

# 生物基化学纤维的研究、应用及发展方向

文美莲

中国纺织工程学会, 北京 100025

**摘要:** 生物基化学纤维是指利用生物体内存在的或者代谢产生的一些高分子物质, 结合高分子物理化学技术, 开发出的性能良好的生物基再生纤维和生物基合成纤维。它们具有原料来源广泛, 制品无污染和可降解等特性。概述各种生物基化学纤维的研究、应用及发展方向, 总结目前研究较多的聚乳酸纤维、莱赛尔纤维、壳聚糖纤维、海藻纤维以及蛋白改性纤维等的性能特点及应用领域, 以期生物基化学纤维的进一步研发提供参考。

**关键词:** 生物基化学纤维; 聚乳酸纤维; 莱赛尔纤维; 壳聚糖纤维; 海藻纤维; 蛋白改性纤维

中图分类号: TS 156

文献标志码: A

文章编号: 1004-7039(2024)11-0023-07

## Research, application and development direction of bio-based chemical fibers

Wen Meilian

China Textile Engineering Society, Beijing 100025, China

**Abstract:** Bio-based chemical fibers refer to the developed bio-based regenerated fibers and bio-based synthetic fibers with good performance, by using some macromolecular substances existing in organisms or produced by metabolism, combining with macromolecular physicochemical technology. They have the characteristics of wide source of raw materials, pollution-free and degradability of products. The research, application and development direction of various bio-based regenerated fibers were summarized, and the performance characteristics and application fields of polylactic acid fibers, Lyocell fibers, chitosan fibers, seaweed fibers and protein modified fibers were summarized, in order to provide references for further research and development of bio-based chemical fibers.

**Keywords:** bio-based chemical fiber; polylactic acid fiber; Lyocell fiber; chitosan fiber; seaweed fiber; protein modified fiber

生物物质是指动植物和微生物中自然存在的或经代谢产生的各种有机物质, 如纤维素、糖类以及酸、醇、酯等有机物。生物基纤维由这些生物物质制成, 其

根据原料来源可分为生物基原生纤维、生物基化学纤维等。生物基原生纤维即天然纤维, 如棉、毛、丝、麻等; 生物基化学纤维根据生产过程可分为生物基

收稿日期: 2024-10-02

作者简介: 文美莲, 女, 1979 年生, 高级工程师, 研究方向为纺织工程、染整工程

再生纤维、生物基合成纤维等。生物基再生纤维包括聚乳酸(PLA)纤维、再生纤维素纤维、壳聚糖纤维、海藻纤维等;生物基合成纤维包括醋酸纤维、生物基聚酰胺纤维、聚对苯二甲酸丙二醇酯(PIT)纤维等。生物基化学纤维相对于石油基化学纤维,具有来源广泛、可再生、无污染、可降解等特性。同时,不同原料的生物基化学纤维各具特色,并拥有不同的应用价值,如以淀粉、糖、纤维素等为原料先经生物发酵生成乳酸,再经聚合制得的聚乳酸纤维,具有非常好的生物相容性及抑菌性,可用于医疗卫生领域,又如从海藻中提取生物基制成的海藻纤维,具有吸附金属离子和防辐射等特性。

本文将主要阐述近年来各种生物基化学纤维的研究与应用现状,以及未来发展方向,以期生物基纤维的研发提供参考,促进安全环保且具有特殊性能的生物基纤维更广泛的应用,给世界带来健康与绿色。

## 1 聚乳酸纤维

聚乳酸是由生物质原料如木薯、蔗糖、秸秆纤维素、甜菜等经微生物发酵生成小分子乳酸后,再经聚合制成的一种高分子材料。聚乳酸纤维是以聚乳酸为原料,经熔融纺丝等方法制备的一种新型绿色纤维,其聚合及纺丝过程全程无污染。此外,聚乳酸纤维在堆肥条件下可快速降解为 $\text{CO}_2$ 和水,产物完全无毒,不污染环境。该纤维还具有良好的芯吸效应,制品导湿作用显著。聚乳酸纤维织物还具有丝绸般的光泽及生物相容性和亲肤性,悬垂性良好,弹性好,穿着舒适,是未来石油基化学纤维的主要替代材料之一。

