

# PTFE 膜增强型消防员灭火防护服外层面料 酸碱阻隔性能提升

孙冰冰<sup>a,b</sup> 石佩玉<sup>a,b</sup> 肖阳阳<sup>a,b</sup> 丁水萍<sup>a,b</sup> 丁亦<sup>a,b</sup> 王妮<sup>a,b</sup>  
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

**摘要:**近年,全国危化品事故频发,消防工作呈全灾种大应急趋势。消防员灭火防护服化学物质阻隔性的提升与轻量化制备,可在提升工效的同时有效保障救援人员生命安全,满足多环境抢险救援工作需要。研究通过对 3 种聚四氟乙烯 (PTFE) 膜的性能进行测试与对比,筛选防护性能最佳的 PTFE 膜与外层阻燃面料复合,旨在制备一种具有优异酸碱阻隔性能的新型轻质复合防护面料,提升化学灾害事故中防护服对消防员的安全防护性能。结果表明:制备的复合防护面料静水压值可达 73.33 kPa,织物侧水接触角 153.5°,质量分数为 96% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 30% NaOH 的标准透过时间均大于 60 min,满足三级化学物质渗透性要求。且经计算,将制备的复合防护面料与常用市售隔热层、舒适层组合,所得 3 层结构消防员灭火防护服总质量小于 2.8 kg。研究结果实现了消防员灭火防护服外层面料酸碱阻隔性能的提升与轻量化制备,有望为救援人员提供更可靠的安全防护。

**关键词:** PTFE 膜;复合防护面料;消防员灭火防护服;酸碱阻隔性能;标准透过时间;静水压

中图分类号:TS 941.48

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2025)11-0001-08

## Enhancement of acid and alkali barrier property in PTFE membrane reinforced outer-layer fabric for firefighter protective clothing

Sun Bingbing<sup>a,b</sup>, Shi Peiyu<sup>a,b</sup>, Xiao Yangyang<sup>a,b</sup>, Ding Shuiping<sup>a,b</sup>, Ding Yi<sup>a,b</sup>, Wang Ni<sup>a,b</sup>

a. Shanghai Frontiers Science Center of Advanced Textiles, b. College of Textiles, Donghua University, Shanghai 201620, China

**Abstract:** In recent years, the increasing frequency of hazardous chemical accidents nationwide has shifted firefighting towards an all-hazard, large-scale emergency response paradigm. Enhancing the chemical barrier property of firefighter protective clothing while achieving lightweight fabrication is crucial for safeguarding the lives of rescue personnel, improving operational efficiency, and meeting the demands of multi-environment emergency operations. Through testing and comparing the performance of three types of polytetrafluoroethylene (PTFE) membranes, the optimal membrane was selected and laminated to an outer shell flame-retardant fabric to develop a novel lightweight composite protective fabric with excellent acid and alkali barrier property, aiming to enhance the safety protection of protective clothing for firefighters in chemical disaster incidents. The results

基金项目:国家重点研发计划(2022YFC3006102)

收稿日期:2025-03-26

作者简介:孙冰冰,女,2001年生,在读硕士研究生,主要研究方向为复合面料液态危化品防护,sunb8913@163.com

通信作者:王妮,教授,研究方向为材料结构、性能与应用,wangni@dhu.edu.cn

indicated that the developed composite protective fabric achieved a hydrostatic pressure of 73.33 kPa and a water contact angle of  $153.5^\circ$  on the fabric side. The standard breakthrough time for both 96% (mass fraction)  $\text{H}_2\text{SO}_4$  and 30% (mass fraction)  $\text{NaOH}$  exceeded 60 min, satisfying the Level 3 chemical permeation requirements. Furthermore, calculations showed that a three-layer firefighting protective ensemble, comprising the developed composite fabric, commonly available commercial insulation layer and comfort layer, had a total weight of less than 2.8 kg. The research successfully achieves the enhancement of acid and alkali barrier property and lightweight fabrication for the outer shell of firefighter protective clothing, and is expected to provide more reliable safety protection for rescue personnel.

**Keywords:** PTFE membrane; composite protective fabric; firefighter protective clothing; acid and alkali barrier property; standard breakthrough time; hydrostatic pressure

化工行业作为国民经济的重要组成部分,其发展动态备受关注。据中国石油和化学工业联合会发布的《2023年中国石油和化学工业经济运行报告》数据,2023年我国石化行业营业收入达15.95万亿元,行业占比约为12%。然而,石油与化工的生产过程多涉及危险化学品,该行业的快速发展会促使危险化学品用量与规模的扩大。易燃易爆、有毒有害的危险化学品具有较高的安全风险和危险系数,若管控不到位则极易在生产、运输、储存和使用等环节引发泄漏、爆炸等危险事故<sup>[1]</sup>。据统计,2023年全国共发生化工事故115起,导致死亡159人,较大及以上事故起数、死亡总人数均同比上升,造成了严重的人员伤亡及财产损失。

