

# 聚乳酸卫生材料的研究进展及应用

郑海燕<sup>1</sup> 韩丽娜<sup>2</sup> 封严<sup>1</sup> 马计兰<sup>2</sup> 钱晓明<sup>1</sup>

1. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387;
2. 北京京兰非织造布有限公司, 北京 101204

**摘要:** 聚乳酸(PLA)是一种可生物降解材料,具有优良的生物相容性和环保性能。近年来,随着人们环保意识的提高和医疗卫生行业的快速发展,聚乳酸在卫生材料领域的研究与应用受到广泛关注。综述聚乳酸卫生材料的特性、制备方法及应用,并展望其未来的发展趋势。

**关键词:** 聚乳酸;卫生材料;生物降解;生物相容性

中图分类号:TQ 321

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2024)12-0001-07

## Research progress and application of polylactic acid hygienic materials

Zheng Haiyan<sup>1</sup>, Han Lina<sup>2</sup>, Feng Yan<sup>1</sup>, Ma Jilan<sup>2</sup>, Qian Xiaoming<sup>1</sup>

1. College of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China;
2. Beijing Jinglan Nonwoven Fabric Co., Ltd., Beijing 101204, China

**Abstract:** Polylactic acid (PLA) is a kind of biodegradable material with excellent biocompatibility and environmental protection properties. In recent years, with the heightened awareness of environmental protection among people and the rapid development of the medical and healthcare industry, the research and application of PLA in the field of hygienic materials has been widely concerned attention. The characteristics, preparation methods, and applications of PLA hygienic materials were reviewed, and the future development trend was prospected.

**Keywords:** polylactic acid; hygienic material; biodegradable; biocompatibility

近年来,我国卫生材料行业蓬勃发展,医用卫生材料与公共卫生材料领域均取得重大的突破与进步。众所周知,卫生用品废弃物数量巨大且不可避免,因此,研究开发绿色可降解的卫生材料具有重要的现实意义。在全社会大力倡导绿色发展的背景下,聚乳酸(PLA)凭借其环保优势在卫生领域得到广泛关注。

PLA 是一种源自生物质且可生物降解的合成材料,由可再生植物资源(如玉米)中的淀粉经生物发酵转化为乳酸,再经精炼、脱水低聚等流程制备而成<sup>[1-2]</sup>。PLA 的合成路径如图 1 所示,其合成方法主要分为直接缩聚和丙交酯开环聚合 2 类<sup>[3]</sup>。PLA 凭借良好的强度、透气透氧性和热稳定性,以及卓越的加工性能<sup>[4]</sup>,成为卫生材料领域重要的绿色原料

基金项目:中国纺织工业联合会科技指导性项目“新型卫生用热风非织造材料关键技术及其产业化”(2019224)

收稿日期:2024-07-05

作者简介:郑海燕,女,2000年生,在读硕士研究生,主要研究方向为聚乳酸卫生材料, haiyanaaha@163.com

通信作者:封严,教授,博士,主要研究方向为新型纤维材料和功能非织造材料, fengyan@tiangong.edu.cn

之一。

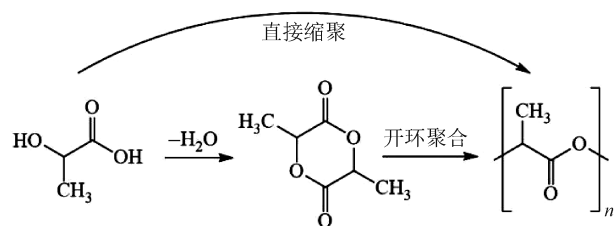


图1 PLA合成路径示意图  
Fig. 1 Synthesis route diagram of PLA

随着科技的不断进步,PLA卫生材料的制备工艺持续改善,产品性能也显著提升,其应用领域愈加广泛。本文概述PLA卫生材料的研究进展及应用现状,介绍PLA材料的特点及其制备工艺,旨在为PLA卫生材料的进一步研究开发提供参考。

## 1 聚乳酸材料的特性

### 1.1 良好的生物相容性

PLA能够在人体内经酸或酶的作用水解成乳酸。乳酸作为一种细胞代谢产物,可被机体内的酶进一步代谢,生成二氧化碳和水。早在19世纪前,大量研究已证实了PLA在体内的可降解性及降解产物的安全性。PLA对人体无毒、无害,具有较好的生物相容性<sup>[5-6]</sup>,这种特性使其在医疗卫生领域表现出良好的应用潜力。

