

消防员灭火防护服外层织物的 疏水耐液态危化品涂层研究

肖阳阳^{1a,1b} 石佩玉^{1a,1b} 丁水萍^{1a,1b} 吴一兰^{1a,1b} 王妮^{1a,1b,2} 肖红^{1a,1b}

1. 东华大学 a. 上海市现代纺织前沿科学研究基地, b. 纺织学院, 上海 201620;
2. 河北省纤维材料技术创新中心, 河北 石家庄 050035

摘要:在消防员灭火防护服外层织物表面构筑疏水耐液态危化品涂层,对提升消防员灭火防护服的防护性能以应对复杂的火场环境具有重要意义。通过浸渍、喷涂相结合的方法,以不同粒径的聚四氟乙烯(PTFE)颗粒为功能材料、聚二甲硅氧烷(PDMS)为黏结剂,对防护服外层织物进行改性整理,制得疏水耐液态危化品涂层织物,并对其表面形貌、润湿性能、耐危化品性能、透气透湿性能及耐久性能等进行测试与表征。研究结果显示:经涂层处理后,织物的纤维表面表现为类似浮雕的不规则粗糙结构,涂层织物的水接触角为 154.18° ,酸接触角与碱接触角分别为 91.8° 和 138.0° ;浸泡于 H_2SO_4 溶液(质量分数为30%)、NaOH溶液(质量分数为30%)、甲醇及乙酸乙酯等液态危化品后织物的质量损失率均小于5%;涂层织物的透气率和透湿率分别为 345.12 mm/s 和 $6\ 557.33\text{ g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$;经多次磨损和洗涤后,涂层织物的疏水性能仅小幅下降;在酒精灯外焰下灼烧20 min后,涂层织物的水接触角仍达 108.00° ,且其表面没有出现明显的破洞和脆裂现象。可知,制备的涂层织物具备良好的疏水性、耐液态危化品性能、透气透湿性能及耐久性能。

关键词:消防员灭火防护服;外层织物;涂层;疏水性;耐液态危化品性能;透气性能;透湿性能;耐久性能

中图分类号:TS 195.57

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2025)06-0043-10

Research on hydrophobic and liquid hazardous chemical-resistant coatings for outer fabric of fireman's protective clothing for firefighting

Xiao Yangyang^{1a,1b}, Shi Peiyu^{1a,1b}, Ding Shuiping^{1a,1b}, Wu Yilan^{1a,1b}, Wang Ni^{1a,1b,2}, Xiao Hong^{1a,1b}

a. Shanghai Frontiers Science Center of Advanced Textiles, b. College of Textiles,

1. Donghua University, Shanghai 201620, China;

2. Technology Innovation Center of Hebei for Fiber Material, Shijiazhuang 050035, Hebei, China

Abstract: It is of great significance to construct a hydrophobic and liquid hazardous chemical-resistant coating on the surface of the outer fabric of fireman's protective clothing for firefighting to cope with complex fire environments. Using polytetrafluoroethylene (PTFE) particles of varied sizes as functional materials, combined with polydimethylsiloxane (PDMS) as a binder, hydrophobic and liquid hazardous chemical-resistant coatings were constructed on the outer fabric surface through an impregnation-spraying dual-modification process. The surface morphology, wettability, hazardous

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3006102);东华大学国家大学生创新训练建设项目(202310255044)

收稿日期:2025-03-05

作者简介:肖阳阳,男,1999年生,在读硕士研究生,主要研究方向为消防服织物表面处理,cktxyy@163.com

通信作者:肖红,高级工程师,主要研究方向为电磁功能纺织材料、功能性纤维与织物、迷彩伪装及隐身纺织材料,76echo@vip.sina.com

chemicals resistance, air and moisture permeability, and durability of the fabrics were tested and characterized. It was observed that an irregular relief-like rough structure was formed on the fiber surfaces after coating treatment. The water contact angle of the coated fabric was 154.18° , while the acid contact angle and the alkali contact angle were 91.8° and 138.0° respectively. After immersion in liquid hazardous chemicals such as H_2SO_4 solution (with a mass fraction of 30%), NaOH solution (with a mass fraction of 30%), methanol and ethyl acetate, the mass loss rate of the fabrics was less than 5%. The air permeability and moisture permeability of the coated fabric were 345.12 mm/s and $6\ 557.33 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ respectively. After multiple wearings and washings, the hydrophobic property of the coated fabric only slightly decreased. After being burned in the outer flame of an alcohol lamp for 20 min, the water contact angle of the coated fabric still reached 108.00° , and there were no obvious holes or cracks on its surface. These findings confirmed that the prepared coated fabric exhibits excellent hydrophobicity, resistance to liquid hazardous chemicals, air and moisture permeability, and durability.

Keywords: fireman's protective clothing for firefighting; outer fabric; coating; hydrophobicity; resistance to liquid hazardous chemical; air permeability; moisture permeability; durability

随着现代工业生产与危化品储运规模的不断扩大,消防员面临的灭火救援环境日益复杂^[1]。近年来,我国消防应急救援事故中涉及液态危化品的事故不断增多,且通常情况下此类事故会产生较严重的灾害链式效应,破坏性大^[2]。在危化品事故救援中,消防员面临液态危化品的威胁,这对消防防护装备提出了更高的技术要求^[3]。传统的消防员灭火防护服虽具备优异的阻燃耐高温性能,但其在抵御液态危化品、有害颗粒物渗透,以及防水和保持防护效果的长期稳定性等方面均存在不足^[4]。

此外,为获得具有良好防护性能的消防员灭火防护服,通常需对服装面料施以超厚(厚度超过几百毫米)功能涂层,这会对防护服的透气透湿性造成不利影响,进而导致消防员在长时间作业中面临热应激等问题^[5]。近年来,表面疏液技术利用微纳粗糙结构与低表面能材料的协同作用,能够在固体上构建出优异的疏液表面^[6]。疏液表面可减少液体与服装面料表面的接触时间,使液体在服装面料表面呈珠状并快速滚落,从而有效防止有害液体的侵蚀、渗透,提高消防服对液态危化品的防护性能。然而,目前该技术在消防服防护领域的应用仍存在诸多不足,如:疏液涂层的力学性能不足,在反复磨损或高温灼烧作用下易失效^[7];传统疏液改性剂多为含氟整理剂,其能够有效降低基底表面的自由能^[8],提升材料的疏水性,但长氟碳链整理过程中会生成全氟辛酸

