

超疏水煤矸石光热涂层的制备及防覆冰性能

张卓昱¹, 吴君¹, 张佳欣¹, 赵世豪¹, 崔敏祺¹, 宋浩杰¹, 李永^{1,2,3}

(1. 陕西科技大学材料科学与工程学院, 西安 710021;

2. 中国民用航空飞行学院民航安全工程学院, 广汉 618307;

3. 四川省全电通航飞行器关键技术工程研究中心, 广汉 618307)

摘要 通过十二胺(DDA)与多巴胺(DA)的迈克尔加成反应原位修饰煤矸石, 制备了超疏水煤矸石光热涂层. 该涂层具有优异的防冰和除冰性能, 为煤矸石废弃物的改性和资源化利用提供了新方案. 结果表明, 煤矸石与聚多巴胺的光热协同效应使得涂层表面温度能够达到 90.2 °C(太阳光照强度为 1.0 kW/m²). 同时, 由于多级结构和低表面能烷基长链的协同作用, 涂层表面的水接触角高达(157±0.8)°, 滚动角低至(3.2±0.3)°. 在-15 °C 的低温环境中, 涂层表面水滴冻结延迟时间是无涂层材料的 38.3 倍. 此外, 由于涂层具有光热转换特性, 涂层表面的覆冰在 1.0 kW/m² 的太阳光照强度下仅需 80 s 即可快速融化, 证明其具有优异的被动防冰和主动除冰特性. 重要的是, 涂层还具有优异的自清洁性能、机械稳定性和化学稳定性. 该多功能光热涂层在煤矸石高值化利用和工程材料绿色防护方面具有重要应用前景.

关键词 煤矸石改性; 光热转换; 超疏水涂层; 防覆冰

中图分类号 O634

文献标志码 A

doi: 10.7503/cjcu20250086

Preparation of Superhydrophobic Coal Gangue Photothermal Coating and Its Anti-icing Performance

ZHANG Zhuoyu¹, WU Jun^{1*}, ZHANG Jiabin¹, ZHAO Shihao¹,

CUI Minqi¹, SONG Haojie¹, LI Yong^{1,2,3*}

(1. School of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology,

Xi'an 710021, China; 2. College of Civil Aviation Safety Engineering,

Civil Aviation Flight University of China, Guanghan, 618307, China;

3. Sichuan Key Technology Engineering Research Center for All-electric Navigable Aircraft, Guanghan, 618307, China)

Abstract A superhydrophobic coal gangue photothermal coating was prepared by *in-situ* modification of coal gangue through the Michael addition reaction of dodecylamine (DDA) and dopamine (DA). This coating has excellent anti-icing and de-icing properties, providing a new solution for the modification and resource utilization of coal gangue waste. The results show that the photothermal synergistic effect of coal gangue and polydopamine enable the surface temperature of the coating to reach 90.2 °C (1.0 kW/m²). At the same time, due to the synergistic effect of the multi-scale structure and low surface energy alkyl long-chain, the coating surface exhibits a water contact angle up to (157±0.8)° and a sliding angle of (3.2±0.3)°. In a low-temperature environment of -15 °C, the freezing delay time of

收稿日期: 2025-03-26. 网络首发日期: 2025-06-30.

联系人简介: 李永, 男, 博士, 副教授, 主要从事表面功能材料的设计及应用方面的研究. E-mail: yongli@sust.edu.cn

吴君, 女, 博士, 副教授, 主要从事新型纳米金属材料 and 光热转换材料的制备及应用研究. E-mail: wjh168@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 52303376)、四川省全电通航飞行器关键技术工程研究中心开放课题(批准号: CAFUC2025KF07)和国家级大学生创新训练计划项目(批准号: 202410708053)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 52303376), the Open Project of Sichuan Key Technology Engineering Research Center for All-electric Navigable Aircraft, China(No. CAFUC2025KF07) and the National Undergraduate Innovation and Entrepreneurship Training Program, China(No. 202410708053).

water droplets on the coating surface is 38.3 times that of uncoated material. In addition, due to the photothermal conversion characteristics of the coating, the ice on the surface of the coating can quickly melt in just 80 s under 1.0 kW/m² of light illumination, demonstrating its excellent passive anti-icing and active de-icing performance. Importantly, the coating also has excellent self-cleaning performance, mechanical stability, and chemical stability. This multifunctional photothermal coating has important application prospects in the high-value utilization of coal gangue and green protection of engineering materials.

Keywords Coal gangue modification; Photothermal conversion; Superhydrophobic coating; Anti-icing

煤矸石(CG)是在煤炭开采过程中产生的主要废弃物,其产量约占我国煤炭开采总量的10%~15%,在所有工业固体废物中占比达40%,是排放量最高的工业废渣之一^[1,2].大量煤矸石的堆积不仅占用土地资源,其含有的重金属成分及自燃特性还可能引发土壤污染和空气污染等问题,严重时甚至导致地质灾害^[3].然而,目前我国煤矸石的利用率仅为60%~70%,且传统利用方式存在诸多不足:焚烧处理易造成二次污染;分选有用矿物的经济成本高;而用于建筑材料的煤矸石产品则因样品差异大,质量稳定性难以保证.因此,开发绿色、高效的煤矸石资源化利用途径具有重要意义.

光热转换材料^[4,5]能够高效地将太阳能转化为热能,因此在海水淡化^[6]、能量储存^[7]以及光热除冰^[8,9]等领域展现出广阔的应用前景.随着对煤矸石资源化利用的关注度持续提升,其光热性能研究逐渐成为热点,在能源回收、环境保护和可持续发展领域具有潜在的应用价值^[5].然而,煤矸石中富含的石英和长石等矿物对可见光的吸收能力较弱,限制了其直接作为光热材料的应用.因此,为开发以煤矸石为基元的高性能光热超疏水防覆冰材料,对其进行改性处理是必要的.

