

莱赛尔纤维抗菌改性的作用机制、研究进展与挑战

付俊凤 马峰刚 刘海龙 杨香莲 王 梓
南京化学纤维厂有限公司 新材料研究院, 江苏 南京 210019

摘要:针对莱赛尔纤维抗菌改性的三大主流技术——物理共混法、化学接枝法及后整理法,系统阐述各自的作用机制、研究进展、核心优势与应用局限,指出未来发展方向,以期为莱赛尔纤维抗菌改性的发展提供参考。

关键词: 莱赛尔纤维; 抗菌改性; 物理共混; 化学接枝; 后整理

中图分类号: TS102.6

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2026)07-0018-06

Mechanisms of action, research progress and challenges for antibacterial modification of Lyocell fibers

Fu Junfeng, Ma Fenggang, Liu Hailong, Yang Xianglian, Wang Zi

Research Institute of New Materials, Nanjing Chemical Fiber Factory Co., Ltd., Nanjing 210019, Jiangsu, China

Abstract: The respective mechanisms of action, research progress, core advantages, and application limitations of three mainstream technologies for antibacterial modification of Lyocell fibers—physical blending, chemical grafting, and post-treatment methods—were systematically elucidated. Furthermore, future development directions were proposed to provide insights for the advancement of antibacterial modification of Lyocell fibers.

Keywords: Lyocell fiber; antibacterial modification; physical blending; chemical grafting; post-treatment

再生纤维素纤维以天然纤维素为原料,纤维兼具天然材质的舒适性与工业化生产的可控性,是纺织材料体系中的重要组成部分^[1]。莱赛尔(Lyocell)纤维基于N-甲基吗啉-N-氧化物(NMMO)溶剂体系,通过干喷湿纺工艺制备而成^[2],生产过程可实现溶剂的高效回收与闭环循环。Lyocell纤维的化学组成与分子结构和天然纤维素一致,纤维吸湿透气性优异,手感柔软,其制品具备生物降解

性,因此被广泛誉为“绿色纤维”^[3]。

然而, Lyocell纤维大分子链上存在大量亲水性羟基,因此 Lyocell纤维及其制品在潮湿环境中易吸湿并积聚水分,这为微生物的黏附与繁殖提供了有利条件。微生物的代谢活动不仅会导致纤维制品产生不良气味和色变,还会引发聚合物分子链降解,造成纤维制品力学性能显著下降、使用寿命缩短等情况。更重要的是,纤维制品上某些致病菌的繁殖及

收稿日期: 2025-11-20

作者简介: 付俊凤,女,1997年生,硕士,工程师,主要研究方向为生物基纤维及新材料产业,1508636815@qq.com

其代谢产物可能诱发人体皮肤过敏甚至交叉感染,这极大地限制了 Lyocell 纤维在医疗、卫生及高性能防护服等对卫生和安全要求苛刻领域的应用与推广^[4]。

面对全球日益增长的健康消费需求以及可持续发展的迫切要求,开发兼具绿色、高效且持久抗菌的 Lyocell 纤维,已成为纤维材料功能化改性的研究热点^[5-6]。目前, Lyocell 纤维的抗菌改性方法主要有 3 种——物理共混法、化学接枝法和后整理法(图 1)。本研究将系统梳理 3 种方法的作用机制与研究进展,深入剖析其面临的瓶颈问题,并对未来发展趋势进行展望。

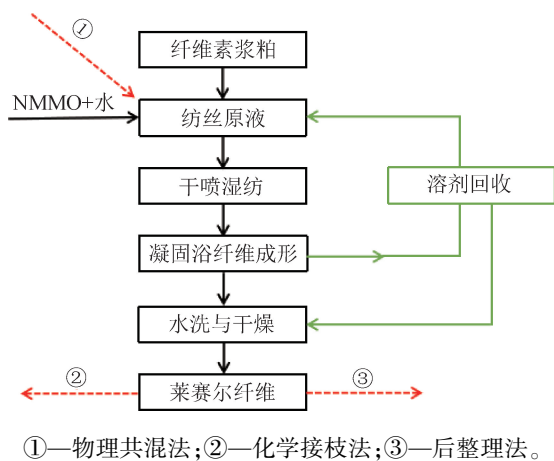


图 1 Lyocell 纤维抗菌改性的主要方法示意
Fig. 1 Schematic of main methods for antibacterial modification of Lyocell fibers

