

高性能高分子材料体系自立自强发展战略研究

夏羽青¹, 王锦艳², 胡桢³, 宋飞⁴, 王润国⁵, 刘小青^{1*}, 蹇锡高², 王玉忠⁴,
张立群^{5,6}, 薛群基¹

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江宁波 315201; 2. 大连理工大学化工学院, 辽宁大连 116081;
3. 哈尔滨工业大学化工与化学学院, 哈尔滨 150006; 4. 四川大学化学学院, 成都 610065;
5. 北京化工大学材料科学与工程学院, 北京 100029; 6. 西安交通大学, 西安 710049)

摘要: 高性能高分子材料具有高强高模、高绝缘、耐腐蚀、耐辐照或绿色低碳等特点, 是保障国家安全和国民经济发展的战略性材料之一, 广泛应用于航空航天、电子电器、生物医疗等重要领域。本文系统梳理了高性能树脂及工程塑料、有机纤维、生物基树脂及可降解材料、特种橡胶及弹性体四大类高性能高分子材料中的重点品种, 分析了国内外重点品种的发展现状和特点。研究发现, 目前我国在高性能高分子材料方面已建立起比较完备的化工原料-合成-加工改性-制品应用上下游产业体系, 但同时也存在关键原料保障不足、产品应用开发有待拓展等问题。在此基础上, 从加强技术创新、推进关键原料保障、组建创新联合体等方面提出对策建议, 以期为我国高性能高分子材料体系发展提供参考。

关键词: 高性能高分子; 高性能树脂及工程塑料; 有机纤维; 特种橡胶及弹性体; 生物基树脂及可降解材料

中图分类号: TB324 文献标识码: A

Independent Development Strategy of High-Performance Polymers

Xia Yuqing¹, Wang Jinyan², Hu Zhen³, Song Fei⁴, Wang Runguo⁵, Liu Xiaoqing^{1*},
Jian Xigao², Wang Yuzhong⁴, Zhang Liqun^{5,6}, Xue Qunji¹

(1. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, Zhejiang, China;
2. School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116081, Liaoning, China; 3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150006, China; 4. College of Chemistry, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 5. College of Materials Science and Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 6. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: High-performance polymers have become a strategic material to ensure national security and national economic development owing to their excellent comprehensive properties. They have been widely applied in important fields such as aerospace, electronics, and medical devices. This study reviews the key varieties of high-performance polymers in four categories: high-performance resins and engineering plastics, organic fibers, bio-based resins and degradable materials, and special rubber and elastomers. The current status and characteristics of key high-performance polymers in China and abroad are analyzed. The study revealed that an industrialization system, including chemical raw material synthesis, modification, and product application, has been

收稿日期: 2024-04-30; 修回日期: 2024-05-31

通讯作者: *刘小青, 中国科学院宁波材料技术与工程研究所研究员, 主要研究方向为高性能高分子材料; E-mail: liuxq@nimte.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“关键材料体系自立自强战略研究”(2022-PP-02)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

established in China. Besides, the current development challenges like the insufficient supply of key raw materials and limited development and application of products are discussed. Accordingly, relevant suggestion for technological innovation, key raw material security, and industrial innovation consortia construction are proposed, paving the way for the development of high-performance polymers in China.

Keywords: high-performance polymers; high-performance resins and engineering plastics; organic fibers; special rubber and elastomers; biobased resins and degradable materials

一、前言

材料是人类赖以生存和发展的物质基础，新材料产业作为战略性新兴产业的重要组成部分，是发展其他各类高新技术产业的物质基础，是抢占科技和经济发展制高点的重要支撑^[1]。高分子材料是新材料中的一大类，在国民经济及国防建设中发挥着重要作用。目前，我国已成为世界高分子材料生产与消费第一大国^[2]。

高性能高分子材料是指具有耐高温、高强高模、高绝缘、耐辐照等优异性能的高分子材料，以及绿色低碳高分子材料；主要包括高性能树脂及工程塑料、有机纤维、生物基树脂及可降解材料、特种橡胶及弹性体四大类；普遍具有较高的军事价值与经济价值，广泛应用于国防军工、航空航天、电子电气、石油化工、汽车制造等领域^[3-6]。如聚芳醚（PAE）、聚酰亚胺（PI）等高性能树脂及工程塑料是武器装备性能向超高速、高隐身、高载荷、功能集成跃升的不可或缺的原材料，同时也是商用飞机、车辆、轨道交通、电子电器、核能、石油化工、环保、生物医疗等结构件和功能件的关键原材料。

我国一直非常重视高性能高分子材料技术与产业的发展，从“十五”开始，连续多个五年计划大力支持相关技术及产业发展。《“十四五”原材料工业发展规划》提出，要重点攻克可降解生物材料、光刻胶、仿生合成橡胶等一批高分子关键材料。工业和信息化部牵头发布的《关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见》提出，加快发展高端聚烯烃、高性能橡塑材料、高性能纤维、生物基材料等高分子产品。近年来，国家重点研发计划对“特种高性能工程塑料及其产业化技术研究”“低成本高性能生物基聚酯和聚碳酸酯的制备与产业化”等项目给予了大力支持，有效推动了我国高性能高分子材料的发展。

