

# 能量转化防冰涂层研究进展

张育新<sup>1,3</sup>, 金周业<sup>1</sup>, 刘丹丹<sup>2</sup>, 刘书佩<sup>1</sup>, 宋欢欢<sup>1,4</sup>

(1.重庆大学材料科学与工程学院,重庆 400000;2.重庆大学土木工程学院,重庆 400000;

3.重庆新能源存储材料与设备研究所,重庆 400044;4.中昊北方涂料工业研究设计院有限公司,兰州 730101)

**摘要:** 结冰是低温环境下威胁电力系统关键装备安全运行的严重问题。能量转化防冰涂层通过将外部能量(如光、电、磁)高效转化为热能,为实现主动、高效、环境适应性强的防冰/除冰提供了创新解决方案。本文系统综述了磁热、电热及光热三类能量转化防冰涂层的工作原理、材料体系与研究进展,深入分析了铁磁/亚铁磁材料、金属基/碳基/导电聚合物以及有机/无机复合材料在不同转化机制中的性能优势与应用局限。本文进一步指出,未来防冰涂层的发展趋势在于通过多功能集成、优化能量管理机制与提升环境耐久性,以实现全天候、低能耗的智能防冰,并对该领域面临的挑战与发展前景进行了展望。

**关键词:** 防冰; 能量转化涂层; 光热转化; 电热转化; 磁热转化

中图分类号:TK124,TQ637 文献标志码:A 文章编号:1007-9548(2026)01-0030-07

## Research Progress and Prospect of Energy Conversion Anti-icing Coatings

ZHANG Yu-xin<sup>1,3</sup>, JIN Zhou-ye<sup>1</sup>, LIU Dan-dan<sup>2</sup>, LIU Shu-pei<sup>1</sup>, SONG Huan-huan<sup>1,4</sup>

(1.College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400000, China;

2.College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400000, China;

3.Chongqing Institute of New Energy Storage Materials and Equipment, Chongqing 400044, China;

4.North Paint & Coatings Industry Research and Design Institute Co., Ltd. of China Haohua, Lanzhou 730101, China)

**Abstract:** Icing is a serious problem that threatens the safe operation of key equipment such as power system in low temperature environment. Energy conversion anti-icing coating provides an innovative solution for active, efficient and environmentally adaptable anti-icing by efficiently converting external energy (such as light, electricity and magnetism) into heat energy. In this paper, the working principle, material system and research progress of three kinds of energy conversion anti-icing coatings are systematically reviewed, and the performance advantages and application limitations of ferromagnetic/ferrimagnetic materials, metal-based/carbon-based/conductive polymers and organic/inorganic/composite materials in different conversion mechanisms are deeply analyzed. This paper further points out that the development trend of anti-icing coating in the future is to realize all-weather and low-energy intelligent anti-icing through multifunctional integration, optimizing energy management mechanism and improving environmental durability, and looks forward to the challenges and development prospects in this field.

**Key words:** anti-icing; energy transfer coating; photothermal conversion; electrothermal conversion; magnetothermal conversion

收稿日期: 2025-11-07

基金项目: 国家自然科学基金 52378217、中央高校基本科研业务费专项资金 2024CDJQYJCYJ-001、重庆市研究生科研创新项目 CYB25019 的资助以及泰山产业领军人才计划专项基金的特

别支持。

作者简介: 张育新(1978—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事纳米材料的可控制备及功能涂层的研究应用工作。E-mail: zhangyuxin@cqueducn。

## 0 引言

极端环境造成的设备、器材和运输工具的冻结给全球经济造成了巨大损失,甚至带来了灾难性事故。2008年1月,我国南方地区的大范围冰冻雨雪灾害对电力运行造成灾难性影响,湖南、湖北、江西、安徽、贵州等省线路覆冰厚度超过30 mm,超过输电线路所能承受极限,造成绝缘子闪络、输电线路跳闸、导线断线及杆塔倒塌等严重事故,电网结构遭到严重破坏。此次灾害致使我国13个省(区)的电力系统运行受到影响,全国范围内36 740条10 kV及以上电力线路、1 743座变电站停运,高压线路杆塔倒塌17.2万基,导致3 348万户、1亿多人口停电,直接经济损失超过(人民币)1 000亿元,而造成的间接经济损失以及社会影响更是难以估计<sup>[1]</sup>。2021年2月,美国南部德克萨斯州遭遇极端严寒天气,大量风电机组由于缺少表面覆冰措施而停转<sup>[2]</sup>。上述例子虽不能完全解释结冰对全球生产和生活的不利影响,但提高设备在极端环境下的防冰能力显然具有重要意义。

