

生物可降解材料在服装行业的应用现状及发展趋势

洪岩¹, 包惠颖¹, 吴波²

(1. 苏州大学 纺织与服装工程学院, 江苏 苏州 215021, 2. 牛顿商学院 商业管理系, 广东 深圳 518000)

摘要: 可持续时尚是服装行业的重要发展趋势, 可降解材料的使用有利于推动可持续时尚的发展。综述了生物可降解材料在服装行业的应用现状, 详细阐释生物可降解材料的定义, 其分类包括天然生物可降解材料、再生生物可降解材料以及合成可降解材料。根据分类综述了近年来主要的生物可降解材料及其在服装中的应用, 总结分析其发展趋势, 为未来可降解材料的研究与创新提供一定的参考。

关键词: 服装; 生物可降解材料; 可持续时尚; 服用材料; 应用趋势

中图分类号: TS 102 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-1928(2022)02-0095-06

Application Status and Development Trend of Biodegradable Materials in Clothing Industry

HONG Yan¹, BAO Huiying¹, WU Bo²

(1. College of Textile and Clothing Engineering, Soochow University, Suzhou 215021, China; 2. Department of Business Administration, Newton Business School, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Sustainable fashion is an important trend in the development of the clothing industry, and the use of biodegradable materials is beneficial to promote the development of sustainable fashion. This paper reviewed the current application status of biodegradable materials in the clothing industry, explained the definition of biodegradable materials in detail, and its classification included natural biodegradable materials, recycled biodegradable materials and synthetic biodegradable materials. The main biodegradable materials and their applications in clothing in recent years were reviewed according to the classification, and their development trends were summarized and analyzed to provide some reference for future research and innovation of biodegradable materials.

Key words: clothing, biodegradable materials, sustainable fashion, materials used in clothing, application trends

服装产业已成为除了石油产业以外的第二大污染产业^[1], 服装行业可持续发展的关注度日益提高。与其他行业相比, 服装行业生产加工的各个环节都会产生各种生态问题, 其中尤为突出的是微塑料问题。生物可降解材料作为一种更加清洁、高效、环保的材料, 可以减轻服装行业对环境造成的负面影响。虽然对生物可降解材料的研究已经有一定成果, 但就服装领域而言, 很多因素限制了生

物可降解材料的适用性。文中对服装行业生物可降解材料进行系统综述, 通过分析其研究趋势, 为今后的研究和创新提供一定参考, 以使更多的可降解材料从实验室走出来, 投入到实际生产应用中。

1 生物可降解材料的分类

生物可降解材料^[2]是指在自然环境中, 经过物理、化学和微生物过程, 最终分解成水、二氧化碳和

收稿日期: 2021-11-30; 修订日期: 2022-03-29。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61906129); 中国科协青年托举人才项目(2021-298); 中国博士后科学基金面上项目(2019M661929); 江苏省博士后科研计划项目(2019Z285); “纺织之光”中国纺织工业联合会高等教育教学改革研究项目(2021BKJGLX24, 2021BKJGLX238, 2021BKJGLX257)。

作者简介: 洪岩(1990—), 男, 副教授, 硕士生导师。主要研究方向为服装设计与工程。Email: hongyan@suda.edu.cn

生物质的材料。生物可降解材料按其合成方法可分为天然可降解材料、再生生物可降解材料以及合成生物可降解材料。生物降解纤维与传统纤维相比,手感柔软,对皮肤的亲和性好,通常用于制作内衣、运动服和医用材料^[3]。

1.1 天然可降解材料

天然纤维包括来自动植物的可降解天然高分子物质,它们比传统合成纤维更容易被降解。天然纤维由于其可再生、可生物降解和环保的特性,在复合材料和纺织工业中发挥着至关重要的作用^[4]。天然可降解材料包括天然植物和动物纤维,如棉、麻、羊毛、丝等,棉、麻纤维广泛应用于各类服装中,蚕丝纤维主要应用于高档内衣、礼服中,羊毛纤维多用于各种内衣、外衣中。棉、丝、皮革和羊毛无疑是制作服装的良好材料,但近几十年来服装产量的激增给这些有限的资源带来了巨大的压力,所以研究人员开始从更广泛的渠道中获取纤维原料,包括食品垃圾、农业废弃物、藻类等。

