DOI 10.15302/J-SSCAE-2026.07.024

聚酰亚胺材料研究现状与发展展望

翟磊[1]，范琳[1]，赵彤[1]，胡维强[2]，潘玲英[3]，左小彪[3]，陈薇[3]，
吕蔚[4]，张步峰[5]，李军[6]，卿凤翎[2*]

（1. 中国科学院化学研究所，北京 100190；2. 中国科学院上海有机化学研究所，上海 200032；3. 航天材料及工艺研究所，北京 100076；4. 上海市塑料研究所有限公司，上海 201702；5. 株洲时代华鑫新材料技术股份有限公司，湖南株洲 412199；6. 常州强力电子新材料股份有限公司，江苏常州 213011）

摘要：聚酰亚胺是耐极端环境的战略性先进功能材料，在航空、航天、半导体等关键领域发挥着不可替代的作用。近年来，我国聚酰亚胺材料领域发展迅速，对高端产业领域的支撑作用与引领意义日益凸显，但是高端产品仍主要依赖进口，产业链安全面临风险，亟需补短板、铸强项，实现产业自立自强。本文基于战略需求迫切性、产业规模代表性、自主保障必要性等维度，聚焦四类典型的聚酰亚胺材料体系——复合材料基体树脂、模塑与热塑树脂、薄膜材料、光敏材料，系统梳理了国外与国内的发展现状，剖析了当前面临的主要问题与挑战；针对国内结构性矛盾突出、大而不强的局面，从主干材料、高端产品、关键装备三个方面凝练了产业亟需解决的共性问题，并分析了聚酰亚胺材料产业发展趋势，提出产业自立自强的发展建议，以期助力我国聚酰亚胺材料产业高质量发展。

关键词：聚酰亚胺；复合材料基体树脂；模塑与热塑树脂；薄膜；光敏材料

中图分类号：TB332　　**文献标识码：**A

Research Progress and Future Development of Polyimide Materials

Zhai Lei[1], Fan Lin[1], Zhao Tong[1], Hu Weiqiang[2], Pan Lingying[3], Zuo Xiaobiao[3], Chen Wei[3], Lyu Wei[4], Zhang Bufeng[5], Li Jun[6], Qing Fengling[2*]

(1. Institute of Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Shanghai Institute of Organic Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China; 3. Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076, China; 4. Shanghai Plastic Research Institute Co., Ltd., Shanghai 201702, China; 5. Zhuzhou Times Huaxin New Material Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412199, Hunan, China; 6. Changzhou Tronly New Electronic Materials Co., Ltd., Changzhou 213011, Jiangsu, China)

Abstract: Polyimide is a strategically important functional material for extreme-environment applications, playing an irreplaceable role in key fields such as aviation, aerospace, and semiconductors. In recent years, the field of polyimide materials in China has made significant progress, highlighting its supportive and leading significance in the high-end industrial field. However, high-end polyimide products still rely on imports, posing risks to the security of the industrial chain. Therefore, it is urgently necessary to achieve

收稿日期：2026-07-27；**修回日期：**2026-08-24

通讯作者：*卿凤翎，中国科学院上海有机化学研究所研究员，中国科学院院士，主要从事高性能高分子材料、有机氟化学和有机含氟材料研究；E-mail: flq@mail.sioc.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（二期）”(2025-PP-02)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

industrial self-reliance in the polyimide material industry. Considering the urgency of strategic demand, representativeness of industrial scale, and necessity of independent supply assurance, this study focuses on four typical polyimide materials in applications: matrix resins for composites, molding and thermoplastic resins, films, as well as photosensitive materials. Moreover, the study reviews the current development status of polyimide both in China and abroad, and identifies the major challenges currently faced. In response to the prominent structural contradictions and the challenge of being large yet not strong, the study clarifies the common issues that urgently require resolution in the polyimide industry from three aspects: primary materials, high-end products, and key equipment. Furthermore, the study analyzes the development trends and proposes strategic recommendations for achieving industrial self-reliance, aiming to promote the high-quality development of the polyimide material field in China.
Keywords: polyimide; matrix resins for composites; molding and thermoplastic resins; films; photosensitive materials

一、前言

聚酰亚胺是一类含有芳杂环结构的高性能聚合物，在可实现商业化应用的聚合物材料中具有最高的耐温等级，凭借其兼具高耐热、高强韧、高绝缘等综合性能优势，在航空、航天、微电子、通信、显示、能源等领域发挥着不可替代的作用。聚酰亚胺结构可设计性强，产品类型多样，涵盖复合材料基体树脂、模塑与热塑树脂、薄膜、光敏材料、功能浆料、泡沫、纤维等[1-2]。作为极端环境应用关键高性能材料与战略性先进功能材料，聚酰亚胺是世界各国长期重点发展的核心材料，其发展水平已成为衡量国家高性能材料创新能力的重要标志之一，多次被列为国家间相互制衡的“卡脖子”关键材料。在2019年的日韩贸易争端中，日本严禁对韩国出口的三类关键材料之一即为含氟聚酰亚胺，这一限制对韩国显示行业造成了巨大冲击。2023年7月，针对中国的先进半导体发展，日本政府响应美国收紧对华限制的响应，对先进半导体制造所需的23个品类的关键材料和设备追加出口管制，其中就包含聚酰亚胺材料。在国际贸易摩擦升级、国外形势日益严峻的大环境下，实现聚酰亚胺材料体系的自立自强迫在眉睫，对保障我国下游产业链的安全具有重要且深远的意义。

20世纪50年代，美国杜邦公司申请了第一个关于聚酰亚胺材料及应用的专利，于1961年首次实现了聚酰亚胺薄膜的商品化并应用于航空航天领域。20世纪80—90年代，随着电子信息产业的兴起，聚酰亚胺材料的应用得到极大发展，伴随着市场需求快速拓展，美日等企业相继进入聚酰亚胺产业领域并得到快速发展。杜邦公司持续完善聚酰亚胺薄膜（Kapton系列）、模塑（Vespel系列）树脂等产品的技术优势，并不断拓展产品应用；美国国家航空航天局（NASA）围绕耐高温黏接剂、先进复合材料用聚酰亚胺基体树脂开展了大量工业化试验工作；美国通用电气公司、日本三井化学株式会社分别在热塑性聚酰亚胺树脂（Ultem系列、Aurum系列）的分子设计与合成技术方面取代商业化突破；日本宇部兴产株式会社在联苯型聚酰亚胺薄膜（Upilex系列）工业化开发方面取得突破，成型工艺技术与产品应用日益成熟；日本钟渊化学工业株式会社成功开发了高尺寸稳定性、高厚度聚酰亚胺薄膜（Apical系列）；日本东丽株式会社、旭化成株式会社、富士胶片株式会社等聚焦微电子层间绝缘介质及光敏型聚酰亚胺（PSPI）领域深耕多年，为半导体封装制程提供了关键光敏材料方案[3-4]。进入21世纪后，微电子、光电子、轨道交通、清洁能源等新兴产业的迅猛发展，为聚酰亚胺材料研究注入了强劲动力；特别是伴随工艺技术的日臻成熟，聚酰亚胺材料的应用领域从早期以航空航天为代表的高端领域，逐步向民用高技术产业延伸。在多元应用场景的牵引下，聚酰亚胺材料步入以多功能协同为特征的发展阶段，国外公司借助先发优势占据了全球主导地位。

我国的聚酰亚胺研究起步于20世纪60年代，集中在耐高温模塑树脂研发与基体树脂探索，在20世纪90年代形成了航空发动机模塑产品，并在“十一五”末实现了航空发动机冷端部件聚酰亚胺复合材料的应用。自“十三五”以来，以聚酰亚胺树脂、薄膜、功能浆料等为主要构成的我国聚酰亚胺材料产业发展迅速，总产能与市场规模不断提升，目前约占全球规模的三分之一。“十四五”期间，在国家政策的引导和支持下，特别是新兴领域的应用需求牵引，极大带动了国内聚酰亚胺材料产业的快速升级，越来越多的企业、科研机构和高校参与到高端产品的研发与应用。在国防应用领域，虽然长期被国外技术封锁，但在航空航天任务需求牵引下，耐高温聚酰亚胺热固树脂及其复合材料发

展迅速，产品种类、耐温等级、型号应用不断丰富，重点技术及产品不断获得突破。在民用及新兴产业领域，聚酰亚胺高端产品仍依赖进口，根据对重点行业及企业的实际调研，部分核心产品如半导体用PSPI的对外依赖度超过90%，产业链韧性与安全面临潜在风险隐患。特别是国内聚酰亚胺材料在核心技术及高端装备方面，较国外仍有明显差距，关键领域受制于人的局面尚未得到实质性改变。

本文聚焦复合材料基体树脂、模塑与热塑树脂、薄膜材料、光敏材料四类代表性聚酰亚胺材料体系，系统梳理国内外研究进展与产业发展现状，分别从技术体系、产业体系、支撑体系深入分析存在的主要问题与挑战；针对国内聚酰亚胺产业结构性矛盾突出、大而不强的局面，重点从主干材料、高端产品、关键装备三个方面凝练产业亟需解决的共性问题，阐述聚酰亚胺产业领域的未来发展趋势。在此基础上，提出实现聚酰亚胺材料体系自立自强的战略路径与发展建议，旨在推动我国聚酰亚胺材料领域的技术升级与高质量发展，为“十五五”时期实现产业链、供应链安全与自主可控提供支撑。

二、聚酰亚胺材料的分类与特点

本文基于战略需求迫切性、产业规模代表性、关键领域自主保障必要性三个维度，遴选以下四类代表性的聚酰亚胺产品体系进行重点分析：① 复合材料基体树脂，直接服务于航空发动机、航天飞行器等国家战略装备，是高性能聚酰亚胺热固性树脂的主要应用形式，技术门槛高、国产自主化需求迫切；② 模塑与热塑树脂，涵盖模塑与注塑加工的聚酰亚胺特种工程塑料及其功能型材，是半导体、精密机械、航空等领域关键材料，产业规模大、进口替代空间显著；③ 薄膜材料，聚酰亚胺薄膜是集成电路、轨道交通、新能源等领域不可替代的电子材料，全球市场规模持续增长，国内高端产品自主保障能力亟待提升；④ 光敏材料，PSPI作为一种必不可缺的高端光刻胶，是半导体封装、有机发光显示（OLED）等先进制造工艺的核心材料，直接关系新一代信息技术产业安全，战略价值突出且国内发展尚处攻坚阶段。本文基于上述四类聚酰亚胺产品体系，采用如图1所示的综合分析框架，分别对国内外的技术、产业及支撑体系的发展状况进行了分类梳理与剖析。

（一）复合材料基体树脂

复合材料基体树脂是指含有反应性封端基团的芳香性酰亚胺低聚物，经过化学交联反应形成的聚酰亚胺热固性树脂。该类树脂分子主链中的芳香性酰亚胺结构赋予优异的耐热稳定性，与纤维增强体复合制得的耐高温复合材料，成为目前支撑先进航空航天飞行器轻量化设计的关键材料之一，已广泛用于航空发动机外涵道、导弹舱段、天线罩、舵翼等关键部件的制造[5-6]。

