



# 竹纤维基日间被动辐射制冷膜的制备与性能

袁帅霞, 张佳文, 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:** 为缓解高温天气带来的负面影响, 可采用经济节能的冷却材料。以天然竹为原料, 采用两步法进行脱木质素处理, 通过喷涂法引入  $\text{SiO}_2$  粒子, 并根据纤维素和  $\text{SiO}_2$  粒子的多级结构和辐射特性, 制备具有日间被动辐射制冷性能的降温材料竹纤维/ $\text{SiO}_2$  复合膜; 对竹纤维/ $\text{SiO}_2$  复合膜进行结构表征, 探究其光谱特性及降温性能。结果表明:  $\text{SiO}_2$  成功引入竹纤维膜中; 与原竹相比, 竹纤维/ $\text{SiO}_2$  复合膜的太阳光反射率提高至 90.1%; 竹纤维/ $\text{SiO}_2$  复合膜在大气窗口范围内的红外发射率约 97.9%; 在户外条件下, 辐照强度为  $546 \text{ mW/cm}^2$  时, 竹纤维/ $\text{SiO}_2$  复合膜与原竹相比可降低温度约  $7.8^\circ\text{C}$ , 红外热成像也证明竹纤维/ $\text{SiO}_2$  复合膜具有良好的降温性能。该竹纤维/ $\text{SiO}_2$  复合膜有较好的降温效果, 具有较大应用潜力。

**关键词:** 天然材料; 竹纤维; 二氧化硅粒子; 多级结构; 光谱性能; 日间被动辐射制冷

**中图分类号:** TQ352.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2022) 11-0893-07

## Preparation of a bamboo fiber-based film for passive daytime radiative cooling and its properties

YUAN Shuai-xia, ZHANG Jia-wen, CAI Ying, YI Ling-min

(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:** Economical and energy-saving cooling materials can be used to alleviate the negative impact of hot weather. Natural bamboo was delignified by two-step method, and  $\text{SiO}_2$  particles were introduced by spraying method. Based on the multiscale structure and natural radiation characteristics of cellulose and  $\text{SiO}_2$  particles, a cooling material bamboo fiber/ $\text{SiO}_2$  composite film with passive daytime radiative cooling (PDRC) performance was prepared. The structure of bamboo fiber/ $\text{SiO}_2$  composite film was characterized. Meanwhile, the spectral properties and cooling performance were explored. The results showed that  $\text{SiO}_2$  was successfully introduced into the bamboo fiber film. Compared with the raw bamboo, the solar reflectivity of bamboo fiber/ $\text{SiO}_2$  composite film was significantly improved and reached to 90.1%. The infrared emissivity of bamboo fiber/ $\text{SiO}_2$  composite film in the atmospheric window was about 97.9%. Under a real outdoor environment, when the irradiation intensity was  $546 \text{ mW/cm}^2$ , the temperature of the bamboo fiber/ $\text{SiO}_2$  composite film was  $7.8^\circ\text{C}$  lower than that of the raw bamboo. Infrared thermal imaging also proves that the bamboo fiber/ $\text{SiO}_2$  composite film has good cooling performance. To sum up, the bamboo fiber/ $\text{SiO}_2$  composite film has good cooling effect and great potential for application.

收稿日期: 2022-04-29 网络出版日期: 2022-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(22078305)

作者简介: 袁帅霞(1997—), 女, 河南项城人, 硕士研究生, 主要从事纺织科学与工程方面的研究。

通信作者: 易玲敏, E-mail: lmyi@zstu.edu.cn

**Key words:** natural material; bamboo fiber; silica particle; multiscale structure; spectral properties; passive daytime radiative cooling

## 0 引言

全球变暖和能源消耗问题日益加剧,传统的空调等制冷设备需要消耗大量能源,并排放温室气体,造成城市热岛效应,因此研究开发新型制冷方式迫在眉睫。日间被动辐射制冷(Passive daytime radiative cooling, PDRC)材料目前已引起众多学者的关注,在涂料<sup>[1]</sup>、节能建筑<sup>[2]</sup>、个人热管理<sup>[3]</sup>和太阳能电池等<sup>[4]</sup>领域的应用进一步扩大。PDRC材料无需能量输入且无温室气体排放,具有高太阳光反射率,同时具备红外大气窗口范围内(波段8~13  $\mu\text{m}$ )的高发射率,有自发冷却的特性<sup>[5]</sup>。相比于成本高、制备复杂的光子结构<sup>[6]</sup>和存在溶剂污染问题的薄膜结构<sup>[7]</sup>材料,开发一种制备简单、环保、价廉的高太阳光反射率、高红外发射率的PDRC材料具有一定意义。