煤矸石改性方法主要包括酸/碱处理、表面有机改性、煅烧改性及水热改性等^[10,11].张长森等^[12]通过微波辐照破坏了煤矸石矿物中牢固的Si—O和Al—O键结构,从而提高了煤矸石的反应活性和胶凝性能.杨长钰等^[13]采用巯基丙基三甲氧基硅烷改性煤矸石,以增强其对土壤中钴离子的钝化效果.张立明等^[14]利用活化(煅烧)煤矸石制备LC3低碳水泥,使活化煤矸石改性混凝土力学性能达到矿渣改性混凝土同一水平.这些改性方法虽然在一定程度上能够提升煤矸石的利用价值,但是存在能耗大、操作复杂、污染环境及转化效率低等缺点,限制了其大规模应用的经济性和环保效益.相比之下,有机聚合物改性凭借广谱吸光性、高光热转换效率^[15-17]及易调控性等优势,成为设计光热功能材料的优选策略.其中,聚吡咯(PPy)和聚多巴胺(PDA)等共轭聚合物^[18]在超疏水光热性能研究中展现出巨大潜力.利用多巴胺改性煤矸石过程不仅环保,使用的试剂较少,对环境影响小,而且比其它改性方法更经济高效.

基于此,本文通过迈克尔加成或席夫碱反应,用十二胺(DDA)和盐酸多巴胺(DA)修饰煤矸石,成功设计了超疏水煤矸石光热涂层.由于PDA和CG的光热协同效应,在1.0 kW/m²的太阳光照强度下,该涂层表面温度迅速上升到90.2 °C.此外,涂层的分层结构和低表面能烷基长链提供了优异的自清洁性能[水接触角为(157±0.8)°],可以避免固体和液体污染物的黏附.同时,兼具光热特性和高疏水性的表面可确保持续稳定的光热转换效率,进而提升防冰/除冰性能.此外,该超疏水光热涂层表现出优异的机械耐久性和化学稳定性,满足实际应用中长期使用的严苛要求.因此,本文制备的多巴胺原位聚合改性煤矸石超疏水光热涂层为煤矸石的资源化利用和在超疏水光热防护领域的应用提供了新的解决方案.

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

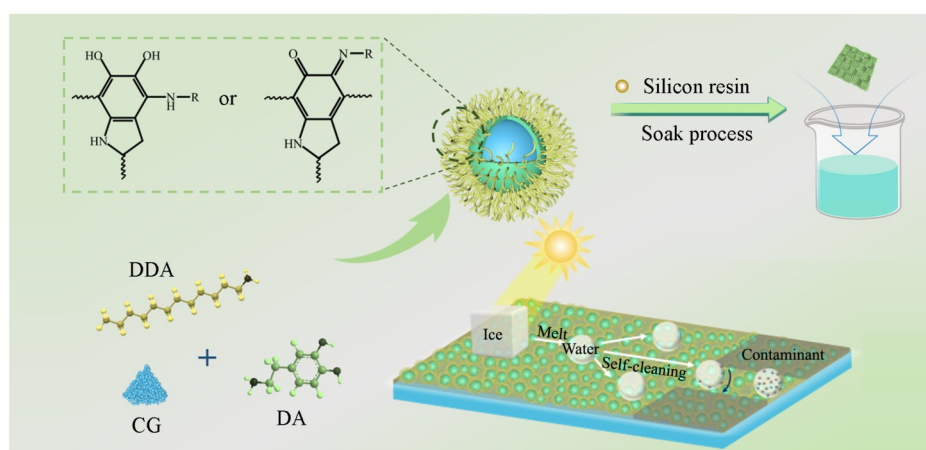
煤矸石,河南鼎诺净化材料有限公司,325目;十二胺,纯度≥98%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;盐酸多巴胺,纯度98%,上海迈瑞尔化学技术有限公司;三(羟基)氨基甲烷(Tris),纯度≥99.9%,上海阿拉丁生化科技股份有限公司;有机硅树脂(9502),湖北隆盛四海新材料股份有限公司;乙醇,分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司;纯棉布,东莞华美布料纺织厂.

Regulus8100型场发射扫描电子显微镜(FESEM), 美国FEI公司; CEL-S500/350型氙灯光源, 北京中教金源科技有限公司; SL200KB型光学法接触角/界面张力仪, 上海梭伦信息科技有限公司; Cary 5000型紫外-可见-近红外(UV-Vis-NIR)分光光度计, 北京京科瑞达科技有限公司; H10型红外线热成像仪, 杭州海康威视数字技术股份有限公司; K-Alpha型X射线光电子能谱仪(XPS), 美国赛默飞世尔科技公司.

1.2 实验过程

1.2.1 PDA-DDA包裹煤矸石(CG@PDA-DDA)的制备 采用一锅法制备CG@PDA-DDA. 首先, 将0.4 g CG和0.4 g DDA加入到Tris缓冲溶液中(pH=8.5), 搅拌15 min进行分散; 然后, 将0.2 g DA加入分散液中, 充分搅拌后用乙醇离心并干燥, 即得到CG@PDA-DDA.

1.2.2 CG@PDA-DDA超疏水光热涂层(CG-SP涂层)的制备 将0.25 g CG@PDA-DDA研磨成粉末, 并与0.5 g有机硅树脂在20 mL乙醇中混合. 搅拌均匀后, 将2 cm×2 cm的纯棉布在混合溶液中浸泡30 min后烘干, 多次重复浸泡与烘干过程, 即可得到CG-SP涂层(Scheme 1).



