

纺织染整助剂

含氧化铁超疏水棉织物的制备及性能

张彩宁, 刘 筱, 王煦漫, 刘笑笑, 宋美娟, 赵明远

(西安工程大学 材料工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 以丙烯酸丁酯与乙烯基硅树脂乳液共聚合含硅丙烯酸酯疏水乳液。用沉淀法制备 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米粒子, 并用硅烷偶联剂 KH-560 对其进行表面改性制得 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 分散液。利用疏水乳液和 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 分散液对棉织物进行浸涂, 制备超疏水棉织物。采用 XRD、FTIR 和 SEM 对 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 和超疏水棉织物的结构、形貌进行了表征。考察了疏水乳液和 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 分散液浸涂次数对棉织物疏水性能和紫外光照射对超疏水棉织物润湿性能的影响, 测定了超疏水棉织物的油水分离性能。结果表明, 用疏水乳液和 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 分散液分别浸涂 2 次即可使棉织物具有良好的超疏水性, 接触角可达 158.6° 。经紫外光照射后, 织物正面转变为超亲水状态, 反面仍为超疏水状态, 棉织物显示出单向导湿性能。超疏水棉织物对油水混合物中油、水的分离效率分别为 96.1% 和 99.0%。

关键词: 超疏水; 棉织物; $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$; 单向导湿; 油水分离; 纺织染整助剂

中图分类号: TQ 630.7 文献标识码: A 文章编号: 1003-5214 (2018) 12-2132-06

Preparation and Properties of Superhydrophobic Cotton Fabric with Iron Oxide

ZHANG Cai-ning, LIU Xiao, WANG Xu-man, LIU Xiao-xiao,
SONG Mei-juan, ZHAO Ming-yuan

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

Abstract: Hydrophobic acrylate emulsion with silicone was synthesized by copolymerization of butyl acrylate and vinyl silicone resin. $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles were prepared by precipitation method, and then silane coupling agent KH-560 was used to modify the obtained $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ nanoparticles. Subsequently, superhydrophobic cotton fabric was prepared by dip-coating of cotton fabric with hydrophobic emulsion and $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dispersion. The structure and morphology of $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ and superhydrophobic cotton fabric were characterized by XRD, FTIR and SEM. The influence of dip-coating times of emulsion and $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ disperse on the hydrophobicity of cotton fabric was investigated. And the influence of UV irradiation on the wettability of superhydrophobic cotton fabric was studied. Moreover, the oil-water separation performance of the superhydrophobic cotton fabric was determined. The results showed that the as-prepared cotton fabric exhibited an excellent superhydrophobicity after two times dip-coating with hydrophobic emulsion and $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dispersion, respectively, with a contact angle of 158.6° . After UV irradiation, the front side of the fabric turned to be superhydrophilic, while the reverse side was still superhydrophobic, indicating that the cotton fabric demonstrated unidirectional moisture conductivity. The separation efficiency of the superhydrophobic cotton fabric to oil and water in oil-water mixture was 96.1% and 99.0%, respectively.

Key words: superhydrophobicity; cotton fabric; iron oxide; unidirectional moisture conductivity; oil-water separation; dyeing and finishing auxiliaries

Foundation items: Special Scientific Research Project of Education Department of Shaanxi Provincial Government (17JK0324); Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students (20180709046, 201822051)

收稿日期: 2018-06-20; 定用日期: 2018-08-28; DOI: 10.13550/j.jxhg.20180444

基金项目: 陕西省教育厅专项科研计划项目 (17JK0324); 大学生创新创业训练项目 (20180709046、201822051)

