



SiO₂-Al₂O₃ 复合气凝胶自清洁 隔热涂层织物的制备及性能

李金哲^{1a}, 赵永欢^{1b}, 郑长勇², 徐宝亮², 苏娟娟^{1b,c}, 韩建^{1b,c}

(1. 浙江理工大学, a. 材料科学与工程学院; b. 纺织科学与工程学院(国际丝绸学院); c. 浙江省产业用
纺织材料制备技术研究重点实验室, 杭州 310018; 2. 浙江泰普森实业集团有限公司, 湖州 313200)

摘要: 为了满足纺织品在使用过程中防污和隔热的需求, 制备了一种自清洁隔热涂层织物。以正硅酸乙酯 (TEOS) 和六水合氯化铝 (AlCl₃·6H₂O) 为前驱体, 使用溶胶-凝胶法制备了 SiO₂-Al₂O₃ 复合气凝胶, 并将其均匀分散于聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 溶液中, 得到整理工作液; 进一步以工作液浸渍整理涤纶织物, 制备得到 SiO₂-Al₂O₃ 复合气凝胶整理的涤纶织物; 采用场发射电子扫描显微镜、水接触角仪、导热系数仪和自清洁性能测试等技术, 对整理后的涤纶织物进行结构和性能分析。结果表明: 当整理工作液中 PDMS 和复合气凝胶的质量分数均为 10% 时, 复合气凝胶在织物表面形成了多级粗糙结构, 水接触角达到了 153°, 织物表现出良好的自清洁性能; 同时, 由于复合气凝胶在织物表面及纤维空隙内部的均匀负载, 使得整理后织物的导热系数降低到了 0.0411 W/(m·K), 在 40.0 °C 条件下织物上下表面的温差达到了 (5.0±0.4) °C, 具有优异的保温隔热效果。该方法赋予了涂层整理涤纶织物一定的自清洁性能和隔热性能。

关键词: 复合气凝胶; 涂层织物; 自清洁; 隔热; 多功能

中图分类号: TB34; TS195.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851 (2022) 11-0848-08

Preparation and properties of SiO₂-Al₂O₃ composite aerogel self-cleaning thermal insulation coated fabrics

LI Jinzhe^{1a}, ZHAO Yonghuan^{1b}, ZHENG Changyong², XU Baoliang², SU Juanjuan^{1b,c}, HAN Jian^{1b,c}

(1a. School of Materials Science & Engineering; b. College of Textile Science and Engineering
(International Institute of Silk); c. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Industrial Textile Material
Preparation Technology Research, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018 China;
2. Zhejiang Hengfeng Top Leisure Co., Ltd., Huzhou 313200, China)

Abstract: In order to satisfy the needs of anti-fouling and thermal insulation of textiles during use, a self-cleaning thermal insulation coated fabric was prepared. SiO₂-Al₂O₃ composite aerogel was prepared by sol-gel method with tetramethyl orthosilicate (TEOS) and aluminum chloride hexahydrate (AlCl₃·6H₂O) as precursors. Then the SiO₂-Al₂O₃ composite aerogel was dispersed in polydimethylsiloxane (PDMS) solution, to get a finishing fluid. Then the finishing fluid was used to finish the polyester fiber fabric with impregnation method. The structure and properties of the coated modified polyester fiber fabric were systematically analyzed via field emission scanning microscope, water contact goniometer, thermal conductivity tester, self-cleaning performance test and other techniques. The results showed that the optimum self-cleaning performance of the coated polyester fiber fabric was achieved when the mass

fractions of both PDMS and composite aerogel in the fluid were 10%, the composite aerogel formed a multi-level coarse structure on the surface of the fabric and the water contact angle was up to 153°. In addition, due to the uniform loading of composite aerogel on the surface of the fabric and inside fiber voids, the thermal conductivity of the finished fabric decreased to 0.0411 W/(m·K), and the temperature difference between the obverse and reverse sides reached (5.0±0.4) °C at 40 °C. The fabric based on SiO₂-Al₂O₃ composite aerogel finishing has an excellent thermal insulation effect. The use of this method endows self-cleaning and thermal insulation properties to the coated modified polyester fabric

Key words: composite aerogel; coated textile; self-cleaning; thermal insulation; multi-functional

