http://pmse.scu.edu.cn

热塑性聚氨酯/二氧化硅超疏水辐射降温及隔热保温协同作用的多孔膜涂层材料的制备及性能

屈园园[1], 薛朝华[1], 柳冰莹[1], 朱媛媛[1], 马超群[2], 晏燕燕[1], 高 奇[1]
(1. 陕西科技大学 轻工科学与工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安工程大学 纺织科学与工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要:被动日间辐射降温能够有效降低全球对制冷需求的能源消耗,然而传统辐射降温材料在冬天使用时存在过度制冷的问题,会导致供暖需求增加,加剧能源消耗。因此,文中将具有高中红外发射特性的热塑性聚氨酯(TPU)和具有高太阳光反射特性的二氧化硅(SiO_2)纳米粒子进行复合,采用牺牲模板法制备了辐射降温与隔热保温协同作用的多孔膜涂层材料。超疏水 TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料在太阳波段平均反射率可达 97%,大气透明窗口平均发射率可达 96.4%,热导率低至 0.071 W/(m·K),接触角为 157°±1.5°,滚动角为 2°±0.5°。在日间平均太阳辐照度 664.2 W/m^2 下,超疏水多孔膜涂层材料可以实现平均 7.4 ℃的降温。超疏水多孔膜涂层材料不仅克服了低温环境中的过度制冷问题,在冬季夜间可实现平均约 0.59 ℃的保温,其优异的超疏水性能还保障了户外降温性能的长久稳定。

关键词:辐射降温;隔热保温;超疏水;多孔材料
中图分类号:TQ323.8 **文献识别码:**A **文章编号:**1000-7555(2026)06-0126-12

随着社会的不断进步和人类文明的持续发展,能源的消耗呈现出逐渐增长的趋势[1,2]。炎炎夏日,为了实现室内环境的凉爽,空调制冷成为众多家庭及办公场所的必需品。然而,这种依赖电力的降温技术导致了大量电能的消耗[3]。严寒冬季,为了抵御低温,人们普遍采取燃煤供暖措施。该措施导致了大量不可再生资源的消耗,并伴随着有害气体的排放,加剧了全球气候变暖,对自然生态平衡构成了威胁[4]。在这一背景下,一种具有节能环保特性的冷却技术——辐射降温技术应运而生。该技术是在太阳光波段(0.3~2.5 μm)反射太阳光[5~7],并且通过大气透明窗口(8~13 μm)将自身的热量以红外辐射的形式发射到寒冷的外太空而无需消耗其他任何能量[8~10],是一种无能耗、无污染的创新技术,能够有效应对夏季出现的高温天气。然而,在实际应用过程中,这些材料面临的一个主要问题,是在低温环境中也会辐射制冷,从而引起过度制冷,这在寒冷的冬季会导致能源消耗的增加[11]。因此,防止冬季过度降温对于达成全年节能具有重要的意义,目前针对此类材料的研究尚少。此外,这些材料在户外使用过程中很容易受到水分和灰尘的影响,使降温效果下降。因此,开发一种具有超疏水功能的辐射降温和隔热保温协同作用的材料至关重要。

针对上述问题,本文以热塑性聚氨酯(TPU)为基体,疏水二氧化硅(SiO_2)纳米粒子为填料,通过牺牲盐模板法致孔,结合喷涂法低表面能改性制备了超疏水 TPU/SiO_2(S-TPU/SiO_2)多孔膜涂层材料。这种牺牲盐模板法操作简便,易于进行规模化材料制备。该涂层材料利用多孔结构实现太阳光波段的

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0082
收稿日期: 2025-06-13
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52573300); 陕西省重点研发计划国际科技合作重点项目(2023-GHZD-09); 陕西省重点研发计划秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2023KXJ-069); 陕西省重点研发计划三项改革综合试点(2023GXLH-070); 陕西省教育厅重点科学研究计划项目(22JY011)
通讯联系人: 薛朝华, 主要从事辐射降温材料和超疏水材料的研究, E-mail: xuech@sust.edu.cn

高反射,利用 TPU 中 C═O 键和 SiO_2 中 Si—O 键的声子共振实现中红外波段的高发射,同时结合材料的多孔粗糙结构和低表面能性质赋予其超疏水性能,实现了超疏水辐射降温与隔热保温功能的协同共存,不仅拓宽了辐射降温材料的户外实际应用范围,而且能保障其在全年范围内的高效节能。制备方法如 Fig.1 所示。

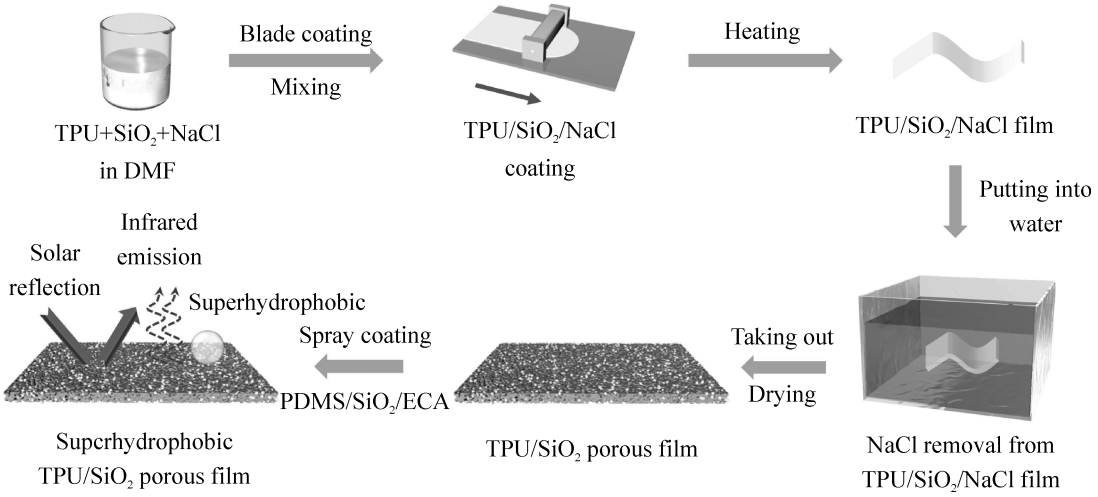


Fig. 1　Preparation diagram of S-TPU/SiO_2 porous film

1　实验部分

1.1　试剂与仪器

热塑性聚氨酯:85085A,昌润塑胶有限公司;疏水二氧化硅:20 nm,济南至鼎焊接材料有限公司;氯化钠(NaCl):1~50 μm,上海麦克林生化科技有限公司;聚二甲基硅氧烷预聚体 A(PDMS 预聚体 A)、聚二甲基硅氧烷固化剂 B(PDMS 固化剂 B):化学纯,美国道康宁公司;N,N-二甲基甲酰胺(DMF)、乙酸乙酯:分析纯,天津富宇精细化工有限公司;α-氰基丙烯酸乙酯(ECA):得力集团有限公司。

场发射扫描电子显微镜(SEM):S-4800 型,日本日立公司;紫外-可见-近红外分光光度计:Cary 5000 型,美国安捷伦公司;傅里叶变换红外光谱仪:IS-50 型,美国 Thermo Scientific 公司;视频光学接触角测量仪:OCA20 型,德国 Dataphysics 公司;K 型热电偶温度测量仪:JK804 型,常州金艾联电子科技有限公司;光密度计:TES 132 型,泰仕电子工业股份有限公司;Hot Disk 导热系数仪:TPS 1500 型,瑞典 Hot Disk 有限公司。

