

# 纳米纤维素凝胶的研究进展

陈勤, 周荣, 杨繁, 卢琳娜, 卢麒麟\*

(闽江学院 服装与艺术工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 纳米纤维素作为一种天然的新型纳米材料, 具有高强度、高结晶度、高透明性、高弹性模量等特性, 同时具备天然纤维素的生物相容性、生物可降解性, 在凝胶领域具有广阔的应用前景。以纳米纤维素构筑成的纳米纤维素凝胶具备强吸水锁水性、生物相容性等优点, 在诸多领域有潜在的应用价值。综述了纳米纤维素的特性及其用于纳米纤维素凝胶的制备, 以及纳米纤维素凝胶在工业、建筑、医学研究、电子等领域的应用, 阐述了纳米纤维素凝胶的制备及应用的研究进展。对纳米纤维素凝胶的制备、功能改性及应用方面存在的问题进行了分析, 同时, 对纳米纤维素凝胶的应用前景进行了展望。

**关键词:** 纳米纤维素; 水凝胶; 气凝胶; 制备; 应用

**中图分类号:** O636.1+1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-0356(2020)12-0009-05

纳米纤维素及其衍生物作为一种来源丰富、理化性质良好、绿色可降解的天然高分子材料, 在纺织、电子光学器件、医药等领域有重要的应用。调控纳米纤维素分子, 选择性组装功能性纳米纤维素衍生物及其复合材料, 成为纤维素材料科学的重要研究内容。纳米纤维素分子链表面含有丰富的羟基, 通过酯化、醚化、接枝共聚、交联反应等为其改性制备提供活性反应平台; 晶态纳米纤维素结构有序排列, 高度结晶赋予了其优异的手性向列光学性能; 纳米纤维素构筑的凝胶所具有的多孔纳米级结构为其在吸附、催化等领域的应用提供了基础。

## 1 纳米纤维素

纤维素的研究已经延续了 100 多年, 人们对其结构、性质、反应机制、衍生物等不断地探索和研究, 使纤维素融入现在的科技生活中。纳米纤维素是在一维空间上达到纳米尺寸的纤维素, 可以通过对纤维素进行酸解、酶解、氧化等方法来制备纳米纤维素。

### 1.1 分类

纳米纤维素按照原料和制备方式的不同可以分为纳米纤维素晶体(Nanocrystalline cellulose, NCC)、微纤化纤维素(Microfibrillated cellulose, MFC)和细菌纳米纤维素(Bacterial nanocellulose, BNC), 具体见表 1。

表 1 纳米纤维素的分类

名称	主要制备方法	纳米尺寸	特点
NCC	酸解法(硫酸、盐酸、磷酸)、酶解法	1~100 nm	刚性棒状纤维素, 纤维素 I 的晶型
MFC	机械法(高压均质、静电纺丝法、TEMPO 氧化法、超声波)	5~60 nm	几个微米的微原纤维或纤维素聚集体
BNC	生物培养法(细菌分解)	20~100 nm	带状原纤维, 结晶度高, 可形成稳定三维网络结构

### 1.2 制备方法

#### 1.2.1 化学法

纤维素聚集结构是结晶区和无定形区沿着纤维素链相互交错体系, 酸解法就是在适当浓度酸的作用下使纤维素中的糖苷键断裂, 破坏无定形区和次结晶区, 保留紧密有序排列的结晶区, 降低纤维素的聚合度得到纤维素悬浮液, 再通过多次离心、洗涤、透析制备得到直径为 5~100 nm 的纳米纤维素。最常见的无机酸降解溶剂是硫酸。硫酸与纤维素表面丰富的 -OH 反应得到带负电的硫酸根, 可提高纤维素在溶液中的分散性, 其中原料以及酸的浓度, 反应温度和反应时间是酸解法的主要影响因素。Beck-Candanedo<sup>[1]</sup> 验证了水解时间加长, 温度升高(过高会碳化), 酸的配比越大, 制备出的纳米纤维素尺寸分布越窄。TEMPO(2,