在涉及危险化学品的燃爆事故中,皮肤是人体抵御外界环境的最后一道屏障。救援人员会暴露于光、热和化学危害交互的复杂环境中,化学物质一旦经由皮肤接触进入血液循环继而侵入人体内部器官后,将对救援人员的生命安全构成重大威胁<sup>[2]</sup>。在这样的环境下,普通消防员灭火防护服难以有效抵御各种危险化学品对人体的侵害,因此,亟需具备较强阻隔性的化学防护装备以抵御气态、液态、固态及气溶胶等形态的危险化学品通过皮肤或呼吸道进入人体<sup>[3]</sup>。现有化学防护服多采用隔绝型防护材料,其通过选取化学稳定性良好的高阻隔材料,在皮肤与危险化学品之间构建隔离屏障,阻隔化学物质对织物的浸润、溶蚀和穿透,实现对人体的有效防护。但这类防护服往往穿着较为笨重,舒适性较差,会对工效产生影响<sup>[4-5]</sup>。相比之下,聚合物微孔膜能在允许气态水分子通过的同时,有效阻隔其他物质的

渗透,能在较大程度上保障穿戴人员运动的自由度。由高阻隔性聚合物微孔膜与阻燃织物复合构建的多层织物,能在确保织物良好阻燃性与耐化学腐蚀性的同时,提升穿着舒适性,并可在一定程度上避免人体与危险化学品的直接接触,为救援人员提供安全保障<sup>[6-9]</sup>。

二氟亚甲基( $-\text{CF}_2$ )表面能约为  $19 \text{ mJ/m}^2$ ,由其构成的全氟烷基化合物聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)具有较低的表面能,表现为优异的液体排斥性,能有效防止化学液体在其表面扩散<sup>[10]</sup>。此外,PTFE及其制品具有优异的热稳定性和耐化学腐蚀性,是阻隔层用理想材料<sup>[11-12]</sup>。通过拉伸工艺制备的PTFE膜具有蛛网状微孔隙结构,这能赋予材料良好的选择透过性和防水透湿性,且轻质,能在不显著增加基材质量的前提下有效提升材料的防护性与舒适性,在消防、化学防护和医疗卫生等领域应用广泛<sup>[13]</sup>。

本研究选择了3种PTFE膜,通过性能测试与比较,优选出膜材并构建多层复合防护面料,开发具有良好防护性能的消防服外层面料,以期实现轻量化耐酸碱防护消防服、灭火防护服的制备提供理论依据和实践参考。

## 1 试验部分

### 1.1 试验材料

3种不同规格的双向拉伸PTFE膜(试样编号PTFE-A、PTFE-B、PTFE-C);经三防功能化整理的外层阻燃面料(简称OF,应急管理部天津消防研究所

提供);片状氢氧化钠(AR,国药集团化学试剂有限公司提供);浓硫酸(质量分数 96%,AR,国药集团化学试剂有限公司提供);PUR5610 反应型湿气固化阻燃聚氨酯(PUR)热熔胶(富乐粘合剂有限公司提供)。

### 1.2 复合防护面料的制备

对 3 种膜的浸润性和酸碱渗透性展开试验。通过对试验结果进行分析与对比,筛选出防护性能好的 PTFE 膜作为阻隔层。再利用阻燃 PUR 热熔胶作为黏结剂,在复合机上通过点胶复合工艺,将 PTFE 膜与经过三防功能化整理的外层阻燃面料复合,制得复合防护面料(PF)。复合时,控制热压时间 10~20 s、热压温度 100~130 °C、热压压强 0.4~1.0 MPa、上胶量 5~20 g/m<sup>2</sup>。

### 1.3 测试与表征

厚度:参照 GB/T 3820—1997《纺织品和纺织制品厚度的测定》,采用 YG141N 型织物厚度仪(温州方圆仪器有限公司)进行测定。每组试样进行 20 次测试,结果取平均值。

单位面积质量:参照 GB/T 4669—2008《纺织品 机织物 单位长度质量和单位面积质量的测定》,在距离试样布边 15 cm 以上的区域取样,测试样尺寸 10 cm×10 cm,采用 FA2004A 型电子天平(梅特勒托利多科技有限公司)称量。每组试样进行 10 次测试,计算结果取平均值。

孔径:参照 GB/T 32361—2015《分离膜孔径测试方法 泡点和平均流量法》,采用 CFP-1100AI 型多孔材料孔径分析仪(美国 Porous Materials Inc 公司),对 3 种 PTFE 膜的孔径大小及分布进行测试,测试方法为泡点法,测试样尺寸为 3 cm×3 cm。

表面浸润性能: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》,采用 OCA15EC 型接触角测量仪(德国 Dataphysics 公司),分别测试 PTFE 膜、外层阻燃面料及复合防护面料的水接触角。每组试样进行 3 次测试,结果取平均值。