作者简介: 张彩宁 (1977—), 女, 副教授, 博士, E-mail: zcn1977@163.com。

棉织物由于具有来源广泛、价格低廉、安全环保及可生物降解等优点, 在纺织、服装领域得到广泛使用^[1]。为进一步拓展其应用范围, 人们通过物理或化学手段来赋予棉织物超疏水、抗菌、抗紫外等特殊功能^[2]。近年来, 超疏水棉织物在防水、防污、抗腐蚀、抗结冰、自清洁等方面被广泛应用^[3]。目前, 制备超疏水表面的基本策略是将微-纳米复合结构和低表面能物质协同作用^[4]。由于棉纤维具有天然的微米级粗糙表面及孔隙结构, 可通过浸涂法^[5]、层层自组合法^[6]、湿化学法^[7]、溶胶-凝胶法^[8]、喷涂法^[9]和化学气相沉积法^[10]等结合低表面能修饰技术, 使棉织物表面获得超疏水性。但在构筑微-纳米复合结构时常用的纳米材料, 如氧化钛、氧化锌、氧化硅等, 不仅存在制备过程复杂的问题, 还易造成环境污染。同时, 在表面修饰时常用的低表面能含氟化学品也会对人体和环境造成危害^[11]。因此, 绿色环保的超疏水涂层是超疏水棉织物制备领域的重要研究方向。

铁是地球储量丰富的元素, 其氧化物是土壤中最常见矿物之一, 具有很好的环境相容性, 故选用氧化铁来构筑材料表面的粗糙结构, 结合不含氟的低表面能物质来制得超疏水表面是降低环境污染的有效措施。目前, 用 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 构筑超疏水表面微-纳米二级结构的报道很少, 尤其鲜见将其用于超疏水表面润湿性转换的报道。

本文首先采用丙烯酸丁酯与乙烯基硅树脂乳液共聚合成含硅丙烯酸酯疏水乳液, 浸涂在棉织物表面以降低其表面能, 避免了含氟化合物的使用。采用沉淀法制备 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米粒子, 再将其浸涂在涂有疏水乳液的棉织物上, 制备出超疏水棉织物。考察了疏水乳液和 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 分散液的浸涂次数对棉织物疏水性能和紫外光照射时间对超疏水棉织物润湿性能及织物的单向导湿性能的影响; 测定了超疏水棉织物的油水分离特性。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

硫酸亚铁、草酸、无水乙醇、四氯化碳、亚甲基蓝、司班-20、十二烷基苯磺酸钠、过硫酸铵、氢氧化钠, 均为 AR, 国药集团化学试剂有限公司; 硅烷偶联剂 KH-560, 工业级, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 丙烯酸丁酯, 工业级, 武汉赛沃尔化工有限公司; 乙烯基硅树脂, 工业级, 济南硅科新材料有限公司。棉织物为市售产品。

XRD-7000 型 X 射线衍射仪, 日本 Shimadzu 公司; 5700 型傅里叶红外光谱仪, 美国 Nicolet 公司; Quanta-450-FEG 扫描电镜, 美国 FEI 公司; JW-360A

型接触角测量仪, 承德市成惠有限公司; ZSZ18D 型紫外灯, 无锡市长江医疗器械公司; FX3150 型全自动织物透湿量测试仪, 瑞士 Textest 公司。

1.2 方法

1.2.1 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的合成及改性

将硫酸亚铁与草酸按质量比 1:1 加入三口瓶中, 在室温搅拌 40 min, 生成黄色 FeC_2O_4 沉淀, 静置, 除去上层清液, 用离心机水洗 4 次 (以除去未反应的硫酸亚铁和草酸) 后, 再用少量无水乙醇洗 2 次。然后将该沉淀在 60 °C 干燥至恒重, 放入马弗炉内于 300 °C 焙烧 3 h, 每隔 1 h 取出搅拌, 使其在空气中与氧作用自然分解。焙烧后得到的红棕色粉末, 即为 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 粒子。

将 1 g $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 加入三口烧瓶中, 再加入 40 mL 溶有 0.1 g 硅烷偶联剂 KH-560 的无水乙醇, 在 80 °C 下搅拌反应 2 h, 然后用超声波清洗仪超声分散 30 min, 用无水乙醇反复洗涤后, 干燥至恒重, 即得红棕色 KH-560 改性的 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 粉末。