纤维素在1060  $\text{cm}^{-1}$ 左右的C—O—C红外振动吸收峰恰好处于大气窗口范围内,具有天然的高发射率辐射特性<sup>[8-9]</sup>。如Hu等<sup>[10]</sup>对天然木材进行脱木质素后,发现其存在的多孔结构可有效反射太阳光,最终实现日间辐射制冷。含有Si—O—Si结构的无机 $\text{SiO}_2$ 粒子具有近红外高反射和中红外高发射的特性,加入其他材料中能提高复合材料的制冷性能<sup>[11-12]</sup>。如Zhang等<sup>[11]</sup>以正硅酸乙酯(TEOS)为硅源,利用原位生长的方法制备了具有优良PDRC性能的涤纶织物,体现出无机 $\text{SiO}_2$ 粒子在PDRC中的应用潜力。

与木材相比,竹子具有较短的生长周期,而且竹材料的纤维素具有多级结构和天然的孔道结构。在竹子原有的结构基础上对其进一步改性,有望获得性能优良的纤维素PDRC基绿色降温材料。本文以天然竹为原材料,通过两步法去除对太阳光有较强吸收的木质素,并采用喷涂法引入无机粒子 $\text{SiO}_2$ 来进一步提高太阳光反射率,制备绿色环保的PDRC竹纤维/ $\text{SiO}_2$ 复合膜;分析了原竹、竹纤维膜和竹纤维/ $\text{SiO}_2$ 复合膜的形貌、结构和光谱特性,并利用自制测温装置及红外热成像设备考察其在户外条件下的制冷性能。

## 1 实验部分

### 1.1 实验材料

竹条,购自湖南省竹森林竹制中心;氢氧化钠

(NaOH)、亚硫酸钠( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ )、乙醇和 $\gamma$ -氨丙基三乙氧基硅烷(硅烷偶联剂KH-550),均购自上海麦克林生化科技有限公司;过氧化氢( $\text{H}_2\text{O}_2$ ),购自无锡市展望化工试剂有限公司;二氧化硅( $\text{SiO}_2$ ),购自东莞市鑫惟进实业有限公司;去离子水,自制。

### 1.2 竹纤维膜的制备

在烧杯中按配比5:10:85加入NaOH、 $\text{Na}_2\text{SO}_3$ 和去离子水,搅拌溶解后作为去木质素溶液备用。在烧杯中按配比15:135加入 $\text{H}_2\text{O}_2$ 和去离子水,作为漂白溶液备用。将竹条放入装有去木质素溶液的烧杯内,120  $^{\circ}\text{C}$ 处理7 h后将竹条取出,并用去离子水清洗多次备用。将清洗后的竹条转移至漂白溶液内,反应处理至白色后用去离子水冲洗数次,获得竹纤维悬浮液。将上述得到的竹纤维悬浮液置于漏斗内进行真空抽滤,经冷冻干燥机干燥后获得白色竹纤维膜。

### 1.3 改性 $\text{SiO}_2$ 分散液的制备

在烧杯中依次加入94 g无水乙醇、5 g  $\text{SiO}_2$ 和1 g KH-550,搅拌均匀后,在85  $^{\circ}\text{C}$ 下反应2 h,得到氨基改性的 $\text{SiO}_2$ 分散液。

### 1.4 竹纤维/ $\text{SiO}_2$ 复合膜的制备

将上述制备得到的改性 $\text{SiO}_2$ 分散液喷涂于上述白色竹纤维膜上,室温下干燥,获得 $\text{SiO}_2$ 粒子涂覆改性的竹纤维/ $\text{SiO}_2$ 复合膜, $\text{SiO}_2$ 粒子的涂覆量为0.32  $\text{mg}/\text{cm}^2$ 。