Scheme 1 Preparation of CG@PDA-DDA and CG-SP coating

2 结果与讨论

2.1 超疏水光热涂层的结构与组成分析

由SEM照片可以看出, 原始织物[图1(A)和(B)]的纤维表面相对光滑、饱满且紧凑. CG表面呈现出不规则的块状、层片状以及团聚结构特征(图S1, 见本文支持信息). 由图1(C)和(D)可以看出, 在

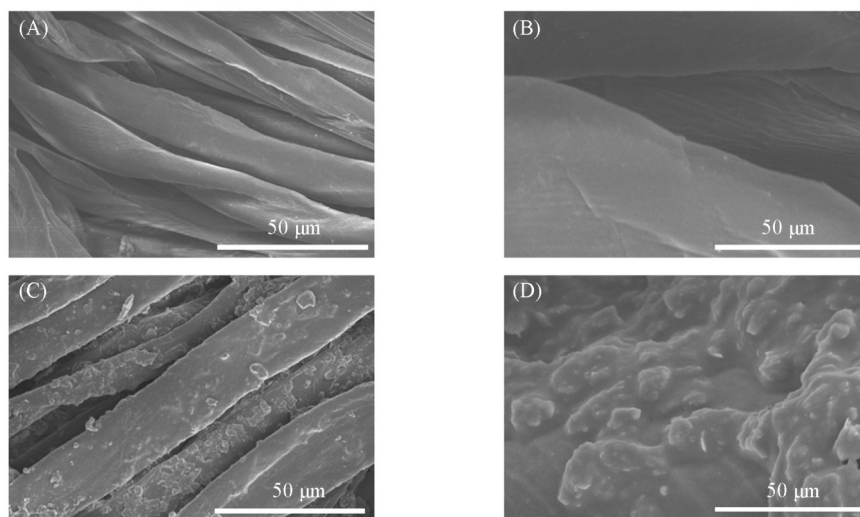


Fig. 1 SEM images of pristine fabric(A, B) and CG-SP coating(C, D)

纯棉布表面制备CG-SP涂层后纯棉布纤维表面嵌入了大量致密且粗糙的突起颗粒. 这是由于PDA层覆盖在CG表面的同时, 其丰富的儿茶酚/醌基团与DDA一端的氨基发生席夫碱或迈克尔加成反应形成共价键, 从而将DDA成功地接枝到PDA包裹的CG上(Scheme 1). 此外, 粗糙的微纳结构被适度的硅树脂覆盖, 显著提高了涂层的机械耐久性. PDA和CG的协同光热效应可赋予涂层优异的光热性能. 大量的疏水物质烷基长链可降低涂层的表面能, 为构建超疏水表面提供了基础.

图2(A)示出了CG, CG@PDA-DDA和CG-SP涂层的XPS全光谱. 在CG的XPS谱线中可以清楚地看到 C_{1s} , O_{1s} , Al_{2p} 及 Si_{2p} 峰. 修饰后, CG@PDA-DDA和CG-SP涂层均出现 N_{1s} 峰, 这表明CG表面成功覆盖了PDA和DDA. 在CG的 C_{1s} 高分辨率XPS光谱[图2(B)]中, 284.8和285.1 eV处的峰分别源自C—C和C—O. 修饰后, C—N/C=N键的峰值出现在285.8 eV处[图2(C)], 这归因于CG表面覆盖的PDA和DDA. 此外, N_{1s} 在结合能为403.1 eV和399.8 eV处的峰分别与—N=和—NH—基团相关[图2(D)], 这说明了PDA和DDA层的形成, 证明本文已成功制备CG@PDA-DDA. CG@PDA-DDA中C, O, N, Si和Al的原子含量分别为40.08%, 37.50%, 2.59%, 11.56%和8.27%. 用硅树脂浸泡和固化后, C, O, N, Si和Al的原子含量分别为40.75%, 40.22%, 0.22%, 17.52%和1.29%.

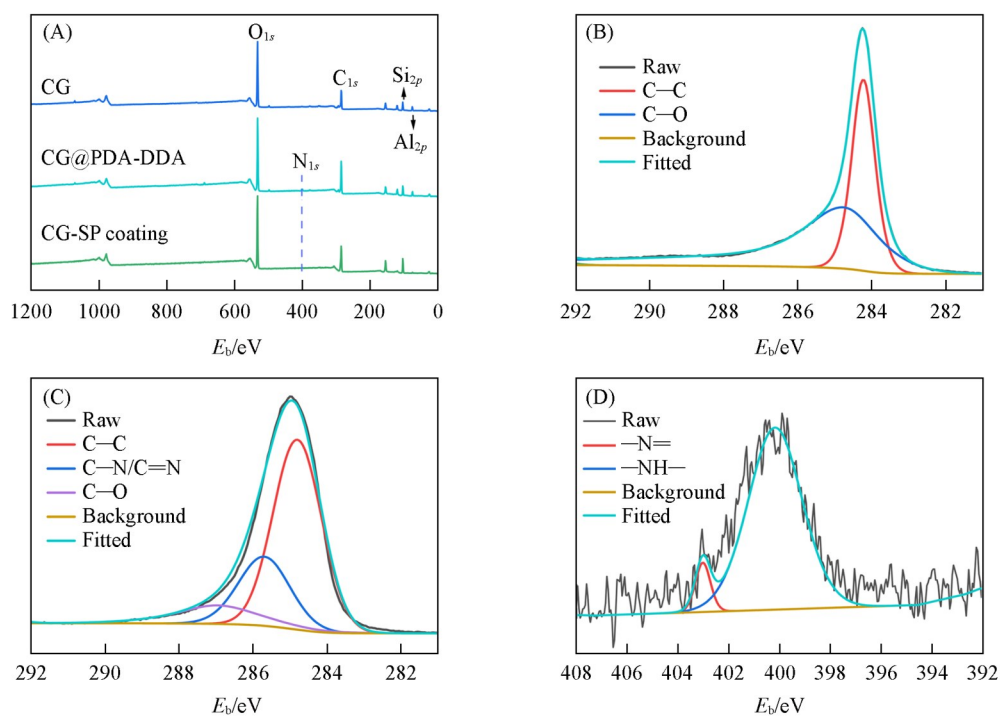


Fig. 2 XPS survey spectra of CG, CG@PDA-DDA and CG-SP coating(A), the high-resolution C_{1s} XPS spectra of CG(B) and CG@PDA-DDA(C), and the high-resolution N_{1s} XPS spectrum of CG@PDA-DDA(D)

