

镧改性铁氧体/聚氨酯复合吸波涂层的制备与性能研究

蒋光文¹, 程小杰¹, 张海龙¹, 薛振雷¹, 祝海洋¹, 李新¹, 杨政清^{2*}
(1. 华润新能源(随县天河口)风能有限公司, 湖北 随县 431514;
2. 大连理工大学化工学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:微波除冰是一种新型除冰技术,适用于风电叶片覆冰问题。针对微波除冰中应用的吸波涂层,首先以硫酸铁为铁源,以氯化镧为稀土源,通过水热共沉淀法制备了稀土改性铁氧体,制备了不同镧含量的改性铁氧体,并将其作为吸波填料、碳化硅作为功能填料加入聚氨酯中制备复合吸波涂层。微波升温结果表明,镧与铁摩尔比为1:19时,复合涂层的温升最高,在800 W、30 s加热下温度达163℃。此时,涂层附着力平均值为6.42 MPa,能承受60次砂纸磨损循环,55 min模拟加速风沙实验。涂层也能承受90 d的模拟海水浸泡,低频阻抗值仍在 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上,展示出良好的附着力、耐磨性、耐冲击性、物理屏蔽性能。

关键词: 镧改性铁氧体;吸波涂层;微波除冰

中图分类号: TM215.92

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)09-0207-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.09.035

Preparation and properties of lanthanum-modified ferrite/polyurethane composite microwave-absorbing coating

JIANG Guang-wen¹, CHENG Xiao-jie¹, ZHANG Hai-long¹, XUE Zhen-lei¹, ZHU Hai-yang¹,
LI Xin¹, YANG Zheng-qing^{2*}

(1. China Resources New Energy (Tianhekou, Suixian) Wind Power Co., Ltd., Suixian 431514, China;

2. School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Microwave de-icing is a novel de-icing technology suitable for addressing ice accumulation on wind turbine blades. For the microwave-absorbing coating used in microwave de-icing, lanthanum-modified ferrite was first prepared via a hydrothermal co-precipitation method using ferric sulfate as the iron source and lanthanum chloride as the rare earth source. Modified ferrites with different lanthanum contents were synthesized and then incorporated into polyurethane as microwave-absorbing fillers, with silicon carbide as the functional filler, to fabricate composite microwave-absorbing coatings. Microwave heating results showed that when the molar ratio of lanthanum to iron was 1:19, the composite coating exhibited the highest temperature rise, reaching 163℃ after heating at 800 W for 30 s. Under these conditions, the coating had an average adhesion of 6.42 MPa, withstanding 60 cycles of sandpaper abrasion and a 55 min simulated accelerated sandstorm test. The coating also endured 90 days of simulated seawater immersion, with the low-frequency impedance value remaining above $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$, demonstrating good adhesion, wear resistance, impact resistance, and physical shielding performance.

Key words: lanthanum-modified ferrite; microwave-absorbing coating; microwave de-icing

近些年,出于环境保护和能源安全方面的考虑,国家大力提倡可再生能源利用,风力发电技术发展迅速,截至2022年末,我国风电发电装机器的规模达到 3.65×10^8 kW。在“双碳”目标的驱动下,风电装机规模还将持续快速增长^[1]。随着风电项目分布范围的扩大,风电机组的运行环境也变得复杂多样,低温高湿环境下的风机叶片结冰问题也越来越突出,成为行业的痛点。为了提高结冰期的风能利用率,延长机组寿命,保证人员和设备安全,就需要采取相应的防冰除冰措施^[2]。微波除冰技术是

一种近几年新兴的叶片除冰技术,具有除冰效率高、绿色无污染等优点^[3]。微波是频率范围在0.3~300 GHz之间的电磁波,作为一种特殊形式的能量载体,具有对介质材料产生热效应的独特性质。该技术可以有效地去除叶片表面冰层,或直接防止叶片结冰,对提高结冰期发电量、延长机组寿命、防止高处掉冰安全事故具有重大意义。吸波涂层是影响微波除冰性能的一个关键因素,它覆盖于叶片表面。优化涂层的吸波性能能够提高微波除冰效率。涂层主要由树脂和填料构成。常规商用树脂

收稿日期: 2025-11-17; 修回日期: 2026-07-01

作者简介: 蒋光文(1977-),男,本科,研究方向为风力发电装备,605552111@qq.com; 杨政清(1990-),男,博士,副教授,研究方向为金属腐蚀与防护、阴极保护,通讯联系人, yangzhengqing@dlut.edu.cn。