0 引 言

隔热材料具有低导热性并能够减少物体热量损耗等优点,满足了人们对于节约能源的需求,被广泛应用于建筑、航天和纺织等领域。常用的棉、麻和矿物纤维只有在较大用量时,才能起到较好的隔热效果,但同时造成了加工困难及力学性能下降等问题,因此气凝胶等新型隔热材料的开发使用变得尤为重要^[1]。气凝胶具有 3D 多孔网络结构,有质轻、吸波、隔热等优点^[2-4],由于纳米孔可以截留大量的静置空气,气凝胶的隔热效果尤为显著。气凝胶种类丰富,包括 Si、Ti、Fe、Al 和 Zr 气凝胶^[5-7],也可以通过以上多种元素复合形成二元气凝胶^[8]或多元气凝胶^[9-10]。其中二氧化硅(SiO₂)气凝胶由于价格便宜、易于生产,吸引了众多研究者的关注,但目前单纯的 SiO₂ 气凝胶存在韧性差、易破碎等缺点,严重限制了其广泛应用。隔热涂层织物制备工艺简单、成本低,但是隔热填料多以空心玻璃微珠为主,存在改性涂层织物质量重且手感僵硬等问题^[11]。将质轻、耐热的气凝胶与柔性织物结合,不仅解决了传统隔热涂层织物存在的使用问题,而且气凝胶更高的孔隙率,将进一步提高隔热涂层织物的保温隔热效果^[12]。

隔热涂层织物通常应用在帐篷、建筑屋顶等户外场所,不可避免地受到污水、灰尘的污染,而自清洁涂层织物表面的污染物附着力弱,用少量的水和一定的外力就能使污渍自行脱落,使织物在使用过程中更加便捷^[13]。荷叶具有超疏水功能的主要原因是其低表面能和粗糙结构,因此可以通过模仿荷叶的表面结构,在织物表面涂覆低表面能的涂层,并通过添加无机粒子来提高粗糙度,从而达到超疏水自清洁的效果^[14-16]。Xue 等^[17]通过对纤维表面进行化学蚀刻,使用 PDMS 为涂层成膜剂,成功地在涤纶纺织品上构建了具有自洁性能的超疏水表面,水滴在纯涤纶织物上会很快扩散,经过涂层处理后,

水接触角提升到了 163°。Jabbari 等^[18]将 SiO₂ 气凝胶添加到聚氯乙烯(PVC)涂料中,随后使用刀刮布法在聚酯织物表面形成了保温隔热涂层, SiO₂ 气凝胶涂层使织物导热系数下降到了 0.15 W/(m·K),水接触角提高到了 88°,保温隔热性能和自清洁性能均有待提高。靳懿等^[19]使用氟硅烷改性制备了 F-CuS/SiO₂ 复合气凝胶,并使用聚二甲基硅氧烷(PDMS)和异丙醇的混合溶液将复合气凝胶整理到了棉织物上,整理后的棉织物水接触角为 159.4°,具有优异的超疏水自清洁性,但并未涉及保温隔热性能。目前利用气凝胶制备保温隔热涂层织物还存在隔热性能不佳、功能单一等问题。

本文针对纯涤纶织物隔热性能差、易被污染等问题,在织物表面构建了低表面能的粗糙涂层。通过共驱体法制备了 SiO₂-Al₂O₃ 复合气凝胶,进一步提高了复合气凝胶的结构稳定性和粗糙度,并将 SiO₂-Al₂O₃ 复合气凝胶均匀分散于 PDMS 溶液中,使用浸渍法将 SiO₂-Al₂O₃ 复合气凝胶整理到了涤纶织物上,对其隔热和自清洁性能进行了分析,制备得到了具有自清洁和保温隔热性能的涂层织物。

1 实验部分

1.1 实验材料

正硅酸乙酯(TEOS,麦克林试剂有限公司);六水合氯化铝(AlCl₃·6H₂O,麦克林试剂有限公司);环氧丙烷(PO,麦克林试剂有限公司);正己烷和六甲基二硅氮烷(HMDS,麦克林试剂有限公司);盐酸(HCl,华东医药股份有限公司);无水乙醇(杭州高晶试剂有限公司);去离子水(H₂O,实验室自制);固化剂(黄山市强力化工有限公司)和分散剂(ZY-650,上海梓意化工有限公司)。

1.2 SiO₂-Al₂O₃ 复合气凝胶的制备

取 10 mL 的 TEOS、20 mL 水和 20 mL 乙醇混合置于烧杯中,滴加 HCl 并调节 pH 值 2,使 TEOS 水解形成硅溶胶;另外称取 4.0 g 的 AlCl₃·6H₂O

溶于 20 mL 的水和 20 mL 的乙醇混合溶液中,使其充分水解成铝溶胶;进一步将铝溶胶缓慢滴加至硅溶胶中,搅拌 1 h,形成混合溶胶,滴加 10 mL 的 PO 于混合溶胶中,静置 12 h 形成湿凝胶,随后向湿凝胶中加入 50 mL 乙醇,在 50 °C 静置 24 h;将老化后的湿凝胶放入体积比为 1:10 的 HMDS 和正己烷混合溶液中,疏水改性 24 h,使用正己烷溶液清洗残留的改性剂,然后将湿凝胶放入 50 mL 的正己烷中浸泡 24 h,最后在 80 °C 干燥 24 h,产物即为 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶。

