

纳米纤维素在纺织材料中的应用进展

石泰¹,李永贵^{1,2,3,*},卢麒麟^{2,3},刘正江¹,陈立军⁴

(1.内蒙古工业大学轻工与纺织学院,内蒙古呼和浩特 010080;

2.福建省新型功能纤维及材料重点实验室,福建福州 350108;

3.闽江学院服装与艺术工程学院,福建福州 350108;

4.长乐恒申合纤科技有限公司,福建福州 350207)

摘要:纳米纤维素作为新兴的纳米纤维材料,不仅保留了纤维素本身的特性,同时兼具纳米材料的性能,以其优异的力学、机械性能及实用性备受关注。纳米纤维素不仅可以改善纺织材料的力学性能,对其进行改性后还可以赋予纺织材料功能性,如抗菌、拒水拒油、抗紫外线等性能。对纳米纤维素的基本分类、制备方法、结构、性能以及其在纺织材料上的应用进行阐述,有益于纳米纤维素的推广应用及纺织新产品的开发。

关键词:纳米纤维素;制备;结构;性能;纺织材料;应用

中图分类号:TS 102

文献标志码:A

文章编号:1673-0356(2023)01-0001-07

DOI:10.19507/j.cnki.1673-0356.2023.01.001

纳米纤维素是指通过多种方式将纤维素原料加工制成至少有一维具有纳米级尺寸的纤维素^[1]。因此,纳米纤维素不仅具有纤维素的一些性能,如生物相容性、可降解性、良好的吸湿性等,也具有纳米材料的特性,如较大的比表面积、较好的机械性能等^[2]。通过交联、接枝、共混等方式对纳米纤维素进行改性,可获得改性纳米纤维素,提高其附加值,在纺织材料、生物医药、造纸、食品等方面有广泛应用。

1 纳米纤维素分类

根据原料来源、纳米纤维素的制备方法及其制得的尺寸,可将其分为微纤化纤维素(MFC)、纳米微晶纤维素(NCC)、细菌纳米纤维素(BNC)^[3-5]及静电纺纳米纤维素(ECC)。

MFC又称纳米原纤化纤维素(NFC),呈纤维状、丝状,主要来源是木材、稻草等,通过化学-物理法进行制备,长度一般大于1 000 nm,直径在5~7 nm之间,由于保留了一定的无定形区,故其柔韧性得到了保证。

NCC又称纤维素纳米晶须(CNF)或纤维素纳米晶(CNC),呈针状、棒状或球状,主要来源是棉花、菠萝皮^[6]、甘蔗渣^[7]等,通过酸水解法进行制备,长度在50

~500 nm之间,直径在2~60 nm之间,结晶度较高,无定形区含量非常少。

BNC又称细菌纤维素(BC),主要来源是微生物(如木醋杆菌)以葡萄糖、蔗糖、淀粉、醇类等进行合成,长度在100~1 000 nm之间,直径在20~100 nm之间^[8]。

ECC以含有纤维素的溶液为基础,由静电纺丝技术制备。ECC的直径与电压、针头直径、流速等有关,一般在几十纳米到几微米之间,但在相同条件下制备的ECC直径均一。

2 纳米纤维素制备

纳米纤维素的制备方法可分为化学法、物理法、生物法及静电纺丝法,也可将几种方法混合使用,以达到更好的制备效果^[9-10]。

2.1 化学法

2.1.1 酸水解法

利用无机酸来降解纤维素中的非结晶区,得到高结晶度的纤维素悬浊液,然后通过一系列的去杂后获得纳米纤维素^[11]。其中,盐酸、硫酸是最常用的无机酸^[12-13]。

2.1.2 氧化法

目前采用较多的是2,2,6,6-四甲基哌啶氧化物(TEMPO)处理法,该方法用TEMPO为催化剂,调节次氯酸对纤维素纤维有选择性地氧化,氧化后的纤维经机械处理便可获得纳米纤维素^[14],还有使用过硫酸

收稿日期:2022-07-31;修回日期:2022-08-27

基金项目:福建省科技创新重点项目(2021G02011);福建省自然科学基金(2021J011034);福建省工业引导性项目(2021H0037);福州市科技计划项目(2021-S-089);闽江学院引进人才项目(MJY18010)