磺酸(PFOS)和全氟辛酸(PFOA)等副产物,进而产生环境毒性与生物累积性等安全问题^[9]。

Chen等^[10]使用不同粒径的 SiO_2 和聚二甲基硅氧烷(PDMS)对棉织物进行疏水改性整理,整理后棉织物的静态水接触角达 161.3° ,具有良好的耐久性和化学稳定性。Alamri等^[11]以不同粒径的 SiO_2 、 Fe_3O_4 颗粒作为功能材料,长氟碳链整理剂为疏水剂,环氧树脂为黏结剂,在钢材上制备了水接触角高达 175° 的超疏水表面。Liu等^[12]以含长氟碳链的1H,1H,2H,2H-十七氟癸基三氯硅烷为主成分、氨基丙烯酸乙酯为黏结剂,制备双疏阻燃芳纶织物。改性后芳纶织物的水接触角达 161.0° ,在距酒精性火源4 mm处灼烧16 min后,其水接触角仍高达 126.7° 。Li等^[13]以粒径为 $10 \mu\text{m}$ 的 SiO_2 和粒径为 25 nm 的 TiO_2 作为功能颗粒,聚氨酯(PU)作为黏结材料,在铝合金基底表面制备水接触角达 154.6° 的疏水涂层。目前,使用不同粒径的功能材料,同时添加可降低材料表面自由能的含氟整理剂,是提升材料疏水性的主要方法。

探索制备兼具耐液态危化品性、疏水性、耐久性、舒适性的新型消防服非常有必要。基于现有研究,本文尝试以2种不同粒径($1 \mu\text{m}$ 和 210 nm)的聚四氟乙烯(PTFE)颗粒为功能材料,PDMS整理剂为黏结剂,对消防员灭火防护服外层织物进行复合涂层整理,在织物表面构建微纳米复合结构,并测试

分析复合涂层整理后织物的疏水性、耐液态危化品性能、透气透湿性能及耐久性能。研究旨在通过物理阻隔和化学惰性的双重防护机制,为多功能防护材料的开发提供理论依据。

1 试验部分

1.1 试验材料

试验用消防员灭火防护服外层织物(基布)来自应急管理部天津消防研究所,成分为聚酰亚胺

(PI)/Nomex/凯夫拉(Kelvar)/导电纤维,面密度为 256 g/m^2 。基布的规格与基本力学性能如表 1 所示,织物组织结构为接结双层组织。试验用试剂如表 2 所示。

表 1 基布的规格与基本力学性能

Tab. 1 Specification and basic mechanical properties of the base fabric

织物方向	纱线密度/ [根·(10 cm) ⁻¹]	断裂强力/ N	断裂伸长率/ %
经向	307	1 308.4	19.9
纬向	179	117.3	15.7

表 2 试验用试剂

Tab. 2 Reagents for the experiment

试剂名称	型号规格	来源
PDMS	DC 184	道康宁公司
固化剂(甲基乙烯基环硅氧烷)	工业品	道康宁公司
稀释剂(二甲硅油)	工业品	道康宁公司
PTFE 颗粒(210 nm, 1 μm)	工业品	杜邦公司
正己烷	分析纯	迈瑞尔化学技术有限公司
氢氧化钠(NaOH)	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
浓硫酸(H ₂ SO ₄)	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
甲醇	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
乙酸乙酯	分析纯	国药集团化学试剂有限公司
稳定剂(改性三聚磷酸铝)	工业品	山东优索化工科技有限公司
非硅类消泡剂	DF-430K	上海先拓精细化工有限公司
去离子水	—	自制

1.2 试验仪器与设备

DHG-9145 型电热鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;OCA15EC 型接触角测量仪,德国 Dataphysics 公司;DXS-10ACKT 型扫描电子显微镜(SEM),日本日立公司;FX3180-CM15 型透湿率分析仪,瑞士 TESTEST 公司;YG461E 型织物透气量仪,温州方圆仪器有限公司;SW-24 型耐洗色牢度试验仪,上海际发仪器设备有限公司。

1.3 制备工艺

1.3.1 耐液态危化品整理剂的制备

根据预试验结果,以去离子水为溶剂并加入一定量的稳定剂和消泡剂,制备 PTFE 质量分数为 6% 的混合溶液。其中,粒径为 1 μm 的 PTFE 颗粒与粒径为 210 nm 的 PTFE 颗粒的质量比为 2:4。对混合溶液超声分散 1 h 后,以 500 r/min 的速率机械搅拌,制得分散均匀、稳定性好的耐液态危化品整

理剂。

1.3.2 PDMS 整理剂的制备

以 $m(\text{PDMS 预聚物}):m(\text{固化剂}):m(\text{稀释剂})=10:1:1$ 的质量比称取相应试剂,将其混合均匀后缓慢滴入正己烷中溶解,并在室温下磁力搅拌 1 h 得到 PDMS 整理剂,作为黏结剂。整理剂中 PDMS 的质量分数为 2%。

1.3.3 疏水耐液态危化品涂层织物的制备

室温下,将经过预处理的基布浸泡在耐液态危化品整理剂中 30 min 后,置于 160 °C 的烘箱中热固化 15 min,然后在距离织物表面 5 cm 处,使用喷枪以 45° 倾角将配制好的 PDMS 整理剂喷涂在织物表面,再在 160 °C 条件下将其烘干,制得疏水耐液态危化品涂层织物试样,记为 H 涂层织物。

