

# 基于 N 改性 MXene/SiO<sub>2</sub> 气凝胶复合光热涂层的风机叶片除冰性能研究

何建军<sup>1,2</sup>, 白郑言<sup>1,\*</sup>, 段子豪<sup>1</sup>, 唐奕<sup>1</sup>, 杨迪<sup>1</sup>

1. 长沙理工大学能源与动力工程学院, 长沙 410114
2. 长沙理工大学电网防灾减灾全国重点实验室, 长沙 410114

**摘要:** [目的] 针对寒冷地区风机叶片覆冰问题, 开发一种高效、稳定的光热除冰涂层, 以提升除冰效率并降低能源消耗。[方法] 通过尿素热解法制备氮掺杂二维过渡金属碳(氮)化物 MXene (MXene@N), 并将其与 SiO<sub>2</sub> 气凝胶复合, 构建具有“光热转换-热管理”协同机制的功能涂层。采用扫描电镜(SEM)、能谱(EDS)、吸收光谱、热成像等手段表征涂层的结构、光热性能及除冰行为, 考察其在不同厚度冰层覆盖下的除冰效果与循环稳定性。[结果] 在 MXene 表面实现了 5.3% (原子分数) 氮原子掺杂, 掺杂后的 MXene@N 仍保持层状结构, 且层间距扩大至 0.98 nm, 光吸收率较未掺杂样品提升 7.41%。MXene@N 质量分数为 15% 的水性聚氨酯涂层光热性能最佳, 在近红外光下平均吸收率达 89.7%, 光热-散热动态平衡温度为 147.6 °C, 被 2 mm 和 4 mm 厚的冰层覆盖后的除冰时间分别为 45 s 和 90 s, 对 2 mm 厚的冰层循环除冰 30 次后的除冰时间不超过 47.8 s, 在磨损和酸/碱浸泡试验中都表现出良好的结构与性能稳定性。[结论] 氮掺杂有效增强了 MXene 的光热转换性能, 而 SiO<sub>2</sub> 气凝胶作为隔热与分散基质, 显著提升了涂层的热管理能力与耐久性。该复合涂层兼具高效、稳定、环境适应性强等优点, 为风机叶片除冰提供了一种有实际应用前景的方案。

**关键词:** 二维过渡金属碳(氮)化物; 氮改性; 二氧化硅气凝胶; 水性聚氨酯; 复合涂层; 风机叶片; 光热除冰

**中图分类号:** TQ637

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-227X (2026) 04-0091-10

## Deicing performance of wind turbine blades based on N-modified MXene/SiO<sub>2</sub> aerogel composite photothermal coating

HE Jianjun<sup>1,2</sup>, BAI Zhengyan<sup>1,\*</sup>, DUAN Zihao<sup>1</sup>, TANG Yi<sup>1</sup>, YANG Di<sup>1</sup>

1. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China
2. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China

**Abstract:** [Objective] Aiming at the problem of ice accretion on wind turbine blades in cold regions, an efficient and stable photothermal deicing coating was developed to improve deicing efficiency and reduce energy consumption. [Method] A Nitrogen-doped two-dimensional MXene material (MXene@N) was prepared by the urea pyrolysis method and then composited with SiO<sub>2</sub> aerogel to construct a functional coating with a synergistic “photothermal conversion-thermal control” mechanism. The structure, photothermal performance, and deicing behavior of the coating were characterized by scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive spectroscopy (EDS), absorption spectroscopy, and thermography. The deicing effectiveness under ice layers of different thicknesses and the cyclic stability of the coating were evaluated. [Result] Nitrogen doping with an atomic fraction of 5.3% was achieved on the MXene surface. The resulting MXene@N retained a layered structure with an expanded interlayer spacing of 0.98 nm, and its light absorption rate was increased by 7.41% compared with the undoped MXene. The waterborne polyurethane coating containing 15% (mass fraction) MXene@N exhibited the optimal photothermal performance, with an average near-infrared absorption rate of 89.7% and a dynamic equilibrium temperature of 147.6 °C under photothermal heating and heat dissipation. The deicing times for 2 mm-thick and 4 mm-thick ice layers were 45 s and 90 s, respectively. After 30 cycles of deicing for the 2 mm-thick ice layer, the deicing time remained below 47.8 s. The coating also showed excellent structural and performance stability in abrasion tests and acid/alkali immersion tests. [Conclusion] Nitrogen doping effectively enhances

**收稿日期:** 2025-09-17 **修回日期:** 2025-10-25

**基金项目:** 湖南省自然科学基金项目 (2025JJ90172)。

**第一作者:** 何建军 (1974-), 男, 博士, 教授, 研究方向为特种功能涂层材料。

**通信作者:** 白郑言 (1999-), 男, 硕士, 研究方向为风机叶片除冰技术。

**引用格式:** 何建军, 白郑言, 段子豪, 等. 基于 N 改性 MXene/SiO<sub>2</sub> 气凝胶复合光热涂层的风机叶片除冰性能研究[J]. 电镀与涂饰, 2026, 45 (4): 91-100.

HE J J, BAI Z Y, DUAN Z H, et al. Deicing performance of wind turbine blades based on N-modified MXene/SiO<sub>2</sub> aerogel composite photothermal coating [J]. Electroplating & Finishing, 2026, 45 (4): 91-100.

the photothermal conversion performance of MXene, while SiO<sub>2</sub> aerogel acts as a thermal insulating and dispersing matrix, significantly improving the thermal control and durability of the coating. This composite coating has the advantages of high efficiency, good stability, and strong environmental adaptability, providing a promising solution for deicing of wind turbine blades.

**Keywords:** MXene; nitrogen modification; silica aerogel; waterborne polyurethane; composite coating; wind turbine blade; photothermal deicing

风能作为重要的清洁能源，在全球能源结构转型中占据关键地位<sup>[1]</sup>。我国风电场多建于风力资源丰富的高山、寒冷地区，这些区域气候湿冷，风机叶片覆冰现象普遍且严重<sup>[2-3]</sup>。叶片覆冰不仅会降低风机气动性能与发电效率，还会引发质量不平衡振动、测风失真、冰层脱落等安全隐患<sup>[4-6]</sup>，亟需开发高效、可靠的除冰解决方案。