聚乳酸纤维可分为3类:长丝、短纤及复合纤维等。在日本,聚乳酸纤维的主要生产企业有钟纺公司、尤尼吉可公司、三井化学公司、帝人公司等;在美国,主要生产企业有Cargill Dow Polymers(CDP)公司等。其中,钟纺公司生产的聚乳酸纤维商品名为Lactron<sup>®</sup>,年产量在700 t以上;尤尼吉可公司生产的聚乳酸纤维商品名为Terramac<sup>®</sup>,年产量在1万t以上;帝人公司生产的聚乳酸纤维商品名为Biofront<sup>®</sup>,其具有高耐热性能,熔点在210℃左右,可进行高温高压染色加工,染色性能良好;三井化学

公司生产的聚乳酸纤维商品名为Lacea<sup>™</sup>;CDP公司于2005年改名为Nature Works公司,聚乳酸纤维年产量可达15万t。我国高校和企业也积极参与聚乳酸纤维的研制工作。如东华大学、青岛大学、嘉兴大学等高校在聚乳酸纤维的制造、纺丝及非织造材料制造方面都取得了大量的研究成果;中国纺织科学研究院、上海同杰良生物材料有限公司、上海德福伦化纤有限公司等开发的聚乳酸纤维也都开始了产业化生产,并已得到推广和应用<sup>[1]</sup>。

聚乳酸纤维在生物医药和服用等领域都有较好应用。聚乳酸纤维可用于手术缝合线,能在伤口愈合后自动降解,并被人体吸收,术后无需拆线<sup>[2]</sup>。其可采用熔喷法、纺黏法、干法纺丝等工艺成网后再结合水刺、针刺或热黏合等加固方法,制作成各种非织造材料<sup>[3]</sup>,广泛应用于一次性医疗卫生用品,如卫生巾、护垫、医用纱布、医用床单、绷带等产品,解决传统一次性医疗和卫生用品带来的“白色污染”问题<sup>[4-5]</sup>。其与棉混纺后除了具有与涤/棉织物同样的性能外,还具有优良的导湿性,常用作内衣面料,可令与之接触的皮肤保持干爽。此外,聚乳酸纤维纯纺或与羊毛混纺制成的面料毛型感强,抗皱性好,是制作外衣的理想选择<sup>[6]</sup>。

随着社会的发展,人们环保意识的增强,以及消费观念的改变,聚乳酸纤维市场将进入快速增长阶段。在此背景下,开发差别化、系列化的聚乳酸纤维产品将成为重要的研究方向。在加工领域,需重点攻克聚乳酸纤维均匀性差、细旦化程度低、耐热性差及染色整理不均匀等难题,具体研究方向包括,开发聚乳酸纤维专用染料、探索聚乳酸纤维原浆着色工艺、推进高支聚乳酸纤维纯纺及混纺纱线的开发与应用等。

## 2 再生纤维素纤维

纤维素是自然界最丰富的可再生天然高分子资源。再生纤维素纤维生产历史悠久。目前,再生纤维素纤维的生产方法主要有黏胶法(生产黏胶纤维)、溶剂法(生产铜氨纤维、莱赛尔纤维等)、纤维素氨基甲酸酯法(生产纤维素氨基甲酸酯纤维)、离子液体法(生产新型纤维素纤维)以及其他新型方法。已工业化生产的莱赛尔纤维实现了从根本

上解决“三废”污染问题,后文将主要介绍莱赛尔纤维。

莱赛尔纤维即 Lyocell 纤维,是以天然纤维素为原料,采用有机溶剂直接溶解后,再经纺丝工艺制备而成的一种再生纤维素纤维。莱赛尔纤维的超分子结构显示含原纤明显,其结晶度高达 53.26%,高于

普通黏胶纤维(结晶度约 30%)和高湿模量黏胶纤维(结晶度约 44%)<sup>[7]</sup>。莱赛尔纤维的高聚合度和高结晶度赋予了其较其他再生纤维素纤维更好的物理性能和力学性能,如高干湿强度、高湿模量,以及干湿强度差小等。莱赛尔纤维与其他纤维素纤维的性能比较见表 1<sup>[8]</sup>。

