

棉纤维在气敏传感领域的应用研究*

吴钊峰^{1,2}, 沈超^{1,2}, 张炜钰^{1,2}, 王龙^{1,2}, 张宇智^{1,2}, 段海明^{1,2†}

(1. 新疆大学物理科学与技术学院, 新疆 乌鲁木齐 830017; 2. 新疆固态物理与器件重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要: 首先, 介绍了棉花和气敏传感器的研究现状; 其次, 围绕棉纤维及其制品具有可再生、易降解、气体通透性好、成本低等优点, 重点介绍了棉纤维作为气敏传感材料模板、传感基底和传感材料前体物在气敏传感领域的应用; 最后, 对棉纤维在气敏传感器领域的应用研究进行了总结和展望。

关键词: 棉纤维; 气敏传感器; 传感材料; 传感基底; 气敏传感材料模板

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2022.06.14.0002

中图分类号: O64 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2023)02-0191-05

引文格式: 吴钊峰, 沈超, 张炜钰, 王龙, 张宇智, 段海明. 棉纤维在气敏传感领域的应用研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2023, 40(2): 191-195.

英文引文格式: WU Zhaofeng, SHEN Chao, ZHANG Weiyu, WANG Long, ZHANG Yuzhi, DUAN Haiming. Application of cotton fiber in the field of gas sensing[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2023, 40(2): 191-195.

Application of Cotton Fiber in the Field of Gas Sensing

WU Zhaofeng^{1,2}, SHEN Chao^{1,2}, ZHANG Weiyu^{1,2}, WANG Long^{1,2},
ZHANG Yuzhi^{1,2}, DUAN Haiming^{1,2}

(1. School of Physics and Technology, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Solid State Physics and Devices, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830017, China)

Abstract: Firstly, the research status of cotton and gas sensor is introduced, and then we focuses on the application of cotton fiber as precursor of sensing material template, sensing substrate and gas sensing material in the field of gas sensing around the advantages of cotton fiber and its products, such as renewable, easy to degrade, good gas permeability and low costs. Finally, the application of cotton fiber in the field of gas sensors is summarized and prospected.

Key words: cotton fiber; gas sensors; sensing material; sensing substrate; sensing material template

0 棉花和棉纤维化学

棉花是关系国计民生的重要战略物资, 也是仅次于粮食的第二大农作物^[1-2]. 我国是世界上主要产棉国之一, 目前我国的棉花产量已经进入世界前列. 我国棉花种植遍布全国, 形成了以西北内陆、黄河流域、长江流域为代表的三大产棉区^[3-4]. 棉花以纤维的形式存在, 主要含有纤维素、多缩戊糖、蛋白质、脂肪和蜡质等物质^[5]. 成熟的棉花纤维素含量接近100%, 为天然的纯纤维素来源. 纤维素是自然界中分布最广、含量最多的一种碳水化合物, 由44.4%碳、6.2%氢和49.4%氧元素组成. 一般来说, 棉纤维的直径约为10 μm , 长度约为几厘米, 是由纤维素大分子通过分子间的氢键作用形成的, 在一定条件下, 微米尺度的棉纤维可以分解为纳米尺度的纤维素纳米晶^[5]. 随着科学技术的发展, 棉花的应用领域不断扩展. 近年来, 棉纤维的应用从传统的织物、服装和棉被等领域开始扩展到一些新兴领域, 如储能、传感、电磁屏蔽、污水治理和气体吸附等, 其科技含量和经济附加值都得到显著提升^[6-11]. 基于近年来棉花产业的新变化和新应用, 本文聚焦棉纤维在气敏传感领域的新应用和新进展, 从传感材料模板、传感基底和传感材料前体物三个方面介绍棉纤维在气敏传感领域的应用研究现状.

* 收稿日期: 2022-06-14

基金项目: 国家自然科学基金“COFs基仿生结构柔性爆炸物传感器的构效关系研究”(21964016); 新疆维吾尔自治区高校科研计划“棉花基碳纤维电子鼻的研发及其构效关系研究”(XJEDU2020Y004); 新疆维吾尔自治区自然科学基金“面向臭氧及其前体物检测的柔性传感器构效关系研究”(2019D01C019).

作者简介: 吴钊峰(1983-), 男, 博士, 副教授, 主要从事气敏传感器的研究, E-mail: wuzf@xju.edu.cn.