第一作者:石泰(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为功能纤维。

*通信作者:李永贵,教授,E-mail:liyonggui@mju.edu.cn。

盐氧化,这两种方法均是在纤维素的表面氧化,但后者的氧化不具有选择性,前者的氧化体系可以选择性地氧化纤维素固定位置上的羟基^[15]。

2.1.3 低共熔溶剂法

低共熔溶剂(DES)由氢键供体与氢键受体组成,将2种组分混合后通过加热法制备,其熔点低于任意组分。用于制备纳米纤维素的DES主要以带氨基的盐类为氢键供体,在一定温度下长时间的预处理,再结合短时间的强力物理作用,使纤维素的结晶区和非晶区部分被破坏,从而制得纳米纤维素^[16]。

2.2 物理机械法

2.2.1 高压均质法

高压均质法主要是在高压条件下将纤维素悬浮液经过不同形状渠道,通过均质腔时发生高速的方向流变,利用这个过程中所产生的力学效应使其变细呈现纤维状,反复进行多次,使产物达到理想的尺寸^[17]。

2.2.2 研磨法

通过磨盘高速旋转产生的机械应力,并在加热或溶剂辅助的条件下,纤维素悬浊液中的纤维素分子之间所存在的氢键及范德华力断裂,使其降解,聚合度下降,通过调整磨盘间隙与研磨次数可获得不同级别的纳米纤维素^[18]。

2.2.3 冷冻粉碎法

通过冷却介质(一般为液氮)将纤维悬浮液中的水冷冻,通过冷冻产生的冰晶使细胞壁破裂,并在高剪切力的作用下使纤维之间被剥离开来,从而制得纳米纤维素。

2.3 生物制备法

2.3.1 酶解法

利用纤维素酶对纤维素进行降解,只保留其结晶区,将非晶区去掉,最终获得纳米纤维素^[19]。酶解法需要酶与纤维素表面直接接触,且水解条件要求较高。酶解法制备工艺条件温和、专一性强、效率高、无污染且使用的试剂酶与纤维素酶均可再生^[20-21]。

2.3.2 微生物合成法

微生物合成纳米纤维素大多是通过木醋杆菌降解产生微纤丝缠绕而成^[22]。与其他方式生成的纳米纤维素有所区别,细菌纤维素具有特殊的理化性能:高化学纯度、高结晶度、高聚合度,高于一般的棉纤维,具有纳米网状结构,具有较好的吸水保水性^[23]。

2.4 静电纺丝法

静电纺丝法制备ECC,是通过将含有纤维素的溶

液在静电力的作用下获得具有纤维素衍生物的纳米膜,再对其进行碱处理,制备出纳米纤维素交织膜。目前多用溶剂直接溶解纤维素纤维,再通过静电纺丝的方式制备ECC,而且纤维素大分子间氢键作用力强,使得纤维素对于溶剂的选择较为苛刻^[24-25]。

3 纳米纤维素的结构与性能

3.1 纳米纤维素结构

纳米纤维素化学结构与纤维素相同,均是由D-吡喃葡萄糖环以 β -(1,4)-糖苷键以 C_1 椅式构象联结而成的线形高分子,所以纳米纤维素在结构及性能上与纤维素相同,同时还具有自身作为纳米颗粒的性能。图1为纳米纤维素分子结构图。

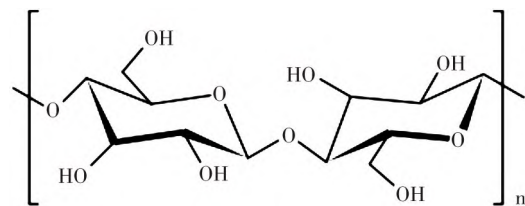


图1 纳米纤维素分子结构图

3.2 纳米纤维素物理性能

纳米纤维素力学性能优异,不仅具有高强度、高结晶度、高聚合度、高杨氏模量、高比表面积,而且由于较高的弹性模量及抗拉强度,可用作复合材料增强剂。

3.3 纳米纤维素化学性质

纤维素分子具有3个游离的羟基,可以发生诸如酯化、醚化、接枝共聚等反应,为纳米纤维素的改性和表面修饰提供了条件^[26]。而纳米纤维素由于大量羟基的存在,分子内与分子间形成了氢键,其稳定性得到提高,也使其在溶剂中的溶解度降低^[27-28]。目前对纳米纤维素的化学改性主要是通过与羟基反应得以实现,如引入同性电荷,提高其在溶液中的稳定性及分散性;或引入功能性基团,赋予其阻燃、吸附、耐磨等性能,提高附加值^[29]。

