



# 被动式日间辐射制冷超疏水 涤纶织物的制备及其性能

潘毕成, 张佳文, 杨孝全, 蔡 英, 易玲敏

(浙江理工大学, a. 纺织科学与工程学院(国际丝绸学院); b. 生态染整技术教育部工程研究中心;

c. 先进纺织材料与制备技术教育部重点实验室, 杭州 310018)

**摘 要:** 为了获得具有制冷性能的超疏水织物, 利用含氟硅烷和环氧硅烷对  $\text{SiO}_2$  粒子进行改性, 通过浸涂的方式将改性粒子整理到涤纶织物上, 并喷涂聚二甲基硅氧烷交联成膜; 对整理前后涤纶织物的表面形貌和结构进行分析, 探究不同涂覆量下有机-无机复合涂层织物的光谱特性, 并考察复合涂层织物的制冷性能和疏水性能。结果表明: 当涂覆量为  $29.67 \text{ mg/cm}^2$  时, 复合涂层织物的太阳光反射率为  $94.3\%$ , 中红外发射率为  $91.2\%$ ; 在户外太阳直射下, 相比原始涤纶织物最高可降温度为  $2^\circ\text{C}$ , 比测试箱体内部环境温度最高可降温  $8.2^\circ\text{C}$ ; 复合涂层织物的静态水接触角为  $151.4^\circ$ , 滚动角为  $6.1^\circ$ ; 经过 100 次摩擦后, 静态水接触角下降至  $147.8^\circ$ 。该超疏水织物具有优异的自清洁性能和较好的耐磨性, 在高温节能、辐射制冷领域具有广阔的应用前景。

**关键词:** 被动式日间辐射制冷; 二氧化硅; 涂层; 涤纶; 超疏水

**中图分类号:** TS195.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2024) 01-0055-08

**引文格式:** 潘毕成, 张佳文, 杨孝全, 等. 被动式日间辐射制冷超疏水涤纶织物的制备及其性能[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2024, 51(1): 55-62.

**Reference Format:** PAN Bicheng, ZHANG Jiawen, YANG Xiaoquan, et al. Preparation and performance of superhydrophobic polyester fabrics for passive daytime radiative cooling[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2024, 51(1): 55-62.

## Preparation and performance of superhydrophobic polyester fabrics for passive daytime radiative cooling

PAN Bicheng, ZHANG Jiawen, YANG Xiaoquan, CAI Ying, YI Lingmin

(a. College of Textile Science and Engineering (International Institute of Silk); b. Engineering

Research Center for Eco-Dyeing & Finishing of Textiles, Ministry of Education;

c. Key Laboratory of Advanced Textile Materials and Manufacturing Technology, Ministry of Education, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** To obtain superhydrophobic fabrics with passive daytime radiative cooling performance,  $\text{SiO}_2$  particles modified with fluorosiloxane and epoxysiloxane were used to coat the polyester fabric via dipping. Then polydimethylsiloxane was sprayed on them to form a cross-linked structure. The morphology and chemical structure of polyester fabrics before and after modification were analyzed, and the spectral characteristics of organic-inorganic composite coated fabrics with different coating amounts were investigated. Meanwhile, the cooling performance and hydrophobic property of the coated polyester fabrics were also studied. The results show that when the coating amount of polyester fabric is  $29.67 \text{ mg/cm}^2$ , the solar reflectance reaches  $94.3\%$ , and the middle infrared emissivity achieves  $91.2\%$ . In direct sunlight, the coated polyester fabric realizes an efficient temperature reduction of  $8.2^\circ\text{C}$  compared with the ambient temperature inside test chamber, and has a lower temperature of  $2^\circ\text{C}$  compared with the

收稿日期: 2023-04-04 网络出版日期: 2023-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(22078305); 浙江省自然科学基金项目(LQ22B060014); 国家级大学生创新创业训练计划项目(202110338018)

作者简介: 潘毕成(1998—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事辐射制冷方面的研究。

通信作者: 易玲敏, E-mail: lmyi@zstu.edu.cn

pristine polyester fabric. The static water contact angle of the composite coated fabric is  $151.4^\circ$  and the rolling angle is  $6.1^\circ$ ; after 100 rubs, the static water contact angle drops to  $147.8^\circ$ . The superhydrophobic fabric has excellent self-cleaning properties and good abrasion resistance, and has broad application prospects in the field of high temperature energy saving and radiative cooling.

**Key words:** passive daytime radiative cooling;  $\text{SiO}_2$ ; coating; polyester; superhydrophobic

## 0 引言

温室气体大量排放,城市热岛效应加剧,高温天气频发,对户外游玩人员、建筑及公共设施等均产生了严重影响。传统户外纺织品并不足以抵消热量给人体带来的危害,因此亟须开发新型户外制冷纺织品以保护户外人员免受高温伤害。被动式日间辐射制冷(Passive daytime radiative cooling, PDRC)技术无需能量输入,通过反射太阳光(波长为  $0.3\sim 2.5\ \mu\text{m}$ ),同时将热量从红外大气窗口(波长为  $8\sim 13\ \mu\text{m}$ )发射到外部空间实现物体表面的自发冷却<sup>[1]</sup>。

