

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.11.027

聚合物静电纺丝材料设计及其功能应用进展

张振兴¹, 魏娟¹, 张森¹, 曹祥祥², 夏维龙², 孙腾飞¹, 林宜昌², 郑宏宇¹

(1. 山东理工大学激光高端制造中心, 山东淄博 255000; 2. 山东新华医疗器械股份有限公司, 山东淄博 255000)

摘要: 综述了采用静电纺丝技术制备聚合物纳米纤维的研究进展, 详细介绍了适用于静电纺丝技术的聚合物材料特点、有机/无机复合材料设计对纤维功能的影响及其应用。简述了静电纺丝设备类型如单针式、同轴式、多流体式及近电场式, 以及包括仪器参数、溶液性质和环境条件在内的纺丝参数对纤维结构的影响。总结了可纺合成聚合物和天然聚合物的特点、应用及现有局限, 并探讨了引入无机金属颗粒与有机颗粒等不同纳米颗粒对纤维功能的增强效应。回顾了聚合物静电纺丝纤维在柔性能量收集、生物医学与环境水处理领域的研究进展。分析表明, 在聚合物中掺杂有机/无机颗粒能够提升纤维功能性, 突破单一聚合物纤维在机械强度、响应速度和生物活性方面的局限性。最后, 总结了当前聚合物静电纺丝技术的优势与挑战, 并对其在未来在绿色加工体系与智能辅助制造的发展趋势进行了展望。

关键词: 聚合物; 静电纺丝; 纳米纤维; 结构调控; 功能应用

中图分类号: O634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)11-0199-09

Progress in material design and functional application of polymer electrospinning

ZHANG Zhenxing¹, WEI Juan¹, ZHANG Sen¹, CAO Xiangxiang², XIA Weilong², Sun Tengfei¹, LAM Yee Cheong²,
ZHENG Hongyu¹

(1. Center for Advanced Laser Manufacturing, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2. Shinva Medical Instrument Co., Ltd., Zibo, China)

Abstract : This review comprehensively summarizes the research progress in the fabrication of polymer nanofibers through electrospinning technology, which elaborates on the characteristics of polymeric materials used in electrospinning, the impact of organic/inorganic composite design on fiber functionality, and their diverse applications. A brief introduction is given to the influence of the types of electrospinning equipment (single-needle, coaxial, multi-fluid, and near-field systems) and processing parameters of the electrostatic spinning (including instrumental parameters, solution-related, and environmental factors) on the morphology of fibers. The properties, applications, and limitations of spinnable synthetic and natural polymers are summarized. Furthermore, the enhancement of fiber functionality through the incorporation of diverse nanoparticles, such as inorganic metal and organic particles, is discussed. Recent advances in the application of polymer electrospun fibers are reviewed, focusing on flexible energy harvesting, biomedical fields, and environmental water treatment. Analysis indicates that polymers doped with organic/inorganic particles can enhance fiber functionality, overcoming the limitations of single-polymer systems in terms of mechanical strength, response speed, and bioactivity. Finally, the current advantages and challenges of polymer electrospinning technology are concluded, with a perspective on its future development trends towards green processing systems and intelligent-assisted manufacturing.

Keywords : polymer ; electrospinning ; nanofiber ; structural regulation ; functional application

静电纺丝工艺可以用于生产平均直径几纳米到几微米的纤维^[1-3]。聚合纳米纤维具有较高的比表面积、出色的机械性能和结构多样性, 已被应用于柔性智能传感器、生物医

疗和环境净化等领域^[4-7]。该技术能够使用多种材料制备纳米纤维, 包括合成聚合物和天然聚合物, 在先进功能材料中具有很高的应用价值^[8]。

基金项目: 国家自然科学基金区域联合基金项目(U24A20109)

通信作者: 魏娟, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为聚合物微流控芯片、生物医用材料

收稿日期: 2025-08-17

引用格式: 张振兴, 魏娟, 张森, 等. 聚合物静电纺丝材料设计及其功能应用进展[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(11): 199-207.

ZHANG Zhenxing, WEI Juan, ZHANG Sen, et al. Progress in material design and functional application of polymer electrospinning[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(11): 199-207.

材料设计在静电纺丝体系中起到至关重要的作用,直接决定纤维的成型、微观结构以及表面性能^[9]。通过调控聚合物类型、分子量、溶液浓度、黏度和导电率等参数实现对纤维形貌(直径、取向以及孔隙率)与结构(核壳、梯度结构)的精准构筑^[10]。不同纺丝方式可以进一步拓展静电纺丝在多功能聚合物材料集成方面的应用^[11-12]。随着材料功能需求的提升,静电纺丝设计理念从“结构可控”向着“结构-功能协同”发展,扩展了聚合物纤维在自响应、高灵敏和自修复领域的发展^[13-14]。

笔者综述了静电纺丝技术的工作原理、影响因素、纺丝材料和纤维应用。介绍了静电纺丝基本工作原理,并概述了不同静电纺丝设备和纺丝参数对于纤维形貌和尺寸的影响。分析不同聚合物与纳米颗粒的复合对静电纺丝纤维功能、结构形貌的调控作用。针对聚合物静电纺丝纤维的功能性,综合探讨了在柔性能量收集平台、生物医学及环境水净化等领域的最新应用。最后,对当前聚合物静电纺丝的优势与局限性进行了分析,并对未来发展进行了展望。

1 静电纺丝原理与工艺

1.1 静电纺丝原理

静电纺丝利用静电力作为牵引力制备微纳米纤维^[15]。图1展示了静电纺丝基本装置,包括注射器、注射泵、喷丝头、高压电源和金属接收板/滚筒。静电纺丝所用聚合物通常通过溶剂溶解或热熔处理,后经注射器输送至喷丝头以进行纤维形成^[9]。当电源施加高压电突破溶液的临界电压(V_c)后,静电力突破溶液的表面张力形成泰勒锥。带电聚合物材料从泰勒锥尖端喷出时的临界电压由泰勒方程确定,见式(1),方程需考虑溶液的表面张力和黏度^[1]:

$$V_c^2 = 4 \frac{H^2}{h^2} \left[\ln \left(\frac{2h}{R} - 1.5 \right) \right] (1.3\pi R\gamma) \times 0.09 \quad (1)$$

式中: H 代表接收器与喷丝头的距离,单位cm; h 是含有溶液的注射器长度,单位cm; R 是喷丝头半径,单位cm; γ 是溶液的表面张力,单位mN/m^[16]。

在射流形成过程中,电压升高使静电力逐渐超过液体表面张力,促使液体自锥体尖端喷出形成射流^[17]。射流初始阶段呈现稳定直线段,通过调节电压来控制泰勒锥强度,通过调整施加电压实现长度精确控^[18]。射流自泰勒锥喷射后,首