1 物理共混法

物理共混法通过将抗菌剂(作为功能组分)均匀分散于 NMMO 纺丝液中,并经干喷湿纺工艺实现功能组分在纤维内部的固载。该方法工艺流程简便,且易于产业化集成,可实现纤维的持久抗菌^[7]。但该方法的应用效果受限于抗菌剂在 NMMO 纺丝液中的相容性、热稳定性及分散均匀性。若抗菌剂分散不均匀或相容性不足,则易导致纺丝过程不稳定,纤维力学性能下降^[8]。因此,抗菌剂的筛选及其分散工艺的优化是提升抗菌改性 Lyocell 纤维性能的核心。

早期的相关研究主要采用无机纳米抗菌剂,如纳米银(Ag-NPs)、纳米氧化锌(ZnO-NPs)和纳米二

氧化钛(TiO_2 -NPs)等。Smiechowicz 等^[9-10]将固定于纳米 SiO_2 中的银纳米颗粒引入 NMMO 纺丝液,成功制备出抗菌 Lyocell 纤维,其中作为载体的纳米 SiO_2 能有效减缓银离子的释放,赋予纤维持久且广谱的抗菌性。类似地,高敏等^[11]利用干喷湿纺工艺成功开发出氧化锌 Lyocell 纤维。如图 2 所示,该研究通过添加不同质量分数的氧化锌得到不同的抗菌 Lyocell 纤维,并发现:相较于未改性的 Lyocell 纤维,当添加的氧化锌质量分数为 1% 时,所得抗菌 Lyocell 纤维断裂强度提高了 8.6%、初始模量提高了 10.4%,对大肠埃希菌、金黄色葡萄球菌和白念珠菌的抗菌率均高达 99.0%,且经 20 次洗涤后性能皆保持稳定。其抗菌机制主要基于锌离子的持续缓释与光催化作用,实现了长效抗菌。这些研究为无机纳米粒子在 Lyocell 纤维抗菌改性中的应用提供了参考。

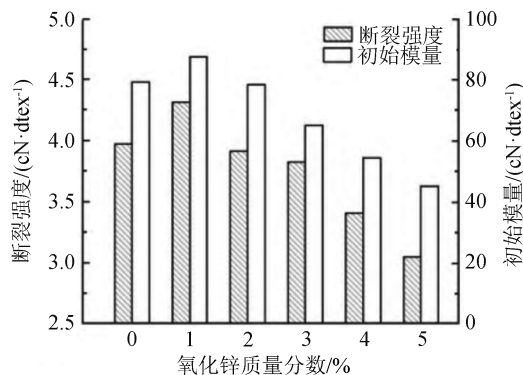


图 2 不同氧化锌质量分数下抗菌 Lyocell 纤维的力学性能
Fig. 2 Mechanical properties of antibacterial Lyocell fibers with different mass fraction of zinc oxide

为了提升抗菌效率与响应速度,研究人员转向利用有机抗菌剂对 Lyocell 纤维进行改性。壳聚糖是一种天然阳离子多糖,其抗菌活性源于氨基质子化后与细菌细胞膜的静电作用,其会造成细胞膜破损,引发细胞内容物泄漏。然而,壳聚糖在 NMMO 纺丝液中的溶解性限制了其直接应用^[12]。为此,研究人员合成了多种水溶性壳聚糖衍生物,如 2-(2-氨基乙氧基)乙基壳聚糖(AECS)^[13]、羧甲基壳聚糖(CMC)^[14]、氨基乙基羟乙基壳聚糖(AHC)^[15]等,显著提高了壳聚糖在宽 pH 值范围内的溶解性。庄旭品等^[16]通过在壳聚糖分子结构中引入长柔性链制得 AECS,并发现:相较于原始壳聚糖,AECS 水溶性大幅改善,同时抗菌性也得到提升。将此类水溶

