

纤维基铜金属有机框架复合材料的制备及应用研究进展

曾 燕¹, 徐康景², 王春梅^{2,*}

(1. 南通海汇科技发展有限公司, 江苏 南通 226011;

2. 南通大学 纺织服装学院, 江苏 南通 226019)

摘要:综述纤维基铜金属有机框架复合材料的制备方法;介绍国内外纤维基铜金属有机框架复合材料在气相吸附与分离、液相吸附与分离、药物释放、光催化和抗菌等方面的应用研究成果;分析纤维基铜金属有机框架复合材料的研究方向。

关键词:铜金属有机框架;纤维基;复合材料;制备;应用

中图分类号: TB 33

文献标志码: A

文章编号: 1673-0356(2023)01-0021-05

金属有机框架材料(MOFs)是一类由有机配体与无机结构单元(金属离子或金属簇)构成的金属框架多孔配位聚合物。铜金属有机框架材料(Cu-MOFs)中较为经典的是1,3,5-均苯三羧酸铜(HKUST-1),它是由二聚四羧酸铜单元组成的,其中每个铜离子与4个1,3,5-均苯三甲酸(BTC)作为三元连接体配位,组成了拓扑的八面体三维网状结构^[1]。它具有高比表面积、高孔隙率、丰富的活性位点与灵活的化学结构^[2]。但是纯Cu-MOFs在应用时存在一些缺点,如气体吸附时需要借助流化床的外部力来克服颗粒间的阻力,防止因颗粒沉积而导致的固体与气体接触面积减小^[3];液体吸附时难以收集粉末颗粒,重复利用率低^[4];催化过程中水稳定性差^[5]等问题。Kuesgens等在纸浆纤维表面生长Cu₃(BTC)₂,引入了纤维素基底的概念^[6],Pinto等开发了一种将Cu₃(BTC)₂负载于棉纤维上的方法,为纤维基Cu-MOFs功能复合材料的制备奠定了基础^[7],从此研究者们致力于将Cu-MOFs与纤维复合来改善性能,拓宽应用。对纤维基Cu-MOFs复合材料的常用制备方法及其在气相吸附与分离、液相吸附与分离、药物释放、光催化及抗菌等领域的应用研究现状进行综述,并简要分析纤维基Cu-MOFs未来的发展趋势。

1 纤维基 Cu-MOFs 复合材料的制备方法

为了提高Cu-MOFs和纤维基材的负载量及结合牢度,研究者们通常以含有大量羟基、羧基和氨基等官能团的天然纤维或改性纤维作为基材,制备纤维基

Cu-MOFs复合材料。目前,常用的制备方法主要有原位生长法、静电纺丝法、层层组装法等。

1.1 原位生长法

原位生长法是指先在纤维上附着前驱体溶液中的金属离子或有机配体,以此作为成核位点不断生长晶体,诱导在纤维表面生成Cu-MOFs。其具有设备简单、操作方便及合成的晶型完美等特点,但是由于成核速度快,最终颗粒粒径普遍较大,难以牢固附着在纤维上,且合成过程中经常需要用到有毒的有机溶剂N,N-二甲基甲酰胺(DMF),环境污染严重。此外,Cu-MOFs的水稳定性也较差,结构易坍塌,有一定局限性。

屠凯丽等采用水热生长法,在经过碱减量改性的涤纶上负载Cu-BTC,涤纶经碱减量后,表面羧基大大增加,可以Cu²⁺为连接体进行配位来络合更多的配体BTC,使Cu-BTC负载量提高。同时发现在溶液中加入一定量的表面活性剂聚乙烯吡咯烷酮(PVP),通过其吸附与分散作用可以使Cu-BTC晶体粒径减小,最终使Cu-BTC更好地负载到改性涤纶上^[8]。另一项针对Cu-MOF@纤维素纤维(CFs)复合材料的绿色工艺没有使用DMF,而是通过水/乙醇混合物将Cu-MOF沉积在CFs上^[9]。Chen等将聚偏氟乙烯(PVDF)中空纤维载体浸入Cu-BTC前驱体溶液中,在PVDF中空纤维支撑膜上原位形成Cu-BTC,然后在表面涂覆聚乙烯醇(PVA),通过交联提高Cu-BTC的水稳定性^[10]。