### 1.4 天然抗菌性

PLA纤维是一种源自玉米、木薯等天然植物原料的生物基纤维,呈弱酸性,具有可降解、抑菌、排湿速干、不发黄、不蓄味等性能。此外,PLA中的乳酸分子能够促进有益菌(如乳酸杆菌)的繁殖,抑制白念珠菌等有害菌的生长,这是其具备天然抗菌特性的关键因素之一。陈丽雅<sup>[13]</sup>根据GB/T 20944.3—2008《纺织品 抗菌性能的评价 第3部分:振荡法》测试了PLA纤维及其纺织品的抗菌性,证实PLA材

### 1.2 独特的降解性能

相较于卫生材料中常见的纤维原料,如棉纤维、聚丙烯纤维、聚酯纤维等,PLA具有独特的降解性能。Fakhri等<sup>[7]</sup>将PLA材料分别置于海水、河水、土壤和堆肥环境中,对其进行为期60d的降解试验,发现所有试验环境下PLA材料均出现了较明显的降解现象。PLA分子结构中存在的酯键对水和热均比较敏感,在高温、有氧且潮湿的环境条件下,酯键会发生断裂,从而产生不同程度的降解。PLA的降解方式多样,如紫外降解、水降解、体内降解及微生物降解等<sup>[8]</sup>。然而,PLA的降解效率并不高,为提高其降解效率且不影响其生物相容性,常将PLA与玉米淀粉<sup>[9]</sup>、壳聚糖<sup>[10]</sup>、聚对苯二甲酸己二酸丁二醇酯(PBAT)<sup>[11]</sup>等材料进行复合,或对PLA进行改性处理。

### 1.3 较好的力学性能

PLA的相对分子质量及结晶度较高,其分子链中存在交联结构,这赋予PLA良好的力学性能,可增强材料的抗蠕变能力,提高断裂强度。此外,可通过调节相对分子质量、结晶度、交联结构等参数,进一步优化PLA材料的性能<sup>[12]</sup>,以满足多样化的应用场景和不同需求。表1为PLA纤维与涤纶、棉纤维的干湿断裂强度及断裂伸长率,可见PLA纤维的断裂伸长率远高于棉纤维,这表明PLA材料的柔软性和舒适性较好。

表1 PLA纤维与涤纶、棉纤维的力学性能对比

Tab. 1 Comparison of mechanical properties of PLA fibers, polyester fibers and cotton fibers

纤维类型	干态断裂强度/(cN·dtex <sup>-1</sup> )	干态断裂伸长率/%	湿态断裂强度/(cN·dtex <sup>-1</sup> )	湿态断裂伸长率/%
PLA纤维	3.2~4.9	30~35	3.0~4.6	35~40
涤纶	3.8~6.2	20~32	3.0~4.6	22~35
棉纤维	1.9~3.1	7~9	2.6~3.0	12~14

料的抗菌性能持久稳定。另有研究表明,PLA低聚物作为一种生物安全、生态友好的功能性抗菌剂,能够有效对抗H1N1、H3N2和SARS-CoV-2病毒,以及大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌、肺炎克雷伯菌、MRSA细菌和白念珠菌等多种病原体<sup>[14]</sup>。PLA的天然抗菌性与其独特的分子结构,以及可降解性、弱酸性、排湿速干特性等密切相关。图2直观展示了PLA的抗菌机制。基于优良的自然抗菌性,PLA在卫生材料领域得到广泛应用。