最基础的覆冰涂层有超疏水覆冰涂层,润滑覆冰涂层以及能量转化覆冰涂层,其中应用最广泛的就是超疏水覆冰涂层<sup>[3-4]</sup>。超疏水覆冰涂层通过构造微米/纳米级粗糙结构(如仿荷叶乳突状或柚子皮多孔结构),结合氟硅烷等低表面能物质,使涂层接触角大于150°,滚动角小于2°,能够实现液滴快速滚落的同时抑制初始霜晶成核,减少覆冰现象的存在。超疏水涂层具有低能耗、环境友好的优点,应用前景广阔,但耐久性和机械性能较差。

为提升性能,科研人员通过掺入稻壳制备的二氧化硅纳米颗粒(PDMS-SiO<sub>2</sub>)开发出高性能的超疏水聚二甲硅氧烷(PDMS)涂层,即使在恶劣环境下也能保持光滑性能,展现出卓越的抗结冰和抗菌能力,适用于船舶、医疗和地板等行业<sup>[5]</sup>。

为进一步提升涂层稳定性和极端环境耐受性,有研究人员使用铝酸盐偶联剂创建了疏水涂层,发现稳定的铝酸盐偶联剂涂层表面表现出较低的结霜率。在实践中发现,传统的疏水覆冰涂层存在效果有限、造价偏贵且环境适应性差等缺陷<sup>[6]</sup>。一旦超疏水覆冰涂层表面的疏水多孔涂层遭到破坏或腐蚀,超疏水覆冰涂层的性能和效果都将大打折扣,并且由于超疏水涂层表面结构和材料的限制,涂层的寿命和耐用性并不高。

将疏水涂层与特殊功能材料相结合,赋予涂层能量转化的能力,是实现涂层全天候防冰的有效策略。能量转化覆冰涂层是一种通过功能性材料将光能、电能、磁能等转化为热能从而延缓或者杜绝冰在设备表

面黏附的技术,核心原理是将外部输入的能量转化为热能,抑制冰、霜在涂层表面形成。能量转化涂层具有能源利用效率高,抗极端环境稳定性强,环境兼容性优化等多个优点。能量转化防冰涂层通常包括磁热转换防冰涂层,电热转换防冰涂层和光热转换防冰涂层。磁热转换防冰涂层则是通过磁滞损耗、弛豫损耗或磁化能积累将磁能转化为热能;电热转换防冰涂层将被动防冰与涂层主动抑制结冰的能力相结合,防冰效率高且实用性较好;光热转换防冰涂层在太阳光谱范围具有高吸收比,在红外波段具有低发射比,从而能够高效地将太阳光转换为热能,实现防覆冰的效果。

随着技术的发展,传统的覆冰涂层的耐久性、生产工艺的经济性和环保性已经不能满足特殊工况下的防冰要求,急需了解最前沿的、具有较为宽广发展空间的能量转化防冰涂层的机理与优化方向。本文归纳总结了3种最为常见的能量转化覆冰涂层:磁热转换防冰涂层、电热转换防冰涂层和光热转换防冰涂层。通过化学机理与物理架构等多方面阐述各个涂层的发展与应用,分析每个涂层的效果、寿命与发展潜力。随着时代的发展,为满足更多特殊工况下防冰要求,研究防冰涂层的耐久性、生产工艺的经济性和环境友好性等工作具有重要意义。

## 1 磁热转换防冰涂层

磁热转换防冰涂层主要是依靠磁热转换原理,当磁性涂层涂覆在物体表面时,在外部磁场的范围内,磁性粒子会因磁滞损耗、弛豫损耗或磁化能积累效应将磁能转化为热能,从而实现融冰和除冰。磁热转换涂层可分为铁磁性和非铁磁性材料涂层。磁热转换防冰涂层转换效率高且无需外部电源或光照,直接利用磁场变化实现热能转换,且能通过调节磁场强度或频率精准控制升温速率,同时极强的环境适应性更适合电磁环境复杂的场景。

### 1.1 铁磁性材料涂层

铁磁性材料涂层是以铁、钴、镍等铁磁性材料为核心成分,通过磁滞损耗或涡流效应将磁场能量转化为热能,实现防冰功能的新型防冰涂层。磁热转换防冰涂层由于无需外部能源,仅依赖磁场即可触发热能释放,更适合复杂电磁环境应用,其能量转换效率可达75%以上。同时铁磁性材料涂层耐腐蚀性较强,结合防护镀层可延长使用寿命。

为了提高磁热转化效率,减少冰层覆盖带来的危害,将磁性纳米颗粒引入超疏水涂料中作为热介质,以达到防冰和除冰的目的,西南科技大学LI P等<sup>[7]</sup>把氨基改性Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>纳米粒子与含氟环氧共聚物复合,制备出超疏水磁性复合涂层;氟碳链使涂层水接触角>156°,