采用相同的喷涂工艺仅将 PDMS 整理剂喷涂在基布表面,不进行 PTFE 颗粒的负载改性,制得

PDMS 涂层织物试样作为对比样。

1.4 性能测试与表征

1.4.1 表面形貌表征

采用 SEM 观察所有待测试样(基布、PDMS 涂层织物及 H 涂层织物)的表面形貌。将试样裁剪成合适大小后,平整贴合在 SEM 的电镜台上,对其进行喷金处理,设定喷金时间为 90 s,测试电压为 10 kV,然后观察其表面形貌。

1.4.2 接触角测试

采用光学接触角测量仪,参照 GB/T 42694—2023《纺织品 表面抗润湿性能的检测和评价 接触角和滚动角法》测量所有待测试样的润湿性能。在试样表面分别选取 5 个位置进行水接触角的测试,结果取平均值。试验用水滴体积为 5 μL 。

1.4.3 耐液态危化品性能测试

使用移液枪在距所有待测试样表面 5 mm 处分别滴加 5 μL 质量分数为 96% 的浓 H_2SO_4 和 5 μL 质量分数为 30% 的 NaOH 溶液,测试试样的酸接触角和碱接触角。

参照 ISO 175:2010,采用溶剂浸泡后的质量损失率表征试样的耐化学稳定性能。试样的耐液态危化品性能测试方法如下:首先,使用去离子水和无水乙醇洗涤试样 3 min 以去除试样上的杂质,再在 100 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干 1 h,称取试样质量,记为 m_1 。然后,根据 GB 24539—2021《防护服装 化学防护服》中对化学防护性能测试用化学物质的要求,选择不同类别(酸类、碱类、醇类、酯类)的液态危化品进行测试。分别将试样浸泡在 H_2SO_4 溶液(质量分数为 30%)、NaOH 溶液(质量分数为 30%)、甲醇及乙酸乙酯等 4 种试剂中,不同试剂中同种试样测试 3 次,浸泡 1 h 后取出试样,逐个采用去离子水洗涤 3 min。其中, H_2SO_4 浸泡后的试样经数次清洗后浸入去离子水中,待溶液 pH 值约为 7 时再取出进行后续操作。待试样表面残留的试剂被清洗干净后,将其置于 100 $^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干 1 h,立刻取出称取其质量,记为 m_2 。最后,按照式(1)计算不同试样的质量损失率 w 。

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

1.4.4 透气性能测试

根据 GB/T 5453—1997《纺织品 织物透气性的

测定》测定所有待测试样的透气性。将试样正面朝上平整铺放在夹具平台上,设置气压为 100 Pa,每种试样测试 10 次,结果取平均值。

1.4.5 透湿性能测试

参照 GB/T 12704.1—2009《纺织品 织物透湿性试验方法 第 1 部分:吸湿法》,使用透湿率分析仪测试试样的透湿性能。测试前所有待测试样在温度为 $(20 \pm 2) ^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 $(65 \pm 4) \%$ 的环境下调湿 24 h。根据透湿杯内径截取试样至合适尺寸再进行测试。

1.4.6 耐久性测试

1.4.6.1 耐明火稳定性

为探究火场环境下所有待测试样的耐明火稳定性,将基布、PDMS 涂层织物及 H 涂层织物裁剪至合适的大小,用双面胶将其两端分别固定在铁丝网上,置于酒精灯上方,使试样待测面与点燃的酒精灯的外焰接触一定时间,记录试样与火焰分别接触 5、10、15 和 20 min 后其表面损伤情况,并测试灼烧处试样的接触角,用于表征其耐明火稳定性。测试环境在室内,酒精灯采用无水乙醇作为燃料,试验过程中需确保酒精灯点燃后不受空气流动的影响。

1.4.6.2 耐磨性能

利用砂纸对基布、H 涂层织物进行磨损性能测试,以表征其耐磨性能。将试样的待测面朝下放置,将 100 g 砝码压在试样上,试样朝下与砂纸[粒度为 15 μm (800 目)]接触并沿标尺移动 10 cm,然后将试样水平旋转 90 $^{\circ}$,再次沿标尺移动 10 cm,使经纬纱受到同等程度的磨损,并将此过程定义为 1 次磨损。对经不同磨损次数后的试样进行水接触角测试,分析其耐磨性能。

1.4.6.3 耐水洗性能

参照 GB/T 3921—2008《纺织品 色牢度试验 耐皂洗色牢度》的试验条件进行洗涤,保持浴比为 50:1,同时加入 10 粒钢珠模拟待测试样洗涤过程中的摩擦作用。在 50 $^{\circ}\text{C}$ 条件下分别洗涤 45、90、135 和 180 min。洗涤过程中,每洗涤 45 min 后将试样取出,悬挂晾干后再次洗涤,以模拟服装使用过程中的洗涤方式。完成洗涤后,取出试样用去离子水清洗 2 次,然后在温度为 $(20 \pm 2) ^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 $(65 \pm 4) \%$ 的恒温恒湿环境中悬挂晾干,观察洗涤前后试样的表面形貌,测试试样润湿性能变化,表征试样的耐水洗牢度。

2 结果与讨论

2.1 表面形貌特征

基布、PDMS 涂层织物及 H 涂层织物的表面 SEM 照片如图 1 所示。可以看出:基布的纤维表面光滑;PDMS 涂层织物的纤维表面覆盖着一层薄膜;H 涂层织物的纤维表面则呈现出不规则的类似浮雕结构的凸起。纤维表面上的疏水耐危化品涂层除能够降低其表面自由能外,还可使织物的表面变得粗糙。这是因为配制的耐液态危化品整理剂中含有低表面能材料 PDMS 和不同粒径的 PTFE 颗粒,大量的 PTFE 颗粒在 PDMS 整理剂的作用下附着在纤维表面,PDMS 能够降低织物的表面能。微米级 PTFE 颗粒的加入则有助于提高复合涂层的坚固耐久性、疏水性和耐危化品性能。

