

· 研究论文 ·

基于二氧化钛无氟超疏水非织造织物制备及其 油水分离性能

郝云歌¹ 周缘¹ 李解放¹ 李蓉¹ 周嫦娥¹ 栗志广^{1,2*}

(1. 江南大学纺织科学与工程学院, 生态纺织教育部重点实验室, 无锡 214122;

2. 武汉纺织大学生物质纤维与生态染整湖北省重点实验室, 武汉 430200)

摘要: 采用硅烷偶联剂KH560作为桥梁, 十八烷基三氯硅烷(OTS)作为长疏水链结构, 对纳米二氧化钛(TiO_2)粒子改性制得OTS-KH560/ TiO_2 溶胶, 并整理到织物上制备超疏水非织造织物。利用红外光谱、扫描电镜和X射线能谱表征织物表面化学结构、形貌和元素组成, 通过测试水接触角表征织物表面疏水性能, 分析 TiO_2 /OTS用量比、焙烘温度、焙烘时间等因素对于整理织物水接触角的影响。此外, 研究疏水整理织物的耐酸碱性能、防污性能、油水分离性能和力学性能。结果表明: 当 TiO_2 /OTS用量比为0.3 g/0.984 g, 焙烘温度和焙烘时间分别为170 °C和80 s时, 整理织物表面的接触角可高达166.5°, 且整理后的织物具有良好的耐酸碱性能、防污性能、油水分离能力、吸油性能和力学性能。

关键词: 超疏水; 无氟; 涤纶非织造织物; 二氧化钛; 油水分离

Preparation of Superhydrophobic Nonwoven Fabric Based on Titanium Dioxide Particles and Its Oil-water Separation Performance

HAO Yun-ge¹, ZHOU Yuan¹, LI Jie-fang¹, LI Rong¹, ZHOU Chang-e¹, LI Zhi-guang^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Eco-textiles of Ministry of Education, College of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. Hubei Key Laboratory of Biomass Fibers and Eco-Dyeing & Finishing, Wuhan Textile University, Wuhan 430200, China)

Abstract: In this paper, OTS-KH560/ TiO_2 sol was obtained by modifying nano- TiO_2 particles with silane coupling agent KH560 as a bridge and OTS as a long hydrophobic chain structure, and then finished on the fabric to prepare superhydrophobic fabric. The fabric structure, surface morphology and element composition were characterized by Fourier transform infrared spectrometer, scanning electron microscopy and energy dispersive spectrometer, and the hydrophobic properties of the fabric surface were characterized by testing the water contact angle. The effects of TiO_2 /OTS dosage ratio, baking temperature and baking time on the contact angle of the finished fabric were further analyzed. In addition, the acid-alkali resistance, anti-fouling performance, oil-water separation performance and mechanical property of the hydrophobic finished fabric were studied. The results showed that when the TiO_2 /OTS dosage ratio was 0.3 g/0.984 g, the baking temperature was 170 °C, and the baking time was 80 s, the water contact angle on the surface of the finished fabric could reach 166.5°. The finished fabric had good acid-alkali resistance, anti-fouling performance, oil-water separation ability, oil absorption performance

2024-07-23 收稿, 2024-08-19 录用, 2024-09-12 网络出版

基金项目: 中国博士后科学基金 (基金号 2021M701449), 江苏省博士后科研资助计划项目 (项目号 2021K080A), 生物质纤维与生态染整湖北省重点实验室开放基金资助 (基金号 STRZ202312)。

* 通信联系人: 栗志广, E-mail: lizg@jiangnan.edu.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2024.24.212

and mechanical property.

Keywords: Superhydrophobic; Fluoride-free; Polyester nonwoven fabric; Titanium dioxide; Oil-water separation

引用: 郝云歌, 周缘, 李解放, 李蓉, 周嫦娥, 栗志广. 基于二氧化钛无氟超疏水非织造织物制备及其油水分离性能. 高分子通报, 2025, 38(1), 100–108.

Citation: Hao, Y. G.; Zhou, Y.; Li, J. F.; Li, R.; Zhou, C. E.; Li, Z. G. Preparation of superhydrophobic nonwoven fabric based on titanium dioxide particles and its oil-water separation performance. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2025, 38(1), 100–108.

由于工业废水、原油泄漏等问题会对人类健康和生态环境造成极大危害, 因而开发绿色环保油水分离材料和吸附材料成为新的研究方向。非织造织物具有孔隙率大和比表面积大等特性^[1,2], 其中涤纶无纺布具有高强度、耐高温、耐老化等性能。但是, 传统涤纶非织造织物因其疏水性的不足难以满足要求。基于此, 在涤纶非织造织物表面进行超疏水改性, 不仅可以提高其性能和附加值, 而且可以满足开发绿色环保油水分离材料和吸附材料的迫切需求^[3]。

超疏水表面(水的接触角大于 150° , 滚动角小于 10°)对水排斥力大, 在自清洁、油水分离等方面展现出广泛的应用前景^[4–7]。研究发现, 要获得超疏水性能表面需满足低表面能和表面粗糙结构两个条件^[8]。据此原理, 将纳米二氧化钛(TiO_2)粒子引入到疏水性体系中, 在其表面构筑低表面能聚合物, 形成具有荷叶效应的超疏水织物。何丽红等^[9]以KH-570为偶联剂, 对纳米 TiO_2 进行有机化改性, 在表面形成良好疏水性能的有机膜。徐林等^[10]用溶胶-水热法在涤纶织物表面原位生成纳米 TiO_2 , 采用氟硅烷对其低表面能修饰, 其表面水接触角达 153° , 拒油等级达到6级。含氟助剂的使用是达到疏水疏油效果的最佳方法, 但含氟超疏水助剂对环境的危害大, 因此选择无氟助剂对于环境保护具有重要意义。

