

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.06.027

生物基聚酰胺56的改性与应用研究进展

吴竹平¹, 詹莹韬², 任天翔³, 屠建朗⁴, 袁聪慧², 陈江炳², 徐煜东³, 许志强², 严俊峰^{1,5,6,7}, 占海华^{1,5,6,7},
赵德方^{1,5,6,7}

[1. 绍兴大学纺织科学与工程学院, 浙江绍兴 312000; 2. 凯泰特种纤维科技有限公司, 浙江绍兴 312000; 3. 现代纺织技术创新中心(鉴湖实验室), 浙江绍兴 312000; 4. 浙江越新科技股份有限公司, 浙江绍兴 312000; 5. 浙江省清洁染整重点实验室, 浙江绍兴 312000; 6. 国家碳纤维工程技术研究中心浙江分中心, 浙江绍兴 312000; 7. 纤维基复合材料国家工程研究中心绍兴分中心, 浙江绍兴 312000]

摘要: 生物基聚酰胺56(bio-PA56)作为传统石油基聚酰胺的可持续替代品, 因原料可再生、低碳环保及优异的吸湿染色等性能备受关注。但其在力学强度、抗冲击性、可加工性和阻燃性等方面仍存在挑战, 需通过各种改性技术改善以拓展应用领域。本文介绍了PA56的最新改性策略与应用研究进展, 简述了高性能化改性与功能化改性两大类, 并探讨了PA56在纺织、医学及工程工业领域的应用前景。指出了PA56改性仍面临填料易团聚、性能损失、改性效果不持久、成本与工艺的环保性等挑战。未来研究应聚焦于开发新型改性技术, 探索其在高端领域更广泛的应用潜力。

关键词: 聚酰胺56; 绿色高分子聚合物; 高性能化改性; 功能化改性; 应用

中图分类号: TQ342+21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)06-0229-09

Research advances in modification and applications of bio-based PA56

WU Zhuping¹, ZHAN Yingtao², REN Tianxiang³, TU Jianlang⁴, YUAN Conghui², CHEN Jiangbing², XU Yudong³, XU Zhiqiang²,
YAN Junfeng^{1,5,6,7}, ZHAN Haihua^{1,5,6,7}, ZHAO Defang^{1,5,6,7}

(1. School of Textile Science and Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, China; 2. CTA High-tech Fiber Co., Ltd., Shaoxing 312000, China; 3. Modern Textile Technology Innovation Center (Jianhu Laboratory), Shaoxing 312000, China; 4. Zhejiang Yuexin Technology Co., Ltd., Shaoxing 312000, China; 5. Key Laboratory of Clean Dyeing and Finishing Technology of Zhejiang Province, Shaoxing 312000, China; 6. Zhejiang Sub-center of National Carbon Fiber Engineering Technology Research Center, Shaoxing 312000, China; 7. Shaoxing Sub-center of National Engineering Research Center for Fiber-based Composites, Shaoxing 312000, China)

Abstract: As a sustainable alternative to traditional petroleum-based polyamides, bio-based PA56 has garnered significant attention due to its renewable raw materials, low carbon emissions, and excellent moisture absorption and dyeing properties. However, challenges remain in its mechanical strength, impact resistance, processability, and flame retardancy, which necessitate performance enhancement through various modification technologies to broaden its application scope. This review systematically presented the latest advances in modification strategies and applications of bio-based PA56, briefly outlining two main categories: high-performance modification and functionalization modification. Furthermore, it was explored the potential applications of PA56 in textiles, medical fields, and industrial engineering. It is also highlighted persistent challenges in PA56 modification, including filler aggregation, performance degradation, limited durability of modification effects, and cost and environmental concerns in processing. Finally, future research directions were emphasized the development of novel modification technologies and the exploration of its broader application potential in high-end fields.

Keywords: polyamide 56; green polymer; high-performance modification; functional modification; application

聚酰胺(PA)分子链上含有重复的酰胺基团, 因其独特的热、自润滑及易加工等优点^[2-3]。其中用量最大的PA6和PA66的应用几乎渗透到大部分工业领域和生活, 包括医疗

基金项目: 绍兴市产业关键技术攻关计划项目(2024B11012), 绍兴文理学院研究生校级科研项目(Y20250278)

通信作者: 赵德方, 副教授, 主要从事高性能纤维及其复合材料的开发与应用研究

收稿日期: 2026-02-08

引用格式: 吴竹平, 詹莹韬, 任天翔, 等. 生物基聚酰胺56的改性与应用研究进展[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(6): 229-237.

WU Zhuping, ZHAN Yingtao, REN Tianxiang, et al. Research advances in modification and applications of bio-based PA56[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(6): 229-237.

器械、机械设备、汽车轻量化、包装材料、电子电器等工程塑料,以及消费品、纺织品等^[4]。但石油基原料不可再生、极大程度危害环境。随着石油资源的匮乏和“双碳”战略目标的推进,开发环境友好型和可持续发展的生物基PA材料成为了科研人员的首要攻关任务^[5]。

生物基PA材料是指原料来自可再生生物质资源(小麦、高粱、玉米、稻壳、秸秆等)^[6],可在特定环境中由自然界微生物作用实现完全分解,属于环境友好型的典型材料。在当下可持续发展的环保背景下,已经有越来越多使用可再生原料制成的生物基PA,如PA11、PA610、PA1010、PA410、PA56等。其中,生物基PA56(bio-PA56)展现出了较为突出的发展前景,其生物基质量分数通常为46%~48%,由生物基戊二胺和生物基己二酸聚合成^[7-8],不仅保留了传统PA的理想性能,还表现出高强度、耐腐蚀、耐热性好及使用寿命长等性能,有望成为替代PA6或PA66的汽车工程材料,使其成为纺织和工程塑料等行业高性能应用的新型材料^[9-10]。

尽管bio-PA56在绿色和可再生性能上具有很大潜力,但其独特的分子结构也带来了一定挑战,由于偶奇碳原子的特殊排列,PA56分子链上的氢键较少,影响了分子间的相互作用,PA56的力学性能受到影响,限制了其可加工性。在复杂环境下的耐久性和稳定性仍有不足,使得PA56的可加工性与适用性有待进一步提高。为了克服这些限制,研究人员正在探索各种改性策略,根据改性方法可分为共混、复合、共聚和交联等,增强PA56分子链间的相互作用,是提高其力学性能、热稳定性及耐化学腐蚀性的有力措施。本文根据实现的功能进行分类,介绍了PA56的高性能化改性和功能化改性,通过高性能化改性提高其强度、韧性和结晶性能;通过功能化改性使其获得持久的阻燃、抗菌及防紫外等多重性能。应用方面,PA56已从纺织领域拓展至医学领域,并在工程工业领域展现出潜力。这些研究不仅会加速PA56的产业化,而且将与其他生物基材料的开发提供有价值的见解。