1.2.2 疏水乳液的合成

分别将 1 g 司班-20, 1 g 十二烷基苯磺酸钠及 100 mg 过硫酸铵溶于 100 mL 蒸馏水中, 将其加入三口瓶中, 升温至 75 °C, 接着加入 10 g 丙烯酸丁酯和 5 g 乙烯基硅树脂, 混合均匀后在 75 °C 反应 6 h, 即得含硅丙烯酸酯疏水乳液。

1.2.3 超疏水棉织物的制备

将棉织物用 50 g/L 的氢氧化钠溶液浸泡 10 min, 再以去离子水洗涤至中性, 然后 50 °C 烘干。将该棉织物浸入疏水乳液中, 超声处理 5 min 后, 在 50 °C 烘箱中烘 6 h 即得浸涂疏水乳液的棉织物。再将涂有疏水乳液的棉织物浸入改性 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的乙醇分散液中, 用超声波清洗仪分散处理 5 min。取出织物, 在 50 °C 烘箱中干燥 6 h, 即得超疏水棉织物。采用“GBT 12704—1991 织物透湿量测定方法”测定超疏水棉织物正面及反面的透湿量。

1.3 表征及性能测试

FTIR: 对不同类型棉织物进行 FTIR 测试, 波数范围为 40~4000 cm^{-1} 。XRD 测定条件为 Cu 靶 K_α 射线, $\lambda=0.154056$ nm, 管电压 40 V, 管电流 40 mA, 扫描范围为 5°~70°。TEM 工作电压为 200 kV。接触角 (CA) 测量采用接触角测量仪提供的量角法测定, 每个样品测量 6 个点, 取平均值。

1.4 油水分离效率的测试

将超疏水棉织物置于烧杯上, 再将 5.0 mL 四氯化碳和 5.0 mL 去离子水混合后, 用玻璃棒引入超疏水棉织物上, 油滴会透过棉织物于下方被收集, 水则于上方被收集。按照下式分别计算油和水的分离效率。

$$E_o / \% = \frac{V'_o}{V_o} \times 100 \quad (1)$$

$$E_w / \% = \frac{V'_w}{V_w} \times 100 \quad (2)$$

式中： E_o 和 E_w 分别为对油和水的分离效率，%； V_o 和 V'_o 分别为油分离前、后的体积，mL； V_w 和 V'_w 分别为水分离前、后的体积，mL。

2 结果与讨论

2.1 XRD 分析

$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的 XRD 图见图 1。可以看出，样品的各个特征衍射峰与 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 标准卡片 (JCPDS 33-0664) 相符，在 $2\theta=24.1^\circ$ 、 33.1° 、 35.5° 、 40.8° 、 49.1° 、 53.8° 、 57.5° 、 62.4° 和 63.6° 的衍射峰分别与六方晶系氧化铁的(012)、(104)、(110)、(113)、(024)、(116)、(122)、(214)和(300)晶面对应，说明制备的产物为 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 。

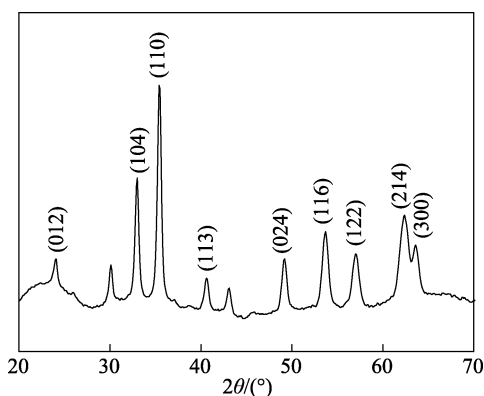


图 1 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的 XRD 图
Fig. 1 XRD pattern of $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$

