

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.05.026

聚乳酸纤维的改性与应用研究进展

吴竹平¹,詹莹韬²,陈江炳²,徐煜东³,任天翔³,严俊峰^{1,4,5,6},缪宏超^{1,4,5,6},许志强²,占海华^{1,4,5,6},赵德方^{1,4,5,6,7,8}

(1.绍兴文理学院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.浙江省清洁染整重点实验室,浙江绍兴 312000;

5.国家碳纤维工程技术研究中心浙江分中心,浙江绍兴 312000; 6.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;

7.浙江大学材料科学与工程学院,杭州 310058; 8.海亮集团有限公司,杭州 310000)

摘要:聚乳酸(PLA)纤维作为新兴的绿色环保型材料,存在质脆、耐热性、韧性低,亲水性和抗菌性差等缺陷而限制了其应用。因此,当前PLA纤维研究的重点是功能化与智能化改性,以克服上述局限性。阐述了近年来对PLA纤维的一些物理改性和化学改性研究进展,重点介绍了PLA纤维在医学、电子电器及纺织领域的应用情况。指出了当前PLA纤维改性存在的关键难题,如改性工艺的复杂性与成本、绿色改性方法的局限性、改性效果矛盾等问题,并对PLA纤维未来研究方向进行了展望。

关键词:聚乳酸纤维;可降解高分子聚合物;物理改性;化学改性;应用

中图分类号: TQ342+21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)05-0186-06

Research progress on modification and application of polylactic acid fiber

WU Zhuping¹,ZHAN Yingtao²,CHEN Jiangbing²,XU Yudong³,REN Tianxiang³,YAN Junfeng^{1,4,5,6},MIAO Hongchao^{1,4,5,6},XU Zhiqiang²,ZHAN Haihua^{1,4,5,6},ZHAO Defang^{1,4,5,6,7,8}

(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. Key Laboratory of Clean Dyeing and Finishing Technology of Zhejiang Province, Shaoxing 312000, China; 5. Zhejiang Sub-center of National Carbon Fiber Engineering Technology Research Center, Shaoxing 312000, China; 6. Shaoxing Sub-center of National Engineering Research Center for Fiber-based Composites, Shaoxing 312000, China; 7. School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 8. Hailiang Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China)

Abstract : As an emerging green and environmentally friendly material, polylactic acid(PLA) fiber has its applications limited by inherent drawbacks such as brittleness, poor heat resistance, low toughness, inadequate hydrophilicity and insufficient antibacterial properties. Therefore, the current research focus on PLA fibers lies in functional and intelligent modification to overcome these limitations. Recent progress in physical and chemical modification methods for PLA fibers was elaborated, with special emphasis on their applications in medical, electronic and textile fields. Bottlenecks in PLA fiber modification were pointed out including the complexity and cost of modification processes, limitations of green modification methods, and contradictory modification effects, while providing prospects for future research directions of PLA fibers.

Keywords : polylactic acid fiber ; degradable high molecular polymer ; physical modification ; chemical modification ; application

纺织品在人们生活中无处不在,棉纤维和化学纤维是纺织品的原料,棉纤维通过种植棉花获得,化学纤维的生产主要依赖于石油资源的深加工与利用。然而石油能源的

大规模开采不仅加速了自然资源的消耗,还会导致严重的环境问题,石油资源的使用造成了CO₂的大量排放,是全球气候变暖的主导因素。现今,我国已开展了生物基纤维的研

基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2024C01185),绍兴文理学院研究生校级科研课题(Y20240261)

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: 2025-03-07

引用格式: 吴竹平,詹莹韬,陈江炳,等.聚乳酸纤维的改性与应用研究进展[J].工程塑料应用,2025,53(5):186-191.

WU Zhuping, ZHAN Yingtao, CHEN Jiangbing, et al. Research progress on modification and application of polylactic acid fiber[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(5): 186-191.