近年来,研究者们将 PDRC 技术应用到织物上,制备具有降温或制冷功能的 PDRC 纺织品。Zhang 等<sup>[2]</sup>根据  $\text{SiO}_2$  在大气窗口具有高发射率的特点,在普通涤纶布上原位生长一层  $\text{SiO}_2$  粒子,使其具有良好的 PDRC 性能。Zeng 等<sup>[3]</sup>通过分级结构的设计,制备了复合超细纤维编织的超材料织物,该超材料织物的太阳光反射率达  $92.4\%$ 、中红外发射率达  $94.5\%$ 。Song 等<sup>[4]</sup>制备了一种聚合物基的纳米光子织物,该织物覆盖的皮肤表面温度相比传统织物低  $3.1\sim 3.5\ ^\circ\text{C}$ 。尽管已有一些关于 PDRC 纺织品的研究,但 PDRC 纺织品仍存在降温不够、服用性能差等问题;此外,户外纺织品在使用过程中不可避免地会遇到降尘、雨水等而被沾污<sup>[5]</sup>,影响其降温性能。因此,开发具有自清洁性能和高制冷性能的 PDRC 纺织品具有重要意义。

超疏水表面通常具有自清洁性能,将表面微纳复合结构与低表面能材料结合可获得超疏水表面。聚二甲基硅氧烷(PDMS)具有较低的表面能,是用于构建超疏水表面的常用材料<sup>[6-7]</sup>,在  $8\sim 13\ \mu\text{m}$  的中红外波段具有很高的发射率<sup>[8-9]</sup>。 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$  结构的  $\text{SiO}_2$  是用于构建粗糙表面的理想材料,且在大气窗口存在声子-极化子共振,有助于提高中红外波段的发射率<sup>[10-12]</sup>。此外,尺寸合适的  $\text{SiO}_2$  具有很强的粒子散射效果,在太阳光谱范围内具有很高的反射率<sup>[13-14]</sup>。

本文针对户外 PDRC 纺织品在使用过程中易被沾污而影响降温性能的问题,使用含氟改性  $\text{SiO}_2$

与 PDMS 复合,采用浸涂、喷涂相结合的方式整理到涤纶织物表面,在织物表面构建具有低表面能、粗糙结构的太阳光高反射、中红外高发射涂层,制备具有良好降温性能的超疏水织物。分析整理前后织物的表面形貌和化学结构,考察涂覆量对复合涂层织物光谱特性的影响规律,并对复合涂层的制冷性能和超疏水性能进行探究,以获得具有较高冷却效果的超疏水涤纶织物,为户外降温织物的制备提供新的设计思路。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

$\text{SiO}_2$  购自东莞市鑫惟进实业有限公司,氢氧化钠( $\text{NaOH}$ )、四氢呋喃(THF)和无水乙醇购自杭州高晶精细化工有限公司,全氟辛基三乙氧基硅烷(FAS)购自广州远达新材料有限公司, $\gamma$ -缩水甘油醚氧丙基三甲氧基硅烷(KH-560)和罗丹明 B 购自上海麦克林生化科技有限公司,聚二甲基硅氧烷(PDMS)购自道康宁公司,涤纶织物(PET)购自广州美龙达环保材料有限公司。

### 1.2 涤纶织物的表面刻蚀

用无水乙醇和去离子水依次清洗原始涤纶织物( $3\text{ cm}\times 3\text{ cm}$ )30 min 以去除杂质,将清洁后的涤纶织物浸入质量分数为  $300\text{ g/L}$  的  $\text{NaOH}$  溶液中 30 min,浸泡后的涤纶织物用大量的水清洗,并在  $80\ ^\circ\text{C}$  下干燥,最后得到化学蚀刻的涤纶织物(H-PET)。

### 1.3 改性 $\text{SiO}_2$ 分散液的制备

将  $2.5\text{ g}$   $\text{SiO}_2$  粒子均匀分散在  $50\text{ mL}$  去离子水中,磁力搅拌 30 min 后,依次向分散液中加入  $1.0\text{ g}$  FAS 和  $0.5\text{ g}$  KH-560,室温条件下磁力搅拌 24 h,得到改性  $\text{SiO}_2$  分散液。

### 1.4 被动式日间辐射制冷超疏水涤纶织物的制备

将 H-PET 浸入改性  $\text{SiO}_2$  分散液中,在  $80\ ^\circ\text{C}$  烘箱中干燥;随后将含有 PDMS 的 THF 溶液(质量分数为  $15\%$ )采用喷涂的方式喷涂到涤纶织物上,烘干后便得到具有辐射制冷功能的超疏水涤纶织物(SP-PET)。

## 1.5 测试方法与表征

### 1.5.1 红外光谱测试

通过傅里叶红外光谱仪(FT-IR, Nicolet 5700 型, 美国热电公司)分析整理前后涤纶织物的化学结构, 扫描范围为  $500 \sim 4000 \text{ cm}^{-1}$ 。

### 1.5.2 X 射线光电子能谱测试

采用 X 射线光电子能谱仪(XPS, K-Alpha, 美国赛默飞公司)分析整理前后涤纶织物表面化学组成和元素含量分析。

### 1.5.3 形貌表征

采用扫描电子显微镜(SEM, SU8100 型, 日立公司)观察整理前后涤纶织物的表面形貌。

### 1.5.4 涂覆量计算

称量整理前涤纶织物( $3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ ), 记录其质量  $W_1$ , 称量由上述方法制备得到的 SP-PET, 记录其质量  $W_2$ 。涂覆量根据式(1)计算:

$$G = \frac{W_2 - W_1}{A} \quad (1)$$

其中:  $G$  为涂覆量,  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ;  $W_1$ 、 $W_2$  为整理前后涤纶织物质量,  $\text{mg}$ ;  $A$  为涤纶织物的表面积,  $\text{cm}^2$ 。