1.2 静电纺丝法

静电纺丝法即通过将Cu-MOFs与聚合物溶液混合,在强电场中进行喷射纺丝,形成纳米纤维。相对于

收稿日期:2022-09-30

第一作者:曾 燕(1985—)女,工程师,主要从事功能纺织品的开发与销售。

* 通信作者:王春梅(1967—),女,教授,博士,E-mail:w.cmei@ntu.edu.cn。

传统的原位生长法, Cu-MOFs 可以更加均匀地分散在纤维上, 具有较高的比表面积与孔隙率, 虽然部分被疏水性聚合物封装的 Cu-MOFs 受到一些制约, 但是在一定程度上也可以提高水稳定性, 同时由于制备成本较低, 在抗菌方面有着广阔的前景^[11]。

Liu 等通过静电纺丝方法制备了 Cu-MOF-1/聚乳酸纤维(PLA)复合纤维膜, 由于其释放的 Cu^{2+} 离子会破坏细菌细胞的微环境, 使细胞膜丧失完整性, 导致细菌失活, 对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率分别高达 99.3% 和 99.8%^[12]。Kiadeh 等合成了含叶酸的改性铜金属框架材料 F-HKUST-1, 并将其加入到果胶静电纺丝纳米纤维中。抗菌试验表明, 改性纤维不仅对金黄色葡萄球菌与大肠杆菌具有较高的抗菌活性, 还具有良好的生物相容性, 在改善 HKUST-1 在蛋白质中稳定性的同时, 还减少了 Cu^{2+} 和叶酸的释放, 降低了 HKUST-1 的毒性^[13]。

1.3 层层组合法

层层组合法是将纤维基材在常温下交替浸入金属离子溶液与配体的溶液, 循环多次反应, 以提高 Cu-MOFs 晶体生长的成核位点数量, 逐层在纤维表面合成 Cu-MOFs^[14]。此方法虽然操作简单, 生成的颗粒分布均匀, 但是工艺耗时较长。

Abbasi 等采用层层组合法在蚕丝纤维表面制备了致密的 Cu-BTC 涂层。碱性条件下, 丝绸纤维表面的羧基由于去质子化作用而带有负电荷, Cu^{2+} 可以通过静电作用和纤维上的羧基结合。随着 Cu-BTC 在纤维表面循环包覆次数的增加, Cu-BTC 的结晶度也不断增加^[15]。Chen 等将 PVDF 中空纤维支撑膜反复浸入醋酸铜水溶液和 BTC 乙醇溶液中, 制备了 Cu-BTC/PVDF 复合膜。随着反应时间的增加, 晶体层的密度变大。虽然经过 5 次循环反应后, 裂纹消失, 缺陷减少, 但在膜表面施加压力或在中空纤维的内腔侧施加额外的力, 最终能在中空纤维上获得更完美的 Cu-BTC 层^[16]。

2 纤维基 Cu-MOFs 复合材料应用

2.1 气相吸附与分离

以 HKUST-1 为代表的 Cu-MOFs 多孔材料, 自身的笼式结构使其具有高比表面积与大孔容积, 同时有易再生性、重复使用率高等特点^[17]。Cu-MOFs 与气体吸附质之间能依靠较弱的范德华力互相吸引, 同时尽管 Cu-MOFs 框架整体呈现电中性, 但是活性位点

Cu^{2+} 经过活化后也可以与气体吸附质相结合, 产生协同作用^[18]。Pokhrel 等发现 H_2S 可以很快地与 Cu-MOFs 中的铜簇发生化学键合^[19]。此外, NO 同样会与不饱和状态下的 Cu^{2+} 发生配位作用^[20], 但是纯 MOFs 往往会因沉积而发生堆叠, 难以完全接触气体吸附质。由此, 研究者们尝试将其与纤维进行复合以更好地利用。