究。在当今市场环境中,聚乳酸(PLA)纤维已实现广泛应用。这种基于可再生资源的纤维制品具备完全生物降解特性,能够在废弃后融入生态循环,分解为 H_2O 和 CO_2 ,形成完整的自然循环体系,有效缓解了资源枯竭与温室效应等环境问题。PLA纤维以优异的生物降解性、抗紫外、易降解及可再生等性能^[1],在纺织、服装、服饰、医疗器械、电子产品等多个领域得到了广泛应用。但耐热性不足和脆性较大等缺陷导致其应用领域受到明显制约,为突破这一局限性,各行各业正致力于通过改性技术提升其综合性能,因此PLA纤维的改性是该领域当前的研究热点。

笔者主要从PLA纤维的物理改性、化学改性两方面进行阐述,并对其在医学领域、电子电器领域、纺织领域的应用进行综述,在此基础上,对PLA纤维的发展方向提出了展望,为后续相关研究提供理论依据和实践指导。

1 PLA纤维的改性研究

作为一种新型纤维,PLA纤维具有可生物降解、生物相容性好及较高的力学强度而备受关注,但PLA纤维也有弱点,如脆性大、抗冲击性能弱、韧性差、染色性差、断裂伸长率较低,制成的纺织品质地偏硬、柔软度低、舒适度不足,这些限制了其应用的问题,急需通过物理改性、化学改性等方法来改善。

1.1 物理改性

物理改性主要基于聚合物分子链及其官能团之间的弱相互作用力,如氢键和范德华力等。鉴于这些相互作用导致的各相体系界面黏合力较弱,通常采用共混、复合等物理方法来有效改性PLA纤维。

1.1.1 共混改性

为改善上述PLA纤维的固有缺陷,通过与其他聚合物共混的方法进行改性,来改善纤维的性能短板,这是一种低成本且普遍度较高的方法。采用的共混聚合物需能与PLA的不足互补,从而提升PLA纤维的整体性能,满足不同领域的多样化商业需求。何娇等^[2]选用聚乙二醇(PEG)对PLA共混改性,制备了PEG/PLA共混纤维,纤维的断裂伸长率随PEG含量的增加而提高。郑思铭^[3]为改善PLA纤维的耐热性,制备了立构复合PLA(scPLA)纤维,显著改善了PLA的强度与耐热性能。吕英华等^[4]意识到矿山粉尘等有害颗粒物对工人健康及环境的严重影响,制备了scPLA纤维,具有高过滤效率和低空气阻力特性,提高了佩戴舒适性与可靠性,强化了对佩戴人员的保护。Deng等^[5]制备的scPLA纤维具有纳米多孔结构,表现出良好的力学性能、稳定性及较高的耐水解性能。朱金唐等^[6]通过左旋聚乳酸(PLLA)和右旋聚乳酸(PDLA)共混改性PLA纤维,制备的scPLA纤维经测试显示,断裂强度可达2.58 cN/dtex,力学表现优于PLA纤维。

Clarkson等^[7]制备了高刚度纤维素纳米纤维(CNF)/PLA纤维,CNF质量分数为1.3%的情况下纤维力学性能提高了600%。Sahoo等^[8]将聚丙烯腈与PLA共混,通过静电纺丝技术制备成PLA纳米纤维,纤维有良好的过滤性能且部分可

生物降解,可用于过滤装置的制备。此外,Shayan等^[9]以PLA和表面改性纤维素纳米晶(mCNC)等为原材料,通过同轴静电纺丝工艺生产核壳结构纳米纤维,与纯PLA纤维相比,引入改性mCNC的纤维在热稳定性方面有显著提升。

以上研究都明确指出,共混改性能显著改善PLA纤维的原有缺点,实现性能的提升,改性效果优异。然而,仍存在功能组分与PLA基体界面相容性不佳的问题,改性效果受到制约。因此,研究PLA纤维共混改性时,解决这一难题是关键着力点。

1.1.2 复合改性

除共混改性外,复合改性也是PLA改性常用的一种方法,把两种或多种不同性质的材料结合在一起,形成一种具有新性能材料的过程,此方法能够克服PLA纤维的性能缺陷,全面提高材料的亲水、阻燃等性能,满足各领域市场的特殊需求。刘超等^[10]针对PLA纤维耐热性差这一问题,通过粘胶纱与PLA纤维共纺,开发了一批品质良好且耐热性优良的面料。Jabbar等^[11]将PLA纤维与莱赛尔纤维混纺,实验结果表明,由此获得的复合织物表现出独特的性能特征,具有较高的透气性能,但在耐水汽、耐热及弯曲长度方面表现欠佳。