-20 °C 下 6  $\mu\text{L}$  水滴冻结时间由 50 s 延长至 2 878 s, 同时磁性粒子在交变磁场或太阳光照射下迅速升温, 实现长时间除冰延迟与热除冰性能。为了进一步提高磁-热转换防覆冰的涂层的寿命, DENG L 等<sup>[8]</sup>通过在氧化铁表面原位涂覆中孔氧化硅纳米颗粒 (MSN), 然后加入高剂量的聚二甲基硅氧烷 (PDMS), 从而获得具有自修复能力的  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@MSN-PDMS}$  磁-热转化填料, 形成 PDMS/水双层润滑剂, 降低冰层黏附力并能够自主修复受损涂层。

铁磁性磁热转换材料防冰涂层凭借无源高效、动态可控、耐腐蚀等优点, 已在电网与织物领域初显身手, 但仍需克服颗粒团聚及长期疲劳失效等短板。在未来, 该类材料有望与纳米合金、二维铁磁膜与智能响应基元结合, 在极端气候、深远海风电和高空装备中实现全天候零维护的防冰安全屏障。

## 1.2 亚铁磁性材料涂层

亚铁磁性材料涂层是利用亚铁磁性材料在外加磁场作用下产生的热量来实现防冰和除冰功能的涂层。原理是亚铁磁性材料 (如  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  等) 在交变磁场中会发生磁滞损耗和涡流损耗, 从而将磁场能量转化为热能。

国外研究中, LI C 等<sup>[9]</sup>制备了 ZIF-8/POTS/EP 超疏水涂层。试验表明, 该涂层在 3.5% NaCl 水溶液中浸泡 7 d 后, 阻抗模量显著提高, 表现出优异的抗结冰性能。同时, 亚铁磁性材料防冰涂层不仅在外加磁场作用下除冰效率高, 而且可以通过加入改性环氧树脂, 使涂层具有较高的表面机械强度。相比于铁磁性材料防冰涂层, 还通过不使用长氟碳链的有机氟材料, 减少了对环境的危害。国外研究人员开发了一种  $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{@SiO}_2\text{@Ag-rGO}$  复合涂层, 该涂层在 1 Sun 光照射下表面温度可达 58.8 °C, 显著延长了结冰时间 (1 498 s), 并在 40  $\text{mW}/\text{cm}^2$  的光强下实现快速除冰<sup>[10]</sup>。

亚铁磁性防冰涂层以  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  等为核心, 借助超疏水微纳结构大幅降低冰黏附, 兼具环保型低氟配方与高机械强度, 已在电网、高空及海洋装备中验证其快速除冰与长期耐候能力, 但居里温度窗口窄、高频磁场下颗粒团聚与界面疲劳仍是规模化应用的瓶颈。

综上所述, 磁热转换防冰涂层中, 铁磁性材料有着高磁热性和强磁性, 磁滞损耗高且磁化强度大, 但存在稳定性差、易团聚、温度依赖性强等问题; 而亚铁磁性材料 (如铁氧体等) 则具有良好的磁热性能和较好的温度稳定性, 可通过调整组成离子的种类和比例来调节性能, 但磁化率相对较低, 磁结构复杂, 需要更精细地控制。但是具有磁热转换功能的防冰涂层凭借其高效除冰、精确控制、环保、节能和耐用性强等技术优势, 在航空航天、电力系统、交通运输等领域具有广阔的应用

前景。

## 2 电热转换防冰涂层

电热转换防冰涂层可以将被动防冰与涂层主动抑制结冰的能力相结合, 在表面产生足够的热量以去除冰层。电热转换防冰涂层通常由碳基材料和金属材料以及导电聚合物材料组成。通电时, 导电材料会产生热量, 并通过热传导将热量传递到涂层表面。

### 2.1 金属基材料涂层

金属基材料涂层是一种利用金属或其化合物的导电性, 通过焦耳热效应将电能转化为热能以实现温度控制的功能型涂层。这种涂层通常由导电材料和黏合剂组成, 通过金属材料的高导电特性, 在通电时快速产生均匀热量, 从而防止或消除表面冰层积累。与传统的主动除冰方法相比, 金属基材料防冰涂层能耗较低, 不用大量的能源输入, 适合长期使用。而电热转换金属基材料防冰涂层在运行过程中不产生污染物, 对环境友好。

BAKSHI S R 等<sup>[11]</sup>采用等离子喷涂技术, 在低碳钢基体上喷涂喷雾干燥的纳米氧化铝与 4% 多壁碳纳米管的混合粉末, 制备的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -4% 多壁碳纳米管复合涂层, 热导率为 7.2  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。LUPOI R 等<sup>[12]</sup>采用冷喷涂技术在硅晶片上喷涂金刚石/铜粉末, 制备的金刚石/铜复合涂层热导率可达 580  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。邓卓梅等<sup>[13]</sup>采用热喷涂技术, 在无氧铜块表面喷涂钨铜复合粉末, 制备的钨铜复合涂层在温度为 50 °C 时, 热导率在 290~310  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  之间, 相比传统钨铜合金散热材料, 热导率提高了近 100  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 可有效用于防覆冰。