酸碱阻隔性能:参照 GB 24539—2021《防护服 化学防护服》与 GB/T 23462—2009《防护服 化学物质渗透试验方法》,采用 T452 型耐化学物质渗透测试仪(上海索彤仪器科技有限公司),测定 PTFE 膜和复合防护面料对质量分数为 96%的

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 30%的 NaOH 的阻隔性能。

耐静水压性能:参照 GB/T 4744—2013《纺织品 防水性能的检测和评价 静水压法》,采用 YG812D-20 型数字式渗水性测试仪(上海际发仪器设备有限公司),选取增压法测定 PTFE 膜、外层阻燃面料及复合防护面料的耐静水压性能。每组试样进行 5 次测试,结果取平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 PTFE 膜的选择

#### 2.1.1 规格

双向拉伸 PTFE 膜是由构象有序的结晶结构和无序排列的非晶结构共同构成的一种聚合物材料。根据“自由体积”模型,非晶区域分子链间间隙有利于小分子扩散并渗透材料,而晶区结晶结构则发挥物理屏障作用阻挡大多数小分子物质通过<sup>[14]</sup>。因此,在渗透剂渗透 PTFE 膜的过程中,渗透剂分子必须绕过晶区抵达无定形区域实现扩散。故对于相同材质的阻隔膜,厚度越大,渗透剂分子在膜材中的渗透路径越长。

测得 3 种 PTFE 膜的厚度及单位面积质量结果如图 1 所示,可以看出:3 种 PTFE 膜的厚度与单位面积质量变化呈正相关趋势;PTFE-B 膜的平均厚度最小(0.016 mm),PTFE-A 膜次之(0.028 mm),PTFE-C 膜厚度最大(达到了 0.038 mm)。较大厚度的 PTFE-C 膜使得渗透剂分子在对其进行渗透时所经路径更复杂,渗透难度增加,故该膜的阻隔性提高,但同时质量增加,PTFE-C 膜的单位面积质量达

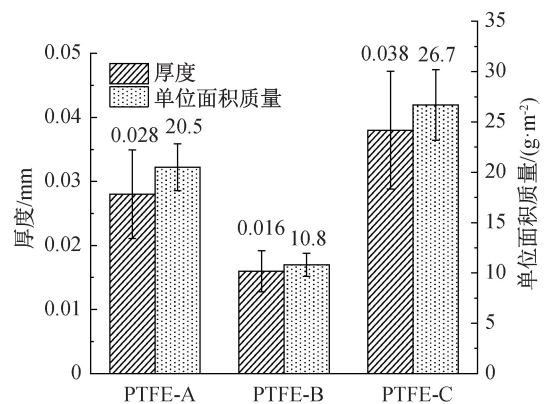


图 1 3 种 PTFE 膜的厚度及单位面积质量  
Fig. 1 Thickness and unit area mass of three types of PTFE membranes

26.7 g/m<sup>2</sup>。因此,实际应用时,需平衡阻隔效率与穿着舒适性,确保所制防护面料满足要求。

### 2.1.2 孔径

3种PTFE膜的孔径分布测试结果如图2所示,可以明显发现:PTFE-C膜的孔径分布范围较窄,且孔尺寸较小,平均孔径为0.068 μm;PTFE-A、PTFE-B膜的孔径分布较均匀,平均孔径分别为0.153 μm和0.139 μm。

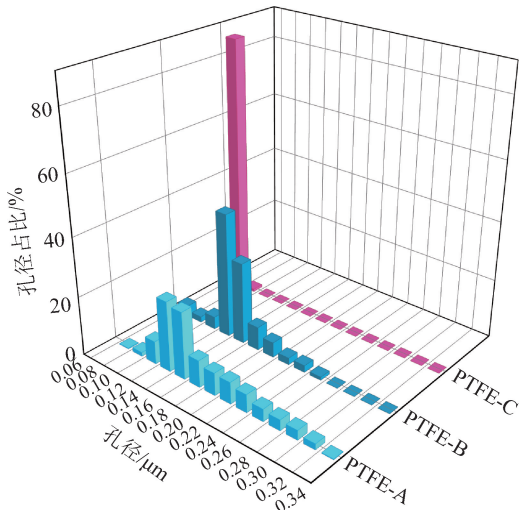


图2 3种PTFE膜的孔径分布

Fig. 2 Pore size distribution of three types of PTFE membranes

根据 Hagen-Poiseuille 方程<sup>[15]</sup>,流体流过多孔膜时,渗透流量( $J_v$ )与膜厚度( $l$ )、孔半径( $r_p$ )存在关系:

$$J_v = \frac{\varepsilon r_p^2}{8l\tau} \cdot \frac{\Delta p}{\eta} \quad (1)$$

式中: $\varepsilon$ 表示孔隙率; $\tau$ 表示孔扭曲度; $\Delta p$ 表示膜两侧压力差; $\eta$ 表示流体动力黏度。

由式(1)可知,渗透流量与孔半径的二次方成正比,与厚度呈反比。根据该关系判定,3种膜的渗透流量关系为PTFE-C<PTFE-A<PTFE-B,且在其他条件相同的情况下,计算得PTFE-C膜的渗透流量较PTFE-B膜低一个数量级。此外,PTFE-C膜较窄的孔径分布可有效增强液压波动下流体的渗透稳定性。