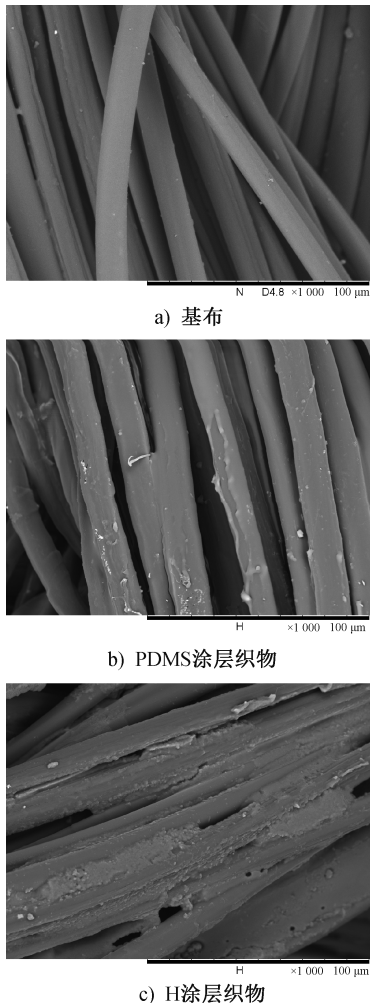


图 1 试样的 SEM 照片

Fig. 1 SEM pictures of the samples

2.2 润湿性能

基布、PDMS 涂层织物及 H 涂层织物的水接触角测试结果如图 2 所示。可以看出,基布、PDMS 涂层织物及 H 涂层织物的平均水接触角分别为 0° 、 150.10° 和 154.18° 。可知,PDMS 整理剂对织物疏水性的改善效果显著,在 PDMS 整理剂低表面能与 PTFE 颗粒的协同作用下,H 涂层织物的疏水性得到进一步提升。

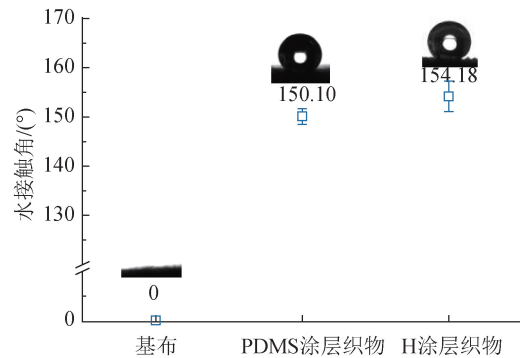


图 2 试样的水接触角

Fig. 2 Water contact angles of the samples

2.3 耐液态危化品性能

基布、PDMS 涂层织物及 H 涂层织物的酸接触角和碱接触角测试结果如图 3 所示。可以看出:滴入的强酸和强碱在基布表面均表现为浸润,接触角为 0° ;基布、PDMS 涂层织物及 H 涂层织物的酸接触角分别为 0° 、 0° 和 91.8° ,碱接触角分别为 0° 、 45.7° 和 138.0° 。

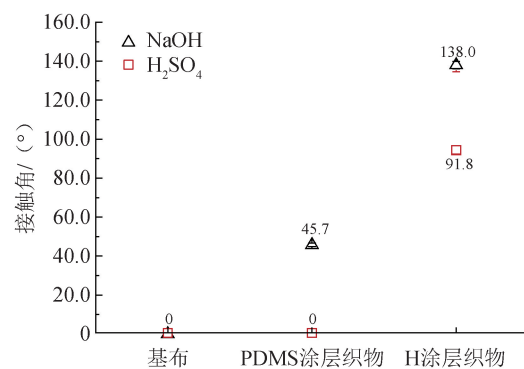


图 3 试样的酸接触角和碱接触角

Fig. 3 Acid contact angles and alkali contact angles of the samples

基布、PDMS 涂层织物及 H 涂层织物浸泡于 H_2SO_4 溶液(质量分数为 30%)、NaOH 溶液(质量分数为 30%)、甲醇及乙酸乙酯后的质量损失率测试

结果如图 4 所示。可以看出:PDMS 涂层织物与基布浸泡于不同液体危化品后,其质量损失率相差不大,浸泡过程中,PDMS 的主链 Si—O—Si 逐渐水解、侧链 Si—C 断裂,导致材料遭受永久性破坏;H₂SO₄ 溶液(质量分数为 30%)和 NaOH 溶液(质量分数为 30%)对 3 种试样的破坏相比乙酸乙酯和甲醇更为严重;与基布和 PDMS 涂层织物相比,H 涂层织物的质量损失率小,在液态危化品的侵蚀作用下,H 涂层织物虽出现了部分损伤,其涂层部分脱落,但因 PTFE 颗粒和 PDMS 黏结剂的有效包覆,整体质量损失率较小,织物中的大部分纤维并未直接接触到液态危化品,故受到的侵蚀破坏作用较小。

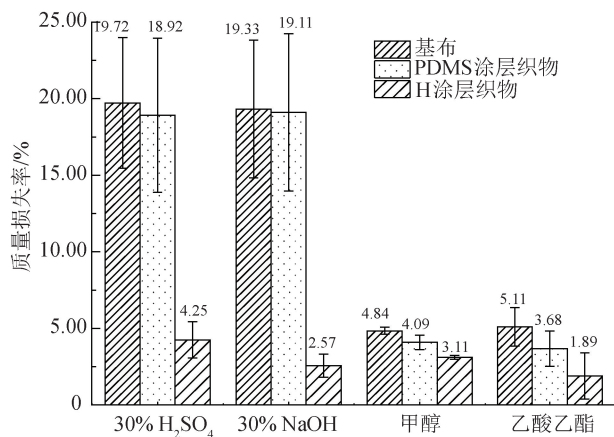


图 4 试样浸泡于不同液态危化品后的质量损失率

Fig. 4 Mass loss rates of the sample after being immersed in different liquid hazardous chemicals