表 1 莱赛尔纤维与其他纤维素纤维的性能比较

Tab.1 Comparison of properties of Lyocell fibers with other cellulose fibers

纤维名称	干态断裂强度/ (cN·tex <sup>-1</sup> )	干态断裂 伸长率/%	湿态断裂强度/ (cN·tex <sup>-1</sup> )	湿态断裂 伸长率/%	湿模量/ (cN·tex <sup>-1</sup> )	打结强度/ (cN·tex <sup>-1</sup> )	纤维素 聚合度	吸水率/ %
莱赛尔纤维	42~48	10~15	26~36	10~18	200~350	18~20	550~600	65~70
普通黏胶纤维	20~25	18~23	18~23	20~25	50	10~14	290~320	90~110
高性能黏胶纤维	36~42	10~15	10~15	27~30	230	8~12	450~500	60~75

莱赛尔纤维可分为普通型莱赛尔纤维、交联型莱赛尔纤维和超细型莱赛尔纤维等品种。普通型莱赛尔纤维主要以木浆粕为原料、以 *N*-甲基吗啉氧化物(NMMO)为溶剂制备,其溶剂回收率可达 99% 以上,主要品种有 Lyocell 短纤,如英国 Acordis 公司的 Tencel<sup>®</sup>、德国 TITK 公司的 Alceru<sup>®</sup>、韩国 Hanil 公司的 Acell<sup>®</sup>、通用技术中纺绿纤公司的绿纤<sup>®</sup>等<sup>[9]</sup>。交联型莱赛尔纤维为克服纤维原纤化现象而研制,代表性产品有 Lenzing 公司的 Lyocell<sup>®</sup> LF, Acordis 公司的 Tencel<sup>®</sup> A100、Tencel<sup>®</sup> A200 等。交联型莱赛尔纤维的形态与普通型不同,前者呈现出永久性的卷曲,但耐晒性和耐湿性与普通莱赛尔纤维相比,无显著差异。此外,该纤维对直接染料的亲和力相对较低。交联型莱赛尔纤维广泛应用于针织产品,非常适合制作内衣及婴儿服。超细型莱赛尔纤维是 Lenzing 公司在抗原纤化 Lyocell<sup>®</sup> LF 纤维基础上开发出的,商品名为 Mirco Lyocell<sup>®</sup>,规格为 0.9 dtex×34 mm<sup>[10]</sup>,产量较小,主要用于针织服装领域。

莱赛尔纤维与传统黏胶纤维相比,在纤维性能与制造工艺方面均有较大的差异。莱赛尔纤维的纺丝溶剂没有毒性,且能实现绝大部分溶剂的回收,制造工艺过程简单,是公认的“绿色”环保型再生纤维素纤维。未来,其发展方向可围绕控制原纤化、控制生产成本、提高产能,以及开发功能化、差别化纤维等方向进行。如控制生产成本可从省略浆粕预处理活化工段、开发高浓度凝固浴纺丝技术、提升溶剂回收率等角度着手。开发功能化和差别化纤维方面,可考虑开发抗菌、导电、抗紫外线、阻燃、发光和吸水

等多种类型的莱赛尔纤维产品。

### 3 壳聚糖纤维

甲壳素是一种多糖碳水化合物,广泛存在于昆虫类、水生甲壳类动物的外壳,以及藻类、菌类等生物的细胞壁中,其生物合成量每年超过 100 亿 t<sup>[11]</sup>。壳聚糖是甲壳素脱乙酰基后的产物,壳聚糖纤维是以壳聚糖为主要原料,经纺丝制备的一种高分子功能性生物基再生纤维,具有一定的力学强度。目前,其常用的纺丝方法主要为湿法纺丝法。壳聚糖纤维具有优异的生物相容性和生物安全性,可自然降解,同时具有天然抑菌、防霉除臭等功能。用其制成的织物,通透性良好,能快速止血,并具有吸湿快干的特点<sup>[12]</sup>。