本文通过发挥硅烷偶联剂KH560的桥梁作用, 将OTS疏水长链与纳米 TiO_2 表面羟基反应制备OTS-KH560/ TiO_2 溶胶, 然后将其整理到非织造织物表面, 得到无氟超疏水非织造织物, 对其制备工艺条件进行优化。对整理后非织造织物表面化学结构、表面形貌、元素组成进行表征, 测试其表面接触角、防污性能、耐酸碱性能、油水分离性能和吸油性能。

1 实验部分

1.1 实验原料与仪器

涤纶非织造织物(40 g/m^2), 信达无纺布有限公司; 十八烷基三氯硅烷(OTS, 分析纯AR), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 纳米二氧化钛(TiO_2 , 25 nm , 99.8%), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; γ -(2,3-环氧丙氧)丙基三甲氧基硅烷(KH560, 98%), 无水乙醇(分析纯AR), 氢氧化钠(分析纯AR), 浓盐酸(分析纯AR, 36%–38%), 二氯甲烷(分析纯AR), 国药集团化学试剂有限公司。苏丹红($\geq 85\%$), 上海百灵威化学有限公司。

Nicolet is10傅里叶变换红外光谱仪, 美国赛默飞世尔科技(中国)有限公司; SU1510扫描电子显微镜, 日本日立公司; JC2000D4M接触角测试仪, 上海中晨数字技术设备有限公司, MIT-1万能材料试验机, 常州三丰仪器科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 OTS-KH560/ TiO_2 溶胶制备

称取一定量的纳米 TiO_2 (0.3、0.4、0.5 g)于烧杯中并加入30 mL无水乙醇超声分散30 min, 制得A溶液; 将与 TiO_2 质量比值为0.15的KH560 (0.045、0.06、0.075 g)和30 mL H_2O 置于烧杯中, 在 70°C 恒温磁力搅拌器(800 r/min)上水解30 min, 制得B溶液。将A溶液、B溶液、OTS (1、2、3 mL)依次加入三颈烧瓶中, 调节pH值为4–5, 然后在 70°C 、转速800 r/min条件下恒温油浴反应3 h, 制得疏水性OTS-KH560/ TiO_2 溶胶。

1.2.2 超疏水涤纶非织造织物的制备

涤纶非织造织物先用洗涤剂皂煮(10 min, 60°C)洗去织物上残留杂质, 再用清水清洗, 置于烘箱中烘干。然后将非织造织物加入到氢氧化钠溶液(25 g/L)中处理^[11], 备用。

将疏水性OTS-KH560/ TiO_2 溶胶超声分散5 min

后对涤纶非织造织物进行疏水整理即制得超疏水涤纶非织造织物,具体工艺步骤:浸轧整理液→二浸二轧(轧余率70%~80%)→预烘(80℃,7 min)→焙烘(140~180℃,60~140 s)→水洗烘干。

1.3 测试方法

1.3.1 傅里叶变换红外光谱(FTIR)测试

利用 Nicolet is10 傅里叶变换红外光谱仪对经疏水整理的涤纶非织造织物进行红外光谱测试,采用 ATR 的方法,扫描范围为 4000~500 cm⁻¹,扫描次数为 32 次。

1.3.2 扫描电子显微镜(SEM)和X射线能谱(EDS)测试

将疏水整理的非织造织物剪成 1 cm×1 cm 试样后喷金,使用 SU1510 扫描电子显微镜分别在加速电压为 5 和 15 kV 条件下观察织物表面形貌和表面元素。

1.3.3 接触角测试

取 5 μL 去离子水分别滴在未整理、氢氧化钠预处理和疏水整理涤纶非织造织物表面,使用 JC2000D4M 接触角测试仪进行表面接触角测试,在同一样品不同位置测量 10 次取平均值^[9]。

1.3.4 防污性能测试

将咖啡、食用油、蓝色活性染料染液、红色活性染料染液、可乐分别滴在疏水整理织物和未整理织物表面,然后用胶头滴管吸去织物表面液滴,观察液滴移去前后织物润湿情况。

1.3.5 耐酸碱性能测试

通过去离子水稀释 1 mol/L 的盐酸溶液和氢氧化钠溶液,配制成 pH 为 2 和 13 的酸碱液。取整理前后的非织造织物,均裁成 1 cm×1 cm,分别在酸液和碱液中浸泡 24 h,取出用去离子水清洗,置于 60℃烘箱中烘干。通过接触角测试表征织物的耐酸碱性能。

1.3.6 油水分离和水下吸油测试

将用苏丹红染色的 50 mL 二氯甲烷与 150 mL 水组成油水混合物倒入分离装置,剪取与分离口等大的疏水整理织物作为分离膜,收集分离瓶中液体并称重。OTS-KH560/TiO₂ 溶胶整理涤纶非织造织物分离通量 F 与效率 η 之间存在以下关系:

$$F = \frac{V}{St} \quad (1)$$

其中: V 为渗透的二氯甲烷的体积, L; S 为整理织物与分离液体混合物有效接触面积, m²; t 表示分

离时间, h。

$$\eta = \frac{m_a}{m_b} \quad (2)$$

其中: m_a 为分离前二氯甲烷的质量, g; m_b 为分离后二氯甲烷的质量, g。

经过 15 次油水分离循环,按照上述方法分别计算分离通量和分离效率。

将苏丹红染色的 2 mL 二氯甲烷与 125 mL 水溶液放入烧杯中,将疏水整理涤纶非织造织物以及酸碱处理后的涤纶非织造织物用镊子夹取放入油水混合物中。待二氯甲烷完全被非织造织物吸附,将非织造织物取出。

