

# “芯-屏-器/气-合”——多功能化聚酰亚胺材料的核心技术突破、性能优化及应用场景探索

胡锦涛, 蔡铭威, 甘一乐, 张 扬, 施海南, 闵永刚

(广东工业大学材料与能源学院, 广州 510006)

**摘要** 聚酰亚胺作为高性能聚合物的关键代表,以其卓越的耐热性、优异的力学性能及突出的介电特性,在集成电路、新能源、航空航天等国家战略新兴领域中扮演着不可替代的角色。然而,面对柔性电子、高效能源转换及“双碳”战略等前沿领域的快速发展,传统聚酰亚胺材料在介电、柔性、功能集成及热管理等方面仍存在显著瓶颈。基于此,本文综合评述了本课题组围绕“芯-屏-器/气-合”5个关键维度所取得的多功能聚酰亚胺的创新研究成果。在“芯”层面,发展了具有超低介电常数与高强度的材料体系,服务于高端芯片封装;在“屏”层面,研制出高透光、耐折曲的柔性薄膜,满足柔性显示需求;在“器/气”层面,一方面拓展了其在能源器件与航空航天热管理中的应用,另一方面通过结构设计显著提升了气体分离性能,服务于“双碳”目标;在“合”层面,通过构建多维导热网络,实现了复合材料热管理能力的突破。本文不仅展示了聚酰亚胺巨大的功能可塑性,也为解决相关科技领域的关键材料挑战提供了重要的理论与技术支撑。

**关键词** 聚酰亚胺; 高频低介电; 薄膜; 气体分离; 热管理

中图分类号 O631; TQ323.7; TB383.2

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20250319

## “IC-Display-Device/Gas separation-Composite”——Breakthroughs in Core Technologies, Performance Optimization, and Application Exploration of Multifunctional Polyimide Materials

HU Jinhong, CAI Mingwei, GAN Yile, ZHANG Yang, SHI Hainan\*, MIN Yonggang\*

(School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract** As a key representative of high-performance polymers, polyimide plays an irreplaceable role in strategic emerging fields such as integrated circuits, new energy, and aerospace, owing to its exceptional thermal resistance, outstanding mechanical properties, and remarkable dielectric characteristics. However, with the rapid development of cutting-edge areas such as flexible electronics, efficient energy conversion, and the “dual-carbon” strategy, traditional polyimide materials still face significant challenges in terms of dielectric properties, flexibility, functional

收稿日期: 2025-10-31. 网络首发日期: 2025-12-10.

联系人简介: 施海南, 男, 硕士, 工程师, 主要从事聚酰亚胺类高分子合成、改性以及氢能燃料电池等方面的研究.

E-mail: 4015081@qq.com

闵永刚, 男, 博士, 教授, 主要从事高性能聚合物材料开发及其在电子信息显示和半导体电子封装技术创新、产品开发、产业发展等方面的研究. E-mail: ygmin@gdut.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(批准号: 2020YFB0408100)、广东省引进创新创业项目(批准号: 2016ZT06C412)、东莞市重点领域研发项目(批准号: 20231200300192)和增城区创业领军团队项目(批准号: 202101005)资助.

Supported by the National Key Research and Development Program of China(No.2020YFB0408100), the Project of Introduces Innovation and Entrepreneurship of Guangdong Province, China(No.2016ZT06C412), the Project of Key Areas of Dongguan City, China(No.20231200300192) and the Zengcheng District Leading Entrepreneurial Team Project, China(No.202101005).

integration, and thermal management. In response, this paper systematically reviews the innovative research achievements in multifunctional polyimides, focusing on five key dimensions: “IC, display, device/gas separation, composite.” Specifically, at the “IC” level, material systems with ultra-low dielectric constants and high strength have been developed for advanced chip packaging. At the “display” level, highly transparent and flexible films with excellent folding endurance have been fabricated to meet the demands of flexible displays. In the “device/gas separation” dimension, applications in energy devices and aerospace thermal management have been expanded, while structural designs have significantly enhanced gas separation performance, contributing to the “dual-carbon” goals. At the “composite” level, breakthroughs in thermal management capabilities of composites have been achieved by constructing multi-dimensional thermal conduction networks. This study not only demonstrates the considerable functional plasticity of polyimides but also provides important theoretical and technical support for addressing key material challenges in related scientific and technological fields.

**Keywords** Polyimide; High frequency with low dielectric constant; Film; Gas separation; Thermal management

聚酰亚胺(Polyimide, PI)作为一类高性能聚合物,因其卓越的耐热性能、优异的力学强度、稳定的化学性质以及突出的介电特性,在高端制造与前沿科技领域中具有不可替代的地位.在2021年发布的《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中,明确提出应着力提升集成电路、新能源、航空航天、低碳环保等关键领域的核心竞争力.在此背景下,高性能聚合物材料的创新已成为推动相关产业自主可控与高质量发展的关键支撑.聚酰亚胺作为其中一类核心材料,广泛渗透于上述战略方向,被誉为“黄金材料”.然而,伴随着新一代信息技术、柔性电子、高效能源转换、“双碳”战略等方向的深入推进,传统聚酰亚胺材料在介电性能、柔韧性、功能集成度、气体分离效率以及热管理能力等方面仍面临显著的技术瓶颈,亟需分子结构设计到系统集成层面实现突破性创新.

基于上述背景,本课题组围绕多功能聚酰亚胺在“芯-屏-器/气-合”5大关键维度的核心问题开展了系统研究,取得了一系列创新成果.在“芯”层面,通过引入含氟及大体积侧基单体、在分子主链中嵌入萘环结构等策略,研制出兼具超低介电常数与高力学强度的聚酰亚胺材料,为高端芯片封装与互连提供了关键的材料支撑<sup>[1-5]</sup>;在“屏”层面,聚焦柔性显示技术需求,通过刚-柔协同的分子结构与表面工程技术,开发出具有高透光率、低热膨胀系数与优异耐折性的聚酰亚胺薄膜<sup>[6-8]</sup>;在“器/气”层面,一方面拓展聚酰亚胺在能源器件中的应用,通过复合结构与增材制造工艺开发出高性能电解质膜<sup>[9-11]</sup>与新型锂电池集流体<sup>[10,12]</sup>,此外,还通过生物基相变复合、焦耳热驱动碳化等技术将聚酰亚胺体系延伸至卷曲光伏、结构吸波、航天热管理等航空航天领域<sup>[13-19]</sup>;另一方面面向“双碳”目标,通过分子结构优化、纳米共混与碳分子筛膜调控,显著提升了CO<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>等关键气体对的分选性能<sup>[20-26]</sup>;在“合”层面,借助多维纳米增强相与三维导热网络的构建,显著提升了聚酰亚胺复合材料的热传导效率,为其规模化应用奠定基础<sup>[27-31]</sup>.

本文综合评述了本课题组在多功能聚酰亚胺领域的核心技术突破,围绕“芯”、“屏”、“器/气”、“合”5个关键维度,深入探索了其性能优化与前沿应用.通过上述5个相互关联的系统研究,不仅彰显了聚酰亚胺材料巨大的功能可塑性与应用潜力,也为应对相关科技领域的材料挑战提供了重要的理论依据与材料解决方案.

## 1 聚酰亚胺的性质与工艺技术

### 1.1 聚酰亚胺的基本性质

PI是一类综合性能优异的功能高分子材料,具备卓越的耐热性、耐低温性、耐辐射性、阻燃性、无毒特性,以及优异的力学性能、尺寸稳定性和化学稳定性.其热分解温度高达500~600 °C,是目前最稳定的聚合物材料之一;同时在-269 °C的深低温环境下,含醚键等柔性单元的聚酰亚胺泡沫、气凝胶以及薄膜等器件仍能保持良好的韧性.其薄膜在5×10<sup>9</sup> rad剂量快电子辐照后强度保持率可达90%,并展

现出本质阻燃特性,发烟率低且在高真空环境下放气量极少,部分聚酰亚胺还具有良好的生物相容性.在力学性能方面,未填充PI的拉伸强度通常超过100 MPa,杨氏模量介于2~3 GPa;其热膨胀系数(CTE)通常在 $2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C} \sim 3 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 之间,联苯型PI可低至 $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,与金属相当.此外,PI通常不溶于普通有机溶剂,化学稳定性良好<sup>[32-36]</sup>.这些卓越的综合性能使其在航空航天、电子电气、通讯及汽车等尖端技术领域获得广泛应用.其性能根源在于分子主链中的芳杂环和酰亚胺基团,该刚性结构赋予了材料优异的热稳定性,这种固有的热稳定性为其作为多功能高性能聚合物的应用奠定了坚实的基础.

## 1.2 聚酰亚胺的合成方法

聚酰亚胺的合成主要分为两类途径:(1)在聚合过程中形成酰亚胺环;(2)直接使用含酰亚胺环的单体进行聚合.前者主要包括二酐-二胺、四元酸-二元胺等反应体系;后者则通过缩聚反应制备聚酰亚胺等多种聚合物.其中,二酐与二胺的反应最为典型,包括一步法、两步法和气相沉积法等工艺<sup>[37,38]</sup>.

一步法在高沸点溶剂中直接合成聚酰亚胺,无需聚酰胺酸(PAA)中间体;通过共沸脱水等方式提高分子量,适用于联苯二酐型聚酰亚胺的制备;但该方法受产物溶解性限制,易导致凝胶化并影响分子量<sup>[39,40]</sup>.

两步法最为简便通用:先在极性溶剂中生成PAA溶液,经加工成型后通过热或化学亚胺化获得聚酰亚胺;虽加工便利,但PAA溶液稳定性差,需通过开发其衍生物进行改进<sup>[41-43]</sup>.

四元酸-二元胺合成聚酰亚胺法<sup>[44]</sup>:先通过四羧酸与二胺在温和条件下进行酰胺化反应,精准调控可溶聚酰胺酸的黏度以适配涂层、纺丝等不同加工场景,再经热/化学亚胺化完成脱水环化.图1为该方法的合成示意图.该体系的核心优势在于四羧酸单体稳定性远优于二酐,且单体选择更丰富,同时反应副产物仅为水、易去除,既适配高纯度电子材料等场景,也能通过温和条件调控适配低温加工需求,兼顾了工艺灵活性与产物适用性<sup>[45]</sup>.

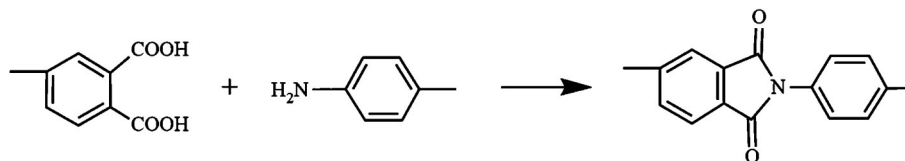


Fig. 1 Method for synthesizing polyimide through the reaction of a dicarboxylic acid diester with a diamine

## 1.3 聚酰亚胺的加工技术

聚酰亚胺的广泛应用需要多样化的加工技术支撑,以满足成膜、纺丝、光刻等精密制造需求.不同结构的PI需匹配相应的加工方法.在薄膜加工领域,主要包括以下几种方法:(1)流延法通过溶液流延实现高熔点PI的成型;(2)沉积法借助气相反应在基体表面聚合形成薄膜;(3)喷涂法通过乳液喷涂与干燥工艺成膜,关键技术在于乳液浓度调控<sup>[46]</sup>;(4)拉伸法通过取向拉伸显著提升薄膜性能<sup>[47]</sup>.

在模压与注塑加工方面:PI的加工性高度依赖于其化学结构.对于热固性PI,通常采用模压成型工艺,将模塑粉或预聚物在高温高压下交联固化,形成不熔不溶的最终制品.而对于热塑性PI(包括可溶型),则可适用注塑与挤塑等高效方法;其工艺原理虽与常规热塑性塑料相似,但因PI熔体黏度高、加工窗口窄,实际生产中需采用更高的加工温度与更精密的设备控制.

在智能制造领域:PI在三维(3D)打印中的应用备受关注,光敏PI和热塑性PI成为研究重点;通过分子设计开发光敏体系,或直接采用商业材料进行熔融沉积打印;然而,PI的强分子间作用力对增材制造构成挑战,需通过分子设计平衡性能与工艺适应性.