1 PA56改性方法

根据主要目的和最终实现的效果,PA56的改性可分为高性能化改性和功能化改性。还可以根据其实实现的具体功能进行分类,进一步分为增强、增韧、结晶改性与阻燃、抗菌处理等。本文从高性能化改性和功能化改性两大方向对不同改性方法展开综述与讨论。

1.1 高性能化改性

1.1.1 增强改性

与传统的石油基尼龙产品如PA6、PA66相比,PA56是一种综合性能更好的可再生新型生物基材料,因而在工程塑料、工业生产、环境处理、纺织等诸多领域得到应用。但其拉伸强度、弯曲模量等刚性指标较低,难以满足结构对抗形变能力的需求。结合实际应用,PA56需代替传统石油基PA在诸多领域的应用,必须通过增强改性突破局限,真正实现与传统PA的性能替代与升级。

玻璃纤维(GF)兼具性能与成本优势,强度高、耐热性、绝

缘性及耐腐蚀性好,且易于加工,是最常用的聚合物增强材料之一。陈勇伟等^[11]制备了GF增强阻燃PA56材料。结果表明,PA56增强材料的拉伸强度为138 MPa,增强效果显著。GÜLEL等^[12]也选用GF作为增强材料,采用双螺杆将GF掺入PA56中制备了PA56/GF复合材料,复合材料的拉伸强度较纯PA56显著增加了143%。GF/PA56因较高的拉伸强度在发电机支架、刹车踏板、座椅靠背骨架、电池外包壳等领域具有高性价比,适合大规模工业化。种云胜等^[13]采用碳纤维(CF)和GF混杂增强制备了PA56复合材料,GF与CF体积比为1:2时,拉伸强度、弯曲强度和弯曲弹性模量是纯PA56的1.48、1.78和3.58倍。种云胜^[14]在新的研究中进一步探究了高性能纤维增强PA56的效果,当加入4束CF时,PA56/CF拉伸强度、弯曲强度和弯曲模量分别是纯PA56的2.61、2.84和5.39倍。CF与GF体积比为2:1时,PA56/CF/GF的拉伸强度、弯曲强度和弯曲模量分别提升了108.8、161.5和10 202 MPa。CF与玄武岩纤维(BF)体积比为2:1时,与纯PA56相比,拉伸强度、弯曲强度和弯曲模量提升了103.4、150.5和8 400 MPa。混杂增强的PA56复合材料弯曲强度和模量显著提升,适用于轻量化、高刚性、高性能结构件等工业机械领域,如无人机、飞机结构件、高速齿轮、轴承支架、电机部件等。

石墨烯、碳纳米管、纳米黏土和纤维素纳米晶体等纳米填料已被广泛用作增强填料,以改善聚合物的性能。Wang等^[15]制备了PA56盐/氧化石墨烯纳米复合材料(GO),进一步采用挤压拉伸法制得了PA56/GO纳米复合纤维。结果表明,GO质量分数为0.2%时,PA56/GO纤维的抗拉强度达到1 050 MPa,是纯PA56纤维的3.3倍。高岭土纳米管(HNT)具有环境友好型和生物相容性,独特的结构推动其在药物传递、骨修复、癌细胞分离、牙科等多个方向的应用。Zhang等^[16]利用改性HNT增强PA56制备了纳米纤维,纤维拉伸强度提高了67%,热稳定性也有所提升,为其在骨组织工程中的应用奠定了良好基础。此外,还可以通过调整熔融纺丝工艺来控制PA56的结晶形态与取向,实现PA56力学性能的增强。Wang等^[17]采用一步熔融纺丝法制备PA56纤维,在最佳拉伸温度190℃下,拉伸比为3.05时,纤维的断裂强度约为4.0 CN/dtex。Wang等^[18]采用高速纺丝法制得的PA56纤维拉伸强度高达4.9 CN/dtex (430 MPa),是目前报道的纯PA56纤维的最高强度。

PA56的增强改性主要通过引入纤维、纳米填料及工艺优化来实现。纤维增强是最常用、效果最显著的方法,GF作为最经济高效的增强材料,能与PA56牢固黏结,有效传递负荷使拉伸与弯曲强度成倍增长,但对韧性提升有限;CF的增强效果更好,但成本较高,通常与GF混杂增强。GO等纳米填料通过纳米级分散与PA56基体形成强界面作用,能在添加量极少的情况下实现显著增强,兼具成核剂作用提升刚性和耐热性,提高复合材料的力学性能,但其分散性与基体间的相容性还需通过表面改性解决。

1.1.2 增韧改性

PA56具有优异的抗疲劳性、耐化学性及较长的使用寿命等,但在力学性能上缺口冲击强度差、脆性高、抗拉性和韧性略显不足,致使加工困难,应用受到一定限制。常规改进方法是引入高柔韧性聚合物聚烯烃弹性体,以此提高其抗冲击强度和韧性。许多研究人员利用橡胶弹性体和聚合物共混制备复合材料,以提高其拉伸性能,改善固有的高脆性和低韧性的缺陷,如乙烯-丙烯二烯单体接枝马来酸酐(EPDM-g-MAH)和聚辛烯-乙炔接枝甲基丙烯酸缩水甘油酯(POE-g-GMA)等,是公认的实现PA良好韧性的两种橡胶弹性体。Xu等^[19]制备了PA56/EPDM-g-MAH复合材料,EPDM-g-MAH质量分数为10%时,复合材料综合表现出较好的抗冲击性能和热性能,冲击强度约为7.2 kJ/m²,具有良好的力学性能,对电器外壳、轴承、支架等工程机械部件而言,耐冲击和耐热性是该应用场景的第一标准。然而,单一的弹性聚合物只能提高PA基材的韧性,如橡胶的加入通常会大幅提高韧性,但会损失刚度。为了平衡PA56的刚度和韧性,核壳橡胶(CSR)是首选材料。Xu等^[20]采用EPDM-g-MAH和聚丙烯(PP)协同提高PA56的刚性和韧性,设计了一种以PP为核,EPDM-g-MAH为壳的核-壳(C-S)结构,可以使PA56复合材料的冲击强度提高4.5倍,而韧性没有明显损失。同时保持了较好的热稳定性和结晶性能,对汽车和工程机械行业产生了深远影响。Zhang等^[21]将PA56与POE-g-GMA增韧剂按一定比例共混制备复合材料,材料的悬臂梁缺口冲击强度提高了近17倍。PA56的抗拉强度也因弹性体的加入大幅降低,Zhang等^[22]在此基础上合成了一种C-S结构冲击改性剂,由POE-g-GMA壳和刚性PP核构成,所制备的PA56复合材料冲击强度提高幅度可达560%,而拉伸性能损失较小,可广泛应用于汽车内饰骨架、电子电器外壳及支撑件、工程机械部件等对刚韧性有较高要求的材料。