2.2 表面润湿性与自清洁性能

图3(A)示出了生活中常见液滴在CG-SP涂层表面的光学照片. 由图3(A)可见, 被玫瑰红染色的水、泥水、牛奶、果汁和可乐以球形静止在CG-SP涂层表面, 表明CG-SP涂层表面对各种液体具有极好的排斥性. 当CG-SP涂层被固定在载玻片上浸入水中时, 可以清楚地观察到银镜现象. 这种银镜现象的形成可归因于该涂层表面的微纳结构能够捕获大量空气, 从而在涂层表面形成一层稳定的空气层. 该空气层不仅能够有效排斥水分子, 还能反射光线, 进而产生银镜现象^[19][图3(B)]. 当原始纯棉布和CG-SP涂层同时浸入水中时, CG-SP涂层由于空气层可以提供浮力漂浮在水面上, 而原始纯棉布则浸没在水中[图3(C)]. 当用水流射击[图3(D)]和冲击[图3(E)] CG-SP涂层表面时, 水流能够快速反弹, 且涂层表面未残留任何水滴. 以上结果充分表明, CG-SP涂层具有优异的超疏水性能.

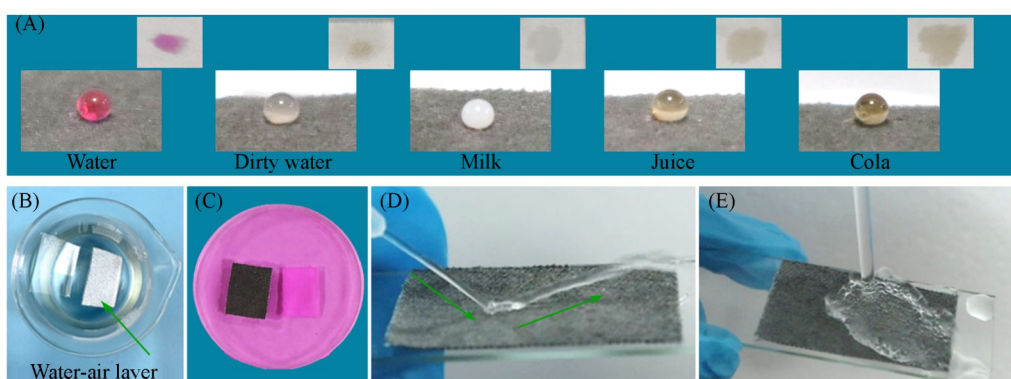


Fig. 3 Wettability of CG-SP coating

(A) Optical images of various liquid droplets on the CG-SP coating surface; (B) silver mirror-like phenomenon of CG-SP coating; (C) the floating states of CG-SP coating and pristine fabric in water; (D, E) water flow shooting (D) and water impact (E) of CG-SP coating surface. Insets of the upper right corner of (A): wetting state of droplets on the original fabric.

涂层表面的自清洁性能可有效防止污垢及其它污染物对光热性能的影响。使用沙粒作为污染物，研究了CG-SP涂层的自清洁性能。当水滴持续滴落在受污染的表面时，沙粒仍然附着于纯棉布表面[图S2(A)，见本文支持信息]。然而，由于CG-SP涂层具有超疏水性和低附着力，水滴能够轻松地将沙粒从涂层表面带走[图S2(B)，见本文支持信息]。此外，CG-SP涂层对多种常见液体表现出优异的防污性能。实验中分别将玫瑰红染色的水、泥水、果汁和可乐液体滴加至涂层表面，可以看到液滴均呈球形滚落，涂层表面没有任何残留的液滴和污渍(图S3，见本文支持信息)。涂层表面始终保持清洁，表现出优异的防污性能。

2.3 光热转换性能

用AM 1.5太阳辐照度光谱表示原始织物和CG-SP涂层的光吸收率。由图4(A)可见，CG-SP涂层

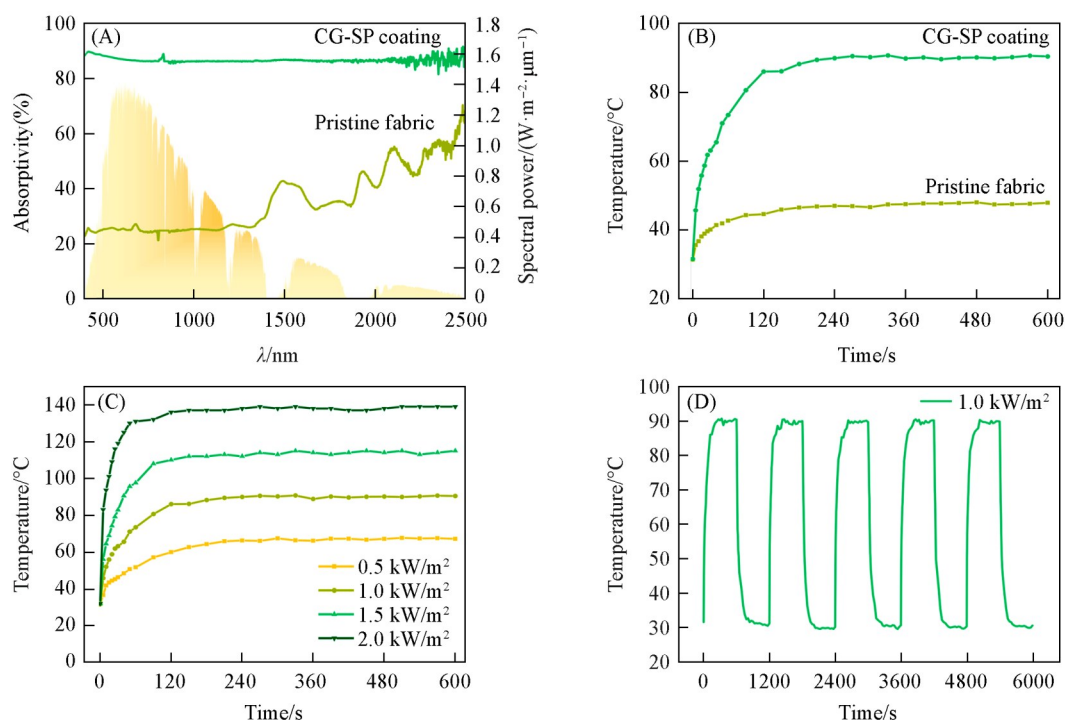


Fig. 4 Photothermal conversion performance of CG-SP coating

(A) Light absorptivity of different samples; (B) temperature change of CG-SP coating and pristine fabric under 1.0 kW/m^2 light intensity; (C) temperature change of CG-SP coating under different light intensities; (D) temperature variations of CG-SP coating during five cycles of repeated heating-cooling.