壳聚糖纤维的线密度一般为 1.6 dtex 左右,断裂强度在 1.4~2.0 cN/dtex,断裂伸长率在 7%~15%<sup>[13]</sup>(低于涤纶、锦纶等化学纤维),初始模量在 70~95 cN/dtex(显示出极大的刚性)。海斯摩尔公司的壳聚糖纤维 1 h 的抑菌性能见表 2<sup>[13]</sup>。

表 2 壳聚糖纤维 1 h 抑菌性能

Tab.2 Antibacterial performance of chitosan fibers within 1 h

试验菌株	抑菌率/%	
	标准要求	壳聚糖纤维
金黄色葡萄球菌	>26	>95
大肠埃希菌	>26	>95
白念珠菌	>26	>45

注:根据 GB 15979—2002《一次性使用卫生用品卫生标准》附录 C5 检测。

壳聚糖纤维主要用于医疗、卫生、过滤、航天、军事、服饰等领域。在医疗方面,壳聚糖纤维主要用于可吸收手术缝合线、医用敷料、人工皮肤等产品<sup>[14-15]</sup>。作为手术缝合线,其在人体内无排斥反应,生物相容性好,可被人体吸收,伤口愈合后无需拆线。作为医用敷料,其可阻挡环境微生物入侵创面,防止交叉感染,同时具有快速止血、舒缓疼痛及促进伤口愈合等功效。作为人工皮肤,它能积极响应生物反应,并展现出优异的亲肤性、柔软性、透气性及贴合度,同时兼具抑菌、止血、镇痛等功效,有助于表皮细胞生长<sup>[16]</sup>。在服饰方面,日本富士纺公司,韩国甲壳素公司,中国青岛即发公司、淄博蓝晶公司、海斯摩尔公司等均推出了市场化产品,主要有抗菌袜、抗菌内裤、保健T恤、婴儿服装等,其壳聚糖纤维质量分数一般在10%~20%,深受消费者青睐。

甲壳素提取技术的改进、超高脱乙酰度壳聚糖的开发、壳聚糖纤维纺丝工艺的优化等均是未来壳聚糖纤维的发展方向。同时,抑菌机理和止血机理的探究也是壳聚糖纤维的重要研究内容。

## 4 海藻纤维

海藻纤维是以海藻为原料,通过提炼得到海藻多糖后,再经湿法纺丝工艺制得的一种生物基再生纤维。该纤维原料来源丰富,外观纯白,表面光滑有光泽,手感柔软,线密度均匀,具有可生物降解及阻燃性能、生物相容性好等特点。海藻纤维的断裂强度在1.6~2.6 cN/dtex<sup>[17]</sup>。纤维结构中富含羟基,故吸湿性良好,回潮率为12%~17%。由于纤维中的糖苷键不够稳定,因而当温度高于150℃时海藻纤维易发生热分解<sup>[18]</sup>。此外,海藻纤维具有本质阻燃特性,极限氧指数(LOI)高达45%,属不燃类纤维,可以离火自熄。

不同类型纤维的极限氧指数对比见图1<sup>[19]</sup>。

海藻纤维大分子结构中含有大量的羟基和羧基,故吸水性能极强,具有非常好的吸湿性,同时海藻纤维由湿法纺丝工艺制备,纤维中存在大量的微孔,故具有良好的保水性。此外,海藻纤维中还含有微量乳酸或低聚物,这使得纤维具有一定的抑菌性。其还能吸附金属离子,故可用于制备新型防电磁辐

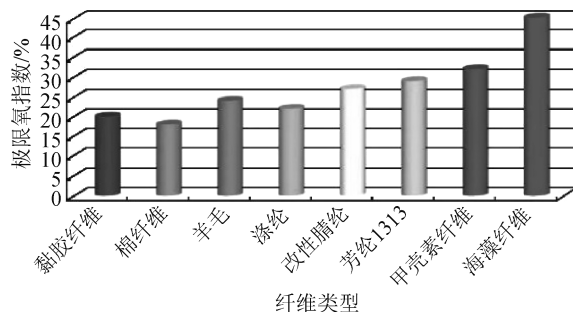


图1 不同纤维的极限氧指数  
Fig. 1 LOI index of different fibers

射材料,如海藻酸钡纤维、海藻酸钙纤维,它们的低频(<300 kHz)防辐射效果可达15 dB以上,中频(200~550 MHz)防辐射效果可达13 dB以上,基本满足民用防辐射服装的要求<sup>[20]</sup>。