通常不具备吸波能力,因此需要开发具有良好吸波性能的材料作为填料。

铁氧体吸波材料作为电磁波吸收领域的关键功能材料,凭借其出色的吸收性能和宽频带特性而受到广泛研究与应用。从晶体学角度分类,铁氧体主要包括尖晶石型、六角晶系和稀土石榴石型 3 大类,其中尖晶石型和六角晶系磁铅石型由于特殊的电磁特性成为研究和应用的重点。在制备技术方面,研究人员已经开发出包括化学共同沉淀法、微乳液法、溶胶-凝胶法、水热合成法、固相球磨法等多种合成工艺,这些方法各具优势,为不同应用需求提供了丰富的技术选择。其中,共沉淀法因其工业化潜力而被视为铁氧体制备的重要技术。该方法首先将金属盐溶液按预设化学计量比混合,随后加入沉淀剂(如氢氧化物、碳酸盐或有机酸盐等)诱导金属离子共沉淀。De Mello 等^[4]采用共沉淀法合成了一系列锌和锰共掺杂磁铁矿纳米颗粒,并根据掺杂程度评价了它们的磁化和磁热疗性能,磁力测量表明,磁铁矿结构中的 Zn 和 Mn 添加有助于增强饱和磁化强度,Zn-Mn 等效磁铁矿的饱和磁化强度值最高。Talebniya 等^[5]通过共沉淀法制备铁氧体尖晶石的 $M\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($M=\text{Co}, \text{Fe}, \text{Zn}, \text{Mn}$ 和 Cu) 纳米颗粒,证明了在不同合成的纳米铁氧体中,锰纳米铁氧体的饱和磁化强度最高。以王丽丽等^[6]的研究为例,他们采用 Fe^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Mn^{2+} 混合盐溶液,以 NaOH 为沉淀剂,在 pH 调控下 80°C 反应 2 h 制备锰锌铁氧体前驱体。沉淀产物经过洗涤、24 h 干燥及研磨处理后,最终获得高纯度的锰锌铁氧体粉末。

稀土吸波材料作为新型功能材料的热门研究方向,其独特性能源于稀土元素特殊的电子结构^[7]。稀土元素的 4f 电子层中存在着没有配对的电子,这些电子对离子磁矩产生主要贡献,而外层的 $5s^25p^6$ 电子则形成有效屏蔽层,使 4f 电子免受邻近原子或离子的干扰。稀土吸波材料的损耗机制具有多元性,可同步实现磁损耗与介电损耗。适量稀土掺杂能够全面提升铁氧体的吸波性能^[8]。具体表现在:对于 M 型六角钡铁氧体体系[如 $(\text{La}_{0.5}\text{Na}_{0.5})_x\text{Ba}_{1-x}\text{Fe}_{12}\text{O}_{19}$]和尖晶石型锂铁氧体($\text{Li}_{0.5}\text{La}_x\text{Fe}_{2.5-x}\text{O}_4$),当 La 掺杂量控制在适当范围时,材料在 8~13 GHz 频段的吸波性能可获得显著提升。最具突破性的进展来自 La 掺杂 $\text{Co}_2\text{-Z}$ 型钡铁氧体纳米晶材料。该材料在 X 波段和 Ku 波段同时出现多个吸收峰,最大吸收值达到创纪录的 -65 dB,同时 -10 dB 带宽扩展至 6.5 GHz,展现出良好的吸波特性。

考虑到风电机组运转时的实际情况,除了吸波性能,要求其表面的涂料能经受风沙、雨蚀等环境因素长年累月的侵蚀。铁氧体对这部分贡献是有限,因此还需要添加填料来解决这部分问题。碳化硅作为一种高效的复合填料,能够显著赋予基体材料防腐与耐磨的防护能力^[9]。其卓越的莫氏硬度使其成为自然界最坚硬的物质之一,当分散于基体中时,这些超硬颗粒能有效抵抗冲击磨损,从而提升材料的抗磨料磨损及耐冲蚀性能,保护基体免受物理破坏。同时,碳化硅具有极致的化学惰性,在常温下几乎不与强酸、强碱、盐类及各类有机溶剂发生反应,其颗粒在涂层或复合材料中构筑起一道极其稳定的化学屏障,有效隔绝腐蚀性介质侵蚀基体。

综上,面对风电叶片除冰的挑战,本文提出制备吸波涂层进行微波除冰的方案,具体来说,是制备添加改性铁氧体及碳化硅的复合涂层。对改性铁氧体的制备参数进行了考察,并对复合涂层的微波升温、附着力、耐磨性、物理屏蔽性进行了测试。

1 材料及试剂

硫酸铁、氢氧化钠、氯化镧均购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司,E51 环氧树脂及固化剂购自上海奥屯化工科技有限责任公司,BY 300 聚氨酯底漆及配套固化剂、BY400 聚氨酯面漆及配套固化剂购自湖南博杨新材料科技有限公司,碳化硅购自上海冶新材料有限公司,乙酸乙酯购自天津市大茂化工试剂厂,去离子水为实验室自制。