性壳聚糖衍生物与纤维素共混纺丝,可制得抗菌 Lyocell 纤维,且这种抗菌剂会广泛分布于纤维表层,赋予纤维优良的抗菌性能。这种基于有机抗菌剂的改性策略,为 Lyocell 纤维在医疗防护及卫生用品等领域的应用开辟了新的可能性。

除了追求高效性和多功能性,解决物理共混工艺中的技术难题亦是 Lyocell 纤维抗菌改性的研究重点。为改善纳米粒子的分散性并减少其对纤维强度的损伤,余晓珊等^[17]探索了采用纳米纤维素作为生物基载体和增强相,与抗菌剂协同使用,以提升抗菌整理效果的均匀性和耐久性。同时,面向特定应用领域的产品开发也在推进。例如,李明聪等^[18]通过共混技术制备了高吸湿抗菌 Lyocell 纤维水刺非织造材料,为非织造领域提供了高附加值原材料解决方案。

上述研究表明, Lyocell 纤维抗菌改性的物理共混法正朝着解决关键技术瓶颈、实现功能精准设计和拓展应用场景的方向不断发展。

2 化学接枝法

为实现 Lyocell 纤维抗菌持久,化学接枝法通过形成稳定的共价键将抗菌剂固定在纤维表面,展现出超越物理共混法的耐久抗菌优势。纤维素分子链富含可作为反应位点的羟基,但高结晶度与刚性链结构在一定程度上限制了其位点的反应活性。为此,常通过选择性氧化预处理在纤维素分子链上引入高活性官能团,如利用高碘酸钠氧化 C2、C3 位的羟基生成醛基,进而与含氨基的抗菌剂通过席夫碱反应形成稳定的 C=N 共价键^[19-20]。该化学接枝策略能赋予 Lyocell 纤维优异的抗菌持久性,尽管面临工艺复杂、成本较高等挑战,但其在实现耐洗涤功能方面具有不可替代的优势。

2.1 基于羟基的直接反应

基于羟基的直接反应是化学接枝法中实现 Lyocell 纤维抗菌改性的基础路径,其核心在于直接利用纤维素分子链上的羟基,通过形成稳定的共价键(如醚键、酯键等),将抗菌剂分子固定于纤维表面。根据抗菌剂分子结构与反应特性的不同,该策略主要分为直接接枝与间接固载 2 种。

直接接枝策略旨在利用稳定的化学键将抗菌剂

永久固定于纤维表面。例如, Fadavi 等^[21]为赋予 Lyocell 纤维光动力抗菌性能,先对 Lyocell 纤维进行活化处理,然后利用原卟啉 IX (PpIX) 分子末端的羧基与纤维素分子中的羟基形成共价酯键,将光敏剂 PpIX 通过共价键牢牢固定到纤维表面。由于卟啉会在光照下敏化产生单线态氧,故而所得 Lyocell 纤维在光照下表现出持久的光抗菌功能,对枯草芽孢杆菌和金黄色葡萄球菌等都有效,且多次洗涤后仍可保持抗菌性能。

间接固载策略通过引入具有包合能力的“中介”分子,为不同类型抗菌剂的负载提供更灵活的设计空间。例如, Nostro 等^[22]先将 β -环糊精(β -CD) 接枝到 Lyocell 纤维表面,然后利用 β -CD 独特的疏水空腔,通过主客体包合作用高效负载疏水性抗菌剂(如百里酚、碘等),最终赋予 Lyocell 纤维抗菌性。这种“先接枝、后负载”的模式实现了抗菌功能的可定制化与可再生性,为智能控释型抗菌 Lyocell 纤维纺织品的开发提供了平台。