Riley 等将 HKUST-1 晶体嵌入聚丙烯腈(PAN)基质中以捕获氙(Xe)。PAN 基质提供了一个牢固的网状基底, 可以将晶体固定在合适的位置。Xe 的吸附容量随复合材料内负载的 Cu-MOF 增加而呈线性增长。但是该方法的主要缺点是 HKUST-1 水稳定性差, 在复合过程中结构可能发生塌陷^[21]。而 Armstrong 等将 HKUST-1 颗粒封装在聚苯乙烯电纺纤维中制成了纳米纤维膜, 提高了水稳定性。结果表明嵌入纤维的 HKUST-1 相比于纯 HKUST-1 粉末捕获了更多的 CO_2 , 对 N_2 却没有显示出明显的吸收, 为选择性吸附与分离提供了思路^[22]。Jiamjirangkul 等将 Cu^{2+} 溶液、有机配体溶液与壳聚糖/PVA 溶液直接混合并静电纺丝成纳米纤维膜, 复合材料的比表面积比纯 PVA 纳米纤维提高了约 11 倍, 并在 0.6~0.8 nm 范围内形成微孔, 在 100 kPa 和 298 K 下复合材料对 CO_2/N_2 的吸附能力相差 14 倍, 使其成为选择性气体吸附与分离的潜在材料^[23]。

2.2 液相吸附与分离

Cu-MOFs 与液相吸附质之间除了利用自身孔道结构进行物理吸附外, 还可以通过共价相互作用^[24]与非共价相互作用^[25-27]进行吸附。其中, 不仅 Cu-MOFs 表面配体可与吸附质发生化学吸附, 若将 Cu-MOFs 加热焙烘或真空干燥, 去除与 Cu^{2+} 结合的溶剂分子或客体分子来进行活化后, 形成的活性位点也可与吸附质结合^[28]。但是 Cu-MOFs 纳米颗粒用于液相吸附时也存在回收困难、难以重复利用的缺点, 通常必须通过过滤或离心将纳米颗粒从分散的悬浮液中分离出来, 以进行再循环。为了避免这一昂贵且耗时的过程, 研究者们尝试将其与纤维进行复合。

Abdelhameed 等先用过氧化氢对棉织物进行氧化处理, 后用水热法制得了 Cu-BTC@cotton 复合材料, 对乙硫磷进行吸附试验, 发现 Cu-BTC 的孔隙可以作为乙硫磷分子的捕获位点, 同时乙硫磷的硫原子与 Cu-BTC 的 Cu^{2+} 之间可以形成配位键, 乙硫磷的氧原子与纤维素官能团之间也可能通过氢键发生相互作用来促

进吸附^[24]。Adelhameed 等采用水热法分别制得 Cu-BTC@羊毛与 Cu-BTC@黏胶复合材料,对对硝基苯酚(PNP)进行吸附试验,发现 2 种复合织物的吸附效果源自于内部孔道的物理吸附作用,同时金属中心 Cu^{2+} 能够与 PNP 中羟基所含的氧原子直接配位。通过理论计算表明,这种 Cu^{2+} 与氧原子所形成的配位键作用力很强,甚至可以形成化学键。由于黏胶纤维作为纤维素纤维比羊毛含有更多的羟基,吸附效果更好^[29]。由此可知,纤维基 Cu-MOFs 可以有效去除硫类、酚类化合物。

2.3 药物释放

生物相容性、良好的机械强度、高载药量等特点是药物控释系统的主要要求。Cu-MOFs 的大孔容积、高表面积和可调孔径等特点使其成为生物医学领域的潜在载体。目前已有研究者成功将药物封装到纳米级 Cu-MOFs 中以生成纳米杂化物。

Emam 等将 Cu-BTC 原位引入天然织物(包括棉、麻和丝)载体中,然后将 DEET(N,N-二乙基-3-甲基苯甲酰胺)负载到改性织物上制备驱虫纺织品,研究 Cu-BTC 对 DEET 的控制与释放的效果。最终测得的 DEET 含量依次为丝绸<亚麻<棉,对 Cu-BTC@织物在驱虫药物释放领域的应用潜力进行了开发^[30]。

2.4 光催化

Cu-MOFs 由含有 Cu^{2+} 的节点构成,并通过非共价键与有机配体互相连接,其中有机配体可以吸收光子产生电荷分离,而配体与金属离子的紧密接触有利于延长电荷分离状态,这种独特的结构使 Cu-MOFs 成为具有光催化活性的材料。目前已有研究者将纤维基 Cu-MOFs 用于化学战剂(CWA)与有机污染物的去除。