† 通讯作者: 段海明(1970-), 男, 博士, 教授, 主要从事计算凝聚态物理及计算材料科学的研究, E-mail: dhm@xju.edu.cn.

1 棉纤维在气敏传感领域的应用研究现状

气敏传感器是将采取到的被测量信息,按一定规律转换成电信号,是人类储存和传达信息的装置^[12].气敏传感器在国防安全、工业生产、矿山开采、健康监控、大气污染预警、污染溯源等方面发挥着重要作用^[13].随着物联网、5G通信技术的飞速发展以及人们对健康的日益重视,气敏传感器的作用也逐渐得到重视.一般而言,气敏传感器由传感材料和传感基底两部分构成,两者都对传感器的传感性能发挥着重要作用^[14-15].因此,可以从传感材料和传感基底两个方面来改善气敏传感器的性能.

1.1 棉纤维在气敏传感材料模板上的应用研究

棉纤维既具有一维的形貌结构,又是天然可再生的生物大分子,在高温氧化作用下易分解成二氧化碳和水,不会产生有毒气体和其它副产物.因此,棉纤维可以用作合成气敏传感材料的绿色模板.Wang等^[16]以棉纤维为模板,先在棉纤维上生长一层 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ 复合物,而后在空气环境下经过煅烧除去棉纤维模板,得到了直径 $6\sim 8\ \mu\text{m}$ 、管壁厚度 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 的 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ 复合物中空微管.由于中空多孔结构为目标气体分子的吸附和脱附提供了丰富的通道,基于 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ 复合物中空微管的气敏传感器对包括丙酮在内的几种常见气体显示出了快速、灵敏的检测能力.Yan等^[17]使用棉花作为模板分别制备了外径 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 、管壁厚度约 $2\ \mu\text{m}$ 的 ZnO 和 CeO_2/ZnO 多孔中空微管.与纯 ZnO 相比, CeO_2/ZnO 复合材料由于异质结结构的存在,在 $260\ \text{°C}$ 下对 $2\times 10^{-4}\ \text{mL/m}^3$ 的乙醇蒸气表现出了更高的响应,响应值达到46,其对乙醇蒸气的检测限达到 $5\times 10^{-6}\ \text{mL/m}^3$.Ma等^[18]以脱脂棉纤维为模板,利用浸渍煅烧两步法制备了长 $50\sim 70\ \mu\text{m}$ 、直径 $5\sim 6\ \mu\text{m}$ 、管壁厚度约 $1\ \mu\text{m}$ 的 In_2O_3 多孔微管.基于 In_2O_3 多孔微管的传感器对 Cl_2 显示出了良好的选择性和较高的灵敏度.由于多孔微管结构避免了 In_2O_3 纳米粒子的团聚,增大了比表面积,故 In_2O_3 多孔微管在 $200\ \text{°C}$ 下对 $1\times 10^{-5}\ \text{mL/m}^3\ \text{Cl}_2$ 的响应值达到1.051,是 In_2O_3 颗粒响应值的25倍.Wu等^[19]以脱脂棉纤维为模板,采用简单的浸渍煅烧法制备了单斜晶系 $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$ 多孔微管,并研究了煅烧温度对微管结构和气敏性能的影响,通过调控煅烧温度实现了对 $\text{Fe}_2(\text{MoO}_4)_3$ 多孔微管结构和气敏性能的调控.相似的,Song等^[20]和Zhu等^[21]分别采用棉花纤维作为模板,通过高温煅烧制备了中空结构的 LaFeO_3 和 SnO_2 传感材料,并且研究了煅烧温度对传感材料中空结构和气敏性能的影响.这些研究表明利用棉纤维作为模板,通过简单的浸渍煅烧法,可以制备出具有多孔结构的微米管状气敏传感材料,有效地阻止了纳米尺度传感材料的团聚,增大了传感材料的比表面积,实现了对传统传感材料气敏性能的有效调控和优异的检测效果.