2.4 透气性能

基布、PDMS 涂层织物及 H 涂层织物的透气性能测试结果如图 5 所示。可以看出,基布、PDMS 涂层织物及 H 涂层织物的透气率分别为 535.13、352.58 和 345.12 mm/s,表明整理后织物的透气性能出现了一定程度的下降。这是因为复合涂层的引入改变了织物的孔隙率与孔径。但总体而言,整理后的试样仍具有较好的透气性能,其透气率明显高于常规的气密性化学防护服(透气率几乎为 0),与目前受关注较多的舒适型化学防护服(透气率小于 40 mm/s)相比,在透气性能方面仍具有较大的优势^[14]。

2.5 透湿性能

基布、PDMS 涂层织物及 H 涂层织物的透湿性

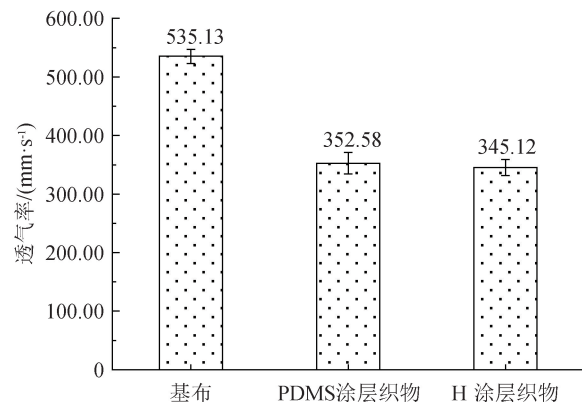


图 5 试样的透气性能

Fig. 5 Air permeability of the samples

能测试结果如图 6 所示。可以看出,基布、PDMS 涂层织物及 H 涂层织物的透湿率分别为 7 735.67、6 945.25 和 6 557.33 g/(m²·d)。与基布相比,H 涂层织物的透湿率下降了 15.2%。传统涂层多数是通过完全封闭纤维间隙实现功能化的,这会导致基布的透湿率大幅下降,而本文的涂层整理未对织物的透湿性能产生显著的影响。原因可能是,水蒸气的动力学直径为 0.27 ~ 0.32 nm,而复合涂层中 PTFE 颗粒所构建的粗糙表面结构允许水蒸气分子自由扩散,从而使水蒸气传递路径得以保留,因此,H 涂层织物和 PDMS 涂层织物的透湿性能与基布相比虽有所下降,但降幅不大。XF 10—2014《消防员灭火防护服》标准中要求消防员灭火防护服专用的防水透气层材料的透湿率大于 5 000 g/(m²·d),本文制备的涂层织物,其透湿率满足此要求,同时优于常规的化学防护服[透湿率为 1 000 ~ 2 000 g/(m²·d)]与舒适型化学防护服[透湿率为 3 000 g/(m²·d)]^[14]。

2.6 耐久性

2.6.1 耐明火稳定性

以无水乙醇为燃料的酒精灯的外焰最高温度达 744.6 °C,平均温度为 519.9 °C^[15],可用于模拟火场环境。经酒精灯外焰灼烧 20 min 后,基布、PDMS 涂层织物及 H 涂层织物的表面损伤情况如图 7 所示。经酒精灯外焰灼烧不同时间后试样的水接触角测试结果如表 3 所示。由图 7 可以看出:酒精灯外焰的灼烧使得基布的部分纤维发生热分解碳化,灼烧 20 min 后,基布被灼烧出一个直径约为 1 cm 的孔洞;灼烧过程中,PDMS 涂层织物上的 PDMS 在高温

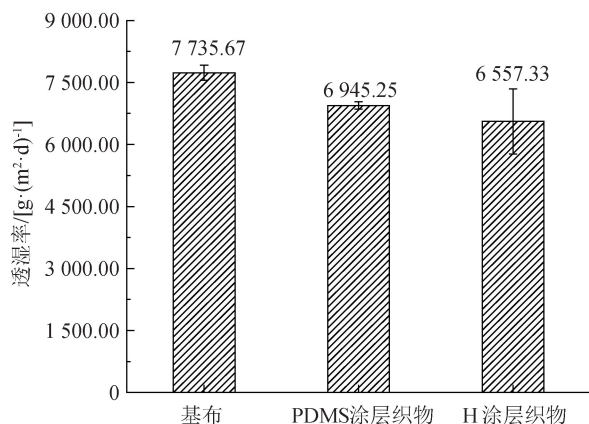


图 6 试样的透湿性能

Fig. 6 Moisture permeability of the samples

下发生热降解,产生的 SiO₂ 微粒散布于织物表面,使得织物表面泛白^[16],且尽管 SiO₂ 的耐高温性能极好,但织物在火焰灼烧过程中逐渐变硬、脆化,导致火焰灼烧处织物发生脆裂、破碎;H 涂层织物经 20 min 灼烧后,其在外观上仅表现为受灼烧区域织物表面颜色有变化,试样表面并未出现因灼烧而产生破洞和脆裂的现象,可见涂层中各组分的协同作用使 H 涂层织物能够抵御酒精灯外焰 20 min 的灼烧。由表 3 可以看出:燃烧前与燃烧后的基布均表现出完全浸润的状态,水接触角均为 0°;灼烧 5 min 后,PDMS 涂层织物和 H 涂层织物的水接触角分别为 10.20°和 141.20°;随着灼烧时间的延长,H 涂层织物的水接触角均呈逐渐下降的趋势,表明受高温影响,复合涂层织物的疏水性有所下降,原因是 PTFE 和 PDMS 材料的初始热分解温度分别为 420 °C 和 200 °C,高温的持续作用使得 PDMS 和 PTFE 分别发生 Si—O 主链及 C—F 键的断裂,PDMS 在高温下发生热降解后形成少量 SiO₂ 散布于织物表面,使涂层织物的疏水性受到影响,但同时又在织物表面形成了碳化屏障,对涂层起到一定的保护作用,涂层织物表面的 PTFE 和粗糙结构并未受太大影响,相比仅采用 PDMS 涂覆的涂层织物,H 涂层织物的疏水性能较好地保持;灼烧 20 min 后,PDMS 涂层织物和 H 涂层织物的水接触角分别为 0°和 108.00°,即 PDMS 涂层织物的疏水性完全失效,转变为亲水表面,而 H 涂层织物的接触角仍大于 90°,仍具有疏水性。

