第 52 卷 第 6 期：2554-2566　　高电压技术　　Vol.52, No.6: 2554-2566
2026 年 6 月 30 日　　High Voltage Engineering　　June 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250884

CuS 增强光热超疏水复合材料的制备及防冰性能

陈　智[1]，张　蓉[2]，李欣然[2]，朱仕惠[1]，陈俊武[3]，谢　毅[2]
（1. 武汉疏能新材料有限公司，武汉 430080；2. 硅酸盐科学与先进建材全国重点实验室(武汉理工大学)，武汉 430070；3. 华中科技大学电气与电子工程学院，武汉 430074）

摘　要：导线、绝缘子等电力设备或器件覆冰问题严重威胁着电力系统的安全运行。该研究发展了一种 CuS 增强的新型光热超疏水 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 纳米复合颗粒及涂层的室温制备方法，探索了所制备材料的光热转换性能及防除冰性能，并展示了其在导线、绝缘子防冰领域的实际应用。首先通过在制备 CuS 的反应过程中引入 Fe_3O_4 纳米颗粒，得到 CuS-Fe_3O_4 复合颗粒；通过原位合成及表面修饰反应获得了甲基修饰的 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 复合颗粒。以树脂基分散液为底漆、CuS-Fe_3O_4@SiO_2 为面漆，喷涂制备了光热超疏水防冰涂层。经优化配方和工艺，所制备的 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层在–30 ℃、1.0 sun(1 sun=1 000 W/m²)条件下其表面水滴冻结时间达 674 s，较纯 SiO_2 超疏水涂层提升了 428 s；在–15 ℃、≥0.8 sun 条件下，即使 3 000 s 后涂层表面水滴仍无冻结现象，表现出了优异的防/除冰性能。此外，所制备的防冰涂层具有良好的机械耐磨性、耐腐蚀性及自清洁性。

关键词：超疏水涂层；光热材料；CuS；CuS-Fe_3O_4@SiO_2 复合颗粒；防冰

Preparation and Anti-icing Application of CuS-enhanced Photothermal Superhydrophobic Composites

CHEN Zhi[1], ZHANG Rong[2], LI Xinran[2], ZHU Shihui[1], CHEN Junwu[3], XIE Yi[2]
(1. Wuhan Shuneng New Material Co., Ltd., Wuhan 430080, China; 2. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures (Wuhan University of Technology), Wuhan 430070, China; 3. School of Electrical and Electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The icing on power equipment and components such as wires and insulators poses a serious threat to the safe operation of power systems. We developed a room-temperature preparation approach for a CuS-enhanced superhydrophobic photothermal(SHP)CuS-Fe_3O_4@SiO_2 nanocomposite and coating,and explored the photothermal conversion,anti-icing performance, and practical anti-icing application of the CuS-Fe_3O_4@SiO_2 in wires and insulators. First, CuS-Fe_3O_4 composites were synthesized by introducing Fe_3O_4 nanoparticles during the preparation of CuS. Methyl groups-modified CuS-Fe_3O_4@SiO_2 composites were then obtained through an in-situ reaction and surface modification. The SHP anti-icing coating was prepared by sequential spraying a resin-based primer and a CuS-Fe_3O_4@SiO_2 topcoat. The freezing time of the water droplet on the optimal photothermal superhydrophobic CuS-Fe_3O_4@SiO_2 coating was 674 s at −30 ℃ under 1.0 sun, which was 428 s longer than that of water droplets on SH SiO_2 coatings. Notably, at −15 ℃ and under ≥0.8 sun illumination, no freezing occurred on the CuS-Fe_3O_4@SiO_2 coating even after 3 000 s, confirming an excellent delayed icing performance. Additionally, the CuS-Fe_3O_4@SiO_2 coating exhibits excellent mechanical wear resistance, corrosion resistance, and self-cleaning properties.

Key words: superhydrophobic coating; photothermal material; CuS; CuS-Fe_3O_4@SiO_2 composite; anti-icing

0　引言

覆冰作为一种自然现象，对农业、航空业、电气化铁路等多个领域构成了严重威胁。尤其在电力系统中，冬季覆冰问题严重影响着电力设施运行的可靠性和安全性。例如，输电线路覆冰导致的线路断线、杆塔倒塌、绝缘子闪络等问题在我国云贵、四川等地区时常发生，给电力系统造成了巨大的损失[1]。当前电力系统防冰主要依靠传统的热力融冰、机械除冰、液体除冰等技术，存在能耗高、效率低、安全性低、污染环境等缺点。近年发展起来的超疏水涂层材料，因其独特的表面微结构、极高的水接触角(water contact angle, WCA)和极低的滚动角(water sliding angle, WSA)等特性，为解决电力设施

表面的防除冰难题提供了一种新思路[2-3]。然而，传统超疏水涂层表面在低温高湿的环境中，防除冰效果会大幅降低，因此仅靠超疏水材料本身并不能完全解决防冰问题。

在此背景下，将具有光热转换能力的光热材料与超疏水材料相结合，构筑光热超疏水材料并应用于防/除冰领域，已成为研究热点[2,4-5]。超疏水涂层的微纳米结构可通过捕获空气降低水滴与涂层表面的接触面积，从而抑制结冰或延缓结冰时间[6]；光热组分可将太阳能转化为热能，并利用光热转换产生的热量提高水-固接触点的局部温度或融化已附着的冰层，从而起到延迟结冰或实现快速、无残留的除冰效果，这种协同机制使得光热超疏水材料兼具防覆冰和除冰双重功能[7-8]。

目前，基于 Fe_3O_4、MXene、石墨烯、碳纳米管等的光热超疏水材料及其防冰/除冰性能已被广泛研究[9-10]。其中，Fe_3O_4 纳米颗粒因其价廉、无毒、可回收、磁响应特性等诸多优点，在光热防覆冰领域备受关注。例如，Lei 等人采用氟改性环氧树脂作为树脂基体[11]，Fe_3O_4@PPy 作为光热填料，制备出具有卓越机械耐久性和耐腐蚀性能的防冰超疏水涂层，其表面 WCA 高达 158.7°，WSA<1°；在−20 ℃环境下可将水滴冻结时间延长至 524 s。Deng 等人通过原位包覆介孔 SiO_2 纳米颗粒(mesoporous silica nanoparticles, MSN)于 Fe_3O_4 表面，并负载聚二甲基硅氧烷(mesoporous silica nanoparticles, PDMS)，获得核壳结构 Fe_3O_4@MSN-PDMS 复合材料，经喷涂法将其掺入有机硅树脂构建防/除冰涂层[12]。该涂层展现优异的超疏水性(WCA 可达 156.7°)，且能在−20 ℃环境下将结冰时间延迟至 412 s。

然而，Fe_3O_4 应用于光热防/除冰领域仍面临诸多挑战：首先，Fe_3O_4 磁性纳米粒子的高比表面积使其在空气中易引发氧化团聚现象，会导致长期使用中光热性能衰减及涂层结构稳定性下降；其次，尽管 Fe_3O_4 具有成本优势，但其光吸收性能及光热转换效率较 CuS 等新型光热材料较差[13]；此外，要想将 Fe_3O_4 光热颗粒引入超疏水涂层材料体系，通常需通过复杂工艺构建微纳粗糙结构并进行低表面能修饰，但其团聚倾向会破坏涂层均匀性，导致疏水性能劣化。上述问题使得 Fe_3O_4 颗粒难以满足防冰涂层对长效稳定性和高效光热协同的要求。

针对上述问题，本文基于 CuS 具有优异近红外局域表面等离子体共振效应(localized surface plasmon resonances, LSPRs)的特性，发展了 Fe_3O_4 与 CuS 两种光热材料的复合策略，克服了单一 Fe_3O_4 在防冰应用中的局限性问题，增强材料的光热转换效率并实现自洁功能。基于 CuS-Fe_3O_4 光热复合颗粒的制备，展示了光热超疏水涂层的光热转换性能及其在导线、绝缘子防覆冰领域中的应用，研究成果为电力系统设备和器件的防/除冰问题提供了一种简便、高效的解决方案。

1　材料的制备与表征

1.1　CuS-Fe_3O_4 光热复合颗粒的制备

以下反应步骤均在磁力搅拌状态下进行：称取 0.488 g $Cu(Ac)_2·H_2O$(1.7 mmol)溶于 100 mL 去离子水中，得到淡蓝色 Cu^{2+}溶液(0.017 mol/L)；称取 1.25 mL 的 3-巯基丙酸(MPA)溶液(0.2 mol/L，溶剂为水)并在其中加入 0.134 g 的 Fe_3O_4 纳米颗粒(粒径为 400~500 nm)，搅拌处理 30 min，使 Fe_3O_4 颗粒在 MPA 溶液中充分进行表面活化，得到 Fe_3O_4-MPA 混合液；称取 0.84 g $Na_2S·9H_2O$(3.4 mmol)溶于 25.7 mL 去离子水中，得到无色透明的 S^{2-}溶液(0.136 mol/L)；将上述 Fe_3O_4-MPA 溶液加入到 S^{2-}溶液中，得到 S^{2-}-Fe_3O_4-MPA 前驱液；进一步将所得 S^{2-}-Fe_3O_4-MPA 前驱液缓慢滴加到所得 Cu^{2+}溶液中，并继续搅拌反应 4 h 后，对形成的黑绿色 CuS-Fe_3O_4 复合颗粒分散液采用水和乙醇(EtOH)进行洗涤和离心提纯，最后加入 25 mL 的 EtOH 溶液分散均匀，得到黑色的 CuS-Fe_3O_4 复合颗粒分散液(摩尔比为 $n(Fe_3O_4):n(CuS)=1:3$)。