收稿日期: 2020-08-26; 修回日期: 2020-09-01

基金项目: 2019 年福建省中青年骨干教师教育科研项目(Grant No. JAT190597); 福州市科技计划项目(Grant No. 2019-S-63); 2019 年闽江学院“校长基金”项目(103952019139; 103952019145); 闽江学院 2019 年度科研项目(Grant No. MYK19009); 闽江学院 2019 年创新创业创造教育专项课题(Grant No. YB009); 闽江学院引进人才项目(Grant No. MJY18010)

作者简介: 陈勤(1998-), 男, 本科在读。

\* 通信作者: 卢麒麟(1989-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为生物质功能纤维及材料, E-mail: qilinlu@njnu.edu.cn.

2,6,6-四甲基哌啶-氮-氧化物)/NaBr/NaClO 选择性氧化体系,在以水为介质的弱酸性条件下,BrO<sup>-</sup>与TEMPO反应生成亚硝鎗离子,将纤维素表面的一OH氧化为一COOH,然后再通过后处理得到尺寸均一、分散性好的纳米纤维素纤丝。该氧化法的优点在于反应条件温和,步骤简单,符合绿色化学生产,TEMPO可以通过脱盐处理。杨建校等<sup>[2]</sup>以漂白针叶木浆为纤维原料,在TEMPO/NaClO/NaBr的氧化体系下制备得到氧化纤维素纳米纤维。

### 1.2.2 物理法

物理法制备纳米纤维素主要有高压均质法、静电纺丝法、溶胀超声法等。与化学法相比,物理法主要依靠高强度的剪切力和冲击力使纤维素断裂、开纤,因此所制备的纳米纤维素的粒径分布较宽。

高压均质法是纤维素悬浮液在高压环境下流过均质腔产生空穴效应和受到瞬间高压剪切力,被超微细化后制得纳米纤维素,该过程需循环重复多次。高压均质法耗能较大,且喷嘴部分易被堵塞,需要对纤维素进行预处理。徐甜甜<sup>[3]</sup>以阔叶木浆和针叶木浆为原料,使用纤维素内切酶分别对其进行酶解处理,结合高压均质法制备纳米纤维素,得到阔叶木为原料最佳反应条件为:酶解时间3.4 h,酶用量1.0 ml,均质次数20次;针叶木为原料最佳反应条件为:酶解时间3.6 h,酶用量0.9 ml,均质次数27次。

静电纺丝法是纤维素溶液在静电力的牵引下形成射流,不断地被拉丝变细最后形成小于100 nm的纳米纤维素。Kim等<sup>[4]</sup>使用LiCl/DMAC及NMMO溶剂体系溶解纤维,然后采用静电纺丝法得到了直径在150~500 nm的纤维素。

### 1.2.3 生物法

细菌纤维素是微生物在特定的实验条件下生产出的一种具有超细网状结构的高分子聚合物,每一丝状纤维素都有几个数量级的微纤维组成,宽度在2~8 nm。可以产生细菌纤维素的微生物包括木醋杆菌、根癌农杆菌和根瘤菌等。1976年英国生物学家Brown<sup>[5]</sup>首次对木醋杆菌合成纤维素的过程进行了探究描述。Somayeh等<sup>[6]</sup>培养Gluconacetobacter xylinus菌株制备成细菌纤维素薄膜,与硫酸盐纸浆混合加工成手抄片,形成负载可溶性酚醛树脂的复合材料。马英辉等<sup>[7]</sup>探讨了菌株Gluconacetobacter HC-N以秸秆水解液培养作为培养皿,采用动静两步法制备细菌

纤维素,产量高达4.27 g/L,并且通过试验证明了LBKP添加到细菌纤维素膜中有利于改善纸张的耐磨度、断裂强度等。生物法制备细菌纤维素可以很好地调控纤维素的晶体结构、粒径分布等,但是制备过程较为复杂,试验条件要求高,所耗费的成本大,不适合工业化生产。