2.6.2 耐磨性能

对基布和 H 涂层织物进行 40 次机械磨损,每

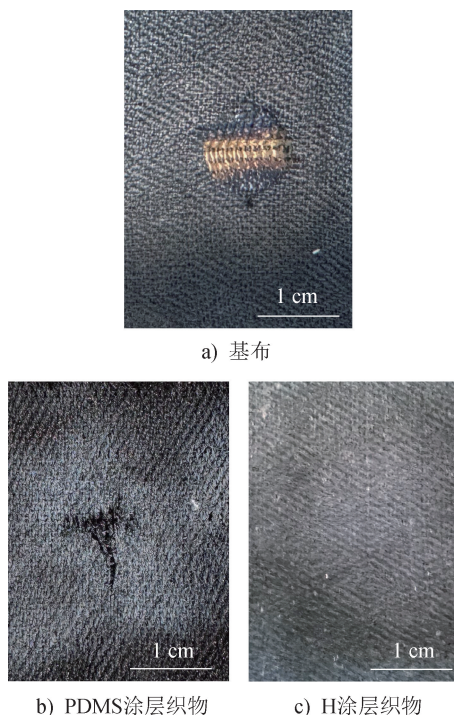


图 7 经酒精灯外焰灼烧 20 min 后试样的表面损伤情况
Fig. 7 Surface damage condition of the samples after being exposed to the outer flame of an alcohol lamp for 20 min

表 3 经酒精灯灼烧不同时间后试样的水接触角

Tab. 3 Water contact angles of the samples after being exposed to the outer flame of an alcohol lamp for different time

灼烧时间/min	水接触角/(°)		
	基布	PDMS 涂层织物	H 涂层织物
5	0	10.20	141.20
10	0	7.30	136.50
15	0	50.60	126.30
20	0	0	108.00

隔 10 次取出一部分试样,观察其表面形貌并测试试样的润湿性能。经不同次数磨损后,基布和 H 涂层织物的表面 SEM 照片分别如图 8 和图 9 所示,其水接触角测试结果如图 10 所示。可以看出:磨损前 H 涂层织物的水接触角为 152.02°,分别磨损 10、20、30 和 40 次后,H 涂层织物的水接触角逐渐小幅下降,分别为 147.38°、145.77°、139.98°和 131.82°。而无论经过多少次磨损,基布表面均表现为完全浸润。磨损 10 次后,基布表面出现大量散乱的纤维,这些纤维相互交叉、盘结、缠绕,纤维束上出现明显的裂痕、凹槽等磨损痕迹,纤维光滑表面遭到破坏,

且随着磨损次数的增加,纤维之间的相互缠绕及纤维表面的受损情况加剧。H 涂层织物经 10 次磨损后,因砂纸摩擦主要作用于涂层的表层,且涂层的粗糙结构使得砂纸与试样表面的实际接触面积较小,故磨损后试样的水接触角仅下降了 3.46° 。随着磨损次数的增加,H 涂层织物的涂层破坏情况呈现非线性的累积效应。但相同磨损次数下,H 涂层织物的损伤情况小于基布,这是因为 H 涂层织物表面 PTFE 和 PDMS 的附着起到了一定的保护作用,磨损时砂纸与织物表面的接触面积小,且大部分摩擦损伤由涂层承担,而非直接作用于纤维。磨损 40 次后,H 涂层织物的水接触角仍达 131.82° ,具有较好的疏水性。

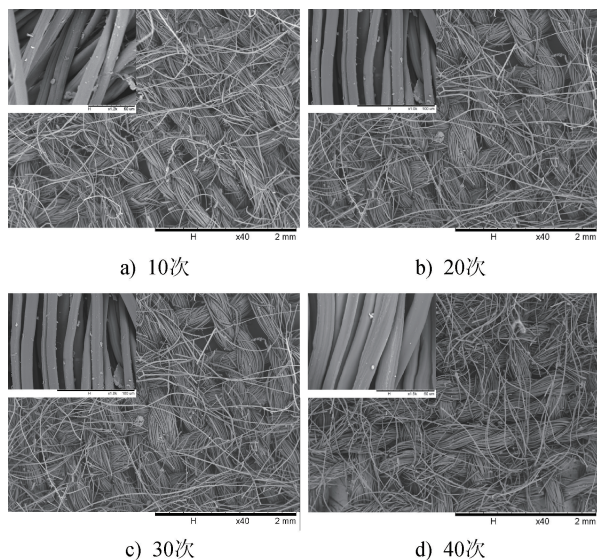


图 8 经不同磨损次数后基布的 SEM 照片
Fig. 8 SEM photos of the base fabrics after different times of abrasion

2.6.3 耐水洗性能

未经洗涤及经不同时间洗涤后 H 涂层织物的 SEM 照片如图 11 所示,其水接触角测试结果如图 12 所示。可以看出,未经洗涤的 H 涂层织物表面呈现出均匀分布的微米级凸起状。经 45、90、135 和 180 min 洗涤后,H 涂层织物的水接触角分别为 148.56° 、 146.36° 、 139.08° 和 134.58° 。随着洗涤时间的延长,钢珠的机械摩擦和洗涤作用导致 H 涂层织物表面的涂层附着受影响,部分区域的涂层出现脱落现象,涂层织物的疏水性呈下降趋势,但其宏观