## 2 芯:聚酰亚胺芯片基材领域的技术创新与性能优化

### 2.1 光敏聚酰亚胺

光敏性并非聚酰亚胺固有的性质,而是通过在其分子链上引入特定的“光敏基团”来实现的,它集

成了PI优异的物理化学性能和光敏材料特有的图形化能力。这些基团在受到特定波长的光(通常是紫外光)照射后,会发生特定的化学反应,从而引起聚合物在显影剂中溶解度的巨大变化。按照受光部分是发生交联固化还是分解更易溶解,光敏聚酰亚胺(PSPI)可以划分为负性PSPI和正性PSPI,表1为二者的特性对比。

Table 1 Characteristics of negative/positive photoresist polyimide

Characteristic	Negative-tone photosensitive polyimide	Positive-tone photosensitive polyimide
Core mechanism	Photo-induced crosslinking	Photo-induced increase in solubility
Photosensitive groups	Acrylate groups, epoxy groups, vinyl ether, etc.	Diazonaphthoquinone(DNQ) compounds, etc.
Development result	Exposed areas are insoluble and retained	Exposed areas are soluble and removed
Features	Mature process, widely applied, good adhesion, fast photosensitivity, low cost	Higher resolution, good pattern precision
Application scenarios	Advanced packaging, insulating buffer layers	High-density integrated circuits, fine pattern transfer

本课题组<sup>[48]</sup>系统地分析了降低PSPI固化温度以解决扇外型晶圆级封装翘曲问题的技术路径。重点评述了3大低温固化策略。

如图2所示,聚酰胺酸催化体系工艺温度较低但是残留物难清除;聚异酰亚胺体系灵敏度较高却需较高的异构化温度;可溶性聚酰亚胺体系可以实现140 °C低温固化,但是灵敏度较低,这是由于可溶性PI中的接枝大分子的感光灵敏度太低,光致产酸剂掺杂策略可以实现高灵敏度,但是需特定酸性基团结构限制。研究指出了未来需拓宽性能窗口、缩短曝光波长,并认为可溶性聚酰亚胺最具有低温固化的应用潜力。

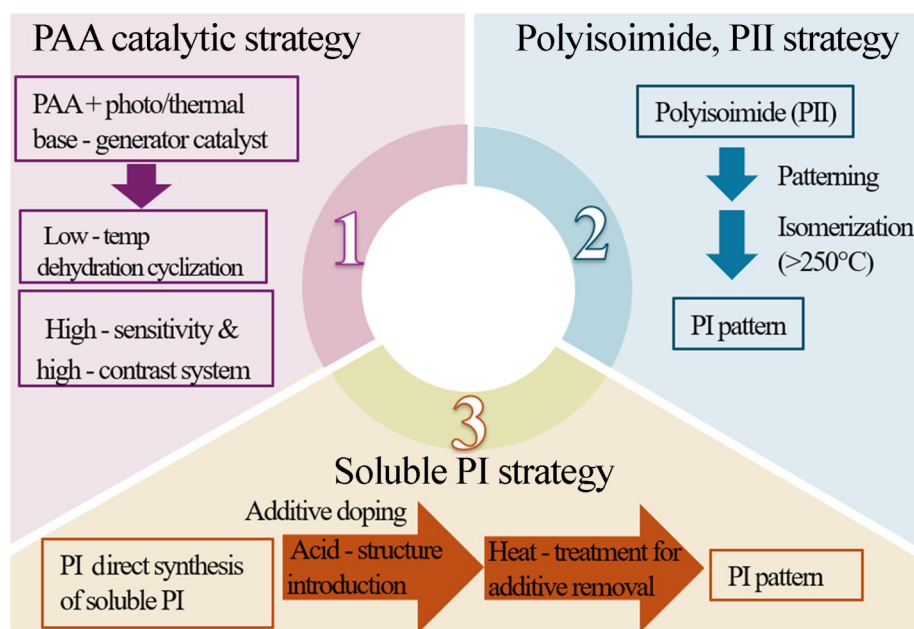


Fig. 2 Three major strategies for low-temperature curing of photosensitive polyimide

2023年,本课题组<sup>[3]</sup>开发了四元嵌段共聚光敏聚酰亚胺的合成方法,如图3所示,通过聚酰胺酸的分步缩聚制备四元嵌段共聚聚酰胺酸(co-PAA),以及共聚聚酰胺酸盐(co-PAS),co-PAS经光交联反应和热亚胺化得到了图案化co-PSPI。该方法显著地提升了其热稳定性,使co-PSPI的玻璃化转变温度达到327.0~358.8 °C,且薄膜5%热失重温度均超495 °C,同时借助精准的合成与光刻工艺,赋予co-PSPI良好的光敏图案化性能,其图案分辨率达到了16~110 μm,实现了热稳定性与光敏图案化性能的协同优化。研究明确了聚合度和亚胺化程度对材料力学性能的关键影响,为光敏聚酰亚胺的结构设计与性能优化提供了新的思路和实验依据。

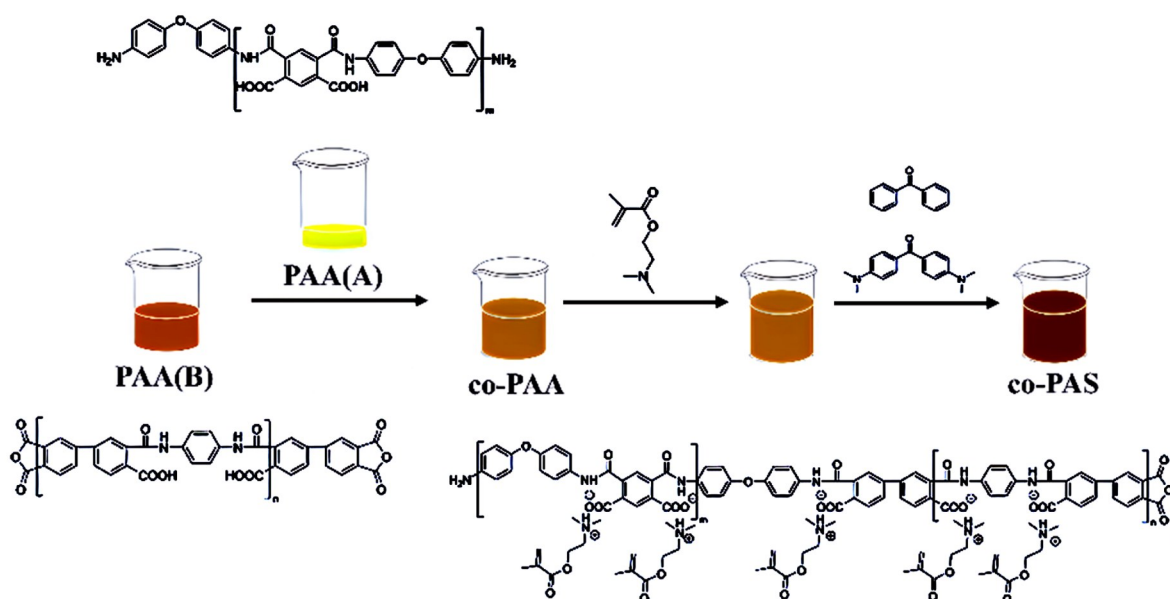


Fig. 3 Preparation process of quaternary block copolyamide acid(co-PAA) and copolyamide salt(co-PAS)<sup>[3]</sup>

## 2.2 高频低介电 PI

高频低介电 PI 是 5G 等高速通信、微电子封装核心材料,可减少信号延迟与损耗,适配高频毫米波场景. 其研发解决了传统 PI 介电性能不足问题,突破了电子器件集成化、轻薄化瓶颈,对提升电子设备性能、推动通信技术升级意义重大<sup>[49-51]</sup>. 本课题组<sup>[4]</sup>针对 5G 毫米波通信中商用 PI 介电性能不足的问题,以降低 PI 介电常数( $D_k$ )和介电损耗( $D_l$ )并兼顾综合性能为目标,采用“模拟+实验”双路径,通过含氟二胺(HFBAPP, TFMB)与二胺(ODA)、二酐(PMDA 等)的三元/四元聚合制备含氟 PI 薄膜,证实含氟基团可通过降低分子极化率优化介电性能,最终筛选出最优配方(图 4),其中,14.3%TFMB/85.7% ODA/PMDA 的  $D_k$  低至 2.12,  $D_l$  为 0.00698,为通信设备用 PI 提供了优质方案与理论支撑.

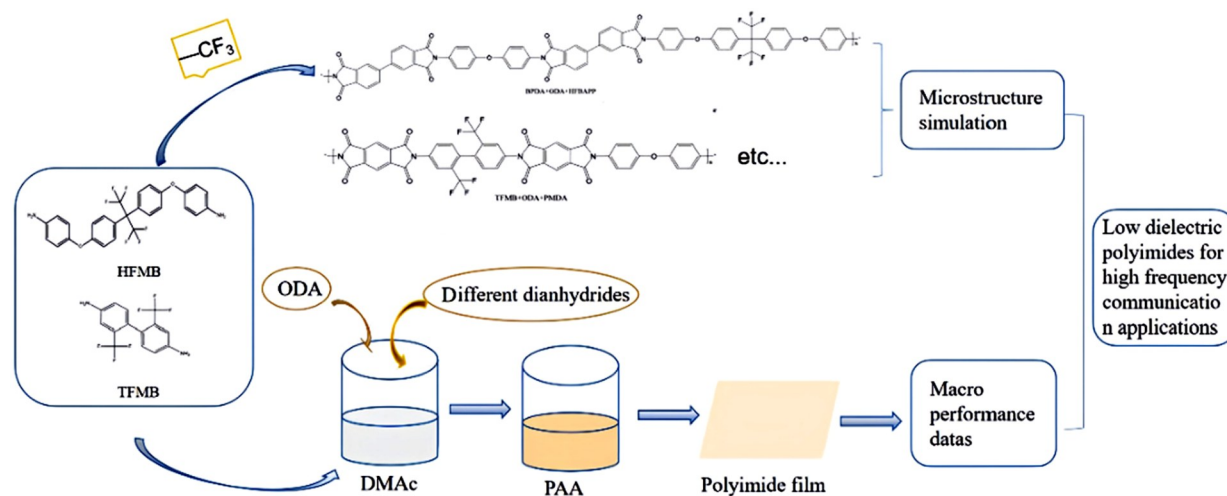


Fig. 4 Schematic diagram of the synthesis of high-frequency low-dielectric PI<sup>[4]</sup>

2023 年,本课题组<sup>[5]</sup>开发了一种简便有效的策略,通过向聚酰亚胺主链引入螺双苄基团的简易策略,既借助其大位阻效应增加材料本征自由体积,使改性聚酰亚胺在 10 GHz 下的  $D_k$  达到 2.74~2.76,接近传统多氟改性聚酰亚胺的 2.67(图 5);又依托其刚性结构与强分子间相互作用抑制偶极取向,将  $D_l$  降至 0.00599,低于传统多氟改性聚酰亚胺的 0.00663,同时该改性材料兼具少氟、无孔的特点,以及良好的热稳定性和力学性能,为 5G 通信用超低介电聚酰亚胺材料的研发提供了有效方案.

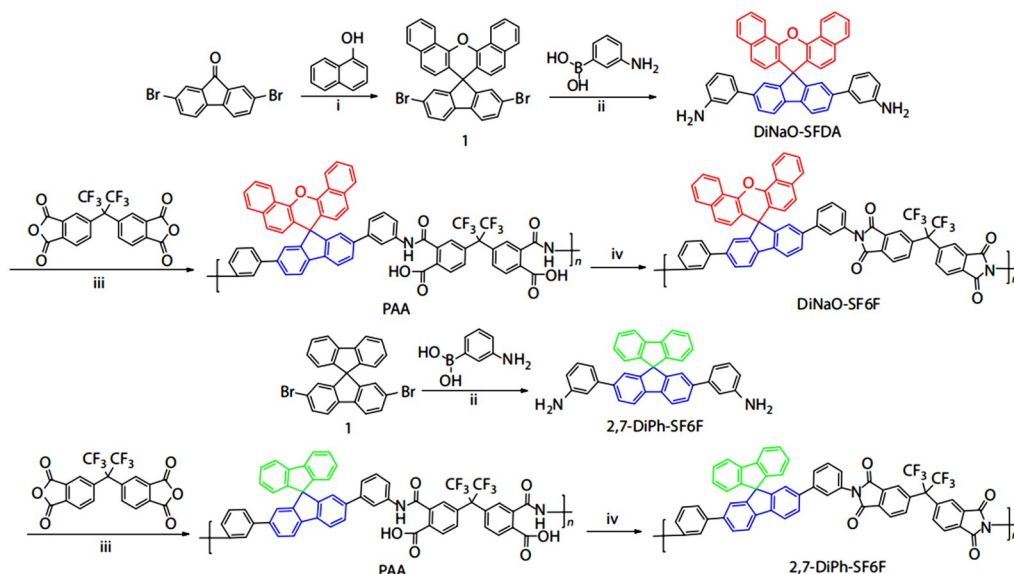


Fig. 5 Synthetic route of MPIs<sup>[5]</sup>

(i) Methanesulfonic acid, 160 °C; (ii) Pd(PPh<sub>3</sub>)<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> aqueous solution (2 mol/L), toluene, 95 °C; (iii) dimethylacetamide (DMAc), r. t.; (iv) thermal imidization.