先因溶剂蒸发和电荷耗散而变细,然后进入失稳摆动阶段,最终固化并被收集器捕获。

1.2 静电纺丝装置

单针静电纺丝是通过单一喷丝头在固定喷丝位置实现纤维喷射和沉积的加工技术。这种纺丝方法操作简单、设备结构简单,适用于制备结构均一、直径可控的纳米纤维^[19-20]。然而,这种方法存在纺丝效率较低、产量有限以及对环境敏感等问题,不适用于大规模生产。同轴静电纺丝采用内外不同通道直径的复合喷丝头^[21-23]。这种纺丝方法可以制备出精密的核壳或者中空纳米纤维,实现两种不同材料性能有效复合^[24]。与单针头静电纺丝相比,同轴静电纺丝能够赋予聚合物更丰富的功能和更优异的力学性能。

多流体静电纺丝具有较高的生产效率,但喷头之间会因为电场干扰等问题影响纺丝过程的稳定性。为了控制多喷嘴静电纺丝中的电场和喷射沉积,可以添加辅助电极或者介电材料^[25-26]。Zhu等^[27]使用线性双阵列对比了三种不同的喷嘴布置,结果表明梯形波布置形成的电场强度更高,且均匀性更好。Salehuddin等^[28]比较了两种不同喷嘴间距的静电纺丝形貌,发现不等间距可以改善电场的均一性和纤维分布。

近电场静电纺丝是一种改进的静电纺丝技术,通过缩短接收器与喷丝头之间的距离,实现精准控制纤维的沉积位置^[29]。同时,近电场静电纺丝上施加的电压较低,可以降低生产风险。同时以高精度、高可控性的优势,推动静电纺丝向着可编辑方向发展。此外,在静电纺丝系统中引入离心力或磁场等辅助能场,能够精确控制射流运动轨迹,为制备复杂三维结构或高度有序纤维阵列提供了有效手段。另一方面,溶液吹纺技术以高速气流替代静电力作为纤维的主要拉伸动力,在显著提高纤维制备效率的同时,降低了对材料导电性的依赖,拓展了适用于纺丝的材料体系。这些新型纺丝工艺的发展与应用,正有力推动静电纺丝技术朝着产业化生产与结构功能多样化方向持续迈进。

1.3 纺丝参数对纤维结构的影响

影响静电纺丝纤维特征的参数可以分为三类:(1)仪器变量,如电压、接收器类型和流速等;(2)材料和溶液类型,包括溶液黏度、导电性和浓度;(3)环境因素,如湿度和温度等因素。

当纺丝电压过高或过低均会导致串珠缺陷:过高电压加速蒸发,致使泰勒锥收缩与射流失稳,纤维变细或成珠,过低电压则因电场强度不足,无法稳定泰勒锥与射流,导致纤维断裂与成珠^[30]。对于高黏度溶液,进料速度过低时会导致静电纺丝纤维变粗^[31]。同时,喷丝头到接收器的距离会改变喷丝头内电场强度,影响纺丝射流的轨迹、纤维沉积时间以及纤维形态和尺寸^[32]。根电场强度是聚合物溶液形成细化纤维的关键因素,接收距离增加同样会导致纤维直径变粗。

聚合物溶液性质也会直接影响静电纺丝纤维形态和特性。例如,Parbu等^[33]在聚乙烯醇(PVA)溶液中添加醋酸纤维素(CA)改变溶液黏度研究纤维形态和直径变化,证明了溶液

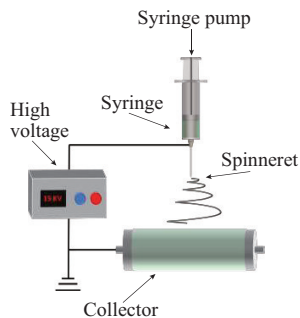


图1 静电纺丝设备示意图

Fig. 1 Electrospinning setup schematic

黏度的变化会对纤维直径产生影响。此外,空气湿度会间接影响溶液的蒸发速率,从而影响电荷在射流表面的迁移和去除^[34-35]。这是因为空气中的中离子成分,会在高电压下传导电荷降低腔室内的电场强度影响纤维成型。因此随着湿度的增加,空气中的水分子逐渐增加导致空气中的电离作用得到增强^[36-37]。例如,Huang等^[38]指出,环境温度影响PVDF纤维形态:低温易产生珠状结构,高温则导致纤维快速固化或脆化。

综上所述,成功的静电纺丝过程依赖于仪器参数、溶液性质以及环境条件等多种因素的协同调控,这些因素对纤维的直径、形貌及力学性能等关键特性具有显著影响。

2 可纺聚合物体系与材料复合

2.1 常见静电纺丝聚合物

合成高分子材料与天然高分子材料因具有优良的可纺性和成膜性,常被用于静电纺丝中。常见的合成高分子材料有PVA,聚己内酯(PCL)、聚偏氟乙烯(PVDF)和聚氨酯(PU)等材料^[39-43]。丝素蛋白(SF)、明胶(Gel)等则是常见的天然高分子材料。

2.1.1 PVA

PVA是一种合成的高生物相容性聚合物,由聚醋酸乙酯(PVAs)水解合成^[44]。PVA具有较强的生物相容性、可生物降解性和较低的毒性,被广泛应用于生物组织工程和药物输送系统中^[45]。PVA具有较强的可纺性能,可溶解在水溶液,水/乙醇和水/乙酸溶液中^[46]。作为超亲水性材料,能够增加药物溶解性,当纤维接触水等介质后会快速降解并释放包埋在纤维中的药物。例如,EI-Okaily等^[47]将PVA、壳聚糖(CS)和纳米生物玻璃(BG)共混制备成静电纺丝纤维,作为药物输载体。然而,PVA较高的水溶性,可能导致包载的药物在尚未被人体充分吸收前快速释放,造成药物浪费。在PVA实际应用中通常需引入辅助颗粒或功能组分以延缓降解速率,实现可控释放。

2.1.2 PCL

PCL是通过 ε -己内脂单体在金属阴离子络合催化剂催化下开环聚合而形成的高分子有机聚合物^[40]。与PVA材料类似,PCL同样具有较强的生物相容性和生物降解性能,也常常被用在生物医学领域^[41,48]。相较于亲水性的PVA,PCL是一种疏水性材料;同时PCL材料可以通过水解中间体6-羟基乙酸和乙酰辅酶A降解,通过柠檬酸循环从体内消除^[49-50]。Al-Baadani等^[51]利用PCL的疏水特性控制辛伐他汀(SIM)的释放效率,实现细胞归巢、血管生成和骨组织再生。同时,因为PCL这种缓慢降解特性可以实现药物长达一个月的缓慢释放,以持续诱导干细胞向成骨细胞分化。