1.2 棉纤维在气敏传感基底上的应用研究

传感材料一般可分为无机材料、有机材料和复合材料三种.这些传感材料多为微米或纳米粉体,需要刚性(陶瓷)或柔性(橡胶和塑料)的传感基底作为支撑材料,连同电极一起才能构成气敏传感芯片^[22-24].目前,包括陶瓷、塑料和橡胶在内的大多数传感基底都是难降解的,例如常见的塑料需要450年才能分解^[24].然而,许多传感器和柔性显示器的平均寿命仅为18个月,这些电子器件失效后会产生大量的电子垃圾^[25].同时,这些传统传感基底的气体通透性较差,一定程度上阻碍了传感材料与目标气体的有效接触,从而限制了气敏传感芯片气体传感性能的改善^[26].棉纤维或棉纤维织物具有可再生、易降解、气体通透性好、柔韧度高和成本低等优点,非常适合用作柔性气敏传感基底^[27].近年来,棉纤维或棉纤维织物作为气敏传感基底的研究报道越来越多^[28-29].Zhang等^[28]将氧化石墨烯(GO)和Ag纳米粒子负载到棉织物上,制备出了多功能的气敏传感器.负载单层和多层GO的棉基传感芯片对 $1\times 10^{-4}\ \text{mL/m}^3$ 的 NH_3 有良好的响应能力和稳定性.此外,该研究组还发现负载GO的棉布还具有一定的阻挡紫外线和抗菌作用,为可穿戴柔性传感器的研发提供了借鉴.Indarit等^[30]将导电聚苯胺涂覆在棉纱上制成了化学电阻型气敏传感器,而后测试了该气敏传感器对不同有毒气体(NH_3 、 NO_2 、 CO 、 H_2S 和 SO_2)以及有机挥发性混合物(乙醇、甲醇、丙酮和甲苯)的传感性能,发现该气敏传感器对 NH_3 有很高的检测灵敏度和选择性,其对 NH_3 的最低检测限仅为 $4\times 10^{-7}\ \text{mL/m}^3$.Han等^[31]将单壁碳纳米管(SWCNT)和表面活性剂十二烷基苯磺酸钠分散在去离子水中,而后用刷子将混合后的SWCNT悬浮液均匀地涂覆在厚度为 $0.1\ \text{mm}$ 的棉纱上,制备了棉纱/SWCNT气敏传感器.棉纱/SWCNT气敏传感器不仅表现出了良好的机械弯曲稳定性,而且可检测 $1\times 10^{-5}\sim 1\times 10^{-4}\ \text{mL/m}^3$ 范围内的 NH_3 ,对 NH_3 的检测限为 $8\times 10^{-6}\ \text{mL/m}^3$,达到了美国职业安全与健康管理局制定的可接受的 NH_3 暴露准则.我们研究组^[29]利用水热法将过期牛奶制备成了氮、磷和硫元素共掺杂的碳量子点(CQDs),而后将棉质洗脸巾浸没到CQDs的悬浮液中,通过氢键和偶极相互作用将CQDs负载到棉纤维

上,制备了棉纤维/CQDs复合物.棉纤维/CQDs复合物对湿度、 NH_3 、双氧水、甲醛、乙醇和丙酮都表现出了良好的响应能力以及不同形状传感曲线.在图像识别技术的帮助下,不需要构建传感器阵列,仅仅依靠单个棉纤维/CQDs传感器就实现了对多种分析物的识别检测.我们研究组^[32]还通过原位聚合法制备了棉纤维/聚苯胺复合材料,进而将其制备成了气敏传感器.由于棉织物和棉纤维具有良好的耐弯曲性能和气体通透性,棉纤维/聚苯胺复合材料对 NH_3 表现出了良好的检测灵敏度和弯曲稳定性.此外,棉纤维/聚苯胺复合材料还表现出了良好的力学强度和电磁屏蔽能力,在柔性传感和电磁屏蔽等领域显示出了良好的综合应用潜力.以上研究表明,棉纤维及其织物作为气敏传感基底在提高气敏传感性能、降低传感器制造成本、减少电子垃圾方面具有较好的前景.