目前风机叶片主流的除冰技术包括电加热除冰、气热除冰、超声波除冰及特殊功能涂层除冰<sup>[7]</sup>。其中，光热涂层除冰技术因能耗低、环境友好、操作简便等优势而受到广泛关注<sup>[8]</sup>。该技术的核心在于光热材料对太阳光谱(特别是近红外波段)的选择性吸收与高效转换，将光能转化为热能来提升表面温度，实现融冰与防覆冰<sup>[9]</sup>。MXene(如 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>)作为一种新型二维过渡金属碳(氮)化物，凭借其独特的局域表面等离子体共振(LSPR)效应和覆盖紫外至近红外波段的宽谱光吸收特性，具备了快速光致升温能力和优异的光热转换效率，在光热应用领域展现出巨大潜力<sup>[10]</sup>。目前 MXene 在光热领域的应用主要体现在光热蒸水、光热催化、光热杀菌等方面<sup>[11]</sup>，在光热除冰领域的探索仍处于初步阶段，尤其是在风机叶片除冰领域应用时面临两大挑战：首先，MXene 材料在低温、高湿的复杂冰缘环境下，其光热转换效率不稳定<sup>[12]</sup>；其次，MXene 材料与聚合物基体的界面相容性差，在涂层中分散不均，影响了涂层的机械耐久性与长效性<sup>[13]</sup>。另外，传统光热涂层产生的热量缺乏有效管理，大量热能会向内传递至叶片复合材料基体，可能引致基体过热、性能退化，甚至出现不可逆损伤<sup>[14-15]</sup>。

基于此，本文提出一种氮(N)掺杂改性 MXene(记为 MXene@N)与 SiO<sub>2</sub> 气凝胶复合的光热除冰涂层，其结构如图 1 所示。对 MXene 进行 N 掺杂旨在调控其电子结构，进一步提升光吸收率与光热转换效率。同时，创新性地采用 SiO<sub>2</sub> 气凝胶构建隔热底层，利用其三维纳米多孔结构，为后续 MXene@N 光热层提供稳定的附着基底。该结构通过物理锚定作用促进了 MXene@N 在涂层中的均匀分布与固载，并能有效阻隔热量向叶片基材的传递，由此构建起“光热转换-热管理”协同机制，最终获得兼具高效光热活性与优异隔热性能的复合涂层，为寒冷地区风机叶片提供一种高效、节能且长效的热防护除冰新方案。

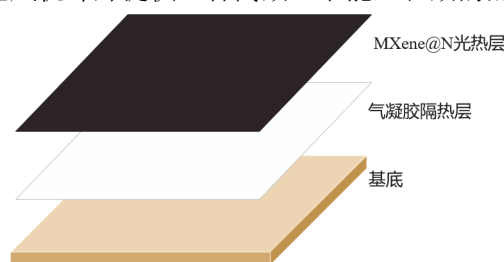


图 1 复合光热涂层结构示意图

Figure 1 Schematic diagram showing the structure of photothermal composite coating

## 1 实验

### 1.1 主要原料及仪器

SiO<sub>2</sub> 气凝胶溶液(粒径 20~70 μm): 自制<sup>[16]</sup>; 陶瓷材料 MAX(化学式 Ti<sub>3</sub>AlC<sub>2</sub>, 200 目, 质量分数 95%): 吉林 11 科技公司; 氟化锂(质量分数 99%)、盐酸(质量分数 36%~38%)、尿素(分析纯)和聚乙烯吡咯烷酮(生化试剂级): 阿拉丁试剂; 聚四氟乙烯(分析纯)、无水乙醇(工业级, 质量分数 99.5%)和水性聚氨酯(固含量 60%): 麦克林科技公司。

Mira4 扫描电子显微镜(SEM): 泰思肯(中国)有限公司; ESCALAB 250Xi X 射线能谱分析仪(EDS): 赛默飞世尔科技公司; HW808AD1000-34F 近红外激光发生器: 深圳市红外线激光科技有限公司; VT04 红外热成像测温仪: 上海福祿克测试仪器有限公司; GSL-1600X 管式炉: 上海精密仪器仪表有限公司。

## 1.2 N 掺杂 MXene/SiO<sub>2</sub> 气凝胶复合光热涂层的制备

### 1.2.1 改性 MXene@N 材料的制备

将 3.2 g 氟化锂与 40 mL 盐酸加入聚四氟乙烯反应釜中, 40 °C 搅拌 15 min 后分批缓慢加入 2 g 钛碳化铝粉末, 维持 40 °C 和转速 500 r/min 反应 48 h 得到混合浆料。将浆液置于 3 500 r/min 转速下离心 7-8 次至 pH 达到 6 后进行真空抽滤, 收集沉淀物并继续离心直到出现黏性沉淀后停止, 将上层黑色液体倒掉并加入 50 mL 去离子水, 通入氩气, 低温超声处理 1 h, 再次以 3 000 r/min 的转速离心 30 min, 得到墨绿色钛化碳分散液。底层沉淀经水洗抽滤、40 °C 真空干燥 8 h, 研磨得 MXene 粉末。最后将制得的 MXene 粉末与尿素按质量比 1:3 干法研磨混合, 置于管式炉中进行退火处理(升温速率 2 °C/min), 在 550 °C 下保温 3 h, 待自然冷却至室温, 制得 MXene@N 材料。

### 1.2.2 复合光热涂层的制备

选用 25 mm × 25 mm 的载玻片作为基材。实验前, 依次使用丙酮、去离子水和乙醇对载玻片进行处理和超声波清洗(每次 20 min), 随后在 100 °C 的干燥箱中恒温处理 24 h, 密封保存备用。将水性聚氨酯(PU)与去离子水按 1:5 的质量比混合, 在室温下以 500 r/min 的速率磁力搅拌 1 h, 形成均匀透明的 PU 溶液; 随后将 MXene@N 分散液与 PU 溶液按一定比例混合, 继续磁力搅拌 2 h, 之后通过超声处理 30 min 进一步分散 MXene@N 并去除气泡, 得到 PU/MXene@N 复合溶液。将 SiO<sub>2</sub> 气凝胶溶液与去离子水混合, 磁力搅拌后装入喷涂设备, 在基材表面均匀喷涂, 得到气凝胶隔热底层(厚度约 1 mm)。将制备好的 PU/MXene@N 复合溶液装入喷涂设备, 每次定量 3 mL, 在气凝胶底层表面以 20~30 cm 的喷涂距离和 0.5 MPa 的压力均匀喷涂, 每层喷涂后在 60 °C 下预干燥 10 min, 重复喷涂 5 次, 最终形成厚度约为 2 mm 的复合涂层, 最后将涂层置于 80 °C 下固化 2 h, 形成稳定的 MXene@N/SiO<sub>2</sub> 气凝胶复合涂层(后文简称复合涂层)。不同 MXene@N 质量分数的复合涂层样品的编号和配方见表 1。