2.1.3 PVDF

PVDF显示出五种不同的结晶相,包括非极性 α 相,极性 β 、 γ 、 δ 和 ε 相^[42],其中 β 相具有固有的自发极化特性,赋予PVDF材料铁电和压电特性^[52]。 γ 相也为电活性相,同样具有优异的能量储存能力,相比较 β 相具有更低的压电性和更

高的融化温度^[53]。其中 α 相为反式-反高斯构象(TGTG'), β 相为全反式构象(TTTT), γ 和 ε 相为T3GT3G'构象^[54]。PVDF独特的构象特性,常被用于构建纳米发电机、传感器等压电响应器件。例如,Du等^[55]将PVDF溶解在二甲基甲酰胺(DMF)/丙酮(ACE)溶剂中,制备成静电纺丝纤维。之后将纤维制备成高性能压电纳米发电机(PENGs),表现出优异柔韧性,使得纤维膜在弯曲等条件下能保持稳定,同时展现出较高的压电输出性能(62 V)。

2.1.4 PU

聚氨酯合成主要由异氰酸酯(—N=C=O)与多元醇分子(R—OH)反应,其中异氰酸酯表现出电子共振结构和高化学反应,能够与多元醇进行反应形成氨基甲酸酯^[43]。常见聚氨酯结构中,软段是由赋予材料良好柔韧性和弹性的多元醇组成,硬段由赋予材料刚性的多异氰酸酯组成^[56]。PU通常按一定质量比例加入四氢呋喃(THF)和DMF的混合溶剂中。由于这两种溶剂具有较强的极性,能够与PU分子间氢键作用和范德华力有效破坏聚合物链之间相互作用,实现PU的物理溶解,形成均匀稳定的静电纺丝溶液。Yue等^[57]利用PU制备出静电纺丝纤维以实现高拉伸应力(1.83 MPa)和应变(453%),这种良好的机械性能能够更快适应活动变化能力。

2.1.5 Gel

Gel是天然胶原蛋白水解的产物,主要由甘氨酸、脯氨酸和羟脯氨酸等氨基酸残基通过肽键连接而成,属于线性高分子多肽^[58-59]。Gel具有良好的生物相容性、生物可降解性和较低的免疫原性,而被广泛应用于组织工程、药物输送和伤口愈合等领域。而在静电纺丝中,Gel作为亲水性高分子,具有良好的成纤维性。Gel用于静电纺丝制造支架时,在溶解过程中会导致天然胶原中的I型D带丢失同时破坏三螺旋构象^[60]。同时,纯明胶制备静电纺丝溶液会在室温下凝固,且纺丝纤维机械性能较差,需与其他合成聚合物共混以增强溶液稳定性及纤维力学性能。Wang等^[61]将Gel与PCL共混,通过湿法静电纺丝制备出结构稳定的三维多孔纤维。PCL的疏水性与Gel的亲水性形成互补,不仅可以改善细胞在支架表面黏附性能并延缓明胶的降解速度,同时使PCL/Gel制备的三维支架具备修复骨关节炎所致软骨退化的作用。

对于合成聚合物的材料设计方法,采用共聚改性(如PCL和PVP共混增强亲水性)和表面接枝技术,从而在分子层面精准优化材料的本征性能。此外在结构设计上,利用同轴和多轴技术建立核壳纤维实现药物的可控释放,或者使用定向接收装置制备高度有序的纤维阵列引导细胞定向生长。同时通过并列式纺丝制备出具有两种化学性质的组成侧面的Janus纤维膜,这种不对称性可以产生定向驱动力实现液体的定向流动。

2.1.6 SF

SF是从自然界中各种昆虫(蜘蛛,蚕)产生的聚合物蛋白质提取。SF主要由丝心蛋白和包覆表面的丝胶蛋白组成,其中丝心蛋白富含疏水性的甘氨酸和丙氨酸,赋予纤维良好

的机械支撑,而丝胶蛋白则含有脂肪和蜡等成分赋予纤维表面亲水特性^[62]。同时,SF高分子链中含有大量 β -折晶区,可以赋予SF优良的机械性能和韧性^[63],使其在静电纺丝过程中具备一定的成纤维稳定性。但SF制备成的静电纺丝溶液容易在空气中聚集和凝胶化,会影响纺丝纤维的稳定和可重复性。SF材料也需要添加合成聚合物对其进行辅助。Zhang等^[64]使用湿法静电纺丝开发了一种用于骨组织再生的双相一体的SF/PCL支架,再结合CO₂气体发泡技术将支架转换成3D多孔支架。实验结果表明,SF/PCL支架具有良好的生物相容性和可降解性。

在静电纺丝中,合成与天然聚合物因独特的化学结构和性能被广泛研究。合成聚合物具有规整的分子链结构和较强的疏水性,会赋予聚合物纤维优异的力学性能与成纤维稳定性;同时酯键、脲键等化学键的存在会赋予纤维良好的可控降解性,便于通过接枝、共聚等方式引入更多官能团以实现聚合物功能的拓展^[65]。天然聚合物如Gel,SF和CS富含羧基、氨基和羟基等亲水性官能团,这些官能团赋予材料良好水溶性和生物可降解性,从而促进细胞黏附、增殖及分化。然而,天然聚合物分子链无序,氢键交联松散,导致可纺性与力学性能不足。合成与天然聚合物的共混设计,是构建兼具生物活性和优异机械性能的多功能纳米纤维支架的理想策略。

2.2 有机/无机复合材料

单一聚合物静电纺丝纤维往往在机械强度、响应速度和生物活性方面存在一定的局限性,难以满足多功能复合材料的发展需求。因此研究人员为了突破这一瓶颈,在聚合物中掺杂有机或者无机颗粒成为提升纤维功能性的策略之一。无机纳米粒子[氧化锌(ZnO)、二氧化钛(TiO₂)、银(Ag)等]可以赋予纤维抗菌性、光催化性能、电学响应速度和力学性能。有机纳米粒子(CS、多肽、小分子导体等)则有助于实现可控释放或者生物相容性调控^[66]。

2.2.1 ZnO

ZnO是一种常见的无机金属氧化物,将ZnO掺杂到静电纺丝纤维中,能够赋予材料一系列增强的生物活性和电学响应能力^[67]。ZnO具有优异的化学稳定性,因此难以与高分子主链发生共价键合,但可以通过氢键作用和范德华力增强与聚合物基体之间的界面作用^[68-69]。ZnO表面存在羟基官能团,可以与聚合物中的羟基、氨基或者羧基形成氢键网络,提升聚合物结构稳定性和力学性能^[70]。此外,ZnO颗粒的六方晶系结构,具有显著的压电性。特别是掺杂ZnO可以促进PVDF等聚合物中 β 相晶体生成,显著提升纤维的压电性能^[71]。同时ZnO具备宽禁带半导体特性,能在紫外光照射下产生光催化反应,生成活性氧(ROS),从而对细菌和病毒产生氧化破坏作用。Zn²⁺的释放也对革兰氏阳/阴性菌具有杀菌作用,ZnO与聚合物静电纺丝结合制备的纤维常用在创伤敷料和抗菌等场景。Kuddushi等^[72]将ZnO混合到PCL溶液中,使用静电纺丝方法制备聚合物纳米纤维,ZnO的加入降