1.3 棉纤维在气敏传感材料前体物方面的应用研究

棉纤维具有一维的形貌结构,其主要成分是纤维素.成熟棉纤维的纤维素含量可以达到95%以上,而纤维素中含量最高的是碳元素,占比高达44%^[33].同时,成熟的棉纤维由初生胞壁、次生胞壁和中腔结构三层构成,往往具有特殊的螺旋状结构,使其经过热解碳化处理后可呈现出一维的螺旋状中空结构,增大了其比表面积.棉纤维的这些特征使棉花成为良好的生物质碳源.例如,Bi等^[34]在氩气保护下在800 °C将棉花碳化成了黑色轻质的碳纤维气凝胶,并将其用于油水分离.Liu等^[35]用NaOH/尿素对棉纤维进行预处理,然后在800 °C进行热解碳化,制备出具有分级多孔结构的碳纤维,并将其用于电容器的电极材料.Ma等^[36]先将棉纤维碳化成碳纤维,进而制备出聚二甲基硅氧烷/棉基碳纤维柔性复合物,并将其用于力学传感,取得了良好的效果.以上研究工作说明棉纤维不仅是良好的生物质碳源,而且棉纤维碳材料的应用领域也是多样的.受上述工作的启发,我们研究组^[37]采用简单的碳化方法将废旧棉纤维碳化成中空的微米碳纤维(CFs)和ZnO/CFs复合材料,并首次将其作为气敏传感材料.通过控制碳化温度,有效地调整了CFs和ZnO/CFs的气体传感特性,进而构建了传感器阵列,在室温下实现了对相对湿度、乙醇、甲醛、 NH_3 和丙酮的快速识别检测.基于CFs和ZnO/CFs的传感器对相对湿度、乙醇、甲醛、 NH_3 和丙酮的响应时间和恢复时间分别不超过15 s和4 s,并且对致癌物甲醛气体显示出了良好的选择性和优异的灵敏度.这项工作首次将棉纤维碳材料应用到气敏传感领域,为气敏传感材料家族增添了新成员.目前为止,棉纤维作为气敏传感材料前体物的研究报道还相对较少.但由于棉纤维具有廉价、易得、可再生以及一维结构等特点,其作为气敏传感材料前体物的研究报道会逐渐增多.

2 总结和展望

由于棉纤维及其制品具有可再生、易降解、气体通透性好、羟基官能团丰富、耐弯曲、成本低等优点,无论是作为传感材料前体物,还是作为传感基底和传感材料模板,都表现出了明显的优势,取得了良好的效果,在气敏传感领域受到了越来越多的关注.可以预见的是,随着科学技术的持续发展和人们对可持续发展的日益关注,棉纤维将会在气敏传感领域的各个方面(如气敏传感基底、气敏传感材料模板、气敏传感材料前体物等)发挥越来越重要的作用.

(1) 在气敏传感基底方面,面向气敏传感领域的新需求,例如柔性可穿戴气敏传感领域的需求^[38],运用水解、微生物发酵等技术将微米尺度的棉纤维制备成纤维素纳米晶、纤维素气凝胶或纤维素水凝胶,进而将其制备成比表面积大、气体通透性好、耐弯曲性能优异的气敏传感基底,或者具有自愈能力的气敏传感基底,这或许是棉纤维在气敏传感基底应用方面的一个发展趋势.同时,利用气相沉积技术将一些半导体气敏传感材料以可控的方式沉积到棉纤维或棉织物上,制备成气敏传感器,这也是棉纤维作为气敏传感基底的一个有前景的应用.

(2) 在气敏传感材料模板方面,随着材料科学的发展,新的半导体材料不断涌现,使得棉纤维作为气敏传感材料模板也具有了更加广阔的空间.例如,利用棉纤维耐酸、耐碱稳定性好,并且其表面丰富的羟基易于与其它官能团形成氢键或络合物的特点,将棉纤维作为模板,在棉纤维上原位生长金属有机框架材料(MOFs)、共价有机骨架材料(COFs)、黑磷、新型二维过渡金属碳化物或碳氮化物材料(MXene)等,然后利用低温氧化或纤维素溶解技术^[39]除去棉纤维模板,制备出具有中空结构的MOFs、COFs、黑磷和MXene等材料,可以有效避免这些纳米材料的团聚,提高其比表面积和气体通透性,为实现良好的气敏传感效果奠定基础.