总之,鉴于PTFE-C膜厚度与孔径的双重作用,液体渗透路径长度大幅增加、宽度减小,加之其孔扭曲度增加,液体渗透作用受阻显著,故PTFE-C膜是阻隔防护材料的优良选择。

### 2.1.3 表面浸润性能

材料表面润湿行为可由杨氏方程  $\gamma_{sv} - \gamma_{sl} = \gamma_{lv} \cos \theta$  描述,式中: $\gamma_{sv}$ 、 $\gamma_{sl}$ 、 $\gamma_{lv}$ 分别表示固-气、固-液与气-液的界面张力; $\theta$ 为固-液-气三相接触点处的接触角,是表征润湿行为的直接参数。固体表面能是决定材料润湿性的核心因素,接触角大小与固体表面能呈负相关关系<sup>[16]</sup>。3种PTFE膜的水接触角测试结果如图3所示,可以看出,3种PTFE膜均具有较好的疏水性能,静态水接触角皆超过130°。PTFE膜表面C—F键的强电负性赋予了材料较低的表面能,导致其与水的界面张力( $\gamma_{sl}$ )大,进而形成了较大的水接触角。这一方面会赋予三相接触线较大的曲率,液体铺展需克服的能垒提升,另一方面会减小固-液接触面积,界面黏附功下降,这能有效避免液体在材料表面铺展浸润,抑制液态化学试剂在其表面附着与渗透,提高防护效果。其中,PTFE-C膜的水接触角最大,为137.7°。

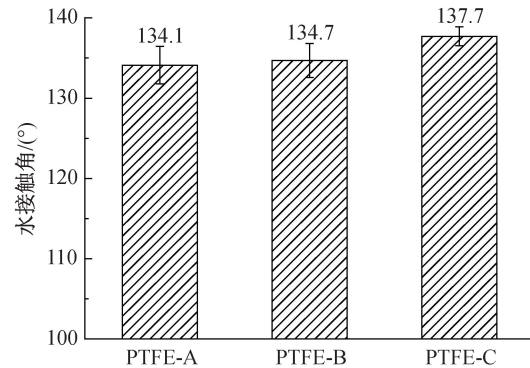


图3 3种PTFE膜表面浸润性能

Fig. 3 Surface wetting property of three types of PTFE membranes

### 2.1.4 酸碱阻隔性能

参照 GB 24539—2021《防护服装 化学防护服》标准,选取质量分数96%的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和30%的NaOH作为测试用化学试剂,测得3种PTFE膜的酸碱阻隔性能如图4所示。化学试剂渗透时间是面料化学防护性能重要的表征指标之一<sup>[17]</sup>。依据 GB/T 23462—2009《防护服装 化学物质渗透试验方法》,采用T452型耐化学物质渗透测试仪,选择闭路测试法,以渗透量达2.5 μg/cm<sup>2</sup>(即认为此时的化学试剂已透过试样)的时间作为标准透过时间。

由图4a)可知,对于H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>,PTFE-C膜在60 min内的渗透量保持小于2.5 μg/cm<sup>2</sup>,则认为其