2.2 基于醛基中间体的反应

基于醛基中间体的席夫碱反应法是一种特异性强且高效的共价固定策略,其步骤标准且高效:首先,利用高碘酸钠(NaIO_4) 将纤维素分子链上葡萄糖环中 C2、C3 位的羟基断键氧化,生成高反应活性的醛基,得到双醛纤维素(DAC);随后, DAC 上的醛基可与任何含有伯氨基($-\text{NH}_2$)的抗菌剂发生高效的席夫碱反应^[23-24]。相关研究表明,席夫碱反应完成后,处理工艺及选用的抗菌剂是决定 Lyocell 纤维最终抗菌性能的关键。

Han 等^[25-26]对该方法做了系统性的研究。他们先验证了 DAC 与多官能团胺类模型化合物反应的可行性,然后应用于壳寡糖功能化。此外,该团队在席夫碱反应后引入了一个关键的还原步骤(如使用硼氢化钠),将生成的亚胺键 C=N 还原为更稳定的仲胺键 C—N。这一处理显著增强了交联网络的化学稳定性。他们研究发现,当使用低相对分子质量(M_w 为 1 000~2 000)的壳寡糖时,所得 Lyocell 纤维的抗菌活性更优,这归因于低分子量壳寡糖更易扩散至 Lyocell 纤维内部,实现更均匀、更牢固的交联。

与之形成对比的是, Janjic 等^[27]采用不同的稳定化策略,即在 DAC 与高相对分子质量壳聚糖发生

席夫碱反应后,未进行还原处理,Lyocell 纤维与壳聚糖之间依靠动态的亚胺键连接。其稳定性主要依赖壳聚糖大分子的多点交联效应,即一个壳聚糖分子链上的多个氨基可同时与 Lyocell 纤维分子链上的多个醛基反应,形成稳固的聚合物涂层网络,使得 Lyocell 纤维表现出更佳的抗菌效果。

3 后整理法

后整理法主要通过 Lyocell 纤维成形后,采用浸渍作为基础工艺,将抗菌剂溶液或分散液施加到 Lyocell 纤维上,最后通过烘干、焙烘等方式实现抗菌成分的固着。根据抗菌剂的引入机制和作用形式,后整理法主要分为直接浸渍法、原位沉积法和活化法等。

3.1 直接浸渍法

直接浸渍法即将 Lyocell 纤维浸渍于抗菌剂溶液中,依靠分子间作用力使抗菌成分吸附于纤维表面。Zemljic 等^[28]比较了浸渍壳聚糖溶液的黏胶纤维、莫代尔纤维、Lyocell 纤维的抗菌效果,发现纤维的抗菌率依次为黏胶纤维>莫代尔纤维>Lyocell 纤维,这与 3 种纤维对壳聚糖的吸收能力表现一致。

除天然高分子抗菌剂外,小分子抗菌剂也可通过浸渍法实现有效应用。相关研究显示,经抗菌剂 5-氯-2-(4-氯苯氧基)苯酚(Tinosan[®])高温(高达 130 ℃)浸渍整理后,Lyocell 纤维织物对金黄色葡萄球菌和肺炎克雷伯菌表现出优异的抑菌性,且抗菌剂质量分数仅 0.5%便可达到显著的抗菌效果^[29]。此外,使用该抗菌剂和紫外线吸收剂同时处理,可制得具有抗紫外线功能的抗菌 Lyocell 纤维织物,其中紫外线吸收剂还可能对光敏性抗菌剂起到一定的保护作用。