3.4 纳米纤维素光学性能

纳米纤维素材料具有向列型液晶性质,其悬浊液通过诱导可形成手性向列液晶,具有特殊的光子结构,极强的旋光性、圆二色性,选择性地吸收一定波长的光,反射圆偏振光,形成五颜六色的双折射现象。通过硫酸水解法制备手性液晶排列的晶态纳米纤维素,再将硅酸四乙酯加入其悬浊液中,在酸性条件下,便组成了手性液晶介孔二氧化硅材料^[30]。

4 纳米纤维素在纺织材料中的应用进展

纳米纤维素原材料来源广泛、绿色环保,和其他纳米材料相比,还具有可生物降解、可再生、生物相容性好等特点,在可降解材料方面为人们提供了更多的选择。同时,纳米纤维素以其优异的力学性能与机械性能应用于纺织材料中,在保证这些纺织材料原本性能的情况下,增强了其力学与机械性能。改性后的纳米纤维素不仅使其力学性能提高,还赋予纺织材料功能性,如抗菌性、阻燃性等。

4.1 上浆浆料

上浆浆料主要用于提高纱线在织造过程中的强力,减少毛羽与断头,其配方的研发趋向于绿色环保,而纳米纤维素这种可降解的材料也开始应用于浆料配方中。

聚酰胺56(PA56)纤维因其本身具有较好的吸湿、染色性,可应用于服用领域^[31]。孙燕琳等^[32]将纳米纤维素与改性淀粉混合,制得混合浆液,将其用于PA56纤维的上浆,发现添加纳米纤维素的混合浆料不仅减少了纱线的毛羽、缠结,提高了浆液在其表面的成膜性能,并且使其断裂强度及断裂伸长率等力学性能获得一定的提高。

纳米纤维素的加入不仅满足上浆浆料增强纱线力学性能的要求,同时减少了其他有害助剂的使用,只是目前含纳米纤维素的浆料研究较少,有待进行更深入的研究与开发。

4.2 印花墨水

数码喷墨印花需通过喷头使印花墨水与织物结合,具有高效、精准、效果好、不产生印花废浆等特点。墨水是数码印花中最为关键的部分,也是影响印花质量的因素之一^[33]。

沈静等^[34]以活性染料为主体,纳米纤维素用作分散剂制得印花墨水,发现纳米纤维素的加入对印花墨水的黏度与电导率有重要影响,并且与其他商用墨水相比,其上色率、印花效果均有明显提升。而且纳米纤维素的生物相容性对纺织品无毒无害,也使得在印花过程中污水排放及能源消耗降低,实现了节能减排、绿色环保。

将纳米纤维素作为分散剂用于印花墨水是一种较为新颖的方式,与上浆浆料的情况类似,目前研究较少,有待进一步的研究。

4.3 整理剂

纺织品织造结束后,进行后整理,赋予其功能性,提高附加值,其中用到最多的便是整理剂。纳米纤维素用作织物整理剂已有较多的研究,由于其本身的力学性能较好,在整理过程中可以改善织物的力学性能,而且对纳米纤维素进行改性后再进行整理,可赋予功能性。与其他在生产过程中会产生有害物质的整理剂相比,纳米纤维素本身的降解性也使其备受关注。

水性聚氨酯(WPU)涂层剂可以使织物具有良好的手感、柔韧性、黏合度等,但由于其物理性能不如溶剂型聚氨酯,刘蓉蓉等^[35]发现可以使用纳米纤维素作为增强剂填充入WPU中,制备出性能优异的涂层整理剂,从而提高产品的物理性能。YANG等^[36]将壳聚糖与纳米纤维素共同对棉织物进行改性,通过浸-烘-焙的方法将该复合材料涂覆于棉织物上。随着纳米纤维素粒径的增大,棉织物力学性能先增大后减小,并且提高了棉织物的抗紫外线功能和耐洗性能,使纳米纤维素成为了棉织物抗紫外线整理剂的一种候选产品。YAO等^[37]通过可逆加成-断裂链转移聚合(RAFT)将丙烯酸与丙烯酸六氟丁酯反应物接枝在纳米纤维素表面,再将改性后的纳米纤维素用作宏观RAFT剂,合成了核壳型NCC改性含氟聚丙烯酸酯无表面活性剂乳液,这种乳液可以用作纺织品的拒水整理剂,提高了织物的拒水拒油性。