1.2　CuS-Fe_3O_4@SiO_2 复合颗粒的制备

在机械搅拌状态下，在上述所得 CuS-Fe_3O_4 复合颗粒分散液中依次加入 1.5 mL NaOH 溶液(1.8 mol/L)和 5 mL 正硅酸四乙酯(TEOS)，搅拌 24 h；TEOS 充分水解形成羟基修饰的 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 复合颗粒；进一步加入 5.0 mL 六甲基二硅氨烷(HMDS)进行表面修饰反应，持续搅拌 12 h 后，得到甲基修饰的 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 光热复合颗粒。

1.3　CuS-Fe_3O_4@SiO_2 基光热超疏水涂层的制备

采用乙酸丁酯作为溶剂制备改性树脂基分散液。借助磁力搅拌，先将 18 g 羟基丙烯酸树脂(FX-9024)完全溶于 60 mL 乙酸丁酯中；随后依次加入 3 g 氟碳树脂、8 g 醇酸树脂、2.5 g 聚丙烯树脂、0.6 mL KH550 水溶液(预先将 0.12 mL KH550 溶于

0.18 mL 水中)、2 g 尼龙粉末，持续搅拌 12 h，获得改性树脂基分散液。

以玻璃为基底，在基底表面先喷涂树脂基分散液，表干后得到树脂基底漆。喷嘴直径为 1.5 mm，压力为 200~2 500 kPa 的喷枪，喷嘴到基底表面的距离为 10~15 cm；基底倾斜 30°放置。喷涂过程中控制喷枪匀速移动，从左至右从上至下交替喷涂以使涂层厚度尽量均匀。在表干的底漆表面喷涂 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 复合颗粒，自然风干 24 h 以使涂层固化完全，即得 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 光热超疏水复合防冰涂层(SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2)。

1.4 材料表征

采用透射电镜(TEM，JEM 2100F 型)测试颗粒的微观形貌，扫描电镜(SEM，日立 S-4800 型)表征涂层表面形貌。采用 X 射线衍射仪(XRD，Bruker D8 型)分析样品的物相与晶格参数。采用傅里叶红外光谱仪(FTIR，Nicolet 6700 型)分析涂层表面化学结构。采用紫外-可见-近红外(UV-Vis-NIR)分光光度计(UV-3600 型)测定样品的光吸收性能。采用氙灯(CEL-S500-T5 型)模拟太阳光，用光功率计(CEL-FZ-A 型)测定光强。采用红外热成像仪(FLIR E6-xt 型)记录光照下涂层表面温度变化。

2 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 复合颗粒及涂层的微观形貌表征

2.1 CuS-Fe_3O_4 光热复合颗粒的表征

通过 TEM、XRD 及分光光度计对 Fe_3O_4 与 CuS 摩尔比为 1:3(n(Fe_3O_4):n(CuS)=1:3)的 CuS-Fe_3O_4 复合颗粒进行表征(见图 1)。首先，TEM 图像可见，所得复合颗粒团聚，团聚体粒径约为 400 nm(见图 1(a))。其对应的高分辨 TEM(HRTEM)分析显示两种晶格间距(见图 1(b))，其中 0.253 nm 的晶格间距对应于 Fe_3O_4 的(311)晶面，0.28 nm 的晶格间距对应于铜蓝矿相 CuS 的(103)晶面，表明形成了 CuS 与 Fe_3O_4 的复合颗粒。

XRD 谱图进一步分析了复合颗粒晶相组成。如图 1(c)所示，CuS-Fe_3O_4 复合颗粒(蓝色曲线)在 2θ 为 31.9°、43.1°、47.9°、52.7°和 58.7°处显示出的特征峰可分别归结为铜蓝矿相 CuS(JCPDS No.00-006-0464)的(103)、(106)、(110)、(108)和(203)的衍射面，而在 2θ 为 30.1°、35.4°、43.0°、56.9°和 62.5°的特征峰可归结为磁铁矿相 Fe_3O_4(JCPDS No.01-072-2303)的(220)、(311)、(400)、(511)和(440)的衍射面，说明复合材料中同时存在 CuS、Fe_3O_4 两种晶相，为后续制备光热超疏水涂层并实现光热防冰应用提供了依据。

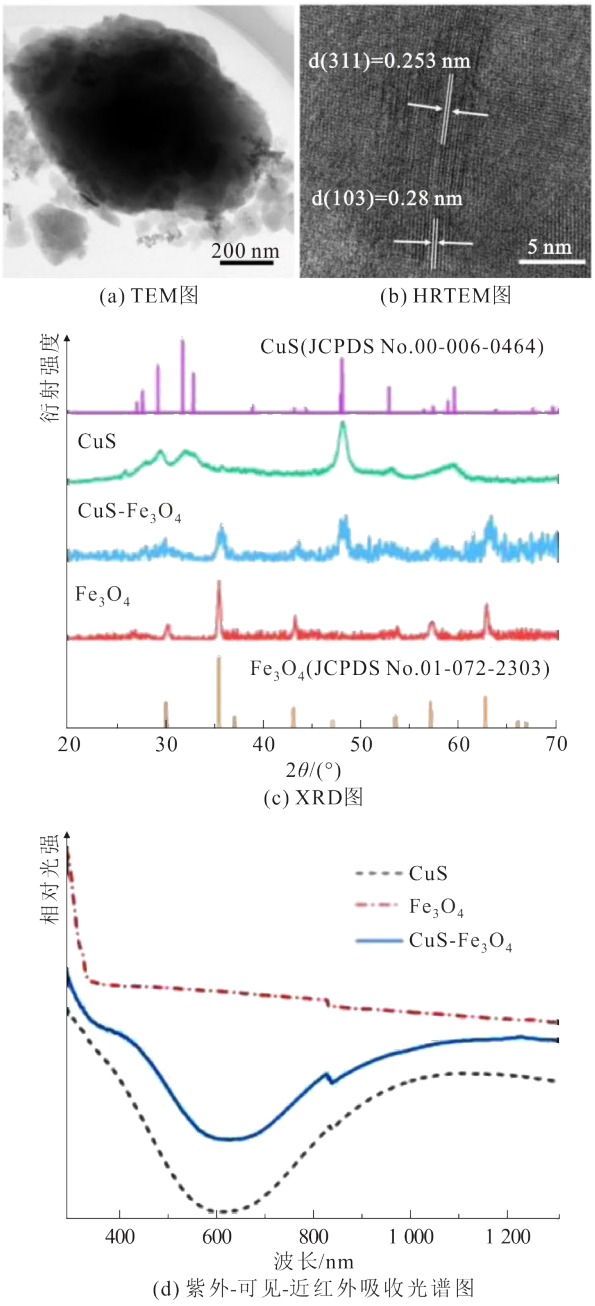


图 1 CuS-Fe_3O_4 光热复合颗粒的 TEM 图像、HRTEM 图像、XRD 谱图以及 UV-Vis-NIR 吸收光谱图

Fig.1 TEM image, HRTEM image,XRD patterns and UV-Vis-NIR absorption spectra of CuS-Fe_3O_4 photothermal composites

UV-Vis-NIR 吸收光谱图展示了复合颗粒的光吸收性能。如图 1(d)所示，相较于 Fe_3O_4 光热颗粒在 300~400 nm 范围内出现单一弱峰，CuS-Fe_3O_4 复合颗粒在 300~1 400 nm 范围内融合了 Fe_3O_4 与 CuS

的吸收峰，形成了协同吸收特性。其中 700~1 400 nm 的宽峰代表 CuS 对近红外光区的强吸收，归因于 CuS 的 LSPRs 效应[14-15]。

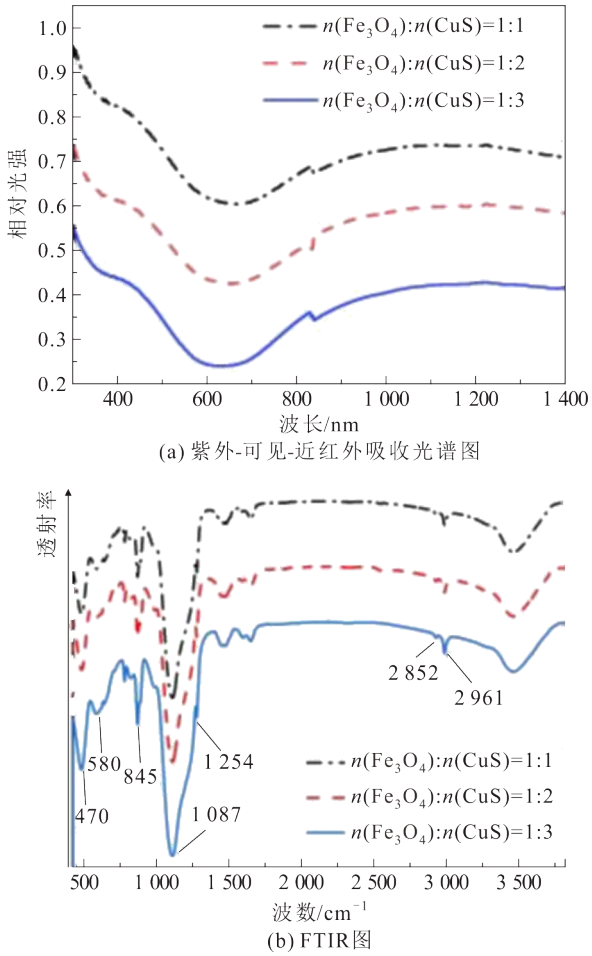
2.2　CuS-Fe_3O_4@SiO_2 超疏水涂层的表征

采用双层喷涂工艺：先在玻璃基底上喷涂树脂基底漆，再涂覆甲基改性的光热超疏水 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 面漆，制备了系列光热超疏水 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层(SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2)。保持 SiO_2 含量恒定，通过调控复合颗粒中 Fe_3O_4 与 CuS 的摩尔比(设计为 $n(Fe_3O_4)$:n(CuS)=1:1、1:2 及 1:3)，以对涂层的结构性能进行优化。