2.2 FTIR 分析

未处理棉织物、浸涂疏水乳液棉织物和超疏水棉织物的 FTIR 谱图见图 2。

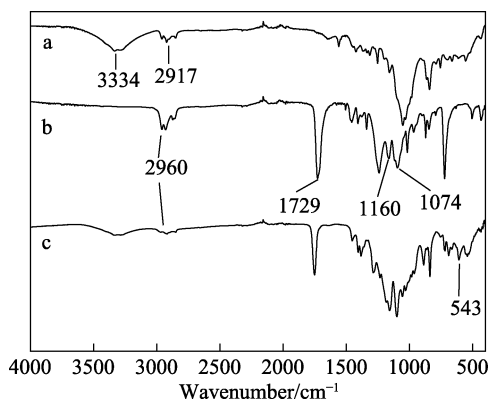


图 2 未处理棉织物(a)，浸涂疏水乳液棉织物(b)，超疏水棉织物(c)的红外光谱图

Fig. 2 FTIR spectra of cotton fabric (a), emulsion coated cotton fabric (b) and superhydrophobic cotton fabric (c)

曲线 a 中， 3334 cm^{-1} 处为纤维素中 O—H 的伸缩振动峰， 2917 cm^{-1} 处为纤维素中 C—H 的伸缩振动峰。二者都是棉织物中纤维素的特征峰。曲线 b 中， 1160 cm^{-1} 处为酯基中 C—O—C 的不对称伸缩振动峰， 1729 cm^{-1} 处为酯基中 C=O 的伸缩振动峰。这些峰与丙烯酸丁酯结构单元对应。在 2960 cm^{-1} 处为 $\text{CH}_3\text{-Si}$ 中 C—H 的伸缩振动峰，在 1074 cm^{-1} 附近为 Si—O—Si 的反对称伸缩振动吸收峰^[12]， 1650 cm^{-1} 处未发现 C=C 特征峰，说明丙烯酸丁酯已完全和乙烯基硅树脂中的双键反应，生成了聚合物。这些结果说明，丙烯酸丁酯和乙烯基硅树脂的共聚物已涂覆在棉织物表面。曲线 c 中，除了上述棉织物疏水乳液的特征峰之外，在 543 cm^{-1} 处为 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的 Fe—O 的伸缩振动峰，说明在超疏水棉织物表面存在疏水共聚物和 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 。

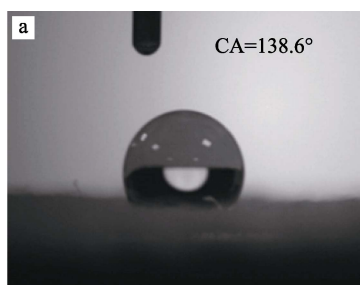
2.3 乳液浸涂次数对棉织物疏水性能的影响

疏水乳液浸涂次数对棉织物疏水性能影响如表 1 所示。图 3 为浸涂疏水乳液棉织物的接触角照片及浸涂疏水乳液前、后棉织物的 SEM 照片。由表 1 可知，表面超亲水的棉织物浸涂 1 次乳液后，对水的接触角增加至 130.2° ，具有良好的疏水性。浸涂 2 次后，对水的接触角增至 138.6° (见图 3a)，浸涂 3 次后，对水的接触角基本保持不变。从图 3b 可以看出，未浸涂疏水乳液的棉纤维表面较为光滑，纤维间界限清晰。浸涂 2 次疏水乳液的棉纤维表面(图 3c) 出现块状物，纤维间产生粘连，表明疏水乳液已经涂覆在纤维表面。在棉织物表面浸涂丙烯酸丁酯和乙烯基硅树脂的共聚乳液后，共聚物中酯基中的羰基可与棉纤维的羟基产生氢键作用，使得乳液覆盖在棉织物表面上。将含硅的物质引入棉纤维表面，可显著降低棉织物表面能，使其对水的接触角增大。而当疏水乳液浸涂超过 2 次后，棉织物的表面能可能已接近最低值，继续增加浸涂次数，对疏水性能影响不大。故选择疏水乳液浸涂次数为 2 次进行后续实验。

表 1 疏水乳液浸涂次数对棉织物疏水性的影响

Table 1 Influence of coating times of emulsion on the hydrophobicity of cotton fabric