Giannakoudakis 等制备了一种由 Cu-BTC 和氧化石墨氮化碳($\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-ox}$)纳米球组成的复合材料 Cu-BTC@ $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-ox}$,并通过简单浸渍法将其负载于棉上。Cu-BTC 与 $\text{g-C}_3\text{N}_4\text{-ox}$ 协同效应可以获得更好的电子空穴分离效果,从而对 CWA 中有机磷神经毒剂有极佳的光催化能力。同时在光催化过程中,复合织物若明显由绿色变为黄色即可说明仍有 CWA 的残留^[31]。江标等使用轧-烘-焙整理工艺将 Cu-BTC 和改性棉纤维表面的羧基反应,制得 Cu-BTC@BTCA-Cotton,无光照条件下其对染料仅具有吸附作用,而在可见光条件下不仅有吸附效果,还有光催化功能,从而可以更快去除染料^[32]。

2.5 抗菌

虽然传统纳米金属粒子可以释放金属离子防止生物膜的形成从而有效灭杀细菌,但是也会向正常组织过度释放金属离子。而 Cu-MOFs 金属离子的释放受有机配体的控制,具有缓释功能,在开发抗菌生物材料领域中极具潜力。首先,Cu-MOFs 可以逐步分解并释放 Cu^{2+} ,通过 Cu^{2+} 来氧化细菌膜上的脂肪酸,且与蛋白质的巯基相互作用,从而使酶失活,降低细胞膜的通透性^[33]。其次,Cu-MOFs 中金属离子与有机配体可以共享正电荷,具有一定的亲脂性,Cu-MOFs 能更容易地穿透细胞膜的脂质层进入细胞内,将蛋白质和遗传信息从细胞内泄漏,使细菌细胞溶解和失活。由于 Cu-MOFs 具有的缓释功能与生物相容性,有利于将其与传统纺织品复合获得新型抗菌医用纺织品。

目前较普遍的研究是将 Cu-MOFs 直接与纤维、织物进行复合。Rubin 等先用氯乙酸钠对棉羧甲基化,以增加成核位点数量,后通过层层组装工艺在棉纤维上均匀生长 Cu-MOF,再使用戊酸酐进行合成后改性,使复合材料可以抵抗超声波水洗与有机溶剂洗涤造成的损伤,水稳定性增强且更缓慢地释放铜离子^[34]。此外,Cu-BTC 也可以直接与羊毛织物复合,所得复合物对大肠杆菌有很高的抗菌性且可重复使用^[35]。Emam 等通过原位生长分别制备了载有 Cu-BTC 的涤纶和锦纶织物,对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、白色念珠菌均有良好的灭杀作用。通过对虾的生态毒性影响测试,证实了该复合物在洗涤过程中释放的 Cu^{2+} 在安全范围之内^[36]。Singbumrung 等制备了 Cu-BTC 并将其掺入到 PVA 纤维中静电纺丝。改性纤维可以对金黄色葡萄球菌与大肠杆菌进行有效抑制,尤其是金黄色葡萄球菌^[37]。

对于水处理中有细菌以污垢粘附/沉积的方式堵塞膜孔的纤维膜,Cu-MOFs 也可以帮助其恢复过滤性能。Zheng 等将多巴胺(PDA)沉积在 PVDF 膜上,后将 Cu-MOF 悬浮液均匀涂覆在膜表面上形成复合物。PDA 的改性使 PVDF 的亲水性显著提高,使细菌细胞表面难以粘附在膜上,有一定的抗粘附作用。同时 Cu^{2+} 直接接触细胞并导致 DNA 损伤进行抑菌,最终细菌无法在膜表面存活或积聚^[38]。

3 结语与展望

目前纤维基 Cu-MOFs 复合材料的制备方法主要有原位生长法、静电纺丝法、层层组装法等。前 2 种方

法通过改进工艺虽然可以使 Cu-MOFs 水稳定性提高,但是层层组装法可以直接在纤维上进行成核并结晶,大大减少结构塌陷的速率,且生产成本较低。Cu-MOFs 具有大孔容与拓扑结构,通过范德华力进行物理吸附来存储物质,无机金属 Cu^{2+} 与有机配体分别可以通过多种非共价键结合力来捕获物质,两者通过配位键紧密结合,还可以使 Cu-MOFs 具有光活性与抗菌能力,使得纤维基 Cu-MOFs 成为一种具有发展潜力的功能纤维材料。

今后研究开发制备方法更经济、稳定性更好、价格低廉的纤维基 Cu-MOFs 复合材料,是研究者们需要努力的方向,主要有几个方面:

