

全球高分子 材料前沿： 数据驱动的创新 趋势全景分析



中石油(上海)新材料研究院
PETROCHINA SHANGHAI ADVANCED MATERIALS RESEARCH INSTITUTE



A division of the
American Chemical Society

项目团队

项目规划

中石油（上海）新材料研究院有限公司：吴利平、黄旭东

美国化学文摘社 (CAS)：Tim Wahlberg、Michael Dennis、Craig Stephens、Dawn Riedel、马清扬、袁琼

研究与分析

中石油（上海）新材料研究院有限公司：陶杨青、马明燕、黄旭东

美国化学文摘社 (CAS)：Jeremy Krogman、Kavita Iyer、Julian Ivanov、Leighton Jones、Hina Goyal、Magesh Ganesan、Bhuvaneshwari Baranwal、Umesh Balande、Ankush Maind、周琼琼

宣传与推广

中石油（上海）新材料研究院有限公司：范紫吟

美国化学文摘社 (CAS)：马清扬、张金颖、王琳、Andy Havens、Peter Carlton、Tina Tomeo、Erica Brown

项目管理

中石油（上海）新材料研究院有限公司：陶杨青、马明燕

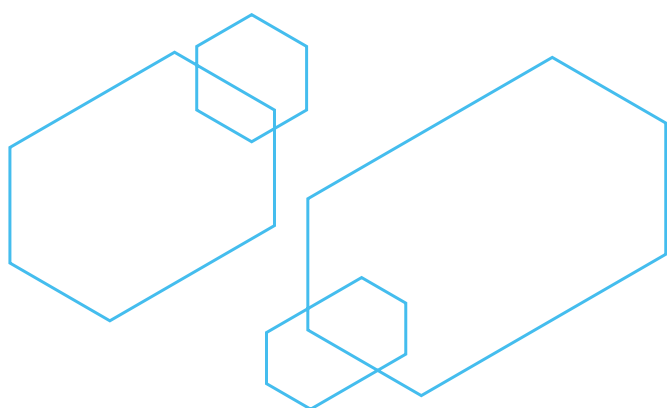
美国化学文摘社 (CAS)：Dharmini Patel、余敏

摘要

中石油（上海）新材料研究院有限公司（简称“新材料院”）是中国石油天然气股份有限公司的全资子公司。成立新材料院是中国石油建设基业长青的世界一流综合性能源与化工公司的战略举措之一。作为中国石油天然气集团炼化业务向新材料转型的重要引擎，新材料院以全新的管理机制，汇集全球顶级科学家，构建了集科学研究、产品及应用开发、产业布局、学术交流、技术服务为一体的新型研发机构。新材料院聚焦产业链“卡脖子”技术难题，致力打造世界一流创新平台，引领全球化工产业向高端化、绿色化、智能化发展。

美国化学文摘社 (CAS) 作为美国化学会分支机构，是全球领先的科学知识管理与数据分析权威。CAS 汇聚了跨越 150 余年的海量科研信息，涵盖期刊论文、专利和人工标引的科学数据，构建了业界最全面的化学相关信息合集——CAS 内容合集 (CAS Content Collection™)。不仅如此，CAS 更通过先进的数据分析技术、深厚的专业知识以及直观的数据可视化能力，将复杂的科学信息转化为清晰、可执行的洞察，评估全球科学发展动态。

本报告由中石油（上海）新材料研究院有限公司与美国化学文摘社 (CAS) 联合编制，双方一致认为：高分子材料的未来创新，离不开深厚产业经验与全球科学智慧体系的深度融合。报告结合了中国石油以应用为导向的材料研发视角，以及 CAS 完备的数据资源与先进分析能力，全面、客观地梳理并呈现全球高分子材料的研发现状。通过系统研判科研热点、聚合物结构演变趋势及新兴应用领域，本分析报告旨在为全球聚合物材料研发的科学决策提供有力支撑，促进跨学科交流协作，助力全球高分子材料研发成果转化，持续创造产业价值和社会价值。



目录

摘要..... 01

1. 引言：不断演进的全球高分子材料创新格局 06

2. 数据、方法与分析框架 10

 2.1 CAS 聚合物知识库的范围与覆盖 10

 2.2 用于趋势发现的高级分析与自然语言处理方法 11

3. 基于数据的全球聚合物研究主题识别与分析 12

 3.1 全球出版动态与竞争格局分析 12

 3.1.1. 聚合物研究的全球出版趋势 12

 3.1.2. 聚合物创新的地域分布 13

 3.1.3. 机构卓越性与研究影响力 14

 3.1.4. 聚合物技术的商业创新格局 15

 3.1.5. 科研机构的专利活动与技术转让潜力 16

 3.2 基于自然语言处理 (NLP) 的学术与商业领域聚合物创新对比分析 18

 3.2.1. 期刊文献全景分析：总体研究主题 19

 3.2.2. 高分子专利全景分析：总体创新主题 23

 3.2.3. 基于期刊全景分析的聚合物类型与材料新兴趋势 28

 3.2.4. 基于专利全景分析的聚合物类型与材料新兴趋势 30

 3.2.5. 化学与合成领域的分化趋势：学术发现与商业实施 34

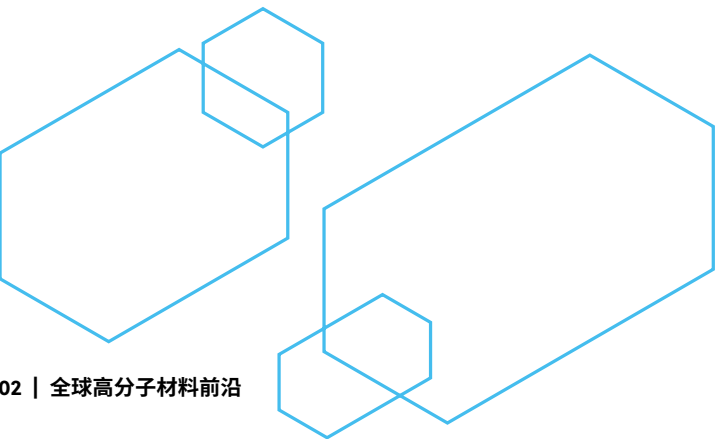
 3.3 基于 CAS 索引科学概念的新兴聚合物主题全景分析 38

 3.3.1. 期刊论文中的新兴主题 38

 3.3.2. 专利文献中的新兴主题 39

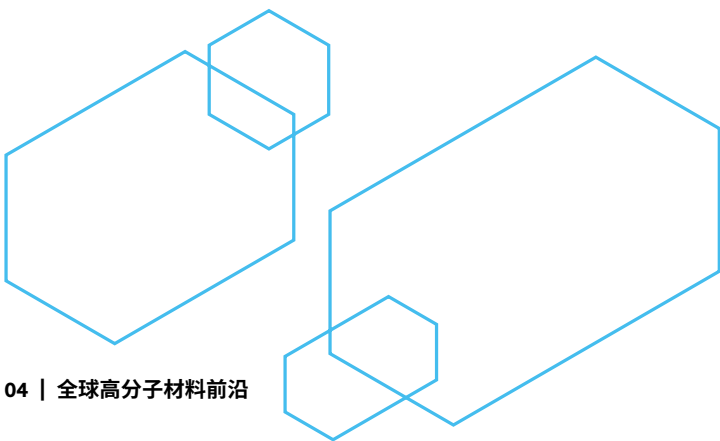
 3.3.3. 比较分析与新兴子主题 42

 3.4 重点关注的新兴研究领域 42



4. 储能系统中的聚合物：推动能源转型的材料	44
4.1 技术背景与总体趋势	44
4.2 储能系统中的聚合物材料	45
4.2.1. 电池：电解质、粘结剂与先进功能性聚合物	46
4.2.2. 电容器：介电聚合物与高性能结构	53
4.2.3. 热能储存：聚合物基相变材料与绝热材料	56
4.3 总结与展望	59
5. 可持续聚合物：兼顾多功能应用与环境责任	60
5.1 不断演变的研究格局：出版趋势与企业专利动态	60
5.2 专利中的可持续聚合物在新兴应用领域中的布局	61
5.2.1. 电子与半导体应用中的可持续聚合物	64
5.2.2. 纺织品与服装应用领域的可持续聚合物	67
5.2.3. 胶粘剂与涂料应用中的可持续聚合物	69
5.2.4. 包装与消费品中的可持续聚合物	71
5.3 合成生物学与生物精炼：为可持续聚合物提供单体供应	74
5.3.1. 合成生物学在直接替代型单体方面的应用	74
5.3.2. 基于合成生物学的 PHA 与聚酯生产方法	78
5.4 总结与展望	79
6. 柔性电子器件用聚合物材料	80
6.1 不断演变的研究格局：出版趋势与企业专利动态	80

6.2 柔性电子领域的新兴聚合物：从结构基板到功能层与封装材料	82
6.2.1. 结构聚合物——基板与支撑系统	83
6.2.2. 功能与介电聚合物——电子性能	83
6.2.3. 封装与胶粘剂系统——保护与组装	85
6.3. 特定应用的聚合物分布	86
6.3.1. 柔性电路	88
6.3.2. 显示与电致发光器件	89
6.3.3. 可穿戴电子设备	91
6.3.4. 传感器	92
6.4 新兴制造工艺与规模化路径	94
6.5 总结与展望	97
7. 聚合物膜领域的研究进展	98
7.1 研究文献分析	98
7.1.1. 学术期刊论文与专利文献的发表趋势	98
7.1.2. 企业与学术机构专利持有情况	99
7.2 聚合物膜领域前沿热点的新兴趋势	101
7.2.1. 聚合物膜领域前沿热点的分析	101
7.2.2. 基于应用主题的发表趋势	101
7.3 膜相关专题的发表趋势	106
7.3.1. 膜相关专题前 30 名	106
7.4 总结与展望	110



8. 聚合物研发的前沿	112
8.1 下一代聚酯	112
8.2 高性能弹性体	114
8.3 导电聚合物	115
8.4 动态聚合物网络	117
8.5 先进工程材料	119
8.6 超支化聚合物材料	120
8.7 框架材料	122
8.8 光敏聚合物	122
9. 结论	125
9.1 全球聚合物创新格局综述	125
9.2 融合主题与技术演进	125
9.3 特定应用的洞察与机遇	125
9.3.1. 储能系统	125
9.3.2. 可持续聚合物	126
9.3.3. 柔性电子	126
9.3.4. 膜技术	126
9.4 新兴前沿与未来发展趋势	127
9.5 战略启示与建议	127
9.6 挑战与未来展望	128
9.7 总结性展望	128
参考文献	129
术语与缩略语	161

1. 引言：不断演进的全球高分子材料创新格局

高分子材料堪称现代工业史上最具影响力的核心材料体系之一。过去一个世纪以来，高分子材料在全球范围内深刻重塑了制造业、医疗健康、能源系统、电子产品及消费品等众多领域。从 1907 年贝克兰 (Baekeland) 成功合成酚醛树脂 (Bakelite)——人类历史上首款全合成塑料——到如今涌现出的可编程、自修复、刺激响应及可生物降解等智能体系，聚合物科学已从经验性材料发现迈向精准分子与工艺设计的新阶段。¹早在近十年前，全球聚合物产业年销售额就已接近 5000 亿美元；随着高分子材料在从挽救生命的医疗器械到清洁能源技术等领域的广泛应用，该产业持续保持增长态势。²

然而，该领域的蓬勃发展也使其变得日益复杂。当前，高分子材料创新横跨合成化学、物理学、生物学、工程学、计算科学与人工智能等多学科，形成交叉融合的研究格局。可供开发的设计空间极其广阔：即便是仅含 50 个单元的 AB 嵌段共聚物，其可能序列组合的规模也高达 10^{15} 数量级。³与此同时，传统材料从发现到规模化应用的研发周期通常长达 15 至 25 年，已愈发难以适应技术加速迭代、监管动态演变及可持续发展等迫切需求。⁴在此背景下，竞争优势不仅取决于卓越的科研水平，更取决于对研究路径、市场需求、区域优势及支撑技术协同演进趋势的深刻洞察。

从经验发现到数据驱动设计

高分子科学的发展历程，不仅是一部材料突破的演进史，更是创新模式不断迭代变革的过程。厘清这一演变脉络，是理解当下行业发展格局的重要基础。

奠基时期（1907-1945 年）以材料解决现实迫切需求为开端，同时也催生了诸多科学难题。酚醛树脂凭借优异的电绝缘性、耐热性与可模塑性的综合性能取得巨大成功。¹美国杜邦公司沃勒斯·卡罗瑟斯 (Wallace Carothers) 对尼龙的研发则证明，合成高分子材料能够凭借更优越的性能，替代昂贵的天然材料。⁵该时期的技术突破大多依托系统性实验探索，而非对理论的透彻认知。彼时，高分子假说本身尚存争议，直到 20 世纪二三十年代，赫尔曼·施陶丁格 (Hermann Staudinger) 通过研究证实，聚合物是由数千个重复单元以共价键连接而成的长链分子，这一假说才得以确立。⁶第二次世界大战进一步加速了行业发展，聚乙烯、合成橡胶与有机硅材料等因军事需求应运而生，也奠定了石化企业在高分子材料创新领域的核心地位。

理性化与专业化阶段（1945-2015 年）将高分子材料领域从经验发现引向理性设计的轨道。齐格勒-纳塔催化剂等关键理论突破，使得高分子材料的性能预测与精确调控成为可能。⁷与此同时，各类表征实验技术飞速发展：凝胶渗透色谱技术普及了分子量表征；小角中子散射、原子力显微镜及基质辅助激光解吸电离质谱等尖端技术，也从专业设施转变为常规分析工具。⁸高分子材料的产品版图从大宗商品向特种材料大幅拓展：工程塑料展现出媲美金属的性能，导电高分子材料催生了有机电子产业，生物医学高分子材料则广泛应用于给药系统。原子转移自由基聚合 (ATRP)、可逆加成-断裂链转移聚合 (RAFT) 以及开环复分解聚合 (ROMP) 等可控聚合技术的出现，彻底革新了高分子合成工艺，实现了分子结构的精准构建，同时极大拓宽了单体适用范围。⁸

然而，这种高速发展也带来了行业的碎片化。聚合物科学日趋专业化，各子领域发展步调不一，技术语言也自成体系。对于工业界而言，如何整合合成、表征、工艺、配方与终端性能等各环节的专业知识，成为一项日益严峻的挑战——即便对于大型企业也是如此。与此同时，学术界与工业界的创新体系在激励机制和时间管理上渐行渐远，导致从实验室到产业化的转化鸿沟不断扩大。此外，全球高分子材料创新版图开始发生明显位移，重心尤为显著地向亚洲转移。

当前的转折点：为何综合分析至关重要

当今高分子行业的变革不仅体现在规模层面，更在于其底层结构的深刻重塑。在可持续发展的刚性约束、全球区域格局重整、多应用场景跨界融合以及数字与生物技术的强力渗透下，创新格局正经历着多维度同步重构。这些驱动力量相互交织、彼此影响，唯有厘清其内在的联动逻辑，才能为战略决策提供关键支撑。

1. 可持续性要求重塑设计优先级。环境考量已从过去的次要性制约，演变为推动全球重大科研投入与监管体系构建的核心驱动力。⁹在可控成本下实现可持续目标，同时保持与传统材料比肩的性能，是一项极为复杂的挑战：可生物降解材料须在使用周期内稳定可靠，废弃后又需按预期可控降解；生物基原料既要实现大宗商品级别的规模化生产，又要在经济性上与石化产品同台竞技。这场变革远不止于材料的简单替代，它要求对高分子材料从合成直至废弃的整个生命周期进行根本性的重新构想。通过系统性追踪，我们可以洞察：哪些技术路径正加速推进，哪些仍徘徊于探索阶段；哪些技术壁垒依然高筑，哪些已显突破曙光；以及各类机构在产业转型不同环节中的领跑格局。监管压力、技术成熟度与商业化可行性的三重交汇，正将可持续高分子材料推向未来十年的决定性竞争高地。

2. 高分子材料创新能力呈现地域性重构。全球高分子材料创新中心已显著向亚太地区转移，深刻改变了竞争格局、供应链结构及技术获取路径。这一转变不仅体现为论文与专利数量的量级跃升，更标志着集基础研究能力、完备制造设施与庞大本地市场于一体的整合型创新生态系统正在同一地域内崛起。透过区域差异，可以窥见多元化的创新策略：有的着力构建覆盖全面的高分子材料研究体系，有的专注于将研究成果高效转化为高价值商业应用，还有的则深耕特定应用领域。无论是谋划合作伙伴关系、开展竞争情报分析，还是进行市场定位决策，都需要准确把握：核心能力分布在何处？区域优先事项如何与组织需求相契合？哪些机构在关键技术领域处于领先地位？创新能力在全球版图上的深刻重构，对全球竞争格局与技术领导权的未来走向，具有深远影响。

3. 应用驱动创新，打破传统边界。随着前沿技术的发展，市场亟需可满足多重性能需求的新材料，高分子材料各应用领域之间长久以来的行业壁垒正逐渐消融。电池系统需要具备离子导电性、机械稳定性和热安全性的高分子材料；柔性电子产品则要求材料兼具形变贴合能力、电学性能与环境耐受性；可持续包装必须在性能上媲美石油基产品，同时具备适宜的生命周期末端处置方案。成功的关键日益转向多功能集成，而不再是单一性能的优化。通过系统对比期刊与专利全景，可以洞察创新成果从实验室走向商业产品的转化路径：哪些突破性材料在学术界备受关注，却尚未大规模商业化；哪些领域的专利活动频繁，预示着技术即将进入市场应用阶段；以及哪些成熟材料正通过工艺或配方创新，被拓展至全新的应用领域。

4. 技术融合催生新范式。高分子材料创新正越来越多地与相邻领域的变革性技术交汇融合。合成生物学使得利用可再生原料生产单体成为可能，为可持续高分子材料的规模化制造开辟了新途径。^{3,9}增材制造实现了常规加工方式难以企及的复杂几何结构与功能梯度，从根本上改变了高分子材料的设计与应用模式；⁴计算化学则能比传统实验方法更高效地探索广阔的化学空间，从而加速新材料的发现进程。这些融合技术为具备跨学科整合能力的组织创造了机遇，同时也给专精于单一领域的机构带来了挑战。厘清这些融合技术的发展机遇与落地壁垒，有助于行业聚焦最具前景的方向，开展精准战略投资与布局。

综合全景分析的价值

综上所述，这些变革共同塑造了一个动态多变且紧密交织的高分子材料创新环境，单凭直觉已难以从容应对。专家判断依然不可或缺，但若能将其与研究热度、机构引领地位、专利布局态势及技术成熟度等定量证据相结合，决策效力方能发挥至最佳。

本报告针对上述需求，对 2015 至 2025 年间近百万条聚合物相关期刊与专利记录开展系统分析。我们综合运用文献计量学方法、自然语言处理及跨领域比较分析，从以下五个维度解析全球高分子材料创新全景：**全球创新图谱**——识别聚合物研究与专利活动的地理聚集区域，明确各国/地区及机构类型中的领先组织；**趋势研判与赛道热度分析**——利用大规模文本分析，从稳定或衰退的领域中区分出快速崛起的热点主题；**应用聚焦分析**——围绕储能、可持续高分子材料、柔性电子及膜技术四大方向，解析关键材料、头部企业以及文献与专利的发表规律（图 1）；**实验室到商业化转化评估**——对比期刊与专利全景，评估哪些技术正走向市场应用，哪些转化环节仍存在缺口；**前沿赛道前瞻探索**——识别出那些尚处早期但已展现出显著增长动能的新兴聚合物类别、制备技术及平台能力集群。

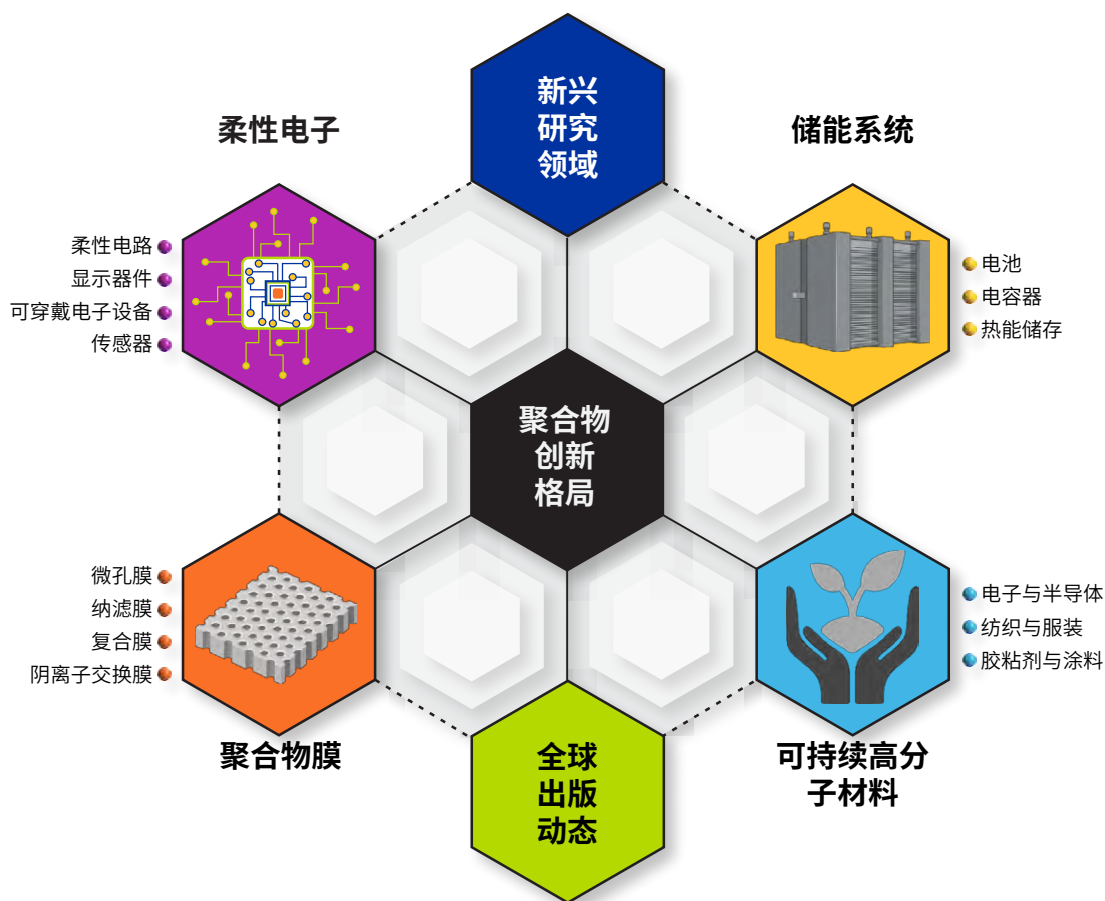


图 1. 本报告所呈现的高分子材料创新格局示意概览。图中部分图标来自 www.BioRender.com。

本报告的目标不仅是描述高分子材料整体发展格局，更在于提供具备落地指导价值的分析结论。聚合物行业正在经历结构性变革：石油基生产体系正面临生物基与循环经济替代方案的挑战；传统高分子材料类别正依据可持续性 & 监管标准被重新评估；应用需求也日益倾向于多功能、系统化的材料解决方案。在此背景下，研发投入、战略合作、人才培养及市场布局等关键决策，都离不开对创新发生领域、主要推动者以及科学进展如何转化为商业机遇的清晰判断。

本报告整合了不同地域与应用领域的文献与专利证据，以数据为依据，全面剖析不断演进的高分子材料创新格局，旨在为科研布局与产业战略制定提供有力支撑。

2. 数据、方法与分析框架

2.1 CAS 聚合物知识库的范围与覆盖

CAS 的主题专家利用其专有的化学结构与科学术语索引系统，构建了一套全面的基于结构式的检索策略，以准确获取与聚合物相关的文献。

该检索策略首先识别 CAS REGISTRY® 中归类为聚合物的物质，进而在 CAS 内容合集中检索到约

250 万种物质，分布于约 580 万篇文献中。随后，通过以下两项标准进一步优化检索策略（图 2）：

- 至少含有一个碳原子，且被不少于两篇文献引用的物质（约 23.5 万种聚合物，被 530 万篇文献引用）。
- 将 CAS 分类号限定为与聚合物相关的特定领域，即第 35–40、43、44 及 51 节（表 1）。



图 2. 聚合物相关文献检索策略及数据范围

表 1. 本研究纳入的 CAS 分类号及其对应文献数量

CAS 分类号及名称	文献数量
38.塑料的制造与应用	27.6 万
37.塑料制造与加工	22 万
35.合成高分子化学	9.9 万
40.纺织品与纤维	7.4 万
39.合成弹性体与天然橡胶	6.4 万
51.化石燃料、衍生物及相关产品	4 万
43.纤维素、木质素、纸张及其他木制品	2.9 万
36.合成高分子的物理性质	2.7 万
44.工业用碳水化合物	0.8 万

此外，检索范围限定于 2015 年至 2025 年间发表的文献。本方法依托 CAS REGISTRY 中基于化学结构的索引功能，并结合 CAS 内容合集的强大索引能力，最终构建了一个包含约 94.8 万篇文献、25 万种独特聚合物以及约 5 万个独特 CAS 概念（提及次数超过 1000 万次）的数据集，所有这些数据均用于后续分析。数据覆盖时间为 2015 年至 2025 年，其中 2025 年的数据仅涵盖 1 月至 11 月。

2.2 用于趋势发现的高级分析与自然语言处理方法

本研究采用多维度的方法论框架，对聚合物整体格局进行了系统分析。该框架融合了文献计量分析、专利情报挖掘以及先进的自然语言处理技术，力求全面描绘该领域的整体图景。

我们从 CAS 内容合集中提取了上述约 94.8 万篇文献的数据字段，具体包括：

- 科学文献的书目信息（标题、摘要、发表年份、作者、研究机构、国家/地区、被引次数等）
- 来自全球 110 家专利机构的专利文献（包括专利局、专利权人、国家/地区、专利族、标题、摘要、权利要求、公开年份等）
- 与文献关联的 CAS 索引科学概念、应用领域及功能作用
- CAS 索引的化学物质信息（CAS 登记号®、化学结构、功能作用等）

专利情报与竞争格局分析：依据专利族数量识别主要专利权人，并将其区分为商业实体与学术机构，以深入理解其创新策略与技术转让模式。

研究与发表趋势分析：综合发表数量与引文影响力，精准锁定领先的研究机构，揭示全球各机构在注重发文量与追求质量上的不同研究策略。

地域研究洞察：通过分析国家/地区及机构归属，绘制全球研究活动分布图，揭示区域主导地位的变化趋势及新兴创新中心的崛起。

关键词与概念挖掘：对标题、摘要以及 CAS 索引的科学概念和物质进行全面检索，同时纳入同义词和缩写词，确保研究全景的完整覆盖。

自然语言处理分析：利用先进的自然语言处理技术，分别在期刊论文和专利文献中识别出该领域 200 余个和 1,000 余个新兴主题。我们的方法包括从摘要、标题（以及专利文献的权利要求）中提取长度为 1 至 6 个词的候选短语。对识别出的候选短语，首先进行基于人工智能的初步分类，随后通过多轮专家验证以优化分类结果。最终分类完成的新兴主题以数张 CAS 全景图谱的形式呈现，旨在直观展示海量主题的科学关注度及其增长模式。关于自然语言处理分析的详细方法，请参阅 Iyer 等人¹⁰及 Hughes 等人的研究。¹¹

3. 基于数据的全球聚合物研究主题识别与分析

3.1 全球出版动态与竞争格局分析

2015 年至 2025 年，全球聚合物领域展现出强劲的商业吸引力，其创新活动亦呈现出明显的地理区域集聚特征。通过对 CAS 内容合集 (Content Collection™) 中近百万篇文献的分析，我们系统梳理了过去十年聚合物科学的演进历程，并揭示了学术研究探索与工业应用开发之间的深层联动关系。

3.1.1. 聚合物研究的全球出版趋势

在聚合物领域，专利活跃度显著高于期刊论文。统计显示，所有聚合物相关文献中，专利族占比达 72%，期刊论文仅占 28%（图 3），二者比例为 2.5:1，明显高于多数理工科领域的常规水平。这充分反映出聚合物创新成果的商业价值与产业实用属性。从文献分布来看，聚合物领域已步入成熟发展阶段，技术应用落地与知识产权保护的优先级已高于基础机理研究。

从时间维度看，近十年期刊论文与专利文献的演变轨迹呈现明显分化。期刊论文发表量保持高度稳定，年均维持在 2.4 万至 2.6 万篇，反映出该领域已形成稳定的科研队伍与可持续的资金支持体系。相比之下，专利族申请量波动较大：2017 至 2019 年间曾出现显著峰值，年申请量约 6.7 万个；此后从 2020 年起回落，至 2021 年降至约 5.8 万个。这一下降趋势或受多重因素叠加影响，包括新冠疫情对工业研发活动的冲击，以及部分聚合物应用市场趋于饱和。

2025 年初步数据显示论文发表量有所下滑，但鉴于当前分析时点该年度数据尚未完整收录，对此趋势应保持审慎解读。总体而言，全球聚合物研究正从此前的快速扩张阶段转向整合优化期，未来的创新重心从追求数量转向重视成果质量与定向应用创新。

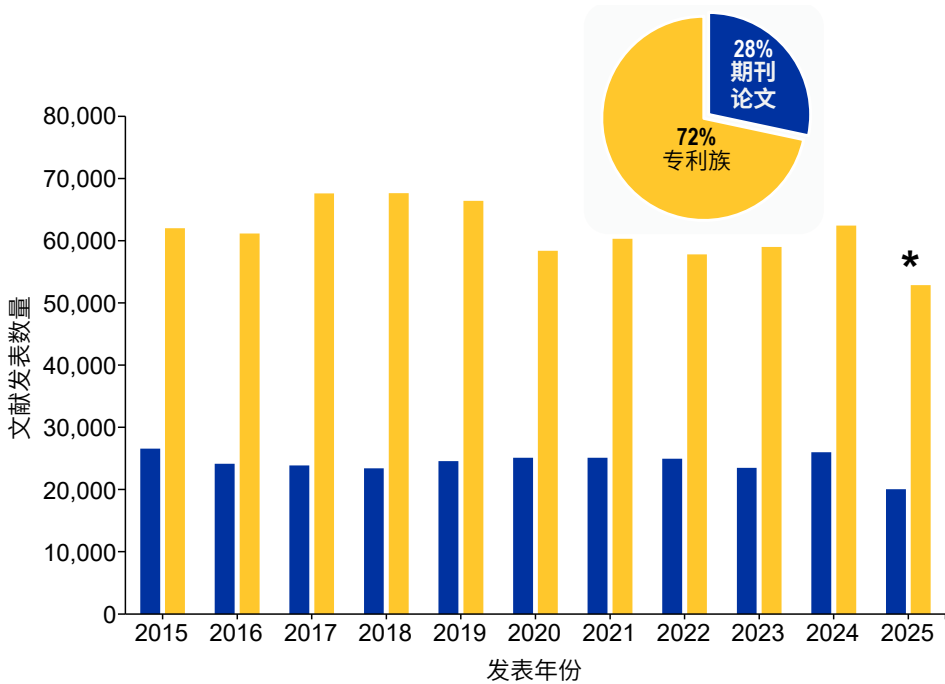


图 3. 2015-2025 年聚合物相关期刊论文与专利族的年度分布。内嵌饼图展示了 CAS 内容合集中专利族与期刊论文的总占比。

*注：2025 年数据仅涵盖 1 月至 11 月。

3.1.2. 聚合物创新的地域分布

地域分析显示，全球聚合物研发活动高度集中于亚洲地区，尤其是中国，这一趋势从根本上重塑了全球创新版图（图 4）。中国的领先地位尤为突出：在统计期内，中国累计贡献期刊论文超过 10.5 万篇、专利族约 36.5 万个，分别占全球总量的约 40% 和 56%。从绝对规模来看，中国在聚合物创新领域的产出已超过其后四个国家/地区的总和，已是无可争议的全球高分子创新龙头。

日本位列第二位，累计发表约 1.5 万篇期刊论文，拥有 12.5 万个专利族，专利与论文比高达 8:1，凸显其对商业化开发的高度重视。这一特征不仅反映了日本在材料科学领域的深厚工业底蕴，也体现了其在高价值聚合物应用知识产权保护方面的战略聚焦。韩国呈现出相似的发展轨迹，期刊论文发表量约 1 万篇，专利族数量达 4.5 万个，印证了其以产业化为导向的科研生态体系。

相比之下，美国的创新模式更为均衡。统计期内，美国累计发表约 2.2 万篇期刊论文，拥有 3.5 万个专利族，专利与论文比为 1.6:1，显著低于亚洲主要经济体。这表明美国在推动技术商业化的同时，依然保持了对基础研究的持续投入与高度重视。这种差异或源于各国在专利布局战略、学术资助体系以及工业研发侧重点上的差别。

欧洲各国的创新格局则呈现差异化。例如，德国发表了约 1 万篇期刊论文，拥有 2 万个专利族；而法国相对于其期刊产出，专利密集度更高。此外，局部放大数据显示还有一些规模较小但贡献突出的国家/地区。其中，印度作为新兴力量展现出强劲潜力，其 1.6 万篇期刊论文的发表量已与部分成熟研究型国家相当；不过，其专利数量相对偏少，表明该国的科研体系目前仍处于商业化转化能力的建设阶段。

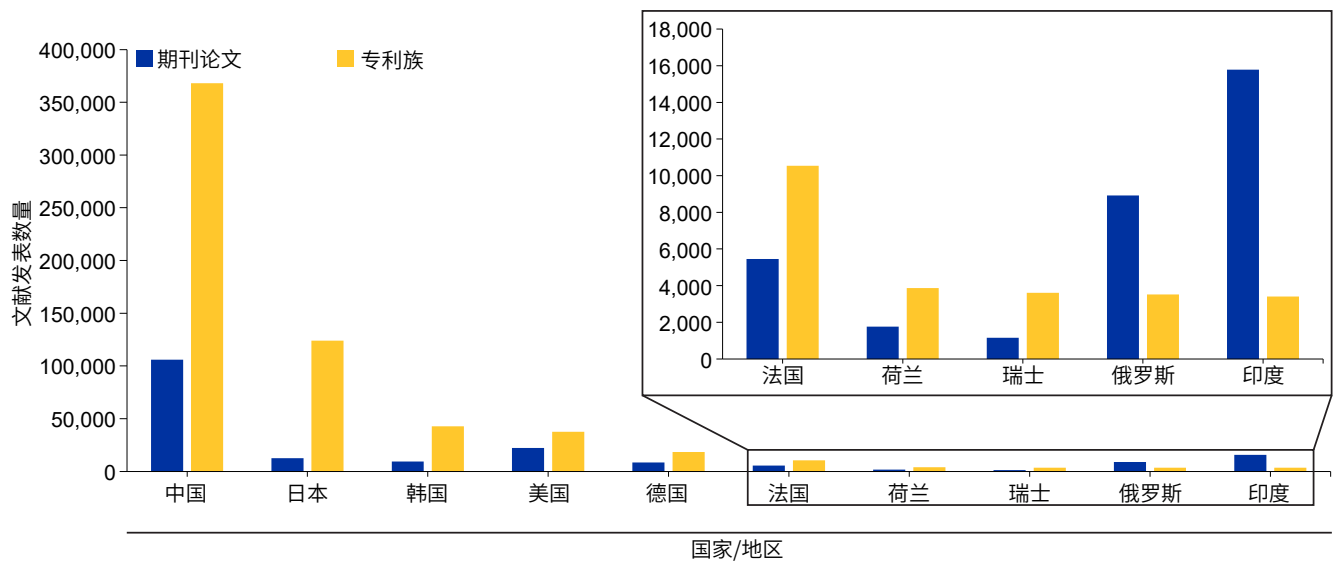


图 4. 2015—2025 年聚合物相关期刊论文与专利族的地理分布（按国家/地区划分）。内嵌柱状图展示了法国、荷兰、瑞士、俄罗斯和印度的局部放大细节。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年间聚合物领域的期刊论文与专利族。

3.1.3. 机构卓越性与研究影响力

对聚合物领域科研机构分析揭示了一个复杂的创新生态：以被引次数衡量的研究质量与发文规模之间，并非简单的线性正相关（图 5）。对顶尖机构的评估表明，尽管发表策略各有不同，但来自不同区域的科研机构均能建立其全球科学影响力。

从篇均被引次数来看，部分机构展现出极高的学术影响力。新加坡国立大学在统计期内发表论文不足 500 篇，却以约 52 次/篇的篇均被引成绩位居榜首，反映出该校采取高度选择性的发表策略，聚焦于突破性前沿研究。同样，西北大学、麻省理工学院和伦敦帝国理工学院等西方顶尖机构的篇均被引次数也均超过 45 次，表明其研究成果在行业中具有核心引领作用。

在绝对发文规模上，中国科研机构占据主导地位。中国科学院以逾 6,000 篇论文发表量领跑，中国科学技术大学和清华大学紧随其后，发文量均在 1,000 篇左右。然而，这些高产机构的篇均被引表现呈现分化态势：中国科学院篇均被引约为 30 次，而其他部分高产机构的平均影响力则相对偏低。这一现象折射出各机构在科研布局上的差异化战略——部分机构追求高分子研究领域的全面布局，而另一部分则深耕高影响力细分方向。

此外，比利时根特大学、沙特阿拉伯的多家科研机构，以及来自亚洲与西方的各类大学纷纷跻身全球高产机构行列，充分印证了聚合物研究的全球化特征。数据表明，该领域的高水平研究已不再局限于传统科学强国，全球各地新兴研究高地正不断崛起。

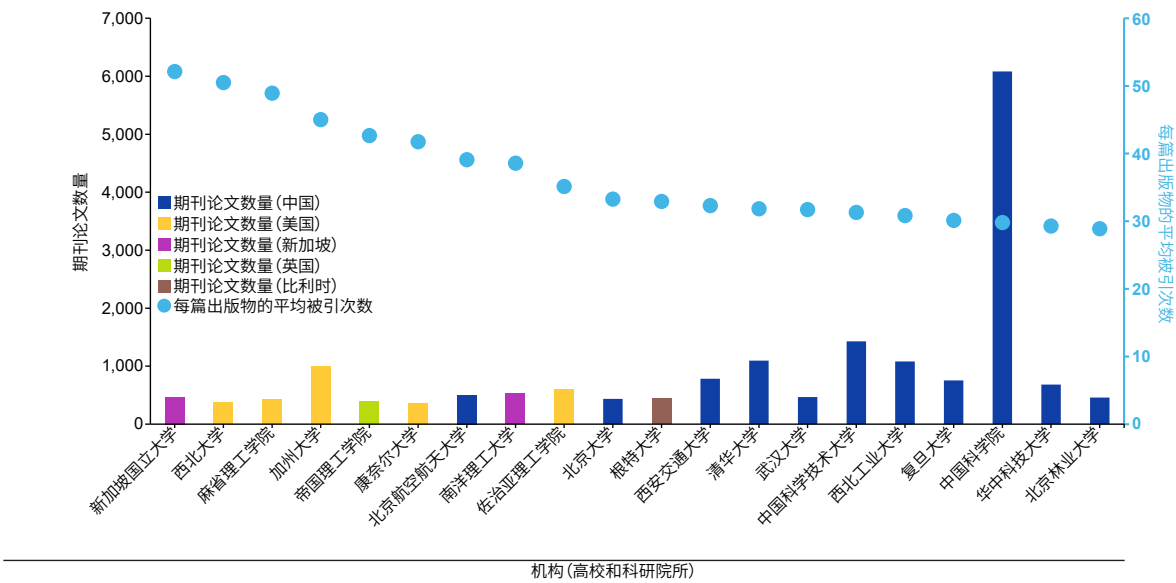


图 5. 聚合物领域领先机构（高校和科研院所）的研究产出（发文量）与影响力（篇均被引次数）。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的期刊论文。

3.1.4. 聚合物技术的商业创新格局

企业专利全景为理解各行业如何推动聚合物创新提供了重要视角（图 6）。在专利申请方面，中国国有企业占据绝对主导地位。其中，中国石化以超过 10,000 个专利族位居首位，中国石油（CNPC）紧随其后，拥有约 4,000 个专利族。石油和天然气巨头庞大的专利组合，深刻反映了中国依托原料优势和垂直整合能力，从基础石化生产向高附加值聚合物材料转型的战略路径。

化工行业的专利龙头呈现更为多元的地域分布格局。韩国 LG 化学以约 6,500 个专利族位居榜首，其后是东丽工业、三菱化学、住友化学等日本企业，各拥有 4,000 至 6,000 个专利族。作为传

统化工行业巨头，这些企业已在各类聚合物应用领域系统构建了全面的专利组合。尽管日本整体的论文产出规模有限，但该国化工企业的专利成果亮眼，彰显了其高效的商业研发体系与清晰的知识产权布局战略。

值得注意的是，跨行业的终端制造商同样表现活跃：富士胶片控股 (Fujifilm Holdings) 和凸版控股(Toppan Holdings) 来自印刷与成像行业，普利司通 (Bridgestone) 和米其林 (Michelin) 则来自轮胎与橡胶制造业。这些企业均拥有规模可观的专利储备（每家 2,000 至 3,500 个专利族），表明聚合物创新已突破传统化工企业的边界，延伸至为特定场景开发专用材料的终端应用端。

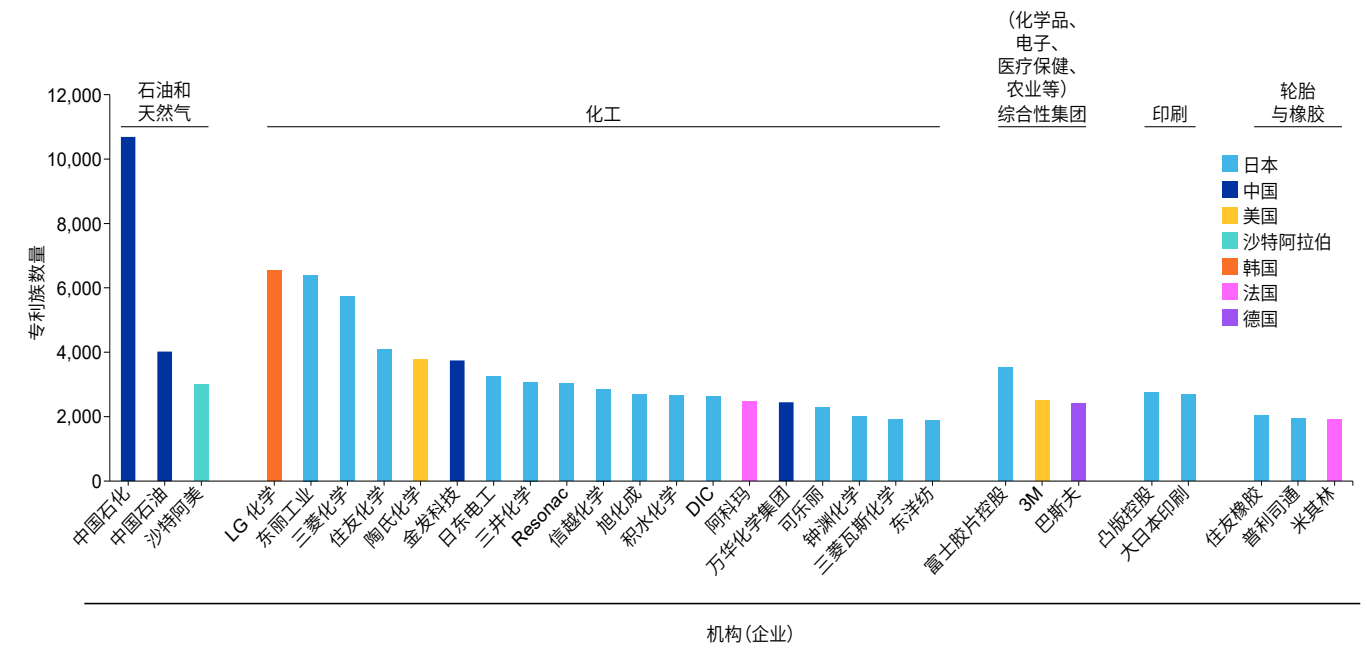


图 6. 按专利族数量排序的聚合物研究领先机构（企业），按行业领域与来源国分类。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年聚合物领域的专利族。

头部企业专利申请人的地域分布，折射出各国不同的创新战略。尽管日本整体科研体量较小，但有多家企业仍跻身顶尖行列，展现出日本将研发投入转化为专利产出效率十分突出。韩国企业（尤其是电子和化工领域）在高附加值应用方面表现出精准的创新力。相比之下，西方企业在专利申请头部榜单中屈指可数——仅有德国巴斯夫(BASF) 及少数美国企业上榜——这可能反映出其在知识产权保护路径上的差异，也预示着全球高分子材料创新中心或许正在转移。

3.1.5. 科研机构的专利活动与技术转让潜力

科研机构申请的专利全景分析为理解产学研合作与技术转让模式提供了重要线索（图 7）。中国科学院尤为突出，拥有近 8,000 个专利族，数量超过了排名其后十家科研机构的总和。这种突出的专利产出表现，反映了中国独特的创新体系：学术机构在政策的有力激励下，不仅承担基础研究职能，同时积极开展具有商业化潜力的应用研究，并主动推动技术成果向产业端转化。

中国高校在科研机构专利布局中占据绝对主导地位，其专利族数量占有所有学术类专利族的

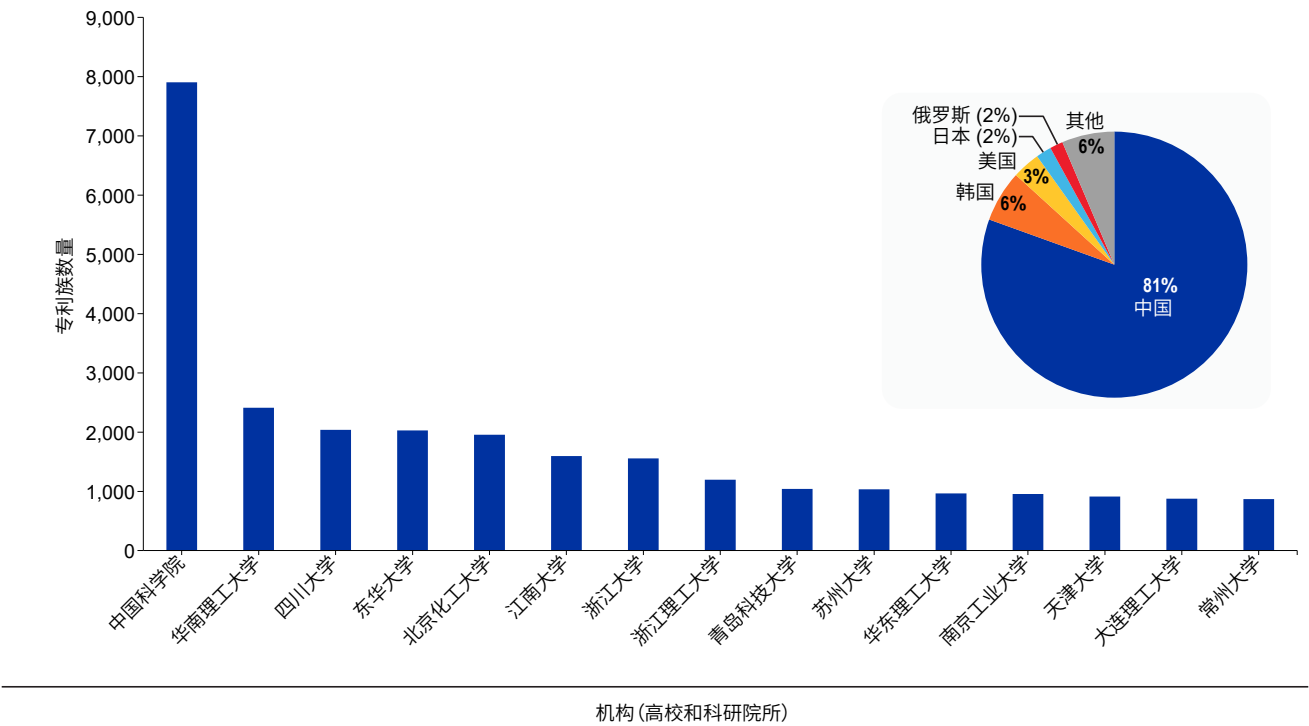


图 7. 按专利族数量排序的聚合物研究领先机构（高校和科研院所）。内嵌饼图展示了其地理分布。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间聚合物研究领域的专利族。

81%。华南理工大学、四川大学、东华大学和北京化工大学等高校各自贡献了 2,000 至 2,500 个专利族，显示出高校体系内有一套系统化的知识产权培育模式。这一模式折射出中国独特的科研评价导向：专利申请已被深度融入学术评价体系，各高校也建立了成熟的科技成果转化机制。

相比之下，西方高校在专利申请榜单上占比较低，反映学术创新路径的根本差异。尽管西方高校在基础研究和高影响力论文发表方面表现出色，但它们较少追求直接的专利产出，可能更倾向于通过技术许可或孵化衍生公司来实现商业化。日本、韩国等其他亚洲国家虽然整体科研产出强劲，但除中国外，这些国家专利的申请仍以企业为主，而非高校。

对比企业申请的专利与科研机构申请的专利申请情况，可以看出各国拥有截然不同的创新生态

态与技术转让机制（图 8）。中国企业申请的专利占主导优势，其专利族数量约 28 万个，远高于科研机构申请的 8.5 万个专利族。表明中国企业正以前所未有的规模，积极将聚合物研究成果转化为受法律保护的知识产权。企业申请的专利与科研机构申请的专利比例为 3.3:1，意味着尽管两类专利的绝对数量均十分可观，但产业端研发的专利产出远超学术界。

日本呈现出截然不同的模式：企业申请的专利族约 12 万个，而科研机构申请的专利数量几乎可以忽略不计。40:1 的悬殊比例表明在其创新生态中，专利申请几乎完全是产业界的行为，高校可能更专注于基础研究，而将商业化环节交由企业合作伙伴完成。韩国和美国则处于中间水平，企业专利数量为科研机构专利数量的 5 至 10 倍，表明其创新体系虽更为均衡，但仍以产业界为主导。

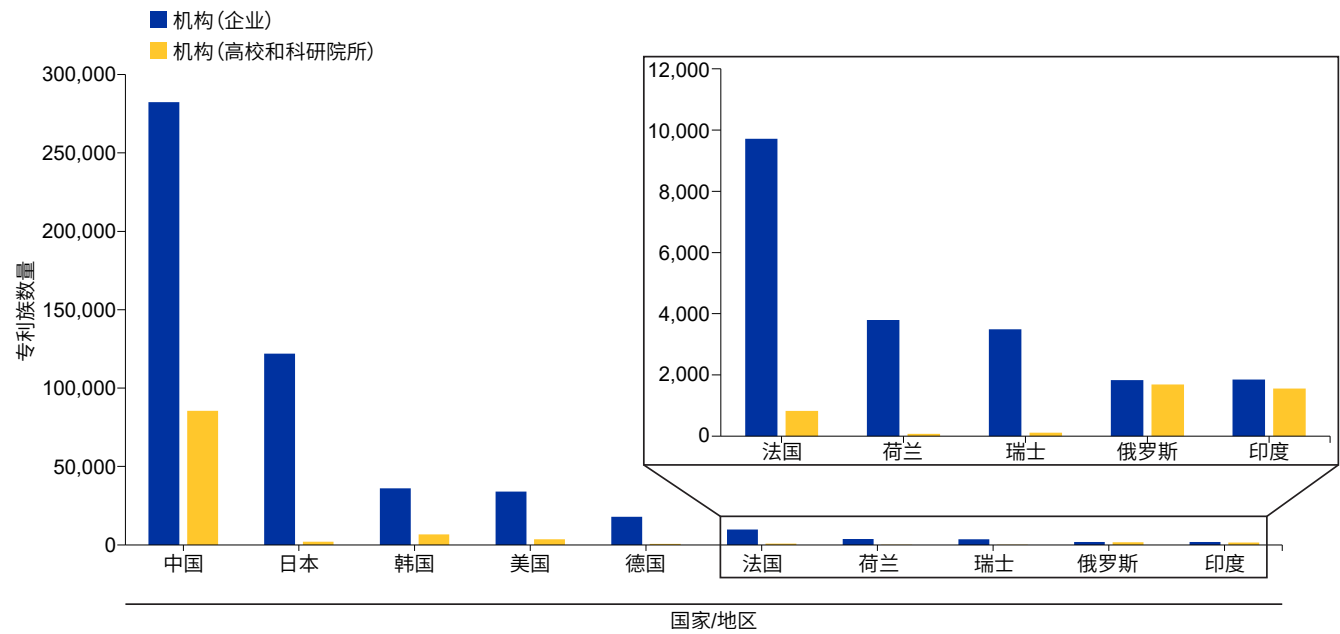


图 8. 各国家/地区研究与学术机构及企业专利族的分布情况（2015-2025 年）。内嵌插图展示了部分国家/地区的详细数据。

欧洲各国在企业与学术机构专利产出比率方面呈现出明显差异。法国企业的专利申请活动相较其国家体量尤为活跃，同时高校的专利产出保持中等水平。荷兰和瑞士尽管专利总量不高，但企业专利申请活跃，反映出它们在高附加值聚合物应用领域的专业创新能力。俄罗斯和印度则呈现出新兴市场的发展特点，其中印度企业专利与科研机构申请的专利数量几乎持平，表明其创新生态尚在发展之中，学术机构在技术开发中仍扮演着重要角色。

对全球聚合物创新的启示

文献统计分析结果表明，全球聚合物创新格局正经历着根本性的地域与结构性重塑。中国机构在学术论文和专利申请方面的绝对主导地位，标志着全球材料科学领域的一次历史性变革，必将对全球供应链、技术标准制定及创新路径产生深远影响。尤其值得关注的是，专利活动在亚洲呈高度集聚态势，且在产业端表现尤为突出，充分表明全球聚合物创新重心已明显东移。

全球聚合物领域较高的专利与期刊论文比率，表明其技术成熟度已处于较高水平，研发主要受到商业应用需求的驱动。这种以商业为导向的格局，可能会深刻影响聚合物创新的演进方向——相比基础理论的突破性进展，创新资源更可能倾向于渐进式改良以及面向特定应用场景的定向开发。不过，全球各地机构仍产出大量高影响力研究成果，证明通过聚焦深耕依然能够不断催生变革性创新。

各国创新战略呈现出鲜明的差异化特征——从中国以规模为导向的综合型策略，到新加坡聚焦高影响力的精准化路径，证明多种模式均能在聚合物

研究领域取得成功。对于希望在当前行业竞争中脱颖而出的各类机构而言，必须深入理解这些迥异的创新生态系统，并因地制宜调整自身战略，例如通过建立深度合作伙伴关系、优化区域战略布局、打造专项核心能力等方式实现突破。

数据同时还揭示了一些代表性不足领域的潜在机遇。欧美企业和高校虽然在聚合物科学领域底蕴深厚、长期保持领先，但当前的专利布局相对有限，这或许意味着技术转移与商业化方面仍存在大量尚未挖掘的潜力。同样，部分新兴经济体的论文发表数量持续增长，但专利布局却较为薄弱。随着其本土创新生态的日益成熟，这些地区有望成为未来的重要增长引擎。

本次对聚合物研究趋势的全面分析，为理解该行业发展现状与未来演进方向提供了关键背景支撑。后续章节将围绕具体应用领域和新兴技术展开深入探讨，而地域集聚、产业主导及机构多元等宏观规律，将为精细化解读研究结论奠定重要基础。

3.2 基于自然语言处理 (NLP) 的学术与商业领域聚合物创新对比分析

本研究采用自然语言处理技术，对近 94.8 万份期刊论文和专利文献进行深度挖掘，旨在精准识别聚合物领域中新兴且快速发展的科研热点方向。分析结果以 CAS 全景图谱的形式呈现（图 9-18），可全面展示各主题的研究热度与增长趋势。由于本次分析聚焦于前沿新兴方向，那些发展成熟且增长趋缓的主题未纳入分析范围。

我们将识别出的新兴概念聚类为八大核心分支，涵盖**聚合物类型与材料**、**复合材料与纳米复合材料**、**应用与终端用途**、**可持续性与循环**

经济、填料与助剂、化学与合成、加工与制造、特性与表征。这八大分支进一步细分为多层级的加权子分支，以构建更为精细的新兴主题全景图。图谱中，六边形面积大小代表文献发表数量（即研究热度，范围从 20 余篇到超过 2.5 万篇不等），颜色反映文献的平均增长倍数，暖色调（红、橙、黄）表示增长速度更快。

从宏观层面看，期刊论文与专利文献在新兴主题的分布上具有一定相似性（图 9、图 10），尤其在**聚合物类型与材料、应用与终端用途**以及**可持续性**与**循环经济**等分支中表现一致。然而，两者在主题数量与性质上仍存在显著差异（图 11-16）。这主要源于二者定位不同：期刊论文侧重于报道学术界的前沿探索性工作，而专利更聚焦于将成熟材料与现有工艺应用于具有商业价值的实际场景。

期刊与专利 NLP 数据对比的关键要点如下（图 9、图 10）：

- **聚合物类型与材料**：可生物降解聚合物、聚酯及特种聚合物在两个领域中均表现突出，表明其从研究到应用的转化路径相对顺畅。此外，导电聚合物与复杂结构在学术研究中备受关注。
- **复合材料与纳米复合材料**：气凝胶、泡沫材料及其他纳米复合材料、特种结构，以及膜材料与膜系统，在学术研究与专利成果中均占有重要地位。
- **应用与终端用途**：储能、电子器件及生物医用是专利重点布局方向，且相关专利数量庞大，显示出明确的商业化导向。

- **可持续性与循环经济**：可持续性在期刊论文与专利文献中均成为日益增长的主题，其中回收利用与循环经济理念受到越来越广泛的重视。
- **填料与助剂**：专利主要聚焦于具有明确商业应用前景的功能性添加剂与实用增强剂。生物基助剂在学术研究中有所涉及，但在专利中并不突出，属于具备潜力的新兴赛道。
- **化学与合成**：学术研究涵盖广泛的基础化学领域，重点聚焦于反应机理。专利方面则更侧重于实际的合成，如引发剂与交联剂。催化剂在期刊论文和专利中均受到高度重视，显示其在研究与应用中的关键作用。
- **加工与制造**：专利更多围绕工业化制造要素展开，涵盖设备与质量控制等多个维度。期刊论文则更聚焦于创新性的特殊加工技术（如自组装）。这种差异也表明学术界研发的新型加工技术具备向工业化场景落地的巨大潜力。
- **特性与表征**：自修复在学术研究中占据显著位置，但在专利中尚不突出，属于典型的新兴技术。专利对阻隔性能等实用特性及经济考量更为关注。同时，两个领域均高度关注材料的电学、力学和热学性能，在核心性能指标上保持高度一致。

3.2.1. 期刊文献全景分析：总体研究主题

图 11 所示的 CAS 全景图谱，揭示了当前聚合物学术领域中若干值得关注的研究趋势。

在**聚合物类型与材料分支**中，生物基与仿生聚合物（增长 1.2 倍）以及可生物降解聚合物（增长 1.1 倍）的显著增长，反映出该领域正致力于在不牺牲性能的前提下寻找可持续替代方案。¹² 同时，具备自主修复能力、可延长材料使用寿命并

降低维护成本自适应与自修复聚合物（增长 1.2 倍）也正崭露头角。¹³ 此外，导电聚合物（增长 1.1 倍）与复杂结构（增长 1 倍）的融合，正在推动智能材料应用的革新。^{14, 15} 值得注意的是，以热稳定性、机械强度与化学惰性著称的聚酰亚胺正以

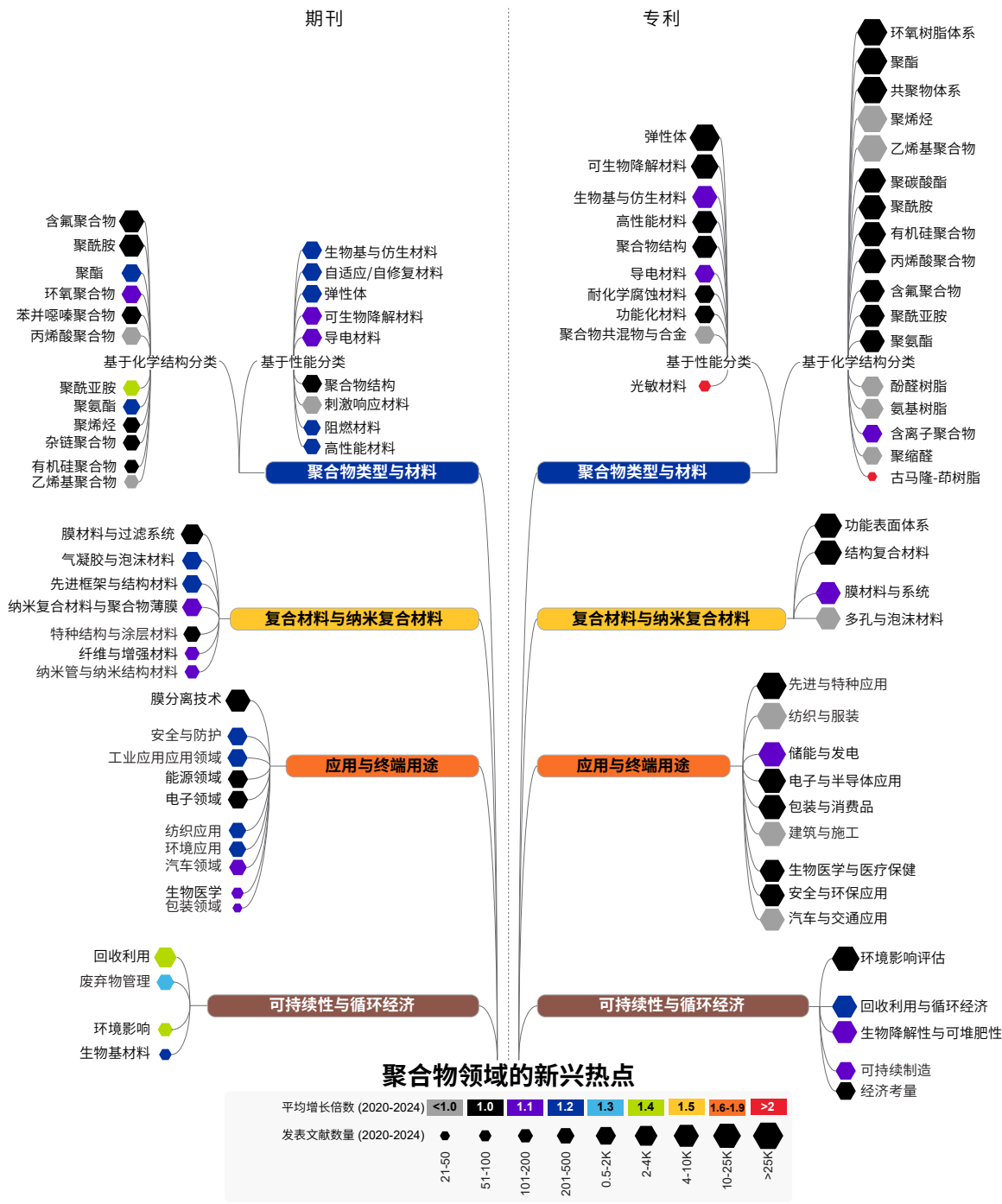


图 9. 基于自然语言处理 (NLP) 技术对四大主要分支：**聚合物类型与材料**、**复合材料与纳米复合材料**、**应用与终端用途**、**可持续性 & 循环经济**的期刊论文与专利文献进行分析，并据此绘制出的 CAS 全景聚合物领域新兴热点图谱。六边形大小代表总体研究关注度（即文献发表数量），颜色则反映文献数量的增长幅度（增长倍数），颜色越暖，增长越快。

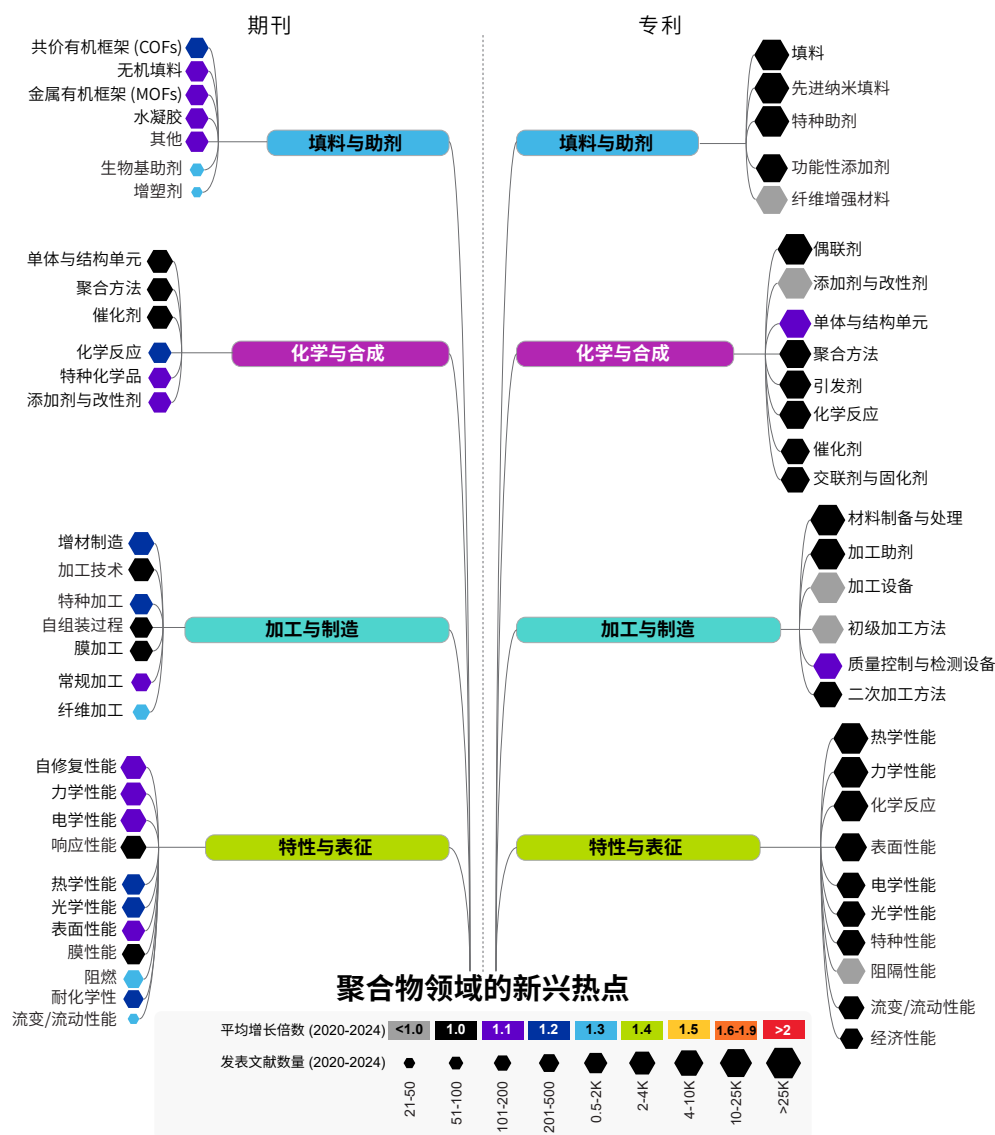


图 10. 基于自然语言处理 (NLP) 技术对四大主要分支：填料与助剂、化学与合成、加工与制造、特性与表征的期刊论文与专利文献进行分析，并据此绘制出的 CAS 全景聚合物领域新兴热点图谱。六边形大小代表总体研究关注度（即文献发表数量），颜色则反映文献数量的增长幅度（增长倍数），颜色越暖，增长越快。

1.4 倍的较快增速迅速兴起。其背后受多重因素驱动：^{16, 17} 超低介电常数聚酰亚胺正成为下一代半导体封装与柔性电路板的关键材料；聚酰亚胺基组件在锂离子电池 (LIBs)¹⁸ 及电动汽车湿度传感器¹⁹ 中得到应用；聚酰亚胺还用于纺织品²¹ 等阻燃体系；²⁰ 而聚酰亚胺气凝胶则在隔热保温等领域展现出广阔的应用前景。²²

在**化学与合成**分支中，能够制备新型单体与结构单元以实现优异材料性能的特种化学品合成方法正逐渐兴起。可控自由基聚合²³ 与开环复分解聚合 (ROMP)²⁴ 等先进聚合方法，为精准调控分子结构提供了有力支撑。值得关注的是，面向可持续聚合物合成的催化体系正不断发展，尤其是酶催化剂（增长 1.2 倍）²⁵、有机催化剂（增长 1.1

倍)²⁶与特种催化剂(增长 1.1 倍)。这类技术路线在保持工业化量产能力的同时,²⁷为降低环境影响提供了可行路径。

复合材料与纳米复合材料分支涵盖多个高速增长研究方向。其中,纳米管与纳米结构材料(增长 1.1 倍)在多功能应用方面展现出非凡潜力。^{28, 29}同时,特种结构与涂层材料(增长 1 倍)的融合,正推动着仿生分级结构材料的设计与实现。

在**填料与助剂**分支中,受多功能聚合物系统需求的驱动,多个研究方向正快速发展。金属有机框架(MOFs, 增长 1.1 倍)与共价有机框架(COFs, 增长 1.2 倍)作为革命性的新型填料崭露头角,在孔隙率、选择性与响应性方面提供了前所未有的调控能力,^{30, 31}在膜应用³²与储能技术中具有重要价值。³³此外,作为传统石油基化合物可持续替代品的生物基助剂,其关注度也显著提升(增长 1.3 倍)。³⁴

应用与终端用途分支呈现出强劲的多元化趋势,多个研究方向正在快速兴起。汽车行业向轻量化、高性能材料转型,拉动对专用聚合物解决方案的需求。³⁵能源领域的应用,特别是电池隔膜³⁶与光伏封装材料,³⁷科研热度空前高涨。同时,水处理^{38, 39}与空气净化系统^{40, 41}等环境应用领域,已成为聚合物应对全球可持续性挑战的高影响力新兴赛道。

可持续性与循环经济领域涌现出多个快速增长的研究方向,表明可持续理念已成为聚合物研究不可或缺的组成部分。其中,回收利用技术(增长 1.4 倍)与废弃物管理策略(增长 1.3 倍)^{42, 43}呈现快速增长态势。受环保诉求与监管压力的双重

驱动,生物基材料的开发正加速推进(增长 1.2 倍)。^{12, 44}此外,全生命周期评估方法(环境影响,增长 1.4 倍)正逐步成为行业标准,以确保新型聚合物技术在全生命周期内带来切实的环境效益。⁴⁵

特性与表征分支显示出若干增长稳健的研究主题,表明材料优化仍是聚合物发展的核心任务。其中,流变/流动性能的增长轨迹最为突出(增长 1.3 倍)。⁴⁶自修复能力(增长 1.1 倍)正从实验室前沿研究走向实际应用,⁴⁷机械性能(增长 1.1 倍)的提升也在持续优化之中。¹²在电子应用中愈发关键的热管理性能(增长 1.2 倍),⁴⁸进一步推动了兼具导热性与电绝缘性的聚合物体系的研究。⁴⁹

最后,在**加工与制造**分支中,增材制造技术发展迅猛(增长 1.2 倍),正在重塑聚合物加工方式,使复杂几何结构与分布式制造模式成为可能。⁵⁰乳液模板法⁵¹与熔喷工艺等特种加工方法(增长 1.2 倍),⁵²正助力构建具有定制化性能的分级结构。纤维加工(增长 1.3 倍)呈现强劲增长势头,其中碳纤维制造尤为突出。⁵³通过将碳前驱体与功能性聚合物共纺制备杂化碳纤维,可生产集传感、热管理与电磁性能于一体的纤维复合材料。^{54, 55}随着复合材料逐步达到使用寿命,碳纤维回收与再加工等先进回收技术变得日益重要。^{56, 57}基于热解的碳纤维回收工艺,结合再纺丝与再碳化能力,正推动循环制造模式的发展,使纤维性能经过多次循环仍得以保持,从而为可持续先进材料制造确立了新范式。此外,受水处理⁵⁹与气体分离⁶⁰等应用需求驱动,⁵⁸膜加工技术亦保持稳步增长(增长 1 倍)。

3.2.2. 高分子专利全景分析：总体创新主题

对新兴主题的专利全景分析显示，聚合物技术创新生态的发展路径与学术研究路径存在明显差异（图 11-13）。专利分析显示，产业界正聚焦于具有明确商业化前景和短期市场潜力的聚合物应用：

在可生物降解聚合物和导电聚合物领域，专利活动与期刊论文的重合度较高，表明两者已形成较为成熟的“科研—转化”闭环，产业界正高效承接并放大学术成果的应用价值。典型案例包括：波音公司与中国商飞北京飞机技术研究院联合开发的阻燃聚乳酸 (PLA) 复合材料；⁶¹ Beyond Plastic 公司基于聚羟基脂肪酸酯 (PHA) 共混物开发的可生物降解塑料；⁶² 以及 Akina Inc. 推出的可在 180 天内降解的烷基聚酯塑料。⁶³ 关于生物基与可生物降解聚合物的详细讨论，请参见第 5 章节。

自修复材料的专利产出增速（增长 1.1 倍）与学术研究体量大致相当，反映出该领域的商业化热度较高，这主要得益于航空航天、电子等高价值行业的明确应用需求。代表性专利包括：礼来公司针对电子皮肤等可穿戴设备开发的自修复水凝胶（由 PEDOT:PSS 和 PVA 组成）；⁶⁴ 以及中国国防科技创新研究院团队研发的自修复防冰聚合物复合涂层（由 PDMS 和氧化亚铁纳米颗粒构成），可用于航空及其他领域的电子设备。⁶⁵ 此外，自修复聚合物在建筑和生物学领域也展现出广阔前景。例如，德雷塞尔大学团队正在研发掺入聚酯、聚乙烯醇(PVA)、聚酰胺及芳纶等聚合物的自修复纤维增强混凝土；⁶⁶ 在生物学领域，自修复特性对医疗器械的创新同样具有很大吸引力。⁶⁷

在**复合材料与纳米复合材料**分支中，结构复合材料和功能表面体系的专利密集度明显高于学术研究，说明这些技术在商业化方面更为成熟，并已建立起较为完善的知识产权保护策略。

当前，**应用**导向型创新模式日益突出，广泛覆盖储能、电子、包装及生物学等终端领域。这与学术界以材料探索为核心的研究格局形成鲜明对比，体现了产业界以市场需求为驱动的创新路径。在储能应用方面，产业界已突破传统锂离子电池技术范畴，呈现出高度多元化的特点，相关专利覆盖储氢^{68, 69}、钠离子体系^{70, 71}以及用于碳捕集的膜材料⁷²等方向，这种对替代性储能路径的积极探索在期刊论文中并不明显。从专利权人来看，以中国、韩国和日本为首的亚洲企业在储能应用相关专利中占据主导地位（该领域的聚合物技术将在第 4 节详细讨论）。在医疗保健领域，聚合物技术在医疗器械^{73, 74}、植入物、^{75, 76} 抗菌应用⁷⁷（并延伸至食品包装⁷⁸与纺织品⁷⁹等领域）以及生物材料等方面形成了精细的分类体系，其应用细分精细度远超学术文献中较为宽泛的生物学分类。同样，电子应用领域也拥有完善的细分体系，^{80, 81} 主要聚焦于显示技术^{82, 83}、柔性电子及互连解决方案，⁸⁴ 尽管商业价值显著，但在学术研究中获得的系统性关注相对有限。

可持续性相关技术（特别是可生物降解材料和回收工艺）领域的专利活动十分活跃，说明市场已充分认识到政策监管要求和消费者偏好的重要性，而学术研究若能加强对这些商业驱动因素的重视，将大有裨益。已进入商业化阶段的实例包

括：可降解的聚乙烯基塑料⁸⁵、无卤阻燃电缆^{86, 87}、环保型隔热材料，⁸⁸以及对苯二甲酸等聚合物单体的绿色合成工艺优化。⁸⁹此外，生物质衍生聚合物（如聚乙烯⁹⁰和聚乙烯醇）也是重要研究方向。⁹¹从地域分布来看，2020至2025年间，商业可持续技术的研发主要由中国及其他亚洲国家/地区（日本、韩国、印度）的企业引领，美国在该领域的商业化布局相对滞后。

先进纳米填料备受工业界关注，且细分领域众多（碳纳米结构⁹²、纳米颗粒⁹³等），表明纳米技术在工业界的应用正在加速推进；相较而言，学术研究对此方向的探索更为宽泛，商业化导向较弱。^{94, 95}同时，化学添加剂，尤其是功能性添加剂（如阻燃剂^{96, 97}、性能增强剂^{98, 99}），以及金属有机框架（MOFs）¹⁰⁰和共价有机框架（COFs），¹⁰¹也频繁出现在专利申请中，反映出工业界在聚合物开发中采取“配方导向”的策略。此外，天然纤维增强材料在多个类别（木质¹⁰²、棉质¹⁰³、蛋白质基¹⁰⁴等）中展现出超出预期的专利密集度，表明工业界对可持续复合材料体系有着极大兴趣。¹⁰⁵产业端对生物基增强材料的重点布局，与学术界在可持续性方面的研究方向高度契合。^{107, 108}

学术研究高度关注新型聚合物合成方法^{109, 110}与先进聚合技术，^{111, 112}但这些方法在专利申请中体现较少，专利反而更侧重于现有聚合物体系的具体应用。这表明学术界与工业界的研究重点存在明显差异：前者偏向合成创新，后者则优先考虑实际应用落地和经济效益。

在性能-特性关系优化方面，专利活动十分活跃，尤其集中在特种性能（如自修复）、^{113, 114}响应行为¹¹⁵⁻¹¹⁷以及表面特性（附着力、^{118, 119}润湿性^{120, 121}）等领域。专利数据表明，产业界更倾向于将基础材料特性转化为具体性能指标，这种应用导向在学术研究中并不常见。同时，响应性性能创新在多个刺激响应类别（光^{122, 123}、热^{124, 125}、pH等^{126, 127}）以及相变领域专利产出量非常可观，^{128, 129}表明智能材料的商业化进程正在加速。

最后，加工助剂和设备规格方面的专利覆盖范围广泛，涵盖材料制备（混合^{130, 131}、输送¹³²）、表面改性^{133, 134}以及加工设备（挤出^{135, 136}、成型^{137, 138}、涂布¹³⁹）等细分领域。尽管这些环节对商业化落地至关重要，但在学术文献中获得的关注相对有限。

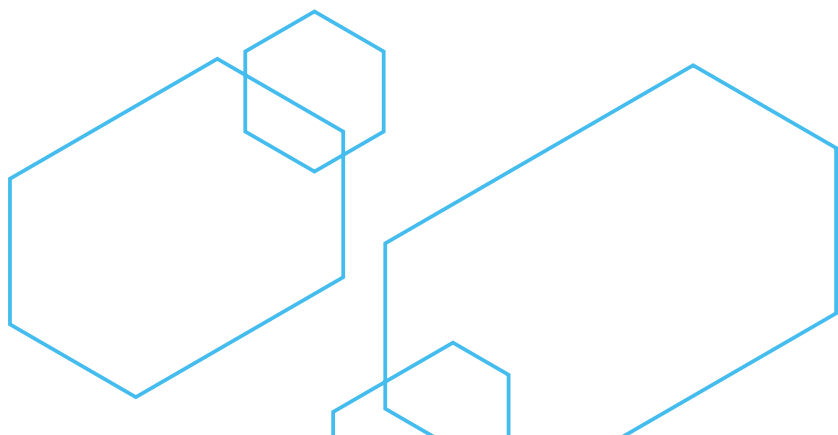




图 11. 基于自然语言处理 (NLP) 技术对期刊论文进行分析, 并据此绘制出的 CAS 全景聚合物领域新兴热点图谱, 展示了全部 8 个分支——**聚合物类型与材料**、**复合材料与纳米复合材料**、**填料与助剂**、**特性与表征**、**应用与终端用途**、**化学与合成**、**可持续性 & 循环经济**、**加工与制造**。六边形大小代表总体研究关注度 (即文献发表数量), 颜色则反映文献数量的增长幅度 (增长倍数), 颜色越暖, 增长越快。

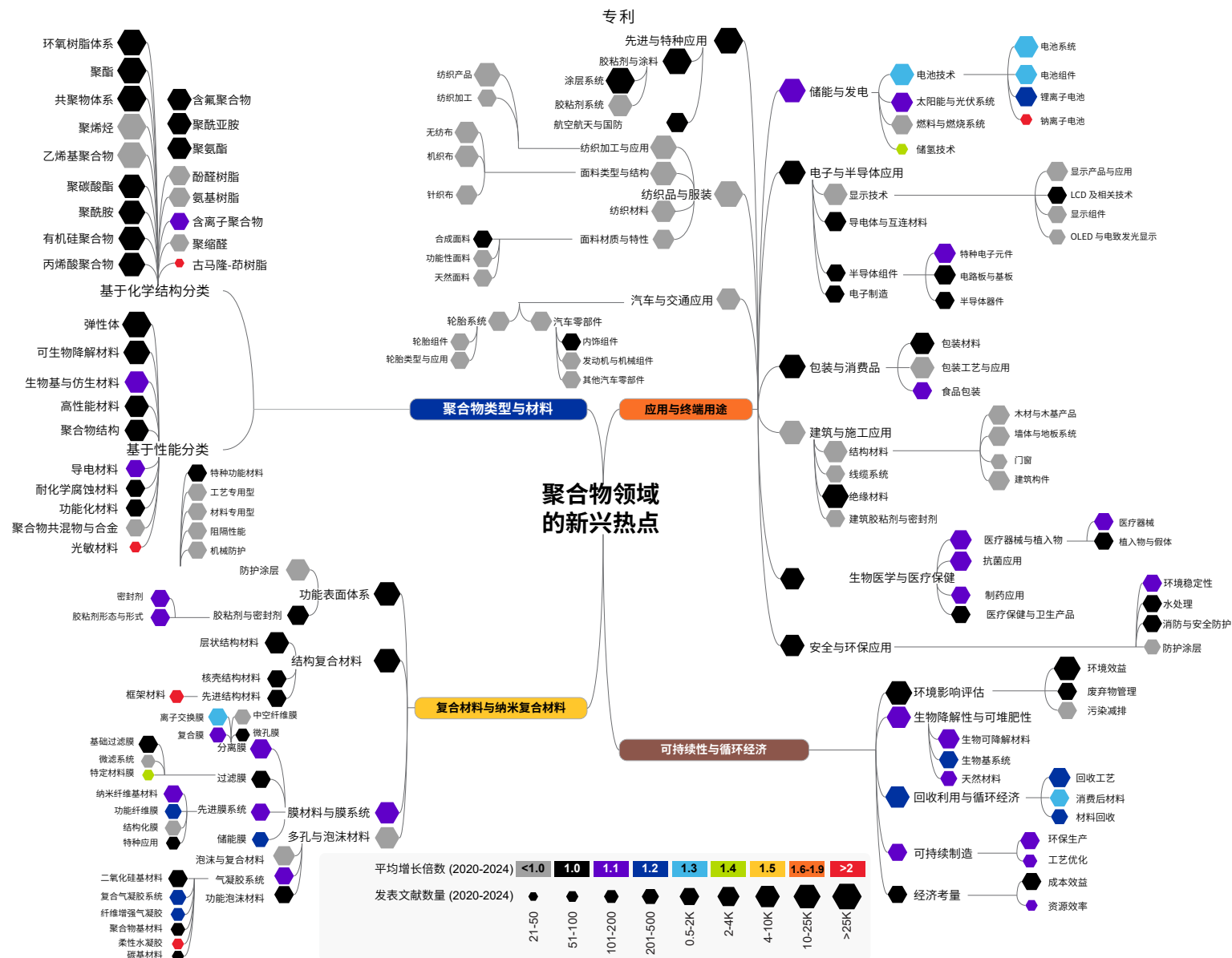


图 12. 基于自然语言处理 (NLP) 技术对四大主要分支——**聚合物类型与材料**、**复合材料与纳米复合材料**、**应用与终端用途**、**可持续性 & 循环经济**的专利文献进行分析，并据此绘制的 CAS 全景聚合物领域新兴热点图谱。六边形大小代表总体研究关注度（即文献发表数量），颜色则反映文献数量的增长幅度（增长倍数），颜色越暖，增长越快。

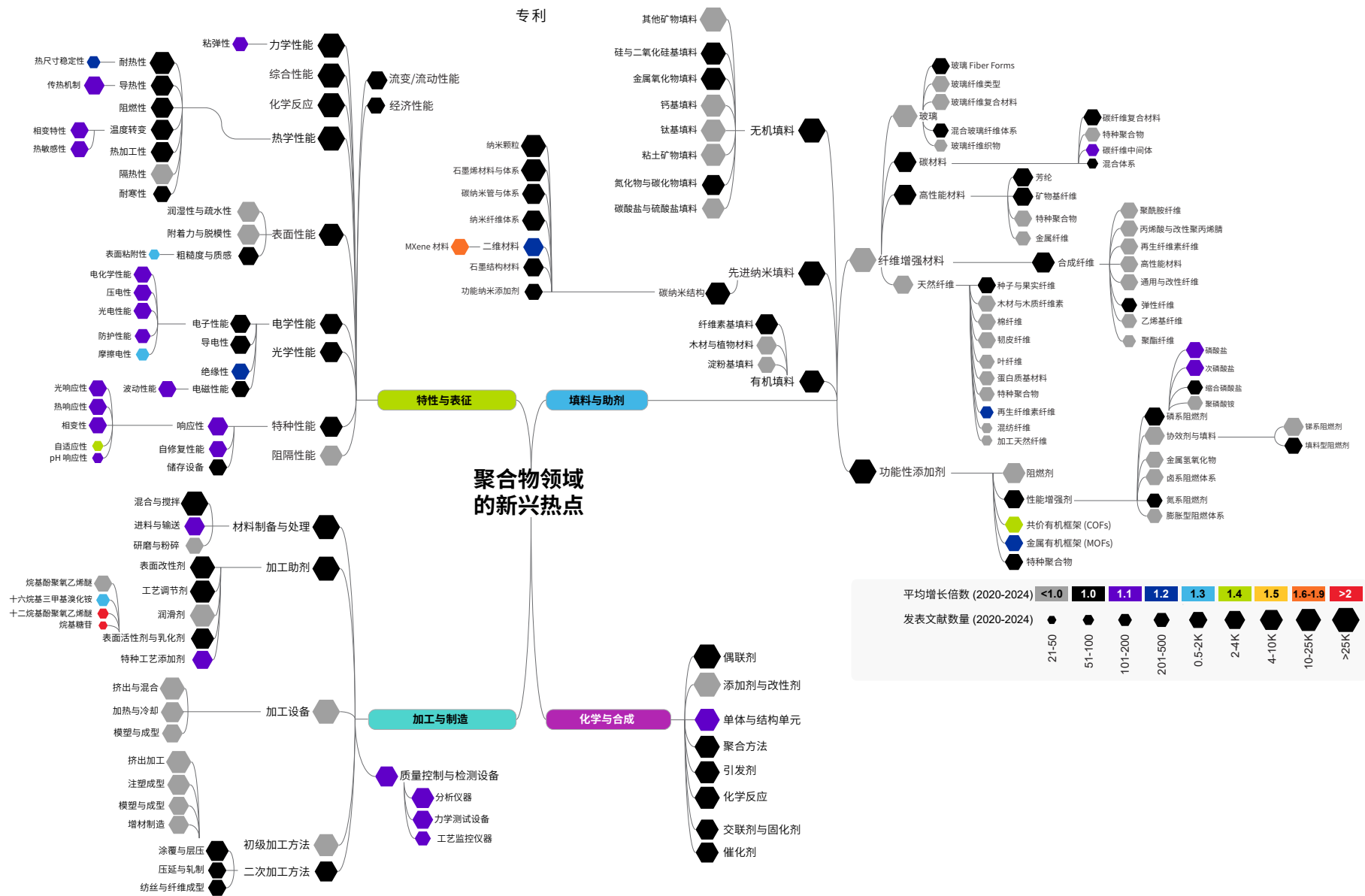


图 13. 基于自然语言处理 (NLP) 技术对四大主要分支——特性与表征、填料与助剂、加工与制造、化学与合成的专利文献进行分析，并据此绘制出的 CAS 全景聚合物领域新兴热点图谱。六边形大小代表总体研究关注度（即文献发表数量），颜色则反映文献数量的增长幅度（增长倍数），颜色越暖，增长越快。

3.2.3. 基于期刊全景分析的聚合物类型与材料新兴趋势

基于期刊论文 NLP 数据，对聚焦于**聚合物类型与材料**的 CAS 全景图谱进行分析（图 14），表明有多个新兴研究板块，其中多个分子结构体系展现出极高的研究热度。

在主链为碳链结构的聚合物中，围绕取代结构和官能团引入的研究十分活跃。含氟聚合物持续受到高度关注，尤其是聚偏二氟乙烯 (PVDF) 体系，这主要得益于其优异的压电特性¹⁴⁰ 以及在储能领域的广泛应用。¹⁴¹ 相比之下，传统乙烯基聚合物（如聚乙烯、聚苯乙烯）及其功能化改性的研究热度有所降低，¹⁴² 说明这些体系已较为成熟，当前的研究重心正转向合成后改性及性能提升。

聚酯目前是研究热点之一，方向高度多元化，重点聚焦于以生物基 2,5-呋喃二甲酸为核心单体的呋喃酸酯体系（如 PEF、PPF、PBF）。^{143, 144} 这一趋势与摆脱石油依赖、实现聚合物原料可持续发展的需求高度契合。同样，聚氨酯领域的研究重点正明显转向非异氰酸酯合成路线（非异氰酸酯聚氨酯，NIPU）¹⁴⁵ 及聚羟基氨基甲酸酯 (PHU)，²² 旨在规避传统聚氨酯化学中的毒性问题，¹⁴⁶ 同时保持其多功能性能优势。

NLP 数据分析表明，具有复杂结构特征的聚合物研究正在加速推进，尤其是杂链聚合物、离子型聚合物¹⁴⁷ 以及共轭体系。¹⁴⁸ 对复杂结构的重视，标志着研究正向精准高分子工程迈进，力求实现定制化的序列分布¹⁴⁹、可控的立构规整度¹⁵⁰ 以及明确的立体规整性。¹⁵¹ 此外，聚噁唑啉¹⁵² 和聚硫¹⁵³ 聚合物已发展为独立的细分研究方向，说明业界日益认可这些结构在独特性能方面的潜力。