	浸涂次数/次			
	0	1	2	3
接触角/ ($^\circ$)	0	130.2	138.6	138.4



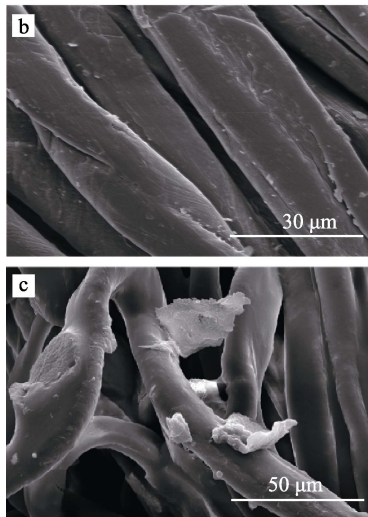


图 3 浸涂疏水乳液 2 次棉织物的接触角照片 (a)、未浸涂乳液棉织物 (b) 及浸涂疏水乳液 2 次后棉织物 (c) 的 SEM 照片

Fig. 3 Contact angle photograph of the cotton fabric emulsion coated 2 times (a), SEM images for the pristine cotton fabric (b) and the cotton fabric emulsion coated 2 times (c)

2.4 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 分散液浸涂次数对棉织物疏水性能的影响

$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 分散液浸涂次数对浸涂 2 次疏水乳液棉织物疏水性能的影响如表 2 所示。图 4 为浸涂 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 棉织物接触角照片和浸涂 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 棉织物及纤维表面 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的 SEM 照片。由表 2 可知, 浸涂 1 次 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 后, 棉织物对水的接触角可达到 152.3° , 另测得棉织物对水的滚动角为 9.1° , 达到超疏水状态。浸涂 2 次后, 棉织物对水的接触角增至 158.6° (见图 4a), 继续增加浸涂次数, 对水的接触角基本保持不变。从图 4b 可以看出, 浸涂 1 次之后, $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 纳米粒子就已将大部分纤维表面覆盖, 且 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 粒径为 $40\sim 70\text{ nm}$ (见图 4c), 在纤维表面形成了纳米级的粗糙结构。结合图 3 和图 4 可知, 棉织物在浸涂疏水乳液和 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 分散液后获得超疏水性能的原因有两个: 首先, 疏水乳液赋予棉纤维表面很低的表面能, 显著降低了纤维的亲水性; 其次, 棉纤维天然的微米级粗糙表面与纳米 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 粒子形成了微米-纳米复合的粗糙结构, 进一步增大了纤维的疏水性。因此, 制备得到棉织物的超疏水特性源于织物表面的低表面能化学组成和微米-纳米复合结构的共同作用^[13]。由于 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 的浸涂次数为 2 次时接触角最大, 故选择 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 分散液浸涂次数为 2 次进行后续实验。

表 2 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 分散液浸涂次数对棉织物疏水性的影响
Table 2 Influence of coating times of $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ dispersion on the hydrophobicity of cotton fabric

接触角/ $(^\circ)$	浸涂次数/次				
	0	1	2	3	4
	138.6	152.3	158.6	158.3	158.3

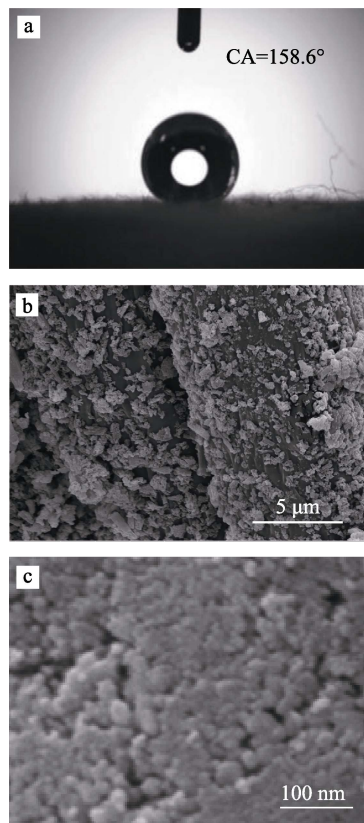


图 4 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 分散液浸涂 2 次棉织物接触角照片 (a)、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 分散液浸涂 1 次的棉织物 (b) 及纤维表面 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ (c) 的 SEM 照片