### 3 屏: 用于柔性显示的透明聚酰亚胺开发

传统聚酰亚胺因强电荷转移络合物(CTC)导致的可见光区吸收而呈深黄色,限制了其在柔性显示等领域的应用.如图6所示,透明聚酰亚胺(CPI)的设计旨在抑制CTC效应并减少共轭结构.引入含氟单体是制备高性能CPI的有效策略,以6FDA为代表;氟原子的引入可有效抑制CTC形成,并调控材料的机械性能.

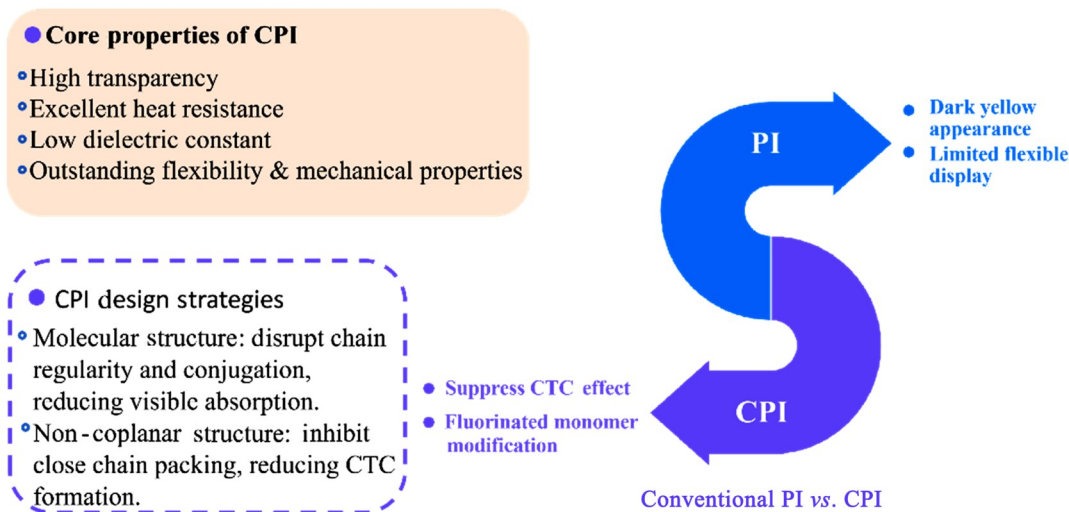


Fig. 6 Differences of modification strategies between CPI and PI

本课题组<sup>[6]</sup>通过含氟单体与联苯结构的分子设计,制备出高性能无色透明聚酰亚胺薄膜;该薄膜可见光透光率达92.05%,热膨胀系数为66.97×10<sup>-6</sup>/K,玻璃化转变温度为321 °C,兼具优异热稳定性和结晶调控能力.与此同时,该工作还系统综述了CPI的合成与策略,如图7所示.

2021年,本课题组<sup>[7]</sup>系统综述了电子器件用低膨胀PI薄膜的研究进展,重点分析了低CTE聚酰亚胺复合薄膜的制备方法及其在柔性电子领域的应用.并提出未来研究将聚焦三大方向:(1)在降低CTE的同时兼顾力学性能与粘结性能,解决无机纳米粒子团聚问题;(2)开发性能更优异的共聚型PI

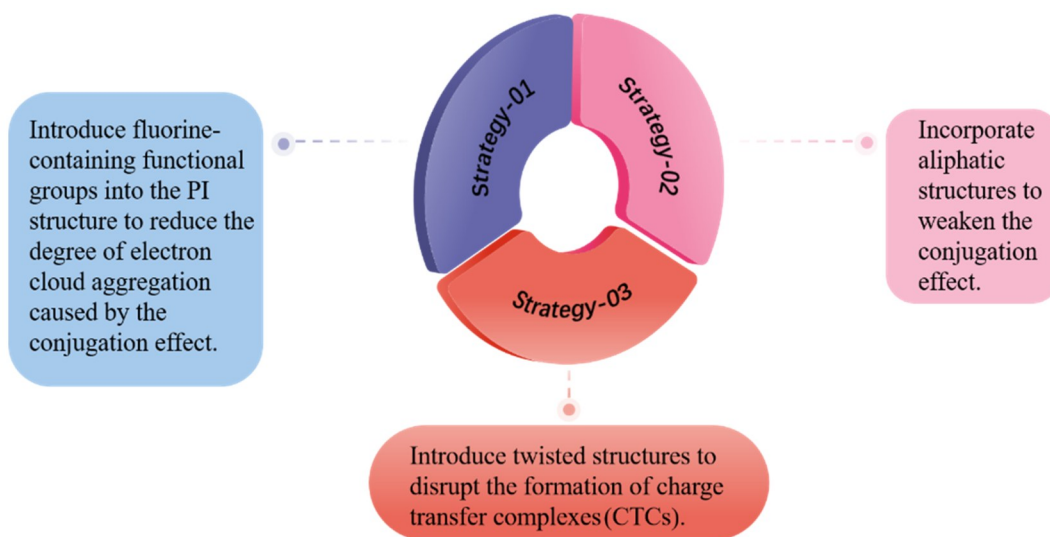


Fig. 7 Synthesis and strategic analysis of transparent polyimide<sup>[6]</sup>

材料,进一步优化柔性显示屏基板所需的透光性、耐热性等指标;(3)改进加工工艺,推动低CTE PI薄膜在柔性电子器件领域的规模化应用(图8)。



Fig. 8 Future research directions of low-expansion PI<sup>[7]</sup>

## 4 器: 基于聚酰亚胺的功能器件设计

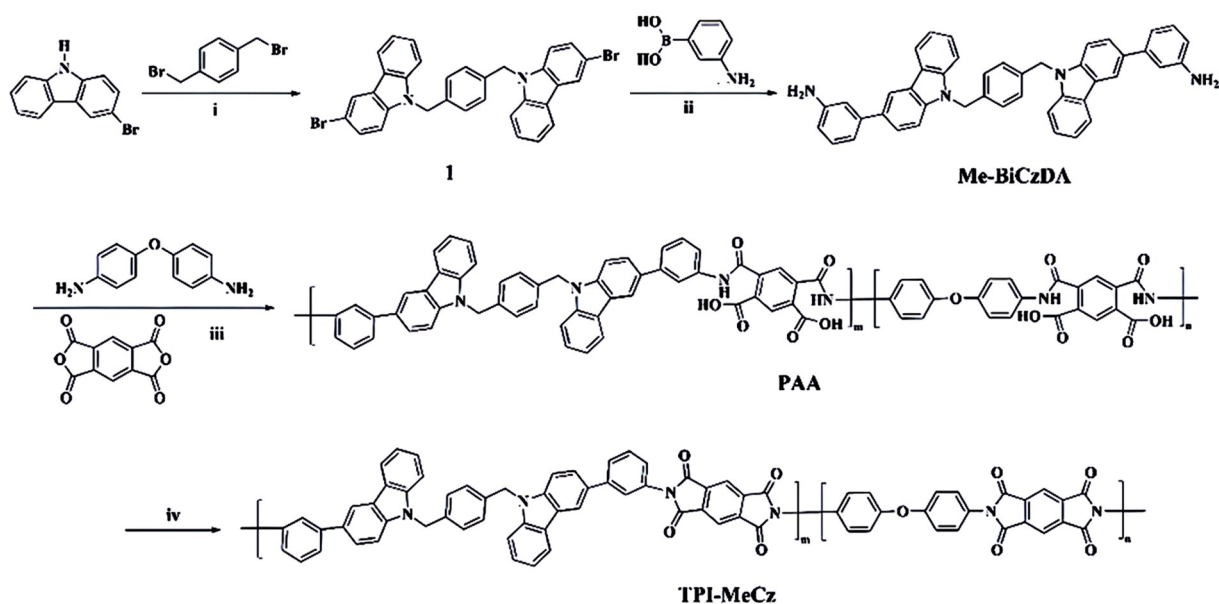
### 4.1 热塑性聚酰亚胺

热塑性聚酰亚胺(TPI)是航空航天和微电子领域的关键高性能聚合物材料。其分子主链中的酰亚胺五元环结构赋予材料优异的力学性能与热稳定性。然而,传统PI因链刚性大、堆叠有序度高,存在溶解与熔融加工性差的问题,限制了其应用。因此,开发可加工、可回收的热塑性聚酰亚胺成为研究重点。本课题组<sup>[52]</sup>曾综合评述了TPI的研究进展、合成方法与应用前景。研究表明,通过分子设计可有效调控TPI的热稳定性、力学性能及加工流变性。优化合成工艺可显著提升材料的热稳定性和力学性能。在柔性覆铜板等领域,TPI可替代传统树脂,提升产品性能并推动工艺发展。如表2所示,TPI在多个高端领域展现出应用前景。未来研究将聚焦于新型单体开发、增材制造工艺优化及功能化应用拓展。

2024年,本课题组<sup>[53]</sup>通过在聚合物主链中结合共平面芳香咪唑基团和短柔性亚甲基链段的共聚策略,制备出综合性能优异的TPI(图9)。该策略有效平衡了TPI的热塑性、热稳定性、力学性能、介电性能之间的权衡关系,所制备的TPI-MeCz-15%样品具有适宜的 $T_g$ (348 °C)、低CTE( $48 \times 10^{-6}/K$ )、优异的

Table 2 TPI application areas and their use scenarios

Application field	Application
Mechanical industry	TPI, with excellent mechanical properties and friction resistance, can replace titanium alloys for manufacturing engine inner covers, dense parts, and clutch rings
Aerospace	TPI exhibits good flame retardancy, applicable to producing aircraft components and reducing fire-related damage risks
Electronics & communications	In harsh environments (high temperature, pressure, humidity), TPI maintains good electrical insulation, used for wafer carriers, electronic insulating films, and connectors
Medical	Artificial bones made from TPI resin are lightweight, non-toxic, and highly corrosion-resistant
Power	TPI, featuring good thermal stability and dielectric properties, is applied in wires, cables, and power equipment
Coatings	Coating metal surfaces with TPI fine powder creates coatings with excellent insulation, corrosion/heat/water resistance, widely used in chemical anticorrosion, home appliances, electronics, and machinery



(i) Potassium hydroxide, THF, r. t.; (ii) Pd(PPh<sub>3</sub>)<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> aqueous solution (2 mol/L), ethanol and toluene, 70 °C, (iii) DMAc, r. t.; (iv) thermal imidization.