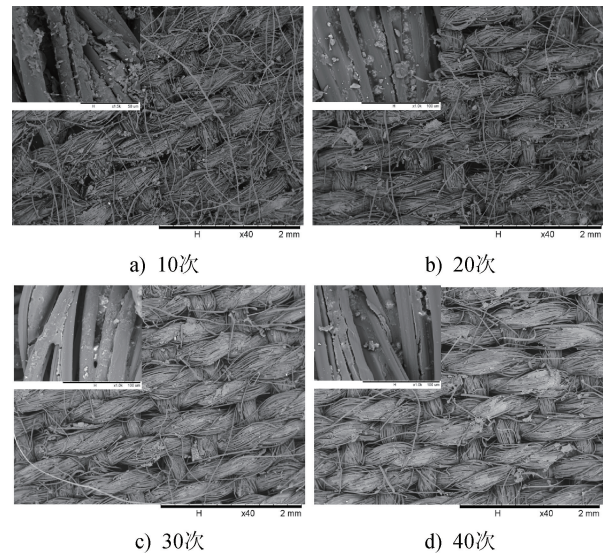


图 9 经不同次数磨损后 H 涂层织物的 SEM 照片
Fig. 9 SEM photos of the H coated fabrics after different times of abrasion

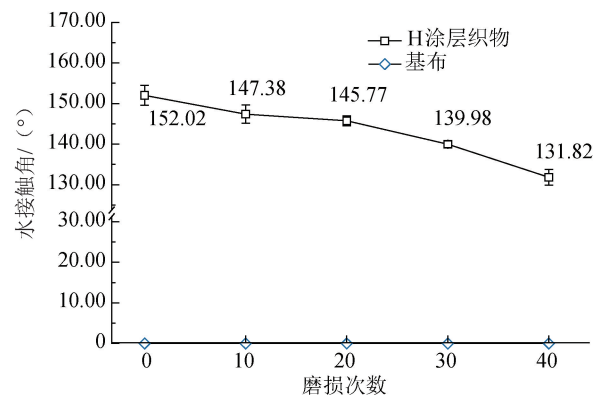


图 10 经不同磨损次数后试样的水接触角
Fig. 10 Water contact angles of the samples after different times of abrasion

粗糙结构仍能保持相对完整性。洗涤 180 min 后,H 涂层织物的水接触角仍达 134.58° ,表明涂层仍能维持 Cassie-Baxter 状态,即宏观粗糙结构有效地锁住了空气,使得水滴无法完全浸润试样表面,它们部分悬浮在空气层之上,仅与粗糙表面凸起部分有限接触。H 涂层织物能维持疏水性能,得益于 PDMS 对 PTFE 颗粒的黏结作用及不同粒径 PTFE 颗粒的协同作用。在不使用含氟整理剂的情况下,本研究开发的涂层与使用含氟整理剂所达到的疏水性和耐久性相近。

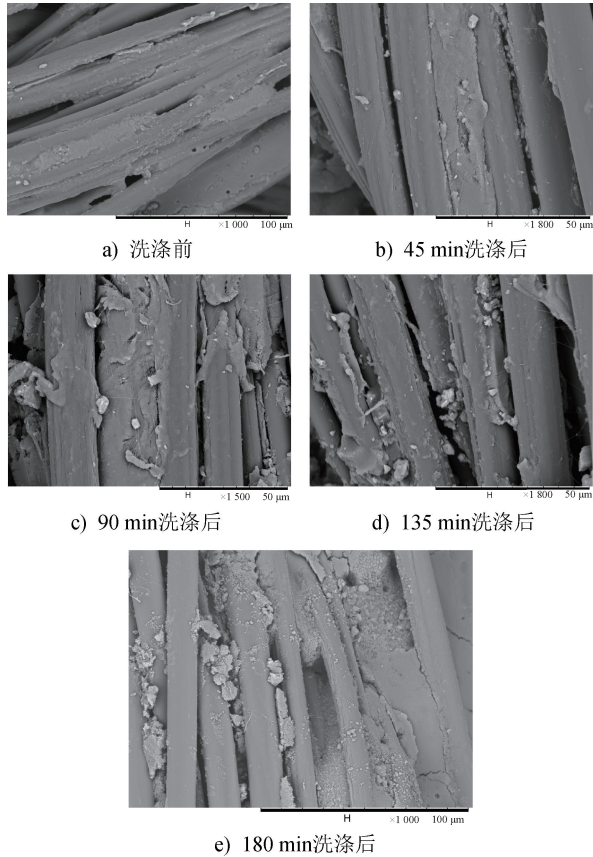


图 11 洗涤前后 H 涂层织物的 SEM 照片
Fig. 11 SEM photos of the H coated fabrics before and after washing

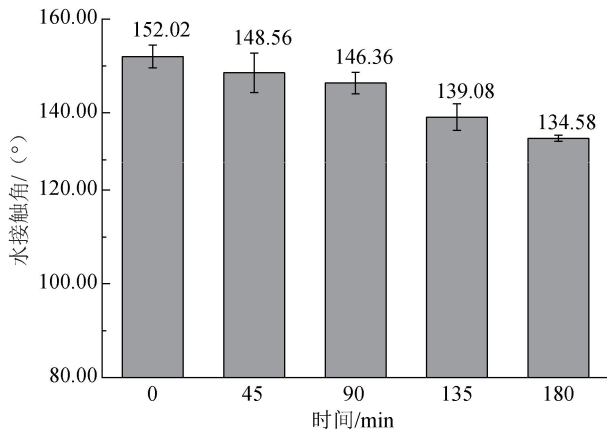


图 12 经不同时间洗涤后 H 涂层织物的水接触角
Fig. 12 Water contact angles of the H coated fabrics after being washed at different time

3 结论

本文使用不同粒径的 PTFE, 采用浸渍、喷涂相

结合的方法制备兼具疏水性和耐液态危化品性能的疏水耐危化品涂层织物——H 涂层织物, 对其进行表面形貌表征, 并测试了织物试样的润湿性能、耐危化品性能、透气透湿性能及耐久性能, 得到如下主要研究结论。

(1) 表面形貌表征与水接触角测试结果表明: H 涂层织物的纤维表面呈现出类似浮雕的不规则粗糙结构; 在 PDMS 的黏结作用下, 织物表面因附着不同粒径的 PTFE 颗粒而较粗糙; H 涂层织物的水接触角为 154.18° , 其疏水性优于仅涂覆 PDMS 的织物。