Clarkson等^[12]将纤维素纳米晶体(CNC)与PLA复合制备了CNC/PLA复合纤维,纤维表现出延展性和脆性行为的混合,最大平均弹性模量为6.5 GPa,失效强度增加100 MPa。Manral等^[13]和Jamadi等^[14]采用处理过的红麻纤维复合改性PLA纤维,结果表明,两者间的界面结合性得到了有效改善,力学性能随之增强。秦潇璇等^[15]开发了一种生物质抗菌复合纱线,该纱线采用了PLA纤维和聚羟基丁酸羟基戊酸共聚酯两种材料,其抗菌性能较PLA纤维提升了70%以上。Kotrotsos等^[16]用多壁碳纳米管和羟基磷灰石(HAP)纳米颗粒改性PLA纤维支架,改性后的PLA纤维支架与原始支架相比,疏水性降低,力学性能也得到改善。

复合改性能在保留PLA优良降解性能的基础上改善其力学性能,各项研究证实,经复合改性后的PLA材料,其性能并非各组分性能的简单叠加,而是呈现出协同增强效应,赋予纤维一些全新的特性,如提高材料的强度、硬度、抗菌性、耐热性等,为PLA纤维开辟更广泛的应用场景。物理改性方法因成本较低且应用广泛,被视为PLA改性的主流手段。尽管该方法操作便捷易于实施,但组分间的相容性问题和填料分散不均等关键问题仍未彻底解决,改性效果受到一定限制。且对PLA的单次改性仅能针对某一或某些特定缺陷进行优化,其综合性能尚未达到理想状态,因此,物理改性在实际运用中仍面临一定的局限性。

1.2 化学改性

1.2.1 共聚改性

共聚改性作为PLA纤维化学改性的关键技术之一,核心在于调控PLA与其他功能单体的组成比例,合成具有新型结构的共聚物,改善PLA纤维的性能。共聚改性将柔性

较好的分子链段引入PLA分子链中,使PLA融合其他聚合物链段的特性,生成具有轻微交联结构的嵌段共聚物。这一过程破坏了PLA分子链原有的规整性,有效调控材料的结晶特性、热转变温度等参数,优化了其力学特性。

赵洋等^[17]开展了PLA共聚改性的研究,实验采用熔融缩聚的方式成功合成PLA共聚物。该实验引入对羟基苯丙酸和苹果酸,在保持PLA的可降解性能同时,增加了PLA的刚性。Malinowski^[18]采用电子束辐射作用于聚己内酯(PCL)/PLA共聚物,加快了PLA的生物可降解性。Sathornluck等^[19]使用环氧化天然橡胶(ENR)共聚改性PLA,合成了ENR/PLA共聚物,使得拉伸性能有所提高,断裂伸长率显著提高了67%;通过计算应力-应变曲线下的面积积分得到拉伸韧性,韧性增强了64%。Zhang等^[20]利用开环聚合合法合成的PLLA三嵌段共聚物具有优异的增韧效果。相较于纯PLLA,其韧性实现了9-12倍的提升。Brzakalski等^[21]使用球硅酸盐的柠檬烯衍生物改性PLA,该改性剂还适用于PLA的3D打印和注塑成型工艺。实验显示,柠檬烯的引入可提高打印样品的拉伸强度,使其力学性能更接近注塑样品。

相较于物理改性,PLA的共聚改性的优势更突出,它能有效解决共混过程中的不均匀性和添加剂析出等问题,确保材料性能的稳定性。但伴随着高昂的成本、复杂的生产工艺及较高的环境污染问题,这些因素限制了其在包装材料和食品容器中的应用,难以满足实际应用需求。

1.2.2 接枝和交联改性

在聚合物主链上引入化学结构各异的侧链是实现接枝改性的主要途径。Wu等^[22]采用丙烯酸对PLA进行接枝改性,并制备了PLA复合织物,该织物展现出高拉伸强度、良好的热稳定性、耐洗性及绝缘性。胡丙南等^[23]采用两步法对PLA纤维开展改性研究:经过低温等离子体预处理后,再借助环氧交联剂和环氮交联剂将丝胶蛋白接枝在纤维表面。实验结果显示,经接枝处理的PLA纤维在抗菌性和抗氧化性方面表现更好。

Fan等^[24]选择来自桦树外皮的三萜提取物(TE)接枝改性PLA纤维,通过静电纺丝技术制备了一种TE负载的PLA纤维,显示出良好的防感染、抗炎及抗菌特性。马艳艳等^[25]对PLA纤维进行O₂等离子体预处理,将预处理后的PLA纤维加入壳聚糖(CS)溶液中进行联合整理得到改性PLA纤维,实现了力学性能的显著提升。同时引入了羟基、氨基等活性基团,极大地改善了PLA纤维的纺织和染色加工性能。Donate等^[26]对PLA进行O₂等离子体处理,提高了PLA表面的亲水性,同时保持其可降解性能。