表 1 复合涂层样品编号及其成分配比  
Table 1 Codes and compositions of composite coating samples

| 涂层编号 | w(MXene@N)/% | m(MXene@N)/g | m(分散剂)/g | m(水性聚氨酯)/g | m(去离子水)/g |
|------|--------------|--------------|----------|------------|-----------|
| M-8  | 8            | 0.80         | 0.01     | 9.19       | 适量        |
| M-10 | 10           | 1.00         | 0.02     | 8.98       | 适量        |
| M-15 | 15           | 1.50         | 0.03     | 8.47       | 适量        |
| M-20 | 20           | 2.00         | 0.04     | 7.96       | 适量        |

## 1.3 测试与表征

### 1.3.1 表面形貌

使用扫描电子显微镜对制得的光热复合涂层的形貌进行观察并加以分析, 采用 X 射线能谱分析仪分析涂层中的元素成分, 测试前对涂层进行导电胶固定和喷金处理。

### 1.3.2 光热性能

采用光谱仪测试涂层样品的光吸收性能。测试前, 将涂层样品固定在样品架上, 确保测试表面平整。测试参数设置如下: 波长 500~1 300 nm, 扫描间隔 5 nm, 积分时间 0.5 s。每个涂层样品重复测试 3 次, 取平均值作为最终结果。

在恒温下使用近红外激光发生器对涂层表面进行直接照射, 样品水平放置, 发生器距离样品表面 30 cm。使用红外热成像仪记录涂层表面温度的变化情况, 红外热像仪固定于样品正上方 20 cm 处, 每 10 s 记录一次涂层表面温度。当连续 3 次测量的温度变化小于 0.5 °C 时, 认为涂层达到光热-散热动态平衡, 此时的稳定温度即为光热平衡温度(后文简称“平衡温度”)。通过分析温度-时间曲线, 评价涂层的光热转换性能。

### 1.3.3 除冰性能

利用结冰试验台将复合涂层样品置于-10 °C、相对湿度 60%的环境中, 当其表面形成厚度分别为 2 mm 和 4 mm 的冰层后, 使用 850 nm 近红外激光(功率 1 W)进行照射。通过红外热成像仪实时记录冰层表面温度的变化, 并利用高清摄像机记录除冰过程, 每组实验重复 5 次。记录从开始照射至冰层与涂层接触界面

融化、导致冰层脱离的时间，并计算其平均值。该时间反映了涂层加热时融化冰层/涂层界面、解除界面粘结的效率，可用于定量表征其不同冰层厚度下的除冰效率。另外，在 2 mm 冰层厚度下进行循环除冰测试，考察涂层的实际除冰能力。

### 1.3.4 稳定性

涂层的耐磨损性能测试按照往复运动磨损试验标准进行，将复合涂层样品置于 800 目砂纸上，随后对涂层分别施加 50 g 和 100 g 的磨损负重，以 50 mm/s 的速率沿水平方向推动试样，移动 10 cm 记为一次磨损。完成一次磨损后，将样品旋转 90°，沿垂直于上一次磨损的方向重复上述过程。每组进行 30 次磨损实验，记录磨损后的质量损失。另外，对不同载荷下磨损后涂层的光热性能进行测试。

涂层的耐酸碱性按国标 GB/T 9274-1988《色漆和清漆 耐液体介质的测定》进行测试，将复合涂层样本分别浸泡于 50 g/L H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中 168 h 和 100 g/L NaOH 溶液中 96 h，同时设置对照组(即置于去离子水中 168 h)，观察涂层表面情况。酸碱性测试完毕，将浸泡后的涂层洗净并干燥，测试涂层的平衡温度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 表征结果及分析

#### 2.1.1 MXene@N 材料的表征

采用化学刻蚀法制备的 MXene，成功去除了 MAX 前体中的 Al 原子层，其 SEM 形貌如图 2a 所示。所得材料呈现典型的“手风琴状”多层结构<sup>[17]</sup>，相较于刻蚀前的 MAX 前驱体，这种剥离得到的“手风琴状”多层结构显著增大了比表面积，提高了材料的分散性，并为增强光吸收能力及光热转换效率提供了结构基础。为进一步优化光热性能，采用氮元素对 MXene 进行掺杂改性。氮掺杂有助于提高材料的自由载流子浓度：氮原子作为电子给体，可取代晶格中的碳原子或与表面官能团(如羟基—OH、端氧基=O)结合，为体系注入额外的自由电子，从而增强 LSPR 效应，拓宽光子捕获范围，对近红外区域的性能提升尤其显著。此外，氮掺杂可调控 MXene 的能带结构，缩小光学带隙，促进可见光至近红外区域低能量光子的吸收，进而高效产生电子-空穴对，并通过非辐射弛豫过程将其能量转化为热能<sup>[18]</sup>。

图 2b 为所制 MXene@N 材料的 SEM 图像。氮掺杂后，材料仍保持清晰的多层片状堆叠结构，层间距约为 0.98 nm，较未掺杂样品的层间距(约 0.87 nm)明显增大。该现象可归因于尿素热解过程中产生的气体对 MXene 的插层与剥离作用，从而有效扩大了其层间距。增大的层间距有效减少了纳米片的重新堆叠，有利于光在层间的多次反射与吸收，从而增强了整体光捕获能力。

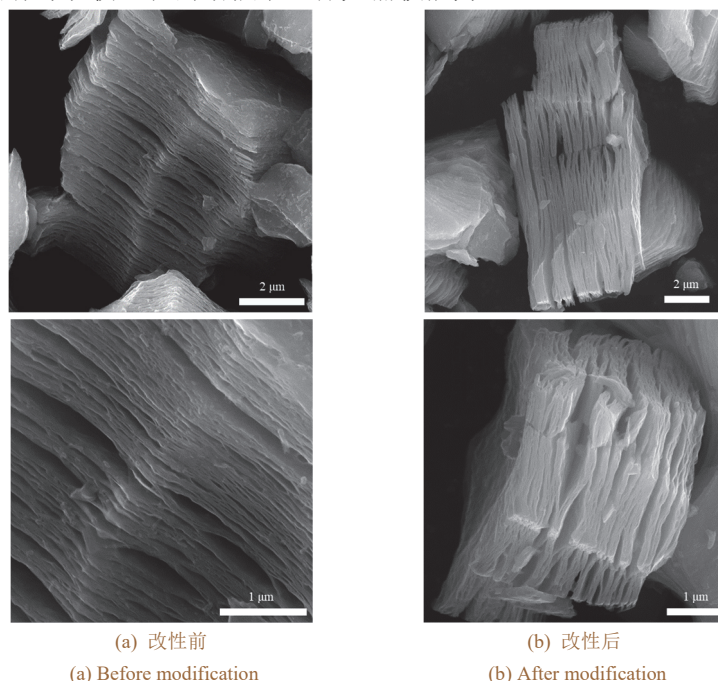


图 2 MXene 材料 N 改性前后的 SEM 图像

Figure 2 SEM images of MXene material before and after modification with nitrogen

