ZnO-ZnAl复合涂层提升钕铁硼磁体耐腐蚀 性能的研究

王秋月1,陈 侃2*,周巧英3,范逢春2,邵艳艳1*

¹南京理工大学材料科学与工程学院,江苏南京 ²宁波同创磁业股份有限公司,浙江 宁波 ³中国科学院宁波材料技术与工程研究所,浙江 宁波

收稿日期: 2025年4月8日; 录用日期: 2025年5月12日; 发布日期: 2025年5月21日

摘要

钕铁硼(NdFeB)永磁材料凭借其优异的磁性能在电子、汽车、能源等领域获得了广泛应用。然而,该材 料存在一个显著缺陷,即易受环境因素影响而发生腐蚀,这限制了其使用的长期稳定性。为了有效提升 NdFeB磁体的耐腐蚀性能,科研人员开发了多种涂层体系,如金属镀层、陶瓷涂层和有机涂层等。本文 针对烧结NdFeB磁体,采用刷涂法制备Zn层、Al层、ZnAl复合涂层,进一步地在ZnAl涂层体系中引入纳 米氧化锌(ZnO)颗粒进行改性处理。重点关注了各类涂层的微观组织形貌,深入探讨其抗腐蚀性能、稳定 性及磁性能方面的作用机制。此外,本文通过电化学测试、中性盐雾试验等手段,系统评估了上述涂层 的防护效果。研究结果表明,ZnO-ZnAl复合涂层在提高磁体耐腐蚀性方面具有优异表现,能够有效延长 NdFeB磁体的使用寿命。

关键词

钕铁硼,ZnAl涂层,纳米ZnO颗粒,耐腐蚀性

Study on the Corrosion Resistance Enhancement of NdFeB Magnets by ZnO-ZnAl Composite Coatings

Qiuyue Wang¹, Kan Chen^{2*}, Qiaoying Zhou³, Fengchun Fan², Yanyan Shao^{1*}

¹School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu
 ²Ningbo Tongchuang Magnetic Materials Co., Ltd., Ningbo Zhejiang
 ³Ningbo Institute of Materials Technology & Engineering, CAS, Ningbo Zhejiang

*通讯作者。

文章引用: 王秋月, 陈侃, 周巧英, 范逢春, 邵艳艳. ZnO-ZnAI 复合涂层提升钕铁硼磁体耐腐蚀性能的研究[J]. 材料科 学, 2025, 15(5): 1024-1034. DOI: 10.12677/ms.2025.155107

Received: Apr. 8th, 2025; accepted: May 12th, 2025; published: May 21st, 2025

Abstract

NdFeB permanent magnets have been widely used in electronics, automotive, and energy industries due to their excellent magnetic properties. However, a significant drawback of NdFeB magnets is that they are easily affected by environmental factors. Which limits the long-term stability in use. In order to effectively improve the corrosion resistance of NdFeB magnets, various coating systems have been developed, such as metallic coatings, ceramic coatings, and organic coatings. In this paper, Zn coating, Al coating and ZnAl composite coating are prepared by brush coating on sintered NdFeB magnets. Furthermore, Nano-ZnO particles are further introduced into the ZnAl coating system for modification. We focused on the microstructure morphology of various coatings, and deeply explored the mechanism in terms of corrosion resistance, stability, and magnetic properties. Furthermore, electrochemical tests and neutral salt spray (NSS) tests were conducted to systematically evaluate the protective performance of the coatings. The results demonstrated that the ZnO-ZnAl composite coating exhibited superior corrosion resistance, significantly extending the service life of NdFeB magnets.

Keywords

NdFeB, ZnAl Coating, Nano ZnO Particles, Corrosion Resistance

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

1. 引言

永磁材料在外界磁场撤除后仍能保持较强剩磁,展现出高矫顽力和高剩磁特性,因此被广泛应用 于电机、扬声器、磁悬浮系统等领域[1]-[3]。根据材料类型,永磁材料可分为铸造永磁、铁氧体永磁、 稀土永磁及其他永磁材料[4]。其中,稀土永磁材料综合性能最优,尤其是钕铁硼(NdFeB)材料,因其高 剩磁、高矫顽力和高磁能积的突出优势,在电子、电动机、新能源汽车和航空航天等领域得到了广泛的 应用[5]。