研究还发现，生物基高分子材料在多种结构类型中均表现出很高的研发热度。呋喃酸酯聚酯¹⁵⁴、聚富马酸丙二醇酯 (PPF)¹⁵⁵ 及碳酸酯聚合物¹⁵⁶ 的发文量可观，表明可再生单体已成功融入成熟的聚合物结构体系。对纤维素¹⁵⁷、木质素¹⁵⁸ 等天然聚合物体系的重点研究，进一步反映出行业正战略性地向具有固有功能的生物源大分子转型。同时，聚乳酸/聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯 (PLA/PBAT) 共混物^{159, 160} 及聚羟基脂肪酸酯 (PHAs) 领域的研究也比较活跃，表明学术界正着力克服单组分生物降解体系在力学性能上的局限。¹⁶¹ 此外，聚丁二酸-己二酸丁二酯 (PBSA)¹⁶²、聚(丁二酸丁二醇酯-共-对苯二甲酸酯) (PBST)¹⁶³ 及聚丁二酸丁二醇酯 (PBS)¹⁶⁴ 作为独立类别出现，说明除主流的 PLA¹⁶⁵ 和 PBAT¹⁶⁶ 体系之外，其他新型结构可生物降解聚酯的关注度正在提升。

动态响应高分子领域同样发展势头强劲，特别是动态共价网络 (CANs)^{167, 168}、自修复体系¹⁶⁹ 以及液晶弹性体 (LCEs)。¹⁷⁰ 动态交联聚合物 (Vitrimers)¹⁷¹ 与共价可适应网络的相关发文量较高，^{172, 173} 表明学术界和产业界对兼具机械强度与可再加工性的可回收热固性材料的兴趣日益浓厚。同时，刺激响应型聚合物由于能按需调控材料性能、适配多种应用场景，已成为研究热点。¹⁷⁴ 对复杂结构与响应性能的双重重视，说明人们对宏观行为背后的分子设计原理的理解不断加深，正推动聚合物设计策略从经验优化走向理性的精准设计。

导电聚合物的研究持续活跃，其中离子导电弹性体 (ICEs)^{175, 176}、导电聚合物复合材料 (CPCs)^{177, 178} 及聚电解质多层膜 (PEMs)¹⁷⁹ 热度明显。CAS 全景图谱显示，行业正重点布局柔性电子体系，¹⁸⁰ 相比

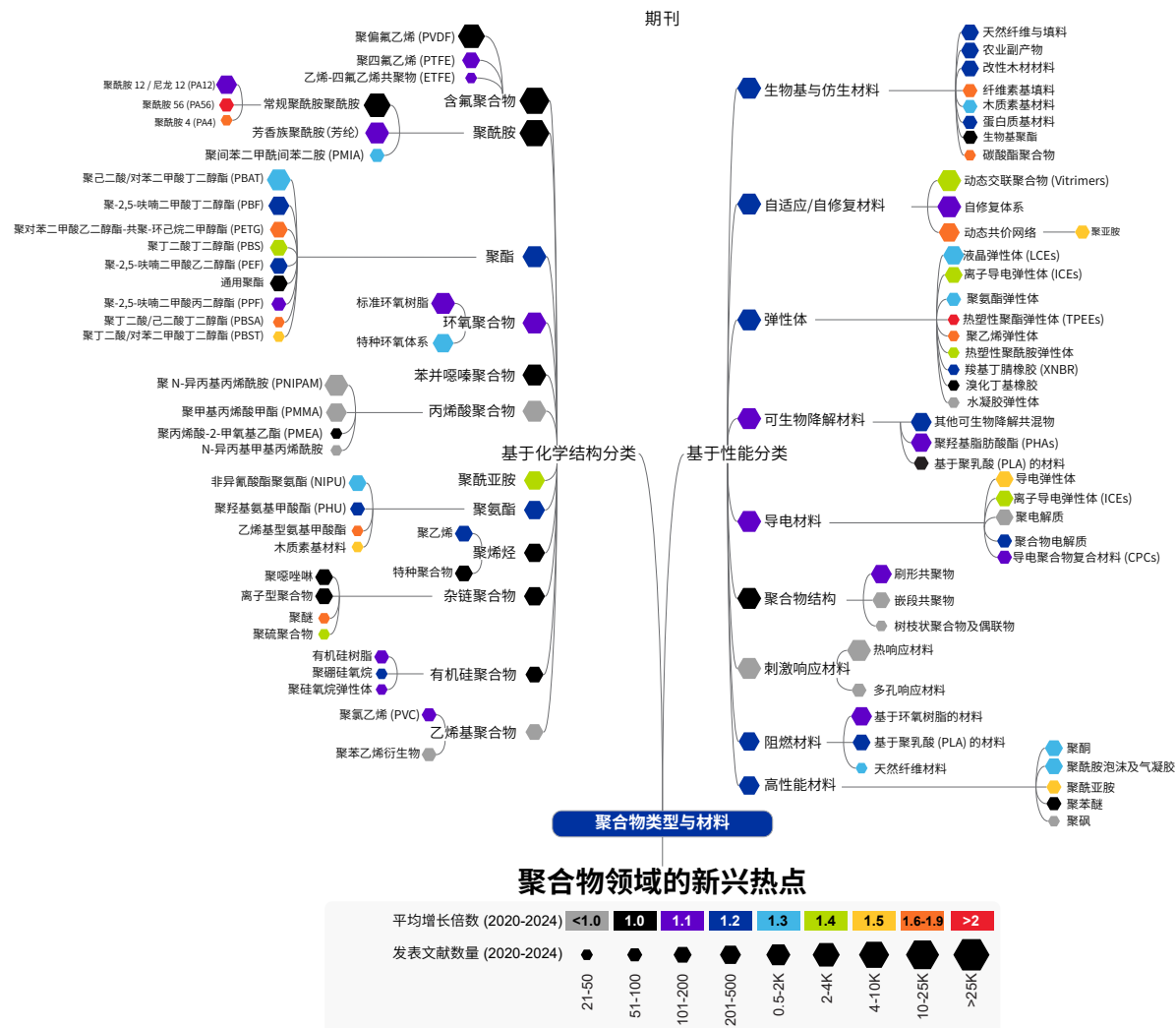


图 14. 基于自然语言处理 (NLP) 技术，对聚合物主要分支之一——**聚合物类型与材料**的期刊论文进行分析，并据此绘制出的 CAS 全景聚合物新兴热点图谱。六边形大小代表总体研究关注度（即文献发表数量），颜色则反映文献数量的增长幅度（增长倍数），颜色越暖，增长越快。

传统无机导体，聚合物在导电性方面展现出明显优势。PBDB-T 的出现，凸显了共轭聚合物在有机电子产业中的持续重要性。¹⁸¹ 此外，芳香族聚酰胺¹⁸² 及高性能纤维¹⁸³ 方面的研究活动表明，对超高强度材料的关注仍在持续。

分析还显示，学术界对能够同时满足多种性能要求的聚合物（如导电弹性体、自修复热塑性塑料）的关注度日益提升，这一趋势源于实际应用工况需要融合以往难以兼容的多项材料性能。而在生物基化学与生物降解性能领域的大量研究，则表明通过共聚、共混等策略性手段，正在逐步解决环境兼容性与功能性能之间的长期矛盾。

3.2.4. 基于专利全景分析的聚合物类型与材料新兴趋势

根据对专利文献进行自然语言处理 (NLP) 后绘制的**聚合物类型与材料** CAS 全景图谱（**图 15**、**图 16**），显示该领域的新兴主题与热点方向明显增多。虽然专利布局与学术研究在聚酯、聚酰胺、聚氨酯、弹性体及导电聚合物等大类上保持一致，但在各细分领域的侧重上存在显著差异，充分体现了学术界与产业界在研究导向上的不同。

聚酯：聚乳酸 (PLA) 体系十分突出，说明围绕该类材料的研究已高度集中，并衍生出 PLA 共混物¹⁸⁴、PLA 共聚物¹⁸⁵ 及改性 PLA¹⁸⁶ 等明确的子类别。这些新兴主题反映出产业界正致力于通过结构改性与共混优化，解决 PLA 固有的脆性^{187, 188} 及热稳定性不足¹⁸⁹ 等问题。

通过引入功能性共聚单体（如羟基化、卤化、芳香族类单体），可以有效突破传统热塑性塑料的性能瓶颈。在 PHA 共聚物中，聚(3-羟基丁酸酯-共-3-羟基己酸酯) (PHBH 或 PHBHHx) 的专利增速最快 (1.5 倍)，其次是聚(3-羟基丁酸

酯-共-4-羟基丁酸酯) (P(3HB-co-4HB)，1.3 倍) 和聚(3-羟基丁酸酯-共-3-羟基戊酸酯) (PHBV 或 P(3HB-co-3HV)，1.1 倍)（**图 15**）。以 PHBV 为例，通过引入戊酸酯单元，有效降低了结晶度与熔点；¹⁹⁰ 其甲基支链打破了 PHB 规整的晶体堆积，在保持热稳定性的同时改善了加工性能。¹⁹¹ PHBV 的商业成功，证明了其在发酵过程中的可规模化控制以及性能调节的可预测性。¹⁹² PHBHHx 是 PHA 性能优化的关键改良材料，通过引入中长链单体打破 PHB 原有的结晶性，降低了玻璃化转变温度与结晶速率，从而改善了脆性和加工窗口狭窄的问题。¹⁹³ 研究表明，当 HHx 含量为 2–14 mol% 时，柔韧性与强度的平衡达到最佳，适用于对抗冲击场景，代价是生物降解性小幅下降。¹⁹⁴ P(3HB-co-4HB) 则通过引入 4HB 共聚单体实现位置异构，额外的亚甲基单元提高了分子链运动能力，并降低了分子间相互作用，赋予了独特的链柔韧性。在适宜的 4HB 含量下，¹⁹⁵ 该共聚物表现出优异的断裂伸长率，成为柔性包装应用的理想选择。

环氧树脂体系：聚缩水甘油基化合物的兴起，表明研究重点正转向能够提高交联密度与热性能的多功能交联结构。¹⁹⁶ 超支化环氧树脂^{197, 198} 的出现，表明树枝状结构在改善加工性能¹⁹⁹ 及与粘度相关的应用²⁰⁰ 方面具有重要价值。同时，针对能源²⁰¹、电子²⁰²、航空航天²⁰³ 等诸多领域，多官能团环氧树脂研究兴趣日益浓厚，体现了通过可控官能团引入来优化交联密度的系统化思路。此外，双酚 F (BPF) 材料的关注度显著提升，²⁰⁴ 反映出业界在监管压力与毒理学安全考量下，持续致力于开发替代双酚 A (BPA) 的更健康方案；但现有研究表明，BPF 可能仍存在与 BPA 相似的毒理学风险。²⁰⁵

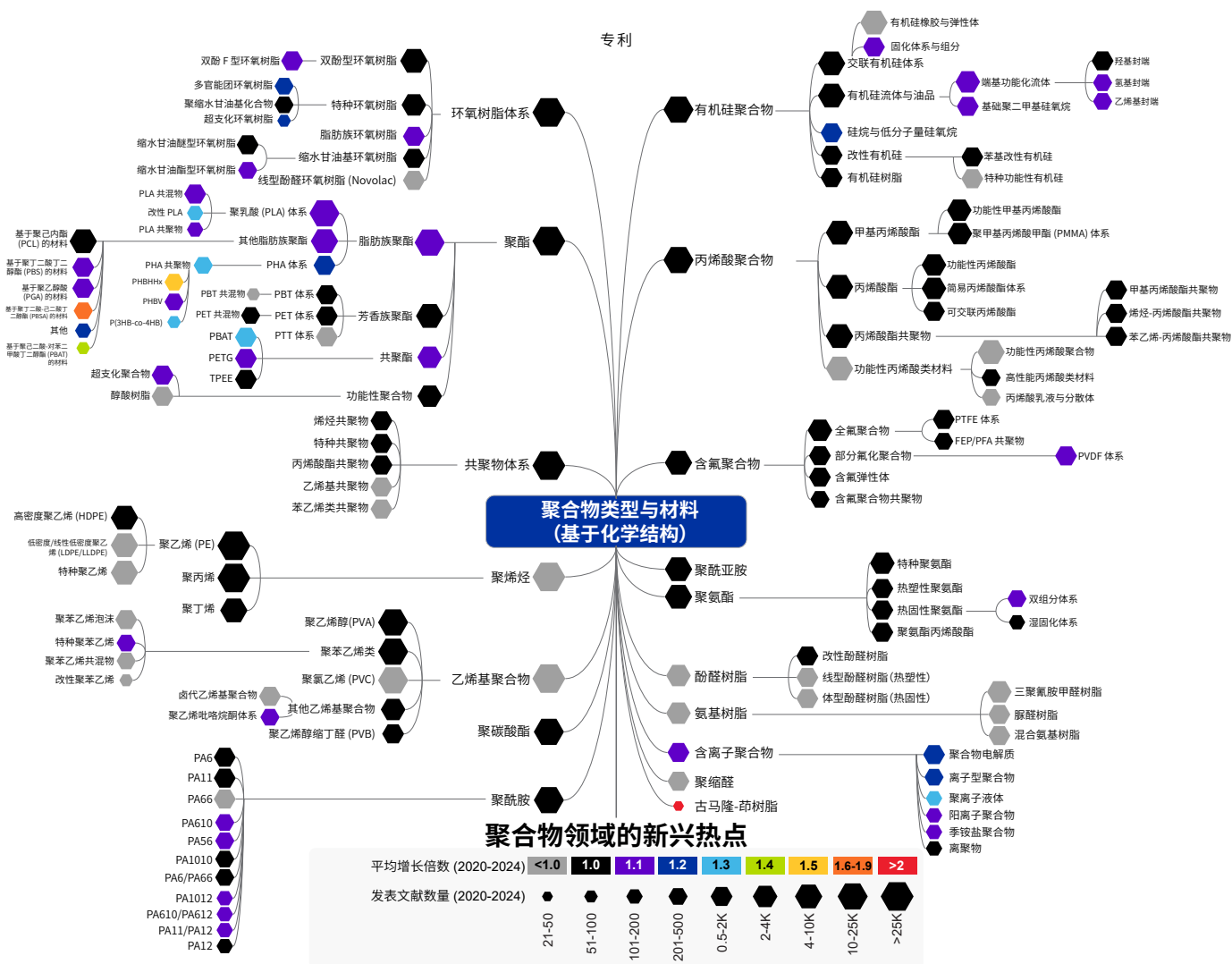


图 15. 基于自然语言处理 (NLP) 技术对主要分支之一——**聚合物类型与材料**的专利进行分析，并据此绘制出的 CAS全景聚合物领域新兴热点图谱，其中聚合物依据化学属性进行分类排列。六边形大小代表总体研究关注度（即文献发表数量），颜色则反映文献数量的增长幅度（增长倍数），颜色越暖，增长越快。

有机硅聚合物：固化体系、组分材料以及交联有机硅体系，是实现加工与性能协同优化的核心研究方向。固化化学研究备受重视，反映了工业界对可控凝胶动力学、常温加工以及定制化网络结构的需求。功能性端基改性流体主要聚焦于偶联剂开发与表面改性应用，其中羟基封端、²⁰⁶ 氢封端²⁰⁷ 及乙烯基封端²⁰⁸ 体系代表了用于交联控制与链延伸的差异化反应平台。硅烷和低分子量硅氧烷相关方向的涌现，表明可控聚合与网络前体开发等基础构建单元的研究正得到重视。聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 基础体系常作为性能对比与改性方案的参照。而苯基改性有机硅^{209, 210} 与特种功能性有机硅^{211, 212} 的研发，已形成成熟的性能提升技术路线：通过侧链改性与官能团精准引入，在保持硅氧烷主链优势的同时，实现面向特定应用场景的定制化性能优化。

含离子聚合物：含离子聚合物体系持续受到关注（增长约 1.1 倍），其核心是在多种聚合物主链上系统性地引入功能性离子官能团。作为高增长方向，聚合物电解质备受瞩目，表明固态电池应用²¹³ 与电化学器件已成为战略性研究重点。²¹⁴ 该领域约 2,000 至 4,000 篇的发文量，说明研究体系已趋于成熟，能够对离子导电性、机械稳定性及电化学窗口进行系统性优化。阳离子聚合物^{215, 216} 与季铵盐聚合物 (polyQAC²¹⁷) 属于侧链离子官能团类型，而离聚物²¹⁸ 则在中性聚合物基体中引入离子微区。两者的结构差异使得定制化调控离子传输机制与力学性能成为可能。聚离子液体^{219, 220} 作为独立研究类别崭露头角，体现了将聚合物加工优势与离子液体特性相结合的先进材料集成理念；其平稳的增长幅度（增长 1.3 倍）表明这一杂化结构领域的研究正日趋成熟。

生物基与仿生材料体系：受可持续发展需求与原料多元化战略的驱动，生物基与仿生聚合物展现出强劲的研究势头，部分研究方向增速高达约 1.5 倍（图 16）。生物基工程聚合物^{221, 222}（如聚氨酯^{223, 224}、聚酰胺及聚酯^{225, 226}）均实现高速增长（>1.3 倍）。植物基材料虽呈温和增长（1.1 倍），但发文量可观（2,000 至 4,000 篇），表明该领域的研究兴趣持续不减，且具备向商业化规模迈进的潜力。

可生物降解聚合物：可生物降解纤维²²⁷ 是增长势头强劲的关键领域（增长 1.5 倍），研究主要致力于解决纺织废弃物管理^{228, 229} 及海洋污染治理问题。²³⁰ 研究重点集中在聚乳酸 (PLA) 材料体系，²³¹ 通过链延伸^{165, 232}、成核控制^{233, 234} 及取向优化^{235, 236} 等手段提升其力学性能。^{237, 238} 同时，可生物降解热塑性塑料呈现持续增长（1.3 倍），重点在于面向包装应用场景，实现加工与性能平衡。^{239, 240} 关于生物基与可生物降解聚合物的详细分析，请参见第 5 节。

复杂结构聚合物：复杂结构聚合物已成为高增长领域（增长 1 至 1.3 倍），其中交联体系、超支化结构与树枝状结构^{241, 242} 在研究关注度最高。交联体系的发文量适中（超过 1,000 篇），表明研究人员对通过调控网络拓扑结构来优化性能的理解正日益加深。^{243, 244} 超支化聚酰胺^{245, 246} 与聚酯^{247, 248} 呈现温和增长，这类材料凭借优异加工性与易于功能改性的潜力持续得到研究。

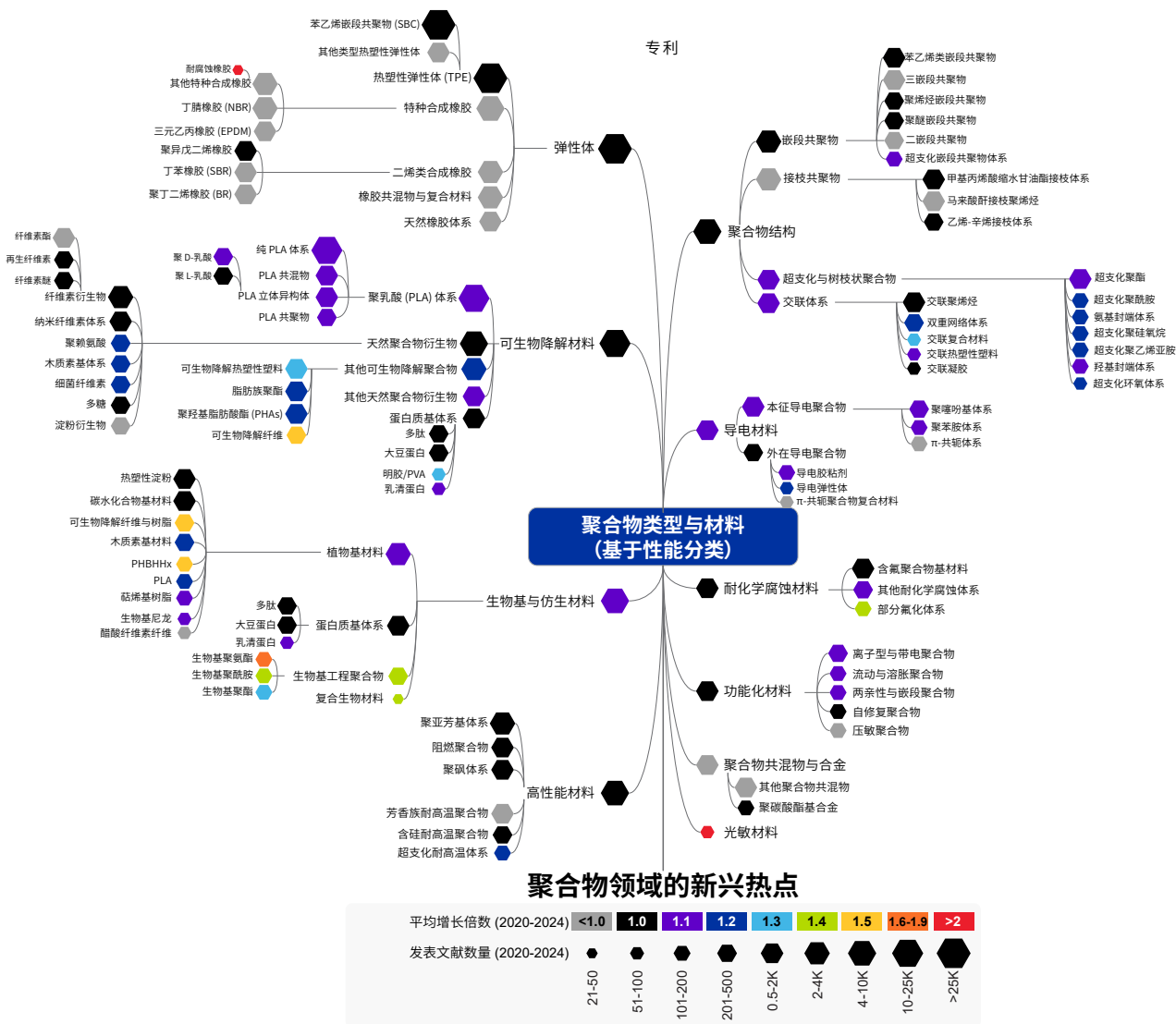


图 16. 基于自然语言处理 (NLP) 技术对主要分支之一——**聚合物类型与材料**的专利进行分析，并据此绘制出的 CAS 全景聚合物新兴热点图谱，其中聚合物按其性质排列/分类。六边形大小代表总体研究关注度（即文献发表数量），颜色则反映文献数量的增长幅度（增长倍数），颜色越暖，增长越快。

其他聚合物：传统乙烯基聚合物、丙烯酸聚合物及含氟聚合物的研究关注度较为平淡，表明相关研究已趋于饱和。酚醛树脂的研究体量保持稳定，这可能得益于其在高性能场景下的应用中需求。²⁴⁹⁻²⁵¹在弹性体领域，特种合成橡胶的研究重点在于通过引入含氟聚合物²⁵²及优化交联工艺来增强耐化学性。²⁵³耐腐蚀橡胶体系尽管研究体量较小（约 23 篇），^{254,255}但增长迅速（超过 2 倍）；热塑性弹性体（TPEs）虽发文量可观，但增长较为缓慢（约 1 倍）。丁苯橡胶（SBR）的研究保持稳定，重点聚焦于微观形貌控制和延长使用寿命。^{256,257}

对聚合物研究趋势的分析表明，期刊论文与专利申请之间存在显著差异，反映出基础研究与商业开发在优先次序上的不同。期刊文献全景分析显示，学术界高度关注复杂的分子结构设计，尤其是动态共价网络、自修复聚合物及刺激响应材料等展现出动态行为与精密高分子工程特征的复杂体系。学术研究以生物基可持续解决方案为重要发展方向，包括呋喃酸酯聚酯（PEF、PPF、PBF）、非异氰酸酯聚氨酯（NIPU）及天然聚合物体系；同时也在积极探索用于柔性电子的先进导电聚合物，以及能够兼容多种不同特性的多功能材料。相比之下，专利全景分析显示新兴领域的研究活动更为密集，商业关注点集中于可规模化推广的解决方案，特别是围绕聚乳酸（PLA）平台技术以及PHA的共聚物体系（如 PHBHHx 增长 1.5 倍，P(3HB-co-4HB) 增长 1.3 倍）。专利研究侧重于实际应用，包括用于工业交联的环氧树脂体系、有机硅固化技术、面向电池应用的含离子聚合物，以及应对纺织废弃物问题的可生物降解纤维（增长 1.5 倍）。尤为值得注意的是，两个领域

在生物基与可生物降解体系方面均展现出强劲势头，专利数据显示生物基工程聚合物的增长率超过 1.3 倍，表明学术界的可持续性研究已成功转化为产业端重点布局的商业化研发方向。

3.2.5. 化学与合成领域的分化趋势：学术发现与商业实施

期刊维度的 CAS 全景图谱（图 17）清晰地展示了学术研究的核心方向，其重点聚焦高分子基础化学与反应机理研究。催化剂^{258, 259}、聚合方法^{260, 261}及化学反应²⁶²主导着新兴研究领域，相关发文量可观（约 500 至 4,000 篇），反映出学术界正系统开展反应机理探究与合成方法学的研发。与之相对，专利研究更侧重商业化落地应用，集中体现为添加剂与改性剂²⁶³⁻²⁶⁵、偶联剂^{266, 267}、交联剂^{268, 269}及固化剂^{270, 271}等品类的多元化开发，表明工业界的关注重心在于性能优化与工艺改进（图 18）。

在聚合方法方面，期刊论文在新兴合成技术上增速更高：开环聚合^{272, 273}与自由基聚合^{274, 275}的涨幅均超过 1.1 倍，表明学术界正在积极探索新型合成路径。专利端聚合工艺布局更加丰富，但成熟技术（本体聚合、模塑聚合及乳液聚合）的增长整体偏平稳，发文量适中（最高 2,000 篇），反映了工业界倾向于规避风险、优先放大成熟可靠工艺。专利布局重点放在可规模化的加工方法（如悬浮聚合^{276, 277}）与工业设备（如反应器内聚合体系^{278, 279}），核心目标是生产制造环节的工艺优化。光聚合技术（增长 1.2 倍）与传统成熟工艺同步发展^{280, 281}，表明工业界对此高度关注，该技术尤其适用于 3D 打印²⁸²与增材制造²⁸³、涂层²⁸⁴、胶粘剂²⁸⁵、电子²⁸⁶及半导体加工等领域。²⁸⁷

学术研究有针对性地侧重可持续化学、生物基单体与结构单元^{288, 289}，增长幅度适中（约 1.2 倍），表明学术界在环境合规性方面可能存在长期的研究投入。期刊对应的 CAS 全景图谱（图 17）还展现了高度多元化的精细化学研究方向，包括特种化学品^{290, 291}、功能化学品²⁹²及环状单体^{293, 294}，反映出学术界在探索复杂分子结构方面具有足够空间。专利活动主要集中于成熟的化学体系（如芳香类和乙烯基单体）及功能添加剂（如紫外防护剂、抗氧化剂），说明产业端优先依托经过市场验证的成熟材料平台，开展商业化研发。

专利大量布局稳定剂与防护剂、²⁹⁵ 增塑剂²⁹⁶及偶联剂，这类研发紧贴市场需求，旨在快速解决当下工业生产痛点。期刊论文则始终以原创探索为导向，重点关注成键/键交换反应^{297, 298}及降解反应，^{299, 300}表明学术界致力于基础性机理研究，不受短期商业应用的束缚。专利分析显示对可持续性的关注相对有限，常规加工方法仍占主导地位，这表明受制于成本压力和配套设施，工业界在绿色技术的落地应用上存在一定滞后。

学术研究强调通过特种催化剂³⁰¹（增长 1.1 倍）与金属催化剂³⁰²（增长 1 倍）实现先进的聚合控制，相关文献产出密集，表明在催化机理方面持续有基础性发现。有机催化剂³⁰³（增长 1.1 倍）与酶催化剂³⁰⁴（增长 1.2 倍）的涌现，反映了该领域正转向可持续的合成方法。

专利则更务实地侧重于固化催化剂³⁰⁵（增长 1.1 倍），反映出工业界优先考虑兼具可加工性与大规模商业化的材料体系。锡基（增长 1 倍）^{306, 307}及其他金属催化剂（如铁、铂、钛）³⁰⁸⁻³¹⁰在专利申请中的突出地位，表明尽管学术界正转向无金

属替代方案，但工业界仍持续依赖成熟的有机金属体系，这反映出学术创新与工业应用之间的步调差异。异氰酸酯固化体系³¹¹（增长 1.2 倍）与缩合催化剂³¹²（增长 1.1 倍）领域的专利数量稳步增长，反映了针对已经形成完善产业基础的成熟聚氨酯与聚酯体系，催化剂的渐进式改进是企业构筑核心竞争优势的关键。

综上所述，学术研究明显更侧重于基础聚合物化学、机理探索以及新兴合成方法的开发。其中，催化剂、聚合方法和化学反应构成了主流研究方向。同时，学术界也在有策略地关注可持续化学、生物基单体，以及有机催化剂和酶催化剂等先进催化体系，这标志着该领域正朝着环境友好的合成范式转型。相比之下，专利研究更注重商业可行性，通过大幅拓展添加剂、改性剂和加工助剂的品类来优化材料性能，强调技术的量产可行性。在本体聚合、乳液聚合、悬浮聚合等成熟方法上，专利增长相对稳健，主要聚焦现有化学品体系与功能助剂的实用化改良。这一差异在催化领域尤为突出：学术界倾向于探索无金属催化体系和精密结构催化剂，而工业专利仍然依赖成熟的有机金属催化体系，反映出学术创新成果与商业应用之间存在滞后性，该现象大概率是成本压力和基础设施不足造成的。总体而言，学术研究以探索发现为导向，聚焦成键机制、降解反应等基础科学问题，并不以短期商业化应用为目标；而专利研发则表现出鲜明的市场驱动特征，通过性能优化和工艺改进来满足当下的工业需求。由此可见，想要实现成功的技术转化，需要有效弥合基础科学突破与规模化生产实践之间的鸿沟。

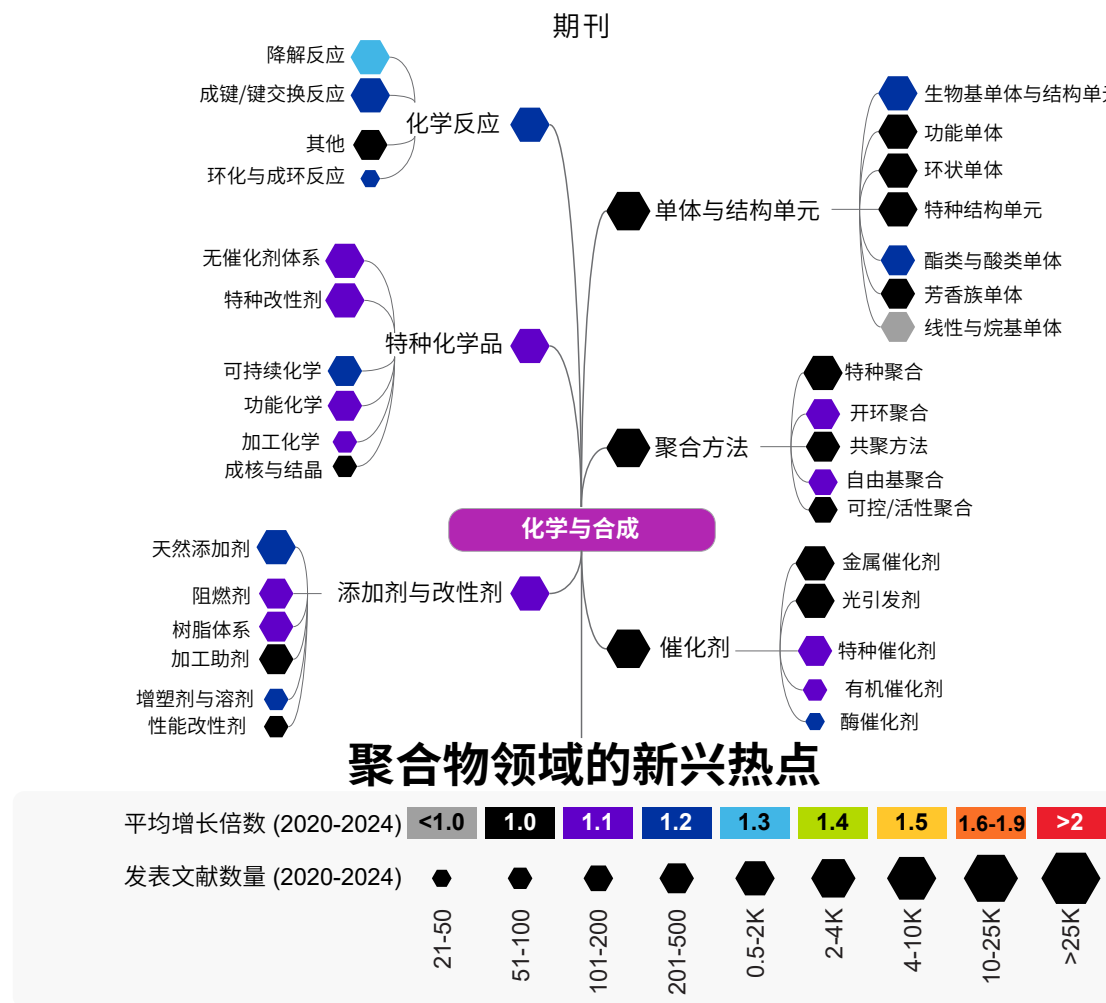


图 17. 基于自然语言处理 (NLP) 技术对主要分支之一——**化学与合成**的期刊论文进行分析，并据此绘制出的 CAS 全景聚合物领域新兴热点图谱。六边形大小代表总体研究关注度（即文献发表数量），颜色则反映文献数量的增长幅度（增长倍数），颜色越暖，增长越快。

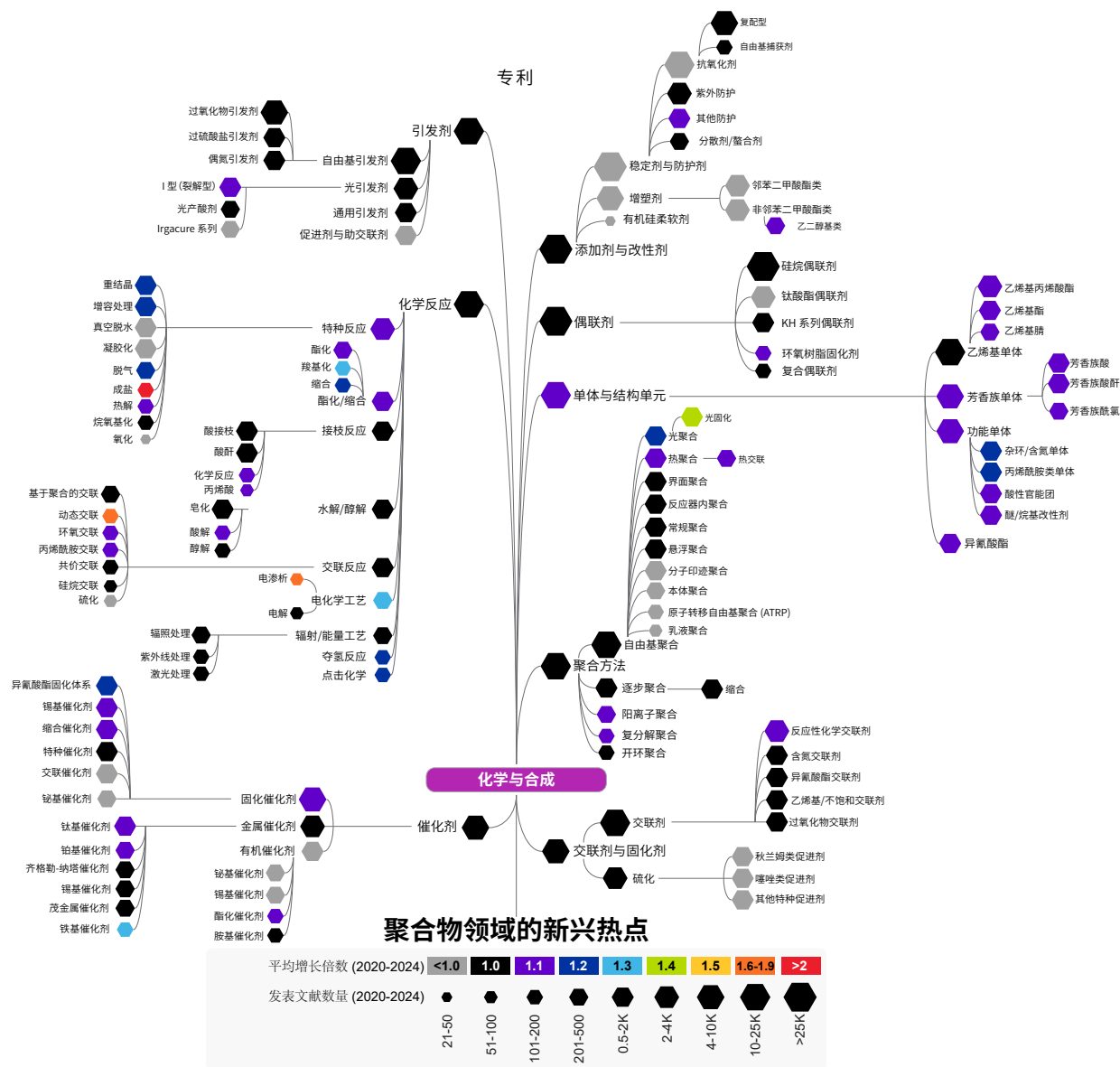


图 18. 基于自然语言处理 (NLP) 技术对主要分支之一——**化学与合成**的专利文献进行分析，并据此绘制出的 CAS 全景聚合物领域新兴热点图谱。六边形大小代表总体研究关注度（即文献发表数量），颜色则反映文献数量的增长幅度（增长倍数），颜色越暖，增长越快。

通过对近百万篇文献的系统分析，我们识别出聚合物领域八大主要分支中的前沿热点方向。这些分支在学术界与工业界呈现出截然不同的增长趋势和创新模式。学术研究更关注复杂分子结构与基础性突破，生物基及可生物降解材料发展势头强劲；动态共价网络与自修复聚合物等复杂体系，以及以有机催化剂和酶催化剂为代表的先进催化体系同样备受重视，标志着整个行业正向绿色可持续路线转型。从期刊论文全景来看，该领域在战略上聚焦于精密高分子工程、刺激响应材料以及融合了以往互不兼容特性的多功能体系，同时依然坚持以探索发现为导向，深入研究反应机理，而不受短期商业可行性的限制。

相比之下，专利活动以可规模化量产与快速落地为首要目标，在实用化技术方向上的研究布局更为密集。专利研究侧重于成熟聚合物平台的系统优化，尤其是聚乳酸 (PLA) 体系与聚羟基脂肪酸酯(PHA) 共聚物，同时大力拓展功能添加剂、加工助剂及定制化专用配方的多元开发。产业端倾向于选择经过市场验证的成熟技术，增长节奏稳健平缓，主要聚焦设备优化以及开发即时响应当下市场需求的解决方案。

在以可持续性为核心的创新领域，学术界与工业界逐渐趋于一致。双方在可生物降解聚合物及生物基工程体系方面均展现出强劲势头，表明从学术研究到商业开发的转化路径已取得成效。然而，技术转化的鸿沟依然存在，尤其是在先进合成方法、复杂结构以及无金属催化体系方面，学术创新虽具备技术优势，但相关专利覆盖依然有限。

本次分析可为科研方向规划提供关键指导，有助于精准识别高增长的潜力赛道，聚焦化学合成创新与材料性能升级的交叉领域，填补尚未被满足的终端应用需求空白区。

3.3 基于 CAS 索引科学概念的新兴聚合物主题全景分析

为识别聚合物领域的前沿研究热点，我们还分析了 2020 至 2024 年间涉及聚合物的文献（见第 2.1 节）中的 CAS 索引概念，可为确定研究趋势与优先商业开发的方向提供定量依据。

针对期刊论文，共提取 124,301 个独特概念（限定出现频次不低于 35 篇）；针对专利文献，共识别 350,125 个概念（限定出现频次不低于 50 个专利族）。年均增长倍数不低于 1.75 的概念被归类为高增长概念，并进一步划分为主题研究领域。

3.3.1. 期刊论文中的新兴主题

对期刊论文中高增长概念的分析结果表明，受可持续发展需求与技术迭代升级驱动，学术界形成差异化的重点研究方向（图 19）。数据归纳出九大核心研究主题，各领域均呈现特定的增长模式与概念集群特征。

可持续材料与废弃物资源化领域的增长率最高，其中热解应用增长 4.4 倍，表明研究重点集中于化学回收利用及将聚合物转化为燃料的技术路线。木质纤维素材料（增长 2.5 倍）与壳聚糖基合成纤维（增长 2.4 倍）进一步印证向可再生原料与可生物降解替代品转型的趋势。这些增长模式高度契合循环经济目标，标志着聚合物研究重点的根本性转向。

储能应用中不同电池化学体系中增长差异明显。锂离子电池相关概念增长 4.7 倍，锌离子技术增长 2.9 倍，这既反映了锂电池体系已日益成熟，也体现出学术界积极探索替代型电池化学体系。多种技术路线同步推进，表明聚合物研究正致力于为电网级储能、移动设备储能等多元储能场景提供配套支撑。

先进电子与柔性器件是另一个高增长领域，其中柔性电路与运动传感器均实现了 2.0 倍的增长。这反映出聚合物材料的作用愈发关键，可支撑可贴合、可拉伸电子体系落地，广泛应用于可穿戴技术与软体机器人领域。

在先进材料领域，纳米粘土的增速最快（4.7 倍），表明其正逐步成为适用多种聚合物体系中的通用增强材料。表面处理技术的创新中，防伪应用增长 4.4 倍，表明聚合物科学与安全防伪技术之间的交叉融合正日益深化。

材料表征技术取得了显著进展，流动性表征研究（增长 3.7 倍）与中红外光谱（增长 3.1 倍）的应用日益广泛。这种分析能力的提升与所开发的聚合物体系日益复杂化的趋势高度吻合。

3.3.2. 专利文献中的新兴主题

专利文献分析显示，产业研发以商业化为导向，研究重心与学术论文趋势存在显著差异（图 20）。数据识别出十大核心研究主题，各领域截然不同的增长态势精准反映了工业研发的关注方向。

储能系统在高增长领域占据主导地位，其中锌离子二次电池呈现出高达 13.6 倍的惊人增长，远超其在期刊论文中的增速。这一显著差异表明，锌离子技术的商业化开发进程正在大幅提速。同时，膜电极组件（增长 4.8 倍）与锂离子电池（增长 4.7 倍）在论文和专利两类文献中均保持稳健增长，表明电化学储能核心零部件长期具备商业化价值。

专利中的可持续聚合物概念侧重于实际应用，其中碳封存（增长 3.9 倍）与建筑废弃物资源化处理（增长 3.1 倍）展现出强劲的增长势头。此外，木质纤维素材料（增长 2.6 倍）在两类文献中均同步稳定增长，进一步证实了其作为生物基原料的商业可行性。

先进膜技术受到产业高度关注，其中电渗析整体增长 1.8 倍，电渗析专用膜增长 4.3 倍。气液分离概念增长 1.8 倍，也印证了聚合物膜在工业分离工艺中的重要性。这些技术可满足水处理、化学加工及能源领域的关键应用需求。

电子与光电子应用领域增长不一，其中柔性电路在专利申请中增长 1.8 倍，与其在期刊论文中的增长趋势高度一致。这种同步增长表明，柔性电子平台的学术研究与商业开发正在协同推进。

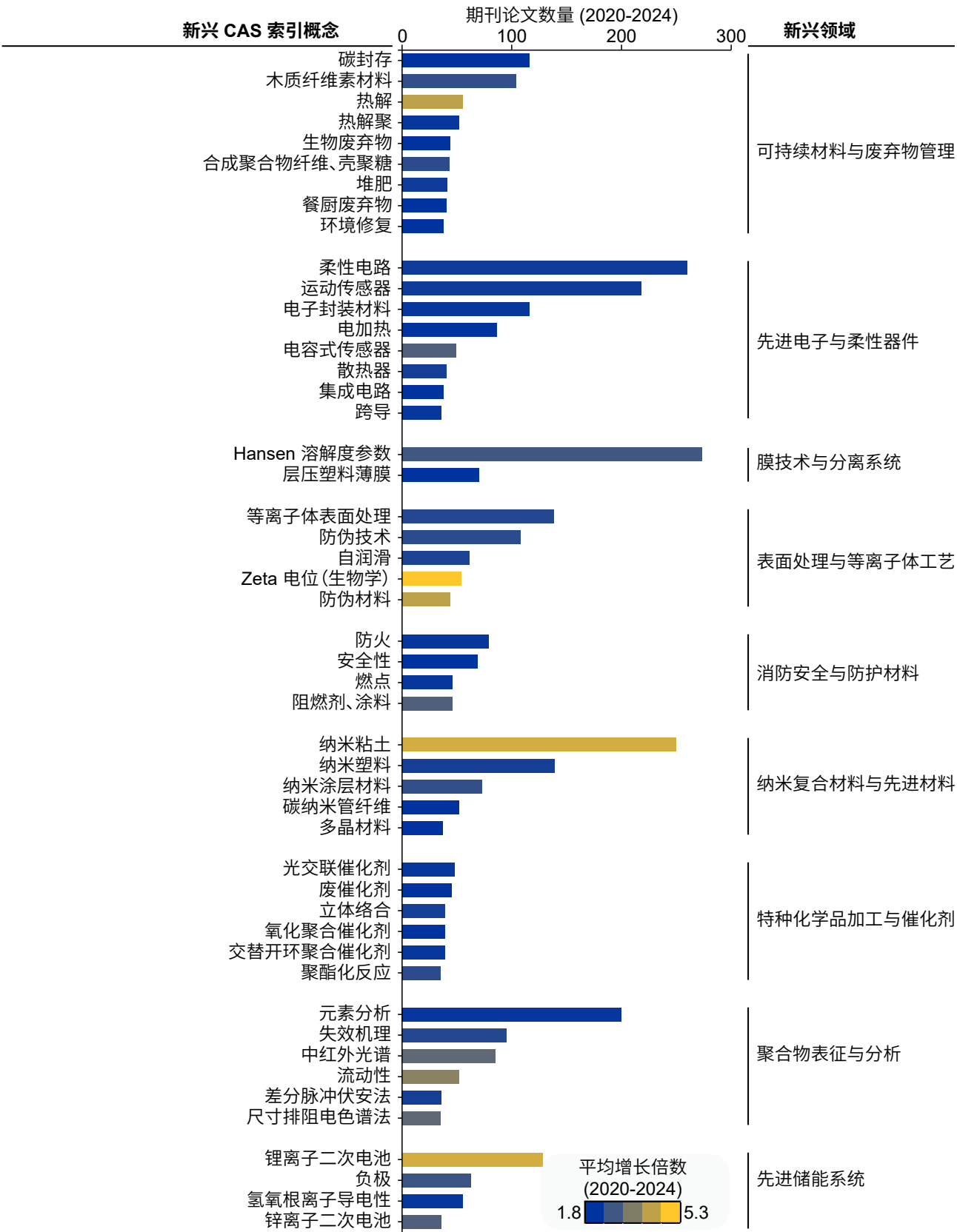


图 19. 期刊论文中新兴的 CAS 索引概念按研究领域分组展示。柱状图颜色根据 2020 至 2024 年期间的平均增长倍数进行编码区分。

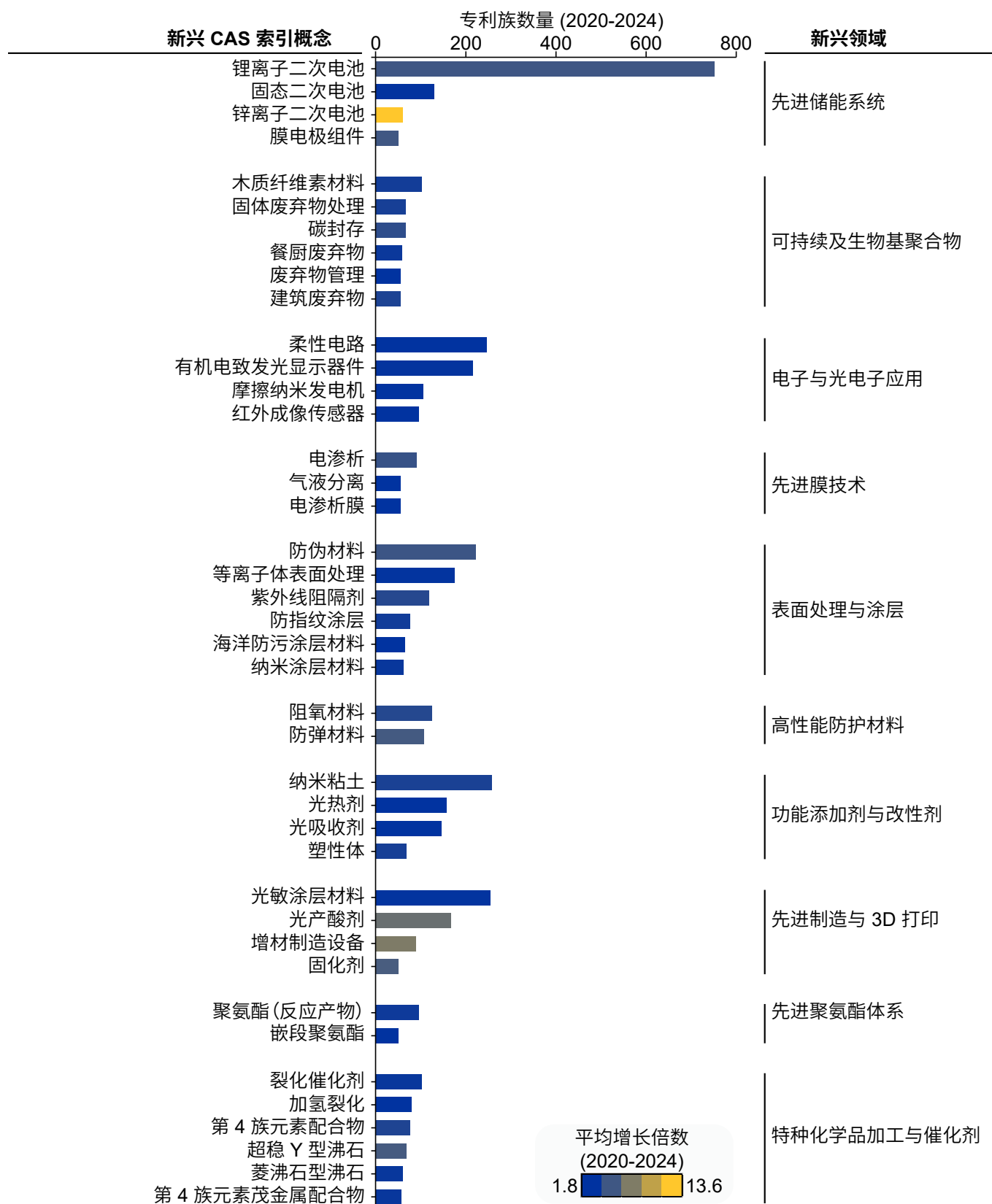


图 20. 按研究领域分组的专利文献新兴 CAS 索引概念，柱状图颜色根据 2020 至 2024 年期间的平均增长倍数进行编码区分。

先进制造领域专利数量暴涨，其中增材制造设备（增长 7.6 倍）与光产酸剂（增长 6.7 倍）引领行业增长。专利高度集中于 3D 打印技术，表明依赖特定光聚合化学体系的聚合物基增材制造系统正加速商业化进程。

表面处理与涂层技术呈现出多样化的商业应用，防伪材料（增长 4.6 倍）与电渗析膜（增长 4.3 倍）代表了不同的细分市场。同时，防弹系统等高性能防护材料增长 5.0 倍，表明国防与安全应用正强力推动聚合物不断创新迭代。

3.3.3. 比较分析与新兴子主题

期刊与专利全景的对比分析，揭示了既相互趋同又各具特色的发展趋势，这些趋势共同定义了新兴的聚合物子主题。储能应用在学术和产业两端均持续占据核心地位，其中电池用聚合物组件代表了一个成熟且发展迅速的研究方向。锌离子体系在专利中的增长率显著高于期刊（13.6 倍对 2.9 倍），表明其从基础研究向商业开发的技术转移正在加速。

以可持续性为核心的概念在论文和专利中热度都很高，但侧重点各有不同。期刊论文优先关注基础材料开发（如木质纤维素原料、可生物降解聚合物），而专利则聚焦于面向特定应用的工程化方案（如碳封存、废弃物管理系统）。

先进制造与 3D 打印主要通过专利活动显现，表明该领域的创新由产业界主导。光聚合相关概念的集中出现，表明聚合物正为下一代制造技术提供关键支撑。

此外，从电渗析到气液分离，膜分离技术在多个概念集群中高频出现，表明其已发展成为一个值得专门研究的独立聚合物应用领域。

基于数据的深度洞察，我们识别出五个持续引领聚合物创新的重要领域：储能系统、可持续及生物基聚合物、电子与先进制造、膜技术，以及代表材料探索前沿的新兴聚合物结构。

3.4 重点关注的新兴研究领域

通过对近百万篇聚合物文献的综合分析，结合自然语言处理与 CAS 索引概念，我们识别出若干关键研究领域。专利与期刊出版趋势的重合部分，揭示了超越传统聚合物分类的鲜明主题集群，精准锚定了兼顾科学创新前沿与满足紧迫技术及社会需求的聚合物创新领域。

我们的分析表明，储能应用已成为专利与期刊领域中最具活力的方向之一。电池技术（涵盖锂离子、锌离子及新兴替代电池体系）、膜电极组件以及特种聚合物电解质的迅猛增长，表明该领域正积极响应全球能源转型的迫切需求。聚合物在各类文献中始终占据重要地位，充分证明了在储能系统领域开展聚合物专项研究的必要性——在该领域，材料创新直接决定着电化学性能、安全性与可持续性。

从木质纤维素原料、壳聚糖基材料，到热解应用与碳封存技术，以可持续性为核心的概念在整个数据集中持续突出，标志着聚合物科学的研究重心发生了根本性转变。

废弃物资源化、建筑垃圾处理及化学回收利用方法的同步增长，表明可回收、可生物降解和生物基聚合物已不仅是一种研究趋势，更是一场需要全面审视的变革性浪潮。

先进制造理念与电子应用的融合，揭示出柔性电子产业已成为关键创新前沿。自然语言处理分析发现，在专利与期刊中，柔性电子、导电聚合物及特种加工方法呈现出显著的聚类现象。同时，兼具导电材料、基板材料与封装材料的多功能聚合物体系大量涌现，表明聚合物是该领域不可或缺的基础赋能技术。学术研究向专利的高效转化，加之聚合物兼具机械柔韧性、可加工性及功能可调性等，完美适配可弯曲、可拉伸器件的需求，因此有必要对柔性电子领域聚合物材料开展专项研究。

膜技术已发展成为一个独特的高增长领域，其中防污膜与电渗析应用在专利及学术文献中均增长显著。分离科学与聚合物工程深度融合，学术界和产业界日益关注 Hansen 溶解度参数及表面改性等技术，因此膜分离与过滤技术领域所用的聚合物，具有开展专项研究的价值。

除上述应用导向的领域外，本次分析还筛选出多种代表基础研究前沿的新兴聚合物结构与功能体系。导电聚合物、动态网络、超支化结构及框架材料等相关概念在多种应用场景中频繁出现，表明这些是具有变革潜力的平台技术。从应对可持续性挑战的新一代聚酯，到满足极端应用需求的高性能弹性体，各类专用聚合物同步快速发展，可见材料创新正在多条战线上同步推进。

这种数据驱动的筛选研究方向的方法，能够确保后续深入研究与真实的研究趋势相契合，而非依赖于主观判断，从而为积极应对全球挑战、开辟新技术路径的聚合物领域提供战略性洞见。

4. 储能系统中的聚合物：推动能源转型的材料

4.1 技术背景与总体趋势

基于自然语言处理 (NLP) 的数据分析显示，无论是期刊论文还是专利文献，聚合物在储能导向型应用中的使用均呈显著增长态势。这一趋势表明，聚合物正加速融入各类储能系统，用以增强机械柔韧性、改善离子与电子传输、优化界面稳定性，并支撑轻量化、可扩展的器件架构。聚合物固有的高度可调性，使其成为众多储能技术中的关键赋能材料。

为深入理解聚合物在该领域的关键驱动作用，我们将储能系统划分为四大类别：电池、电容器、热能储存 (TES) 与化学储能。在电池与电容器体系中，聚合物常作为电解质、粘结剂、隔膜、活性物质载体以及保护界面层出现，从而在循环稳定性、导电性与安全性等方面发挥重要支撑作用。^{313, 314} 在热能储存领域，聚合物基体与相变聚合物系统有助于实现热量的可控储存与释放；³¹⁵ 而在化学储能体系中，功能性聚合物则被用于气体捕集、储氢及催化等过程。³¹⁶

我们进一步分析了聚合物相关文献在上述储能系统中的分布趋势，发现期刊与专利产出均呈显著增长态势，如图 21 所示。这一趋势与自然语

言处理 (NLP) 分析结果高度吻合：自 2020 年以来，发文量明显加速增长，其中期刊论文数量较 2010 年代末期近乎翻番，而专利的增长曲线更为陡峭。

在专利格局中，电池方向的绝对主导地位表明，聚合物在离子传导、界面稳定性、安全性及可制造性等方面的应用已接近商业化成熟阶段。这凸显了在柔性、轻量化及高安全性储能需求日益增长的背景下，聚合物作为下一代电池关键赋能材料的核心地位。期刊论文则展现出更为多元的学科分布：电池研究依然保持强劲增势，电容器方向发文量稳中有升，而热能储存 (TES) 领域自 2021 年起增长尤为迅猛，反映出学术界对聚合物在介电调控、热管理与封装等方面作用的持续关注与探索。相比之下，尽管聚合物在储氢及其他化学储能系统中潜力显著，该方向的研究仍相对有限，形成了值得关注的潜在突破空间。

整体趋势显示，该领域已从初期的多元化探索逐步转向对电池与电容器体系的重点布局。2020 年可被视为关键转折点，此后学术界与产业界的创新活动均显著提速，这可能与全球清洁能源战略推进以及电动汽车快速普及密切相关。

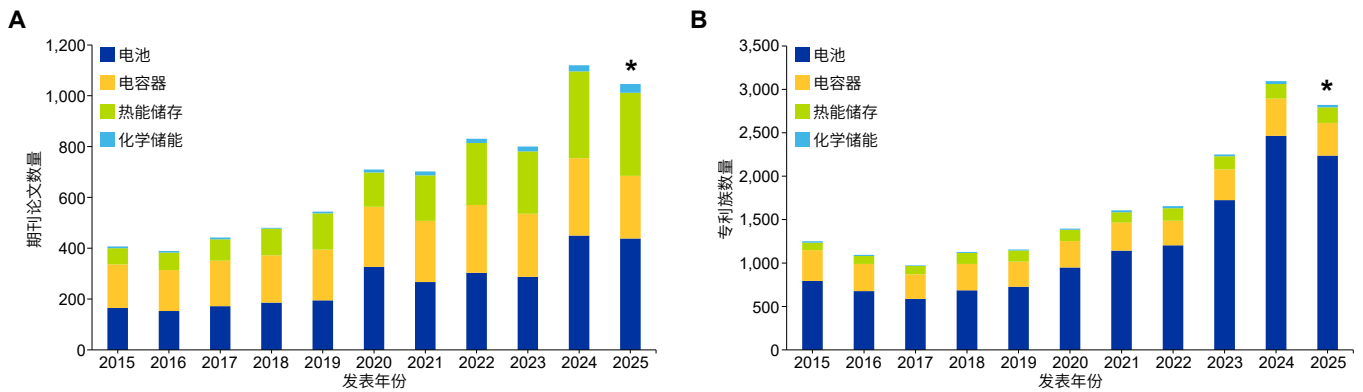


图 21. 储能系统领域中 (A) 期刊论文与 (B) 专利族的发表趋势。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的期刊论文与专利文献。*注：2025 年数据仅涵盖 1 月至 11 月。

4.2 储能系统中的聚合物材料

我们系统梳理了主要储能系统中应用的聚合物类型及其所属类别。通过聚焦聚合物应用的增长热点，以及它们在电池、电容器、热能储存与化学储能中发挥的不同作用，我们试图进一步厘清创新的重点方向以及不同储能技术对聚合物性能需求的差异。

为考察聚合物在不同储能系统中的商业化进展，我们分析了 2020 年至 2024 年间应用最广泛且增长最快的聚合物类别（图 22）。正如图 21 所强调的，专利布局仍高度集中于电池方向，这一格局在 2020–2024 年间保持稳定（图 22）。电池领域占据了全部聚合物相关储能专利的 75%，充分印证了其在当前创新活动中的核心地位。电容

器方向占比为 17%，位列第二；热能与化学储能则分别仅占 7% 和 1%，表明相关领域仍处于发展初期，未来存在显著的增长空间与创新机遇。

不同储能应用场景中的聚合物类别选择，清晰地揭示出受特定性能需求驱动的材料偏好差异。在电池领域，含氟聚合物以惊人的增长速度（深蓝色标识）成为显著领先者，这主要归功于其优异的化学稳定性与离子导电性——这两项特性对下一代电池隔膜和粘结剂至关重要。³¹⁷ 聚酯与聚醚多元醇同样展现出强劲的专利活跃度和高增长率，表明其在电池组件中的重要性正日益提升。值得注意的是，丁苯橡胶 (SBR) 呈现出显著的增长势头，意味着其应用正从传统领域向先进的电池粘结剂与柔性电极材料拓展。³¹⁸

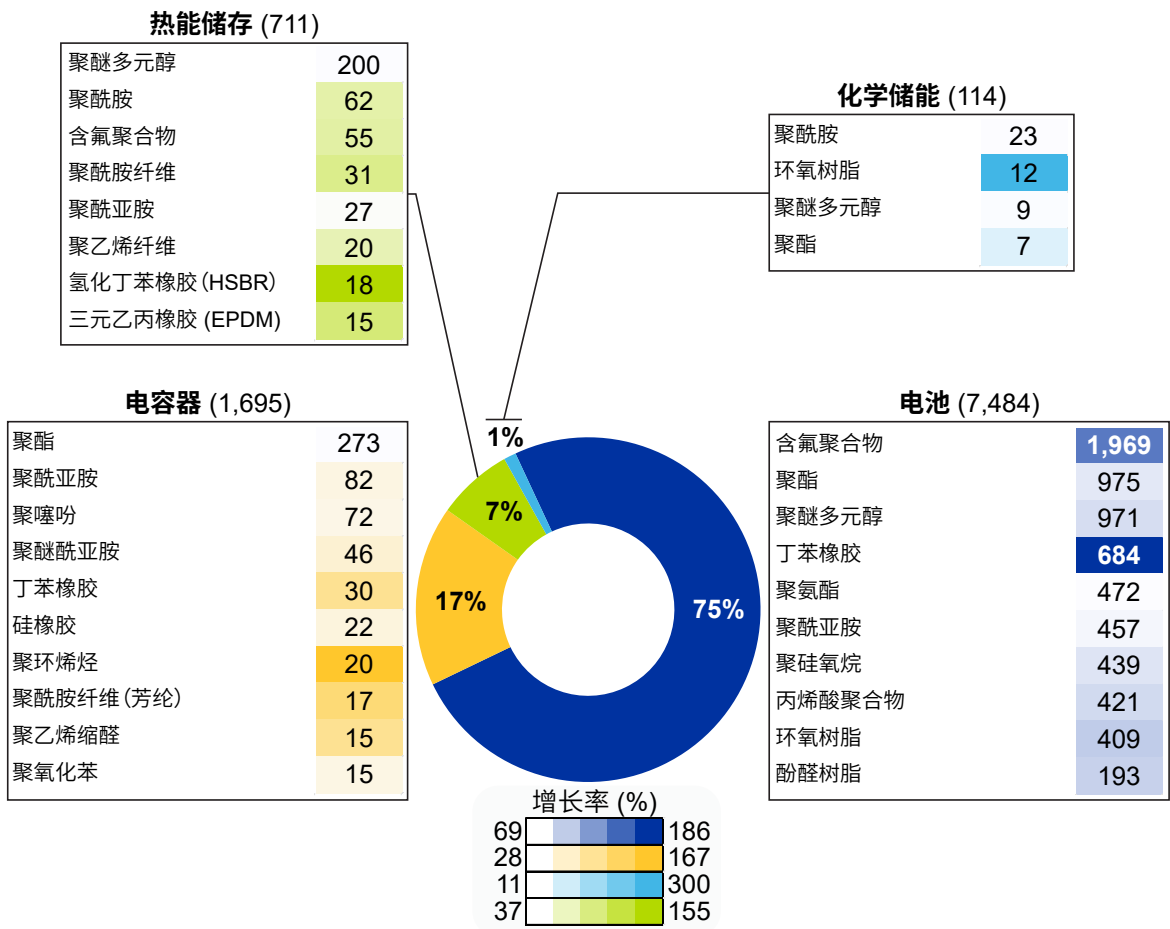


图 22. 圆环图展示了专利族在四大主要储能系统（电池、电容器、热能储存和化学储能）中的分布情况。热力图进一步呈现各细分领域内新兴聚合物类别的相对增长率（按专利数量排序，颜色深浅表示增速高低）。数据涵盖 CAS 内容合集中 2020 年至 2024 年期间的聚合物领域期刊论文与专利文献。

电容器领域呈现出活跃的创新格局。聚酯虽在专利数量上占据主导，但增长率较低，暗示传统介电应用市场已趋于饱和。聚酰亚胺与聚噻吩的专利活跃度及增长态势较为温和，表明围绕其作为高性能介电材料与可调导电材料的研发仍在持续推进。值得注意的是，聚环烯烃、丁苯橡胶(SBR)、聚酰胺纤维（芳纶）及聚乙烯缩醛的专利数量虽少，但增长率较高，表明业界对轻质、柔性、高频及耐高温电容器材料的探索仍在不断深化。

热能储存领域呈现出一种有趣的二元格局。聚醚多元醇在专利数量上领先但增长率偏低，表明其作为相变材料 (PCMs) 的应用已相当成熟。同样，聚酰胺与含氟聚合物虽专利活动频繁，但增长幅度有限。然而，氢化丁苯橡胶 (HSBR) 嵌段共聚物与三元乙丙橡胶 (EPDM) 等用量较小的材料，在专业热管理应用方面却展现出更高的增长率与新兴的创新活力。

化学储能仍是占比最小的细分领域，仅占专利总数的 1%，凸显出显著的创新空白。聚酰胺在专利数量上居首，但增长微弱；环氧树脂尽管专利数量不多，却呈现出高增长率，这可能源于其在储氢系统或先进化学储能技术中的新兴应用。该领域涉及的聚合物种类有限且整体活跃度不高，昭示着未来化学储能解决方案中聚合物创新存在巨大的待开发潜力。

聚酰亚胺、聚酰胺和含氟聚合物等跨应用材料出现在多个类别中，这表明其具备多功能性，有望在不同储能技术之间催生协同解决方案。总体增长趋势表明，聚合物应用的重心正从传统领域转向针对特定储能挑战而定制的专用高性能材料，其中尤以电池领域的创新表现最为突出。

4.2.1. 电池：电解质、粘结剂与先进功能性聚合物

鉴于电池技术在期刊与专利版图中均占据主导地位，该细分领域值得深入探讨。其突出地位不仅反映了电池系统的技术成熟度与商业紧迫性，也体现出高性能、高耐久与高安全的应用需求对高分子材料的依赖度持续提升。聚合物通过促进离子传输、稳定界面、增强机械完整性以及提升热稳定性与电化学稳定性，在推动下一代电池化学体系发展中发挥着关键作用。

通过更深入地剖析电池领域，我们可以识别驱动创新的关键聚合物，理解其功能与应用模式的演变，并评估这些变化所折射出的整个行业的宏观研发重心。下一节将概述主要参与者，以及在整个储能产业中推动电池技术迭代的关键聚合物趋势。

4.2.1.1 电池领域的主要参与者

为评估电池领域的商业化进程，我们基于专利活动识别了主要参与者（图 23）。LG 化学以最高专利数量领跑，紧随其后的是宁德时代 (CATL) 与东丽工业 (Toray Industries)。值得注意的是，排名前 15 的机构既包括宁德时代、三星 SDI、比亚迪、珠海光宇电池等电池制造商，也涵盖 LG 化学、东丽工业、阿科玛、旭化成、瑞翁等化工企业。这一构成反映了两种截然不同的战略路径：电池制造商直接投资于产品所需的聚合物创新，而传统化工企业则凭借其在先进材料与聚合物领域的技术积淀切入电池供应链。尤为引人注目的是沙特阿美 (Saudi Aramco) 的参与，这表明即便是石油公司也已认识到聚合物在能源转型中的战略价值。

聚合物相关电池技术领域的主要企业专利权人，其地理分布高度集中于东亚。日本以 45 %

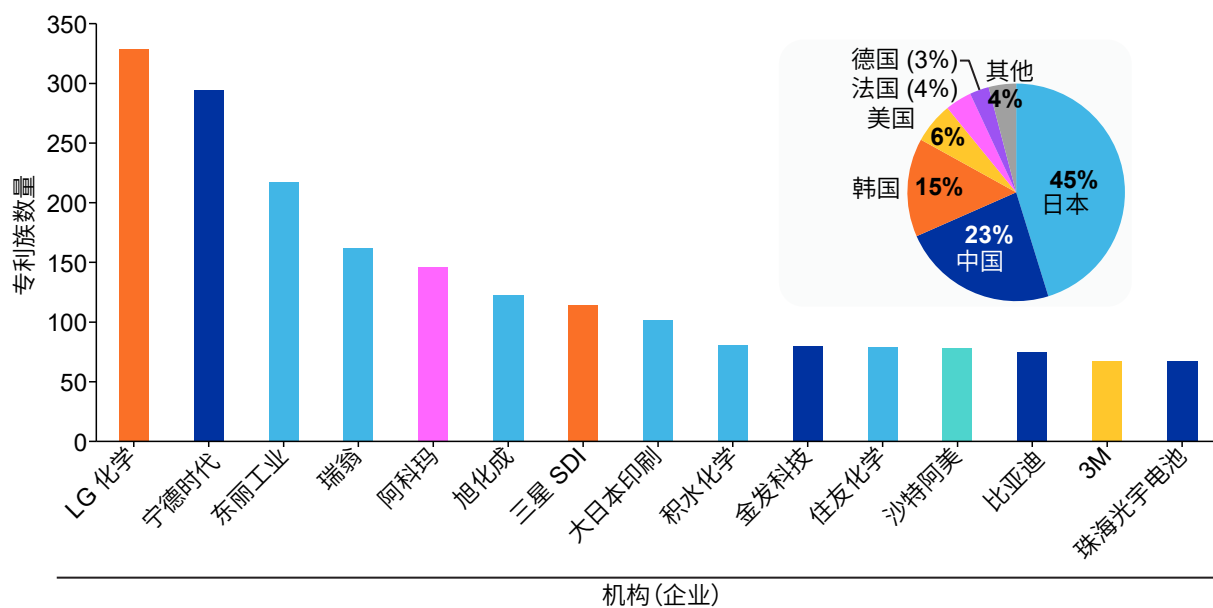


图 23. 2015 至 2025 年期间，按电池相关专利公开量排名的领先机构（企业）。内嵌饼图展示了各国家/地区在该领域的专利公开量占比。

的份额位居首位，由东丽工业、瑞翁和旭化成领衔，这反映出日本在聚合物材料领域的深厚积淀及其与汽车和电子产业的紧密联系。中国占比 23%，主要由宁德时代、比亚迪、金发科技和珠海冠宇电池等大型电池制造商驱动；韩国则通过 LG 化学和三星 SDI 贡献了 15%。西方企业的代表性较为有限，美国占 6%，法国占 4%，德国占 3%，沙特阿美及其他国家/地区合计贡献 4%。东亚企业合计占领先商业专利申请人总数的 83%，凸显了该地区在聚合物基电池创新领域的主导地位。这种地域上的不平衡表明，西方企业可能在聚合物基电池创新方面处于追赶态势，或正寻求替代技术路径，而亚洲则在下一代储能材料领域持续巩固其领导地位。

4.2.1.2 锂离子电池中的新兴聚合物及其类别

锂离子电池 (LIBs) 作为一项成熟且高度商业化的技术，厘清产业投资正积极推动的材料创新领域尤为重要。在此背景下，相较于范围更广、更具探索性的学术研究，专利更能精准反映企业认为对实际应用至关重要的聚合物类别。通过分析锂离子电池的专利格局，我们可以更清晰地了解哪些聚合物种类正被大规模采用、其功能如何演变，以及它们如何助力主要参与者的竞争定位。本节将呈现这些基于专利的洞察，以阐明聚合物创新在锂离子电池系统中的发展脉络。

我们识别了应用最广的聚合物类别及各组内的关键材料，并标明了专利活动中增长最快的类别，如图 24 所示。该分析清晰揭示了行业优先发展的聚合物类型以及当前商业开发努力的方向。本研究考察了在锂离子电池领域中呈现不同应用普及度与增长势头的几类主要聚合物。聚烯烃在专利申请中占比最大，其次为含氟聚合物、天然聚合物和聚醚。其余重要类别包括丙烯酸聚合物、合成橡胶、乙烯基聚合物和聚酯。

在聚烯烃类别中，聚乙烯 (PE) 和聚丙烯 (PP) 以极高的专利数量及近年的快速增长领跑，凸显了

其在电池隔膜领域持续的核心地位——该领域对低成本、化学稳定性及机械强度有着关键要求。^{319, 320} 这些聚合物易于加工成均匀的多孔薄膜，既能允许锂离子通过，又能有效防止短路。此外，尽管文献数量相对较少，等规 PP 仍展现出强劲的增长势头。等规 PP 之所以备受关注，很可能归因于其高度有序的分子结构所带来的更高结晶度，进而赋予了更强的机械强度、更优的耐热性以及更均匀的孔隙结构，使其成为高性能锂离子电池的理想候选材料。³²¹

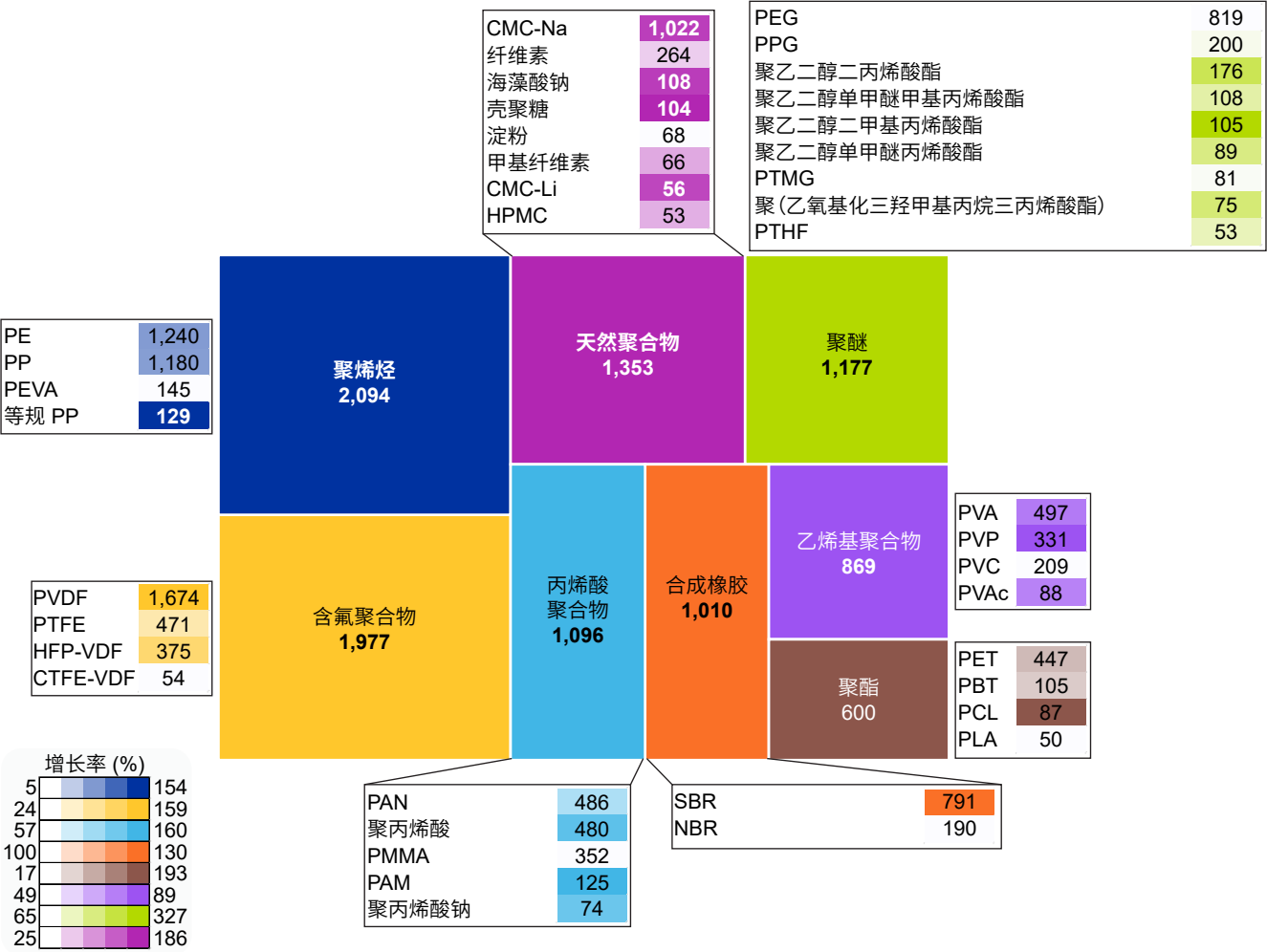


图 24. 聚合物数据集中锂离子电池用各类聚合物的专利族分布（树状图）。对应热力表格突出展示了各类别中的新兴聚合物，按专利数量排序，颜色深浅代表 2020 至 2024 年期间的相对增长率。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年聚合物领域的专利族。

含氟聚合物同样表现强劲，这得益于其在电极粘结剂与隔膜涂层中的广泛应用。持续高企的专利公开数量反映出业界对其电化学稳定性、耐化学腐蚀性、热机械强度及优异粘附性能的依赖——这些特性对保障电池循环寿命与安全性至关重要。³²² 它们还能形成坚固均匀的薄膜，有助于在反复充放电循环中维持电极结构的完整性。在含氟聚合物类别中，聚偏二氟乙烯 (PVDF) 以高增长率与庞大专利数量领先，其后为聚四氟乙烯 (PTFE) 与六氟丙烯-偏氟乙烯共聚物 (HFP-VDF)，两者均保持稳定增长。PVDF 与 PTFE 通常用作电极粘结剂，^{323, 324} 而 HFP-VDF 则常用于凝胶聚合物电解质与隔膜涂层，这使得它们在下一代锂离子电池中具有重要应用价值。³²⁵

天然聚合物在成熟材料与新兴材料之间呈现出一种有趣的二元格局。羧甲基纤维素钠 (CMC-Na) 以最多的专利数量和强劲的增长态势居于领先地位；而海藻酸钠、壳聚糖等其他多糖类物质虽专利体量较小，但也呈现温和的增长模式。这一趋势顺应了行业向水基加工、更具成本效益且环境友好的粘结剂体系转型的方向，尤其适用于高容量负极。³²⁶ 此类材料能够以水替代有毒有机溶剂进行加工，从而显著降低制造成本与环境影响。其他纤维素衍生物，如羧甲基纤维素锂 (CMC-Li)，亦呈现更为快速的增长，这很可能源于在聚合物主链中以锂离子 (Li⁺) 取代钠离子 (Na⁺) 后，电化学相容性得以增强、性能随之提升。³²⁷ Li⁺ 与活性材料的相互作用更为高效，可降低界面电阻并增强离子传输能力。³²⁸ 相较于传统的 CMC-Na，这通常能带来更高的循环稳定性、更低的阻抗及更优的倍率性能，这也解释了为何其在下一代锂离子电池的研究与专利中应用日益广泛。

聚醚因在凝胶聚合物电解质、离子传导基质及界面工程中的关键作用，依然占据重要地位。³²⁹ 聚乙二醇 (PEG) 仍是专利申请最广泛的材料，因

其兼具离子传输能力、柔韧性及与电池电解液的相容性，使其在固态与凝胶电解质体系，以及粘结剂与涂层应用中均具有重要价值。^{330, 331} 此外，若干 PEG 衍生物（如聚乙二醇二丙烯酸酯、聚乙二醇二甲基丙烯酸酯及改性甲基丙烯酸酯变体）呈现出高增长率，表明业界正日益关注通过交联、机械增强及可调控的聚合物网络，以提升先进锂离子电池中电解液配方的导电性与稳定性。¹²¹

在合成材料中，丙烯酸聚合物因其出色的粘附能力、机械稳定性及电解质相容性而展现出较高的专利申请活跃度，使其在粘结剂、隔膜以及先进电解质体系中均具有重要价值。¹²¹ 具体而言，聚丙烯腈 (PAN) 与聚丙烯酸均拥有庞大的专利组合，且增长势头强劲。聚丙烯腈 (PAN) 因其卓越的化学与热稳定性，被广泛用作固态聚合物电解质的前驱体及隔膜涂层材料；³³² 而聚丙烯酸则广泛用作水基负极粘结剂，尤其适用于富硅及其他高膨胀材料。³³³ 由于聚丙烯酸可通过水相加工，无需使用有毒溶剂，因此有助于实现更可持续的制造工艺。其他新兴聚合物包括聚丙烯酰胺 (PAM) 与聚丙烯酸钠。这些材料之所以崭露头角，很可能源于其优异的粘附强度、化学功能性、力学性能及环境优势，使其成为下一代电池电极（尤其是富硅负极）粘结剂的有力候选者。³³⁴

合成橡胶因其兼具柔韧性、强粘附性、弹性及水基加工兼容性，被广泛应用于锂离子电池，使其作为负极粘结剂以及柔性或高耐久性电极配方中的组分尤为宝贵。³³⁵ 在锂离子电池领域，该类别展现出尤为强劲的增长态势，其中丁苯橡胶 (SBR) 专利数量庞大且增长率最高，凸显了其作为水基负极粘结剂的重要地位。³¹⁸ 另一种聚合物——丁腈橡胶 (NBR) 正逐渐兴起，这可能归因于其优异的机械完整性与化学稳定性，有助于在经历大幅体积膨胀的含硅负极等更为严苛的电极环境中维持结构稳定性并延长循环寿命。³³⁶

乙烯基聚合物在锂离子电池中的重要性日益凸显，这源于其分子结构赋予了独特的界面、电化学及结构功能，使其有别于其他类别的粘结剂。在该类别中，聚乙烯醇 (PVA) 与聚乙烯基吡咯烷酮 (PVP) 处于领先地位，且增长率稳定，表明其将持续应用于隔膜涂层、凝胶聚合物电解质及电极粘结剂等领域。^{337, 338} 另一种新兴的乙烯基聚合物是聚乙酸乙烯酯 (PVAc)，其增长率较高但专利数量较少。PVAc 凭借其在机械性能、化学性能及加工性能方面的均衡优势，正作为一种极具前景的粘结剂受到关注，这与行业向可持续且高性能电极材料转型的趋势相契合。³³⁹

聚酯类虽总体专利数量较少，但因其固有的高极性与优异的热形态稳定性，在锂离子电池隔膜技术及机械韧性组件中具有独特应用价值。在聚酯类材料中，聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 与聚对苯二甲酸丁二醇酯 (PBT) 处于领先地位，专利数量庞大且增长率适中，表明其将持续应用于隔膜基材及热稳定隔膜领域。^{340, 341} 此外，聚己内酯 (PCL) 因其优异的锂离子溶剂化能力、高柔韧性、可调的结晶度，以及与固态和凝胶电解质结构的兼容性，正以最高的增长率备受关注，这与行业

向先进电解质及机械自适应电极设计转型的趋势相契合。^{342, 343}

总体分析表明，尽管锂离子电池的材料选择仍以聚烯烃与含氟聚合物等成熟体系为基石，但增长最为强劲领域集中于天然聚合物、改性聚酯以及先进粘结剂体系（丙烯酸聚合物、合成橡胶）。这些趋势反映出行业正致力于在高容量负载下提升电极完整性、推动更安全且更可持续的制造工艺，并为需要全新界面与机械特性的下一代锂离子电池化学体系做好技术储备。这一基于专利的视角，为企业洞悉材料创新的优先布局以及聚合物在商用锂离子电池中角色的演变提供了直观窗口。

4.2.1.3 下一代电池中的聚合物及其类别

当我们把目光投向锂离子体系之外，聚合物数据集显示，下一代电池化学体系正呈现明显的扩展趋势，且近期发展速度显著加快，涵盖固态电池、钠离子电池、液流电池、锌离子电池及金属-空气电池等方向。**图 25** 展示了这些先进电池化学体系的发表趋势，揭示了学术研究与商业开发之间引人注目的分化现象。在期刊论文方面，

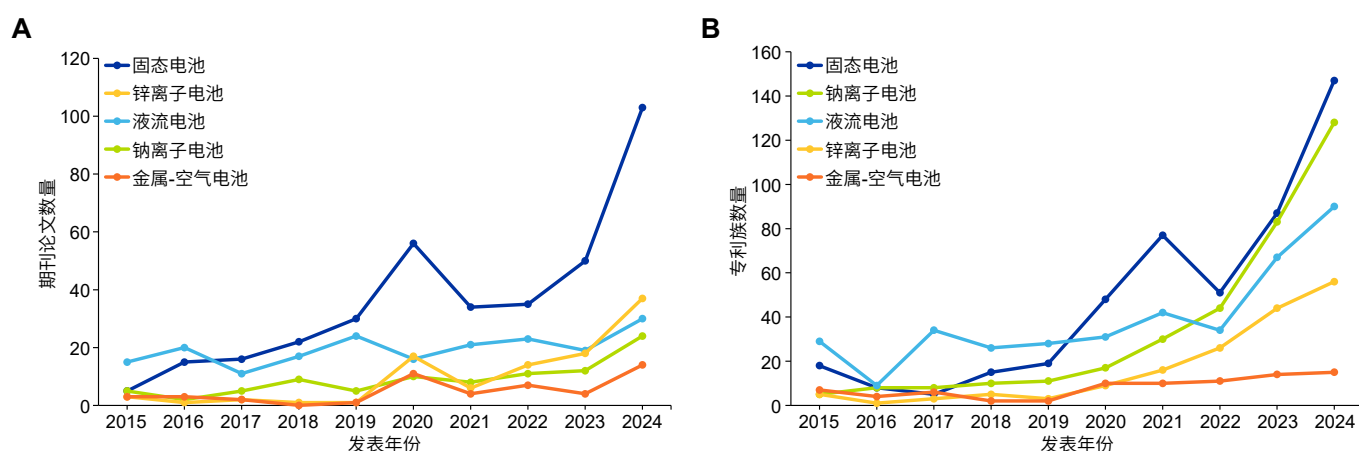


图 25. CAS 内容合集中 2015 至 2024 年期间聚合物领域下一代电池技术 (A) 期刊论文与 (B) 专利族的发表趋势。

固态电池已成为学术界公认的焦点，呈现加速增长态势，2020 年的显著增长峰值很可能反映了聚合物电解质领域的突破性发现。相比之下，专利格局则展现了更为多元化的商业化图景：固态电池、钠离子电池和液流电池等多条技术路线自 2021 年起均呈现陡峭的上升轨迹，并于 2024 年达到相近水平。

学术活动与专利活动之间的这种分化，暗示了不同的技术成熟阶段及商业可行性评估。学术界对固态电池的关注虽早且波动较大，但随后的专利申请滞后则体现了从基础研究到应用开发的典型演进路径。与此同时，2021 年后多项技术专利数量的同步激增，反映了行业的一种对冲策略——即认识到不同的电池化学体系可能服务于不同的细分市场。尽管钠离子电池在学术期刊上的表现平平，但其专利数量的显著增长表明，受成本优势与材料丰富性驱动，这一成熟科学成果正迅速走向商业化。同样，液流电池专利增长远超论文增长，表明尽管科学突破相对较少，但业界对其在电网级储能领域的商业潜力持乐观态度。从固态电池的固态电解质到液流电池的选择性膜，这些多样化体系对聚合物的需求正推动着专用聚合物的定向开发，从而精准匹配不同技术路线的独特性能要求。

为获得更深入的洞察，我们梳理了期刊论文与专利，以识别这些先进电池化学体系中使用的聚合物。**图 26** 揭示了下一代电池技术中截然不同的聚合物应用模式，其中学术研究与商业开发之间存在显著差异。学术研究成果涵盖更广泛的化学物质，而专利则主要集中在已具备规模化生产能力的基础材料上。换言之，学术期刊侧重于探索界面化学与传输机制，而专利则聚焦于适配现有涂布产线

与供应链的隔膜基材、粘结剂及膜基质。值得注意的是，PVDF、HFP-VDF、PTFE、PEG、PAN、聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)、CMC-Na、PVA、PVP 等少数聚合物同时出现在两个领域中，表明这些材料最接近实际应用。仅出现在学术文献中的其他聚合物，如聚醚醚酮 (PEEK-HT)、双酚 A 聚砜、聚 (间-苯基双苯并咪唑) (m-PBI)、聚多巴胺 (PDA)、可交联 PEG 等，虽前景可期，但在成本、工艺或可靠性方面仍有待进一步优化。

固态电池在研究与商业化路径之间展现出最为鲜明的对比。期刊论文高度集中于 PEG 及其可交联衍生物，反映出学术界致力于通过基于 PEG 的固态聚合物电解质来优化离子导电性。^{344, 345} 聚乙二醇二丙烯酸酯与 PEG 甲基丙烯酸酯衍生物的出现，凸显了研究人员通过构建网络结构来平衡离子导电性与机械完整性的探索。然而，专利则优先选择 PVDF、PTFE 和 HFP-VDF 等含氟聚合物，以及聚烯烃和 SBR 等多种材料，这表明工业界高度重视电化学稳定性、机械强度、可加工性及成本效益，使这些材料适用于高电压固态体系中的粘结剂、复合电解质基体及电极涂层。^{346, 347}

钠离子电池展现了有趣的聚合物选择策略。期刊论文更侧重于 PEG 及特定含氟聚合物，反映出对 Na^+ 传输行为、电解液相容性及界面化学的持续研究。³⁴⁸⁻³⁵⁰ 相比之下，专利则高度聚焦于实用的电极与隔膜材料。PVDF 是专利数量最多的聚合物，其后依次为 PTFE、聚烯烃 (PE、PP) 及 CMC-Na。这一组合反映了工业界对成本高效、化学稳定性好，并能与现有制造基础设施无缝集成的粘结剂与隔膜基材的需求。^{351, 352} 此外，SBR 仅出现在专利中，表明工业界对电极柔韧性与制造可扩展性的关注。