目前，欧美国家凭借先发优势，在技术和市场

上占据优势地位。我国虽然在高分子材料产业规模方面已居世界第一，但主要以通用品种为主，电子、医疗及航空航天领域用高端品种仍大量从国外进口；除生物基高分子材料方面与国外基本处于同一发展水平之外，大部分类别的高分子材料仍缺乏原创技术支撑，部分关键设备尚不能完全自立；总体上尚未形成完善的材料体系，产品以仿制国外品种为主，总体质量不稳定，且深加工制品牌号少。本文旨在深入贯彻落实国家关于建设科技强国、实现高水平科技自立自强的决策部署，系统梳理目前高性能高分子材料体系中的重点关键品种，对其国内外发展现状和趋势、面临的问题和挑战等进行系统总结分析，提出下一步自立自强的发展建议，希望能够为我国高性能高分子材料体系的建设和发展提供参考。

二、高性能高分子材料体系重点品种梳理

高分子材料产品种类繁多，应用广泛。本文主要选择其中具有耐高温、高强高模、高绝缘、耐辐照等优异性能，并且在国防装备和国民经济领域有重大应用需求的高性能高分子材料和绿色低碳的高分子材料：高性能树脂及工程塑料、有机纤维、生物基树脂及可降解材料、特种橡胶及弹性体，同时结合每种材料的技术先进性、应用领域重要性及市场竞争力，选择其中的重点品种进行分析。

本文涉及的高性能树脂及工程塑料主要包括聚芳醚、聚酰亚胺、显示液晶材料、集成电路封装基板用树脂等，具有优异的电绝缘性、力学性能、耐高温性能、耐辐射性能以及耐化学药品性能等，广泛应用于航空航天、舰船、轨道交通、石油化工、生物医疗、机械、电子电气、通信等领域^[7]。

高性能有机纤维通常比普通纤维具有更高的力学性能与热稳定性。主要包括芳纶、超高分子量聚乙烯纤维、聚酰亚胺纤维，以及聚对苯撑苯并二噁唑（PBO）纤维和聚[2,5-二羟基-1,4-苯撑吡啶并二

咪唑] (PIPD) 纤维。

生物基树脂及可降解材料包括三种：① 生物基可生物降解材料，包括聚乳酸 (PLA)、聚羟基烷酸酯 (PHA) 等；② 生物基不可生物降解材料，包括生物基聚烯烃 (bio-PE/PP)、生物基聚对苯二甲酸乙二酯/丙二酯 (bio-PET/PTT)、生物基尼龙 (bio-PA)、聚呋喃二甲酸乙二酯 (PEF)、生物基环氧树脂等；③ 非生物基可生物降解材料，包括聚对苯二甲酸-己二酸丁二酯 (PBAT)、聚丁二酸丁二酯 (PBS)、聚碳酸亚丙酯 (PPC)、聚己内酯 (PCL)、聚乙交酯 (PGA)、聚对二氧环己酮 (PPDO) 等。

特种橡胶也称特种合成橡胶，指不同于通用橡胶材料而具有耐高/低温、耐老化、抗烧蚀、耐化学介质等特殊性能，能在苛刻条件使用的合成橡胶材料。特种合成橡胶主要包括以下几类：氟橡胶、硅橡胶、聚硫橡胶、聚氨酯橡胶、氢化丁腈橡胶、聚磷腈橡胶、丙烯酸酯橡胶等。具体分类及应用需求见表 1。

三、国外高性能高分子材料的发展现状

总体来看，目前欧美国家在高性能高分子领域处于优势地位，掌握更多原创技术并占据垄断地位。另外，欧美公司普遍重视全球化市场和专利布局，善于利用自身资源优势布局发展相关产业，构

建起完善的产业链和供应链。当前，绿色环保和循环回收技术受到越来越多的关注，世界各国近年来也相继发布了多项政策以支持高分子材料可持续发展^[8,9]。这也是高性能高分子材料未来发展的重要趋势之一。

(一) 高性能树脂及工程塑料

一直以来，西方发达国家不断扩展聚芳醚、聚酰亚胺等高端高性能树脂及工程塑料的应用领域，如聚醚醚酮 (PEEK) 具有优异的耐高温、耐腐蚀、耐磨损等性能，在航空航天、生物医疗、机器人等领域应用广阔。美国波音公司的 B757 民航客机采用玻璃纤维与 PEEK 复合，以注射成型的方法制备发动机整流罩，该材料具备抗恶劣条件如高湿度、超声振动、高流速等特点，质量比金属制品减轻约 30%，价格降低约 90%^[10]。在植入性医疗器械领域，已陆续开发出脊柱融合器械、膝关节和髋关节置换部件、接骨板和髓内钉、颅颌面、种植体等产品，成为了应用最广泛的生物医用非金属材料。在机器人等新兴领域，由于 PEEK 材料满足高强度、轻量化的要求，也显示出较高的应用潜力。2023 年，特斯拉汽车公司展示了 Optimus-Gen2 人形机器人，因采用了 PEEK 复合材料，在不牺牲性能的情况下减重 10 kg，行走速度加快 30%。