低了纤维的透明度和亲水性,但是赋予纤维抗菌性能、促进细胞增殖、血管生成以及胶原排列,且细胞存活率大于82%。ZnO作为一种高效的多功能纳米填料,在聚合物静电纺丝材料设计中发挥着关键作用。其添加可显著改善纤维的力学性能和热稳定性,同时赋予材料优异的抗菌性、紫外屏蔽能力以及对外部环境(力、光等)的刺激响应行为。这使得ZnO增强的纳米纤维膜在伤口敷料、防护服装和传感材料等领域展现出广阔的应用前景。

2.2.2 TiO₂

TiO₂颗粒具有良好的空气净化功能以及热稳定性^[73-74]。TiO₂颗粒表面存在羟基,易于与聚合物链段中的羟基、氨基等形成氢键或者通过静电相互作用增强界面结合。TiO₂为n型宽禁带半导体(带隙为3~3.2eV),在紫外光照下生成电子-空穴对,进一步生成OH·、O₂⁻等活性物质,使得TiO₂常用于空气净化、水处理和抗菌等场合^[75]。TiO₂具有较高的热稳定性(熔点1843℃),掺杂到聚合物中可以显著提高纤维的热分解温度与阻燃特性^[76]。TiO₂是具有光催化性和热稳定性的无机材料,当掺杂到聚合物静电纺丝纤维中可以增强和赋予纤维空气净化和阻燃性能,拓展了纤维在环境治理和高性能防护材料中的应用前景。

2.2.3 Ag

Ag具有优异的抗菌性能、导电性和表面活性。在掺杂到聚合物纤维中后,Ag纳米粒子不仅能够通过持续释放Ag⁺与细菌细胞膜上的巯基相互作用,破坏细胞膜结构、干扰代谢过程,实现广谱抗菌效应,还能赋予纤维优异柔韧性和导电性能^[77-78]。此外,银还具有表面增强拉曼散射(SERS)活性,故其同时适用于高灵敏检测平台^[79]。Ag可通过多种方式掺入静电纺丝纤维,例如将银纳米颗粒(AgNPs)直接混入纺丝液中、利用电场原位还原银盐,或在纤维表面沉积溅射AgNPs。例如,Khan等^[80]将硝酸银和四氢硼酸与聚苯胺(PAN)聚合物在DMF溶液中混合,通过静电纺丝方法使Ag纳米粒子均匀分布在纤维中,使用平行条纹法测试表明纤维膜对于多种细菌表现出优异的抗菌活性。Ag能优化聚合物纤维的综合性能,不仅具备广谱抗菌性与优异导电性,还可通过构建导电网络及纳米分散相强化化学性能,SERS效应为其在高灵敏度检测领域的应用提供了潜力。

2.2.4 CS

甲壳素是由 β -(1 $\rightarrow$ 4)连接的N-乙酰-D-葡萄糖胺组成的半结晶共聚物。CS是甲壳素的部分脱乙酰化的产物,主要组成为 β -(1 $\rightarrow$ 4)-2-乙酰氨基-D-葡萄糖和 β -(1 $\rightarrow$ 4)-2-氨基-D-葡萄糖组成^[81]。独特氨基结构,使得CS在酸性条件下可溶于水,表现出良好的阳离子特性。CS虽然为天然聚合物具有一定可纺性能,CS物链刚性过大且制备出的溶液导电性较差导致纺丝条件较高难以制备^[82]。因此,当前的研究主要集中于将CS以纳米颗粒形式直接掺入静电纺丝纤维中,例如与PVA,PCL或PVDF等聚合物材料进行共混。同时,CS具备天然的抗菌活性,阳离子氨基能够与细菌细胞膜发生静

电作用,从而有效地抑制细菌生长^[83]。此外,可以作为药物或者活性分子的载体,实现在纤维中的释放。

2.2.5 多肽类等材料

凭借对天然肽功能的有效模拟以及出色的生物相容性和可降解特性,多肽类材料已被广泛认可为具有重要应用前景的生物材料。多肽类是一类氨基酸残基通过肽链连接而成的分子,分子结构可以通过精准的序列设计实现特定功能,例如细胞黏附、抗菌活性和响应性释放^[84]。在静电纺丝制备过程中,多肽通常以两种形式引入:一种是以游离态直接分散掺杂在静电纺丝溶液中,通过纺丝过程中将多肽包埋在纤维中;另一种是以涂层等形式将多肽组装在纤维周边以提高纤维的生物相容性^[85]。肽的引入可增强纤维的生物相容性,并调节其润湿性、降解速率和力学性能,还能用于酶响应型药物释放。Jiang等^[86]将多肽与胱氨酸二甲酯掺入聚氨酯中,通过静电纺丝制成纳米纤维。其纤维具备聚氨酯的高拉伸性能(杨氏模量=286.47 MPa),每根纤维可以提起50 g重物。

在静电纺丝材料设计中,掺杂无机或者有机颗粒将赋予聚合物纤维更多特性,从而突破单一聚合物材料的功能局限性。除上述介绍的几种颗粒外,还可以掺杂MXene、碳纳米管(CNT)等二维材料制备柔性传感器,掺杂钙钛矿或者量子点实现光学传感与生物成像。然而这一策略也同样面临挑战,例如纳米颗粒固有的高表面能导致其在聚合物溶液中团聚,形成大颗粒从而堵塞喷头并在纤维中引入结构缺陷;同时纳米颗粒会改变溶液流变性质,直接影响泰勒锥的形成与射流的稳定性。因此,为了解决这一问题需要对纳米颗粒进行表面改性以增强其与聚合物的相容性以及分散稳定性。

3 聚合物静电纺丝纤维的应用进展

3.1 柔性能量收集平台

3.1.1 压电纳米发电机

传统压电陶瓷材料因其固有的刚性晶体结构,在应用上存在较大局限,而通过静电纺丝制备的聚合物纳米纤维在柔性和功能性方面展现出显著优势,有望弥补上述不足^[87]。在静电纺丝过程中,电场拉伸将聚合物材料的非极性相转变成电活性相,从而赋予纤维压电性能^[88]。例如PVDF会在电场作用下将 α 相转换成 β 相,从而组成高压电响应的压电纳米发电机。