PLA由于耐热性不佳,在室温下是一种坚硬的聚合物,用其纺制的纤维质地生硬、染色性能也不理想。通过交联作用促使聚合物分子间形成更紧密的网络结构,使材料的耐热性能得到明显改善。交联改性是一种PLA分子链在交联剂或辐射下与其他单体通过化学键形成网络结构的方法^[27]。Liu等^[28]利用酸酐和环氧反应,合成聚乳酸-b-聚(丙交酯-共

己内酯)嵌段共聚物。长链支化结构的存在使共聚物在拉伸过程中表现出较高的延展性,拉伸强度为173 MPa,模量达到5.4 GPa,符合应用要求。Chalermpanaphan等^[29]合成了聚丁二酸丁烯酯(PBTS)与PLA的共聚物(PBTS-PLA)。通过热交联增加PLA共混物的延展性以及PBTS-PLA与PLA之间的界面相互作用,也改善了两者的界面黏附性。王伟彬^[30]在海藻酸钠水溶液中利用交联剂对PLA/CS复合纤维进行处理,获得PLA复合纳米纤维支架。经性能测试显示,该支架相较于纯PLA纤维支架展现出了更好的亲水性。Tefsaye等^[31]通过添加少量的自由基引发剂过氧化二异丙苯,制备具有接枝链拓扑结构的纳米丝素蛋白支化交联PLA纤维,其热性能和力学性能得到改善。郭荣英^[32]以制备的PLA纳米纤维支架为原料,采用海藻酸钠水溶液为包裹液,二价锶离子(Sr²⁺)为交联剂,将得到的核壳结构微球引入到改性PLA溶液中,获得的改性PLA支架兼具纤维结构和光热性能。且具有良好的光稳定性,可以在激光照射下实现药物的控制释放。

接枝改性使聚合物与其他材料的相容性得以提高,表面性能也得到优化;在保持PLA主链原有优势的基础上,改善及赋予PLA其他性能,如亲水性、抗菌性等。通过交联反应构建的三维网状结构,增强了材料的热稳定性和化学稳定性,交联后的聚合物分子链不易在高温或化学试剂作用下发生流动或分解,但部分交联剂存在难以控制用量,使用后难以去除,具有毒性等缺点。

1.2.3 扩链改性

陈志琪等^[33]以苯乙烯、甲基丙烯酸甲酯与甲基丙烯酸缩水甘油酯的共聚物(X-U993)为扩链改性剂,研究其对PLA性能的改性效果,结果表明,共混物的力学性能随X-U993的用量增加先增大后减小;PLA的综合性能在扩链剂质量分数为0.8%时达到最优状态。Yang等^[34]采用多元环氧扩链剂(ADR)改性PLA纤维,并制备了ADR/PLA纤维,对纤维的力学性能和耐水解性进行了研究,结果证实,经改性处理后的纤维取向度和结晶度都有所提高。

张巨等^[35]选用环氧扩链剂(REC)改性PLA。分析测试证实,REC有效实现了PLA分子链的延伸,从而降低了PLA的结晶度,增强了其耐溶剂性。李璐瑶等^[36]预先混合了聚己二酸对苯二甲酸丁二酯(PBAT)与ADR,并利用该体系对PLA薄膜的性能进行了优化。研究证实,ADR的引入不仅强化了扩链和增容效果,还对提高熔体强度和黏度具有显著效果。丁馨怡等^[37]采用扩链剂、成核剂改性PLA,经分析得出,当扩链剂质量分数为6%、成核剂的质量分数为1%时PLA的结晶性能最佳,且综合性能也得到显著提升。

基于分子结构设计的原理,化学改性通过共聚反应、接枝改性、交联处理或扩链等方法,将功能性基团或链段引入到PLA分子链中,从而精确调控聚合物微观结构和分子量,在优化PLA纤维性能方面具有显著优势。然而,化学改性往往在强化某一性能的同时,不可避免地导致其他性能的下

降,还伴随着较高的成本、环境污染严重、严格的工艺要求以及复杂的反应过程,实施难度较大。因此,未来的研究重点应集中于更易实现、更加环保、成本更低的化学改性方法。具体而言,探索简化改性流程、采用环境友好型材料和催化剂、以及降低整体成本的技术路径,是今后努力的关键方向,旨在克服现有挑战,推动PLA纤维的广泛应用。