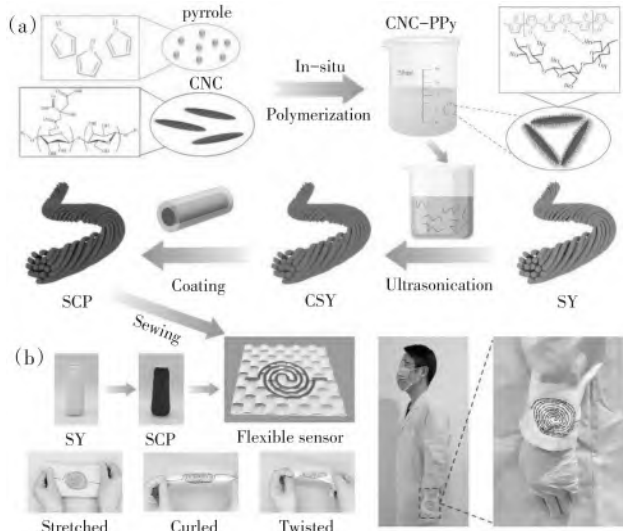
4.4 生物传感器材料

目前,具有高灵敏度特性的柔性可穿戴设备在研发过程中只关注于其灵敏度与机械性能,忽略了穿戴舒适性与透气性。OUYANG等^[38]在一种新型的传感器制备过程中利用纳米纤维素与聚吡咯(PPy)所形成的导电单元,再以蚕丝-聚氨酯混纺纱为支撑材料,制备了导电丝-聚氨酯混纺纱/纤维素纳米晶-聚吡咯传感器(SCP20)。该传感器在一定温度及全范围pH值下都有显著的响应,为后续设计具有高灵敏度、较高的机械性能和动态耐久性的可穿戴传感器提供了思路。图2为该柔性传感器设计示意图。

4.5 织物复合膜

纳米纤维素本身具有一定的成膜性与高透明性,将其与一些聚合物、乳液等混合,通过一些基本的成膜方式,如过滤、浇铸、浸渍及静电纺丝法^[39]等,制得薄膜,增强了薄膜的力学性能、机械性能,并赋予其一定的功能性^[40-41]。目前对于纳米纤维素在织物复合膜的

研究中,主要以其与其他高聚物混合制得纺丝液,再通过静电纺丝的方法制备成膜的研究居多。



(a) SCP 制备工艺; (b) 从纱线到织物的制备工艺^[38]

图 2 柔性传感器设计示意图

4.5.1 增强力学性能

聚乙烯醇(PVA)极性与纳米纤维素接近,界面相容性好,使得二者具有复合的可能。胡月等^[42]将纳米纤维素加入制得纳米纤维素/PVA 复合膜,发现纳米纤维素的加入对 PVA 起到了增补效应,使其力学性能得到提升,并且对本身的性质未产生影响。

聚乳酸(PLA)具有一定的生物降解性及生物相容性,但是其结晶性差,会表现出高脆性及低热变形的问题。曹杏^[43]通过浇铸成膜法将纳米纤维素与 PLA 复合成膜,在基本没有影响复合膜透光率及雾度值的情况下,改善了复合膜的力学性能。

4.5.2 赋予抗菌性能

一般的纳米纤维素不具有抗菌性,限制了其在有抗菌要求产品上的应用。但是,从某些具有抗菌效果的植物中提取的纳米纤维素,本身具有一定的抗菌性。而没有抗菌性的纳米纤维素可以通过将抗菌剂与其进行复合,制备成膜后的膜材料在基材特性不变的前提下获得纳米纤维素的特性及抗菌性^[44-45]。

王璐^[46]以 PLA 为基底,与从具有抗菌性的罗布麻中提取的纳米纤维素通过静电纺丝的方式制备静电纺膜,不仅改善了膜的润湿性、渗透性,并且使之获得了一定的抗菌性能。传统的有机抗菌剂稳定性差,抑菌作用的时效短;天然抗菌剂应用范围窄,目前主要使用的还是无机抗菌剂,如银系、光催化(ZnO 、 TiO_2)型抗菌剂,也有多组分相结合制备抗菌复合材料的方法。

在医用防护服、口罩等纺织相关产品中,抗菌是必不可少的性能,但是这些材料往往都是一次性用品,所以它们的回收也是一个问题。利用纳米纤维素的可降解性,为制备可回收医用防护用品提供了新思路。