首先利用 UV-Vis-NIR 吸收光谱仪测试了系列涂层的光吸收性能。如图 2(a)所示，涂层在 300~400 nm(对应 Fe_3O_4 的 d-d 电子跃迁[16])、400~1 400 nm(对应 CuS 的 LSPRs 效应[17])范围内表现出显著的吸收峰。通过系统调控 CuS 与 Fe_3O_4 的配比发现：随着光热复合颗粒中 CuS 比例的增加，位于近红外区的光谱吸收强度呈现增强趋势，表明涂层的光吸收性能相应增强。其协同增强效应可通过光谱互补效应[18-19]来解释：Fe_3O_4 在紫外-可见区的吸收(300~400 nm)与 CuS 在可见-近红外光区的强吸收形成宽谱覆盖，两种光热颗粒在宽谱范围内形成互补吸收，从而提升了全波段光利用率。

通过 FTIR 对系列 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 样品进行分析，如图 2(b)所示，在 470~2 961 cm^{-1}范围内呈现出多个特征吸收峰。其中 2 852、2 961 cm^{-1}处的吸收峰对应 C—H 键伸缩振动[20]；1 087 cm^{-1}处的强吸收峰对应 Si—O—Si 的不对称伸缩振动，表明 SiO_2 骨架的成功构建；而 845、1 254 cm^{-1}处的特征峰对应 Si—CH_3 基团的拉伸振动，证明复合材料表面经甲基基团修饰。另外，580 cm^{-1}处的吸收峰对应 Fe—O 键的伸缩振动[21]，而 470 cm^{-1}处的吸收峰对应 Cu—S 键的弯曲振动，分别证实了 Fe_3O_4 和 CuS 的存在。值得注意的是，保持其他条件恒定，通过调控 CuS 与 Fe_3O_4 的配比发现：随着光热复合颗粒中 CuS 比例的增加，涂层样品在 470 cm^{-1}处的特征峰强度呈现增强趋势。可见涂层的光热转换性能可根据调控 CuS 与 Fe_3O_4 的比例来调控。

基于以上研究结果，选择最优配比($n(Fe_3O_4)$:n(CuS)=1:3)进行典型 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 复合光热超疏水涂层的制备。通过 SEM 图像观察涂层表面及断面的微观形貌。由图 3(a)可见，涂层表面呈现出均匀的微纳米级突起结构，微米级突起状沉积物粒径在 50~100 μm 之间，主要由树脂基底漆中尼龙粉等微米颗粒形成。另外，单个突起结构表面还呈现出层状粗糙结构(见图 3(a)第 3 张图)，该结构是由纳米级 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 颗粒堆积得来。涂层断面结构 SEM(图 3(b))表面，涂层厚度大约为 100 μm；除了树脂基底漆的表面，部分 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 复合颗粒在喷涂压力的作用下嵌入底漆层内部，且 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 复合颗粒的浓度从底漆表面到底漆-基底界面逐渐降低，呈现出梯度分布特征(图 3(b)第 3 张图)。这种梯度结构有助于提高防冰涂层的超疏水性以及耐磨性[22]。材料表面改性与微纳米结构相结合是获得超疏水表面的有效手段，结果表明，制备的 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 复合涂层表面的水静态接触角(WCA)为 158.5°，滚动角(WSA)为 1°，呈现出优异的超疏水性能。

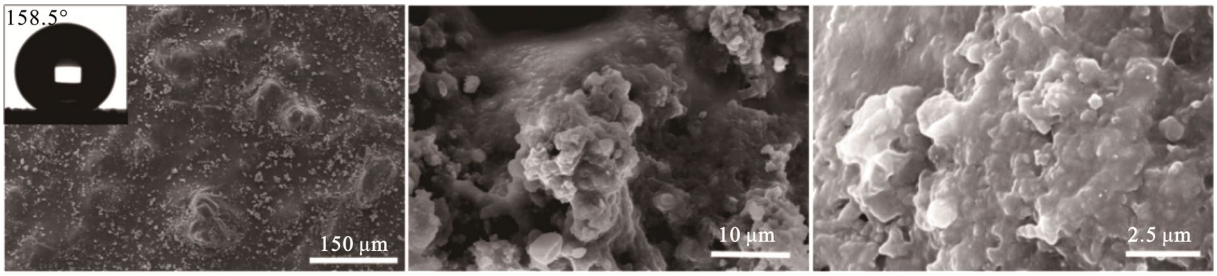


(a) 紫外-可见-近红外吸收光谱图

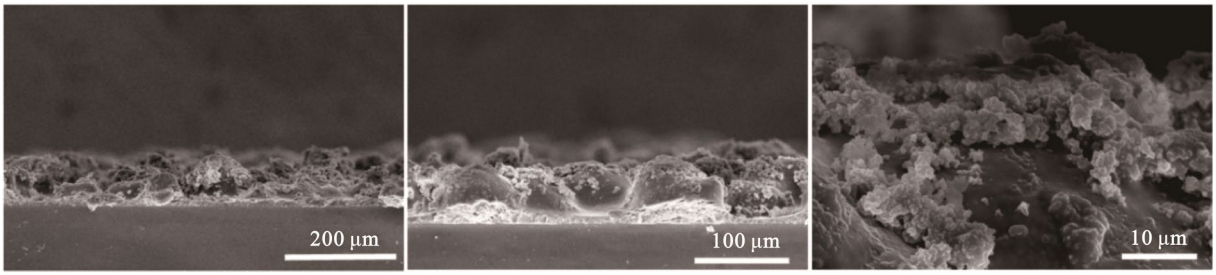
(b) FTIR图

图 2　不同配比制备的系列 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 光热复合材料的 UV-Vis-NIR 吸收光谱图以及 FTIR 光谱图

Fig.2　The UV-Vis-NIR absorption spectra and the FTIR spectra of the CuS-Fe_3O_4@SiO_2 photothermal composite prepared with different ratios of Fe_3O_4 and CuS



(a) 表面微观形貌图及接触角



(b) 断面微观形貌图

图 3 典型 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层表面和断面的不同放大倍数的 SEM 图像及水接触角照片

Fig.3 SEM images with different magnifications of the representative SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 coating surface and cross-section, along with the photograph of WCA

3 涂层光热温升性能研究

3.1 实验方法

为评估光热防冰涂层的光热转换性能，利用氙灯模拟太阳光照对典型 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层进行了光热温升性能测试。为进行对照，还制备了只含一种光热颗粒 Fe_3O_4 的光热超疏水涂层(SHP Fe_3O_4@SiO_2)：保持其他制备条件恒定，且固定所添加的光热颗粒(即 Fe_3O_4)总含量不变。

3.2 实验结果及分析

在 1 个太阳光光强(1 sun=1 kW/m^2)照射下，两种光热超疏水(SHP)涂层相较纯超疏水(SH)涂层和玻璃基底，表现出显著的光热温升性能(见图 4)。在 200 s 和 300 s 内，SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层表面温度由 27.9 ℃分别升高到 85.1 ℃和 90.3 ℃，在同样时间内相较于 SHP Fe_3O_4@SiO_2 涂层表面的温升分别提高了 4.2 ℃和 3.3 ℃，证明了 CuS 的引入具有显著的协同增强光热转换性能。此外，为评估样品不同光强下的温升效果，还测试了其在 0.3 sun、0.5 sun、0.8 sun 光强条件下的表现。结果表明，即使在 0.3 sun 的弱光照射下，涂层表面温度仍然可达 60.5 ℃(见图 4(b))，表明 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层具有出色、稳定的光热温升特性。

4 涂层防/除冰性能研究

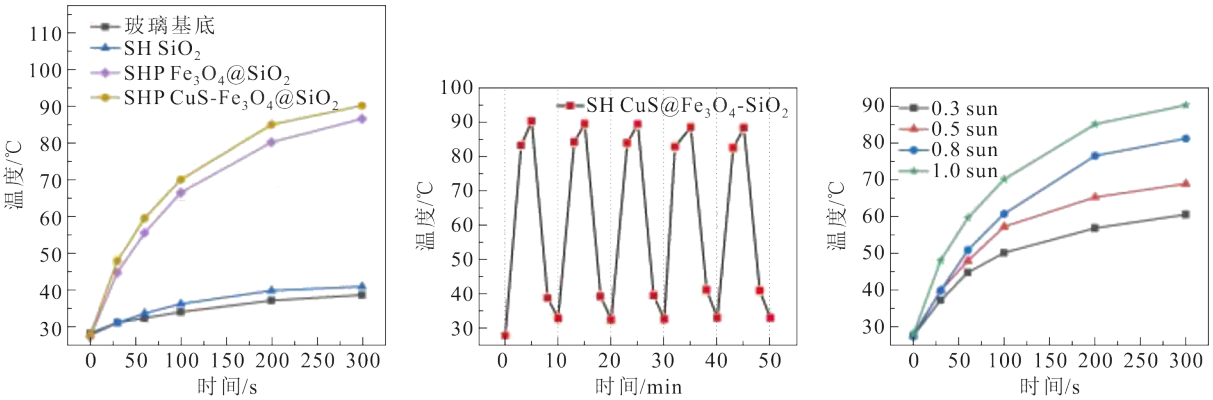
4.1 实验方法

电力设备表面覆冰对其安全运行和效益具有严重负面影响[23-24]。防/除冰实验在自行搭建的实验装置上(如图 5)进行，该装置由 4 部分组成：太阳光模拟器(氙灯)、冷凝装置、隔热箱和录像设备。模拟太阳光灯光强可调，利用红外热成像仪及温度计对温度进行监测。通过录像设备和计时器监测亚甲基蓝(MB)液滴在涂层表面的冻结时间及冰块在涂层表面融化的时间，研究防冰涂层的防/除冰性能。