1.2　S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料的制备

1.2.1　TPU/SiO_2/NaCl 分散液的配置:首先,将一定量的 TPU 溶解在 20 g DMF 中,加入 0.2 g SiO_2,在 80 ℃磁力搅拌 1 h,获得 TPU 质量分数为 12% 的 TPU/SiO_2 分散液。然后加入 9 g NaCl,搅拌 30 min,最后置于真空干燥箱中脱泡 30 min,得到 TPU/SiO_2/NaCl 分散液。

1.2.2　TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料的制备:用无水乙醇将聚四氟乙烯板清洗干净并烘干,以除去聚四氟乙烯板表面的污染物和杂质。将 TPU/SiO_2/NaCl 分散液倾倒到聚四氟乙烯板上,采用刮涂器刮涂均匀。然后,置于 60 ℃的烘箱中固化 2 h 得到 TPU/SiO_2/NaCl 复合膜。最后,将固化的 TPU/SiO_2/NaCl 复合膜置于 40 ℃的去离子水中除去 NaCl,得到 TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料。

1.2.3　S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料的制备:将 1 g PDMS 预聚体 A 和 0.1 g PDMS 固化剂 B 溶解在 20 g 乙酸乙酯中,形成 PDMS 溶液,随后向上述溶液中加入 0.5 g SiO_2 搅拌 30 min,然后加入 0.8 g ECA,继续搅拌 10 min 形成分散液。最后,将分散液左右来回喷涂 10 次于 TPU/SiO_2 多孔膜上,室温干燥后得到 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料。

1.3　测试与表征

1.3.1　微观形貌分析:采用场发射扫描电子显微镜对 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料的微观形貌进行观

察。为了提高样品的导电性,测试前对样品喷金 90 s,设置测试电压为 5 kV。

1.3.2 光学性能表征:使用紫外-可见-近红外分光光度计,通过积分球附件,以硫酸钡为基线参考,测试 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料在太阳波段(0.3~2.5 μm)的反射率,通过式(1)计算平均太阳光反射率[3]

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

式中:I_{solar}——光谱太阳辐照度;$R(\lambda)$——样品在 0.3~2.5 μm 波长范围内的反射率。采用傅里叶变换红外光谱仪和金积分球,以光学玻璃为参考,测试 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料在红外波长范围(2.5~25 μm)的红外发射率[3]。

1.3.3 辐射降温性能测试:在绝缘聚苯乙烯(PS)泡沫中挖出多个 3 cm×3 cm×1 cm 的腔体。用铝箔将 PS 泡沫包裹起来,以减少外部热辐射;然后将 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料覆盖在腔体上,超疏水侧朝向天空。装置顶部覆盖有聚乙烯(PE)薄膜,以减少空气对流的影响。将装置放置在建筑物的屋顶,使用光密度计和热电偶实时记录太阳辐照度和温度变化。

1.3.4 隔热保温性能测试:采用导热系数仪测试 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料的热导率。将多孔膜涂层材料样品放置在设定温度的热台上,使用多通道热电偶记录表面温度。将 1.3.3 节中同款装置放置在冰箱中,记录腔体和空气中的实时温度,以表征 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料的保温性能。

1.3.5 润湿性测试:采用视频光学接触角测量仪测试样品表面的静态接触角(CA),裁剪样品黏贴于载玻片上,取 5 μL 去离子水滴在样品表面,记录 CA 值。采用滚动角测试仪测试样品表面的滚动角(SA),制样方法与 CA 类似,测量过程中,取 8 μL 去离子水滴到水平放置的样品表面,然后缓慢抬高样品,水滴恰好能在样品表面滚动的临界角,即为 SA 值。

1.3.6 自清洁性测试:将样品固定于载玻片上,并以一定角度倾斜置于培养皿中。接着取适量的泥土作为污染物置于样品表面。随后,将水滴在样品表面的泥土上方滴落,观察并记录样品表面的污染状况。

2 结果与讨论

2.1 NaCl 用量对 TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料微观形貌及反射率的影响

控制其他量不变,仅改变 NaCl 的用量来制备 TPU/SiO_2 多孔膜,以考察 NaCl 用量对多孔膜微观形貌及反射率的影响。Fig.2(a, b)为 NaCl 扫描电镜图与粒径分布图,NaCl 粒径在 1~50 μm。

Fig.3(a~e)为 NaCl 质量分数分别为 30%,35%,40%,45% 和 50% 的 TPU/SiO_2 多孔膜横截面 SEM 图。从图中可以看出,不同比例 NaCl 的加入使得 TPU/SiO_2 多孔膜内部有不同大小的孔隙存在。由 Fig.3(f)知,随着 NaCl 用量的增加,孔隙结构变得多且复杂,反射率出现先升高后降低的趋势,平均反射率依次为 85.0%,94.6%,95.0%,95.1% 和 90.0%。NaCl 含量从 30% 增加到 35% 时,反射光谱在 500~1500 nm 范围的反射率有较大变化,而从 35% 增加到 50% 时反射率变化很小。是因为当 NaCl 含量为 30% 时,模板 NaCl 较少,不能形成在 500~1500 nm