(1)改进 Cu-MOFs 复合材料制备方法。寻找绿色溶剂代替有机溶剂进行制备,在不破坏 Cu-MOFs 结构的情况下,活化更多的活性位点,进一步提高不饱和金属位点数量,提高 Cu-MOFs 性能。

(2)掺入不同金属与配体。加入不同的金属不仅可以形成双金属中心,还可能形成羟基双盐,使常温快速制备成为可能;加入不同的配体则不仅可能形成双配体接头,还能提高电荷载体寿命,增强可见光活性。

(3)对纤维进行改性。使纤维表面具有更多的官能团,进一步提高 Cu-MOFs 的负载量。

参考文献:

- [1] YANG P, KRUNGLEVICIUTE V, ERYAZICI I, et al. Methane storage in metal-organic frameworks: Current records, surprise findings, and challenges[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2013, 135(32): 11887-11894.
- [2] TRAN T V, NGUYEN D, NGUYEN T T, et al. Metal-organic framework HKUST-1-based $\text{Cu}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{CuO}@$ C porous composite: Rapid synthesis and uptake application in antibiotics remediation[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 36: 101319.
- [3] RAGANATI F, GARGIULO V, AMMENDOLA P, et al. CO_2 capture performance of HKUST-1 in a sound assisted fluidized bed[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2014, 239: 75-86.
- [4] LIU Z, FAN A, HO C H. Preparation of AC/Cu-BTC composite and its adsorption mechanisms[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2020, 146(4): 04020018.
- [5] LOW J J, BENIN A I, JAKUBCZAK P, et al. Virtual high throughput screening confirmed experimentally: Porous coordination polymer hydration[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2009, 131(43): 15834-15842.
- [6] KUESGENS P, SIEGLE S, KASKEL S. Crystal growth of the meta-organic framework $\text{Cu}_3(\text{BTC})_2$ on the surface of pulp fibers[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2009, 11(1-2): 93-95.
- [7] PINTO M D, SIERRA-AVILA C A, HINESTROZA J P. In situ synthesis of a Cu-BTC metal-organic framework (MOF 199) onto cellulosic fibrous substrates: Cotton[J]. *Cellulose*, 2012, 19(5): 1771-1779.
- [8] 屠凯丽,蒋淑娟,吴明华,等. 涤纶纤维表面原位水热生长铜金属有机框架材料[J]. *印染助剂*, 2018, 35(9): 48-52.
- [9] CHEN W, QIAN X, AN X. In situ green preparation and antibacterial activity of copper-based metal-organic frameworks/cellulose fibers (HKUST-1/CF) composite [J]. *Cellulose*, 2015, 22(6): 3789-3797.
- [10] CHEN Y, LIU H, HU X, et al. PVDF/Cu-BTC composite membranes for dye separation[J]. *Fibers & Polymers*, 2017, 18(7): 1250-1254.
- [11] XUE J, WU T, DAI Y, et al. Electrospinning and electrospun nanofibers: Methods, materials, and applications [J]. *Chemical Reviews*, 2019, 119(8): 5298-5415.
- [12] LIU Z, YE J, RAUF A, et al. A flexible fibrous membrane based on copper(II) metal organic framework/poly (lactic acid) composites with superior antibacterial performance[J]. *Biomaterials Science*, 2021, 9(10): 3851-3859.
- [13] KIADEH S, GHAEI A, FAROKHI M, et al. Electrospun pectin/modified copper-based metal-organic framework (MOF) nanofibers as a drug delivery system[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 173: 351-365.
- [14] LI Z, HORI N, TAKEMURA A. Synthesis and characterization of Cu-BTC metal-organic frameworks onto lignocellulosic fibers by layer-by-layer method in aqueous solution[J]. *Cellulose*, 2020, 27(3): 1733-1744.
- [15] ABBASI A R, AKHBARI K, MORSALI A. Dense coating of surface mounted CuBTC metal-organic framework nanostructures on silk fibers, prepared by layer-by-layer method under ultrasound irradiation with antibacterial activity[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2012, 19(4): 846-852.
- [16] CHEN Y, WANG B, ZHANG S, et al. Fabrication of Cu-BTC metal organic frameworks on PVDF hollow fiber membrane for gas separation via multiple reactions[J]. *Fibers & Polymers*, 2015, 16(10): 2130-2134.
- [17] XU G, AN Z, XU K, et al. Metal organic framework