1.3 PDMS 涂层织物的制备

将 4.0 g 的 PDMS 与 0.4 g 的固化剂加入到 60 mL 的正己烷中,超声搅拌 1 h,得到 PDMS 整理工作液;随后将 5 cm×5 cm 的涤纶织物浸渍在 PDMS 整理工作液中,浸渍 1 h 后取出,在 80 °C 下干燥 20 min,得到 PDMS 整理的涂层织物,记为 PDMS/织物。

1.4 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶涂层织物的制备

称取 4.0 g 上述制备得到的复合气凝胶粉末,加入到 60 mL 正己烷中,逐滴滴加分散剂并搅拌 2 h,使复合气凝胶均匀分散于正己烷中;进一步加入 4.0 g 的 PDMS 与 0.4 g 的固化剂,超声搅拌 1 h,得到整理工作液;最后将尺寸为 5 cm×5 cm 的涤纶织物浸渍在工作液中,浸渍 1 h 后取出,在 80 °C 干燥 20 min,得到了 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶整理的涂层织物,记为 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ /织物。

1.5 测试与表征

a)采用场发射扫描电子显微镜(Ultra 55,德国 Carl Zeiss)分析样品的表面形貌,测试电压为 3 kV,并使用能谱(EDS)测试样品的元素组成。

b)采用傅里叶变换红外光谱仪(Nicolet iS50,美国 Thermo Electron)分析复合气凝胶表面的官能团变化,测试前将样品烘干,在 4000~400 cm^{-1} 范围内扫描 32 次。

c)利用接触角仪(JY-82B,承德鼎盛试验机设备有限公司)测定样品表面的水接触角,测量气凝胶水接触角时,将气凝胶粉末均匀的铺在载玻片上;测量织物时将织物贴在载玻片上,保证织物的平整性。

d)采用比表面积分析仪(ASAP 2000,美国 Micromeritics)分析气凝胶样品的孔径大小,称取 100 mg 样品,在 N_2 中吸附,然后在 120 °C 脱气 12 h。

e)采用导热仪(TPS 2500 s,瑞典 Hot Disk)测定样品的导热系数,测试时准备两块大小为 5 cm×

5 cm 的样品,使用聚酰亚胺薄膜包裹的 7280 探头,测试温度为 25 °C。

f)使用加热台(JF-976,东莞市长安金棒电子工具厂)测试织物上下表面的温差,加热温度为 40 °C,每 10 s 记录一次温度变化。

g)自清洁性能测试,称取 1.0 g 亚甲基蓝粉末作为污染物,将织物放在倾斜角度为 45°的载玻片上使用水滴冲刷,表征织物的自清洁性能。

2 结果与讨论

2.1 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶的微观形貌分析

图 1 为多种气凝胶的 SEM 与元素分布图。从图 1(a)~(b)中可以看到, SiO_2 气凝胶呈现出多孔的 3D 网络结构,其骨架由珍珠链状的 SiO_2 粒子组成, Al_2O_3 气凝胶同样呈现出多孔的 3D 网络结构,但骨架由片状结构的 Al_2O_3 组成;从图 1(c)中可以看到, $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶骨架由珍珠链与片状结构穿插而成,其不仅具有多孔 3D 网络结构,而且表面更加粗糙;利用 EDS 测试 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶的元素含量,如图 1(d)所示, $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶同时具有 Si 和 Al 元素,且 Si 与 Al 原子含量的比值约为 4:1。以上结果表明,通过共前驱体法可以使两种气凝胶互相交联穿插,成功制备结构稳定的 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶。

图 2 为 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶的 N_2 吸附-脱附曲线和孔径分布曲线。从图 2(a)中可以看出, $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶的 N_2 吸附-脱附曲线为第 IV 型曲线,并且表现出了 H1 型的滞后环,具有典型的介孔材料的特征;观察图 2(b)可以看出, $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶的孔径主要集中在 30 nm 左右,因为两种前驱体溶胶粒子在凝胶化的过程中互相交联增强了骨架结构,使其在干燥后保持了比较大的孔径,表明本文制备的 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶具有丰富的纳米孔和发达的 3D 网络结构。

2.2 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶的化学结构及疏水性分析

$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶的傅里叶红外光谱如图 3 所示。图 3 表明: SiO_2 气凝胶、 Al_2O_3 气凝胶和 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶均在 3453 cm^{-1} 和 2934 cm^{-1} 出现了吸收峰,是由表面的一OH 伸缩振动以及—CH₃ 的不对称伸缩振动引起,表明这 3 种气凝胶成功被疏水改性; SiO_2 气凝胶在 1063 和 848 cm^{-1} 出现的吸收峰是由 Si—O—Si 伸缩振动引起^[20-21], Al_2O_3