近年来，发达国家竞相开发耐热等级更高、加工性能优异的新型聚芳醚砜、聚芳醚酮等高性能树

表 1 高性能高分子关键材料分类及应用需求

分类	重点品种	国防装备领域重大需求	国民经济领域重大需求
高性能树脂及工程塑料	聚芳醚 (包括聚芳醚酮、聚芳醚砜、聚芳醚腈等)、聚酰亚胺、显示液晶材料、集成电路封装基板用树脂	武器装备性能向超高速、高隐身、高载荷功能集成跃升不可或缺的原材料	民用/商用飞机、车辆、轨道交通、电子电器、核能、石油化工、环保、生物医疗等结构件、功能件的关键原材料
有机纤维	芳纶纤维、超高分子量聚乙烯纤维、聚酰亚胺纤维、PBO 纤维、PIPD 纤维	导弹、军用飞机功能部件和结构部件，舰船、武器装备、核工业等	第五代移动通信 (5G) 网络建设、高端体育器材、航空航天、交通运输、环境保护等领域
生物基树脂及可降解材料	生物基可生物降解材料、生物基不可生物降解材料、非生物基可生物降解材料	—	生物基和生物医用材料研发应用、一次性塑料制品、绿色低碳发展
特种橡胶及弹性体	氟橡胶、高性能硅橡胶、丙烯酸酯橡胶、氢化丁腈橡胶、聚氨酯弹性体、聚磷腈橡胶	主要用于火箭、导弹、航天卫星、宇宙飞船、飞机、极地船舶车辆等运载工具的耐油密封和耐油管路等特种领域	新能源汽车锂电池、传统汽车制造、船舶、石油开采、冶金采矿、医疗器械等

脂。美国的杜邦公司和德国的巴斯夫公司针对 PEEK 进行了相应的技术改进，开发出耐热等级更高的聚醚酮（PEK）和聚醚酮酮（PEKK）产品，但上述高性能树脂均未解决难溶解、难加工、成本高的问题。目前国际上应用面最广的高性能树脂仍然是聚醚醚酮、聚醚砜等，使用温度均在 240 °C 以下，并且当使用温度超过其玻璃化温度后，机械性能将会大幅度下降。

（二）有机纤维

目前，高性能有机纤维领域依然以美国、日本、德国和荷兰为主导。在高性能超高分子量聚乙烯（UHMWPE）纤维方面，荷兰皇家帝斯曼集团是世界上率先形成 UHMWPE 纤维产业化的公司，也一直是 UHMWPE 纤维行业的引领者，其他生产商还包括美国霍尼韦尔国际公司以及日本的东洋纺织株式会社、三井化学株式会社等。在 PBO 纤维方面，1991 年日本东洋纺织株式会社购买了道康宁公司关于 PBO 纤维研究的全部专利，并开始进行独立研发，直到目前，日本东洋纺织株式会社仍然是世界唯一一家可以规模生产 PBO 纤维的公司。

有机纤维中最具代表性的是芳纶纤维，其工业化品种主要为对位芳纶和间位芳纶，具有高强高模、耐高温、阻燃等特性，在航空航天、防护装备、交通运输、环境保护、体育器材等领域具有广泛应用^[11,12]。目前，芳纶的主要生产厂家主要集中在美国、亚洲和欧洲等地区，其中美国杜邦公司和日本帝人公司拥有规格完整的产品系列，占据了全球主要市场^[4]。俄罗斯在技术上另辟蹊径，开发出综合性能更优异的杂环芳纶系列产品，区别于美国杜邦公司的间位芳纶和对位芳纶。

在合成技术方面，以对位芳纶为例，主要有界

面缩聚法和低温溶液缩聚法两种。相比之下，低温溶液缩聚法是目前国内外工艺最成熟的合成芳纶纤维方法，其产品质量更稳定，适合大规模合成，但工艺相对复杂，溶剂浪费较多，且溶剂残留对后续纺丝造成不利影响。因此，需对其合成工艺进一步优化，提高分子量、减小分子量分布宽度；对纺丝工艺进行优化，进一步提升成品率，降低成本，提高竞争力。近年来，帝人公司与 BioBTX、Syncom 公司一起，率先使用生物质原料试制高性能对位芳纶，可减少生产过程中的碳足迹^[13]。

（三）生物基树脂及可降解材料

2021 年，亚太地区（含中国、日本、韩国等）在生物基树脂及可降解材料领域的市场份额为 49.9%，占据主导地位；北美（含美国、加拿大、墨西哥）占据第二位。目前，PLA 是全球范围内产业化最成熟、产量最大、应用最广泛的生物基可降解塑料。在 PLA 的合成方面，技术路线主要有两种：一种是由生物发酵制备乳酸单体，再通过乳酸酯化缩聚合成；另一种是通过齐聚-环化解聚制备丙交酯，再经过开环聚合合成。当前，绝大部分 PLA 生产均采用丙交酯开环聚合方法。PLA 合成技术路线如图 1 所示。