高频介电性能和良好的力学性能。该设计思路为高频通信领域高性能 TPI 器件的开发提供了新参考方向。

#### 4.2 新能源器件

锂电池技术对高能量密度、高安全性及长循环寿命的持续需求,对关键组件提出了更高要求。传统聚烯烃隔膜[如聚丙烯(PP)/聚乙烯(PE)]热稳定性较差,熔点约 150 °C,已成为诱发电池热失控的关键瓶颈之一。针对此问题,本课题组聚焦于聚酰亚胺材料在能源器件中的多功能应用,重点开展其在高性能锂电池隔膜、固态电解质等方向的研究,并拓展应用于燃料电池用质子交换膜的开发,以推动下一代安全、高效能源存储与转换系统的发展。

2021年,本课题组<sup>[9]</sup>设计了一种聚环氧乙烷(PEO)/羧甲基纤维素锂(CMC-Li)@PI混合固态电解质膜,如图10所示,该体系以电纺PI无纺布为支撑骨架,在30和60 °C下离子电导率分别达3.16×10<sup>-5</sup>和3.15×10<sup>-4</sup> S/cm,机械强度提升至6.47 MPa,电化学窗口拓宽至约5 V。基于该电解质的全固态电池在0.5C和1.0C倍率下放电比容量分别为99和51 mA·h/g,150次循环后容量保持率达82%,该体系各项性能数据合理,提出PI纺丝作为骨架,引入含大量羧基的CMC-Li,在提升结构稳定性的同时,兼顾了提升离子电导率的改性策略,为当时固态锂离子电池提供了固体聚合物电解质设计的新思路。

2021年,本课题组<sup>[10]</sup>采用真空蒸镀法制备出一种三明治结构超轻高导热复合集流体——铜@类石

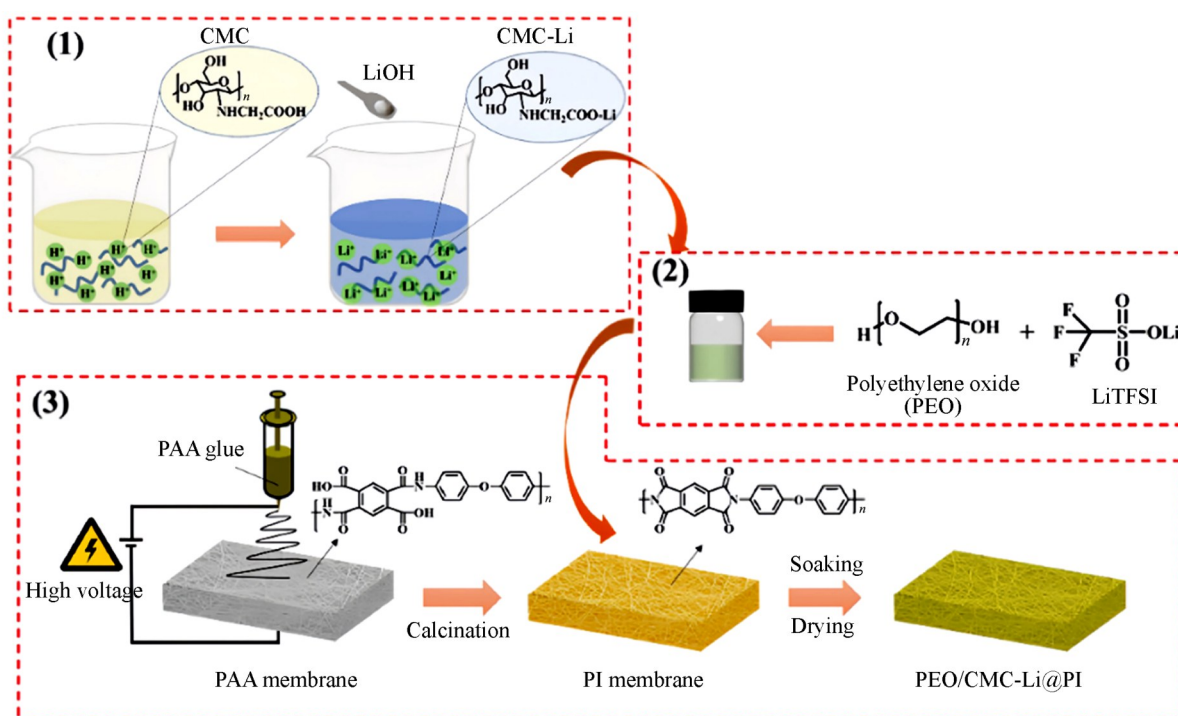


Fig. 10 Schematic for the fabrication of PEO/CMC-Li@PI hybrid solid polymer electrolyte membrane<sup>[9]</sup>

墨烯导热膜(Cu@GTF)(图 11)。该材料以聚酰亚胺为前驱体,经碳化与石墨化处理形成类石墨烯导热膜(GTF),再于其表面蒸镀铜层构筑复合结构。研究表明,Cu@GTF在集流体应用中具备多重优势:面密度低于 $7.0 \text{ mg/cm}^2$ ,远低于商用铜箔( $17.50 \text{ mg/cm}^2$ ),表现出显著的轻量化特性;热扩散系数达 $550 \text{ mm}^2/\text{s}$ 以上,为铜箔( $164 \text{ mm}^2/\text{s}$ )的3.4倍,具备优异的热管理能力;电导率虽略低于纯铜箔,但通过调控铜层厚度(如 $1000 \text{ nm}$ )可实现 $8.8 \text{ m}\Omega/\text{sq}$ 的片电阻,在保持合理导电性能的同时,显著提升了电池的倍率性能与循环稳定性。该材料能在高温环境下快速传导热量,有效抑制电池局部过热,为开发

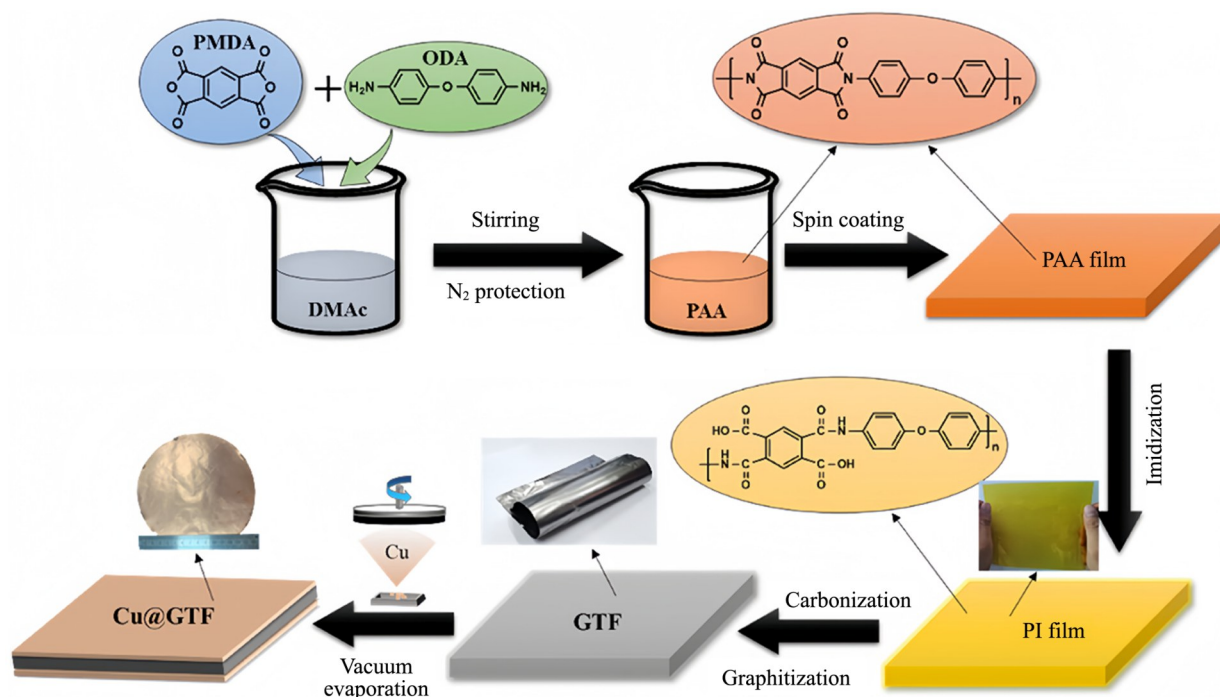


Fig. 11 Preparation of the graphite-like @Cu composite film<sup>[10]</sup>

高能量密度、高安全性的锂离子电池提供了新型集流体解决方案。

### 4.3 航天航空器件

为了满足未来空间任务对高效能源系统的需求,发展轻质可折叠光伏阵列是关键。聚酰亚胺薄膜凭借优异的耐极端环境特性与机械柔性,成为理想的空间光伏基底材料。经复合增强的PI基光伏系统可耐受极端温度交变与强辐照,并实现显著的轻量化。其耐电晕特性保障了高压系统的绝缘可靠性,而功能填料的引入还可赋予吸波性能,助力航天器隐身防护。

4.3.1 柔性卷曲光伏PI 聚酰亚胺基柔性卷曲光伏系统的实现基于其独特的分子结构与功能设计。芳杂环刚性骨架赋予材料优异的耐高温性与机械强度,通过分子调控可实现力学与电学性能的平衡;稳定的共价键与芳环结构保障了耐电晕特性,而芳杂环共轭体系可有效抵抗太空辐射损伤。通过功能填料构建的三维网络进一步实现了导热与吸波等多功能集成,确保系统在极端空间环境下的结构完整性与功能稳定性。

本课题组<sup>[13]</sup>开发的生物基形状稳定有机相变复合材料(SSOPCC)采用膨胀珍珠岩(EP)/聚苯乙烯-*b*-乙烯-共-丁烯-*b*-苯乙烯(SEBS)双支撑骨架封装石蜡C<sub>22</sub>,并引入氮化硼(BN)与生物质(CL)分别作为导热增强剂和光热转换剂,如图12所示。该材料可与聚酰亚胺柔性衬底集成,相变潜热达188.47 J/g,导热系数提升46%,达0.596 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>,在实现高效光热转换的同时为柔性光伏系统提供了可靠的温度调控方案,显著提升了空间环境下的能源利用效率与系统稳定性。

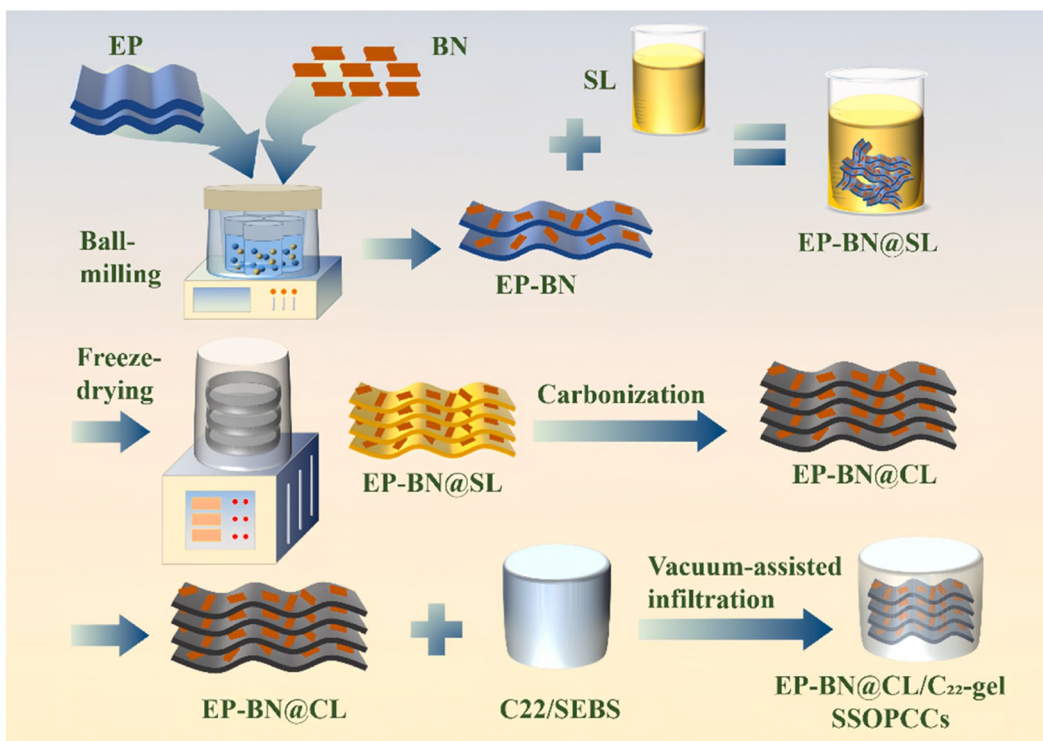


Fig. 12 Schematic graph of the fabrication process of EP-BN, EP-BN@CL and *n*-docosane based SSOPCCs<sup>[13]</sup>