为了提升纤维的压电相成核率,研究人员向聚合物纤维中掺杂部分无机颗粒和有机颗粒。Ma等^[54]将ZnO和Ag纳米颗粒掺杂到PVDF纤维中,以提升纤维的压电输出能力和灵敏度。ZnO和Ag纳米颗粒的引入有效增强了PVDF纤维中的压电相含量。复合纤维膜的开路电压(V_{oc})达到11.5 V,短路电流(I_{sc})为1.92 μ A,分别是纯PVDF纤维的3.5倍和4倍,表明ZnO@Ag/PVDF纤维压电性能显著提升。ZnO@Ag/PVDF纤维对于身体不同动作表现出不同的压电灵敏度。此外,对于压电传感器的电活性 β 相的提升不仅可以通过掺杂无机纳米颗粒实现,还可以通过调节纤维结构实

现^[89]。无机颗粒掺杂作为一种有效的材料设计策略,可以通过异相与局部电场协同作用调节聚合物的结晶行为,实现压电性能的定向成长。值得注意的是除了掺杂颗粒改性外,纤维本身的微观调控同样对于晶向形成具有重要的影响。

3.1.2 摩擦电纳米发电机(TENG)

TENG在将机械能转化为电能方面表现出优异的能力,作为一种适用于可穿戴和小型电子设备的能量收集技术受到广泛关注^[90]。传统TENG材料因为表面积小和机械柔性不足,能量转换效率受到限制,难以实现高电荷收集和传输性能。Mahanty等^[91]通过将PAN修饰到聚偏氟乙烯-三氟乙烯(PVDF-TrFE)/钛酸钡(BTO)静电纺丝纤维上,构建TENG器件, V_{oc} =300 V, I_{sc} =77 μ A,瞬时能量转化效率为88%,相对于纯PVDF-TrFE性能显著提升。结果表明,静电纺丝制备出的纳米纤维可以有效克服传统摩擦电材料局限性,并利用纤维的高比表面和优异的机械柔性极大提升了TENG的传感性能。

研究人员通过在静电纺丝纳米纤维中添加不同的无机/有机纳米颗粒来进一步提升TENG的输出性能,增强纤维表面摩擦电位和信号输出。Parandeh等^[92]开发了一种基于PCL/氧化石墨烯(rGO)纳米纤维层与纤维素纸的环保型TENG,其中纤维以PCL/rGO纳米纤维作为负极摩擦层,纤维素纸为正极摩擦层,通过垂直接触分离模式进行工作。为了提升TENG摩擦电输出性能,可以引入功能化纳米颗粒,以调节聚合物纤维表面电荷与摩擦电行为。另外,通过结构优化可以实现摩擦电输出能力的增强,如构建多级和孔隙结构以增大有效接触面积,实现功能分区增强电荷定向分离,增强机械能的收集灵敏度。这些尺度结构设计方法优化了电荷产生、捕获与收集过程,为开发高性能的TENG提供了坚实基础。

3.2 生物医学领域

3.2.1 伤口愈合

用于伤口愈合的敷料应有效消除多余渗出物、保护伤口组织避免伤口感染并且具有生物相容性^[93]。静电纺丝技术制备出的聚合物纳米纤维可以模仿天然细胞外基质(ECM)特征,从而增强细胞活性(增殖、黏附、迁移和分化)^[94]。皮肤损伤在自然状态下难以快速修复,因此需要使用外部敷料以加速伤口愈合进程。例如,Huang等^[95]利用PCL和SF材料制备成核壳纤维,其中PCL为芯层提供力学支撑,SF为壳层以增强纤维生物相容性。体内实验表明,金黄色葡萄球菌感染大鼠模型第6天伤口闭合率为66.3%,第18天达97.7%,且能促进血管生成与胶原沉积;而纯天然聚合物敷料在处理复杂伤口时仍需借助功能颗粒增强性能。天然聚合物制备的敷料,对于复杂伤口(如糖尿病伤口、感染型伤口等),仍需复合功能性颗粒以增强其性能。

Zhan等^[96]将CS/ZnO NPs构建为纤维底层,将CS/MXene复合到负载虾青素(AST)PVA中,形成PVA/CS/MXene@AST纤维上层。该复合纤维膜底层ZnO NPs通过

释放 Zn^{2+} 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌率超过 90%; 上层 MXene 凭借其尖锐边缘协同增强抗菌作用, AST 组分则具有强抗氧化性, 对 DPPH 自由基清除率超过 90%。在糖尿病小鼠模型中, 该纤维膜使伤口修复率达 97.25%, 并显著促进胶原沉积和血管生成。该材料策略通过调控静电纺丝纤维结构并集成多功能, 同步实现抗菌、抗氧化与组织再生, 在分子及细胞层面协同促进伤口愈合。

3.2.2 骨组织修复

骨组织工程是一种修复或再生骨缺陷的替代治疗方法。骨重塑涉及两个过程: 破骨细胞介导的骨吸收和成骨细胞介导的骨形成^[97]。由于骨组织工程支架需体内植入, 其生物相容性与可降解性标准远高于皮肤外用敷料。基于此, 具有高度生物相容性的静电纺丝纤维(尤其是能有效模拟细胞外基质)已成为骨修复研究中的一种关键材料。例如, Al-Baadani 等^[98]通过静电纺丝技术制备了 PCL/Gel 复合膜, 用于骨组织再生的可调药物输送系统。PCL/Gel-5 组(Gel, PCL 质量分数分别为 20%, 15%)细胞黏附、增殖和成骨分化能力最强, 增加 PCL 浓度有助于增强骨组织修复效率。Lei 等^[99]溶胶-凝胶静电纺丝制备了硼掺杂二氧化硅/CS (SiO_2 -B/CS)弹性三维海绵支架, 支架可以协同释放 Si^{4+} 和 B^{3+} 从而抑制细菌生长。大鼠颅骨破损模型中, 第六周时 SiO_2 -B/CS 组新骨体积分数为 20.8% 显著高于对照组。在骨组织工程的材料设计中, 通常通过复合天然与合成聚合物构建纤维支架, 在兼顾优良机械性能与生物相容性的同时, 实现对结构支撑和生物微环境调控的双重目标, 从而推动一体化骨再生策略的实现。