聚酰亚胺热固性树脂主要包括单体原位聚合即PMR型树脂和亚胺化型树脂两大类，以下对两类聚酰亚胺热固性树脂进行简要介绍。

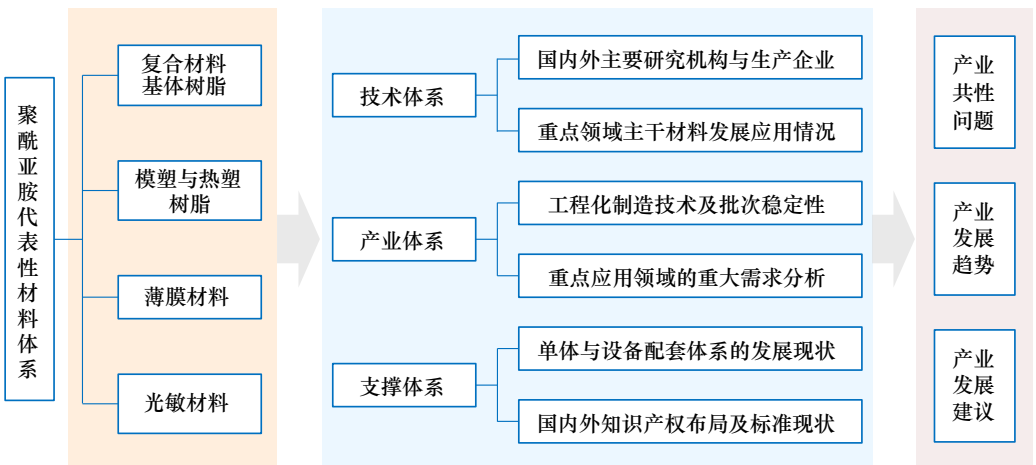

图1　基于四类代表性聚酰亚胺材料的分析框架

1. PMR 型热固性树脂

PMR 型热固性树脂是基于二酐 / 封端剂的酯化衍生物与二胺单体反应得到的低分子量酯胺盐溶液。通过将溶液浸渍纤维得到预浸料，多层预浸料铺叠后经热固化得到相应的复合材料。在复合材料固化过程中，树脂在纤维表面原位亚胺化生成一定分子量的预聚物，再经高温交联反应形成网状结构。该类树脂的特点是采用低沸点溶剂获得高含量低黏度的树脂溶液，与纤维具有良好的浸润性，适于热模压、真空热压罐等复合材料成型工艺[7]。PMR 型树脂按照封端剂种类可分为降冰片烯二甲酸酐（NA）封端、4- 苯基乙炔基邻苯二甲酸酐（PEPA）封端、其他封端类型，前两种封端类型树脂应用较多。NA 封端型树脂的交联温度在 320~350 ℃；PEPA 封端型树脂的交联温度更高，通常在 350~370 ℃，大大拓宽了树脂的加工窗口。与 NA 封端型树脂相比，PEPA 封端的固化交联度更高，且交联产物不含脂肪结构，具有更优异的热氧化稳定性。

2. 亚胺化型热固性树脂

亚胺化型热固性树脂是将二酐、二胺以及封端剂单体在高沸点溶剂中进行缩聚反应，经高温脱水完成亚胺化反应后得到聚酰亚胺低聚物，主要为 PEPA 封端的树脂粉末。该类树脂因已完成亚胺化反应，在复合材料固化过程中只发生端基交联反应，不会释放小分子。基于分子构型不对称异构二酐的亚胺化型树脂，通过进一步控制树脂预聚物的分子量，可获得低熔体黏度和高熔体稳定性的热固性树脂，能够满足复合材料树脂传递模塑（RTM）成型的要求，一定程度上降低了低孔隙率复合材料制件的加工难度[8]。但在热模压应用中，需要将树脂预聚物粉末溶解在溶剂中以制备预浸料，因此该类聚酰亚胺热固性树脂的溶解性与耐热性平衡是技术关键。

航空航天工业对轻质、耐高温结构承载树脂基复合材料的需求一直是聚酰亚胺热固性树脂发展的主要驱动力。目前已形成 260~500 ℃不同耐温等级的复合材料基体树脂体系，按照耐温等级可划分为四个代次，国内外不同代次聚酰亚胺热固性树脂的典型牌号、主要研发单位情况如表 1 所示。

（二）模塑与热塑树脂

与热固性树脂的交联结构不同，聚酰亚胺模塑与热塑树脂是通过灵活分子结构设计将热固性树脂出色的耐热性能和热塑性树脂的熔融加工优势结合在一起，形成基于线性分子结构的特种工程塑料。聚酰亚胺模塑与热塑树脂的分子结构和成型工艺存在较大差异，但两类树脂均有出色的耐热与力学性能，广泛应用于航空、电子等高端装备领域[9]。

表 1　国内外聚酰亚胺热固性树脂典型产品信息

树脂代次		树脂类型	代表性树脂体系牌号与研发单位			
			国外牌号	国外研发单位	国内牌号	国内研发单位
第一代	260~320 ℃	有机体系	PMR-15 LaRC-RP46	美国 NASA	BMP-316 AC721 LP-15 KH-308 KH-320N	中国航空制造技术研究院 中国航发北京航空材料研究院 中国科学院化学研究所
第二代	320~370 ℃	有机体系	PMR-II AFR-700B	美国 NASA	AC732 EC-380A KH-377	中国航空制造技术研究院 中国航发北京航空材料研究院 中国科学院化学研究所
第三代	370~450 ℃	有机体系	DMBZ-15 AFR-PE-4	美国 NASA	KH-400N NPI-550-2	中国科学院化学研究所 中国科学院宁波材料技术与工程研究所
第四代	450~500 ℃	有机无机杂化体系	$P^2SI900HT$	美国 Performance Polymer Solution Inc.（P^2SI）	KH-500S AC741	中国科学院化学研究所 中国航空制造技术研究院

1. 模塑树脂

基于刚性 / 半刚性分子结构设计策略的聚酰亚胺模塑树脂，普遍具有高的耐温等级、强度和模量，适用于高温模压成型工艺。代表性产品有美国杜邦公司的 Vespel 系列、美国氰特公司的 Avimid 系列、德国赢创工业集团的 P84 系列、德国恩欣格公司的 Tecasint 系列等。

聚酰亚胺模塑树脂作为高性能聚合物基体，可与多种功能填料进行共混复合，进而通过模压成型工艺制备出兼具耐高温、高强度、抗蠕变和特定功能特性的模塑制件，赋予材料导电、导热、耐磨、自润滑等性能。近年来，在航空航天、精密机械等领域，采用特种工程塑料替代部分金属材料应用于零部件制造已成为装备轻量化的一项重要策略。聚酰亚胺模塑树脂可在满足强度和耐温要求的前提下，大幅度减少金属材料的使用量[10]。典型应用包括航空航天领域的高温衬套、轴套、垫圈、密封环、紧固件、发动机支架等，半导体与电子制造领域的晶圆夹持器、高温绝缘垫片、连接器、真空吸盘、定位夹具等。

2. 热塑树脂

基于柔性分子结构设计策略的聚酰亚胺热塑树脂具有中等耐温等级、良好熔体流动性、本征阻燃性等性能特点，适用于注射、挤出等成型工艺[11]。代表性产品有美国 NASA 的 LaRc 系列、沙特阿拉伯王国（沙特）基础工业公司（SABIC）的 Ultem 和 Extem 系列（原美国通用电子公司产品）、日本三井化学株式会社的 Aurum 和 Super Aurum 系列、比利时索尔维公司的 Torlon PAI 系列、美国亨斯迈公司的 Matrimid 系列等。

聚酰亚胺热塑树脂可通过共聚、合金化或填充改性获得特定性能的复合树脂产品，如碳纤维增强、聚四氟乙烯改性、导电、抗静电等牌号。据海外市场调研机构 Mordor Intelligence 报道，全球聚酰亚胺工程塑料市场年需求量超过 60 000 t，其中 80%~90% 为热塑树脂，热塑性聚醚酰亚胺（PEI）树脂占比最大。随着第五代 / 六代移动通信（5G/6G）、新能源汽车、光通信等产业的蓬勃发展，聚酰亚胺热塑树脂用量增长强劲，广泛应用于基站天线、射频线缆、印刷电路板、光模块等关键部件。典型应用包括汽车工业的密封件、耐磨轴承 / 衬套、轻量化部件，电子通信领域的集成电路托盘、高温绝缘垫片、光模块连接器，以及医疗器械领域的手术器械、消毒容器及植入式部件等[12-13]。

（三）薄膜材料

聚酰亚胺薄膜是最早实现商业化、技术最成熟、市场用量最大的聚酰亚胺类品种，其中电子级应用占比最大。据第三方调研机构 QY Research 统计，2025 年全球聚酰亚胺薄膜产能与销量分别约为 3.6×10^4 t 和 2.2×10^4 t，中国大陆企业产能和销量约为 1.4×10^4 t 和 9200 t，占比分别为 38.4% 和 41.8%。在高端薄膜产品方面，主要由美国、日本、韩国的企业长期垄断。

根据应用场景划分，聚酰亚胺薄膜可分为电工级、电子级、热控级、光学级、航天级等[14]。电工级薄膜以高绝缘、耐电晕、高耐热、高耐电弧等为主要性能指标，应用于风力发电、轨道交通、航空线缆等领域；电子级薄膜以高挠性、高尺寸稳定性、低介电等为主要性能指标，应用于柔性电路基板、柔性覆晶薄膜（COF）基板、覆盖保护膜材等；热控级薄膜以高面内分子取向、高成碳等为主要性能指标，由其烧制的石墨片具有优异的导热性能，应用于 3C 电子、显示面板、新能源汽车、空间飞行器等；光学级薄膜以高透明、低色度、高强度等为主要性能指标，应用于显示器件的柔性盖板、基板材料等；航天级薄膜以耐辐照性、耐原子氧等为主要性能指标，应用于航空导线、太阳能电池阵列、卫星可展开机构、太阳帆、太空望远镜等领域。

聚酰亚胺薄膜的常规制备，以二酐与二胺单体为原料，经缩聚反应获得聚酰胺酸（PAA）溶液，随后将其流延涂布于钢带上，在高温或化学试剂辅助作用下完成部分亚胺化脱水，再将其从钢带上剥离后进行高温热处理，完成亚胺化反应，同时完成薄膜的拉伸取向与定型，最终制得高性能薄膜产品。由于聚酰亚胺结构配方的差异，不同体系薄膜的亚胺化反应工艺条件亦不尽相同。目前，薄膜工程化制备的成熟工艺主要分为两类：热亚胺化流延工艺（即热法）和化学亚胺化流延工艺（即化学法）。

热法制备工艺相对简单，主要依靠高温加热实现聚酰胺酸的亚胺化反应，无需引入化学助剂。然而，该工艺不可避免会引发高温副反应，同时溶剂过快脱除会导致双向拉伸阶段难以对分子链的取向