4.5.3 提高耐磨、耐久及稳定性能

可穿戴电子和智能纺织品在飞速发展,其中有一种无声、可持续发电的柔性可穿戴热电(TE)器件的需求在迅速增加。KLOCHKO 等^[47]用具有生物相容性的半导体碘化铜(CuI)与纳米纤维素制备该器件,通过廉价易得、可扩展的低温水相制备技术(SILAR)制备得到 CuI 薄膜,不仅没有破坏 CuI 本身的性能,而且提高了这种 TE 纺织品制备的可穿戴热电模块的耐久性和耐磨性。

海藻酸钠本身是一种有良好成膜性的水溶性高分子物质,由于其本身含有大量的羟基,使其亲水性较强,导致海藻酸钠膜的力学性能和阻隔能力差。董峰等^[48]将纳米纤维素添加到海藻酸钠悬浊液中,通过培养皿制备得到海藻酸钠-纳米纤维素共混膜,使其获得了较为优异的力学性能和阻隔能力,并且在加入纳米纤维素后,膜的热稳定性得到了提高。

4.5.4 用于膜材料基底

传统的电磁屏蔽材料存在密度高、柔性低、难加工等特点,在柔性可穿戴织物中的应用受限制,而且目前所用较多的聚合物基电磁屏蔽材料来源于矿物资源,属于不可再生资源,会造成一定的环境污染。使用可生物降解的细菌纤维素(BC)作为电磁屏蔽材料的高强基底,其本身虽然不具有导电性与磁性,但是可以通过引入导电高分子或纳米粒子增强其与电/磁场的相互作用,提高电磁屏蔽性能^[49]。李桢等^[50]将 BC 、 Fe_3O_4 、银纳米线($AgNWs$)通过原位共沉淀法及两步真空辅助抽滤法,制备出具有层级结构的 $BC@Fe_3O_4/AgNWs$ 复合薄膜,工艺简单,所获得的膜材料电磁屏蔽效果较好,为柔性电磁屏蔽材料的制备提供了新思路。

4.6 凝胶材料

凝胶是指以气体、液体为介质,将其填充在具有三维网格结构的高分子中而形成的物质,由于一般介质是液体,可以将凝胶看做是高分子三维网格包含液体的膨润体。根据介质的不同又可分为气凝胶、水凝胶和有机凝胶。凝胶以其诸多优异的性能应用于纺织品的开发^[51]。

4.6.1 水凝胶

水凝胶能够膨胀和保留水份但不溶于水,还具有

优异的吸水、保水性等^[52-53]。但是水凝胶较为柔软、力学性能差,通过接枝的方式将其与纺织品进行结合,在织物或纤维的表面形成凝胶层,不仅改善了凝胶材料力学性能,还可以使纺织品获得吸湿、保温保水、环境响应等性能。将纳米纤维素与高分子聚合物通过物理或化学两种方式交联作用,制得水凝胶,能够使水凝胶基团和交联的网格密度增加,使其生物降解及力学性能得以改善^[54-55]。卢麒麟等^[56]将纳米纤维素与明胶形成酰胺键及氢键的结合,二者之间紧密连接,制备了自愈合材料,具有成型快、自愈合时间短、愈合程度高等特点。Smriti等^[57]将天然靛蓝颗粒、纳米纤维素水凝胶及少量的分散剂形成的混合物沉积在织物表面,再通过壳聚糖水溶液对织物进行涂层整理,最终获得一种牛仔布靛蓝染色的新方法。这种方法利用了纳米纤维素高比表面积的特性,减少了染料的用量,染色过程中的耗水量也减少,并且染色过程无需任何还原剂或碱液,固色率可达到90%以上,比传统的染料染色固色率要高。

4.6.2 气凝胶

气凝胶是一种纳米级的多孔材料,是公认的密度最低的固体,具有低密度、高空隙率、高比面积、大孔体积等特性,在隔热、气体吸附分离、水处理等方面有良好的应用性能^[58]。国际上使用气凝胶对纺织产品改性的供应商主要有阿斯彭(Aspen)Aerogels和Cabot Corp.等公司,以气凝胶毯及其组合材料的形式出售,这些材料具有较好的柔性及可弯性,将其与服装的特定位置结合,能起到隔热保温功能。但是气凝胶本身存在较大的脆性、容易粉末化、弯折难复原等问题,在纺织服装的应用中也由于力学性能差无法满足工业要求^[59-60]。王世贤等^[61]通过对纳米纤维素进行一定的改性后,经过真空冷冻干燥后用于制备气凝胶,不仅保留了原有的性能,而且使其获得了低柔韧性、低力学强度的特点,为应用于纺织服装提供了新思路。