Fig. 4 Contact angle photograph of cotton coated 2 times by iron oxide dispersion (a), SEM images for the cotton fabric coated 1 times by iron oxide dispersion (b) and the iron oxide on the fibre (c)

2.5 紫外光对含 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 棉织物润湿性的影响

用紫外光对超疏水棉织物单面照射, 考察了紫外光照射时间对织物正面 (即光照面) 和背面 (即背光面) 润湿性能的影响, 结果见图 5。

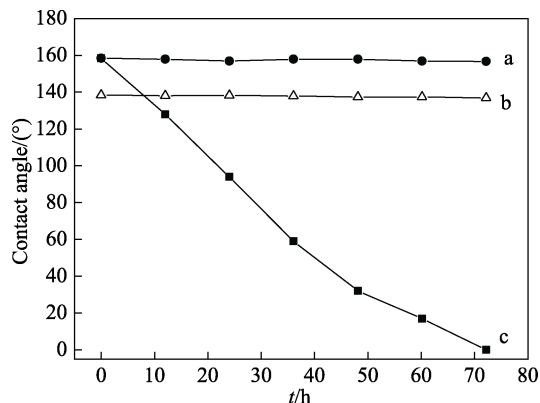


图 5 紫外光照射时间对超疏水棉织物正、反面 (c 和 a) 及浸涂疏水乳液棉织物 (b) 润湿性的影响

Fig. 5 Influence of ultraviolet irradiation time on the wettability of front side (c), reverse side (a) of the super hydrophobic cotton fabric and emulsion coated cotton fabric (b)

可以看出, 织物正面对水的接触角随着紫外光照射时间的延长而逐渐减小。当光照 36 h 后, 对水的接触角已降至 59.3° , 转变为亲水性; 当光照 72 h 后, 对水的接触角降至 0° , 织物正面转变为超亲水性(图 5 曲线 c)。而织物反面对水的接触角几乎保持不变, 光照 72 h 后, 接触角为 157.4° , 依旧为超疏水状态(图 5 曲线 a)。此外, 仅浸涂疏水乳液棉织物对水的接触角并未发生显著变化(图 5 曲线 b)。这是因为织物正面的 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 作为 *n* 型半导体, 可吸收能量大于带隙能的紫外光, 将价带上的电子激发到导带上, 发生氧化还原反应, 产生氧空位, 使表面吸收水分子, 形成亲水微区, 呈现出超亲水状态^[14-15]。

2.6 棉织物的单向导湿性能

经紫外光照射的超疏水棉织物正面及反面的透湿量如表 3 所示。可以看出, 棉织物的正反两面都具有透湿性, 且反面较高, 说明制备的棉织物具有一定的单向导湿性能。棉织物反面导湿时, 棉织物面向水的一侧表面为超疏水性, 难以被水润湿, 水分不易滞留; 而面向空气一侧表面为超亲水性, 对水分子的牵引和吸收较强, 可使水分迅速散发至空气中, 这样产生差动毛细效应^[16], 因而棉织物具有较高的透湿量^[17]。

表 3 超疏水棉织物的正面及反面透湿量

Table 3 Moisture permeability of the front and reverse side of the super hydrophobic cotton fabric