1.1.1 Piñatex 纤维 皮革一直是最受争议的面料之一,庆幸的是近年来有越来越多的替代品出现。Piñatex^[5]是一种由菠萝叶纤维制成的纯素食皮革,是目前市场上最受欢迎的可持续材料之一。菠萝叶纤维面料的色牢度和耐晒性能优于牛软革。由菠萝叶制成的天然织物可与皮革结合,用于制造多品类的服装^[6]。Piñatex 自 2016 年商业化以来,已经被 500 多个品牌采用,其中包括 Trussardi, Rombaut, Hugo Boss 等。2017 年,意大利超模伊娃·洛克波诺(RICCOBONO E)身穿以 Piñatex 定制的 Trussardi 礼服亮相绿毯时尚大奖;2019 年,巴黎鞋履品牌 Rombaut 推出了多款混合了 Piñatex 的鞋子;2019 年,德国时尚品牌 Hugo Boss 推出了一款由 Piñatex 菠萝皮革制作的男士运动鞋。

1.1.2 Vegea textile 纤维 Vegea textile^[7]纤维由意大利生物材料公司 Vegea 制造,是一种使用葡萄皮、葡萄藤及葡萄籽等葡萄酒副产品生产的类皮革材料。在生产过程中, Vegea textile 不使用任何有毒化学试剂,减少了对环境的影响。服装品牌 & Other Stories 使用 Vegea textile 制作了凉鞋与包袋; H&M 等企业将其用于制作鞋类、皮包、高级定制礼服等。

1.1.3 柑橘纤维 柑橘纤维^[8-11]是由柑橘汁制成的丝状纤维织物,类似于黏胶纤维,可与丝绸和棉混纺制成柔软丝滑的面料,这一技术“拯救”了每年在意大利丢弃的 70 万 t 橘皮。2017 年,意大利奢侈品牌 Salvatore Ferragamo 使用这种材料制作了首个胶囊系列,该材料具有优质的饰面,因而成为意大利

奢侈品牌的理想选择。

1.1.4 海藻纤维 海藻纤维是一种新型生物可降解纤维,其原料为海藻酸钠,富含生物活性化合物,具有优异的生物相容性。目前,由海藻纤维制成的可降解材料多用于生产活性纱布、面罩、手术衣等卫生防护类纺织品^[12]。海藻纤维具有吸湿透气、抗菌、阻燃、可降解等优异特性,在纺织服装领域也表现出极大的应用潜力。例如,美国佛罗里达的 Nanonic 公司利用海藻和桉树的提取物,制成一种名为 SeaCell 的海藻纤维,其质地如丝般柔顺,具有良好的抗菌、抗氧化功能,并且十分透气,是制作运动服的理想材料;高端运动服品牌 Rhone 使用 SeaCell 纤维制作了连帽衫与紧身衣套装。2019 年 8 月, Vollebak 推出了一款藻类制成的 T 恤^[13]。

1.1.5 蘑菇菌丝 Mylo 纤维是一种由野蘑菇根部菌丝体培育出的既柔软又坚固的可再生类皮革材料,由美国生物初创公司 Bolt Threads 研发。阿迪达斯的 Stan Smith 系列运动鞋是第一款大规模采用 Mylo 纤维制作的鞋履; Lululemon 运用 Mylo 制作了瑜伽配件系列; Stella McCartney 也使用这种材料制作了紧身胸衣和长裤。

1.2 再生可降解材料

再生可降解材料是由天然纤维素(如棉、麻、竹子、榉木等)制成,在不改变其化学结构的基础上,改变其物理结构,从而生产出性能更佳的纤维,且同样能自然生物降解,如常见的天丝(tencel)、竹纤维、莫代尔(modal)和甲壳素纤维等。

1.2.1 莱赛尔纤维 Lyocell(莱赛尔)纤维^[14]是一种人造丝,由可再生竹子、树木等天然植物捣碎后形成的木浆制成,兼具天然纤维与合成纤维的多种优良特性,生产过程中不使用任何有毒溶剂,也不产生任何化学反应,溶剂回收率高达 99.7%,是一种优质的传统黏胶纤维替代品,广泛应用于休闲服、时装、贴身衣物等。