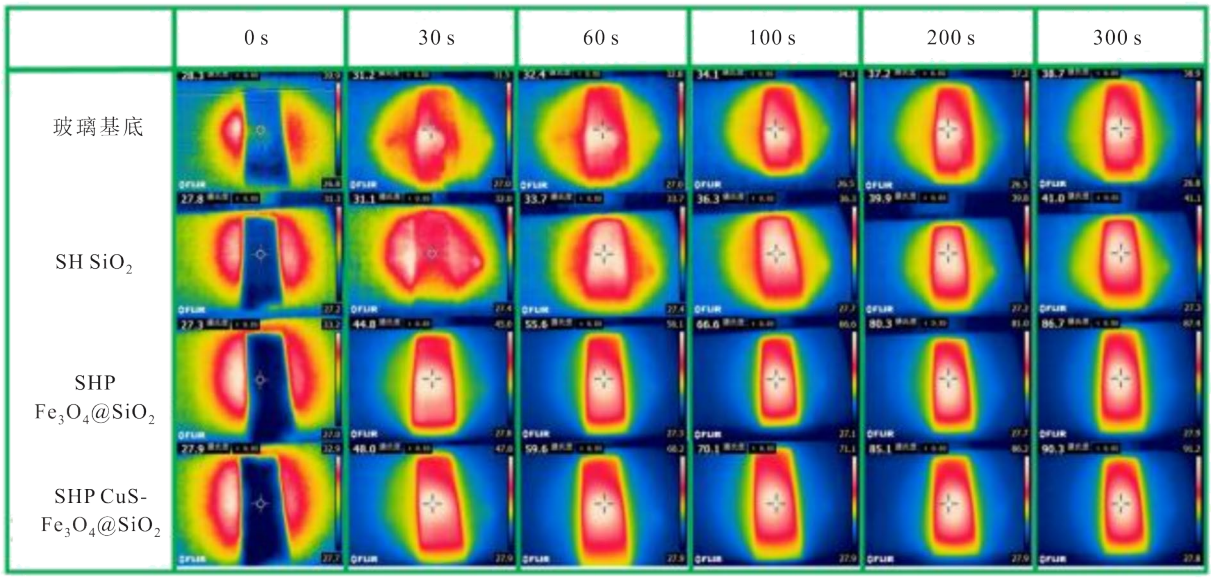
具体地，进行了以下几组实验：

(1)对比各涂层在相同环境温度(−30 ℃)、无光照条件下的延迟结冰时间：将玻璃基底(glass slide)、疏水树脂基涂层(hydrophobic resin-based coating)、普通超疏水 SiO_2 涂层(SH SiO_2 coating)、两种光热超疏水涂层(SHP Fe_3O_4@SiO_2、SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2)作为对照组，对比 5 种样品在−30 ℃、黑暗环境下的延迟结冰时间。黑暗条件下，将 5 种样品置于−30 ℃的冷凝台上，待涂层表面温度稳定至−30 ℃时，滴加等量(50 μL)MB 液滴于涂层表面并计时，记录液滴的完全结冰时间。

(2)对比光热超疏水防冰涂层(SHP Fe_3O_4@SiO_2、SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2)与 SH SiO_2 涂层在



(a) 各涂层在1 sun下照射5 min的时间-温度图　(b) SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层在循环升温测试中的时间-温度图　(c) SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层在不同光强下的时间-温度图



(d) 各涂层在1 sun下照射5 min对应的热红外成像图(对应图(a))

图 4　SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层与其他对照组(玻璃基底、纯 SiO_2 涂层和 SHP Fe_3O_4@SiO_2 涂层)在光照下的时间-温度曲线图

Fig.4　Time-temperature curves of the SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 coating and other control groups (the glass slide, SH SiO_2 coating, and the SHP Fe_3O_4@SiO_2 coating) under light irradiation

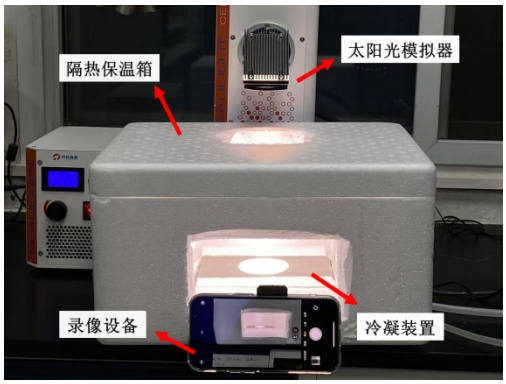


图 5　光热防冰实验装置图

Fig.5　Photothermal anti-icing experimental setup diagram

相同环境温度(−30 ℃)、不同光照强度(0.3、0.5、0.8、1 kW/m^2)下的延迟结冰时间：将涂层置于−30 ℃的冷凝台上，待涂层表面温度稳定至−30 ℃时，滴加等量(50 μL)MB 液滴，立即打开氙灯照射涂层表面并计时，记录液滴的完全结冰时间。

(3)对比 SH SiO_2、SHP Fe_3O_4@SiO_2 和 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层在相同光强(1 kW/m^2)、不同环境温度(−30、−20、−15 ℃)下的延迟结冰时间，方法同(2)。

(4)对比了 SH SiO_2、SHP Fe_3O_4@SiO_2、SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 在相同光强(1 sun)、相同温度(−15 ℃)、相同相对湿度(70%±5%)下的融冰时间，考察光热涂层材料的融冰性能。在相同尺寸(5 cm×5 cm)的 3 种涂层样品表面预制相同尺寸

(2 cm×2 cm×1.5 cm)的冰块，样品固定于冷凝台上，冷凝台与水平面呈 30°倾角且温度设置为−15 ℃。打开氙灯照射涂层表面，记录冰块融化情况及其从样品表面脱落所需时间。

4.2 实验结果及分析

通过设置对照组涂层以及不同实验条件等参数，对比研究了 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 防冰涂层与其他几种涂层表面的延迟结冰效果，评估了典型 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层的防冰性能[25]。MB 液滴在所有涂层样品结冰过程中均经历了从蓝色透明到不透明的转变。随后冰锋自下而上逐渐延伸至水滴顶端，最终形成桃尖状形态，标志着结冰过程完成并记录为结冰时间[26]。结果如图 6 所示。

首先，探究了几种涂层在低温、无光照环境下的防冰性能(图 6a)。结果表明，SH SiO_2 涂层与两种 SHP 涂层在相同温度下表现出相近的延迟结冰时间。相较于未镀膜玻璃与疏水性树脂基涂层，SH SiO_2 涂层和两种 SHP 涂层表面水滴的冻结时间显著延长。具体而言，在−30 ℃、黑暗环境中，亲水性未镀膜玻璃与疏水性树脂基涂层表面水滴分别在 37 s 和 99 s 后完全冻结，而 SH SiO_2、SHP CuS@SiO_2 与 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层表面冻结时间分别延长至 229 s、284 s 和 295 s。可见，SH SiO_2 涂层和两种 SHP 涂层在黑暗条件下延迟结冰性能远优于亲水性未镀膜玻璃与疏水性树脂基涂层，其协同机制为：(1)超疏水涂层与水滴固-液界面处存在空气垫层；(2)涂层微纳多级结构大幅降低固-液接触面积；(3)引入的 Fe_3O_4、CuS-Fe_3O_4 光热颗粒增加了涂层表面的粗糙度[27]。