### 1.5 测试方法与表征

#### 1.5.1 形貌表征

采用扫描电子显微镜(SEM, SU8100型,日立公司)分析原竹、竹纤维膜和竹纤维/ $\text{SiO}_2$ 复合膜样品的表面形貌。

#### 1.5.2 红外光谱

通过傅里叶红外光谱仪(FTIR, Nicolet 5700型,美国热电公司),采用ATR测试方法对样品进行结构分析。

#### 1.5.3 光谱性能表征

反射率测试:采用带有硫酸钡( $\text{BaSO}_4$ )积分球的UV-Vis-NIR分光光度计(Hitachi UH4150,日立公司)进行测试分析,设定测试波长范围为0.3~2.5  $\mu\text{m}$ 。

发射率测试:通过带有镀金积分球附件的

FTIR 光谱仪测量样品红外发射率。使用前,需加入液氮保护光栅。

根据式(1)—(2)<sup>[13-14]</sup>计算平均反射率 $\overline{R}_{\text{solar}}$ 和平均发射率 $\overline{\varepsilon}_{\text{LWIR}}$ :

$$\overline{R}_{\text{solar}} = \frac{\int_{0.3}^{2.5} I_{\text{solar}}(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int_{0.3}^{2.5} I_{\text{solar}}(\lambda) d\lambda} \quad (1)$$

$$\overline{\varepsilon}_{\text{LWIR}} = \frac{\int_8^{13} I_{\text{bb}}(T, \lambda) \varepsilon(T, \lambda) d\lambda}{\int_8^{13} I_{\text{bb}}(T, \lambda) d\lambda} \quad (2)$$

其中: $I_{\text{solar}}(\lambda)$ 表示 AM1.5 时对应的太阳光谱; $R(\lambda)$ 表示降温材料的光谱反射率; $I_{\text{bb}}(T, \lambda)$ 表示温度为  $T$  的黑体所发出的光谱强度; $\varepsilon(T, \lambda)$ 表示降温材料的光谱发射率。

#### 1.5.4 户外 PDRC 性能测试

竹纤维/ $\text{SiO}_2$  复合膜的 PDRC 性能测试装置为课题组自制装置。采用热电偶(PT100)、温度记录仪(SIN-R200F)实时监测并记录待测样品的温度变化。使用红外热成像仪(Fluke Ti400, America)分析竹纤维/ $\text{SiO}_2$  复合膜的户外实际降温效果。

#### 1.5.5 力学性能测试

采用万能拉力试验机(EJA SERIES, Thwing-Albert Co, USA)对竹纤维/ $\text{SiO}_2$  复合膜进行测试分析,参考标准《塑料 拉伸性能实验方法》(GB/T 1040.1—2006)。

#### 1.5.6 耐磨损性能测试

采用砂纸磨损法对竹纤维/ $\text{SiO}_2$  复合膜进行机

械稳定性测试,在 100 g 砝码的压力下,样品在 2000 目砂纸上沿钢尺滑行 10 cm,并进行 2 个循环。在模拟日光氙灯光源(PL-X300DF,北京普林赛斯科技有限公司)下测试磨损前后竹纤维/ $\text{SiO}_2$  复合膜的降温效果。

## 2 结果与讨论

### 2.1 竹纤维复合膜的微观形貌分析

为了探究原竹与竹纤维/ $\text{SiO}_2$  复合膜的微观形貌,对其进行 SEM 分析,结果如图 1 所示。从图 1(a)可知:原竹呈现有序排列的纤维结构,纤维束直径约 20  $\mu\text{m}$ ,紧密排列结构为原竹提供了高强度的力学性能。经去木质处理后,细胞壁内木质素被大量去除,连接纤维间的桥梁被破坏,竹纤维从原来的紧密排列变得无序且分散,见图 1(b)。从图 1(c)可知,竹纤维直径约 3~10  $\mu\text{m}$ ,其表面表现出纳米级沟壑状结构,这些尺寸大小与太阳光波长相当。从图 1(d)可知,竹纤维过滤成膜后,纤维之间无序堆叠形成随机孔隙,对竹纤维膜进行  $\text{SiO}_2$  改性后,可以明显观察到竹纤维表面覆盖了一层均匀的  $\text{SiO}_2$  粒子。由于  $\text{SiO}_2$  粒子尺寸较小,竹纤维/ $\text{SiO}_2$  复合膜呈现出随机堆叠的多尺度结构<sup>[15]</sup>。从图 1(e)—(f)可知,经过砂纸机械磨损 2 个循环后,竹纤维/ $\text{SiO}_2$  复合膜的微观形貌无明显变化,表明  $\text{SiO}_2$  粒子在竹纤维表面牢度较好,其原因可能是 KH-550 改性后的  $\text{SiO}_2$  粒子,表面存在的氨基可与纤维素上的羧基等基团发生反应,从而提高粒子的结合牢度与复合膜的结构稳定性。