排列进行有效调控，二者均会对薄膜的耐热性能及力学性能产生不利影响，因而需要更加精确的工艺控制，以获得高性能薄膜产品。相比之下，化学法制备工艺则更为复杂，需借助外加脱水剂与催化剂，在较低温度下即可完成聚酰胺酸较大程度的亚胺化反应。化学法工艺反应速度快，可有效规避高温引发的副反应，显著提升生产效率；同时，配合适宜的双向拉伸工艺，能够实现分子链取向排列的有效调控，使聚合物结构更加规整、取向度更高，从而获得兼具高力学强度与均匀热尺寸稳定性的薄膜产品[15-16]。需要指出的是，由于化学法中亚胺化反应速度快，对薄膜产线工艺控制及装备技术水平均提出较高要求。热法与化学法两种流延工艺的技术对比见表2。

（四）光敏材料

PSPI是一类重要的高端光刻胶和封装材料，分子结构中同时兼有酰亚胺与光敏功能基团，是集优异耐热、机械、介电和感光等性能于一体的特殊结构聚酰亚胺，在半导体集成电路、新型显示等领域发挥着不可替代的作用[17-18]。PSPI不但有传统聚酰亚胺材料的优良耐热、力学等性能，而且还具有常规光刻胶的光刻功能，无需额外配合光刻胶即可进行刻蚀加工实现图案化，大幅缩减了半导体芯片和器件的加工工序，因而被广泛应用于半导体芯片表面保护与应力缓冲、晶圆级 / 面板级封装再布线、电子元件层间绝缘等光电领域。

表2　聚酰亚胺薄膜的热法与化学法工艺特点对比

制备工艺对比	热法工艺	化学法工艺
树脂聚合方式	反应釜一步完成PAA树脂合成	反应釜多步连续方式完成PAA树脂合成
亚胺化脱水方式	高温脱水，亚胺化率相对较低	催化剂低温脱水与高温辅助脱水，亚胺化率更高
拉伸取向方式	单向或双向拉伸取向结构控制难	双向拉伸取向结构易实现定量控制
溶剂利用方式	可回收利用	部分回收利用或不回收
典型产线幅宽	0.5~1.2 m	1.6~2.1 m
典型运行速度	3~5 m/min	15~20 m/min
产线运行成本	低	高
薄膜品质差异	中等品质薄膜	高品质薄膜

注：PAA表示聚丙烯酸。

根据感光化学机理的不同，PSPI材料可分为正性和负性两大系列。负性PSPI的特点是曝光区发生光或热交联反应导致溶解性能下降，而非曝光区的分子结构没有变化，依然保持良好的溶解性；选用适当的有机溶剂或碱性水溶液作显影液将其溶解除去，可使曝光部分保留下来形成光刻图案。1973年，德国西门子公司的Rubner等将可光照或辐照快速交联的烯丙基酯基团引入到聚酰胺酸结构中，申请了第一件关于负性PSPI的专利（DE 2308830A），该方法也成为后续负性PSPI合成的基础路线之一。

正性PSPI的特点是曝光区的分子结构发生光化学反应而使溶解性增大，在显影时被溶解除去，而非曝光区因不溶于显影液或在显影液中的溶解速度比较慢，因而得以保留下来形成光刻图案。1975年，美国GAF公司申请了首件关于正性PSPI的专利（US 4093461A），曝光后采用碱性溶液显影，获得了良好的光刻图形。与负性PSPI相比，正性PSPI具有诸多应用优势，一直是国内外研发与应用的重点。例如，正性PSPI大都可采用碱性水溶液作为显影剂，不仅环境相容性好，而且避免了负性体系采用的有机溶剂显影液对光刻图案的侵蚀，从而可以获得更高的图形分辨率。

PSPI作为实现芯片互连和功能集成的关键材料，直接影响芯片信号传输效率与封装可靠性，是半导体先进封装再布线制程（RDL）、硅通孔（TSV）工艺的核心材料，同时也是OLED显示器件制造中重要的像素定义层、平坦化层、支撑层关键材料。近年来，半导体、新型显示产业的飞速发展，极大推动了半导体封装用PSPI和显示用PSPI的产品应用，国内外企业和科研机构先后针对晶圆级封装与OLED显示两大应用需求开展PSPI系列产品开发。根据PSPI固化交联温度的高低，可进一步细分为高温固化PSPI（≥300 ℃）和低温固化PSPI（≤250 ℃）。低温固化PSPI具有显著的加工优势，无需高温处理，是当前及未来研究的重点，其技术难度也较大。

三、国外聚酰亚胺材料的发展现状

（一）复合材料基体树脂

国外对聚酰亚胺热固性树脂的研究始于20世纪

70 年代，代表性机构与企业包括：美国 NASA、美国空军研究实验室（AFRL）、美国 P²SI 公司、日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）等[19]。

国外第一代聚酰亚胺热固性树脂的产品牌号包括PMR-15、RP-46、PETI-5、PETI-298等。1972年，美国 NASA Lewis 研究中心成功开发了 PMR-15 树脂，解决了热固性树脂溶解性差和工艺性差的难题，具有划时代意义。PMR-15 是第一个广泛使用的耐高温聚酰亚胺基体树脂，树脂固化物的玻璃化转变温度在 360 ℃左右，以其为基础的复合材料可在 316 ℃长期使用。美国于 1989 年提出高速民用飞行器计划（HSTC），并对耐高温基体树脂进行了深入研究，开发了以 PEPA 封端的聚酰亚胺热固性树脂，该类树脂固化物具有其他热固性树脂所不具备的高韧性，代表性牌号为 PETI-5。

国外第二代聚酰亚胺热固性树脂的产品牌号包括 PMR-II、AFR-700B、PETI-330、PETI-375 等。为提高复合材料的使用温度，美国 NASA 和 AFRL 先后开发了多种改进型的 PMR 型聚酰亚胺树脂，如 PMR-II-50、AFR-700B 等，以此树脂为基体的复合材料使用温度提高至 370 ℃左右[20]。美国 NASA 开发了适合 RTM 工艺的 PETI-330 和 PETI-375，这两种树脂的熔体黏度更低，且异构二酐的引入同时提高了树脂的工艺性和固化物的耐温等级。

国外第三代聚酰亚胺热固性树脂的产品牌号包括 AFR-PE-4、DMBZ-15 等。前者是美国 AFRL 开发，适于热压罐成型工艺；后者由美国 NASA 推出，适于热模压和热压罐成型工艺。国外第四代聚酰亚胺热固性树脂的产品牌号是美国 P²SI 公司推出的 P²SI 900HT，其典型特征是在分子结构中引入含硅组分。该类热固性树脂通过高温后处理可获得独特的有机无机杂化结构，大幅提升了树脂的短时耐热与抗热氧化稳定性，由其制备的复合材料在 427~538 ℃下仍具有良好的力学性能。该类树脂的创新性尤为突出，其难点在于突破传统全有机体系的局限，通过有机–无机杂化策略构建全新结构，在材料设计与性能调控方面具有里程碑意义。

（二）模塑与热塑树脂

国外聚酰亚胺模塑与热塑树脂研发发展较为成熟，体系种类丰富、耐温等级涵盖范围广，包括聚酰亚胺、聚醚酰亚胺、聚酰胺–酰亚胺（PAI）等不同产品系列，已形成万吨级市场规模。全球聚酰亚胺模塑与热塑树脂市场绝大部分被国外公司所垄断，美国杜邦公司的 Vespel 系列、沙特 SABIC 公司的 Ultem 系列分别代表了聚酰亚胺模塑与热塑两类树脂的最高水平。国外代表性模塑与热塑树脂产品牌号及研制单位见表 3；受国际形势复杂多变影响，国外产品进口渠道稳定性与交付周期存在较大的不确定性。

在高性能模塑树脂方面，美国杜邦公司的 Vespel 系列是最具代表性的产品，其长期使用温度在 350 ℃以上，需采用高温模压成型或静压–烧结法成型工艺。该系列树脂兼具优异的耐高低温、极

表 3　国外聚酰亚胺模塑与热塑树脂产品信息

研发单位	产品牌号	玻璃化转变温度	结构性能特点
美国杜邦公司	Vespel 系列	>400 ℃	耐热等级高，适于模压或等静压–烧结法成型
美国氰特公司	Avimid N/K	260~360 ℃	含氟二酐系列，主要用于热塑性复合材料基体
德国赢创工业集团	P84NT/P84UHT	>350 ℃	可溶型，适于模压或高温烧结成型
德国恩欣格公司	Tecasint 系列	200~400 ℃	不同耐热等级 / 成型工艺，共混改性种类丰富
美国 NASA	LaRC-IA/IAX-3	227~241 ℃	含醚 / 间位结构系列
	LaRC-8515/SI	234~248 ℃	联苯二酐系列，适于挤出 / 注塑工艺
沙特 SABIC	Ultem 系列	210~280 ℃	热塑非晶型，适于挤出 / 注塑工艺
	Extem 系列	311 ℃	热塑非晶型，耐温等级高，适于挤出 / 注塑工艺
日本三井化学株式会社	Aurum 系列	250 ℃	热塑性 / 结晶型，适于挤出 / 注塑工艺
	Super Aurum	390~400 ℃	热塑结晶型，耐温等级更高，适于注塑工艺
比利时索尔维集团	Torlon 系列	230~275 ℃	属于 PAI，适于注塑 / 挤出工艺
美国亨斯曼公司	Matrimid 5218 / 9725	330 ℃	可溶型，作为增韧剂、热塑性复材树脂基体

佳的耐磨性、优异的抗蠕变性和高温尺寸稳定性，广泛应用于航空航天、汽车、半导体及工业机械等领域。国外对该类树脂的大部分型号产品实施出口管制，对国内供应部分工程塑料型材和制件。

美国氰特公司的Avimid N系列模塑树脂主要用作热塑性复合材料的基体树脂，可通过模压成型制成低孔隙率的部件，以满足严苛的航空航天要求，也可采用真空袋–热压罐工艺进行加工，以灵活满足其他应用需求。德国赢创工业集团的P84系列树脂属于可溶性聚酰亚胺树脂，长期使用温度达260 ℃，可采用模压成型或直接烧结技术加工成半成品和部件，具有出色的化学稳定性、高机械强度及本征阻燃、低摩擦系数、低磨损特性，广泛应用于高温过滤、航空航天、汽车密封、工业摩擦材料及特种防护等领域。

在更易于加工成型的热塑树脂方面，美国NASA在早期面向航空航天应用需求，开发了LaRC-IA/IAX-3、LaRC-8515/SI系列热塑树脂，耐热在227~248 ℃，适用于挤出、注塑成型工艺。自20世纪70年代，原美国通用电气公司开始研发热塑性PEI树脂，推出了代表性的Ultem系列商品化产品，现已归属于沙特SABIC公司。该类树脂玻璃化转变温度在210~280 ℃，适于注塑和挤出成型工艺，其优异加工性能极大推动了该类树脂的应用领域，并逐渐成为用量最大、最具代表性的聚酰亚胺热塑树脂。2023年，SABIC公司开发了适用于单模光纤收发透镜的ULTEM树脂，其较高的近红外透过率、高折射率以及良好的尺寸稳定性，有助于确保与单模光纤的对准。2026年，SABIC公司针对新一代航空结构件的快速开发与轻量化需求，进一步推出了一种经胺基官能化的反应型PEI低聚物（牌号为Ultem SU3102P），该产品可用作各类热固性树脂的高温增韧剂，是唯一添加量可达50wt%的增韧剂解决方案，可显著改善材料刚韧平衡性和耐高温性。