3.2.3 药物输送

在药物输送系统中, 静电纺丝技术凭借独特的纤维结构设计能力, 成为一种高效的药物载体构建策略。药物可以在纺丝过程中均匀分布在聚合物基质中, 或者使用涂覆和喷涂的方法固定在纤维表面, 从而根据需求释放药物^[100]。例如, Tolun 等^[101]采用单针和同轴静电纺丝分别制备了姜黄素/羟丙基- β -环糊精包合物(HP- β -CD)/支链淀粉纳米纤维。纤维在 350 min 内的药物累积释放率为 80%, 而同轴核壳纤维的同期释放率达 93%, 且热稳定性更高(分解温度 291.63 $^{\circ}\text{C}$)。Cao 等^[102]将过敏性蛋白(OVA)包埋在阳离子脂质(DDA)中, 之后将包埋颗粒喷涂到导电聚吡咯(PPy)/PVA 纤维基底上, 负载后纤维直径为 320 nm。在离子导入作用下, 能高效释放并促进过敏原渗透, 增强朗格汉斯细胞摄取, 调节免疫平衡。在哮喘小鼠模型中, 纤维膜可以降低气道高反应和 OVA 特异性免疫球蛋白 E 水平, 促进保护性抗体产生, 维持肺泡正常结构。药物输送静电纺丝纤维的材料设计聚焦于可控降解生物材料的选择和多级纤维结构的构建以及功能化表面的修饰, 协同优化药物的负载、释放动力学与靶向药递送效率。

3.3 环境水处理

3.3.1 油水分离

聚合物静电纺丝纤维在油水分离领域展现出独特优势。通过制备具有疏水/亲油或者亲水/疏油的聚合物材料, 或通过掺杂功能性纳米颗粒对纤维表面进行修饰, 如 SiO_2 , TiO_2 和其他氟化颗粒, 制备出超疏水性能或超亲水纤维膜, 实现高效的油水分离^[103]。例如, Feng 等^[104]使用多流体静电纺丝技术制备 PVDF-PVDF/PDA 纳米纤维膜, 平均纤维直径为 150 nm, 孔体积 0.043 cm^3/g 。PVDF-PVDF/PDA 纤维的水接触角为 125.9 $^{\circ}$, 且展现出亲油性, 同时根据油水分离实验可以看出该纤维膜可以实现快速的油水分离。Chen 等^[105]通过静电纺丝制备了 TPU/二苯甲酮(BPAF-an)纳米纤维膜, 平均纤维直径为 0.88 μm , 水接触角为 145.2 $^{\circ}$ 。TPU/BPAF-an 纳米纤维膜对于油水混合物的分离效率超过 99%, 而通过 100 次循环时, 分离效率可以维持在 96%。聚合物静电纺丝纤维膜的材料设计主要围绕表面化学特性调控和微观结构构建两方面展开。该策略的核心在于通过降低纤维表面能, 从而有效赋予纤维膜疏水性或疏油性。降低纤维膜表面能主要有两种途径: 一是通过表面喷涂方式覆盖低表面能材料; 二是通过在聚合物分子链中引入氟化基团进行化学改性。两者均可有效降低表面能, 从而赋予纤维膜疏水性, 实现油水分离。

3.3.2 污水处理

现代社会的快速城市化和工业化导致废水中的有机化合物和微生物增加^[5]。聚合物静电纺丝纤维为了实现快速的污水处理速度往往需要引入改善污染物吸附的官能团^[106]。Li 等^[107]以苹果皮为碳源制备了 CDs@BN 复合物, 并通过静电纺丝将其掺杂于 PAN 中制成纳米纤维膜。该膜对亚甲基蓝和罗明丹 B 表现出高吸附容量(分别为 220.79 和 198.81 mg/g), 5 次循环后吸附性能保持 95% 以上, 且在太阳光照 1 小时后对两种染料的去除率最高可达 99.5%。Chen 等^[108]使用无针静电纺丝技术, 以 PVA 为原料混合 *N*-甲基-4-吡啶甲基硫酸盐(SBQ)制备出高通量、高耐久性的纳米纤维膜, 纤维直径为 270 nm。纯水通量最高可以达到 4 785.23 L/($\text{m}^2 \cdot \text{h}$), 10 nm 以上颗粒残留率为 99%; 而在过滤湖水时, 高锰酸盐降至 1.05 mg/L , 大肠杆菌完全截留。综上所述, 聚合物静电纺丝在污水处理领域主要围绕高吸附和高通量两大目标展开。通过将功能性组分掺杂到聚合物基体中, 显著提升纤维表面对于特定污染物的吸附。此类材料设计可同时实现高吸附率、高通量、良好的机械强度与抗污染性, 体现了面向高效能、多功能水处理材料的发展趋势。

4 结语与展望

近年来, 能量收集、生物医疗和水处理等领域对高性能纳米纤维的迫切需求, 持续推动了聚合物静电纺丝技术的发展。合成与天然高分子材料的系统设计以及功能性颗粒的引入可以对纤维的结构和功能进行调控。然而静电纺丝技术仍面临着大规模生产效率不足、功能性符合程度有限以及

智能响应能力不足等挑战;同时传统工艺大量使用有机溶剂带来的环境污染问题急需解决。此外,为了响应绿色可持续发展趋势研究正在向着引入绿色加工体系发展,并通过优化工艺参数减少制备的不稳定性。此外,人工智能在材料设计与参数调控中的应用显示出巨大潜力,机器学习、深度学习与数字孪生技术的引入使得配方、电场、湿度与温度等多因素可实现高效优化,并通过实时监测和闭环控制推动静电纺丝过程的智能化升级

未来,聚合物静电纺丝技术将朝着多元化与智能化深度融合的方向进行演化。多能场辅助(电场、磁场和热场等)、绿色水基纺丝体系以及吹纺体系纺丝技术有望突破;在材料设计方面,聚合物静电纺丝技术应更注重多功能材料复合、生物基与可降解材料以及智能响应材料的开发,从而进一步增强聚合物的催化、抗菌和传感等功能;在应用拓展方面,静电纺丝技术有望在血管化组织工程支架、精准时序控制药物释放系统以及电催化纤维电极等领域实现更深入的应用。同时人工智能与机器学习将在工艺优化与质量控制中发挥核心作用,进一步提升生产效率实现从实验室迈向大规模生产转换。