综上所述,尿素热解掺杂法在实现氮元素掺杂的同时,较好地维持了 MXene 的主体结构稳定性,为其后续性能研究奠定了可靠基础。

为探究 MXene 及 MXene@N 材料的化学组成与元素分布,采用 EDS 进行表征。如图 3 所示, MXene 中 Ti 和 C 元素分布均匀,符合其理论结构特征<sup>[19]</sup>。MXene@N 材料的 EDS 分析结果如图 4 所示。比较改性前后元素分布可知, N 元素以 5.3% 的原子分数成功掺杂于 MXene 材料中,而 Ti 与 C 元素的分布形态及 Ti/C 原子比(约 3:2)未发生显著变化。以上结果表明,尿素热解掺杂法在实现氮元素均匀掺杂的同时,未显著改变 MXene 的主体化学组成和元素分布,可见该改性过程在引入氮的同时,较好地保持了 MXene 本征结构的稳定,氮掺杂改性过程有效且可控,这为后续光热性能研究提供了可靠的成分依据。

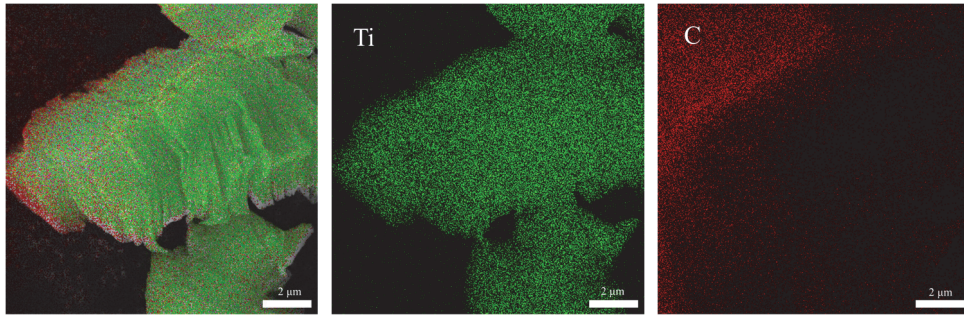


图 3 MXene 材料的 Ti、C 元素分布图

Figure 3 Distribution maps of Ti and C for MXene material

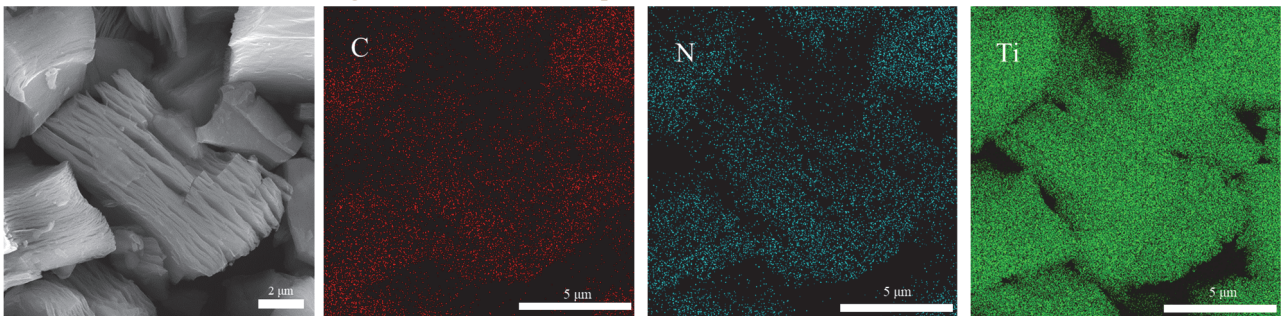


图 4 MXene@N 材料的 C、N、Ti 元素分布图

Figure 4 Distribution maps of C, N, and Ti for MXene@N material

### 2.1.2 复合涂层的表征

图 5 展示了复合涂层的 SEM 图像。从观察区域内可见 MXene@N 颗粒在涂层表面呈现均匀分布,且保持了其自身的层状结构。这种均匀分散且开放的结构有利于增大材料与光的接触面积,为高效的光吸收和光热转换提供了有利条件。复合涂层表面的 EDS 元素分布如图 6a 显示, Ti、C 和 N 元素在整个复合涂层中均匀分布,进一步证实氮的成功掺杂; Si 元素信号与气凝胶骨架形态高度吻合,表明 MXene@N 与气凝胶基质结合良好,各组分分布均匀。图 6b 展示了复合涂层截面的 SEM 图像及 EDS 分析结果,可见 MXene@N 在气凝胶(粒径 0.05 ~ 0.10 mm)孔道中受尺寸差异与空间限域效应的协同作用,实现了在孔隙网络中的渗透与均匀填充。N 与 Si 元素的分布在空间上呈现互补特征,表明 MXene@N 与 SiO<sub>2</sub> 气凝胶基质实现了良好的复合,两者在界面处可能形成了紧密的相互作用。这种均匀复合的微观结构有望为涂层提供良好的机械稳定性,并有利于构建高效的热传导网络,从而协同实现高效的光热转换与热管理效果。