日本三井化学株式会社的Aurum、Super Aurum系列产品不同于其他非晶性聚酰亚胺树脂，是典型的可熔融加工的结晶性热塑树脂。其熔点大于380 ℃，长期使用温度可达250 ℃以上，具有优异的耐热性、耐磨性、自润滑性、尺寸稳定性和耐化学性，适用于注塑、挤出等成型工艺。此外，索尔维公司的Torlon系列树脂是一类含酰胺结构的特种PAI树脂，对设备改进后可注塑或挤出成型，但需要进行长时间的高温后处理，长期使用温度可达260 ℃左右。

（三）薄膜材料

国外聚酰亚胺薄膜主要厂商有美国杜邦公司、韩国PI Advanced Materials公司（简称PIAM，现归属于法国阿科玛公司）、日本钟渊化学工业株式会社、日本宇部兴产株式会社等。除宇部兴产株式会社外，其他三家公司单一产量均在4000 t/a以上。此外，国外从事特种聚酰亚胺薄膜产品研发的企业或机构包括美国NeXolve公司、日本JAXA公司等[21]。

自美国杜邦公司于1961年推出首个商品化且最具代表性的Kapton薄膜产品后，聚酰亚胺薄膜迎来了多个飞速发展时期，并逐步在航空、航天、电工、电气等众多领域获得广泛应用。针对航空导线及电缆绝缘应用需求，美国杜邦公司推出了高绝缘高击穿强度的Oasis系列聚酰亚胺/氟树脂复合薄膜。日本宇部兴产株式会社、钟渊化学工业株式会社分别推出了牌号为Upilex和Apical的商品化薄膜产品。2000年以后，韩国的聚酰亚胺薄膜企业成长迅速，市场占有率与日俱增。与日本和美国公司相比，韩国企业的聚酰亚胺薄膜产品性能和质量尚存在一定差距。韩国PIAM公司于2009年实现了聚酰亚胺薄膜的规模化生产，并于2023年被法国阿科玛公司收购，目前产能约为6000 t/a。

随着光电显示技术的革新与应用需求牵引，国外公司率先推出了光学透明性聚酰亚胺薄膜，日本三菱瓦斯化学公司于2007年率先推出了牌号为Neopulim的无色透明薄膜产品。韩国Kolon公司于2018年推出了牌号为CPI的透明薄膜商品化产品，在可折叠手机等新型显示领域获得规模化应用，也是当前最主要的透明聚酰亚胺薄膜供应商。

在国外企业中，日本宇部兴产株式会社采用热亚胺法工艺生产聚酰亚胺薄膜，但需要借助特殊单体并采用比化学流延法更复杂的设备，生产效率低、成本高，产品只能应用于COF、TAB等特定领域。美国杜邦公司、韩国PIAM公司、日本钟渊化学工业株式会社均采用先进的化学流延法工艺，并结合双向拉伸工艺来生产高性能聚酰亚胺薄膜。该类产品占据了全球市场的主要份额，目

前幅宽已经达到2100 mm，车速可达20 m/min，具备更高的生产效率和产品一致性。

（四）光敏材料

国外对PSPI材料的开发已有四十多年的历史，全球市场份额绝大多数由国外公司垄断，代表性企业包括：日本东丽株式会社、旭化成株式会社、富士胶片株式会社、日产化学株式会社、JSR株式会社、信越化学工业株式会社、住友电木株式会社等，以及美国和日本合资的HD Microsystems、韩国的LG化学等。对国内外企业申请人自2011年以来在中国大陆申请的PSPI专利数量进行统计发现，日本企业的专利申请总量占国外在华PSPI专利申请量的1/3左右，显示出绝对优势。据日本富士Chimera预测，2025年全球PSPI产品销售量约为2700 t，销售金额约为7.7亿美元，美国和日本公司垄断了全球90%份额。

20世纪80年代以来，随着应用需求的不断升级，PSPI材料在产品种类、分辨率、固化温度等方面发生了数次技术迭代[22-23]。如图2所示，PSPI经历了从本征非光敏型、负性光敏型逐渐发展到正性光敏型、低温固化光敏型体系，显影方式从有机溶剂显影发展为碱水溶液显影，光刻分辨率也根据集成电路封装制程的要求从30 μm逐渐发展至10 μm、5 μm及以下。国外开发的很多PSPI产品已在晶圆级、显示面板级封装领域成为普遍采用的标准材料，相关产品对我国实施严格的技术封锁。

近年来，人工智能（AI）需求驱动、先进封装、柔性显示技术的不断发展，对PSPI的需求快速增长，国外公司在高端PSPI产品市场形成绝对技术垄断。针对材料可靠性和工艺兼容性有较高要求的应用场景，推出了高温或低温负性PSPI产品，代表性产品包括东丽株式会社PN系列、日立杜邦公司HD-4100系列、富士胶片株式会社Durimide-7500系列等；针对分辨率或水性显影能力有明确需求的应用场景，开发了高温正性PSPI，代表产品有东丽株式会社PW系列、住友电木株式会社CRC-8300/8800系列等；针对半导体先进封装的低温固化工艺需求，相继推出了低温固化PSPI，代表性产品有东丽株式会社LT系列、旭化成株式会社BL-301、富士胶片株式会社LTC9300、日立杜邦公司HD-8930等。2025年5月，旭化成株式会社发布公告，由于AI应用快速发展导致PSPI需求激增，公司产品供不应求，产能短期内无法完全满足市场需求，因此优先保障台湾积体电路制造股份有限公司等厂商，减少了对其他厂商的供给，引发市场巨震。2025年8月，旭化成株式会社宣布投入约160亿日元进一步扩大PSPI的产能，计划到2030年将现有产能翻一番。

日本东丽株式会社在2025年7—12月相继推出

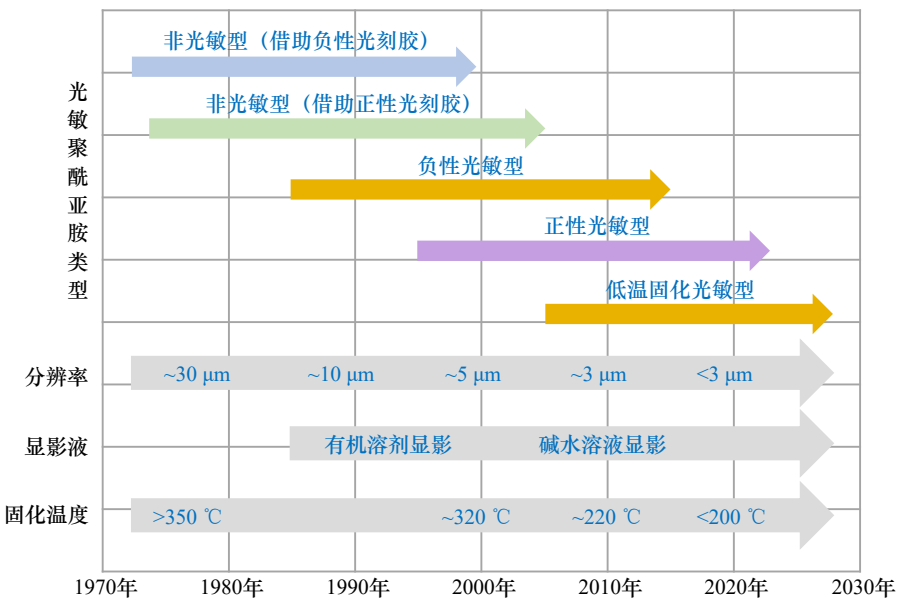

图2 光敏性聚酰亚胺材料技术发展历程示意图

了三款高端PSPI新品，其中包括用于下一代玻璃芯基板的负性光刻胶可定义PSPI薄膜，该薄膜可同时实现重布线层的微加工和玻璃通孔电极树脂填充。2026年5月，旭化成株式会社宣布开发出一种用于先进面板级半导体封装的新型PSPI薄膜，其设计满足绝缘层层数增加的行业趋势，可将层压工艺应用于大尺寸方形面板，大幅提高半导体封装制造的生产效率，未来将应用于半导体封装的重布线层和封装基板的绝缘层。可以看出，国外巨头正加速迭代更高性能PSPI产品，提前布局下一代半导体封装，并展现出强大的材料创新能力与超前发展思维。

四、我国聚酰亚胺材料的发展现状

（一）复合材料基体树脂

我国针对聚酰亚胺热固性树脂的研究始于20世纪70年代末，相关科研机构与企业以任务需求为牵引，经过长期攻关初步解决了树脂的耐热性、加工性与力学性能的平衡难题，先后开发了多种新型功能单体、树脂合成工艺和复合材料成型技术，在单体分子结构设计、低聚物分子量控制、预浸料制备与成型等方面取得了系列成果，研究水平日益提升，应用范围不断拓展。目前，国内聚酰亚胺热固性树脂的技术水平与国外基本持平，有力支撑了我国航空航天等国防战略领域的发展。国内聚酰亚胺热固性树脂及其复合材料研发的优势单位有中国科学院化学研究所、中国科学院宁波材料技术与工程研究所等[24-26]。

国内第一代聚酰亚胺热固性树脂基本采用NA封端，耐温等级相对偏低、韧性中等，适于热模压和热压罐成型工艺。代表性产品牌号包括：中国航空制造技术研究院（原北京航空制造工程研究所）的BMP-316、AC721，中国航发北京航空材料研究院的LP-15，中国科学院化学研究所的KH-304、KH-308、KH-320N等。相关产品大量应用于运载火箭天线罩、航天武器装备舱段、航空发动机外涵机匣等关键部件制造。

第二代聚酰亚胺热固性树脂的产品牌号包括：中国航空制造技术研究院的AC732、AC729RTM，中国航发北京航空材料研究院的EC-380A，中国科学院化学研究所的KH-370等。相关产品已在空天装备的透波件、发动机尾罩等部位获得大量应用。

第三代聚酰亚胺热固性树脂的特点是熔体黏度低，在大厚度制品方面具有独特优势。代表性产品牌号包括：中国科学院化学研究所的KH-400N，中国科学院宁波材料技术与工程研究所的NPI-550-2等。该系列树脂已成功应用于航空发动机冷端部件、武器装备舱段、航天装备透波结构等。