金属基电热防冰涂层凭借高导电导热特性, 可在低电压下瞬时、均匀地产生焦耳热, 且与超疏水或光-热协同结构复合后, 既能主动除冰又能被动抑冰, 并在多个场景验证其高效、可规模化喷涂等优势, 但长期使用仍面临金属氧化、界面剥离、高功率密度导致局部过热及布线复杂等瓶颈。

### 2.2 碳材料涂层

碳材料涂层是一种利用碳材料导电性和焦耳热效应, 构建导电网络的涂层。当涂层受到电压作用时, 电流通过导电层产生热量, 从而融化冰层。此外, 该涂层表面具有超疏水性能, 能够有效防止水滴附着, 从而减少冰的形成。由于该涂层良好的柔韧性, 它不仅适用于平面表面, 还能适应曲面的大变形, 在各种需要防冰和除冰的场景, 如户外、高空、寒冷地区的工业设备等都有广泛的应用前景。

西华大学的王教授团队<sup>[14]</sup>开发了一种结合多壁碳纳米管 (MWCNT) 和聚吡咯 (PPy) 的复合涂层, 具有电热、光热和超疏水性能。该涂层在电场下表现出高效的

电热转换能力,能够在低电压下快速升温,同时具备良好的光热辅助效果。为解决极端寒冷和恶劣天气造成的结冰现象。同样,LIU X 等<sup>[15]</sup>提出了一种新的自组装方法来制造光滑的多孔电热涂层,通过简单的水滴模板法在多壁碳纳米管/聚合物电热涂层上直接构建紧密排列的微孔,然后将硅油注入微孔中,形成光滑的液体注射多孔电热涂层(SEHC),具有优异的“油膜隔离效果”和超低的冰附着力。

目前,多功能涂料的制备往往依赖于复杂的制备技术、昂贵的原材料和额外的控制系统,这限制了这种减冰策略的实际应用。WU X<sup>[16]</sup>和他的同事结合了主动和被动冰缓解方法来构建电热转换超疏水涂层。根据石墨分子的分层分布,采用简单的机械擦拭法制备了微纳米片状石墨颗粒。通过与PDMS的强黏附,涂层具有超疏水性和电热性。这种多功能减冰策略避免了复杂的控制系统和复杂的准备过程,为有效地防冰/除冰提供了一条新的可行途径。

碳材料电热转换涂层凭借高效导电网络,可在低压下瞬间升温,同时兼具轻量、环境友好等优势,已在风机叶片、飞机机翼等复杂构件上示范快速除冰,但导电网络长期弯折后电阻升高、功率密度受限及大面积均匀供电布线难题仍待破解。

### 2.3 导电聚合物涂层

导电聚合物涂层是一种通过导电填料与聚合物基体结合,利用焦耳效应将电能转化为热能以实现除冰的功能性涂层,其核心在于导电网络的形成。当施加电压时,电流通过导电材料产生热量,以防止结冰或融化已形成的冰层。该涂层常用碳纳米管、石墨烯、钛氮化物等纳米材料作为导电介质,分散于聚合物基体中,形成导电通路。此外,该涂层环境适应性超强,通过结合光热转换功能,可在光照条件下补充热能。部分涂层可通过IPN基料或纳米填料改性,改善涂层抗裂性及长期稳定性。

YIN Y 等<sup>[17]</sup>制备了以钛酸酯偶联剂改性的六方氮化硼(h-BN)/聚酰亚胺(PI)复合薄膜,填料质量含量为40%时,复合膜的热导率为 $0.703\ 2\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,是纯PI膜的3.73倍。DING D 等<sup>[18]</sup>以聚多巴胺(PDA)修饰的六方氮化硼(h-BN@PDA)为导热填料,制备了h-BN@PDA/聚酰亚胺(PI)复合材料,填料体积分数为20%时,PI复合材料的平面导热系数可达 $3.01\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,PDA涂层的存在也提高了复合材料的热稳定性。北京理工大学先进结构技术研究院陈教授<sup>[19]</sup>课题组开发了一种基于石墨烯泡沫的主被动耦合防冰涂层。该涂层由石墨烯泡沫作为导电层,表面喷涂氮化钛和二氧化硅纳米颗粒,形成光热和超疏水表

面。其电热能量转换率高达90%以上,仅需1 V电压即可在短时间内将表面温度提升至零度以上,显著优于传统电热技术。

导电聚合物电热防冰涂层同时具备低压高效焦耳热、可拉伸曲面贴合及超疏水抑冰等多重优势,已在飞机蒙皮、风机叶片和高压电缆等场景验证其能耗低、升温快、环境友好等优势,但长期电-热循环下的填料团聚、界面老化及大面积均匀布线仍是规模化应用的痛点。