4.3.2 PI基吸波材料 聚酰亚胺基吸波材料通过多元协同机制实现高效电磁波管理。在PI基体中构建的导电网络(如碳纳米管)产生介电损耗,磁性组分(如铁氧体)引发磁损耗,二者协同将电磁能转化为热能;其多孔/多层结构可增强电磁波传播路径与界面反射损耗,而PI本身的分子可调性及耐高温特性确保了材料在宽频范围内的阻抗匹配特性及极端环境下的稳定性能。

本课题组<sup>[16]</sup>近期开发了一种焦耳热驱动碳化新策略,如图13所示:通过调控聚吡咯基聚合物纳米管的石墨化程度,实现了电磁波吸收与导热性能的协同优化。研究发现,经1000℃处理的样品在C-Ku波段展现出3.46 GHz的有效吸收带宽与-45.1 dB的最小反射损失;而2000℃处理样品与聚二甲基硅氧烷(PDMS)复合后热导率高达4.20 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>,较纯PDMS提升超过15倍。该研究为高功率电子器件

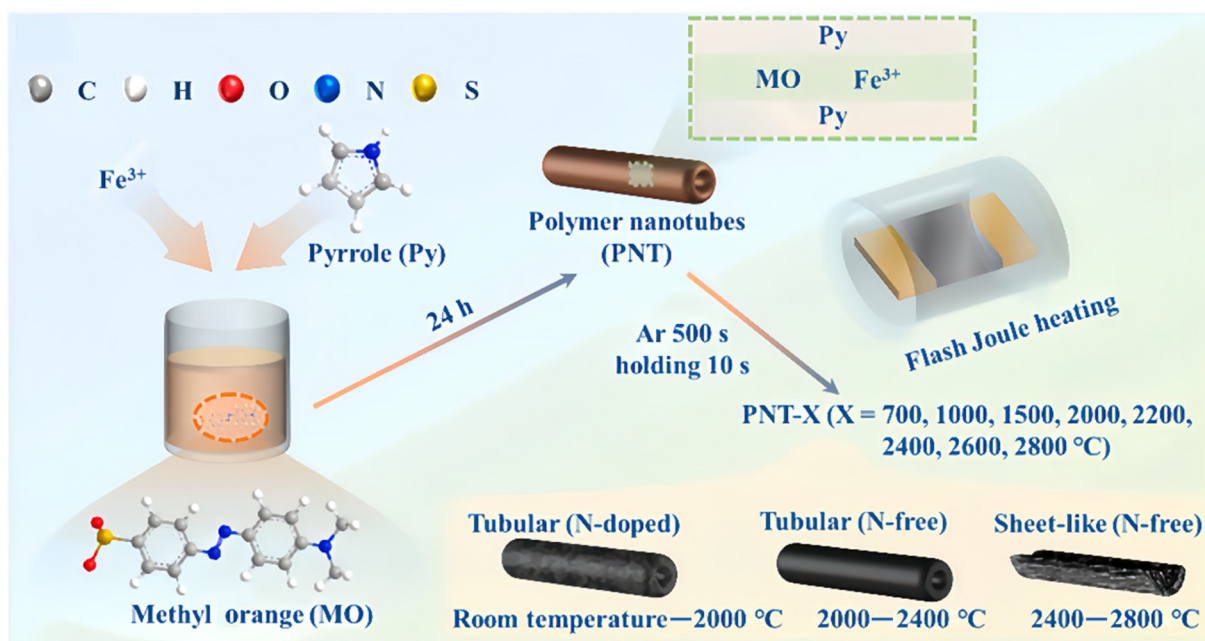


Fig. 13 Schematic diagram of the preparation of PNT-X<sup>[16]</sup>

PNT-X: polymer nanotubes-X(X=different target temperatures).

的电磁辐射抑制与热管理问题提供了创新的材料解决方案。

#### 4.4 高性能绝缘材料

本课题组<sup>[54]</sup>研究通过D- $\pi$ -A结构设计策略(图14). 成功解决了传统PI改性中“击穿强度提升与热/力学性能牺牲”的矛盾: 引入N-烷基咪唑基团后, PI击穿强度从291 kV/mm提升至570~632 kV/mm, 且保持 $T_{d5\%}>524$  °C,  $T_g>364$  °C的热稳定性与拉伸强度 $>80$  MPa的力学性能. 该策略为高压设备用高性能绝缘材料的多场景商业化应用(如新能源汽车、高压电缆)提供了关键设计思路, 具有重要实用价值.

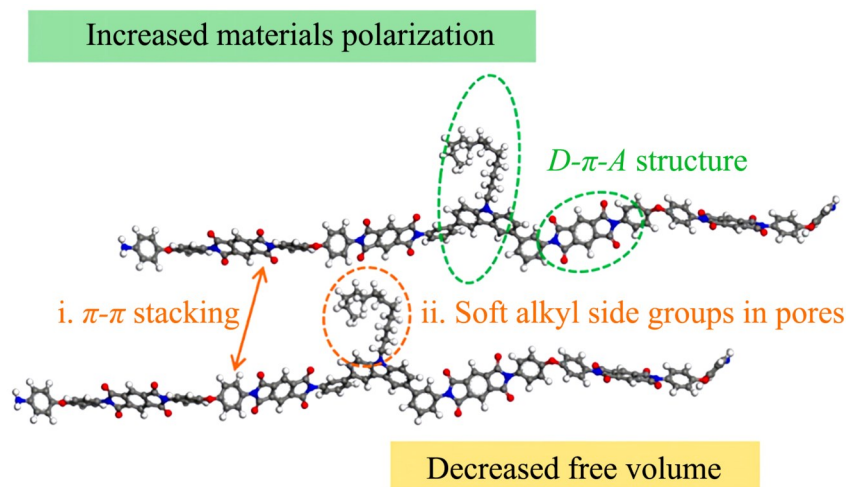


Fig. 14 Schematic diagram of high-performance polyimide insulation design strategy<sup>[54]</sup>

## 5 气: 聚酰亚胺气体分离膜设计与性能优化

在全球能源转型和战略资源获取需求日益紧迫的背景下, 高效节能的分离技术已成为科研与工业界的焦点. PI作为一种性能卓越的高分子材料, 因其可设计的分子结构、固有的高透气选择性及出色的化学和热稳定性, 被视为构筑下一代分离膜的核心材料. 如图15所示, 本课题组<sup>[20-26, 62-64]</sup>曾致力于

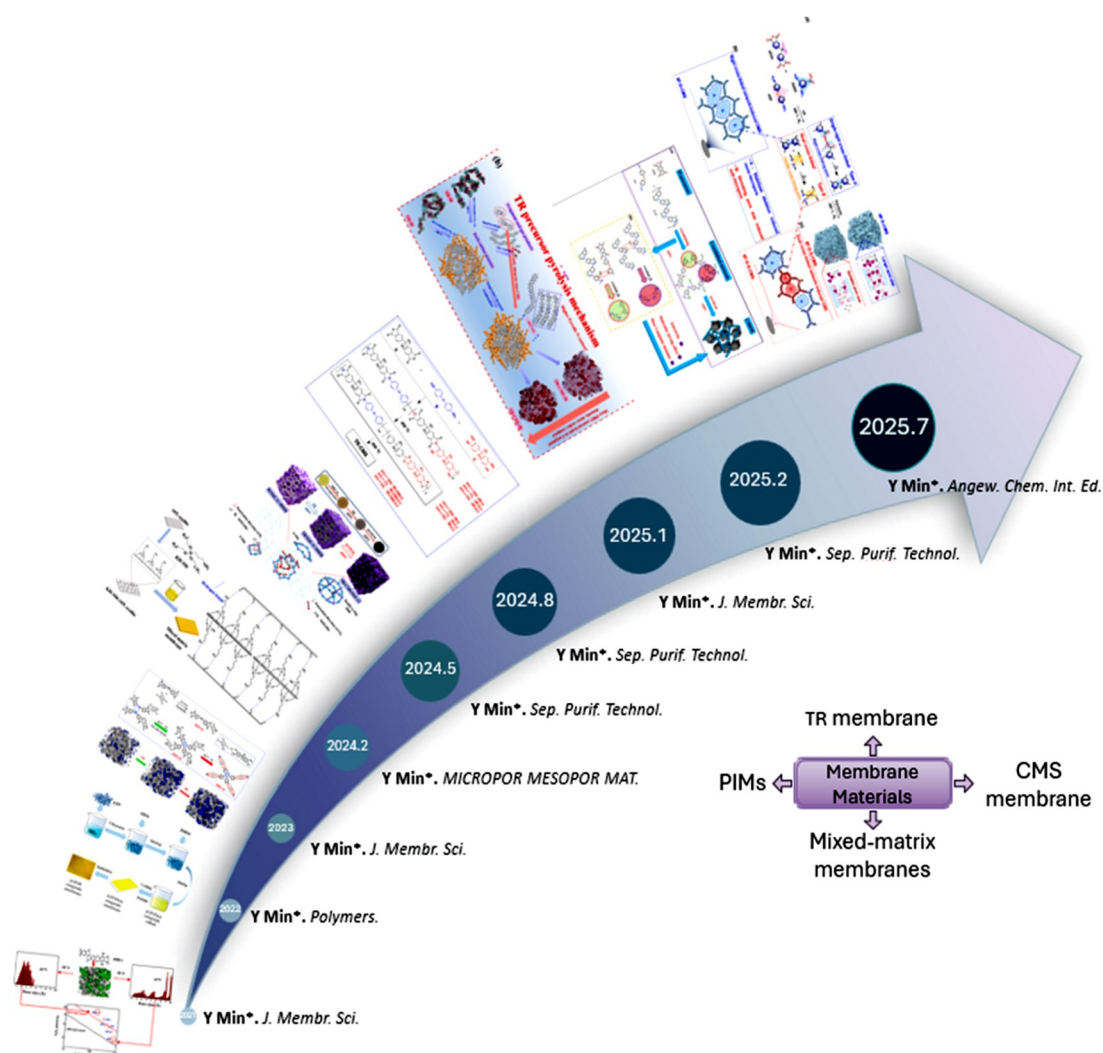


Fig. 15 Research achievements in the application of polyimide to gas separation<sup>[20–26,62–64]</sup>

将聚酰亚胺应用于气体分离领域，主要策略为聚合物分子结构设计，与纳米颗粒共混以及前驱体结构和衍生碳分子筛膜结构-性能调控等。

### 5.1 聚合物分子结构设计

聚合物分子结构设计是优化性能的根本途径，通过修饰PI主链与侧基可直接调控分子链堆砌与自由体积，构建选择性传输通道。引入刚性结构或大体积侧基可扩大自由体积，提升渗透性；嵌入极性基团则增强对特定气体的吸附选择性。该方法无需外源组分，可精准适配多种气体分离场景。

本课题组<sup>[24]</sup>创新性提出双交联策略，用于解决碳分子筛膜亚纳米孔径控制与热解稳定性难题。如图16所示，通过构建刚-柔双网络结构，协同调控热解过程，实现孔径精确控制，成功制备出亚纳米级孔径精度的碳分子筛(CMS)膜，并系统评估其氢气分离性能。

根据表征分析，所制备的膜表现出卓越的分离性能：其中在650 °C碳化2 h后，双联6F-D-S-CMS在渗透率和选择性方面表现出优越性能，其H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>选择性达到3807，超越了最先进的基准。在850 °C下进一步碳化，6F-D-S-CMS-850显示出卓越的H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub>选择性(6538)，将该膜与目前已经报道的CMS膜进行了对比<sup>[21,55–61]</sup>，表3结果显示，该膜超过了目前报道的大部分CMS膜。该膜展现出优异稳定性：在长期测试中选择性保持稳定，老化后渗透率仅下降24%，且具有出色抗塑化能力。模拟证实该结构可抑制CH<sub>4</sub>吸附，提高小孔比例，消除非选择性通道。该研究实现了碳膜微孔结构的精确调控，获得了领先的H<sub>2</sub>分离性能，为高效气体分离提供了可规模化解决方案<sup>[24]</sup>。