### 1.5.5 光谱性能测试

反射率测试: 采用配有  $\text{BaSO}_4$  积分球的紫外可见分光光度计(UV-2600, 日本岛津)进行测试, 设定测试波长范围为  $200 \sim 800 \text{ nm}$ 。

发射率测试: 采用配有金积分球的傅里叶红外光谱仪(布鲁克 5700 型)进行测试, 设定测试波长范围为  $2.5 \sim 16.0 \text{ }\mu\text{m}$ 。

### 1.5.6 PDRC 性能测试

使用实验室自制辐射制冷装置对原始织物、整理后织物及环境温度进行降温测试。该装置整体由泡沫盒组成, 盒子外部贴有一层铝箔, 装置顶部覆盖有一层低密度聚乙烯薄膜, 用来抑制热对流和热传导。使用热电偶(PT-100)和温度记录仪(SIN-R200F)实时监测样品及环境温度变化; 使用辐照计(FZ-A)对实时太阳辐照强度进行测量; 实时风速和环境相对湿度由空气流量风速计(GM8902)和自动温湿度记录仪(TH20R-EX)测量; 使用红外热成像仪(Fluke Ti400, America)拍摄整理后涤纶织物实际户外降温情况。

### 1.5.7 接触角测试

采用视频接触角张力仪 DSA-100 对整理前后涤纶织物进行润湿性测试, 水滴体积为  $1.5 \text{ }\mu\text{L}$ , 测量织物 5 个不同位置的数值, 取平均值。

### 1.5.8 磨损性能测试

磨损测试根据《耐摩擦色牢度: AATCC 摩擦测试仪法》(AATCC 8—2007)中的磨损方式进行。使用纯涤纶布作为耐摩材料搭档, 将样品固定在不锈钢柱上, 并以  $92 \text{ kPa}$  的负载压力反复移动 100 次(移动距离为  $20 \text{ cm}$ ), 测试摩擦前后样品织物接触角变化来表征整理后涤纶织物的耐磨损性能。

### 1.5.9 透气性能测试

采用数字式透气量仪(YG461E)对整理前后涤纶织物进行透气性测试, 测量织物 5 个不同位置的数值, 取平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 有机-无机复合涂层织物的表面化学组成

$\text{SiO}_2$  改性前后红外谱图如图 1(a)所示, 改性后的  $\text{SiO}_2$  在  $1200 \text{ cm}^{-1}$  和  $960 \text{ cm}^{-1}$  处出现了新的吸收峰, 分别对应 C—F 键的伸缩振动和 Si—OH 键的弯曲振动;  $906 \text{ cm}^{-1}$  出现了代表—CH(O)CH—的特征峰<sup>[15]</sup>, 表明  $\text{SiO}_2$  改性成功。原始涤纶织物和整理后涤纶织物的红外谱图如图 1(b)所示。原始涤纶织物  $1712 \text{ cm}^{-1}$  处的峰对应于羰基的伸缩振动,  $1408 \text{ cm}^{-1}$  和  $1336 \text{ cm}^{-1}$  处的峰对应于苯环的振动吸收, 在涤纶织物表面浸渍改性  $\text{SiO}_2$  和喷涂 PDMS 后, 整理后的涤纶织物在  $1240 \text{ cm}^{-1}$  和  $1088 \text{ cm}^{-1}$  处出现了新的吸收峰(见图 1(b)), 分别对应于 C—F 键和 Si—O—Si 键的伸缩振动。图 1(c)是整理前后涤纶织物的 XPS 谱图, 织物表面元素含量分析如表 1 所示。图 1(c)和表 1 显示: 原始涤纶织物表面只存在 C 和 O 元素, 而整理后的织物表面出现了 F 和 Si 两种元素, 含量分别为  $22.59\%$  和  $10.32\%$ 。以上结果表明含氟改性的  $\text{SiO}_2$  和 PDMS 已经成功涂覆到涤纶织物上。

### 2.2 有机-无机复合涂层织物的表面形貌

对原始涤纶织物和整理后涤纶织物的形貌进行分析, 结果如图 2 所示。由图 2 可知: 原始涤纶织物表面光滑, 单根纤维清晰可见, 经过改性  $\text{SiO}_2$ /PDMS 涂覆的涤纶织物, 纤维表面被覆盖了大量粒子, 粒子表面被聚合物 PDMS 所包裹, PDMS 交联的作用增强了粒子与纤维间的附着力; 当涂覆量为  $10.56 \text{ mg}/\text{cm}^2$  时, 涤纶织物的纤维表面附着了改性  $\text{SiO}_2$  粒子, 且纤维仍有部分未被覆盖, 纤维的整体轮廓清晰; 当涂覆量达到  $29.67 \text{ mg}/\text{cm}^2$  时, 大部分涤纶织物被覆盖, 纤维表面及纤维与纤维之间均充满了粒子, 且粒子没有明显的聚集现象。