电热转换是一项相对成熟的技术,像碳纳米管、石墨烯等的碳基材料具有优异的电热性、质量轻、柔韧性好以及可设计性强等优点,但成本较高、不均匀性问题、机械强度有限等劣势不可忽略;同时具有高导电性和导热性、良好的机械性能和稳定性的金属基材料,存在着密度大、成本较高、易氧化等问题;导电聚合物则具有轻质高柔韧性、可加工性好、成本较低等优势,但是其导电性有限、热稳定性差。所以,虽然电转换涂层具有较高的除冰效率和相对成熟的原理基础,但除冰过程仍然需要大量的电力。

## 3 光热转化防冰涂层

光热转换涂层在太阳光谱范围(0.3~2.5  $\mu\text{m}$ )具有高吸收比,在红外波段(2.5~25.0  $\mu\text{m}$ )具有低发射比,从而能够高效地将太阳光转换为热能。通过调控表面粗糙度和光热材料的电磁属性,可以提高材料的光吸收率,进而实现光热转换。涂层的表面微纳米结构通过降低冰附着力延缓结冰,同时光热层融化冰后,超疏水表面促使其快速脱落。部分涂层由于其高透明度设计,可适配于汽车挡风玻璃等需透光场景。而太阳能的能源自给性,使该涂层无需外部供电。同时部分涂层兼具防腐、自清洁功能,适用于恶劣环境。该涂层通过一系列特性的协同创新,为极端环境下的防冰难题提供了高效、可持续的解决方案<sup>[6]</sup>。

### 3.1 有机材料

有机防冰涂层是以有机材料为基体或主要成分,利用光热效应来防止冰形成的涂层。这种涂层通过吸收光能并将其转化为热能,结合超疏水表面特性实现防冰功能的多功能复合材料。其通过光热效应主动提升表面温度,同时利用低表面能特性降低冰附着力,形成协同防护机制。

GUO W 团队<sup>[20]</sup>为了提高光-热转换效率,同时增强涂层的实用性,以硫化亚铜为填料,有机硅作为黏结剂,设计了在玻璃表面直接喷涂的高透明光-热复合涂层。该涂层表现出良好的光热转换性能和疏水性能,具有优异的防冰和自融冰性能。上海海事大学的研究团队<sup>[21]</sup>通过全氟癸基三乙氧基硅烷(FAS)对聚苯胺

(PANI)进行改性,再与硅树脂(SR)混合制备出 F-PANI 涂层。该涂层兼具光热和超疏水性能,接触角达  $150.8^\circ$ ,滚动角为  $3^\circ$ 。在  $20^\circ\text{C}$ 、1 倍太阳光照射下,5 min 内表面温度可达  $83.5^\circ\text{C}$ ,且在  $-25^\circ\text{C}$  下仍具有良好的光热性能,水滴冻结时间显著延长。此外,还有研究人员制备了氟改性聚苯胺(F-PANI)光热超疏水防冰涂层。该涂层通过在低温条件下模拟不同强度的太阳光照射,展现出优异的光热转换能力和被动防冰性能。试验表明,在 1 Sun 光照强度下,涂层表面温度可升至  $83.5^\circ\text{C}$ ,显著延缓了水滴的结冰时间。这些涂层的研发展现了光热转化有机防冰涂层通过吸收太阳光热量来实现高效防冰和除冰功能在航空航天、能源设备等领域的广泛应用。北京科技大学研究团队<sup>[21]</sup>开发了一种集光热、相变储能和超疏水于一体的复合涂层。该涂层以三维等离子半导体  $\text{Cu}_2\text{-xS}$  为壳层封装相变材料,光热转换效率高达 96.1%,蓄热能力达 99.2%。在低温( $-20^\circ\text{C}$ )、高湿(相对湿度 60%~70%)条件下,涂层展现出卓越的防冰性能。

有机光热转换防冰涂层以光热活性聚合物为基体,通过高效吸收太阳光并将其转化为热能,协同表面超疏水微纳结构,展现出能源自给、绿色环保、极端环境适应性等显著优势,但其性能仍受日照强度制约,有机基体在长期紫外、机械磨损下易老化,且氟化改性、微胶囊负载等工艺增加了成本与制备复杂度。

### 3.2 无机材料

无机光热转换涂层是以无机材料为主体,通过吸收光能,并将其转化为热能并协同超疏水表面特性,实现主动防冰与被动除冰双重功能的复合功能涂层。其核心在于无机纳米材料的高效光热响应与稳定化学性质的结合,适用于极端环境下的长效防冰需求。