聚合物共混也是一种效果良好的增韧方式,与高韧性聚合物通过界面作用和协同变形实现韧性的提高。相关研究显示,引入少量PA6与PA56共混,可显著提升断裂伸长率并保持强度不下降。Wang等^[23]在研究PA56/PA6共混物的混相、结晶行为和结晶形貌时证实了这一点,为开发具有理想性能的PA材料指明了方向。刚性粒子也可以实现韧性与刚性的协同提升。庄肖等^[24]以有机刚性粒子聚苯醚(PPO)为增韧剂制备了PA56/PPO合金,其简支梁缺口冲击强度和断裂伸长率随PPO含量的增加而提高,在PPO质量分数为30%时分别提高了303%和820%,可作为工程设备防护件、缓冲部件抗冲击外壳使用。GF在聚合物中不仅有增强作用,更能作为承载体提高其韧性。种云胜等^[13]表征其制备的PA56/CF/GF复合材料发现,材料的缺口冲击强度可以达到9.3 kJ/m²,是纯PA56的2.1倍;在后续研究中制备的PA56/CF、PA56/CF/GF和PA56/CF/BF三种复合材料,其最佳力学性能下的缺口冲击强度相较于纯PA56分别提升了6.1、6.3、7.6 kJ/m²^[14]。

通过弹性体共混、构建核壳结构及与聚合物共混可提高PA56的缺口冲击强度与韧性。弹性体通过增强界面作用有效提高缺口冲击强度,但会牺牲其拉伸强度与模量;构建核壳结构更能在提升韧性的同时,较好地维持材料刚度,实现刚-韧平衡。与高韧性聚合物共混也能大幅改善PA56的抗冲击性能,改善其脆性缺陷。刚性粒子在提升韧性的同时,还可减少增韧带来的刚性损失。但增加了工艺复杂性、成本上升及界面相容性等难题,界面调控是实现有效改性的关键。

1.1.3 结晶改性

PA56作为一种性能优异的新型PA材料,与传统PA6和PA66相比,形成的球晶对称性更好,规整度更高^[6]。然其特殊的奇偶结构,分子链上的氢键较少,PA56的结晶性能较差,体现在结晶度相对较低,晶粒尺寸较大,导致了纤维沸水收缩率较高,面料的尺寸稳定性差;在需要快速冷却的情况下,PA56表现出缓慢的结晶速率,导致机械性能和耐热性下降,限制了其在轴承、轮胎、电缆等需要高强度和热性能材料的应用。良好的结晶性能有利于PA56加工成形,提高力学性能以取代汽车零部件、机械零部件、工程配件等产品中使用的石油基PA材料。目前,最常用和最有效的方法是加入无机填料、高分子材料等作为成核剂来提高PA56的结晶速率和结晶度。

最常用、性价比最高的成核剂是二氧化硅(SiO₂)^[25],具有良好的耐热性和较高的比表面积^[26]。王宇^[27]研究发现,纳米SiO₂和PA66可显著改善PA56的结晶行为,表现为半结晶时间缩短,结晶速率加快,球晶的尺寸减小,PA56在结晶时球晶排列更规整,结晶一致性增强,应用于对尺寸稳定性要求较高的工程场景,如精密电子电器部件、小型工程结构件、要求尺寸精准的机械配件等。Xun等^[28]比较不同粒径纳米SiO₂的作用,研究表明其能显著改善PA56复合材料的结晶性能,粒径较小的SiO₂改善作用尤为显著,在汽车发动机周边部件、轴承支架等要求耐热、尺寸稳定领域有潜力。为改善纳米颗粒的团聚现象,Pei等^[29]对纳米SiO₂进行了表面改性,制备了未改性SiO₂/PA56、改性SiO₂/PA56复合材料,实验显示,未改性SiO₂用量的增加使复合材料结晶行为相应减弱,而改性SiO₂会增强结晶行为。10 °C/min时,改性SiO₂和未改性SiO₂复合材料的结晶速率分别比纯PA56提高了135%和122%,半结晶时间减少了24.4%、23.6%。张瀚誉等^[30]证实,在与不同比例的聚六亚甲基胍盐酸盐(PHMB)共混时,可有效提高PA56的结晶速度与结晶温度,缩短结晶时间,为PA56结晶改性提供了新路径,同时满足医疗、食品等行业的抗菌需求。

结晶改性在提升结晶速率、结晶度和尺寸稳定性时,也带来了韧性、吸湿性的下降,工艺复杂化、成本增加,及填料分散和界面问题导致的力学性能下降。韧性与断裂伸长率的降低会使材料变得更硬、更脆。材料吸湿性降低虽改善了尺寸稳定性,却增加了后续染色难度。总之,PA56的结晶改

性还存在一定局限性,未来改性应聚力于开发新型高效的成核剂、优化填料表面改性技术以提高分散性和界面结合力,还可以进一步采用多元复合改性策略,例如将刚性粒子增韧与结晶改性结合,实现PA56的刚韧平衡。

1.2 功能化改性

1.2.1 阻燃改性

PA56与其他常规PA材料类似,是易燃聚合物,其极限氧指数(LOI)相对较低。纯PA56在UL94垂直燃烧测试中通常无阻燃等级(NR),自熄性差,且存在严重熔体滴落,易造成烫伤或二次火灾^[31],故开发高性能阻燃PA56材料是急需突破的关键课题。为实现这一目标,其改性方法主要归纳为三类:阻燃剂(FRs)共混改性、阻燃共聚改性和阻燃后处理。

(1)FRs共混改性。

FRs共混改性是将添加型FRs与PA母粒直接混合,经双螺杆挤出熔融共混制备阻燃PA的改性方法,成本低、操作方便、易加工及周期短,广泛应用于各种塑料加工和改性。二乙基次磷酸铝(ADP)常用于PA6、PA66的阻燃改性,是一种高效添加型阻燃成分,已有较多成功应用实例。应凯明^[32]将ADP、三聚氰胺氰尿酸盐引入PA56中,PA56混合物的阻燃性能均有显著提升,垂直燃烧为UL94 V-0级、LOI为30.5%,完全达到了电子电气(线圈骨架、继电器外壳)和汽车(高压连接器、电池膜组件)等行业对材料阻燃性能的工程应用标准。Zhang等^[33]采用改性聚磷酸铵、石墨化氮化碳($g-C_3N_4$)制备了一种氮磷阻燃剂,PA56共混物达到了UL94 V-0等级,LOI为31.7%。与纯PA56相比,其峰值释热速率与总释热速率分别降低了35.3%、24.0%,而成炭率显著提高了874%。阻燃剂能促进更稳定致密碳层的形成,减少可燃气体产生,从而起到隔热作用提高PA56的阻燃与抑烟性能,隔热作用可以保护材料内部结构,对于电子外壳设备、建筑材料等应用非常重要。Wang等^[34]将PA56与自制阻燃剂熔融共混得到PA56阻燃复合材料,垂直燃烧性能测试结果为UL94 V-0等级,LOI为30.1%。与纯PA56相比,PA56材料总放热率和总发烟率分别降低了45.45%和13.62%。良好的抑烟性能是轨道交通、航空航天等密闭空间应用的关键指标。Wang等^[35]通过改变阳离子自制了不同的磷钼酸盐(POMS),讨论其对PA56阻燃性能的影响。研究发现,质量分数3%的磷钼酸钠或磷钼酸镍可使PA56达到UL94 V-0等级,在燃烧过程中生成更多的焦炭,改变热解途径,减少了易燃挥发和有毒气体的产生,从而有效改善了PA56的阻燃性能。POMS促进了PA56的低温降解和高温成炭,提高了PA56在空气中的热稳定性,但与PA56的相容性较差,力学性能会有不同程度的劣化,需要设计和应用更多具有新颖结构的POMS,以平衡PA56的阻燃和力学性能。PA中大量的FRs的引入会带来分散性和相容性问题,严重损害力学性能;且FRs在长期使用过程中存在水解和逸出问题^[36],导致阻燃性能降低及阻燃不持久等问题^[37]。