第四代聚酰亚胺热固性树脂与之前全有机结构树脂有显著不同，通过引入有机–无机杂化理念大幅提升了结构与性能的可调空间，但其合成与调控难度陡增。近年来，中国科学院化学研究所、中国航空制造技术研究院在第四代树脂开发方面取得突破，采用有机–无机杂化的分子设计思路，分别开发了牌号为KH-500S、AC741的耐超高温聚酰亚胺树脂，并且前者已成功在航天装备进行了应用验证[27-29]。KH-500S树脂以苯乙炔基苯酐为封端剂，在结构中引入硅氧烷链段，在进一步改善树脂熔体流动性的同时，利用硅氧烷结构在高温区的有机–无机转变，将树脂短时耐温等级提升至500~550 ℃。AC741树脂的分子设计理念与之相似，采用了特种含硼单体，实现了热固性树脂高温氧化稳定性的大幅提升。

国内PMR型聚酰亚胺热固性树脂早期采用的单体结构和工艺路线与国外相仿，近些年开始出现不同技术路径，性能达到了美国同类产品水平[30]。当前国内热固性树脂体系应用主要集中在400 ℃以下的次承载及功能部件，如整流罩、发动机外涵道、透波件等。随着航空航天装备的发展需求，耐450 ℃以上高温的聚酰亚胺树脂及其复合材料开始逐步在承力和透波功能件得到应用。与此同时，航空航天飞行器逐步向高速度、长寿命方向发展，对聚酰亚胺树脂基复合材料提出了长时（>100 h）、耐高温（400 ℃及以上）等极为苛刻的要求[31]。国内外尚未有满足上述长期使用要求的耐高温树脂报道，国内已有的第四代聚酰亚胺热固性树脂虽然可以在450 ℃以上短期使用[32]，但高温长时热氧稳定性亟待进一步提升，尚无相关树脂基复合材料的应用验证。

（二）模塑与热塑树脂

国内针对聚酰亚胺模塑与热塑树脂的研究起步较早，但前期从事树脂研发的研发力量薄弱，同时受限于市场需求有限，该领域在过去较长时期内发

展缓慢。近年来，随着应用场景拓展、市场需求释放等多重利好因素叠加，国内开展聚酰亚胺模塑与热塑树脂研发的机构和企业逐渐增多，品种和生产规模不断扩大，行业逐渐步入快速发展轨道。随着国际形势日益严峻，叠加耐高温、功能化特种树脂需求的激增，高端聚酰亚胺模塑与热塑树脂的自主国产化替代势在必行。国内开展聚酰亚胺模塑与热塑树脂的优势单位包括：上海市塑料研究所有限公司（原上海市合成树脂研究所）、中节能万润股份有限公司等。

目前，国内高耐温等级的聚酰亚胺模塑树脂年产量在百吨级，基本保障了航空发动机批量生产需求，然而更多种类高端树脂尚未实现自主保障[33-34]。上海市塑料研究所开发的YS系列树脂是国内最具代表性的模塑与热塑产品，适于模压或挤出成型工艺，在航空发动机的衬套、轴承轴套、轴承保持架等方面得到广泛应用。其中，YS-10型模塑树脂的分子结构类似于美国杜邦公司的Vespel SP-1，耐热等级在400 ℃以上。长春高琦聚酰亚胺材料有限公司与中国科学院长春应用化学研究所合作，开发了基于氯代苯酐合成聚酰亚胺树脂的合成新工艺，发展了模压级、注塑级纯树脂及功能复合树脂。黄山金石木科技股份有限公司、苏州予信天材新材料应用技术有限公司等也开发了基础型、改性型、复合材料增强 / 增韧型等不同系列树脂产品，主要用于精密轴承、垫圈、密封件、传动件等耐高温零部件，以及作为增韧相制备高性能复合材料。

受益于下游应用领域的持续拓展，聚酰亚胺热塑树脂市场需求旺盛，正驱动该行业步入加速扩张期。目前，国内聚酰亚胺热塑树脂已具备百吨级至千吨级的规模化生产能力，应用边界亦向新能源、光模块等新兴战略领域不断延伸。其中，注塑加工性能尤为突出的PEI类热塑树脂，市场需求明确，正吸引越来越多的企业投身于该类产品的生产与研发，产业化进程显著加速。中节能万润股份有限公司开发了PEI、TPI、PI-5218等系列热塑树脂产品，报道称已建成年产1500 t的PEI树脂生产线，实现稳定量产与销售，其TPI与PI-5218产品亦具备百吨级的年产能。珠海万通特种工程塑料有限公司正加紧布局热塑性聚酰亚胺，其千吨级聚合产线已宣布开车成功，标志着该领域规模化竞争格局初现。与此同时，为提升精细化工产业链韧性和安全水平，工业和信息化部于2025年11月发布“精细化工关键产品创新任务揭榜挂帅”通知，热塑性PEI产品入选任务榜单的重点材料类，其典型应用包括飞机零部件、电路板、连接器、线圈骨架、发动机及变速器零部件、人工关节等。

（三）薄膜材料

我国聚酰亚胺薄膜的自主研发始于20世纪60年代，早期即涵盖了树脂合成、制膜工艺及专用设备的探索研究，并实现了小批量生产。长期以来，薄膜行业虽生产企业众多，但以中小规模为主，产业集中度较低，这一局面直至近十年方得到显著改善。在工艺路线上，国内主流企业长期采用热亚胺法生产线，单线投资规模从数百万元至数千万元不等，但产线自动化水平、控制精度等均与国际先进水平存在较大差距。近年来，随着国内企业大规模引进国外先进生产设备与整条产线，产品品质获得明显提升。尤为重要的是，化学亚胺化法生产技术已逐步实现贯通，并在薄膜产品的幅宽、厚度控制及超薄化方面取得关键技术突破，初步实现了厚度100~200 μm超厚膜及5 μm以下超薄膜的国产化制备，标志着行业整体技术实力迈上新台阶。

国内代表性的聚酰亚胺薄膜企业包括：台湾达迈科技股份有限公司、深圳瑞华泰薄膜科技股份有限公司等。台湾达迈科技股份有限公司于2009年实现了高性能聚酰亚胺薄膜的稳定生产，产品品质处于行业较高水平；公司约80%的产品用于柔性电路板（FPC）行业，约20%的产品用于电子散热领域，2025年全年实现营业总收入5.1亿元。相比之下，大陆薄膜企业量产销售产品主要集中于电工、热控、电子三大应用领域，航空、航天用特种薄膜产品大多仍处于小批量供应阶段，柔性显示用透明薄膜尚未实现稳定商业化量产。

近年来，国内企业相继实现关键技术突破，聚酰亚胺薄膜行业整体竞争力显著提升，头部企业已逐渐步入全球第一梯队，在产能规模与产品性能上与国际巨头的差距显著缩小。从细分领域看，我国电工级绝缘薄膜产品已在轨道交通、航空线缆领域实现进口替代，人工石墨散热膜用薄膜产量居全球首位。然而，在航空航天、集成电路等关键领域所需的高尺寸稳定性电子级薄膜，以及可折叠显示、太空光伏用光学级等高端薄膜产品方面，仍以进口

为主导，国产高端化突破尚需时日[35]。

深圳瑞华泰薄膜科技股份有限公司是国内较早规模化生产聚酰亚胺薄膜的企业之一，主要以热亚胺化双拉工艺为主，包括位于深圳与浙江嘉兴的两大生产基地。截至2025年年底，深圳基地9条产线和嘉兴基地6条聚酰亚胺薄膜产线已全面投产，含2条1600 mm幅宽自主工艺化学法生产线。2025年全年实现营业总收入3.8亿元，公司总设计产能达到2600 t。株洲时代华鑫新材料技术有限公司是国内以化学亚胺化工艺为代表的聚酰亚胺薄膜生产企业，通过引进日本产线设备，于2017年年底建成国内首条化学亚胺化法薄膜生产线。2022年公司进一步提升化学亚胺法宽幅制膜水平，将产品幅宽提升到2100 mm，车速20 m/min以上；2025年营业总收入为5.6亿元，总设计产能超过2300 t。

在聚酰亚胺薄膜核心技术攻关层面，国内已形成覆盖科研机构、高校与企业的研究矩阵，已积累形成丰富的研究成果与技术储备，为后续产业化突破奠定了坚实基础。国内从事高性能聚酰亚胺薄膜研发的科研机构主要有：中国科学院化学研究所、中国科学院宁波材料技术与工程研究所、中山大学等。值得强调的是，以航空航天等国家重大工程需求为牵引，国内科研机构与生产企业、用户单位深度协同，系统开展了特种聚酰亚胺薄膜的研制、中试放大及应用考核研究。相继突破了耐极端环境薄膜的功能结构设计、高可靠性稳定制备等关键技术瓶颈，产品性能满足航空航天等严苛应用场景的要求。在此基础上，已建成小批量连续化制备生产线，部分产品已完成了装机应用验证，实现了从技术突破到工程应用的有效贯通。

（四）光敏材料

我国PSPI材料研究起步偏晚，早期研发力量集中在高校与科研院所，包括河北工业大学、中国科学院长春应用化学研究所等，主要围绕负性与正性PSPI开展基础性探索工作。直到20世纪90年代中后期，国内才在PSPI领域进行专利布局，且专利申请量极为有限，这一态势客观反映了国内PSPI领域应用需求滞后、早期关注度不足的现实[36]。

近年来，在国家产业政策的引导与大力支持下，国内企业持续加大对PSPI等高端光刻胶材料的产业化投入力度，先后建成了高标准的高洁净度光刻胶实验平台、先进的光刻工艺评价验证平台，为自主研发与产业化验证提供了坚实的硬件基础。以中国科学院化学研究所、中国科学院深圳先进技术研究院、上海交通大学为代表的国内科研机构，不断加速PSPI材料的研究与技术转化。特别是国家“十四五”新材料专项将PSPI列为攻关重点，国内企业联合科研机构与高校针对OLED显示级封装与半导体晶圆级封装两大需求开展共同攻关。以湖北鼎龙控股股份有限公司、吉林奥来德光电材料股份有限公司等为代表的国内企业，侧重于显示面板用PSPI产品开发；而以台湾律胜科技股份有限公司、波米科技有限公司、常州强力电子新材料股份有限公司等为代表的国内企业，则侧重于半导体用PSPI产品开发。

由于不同类型PSPI产品的技术难度差异较大，研发进展情况也有明显不同。根据实际行业调研结果，2025年国产PSPI总产能突破2000 t，成本较进口降低30%~50%，在功率器件等领域已实现国产替代。湖北鼎龙控股股份有限公司打破国外对有源矩阵有机发光二极管显示用PSPI的绝对垄断，已建成1000 t/a的量产线，批量供货国内面板厂商。针对半导体封装用PSPI，国内整体处于加速验证与小批量生产阶段，高分辨率、低温固化等高端产品仍处于研发阶段。台湾律胜科技股份有限公司专门为重布线层（RDL）制程设计开发了高性能负性PSPI产品，具有优异的成像解析能力、低热膨胀系数、良好介电特性。此外，国内企业在扇出型晶圆级封装、2.5D/3D封装用低温固化PSPI方面取得较大进展。