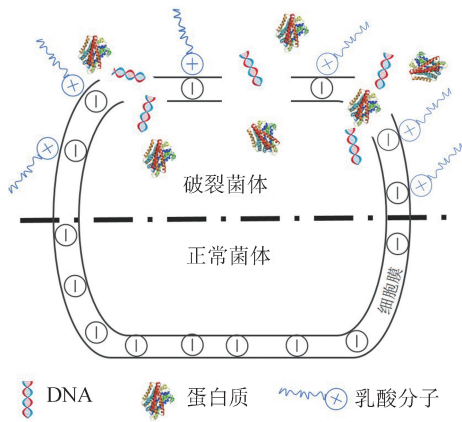


图 2 PLA 的抗菌机制  
Fig. 2 Antibacterial mechanism of PLA

### 1.5 绿色环保

PLA 是一种能够完全生物降解的材料,其降解过程无需燃烧,不释放有害气体,可被自然环境中的多种微生物分解成水和二氧化碳,从而实现环境友好型循环,不对环境造成污染。相较于传统的石油基材料,PLA 在生产和使用过程中表现出更低的碳排放量,具有明显的环保优势。图 3 为 PLA 循环利用的路径图。

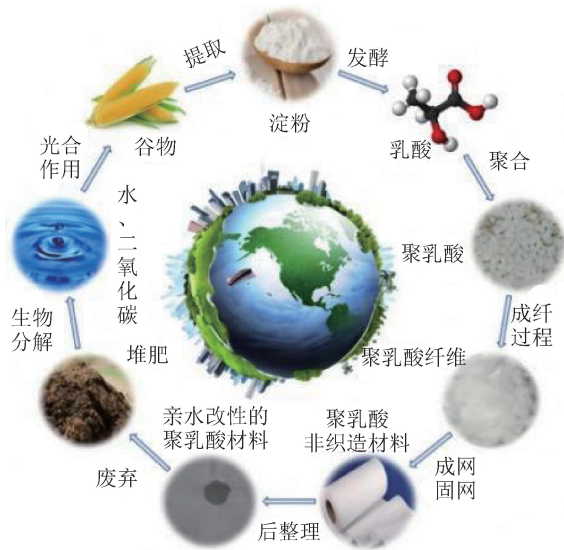


图 3 PLA 循环利用的路径图<sup>[15]</sup>  
Fig. 3 Path diagram of PLA recycling<sup>[15]</sup>

## 2 聚乳酸卫生材料的制备

尽管 PLA 具有良好的生物降解性、力学性能以及天然抗菌特性,但其在强度、尺寸稳定性及抗老化

等方面仍存在一定的改进空间。实际应用中,PLA 的降解效率高度依赖于环境条件尤其是温度。相关研究表明,在低于 50 °C 条件下,PLA 几乎不发生降解或降解过程极为缓慢,且在土壤环境中的生物降解效率不高<sup>[16]</sup>。此外,随着降解过程的进行,PLA 的抗菌性能亦呈现出逐渐减弱的趋势。

当前,常见的 PLA 卫生材料制备方法有水刺法、熔喷法、纺黏法、静电纺丝法及 3D 打印等。此外,为进一步优化 PLA 的性能,业界广泛采用各类改性方法对其进行处理。

### 2.1 水刺法

水刺法是利用高压射流的冲击作用使纤维重新排列并相互缠结以制备非织造材料的一种方法<sup>[17]</sup>。水刺非织造材料具有良好的吸湿性和透气性,纤维不易脱落且生产过程中无需使用黏合剂<sup>[18-19]</sup>。PLA 纤维虽强力较高,但吸湿性欠佳,因此在利用水刺工艺制备卫生材料时,常将其与其他具有优良吸湿性能的纤维共混。

杨兆薇<sup>[20]</sup>利用水刺工艺将醋酸纤维与 PLA 纤维混合加固,所得材料具有良好的过滤性能和抑菌性能,可用于制作手术服。将 PLA 纤维与黏胶纤维通过水刺工艺复合,可在一定程度上提升 PLA 水刺非织造材料的防水透湿性能,同时赋予产品降解特性<sup>[21]</sup>。对不同质量比的 PLA 纤维与石墨烯纤维进行混合水刺,所得 PLA/石墨烯水刺非织造材料的纵横向断裂强力均大于 50 N,同时具有良好的抗菌性<sup>[22]</sup>。

### 2.2 熔喷法

熔喷技术是一种产业化制备亚微米级至微米级,乃至纳米级超细纤维的非织造材料技术,其特点在于工艺流程短、生产效率高、环境污染小<sup>[23]</sup>。熔喷非织造材料轻质蓬松、孔隙率高,广泛应用于卫生材料领域,如一次性防护服、口罩、医用敷料等<sup>[24-26]</sup>。早在 2001 年,就已出现关于 PLA 熔喷非织造材料研究与应用的报道<sup>[27]</sup>,发展至今,PLA 材料已在熔喷技术领域广泛应用。