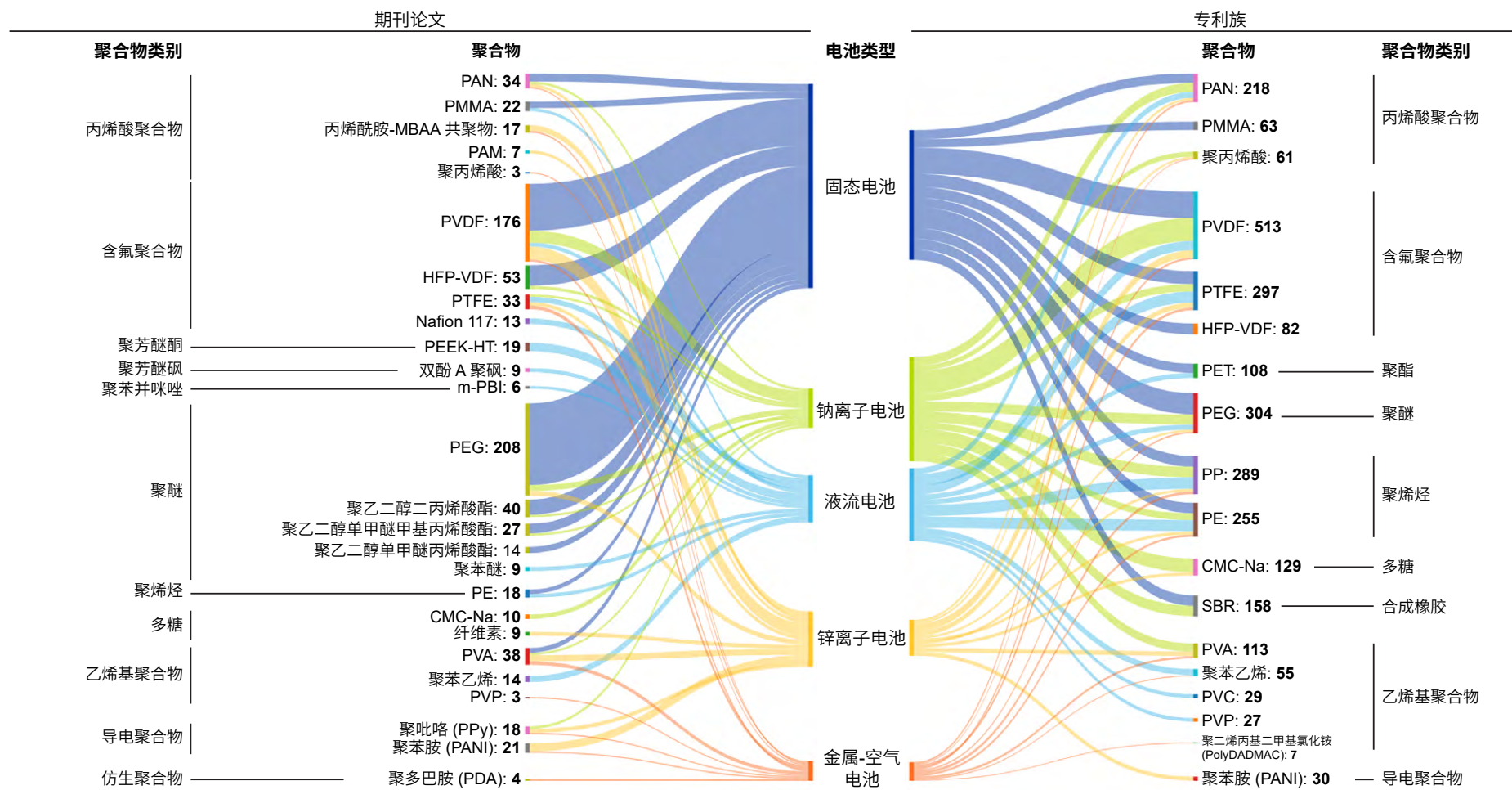


图 26. CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间聚合物数据集内，用于下一代电池的聚合物及其类别在期刊论文（左）与专利族（右）中的分布情况。各节点的宽度与相关文献的数量成正比。

液流电池在学术研究与商业应用之间呈现出最为显著的差异。学术研究聚焦于 PEEK-HT、双酚 A 聚砜、m-PBI 及 Nafion 117 等专用高性能聚合物，这些材料在严苛的水系或非水系氧化还原环境中，以其优异的耐化学性、氧化稳定性及尺寸可控性而著称。³⁵³ 这些材料仅见于期刊论文，表明其正作为离子选择性膜材料被积极研究；在此领域，长期化学耐久性至关重要，而成本与可加工性仍是其商业化进程中的主要障碍。³⁵⁴ 相反，专利则集中于 PTFE、PVDF、PEG、PET 及聚烯烃（PP 和 PE），凸显了工业界对化学惰性、易于规模化且成本效益更高的替代材料的偏好——即便其性能或许略有不及。^{355, 356}

锌离子电池则呈现出有趣的趋同态势。学术界与商业界均广泛采用 PVDF，认可其作为隔膜与粘结剂材料的价值。^{357, 358} 聚苯胺 (PANI) 等导电聚合物在期刊与专利中均占据显著位置，这反映出其锌离子存储能力已得到验证。³⁵⁹ 专利侧重于将羧甲基纤维素钠应用于实际电极，而期刊则探讨纯纤维素的应用，表明在可持续粘结剂材料领域存在不同的研究路径。

金属-空气电池是发展程度最低的类别，所涉及的聚合物种类也最为有限。总体趋势表明，学术研究侧重于通过专用聚合物优化性能，而专利活动则体现了产业界在功能性、可扩展性与商业可行性之间寻求务实平衡。

对下一代电池技术中聚合物应用的整体分析揭示，技术成熟度与商业化策略呈现出清晰的分层格局。学术研究倾向于探索针对特定电化学反应进行优化的新型高性能聚合物，而专利活动则反映了行业在性能追求与制造可行性、成本及可规模化之间寻求平衡的务实路径。随着这些技术的日益成熟，商业化是否能成功，将在很大程度上取决于能否在上述相互竞争的需求间找到最佳

平衡点。聚合物作为关键赋能材料，将在推动实验室突破向市场化储能解决方案转化的过程中发挥核心作用。

4.2.2. 电容器：介电聚合物与高性能结构

从我们的聚合物数据库中涌现出的另一类关键储能系统是电容器。尽管电容器在电荷存储机制上与电池存在根本差异，但它们对聚合物材料同样有着严苛要求，尤其是在介电性能、热稳定性和可加工性方面。在该领域，由聚合物驱动的研究与专利活动正快速增长，充分彰显了业界在提升传统电容器及先进超级电容器系统的能量密度、可靠性与形态设计灵活性方面所付出的持续努力。

鉴于其独特的功能需求与应用领域，电容器为理解聚合物在各类储能技术中角色的多元化提供了独特的视角。下一节将探讨推动电容器相关发展的主要参与者与关键聚合物趋势，重点识别材料创新最为活跃的领域。

4.2.2.1 电容器领域的主要参与者

为评估电容器领域的商业化进展，我们根据专利活动筛选出排名前 15 的企业（图 27）。该领域的专利格局显示出一个高度集中的市场，由单一领军企业主导，并呈现出明显的地域聚集特征。东丽工业占据绝对主导地位，其专利数量几乎是排名第二的竞争对手的三倍。第二梯队包括王子控股、三菱化学、大日本印刷、信越化学等多家日本化工与材料企业。这一显著差距表明东丽工业在聚合物基电容器技术领域投入了战略性资源，这很可能源于其在介电应用领域高性能聚合物薄膜方面的深厚技术积淀。值得注意的是，沙特阿美 (Saudi Aramco)、国家电网 (State Grid) 等非传统电容器企业的出现，表明各行业对聚合物电容器战略重要性的认知正日益提升。总体而

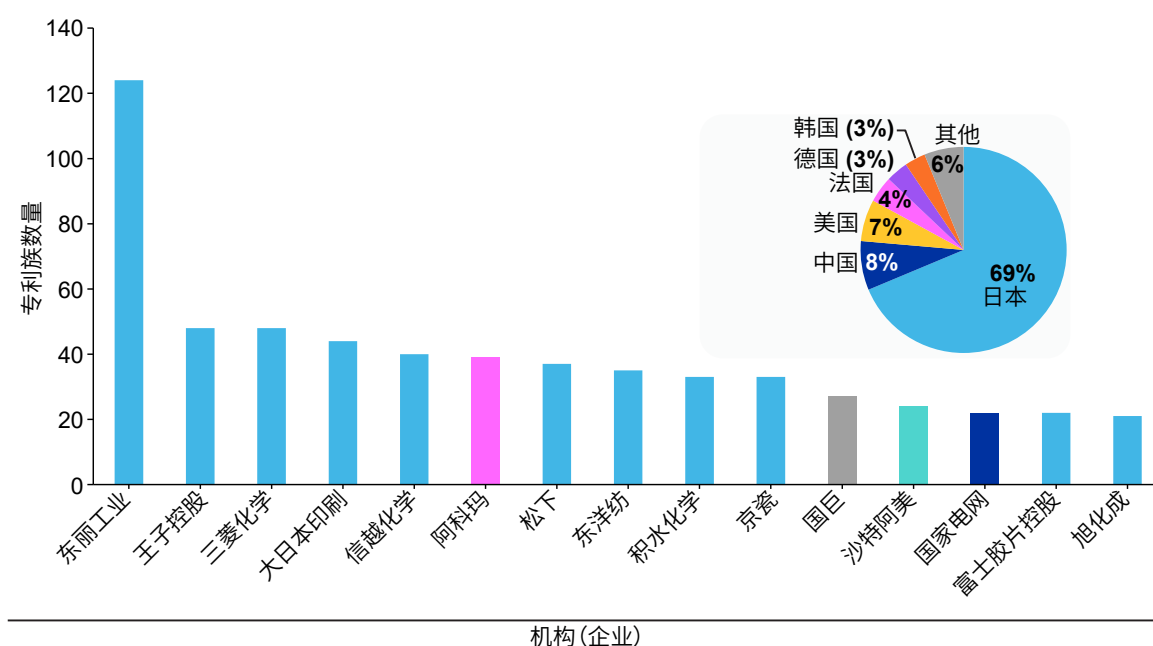


图 27. 2015 至 2025 年期间，按电容器相关专利公开量排名的领先机构（企业）。内嵌饼图展示了各国家/地区在该领域的专利公开量占比。

言，专利格局呈现出向聚合物薄膜、涂层及精密加工领域拥有深厚专业积淀的企业倾斜的态势，而电子制造商与能源巨头的参与度相对较低。这一趋势表明，电容器领域的聚合物创新主要由材料专业技术驱动，而非器件制造能力。

从地域分布来看，日本以 69% 的占比占据绝对主导地位，反映了其在先进材料与精密制造领域长期以来的领先优势。尽管中国拥有强大的制造业实力，但其 8% 的占比相对较低，表明在专用电容器聚合物领域的的能力仍处于发展阶段。美国仅占 7%，欧洲国家则仅限于法国 (4%) 与德国 (3%)；而韩国虽拥有强大的电子工业，占比却仅为 3%。这种地域上的不均衡表明，电容器用聚合物的创新仍高度专业化，主要集中在拥有高性能聚合物薄膜与介电材料成熟技术专长的国家/地区，尤其是日本化工与电子一体化的产业生态。

4.2.2.2 电容器中的聚合物及其类别

我们进一步识别了电容器领域中的聚合物及其类别（图 28）。电容器用聚合物的分布情况，揭示了学术界与工业界在研究思路与商业化策略上的显著差异。学术文献侧重于那些能够提升介电性能与电化学性能的探索性材料，而产业界则更关注可大规模生产、使用寿命内性能可靠，且已集成至薄膜或器件生产线中的聚合物。总体而言，数据表明该领域在专利文献中以成熟的薄膜介电材料和粘结剂为基石，而期刊论文则致力于探索风险更高、性能更优的前沿方向，如铁电聚合物、导电聚合物及生物基基质。

含氟聚合物在两个领域均占据重要地位，但侧重点有所不同。期刊论文高度聚焦于 PVDF 及其变体（如 HFP-PVDF、偏氟乙烯-三氟乙烯共聚物 (PVDF-TrFE)、三氟氯乙烯-偏二氟乙烯共聚

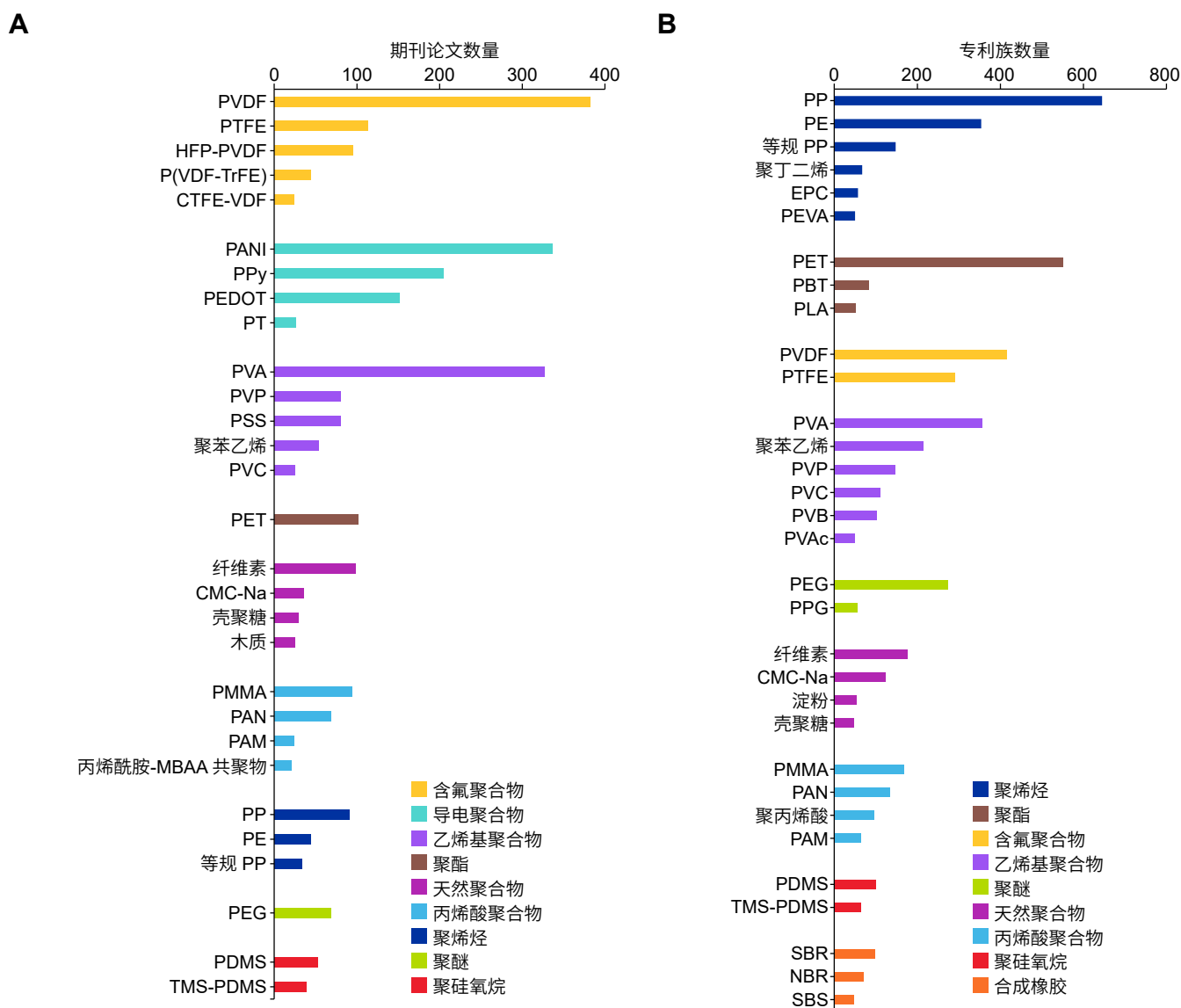


图 28. 2015 至 2025 年期间，CAS 内容合集的聚合物数据集中，按电容器用聚合物类别划分的 (A) 期刊论文与 (B) 专利族中的聚合物分布情况。

物 (CTFE-VDF)) 以及 PTFE，反映出学术界对高铁电性能、电活性响应、化学/热稳定性，以及其在电化学电容器凝胶或固态电解质中作用的浓厚兴趣。³⁶⁰⁻³⁶² 专利数据同样显示 PVDF 与 PTFE 领域活动频繁，涉及粘结剂与涂层应用、高温薄膜介电材料及表面改性层，表明这些材料正用于高性能电容器。³⁶³ 总体而言，学术界正在探索性能的极致提升，而产业界则致力于保障材料的集成性与可靠性。

聚烯烃表现出最为显著的学术与商业分野。尽管在期刊中的代表性较为有限，但专利中聚烯烃（尤其是 PP）却展现出压倒性的主导地位，在所有聚合物中位列首位。这种反向关系表明，聚烯烃已跨越研究阶段，凭借其优异的加工性能、低成本以及在双向拉伸薄膜形态下的可靠表现，成为电容器介电材料的工业主力。^{364, 365}

导电聚合物则呈现出相反的模式：聚苯胺 (PANI)、聚吡咯 (PPy) 和聚 (3,4-乙烯二氧噻吩) (PEDOT) 在学术界占有显著地位，但在专利领域却鲜有涉及。这一鲜明对比凸显了将这些材料在电化学电容器中令人瞩目的实验室性能转化为商业可行产品所面临的持续挑战，其商业化进程主要受制于稳定性与可加工性方面的瓶颈。³⁶⁶与此同时，聚酯类材料展现出强劲的商业应用势头，其中聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 占据主导地位，反映出其在薄膜电容器领域业已成熟的角色定位。³⁶⁷专利中还包含聚对苯二甲酸丁二醇酯 (PBT)、聚乳酸 (PLA) 等其他聚酯材料，而此类材料在学术文献中未见提及，表明当前工作主要是针对现有平台的工业优化，而非基础性研究的拓展。

乙烯基聚合物与聚醚在加工工艺与性能表现之间起到了桥梁作用。聚乙烯醇 (PVA) 在两个板块中均十分显眼：在期刊论文中，它反映了基于 PVA 的水凝胶³⁶⁸与凝胶电解质的广泛研究；在专利中，则体现了其作为成膜剂、粘结剂及膜材料的应用，这些用途易于实现规模化生产。³⁶⁹聚乙烯吡咯烷酮 (PVP)、聚苯乙烯、聚氯乙烯 (PVC)、聚乙烯醇缩丁醛及聚醋酸乙烯酯 (PVAc) 在专利中的出现频率高于期刊，这指向了用于改善薄膜加工性与金属化可靠性的粘合层、中间层及层压化学技术。^{370, 371}此外，期刊还关注聚苯乙烯磺酸钠 (PSS) 等特种材料，因其具有离子导电性。然而，聚乙二醇 (PEG)、聚丙二醇 (PPG) 等聚醚类物质在专利中的出现频率高于期刊，这与其作为电解质、聚合物基体、粘结剂及介电改性剂的应用相一致，表明它们正逐步向电解电容器与超级电容器领域实现商业化。^{372, 373}

天然聚合物与丙烯酸聚合物的表现表明，行业正致力于推动更环保的加工工艺与更精准的力学控制。纤维素与羧甲基纤维素钠 (CMC-Na) 在两类文

献中均有体现，且在专利方面占比更高，反映出其在隔膜、水性粘结剂及孔隙率调控中的重要作用，因其成本优势与可持续性而备受青睐。^{374, 375}在丙烯酸类材料中，聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)、聚丙烯腈 (PAN)、聚丙烯酸及聚丙烯酰胺 (PAM) 在专利领域表现突出，其应用方向与介电涂层、造孔剂、隔膜支撑层及粘附调控相契合。³⁷⁶这些材料在期刊中的可见度虽保持稳定但相对较低，表明主要进展集中于配方开发与加工工艺优化，而非全新丙烯酸化学体系的探索发现。

聚硅氧烷与合成橡胶虽属小众领域，却发挥着不可或缺的重要作用。聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 与三甲基硅基封端聚二甲基硅氧烷 (TMS-PDMS) 在两个领域均有应用，主要涉及对化学稳定性与弹性有较高要求的柔性/可拉伸介电材料及封装材料。^{377, 378}丁苯橡胶 (SBR)、丁腈橡胶 (NBR)、苯乙烯-丁二烯-苯乙烯共聚物 (SBS) 等弹性体粘结剂在专利中更为常见，表明针对柔性环境已存在成熟的制造解决方案，且更侧重于器件集成层面的知识产权，而非新材料的发现。^{379, 380}

这项全面分析揭示，电容器聚合物的开发遵循着不同的轨迹：学术研究致力于探索性能前沿，而产业界则专注于优化经济高效且可制造的解决方案。

4.2.3. 热能储存：聚合物基相变材料与绝热材料

接下来，热能储存 (TES) 成为我们聚合物数据库中识别出的另一类重要储能系统。与主要以电能或化学能形式储存能量的电池和电容器不同，TES 系统通过收集和储存热能，以备后续使用。聚合物凭借其可调的热学性能、可加工性、设计灵活性、化学多功能性、低密度以及与多种热储能机制的兼容性，在该领域发挥着关键作用。

在 TES 系统中，聚合物被广泛研究用作活性储能介质、相变材料、支撑基体、封装层及活性组件，从而实现显热与潜热储能。下一节将探讨这些正在塑造 TES 未来发展方向的关键聚合物趋势，重点介绍创新加速、新机遇不断涌现的材料体系。

4.2.3.1 TES 中的聚合物及其类别

我们考察了 TES 领域内的关键聚合物及其对应类别，结果总结如图 29 所示。TES 领域的聚合

物格局揭示了学术研究与商业开发在材料选择上的明显差异，这反映了相变材料 (PCMs) 设计及相关封装策略中优先级的不同。期刊论文反映了科研界正在积极探索和开发新概念材料的领域，而专利申请则凸显了产业界正致力于可扩展、可制造且可直接应用的配方。尽管这两个领域存在明显重叠，但出于不同原因，各自优先考虑不同的聚合物类别：学术研究侧重于新颖的结构、机理与多功能行为，而专利则倾向于能够大规模加工、并易于集成到实际 TES 产品中的稳健材料平台。

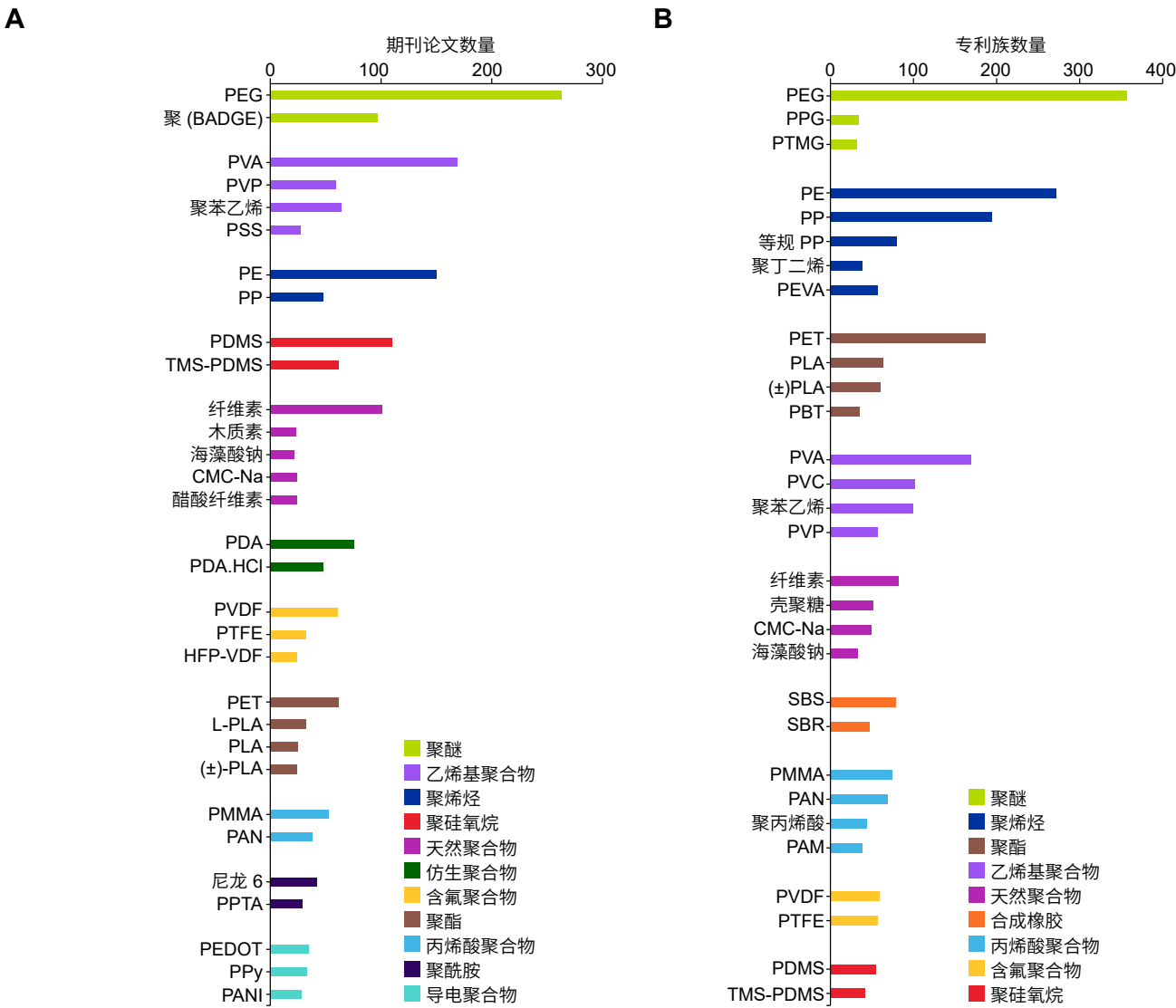


图 29. 2015 至 2025 年期间，CAS 内容合集的聚合物数据集中，按热能储存系统所用聚合物类别划分的 (A) 期刊论文与 (B) 专利族中的聚合物分布情况。

聚醚类在期刊与专利中均占据主导地位，其中聚乙二醇 (PEG) 以显著优势成为出现频率最高的聚合物。这一现象在 TES 应用中并不意外，因为 PEG 被广泛认为是一种实用的聚合物相变材料 (PCM)。³⁸¹ PEG 主要通过可逆熔化与结晶过程所伴随的潜热来存储热能，其相变温度可通过调控分子量与配方进行系统性调节。³⁸² 此外，其在期刊论文与专利中的广泛出现，反映了其关键优势，包括易于加工、高潜热储能容量、优异的化学稳定性，以及与常见封装方法和复合材料制造策略的广泛兼容性。^{383, 384}

聚烯烃的出现频率位居第二，且学术界与商业界的关注重点存在显著差异。尽管期刊论文中相关报道表现平平，但专利领域却呈现出显著的存在感，表明工业界在 TES 领域的创新大多聚焦于复合材料工程路径。³⁸⁵ 在此类体系中，聚乙烯 (PE) 和聚丙烯 (PP) 等低成本、高可加工性的基体材料被用于封装和稳定相变材料 (PCMs)，同时应对泄漏控制、机械完整性、热循环耐久性及可规模化制造等实际挑战。^{386, 387} 聚烯烃凭借其化学惰性、低成本及优异的加工性能，成为大规模 TES 应用中的首选材料。

乙烯基聚合物在期刊与专利中均占据显著地位，其中聚乙烯醇 (PVA) 在两个领域均为核心材料。聚乙烯醇 (PVA) 因其出色的粘合能力、成膜性以及形成互连聚合物网络的能力，在热能储存 (TES) 领域应用广泛，非常适合作为复合相变材料 (PCMs) 的支撑基体及功能性封装组分。^{388, 389} 专利文献还显示，聚氯乙烯 (PVC) 与聚苯乙烯 (PS) 同样备受关注。这两种材料在反复热循环下具备良好的热稳定性与机械稳定性，常被用作微胶囊化及复合 TES 结构中的刚性基体。^{390, 391} 聚乙烯吡咯烷酮 (PVP) 在两个领域均有适度应用，主要作为分散剂与稳定剂，用以抑制相分离并提升热循环可靠性。³⁹²

聚酯类，尤其是聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 及聚乳酸 (PLA) 立体异构体，在专利中的存在感更为显著。PET 作为广泛应用于薄膜、纤维及包装产品的结构与阻隔聚合物，其特性与封装型 PCM、稳定复合材料及温控纺织品等 TES 产品的应用天然契合。^{393, 394} PLA 的出现往往反映了工业界对生物基及可持续性 TES 组件的推动。此外，丙烯酸聚合物是另一类同时出现在两个图表中的材料。这些聚合物对 TES 至关重要，因为其作为 PCM 的支撑基体，能够提供高机械强度、热稳定性及定形储热性能。^{395, 396} 聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 是一种成熟的封装聚合物，而聚丙烯腈 (PAN) 则为 PCM 复合材料提供了坚固的基体，这促使业界对基于丙烯酸的微胶囊化与复合材料策略表现出浓厚兴趣。^{397, 398}

聚硅氧烷 (PDMS 及其改性体，如 TMS-PDMS) 在两个图表中均有体现，表明其作为导热基体与柔性封装材料具有独特作用，能在宽温度范围内保持性能稳定。^{399, 400} 此外，**图 29** 还显示，天然聚合物（尤其是纤维素、海藻酸钠及羧甲基纤维素钠 (CMC-Na)）在期刊与专利中均呈现增长趋势。这些聚合物常被用作多孔支架、气凝胶、纤维或网络基体，通过物理方式限域 PCM 并减少泄漏。^{401, 402} 这一趋势还表明，业界对可持续、可生物降解的封装材料及生物基 PCM 复合材料表现出商业兴趣，相关研究正从实验室验证向实际应用迈进。

含氟聚合物 (PVDF、PTFE、HFP-VDF) 在期刊与专利中均有出现，通常因其耐化学性、热稳定性、耐反复循环性及耐久性而被选用。⁴⁰³ 在 TES 领域，此类聚合物很少直接用作储热材料——因其自身即具有可观的热储存能力；相反，它们更多地被用于辐射冷却，或作为 PCM 的支撑基体。^{404, 405}

仿生聚合物（PDA 及相关体系）、导电聚合物（PEDOT、PPy 和 PANI）以及聚酰胺（如尼龙 6）主要出现在学术文献中，这反映出研究重点在于探索兼具蓄热功能与电学、粘合或结构性能增强的多功能 TES 材料。^{406, 407} 相反，合成橡胶（SBS、SBR）仅出现在专利中，表明柔性 PCM 领域正呈现出工业创新的活跃态势。⁴⁰⁸

这项全面分析表明，学术界正在探索新颖的功能组合，而产业界则致力于优化经济高效的封装与形状稳定化策略。多类聚合物领域强劲的专利活动表明，热储能技术正从材料发现阶段向系统级优化与商业化阶段过渡。

4.3 总结与展望

综上所述，随着研究与专利活动的持续增长，聚合物在现代储能系统中的重要性日益凸显。其高度可调性、机械柔韧性及对离子/电子传输的支撑能力，使其成为电池、电容器、热能储存 (TES) 及化学储能等各类储能系统中不可或缺的关键组分。电池领域占据主导地位，聚合物在其中扮演着隔膜、粘结剂、电解质及界面稳定剂等多重角色。在锂离子电池 (LIBs) 中，聚烯烃仍是隔膜的基础材料，而含氟聚合物则被广泛用作化学稳定性优异的粘结剂。新兴趋势凸显了天然聚合物（如羧甲基纤维素钠 (CMC-Na)）以及聚乙二醇 (PEG) 衍生物、丙烯酸聚合物和合成橡胶的重要地位，这些材料为下一代锂离子电池提供了有力支撑。在锂离子体系之外，聚合物的应用正向固态电池、钠离子

电池、液流电池、锌离子电池及金属-空气电池等下一代电池技术多元拓展。其中，学术界致力于探索高性能膜与电解质，而工业界则更倾向于含氟聚合物、聚烯烃等可规模化生产的材料。电容器与热能储存 (TES) 领域亦呈现类似格局：聚烯烃、PET、PEG 及乙烯基聚合物在商业应用中占据主导地位，同时学术界对导电聚合物、仿生聚合物及多功能复合材料的探索仍在持续推进。化学储能仍是发展相对滞后的细分领域，聚合物种类极为有限，专利活动亦仅集中于聚酰胺及新兴的环氧基体系。

总体而言，该领域正从广泛的探索性研究转向以应用为导向、目标明确的聚合物开发，特别是在电池、电容器和热能储存 (TES) 领域。工业界日益青睐兼具可制造性、稳定性以及与现有生产线兼容性的聚合物，而学术研究则持续突破先进固态电解质、高性能介电薄膜及多功能储热复合材料的边界。展望未来，聚合物有望成为下一代储能技术的关键赋能材料，助力更安全的固态电池、高能量密度电容器、可持续的聚合物加工工艺以及耐用的热能储存 (TES) 系统；同时，随着氢能与化学储能领域的逐步成熟，聚合物也将在这些方向开拓新的机遇。

5. 可持续聚合物：兼顾多功能应用与环境责任

5.1 不断演变的研究格局：出版趋势与企业专利动态

在对期刊论文与专利族进行的自然语言处理 (NLP) 分析中，可持续聚合物已成为一个重要的关注领域。在日益严峻的环境挑战与全球循环经济转型的双重驱动下，这一快速扩张的领域已成为学术界与工业界的核心研发方向。本综合分析通过对 2015 至 2025 年间收录于 CAS 数据库的学术文献与专利族进行系统评估，梳理了可持续聚合物技术领域的发展态势。

为全面把握可持续聚合物领域的出版趋势，我们筛选了包含可持续聚合物相关关键词或被归类为可持续聚合物的文献。最终在整个研究周期内，我们获得了约 28.5 万篇文献的数据集。

图 30 展示了 2015 年至 2025 年间两类文献的年度发表分布与构成：一类是通过可持续聚合

物相关关键词检索获得的文献，另一类是在索引中标注了可持续聚合物相关关键词的文献。数据显示，在此期间可持续聚合物研究持续扩张：期刊论文数量增长 53%（从 6,407 篇增至 2024 年的 9,830 篇），专利族数量增长 37%（从 15,765 个增至 2024 年的 21,637 个）。专利与期刊论文的比例高达 2.5:1（如饼图中 71%:29% 的分布所示），表明商业开发的强劲势头显著领先于学术研究。2020 年至 2022 年期间，两个领域均经历了同步的增长加速，这与全球可持续发展倡议的密集推进相吻合。

头部企业专利权人及企业专利的地域分布如 **图 31** 所示。可持续聚合物的商业格局主要由集中于特定地理区域的大型企业所主导。对专利活动的分析显示，全球各大市场的企业研发投入与战略定位呈现显著差异。中国企业在可持续聚合

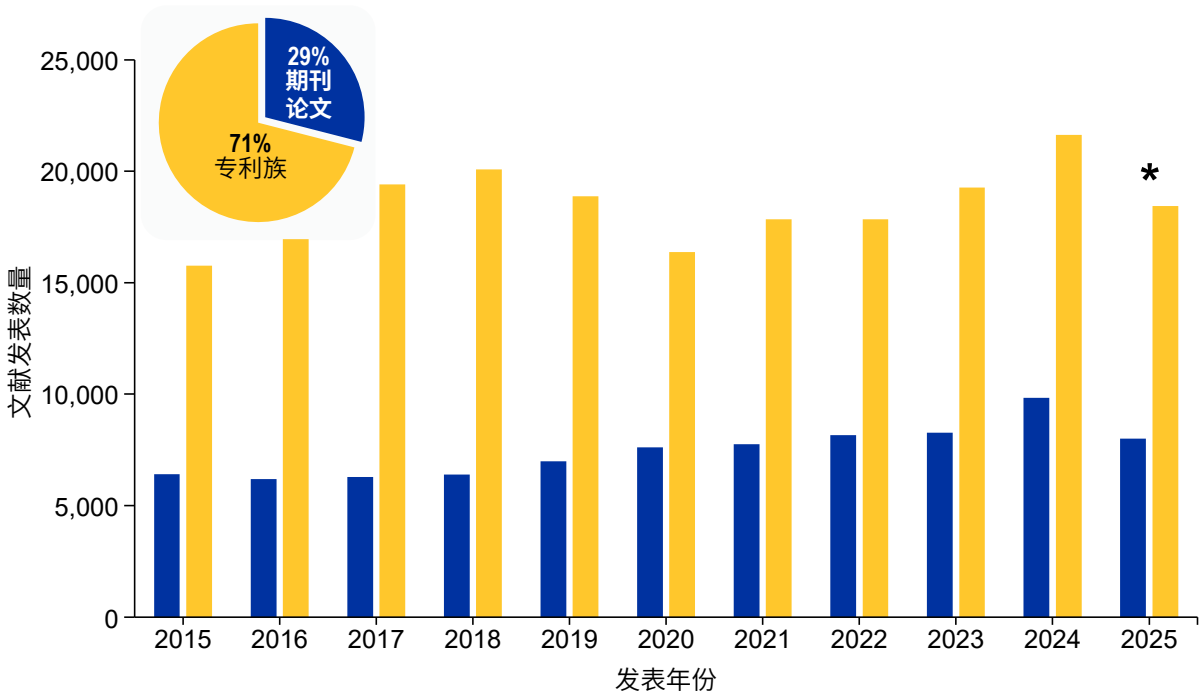


图 30. 包含可持续聚合物相关关键词及可持续聚合物的文献趋势。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的期刊与专利文献。*注：2025 年数据仅涵盖 1 月至 11 月。

物技术领域确立了绝对的领先地位，占据该领域企业专利总量的 54%。中国石化以 3,409 项专利位居全球首位，其专利数量几乎是紧随其后的竞争对手中国石油（1,227 项专利）的三倍。这一中国主导的格局涵盖了国有能源集团（中国石化、中国石油）与专业化工制造商（万华化学、金发科技），表明国家对可持续聚合物开发有着统筹协调的战略布局。日本企业已在关键的技术细分领域占据一席之地，合计持有全球企业专利的 10%。东丽工业、三菱化学、可乐丽及富士胶片控股凭借日本在先进材料工程与精密制造领域的传统优势，在高性能可持续聚合物方面确立了领先地位。欧洲的商业活动以巴斯夫和阿科玛等老牌化工企业为核心，而陶氏化学则代表了美国在该领域的主要商业力量。专利占比达 17% 的“其他”类别，揭示了主要参与者之外的多元化创新

来源，表明新兴竞争者在专业细分市场中仍存机遇。如图 31 所示，此种分布格局呈现高度集中的商业态势，区域产业政策与企业专业化布局，正深刻影响着可持续聚合物的创新路径与市场发展方向。

5.2 专利中的可持续聚合物在新兴应用领域中的布局

接下来，我们将关注可持续聚合物材料如何在各类工业应用领域实现部署。本分析考察了电子与半导体、纺织、胶粘剂与涂料、建筑、包装等关键商业领域中，既有的及新兴的可持续聚合物技术。通过将具体的材料创新与其目标应用进行关联，我们可以识别出可持续替代方案在哪些领域正获得商业认可，哪些领域存在最大的应用障碍，以及哪些技术缺口存在未来发展的机遇。

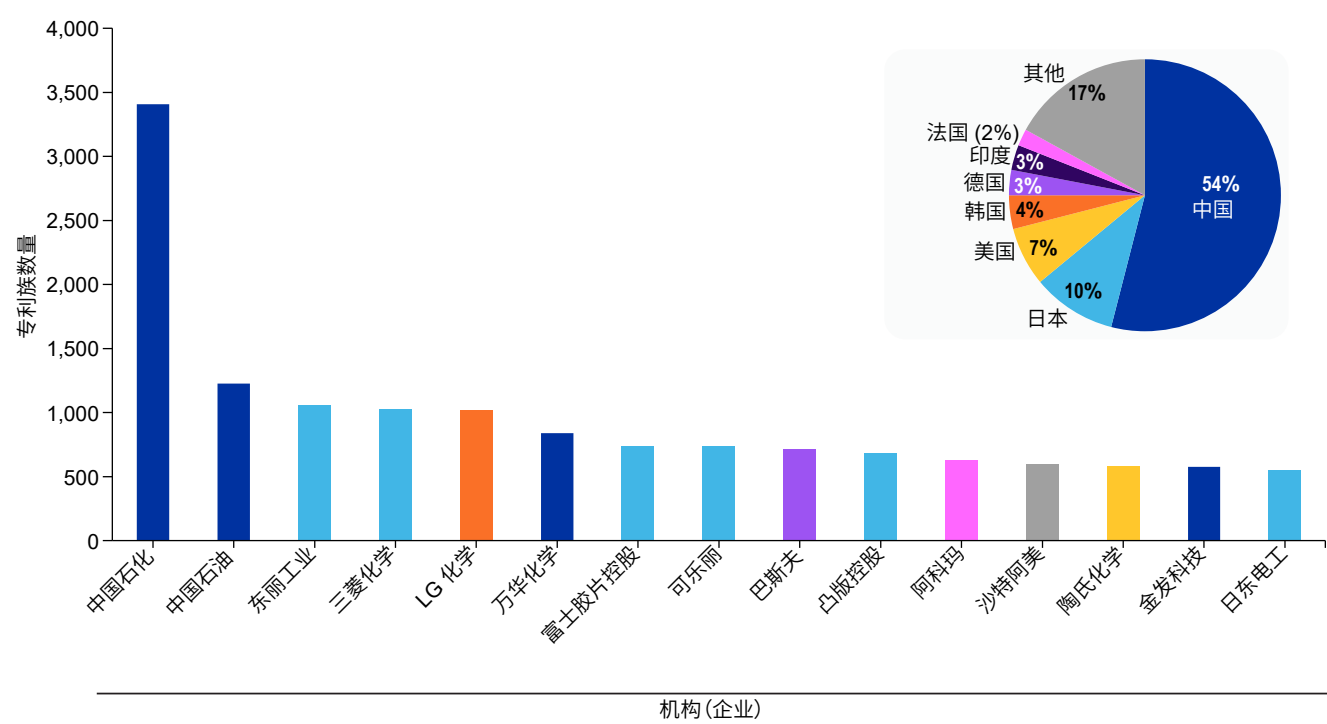


图 31. 按可持续聚合物专利数量排名的领先企业，内嵌饼图展示了各国家/地区的分布占比。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的专利族。

图 32 展示了九个新兴应用领域的专利公开数量。电子与半导体、纺织品与服装、胶粘剂与涂料是三大主要应用领域，其后依次为建筑与施工、包装与消费品。**图 32** 列出了这九个新兴应用领域中最常见的聚合物类别。该图还进一步展示了 2020 至 2024 年期间，各应用领域中含有这些聚合物种类的专利族数量及其增长率。在这九个新兴应用领域中，主流的聚合物类别存在显著的重叠，且均属于下文讨论的九大物质类别。

聚醚多元醇在这些应用中的专利族数量最多。聚醚多元醇主要是通过环氧化物的聚合反应合成的可生物降解聚合物，通常以石油基原料为来源。聚醚多元醇在纺织品领域的主导地位，反映了其在吸湿排汗面料^{409, 410}与透气膜中作为亲水链段的关键作用。⁴¹¹在电子领域，聚醚多元醇在导电复合材料中充当柔性间隔层，⁴¹²并作为半导体封装材料的加工助剂。⁴¹³聚醚多元醇在能源应用领域实现了 57% 的显著增长，尽管专利数量相对较少（2,912 项），但这预示着其在下一代电池的固态电解质⁴¹⁴与隔膜领域正涌现新的机遇。⁴¹⁵

聚乳酸基聚酯及其纤维，是新兴应用领域中最主流的材料品类之一。聚乳酸基聚酯主要来源于可再生生物质，通过细菌发酵产生所需的乳酸单体。乳酸基聚酯展现出强劲的增长势头，其中生物医学应用领域尽管专利数量适中，却实现了 96% 的增长。这反映了该材料良好的生物相容性及可控的降解动力学特性，使其成为药物递送系统⁴¹⁶与临时植入物的理想选择。⁴¹⁷储能应用领域 88% 的增长表明可生物降解电池组件的发展前景广阔，⁴¹⁸而包装领域 75% 的增长则契合了循环经济对可堆肥食品容器的需求。⁴¹⁹

聚羟基脂肪酸酯 (PHAs) 是一类天然的可生物降解聚酯，由多种微生物以胞内颗粒的形式合成，用于储存碳源与能量。聚羟基脂肪酸酯 (PHAs) 是增长最为迅猛的材料品类，其安全与环保应用领域呈现出前所未有的 580% 增幅。尽管这一爆发式增长源于较小的基数（52 项专利），但预示着在环保型渗透膜⁴²⁰与复合材料领域已取得突破性创新。⁴²¹ PHAs 源于天然且具备完全生物降解性，使其在对环境影响要求严苛的应用场景中成为首选解决方案。

纤维素纤维主要来源于植物原料，包括种子绒毛、木质原料和韧皮纤维，这些材料均由天然高分子——纤维素构成。纤维素纤维在安全应用领域展现出显著增长（增幅 173%），主要得益于阻燃处理技术⁴²²与防护装备的迭代创新。⁴²³其在建筑领域 91% 的增长，反映出纤维素在生物基绝缘材料与结构复合材料中的应用日益广泛，其固有的强度与热学特性为合成材料提供了可持续的替代方案。

天然橡胶在安全应用领域表现出惊人的 247% 增长，主要用于防护装备中的减震材料。⁴²⁴天然橡胶主要来源于巴西橡胶树的乳白色胶乳。其卓越的弹性回复与抗撕裂性能，使其在需要反复变形循环的应用中不可或缺。在电子领域（增长 11%），天然橡胶用作柔性基板，⁴²⁵其固有的延展性使其能够与曲面实现共形贴合，同时保持良好的电绝缘性能。

松香是一种天然固体树脂，主要通过蒸馏从活体松树上采集的松脂制得。松香基聚合物在胶粘剂领域表现突出（增长 17%，758 项专利），在

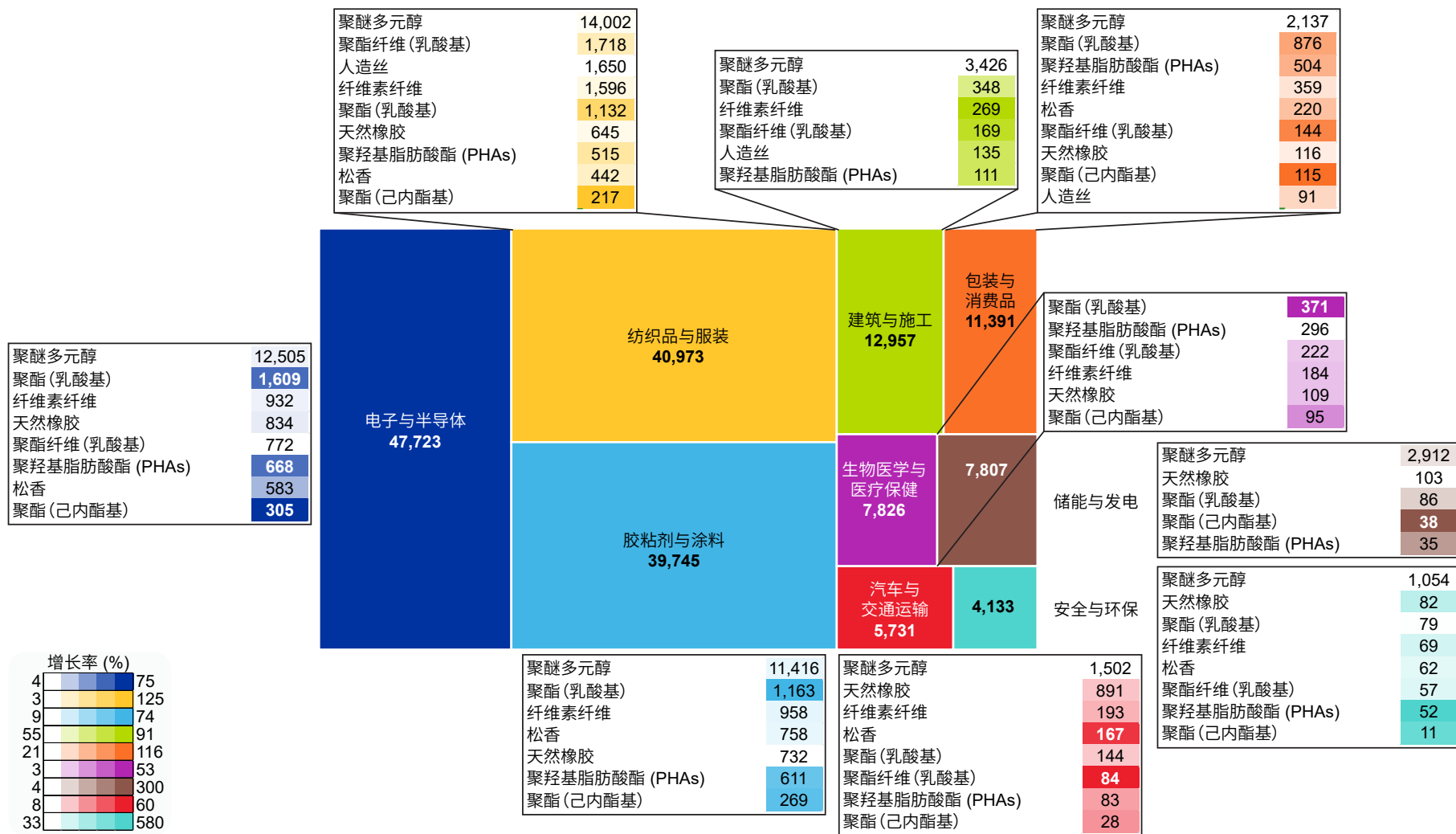


图 32. 九大新兴应用领域中的可持续聚合物类别、主流物质类别及其专利族数量。各单元格根据 2020 至 2024 年期间专利文献的增长率进行颜色编码，具体参见图例。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的专利族。

压敏胶中用作增粘剂。⁴²⁶ 其芳香族聚酯结构赋予其对多种基材的优异粘附性，同时保持良好的可剥离性。在电子应用领域（增长 29%），松香被用于导电浆料的制备。⁴²⁷

人造丝在纺织领域保持稳定增长（增长 3%，1,650 项专利），在技术纺织品中用作吸湿纤维。⁴²⁸ 人造丝是一种半合成纤维，通过对源自天然植物的纤维素进行化学再生而制得。其高比表面积与亲水性，使其成为过滤介质与吸收性产品的理想材料。在建筑应用领域（增长 66%），人造丝可用作隔音结构中的增强纤维材料。⁴²⁹

聚己内酯 (PCL) 是一种可生物降解的合成聚酯，通常通过 ϵ -己内酯的开环聚合制得，该单体源自环己酮等石化前体。在环境应用领域，PCL 展现出高达 500% 的显著增长率，这主要得益于其作为环境修复中缓释基质的应用。⁴³⁰ 其缓慢的降解动力学特性，可实现活性成分的持续释放，以满足土壤处理等应用需求。在生物医学应用领域（增长 53%），PCL 被用作长期植入材料，其较长的降解周期（2-3 年）与组织重塑的时间需求高度契合。⁴³¹

专利格局表明，可持续聚合物正从小众应用迈向主流工业应用。监管压力、技术成熟度与已验证的商业可行性相结合，为该领域的持续增长奠定了基础，尤其在高增长、小批量的应用领域蕴藏着巨大机遇，这些领域可能成为未来的主流核心市场。

在考察了各应用领域专利族中的主要聚合物类别后，我们将基于以下四个标准，对期刊论文与专利文献中的具体聚合物展开分析：

普遍性——识别体量最大的主流材料，表明其已确立的商业重要性及研究成熟度。

专利集中度——揭示专利与期刊论文比例较高的物质，表明其备受商业开发关注，并预示潜在的近期市场机遇。

增长率（2020-2024 年）——重点展示研发活动加速推进、快速崛起的新兴物质，预示其未来的市场潜力与技术发展势头。

引文影响力——识别每篇期刊论文平均被引次数较高的物质，揭示具有显著学术影响力的材料。此类材料在成功完成研究验证后，有望成为下一代商业技术。

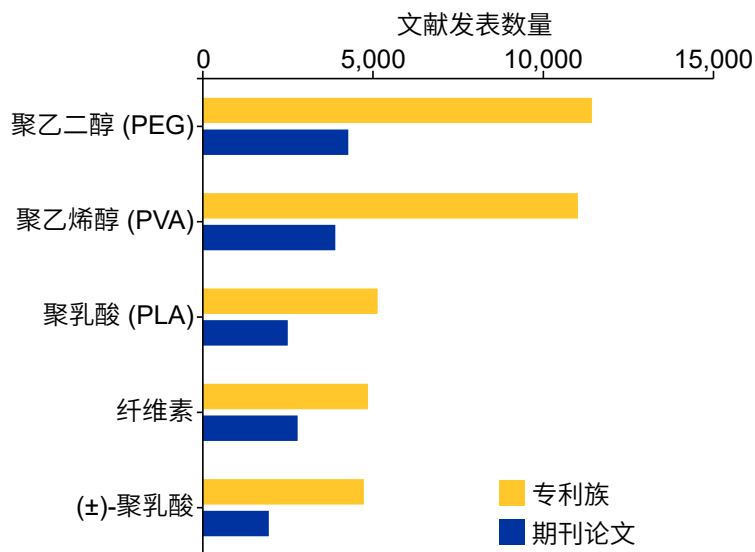
这一多维度分析为新兴应用领域的聚合物格局提供了全面视角，涵盖了现有领导者（普遍性）、近期商业机遇（专利集中度）、新兴物质（增长率）以及未来有望取得突破的候选材料（引文影响力）。

5.2.1. 电子与半导体应用中的可持续聚合物

电子与半导体领域是可持续聚合物快速发展的应用方向，环境法规、微型化需求与高性能指标多重叠加，共同推动创新向生物基替代品演进。**图 33** 展示了电子与半导体应用中的可持续聚合物，分别依据其普遍性、专利占比、增长率（2020-2024 年）及篇均被引次数进行分类。

电子与半导体应用中最常见的聚合物如**图 33A** 所示。聚乙二醇 (PEG) 在该领域占据主导地位，主要用作柔性电池与超级电容器中的固态聚合物电解质。⁴³² 其醚键结构赋予其离子导电性，

A



B

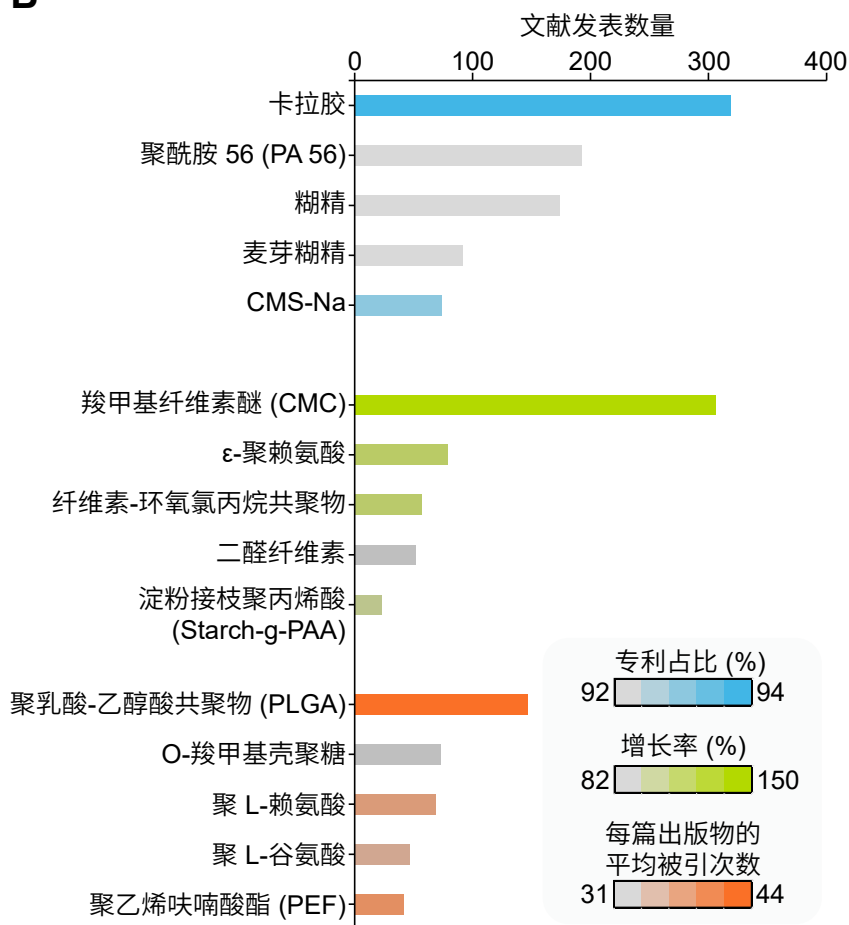


图 33. 基于 (A) 普遍性, 以及 (B) 专利占比、增长率 (2020-2024 年) 和篇均被引次数, 电子与半导体应用领域中排名前五的可持续聚合物。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的期刊论文与专利文献。

同时在宽温度范围内保持良好的电化学稳定性。聚乙二醇 (PEG) 在导电聚合物配方中作为加工助剂, 可实现碳纳米管与石墨烯的均匀分散, 这对柔性电子应用至关重要——此类应用在反复弯曲过程中必须保持机械完整性。⁴³³ 聚乙烯醇 (PVA) 同样备受商业关注, 主要用作有机薄膜晶体管 (OTFT) 中的介电层。⁴³⁴ 其优异的成膜性能以及通过交联实现的可调介电常数, 使得器件性能能够得到精确控制。纤维素作为印刷电子的柔性基板材料, 依然保持着重要地位。⁴³⁵ 其纤维结构提供了机械增强作用, 而化学改性则可调控表面能, 从而实现最佳的油墨附着力。纤维素衍生物还可用作透明导电薄膜的基质, 其中高长径比的纤维在保持光学透明度的同时, 构建了用于导电的渗流网络。⁴³⁶

专利占比较高的代表性物质如图 33B 所示。卡拉胶的专利集中度高达 94%, 表明其作为生物相容性传感器中的凝胶电解质正处于密集的商业开发阶段。其热可逆凝胶化机制使其可在适中温度下进行加工, 同时提供适用于可穿戴健康监测设备的离子导电性。⁴³⁷ 卡拉胶结构中的硫酸基团在促进离子传输的同时, 保持了适用于皮肤接触应用的生物相容性。尼龙56 (PA56) 的专利集中度为 92%, 在电力电子应用中用作高温介电材料。⁴³⁸ 该材料在保持低介电损耗的同时, 提供超过 300°C 的热稳定性, 这对电动汽车逆变器和可再生能源电力转换系统至关重要——在这些领域, 可持续材料有助于解决产品生命周期结束时的回收利用问题。糊精展现出 92% 的专利集中度, 被用作 OLED 薄膜中的可生物降解添加剂。⁴³⁹ 其可控的降解动力学特性使得开发用于环境监测的瞬态电子设备成为可能, 此类设备在预定运行周期结束后会无害地溶解。糊精还被用作电容器粘结剂的组分。⁴⁴⁰

2020 至 2024 年期间增长显著的材料如图 33B 所示。羧甲基纤维素醚 (CMC 醚) 展现出 150% 的惊人增速, 被应用于高压超级电容器的水凝胶电解质中。⁴⁴¹ 羧甲基改性在保持纤维素力学性能的同时引入了离子功能, 从而推动了可持续电容器隔膜的开发。⁴⁴² 它还被用作可持续基体, 为压力传感器的导电复合材料赋予柔韧性。⁴⁴³ ϵ -聚赖氨酸作为电子元件的抗菌涂层, 展现出 114% 的增长。⁴⁴⁴ ϵ -聚赖氨酸在化学传感器的制备中用作生物相容性聚合物支架。⁴⁴⁵ 纤维素与环氧氯丙烷的共聚物展现出 112% 的增长, 这得益于其优异的机械、热、化学稳定性及导电性。通过环氧氯丙烷交联引入的季铵基团可赋予材料氢氧根离子导电性, 而纤维素主链则确保了其机械稳定性。作为一种可持续的膜材料, 它在锂离子电池等清洁能源应用中有效解决了传统全氟聚合物带来的环境影响问题。⁴⁴⁶ 纤维素-环氧氯丙烷共聚物的水凝胶具备良好生物相容性, 可用作柔性电极材料, 应用于下一代生物接口与柔性植入式器件。⁴⁴⁷

高被引文献中所涉及的聚合物如图 33B 所示。聚乳酸-羟基乙酸共聚物 (PLGA) 以平均 44 次被引居首, 彰显了其作为瞬态电子器件可生物降解基板的重要性。⁴⁴⁸ 通过调节丙交酯/乙交酯比例实现的可调降解动力学, 能够精确控制器件寿命, 这对植入式医疗电子设备至关重要——可控的溶解过程可防止长期生物累积。⁴⁴⁹ PLGA 作为药物洗脱电子平台的作用, 体现了可持续材料与先进医疗技术的融合。⁴⁵⁰ 聚呋喃二甲酸乙二醇酯 (PEF) 的平均被引次数为 39 次, 代表了柔性电子领域中替代化石燃料基聚合物基板的可持续基板选择。⁴⁵¹ PEF 源自生物质基呋喃二甲酸, 与传统聚酯相比, 具有更优异的氧气与水分阻隔性能。⁴⁵² 聚 L-赖氨酸的平均被引次数为 37 次, 主要研究其

用于生物电子接口中的应用。^{453, 454} 其阳离子特性使其能够与带负电的生物表面形成强效粘附，同时保持生物相容性，从而适用于生物传感器领域。⁴⁵⁵

5.2.2. 纺织品与服装应用领域的可持续聚合物

纺织品与服装行业是可持续聚合物的变革性应用领域，消费者对环保产品的需求、针对微塑料污染的监管压力以及材料性能升级要求，共同推动行业研发转向生物基与可生物降解替代品。

图 34 展示了纺织品与服装应用领域可持续聚合物的分类情况，分类依据包括其普遍性、专利占比、增长率及篇均被引次数。对专利族与期刊论文的分析揭示了不同可持续聚合物平台在商业开发、研究重点及新兴技术机遇方面的显著差异。

最普遍的材料如**图 34A** 所示。聚乙二醇 (PEG) 在商业领域占据主导地位，主要作为功能性纺织品中的吸湿排汗剂。其亲水性的醚键能将水分从皮肤快速输送至织物表面，而该聚合物的低毒性则确保了其在运动服装中的皮肤亲和性。⁴⁵⁶ 在可生物降解纤维的熔融加工过程中，PEG 作为纤维纺丝助剂，可降低熔体粘度，并防止 PLA 及其他热敏性生物聚合物在高温挤出成型过程中发生热降解。⁴⁵⁷ 聚乙烯醇 (PVA) 在研究领域备受关注，且商业开发成果显著，可作为水溶性纤维用于临时性纺织结构。⁴⁵⁸ 其卓越的成膜性能使其能够生产用于医用纺织品的可生物降解无纺布，通过可控溶解去除临时支撑结构，且无残留污染。⁴⁵⁹ 在可持续织造工艺中，PVA 作为上浆剂，在织物成形过程中提供临时纱线强度，随后可通过水

洗完全去除，从而替代石油基上浆化学品。⁴⁶⁰ PLA 保持产学研均衡发展，是当前主流的可生物降解合成纤维材料平台。⁴⁶¹ 其热塑性使其能够采用常规熔融纺丝工艺，同时在工业条件下实现完全可堆肥化。PLA 作为微纤维替代品，有助于应对海洋污染问题，因为洗涤过程中释放的可生物降解微纤维会在海洋环境中无害降解，这与持久存在的石油基微塑料形成鲜明对比。⁴⁶²

专利占比较高的材料如**图 34B** 所示。羟丙基甲基纤维素 (HPMC) 的专利集中度高达 93%，表明其作为纺织品印花增稠剂的商业开发十分活跃。⁴⁶³ 其假塑性流变行为在保持生物降解性的同时提供出色的印花清晰度，从而在可持续纺织品印花工艺中替代合成增稠剂。在无纺布生产中，HPMC 作为临时粘结剂，在纤网成形期间实现纤维固结，随后在可控条件下溶解，这对生产可生物降解卫生用品与医用纺织品至关重要。⁴⁶⁴ 糊精的专利集中度达 96%，主要用作织物整理中的天然纺织淀粉。其支链葡萄糖结构在保持完全生物降解性的同时，提供可控的挺括度与抗皱性。⁴⁶⁵ 糊精作为环保型织物柔软剂，通过酶改性形成两亲性结构，无需季铵盐化合物即可降低纤维间摩擦，同时兼顾性能与环境要求。⁴⁶⁶ 卡拉胶的专利集中度为 93%，在纺织品染色过程中用作成胶剂。⁴⁶⁷ 其热可逆凝胶化机制可通过凝胶相染色技术控制染料渗透与固着，同时减少用水量。作为抗菌纺织品处理剂，卡拉胶利用其天然生物活性，在无需合成杀菌剂的情况下，即可抑制运动服装中引起异味的细菌滋生。⁴⁶⁸

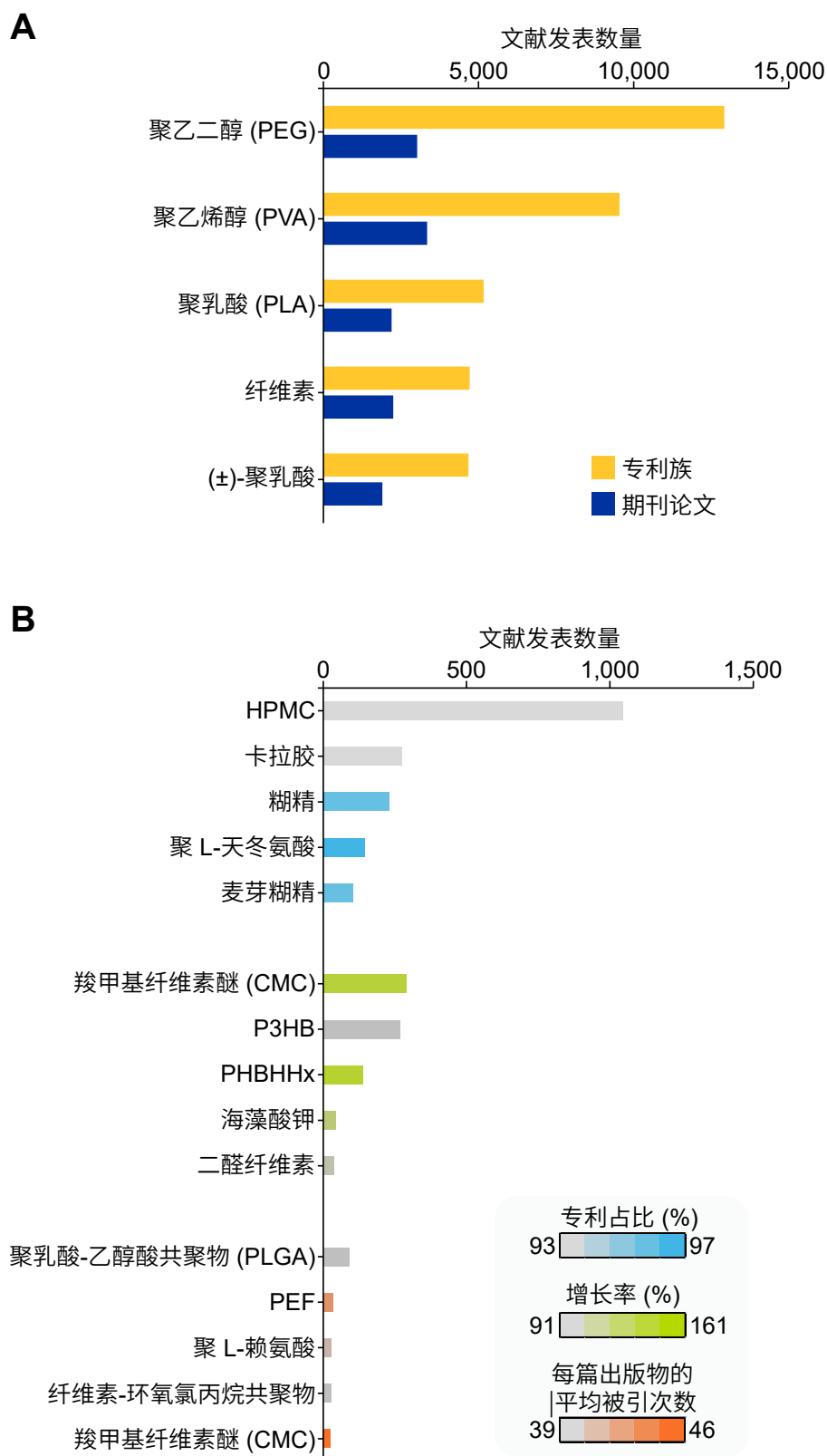


图 34. 纺织品与服装应用领域中排名前五的可持续聚合物材料，依据指标包括：**(A)** 普遍性；以及 **(B)** 专利占比、增长率（2020-2024 年）和篇均被引次数。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的期刊论文与专利文献。

2020 至 2024 年期间增长明显的材料如图 34B 所示。PHBHHx 展现出 192% 的惊人增长率，代表了新一代海洋可生物降解合成纤维。与聚-3-羟基丁酸酯 (P3HB) 相比，引入己酸酯链段降低了结晶度，在保持海水环境中完全生物降解的同时，提高了纤维的柔韧性与加工性能。PHBHHx 可作为户外服装的可持续微纤维替代品，其在穿着过程中释放的纤维碎片可在自然环境中无害降解。^{469, 470} 羧甲基纤维素醚 (CMC 醚) 作为离子交换纤维处理剂，增长率达 161%。羧甲基改性在保持纤维素力学性能的同时引入了阴离子官能团，通过可控的金属离子结合，实现了抗菌纺织品的开发。⁴⁷¹ 作为一种湿度响应性纤维涂层，它利用可控的溶胀行为，制备出能响应湿度变化的自适应纺织品。⁴⁷² 聚-3-羟基丁酸酯 (P3HB) 增长率达 91%，用作天然纤维的可生物降解涂层。其热塑性使其适用于熔融涂覆工艺，同时为棉、毛纺织品提供防水性与尺寸稳定性。⁴⁷³ P3HB 作为含氟处理剂的可持续替代方案，在提供防污与防水性能的同时，不会造成持久性环境污染。⁴⁷⁴

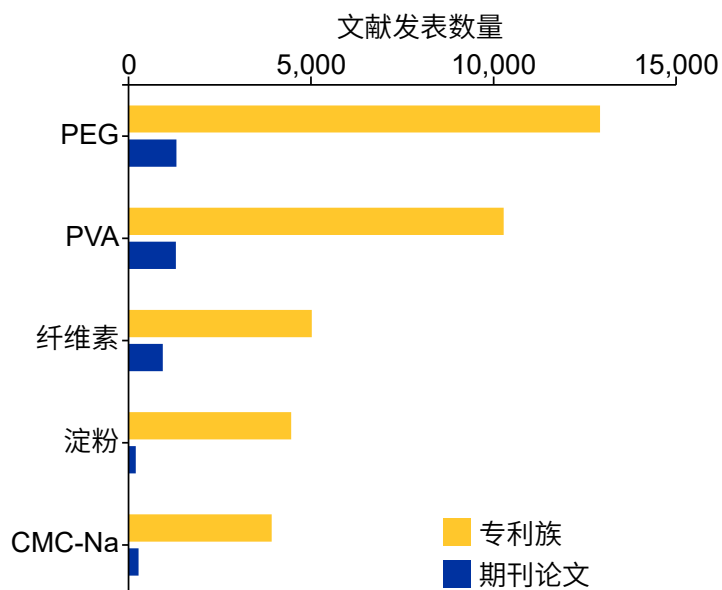
高被引文献中所涉及的材料如图 34B 所示。羧甲基纤维素醚 (CMC 醚) 以平均 46 次被引居首，彰显了其作为多功能纺织品处理平台的重要性。2,5-呋喃二甲酸与 1,2-乙二醇的聚合物 (PEF) 平均被引 43 次，代表了性能增强的生物基聚酯纤维。PEF 源自生物质基呋喃二甲酸，与 PET 相比，在保持可回收利用性的同时，具有更优异的力学性能与热稳定性。⁴⁷⁵ 研究重点在于优化纤维纺丝工艺，并提升其与天然纤维的混纺相容性，以开发高性能可持续纺织品。⁴⁷⁶

5.2.3. 胶粘剂与涂料应用中的可持续聚合物

胶粘剂与涂料领域是可持续聚合物的关键应用方向，环境法规与性能要求的双重驱动正推动创新向生物基与可生物降解替代品转型。图 35 展示了胶粘剂与涂料应用中可持续聚合物的分类情况，分类依据涵盖普遍性、专利占比、增长率及篇均被引次数。

最普遍的材料如图 35A 所示。聚乙烯醇 (PVA) 在这两大领域的专利格局中均占据主导地位，在环保型胶粘剂配方中用作水溶性粘结剂。其优异的成膜性能与氢键结合能力，使其成为纸张与包装胶粘剂的理想选择，可提供强劲的初粘性，并实现可控的水敏感性。⁴⁷⁷ 在涂料应用中，PVA 作为流变调节剂与保护胶体，既能稳定乳液体系，又能提供抗油抗脂的阻隔性能。⁴⁷⁸ 聚乙二醇 (PEG) 展现出显著的商业价值，主要在聚氨酯胶粘剂中用作增塑剂与扩链剂。⁴⁷⁹ 其亲水性及低毒性特点，使得配制挥发性有机化合物排放量更低的水性胶粘剂系统成为可能。⁴⁸⁰ 在涂料配方中，PEG 作为相转移催化剂，有助于无机填料与颜料的均匀分散，从而提高涂层的耐久性与外观质量。⁴⁸¹ 纤维素在文献和专利两个领域均占据重要地位，既可作为天然增稠剂，也可作为成膜聚合物。其纤维结构为粘接接头提供机械增强作用，而化学改性则使其溶解性与粘附性能可调。在涂料中，纤维素衍生物作为颜料悬浮液的防沉剂，在储存期间防止相分离，同时保持施工粘度。⁴⁸²

A



B

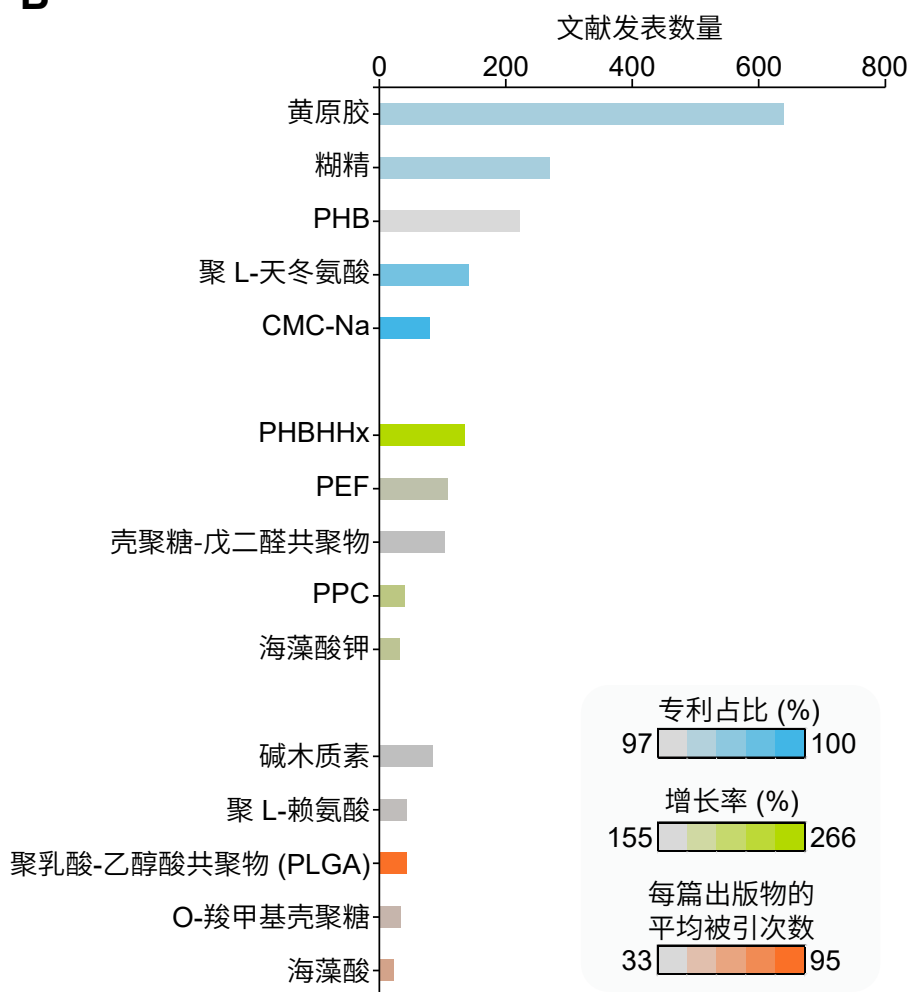


图 35. 胶粘剂与涂料应用领域中排名前五的可持续聚合物材料，依据 (A) 普遍性及 (B) 专利占比、增长率、篇均被引次数进行分类。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的期刊论文与专利文献。

专利占比较高的材料如**图 35B** 所示。黄原胶的专利集中度高达 98%，表明其作为水性胶粘剂系统中流变改性剂的商业开发势头强劲。其假塑性流变行为赋予涂料卓越的施工性能——静止时的高粘度可防止滴落，而剪切变稀特性则确保了涂布的顺畅性。⁴⁸³ 其微生物来源与生物降解性在解决环境问题的同时，保持了与合成增稠剂相当的性能。糊精的专利集中度达 98%，主要用作压敏胶中的天然增粘剂。⁴⁸⁴ 其支链葡萄糖结构可实现粘性的可控建立及可剥离性，这对临时粘接应用至关重要。糊精的水溶性使得粘接基材易于清洁与回收利用，契合了包装应用中的循环经济要求。聚羟基丁酸酯 (PHB) 的专利集中度达 97%，在涂料配方中用作可生物降解的基体树脂。⁴⁸⁵ 其热塑性特性使其能够进行熔融加工，同时在堆肥条件下保持完全的生物降解性。PHB 对水蒸气与氧气的阻隔性能，使其适用于可生物降解包装材料的防护涂层。

2020 至 2024 年期间增长显著的材料如**图 35B** 所示。PHBHHx 展现出 266% 的惊人增长率，代表了新一代柔性可生物降解涂层。⁴⁸⁶ 与 PHB 均聚物相比，己酸酯共聚单体降低了结晶度，从而提高了柔韧性与可加工性。PHBHHx 作为一种适用于海洋暴露环境的海洋可降解阻隔涂层，在保持防护性能的同时，有效应对了塑料污染问题。⁴⁸⁷ 作为高性能涂料用生物基聚酯，PEF 展现出 167% 的增长。PEF 源自生物质基呋喃二甲酸，与石油基聚酯相比，具有更优异的阻隔性能。在户外应用中，其作为抗紫外线面漆，既利用了呋喃环固有的光稳定性，又减少了对合成紫外线吸收剂的依赖。⁴⁸⁸ 壳聚糖-戊二醛共聚物作为抗菌涂层剂，展现出 155% 的增长。⁴⁸⁹ 其交联结构可在保持涂层

完整性的同时，实现抗菌性壳聚糖链段的可控释放。该共聚物可用作医疗器械与食品包装的生物活性表面处理剂，其持续抗菌活性可在不浸出有毒化合物的前提下防止污染。

高被引文献中所涉及的聚合物如**图 35B** 所示。聚乳酸-羟基乙酸共聚物 (PLGA) 以平均 95 次被引居首，彰显了其作为控释涂层体系的重要性。通过调节丙交酯/乙交酯比例实现的可调降解动力学，能够精确控制活性成分的释放速率。PLGA 作为医疗植入物上的药物洗脱涂层，体现了可持续材料与先进医疗应用的融合。⁴⁹⁰ 海藻酸的平均被引次数为 55 次，主要研究其在水性涂层系统中的成胶特性。其钙响应性凝胶化机制，使得开发能够响应环境条件的智能涂层成为可能。⁴⁹¹ 海藻酸可作为自修复涂层基质，钙离子的迁移能修复微观缺陷，从而延长涂层使用寿命。⁴⁹² O-羧甲基壳聚糖的平均被引次数为 41 次，代表了先进的 pH 响应性涂层技术。羧甲基改性在提高水溶性的同时，保留了壳聚糖固有的抗菌特性。⁴⁹³

5.2.4. 包装与消费品中的可持续聚合物

在对文献发表数量排名前三的应用领域进行详细分析之后，鉴于近年来可持续包装备受关注，我们进一步考察了包装与消费品领域的应用。包装与消费品领域是可持续聚合物最常见的应用方向，一次性塑料所面临的监管压力、消费者环保意识的提升以及循环经济倡议的推进，正共同驱动着向生物基与可生物降解替代品的快速创新。**图 36** 展示了包装与消费品应用中可持续聚合物的分类情况，分类依据涵盖普遍性、专利占比、增长率及篇均被引次数。

最普遍的材料如图 36A 所示。聚乙烯醇 (PVA) 在商业开发中占据主导地位，主要用作洗涤剂凝珠与农业应用中的水溶性包装薄膜。⁴⁹⁴ 其优异的成膜性能与可控的水溶性，使得单剂量包装能在使用过程中完全溶解，从而消除包装废弃物。PVA 还可作为纸基包装的阻隔涂层，在提供防油防潮性能的同时，仍能通过标准纸张回收工艺实现可回收利用，从而满足对塑料涂层纸板可持续替代品的需求。⁴⁹⁵ 淀粉作为可生物降解的发泡包装材料，展现出强劲的商业吸引力。⁴⁹⁶ 其在塑化后的热塑性加工能力，使得能够生产出兼具缓冲保护功能且可在 90 天内完全堆肥的发泡包装材料。淀粉基聚合物可用作食品领域的可食用包装薄膜，其可控的氧气与水分透过性可延长货架期，而包装本身可被食用或堆肥，从而彻底消除废弃物流。⁴⁹⁷ PLA 在学术研究与产业开发之间保持平衡，是石油基塑料的主要刚性包装替代品。其热塑性特性使其可在现有设备上进行常规加工，同时具备完全的工业堆肥性。⁴⁹⁸ PLA 可用作食品包装的透明阻隔薄膜，其受控结晶性使其氧气阻隔性能与 PET 相当，同时保持透明度以确保产品可见性与消费者接受度。⁴⁹⁹

专利占比较高的材料如图 36B 所示。羟甲基纤维素 (49 项专利) 用作药品与保健食品包装的控释涂层体系。其热塑性行为与 pH 响应性溶解特性，使得开发肠溶包衣成为可能——此类包衣可在储存期间保护活性成分，同时确保可控的生物利用度。与天然纤维素相比，羟甲基改性提升了水溶性，从而能够为靶向递送应用提供精确的

溶解时机控制。⁵⁰⁰ 木质素磺酸 (42 项专利) 在纸基包装配方中用作天然分散剂与粘结剂。⁵⁰¹ 作为亚硫酸盐制浆工艺的副产物，它能够以经济高效的方式进行流变改性，同时增强瓦楞包装的湿强性能。其芳香族聚酯结构赋予材料天然抗氧化活性，可在保持完全生物降解性的同时，保护包装内容物免受氧化降解。聚乙交酯聚合物 (37 项专利) 代表了用于食品包装的高性能可生物降解阻隔薄膜。聚乙交酯的快速水解降解特性，使得开发对时间敏感的包装成为可能——此类包装在保质期内能保持阻隔性能，并在堆肥条件下完全降解。⁵⁰² 其高结晶度赋予了卓越的气体阻隔性能，可与常规合成薄膜相媲美。⁵⁰³

2020 至 2024 年期间增长显著的聚合物如图 36B 所示。羧甲基纤维素醚 (CMC 醚) 凭借其卓越的阻隔性能与机械强度，展现出高达 700% 的增长率。⁵⁰⁴ 作为柔性可生物降解包装薄膜，PHBHHx 的增长率为 170%。⁵⁰⁵ 与 PHB 均聚物相比，己酸酯共聚单体降低了结晶度，从而提高了柔性包装应用所必需的柔韧性与热封性。PHBHHx 可用作海洋环境产品的海洋可降解包装材料，在此类环境中，包装碎片会在海水中无害降解，而非作为持久性污染物累积。⁵⁰⁶ 乙基纤维素增长率达 119%，可用作敏感产品的防潮涂层。⁵⁰⁷ 其疏水特性在提供卓越水蒸气阻隔性能的同时，在适当条件下仍能保持生物降解性。乙基纤维素用作活性包装应用中的控释基质，其中抗菌或抗氧化化合物可逐渐释放，以延长产品保质期并维持品质。⁵⁰⁸

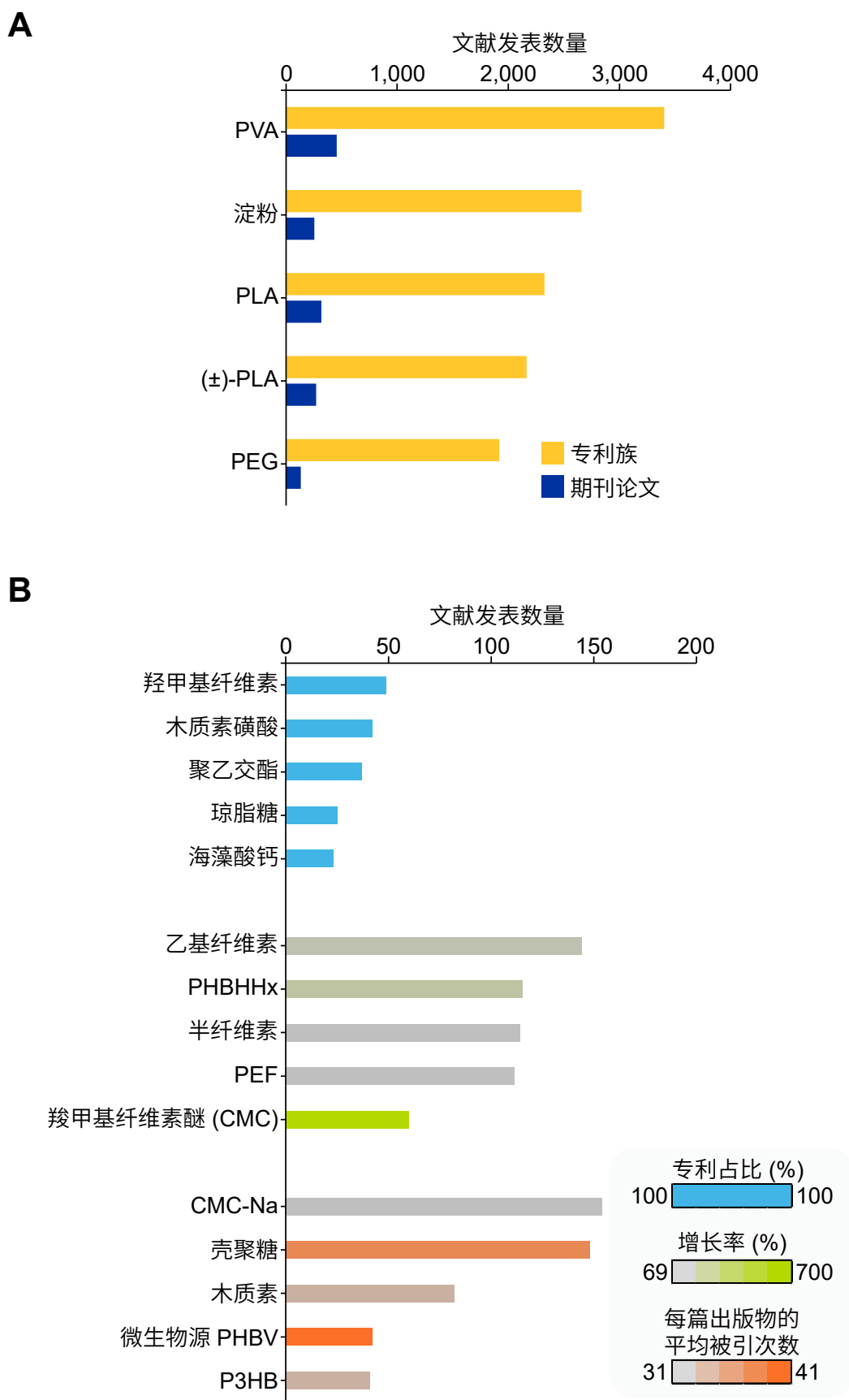


图 36. 包装与消费品应用领域中排名前五的可持续聚合物材料，依据 (A) 普遍性及 (B) 专利占比、增长率（2020 至 2024 年）、篇均被引次数进行分类。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的期刊论文与专利文献。

高被引文献中出现的聚合物如图 36B 所示。壳聚糖以平均 38 次被引居首，彰显了其作为多功能抗菌包装材料的重要性。其阳离子特性赋予其广谱抗菌活性，而优异的成膜性能则使其能够开发出可食用涂层与可生物降解薄膜。⁵⁰⁹ 研究重点在于优化分子量与脱乙酰度，以在食品包装应用中实现特定的阻隔性能与抗菌功效。⁵¹⁰ 木质素的平均被引次数为 33 次，代表了生物基抗氧化包装体系。作为最丰富的芳香族聚酯生物聚合物，木质素通过酚羟基提供天然抗氧化活性，同时可作为合成抗氧化剂的可再生替代品。研究重点在于通过木质素改性以改善其加工性能，并在活性包装应用中实现抗氧化剂的可控释放，尤其针对易发生氧化酸败的含脂食品。⁵¹¹

5.3 合成生物学与生物精炼：为可持续聚合物提供单体供应

前几节通过基于自然语言处理 (NLP) 的增长分析识别出了新兴的可持续聚合物，但要理解其可行性，还需深入探究支撑这些材料的生物合成体系。合成生物学通过两条既独立又互补的路径，为可持续聚合物制造提供了变革性的技术平台：一是通过发酵生产可再生单体，并将其投入现有的化学聚合工艺；二是通过微生物直接合成聚合物，如聚羟基脂肪酸酯 (PHAs)。这些生物方法利用工程化微生物与酶催化系统，将生物质原料转化为完整的聚合物链或独立的化学结构单元，从根源上推动高分子材料由传统石油基向生物基原料体系转型。

5.3.1. 合成生物学在直接替代型单体方面的应用

在可持续聚合物领域，合成生物学作为一项赋能技术，通过工程化改造微生物与酶系统，将可再生碳源转化为传统上源自石油的化学单体。

与聚羟基脂肪酸酯 (PHAs) 等直接微生物合成聚合物不同，该方法利用代谢工程生产独立的化学中间体，随后再通过常规化学聚合反应进行加工。该策略在用可再生原料替代化石基原料的同时，保持了与现有聚合物加工基础设施的兼容性。

生物精炼价值链遵循系统化的路径：生物质底物经过发酵或酶促转化，生成平台化学品，随后通过成熟的化学路线进行纯化与聚合。⁵¹² 现代生物精炼厂日益整合多种转化路径，将发酵与化学催化相结合，以最大限度地提高碳利用率，并拓宽可制备单体的种类范围。⁵¹³

对合成生物学在聚合物单体生产中应用的年度文献数据分析表明，该领域的研究势头强劲（图 37）。期刊论文数量呈现持续增长态势，从 2015 年的 487 篇增至 2024 年的 775 篇，十年间增幅达 59%。这一上升趋势反映了学术界对单体生产中代谢途径优化、菌株工程及生物工艺开发的持续关注。2020 年后研究明显加速，年发表量超过 600 篇，这与全球对循环经济原则及碳中和化工生产的日益重视相吻合。