5 结束语

纳米纤维素在纺织材料中的应用研究还处于发展阶段。纳米纤维素的加入提高了纺织材料的力学性能,而且进行改性后还可赋予纺织材料功能性,提高产品的附加值。而且其本身属于可降解、可再生资源,在提倡绿色环保的大环境下有较好的应用前景。

目前,纳米纤维素在上浆浆料、整理剂、纱线、织物

复合膜等方面已经有研究,主要是以增强剂、助剂的形式加入反应,从而改变纺织材料的性能,未来纺织材料的研究可以尝试将纳米纤维素作为助剂加入反应。纳米纤维素属于纤维素,其是否能够作为原料来制备纺织材料也是一个有待验证的问题。而且纳米纤维素在与纺织材料结合的过程中,结合方式、在材料中的分散性、耐久性等也需进一步研究。虽然纳米纤维素作为可降解、可再生资源,但在实际应用之后还需考虑再生产与回收的问题,做到高效回收利用,实现真正的绿色环保。

参考文献:

- [1] 霍倩,刘姝瑞,谭艳君,等. 纳米纤维素的制备及应用研究进展[J]. 纺织科学与工程学报,2020,37(3):94-101.
- [2] MARY-ANNE H,陈京环. 纤维素纳米纤维:一种新的重要材料[J]. 造纸信息,2019,392(9):84.
- [3] ZOPPE J O, VENDITTI R A, ROJAS O J. Pickering emulsions stabilized by cellulose nanocrystals grafted with thermo-responsive polymer brushes[J]. Journal of Colloid and Interface Science,2012,369(1):202-209.
- [4] 张欢,戴宏杰,陈媛,等. 纳米纤维素的制备及其在 Pickering 乳液中的应用研究进展[J]. 食品研究与开发,2020,41(15):173-181.
- [5] DIETER K, FRIEDERIKE K, SEBASTIAN M, et al. Nanocelluloses: A new family of nature-based materials [J]. Angewandte Chemie, 2011,50(24):5438-5466.
- [6] 罗苏芹,戴宏杰,黄惠华. 不同制备方法对菠萝皮渣纳米纤维素的结构影响[J]. 包装与食品机械,2018,36(5):1-6.
- [7] TEIXEIRA R S S, SILVA A S, JANG J, et al. Combining biomass wet disk milling and endoglucanase/ β -glucosidase hydrolysis for the production of cellulose nanocrystals[J]. Carbohydrate Polymers,2015,128:75-81.
- [8] RAMANA K V, TOMAR A, SINGH L. Effect of various carbon and nitrogen sources on cellulose synthesis by *Acetobacter xylinum*[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology,2000,16(3):245-248.
- [9] JIANG J G, ZHU Y L, JIANG F. Sustainable isolation of nanocellulose from cellulose and lignocellulosic feedstocks: Recent progress and perspectives [J]. Carbohydrate Polymers,2021,267:118188.
- [10] SUN Y Y, XIA Z P, YANG A P, et al. Nanocellulose extracted from waste polyester/cotton fabric by chemical-mechanical separation technology[J]. Journal of Physics;