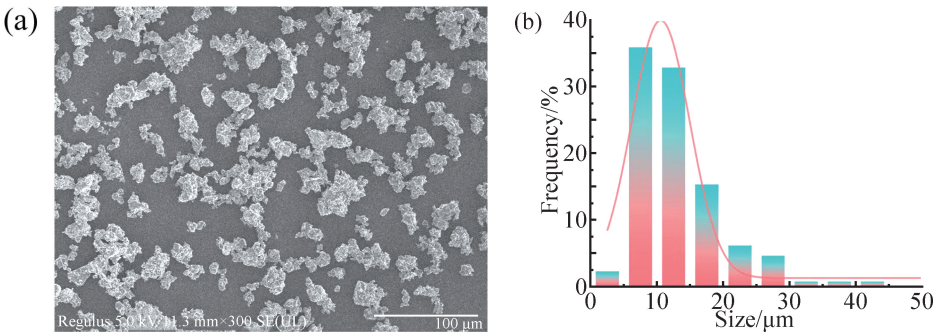


Fig. 2 (a) SEM image of NaCl; (b) particle size distribution of NaCl

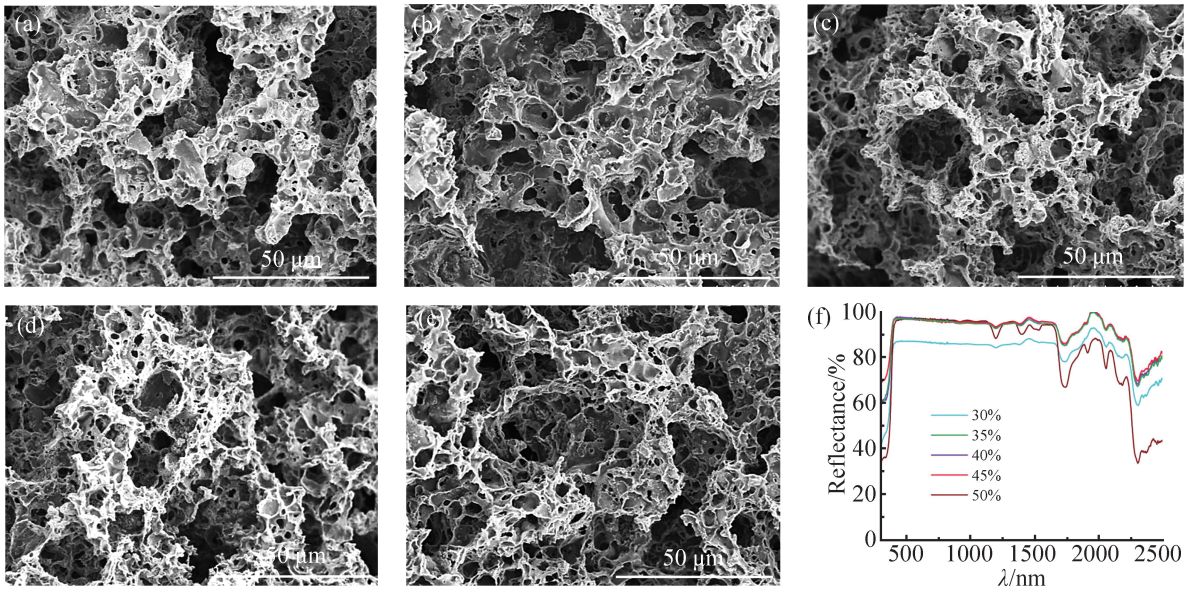


Fig. 3　SEM images of the cross-section of TPU/SiO_2 porous films with different NaCl mass fractions: (a) 30%; (b) 35%; (c) 40%; (d) 45%; (e) 50%. (f) Changes of solar reflectance of porous films with different NaCl mass fractions

范围内具有高反射率的孔径。当 NaCl 含量过多,达到 50%时,过量的 NaCl 使多孔膜材料的连续完整性受到影响,进而造成 1500~2500 nm 反射率的下降。当 NaCl 含量为 45%时,形成了丰富的微纳多级多孔结构,有利于形成对太阳光强烈的米氏散射,达到较高的太阳光反射率。

2.2　SiO_2 含量对 TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料微观形貌及反射率的影响

通过加入不同质量分数的疏水 SiO_2 纳米粒子制备了 TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料,研究 SiO_2 纳米粒子的用量对多孔膜涂层材料微观形貌及反射率的影响。Fig.4(a~e)为 SiO_2 质量分数分别为 1.0%,

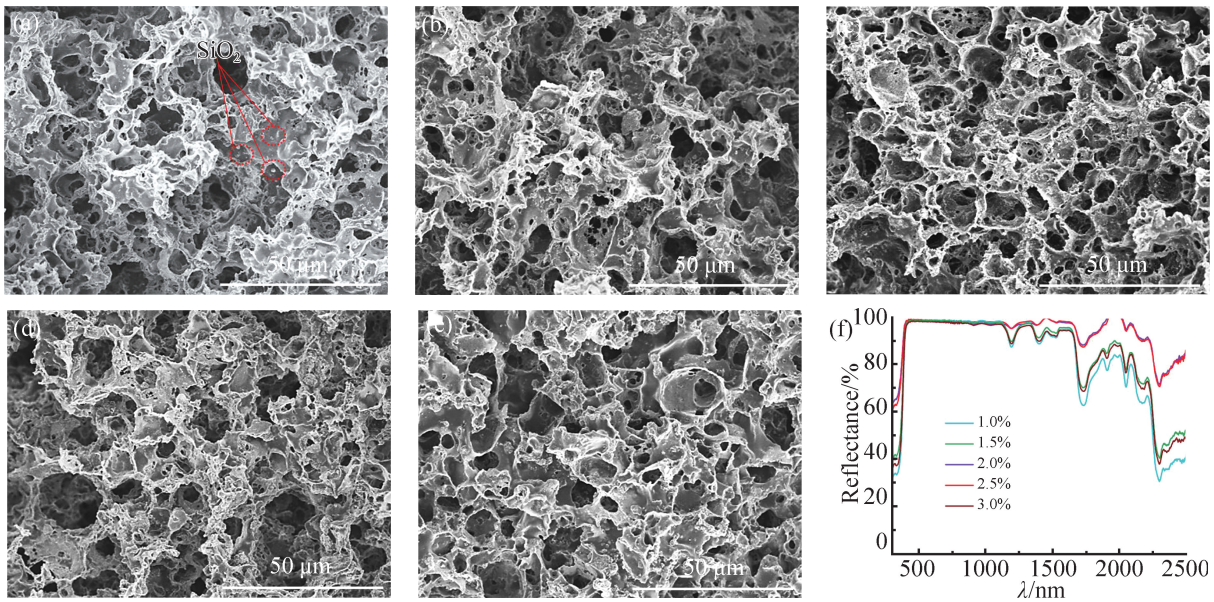


Fig. 4　SEM images of the cross-section of TPU/SiO_2 porous films with different SiO_2 mass fractions: (a) 1.0%; (b) 1.5%; (c) 2.0%; (d) 2.5%; (e) 3.0%. (f) Changes of solar reflectance of porous films with different SiO_2 mass fractions

1.5%,2.0%,2.5% 和 3.0% 时 TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料横截面 SEM 图,平均反射率依次为 93.2%,94.2%,97.0%,96.9% 和 94.1%。观察 SEM 图可以清晰地看到,多孔膜内部出现了许多颗粒状的物质,应为加入的 SiO_2 纳米粒子。随着 SiO_2 用量逐渐增加,SiO_2 粒子团簇不断增大,太阳光反射率呈现先升高后降低的趋势。当 SiO_2 含量达到 2.0% 时,SiO_2 纳米团簇的大小变得非常接近,并且它们均匀地镶嵌在孔隙内部,形成了既有孔隙结构又有 SiO_2 粒子团簇结构的均匀结构,太阳光反射率达到最高(Fig.4(f))。继续增加 SiO_2 用量时,过多的 SiO_2 纳米粒子大量团聚,填埋了 TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料内的孔隙,导致孔结构减少,孔结构的减少会引起太阳光反射率的降低。综合考量,确定 SiO_2 的最佳质量分数为 2.0%。

2.3 厚度对 TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料微观形貌及反射率的影响

厚度也是影响 TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料光学性能的重要因素。控制其他因素不变,通过不同规格刮涂器刮出不同厚度的 TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料。Fig.5(a~e)是厚度分别为 817 μm,984 μm,1151 μm,1581 μm 和 1658 μm 的多孔膜涂层材料横截面的 SEM 图,平均反射率依次为 94.0%,96.5%,96.7%,96.9% 和 96.9%。由 Fig.5(f)可知,多孔膜厚度对其太阳光反射率有一定影响。随着厚度增加,多孔膜涂层材料的太阳光反射率呈增长趋势,这是因为随着多孔膜厚度的增加,膜的透过率减小,太阳光透过膜的能力不断减弱,其反射率相应的会升高。而当多孔膜厚度增加到 1581 μm 后,继续增加厚度,多孔膜的太阳光反射率变化并不显著。这是因为当多孔膜的厚度达到某一阈值后,透过率不再进一步降低,此时多孔膜的太阳光反射率也趋于稳定,因而选择 1581 μm 为多孔膜最优厚度。