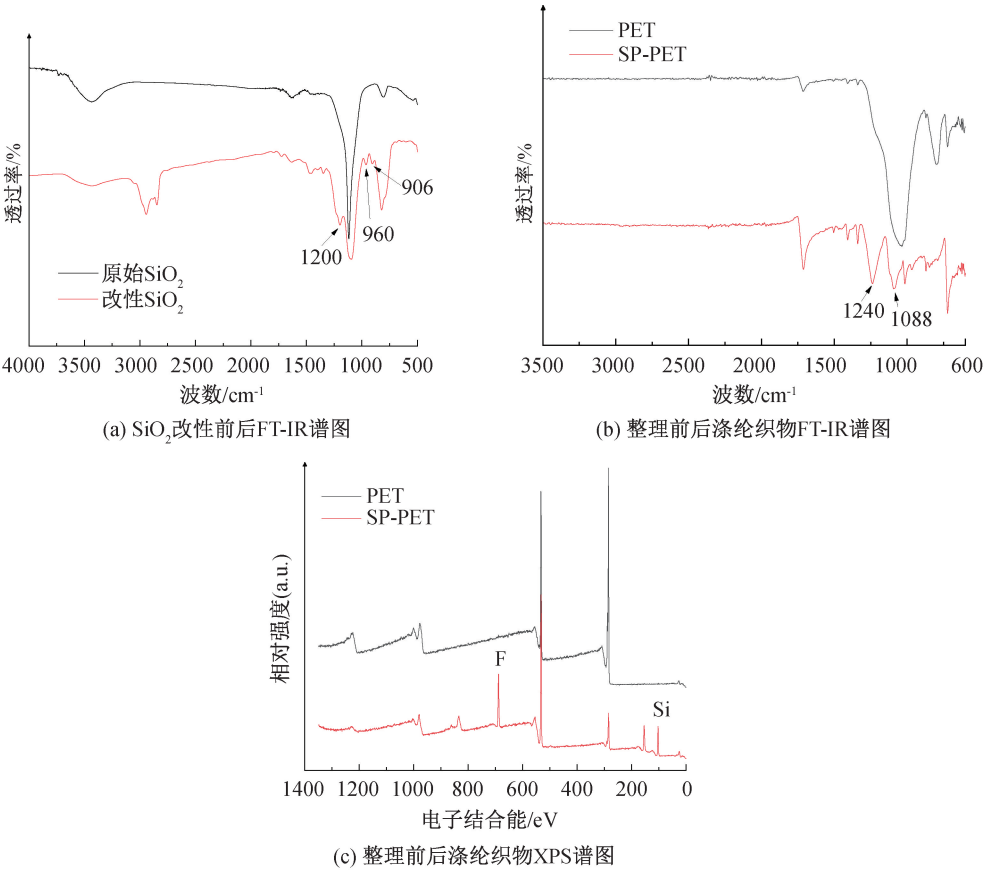


图 1  $\text{SiO}_2$  改性前后 FT-IR 谱图和整理前后涤纶织物的 FT-IR 谱图、XPS 谱图

元素	元素含量/%	
	原始涤纶织物	整理后涤纶织物
C	74.36	28.6
N	0	0.82
O	25.64	37.67
F	0	22.59
Si	0	10.32

2.3 有机-无机复合涂层织物的光谱性能

太阳光谱区域的反射率是影响 PDRC 性能的关键因素,为了探究整理前后涤纶织物太阳光反射率的差异以及不同涂覆量对涤纶织物太阳光反射率的影响,本文对两种涤纶织物太阳光反射率进行分析,结果如图 3 所示。图 3(a)表明:当涤纶织物由改性  $\text{SiO}_2$ /PDMS 涂覆整理后,太阳光反射率相较

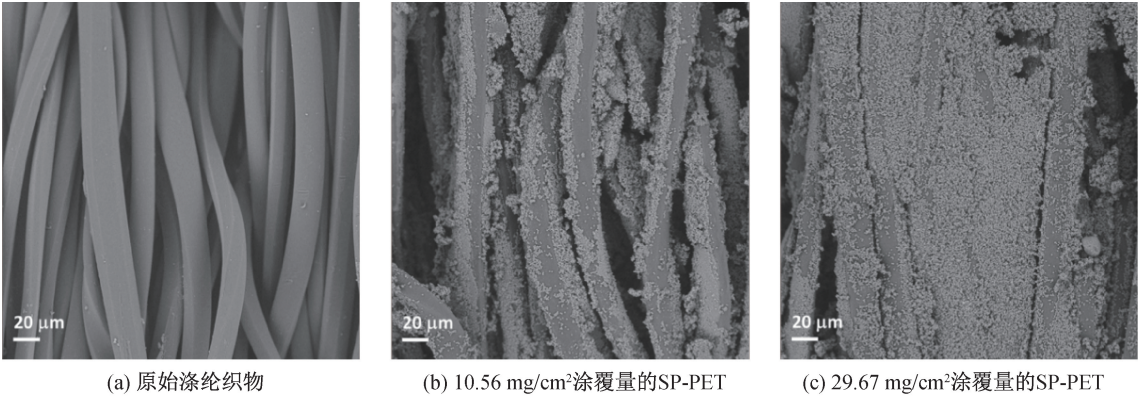


图 2 整理前后涤纶织物的 SEM 图

于原始涤纶织物有明显的提高,原始涤纶织物的太阳光反射率仅为 65.5%;随着涂覆量的增加,复合涂层织物的太阳光反射率也随之提高。当涂覆量达

到 21.33  $\text{mg}/\text{cm}^2$  时,反射率达 93.3%,进一步提高涂覆量,反射率变化不大;当涂覆量达到 29.67  $\text{mg}/\text{cm}^2$  时,反射率达 94.3%。整理后涤纶织物反射率