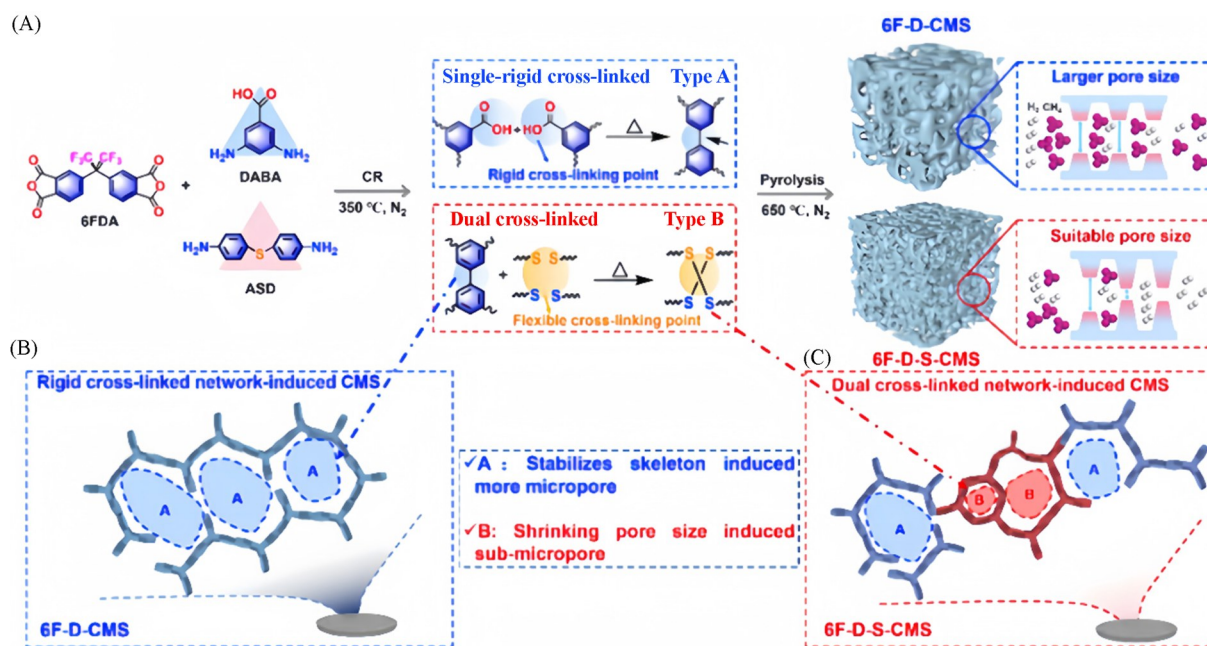


Fig. 16 Schematic illustration of CMS membranes derived from two types of cross-linked precursors (Types A and B)(A), schematic diagram of the rigid cross-linked mechanism(B), illustration of sub-nanometer pore structural transformation in the CMSMs during pyrolysis of the dual cross-linked precursor(C)<sup>[24]</sup>

Table 3 Comparison of the performance of the prepared gas separation membranes with some reported CMS membranes(tested at 35 °C and 0.2 MPa)

Membrane	Permeability (Barrer)				Ideal selectivity ( $\alpha_{X/Y}$ )		Ref.
	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub>	
6F-D-S-CMS	3464	904	12	0.91	3807	2.7	[24]
6F-D-S-CMS-850	523	3.5	0.32	0.08	6538	149	[24]
PEK-C-900	2919	26.3	12.3	1.57	1859	110	[21]
6F-DABA-75-CM576	5832	3573	113	69	84.3	1.6	[55]
BAPP-PMDA-900	323	192	2	1	323	1.7	[56]
TR-CMS-0.5	3843	901	14.6	6.3	610	4.3	[57–59]
Ti-MOF	6444	4633	118	118	54.6	1.4	[60]
CMS/10X-7.5	1709	691	16.2	3.1	551	2.5	[61]

## 5.2 纳米颗粒共混

纳米颗粒共混是突破聚酰亚胺膜“渗透性-选择性权衡”瓶颈的有效策略。纳米填料可构建快速传输通道并抑制非选择性缺陷，同步提升渗透性与选择性。该策略的关键在于确保填料均匀分散，适用于需突破性能极限的分离场景。

2022年，本课题组<sup>[25]</sup>通过原位聚合法制备了多孔凹凸纳米棒石(ATP)增强的PI复合膜，如图17所示。研究表明，适量ATP可显著提升气体渗透性(最高提升160%)而不牺牲选择性。表征分析结果证实，ATP在基体中分散均匀，形成纳米通道并增大自由体积。过量ATP会导致颗粒聚集，引起选择性下降。该膜还表现出优异的高温高压稳定性，适用于苛刻环境下的气体分离。

## 5.3 衍生碳分子筛膜结构-性能调控

衍生碳分子筛膜通过前驱体设计与碳化工艺调控，可获得规整微孔结构，拓展其在苛刻工况下的应用。通过优化前驱体结构与碳化条件，可精准调控微孔尺寸，实现高效分子筛分。该策略可有效减少膜缺陷，适用于高温高压等苛刻分离环境。

2024年，本课题组<sup>[26]</sup>开发了新型热重排混合基质膜前驱体，经热解获得高性能碳分子筛膜6F-AP/

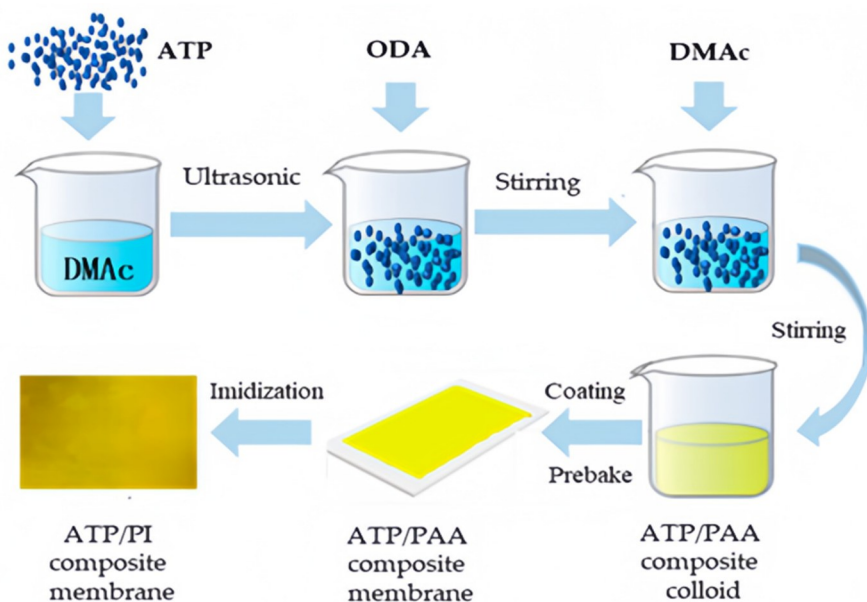


Fig. 17 Preparation flow chart of PI/ATP composite membranes<sup>[25]</sup>

ODA, 6F-AP/ODA-TR 和 TR-CMS, 如图 18 所示. 通过复合改性沸石与聚酰亚胺前驱体, 经热重排与热解过程制得目标膜材料. 该过程显著提升了材料的比表面积与自由体积. 沸石的引入提供了额外筛分通道, 同时抑制热解过程中的结构坍塌, 构建超微孔结构. 最优膜表现出卓越的渗透性与选择性, 性能超越 Robeson 上限, 并展现优异稳定性, 为气体分离提供了创新解决方案.

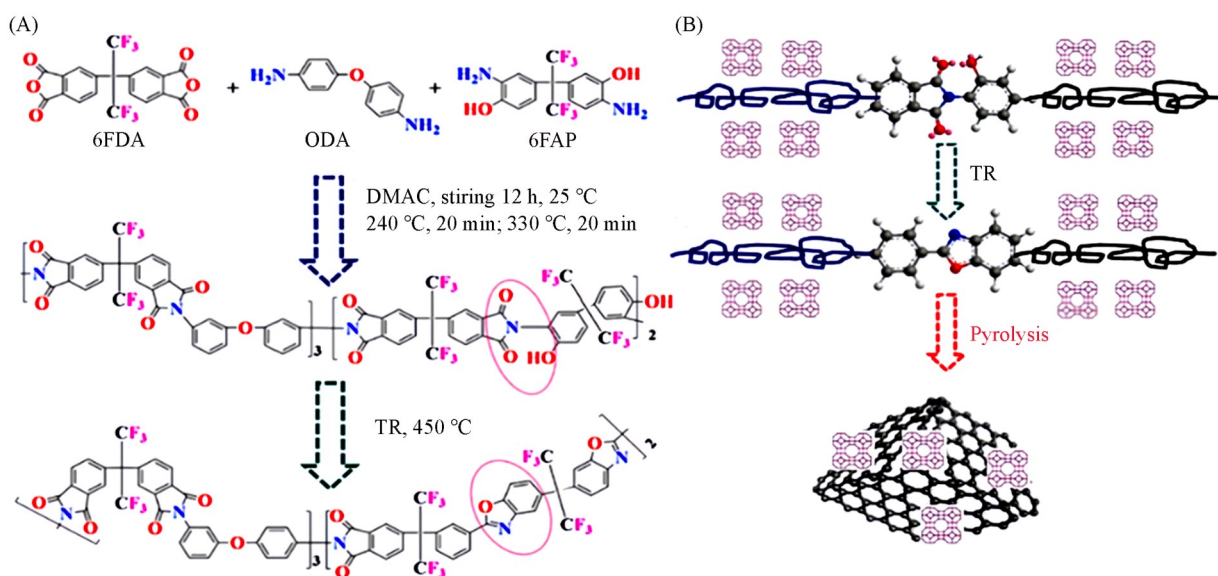


Fig. 18 Synthetic routes(A) and schematic representation(B) of molecular chain conformation of the 6F-AP/ODA, 6F-AP/ODA-TR and TR-CMS membranes<sup>[26]</sup>

除研究性成果外, 本课题组也非常关注聚酰亚胺应用于气体分离领域的研究动态, 旨在通过系统梳理聚酰亚胺其“结构-性能”关系、总结不同改性策略并精准指出现存挑战与未来方向, 不仅为该领域绘制清晰的知识图谱, 更为后续研究提供理论依据与创新启发. 以期持续推动聚酰亚胺气体分离膜的研究与实用化进程<sup>[62-66]</sup>.

## 6 合: 高性能聚酰亚胺及复合材料构筑与性能

高性能复合 PI 材料是以 PI 为基体, 复合无机填料或功能材料形成的多元体系. 该材料在保持 PI

基体优异性能的同时,可实现增强、功能化或综合性能优化,广泛应用于5G封装、航空航天等高端领域<sup>[66,67]</sup>.

2022年,本课题组<sup>[30]</sup>开发了一种无模板、非化学气相沉积(CVD)的石墨烯管制备方法,如图19所示,通过CaCO<sub>3</sub>掺杂的PI薄膜在热处理过程中,CaCO<sub>3</sub>分解产物催化PI热解碳源原位自组装形成石墨烯管;所得石墨烯管具有中空竹节状结构,直径100~600 nm,长度超过500 μm,且纯度和石墨化程度高;该方法原料廉价、工艺简单,可同步获得可转化为高导热石墨膜的碳膜,石墨烯管(GTs)产量与PI膜面积成正比,具规模化潜力,为实现高导热石墨膜产业化提供了极大助力.