2.4 除盐时间对 TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料微观形貌及反射率的影响

控制其他量不变,通过改变除盐时间来制备 TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料。Fig.6(a~e)为除盐时间分别为 2 h,3 h,4 h,5 h 和 6 h 的 TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料横截面 SEM 图,平均反射率依次为 85.1%,94.2%,94.5%,95.2% 和 95.2%。随着除盐时间的延长,TPU/SiO_2 多孔膜内部 NaCl 逐渐被溶解,孔结构逐渐增多,太阳光反射率呈现先升高后持平的趋势,当除盐时间为 5 h 时,TPU/SiO_2 多孔膜内部孔隙结构分布均匀,聚合物材料实现了较高的反射率,随着时间进一步延长,材料的反射率未继续增加。因此,选取 5 h 为最优除盐时间。

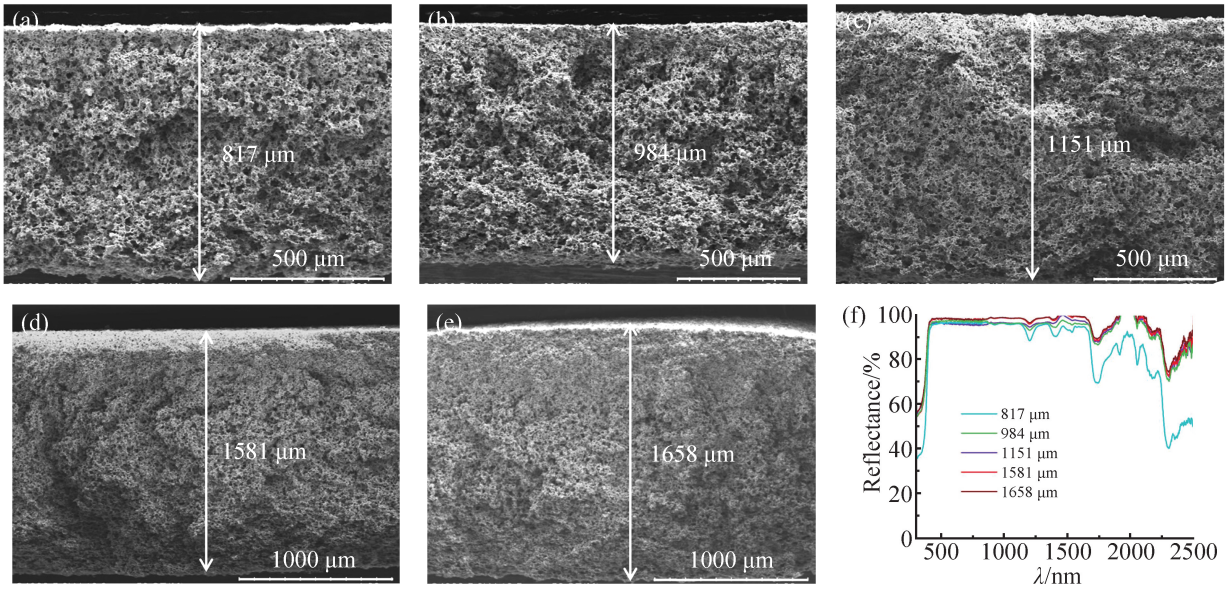


Fig. 5 SEM images of the cross-section of TPU/SiO_2 porous films with different thickness: (a) 817 μm; (b) 984 μm; (c) 1151 μm; (d) 1581 μm; (e) 1658 μm. (f) Changes of solar reflectance of porous films

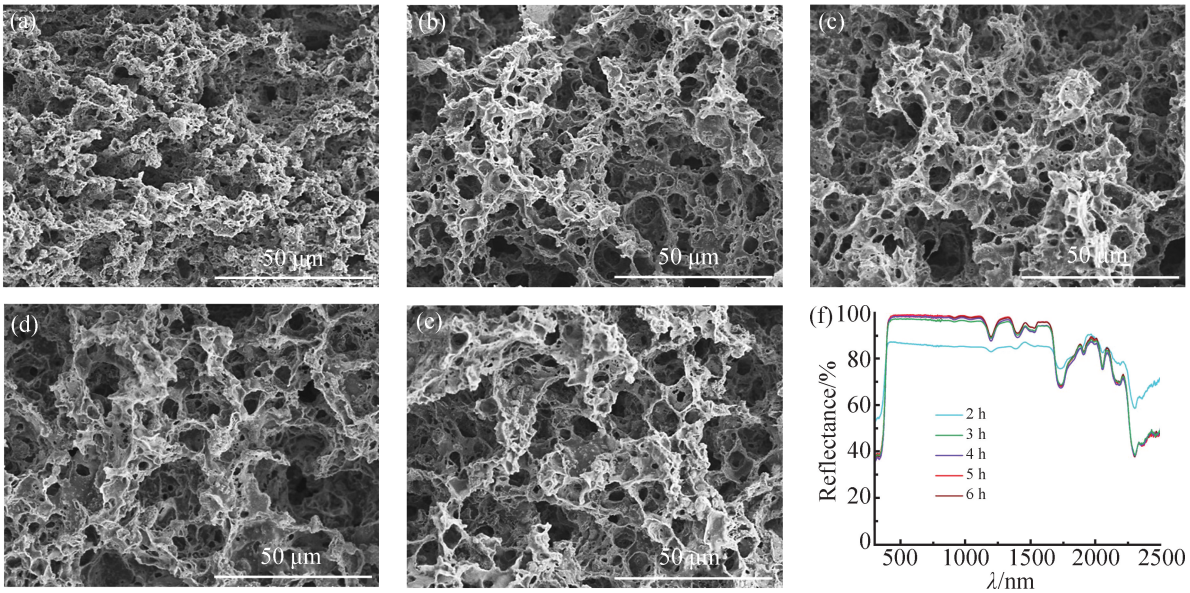


Fig. 6　SEM images of the cross-section of TPU/SiO_2 porous films with different desalt time: (a) 2 h; (b) 3 h; (c) 4 h; (d) 5 h; (e) 6 h. (f) Changes of solar reflectance of porous films with different desalt time

2.5　S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料的光学性能及户外降温性能

根据单因素探究,确定了制备 TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料的最优配方和工艺参数。具体而言,最佳 SiO_2 质量分数为 2.0%,最佳 NaCl 质量分数为 45%,最佳除盐时间为 5 h,最佳刮涂厚度为 1581 μm。最