(2)阻燃共聚改性。

阻燃共聚改性,是将反应性阻燃剂(r-FR)与单体共聚,将阻燃结构单元以共价键形式接入PA大分子链,使PA获得内在的阻燃性能,而不影响其基本性质。该方法能够克服FRs易挥发、团聚、迁移及浸出等问题,阻燃持久性较好。Zhao等^[38]合成了具有良好溶解性和耐温性的r-FR并制备了阻燃PA56共聚物(FRPA56)。r-FR质量分数为6%时,FRPA56的LOI达到28.4%,垂直燃烧测试为V-0等级;r-FR质量分数为8%时,FRPA56熔融温度为246.1℃,拉伸强度为71.05MPa,表现出优异的耐温与力学性能,是构建本征阻燃PA的一种有效策略,同时能满足工程塑料的加工与纺织领域的要求。Yang等^[39]证实了3-羟基苯基磷酰丙酸(CEPPA)的高阻燃效率,通过引入该单体合成了FRPA56。单体摩尔分数为7.8%时,共聚物在垂直燃烧试验中达到UL94 V-0级,与PA56相比总放热降低了20%。Yang等^[40]在另一项研究中引入[(6-氧代-6H-二苯并[c,e][1,2]氧磷杂己环-6-基)甲基]丁二酸(DDP)单体合成了FRPA56,仅需添加少量的DDP,FRPA56在垂直燃烧测试中便可达到UL94 V-0级;DDP摩尔分数为1.2%时,FRPA56放热速率峰值和总放热量相较于PA56分别降低了35%和19%,表明DDP具有较高的阻燃效率。以上制备得到的PA56阻燃共聚物具有较好的自熄性与低放热特性,可显著降低内部火灾蔓延风险,能广泛应用于断路器、电池组件、外壳、电源部件等工程塑料领域。共聚改性是一种较为理想的阻燃改性方法,添加少量的r-FR即可显著提高PA的阻燃性能又能较好地保持其本身的性能。然而,该方法工艺复杂、成本高且对阻燃单体要求较为严格,这种固有的阻燃聚酰胺的工业化也存在r-FR的设计问题。因此,共聚阻燃改性在工业上的应用受到了限制。

(3)阻燃后处理改性

在纤维表面涂覆或接枝FRs是阻燃后处理的重要改性手段。现有研究表明9,10-二氢-9-氧-10-磷菲-10-氧化物(DOPO)是一种环保高效的FRs,表现出较强的反应性,已经合成了大量的DOPO衍生物,并广泛应用于PA阻燃材料^[41]。Jiang等^[42]通过自制的烯丙基硫脲(ATU)研制了一种绿色可持续多功能涂料DOPO-ATU,并通过表面涂覆实现PA56织物的改性。在增重7.8%的情况下,PA56织物的LOI值高达30.1%,在未施加滴水条件的垂直燃烧测试中损坏长度仅为11.1cm,未观察到滴落现象。峰值放热率和平均有效燃烧热分别降低了20.5%和46.4%,具有良好的防火安全性,DOPO-ATU对PA56织物具有优异的阻燃性。涂层后的PA56织物还表现出优异的抗菌性能和防紫外线性能,这为制备PA56保护生物材料的多功能涂层提供了一种更清洁、可持续的方法。Cui等^[43]以三种化合物为原料,设计了一种水溶性聚电解质复合物,并用于PA56织物的处理。结果发现,在温和的条件下,三种化合物在涂层表面形成弱键交联,产生三维网络结构,PA56织物的热稳定性、阻燃性获得提高,PA56经洗涤50次后仍保持良好的阻燃性,热稳定性和耐久性均获得提升。

1.2.2 抗菌与紫外线防护改性

公众健康意识的增强,正驱动着市场对具备防臭、抗菌等功能性纺织品的必然需求。PA56作为一种绿色材料,在生物废物处理方面表现出良好的前景,但缺乏固有的抗菌性。对其进行抗菌改性有望降低疾病的传播风险,也满足抗菌需求,扩大其在生物医学和功能纺织品的应用。材料抗菌性常通过引入抗菌剂来实现,主要有无机、天然和有机抗菌剂。

无机抗菌剂分金属离子型和光催化型两大类,纳米 ZnO (nano-ZnO)作为一种典型的光催化抗菌剂,具备抗菌、抗静电、导热等优良特性,是制造化学传感器、医疗设备及紫外线保护膜的关键原料。朱旭等^[44]以 nano-ZnO 为改性粒子,通过共混制备了多功能基 ZnO/PA56 复合纤维,对于大肠杆菌和金黄色葡萄球菌,ZnO 质量分数为 0.5% 时,复合纤维对其抑菌率均达 100%,PA56 对两者的抑制率仅为 25%、41%,抗菌性能显著提升。徐丽亚等^[45]复合得到纳米 ZnO-Ag 抗菌剂,与 PA56 熔融共混制备 ZnO-Ag/PA56 复合纳米纤维膜,ZnO-Ag 质量分数为 6% 时,纳米纤维膜对金黄色葡萄球菌和大肠埃希菌的抑菌率分别为 98.7%、89.3%,符合伤口敷料等医疗卫生产品需求。无机抗菌剂的改性效果显著,但纳米粒子极易团聚,严重影响抗菌效率和力学性能,且金属及其化合物存在生物毒性隐患,可能产生严重的健康和生态问题;且光催化类抗菌剂需在特定条件下才能产生抗菌作用。需通过表面修饰和工艺优化解决纳米粒子分散的难题,采用复合协同策略平衡抗菌效果、材料性能及成本。天然抗菌剂主要从植物、动物、微生物及矿物中提取。池珊等^[46]基于橙活性成分研制出一种多功能 PA56 纤维,表现出良好的抑菌、抗病毒和氧化的综合功效,橙活性成分含量约为 4.38 mg/kg 时,其抑菌率高于 95%,对某一病毒的抗病毒率可达 99.39%,抗氧化自由基清除率为 42.35%。但天然抗菌活性成分在熔融高温下易分解、失活、耐久性不足,且与 PA56 基体相容性较差,影响力学性能。