美国是全球最早研究 PLA 的国家，目前欧美国家的 NatureWorks、TCP、Synbra、Hycail 等公司已经抢占全球主要的市场份额，美国 Natureworks 公司和荷兰 TCP 公司合计拥有全球 73% 的 PLA 产能。在 PLA 的应用开发方面，1966 年，Kulkarni 等人通过两步法制备了高分子量的 PLA，并研究了 PLA 在体内的降解，发现聚左旋乳酸作为手术缝合线，具有良好的生物相容性和生物可降解性^[14]。目前，美国食品药品监督管理局已批准 PLA 广泛应用于骨科

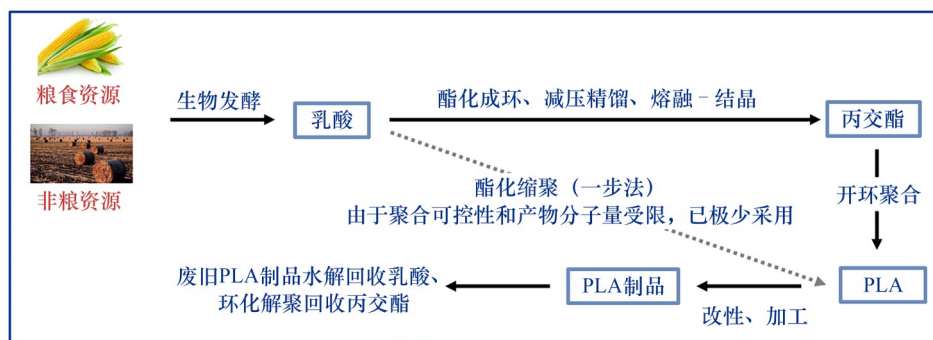


图 1 PLA 合成技术路线

植入物、药物传输等^[5]。美国的PLA改性及加工技术较为成熟，可通过定制生产不同的PLA产品，以满足不同性能实际应用需求。

（四）特种橡胶及弹性体

2023年，亚太地区（含中国、日本、韩国等）在特种橡胶及弹性体领域的市场份额约占全球的46%，占据主导地位。近年来，橡胶领域的专利主要集中在氟橡胶、硅橡胶等技术领域，反映出特种橡胶受到全球行业专家的高度关注。

氟橡胶具有优异的耐化学介质、耐高温、耐老化等特性，俗称“橡胶王”。传统的三元乙丙橡胶、丁基橡胶的极限使用温度只有150℃，而氟橡胶可以在250℃下长时间使用，极限使用温度可达300℃。氟橡胶除了耐高温还具有优异的耐油、耐化学介质、耐酸碱性能，主要用于火箭、导弹、飞机、船舶、汽车等运载工具的耐油密封和耐油管路等特种用途^[6]。国外主要生产厂家主要包括美国杜邦公司、明尼苏达矿业及机器制造公司（3M），意大利苏威集团，日本大金工业株式会社、旭硝子玻璃股份有限公司等。目前，国际上已经形成了一系列多品种的特种橡胶，美国以聚烯烃类氟橡胶、亚硝基类氟橡胶及用过氧化物硫化的高氟含量氟橡胶、耐低温偏氟醚橡胶为主要产品。

在氟橡胶的合成技术方面，各个公司分别采取了不同的交联技术体系。日本信越化学工业株式会社生产的全氟聚醚橡胶采用的是一种铂催化硅氢加成的硫化反应，杜邦公司的产品Perlast使用的是碘硫化体系，而Kalrez产品使用的是含氰基（CN）侧基硫化体系。采用的硫化体系不同，得到的氟橡胶产品具有不同的特性，丰富了氟橡胶面对不同苛刻环境的交联网络结构。近年来，各国在改善氟橡胶性能方面开展了大量研究工作，其中比较常用的方法就是在混炼胶中加入填料以提高硫化胶的各项性能^[7]。

四、我国高性能高分子材料的发展现状

目前，我国在高性能高分子材料方面已建立起比较完备的化工原料—合成—加工改性—制品应用上下游产业体系，自主开发的聚芳醚、聚酰亚胺、芳纶、氟橡胶等成功应用于航空航天、轨道交通、

电子电器、生物医疗等领域，生物基高分子等部分领域与国际处于同一发展水平。

（一）高性能树脂及工程塑料

我国高性能树脂的研发始于20世纪70年代，80年代进行了深入研究和开发，90年代发展较快，取得了突破性进展。目前，我国实现了部分高性能树脂材料由“跟跑”到“并跑”并逐步走向“领跑”的目标，但在高端产品稳定性、系列化和成本等方面依然落后于国际先进水平，尤其在航空航天、新型显示、集成电路、5G通信、人工智能、新能源等领域的产业布局欠缺，相关技术成果转化动力不足。目前，我国的电子级聚酰亚胺薄膜、集成电路封装基板板材均全部依赖进口。