## 2 水凝胶

近年来,水凝胶作为一种功能化衍生的生物质基质材料,被赋予独特的性能,如强吸水锁水性、生物相容性、化学可修饰性、响应性、吸附性等,在医学、生物、电子、环保领域具有广阔的发展空间和极大的利用价值。水凝胶根据合成原料的不同可分为天然高分子水凝胶和合成高分子水凝胶。天然高分子凝胶一般是由明胶、纤维素、海藻酸钠、淀粉、壳聚糖等为原料,合成高分子水凝胶则由聚酯、聚丙烯酸、聚丙烯酰胺等通过二硫键或亚胺键形成。纤维素水凝胶是纤维素大分子链通过共混法或冻融法等进行物理缠绕,或者在光热、辐射、交联剂的作用下产生化学交联形成稳定的三维网络状结构,具有高孔隙度、吸水溶胀、机械强度高、自我修复性、吸附性、可逆形变等优点。

### 2.1 水凝胶的制备

纤维素水凝胶的制备方法按照引发体系的不同,可大致分为3种,即化学引发法、辐射引发法和等离子体引发法。化学引发法是通过加入硝酸铈铵/硝酸、过硫酸铵/硫代硫酸钠、过硫酸钾等引发剂,诱导纤维素大分子链形成自由基并扩散,聚合物链再与单体发生接枝共聚,形成三维网状水凝胶。张修强等<sup>[8]</sup>将微晶纤维素硫酸水解制得CNCS,以硝酸铈铵(CAN)为引发剂,诱导OEGMA475单体与CNCS表面发生接枝共聚,然后将共聚物CNCS-POEMA与 $\alpha$ -环糊精( $\alpha$ -CD)在水溶液中反应得到具有温度敏感特性,生物相容性良好的超分子水凝胶。辐射引发包括 $\gamma$ 射线辐射、电子束辐射、紫外光辐射和微波辐射,比较环保绿色,但成本较高,只适用于实验室小型制备。Fekete等<sup>[9]</sup>通过 $\gamma$ 辐射(<sup>60</sup>CO $\gamma$ 源)制备了超吸水性水凝胶材料。等离子体引发是指辉光放电形成等离子体(GDEP),并形成大量的HO·和H·自由基,然后引发单体发生接枝共聚。

纤维素水凝胶的制备还可分为物理交联法和化学交联法。物理交联法制备水凝胶是天然高分子链在光

热、辐射、超声等条件下,通过多重氢键、静电引力、离子键等主-客体相互作用、超分子相互作用形成的可逆性水凝胶。李建昱等<sup>[10]</sup>为了改善传统PVA水凝胶溶胀性低和热稳定性差的缺点,以PEG为致孔剂,CNFs为增强相,利用冻融法制备了具有网络互穿结构的多孔复合水凝胶,如图1所示,纯PVA水凝胶的孔隙直径大,密度小,随着PEG的加入,孔隙密度大且均匀,该PEG/CNFs/PVA复合水凝胶在食品包装中可以避免长时间运输带来湿度和温度变化不稳定而导致的食品腐坏。物理交联法制备水凝胶虽然环保,但是水凝胶的力学性能较低,而化学交联法是通过动态化学键自由基聚合反应接枝形成的水凝胶,在结构上化学交联键更稳定,表面基团更丰富,更容易与其他活性基团反应,有利于制备响应性智能水凝胶。