1.3.7 力学性能测试

将处理前后的非织造织物剪成 10 mm × 50 mm 样品,通过夹持法测试膜的力学性能,测试参数:拉伸速度 10 mm/min,加持距离 30 mm。

2 结果与讨论

2.1 OTS-KH560/TiO₂ 溶胶制备及其对非织造织物整理原理

OTS-KH560/TiO₂ 溶胶的制备过程及其对非织造织物整理过程如图 1 所示。KH560 和 OTS 发生水解反应的产物端基为 Si—OH。其中 OTS 的水解缩合不同于传统的溶胶-凝胶法。在剧烈搅拌中,水与 OTS 形成稳定均匀的乳液,在水溶液中倾向于形成头对头的线性结构发生聚集,最终形成微米尺寸的颗粒^[12]。同时, TiO₂ 表面的一 OH 与 KH560 和 OTS 水解的产物进一步发生缩聚反应,使 TiO₂ 表面的一 OH 减少, KH560 和 OTS 水解的产物在 TiO₂ 表面缩聚反应生成大分子网络的溶胶^[13,14]。预处理后的涤纶织物表面也存在大量一 OH,在轧烘整理工艺条件下与 OTS-KH560/TiO₂ 溶胶发生反应^[15],得到改性涤纶非织造织物。

2.2 红外光谱分析

疏水整理非织造织物的红外光谱图如图 2 所示。可以看出, 724 cm⁻¹ 为 TiO₂ 分子中 Ti—O—Ti 键的伸缩振动峰, 1100 和 1250 cm⁻¹ 分别为 KH560 中环氧基(C—O—C)和 C—O—C 键伸缩振动的吸收峰。1720 cm⁻¹ 处为涤纶织物中—C=O 键的伸缩振动峰。在 2913、1410 cm⁻¹ 和 2858、1340 cm⁻¹ 处分别出现—CH₃ 和—CH₂ 的伸缩振动峰,表明 OTS 成功接枝到织物表面。1020 cm⁻¹ 处为 Ti—O—Si 键的特征峰,表明 KH560 在水解后与 TiO₂

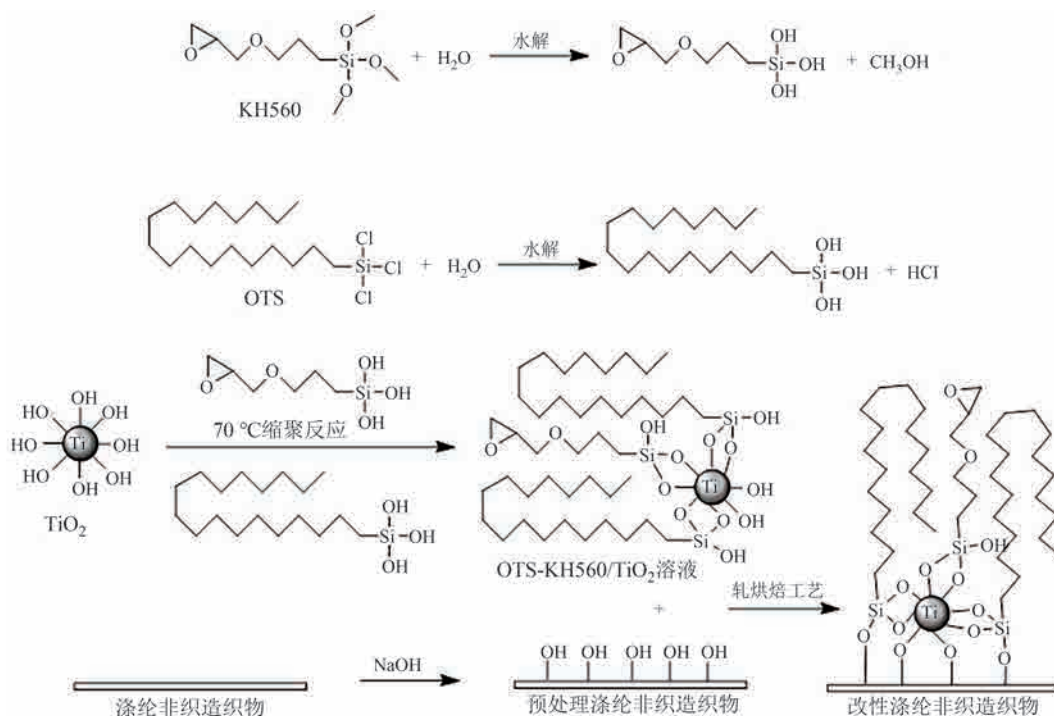
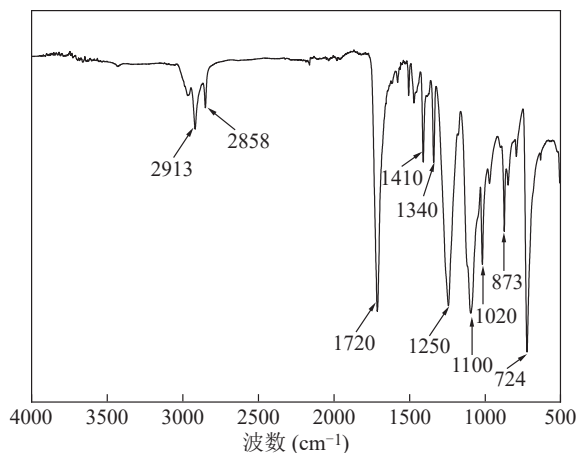
图1 OTS-KH560/TiO₂ 溶胶的制备及其对非织造织物整理过程图Figure 1 Preparation of OTS-KH560/TiO₂ sol and its finishing process on nonwoven fabric