以聚芳醚为例，相关产业已初具规模，部分工业级品种已占据国内近50%的市场份额。1988年，吉林大学在国内率先完成了PEEK的实验室小试和扩试，2002年实现了工业化生产，其后吉林省中研高分子材料股份有限公司、长春吉大特塑工程研究有限公司、浙江鹏孚隆科技股份有限公司和金发科技股份有限公司等也相继实现了规模化生产。近年来，中国科学院长春应用化学研究所首创性地合成了含酚酞结构的可溶性聚芳醚砜（PEESc）和聚芳醚酮（PEEKc），解决了溶解难的问题，但耐热性及化学稳定性有所降低，目前只有小规模的生产。山东凯盛新材料股份有限公司通过自主研发，已实现PEKK产品的工业化生产。大连理工大学开发的含二氮杂萘酮联苯结构的系列高性能树脂具有耐高温、可溶解等优势，解决了传统高性能树脂不能兼具耐高温、可溶解的技术难题，综合性能优异，是目前耐热等级最高的可溶性聚芳醚新品种，目前正在由大连醚太新材料有限公司进行产业化。总体上，我国聚芳醚领域仍存在产业化进程缓慢、市场开拓能力差、产品品种牌号少等问题。

（二）有机纤维

从总体情况看，目前我国芳纶、超高分子量聚乙烯纤维、聚酰亚胺纤维产业已具备一定规模，建立了多个国家及地方研发与技术平台^[8]。但由于质量稳定性差、成本高，高性能品种产能均远远无法满足国家整体需求，亟需自立自强。PBO纤维抗老化、低成本技术亟需突破和攻关；PIPD纤维则亟

需加强前瞻部署。

在芳纶纤维方面，目前我国已孵化出多家纤维制造企业，代表企业为泰和新材料集团股份有限公司，该公司在2004年实现了间位芳纶的产业化生产^[4]。其他生产商还包括中蓝晨光化工研究设计院有限公司、中化国际（控股）股份有限公司、中国石化仪征化纤有限责任公司和中芳特纤股份有限公司等。总体上，国内企业产能相对较小，其中以泰和新材料集团股份有限公司和中化国际（控股）股份有限公司为主，是国内目前仅有的两家产能超过5000 t的企业。

近年来，关于微反应器在聚合物制备中的应用研究成为热点，在调控产物分子量、分子量分布和组成以及优化反应条件等方面展现出巨大潜力。目前，微通道反应器也逐渐开始在芳纶生产中得到应用和推广；未来，芳纶纤维的生产将更加趋于环保、节能、安全、高效。

（三）生物基树脂及可降解材料

我国生物基树脂及可降解材料的品类与产业体系健全，总体生产能力基本能满足国内的需求。PLA、PBAT、PCL等树脂产能高、产品竞争力强，但如丙交酯等关键单体的制备技术与设备仍依赖进口、亟需突破；生物医用可降解材料技术业已成熟、但产业链尚未完全自立；工业堆肥降解与循环利用等末端处理产业发展较为滞后；国内PGA、PPC、PPDO、PEF等新型品种的产业化已处于领先地位，非粮生物基技术已展现良好发展势头，均可进行前瞻部署、自强发展。

在聚乳酸及其制品方面，目前我国已占据国内大部分市场份额且产能增长较快。国内的PLA生产企业以金发科技股份有限公司、上海同杰良生物材料有限公司、浙江海正生物材料股份有限公司、浙江友诚新材料有限公司、安徽丰原集团有限公司等为代表。

在技术研发方面，目前国内许多企业正在大力研发丙交酯生产技术，试图攻破聚乳酸产业技术壁垒，打通“乳酸-丙交酯-聚乳酸”全产业链，增强成本优势。面向未来，PLA的化学回收正处于技术探索阶段，目前国内深圳光华伟业股份有限公司、安徽丰原生物技术股份有限公司、四川大学、青岛科技大学等企业和高校均在攻克相关技术。

（四）特种橡胶及弹性体

目前我国通用特种橡胶已实现产业化，产业规模国际领先，性能与国际相当；但也存在产品同质化严重等问题，中高端牌号供给不足，很多特种高性能产品长期依赖进口；在产品质量、工艺创新和环境友好三个方面仍与国外存在差距，需重点发展，补齐短板。

近年来，随着国内汽车、机械类产品的高速发展所产生的需求，国内氟橡胶的市场容量增长了10倍以上。目前，国内普通氟橡胶生产企业包括中昊晨光化工研究院有限公司、巨化集团有限公司、东岳氟硅科技集团有限公司等。随着技术升级和新兴行业发展，国内外技术差距缩小，国内纷纷扩大产能。目前，我国已实现通用氟橡胶的稳定供应，产业规模国际领先，性能与国际相当；已完成羧基亚硝基氟橡胶国产化研制和应用，开发系列牌号，材料性能达到国际先进水平。

经过多年发展，我国基本形成了从单体、生胶聚合、胶料配方到工艺、密封应用的全链条氟橡胶研制体系，大幅度缩短了与国外的差距，目前仍存在的问题及未来发展方向主要是：耐低温型氟醚橡胶单体低成本制造技术、氟醚生胶固液分离和洗涤技术、生胶分子化学结构表征技术。

五、我国高性能高分子材料发展面临的问题和挑战

（一）产业结构尚需调整，高端品种供给不足

总体上，我国高分子材料产业存在通用低端材料供应过剩、高端材料供给不足的问题，尤其是电子电气、生物医疗及航空航天领域用高端品种仍大量从国外进口，在产品质量稳定性、高纯单体合成、循环回收技术等方面与国外相比仍存在一定差距。如在聚芳醚树脂方面，我国已有多家企业生产PEEK、PEKK、PES等，工业级产品能满足我国市场需求，但医用产品，如血液透析膜专用PES和骨植入PEEK等材料依然依赖进口。总体上，仿制国外品种产品总体质量不稳定，自主创新产品规模不足，深加工制品牌号少。