YU B 等<sup>[23]</sup>通过沉积  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米颗粒和多巴胺,通过简单的氟化处理,制备了一种光热超疏水性聚氨酯海绵(PSP-SPONGE),实现了在微弱阳光照射下的快速防冰和除冰。在  $-30^\circ\text{C}$  的潮湿环境中,PSP-SPONGE 表面的水滴在微弱的  $0.3\text{ kW/m}^2$  阳光照射下永远不会结冰,而在  $1\text{ kW/m}^2$  太阳照射下,冰在 18 min 内完全融化。北京科技大学研究团队开发了一种集高效光热转换、相变储能和超疏水性能于一体的复合涂层<sup>[24]</sup>。该涂层利用三维结构的  $\text{Cu}_2\text{-xS}$  纳米晶体作为光热材料,包覆相变材料,展现出 96.1%的光热转换效率和 99.2%的蓄热能力。在低温( $-20^\circ\text{C}$ )、高湿(相对湿度 60%~70%)条件下,涂层表现出卓越的防冰和快速除冰能力。李梦潘等<sup>[25]</sup>开发出一种具有微纳多级结构阵列的多功能光热膜,二维  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  纳米片的引入赋予膜材料低导热系数、高光热转换效率,结合十八烷基三氯硅

烷诱导的低表面张力使薄膜具有一定的疏水性,可用于电气设备防冰/除冰等领域。此外,西南交通大学刘艳团队<sup>[25]</sup>通过一步喷涂法制备了一种坚固耐用的超疏水光热涂层。该涂层将刚性  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  纳米颗粒封装在多孔硅藻土中,展现出良好的被动防冰和主动除冰能力。

无机光热转换防冰涂层以高效无机光热材料为核心,集成微纳超疏水结构,并借助相变微胶囊实现高效除冰。但无机体系密度大、脆性高、制备工艺复杂且成本高,大面积柔性基底附着与机械疲劳问题仍待解决。

### 3.3 复合涂层材料

复合材料涂层是将有机材料与无机材料结合,通过协同作用提升光热转换效率、稳定性和功能适应性的涂层。它融合了有机材料的柔韧性、易加工性和无机材料的高耐热性、强光吸收能力,克服单一材料的局限性。而复合导电材料可实现光/电热双模式响应,像有机组分通过分子链电子跃迁吸收可见光,无机组分利用宽光谱吸收与晶格振动捕获近红外光,共同实现全光谱光能转化为热能,综合光吸收率可达 95%以上。同时有效增强了无机纳米粒子与有机硅烷复合可形成微纳粗糙结构,接触角可达  $160^\circ$ ,冰附着力低至 4 kPa。解决了单一材料性能瓶颈问题,为防冰难题提供了高效且综合性的解决方案。

WANG T 等<sup>[27]</sup>将氧化石墨烯均匀涂覆在木材表面,制备了木材-氧化石墨烯复合材料涂层。木材作为基底材料,氧化石墨烯作为光热转换材料,在  $12\text{ kW/m}^2$  的光照下,该复合材料的太阳光水蒸气产生效率达到 83%,表现出良好的光热转换性能。为了提高光-热转化效率,SONG Y 等<sup>[28]</sup>将相变微胶囊(PCMs)和具有光热效应的碳纳米管(CNTs)相结合,成功制备了多功能光热相变超疏水膜(MPPSF)。由于碳纳米管具有优良的光热转换效应,在  $808\text{ nm}$  近红外激光照射  $1\text{ W/cm}^2$  下,表面温度可在 180 s 内由  $-20^\circ\text{C}$  提高到  $130.1^\circ\text{C}$ ,从而实现了高效除冰。CHENG T 等<sup>[29]</sup>以 MNPs 为热介质,与氨基改性的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  颗粒混合,再与二乙烯三胺交联制备得到多功能磁性杂化涂层,具有优异的超疏水性和润湿稳定性以及较长的结冰延迟性能和优异的热除冰性能。

光热转换复合材料涂层通过有机-无机协同设计,将聚吡咯/PDMS 等柔性光热组分与  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Cu}_2\text{-xS}$ 、MAX 相等高稳定无机纳米粒子耦合,实现高效转换效率,且引入相变微胶囊(PCMs)突破了传统光热涂层对阳光的依赖。尽管该体系兼具轻质、高柔韧性、易加工及耐腐蚀优势,能在盐雾、酸碱等极端环境中长期服

役,但仍面临无机粒子团聚、高温下纳米结构失稳、大面积柔性基底附着强度不足及工艺成本偏高等挑战。

基于超疏水或超光滑表面的光热转换防冰涂层是最环保、最持久的外援除冰方法之一。虽然实现这一功能的防冰涂层仍然受到光强度、光持续时间、光热转换效率等客观因素的影响,但许多研究人员对提高转换效率和增加作用持续时间进行了深入研究。以有机材料为基底的光热转换防冰涂层轻质、可加工性强且成本低,但热稳定性差并且耐久性有限;而以无机材料为基底的具备高热稳定性、良好机械性能和耐化学腐蚀性的优点,但密度大、成本高、柔韧性还差;有机-无机复合材料则综合了两者优点,兼具优异的综合性能和协同效应,可调节性强,但制备工艺相对复杂。