气凝胶在 1063、837 cm⁻¹ 和 600 cm⁻¹ 处出现了 Al—O 伸缩振动引起的吸收峰^[22],而 SiO₂-Al₂O₃ 复合气凝胶在 1033 cm⁻¹ 出现的峰是由 Si—O—Al 伸

缩振动引起,表明两种气凝胶的骨架之间不仅限于物理穿插,在凝胶过程中还相互交联,生成新的化学键,形成 SiO₂-Al₂O₃ 复合气凝胶。

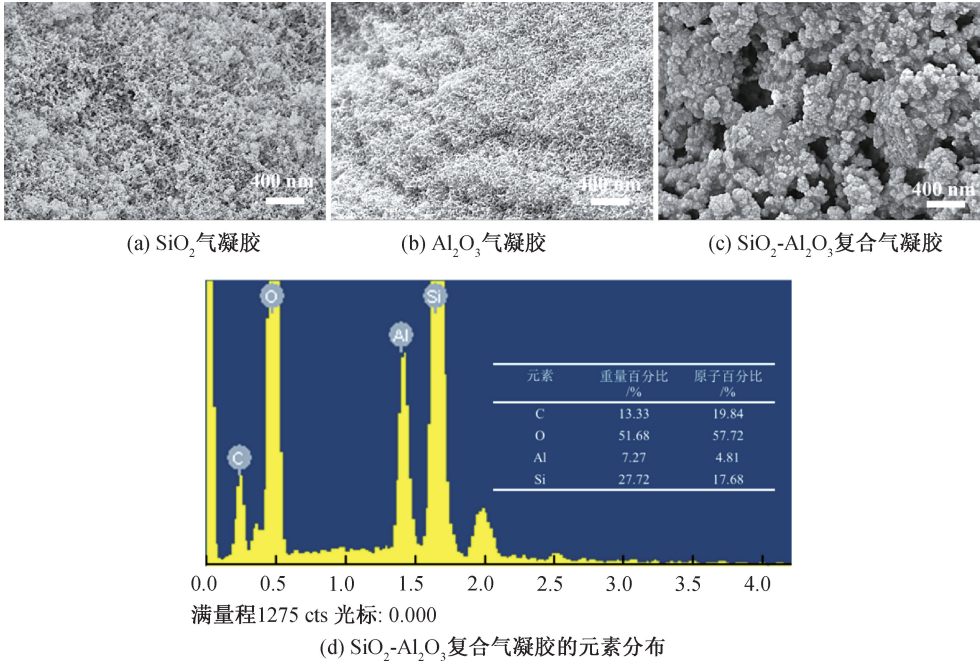


图 1 不同气凝胶的扫描电子显微镜照片和元素分布图

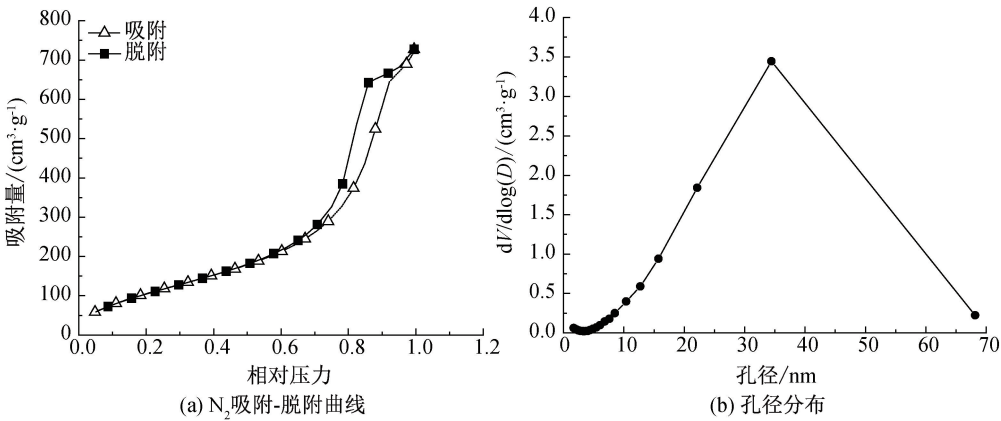


图 2 SiO₂-Al₂O₃ 复合气凝胶的 N₂ 吸附-脱附曲线和孔径分布图

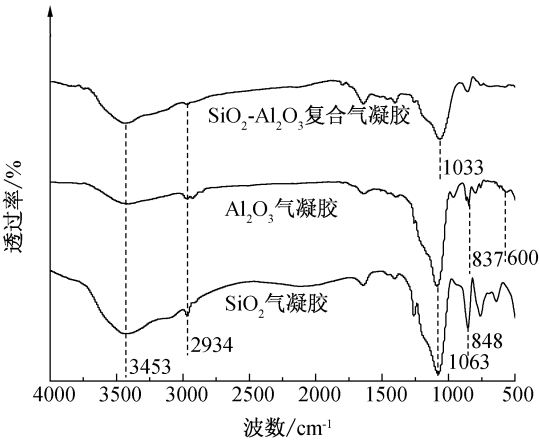


图 3 三种气凝胶的傅里叶变换红外光谱图

SiO₂-Al₂O₃ 复合气凝胶的表面水接触角如图 4 所示。由图 4 可知, SiO₂ 气凝胶的水接触角为 143°, Al₂O₃ 气凝胶的水接触角为 144°, SiO₂-Al₂O₃ 复合气凝胶水接触角达到了 150°, 复合气凝胶的水接触角相比于 SiO₂ 气凝胶提高了 4.9%, 这是因为复合气凝胶的骨架间互相交联形成了互穿结构, 提高了 SiO₂-Al₂O₃ 复合气凝胶表面的粗糙度, 使 SiO₂-Al₂O₃ 复合气凝胶的疏水性增大。

2.3 SiO₂-Al₂O₃ 复合气凝胶涂层织物的微观形貌

图 5 为纯织物及经 PDMS 整理、SiO₂-Al₂O₃ 复合气凝胶整理后织物的扫描电子显微镜照片。从图 5(a) 可见, 纯织物纤维表面较为光滑, 而经 PDMS