专利分析则呈现出截然不同的态势，在整个研究期间，年均专利族数量稳定在 250 至 450 个之间。总体分布显示，期刊与专利的比例为 63:37，这一比例显著高于典型的生物技术领域——在这些领域中，商业活动通常与学术产出持平甚至更高。这种不对称性表明，尽管生物基单体生产的基础研究进展迅速，但其商业转化仍持续面临着与生产经济性、规模化复杂性以及与传统石化路线竞争相关的技术挑战。

这些文献数据源自对 CAS 第 16 分部（发酵与生物工业生物化学）的检索，涵盖了一系列作为可持续聚合物结构单元的单体。其中包括乳酸与琥珀酸这两大主导性平台化学品，反映了其成熟

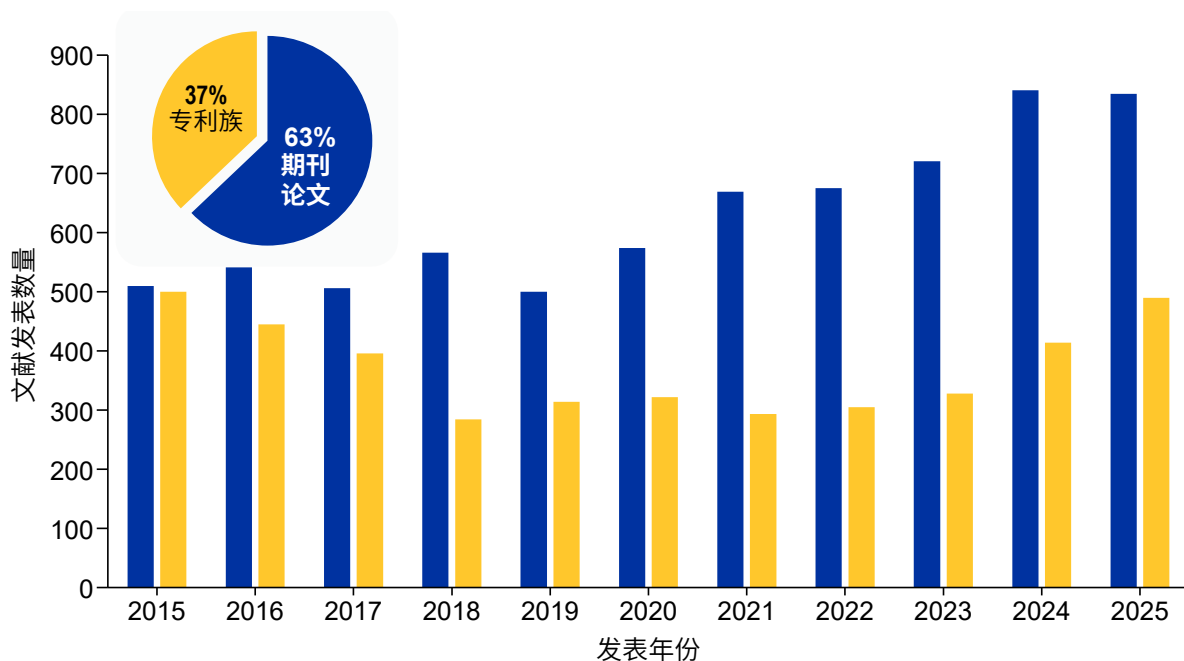


图 37. 合成生物学相关文献中部分生物基聚合物的总体发表趋势。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的期刊论文与专利文献。

的发酵路径与商业价值。己二酸是聚酰胺生产中另一重要的 C6 平台。其余单体则呈现出更为专业化的发展模式：用于生产聚对苯二甲酸丙二醇酯 (PTT) 的 1,3-丙二醇、用于特种聚酰胺的长链二羧酸 (C9-C18)、用于多种聚酯的 1,4-丁二醇，以及用于新一代芳香族聚酯的 2,5-呋喃二甲酸。二胺单体包括 1,5-戊二胺、腐胺 (1,4-丁二胺)，它们与二羧酸聚合，形成生物基聚酰胺。其他特种单体，如对苯二甲酸、2-吡咯烷酮及相关环状化合物，则代表了面向大宗及特种聚合物应用的新兴生物精炼目标。针对发酵与生物化学工业领域的专项检索，确保了所收录文献专门涉及生物生产路径，而非传统的化学合成方法。

机构层面分析揭示了全球范围内单体生物合成能力的分布特点 (图 38)。中国学术机构在发文量上处于领先地位，江南大学、南京工业大学与清华大学各贡献了超过 25 个专利族。这一集中趋势反映了中国在工业生物技术与生物基化学生产领域的国家级战略布局与持续投入，其资金来源包括国家自然科学基金、国家级实验室以及专注于合成生物学应用的“知识创新计划”。⁵¹⁴

欧洲与亚洲企业在该领域展现出强劲的商业参与度。上海凯赛生物技术股份有限公司作为一家专业的工业生物技术企业，也是专业生物精炼运营商崛起的典型代表。它们既与成熟的化工制造商竞争，也与跨界布局生物基化学品的多元化

科技公司展开角逐。⁵¹⁵ 中国石化已在发酵基单体生产领域建立了广泛的能力，拥有庞大的专利组合，涵盖通过微生物发酵与代谢工程生产长链二羧酸及 1,3-丙二醇的方法。⁵¹⁶⁻⁵¹⁸ 帝斯曼（荷兰）与巴斯夫（德国）代表了向生物技术转型的传统化工企业，它们利用在下游聚合物领域的专业技术，向后整合进入生物基单体生产环节。^{519, 520} 东丽工业等日本企业已建立起全面的生物技术能力，其专利涵盖用于生产己二酸衍生物（3-羟基己二酸、 α -羟基粘康酸）及 1,5-戊二胺的转基因微生物，专门聚焦于聚酰胺单体的生物基路线。^{521, 522}

韩国的三星电子已建立起广泛的代谢工程能力，拥有 50 余项专利，涵盖用于生产乳酸、琥珀酸及 1,4-丁二醇的工程菌株，包括酿酒酵母、谷氨酸棒杆菌及大肠杆菌。^{523, 524} 这些科技公司对菌株工程与生物工艺开发的直接投资，表明其战略正向着可持续材料供应链的垂直整合转变。

对 CAS 第 16 分部（发酵与生物工业生物化学）中各类单体文献的分析表明，其研发重点与下游聚合物应用高度契合（图 39）。乳酸在本数据集中占期刊论文的 58% 及专利族的 45%，是当

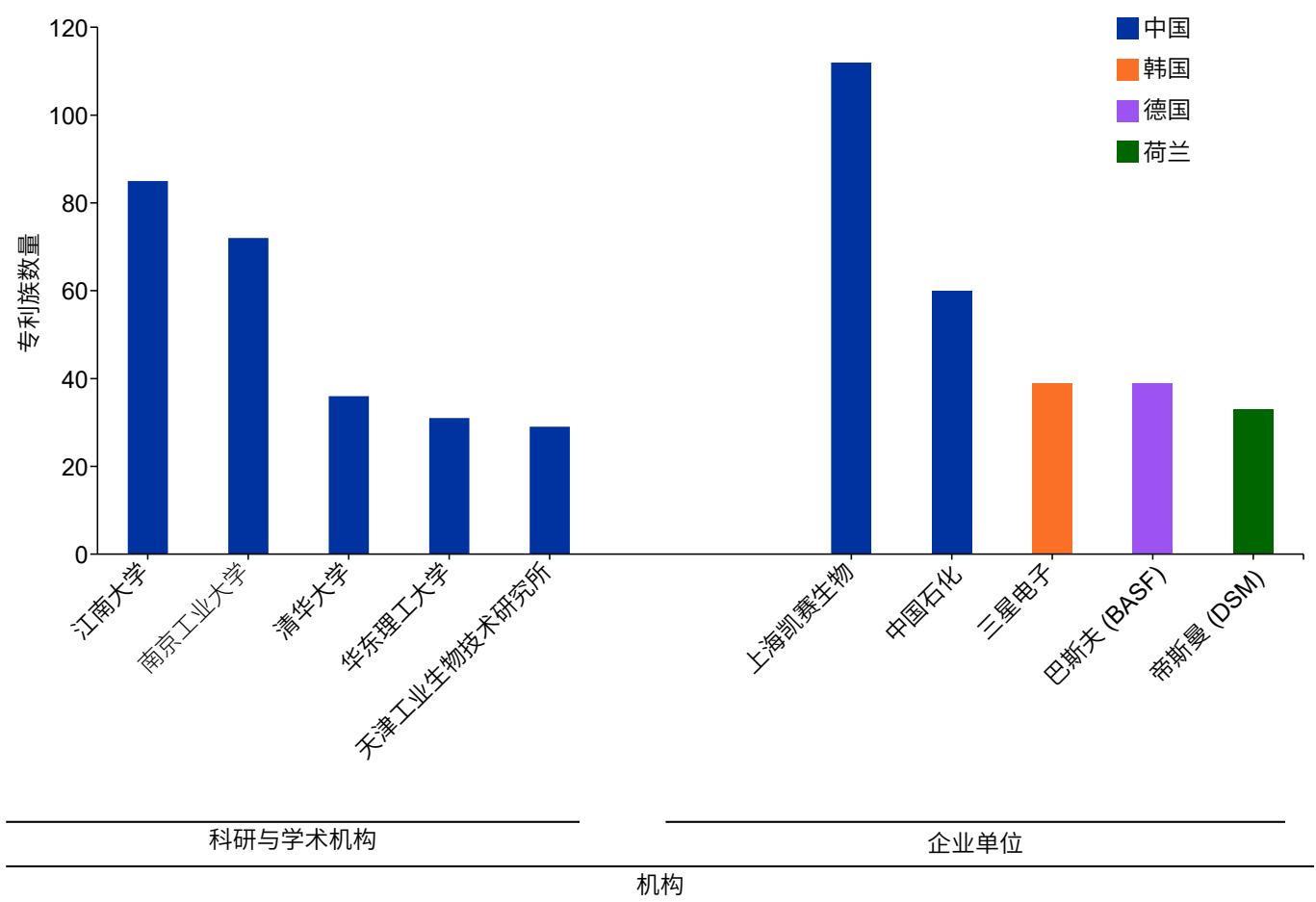


图 38. 合成生物学相关文献中的领先机构（科研与学术机构及企业）。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的专利文献。

前生物基单体领域的核心研究热点。这一集中趋势与我们早先基于自然语言处理 (NLP) 的分析结论相吻合：聚乳酸 (PLA) 已成为领先的商业化可生物降解聚酯。利用多种碳水化合物来源发酵生产乳酸的工艺已达到工业成熟水平，全球范围内已有多个商业化生产设施投入运营。⁵²⁵

琥珀酸约占期刊及专利文献总量的 20%，作为多用途 C4 构建单元，广泛应用于多种聚酯体系。通过细菌发酵生产生物基琥珀酸的技术已从实验室验证阶段迈入商业化实施阶段，多家企业已实现规模化量产，成本相比石油基替代品具备竞争优势。⁵²⁶ 其聚合物应用包括聚丁二酸丁二醇酯 (PBS)、聚丁二酸-己二酸丁二醇酯 (PBSA) 及多种共聚酯，在这些材料中琥珀酸赋予了生物降解性与柔韧性。

这些特种单体呈现出不同的研究模式，反映了其技术成熟度与市场潜力。1,3-丙二醇可用于生产部分生物基材料聚对苯二甲酸丙二醇酯 (PTT)，杜邦等公司已建立了相应的商业化发酵工艺。⁵²⁷ 该二醇可通过甘油或葡萄糖进行生物合成，为石油基丙烯路线提供了可再生的替代方案。

长链 α,ω -二羧酸是生物精炼领域一个新兴的目标产物，具有显著的商业潜力。⁵²⁸⁻⁵³⁰ 这些单体可用于生产特种长链聚酰胺，如 PA610、PA1010 和 PA1012，与传统的短链聚酰胺相比，它们具有更优异的柔韧性、更低的吸湿性以及更强的耐化学性。传统方法制备这些单体依赖于蓖麻油或石油原料的高能耗化学氧化过程，而基于发酵的路线则有望实现更可持续的生产，并对碳链长度分

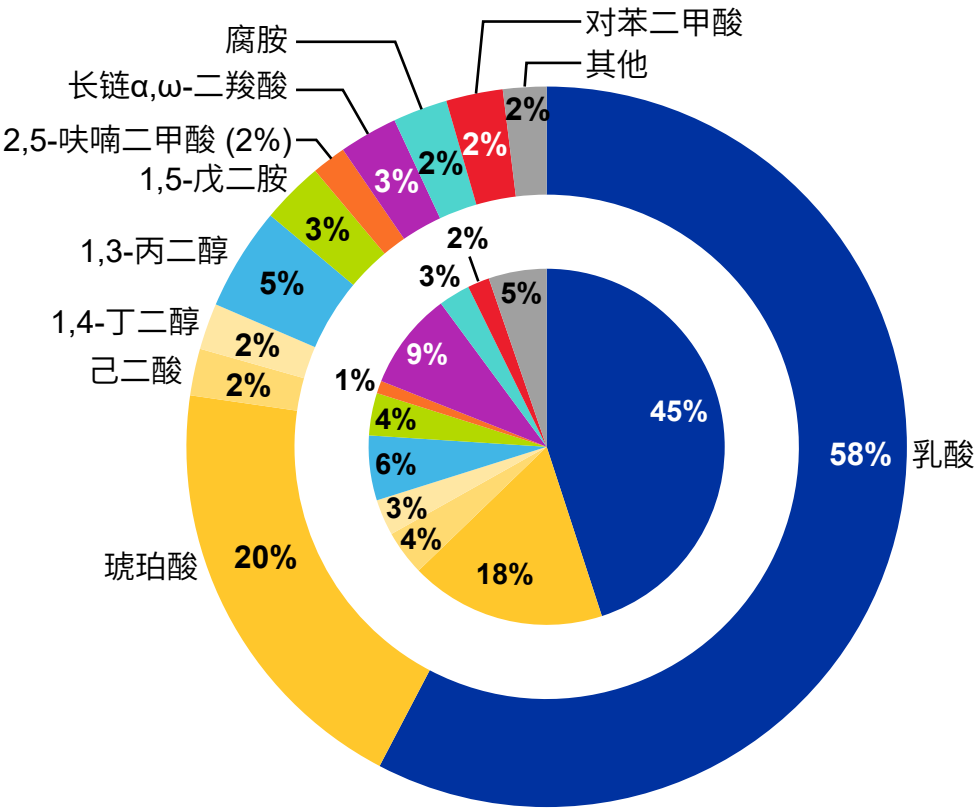


图 39. 生物基单体文献分布图，展示了 CAS 第 16 分部（发酵与生物工业生物化学）内期刊论文（外环）与专利族（内环）的分布情况。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的期刊论文与专利文献。

布实现更优的控制。将这些长链二元酸与生物基二胺相结合，可制备出完全可再生的高性能聚酰胺，其应用范围涵盖从汽车燃油管路到纺织纤维等多个领域。

1,5-戊二胺与己二酸发生缩聚反应，可制成完全生物基的 PA56。这种新型聚酰胺的力学性能与 PA66 相当，同时在纺织应用中具有更优的吸湿性与染色性。⁵³¹ 通过赖氨酸脱羧生物合成 1,5-戊二胺，是生物基聚酰胺单体的新兴制备途径之一。⁵³²

2,5-呋喃二甲酸 (FDCA) 在文献中的占比虽最小，但作为 PEF 的芳香族聚酯结构单元，其未来潜力巨大。以果糖或葡萄糖为原料，经由 5-羟甲基糠醛生产 FDCA 的工艺，结合了化学与生物转化步骤，近期在产率提升和降低成本方面已取得突出进展。⁵³³ PEF 在具备完全生物基特性的同时，还拥有远优于 PET 的阻隔性能，使其成为下一代包装材料的理想之选。⁵³⁴

1,4-丁二醇可应用于多种聚合物，包括聚丁二醇丁二酯 (PBS)、聚己二酸-对苯二甲酸丁二酯 (PBAT) 及热塑性聚氨酯。通过糖类直接发酵生产生物基 1,4-丁二醇已实现商业化规模，为传统的乙炔或丁烷基路线提供了可再生替代方案。⁵³⁵ 其他受到生物精炼关注的特种单体包括 2-吡咯烷酮和 2-哌啶酮等环状中间体，它们是尼龙-4 及其他特种聚酰胺的前体，可为医疗器械与特种纤维提供独特的性能组合。^{536, 537}

围绕乳酸与琥珀酸平台的研究活动高度集中，反映了对成熟发酵路径的战略性聚焦——这些路径技术风险较低，且已具备规模化生产经验。这些成熟平台为扩大生物基聚合物生产提供了近期的可行机遇。随着代谢工程能力的提升，以及技术积累与规模效应带来的生产成本下降，FDCA 和 1,5-戊二胺等新兴单体则代表着更长远的发展机遇。

综上所述，这种将成熟平台优化与新型路径探索相结合的分层发展策略，使合成生物学成为连接可再生碳源与循环经济转型所需高性能可持续聚合物的关键赋能技术。要在该领域取得成功，必须持续投入基础研究以拓展可获取单体的范围，同时推进应用开发以实现具有成本竞争力的工业化生产。将合成生物学与化学催化、工艺强化及数字化生物工艺优化相结合，对于充分释放生物基单体在可持续聚合物供应链中的潜力至关重要。

5.3.2. 基于合成生物学的 PHA 与聚酯生产方法

通过实现对微生物代谢与生物催化途径的精准调控，合成生物学已成为生产聚羟基脂肪酸酯 (PHAs) 及相关聚酯的强大技术平台。通过对天然及非传统宿主进行靶向基因工程改造，并结合酶催化与生物-化学耦合工艺，这类技术拓展了可合成单体的化学类型，提高了生产效率，并促进了可再生或废弃物来源原料向可持续聚合物材料的转化。

近期的专利分析表明，微生物宿主的基因与代谢工程已成为 PHA 生产创新的主要驱动力。多项公开内容⁵³⁸⁻⁵⁴⁰ 聚焦于对典型 PHA 生产菌株进行工程化改造，以扩大单体多样性、增加细胞内聚合物积累量，并实现对共聚物组成的更精确控制。通过引入非天然酶与优化的基因表达盒，这些发明超越了传统的 PHB 和 PHBV，迈向 P(3HP-co-3HB) 等高性能共聚物，这反映了生物聚合物合成领域正从以产率为核心的优化范式，向“按需材料设计”范式发生更广泛的转变。

与此同时，另一条差异化创新路径，利用非常规微生物及极端环境微生物宿主，解决规模化生产、工艺稳健性及污染控制相关的挑战。古菌与嗜盐生产系统能够在高盐度或其他选择性条件下合成 PHA，既降低了对严格无菌条件的依赖，

又拓宽了可用原料的范围。^{541, 542} 此类平台凭借其运行稳定性和成本降低潜力，对工业发酵具有特别的吸引力。

除菌株工程外，多项公开内容还强调工艺层面与下游环节的创新是实现商业化的关键推动力。针对降低发酵液粘度、提高聚合物回收率及改善裂解后处理的方法，直接解决了 PHA 纯化中长期存在的瓶颈问题。⁵⁴³ 这些专利凸显了这样一种共识：仅靠高发酵效率远远不够；必须将生物生产与高效、可规模化放大的回收流程相结合，才能生产出具有成本竞争力的生物塑料。

专利分析结果中的另一个显著趋势是：对循环原料及废弃物衍生原料的重视程度日益提升。相关专利报道了将聚酯废料或非食用生物质通过微生物转化为 PHA，表明生物聚合物合成与可持续材料资源化利用两大领域正趋于融合。⁵⁴⁴ 微生物共培养系统及废弃物转化为 PHA 的路径，重新定义了 PHA 的价值，其不再只是可生物降解的终端产品，更是全域循环碳流体系中的关键中间体，使聚合物创新与可持续发展导向的市场需求及政策监管要求深度契合。⁵⁴⁵

最后，酶级联催化、微流控反应器集成及模块化生物转化单元的应用，反映出合成生物学与精细化学品及聚合物制造之间的交叉融合日益加深。^{546, 547} 总体而言，这些方法拓展了生物辅助聚合物合成的设计空间，展示了生物体系不仅被用于生产 PHAs，还在重塑传统聚酯及其前体的合成路径。

综合本节梳理的专利内容可以看出：合成生物学正通过菌株改造工程、宿主筛选、工艺优化及原料利用等方面的协同进展，重塑 PHA 与聚酯的制造方式。这一格局揭示了生产模式正从传统 PHA 生产向更具多功能性、以材料为导向的平台转型——此类平台能够生产定制化共聚物，在工业级稳健条件下运行，并能利用可再生或废弃物来源的碳源。上述一系列创新充分表明，合成生物学驱动的聚合物技术日益成熟，并展现出可规模化、可持续替代石油基塑料的巨大潜力。

5.4 总结与展望

本次对可持续聚合物的全面分析表明，这一充满活力的领域正经历从小众研究向主流工业应用的快速转型。环境必要性、技术成熟度与经济可行性的交汇，使可持续聚合物有望在多个行业产生变革性影响。该领域的发展轨迹表明，其正从替代材料向优选解决方案演进，这对全球竞争力、环境保护及技术主权均具有深远影响。

6. 柔性电子器件用聚合物材料

自然语言处理 (NLP) 分析结果显示，柔性电子产业已成为聚合物的一个重要应用领域，凸显了其日益增长的技术重要性。聚合物是柔性电子系统发展的基石，使设备能够兼具机械可变形性与可靠性能。随着对可弯曲、可拉伸、可折叠或可贴合形状的电子设备需求不断增长，材料要求也日益复杂。这些器件体系不仅需要承受巨大的机械应力，还必须具备针对特定应用而定制的精确定电学、光学和化学功能。⁵⁴⁸

在此背景下，聚合物及其复合材料在柔性电子领域中发挥着广泛多样的作用。它们可作为非功能性结构组件，例如基板、结构支撑层和绝缘层，在此类应用中，韧性、热稳定性及加工便利性等特性至关重要。⁵⁴⁹与此同时，随着高分子化学的进步，材料应用范围已拓展至活性功能组件，包括直接影响器件性能的导电、半导体、介电及阻隔材料。⁵⁴⁹此外，聚合物还发挥着至关重要的保护与集成作用，作为封装材料、胶粘剂及环境阻隔层，确保器件在反复变形及多种工况下的长期可靠性。⁵⁴⁹

凭借上述多元化性能优势，高分子材料成为下一代柔性电子技术的关键赋能材料。本节旨在探讨支撑这一不断发展领域的聚合物材料现状，概述其功能、性能要求及材料开发的新兴趋势。

6.1 不断演变的研究格局：出版趋势与企业专利动态

为了描绘柔性电子领域中聚合物的格局，我们筛选了与聚合物基柔性电子技术相关的文献。这些文献包括 2015 年至 2025 年的期刊论文与专利文献，总量约为 3.6 万篇。其内容涵盖聚合物作为柔性赋能材料的应用、利用这些材料实现增强柔

性与功能的电子器件，以及旨在扩大聚合物基柔性材料与器件制造规模的工艺流程。

图 40 显示，聚合物基柔性电子领域的研究与商业化投入呈现出显著且持续的增长态势。饼图进一步显示，期刊论文 (52%) 与专利族 (48%) 的比例近乎持平，表明该领域的科研与产业生态系统发展均衡。

基于全球申请趋势，专利文献的地域分布进一步揭示了高分子基柔性电子领域的技术领先格局。据此，我们对该领域内企业的专利情况进行了分析。专利的地域分布 (**图 41** 饼图) 呈现出明显的区域集中趋势：中国占据专利总量的 48%，位居首位；日本以 26% 紧随其后。韩国占比 8%，而西方机构的存在感相对有限。美国占 7%，德国与法国分别为 2% 和 1%。亚太地区高达 82% 的专利集中度对全球供应链与技术获取具有深远影响，表明柔性聚合物电子领域的大部分核心知识产权由亚洲企业掌控。

图 41 中的柱状图突出展示了排名前 15 位的专利机构（企业），揭示了领先的化工与材料公司如何定位自身，以应对柔性电子行业日益增长的需求。住友化学在聚合物配方与化学组成领域以 245 个专利族领先，紧随其后的是 Resonac 与琳得科 (Lintec)，二者分别专注于半导体级材料与粘合薄膜。这种集中于材料供应商而非电子制造商的格局表明，基础性创新正发生在上游化工行业。这些公司正在开发赋能底层支撑技术，后续电子制造商将把这些技术集成到消费类设备中。这些创新背后的技术可归纳为三大核心材料支柱，共同支撑起柔性电子产业的发展根基。

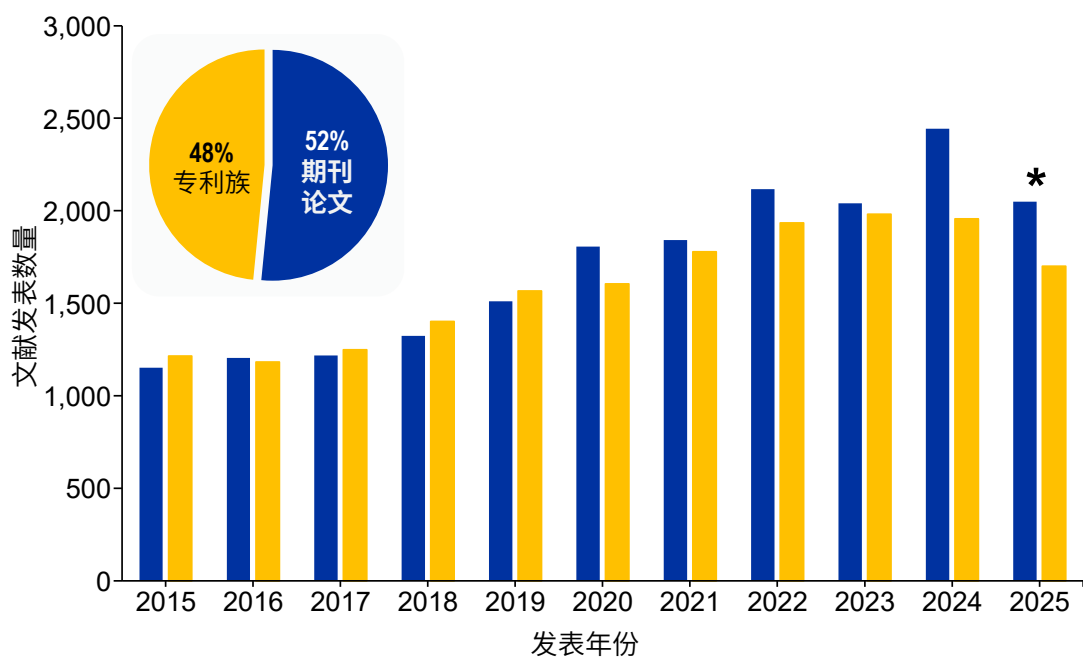


图 40. 柔性电子应用领域期刊论文与专利族的发表趋势，内嵌饼图展示其分布占比。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的期刊论文与专利文献。*注：2025 年数据仅涵盖 1 月至 11 月。

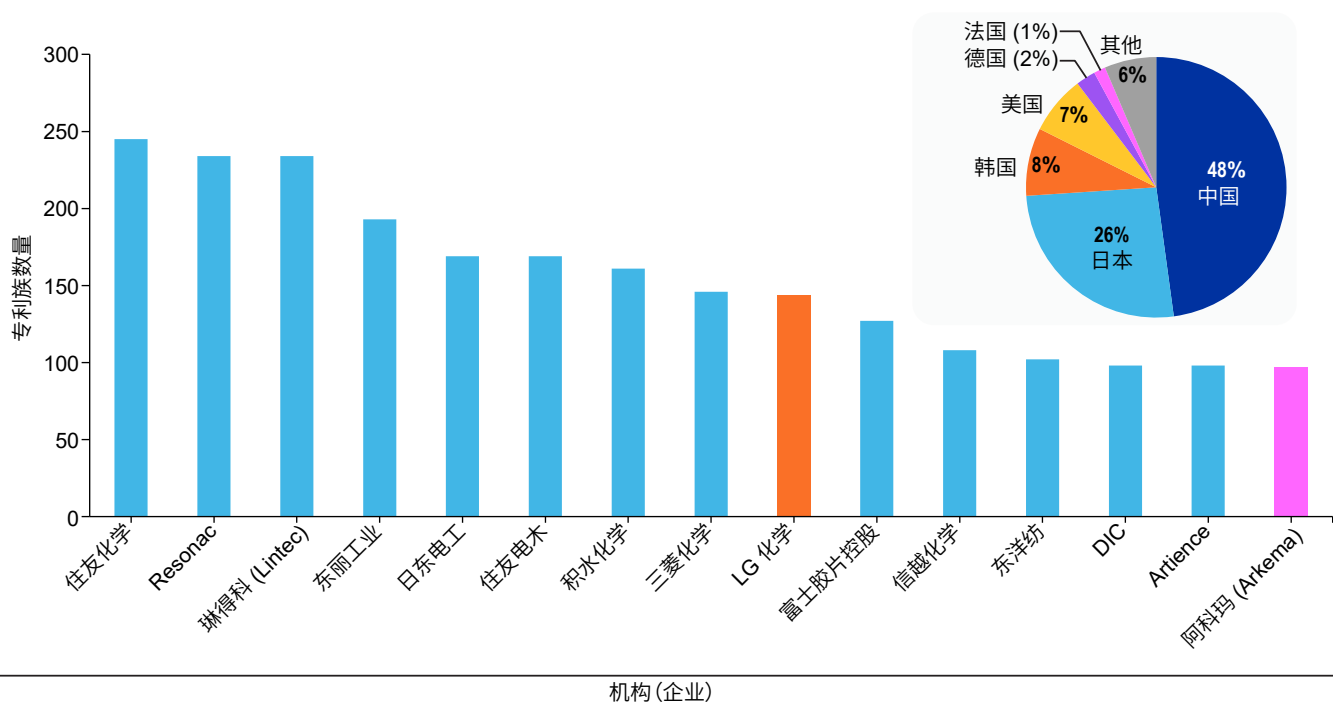


图 41. 聚合物基柔性电子领域专利格局中的领先机构（企业）。内嵌饼图展示了这些机构的地域分布。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的期刊论文与专利文献。

聚酰亚胺与结构薄膜技术

柔性电子材料主要由聚酰亚胺与聚酰胺-酰亚胺薄膜技术主导，这些技术奠定了下一代显示器的结构、光学及热学基础。住友化学、东丽工业、阿科玛、东洋纺与 LG 化学在这一领域处于领先地位，其研发的薄膜具备尺寸稳定性、低雾度、耐热性及耐折性等特性。其创新成果包括生产用于盖板的高度酰亚胺化聚酰胺高表面硬度薄膜、⁵⁵⁰ 抑制褶皱的聚酰亚胺前驱体体系，⁵⁵¹ 以及散热型显示基板。⁵⁵² 这些体系正变得日益多功能化，在单一聚合物架构内融合了透明度、机械刚度（杨氏模量）、介电稳定性，以及与触控层、阻隔层和粘合层的兼容性。

粘接与界面材料

粘接、层压及工艺适配界面构成第二大支柱，其发展由琳得科、日东电工、东洋纺、积水化学、Resonac 及住友化学等企业的胶粘剂与湿法工艺化学品所驱动。这些材料决定了组装质量、机械可靠性以及显示器在反复弯曲循环中的均匀性。具体而言，包括基于丙烯酸共聚物的低温保持柔韧性胶粘剂，⁵⁵³ 以及基于热塑性树脂的可加热高频介电胶粘剂，⁵⁵⁴ 后者可实现快速低温层压。此外，还包括确保洁净粘接的压敏丙烯酸胶粘剂体系，⁵⁵⁵ 以及用于实现电气精度的电路级胶粘剂。⁵⁵⁶ 积水化学与住友化学将这一领域进一步拓展至可返工、热适应性及低模量胶粘剂，相关成果见于专利 JP6799186 及⁵⁵⁷ KR2016100122⁵⁵⁸。总体而言，这些创新表明胶粘剂已从被动的粘接层演变为功能性工程材料。该领域中一个尤为关键的分支是压敏胶 (PSA) 技术。日东电工凭借多种丙烯酸基配方在该领域处于领先地位，其创新成果包括采用反应性乳化剂与水溶性交联剂以抑制低温针孔的发明，⁵⁵⁹ 以及可增强光学应用耐久性的抗紫外线丙烯酸粘合层。⁵⁶⁰

加工与功能性材料

最后一个支柱由加工材料、阻隔材料及功能性材料构成，这些材料确保了加工性、耐用性及器件运行。富士胶片、信越化学及住友电木在先进光刻与光敏化学材料领域占据主导地位。这包括来自富士胶片柔性印刷与平版印刷平台的专利，⁵⁶¹ 以及信越化学用于绝缘与保护膜的碱显影型高功能感光树脂体系。⁵⁶² 对有机发光二极管 (OLED) 稳定性至关重要的阻隔与封装能力，正通过透明阻隔层压材料⁵⁶³ 及基于压敏嵌段共聚物胶粘剂、结合气体阻隔保护膜的层压工艺等创新持续进步。⁵⁶⁴ 在功能层面，导电与传感材料的创新进一步拓展了耐变形电子产品的设计空间。这些进展包括可拉伸导体，⁵⁶⁵ 以及基于金属纳米线、采用聚合物基板与电极的触控传感器。⁵⁶⁶

这些材料类别共同构成了一个紧密整合的生态系统，全球领军企业在此汇聚，共同打造柔性电子器件的光学、机械、界面及制造基础。随着企业通过基板、胶粘剂与功能性化学材料重塑上游产业格局，接下来的问题便是这些聚合物在器件层面如何发挥作用。下一节将探讨聚合物材料在柔性电子系统中，如何通过结构、功能及封装性能发挥具体作用。

6.2 柔性电子领域的新兴聚合物：从结构基板到功能层与封装材料

柔性电子技术的创新从根本上由先进聚合物材料驱动，这些材料为下一代器件提供了所需的机械柔韧性、电气稳定性及加工适应性。这些聚合物在柔性架构中实现三项核心功能：作为结构基板、电子层与介电层，并通过封装与胶粘剂系统发挥加工助剂的作用。前一节考察了更广泛的专利格局，并重点介绍了 2015 至 2025 年间塑造柔性电子产业的主导技术与机构；本节则将焦点转

向过去五年（2020 至 2024 年）中日益突出的新兴聚合物材料，相关热度可在期刊与专利公开数据（图 42A 和图 42B）中体现。

图 42A 显示，功能与介电聚合物在柔性电子领域占据主导地位。结构聚合物位列第二大类，而封装与粘合聚合物虽然占比较小，但同样不可或缺。图 42B 通过将期刊论文与专利族中的具体聚合物与其功能角色相对应，进一步细化了这一分类，展示了各类材料如何在柔性电子设备中为结构、功能、介电及封装应用做出贡献。

6.2.1. 结构聚合物——基板与支撑系统

结构聚合物作为机械骨架、柔性载体及电绝缘支撑，使电路能够在柔性、可穿戴及可变形设备中实现弯曲、成型与集成。在所检出的聚合物中，大部分属于已经在柔性电子领域广泛应用的成熟材料，通常作为基板、机械增强材料或绝缘层，用于保障器件的耐久性与结构完整性。

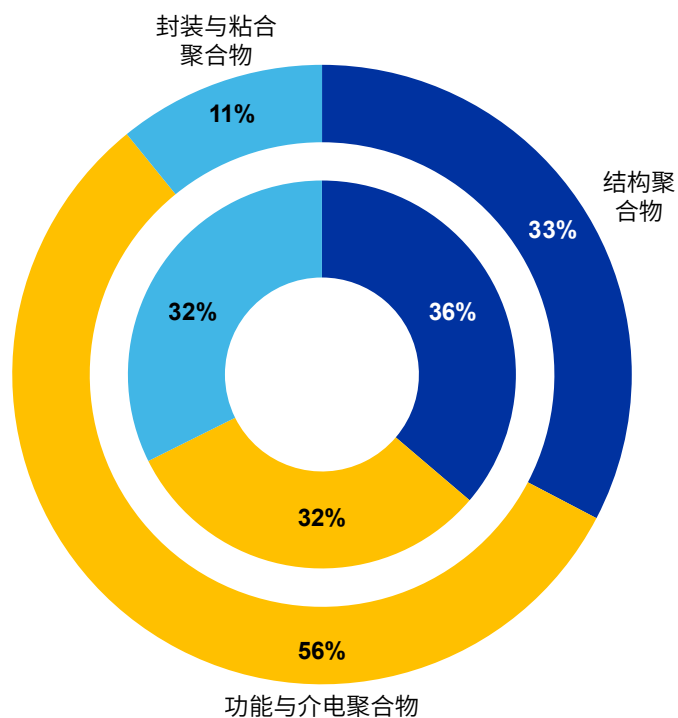
在期刊数据中，结构聚合物材料主要由纤维素、PLA 及壳聚糖等生物基材料构成，同时还包括聚四亚甲基醚二醇 (PTMG) 及聚乙二醇二丙烯酸酯等软段候选材料。这种分布特征表明，当前研究重点在于兼具可持续性、生物降解性及机械适应性结构的聚合物。近期相关研究取得了多项进展。纤维素纳米纤维被用作可生物降解、可印刷的基板，能够支持高分辨率导电图案化。⁵⁶⁷ PLA 薄膜可满足无需 ITO、低温工艺的 OLED 制备需求，⁵⁶⁸ 而源自 PLA 的聚氨酯则提升了韧性并具备自修复能力。⁵⁶⁹ 基于 PTMG 的聚氨酯弹性体凭借高抗拉强度、优异的拉伸性及基于动态键的自修复能力，可用于拉伸导体与应变传感器领域。^{570, 571}

相比之下，专利则聚焦于 PVC、SBS、PVA、TMS PDMS、PVP、PVDF、PCL 及 PEVA，这些材料因其可量产与已验证的性能而被选用。PVC 通过添加稳定剂进行优化，可制备热稳定性良好的保护薄膜。⁵⁷² SBS 在等离子体处理的弹性体叠层结构中作为可拉伸基板材料出现，⁵⁷³ 而 PCL 正逐渐应用于可生物降解的层压基板。⁵⁷⁴ PDMS 与 TMS-PDMS 仍是可拉伸绝缘材料的基础材料，相关专利广泛覆盖全印刷薄膜晶体管 (TFT) 系统及三维 (3D) 印刷电路架构。^{575, 576} PEVA 的应用范围正通过抗菌薄膜与光学透明薄膜不断拓展。^{577, 578} 总体而言，这些专利布局凸显了工业界对可靠、可规模化材料体系的偏好，这与学术界推动更环保、可降解及自适应结构方案的趋势形成互补。

6.2.2. 功能与介电聚合物——电子性能

功能与介电聚合物（图 42B）是柔性电子的核心材料体系，通过介电稳定性、导电性或特种加工优势赋予电子功能。相较于专利 (32%)，期刊论文占比更高 (56%)，这很可能反映了该领域对基础研究的高度重视——在实现大规模技术商业化之前，材料优化与构效关系研究是必要的前置基础。在该类别中，有几种材料体现了当前的研究方向。聚乙烯醇 (PVA) 凭借其介电性能与水溶性加工能力脱颖而出，为新型器件架构提供了可能。导电聚合物是另一大类。PEDOT 凭借光刻图案化与交联高导电性配方等进展，持续展现出工业应用价值。⁵⁷⁹ PANI 通过热稳定和化学稳定薄膜方面的专利持续保持其重要性；⁵⁸⁰ 而 PPy 则受益于成熟的氧化与电化学合成工艺，在传感器与能源器件中仍被广泛应用。近期研究进展包括引入 PPy/PANI 协同导电网络的生物基柔性基板，⁵⁸¹ 以及制备高导电性 PPy 水性分散液的方法。⁵⁸²

A



B

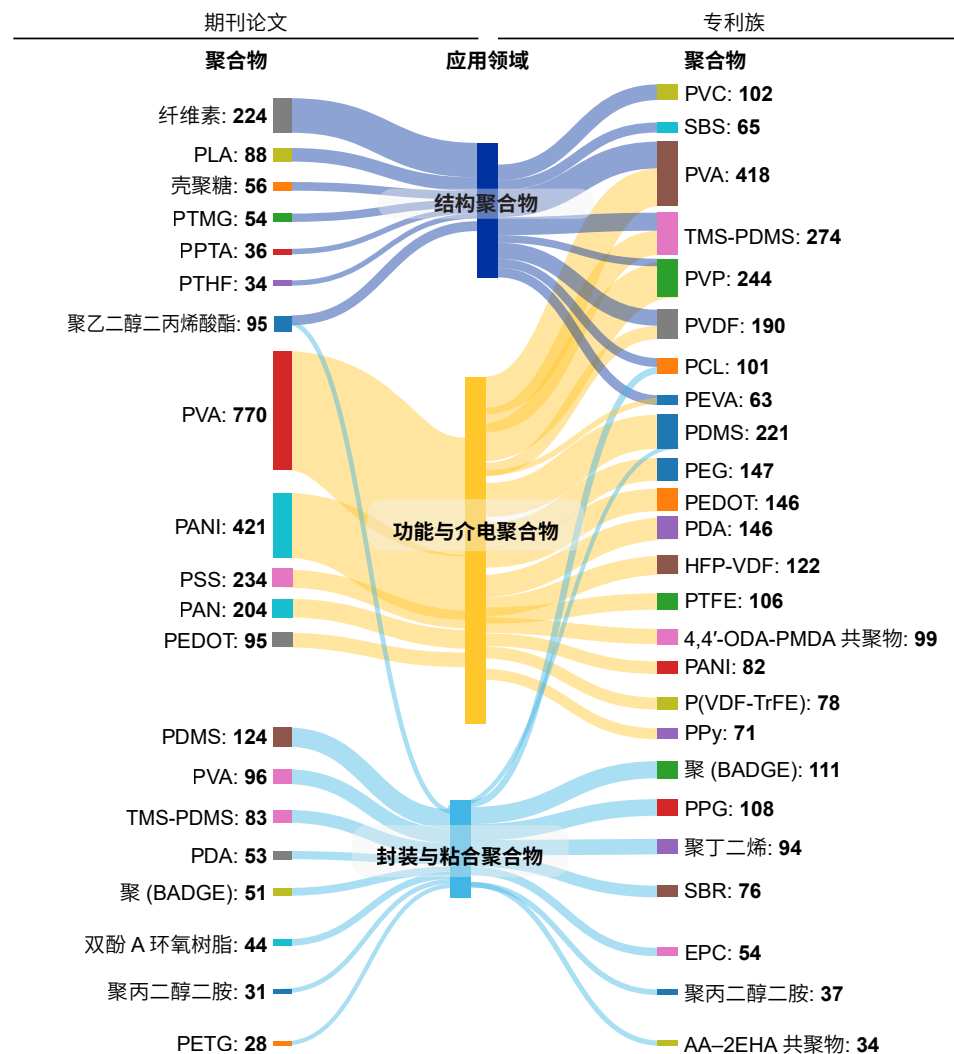


图 42. (A) 按聚合物在柔性电子产业中的作用分类的专利族（内圈）与期刊论文（外圈）分布图。(B) 三大聚合物类别（结构聚合物、功能性与介电聚合物、封装与粘合聚合物）中领先新兴聚合物（按增长率排序）的桑基图。数据涵盖 CAS 内容合集中 2020 至 2024 年期间的期刊论文与专利族。

PDMS 与 TMS-PDMS 等高性能弹性体，展现出从科研到专利转化的良好转化态势，这得益于其低介电损耗、机械顺应性及界面可调性，在压电与摩擦纳米发电机领域尤受关注。⁵⁸³ 含氟聚合物（PVDF、PTFE）因其电活性、柔韧性与化学稳定性，同样展现出强劲的专利活跃度，成为柔性压力传感器与纳米发电机的关键材料。⁵⁸⁴

尽管成熟材料在现有研究体量上占据主导地位，但该类别中新兴聚合物的涌现，预示着柔性电子技术未来发展的重要方向。其中，PDA 作为一种多功能材料表现尤为突出，广泛应用于功能层、介电材料及封装体系，代表了一类新型的仿生多功能聚合物。⁵⁸⁵ 此外，特种共聚物如 4,4'-二氨基二苯醚与均苯四甲酸二酐的共聚物 (4,4'-ODA-PMDA) 亦作为高性能材料发挥着关键作用。专利证据进一步印证了其应用价值——例如，4,4'-ODA-PMDA 共聚物在柔性 OLED 显示屏中用作柔性、⁵⁸⁶ 热稳定的基板，并在微电子系统中用作高稳定性绝缘层与高可靠性薄膜。⁵⁸⁷

6.2.3. 封装与胶粘剂系统——保护与组装

封装与胶粘剂材料属于高度专用化体系，对器件的保护、组装及长期可靠性至关重要。该类别中的材料选择严格受制于加工兼容性、固化动力学及反复变形条件下的耐久性要求。分析结果表明，部分材料——尤其是 PDMS、环氧树脂及聚丙二醇二胺——在期刊论文与专利族中均高频出现，显示出从学术研究到产业应用的良好转化势头。

就学术期刊而言，丙烯酸树脂（如聚乙二醇二丙烯酸酯）与有机硅基体系（如 PDMS 和 TMS-PDMS）被广泛应用于光学粘接、薄膜层压及可返工显示器件组装。有机聚硅氧烷基压敏胶 (PSA) 配方的创新，展现出高温下增强的机械模量以及对有机硅橡胶的优异粘附性。这些进展与电子产品及热封应用的性能需求高度契合。^{559, 588} 丙烯酸压敏胶正通过高分子量聚丙烯酸酯与丙烯酸低聚物持续迭代升级，这些材料具有可调的粘附性、透明度及耐热性。⁵⁸⁹ 总体而言，这些压敏胶体系是可折叠 OLED、柔性触摸屏及薄膜封装技术的关键配套材料。聚多巴胺 (PDA) 的出现及其多样化的功能应用，表明业界对多功能胶粘剂兴趣持续攀升。近期多项研究进一步证实了这一趋势，包括开发用于应变传感器、兼具高粘附性与韧性的 PDA@PEDOT 纳米复合水凝胶，⁵⁹⁰ 以及能够实现热塑性材料与金属混合组件中强力结构粘接的化学改性 PDA 涂层。⁵⁹¹

此外，成熟的工业化材料体系在学术界和产业界均有广泛研究。就学术期刊而言，双酚 A (BPA) 等环氧树脂体系的研究涉及封装与结构粘接，反映了学术界对优化环氧网络力学性能与固化行为的持续关注。⁵⁹² 相比之下，聚丁二烯与乙烯-丙烯共聚物 (EPC) 等弹性体改性剂主要出现在专利文献中，其在柔性器件组装中的工业价值在于增强韧性、应力消散及长期机械可靠性。^{593, 594} 这些材料在柔性器件制造中发挥着关键作用，能够提供防潮防氧的环境保护、分散机械应力，并实现牢固的层间粘接。

归根结底，柔性电子器件的性能取决于基板、功能层与介电层，以及封装/粘合界面的协同作用。不同材料在热性能、耐溶剂性、界面附着力及热膨胀系数等方面的差异，意味着即使是高性能材料，在组合使用时也可能失效。这种相互依赖性解释了为何新兴聚合物在转化应用中始终存在差距，也解释了为何专利研究仍持续聚焦于那些特性明确、性能稳健且能够实现可靠集成的化学体系。

6.3. 特定应用的聚合物分布

为了解各类聚合物在整个柔性电子领域中的发展演变趋势，我们分析了 2020 至 2024 年的专利文献，以识别关键应用领域与新兴材料趋势。相关研究结果总结于图 43 中，该图展示了按应用分类的专利分布，并突出呈现了各类别中聚合物的增长特点。

聚合物材料的品类专业化特征与应用落地趋势，反映了该领域正迅速向场景定制化聚合物结构演进。柔性电路仍是最大的应用类别，其中聚酰胺酸-聚醚与聚酰胺处于领先地位，这得益于其热稳定性、耐弯折性及可靠的介电性能——这些特性对于多层电路制造至关重要。^{595, 596} 含氟聚合物因其具有低介电常数与极小的信号损耗，在柔性电路中主要用作高频介电层。另外它们凭借优异的耐化学性、防潮性能及长期环境耐久性，还可用作保护性外层薄膜。⁵⁹⁷ 丙烯酸聚合物具备可图案化与可控粘附性，适用于精细特征光刻工艺，可满足多层堆叠制备需求。苯氧基树脂虽因韧性及层间粘附性而备受重视，但其应用扩展相对有限。该类材料增速适中 (12%-52%)，反映出柔性电路制造产业已趋于成熟。在该领域，聚酰亚胺等材料已主导工业生产体系。

相比之下，用于显示器与电致发光 (EL) 器件领域的聚合物材料是增长最快的品类之一 (20%-94%)，表明用于光学层、发光层及封装层的材料正不断进步。聚氨酯-丙烯酸聚合物体系巧妙地解决了机械强度与光学性能之间的经典权衡难题。聚氨酯提供结构完整性与基板粘附力，而丙烯酸则带来高透明度与抗紫外线性能。^{598, 599} 聚硅氧烷-聚醚组合为柔性显示材料提供了均衡的结构设计。聚硅氧烷赋予材料柔韧性、热稳定性与光学透明度，而聚醚链段则增加了低温韧性与顺应性弹性，使该体系成为兼具高回弹性及高透明度的显示层的理想选择。⁶⁰⁰ 丙烯酸酯封端聚醚多元醇体系可制备固化迅速、光学透明的胶粘剂/薄膜，同时保持顺应性弹性与器件兼容性——非常适合用于柔性 OLED 封装及多层显示器粘接场景。⁶⁰¹

可穿戴电子设备领域的新兴聚合物发展势头最为强劲，其增长率高达 10% 至 109%。增长最快的类别是含氟聚合物，这得益于其卓越的介电性能、耐化学性，以及在摩擦电器件与压电器件中的优异表现。⁶⁰² 聚氨酯与聚酰胺紧随其后，这得益于它们的弹性、韧性，以及与织物集成、可拉伸及皮肤接触应用的兼容性。^{603, 604} 聚酯与聚噻吩属于下一层级，由于其尺寸稳定性、可印刷性以及在柔性导电层与半导体层中的成熟应用，呈现出稳步增长的态势。^{605, 606} 在可穿戴设备领域，含氟聚合物、聚酯、聚醚多元醇、聚酰亚胺、聚硅氧烷、丙烯酸聚合物及聚噻吩等聚合物占据主导地位，这是因为它们兼具生物相容性、可拉伸性及低温加工兼容性。这些材料应用日益广泛，反映了健康监测、软体机器人、智能纺织品及电子皮肤领域的快速扩张。基于纳米发电机的可穿戴设备是一个值得关注的细分方向，其高度依赖含

氟聚合物（如 PVDF、PTFE）和聚酯所固有的摩擦电与压电性能，同时采用弹性聚硅氧烷与热稳定性聚酰亚胺。⁶⁰⁷ 含氟聚合物基纳米发电机材料的强劲增长，与业界对自供能可穿戴系统日益增长的兴趣相吻合。

传感器的应用涵盖工业应变测绘、环境与化学传感、触觉机器人接口以及生物医学监测等多个领域，导致各类聚合物的增长率差异显著。该类别必须适应多种信号转换机制，因此新兴聚合物材料的增长率范围在 10% 至 74% 之间。聚醚多元醇处于领先地位（约 74%），这得益于其低玻璃化转变温度 (T_g) 以及富含醚键的主链，可形成柔软、透气的网络结构，非常适用于应变、离子及生化传感。^{608, 609} 紧随其后的是含氟聚合物，它们作为低介电常数 (k)、低损耗的介电材料，适用于电容式、压电式及高频传感器。聚酰亚胺与聚硅氧烷占据下一层级——聚酰亚胺为恶劣环境传

感提供热稳定性与介电稳定性，聚硅氧烷则为皮肤贴附式器件提供弹性与生物相容性。聚酯因其尺寸稳定性与可印刷性增长稳健。总体而言，增长最快的传感器材料是那些能够实现极性可调、质地柔软以及介电行为可控的材料。

在晶体管与半导体应用领域，增速较为有限（4% 至 34%），这是因为该领域依赖于成熟的共轭半导体（聚噻吩）及定型的介电材料（聚酰亚胺、含氟介电材料）。这些材料的电子结构、微观形貌及界面能态均经过长期优化，以支撑载流子迁移率、稳定性及制备工艺兼容性。仅聚氨酯与聚烯烃展现出显著的增长：聚氨酯具有机械自适应的嵌段结构，可支持柔性封装并有效缓解应力；聚烯烃则凭借其化学惰性、低介电常数的烃类主链，主要用作简单的绝缘与钝化层材料。⁶¹⁰ “其他”类别占比14%，涵盖智能、光学及通信设备等领域，其材料增长与特定功能需求密切相关。

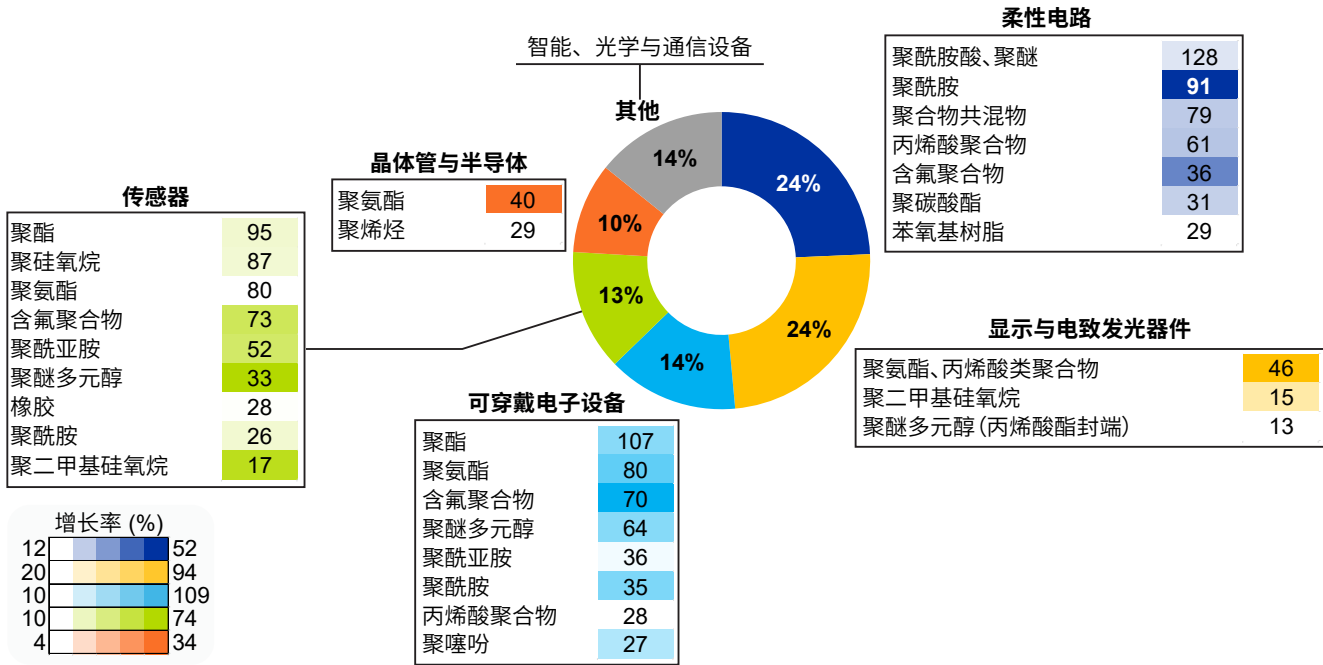


图 43. 聚合物领域中新兴的柔性电子应用（圆环图）。热力图展示了新兴聚合物类别的分布，颜色基于增长率编码。数据涵盖 CAS 内容合集中 2020 至 2024 年期间的专利文献。

纵观整个柔性电子领域，增长最快的聚合物类别——聚硅氧烷、聚氨酯、聚酯、含氟聚合物、聚醚多元醇及聚噻吩——正是那些能够实现可拉伸性、皮肤贴合性、轻量化可穿戴设计及有机半导体性能的材料。相比之下，聚酰亚胺与聚酰胺等成熟体系的增长率较低，这与其在柔性电路与显示器制造中的既定角色相符。这些趋势表明，柔性电子领域的扩张正日益集中于支撑下一代可穿戴、可拉伸及自供能平台的材料。为补充对新兴技术这一类别层面的全景描述，以下各节将对主要聚合物（2015 至 2024 年）进行更深入的分析。

6.3.1. 柔性电路

该应用涵盖柔性电路与可印刷电路，依托聚合物基板与聚合物基墨水，以实现增材制造与印刷工艺。在这些体系中，聚合物提供了下一代电路设计所必需的机械柔韧性、可印刷性及导电/介电性能。**图 44** 展示了期刊论文与专利文献中主要聚合物的分布情况。对这些数据集的分析表明，主导探索性研究的材料与已实现工业成熟度的材料之间存在明显差异。

聚酯类材料呈现出成熟商业平台的典型特征：研究热度适中，专利布局数量庞大。得益于其优异的力学强度与光学性能，PET 被广泛应用于柔性显示器、印刷光伏及薄膜电子电路领域。当前的创新主要集中在提升表面均匀性、尺寸稳定性、阻隔层性能及光刻兼容性方面。^{611, 612} 基于聚硅氧烷的聚合物（包括 PDMS 与 TMS-PDMS）在期刊与专利活动方面表现均衡。这些聚合物凭借其机械柔韧性、光学透明性、生物相容性及与软光刻工艺的兼容性，成为柔性电子领域的基础材料。⁶¹³

乙烯基聚合物研究热度较高，尤其是 PVA，在转印印刷与三维集成电子产业中作为水溶性基板或牺牲层。大量研究表明，水溶性 PVA 薄膜是顺应性电子器件与瞬态电子器件的有效支撑材料。⁶¹⁴ 然而，与 PET 相比，PVA 的专利活跃度仅处于中等水平，这反映了其工业应用存在明显短板：如对湿气敏感，长期稳定性不足。聚苯乙烯磺酸钠 (PSS) 期刊与专利中均有广泛报道，反映了其作为印刷电子领域的离子/导电添加剂，应用十分成熟。⁶¹⁵ PVP 与聚丙烯酸主要出现在专利中，用作表面改性、分散及界面工程方面的功能支撑层。^{616, 617}

就功能材料而言，PEDOT（通常为 PEDOT:PSS）与 PANI⁶¹⁸ 等导电聚合物主要出现在专利申请中。这些体系是印刷导体研发的核心，目前正致力于提高其导电性、环境稳定性及溶液加工性能，反映出这类材料技术成熟度中等，且材料体系本身正处于持续优化迭代的进程中。

天然聚合物（包括纤维素与壳聚糖）在期刊与专利活动方面保持均衡，这源于可持续电子产品领域对生物基、可生物降解聚合物的研发需求。虽然纤维素不是本征导电聚合物，但它可作为可生物降解的基底或结构基体，^{567, 619} 当与碳纳米管、石墨烯或金属纳米线等填料复合时，便可获得电学功能。⁶²⁰ 这些材料非常适用于一次性或生态设计型器件，但目前尚无法替代高性能功能性聚合物。

总体而言，期刊与专利分析所呈现的趋势表明，柔性可印刷电子产品依赖于广泛多样的聚合物体系。从商业化根基深厚的基板材料（如聚硅氧烷、聚酯），到研究密集型功能材料（导电聚合物、乙烯基聚合物），再到新兴的生物基替代材料，不一而足。这种分布为下一代柔性电子技术的战略材料选择与研发投资提供了指导方向。

6.3.2. 显示与电致发光器件

在显示与电致发光 (EL) 器件领域，多层堆叠结构对光学、机械及加工性能提出了严苛要求，极大限制了聚合物的选择范围。因此，工业界的创新主要围绕聚酯、聚酰亚胺及聚酰胺酰亚胺 (PAI) 等成熟聚合物展开。住友化学、东丽工业、阿科玛、东洋纺及 LG 化学等公司更倾向于在现有基础上进行渐进式改良，而非引入全新的材料类别（如图 41 所示）。技术进步侧重于酰亚胺化控制、表面硬度、抗皱性及散热性能优化等方面，表明行业正在寻求能在热循环与机械应变下保持稳定的基板。⁵⁵⁰⁻⁵⁵² 这一成熟度与专利格局相吻合：在专利申请中，商业应用已成熟的聚合物（PET、聚酰亚胺）占据主导地位，而 PEDOT:PSS 等新兴的混合离子-电子导电材料虽研究活跃，但商业转化较为有限。

图 45 展示了期刊与专利文献中的聚合物分布情况。聚酯（尤其是 PET）在专利领域占据主导地位，这反映了其作为显示与电致发光 (EL) 器件制造领域的可靠基板，地位长期稳固且技术成熟。PET 具有优异的尺寸稳定性和光学透明度，且与卷对卷工艺及多层器件结构具有良好的加工兼容性。近期进展表明该材料仍在持续发展，例如用于增强阻隔性能的载银 PET 薄膜、⁶²¹ 具有抗开裂结构的轻质 PET-气凝胶复合材料，⁶²² 以及可生物降解的 PET 共聚酯变体。⁶²³ 凭借这些创新，PET 作为技术成熟且符合工业标准的基板，其地位得到了进一步巩固。

导电聚合物在学术研究与专利申请方面呈现出显著的差异。PEDOT 与聚对苯乙炔 (PPV) 在期刊论文中大量出现，但专利数量较少（尤其是

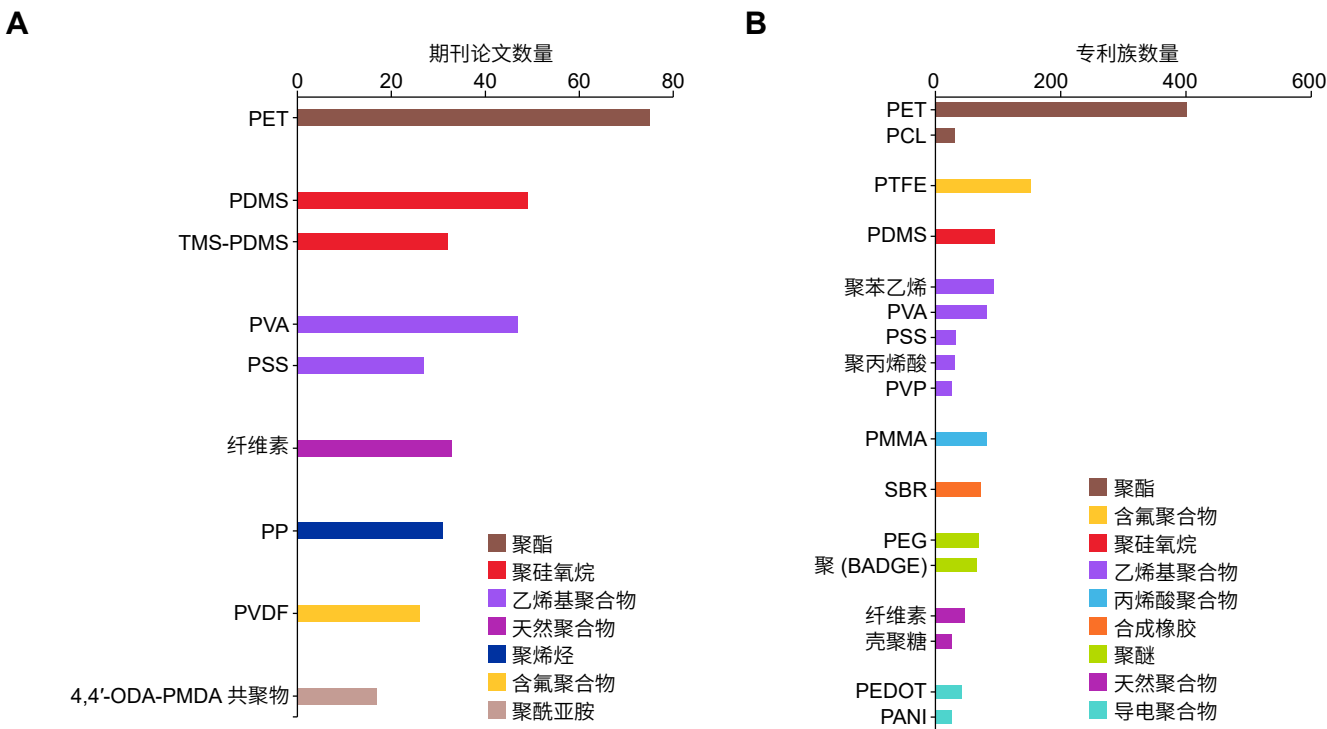


图 44. 聚合物数据集中柔性电路相关 (A) 期刊论文与 (B) 专利族中的聚合物分布。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2024 年期间的期刊论文与专利文献。

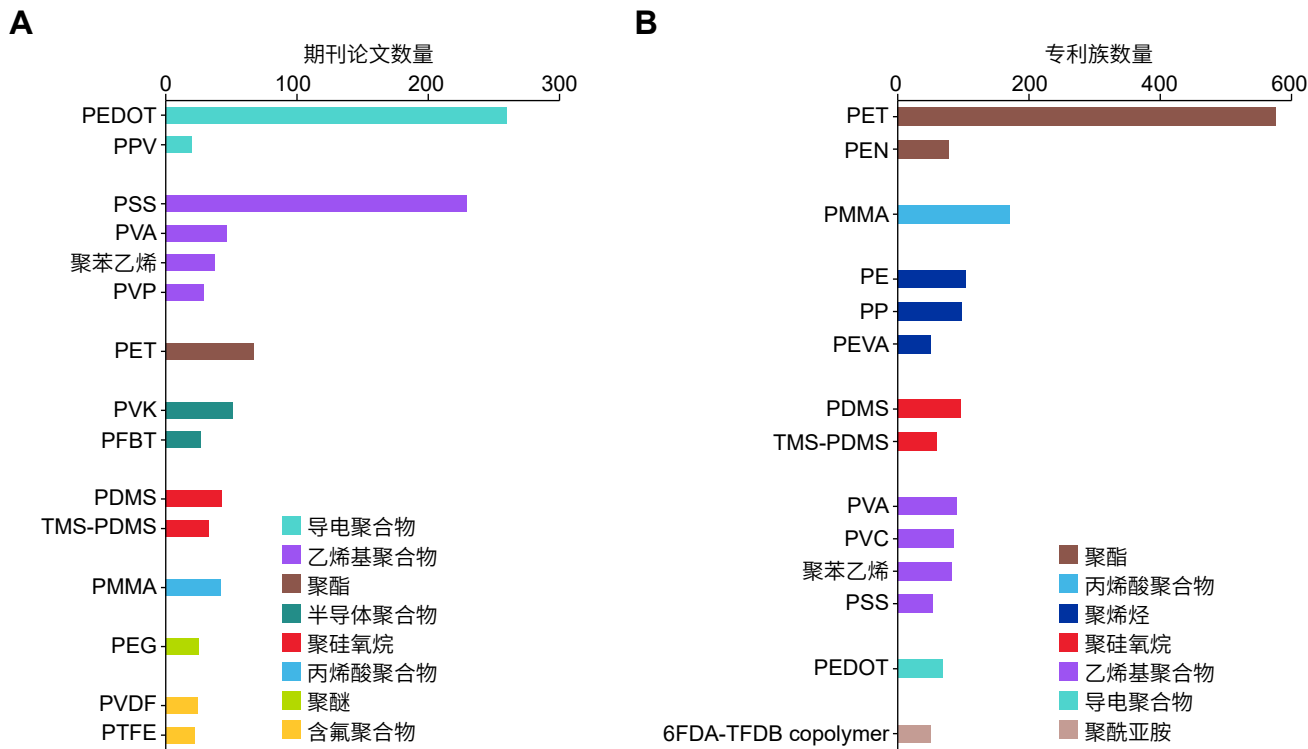


图 45. 聚合物数据集中显示与电致发光 (EL) 应用相关的 (A) 期刊论文与 (B) 专利族中的聚合物分布。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2024 年期间的期刊论文与专利文献。

PEDOT)，表明在显示与 EL 应用领域，它们目前仍主要属于研究驱动型材料。聚 N-乙烯基咔唑 (PVK)、聚 (9,9-二辛基芴-交替-苯并噻二唑) (PFBT) 等半导体聚合物则在学术界展现出极高的研究活跃度。这些材料主要用作空穴传输层、发光基质及离子导体⁶²⁴，因其具有可调的电子结构与溶液加工性能而备受关注。然而，工作应力下的不稳定性、有限的器件寿命以及大面积均匀性方面的挑战，阻碍了其大规模工业化应用。

PVA、PMMA、聚苯乙烯、PDMS 及 TMS-PDMS 等聚合物在学术研究与专利活动方面表现均衡。这些材料可用作介电层、光学平滑层、封装薄膜、柔性波导或图案化介质。由于折射率控

制、表面粗糙度及附着力对 OLED 的效率和稳定性至关重要，该领域的学术研究热度不减。这些材料稳定的专利申请活动表明，工业界正持续致力于优化其可印刷性、光学质量、界面控制，以及与卷对卷和柔性加工工艺的兼容性。⁶²⁵

在专利活动占主导的另一类材料中，主要涉及聚萘二甲酸乙二醇酯 (PEN)、PE、PP、PVC、PEVA 及 PTFE 等聚合物。这些材料在商用显示器制造中充当着结构基板、阻隔层及支撑薄膜的关键角色。^{626, 627}其密集的专利布局，不仅反映出它们已深度融入工业生产流程，也表明工业界正持续围绕其防潮阻隔性能、热机械稳定性、层压可靠性及多层复合结构开展技术改进。

最后，6FDA-TFDB 共聚物等聚合物则呈现出专利分布占优的特征，且相关研究高度聚焦。凭借在透明高玻璃化转变温度 (T_g) 基板、可折叠设备覆盖膜及铁电电材料中的应用，它们已成为下一代显示技术的关键赋能材料。^{628, 629} 其较高的专利可见度反映了产业界在透明聚酰亚胺配方领域的投资竞争尤为激烈；与此同时，现有研究持续优化材料的光学清晰度、耐热性与抗形变能力，以适配柔性及曲面显示器应用。

6.3.3. 可穿戴电子设备

可穿戴电子设备，包括可穿戴传感器、电子皮肤、体表贴合式器件及可穿戴纳米发电机，是柔性电子领域中对生物相容性要求最为严苛的细分领域。这类聚合物的选择，主要是为了在不牺牲电子功能的前提下，确保与人体接触时的安全性、舒适度及稳定性。图 46 展示了这些应用中聚合物类别的广泛分布，反映了该领域对解决生物集成基础问题的高度重视。该领域的材料创新主要围绕实现与人体组织相匹配的力学性能、生物相容性界面，以及在长期与人体接触过程中保持稳定性能展开。

乙烯基聚合物因其可调的化学结构、机械柔软性以及与水凝胶工程的兼容性，在生物集成柔性电子领域的期刊论文与专利文献中持续占据主导地位。在学术研究中，聚乙烯醇 (PVA) 占据主导地位。这得益于其能够制备出兼具生物相容性、离子导电性及匹配人体组织力学性能的水凝胶，广泛应用于心电图 (ECG)/肌电图 (EMG) 监测及皮肤界面传感器领域。⁶³⁰ PVA 与丙烯酰胺-N,N-亚甲基双丙烯酰胺共聚物 (Acrylamide-MBAA) 网络结构，可提供贴合式电子皮肤所需的自修复性、粘附性及水合稳定性。^{631, 632} 此外，在制备双网络水

凝胶时，常将聚丙烯酰胺 (PAM) 和聚苯乙烯磺酸钠 (PSS) 与 PVA 及 PEDOT 配合使用。⁶³³ 这些体系代表了新兴的生物集成架构，其设计旨在适配皮肤的力学特性，并在人体运动过程中保持可靠的电接触。

PEDOT、聚苯胺 (PANI) 及聚吡咯 (PPy) 等导电聚合物在期刊与专利活动中的活跃度相当，表明其已成功从实验室走向商用器件。这些 π 共轭聚合物在机械形变下仍能保持导电性，这对生理监测至关重要。PEDOT 具有混合离子-电子传输能力，因此特别适用于生物界面。⁶³⁴ PSS 作为聚电解质掺杂剂，构建了连接电子器件与离子生物系统所必需的混合传导机制，从而实现了能够适应体表佩戴应用动态力学环境的耐拉伸电极与传感薄膜。⁶³⁵

弹性体聚硅氧烷，尤其是 PDMS 与 TMS-PDMS，在专利领域占据主导地位，同时持续受到学术界关注。其 Si-O-Si 主链提供了超低模量、可拉伸性、化学惰性及热稳定性，从而确保了长期的舒适性与机械顺应性。基于 PDMS 的体系可作为软封装材料、耐汗保护层，以及用于可穿戴传感器、电子皮肤及能量采集器件中导电互连的可拉伸基体。^{636, 637} 含氟聚合物为可穿戴设备提供了关键的能量采集功能。PVDF 与 PTFE 在专利活动中表现活跃，表明这些材料已成功从基础研究转化为商用纳米发电机。PVDF 仍是最主流的压电聚合物，相关研究聚焦于通过纳米填料、共聚及工艺优化来提升性能，如 PVDF/MXene 纳米纤维⁶³⁸ 与石墨烯增强型 PVDF 薄膜所示。⁶³⁹ PTFE 具有极强的负摩擦电性与耐久性，可支持长期的电荷生成，这一点已在纳米织构化 PTFE-SiO₂ 纳米纤维及耐低温 PTFE 织物摩擦纳米发电机 (TENGs) 中得到验证。⁶⁴⁰

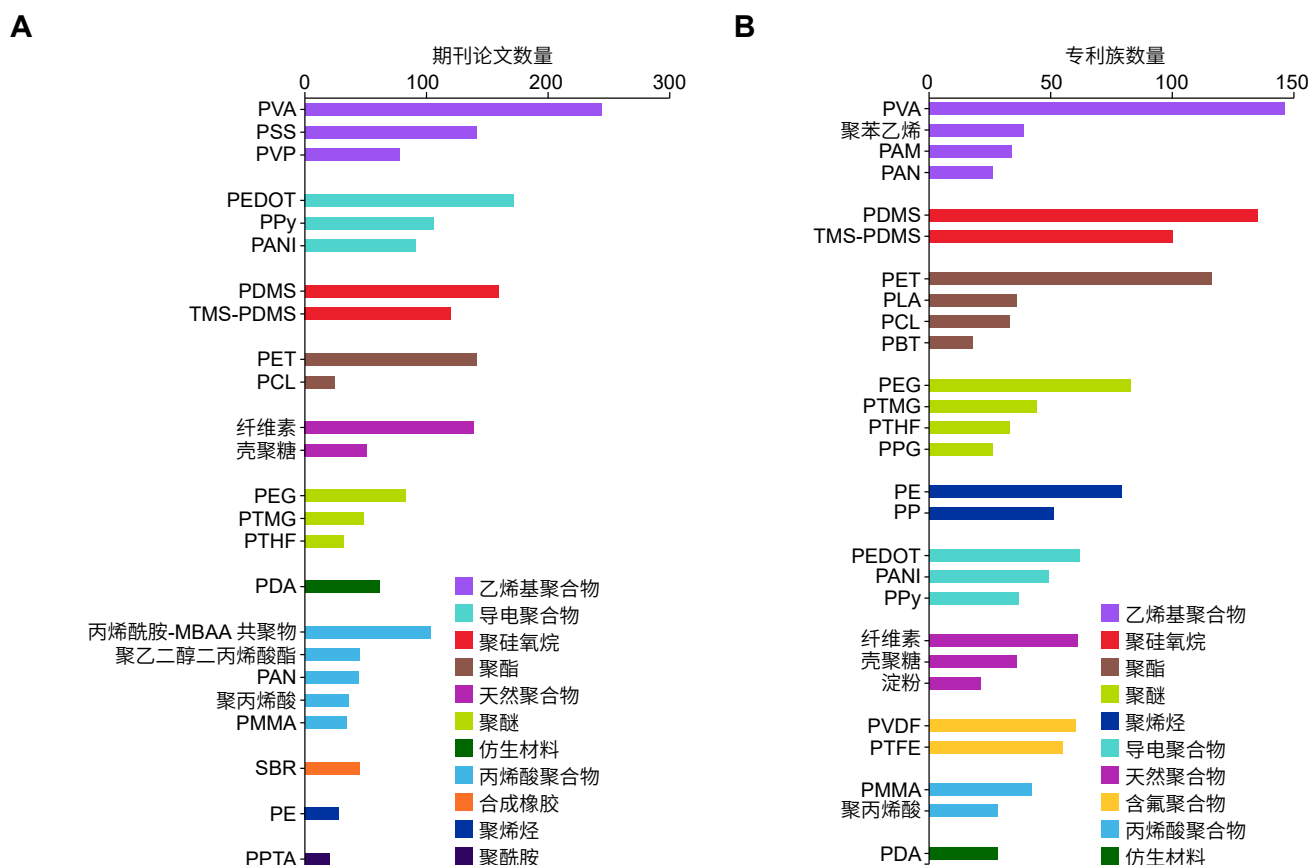


图 46. 聚合物数据集中可穿戴电子设备应用领域 (A) 期刊论文与 (B) 专利族中的聚合物材料分布。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2024 年期间的期刊论文与专利文献。

在可穿戴电子设备领域，首选材料需兼具柔软、生物相容、可拉伸、贴合接触及稳定的电学性能。材料选择时重点考虑其能否匹配皮肤级的力学特性、在持续身体运动中保持舒适性，并与生物组织形成低阻抗界面。具备离子或混合导电性、自粘附性、耐湿性，且在反复形变下仍能保持长期耐久性的材料体系，展现出最强劲的研究势头。在工业界，具有稳定机械顺应性、环境稳定性及与可规模化制造工艺兼容性的材料主导着专利活动。总体而言，可穿戴电子设备优先选用能够与人体可靠交互的聚合物，在兼顾机械柔软性、生物相容性与结构稳定性的同时，能以可变形的结构，实现传感、能量采集或通信功能。

6.3.4. 传感器

随着传感需求从简单的机械应变检测扩展到生化与环境监测，柔性传感器的开发愈加依赖于可调控的聚合物化学体系，以实现柔韧性、导电性、稳定性及对分析物的选择性响应。**图 47** 绘制了 2015 至 2024 年间推动该领域发展的主要聚合物类别及其具体材料，凸显了处于研发前沿的响应材料与商业化成熟材料两大发展分支。

图 47A 与 47B 的分析显示，乙烯基聚合物（PVA、PVP）总体增长强劲，在学术文献中领先，且专利热度也较高。PVA 在研究领域的领先地位源于其水凝胶特性，适用于湿度、pH 及生物

传感等应用。⁶⁴¹ PVP 在研究领域同样表现突出，而 PSS 与 PVC⁶⁴² 等乙烯基聚合物则多见于专利中，说明它们主要用在离子传导层及封装层。

聚硅氧烷（PDMS 与 TMS-PDMS）在该领域的专利文献中占据主导地位。这类材料应用广泛，表明其凭借光学透明性、透气性及易加工性，已成为微流体与柔性传感器的优选基板材料。⁶⁴³ 导电聚合物同样吸引了大量研究投入，尤其是 PEDOT 与 PPy。与 PANI 一道，PEDOT 与 PPy 在专利领域同样表现活跃，表明导电聚合物已成功从实验室验证阶段转化为商用传感元件，尤其在电化学与气体传感器领域。^{644, 645}

丙烯酰胺-MBAA 共聚物与聚丙烯酸的相关研究十分活跃，表明业界正日益关注刺激响应材料，这类材料在接触目标检测物时，性能会发生可量化的变化。这些聚合物有助于开发具有自适应能力的响应型传感架构^{646, 647} 及应变传感器。⁶⁴⁸ PET 在期刊论文与专利文献中均呈现强劲增长，反映了其作为商用传感器系统中稳定可靠基板的重要作用。⁶⁴⁹

PVDF 与 PTFE 在研究与专利领域均有出现，这与柔性传感器的性能需求密切相关。PVDF 具有强烈的压电响应与机械柔韧性，以实现高效信号转换；⁶⁵⁰ 而 PTFE 则具备卓越的化学惰性与热稳定

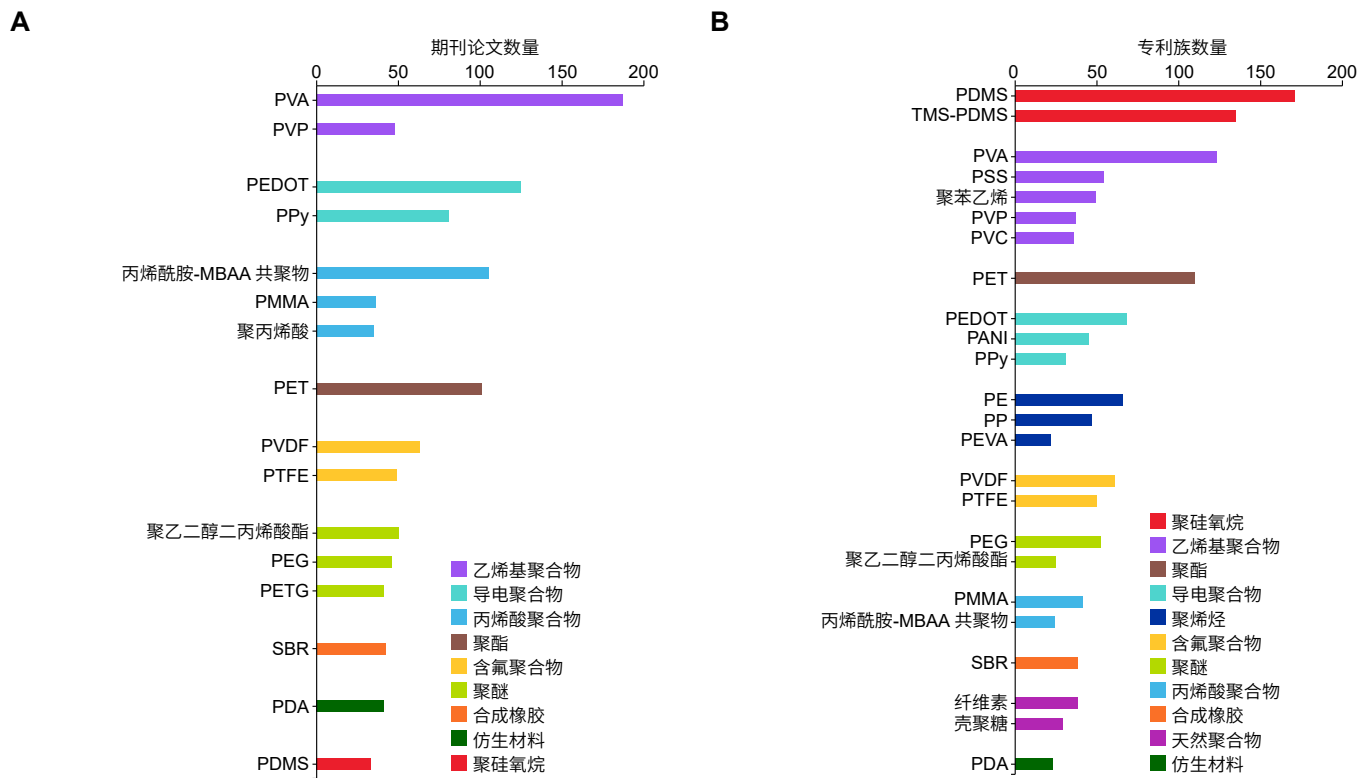


图 47. 聚合物数据集中传感器相关 (A) 期刊论文与 (B) 专利族的聚合物物质分布。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2024 年期间的期刊论文与专利文献。

性，确保在恶劣或多变环境中的可靠传感。⁶⁵¹ 这些材料的出现，契合了各类传感环境中对压电或化学惰性材料的应用需求。

纤维素与壳聚糖的应用，凸显了该领域正在向可持续及可植入传感器技术方向发展，表明下一代传感器不仅需具备高性能，还必须满足日益严苛的生物相容性与环境可持续性要求。^{652, 653}

总体而言，传感器领域的发展格局表明，具备跨应用通用性的材料（而非仅针对特定设备的专用材料）往往最为成功。PDMS、PVDF、PVA 与 PEDOT 等聚合物正是这一趋势的典型代表，他们兼具多种核心功能：机械顺应性、能量采集能力、生物相容性传感特性及可靠的导电性。从期刊与专利的分布规律来看，尽管成熟技术仍依赖于高性能的既有聚合物，但增长最快的却是那些能在单一结构中同时具备柔韧、生物相容、电子响应及环境稳定性的材料。这种多功能的融合预示着行业正在向集成化聚合物体系转变。未来的技术突破将取决于能够适应多样化传感需求的化学体系——从柔软的皮肤界面到机械强度高的环境传感器——同时满足各应用场景对特定性能的要求。

6.4 新兴制造工艺与规模化路径

在本分析中，我们考察了用于柔性电子领域聚合物成型与功能化的新兴加工路径。在聚合物基柔性电子专利全景中，我们识别出那些凸显柔性聚合物材料制造策略与可规模化生产工艺最新进展的文献。2020 至 2024 年的专利动态（图 48）表明，整体成形、涂层技术与结构化制造领域的技术进步，正在重新定义聚合物基柔性电子的制造路径。

整体成形与塑型工艺可将聚合物浇铸、模塑或图案化为薄型、柔性的几何构型，从而保持其固有的柔软性与弹性。此类工艺包括挤出成型、热压成型、热成型及压延等，对于生产支撑柔性器件的大面积薄膜、片材与模塑基板至关重要。这些工艺的广泛应用，反映出那些具有可靠熔体行为与高通量兼容性的聚合物，在稳定性与可规模化方面的优势。聚乙烯醇 (PVA) 凭借优异的成膜能力、顺畅的熔体加工性能以及与大面积挤出和压延工艺的兼容性，以约 69% 的高增长率领跑该领域。⁶⁵⁴ 丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物 (ABS) 紧随其后，凭借其高熔体强度、抗冲击性及尺寸稳定性⁶⁵⁵，可通过挤出或热成型加工为柔性模块的坚固外壳与支撑框架。PBAT 与 乙烯-1-辛烯共聚物呈现适度增长，其熔体加工性能洁净，且刚度与弹性可调，适用于制造耐弯曲板材与可贴合绝缘体。^{656, 657} PBT 可为承受机械应力的基板提供半结晶材料特有的耐久性，而 PLA 与生物基聚酯则作为可持续的熔体加工替代方案日益受到关注。上述材料兼具可预测的熔体流变行为、抗弯折结构稳定性及可持续应用潜力，持续推动着整体成形工艺的普及与应用。

薄层沉积与成膜工艺将聚合物转化为超薄、轻量且高度柔顺的形态，在保持柔韧性的同时，使其能够弯曲、拉伸并贴合曲面，且不发生力学失效。由于这些工艺可制备均匀的介电、导电、光学及阻隔涂层，因此采用这类工艺的聚合物相关专利也实现了显著增长 (15%–89%)。PMMA 与 PSS 因具备可控的溶解性、优异的成膜性能及光滑的形貌而崭露头角，非常适合用作栅极介电层、中间层及电荷调制涂层。⁶⁵⁸ PEDOT 凭借其可旋涂及刮刀涂布工艺的广泛兼容性，仍是主流的溶液加工型导电材料，成为印刷与混合平台中首

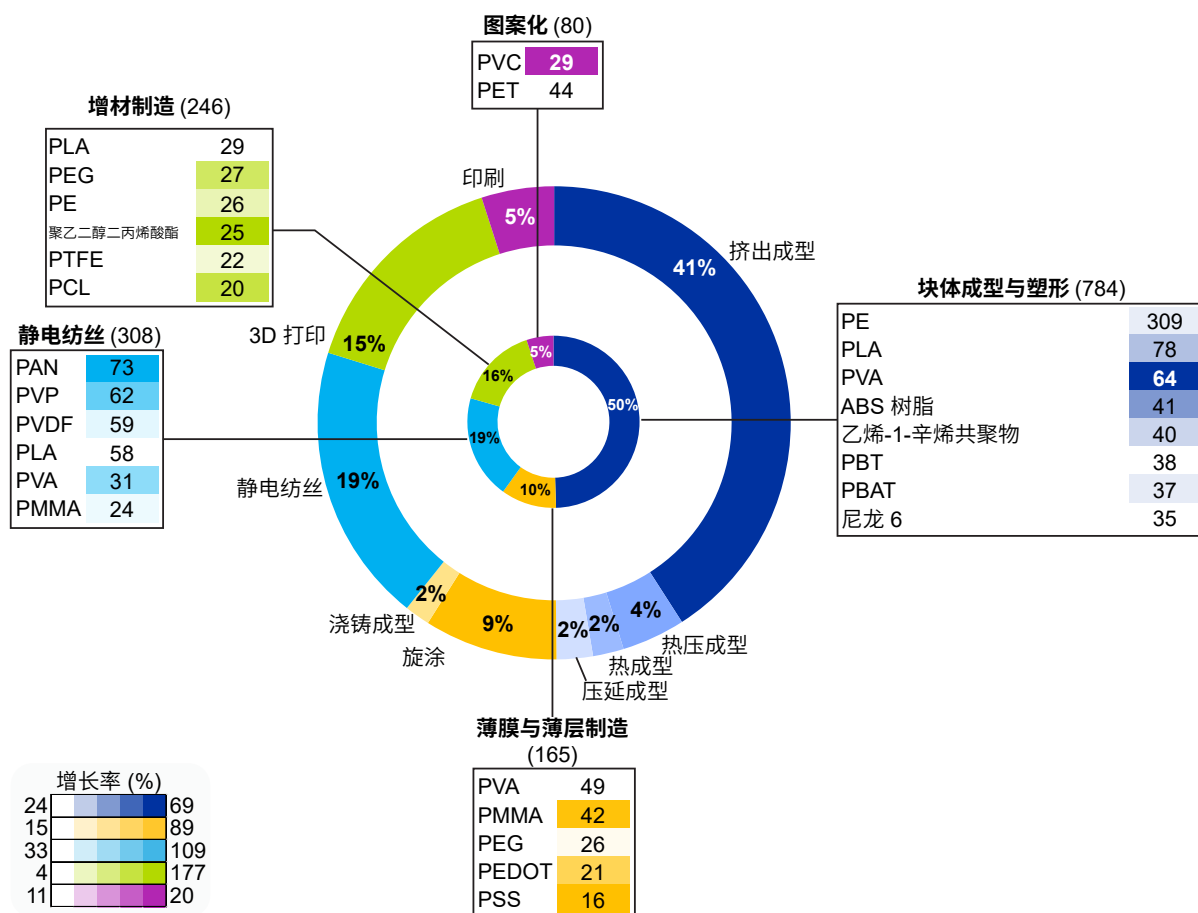


图 48. 基于聚合物的柔性电子专利族格局中的新兴制造工艺。内圈代表新兴制造工艺的主要类别，外圈则展示了相应的具体工艺。热力图表格显示了各工艺中排名前列的新兴聚合物。数据涵盖 CAS 内容合集中 2020 至 2024 年期间的专利文献。

选的电极及传感器接口材料。PVA 与 PEG 则在特定领域发挥作用：尽管 PVA 和 PEG 在某些专业领域（如湿度响应型或离子传导型薄膜）中发挥作用，但其对水分的敏感性以及有限的热稳定性限制了它们更广泛的应用。⁶⁵⁹ 总体而言，这种增长分布反映了高质量薄膜所需的化学特性：具备可预测溶解度、均一的表面能及沉积后形貌稳定的材料，方才适合这些工艺。