3.2 原位沉积法

原位沉积法通过化学还原反应,在 Lyocell 纤维表面原位生成并固定金属或金属氧化物纳米颗粒,形成抗菌涂层。Emam 等^[30]利用 D-葡萄糖酸铜络合物溶液实现了 Cu^{2+} 在纤维素基质上的吸附固载。他们在 30 ℃、 Cu^{2+} 浓度为 100 mmol/L、pH 值为 13 的铜络合物溶液中对 Lyocell 纤维进行不同时间的浸渍处理,发现 15 h 后,纤维表面可观察到明显的固体沉积物(图 3)。类似地,Emam 等^[31]还利用纤维素纤维作为还原剂和载体,在水相中直接将银离子还原为纳米银颗粒并原位沉积于 Lyocell 纤维表面,实现了绿色、简便的抗菌改性。

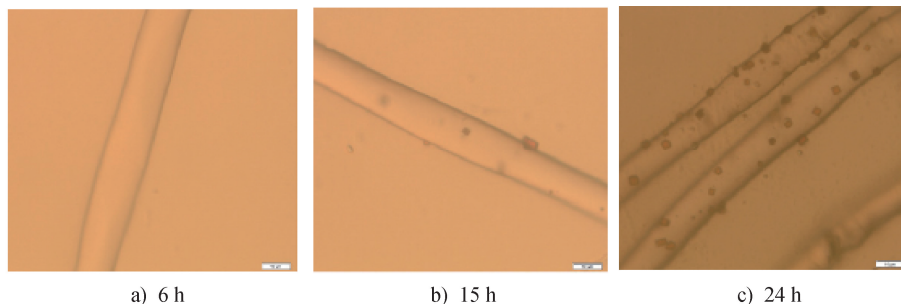


图 3 不同浸渍时间的纤维表面形态光学显微镜照片

Fig. 3 Optical microscope photos of fiber surface morphology at different impregnating time

3.3 活化法

活化法通过物理或化学预处理的方式改变 Lyocell 纤维表面性质,以显著提升纤维对抗菌剂的吸附和固着能力。

等离子体处理是一种有效的物理活化法。Ibrahim 等^[32]研究表明,采用 N_2 等离子体对 Lyocell 纤维织物表面进行预处理,可在纤维表面构建新的活性结合位点,再通过负载银纳米粒子,与特定抗生素通过耗竭法联合使用,可显著提高不同织物的抗菌活

性和耐久性,洗涤 15 次后织物抗菌活性仍保持显著。

化学活化的效果同样显著。Praskalo-Milanovic 等^[33]对 Lyocell 纤维进行了选择性氧化(生成二醛纤维素),可增强纤维表面对银离子的吸附能力。Milanović 等^[34]还采用 2,2,6,6-四甲基哌啶氧化物进行氧化,在 Lyocell 纤维表面引入羧基,极大地提高了纤维对银离子的吸附容量(由未改性 Lyocell 纤维的 0.014 mmol/g 提升至 0.809 mmol/g)。这些通过离子交换作用吸附的银离子还可进一步被还原为