的光吸收率在可见光波长和红外波长范围内均达 80% 以上。这是由于 PDA 是一种具有优异光热性能的光热材料。此外, PDA 和 CG 的光热协同作用促进了光的吸收。将样品置于三聚氰胺海绵上, 用氙灯模拟太阳光源, 测试涂层的光热性能。图 4(B) 对比了原始织物和 CG-SP 涂层在 1.0 kW/m^2 的光照强度下 600 s 内的温度变化曲线。原始织物的平衡温度仅为 $41.8 \text{ }^\circ\text{C}$, 而 CG-SP 涂层迅速升温并稳定在 $90.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图 4(C) 示出了 CG-SP 涂层在不同光照强度 ($0.5, 1.0, 1.5$ 和 2.0 kW/m^2) 下照射 600 s 的温度变化。可以明显观察到, 随着光照强度的增加, CG-SP 涂层的平衡温度逐渐升高。图 S4 (见本文支持信息) 进一步呈现了 CG-SP 涂层在不同光照强度下的最高平衡温度所对应的红外热成像图像。在 0.5 kW/m^2 的光照强度下, CG-SP 涂层的平衡温度为 $67.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。当光照强度增加至 2.0 kW/m^2 时, CG-SP 涂层的平衡温度升高至 $138 \text{ }^\circ\text{C}$ 。此外, 为探究 CG-SP 涂层在日常使用条件下的稳定性, 对 CG-SP 涂层进行了 5 个加热-冷却循环的光热性能测试。结果表明, 涂层在经历 5 个循环后仍保持了优异的光热性能 [图 4(D)]。

2.4 防冰/除冰性能

将样品附着在 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 的冷却器上, 在原始织物和 CG-SP 涂层表面分别滴加约 $10 \text{ }\mu\text{L}$ 的水滴进行实验。原始织物表面的水滴在 48 s 内完全冻结 [图 5(A)] 上; 而 CG-SP 涂层表面的水滴 1836 s 内完全冻结 [图 5(B)]。对比实验结果表明, 水滴在 CG-SP 涂层上的冻结过程大大延迟。冷冻过程如图 5(C) 所示。由于气垫的存在, 从冷却器底部到液滴内部的传热过程受到阻碍, 导致冷冻时间延长。随着温度的降低, 一些液滴在低温下进入微纳米结构中。当温度低于冰点时, 水滴迅速冻结 [20]。图 5(D) 比较了制备的 CG-SP 涂层与文献 [21~27] 报道的其它涂层的防冰能力。

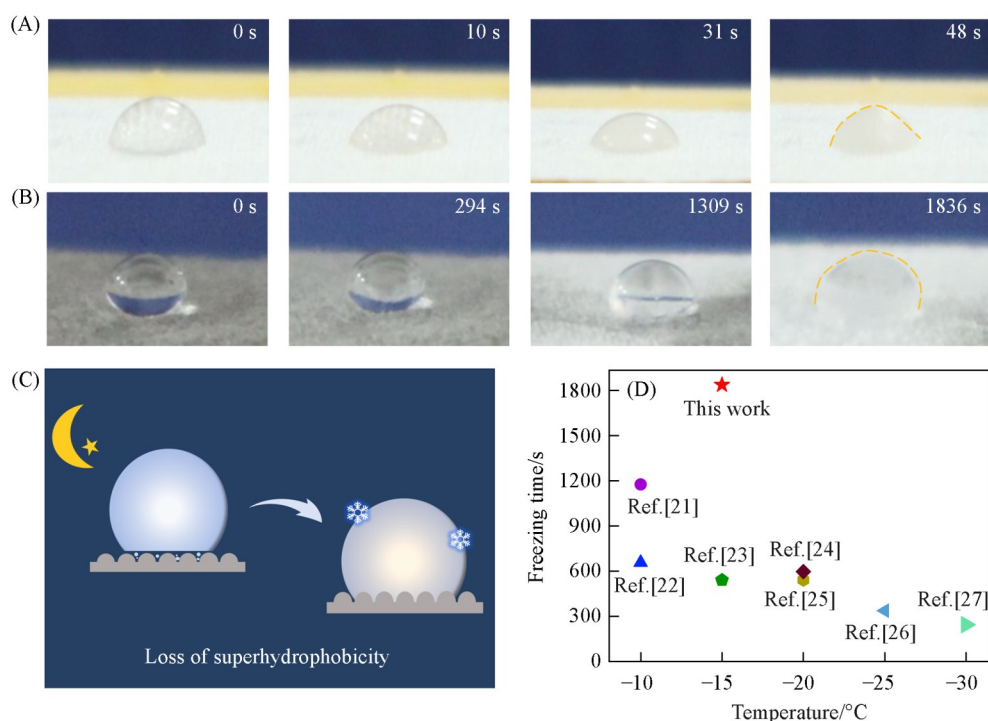


Fig. 5 Passive anti-icing performance

(A) A water droplet freezing process on pristine fabric (A) and CG-SP coating (B) with different time; (C) schematic illustration of freezing process; (D) comparison of anti-icing ability of CG-SP coating with otherwork.