在服用领域,海藻纤维可用于制作内衣面料、阻燃防护服、阻燃作战服等产品;在医用领域,海藻纤维可用于制作敷料、采血护理包等产品,其可减少绷带更换的次数,缩短护理时间,还能避免因去除纱布而造成的二次创伤;在卫生领域,海藻纤维可用于制作一次性擦拭用品、消毒湿巾、婴幼儿抑菌纸尿裤、成人卫生巾等产品;在工程领域,可利用海藻纤维的阻燃特性制备阻燃产品(如阻燃救生毯等),利用其分子链上大量羧基和羟基易产生负电基团的特性制备吸附材料<sup>[19]</sup>。

海藻纤维因海藻酸特殊的高分子结构而存在质地脆硬、强力较低、耐盐碱性能差等缺点,故纤维共混改性是其未来的重要研究方向。

## 5 蛋白改性纤维

蛋白改性纤维是指在制备化学纤维的过程中,通过接枝、共混等方法加入大豆蛋白、羊毛角蛋白、牛奶、丝素等蛋白质而得到的一种改性化学纤维。蛋白改性纤维包括大豆蛋白改性纤维、丝素蛋白改性纤维、胶原蛋白改性纤维、牛奶蛋白改性纤维、羊毛角蛋白改性纤维、羽毛蛋白改性纤维、蚕蛹蛋白改性纤维等。蛋白改性纤维不仅保留了原有化学纤维的性能,还被赋予了高模量、高吸湿等特性,舒适性较好,特别适合制作与人体皮肤接触较多的用品,如床上用品、卫生巾、内衣等。

### 5.1 大豆蛋白改性纤维

大豆蛋白改性纤维应用较多的有大豆蛋白改性聚乙烯醇纤维、大豆蛋白改性黏胶纤维、大豆蛋白改性聚丙烯腈纤维等。

大豆蛋白改性聚乙烯醇纤维是以出油后的大豆废粕为原料,从中提取球蛋白,与高聚物聚乙烯醇共混配制成一定浓度的纺丝液后,再通过湿法纺丝制成的。大豆蛋白改性聚乙烯醇纤维兼具天然纤维和化学纤维的诸多优点,如纤维细度细,强伸度高,耐酸碱性能良好,质地轻薄等,被称为“人造羊绒”。其织物具有羊绒般的手感和保暖性,丝绸般的光泽度,棉纤维般的吸湿导湿性<sup>[21]</sup>,穿着非常舒适,同时对金黄色葡萄球菌、大肠埃希菌、白念珠菌等致病性细菌具有明显的抑制作用。大豆蛋白改性聚乙烯醇纤维既可纯纺,也可与羊毛、蚕丝、棉、麻、涤纶、天丝等纤维混纺,是制作高档羊绒衫、针织保健内衣、T恤、西服、运动服装等的理想材料<sup>[22]</sup>。

大豆蛋白改性黏胶纤维与普通黏胶纤维都具有很好的吸湿性、染色性及透气性,且断裂强度和断裂伸长率基本相似,都具有真丝般的光泽,以及较好的亲肤性。

大豆蛋白改性聚丙烯腈纤维改善了腈纶的亲肤性,但生产成本较高。

### 5.2 丝素蛋白改性纤维

丝素蛋白是一种纤维状的蛋白,相对分子质量非常高。丝素是由结晶区和非结晶区组成的一种半晶态聚合物。丝素蛋白改性纺丝液可采用磷酸<sup>[23-24]</sup>、六氟丙酮<sup>[25]</sup>、磷酸/甲酸混合液<sup>[26]</sup>等溶解丝素制备,也可先将蚕茧溶解于质量分数为 0.5% 的 NaHCO<sub>3</sub> 溶液中脱胶,然后溶解于 9.5 mol/L 的溴化锂中制备,或将丝素蛋白溶解于 1-乙基-3-甲基咪唑氯盐<sup>[27]</sup> 和 4-甲基吗啉-N-氧化物<sup>[28]</sup> 中制备。所得丝素蛋白改性纤维的聚集态结构与天然蛋白纤维相近。