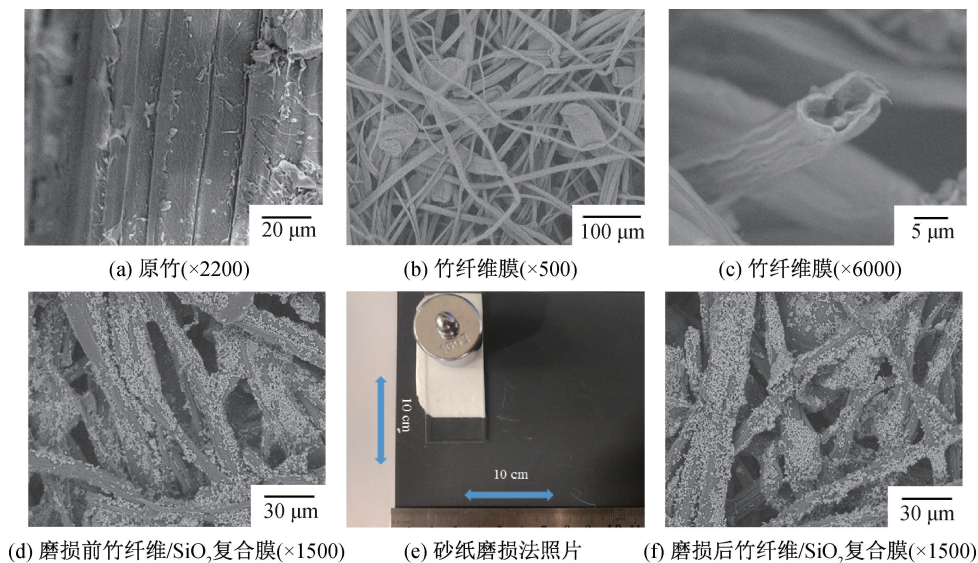


图 1 原竹、竹纤维膜及竹纤维/ $\text{SiO}_2$  复合膜的形貌照片

2.2 竹纤维复合膜的基团组成分析

图2为竹纤维膜和竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜经归一化处理后的红外光谱图。由图2可知:竹纤维膜在1060 cm<sup>-1</sup>附近所显示的特征峰归因于纤维素的C—O—C的伸缩振动峰;相比竹纤维膜,竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜在800 cm<sup>-1</sup>附近出现了对应于KH-550 N—H的新特征峰<sup>[16]</sup>,在1060 cm<sup>-1</sup>附近的特征峰强度明显提高。这是因为KH550水解缩聚形成Si—O—Si,部分Si—O—Si与竹纤维上—OH进一步发生反应生成了Si—O—CH<sub>3</sub>,这些基团的特征峰均出现在1000~1200 cm<sup>-1</sup>附近,会与纤维素的C—O—C峰发生重叠,从而增强特征峰强度。以上结果说明SiO<sub>2</sub>已经成功改性并涂覆到竹纤维膜的表面,与SEM结果一致。此外,Si—O—Si和C—O—C的特征峰位置恰好处于大气窗口8~13 μm范围内,为竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜在大气窗口范围内的热辐射创造条件。