此外, 还研究了 CG-SP 涂层的光热除冰过程。首先, 将一滴约 $20 \text{ }\mu\text{L}$ 的水滴滴加到放置在 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 制冷台上的 CG-SP 涂层表面, 当水滴完全冻结后, 观察其在 1.0 kW/m^2 的光照强度下的融化过程。由图 6(A) 可见, 冻结的液滴在 80 s 内融化, 同时融化的液滴保持球形。可见, PDA 和 CG 的光热协同效应增强了 CG-SP 涂层的光热性能, 从而显著提高除冰效率。考虑到复杂多变的现实条件, 本文测试了在 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 、不同光照强度下 CG-SP 涂层的光热温度和光热除冰能力。当光照强度分别为 $0.4, 0.6, 0.8$ 和 1.0 kW/m^2 时, CG-SP 涂层表面的最高平衡温度分别为 $6.9, 16.1, 26.4$ 和 $36.6 \text{ }^\circ\text{C}$ 。CG-SP 涂层表

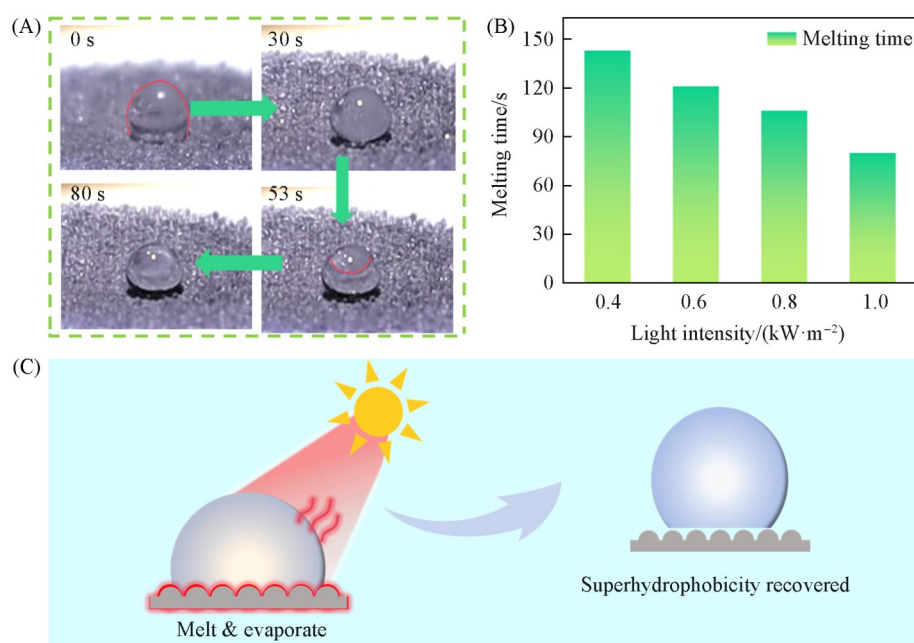


Fig. 6 Optical images of photothermal de-icing of the CG-SP coating under 1.0 kW/m² light intensity(A), ice melting time of CG-SP coating at different light intensities(B) and schematic diagram of photothermal de-icing mechanism for CG-SP coating(C)

面的升温曲线如图S5(见本文支持信息)所示. 图6(B)示出了CG-SP涂层表面在不同光照强度下的融冰时间. 即使在0.4 kW/m²的光照强度下, CG-SP涂层表面结冰液滴也可在3 min内融化. 结果表明, CG-SP涂层在-15 °C的低温下保持优异和持久的光热除冰性能. 光热除冰机理如图6(C)所示, CG-SP涂层表面温度在模拟太阳光照射下迅速升高, 冷冻液滴在短时间内开始从底部融化, 液滴的温度逐渐升高, 冷冻区域缓慢收缩, 直到完全消失.

2.5 机械稳定性和化学稳定性

超疏水涂层在户外应用过程中不可避免地会受到恶劣环境下的物理损伤和化学损伤. 通过砂纸摩擦、扭曲折叠和胶带剥离测试评估了CG-SP涂层的机械耐久性.

砂纸磨损试验如图7(A)所示, 使用夹子固定CG-SP涂层的两端以方便其来回移动, 将涂层放置于2000目的砂纸上, 并用50 g的砝码作为负载, 每个磨损周期的移动距离为10 cm. 经过200次砂纸磨擦后涂层的水接触角(CA)从(157±0.8)°略微降低至(150.1±0.9)°, 滚动角(SA)从(3.2±0.3)°显著增加至(18.5±0.9)°[图7(B)]. 此外, 对CG-SP涂层在摩擦处理后的光热性能进行了测试. 由图7(C)可见, 在1.0 kW/m²的光照强度下, 涂层表面温度迅速升高, 并最终稳定在87.6 °C[图7(C)插图]. 经过200次循环磨损后, 涂层的表面颜色略有变浅, 但水滴在涂层上仍呈球形状态[图7(D)], 表明其表面依然维持着超疏水特性.

此外, 分别进行了1000次的扭曲折叠循环测试和300次的胶带剥离循环测试. 扭曲折叠过程如图S6(A)插图(见本文支持信息)所示. 经过1000次扭曲折叠循环后, CG-SP涂层的CA基本保持不变, 而SA略微升高[图S6(A), 见本文支持信息]. 扭曲折叠循环后, 在1.0 kW/m²光照强度下, 涂层表面温度的变化曲线如图S6(B)(见本文支持信息)所示, 其最高平衡温度可达89.6 °C[图S6(B)插图, 见本文支持信息]. 胶带剥离过程如图S6(C)插图(见本文支持信息)所示. 经过300次胶带剥离循环后, 涂层的CA虽有所变化但仍大于150°[图S6(C), 见本文支持信息]. 在1.0 kW/m²的光照强度下, 涂层表面温度变化曲线如图S6(D)(见本文支持信息)所示, 其平衡温度仍高于85 °C[图S6(D)插图, 见本文支持信息]. 以上结果表明, 涂层在经历机械测试后仍具备优异的超疏水性能, 并保持着良好的光热性能. 这些结果充分证明该CG-SP超疏水光热涂层具有卓越的机械稳定性.