整理后,由于 PDMS 具有良好的成膜性,织物纤维间被连续的膜状物质覆盖(见图 5b));而从图 5(c)可以看出,经过 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶整理的涂层织物,表面均匀负载了大量的 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝

胶,表明以 PDMS 为成膜剂, $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶可以有效地黏合在织物表面,同时显著提高了织物表面的粗糙度。

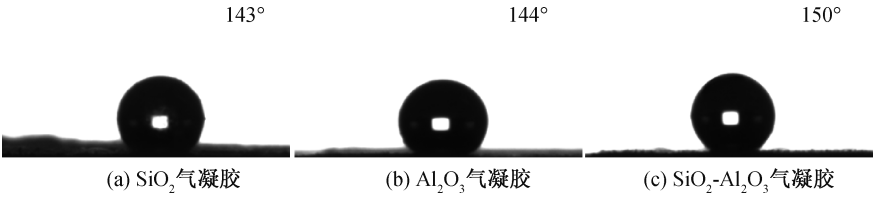


图 4 不同气凝胶的水接触角

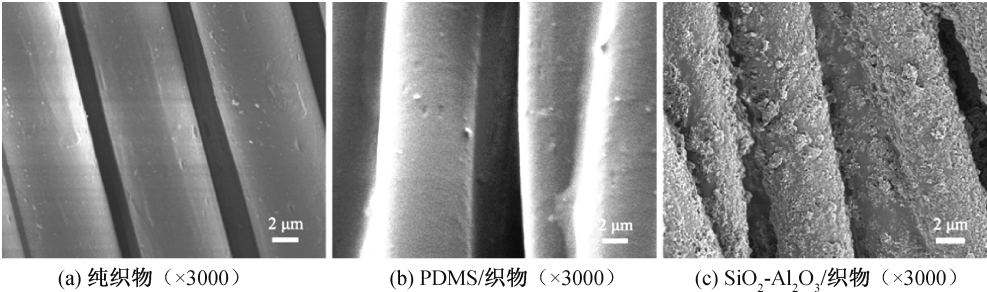


图 5 涤纶织物整理前后的扫描电子显微镜照片

图 6 为织物表面的疏水性测试结果。由图 6 可知:纯织物表面的水接触角为 75° ,涤纶纤维是疏水性纤维,但当涤纶纤维织成织物时,由于织物表面的经纬结构和毛细管效应,水滴在纯织物表面会呈现一定的铺展状态^[23];经 PDMS 整理的涤纶织物,其表面的水接触角提高到了 128° ,是由于涂覆于织物表面的 PDMS 形成了连续的低表面能膜状结构,赋予了 PDMS 整理涤纶织物良好的疏水性能;而经过

$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶整理后,涤纶织物的水接触角进一步提高到了 153° ,达到了超疏水的标准,使水滴能够在涤纶织物上滚动,这是由于 PDMS 赋予了织物低表面能,同时 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶均匀负载于织物表面,使织物表面形成了微纳多级粗糙结构,从而显著提升了 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶整理涂层织物的疏水性能。