2 实验方法

2.1 改性铁氧体的制备

本实验采用化学共沉淀法来制备掺杂稀土元素的改性铁氧体。具体步骤如下:称取一定量的硫酸铁固体粉末和六水合氯化镧固体粉末加入到 250 mL 烧杯中,随后加入 100 mL 的去离子水。在不断的搅拌条件下,将烧杯放入 80°C 恒温中加热 0.5 h,至粉末完全溶解。称取 6 g NaOH 固体加入到小塑料杯中,缓慢加入 30 mL 去离子水,搅拌至完全溶解。将烧杯从水浴锅中取出,将配置好的 NaOH 溶液逐滴加入至烧杯中并不断搅拌直至 $\text{pH}=11$ 。在不断搅拌的条件下,将烧杯再次放入水浴锅中搅拌 1 h,温度为 80°C ,直至沉淀完全。将烧杯中的溶液倒入离心管中,配平后,将离心管放入台式高速离心机中,以 11 000 r/min 的转速离心 5 min,离心后取出,将上层清液倒出,用无水乙醇进行洗涤,直至上层清液

pH=7, 再将离心管放入台式高速离心机中, 再以 11 000 r/min 的转速离心 5 min, 倒出上层清液, 在 100℃ 的电热恒温鼓风干燥箱中干燥 4 h, 干燥后将固体倒出, 充分研磨。将固体粉末放入箱式电阻炉, 在 600℃ 下加热 2 h, 即得到镧掺杂的改性铁氧体粉末。制备出改性铁氧体记为 $\text{La}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$, 其中 x 分别取 0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2。

2.2 吸波涂层的制备

2.2.1 基体预处理

选用真实叶片作为涂覆基材进行试验, 叶片的尺寸为 7 cm×9 cm, 对叶片表面进行打磨处理后备用。

2.2.2 底漆制备

取聚氨酯底漆质量分数 57%、碳纳米管 4%、乙酸乙酯 10%, 将碳纳米管和乙酸乙酯加入到聚氨酯底漆中, 机械搅拌至混合均匀, 随后加入 29% 的环氧树脂, 按比例加入固化剂, 机械搅拌 5 min 后, 刷涂在叶片上, 每次涂装后在常温下放置 24 h 可完全固化, 再重复进行下一次涂装以达到预定厚度。

2.2.3 面漆制备

取聚氨酯面漆 70%、改性铁氧体 10%、碳化硅 8%、去离子水 10%, 机械搅拌至混合均匀, 按比例加入固化剂, 刷涂在底漆上, 每次涂装后在常温下放置 24 h 可完全固化, 再重复进行下一次涂装, 最后得复合涂料。

2.3 测试与表征分析

2.3.1 吸波温升测试

首先, 用红外热像仪测量制备好的涂料试样表面温度并记录, 然后将涂料试样放入微波屏蔽腔中, 将涂料表面与微波发生器平行。打开微波发生器, 加热 30 s。微波加热结束后, 立即将试样取出, 采用红外热像仪对涂料表面进行测温并记录。

2.3.2 填料与涂层的形貌、成分表征

采用场发射扫描电子显微镜 (FE-SEM, 德国蔡司) 对填料、涂层的表面形貌进行分析。用傅里叶红外光谱 (FT-IR, 美国赛默飞) 和 X 射线衍射仪 (XRD, 荷兰帕纳科) 测量了其化学结构。

2.3.3 涂层的附着力、耐磨性、物理屏蔽性测试

采用 DGB-500 数显拉开法附着力测试仪测量涂层与基底金属的附着力。

采用砂纸磨损实验测试涂层的耐磨性。将涂覆好的吸波涂料表面朝下放在 800 目碳化硅砂纸上, 取 500 g 砝码放在涂料上, 固定砂纸不动, 将涂料试样向前移动 10 cm, 随后, 将涂料试样旋转 90°, 继续

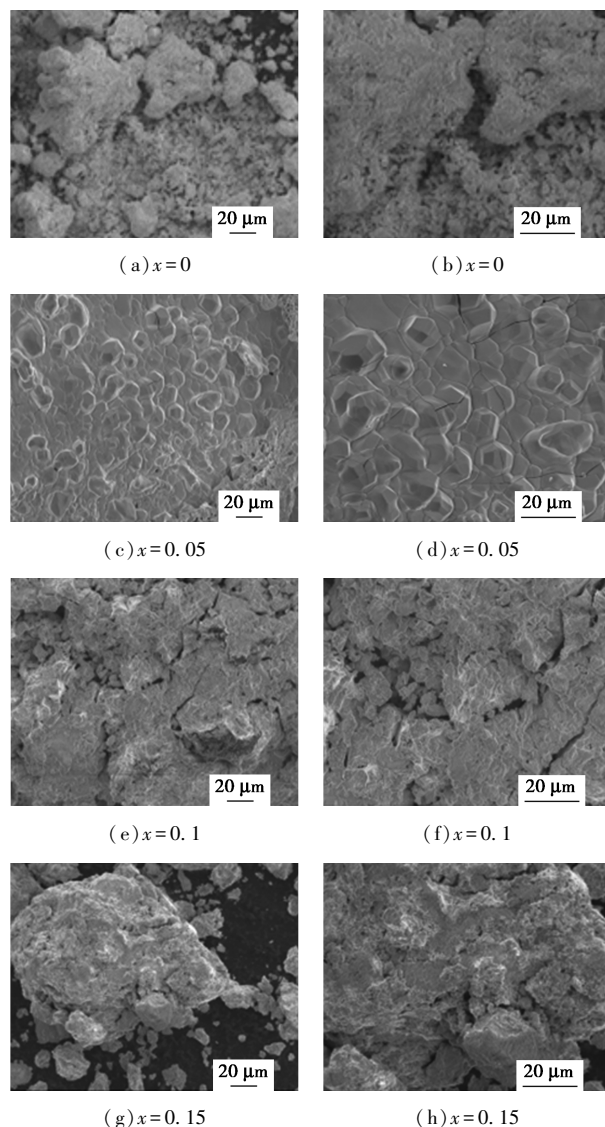
移动 10 cm, 记为一次磨损循环。测量不同磨损循环 (10、20、30、40、50 和 60 次) 后涂料表面的水接触角。