静电纺丝技术可将聚合物拉伸成微米至纳米尺度的纤维，具有极高的比表面积、可调控的形貌及机械柔韧性，使其成为可拉伸与贴合式电子架构的理想材料。通过制备超薄、多孔且轻量的纤维网络，电纺结构可提升透气性、应变适应能力及传感器响应性，从而支持其集成到下一代柔性及可穿戴电子设备中。⁶⁶⁰ 该领域的聚合物相关专利增速介于 33% 至 109% 之间。PAN（专利增

幅约 109%) 表现尤为出色, 因为其富含腈基的主链结构能实现稳定射流成型, 可制备强韧均匀的纤维, 可这类纤维进一步碳化, 用以构建导电网络。^{661, 662} PVP 与 PVA 适合电纺, 因其氢键结合能力可形成光滑、无缺陷的纤维毡, 非常适合用作电解质、过滤材料及柔性支撑体。⁶⁶³ PVDF 紧随其后, 因其具有强电偶极矩以及能够形成富含 β 相的电活性纤维而备受青睐, 这些纤维可增强压电或摩擦电转换效能。⁶⁶⁴ PMMA 与 PLA 呈现适度增长, 可提供光学透明度、介电稳定性或生物相容性, 在相关应用中, 纳米纤维形态可提升透气性、拉伸性或组织整合性。^{665, 666} 总体而言, 静电纺丝工艺更适用于溶液流变行为可预测、具备链取向潜力且终端适用功能性能优异的聚合物。

增材制造技术通过逐层堆积的 3D 打印方法, 以数字化方式将聚合物成型为定制化、轻量化且具有机械顺应性的结构。该技术要求聚合物具备精确的熔体流变特性、可靠的固化动力学及强大的层间结合力, 以支撑复杂的 3D 几何构型、嵌入式通道及柔性结构组件。在此类别中, 专利主要聚焦于对聚合物的改性处理, 以使其与增材制造工艺兼容。⁶⁶⁷ PTFE 在该类别中处于领先地位 (约 177%), 其 C-F 主链赋予材料高热稳定性及低摩擦熔体流动性, 可通过改良的熔融沉积成型 (FFF) 工艺打印出坚固的绝缘部件。聚乙烯 (PE) 基材料紧随其后, 凭借洁净的熔体流动特性与优异的层间熔合性能, 非常适用于柔性外壳及低介电支撑结构。聚乙二醇二丙烯酸酯与 PCL 位居下一梯队, 二者分别契合光固化立体成型 (SLA) 和数字光处理 (DLP) 对粘度与交联性的要求: 前者可形成均匀的光固化网络, 适用于柔软的生物集成组件; 后者则具备低温可打印性与机械顺应性, 适用于柔性框架。^{668, 669} PVA 与 PEG 主要用作可溶性支撑材料、

湿度响应型基质或牺牲层, 其亲水性限制了它们在长期结构件中的应用。近期的研究进展包括: 融合相变材料的光/热固化混合体系、单组分可打印液体的光固化聚氨酯-丙烯酸酯弹性体,⁶⁷⁰ 以及通过模塑或 3D 打印等方式制备的弹性体-形状记忆复合材料等。^{671, 672}

印刷等图案化技术可在聚合物薄膜上构建微米级导电、介电或传感架构, 在不影响力学柔顺性的前提下实现精准的空间控制。图案化技术优先选用那些具备良好尺寸稳定性、可将实现精细化图案成型, 且与油墨、涂层及光束加工工艺兼容性优异的聚合物。在这一领域, PVC 的增长率高于 PET。PVC 可应用于图案化电子标签、层压结构以及热成型印刷部件。近期专利表明, PVC 与 UV 油墨图案化、室温压花及溶剂型加工工艺兼容, 从而能够高效制备兼具装饰性与功能性的多层表面。^{673, 674} 其可溶性与热成型性进一步支持了需要贴合几何形状的应用场景, 且无需对工艺流程进行重大调整。PET 则凭借其光学透明度、热稳定性及光滑表面而备受青睐, 可实现 UV/电子束图案化、导电印刷及多层光学结构 (包括金属化-去金属化工艺) 而不发生形变。⁶⁷⁵⁻⁶⁷⁷ 这些技术成果表明, PET 能够适应精细图案印刷, 并可与显示或光调控层集成, 使其成为柔性电子与防伪包装领域的优选材料。

总体而言, 专利全景分析显示一体化制造生态系统正在形成。整体成型工艺提供可规模化制备的结构基板; 涂层与静电纺丝技术通过构筑改性介电层及纳米结构拓展材料功能; 增材制造引入可编程几何形状与嵌入式功能; 而 PET/PVC 图案化技术则为传感、防伪及显示技术提供了高分辨率特征。这些进展共同表明, 柔性聚合物电子

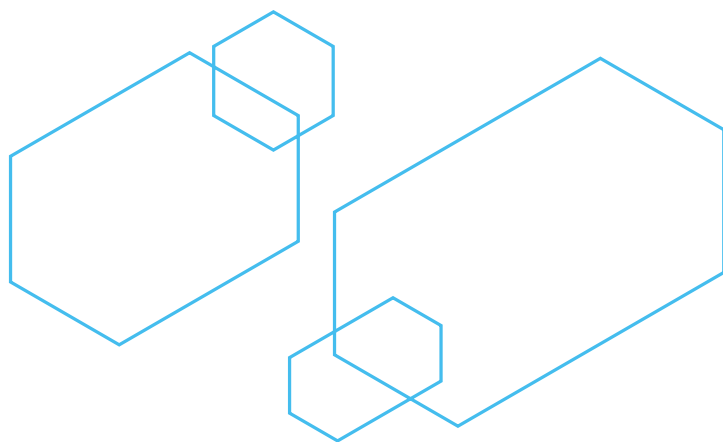
产品正越来越多地通过协调的多步工艺流程进行生产，这种流程既能支持大规模制造，也能满足高度定制化的器件设计需求。

6.5 总结与展望

2015 至 2024 年间，聚合物基柔性电子技术已从一个研究驱动领域，发展为商业化持续加速的技术领域，具有区域高度集中化、材料体系日趋成熟、制造生态系统不断一体化的特征。材料创新正转向能够同时满足机械、电子及界面要求的多功能聚合物体系。含氟聚合物、聚硅氧烷、导电聚合物及水凝胶正是这一趋势的典型代表，它们在多个应用领域均表现出可靠性能，减少了对多种独立材料体系的依赖。学术界更关注可持续的生物基聚合物，而工业界则依赖于高性能的成熟材料，两者之间的分歧依然存在，这凸显了绿色替代材料推向商业化仍面临诸多挑战。

从应用角度看，可穿戴设备、柔性电路及电子皮肤等新兴领域受限于复杂的机械与生理环境，对材料体系的多样性提出了更高要求；而 OLED 和 EL 显示器等成熟领域则依赖于成熟且经过优化的聚合物。制造技术的进步进一步加速了这一转型：整体成形工艺实现了结构基板的规模化制备；溶液加工与电纺丝技术构筑了功能性纳米结构层；增材制造引入了可编程的几何形态；而精密图案化技术则实现了高分辨率的器件集成。

总体而言，柔性电子的发展轨迹日益取决于化学驱动的多功能材料平台以及协同优化的工艺路线，而非孤立的材料突破。未来的竞争优势将源于掌握刚性-柔性-可拉伸全区间的材料与工艺的一体化技术能力，从而推动下一代自适应、可规模化且高性能的柔性电子系统的发展。



7. 聚合物膜领域的研究进展

自然语言处理 (NLP) 分析表明，聚合物膜已成为科学界高度关注的新兴领域。聚合物膜是一种高分子工程薄膜，具有选择性屏障功能，允许特定分子或离子通过，同时阻隔其他物质，因此在各行各业的分离、纯化和可控传输过程中得到了广泛应用。⁶⁷⁸ 聚合物膜多孔或者致密的结构，使其可用于去除水中的颗粒物和微生物、实现海水脱盐、二氧化碳 (CO₂) 和氢气等气体分离、完成化学加工中的溶剂净化，并用作电池、燃料电池和电解槽中的离子导电层。⁶⁷⁹ 此外，通过化学改性、交联或与其他材料共混，可以精细调控薄膜选择性，以满足特定的分离需求。⁶⁸⁰

聚合物膜的应用日益广泛，主要受两方面因素驱动：一是市场亟需更节能、模块化且成本更低的替代方案，以取代传统的热分离法或化学分

离法；二是聚合物化学技术的进步显著提升了膜的选择性、耐久性和抗污染性。因此，聚合物膜已成为水处理、清洁能源系统、工业气体处理、生物技术及食品生产等领域不可或缺的核心技术。本节着重探讨 2015 至 2025 年期间，高分子化学在各类聚合物膜研发中的关键作用，及其在学术文献和专利族中的广泛应用成果。

7.1 研究文献分析

7.1.1. 学术期刊论文与专利文献的发表趋势

为厘清聚合物膜领域的研究格局，我们从 2015 至 2025 年期间的聚合物相关数据集中提取了与聚合物膜相关的期刊论文与专利族，并分析了这些文献的发表趋势（如图 49 所示）。发表趋势显示，聚合物膜是一个成熟、由商业驱动且产业

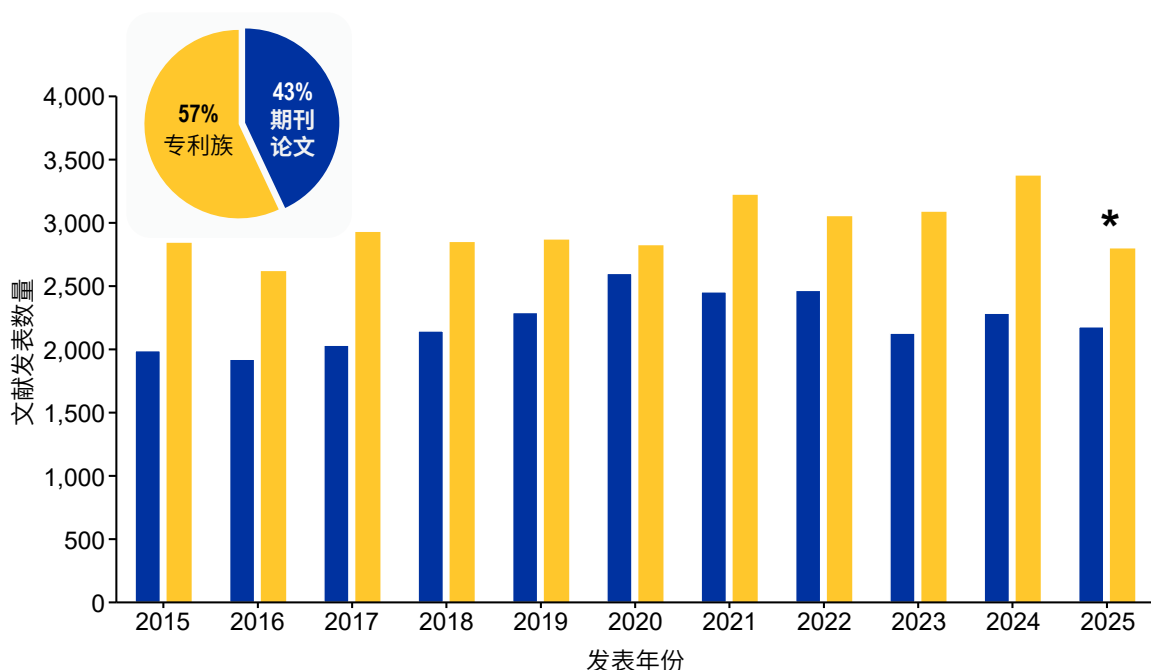


图 49. 2015 至 2025 年期间，CAS 内容合集的聚合物数据集中聚合物膜相关文献的发表趋势。*注：2025 年数据仅涵盖 1 月至 11 月。

参与度较高的领域。专利占比高达 57%，反映了该领域在知识产权保护方面的持续投入，而期刊论文与专利的发表量保持稳定，表明该领域正从快速探索阶段转向渐进式优化和以应用为导向的开发阶段。这种稳定性与技术成熟度相符——在此阶段，竞争优势主要来自工艺与性能的改进，而非突破性创新。

7.1.2. 企业与学术机构专利持有情况

我们接着分析了专利的地域分布，以区分企业界与学术界的贡献。图 50 展示了聚合物膜研发领域的全球商业格局。聚合物膜领域的专利发表情况表明该领域创新高度区域集中，其中亚洲企业占据主导地位，中国拥有绝大多数专利族，日本与韩国紧随其后。日本企业东丽工业作为无可争议的领军者脱颖而出，展现出在膜技术领域非凡的研发投入与技术深度。富士胶片控股、旭化

成及日东电工等其他日本企业也贡献卓著，说明日本在高性能聚合物材料与特种膜领域已确立领先地位。中国石化巨头中国石化 (Sinopec) 与中国石油 (CNPC) 代表了创新活动的第二梯队，反映了中国在分离与过滤技术领域的优先发展战略。韩国与美国企业位居中游，以 LG 化学和 3M 等为代表，表明其投资虽具针对性，但规模不及东亚领先企业。欧洲企业（包括巴斯夫、西卡和 世索科等专业公司）参与范围相对较窄，但技术高度聚焦，反映了欧洲侧重面向监管严格且由可持续发展驱动的市场，布局先进材料领域。

涵盖石化企业、化工制造商与工业集团的多元机构布局表明，聚合物膜技术处于多个产业链的交汇点。专业化工企业与多元化集团并存，表明存在不同的创新策略——专业企业聚焦于核心膜化学，而综合型企业则致力于开发应用导向的解决方案。西方机构（尤其是欧美企业）占比较

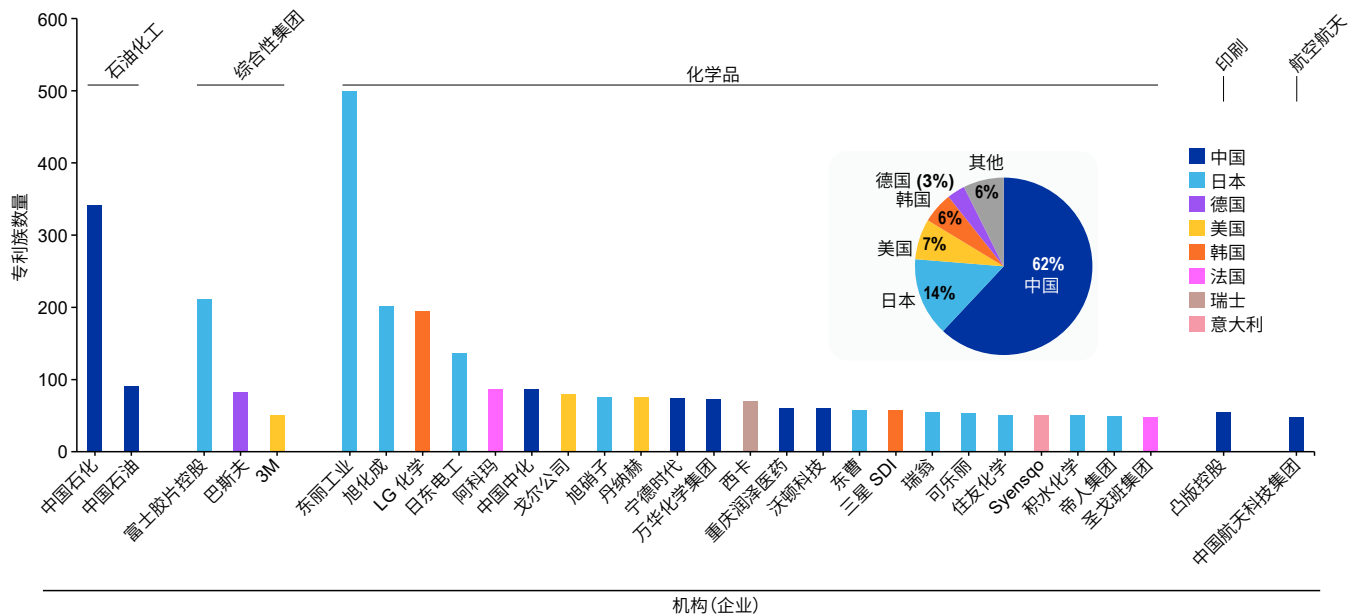


图 50. 根据 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年聚合物数据集内与膜相关的专利公开情况，按行业类型与地理分布对领先机构（企业）进行分类。

低，反映出其在该领域存在竞争劣势或战略优先级下调的情况。这种地域与机构层面的高度集中，对全球供应链的依赖性、技术获取途径，以及在水处理、气体分离和电池技术等高度依赖膜技术的应用领域中的竞争格局，均具有重要影响。

为识别推动该领域创新的科研与学术机构，**图 51** 展示了这些机构的地理分布，并基于专利数量列出了排名前 30 的机构。分析显示，中国机构占据绝对主导地位，仅有一家非中国机构——韩国的韩国化学研究院 (KRICT)。值得注意的是，天津工业大学（原天津纺织工学院）在专利产出方面位居榜首，中国科学院紧随其后。为理解这一结果，有必要考量这些机构的历史与体制背景。

中国科学院由众多高水平研究机构组成的广泛网络所构成，这些机构虽并非专门从事聚合

物膜研究，但共同为该领域贡献了可观的研究成果。相比之下，天津工业大学在膜科学领域有着悠久的历史专业积淀，形成了专一的研究方向。该校于 1974 年成立了中国首个专门的膜研究机构——膜分离技术研究实验室⁶⁸¹，此后通过建设市级、省级及国家级实验室，不断拓展其研究能力。重要的里程碑包括：2015 年成立的“分离膜与膜过程国家重点实验室”，以及最近于 2025 年启用的“先进分离膜材料国家重点实验室”。⁶⁸²

该校在各类先进膜技术领域均具备领先的科研实力。例如，采用 PVDF 超滤膜的污水处理技术、⁶⁸³ 基于聚多巴胺 (PDA) 的纳滤膜、⁶⁸⁴ 用于 CO₂ 选择性气体分离的聚酰亚胺膜、⁶⁸⁵ 用于锂离子电池隔膜的聚酰胺膜，⁶⁸⁶ 以及 pH 响应型聚醚砜 (PESU) 膜系统等创新成果。⁶⁸⁷

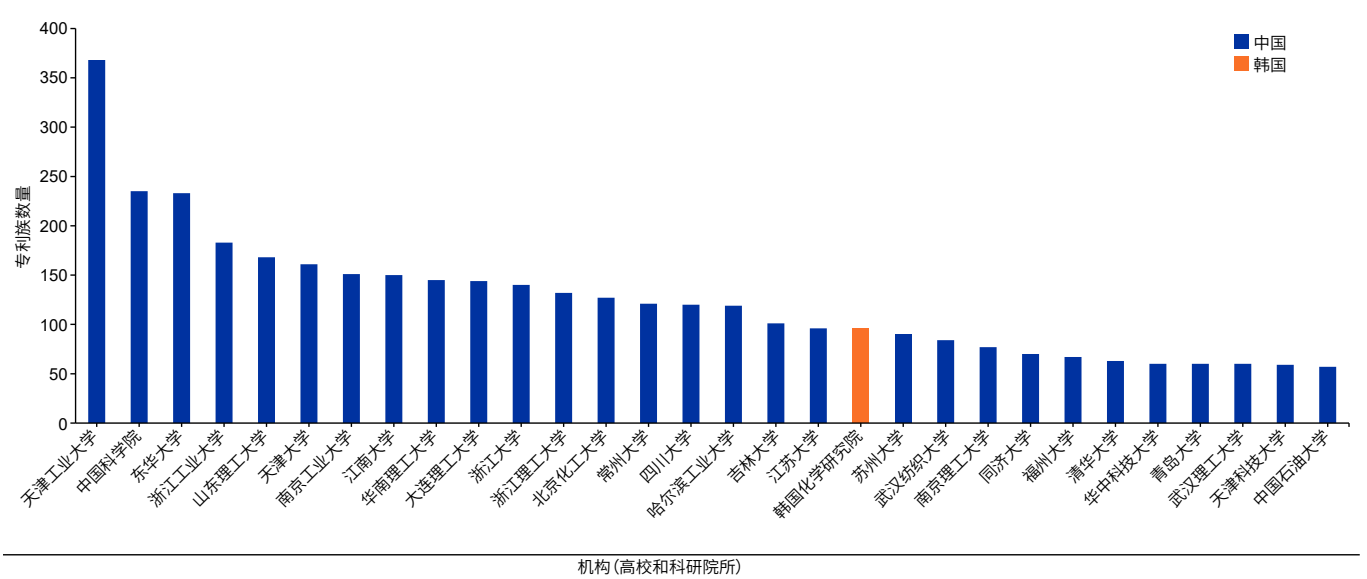


图 51. 2015 至 2025 年期间，CAS 内容合集的聚合物数据集中，膜相关专利文献的领先机构（研究与学术机构）及其所在国家/地区。

KRICT 在韩国的角色与天津工业大学类似，但其定位是研究机构，而非传统的教学型大学。作为国家级研究机构，KRICT 在化学工艺、先进能源材料等多个战略领域开展研究，⁶⁸⁸ 并设有分离技术、⁶⁸⁹ 聚合物科学及电池技术⁶⁹⁰ 等专业研究中心。

7.2 聚合物膜领域前沿热点的新兴趋势

7.2.1. 聚合物膜领域前沿热点的分析

为进一步评估该领域的商业化趋势，并深入了解聚合物膜在实际应用中的发展状况，我们对 2015 年至 2025 年间聚合物膜相关专利中 CAS 索引的科学概念进行了系统分析（图 52）。在此基础上，依据概念属性将其划分为六大类别：结构、聚合物类别、应用、方法、性能与工艺（图 52A）。此外，我们评估了这些概念在 2020 年至 2024 年间的增长率，旨在识别过去五年中呈现显著发展态势的新兴方向（图 52B）。

聚合物膜研究中排名前 30 的概念分布显示，该领域目前仍由成熟聚合物类别主导，其中含氟聚合物拥有最为庞大的专利组合，聚酯与聚醚多元醇紧随其后。这一层级结构反映出，在耐化学腐蚀、耐热及机械耐久性等严苛分离应用中，高性能聚合物仍具有持续的重要性。塑料薄膜、无纺布等结构相关概念的高频出现，表明业界对物理结构与形貌调控的高度重视，这些结构特征被视作决定膜性能的关键因素。应用层面覆盖多个工业领域，尤以涂层材料、交联剂与胶粘剂表现突出，说明膜技术已从单一的过滤应用拓展至复合材料体系与多功能平台。⁶⁹¹ 聚合物类别、结构特征与加工方法之间相对均衡的分布格局，则体现了膜技术创新所需的多学科交叉属性——需要对材料化学、纳米尺度结构及制造工艺进行协同优化。

增长率分析揭示了研究重点的显著转变。其中，二次电池隔膜呈现爆发式增长，这主要受全球电气化转型及储能需求的驱动。与此形成鲜明对比的是，含氟聚合物、聚氨酯等传统塑料薄膜材料的关注度有所下降，表明部分经典膜应用领域正步入市场饱和或技术成熟期。作为一项关键制备技术，静电纺丝呈现出强劲的增长势头，这与业界对纳米结构膜及高比表面积结构的日益关注相契合。而无纺布与挤出成型工艺的同步放缓，则意味着业界正从传统制造路线转向能够更精细控制膜微结构的先进加工技术。值得注意的是，交联剂、抗氧化剂与偶联剂均呈现正向增长趋势，表明通过化学改性与界面工程提升膜性能已成为一条关键创新路径。成熟聚合物类别与新兴应用领域之间截然不同的发展轨迹，凸显出该领域正从以材料为中心向应用驱动型创新转变——在此背景下，膜材料的研发日益紧扣储能、环境修复及先进制造等具体场景中的技术挑战展开。

7.2.2. 基于应用主题的发表趋势

为更清晰地呈现专利在不同终端应用领域的分布格局，我们进一步评估了 2015 至 2025 年间聚合物膜领域基于应用主题或 CAS 索引概念的发表趋势（图 53）。发表趋势分析显示，聚合物膜研究格局正经历剧变，其中二次电池隔膜增长显著，尤其是自 2020 年以来，已跃升为核心应用类别。这一激增反映了全球电气化转型的强劲驱动，其背后是电动汽车、可再生能源储能及便携式电子设备的蓬勃发展。作为电池中的关键安全组件，聚合物隔膜兼具离子导电性与防止电极短路的双重功能。^{692, 693} 受严格的安全性标准、对更高能量密度与更快充电速率，以及固态电池、锂

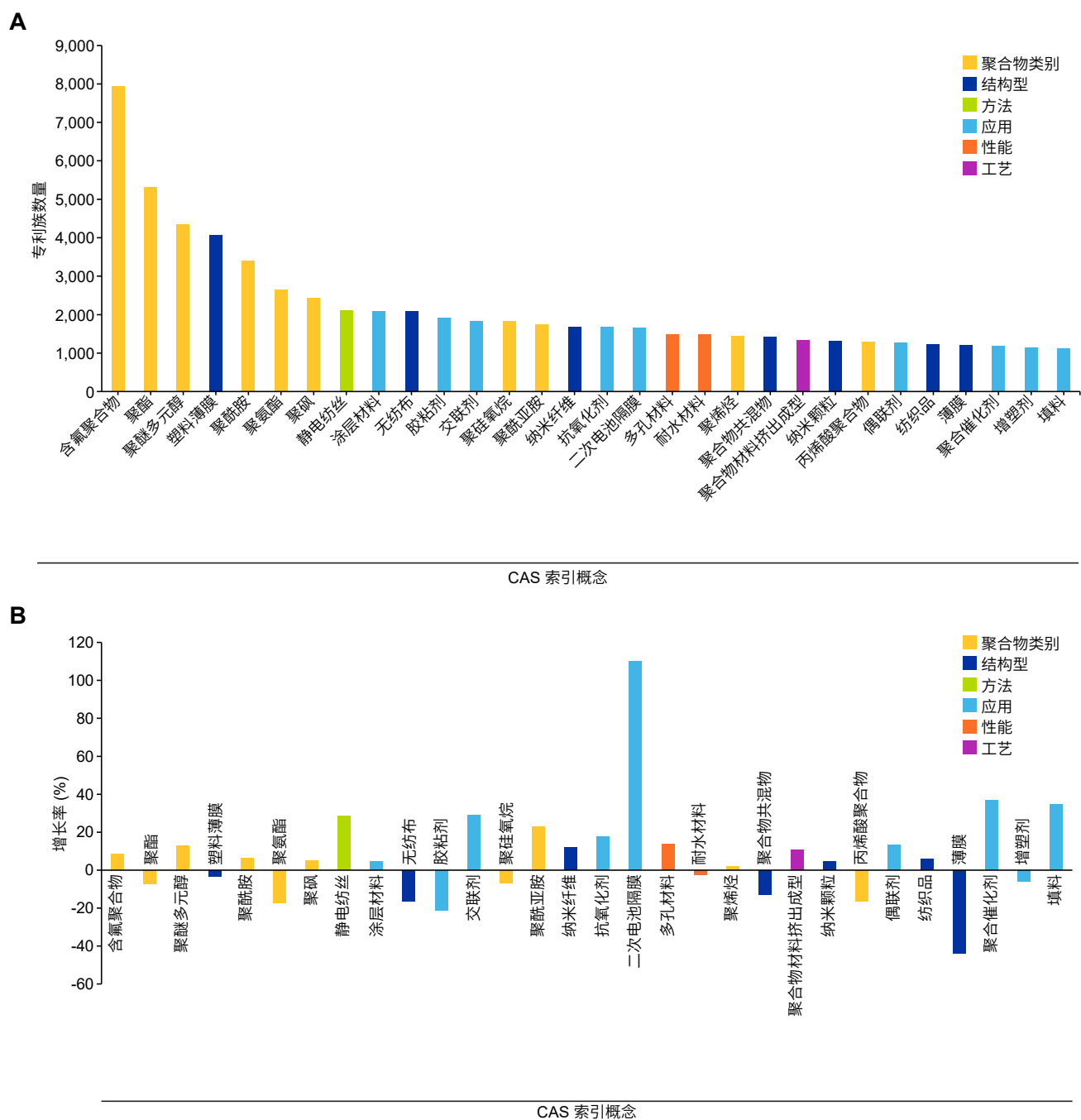


图 52. 2020 至 2024 年期间，按 **(A)** 专利公开数量与 **(B)** 相对增长率排序的领先 CAS 索引概念。这些概念被归入结构、聚合物类别、应用、方法、性能与工艺等类别。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的专利文献。

硫电池等多元化电池体系的需求推动，该领域的增长势头持续增强。上述新型电池体系对隔膜在离子选择性、力学性能及电化学稳定性方面提出了持续创新的要求。⁶⁹⁴

交联剂领域呈现持续增长，表明膜性能的提升日益依赖化学改性及稳定化策略。交联处理可赋予膜优异的尺寸稳定性、耐溶剂性及机械强度，这些特性对于有机溶剂纳滤及高温燃料电池

等苛刻环境中的应用至关重要。⁶⁹⁵ 抗氧化剂则保持稳定增长，反映出行业对膜在氧化性环境中长期耐久性的关注，以及在向商业化应用过渡时，将运行寿命视为成本效益核心要素的考量。⁶⁹⁶ 填料同样呈现总体上升趋势，体现了业界对混合基质膜的持续关注。此类膜材料通过引入无机颗粒，将聚合物优良的加工性能与纳米粒子或沸石等功能性添加剂的特性相结合，以协同增强材料的机械强度、热稳定性与分离性能。⁶⁹⁷

偶联剂呈现温和增长，其作用在于改善有机聚合物基体与无机填料间的界面相容性，从而优化复合膜的综合性能。⁶⁹⁸ 涂层材料在 2022 年前增长强劲，随后出现回调，或表明表面改性方法可能已趋于市场饱和或技术成熟期。⁶⁹⁹ 聚合催化剂领域则呈现显著扩张，反映出可控聚合合成方法日益受到重视。该方法使研究人员能够制备具

有精确分子结构、均一形貌及定制化性能的膜材料，从而摆脱传统试错模式的局限。⁷⁰⁰

自 2020 年起，多个应用领域研究热度同步走高，表明其背后存在超越单一应用需求的系统性驱动因素。可持续发展需求与能源转型共同推动了电池、高效化学分离及耐用材料等领域对先进膜技术的需求。制造技术日趋成熟，使原本局限于实验室的复杂膜结构得以实现商业化规模生产，从而有效弥合了科研创新与工业应用之间的鸿沟。相较之下，增塑剂的相对衰退，以及涂层材料与胶粘剂等若干成熟领域近期增长停滞甚至下滑，表明这些领域正逐步走向大宗商品化；与此同时，研究投入正向储能与化学稳定调控等高附加值领域集中，这些方向仍存在显著的性能缺口与颇具吸引力的商业机遇。

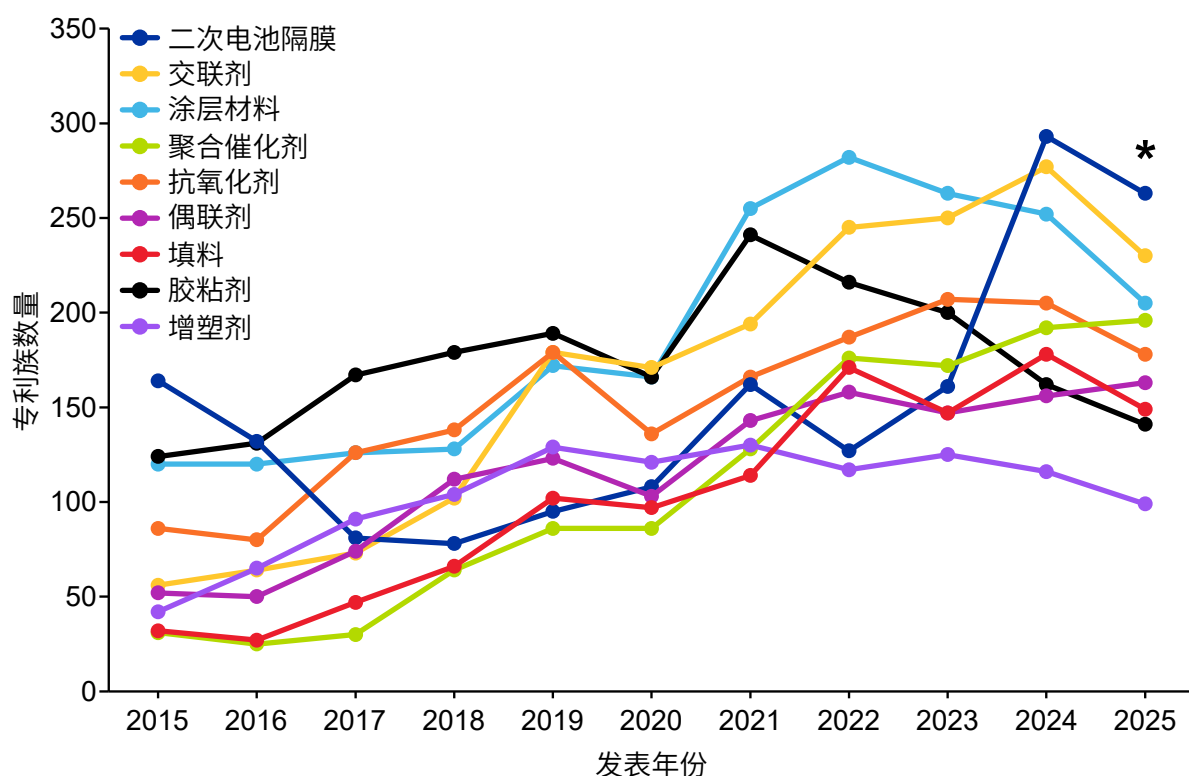


图 53. 2015 至 2025 年期间，CAS 内容合集中与聚合物应用相关的 CAS 索引概念专利族发表趋势。*注：2025 年数据仅涵盖 1 月至 11 月。

为明确驱动这些应用的关键聚合物材料，我们识别了主要涉及的聚合物类别，并重点标注了专利活跃度增长最为快的材料（图 54）。图 54 显示，就绝对数量而言，涂层材料与交联剂是研究最多的应用领域；而二次电池隔膜作为对聚合物性能有独特需求的细分方向，其增长速度最为迅猛。

在电池隔膜应用中，聚乙烯 (PE) 在专利版图中占据主导地位，但其增长幅度有限，这体现了其作为行业标准隔膜材料的成熟地位。该材料因其热闭孔性能、化学稳定性及机械强度而备受重视，能够在防止电极直接接触的同时保障离子高效传输。⁷⁰¹ 相比之下，PVDF 的增速显著，表明针对该高性能聚合物的研发正在加速。该材料适用于需要更宽电化学稳定性窗口、优良耐热韧性及优异电解液兼容性的先进电池体系，而这些特性对于高压电池及下一代固态电池系统至关重要。^{702, 703} CMC-Na、HFP-VDF 共聚物及 PEG 等特种聚合物的强劲增长态势，则反映出市场正从大宗隔膜材料向功能化材料拓展，后者安全性、润湿性更好，且与新兴电解液体系兼容性更好。⁷⁰⁴

涂层材料作为聚合物膜最大的研究方向，充分体现了表面改性的核心地位。聚烯烃（如 PE 和 PP）因其出色的机械强度、疏水性及化学惰性，在专利体量方面占比最大，适用于制备保护性或结构性涂层。^{705, 706} 相比之下，PVDF 与 PTFE 则是增长最为迅猛的细分领域。PVDF 被广泛用作耐化学腐蚀、耐候且热稳定的膜涂层材料，尤其在分离工艺及溶剂接触环境中表现突出。^{707, 708} PTFE 凭借其极低的表面能及优异的热稳定性与化学稳定性，在防污、不粘及低摩擦涂层应用中占据优势。⁷⁰⁹

在交联剂领域，尽管 PTFE 的专利基数较小，但其增长速度最快。这主要归因于其作为化学惰性、热稳定且高度疏水的膜材料，特别适合在苛刻环境中应用；其优异的耐化学性与耐久性在该类应用中至关重要。⁷¹⁰ 聚乙烯醇 (PVA) 在专利数量上保持领先，得益于其出色的交联能力，能够通过热交联或化学交联形成稳定的亲水网络，使其成为全蒸发膜与质子交换膜的核心材料。聚乙二醇 (PEG) 则兼具交联剂与致孔剂的双重功能，通过其吸湿性及空间位阻排斥效应，有效提升了材料的亲水性与抗污性能。⁷¹¹

抗氧化剂领域的专利活跃度也比较高，主要用于抑制膜的氧化降解。聚乙烯 (PE) 与聚丙烯 (PP) 在专利数量上领先，其疏水性基体易于掺入受阻酚、亚磷酸酯等亲脂性抗氧化剂，但受自身低极性的限制，抗氧化剂的分散效果有限。⁷¹² 苯乙烯-丁二烯-苯乙烯共聚物 (SBS) 的增长最快，反映出其弹性体基体能够使酚类抗氧化剂均匀分散，从而提供更为长效的抗氧化保护。⁷¹³

在偶联剂应用领域，聚乙烯 (PE) 的专利数量虽仍占主导地位，但其增长率最低，体现了其在聚烯烃基复合材料中业已成熟的应用角色。⁷¹⁴ 聚乙烯醇 (PVA)、聚乳酸 (PLA) 及纤维素等增速较高，表明研究焦点正转向具备固有反应活性的功能材料。其中 PVA 增长尤为迅猛，其结构中丰富的羟基可通过形成界面化学键，使其同时发挥膜基体与偶联剂的双重功效。⁷¹⁵ 受可持续发展需求驱动，生物基 PLA 与纤维素的相关专利亦呈现显著的高速增长态势。

在聚合催化剂领域，PVDF 与聚丙烯 (PP) 的增长反映了业界对商业关键膜材料可控聚合方法的深入探索。⁷¹⁶ 聚乙烯亚胺 (PEI)、聚乙二醇二丙烯酸酯等高增长特种聚合物，则凸显了对膜材料精密结构设计的高度重视。PEI 通过催化合成具有高胺基密度的超支化结构，在 CO₂ 选择性气体分离领域增长势头强劲。⁷¹⁷ 聚乙二醇二丙烯酸酯支持光聚合技术，可实现空间可控的膜制备，从而满足梯度结构构建与微流体器件的应用需求。⁷¹⁸

在填料应用领域，丁苯橡胶 (SBR)、PVA 与 PTFE 均呈现高增长态势，揭示了研究方向正向专用基体材料战略转型。SBR 增长最快，其弹性体基体能够容纳刚性填料而不致产生裂纹，在热循环过程中维持柔韧性，并通过链段运动实现自修复功能——这些特性对于高机械韧性的气体分离膜及电池隔膜至关重要。^{719, 720} PVA 作为亲水性基体同样呈现强劲增长，亲水性填料的引入可提高通量并增强抗污性能，而基体中的羟基则有助于改善填料的分散均匀性。⁷²¹

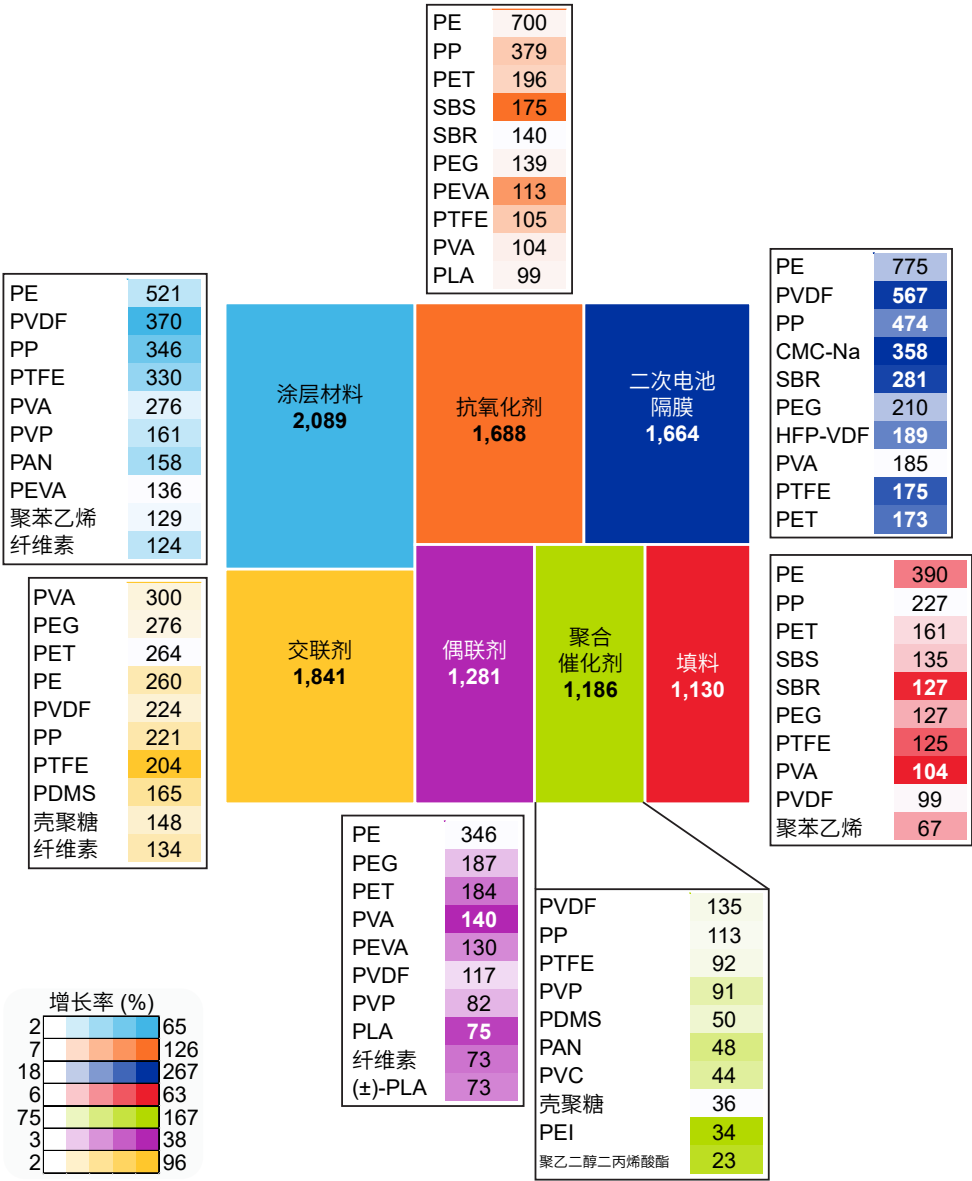


图 54. 聚合物数据集中与各类应用导向的 CAS 索引概念相关的聚合物膜专利族分布（以矩形树图展示）。对应热力图表格突出显示了各应用类别中专利活动增长最快的新兴聚合物，按专利数量排序，颜色深浅表示 2020 至 2024 年间的相对增长率。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年聚合物领域的专利族。

整体而言，聚合物应用格局呈现清晰的分化：通用聚烯烃（PE、PP）虽在专利数量上占据主导地位，但其温和的增长态势表明该领域已步入成熟阶段；而特种聚合物则在功能化需求与可持续发展愿景的驱动下展现出强劲的增长活力。二次电池隔膜领域的扩张最为显著，正经历从依赖 PE 热闭孔特性向追求 PVDF 高电化学稳定性及面向下一代储能技术的功能化共聚物的过渡。含氟聚合物（PVDF、PTFE）凭借其卓越的耐化学性与热稳定性，在多个应用领域持续保持高增长态势；而弹性体（SBR、SBS）与 PVA 则依托其机械韧性、自修复潜力及固有多功能性，展现出非凡的增长势头。生物基聚合物（PLA、纤维素、壳聚糖）的显著增长，则反映了全球可持续发展的迫切需求。该领域正逐步分化为两大路径：一是通过渐进式优化不断演进的大宗成熟应用；二是以储能、CO₂ 捕集为代表的高价值新兴领域。后者的创新重点在于精密催化控制、内在界面相容性及针对特定应用场景的性能精细调控，而非常规的材料替代。

为识别上述应用领域中的核心研发主体，我们对企业与学术机构的专利权人情况进行了分析。图 55 展示了前四大新兴应用主题的前十位专利权人：A) 涂层材料、B) 交联剂、C) 抗氧化剂及 D) 二次电池隔膜。涂层材料领域的专利活跃度最高，东丽工业位居首位，富士胶片控股与旭化成 (Asahi Kasei) 紧随其后；除天津工业大学外，该类别专利权人以企业为主导。相比之下，在交联剂领域，中国石化以 29 项专利领跑，且前十名中学术机构占据多数（七家），尽管各机构持有的专利数量相对有限（10 至 18 项）。抗氧化剂与二次电池隔膜领域的企业与机构参与度则较为均衡，中国石化与东丽工业仍是其中的主要贡献者。总体而言，四个主题的专利权人均高度集中于中国，日本与韩国次之。

7.3 膜相关专题的发表趋势

7.3.1. 膜相关专题前 30 名

通过对专利文献的深入挖掘，我们分析了基于 CAS 索引概念的膜相关专题，并将其在 2015 至 2025 年间的文献数量分布展示于图 56。这些专题进一步归类为四大类别：性能、结构、过滤与分离。

排名前五的主题依次为：超滤膜、微孔膜、中空纤维膜、复合膜与纳滤膜。超滤膜可截留尺寸约为 10 至 100 纳米的大分子与胶体，同时允许小分子溶质透过。⁷²² 纳滤膜则允许尺寸约 1 至 10 纳米的小分子透过。⁷²³ 微孔膜通常用于截留微米级（约 1 至 10 微米）的较大颗粒，并因其孔径较大而具有较大的比表面积。⁷²⁴ 中空纤维膜⁷²⁵ 与复合膜属于结构类型⁷²⁶：前者由密集排列的中空管构成，以最大化比表面积；后者则通过引入多层或添加改性材料，以增强机械强度或分离性能。接下来的五个主题均与分离技术相关，随后的其他主题专利数量大致为 300 项，并呈逐步递减趋势。

我们对图 56 中所有主题在 2015 至 2025 年间的变化趋势进行了研究，结果如图 57 所示。

在“性能”类别中（图 57A），微孔膜不仅在发文量上占据绝对主导地位，更是该类别中唯一随时间推移持续增长的主题。这一上升趋势表明，研究关注点正从传统的微尺度颗粒截留，转向对孔结构、比表面积及孔隙驱动性能的精细化调控。微孔膜，尤其是聚烯烃基微孔膜，被广泛用作电池隔膜，该应用场景对高比表面积、可控孔径及热稳定性提出了关键要求。⁷²⁷ 相比之下，疏水膜、亲水膜及选择性渗透膜更多地应用于纺织品、服装及防护材料行业，其增长速度相对较低于储能领域。

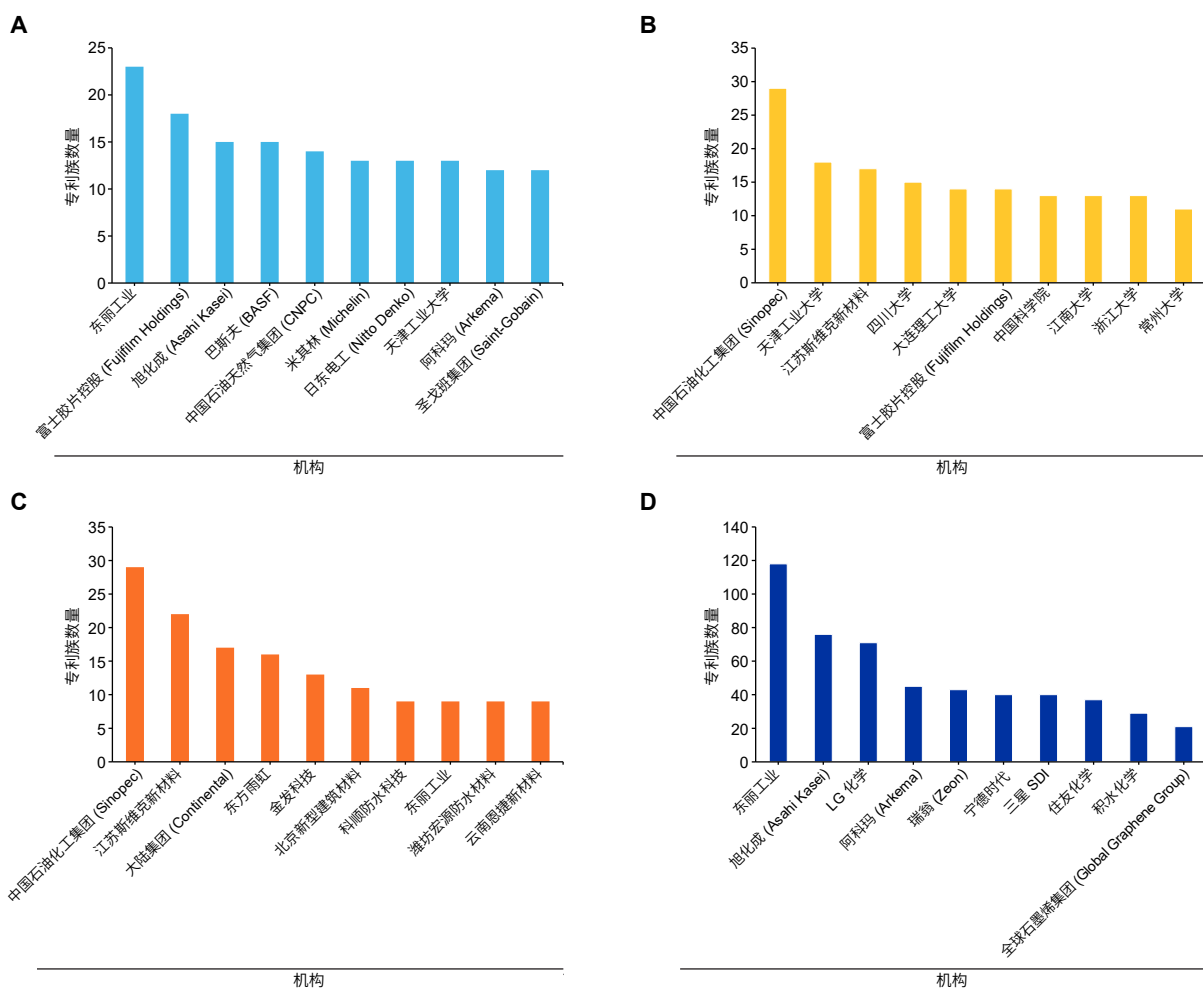


图 55. 聚合物膜相关应用领域领先的组织（包括企业与学术机构），涵盖 (A) 涂层材料、(B) 交联剂、(C) 抗氧化剂及 (D) 二次电池隔膜。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的专利文献。

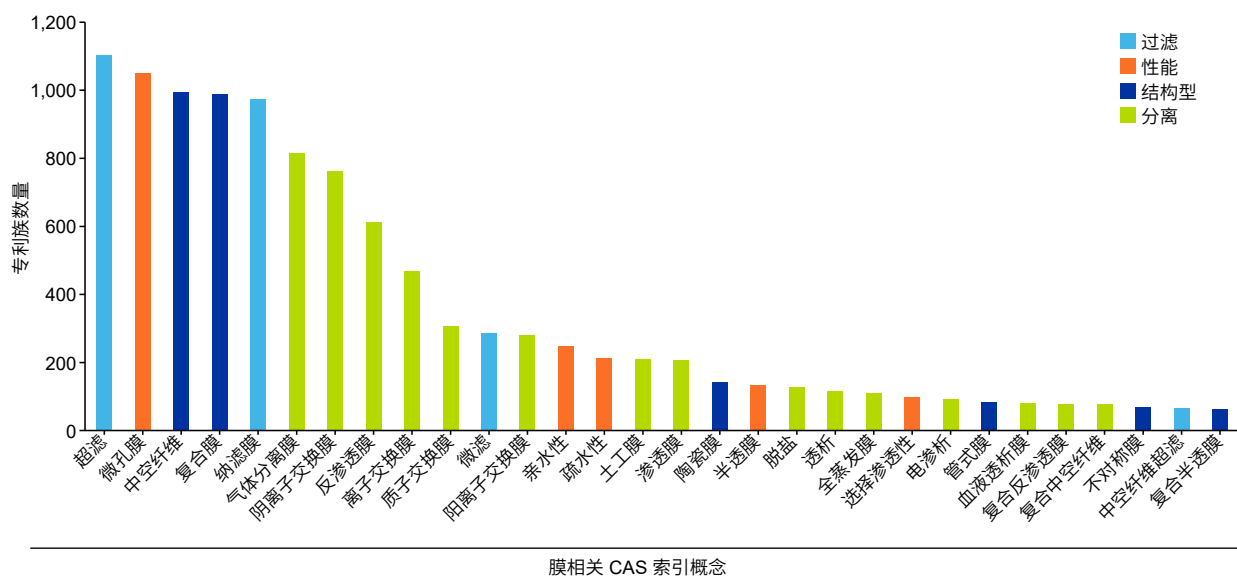


图 56. 领先的膜相关 CAS 索引概念，按性能、结构、过滤与分离四大类别划分。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的专利文献。

在“过滤”类别中（图 57B），纳滤膜呈现增长态势，表明业界对能够实现分子级分离的膜技术兴趣日益浓厚，这比超滤膜的纳米级分离尺度更为精细。这一趋势与全球对高纯度饮用水、工业废水深度处理及资源回收的需求高度契合，上述应用领域要求膜材料能够去除溶解性有机物、多价离子及痕量污染物。⁷²⁸

在“结构”类别中，复合膜表现突出，呈现显著增长，而其他膜类型在近十年间则基本持平或呈下降态势。复合膜设计通常采用多层结构或通过添加剂增强的选择性层，对于实现定制化的机械、化学及传输性能正变得愈发重要。⁷²⁹ 其日益凸显的研发地位与先进燃料电池、电解系统及水净化技术的发展密切相关。⁷³⁰

在“分离”类别中，阴离子交换膜相较其他类型展现出强劲的增长态势。阴离子交换膜可实现低成本碱性工况运行，使燃料电池与电解槽能够采用非贵金属催化剂，同时保持高离子电导率与耐久性。⁷³¹ 基于阴离子交换膜的燃料电池技术的快速进步，现代聚合物结构的优化已显著改善了该领域的化学稳定性与综合性能，进一步推动其应用热度上升。此外，阴离子交换膜在新兴的 CO₂ 电解技术中亦扮演核心角色，可在高效、零间隙反应器中促进离子传输，从而推动 CO₂ 向燃料的转化。⁷³²

为进一步了解上述新兴膜技术中所涉及的新型聚合物，我们根据增长率对主要聚合物类型进行了分析（图 58）。微孔膜的增长率模式因聚

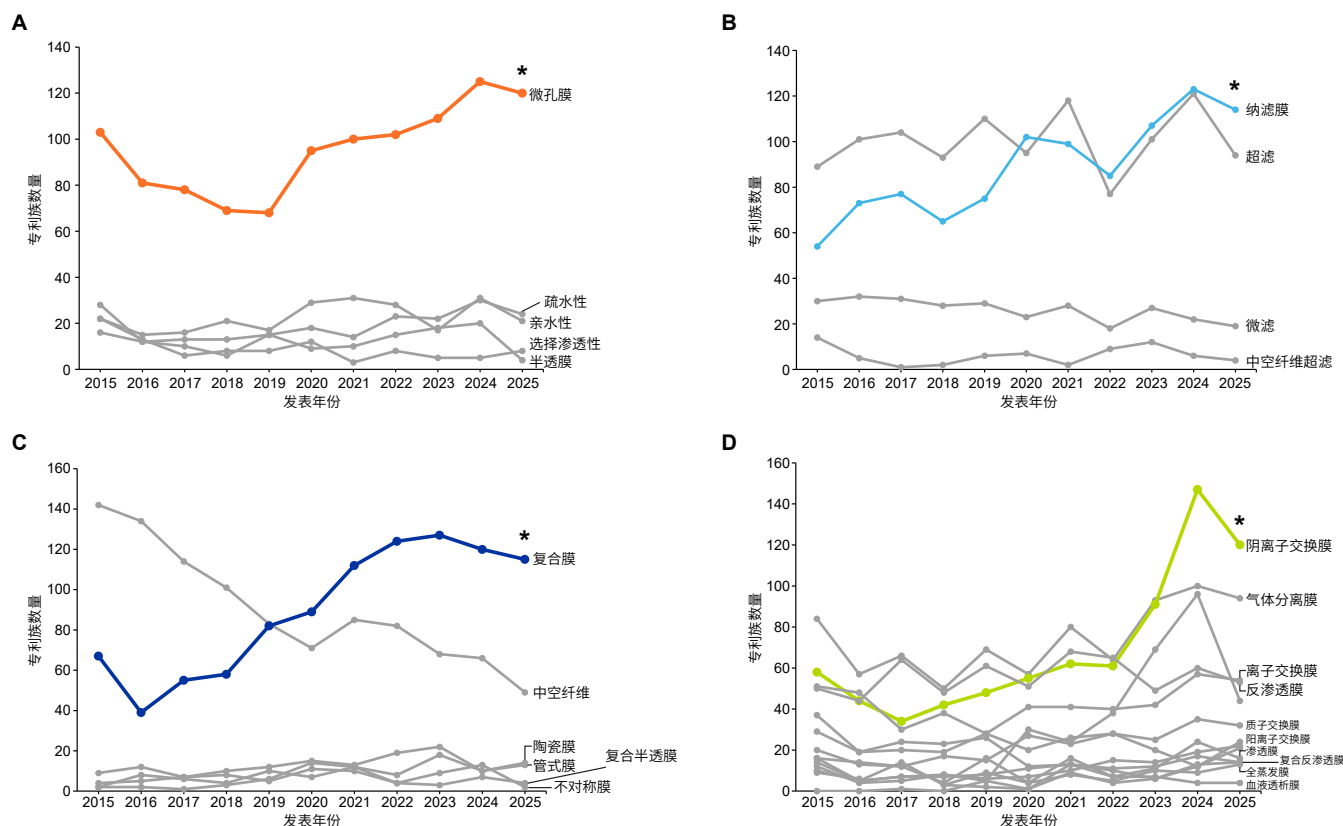


图 57. 2015 至 2025 年间 CAS 内容合集中专利文献所呈现的膜相关 CAS 索引概念发表趋势，(A) 性能型、(B) 过滤型、(C) 结构型及 (D) 分离膜。*注：2025 年数据仅涵盖 1 月至 11 月。

合物功能不同而呈现显著差异：结构基质材料发展趋于稳步成熟，而功能性添加剂与表面改性剂研发规模快速扩张。聚苯乙烯与丁苯橡胶 (SBR) 等特种功能性聚合物增速最快，这主要受对特定力学或粘合性能有专门需求的细分场景驱动。其中，SBR 的增长尤为迅速，其既可用于负极粘结剂⁷³³，又可在隔膜涂层中充当粘合树脂。⁷⁰³ CMC-Na 增速适中，主要用作致孔剂、增稠剂及粘结剂；近期研究证实其在水性涂层中能有效实现填料的均匀分散，⁷³⁴并在聚烯烃隔膜上形成强力粘合。PVDF 与 PEG 增速次之，其中 PVDF 作为应用广泛的结构型成膜聚合物，而 PEG 则主要通过增强亲水性发挥致孔剂作用，而非充当膜

基质。最后，PE、PTFE 与 PVDF等经典结构性聚合物呈现出适度且稳健的增长态势（104% 至 119%），这与其长期作为坚固微孔膜骨架材料并持续开展渐进式优化的行业现状相符。⁷³⁵

在复合膜类别中，m-PDA-TMC 共聚物是增长最快的材料。专利数据表明，其发展主要得益于界面聚合与功能选择层精准构筑技术的快速创新。例如，m PDA-TMC 用于形成聚酰胺复合膜的活性选择层（分离层），⁷³⁶其应用包括电中性⁷³⁷及耐高温反渗透膜系统。⁷³⁸聚乙烯醇 (PVA) 等功能改性聚合物紧随其后，由于其可提升增强复合膜结构的亲水性、粘附性及层间相容性，呈现出稳

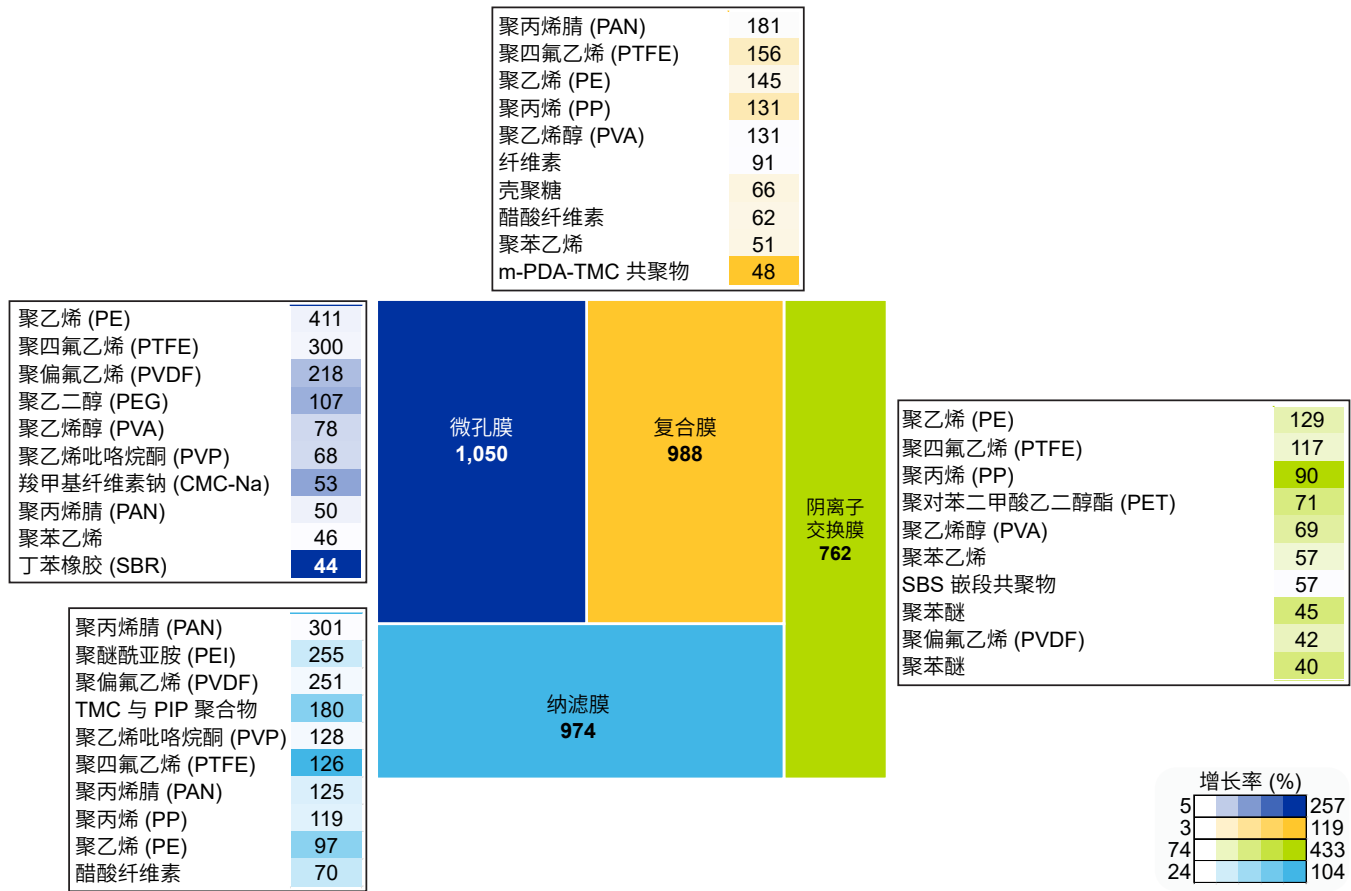


图 58. 聚合物数据集中，各类基于膜的 CAS 索引概念专利族分布（矩形树图）。对应的热力图表格按专利数量排序，突出显示了各膜类别中的新兴聚合物，颜色深浅代表 2020 至 2024 年期间的相对增长率。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年聚合物领域的专利族。

步增长态势。PAN、PTFE、PE 与 PP 等结构支撑聚合物继续呈现稳健且成熟的增长态势，这类材料作为作为新能稳定的多孔基材，经优化后具备优异机械强度与界面相容性，应用地位已十分稳固。纤维素与壳聚糖等可持续基质材料，受绿色膜材料需求的推动，应用规模同样稳步提升。总体而言，尽管复合膜仍依赖成熟基材材料，但创新活力主要集中在选择性层化学与先进界面工程领域。

在纳滤膜领域，PTFE 增速遥遥领先。近期专利研究表明，PTFE 化学性能优异、机械强度稳定，可用作多孔基材。该基材经表面改性后，能构筑致密、无缺陷的聚酰胺选择性层。该复合结构能够耐受强有机溶剂，并实现高性能纳滤（包括提高锂回收率）。^{739, 740} TMC 与 PIP 聚合物通过界面聚合形成聚酰胺选择性层，构建了负责分子尺度分离、基于电荷的选择性以及可控孔径 (0.5–2 nm) 的核心纳滤屏障。

在这四个类别中，阴离子交换膜类别的聚合物增长率最高，达到 74% 至 443%，表明这是膜技术领域中最具活力且发展最为迅猛的细分领域之一。这种非凡的增长态势，反映了阴离子交换膜在新兴能源技术（尤其是对离子导电性与碱性稳定性要求极高的燃料电池、电解槽及下一代电池系统）中的关键作用。聚丙烯 (PP) 增长率最高，其应用创新主要集中在燃料电池的制备方法⁷⁴¹ 以及电渗析领域。⁷⁴² 聚苯醚呈现高增长率，且专利数量适中。该材料具备优异的热稳定性、易于功能化及良好的耐化学性，可制备高导电性、长寿命的阴离子交换膜，⁷⁴³ 应用于电吸附脱盐⁷⁴⁴、水处理离子交换系统及碱性燃料电池等领域。⁷⁴⁵ 传统基体聚合物

(PE、PTFE) 的温和增长表明，针对这类成熟材料的辐射接枝与化学功能化以引入离子基团的优化仍在持续；而特种材料的爆发式增长，则标志着行业技术正从通用塑料改性向专用定制型聚合物转型。

对上述四大膜材料细分领域的专利权人分析（图 59）显示，不同赛道的领导地位差异显著：微孔膜领域由主要由东丽工业、旭化成等工业巨头主导，反映出这是一个技术成熟、制造密集型且准入门槛较高的市场；而复合膜、纳滤膜及阴离子交换膜领域则呈现出明显的学术主导态势，由天津工业大学、浙江工业大学、大连理工大学及复旦大学等机构领衔，表明这些领域仍处于早期、研究驱动的创新阶段，在技术进步与未来商业化方面蕴藏着巨大机遇。总体而言，相关专利高度集中于中国，其次为日本与韩国，凸显了亚洲在全球膜材料产业与学术创新体系中的核心地位。

7.4 总结与展望

2015 至 2025 年间，聚合物膜技术稳步走向成熟，在水处理、气体分离、化学加工，尤其是能源存储领域的战略地位日益提升。相关文献发表量总体保持稳定，但专利数量居高不下，体现出产业端持续加码投入，创新以实际应用为导向。材料发展呈现二元格局：含氟聚合物（PVDF、PTFE）和聚烯烃（PE、PP）等成熟聚合物仍广泛应用；PVA、PEG、SBR、SBS 及生物基聚合物等功能性材料则发展迅猛。当前的研发日益倾向于开发具有更优机械稳定性、离子导电性、化学耐受性及可持续性的聚合物，并辅以交联剂、抗氧化剂与偶联剂，以进一步提升其在严苛工况下的使用寿命。

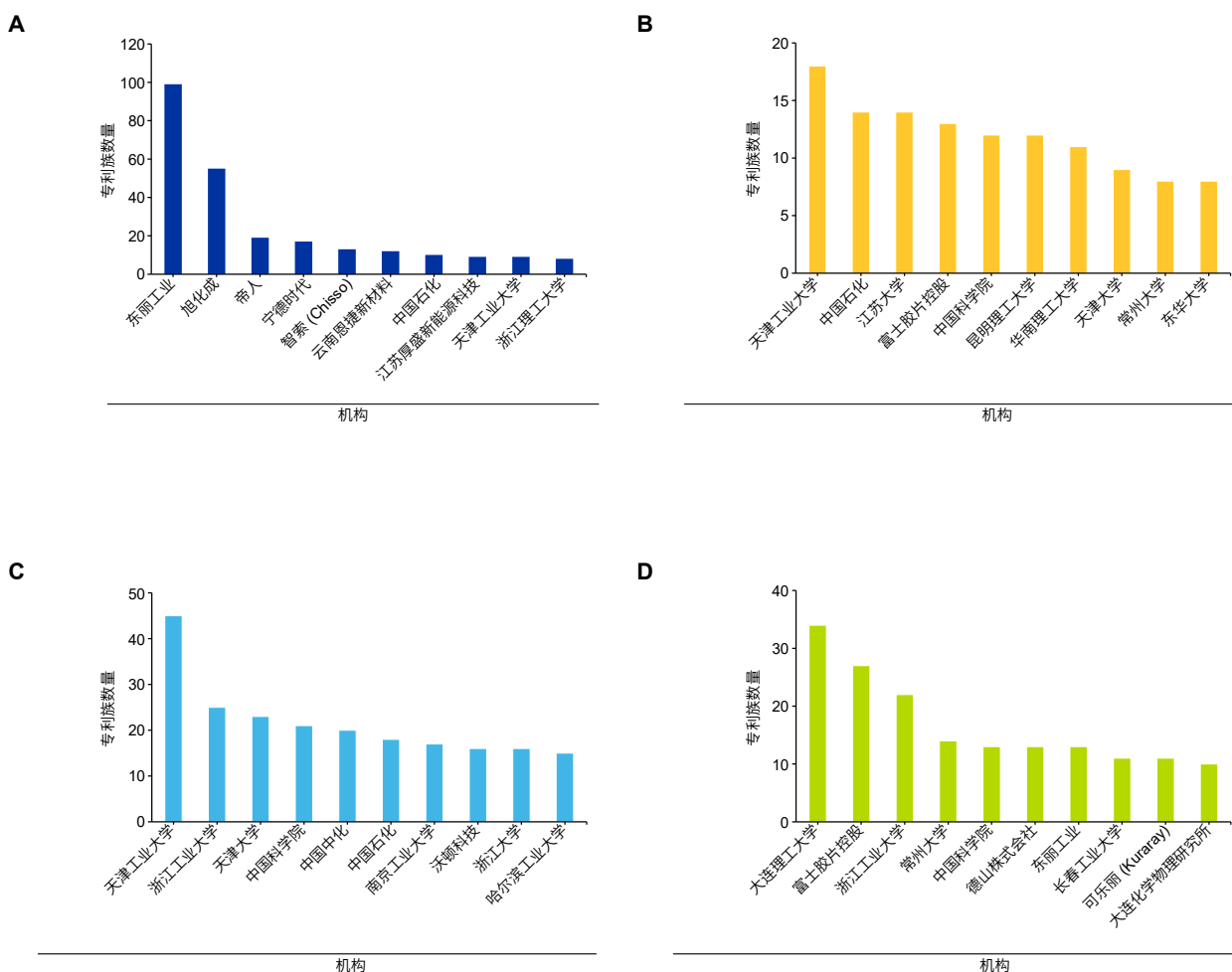


图 59. 聚合物膜技术领域的领先机构（企业及学术机构），涵盖 (A) 微孔膜、(B) 复合膜、(C) 纳滤膜、(D) 阴离子交换膜。数据涵盖 CAS 内容合集中 2015 至 2025 年期间的专利文献。

在所有应用领域中，由于电气化进程加速以及对更安全、更高性能储能系统需求的增长，二次电池隔膜尤为突出。市场需求的激增，正推动面向离子传输及热/电化学稳定性优化的先进聚合物结构与纳米结构膜的密集研发。复合膜、纳滤膜与阴离子交换膜同样展现出强劲的发展势头，其中阴离子交换膜可用于制氢、燃料电池及 CO₂ 电解领域，正成为增长最快的细分领域。

展望未来，作为清洁能源系统、先进分离技术及绿色工业流程的关键赋能材料，聚合物膜拥有广阔的增长空间。后续的研发将围绕高性能聚合物、新一代膜结构以及现代制造工艺展开。总体而言，该领域正从传统的分离应用转向高附加值、对性能要求苛刻的应用领域，这进一步巩固了聚合物膜作为未来十年核心技术的地位。

8. 聚合物研发的前沿

8.1 下一代聚酯

聚酯是目前全球产量最高的纤维材料，但它的原料来自化石资源，还存在微塑料污染问题，以及纺织品回收利用率偏低，使其成为可持续发展议题的焦点。⁷⁴⁶当前，学术界和产业界正在协同发力，开发兼具生物基、可生物降解及可循环利用的特性的下一代聚酯材料。我们对研究趋势的自然语言处理 (NLP) 分析 (图 14 和图 15) 表明，市场正在经历明确的转型。新兴聚酯化学体系在各类应用领域呈现出加速的研究势头，既表明技术日趋成熟，也预示着其商业价值正在持续提升。我们进一步分析了 2020 至 2024 年期间经 NLP 识别出的这些新兴聚酯的发展趋势，如图 60A 和图 60B 所示。

聚乳酸 (PLA) 虽不属于新一代聚酯体系，但可作为参照基准，用以梳理各类配套生物聚酯技术的演进脉络。在 2020 至 2024 年的分析期间，其期刊与专利产出数量均呈现出稳步增长。

聚对苯二甲酸乙二醇酯-共聚-环己烷二甲醇酯 (PETG) 呈现出最为显著的变化，其在期刊文献中的占比从 7.4% 攀升至 44%。尽管其专利增长存在波动，但这表明学术界正致力于探索其新应用，而非急于实现商业化。聚己二酸-对苯二甲酸

丁二醇酯 (PBAT) 从 10.5% 升至 32.3%，聚丁二酸-己二酸丁二醇酯 (PBSA) 从 12.4% 升至 27.6%，二者均呈现出同样显著的增长；而聚丁二酸-对苯二甲酸丁二醇酯 (PBST) 则在 2023 年前研究规模持续扩大，随后出现下滑。聚 (3-羟基丁酸-co-3-羟基戊酸) (PHBV) 与聚 (3-羟基丁酸-co-3-羟基己酸) (PHBHHx) 则呈现出相反的趋势：期刊论文增长有限，但专利数量激增，表明其正迈向应用开发与商业化阶段。专利数量大幅增长，源于产业界着力优化规模化发酵工艺、改造微生物菌株、降低生产成本，并开发共混物、复合等专用配方及改良加工工艺。⁷⁴⁷

当前的研究趋势表明，PETG 已成为先进制造领域的关键赋能材料。近期研究探索了 PETG 在高性能复合材料基体⁷⁴⁸、形状记忆四维 (4D) 打印⁷⁴⁹、废弃物回收利用等方面的应用，⁷⁵⁰同时围绕生物降解改性及制造工艺优化展开研究，⁷⁵¹充分展现了其在循环经济领域的应用潜力。

PBST 的相关研究表明，这类材料拥有优异的气体阻隔性能与加工性能，弥补了传统可生物降解材料的短板。⁷⁵² PBAT 的研究侧重于柔性包装与农业领域，主要包括农用地膜、土壤生物降解及环境兼容性等方向。⁷⁵³ PBSA 展现出与 PLA 的卓越兼容

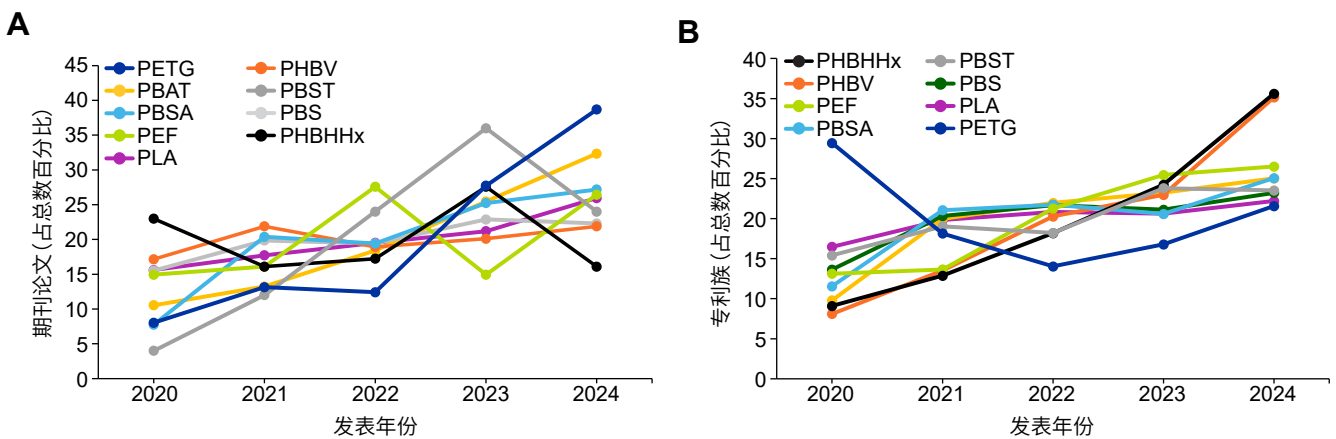


图 60. 新一代聚酯在 (A) 期刊论文与 (B) 专利族方面的发表趋势。数据涵盖 2020 至 2024 年期间 CAS 内容合集的期刊论文与专利文献。

性，弥补了纯 PLA 体系⁷⁵⁴固有的脆性缺陷，并显示出与天然填料的良好相容性。⁷⁵⁵与此同时，PLA 通过增强的层间粘合性能以及将废料转化为高价值线材的创新，在以数字化方式优化的增材制造与多功能复合材料领域继续保持领先地位。^{756, 757}

聚羟基脂肪酸酯 (PHAs)，尤其是 PHBV 与 PHBHHx，具有可调的机械性能与完全的可堆肥性，但目前成本问题仍限制其广泛应用。^{747, 758} PHBV 多用于于高强度共混材料、生物医用材料、阻隔膜及电纺滤材等领域；⁷⁵⁹ 而延展性更佳的 PHBHHx 则有助于克服 PHBV 的固有脆性，可制备兼具柔韧、耐用且可堆肥的薄膜及模塑制品，用于消费品与医疗包装领域。⁷⁶⁰ 这些聚羟基脂肪酸酯共同构成了可堆肥性能的基础，在对生物降解性、力学性能调节及防渗漏性能要求极高的应用场景中，为实现单一材质产品设计提供了可能。基于生物基琥珀酸路线制备的聚丁二酸丁二醇酯

(PBS) 兼具热成型性与可堆肥性，正成为刚性包装与模塑制品领域的支柱材料，可在耐热性、延展性与工业可堆肥性之间实现良好平衡。⁷⁶¹

新兴聚酯领域的专利全景分析显示明显的区域集中特点，其中日本与中国占据了全球专利申请量的主要份额（图 61）。这表明在制造业基础雄厚且石化产业正逐步向可持续发展转型的地区，可持续聚合物的研发正在快速扩张。中国石油天然气集团 (CNPC) 在该领域拥有庞大且持续增长的专利族组合。这一趋势印证了传统石化行业向可持续发展转型的大趋势，老牌企业纷纷布局可生物降解和生物基聚酯技术。与此同时，三菱化学、钟渊化学以及金发科技等精细化工企业及创新者的积极专利布局表明，该技术正稳步从研究阶段迈向商业化应用。欧洲和北美地区虽也有相关专利布局，但集中度较低，反映出各区域不同的创新战略。

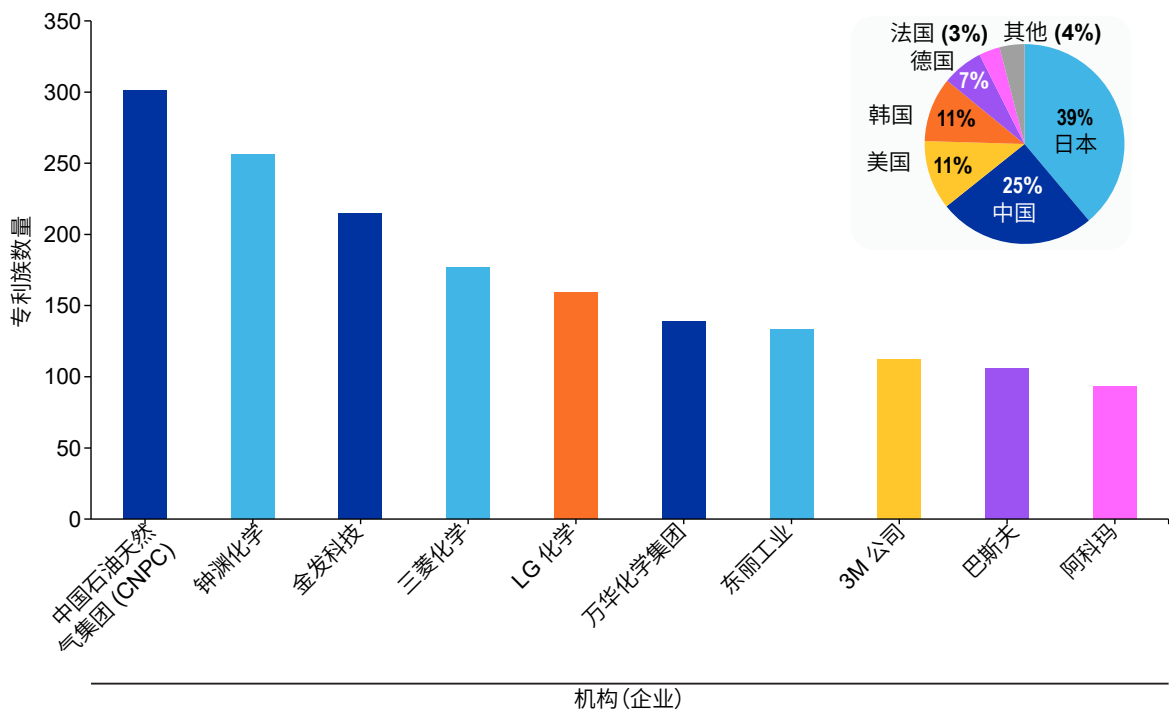


图 61. 新一代聚酯领域中的领先机构（企业）。饼图展示了这些机构的地理分布。数据涵盖 2020 至 2024 年期间 CAS 内容合集的期刊论文与专利文献。

聚酯材料的多元化发展格局，标志着行业正在发生根本性转变：从过去单一聚合物主导市场，转向将性能要求与产品生命周期末端考量相结合的应用导向型材料策略。行业发展现状表明，新材料能否成功打入市场，不仅取决于聚合物本身的性能，还需要配套的加工体系、标准化堆肥检测规范以及供应链整合作为支撑，以此打通从技术研发向规模化工业应用的全链条。随着法规体系日益倾向于循环设计原则，新一代聚酯材料体系将推动行业实现升级：不再局限于简单的生物基替代方案，而是打造真正意义上可持续的材料体系——该体系能够同时满足不同应用领域的技术指标与环保要求。

8.2 高性能弹性体

对 2020 至 2024 年间聚合物相关专利与期刊论文的自然语言处理 (NLP) 分析表明，高性能弹性体正迅速崛起为一个新兴研究领域，多个前沿技术在此领域融合创新。该综合性领域涵盖智能响应材料、增强型加工平台以及面向特定应用的性能优化，标志着弹性体研发正从传统弹性体开发向多功能、自适应聚合物系统的范式转变。当前高性能弹性体主要包含五大技术方向：实现可

编程形变材料的液晶弹性体 (LCEs)；兼具机械柔韧性与电学功能的导电弹性体；为热固性橡胶提供可回收利用替代方案的热塑性弹性体 (TPEs)；具备增强耐化学性与耐热性的特种合成橡胶；以及在保持性能要求的同时满足可持续性需求的生物基弹性体。

各类技术融合发展，反映了工业界对新材料的迫切需求——即材料需兼顾机械性能、环境可持续性、加工效率，并适配软体机器人、可穿戴电子设备及自主系统等新兴应用场景。自然语言处理 (NLP) 的关键词分析表明，该领域正从经验性的橡胶混炼，转向设计具有可预测、可调性能的弹性体材料。

图 62 展示了新兴弹性体在期刊与专利中的发表趋势。导电弹性体、液晶弹性体 (LCEs) 和热塑性聚酰胺弹性体 (TPAEs) 是期刊论文中涌现的新兴材料 (图 62A)。其中，液晶弹性体 (LCEs) 代表了最具科学价值的新兴技术，它将液晶有序结构与弹性体网络相结合，从而创造出可编程的致动器材料。⁷⁶² 这类材料能在热、光或电刺激下发生可逆形变，应用领域涵盖软体机器人、3D 打印及生物医学设备。⁷⁶³ LCEs 的功能实现依赖于液晶取

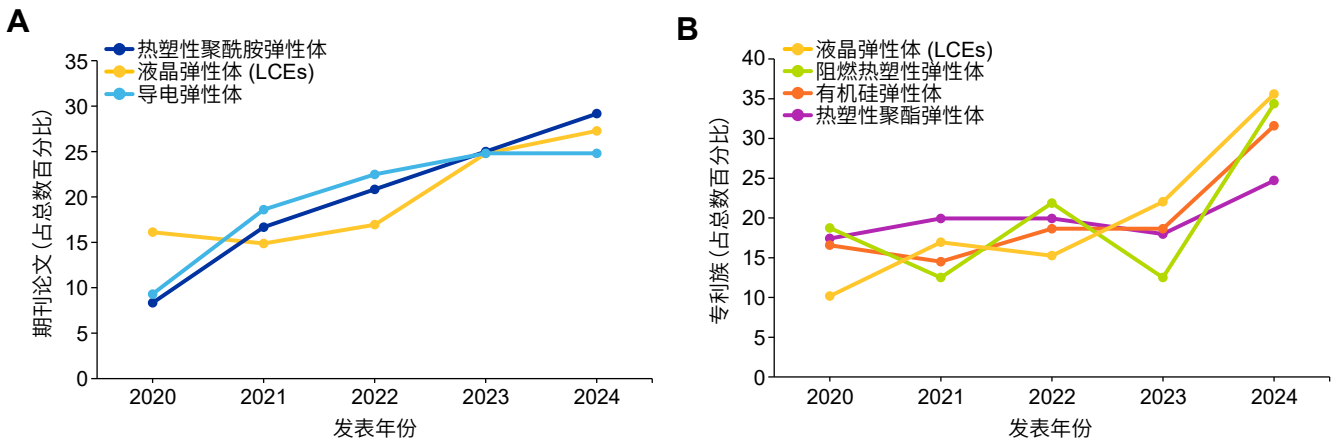


图 62. 2020 至 2024 年期间新兴弹性体在期刊 (A) 与专利 (B) 中的发表趋势

向方向与力学形变之间的耦合效应，从而制备出能够执行弯曲、扭转和振荡等复杂运动的材料。导电弹性体已成为柔性电子与软体机器人应用中的关键材料，这类材料在发生力学形变时，导电性能仍可保持稳定或实现可控调节。⁷⁶⁴ 这类材料通常在弹性体基体中掺入导电填料（碳纳米管、石墨烯、金属颗粒），从而形成应变敏感的导电网络。⁷⁶⁵ 导电网络在机械形变下的渗流行为，为开发压力传感器、应变片及柔性电路提供了可能，使其在大幅形变（应变超过 100%）下仍能正常工作。⁷⁶⁶ TPAE 是一类先进的嵌段共聚物，由聚酰胺硬段与柔性软段结合而成，兼具高温弹性与热塑性加工特性。⁷⁶⁷ 与传统热塑性弹性体 (TPE) 相比，这类材料在高温下具有更优异的力学性能，可应用于汽车发动机舱零部件与工业密封件。⁷⁶⁸ 聚酰胺链段中的氢键形成了物理交联，既赋予材料弹性体行为，又保持其热可逆特性，便于回收与再加工。

专利族中新兴的弹性体包括阻燃热塑性弹性体、LCEs、硅橡胶以及热塑性聚酯弹性体 (TPEEs) (图 62B)。阻燃热塑性弹性体可满足交通运输、建筑及电气应用中的关键安全性要求。⁷⁶⁹ 这些材料通过引入阻燃添加剂或具有本征阻燃性的聚合物结构，在保持弹性与热塑加工性的同时实现阻燃效果。目前的研发重点在于通过磷系添加剂、金属氢氧化物或本征阻燃聚合物主链实现无卤阻燃，既能满足严苛的消防安全标准，又避免卤素化合物带来的环境问题。有机硅弹性体正不断向适用于极端工况的专用应用领域发展。改性的有机硅弹性体可为医疗植入物提供生物相容性，为

航空航天应用提供超过 200°C 的热稳定性，并为 LED 封装提供光学透明度。^{770, 771} 相关专利主要聚焦新型交联体系、功能性有机硅改性工艺以及能够实现复杂几何结构与多材料集成的加工技术。TPEE 虽属成熟技术，但正借助生物基原料与高性能配方迎来新一轮创新。⁷⁷² 这些嵌段共聚物将结晶性聚酯硬段与柔性聚醚或聚酯软段相结合，其耐化学性与耐高温性能均优于传统热塑性弹性体 (TPE)。⁷⁷³ TPEE 的商业开发侧重于汽车应用领域，可替代燃油系统中的热固性橡胶部件，在与新型燃油配方保持良好相容性的同时，还具备可回收性优势。⁷⁷⁴

综上，高性能弹性体的发展趋势反映了工业界对材料的多元要求：材料需兼顾机械性能、可持续性与加工效率，并能应用于软体机器人、可穿戴电子设备及自主系统等新兴领域。随着技术不断迭代，高性能弹性体将突破传统行业界限，逐步在各大工业领域实现规模化应用。

8.3 导电聚合物

对聚合物数据的自然语言处理 (NLP) 分析进一步揭示，导电聚合物在期刊论文 (图 14) 与专利 (图 16) 中均备受关注，表明该领域已成为科研和技术研发的新兴热点。尽管导电聚合物因其兼具聚合物柔韧性与电子功能这一独特优势而长期备受关注，但近年来导电弹性体、导电胶粘剂、导电聚合物复合材料及导电聚合物电解质的迅猛发展表明，该领域正从单一的基础材料研究，向应用导向型及复合导电系统开发转型。我们扩展了分析范围，以探究这些导电系统在期刊

论文与专利中的应用演变。**图 63** 显示，2020 至 2024 年间这些先进导电材料快速兴起，行业朝着兼具导电性、机械性能或粘合性能的多功能材料方向发展，从而满足柔性电子、储能及先进制造应用中的核心应用需求。

导电胶粘剂是一个快速发展的领域，学术研究重点在于开发能够替代传统焊料连接、同时支持低温加工并兼容柔性基板材料。⁷⁷⁵ 期刊论文强调利用银、MXenes 和碳纳米管等填料提高热稳定性与导电性，同时开发兼具强力粘接与有效热管理的导热胶粘剂，用于电子封装领域。^{776, 777} 导电胶粘剂在柔性可拉伸电子设备中的应用也备受关注，在此类应用中，发生形变后仍能保持导电性对可穿戴设备、软体机器人与柔性传感器至关重要。⁷⁷⁸