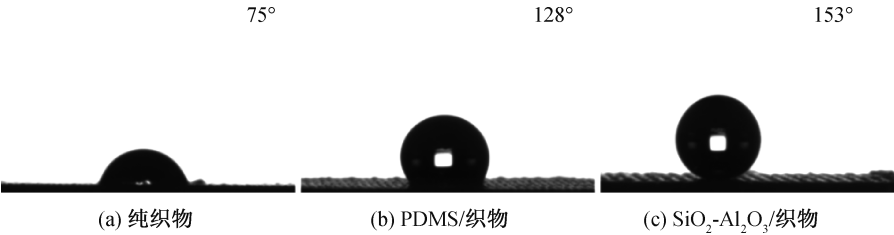


图 6 涤纶织物整理前后的水接触角

2.4 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶涂层织物的隔热性能

织物的导热系数如图 7 所示。图 7 表明:纯织物的导热系数为 $0.0726\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,经过 PDMS 整理后,织物导热系数略微上升,为 $0.0736\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,这是由于未经处理的涤纶织物,其纤维之间存在明显的间隔;经 PDMS 整理后,纤维之间形成了连续的涂层膜,使纤维的间隔变少或消失,从而增大了织物的传热能力,使导热系数有所上升;经过 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶整理后,涤纶织物的导热系数大幅度降低,为 $0.0411\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,比纯织物下降了 43.4% ,是由于 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶具有

丰富的纳米孔和发达的 3D 网络结构,其可以截留大量的静置空气,自身具有较低的导热系数,当 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶与织物紧密结合时,热量在织物中传递时,被 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶阻碍,降低了织物的传热性能,使 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶整理涂层织物的导热系数大大降低。

在室温为 $18.0\ ^\circ\text{C}$ 和加热台温度 $40.0\ ^\circ\text{C}$ 时,织物上下表面的温差如图 8 所示。图 8 显示:纯织物上下表面温差为 $(1.0\pm0.3)\ ^\circ\text{C}$,经过 PDMS 整理后,其上下表面温差达到 $(1.1\pm0.3)\ ^\circ\text{C}$,而经 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶整理的涂层织物上下表面温差达

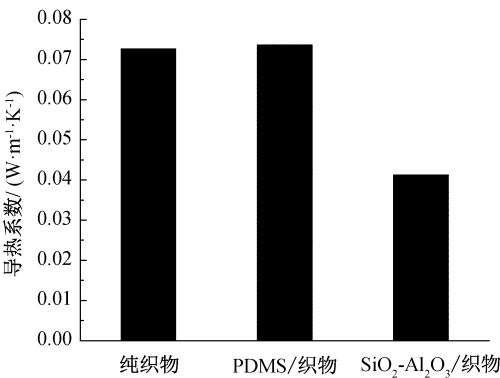


图 7 涤纶织物整理前后的导热系数

到了(5.0±0.4)℃;相比纯织物和PDMS整理织物均有很明显的提高,是由于结合在织物表面的SiO₂-Al₂O₃复合气凝胶,降低了热量在织物纤维间的传递,导热系数低使得热量难以从下表面传递到上表面,使织物上下表面产生了比较大的温度差,从而提高了涤纶织物的隔热性能。