(3) 在气敏传感材料前体物方面,棉纤维同样可以继续发挥作用.表面修饰、原子掺杂、负载贵金属纳米

粒子和构建异质结是调控半导体材料气敏性能的有效方法^[40]。例如,以棉纤维为前体物先制备出棉基碳纤维,然后利用碳材料良好的吸附能力,采用功能小分子对其进行非共价表面修饰,从而调控其气敏性能或者构建传感器阵列。或者将棉基碳材料与新型半导体材料MOFs、COFs、黑磷和MXene复合,构建出具有异质结结构的复合气敏传感材料,进而达到调控棉基碳材料气敏性能的目的。亦或是,先用贵金属的盐溶液(如硝酸银等)浸泡处理棉纤维,而后将浸泡过的棉纤维通过高温碳化处理,在得到棉基碳材料的同时,利用碳元素的还原性将金属盐还原得到贵金属纳米粒子,得到负载贵金属纳米粒子的棉基碳纤维气敏传感材料。

综上所述,棉纤维在气敏传感领域的应用研究不仅拓展了棉花的应用领域,促进了气敏传感器的发展,而且提高了棉花制品的科技含量和经济附加值。随着社会需求的增加和科学技术的进步,棉纤维在气敏传感等领域的应用研究将会不断深入和拓展。

参考文献:

- [1] 张泓,郭刚. 中国棉花生产区域格局变动及影响分析[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(7): 214-218.
- [2] 唐军虎,贡璐,赵晶晶. 塔里木河上游棉区居民对棉花生产正外部性价值的支付意愿调查及其影响因素分析[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2020, 37(4): 543-550.
- [3] 李红丽. 新疆农业气象灾害对棉花生长的影响及防范措施[J]. 智慧农业导刊, 2022, 2(10): 22-24.
- [4] 孙起,刘瑞,王立永,等. 新疆棉花主栽品种的分类与优势比较[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2017, 34(4): 493-499.
- [5] SHCHIPUNOV Y, POSTNOVA I. Cellulose mineralization as a route for novel functional materials[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(27): 1705042.
- [6] SUBBIAH D K, MANI G K, BABU K J, et al. Nanostructured ZnO on cotton fabrics: a novel flexible gas sensor and UV filter[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 194: 372-382.
- [7] 曹帅. 棉纤维基复合材料的制备及其气敏性能研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2021.
- [8] AGUILAR N M, ARTEAGA-CARDONA F, DE ANDA REYES M E, et al. Magnetic bioplastics based on isolated cellulose from cotton and sugarcane bagasse[J]. Materials Chemistry and Physics, 2019, 238: 121921.
- [9] VINCENT J E, FONTENOT K R, PREVOST N T, et al. Preparation, characterization and activity of a peptide-cellulosic aerogel protease sensor from cotton[J]. Sensors, 2016, 16(11): 1789.
- [10] SUN R Q, SUN L B, CHUN Y, et al. Synthesizing nanocrystal-assembled mesoporous magnesium oxide using cotton fibres as exotemplate[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2008, 111(1/2/3): 314-322.
- [11] LI J M, CHEN J M, WANG H, et al. Front cover: all MXene cotton based supercapacitor powered human body thermal management system[J]. ChemElectroChem, 2021, 8(4): 648-655.
- [12] 张炜钰. 植物纤维传感器的制备及其气敏性能研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020.
- [13] FEANKE M E, KOPLIN T J, SIMON U. Metal and metal oxide nanoparticles in chemiresistors: does the nanoscale matter?[J]. Small, 2006, 2(1): 36-50.
- [14] 鲁文博. 金属氧化物基纳米纤维气体传感器的设计与制备[D]. 青岛: 中国石油大学, 2018.
- [15] SUN Y F, LIU S B, MENG F L, et al. Metal oxide nanostructures and their gas sensing properties: a review[J]. Sensors, 2012, 12(3): 2610-2631.
- [16] WANG H, LI H Y, LI S C, et al. Fabrication of hollow In₂O₃-ZnO microtubules by a simple biotemplate method and their gas-sensing properties[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2017, 28(1): 958-962.
- [17] YAN S H, MA S Y, XU X L, et al. Synthesis and gas sensing application of porous CeO₂-ZnO hollow fibers using cotton as biotemplates[J]. Materials Letters, 2016, 165: 9-13.
- [18] MA J W, FAN H Q, TIAN H L, et al. Ultrahigh sensitivity and selectivity chlorine gas sensing of In₂O₃ hollow microtubules by bio-template method with degreasing cotton[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 262: 17-25.
- [19] WU Y Y, TENG Y, ZHANG M, et al. Cooperative modulation of Fe₂(MoO₄)₃ microstructure derived from absorbent cotton for enhanced gas-sensing performance[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2020, 329: 129126.
- [20] SONG P, WANG Q, ZHANG Z, et al. Synthesis and gas sensing properties of biomorphic LaFeO₃ hollow fibers templated from cotton[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2010, 147(1): 248-254.
- [21] ZHU S M, ZHANG D, GU J J, et al. Biotemplate fabrication of SnO₂ nanotubular materials by a sonochemical method for gas sensors[J]. Journal of Nanoparticle Research, 2010, 12(4): 1389-1400.