在专利领域，导电胶粘剂已在 LED 封装、电池组件及光伏领域实现了商业化应用。^{779, 780} 在 LED 中，它们可实现低温电气粘接并高效散热；在电池中，它们在粘接电极的同时降低热应力与内阻。^{781, 782} 此外，专利还强调了耐热胶粘剂，表明工业界关注在高温工作环境下既能保持粘接强

度又能维持导电性的材料，这对汽车及电力电子应用至关重要。⁷⁸³ 总体而言，专利凸显了导电胶粘剂作为提升各类设备性能的实用解决方案，而期刊论文则聚焦针对先进新兴应用对其进行改进与开发。

在此期间，导电弹性体在期刊论文与专利中均呈现持续增长，表明学术界与工业界对该领域保持着持续关注。导电弹性体兼具导电性与高弹性，契合可拉伸、可穿戴电子设备及软体机器人的应用趋势，因此备受重视。^{176, 784} 它们广泛应用于柔性传感器与驱动器中，其电阻会随应变或压力变化，因而可用于健康监测、人机界面及假肢传感等领域。⁷⁸⁵ 此外，其增长势头亦表明，学术界和工业界正从刚性导电框架转向高顺应性架构——此类架构可在不牺牲电性能的前提下承受机械应力。

导电聚合物复合材料的研究趋势在 2024 年前呈现相对稳定且缓慢上升的态势，反映了业界持续通过填料改性优化材料的导电性。这类复合材料应用广泛，可用于电子皮肤、可穿戴电子设备及人体运动检测等领域，成为相关研究的主要推

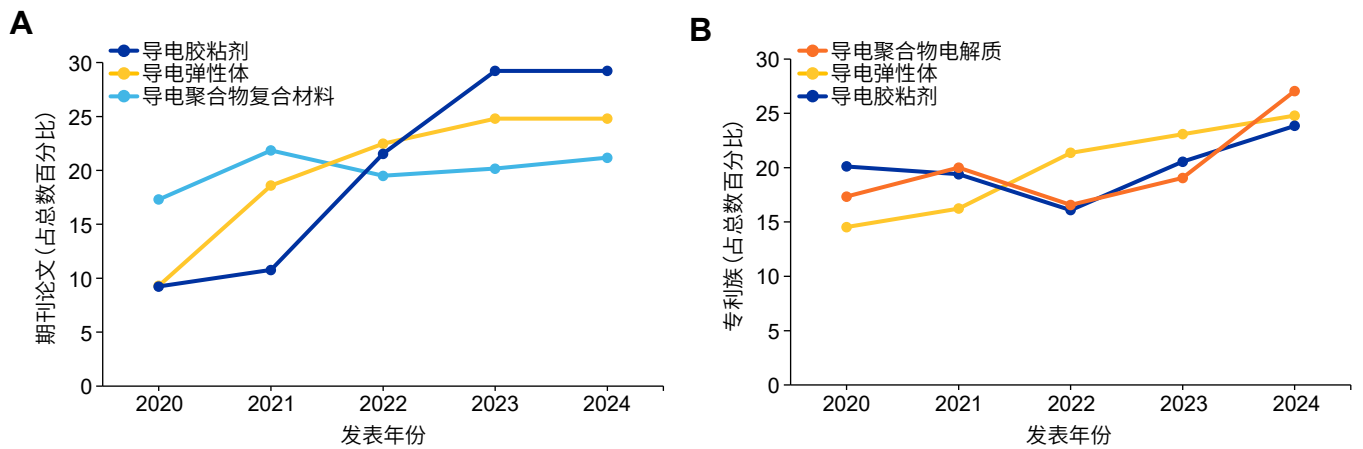


图 63. 2020 至 2024 年期间，CAS 内容合集中 (A) 期刊论文与 (B) 专利族的新兴导电聚合物系统发表趋势。

动力。⁷⁸⁶ 其可调的介电特性与刺激响应性能，亦使其可用于电磁干扰屏蔽、传感平台及软体机器人驱动部件。⁷⁸⁷ 随着新型复合材料结构的设计思路不断拓展，当各类新型材料体系与制备工艺逐步成熟后，相关专利活跃度有望随之升温。

在专利领域，导电聚合物电解质增长最快，这反映了市场对固态电池及更安全储能系统的迫切需求。相关专利聚焦于兼具高离子导电性、机械稳定性及宽电化学窗口的聚合物电解质，面向下一代锂电池、超级电容器及电致变色器件开展应用布局。^{788,789} 这些材料既解决了电动汽车的关键安全性问题，又为便携式电子设备的外形设计提供了更多可能。专利数量的激增表明，基础研究已成功转化为具备商业可行性的配方，这些配方不仅能实现规模化生产，还能满足热稳定性、循环寿命与安全性等方面的严苛性能要求。

综合各类导电体系可以看出，导电聚合物领域正迎来整体转型：从对本征导电聚合物主链的孤立研究，转向系统化设计理念，即将导电性与机械顺应性、粘附性、结构增强或离子迁移性能有机结合。多方向技术融合，标志着该领域的研究体系愈发成熟且紧密贴合应用需求。导电聚合物也由此成为电子、能源及新兴多功能技术领域的关键赋能材料。

8.4 动态聚合物网络

从自然语言处理 (NLP) 的聚合物数据分析结果中，我们发现动态聚合物网络 (DPNs) 已成为期刊论文中一个显著的新兴研究课题（图 14），但相关的专利活动并未同步增长。这种不对称性表

明，DPNs 目前仍处于科学驱动的概念开发阶段：研究人员正积极探索新的化学体系、作用机制与设计规则，而产业化应用仍较为有限。

DPNs 打破了传统永久惰性交联聚合物的固有特性，通过引入可逆或可交换的相互作用，可实现自修复、应力松弛、熔接、再加工、形状重塑及可回收利用等功能。⁷⁹⁰ DPNs 在学术文献中的占比持续提升，反映了高分子领域的主流研究方向：聚焦绿色可持续性、循环材料设计以及耐损伤、自适应材料的开发。然而，专利增长的停滞表明，这些理念尚未转化为成熟的制造工艺或可靠的工业配方。换言之，该领域在学术层面正不断拓展，但商业化落地仍处于孕育阶段。

在 DPN 领域，研究热度最高的类别当属动态共价网络 (CANs)。这类材料兼具共价交联聚合物的优异机械性能，同时可在外界刺激下实现网络拓扑结构重组。⁷⁹¹ CANs 在学术研究中备受瞩目，因其有望实现热固性材料的重复加工——这是聚合物材料领域长期以来的追求目标。⁷⁹²

CANs 进一步分为两大类——类玻璃高分子 (Vitrimers) 与解离型共价网络，二者具有不同的动力学特性及实际应用局限。类玻璃高分子通过缔合交换机制实现流动，同时保持交联密度，但催化剂复杂性、湿度敏感性以及再加工过程中的性能漂移等挑战仍阻碍其工业应用。^{793, 794} 解离型共价网络则通过解离交换表现出响应性行为，但其解离导致的软化会降低机械完整性，从而限制其在承重复合材料、涂层和胶粘剂中的应用。^{795, 796}

除 CANs 之外，超分子聚合物网络是另一大类动态高分子体系。这些网络依靠可逆的非共价相互作用，例如氢键、离子簇、主客体复合物、 π -相互作用或金属-配体配位作用构建。⁷⁹⁷ 然而，超分子体系在抗蠕变性、环境稳定性、湿度敏感性⁷⁹⁸及长期耐久性方面存在局限，这些因素均阻碍了其产业化进程。

我们进一步分析了数据中各类动态系统的发表趋势（图 64）。结果显示不同方向的研究热度出现明显分化，其中类玻璃高分子发展增速最快，技术体系也日趋成熟。这一陡峭的增长曲线表明，该领域的研究重点正转向可再加工热固性材料，主要受工业界对可回收复合材料、可重加工涂层及可持续高性能材料的需求驱动。⁷⁹⁹ 此外，这种快速增长也得益于动态交联高分子化学体系的多样化发展（例如酯交换、亚胺交换、二酮烯胺交换），以及业界为解决长期存在的难题而做出的持续努力。^{800, 801}

相比之下，解离型共价网络呈现更为温和但稳步上升的态势。其增长轨迹表明，学术界对温和条件下自修复体系的兴趣正在回升。然而，与类玻璃高分子相比，其易解离特性与较弱的机械稳定性可能限制了应用拓展。⁷⁹⁶ 超分子聚合物网络的增长速度最为缓慢，一方面是因为其理论体系已较为成熟，另一方面也受自身短板制约：与共价网络相比，其蠕变敏感性更高、环境稳定性更差且承重性能更弱。⁷⁹⁸ 目前该领域仅围绕自修复涂层、可拉伸电子器件及生物医学材料等开展应用研究，暂未出现颠覆性基础性突破。

总体而言，当前学术研究的重点在于寻找具有更高稳定性与循环耐久性的化学体系。然而，这类材料要实现大规模商业化，还需进一步提升综合性能，并解决与填料、增强材料之间的兼容性问题。

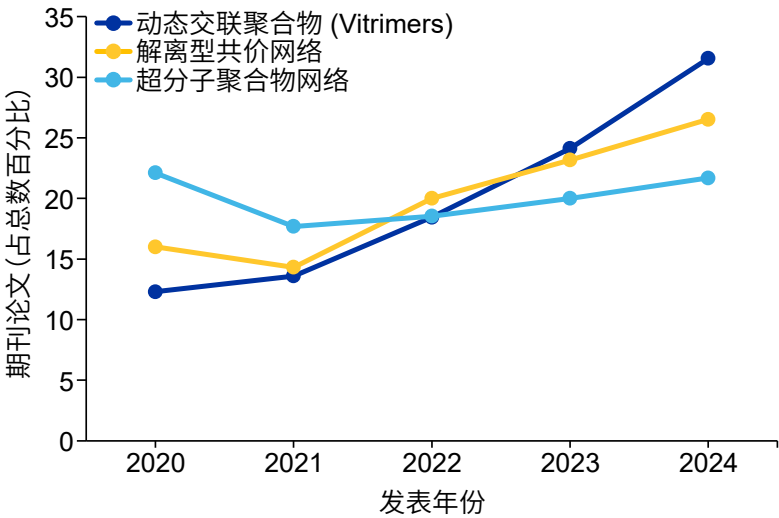


图 64. 2020 至 2024 年期间，CAS 内容合集中各类新兴动态聚合物网络的期刊论文发表趋势。

8.5 先进工程材料

对 2020 至 2024 年间聚合物相关专利与期刊论文的自然语言处理 (NLP) 分析表明, 先进工程高分子材料 (AEMs) 正快速崛起为一个新兴研究领域。AEMs 广泛用于航空航天、汽车、电子及工业设备等领域, 可满足这些场景对材料的机械、热学及化学性的极高要求。高端工程聚合物领域涵盖了多个关键技术集群: 兼具优异力学性能与加工优势的长链聚酰胺; 可作为超高强度增强材料的芳纶纳米纤维 (ANFs); 兼具环保与性能的生物基工程聚合物; 满足特定应用需求的特种聚酯; 以及在保持优异性能的同时赋予加工灵活性的高性能热塑性塑料。

图 65 展示了新兴材料在期刊与专利中的发表趋势。芳纶、PA56、PETG 和聚间苯二甲酰间苯二胺 (PMIA) 是期刊论文中出现的新兴材料 (图 65A)。芳纶是当下最具科研价值的前沿方向, 研究重点聚焦于作为下一代增强材料的芳纶纳米纤维 (ANFs)。这些超高强度纤维源自传统芳纶聚合物, 通过受控的原纤化工艺制得, 能够在纳米尺度上提供卓越的机械增强性能。ANFs 在复合材

料体系中作为多功能添加剂, 不仅能机械增强, 还兼具热管理、电绝缘及阻隔性能。⁸⁰² 目前相关研究侧重于开发 ANF 的规模化制备方法, 并理解其在多种聚合物基体中的分散行为, 以优化复合材料的性能。PMIA 作为一种高温芳纶材料, 与传统工程塑料相比, 具有更优异的热稳定性与阻燃性。^{803, 804} PMIA 的间位连接芳香族聚酯结构使其无需添加剂即具备本征阻燃性, 同时在加工性方面优于凯夫拉 (Kevlar) 等对位芳纶。学术界重点攻关 PMIA 成型加工技术、高温老化降解机理, 并探索其在航空航天和电子等对阻燃性要求极高的领域中的应用。PA 56 作为一种关键的生物基工程聚酰胺, 依托可再生原料制备, 综合性能出色。PA 56 由生物基戊二胺与己二酸聚合而成, 与传统的 PA 6 及 PA 66 相比, 具有更优异的尺寸稳定性与更低的吸湿性。⁸⁰⁵ 该聚合物均衡的结晶行为使其在保持适用于汽车和工业应用的机械性能的同时, 还具备加工优势。学术研究侧重于优化合成路径、理解构效关系, 以及开发面向特定应用的专用牌号。PETG 属于新型无定形聚酯技术, 具有卓越的光学透明度、耐化学性及可加工性。与结晶性 PET

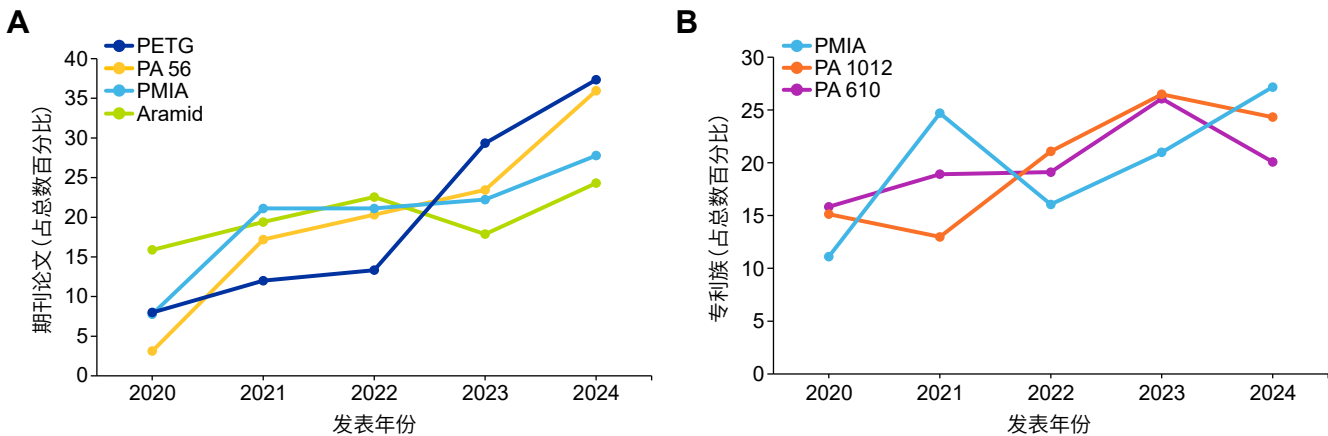


图 65. 2020 至 2024 年期间, 新兴先进工程材料在 (A) 期刊与 (B) 专利中的发表趋势

不同，PETG 的无定形结构使其能够通过热成型与注塑加工，适用于对光学透明度与抗冲击性有要求的应用场景。⁸⁰⁶ 相关的研究重点在于理解二元醇改性程度与最终性能之间的关系，开发 PETG 废料回收技术，以及优化复杂几何形状的加工条件。

聚酰胺 610 (PA 610)、聚酰胺 1012 (PA 1012) 及 PMIA 是专利族中的新兴材料（图 65B）。PA 610 作为一种具有增强性能特性的生物基长链聚酰胺，展现出强劲的商业开发势头。PA 610 由己二胺与（蓖麻油基）癸二酸聚合制备，与传统的短链聚酰胺相比，具有更低的吸湿性、更优的尺寸稳定性及更强的耐化学性。⁸⁰⁷ 相关专利主要聚焦汽车燃油系统应用：PA 610 对现代燃油配方（包括乙醇混合燃料）的耐化学性优于 PA6 与 PA 66，同时满足可持续性要求。⁸⁰⁸ PA 1012 属于高端长链聚酰胺，在保持工程塑料性能水平的同时，兼具卓越的柔韧性与抗冲击性。PA 1012 中更长的亚甲基链段降低了材料的结晶度与玻璃化转变温度，即便在低温环境下仍能保持韧性，且不牺牲机械强度。⁸⁰⁹ 商业开发重点聚焦于恶劣环境下的应用，即传统工程塑料易变脆的场合，包括暴露于温度交叉变化环境的汽车外饰件及工业设备。PMIA 同时在期刊与专利中均有大量布局，表明其已成功实现从基础研究到商业化的跨越。专利主要集中于加工技术、纤维纺丝方法，以及针对需要高温性能与阻燃性的行业所开发的特定应用配方。商业应用包括航空航天内饰组件、电气绝缘系统及防护装备，在这些领域，PMIA 凭借其加工性能与综合性能的结合，相比传统热固性材料更具优势。^{810, 811}

综上，先进工程高分子材料领域实现了基础研究与商业创新的深度融合，其中生物基长链聚酰胺与芳纶纳米纤维是最具代表的新兴技术。这两类材料在学术文献与专利文献中同步快速发展，表明相关技术已成功转化，且具备良好的商业化前景。

8.6 超支化聚合物材料

自然语言处理 (NLP) 分析显示，2020 至 2024 年间，超支化聚合物领域的专利数量年均增速达 10%，可见其商业研发热度高涨（图 16）。超支化聚合物结构特殊，拥有高度支化的三维树状结构，与传统线性聚合物链存在显著差异。⁸¹² 与线性生长的传统聚合物不同，超支化聚合物在其结构中包含大量分支点，从而形成致密的球状形态，并携带众多官能团端基。⁸¹³ 这种独特的结构赋予了它们非凡的特性：尽管分子量高但溶液粘度低；同时可反应端基含量高，可根据具体应用进行改性。超支化聚合物兼具独特的可加工性、官能团特性及综合性能，使其在半导体⁸¹⁴ 及储能系统等诸多应用领域备受青睐。⁸¹⁵

图 66A 显示，2015 至 2025 年间，超支化聚合物材料的专利族数量呈现显著上升趋势，这反映了市场关注度不断提升，以及这类具备实际应用价值的结构材料也逐步走向技术成熟。这一趋势与自然语言处理 (NLP) 分析结果相吻合：超支化聚合物已是高分子领域的新型研究方向，正从纯理论研究转变为多领域应用的核心平台。我们进一步考察了 NLP 分析中被认定为高增长领域的几类超支化聚合物（图 16），具体包括聚酯、聚硅氧烷、环氧树脂和聚酰胺，具体数据如图 66B 所示。

超支化聚酯、聚硅氧烷、环氧树脂和聚酰胺领域的相关专利数量持续增长，说明这类功能性材料已具备落地应用条件，其化学结构也与新兴工业需求高度契合。超支化聚酯因其可生物降解性以及和纳米材料良好的复配兼容性而日益受到

关注，在可持续发展、生物医学及高性能应用领域极具吸引力。^{816, 817}超支化聚硅氧烷拥有优异的热稳定性、柔韧性、荧光特性及表面改性潜力，可满足先进涂层、生物传感器、药物递送、生物成像及化学检测领域日益增长的应用需求。

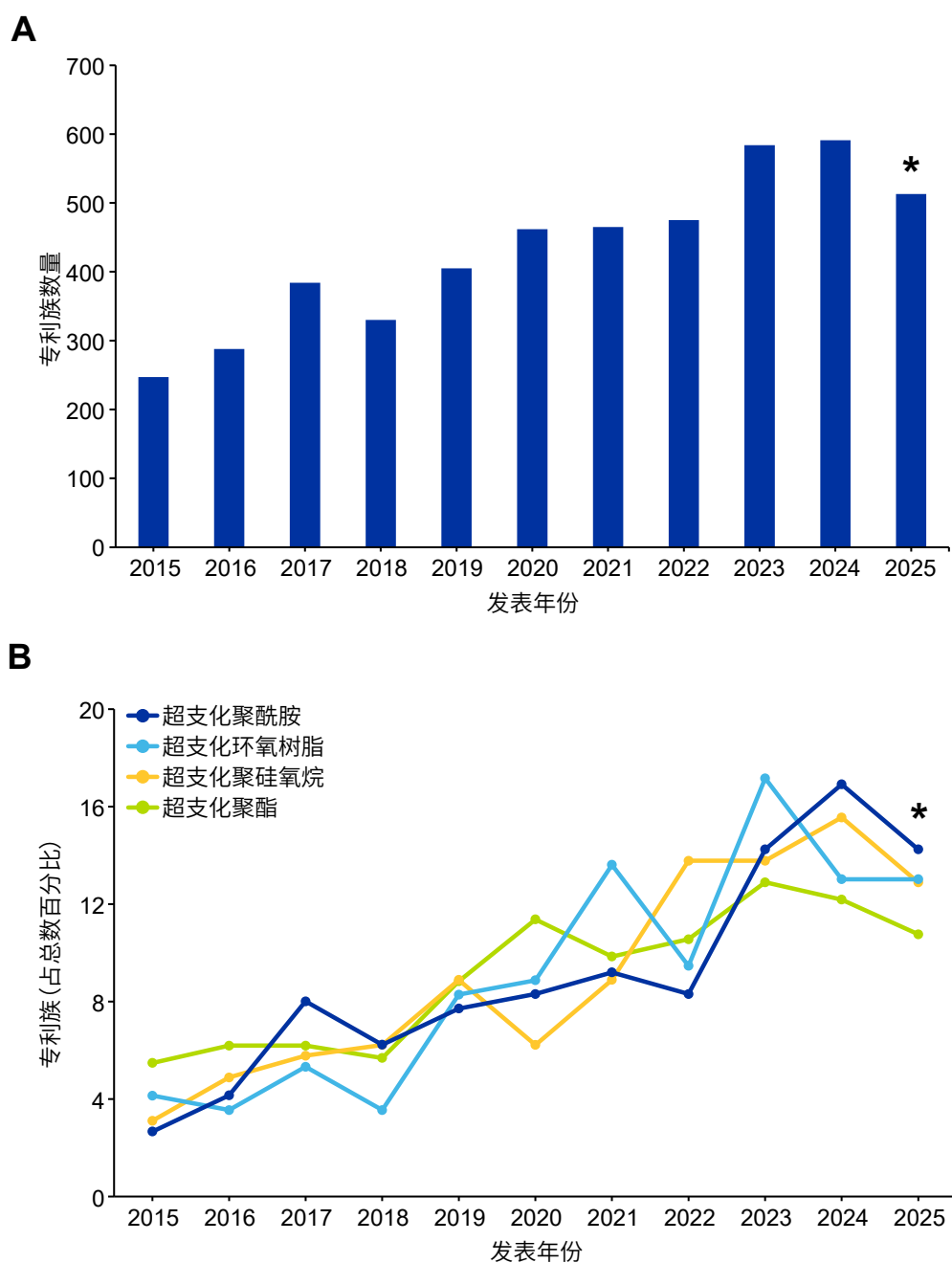


图 66. (A) 超支化聚合物材料的专利公开趋势，以及 (B) 特定类别超支化聚合物材料（即聚酯、聚硅氧烷、环氧树脂和聚酰胺）的相对专利公开趋势。*注：2025 年数据仅涵盖 1 月至 11 月。

超支化环氧树脂具有高交联密度以及优异的机械性能与耐化学性，因此迅速在胶粘剂、复合材料及防护涂层领域获得应用。^{818, 819}最后，超支化聚酰胺凭借其优异的机械强度、耐溶剂性及功能化能力，在膜材料与阻隔材料领域的重要性日益凸显。⁸²⁰这四大类材料的共同增长，反映了高分子行业正整体趋向于开发高功能性、结构多样性以及与下一代技术兼容的聚合物材料。

8.7 框架材料

框架材料是一类革命性的晶态多空材料，凭借其结构多样性与性能可调性⁸²¹已彻底改变了材料科学领域；根据我们的 NLP 分析（图 12），2020 至 2024 年间，其平均增长幅度超过 2 倍。金属有机框架 (MOFs)（图 11、图 13）由金属离子或团簇作为节点，有机配体作为连接单元构筑形成的三维网络结构，具有极高比表面积（通常超过 1000 m²/g），且孔径可精确调控。⁸²²共价有机框架 (COFs)（图 11、图 13）是纯有机晶体材料，其结构单元通过强共价键连接，具备卓越的化学稳定性、永久孔隙率，并能在骨架中引入各类官能团。⁸²¹沸石咪唑酯骨架 (ZIFs) 是 MOFs 的一个特殊子类，它将金属节点（通常为锌或钴）与咪唑酯连接子相结合，形成既模拟沸石拓扑结构又保持 MOFs 化学可调性的材料，并因此赋予了材料卓越的热稳定性与化学稳定性。⁸²³氢键有机框架 (HOFs) 则通过较弱但更具动态性的氢键相互作用构建而成，形成更为灵活且响应性更强的结构。⁸²⁴这些框架材料可实现对孔隙率、表面化学性质及功能的精细化调控，在气体存储、能量存储、分离与催化等领域应用价值巨大。其模块化设计使得通过合理选择结构单元，即可为特定应用量身定制材料性能。^{825, 826}

框架材料可与聚合物复合改性，从而制备出先进的复合材料。这类材料兼具聚合物的可加工性与力学性能，以及框架结构卓越的孔隙率与功能性。⁸²⁷此类混合材料体系一般是通过将框架颗粒 (MOFs、COFs、HOFs 或 ZIFs) 分散在聚砜、聚酰亚胺或聚硅氧烷等聚合物基体中而制备。框架材料作为功能性填料，能够显著提升气体分离性能、催化活性或传感能力，而聚合物则提供结构完整性、柔韧性，并便于加工成薄膜、纤维或其他复杂形状。⁸²⁸

图 67 展示了 2015 至 2025 年间聚合物框架材料相关专利的增长态势。2023 年以前，专利数量稳步上升，随后增速显著加快，并在 2024–2025 年间达到峰值，年专利公开量超过 700 项。MOFs 在早期研究中占据主导地位，并在整个研究期间保持较高研发热度。然而，最引人注目的是 COFs 的爆发式增长——该领域在早期仅占次要地位，但自 2022 年以来已成为推动行业增长的主要驱动力。ZIFs 历年发展平稳但整体规模偏小，而 HOFs 则始终是增长最为缓慢的研究领域。数据表明，聚合物框架材料领域正迎来空前发展，而 COFs 已成为主导性的研究方向，从根本上改变了行业研究格局，也是近年专利数量激增的核心原因。

8.8 光敏聚合物

光化辐射是指能够引发光化学反应的高能紫外光及短波长可见光。在半导体光刻工艺中，光敏聚合物用作化学放大光刻胶 (CAR) 中的粘合树脂。这些材料的作用机制已得到充分验证：首先暴露于光化辐射，随后光产酸剂 (PAG) 被激活，经酸催化发生脱保护或断链，继而引起极性变化，从而实现选择性溶解。⁸²⁹这些光刻胶体系的

性能取决于光酸生成与扩散、聚合物分子结构以及显影液相互作用之间的协同效应，这些因素共同决定了灵敏度、分辨率及随机噪声特性等关键光刻指标。⁸³⁰ 结合专利自然语言处理 (NLP) 分析 (图 16) 结果可知：尽管光敏聚合物在总体研究规模中占比仍然较小，但其增长率强劲 (>2)，说明下一代光刻胶相关技术创新热度回升，行业关注度持续提高。这一增长趋势反映了业界正在持续努力开发下一代光刻材料，以适配半导体器件的持续微缩进程，并应对新兴的图案化挑战。

图 68 展现了光敏聚合物专利申请的增长势头。值得注意的是，该领域的所有专利仅掌握在两家日本企业手中：富士胶片控股和东洋油墨 (Artience)。分析表明，富士胶片控股的光敏聚合物创新是通过一个专为 25 纳米以下极紫外 (EUV)

光刻技术设计的综合材料平台实现的。^{831, 832} 富士胶片并未止步于孤立的发明，而是将光致酸产生剂 (PAGs)、聚合物结构及加工条件整合为一个相互依存的体系，旨在解决分辨率、线宽粗糙度与灵敏度之间的根本性矛盾。在化学结构设计上，该公司采用定制化铈盐/碘鎓盐类光致酸产生剂，配合含氟芳香族结构的特种聚合物主链以控制扩散；⁸³³ 同时引入含硅骨架以提升抗蚀刻性；⁸³⁴ 以及选用主链断裂型聚合物以实现高感光度；⁸³⁵ 再辅以硼化合物和金属增感剂等精密添加剂，精细调控酸的寿命与 EUV 吸收。⁸³⁶ 工艺端则与化学体系协同设计：选用乙酸丁酯混合体系有机显影剂，适配材料极性变化；采用双重显影工艺优化图形分辨率，并配套使用上层保护性薄膜。

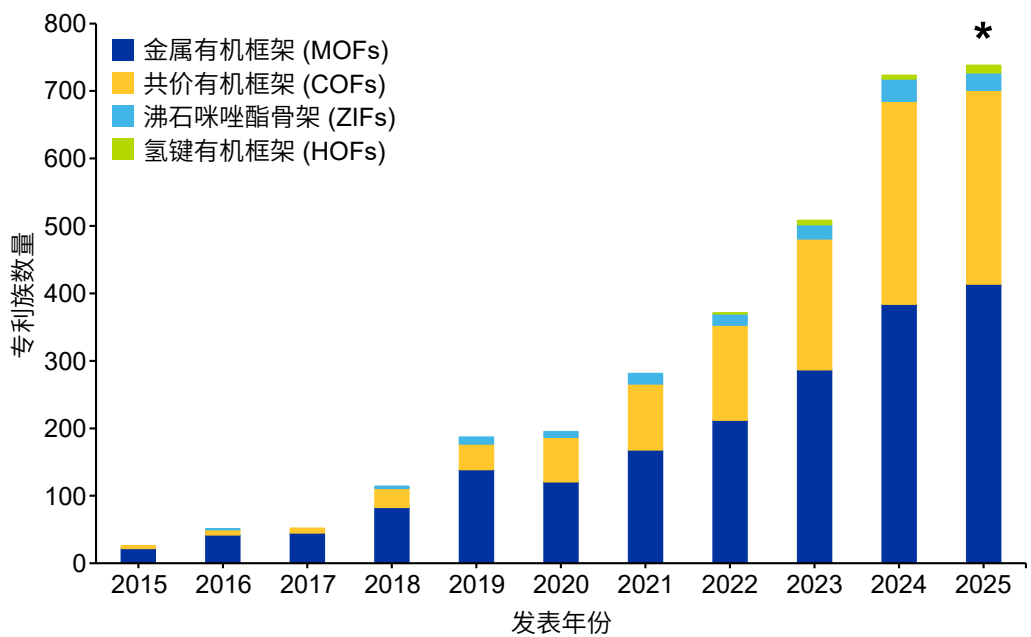


图 67. 特定类别框架材料的专利公开趋势。*注：2025 年数据仅涵盖 1 月至 11 月。

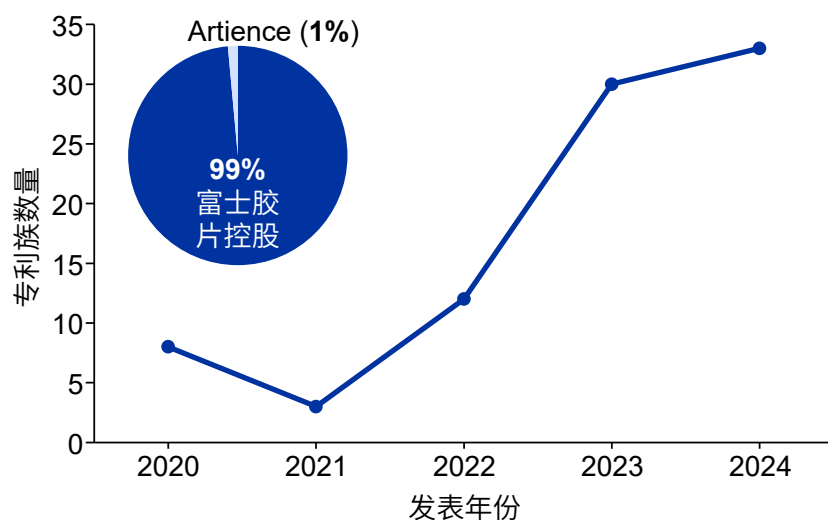


图 68. 光敏聚合物的专利公开趋势。内嵌饼图展示了专利族的机构（企业）分布情况。数据涵盖 CAS 内容合集中 2020 至 2024 年期间的专利文献。

这种系统化研究思路表明，未来 EUV 光刻技术的进步，有赖于对整个光刻胶体系的协同优化，而非单一组分的突破。该技术方案还可满足 20 纳米以下高数值孔径 (NA) EUV 光刻的应用要

求。在此工况下，受光子随机效应限制，必须通过材料与工艺的一体化协同设计，实现对化学反应过程的精准调控。

9. 结论

9.1 全球聚合物创新格局综述

对 2015 至 2025 年间近一百万篇聚合物相关文献的全面分析表明，该领域正经历着前所未有的变革。通过系统考察文献计量数据、基于自然语言处理 (NLP) 的深度分析以及 CAS 索引概念，我们发现，高分子科学已从单纯的材料学科，逐步转型为能够解决全球关键难题的综合应用学科。

本次分析最核心的结论是创新能力的地理格局已发生根本性重构。中国作为主导力量的崛起——贡献了 40% 的期刊论文和 56% 的专利族——其意义远非单纯的数量增长所能概括。这标志着一种全新的创新范式已然形成：亚太地区的机构（尤其是中国的国有企业与高校），正引领着全球基础研究与产业化落地。与此同时，日本具备极强的科研成果转化能力，可将研究成果高效转化为高价值专利；韩国则在电子与化工领域开展精准创新布局。多方合力之下，亚太地区已然成为全球聚合物创新的中心，其柔性电子相关专利占比 82%，在其他重点战略领域亦占据相近份额。

9.2 融合主题与技术演进

我们的多维度分析揭示了正在重塑聚合物科学的变革性主题：

多功能性一体化：高分子材料研发已从优化单一性能，演进为开发能够满足多重性能要求的材料，这一趋势在所有研究领域中均有体现。储能用聚合物必须在离子导电性、机械稳定性与可加工性之间取得平衡；柔性电子材料将结构支撑、电学功能与环境保护融为一体；分离膜材料则兼顾了选择性、耐久性与量产能力。这种向多功能材料体系的发展趋势，标志着材料设计理念发生了根本性转变。

绿色可持续成为核心性能指标：环境兼容性与功能性能之间长久以来的对立局面已不复存在。可持续聚合物的期刊发文量增长了 190%，专利数量也同步增长，表明相关技术已成功实现产业化落地。PLA、PBAT 及生物基聚酰胺等材料，如今凭借综合性能参与市场竞争，而非仅依靠环保属性。合成生物学平台的出现进一步加速了这一转型，这些平台能够生产可直接替代传统原料的单体，还能利用微生物直接合成聚合物；其中以乳酸、琥珀酸为核心的生物基原料平台技术，已迈入工业化成熟阶段。

制造工艺引领技术创新：加工工艺正日益主导着材料的选型与研发优先级。这一点在多个方面均有体现：可规模化加工方法在专利全景中表现突出；电池领域普遍侧重水性加工体系；溶液加工性能更是柔性电子中的关键指标。增材制造与聚合物创新的深度融合，也生动地诠释了加工技术正深刻影响着材料的发展方向。

9.3 特定应用的洞察与机遇

9.3.1. 储能系统

高分子材料已从传统辅助材料转变为核心功能材料。在储能领域，电池相关专利占比达 75%，且呈现出清晰的“材料-应用”适配特征：含氟聚合物是电池隔膜与粘结剂的主流选择；羧甲基纤维素 (CMC) 等天然聚合物推动着电极技术向可持续方向发展。在固态电池领域，学术界侧重于研究 PEG 基电解质，工业界则聚焦可加工的含氟聚合物，二者技术路线出现明显分化。锌离子技术的发展以及钠离子体系的涌现，表明电池技术正超越锂离子实现多元化，也为专用聚合物电解质与隔膜材料创造了新的发展机遇。

关键战略洞察：学术研究深耕新型 PEG 基固态电解质，而企业专利则持续优化成熟的含氟聚合物体系，二者发展方向差异显著，暴露出下一代电池技术在成果转化上存在明显断层。致力于固态电池技术的企业面临战略抉择：是投资高风险的新型材料，还是专注于成熟系统的渐进式改良。目前，亚洲地区的企业在这两条路径上均占据主导地位。

9.3.2. 可持续聚合物

可持续聚合物领域呈现出精密的细分市场格局，其中电子半导体（47,723 项专利）与纺织领域（40,973 项专利）的商业化应用规模位居前列。聚醚多元醇因加工性能优异，在各类场景中均得到广泛应用；而 PHBHHx（增长 192%）及 CMC 衍生物（增长 150%-700%）等专用生物聚合物，则瞄准高价值利基市场。从单体制备领域 期刊-专利数量 63:37 的比例可以看出，合成生物学与聚合物生产的结合已具备扎实的研究基础，但生物制造技术仍面临规模化量产难题。

关键战略洞察：可持续聚合物已从生产生物基大宗商品替代品，转向开发新型高性能材料。合成生物学领域的投资，正集中于开发高性能应用的单体：如用于特种聚酰胺的长链二元酸与二元胺、用于阻隔性聚酯的呋喃二甲酸、用于柔性可降解材料的琥珀酸系列原料，而非仅仅生产生物基大宗塑料的替代品。这也解释了为何中国石化、东丽工业、三星等老牌石化与化工企业，纷纷在发酵及聚合物专利领域投入巨资。可持续聚合物正演变为需要贯穿价值链综合能力的高性能材料，而非仅凭终端处置优势竞争的环保替代品。

9.3.3. 柔性电子

该领域呈现出鲜明的区域分工特征：亚洲企业主导基础材料的创新，而西方企业则深耕高附加值应用领域。材料选择也体现出应用驱动的差异化特征：可穿戴设备中用于能量采集的含氟聚合物增长率达 109%；传感器中用于应变检测的聚醚多元醇增长率达 74%；显示器领域则以成熟的聚酰亚胺与聚酯材料为主，技术迭代相对稳健。学术界侧重于研发生物基材料，而工业界依旧沿用成熟的化学体系，这种分歧意味着可持续替代品在商业化落地过程中仍面临诸多阻碍。

关键战略洞察：柔性电子材料能否取得成功，关键不在于开发新型聚合物，而在于通过系统工程，将成熟材料整合至可量产的器件结构中。专利全景分析显示，亚洲企业之所以占据领先地位，核心在于其主要聚焦特定加工需求，对成熟材料体系（如聚酰亚胺、含氟聚合物）进行优化，而非研发颠覆性新材料。这也说明，该领域的竞争优势更多体现在制造能力与定制化配方技术上，而非高分子化学层面的原始创新。

9.3.4. 膜技术

该领域以专利成果为主，专利占比 57%，期刊占比 43%，表明该领域已步入成熟商业化阶段。二次电池隔膜技术增长迅猛，充分反映出储能产业的旺盛需求。行业呈现高度集中的地域格局：在排名前 30 的学术专利持有机构中，中国机构独占 29 席，其中天津工业大学凭借其专业化的分离膜科研平台位居前列。材料趋势方面，成熟聚合物如 PVDF、PTFE 因其可靠性而备受青睐，而新兴应用则驱动着复合膜（增长 119%）与阴离子交换膜（其中聚丙烯 (PP) 类增长 433%）的创新步伐。

关键战略洞察：膜技术领域呈现出两极分化态势：成熟应用市场由头部企业主导，其生产工艺和材料体系均已优化到位，竞争格局稳固；而新兴应用领域（如电池隔膜的异常增长，阴离子交换膜增长率超过 400%）的竞争格局仍处于动态变化之中。中国科研机构在专利领域的绝对主导地位，是国家层面对相关产业能力的系统性布局的结果。这意味着西方竞争者应将目光投向材料要求仍在迭代的新兴应用领域，而非在成熟的膜产品市场正面竞争。

9.4 新兴前沿与未来发展趋势

通过分析基于自然语言处理 (NLP) 得出的技术趋势与增长态势，我们识别出以下几种蓄势待发、即将迈向主流应用的变革性技术：

新一代聚酯材料：行业不再局限于聚乳酸 (PLA) 单一品类，逐步向聚己二酸-对苯二甲酸丁二醇酯 (PBAT)、聚丁二酸丁二醇酯 (PBS)、聚(3-羟基丁酸-co-3-羟基己酸) (PHBHHx) 及聚呋喃二甲酸乙二醇酯 (PEF) 等多元品类拓展。标志着行业正从单一生物降解解决方案，演进为面向应用的产品组合，兼顾材料的使用性能与废弃后环保属性。

动态聚合物网络：类玻璃高分子 (Vitrimers) 在学术领域呈现出爆发式增长，但专利活动并未同步跟进，表明该领域的基础技术突破尚未实现商业化。要想成功实现商业化，关键是要解决加工瓶颈，并验证这类可再加工热固性材料的经济性。

导电聚合物体系：相关研究的重心已从单纯探究本征导电性，转向将电学性能与机械顺应性、粘附性及离子迁移性能相融合，推动这类材料在柔性电子与储能应用领域落地应用。

框架-聚合物杂化材料：金属有机框架 (MOF) 和共价有机框架 (COF) 与聚合物基体的复合，可制备具有多重优异性能的新型材料。共价有机框架 (COF) 作为主要增长驱动力的崛起（预计到 2024 年将从次要组分转变为主导性框架材料），预示着其在催化与分离领域将有望实现突破性应用。

光敏聚合物：富士胶片与东洋油墨在 25 纳米以下光刻技术领域高度集中的创新，表明了通过化学体系、制备工艺与性能表征的全流程协同优化，能够持续支撑半导体器件的微缩化发展。

9.5 战略启示与建议

针对研究机构：成功的关键在于基础发现与应用导向型研发之间的平衡。那些发文量较低但引文影响力较高的机构证明，专注、高质量的研究比盲目追求发文数量的策略更具价值。此外，与亚洲制造中心开展合作，对于技术转化至关重要。

针对产业界：专利全景分析显示，目前仍存在不少技术空白领域存在发展机遇，包括化学储能（相关专利占比仅 1%）、可持续电子材料以及动态聚合物网络等。面对创新活动在地理上的高度集中，企业可通过缔结战略合作、布局区域性研发中心等方式主动应对。专利分析显示材料供应商的专利布局十分活跃，但要全面研判产业链发展态势，还需结合材料专利与器件专利综合分析。

针对政策制定者：全球创新格局的地域重构，深刻影响着技术自主与供应链安全。因此，在支持本土聚合物创新的同时，推动国际合作也尤为重要。相关监管法规也必须随材料创新同步完善，特别是针对可生物降解材料与生物基制造体系等。

9.6 挑战与未来展望

尽管高分子材料行业已经取得了显著进展，但关键挑战依然存在：

学术研究与商业应用之间仍存在显著的**转化鸿沟**，尤其是在动态网络、导电聚合物及生物基电子材料领域。这表明需要建立新的合作模式，以打通基础理论与工业应用之间的壁垒。

地域发展失衡既蕴藏机遇，也暗藏风险。尽管亚洲在文献产出规模上占据明显优势，但从引文影响力来看，西方机构在突破性创新方面仍保持领先地位，这表明两种创新模式具有互补性。

对于大宗应用而言，**可持续性、性能与成本**三者之间的优化仍难以实现。尽管技术不断进步，但要同时实现环境友好、功能优异与经济可行，仍是可持续替代品大规模应用所面临的挑战。

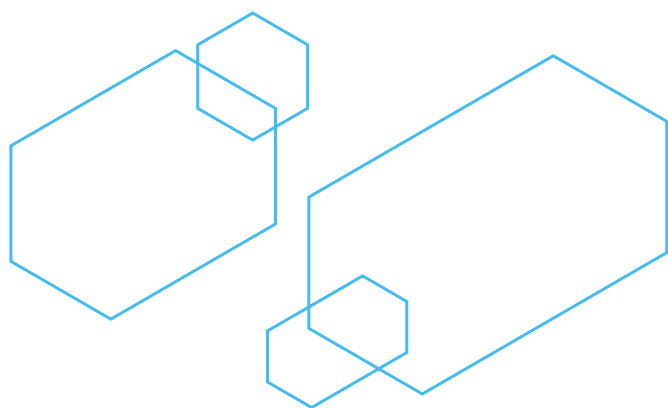
技术体系复杂性正日益成为决定成败的关键因素。随着聚合物从单纯的材料演变为集成系统，材料的成功与否取决于能否协调多种组件、加工工艺与性能要求，这使得具备综合能力的组织相比单一领域的专业化参与者更具竞争优势。

9.7 总结性展望

本分析所呈现的高分子材料创新格局表明，该领域正处于一个转折点。学科之间、可持续性与性能之间、基础材料与集成系统之间的传统界限正在消融，并以新的形态重新组合。在绿色发展刚需、数字制造技术与全球创新网络的共同推动下，行业迎来了实现跨越式发展的历史性机遇。

数据表明，聚合物科学正从一门传统的材料学科演变为一个赋能型技术平台。评判技术价值的标准，也从单一材料性能指标转向整体系统效益。那些能够洞察这一转型趋势，并投资于多功能材料、绿色生产体系及集成制造技术的组织与地区，将在未来十年的创新格局中占据主导地位。

展望未来，本分析所揭示的趋势表明，高分子材料将成为人类需求与技术能力之间的关键桥梁，为应对气候变化、资源短缺、医疗保健及先进制造等全球性挑战提供解决方案。未来的竞争赢家，必将属于那些既能驾驭这种复杂性，又能始终专注于创造高性能、可持续、易加工且易获取材料的从业者。高分子科学也将真正践行其发展使命，成为 21 世纪的应用型综合学科。



参考文献

- (1) *Bakelite: First synthetic plastic*. American Chemical Society, <https://www.acs.org/education/whatischemistry/landmarks/bakelite.html> (accessed 2026 19 February 2026).
- (2) Lodge, T. P. Celebrating 50 years of macromolecules. *Macromolecules* **2017**, *50* (24), 9525–9527. DOI: 10.1021/acs.macromol.7b02507.
- (3) Martin, T. B.; Audus, D. J. Emerging trends in machine learning: A polymer perspective. *ACS Polym. Au* **2023**, *3* (3), 239–258. DOI: 10.1021/acspolymersau.2c00053.
- (4) Patra, T. K. Data-driven methods for accelerating polymer design. *ACS Polym. Au* **2022**, *2* (1), 8–26. DOI: 10.1021/acspolymersau.1c00035.
- (5) *Wallace carothers and polymer science*. American Chemical Society, <https://www.acs.org/education/whatischemistry/landmarks/carotherspolymers.html> (accessed 2026 19 February 2026).
- (6) *Hermann staudinger and the foundation of polymer science*. <https://www.acs.org/education/whatischemistry/landmarks/staudingerpolymerscience.html> (accessed 2026 19 February 2026).
- (7) *Discovery of polypropylene and high-density polyethylene*. American Chemical Society, <https://www.acs.org/education/whatischemistry/landmarks/polypropylene.html> (accessed 2026 19 February 2026).
- (8) Lodge, T. P. Editorial. *Macromolecules* **2017**, *50* (1), 1–2. DOI: 10.1021/acs.macromol.6b02686.
- (9) Bin Abu Sofian, A. D. A.; Sun, X.; Gupta, V. K.; Berenjian, A.; Xia, A.; Ma, Z.; Show, P. L. Advances, synergy and perspectives of machine learning and biobased polymers for energy, fuels and biochemicals for a sustainable future. *Energy Fuels* **2024**, *38* (3), 1593–1617. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.3c03842.
- (10) Iyer, K. A.; Ivanov, J.; Tenchov, R.; Ralhan, K.; Rodriguez, Y.; Sasso, J. M.; Scott, S.; Zhou, Q. A. Emerging targets and therapeutics in immunoncology: Insights from landscape analysis. *J. Med. Chem.* **2024**, *67* (11), 8519–8544. DOI: 10.1021/acs.jmedchem.4c00568.
- (11) Hughes, K. J.; Iyer, K. A.; Bird, R. E.; Ivanov, J.; Banerjee, S.; Georges, G.; Zhou, Q. A. Review of carbon nanotube research and development: Materials and emerging applications. *ACS Appl. Nano Mater.* **2024**, *7* (16), 18695–18713. DOI: 10.1021/acsanm.4c02721.
- (12) Kim, J.-K.; Oh, S. H.; Song, M.-O.; Jang, S.; Kang, S. J.; Kwak, S. K.; Jin, J. Wholly bio-based, ultra-tough, transparent PLA composites reinforced with nanocellulose and nanochitin. *Compos. B: Eng* **2024**, *281*, 111563. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111563.
- (13) Lin, C.; Liang, C.; Li, J.; Liang, Y.; Dong, D. Transparent, tough, and self-healable elastomer based on dynamic dual cross-linking of coordination and disulfide bonds. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2024**, *6* (8), 4516–4524. DOI: 10.1021/acsapm.3c03177.
- (14) Aierken, Y.; Xu, Y.; Xiang, S.; Peng, W.; Zhang, X.; Hakkarainen, M.; Ma, P. Reprocessable, highly transparent ionic conductive elastomers based on β -amino ester chemistry for sensing devices. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2024**, *16* (19), 25374–25384. DOI: 10.1021/acsami.4c03559.
- (15) Yi, J.; Chen, J.; Wang, Z.; Zhu, J.; Li, X. Nanosilica-reinforced poly(dimethylsiloxane) stretchable transparent electrodes and multifunctional applications. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2024**, *16* (43), 59268–59279. DOI: 10.1021/acsami.4c12458.
- (16) Chae, S.-H.; Noh, Y.; Kim, I.-H.; Choi, H.-H.; Jeong, Y. G. Low-dielectric polyimide composite films with enhanced thermal, mechanical, and hydrophobic properties via silica aerogel integration. *Surf. Interfaces* **2025**, *69*, 106788. DOI: 10.1016/j.surf.2025.106788.
- (17) Zhang, Y.; Huang, S.; Lv, X.; Wang, K.; Yin, H.; Qiu, S.; Li, J.; Zhang, G.; Sun, R. Polyimides with low dielectric constants and dissipation factors at high frequency derived from novel aromatic diamines with bistrifluoromethyl pendant groups. *Polym. Chem.* **2023**, *14*, 3862. DOI: 10.1039/D3PY00773A.
- (18) He, Y.; Li, Z.; Gao, S.; He, Y.; Liang, Y.; Zhai, Y.; Li, Y.; Yang, H.; Cao, P.-F. Polyimide-driven innovations as “inert” components in high-performance lithium-ion batteries. *Mater. Horiz.* **2025**, *12*, 8351–8379. DOI: 10.1039/D5MH00822K.
- (19) Wang, W.; Zou, J.; Ni, Y.; Yu, K.; Yan, X.; Yin, J.; Gao, W.; Chen, D.; Jin, Q.; Jian, J. Structural optimization of polyimide-film humidity sensors for new energy vehicles. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2024**, *16* (37), 49733–49744. DOI: 10.1021/acsami.4c07661.
- (20) Yu, Q.-X.; Bei, R.-X.; Liu, J.-H.; He, Y.-W.; Liu, S.-W.; Chi, Z.-G.; Xu, J.-R.; Zhang, Y. Bioinspired polyimide film with fire retardant and gas barrier properties by gravity-induced deposition of montmorillonite. *Aggregate* **2023**, *4* (6), e392. DOI: 10.1002/agt.2392.
- (21) Ma, Y.; Shi, W.; Tang, K.; Li, S.; Sun, J.; Xu, D.; Li, W.; Hu, X.; Tian, M. Flexible polyimide-based flame-retardant E-textile for fire damage warning in firefighting clothing. *Prog. Org. Coat.* **2024**, *192*, 108517. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108517.
- (22) Jiang, S.; Liu, L. Carbon dioxide-based cross-linked poly(hydroxyurethane-urea) elastomers: Synthesis and modification utilizing pendent hydroxyl groups. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2024**, *6* (21), 13281–13289. DOI: 10.1021/acsapm.4c02582.
- (23) Parkatzidis, K.; Wang, H. S.; Truong, N. P.; Anastasaki, A. Recent developments and future challenges in controlled radical polymerization: A 2020 update. *Chem* **2020**, *6* (7), 1575–1588. DOI: 10.1016/j.chempr.2020.06.014.

- (24) Bloesch, S. E.; Scannelli, S. J.; Alaboalirat, M.; Matson, J. B. Complex polymer architectures using ring-opening metathesis polymerization: Synthesis, applications, and practical considerations. *Macromolecules* **2022**, *55* (11), 4200–4227. DOI: 10.1021/acs.macromol.2c00338.
- (25) Xia, B.; Chen, H.; Wang, J.; Liu, Y.; Wu, Q.; Pan, X. Enzymatic polymerization: Recent advances toward sustainable polymer synthesis. *Biotechnol. Adv.* **2025**, *81*, 108566. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2025.108566.
- (26) Liu, Y.; Zhang, J.; Kou, X.; Liu, S.-W.; Li, Z. Highly active organocatalysts for stereoselective ring-opening polymerization of racemic lactide at room temperature. *ACS Macro Lett.* **2022**, *11* (10), 1183–1189. DOI: 10.1021/acsmacrolett.2c00425.
- (27) Acciaretto, F.; Pasquale, A.; Lombardo, G.; Damonte, G.; Petroni, S.; Leuzzi, L.; Mangiagalli, M.; Brocca, S.; Pellis, A.; Cipolla, L. Sugar-based polyesters: From glux-diol synthesis to its enzymatic polymerization. *ACS Omega* **2026**, *11* (2), 2722–2729. DOI: 10.1021/acsomega.5c08325.
- (28) Irez, A. B. Inspection of microwave self-healing efficiency in carbon nanotube reinforced polymer composites for aerospace applications. *Polym. Compos.* **2024**, *45* (11), 9995–10010. DOI: 10.1002/pc.28453.
- (29) Wu, B.; Qian, G.; Yan, Y.; Alam, M. M.; Xia, R.; Qian, J. Design of interconnected carbon fiber thermal management composites with effective EMI shielding activity. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2022**, *14* (43), 49082–49093. DOI: 10.1021/acsami.2c13433.
- (30) Cheng, P.; Zhu, T.; Wang, X.; Fan, K.; Liu, Y.; Wang, X.-M.; Xia, S. Enhancing nanofiltration selectivity of metal–organic framework membranes via a confined interfacial polymerization strategy. *Environ. Sci. Technol.* **2023**, *57* (34), 12879–12889. DOI: 10.1021/acs.est.3c03120.
- (31) Wang, Y.; Geng, S.; Yan, G.; Liu, X.; Zhang, X.; Feng, Y.; Shi, J.; Qu, X. A squaraine-linked zwitterionic covalent organic framework nanosheets enhanced poly(ethylene oxide) composite polymer electrolyte for quasi-solid-state Li–S batteries. *ACS Appl. Energy Mater.* **2022**, *5* (2), 2495–2504. DOI: 10.1021/acsaem.1c04009.
- (32) El-Mehalmey, W. A.; Safwat, Y.; Bassyouni, M.; Alkordji, M. H. Strong interplay between polymer surface charge and MOF cage chemistry in mixed-matrix membrane for water treatment applications. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, *12* (24), 27625–27631. DOI: 10.1021/acsami.0c06399.
- (33) Xie, Z.; Le, K.; Li, H.; Pang, X.; Xu, T.; Altoé, V.; Klivansky, L. M.; Wang, Y.; Huang, Z.; Shelton, S. W.; et al. Interfacial engineering using covalent organic frameworks in polymer composites for high-temperature electrostatic energy storage. *Adv. Funct. Mater.* **2024**, *34* (21), 2314910. DOI: 10.1002/adfm.202314910.
- (34) Lu, M.; Jiang, P.; Zhang, P.; Feng, S.; Cui, Z.; Song, Q.; Zhao, Y. A highly stable bio-based plasticizer constructed from renewable acids for plasticizing and enhancing the optical properties of poly(vinyl chloride). *New J. Chem.* **2023**, *47* (4), 1784–1796. DOI: 10.1039/D2NJ04972D.
- (35) de Melo Morgado, G. F.; Montagna, L. S.; Gouvêa, R. F.; Guimarães, A.; Passador, F. R.; Rezende, M. C. Fatigue resistance of carbon fiber/polyphenylene sulfide composites engineered for automotive use. *Polym. Compos.* **2024**, *45* (9), 7719–7733. DOI: 10.1002/pc.28299.
- (36) Porporato, S.; Darjazi, H.; Gastaldi, M.; Piovano, A.; Perez, A.; Yécora, B.; Fina, A.; Meligrana, G.; Elia, G. A.; Gerbaldi, C. On the use of recycled PVB to develop sustainable separators for greener Li-ion batteries. *Adv. Sustainable Syst.* **2025**, *9* (1), 2400569. DOI: 10.1002/adsu.202400569.
- (37) Kim, D.; Lim, H.; Kim, S. H.; Lee, K. N.; You, J.; Ryu, D. Y.; Kim, J. Recent developments of polymer-based encapsulants and backsheets for stable and high-performance silicon photovoltaic modules: Materials nanoarchitectonics and mechanisms. *J. Mater. Chem. A* **2024**, *12* (13), 7452–7469. DOI: 10.1039/D3TA06130B.
- (38) Zhang, S.; Ding, J.; Tian, D.; Su, W.; Zhu, J.; Ma, X.; Lu, M. ZIF-67 loaded thio-groups modified chitosan hydrogel for high efficient Hg(II) removal from water. *J. Solid State Chem.* **2024**, *336*, 124769. DOI: 10.1016/j.jssc.2024.124769.
- (39) Wang, W.; Jiang, A.; Zhang, H.; Wang, J.; Li, X.; Fu, C.; Yang, X.; Liu, K.; Wang, D. Synthesis of tough and hydrophobic polyamide 6 for self-cleaning, oil/water separation, and thermal insulation. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2024**, *6* (19), 12018–12027. DOI: 10.1021/acsapm.4c02166.
- (40) Song, X.; He, X.; Tang, M.; Wang, C.; Zhang, Y.; Li, X.; Li, T.; Ke, L.; Li, X.; Zhang, M.; et al. Multi-protection from microbial and PM pollutants by humidity-resistant, breathable and self-charging nanofibrous membranes. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2024**, *12* (32), 12216–12225. DOI: 10.1021/acssuschemeng.4c04333.
- (41) Wang, K.; Han, P.; Liu, S.; Han, R.; Niu, J.; Liu, F.; Yu, H.; Cao, L.; Li, X.; Cao, Y.; et al. Polystyrene/Polymethylhydrosiloxane multiscale electrospun nanofiber membranes for air filtration. *ACS Appl. Nano Mater.* **2023**, *6* (22), 21293–21302. DOI: 10.1021/acsanm.3c04590.
- (42) Liu, S.; Hu, L.; Liu, J.; Zhang, Z.; Suo, H.; Qin, Y. Zinc catalyst for chemical upcycling of PLA wastes: Novel industrial monomer resource toward poly(ester–amide). *Macromolecules* **2024**, *57* (10), 4662–4669. DOI: 10.1021/acs.macromol.4c00360.
- (43) Wijeyatunga, S. K.; Derr, K. M.; Maladeniya, C. P.; Saucedo-Oloño, P. Y.; Tennyson, A. G.; Smith, R. C. Upcycling waste PMMA to durable composites via a transesterification-inverse vulcanization process. *J. Polym. Sci.* **2024**, *62* (3), 554–563. DOI: 10.1002/pol.20230609.
- (44) Thakur, S.; Verdejo, R.; Manchado, M. A. L. Unveiling the potential of self-healing and closed-loop recyclability in bio-based non-isocyanate polyurethane. *Eur. Polym. J.* **2024**, *217*, 113296. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2024.113296.

- (45) Lee, S.; Lee, I.; Seo, D.; Kim, H.; Joo, G.; Lee, S.; Park, K. Life cycle assessment of aPHA production. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2024**, *12* (1), 72–84. DOI: 10.1021/acssuschemeng.3c04788.
- (46) Song, X.; Wang, L.; Yang, W.; Li, P.; Lai, X.; Wang, R.; Li, Y.; Wang, W. Study on the rheological properties of long-term temperature-resistant and saline-resistant copolymer systems based on hydrophobic segments. *J. Appl. Polym. Sci.* **2025**, *142* (43), e57656. DOI: 10.1002/app.57656.
- (47) Gomez, E. F.; Wanasinghe, S. V.; Flynn, A. E.; Dodo, O. J.; Sparks, J. L.; Baldwin, L. A.; Tabor, C. E.; Durstock, M. F.; Konkolewicz, D.; Thrasher, C. J. 3D-printed self-healing elastomers for modular soft robotics. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, *13* (24), 28870–28877. DOI: 10.1021/acsami.1c06419.
- (48) Guo, H.; Zhao, H.; Niu, H.; Ren, Y.; Fang, H.; Fang, X.; Lv, R.; Maqbool, M.; Bai, S. Highly thermally conductive 3D printed graphene filled polymer composites for scalable thermal management applications. *ACS Nano* **2021**, *15* (4), 6917–6928. DOI: 10.1021/acsnano.0c10768.
- (49) Jang, W.; Lee, S.; Kim, N. R.; Koo, H.; Yu, J.; Yang, C.-M. Eco-friendly and scalable strategy to design electrically insulating boron nitride/polymer composites with high through-plane thermal conductivity. *Compos. B: Eng* **2023**, *248*, 110355. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.110355.
- (50) Shin, S.; Kwon, Y.; Hwang, C.; Jeon, W.; Yu, Y.; Paik, H.-J.; Lee, W.; Kwon, M. S.; Ahn, D. Visible-light-driven rapid 3D printing of photoresponsive resins for optically clear multifunctional 3D objects. *Adv. Mater.* **2024**, *36* (19), 2311917. DOI: 10.1002/adma.202311917.
- (51) Zhang, T.; Sanguramath, R. A.; Israel, S.; Silverstein, M. S. Emulsion templating: Porous polymers and beyond. *Macromolecules* **2019**, *52* (15), 5445–5479. DOI: 10.1021/acs.macromol.8b02576.
- (52) Crawford, E. A.; Gupta, S.; Trinh, B. M.; Mekonnen, T. H. Styrene-ethylene-butylene-styrene (SEBS) melt-blown fibers for oil spill remediation and oil barrier geotextiles. *Polymer* **2024**, *298*, 126942. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.126942.
- (53) Karaş, B.; Smith, P. J.; Fairclough, J. P. A.; Mumtaz, K. Additive manufacturing of high density carbon fibre reinforced polymer composites. *Addit. Manuf.* **2022**, *58*, 103044. DOI: 10.1016/j.addma.2022.103044.
- (54) Yang, T.; Wan, C.; Zhang, X.; Liu, T.; Niu, L.; Fang, J.; Liu, Y. High-efficiency preparation of multifunctional conjugated electrospun graphene doped PVDF/CF yarns for energy harvesting and human movement monitoring in TENG textile. *Nano Research* **2024**, *17*, 4478–4488. DOI: 10.1007/s12274-023-6373-8.
- (55) Lebeda, F.; Demleitner, M.; Pongratz, A.; Ruckdäschel, H.; Retsch, M. Shaping thermal transport and temperature distribution via anisotropic carbon fiber reinforced composites. *ACS Omega* **2024**, *9* (37), 39232–39241. DOI: 10.1021/acsomega.4c06558.
- (56) Kazari, H.; Farkhondehnia, M.; Maric, M.; Hubert, P. Recyclable multiscale composite structural supercapacitor. *Polym. Compos.* **2024**, *45* (13), 12016–12032. DOI: 10.1002/pc.28615.
- (57) Jian, Z.; Lu, X.; Wang, Z.; Xia, H. Solvent-free preparation of carbon fiber reinforced dynamically cross-linked vanillin-based polyurethane composites with excellent self-healing and closed-loop recycling performance. *Polymer* **2024**, *312*, 127618. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127618.
- (58) Ren, Y.; Xu, L.; Han, Z.; Xiao, S.; Sun, Y.; Nan, Z.; Shu, J.; Li, L.; Shen, Z. Study on recycling carbon fibers from carbon fiber reinforced polymer waste by microwave molten salt pyrolysis. *Fuel* **2024**, *377*, 132819. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.132819.
- (59) McGaughey, A. L.; Srinivasan, S.; Zhao, T.; Christie, K. S. S.; Ren, Z. J.; Priestley, R. D. Scalable zwitterionic polymer brushes for antifouling membranes via Cu0-mediated atom transfer radical polymerization. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2023**, *5* (7), 4921–4932. DOI: 10.1021/acspam.3c00407.
- (60) Mian, Z.; Bin, W.; Chao, L.; Zhenhui, Y.; Liu, J. Process parameter optimization for ionic liquids as gas separation membranes based on a GWO-BPNN model. *J. Appl. Polym. Sci.* **2024**, *141* (10), e55068. DOI: 10.1002/app.55068.
- (61) Ji, S.; Li, X.; Ji, J.; Lin, J. Halogen-free flame-retardant plant fiber reinforced polylactic acid composite material and preparation method thereof. China CN117659650, 2024.
- (62) Ambriz, E. Polyhydroxyalkanoate-based marine biodegradable polymer blends. United States US20240209205, 2024.
- (63) Park, K.; Garner, J. S. Synthesis of environmentally degradable alkyl polyesters. US20250011531, 2025.
- (64) Hong, S. L.; Chi Hwan. Self-healing hydrogel which may be used for wearable sensing applications. United States WO2025064595.
- (65) Cui, X.; Huang, J.; Shen, C.; Zhang, P.; Liang, X.; Hu, Z.; Zhang, Z.; Li, C.; Zhang, Z. Preparation of photothermal self-healing anti-icing coating material for electronics, structural parts in aeronautics, aviation field, marine engineering, power industry and aerospace field. China CN118580767, 2024.
- (66) Khaneghahi, M. H.; Farnam, Y. Damage-responsive self-healing concrete reinforced by biofibers. United States WO2025217013, 2025.
- (67) Yuan, W.; Feng, X. Self-healing thermoplastic elastomer composition. United States WO2023009830, 2023.
- (68) Vanderveken, Y.; Mondschein, R.; Benson, B.; Delimoy, D. Multilayer structure comprising semi-aromatic polyamide and its use for hydrogen storage and transportation. United States WO2025195942, 2025.
- (69) Kim, J. L.; Kim, C.; Jang, W.; Jeong, I. S. Epoxy resin composition and pressure vessels manufactured using same. Republic of Korea WO2023128254, 2023.

- (70) Chen, W.; Ge, S.; Li, W.; Feng, X.; Wang, E.; Cao, R. High-voltage fast-charging composite binder, positive electrode sheet, and battery containing binder. China CN120383900, 2025.
- (71) Ogura, A.; Yamazaki, S.; Ichinose, Y.; Terada, J.; Fujiwara, K. Binder for positive electrodes, electrode mixture, electrode and secondary battery. WO2024090324, 2024.
- (72) Kumar, A.; Mathur, A.; Garcia Ruiz, D. E.; Jaime-Vargas, J. A.; Kumari, P.; Yadav, T.; Singh Chundawat, T.; Sahu, V. Bioabsorber-based apparatus for carbon capture from flue gases of the cement industry. DE202024102085, 2024.
- (73) Yang, Y.; Cheng, B.; Chen, P.; Li, Z.; Hu, G.; Shu, D.; Xi, P.; Xia, L.; Zhao, C.; Ding, C.; et al. Preparation of composite fiber sheet as a protective packaging product with good heat resistance, air permeability, opacity and water resistance. for medical devices. China CN120716263, 2025.
- (74) Izumi, N. Copolymer, composition, coated device, coated medical device, and method for producing coated medical device. Japan JP2025136704, 2025.
- (75) Lee, J. Bio-implantable electrode structure based on one-dimensional porous microfibers and manufacturing method thereof. WO2025211847, 2025.
- (76) Basu, B.; Sablaniya, D. Ultra high molecular weight polyethylene polymer blends for manufacturing of injection moldable orthopedic implant. India WO2025196823, 2025.
- (77) Kulkarni, A.; Sapre, N.; Shirolkar, M.; Tiwari, A. K. A biopolymer blend based film and a method of manufacturing thereof. India IN202321008018, 2023.
- (78) Li, Y.; Zhang, Y.; Wei, L.; Zhang, B.; Wang, Z. Broad-spectrum antibacterial photothermal biofilm and preparation method and application thereof. CN120519021, 2025.
- (79) Jiang, B. Anti-wrinkle and antibacterial cotton-polyester blended composite fabric and preparation method thereof. China CN120505792, 2025.
- (80) Mizoguchi, K. Liquid crystal alignment agent, liquid crystal alignment film, and liquid crystal display element. WO2025205803, 2025.
- (81) Wang, T.; Hu, W.; Huang, L. Preparation of colorful and white light long afterglow luminescent material and full-color display. China CN120699366, 2025.
- (82) Li, M.; Zhang, J.; Liu, B.; Guan, Y.; Yang, X.; Zhao, S. Method for preparing bending-resistant, low-dielectric transparent polyimide film with good heat resistance for flexible electronic devices. CN120590661, 2025.
- (83) Heo, Y. M.; Yeon, J. W.; Lim, B. J. Flexible laminate, polyester film, flexible flat cable, and flexible electronic substrate thereof. Republic of Korea KR2024135440, 2024.
- (84) Strohhahn, L.; Hanus, K.; Barnes, R.; Chen, M.; Meyjes, E. Interconnecting current collectors comprising polymer bases and metal layers for lithium electrochemical cells. United States WO2024158447, 2024.
- (85) Zheng, G. Green and environmentally-friendly PE plastic. China CN120464042, 2025.
- (86) Liu, Y.; Ji, S.; Huang, Z.; Zhang, K. Preparation of environmentally friendly halogen-free flame-retardant cable composition used to prepare cable sheath. CN120518939, 2025.
- (87) Jia, B.; Jia, M. Environmentally friendly, halogen-free, flame-retardant secondary sheath material for concentrated optical cables and preparation method thereof. China CN120737554, 2025.
- (88) Lee, S. S. Manufacturing method of eco-friendly thermal insulation coating composition. KR2866683, 2025.
- (89) Wang, Z.; Wu, J.; Xia, W.; Wang, L.; Yan, Z. Green preparation and recovering of terephthalic acid from textile waste enzymatic hydrolysate. China CN120717884, 2025.
- (90) Kuniwaki, H.; Koike, T.; Saito, T. Biomass-derived chlorosulfonated polyethylene. WO2025146793, 2025.
- (91) Qin, H.; Wu, J.; He, S.; Wu, Y.; Lan, Q.; Li, Y.; Su, J.; Mo, Y.; Jiang, J. Biomass polyvinyl alcohol and preparation method thereof. China CN119708311, 2025.
- (92) Zhang, H.; Yin, X.; Su, H.; Bu, S. Carbon nanotube-reinforced polyethylene double-wall corrugated pipe and preparation method thereof. China CN120484368, 2025.
- (93) Fan, G.-L.; Chen, W.-H.; Yu, K.-H. Anti-glare film and polarizer with the same. Taiwan US20250289937, 2025.
- (94) Bozeya, A.; Makableh, Y. F.; Al-Mezead, L. A.; Abu-Zurayk, R. Wet ball milling and hot press for the preparation of UHMWPE/modified MWCNTs nanocomposite with enhanced mechanical and thermal properties. *Polym. Bull.* **2024**, *81*, 1707–1727. DOI: 10.1007/s00289-023-04790-w.
- (95) Dündar, G. S.; Okan, B. S. Utilizing upcycled graphene nanoplatelet-coated glass fibers as a performance booster and compatibilizer for enhanced mechanical performance of polypropylene/glass fiber/graphene nanoplatelet composites. *ACS Omega* **2024**, *9* (15), 17432–17445. DOI: 10.1021/acsomega.4c00214.
- (96) Ryu, S. Y. Preparation method of flame-retardant fabric. Republic of Korea KR2850150, 2025.
- (97) Hungerland, T.; Nolte, M.; Knaupp, M. Flame-retardant polycarbonate compositions having high CTI. Germany WO2022263335, 2022.
- (98) Wang, B.; Fang, Q.; Hu, W.; Li, Z.; Hu, Y.; Song, L.; Jin, Z.; Dong, C. Halogen-free flame-retardant sheath material for nuclear power station and preparation method thereof. China CN110862604, 2020.

- (99) Patange, J.; Ghosh, S.; Patade, P.; Singh, U.; Chowdhury, S. N. Anti-scaling polymer composition for anti-scaling coating on a heating element. IN202121045667, 2023.
- (100) Pan, X.; He, H.; Feng, Y.; Huang, W.; Liu, F.; Tan, Q. Modified metal organic framework material and preparation method and application thereof. CN119978392, 2025.
- (101) Liu, K.; Liu, Y.; Liu, H.; Di, Q. Covalent organic framework nanosheet with effect of enhancing flame retardancy of polyvinyl chloride and polyethylene pipe and preparation method and application thereof. CN120647959, 2025.
- (102) Zhan, X.; Dai, L. Highly-branched wood fiber reinforcing agent and preparation method thereof. China CN117777385, 2024.
- (103) Chen, J.; Cheng, H.; Ren, Y. Preparation method of copper-free and antimony-free high-performance friction material for cars. China CN117551331, 2024.
- (104) Liu, Y.; Jin, C. Antistatic wig wire and preparation method thereof. CN119932746, 2025.
- (105) Liao, S.; Li, H.; Han, Y.; Zhou, C.; Wang, L.; Wei, X.; Lin, Z.; Yin, Z.; Zhu, C. Rubber-plastic composite modified asphalt activated by light components of waste oil and preparation method. CN120535966, 2025.
- (106) Geng, L.; Wang, S.; Dong, C.; Cui, Y. Bamboo fiber-reinforced biomass composite board and preparation method thereof. China CN120737622, 2025.
- (107) Liu, Z.; Liu, S.; Zhang, H.; Wang, X. Chemical recycling of post-consumer PET into high-performance polymer aerogels. *J. of Mater. Chem. A* **2024**, 12 (16), 9454–9461. DOI: 10.1039/d4ta00351a.
- (108) Islam, K.; Islam, T.; Shiddique, M. N. A.; Roy, M. N.; Fahimuzzaman, M.; Islam, M. A.; Bashar, M. M.; Khan, M. A. Utilization of jute waste for sustainable eco-film preparation. *ACS Sustainable Resour. Manage.* **2024**, 1 (3), 517–529. DOI: 10.1021/acssusresmgmt.3c00123.
- (109) Hurst, P. J.; Rakowski, A. M.; Patterson, J. P. Ring-opening polymerization-induced crystallization-driven self-assembly of poly-L-lactide-block-polyethylene glycol block copolymers (ROPI-CDSA). *Nat. Commun.* **2020**, 11, 4690. DOI: 10.1038/s41467-020-18460-2.
- (110) Baral, S.; Liu, C.; Mao, X.; Coates, G. W.; Chen, P. Tuning single-polymer growth via hydrogen bonding in conformational entanglements. *ACS Cent. Sci.* **2022**, 8 (8), 1116–1124. DOI: 10.1021/acscentsci.2c00415.
- (111) Martinez, M. R.; Sobieski, J.; Lorandi, F.; Fantin, M.; Dadashi-Silab, S.; Xie, G.; Olszewski, M.; Pan, X.; Ribelli, T. G.; Matyjaszewski, K. Understanding the relationship between catalytic activity and termination in photoATRP: Synthesis of linear and bottlebrush polyacrylates. *Macromolecules* **2020**, 53 (1), 59–67. DOI: 10.1021/acs.macromol.9b02397.
- (112) Vinciguerra, M. R.; Patel, D. K.; Zu, W.; Tavakoli, M.; Majidi, C.; Yao, L. Multimaterial printing of liquid crystal elastomers with integrated stretchable electronics. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, 15 (20), 24777–24787. DOI: 10.1021/acsami.2c23028.
- (113) Wang, D.; Chen, X.; Zhao, Y. Preparation of fast self-repairing composite liquid crystal film. China CN112677596, 2021.
- (114) Li, H.; Wang, Z. Self-repairing flexible hydrogels comprising betaine polymethacrylic acid sulfonate for battery containing hydrogels. CN112646074, 2021.
- (115) Zhang, R.; Jiang, C.; Mou, S.; Fang, Y.; Li, Z.; Jiao, H.; Wang, C. Temperature-sensitive gel-based cooling and thermal insulation material composition for storage tank coating and preparation method thereof. China CN113388068, 2021.
- (116) Li, N.; Chen, J.; Gao, Y.; Su, C.; Wang, D.; Qiao, B. Thermochromic polymer composition, electrical device, and corresponding use and processes. US11624024, 2023.
- (117) Kawabata, T.; Uemura, M.; Tsuchimura, T. Active light sensitive or radiation sensitive resin composition, active light sensitive or radiation sensitive film, pattern forming method, method for producing electronic device, and compound. Japan WO2023008345, 2023.
- (118) Wang, Q.; Yu, J.; Teng, X.; Ding, H. Self-adhesive waterproof membrane with polymer film. China CN116904122, 2023.
- (119) Yoo, S. G.; Jung, U. J.; Lee, S. J.; Kim, D. Y.; Cho, H. Y.; Choi, H. J.; Kim, I. J. Adhesive film for polarizing plates, polarizing plates and display devices thereof. Republic of Korea KR2025167348, 2025.
- (120) Nagahara, A.; Yano, S. Silicone mold release polyester film with light peelability and wettability for producing ceramic green sheet. JP2021011081, 2021.
- (121) Lee, T. H.; Han, S. J.; Moon, S. S.; Jung, G. A. An electrode for lithium secondary battery having improved electrolyte wettability while including a crosslinking binder, and lithium secondary battery including thereof. KR2024159388, 2024.
- (122) Kato, R.; Yamazaki, H.; Kojima, M. Active light- or radiation-sensitive resin composition, resist film, pattern forming method, method for producing electronic device, and compound. Japan WO2025146768, 2025.
- (123) Ouyang, L.; Cai, Y. Photo-sensitive compositions based on bismaleimide and acrylic liquid crystalline light sensitive resins. CN118466117, 2024.
- (124) Wang, J.; Gao, J. Preparation of heat-sensitive coating composition for heat-sensitive color-developing paper. China CN120775437, 2025.
- (125) Wang, X.; Wang, Y.; Li, Z.; Qin, X. Temperature response flame-retardant composite material and preparation method and application thereof. China CN120648084, 2025.
- (126) Yao, H.; Qiu, H. Preparation method of pH-responsive hydrogel for smart textiles. China CN120329571, 2025.
- (127) Ma, J.; Gao, H.; Cheng, H.; Yang, D.; Wang, Z.; Bai, L. Preparation of ph-responsive nanocellulose hydrogel. CN119775595, 2025.

- (128) Zhou, Y. Preparation method of thermal conductive phase change energy storage film. CN120735457, 2025.
- (129) Qiao, J.; Yao, Y.; Hu, C.; Ru, Y.; Guo, Z.; Gao, Y.; Zhang, X.; Lai, J.; Song, Z. Recyclable polymer aerogel, cold-storage phase-change composite, preparation methods, and uses. China CN117720883, 2024.
- (130) Guo, H.; Zhou, M.; Cai, X.; Lu, C. Preparation method of highly conductive polymer composite and organic solvent dispersion for flexible electronic devices and sensors. China CN120209360, 2025.
- (131) Zhang, Y. Fabrication method of hydrogen storage material with ice structure. China CN113845688, 2021.
- (132) Zhang, W.; Que, Y. Continuous-flow synthesis process for high-efficiency polycarboxylate-based water reducing agent. China CN120737275, 2025.
- (133) Yao, W.; Chen, L.; Wang, S.; Hua, Y.; Yuan, T.; Wu, Z. Preparation method of multilayer-structure high-shielding-efficiency reinforced polypropylene composite material. China CN114030170, 2022.
- (134) Jiang, G.; Yan, C.; Yu, K.; Su, L.; Wang, S.; Yan, T.; Wang, H.; Li, M. Method for surface modification and electromagnetic shielding functionalization of UHMWPE fiber and fabric. China CN116575229, 2023.
- (135) Chen, F.; Lai, W.; Zhang, Z.; Chang, L.; Liu, P.; Ma, Y.; Deng, Y.; Liu, W.; Dai, S.; Liu, H.; et al. Preparation method of expanded polytetrafluoroethylene and composite ion exchange membrane. China CN120682529, 2025.
- (136) Ye, Q.; Yao, J.; Ye, J.; Zhang, F.; Cheng, J. Preparation of bending-resistant polyvinyl chloride foam co-extrusion composite material. China CN120534036, 2025.
- (137) Lee, J. H.; Sim, M. T.; Kong, B. S.; Ijima, Y.; Mochizuki, K.; Sasaki, M.; Sivasubramanian, K.; Kaur, B.; Phukan, M. Preparation of epoxy resin composition for semiconductor device molding. KR2025038048, 2025.
- (138) Enomoto, T.; Bando, T. Method for producing composite for pellet-shaped molding material. Japan JP2021020345, 2021.
- (139) Shimada, T.; Yamada, R.; Mikami, K. Method for manufacturing plastic lens with thermal deformation. Thailand JP2025152809, 2025.
- (140) Lin, J.; Malakooti, M. H.; Sodano, H. A. Thermally stable poly(vinylidene fluoride) for high-performance printable piezoelectric devices. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2020**, *12* (19), 21871–21882. DOI: 10.1021/acsami.0c03675.
- (141) Wu, S.; Wang, C.; Li, S.; Lin, L.; Tong, Q.; Zhu, M.; Weng, J. Coconstruction of supramolecular lithium-conducting cross-linked networks based on PVDF and triblock polymer nanomicrosphere solid-state polymer electrolytes for lithium-metal batteries. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2024**, *16* (22), 28482–28492. DOI: 10.1021/acsami.4c03355.
- (142) Lai, S. M.; Tu, S. N.; Zhang, B. X.; Cai, J. X.; Pan, J. W. Synergistic effects of thermal and near-infrared radiation heating on the self-healing effect of shape memory polyethylene elastomer nanocomposites. *J. Macromol. Sci., Part B:Phys.* **2022**, *61* (1), 61–79. DOI: 10.1080/00222348.2021.1968618.
- (143) Miah, M. R.; Ding, J.; Zhao, H.; Chu, Q.; Wang, H.; Wang, J.; Zhu, J. Boron nitride-based polyester nanocomposite films with enhanced barrier and mechanical performances. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2024**, *6* (5), 2913–2923. DOI: 10.1021/acsapm.3c03148.
- (144) Wei, J.; Long, L.; Ye, B.; Li, Y.; Wang, Z. Unexpected enhancements of biobased poly(butylene 2,5-furandicarboxylate) by blending with biodegradable poly(ϵ -caprolactone). *Mater. Lett.* **2022**, *313*, 131753. DOI: 10.1016/j.matlet.2022.131753.
- (145) Song, D.; He, J.; Xie, Q.; Lv, X.; Liu, Y.; Zheng, L. Nonisocyanate polyurethanes originated from biobased isosorbide with good combined properties. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2024**, *6* (14), 8133–8141. DOI: 10.1021/acsapm.4c00790.
- (146) de Souza, F. M.; Kahol, P. K.; Gupta, R. K. Introduction to polyurethane chemistry. In *Polyurethane chemistry: Renewable polyols and isocyanates*, ACS Symposium Series, Vol. 1380; American Chemical Society, 2021; pp 1–24.
- (147) de Lacalle, J. L.; Gallastegui, A.; Olmedo-Martínez, J. L.; Moya, M.; Lopez-Larrea, N.; Picchio, M. L.; Mecerreyes, D. Multifunctional ionic polymers from deep eutectic monomers based on polyphenols. *ACS Macro Lett.* **2023**, *12* (2), 125–132. DOI: 10.1021/acsmacrolett.2c00657.
- (148) Xiong, S.; Liu, J.; Wang, Y.; Wang, X.; Chu, J.; Zhang, R.; Gong, M.; Wu, B. Solvothermal synthesis of triphenylamine-based covalent organic framework nanofibers with excellent cycle stability for supercapacitor electrodes. *J. Appl. Polym. Sci.* **2022**, *139* (3), 51510. DOI: 10.1002/app.51510.
- (149) DeStefano, A. J.; Segalman, R. A.; Davidson, E. C. Where biology and traditional polymers meet: The potential of associating sequence-defined polymers for materials science. *JACS Au* **2021**, *1* (10), 1556–1571. DOI: 10.1021/jacsau.1c00297.
- (150) Li, G.; Xu, G.; Guo, X.; Yang, R.; Sun, H.; Wang, Q. Polymer tacticity control for stereoselective ring-opening polymerization of racemic n-propylglycolide. *ACS Catal.* **2024**, *14* (2), 1173–1182. DOI: 10.1021/acscatal.3c04798.
- (151) Li, Z.; Zhao, D.; Shen, Y.; Li, Z. Ring-opening polymerization of enantiopure bicyclic ether-ester monomers toward closed-loop recyclable and crystalline stereoregular polyesters via chemical upcycling of bioplastic. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2023**, *62* (23), e202302101. DOI: 10.1002/anie.202302101.
- (152) Atespare, A. E.; Behrooz Kohlan, T.; Salamatgharamaleki, S.; Yildiz, M.; Menciloglu, Y. Z.; Unal, S.; Dizman, B. Poly(2-alkyl/aryl-2-oxazoline)-imidazole complexes as thermal latent curing agents for epoxy resins. *ACS Omega* **2024**, *9* (34), 36398–36410. DOI: 10.1021/acsomega.4c03904.
- (153) Berk, H.; Kaya, M.; Cihaner, A. Thermally highly stable polyhedral oligomeric silsesquioxane (POSS)-sulfur based hybrid inorganic/organic polymers: Synthesis, characterization and removal of mercury ion. *Polym. Chem.* **2022**, *13* (35), 5152–5158, 10.1039/D2PY00761D. DOI: 10.1039/D2PY00761D.

- (154) Perin, D.; Fredi, G.; Rigotti, D.; Soccio, M.; Lotti, N.; Dorigato, A. Sustainable textile fibers of bioderived polylactide/poly(pentamethylene 2,5-furanoate) blends. *J. Appl. Polym. Sci.* **2022**, *139* (10), 51740. DOI: 10.1002/app.51740.
- (155) Liu, Z.-C.; Wang, M.; Huang, S.; Yang, H. Biodegradable and crosslinkable poly(propylene fumarate) liquid crystal polymers. *Polym. Chem.* **2022**, *13* (9), 1267-1273. DOI: 10.1039/D1PY01475G.
- (156) Wang, Y.; Wen, L.; Liu, J.; Li, C.; Yin, T.; Xiao, Y.; Jiang, Z.; Wu, S.; Zhang, Z.; Zhang, B. Synthesis of bio-based poly(butylene carbonate-co-glycolic acid) with tunable degradation rate and mechanical properties. *J. Appl. Polym. Sci.* **2024**, *141* (14), e55186. DOI: 10.1002/app.55186.
- (157) Parit, M.; Du, H.; Zhang, X.; Jiang, Z. Flexible, transparent, UV-protecting, water-resistant nanocomposite films based on polyvinyl alcohol and kraft lignin-grafted cellulose nanofibers. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2022**, *4* (5), 3587-3597. DOI: 10.1021/acscpm.2c00157.
- (158) Xie, D.; Pu, Y.; Meng, X.; Bryant, N. D.; Zhang, K.; Wang, W.; Ragauskas, A. J.; Li, M. Effect of the lignin structure on the physicochemical properties of lignin-grafted-poly(ϵ -caprolactone) and its application for water/oil separation. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2022**, *10* (50), 16882-16895. DOI: 10.1021/acssuschemeng.2c05495.
- (159) Liu, W.; Wang, Y.; Xiang, S.; Liu, H. Unveiling the effect of enhanced interfacial compatibility on the mechanical properties of PLA/PBAT blends. *Polymer* **2024**, *296*, 126815. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.126815.
- (160) Dhakal, K. N.; Krause, B.; Lach, R.; Wutzler, A.; Grellmann, W.; Le, H. H.; Das, A.; Wießner, S.; Heinrich, G.; Adhikari, R. Electrically conductive nanocomposites based on poly(lactic acid)/flexible copolyester blends with multiwalled carbon nanotubes. *J. Appl. Polym. Sci.* **2022**, *139* (4), 51554. DOI: 10.1002/app.51554.
- (161) Shi, Y.; Huang, W.; Li, Y.; Wang, W.; Sui, M.; Yang, Q.; Tong, Y.; Yang, K.; Chen, P. Toward heat resistant polylactide blend fibers via incorporation of low poly[(R)-3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate] content. *J. Appl. Polym. Sci.* **2022**, *139* (29), e52652. DOI: 10.1002/app.52652.
- (162) Kyaw, Z. W.; Opaprakasit, P.; Polpanich, D.; Sreearunothai, P.; Elaissari, A.; Kaewsaneha, C. Fabrication of water-based alcoholized poly(butylene succinate-co-adipate) submicron particles as green coating agents for sustainable paper packaging. *ACS Appl. Bio Mater.* **2024**, *7* (12), 8328-8340. DOI: 10.1021/acscabm.4c01125.
- (163) Liu, C.; Chen, L.; Yan, X.; Dong, X.; Tian, H.; Pan, H.; Wang, D.; Zhao, Y.; Zhang, H. Sustainable and biodegradable poly(butylene succinate-co-terephthalate)/poly(propylene carbonate) blown films with enhanced compatibility, mechanical, and barrier properties. *J. Appl. Polym. Sci.* **2024**, *141* (7), e54939. DOI: 10.1002/app.54939.
- (164) Ryu, K.-H.; Cho, J.-H.; Lee, T.-H.; Kim, H.; Han, G.-Y.; Back, J.-H.; Kim, H.-J. Toward sustainable adhesives with biodegradability, scalability, and removability: Poly(butylene succinate)-based hot-melt adhesives. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2024**, *12* (44), 16165-16174. DOI: 10.1021/acssuschemeng.4c03234.
- (165) Liu, B.; Li, Z.; Li, L.; Jin, J.; Zhang, Y.; Sheng, P.; Han, C. Preparation method of biodegradable PBST-PLA copolymer with good mechanical property and degradability. CN119431805, 2025.
- (166) Li, M.; Li, C.; Jia, Z.; Guo, P.; Lyu, M.; Gao, D.; Wei, Z.; Sang, L. Exploring biodegradable poly(butylene succinate terephthalate)/poly(glycolic acid) mulch films: Reactive blending, performance, degradation under UV irradiation, and covering plants on agriculture soil. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2024**, *6* (22), 13904-13915. DOI: 10.1021/acscpm.4c02963.
- (167) Fenimore, L. M.; Suazo, M. J.; Torkelson, J. M. Covalent adaptable networks made by reactive processing of highly entangled polymer: Synthesis-structure-thermomechanical property-reprocessing relationship in covalent adaptable networks. *Macromolecules* **2024**, *57* (6), 2756-2772. DOI: 10.1021/acs.macromol.3c02515.
- (168) Wang, Z.; Zhang, X.; Yao, W.; Dong, Y.; Zhang, B.; Dong, X.; Fang, H.; Zhang, G.; Ding, Y. Dynamically cross-linked waterborne polyurethanes: Transalkylation exchange of C-N bonds toward high performance and reprocessable thermosets. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2022**, *4* (8), 5920-5926. DOI: 10.1021/acscpm.2c00794.
- (169) Diodati, L. E.; Liu, S.; Rinaldi-Ramos, C. M.; Sumerlin, B. S. Magnetic nanoparticles improve flow rate and enable self-healing in covalent adaptable networks. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, *15* (27), 32957-32966. DOI: 10.1021/acscami.3c06329.
- (170) Maurin, V.; Chang, Y.; Ze, Q.; Leanza, S.; Wang, J.; Zhao, R. R. Liquid crystal elastomer-liquid metal composite: Ultrafast, untethered, and programmable actuation by induction heating. *Adv. Mater.* **2024**, *36* (34), 2302765. DOI: 10.1002/adma.202302765.
- (171) Nishiie, N.; Kawatani, R.; Tezuka, S.; Mizuma, M.; Hayashi, M.; Kohsaka, Y. Vitimer-like elastomers with rapid stress-relaxation by high-speed carboxy exchange through conjugate substitution reaction. *Nat. Comm.* **2024**, *15* (1), 8657. DOI: 10.1038/s41467-024-53043-5.
- (172) Miao, R.; Ding, Y.; Liu, J.; Liu, J.; Xin, Z.; Bao, C. Mechanically robust and chemically recyclable poly(β -Amino Esters)-based thermosetting plastics. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2024**, *6* (21), 13439-13448. DOI: 10.1021/acscpm.4c02945.
- (173) Lei, Z.; Chen, H.; Luo, C.; Rong, Y.; Hu, Y.; Jin, Y.; Long, R.; Yu, K.; Zhang, W. Recyclable and malleable thermosets enabled by activating dormant dynamic linkages. *Nat. Chem.* **2022**, *14* (12), 1399-1404. DOI: 10.1038/s41557-022-01046-4.
- (174) Howard, E.; Li, M.; Kozma, M.; Zhao, J.; Bae, J. Self-strengthening stimuli-responsive nanocomposite hydrogels. *Nanoscale* **2022**, *14* (48), 17887-17894, 10.1039/D2NR05408F. DOI: 10.1039/D2NR05408F.