（二）技术支撑仍需加强，产品应用开发有待拓展

我国高分子材料部分领域技术支撑能力不足，

缺少系列化产品开发和产品应用技术开发，重大装备研制投入不足^[2]。在芳纶纤维方面，我国对位芳纶产业化水平与国外先进水平仍有较大差距，在产品质量及应用等方面尚待提升^[18]。在聚乳酸方面，目前还存在丙交酯合成及纯化技术与设备尚不能完全自立、PLA 循环回收产业布局缺失等问题。在氟橡胶方面，目前全氟醚橡胶还完全依赖进口，缺少超耐低温氟橡胶；总体上成本高、产能低，产品质量不稳定，缺乏先进的后处理设备等等。

（三）原始创新投入不足，前瞻布局尚需加强

我国高分子材料的开发大多是通过引进技术消化吸收再创新，原创品种较少，整体上缺乏“从 0 到 1”的重大基础理论突破和原创研究，顶层设计有待加强。研发工作往往以产品为依托，必要的科学机理尚未完全揭示清楚，相关学科的基础研究落后于材料研制与应用，理论支撑不足^[4]。部分细分领域比如生物基树脂及可降解材料，虽然目前研发和生产总体上与国外处于同一起跑线，但在一些引领性新兴品种和非粮生物基技术的产业化方面仍需前瞻布局、自强发展，以抢占未来发展新优势。

（四）产研合作效率较低，标准体系建设有待加强

以聚芳醚酮为例，我国的专利申请以高等院校为主，但高校创新成果转化较低，创新成果难以为企业服务。欧美国家则以生产企业及应用单位申请为主，依托企业内部不断的技术创新，逐步形成技术壁垒，在航空航天、医疗等高技术领域形成市场垄断。同时，我国在标准体系建设方面仍有不足。比如在生物基高分子领域，美国、欧洲等拥有较完备的材料标准体系。目前我国已经具备生物基、生物基复合材料基本术语定义，并制定了生物基测试等一系列相关标准，但相比于美国材料实验协会（ASTM）标准，生物降解测试标准尚缺少海水、海沙等自然条件下相关测试方法标准。

（五）循环回收布局不够，绿色发展需重视

目前，绿色可持续发展已成为高分子材料领域的发展主题之一。在“双碳”战略背景下，随着世界各国限塑及禁塑政策的推进，可降解、可回收高分子材料迎来了广阔的市场机遇^[19,20]。2022 年，美国启动了《国家生物技术和生物制造计划》，并计划

投入 20 亿美元来发展美国的生物制造。2018 年，欧盟委员会发布了《欧洲循环经济中的塑料战略》，以推动塑料回收技术。我国目前工业堆肥降解与循环回收等末端处理产业发展较为滞后，相关技术有待推广。

六、我国高性能高分子材料自立自强发展思路

（一）总体思路和目标

总体思路：针对我国目前产业体系、技术体系的问题和不足，重点推进部分核心单体的合成技术、相关纯化工艺与关键装备自主、关键品种低成本化与规模化制造，促进相关材料在电子信息及航空航天等高端领域的应用。面向未来，完善系列品种，建立自立自强的技术和产业体系。

总体目标：到 2030 年，建立相对完整的技术和产业体系，实现高端牌号自给自足，实现自立发展；到 2035 年，实现大部分材料牌号自立自强，初步建成高性能高分子材料强国；到 2050 年，建成自主牌号系列，实现全产业链自主，达到世界领先水平。

（二）重点品种发展思路

1. 高性能树脂及工程塑料

聚芳醚：近期重点攻关仿制品种的产品质量及其稳定性，优先发展我国独创的杂萘联苯型聚芳醚品种，逐步实现耐热等级更高产品的工程化，促进深加工产品形成系列化，拓展应用领域。

显示液晶：创制可柔性大面积加工液晶高分子复合体系，优化现有液晶材料稳定性，提升响应速度；近期重点突破具有棒状结构的含氟侧基液晶材料。

聚酰亚胺薄膜：实现电子级聚酰亚胺薄膜生产设备和工艺国产化，大力发展薄膜制造装备，形成系列化品种。

封装基板及板材用树脂：攻关关键高端树脂，发展高端系列封装基板，近期重点突破介电常数 $\epsilon < 4.0$ 、热膨胀系数（CTE）7~9 的封装基板用关键树脂体系及基板制造，实现进口替代和自主可控。

2. 有机纤维

芳纶纤维：攻克高质量单体低成本合成技术，突破高分子量芳纶聚合物的合成控制技术，解决“三废”回收技术问题，实现芳纶纤维的低成本化与规模化。

超高分子量聚乙烯纤维：开发低缠结合成技术，开发固态拉伸纺丝技术，提升数字化、绿色化水平；近期重点完成非均相催化剂体系设计与制备，突破低缠结合成技术。

聚酰亚胺纤维：优化聚酰亚胺纤维制备工艺，形成系列品种，促进高新技术聚酰亚胺纤维产业化。近期重点实现关键材料、关键技术和工艺设计国产化，纤维产品性能和产能达到美国通用电气公司、奥地利Enovic公司水平。