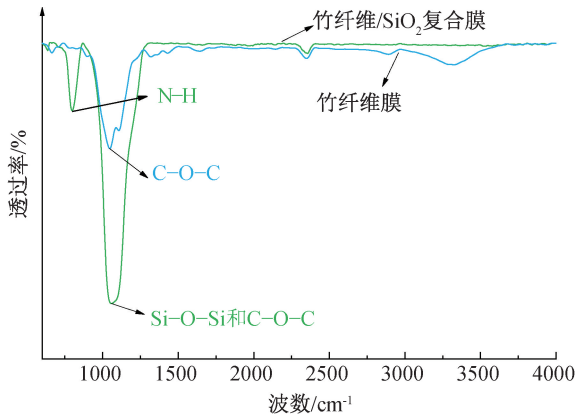


图2 竹纤维膜及竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜的红外光谱图

2.3 竹纤维复合膜的光谱性能分析

2.3.1 竹纤维复合膜的太阳光反射率

材料的太阳光反射率(0.3~2.5 μm)和中红外发射率(8~13 μm)是评判其PDRC性能的关键因素<sup>[17]</sup>。图3为原竹、竹纤维膜和竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜在太阳光范围内的反射率谱图,表1为样品对应的平均太阳光反射率数值。由图3和表1可知:原竹平均反射率为65.9%,竹纤维膜的平均反射率提高到89.5%,而竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜的平均反射率达90.1%,对比原竹,竹纤维膜的反射率明显提高,这是由于竹材中木质素的去除,以及竹纤维本身的多层次沟壑结构。竹纤维表面的沟壑结构能有效提高太阳光反射,而随机多孔结构能引起多次光散射<sup>[18-19]</sup>,进一步提高了反射率。对比竹纤维膜,竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜的反射率在可见光范围内有所提高

(见图1),这是因为引入了无机SiO<sub>2</sub>粒子,除竹纤维的多级结构可帮助提高太阳光反射率外,纳米SiO<sub>2</sub>的加入也可以增强瑞利散射和Mie散射<sup>[20]</sup>,从而进一步提高了太阳光反射率。由于太阳光反射率对材料的PDRC性能有显著影响,1%吸收率的增加会使其冷却功率下降10%<sup>[12]</sup>,少量提高竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜太阳光反射率也有利于其PDRC性能的提升。

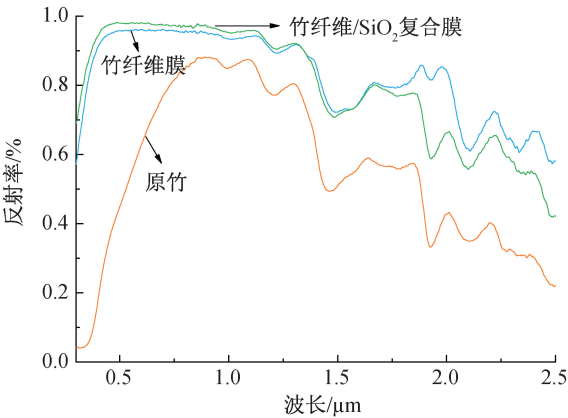


图3 原竹、竹纤维膜及竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜的反射率曲线

表1 不同样品材料的平均反射率

| 样品名称                     | $\bar{R}_{\text{Solar}}/\%$ |
|--------------------------|-----------------------------|
| 原竹                       | 65.9                        |
| 竹纤维膜                     | 89.5                        |
| 竹纤维/SiO <sub>2</sub> 复合膜 | 90.1                        |

2.3.2 竹纤维复合膜的红外发射率

图4为原竹、竹纤维膜和竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜在中红外波长范围内的发射率谱图,表2为每个样品对应的平均发射率数值。从图4可知:原竹、竹纤维膜和竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜的红外发射率均很高,竹纤维膜的发射率相比于原竹有所下降,这是由于木质素和半纤维素的去除<sup>[8]</sup>;经SiO<sub>2</sub>涂覆改性所得竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜相比于竹纤维膜其发射率几乎没有变化。原竹的平均发射率为98.3%,竹纤维膜的平均发射率为97.8%,竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜的平均发射率为97.9%(见表2)。以上结果表明,本文制备的竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜在提高其太阳光反射率的同时,保留了其原有的高红外发射率。

表2 不同样品材料的平均发射率

| 样品名称                     | $\bar{\epsilon}_{\text{LWIR}}/\%$ |
|--------------------------|-----------------------------------|
| 原竹                       | 98.3                              |
| 竹纤维膜                     | 97.8                              |
| 竹纤维/SiO <sub>2</sub> 复合膜 | 97.9                              |