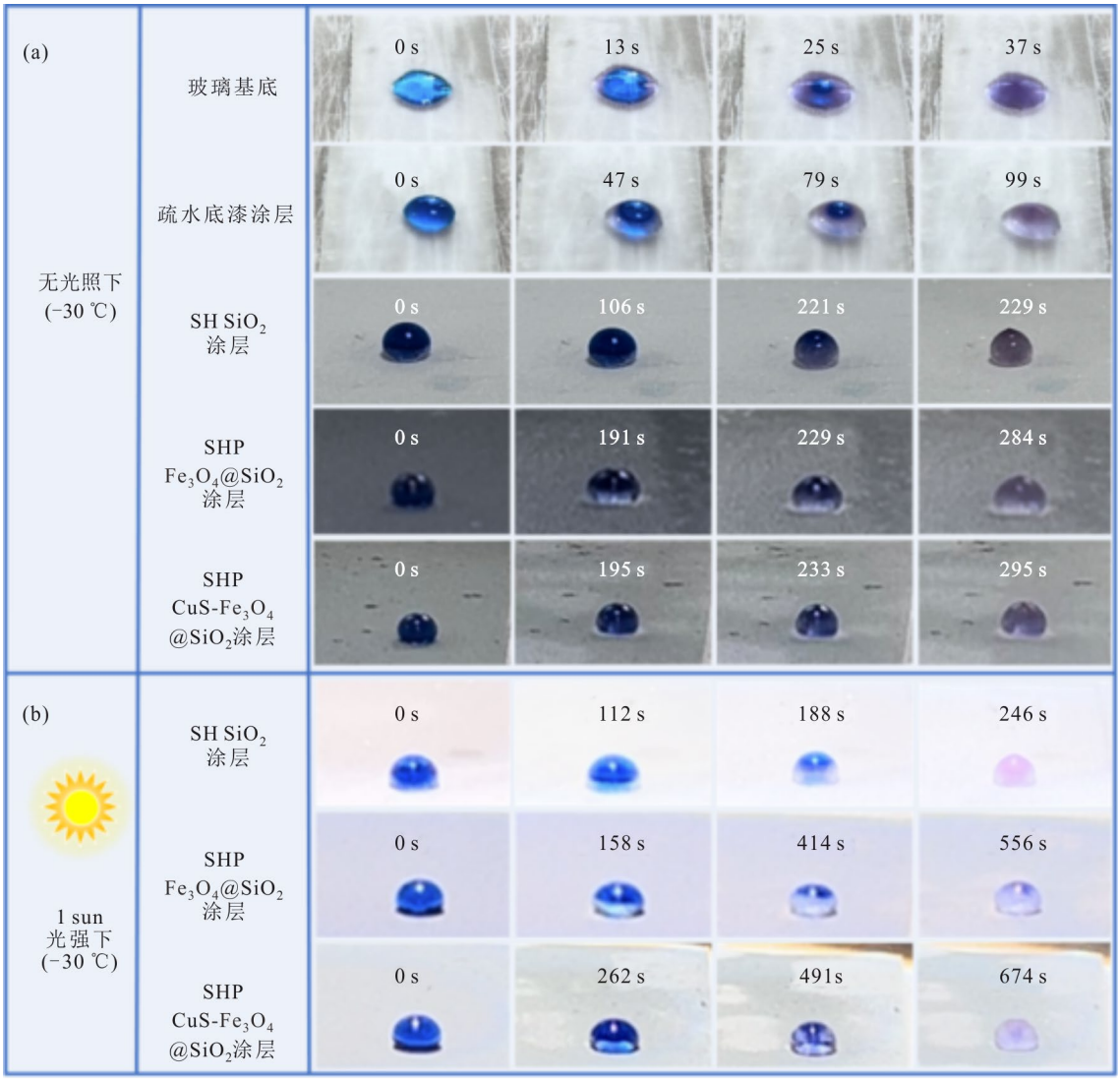


图 6 −30 ℃、无光照下和−30 ℃、1.0 sun 光强下 MB 液滴在无涂层玻璃基片和各涂层表面结冰过程的数码照片

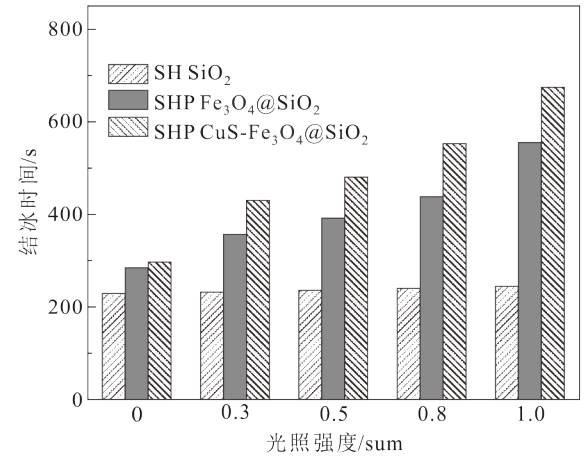
Fig.6 Digital photographs of the MB droplet freezing process on glass slide and various coating surfaces:at −30 ℃ without light illumination and at −30 ℃ under 1.0 sun illumination

进一步地，对比了 SH SiO_2 涂层与 SHP CuS@SiO_2、CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层在低温、有光照(1 sun)环境下的防冰性能(见图 6(b))。结果表明，在有光照条件下，SH SiO_2 涂层表面水滴冻结时间较无光照条件略有延长，而 SHP 涂层的冻结时间则随光照强度提升显著增加。1.0 sun 光照下，纯 SH 涂层和 SHP Fe_3O_4@SiO_2 涂层表面水滴分别于 112、158 s 失去透明性，而 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层表面水滴在 262 s 内仍保持透明，至 674 s 时才开始出现桃尖状形变。由此表明，在光照下，SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层的防冰性能要比 SH SiO_2 涂层、SHP Fe_3O_4@SiO_2 涂层出色。这主要归因于：CuS 的引入显著提升了涂层的光热转换效率；增强的光热效应促使涂层表面温度快速升高；最终涂层表面温度升高有效延缓了冰晶的成核与生长过程，从而大幅延长了液滴的冻结时间。

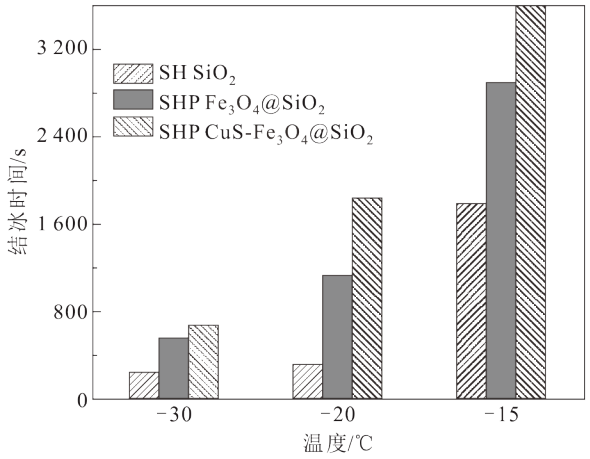
进一步通过固定环境温度、改变光强以及固定光强、改变环境温度对 SH SiO_2、SHP Fe_3O_4@SiO_2、SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 3 种防冰涂层进行了延迟结冰测试，如图 7 所示。结果表明，光强增加可显著延迟 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层表面水滴的冻结时间。如图 7(a)所示，在−30 ℃条件下，光强分别为 0 sun、0.5 sun、1.0 sun 时，SH SiO_2 涂层表面水滴冻结时间分别为 229 s、237 s、246 s，变化并不显著；而 SHP Fe_3O_4@SiO_2 和 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层表面水滴在相同环境下的冻结时间分别为 205 s、392 s、556 s 和 295 s、479 s、674 s。可见，在–30 ℃、1.0 sun 光照下，SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层表面水滴冻结时间不仅比 SH 涂层延迟了 428 s，还比 SHP Fe_3O_4@SiO_2 延迟了 118 s。

其次，由图 7(b)可见，环境温度的升高使得涂层表面水滴冻结时间延长，且 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层的这种趋势随光强增加而更显著。在−20 ℃、1.0 sun 条件下，SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层表面水滴经过 1 800 s (30 min)才冻结(图 7(b))；值得注意的是，在−15 ℃、1.0 sun 光照强度下，即使经过 3 000 s (50 min)水滴也不会冻结。而相比之下，SHP Fe_3O_4@SiO_2 涂层表面水滴在−20 ℃、1.0 sun 下仅能维持 1 140 s (19 min)便完全冻结。

为了评估了不同超疏水涂层的光热融冰除冰性能，在 1.0 sun 光照及恒定测试条件(−15 ℃，(70±5)% RH)下，监测不同样品表面冰块的融化过程并记时。由图 8 可见，SH SiO_2 涂层表面冰块在



(a) −30 ℃、不同光强下各涂层的延迟结冰时间



(b) 1 sun光强、不同环境温度下各涂层的延迟结冰时间

图 7　不同光强及不同温度环境下水滴在 3 种典型涂层表面的延迟结冰时间

Fig.7　Delayed freezing time of MB droplets on three typical coating surfaces under different light intensity and different temperatures

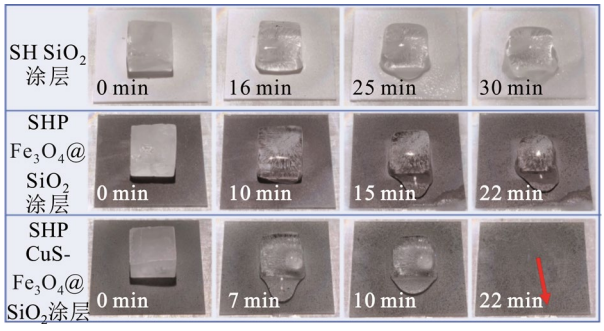


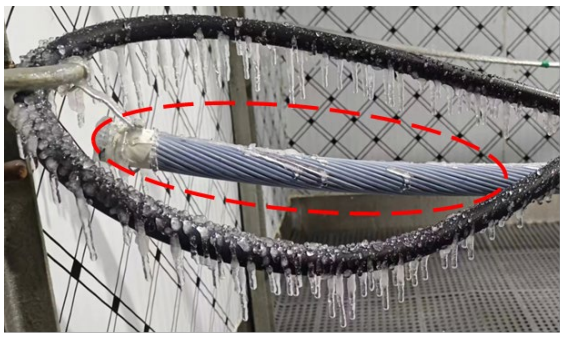
图 8　在−15 ℃、1sun 下，冰块在 SH SiO_2 涂层、SHP Fe_3O_4@SiO_2 涂层和 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层表面的融化时间