#### 4 结语

本文着重介绍了能量转换涂层的主要防冰能力和机理,总结了单功能和多功能涂料在防冰领域的应用研究进展,分析了制备技术和材料特性的优缺点,指出了目前不同种类防冰涂料应用中存在的主要问题,并对其未来的发展趋势进行了展望。

就目前能量转换涂层的发展而言,光热转换涂层技术更加成熟,发展占据一定优势,已形成“光热材料+储能+超疏水”的复合体系,能够实现全天候防冰功能;电热转换防冰技术更加稳定可控,而且电热转换效率高(接近100%),通过导电材料直接实现了热能输出,但是依赖性太强受环境限制程度大,更适合小范围精准温控场;而磁热涂层仍处于实验室研究阶段,依赖磁性材料在交变磁场下的热效应,能量转换机制可行但缺乏实际工程验证。若不能解决磁场均匀性、材料性能稳定性等瓶颈,短期内磁热转换防冰涂层商业化难度较大。而面对单一功能的材料仍然无法达到与传统涂料(疏水性和润滑性涂料)相同的效果。从技术角度实现防冰材料的多功能集成和从可持续发展的角度实现材料的低能耗或主动除冰,需要通过优化材料设计和能量转化机制,减少对外部资源的依赖,实现涂层在各种环境下的高效除冰。

尽管目前各类涂层在实际应用中仍存在诸多问题,但随着技术的不断进步和研究的深入开展,通过多功能集成、技术创新和跨学科合作,有望实现涂层的全天候主动除冰,在更多领域发挥重要作用,为保障设备安全稳定运行提供有力支持。

#### 参考文献:

[1] 李剑,王湘雯,黄正勇,等.超疏水绝缘涂层制备与防冰、防污研究现状[J].电工技术学报,2017,32(16):61-75.

- [2] 郑奇凯,孙阔腾,黄松强,等.防冰涂层材料及电力材料防覆冰应用的研究进展[J].表面技术,2021,50(12):282-293.
- [3] BO W, XUEQIN Z, BINGKUN L, et al. Advances in superhydrophobic material research: from preparation to electrified railway protection [J].RSC Advances,2024,14(17):12204-12217.
- [4] 王军军,王贤明,吴连锋,等.超疏水涂层防覆冰机理及制备[J].化学通报,2021,84(6):515-523.
- [5] SOARES E G, CASTRO-GOMES J. Carbonation curing influencing factors of carbonated reactive magnesia cements (CRMC)-a review [J].Journal of Cleaner Production,2021,305:127210.
- [6] 马维,李洋,姚舒怀,等.光热防冰防霜防雾表面近期研究进展[J].物理学报,2022,71(8):341-351.
- [7] LI P, MU Y, YU Q, et al.A Superhydrophobic multiwalled carbon nanotube/epoxy nanocomposite with photothermal and electrothermal properties as durable anti-icing coating [J].ACS Applied Nano Materials,2025,8(30):15196-15207.
- [8] DENG L, WANG Z, WU J, et al.A superhydrophobic Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@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.
- [9] LI C, WANG C, LIU Y, et al. Electrospinning and multilayer modification to construct NH<sub>2</sub>/EPSP-modified polyacrylonitrile nanofiber films for humidity regulation [J].Progress in Organic Coatings,2023,178:107485.
- [10] HU J, HE X, CAI J, et al.Biodegradable CoSnO<sub>3</sub> nanozymes modulate pH-responsive graphene quantum dot release for synergistic chemosonodynamic nanocatalytic cancer therapy[J].Chemical Engineering Journal,2024,481:148561.
- [11] BAKSHI S R, BALANI K, AGARWAL A. Thermal conductivity of plasma-sprayed aluminum oxide-multiwalled carbon nanotube composites [J].Journal of the American Ceramic Society, 2008,91(3):942-947.
- [12] LUPOI R, LUPTON T, JENKINS R, et al. Direct manufacturing of diamond composite coatings onto silicon wafers and heat transfer performance[J].CIRP Annals,2018,67(1):185-188.
- [13] 邓卓梅.铜基表面超音速火焰喷涂制备 W-Cu 复合涂层及散热性能的研究[D].芜湖:安徽工程大学,2018.
- [14] PENG S, XIAO X, WEI J, et al. Superhydrophobic coating with electro-photo-thermal conversion properties for all-weather anti-icing [J].Solar Energy,2024,270:112384.
- [15] LIU X, CHAN H, ZHAO Z, et al. Slippery liquid-infused porous electric heating coating for anti-icing and de-icing