- Conference Series, 2021, 1790(1): 012074.
- [11] BEYENE D, CHAE M, VASANTHAN T, et al. A biorefinery strategy that introduces hydrothermal treatment prior to acid hydrolysis for co-generation of furfural and cellulose nanocrystals[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2020, 8: 323.
- [12] ABDEL-HALIM E S, AL-DEYAB S S. Low temperature bleaching of cotton cellulose using peracetic acid[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2011, 86(2): 988-994.
- [13] ALMASHHADANI A Q, LEH C P, CHAN S Y, et al. Nanocrystalline cellulose isolation via acid hydrolysis from non-woody biomass: Importance of hydrolysis parameters[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 286: 119285.
- [14] 徐威宇. 植物纤维原料制备纳米纤维素的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [15] 乐志文, 凌新龙. 纳米纤维素的制备及应用研究进展[J]. *成都纺织高等专科学校学报*, 2016, 33(4): 105-113.
- [16] 廖可瑜. 低共熔溶剂制备纳米纤维素及其应用研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2020.
- [17] 许甜甜. 酶解结合高压均质法制备纳米纤维素及其再分散性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- [18] ANUBHAV S, POORAN S. A green technique for nanocellulose derivatives preparation and functionality[J]. *Asian Journal of Research in Social Sciences and Humanities*, 2021, 11(11): 798-804.
- [19] CHENX Q, PANG G X, SHEN W H, et al. Preparation and characterization of the ribbon-like cellulose nanocrystals by the cellulase enzymolysis of cotton pulp fibers[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 207: 713-719.
- [20] 曹媛. 纳米纤维素酶法制备及酶系优化的研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
- [21] GAO J, QIAN Y C, WANG Y F, et al. Production of the versatile cellulase for cellulose bioconversion and cellulase inducer synthesis by genetic improvement of *Trichoderma reesei*[J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2017, 10(1): 272.
- [22] KLEMM D, SCHUMANN D, KRAMER F, et al. Nanocelluloses as innovative polymers in research and application[J]. *Advances in Polymer Science*, 2006, 205: 49-96.
- [23] 郭香. 木醋杆菌炼制纤维素废料制备细菌纳米纤维素的研究[D]. 上海: 东华大学, 2014.
- [24] 史杏娟, 蔡志江. 静电纺丝法制备纤维素纳米纤维的研究进展[J]. *高分子通报*, 2013, 172(8): 45-50.
- [25] 卿彦, 易佳楠, 吴义强, 等. 纳米纤维素储能研究进展[J]. *林业科学*, 2018, 54(3): 134-143.
- [26] 王帅. 改性纳米纤维素的制备与聚醚磺混溶制膜机制及其性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2017.
- [27] 张帆, 陶浩然, 毛钺程, 等. 纳米纤维素基无机复合抗菌膜材料的研究进展[J]. *精细化工*, 2003, 39(6): 1081-1088.
- [28] 张燕, 张铭涛, 沈晓飞, 等. 纳米纤维素的最新制备进展 I. 化学法[J]. *纤维素科学与技术*, 2020, 28(3): 49-58.
- [29] 冉琳琳, 谢帆钰, 王封丹, 等. 纳米纤维素的制备及应用研究进展[J]. *广州化工*, 2021, 49(6): 1-5.
- [30] SHOPSOWITZ K E, HAO Q, HAMAD W Y, et al. Free-standing mesoporous silica films with tunable chiral nematic structures[J]. *Nature*, 2010, 468(7322): 422-425.
- [31] 李蒙蒙, 胡柳, 侯爱芹, 等. 生物基纤维尼龙 PA56 染色性能及产品开发研究进展[J]. *染料与染色*, 2016, 53(5): 25-30.
- [32] 孙燕琳, 曹建达, 颜志勇, 等. 纳米纤维素/改性淀粉混合浆液对 PA 56 纤维性能的影响[J]. *合成纤维工业*, 2020, 43(6): 7-10.
- [33] 张昭燕, 李政, 张健飞, 等. 数码印花染料墨水的研究进展[J]. *针织工业*, 2020(6): 48-52.
- [34] 沈静. 纳米纤维素印花墨水的研制与丝绸冷轧堆印花技术的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019.
- [35] 刘蓉蓉. 纳米纤维素/水性聚氨酯复合材料的制备及其涂层性能研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2021.
- [36] YANG X, WANG Z Y, ZHANG Y S, et al. A biocompatible and sustainable anti-ultraviolet functionalization of cotton fabric with nanocellulose and chitosan nanocomposites[J]. *Fibers and Polymers*, 2020, 21: 2521-2529.
- [37] YAO H T, ZHOU J H, LI H, et al. Nanocrystalline cellulose/fluorinated polyacrylate latex via RAFT-mediated surfactant-free emulsion polymerization and its application as waterborne textile finishing agent[J]. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2019, 57(12): 1305-1314.
- [38] OUYANG Z F, XU D W, YU H Y, et al. Novel ultrasonic-coating technology to design robust, highly sensitive and wearable textile sensors with conductive nanocelluloses[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 428: 131289.
- [39] 杨恩龙, 王善元, 李妮, 等. 静电纺丝技术及其研究进展[J]. *产业用纺织品*, 2007(8): 7-10.
- [40] 戴磊, 龙柱. 纳米纤维素增强聚乙烯醇/水性聚氨酯静电纺膜的研究[J]. *功能材料*, 2015, 46(3): 3110-3114.
- [41] 洪铮铮, 田秀枝, 蒋学, 等. 二醛纳米纤维素交联聚乙烯醇膜的制备及性能[J]. *材料科学与工程学报*, 2019, 37(4): 578-582.
- [42] 胡月. 纳米纤维素/聚乙烯醇复合材料的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.