目前,胍、季铵盐和苯酚等有机抗菌剂已进入工业化使用。陈和春等^[47]通过熔融纺丝制备了改性 PA56 纤维及其织物,发现织物的抗菌性随氨基胍盐酸盐比例的增加显著提升。Wang 等^[48]以聚五亚甲基胍(PPMG)作为绿色生物基抗菌剂,对于大肠杆菌和金黄色葡萄球菌,当 PPMG 质量分数大于 1.0% 时,改性后的抗菌 PA56 对二者均能实现 99.99% 以上的抑制率,且经热水(90 °C)和洗涤剂洗涤 30 次后仍能保持较好的抑菌效果。聚六亚甲基双胍(PHMB)是一种低毒性、能抑制膜表面微生物生长的阳离子聚合物双胍,在食品工业、漱口水和伤口敷料中应用十分普遍。Xue 等^[49]通过绿色工艺制备了具有抗菌活性的改性膜,在微量 PHMB 作用下,PA56 纳米纤维膜对大肠杆菌和恶臭杆菌的抑菌率分别为 96.7% 和 100%。Yang 等^[50]先制备了 PA56 纳米纤维膜,经壳聚糖(CS)修饰后,再与带正电的 PHMB 结合,形成改性 PA56 纳米纤维膜。抗菌试验表明改性,改性纳米纤维膜的

抗菌效率超过 97%,在生物垃圾处理及相关应用方面具有很大的潜力。Liao 等^[51]也对 PA56 纳米纤维膜进行 CS、PHMB 等一系列处理,得到的改性纤维膜对大肠杆菌的抑菌率高于 90%。然而,这些膜主要用于一次性使用系统,在重复使用时表现出显著降低的抗菌活性。有机抗菌剂为 PA56 提供了高效的抗菌改性方案,但需着重解决其易迁移与材料相容性问题。未来的发展方向是从分子设计入手,开发反应型或高分子型抗菌剂,并通过复合技术与加工工艺,在确保安全性的前提下,实现 PA56 材料高性能与长效抗菌的统一。

PA56 因环保特性和良好的综合性能得到广泛应用,而在这些应用中,对其阻燃、抗菌、防紫外线等多功能性能也提出了更高的要求。但 PA56 的防紫外线性能较差,对于运动服饰、帐篷、降落伞、汽车部件和电子电器零件等需要长期暴露在户外紫外线下的制品而言,经过紫外改性后的 PA56 材料能有效保障产品的耐久性和稳定性。Jiang 等^[42]研究其制备的 PA56 织物性能发现,原始 PA56 织物具有较低的 UPF (紫外线防护系数)值,而改性 PA56 织物样品 UPF 值较高。尤其是 DOPO-ATU 含量为 40 g/L 时,改性 PA56 织物的 UPF 值达到 160.7,表现出了优异的防紫外线性能。朱旭等^[44]表征了 PA56 和 ZnO/PA56 复合纤维的抗紫外老化性,140 h 紫外光辐照后,复合纤维力学性能增强,断裂强度下降率更低,表明 nano-ZnO 具有强紫外线吸收特性。Gao 等^[52]通过特定染料和 3,3',4,4'-二苯甲酮四羧酸对 PA56 织物改性,研究其紫外线防护功能发现,未经染料处理的改性 PA56 织物的 UPF 系数为 80.87,而处理后的改性 PA56 织物 UPF 值均超过 140,具有良好的紫外线防护性能。杜培波等^[53]制备了紫外线防护性能优异的 PA56 织物,采用天然板栗壳色素染料处理织物,染色后织物 UPF 达到 299。经紫外防护改性的织物手感可能变硬,影响织物风格,且表面功能层耐水洗和耐摩擦性能较差,可在聚合阶段引入抗紫外单体,再结合后整理,实现长效防护。

以上不同改性技术特点及其改进方法汇总见表 1。

1.2.3 其他改性

长期光照下产生的黄变和老化是生物基 PA 材料固有的局限性。为提高纤维色值,通常采用原位聚合法和熔融共混法引入增白改性剂。Zhang 等^[54]采用上述方法引入了荧光增白剂等三种增白剂至 PA56 纤维中,测试表明,当荧光增白剂质量分数为 0.3% 时,亮度值由 84 提高到 90,增加了 11.2%,灰度值减少了 37.8%,黄度指数减少了 29.6%。PA56 纤维的断裂强度高达 4.27 cN/dtex,说明 PA56 纤维有良好的抗黄变性能和耐久性,增白剂对降低 PA56 的灰黄度效果显著。王青弘等^[55]在制备 PA56/荧光素纳米纤维膜过程中发现,荧光素分散均匀且荧光强度与其含量呈正相关,而断裂强度和断裂伸长率出现一定程度的下降。

锦纶纤维用活性染料染色时,常面临染色提升性不佳、染料利用率偏低的问题。陈雪莉^[56]基于此进行了一系列探究,研究发现,未经处理的 PA56 纤维上染率为 25%;经氯化

表1 不同改性技术特点及其改进方法

Tab. 1 Characteristics and enhancement methods of different modification technologies

Modification technology	Strength	Weakness	Improvement methods
Reinforcement modification ^[14-15]	Significant improvement in mechanical properties, enhancement of thermal stability and heat resistance, optimization of crystallization behavior.	Weak interfacial bonding, significant decrease in toughness, agglomeration of reinforcements, reduced processability, high cost.	Surface modification of reinforcements, synergistic toughening, process optimization to improve dispersion, combined use of low-cost reinforcements, and control of reinforcement content.
Toughening modification ^[19,23]	Significant improvement in toughness, simple process, low cost, and strong controllability of interface.	Difficulty in balancing rigidity and toughness, poor interfacial compatibility, and decreased thermal stability.	Constructing core-shell structure to achieve rigidity-toughness balance and adjustment of blending ratio.
Crystallization modification ^[27]	Improvement of dimensional stability and heat resistance, enhancement of processability, and flexible modification approaches.	Poor interfacial compatibility, difficulty in regulating crystallization, decrease in toughness and moisture absorption, uneven dispersion of modifiers, and increased cost and process complexity.	Surface modification, pre-dispersion, and adjustment of modifier ratio.
Flame retardant modification ^[34,38,42]	Various approaches, mature technology, significant effect, and strong compatibility.	Degradation of mechanical properties, easy migration of flame retardants, high cost, and insufficient environmental friendliness.	Use of halogen-free flame retardants, development of green and efficient flame retardants, and multicomponent synergistic modification.
Antibacterial modification ^[44,46,48]	Significant antibacterial effect, controllable operation, and multiple modification approaches.	Insufficient long-term antibacterial durability, loss of mechanical properties, poor compatibility, and difficulty in cost control.	Selection of reactive antibacterial agents, synergistic modification, and improvement of dispersibility.
UV protection modification ^[42]	various types of modifiers and improvement of aging resistance.	Poor modification stability, insufficient long-term effectiveness of modification, and adverse effect on fabric handle.	Enhanced crosslinking curing, process optimization, and development of natural modifiers.