图2 疏水整理非织造织物红外光谱图

Figure 2 FTIR spectrum of hydrophobic nonwoven fabric

交联,而在 873 cm^{-1} 处出现特征峰说明 KH560 水解后剩余 -OH 与 OTS 水解后的 -OH 发生反应。KH560 以共价键的形式接枝纳米二氧化钛和疏水长链 OTS, 并且 OTS-KH560/TiO₂ 溶胶成功负载到涤纶非织造织物上。

2.3 表面形貌分析

未整理织物和经 OTS-KH560/TiO₂ 溶胶疏水整理织物的扫描电镜图如图 3 所示。从图 3(a) 中可以看出, 未处理织物纤维表面比较光滑, 无明显杂质和粗糙结构。图 3(b) 中经 OTS-KH560/TiO₂

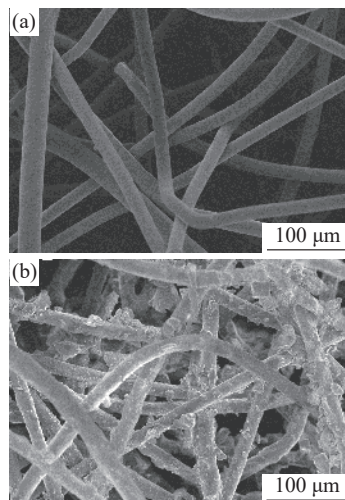


图3 (a)未整理非织造织物和(b)疏水整理非织造织物表面 SEM 图

Figure 3 SEM images of (a) unfinished and (b) hydrophobic nonwoven fabrics

溶胶处理织物纤维表面可明显看到部分纳米颗粒积聚成较大颗粒, 牢固地覆盖在纤维表面, 形成粗糙结构。

2.4 表面元素分析

对整理后织物进行 EDS 元素分析如图 4 所示。由图 4 可看出, 整理织物中存在 C、O、Si、Cl、Ti 五种元素。C 和 O 元素是因为织物本身就含有大量

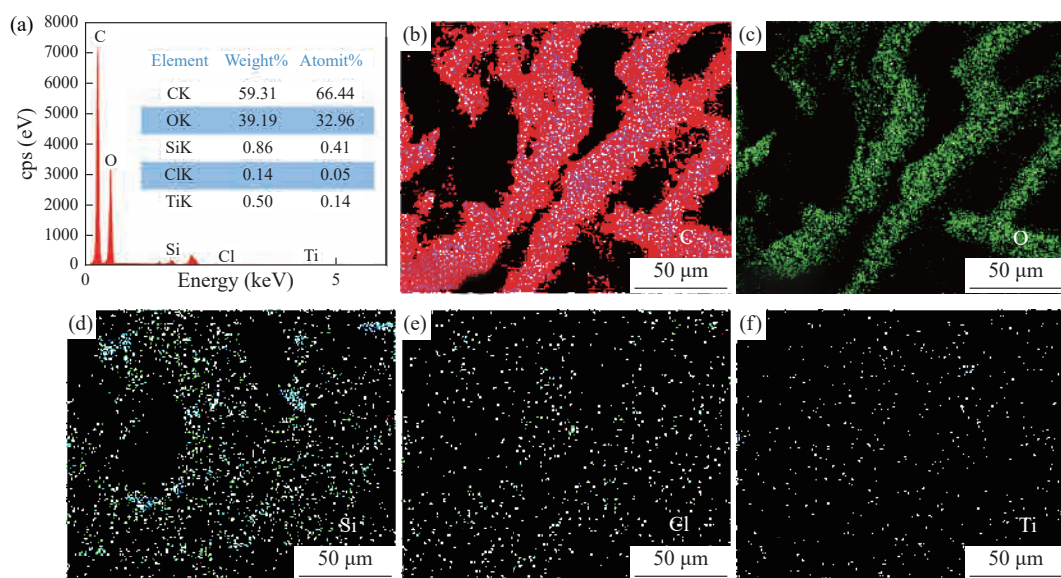


图4 (a)疏水整理非织造织物 EDS 能谱图和(b~f)其表面元素点分布图

Figure 4 (a) EDS spectrum and (b~f) surface element point distribution of hydrophobic finish nonwoven fabric

烃基和酯基,且硅烷偶联剂KH560和OTS均有大量甲基、亚甲基等烃类结构。由于OTS遇水水解,会放出HCl气体,因而整理织物中Cl元素质量分数相较OTS中质量分数下降较多。从图4(a)中可看出, Si和Ti两种元素的质量分数分别为0.86%和0.50%,与添加反应体系中化合物的质量分数基本一致,说明OTS和KH560成功接枝TiO₂并整理到织物表面。从图4(b)~4(f)中可看出, C、O、Si、Cl和Ti元素较为均匀,说明OTS-KH560/TiO₂溶胶在织物表面分布良好,未出现严重聚集现象。