采用电化学交流阻抗 (EIS) 评价所制备叶片吸波涂料的物理屏蔽防护性能, EIS 测试所用的仪器为电化学工作站 (VSP300, 法国 Bio-Logic)。测试溶液为 3.5% NaCl 溶液, 涂覆涂层的铜试样作为工作电极, 铂电极作为辅助电极, 饱和甘汞电极作为参比电极。

3 结果与讨论

3.1 改性填料的形貌、结构

图 1 为不同镧掺杂比例铁氧体粉末的扫描电子显微镜 (SEM) 图。通过对比分析可以发现, 随着镧掺杂浓度的增加, 样品表面形貌发生显著变化, 镧含量为 0 的样品呈现较为致密的表面结构, 当掺杂较低含量镧时, 样品表面开始出现明显的多孔结构特



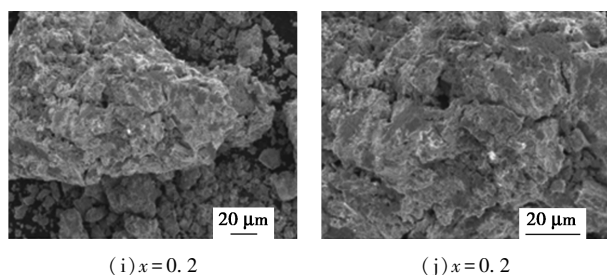
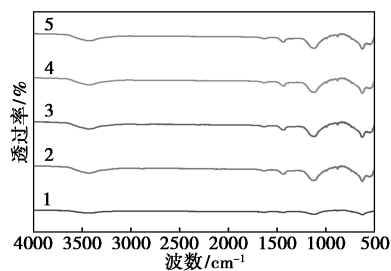


图 1 镧改性铁氧体固体粉末($\text{La}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$)的 SEM 图

征, 进一步增加镧含量时, 样品表面孔隙率显著提高。初步分析, 这可能与 La^{3+} 和 Fe^{3+} 的半径差异, 高温烧结过程中 La 元素的挥发效应, 不同价态离子间的氧化还原反应对晶体生长动力学的影响有关。

图 2 为镧改性铁氧体固体粉末的红外光谱。测试采用 KBr 压片法进行。可以看出, 3421 cm^{-1} 处宽吸收峰归属于样品表面羟基 O—H 伸缩振动, 表明材料存在羟基化表面。 1122 cm^{-1} 附近吸收峰源于 La—O—Fe 键振动模式, 反映 La^{3+} 与铁氧体晶格键合作用。 881 cm^{-1} 及 622 cm^{-1} 吸收峰分别对应尖晶

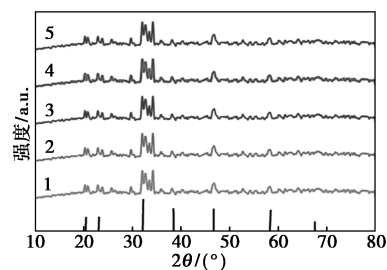


1— $x=0$; 2— $x=0.05$; 3— $x=0.1$; 4— $x=0.15$; 5— $x=0.2$

图 2 镧改性铁氧体固体粉末的 FT-IR 图

石结构中四面体位 $\text{Fe}^{3+}\text{—O}^{2-}$ 对称伸缩振动及八面体位 $\text{Fe}^{3+}\text{—O}^{2-}$ 反对称伸缩振动, 证实铁氧体主晶格存在。 553 cm^{-1} 的低波数峰分别归属于 Fe—O 晶格弯曲振动及整体晶格畸变模式, 与 La 掺杂引起局部结构微调相关。红外光谱分析表明, La 改性通过 La—O—Fe 键形成增强了晶格稳定性, 而且未显著破坏铁氧体主结构。

如图 3 所示, 镧改性铁氧体固体粉末的 XRD 谱图与氧化铁的标准卡片较为对应, 部分峰有些偏移, 可能是由于 La 进入铁氧体晶格的原因。但总体来说, La 改性没有改变铁氧体的晶型, 仍是与氧化铁类似的。