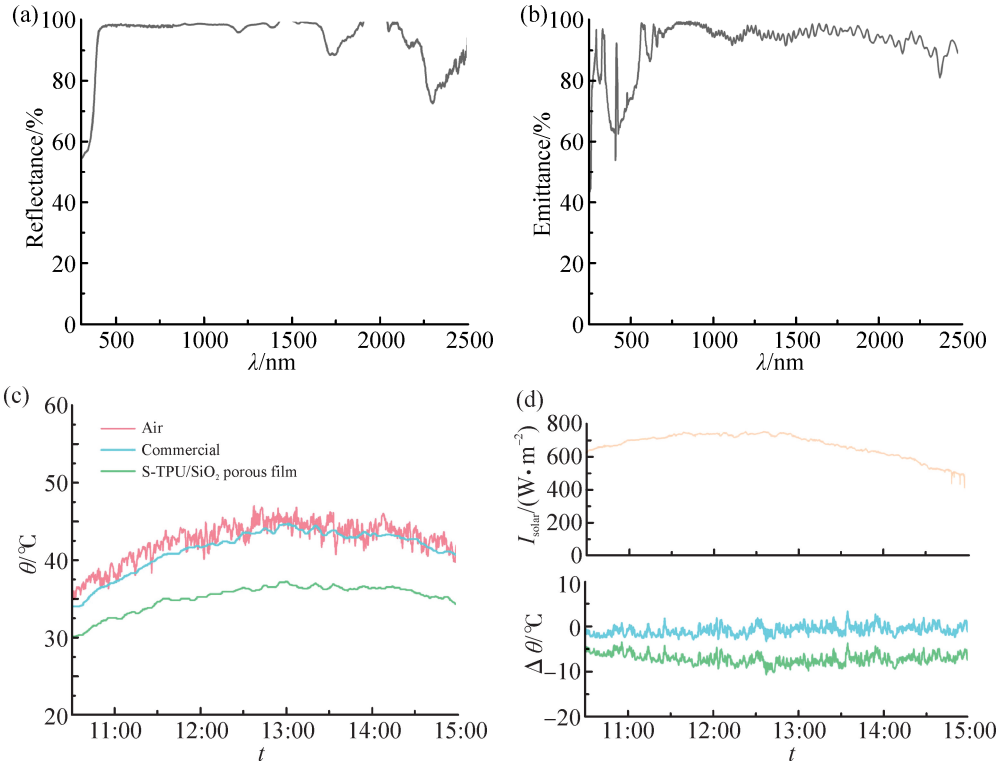


Fig. 7　(a) Sunlight reflection spectrum of S-TPU/SiO_2 porous film; (b) infrared emission spectrum of S-TPU/SiO_2 porous film; (c) air, S-TPU/SiO_2 porous film, commercial cooling material temperature change; (d) real-time solar intensity and temperature difference

优 TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料展现出了显著的疏水特性(CA = 120°),进一步采用低表面能 PDMS 结合疏水 SiO_2 纳米粒子,在最优 TPU/SiO_2 多孔膜表面喷涂 1 层 PDMS/SiO_2/PECA,得到超疏水 TPU/SiO_2(S-TPU/SiO_2)多孔膜涂层材料,接触角可达 157°,可见,喷涂疏水 SiO_2 纳米粒子显著增强了材料的超疏水性。超疏水多孔膜内部具有均匀分布的微纳米孔结构,通过 Nano Measurer 软件分析发现,S-TPU/SiO_2 多孔膜的孔径主要集中在 0~20 μm,这些微小的孔隙能有效增强太阳光的反射和散射,使膜呈现出独特的白色外观。由 Fig.7(a)可以看出,S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料在太阳光谱波段具有很高的反射率,经计算为 97%;由 Fig.7(b)可以看出,该材料在红外波段具有很强的发射率,经计算为 96.4%。采用导热系数仪对 S-TPU/SiO_2 多孔膜的导热性能进行了表征,发现最优样品 S-TPU/SiO_2 多孔膜(1581 μm)的热导率为 0.071 W/(m·K),更小的微纳孔结构形成了低的热导率。这些数据表明,S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料在被动日间辐射降温应用中具有巨大的潜力。

将自制的测试装置安装在建筑物的屋顶,以评估 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料在实际户外环境中的降温效果。监测日间 10: 30 至 15: 00 的连续太阳照射下环境与 S-TPU/SiO_2 多孔膜、商用降温材料覆

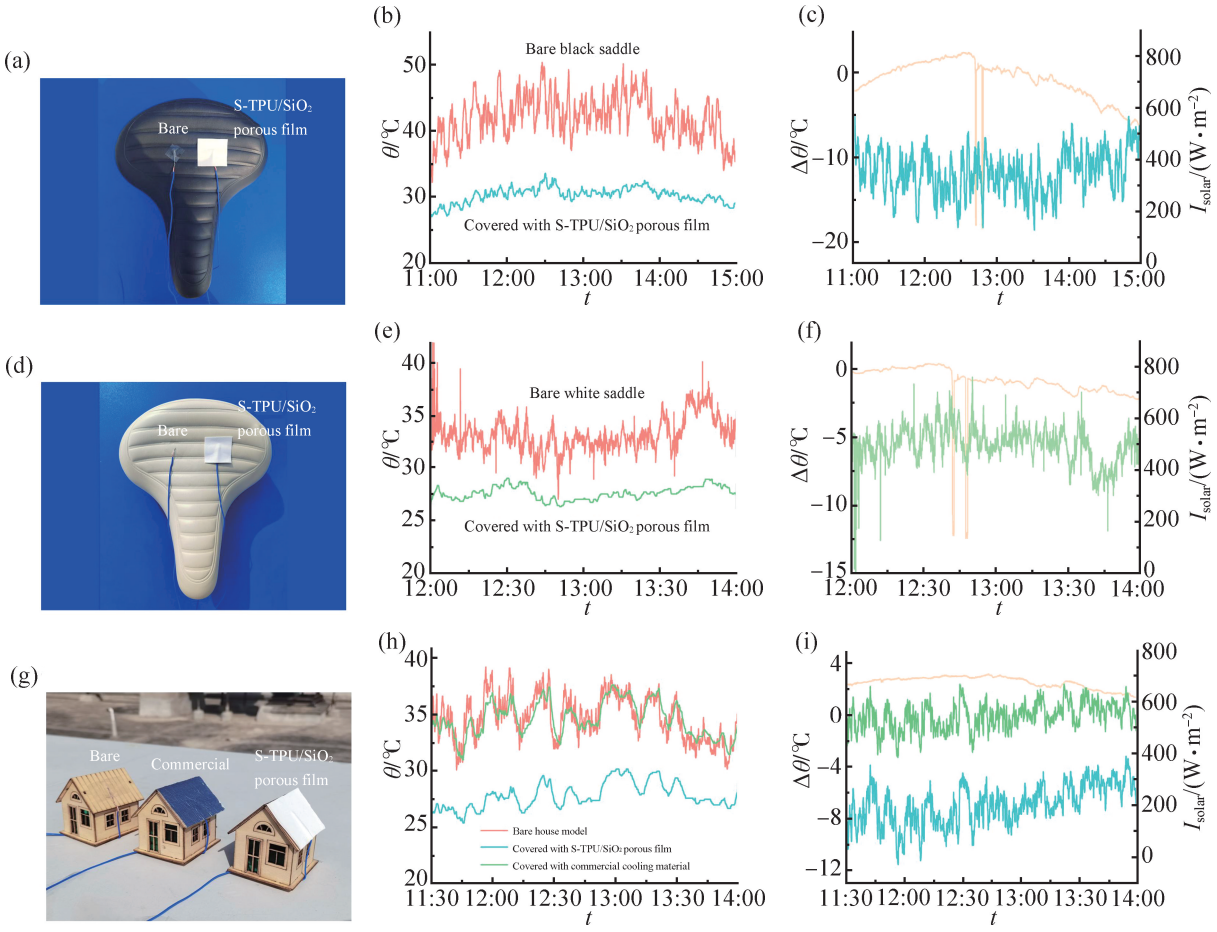


Fig. 8 Application cooling test: (a) black saddle covered with S-TPU/SiO_2 porous film; (b) temperature change corresponding to the black saddle test; (c) black saddle test corresponds to solar irradiance and temperature difference; (d) white saddle covered with S-TPU/SiO_2 porous film; (e) temperature changes corresponding to the white saddle test; (f) white saddle test corresponds to solar irradiance and temperature difference; (g) covered with S-TPU/SiO_2 porous film, commercial cooling materials and non-covered house models; (h) temperature changes corresponding to the testing of the house model; (i) house model test corresponding to solar irradiance and temperature difference