1.2.2 莫代尔纤维 莫代尔纤维^[15-16]是兰精(Lenzing)公司最早开发的具有高湿模量的再生纤维,该纤维以高品质欧洲榉木为原材料,将榉木制成木浆,再通过溶剂纺丝工艺加工成纤维。莫代尔纤维采用专门的机械及特殊加工处理方法,减少了传统黏胶纤维生产中产生的污染,具有良好的环保特性。莫代尔的原材料为纤维素纤维,属于天然纤维,能够自然降解,对人体和环境无害。莫代尔纤维多用于内衣中,也可用于运动装、休闲装等。

1.2.3 竹纤维 竹纤维^[17-18]是通过物理或微生物脱胶法从竹子中提取的纤维,在提取过程中,竹纤

维的结构特性没有发生改变,使得纤维保有天然的特性。竹纤维具有良好的吸湿透气性、耐磨性和染色性,具有天然抗菌、抑菌、除螨及抗紫外线等性能^[19-20],可应用于内衣、家居服、针织衫等。

1.2.4 甲壳素纤维 甲壳素是一种丰富的天然氨基多糖,存在于真菌、甲壳类动物以及昆虫中,具有生物相容性、生物降解性,且可促进伤口愈合,是一种具有高潜力的新型功能材料,在生物医学、环境、纺织服装等领域有广泛的应用前景。甲壳素纤维^[21-23]具有优良的可纺性、透气性以及抗菌性,所制成的服装穿着舒适,具有抗菌防臭的功效,能预防皮肤病,可用于制造抗菌内衣、童装等。

1.2.5 大豆蛋白纤维 大豆蛋白纤维^[24]是由大豆中含有的蛋白质制成的人造纤维,属于再生植物蛋白纤维,原料来源于可再生植物资源,具有优异的生物降解性能,对人类和环境友好。大豆蛋白纤维面料手感细腻、光泽柔和,具有保暖性好、吸湿透气性优异等特点,有较好的穿着舒适性,且具有独特的润肌养肤、抗菌消炎的保健功效^[25]。大豆蛋白纤维面料适用于服装产品,可作为化学纤维面料的替代品,目前多应用于高档针织内衣、羊毛衫、T恤等。

1.2.6 牛奶蛋白纤维 牛奶蛋白纤维^[26-27]是一种再生蛋白质动物纤维,是将牛奶脱水、脱脂后利用生物工程技术形成蛋白纺丝液,再通过湿法纺丝工艺喷丝而成的纤维。牛奶蛋白纤维具有较好的抑菌功能,能够抑制金黄色葡萄球菌、大肠杆菌等,此外还具有防霉防蛀、耐穿耐洗、润肌养肤等性能^[28]。由于牛奶蛋白纤维服用性能优异,因此可采用针织、非织造等多种方式进行服用面料的开发,并广泛应用于高档内衣、童装等品类。

1.3 合成可降解材料

可生物降解的新型合成纤维在商业市场中拥有十分乐观的前景。新型合成纤维产品有聚乳酸(PLA)、聚己内酯(PCL)和生物聚酯(PHA)等。

1.3.1 PLA纤维 PLA纤维^[29]又称玉米纤维,是以聚乳酸为主原料,经过缩聚反应得到的聚合物,属于聚酯类纤维。合成可生物可降解材料中应用较广泛的是PLA纤维^[30],聚乳酸具有优异的生物相容性以及抗菌、抗紫外线、可生物降解等性能^[31],可广泛应用于医用纺织领域,如手术缝纫线、医用口罩、非织造布等。PLA针织物具有良好的吸湿快干性及尺寸稳定性,因此PLA纤维面料可用于织造夏季运动服、T恤衫等;PLA还具有好的阻燃性能,适用于床单、被罩等家用纺织品。