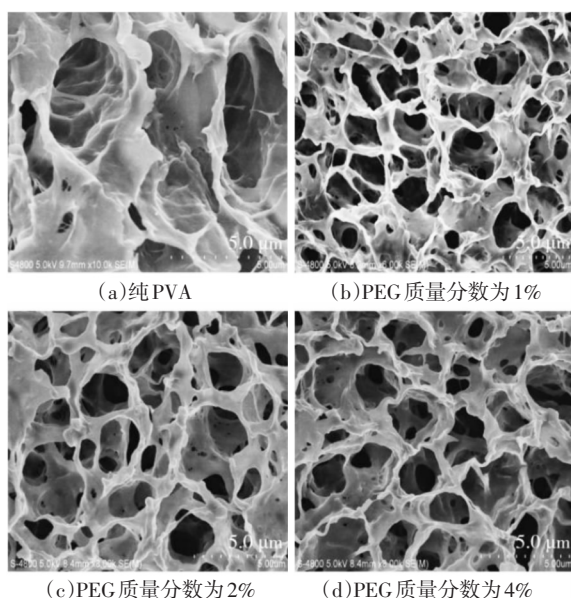


图1 多孔复合水凝胶断面微观形貌

### 3 气凝胶

气凝胶是在水凝胶的基础上通过干燥来去除溶胶中的溶剂但又不破坏其纳米级多孔结构的轻质材料。气凝胶的制备一般分为2步,首先通过溶胶-凝胶法制备出凝胶,然后通过干燥法,保持三维网状结构去除凝胶中的溶剂得到气凝胶。常用的干燥方法有临界干燥法和冷冻干燥法。临界干燥法是在一定的温度和压力下将溶剂表面压力降至最低形成临界,从而从三维网状结构中脱落。冷冻干燥法是通过形成冰晶,以升华的方式去除溶剂。气凝胶又分为无机气凝胶、有机气凝胶、有机-无机气凝胶以及碳气凝胶,有机气

凝胶的机械强度更高。由于超高孔隙率、低导热性、表面积大、密度低、富含羟基,可用作吸附材料、绝热材料、抗菌材料、生物传感材料等。水凝胶还能作为模板基与其他功能性聚合物合成复合型材料,如复合纤维/二氧化硅气凝胶是具有优良隔热效果的复合材料,Bo等<sup>[11]</sup>将纤维素气凝胶(CA)和金属有机骨架(MOF)2合成一种吸附性材料来去除工业重金属离子中的水分子。

## 4 凝胶的应用

### 4.1 工业应用

纤维素是一种来源丰富,可降解的生物基材料。纤维素凝胶表面积大、孔隙率高、含有的特殊的表面官能团(如-OH、-NH<sub>2</sub>、-SO<sub>3</sub>H、-COOH)能通过络合作用消除重金属离子,可通过静电作用吸附染料中的甲基蓝等,所以可用于污水处理中的吸附材料。

刘学等<sup>[12]</sup>通过接枝共聚法使羧甲基纤维素与β-环糊精交联,引入Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>粒子,制备了具有高吸附性能的磁性羧甲基纤维素基水凝胶(MHG)。通过FTIR、SEM等表征探究了MHG在不同温度和不同Cu<sup>2+</sup>溶液质量浓度中不同的吸附效果,发现MHG对蒸馏水的吸附法效果良好,可达5767 mg/g。在不同质量浓度的Cu<sup>2+</sup>溶液中,吸附量随着Cu<sup>2+</sup>溶液质量浓度的升高而增大;当吸附温度为20~40℃时,MHG对Cu<sup>2+</sup>的吸附量先升高后趋于平稳。吸附峰值为465 mg/g,由此证明MHG是一种优良的重金属离子吸附剂。李倩等<sup>[13]</sup>以小麦秸秆为原料,离子液体为溶剂制备了纤维素水凝胶球(SCHBs),并对水中的Cd(II)进行吸附测试,结果表明,Cd(II)被再生离子纤维素水凝胶吸附的最大吸附量达到95.62 mg/g,吸附等温线符合Langmuir模型和吸附动力学复合二级动力学模型。纤维素基碳气凝胶作为高孔隙度、高表面积的新型吸附材料,在降低成本、提高净化效果和防止二次污染上有显著的优势。徐春霞<sup>[14]</sup>用水稻秸秆纤维素纳米纤维(CNF)为原料制备出高孔隙率、强吸附性的CNF气凝胶,对吸收染料废液中的亚甲基蓝有显著效果,CNF气凝胶薄膜在温度为25℃和碱性环境下,吸附能力达到最高值,可吸附亚甲基蓝196.08 mg/g。程友亮<sup>[15]</sup>以原生木浆纤维素为原料,石墨烯量子点(GQDs)为填充物制备出复合型纤维素气凝胶,和未加入GQDs的气凝胶相比,对甲基蓝的吸附率从5.85%增加到了