2 PLA纤维的应用研究

2.1 PLA纤维在医学领域中的应用

PLA纤维现已广泛用于眼科植入、手术缝合线、骨膜生长隔离膜、牙科、人体组织修复材料和硬组织修复的甲壳类增强材料等。杨兆薇^[38]以PLA纤维为基体,开发了适于手术服的醋酸纤维/PLA纤维非织造材料,该材料展现出优异的表面亲水性,能够有效吸收手术过程中病人可能喷溅的体液和血液,从而提升了手术服的防护性能。

PLA纤维制成的组织工程支架在前三个月里起组织支撑作用,使得组织器官再生所需的细胞能在支架表面形成再生的组织结构和器官。Choudhary等^[39]基于PLA纤维制备了一种3D打印的PLA/硅灰石支架,表现出了良好的可降解性、抗菌活性。Yin等^[40]基于CS、PLA、芦荟素制备了高孔隙率的PLA复合纳米纤维膜,具有优异的抗菌效果和良好的生物相容性。于晓辉等^[41]运用静电纺丝技术制备了PLA复合纤维膜,PLA纤维的疏水性得到了极大改善,为PLA纤维在医学领域的应用拓展了方向。Maleki等^[42]通过静电纺丝制备了一种纳米结构的PLA纤维,对胶原蛋白沉积、血管生成和炎症有积极影响,可加快伤口闭合速度。PLA纤维的抗菌性尚未达到医疗用品所需的抗菌标准,可通过添加抗菌剂来实现抗菌效果。陈欢欢等^[43]制备了PLA/百里酚抗菌纤维,纤维的抗菌性随百里酚添加量变化,当其质量分数达到15%时,对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制作用极为显著,抑菌率高达99.99%。冯淑芹等^[44]制备的Cu₂O/PLA复合抗菌纤维对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌和白色念珠菌的抑菌率都高于99%。

此外,在骨修复材料领域,PLA纤维也有新的应用进展。陆健^[45]成功实现了促进骨修复的纳米HAP粒子与PLA纤维的有效整合,并制备出杂化纤维,进一步编织成高强度的人工韧带材料,这种新型材料在韧带组织修复方面具有广阔的应用价值,改变了既往金属等骨内固定材料的传统概念,是骨内固定材料研究的一大突破。随着技术的不断进步和应用研究的深入,PLA纤维在医学领域的应用范围将愈发广阔。

2.2 PLA纤维在电子电器领域中的应用

在电子电器行业中,PLA的电化学特性为其在微电子器件、光电转换材料等前沿科技领域的应用开辟了广阔天地。电容器作为一种重要的电子元件,应用范围极为广泛,包括国防领域的储能系统、城市轨道交通、新能源汽车领域,以及工业节能系统等。研究表明,超级电容器的关键性能指标主要由电极活性材料的特性决定,PLA由于富含碳氧元素且具

有优异的结构可扩展性,被视为高性能电极材料的理想原料。徐嘉晨等^[46]采用低温磷酸交联反应和KOH活化形成孔隙的两步法成功制备了基于PLA纤维的活性炭。性能测试结果显示,PLA材料在超级电容器电极活性材料的应用上具有显著潜力。这一研究成果为PLA在电化学储能领域的应用奠定了重要基础。吕英华等^[4]制备了一种用于呼吸防护装备、可完全降解的PLA纳米纤维膜,在呼吸防护的基础上集成传感功能,能实时监测人的呼吸状态,电活性较高。刘霞等^[47]制备了一种智能相变调温PLA纤维膜,调温纤维膜具有良好的热循环使用性能且水接触角可达到110°。

PLA纤维是最常用的3D打印材料之一,具备易于加工、成本相对较低、可降解性的特点,打印成品具有良好的力学性能和表面光洁度。徐冬梅等^[48]开发了一种改性PLA材料,专用于3D打印应用,其性能可与市场上用于3D打印的PLA相媲美。Gauss等^[49]制备了碳纳米纤维(CNF)/PLA和改性后的碳纳米纤维(g-CNF)/PLA微粒,与CNF/PLA相比,接枝后所得的g-CNF/PLA微粒更易于加工成长丝并用于3D打印。Murphy等^[50]通过添加微晶纤维素(MCC)制备了用于3D打印的PLA生物复合材料长丝,改性材料的加入增加了PLA基体的成核位点,促进了PLA的结晶性能,进一步拓宽了应用领域。