Fig.8　Ice melting time on SH SiO_2 coating, SHP Fe_3O_4@SiO_2 coating, and SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 coating surfaces at −15 ℃ under 1 sun irradiation

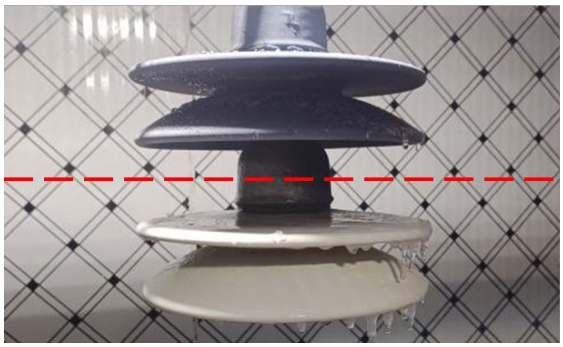
光照 16 min 后开始融化，即使光照 30 min 后，样品表面仍有大量冰块残留；SHP Fe_3O_4@SiO_2 涂层表面冰块在光照 10 min 后就开始融化，15 min 时有明显融化水滴形成；SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层表面光照仅 7 min 即明显观察到融化水滴且水滴滚落表面，随着辐照时间延长，冰/水界面逐渐向冰层内部迁移，最终在 22 min 后融化所剩冰层整体滑移脱落，展现出优异的除冰效率。这种性能提升源于 CuS 增强的光热转换性能，显著加速了光照下的融冰过程。

为考察材料在电力导线和绝缘子上的实际防冰应用，图 9 展示了在模拟冻雨环境下(实验舱环境温度为−10~−5 ℃，喷水雾时间 25 min，冷冻时间 1 h)涂布 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层的导线和绝缘子与未涂布涂层对照样品的防冰性能照片。可见，在相同低温环境中，涂布 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层的导线表面形成极少数冰凌，大部分区域无明显覆冰现象(图 9(a))；然而，未涂布涂层的裸导线表面冰凌数量远多于涂层导线的冰凌数量，且冰凌较长(约 3~7 cm)。图 9(b)表明，在上述同样的低温环境中，涂布 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层的绝缘子表面几乎无覆冰现象，仅形成极少数短小冰凌；而无涂层绝缘子表面覆冰量显著增加，且冰凌较长(3~5 cm)。

CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层优异的太阳能驱动防冰性能，其机制首先在于涂层表面具备良好的超疏水特性，水滴或冻雨难以在其表面润湿、停留，故而使得涂层表面无冰水凝结或凝结量较少。其次，固-液界面空气垫层的存在以及微纳结构限域共同作用，大幅降低了固-液接触面积。最后，CuS 的加入显著增强了防冰涂层的光热转换效应，大幅提升了水滴-涂层界面接触点的温度。上述三者的协同作用显著延缓了冰核形成时间及水滴冻结进程。



(a) 涂布 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层的导线(红色虚线内)及裸导线(红色虚线外)



(b) 涂布 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层的绝缘子(红色虚线上)及无涂层绝缘子(红色虚线下)

图 9 模拟冻雨环境下涂布 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层的导线、绝缘子与裸导线及无涂层绝缘子的结冰性能对比

Fig.9 Anti-icing performances of the coated SHP wires and insulators, uncoated wires and uncoated insulators under freezing rain environments

5 涂层耐候性及自洁性测试

5.1 实验方法

为评估 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 防冰涂层的实际应用效果，对其进行了耐候性和自洁性能测试。其中，耐候性主要包括耐磨、耐化学腐蚀及耐紫外光照射性能，测试方法参照已有相关报道[24,28]。

(1)耐磨性能：将涂敷有 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 光热复合涂层的玻璃片(2.5 cm×2.5 cm×0.1 cm)在 500 g 负载下以恒定的慢速(约 1 cm/s)在砂纸(800 目)上移动，以 10 cm 为周期往返拉动，20 cm 记作一个磨损周期。每经过 100 个磨损周期测试一次接触角，并测试涂层光热升温变化情况。

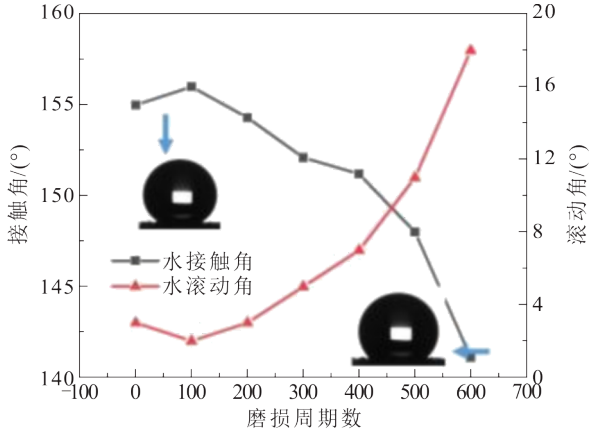
(2)耐化学腐蚀性：通过将涂层浸泡于 3 种不同 pH 值的溶液中评估涂层的耐化学腐蚀性，每隔 24 h 取出后用蒸馏水缓慢冲洗样品并干燥，测试各涂层的水接触角，持续测试 20 d。监测涂层失去超疏水性的时间以及浸泡过后的光热升温变化情况。

(3)耐紫外性能：通过用紫外线灯(UVA-340，40 W)持续照射防冰涂层，利用光强度计控制光强，监测涂层表面润湿性、光热效应的演变过程，以此来研究涂层的紫外线稳定性。

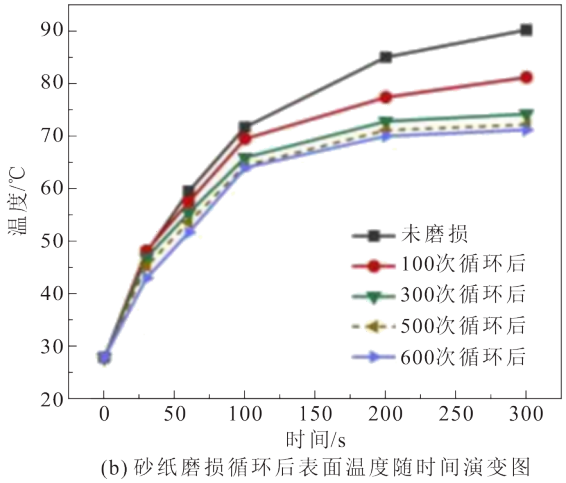
(4)自清洁性能测试：采用硅藻土和 NaCl 颗粒的混合物(质量比为 6:1)模拟固体污染物，铺撒于样品表面，倾斜 10°放置，用胶头滴管吸取 MB 水溶液在其表面滴落，观察样品表面水滴带走污染物的情况。另外，使用橙汁、可乐、甲基橙染液等模拟液体污染物，研究涂层在被液体污染物浸泡后表面外观及润湿性的变化情况[29]。

5.2　实验结果及分析

机械耐久性对于防冰涂层的实际应用具有重要意义。对 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层进行耐磨性测试，结果见图 10。由图 10(a)可见，WCA 在前 400 个磨损周期内保持在 150°以上，WSA 保持在 10°以下。这一结果充分展示了防冰涂层在耐磨方面的优异性能。随后涂层在经历第 500 个磨损周期后，WCA 低于 150°，表明涂层此时失去超疏水性。在经历长时间的磨损后，表面微纳结构一定程度上被破坏，但涂层还能保持一定的疏水性。另外，由图 10(b)可见，随着摩擦次数的增加，涂层的光热升温趋势虽然在前 200 个周期内有些许下降，但在随后的几百个周期内趋于稳定。最终在经 600 个磨损周期后，涂层表面温度在 1 sun 下还是能达到 70 ℃左右，可见摩擦并没有严重影响涂层的光热效果。



(a) 在砂纸磨损循环中的接触角与滚动角演变图

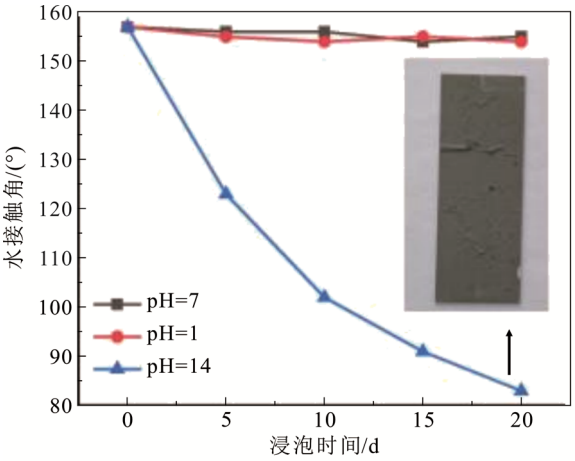


(b) 砂纸磨损循环后表面温度随时间演变图

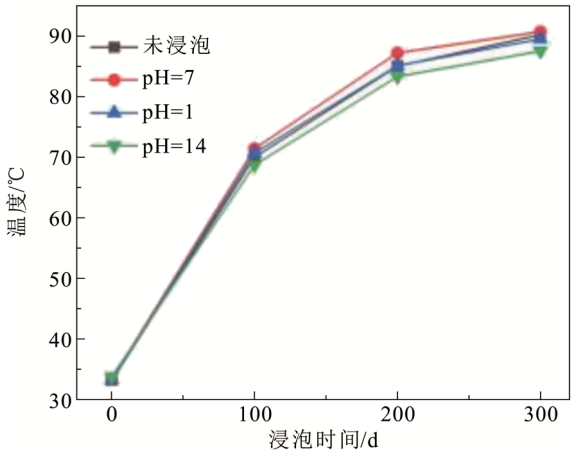
图 10　SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 防冰涂层的砂纸磨损循环实验