11.22%。陈俊峰<sup>[16]</sup>制备了氮掺杂纤维素基碳气凝胶(N-CCA),并对染料废水中的亚甲基蓝和刚果红进行吸附测试,发现尿素改性后的气凝胶比表面积增加,多孔结构稳定,对阴离子刚果红的吸附能力大于阳离子吸附,经过反复吸附循环试验,吸附率达到98%以上。

#### 4.2 建筑行业

纤维素气凝胶还能作为隔热阻燃材料在建筑材料或电器中的热绝缘体中使用,通过与其他聚合物基团结合降低密度,提高孔隙率,减少热导系数来大大增强隔热阻燃性能。复合纤维素/SiO<sub>2</sub>气凝胶比普通绝热材料的热导率低。党丹旻<sup>[17]</sup>通过冷冻干燥法制备了纳米蒙脱土(MMT)/纳米纤维气凝胶,有效地解决了纤维素易燃的问题,改善了气凝胶力学性能、热稳定性以及增加了极限氧指数。试验结果表明,MMT质量分数在42.9%~50%之间,复合气凝胶的热阻性能最佳。Han等<sup>[18]</sup>为了提高纤维素的导热系数,改善其阻燃性能,用废弃棉为原料制备了纳米纤维素溶液,以纳米Mg(OH)<sub>2</sub>粒子作为阻燃剂,通过冷冻干燥制备了纳米Mg(OH)<sub>2</sub>/纳米纤维素气凝胶。该复合纤维素气凝胶能在离开火焰40s内熄灭,是绿色环保的阻燃材料。陈艳果<sup>[19]</sup>在纤维素黏液中添加5%的氧化石墨烯制备了多孔气凝胶,由于氧化石墨烯具有催化成碳能力,提高了复合气凝胶的残碳数量、紧密程度,从而增强了气凝胶的阻燃性。

#### 4.3 医学方面

纳米纤维素具有优异的生物相容性和可降解性,也被广泛用于医学领域。普通棉纱布的抗感染性一般,渗出液管理差,无法为伤口的愈合提供一个湿润的环境。BNC具有强吸水溶胀性,可以用作敷料作为医用材料。张丽等<sup>[20]</sup>采用旋转浸渍法分别制备了纯BNC水凝胶、BNC/海藻酸钠(SA)水凝胶、BNC/SA/PVA水凝胶,通过力学、抗菌、形貌等测试,发现BNC/SA/PVA水凝胶具有广谱抗菌性能和良好的促凝血效应,在功能性敷料领域应用潜力巨大。潘晶晶等<sup>[21]</sup>先将乙基纤维素/明胶以质量1:1的比例通过静电纺丝的技术制备了纳米纤维素,然后以海藻酸钠(Sodium Alginate, SA)和氯化钙(CaCl<sub>2</sub>)作为交联剂,制备了高孔隙率、隔热性能良好的EG11-SA、EG11-SA/Ca气凝胶,并添加不同质量分数的纳米氧化锌EG11-SA/Ca作为气凝胶结构中的抑菌物质。分析对比结果发现,质量分数为2%的添加量能够杀死大量大肠杆菌、金黄