在电子电器领域的应用上,PLA纤维不仅减少了对环境的影响,还提供了新的材料解决方案。PLA纤维本身并不属于阻燃材料,是其在电子电器领域内应用的一大障碍,可对PLA进行一系列的阻燃处理,随着技术的进步和成本的降低,预计PLA纤维在这一领域内的应用将会进一步地拓展与延伸。

2.3 PLA纤维在纺织领域中的应用

PLA纤维加工制成的产品广泛应用于梭织物、针织品、非织造材料、纸张、薄膜以及热成型等多个领域^[51]。Zhu等^[52]使用PDLA,制备了一种具有立体复合物晶体的超疏水和超亲油性PLA无纺布,在油水分离领域可重复使用。基于PLA纤维生产的无纺布主要用于包装袋、卫材等一次性消费品、清洁擦拭布、厨房滤水/滤渣袋和汽车的内装饰材料。

PLA纤维具有优异的吸湿排汗能力,良好的悬垂性、回弹性,出色的抗皱性、形态稳定性,手感亦显得蓬松^[53]。但随着人们生活品质和消费观念的转变,消费者对夏季服装功能的关注更多地聚焦于防紫外线、带来凉感等方面。魏艳红等^[54]制备了含有凉感因子的PLA凉感纤维,再制成凉感PLA面料,为纺织领域带来了新的发展方向。丁九阳^[55]以氮化硼、贝壳粉、PLA为原料开发出具有凉感特性的PLA功能纤维,基于此开发出满足夏季服装吸湿速干要求的面料。PLA纤维可以通过调整工艺和添加其他材料,制成具有特定功能的纤维,开发出独具优势的服装面料。彭丽萍等^[56]基于PLA纤维,研发了一种双面剪毛绒针织面料,这种面料质轻、保暖、透气,能为用户带来舒适的穿着体验,还具有亲肤、抑菌的特点,满足了消费者对于健康、舒适纺织品的需求。程燕

婷等^[57]用PLA纤维制备了4种具有透气性能的3D打印服装面料,测试结果表明,面料表面平整,透气性能突出,尤其适用于夏季服饰产品的开发。

应丽丽^[58]采用PLA无纺布作为基底材料,把亲水性能获得改性的PLA材料与混合导电液组装,进而构建出具备功能性的PLA导电织物,这一成果为智能穿戴服装领域提供了新的材料选择。PLA纤维不仅在纺织行业有着广泛的应用潜力,在可持续发展和环保意识日益增强的今天,其重要性更加凸显,有望在未来承担更为重要的角色,推动绿色、环保的纺织行业发展。

3 总结与展望

当前,PLA纤维的物理改性与化学改性手段不断进步,旨在提升PLA纤维的性能,尽管改性PLA纤维的性能有所提高,但仍面临一些难题亟待解决。

(1)共混改性效果显著,但受到功能组分与PLA基体界面相容性不佳的制约。因此,研究PLA纤维共混改性时,可通过优化共混工艺参数、使用相容剂等方法来改善界面相容性问题。

(2)复合改性能通过协同作用提高PLA纤维的整体性能,但存在界面结合力弱、填料分散不均、力学性能矛盾、功能化改性持久性差等问题。未来需重点研究表面改性、添加相容剂等方法解决性能问题。

(3)共聚改性能解决共混过程中的不均匀性及添加剂析出等问题,确保纤维性能的稳定性,同时伴随着高昂的成本、复杂的生产工艺以及较高的环境污染问题。需聚焦于开发新型高效催化剂、优化聚合工艺条件、采用可控聚合技术等解决以上难题。

(4)接枝和交联改性能在PLA原有优势上赋予PLA纤维其他性能,且交联改性构建的三维网状结构能增强材料的热稳定性,交联后的聚合物分子链不易在高温或化学试剂作用下发生流动或分解。但化学试剂的使用会引入有害高污染物,导致纤维的加工性能与降解性能下降,可采用辐射交联、开发可降解交联剂等清洁方法实现绿色改性。

(5)扩链改性可显著提高PLA分子量增强纤维的力学性能,但未来仍需通过分子设计、新型扩链剂开发来解决交联过度、降解性下降、生物相容性等问题,以克服其缺点,制备高性能纤维,满足医疗、电子电器、纺织等领域的多样化需求。

参考文献

- [1] 谭文萍,等.棉纺织技术,2023,51(4):73-78.

TAN Wenping, et al. Cotton Textile Technology, 2023, 51(4): 73-78.

- [2] 何娇,等.合成纤维,2020,49(12):8-12.