1.3.2 PCL纤维 PCL纤维属于可吸收医用合成纤维的一种,其对药物的透过性好,因而多用于医用纺织领域,如药物释放载体、医用缝合线等,目前在服用纺织品中应用较少。

1.3.3 PHA纤维 PHA纤维^[32]是由各种微生物(如海水中的微生物、土壤中的细菌等)为原材料合成的纤维,其原材料丰富,生物降解性能优良,而且降解产物对人体及环境无危害;它有良好的生物相容性以及抗紫外线、抗菌等特殊性能,未来将会成为最有潜力与聚酯纤维竞争的纤维种类。但是PHA纤维的热性能和力学性能较差,脆性大,为改善其可纺性能,研究人员将PET、碳纳米管、PLA等材料与之进行混纺。目前,PHA纤维的性能缺陷还未得到有效克服。

2 生物可降解材料的发展趋势

2.1 可降解食物材料

目前,可持续服装材料开发的重点之一是将食物与织物结合,以减少食品与织物两个领域的浪费^[11]。例如,作为农业废弃物的菠萝叶^[33]可以制成纯素食皮革,这种皮革是目前市场上极受欢迎的可持续性材料之一;柑橘纤维是由柑橘汁制成的丝状纤维织物,可与丝绸和棉混纺制成可降解功能性面料^[34];从桑皮中提取出桑树纤维,可以生产具有天然可降解抗菌特性的医用无纺布^[35]。由于天然纤维不具备有些合成纤维的优越性能,所以许多研究人员将天然纤维与其他材料复合,以改善其性能特点^[36]。

2.2 动物替代面料

动物毛皮由于独特的舒适性和柔软性,具有极高的商业价值,在服装市场中发挥着重要的作用。随着人们道德意识的提高,消费者开始关注动物保护,有意识地减少皮草消费,可持续的纯素时尚日益流行。现在越来越多的研究者致力于材料创新,专注于开发动物面料纺织品的替代产品,包括素食皮革、人造皮草、羽绒替代品等。

2.2.1 素食皮革 Koba面料是由杜邦和法国人造皮草制造商Ecopel合作开发的全球首款生物基人造皮草。这种面料由100% Sorona(索罗娜)纤维制成,含有37%的天然原料——玉米,不仅色彩鲜艳,结实耐用,也延续了Sorona的环保特性,与其他人造皮草相比,其制造过程能够减少63%的温室气体排放。服装品牌Stella McCartney与Maison Atia都曾选用Koba制作了人造皮草单品。

2.2.2 羽绒替代品 Flwrdsn纤维是由材料创新

公司 Pangaia 耗时 10 年开发的,是一种使用野花与生物聚合物混合制成的羽绒替代品。以野花为原料不需要人工灌溉,减少了水资源的使用。测试显示,这种材料透气且保暖,致敏性低,并且可以生物降解。

2.3 仿生生物材料

所有生物体都是地球上的伟大设计师,它们以独特的模式生产材料,以满足特定的功能。合成生物学家受到大自然的启发,运用这些生物体独特的能力,充分利用大自然的潜力,通过改变分子结构来革新服装。生物材料朝着高性能^[37-38]和可持续发展方向不断发展。

2.3.1 人造蛛丝 长期以来,合成生物学家一直在“调整”基因信息,以从活细胞中产生特定的化学物质。蛛丝就是一个典型的案例,它有“生物钢材”之称,是已知生物材料中强度最高的,但是蛛丝极难获取,所以研究人员利用基因重组蛋白技术合成了人造蛛丝。Spiber 是一家日本生物技术公司,其生产的人造蛛丝是以微生物作为原料制造的基于植物蛋白聚合物的环保纤维,这种纤维具有柔滑的光泽,还能够制成类似羊绒或羊毛的细纱线,用途非常广泛。运动品牌 The North Face 使用 Spiber 制作了一款高性能滑雪服,名为月球派克(moon parka)。美国旧金山的生物技术公司 Bolt Threads 研制出一种名叫微丝(microsilk)的人造蜘蛛丝面料。2017年,Bolt Threads 开发了微丝制成的领带以及羊毛和微丝混纺制成的针织帽;2019年,Stella McCartney 在春夏系列产品中用微丝制作了连体裤、降落伞等单品。