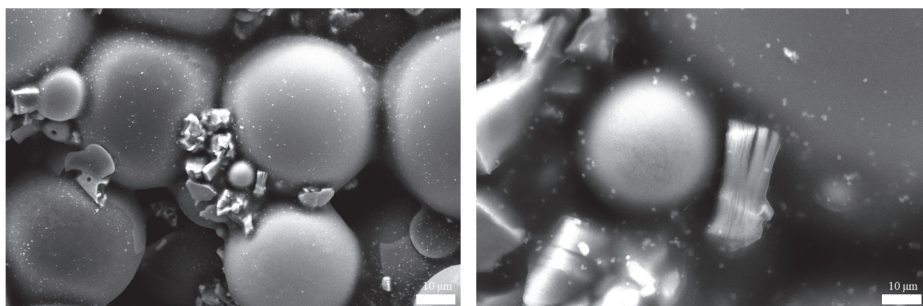


图 5 复合涂层表面的 SEM 图像

Figure 5 SEM images of composite coating surface

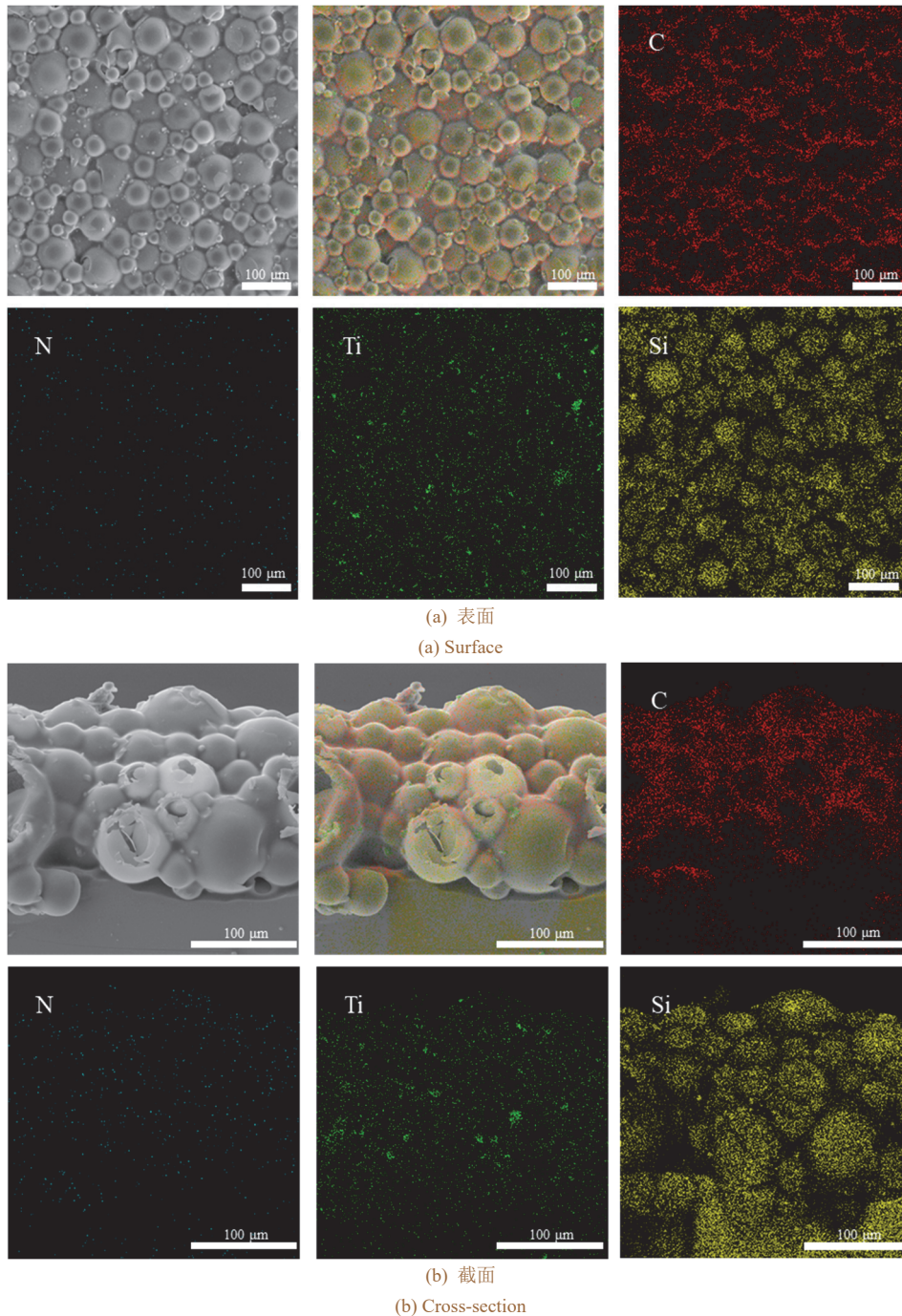


图 6 复合涂层的 EDS 元素映射图像及各种元素的分布图

Figure 6 EDS mapping images and elemental distribution of the composite coating

## 2.2 涂层的光热性能测试

水性聚氨酯基体本身光吸收能力较弱,但可有效分散并固定 MXene@N 纳米材料,构成稳定的复合涂层结构。本研究所制涂层用于风机叶片除冰环境,光热性能测试在室温下进行,目的是在基础条件下系统评估并对比不同涂层的本征光热转换能力,为除冰性能研究筛选最优配方。不同 MXene@N 添加量的复合涂层样品的吸收光谱如图 7a 所示。在 500 ~ 1 300 nm 波长范围内, M-15 涂层表现出最优的光捕获能力,平均吸收率达 89.7%,并在 800 nm 附近出现由层状结构及 LSPR 效应引起的特征吸收峰。低添加量样品(M-8 和 M-10)因 MXene@N 材料不足,致使吸光性能受限;而高添加量样品(M-20)的吸收性能相对于 M-15 反而出现下降,这是因为过高的填料浓度导致了纳米颗粒团聚,从而增强了光散射并减少了有效光吸收面积<sup>[20]</sup>。图 7b 显示了在 M-8 样品的质量分数(8%)下采用 MXene@N 的涂层与采用未掺杂 MXene 的涂层在光吸收行为上的差异,氮掺杂样品的吸收率显著提高,较未掺杂样品提升约 7.41%。这主要得益于氮掺杂引入了额外自由载流子,增强了 LSPR 效应并窄化了材料的光学带隙,有效提升了光吸收能力。