目前，我国PSPI高端产品总体仍由国外垄断，国产化率较低，部分核心产品如半导体用PSPI的对外依赖度接近100%。具体而言，国内在高温固化的负性或正性PSPI产品方面进展明显，特别是在显示应用领域的验证推进速度较快。对标国外的HD-4100、PW-1500等系列产品，国产的高温固化PSPI产品已初步实现小批量供货，但仍面临界面兼容性、可靠性及批次稳定性的问题，此类产品有望在五年内达到当前行业采用的国外标准材料水平。相比之下，国内在低温固化的负性或正性PSPI产品开发方面面临更大的技术挑战，此类产品属于当前行业发展主航道，国外技术领先优势明显、产品迭代越来越快。对标国外的BL-301、HD-8930、DL-

1000 等系列产品，国内开发的低温固化 PSPI 产品正处于工艺性验证及小批量供货试用阶段，面临的长期可靠性问题突出，核心产品实现技术突破尚需更长时间。值得关注的是，在碱水显影负性光敏型、永久键合光敏型等特殊功能 PSPI 产品，国内尚处于实验室研发阶段，与国外成熟产品相比仍有较大代际差距。

五、聚酰亚胺材料发展面临的问题与挑战

（一）复合材料基体树脂

国内自主研发的第四代聚酰亚胺热固性树脂及其复合材料较好地满足了航空航天在研在役型号的应用需求，关键单体、复合材料成型技术快速提升，产品种类、耐温等级、型号应用不断丰富。新一代更高耐温等级的有机–无机杂化型树脂，与国外相比处于“并跑”地位，并较国外有特色应用优势。从保障应用需求方面，该领域尚存在以下问题。

（1）聚酰亚胺热固性树脂的长时耐温、高温韧性及工艺性能有待进一步提升，尚未完全满足大尺寸复杂构件、可重复使用等新一代空天装备的应用需求。同时，缺少适于聚酰亚胺热固性树脂基复合材料专用的高温配套材料体系，如高温增韧助剂、高温上浆剂、高温胶黏剂等。

（2）聚酰亚胺热固性树脂批次稳定性有待提升，树脂合成的设备自动化控制精度不够，且缺乏有效的树脂工程化批次稳定性评价方法。亟需深入开展热固性树脂预聚物批量制备工艺与结构性能关系研究，建立树脂分子量指纹表征方法，实现工程化产品的批次稳定性技术突破。

（3）聚酰亚胺热固性树脂成本偏高，对其应用延伸拓展形成了显著制约。关键单体的低成本合成路线与规模化效益问题尚未完全解决，导致树脂及复合材料构件价格居高不下，严重影响了其在新研装备、树脂基复合材料领域的规模化应用，上下游协同推进树脂低成本化已迫在眉睫。

（二）模塑与热塑树脂

当前，国内聚酰亚胺模塑与热塑树脂产业取得了长足进步，但与国际先进水平相比仍存在显著差距。国外产品系列已趋于成熟，生产规模达到万吨级，而国内尚停留在百吨级水平，产品种类有限且多集中于低端应用领域，高端产品仍高度依赖进口。其技术短板突出表现在以下两个方面。

（1）聚酰亚胺模塑与热塑树脂合成工艺和加工设备亟需创新迭代。在合成工艺方面，普遍存在单批次生产规模小、废液量大、成本高昂及自动化设备缺失等问题，亟待发展绿色低廉的模塑树脂溶液合成工艺及快速高效的热塑树脂熔融聚合挤出工艺，以提升产品批次稳定性。在加工装备方面，高温加工设备精度不足、自动化程度偏低，且缺乏适用于高温注塑与模压成型的专用装备，严重制约了成型质量的提升。在产品性能方面，模压级与注塑级树脂种类偏少，粉料粒径与形貌控制、成型工艺与制品性能关系等关键技术亟待突破，产品长期使役性难以保障。

（2）聚酰亚胺模塑与热塑树脂在功能改性及成型加工技术方面存在明显短板，功能树脂品种单一，且推广应用缺乏有效的需求牵引。当前亟需加强复合改性技术攻关，突破高温模压与注塑成型加工关键技术。树脂增强体系涵盖粉体颗粒、短切玻纤及碳纤等类型，国内尚未掌握高模量低收缩等多系列模塑树脂功能复合制备的核心技术。同时，航空航天等高端制造领域对连续纤维增强的热塑性复合材料提出了明确需求，亟待开发适用于预浸料制造及缠绕加热成型工艺的聚酰亚胺热塑树脂。

（三）薄膜材料

聚酰亚胺薄膜的生产水平与产品质量，从根本上取决于树脂、工艺、设备三大核心要素，三者互为支撑、相互制约，任一环节的短板都将制约整体水平的提升。国内聚酰亚胺薄膜产品种类日趋丰富，性能与品质稳步提升。然而，国外对化学法生产工艺技术长期实施封锁，尤其是超大幅宽薄膜生产所需的关键设备对华限售，严重制约了国内产业的自主发展步伐。薄膜行业主要面临以下突出问题。

（1）聚酰亚胺薄膜产业面临高端功能化产品种类匮乏，且迭代缓慢的突出问题。一方面，抗水解电工薄膜、240 级以上耐高温电工薄膜、高频低介电损耗电子级薄膜、高模超低膨胀电子级薄膜、超高导热热控薄膜、耐弯折光学级薄膜等高性能产品亟需开发；另一方面，现有薄膜产品的稳定性与一

致性尚难满足高端应用标准，其深层原因在于薄膜工程化制备的核心技术研究不足，难以支撑新兴产业对高端产品的迫切需求。

（2）化学法工艺技术瓶颈尚未全面突破，薄膜化学亚胺化过程中的关键技术难题亟待解决，尤其需要强化对“材料–工艺–装备”多尺度耦合机理的深入理解。具体而言，化学催化体系仍受限于低温使用条件，室温高活性流延制造技术尚未突破；溶剂脱除环节依赖电加热式热风干燥，能耗高且效率偏低；核心设备如涂布挤出多层模头、高精度大幅宽钢带等仍依赖进口，自主化替代势在必行。

（四）光敏材料

PSPI材料是半导体封装、新型显示等领域不可或缺的关键制程材料，是不可替代的核心绝缘和介电材料。随着AI芯片、柔性折叠显示等前沿技术的高速发展，高端PSPI产品需求被持续拉动，其战略意义日益凸显。在此背景下，当前PSPI材料领域面临的主要问题如下。

（1）日本、美国等国外公司长期从事PSPI技术与产品的开发，至今已积累了丰富的产品研发经验与规模化量产实绩，形成难以逾越的先发优势。在此过程中培育了大量专业技术人才，构建了涵盖研发、量产及售后服务的完整高效体系，同时布局了大量核心专利，形成了严密的知识产权壁垒。相比之下，国内PSPI研发与产业化仍处于起步阶段，在研发经验与量产实绩、人才储备与技术水平、原材料与核心设备配套、专利突破、验证评价资源等关键维度上均明显落后，不仅面临技术门槛，更面临专利侵权风险与市场准入限制。亟需推动PSPI产业链上下游企业与科研单位高效协同，突破国外知识产权封锁，并由终端用户提供关键评价资源与验证应用机会，以体系化协作加速追赶步伐，持续缩小与国外水平的差距。

（2）国内高性能PSPI产品自主开发能力弱，核心瓶颈集中于结构配方设计难度大，主要采取对标国外成熟产品的跟随策略，自主原创性不足；在非全氟烷基及多氟烷基（PFAS）类前沿产品的开发与新技术储备方面，能力明显欠缺。与此同时，国产PSPI产品在实际应用中的稳定性仍有待提升，评价验证体系尚不完善，制约了产品性能的充分验证与优化。而国外领先企业迭代速度快，且采取主动降价策略，进一步压缩国内产品导入空间，阻碍国产化进程。为此，亟需突破关键原材料及配套材料的自主可控与批次稳定性问题，强化上下游协同导入机制，充分利用行业中试验证平台，借助引导性政策支持国产化验证，加速推动替代应用。

（五）产业共性问题

聚酰亚胺材料产业链的基本构成如图3所示，主要包括上游原材料与设备、中游产品制造、下游终端应用。基于上述对复合材料基体树脂、模塑与热塑树脂、薄膜材料、光敏材料四类典型产品体系的技术现状与面临挑战的综合研判，梳理了目前国内聚酰亚胺产业面临的三方面突出共性问题：

1. 聚酰亚胺主干材料面临产品稳定性与低成本化压力，难以支撑装备发展的现实需求

以复合材料基体树脂、模塑树脂为代表的聚酰亚胺主干材料有力支撑了航空航天等重大工程任务应用需求，但面临成本过高、产品工艺性与批次稳定性差的突出挑战，限制了大规模应用。聚酰亚胺材料的高成本受限于用量规模较小，关键原材料成

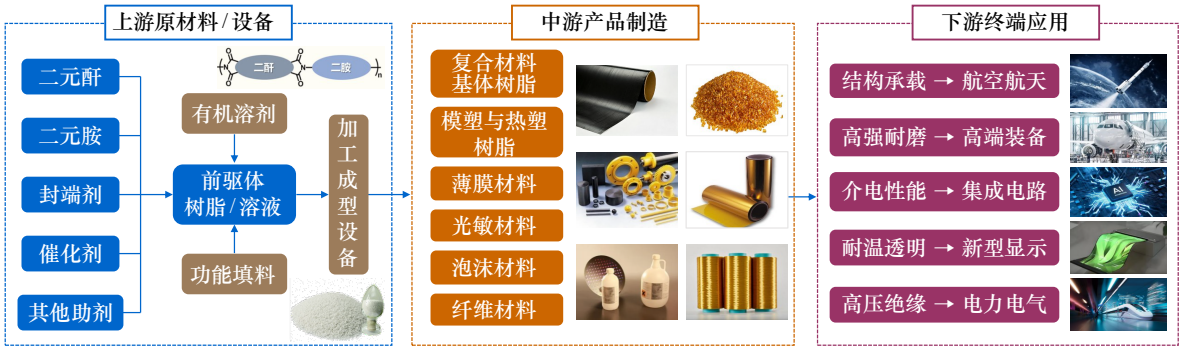

图3　聚酰亚胺材料产业链的基本构成

本高，合成与加工制造工艺复杂，有待实现规模化制备、低成本高效合成、自动化加工等技术突破。在材料性能与工艺稳定性方面，缺少高精度工艺控制技术，尚未建立先进分析技术对全流程的有效管控方法，应用验证评价数据积累不足。

2. 聚酰亚胺高端产品仍受制于人且自主创制能力不足，无法保障产业自主可控发展

聚酰亚胺高端产品在5G/6G高频通信、柔性显示等新兴领域的应用加速拓展，国外巨头依然垄断高端产品市场，掌握原始技术和超过60%的核心专利（以PSPI专利调研结果推断），形成了强大的技术封锁和专利壁垒。国内由于缺乏系统规划，仍以跟随国外已有产品为主，高端产品自主开发能力弱，对聚酰亚胺材料制造与应用中的科学问题与工程关键技术认识不足，难以有效指导具有独立自主知识产权高端产品创制，不利于实现产业自主可控。