- (MOF)-based micro/nanoscaled materials for heavy metal ions removal: The cutting-edge study on designs, synthesis, and applications [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2021, 427: 213554.
- [18] ZHANG H, SHI R, FAN H, et al. Defect creation by benzoic acid in Cu-based metal-organic frameworks for enhancing sulfur capture[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2020, 298: 110070.
- [19] JEEWAN P, NIDHIKA B, WU C, et al. Cu-and Zr-based metal organic frameworks and their composites with graphene oxide for capture of acid gases at ambient temperature[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2018, 266: 233-243.
- [20] XIAO B, WHEATLEY P S, ZHAO X, et al. High-capacity hydrogen and nitric oxide adsorption and storage in a metal-organic framework[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2007, 129(5): 1203-1209.
- [21] RILEY B J, CHONG S, KUANG W B, et al. Metal-organic framework-polyacrylonitrile composite beads for xenon capture[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(40): 45342-45350.
- [22] ARMSTRONG M, SIROUS P, SHAN B, et al. Prolonged HKUST-1 functionality under extreme hydrothermal conditions by electrospinning polystyrene fibers as a new coating method[J]. *Microporous & Mesoporous Materials*, 2018, 270: 34-39.
- [23] JIAMJIRANGKUL P, INPRASIT T, INTASANTA V, et al. Metal organic framework-integrated chitosan/poly(vinyl alcohol) (PVA) nanofibrous membrane hybrids from green process for selective CO₂ capture and filtration [J]. *Chemical Engineering Science*, 2020, 221: 115650.
- [24] ABDELHAMEED R M, ABDEL-GAWAD H, ELSHAHAT M, et al. Cu-BTC@cotton composite: Design and removal of ethion insecticide from water[J]. *Royal Society of Chemistry*, 2016, 48 (6): 42324-42333.
- [25] AU K M. Recent advances in the use of metal-organic frameworks for dye adsorption[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2020, 8: 708.
- [26] KHAN M S, KHALID M, AHMAD M S, et al. Three-in-one is really better: Exploring the sensing and adsorption properties in a newly designed metal-organic system incorporating a copper (II) ion[J]. *Dalton Transactions*, 2019, 48(34): 12918-12932.
- [27] MANTASHA I, SALEH H A M, QASEM K M A, et al. Efficient and selective adsorption and separation of methylene blue (MB) from mixture of dyes in aqueous environment employing a Cu(II) based metal organic framework[J]. *Inorganica Chimica Acta*, 2020, 511: 119787.
- [28] ZHANG K, SUN D, MA C, et al. Activation of peroxy-monosulfate by CoFe₂O₄ loaded on metal-organic framework for the degradation of organic dye[J]. *Chemosphere*, 2020, 241: 125021.
- [29] ABDELHAMEED R M, EMAM H E, ROCHA J, et al. Cu-BTC metal-organic framework natural fabric composites for fuel purification[J]. *Fuel Processing Technology*, 2020, 158: 306-312.
- [30] EMAM H E, ABDELHAMEED R M. In-situ modification of natural fabrics by Cu-BTC MOF for effective release of insect repellent (N,N-diethyl-3-methylbenzamide) [J]. *Journal of Porous Materials*, 2017, 24(5): 1-11.
- [31] GIANNAKOUDAKIS D A, HU Y, FLORENT M, et al. Smart textiles of MOF/g-C₃N₄ nanospheres for the rapid detection/detoxification of chemical warfare agents [J]. *Royal Society of Chemistry*, 2017, 2(6): 356-364.
- [32] 江标,董永春,边立然. Cu-BTC 对棉织物的负载整理及其对偶氮染料去除性能[J]. *印染*, 2020, 46(9): 53-57.
- [33] PETTINARI C, PETTINARI R, DI N C, et al. Antimicrobial MOFs [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2021, 446(49): 214121.
- [34] RUBIN H N, NEUFELD B H, REYNOLDS M M. Surface-anchored metal-organic framework-cotton material for tunable antibacterial copper delivery[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, 10(17): 15189-15199.
- [35] LIS M J, CARUZI B B, GIL G A, et al. In-situ direct synthesis of HKUST-1 in wool fabric for the improvement of antibacterial properties[J]. *Polymers*, 2019, 11(4): 713.
- [36] EMAM H E, DARWESH O M, ABDELHAMEED R M. In-growth metal organic framework/synthetic hybrids as antimicrobial fabrics and its toxicity[J]. *Colloids & Surfaces B: Biointerfaces*, 2018, 165: 219-228.
- [37] SINGBUMRUNG K, MOTINA K, PISITSAK P, et al. Preparation of Cu-BTC/PVA fibers with antibacterial applications[J]. *Fibers and Polymers*, 2018, 19(7): 1373-1378.
- [38] ZHENG H, WANG D, SUN X, et al. Surface modified by green synthetic of Cu-MOF-74 to improve the anti-biofouling properties of PVDF membranes[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 411: 128524.