丝素蛋白静电纺丝技术是近年研究的热点。如 Jeong 等<sup>[28]</sup>、Sukigara 等<sup>[29-30]</sup> 都以甲酸作为溶剂,采用静电纺丝法,分别成功制备出直径为 80 nm 及直径小于 40 nm 的丝素蛋白纳米纤维;Ayutsede 等<sup>[31]</sup> 制备的丝素蛋白纤维直径也在 100 nm 以下。Park 等<sup>[32]</sup> 同样以甲酸为溶剂,制备出直径为 450 nm 的丝素蛋白/壳聚糖复合纤维。

静电纺丝素蛋白超细纤维在组织工程支架领域取得了较好的应用。Min 等<sup>[33]</sup> 在制备的直径为 80 nm 的丝素蛋白纳米纤维上培养人类角化细胞和人类纤维原细胞,发现丝素蛋白纳米纤维可以促进人类角化细胞和人类纤维原细胞的黏附、增殖与扩散。Park 等<sup>[34]</sup> 将制备的丝素蛋白/甲壳素共混纳米纤维用作支架,并在支架上培养人类纤维原细胞和表皮角化细胞,发现甲壳素与再生丝素蛋白质量比为 75:25 时,细胞在支架上的增殖效果最好。Soffer 等<sup>[35]</sup> 采用丝素蛋白通过静电纺丝制备出纳米纤维管,用作血管接枝的支架材料,其具有良好的力学性能,可支持人类皮细胞和平滑肌细胞在支架材料上的生长。Jin 等<sup>[36]</sup> 在静电纺丝素蛋白纤维上培养人类骨髓基质细胞(BMSCs),发现丝素蛋白纤维支架能促进人类骨髓基质细胞在其上的生长和分化,加速骨组织的生成。

### 5.3 其他蛋白改性纤维

酪蛋白改性纤维即牛奶蛋白纤维,是以牛乳作为基本原料制得的一种再生蛋白纤维,主要制备方法包括共混法、交联法、接枝共聚法等。该纤维主要用于针织面料,其织物抗皱性较好,可机洗,免熨烫,易洗快干且耐用。

蚕蛹蛋白改性纤维与普通黏胶纤维相似,都属于部分结晶的高分子材料。蚕蛹蛋白改性纤维的断裂强度、断裂伸长率均低于蚕丝,但与普通黏胶纤维较接近;吸湿率与普通黏胶纤维相当,但比蚕丝、棉纤维高,吸湿性能很好;透气率比蚕丝织物高 20%~30%,被称为“会呼吸的纤维”。

## 6 结束语

在当今“保护环境、杜绝污染、构建可持续发展社会”的大背景下,科技工作者孜孜不倦地研究和开发各种可再生、无污染、可降解的纤维。研究人员结合现代高分子化学技术手段,利用生物体内存在的或代谢产生的部分高分子物质,研制开发出性能优良的生物基化学纤维。这些生物基化学纤维与天然纤维一样,来源广泛,具有无污染和可降解的特性。相信这些安全环保、具有特殊性能的生物基化学纤维,在未来会得到广泛应用,并在各大产业领域大放异彩。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

[ 1 ] 李亚滨,寇士军. 聚乳酸/聚乙醇酸复合纤维的性能探讨[J]. 合成纤维工业,2005,28(1):20-22.

[ 2 ] PANG X, ZHUANG X L, TANG Z H, et al. Polylactic acid (PLA): research, development and industrialization [J]. Biotechnology Journal, 2010, 5(11): 1125-1136.

[ 3 ] ZHAO R L, WANG S B, YANG M G, et al. Synthesize PLA for filature and the performance of PLA fibers[J]. Progress in Textile Science & Technology, 2006(6): 15-16.

[ 4 ] 刘淑强,张蕊萍,贾虎生,等. 可生物降解聚乳酸长丝的熔融纺丝工艺[J]. 纺织学报, 2012, 33(11): 11-14.