2.5 影响织物水接触角的因素

未处理的非织造织物表面水接触角为 $107.3^\circ \pm 1.4^\circ$,具有一定的疏水性能。而经氢氧化钠溶液预处理后,非织造织物表面对水接触角为 $61.0^\circ \pm 1.7^\circ$,由于经氢氧化钠处理后,其表面产生大量羟基^[11],表现出亲水性能。

2.5.1 TiO₂/OTS用量比的影响

首先对TiO₂/OTS用量比进行工艺调控,选择焙烘温度170℃,焙烘时间80s,其工艺处方及整理后织物的对水接触角如表1所示。

由表1可知,当用量比为0.3 g/0.984 g时,织物的水接触角最大,可能是由于此时TiO₂粒子表面羟基能较完全地与KH560交联,因而OTS中疏水链可最大程度地接枝在织物表面,形成较为致密的粗糙结构;当用量比为0.5 g/0.984 g时,织物接触角最小,因为OTS量不足,其疏水链在织物表面难以形成完整均匀的粗糙结构,因此难以达到

表1 不同TiO₂/OTS用量比整理液整理织物后水接触角

Table 1 Water contact angle on the finishing the fabric with different TiO₂/OTS dosage ratios

编号	TiO ₂ /OTS 用量比 (g/g)	水接触角 (°)
1	0.3/0.984	166.5 ± 1.4
2	0.3/1.968	156.1 ± 1.1
3	0.3/2.952	153.7 ± 1.7
4	0.4/0.984	138.9 ± 1.3
5	0.4/1.968	146.1 ± 1.4
6	0.4/2.952	156.6 ± 1.2
7	0.5/0.984	125.7 ± 1.3
8	0.5/1.968	151.2 ± 1.4
9	0.5/2.952	161.1 ± 1.1

较好的疏水效果。

2.5.2 焙烘温度和焙烘时间

改变焙烘温度或焙烘时间,织物表面接触角如图5所示。从图5(a)中可看出,当增加焙烘温度时,织物表面水接触角先增大后减小。随着焙烘温度的增加,脱水缩合反应充分,交联程度增强导致分子排列紧密,接触角提高。当焙烘温度达到170℃以后,由于温度较高,织物表面交联结构遭到破坏,因而其表面疏水性能降低。从图5(b)中可看出,若焙烘时间过短,羟基间脱水缩合不完全,整理剂还未与织物完全交联,织物表面接触角较低。延长焙烘时间达到80s后,接触角达到最大值。随着焙烘时间的增加,过度脱水缩合导致其表面微纳结构被破坏,织物表面接触角稍有下降。

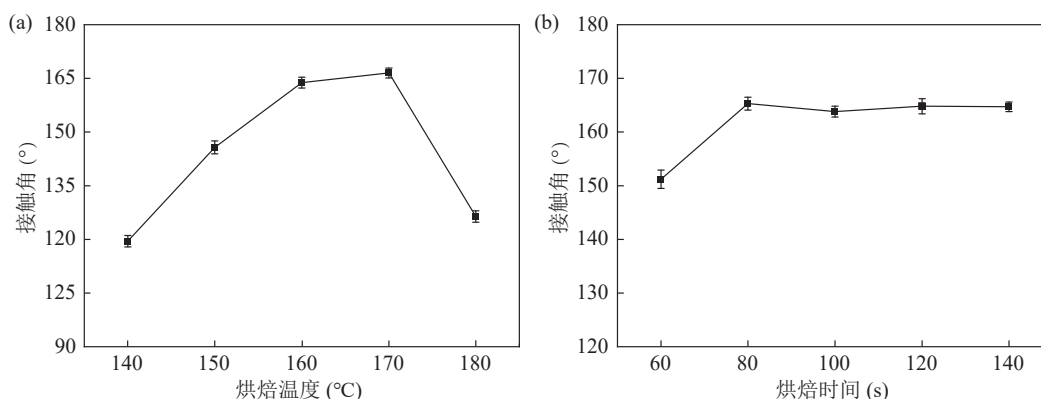


图5 (a)烘焙温度和(b)烘焙时间对于涤纶非织造织物接触角的影响

Figure 5 Influence of (a) baking temperature and (b) baking time on the contact angle of polyester nonwovens

综合考虑,当 TiO_2/OTS 用量比为0.3 g/0.984 g时,烘焙温度为170 °C,烘焙时间为80 s时,织物表面水接触角最好,可高达166.5°。

2.6 耐酸碱性能测试

未处理和经酸碱处理后的非织造织物的接触角如图6所示。从图6可看出,经酸碱处理后,涤纶织物表面接触角均有降低,但经碱处理后降低幅度更大。因为经过酸碱溶液浸泡,表面微纳米粗糙结构局部被破坏,纤维存在一定程度损伤,又因为涤纶中酯基相对耐酸不耐碱,故而经碱液浸泡处理后织物接触角降低更多。

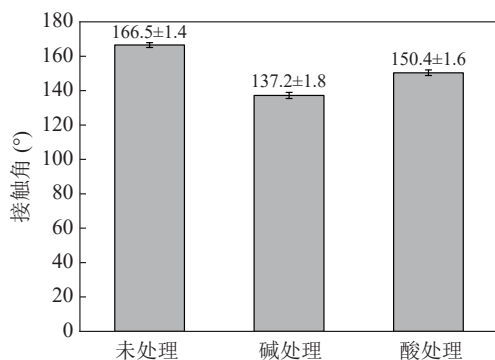


图6 未处理和经酸碱处理非织造织物表面接触角

Figure 6 Surface contact angle of untreated and acid-alkali treated nonwoven fabrics