Fig.10　Sandpaper abrasion cycle test of a typical SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 anti-icing coating

为评估涂层在腐蚀性溶液中的稳定性，将样品在 pH=1 的 HCl 溶液、10%的 NaCl 溶液(pH=7)及 pH=14 的 NaOH 溶液 3 种极端腐蚀溶液中分别浸泡 20 d，结果表明，超疏水涂层在酸性和中性环境下的稳定性明显高于碱性环境。由图 11(a)可见，涂层在 pH=14 的 NaOH 溶液中持续浸泡 5 d 后不再具备超疏水性(WCA 低于 150°)；且浸泡过后的涂层出现明显褶皱(图 11(a)插图)，表明涂层附着力明显变差；而在 pH=1 的 HCl 溶液和高盐度盐水中浸泡 20 d 后涂层依然保持超强的拒水性能(WCA 保持在 155°左右)。



(a) 不同PH值溶液中浸泡的接触角随时间演变图



(b) 不同溶液环境浸泡后涂层表面温度随光照时间演变图

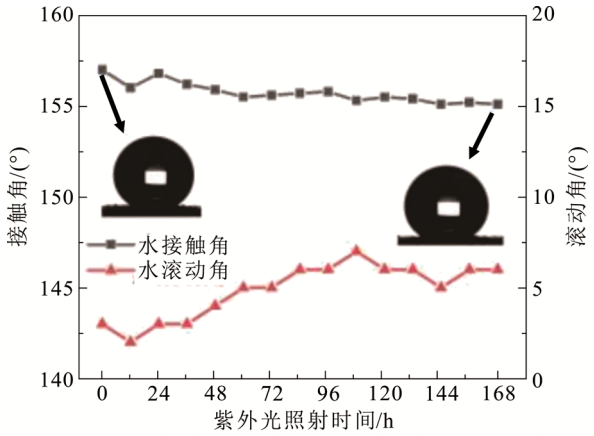
图 11　SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 防冰涂层的耐化学腐蚀实验

Fig.11　Chemical corrosion resistance test of a typical SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 anti-icing coating

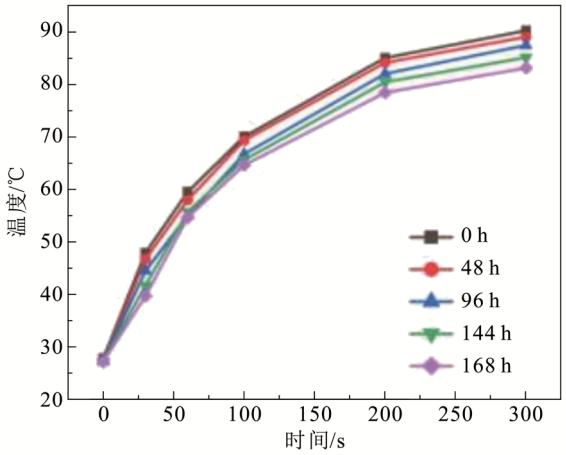
另外，温升测试结果表明，经过强酸、强碱或盐溶液浸泡后，涂层表面在模拟太阳光照射下的光热升温效果都保持良好，表明涂层具有稳定的光热转换性能(见图 11(b))。

耐紫外线照射对于涂层在户外场景的应用也十分重要。对涂层进行耐紫外线照射测试，结果见图 12。如图 12(a)所示，发现随着置于户外照射时

间延长，涂层的超疏水性能并没有受到较大幅度的变化，暴露于紫外照射 168 h 后，涂层表面仍旧可以保持其超疏水性。经紫外光照射后，涂层表面温度随模拟太阳光照射时间的演变趋势见图 12(b)所示。可见，各涂层表面光热升温效果相较未被紫外照射过的涂层仅有轻微下降，充分证明了该防冰涂层在户外长期使用中的稳定性和实用性。



(a) 紫外光照射过程中的接触角与滚动角随时间演变图



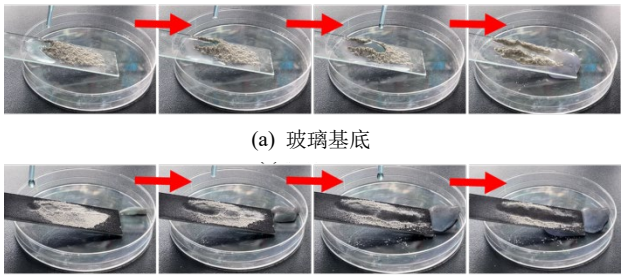
(b) 紫外灯照射不同时间后，涂层表面温度随模拟太阳光照射时间的演变图

图 12 典型 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 防冰涂层的耐紫外光照射实验

Fig.12 UV irradiation resistance test of a typical SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 anti-icing coating

在户外实际应用中，涂层表面会接触到固、液两种主要污染物，覆盖在涂层表面造成其光热转换效率下降，因此涂层应具有一定的自清洁能力。以硅藻土/氯化钠混合物为模拟污染物，参照已报道方法，对玻璃基底与 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 防冰涂层自清洁性能进行测试分析[24,29]，结果如图 13 和 14 所示。

图 13 展示了空白玻璃片与所制备的典型 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 防冰涂层对于固体污染物颗粒的

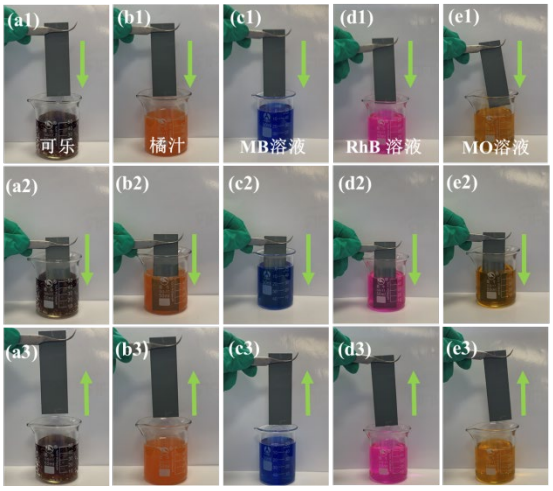


(a) 玻璃基底

(b) CuS-Fe_3O_4@SiO_2 防冰涂层

图 13 对玻璃基底与 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 防冰涂层进行自洁性测试

Fig.13 Self-cleaning tests of plain glass substrate and CuS-Fe_3O_4@SiO_2 anti-icing coating



(a1-a3) 可乐；(b1-b3) 橙汁；(c1-c3)亚甲基蓝溶液；(d1-d3)罗丹明溶液；(e1-e3)甲基橙溶液

图 14 采用液体污染物对 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 防冰涂层进行防污性能测试

Fig.14 Anti-fouling performance evaluation of typical SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 anti-icing coating against liquid contaminants

自清洁效果。结果表明，当 MB 液滴沿涂层表面滑落时，涂层表面的灰白色污染物颗粒随着水滴的滚动被有效地带离表面。经液滴多次冲刷后的区域污染物颗粒均无残留，证实涂层在雨水等外力条件下能迅速恢复原始清洁状态，从而有效地避免了污染物对涂层表面的附着所造成的影响。最终材料恢复初始深色外观，可以继续发挥其光热转换性能。

由图 14 可见，将超疏水防冰涂层浸泡在各种污染物中，保持 60 s 后取出。可以发现，无论在哪种液体污染物中浸泡，取出后涂层表面都能保持清洁状态。这是因为涂层表面超强的憎水性和极低的界面黏附力使涂层具有类似莲花[30]的表面特性，可

见这所制备的防冰涂层具有出色的防污能力，为防冰涂层在恶劣环境中的长期应用提供了积极效果。

6　结论

1）通过在常温下以 MPA 作为配体将 Fe_3O_4 引入 CuS 水相合成体系，成功制备出 CuS-Fe_3O_4 光热复合颗粒。CuS 的引入拓宽了 Fe_3O_4 的紫外-可见光吸收范围，使得 CuS-Fe_3O_4 复合颗粒展现出宽光谱吸收特性(300~1 400 nm)，协同增强了光热吸收性能，提高了 Fe_3O_4 的光热转换效率。

2）通过在原位水解原硅酸四乙酯(TEOS)的过程中引入预先合成的 CuS-Fe_3O_4 复合颗粒，制备得到 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 光热复合颗粒，并通过表面修饰制备了甲基修饰的 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 光热复合颗粒，进一步利用双层喷涂工艺制备了兼具高效光热转换性能及超疏水性能的 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 复合防冰涂层(SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2)。涂层在 1 sun 下 200 s 内表面温度由 27.9 ℃升高到 85.1 ℃，即温升达 57.2 ℃，显著优于纯 SiO_2 疏水涂层表面温升(12.1 ℃)，且其温升较 SHP Fe_3O_4@SiO_2 涂层提高约 4.2 ℃，证实了 CuS 对光热转换的增强效应。

3）所制备的 CuS 增强型光热超疏水防冰涂层具有优异的光热防冰性能：在−30 ℃、无光照环境中，SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层表面水滴冻结时间达 295 s，显著优于亲水载玻片(37 s)和树脂基疏水涂层(99 s)；在−30 ℃、1.0 sun 条件下，其冻结时间延长至 674 s，较 SH SiO_2 涂层(246 s)和 SHP Fe_3O_4@SiO_2 涂层(556 s)分别提升 428 s 和 118 s。值得注意的是，在−20 ℃、1.0 sun 时，该涂层表面水滴经历 1 800 s 仍未冻结；甚至在−15 ℃、≥0.8 sun 条件下，超过 3 000 s 仍无冻结现象。