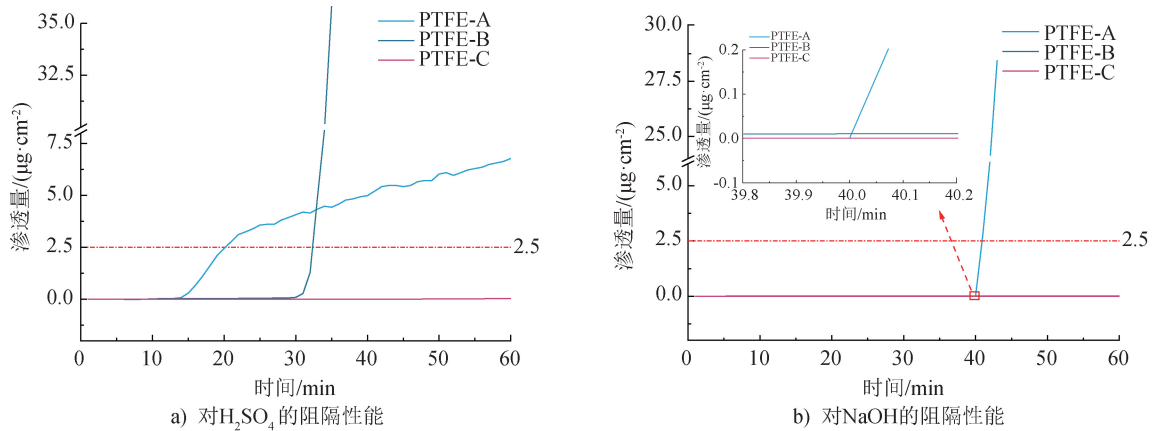


图 4 3 种 PTFE 膜的酸碱阻隔性能

Fig. 4 Acid and alkali barrier property of three types of PTFE membranes

未出现渗透现象;而 PTFE-A 膜与 PTFE-B 膜分别在 20 min 和 32 min 附近渗透量达到  $2.5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ , 发生了渗透,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  透过了膜材。再根据 GB 24539—2021 判定, PTFE-A 膜符合一级渗透要求, PTFE-B 膜符合二级渗透要求, PTFE-C 膜符合三级渗透要求。由图 4b) 可知, 对于  $\text{NaOH}$ , PTFE-A 膜在 41 min 左右渗透量达到  $2.5 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ , 则认为其发生了渗透,  $\text{NaOH}$  透过了膜材, PTFE-A 膜符合二级渗透要求; PTFE-B 膜与 PTFE-C 膜在 60 min 内的渗透量几乎为 0, 且波动较小, 则认为它们未发生渗透, 2 种膜满足三级渗透要求, 其中 PTFE-C 膜的渗透量相对更小。

总之, 3 种 PTFE 膜中, PTFE-C 膜对  $\text{H}_2\text{SO}_4$  和  $\text{NaOH}$  这 2 种化学试剂均表现出良好的阻隔性能, 标准透过时间均达到 60 min 以上, 满足三级渗透要求。这一结果与前述的厚度、孔径测试结果相符, 渗透剂分子渗透 PTFE-C 膜的路径更细、更长、更曲折, 其渗透过程相较 PTFE-A、PTFE-B 膜更困难, 故防护作用更显著。

基于上述试验结果与分析, PTFE-C 膜具有更大的厚度、更小的孔径及更高的水接触角, 能在抑制化学试剂表面浸润的同时, 凭借厚度与孔径优势有效阻止化学试剂的渗透扩散, 展现出双重的防护机制。其中, 在酸碱阻隔性能测试中, PTFE-C 膜对  $\text{H}_2\text{SO}_4$  和  $\text{NaOH}$  的标准透过时间均超过 60 min, 表现为优异的酸碱阻隔性。只是其单位面积质量较大, 这可能给防护服带来较大的质量负荷。本研究基于实际应用的综合考量, 为保障复合防护面料对

酸碱的阻隔性, 选取 PTFE-C 膜为阻隔层与外层阻燃面料进行复合, 制备耐酸碱复合防护面料。通过复合工艺实现质量与防护效率的平衡, 即将整套防护服装的质量控制在标准要求范围内, 同时有效提升防护服装的酸碱阻隔性能。

## 2.2 复合防护面料

### 2.2.1 规格

耐酸碱复合防护面料各组成部分的厚度与单位面积质量见表 1。复合过程中, 外层阻燃面料表面的毛羽在高温高压作用下倒伏, 纤维排列更紧密, 外层阻燃面料和 PTFE-C 膜内部孔隙结构因压缩而减少, 且由表面粗糙度引起的界面间隙减少, 复合防护面料厚度较复合前降低。

表 1 试样规格

Tab. 1 Sample specification

试样	厚度/mm	单位面积质量/( $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ )
PTFE-C	0.038	26.7
OF	0.712	251.3
PF	0.706	288.9

根据 XF 10—2014《消防员灭火防护服》标准, 消防员灭火防护服一般由外层、防水透气层、隔热层与舒适层组成, 整套防护服质量应不大于 3.5 kg。过去, 为提升性能指标, 各类消防员灭火防护服产品在舒适性与减重方面做出了一定的牺牲。如今, 新一代 3 层结构轻质消防员灭火防护服能在确保热防护性能的基础上, 显著提高舒适性与作业灵活性, 有效实现了减重增效<sup>[18]</sup>。本研究选择 3D 结构菱形格双层组织面料作为外层阻燃面料, 其能在高温条件

下迅速膨胀并在内部形成空气层,实现隔热效果。将该外层阻燃面料与 PTFE-C 膜复合后,制得的复合防护面料兼具传统外层面料防护功能与防水透气层作用,再将其与隔热层、舒适层组合,即可获得 3 层结构轻质消防员灭火防护服面料。