1— $x=0$; 2— $x=0.05$; 3— $x=0.1$; 4— $x=0.15$; 5— $x=0.2$

图 3 镧改性铁氧体固体粉末的 XRD 图

3.2 添加改性填料的涂层的吸波温升

根据工程经验及前期实验, 吸波温升依靠面漆决定。而面漆中, 碳化硅的吸波性能较差, 因此改性铁氧体决定了吸波温升。填料为普通铁氧体和 4 组掺杂不同镧含量铁氧体 ($\text{La}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$) 的复合涂层在 800 W 、 30 s 加热下的初始温度和最终温度如图 4 所示。

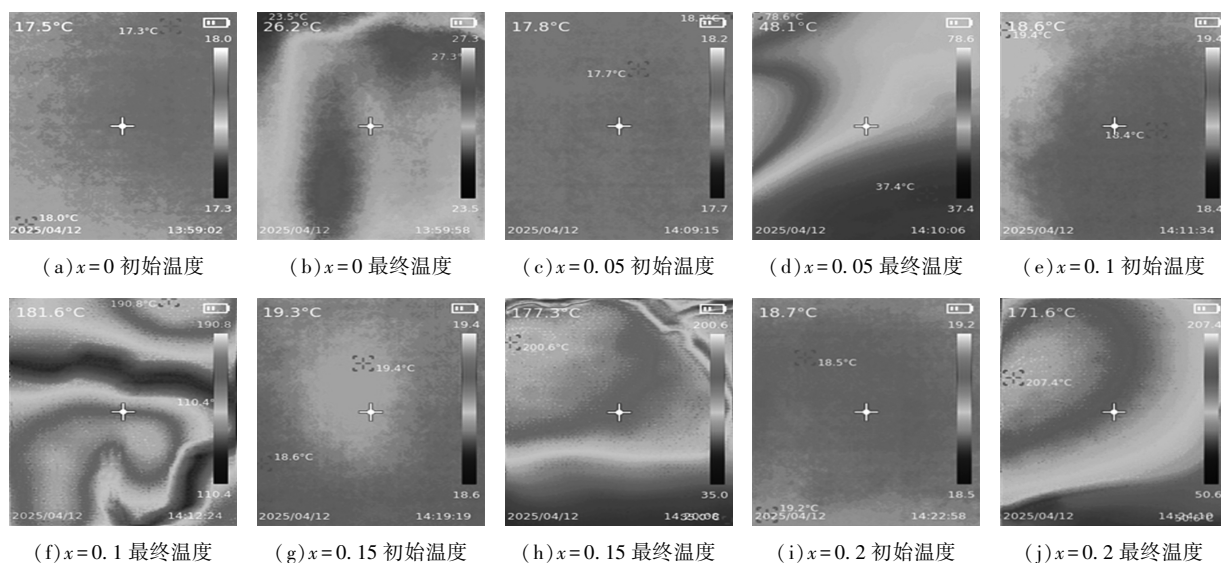


图 4 不同镧含量铁氧体($\text{La}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$)复合涂层初始温度和最终温度

不同涂层的温升数值如图 5 所示。可以发现, 在 800 W、30 s 的加热条件下, 温升先升高再降低, $x=0.1$ 、 $x=0.15$ 、 $x=0.2$ 温升相比于 $x=0.05$ 极为显著, 当 $x=0.1$ 时, 温升数值最高, 为 163℃。原因分析如下: 功率依赖的电磁响应机制: La^{3+} 的离子半径较大, 其掺杂显著改变铁氧体的磁畴结构, 增强自然共振效应。 $x=0.1$ 时磁损耗主导, 材料在特定频率下共振吸收增强, 导致温升显著。此外, La 掺杂量增加可调节材料的阻抗匹配过量 La^{3+} (如 $x=0.2$) 可能导致复介电常数虚部过高, 引发电磁波反射增强。

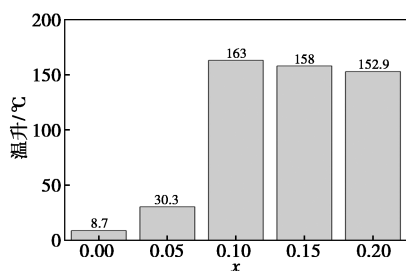
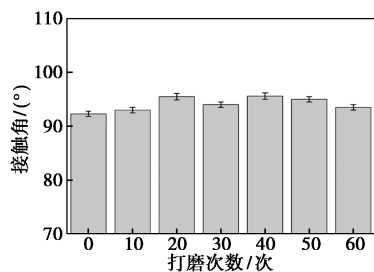


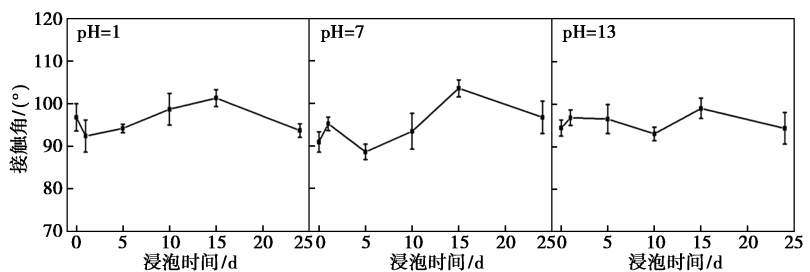
图 5 不同镧含量铁氧体 ($\text{La}_x\text{Fe}_{2-x}\text{O}_3$) 复合涂层的温升