纳米银,制得的载银 Lyocell 纤维对金黄色葡萄球菌和大肠埃希菌均具有良好的抗菌活性,且对革兰氏阳性菌的抑制效果更为显著。

4 总结与展望

Lyocell 纤维的抗菌改性是克服其亲水易滋生微生物弊端、拓展其高端应用的关键,现有物理共混法、化学接枝法与后整理法三大主流技术路径,它们各有优势与局限:物理共混法实现了抗菌功能与产业化的高效衔接,已达成力学性能与抗菌性能的协同提升,但受限于抗菌剂与纺丝体系的相容性及分散均匀性;化学接枝法通过共价键合赋予纤维卓越的抗菌耐久性,还可实现特殊抗菌功能的定制化,但工艺复杂、成本较高,规模化推广困难;后整理法操作灵活、适配性广,在绿色制备与表面活性增强方面进展显著,但耐洗涤性不足。三类技术均围绕抗菌剂的高效利用、纤维本征性能的保持、工艺绿色化与经济性的优化展开。未来, Lyocell 纤维抗菌改性需紧扣“绿色高效、功能协同、产业适配”的主线,聚焦生物基与环境友好型抗菌剂研发,强化多技术协同策略,构建双重功能体系,推进性能一体化设计,并通过工艺优化解决现有技术瓶颈,降低产业化成本,同时加强高端领域的针对性开发与评价体系的完善,推动抗菌改性 Lyocell 纤维向“高性能、多功能、绿色化、低成本”方向深度融合,为再生纤维素纤维的功能化升级与可持续发展提供新路径。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 文美莲. 生物基化学纤维的研究、应用及发展方向[J]. 产业用纺织品, 2024, 42(11): 23-29.
- [2] Fink H P, Weigel P, Purz H J, et al. Structure formation of regenerated cellulose materials from NMMO-solutions[J]. Progress in Polymer Science, 2001, 26(9): 1473-1524.
- [3] 王超, 田恒荣, 李少敏, 等. 莱赛尔纤维的结构性能与研究现状[J]. 上海纺织科技, 2026, 54(5): 6-9.
- [4] Carrillo F, Colom X, Suñol J, et al. Structural FTIR analysis and thermal characterisation of lyocell and viscose-type fibres [J]. European Polymer Journal, 2004, 40(9): 2229-2234.
- [5] 胡春兰, 郑文星. 功能性纤维在服装上的应用简介[J]. 国际纺织导报, 2024, 52(1): 6-10.
- [6] 赵明良, 邢明杰, 任晓川. 新型抗菌喷气涡流纺纱线的研究[J]. 国际纺织导报, 2024, 52(2): 1-5.
- [7] 张建全, 王志洪, 李延安, 等. 功能化 Lyocell 纤维的发展现状[J]. 丝绸, 2025, 62(6): 105-115.
- [8] 高兵. 交联/抗菌莱赛尔纤维制备试验研究[J]. 人造纤维, 2025, 52(1): 5-8.
- [9] Smiechowicz E, Niekraszewicz B, Strzelinska M, et al. Antibacterial fibers containing nanosilica with immobilized silver nanoparticles [J]. Autex Research Journal, 2020, 20(4): 441-448.
- [10] Smiechowicz E, Niekraszewicz B, Kulpinski P, et al. Antibacterial composite cellulose fibers modified with silver nanoparticles and nanosilica [J]. Cellulose, 2018, 25(6): 3499-3517.
- [11] 高敏, 程春祖, 徐中凯, 等. 氧化锌/Lyocell 复合纤维的制备及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2024, 40(8): 39-49.
- [12] Verlee A, Mincke S, Stevens C V. Recent developments in antibacterial and antifungal chitosan and its derivatives[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 164: 268-283.
- [13] Zhuang X P, Liu X F, Li S Y, et al. Preparation and properties of 2-(2-aminoethoxy) ethyl chitosan/cellulose fiber using *N*-methylmorpholine-*N*-oxide process [J]. Fibers and Polymers, 2008, 9(4): 400-404.
- [14] Zhuang X P, Liu X F, Cheng B W, et al. Preparation and properties of antibacterial lyocell fibers containing chitosan derivative [J]. Journal of Donghua University (English Edition), 2006, 23(5): 83-86.
- [15] Jin X, Liu X F, Liu Q W, et al. Manufacture and performance of ethylamine hydroxyethyl chitosan/cellulose fiber in *N*-methylmorpholine-*N*-oxide system [J]. Reactive and Functional Polymers, 2015, 91: 62-70.
- [16] 庄旭品, 程博闻, 刘晓非, 等. 壳聚糖的抗菌性及其改性纤维素纤维的研究[J]. 产业用纺织品, 2006, 24(7): 9-12.