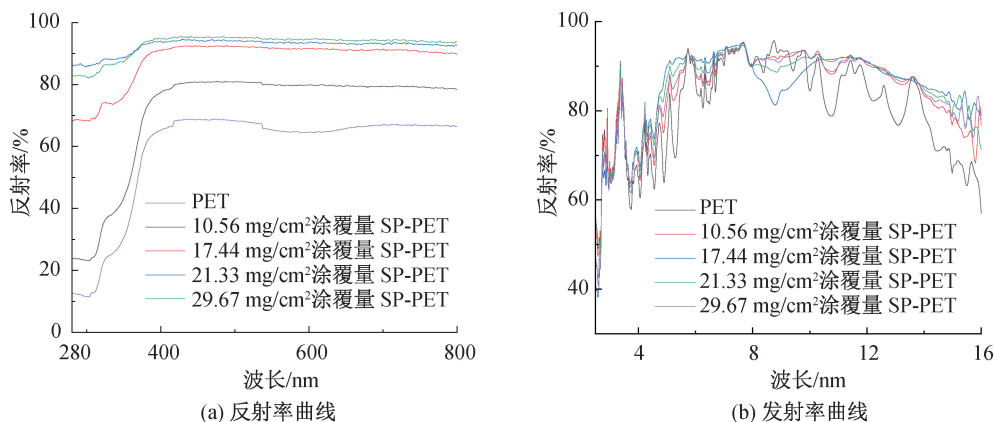


图 3 涤纶织物的光谱特性曲线

的提高主要是由于  $\text{SiO}_2$  粒子的存在,粒子的添加提高了织物对太阳光的散射效果<sup>[16]</sup>,从而提高了反射率。涂覆改性  $\text{SiO}_2/\text{PDMS}$  可提升涤纶织物的发射率,原始涤纶织物的发射率仅为 88.3%,当涂覆量为  $29.67 \text{ mg/cm}^2$  时,发射率可达 91.2%(见图 3(b)),是由于整理后的涤纶织物表面存在大量 C—F 键和 Si—O—Si 键,在大气窗口内具有较强的吸收振动峰<sup>[17]</sup>,对应着较强的红外吸收能力。

## 2.4 有机-无机复合涂层织物的 PDRC 性能

为了探究涂层织物的 PDRC 性能,使用自制 PDRC 装置(见图 4(a)—(b))进行测试。图 4(c)显示了实时的太阳辐照强度,当天为多云天气,辐照强度波动比较大。图 4(d)为太阳直射条件下整理前后涤纶织物的温度随时间变化的曲线。复合涂层织物的温度始终低于箱体环境温度和原始涤纶织物的温度,复合涂层织物的温度相比箱体环境温度可低  $8.2^\circ\text{C}$ ,相较于原始涤纶织物温度可下降  $2^\circ\text{C}$ (见图 4(d))。整理后的涤纶织物具有高反射率,能够在太阳光区域最大限度地反射阳光,减少热量的吸收,同时因其高发射的特性,能够将热量从大气窗口辐射出去,从而达到较好的制冷效果。

使用红外热成像仪对复合涂层涤纶织物进行户外降温性能测试。测试时间为 2023 年 3 月 14 日,天气晴朗,温度为  $23^\circ\text{C}$ ,环境相对湿度为 59%。图 5(a)—(b)为织物覆盖在建筑模型屋顶的实物照片和对应的红外热成像图,裸露的屋顶表面温度达  $31.3^\circ\text{C}$ ,而覆盖有复合涂层织物的屋顶表面温度仅为  $25.3^\circ\text{C}$ ,复合涂层织物能够提供  $6^\circ\text{C}$  的制冷效果。图 5(c)—(d)则是织物覆盖在汽车模型的实物照片和红外热成像图,黑色汽车在户外环境下表面温度极高,严重影响其使用寿命,整理后涤纶织物作为户外遮阳纺织品,能够使汽车模型表面温度降低

约  $11.6^\circ\text{C}$ 。上述结果表明复合涂层涤纶织物作为户外遮阳纺织品能够在多种场合使用,且具有良好的降温制冷效果。

## 2.5 有机-无机复合涂层织物的疏水自清洁性能、耐摩性能和透气性能

在户外环境下,雨水、灰尘和微粒污染物等会沾污涂层表面,从而影响其 PDRC 性能。为了提高制冷织物的户外使用性,本文采用含氟改性  $\text{SiO}_2$  粒子和 PDMS 相结合,提高织物表面的疏水性能和自清洁性能,不同涂覆量下涤纶织物的疏水性能测试的结果如图 6 所示。图 6(a)显示:原始涤纶织物的水接触角为  $105.4^\circ$ ,改性  $\text{SiO}_2/\text{PDMS}$  涂覆显著提高了织物的水接触角,且随着涂覆量的增加,水接触角不断提升。随着涂覆量的增加,滚动角不断降低,当涂覆量为  $29.67 \text{ mg/cm}^2$  时,复合涂层织物的静态接触角达到  $151.4^\circ$ ,滚动角为  $6.1^\circ$ (见图 6(b)),其原因是涂覆量的增加,涂层表面能下降,表面粗糙度增加,从而提高了涤纶织物表面的疏水性。

对整理前后涤纶织物自清洁性能进行测试结果如图 7 所示。从图 7 可以看出:原始涤纶织物在浸入罗丹明 B 水溶液后,织物表面被润湿并染色,而整理后的涤纶织物未被罗丹明 B 水溶液润湿,在织物表面并没有观察到明显的着色痕迹;将罗丹明 B 水溶液滴落在整理前后涤纶织物上,原始涤纶织物表面沾满了颜色,而整理后涤纶织物表面水滴很快地滚落,没有被污染的痕迹。以上测试结果均表明复合涂层涤纶织物具有较好的自清洁性能。

整理前后涤纶织物的耐摩擦性能和透气性能见图 8。通过观察整理后涤纶织物摩擦 100 次前后的接触角变化来探究织物的耐摩擦性能,由图 8(a)可知,经过 100 次摩擦后,复合涂层织物的静态水接触角由摩擦前的  $151.4^\circ$  下降至  $147.8^\circ$ ,下降幅度较