4）所制备的 SHP CuS-Fe_3O_4@SiO_2 涂层应用于电力导线和绝缘子，可显著减少冻雨环境下的表面覆冰量。在环境温度−10~−5 ℃、喷水时间 25 min、冰冻持续时间 1 h 环境下，涂布光热超疏水涂层的导线及绝缘子表面仅形成少数冰凌，大部分区域无明显覆冰现象，远远优于无涂层的绝缘子和导线(同样环境下表面均明显覆冰且冰凌较长)。

5）防冰涂层具有高效自洁功能，可排斥固体污染物和多种液体污染物，并在反复机械磨损、强酸等极端化学腐蚀环境中浸泡及长时间紫外辐照下都能保持稳定的超疏水性和光热转换性能。

总之，本研究制备的 CuS-Fe_3O_4@SiO_2 光热超疏水复合材料，具备高效的光热转换性能及优异的超疏水性、耐候性和机械稳定性，不仅在解决低温环境电力设备覆冰安全隐患等问题中具有良好的应用前景，且该成果可拓展至飞机机翼、高铁接触网等防除冰场景。同时应当指出的是，光热超疏水涂层防冰技术在从实验室走向大规模实际应用的过程中，仍然面临着极端环境长期稳定性、机械耐久性及使用寿命等挑战和局限，有待于进一步深入研究。

参考文献　References

[1] 韦晓星，贾志东，孙振庭，等. 添加半导电硅橡胶涂层对运行绝缘子防覆冰性能的改善[J]. 高电压技术，2012，38(4)：871-877.
WEI Xiaoxing, JIA Zhidong, SUN Zhenting, et al. Heating effect on insulator surface with semiconducting silicone rubber[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 871-877.

[2] ZHANG H L, QIU C X, ZHANG R, et al. Superwetting MAX@SiO_2 coatings with high photothermal conversion performances for efficient seawater desalination and anti-/de-icing[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 496: 153707.

[3] 罗康，李黎，谢雨龙，等. 具有超疏水迁移特性的超疏水防污闪材料的构筑及其性能[J]. 高电压技术，2025，51(4)：2013-2024.
LUO Kang, LI Li, XIE Yulong, et al. Construction and performance of superhydrophobic anti-pollution flashover materials with superhydrophobic migration properties[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 2013-2024.

[4] JIANG G, CHEN L, ZHANG S D, et al. Superhydrophobic SIC/CNTs coatings with photothermal deicing and passive anti-icing properties[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(42): 36505-36511.

[5] WU Y L, DONG L, SHU X, et al. Recent advancements in photothermal anti-icing/deicing materials[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 469: 143924.

[6] ZHANG S N, HUANG J Y, CHENG Y, et al. Bioinspired surfaces with superwettability for anti-icing and ice-phobic application: concept, mechanism, and design[J]. Small, 2017, 13(48): 1701867.

[7] CHU H Q, XU Q, XU N L, et al. Eco-friendly photothermal superhydrophobic coatings: recently advances in icephobic mechanisms, efficient photothermal conversion, and sustainable anti/de-icing technologies[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2025, 343: 103565.

[8] HE H, HUANG W, GUO Z G. Superhydrophobic and photothermal SiC/TiN durable composite coatings for passive anti-icing/active de-icing and de-frosting[J]. Materials Today Physics, 2023, 30: 100927.

[9] XIE Z T, TIAN Y, SHAO Y C, et al. Recent progress in anti-icing and deicing applications of the photothermal conversion materials[J]. Progress in Organic Coatings, 2023, 184: 107834.

[10] JIANG L H, SUN J J, LIN Y F, et al. The preparation of CNTs/GP/TiN/PDMS/PVDF superhydrophobic coating with strong photothermal and electrothermal properties for anti-icing and de-icing[J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 476: 130273.

[11] LEI Y H, YE G, JIANG B C, et al. Ice-resistant Fe_3O_4@PPy coating: enhancing stability and durability with photothermal super hydrophobicity[J]. Progress in Organic Coatings, 2024, 196: 108704

[12] DENG L C, WANG Z W, WU J Z, et al. A superhydrophobic Fe_3O_4@MSN-PDMS based composite coating with icephobicity,

long-term durability and self-healing property for anti-/de-icing[J]. Composites Science and Technology, 2025, 259: 110937.

[13] ZHANG H B, XU X Y, WU M Z, et al. Virus-like iron oxide minerals inspired by magnetotactic bacteria: towards an outstanding photothermal superhydrophobic platform on universal substrates[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(29): 2201795.

[14] XIE Y, CHEN W H, BERTONI G, et al. Tuning and locking the localized surface plasmon resonances of CuS (Covellite) nanocrystals by an amorphous $CuPd_xS$ shell[J]. Chemistry of Materials, 2017, 29(4): 1716-1723.

[15] ZHANG R, ZHANG H L, ZHONG Y W, et al. Photothermal CuS@SiO_2 nanocomposites for solar-driven anti-icing/deicing and synchronous evaporation and photocatalysis[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2025, 13(2): 1499-1511.

[16] RADOŃ A, DRYGAŁA A, HAWEŁEK Ł, et al. Structure and optical properties of Fe_3O_4 nanoparticles synthesized by co-precipitation method with different organic modifiers[J]. Materials Characterization, 2017, 131: 148-156.

[17] HU C, CHEN W H, XIE Y, et al. Generating plasmonic heterostructures by cation exchange and redox reactions of covellite CuS nanocrystals with Au^{3+} ions[J]. Nanoscale, 2018, 10(6): 2781-2789.

[18] ZHOU K, SONG J L, LU L, et al. Plasmon-enhanced broadband absorption of MoS_2-based structure using Au nanoparticles[J]. Optics Express, 2019, 27(3): 2305-2316.

[19] WANG S Y, CUI Y O, DALANI T, et al. Polydopamine-based plasmonic nanocomposites: rational designs and applications[J]. Chemical Communications, 2024, 60(22): 2982-2993.

[20] LI T, DING Y X, KAREEM S, et al. Hexamethyldisilazane-triggered room temperature synthesis of hydrophobic perovskite nanocrystals with enhanced stability for light-emitting diodes[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 552: 101-110.

[21] MOHAMMADPOUR A, KARAMI N, ZABIHI R, et al. Green synthesis, characterization, and application of Fe_3O_4 nanoparticles for methylene blue removal: RSM optimization, kinetic, isothermal studies, and molecular simulation[J]. Environmental Research, 2023, 225: 115507.

[22] XIE Y, XIONG W, KAREEM S, et al. Robust superamphiphobic coatings with gradient and hierarchical architecture and excellent anti-flashover performances[J]. Nano Research, 2022, 15(8): 7565-7576.

[23] 蒋兴良，王茂政，袁一钧，等. 基于低居里点 PTC 材料的风机叶片防冰数值模拟及试验验证[J]. 高电压技术，2024，50(9)：4080-4090.
JIANG Xingliang, WANG Maozheng, YUAN Yijun, et al. Numerical simulation and experimental validation of wind turbine blades anti-icing based on low curie point PTC material[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(9): 4080-4090.

[24] 韩兴波，孙鹏，王杰，等. 大型风机迎风面覆冰增长规律及气动特性[J]. 高电压技术，2025，51(3)：1169-1179.
HAN Xingbo, SUN Peng, WANG Jie, et al. Growth law and aerodynamic characteristics of icing on the windward side of large wind turbines[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1169-1179.

[25] ZHOU Z H, SHEN Y J, HAO J S, et al. Inexpensive anti-icing concrete material for application to tunnel and slope engineering infrastructures in cold regions[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(44): 53030-53045.

[26] XIE Z T, WANG H, GENG Y, et al. Carbon-based photothermal superhydrophobic materials with hierarchical structure enhances the anti-icing and photothermal deicing properties[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(40): 48308-48321.

[27] ZHOU W L, WU T, DU Y, et al. Efficient fabrication of desert beetle-inspired micro/nano-structures on polypropylene/graphene surface with hybrid wettability, chemical tolerance, and passive anti-icing for quantitative fog harvesting[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 453: 139784.

[28] DENG T H, GENG L S, ZHANG H L, et al. Resolving the liquid repellency-mechanical durability trade-off via a biomimetic nacre-like superamphiphobic architecture[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 520: 166032.

[29] YUAN S, ZHAO X, JIN Z Q, et al. Design and realization of versatile durable fluorine-free anti-corrosive coating with robust superhydrophobicity[J]. Electrochimica Acta, 2024, 495: 144428.

[30] ADAK D, BHATTACHARYYA R, BARSHILIA H C. A state-of-the-art review on the multifunctional self-cleaning nanostructured coatings for PV panels, CSP mirrors and related solar devices[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 159: 112145.



陈　智
1983—，男，硕士，高工
主要从事输变电设备外绝缘防污自洁、防除冰及线路雷电屏蔽方向的研究工作

CHEN Zhi
Senior engineer



谢　毅(通信作者)
1975—，男，博士，教授
主要从事纳米材料和功能薄膜制备及其在光电、光催化、光热转换、电力防污闪、防腐蚀、防除冰、海水淡化等领域的应用研究
E-mail: xiey@whut.edu.cn

XIE Yi
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-06-14　在线出版日期　2025-12-03　　编辑　曹昭君