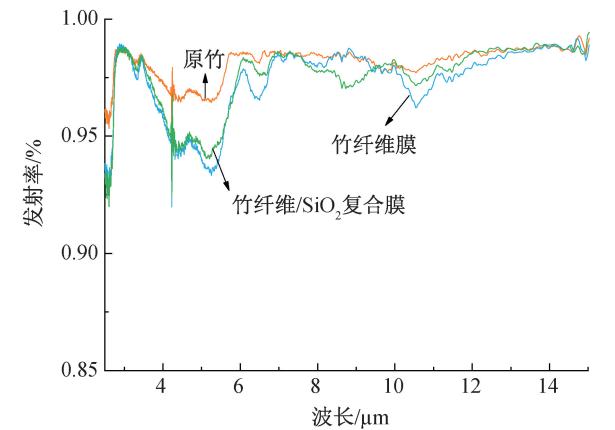
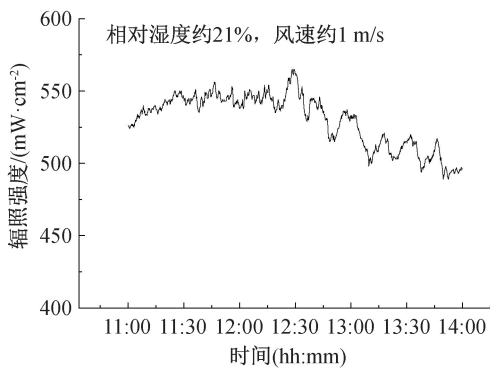


图 4 原竹、竹纤维膜及竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜的发射率曲线

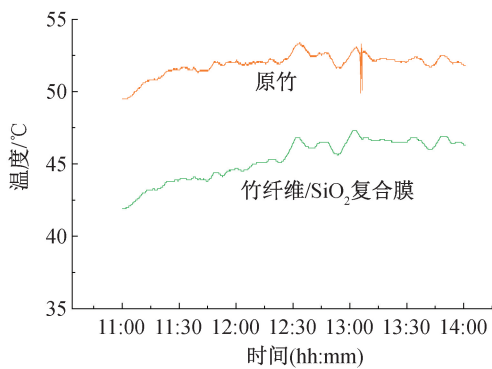
### 2.4 竹纤维复合膜的 PDRC 性能及应用

为了测试竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜的 PDRC 性能,以原竹为对比样,使用自制 PDRC 装置考察竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜在真实日间环境下的降温效果(2022 年

04 月 08 日,浙江杭州)。采用风速和湿度测试装置记录环境条件,通过热电偶监测并记录竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜与原竹表面温度的变化情况。图 5(a)为当天测试环境条件,当日风速约为 1 m/s,辐照强度为 500~550 mW/cm<sup>2</sup>,环境相对湿度约 21%。图 5(b)为阳光直射下的竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜、原竹的温度随时间的变化曲线。图 5 表明:竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜的降温效果受辐照强度的影响有所变化,辐照强度越高,降温效果越好;当辐照强度为 546 mW/cm<sup>2</sup> 时,竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜相比原竹对照样的温度下降了 7.8℃;由 PDRC 材料的日间辐射冷却功率<sup>[17]</sup>可知,反射率越高,对太阳光的热吸收越低;发射率越高,将自身热量辐射出去的能力越强。处理后的竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜相比原竹具有更高的反射率,使其吸收更少的太阳能,同时还能将自身热量辐射出去,也是其能比原竹实现降温 7.8℃ 的原因。