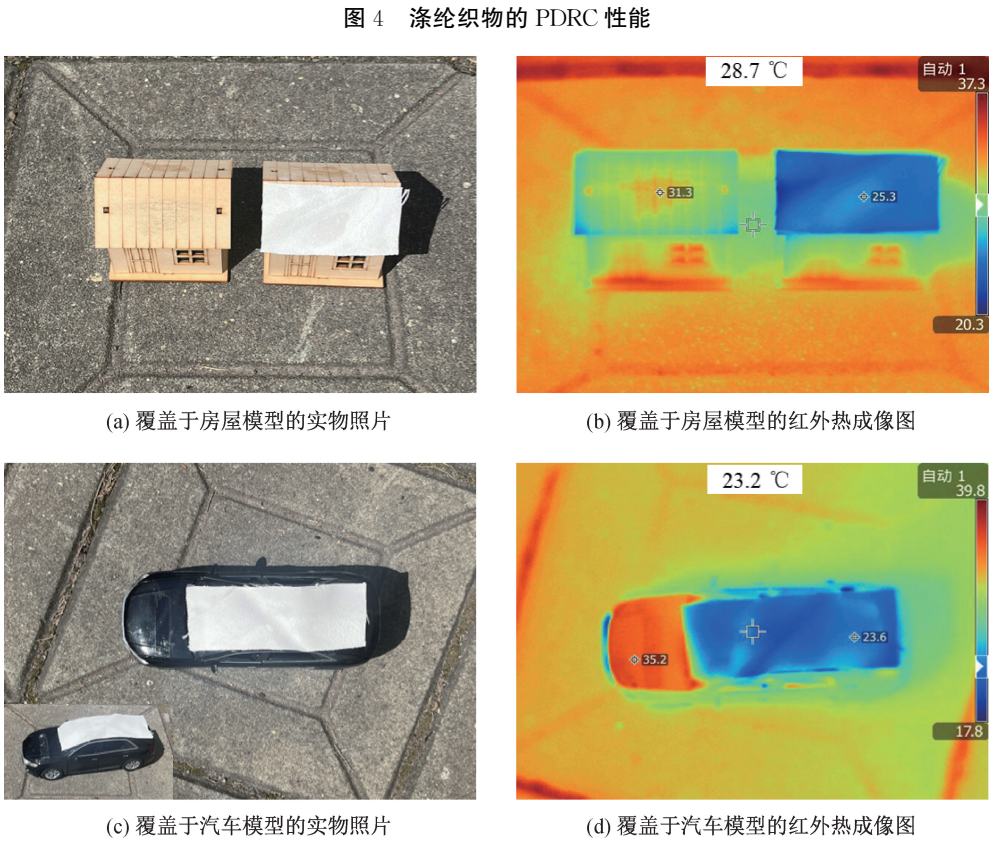
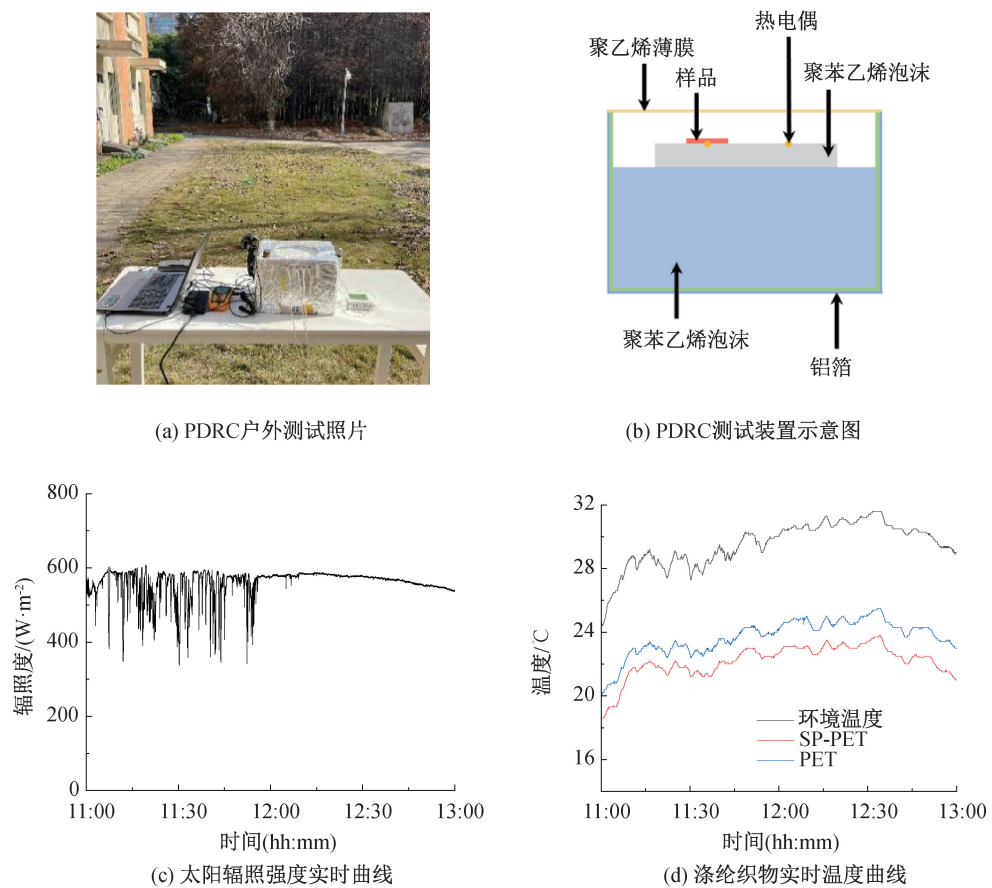