2.7 防污性能测试

将咖啡、活性红 B-3BF 染液、可乐、活性艳蓝 P-3R 染液、食用油依次滴到未处理织物和处理后的织物上,再移除观察织物表面液体残留情况,如图7所示。

从图7可看出,5种液滴在未整理织物表面均立即润湿织物表面,形成污渍。而只有食用油能润湿整理织物表面,其余液滴均在织物表面成液

珠状,在移除后也未留下任何污渍痕迹,表现出良好的防污性能。这是整理后的非织造织物表面微/纳粗糙结构及低表面能物质使其表面产生空气空隙,有效阻止液体的渗透。

2.8 油水分离和水下吸油测试

非织造织物油水分离过程以及随着循环次数增加,其分离通量和分离效率变化分别如图8(a)和8(b)所示。由图8(a)可以看出,水和油分离较为彻底,基本看不到液体的混合现象。根据1.3.6节中公式计算分离通量 F 为 $1356.7 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,分离效率 η 为86.48%,主要是非织造织物多孔结构造成。因此,经疏水整理后的非织造织物具有良好的油水分离效果。

为进一步考察疏水处理后的非织造织物的油水分离能力,将非织造织物重复分离二氯甲烷/水混合物15次,分别计算分离通量和分离效率。由图8(b)可以看出,随着循环次数的增加,处理后的非织造织物表面由于出现水的堆积,其分离通量不断下降,经15次循环仍能保持 $1100 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 以上,分离效率保持在83.1%以上,说明疏水整理后的非织造织物具有优异的循环使用性能。

疏水整理后的非织造织物的水下吸油性能如图9(a)所示。此外,对整理后的非织造织物进行酸碱分别处理24 h后的样品进行吸附性能测试,其水下吸油过程如图9(b)和9(c)所示。

由图9(a)可知,将疏水整理涤纶非织造织物用镊子夹取放入油水混合物中,可看到二氯甲烷迅速被织物吸收,夹起织物,未观察到有二氯甲烷液滴落下,且烧杯中水量仍保持原量,表明疏水整理后织物具有优良的疏水亲油性能,能达到水下吸油效果。由图9(b)和9(c)可以看出,疏水

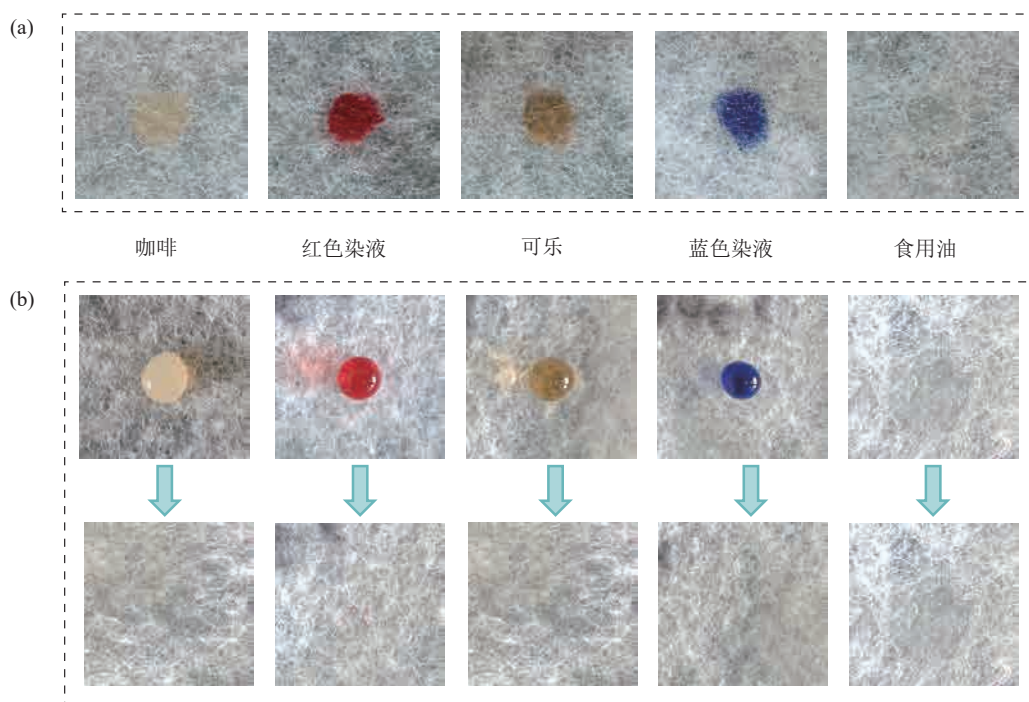


图 7 (a)未处理非织造织物和(b)处理后非织造织物对不同污渍的防污性能

Figure 7 Anti-fouling properties of (a) untreated nonwoven fabric and (b) treated nonwoven fabric to different stains