(a) 辐照强度随时间的变化曲线



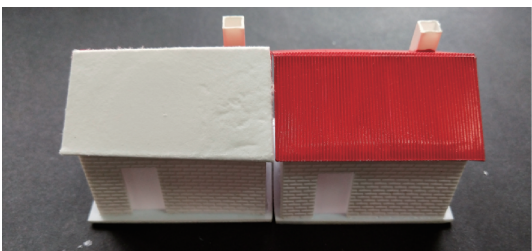
(b) 温度随时间的变化曲线

图 5 竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜的 PDRC 性能测试

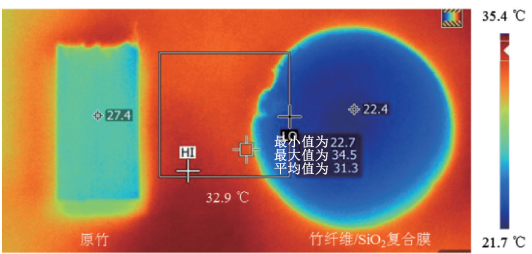
本文所得竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜呈白色,具有一定的可裁剪性,可应用于不同基材表面,如建筑外墙及屋顶。图 6(a)左侧为白色竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜覆盖在屋顶上的实物图。图 6(b)为竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜与对照样原竹的红外热成像图。由图 6(b)可知,竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜与原竹及周围环境之间存在显著的颜色差异。竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜的表面温度为 22.4℃,原竹的表面温度为 27.4℃,环境温度为 32.9℃,竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜的表面温度低于原竹 5.0℃、低于环境温度 10.5℃。这与上述降温测试的结果一致,说明竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜具有良好的降温效果,有望做为节能建筑材料应用于 PDRC 领域。

### 2.5 竹纤维复合膜的机械性能

由于木质素的大量去除,竹纤维从原来的紧密排列变得无序且分散,因此竹纤维膜的力学性能可



(a) 竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜覆在屋顶实物图

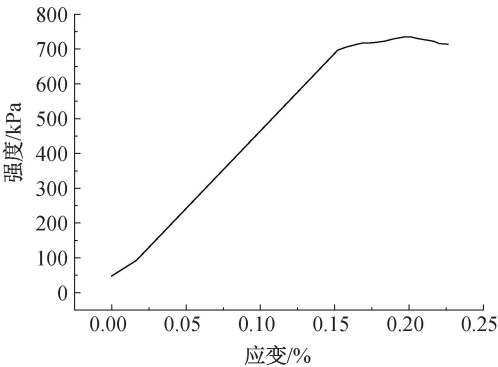


(b) 竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜红外热成像图

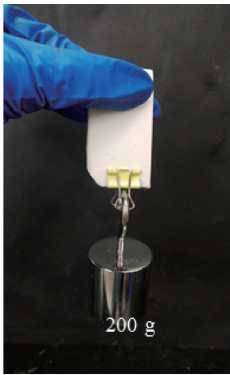
图 6 竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜的应用及红外热成像

能变差。竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜的应力—应变曲线如图 7 所示。从图 7(a)可见,竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜断裂强度为 734.6 kPa,显示出良好的力学性能。从图 7(b)—图 7(c)可见,竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜还可以稳定地承受 200 g 重的砝码,具有较好的拉伸强度,同时具有一定的柔韧性。另外,对竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复

合膜进行耐磨损性能测试后发现,在模拟太阳光源下,磨损 2 个循环后的竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜相比于竹纤维膜可降低温度 5.4 ℃,仍具有良好的降温效果,见图 7(d)。上述结果表明,制备得到的竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜具有良好的力学性能与耐磨损性能。



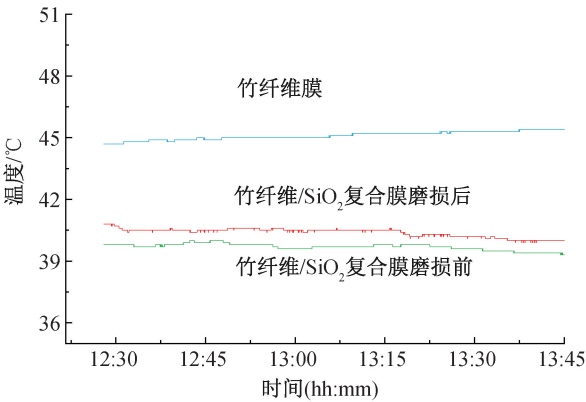
(a) 竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜的应力-应变曲线