色葡萄球菌,得到抑菌效果。水凝胶还能在药物控释系统作为药物载体,水凝胶的孔隙多,吸水溶胀性强,可以控制药物释放浓度和速率,有效提高药物利用率。刘宝联<sup>[22]</sup>为了改善药物“突释”现象,针对吲哚美辛(IND)进行缓释药物的研究,以针叶木浆板为原料通过TEMPO/NaClO/NaClO<sub>2</sub>体系氧化以及高压均质法辅助加工、高碘酸钠选择性氧化、Schiff碱反应引入氨基和羧基得到改性纳米纤维素(NFC-m-Lysine),氨基和羧基的引入增强了纤维素的热稳定性以及赋予BNC对不同pH值环境的响应反应。然后以阳离子瓜尔胶(CGG)和NFC-m-Lysine为原料制备出阳离子瓜尔胶/赖氨酸改性纳米纤维素混合水凝胶(CGG/NFC-m-Lysine水凝胶),将IND负载到水凝胶上进行药物突释系统试验,结果表明,IND的释放时间和释放速率得到有效的提高。行云逸等<sup>[23]</sup>探究了以菠萝果肉纤维素(Pineapple pulp cellulose, PPC)为原料,以丙烯酸为改性单体制备的pH敏感性水凝胶(Pineapple pulp cellulose hydrogel-Acrylic acid, PPCH-AA)作为负载益生菌的载体在模拟胃液和肠液中的缓释行为。

#### 4.4 电子应用

导电聚合物(如碳纳米管、石墨烯)与纤维素基结合可以制备具有高力学性能的化学活性导电复合材料;多孔、高表面积的纤维素碳气凝胶具有优异的电解质吸收性能,可以制备全固态柔性电化学电容器(超级电容器)。超级电容器是具有大比电容、大功率密度、可超长循环使用的高效能量储存装置,其电化学性能取决于电极材料和电解液。多孔碳是目前研究最多的碳电极材料,孔结构决定双电层电容器的电荷储能。碳气凝胶具有比天然纤维气凝胶优良的导电性,不同碳材料的孔结构决定超级电容器的比热容。Hu等<sup>[24]</sup>以棉短绒为原料,NaOH/尿素为溶剂破坏纤维素链之间有序的结晶结构,形成Na-纤维素络合物和碱离子水合物,其中尿素辅助纤维素溶解并抑制其再聚集结晶,制备出II型纤维素后通过临界干燥法得到多孔级纤维素碳气凝胶。Cheng等<sup>[25]</sup>利用氮气碳化棉花得到碳纤维气凝胶,KOH/碳气凝胶体系活化处理后其经过电化学测试发现,电流为1A时比电容为283F/g,100A时为224F/g。

高导电性聚合物的引入可以提高碳气凝胶的比电容,Weng等<sup>[26]</sup>将氧化石墨烯纳米片与纤维素纸混合,在1M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>电解溶液中比电容能达到81mF/cm<sup>2</sup>,

在 LiPF<sub>6</sub> 电解液中比热容为 252 F/g。Zheng 等<sup>[27]</sup>为了解决 NiS NPs 的聚集和提高其电导率,通过聚合、碳化、一步溶剂热反应等方法,制备了 NiS 掺杂的碳纤维气凝胶(N-CFA)纳米复合材料。采用循环伏安法、恒电流放电法和交流阻抗法对制备的 NiS/N-CFA 纳米复合材料的电化学性能进行了研究。优化后的 NiS/N-CFA 纳米复合材料在充放电电流密度为 1 A/g 时的比电容为 1 612.5 F/g,在 20 A/g 时的速率电容保持率为 66.7%。NiS/N-CFA 纳米复合材料优异的电化学性能使其有望成为超级电容器的电极材料。

## 5 结语

纳米纤维素可以作为模板制备成新型材料,还可以通过改性赋予其优异的性能,可广泛应用于国民生产的各个领域,但现有的研究中还存在一些难以攻克的难题。第一,纳米纤维素在制备过程中分散性差,易聚集,溶剂回收成本高。第二,纳米纤维素改性工艺的改进,在降低成本且符合工厂生产上需要进一步研究。第三,纤维素凝胶的制备、改性以及应用的研究相对不足,需要探索在溶胶-凝胶与溶剂的交换过程中减少工艺步骤和降低成本,减少有毒有害化学试剂的使用,最大可能实现工业化生产的新方法。