HE Jiao, et al. Synthetic Fiber in China, 2020, 49(12):8-12.

- [3] 郑思铭.立构复合聚乳酸纤维的协同阻燃改性及其机理研究[D].无锡:江南大学,2024.

ZHENG Siming. Synergistic flame retardant modification and

mechanism research of stereocomplex polylactic acid fibers[D]. Wuxi:Jiangnan University, 2024.

- [4] 吕英华,等.金属矿山,2025(2):247-255.

LYU Yinghua, et al. Metal Mine, 2025(2):247-255.

- [5] DENG Y F, et al. Journal of Hazardous Materials, 2021, 407. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.124787.

- [6] 朱金唐,等.纺织科学研究,2023,34(7):45-48.

ZHU Jintang, et al. Textile Science Research, 2023, 34(7):45-48.

- [7] CLARKSON C M, et al. ACS Applied Polymer Materials, 2019, 1(2):160-168.

- [8] SAHOO R, et al. Indian Journal of Fibre and Textile Research, 2023, 48(2):45-48.

- [9] SHAYAN M, et al. Industrial Crops and Products, 2024, 222. DOI: 10.1016/j.indcrop.2024.119594.

- [10] 刘超,等.棉纺织技术,2021,49(1):69-72.

LIU Chao, et al. Cotton Textile Technology, 2021, 49(1): 69-72.

- [11] JABBAR A, et al. The Journal of the Textile Institute, 2020, 111(1):129-138.

- [12] CLARKSON C M, et al. Green Materials, 2018, 6(1): 6-14.

- [13] MANRAL A, et al. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(13): 5 709-5 727.

- [14] JAMADI A H, et al. Polymers, 2021, 13(19). DOI: 10.3390/polym13193299.

- [15] 秦潇璇,等.棉纺织技术,2020,48(7):35-38.

QIN Xiaoxuan, et al. Cotton Textile Technology, 2020, 48(7): 35-38.

- [16] KOTROTSOS A, et al. Biomimetics, 2020, 5(3). DOI: 10.3390/biomimetics5030043.

- [17] 赵洋,等.当代化工研究,2024(3):169-172.

ZHAO Yang, et al. Modern Chemical Research, 2024(3): 169-172.

- [18] MALINOWSKI R. Journal of Polymer Engineering, 2018, 38(7): 635-640.

- [19] SATHORNLUCK S, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(48). DOI:10.1002/app.48267.

- [20] ZHANG B F, et al. European Polymer Journal, 2019, 111: 28-37.

- [21] BRZĄKALSKI D, et al. Molecules, 2020, 25(24). DOI:10.3390/molecules25245882.

- [22] WU C S, et al. Express Polymer Letters, 2022, 16(1): 21-33.

- [23] 胡丙南,等.印染,2021,47(11):53-57.

HU Bingnan, et al. China Dyeing & Finishing, 2021, 47(11): 53-57.

- [24] FAN T Y, et al. AAPS PharmSciTech, 2021, 22(6). DOI:10.1208/s12249-021-02081-z.

- [25] 马艳艳,等.材料科学与工艺,2024,32(3):51-58.

MA Yanyan, et al. Materials Science and Technology, 2024, 32(3): 51-58.

- [26] DONATE R, et al. Polymers, 2021, 13(10). DOI: 10.3390/polym13101643.