熔喷工艺制备的 PLA 卫生材料手感柔软,力学性能达标且具有一定抗菌性能,具有良好的应用潜力<sup>[28-29]</sup>。Gao 等<sup>[30]</sup>将加氢化 PLA (HC-PLA) 与熔喷技术结合,所得材料孔隙率高、过滤效率优异,解决了纯 PLA 熔喷非织造材料过滤性能不足的问题。

Obaidur<sup>[31]</sup>采用熔喷法将 PLA 与热塑性聚氨酯 (TPU) 结合,有效提升了 PLA 的韧性。Majchrzycka 等<sup>[32]</sup>以珍珠岩改性活性物“Bioperlit”作为杀菌剂,将其与 PLA 结合,通过熔喷法制备出具有杀菌作用的过滤呼吸器。Wang 等<sup>[33]</sup>以聚乙二醇(PEG)为增塑剂、十二烷基硫酸钠(SDS)为亲水剂,通过熔喷技术制备出 PLA/PEG 超细纤维材料,不仅增强了 PLA 的韧性,还改善了其亲水性,为医用敷料领域提供了新的解决方案。

### 2.3 纺黏法

纺黏法是一种直接将聚合物切片经挤压熔融、纺丝、牵伸、铺网、固结等工序成型为非织造材料的生产技术,其生产流程短、效率高,纺黏非织造产品强力高且尺寸稳定性好<sup>[34]</sup>。

将纺黏法与 PLA 结合,能够有效提高 PLA 卫生材料的强度,弥补 PLA 因降解导致的强力不足问题。杨钦等<sup>[35]</sup>以 PLA 和聚丙烯(PP)为原料,以自制的马来酸酐接枝物为助剂,制备出可生物降解的 PLA/助剂/PP 复合纺黏非织造材料,并通过试验证实,添加助剂后 PLA 和 PP 结合得更紧密,所得材料强度明显提升。

此外,纺黏法常与熔喷法联合应用,以制备口罩、防护服等卫生用品。在这一领域,PLA 也因其绿色环保特性而备受关注。Zhang 等<sup>[36]</sup>制备出一种纺黏层、熔喷层、纺黏层(SMS)叠层结构的 PLA 基复合材料,其防护性能优异,同时具有良好的降解性能,可用于制作高性能防护服。

### 2.4 静电纺丝法

静电纺丝作为一种新型纳米纤维生产技术受到广泛关注,该技术制备的纳米纤维具有比表面积大、易于实现表面功能化等优势<sup>[37]</sup>。此外,静电纺丝过程中还可通过不同的改性方法,或添加无机粒子、抗菌剂、酶等添加剂,对纳米纤维进行修饰<sup>[38-40]</sup>,以满足不同的应用需求。

李建根等<sup>[41]</sup>采用静电纺丝技术制备出 PLA/锌基金属有机骨架(BioMIL-5)复合纤维膜,该纤维膜不仅可高效捕获 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 等颗粒物,还可显著改善 PLA 的抗菌性能。李彪等<sup>[42]</sup>将相同质量分数的电气石加入 PLA 纺丝液中,通过静电纺丝技术制得的电气石/PLA 纳米纤维膜,兼具高效低阻特性和高滤效稳定性。Wu 等<sup>[43]</sup>以纳米银(Ag)和茶多

酚(TP)为复合抗菌剂,采用静电纺丝技术制备出一种负载纳米银和茶多酚结合物的 PLA 抗菌纳米纤维膜。结果显示,添加一定的抗菌剂不仅大幅提升了材料的抗菌效果,还有效增强了其亲水性。

### 2.5 3D 打印

3D 打印技术是一种将数字模型文件转换为实体的数字制造技术,包括选择性激光烧结(SLS)、分层实体制造、立体光刻和熔融沉积成型(FDM)等<sup>[44]</sup>。3D 打印技术因具有成本低、形状设计灵活、精度高等优点,广泛应用于生物医学领域。PLA 也是 3D 打印中最常用的原材料之一<sup>[45-46]</sup>。将 3D 打印技术与 PLA 材料结合,可用于制备定制化医疗器械和支架等<sup>[47]</sup>。