2.3.2 菌丝体材料 在生态设计中,材料是生长的,而不是合成的。近来,一些新兴的生物技术公司使用菌丝体(蘑菇的根结构)组成复杂的材料,这些材料拥有非常优异的性能,同时又具有生态友好性。生物技术公司 MycoWorks 开发了用灵芝培育而来的 Reishi 菌丝面料,这种面料采用 MycoWorks 公司独特的专利技术在实验室中用蘑菇菌丝体培育而成,其强度和耐用性可以和牛皮相媲美。2021年3月,爱马仕与 MycoWorks 公司进行深度合作,开发了源自 Reishi 菌丝的生物面料 Sylvania,推出了可持续版本的 Victoria 旅行包;此外,意大利 Grado Zero 公司利用一种热带雨林的真菌,开发了皮革替代面料 MuSkin,其质地类似于天鹅绒,可用于女士礼服等。

3 结语

服装产业是污染较严重的产业之一,服装洗涤

过程中产生的微塑料污染会对海洋生态系统造成巨大的威胁,生物可降解材料是解决此问题的关键。生物可降解材料可以分为天然可降解材料、再生可降解材料和合成可降解材料。根据文中对生物可降解材料的综述,得出以下结论:

1) 服装生产的激增给有限的天然资源(如棉、麻等)带来了巨大压力,所以需从更广泛的渠道获取天然纤维作为服装原材料,尤其可优先选择食品垃圾、农业废弃物等材料。

2) 随着人们保护野生动物意识的逐步加强,动物替代面料应运而生,并逐渐成为未来的发展趋势。

3) 未来研究重点将集中在开发具有高性能和可持续性能的生物材料上。

21 世纪是知识经济时代,信息技术、生命科学、高新技术不断发展,纺织品等纤维型产品正朝着高舒适、高功能、高智能方向发展。如今,随着人们对生态环境需求的不断增长,生物可降解纤维的开发将成为纤维研究发展的主流。对可生物降解性能的研究是未来的热点之一,它将取代一些不可降解的石油基化学纤维材料,对其研究将集中于功能性特性的开发,特别是物理特性上。

在众多的可生物降解纤维中,多数纤维的物理性能相对较差,且价格比传统的合成纤维贵很多,这就导致在有功能性需求时,它只能应用在可承受较高价格的医用领域。但由于生物可降解纤维具有良好的降解性、环保性和安全性,使得其有望代替传统的化学纺织面料,减轻纺织服装行业所产生的污染。随着人们生活水平的不断提高,对可生物降解纤维的需求也在不断增加,而新技术的应用和新材料的出现,也使具有多种功能的生物可降解纤维可以得到更广泛的应用。

参考文献:

- [1] NIINIMAKI K, PETERS G, DAHLBO H, et al. The environmental price of fast fashion[J]. *Nature Reviews Earth and Environment*, 2020, 1(4): 189-200.
- [2] 金林宇, 何思远, 李丹, 等. 可降解材料现状及其在海洋领域的研究进展[J]. *包装工程*, 2020, 41(19): 108-115.
JIN Linyu, HE Siyuan, LI Dan, et al. Status of degradable materials and their progress in marine research[J]. *Packaging Engineering*, 2020, 41(19): 108-115. (in Chinese)
- [3] GRINEVICIUTE D, KRAULEDAS S, GUTAUSKAS M V. Hand evaluation of clothing fabrics from new biode-