	正面	反面
透湿量 / [g/(m ² ·d)]	854.34	1035.35

2.7 超疏水棉织物的油水分离性能

为考察超疏水棉织物的油水分离特性, 以 5.0 mL 四氯化碳模拟油与 5.0 mL 去离子水(用亚甲基蓝染色, 被染色的水中亚甲基蓝质量浓度为 1 g/L)混合, 图 6a 为油水分离装置示意图; 图 6b 为分离前的油水混合物; 图 6c、d 分别为分离后所得的四氯化碳和水。将棉织物放在烧杯上(见图 6a), 然后将油水混合物缓慢倒在棉织物上, 油滴会迅速透过超疏水的棉织物, 收集在烧杯中, 水则由于棉织物的超疏水性难以透过, 在上方被收集, 如图 6c、d 所示。可见, 利用棉织物表面的超疏水特性, 可在 20 s 内对油水混合物快速分离, 其对油水混合物中油、水的分离效率分别为 96.1% 和 99.0%。此外, 在连续循环 5 次后, 其还可在 20 s 内对油水混合物实现快速分离, 对油、水的分离效率分别为 94.2% 和 98.5%, 证明制备的超疏水棉织物具有良好的循环使用性能。

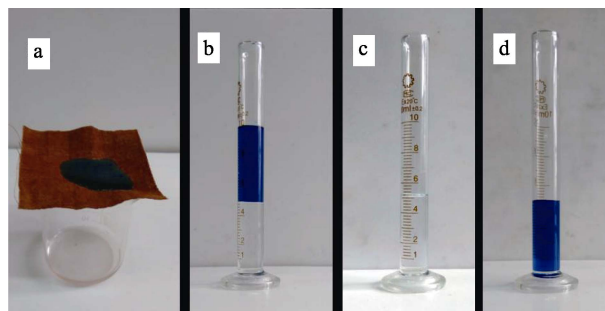


图 6 超疏水棉织物对油水混合物分离

Fig. 6 Oil-water mixture separation by superhydrophobic cotton fabric separation device of water-oil mixture executed by superhydrophobic cotton fabric (a), oil-water mixtures before separation (b), oil collected in cylinder (c) and water collected in cylinder (d)

3 结论

采用含硅的疏水乳液和 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 分散液分别浸涂的方法, 可使棉织物表面对水的接触角达到 158.6° , 获得超疏水性。织物表面形貌分析结果证实棉织物表面微米-纳米复合结构的形成。用紫外光照射该超疏水棉织物表面, 正面转变成超亲水性, 而反面仍为超疏水性, 并且反面的透湿量大于正面, 说明光照后棉织物具有单向导湿性能。同时, 超疏水棉织物具有良好的油水分离特性, 对油水混合物中油和水的分离效率分别是 96.1% 和 99.0%。

用疏水乳液和 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 分别浸涂制备超疏水棉织物是一种有效、不使用含氟化学品、对环境友好且简便易行的方法。该超疏水棉织物在油水分离、自清洁和单向导湿等领域具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] Qin Zhenjun (秦贞俊). Frontier technology of world cotton textile (世界棉纺织前沿技术)[M]. Beijing: China Textile Press (中国纺织出版社), 2010: 1-2.
- [2] Qin Yimin (秦益民), Mo Lan (莫岚), Zhu Changjun (朱长俊), *et al.* Progress in technologies for functional modifications of cotton fibers [J]. Journal of Textile Research (纺织学报), 2015, 36(5): 153-157.
- [3] Liu H, Gao S, Cai J, *et al.* Recent progress in fabrication and applications of superhydrophobic coating on cellulose-based substrates[J]. Materials, 2016, 9(3): 124-161.
- [4] Shanguan Wenchao (上官文超), An Qiufeng (安秋凤), Lv Zhujun (吕竹筠). Synthesis and application of transparent water-repellent and wear resistant coating[J]. Fine Chemicals (精细化工), 2018, 35(3): 377-382.
- [5] Lin J, Zheng C, Ye W, *et al.* A facile dip-coating approach to prepare SiO₂/fluoropolymer coating for superhydrophobic and superoleophobic fabrics with self-cleaning property[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(1): 912-918.
- [6] Li Hao (李浩), Su Xunjia (苏勋家), Hou Genliang (侯根良), *et al.* Construction of superhydrophobic surface with nano-silica based on layer-by-layer assembly[J]. New Chemical Materials (化工新型材料), 2014, 42(10): 102-104.

(下转第 2154 页)