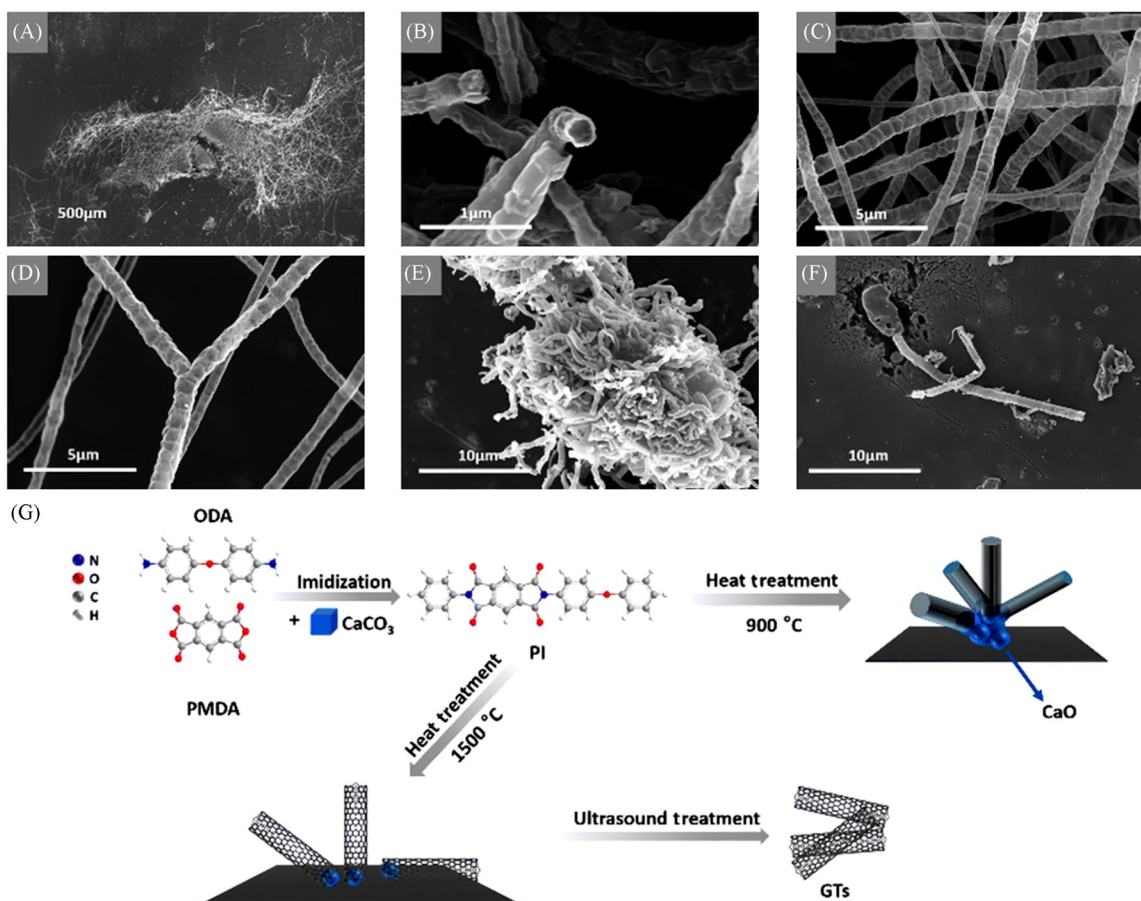


Fig. 19 SEM images of the GTs grown *in situ* on PI/CaCO<sub>3</sub> carbon film(A—D), precursor of GTs at 900 °C(E, F) and schematic diagram of GT synthesis(G)<sup>[30]</sup>

聚酰亚胺基石墨膜凭借其独特的层状结构和优异的面内热导率而备受关注.通过高温处理形成高度取向的石墨结构,其面内热导率显著优于传统金属散热材料.优化前驱体分子结构与石墨化工艺可获得热导率达数百至上千  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  的高性能石墨膜.该材料兼具轻质、柔韧等特性,适用于高功率密度电子器件的热管理.近年来,通过构建三维导热网络的复合策略进一步提升了热传导效率,推动了其规模化应用.

2022年,本课题组<sup>[31]</sup>采用有机碱催化剂,通过优化催化工艺制备了高性能复合石墨膜(图20).其中,最优样品热导率达  $1483 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , LED 散热测试结果显示,其具有优异的散热性能;该方法工艺简单、能耗低,为器件热管理提供了高效解决方案.

2025年,本课题组<sup>[68]</sup>采用尿素-氯化胆碱深共熔溶剂(UCC)对 ODA-PMDA 与 3,5-二氨基苯甲酸-3,3',4,4'-联苯四甲酸二酐(DABA-BPDA)两类聚酰胺酸(PAA)进行改性(图21).所得 UCC/PI 复合膜经 1250 °C 碳化及 2800 °C 石墨化后,成功制备出石墨膜.结果表明,UCC 不仅能保持 PI 的完全亚胺化,还可通过氢键优化分子链排列,显著提升石墨化程度[OPU(ODA-PMDA)体系: 30%→59% 以上];

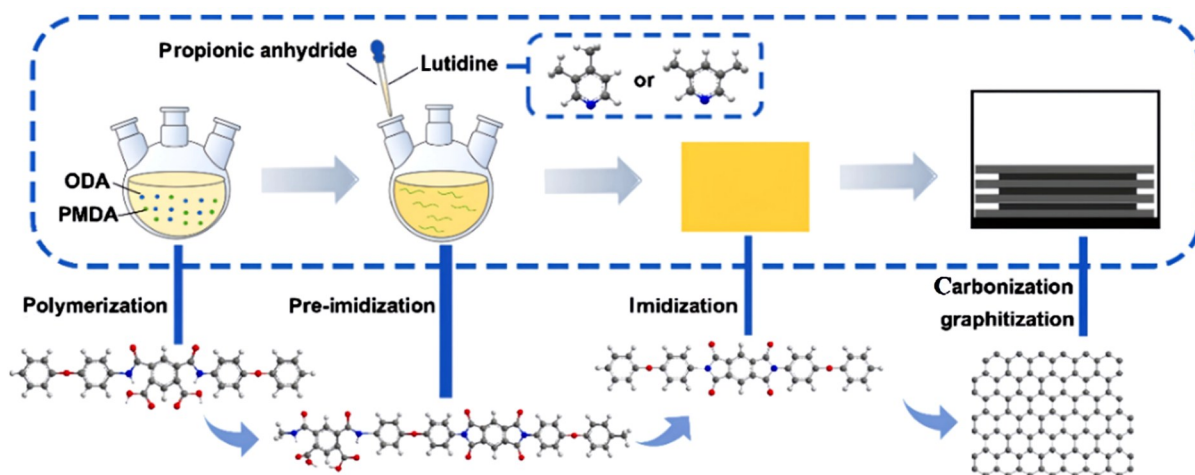


Fig. 20 Schematic diagram of graphite PI membrane preparation<sup>[31]</sup>

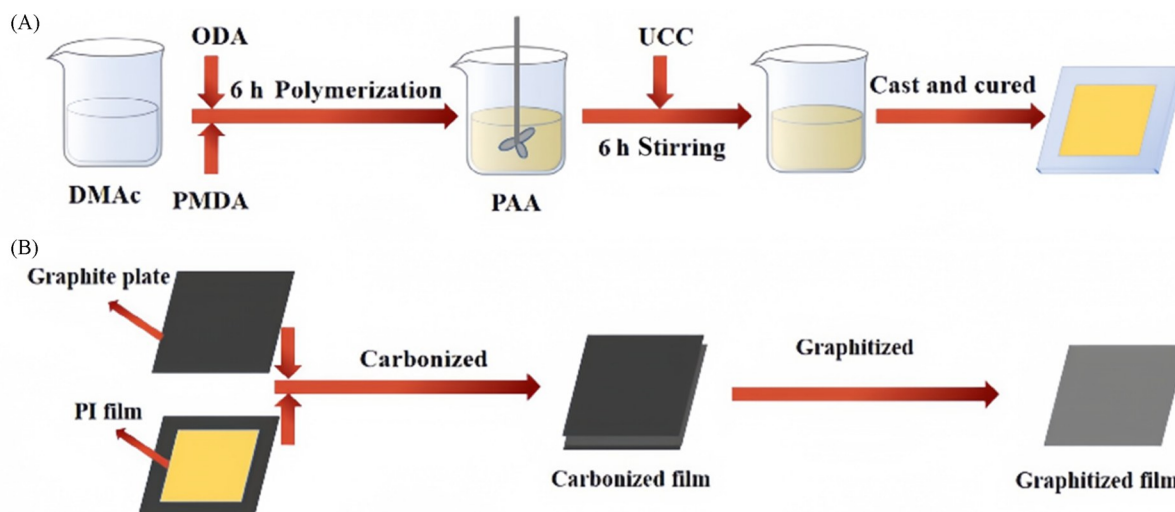


Fig. 21 Preparation process of thin film samples of UCC/PI film(A) and graphite film(B)<sup>[68]</sup>

DBU(DABA-BPDA)体系: 80%→92%以上]. 其中, 3.5%(质量分数) UCC 改性样品性能最优: OPU35 导热系数达  $45 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  (提高 200%), DBU35 导热系数为  $742 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  (提高 47.8%), 并形成紧密有序的石墨结构. 然而, 在 OPU 体系中, UCC 在增大晶粒尺寸、促进石墨化的同时, 也引入了碳结构缺陷; 而在 DBU 体系中, UCC 不仅促进石墨化, 在浓度超过 2.5%(质量分数)时还能减少结构缺陷, 这是由于 DBU 体系的结晶度高于 OPU 体系. 综上, UCC 应用于合适的体系可有效优化 PI 基石墨膜性能, 为电子散热领域提供了新材料及可行的改性策略.

## 7 总结与展望

聚酰亚胺基材料凭借其独特的性能组合, 在多个前沿技术领域展现出广阔的应用前景. 在机器人领域, PI 通过高比强度与低蠕变特性实现机械部件 25% 的减重, 显著提升运动效能; 其柔性电路板特性支撑了机器人“神经系统”的构建, 在有限空间内实现高可靠性布线与多模态传感集成; 在外骨骼应用中, PI 基复合材料兼具结构支撑与人机交互功能, 形成智能反馈一体化系统.

在生物医学工程领域, PI 正向微型化与柔性化方向拓展: 作为微流控芯片基材, 满足结构精密性与高温工艺集成需求; 通过表面修饰与可降解设计, 在植入式电极与脑机接口中实现生物相容性与功能性平衡; 其超薄特性使其成为可穿戴健康监测的理想载体.

在半导体领域, PI 在先进封装中发挥关键作用: PI 基导热材料提升芯片散热效率, 其绝缘性能保

障高密度集成可靠性;在2.5D/3D封装中作为再布线层介质,显著提升信号传输能效比;在硅光封装中,PI光波导实现低损耗光电传输,热光效应为动态光路管理提供新途径。

未来聚酰亚胺材料将聚焦多功能集成与跨领域创新,通过分子设计与工艺突破,拓展在可降解电子、智能传感-结构一体化系统等前沿领域的应用,为下一代技术革命提供关键的材料支撑。

闵永刚教授在此特别鸣谢汤心颐先生等于1986年在本人撰写毕业论文期间给予的悉心指导,以及安排高分子固化理论的验证实验,使得论文得以顺利发表,并获得“吉林大学青春大奖赛一等奖”;在1986~1990年期间,汤心颐先生在北京化纤工学院指导了包括本人在内的6位研究生的科研工作,不厌其烦地解答我们的科研问题,为我们的未来规划了蓝图,并推荐我到美国宾夕法尼亚大学留学和进入Alan G. MacDiarmid教授(2000年诺贝尔奖得主)课题组。1994年,在我与MacDiarmid教授回国进行学术交流期间,汤心颐先生亲自为MacDiarmid教授安排了国内行程以及相应的学术交流活动,随后推荐了MacDiarmid教授担任吉林大学的荣誉教授,并在MacDiarmid教授荣获诺贝尔奖后,在吉林大学成立了我国高校第一个以诺贝尔奖获得者名字命名的实验室——麦克德尔米德实验室,在全国乃至全世界产生了极大的反响。值此汤心颐先生诞辰百年之际,特撰此稿,以感谢汤先生多年来的培育和教导之恩!