参考文献

- [1] RENEKER D H, et al. *Polymer*, 2008, 49(10):2 387–2 425.
- [2] JIANG J-W, et al. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2023, 24(3):511–529.
- [3] 潘雨晴,等. *工程塑料应用*, 2025, 53(3):166–173.
PAN Yuqing, et al. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(3):166–173.
- [4] XUE J, et al. *Chemical Reviews*, 2019, 119(8):5 298–5 415.
- [5] XU C, et al. *Materials Today*, 2025, 87:151–175.
- [6] NACHEV N, et al. *Molecules*, 2022, 27(17):57–38.
- [7] JAHAN I, et al. *Journal of Polymers and the Environment*, 2022, 30(5):1 709–1 729.
- [8] YU J, et al. *Industrial Crops and Products*, 2021, 168. DOI:10.1016/j.indcrop.2021.113610.
- [9] WANG M, et al. *Materials Highlights*, 2020, 1(1):1–13.
- [10] LI M S, et al. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, 59(13):6 301–6 308.
- [11] XING J Y, et al. *Materials Today Bio*, 2023, 21. DOI:10.1016/j.mtbio.2023.100710.
- [12] KING W, et al. *Polymers*, 2021, 13(7). DOI: 10.3390/polym13071097.
- [13] LIU L, et al. *Composites Communications*, 2020, 22. DOI: 10.1016/j.coco.2020.100506.
- [14] ZHENG Q L, et al. *RSC Advances*, 2024, 14 (5):3 359–3 378.
- [15] HUANG J, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 491. DOI: 10.1016/j.cej.2024.151971.
- [16] TAYLOR G. *Proc. Roy. Soc. London A*, 1969, 313:453–475.
- [17] SU C L. *Fibers and Polymers*, 2013, 14:542–549.
- [18] DUFT D, et al. *Nature*, 2003, 421(6919):128–128.
- [19] WANG C, et al. *Progress in Materials Science*, 2025, 154. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2025.101494.
- [20] MUNAWAR M A, et al. *Materials Chemistry and Physics*, 2025, 329. DOI:10.1016/j.matchemphys.2024.130009.
- [21] BATKA O, et al. *Applied Sciences*, 2024, 14(11). DOI: 10.3390/app14114638.
- [22] 张奇等, *膜科学与技术*, 2020, 40(06):104–110.
ZHANG Qi, et al. *Membrane Science and Technology*, 2020, 40(06):104–110.
- [23] VYSLOUŽILOVÁ L, et al. *International Journal of Pharmaceutics*, 2017, 516(1–2):293–300.
- [24] LI X, et al. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, 4(37):14 453–14 463.
- [25] BEAUDOIN É J, et al. *Nanomaterials*, 2022, 12(8):1356.
- [26] ZHU Z, et al. *AIP Advances*, 2019, 9(10). DOI: 10.1063/1.5111936.
- [27] ZHU Z, et al. *AIP Advances*, 2018, 8(8). DOI:10.1063/1.5026908.
- [28] SALEHHUDIN H S, et al. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 85(0):544–555.
- [29] PARAJULI D, et al. *Virtual and Physical Prototyping*, 2016, 11(3):193–207.
- [30] GEE S, et al. *Journal of Membrane Science*, 2018, 563, 804–812.
- [31] LIMA F D A, et al. *Journal of Environmental Management*, 2024, 362. DOI:10.1016/j.jenvman.2024.121352.
- [32] OY N, et al. *Chemical Engineering Science*, 2021, 230. DOI: 10.1016/j.ces.2020.116200.
- [33] PRABU G T V, et al. *Scientific Reports*, 2020, 10(1). DOI: 10.1038/s41598-020-60752-6.
- [34] COLLINS G, et al. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(4). DOI: 10.1063/1.3682464.
- [35] MAILLEY D, et al. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2021, 306(7). DOI:10.1002/mame.202100115.
- [36] HUANG L, et al. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2011, 49(24):1 734–1 744.
- [37] MEDEIROS E S, et al. *Canadian Journal of Chemistry*, 2008, 86(6):590–599.
- [38] HUANG F, et al. *e-Polymers*, 2008, 8(1). DOI: 10.1515/epoly.2008.8.1.1758.
- [39] ZAHRA F T, et al. *Polymers*, 2023, 15(18). DOI: 10.3390/polym15183837.
- [40] RAHIMKHOEI V, et al. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2023.126642.
- [41] WOODRUFF M A, et al. *Progress in Polymer Science*, 2010, 35(10):1 217–1 256.
- [42] MOKHTARI F, et al. *Progress in Materials Science* 2025, 148. DOI:10.1016/j.pmatsci.2024.101376.
- [43] WU S, et al. *Polymer*, 2025, 327. DOI: 10.1016/j.

- polymer.2025.128361.
- [44] GAAZ T, et al. *Molecules*, 2015, 20 (12):22 833–22 847.
- [45] YANG Q, et al. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 236. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2023.124004.
- [46] TÜRKOĞLU G C, et al. *International Journal of Molecular Sciences*, 2024, 25(3). DOI:10.3390/ijms25031668.
- [47] EL-OKAILY M S, et al. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 182:1 582–1 589.
- [48] 徐超等. *工程塑料应用*, 2023, 51(04):51–56.
- XU Chao, et al. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(04): 51–56.
- [49] LAM C X F, et al. *Biomedical Materials*, 2008, 3(3). DOI: 10.1088/1748-6041/3/3/034108.
- [50] LAM C X F, et al. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, 2009, 90A(3):906–919.
- [51] AL-BAADANI M A, et al. *Materials Today Bio*, 2023, 21. DOI: 10.1016/j.mtbio.2023.100692.
- [52] MIREJA S, et al. *Polymer*, 2024, 293. DOI: 10.1016/j.polymer.2023.126665.
- [53] KARAN S K, et al. *Nanoscale*, 2015, 7 (24):10 655–10 666.
- [54] MA Y, et al. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 20:2 689–2 704.
- [55] DU X, et al. *Journal of Advanced Ceramics*, 2022, 11 (2):331–344.
- [56] CHENG B-X, et al. *Polymer Testing*, 2022, 107. DOI:10.1016/j.polymertesting.2022.107489.
- [57] YUE Y, et al. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, 592: 310–318.
- [58] LARUE L, et al. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 2024, 10 (9):5 537–5 549.
- [59] WANG X, et al. *Polymers*, 2017, 9(9). DOI: 10.3390/polym9090401.
- [60] ZEUGOLIS D I, et al. *Biomaterials*, 2008, 29(15):2 293–2 305.
- [61] WANG H, et al. *Materials Today Bio*, 2025, 33. DOI:10.1016/j.mtbio.2025.101997.
- [62] REIZABAL A, et al. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(3). DOI:10.1002/adfm.202210764.
- [63] INOUE S, et al. *Journal of Biological Chemistry*, 2000, 275 (51): 40 517–40 528.
- [64] ZHANG Z, et al. *Materials Today Bio*, 2025, 32. DOI:10.1016/j.mtbio.2025.101737.
- [65] RIZZARELLI P, et al. *Mass Spectrometry Reviews*, 2023, 44. DOI:10.1002/mas.21869.
- [66] ZHAO Y, et al. *Food Chemistry*, 2023, 405. DOI:10.1016/j.foodchem.2022.134991.
- [67] KUBIAK A, et al. *Materials*, 2018, 11(11). DOI: 10.3390/ma11112295.
- [68] ASTURE A, et al. *Polymer Bulletin*, 2023, 80 (4):3 507–3 545.
- [69] VAGENA I-A, et al. *Nanomaterials*, 2024, 14(5). DOI: 10.3390/nano14050397.
- [70] YARI H, et al. *Progress in Organic Coatings*, 2020, 147. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105773.
- [71] ZHANG M, et al. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15 (25):30 849–30 858.
- [72] KUDDUSHI M, et al. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2025, 8(2). DOI:10.1007/s42114-025-01269-2.
- [73] GUO Q, et al. *Advanced Materials*, 2019, 31(50). DOI: 10.1002/adma.201901997.
- [74] GE M, et al. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, 4(18):6 772–6 801.
- [75] RASHID AL-MAMUN M, et al. *South African Journal of Chemical Engineering*, 2022, 40:113–125.
- [76] WANG J, et al. *Journal of Energy Storage*, 2021, 42. DOI:10.1016/J.est.2021.103094.
- [77] LI X, et al. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2025, 683: 256–268.
- [78] WEI Z, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 137(23). DOI:10.1002/app.48788.
- [79] XU Y, et al. *ACS Sensors*, 2024, 9 (2):849–859.
- [80] KHAN A, et al. *Optical Materials*, 2024, 149. DOI: 10.1016/j.optmat.2024.115063.
- [81] MUANPRASAT C, et al. *Pharmacology & Therapeutics*, 2017: 170:80–97.
- [82] SILVA A O, et al. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 272. DOI: 10.1016/j.carbpol.2021.118472.
- [83] LI X, et al. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2025:683: 256–268.
- [84] KANG D, et al. *Journal of Nanobiotechnology*, 2025, 23(1). DOI: 10.1186/s12951-025-03166-8.
- [85] ALBRIGHT V, et al. *Advanced Healthcare Materials*, 2018, 7 (11). DOI:10.1002/adhm.201800132.
- [86] JIANG Y, et al. *Small*, 2025, 21 (17). DOI: 10.1002/sml.202412432.
- [87] ZHANG J, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2024, 141 (9). DOI:10.1002/app.55009.
- [88] 王怀念,等. *化工新型材料*, 2025, 53(5):232–237.
- WANG Huainian, et al. *New Chemical Materials*, 2025, 53(5): 232–237.
- [89] ZHANG Q, et al. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 498. DOI: 10.1016/j.cej.2024.155661.
- [90] TANG W, et al. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25 (24): 3 718–3 725.
- [91] MAHANTY B, et al. *Chemical Engineering Journal*. 2025, 519. DOI:10.1016/j.cej.2025.165418.
- [92] PARANDEH S, et al. *Nano Energy*, 2019, 59:412–421.
- [93] CHENG F, et al. *Advanced Functional Materials*, 2025, 35(1). DOI:10.1002/adfm.202406950.