- gradable fibres [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2012, 24(4): 201-210.
- [4] SUNNY G, RAJAN T P. Review on areca nut fiber and its implementation in sustainable products development [J]. *Journal of Natural Fibers*, 2021(1): 1-15.
- [5] Piñatex [EB/OL]. [2022-01-05]. <https://www.ananas-anam.com/about-us>.
- [6] SURESHKUMAR P S, THANIKAIVELAN P, PHEBE K, et al. Investigations on structural, mechanical, and thermal properties of pineapple leaf fiber-based fabrics and cow softy leathers: an approach toward making amalgamated leather products [J]. *Journal of Natural Fibers*, 2012, 9(1): 37-50.
- [7] Vegea [EB/OL]. [2022-01-05]. <https://www.vegea-company.com>.
- [8] Orange faber [EB/OL]. [2022-01-05]. <https://www.forbes.com/sites/oliviapinnock/2019/01/23/5-innovative-fashion-materials-made-from-food-byproducts/?sh=59f9fad5749>.
- [9] REHAN M, ABDEL-WAHED N A M, FAROUK A, et al. Extraction of valuable compounds from orange peel waste for advanced functionalization of cellulosic surfaces [J]. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 2018, 6(5): 5911-5928.
- [10] YADAV S, MATTAPARTHI S, SREENIVASULU K, et al. Recycling of thermoplastic polystyrene waste using citrus peel extract for oil spill remediation [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2019, 136(33): 47886.
- [11] CHEON E H, KIM S Y. Trend analysis on sustainable fiber materials—focused on the use of alternative materials [J]. *Journal of Basic Design and Art*, 2020, 21(5): 589-600.
- [12] JANARTHANAN M, SENTHIL KUMAR M. A modern development of bioactive wound dressing material using *Chaetomorpha linum* seaweed/cotton blended fabric [J]. *International Journal of Clothing Science and Technology*, 2018, 30(1): 16-28.
- [13] Forbes biodegradable [EB/OL]. [2022-01-05]. <https://www.forbes.com/sites/jenniferhicks/2019/08/25/this-t-shirt-is-made-from-algae-and-100-biodegradable-in-12-weeks/?sh=622548401875>.
- [14] 王永生, 李泽洲, 李增俊. 生物基化学纤维产业分析 [J]. *棉纺织技术*, 2021, 49(4): 37-42.
WANG Yongsheng, LI Zezhou, LI Zengjun. Analysis on bio-base chemical fiber industry [J]. *Cotton Textile Technology*, 2021, 49(4): 37-42. (in Chinese)
- [15] 万晗. 兰精推出新款天丝莫代尔纤维 采用 Indigo Color 技术, 提升牛仔行业可持续性 [J]. *纺织服装周刊*, 2021(8): 24.
WAN Han. Lenzing launched new tencel modal fiber with Indigo Color technology to enhance the sustainability of denim industry [J]. *Textile and Apparel Weekly*, 2021(8): 24. (in Chinese)
- [16] 李勇强, 谭艳君, 刘妹瑞, 等. 莫代尔纤维的性能及应用 [J]. *纺织科学与工程学报*, 2021, 38(2): 60-66.
LI Yongqiang, TAN Yanjun, LIU Shurui, et al. Properties and applications of modal fiber [J]. *Journal of Textile Science and Engineering*, 2021, 38(2): 60-66. (in Chinese)
- [17] 龚有彤, 郭淑儒. 竹纤维织物抗菌研究进展 [J]. *纺织科技进展*, 2021(5): 9-11.
GONG Youtong, GUO Shuru. Research progress on antibacterial properties of bamboo fiber fabric [J]. *Progress in Textile Science and Technology*, 2021(5): 9-11. (in Chinese)
- [18] 刘加飞. 绿色天然纤维——竹纤维 [J]. *中国检验检疫*, 2007(8): 64.
LIU Jiafei. Green natural fiber—bamboo fiber [J]. *China Inspection and Quarantine*, 2007(8): 64. (in Chinese)
- [19] NAYAK L, MISHRA S P. Prospect of bamboo as a renewable textile fiber, historical overview, labeling, controversies and regulation [J]. *Fashion and Textiles*, 2016, 3(1): 2.
- [20] 王绍平. HVI 法测定竹原纤维物理性能研究 [J]. *质量技术监督研究*, 2012(1): 18-20.
WANG Shaoping. Nature bamboo fiber physical properties tested by HVI [J]. *Quality and Technical Supervision Research*, 2012(1): 18-20. (in Chinese)
- [21] TOKURA S, NISHIMURA S I, SAKAIRI N, et al. Biological activities of biodegradable polysaccharide [J]. *Macromolecular Symposia*, 1996, 101(1): 389-396.
- [22] FERRÁNDIZ M, FAGES E, ROJAS-LEMA S, et al. Development and characterization of weft-knitted fabrics of naturally occurring polymer fibers for sustainable and functional textiles [J]. *Polymers*, 2021, 13(4): 665.
- [23] 陈驰, 但卫华, 曾睿, 等. 可生物降解功能纤维的研究进展 [J]. *纺织学报*, 2006, 27(7): 100-103.
CHEN Chi, DAN Weihua, ZENG Rui, et al. Advances in research on biodegradable functional fibers [J]. *Journal of Textile Research*, 2006, 27(7): 100-103. (in Chinese)
- [24] MATUSIAK M, KAMINSKA D. Investigation of selected utility properties of woven fabrics made of soybean protein fibres [J]. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, 2019, 27(6): 39-45.
- [25] 杨友谊. 大豆蛋白纤维纯纺纱线的上浆研究 [D]. 西安: 西安工程大学, 2007.
- [26] 黄庄芳容, 左凯杰, 颜怀成. 牛奶蛋白纤维/棉纤维交织物湿法转移印花方法: 106012594B [P]. 2019-