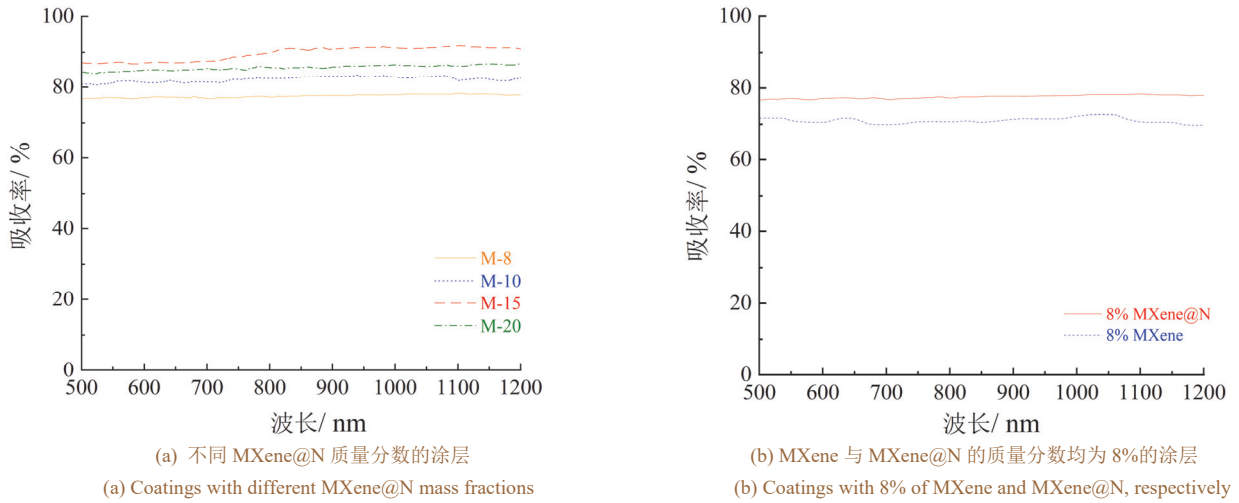


图 7 不同涂层的近红外吸收光谱图

Figure 7 Near-infrared absorption spectra of different coatings

图 8a 为近红外光照射下不同涂层的温度-时间变化曲线。所有样品均呈现快速升温后趋于平衡的特征，初始升温速率表现为： $M-8 < M-10 < M-20 < M-15$ 。其中，M-8 样品因 MXene@N 含量较低，前 60 s 内的平均温升速率为  $1.06\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ，并于 170 s 后达到平衡温度  $74.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，其升温速率和平衡温度均较低；M-10 在近红外光照射后 60 s 内的平均温升速率为  $1.63\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ，并于 200 s 后升至  $112.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，随后趋于稳定；M-15 性能最优，在前 60 s 内的平均温升速率最高 ( $2.28\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ )，并于 200 s 左右达到最高平衡温度  $147.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；而 M-20 尽管初始升温较 M-8 和 M-10 明显加快，为  $2.09\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ，但在 200 s 后其最终平衡温度仅达到  $139.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，低于 M-15。结合 M-20 的吸收光谱性能下降现象进行分析，认为这是由于过高的 MXene@N 含量导致纳米颗粒在涂层中发生团聚，一方面增强了光散射，另一方面减少了有效的光热转换位点，最终限制了整体性能的提升。该结果进一步表明存在一个最优的 MXene@N 填充比例，在质量分数 15% 之下，材料分散均匀且光吸收率最优。

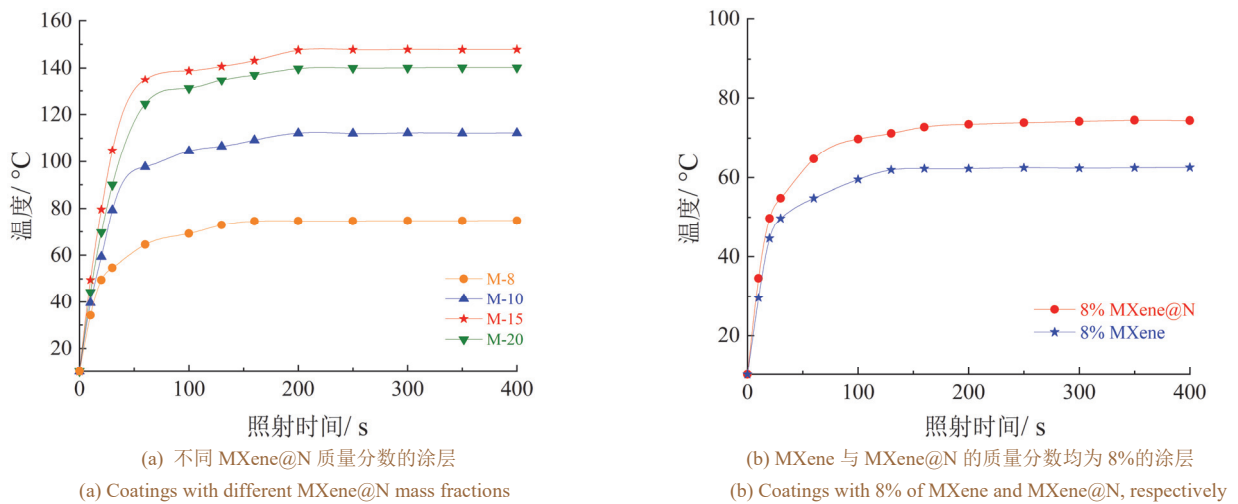


图 8 不同涂层的温度随近红外照射时间的变化

Figure 8 Temperature vs. near-infrared irradiation time curves of different coatings

图 8b 进一步对比了相同质量分数 (8%) 下 MXene@N 涂层与未掺杂 MXene 涂层的升温过程。MXene@N 涂层显现出更高的升温速率和平衡温度，平衡温度相比于改性前提高了 21.90%。这说明氮掺杂不仅提升了涂层的光吸收能力，还显著增强了光热转换效率。

### 2.3 涂层的除冰性能测试

为探究复合涂层的光热除冰性能，在近红外光照射下测试了覆盖有 2 mm 与 4 mm 厚度的冰层的表面融化行为。图 9 通过时序图像展示了不同厚度冰层在红外光照下的融化过程。实验结果表明，2 mm 厚的冰层在近红外光照射下于 15 s 开始融化，30 s 内中心区域完全融化，45 s 后接触冰层彻底融化；而 4 mm 厚的冰层需 20 s 才开始融化，50 s 内中心区域基本消融，90 s 后接触冰层全部融化。

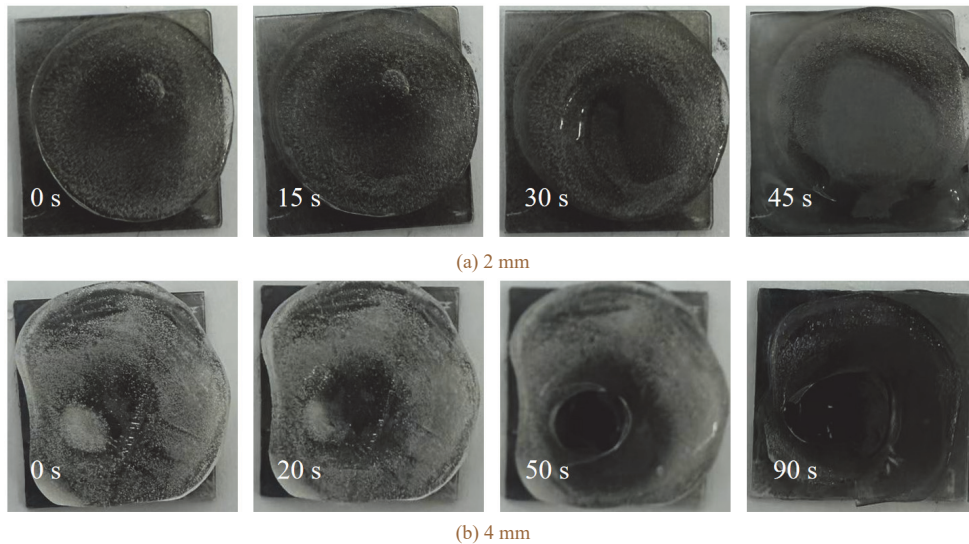


图 9 M-15 复合涂层上不同厚度的冰层在近红外光照射下的融化过程

Figure 9 Melting processes of ice layers with different thicknesses on M-15 composite coating under near-infrared irradiation