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Luo J. R., Liu Y. D., Liu H., Chen W. P., Cui T. T., Xiao L., Min Y., *Materials*, **2022**, *15*, 8014
- [ 2 ] Chen Y., Liu Y., Min Y., *Materials*, **2022**, *15*, 2755
- [ 3 ] Wu J., Zhang S., Cai M., Li Q., Wang Z., Lu X., Min Y., *High Perform. Polym.*, **2023**, *35*, 1026
- [ 4 ] Chen Y., Liu Y., Min Y., *Polymers*, **2023**, *15*, 1256
- [ 5 ] Tan W. Y., Jian L. F., Chen W. P., Zhang Y. W., Lu X. C., Huang W. J., Zhang J. S., Wu J. W., Feng J. L., Liu Y. D., Cui T. T., Min Y. G., *Chin. J. Polym. Sci.*, **2023**, *41*, 288
- [ 6 ] Jian L. F., Lu Z. Y., Tan W. Y., Min Y. G., *Mod. Plast. Process. Appl.*, **2024**, *36*, 17(简凌峰, 卢治宇, 谭婉怡, 闵永刚. 现代塑料加工应用, **2024**, *36*, 17)
- [ 7 ] Lu X. C., Yu W. T., Weng M. M., Liu Y. D., Zhang J. S., Fang J. Y., Min Y. G., *Insul. Mater.*, **2021**, *54*, 11(卢小闯, 余文涛, 翁梦蔓, 刘屹东, 张继升, 方基永, 闵永刚. 绝缘材料, **2021**, *54*, 11)
- [ 8 ] Lu J., Zhang J., Liu H., Chen W., Luo J., Wang Z., Cui T., Min Y., Liu Y., *High Perform. Polym.*, **2023**, *35*, 936
- [ 9 ] Huang X. W., Liao S. Y., Liu Y. D., Rao Q. S., Peng X. K., Min Y. G., *Electrochimica Acta*, **2021**, *389*, 138747
- [ 10 ] Hu J. Q., Li Y. Z., Liao S. Y., Huang X. W., Chen Y. Z., Peng X. K., Yang Y. B., Min Y. G., *ACS Appl. Energy Mater.*, **2021**, *4*, 9721
- [ 11 ] Song T., Min Y., *J. Appl. Polym. Sci.*, **2024**, *141*, e55721
- [ 12 ] Liu C. S., Hu J. Q., Mao T. T., Liao S. Y., Feng R. M., Liu Y. D., Min Y. G., *Chin. J. Polym. Sci.*, **2024**, *42*, 521
- [ 13 ] Huang J., Su J., Weng M., Xiong L., Wang P., Liu Y., Lin X., Min Y., *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **2022**, *245*, 111872
- [ 14 ] Cao Y., Zhao Z., Zeng X., Teng J., Huang J., Min Y., *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, **2025**, *8*, 104
- [ 15 ] Yu W., Lin J., Cao Y., Fang J., Wang Z., Huang J., Min Y., *RSC Adv.*, **2024**, *14*, 16971
- [ 16 ] Cao Y., Zeng X., Su J., Yu W., Zhang H., Abdou S. N., Ibrahim M. M., Fallatah A. M., Zhang J., Amangeldi N., Algadi H., Ainur Y., Toktarbay Z., Huang J., Min Y., Guo Z., *Carbon*, **2025**, *242*, 120427
- [ 17 ] Wang Z., Min Y., Fang J., Yu W., Huang W., Lu X., Wang B., *RSC Adv.*, **2023**, *13*, 7055
- [ 18 ] Yu W., Lin J., Zhao Z., Fang J., Wang Z., Huang J., Min Y., *RSC Adv.*, **2024**, *14*, 9716
- [ 19 ] Huang J., Zeng X., Yu W., Zhang H., Min Y., *Diam. Relat. Mater.*, **2025**, *152*, 111968
- [ 20 ] Ji W., Li K., Min Y. G., Shi W., Li J., Ma X., *J. Membr. Sci.*, **2021**, *623*, 119091
- [ 21 ] Cai M., Chen J., Liu H., Sun L., Wu J., Han Z., Chen Z., Cui T., Zhang S., Ma X., Min Y., *Sep. Purif. Technol.*, **2024**, *341*, 126945
- [ 22 ] Zhang S., Xu Z., Weng Y., Cai M., Wang Y., Zhu W., Min Y., Ma X., *J. Membr. Sci.*, **2023**, *672*, 121464
- [ 23 ] Cai M., Liu H., Chen J., Wu J., Han Z., Chen Z., Zhang S., Min Y., *Microporous Mesoporous Mater.*, **2024**, *365*, 112889
- [ 24 ] Cai M., Liang H., Liang F., Tao M., Sun L., Ma X., Zhang S., Min Y., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2025**, *64*, e202509756
- [ 25 ] Zhang S., Lu X., Cai M., Wang Z., Han Z., Chen Z., Liu R., Li K., Min Y., *Polymers*, **2022**, *14*, 5391
- [ 26 ] Cai M., Liu H., Chen J., Sun L., Wu J., Chen Z., Han Z., Cui T., Zhang S., Min Y., Ma X., *Sep. Purif. Technol.*, **2024**, *335*, 126163
- [ 27 ] Luo X. L., Wu J. H., Liu J., Wang Z. Q., Min Y. G., Liu Y. D., *Funct. Mater.*, **2023**, *54*, 7145(罗旭良, 吴嘉豪, 刘靖, 王子青, 闵永刚, 刘屹东. 功能材料, **2023**, *54*, 7145)
- [ 28 ] Weng M. M., Yu W. T., Lu X. C., Li Q. L., Liu J., Liu Y. D., Min Y. G., *Insul. Mater.*, **2021**, *54*(4), 1(翁梦蔓, 余文涛, 卢小闯, 李清玲, 刘佳, 刘屹东, 闵永刚. 绝缘材料, **2021**, *54*(4), 1)
- [ 29 ] Weng M. M., Zhao X. J., Luo X. L., Min Y. G., *Polym. Bull.*, **2023**, *36*, 1090(翁梦蔓, 赵晓君, 罗旭良, 闵永刚. 高分子通报,

- 2023, 36, 1090)
- [30] Luo X., Huang J., Wang X., Weng M., Cao Y., Min Y., *Chem. Commun.*, **2023**, 59, 13321
- [31] Weng M., Luo X., Jian L., Liang J., Hu J., Liu Y., Zhang J., Feng X., Min Y., *Appl. Surf. Sci.*, **2022**, 578, 152029
- [32] Liaw D. J., Wang K. L., Huang Y. C., Lee K. R., Lai J. Y., Ha C. S., *Prog. Polym. Sci.*, **2012**, 37, 907
- [33] Viehbeck A., Goldberg M. J., Kovac C. A., *J. Electrochem. Soc.*, **1990**, 137, 1460
- [34] Rothman L. B., *J. Electrochem. Soc.*, **1980**, 127, 2216
- [35] Muruganand S., Narayandass S. K., Mangalaraj D., Vijayan T. M., *Polym. Int.*, **2001**, 50, 1089
- [36] Chen S. T., *MRS Online Proc. Libr. OPL*, **1995**, 381, 141
- [37] Ohya H., Kudryavsev V. V., Semenova S. I., *Polyimide Membranes: Applications, Fabrications and Properties*, Routledge, London, **2022**
- [38] Dixit B. C., Dixit R. B., Desai D. J., *Int. J. Polym. Mater.*, **2009**, 58(4), 229
- [39] Jeon J. Y., Tak T. M., *J. Appl. Polym. Sci.*, **1996**, 61, 371
- [40] Dong J., Yin C., Luo W., Zhang Q., *J. Mater. Sci.*, **2013**, 48, 7594
- [41] Chen T. A., Jen A. K. Y., Cai Y., *Macromolecules*, **1996**, 29, 535
- [42] Fang B., Pan K., Meng Q., Cao B., *Polym. Int.*, **2012**, 61, 111
- [43] Rensch T., Fabig S., Grätz S., Borchardt L., *ChemSusChem*, **2022**, 15, e202101975
- [44] Xu Z., Croft Z. L., Guo D., Cao K., Liu G., *J. Polym. Sci.*, **2021**, 59, 943
- [45] Bell V. L., Stump B. L., Gager H., *J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed.*, **1976**, 14, 2275
- [46] Sezer Hicyilmaz A., Celik Bedeloglu A., *SN Appl. Sci.*, **2021**, 3, 363
- [47] Kreuz J. A., Edman J. R., *Adv. Mater.*, **1998**, 10, 1229
- [48] Peng X. K., Huang X. W., Liu R. T., Zhang Y. W., Zhang S. Y., Huang J. T., Min Y. G., *Mater. Rev.*, **2022**, 36, 184(朋小康, 黄兴文, 刘荣涛, 张永文, 张诗洋, 黄锦涛, 闵永刚. 材料导报, **2022**, 36, 184)
- [49] Liu H., Liu Y. D., Chen W. P., Cui T. T., Min Y. G., *Chem. Bull.*, **2024**, 87, 605(刘恒, 刘屹东, 陈伟鹏, 崔婷婷, 闵永刚. 化学通报, **2024**, 87, 605)
- [50] Meador M. A. B., McMillon E., Sandberg A., Barrios E., Wilmoth N. G., Mueller C. H., Miranda F. A., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2014**, 6, 6062
- [51] Zhang D., Li L., Wang Y., Zhang C., Teng C., *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **2023**, 108, 1
- [52] Liu C. S., Chen Y. W., Cao J. R., Liu J., Ma X. H., Liu Y. D., Min Y. G., *Insul. Mater.*, **2021**, 54(2), 1(刘存生, 陈钰玮, 曹景茹, 刘佳, 马小华, 刘屹东, 闵永刚. 绝缘材料, **2021**, 54(2), 1)
- [53] Du Q., Chen W., Guo H., Wang Z., Zhao L., Zhu Y., Tan W., Min Y., Liu Y., *J. Polym. Sci.*, **2024**, 62, 3066
- [54] Liu Y., Chen W., Liu H., Luo J., Zhao L., Zhang J., Wang H., Wu J. W., Feng J. L., Zhu Y., Tan W. Y., Cui T., Min Y., *Polym. Degrad. Stab.*, **2023**, 209, 110264
- [55] Wang Q., Huang F., Cornelius C. J., Fan Y., *J. Membr. Sci.*, **2021**, 621, 118785
- [56] Hou M., Qi W., Li L., Xu R., Xue J., Zhang Y., Song C., Wang T., *J. Membr. Sci.*, **2021**, 635, 119541
- [57] Chen S., Wahiduzzaman M., Ji T., Liu Y., Li Y., Wang C., Sun Y., He G., Maurin G., Wang S., Liu Y., *Angew. Chem.*, **2025**, 137, e202413701
- [58] Liu L., Li Q., Sun L., Riaz A., Li J., Wang Y., Pinnau I., Ma X., *J. Membr. Sci.*, **2025**, 717, 123647
- [59] Lei L., Pan F., Lindbräthen A., Zhang X., Hillestad M., Nie Y., Bai L., He X., Guiver M. D., *Nat. Commun.*, **2021**, 12, 268
- [60] Hu L., Lee W. I., Roy S., Subramanian A., Kisslinger K., Zhu L., Fan S., Hwang S., Bui V. T., Tran T., Zhang G., Ding Y., Ajayan P. M., Nam C. Y., Lin H., *Nat. Commun.*, **2024**, 15, 5688
- [61] Zhang C., Koros W. J., *Adv. Mater.*, **2017**, 29, 1701631
- [62] Cai M. W., Wang Z., Lu X. C., Wu J. H., Zhang S. Y., Min Y. G., *Chem. Bull.*, **2023**, 86, 153(蔡铭威, 王知, 卢小闯, 吴嘉豪, 张诗洋, 闵永刚. 化学通报, **2023**, 86, 153)
- [63] Zhang S. Y., Ye B., Zhao W. T., Min Y. G., *Contemp. Chem. Res.*, **2022**, (19), 17—20(张诗洋, 叶彬, 赵文通, 闵永刚. 当代化工研究, **2022**, (19), 17—20)
- [64] Wang Z., Zhang S. Y., Cai M. W., Lu X. C., Liu Y. D., Min Y. G., *Chem. Bull.*, **2023**, 86, 270(王知, 张诗洋, 蔡铭威, 卢小闯, 刘屹东, 闵永刚. 化学通报, **2023**, 86, 270)
- [65] Cai M. W., Wang Z., Lu X. C., Zhuang J. W., Wu J. H., Zhang S. Y., Min Y. G., *Chem. Ind. Eng. Prog.*, **2023**, 42, 5232(蔡铭威, 王知, 卢小闯, 庄俊伟, 吴嘉豪, 张诗洋, 闵永刚. 化工进展, **2023**, 42, 5232)
- [66] Zhao X. J., Luo X. L., Weng M. M., Min Y. G., *Funct. Mater.*, **2023**, 54, 12018(赵晓君, 罗旭良, 翁梦蔓, 闵永刚. 功能材料, **2023**, 54, 12018)
- [67] Ha H. W., Choudhury A., Kamal T., Kim D. H., Park S. Y., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2012**, 4, 4623
- [68] Huang J., Lv H., Zhao X., Lee J. M., Min Y., *J. Appl. Polym. Sci.*, **2025**, 142, e56879

(Ed.: Y, K, S)