钙(GaCl_2)无水乙醇溶液络合处理的PA56纤维提升至65%左右;而直接将 GaCl_2 加入染液所得的PA56纤维高达90%,效果最佳,证实了 GaCl_2 络合对提升染色性能的有效性。针对PA56染色后耐洗色牢度较差的问题,需对其进行固色处理。李蒙蒙^[57]选用了两种酸性固色剂和染色印花湿牢度提升剂,经验证,不同固色剂都可显著提升PA56织物的耐洗色牢度。张彦博等^[58]也选用了三种固色剂处理PA56织物,再次证实了李蒙蒙的实验结论,固色处理后的PA56织物在开发生产舒适、安全、具有视觉吸引力的服装面料、包装材料方面有明显优势。

为减轻毛羽突出、开口不清、经纱断头、产生织疵等现象,PA56纤维需要经过上浆工艺。淀粉作为常用的上浆剂,存在浆液的成膜性不足的问题,添加纳米纤维素可有效改善这一缺陷。孙燕琳等^[59]按不同质量比混合改性淀粉、纳米纤维素配制浆液,研究其对PA56纤维性能和毛羽指数的影响,上浆后纤维4 mm毛羽指数降低;将部分改性淀粉换成纳米纤维素时,毛羽降低效果更佳,4 mm毛羽显著减少,这表明纳米纤维素有利于提高浆液表面成膜性。

2 PA56的应用

2.1 纺织领域

PA56在纺织服装行业适用于运动服饰、床上用品与内衣等,其强度高、吸湿性好、耐高温,在产业用纺织品领域(渔网丝、帘子布、气囊、帆布等)展现出理想的应用特性。此外,在帐篷、高强防护服装、降落伞等军用装备上的应用,能够满足军警行业的穿用和防护需求。

在地毯材料、高级服装等市场,PA56比PA66更有前景,能生产出更高色度、更柔软、更贴身的面料,可以与其他纤维混纺互补优势。Wang等^[60]制备了聚对苯二甲酸三亚甲基酯(PTT)/PA56共混纤维,共混纤维在拉伸性能和尺寸稳定性方面达到了最佳组合,具有良好的综合性能,在纤维、服装、装饰等纺织领域具有潜在的竞争力。PA56与聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)形成的共混体系能在韧性、吸湿性等方面互补,夏长林等^[61]制备了PA56/PET共混纤维,具有较好的力学与染色性能,制成织物的染色均匀性为2.5~3.5级,风格上呈现出明显的异彩条纹。PA56/PET共混纤维可用于高端运动服饰和贴身衣物,地毯、窗帘等家用纺织品,传送带、安全绳等产业用纺织品,提高了纤维的综合使用性能。Wang等^[62]制备的超疏水PA56/棉交织织物具有自清洗和油水分离功能,可抗腐蚀、抗紫外线辐射、抗机械磨损和耐水洗,在工业防护服、帐篷、睡袋等户外装备及军用特种服装等领域有极大应用潜力。此外,冯特等^[63]发现,PA56纤维经靛蓝隐色体浸渍法染色后获得了良好的耐皂洗色牢度和耐汗渍色牢度。马鹏宇等^[64]在5%活性染料用量下达到了4~5级的耐皂洗色牢度,实现了PA56穿着舒适性和颜色持久性的统一。王亚辉等^[65]为解决PA56纤维的染色同色性问题,选择添加缓染剂并结合一浴一步法,在提升染色同色性效果时优化了工艺条件。源于可再生资源的绿色本质,超越传统尼龙的吸湿排汗、亲肤手感及优良的可染性等,PA56广泛应用于纺织领域,为市场带来了更环保、更舒适的选择。展望未来,通过持续的改性与工艺优化,有望在功能性服装和工程纺织品领域

实现对石油基尼龙的替代。

2.2 医学领域

现阶段,针对PA56在医学应用方面的研究,重点聚焦在抗菌材料、组织工程支架及药物递送系统等方面,良好的生物相容性、力学性能稳定、吸湿透气性及可持续性,为PA56奠定了可观的应用潜力。Wen等^[66]开发了一种高效PA56抗菌纳米纤维膜,该膜具有良好的生物相容性,细胞存活率为100%,在短时间内抗菌效率接近100%,在一次性医疗产品的开发中具有广阔的应用前景。丁照轩^[67]制备的PA56/水溶性壳聚糖(CS)抗菌纳米纤维膜具备透气、无毒的特性,对革兰氏阳性菌和大肠杆菌的抑菌率都高于99%,能够作为潜在的医用敷料材料加以应用。该研究进一步拓展了生物基PA在吸声与医用敷料领域的应用,由制备的PA56纳米蛛网膜与非织造基材复合而成,成功研制出一种具备出色全频吸声性能的新材料。Zhang等^[16]采用改性HNT,通过静电纺丝合成了改性HNT增强PA56纳米纤维,制备的PA56支架具有良好的生物相容性和无细胞毒性,骨组织工程是其重要应用方向。Xu等^[68]将PA56与表面处理后的羟基磷灰石共混制备生物基纳米纤维,纳米纤维膜的弹性模量及亲水性能显著提高,是骨组织工程与骨修复领域的有力候选材料。Wang等^[69]以聚五亚甲基胍硫酸盐(PPGS)为抗菌剂,通过高速纺丝制备了抗菌生物基PA56纤维。PPGS质量分数为1.0%时,在实现对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌99.99%以上抑制率时,还具备易着色、色牢度佳的优点。这些发现有望促进PA56在抗菌相关领域的实际应用,并指导抗菌纤维的染色工艺。

PA56未来在医学领域将向高功能化与绿色化方向发展,通过改性赋予其适配医疗场景的优异性能,突破传统应用边界,拓展至可吸收缝合线、长效抗菌敷料、微创手术器械及可穿戴医疗设备等。PA56分子结构的可调控性使其在药物缓释系统中潜力广阔,贯穿防护、治疗、修复与检测的全医疗流程,形成绿色高性能医用材料的解决方案,符合医疗领域精准化与低碳化的发展趋势。

2.3 工程工业领域

PA56在工程工业领域也有很大发展空间,尤其是在工程塑料方面,可广泛应用于汽车工业、运输交通、电子电气及高铁等行业。Wu等^[1]将不同含量的羊毛与PA56混纺,制备了羊毛/PA56混纺纱线,该纱线具有高柔软、耐磨、吸湿和资源节约、生物降解、环保等优点,适用于座椅面料等汽车内饰。He等^[70]通过添加自制的耐热剂到PA56中制备了复合材料,与PA56相比,PA56复合材料的热变形温度提高了10%以上,抗吸湿性提高了约15%,扩大了其在汽车制造与交通运输领域的应用。Li等^[71]制备的超韧PA56共混体系为物流、电商等行业的绿色升级提供了材料基础,其缺口冲击强度和断裂伸长率分别提高了427.3%、252.8%,在交通运输行业同样有着广阔的应用前景与研究价值,如门内饰板、汽车软包装、坐垫织物、仪表板等构件。Li等^[72]制备的功能化改