Ambone 等<sup>[48]</sup>利用 3D 打印技术将纤维素纳米纤维(CNF)与 PLA 结合,结果显示,与纯 PLA 相比,在 PLA 中添加 CNF 能够提高其拉伸强度和模量,降低断裂伸长率,且 CNF 的加入还可加速 3D 打印 PLA 的成核和结晶,从而提高其结晶度。此外,3D 打印 PLA/CNF 复合材料的热稳定性不受 CNF 的影响。张志成等<sup>[49]</sup>以 PLA 为基体材料,添加环氧大豆油(ESO)与羟基磷灰石(HA)对其进行改性,利用 3D 打印技术制备的 PLA/ESO/HA 复合材料,适用于加工医用塑料止血夹。3D 打印技术与 PLA 材料结合,不仅赋予了 PLA 材料更高的形状灵活性,还显著增强了其韧性和强度,拓宽了 PLA 的应用范围。

## 3 聚乳酸卫生材料的应用

PLA 卫生材料大致可分为个人护理卫生材料、食品卫生材料与医疗卫生材料等。图 4 为 PLA 卫生材料的分类及其具体示例。

### 3.1 个人护理卫生材料

以 PLA 为原材料的卫生产品,在生活中有着广泛应用,如卫生巾、婴儿纸尿裤及口罩等。PLA 材料具有良好的透气性、舒适性和环保性,对皮肤非常友好,其不仅能够有效缩短液体与皮肤的直接接触时长,还因弱酸性特性能够中和碱性刺激,显著减少身体褥疮发生的可能,因而深受市场喜爱。如,美国 PLA 生产商 NatureWorks 公司研发出一种可用于婴儿尿布、成人失禁和女性卫生用品的新型非织造材



图 4 PLA 卫生材料的分类及其具体示例  
Fig. 4 Classification of PLA hygienic materials and specific examples

料,其返湿量是 PP 非织造材料的 50%,同时对皮肤的刺激性更低<sup>[50]</sup>。国内的驼人控股集团、稳健医疗等企业也相继推出了 PLA 可降解口罩产品<sup>[51]</sup>。

### 3.2 食品卫生材料

PLA 材料因其安全性和环保性,被广泛用于制作食品卫生包装材料,这有助于减轻环境污染。以 PLA 为原材料制作的食物包装袋,不仅满足食品卫生标准,还具有一定的抗菌性能。此外,其良好的保鲜性还能够有效延长食品的保质期。如, Yang 等<sup>[52]</sup>制备的 PBAT/PLA 食品包装薄膜,除具有抗菌性能外,还具有良好的透水透气性能。Wen 等<sup>[53]</sup>将肉桂精油/ $\beta$ -环糊精包合物 (CEO/ $\beta$ -CD-IC) 掺入 PLA 纳米纤维中,制得一种可用于活性食品包装的卫生材料。王德宝等<sup>[54]</sup>制备的一种负载紫苏醛 (PAE) 的 PLA 抗菌纳米纤维包装膜,对冷鲜羊肉具有良好的保鲜效果。

### 3.3 医疗卫生材料

PLA 材料凭借其突出的生物相容性,成为负载蛋白类药物、多肽等生物活性分子的理想选择。美国食品和药物管理局已批准了 15 种以 PLA 作为载体与生物液体直接接触的制剂的使用,这些制剂用于抗癌、止泻、抗生素、消炎、降糖等药物的控制递送<sup>[55-56]</sup>。PLA 材料能够作为药物载体,将药物包裹在其内部,并通过控制药物释放速率,实现良好的治疗效果。Olmo 等<sup>[57]</sup>制备出一种具有药理活性的可生物降解 PLA 支架,该支架不仅能促进组织再生,还表现出优异的抗菌性能。林俊敏<sup>[58]</sup>制备的贝尼

尔 PLA 微球能够有效降低制剂对基体产生的毒副作用。Li 等<sup>[59]</sup>设计了一种针头为 PLA/PLA-羟基乙酸共聚物 (PLGA) 材质的微针贴片。该贴片依赖于 PLA/PLGA 的可生物降解特性,实现了左炔诺孕酮(一种避孕激素)的连续释放,既增强了药物效果,又确保了人体安全。Chen 等<sup>[60]</sup>将透明质酸和维托酚芬负载到 PLA 上制得纳米凝胶。该凝胶能够通过加速伤口再上皮化,控制瘢痕形成,促进无瘢痕伤口的愈合。上述研究进一步证实,PLA 在生物医学领域具有广泛的应用前景。