盖空腔内部温度。Fig.7(c, d)显示,平均太阳辐照度约为 664.2 W/m^2 时,S-TPU/SiO_2 多孔膜下空腔温度相比环境平均可降 7.4 ℃,最高可降 10.5 ℃。为了进一步验证 S-TPU/SiO_2 多孔膜的实际应用降温性能,将 S-TPU/SiO_2 多孔膜覆盖在马鞍形状的模型上,在其底部放置温度探头,并在裸露表面放置探头作为对比温度,测试其实际降温能力,监测日间 11:00~15:00 的太阳辐照度和温度变化。Fig.8(a~c)表明,当裸露黑色马鞍的温度达到 44.5 ℃时,S-TPU/SiO_2 多孔膜覆盖下的温度仅为 30.9 ℃。在平均太阳辐照度为 706 W/m^2 的情况下,温度平均降低 11.8 ℃,最高降温 17.7 ℃。监测日间 12:00~14:00 的太阳辐照度和温度变化,当裸露白色马鞍的温度为 35 ℃时,覆盖有 S-TPU/SiO_2 多孔膜处的温度低至 28 ℃。Fig.8(d~f)显示,在平均太阳辐照度为 743.4 W/m^2 的情况下,覆盖有 S-TPU/SiO_2 多孔膜的白色马鞍表面温度相比于裸露表面温度平均降低 5.9 ℃,最高降低 12.6 ℃。通过模拟建筑围护结构,对房屋模型进行降温测试。考虑了 3 种情况,一种没有任何覆盖物,一种覆盖商用降温材料,一种覆盖 S-TPU/SiO_2 多孔膜。监测日间 11:30~14:00 的太阳辐照度和温度变化。Fig.8(g~i)表明,在平均太阳辐照度为 676.4 W/m^2 的情况下,覆盖 S-TPU/SiO_2 多孔膜的房屋表面温度比裸露的房屋表面温度平均降温 6.9 ℃,最高降温 11 ℃。综上,S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料在户外各种应用场景中都表现出优异的降温效果,这种优异的降温性能归因于 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料的高太阳光反射率、强红外发射率及低热导率。

2.6　S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料的隔热保温性能

将辐射降温测试部分相同的装置放置在−10 ℃的冰箱中,通过热电偶实时记录温度(Fig.9(a))。结果表明,环境温度急速下降,S-TPU/SiO_2 多孔膜下腔体温度缓慢下降,当达到平衡温度时,未覆盖的腔体内部空气温度为−9.6 ℃,S-TPU/SiO_2 多孔膜下空腔的温度为−8.7 ℃。进一步探究 S-TPU/SiO_2 多孔

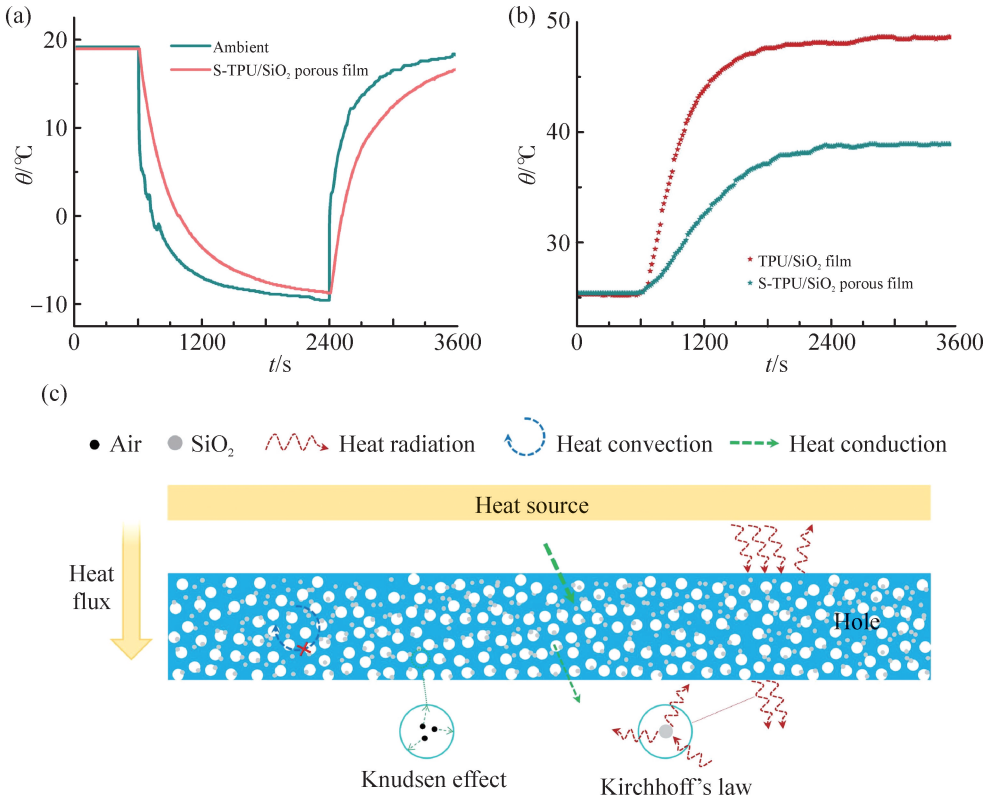


Fig. 9　Thermal insulation performance and principle of S-TPU/SiO_2 porous film: (a) temperature change of the cavity in the environment and S-TPU/SiO_2 porous film (−10 ℃); (b) temperature change of different samples on 50 ℃ hot table; (c) heat transfer diagram of S-TPU/SiO_2 porous film

膜的隔热性能,将 S-TPU/SiO_2 多孔膜与对比样品同时放置在温度设定为 50 ℃的热台上,用热电偶进行温度监测。如 Fig.9(b)所示,当加热开始后,TPU/SiO_2 膜和 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料的表面温度都呈现快速上升的趋势,加热持续了 60 s 之后,2 种膜的表面温度都达到了相对稳定的平衡状态。在这一平衡状态下,TPU/SiO_2 膜的表面温度稳定在 47 ℃,而 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料的表面温度为 38.7 ℃。此外,对 S-TPU/SiO_2 多孔膜的实际户外保温性能进行测试,监测冬季夜间 0:00~6:00 的温度变化情况。结果表明,当环境温度达到−5.2 ℃时,S-TPU/SiO_2 多孔膜下空腔温度为−4.6 ℃,6 h 内平均保温约 0.59 ℃。而大多数普通的辐射降温材料在冬季会持续降温,Wang 等[12]制备的分层多孔超疏水 TPU 薄膜仅用于被动辐射冷却和自清洁,冬季会造成持续降温。Yang 等[13]制备了一种夹层结构聚丙烯/聚氨酯复合泡沫,具有高隔热性,热导率低至 0.051 W/(m·K),但其不具备辐射降温功能。显然 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料具备辐射降温性能的同时可以避免过度制冷。S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料的隔热保温原理如 Fig.9(c)所示,当孔径小于空气分子的平均自由路径时,空气在孔内的运动受到限制,无法自由流动,从而使热对流被有效抑制[14],这种现象叫做克努森效应。此外,由于孔径减小,热传导路径随之加长,这使得热量从温度较高的区域传递到温度较低的区域变得更加困难[15,16],降低了传热速率。另外,根据基尔霍夫定律,TPU,SiO_2 及 PDMS 这 3 种材料在 8~13 μm 波段都有着强的吸收峰,赋予了 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料在中红外波段的强发射率。