性SiO₂/PA56纳米纤维膜有良好的亲水性, SiO₂质量分数为0.8%时,纤维膜对水包油乳液的分离效率达99.8%。亲水性和水下超疏油性性能优异,可作为原料用于保鲜膜、外包装等食品包装膜,也为处理冶金、石油化工、食品加工等工业废水提供了一种新型生物基材料及高效、绿色的解决办法。

罗真梦等^[73]在PA56织物表面成功构筑了高附着力的导电镀铜层,该织物可作为电子半导体工业、电磁屏蔽、柔性传感器和有机光伏等领域的常用工程材料,其表面电阻仅为0.028 Ω/sq,导电性良好,具备耐水洗、耐干湿摩擦以及透气性。包宗尧等^[74]发现增加氨基化碳纳米管(AMWNTs)在PA56复合材料中的比例会改变材料的热学性能与结晶结构,并提升其导电性。在燃料电池、交通运输、机械轴承、3D打印耗材等高强度领域及智能穿戴纺织品、抗静电纤维等纺织领域有很大应用前景。但PA56机械强度较低、吸湿性较高,导致其湿抗拉强度下降最为显著,因此还未实现对PA6、PA66的完全取代。PA56增强、增韧等改性技术的不断研究,将迎来其在工程工业领域的进一步发展。

3 总结与展望

(1)bio-PA56作为一种前景广阔的生物基材料,通过增强、增韧、结晶改性等高性能化改性以及阻燃、抗菌和紫外线防护等功能化改性,其综合性能得以显著提升,实现了PA56的多功能开发以满足市场要求,现已广泛应用于纺织、医学和工程工业等领域。但改性过程还存在局限性,未来需要更具创新性、环保性和针对性的改性策略,推动PA56在各行各业的发展,顺应绿色低碳的可持续发展。

(2)高性能化改性的重点是增强、增韧与结晶改性。增强改性旨在提高PA56的拉伸和弯曲强度,但存在韧性不足、纳米填料易团聚及脆性增加等现象,可在增强过程中添加弹性体,或采用核壳结构等实现增强增韧同步;增韧改性旨在提高缺口冲击强度与韧性,往往会损失刚性,刚性粒子虽能平衡刚韧,但其表面改性会增加工艺复杂性与成本;结晶改性旨在改善结晶度和结晶速率,但通常会牺牲韧性和吸湿性,同样面临填料难分散和界面问题,以上纳米填料问题均可通过表面修饰或界面相容剂解决。

(3)功能化改性主要聚焦于阻燃、抗菌与紫外线防护。阻燃剂共混与后处理改性成本低、工艺灵活,但阻燃剂易迁移、水解,阻燃性能不持久;而阻燃共聚改性能克服阻燃剂迁移问题,效率高、改性效果好,但工艺复杂且周期长。在抗菌改性中,主要挑战在于抗菌剂的迁移、潜在毒性与PA56的相容性,可利用橙活性成分等开发新型抗菌剂或表面修饰来改善。在紫外线防护改性中,可能导致材料黄变、手感变硬及力学性能下降,可采用原位聚合与共混协同、研发多功能复合改性剂等方法,实现力学性能的稳定与紫外线的长效防护。

参考文献

- [1] WU S Q, et al. *Polymers*, 2024, 16(14). DOI: 10.3390/polym16142052.

- [2] LUO K M, et al. *Polymers*, 2023, 15(13). DOI:10.3390/polym15132877.
- [3] 王建明,等. *纺织学报*, 2021, 42(8):1-7.
WANG Jianming, et al. *Journal of Textile Research*, 2021, 42(8):1-7.
- [4] 刘冰肖,等. *工程塑料应用*, 2025, 53(1):31-36.
LIU Bingxiao, et al. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(1):31-36.
- [5] 王迎,等. *纺织学报*, 2021, 42(1):84-89.
WANG Ying, et al. *Journal of Textile Research*, 2021, 42(1):84-89.
- [6] 陈建新,等. *合成纤维工业*, 2021, 44(6):53-56.
CHEN Jianxin, et al. *China Synthetic Fiber Industry*, 2021, 44(6):53-56.
- [7] YANG H Y, et al. *Polymer Engineering and Science*, 2023, 63(8):2 484-2 497.
- [8] 孙朝续,等. *纺织学报*, 2021, 42(4):26-32.
SUN Chaoxu, et al. *Journal of Textile Research*, 2021, 42(4):26-32.
- [9] 陈静,等. *化工新型材料*, 2025, 53(4):30-32.
CHEN Jing, et al. *New Chemical Materials*, 2025, 53(4):30-32.
- [10] 何辉辉. *聚酯工业*, 2023, 36(5):59-61.
HE Huihui. *Polyester Industry*, 2023, 36(5):59-61.
- [11] 陈勇伟,等. *塑料工业*, 2023, 51(9):114-119.
CHEN Yongwei, et al. *China Plastics Industry*, 2023, 51(9):114-119.
- [12] GÜLEL Ş, et al. *Polymer Composites*, 2024, 45(16): 14 832-14 849. DOI:10.1002/pc.28529.
- [13] 种云胜,等. *工程塑料应用*, 2023, 51(11):9-14.
CHONG Yunsheng, et al. *Engineering Plastics Application*, 2023, 51(11):9-14.
- [14] 种云胜. 高性能纤维增强生物基尼龙 56 复合材料的制备及性能[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2024.
CHONG Yunsheng. Preparation and properties of high performance fiber reinforced bio-based nylon 56 composites[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology, 2024.
- [15] WANG Z J, et al. *Polymer Composites*, 2024, 45(9):8 374-8 388.
- [16] ZHANG Y H, et al. *Colloids and Surfaces A:Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 648. DOI:10.1016/J. COLSURFA.2022.129378.
- [17] WANG Z, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, 140(20).DOI:10.1002/app.53856.
- [18] WANG Y, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020; 137(44).DOI:10.1002/app.49344.
- [19] XU Y H, et al. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, 139. DOI:10.1002/app.52346.
- [20] XU Y H, et al. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2024, 63(6):756-769.
- [21] ZHANG Y H, et al. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2021, 60(14):1 585-1 604.
- [22] ZHANG Y H, et al. *Polymers for Advanced Technologies*, 2022, 33:3 137-3 150.
- [23] WANG Z, et al. *Polymer*, 2023, 265. DOI:10.1016/J. POLYMER.2022.125603.
- [24] 庄肖,等. *塑料*, 2024, 53(4):1-7.
ZHUANG Xiao, et al. *Plastics*, 2024, 53(4):1-7.
- [25] WANG W Z, et al. *ES Materials & Manufacturing*, 2019. DOI:10.30919/esmm5f219.
- [26] WANG H Q, et al. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2019, 2(4):743-752.
- [27] 王宇. 生物基聚酰胺 56 的共混改性及其结晶性能研究[D]. 上海:东华大学, 2020.
WANG Yu. Blending modification and crystallization properties of bio-based polyamide 56[D]. Shanghai: Donghua University, 2020.
- [28] XUN Z J, et al. *ACS Applied Polymer. Materials*, 2022, 4:4949-4960. DOI:10.1021/acsapm.2c00505.
- [29] PEI X Y, et al. *Polymer Composites*, 2025, 46(10):8 866-8 882.
- [30] 张瀚誉,等. *合成纤维*, 2020, 49(12):1-7.
ZHANG Hanyu, et al. *Synthetic Fiber in China*, 2020, 49(12):1-7.
- [31] 杜心宇,等. *大连工业大学学报*, 2026, 45(1):42-50.
DU Xinyu, et al. *Journal of Dalian Polytechnic University*, 2023, 51(9):114-119.
- [32] 应凯明. ADP 及其协效阻燃生物基、半芳香族聚酰胺的制备与性能[D]. 上海:东华大学, 2022.
YING Kaiming. Preparation and properties of ADP and its synergistic flame-retardant bio-based, semi-aromatic polyamide[D]. Shanghai:Donghua University, 2022.
- [33] ZHANG Y H, et al. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 2022, 28(3):615-630.
- [34] WANG Z H, et al. *Journal of Vinyl & Additive Technology*. 2024, 30:456-469.
- [35] WANG S Y, et al. *Polymer Degradation and Stability*, 2025. DOI:10.1016/J. POLYMDEGRADSTAB.2025.111214.
- [36] GUO S Z, et al. *American Chemical Society. ACS Omega*, 2021, 6:12887-12897.
- [37] WANG H, et al. *Polymer Degradation and Stability*, 2021, 183. DOI:10.1016/j.polymdegradstab.2020.109426.
- [38] ZHAO S K, et al. *Polymer Degradation and Stability*, 2023, 207. DOI:10.1016/J. POLYMDEGRADSTAB.2022.110212.
- [39] YANG T T, et al. *Polymers for Advanced Technologies*, 2022, 33(9):2 807-2 819.
- [40] YANG T T, et al. *Journal of Polymers and the Environment*, 2022, 30(9):3 802-3 814.
- [41] ZHU R S, et al. *Polymer*, 2024, 302. DOI: 10.1016/J. POLYMER.2024.127078.
- [42] JIANG W J, et al. *Surfaces and Interfaces*, 2023, 42(PB). DOI:10.1016/J. SURFIN.2023.103513.
- [43] CUI Y L, et al. *Polymers*, 2024, 16(8). DOI: 10.3390/POLYM16081044.