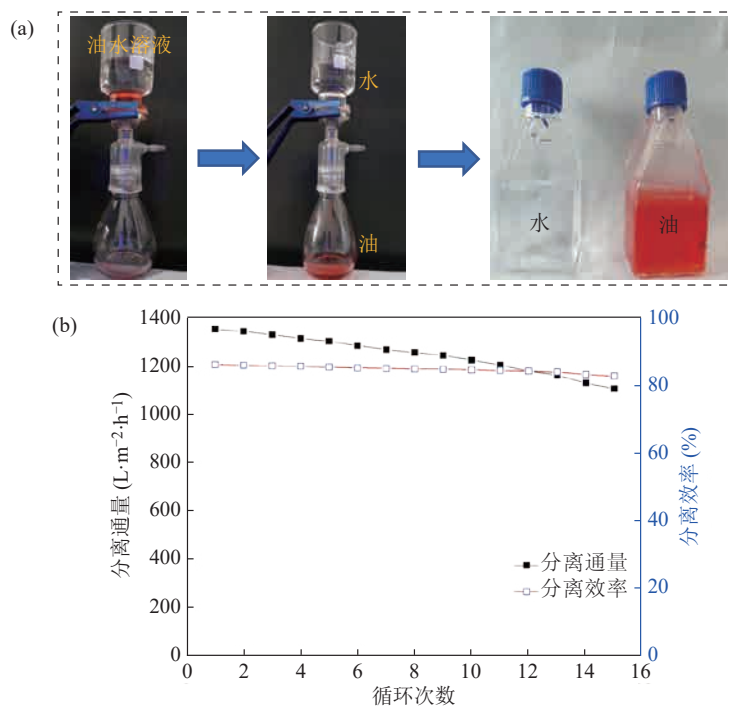


图 8 (a)疏水整理的非织造织物的油水分离过程;(b)疏水整理非织造织物分离通量和分离效率随循环次数变化图

Figure 8 (a) Oil-water separation process of hydrophobic finishing nonwoven fabric; (b) Separation flux and separation efficiency of hydrophobic finishing nonwoven fabric with the number of cycles

整理后的非织造织物经酸和碱分别处理 24 h 后,仍具有良好的水下吸油性能,说明酸和碱未对疏水整理非织造织物造成很大程度的破坏。

2.9 织物强力测试

未整理非织造织物和疏水整理后的非织造织物的力学性能如图 10 所示。可以看出,未处理非

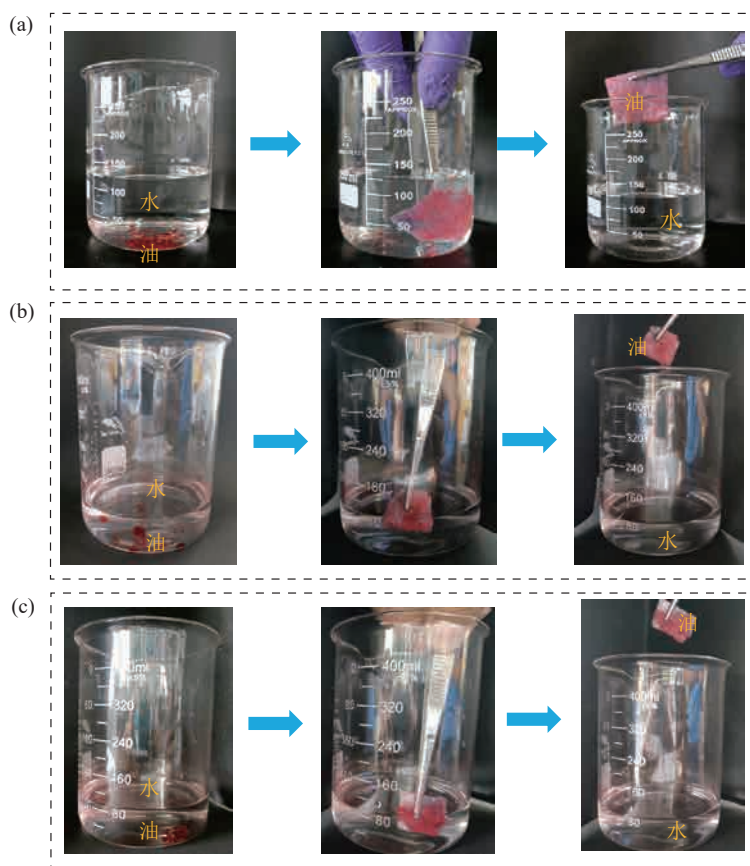


图9 (a)疏水整理的非织造织物的水下吸油过程;(b)疏水整理的非织造织物经酸处理后的水下吸油过程;(c)疏水整理的非织造织物经碱处理后的水下吸油过程

Figure 9 (a) Underwater oil absorption process of hydrophobic finishing nonwoven fabric; (b) Underwater oil absorption process of hydrophobic finishing nonwoven fabric treated with acid; (c) Underwater oil absorption process of hydrophobic finishing nonwoven fabric treated with alkali

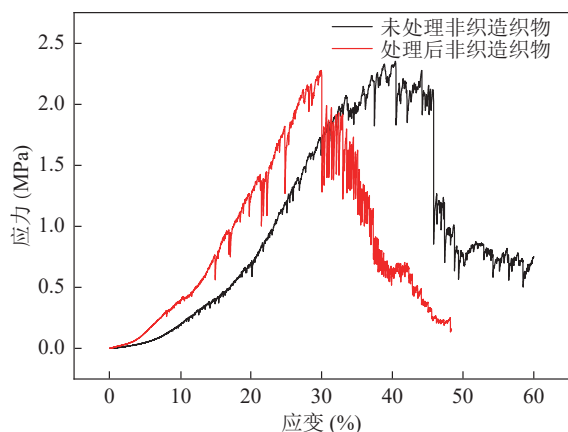


图10 未处理和处理后非织造织物的应力-应变曲线图
Figure 10 Tensile stress-strain curves of untreated nonwoven fabric and treated nonwoven fabric