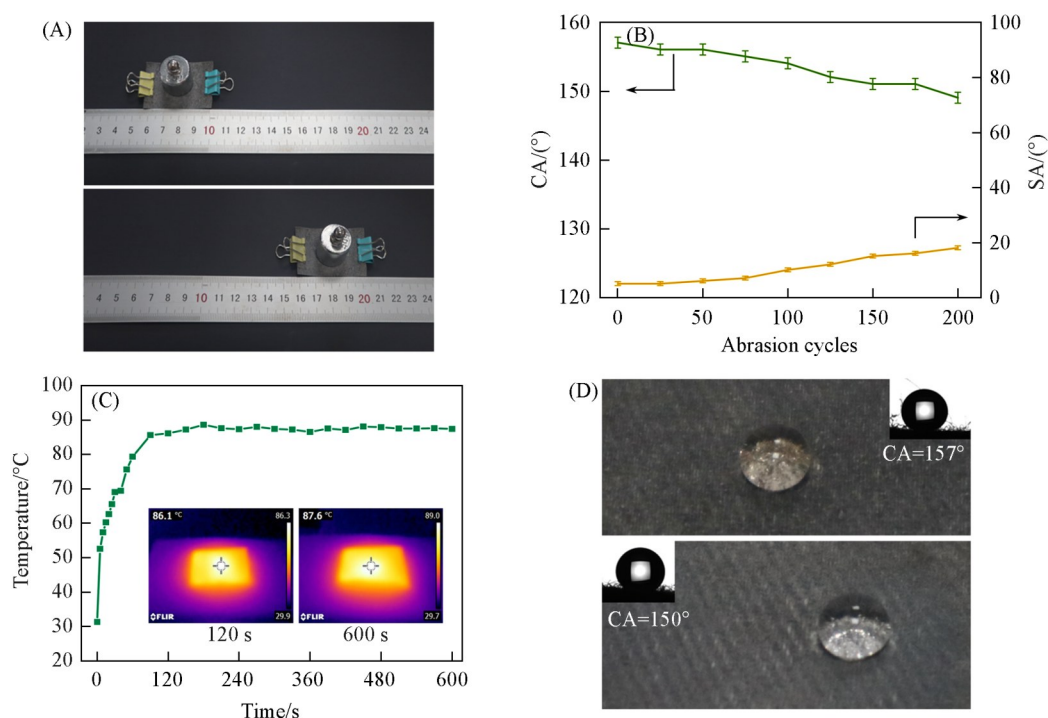


Fig. 7 Sandpaper abrasion resistance performance of the CG-SP coating

(A) Schematic of the sandpaper abrasion test for CG-SP coating; (B) CA and SA changes of abrasion test; (C) temperature variation curves of CG-SP coating under 1 kW/m^2 light illumination after abrasion test; (D) macroscopic surface appearance of CG-SP coating before and after abrasion for 200 cycles.

在实际应用中, 涂层可能长时间暴露于阳光下, 因此对 CG-SP 涂层进行了紫外线照射实验, 以评估涂层的抗老化性能. 将涂层样品置于 150 W 紫外灯下 (距离 30 cm), 每 8 h 检测一次涂层的 CA. 如图 S7(A) [见本文支持信息] 所示, 即使经过 48 h 的紫外线照射, 涂层的 CA 仍保持在 $(151.6 \pm 0.8)^\circ$. 在 1.0 kW/m^2 的光照强度下持续照射 600 s 后, 经过紫外线照射处理的涂层表面温度达到 $85.8 \text{ }^\circ\text{C}$ [图 S8(上), 见本文支持信息]. 此外, 还将 CG-SP 涂层在不同 pH 值的溶液中浸泡 24 h , 以评估涂层的耐化学腐蚀性能. 在强酸和中性溶液中浸泡后, 涂层的 CA 仍保持高于 150° , SA 小于 10° . 而在碱性溶液中浸泡后, 涂层的 CA 降低至 120° [图 S7(B), 见本文支持信息], 且水滴表现出较强的黏附性并附于涂层表面. 为了研究样品的长期热耐久性, 将 CG-SP 涂层于 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 下加热 12 h , 并每 2 h 检测一次样品表面的 CA. 结果表明, 经过长时间的热处理后, CG-SP 涂层的 CA 值没有发生显著变化 [图 S7(C), 见本文支持信息]. 图 S8(下) (见本文支持信息) 显示了煅烧 12 h 后 CG-SP 涂层的红外热成图像图片, 涂层依然保持了优异的光热性能. 以上结果表明, 该样品具有出色的化学稳定性和热稳定性.

3 结 论

通过简单的一锅法制备了煤矸石改性的超疏水光热涂层. 由于煤矸石和 PDA 的光热协同效应, 在 1.0 kW/m^2 的光照强度下, CG-SP 涂层表面温度可达 $90.2 \text{ }^\circ\text{C}$. 得益于涂层的多级结构和低表面能烷基长链, 涂层表面展现出高达 $(157 \pm 0.8)^\circ$ 的水接触角和低至 $(3.2 \pm 0.3)^\circ$ 的滚动角, 从而赋予了涂层优异的自清洁性能, 且能有效避免固体和液体污染物的黏附. 在 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 的低温环境中, CG-SP 涂层表面的水滴冻结延迟时间是无涂层织物的 38.3 倍, 在 1.0 kW/m^2 的光照强度下仅需 80 s 即可快速融化. 此外, 该涂层在承受砂纸摩擦、反复扭曲折叠以及胶带剥离后, 仍能保持超疏水性, 展现了卓越的机械耐久性. 同时, 涂层展现出对高温、紫外线照射及腐蚀性介质的良好耐受性, 体现了卓越的化学稳定性与热稳定性, 确保了其在长期使用环境中的可靠性和稳定性.

支持信息见 <http://www.cjcu.jlu.edu.cn/CN/10.7503./cjcu20250086>.