- 03-15.
- [27] 郭昌盛, 蒋芳, 林海涛. 牛奶蛋白纤维的性能及应用[J]. 成都纺织高等专科学校学报, 2016, 33(4): 170-172.
GUO Changsheng, JIANG Fang, LIN Haitao. Properties and application of milk protein fiber [J]. Journal of Chengdu Textile College, 2016, 33(4): 170-172. (in Chinese)
- [28] 郭文杰, 石柴伟. 双蛋白纤维的前处理及染色工艺研究[J]. 毛纺科技, 2015, 43(10): 28-30.
GUO Wenjie, SHI Chaiwei. Study on pretreatment and dyeing process of double protein fiber [J]. Wool Textile Journal, 2015, 43(10): 28-30. (in Chinese)
- [29] 廖世豪, 王瑄, 沈兰萍, 等. 聚乳酸纤维研究现状及在纺织品中的应用[J]. 针织工业, 2021(9): 27-29.
LIAO Shihao, WANG Xuan, SHEN Lanping, et al. Research status and application of polylactic acid fiber [J]. Knitting Industries, 2021(9): 27-29. (in Chinese)
- [30] JAE L K, KIM I. A case study on eco-friendly wedding dress made of corn starch fabric (poly lactic acid) [J]. A Journal of Brand Design Association of Korea, 2017, 15(4): 29-40.
- [31] CAI S Y, HU G, REN J. Processing, properties and application of poly lactic acid (PLA) fiber [J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2016, 32(6): 786-797.
- [32] 廖杏梅. PHA 纤维及其交织物的染整加工技术研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2019.
- [33] JALIL M A, PARVEZ M S, SIDDIKA A, et al. Characterization and spinning performance of pineapple leaf fibers: an economic and sustainable approach for Bangladesh [J]. Journal of Natural Fibers, 2021, 18(8): 1128-1139.
- [34] MAHATO N, SHARMA K, SINHA M, et al. Biosorbents, industrially important chemicals and novel materials from citrus processing waste as a sustainable and renewable bioresource: a review [J]. Journal of Advanced Research, 2020(23): 61-82.
- [35] 瞿才新, 赵磊. 用桑皮纤维加工医用非织造布的研究[J]. 上海纺织科技, 2012, 40(11): 32-33, 46.
QU Caixin, ZHAO Lei. Study on producing medical nonwovens made of mulberry fiber [J]. Shanghai Textile Science and Technology, 2012, 40(11): 32-33, 46. (in Chinese)
- [36] LYU D, ZHU M M, JIANG Z C, et al. Green electrospun nanofibers and their application in air filtration [J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2018, 303(12): 1800336.
- [37] 苏静, 杨雪, 王鸿博. 自修复超疏水材料的发展及应用[J]. 服装学报, 2021, 6(5): 384-389.
SU Jing, YANG Xue, WANG Hongbo. Development and application of self-healing superhydrophobic materials [J]. Journal of Clothing Research, 2021, 6(5): 384-389. (in Chinese)
- [38] 肖学良, 陈天骄, 谢云涛, 等. 发热服装面料的开发及应用[J]. 服装学报, 2021, 6(4): 283-290.
XIAO Xueliang, CHEN Tianjiao, XIE Yuntao, et al. Developments and applications of heat-generating fabrics [J]. Journal of Clothing Research, 2021, 6(4): 283-290. (in Chinese)

(责任编辑:沈天琦)