图 5 复合涂层织物覆盖于房屋、汽车模型的实物照片和红外热成像图

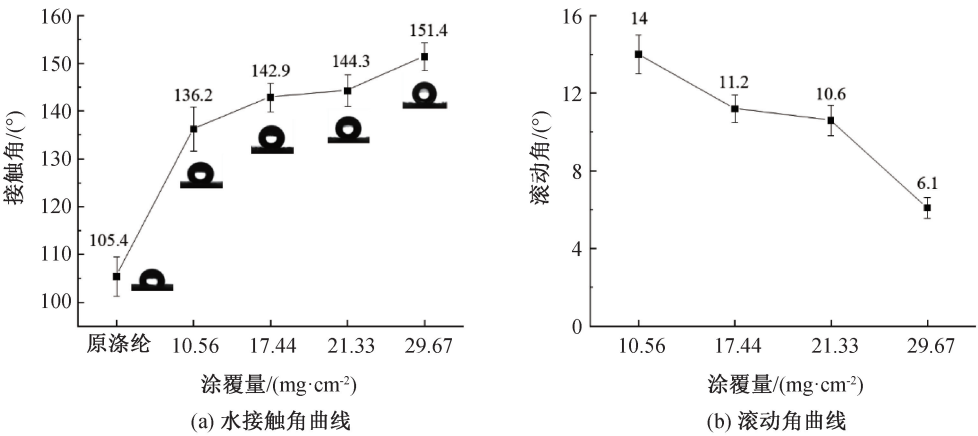


图 6 不同涂覆量整理后涤纶织物的水接触角和滚动角变化曲线

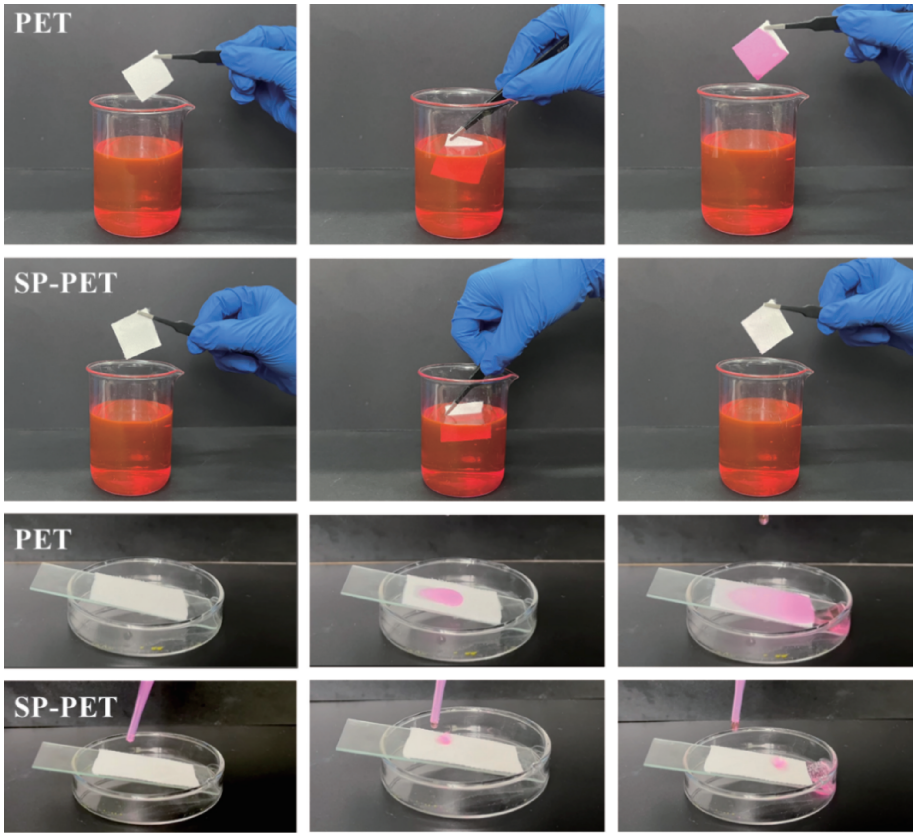
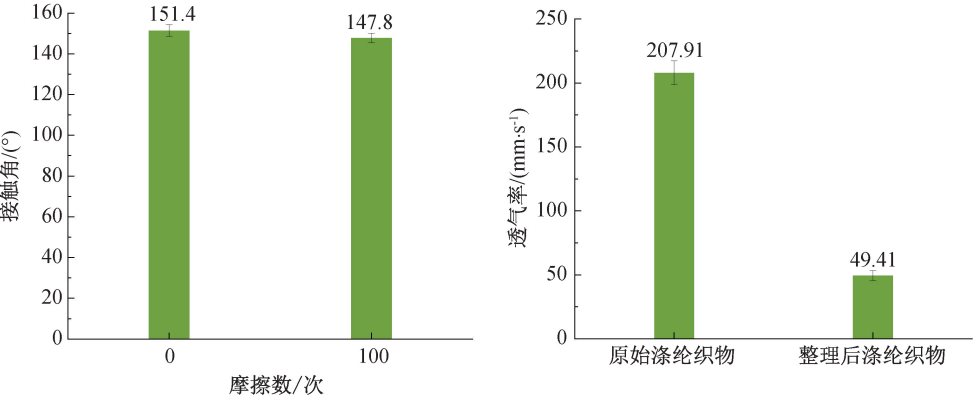