## 4 结束语

PLA 卫生材料作为一种生物降解材料,其凭借优异的可加工性,在卫生材料领域展现出广阔的发展前景和巨大的市场潜力。然而,PLA 卫生材料的发展也面临一些挑战,其生产过程相对复杂且成本较高,同时在特定条件(高温高压环境)下的稳定性也有待提高。因此,持续提升 PLA 卫生材料的性能与品质,以适应市场需求,显得尤为迫切。

当然,PLA 卫生材料广阔的应用前景仍然值得期待。目前,国内在 PLA 的生产上尚处于起步阶段,需要加大投入力度,提升生产技术,以满足日益增长的市场需求。此外,随着 PLA 材料的广泛应用,也需要注意其可能带来的环境影响,并积极寻求解决方案,实现可持续发展。



期刊采编平台



中国知网下载

## 参考文献

- [1] 马喜峰. 聚乳酸复合材料在生物医学领域的应用研究[J]. 化学与粘合, 2022, 44(5): 436-440.
- [2] 杨菲菲, 王永生, 李增俊, 等. 聚乳酸纤维产业发展现状及措施建议[J]. 纺织科学研究, 2024, 35(增刊 2): 17-19.
- [3] 李曹, 王远亮. 聚乳酸制备研究进展[J]. 国外医学(生物医学工程分册), 2002(6): 274-278.
- [4] HAMAD K, KASEEM M, AYYOUB M, et al. Poly lactic acid blends: the future of green, light and tough[J].