3. 聚酰亚胺关键装备依赖进口且设备设计开发与材料成型工艺脱节，严重制约产品迭代升级

关键装备是制约我国聚酰亚胺产业向高端突破的短板瓶颈，国内高端产品所需的核心设备主要依赖国外进口。聚酰亚胺薄膜化学法产线主要从日本引进，热法产线的挤出模头、特种钢带等核心基础部件均未国产化。国内企业通过引进国外设备，实现了产品质量显著提升，但缺乏对“工艺–材料–装备”耦合机理的深度理解，高端产品种类与性能较国外仍有差距。国内设备企业的整机设计与系统集成、自动化控制及机电协同等方面的自主创新能力弱，对温度场、应力场无法精准调控，导致产品批次稳定性与国际顶尖水平存在代差。国产装备与材料研发链条脱节，导致与聚酰亚胺材料反应特性、工艺窗口的适配性不足，难以实现装备与工艺同步迭代。

六、聚酰亚胺材料产业发展趋势

（一）复合材料基体树脂

随着耐高温树脂基复合材料应用的不断拓展，对聚酰亚胺热固性树脂提出了高性能化、低成本化及高可靠性的发展需求。未来新一代可重复使用飞行器、超高音速飞行器对高温结构承载树脂基复合材料提出了极高要求，包括更高耐温等级、更高韧性、更高的长时热氧化稳定性、更优的工艺性能以及更低的成本。为满足国家重大战略装备跨越式发展需求，亟需加快发展兼具宽工艺窗口、耐高温、高韧性的新一代树脂体系，实现短时耐热>600 ℃、长时耐热400~450 ℃性能突破；重点推进关键原材料的规模化生产，优化聚酰亚胺树脂预聚物的合成工艺，着力提升工艺装备的自动化水平，从原材料、装备、工艺等多维度协同发力，实现高性能树脂的工程化稳定制备与成本可控。同时，系统研究单体结构、批量制备工艺参数与树脂性能之间的内在关联，明确聚酰亚胺热固性树脂规模化制备过程中质量控制的关键参量，完善分子结构检测手段与工艺性能评价体系，进而实现树脂批次间性能的稳定可控。

（二）模塑与热塑树脂

新能源汽车、半导体、电气装备、医疗器械等领域对耐高温聚酰亚胺模塑与热塑树脂需求持续增长，同时商业航天、低空经济等新兴领域对树脂功能化提出了更高要求。为此，亟需开发涵盖不同耐温、耐磨等级，具备填料 / 纤维改性功能化特性，且可快速加工成型的系列聚酰亚胺模塑与热塑树脂体系，并创新树脂合成及加工工艺技术，以实现树脂成本的大幅降低。其中，聚酰亚胺模塑树脂需重点探索绿色高效的溶液聚合工艺，突破粉体粒径与形貌控制技术，尤其实现航空航天用耐400 ℃模塑树脂大规模稳定制备的技术突破；针对聚酰亚胺热塑树脂市场潜在需求巨大、功能化定制要求日益提升的现状，亟需丰富产品种类，突破熔体流动性与耐温之间的性能平衡瓶颈，重点攻关熔融聚合挤出技术与高温加工工艺，以满足高温注塑及三维（3D）打印等应用需求。

（三）薄膜材料

国内聚酰亚胺薄膜产业面临突出的结构性矛盾，低端产能严重过剩，高能耗低端产品供应量大、价格低，导致中低端应用领域“内卷”加剧，不仅制约了行业的技术积累与创新投入，也不利于产业向高质量发展转型。为此，亟需通过政策引导与行业自律，优化市场竞争环境，推动低端产能有序退出或升级。与此同时，高频通信、柔性显示、空间光伏、高温储能等新兴应用领域正快速发展，

对薄膜的热学、力学、电学及光学等综合性能提出了更高要求，亟需加快开发系列化、高性能与功能化的聚酰亚胺薄膜产品，以满足差异化应用场景的需求[37]。在技术路线方面，化学法生产工艺因其在薄膜性能提升及生产效率上的优势，将成为未来高性能薄膜的主流制造方向，且薄膜生产正向大幅宽、高线速、低能耗方向持续演进。亟需薄膜生产企业与科研机构深化协同，围绕“材料–工艺–装备”多尺度耦合机理开展系统研究，加速关键制膜设备的国产化进程，提升制膜装备加工精度与运行稳定性，从源头实现薄膜品质的显著提升与批次一致性，支撑高端领域的规模化应用。

（四）光敏材料

PSPI材料凭借其显著提升封装效率、适配多层绝缘结构的优异特性，已在先进半导体封装（如再布线层、钝化层）、柔性电路板、微机电系统（MEMS）、3D集成芯片及显示基板等领域得到广泛应用。随着芯片封装密度持续提升及AI数据中心对更大尺寸介电层材料的需求，PSPI材料的市场空间不断扩展。同时，封装工艺正从晶圆级向面板级演进，布线图案日趋精细、层数持续增加、封装结构立体化程度加深，这对PSPI材料的综合性能提出了更高要求[38-39]。面向未来28 nm及以下半导体制程、2.5D/3D封装、OLED显示及MEMS等领域技术需求，亟需加大新型PSPI结构设计、新型光敏反应及其催化增幅机制的研究，重点发展高分辨率、低温固化、高透明/高遮光、低介电等高端PSPI产品。同时，在全球环保法规日趋严格、欧美地区对含氟物质限制力度加大的背景下，非PFAS类及不使用N-甲基吡咯烷酮溶剂的PSPI产品正成为未来可持续发展的重要方向[40]。

七、聚酰亚胺材料产业发展建议

聚酰亚胺材料对高端产业的支撑与引领作用日益凸显，而国内产业链供应链安全仍面临风险，亟需构建自主可控的产业体系，实现体系层面的自立自强。与此同时，尽管国内聚酰亚胺材料的总产能规模和市场体量庞大，但在全球产业分工中却长期处于中低端位置，结构性矛盾突出，“大而不强”的困局亟待破解。

（一）加大聚酰亚胺主干材料的工程化研制与应用能力建设，需求牵引协同攻关，实现产品高稳定性与低成本化制造

通过国家重大任务需求牵引、企业政策扶持等措施，进一步加大对长时耐高温复合材料基体树脂、高耐温等级模塑与热塑树脂、极端环境特种功能薄膜等聚酰亚胺主干材料的工程化研制支持力度，系统提升产品批次稳定性和规模化制造水平，推动产业实现“稳定量产、高端可控”的根本性跨越。

以材料工程化应用为导向，组织上下游协同攻关，重点突破高效精准合成技术、工艺条件精准管控、性能复杂影响机制等关键难题，着力解决工程化制备稳定性不足与成本偏高的问题。同时，依托国内成熟的精细化工产业基础，推动聚酰亚胺核心原材料及特种单体的规模化、低成本稳定供给，强化新型单体的主动设计与创制能力，从而实现对下游高端树脂产业的引领效应。

构建数据驱动的聚合工艺优化体系，优化加料策略、反应终点判据及分子量窄分布控制方法，强化亚胺化与固化交联过程的精准控制及在线监测能力。同时，发展聚酰亚胺主干材料的工程化稳定制备技术、高精度自动化生产工艺及全周期分析与表征方法，由材料研制与应用单位协同推进考核评价与应用验证；此外，搭建数据与信息共享平台，完善树脂及复合材料应用评价标准体系，为树脂高质量发展提供科学指导。

（二）加强聚酰亚胺高端产品的全链式攻关与国产化验证，抢占技术制高点，助力我国信息产业升级与自主发展

依托国家重点研发计划、科技创新2030重大项目、“揭榜挂帅”等多元化项目组织机制，进一步加大对先进封装与制程用PSPI、集成电路用低介电损耗与低膨胀电子级薄膜、空天极端环境用特种薄膜与树脂等聚酰亚胺高端产品的研发攻关支持力度，并将AI驱动材料开发作为提升高端聚酰亚胺自主创新能力的关键举措。

将重点领域亟需的高端聚酰亚胺产品列为优先攻关目标，创新构建战略需求牵引的全链条攻关实体，实现全产业链贯通与全要素协同整合，破解制约产业升级的深层次问题，并突破国外核心知识产

权与标准壁垒，实现关键技术自主可控。针对新兴产业领域的新增长点，充分利用国家在集成电路、新型显示、新能源等领域已布局建设的应用验证平台，提高对国产材料验证支持力度，打破市场导入壁垒，加速高端产品自主研发与应用。

针对聚酰亚胺树脂、薄膜及PSPI等高端产品，建立涵盖“产品结构–制备工艺–英语性能”关联的综合数据库，发展AI辅助设计与预测技术，并与高通量合成及表征手段深度融合，从而有效缩短研发周期、降低试错成本。重点突破多目标协同优化、小样本学习等核心算法，构建“计算设计–智能筛选–实验验证”的闭环研发范式，加速聚酰亚胺高端产品的迭代创新与工程化应用进程。

（三）加快聚酰亚胺关键装备的自主化研制与迭代速度，应用导向联合攻关，实现国产化装备的高精度可控制造与跨越升级

依托关键装备攻关专项和风险补偿基金，充分发挥“首批次/首台（套）”等政策的引导作用及对企业扶持的叠加效应，加大对聚酰亚胺薄膜与树脂关键装备制造的支持力度，涵盖超薄/超厚薄膜用化学法工艺设备、高端电子级薄膜用超高精度双向拉伸设备、光学级薄膜用高洁净度流延/涂布设备，以及模塑树脂成型用精密控温模压设备、热塑树脂高温熔融反应挤出设备等，全面提升聚酰亚胺材料领域关键装备的自主保障能力。

关键装备短板本质上是高端精密制造能力、基础工业体系与跨学科协同创新机制的综合反映。为此，建议着力加强加工制造装备领域的能力建设，构建涵盖聚酰亚胺“材料–整机–部件–工艺”的产业发展联盟，建立协同攻关机制。同时，遴选具备一定规模实力和丰富经验的企业作为链主单位，整合科研机构、材料企业、核心部件及控制系统企业等力量，立足聚酰亚胺材料反应机理与工艺特性，开展装备的定向设计与开发，实现装备与材料机理、工艺技术的深度融合。此外，依托国家新材料生产应用示范平台，建设聚酰亚胺关键装备中试验证与迭代平台，为高端产品研发提供真实的工艺验证环境。

当前，国产化替代的政策驱动与新兴应用市场的需求牵引形成双重合力，为国内聚酰亚胺产业转型升级提供了重要战略机遇。“十五五”期间应充分利用国家战略需求与庞大应用市场的叠加优势，有组织地开展全链条协同攻关，着力补齐前端（单体、产品、装备）和后端（应用验证、标准制定、知识产权保护）的短板，下大力气加快行业重塑，筑牢我国聚酰亚胺材料新域新质生产力发展根基。

利益冲突声明

本文作者在此声明不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: July 27, 2026; **Revised date:** August 24, 2026

Corresponding author: Qing Fengling is a research fellow from Shanghai Institute of Organic Chemistry, Chinese Academy of Sciences, and a member of Chinese Academy of Sciences. His major research fields include high-performance polymers, organofluorine chemistry and fluorinated materials. E-mail: flq@mail.sioc.ac.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Strategic Research on Self-Reliance and Self-Strengthening of Key Material Systems (Phase II)” (2025-PP-02)

参考文献

[1] 丁孟贤. 聚酰亚胺——化学、结构与性能的关系及材料[M]. 2版. 北京：科学出版社，2012：1-6.
Ding M X. Polyimides：Chemistry，structure-property relationships and materials[M]. 2nd ed. Beijing：Science Press，2012：1-6.