- [17] 余晓珊, 邱婷婷, 郑迪力, 等. 抗菌纳米纤维素在 Lyocell/粘胶混纺纱线及织物抗菌整理应用[J]. 纤维素科学与技术, 2023, 31(4): 7-12.
- [18] 李明聪, 陈文静, 孙明楷, 等. 高吸湿抗菌 Lyocell 水刺布的制备及性能[J]. 棉纺织技术, 2025, 53(6): 36-40.
- [19] Bansal M, Chauhan G S, Kaushik A, et al. Extraction and functionalization of bagasse cellulose nanofibres to Schiff-base based antimicrobial membranes [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 91:887-894.
- [20] Gao C Z, Edgar K J. Efficient synthesis of glycosaminoglycan analogs [J]. Biomacromolecules, 2019, 20(2): 608-617.
- [21] Fadavi F, Abdulkhani A, Hamzeh Y, et al. Photodynamic antimicrobial cellulosic material through covalent linkage of protoporphyrin IX onto Lyocell fibers [J]. Journal of Wood Chemistry and Technology, 2019, 39(1): 57-74.
- [22] Nostro P L, Fratoni L, Ridi F, et al. Surface treatments on Tencel fabric: grafting with β -cyclodextrin [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2003, 88(3): 706-715.
- [23] Li H L, Wu B, Mu C D, et al. Concomitant degradation in periodate oxidation of carboxymethyl cellulose[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 84(3): 881-886.
- [24] Yang H, Chen D Z, Ven D V M G T. Preparation and characterization of sterically stabilized nanocrystalline cellulose obtained by periodate oxidation of cellulose fibers[J]. Cellulose, 2015, 22(3): 1743-1752.
- [25] Han S, Lee M. Crosslinking reactions of oxidized cellulose fiber. II. Reactions between dialdehyde cellulose and chito-oligosaccharides on lyocell fabric [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 112(2): 709-714.
- [26] Han S, Lee M, Kim B K. Crosslinking reactions of oxidized cellulose fiber. I. Reactions between dialdehyde cellulose and multifunctional amines on lyocell fabric[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 117(2): 682-690.
- [27] Janjic S, Kostic M, Vucinic V, et al. Biologically active fibers based on chitosan-coated lyocell fibers[J]. Carbohydrate Polymers, 2009, 78(2): 240-246.
- [28] Zemljic L F, Sauperl O, Kreze T, et al. Characterization of regenerated cellulose fibers antimicrobial functionalized by chitosan [J]. Textile Research Journal, 2013, 83(2): 185-196.
- [29] Sarkar A K, Vora G. Imparting protective properties to Lyocell via finishing treatments[J]. AUTEX Research Journal, 2011, 11(3): 89-92.
- [30] Emam H E, Manian A P, Široká B, et al. Copper inclusion in cellulose using sodium D-gluconate complexes[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 90(3): 1345-1352.
- [31] Emam H E, El-Bisi M K. Merely Ag nanoparticles using different cellulose fibers as removable reductant [J]. Cellulose, 2014, 21(6): 4219-4230.
- [32] Ibrahim N A, Eid B M, Abdel-Aziz M S. Effect of plasma superficial treatments on antibacterial functionalization and coloration of cellulosic fabrics[J]. Applied Surface Science, 2017, 392: 1126-1133.
- [33] Praskalo-Milanovic J Z, Kostic M M, Dimitrijevic-Brankovic S I, et al. Silver-loaded Lyocell fibers modified by TEMPO-mediated oxidation[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2010, 117(3): 1772-1779.
- [34] Milanović J, Kostić M, Dimitrijević S, et al. Antibacterial activity of selectively oxidized Lyocell fibers [J]. Contemporary Materials, 2013, 4(1): 39-45.

(上接第 9 页)

- [20] Standard test method for in-plane shear properties of sandwich panels using a picture frame fixture: ASTM D8067/D8067M-17[S].
- [21] 张一帆, 陈利, 孙绯, 等. 预定型机织物剪切变形实验研究[J]. 复合材料学报, 2009, 26(3): 29-34.
- [22] 张明卓, 赵宇, 吴国建, 等. RTM 成型头盔外壳纤维增强体铺覆方法研究[J]. 产业用纺织品, 2025, 43(11): 9-16.