- Progress in Polymer Science, 2018, 85: 83-127.
- [ 5 ] CASALINI T, ROSSI F, CASTROVINCI A, et al. A perspective on polylactic acid-based polymers use for nanoparticles synthesis and applications [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2019, 7: 259.
- [ 6 ] YANG X M, QIU S, YUSUF A, et al. Recent advances in flame retardant and mechanical properties of polylactic acid: a review [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 243: 125050.
- [ 7 ] FAKHRI M A, MARIATTI M, VILAY V, et al. Comparison of physical properties and degradation of polylactic acid and polypropylene facemask layer [J]. *Fibers and Polymers*, 2023, 24(3): 869-884.
- [ 8 ] 何晓莉, 龚芮, 杨秀英, 等. 聚乳酸降解行为和老化改性研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(6): 166-171.
- [ 9 ] OHKITA T, LEE S H. Thermal degradation and biodegradability of poly(lactic acid)/corn starch biocomposites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, 100(4): 3009-3017.
- [ 10 ] 孙倩玉, 杨仁党. 一种壳聚糖接枝聚乳酸共聚物及其制备方法与应用: CN111019099B [P]. 2021-12-21.
- [ 11 ] SCHMITZ L, HARADA J, RIBEIRO W B, et al. Toughening of poly(lactic acid) (PLA) with poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT): a morphological, thermal, mechanical, and degradation evaluation in a simulated marine environment [J]. *Colloid and Polymer Science*, 2023, 301(12): 1405-1419.
- [ 12 ] FARAH S, ANDERSON D G, LANGER R. Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications: a comprehensive review [J]. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 2016, 107: 367-392.
- [ 13 ] 陈丽雅. 聚乳酸纺织品抑菌性能及微塑人体无害化研究[D]. 上海: 东华大学, 2023.
- [ 14 ] BAO Q, ZHANG Z H, YU B C, et al. Synthesis of polylactic acid oligomers for broad-spectrum antimicrobials [J]. *Polymers*, 2022, 14(20): 4399.
- [ 15 ] 王镔琛, 张恒, 孙焕惟, 等. 医疗卫生用聚乳酸非织造材料的制备及其亲水改性研究进展 [J]. *中国塑料*, 2022, 36(5): 158-166.
- [ 16 ] GOTO T, KISHITA M, SUN Y, et al. Degradation of polylactic acid using sub-critical water for compost [J]. *Polymers*, 2020, 12(11): 2434.
- [ 17 ] GULHANE S, TURUKMANE R, MAHAJAN C. 水刺非织造布的水刺工艺流程及其性能 [J]. 童艺翻, 译. *国际纺织导报*, 2019, 47(10): 18-20.
- [ 18 ] 马腾飞, 宋东鹏, 刘双营, 等. 水刺法非织造材料及工艺在过滤领域的应用 [J]. *产业用纺织品*, 2023, 41(12): 1-5.
- [ 19 ] 董二莹, 金银山, 王松. 水刺复合非织造布的现状分析及前景展望 [J]. *化纤与纺织技术*, 2022, 51(1): 46-48.
- [ 20 ] 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.
- [ 21 ] 韩秀丽, 王春红, 高涵超, 等. 水刺工艺对医用复合非织造材料防水透湿性的影响 [J]. *毛纺科技*, 2023, 51(9): 24-31.
- [ 22 ] 郭奇, 郭守才, 苏怀平, 等. 石墨烯改性纤维水刺非织造布制备与性能研究 [J]. *山东纺织科技*, 2021, 62(5): 4-7.
- [ 23 ] HIREMATH N, BHAT G. Melt blown polymeric nanofibers for medical applications: an overview [J]. *Nanoscience & Technology: Open Access*, 2015, 2(1): 1-9.
- [ 24 ] 王镔琛, 张恒, 翟倩, 等. 聚乳酸超细纤维敷料的熔喷成形工艺及其快速导液特性 [J]. *纺织学报*, 2024, 45(1): 30-38.
- [ 25 ] 解宇, 郭芳, 祁宁. 医用防护服面料的研究进展 [J]. *现代丝绸科学与技术*, 2023, 38(2): 36-42.
- [ 26 ] 丁敏, 周日敏, 丁超, 等. 可降解熔喷 PLA 非织造材料制备及其过滤性能研究 [J]. *化工新型材料*, 2023, 51(增刊2): 402-406.
- [ 27 ] MÜLLER D H, KROBJIŁOWSKI A. Meltblown fabrics from biodegradable polymers [J]. *International Nonwovens Journal*, 2001, 10(1): 1558925.
- [ 28 ] 彭鹏, 张瑜, 张伟, 等. 聚乳酸超细纤维医用抗菌敷料的制备 [J]. *上海纺织科技*, 2014, 42(12): 18-20.
- [ 29 ] LIU G H, GUAN J, WANG X F, et al. Polylactic acid (PLA) melt-blown nonwovens with superior mechanical properties [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2023, 11(10): 4279-4288.
- [ 30 ] GAO H, LIU G H, GUAN J, et al. Biodegradable hydro-charging polylactic acid melt-blown nonwovens with efficient PM<sub>0.3</sub> removal [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 458: 141412.
- [ 31 ] OBAIDUR M R. 热塑性聚氨酯增韧聚乳酸熔喷非织造材料的制备与性能研究 [D]. 浙江: 浙江理工大学, 2021.