[2] 杨士勇，范琳，冀棉，等. 耐高温聚酰亚胺材料研究进展[J]. 高分子通报，2011，24(10)：70-78.
Yang S Y，Fan L，Ji M，et al. Advances in high temperature polyimide materials[J]. Polymer Bulletin，2011，24(10)：70-78.

[3] Liaw D J，Wang K L，Huang Y C，et al. Advanced polyimide materials：Syntheses，physical properties and applications[J]. Progress in Polymer Science，2012，37(7)：907-974.

[4] Gouzman I，Grossman E，Verker R，et al. Advances in polyimide-based materials for space applications[J]. Advanced Materials，2019，31(18)：1807738.

[5] 杨士勇，范琳，陈建升，等. 高性能聚酰亚胺材料的研究进展[J]. 热固性树脂，2008，23(S1)：32-35.
Yang S Y，Fan L，Chen J S，et al. Research development of polyimide with high performance[J]. Thermosetting Resin，2008，23(S1)：32-35.

[6] 阎敬灵，孟祥胜，王震，等. 热固性聚酰亚胺树脂研究进展[J]. 应用化学，2015，32(5)：489-497.
Yan J L，Meng X S，Wang Z，et al. Progress in thermosetting polyimide resins[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry，2015，32(5)：489-497.

[7] 赵伟栋，王磊，潘玲英，等. 聚酰亚胺复合材料研究进展[J]. 宇航材料工艺，2013，43(4)：14-19.
Zhao W D，Wang L，Pan L Y，et al. Recent advances in polyimides matrix structural composites[J]. Aerospace Materials & Technology，2013，43(4)：14-19.

[8] 王献伟，柯红军，袁航，等. 耐高温可溶性聚酰亚胺树脂及其复合材料[J]. 高等学校化学学报，2021，42(6)：2041-2048.

Wang X W，Ke H J，Yuan H，et al. High temperature resistant and soluble polyimide resins and their composites[J]. Chemical Journal of Chinese Universities，2021，42(6)：2041-2048.

[9] Mittal K L. Polyimides：Synthesis，characterization，and applications（Volume 1）[M]. New York：Springer，1984：117-135.

[10] 王齐华，王廷梅，裴先强. 聚酰亚胺摩擦学[M]. 北京：机械工业出版社，2023：15-21.
Wang Q H，Wang T M，Pei X Q. Polyimide tribology[M]. Beijing：China Machine Press，2023：15-21.

[11] 王凯，高生强，詹茂盛，等. 热塑性聚酰亚胺研究进展[J]. 高分子通报，2005，18(3)：25-32.
Wang K，Gao S Q，Zhan M S，et al. Development of thermoplastic polyimide[J]. Polymer Bulletin，2005，18(3)：25-32.

[12] 段春俭，崔宇，王超，等. 高温条件下热固性聚酰亚胺摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报，2017，37(6)：717-724.
Duan C J，Cui Y，Wang C，et al. High temperature tribological properties of thermosetting polyimide[J]. Tribology，2017，37(6)：717-724.

[13] 段春俭，邵明超，李宋，等. 极端条件下的聚酰亚胺自润滑复合材料的研究进展[J]. 中国科学：化学，2018，48(12)：1561-1567.
Duan C J，Shao M C，Li S，et al. The research progress in polyimide self-lubricating composites under extreme conditions[J]. Scientia Sinica Chimica，2018，48(12)：1561-1567.

[14] Yang S Y. Advanced polyimide materials：Synthesis，characterization，and applications[M]. Amsterdam：Elsevier，2018：20-62.

[15] Ding M X. Isomeric polyimides[J]. Progress in Polymer Science，2007，32(6)：623-668.

[16] 王畅鸥，翟磊，高梦岩，等. 聚酰亚胺薄膜材料的热膨胀行为研究进展[J]. 中国科学：化学，2022，52(3)：437-451.
Wang C O，Zhai L，Gao M Y，et al. Research progress in thermal expansion behavior of polyimide films[J]. Scientia Sinica Chimica，2022，52(3)：437-451.

[17] Ree M，Nunes T L，Chen K R. Structure and properties of a photosensitive polyimide：Effect of photosensitive group[J]. Journal of Polymer Science Part B：Polymer Physics，1995，33(3)：453-465.

[18] Mochizuki A，Ueda M. Recent development in photosensitive polyimide（PSPI）[J]. Journal of Photopolymer Science and Technology，2001，14(5)：677-687.

[19] Hergenrother P M，Connell J W，Smith J G. Phenylethynyl containing imide oligomers[J]. Polymer，2000，41(13)：5073-5081.

[20] Russell J D，Kardos J L. Crosslinking characterization of a polyimide：AFR700B[J]. Polymer Composites，1997，18(5)：595-612.

[21] 任小龙，董占林，张俊丽，等. 国外聚酰亚胺薄膜产品及应用进展[J]. 绝缘材料，2013，46(3)：28-32.
Ren X L，Dong Z L，Zhang J L，et al. Polyimide film product and its application development at abroad[J]. Insulating Materials，2013，46(3)：28-32.

[22] Fu M C，Higashihara T，Ueda M. Recent progress in thermally stable and photosensitive polymers[J]. Polymer Journal，2018，50(1)：57-76.

[23] Sajjad L，Ustad R E，Chavan V D，et al. Recent progress and challenges of photosensitive polyimides in advanced packaging：Technology beyond limit[J]. European Polymer Journal，2025，239：114302.

[24] 陈建升，左红军，范琳，等. 适用于RTM成型聚酰亚胺材料研究进展[J]. 高分子通报，2006，19(12)：29-33，88.
Chen J S，Zuo H J，Fan L，et al. Progress in RTM polyimide matrix resins and composites[J]. Chinese Polymer Bulletin，2006，19(12)：29-33，88.

[25] 包建文，陈祥宝. 发动机用耐高温聚酰亚胺树脂基复合材料的研究进展[J]. 航空材料学报，2012，32(6)：1-13.
Bao J W，Chen X B. Advance in high temperature polyimide resin matrix composites for aeroengine[J]. Journal of Aeronautical Materials，2012，32(6)：1-13.

[26] 王婧，廉一龙，韩秀峰. 航空发动机用聚酰亚胺复合材料研究与应用[J]. 航空制造技术，2017，60(15)：85-91.
Wang J，Lian Y L，Han X F. Research and application of polyimide composites for aeroengine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology，2017，60(15)：85-91.

[27] Wu Y E，Chen G，Feng C，et al. High T_g and thermo-oxidatively stable thermosetting polyimides derived from a carborane-containing diamine[J]. Macromolecular Rapid Communications，2018，39(21)：1800484.

[28] 刘仪，莫松，潘玲英，等. 耐高温有机无机杂化聚酰亚胺树脂及其复合材料[J]. 宇航材料工艺，2018，48(3)：1-5.
Liu Y，Mo S，Pan L Y，et al. Organic-inorganic hybrid polyimides and their composites with high temperature resistance[J]. Aerospace Materials & Technology，2018，48(3)：1-5.

[29] 刘仪，莫松，许晓洲，等. 耐高温有机 / 无机杂化聚酰亚胺基体树脂[J]. 复合材料学报，2023，40(1)：62-71.
Liu Y，Mo S，Xu X Z，et al. Organic/inorganic hybrid polyimide matrix resins with high temperature resistance[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2023，40(1)：62-71.

[30] 吴嘉宁，赵光辉，陈薇，等. RTM成型用聚酰亚胺树脂及其复合材料研究进展[J]. 宇航材料工艺，2023，53(6)：1-8.
Wu J N，Zhao G H，Chen W，et al. Research progress on polyimide resin and their composites for RTM technique[J]. Aerospace Materials & Technology，2023，53(6)：1-8.

[31] 张朋，刘寒松，姚逸伦，等. 聚酰亚胺树脂及其复合材料热氧化稳定性改性进展[J]. 热固性树脂，2023，38(2)：55-67.
Zhang P，Liu H S，Yao Y L，et al. Advance in modification of polyimide resin and its composites on thermo-oxidative stability[J]. Thermosetting Resin，2023，38(2)：55-67.

[32] Hu Z F，Xu X Z，Zhang Y，et al. Pretreatment temperature optimization and mechanical properties improvement：500 ℃ resistant carbon fiber-reinforced polyimide composite material[J]. Polymer Composites，2026，47(S1)：S730-S740.

[33] 杨才冉，徐广锐，吕蔚. 玻纤增强热固性聚酰亚胺复合材料的制备及性能表征[J]. 上海化工，2025，50(3)：11-13.
Yang C R，Xu G R，Lyu W. Preparation and characterization of thermosetting polyimide composites reinforced by glass fibers[J]. Shanghai Chemical Industry，2025，50(3)：11-13.

[34] 张世伟，董源，杨睿，等. 聚酰亚胺工程塑料高温摩擦性能研究进展[J]. 高分子通报，2025，38(6)：868-879.
Zhang S W，Dong Y，Yang R，et al. Research progress on the high-temperature friction properties of polyimide engineering plastics[J]. Polymer Bulletin，2025，38(6)：868-879.

[35] 付继光，张凯，温丽萍，等. 聚酰亚胺薄膜中国专利技术分析[J].

塑料工业，2023，51（1）：1-5，35.
Fu J G，Zhang K，Wen L P，et al. Analysis of polyimide patents applied in China[J]. China Plastics Industry，2023，51（1）：1-5，35.
[36] 杨斐，郭彦，苑伟康，等. 光敏聚酰亚胺中国专利技术分析[J]. 绝缘材料，2024，57（10）：98-105.
Yang F，Guo Y，Yuan W K，et al. Technical analysis of photosensitive polyimide patents applied in China[J]. Insulating Materials，2024，57（10）：98-105.
[37] Zha J W. Functional polyimide dielectrics：Structure，properties，and applications[M]. Berlin：Wiley-VCH，2025：1-8.
[38] Wang L Z，Cao X Y，Jia B，et al. Positive-tone chemically amplified photosensitive polyimides with controllable taper angles[J]. Materials Today Chemistry，2023，31：101613.
[39] Peng Z Y，Ye A，Pu Y B，et al. Low-dielectric and submicron-resolution photosensitive polyimide substrate for large-scale pattern customization and low-signal-loss transmission with nanotesla-scale quantum sensing potential[J]. Advanced Functional Materials，2025，35（49）：e09278.
[40] Choi M，Choi J，Choi S，et al. Fluorine-free，low-dielectric photosensitive polyimides based on methyl methacrylate-functionalized bulky diamines for high-fidelity UV patterning[J]. ACS Applied Polymer Materials，2026，8（2）：1346-1357.