- [22] WU Z F, ZHOU C Y, ZU B Y, et al. Contactless and rapid discrimination of improvised explosives realized by Mn^{2+} doping tailored ZnS nanocrystals[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(25): 4578-4586.
- [23] BAI S L, SUN C Z, WAN P B, et al. Transparent conducting films of hierarchically nanostructured polyaniline networks on flexible substrates for high performance gas sensors[J]. *Small*, 2015, 11(3): 306-310.
- [24] ROBINSON B H. E-Waste: an assessment of global production and environmental impacts[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 408(2): 183-191.
- [25] WANG L L, CHEN D, JIANG K, et al. New insights and perspectives into biological materials for flexible electronics[J]. *Chemical Society Reviews*, 2017, 46(22): 6764-6815.
- [26] LIU H, LI M, VOZNY O, et al. Physically flexible, rapid response gas sensor based on colloidal quantum dot solids[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(17): 2718-2724.
- [27] HE X, LIU Q C, ZHOU Y, et al. Graphene oxide-silver/cotton fiber fabric with anti-bacterial and anti-UV properties for wearable gas sensors[J]. *Frontiers of Materials Science*, 2021, 15(3): 406-415.
- [28] ZHANG W Y, WU Z F, HU J D, et al. Flexible chemiresistive sensor of polyaniline coated filter paper prepared by spraying for fast and non-contact detection of nitroaromatic explosives[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, 304: 127233.
- [29] WU Z F, ZHANG M, CAO S, et al. Flexible all-biomass gas sensor based on doped carbon quantum dots/nonwoven cotton with discriminative function[J]. *Cellulose*, 2022, 29(10): 5817-5832.
- [30] INDARIT N, KIM Y H, PETCHSANG N, et al. Highly sensitive polyaniline-coated fiber gas sensors for real-time monitoring of ammonia gas[J]. *RSC Advances*, 2019, 9(46): 26773-26779.
- [31] HAN J W, KIM B, LI J, et al. A carbon nanotube based ammonia sensor on cotton textile[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(19): 193104.
- [32] ZHANG W Y, ZHANG X P, WU Z F, et al. Mechanical, electromagnetic shielding and gas sensing properties of flexible cotton fiber/polyaniline composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2019, 188: 107966.
- [33] 连素梅, 叶曦雯, 罗忻棉. 纤维结构与理化性能关系分析[J]. *棉花科学*, 2013, 40(1): 48-52.
- [34] BI H C, YIN Z Y, CAO X H, et al. Carbon fiber aerogel made from raw cotton: a novel, efficient and recyclable sorbent for oils and organic solvents[J]. *Advanced Materials*, 2013, 25(41): 5916-5921.
- [35] LIU Y, SHI Z J, GAO Y F, et al. Biomass-swelling assisted synthesis of hierarchical porous carbon fibers for supercapacitor electrodes[J]. *Acs Applied Materials and Interfaces*, 2016, 8(42): 28283-28290.
- [36] MA Q, HAO B, MA P C, et al. Flexible sensor based on polymer nanocomposites reinforced by carbon nanotube foam derived from cotton[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 192: 108103.
- [37] CAO S, WU Z F, SUN Q H, et al. Gas sensing properties of cotton-based carbon fibers and ZnO/carbon fibers regulated by changing carbonization temperatures[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2021, 337(2): 129818.
- [38] ZHANG L, WANG J, WANG S W, et al. Neuron-inspired multifunctional conductive hydrogels for flexible wearable sensors[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2022, 10(11): 4327-4335.
- [39] CAI J, ZHANG L N, ZHOU J P, et al. Novel fibers prepared from cellulose in NaOH/urea aqueous solution[J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2004, 25(17): 1558-1562.
- [40] FRANKE M E, KOPLIN T J, SIMON U. Metal and metal oxide nanoparticles in chemiresistors: does the nanoscale matter?[J]. *Small*, 2006, 2(3): 301.

责任编辑: 赵新科 刘敏