表 1 中,制备的复合防护面料的单位面积质量为  $288.9 \text{ g/m}^2$ 。常用市售的 4 层结构消防员灭火防护服,其隔热层与舒适层的单位面积质量通常为  $(70.0 \pm 3.5) \text{ g/m}^2$  和  $(120.0 \pm 6.0) \text{ g/m}^2$ [19]。再结合文献[20],当采用 3 层结构的优化方案时,消防员灭火防护服的总质量( $M_{\text{总}}$ )与各结构层材料的单位面积质量( $m_{\text{外层}}$ 、 $m_{\text{隔热层}}$ 、 $m_{\text{舒适层}}$ )存在关系  $M_{\text{总}} = k(m_{\text{外层}} + m_{\text{隔热层}} + m_{\text{舒适层}})$ ,其中  $k$  为  $5.5 \sim 5.7$ 。经计算,本研究制备的复合防护面料与现有隔热层、舒适层组合,所得 3 层结构消防员灭火防护服的理论总质量为  $2.6 \sim 2.8 \text{ kg}$ ,其能在确保热防护性能的前提下,实现消防员灭火防护服的轻量化制备。

### 2.2.2 表面浸润性能

PTFE-C 膜、外层阻燃面料及复合防护面料的水接触角对比见图 5。经三防功能化整理的外层阻燃面料已具备优异的疏水性,水接触角为  $149.8^\circ$ 。通过点胶复合工艺将 PTFE-C 膜与外层阻燃面料复合,得到的复合防护面料织物侧的水接触角为  $153.5^\circ$ ,达到超疏水标准( $>150^\circ$ )。复合过程中,热压作用促使纤维排列紧密,形成的疏水表面更为连续,且液体通过毛细作用渗透的位点减少,超疏水复合防护面料表面呈现 Cassie 非浸润态,液体在织物表面铺展时需克服的能量势垒更高,再结合高阻隔 PTFE 膜材复合后液体渗透路径缩减,故以水为载

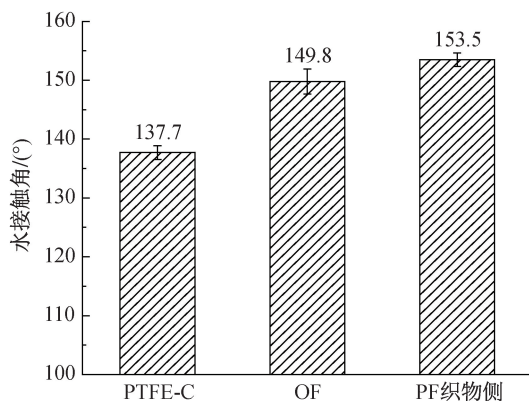


图 5 复合防护面料及其各组分表面浸润性

Fig. 5 Surface wettability of composite protective fabric and its components

体的酸碱溶液对复合防护面料的渗透得到了有效抑制。

### 2.2.3 耐静水压性能

各组分及复合防护面料静水压测试结果如表 2 所示。根据表面润湿理论,固-液界面张力的差异将直接影响液体的浸润行为。水的表面张力为  $72.8 \text{ mN/m}$ ,而 PTFE 膜的表面张力约为  $19 \text{ mN/m}$ ,这使得水溶液难以浸润 PTFE 膜表面。PTFE 膜材具有极低的吸水率与渗透率[21],理论上可形成有效的阻水屏障,阻止水溶液通过。但单一 PTFE 膜材的应用受限于其力学性能,如在静水压测试过程中,随着压力的增加,单一 PTFE 膜材会发生结构性失效——膜材在液压作用下变形、破裂并喷出明显的水柱,但破裂前材料表面无水珠渗出。

表 2 数据显示,复合防护面料的静水压达  $73.33 \text{ kPa}$ ,与各组分材料相比提升幅度较大。复合整理后,外层阻燃面料为体系提供了强力并分散了局部的应力集中,黏结剂在 PTFE-C 膜与 OF 间形成致密层,有效填补了界面微孔缺陷。这种结构有效地减少了复合防护面料整体的孔隙,使液态水渗透路径由单层转变为膜-胶-织物多层,且渗透路径曲折度大幅提升,液态水渗透难度增加,静水压值显著提高。

表 2 静水压测试结果

Tab. 2 Test results of hydrostatic pressure

试样	静水压/kPa	静水压 CV 值/%
PTFE-C	8.24	8.11
OF	0.82	10.11
PF	73.33	9.21

### 2.2.4 酸碱阻隔性能

对复合防护面料和外层阻燃面料进行酸碱阻隔性能测试,并与 PTFE-C 膜进行对比,结果如图 6 所示。从图 6 可以看出,未经复合整理的外层阻燃面料几乎不阻隔化学试剂,对  $\text{H}_2\text{SO}_4$  的标准透过时间约为  $1 \text{ min}$ ,对  $\text{NaOH}$  的标准透过时间约为  $9 \text{ min}$ 。但与 PTFE-C 膜复合后,复合防护面料在  $60 \text{ min}$  的测试周期内,酸、碱溶液的渗透量均小于  $2.5 \mu\text{g/cm}^2$ ,满足三级化学物质渗透性要求。在对质量分数为 30%  $\text{NaOH}$  的阻隔性能测试中,复合防护面料的阻隔性表现较在酸性溶液中更为突出,其渗透量保持在极低水平,表现出稳定的碱液阻隔性能。