3.3 涂层的附着力、耐磨性、物理屏蔽性

由上节可知, 改性填料 $x=0.1$ 时, 涂层的吸波



(a) 涂层磨损循环后涂料表面水的接触角变化



(b) 涂层在不同 pH 溶液中浸泡后水的接触角

图 6 涂层的接触角测试

为进一步探究叶片复合吸波涂料在模拟加速风沙环境中的气-固冲击行为, 对涂层在不同时间气-固冲击下的冲击失重率和接触角进行测试分析。如图 7(a) 所示, 在冲击过程中, 涂层的冲击失重率随冲击时间的延长而稳步增加, 但在每 5 min 的冲击周期内涂层的冲击失重速率都较为平稳, 并未在某一周期内有突然的较大程度的涂层失重, 表明实验过程中每周期的冲击量都大致相同。此外, 在气-固冲击过程中也并未出现明显的涂层冲击剥落现象, 直到冲击 55 min 后出现了较轻微的涂层冲击孔洞剥落, 表现出了涂层优异的抗冲击性能。图 7(b) 为复合吸波涂料在气固冲击中的冲击磨损示意图所示, 添加碳化硅颗粒后, 能够赋予涂料在冲击环境下

温升性能最佳。因此继续探究此条件下涂层的附着力、耐磨性、耐冷热冲击性、物理屏蔽性。

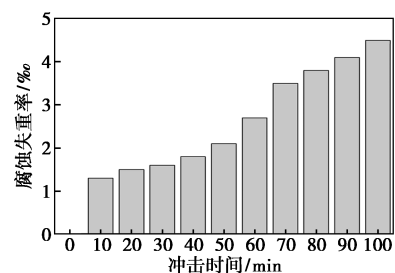
表 1 是涂层的附着力测试结果。可以看出, 复合吸波涂层的结合力在 4.58~7.93 MPa 范围内, 结合力的平均值为 6.42 MPa, 高于涂料标准要求的最低值 5 MPa。

表 1 结合力测试结果

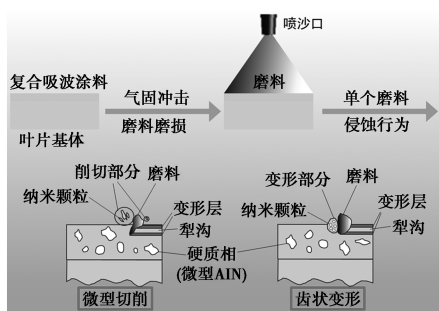
	位置 1	位置 2	位置 3	位置 4	平均值
结合力/MPa	7.58	7.93	4.58	5.59	6.42

图 6(a) 是涂层的耐磨性能测试结果。可以看出, 经过 60 次循环后, 所制备的复合吸波涂料表面保持 90° 以上的水接触角, 机械磨损后仍表现出良好的疏水性。主要是由于经砂纸打磨后, 碳化硅仍可以牢固地嵌入在涂料表面, 表面结构没有发生明显的变化, 因此涂料仍具有良好的疏水性能。还研究了酸碱溶液对涂层表面接触角的影响。图 6(b) 显示了在不同的 pH (1, 7 和 13) 下浸入水溶液之后疏水表面的水接触角的变化。从图中可以看出, 在不同 pH 下, 接触角没有明显的波动, 接触角在浸泡 24 d 后仍高于 90°, 表明所制备的复合吸波涂料的具有优异的耐酸碱化学稳定性。

机械耐久性的原因主要是涂层中存在的碳化硅颗粒在一定程度上能够抵消一部分磨料的冲击磨损作用, 从而经气-固冲击时磨料对涂层会同时存在微切削作用和凹痕变形作用。在冲击过程中, 碳化硅硬质填料颗粒周围的软质基体会被渐渐冲击并且部



(a) 不同气-固冲击时间下复合吸波涂料的冲击失重率变化



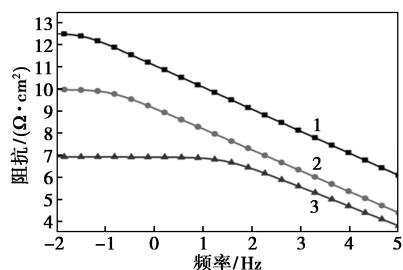
(b) 复合吸波涂料在气-固冲击时间下的磨损机理示意图

图 7 冲击失重率变化图及磨损机理示意图

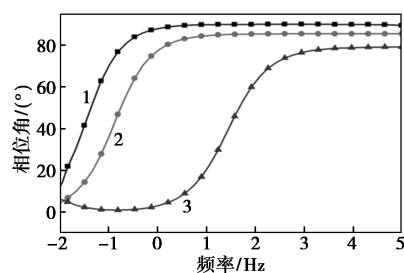
分软质粒子因受到磨粒的剪切作用而脱落形成切削颗粒,从而使涂层表面会出现形状、深浅不一的凹坑,产生具有多级微纳结构突起的形貌。