- [94] JAYARAMA R V, et al. Wound Repair and Regeneration, 2013, 21(1):1–16.
- [95] HUANG B, et al. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 279. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2024.135100.
- [96] ZHAN Y, et al. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 311. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2025.143921.
- [97] YUE H, et al. Journal of Materials Chemistry B, 2018, 6 (3): 393–400.
- [98] AL-BAADANI M A, et al. Materials & Design, 2021, 209. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109962.
- [99] LEI Z, et al. Carbohydrate Polymers, 2025, 358. DOI: 10.1016/j.carbpol.2025.123491.
- [100] YE K, et al. Pharmaceutics, 2019, 11(4). DOI: 10.3390/pharmaceutics11040182.
- [101] TOLUN A, et al. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 300. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2025.140064.
- [102] CAO Z, et al. Advanced Functional Materials, 2025. DOI: 10.1002/adfm.202503522.
- [103] MASKE V A, et al. Polymer Bulletin, 2024, 8 (18): 16 415 – 16 455.
- [104] FENG T, et al. Polymers, 2025, 17(5). DOI: 10.3390/polym17050703.
- [105] CHEN X, et al. Journal of Membrane Science, 2024, 702. DOI: 10.1016/j.memsci.2024.122788.
- [106] 师晓凤,等.材料导报,2022,36(18):215–223.
- SHI Xiaofeng, et al. Materials Reports, 2022, 36(18):215–223.
- [107] LI S, et al. Separation and Purification Technology, 2025, 364. DOI:10.1016/j.seppur.2025.132479.
- [108] CHEN Y, et al. Journal of Membrane Science, 2025, 727. DOI: 10.1016/j.memsci.2025.124024.

(上接第 189 页)

- [17] CANDAL M V, SAFARI M, FERNÁNDEZ M, et al. Structure and properties of reactively extruded opaque post-consumer recycled PET[J]. Polymers, 2021, 13(20). DOI: 10.3390/polym13203531.
- [18] DHIBAR S, PAL B, KARMAKAR K, et al. A 5-aminoisophthalic acid low molecular weight gelator based novel semiconducting supramolecular Zn(ii)-metallogel:Unlocking an efficient Schottky barrier diode for microelectronics[J]. Nanoscale Advances, 2023, 5 (23):6 714–6 723.
- [19] BALKAEV D, NEKLYUDOV V, STARSHINOVA V, et al. Novel nucleating agents for polypropylene and modifier of its physical-mechanical properties[J]. Materials Today Communications, 2021, 26. DOI:10.1016/j.mtcomm.2020.
- [20] WU J B, LIN J H, XIAO W H, et al. Influence of functional group structures in nucleating agents on the crystallization behavior of poly(ethylene terephthalate) [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2025, 142(3). DOI:10.1002/app.56365.
- [21] HIRAI T, MATSUNAGA T, SATO N, et al. High-temperature crystallization of immiscible polymer blends induced by the shear flow in injection molding[J]. Polymer Crystallization, 2019, 2(4). DOI:10.1002/per2.10069.
- [22] GAONKAR A, MURUDKAR V, DESHPANDE V D. Isothermal crystallization, melting behavior and mechanical properties of polyethylene terephthalate (PET) and reorganized PET (RPET)[J]. Journal of Macromolecular Science, Part B, 2023, 62(3):105–128.
- [23] BANDYOPADHYAY J, MEKOA C, MAKWAKWA D, et al. Influence of nucleation and growth mechanisms on the heat deflection temperature of a reactively processed polypropylene nanocomposite[J]. Polymer Engineering & Science, 2021, 61(4): 1 195–1 208.
- [24] ZHANG X, ZHAO S C, MOHAMED M G, et al. Crystallization behaviors of poly(ethylene terephthalate) (PET) with monosilane isobutyl-polyhedral oligomeric silsesquioxanes (POSS) [J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(29):14 642–14 655.
- [25] PATRA P K, JAISINGH A, GOEL V, et al. Crystallization kinetics of compatibilized blends of polypropylene and polyethylenimine[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2022, 147 (12):6 689–6 699.
- [26] ZHANG Q F, LI K, FANG Y, et al. Improvements in compatibility and properties of biocomposites modified through nanosilica attachment[J]. Iranian Polymer Journal, 2022, 31(11):1 387–1 398.