织造织物的拉伸强度为2.35 MPa, 处理后非织造织物的拉伸强度为2.27 MPa。处理后的织物拉伸强度比未处理织物的拉伸强度稍有降低, 说明整

理过程对其强力影响不大, 不影响其后续应用。

3 结论

以KH560为桥梁, OTS为疏水长链, 对纳米二氧化钛粒子改性, 并用其整理涤纶非织造织物, 得到具有超疏水性能的无氟涤纶非织造织物。对整理工艺影响因素的探究结果显示, 当 TiO_2/OTS 用量比为0.3 g/0.984 g时, 焙烘温度为170 °C, 焙烘时间为80 s时, 织物表面水接触角最好, 可高达166.5°。经过pH=2和pH=13的酸碱溶液处理24 h后, 其接触角分别为150.4°和137.2°, 仍能达到超疏水和疏水性能。整理后的涤纶非织造织物对咖啡、红色染液、可乐、蓝色染液具有良好防污性能, 而食用油能润湿其表面。此外, 整理后的非织造织物具有良好油水分离性能, 分离效率为86.48%, 经15次循环后其分离通量和分离效率仍然保持在 $1100 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和83.1%以上。整理后的

非织造织物以及经过酸碱处理 24 h 后, 仍然具有良好的水下吸油能力。整理后的非织造织物的强力变化较小, 有利于其后续应用。

参考文献

- 1 焦宏璞, 钱晓明, 钱么, 邹驰. 医疗用非织造材料的加工技术及发展. *化工新型材料*, **2019**, 47(12), 27–31.
- 2 陈苗苗, 曾泳春, 卢晨, 刘力, 王洪. 水驻极熔喷非织造材料的制备与性能研究. *高分子通报*, **2022**, (2), 48–55.
- 3 张红阳, 任煜, 徐林, 吴双全, 李雅, 臧传锋, 徐思峻, 丁志荣. 常压等离子体辅助涤纶非织造材料表面拒水拒油整理研究. *纺织导报*, **2019**, (4), 26–29.
- 4 Pakdel, E.; Wang, J. F.; Kashi, S. M.; Sun, L.; Wang, X. G. Advances in photocatalytic self-cleaning, superhydrophobic and electromagnetic interference shielding textile treatments. *Adv. Colloid Interface Sci.*, **2020**, 277, 102116.
- 5 Xu, L. H.; Liu, Y. D.; Yuan, X. L.; Wan, J.; Wang, L. M.; Pan, H.; Shen, Y. One-pot preparation of robust, ultraviolet-proof superhydrophobic cotton fabrics for self-cleaning and oil/water separation. *Cellulose*, **2020**, 27(15), 9005–9026.
- 6 贺立, 陈晓丹, 李铮, 靳焘, 陈玉放, 赖华杰, 刘瑞. 基于点击化学反应的织物超疏水改性研究. *高分子通报*, **2019**, (11), 26–32.
- 7 张炜栋, 黄旭. 烷基类 SiO₂ 改性聚乳酸高效除油非织造布的制备及性能. *印染*, **2022**, 48(10), 55–58.
- 8 Xing, L. L.; Zhou, Q. Q.; Chen, G. Q.; Sun, G.; Xing, T. L. Recent developments in preparation, properties, and applications of superhydrophobic textiles. *Text. Res. J.*, **2022**, 92(19-20), 3857–3874.
- 9 何丽红, 周超, 李力, 卢章天. 硅烷偶联剂表面改性二氧化钛粒子超疏水性能. *精细化工*, **2014**, 31(9), 1061–1064.
- 10 徐林, 任煜, 张红阳, 吴双全, 李雅, 丁志荣, 蒋文雯, 徐思峻, 臧传锋. 涤纶织物表面 TiO₂/氟硅烷超疏水层构筑及其性能. *纺织学报*, **2019**, 40(12), 86–92.
- 11 Xue, C. H.; Guo, X. J.; Ma, J. Z.; Jia, S. T. Fabrication of robust and antifouling superhydrophobic surfaces via surface-initiated atom transfer radical polymerization. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2015**, 7(15), 8251–8259.
- 12 Zhang, L. S.; Zhou, A. G.; Sun, B. R.; Chen, K. S.; Yu, H. Z. Functional and versatile superhydrophobic coatings via stoichiometric silanization. *Nat. Commun.*, **2021**, 12(1), 982.
- 13 Gui, C. M.; Ma, H. D.; Zhang, R. X.; Liu, Y. L.; Li, H. L.; Huang, J. J.; Li, P. Stability analysis: rational design of a Ag nanoparticle/polymer brush for fabricating Cu coating on a PET surface. *Langmuir*, **2021**, 37(18), 5673–5681.
- 14 Zheng, X. C.; Zhou, X. F.; Chen, S. Q.; Wei, F.; Huang, M. D.; Hu, T. Terminal amine-based hyperbranched polymer-modified metal oxide particles for improving the stability of water-based drilling fluids in interaction with shales. *J. Appl. Polym. Sci.*, **2024**, 141(11), e55102.
- 15 Zhuo, T.; Chen, Z.; Xin, B. Surface modification of PE/PET by two-step method with graphene and silver nanoparticles for enhanced electrical conductivity. *J. Ind. Text*, **2022**, 51(5S), 8246S–8266S.