2.5 SiO₂-Al₂O₃ 复合气凝胶涂层织物的自清洁性能

图 9 为织物表面自清洁性能的测试结果。当使用水滴冲刷后,纯织物表面的亚甲基蓝粉末残留量

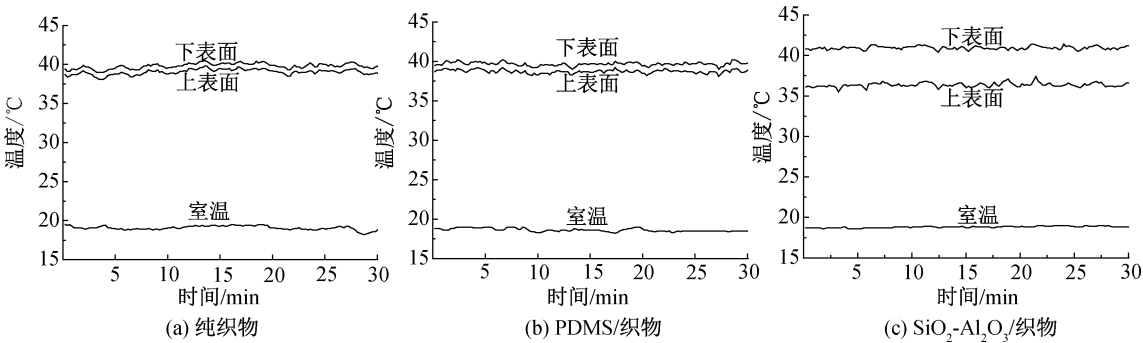


图 8 涤纶织物整理前后的上下表面温差

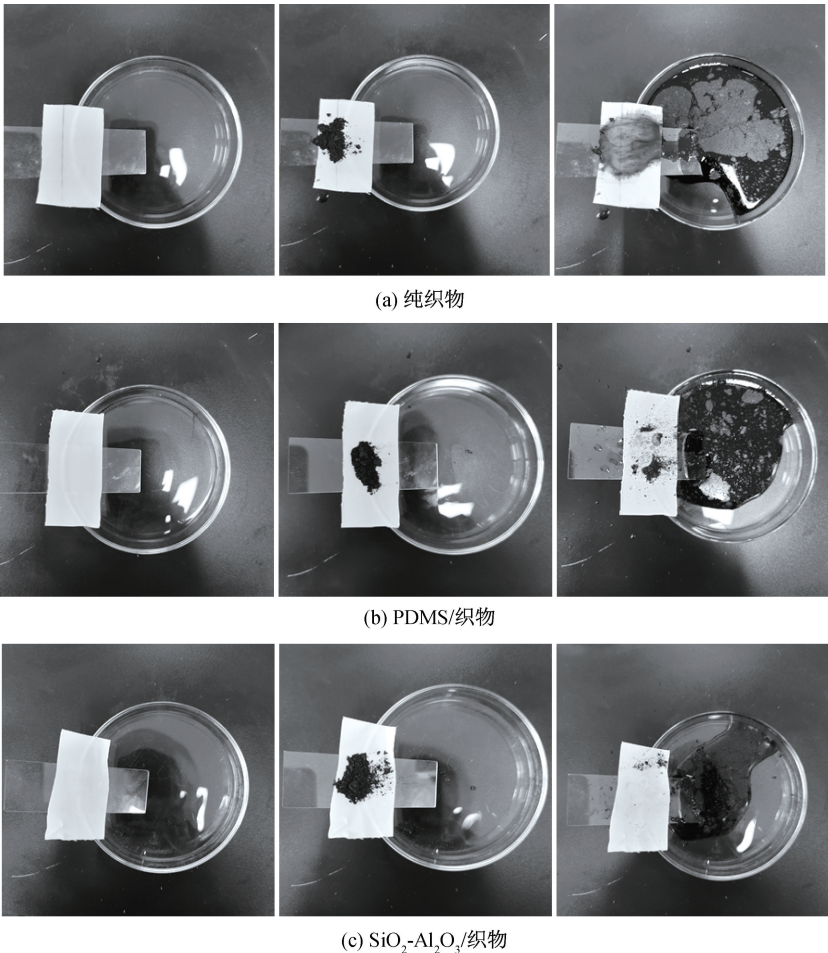


图 9 涤纶织物整理前后的自清洁性能

较大,污染物全部渗透到了织物纤维间隙之间(见图9(a)),因此,纯织物并不具备防污的作用。PDMS整理后的织物经过水滴冲刷后,大量的亚甲基蓝粉末已被水流带走,但还有少量的污渍停留在织物表面(见图9(b)),说明PDMS整理可以降低织物的表面能,从而使涤纶织物具有较高的疏水性,但其自清洁性还有待提高。图9(c)表明:经过 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶整理后,涂层织物表面的亚甲基蓝粉末几乎完全被水冲刷掉,是由于涂层织物的低表面能和较高粗糙度,其超疏水性降低了粉末在织物表面的黏附力,所以 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶涂层织物表现出良好的自清洁性能。

3 结 论

本文通过溶胶-凝胶法制备了 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶,将其均匀分散于PDMS溶液制备得到整理工作液,进一步利用浸渍法将 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶涂覆于涤纶织物,制备了涂层整理的涤纶织物,所得主要结论如下:

a)成功制备了 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶,其中Si元素与Al元素的摩尔比为4:1,复合气凝胶骨架由珍珠链状和片状穿插构成,具有丰富的纳米孔和发达的3D网络结构。

b)以PDMS为成膜剂, $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶可以均匀且紧密负载于织物表面,其丰富的孔道结构起到良好阻隔热量传递的作用,涂层织物的导热系数降低到了 $0.0411\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,相比于纯织物下降了43.4%,在 $40.0\text{ }^\circ\text{C}$ 加热温度时,涂层织物上下表面温差达到了 $(5.0\pm0.4)\text{ }^\circ\text{C}$,显示出较好的隔热性能。

c)PDMS低表面能和 $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 复合气凝胶的微纳粗糙结构,使涂层织物的水接触角达到了 153° ,亚甲基蓝粉末可以被水滴完全冲刷掉,展现出较好的自清洁性能。

参考文献:

- [1] Lee K Y, Mahadik D B, Parale V G, et al. Composites of silica aerogels with organics: A review of synthesis and mechanical properties[J]. Journal of the Korean Ceramic Society, 2020, 57(1): 1-23.
- [2] Li X, Dong G, Liu Z, et al. Polyimide aerogel fibers with superior flame resistance, strength, hydrophobicity, and flexibility made via a universal sol-gel confined transition strategy[J]. ACS Nano, 2021, 15(3): 4759-4768.
- [3] Tian J, Shafi S, Tan H, et al. Mechanical and thermal-

insulating performance of silica aerogel enhanced jointly with glass fiber and fumed silica by a facile compressing technique[J]. Chemical Physics Letters, 2020, 739: 136950.