- [27] 朱凡. 聚乳酸纤维的晶体结构调控与耐热改性[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019.
ZHU Fan. Crystal structure regulation and thermal-resistance modification of polylactic acid fibers[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019.
- [28] LIU Y L, CAO H J, YE L, et al. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(10): 4 524–4 532.
- [29] CHALERPANAPHAN V, et al. Polymer Bulletin, 2022, 79(4): 2 003–2 017.
- [30] 王伟彬. 聚乳酸复合纳米纤维组织工程支架材料的制备与性能[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
WANG Weibin. Preparation and properties of polylactic acid composite nanofiber scaffold materials for tissue engineering[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.
- [31] TESFAYE M, et al. ACS Omega, 2017, 2(10): 7 071–7 084.
- [32] 郭荣英. 改性聚乳酸纳米纤维复合支架的制备和表征[D]. 福州: 福建师范大学, 2020.
GUO Rongying. Preparation and characterization of modified polylactic acid nanofiber composite scaffold[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2020.
- [33] 陈志琪, 等. 工程塑料应用, 2022, 50(6):144–148.
CHEN Zhiqi, et al. Engineering Plastics Application, 2022, 50(6): 144–148.
- [34] YANG H J, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140 (38). DOI:10.1002/app.54436.
- [35] 张臣, 等. 材料科学与工程学报, 2017, 35(4):587–591, 569.
ZHANG Chen, et al. Journal of Materials Science and Engineering, 2017, 35(4): 587–591, 569.
- [36] 李璐瑶, 等. 工程塑料应用, 2023, 51(8):8–14.
LI Luyao, et al. Engineering Plastics Application, 2023, 51(8): 8–14.
- [37] 丁馨怡, 等. 中国塑料, 2024, 38(9):41–46.
DING Xinyi, et al. China Plastics, 2024, 38(9):41–46.
- [38] 杨兆薇. 手术服用醋酸纤维/聚乳酸纤维非织造材料的设计与制备[D]. 天津: 天津工业大学, 2020.
YANG Zhaowei. Design and preparation of cellulose acetate/polylactic acid fiber nonwoven materials for surgical gowns[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2020.
- [39] CHOUDHARY R, et al. Polymers, 2022, 14(19). DOI:10.3390/polym14193932.
- [40] YIN J, et al. Advanced Fiber Materials, 2022, 4(4):832–844.
- [41] 于晓辉, 等. 江西师范大学学报(自然科学版), 2020, 44(3): 235–239.
YU Xiaohui, et al. Journal of Jiangxi Normal University(Natural Science Edition), 2020, 44(3):235–239.
- [42] MALEKI H, et al. Iranian Polymer Journal, 2020, 29(9):841–851.
- [43] 陈欢欢, 等. 纺织学报, 2023, 44(2):34–43.
CHEN Huanhuan, et al. Journal of Textile Research, 2023, 44(2): 34–43.
- [44] 冯淑芹, 等. 纺织导报, 2022(2):52–55.
FENG Shuqin, et al. China Textile Leader, 2022(2):52–55.
- [45] 陆隼. 生物医用聚乳酸纤维材料的设计制备及其血管、韧带组织功能修复研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.
LU Jian. Design and preparation of biomedical polylactic acid fiber materials and study on functional repair of vascular and ligament tissue[D]. Shanghai: Donghua University, 2022.
- [46] 徐嘉晨, 等. 电源技术, 2023, 47(6):693–697.
XU Jiachen, et al. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47 (6): 693–697.
- [47] 刘霞, 等. 纺织学报, 2024, 45(12):18–24.
LIU Xia, et al. Journal of Textile Research, 2024, 45(12):18–24.
- [48] 徐冬梅, 等. 工程塑料应用, 2021, 49(11):68–71.
XU Dongmei, et al. Engineering Plastics Application, 2021, 49 (11): 68–71.
- [49] GAUSS C, et al. Additive Manufacturing, 2023, 61.DOI:10.1016/J.ADDMA.2022.103346.
- [50] MURPHY C A, et al. Polymer Composites, 2018, 39(4):1 311–1 320.
- [51] 陶永亮, 等. 天津纺织科技, 2024(1):44–47.
TAO Yongliang, et al. Tianjin Textile Science & Technology, 2024(1):44–47.
- [52] ZHU C X, et al. ACS Applied Polymer Materials, 2020, 2(7): 2 509–2 516.
- [53] 李浩宇, 等. 纺织科学与工程学报, 2023, 40(3):133–138.
LI Haoyu, et al. Journal of Textile Science and Engineering, 2023, 40(3):133–138.
- [54] 魏艳红, 等. 棉纺织技术, 2025, 53(1):56–59.
WEI Yanhong, et al. Cotton Textile Technology, 2025, 53(1): 56–59.
- [55] 丁九阳. 凉感聚乳酸纤维与织物的制备及性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2023.
DING Jiuyang. Preparation and performance study of cool feeling polylactic acid fibers and textiles[D]. Shanghai: Donghua University, 2023.
- [56] 彭丽萍, 等. 现代纺织技术, 2023, 31(6):167–173.
PENG Liping, et al. Advanced Textile Technology, 2023, 31(6): 167–173.
- [57] 程燕婷, 等. 上海纺织科技, 2024, 52(3):32–34, 47.
CHENG Yanting, et al. Shanghai Textile Science & Technology, 2024, 52(3):32–34, 47.
- [58] 应丽丽. 低共熔溶剂作用聚乳酸纤维的表面改性与功能化修饰研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2022.
YING Lili. Study on surface modification and functional modification of polylactic acid fiber with deep eutectic solvents[D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2022.