[ 5 ] 钱程,许克强,陈瑞锋,等. 一种表层材料为三层结构的纸尿裤:CN204016632U[P]. 2014-12-17.

[ 6 ] 钱程,许克强,陈瑞锋,等. 一种防侧漏的卫生巾:CN204016626U[P]. 2014-12-17.

[ 7 ] 王蕊,郝龙云,房宽峻,等. 交联处理对Lyocell纤维原纤化性质的影响[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2005, 20(1): 50-53.

[ 8 ] 郎忠义. 纤维素纤维的新品种:TENCEL[J]. 人造纤维,1991(5):40-44.

[ 9 ] 董奎勇,杨萍. Lyocell纤维发展概况及趋势[J]. 中国纤检, 2004(11):40-42.

[ 10 ] 赵家森,王渊龙,程博闻. 绿色纤维素纤维:Lyocell纤维[J]. 纺织学报, 2004, 25(5): 124-126.

[ 11 ] 李达,马建伟. 壳聚糖纤维的生产现状及展望[J]. 现代纺织技术, 2009, 17(3): 66-68.

[ 12 ] 张洁,钱晓明. 壳聚糖非织造布的制备及壳聚糖非织造医用敷料的研究进展[J]. 产业用纺织品, 2011, 29(7): 24-27.

[ 13 ] 苏丹. 壳聚糖衍生物纤维的研究[D]. 大连:大连工业大学, 2012.

[ 14 ] 王夕雯,靳向煜,柯勤飞. 壳聚糖纤维性能的测试与分析[J]. 产业用纺织品, 2011, 29(11): 15-19.

[ 15 ] 钱程. 壳聚糖纤维医用敷料的生产及应用[J]. 纺织学报, 2006, 27(11): 100-101.

[ 16 ] 蒋挺大. 壳聚糖[M]. 2版. 北京:化学工业出版社, 2007: 237-245.

[ 17 ] 孙玉山,卢森,骆强. 改善海藻纤维性能的研究[J]. 纺织科学研究, 1990, 1(2): 28-30.

[ 18 ] 张俐娜,郭继,周金平,等. 羧甲基壳聚糖和海藻酸共混膜或纤维的制备方法及其用途:CN1297957[P]. 2001-06-06.

[ 19 ] 任杰. 生物基化学纤维生产及应用[M]. 北京:中国纺织出版社, 2018: 239.

[ 20 ] ROGERS R D, VOTH G A A. Ionic liquids [J]. Chemical Research, 2007, 40:1077-1078.

[ 21 ] 张岩昊,王学林. 新型环保纤维:大豆蛋白纤维[J]. 毛纺科技, 2000, 28(6): 42-43.

[ 22 ] 郁兰. 大豆蛋白纤维机织物性能与结构的关系[D]. 苏州:苏州大学, 2006.

[ 23 ] ISHIZAKA H, WATANABE Y, ISHIDA K, et al. Regenerated silk prepared from ortho phosphoric acid solution of fibroin[J]. Nippon Sanshigaku Zasshi, 1989(58):87-95.

[ 24 ] YAO J M, MASUDA H, ZHAO C H, et al. Artificial spinning and characterization of silk fiber from Bombyx Mori silk fibroin in hexafluoroacetone hydrate [J]. Macromolecules, 2002, 35(1): 6-9.

[ 25 ] CHEN X, SHAO Z Z, KNIGHT D P, et al. Conformation transition of silk protein membranes monitored by time-resolved ftir spectroscopy: effect of alkali metal ions on nephila spidroin membrane[J]. Acta Chimica Sinica, 2002, 60(12):2203-2208.

[ 26 ] PHILLIPS D M, DRUMMY L F, NAIK R R, et al. Regenerated silk fiber wet spinning from an ionic liquid solution[J]. Journal of Materials Chemistry, 2005, 15(39): 4206-4208.

[ 27 ] MARSANO E, CORSINI P, AROSIO C, et al. Wet spinning of Bombyx Mori silk fibroin dissolved in N-methyl morpholine N-oxide and properties of regenerated fibres [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2005, 37(4): 179-188.