PIPD纤维：解决高纯度单体制备难题，突破高黏度液晶聚合技术，实现聚合物稳定连续制备；加速产品开发及下游应用技术研究。

3. 生物基树脂及可降解材料

PLA：发展非粮生物资源发酵制备乳酸技术、丙交酯高效合成及纯化工艺与设备、废旧PLA化学闭环循环技术。

PPDO：近期重点开展PPDO在生物医用领域的国产化替代；逐步实现PPDO单体合成、开环聚合、材料应用、循环回收的全产业链自强发展。

PEF：开发呋喃二甲酸单体原料的非粮连续化制备技术和羟甲基糠醛的低成本氧化技术；建立呋喃聚酯的高效催化聚合体系，实现全链条技术发展。

bio-PA：基于生物基二元酸或二元胺单体，自主开发生物基脂肪族、半芳香、全芳香族聚酰胺新材料。

4. 特种橡胶及弹性体

氟橡胶：解决核心单体的合成技术，实现单体(CF₃OCF₂OCF=CF₂, MOVE)的批量化生产及-30℃全氟醚橡胶的工程化。

硅橡胶：推进特种有机硅单体制备技术，开展高苯基硅橡胶、氟硅橡胶等的合成和工程化研究。近期重点突破含氟长链单体工程化制备技术，开发具有全氟长链的氟硅橡胶，开发专用助剂与填料，形成系列化产品。

聚磷腈橡胶：攻克三聚体等聚合单体供应问题；优化合成方式和工艺流程，降低成本。

氢化丁腈橡胶：提高催化剂活性，解决加氢工艺的稳定性技术问题，开展溶剂高效回收研究，自主研究干法凝聚工艺。

聚氨酯弹性体：开发低毒无毒原料、低碳环保流程工艺、高耐热及生物医用级聚氨酯弹性体材料。

七、对策建议

(一) 以技术创新引领产业创新

针对高性能高分子领域目前存在的薄弱环节和产业链卡点堵点问题加强攻关，在核心单体规模化低成本制备技术、循环回收技术、高端应用领域产品开发及关键装备自主等方面取得突破，保障源头技术供给，促进关键品种自立。面向未来科技前沿，加强多学科交叉融合，在智能高分子、极端环境高分子、可反复化学循环生物降解高分子、人工智能辅助单体分子结构设计等方向布局一批前瞻技术研究，抢占新一轮科技制高点。推动一批具有自主知识产权的原创品种在国际上形成新优势，为我国高性能高分子行业新质生产力发展提供源动力。

(二) 推进关键原料保障和高端牌号供给

核心单体是制备高性能高分子材料的关键原料，建议通过设立若干攻关专项，突破核心单体的合成技术，同时降低副产物和废弃物生成量，实现低成本、规模化生产应用，打破国外垄断。鼓励各地化工园区设立化工中试基地，推动相关技术实现工程化、产业化。大力支持化工中试等相关平台建设，推动核心单体关键原料和部分国家亟需的小批量高端牌号高分子原材料自立自强，解决长期以来的卡点、堵点问题。

(三) 组建产业创新联合体

优化研发资源配置，实现设备、人才、技术等资源的共享与整合。建立资源共享机制，降低企业研发成本，提高研发效率和创新能力。强化产业链上下游协同的体系化发展，扭转“只重产品研发保障，不重技术/产业体系建设”的传统发展模式，在研制开发新产品的同时，积极布局研制开发与之相匹配的核心配套材料、关键工艺装备、新应用等成套技术，建立从原材料、新产品研制生产到最终应用的完整技术链和产业链。

(四) 以“双碳”战略引领绿色发展

基于推进高分子材料绿色和低碳发展的目标，以生物基、可循环、易回收、可降解为导向，研发推广性能达标、绿色环保、经济适用的塑料制品及替代产品，培育有利于规范回收和循环利用、减少

塑料污染的新业态新模式。以 PLA 等材料为突破口, 基于其来源于生物质和可堆肥降解的特点, 优化末端回收与循环体系, 使其在一次性塑料制品应用领域率先作为环境友好替代品推广。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: April 30, 2024; **Revised date:** May 31, 2024

Corresponding author: Liu Xiaoqing is a research fellow from Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences. His major research field is high performance polymer materials. E-mail: liuxq@nimte.ac.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on the Self-Reliance and Self-Improvement of Critical Materials System” (2022-PP-02)