2.7 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料的超疏水性及稳定性

为了防止灰尘堆积和雨水侵蚀对材料的光学特性造成不良影响,评估 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料的超疏水稳定性是有必要的。将不同颜色液滴置于 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料表面,可以看到,不同颜色液滴在 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料上都呈现球形状态(Fig.10(a)),后将其置于水中发生了银镜现象(Fig.10(b))。进一步进行泥土污染测试,如 Fig.10(c)和 Fig.10(d)所示,当水滴接触到 TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料的表面时,多孔膜表面受到了一定程度的污染。相比之下,在 S-TPU/SiO_2 多孔膜

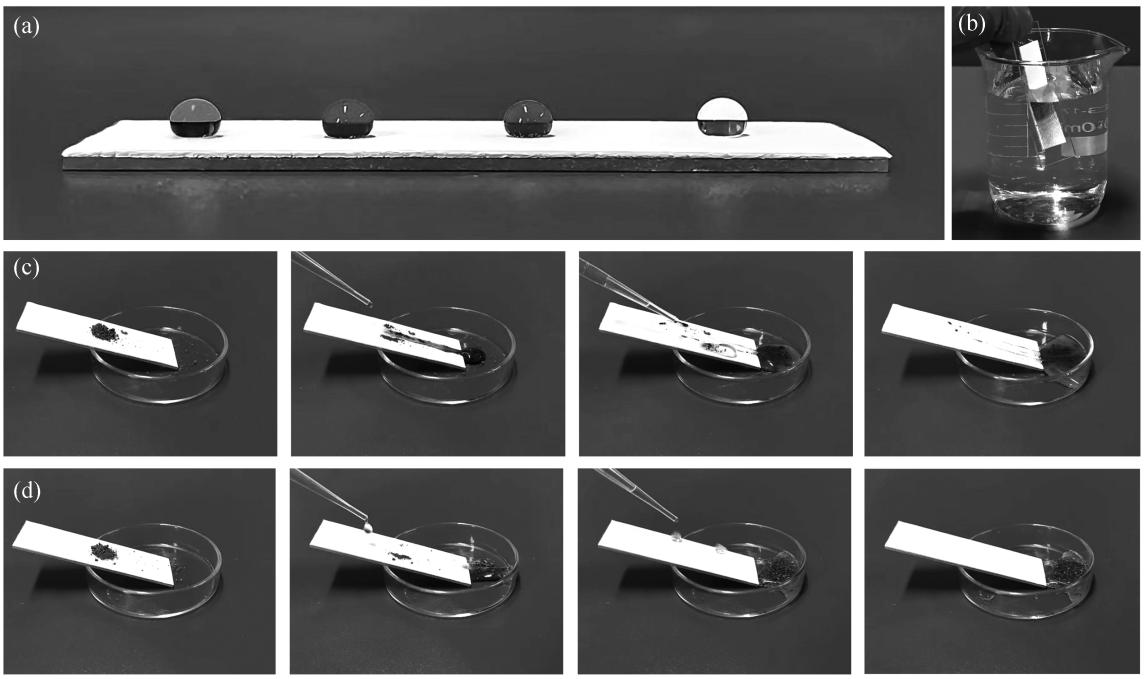


Fig. 10 (a) Picture of droplets of different colors on S-TPU/SiO_2 porous film; (b) silver mirror phenomenon of S-TPU/SiO_2 porous film in water; (c) TPU/SiO_2 porous film surface contamination; (d) self-cleaning of S-TPU/SiO_2 porous film surface

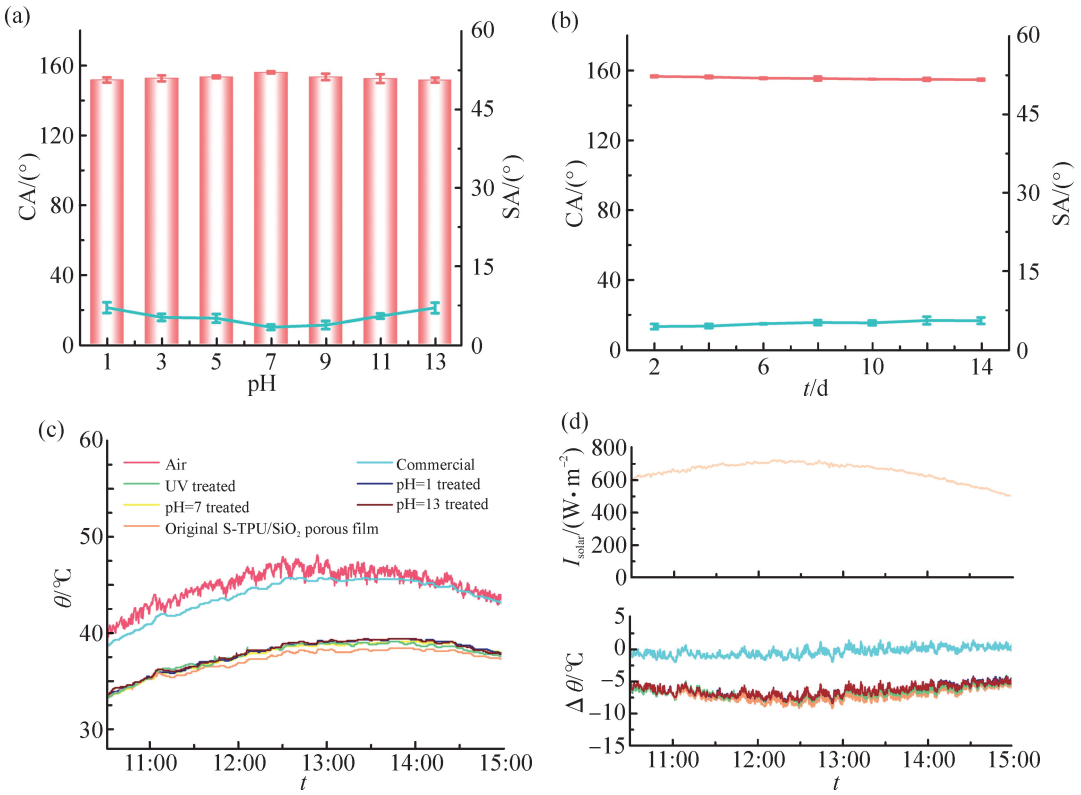


Fig. 11　Superhydrophobic stability of S-TPU/SiO_2 porous film: (a) CA/SA of S-TPU/SiO_2 porous film after soaking in different pH solutions for 7 d; (b) CA/SA of S-TPU/SiO_2 porous film after 14 d of irradiation under UV lamp; (c) daytime outdoor cooling test; (d) real-time solar intensity and temperature difference