- [44] 朱旭,等.精细化工,2024,41(10):2 143–2149+2188.
ZHU Xu, et al. Fine Chemicals, 2024, 41(10):2 143–2149+2188.
- [45] 徐丽亚,等.纺织学报,2025,46(7):37–45.
XU Liya, et al. Journal of Textile Research, 2025, 46(7):37–45.
- [46] 池姗,等.纺织高校基础科学学报,2022,35(4):38–44.
CHI Shan, et al. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2022, 35(4):38–44.
- [47] 陈和春,等.上海纺织科技,2024,52(5):34–37.
CHEN Hechun, et al. Shanghai Textile Science & Technology, 2024, 52(5):34–37.
- [48] WANG L L, et al. ACS Applied Polymer Materials, 2023, 5(7): 4 986–4 992.
- [49] XUE C F, et al. Chemosphere, 2021, 266. DOI:10.1016/j.chemosphere.2020.128967.
- [50] YANG J H, et al. Biochemical Engineering Journal, 2025, 213. DOI:10.1016/j.bej.2024.109538.
- [51] LIAO T C, et al. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 310(2). DOI:10.1016/j.ijbiomac.2025.143331.
- [52] GAO A Q, et al. Materials & Design, 2017, 130:215–222.
- [53] 杜培波,等.印染,2022,48(11):20–22.
DU Peibo, et al. Dyeing and Finishing, 2022, 48(11):20–22.
- [54] ZHANG S Y, et al. e-Polymers, 2018, 18(1):91–95.
- [55] 王青弘,等.上海纺织科技,2021,49(7):44–46.
WANG Qinghong, et al. Shanghai Textile Science & Technology, 2021, 49(7):44–46.
- [56] 陈雪莉. Ca^{2+} 络合作用对生物基PA56纤维结构及其活性染料染色性能的影响研究[D].上海:东华大学,2022.
CHEN Xueli. Study on the effect of Ca^{2+} complexation on the structure of bio-based PA56 fiber and its reactive dyeing properties [D]. Shanghai: Donghua University, 2022.
- [57] 李蒙蒙.生物基纤维PA56的染色性能及功能整理研究[D].上海:东华大学,2017.
LI Mengmeng. Study on dyeing properties and functional finishing of bio-based fiber PA56[D]. Shanghai: Donghua University, 2017.
- [58] 张彦博,等.印染,2021,47(11):5–8.
ZHANG Yanbo, et al. Dyeing and Finishing, 2021, 47(11):5–8.
- [59] 孙燕琳,等.合成纤维工业,2020,43(06):7–10, 14.
SUN Yanlin, et al. China Synthetic Fiber Industry, 2020, 43(06):7–10, 14.
- [60] WANG A, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2024, 141 (45). DOI:10.1002/APP.56196.
- [61] 夏长林,等.合成纤维工业,2024,47(3):15–20.
XIA Changlin, et al. China Synthetic Fiber Industry, 2024, 47(3): 15–20.
- [62] WANG B L, et al. RSC advances, 2021, 11(18):10 699–10 709.
- [63] 冯特,等.印染,2022,48(8):6–9.
FENG Te, et al. Dyeing and Finishing, 2022, 48(8):6–9.
- [64] 马鹏宇,等.针织工业,2022,(7):38–41.
MA Pengyu, et al. Knitting Industries, 2022(7):38–41.
- [65] 王亚辉,等.印染,2021,47(4):6–10.
WANG Yahui, et al. Dyeing and Finishing, 2021, 47(4):6–10.
- [66] WEN H Y, et al. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 279. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2024.135464.
- [67] 丁照轩.生物基PA56静电纺纳米纤维网形貌调控及其应用[D].大连:大连工业大学,2021.
DING Zhaoxuan. Morphology regulation and application of electrospun bio-based PA56 nanofiber mesh[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2021.
- [68] XU Y H, et al. European Polymer Journal, 2023, 187. DOI: 10.1016/J. EURPOLYMJ.2023.111913.
- [69] WANG L L, et al. Polymers, 2024, 16(19). DOI: 10.3390/ POLYM16192707.
- [70] HE L L, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140(34). DOI:10.1002/APP.54301.
- [71] LI Z L, et al. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 259(P2). DOI:10.1016/J. IJBIOMAC.2024.129310.
- [72] LI Z Q, et al. Journal of Membrane Science, 2025, 713. DOI: 10.1016/J. MEMSCI.2024.123400.
- [73] 罗真梦,等.印染,2023,49(7):51–54, 59.
LUO Zhenmeng, et al. Dyeing and Finishing, 2023, 49(7): 51 – 54, 59.
- [74] 包宗尧,等.功能材料,2022,53(7):7 189–7 195.
BAO Zongyao, et al. Journal of Functional Materials, 2022, 53(7): 7 189–7 195.