叶片表面防护涂层的物理屏蔽性能是影响服役寿命的关键因素。如图 8(a)、(b) 所示,不含填料的空白涂层的 EIS 随着浸泡时间从 10 d 到 30 d, $\log|Z|$ 对 $\log f$ 的模值曲线向低频方向移动,相位角曲线略有下降。模值和相位角曲线的下降说明了随着涂层浸泡时间的延长,液体逐渐向有机涂层基体中渗透,导致涂层电阻的降低、涂层电容的提高。涂层在浸泡 30 d 内,阻抗谱图中 $\log|Z|$ 对 $\log f$ 的曲线在较大频率范围内为一条直线,相位角接近 -90° ,呈现一个时间常数的特征,说明此时的涂层相当于一个电阻值很大的隔绝层。随着浸泡时间的延长,溶液渗透到涂层/基体的界面并形成腐蚀微电池,阻抗谱图出现两个时间常数,高频率所对应的时间常数是涂层的电阻和涂层电容,低频率所对应的时间常数是金属腐蚀反应的电荷转移电阻和双电层电容,说明空白涂层经过 90 d 的浸泡后防护性能下降明显。

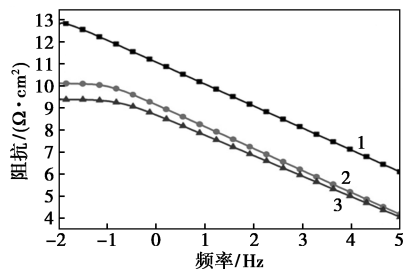
添加改性填料的涂层的 EIS 谱图如图 8(c)、(d) 所示,添加填料后,复合涂层在浸泡 90 d 内, $\log|Z|$ 对 $\log f$ 的曲线向低频方向移动,但低频阻抗值仍在 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上;相位角曲线略有下降,但相角在很宽的频率范围内仍维持在 -90° 左右,在 $10^2 \sim 10^5 \text{ Hz}$ 范围内仅出现一个涂层响应峰,低频率区域



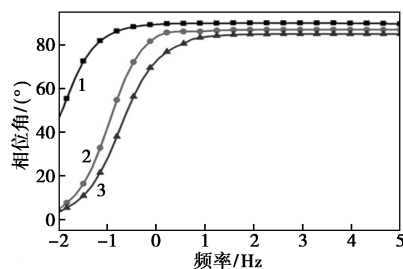
(a) 空白涂层的阻抗



(b) 空白涂层的相位角



(c) 添加改性填料的复合涂层的阻抗



(d) 添加改性填料的复合涂层的相位角

1—10 d; 2—30 d; 3—90 d

图 8 不同涂料 EIS 谱图

无腐蚀响应峰,说明此时介质中的水或侵蚀性离子仍未能浸入到涂层基体内部,涂层仍具有良好的物理屏蔽防护性能。EIS 测试结果表明,填料添加后可以有效地提高涂层的物理屏蔽防护性能,延长服役寿命。

EIS 可在很宽的频率范围内评价涂料的物理屏蔽防护性能,通过对 EIS 谱图拟合得到相关的电化学参数值可定量地评价涂料的防护性能。采用图 9(a) 所示的等效电路拟合不同浸泡时间的空白涂层及复合涂层的 EIS 数据,根据 EIS 谱图特点,空白涂层试样浸泡初期和复合吸波涂料试样对应的物理模型为 $R(CR)$,此时的涂层呈现一个时间常数,是一个屏蔽性能良好的隔离层,有效地隔绝了水和金属的接触;空白涂层浸泡末期对应的物理模型为 $R(C(R(CR)))$,此时的涂层呈现 2 个时间常数的特征,水已经渗透到涂层/基体界面,形成了腐蚀微电池。经等效电路拟合后,涂层电阻随浸泡时间变化的曲线如图 9(b) 所示,由图可知,空白涂层在浸

泡 5 d 内的 R_c 值维持在较高范围, 在 $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 左右, 浸泡 10 d 后下降至 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 左右, 浸泡 15 d 后迅速下降至 $10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$, 说明空白涂层的物理屏蔽性能逐渐下降而失去防护性能; 而复合涂层试样初期的 R_c 值在 $10^{12} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上, 浸泡 30 d 后下降至 $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$ 左右, 浸泡 90 d 后涂层 R_c 值仍维持在 $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 以上, 涂层具有良好的屏蔽介质的性能。综上, 复合涂层试样的 R_c 值均高于空白叶片涂料涂层, 表明添加改性填料提高了物理屏蔽防护性能, 所制备的复合涂层具有更长久的防护性能。