## 参考文献:

- [1] BECK-CANDANEDO S, ROMAN M, GRAY D G. Effect of reaction conditions on the properties and behavior of wood cellulose nanocrystal suspensions[J]. *Biomacromolecules*, 2005, 6(2):1 048-1 054.
- [2] 杨建校,章丽萍,左宋林,等. TEMPO 氧化法制备氧化纤维素纳米纤维[J]. *东北林业大学学报*, 2011, 39(3):96-98,105.
- [3] 许甜甜,张春辉,张福山. 酶处理和机械处理对微纳纤维素粒径影响的研究[J]. *造纸科学与技术*, 2019, 38(2):38-43.
- [4] KIM C W, FREY M W, MARQUEZ M, *et al.* Preparation of submicron-scale electrospun cellulose fibers via direct dissolution[J]. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 2005, 43(13):1 673-1 683.
- [5] BROWN R M, WILLISON J H, RICHARDSON C L. Cellulose biosynthesis in *Acetobacter xylinum*: visualization of the site of synthesis and direct measurement of the in vivo process[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1976, 73(12): 4 565-4 569.
- [6] SOMAYEH S, TAGHI T, MAHDI M, *et al.* Multilayer bacterial cellulose/resole nanocomposites: Relationship between structural and electro-thermo-mechanical properties[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 120: 2 115-2 122.
- [7] 马英辉,李利军,卢美欢,等. 细菌纤维素的制备及其对 LBKP 性能的影响[J]. *中国造纸*, 2016, 35(6):22-27.
- [8] 张修强,任素霞,朱金陵,等. 基于纳米纤维素超分子水凝胶的制备及性能表征[J]. *河南科学*, 2016, 34(11): 1 812-1 817.
- [9] FEKETE T, BORSA J, TAKACS E, *et al.* Synthesis of carboxymethylcellulose/starch superabsorbent hydrogels by gamma-irradiation [J]. *Chemistry Central Journal*, 2017, 11(1): 46.
- [10] 李健昱,徐朝阳,周欢,等. 多孔 PVA/CNFs 复合水凝胶的制备与性能[J]. *包装工程*, 2016, 37(15):56-60.
- [11] BO S, REN W, LEI C, *et al.* Flexible and porous cellulose aerogels/zeolitic imidazolate framework (ZIF-8) hybrids for adsorption removal of Cr(IV) from water[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2018, 262:135-141.
- [12] 刘学,张璐,高鸣霞,等. 磁性羧甲基纤维素基水凝胶的制备及其对 Cu<sup>2+</sup> 的吸附行为[J]. *东北林业大学学报*, 2020, 48(4): 109-113,124.
- [13] 李倩,王付栋,苏园,等. 一种秸秆纤维素水凝胶-CdS 纳米量子点复合物及其制备方法:107915867A[P]. 2018-04-17.
- [14] 徐春霞,降帅,韩阜益,等. 纤维素纳米纤维气凝胶制备及其对亚甲基蓝的吸附性能[J]. *纺织学报*, 2019, 40(10):20-25.
- [15] 程有亮,张庆玲,方长青. 一种香烟过滤嘴/石墨烯复合材料的制备方法及其用途:107946082A[P]. 2018-04-20.
- [16] 陈俊峰. 氮掺杂纤维素基碳气凝胶对染料吸附的影响[J]. *中国造纸*, 2019, 38(9):26-31.
- [17] 党丹旸,崔灵燕,王亮,等. 纤维素纳米纤维/纳米蒙脱土复合气凝胶制备及其结构与性能[J]. *纺织学报*, 2020, 41(2):1-6.
- [18] HAN Y, ZHANG X, WU X, *et al.* Flame retardant, heat insulating cellulose aerogels from waste cotton fabrics by in situ formation of magnesium hydroxide nanoparticles in cellulose gel nanostructures[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2015, 3(8):1 853-1 859.