- [32] MAJCHRZYCKA K, BROCHOCKA A, BRYCKI B. Biocidal agent for modification of poly(lactic acid) high-efficiency filtering nonwovens[J]. *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 2015, 23: 88-95.
- [33] WANG R C, ZHANG H, CAO Y, et al. Preparation of PLA/PEG@SDS microfibers-based nonwovens via melt-blown process parameters; wound dressings with enhanced water wetting performance [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, 140(31): e54234.
- [34] 陈喆, 陈龙敏. 纺粘非织造工艺的发展(一)[J]. *上海纺织科技*, 2005, 33(3): 34-36.
- [35] 杨钦, 王陈曼, 潘莉莎, 等. 可生物降解聚乳酸/助剂/聚丙烯复合纺粘非织造布的制备与性能研究[J]. *化工新型材料*, 2016, 44(7): 249-251.
- [36] ZHANG Y M, MA W H, LIN M G, et al. Preparation of PLA-based SMS nonwoven composites and its applications in protective apparel[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2024, 115(7): 1021-1029.
- [37] 刘思彤, 金丹, 孙东明, 等. 静电纺纳米纤维结构的研究进展[J]. *纺织学报*, 2024, 45(6): 201-209.
- [38] 于雯, 邓南平, 唐湘泉, 等. 静电溶吹微纳无机纤维制备技术及其应用进展[J]. *纺织学报*, 2024, 45(7): 230-239.
- [39] 陈美萍, 马超, 李蓉. 静电纺制备耐水抗菌性姜黄素纳米纤维膜及其性能研究[J]. *化工新型材料*, 2023, 51(6): 279-283.
- [40] 刘明迪, 邹梦君, 周菊英, 等. 载木犀草素纳米纤维膜的制备与性能[J]. *现代塑料加工应用*, 2024, 36(1): 1-4.
- [41] 李建根, 杨岩莎, 朱妍妍, 等. 电纺 PLA/BioMIL-5 复合纤维膜的制备及其吸附过滤性能研究[J]. *化工新型材料*, 2023, 51(7): 259-265.
- [42] 李彪, 任方正, 董璐, 等. 溶液静电纺丝制备电气石/PLA 纳米纤维膜及其过滤性能、稳定性研究[J]. *北京服装学院学报(自然科学版)*, 2023, 43(3): 1-7.
- [43] WU J, LIU S Q, WU G H, et al. Preparation and properties of poly(lactic acid) (PLA) antibacterial nanofiber membrane with Ag@TP composite antibacterial agent [J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2023, 114(12): 1887-1897.
- [44] 王新艳, 沈芳. 3D 打印技术综述[J]. *江西化工*, 2019, 35(3): 242-243.
- [45] 朱小明, 章盼梅, 江丽珍, 等. 聚合物 3D 打印工艺及打印材料的研究进展[J]. *合成树脂及塑料*, 2023, 40(4): 65-71.
- [46] MICLAUS R, REPANOVICI A, ROMAN N. Biomaterials: polylactic acid and 3D printing processes for orthosis and prosthesis[J]. *Materiale Plastice*, 2017, 54(1): 98-102.
- [47] 刘嘉旋, 夏学莲, 史向阳, 等. 3D 打印用聚乳酸/纤维复合材料研究进展[J]. *河南化工*, 2023, 40(9): 1-4.
- [48] AMBONE T, TORRIS A, SHANMUGANATHAN K. Enhancing the mechanical properties of 3D printed polylactic acid using nanocellulose [J]. *Polymer Engineering & Science*, 2020, 60(8): 1842-1855.
- [49] 张志成, 谢德明. 改性 PLA/ESO/HA 材料用于 3D 打印医用塑料止血夹[J]. *塑料工业*, 2023, 51(7): 150-155.
- [50] NatureWorks: 用于失禁和卫生用品的新型聚乳酸非织造布[J]. 陈肖颖, 译. *国际纺织导报*, 2020, 48(1): 44.
- [51] 何飘, 黄艺涓. 基于专利视角的可降解医疗防护纺织品[J]. *纺织科技进展*, 2023(8): 4-7.
- [52] YANG S S, SHANG P P, ZHANG K, et al. PBAT/PLA food packaging film containing sodium dehydroacetate-loaded diatomite as an antibacterial agent; fabrication, water-gas regulation and long-acting antimicrobial mechanism[J]. *Food Chemistry*, 2024, 446: 138880.
- [53] WEN P, ZHU D H, FENG K, et al. Fabrication of electrospun polylactic acid nanofilm incorporating cinnamon essential oil/ $\beta$ -cyclodextrin inclusion complex for antimicrobial packaging[J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 996-1004.
- [54] 王德宝, 邹玉富, 李佳, 等. 负载紫苏醛的聚乳酸纳米纤维膜对冷鲜羊肉保鲜效果的影响[J]. *食品与机械*, 2023, 39(7): 131-136.
- [55] ARORA B, BHATIA R, ATTRI P. Bionanocomposites: green materials for a sustainable future [M] // *New Polymer Nanocomposites for Environmental Remediation*. Amsterdam: Elsevier, 2018: 699-712.
- [56] SUN J Y, SHEN J J, CHEN S K, et al. Nanofiller reinforced biodegradable PLA/PHA composites: current status and future trends [J]. *Polymers*, 2018, 10(5): 505.
- [57] OLMO C, FRANCO L, DEL VALLE L J, et al. Biodegradable polylactide scaffolds with pharmacological activity by means of ultrasound micromolding technology [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(9): 3106.

(下转第 19 页)