在光热除冰过程中，涂层产生的热量首先传导至与之接触的底层冰，使其由内向外发生相变融化。除冰时间的差异主要缘于两个方面：其一，冰层厚度增加显著提高了融化所需的总热负荷；其二，当冰层较厚时，内部融化的液态水被外部冰体封住，增强了近红外光在冰-水混合体系中的散射与折射，造成光能分散、能量密度下降，从而降低了有效光热转换效率。

图 10 为近红外照射 60 s 后不同厚度冰层覆盖下涂层的红外热成像图。在 2 mm 厚的冰层下，涂层中心温度升至 37.6 °C；而在 4 mm 厚的冰层下，涂层中心温度为 30.1 °C。尽管冰层融化吸收了大量相变潜热，导致涂层表面温度显著低于无冰状态下的温度 (135.0 °C)，但涂层表面温度仍能迅速提升至 0 °C 以上，并维持融化所需的热量供给，表明其具有强劲的光热响应能力，满足本实验条件下 2~4 mm 厚冰层的除冰需求。

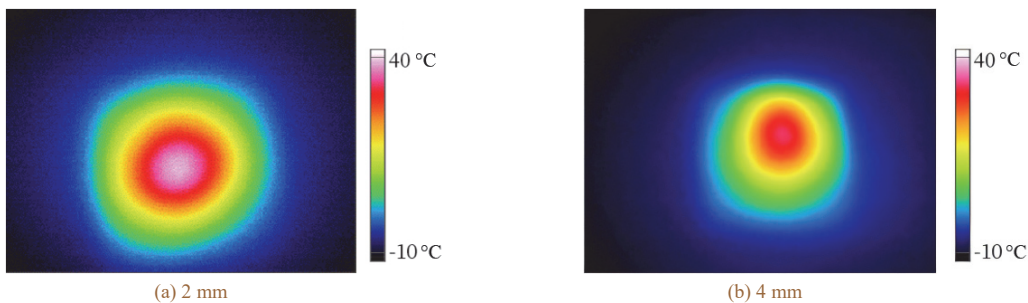


图 10 不同厚度的冰层在近红外照射 60 s 后 M-15 复合涂层表面的热分布图像

Figure 10 Thermal distribution images of M-15 composite coating surfaces covered with ice layers of different thicknesses after 60 seconds of near-infrared irradiation

涂层的循环除冰性能如图 11 所示。经历多次除冰循环后，除冰时间基本稳定在 45 s 左右。尽管第 28 次循环时除冰时间略增至 47.8 s，这主要归因于循环过程中存在少量 MXene@N 颗粒流失而导致光热性能轻微衰减，但涂层仍保持较高的除冰效率与稳定性，表明其具备实际应用的可靠性和耐久性。

## 2.4 涂层的稳定性分析

M-15 复合涂层的耐磨性测试结果见表 2。在 50 g 负重下，涂层的磨损率为 1.96%，且在相同的光热测试条件下，磨损前后的平衡温度未发生显著变化，表明涂层结构稳定性良好，光热性能得以有效保持。在 100 g 负重下，涂层磨损率为 5.82%，平衡温度下降 25.1%，但仍保持良好的光热转换能力，可满足实际应用需求。该结果表明涂层能够抵抗机械磨损对其功能性的影响。其耐磨性主要源于水性聚氨酯基体的韧性及 MXene@N 颗粒在基质中的良好分散与结合，从而在表面发生磨损时仍能维持光热组分的有效含量与分布。

表 3 显示了 M-15 复合涂层分别在 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液、NaOH 溶液及去离子水中浸泡前后的平衡温度。在去离子水中浸泡后，涂层平衡温度未发生显著变化，表明其光热性能保持稳定。在酸性和碱性溶液中浸泡后，涂层的平衡温度虽分别下降 8.51% 和 12.01%，但仍达到 130 °C 左右，远高于融冰临界温度，可满足除冰

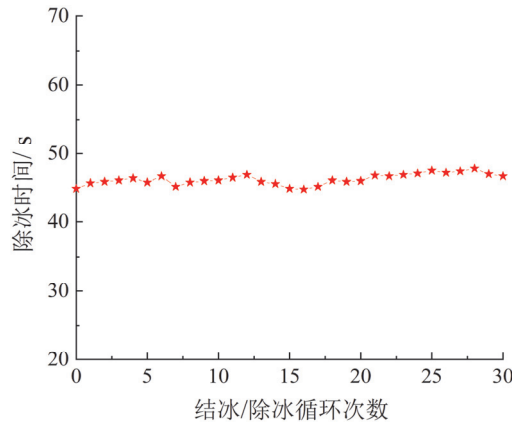


图 11 M-15 复合涂层的循环除冰时间

Figure 11 Deicing time of M-15 composite coating during icing/deicing cycles

表 2 M-15 复合涂层的磨损试验结果

Table 2 Abrasion test results of M-15 composite coating

| 负重/g | 载荷/(N·m <sup>-2</sup> ) | 磨损率/% | 磨损前的平衡温度/°C | 磨损后的平衡温度/°C |
|------|-------------------------|-------|-------------|-------------|
| 50   | 800                     | 1.96  | 146.3       | 141.5       |
| 100  | 1 600                   | 5.82  | 146.3       | 105.2       |

表 3 M-15 复合涂层在不同介质中浸泡前后的平衡温度

Table 3 Equilibrium temperature of M-15 composite coating before and after immersion in different media

| 介质                                       | 浸泡前的平衡温度/°C | 浸泡后的平衡温度/°C |
|--|-------------|-------------|
| 50 g/L H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 溶液 | 146.8       | 134.3       |
| 100 g/L NaOH 溶液                          | 146.5       | 128.9       |
| 去离子水                                     | 147.3       | 146.8       |

所需的热量供给。浸泡后涂层表面未出现起泡、皱褶或明显变色等现象，显示出良好的耐化学腐蚀性和结构完整性，满足实际应用对耐久性的要求。该现象是由于聚氨酯基体与 MXene@N 颗粒间的良好相容性及界面结合力有效阻隔了腐蚀介质的渗透，从而保证涂层在复杂化学环境中的性能稳定。

### 3 结论

本研究成功制备了氮掺杂 MXene (MXene@N) 与 SiO<sub>2</sub> 气凝胶复合的光热涂层，并系统验证了其在风机叶片主动除冰应用中的性能。主要结论如下：