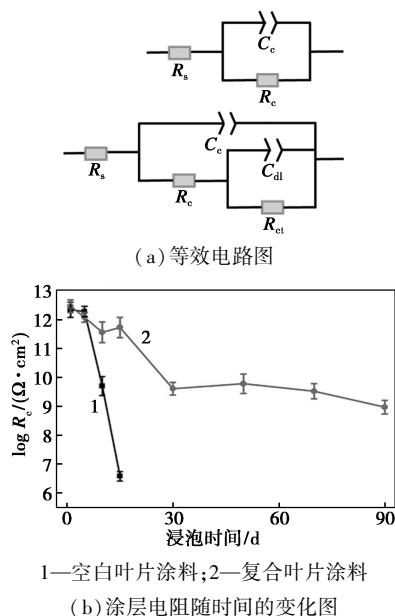


图 9 等效电路图与涂层电阻随时间的变化图

4 结论

本文针对风电叶片除冰问题, 提出制备镧改性

铁氧体吸波复合涂层的解决方案。以硫酸铁为铁源, 以氯化镧为稀土源, 通过共沉淀法可制备稀土改性铁氧体。通过 SEM、FT-IR、XRD 成功证明了改性铁氧体的制备。复合涂层的吸波温升结果表明, 镧的加入能有效改善铁氧体的吸波性能, 在镧与铁摩尔比为 1:19 时吸波温升最显著。并且此时复合涂层还具有较高的附着力、优异的耐磨性、耐冲击性与物理屏蔽性。

参考文献

- [1] 贺方云. 如何推动风力发电产业发展更加高效、智能、环保[J]. 中国商界, 2025, (3): 124-126.
- [2] 王聪, 黄洁亭, 张勇, 等. 风电机组叶片结冰研究现状与进展[J]. 电力建设, 2014, (2): 6.
- [3] 赵静, 王选仓, 辛磊, 等. 用于微波除冰的吸波骨料选择及路面吸波功能层设计[J]. 材料导报, 2024, 38(12): 82-89.
- [4] De Mello L B, Varanda L C, Sigoli F A, et al. Co-precipitation synthesis of (Zn-Mn)-co-doped magnetite nanoparticles and their application in magnetic hyperthermia[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 779: 698-705.
- [5] Talebniya S, Sharifi I, Saeri M R, et al. Study of cation distribution and magnetic properties of $M\text{Fe}_2\text{O}_4$ ($M = \text{Fe}, \text{Co}, \text{Zn}, \text{Mn}, \text{and Cu}$) nanoparticles[J]. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2022, 35(3): 899-908.
- [6] 王丽丽, 彭希虹, 林叶红, 等. 共沉淀法制备锰锌铁氧体及其磁性性能研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2016, 32(4): 35-39.
- [7] 褚海荣, 陈平, 于祺, 等. $\text{FeCo}/\text{石墨烯}$ 的制备和吸波性能[J]. 材料研究学报, 2018, 32(3): 161-167.
- [8] 赵爽. 锰酸镧掺杂及复合吸波材料的制备与性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- [9] 韩畅. SiC/EP 复合材料的固化特性与电气性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2024. ■

(上接第 206 页)

- [14] Zhou K L, Wang C, Wang Z, et al. Seamlessly conductive $\text{Co}(\text{OH})_2$ tailored atomically dispersed Pt electrocatalyst with a hierarchical nanostructure for an efficient hydrogen evolution reaction[J]. Energy & Environmental Science, 2020, 13(9): 3082-3092.
- [15] Li Z, Niu W, Yang Z, et al. Boosting alkaline hydrogen evolution: The dominating role of interior modification in surface electrocatalysis[J]. Energy & Environmental Science, 2020, 13(9): 3110-3118.
- [16] Wu J, Gross A, Yang H. Shape and composition-controlled platinum alloy nanocrystals using carbon monoxide as reducing agent[J]. Nano Letters, 2011, 11(2): 798-802.
- [17] Li B, Wang J, Gao X, et al. High performance octahedral PtNi/C catalysts investigated from rotating disk electrode to membrane electrode assembly[J]. Nano Research, 2018, 12(2): 281-287.
- [18] Li M, Hu Z, Li H, et al. Pt-Ni alloy nanoparticles via high-tempera-

ture shock as efficient electrocatalysts in the oxygen reduction reaction[J]. ACS Applied Nano Materials, 2022, 5(6): 8243-8250.

- [19] Yao Y, Huang Z, Xie P, et al. Carbothermal shock synthesis of high-entropy-alloy nanoparticles[J]. Science, 2018, 359(6383): 1489-1494.
- [20] Zhang Y, Wang Z, Wang L, et al. Ultra-small high-entropy alloy as multi-functional catalyst for ammonia based fuel cells[J]. Small, 2024, 20(43): 2400892.
- [21] Kim M, Kim Y, Kim G, et al. Synthesis of sulfur-doped PtRuNi alloy catalyst for efficient hydrogen evolution reaction[J]. Small Methods, 2025, 11(9): e0131.
- [22] Shi W, Li Z, Gong Z, et al. Transient and general synthesis of high-density and ultrasmall nanoparticles on two-dimensional porous carbon via coordinated carbothermal shock[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 2294. ■