(下转第 18 页)

## Development and Research Status of Super-soft Spinning Technology Based on False Twist Device

ZHOU Ya-nan, WANG Jin-mei\*, ZHANG Hui

(School of Textile Science and Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The ultra-soft spinning technology was a new spinning technology based on the low-torque spinning technology. This technology used a false twist device to adjust the tension balance of the yarn and improve the problem of residual torque in the yarn. The false twisting device could be roughly divided into friction false twisting device, twisting false twisting device, mechanical center rotating false twisting device, and airflow false twisting device. After analysis, the current situation of promotion difficulties could be improved from three aspects: reducing costs, providing policies and upgrading technology, to promote the progress of the textile industry and realize the industrialization.

**Key words:** super soft spinning; low torque spinning; false twisting device; residual torque; industrial promotion

(上接第 13 页)

- [19] 陈艳果, 李志伟, 李小红, 等. 纤维素/氧化石墨烯复合气凝胶的制备及其阻燃性能研究[J]. 中国塑料, 2019, 33(1):33-39.
- [20] 张丽, 袁海彬, 陈琳, 等. 细菌纳米纤维素复合抗菌水凝胶敷料的性能研究[J]. 纤维素科学与技术, 2019, 27(2):31-38, 58.
- [21] 潘晶晶, 王京阳. 玩出来的新材料——气凝胶[J]. 自然杂志, 2019, 41(4):235-241.
- [22] 刘宝联. 赖氨酸改性纳米纤维素基水凝胶的制备及对吡喹啉美辛的缓释行为研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [23] 行云逸, 黄惠华. 菠萝果肉纤维素水凝胶的制备及对益生菌的包埋与缓释分析[J]. 食品科学, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200320.1559.002.html>.
- [24] HU C C, CHANG K H, LIN M C, *et al.* Design and tailoring of the nanotubular arrayed architecture of hydrous RuO<sub>4</sub>[J]. Nano Letters, 2007, 6(12):2 690-2 695.
- [25] CHENG H, GU B, PENNEFATHER M P, *et al.* Cotton aerogels and cotton-cellulose aerogels from environmental waste for oil spillage cleanup[J]. Materials & Design, 2017, 130(9):452-458.
- [26] WENG Z, SU Y, WANG D W, *et al.* Graphene-cellulose paper flexible supercapacitors[J]. Advanced Energy Materials, 2011, 1(5):917-922.
- [27] ZHENG Q, CAI Z, MA Z, *et al.* Cellulose nanofibril/reduced graphene oxide/carbon nanotube hybrid aerogels for highly flexible and all-solid-state supercapacitors[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(5):3 263-3 271.

## Research Progress of Nanocellulose Gel

CHEN Qin, ZHOU Rong, YANG Fan, LU Lin-na, LU Qi-lin\*

(Clothing and Design Faculty, Minjiang University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** Nanocellulose, as a new natural nanomaterial, had the characteristics of high strength, high crystallinity, high transparency, high elastic modulus and so on. At the same time, it had the biocompatibility and biodegradability of natural cellulose, so it had broad application prospect in the field of gel. Nanocellulose gel made of nanocellulose had the advantages of strong water absorption, water lock, biocompatibility and so on, and had potential application value in many neighboring areas. The properties of nanocellulose and its application in the preparation of nanocellulose gel were reviewed, and the application of nanocellulose gel in industry, construction, medical research, electron and other fields were reviewed. Research progress in preparation and application of nanocellulose gel was described. The problems in the preparation, functional modification and application of nanocellulose gel were analyzed, and the application prospect of nanocellulose gel was forecasted.

**Key words:** nanocellulose; hydrogel; aerogel; preparation; application