- 1) 氮掺杂改性在保持 MXene 原有层状结构的基础上，通过尿素热解插层效应扩大了层间距，并实现了氮元素在 MXene 表面以 5.3% 的原子分数均匀掺杂，有效增强了材料的光吸收能力和光热转换性能。
- 2) 当 MXene@N 质量分数为 15% 时，所制备的水性聚氨酯涂层表现出最优的综合性能：近红外光吸收率 89.7%，初始升温速率约 2.28 °C/s，平衡温度 147.6 °C (较未掺杂涂层提高 21.90%)，表明氮掺杂显著提升了光热转化效率。另外，该涂层在厚度 2 mm 与 4 mm 的冰层覆盖条件下均表现出良好的除冰性能，除冰时间短且循环稳定性良好，在 20 次循环后仍保持较高的除冰效率，即使受到机械磨损和化学腐蚀，仍能维持结构完整和性能稳定，显示出较强的工程适用性。
- 3) SiO<sub>2</sub> 气凝胶作为多功能基质，不仅实现了 MXene@N 颗粒的均匀分散与固定，还通过其纳米多孔结构有效抑制了热量向基材的传递，显著提升了涂层的热管理能力和耐久性。

#### 参考文献：

[1] 张家蓓. 经济转型升级中传统能源行业的绿色转型路径[C] // 2024 新质生产力视域下智慧建筑与经济发展论坛论文集(三). [出版地不详: 出版者不详], 2024: 59-60.  
ZHANG J B. The green transformation path of traditional energy industry in economic transformation and upgrading [C] // Proceedings of the 2024 Forum on Smart Buildings and Economic Development in the Context of New-Quality Productive Forces: Vol. 3. [S.l.: s.n.], 2024: 59-60.

[2] GAO L, HU H. Wind turbine icing characteristics and icing-induced power losses to utility-scale wind turbines [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021, 118 (42): e2111461118.

[3] 胡琴, 杨大川, 蒋兴良, 等. 叶片模拟冰对风力发电机功率特性影响的试验研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35 (22): 4807-4815.  
HU Q, YANG D C, JIANG X L, et al. Experimental study on the effect of blade simulated icing on power characteristics of wind turbine [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (22): 4807-4815.

- [4] 成和祥, 行九晖, 刘杰, 等. 风电机组叶片覆冰形成原因及覆冰防治概述[J]. 电力设备管理, 2021 (6): 104-107.  
CHENG H, XING J, LIU J, et al. An overview of the causes of icing on wind turbine blades and the prevention and control of icing [J]. Electric Power Equipment Management, 2021 (6): 104-107.
- [5] DANILUK V, XU Y M, LIU R B, et al. Ultrasonic de-icing of wind turbine blades: Performance comparison of perspective transducers [J]. Renewable Energy, 2020, 145: 2005-2018.
- [6] HU Q, YANG H, JIANG X L, et al. Investigation on one-step preparation and anti-icing experiments of robust super-hydrophobic surface on wind turbine blades [J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 195: 103484.
- [7] 倪一帆, 张作贵, 符锐. 风力发电机叶片覆冰机理及防冻除冰技术的研究进展[J]. 发电设备, 2023, 37 (4): 223-229.  
NI Y F, ZHANG Z G, FU R. Review of icing mechanism and anti-icing/de-icing techniques for wind-generator set blade [J]. Power Equipment, 2023, 37 (4): 223-229.
- [8] 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.
- [9] JIANG L H, HAN M M, SUN J J, et al. Strong mechanical and durable superhydrophobic photothermal MWCNTs/SiO<sub>2</sub>/PDMS/PVDF composite coating for anti-icing and de-icing [J]. Progress in Organic Coatings, 2023, 174: 107282.
- [10] WANG Z Y, ZHU Y J, CHEN Y Q, et al. Bioinspired aerogel with vertically ordered channels and low water evaporation enthalpy for high-efficiency salt-rejecting solar seawater desalination and wastewater purification [J]. Small, 2023, 19 (19): 2206917.
- [11] 朱林, 曹宁宁, 叶继坤, 等. MXene 材料在光热领域的研究进展[J/OL]. 材料工程 (2025-03-05) [2025-09-17] <https://link.cnki.net/urlid/11.1800.TB.20250305.1128.002>.  
ZHU L, CAO N N, YE J K, et al. Research progress in MXene-based materials for the photothermal field [J/OL]. Journal of Materials Engineering (2025-03-05) [2025-09-17]. <https://link.cnki.net/urlid/11.1800.TB.20250305.1128.002>.
- [12] HAN X, ZHOU W J, CHEN M F, et al. Interfacial nitrogen engineering of robust silicon/MXene anode toward high energy solid-state lithium-ion batteries [J]. Journal of Energy Chemistry, 2022, 67: 727-735.
- [13] GAO Q S, FENG M J, LI E, et al. Mechanical, thermal, and rheological properties of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> MXene/thermoplastic polyurethane nano-composites [J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2020, 305 (10): 2000343.
- [14] 张若阳, 刘斌, 宋轶涵, 等. MXene 改性功能涂料的研究进展[J]. 涂料工业, 2024, 54 (12): 72-79.  
ZHANG R Y, LIU B, SONG Y H, et al. Research progress of MXene modified functional coatings [J]. Paint & Coatings Industry, 2024, 54 (12): 72-79.
- [15] 万彪, 杨富国, 张桥, 等. 提升碱化 MXene 材料性能的策略综述[J]. 武汉工程大学学报, 2024, 46 (5): 503-509.  
WAN B, YANG F G, ZHANG Q, et al. Review of strategies for improving the performance of alkaline MXene materials [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2024, 46 (5): 503-509.
- [16] HE J J, HUANG C Y, PU M, et al. Preparation and performance study of SiO<sub>2</sub> aerogel thermal insulation coating with nanoporous structure for wind turbine blade surface [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2024, 38 (13): 2425-2446.
- [17] LI R Y, ZHANG L B, SHI L, et al. MXene Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>: an effective 2D light-to-heat conversion material [J]. ACS Nano, 2017, 11 (4): 3752-3759.
- [18] 张倩, 王英迪, 高峰, 等. N-TiO<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> 复合材料的原位合成及其光催化性能[J]. 精细化工, 2022, 39 (3): 525-532.  
ZHANG Q, WANG Y D, GAO F, et al. In-situ synthesis and photocatalytic performance of N-TiO<sub>2</sub>/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> composite [J]. Fine Chemicals, 2022, 39 (3): 525-532.
- [19] GOGOTSI Y, ANASORI B. The rise of MXenes [J]. ACS Nano, 2019, 13 (8): 8491-8494.
- [20] LIU Z L, ZHAO X, XUE F H, et al. Shear-rheological-assisted MXene dispersion in epoxy resin for efficient electromagnetic absorption [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34 (49): 2409069.

【编辑：温靖邦】