(2) H 涂层织物对强酸、强碱具有更好的疏液性, 其酸接触角和碱接触角分别为 91.8° 和 138.0° , 织物中的大部分纤维并未直接接触到液态危化品, 其损伤主要表现为涂层受到侵蚀而部分脱落, 纤维受到的损伤较小。将织物试样分别浸泡于 H_2SO_4 溶液(质量分数为 30%)、NaOH 溶液(质量分数为 30%)、甲醇及乙酸乙酯 4 种液态危化品中, 结果显示, PTFE 和 PDMS 的有效包覆使得 H 涂层织物的质量损失率低于基布和 PDMS 涂层织物, 耐液态危化品性能更好。

(3) 透气透湿性能的测试结果显示, H 涂层织物的透气率和透湿率分别为 345.12 mm/s 和 $6557.33 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 明显优于常规的化学防护服, 具备较好的服用舒适性。

(4) 耐明火稳定性测试结果表明, H 涂层织物能够有效抵御酒精灯外焰 20 min 的灼烧, 灼烧后试样未出现破洞和脆裂的现象, 且仍具备疏水性。H 涂层织物的耐磨性能与耐洗涤性能较好, 经 40 次磨损测试和 180 min 洗涤测试后, 其水接触角仍分别达 131.82° 和 134.58° , 同时织物表面未出现大量相互缠绕的纤维, 且纤维表面的损伤小, 即 H 涂层织物的耐久性能良好。

总体而言, 本文制备的涂层具有潜在的应用推广价值。研究可为疏水、耐液态危化品且耐久性好的新型消防服的开提供开发提供参考。



期刊采编平台



中国知网下载

参考文献

- [1] 骆成, 韩东, 蒋灶, 等. 危险化学品道路运输事故复杂性机理研究综述[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(7): 919-931.
- [2] 何青伦, 姜文宇, 王飞, 等. 危化品事故多层级链式推演模型及案例分析[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 162-170.
- [3] 刘焯, 王俊胜, 金星, 等. 消防员灭火防护装备研究进展[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(12): 1636-1646.
- [4] 汤爱华, 朱超俊. 新一代消防员灭火防护服的设计方向与实例[J]. 产业用纺织品, 2024, 42(7): 44-47.
- [5] OUYANG Y X, WANG H Q, OUYANG X, et al. Recent advances and strategies for high-performance coatings [J]. Progress in Materials Science, 2023, 136: 101125.
- [6] 徐文婷, 傅平安, 欧军飞. 耐久超疏水表面的研究进展[J]. 表面技术, 2023, 52(11): 23-39.
- [7] WANG D H, SUN Q Q, HOKKANEN M J, et al. Design of robust superhydrophobic surfaces[J]. Nature, 2020, 582(7810): 55-59.
- [8] 王博. 含短氟链苯乙烯共聚物的合成及其在棉织物上的应用[D]. 上海: 东华大学, 2021.
- [9] 黄勇, 李俊越, 张栋葛, 等. 化纤织物疏水疏油功能整理的发展概况 [J]. 材料导报, 2024, 38(4): 244-257.
- [10] CHEN J Y, YUAN L H, SHI C, et al. Nature-inspired hierarchical protrusion structure construction for washable and wear-resistant superhydrophobic textiles with self-cleaning ability[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(15): 18142-18151.
- [11] ALAMRI H, AL-SHAHRANI A, BOVERO E, et al. Self-cleaning superhydrophobic epoxy coating based on fibrous silica-coated iron oxide magnetic nanoparticles [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2018, 513: 349-356.
- [12] LIU X, CHEN J L, SHAO Q Q, et al. Robust, flame-retardant and colorful superamphiphobic aramid fabrics for extreme conditions[J]. Science China Technological Sciences, 2021, 64(8): 1765-1774.
- [13] LI H, XIN L, GAO J, et al. Underwater bionic self-healing superhydrophobic coating with the synergetic effect of hydrogen bonds and self-formed bubbles [J]. Small, 2024, 20(20): e2309012.
- [14] 殷瑜敏, 房罗伟, 陈双, 等. 舒适型化学防护服织物的研发与性能测试[J]. 产业用纺织品, 2024, 42(4): 27-32.
- [15] 孙黎颖, 王程杰. 酒精灯火焰的温度及实验室加热源[J]. 化学教学, 2017(11): 92-96.
- [16] HE Q, WANG J W, WANG G F, et al. Construction of a durable superhydrophobic flame-retardant coating on the PET fabrics [J]. Materials & Design, 2023, 233: 112258.
- [47] 王虹, 倪星元, 汤人望, 等. 纤维毡复合 SiO₂ 气凝胶常压干燥法制备超低导热系数保温隔热材料[J]. 产业用纺织品, 2009, 27(11): 9-12.
- [48] LI M M, GAN F, DONG J, et al. Facile preparation of continuous and porous polyimide aerogel fibers for multifunctional applications[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(8): 10416-10427.
- [49] DU Y, ZHANG X H, WANG J, et al. Reaction-spun transparent silica aerogel fibers[J]. ACS Nano, 2020, 14(9): 11919-11928.
- [50] HE H L, LIU J R, WANG Y S, et al. An ultralight self-powered fire alarm e-textile based on conductive aerogel fiber with repeatable temperature monitoring performance used in firefighting clothing [J]. ACS Nano, 2022, 16(2): 2953-2967.
- [51] HUANG J Z, LI J Y, XU X X, et al. *In situ* loading of polypyrrole onto aramid nanofiber and carbon nanotube aerogel fibers as physiology and motion sensors [J]. ACS Nano, 2022, 16(5): 8161-8171.
- [52] BAO Z J, BING N C, YAO H R, et al. Three-dimensional interpenetrating network phase-change composites with high photothermal conversion and rapid heat storage and release [J]. ACS Applied Energy Materials, 2021, 4(8): 7710-7720.
- [53] ZHANG Q R, XUE T T, TIAN J, et al. Polyimide/boron nitride composite aerogel fiber-based phase-changeable textile for intelligent personal thermoregulation [J]. Composites Science and Technology, 2022, 226: 109541.

(上接第 31 页)