- (175) Lan, Y.; Liu, W.; Lv, Z.; Li, Z.; Dufresne, A.; Fu, L.; Lin, B.; Xu, C.; Huang, B. Liquid-free, tough and transparent ionic conductive elastomers based on nanocellulose for multi-functional sensors and triboelectric nanogenerators. *Nano Energy* **2024**, *129*, 110047. DOI: 10.1016/j.nanoen.2024.110047.
- (176) Luo, C.; Chen, Y.; Huang, Z.; Fu, M.; Ou, W.; Huang, T.; Yue, K. A Fully self-healing and highly stretchable liquid-free ionic conductive elastomer for soft ionotronics. *Adv. Funct. Mater.* **2023**, *33* (49), 2304486. DOI: 10.1002/adfm.202304486.
- (177) Dai, C.; Qi, Y.; Gao, J.; Li, Z.; Wu, Y.; Chen, X. Investigation of cyclic stability and pyro-resistive properties in high-density polyethylene/tungsten carbide composites under thermal and electric activation. *ACS Appl. Electron. Mater.* **2024**, *6* (4), 2478-2489. DOI: 10.1021/acsaelm.4c00125.
- (178) Wang, G.; Wang, M.; Zheng, M.; Ebo, B.; Xu, C.; Liu, Z.; He, L. Thermoplastic polyurethane/carbon nanotube composites for stretchable flexible pressure sensors. *ACS Appl. Nano Mater.* **2023**, *6* (11), 9865-9873. DOI: 10.1021/acsanm.3c01543.
- (179) Azinfar, A.; Helm, C. A. Self-patterning of polyelectrolyte multilayer films: The roles of PSS molecular weight, the top layer, and post-preparation treatment. *Macromolecules* **2023**, *56* (8), 3095-3109. DOI: 10.1021/acs.macromol.2c02476.
- (180) Li, D.-Y.; Liu, L.-X.; Wang, Q.-W.; Zhang, H.-B.; Chen, W.; Yin, G.; Yu, Z.-Z. Functional polyaniline/MXene/cotton fabrics with acid/alkali-responsive and tunable electromagnetic interference shielding performances. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2022**, *14* (10), 12703-12712. DOI: 10.1021/acsami.2c00797.
- (181) Wu, R.; Meng, X.; Yang, Q.; Zhang, W.; Shen, S.; Yang, L.; Li, M.; Chen, Y.; Zhou, Y.; Song, J. Synergistically regulating the conjugation length and side chain on oligothiophene-based fully nonfused ring electron acceptors for efficient organic solar cells. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2024**, *6* (23), 14668-14675. DOI: 10.1021/acsapm.4c02826.
- (182) Reese, C. J.; Qi, Y.; Abele, D. T.; Shlafstein, M. D.; Dickhudt, R. J.; Guan, X.; Wagner, M. J.; Liu, X.; Boyes, S. G. Aromatic polyamide brushes for high young's modulus surfaces by surface-initiated chain-growth condensation polymerization. *Macromolecules* **2022**, *55* (6), 2051-2066. DOI: 10.1021/acs.macromol.1c02088.
- (183) Luo, J.; Wen, Y.; Jia, X.; Lei, X.; Gao, Z.; Jian, M.; Xiao, Z.; Li, L.; Zhang, J.; Li, T.; et al. Fabricating strong and tough aramid fibers by small addition of carbon nanotubes. *Nat. Comm.* **2023**, *14* (1), 3019. DOI: 10.1038/s41467-023-38701-4.
- (184) Chen, X. Preparation of high-temperature resistant polybutylene adipate terephthalate/polylactic acid fully biodegradable material. CN112409644, 2021.
- (185) Yang, X.; Xiao, K. Method for synthesizing a high molecular weight polylactic acid-glycolic acid copolymer. CN118290709, 2024.
- (186) Jiang, T.; Zhang, Y.; Yang, Y.; Xiang, X. Preparation method of MXene coating modified PLA non-woven fabric. CN117051580, 2023.
- (187) Wang, X.; Quan, F.; Ning, H. Preparation method of degradable polylactic acid film with good toughness. CN120757820, 2025.
- (188) Jin, Z.; Luo, F.; Su, H.; Tian, J.; Zhuang, Z.; Shi, M.; Zhao, N.; Wu, Y.; Zhang, A.; Jing, Y.; et al. Toughened poly(lactic acid) composition and toughened poly(lactic acid) material for engineering plastic. CN112300548, 2021.
- (189) Dong, Y.; Wei, Y.; Li, J.; He, K. Preparation method of biodegradable PLA floor with excellent thermal stability. CN117799270, 2024.
- (190) Alfano, S.; Doineau, E.; Perdrier, C.; Preziosi-Belloy, L.; Gontard, N.; Martinelli, A.; Grousseau, E.; Angellier-Coussy, H. Influence of the 3-hydroxyvalerate content on the processability, nucleating and blending ability of poly(3-Hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate)-based materials. *ACS Omega* **2024**, *9* (27), 29360-29371. DOI: 10.1021/acsomega.4c01282.
- (191) Hong, S.-G.; Gau, T.-K.; Huang, S.-C. Enhancement of the crystallization and thermal stability of polyhydroxybutyrate by polymeric additives. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2011**, *103* (3), 967-975. DOI: 10.1007/s10973-010-1180-3.
- (192) Shibin, S. P.; Puthumana, J.; Singh, I. S. B.; Thomas, R. M.; Madhu, G. Microbial production of poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV) as a sustainable alternative to petroleum-based plastics: Advances, challenges, and prospects. *The Microbe* **2025**, *9*, 100582. DOI: 10.1016/j.microb.2025.100582.
- (193) Eraslan, K.; Aversa, C.; Nofar, M.; Barletta, M.; Gisario, A.; Salehiyan, R.; Goksu, Y. A. Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate) (PHBH): Synthesis, properties, and applications - A review. *Eur. Polym. J.* **2022**, *167*, 111044. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2022.111044.
- (194) Thiele, I.; Santolin, L.; Meyer, K.; Machatschek, R.; Böhl, U.; Tarazona, N. A.; Riedel, S. L. Microbially synthesized poly(hydroxybutyrate-co-hydroxyhexanoate) with low to moderate hydroxyhexanoate content: Properties and applications. *International Journal of Biological Macromolecules* **2024**, *263*, 130188. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.130188.
- (195) Dulac, L.; Gauthier, É.; Mathel, V.; Kedzierski, M.; Halley, P.; Vandi, L.-J.; Bruzaud, S. Processing of poly(3-hydroxybutyrate-co-4-hydroxybutyrate) (P(3HB-co-4HB)) using acetic acid: An eco-friendly alternative to chloroform. *Journal of Polymers and the Environment* **2026**, *34* (1), 25. DOI: 10.1007/s10924-026-03763-0.
- (196) Ma, G.; Li, Q.; Zhang, K.; Zhao, L.; Huang, Y.; Zhou, W.; Wu, X.; Zhu, K. Hydrophilic modification method for poly(glycidyl methacrylate) or copolymer thereof and material obtained by modification. CN107365422, 2017.
- (197) Lin, J.; Qiu, X.; Du, P.; Xu, Z.; Li, Y. Preparation of low viscosity, low volatility hyperbranched epoxy resin for photocuring 3D printing. CN119775532, 2025.
- (198) Xu, L.; Huang, J.; Sun, C.; Ding, K.; Li, X.; Li, M. Hyperbranched epoxy resin and preparation method thereof. CN113354795, 2021.

- (199) Zhang, Z.; Yao, J.; Ruizhi, Y.; Dai, Y.; Yan, H. Excellent comprehensive performance epoxy resin with ultra-high toughness enabled by heteroatom-containing hyperbranched polyester. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2026**. DOI: 10.1021/acsapm.5c04201.
- (200) Zhang, Y.; Yu, W. Synthesis of hyperbranched polymers and prospects for application in oilfield chemistry. *Front. Energy Res* **2022**, Volume 10 - 2022, Review. DOI: 10.3389/fenrg.2022.894096.
- (201) Wang, S.; Chen, T.; Wang, J.; Xie, H. Conductive paste for battery and preparation method thereof. CN115862928, 2023.
- (202) Nie, Q.; Zheng, H.; Chen, H.; He, C.; Cao, X. Preparation method of modified epoxy resin adhesive for submarine cable potting. CN117343677, 2024.
- (203) Hu, M.; Huang, C.; Liao, J.; Chen, H.; Hu, W. Preparation method of dual-curing system high temperature resistant resin for solid rocket engine. CN118307744, 2024.
- (204) Yoshimura, R.; Urano, W. Bisphenol f type epoxy resin, an epoxy resin composition, cured product, and electricity and electronic parts. JP2023092965, 2023.
- (205) Harnett, K. G.; Chin, A.; Schuh, S. M. BPA and BPA alternatives BPS, BPAF, and TMBPF, induce cytotoxicity and apoptosis in rat and human stem cells. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **2021**, 216, 112210. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2021.112210.
- (206) Wang, G.; Kong, F.; Du, P. Weather-resistant silicone sealant and preparation method thereof. CN120329912, 2025.
- (207) Wang, Y.; Yang, H.; Sun, L. Organic silicon rubber with soft lignin as crosslinking point and preparation method thereof. CN119708850, 2025.
- (208) Sun, S.; Xiao, M.; Liu, M. Preparation method of organic silicon liquid optical adhesive. CN112646543, 2021.
- (209) Yang, X.; Gao, Y.; Huang, S. Preparation method of scratch-resistant BOPP touch precoated film. CN116179107, 2023.
- (210) Li, J.; Jiang, X.; Liao, G.; Lu, Y.; Zhang, Q.; Gao, D. Preparation method and device for long-chain alkylphenyl modified silicone oil with precisely controllable viscosity. CN119331251, 2025.
- (211) Liu, M. Preparation method and application of star-shaped polyether silicone copolymer. CN120607714, 2025.
- (212) Jin, S. H.; Jung, J. Y.; Lee, J. S. Fluorosilicone elastomer composition, its manufacturing method and semiconductor test socket member manufactured using the same. KR2024149130, 2024.
- (213) Wang, C.; Wang, S.; Ling, C. Polymer electrolytes and batteries with the same. US20250174717, 2025.
- (214) Jung, C. S.; Lee, H. M. Solid polymer electrolyte with semi-interpenetrating polymer network structure and electrochemical device comprising thereof. KR2025139641, 2025.
- (215) Zhang, H.; Wu, B.; Miao, H.; Xi, J.; Jiang, L.; Hu, X. Cationic polymer and preparation method thereof. CN120173187, 2025.
- (216) He, K.; Yang, Z.; Zhang, J.; Ma, S. Cationic polymer with multi-branched structure, preparation method thereof, and circuit board charge hole conditioner. CN120040754, 2025.
- (217) Xia, Y.; Zhang, X.; Ma, J.; Zhao, Y. Composite anion exchange membrane for electrolytic device and preparation method thereof. CN120005398, 2025.
- (218) Yuan, P.; Dai, H.; Su, X.; Wang, Y. Ionomer for membrane electrode and fuel cell and preparation method thereof. CN120441813, 2025.
- (219) Kang, W.; Wang, X.; Han, X.; Li, G.; Zhu, Z.; Zhang, P.; Fan, J.; Zhang, P.; Li, Y.; Meng, X. Preparation of polyionic liquid carrier for polymerization of olefins. CN119684503, 2025.
- (220) Chen, G.; Liu, Y.; Li, Y.; Hu, Z.; Wang, H.; Pei, M.; Fan, Y.; Zheng, Y. Preparation method and application of polybenzimidazole/polyionic liquid/heteropolyacid imidazole composite ionic membrane with high ion selectivity. CN119069758, 2024.
- (221) Shi, C.; Shi, Y. Preparation of bio-based polyurethane composite resin. CN120647881, 2025.
- (222) Sang, P.; Xia, F.; Zhang, D. Bio-based polyurethane material and preparation method thereof. CN120137131, 2025.
- (223) Yuan, Y.; Xie, X.; Zhao, C.; Tan, J. Preparation method of bio-based polyamide with low water absorption. CN120699248, 2025.
- (224) Ye, S.; Cao, M.; Wen, L.; Chen, P.; Ye, N.; Yang, H.; Yang, S.; Xie, M.; Wang, F.; Jiang, S.; et al. Preparation of biobased polyamide resin and its application. CN119331243, 2025.
- (225) Zhou, G.; Jiang, M.; Li, D. Bio-based polyester and preparation method thereof. CN120173217, 2025.
- (226) Lei, G.; Huang, B.; Sun, L.; Lian, X.; Zheng, R.; He, C.; Li, J. Preparation of bio-based polyester thermoplastic elastomer material for high-performance communication data cable sheaths. CN119463425, 2025.
- (227) Won, Y. G. Manufacture of composition for biodegradable fiber and biodegradable fiber. KR2025132011, 2025.
- (228) Saha, T.; Kubina, P.; Janos, J.; Vanko, I. Biodegradable sports shoes. CZ309039, 2021.
- (229) Miyamoto, A. Method for recycling textile products. JP2024025717, 2024.
- (230) Manfra, L.; Marengo, V.; Libralato, G.; Costantini, M.; De Falco, F.; Cocca, M. Biodegradable polymers: A real opportunity to solve marine plastic pollution? *J. Hazard. Mater.* **2021**, 416, 125763. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2021.125763.
- (231) Taguchi, S.; Koh, S.; Matsuki, Y.; Sakamoto, Y. Fiber of polylactic acid having significantly improved biodegradability, and resin composition, nonwoven fabric and product thereof. JP2025141665, 2025.
- (232) Hong, J. S.; Ahn, G. H.; Jung, H. Y. Biodegradable polymer blend with improved mechanical properties, barrier properties and processability and its manufacturing method. KR2023087191, 2023.
- (233) Luo, K.; Zhu, F.; Wei, S.; Sun, C.; Ding, F. Preparation method of modified polylactic acid-glycolic acid copolymer for degradable and recyclable materials. CN119409955, 2025.

- (234) Sun, H.; Luo, W.; Weng, Y.; Zhang, C. Advances in poly(Lactic Acid) chain extenders: Mechanisms, performance, and sustainability. *J. Vinyl and Addit. Technol.*, 1-22. DOI: 10.1002/vnl.70032.
- (235) Lei, C.; Wu, J.; Xiao, W.; Xu, R.; Zeng, R. Green preparation of bio-based self-assembling amide nucleating agents for preparing polylactic acid composition. CN117945939, 2024.
- (236) Xiao, W.; Wu, J.; Liu, X.; Xie, J.; Xu, R.; Lei, C. Developing an Efficient Biobased Nucleating Agent with Antimicrobial Properties by Controlling the Conformation of Poly(lactic acid) Based on Intermolecular Forces. *Macromolecules* **2024**, 57(15), 7398-7408. DOI: 10.1021/acs.macromol.4c01399.
- (237) Wang, J.; Chen, X. Method for preparing an environmentally friendly plastic storage box made of degradable bio-based composite material. CN120173385, 2025.
- (238) Vo, H.-G. D.; Yamaguchi, M. Elucidating the effect of chain orientation on the dimensional change of a poly(lactic acid) composite containing a flexible fiber. *Polymer* **2025**, 333, 128589. DOI: 10.1016/j.polymer.2025.128589.
- (239) Kundu, M. A method for preparing biodegradable packaging bags from thermoplastic starch and composition thereof. IN202411046613, 2024.
- (240) Wang, C.; Fang, Y.; Lin, J.; Yang, L. Biodegradable composite material and preparation method thereof. CN117024933, 2023.
- (241) Oh, K. H.; Kim, S. K.; Kim, H. J.; Kim, K. H.; Park, D. Y. Modified conjugated diene-based polymer, method for preparing same, and rubber composition comprising same. WO2025206621, 2025.
- (242) Wang, Y.; Yu, S.; Zhou, Y. Preparation method and application of hyperbranched ionic liquid, separator, lithium-ion battery. CN120699265, 2025.
- (243) Ros, S.; Johnson, M. A.; Stewart, S. A.; Burke, N. A. D.; Stover, H. D. H. Crosslinked hydrogels with controlled permeability. WO2025208238, 2025.
- (244) Otsuka, Y.; Tanaka, H.; Takagi, N.; Tamai, H.; Ishida, M. Crosslinkable cyanated silicone composition and crosslinked cyanated silicone elastomer having high relative dielectric constant and excellent elongation at break. JP2025141591, 2025.
- (245) Zhang, Y.; Ma, Z.; Lu, Y. Preparation method and application of hyperbranched polyamide resin. CN120535742, 2025.
- (246) Kaneko, T.; Liu, J.; Kaneko, M.; Ali, M. A. Preparation of polybranched polyamides. CN120309927, 2025.
- (247) Huang, S.; Zhang, Z. Preparation of aliphatic amphiphilic dendritic polyester and its application. CN119390955, 2025.
- (248) Wang, X.; Wang, Z. Preparation of weather-resistant, reinforced, toughened, antistatic polyester masterbatch. CN120365711, 2025.
- (249) Han, H.; Cui, Z.; Li, G. Electronic grade phenolic resin with high purity and low free phenol and preparation method thereof. CN120718400, 2025.
- (250) Bhandakkar, A.; S. R. M.; Patil, S. S.; B, L. Adhesive used for gluing film of metal to metal for industrial applications. IN202321083784, 2025.
- (251) Miyashita, T.; Kitajima, K. Novolac-type phenolic resin, photosensitive resin composition, resin film and electronic device. JP2025109295, 2025.
- (252) Xing, P.; Ren, J.; Cheng, P.; Liu, Y.; Wang, Y. Co-cured fluoroelastomers with improved chemical resistance. US20210253762, 2021.
- (253) Galimberti, M. S.; Barbera, V.; Naddeo, S. Cross-linking agent for elastomeric composites and process for crosslinking elastomeric blends by means of dipyrrole crosslinking agent. WO2025196633, 2025.
- (254) Yin, C.; Wang, J.; Zhou, C.; Nie, S. Corrosion-resistant rubber sealing material and preparation method thereof. CN120365661, 2025.
- (255) Corrosion-resistant rubber material and preparation method thereof. China 2025.
- (256) Gao, G.; Xi, H.; Zhao, P.; Tang, J. Heat-resistant and ageing-resistant SBS modified asphalt and preparation process thereof. CN118359938, 2024.
- (257) Jiang, S.; Li, J.; Chen, S.; Qin, X.; Zhu, Z.; Song, Q. Super wear-resistant tread rubber composition and its preparation method. CN117844073, 2024.
- (258) Zhang, L.; Gregory, S. A.; Malinowski, K. L.; Atassi, A.; Freychet, G.; Losego, M. D. Vapor Phase Infiltration of Titanium Oxide into P3HT to Create Organic-Inorganic Hybrid Photocatalysts. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2024**, 16(26), 33259-33269. DOI: 10.1021/acsami.3c16469.
- (259) Sever, C. M.; Esper, A. M.; Ghiviriga, I.; Lester, D. W.; Marathianos, A.; Ehm, C.; Veige, A. S. Self-accelerating ring expansion metathesis polymerization. *ACS Catal.* **2025**, 15(6), 5046-5052. DOI: 10.1021/acscatal.5c01208.
- (260) Sivabalan, P.; Kozody, M. J.; Yuya, P.; Samways, D. S. K.; Shipp, D. A. Synthesis of soluble poly(methacrylic anhydride) by radical cyclopolymerization. *Macromolecules* **2024**, 57(9), 3985-3992. DOI: 10.1021/acs.macromol.3c01957.
- (261) Durso, M. N.; Sawyer, W. J.; Hart, A. J. Versatile fabrication of carbon nanotube yarn composites by in-situ interfacial polymerization of polyetherimide. *Compos. B: Eng* **2024**, 287, 111770. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111770.
- (262) Wang, L.; Zhou, Q.; Chen, Y.; Yang, X.; Zhang, Y.; Duan, H.; Song, H.; Wang, Y.; Zheng, Y. Mechanochemical reactions within graft copolymeric assemblies: ultrasound-induced multimechanophore activation, arm chain scission, and aggregation morphology/size changes. *Polym. Chem.* **2023**, 14(20), 2520-2532, 10.1039/D2PY01515C. DOI: 10.1039/D2PY01515C.
- (263) Reyes, E. A.; Recio, A.; Holan, K. H.; Beuterbaugh, A. M. Nanobubbles to stabilize scale control additives. WO2025212097, 2025.

- (264) Li, L.; Huang, W.; Cao, T. Non-ionic silicone functional additives for softeners. CN120649306, 2025.
- (265) Frenkel, P.; Evans, P. Carbodiimide additives for improving performance of PVC compounds. EP4628533, 2025.
- (266) Xu, W.; Xie, L.; Li, P.; Wang, F.; Ji, W. Silane coupling agent and application thereof in two-component moisture-hardening silicone resin composition. CN119954855, 2025.
- (267) Kwon, H. R.; Lee, J. U.; Jung, G. M. Silane coupling agent and adhesive composition. KR2025052159, 2025.
- (268) Fang, J.; Fang, Y.; Pan, L.; Yang, Z.; Jiao, K.; Wei, D. The invention discloses a crosslinking agent, a preparation method thereof and a fracturing fluid containing the crosslinking agent. CN120309569, 2025.
- (269) Qiao, J.; Tu, B.; Chen, Y.; Yang, W.; Li, S.; Hu, J.; Yang, R.; Zhao, J.; Deng, G.; Zhang, Y.; et al. Crosslinking agent, co-crosslinking agent compound system and a high-voltage submarine cable long-time extruded semi-conductive shielding material using the same. CN120271911, 2025.
- (270) Liu, L.; Hu, J.; Wang, C.; Zhang, C.; Liu, Y.; Wang, C.; Jiang, G.; Wang, J. Organic silicone modified amine epoxy curing agent and preparation method thereof. CN120647953, 2025.
- (271) Yan, K.; He, G.; Zhang, G. Amine curing agent, epoxy electronic adhesive and preparation method thereof. CN120623446, 2025.
- (272) Ma, W.; Miller, P. G.; Wang, Y. ABA block copolyester thiol-ene resin from triethylborane-assisted ring-opening copolymerization. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2024**, *6* (2), 1503-1513. DOI: 10.1021/acsapm.3c02745.
- (273) Du, Y.; Hu, J.; Wang, W.; Liu, X.; Liu, Y.; Duan, R.; Bian, X.; Chen, X. Highly regioselective ring-opening polymerization of an asymmetric diester. *Macromolecules* **2024**, *57* (24), 11476-11487. DOI: 10.1021/acs.macromol.4c02286.
- (274) Gu, X.-Y.; Wu, W.-J.; Sun, X.-L.; Deng, H.; Chen, Q.-H. Radical ring-opening polymerization towards degradable polymer as chain extender for polylactic acid. *Polymer* **2024**, *307*, 127294. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127294.
- (275) Georgiou, P. G.; Neal, T. J.; Newell, M. A.; Hepburn, K. S.; Tyler, J. J. S.; Farmer, M. A. H.; Chohan, P.; Roth, P. J.; Nicolas, J.; Armes, S. P. Degradable diblock copolymer vesicles viaradical ring-opening polymerization-induced self-assembly in aqueous media. *J. Am. Chem. Soc.* **2025**, *147* (23), 19817-19828. DOI: 10.1021/jacs.5c03744.
- (276) Okumura, S. Method for producing modacrylic resin capable of copolymerize monomers having anionic functional groups by suspension polymerization using oil-soluble initiator. JP2025099966, 2025.
- (277) Zhang, C.; Xu, D. Ultra-high molecular weight polyvinylidene fluoride resin suspension polymerization process. CN118496402, 2024.
- (278) Zhou, P.; He, W.; Huang, L. Preparation process of a highly flame-retardant and heat-resistant 22F copper-clad laminate using epoxy resin. CN114801348, 2022.
- (279) Yoo, H. S.; Shin, B. H.; Kim, Y. H.; Lee, E. H.; Choi, P. G. Manufacturing method of eco-friendly silica dispersant for rubber composition with good mechanical property. KR2024085780, 2024.
- (280) Garmshausen, Y. Naphthopyran photoswitchable photoinitiators for locally polymerizing a starting material by dual color photopolymerization. US20250179306, 2025.
- (281) Cao, Y.; Zhao, Y.; Yu, L. Preparation method of enzyme catalyzed photopolymerization reduced polyaniline anode material. CN119505230, 2025.
- (282) Kim, J. H.; Hwang, G. T.; Choi, J. H.; Kim, E. S.; Han, G. S. Photopolymerization 3D printer, photopolymerization 3D printing method, and composition for photopolymerization 3D printing. KR2023047269, 2023.
- (283) Fortulan, C. A.; Leite de Camargo, I.; Lovo, J. F. P.; Erbereli, R. Preparation of coating system with sequential action plates for additive manufacturing by vat photopolymerization. BR102021021544, 2023.
- (284) Morone, M.; Razzano, V. 10,11-Dihydro-5H-dibenzo[b,f]azepine derivatives as photoinitiators in photopolymerization for use in photocurable compositions. WO2025027517, 2025.
- (285) Cros, S.; Labarthe, C.; Laurichesse, C.; Majorel, M. Adhesive photopolymerizable composition for the encapsulation of electronic or optoelectronic devices. WO2023118410, 2023.
- (286) Li, W.; Shi, Z.; Wang, Y.; Chen, H.; Liu, H. Photoinitiating system used in aggregate environment, photopolymerizable material and application. CN114907503, 2022.
- (287) Yamada, K.; Konno, Y.; Nojiri, T. Photosensitive resin composition, photosensitive resin film, printed wiring board, semiconductor package and photopolymerizable compound. JP2025018036, 2025.
- (288) Mousa, M.; Jonsson, M.; Granbom, L.; Larsson Kron, A.; Malmström, E. Thermally expandable microspheres based on fully or partially bio-based polymers. *J. Appl. Polym. Sci.* **2024**, *141* (20), e55368. DOI: 10.1002/app.55368.
- (289) Song, Y.; He, J.; Zhang, Y.; Gilsdorf, R. A.; Chen, E. Y. X. Recyclable cyclic bio-based acrylic polymer via pairwise monomer enchainment by a trifunctional Lewis pair. *Nat. Chem.* **2023**, *15* (3), 366-376. DOI: 10.1038/s41557-022-01097-7.
- (290) Zhou, M.; Yu, P.; Jiang, C.; Li, A.; Cai, Z.; Huang, H.; Wu, Z. Simultaneously improving lignin dispersion and interfacial interaction in rubber/lignin composites by using deep eutectic solvent as a highly effective modifier. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2025**, *13* (4), 1798-1806. DOI: 10.1021/acssuschemeng.4c09936.
- (291) Levkovsky, I. O.; Trachsel, L.; Murata, H.; Matyjaszewski, K. Oxygen-tolerant, red light-driven controlled synthesis of easily degradable and high molecular weight α -lipoic acid-vinyl copolymers. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2025**, *64* (44), e202516164. DOI: 10.1002/anie.202516164.

- (292) Gu, X.; Niu, H.; Sun, Q.; Jiang, S.; Shi, Y.; Cai, Y. Thiol-ene click chemistry: A general strategy for tuning the properties of vinylene-linked covalent organic frameworks. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2025**, *17* (2), 3818-3828. DOI: 10.1021/acsami.4c19765.
- (293) Li, J.-Y.; Pan, H.-T.; Yang, F.; Wu, Y.-Y.; Wu, B.-B.; Song, J.; Li, Y.; Zhang, G.-D.; Tang, L.-C. Facile and efficient synthesis of fluorosilicone polymers by using an optimized gradient ring-opening reaction. *Macromol. Rapid Commun.* **2025**, *46* (2), 2400698. DOI: 10.1002/marc.202400698.
- (294) Bruno, N. C.; Mathias, R.; Lee, Y. J.; Zhu, G.; Ahn, Y.-H.; Rangnekar, N. D.; Johnson, J. R.; Hoy, S.; Bechis, I.; Tarzia, A.; et al. Solution-processable polytriazoles from spirocyclic monomers for membrane-based hydrocarbon separations. *Nat. Mater.* **2023**, *22* (12), 1540-1547. DOI: 10.1038/s41563-023-01682-2.
- (295) Chang, X.; Xu, S.; Wu, Q.; Shen, J.; Zhang, J.; Zhang, L. Environmentally friendly calcium-zinc composite PVC heat stabilizer and preparation method thereof. CN120737436, 2025.
- (296) He, J. Preparation of heat-resistant and anti-aging rubber plasticizer. CN120271978, 2025.
- (297) Dong, Z.; Gao, J.; Guo, Z.; Li, J.; Yang, J.; Zhang, B.; Hu, J. Recyclable thermosetting foams with isotropic auxetic features enabled by dynamic bond exchange reactions. *Chem. Eng. J.* **2025**, *508*, 160961. DOI: 10.1016/j.cej.2025.160961.
- (298) Hayashi, M.; Mizuno, T. Designing dual-domain thermoplastic elastomers from ABA triblock copolymers: Introducing bond-exchangeable subdomains into B-block strands. *Polym. Chem.* **2024**, *15* (38), 3854-3863, 10.1039/D4PY00858H. DOI: 10.1039/D4PY00858H.
- (299) Wang, H. S.; Agrachev, M.; Kim, H.; Truong, N. P.; Choi, T.-L.; Jeschke, G.; Anastasaki, A. Visible light-triggered depolymerization of commercial polymethacrylates. *Science* **2025**, *387* (6736), 874-880. DOI: 10.1126/science.adr1637.
- (300) Wu, X.; Turnell-Ritson, R. C.; Han, P.; Schmidt, J.-C.; Piveteau, L.; Yan, N.; Dyson, P. J. Carbamate-bond breaking on bulk oxides realizes highly efficient polyurethane depolymerization. *Nat. Comm.* **2025**, *16* (1), 4322. DOI: 10.1038/s41467-025-59688-0.
- (301) Diment, W. T.; Lindeboom, W.; Fiorentini, F.; Deacy, A. C.; Williams, C. K. Synergic heterodinuclear catalysts for the ring-opening copolymerization (ROCOP) of epoxides, carbon dioxide, and anhydrides. *Acc. Chem. Res.* **2022**, *55* (15), 1997-2010. DOI: 10.1021/acs.accounts.2c00197.
- (302) Pesqueira, N. M.; Morlet-Savary, F.; Schmitt, M.; Carvalho, V. P.; Goi, B. E.; Lalevée, J. Visible light-promoted nickel-NHC photocatalysts for free radical photopolymerization and 3D printing application. *Polym. Chem.* **2025**, *16* (20), 2436-2448, 10.1039/D4PY01252F. DOI: 10.1039/D4PY01252F.
- (303) Zhang, S.; Wang, J.; Su, D.; Xiao, X. Facile visible-light upcycling of diverse waste plastics using a single organocatalyst with minimal loadings. *Nat. Comm.* **2025**, *16* (1), 4188. DOI: 10.1038/s41467-025-59540-5.
- (304) Dong, P.; Xiong, W.; Feng, J.; Wang, B.; Liang, C.; Wang, H.; Sun, T.; Wei, M.; Shi, Q.; Xie, X. Enzymatic synthesis of poly(β -amino ester) copolymer with high potency in eliminating gram-negative bacteria. *Macromol. Rapid Commun.* **2025**, *46* (12), 2400885. DOI: 10.1002/marc.202400885.
- (305) Onoda, M.; Miyagi, M.; Nagayama, S. Polyisocyanate curable composition, cured product and curing catalyst for blocked isocyanate compound. WO2023100839, 2023.
- (306) Wang, C.; Zhao, L.; Yang, Z.; Cui, X. Preparation method of self-repairing organic-inorganic composite electrolyte membrane for solid state lithium battery. CN119823636, 2025.
- (307) Zhang, J.; Meng, Z.; Liao, L.; Fan, J.; Gao, C.; Li, J.; Luo, S. Preparation method and product of polylactic acid. CN116023635, 2023.
- (308) Niu, Q.; Jin, M.; He, A. Metal-organic framework-supported heterogeneous iron-based catalyst for preparing polyisoprene rubber. CN119192446, 2024.
- (309) Lu, L.; Wang, C. A composition for preparing high performance silicone rubber. CN120424507, 2025.
- (310) Qin, Y.; Liang, H.; Wu, K.; Wang, Q.; Liu, Y. Preparation method of multifunctional titanium catalyst for synthesizing polyester. CN120574386, 2025.
- (311) Fan, W.; Zhao, L.; Chen, R.; Lu, F.; Sun, L.; Shang, Y.; Guo, C. Preparation of isocyanate curing agents and their applications. CN120590297, 2025.
- (312) Wang, Q.; Ding, B.; Liu, H.; Cheng, L. Preparation method of MOF-based polyester polycondensation catalyst for production of polyethylene terephthalate. CN120309968, 2025.
- (313) Mecerreyes, D.; Casado, N.; Villaluenga, I.; Forsyth, M. Current trends and perspectives of polymers in batteries. *Macromolecules* **2024**, *57* (7), 3013-3025. DOI: 10.1021/acs.macromol.3c01971.
- (314) Xiong, W.; Tang, H.; Zhang, X.; Luo, X.; Wang, J.; Huang, F.; Cao, Y. High-performance n-type conducting polymer-based supercapacitors with enhanced capacitance and stability via redox additives. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2025**, *17* (51), 69754-69764. DOI: 10.1021/acsami.5c14387.
- (315) Yang, J.; Feng, C.-P.; Bai, L.; Bao, R.-Y.; Yang, M.-B.; Yang, W. Polymer composites for thermal energy storage. In *Polymer Composites for Electrical Engineering*, 2021; pp 29-61.
- (316) Chang, Z.; Zhang, D.-S.; Chen, Q.; Bu, X.-H. Microporous organic polymers for gas storage and separation applications. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2013**, *15* (15), 5430-5442, 10.1039/C3CP50517K. DOI: 10.1039/C3CP50517K.
- (317) Fluoropolymers for lithium-ion battery separator. In *Fluoropolymeric Membranes*, 2025; pp 265-287.

- (318) Son, J. M.; Han, J. S.; Woo, J. E.; Kim, D. Y. Anode comprising styrene butadiene binder, and secondary battery comprising same. KR2022049311, 2022.
- (319) Adams, C. W.; Zhang, Z.; Reinartz, S. Dry-process polyethylene membranes, coated membranes, separators, and related methods. WO2022132682, 2022.
- (320) Lee, J.; Jung, S.; Jung, H.; Kim, C.; Cha, S.; Kim, M.; Im, D.; Kim, H.; Cho, H.; Jun, B.; et al. Method for manufacturing polypropylene for secondary battery separator having excellent mechanical properties and thermal properties, and secondary battery separator produced therefrom. WO2025116430, 2025.
- (321) Liu, H.; Yang, F.; Xiang, M.; Cao, Y.; Wu, T. Development of multilayer polypropylene separators for lithium-ion batteries via an industrial process. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2021**, *60* (30), 11611-11620. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c01577.
- (322) Chen, Q.; Duan, J.; Guan, Y.; An, C.; Zhang, D.; Zhang, Y.; Yang, D.; Lai, W.-Y. Fluoropolymer electrolytes for flexible lithium batteries: Recent advances and challenges. *ChemSusChem* **2025**, *18* (20), e202501082. DOI: 10.1002/cssc.202501082.
- (323) Wang, H.; Liu, W.; Li, X.; Tang, N.; Wang, J. Preparation method of PVDF in high yield for binder of lithium battery. CN104530276, 2015.
- (324) Nishimura, K.; Yamada, T.; Yasuda, K.; Kato, T.; Inoue, R.; Tokuda, H.; Atsumo, K.; Yamamoto, E.; Terada, J.; Yamanaka, T. Polytetrafluoroethylene composition, battery binder, electrode mixture, electrode, and secondary battery. JP2024101797, 2024.
- (325) Li, Z.; Su, Q.; Liu, H. Gel polymer electrolyte for electrochemical cells. DE102022117456, 2023.
- (326) Kim, T. H.; Rajeev, K. K.; Jang, W. S.; Kim, S. U. Binder for aqueous silicon anode containing gallic acid-grafted chitosan copolymer and lithium secondary battery containing same. KR2023069510, 2023.
- (327) Li, J.; Wang, A.; Xiang, W.; Liu, S.; Li, L.; Wu, Q.; Liu, Y.; Liu, Y.; Nie, G.; Nie, S.; et al. Direct synthesis of a lithium carboxymethyl cellulose binder using wood dissolving pulp for high-performance LiFePO₄ cathodes in lithium-ion batteries. *Bioresour. Technol.* **2024**, *401*, 130711. DOI: 10.1016/j.biortech.2024.130711.
- (328) Park, H.; Lee, D.; Song, T. Synthesis of carboxymethyl cellulose lithium by weak acid treatment and its application in high energy-density graphite anode for Li-ion batteries. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2018**, *57* (27), 8895-8901. DOI: 10.1021/acs.iecr.8b00851.
- (329) Hou, J.; Zhang, J.; Wu, S.; Liu, X.; Li, Y.; Yan, Z.; Zhang, K.; Lu, Y.; Chen, J. Advanced design and characterization of polyether-based solid-state electrolytes for high-energy-density lithium batteries. *Adv. Mater.* **2025**, e15430. DOI: 10.1002/adma.202515430.
- (330) Chen, G.; Shen, C.; Wei, H.; Yao, L.; Dai, Y.; Han, Z.; Jin, H.; Lu, G.; Wang, S.; Zhang, M. Preparation of carboxylated itaconic acid polyethylene glycol solid electrolyte material for lithium battery. CN115058002, 2022.
- (331) Li, Y.; Xue, X.; Wang, Y.; Liu, H.; Bai, F.; Dong, L.; Jin, J.; Wang, F.; Hu, N.; Zhai, T. Polyacrylic acid-polyethylene glycol copolymer as binder for lithium ion batteries and preparation method thereof. CN112142988, 2020.
- (332) Xu, F.; Yuan, H.; Meng, X.; Su, B. Polyacrylonitrile separator coating solution, and its preparation method and application in lithium battery separator. CN109504226, 2019.
- (333) Lin, Z.; Hu, C.; Wu, S.; Zhang, Z.; Shen, W.; Huang, C. An aminated polyacrylic acid aqueous polymer binder for silicon-based negative electrode of lithium ion battery and preparation method and application thereof. CN119463748, 2025.
- (334) Meng, T.; Yang, L.; Shu, D.; Li, S.; Ye, T.; Zhong, J. Silicon anode supramolecular binder for lithium ion battery and preparation method thereof. CN120464338, 2025.
- (335) Verdier, N.; El Khakani, S.; Lepage, D.; Pr  b  , A.; Aym  -Perrot, D.; Doll  , M.; Rochefort, D. Polyacrylonitrile-based rubber (HNBR) as a new potential elastomeric binder for lithium-ion battery electrodes. *J. Power Sources* **2019**, *440*, 227111. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2019.227111.
- (336) Lee, W. M.; Lee, B. S.; Sim, J. G.; Ryu, D. S.; Jung, E. B. Water-based binder for silicon-based anode material and manufacturing method thereof. KR2024061126, 2024.
- (337) Zhang, Q.; Qian, J.; Zhan, X. Preparation method of modified polyvinyl alcohol-based gel electrolyte membrane for lithium-sulfur battery. CN113527725, 2021.
- (338) Chen, W.; Li, S.; Wang, H.; Li, J.; Xu, Y. Conductive polymer binder polyvinylpyrrolidone-polyaniline copolymer for lithium ion battery and its preparation method. CN110128650, 2019.
- (339) Prosini, P. P.; Carewska, M.; Masci, A. A high voltage cathode prepared by using polyvinyl acetate as a binder. *Solid State Ionics* **2015**, *274*, 88-93. DOI: 10.1016/j.ssi.2015.03.008.
- (340) Yu, Y.; Wu, X.; Chen, H. Polyester film for lithium battery separator process protector and preparation method thereof. CN115447236, 2022.
- (341) Wujcik, K.; Burdyska, J.; Villaluenga, I. Thermally responsive solid state composite electrolyte separator. WO2020264579, 2020.
- (342) Chen, Y.-H.; Hsieh, Y.-C.; Liu, K. L.; Wichmann, L.; Thienenkamp, J. H.; Choudhary, A.; Bedrov, D.; Winter, M.; Brunklaus, G. Green polymer electrolytes based on polycaprolactones for solid-state high-voltage lithium metal batteries. *Macromol. Rapid Commun.* **2022**, *43* (20), 2200335. DOI: 10.1002/marc.202200335.
- (343) Deng, Y.; Xu, H. Polymer, polymer electrolyte, polymer electrolyte membrane, non-aqueous electrolyte solution, and lithium ion battery. CN111326797, 2020.

- (344) Naboulsi, A.; Chometon, R.; Ribot, F.; Nguyen, G.; Fichet, O.; Laberty-Robert, C. Correlation between ionic conductivity and mechanical properties of solid-like PEO-based polymer electrolyte. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2024**, *16* (11), 13869-13881. DOI: 10.1021/acsami.3c19249.
- (345) Lin, Y.; Liu, K.; Wu, M.; Zhao, C.; Zhao, T. Enabling solid-state Li metal batteries by in situ forming ionogel interlayers. *ACS Appl. Energy Mater.* **2020**, *3* (6), 5712-5721. DOI: 10.1021/acsaem.0c00662.
- (346) Wu, J.; Hao, J. Binder for composite positive electrodes of solid-state lithium batteries and preparation method thereof. CN117844403, 2024.
- (347) Shin, H.; Lee, J.; Sohn, J.; Yang, J.; Jung, S. An all solid-state battery comprising an electrode coating protection layer. US20250105299, 2025.
- (348) Sadiq, M.; Raza, M. M. H.; Zulfequar, M.; Ali, J. Facile synthesis of highly flexible sodium ion conducting polyvinyl alcohol (PVA)-polyethylene glycol (PEG) blend incorporating reduced graphene-oxide (rGO) composites for electrochemical devices application. *J. Polym. Res.* **2022**, *29* (4), 107. DOI: 10.1007/s10965-022-02892-z.
- (349) Nguyen, H.; Wei, S. Recent progress of gel polymer electrolytes for sodium sulfur batteries. *ACS Appl. Electron. Mater.* **2024**, *6* (12), 8671-8688. DOI: 10.1021/acsaem.3c01841.
- (350) Gao, S.; Yang, T.; Liu, J.; Zhang, X.; Zhang, X.; Yang, T.; Zhang, Y.; Chen, Z. Incorporating sodium-conductive polymeric interfacial adhesive with inorganic solid-state electrolytes for quasi-solid-state sodium metal batteries. *Small* **2024**, *20* (38), 2401892. DOI: 10.1002/smll.202401892.
- (351) Zheng, J.; Li, K.; Zeng, W.; Li, S. Composite binder for homogenization process of sodium ion battery cathode material and preparation method thereof. CN117143543, 2023.
- (352) Cheng, T.; Yang, H.; Zheng, B.; Dai, J.; Chen, Q. Preparation of PVDF binder for battery positive electrodes. CN117603634, 2024.
- (353) Qian, P.; Wang, H.; Zhang, L.; Zhou, Y.; Shi, H. An enhanced stability and efficiency of SPEEK-based composite membrane influenced by amphoteric side-chain polymer for vanadium redox flow battery. *J. Membr. Sci.* **2022**, *643*, 120011. DOI: 10.1016/j.memsci.2021.120011.
- (354) Yu, H.; Xia, Y.; Zhang, H.; Gong, X.; Geng, P.; Gao, Z.; Wang, Y. Improved chemical stability and proton selectivity of semi-interpenetrating polymer network amphoteric membrane for vanadium redox flow battery application. *J. Appl. Polym. Sci.* **2021**, *138* (6), 49803. DOI: 10.1002/app.49803.
- (355) Wang, W.; Zhu, H. Ion exchange membrane, method of making the ion exchange membrane, and flow battery comprising the ion exchange membrane. WO2020214315, 2020.
- (356) Zhang, Y.; Hu, C. Preparation method and application of modified polyvinylidene fluoride blend ion exchange membrane for flow battery. CN120775234, 2025.
- (357) Jaikrajang, N.; Kao-Ian, W.; Muramatsu, T.; Chanajaree, R.; Yonezawa, T.; Al Balushi, Z. Y.; Kheawhom, S.; Cheacharoen, R. Impact of binder functional groups on controlling chemical reactions to improve stability of rechargeable zinc-ion batteries. *ACS Appl. Energy Mater.* **2021**, *4* (7), 7138-7147. DOI: 10.1021/acsaem.1c01214.
- (358) Jin, Y.; Zhang, D.; Lu, H.; Duan, C.; Jiang, X.; Lv, N. Hydrophobic zinc ion battery separator based on inorganic oxide and application thereof in zinc battery. CN117438741, 2024.
- (359) Du, W.; Xiao, J.; Geng, H.; Yang, Y.; Zhang, Y.; Ang, E. H.; Ye, M.; Li, C. C. Rational-design of polyaniline cathode using proton doping strategy by graphene oxide for enhanced aqueous zinc-ion batteries. *J. Power Sources* **2020**, *450*, 227716. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.227716.
- (360) Chernysh, O.; Makyeyeva, I.; Khomenko, V.; Barsukov, V. Alternative binders for electrodes of electrochemical capacitors: The transition to aqueous and alcohol based solvent electrode processing. *Mater. Today Proc.* **2022**, *50*, 419-422. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.242.
- (361) Xiao, L.; Liu, Z.; Sun, X.; Zhang, L.; Liu, K.; Zhang, F.; Zheng, Y.; Xie, S.; Wang, Y. Composition-driven polarization distribution in poly(vinylidene fluoride)-based copolymer blends for high power density capacitors. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, *15* (17), 21403-21412. DOI: 10.1021/acsami.2c23154.
- (362) Chen, W.; Xing, Z.; Wei, Y.; Zhang, X.; Zhang, Q. High thermal safety and conductivity gel polymer electrolyte composed of ionic liquid [EMIM][BF₄] and PVDF-HFP for EDLCs. *Polymer* **2023**, *268*, 125727. DOI: 10.1016/j.polymer.2023.125727.
- (363) Amin-Sanayei, R.; Gaboury, S. R. Aqueous polyvinylidene fluoride composition. US20150030906, 2015.
- (364) Toyoshima, T.; Fujihira, R.; Asano, T. Biaxially drawn polypropylene film for film capacitor. JP2016189457, 2016.
- (365) Fujine, M.; Kaminiwa, M.; Matsumura, N.; Takahashi, K. Method for manufacturing of stretched polyethylene film for film capacitors. JP2022113284, 2022.
- (366) Wang, D.; Li, Z.; Qi, K.; Qiu, Y.; Guo, X. Insights on the capacitance degradation of polypyrrole nanowires during prolonged cycling. *Polym. Degrad. Stab.* **2022**, *202*, 110034. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110034.
- (367) Wang, R.; Zhuang, Z.; Yu, D.; Wang, Y.; Li, J.; Miao, J.; Wang, F.; Qi, B. High temperature resistant BOPET capacitor film and preparation method thereof. CN120439661, 2025.
- (368) Yan, T.; Zou, Y.; Zhang, X.; Li, D.; Guo, X.; Yang, D. Hydrogen bond interpenetrated agarose/PVA network: A highly ionic conductive and flame-retardant gel polymer electrolyte. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, *13* (8), 9856-9864. DOI: 10.1021/

- (369) Matbiangthaw, S.; A, S. Modified lignin PVA membrane for flexible supercapacitors. IN202441091496, 2024.
- (370) Jiang, X.; Zhang, Y.; Jiang, P. Adhesive, laminated foil and liquid aluminum electrolytic capacitor. CN120718572, 2025.
- (371) Liu, J. Impact resistant plastic shell capacitor composed of terpene resin and polystyrene. CN107868381, 2018.
- (372) Hou, S. S.; Kuo, P. L.; Teng, H. S.; Wu, C. A.; Huang, C. W. Polyethylene glycols copolymer with high conductivity. TWI608022, 2017.
- (373) Liu, P.-I.; Chung, L.-C.; Liang, T.-M.; Horng, R.-Y.; Shao, H.; Chen, R.-S.; Fan, H.-T.; Fang, C.-H.; Chang, M.-C. Binder and method for manufacture of binder for capacitive deionization electrode. US20170174820, 2017.
- (374) Liu, Q.; Cao, Y.; Gu, N.; Liu, Z.; Liu, Q.; Ou, K.; Liu, Z.; Sun, Y. A self-healing and robust aqueous network binder for aqueous energy storage devices. *Mater. Today Chem.* **2023**, 32, 101651. DOI: 10.1016/j.mtchem.2023.101651.
- (375) Tanaka, K.; Fujimoto, N. Capacitor separator containing regenerated cellulose and capacitor using it. WO2015092898, 2015.
- (376) Rong, H.; Deng, K.; Wang, D.; Lu, J.; Zhang, G.; Yu, J.; Wu, Q.; Yao, J.; Xu, S.; Liu, J. Polyacrylonitrile mesoporous activated carbon fiber for supercapacitor electrode and its preparation method. CN105603584, 2016.
- (377) Ma, Y.-J.; Wang, J.-W.; Zhang, Y.; Zhang, Z.-L.; Zhuang, G.-C.; Yang, J.-B.; Wang, H.-Q. Enhancement of dielectric properties of poly(dimethyl siloxane) copolymer elastomer using chemically modified metal-organic frameworks. *Compos. Sci. Technol.* **2023**, 241, 110122. DOI: 10.1016/j.compscitech.2023.110122.
- (378) Zhang, Y.; Wen, D.; Liu, M.; Li, Y.; Lin, Y.; Cao, K.; Yang, F.; Chen, R. Stretchable PDMS encapsulation via SiO₂ doping and atomic layer infiltration for flexible displays. *Adv. Mater. Interfaces* **2022**, 9(5), 2101857. DOI: 10.1002/admi.202101857.
- (379) Yang, W.; Li, F.; Tao, Y.; Lu, X. Built-in high-dielectric constant flexible resin composite and preparation method and application thereof. CN107573645, 2018.
- (380) Zheng, X.; Zheng, Y.; Wen, Q.; Fu, W.; Xu, Q.; Mao, N.; Chen, W.; Qin, X.; Qiu, Y.; Chen, X.; et al. Method for preparing superelastic electric conductive fiber and supercapacitor thereof. CN107988645, 2018.
- (381) Sun, Q.; Jiang, Y.; Zhang, N.; Ju, F.; Yuan, Y. Functionalized polyethylene glycol composite phase change materials: A review. *Adv. Eng. Mater.* **2025**, 27 (21), e202501430. DOI: 10.1002/adem.202501430.
- (382) Paberit, R.; Rilby, E.; Göhl, J.; Swenson, J.; Refaa, Z.; Johansson, P.; Jansson, H. Cycling stability of poly(ethylene glycol) of six molecular weights: influence of thermal conditions for energy applications. *ACS Appl. Energy Mater.* **2020**, 3 (11), 10578-10589. DOI: 10.1021/acsaem.0c01621.
- (383) Xu, X.; Sun, Y.; Wang, W.; Ju, L.; Shu, R.; Gu, H. An overview of polyethylene glycol composite phase change materials: Preparation, physicochemical properties and application. *J. Energy Storage* **2024**, 104, 114581. DOI: 10.1016/j.est.2024.114581.
- (384) Fu, W.; Pan, J.; Liang, L.; Lin, G.; Wu, C.; Suo, H.; Zhang, X.; Chen, L. Polyethylene glycol solid-solid phase change material with high thermal conductivity and preparation method thereof. CN106810648, 2017.
- (385) Lu, H.; Tang, Z.; Li, P.; Zhang, H. Composite phase-change film and preparation method thereof. CN113881124, 2022.
- (386) Lin, C.; Du, Y.; Li, X.-L.; Zhou, W.-L.; Zhang, C.-Y.; Xie, H.; Wu, T.; Qu, J.-P. Efficient fabrication of low-density polyethylene/polyethylene oxide/carbon nanotubes films with robust shape stability and photothermal property for thermal management and afterheat utilization. *Polymer* **2022**, 260, 125381. DOI: 10.1016/j.polymer.2022.125381.
- (387) Zhang, G.; Xu, K.; Li, Y. Preparation of ultrahigh molecular weight polyethylene-based coaxial phase change energy storage fiber. CN117626470, 2024.
- (388) Nan, B.; Wu, K.; Chen, W.; Liu, Y.; Zhang, Q.; Lu, M. Bioinspired modification strategy to improve thermal conductivity of flexible poly(vinyl alcohol)/nanodiamond nanocomposite films for thermal management applications. *Appl. Surf. Sci.* **2020**, 508, 144797. DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.144797.
- (389) Zhang, Z.; Zhang, S.; Wang, Z.; Shang, M. A composite film with photo thermal conversion and thermal energy storage-release function and preparation method thereof. CN105602167, 2016.
- (390) Liu, H. Polyvinyl chloride composite material capable of heat storage and heat release and preparation method thereof. CN115821603, 2023.
- (391) Wang, Y. Preparation of polystyrene-based phase-change microcapsule heat storage material. CN106554577, 2017.
- (392) Yang, L.; Zhang, N.; Yuan, Y.; Cao, X.; Xiang, B. Thermal performance of stearic acid/carbon nanotube composite phase change materials for energy storage prepared by ball milling. *Int. J. Energy Res.* **2019**, 43 (12), 6327-6336. DOI: 10.1002/er.4352.
- (393) Zhao, X.; Chen, H.; Gu, H.; Wang, Y.; Feng, Z.; Yang, W.; Lu, Y.; Wang, J.; Yang, C.; Li, Z.; et al. Antibacterial thermal storage polyester fiber for functional textile, and preparation method thereof. CN109695067, 2019.
- (394) Wang, X. Medical packaging film and preparation method thereof. CN111761898, 2020.
- (395) Bidiyasar, R.; Kumar, R.; Jakhar, N. A critical review of polymer support-based shape-stabilized phase change materials for thermal energy storage applications. *Energy Storage* **2024**, 6 (4), e639. DOI: 10.1002/est2.639.
- (396) Zhu, P.; Fan, D.; Gong, Z.; Li, C.; Huang, W.; Cao, Y. Encapsulated electrospun photothermal membranes with enhanced thermal confinement for high-efficiency solar water evaporation. *Mater. Lett.* **2025**, 400, 139147. DOI: 10.1016/j.matlet.2025.139147.

- (397) Kalaiselvam, S.; Karuppasamy, P.; Dinesh, R. Encapsulated phase change material sandwiched rechargeable thermal jacket for extreme climatic conditions. IN201941046099, 2021.
- (398) Sun, D.; Du, Q.; Sun, H.; Li, D. Preparation of thermally conductive phase change composite material for energy storage and thermal management. CN118205278, 2024.
- (399) Souza, R.; Nobrega, G.; Afonso, I. S.; Pereira, J.; Cardoso, E.; Marques, F.; Vilarinho, C.; Moita, A.; Lima, R. A. Thermal performance evaluation of pure PDMS and PDMS composites heat exchangers. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2025**, *150* (13), 10401-10412. DOI: 10.1007/s10973-025-14394-3.
- (400) Selinger, F.; Weinberger, P.; Ertl, P. Device for storing thermal energy with heat storage medium embedded in a matrix. WO2025054647, 2025.
- (401) Zheng, N.; Pan, H.; Chai, Z.; Liu, Z.; Gao, F.; Wang, G.; Huang, X. Anisotropic rotunda-shaped carboxymethylcellulose/carbon nanotube aerogels supported phase change materials for efficient solar-thermal energy conversion. *ChemSusChem* **2024**, *17* (7), e202301971. DOI: 10.1002/cssc.202301971.
- (402) Maji, P. K.; Bhardwaj, S.; Singh, S.; Choudhary, N. Cellulose aerogel-based composite and a process for its preparation. IN202411077028, 2025.
- (403) Xiao, Y.; Zheng, W.; Guan, J.; Chen, Y.; Chen, R.; Zhao, Y.; Xiang, S. Surface-engineered PVDF-HFP/BNNS micro-nano fibers enable high-performance radiative cooling through synergistic photon scattering. *Nanoscale* **2025**, *17* (28), 16767-16774, 10.1039/D5NR01671A. DOI: 10.1039/D5NR01671A.
- (404) Yang, C.; Sun, X.; Hu, H.; Zhang, K.; Ni, Y.; Shang, S.; Liu, Y. Scalable fabrication of PVDF/SiO₂-PTFE fiber membrane for effective daytime radiative cooling. *Mater. Lett.* **2022**, *320*, 132372. DOI: 10.1016/j.matlet.2022.132372.
- (405) Wang, M.; Jiao, Z.; Chen, Y.; Hou, X.; Fu, L.; Wu, Y.; Li, S.; Jiang, N.; Yu, J. Enhanced thermal conductivity of poly(vinylidene fluoride)/boron nitride nanosheet composites at low filler content. *Compos. - A: Appl. Sci. Manuf* **2018**, *109*, 321-329. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.03.023.
- (406) Yazdani McCord, M. R.; Seppälä, A.; Pourakbari-Kasmaei, M.; Zimmerman, J. B.; Rojas, O. J. From low conductivity to high energy efficiency: The role of conductive polymers in phase change materials. *Chem. Eng. J.* **2025**, *508*, 160804. DOI: 10.1016/j.cej.2025.160804.
- (407) Fredi, G.; Simon, F.; Sychev, D.; Melnyk, I.; Janke, A.; Scheffler, C.; Zimmerer, C. Bioinspired polydopamine coating as an adhesion enhancer between paraffin microcapsules and an epoxy matrix. *ACS Omega* **2020**, *5* (31), 19639-19653. DOI: 10.1021/acsomega.0c02271.
- (408) Jia, X.; Hu, D. Preparation of flexible phase change composite material with crosslinked network structure. CN113088030, 2021.
- (409) Wei, S. Infant diaper and its preparation method. CN104264471, 2015.
- (410) Pu, J.; Tao, G. Method for manufacture of directly spun hydrophilic polyester short fiber for spunlace nonwoven fabric. CN104328531, 2015.
- (411) Deng, R.; Xiong, T.; Li, Z.; Shi, R.; Zou, J. Polyethylene microporous breathable membrane for medical protective clothing and preparation method thereof. CN111875864, 2020.
- (412) Mo, Y.; Wu, Z. Crosslinkable two-component semiconductor adhesive and preparation method thereof. CN110387205, 2019.
- (413) Huang, J.; Wen, M.; Xu, H.; Shi, X. Preparation method and application of deep UV-curable LED packaging adhesive. CN116333671, 2023.
- (414) Rogojina, E.; Huang, Q.; Gazda, J.; Bell, J.; Lanning, B.; Stowell, M. W.; Jampani Hanumantha, P.; McKinney, J.; Gibbs, G. C. Artificial solid electrolyte interface (A-SEI) cap layer including graphene layers with flexible wrinkle areas. US20210126287, 2021.
- (415) Miller, E. H.; Sy, S.; Appikarla, S.; Iwama, J.; Whear, J. K.; Brooks, A. T.; Roberts, M. R. Battery separators, battery gelation composite substrates, battery separator coated membranes, related methods, and cells, batteries or systems incorporating the same. WO2025155866, 2025.
- (416) Zhang, S.; Zong, Z.; Wu, Z. Hard magnetic porous material for flexible pressure capacitive sensors, magnetic field direction detection modules and drug delivery magnetically controlled soft robots and preparation method thereof. CN115353661, 2022.
- (417) D'Agostino, J. A.; Nelson, E.; Keaney, S. S. Degradable composite and method of fabrication. WO2023225649, 2023.
- (418) Pan, K.; Li, Z.; Yang, G.; Shu, J.; Zhong, S. Shape memory transfer film, battery grid line and preparation method thereof. CN120504943, 2025.
- (419) Mekhail, M.; Castiello Flores, F. R.; Craik, L. C. Packaging film with oxygen transmission for packaging of perishable item. WO2024130434, 2024.
- (420) Ye, G. Preparation of forward osmosis membrane material for wastewater treatment. CN120393768, 2025.
- (421) Patel, S. P. Preparation of bio-compostable sustainable multilayered composite. IN201921033761, 2021.
- (422) Cai, Z.; Zhou, M.; Zhou, L.; Li, A. Preparation method of anti-static and flame-retardant safe operation clothing fabrics. CN106087427, 2016.
- (423) Wang, D.; Kong, D.; Fu, S.; Zhang, J. Preparation method of flame-retardant fire early warning bacterial cellulose aerogel fiber. CN119736793, 2025.

- (424) Gutsch, M.; Heber, M.; Hellbach, B.; Platte, D.; Schnetz, T. Coated elastomeric component for vibration damping. DE102013017571, 2015.
- (425) Kim, B. J.; Lim, H. H. Electric adhesive gripper with flexible substrate and method of manufacturing the same. KR2020040152, 2020.
- (426) Zhang, Y.; Zhou, S. Medical hot melt pressure-sensitive adhesive with better bonding effect, good flexibility, and stronger fluidity for disposable absorbent products such as diapers, pull-up pants, adult diapers, and absorbent underwear. CN117143548, 2023.
- (427) Yoshida, N.; Aikawa, T.; Takano, K.; Kawamura, T.; Narita, S.; Fukuda, K. Conductive paste, electronic component, and multilayer ceramic capacitor. WO2023190615, 2023.
- (428) Qiu, X.; Qiu, M. Viscose fiber having good moisture absorption, crimpiness and resurgence and used for suppository carrier. CN104264278, 2015.
- (429) Moon, G. M. Woody panel with sound absorption function. KR1479965, 2015.
- (430) Khodakarami, M.; Honaker, R. Photothermal polymeric aerogels for wastewater detoxification and water recycling. WO2024233436, 2024.
- (431) Kirschman, D. L.; Weeda, D. J.; Hunter, S. A. Bioceramic-containing thermoplastic extrusion and method of surgical implant manufacture. WO2022197859, 2022.
- (432) Shin, Y.; Le Mong, A.; Nguyen Thi Linh, C.; Kim, D. Tough and single lithium-ion conductive nanocomposite electrolytes based on PAES-g-PEG and POSS-PEG for lithium-sulfur batteries. *J. Mater. Chem. A* **2024**, *12* (23), 13980-13993. DOI: 10.1039/d4ta01569j.
- (433) Wu, X.; Liu, M.; Pan, Y.; Liu, Y.; Lv, C.; Chang, Z.; Du, Y. Integrating boron nitride and hydroxylated graphene in phase-change films for flexible electronics cooling. *Carbon* **2025**, *244*, 120696. DOI: 10.1016/j.carbon.2025.120696.
- (434) Makita, T.; Nakamura, R.; Sasaki, M.; Kumagai, S.; Okamoto, T.; Watanabe, S.; Takeya, J. Electroless-plated gold contacts for high-performance, low contact resistance organic thin film transistors. *Adv. Funct. Mater.* **2020**, *30* (39), 2003977. DOI: 10.1002/adfm.202003977.
- (435) Moore, J. C.; Pettit, J.; Law, A. Release layer for subsequent manufacture of flexible substrates in microelectronic applications. US20160071756, 2016.
- (436) Qiu, Y.; Zhang, L.; Wang, K. Electrically-conductive nanofiber, manufacture method, and application in electrically-conductive transparent electrode. CN105696110, 2016.
- (437) Zhao, J.; Cheng, D.; Chen, R.; Yang, X.; Li, Y.; Guo, Y.; Zhang, J.; Hu, R.; Zheng, J. Hydrogen bonding enhanced polysaccharide-based gels with ultrahigh stretchability and unprecedented crack propagation strain. *Macromolecules* **2025**, *58* (11), 5627-5639. DOI: 10.1021/acs.macromol.5c00537.
- (438) Ren, D.; Guan, B.; Song, J.; Chen, P.; Li, R. Modified bio-based nylon 56 material for preparation of LED supports, binding posts, sockets or switches and preparation method thereof. CN111004501, 2020.
- (439) Takahashi, Y.; Yoda, A.; Yamahiro, M. Polyurea-based alternating copolymer, resin composition, coating, resin film, OLED element, light-emitting device, and method for manufacturing polyurea-based alternating copolymer. WO2019049982, 2019.
- (440) Chen, F.; Wang, L.; Zhou, H.; Lu, X.; Pan, L.; Jia, X.; Zhang, Y. Method for preparing breathable zirconium dioxide coating for chip capacitor industry. CN113292337, 2021.
- (441) Wei, J.; Zhou, J.; Su, S.; Jiang, J.; Feng, J.; Wang, Q. Water-deactivated polyelectrolyte hydrogel electrolytes for flexible high-voltage supercapacitors. *ChemSusChem* **2018**, *11* (19), 3410-3415. DOI: 10.1002/cssc.201801277.
- (442) Tsuzuki, T. Electrochemical capacitor capable of inhibiting change in capacitance and cell resistance rise. JP2015225920, 2015.
- (443) Zhao, B.; Shen, W.; Liu, H.; Zhou, X.; Wang, L.; Li, S.; Cao, F.; Song, G.; Du, Y.; Tang, Q. Self-repairing graphene-based pressure sensor. CN107036741, 2017.
- (444) Zhou, X. Antibacterial and mildew-proof polyethylene cable material and preparation method thereof. CN107033429, 2017.
- (445) Wakako, S.; Hori, Y.; Kinoshita, T.; Saiki, T.; Qi, X.; Hasegawa, K.; Imai, Y.; Mori, T.; Nakagawa, K.; Fukuhara, G. Pressure-responsive polymer chemosensors for hydrostatic-pressure-signal detection: poly-L-lysine-pyrene conjugates. *ACS Macro Lett.* **2023**, *12* (10), 1389-1395. DOI: 10.1021/acsmacrolett.3c00427.
- (446) Jia, S.; Chen, Z.; Li, Y.; Li, C.; Duan, C.; Lim, K. H.; Kawi, S. Construction of green biodegradable bacterial cellulose/Uio-66-NH₂ composite separators for efficient enhancing performance of lithium-ion battery. *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, *269* (Part_1), 131988. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.131988.
- (447) Zhang, M.; Chen, S.; Sheng, N.; Wang, B.; Wu, Z.; Liang, Q.; Wang, H. Anisotropic bacterial cellulose hydrogels with tunable high mechanical performances, non-swelling and bionic nanofluidic ion transmission behavior. *Nanoscale* **2021**, *13* (17), 8126-8136. DOI: 10.1039/d1nr00867f.
- (448) Paun, I. A.; Zamfirescu, M.; Mihailescu, M.; Luculescu, C. R.; Mustaciosu, C. C.; Dorobantu, I.; Calenic, B.; Dinescu, M. Laser micro-patterning of biodegradable polymer blends for tissue engineering. *J. Mater. Sci.* **2015**, *50* (2), 923-936. DOI: 10.1007/s10853-014-8652-y.

- (449) Fisher, P. D.; Venugopal, G.; Milbrandt, T. A.; Hilt, J. Z.; Puleo, D. A. Hydroxyapatite-reinforced in situ forming PLGA systems for intraosseous injection. *J. Biomed. Mater. Res., Part A* **2015**, *103* (7), 2365-2373. DOI: 10.1002/jbm.a.35375.
- (450) Aragon, J.; Feoli, S.; Irusta, S.; Mendoza, G. Composite scaffold obtained by electro-hydrodynamic technique for infection prevention and treatment in bone repair. *Int. J. Pharm.* **2019**, *557*, 162-169. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2018.12.002.
- (451) Lam, J.-Y.; Jang, G.-W.; Huang, C.-J.; Tung, S.-H.; Chen, W.-C. Environmentally friendly resistive switching memory devices with DNA as the active layer and bio-based polyethylene furanoate as the substrate. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2020**, *8* (13), 5100-5106. DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b07168.
- (452) Stoclet, G.; Arias, A.; Yeniad, B.; De Vos, S. Relationships between crystalline structure and the thermal behavior of poly(ethylene 2,5-furandicarboxylate): An in situ simultaneous SAXS-WAXS study. *Polym. Eng. Sci.* **2019**, *59* (8), 1667-1677. DOI: 10.1002/pen.25165.
- (453) Pappa, A.-M.; Inal, S.; Roy, K.; Zhang, Y.; Pitsalidis, C.; Hama, A.; Pas, J.; Malliaras, G. G.; Owens, R. M. Polyelectrolyte layer-by-layer assembly on organic electrochemical transistors. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2017**, *9* (12), 10427-10434. DOI: 10.1021/acscami.6b15522.
- (454) Marpu, S.; Upadhyay, P. K.; Nguyen, D. T.; Oswald, I. W. H.; Arvapally, R. K.; Petros, R. A.; Hu, Z.; Omary, M. A. Self-assembly of linear polymers into phosphorescent nanoparticles: Optimization toward non-cytotoxic bioimaging and photonic devices. *J. Phys. Chem. C* **2015**, *119* (22), 12551-12561. DOI: 10.1021/acs.jpcc.5b00119.
- (455) Duan, X.; Mu, L.; Sawtelle, S. D.; Rajan, N. K.; Han, Z.; Wang, Y.; Qu, H.; Reed, M. A. Functionalized polyelectrolytes assembling on nano-BioFETs for biosensing applications. *Adv. Funct. Mater.* **2015**, *25* (15), 2279-2286. DOI: 10.1002/adfm.201500002.
- (456) Wang, L.; Qin, M.; Ma, J.; Wu, M.; Wang, X.; Li, H. A novel quaternary ammonium triethanolamine modified polyester polyether for rapid wetting and penetration pretreatment for digital inkjet dyeing of polyester fabric. *Colloids Surf., A* **2025**, *704*, 135447. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2024.135447.
- (457) Hu, C.; Gong, R. H.; Zhou, F. L. Electrospun sodium alginate/polyethylene oxide fibers and nanocoated yarns. *International Journal of Polymer Science* **2015**, *2015* (1), 126041. DOI: 10.1155/2015/126041.
- (458) Zhu, M.; Chen, S.; Ma, W.; Zhou, Z. Water soluble polymer/graphene composite fiber and its preparation method and application. CN104451925, 2015.
- (459) Takeuchi, J.; Hori, T. Nonwoven fabric sheet exhibiting blood circulation promotion effect. JP2015105451, 2015.
- (460) Onishi, K.; Nakamae, M.; Miyagi, A.; Yuvaniyama, J. Fiber sizing agent containing polyvinyl alcohol, starch, and wax. WO2016063929, 2016.
- (461) Abdalbaki, M. K.; Tung, W.-H. Synthetic fibers with enhanced soil resistance and methods for production and use thereof. WO2016179384, 2016.
- (462) Yang, Z.; Zhang, H.; Gan, Y.; Wang, R. Polylactic acid superfine fiber nonwoven material with both toughness and liquid conductivity, its preparation method and application in microfiber wet wipe, urine-separating pad or medical dressing. CN115748107, 2023.
- (463) Fu, S.; Li, M.; Zhang, L.; An, Y.; Tan, Y. Method for improving inkjet printed pattern definition, color yield and vividness of real silk fabric. CN106498772, 2017.
- (464) Tang, H. Preparation process of nonwoven fabric finishing liquid. CN107503152, 2017.
- (465) Fahmy, H. M.; Aly, A. A.; Mohamed, Z. E. Synthesis of poly (N-vinyl-2-pyrrolidone)/pyrodextrins adducts and their utilization in functionalization of cotton fabric. *Int. J. ChemTech Res.* **2016**, *9* (9), 96-109. DOI: NA.
- (466) Raabe, B.; Rost, B.; Koepke, C.; Georgi, J. A.; Bertram, R.; Gregor, D.; Vogel, A. Method for producing microcapsules. WO2022028705, 2022.
- (467) Wrubbel, N.; Janzen, L.; Nemmertz, S.; Schumacher, A.; De Dominicis, M.; Kessler, A.; Eiting, T.; Klemmer, A.; Job, M.; Pegelow, U. Method for textile care. EP3854866, 2021.
- (468) Chopra, R. T. Non-woven metal coated fabric material and method for producing the same thereof. WO2022054093, 2022.
- (469) Tian, Y.; Wang, L. Cavity-microfibers, method and apparatus for fabrication of microfibers, threads, and filaments. WO2017219305, 2017.
- (470) Xu, H.; Bauer, B.; Yamamoto, M.; Yamane, H. Structure and properties of poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate)/poly(L-lactic acid) quasi core/sheath melt-electrospun microfibers. *Text. Res. J.* **2019**, *89* (9), 1770-1781. DOI: 10.1177/0040517518779997.
- (471) Zhou, Q. Preparation method of blended yarn. CN106436300, 2017.
- (472) Li, J. Far-infrared negative-ion electric heating blanket. CN104257178, 2015.
- (473) Demedts, B.; Uyttendaele, W.; Vanneste, M. Polyhydroxyalkanoate plastisol compositions. WO2025153697, 2025.
- (474) Zhou, M.; Edeleva, M.; Wang, G.; Cardon, L.; D'Hooge, D. R. Reactive blending of deliberately degraded polyhydroxy-butyrates with poly(lactic acid) and maleic anhydride to enhance biopolymer mechanical property variations. *Eur. Polym. J.* **2025**, *230*, 113890. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2025.113890.

- (475) Zhu, X.; Ren, Q.; Li, W.; Wu, M.; Weng, Z.; Wang, J.; Zheng, W.; Wang, L. In situ nanofibrillar fully-biobased poly (lactic acid)/poly (ethylene 2,5-furandicarboxylate) composites with promoted crystallization kinetics, mechanical properties, and heat resistance. *Polym. Degrad. Stab.* **2022**, *206*, 110172. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110172.
- (476) Huang, Y.-H.; Chang, Y.; Huang, C.-J.; Lin, J.-M.; Tung, S.-H.; Jang, G.-W.; Liu, C.-L. Electrospun biomass polyethylene furanoate nonwoven substrates for flexible thermoelectric generators. *Polymer* **2024**, *312*, 127619. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.127619.
- (477) Zhou, H. Anti-wrinkling environmentally-friendly adhesive containing starch and preparation method thereof. CN104327760, 2015.
- (478) Zou, Q. High-levelling-property stain-resistant PVA inner-wall antibacterial coating materials. CN108485404, 2018.
- (479) Gouveia, J. R.; de Sousa, R. R. J.; Ribeiro, A. O.; Saraiva, S. A.; dos Santos, D. J. Effect of soft segment molecular weight and NCO:OH ratio on thermomechanical properties of lignin-based thermoplastic polyurethane adhesive. *Eur. Polym. J.* **2020**, *131*, 109690. DOI: 10.1016/j.eurpolymj.2020.109690.
- (480) Ghosh, B.; Gogoi, S.; Thakur, S.; Karak, N. Bio-based waterborne polyurethane/carbon dot nanocomposite as a surface coating material. *Prog. Org. Coat.* **2016**, *90*, 324-330. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2015.10.025.
- (481) Shen, L.; Yi, M.; Japip, S.; Han, C.; Tian, L.; Lau, C. H.; Wang, Y. Breaking through permeability-selectivity trade-off of thin-film composite membranes assisted with crown ethers. *AIChE J.* **2021**, *67* (6), e17173. DOI: 10.1002/aic.17173.
- (482) Alvarez-Martos, I.; Fapyane, D.; Perzon, A. Production of bacterial cellulose suspensions suitable for coating applications. WO2022200631, 2022.
- (483) Braun, R.; Gier, A.; Hasch, J.; Kalwa, N. Wood material panel with coated and sealed square and/or bevelled edges. EP4417657, 2024.
- (484) Wiercinski, R. A.; Ranganathan, A.; Cao, X.; Paul, R. Waterproofing membrane. US8931229, 2015.
- (485) Mao, Z.; Hu, J.; Zhao, X. Degradable composite barrier coating applied on paper base material. CN117626703, 2024.
- (486) Backfolk, K.; Ribu, V. Polymer coated paper and paperboard. SE2023030601, 2025.
- (487) Tateiwa, J.; Kimura, S.; Kasuya, K.-i.; Iwata, T. Multilayer biodegradable films with a degradation initiation function triggered by weakly alkaline seawater. *Polym. Degrad. Stab.* **2022**, *200*, 109942. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.109942.
- (488) Zhang, F.; Yan, D.; Xu, J.; Li, Y. Preparation method of modified biodegradable coating material composition with of stable and high quality. CN118546501, 2024.
- (489) Liu, A. Chitosan photocatalyst antimicrobial towel. CN106811968, 2017.
- (490) Pawley, D. C.; Goncalves, S.; Bas, E.; Dikici, E.; Deo, S. K.; Daunert, S.; Telischi, F. Dexamethasone (DXM)-coated poly(lactic-co-glycolic acid) (PLGA) microneedles as an improved drug delivery system for intracochlear biodegradable devices. *Adv. Ther.* **2021**, *4* (11), 2100155. DOI: 10.1002/adtp.202100155.
- (491) Pan, Y.; Wang, W.; Liu, L.; Ge, H.; Song, L.; Hu, Y. Influences of metal ions crosslinked alginate based coatings on thermal stability and fire resistance of cotton fabrics. *Carbohydr. Polym.* **2017**, *170*, 133-139. DOI: 10.1016/j.carbpol.2017.04.065.
- (492) Ren, Y.; Lou, R.; Liu, X.; Gao, M.; Zheng, H.; Yang, T.; Xie, H.; Yu, W.; Ma, X. A self-healing hydrogel formation strategy via exploiting endothermic interactions between polyelectrolytes. *Chem. Commun. (Cambridge, U. K.)* **2016**, *52* (37), 6273-6276. DOI: 10.1039/c6cc02472f.
- (493) Xu, G.; Liu, P.; Pranantyo, D.; Neoh, K.-G.; Kang, E.-T. Dextran- and chitosan-based antifouling, antimicrobial adhesion, and self-polishing multilayer coatings from pH-responsive linkages-enabled layer-by-layer assembly. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2018**, *6* (3), 3916-3926. DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b04286.
- (494) Yamamoto, T. Water soluble polyvinyl alcohol-based films and pharmaceutical and detergent packaging materials. WO2025134593, 2025.
- (495) Berguig, G. Paper recyclable heat sealable bag. US20240124194, 2024.
- (496) Yoo, Y. J. Eco-friendly biodegradable packaging container with antibacterial activity. KR2025021130, 2025.
- (497) Chang, X.; Wang, H.; Du, J.; Yu, F.; Sun, X.; Bai, Q.; Liu, Z.; Zhang, C.; Ren, D. Method for preparing an edible starch film and edible seasoning packet for packaging material thereof. CN119567483, 2025.
- (498) Zhang, S.; He, Y.; Si, W.; Tan, B. High-folding-resistant polylactic acid/thermoplastic starch composite material for food packaging material. CN111825967, 2020.
- (499) Zeng, F.; Cui, M.; Yang, J. Photo-oxygen barrier agent for packaging materials and preparation method thereof. CN116333464, 2023.
- (500) Guo, Y.; Lin, M. Preparation method of paper-based mulching film for sustained-release drug delivery. CN106120477, 2016.
- (501) Xiong, L. Biodegradable milk tea packaging bag and preparation method thereof. CN119019826, 2024.
- (502) Hausmann, M. K.; Bhattacharya, A.; Zimmer, J.; Haeri, M.; Kleyer, H.; Zeboudj, L.; Jukarainen, J. I. A marine biodegradable and recyclable paper-based packaging material with high moisture and oxygen barrier properties. WO2023222625, 2023.
- (503) Dorn, M. Oxygen- and oil-barrier packaging material comprising biodegradable polymer composite layer. DE102023102877, 2024.

- (504) Liu, J.; Cheng, H.; Jia, W.; Liu, H.; Xie, C.; Yan, L.; Guo, H.; Hu, X. Preparation of coating for white cardboard with high lamination strength. CN118773949, 2024.
- (505) Inagaki, M. Biodegradable vapor-filmed film for forming laminate and packaging material, and method for manufacturing of film. JP2022031161, 2022.
- (506) Deng, W. Preparation method of heat-resistant marine degradable injection molding packaging material. CN118325314, 2024.
- (507) Weng, H. Moisture-repellent multilayer packaging material. CN107891645, 2018.
- (508) Hao, T.; Wen, B.; Li, S.; Li, Z.; Huang, C. Preparation of multilayer film with antibacterial high resistance used in the fields of food packaging, medical and health treatment, and household cleaning product packaging. CN119749030, 2025.
- (509) Yin, M.; Li, J.; Wang, H.; Xu, X.; Wang, Y.; Ma, Z.; Chen, J.; Li, X. Development of anti-bacterial adhesion and antibacterial sulfobetaines modified chitosan/polyvinyl alcohol composite films as packaging materials. *Int. J. Biol. Macromol.* **2024**, *260* (Part 1), 129465. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.129465.
- (510) Liu, Z.; Qin, Z.; Jia, H.; Xu, J.; Liu, M.; Hou, Z. Dual-crosslinked starch-poly(ester urethane)-oligochitosan films with high starch content: Application as biodegradable food packaging. *Food Packag. Shelf Life* **2023**, *37*, 101064. DOI: 10.1016/j.fpsl.2023.101064.
- (511) Guo, L.; Li, M.; Xu, Q.; Jin, L.; Wang, Y. Bio-based films with high antioxidant and improved water-resistant properties from cellulose nanofibres and lignin nanoparticles. *Int. J. Biol. Macromol.* **2023**, *227*, 365-372. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2022.12.128.
- (512) Lee, S. Y.; Kim, H. U. Systems strategies for developing industrial microbial strains. *Nat. Biotechnol.* **2015**, *33* (10), 1061-1072. DOI: 10.1038/nbt.3365.
- (513) Chandel, A. K.; Garlapati, V. K.; Singh, A. K.; Antunes, F. A. F.; da Silva, S. S. The path forward for lignocellulose biorefineries: Bottlenecks, solutions, and perspective on commercialization. *Bioresour. Technol.* **2018**, *264*, 370-381. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.06.004.
- (514) 3 Strategies for advancing synthetic biology. In Positioning Synthetic Biology to Meet the Challenges of the 21st Century, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. , 2013; pp 17-64.
- (515) Liang, Y.; Liu, W.; Liu, X. Recombinant *Corynebacterium glutamicum* expressing L-lysine decarboxylase encoding gene for 1,5-pentanediamine fermentation production. CN119824019, 2025.
- (516) Zhang, L.; Fan, Y.; Shi, W. Method and apparatus for preparing long-chain dibasic acid by fermentation. CN114525311, 2022.
- (517) Zhang, L.; Fan, Y.; Shi, W. Method for preparing long-chain dicarboxylic acid by fermentation. CN112725385, 2021.
- (518) Zhang, L.; Fan, Y.; Shi, W. Method for producing 1,3-propanediol by combining glycerol fermentation and microalgae cell metabolism. CN111100901, 2020.
- (519) Straatman, H. M. M. G.; Schuermann, M.; Riebel, P. H. Lipase catalyzed selective production of 1,3-propanediol monoacetate. WO2019129507, 2019.
- (520) Krawczyk, J. M.; Haefner, S.; Schroeder, H.; Dantas Costa, E.; Zelder, O.; Von Abendroth, G. Genetically modified *Basfia succiniciproducens* strain for improved production of succinate from sucrose. WO2015118051, 2015.
- (521) Morita, K.; Isobe, K.; Kawamura, K.; Yamada, K. Genetically modified microorganism for producing 3-hydroxyadipic acid and/or α -hydroxymuconic acid, and method for producing chemical product. WO2023157816, 2023.
- (522) Murata, Y.; Kuribayashi, T.; Onishi, F.; Hiura, T. 1,5-Pentamethylene diamine and method for producing same. WO2015076238, 2015.
- (523) Jung, Y.; Park, J.; Kim, J.; Cho, H.; Cho, K. An aldehyde dehydrogenase variant using 4-hydroxybutyryl-CoA as a substrate for manufacture of 1,4-butanediol. US20150284694, 2015.
- (524) Lim, H.; Kang, C.; Song, J.; Lee, S.; Cho, K. Acid resistant *Saccharomyces cerevisiae* strain for the production of lactic acid. US20150225752, 2015.
- (525) de Albuquerque, T. L.; Marques, J. E. J.; de Queiroz, L. P.; Ricardo, A. D. S.; Rocha, M. V. P. Polylactic acid production from biotechnological routes: A review. *Int. J. Biol. Macromol.* **2021**, *186*, 933-951. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2021.07.074.
- (526) Shaji, A.; Shastri, Y.; Kumar, V.; Ranade, V. V.; Hindle, N. Economic and environmental assessment of succinic acid production from sugarcane bagasse. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2021**, *9* (38), 12738-12746. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c02483.
- (527) Ames, T. T. Process for the isolation of 1,3-propanediol from fermentation broth. US6361983, 2002.
- (528) Zhang, X.; Weber, J. F. W.; Zhang, Y. Bio-oxidation process for the preparation of alkanedioic acids. US20250257373, 2025.
- (529) Hao, Y.; Bao, J.; Xu, M.; Liu, X. Method for producing long-chain dicarboxylic acid, and product. WO2025097557, 2025.
- (530) Cao, D.; Haas, T.; Li, L.; Potter, M.; Tao, G. Fermentative production of ω -hydroxy fatty acids from alkanes by oleaginous yeasts using acetate. WO2018018402, 2018.
- (531) Yang, H.; Liu, W. Bio-based polyamide 56: recent advances in basic and applied research. *Polym. Eng. Sci.* **2023**, *63* (8), 2484-2497. DOI: 10.1002/pen.26390.
- (532) Chou, H.; Li, N.; Liu, X. Expression of polypeptides involved in lysine decarboxylation, and methods and applications thereof. WO2015196430, 2015.
- (533) Sajid, M.; Zhao, X.; Liu, D. Production of 2,5-furandicarboxylic acid (FDCA) from 5-hydroxymethylfurfural (HMF): Recent progress focusing on the chemical-catalytic routes. *Green Chem.* **2018**, *20* (24), 5427-5453. DOI: 10.1039/c8gc02680g.

- (534) Burgess, S. K.; Leisen, J. E.; Kraftschik, B. E.; Mubarak, C. R.; Kriegel, R. M.; Koros, W. J. Chain mobility, thermal, and mechanical properties of poly(ethylene furanoate) compared to poly(ethylene terephthalate). *Macromolecules* **2014**, *47* (4), 1383-1391. DOI: 10.1021/ma5000199.
- (535) Yim, H.; Haselbeck, R.; Niu, W.; Pujol-Baxley, C.; Burgard, A.; Boldt, J.; Khandurina, J.; Trawick, J. D.; Osterhout, R. E.; Stephen, R.; et al. Metabolic engineering of *Escherichia coli* for direct production of 1,4-butanediol. *Nat. Chem. Biol.* **2011**, *7* (7), 445-452. DOI: 10.1038/nchembio.580.
- (536) Wu, J.; Jiang, X.; Liu, L.; Song, W.; Zhou, Y.; Chen, X.; Liu, J.; Gao, C. Method for preparing pyrrolidone by catalyzing γ -aminobutyric acid with carnitine CoA ligase CaiC. WO2024050928, 2024.
- (537) Yu, B.; Song, W.; Wang, S.; Wei, W.; Hu, G.; Li, X.; Gao, C.; Liu, J.; Wen, J.; Wu, J. Thermostable coenzyme A ligase for efficient biosynthesis of 2-pyrrolidone via protein and fermentation engineering. *ACS Synth. Biol.* **2025**, *14* (4), 1298-1308. DOI: 10.1021/acssynbio.5c00092.
- (538) Aversch, N.; Pane, V.; Waymouth, R.; Criddle, C. Fermentative production of polyhydroxyalkanoates genetically modified *Cupriavidus necator*. WO2023283609, 2023.
- (539) Ko, J. K.; Jo, Y.; Gong, G.; Ahn, J. H.; Lee, S. M.; Um, Y. Recombinant microorganism for producing poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate). US20230313241, 2023.
- (540) Park, S. H.; Gaur, V. K. Recombinant *Escherichia coli* strain producing P(3HP-co-3HB) with high efficiency and method for producing biodegradable P(3HP-co-3HB) using same. KR2025018302, 2025.
- (541) Chen, G.; Yan, X.; Wu, F.; Lan, Y. Transgenic *Halomonas* expressing exogenous genes for the production of poly(3-hydroxybutyric acid-4-hydroxybutyric acid-5-hydroxyvaleric acid) trimer and its construction. CN113684169, 2021.
- (542) Golberg, A.; Ghosh, S.; Gozin, M. Fermentative production of polyhydroxyalkanoates by *Haloferax mediterranei*. WO2023073684, 2023.
- (543) Oguma, T.; Hirano, M. Method for producing polyhydroxyalkanoic acid from a bacterial culture. WO2023021878, 2023.
- (544) Aragao Peralta Boerner, R. M. M.; Boerner, T.; Munoz Torre, R.; Santos Beneit, F.; Bordel Velasco, S. Bio-recycling of polyesters into polyhydroxyalkanoate (PHA). WO2024083888, 2024.
- (545) Takasuga, T.; Kumar, V. Polyester and its production from non-edible raw material by a microbial co-culture system. JP2024104961, 2024.
- (546) Ghislieri, D.; Oedman, P.; Zimmermann, T. J.; Schmidt, A.-C. Process for enzymatic production of ammonium (meth-) acrylate and subsequent acrylate polymer production. WO2020079120, 2020.
- (547) Zhu, C.; Ban, C.; Zhu, N.; Ying, H.; Shen, T.; Ji, L.; Tan, Z.; Li, M.; Zhuang, W. Method for synthesizing novel bio-based polyesters using enzyme cascade catalysis combined with microfluidic field coupling. CN116199868, 2023.
- (548) Shaji, S.; Anna, A.; Kiran, S.; Aboobaker, A.; Varghese, A. J.; Nancy, P.; Ravindran, L.; Thomas, S. Review on sustainable flexible electronics: exploring the potential of chitosan, cellulose starch, silk fibroin and gelatin. *Discov. Polym.* **2025**, *2* (1), 19. DOI: 10.1007/s44347-025-00031-7.
- (549) Li, L.; Han, L.; Hu, H.; Zhang, R. A review on polymers and their composites for flexible electronics. *Mater. Adv.* **2023**, *4* (3), 726-746, 10.1039/D2MA00940D. DOI: 10.1039/D2MA00940D.
- (550) Miyamoto, K.; Masui, N.; Kanesaka, S.; Ikeuchi, J. Film for flexible display, resin composition, and production method for polyamide-imide resin. WO2018135432, 2018.
- (551) Saeki, A.; Koshino, M.; Miyazaki, D. Polyimide precursor resin composition for forming a polyimide resin film and a laminate with suppressed wrinkles and excellent adhesion and peelability for a flexible device. JP2020023671, 2020.
- (552) Park, J.; Kim, K. Polyimide film for flexible display device substrate having excellent heat dissipation characteristics. WO2019221364, 2019.
- (553) Takahashi, Y.; Arai, T.; Kosaba, K. Adhesive for forming an adhesive sheet and a flexible lamination material with excellent bending resistance for a flexible display. JP2018045213, 2018.
- (554) Tsuchibuchi, K.; Kubo, S.; Taya, N. High-frequency dielectric heatable adhesive. JP2024132261, 2024.
- (555) Arai, R.; Nagata, T.; Shitara, K.; Takarada, S. Acrylic pressure-sensitive adhesive composition, sheet, film, and flexible device therefrom. WO2022163166, 2022.
- (556) Kawaguchi, M.; Kudo, T. Adhesive composition for circuit connection, film adhesive, method for manufacturing circuit connection structure, and circuit connection structure. JP2023130865, 2023.
- (557) Shimojitosho, A.; Ogata, Y.; Nomura, T. Curable adhesive composition, adhesive tape, semiconductor wafer processing, and semiconductor device fabrication. JP6799186, 2020.
- (558) Kim, S. H.; Jung, G. M. Temperature-sensitive adhesive composition and temperature-sensitive adhesive tape for flexible display device. KR2016100122, 2016.
- (559) Tsujita, M.; Ohata, R.; Kawade, K.; Shibata, N. Water-dispersed acrylic pressure-sensitive adhesive sheet with enhanced low-temperature stability. JP2026006348, 2026.
- (560) Akiyama, A.; Takahashi, T.; Tanaka, S. Pressure-sensitive adhesive tapes with excellent heat resistance and adhesive properties. JP2016089045, 2016.