[ 28 ] JEONG L, LEE K Y, PARK W H. Effect of solvent on the characteristics of electrospun regenerated silk fibroin nanofibers[J]. Key Engineering Materials, 2007, 342/343: 813-816.

[ 29 ] SUKIGARA S, GANDHI M, AYUTSEDE J, et al. Regeneration of Bombyx Mori silk by electrospinning: part 1: processing parameters and geometric properties [J]. Polymer, 2003, 44(19): 5721-5727.

[ 30 ] SUKIGARA S, GANDHI M, AYUTSEDE J, et al. Regeneration of Bombyx Mori silk by electrospinning:

- part 2: process optimization and empirical modeling using response surface methodology [J]. *Polymer*, 2004, 45(11): 3701-3708.
- [31] AYUTSEDE J, GANDHI M, SUKIGARA S, et al. Regeneration of Bombyx Mori silk by electrospinning: part 3: characterization of electrospun nonwoven mat [J]. *Polymer*, 2005, 46(5): 1625-1634.
- [32] PARK W H, JEONG L, YOO D I, et al. Effect of chitosan on morphology and conformation of electrospun silk fibroin nanofibers [J]. *Polymer*, 2004, 45(21): 7151-7157.
- [33] MIN B M, LEE G E, KIM S H, et al. Electrospinning of silk fibroin nanofibers and its effect on the adhesion and spreading of normal human keratinocytes and fibroblasts *in vitro* [J]. *Biomaterials*, 2004, 25(7/8): 1289-1297.
- [34] PARK K E, JUNG S Y, LEE S J, et al. Biomimetic nanofibrous scaffolds: preparation and characterization of chitin/silk fibroin blend nanofibers [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2006, 38(3/4/5): 165-173.
- [35] SOFFER L, WANG X Y, ZHANG X H, et al. Silk-based electrospun tubular scaffolds for tissue-engineered vascular grafts [J]. *Journal of Biomaterials Science (Polymer Edition)*, 2008, 19(5): 653-664.
- [36] JIN H. Human bone marrow stromal cell responses on electrospun silk fibroin mats [J]. *Biomaterials*, 2004, 25(6): 1039-1047.

## 2025 年《棉纺织技术》征订启事

《棉纺织技术》是由陕西省纺织科学研究院有限公司和中国纺织信息中心主办,全国棉纺织科技信息中心、陕西棉纺织技术期刊社有限公司编辑出版,国内外公开发行的专业技术月刊。期刊兼顾科研、教学、生产需要,坚持理论与实践相结合、技术与经济相结合、普及与提高相结合、当前与长远相结合、国内与国外相结合的办刊方针,形成了前瞻性、适用性、操作性的独特风格;荣获“第三届国家期刊奖提名奖”,连续被选列为“中国科技核心期刊”,入选首批“中国科技期刊卓越行动计划梯队期刊”“纺织领域高质量科技期刊分级目录”T2级;已被美国《化学文摘》、英国《科学文摘》、俄罗斯《文摘杂志》、EBSCO 数据库等收录,在国内外具有广泛的学术影响力。

《棉纺织技术》报道纺织领域先进技术,范围涉及纤维材料、纺织工程、纺织装备、技术性纺织品、纺织数字化、纺织检测、企业管理等创新成果。办刊严谨,审稿高效,服务细致,热忱欢迎广大纺织科技人员踊跃投稿、订阅。

《棉纺织技术》官方投稿网址为 <http://www.mfzjs.com>。

《棉纺织技术》微信订阅号为“棉纺织技术”,可在线订阅书籍、在线支付、在线投稿和互动,欢迎关注!



《棉纺织技术》期刊由邮政局向全国发行,邮发代号 52-43,亦可向编辑部直接订阅,纸质刊每册 20 元,全年订价 240 元。电子刊每册 10 元,全年订价 120 元。

地址:西安市纺织城西街 138 号(710038)

电话:(029)83553538、83553571

订阅专线:15529232520

E-mail:sf-mfzjs@ctsti.cn

银行付款

户名:陕西棉纺织技术期刊社有限公司

账号:611899991010003557935

开户行:交通银行西安城西支行

追求环保是你我的心愿  
参与环保是你我的责任