涂层材料表面,滴落的水滴呈球形状滑动,且滑走的过程中可以将泥土带走,表面没有留下任何残留物,保持了样品表面的干净,这归因于 S-TPU/SiO_2 多孔膜表面粗糙的微纳米结构和较低的表面能。

户外环境通常是复杂变化的,S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料的超疏水稳定性对于其长期户外使用具有重要意义。将样品浸泡在预先配置的不同 pH 的酸碱盐溶液中,浸泡 7 d 后测试其 CA 与 SA,置于紫外灯下 14 d 后测试其 CA 与 SA。Fig.11(a, b)表明,酸碱盐处理和紫外处理后,多孔膜涂层材料仍具有良好的超疏水性。随后对降温性能进行测试,结果表明,在平均太阳辐照度为 624.3 W/m^2 的情况时,相较于原始薄膜,酸碱盐浸泡 7 d,紫外照射 14 d 后的多孔膜材料均实现了约 7.6 ℃的降温(Fig.11(c, d))。这证实 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料具有优异的耐酸碱盐性及抗紫外线能力,适用于严苛的环境条件。

3　结论

S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料接触角为 157°±1.5°,滚动角为 2°±0.5°,太阳光反射率高达 97%,中红外发射率高达 96.4%,热导率为 0.071 W/(m·K)。户外测试结果表明,在平均太阳辐照度为 664.2 W/m^2 的条件下,S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料相比环境温度平均降温 7.4 ℃。冬季夜间测试结果表明,S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料相比环境温度分别可保温约 0.59 ℃。综上所述,具备高太阳光反射率、高红外发射率及低导热性能的 S-TPU/SiO_2 多孔膜涂层材料展现了卓越的辐射降温性能和隔热保温性能。将该涂层材料应用于遮阳帐篷、防晒服等,夏季发挥辐射降温的同时阻止热量通过热传导方式进入室内,并将热量以红外辐射的形式发射到寒冷外太空,有效减少了太阳光产生的寄生热,从而达到高效的降温效果。而在冬季夜间,依靠其低的热导率可以防止室内热量散失至户外,减轻过度制冷的问题。该多孔膜涂层材料可在节能环保领域发挥重要作

用,有效降低全球对于制冷需求的能源消耗。

参考文献:

[1] Cai C Y, Wei Z C, Ding C X, *et al*. Dynamically tunable all-weather daytime cellulose aerogel radiative supercooler for energy-saving building[J]. Nano Letters, 2022, 22: 4106-4114.

[2] Wang Y, Ji H N, Liu B, *et al*. Radiative cooling: structure design and application[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2024, 12: 9962-9978.

[3] Ma C Q, Xue C H, Guo X J, *et al*. Fabrication of passive cooling fabric as thermal management curtain for building energy-saving[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 497: 154431.

[4] Farooq A S, Zhang P, Gao Y F, *et al*. Emerging radiative materials and prospective applications of radiative sky cooling-a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 144: 110910.

[5] Gao W, Chen Y P. Emerging materials and strategies for passive daytime radiative cooling[J]. Small, 2023, 19: 2206145.

[6] Li Y N, Chen X Y, Yu L, *et al*. Janus interface engineering boosting visibly transparent radiative cooling for energy saving[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15: 4122-4131.

[7] Liu R, Wang S C, Zhou Z G, *et al*. Materials in radiative cooling technologies[J]. Advanced Materials, 2024, 37: 2401577.

[8] Huang M C, Yang M P, Guo X J, *et al*. Scalable multifunctional radiative cooling materials[J]. Progress in Materials Science, 2023, 137: 101144.

[9] Ma J W, Zeng F R, Lin X C, *et al*. A photoluminescent hydrogen-bonded biomass aerogel for sustainable radiative cooling[J]. Science, 2024, 385: 68-74.

[10] Yu L, Huang Y M, Zhao Y W, *et al*. Self-sustained and insulated radiative/evaporative cooler for daytime subambient passive cooling[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16: 6513-6522.

[11] Chen Q X, Lu Y H, Zhang J P, *et al*. Flexible structural polyethylene films for dynamically tunable energy harvesting from the sun and outer space[J]. Nano Energy, 2023, 114: 108610.

[12] Wang T R, An J J, Shao C G, *et al*. Hierarchically porous superhydrophobic thermoplastic polyurethane film for passive radiative cooling and self-cleaning[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2025, 64: 13761-13769.

[13] Yang C G, Xu Y K, Liu H Y, *et al*. Sandwich-structured polypropylene/polyurethane composite foam with high thermal insulation for infrared radiation absorption[J]. Langmuir, 2025, 41: 29606-29615.

[14] Ma C Q, Xue C H, Fan W, *et al*. Synchronous radiative cooling and thermal insulation in sio_2/poly(vinyl alcohol) composite aerogel for energy savings in building thermal management[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2024, 12: 5695-5704.

[15] Ren W R, Wang C H, Han C B, *et al*. Cement-based external wall insulation material with thermal performance improvement by partial substitution of calcium silicate[J]. Energy and Buildings, 2024, 317: 114415.

[16] Uetani K, Hatori K. Thermal conductivity analysis and applications of nanocellulose materials[J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2017, 18: 877-892.

Preparation and Properties of Thermoplastic Polyurethane/Silica Porous Coating Materials with Synergistic Effects of Superhydrophobic Radiative Cooling and Thermal Insulation

Yuanyuan Qu[1], Chaohua Xue[1], Bingying Liu[1], Yuanyuan Zhu[1], Chaoqun Ma[2], Yanyan Yan[1], Qi Gao[1]

(*1. College of Bioresources Chemical and Materials Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China; 2. College of Textile Science and Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China*)

ABSTRACT: Passive daytime radiative cooling can effectively reduce the energy consumption for global cooling demand. However, traditional radiative cooling materials have the problem of excessive cooling when used in winter, which leads to an increase in heating demand and intensifies energy consumption. Therefore, in this paper, by combining thermoplastic polyurethane (TPU) with high and medium infrared emission characteristics and silicon dioxide (SiO_2) nanoparticles with high solar reflection characteristics, a porous coating material with the synergistic effect of radiative cooling and heat insulation was prepared by sacrificial template method. The superhydrophobic TPU/SiO_2 porous coating material has an average reflectivity of up to 97% in the solar band, an average emissivity of up to 96.4% in the atmospheric transparent window, a thermal conductivity as low as 0.071 W/(m·K), a contact angle of 157°±1.5°, and a rolling angle of 2°±0.5°. Under the average daytime solar irradiance of 664.2 W/m^2, the superhydrophobic porous coating material can achieve an average cooling of 7.4 ℃. This superhydrophobic porous coating material not only overcomes the problem of excessive cooling in low-temperature environments, achieving an average insulation of approximately 0.59 ℃ at night in winter, but also ensures the long-term stability of outdoor cooling performance due to its excellent superhydrophobic properties.

Keywords: radiative cooling; thermal insulation; superhydrophobic; porous material