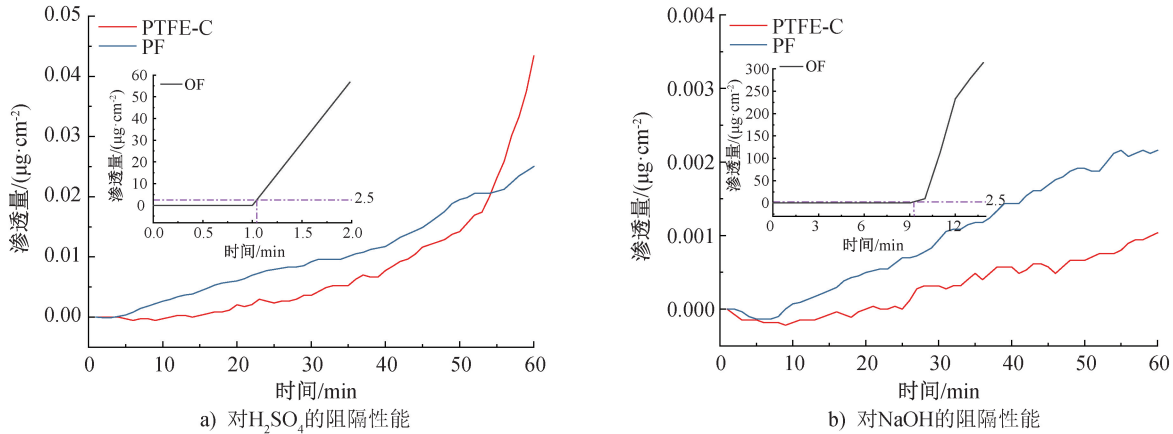


图 6 复合防护面料及其各组分酸碱阻隔性能

Fig. 6 Acid and alkali barrier property of composite protective fabric and its various components

PTFE 化学式为  $(\text{CF}_2-\text{CF}_2)_n$ , 其主链上每个碳原子为氟原子以完全对称的方式包围着。在氟原子间强排斥力的作用下, 具有较大半径的氟原子和较短键长的 C—F 键使得整个大分子链呈螺旋状排列<sup>[22]</sup>。氟原子在主链外层形成紧密堆积的“氟代”保护层, 有效保护了碳链免受化学物质的侵蚀。—F 侧基的引入使聚合物分子间氢键作用增强, 分子间作用力提升, 链段堆砌密度提高, 聚合物的自由体积和自由体积分数下降, 小分子在聚合物中的扩散系数降低, PTFE 聚合物的阻隔性能提升<sup>[23]</sup>。在复合防护面料中, PTFE 膜起主要的化学阻隔作用, 其与外层阻燃面料构成孔径梯度结构, 延长了溶液的渗透路径。黏结剂的使用填充了织物与 PTFE 膜材界面的孔隙与空腔, 形成了致密结构, 阻挡了酸碱溶液的渗透, 复合防护面料酸碱阻隔性能进一步提升。

### 3 结论

通过对 3 种 PTFE 膜进行测试与比较, 选取防护性能最佳的 PTFE 膜与经三防功能化整理的外层阻燃面料, 在阻燃 PUR 热熔胶的作用下, 经过点胶复合工艺制备复合防护面料。研究发现:

(1) PTFE 膜作为增强层材料, 能显著提升复合防护面料对酸碱溶液的阻隔性能。PTFE 膜厚度的增加与孔径的减小均能降低液体渗透速率, 其中, PTFE-C 膜厚度与孔径的双重作用使得渗透剂分子渗透路径变长、变窄, 其对化学物质的阻隔作用

最强。

(2) 经热压作用后, 复合防护面料的厚度下降, 单位面积质量为  $288.9 \text{ g}/\text{m}^2$ 。当 3 层结构消防员灭火防护服总质量与各结构层材料单位面积质量和的比值范围为 5.5~5.7 时, 本研究制备的复合防护面料与常用市售隔热层、舒适层面料组合, 所制 3 层结构消防员灭火防护服的总质量小于 2.8 kg, 满足整套防护服质量应不大于 3.5 kg 的要求。

(3) 复合防护面料水接触角达  $153.5^\circ$ , 静水压为 73.33 kPa, 酸、碱标准透过时间均超 60 min, 满足 GB 24539—2021《防护服装 化学防护服》中化学物质渗透性能三级要求, 具有优异的酸碱阻隔性能、耐静水压性能与超疏水特性, 能有效提升消防人员在酸碱环境中的安全保障程度。