图 7 整理前后涤纶织物的自清洁效果照片



(a) 复合涂层织物摩擦前后接触角柱状图 (b) 整理前后涤纶织物的透气率柱状图

图 8 复合涂层织物摩擦前后接触角柱状图和整理前后涤纶织物的透气率柱状图



小,涂层织物仍保持较强的疏水性能,说明整理后涤纶织物具有较好的耐摩擦性能。整理前后涤纶织物的透气性能测试结果如图 8(b)所示,原始涤纶织物的透气率达到 207.91 mm/s,整理后涤纶织物的透气率为 49.41 mm/s。整理后涤纶织物透气率的下降是由于  $\text{SiO}_2$  和 PDMS 交联成膜后(见图 8(b)),堵塞了纤维与纤维之间的部分孔隙。

### 3 结 论

本文将改性  $\text{SiO}_2$  粒子和 PDMS 通过先浸涂再喷涂的方式整理到涤纶织物上,制备得到具有良好降温性能的超疏水涤纶织物;考察整理前后织物的表面形态和化学结构,分析涂覆量对复合涂层织物光谱特性的影响,并考察了织物的降温性能和疏水性能。主要结论如下:

a)随着改性  $\text{SiO}_2$ /PDMS 涂覆量的增加,复合涂层涤纶织物的太阳光反射率和中红外发射率大幅提高。当涂覆量为  $29.67 \text{ mg/cm}^2$  时,复合涂层织物的太阳光反射率达 94.3%,中红外发射率达 91.2%。

b)复合涂层织物相较于原始涤纶织物,温度可下降  $2^\circ\text{C}$ ,相比于箱体内的环境温度,温度可下降  $8.2^\circ\text{C}$ ,具有良好的 PDRC 性能。

c)随着  $\text{SiO}_2$ /PDMS 涂覆量的增加,复合涂层涤纶织物的疏水性能提高。当涂覆量为  $29.67 \text{ mg/cm}^2$  时,复合涂层织物的静态水接触角达到  $151.4^\circ$ ,动态角为  $6.1^\circ$ ,显示出良好的自清洁性能。

### 参考文献:

- [1] Raman A P, Abou Anoma M, Zhu L X, et al. Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight[J]. *Nature*, 2014, 515(7528): 540-544.
- [2] Zhang Y L, Yu J E. In situ formation of  $\text{SiO}_2$  nanospheres on common fabrics for broadband radiative cooling[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2021, 4(10): 11260-11268.
- [3] Zeng S N, Pian S J, Su M Y, et al. Hierarchical-morphology metafabric for scalable passive daytime radiative cooling[J]. *Science*, 2021, 373(6555): 692-696.
- [4] Song Y N, Lei M Q, Deng L F, et al. Hybrid metamaterial textiles for passive personal cooling indoors and outdoors [J]. *ACS Applied Polymer Materials*, 2020, 2(11): 4379-4386.
- [5] 韦任轩. 超疏水辐射降温涂层织物的制备及性能研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2021: 39-52.
- [6] Lu C, Gao Y, Yu S, et al. Non-fluorinated flexible superhydrophobic surface with excellent mechanical durability and self-cleaning performance[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(3): 4750-4758.
- [7] 范婷婷, 薛朝华. PDMS/ $\text{ZrO}_2$ / $\text{SiO}_2$  超疏水辐射制冷薄膜的制备及性能[J]. *精细化工*, 2022, 39(11): 2249-2258.
- [8] Zhou L, Song H, Liang J, et al. A polydimethylsiloxane-coated metal structure for all-day radiative cooling [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(8): 718-724.
- [9] Wu W C, Lin S H, Wei M M, et al. Flexible passive radiative cooling inspired by saharan silver ants [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 210: 110512.
- [10] Ali Yalçın R, Blandre E, Joulain K, et al. Daytime radiative cooling with silica fiber network[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 206: 110320.
- [11] Jaramillo-Fernandez J, Whitworth G L, Pariente J A, et al. A self-assembled 2D thermofunctional material for radiative cooling [J]. *Small*, 2019, 15 (52): e1905290.
- [12] Zhai Y, Ma Y, David S N, et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling[J]. *Science*, 2017, 355 (6329): 1062-1066.
- [13] Dong Y, Han H, Wang F, et al. A low-cost sustainable coating: Improving passive daytime radiative cooling performance using the spectral band complementarity method[J]. *Renewable Energy*, 2022, 192: 606-616.
- [14] 袁帅霞, 张佳文, 蔡英, 等. 竹纤维基日间被动辐射制冷膜的制备与性能[J]. *浙江理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 47(6): 893-899.
- [15] Zhao W, Zhu R, Jiang J, et al. Environmentally-friendly superhydrophobic surface based on  $\text{Al}_2\text{O}_3$ @ $\text{KH560}$ @ $\text{SiO}_2$  electrokinetic nanoparticle for long-term anti-corrosion in sea water [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 484: 307-316.
- [16] Huang X, Liu D, Li N, et al. Single novel  $\text{Ca}_{0.5}\text{Mg}_{10.5}(\text{HPO}_3)_8(\text{OH})_3\text{F}_3$  coating for efficient passive cooling in the natural environment[J]. *Solar Energy*, 2020, 202: 164-170.
- [17] Aili A, Wei Z Y, Chen Y Z, et al. Selection of polymers with functional groups for daytime radiative cooling [J]. *Materials Today Physics*, 2019, 10: 100127.