- applications [J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 374: 889–896.
- [16] WU X, CHEN Z, LIU J, et al. Co-combustion of Zn/Cd-hyperaccumulator and textile dyeing sludge: Heavy metal immobilizations, gas-to-ash behaviors, and their temperature and atmosphere dependencies [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 451: 138683.
- [17] YIN Y, ZHANG J, YANG S, et al. Effect of microstructure on the electrochemical dissolution behaviour of Hastelloy® X superalloy processed by selective laser melting and heat treatments [J]. Materials & Design, 2021, 206: 109828.
- [18] DING D, SHANG Z, ZHANG X, et al. Greatly enhanced thermal conductivity of polyimide composites by polydopamine modification and the 2D-aligned structure [J]. Ceramics International, 2020, 46(18): 28363–28372.
- [19] HUANG J, LI D, PENG Z, et al. High-efficient anti-icing/deicing method based on graphene foams [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(36): 43026–43037.
- [20] GUO W, LIU C, LI N, et al. A highly transparent and photothermal composite coating for effective anti-/de-icing of glass surfaces [J]. Nanoscale Advances, 2022, 4(13): 2884–2892.
- [21] 安燕, 荆永良, 刘涛, 等. 聚苯胺光热超疏水防冰涂层的制备及其防冰除冰性能 [J]. 中国腐蚀与防护学报, 2024, 44(6): 1485–1494.
- [22] WANG L, WANG Z, WANG F, et al. Response of performance, antibiotic resistance genes and bacterial community exposure to compound antibiotics stress: Full nitrification to shortcut nitrification and denitrification [J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 451: 138750.
- [23] YU B, SUN Z, LIU Y, et al. Photo-thermal superhydrophobic sponge for highly efficient anti-icing and de-icing [J]. Langmuir, 2023, 39(4): 1686–1693.
- [24] LI W, GAO C, HOU A, et al. One-pot in situ synthesis of expandable graphite-encapsulated paraffin composites for thermal energy storage [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 481: 148541.
- [25] 李梦潘, 杨朝琨, 吕双祺, 等. 基于微纳结构的光热疏水材料及其防结冰性能 [J]. 材料导报, 2025, 39(14): 236–245.
- [26] 郭浩冉, 王优强, 安恺, 等. CeO<sub>2</sub>/MWCNTs 光热超疏水复合涂层的制备及其防结冰/除冰性能 [J]. 表面技术, 2025, 54(12): 182–193.
- [27] WANG T, LI M, XU H, et al. MXene sediment-based poly(vinyl alcohol)/sodium alginate aerogel evaporator with vertically aligned channels for highly efficient solar steam generation [J]. Nano-Micro Letters, 2024, 16(1): 220.
- [28] SONG Y, SONG Z, JIANG C, et al. Ferroelectric layer-assisted asymmetric heterojunction boosts power output in silicon hydrovoltaic device [J]. Advanced Energy Materials, 2023, 13(48): 2302765.
- [29] CHENG T, HE R, ZHANG Q, et al. Magnetic particle-based super-hydrophobic coatings with excellent anti-icing and thermoresponsive deicing performance [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2015, 3(43): 21637–21646.

(上接第 29 页)

总之, PVC 涂胶机器人仿形自主调试技术的应用不仅显著提高了生产效率和质量, 还为制造业的智能化发展提供了坚实的技术支持。随着技术的不断进步和应用的深化, 这一领域将迎来更加广阔的发展前景。

#### 参考文献:

- [1] 陶洋, 姜磊, 晏飞, 等. 安川机器人仿形制作及其参数设定 [J]. 电镀与涂饰, 2021(10): 737–742.
- [2] 浙江吉利汽车研究院有限公司. 汽车涂装车门工装及具有该车门工装的连接结构: CN201210172350.7 [P]. 2012–10–17.
- [3] 华晨宝马汽车有限公司. 用于喷涂 PVC 涂料的枪嘴: CN 202122186728.6 [P]. 2021–12–21.
- [4] 张力. 浅谈外表面喷涂机器人仿形编制 [J]. 现代涂料与涂装, 2014(10): 1–3.
- [5] 黄波. 汽车涂装机器人全新车型仿形调试及常见问题研究 [J]. 现代涂料与涂装, 2020(7): 35–37.
- [6] 陈欣婷, 吴拉, 甘正贤, 等. 浅谈优化涂装机器人仿形提升外观质量 [J]. 现代涂料与涂装, 2020(6): 64–67.
- [7] 俞锋, 占早华, 吕正芳, 等. 涂装喷涂仿形制作和应用全过程质量控制 [J]. 现代涂料与涂装, 2023(5): 69–72.
- [8] 陈桂林, 辛锐, 何智卿, 等. 汽车涂装 PVC 喷涂线机器人效能提升研究 [J]. 现代涂料与涂装, 2023(12): 69–72.
- [9] 石雨磊, 季燕雄, 于春芳, 等. 机器人喷涂在汽车涂装中的应用 [J]. 现代涂料与涂装, 2014(1): 48–50.
- [10] 乔新义, 陈冬雪, 张书健, 等. 喷涂机器人及其在工业中的应用 [J]. 现代涂料与涂装, 2016(8): 53–55.