- 再利用[J]. 纺织科技进展, 2021(1):56-59.
- [11] 孙瑞, 王晓映, 薛菁雯, 等. 国内废旧服装回收再利用的调查与分析[J]. 纺织导报, 2021(1):44-47.
- [12] 陈游芳. 美国废旧纺织品回收体系及对中国的启示[J]. 毛纺科技, 2015, 43(2):62-65.
- [13] 关娟娟, 宋晓琳, 周晓帆, 等. 废旧服装回收分类属性与再利用方式[J]. 毛纺科技, 2019, 47(5):91-94.
- [14] 关娟娟, 张灏, 陶静琪, 等. 基于废旧服装再利用的服装可持续设计研究[J]. 天津纺织科技, 2020(3):12-15.
- [15] 程婉莹, 梁建芳, 彭欣桐. 社交媒体中消费者绿色服装购买意愿分析[J]. 纺织高校基础科学学报, 2020, 33(1):45-50.
- [16] 梁建芳, 和嘉伟. 基于行为意向中介效应的可持续消费认知与服装再利用行为的关系[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2020, 46(3):463-471.
- [17] 黄微. 感性认识与理性认识辩证关系及现实启示[J]. 安顺学院学报, 2020, 22(5):89-92.
- [18] 王秀梅, 谷杨怡文. 时尚可持续发展论纲[J]. 浙江理工大学学报(社会科学版), 2021, 46(6):702-712.
- [19] 龙成志, 卿前龙. 消费者可持续性知识对绿色消费行为的影响——以品牌可持续性感知为中介[J]. 中国流通经济, 2017, 31(7):91-102.
- [20] 祝爱民, 石晓姣, 于丽娟, 等. 管理团队认知能力、行为整合对决策效果的影响机制研究[J]. 沈阳工业大学学报(社会科学版), 2018, 11(6):530-537.
- [21] 封竹, 梁建芳. 基于绿色情感中介效应的面子特征对消费者旧衣再利用行为的影响[J]. 服装学报, 2020, 5(4):364-371.

Research on the Influence of Sustainable Fashion Cognition on Clothing Reusing Behavior

JIANG Shimeng, WANG Jun*

(School of Fashion, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

Abstract: Aiming at the dilemma of domestic clothing reuse, starting with the connotation and development process of sustainable fashion, a questionnaire around the perception, rational cognition and clothing reuse behavior of sustainable fashion was designed. Reliability and validity test and regression analysis on the collected data were conducted to study the influence of consumers' cognition of sustainable fashion on clothing reuse behavior. The results showed that the perceptual and rational cognition of sustainable fashion had a positive and significant impact on clothing reuse behavior. By strengthening publicity and guidance, consumers' awareness of sustainable fashion can be improved. Increasing the sustainability and high-tech investment in product design and circulation, can fundamentally promote the sustainable development of fashion.

Key words: sustainable fashion; perceptual cognition; rational cognition; clothing reusing behavior; regression analysis

(上接第 25 页)

Preparation and Application Progress of Fiber-based Copper Metal Organic Frameworks Materials

ZENG Yan¹, XU Kangjing², WANG Chunmei^{2,*}

(1. Nantong Haihui Science and Technology Development Co., Ltd., Nantong 226011, China;

2. School of Textile and Clothing, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: The preparation methods of fiber-based copper metal-organic framework composite materials were reviewed. The application research results of fiber-based copper metal-organic framework composite materials on gas phase adsorption and separation, liquid phase adsorption and separation, drug release, photocatalysis and antibacterial were introduced. The research direction of fiber-based copper metal-organic framework composites was analyzed.

Key words: copper metal organic framework; fiber-based; composite material; preparation; application