(b) 竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜拉伸照片



(c) 竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜弯曲照片



(d) 竹纤维膜与磨损前后竹纤维/SiO<sub>2</sub>复合膜的温度随时间的变化曲线

图 7 竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜的机械性能

3 结 论

本文以天然竹为原材料,通过两步法去除木质素制备了竹纤维膜,并引入改性 SiO<sub>2</sub> 无机粒子,成功制备得到具有较高太阳光反射率和中红外发射率的竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜;考察了复合膜的形貌、结构、光谱性能及降温效果。主要结论如下:

a)脱木质素后的竹纤维表面存在尺度与太阳光波长相当的多级沟壑状结构,经喷涂法制得的竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜表面成功覆盖一层纳米级、规整性较好、无明显团聚的粒子。

b)木质素的去除和 SiO<sub>2</sub> 的引入显著改善了竹纤维材料的光谱性能,竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜具有 90.1%的太阳光反射率和 97.9%的中红外发射率。

c)竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜具有优异的 PDRC 性

能,在户外太阳光辐照强度为 546 mW/cm<sup>2</sup> 的条件下,竹纤维/SiO<sub>2</sub> 复合膜与原竹相比可降低温度约 7.8 ℃,且耐磨损性能良好。

参考文献:

[1] 邱童, 徐强, 李德荣, 等. 建筑外墙隔热涂料节能效果实测研究[J]. 新型建筑材料, 2010, 37(9): 80-82.  
[2] Feng C Z, Yang P H, Liu H D, et al. Bilayer porous polymer for efficient passive building cooling[J]. Nano Energy, 2021, 85: 105971.  
[3] Soumya S, Kumar S N, Mohamed A P, et al. Silanated nano ZnO hybrid embedded PMMA polymer coatings on cotton fabrics for near-IR reflective, antifungal cool-textiles[J]. New Journal of Chemistry, 2016, 40(8): 7210-7221.  
[4] Lee K W, Lim W, Jeon M S, et al. Visibly clear radiative cooling metamaterials for enhanced thermal

- management in solar cells and windows[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(1): 2105882.
- [5] Ye C Q, Li M Z, Hu J P, et al. Highly reflective superhydrophobic white coating inspired by poplar leaf hairs toward an effective “cool roof”[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(9): 3364-3367.
- [6] 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.
- [7] Mandal J, Jia M X, Overvig A, et al. Porous polymers with switchable optical transmittance for optical and thermal regulation[J]. *Joule*, 2019, 3(12): 3088-3099.
- [8] Tian Y P, Shao H, Liu X J, et al. Superhydrophobic and recyclable cellulose-fiber-based composites for high-efficiency passive radiative cooling[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(19): 22521-22530.
- [9] Zhou C Z, Julianri I, Wang S C, et al. Transparent bamboo with high radiative cooling targeting energy savings[J]. *ACS Materials Letters*, 2021, 3(6): 883-888.
- [10] Li T, Zhai Y, He S M, et al. A radiative cooling structural material[J]. *Science*, 2019, 364(6442): 760-763.
- [11] Zhang Y L, Yu J. 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.
- [12] Atiganyanun S, Plumley J B, Han S J, et al. Effective radiative cooling by paint-format microsphere-based photonic random media[J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(4): 1181-1187.
- [13] Chen M J, Pang D, Mandal J, et al. Designing mesoporous photonic structures for high-performance passive daytime radiative cooling[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(3): 1412-1418.
- [14] Granqvist C G, Hjortsberg A. Radiative cooling to low temperatures: General considerations and application to selectively emitting  $\text{SiO}$  films[J]. *Journal of Applied Physics*, 1981, 52(6): 4205-4220.
- [15] Hu X L, Tian M W, Xu T L, et al. Multiscale disordered porous fibers for self-sensing and self-cooling integrated smart sportswear[J]. *Acs Nano*, 2020, 14(1): 559-567.
- [16] 谭瑶. 硅烷偶联剂 KH550 改性纳米纤维素及其增强水性丙烯酸复合涂料研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [17] Zhong S J, Yi L M, Zhang J W, et al. Self-cleaning and spectrally selective coating on cotton fabric for passive daytime radiative cooling [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 407: 127104.
- [18] Shi N N, Tsai C C, Carter M J, et al. Nanostructured fibers as a versatile photonic platform: radiative cooling and waveguiding through transverse Anderson localization[J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(1): 1-9.
- [19] Yang Z B, Zhang J. Bioinspired radiative cooling structure with randomly stacked fibers for efficient all-day passive cooling [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, 13(36): 43387-43395.
- [20] Huang X, Liu D F, 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.

(责任编辑:张会巍)