参 考 文 献

- [1] Guo F. Q., Liu K. L., Yu Q., Yang Q. L., Su P., *Coal Process. Compr. Util.*, **2023**, (8), 89—93, 8(郭富强, 刘昆仑, 俞乔, 杨秦礼, 苏蓬. 煤炭加工与综合利用, **2023**, (8), 89—93, 8)
- [2] Zhang H. L., Teng Z. D., Jiang X. L., Yang Y. M., Li T. G., *Environ. Chem.*, **2024**, *43*(6), 1778—1791(张华林, 滕泽栋, 江晓亮, 杨幼明, 李庭刚. 环境化学, **2024**, *43*(6), 1778—1791)
- [3] Li H., Yang C. M., *J. Nat. Sci. Hunan Norm. Univ.*, **2024**, *47*(1), 1—9(李欢, 杨春明. 湖南师范大学自然科学学报, **2024**, *47*(1), 1—9)
- [4] Song W. Z., Li H., Zhang Y., He D., Li Y. Z., Huang Z. Z., Liu X., Yin W. Z., *Chem. J. Chinese Universities*, **2018**, *39*(12), 2644—2650(宋文植, 李慧, 张艳, 何丹, 李英姿, 黄臻臻, 刘新, 尹万忠. 高等学校化学学报, **2018**, *39*(12), 2644—2650)
- [5] Wu J., Yang X. Y., Jia X. H., Yang J., Miao X., Shao D., Song H. J., Li Y., *Chem. Eng. J.*, **2023**, *471*, 144684
- [6] Jiang H., Gu H. H., Liang F., He G. J., Tian Y., *Chem. J. Chinese Universities*, **2024**, *45*(12), 20240403(姜杭, 谷昊辉, 梁峰, 何冈骏, 田宇. 高等学校化学学报, **2024**, *45*(12), 20240403)
- [7] Chai Z. C., Fang. M. H., Min. X., *Nano Energy*, **2024**, *124*, 109437
- [8] Guo Y., Zhao H. B., Zhang. C. S., Zhao G. Q., *Chem. Eng. J.*, **2024**, *497*, 154383
- [9] Zhang F., Yan H. J., Chen M. J., *Small*, **2024**, *20*(32), 2312226
- [10] Zhang H. L., Zhao M. F., Jiang X. L., Tian S. J., Teng Z. D., Li T. G., *Acta Chimica Sinica*, **2024**, *82*(5), 527—540(张华林, 赵梦飞, 江晓亮, 田少静, 滕泽栋, 李庭刚. 化学学报, **2024**, *82*(5), 527—540)
- [11] Peng L. G., He Y. G., Zhang L. Q., Cheng H. Q., Ding Z. Y., Zhang J. K., *Appl. Chem. Ind.*, **2023**, *52*(7), 2184—2187(彭龙贵, 何毓刚, 张亮青, 程焕全, 丁治玉, 张金魁. 应用化工, **2023**, *52*(7), 2184—2187)
- [12] Zhang C. S., Deng Y. X., Wu Q. S., *J Environ. Eng.*, **2013**, *7*(8), 3170—3174(张长森, 邓育新, 吴其胜. 环境工程学报, **2013**, *7*(8), 3170—3174)
- [13] Yang C. Y., Liu L. J., Shang Z. B., Li D. L., Zhong R. F., Chang Z. X., *J. Chem. Res.*, **2020**, *31*(5), 400—404(杨长钰, 刘兰靖, 尚中博, 李德亮, 种瑞峰, 常志显. 化学研究, **2020**, *31*(5), 400—404)
- [14] Zhang L. M., Zhang K. Q., Yang Q. Y., Tang S. M., *West China Commun. Sci. Technol.*, **2020**, (5), 19—24(张立明, 张坤球, 姚青云, 唐双美. 西部交通科技, **2020**, (5), 19—24)
- [15] Li Y., Yan S. W., Jia X. H., Wu J., Yang J., Zhao C. X., Wang S. Z., Song H. J., Yang X. F., *Appl. Catal. B Environ*, **2021**, *287*, 119926
- [16] Li Y., Li H., Wu J., Jia X. H., Zhang Z. Y., Yang J., Miao X., Feng L., Song H. J., *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **2023**, *11*, 10566—10577
- [17] Cheng S. J., Latthe S. S., Nakata K., Xing R. M., Liu S. H., Fujishima A., *Mater. Today Chem.*, **2024**, *35*, 101868
- [18] Li Y., Li H., Wu J., Yang X. Y., Jia X. H., Yang J., Shao D., Feng L., Wang S. Z., Song H. J., *Appl. Surf. Sci.*, **2022**, *600*, 154177
- [19] Li R., Li Y., Jia X. H., Yang J., Miao X., Shao D., Feng L., Wang S. Z., Wu J., Song H. J., *Ceram. Int.*, **2023**, *49*, 14635—14644
- [20] Xuan S. S., Yin H., Li G. Q., Zhang Z. X., Jiao Y., Li J. H., Liu S. Y., Wang Y., Tang C. N., Wu W. M., Li G. L., Yin K., *ACS Nano*, **2023**, *17*(21), 21749—21760
- [21] Fu P. A., Ou J. F., He Y. J., Hu Y. T., Wang F. J., Fang X. Z., Li W., Amirfazli A., *Surf. Interfaces*, **2024**, *45*, 103890
- [22] Hao S. S., Zhan Y. L., Li W., Zhao W. X., Amirfazli A., *Adv. Eng. Mater.*, **2024**, *26*(7), 2301948
- [23] Huang X. C., Sun M., Shi X., Shao J. L., Jin M. H., Liu W. N., Zhang R. H., Huang S. W., Ye Y. M., *Chem. Eng. J.*, **2023**, *454*, 139981
- [24] Liu Z. Y., Hu J. H., Jiang G., *Surf. Coat. Tech.*, **2022**, *444*, 128668
- [25] Wu L. S., Liu P., Hua X. C., Guo Z. G., Liu W. M., *Chem. Eng. J.*, **2024**, *480*, 147553
- [26] Yuan Y., Zhang C. Z., Jiang B. C., Lei Y. H., Li Z. T., Sun K., Zhang Y. L., *Prog. Org. Coat.*, **2024**, *196*, 108725
- [27] Zhou X. D., Zhai Z. Q., Wang J. S., Wang T., Zheng H. Y., Wu Y. L., Yan C. Y., Liu M. M., *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2024**, *6*(12), 7137—7147

(Ed.: W, K, M)