参考文献

- [1] 屠海令, 张世荣, 李腾飞. 我国新材料产业发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2016, 18(4): 90–100.
Tu H L, Zhang S R, Li T F. Research on development strategies for China’s advanced materials industry [J]. Strategic Study of CAE, 2016, 18(4): 90–100.
- [2] 曹湘洪. 加快我国高分子材料高端化步伐 [J]. 石油炼制与化工, 2024, 55(1): 1–6.
Cao X H. Accelerate the pace of premiumization for polymer materials in China [J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2024, 55(1): 1–6.
- [3] 鲍锋. 新型杂萘联苯聚芳醚酮树脂的合成与性能研究 [D]. 大连: 大连理工大学 (博士学位论文), 2020.
Bao F. Synthesis and properties of novel poly(aryl ether ketone)s resins containing phthalazinone moieties [D]. Dalian: Dalian University of Technology (Doctoral dissertation), 2020.
- [4] 李仲平, 冯志海, 徐樛华, 等. 我国高性能纤维及其复合材料发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 28–36.
Li Z P, Feng Z H, Xu L H, et al. Development strategies for China’s high-performance fibers and their composites [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 28–36.
- [5] 陈祥宝, 张宝艳, 邢丽英. 先进树脂基复合材料技术发展及应用现状 [J]. 中国材料进展, 2009, 28(6): 2–12.
Chen X B, Zhang B Y, Xing L Y. Application and development of advanced polymer matrix composites [J]. Materials China, 2009, 28(6): 2–12.
- [6] 赵云峰, 孙宏杰, 李仲平. 航天先进树脂基复合材料制造技术及其应用 [J]. 宇航材料工艺, 2016, 46(4): 1–7.
Zhao Y F, Sun H J, Li Z P. Manufacturing technology and its application of aerospace advanced polymer matrix composites [J]. Aerospace Materials & Technology, 2016, 46(4): 1–7.
- [7] 姜佳伟, 张小舟, 李鑫, 等. 含杂环结构聚芳醚酮的合成及应用进展 [J]. 塑料, 2022, 51(2): 89–94, 136.
Jiang J W, Zhang X Z, Li X, et al. Progress in synthesis and application of polyaryletherketone with heterocyclic structure [J]. Plastics, 2022, 51(2): 89–94, 136.
- [8] Wu X Y, Hartmann P, Berne D, et al. Closed-loop recyclability of a biomass-derived epoxy-amine thermoset by methanolysis [J]. Science, 2024, 384(6692): eadj9989.
- [9] Dawn A, Todd A, Gayle B, et al. Strategy for plastics innovation [R]. Washington DC: U.S. Department of Energy, 2023.
- [10] 罗云烽, 姚佳楠. 高性能热塑性复合材料在民用航空领域中的应用 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(16): 93–102.
Luo Y F, Yao J N. Applications of high performance thermoplastic composites in civil aviation [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(16): 93–102.
- [11] 宋吉贤, 江华, 崔志华, 等. 间位芳纶着色技术研究进展 [J]. 现代纺织技术, 2022, 30(2): 9–17.
Song J X, Jiang H, Cui Z H, et al. Research progress of coloring technology for meta-aramid [J]. Advanced Textile Technology, 2022, 30(2): 9–17.
- [12] 周子言, 翟文, 董彬, 等. 抗弹复合材料用高性能有机纤维、树脂及其匹配性研究进展 [J]. 工程塑料应用, 2024, 52(4): 181–187.
Zhou Z Y, Zhai W, Dong B, et al. Research progress in high-performance organic fibers, resins and their compatibility for bulletproof composite materials [J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(4): 181–187.
- [13] 罗益锋. 全球高性能纤维及其复合材料行业新进展 [J]. 纺织导报, 2023 (3): 65–75.
Luo Y F. New developments in the global high-performance fiber & composites industry [J]. China Textile Leader, 2023 (3): 65–75.
- [14] Kulkarni R K, Pani K C, Neuman C, et al. Polyactic acid for surgical implants [J]. National Library of Medicine, 1966, 93(5): 839–843.
- [15] 邢璐, 李博宁, 肖本好, 等. 医用聚乳酸材料性能及加工方法研究进展 [J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(6): 167–174.
Xing L, Li B N, Xiao B H, et al. Progress of properties and processing methods of medical poly (lactic acid) materials [J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(6): 167–174.
- [16] 徐林, 曾本忠, 王超, 等. 我国高性能合成橡胶材料发展现状与展望 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 128–136.
Xu L, Zeng B Z, Wang C, et al. Current status and prospects of high-performance synthetic rubber in China [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 128–136.
- [17] 鲍泳. 氟橡胶的制备方法及其研究进展 [J]. 辽宁化工, 2024, 53 (3): 458–460.
Bao Y. Preparation methods and research progress of fluoroelastomer [J]. Liaoning Chemical Industry, 2024, 53(3): 458–460.
- [18] 曹维宇, 杨学萍, 张藕生. 我国高性能高分子复合材料发展现状与展望 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 112–120.
Cao W Y, Yang X P, Zhang O S. Development and prospect of high performance polymer composites in China [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 112–120.
- [19] 庞烜, 边新超, 陈学思. 中国可降解、可回收高分子材料化学领域发展现状和未来挑战 [J]. 科学观察, 2023, 18(4): 1–4.
Pang X, Bian X C, Chen X S. Degradable and recyclable polymer material [J]. Science Focus, 2023, 18(4): 1–4.
- [20] 张丽平, 杨学萍, 初立秋, 等. 我国高性能合成树脂发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 121–127.
Zhang L P, Yang X P, Chu L Q, et al. Development strategies for high performance synthetic resins in China [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 121–127.