- (561) Shirakawa, M. Flexographic printing plate precursor and manufacturing method thereof. WO2024024612, 2024.
- (562) Iio, M.; Urano, H.; Watanabe, O.; Takemura, K. Negative photosensitive resin composition, pattern forming method, the cured film forming method, interlayer insulating film, and surface protection film. CN115113482, 2022.
- (563) Isaki, K. Electronic packaging film with good transparency, barrier effect, and adhesion. JP2016117209, 2016.
- (564) Hidalgo, M.; Cros, S.; Boldrighini, P. Adhesive including block copolymers, for the encapsulation of flexible electronic devices, improving protection against the permeability to gases. WO2017060610, 2017.
- (565) Nakamura, M.; Irie, M.; Kondo, T.; Narusawa, H. Conductive paste for forming stretchable conductor, stretchable conductor layer, method for producing stretchable conductor layer, stretchable electrical wiring structure, and biological information measurement device. US20210307666, 2021.
- (566) Jang, W. Y.; Cho, S. H.; Choi, Y. S. Metal nanowire coating layer-containing patterned touch sensor for flexible display device. KR2017069746, 2017.
- (567) Jaiswal, A. K.; Kumar, V.; Jansson, E.; Huttunen, O.-H.; Yamamoto, A.; Vikman, M.; Khakalo, A.; Hiltunen, J.; Behfar, M. H. Biodegradable cellulose nanocomposite substrate for recyclable flexible printed electronics. *Adv. Electron. Mater.* **2023**, *9*(4), 2201094. DOI: 10.1002/aelm.202201094.
- (568) Prontera, C. T.; Villani, F.; Palama, I. E.; Maglione, M. G.; Manini, P.; Maiorano, V.; Tammaro, L. Fabrication and biocompatibility analysis of flexible organic light emitting diodes on poly(lactic acid) substrates: toward the development of greener bio-electronic devices. *Polym. Adv. Technol.* **2022**, *33*(5), 1523-1532. DOI: 10.1002/pat.5618.
- (569) Wang, C.-Y.; Ma, K.; Wang, X.-X.; Chen, K.-Z.; Qiao, S.-L. Mechanical robust and recyclable PLA-based polyurethane elastomers for flexible electronics. *Chem. Eng. J.* **2025**, *522*, 167855. DOI: 10.1016/j.cej.2025.167855.
- (570) Zhang, Q.; Niu, S.; Wang, L.; Lopez, J.; Chen, S.; Cai, Y.; Du, R.; Liu, Y.; Lai, J.-C.; Liu, L.; et al. An elastic autonomous self-healing capacitive sensor based on a dynamic dual crosslinked chemical system. *Adv. Mater.* **2018**, *30*(33), n/a. DOI: 10.1002/adma.201801435.
- (571) Wei, C.; Zhou, H.; Li, S.; Zhao, G.; Jin, Z.; Jin, X.; Chen, W.; Zhao, W.; Ma, A. Dipentaerythritol-derived hyperbranched polyurethane elastomer and their applications in flexible strain sensor. *Macromol. Mater. Eng.* **2022**, *307*(7), 2100954. DOI: 10.1002/mame.202100954.
- (572) Jiang, X. Preparation of polyvinyl chloride protective film for electronic component. CN113214572, 2021.
- (573) Lee, J. Y.; Jeon, Y. J.; Lee, S. B. Thin-film type stretchable electronics including stretchable substrate and manufacturing method therefor. WO2023075201, 2023.
- (574) Lancry, E. Biodegradable laminated structures. WO2021250673, 2021.
- (575) Wang, C.; Cai, L. Fully-printed stretchable thin-film transistors and integrated logic circuits. US20190157256, 2019.
- (576) Fedder, G. K.; Panat, R.; Brennenman, J.; Tansel, D. Z. Stretchable 3d-printed circuit boards. US20220304160, 2022.
- (577) Wang, J. Antimildew and antibacterial EVA or PEVA film. CN105885203, 2016.
- (578) Chen, W.; Sun, Z. Anti-mold and antibacterial transparent polyethylene-EVA film and preparation method thereof. CN110643107, 2020.
- (579) Bao, Z.; Jiang, Y. Patterning of an electrically conductive crosslinked PEDOT:PSS polymer. US20200401042, 2020.
- (580) Kinlen, P. J.; Flack, M. A.; Bruton, E. A. Polyanilines, apparatus and methods of polymerization and articles. EP3722348, 2020.
- (581) Cao, M.; Yang, J.; Qi, Y.; Wu, X.; Song, Q.; Qiu, D.; Xiang, Y.; Pei, L.; Li, H.; Wang, Y. A flexible composite conductive material and preparation method and application. CN120319523, 2025.
- (582) Guo, H.; Zhou, M.; Cai, X.; Lu, C. Preparation method of highly conductive polymer composite and aqueous dispersion for flexible electronic devices and sensors. CN120209350, 2025.
- (583) Wang, Z.; Hao, C.; Cai, M.; Cui, J.; Zheng, Y.; Xue, C. A highoutput PDMS-MXene/gelatin triboelectric nanogenerator with the petal surface-microstructure. *Nano Res.* **2024**, *17*(5), 4151-4162. DOI: 10.1007/s12274-023-6352-0.
- (584) Mohammadpourfazel, S.; Arash, S.; Ansari, A.; Yang, S.; Mallick, K.; Bagherzadeh, R. Future prospects and recent developments of polyvinylidene fluoride (PVDF) piezoelectric polymer; fabrication methods, structure, and electro-mechanical properties. *RSC Adv.* **2023**, *13*(1), 370-387, 10.1039/D2RA06774A. DOI: 10.1039/D2RA06774A.
- (585) Zhang, W.; Zhao, X.; Guo, Y.; Wang, Y.; Li, L.; Zhao, Y.; Zhang, Y.; Zhang, W. Multifunctional dopamine-coated FeVO₄ composites applied in supercapacitors and sensors for human motion, gas and light monitoring, and secure transmission of information. *Chem. Eng. J.* **2025**, *519*, 165107. DOI: 10.1016/j.cej.2025.165107.
- (586) Ikeda, K.; Kamemoto, S. Organic EL display device. WO2025063189, 2025.
- (587) Koshirai, M.; Kuraseko, H.; Kokubu, R.; Tomizawa, K. Enamel-coated superconducting wire using polyimide resin. WO2026004990, 2026.
- (588) Sasaki, Y.; Miyazawa, A.; Saito, K. Adhesive composition, and adhesive sheet having adhesive layer containing adhesive composition. JP7794354, 2026.
- (589) Saito, K.; Sato, R. Adhesive composition with excellent heat resistance and transparency, adhesive layer, and adhesive sheet. JP7798223, 2026.

- (590) Li, X.; Zhao, X.; Liu, R.; Wang, H.; Wang, S.; Fan, B.; Hu, C.; Wang, H. Mussel-inspired PDA@PEDOT nanocomposite hydrogel with excellent mechanical strength, self-adhesive, and self-healing properties for a flexible strain sensor. *J. Mater. Chem. B* **2024**, *12* (12), 3092-3102, 10.1039/D3TB02748A. DOI: 10.1039/D3TB02748A.
- (591) Kafkopoulos, G.; Martinho, R. P.; Padberg, C. J.; Duvigneau, J.; Wurm, F. R.; Vancso, G. J. Metal ions in polydopamine coatings enhance polymer-metal adhesion. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2025**, *7* (4), 2408-2418. DOI: 10.1021/acsapm.4c03551.
- (592) Othman, A. H.; Aziz, M. S. A.; Ishak, M. H. H.; Nashrudin, M. N.; Azman, M. A. Epoxy molding compound encapsulation process in IC packaging: A review at wafer and component levels. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2026**. DOI: 10.1007/s00170-025-17196-x.
- (593) Brigandi, P. J.; Caronia, P. J.; Cree, S.; Hughes, M.; Colin Li Pi, S. Ethylene alkene elastomers for cable insulation applications. In 2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D), 3-5 May 2016, 2016; pp 1-5. DOI: 10.1109/TDC.2016.7520063.
- (594) Oh, J. Y.; Pang, C. H.; Jeong, M. W.; Kim, D. W.; Lim, D. H. Self-healing adhesive patch for an electronic skin sensor and manufacturing method thereof. US20260020804, 2026.
- (595) Adachi, T.; Honma, S.; Inoue, S.; Hisano, N.; Izumi, N.; Manaka, T.; Taguchi, D. Polyimide precursor composition, polyimide film, multilayer object, and flexible electronic device substrate. WO2025079540, 2025.
- (596) Kido, M.; Nakayama, H.; Tanaka, N. Polyamic acid, polyamic acid composition, polyimide for laminate and flexible device. JP2024150826, 2024.
- (597) Komori, H.; Higuchi, T.; Takahashi, K.; Kawamura, M.; Yokotani, K.; Terada, J.; Komatsu, N. Fluororesin film, copper-clad laminate and substrate for circuits. WO2022158524, 2022.
- (598) Tabata, D.; Minemoto, M. Acrylic adhesive sheet, flexible image display device member, optical member, and image display device. WO2021100636, 2021.
- (599) Fujita, M.; Nakano, T.; Arai, R.; Watanabe, Y.; Nagata, M. Adhesive composition used in image display device, optical film with adhesive layer, and image display device. JP2022050067, 2022.
- (600) Jian, C.; Jing, X.; Zhao, M. Flexible polyurethane acrylate adhesive for bonding ultra-thin frameless LCD screens and preparation method thereof. CN117965125, 2024.
- (601) Sasaki, M.; Yamashita, Y.; Kurimura, H. Composition, cured body, sealing material for organic electroluminescent display element, and organic electroluminescent display device. WO2021100710, 2021.
- (602) Rosselli, S.; Khodabakhshi Shalamzari, E.; Hennig, D.; Roberts, A.; Chercka, D.; Deichmann, V. A. F.; Stahl, S.; Nelles, G.; Henning, S.; Takuma, T.; et al. Adaptive fabrics for energy harvesting and filtering. WO2022207327, 2022.
- (603) Komine, T.; Sasazaki, H.; Nakamura, M. Adhesive composition, production method therefor, adhesive, patch, wearable device, and wearable device kit. WO2024209986, 2024.
- (604) Wang, C. Composition for making plastic, wristband and wearable device and preparation method thereof. CN119661958, 2025.
- (605) S, S. P.; R, M. R.; S, J. H. Bend resilient micro strip patch antenna utilizing flexible materials for wearable devices. IN202441075601, 2024.
- (606) Ha, J. S.; Jang, G. N. Sensor containing poly(3-hexylthiophene) coated elastic carbon foam and wearable device including same. KR2023047685, 2023.
- (607) Zou, H.; Zhang, Y.; Guo, L.; Wang, P.; He, X.; Dai, G.; Zheng, H.; Chen, C.; Wang, A. C.; Xu, C.; et al. Quantifying the triboelectric series. *Nat. Commun.* **2019**, *10* (1), 1427. DOI: 10.1038/s41467-019-09461-x.
- (608) Liu, P.; Hu, R.; Liu, Z.; Tian, H.; Ma, Y.; Liu, C.; Zhang, Y.; Huang, Y.; Xia, Y.; Xia, H.; et al. Capacitive flexible temperature sensor for body temperature monitoring. WO2025222748, 2025.
- (609) Jiang, B.; Zhang, S.; Liu, T.; Shi, X.; Jiang, W.; Huang, Y. Preparation method of flexible protective sensing material. CN121086435, 2025.
- (610) Bjurström, A.; Edin, H.; Hillborg, H.; Nilsson, F.; Olsson, R. T.; Pierre, M.; Unge, M.; Hedenqvist, M. S. A review of polyolefin-insulation materials in high voltage transmission; From electronic structures to final products. *Adv. Mater.* **2024**, *36* (52), 2401464. DOI: 10.1002/adma.202401464.
- (611) Chen, Y.; Wu, P.; Qin, P. Enhanced adhesion and flexibility of PET-Ag composite films via ethylenediamine surface modification for flexible electronics. *Mater. Sci. Mater. in Electron* **2025**, *36* (22), 1386. DOI: 10.1007/s10854-025-15473-9.
- (612) Lee, J. G.; Kang, G. H.; Kim, H. S.; Noh, S. J.; Shin, C. S.; Yoon, S. W.; Lee, J. G. Transparent display panel and manufacturing method including metal layer pattern, organic island layers, and LED mounting structure. KR2897006, 2025.
- (613) Qi, D.; Zhang, K.; Tian, G.; Jiang, B.; Huang, Y. Stretchable electronics based on PDMS substrates. *Adv. Mater.* **2021**, *33* (6), 2003155. DOI: 10.1002/adma.202003155.
- (614) Yi, J.; Zou, G.; Huang, J.; Ren, X.; Tian, Q.; Yu, Q.; Wang, P.; Yuan, Y.; Tang, W.; Wang, C.; et al. Water-responsive supercontractile polymer films for bioelectronic interfaces. *Nature* **2023**, *624* (7991), 295-302. DOI: 10.1038/s41586-023-06732-y.
- (615) Galliani, M.; Ferrari, L. M.; Bouet, G.; Eglin, D.; Ismailova, E. Tailoring inkjet-printed PEDOT:PSS composition toward green, wearable device fabrication. *APL Bioeng.* **2023**, *7* (1), 016101. DOI: 10.1063/5.0117278.
- (616) Militello, M.; Hossainy, S.; Babcock, D. E. Lubricious coating containing polyacrylic acid for medical device. WO2024102465, 2024.

- (617) Babcock, D. E.; Kloke, T. M.; McGonigle, J. S.; Lockwood, N.; Jelle, B. Low particulate lubricious coating with vinyl pyrrolidone and acidic polymer-containing layers. US10980918, 2021.
- (618) Raman, S.; Ravi Sankar, A. Intrinsically conducting polymers in flexible and stretchable resistive strain sensors: A review. *J. Mater. Sci.* **2022**, 57 (28), 13152-13178. DOI: 10.1007/s10853-022-07479-z.
- (619) das Neves, M. F. F.; Barcote, M. V. W.; da Silva, E. S.; de J. Bassi, M.; Benatto, L.; Eising, M.; de Oliveira, C.; Alves, H. J.; Roman, L. S. Chitosan-based substrates for flexible, printable and sustainable organic electronic devices. *ACS Appl. Electron. Mater.* **2025**, 7 (8), 3477-3485. DOI: 10.1021/acsaelm.5c00217.
- (620) Hernández-Pérez, A.; Granados-Martínez, F. G.; Flores-Ramírez, N.; Vásquez-García, S. R.; Domratcheva-Lvova, L. Strengthening biopolymer composite membranes via electrospinning cellulose/chitosan with MWCNTs. *MRS Adv.* **2025**, 10 (6), 702-707. DOI: 10.1557/s43580-024-01012-x.
- (621) Zhang, Y.; Ye, L.; Shen, Z. High barrier film for flexible display and preparation method thereof. CN118254446, 2024.
- (622) Zhu, Q. Preparation of heat-reflecting aerogel PET composite insulation board. CN118124234, 2024.
- (623) Zhang, S.; Song, W.; Tang, J.; Zhou, Y. Method for improving adhesion between polyester film and ethylene-vinyl acetate copolymer film. CN117903707, 2024.
- (624) Tian, R.; Gao, F.; Xu, H. Optoelectronic polymers for organic light-emitting diodes (OLEDs). In Optical and optoelectronic polymers, Wong, W.-Y., Ma, Y. Eds.; Vol. 38; Royal Society of Chemistry, 2024; p 0.
- (625) Salim, E.; Magdy, A.; El-Farrash, A. H.; El-Shaer, A. Optimizing optical, dielectric, and electrical properties of polyvinyl alcohol/polyvinyl pyrrolidone/poly(3,4-ethylene dioxithiophene) polystyrene sulfonate/NiO-based polymeric nanocomposites for optoelectronic applications. *Sci. Rep.* **2025**, 15 (1), 821. DOI: 10.1038/s41598-024-76918-5.
- (626) Lee, D. W.; Jeong, H.-C.; Kim, D. H.; Oh, J. Y.; Liu, Y.; Seo, D.-S. Liquid crystals alignment and switching between surface reinforced poly(ethylene-co-vinyl acetate) thin layers. *Opt. Mater.* **2022**, 125, 112088. DOI: 10.1016/j.optmat.2022.112088.
- (627) Jo, J. Y.; Lee, J. K.; Kim, T. Y.; Kim, B. G.; Ahn, H. H.; Lee, H. W.; Jung, H. S.; Choi, P. H. Display device. DE102024119422, 2025.
- (628) Li, Z.; Han, C. Polymer solid electrolyte thin film with self-assembled polyester network and preparation method and application thereof. CN120637584, 2025.
- (629) Zhai, Y.; Li, Y.; Wang, X.; Li, X.; Yang, K.; Qiu, Y.; Hao, J.; Xu, X.; Gao, X. Method for preparing polyimide films by combining imidization and simultaneous biaxial stretching. CN121226798, 2025.
- (630) Di, X.; Ma, Q.; Xu, Y.; Yang, M.; Wu, G.; Sun, P. High-performance ionic conductive poly(vinyl alcohol) hydrogels for flexible strain sensors based on a universal soaking strategy. *Materials Chemistry Frontiers* **2021**, 5 (1), 315-323, 10.1039/D0QM00625D. DOI: 10.1039/D0QM00625D.
- (631) Liu, X.; Zhang, S.; Fu, D.; Wei, R.; Ke, X.; Zhang, Y.; Xiao, B. Preparation method of modified starch-based hydrogel piezoresistive sensor for biomechanical signal monitoring and external mechanical stimulus sensing. CN121248851, 2026.
- (632) Zhang, Z.; Cui, S.; Niu, Z.; Gao, M.; Chen, Y. Preparation of multiple stimulus-responsive bilayer hydrogels based on cellulose nanocrystals for soft robotics and flexible sensing. CN121181782, 2025.
- (633) Yang, J.; Fan, Y.; Xiong, X.; Jiang, Q.; Li, P.; Jian, J.; Chen, L. Highly conductive and adhesive wearable sensors based on PVA/PAM/SF/PEDOT:PSS double network hydrogels. *Appl. Phys. A* **2024**, 130 (3), 157. DOI: 10.1007/s00339-024-07329-6.
- (634) Rivnay, J.; Inal, S.; Collins, B. A.; Sessolo, M.; Stavrinidou, E.; Strakosas, X.; Tassone, C.; Delongchamp, D. M.; Malliaras, G. G. Structural control of mixed ionic and electronic transport in conducting polymers. *Nat. Comm.* **2016**, 7 (1), 11287. DOI: 10.1038/ncomms11287.
- (635) Du, X.; Yang, L.; Liu, N. Recent progress on poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(Styrenesulfonate) bioelectrodes. *Small Sci.* **2023**, 3 (7), 2300008. DOI: 10.1002/smssc.202300008.
- (636) Zhang, J.; Zhang, Q.; Yu, Z.; Yang, Y.; Tian, L.; Wang, L.; Zhao, S.; Yang, J.; Li, H.; Wang, H.; et al. Multifunctional flexible sers substrate and preparation method and application thereof. CN121164188, 2025.
- (637) Fu, H.; Huang, P.; Ou, H.; Fu, K.; Xiao, Z.; Liu, L.; Dong, C. Antibacterial flexible self-powered triboelectric wearable sensor and preparation method thereof. CN120869395, 2025.
- (638) Xu, M.; Wang, Z.; Guo, L.; Tao, L.; Ma, T.; Wang, T.; Wang, Q. Tribological properties of PTFE-based fabric composites at cryogenic temperature. *Friction* **2024**, 12 (2), 245-257. DOI: 10.1007/s40544-023-0746-x.
- (639) Salama, M.; Hamed, A.; Noman, S.; Magdy, G.; Shehata, N.; Kandas, I. Boosting piezoelectric properties of PVDF nanofibers via embedded graphene oxide nanosheets. *Sci. Rep.* **2024**, 14 (1), 16484. DOI: 10.1038/s41598-024-66258-9.
- (640) Iniguez, F. B.; Choi, D.; Jiang, P.; Park, D.; Kim, K.; Lee, M. W.; Jo, H.; An, S. Nanotextured tribonegative PTFE-SiO₂ submicron fibers for self-cleanable and highly flexible kinetic energy harvester. *Adv. Fiber Mater.* **2025**. DOI: 10.1007/s42765-025-00633-7.
- (641) Borah, A.; Sahu, P. P.; Saikia, H. B.; Haloi, D. Polyvinyl alcohol based sensing materials: A comprehensive review. *Colloid. Polym. Sci.* **2026**, 304 (1), 43-66. DOI: 10.1007/s00396-025-05519-z.
- (642) He, J. Plasticizer for ai-based sensor and preparation method thereof. CN120718342, 2025.
- (643) Khaustov, I. A.; Safronova, Y. A.; Chebotareva, O. E.; Brianton, J. A.; Knyazev, E. N. Optimization of gas permeability in PDMS microfluidic chips for organ-on-chip modeling. *Appl. Biochem. Microbiol.* **2025**, 61 (9), 1753-1759. DOI: 10.1134/S0003683825700577.

- (644) Smith, R. E.; Totti, S.; Reid, D.; Hingley-Wilson, S. M.; Velliou, E.; Campagnolo, P.; Ward, N. I.; Varcoe, J. R.; Crean, C. pH-responsive and antibacterial PANI-PEDOT:PSS fibres for wearable applications. *Mater. Adv.* **2024**, *5* (6), 2306-2315, 10.1039/D3MA00711A. DOI: 10.1039/D3MA00711A.
- (645) Zeng, H.; Xie, Y.; Liu, T.; Chu, Z.; Dempsey, E.; Jin, W. Conductive polymer nanocomposites: recent advances in the construction of electrochemical biosensors. *Sens. Diagn.* **2024**, *3* (2), 165-180, 10.1039/D3SD00160A. DOI: 10.1039/D3SD00160A.
- (646) Çetin, G.; Üzümlü, Ö. B. Swelling/deswelling and adsorption/desorption properties of stimuli-responsive biocomposite acrylamide/glycidyl methacrylate/pectin hydrogels. *Polym. Bull.* **2025**, *82* (17), 12207-12236. DOI: 10.1007/s00289-025-05994-y.
- (647) Kang, M.; Cheng, Y.; Hu, Y.; Ding, H.; Yang, H.; Wei, Y.; Huang, D. Self-healing poly(acrylic acid) hydrogels fabricated by hydrogen bonding and Fe³⁺ ion cross-linking for cartilage tissue engineering. *Front. Mater. Sci.* **2023**, *17* (3), 230655. DOI: 10.1007/s11706-023-0655-7.
- (648) Xu, J.; Yang, Q.; Yu, M.; Tan, H. Preparation method of gallium-based liquid metal conductive hydrogel for triboelectric nanogenerators, flexible electronic skin, implantable sensors, and bio-inspired robots. CN121045584, 2025.
- (649) Zhang, Z.; Feng, J.; Wang, T.; Zhu, J.; Zhang, R.; Song, Z.; Cao, W.; Lu, J. Method for preparing a PNLC film for intelligent dimmable sunroofs for automobiles. CN121200534, 2025.
- (650) Huang, X.; Chai, B.; Shi, K.; Huang, Z.; Zhuo, R.; Cheng, C.; Luo, Y.; Gao, M.; Chen, Q.; Yang, W.; et al. Piezoelectric nanocomposite material with enhanced coefficient and scalable manufacturing method. CN121449937, 2026.
- (651) Zhao, Y. MEMSs gas sensor and preparation method therefor. CN121231572, 2025.
- (652) Xu, W.; Yu, H.; Li, X.; Chen, C.; Huang, H.; Yao, Z. High-strength sensing fibers for flexible tactile sensors, joint motion sensors, or electronic skin for humanoid robots and preparation method thereof. CN121204990, 2025.
- (653) Postrel, R. System of sensors and method for managing life sustaining biosystems. US20240373777, 2024.
- (654) Abazari, M.; Badeleh, S. M.; Barkhordari, S.; Mohammed, S. S.; Ahmed, M. M.; Mohammed Ameen, M. S.; Abdollahi, H. Preparation and characterization of polyvinyl alcohol thin films: Rheological, physicochemical and functional properties. *Heliyon* **2025**, *11* (12), e43604. DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e43604.
- (655) Zargoosh, M.; Sobhani, H.; Khorasani, M. M. Mechanical and thermal properties of acrylonitrile-butadiene-styrene/wollastonite composites: the role of mixing strategy. *J. Polym. Res.* **2025**, *32* (3), 75. DOI: 10.1007/s10965-025-04290-7.
- (656) Xu, Z.; Dong, Y.; Yang, Y.; Zhu, J. Mechanical, barrier, and biodegradable properties of poly(butylene adipate-co-terephthalate)/polyglycolic Acid blends prepared by reactive extrusion. *ACS Appl. Eng. Mater.* **2023**, *1* (1), 304-315. DOI: 10.1021/acsaenm.2c00069.
- (657) Ajellal, N.; Al-Haj Ali, M.; Cheng, J. J.; Pomakhina, E.; Albrecht, A.; Sinha, P. P. Ethylene-octene copolymers with improved property profile. WO2022069411, 2022.
- (658) Findik, Ş.; Öztürk, S.; Örnek, O.; Köker, R.; Kösemen, A. Detailed investigation of plasticized PMMA dielectric for improved performance of organic field-effect transistors. *J. of Electron. Mater.* **2024**, *53* (5), 2554-2561. DOI: 10.1007/s11664-024-10974-5.
- (659) Mohammed, M. I.; El-Sayed, F. PEG's impact as a plasticizer on the PVA polymer's structural, thermal, mechanical, optical, and dielectric characteristics. *Opt. Quantum Electron.* **2023**, *55* (13), 1141. DOI: 10.1007/s11082-023-05420-5.
- (660) Elfawal, G. F.; Šišková, A. O.; Andicsová, A. E. Electrospinning: A game-changer in fiber production and practical applications. *Fibers Polym.* **2025**, *26* (10), 4133-4160. DOI: 10.1007/s12221-025-01105-w.
- (661) Li, Y.; Yin, R.; Liang, J.; Zhou, Y.; Liu, H.; Li, W.; Li, P.; Li, T. Piezoelectric/pyroelectric dual-function flexible high-temperature resistant sensor comprising nano-power generation film. CN117782379, 2024.
- (662) Gong, H.; Ni, L.; Cheng, Z.; Mu, Y.; Hu, T.; Sun, Y.; Guo, Y.; You, M.; Li, S. Preparation method of flexible temperature-sensitive material. CN119020888, 2024.
- (663) Li, S.; Cao, C.; Zhu, J. Controllable diameter polyvinyl alcohol nanofiber and preparation method. CN113005535, 2021.
- (664) Johnson, J. K.; Ohst, D.; Helterbran, M. Flexible electrospun fiber rods and methods of manufacture. US20190271098, 2019.
- (665) Wang, P.; Zhou, Y.; Teng, S. Method for preparing a PU-PMMA-silicon dioxide composite material with controllable wettability. CN114836842, 2022.
- (666) Chen, Z.; Chen, A.; Wang, S.; Wang, R.; Fu, C.; Kang, S.; Zhao, J.; Lin, Q. Method for preparing long afterglow luminescence film material based on electrostatic spinning technology and application. CN111155236, 2020.
- (667) Additive manufacturing with fully fluorinated polymers. 3M, <https://multimedia.3m.com/mws/media/1453204O/brochure-additive-manufacturing-or-3d-printing-with-fully-fluorinated-polymers.pdf> (accessed 2026 12 February 2026).
- (668) Levin, M.; Tang, Y.; Eisenbach, C. D.; Valentine, M. T.; Cohen, N. Understanding the response of poly(ethylene glycol) diacrylate (PEGDA) hydrogel networks: A statistical mechanics-based framework. *Macromolecules* **2024**, *57* (15), 7074-7086. DOI: 10.1021/acs.macromol.3c02635.
- (669) Bartolini Torres, G.; Stefanovic, S.; Li, B.; Heise, A. Digital light processing (DLP) 3D printing of caprolactone copolymers with tailored properties through crystallinity. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2024**, *6* (18), 11241-11250. DOI: 10.1021/acsapm.4c01772.
- (670) Wang, T.; Yin, C.; Huang, W. Light/heat-curable shape memory hybrid material and preparation method for 3D printing. CN115477853, 2022.

- (671) Sim, U. S. Photocurable elastic material composition for three-dimensional printing with excellent mechanical properties. KR2024103819, 2024.
- (672) Shan, M.; Huang, S.; Sheng, J.; Zhang, H.; Wei, J.; Zhou, S.; Xu, W. Preparation of composite material of elastomer and shape memory polymer with self-deformation ability. CN112409774, 2021.
- (673) Padwal, A.; Leeber, B. W.; Jiang, X.; Whelan, B. A roofing membrane having a controllable color change. WO2023152379, 2023.
- (674) Li, S.; Wang, H.; Zhang, K.; Wu, Y.; Gao, K.; Li, H.; Liang, Y. Alcohol-soluble modified ink for solving shrink label wrinkle and preparation method thereof. CN121319697, 2026.
- (675) Chaturvedi, A. A process of incorporating embossed visual effect / security feature on a flexible substrate and substrate / package made therefrom. WO2017060926, 2017.
- (676) Makishima, Y.; Watanabe, M.; Li, H.; Ko, H.; Kita, H. Barrier film comprising organic compound, its production method, barrier film laminate, and electronic device. JP2020188047, 2020.
- (677) Kim, S. H.; Kim, G. H.; Lee, I. S. Including cholesteric liquid crystal display layer for flexible package material. CN113665206, 2021.
- (678) Hampu, N.; Werber, J. R.; Chan, W. Y.; Feinberg, E. C.; Hillmyer, M. A. Next-generation ultrafiltration membranes enabled by block polymers. *ACS Nano* **2020**, *14* (12), 16446-16471. DOI: 10.1021/acsnano.0c07883.
- (679) Karki, S.; Hazarika, G.; Yadav, D.; Ingole, P. G. Polymeric membranes for industrial applications: Recent progress, challenges and perspectives. *Desalination* **2024**, *573*, 117200. DOI: 10.1016/j.desal.2023.117200.
- (680) Ma, Z.-Y.; Xue, Y.-R.; Yang, H.-C.; Wu, J.; Xu, Z.-K. Surface and interface engineering of polymer membranes: Where we are and where to go. *Macromolecules* **2022**, *55* (9), 3363-3383. DOI: 10.1021/acs.macromol.1c02647.
- (681) Development History of State Key Laboratory of Advanced Separation Membrane Materials. Tiangong University, <https://membrane.tiangong.edu.cn/fzlc/list.htm> (accessed 2026 02/04/2026).
- (682) Company Overview of State Key Laboratory of Advanced Separation Membrane Materials <https://membrane.tiangong.edu.cn/dwgk/list.htm> (accessed 2026 02/04/2026).
- (683) Wang, H. Y.; Boya; Chang, Na. Preparation method of high-throughput anti-pollution polyvinylidene fluoride hybrid ultrafiltration membrane for waste water treatment. China CN115738760 A, 2023.
- (684) Wang, X. Z.; Jingguo; Zhang, Huan; Kong, Zhiyun; Jin, Yuqian; Li, Shuang; Wang, Huicai; Huang, Chan. Preparation method of solvent-resistant nanofiltration membrane with polydopamine/amino silica intermediate layer used to organic solvent recovery and drug purification. China CN120268257 A, 2025.
- (685) Ding, X. C.; Xianyun; Zhao, Hongyong. Method for preparing polyimide composite membrane with high CO₂ selectivity and permeability. China CN120305849 A, 2025.
- (686) Zhuang, X. H.; Honggui; Gao, Lu; Deng, Nanping. Preparation method of aromatic polyamide porous membrane for separator in lithium-ion battery. China CN119971801 A, 2025.
- (687) Dai, Z. L.; Yushuang; Li, Nan. Macrocyclic ultrathin nanofiltration membrane with pH color indication for monitoring pH standard discharge of dye wastewater and preparation method thereof. China CN118477502 A, 2024.
- (688) Separation & Purification Research Center of the Korea Research Institute of Chemical Technology https://www.kRICT.re.kr/eng/sub02_01_05.do (accessed 02/04/2026).
- (689) Advanced Functional Polymers Research Center of the Korea Research Institute of Chemical Technology. https://www.kRICT.re.kr/eng/sub02_02_03.do (accessed 02/04/2026).
- (690) Advanced Battery Research Center of the Korea Research Institute of Chemical Technology. https://www.kRICT.re.kr/eng/sub02_02_08.do (accessed 02/04/2026).
- (691) Scholes, C. A.; Motuzas, J.; Smart, S.; Kentish, S. E. Membrane adhesives. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2014**, *53* (23), 9523-9533. DOI: 10.1021/ie501036p.
- (692) Martins, P. M.; Nunes-Pereira, J.; Lanceros-Méndez, S.; Costa, C. M. Chapter 17 - Synthetic polymer-based membranes for lithium-ion batteries. In *Synthetic polymeric membranes for advanced water treatment, gas separation, and energy sustainability*, Ismail, A. F., Salleh, W. N. W., Yusof, N. Eds.; Elsevier, 2020; pp 383-415.
- (693) Trinh, H. N.; Eesaee, M.; Shahgaldi, S.; Singh, J.; Hoang, T. L. G.; Nguyen-Tri, P. Advancements and challenges in polymer-based separators for lithium-ion batteries. *Energy Storage Mater.* **2025**, *77*, 104153. DOI: 10.1016/j.ensm.2025.104153.
- (694) Liu, Z.; Huang, B.; Li, C.; Zhu, H.; Liu, G. Review of progress in the application of polytetrafluoroethylene-based battery separators. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2024**, *16* (46), 63109-63128. DOI: 10.1021/acsaami.4c12380.
- (695) Zeng, X.; Liu, X.; Zhu, H.; Zhu, J.; Lan, J.; Yu, Y.; Lee, Y.-S.; Yang, X. Advanced crosslinked solid polymer electrolytes: Molecular architecture, strategies, and future perspectives. *Adv. Energy Mater.* **2024**, *14* (46), 2402671. DOI: 10.1002/aenm.202402671.
- (696) Kwon, T.; Lim, Y.; Cho, J.; Lawler, R.; Min, B. J.; Goddard, W. A.; Jang, S. S.; Kim, J. Y. Antioxidant technology for durability enhancement in polymer electrolyte membranes for fuel cell applications. *Mater. Today* **2022**, *58*, 135-163. DOI: 10.1016/j.mattod.2022.06.021.
- (697) Hasan, M. R.; Coronas, J. How can the filler-polymer interaction in mixed matrix membranes be enhanced? *ChemPlusChem* **2024**, *89* (12), e202400456. DOI: 10.1002/cplu.202400456.

- (698) Yu, J.; Zheng, H.; Hou, D.; Zhang, J.; Xu, W. Silane coupling agent modification treatment to improve the properties of rubber-cement composites. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2021**, *9* (38), 12899-12911. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c03789.
- (699) Hadi, M. K.; Wang, X.; Peng, Y.; Sangaraju, S.; Ran, F. Functional polymeric membrane materials: A perspective from versatile methods and modification to potential applications. *Polym. Sci. Technol.* **2025**, *1* (5), 366-412. DOI: 10.1021/polymscitech.4c00030.
- (700) Li, J.; Lyu, W.; Mi, X.; Qian, C.; Liu, Y.; Yu, J.; Kaner, R. B.; Liao, Y. Conjugated microporous polymers-based catalytic membranes with hierarchical channels for high-throughput removal of micropollutants. *Adv. Sci.* **2024**, *11* (29), 2401966. DOI: 10.1002/advs.202401966.
- (701) Babiker, D. M. D.; Usha, Z. R.; Wan, C.; Hassaan, M. M. E.; Chen, X.; Li, L. Recent progress of composite polyethylene separators for lithium/sodium batteries. *J. Power Sources* **2023**, *564*, 232853. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2023.232853.
- (702) Bicy, K.; Gueye, A. B.; Rouxel, D.; Kalarikkal, N.; Thomas, S. Lithium-ion battery separators based on electrospun PVDF: A review. *Surfaces and Interfaces* **2022**, *31*, 101977. DOI: 10.1016/j.surfin.2022.101977.
- (703) Suzuki, K. O.; Shuhei. Separator with excellent short-circuit resistance and non-aqueous secondary battery. Japan JP2025145458 A, 2025.
- (704) Lizundia, E.; Costa, C. M.; Alves, R.; Lanceros-Méndez, S. Cellulose and its derivatives for lithium ion battery separators: A review on the processing methods and properties. *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.* **2020**, *1*, 100001. DOI: 10.1016/j.carpta.2020.100001.
- (705) Narimisa, M.; Ghobeira, R.; Onyshchenko, Y.; De Geyter, N.; Egghe, T.; Morent, R. Different techniques used for plasma modification of polyolefin surfaces. In *Plasma Modification of Polyolefins: Synthesis, Characterization and Applications*, Baneesh, N. S., Sari, P. S., Vackova, T., Thomas, S. Eds.; Springer International Publishing, 2022; pp 15-56.
- (706) Liao, P.; Ping, X.; Yao, Y.; Zhang, L.; Chen, L. A kind of ceramic and polymer composite coating for lithium ion membrane and its preparation method. CN107275550, 2017.
- (707) Teng, L.; Yue, C.; Zhang, G. Epoxied SiO₂ nanoparticles and polyethyleneimine (PEI) coated polyvinylidene fluoride (PVDF) membrane for improved oil water separation, anti-fouling, dye and heavy metal ions removal capabilities. *J. Colloid Interface Sci.* **2023**, *630*, 416-429. DOI: 10.1016/j.jcis.2022.09.148.
- (708) Cheng, X. Q.; Jiao, Y.; Sun, Z.; Yang, X.; Cheng, Z.; Bai, Q.; Zhang, Y.; Wang, K.; Shao, L. Constructing scalable superhydrophobic membranes for ultrafast water-oil separation. *ACS Nano* **2021**, *15* (2), 3500-3508. DOI: 10.1021/acsnano.1c00158.
- (709) Thomas, P. A. F. Primer composition for non-stick coatings with good adhesion to metal substrates. WO9414904, 1994.
- (710) Liu, W.; Lin, H.; Wang, J.; Han, Q.; Liu, F. Polytetrafluoroethylene (PTFE) hollow fibers modified by hydrophilic crosslinking network (HCN) for robust resistance to fouling and harsh chemical cleaning. *J. Membr. Sci.* **2021**, *630*, 119301. DOI: 10.1016/j.memsci.2021.119301.
- (711) Gomaa, M. M.; Hugenschmidt, C.; Dickmann, M.; Abdel-Hady, E. E.; Mohamed, H. F. M.; Abdel-Hamed, M. O. Crosslinked PVA/SSA proton exchange membranes: correlation between physiochemical properties and free volume determined by positron annihilation spectroscopy. *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2018**, *20* (44), 28287-28299, 10.1039/C8CP05301D. DOI: 10.1039/C8CP05301D.
- (712) Li, Z.; Zhang, C.; Jiang, Y.; Bai, Y.; Xu, M.; Xu, K.; Gao, D.; Leroux, F.; Feng, Y. Antimigration polypropylene antioxidants: A review. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2024**, *63* (4), 1713-1728. DOI: 10.1021/acs.iecr.3c03891.
- (713) Xiao, L.; Liu, W.; Huang, J.; Lou, H.; Qiu, X. Study on the antioxidant activity of lignin and Its application performance in SBS elastomer. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2021**, *60* (1), 790-797. DOI: 10.1021/acs.iecr.0c04699.
- (714) Liu, T.; Chen, D.; Cao, Y.; Yang, F.; Chen, J.; Kang, J.; Xu, R.; Xiang, M. Construction of a composite microporous polyethylene membrane with enhanced fouling resistance for water treatment. *J. Membr. Sci.* **2021**, *618*, 118679. DOI: 10.1016/j.memsci.2020.118679.
- (715) do Nascimento, F. C.; de Aguiar, L. C. V.; Costa, L. A. T.; Fernandes, M. T.; Marassi, R. J.; Gomes, A. d. S.; de Castro, J. A. Formulation and characterization of crosslinked polyvinyl alcohol (PVA) membranes: effects of the crosslinking agents. *Polym. Bull.* **2021**, *78* (2), 917-929. DOI: 10.1007/s00289-020-03142-2.
- (716) Van Goethem, C.; Magboo, M. M.; Mertens, M.; Thijs, M.; Koeckelberghs, G.; Vankelecom, I. F. J. A scalable crosslinking method for PVDF-based nanofiltration membranes for use under extreme pH conditions. *J. Membr. Sci.* **2020**, *611*, 118274. DOI: 10.1016/j.memsci.2020.118274.
- (717) Darmayanti, M. G.; Tuck, K. L.; Thang, S. H. Carbon dioxide capture by emerging innovative polymers: Status and perspectives. *Adv. Mater.* **2024**, *36* (30), 2403324. DOI: 10.1002/adma.202403324.
- (718) Krutkramelis, K.; Xia, B.; Oakey, J. Monodisperse polyethylene glycol diacrylate hydrogel microsphere formation by oxygen-controlled photopolymerization in a microfluidic device. *Lab Chip* **2016**, *16* (8), 1457-1465, 10.1039/C6LC00254D. DOI: 10.1039/C6LC00254D.
- (719) Chakraborti, S.; Banerjee, P. S.; Basu, D.; Wießner, S.; Heinrich, G.; Das, A.; Banerjee, S. S. Elastomers for soft electronics: A review from the material's perspective. *Adv. Eng. Mater.* **2025**, *27* (9), 2402458. DOI: 10.1002/adem.202402458.

- (720) Çolak, S. G.; Güngör, A.; Çolak, M. Ö. A.; Şimşek, U. B.; Güngör, A. Rubber-based nanoblends. In Engineering Applications of Polymer based Nano Blends, Visakh, P. M. Ed.; Springer Nature Switzerland, 2025; pp 177-220.
- (721) Karunanithi, A.; Suryawanshi, T. Y.; Redkar, N.; S. Mural, P. K.; Saxena, S.; Shukla, S. rGO induced enhanced antifouling properties in electrospun PVA-rGO nanocomposite membranes. *Environ. Sci.:Water Res. Technol.* **2023**, *9* (11), 2891-2902, 10.1039/D3EW00406F. DOI: 10.1039/D3EW00406F.
- (722) Prihartini Aryanti, P. T.; Nugroho, F. A.; Lugito, G.; Khoiruddin, K. Tight ultrafiltration membranes: Advancing separation technologies for water and wastewater treatment. *Sep. Purif. Technol.* **2025**, *367*, 132892. DOI: 10.1016/j.seppur.2025.132892.
- (723) Zhang, L.; Hu, M.; Matsuyama, H.; Li, X. Preparation strategies of the positively charged nanofiltration membrane: A comprehensive review. *Sep. Purif. Technol.* **2024**, *334*, 126011. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.126011.
- (724) He, L.; Qin, J.; Zhang, W.; Chen, R.; Zhu, W.; Li, J.; Guo, S.; Shen, J. Superhydrophobic PCTFE-based microporous membrane for water/oil emulsion separation in various environments. *J. Membr. Sci.* **2024**, *707*, 122986. DOI: 10.1016/j.memsci.2024.122986.
- (725) Hazarika, G.; Ingole, P. G. Polymer-based hollow fiber membranes: A modern trend in gas separation technologies. *Mater. Today Chem.* **2024**, *38*, 102109. DOI: 10.1016/j.mtchem.2024.102109.
- (726) Wani, A. A.; Shaari, N.; Kamarudin, S. K.; Raduwan, N. F.; Yusoff, Y. N.; Khan, A. M.; Yousuf, S.; M. N. M. , A. Critical Review on composite-based polymer electrolyte membranes toward fuel cell applications: Progress and perspectives. *Energy Fuels* **2024**, *38* (19), 18169-18193. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.4c02516.
- (727) Heidari, A. A.; Mahdavi, H. Recent development of polyolefin-based microporous deparators for Li-ion batteries: A review. *Chem. Rec.* **2020**, *20* (6), 570-595. DOI: 10.1002/tcr.201900054.
- (728) Liu, Y.; Cen, Q.; Fan, K.; Hu, A.; Yuan, X.; Xia, S. Enhancing nanofiltration membrane selectivity between mineral salts and organic pollutants by sulfonic acid functionalization for drinking water treatment. *J. Membr. Sci.* **2024**, *693*, 122358. DOI: 10.1016/j.memsci.2023.122358.
- (729) Kawakami, H. Development of composite electrolyte membranes with functional polymer nanofiber frameworks. *Polym. J.* **2025**, *57* (6), 623-633. DOI: 10.1038/s41428-024-01007-3.
- (730) Vo, T. S.; Lwin, K. M.; Kim, K. Recent developments of nano-enhanced composite membranes designed for water/wastewater purification—a review. *Adv. Compos. Hybrid Mater.* **2024**, *7* (4), 127. DOI: 10.1007/s42114-024-00923-5.
- (731) J, N.; Singh, R. K. Recent advances in anion-exchange membranes for electrolyzers, fuel cells and redox-flow batteries. *J. Mater. Chem.* **2025**, *13* (43), 36853-36880, 10.1039/D5TA05392G. DOI: 10.1039/D5TA05392G.
- (732) Garg, S.; Giron Rodriguez, C. A.; Rufford, T. E.; Varcoe, J. R.; Seger, B. How membrane characteristics influence the performance of CO₂ and CO electrolysis. *Energy Environ. Sci.* **2022**, *15* (11), 4440-4469, 10.1039/D2EE01818G. DOI: 10.1039/D2EE01818G.
- (733) Xu, G. X.; Gui; Wang, Zhihao; Song, Guizhou. Binder, lithium battery negative electrode, lithium ion battery and preparation method thereof. China CN120290114 A, 2025.
- (734) Sung, I. H.; Yoon, S. J.; Lee, S. J.; Kwon, H. J. Separator comprising CMC, particulate binder, and soluble binder. KR2019083910, 2019.
- (735) Tian, X.; Liu, C.; Yin, H.; Wei, Z.; Zhang, G.; Zheng, Q. Preparation method of hydrophobic blend modified PVDF composite membrane for wastewater deammoniation. CN120393771, 2025.
- (736) Zhou, S. L., Shenglan; Zhou, Lanfeng. Method for preparing lignin-modified high-flux polyamide composite membrane. China CN120502251 A, 2025.
- (737) Hu, Y. X., Yongkai; Hao, Shuang. Preparation method of polyamide composite membrane with nearly electrically neutral surface and its application. China CN117482763 A, 2024.
- (738) Wu, S. L., Xing. Method for preparing polyamide reverse osmosis composite membrane with effects of resisting temperature and solvent. China CN120605628 A, 2025.
- (739) Liang, Y.; Cui, F.; Li, H.; Li, Z.; Ma, D.; Li, F.; Xie, X. Composite nanofiltration membrane based on ptfe and preparation method and application thereof. CN120094419, 2025.
- (740) Li, P.; Su, Z.; Liu, T. A preparation method of hollow fiber nanofiltration membrane based on polytetrafluoroethylene. CN120094415, 2025.
- (741) Li, M. L., Junyu; Liao, Yunlan. Polymer with nitrogen heterocycles hanging from side chains, ion exchange membrane in fuel cells. CN120329501 A, 2025.
- (742) Liu, N. L., Tianyu; Lv, Xuemin; Huang, Jianglong; Xie, Peng; Li, Chao; Tang, Na; Chen, Weiyi. Preparation method of homogeneous anion exchange membrane for electrodialysis. CN119793252 A, 2025.
- (743) Zhou, S.; Liao, J.; Ding, N.; Xu, Y.; Xu, G.; Wu, Z. Preparation method of temperature-resistant solvent-resistant monovalent anion selective composite ion exchange membrane. CN120286089, 2025.
- (744) Son, W. G.; Lee, S. Y.; Kumar, S.; Kang, B. G. Method for manufacturing anion exchange membrane. KR2826131, 2025.
- (745) Nam, S. Y.; Kim, D. H.; Lim, G. S. Polymer membrane comprising cross-linked anion exchange copolymer and manufacturing method thereof. KR2025079705, 2025.

- (746) Zhao, S.; Hou, N.; Li, R. Life cycle assessment of recycled polyester and analysis of key emission sources. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2025**, *30* (12), 3250–3263. DOI: 10.1007/s11367-025-02440-z.
- (747) Acharjee, S. A.; Gogoi, B.; Bharali, P.; Sorhie, V.; Alemtoshi, B. W. Recent trends in the development of polyhydroxyalkanoates (PHAs) based biocomposites by blending with different bio-based polymers. *Polym. Res* **2024**, *31* (4), 98. DOI: 10.1007/s10965-024-03947-z.
- (748) Kumar, J.; Negi, S.; Mishra, V. 3D printed PETG/cenosphere syntactic foam composites for lightweight structural applications. *Mater. Lett.* **2024**, *355*, 135493. DOI: 10.1016/j.matlet.2023.135493.
- (749) Soleyman, E.; Rahmatabadi, D.; Soltanmohammadi, K.; Aberoumand, M.; Ghasemi, I.; Abrinia, K.; Baniassadi, M.; Wang, K.; Baghani, M. Shape memory performance of PETG 4D printed parts under compression in cold, warm, and hot programming. *Smart Mater. Struct.* **2022**, *31* (8), 085002. DOI: 10.1088/1361-665x/ac77cb.
- (750) Balou, S.; Ahmed, I.; Priye, A. From waste to filament: Development of biomass-derived activated carbon-reinforced PETG composites for sustainable 3D Printing. *ACS Sustain. Chem. Eng.* **2023**, *11* (34), 12667–12676. DOI: 10.1021/acssuschemeng.3c02685.
- (751) Tang, D. Three dimensional printing plate with improved clarity. CN118254445, 2024.
- (752) Wei, S.; Xie, J.; Zhang, J.; Zhao, L.; Hu, D. Green preparation of poly(butylene succinate-co-butylene terephthalate) foam with tunable degradability and mechanical properties by supercritical CO₂. *Polym. Degrad. Stab.* **2024**, *223*, 110732. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2024.110732.
- (753) Itabana, B. E.; Mohanty, A. K.; Dick, P.; Sain, M.; Bali, A.; Tiessen, M.; Lim, L.-T.; Misra, M. Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) - based biocomposites: A comprehensive review. *Macromol. Mater. Eng.* **2024**, *309* (12), 2400179. DOI: 10.1002/mame.202400179.
- (754) Nofar, M.; Salehiyan, R.; Ciftci, U.; Jalali, A.; Durmus, A. Ductility improvements of PLA-based binary and ternary blends with controlled morphology using PBAT, PBSA, and nanoclay. *Compos. B: Eng* **2020**, *182*, 107661. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.107661.
- (755) Gao, J.; Chen, Z.; Du, K.; Zhang, Y.; Bi, Y.; Su, J.; Zhang, S. A coordination-driven interface system for improving the performance of high-filled bamboo fiber /poly (butylene succinate-co-butylene adipate) (PBSA) biocomposites. *J. Cleaner Prod.* **2023**, *418*, 138198. DOI: 10.1016/j.jclepro.2023.138198.
- (756) Uuganbayar, N.; Shiode, H.; Yukita, T. Acrylic resin composition for fdm 3d printing dental devices with high accuracy. JP2026011437, 2026.
- (757) McGuire, J. A. Novel wood-plastic composite material, products, and processes for making same. US20220396008, 2022.
- (758) Lemos de Moraes, A. C.; da Silva Fortes, A. G.; Rodrigues de Abreu, I.; van Noordenne-Bos, C.; Voet, V. S. D.; Folkersma, R.; Loos, K. Blending PHBV with P(3HB-co-4HB) for superior thermal stability, mechanical strength, and environmental degradation. *Faraday Discuss.* **2026**, *262* (0), 68–93, 10.1039/D5FD00035A. DOI: 10.1039/D5FD00035A.
- (759) Kaniuk, Ł.; Stachewicz, U. Development and advantages of biodegradable PHA polymers based on electrospun PHBV fibers for tissue engineering and other biomedical applications. *ACS Biomater. Sci. Eng.* **2021**, *7* (12), 5339–5362. DOI: 10.1021/acsbiomaterials.1c00757.
- (760) Berrabah, I.; Kaci, M.; Dehouche, N.; Delaite, C.; Deguines, C.-H.; Bououdina, M. Advancing food packaging: Enhancing stability and performance of biodegradable PHBHHx with ZnO nanofillers. *Polym. Bull.* **2024**, *81* (12), 10953–10971. DOI: 10.1007/s00289-024-05209-w.
- (761) An, F.; Hou, J.; An, X.; Li, D.; Wu, L. A composite degradable material using PBAT/PBS as matrix and preparation method thereof. CN120310203, 2025.
- (762) Lu, X.; Ambulo, C. P.; Wang, S.; Rivera-Tarazona, L. K.; Kim, H.; Searles, K.; Ware, T. H. 4D-printing of photoswitchable actuators. *Angew. Chem., Int. Ed.* **2021**, *60* (10), 5536–5543. DOI: 10.1002/anie.202012618.
- (763) Saed, M. O.; Gablier, A.; Terentjev, E. M. Exchangeable liquid crystalline elastomers and their applications. *Chem. Rev.* **2022**, *122* (5), 4927–4945. DOI: 10.1021/acs.chemrev.0c01057.
- (764) He, X.; Cheng, J.; Li, Z.; Ye, H.; Wei, X.; Li, H.; Wang, R.; Zhang, Y.-F.; Yang, H. Y.; Guo, C.; et al. Printing 3D ultraviolet-curable ionic conductive elastomer polymers for flexible electronics. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, *15* (2), 3455–3466. DOI: 10.1021/acsami.2c18954.
- (765) Zhu, S.; Sun, H.; Lu, Y.; Wang, S.; Yue, Y.; Xu, X.; Mei, C.; Xiao, H.; Fu, Q.; Han, J. Inherently conductive poly(dimethylsiloxane) elastomers synergistically mediated by nanocellulose/carbon nanotube nanohybrids toward highly sensitive, stretchable, and durable strain sensors. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, *13* (49), 59142–59153. DOI: 10.1021/acsami.1c19482.
- (766) Jin, Y.; Pan, C.; Chen, H.; Wang, J.; Zhang, M.; He, J.; Ni, P. A polymerizable eutectic strategy toward multifunctional ionic conductive elastomers for strain sensors. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2024**, *6* (20), 12734–12743. DOI: 10.1021/acsapm.4c02324.
- (767) Jiang, J.; Tang, Q.; Pan, X.; Xi, Z.; Zhao, L.; Yuan, W. Structure and morphology of thermoplastic polyamide elastomer based on long-chain polyamide 1212 and renewable poly(trimethylene glycol). *Ind. Eng. Chem. Res.* **2020**, *59* (39), 17502–17512. DOI: 10.1021/acs.iecr.0c01334.

- (768) Fu, X.-b.; Yang, J.-c.; Zhang, G.; Zhang, M.-l.; Wang, X.-j.; Yang, J. Tough and excellent heat-resistant semiaromatic polyamide elastomer containing hierarchical bonds: Synthesis and synergistic molecular design. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2023**, *62* (7), 3165-3175. DOI: 10.1021/acs.iecr.2c04027.
- (769) Zeng, L.; Zhou, X.; Li, Z.; Wei, Y.; Yang, Z. Flame retardant thermoplastic elastomer electric cable material and preparation method thereof. CN114634699, 2022.
- (770) Liu, Y.; Wang, Z.; Zhang, D.; Zhang, K.; Gao, C.; Wu, Y. Antibacterial silicone elastomer for flexible sensors, electronic skins, wearable electronic products and medical devices and preparation method thereof. CN113462168, 2021.
- (771) Li, N.; Liu, Y.; Zeng, F.; Dong, X.; Yin, J.; Xiang, Y.; Wang, Q.; Wang, Q.; Zhang, H.; Tan, C. Castor oil bio-based heat conduction organic silicone elastomer and preparation method thereof. CN118546517, 2024.
- (772) Sun, S. Processing and recycling method of thermoplastic polyester elastomer. CN120170914, 2025.
- (773) Wang, G.; Chen, P.; Ye, N.; Li, S.; Ye, L.; Ruan, Y.; Qiu, X.; Chen, W. Preparation of encapsulating resin low temperature resistant TPE material and encapsulated products for automotive field or the electric tool field. CN118307924, 2024.
- (774) Zhang, Z.; Chen, X. Chemical-resistant flame-retardant PC-ABS alloy material and preparation method thereof. CN118652531, 2024.
- (775) Chen, X.; Chen, C.-H.; Su, Z. H.; Chen, J.; Wang, K.-L.; Xia, Y.; Nizamani, N.; Huang, L.; Jin, R.-J.; Li, Y.-H.; et al. Adhesively bridging SAM molecules and perovskites for highly efficient photovoltaics. *Adv. Funct. Mater.* **2025**, *35* (12), 2415004. DOI: 10.1002/adfm.202415004.
- (776) Cao, G.; Hao, C.; Gao, X.; Lu, J.; Xue, W.; Meng, Y.; Cheng, C.; Tian, Y. Carbon nanotubes with carbon blacks as cofillers to improve conductivity and stability. *ACS Omega* **2019**, *4* (2), 4169-4175. DOI: 10.1021/acsomega.8b03684.
- (777) Gao, G.; Zhao, Y.; Cao, W.; Su, Z.; Wang, X.; Wang, Z.; Sun, T.; Dai, B.; Han, J.; Li, B.; et al. Diamond-reinforced Al(H₂PO₄)₃@ epoxy hybrid thermal adhesive with ultra-high thermal conductivity and bonding strength. *Small* **2024**, *20* (44), 2403490. DOI: 10.1002/smll.202403490.
- (778) Yan, Q.; Zhou, M.; Fu, H. A reversible and highly conductive adhesive: Towards self-healing and recyclable flexible electronics. *J. Mater. Chem. C* **2020**, *8* (23), 7772-7785, 10.1039/C9TC06765E. DOI: 10.1039/C9TC06765E.
- (779) Liu, W.; Wei, Y.; Luo, H. Recyclable LED packaging conductive adhesive composition and preparation method thereof. CN110724486, 2020.
- (780) Guo, H.; Sun, S.; Huo, K. Low-density conductive adhesive applied to photovoltaic imbricated component and preparation method thereof. CN119410319, 2025.
- (781) Lin, Q.; Yang, X.; Lu, X.; Yang, Z.; Jia, C. High thermal conductivity and low thermal resistance epoxy thermal conductive adhesive for high-power LED heat dissipation components and preparation method thereof. CN119912887, 2025.
- (782) Yue, M.; Liu, J.; Wang, W. Waterborne conductive adhesive and preparation method thereof and application in battery electrode. CN116814187, 2023.
- (783) Aso, T.; Suda, N.; Yanagisawa, J.; Shimada, N. Antistatic adhesive tape having excellent conductivity, heat resistance, solvent resistance and chemical resistance. JP2021088646, 2021.
- (784) Lin, J.; Li, Y.; Lin, J.; Cheng, X.; Deng, F.; Chen, Y. Preparation of conductive elastomer composite material for wearable devices, electronic skin, soft robots and strain sensor products. CN119639052, 2025.
- (785) Zhang, J.; Wu, J.; Sun, T.; Han, Z.; Xin, Y.; Dai, Q.; Gu, X.; Xu, W.; Zhang, X.; Li, X.; et al. Bionic flexible pressure sensor with ultra-sensitivity and wide detection range and preparation method thereof. CN118857516, 2024.
- (786) Sadi, M. S.; Kumpikaitè, E. Highly conductive composites using polypyrrole and carbon nanotubes on polydopamine functionalized cotton fabric for wearable sensing and heating applications. *Cellulose* **2023**, *30* (12), 7981-7999. DOI: 10.1007/s10570-023-05356-9.
- (787) He, L.; Chen, Y.; Shao, X.; Yao, Q.; Feng, D.; Yin, L.; Wang, W. A facile method in fabricating flexible conductive composites with large-size segregated structures for electromagnetic interference shielding. *Macromol. Rapid Commun.* **2025**, *46* (7), 2400585. DOI: 10.1002/marc.202400585.
- (788) Leitner, A. P.; Taylor, M. E.; Mohamed, A. A. I. Linear superionic polymer electrolyte for a lithium secondary battery. WO2024044354, 2024.
- (789) Liu, W.; Lin, G.; Shi, J.; Chen, C.; Han, Z.; Hu, L. Gel polymer electrolytes and electrochromic gels, electrochromic devices. CN112812234, 2021.
- (790) Wemyss, A. M.; Ellingford, C.; Morishita, Y.; Bowen, C.; Wan, C. Dynamic polymer networks: A new avenue towards sustainable and advanced soft machines. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2021**, *60* (25), 13725-13736. DOI: 10.1002/anie.202013254.
- (791) Jia, Y.; Delaittre, G.; Tsotsalas, M. Covalent adaptable networks based on dynamic alkoxyamine bonds. *Macromol. Mater. Eng.* **2022**, *307* (9), 2200178. DOI: 10.1002/mame.202200178.
- (792) Sun, M.; Felsenthal, L. M.; Kim, S.; Choi, E. Y.; Reed, L. J.; Elling, B. R.; Dichtel, W. R. Covalent adaptable networks: Reprocessable cross-linked polymers. *Chem. Rev.* **2026**. DOI: 10.1021/acs.chemrev.4c00994.
- (793) Krishnakumar, B.; Sanka, R. V. S. P.; Binder, W. H.; Parthasarthy, V.; Rana, S.; Karak, N. Vitrimers: Associative dynamic covalent adaptive networks in thermoset polymers. *Chem. Eng. J.* **2020**, *385*, 123820. DOI: 10.1016/j.cej.2019.123820.

- (794) Schenk, V.; Labastie, K.; Destarac, M.; Olivier, P.; Guerre, M. Vitriimer composites: Current status and future challenges. *Mater. Adv.* **2022**, *3* (22), 8012–8029, 10.1039/D2MA00654E. DOI: 10.1039/D2MA00654E.
- (795) Lei, Z.; Chen, H.; Huang, S.; Wayment, L. J.; Xu, Q.; Zhang, W. New advances in covalent network polymers via dynamic covalent chemistry. *Chem. Rev.* **2024**, *124* (12), 7829–7906. DOI: 10.1021/acs.chemrev.3c00926.
- (796) Cornellà, A. C.; Furia, F.; Van Assche, G.; Brancart, J. Controlling the relaxation dynamics of polymer networks by combining associative and dissociative dynamic covalent bonds. *Adv. Mater.* **2024**, *36* (46), 2407663. DOI: 10.1002/adma.202407663.
- (797) Zhou, S.-W.; Yu, C.; Chen, M.; Shi, C.-Y.; Gu, R.; Qu, D.-H. Self-healing and shape-shifting polymers controlled by dynamic bonds. *Smart Mol.* **2023**, *1* (2), e20220009. DOI: 10.1002/smo.20220009.
- (798) Niu, W.; Li, Z.; Liang, F.; Zhang, H.; Liu, X. Ultrastable, superrobust, and recyclable supramolecular polymer networks. *Angew. Chem. Int. Ed.* **2024**, *63* (10), e202318434. DOI: 10.1002/anie.202318434.
- (799) Yue, L.; Bonab, V. S.; Yuan, D.; Patel, A.; Karimkhani, V.; Manas-Zloczower, I. Vitriimerization: A novel concept to reprocess and recycle thermoset waste via dynamic chemistry. *Global Challenges* **2019**, *3* (7), 1800076. DOI: 10.1002/gch.2.201800076.
- (800) Wu, N.-H.; Liu, Y.-L. Biomass-based diketoenamine vitrimers: synthesis, properties, reprocessing, and closed-loop chemical recycling. *ACS Appl. Polym. Mater.* **2025**, *7* (4), 2206–2216. DOI: 10.1021/acspapm.4c03127.
- (801) Ye, G.; Wang, C.; Guo, Y.; Yang, Q.; Huo, S. Vitriimer as a sustainable alternative to traditional thermoset: recent progress and future prospective. *ACS Polym. Au* **2025**, *5* (5), 445–457. DOI: 10.1021/acspolymersau.5c00081.
- (802) Li, M.; Chen, X.; Li, X.; Dong, J.; Zhao, X.; Zhang, Q. Controllable strong and ultralight aramid nanofiber-based aerogel fibers for thermal insulation applications. *Adv. Fiber Mater.* **2022**, *4* (5), 1267–1277. DOI: 10.1007/s42765-022-00175-2.
- (803) Gu, S.; Xie, P.; Hu, Z.; Yu, J.; Wang, Y.; Li, N. Outstanding mechanical properties, high thermal stability and enhanced breakdown strength of PDA@BNNS/PMIA-coated meta-aramid paper with sandwich structure. *J. Mater. Sci.* **2023**, *58* (8), 3687–3700. DOI: 10.1007/s10853-022-07957-4.
- (804) Liang, S.; Xie, Q.; Xu, Q.; Sun, Z.; Liu, Y.; Jiang, X.; Liu, P.; Jiang, M. Enhancing anti-meltdrop and smoke suppression properties of flame retardant poly(ethylene terephthalate) fabric by fiber-blending method. *J. Appl. Polym. Sci.* **2023**, *140* (25), e53981. DOI: 10.1002/app.53981.
- (805) He, L.; An, T.; He, M.; Fan, Q.; Yang, J.; Liu, Y.; Qin, S.; Yu, J. Achieving anti-moisture absorption and high thermal properties in bio-based polyamide 66/F-based heat-resistant agent composites through crystal regulation. *J. Appl. Polym. Sci.* **2023**, *140* (34), e54301. DOI: 10.1002/app.54301.
- (806) Yu, D.; Zhong, J.; Wu, F.; Zheng, P.; Xiang, Y.; Zhu, R.; Wang, X.; Yue, M.; Pu, Z. Preparation and properties of PC / PCTG blends with excellent optical properties and solvent resistance. *Polym. Int.* **2024**, *73* (6), 478–483. DOI: 10.1002/pi.6620.
- (807) Nagahata, S. Resin composition having excellent low water absorptivity, weather- and chemical resistance. JP2020111672, 2020.
- (808) Ma, X.; Wang, L.; Ji, W.; Li, T.; Zhang, S.; Li, Z. Hydrolysis-resistant and extrudable polyamide material for cooling pipelines for fuel vehicles and preparation method thereof. CN117511197, 2024.
- (809) Mizuta, H.; Hioki, T.; Asaka, M.; Kamenno, S. Hollow tube with improved creep resistance and flexibility. WO2023171101, 2023.
- (810) Gillissen, A.; Joern, P. Method and apparatus for manufacture of fiber-reinforced thermoplastic component for aircraft. WO2021018578, 2021.
- (811) Russell, J. Double-jacketed, high-temperature fire hose. US20210364107, 2021.
- (812) Voit, B. I.; Lederer, A. Hyperbranched and highly branched polymer architectures—Synthetic strategies and major characterization aspects. *Chem. Rev.* **2009**, *109* (11), 5924–5973. DOI: 10.1021/cr900068q.
- (813) Zhang, Y.; He, C.; Xu, H. Functional heteroatom substituted hyperbranched polymers: Recent developments and perspectives. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2025**, *17* (9), 13324–13341. DOI: 10.1021/acsaami.4c22844.
- (814) Zhou, Z.; Luo, N.; Shao, X.; Zhang, H.-L.; Liu, Z. Hyperbranched polymers for organic semiconductors. *ChemPlusChem* **2023**, *88* (7), e202300261. DOI: 10.1002/cplu.202300261.
- (815) Flouda, P.; Bukharina, D.; Pierce, K. J.; Stryutsky, A. V.; Shevchenko, V. V.; Tsukruk, V. V. Flexible sustained ionogels with ionic hyperbranched polymers for enhanced ion-conduction and energy storage. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2022**, *14* (23), 27028–27039. DOI: 10.1021/acsaami.2c04502.
- (816) Sui, B.; Nisar, S.; Seneviratne, M. D. I. H. Biodegradable hyperbranched polyesters of trimethylolpropane with acrylate side chains enabling sustainable gel materials and nanomaterials for drug delivery applications. *J. Mater. Chem.* **2025**, *13* (28), 8368–8379, 10.1039/D5TB00806A. DOI: 10.1039/D5TB00806A.
- (817) Du, Y.; Yan, H.; Huang, W.; Chai, F.; Niu, S. Unanticipated strong blue photoluminescence from fully biobased aliphatic hyperbranched polyesters. *ACS Sustainable Chem. Eng.* **2017**, *5* (7), 6139–6147. DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b01019.
- (818) Zhuang, M.; Wang, Y.; Xu, Y.; Jiang, J.; Xu, H.; Li, Y.; Li, G.; Xi, K. Construction and properties of release coating based on hydrogen-terminated hyperbranched polysiloxane. *Prog. Org. Coat.* **2025**, *200*, 108968. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108968.
- (819) Bai, L.; Yang, P.; Guo, L.; Liu, S.; Yan, H. Truly multicolor emissive hyperbranched polysiloxane: synthesis, mechanism study, and visualization of controlled drug release. *Biomacromolecules* **2022**, *23* (3), 1041–1051. DOI: 10.1021/acs.biomac.1c01396.

- (820) Zhang, X.; Zhao, K.; Zhang, Y.; Zhang, Y.; Zhao, G.; Wang, P.; Chen, S.; Hu, Y.; Yuan, B.; Hu, P.; et al. Charge- and structure-engineered hyperbranched polyamide nanofiltration membrane targeting high-efficiency Li⁺/Mg²⁺ separation and fouling resistance in challenging low-quality brine. *J. Membr. Sci.* **2026**, *740*, 125002. DOI: 10.1016/j.memsci.2025.125002.
- (821) Lee, J.; Lee, J.; Kim, J. Y.; Kim, M. Covalent connections between metal–organic frameworks and polymers including covalent organic frameworks. *Chem. Soc. Rev.* **2023**, *52* (18), 6379–6416, 10.1039/D3CS00302G. DOI: 10.1039/D3CS00302G.
- (822) Kalaj, M.; Bentz, K. C.; Ayala, S., Jr.; Palomba, J. M.; Barcus, K. S.; Katayama, Y.; Cohen, S. M. MOF-polymer hybrid materials: From simple composites to tailored architectures. *Chem. Rev.* **2020**, *120* (16), 8267–8302. DOI: 10.1021/acs.chemrev.9b00575.
- (823) Zheng, Z.; Rong, Z.; Nguyen, H. L.; Yaghi, O. M. Structural chemistry of zeolitic imidazolate frameworks. *Inorg. Chem.* **2023**, *62* (51), 20861–20873. DOI: 10.1021/acs.inorgchem.3c02322.
- (824) Zhang, Z.; Ye, Y.; Xiang, S.; Chen, B. Exploring multifunctional hydrogen-bonded organic framework materials. *Acc. Chem. Res.* **2022**, *55* (24), 3752–3766. DOI: 10.1021/acs.accounts.2c00686.
- (825) Chen, L.; Zhang, B.; Chen, L.; Liu, H.; Hu, Y.; Qiao, S. Hydrogen-bonded organic frameworks: design, applications, and prospects. *Mater. Adv.* **2022**, *3* (9), 3680–3708, 10.1039/D1MA01173A. DOI: 10.1039/D1MA01173A.
- (826) Li, D.; Yadav, A.; Zhou, H.; Roy, K.; Thanasekaran, P.; Lee, C. Advances and applications of metal-organic frameworks (MOFs) in emerging technologies: A comprehensive review. *Global Challenges* **2024**, *8* (2), 2300244. DOI: 10.1002/gch2.202300244.
- (827) Wu, W.-N.; Mizrahi Rodriguez, K.; Roy, N.; Teesdale, J. J.; Han, G.; Liu, A.; Smith, Z. P. Engineering the polymer–MOF interface in microporous composites to address complex mixture separations. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2023**, *15* (45), 52893–52907. DOI: 10.1021/acsami.3c11300.
- (828) Chen, C.; Shen, L.; Lin, H.; Zhao, D.; Li, B.; Chen, B. Hydrogen-bonded organic frameworks for membrane separation. *Chem. Soc. Rev.* **2024**, *53* (5), 2738–2760, 10.1039/D3CS00866E. DOI: 10.1039/D3CS00866E.
- (829) Yao, D.; Dong, L.; Hao, Y.; Wei, Y.; Fang, M. Extended model for chemically amplified resist with multiple photoacid generators. *J. Vac. Sci. Technol.* **2025**, *43* (2). DOI: 10.1116/6.0004381.
- (830) Kojima, M.; Bekki, Y.; Hiura, N. Active-light-sensitive or radiation-sensitive resin compositions, resist films, pattern formation method, and manufacture of electronic devices. WO2022270230, 2022.
- (831) Kawabata, T.; Goto, A. Actinic ray- or radiation-sensitive resin composition, actinic ray-sensitive or radiation-sensitive film, pattern formation method, and electronic device manufacturing method. WO2025263596, 2025.
- (832) Ishiji, Y.; Horigome, H.; Murakami, T.; Ushirogata, K.; Goto, A. Photosensitive or radiation-sensitive resin composition, resist film, pattern-forming method, and electronic device manufacturing method. WO2025249390, 2025.
- (833) Yoshioka, T.; Kamino, Y. Actinic ray-sensitive or radiation-sensitive resin composition, actinic ray-sensitive or radiation-sensitive film, pattern forming method, and electronic device manufacturing method. WO2025177844, 2025.
- (834) Marumo, K.; Tango, N. Active light sensitive or radiation sensitive resin composition having predetermined resin, resist film, pattern forming method and electronic device manufacturing method thereof. WO2018066247, 2018.
- (835) Shibuya, A.; Kojima, M.; Goto, A.; Oka, H. Active-ray-sensitive or radiation-sensitive resin composition, resist film, pattern formation method, and electronic device production method. WO2025069927, 2025.
- (836) Yoshino, F. Actinic ray-sensitive or radiation-sensitive resin composition, resist film, pattern formation method, and electronic device manufacturing method. WO2025263595, 2025.

术语与缩略语

中文名称	简称	CAS RN®
(±)-聚乳酸	(±)-PLA	26100-51-6
1,2-苯二酚-4-(2-氨基乙基)盐酸盐 (1:1) 均聚物	聚多巴胺; PDA.HCl	1200398-97-5
1,3,5-苯三甲酰氯与1,3-苯二胺的聚合物	m-PDA-TMC 共聚物	83044-99-9
1,3,5-苯三甲酰氯与哌嗪的聚合物	PIP-TMC 聚酰胺	79122-60-4
1,3-丙二醇		504-63-2
1,4-丁二醇		110-63-4
1,5-戊二胺		462-94-2
2,2-双(3,4-二羧基苯基)六氟丙烷二酐与2,2-双(三氟甲基)-4,4'-二氨基联苯的共聚物	6FDA-TFDB 聚酰亚胺	129197-26-8
2,5-呋喃二甲酸	FDCA	3238-40-2
2-吡咯烷酮		616-45-5
2-哌啶酮		675-20-7
3-羟基己二酸		14292-29-6
4,4'-二氨基二苯醚与均苯四甲酸二酐的共聚物	4,4'-ODA-PMDA 聚酰亚胺	25038-81-7
5-羟甲基糠醛		67-47-0
CAS登记号	CASRN	
Nafion 117		66796-30-3
O-羧甲基壳聚糖		62711-98-2
α-羟基粘康酸		4440-68-0
ε-聚赖氨酸		28211-04-3
薄膜晶体管	TFT	
苯乙烯类嵌段共聚物	SBCs	
丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物	ABS	9003-56-9
丙烯腈-丁二烯共聚物	NBR	9003-18-3
丙烯酸与丙烯酸-2-乙基己酯的共聚物	AA-2EHA共聚物	25134-51-4
丙烯酸与淀粉的接枝共聚物	淀粉接枝聚丙烯酸	9086-70-8
丙烯酰胺与N,N'-亚甲基双丙烯酰胺的共聚物	丙烯酰胺-MBAA共聚物	25034-58-6
玻璃化转变温度	Tg	
醇改性聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PETG)	PETG	25038-91-9
醋酸纤维素		9004-35-7
导电高分子复合材料		
等规聚丙烯	等规PP	25085-53-4
低分子量聚苯醚		24938-67-8
低密度聚乙烯	LDPE	

碘鎗离子		43413-76-9
电磁干扰	EMI	
电致发光	EL	
电子皮肤	E-skin	
淀粉		9005-25-8
丁苯橡胶	SBR	9003-55-8
丁二烯-苯乙烯三嵌段共聚物	SBS	694491-73-1
动态共价网络	CANs	
动态聚合物网络	DPNs	
对苯二胺-对苯二甲酸共聚物 (SRU)	PPTA	24938-64-5
对苯二甲酸	TPA	100-21-0
二醛纤维素		9032-52-4
二氧化硅	SiO ₂	7631-86-9
二氧化碳	CO ₂	124-38-9
发光二极管	LED	
芳纶纳米纤维	ANFs	
非异氰酸酯聚氨酯	NIPU	
沸石咪唑酯骨架材料 (ZIFs)	ZIFs	
呋喃二甲酸		58465-65-9
氟化乙烯丙烯共聚物	FEP	25067-11-2
腐胺 (1,4-丁二胺)		110-60-1
甘油		56-81-5
高密度聚乙烯	HDPE	
共价有机框架	COF	
光产酸剂	PAG	
光固化立体成型	SLA	
硅	Si	7440-21-3
硅烷改性聚乙二醇		74695-91-3
癸二酸		111-20-6
果糖		57-48-7
海藻酸		9005-32-7
海藻酸钙		9005-35-0
海藻酸钾		9005-36-1
海藻酸钠		9005-38-3
韩国化学技术研究院	KRICT	
红外线	IR	

糊精		9004-53-9
琥珀酸		110-15-6
化学放大光刻胶	CAR	
环氧丙烷-二氧化碳共聚物	PPC	25511-85-7
环氧氯丙烷		106-89-8
黄原胶		11138-66-2
挥发性有机化合物	VOC	
肌电图	EMG	
极紫外光	EUV	
己二酸		124-04-9
季铵盐聚合物		
甲基纤维素		9004-67-5
碱木质素		8068-05-1
介电常数	k	
金属有机框架	MOF	
聚(3,4-乙烯二氧噻吩)	PEDOT	126213-51-2
聚(3-羟基丁酸酯)	P3HB	26063-00-3
聚(3-羟基丁酸酯-共-3-羟基己酸酯)	PHBHHx	147398-31-0
聚(3-羟基丁酸酯-共-3-羟基戊酸酯)	PHBV	80181-31-3
聚(3-羟基丁酸酯-共-4-羟基丁酸酯)	P(3HB-co-4HB)	117068-64-1
聚(9,9-二辛基芴-交替-苯并噻二唑)	PFBT	210347-52-7
聚(丁二酸丁二醇酯-共-对苯二甲酸酯)	PBST	144123-61-5
聚对苯二甲酸丁二醇酯	PBT	24968-12-5
聚二烯丙基二甲基氯化铵		26062-79-3
聚富马酸丁二醇酯	PBF	
聚(乙氧基化三羟甲基丙烷三丙烯酸酯)		28961-43-5
聚[2,1,3-苯并噻二唑-4,7-二基(9,9-二辛基-9H-芴-2,7-二基)]	PFO-BT	
聚[2,2'-(间亚苯基)-5,5'-联苯并咪唑]	m-PBI	25734-65-0
聚-D-乳酸	D-PLA	106989-11-1
聚L-谷氨酸		25513-46-6
聚L-赖氨酸		38000-06-5
聚L-乳酸	L-PLA	26811-96-1
聚L-天冬氨酸		25608-40-6
聚N-乙烯基吡唑	PVK	25067-59-8
聚N-异丙基丙烯酰胺	PNIPAM	25189-55-3
聚苯胺	PANI	25233-30-1

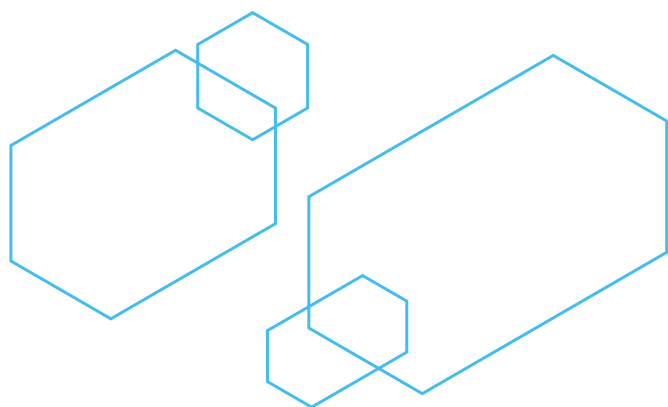
聚苯醚		25134-01-4
聚苯乙烯	PS	9003-53-6
聚苯乙烯磺酸	PSS	50851-57-5
聚吡咯	PPy	30604-81-0
聚丙二醇	PPG	25322-69-4
聚丙二醇二胺		9046-10-0
聚丙烯	PP	9003-07-0
聚丙烯腈	PAN	25014-41-9
聚丙烯酸		9003-01-4
聚丙烯酸-2-甲氧基乙酯	PMEA	28628-64-0
聚丙烯酸钠		9003-25-8
聚丙烯酰胺	PAM	9003-05-8
聚电解质多层膜		
聚丁二酸/己二酸丁二醇酯	PBSA	67423-06-7
聚丁二酸丁二醇酯	PBS	26247-20-1
聚丁二烯		9003-17-2
聚丁二烯橡胶	BR	
聚对苯二甲酸丙二醇酯	PTT	26546-03-2
聚对苯二甲酸乙二醇酯	PET	25038-59-9
聚对苯乙炔	PPV	26009-24-5
聚多巴胺	PDA	86389-83-5
聚二甲基硅氧烷	PDMS	31900-57-9
聚芳醚酮	PAEK	31694-16-3
聚呋喃二甲酸乙二醇酯	PEF	27598-47-6
聚富马酸丙二醇酯	PPF	27083-66-5
聚己二酸/对苯二甲酸丁二醇酯	PBAT	130479-65-1
聚己内酯	PCL	24980-41-4
聚甲基丙烯酸甲酯	PMMA	9011-14-7
聚间苯二甲酰间苯二胺	PMIA	24938-60-1
聚赖氨酸		25104-18-1
聚磷酸铵		68333-79-9
聚氯乙烯	PVC	9002-86-2
聚醚砜	PESU	
聚萘二甲酸乙二醇酯	PEN	9020-73-9
聚偏氟乙烯	PVDF	24937-79-9
聚羟基丁酸酯	PHB	52352-27-9

聚羟基聚氨酯	PHU	
聚羟基脂肪酸酯	PHA	
聚乳酸	PLA	26023-30-3
聚乳酸-羟基乙酸共聚物	PLGA	34346-01-5
聚噻吩		25233-34-5
聚四氟乙烯	PTFE	9002-84-0
聚四氢呋喃	PTHF	24979-97-3
聚四亚甲基醚二醇	PTMG	25190-06-1
聚酰胺 4	PA4	24938-56-5
聚酰胺 6	PA6	25038-54-4
聚酰胺 11	PA11	25587-80-8
聚酰胺 12	PA12	24937-16-4
聚酰胺 56	PA56	41724-56-5
聚酰胺 66	PA66	32131-17-2
聚酰胺 510	PA510	105063-19-2
聚酰胺 610	PA610	9008-66-6
聚酰胺 612	PA612	24936-74-1
聚酰胺 1010	PA1010	28774-87-0
聚酰胺 1012	PA1012	55426-60-3
聚酰胺酰亚胺	PAI	
聚乙醇酸	PGA	26124-68-5
聚乙二醇	PEG	25322-68-3
聚乙二醇单甲醚丙烯酸酯	mPEG-Ac	32171-39-4
聚乙二醇单甲醚甲基丙烯酸酯	mPEG-MA	26915-72-0
聚乙二醇二丙烯酸酯	PEGDA	26570-48-9
聚乙二醇二甲基丙烯酸酯	PEGDMA	25852-47-5
聚乙交酯	PGA	26202-08-4
聚乙酸乙烯酯	PVAc	9003-20-7
聚乙烯	PE	9002-88-4
聚乙烯醇	PVA	9002-89-5
聚乙烯醇缩丁醛	PVB	915977-69-4
聚乙烯基吡咯烷酮	PVP	9003-39-8
聚乙烯亚胺	PEI	26913-06-4
聚异戊二烯		9003-31-0
卡拉胶		9000-07-1
开环复分解聚合	ROMP	

壳聚糖		9012-76-4
壳聚糖与戊二醛的共聚物		75578-61-9
可逆加成-断裂链转移聚合	RAFT	
赖氨酸		56-87-1
离子导电弹性体	ICE	
锂离子		17341-24-1
锂离子电池	LIBs	
铊盐		18155-21-0
六氟丙烯-偏氟乙烯共聚物	HFP-VDF	9011-17-0
麦芽糊精		9050-36-6
美国	U.S.	
摩擦纳米发电机	TENG	
木质素		9005-53-2
木质素磺酸		8062-15-5
钠离子	Na ⁺	17341-25-2
宁德时代新能源科技股份有限公司	CATL	
偏氟乙烯-三氟乙烯共聚物	P(VDF-TrFE)	28960-88-5
葡萄糖		50-99-7
羟丙基甲基纤维素	HPMC	9004-65-3
羟甲基纤维素		37353-59-6
氢化丁苯橡胶		
氢键有机框架	HOFs	
氢氧根离子		14280-30-9
琼脂糖		9012-36-6
全氟烷氧基烷烃树脂	PFA	
热能储存	TES	
热塑性弹性体	TPEs	
热塑性聚酰胺弹性体	TPAEs	
热塑性聚酯弹性体	TPEEs	
熔融沉积成型	FFF	
乳酸		50-21-5
三氟氯乙烯与偏二氟乙烯的共聚物	CTFE-VDF	9010-75-7
三甲基硅基封端聚二甲基硅氧烷	TMS-PDMS	42557-10-8
三维	3D	
三元乙丙橡胶	EPDM	
十二烷基苯酚聚氧乙烯醚		9014-92-0

十六烷基三甲基溴化铵		57-09-0
数值孔径	NA	
数字光处理	DLP	
双酚A	BPA	25135-51-7
双酚A二缩水甘油醚均聚物	Poly (BADGE)	25085-99-8
双酚A聚砜		25135-51-7
双酚F	BPF	1333-16-0
四维	4D	
羧基丁腈橡胶	XNBR	
羧甲基淀粉钠	CMS-Na	9063-38-1
羧甲基纤维素锂盐	CMC-Li	55962-76-0
羧甲基纤维素醚	CMCether	9000-11-7
羧甲基纤维素钠	CMC-Na	9004-32-4
天津工业大学		
微生物合成聚(3-羟基丁酸酯-共-3-羟基戊酸酯)	微生物来源PHBV	160555-53-3
戊酸酯		10023-74-2
先进工程高分子材料		
纤维素		9004-34-6
纤维素与环氧氯丙烷的共聚物	纤维素-ECH共聚物	37337-21-6
线性低密度聚乙烯	LLDPE	
相变材料	PCM	
心电图	ECG	
压电纳米发电机	PENG	
压敏胶	PSA	
氧化亚铁		1345-25-1
氧化铟锡	ITO	50926-11-9
液晶弹性体	LCE	
乙基纤维素		9004-57-3
乙烯-1-辛烯共聚物		26221-73-8
乙烯-丙烯共聚物	EPC	9010-79-1
乙烯-醋酸乙烯酯共聚物	EVA	24937-78-8
乙烯-四氟乙烯共聚物	ETFE	25038-71-5
银	Ag	7440-22-4
有机薄膜晶体管	OTFT	
有机发光二极管	OLED	
有机光伏给体超长共轭聚合物 (PBDB-T系列)	PBDB-T	1415929-80-4

原子转移自由基聚合	ATRP	
直接墨水书写	DIW	
中国石油天然气集团有限公司	CNPC	
紫外线	UV	
自然语言处理	NLP	





中石油（上海）新材料研究院有限公司



美国化学文摘社（CAS）

关于中石油（上海）新材料研究院有限公司

中石油（上海）新材料研究院有限公司成立于 2021 年 12 月，位于中国上海临港新片区顶尖科学家社区。新材料院坐拥 7.2 万平方米专业化研发大楼，配备各类科研设备 700 余套，并在江苏南通建有中试基地，具备完善的研发、中试一体化创新平台。新材料院未来将进一步扩建基础设施，打造规模达 1000 人的高水平人才队伍，集聚产业领军专家及高层次人才，聚力打造技术领先、管理先进的世界一流新型研究院。



关于 CAS

美国化学文摘社 (CAS) 是美国化学会分支机构，链接全球科学知识加速科学突破，以实现改善人们生活的愿景。CAS 助力全球创新者在当今复杂的数据环境中高效定位，在创新之旅的每个阶段做出自信的决策。作为科学知识管理专家，CAS 建立了全球权威的人工标引科学数据合集，提供不可或缺的信息解决方案、定制服务和专业资源。不同行业的科学家、专利专业人士和商业领袖信赖 CAS，从而发现机会、降低风险、解锁共享知识，更快地获得灵感实现创新。CAS 是美国化学会分支机构。

联系我们请访问 cas.org