- [43] 曹杏. 不同长径比纳米纤维素的制备及其对 PLLA/PD-LA 复合膜性能的影响[D]. 武汉:武汉纺织大学,2020.
- [44] VATANSEVER E, ARSLAN D, NOFAR M. Polylactide cellulose-based nanocomposites[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 137:912-938.
- [45] NAZRIN A, SAPUAN S M, ZUHRI M Y M, et al. Nanocellulose reinforced thermoplastic starch (TPS), polylactic acid (PLA), and polybutylene succinate (PBS) for food packaging applications[J]. Frontiers in Chemistry, 2020, 8:213.
- [46] 王璐. 罗布麻纳米纤维素载药缓释功能材料的制备及性能研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2020.
- [47] KLOCHKO N P, BARBASH V A, PETRUSHENKO S I, et al. Thermoelectric textile devices with thin films of nanocellulose and copper iodide[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2021, 32(18):1-20.
- [48] 董峰, 黄帅超, 魏占锋, 等. 海藻酸钠-纳米纤维素共混膜的制备及性能[J]. 材料科学与工程学报, 2019, 37(3):401-404.
- [49] CHEN Y M, PANG L, LI Y, et al. Ultra-thin and highly flexible cellulose nanofiber/silver nanowire conductive paper for effective electromagnetic interference shielding[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 135:105960.
- [50] 李桢, 马忠雷, 康松磊, 等. 细菌纤维素@Fe₃O₄/AgNWs 复合薄膜的制备与电磁屏蔽性能[J]. 精细化工, 2002, 39(6):1162-1169.
- [51] 刘茜, 陆梦. 凝胶材料在纺织品开发中的应用[J]. 中国纤检, 2011(14):84-86.
- [52] WICHTERLE O, LÍM D. Hydrophilic gels for biological use[J]. Nature, 1960, 185:117.
- [53] 王晨孜孜. 罗布麻纳米纤维素基水凝胶保鲜材料的制备及性能研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2021.
- [54] 路洁, 李明星, 周奕杨, 等. 纳米纤维素的制备及其在水凝胶领域的应用研究进展[J]. 中国造纸, 2021, 40(11):107-117.
- [55] HEIDARIAN P, KAYNAK A, PAULINO M, et al. Dynamic nanocellulose hydrogels: Recent advancements and future outlook[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 270:118357.
- [56] 卢麒麟, 谢帆钰, 康明明, 等. 纳米纤维素自愈合材料的研制[J]. 纺织科技进展, 2021(3):18-25.
- [57] RAI S, SAREMI R, SHARMA S, et al. Environment-friendly nanocellulose-indigo dyeing of textiles[J]. Green Chemistry, 2021, 23(20):7937-7944.
- [58] 孔勇, 沈晓冬, 崔升. 气凝胶纳米材料[J]. 中国材料进展, 2016, 35(8):569-576.
- [59] 赵国樑, 李光武, 薛蓉, 等. 气凝胶在纺织服装领域的应用技术现状[J]. 新材料产业, 2021(2):48-53.
- [60] 吴清林, 梅长彤, 韩景泉, 等. 纳米纤维素制备技术及产业化现状[J]. 林业工程学报, 2018, 3(1):1-9.
- [61] 王世贤, 降帅, 李萌萌, 等. 硅烷偶联剂改性纳米纤维素气凝胶的制备及其表征[J]. 纺织学报, 2020, 41(3):33-38.

Research Progress on Application of Nanocellulose in Textile Field

SHI Tai¹, LI Yonggui^{1,2,3,*}, LU Qilin^{2,3}, LIU Zhengjiang¹, CHEN Lijun⁴

(1. College of Textile and Light Industry, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China;

2. Fujian Key Laboratory of Novel Functional Textile Fibers and Materials, Fuzhou 350108, China;

3. Clothing and Design Faculty, Minjiang University, Fuzhou 350108, China;

4. Changle Heng Shen Synthetic Fiber Co., Ltd., Fuzhou 350207, China)

Abstract: As an emerging nano-fiber material, nano-cellulose not only retains the characteristics of cellulose itself, but also has the properties of nanomaterials. It has attracted much attention due to its excellent mechanical properties and practicability. Nanocellulose can not only improve the mechanical properties of textile materials, but also endow textile materials with functional properties, such as antibacterial, water and oil repellency, UV resistance and so on. The basic classification, preparation methods, structure and properties of nanocellulose and its application in textile materials were described, which can promote the application of nanocellulose and the development of new textile products.

Key words: nanocellulose; preparation; structure; performance; textile material; application