- [4] Sarawade P B, Quang D V, Hilonga A, et al. Synthesis and characterization of micrometer-sized silica aerogel nanoporous beads[J]. Materials Letters, 2012, 81: 37-40.
- [5] Hu W, Li M, Chen W, et al. Preparation of hydrophobic silica aerogel with kaolin dried at ambient pressure[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2016, 501: 83-91.
- [6] Zhang B, Yu H, Zhang Y, et al. Bacterial cellulose derived monolithic titania aerogel consisting of 3D reticulate titania nanofibers[J]. Cellulose, 2018, 25(12): 7189-7196.
- [7] Zhang X, Zhang R, Zhao C. Ultra-small sepiolite fiber toughened alumina aerogel with enhanced thermal stability and machinability [J]. Journal of Porous Materials, 2020, 27(5): 1535-1546.
- [8] Zu G Q, Shen J, Wang W Q, et al. Preparation of heat-resistant, core/shell nanostructured $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ composite aerogels and their photocatalytic properties [J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2015, 31(2): 360-368.
- [9] Wu X, Shao G, Shen X, et al. Evolution of the novel C/ SiO_2/SiC ternary aerogel with high specific surface area and improved oxidation resistance [J]. Chemical Engineering Journal, 2017, 330: 1022-1034.
- [10] An Z, Ye C, Zhang R, et al. Multifunctional C/ SiO_2/SiC -based aerogels and composites for thermal insulators and electromagnetic interference shielding [J]. Journal of Sol-Gel Science and Technology, 2019, 89(3): 623-633.
- [11] Tao D, Li X, Dong Y, et al. Super-low thermal conductivity fibrous nanocomposite membrane of hollow silica/polyacrylonitrile[J]. Composites Science and Technology, 2020, 188: 107992.
- [12] Greszta A, Krzeminska S, Bartkowiak G, et al. Development of high-insulating materials with aerogel for protective clothing applications-an overview [J]. International Journal of Materials Research, 2021, 112(2): 164-172.
- [13] 王宗乾, 何铠君, 吴开明, 等. 自清洁功能性纺织品研究进展[J]. 现代纺织技术, 2014, 22(1): 60-64.
- [14] Luo G, Jin Z, Dong Y, et al. Preparation and performance enhancements of wear-resistant, transparent PU/ SiO_2 superhydrophobic coating[J]. Surface Engineering, 2018, 34(2): 139-145.

- [15] Fu X, Gong H F, Xiao X M. Facile method to prepare superhydrophobic high-density polyethylene coating [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 634: 2960-2963.
- [16] Sun N, Qin S, Wu J, et al. Bio-inspired superhydrophobic polyphenylene sulfide/polytetrafluoroethylene coatings with high performance [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2012, 12(9): 7222-7225.
- [17] Xue C H, Li Y R, Zhang P, et al. Washable and wear-resistant superhydrophobic surfaces with self-cleaning property by chemical etching of fibers and hydrophobization [J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2014, 6(13): 10153-10161.
- [18] Jabbari M, Åkesson D, Skrifvars M, et al. Novel lightweight and highly thermally insulative silica aerogel-doped poly (vinyl chloride)-coated fabric composite [J]. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2015, 34(19): 1581-1592.
- [19] 靳懿, 徐丽慧, 曲珍, 等. 氟硅烷改性 CuS/SiO₂ 复合气凝胶的超双疏防紫外线纺织品[J]. *印染*, 2020, 46(2): 1-6.
- [20] Liu Y, Han X, Kuerbanjiang B, et al. Effect of sodium bicarbonate solution on methyltrimethoxysilane-derived silica aerogels dried at ambient pressure[J]. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2021, 15(4): 954-959.
- [21] Li Z, Zhao S, Koebel M M, et al. Silica aerogels with tailored chemical functionality [J]. *Materials & Design*, 2020, 193: 108833.
- [22] Yu H, Tong Z, Yue S, et al. Effect of SiO₂ deposition on thermal stability of Al₂O₃-SiO₂ aerogel[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2021, 41(1): 580-589.
- [23] 李枫裕, 陈慰来, 陈梦颖. 经编双面绒织物的疏水整理研究[J]. *现代纺织技术*, 2019, 27(5): 73-79.

(责任编辑:廖乾生)