PTFE 膜的应用显著增强了消防员灭火防护服对酸碱的防护性能。但作为消防员灭火防护服, 还需综合考量热防护、力学强度等多方面性能参数。后续研究可对消防员灭火防护服用面料进行多重结构组合设计与优化, 并依据 XF 10—2014 标准完善相关测试, 以全面明确其防护性能。



期刊采编平台



中国知网下载

### 参考文献

[1] 李光耀, 孙振文, 刘耀, 等. 我国与欧美危险化学品

- 事故调查机制比较分析[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(6): 902-906.
- [ 2 ] RAHMAN BHUIYAN M A, WANG L J, SHAID A, et al. Advances and applications of chemical protective clothing system [J]. Journal of Industrial Textiles, 2019, 49(1): 97-138.
- [ 3 ] VAN WELY E. Current global standards for chemical protective clothing: how to choose the right protection for the right job? [J]. Industrial Health, 2017, 55(6): 485-499.
- [ 4 ] 李可欣, 严庆帅, 戴红芳, 等. 隔绝式化学防护服研究现状及发展趋势[J]. 纺织导报, 2024(5): 34-40.
- [ 5 ] 卢聪, 王怀璋, 李贺希, 等. 化学防护服及材料研究进展[J]. 医疗卫生装备, 2021, 42(2): 86-92.
- [ 6 ] SONG N K, ZHANG X, SI Y, et al. Superelastic, breathable, and high-barrier nanofibrous membranes with biomimetic ECM structure for toxic chemical protection [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(6): 8499-8507.
- [ 7 ] SUKUMAR N, GANANVEL P, DHARMALINGAM R, et al. Development of chemical protective clothing using multilayer fabric for hazardous chemicals handling [J]. Journal of Natural Fibers, 2022, 19(4): 1265-1280.
- [ 8 ] 顾玉培, 季涛, 高强, 等. 多功能隔绝式化学防护复合面料的制备及性能[J]. 棉纺织技术, 2022, 50(12): 13-18.
- [ 9 ] 王俊胜, 金星, 张杰, 等. 高等级化学防护服用多层膜面料的阻燃性能和热防护性能[J]. 消防科学与技术, 2024, 43(3): 389-392.
- [ 10 ] WONG W S Y, KISELEVA M S, ZHOU S C, et al. Design of fluoro-free surfaces super-repellent to low-surface-tension liquids [J]. Advanced Materials, 2023, 35(29): 2300306.
- [ 11 ] LIU S Y, XU L, YU J Y, et al. Amphiphobic, thermostable, and stretchable PTFE nanofibrous membranes with breathable and chemical-resistant performances for protective applications [J]. ACS Applied Polymer Materials, 2023, 5(2): 1464-1473.
- [ 12 ] 代艳红, 王瑞柳, 徐广标, 等. 聚四氟乙烯热轧纤维膜的结构与性能[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2019, 45(3): 358-363.
- [ 13 ] 孙喜娥, 廉志军, 张师军, 等. PTFE 微孔膜在安全防护领域的应用探讨[J]. 纺织科学研究, 2022, 33(8): 55-57.
- [ 14 ] LAGARON J M, CATALÁ R, GAVARA R. Structural characteristics defining high barrier properties in polymeric materials [J]. Materials Science and Technology, 2004, 20(1): 1-7.
- [ 15 ] 罗立汉, 童奕皓, 贾蕊, 等. 有机溶剂纳滤膜在化学品纯化方面的应用进展[J]. 化学试剂, 2023, 45(7): 17-24.
- [ 16 ] 刘文静, 李超婧, 吴斯蔚, 等. 超润滑聚四氟乙烯膜的制备及滑移性能[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2021, 47(5): 8-17.
- [ 17 ] PHALEN R N, DUBROVSKIY A V, BROWN B C, et al. Chemical permeation of similar disposable nitrile gloves exposed to volatile organic compounds with different polarities, part 2: predictive polymer properties [J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2020, 17(4): 172-180.
- [ 18 ] 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, 52.
- [ 19 ] 刘亚光. 消防员灭火防护服减层结构及其热防护性能评价[J]. 产业用纺织品, 2024, 42(3): 44-50.
- [ 20 ] 李永海, 韩月芬, 李慧峰, 等. 灭火防护服3层组合试样的热防护性能[J]. 毛纺科技, 2024, 52(6): 29-33.
- [ 21 ] 谢苏江. 聚四氟乙烯的改性及应用[J]. 化工新型材料, 2002, 30(11): 26-30.
- [ 22 ] FENG Y, XIONG T R, JIANG S H, et al. Mechanical properties and chemical resistance of electrospun polytetrafluoroethylene fibres [J]. RSC Advances, 2016, 6(29): 24250-24256.
- [ 23 ] 黄杰, 向贤伟, 刘亦武, 等. 聚合物结构与气体渗透性能研究[J]. 广州化工, 2016, 44(9): 40-42.

激情全运会 活力大湾区