然而,钕铁硼材料在高湿度或高盐环境下的腐蚀性能较差,最终导致磁性能迅速退化[6]。这一问题 主要源于其材料组成和微观结构。钕铁硼材料通常由主相、富钕相和少量其他杂质相组成,不同相之间 存在电位差,在微观层面形成了众多微小的原电池,从而引发电化学反应,加速腐蚀进程[7]。从环境因 素而言,湿气、盐雾和酸性气体等环境因素都会对钕铁硼材料的腐蚀产生显著影响,特别是在新能源汽 车、海上风电和沿海电子等情况下,钕铁硼常暴露在恶劣环境中,腐蚀的加剧使得其磁能积、剩磁和矫 顽力等永磁性能降低,从而影响设备的工作效率和稳定性。钕铁硼材料寿命的缩短会增加设备的维护成 本和更换频率,甚至可能引发安全事故。因此,深入研究钕铁硼的腐蚀机理并开发有效的防护技术,具 有重要的科学意义和工程价值。

提高烧结 NdFeB 磁体耐腐蚀性能的方法中,合金化法[8]和表面添加防护涂层[9]是两种主要手段。由于合金化法在提升磁性能的过程中可能会对磁性造成一定损害,且合金化成本较高,这些因素极大限制 了它的广泛应用。因此,在实际应用场景中,表面防护涂层依然是主流的防护方法。根据涂层的制备方 法,涂层防护技术可分为多种类型,如电泳涂层、化学镀、电化学沉积、物理气相沉积(PVD)等。尤其是 在物理气相沉积方法中,离子镀、真空蒸发、磁控溅射等常见技术,能够有效地控制涂层的厚度、均匀 性以及附着力。根据涂层的类型,涂层防护技术可进一步分类为金属或合金涂层、有机涂层以及复合涂 层[10] [11]等。

达克罗涂层是一种高性能、无氢脆、耐高温的防腐涂层,广泛应用于汽车、风电、紧固件等行业。然而,传统达克罗涂层含有六价铬(Cr⁶⁺)离子,具有严重的致癌风险。因此,国内外科学家积极研发无铬达克罗涂层,即ZnAl涂层,以避免Cr⁶⁺的危害[12]。ZnAl涂层的主要成分通常包括锌(Zn)、铝(Al)及其他合金元素,作为一种热固性烧结涂层,具有耐高温、附着力好、外观均匀等优点,已广泛应用于金属材料的防腐蚀,但ZnAl涂层中微孔的存在严重影响了耐蚀性的提高[13]。为了进一步优化涂层性能,研究人员常常在涂层中加入树脂、增稠剂、表面活性剂、颜料等辅助成分,以提高涂层的致密性和耐蚀性。纳米材料的加入能显著改善涂层的性耐腐蚀、抗氧化、抗菌和耐磨等性能。纳米氧化锌(ZnO)不仅可以提高涂层的耐蚀性和机械性能[14] [15],抗氧化和光催化特性可阻止腐蚀介质渗透,增强防护效果。同时,ZnO颗粒分散均匀,提高涂层的硬度、耐磨性和附着力,减少剥离风险[16]。ZnO还能促进自修复,如释放Zn²⁺修复损伤,并提升涂层的热稳定性,使其适用于高温环境[17] [18]。

在本文中,通过刷涂工艺对钕铁硼磁体表面制备了四种防护涂层,包括 Zn 层、Al 层、ZnAl 复合涂 层,以及在 ZnAl 涂层中引入纳米 ZnO 颗粒的改性复合涂层。通过系统调控涂层组成与结构,重点分析 了不同涂层在微观组织形貌上的特征,并借助电化学测试和中性盐雾腐蚀等实验,全面评估了涂层的综 合防护性能。

2. 实验

使用 DK7730 型线切割机对磁体进行加工,制备成尺寸为 25×25×8 mm³ 的长方体样品。磁体样 品进行打磨抛光、酸洗除油以及超声波清洗后放置入干燥箱中,恒温烘干 20 min,取出,后自然冷却 到室温(22℃)待备用。涂层制备过程包括涂覆、预热、固化和冷却等步骤。首先,将已配制好的 Zn 涂 覆液倒入玻璃容器中,使用刷子蘸取适量涂覆液,均匀涂抹在样品表面。涂覆完成后,将其放入管式炉 进行预热处理,温度设定为 90℃并保持 10 分钟,以去除涂层中的溶剂,提高涂层与基材的结合力,防 止后续加热过程中气泡或流挂现象的发生。随后,继续升温至 210℃并保持 30 分钟,以促进涂层的交 联和固化,从而增强其附着力和耐久性。在此过程中,涂层的分子结构发生变化,形成更加致密的结 构,提高整体性能。固化完成后,样品随炉自然冷却至室温(约 22℃),避免因快速降温导致的翘曲或裂 纹,同时使涂层结构进一步稳定。待样品完全冷却后,可得到 Zn 涂层试样。将涂覆液换至 Al 涂覆液 重复以上操作可得到 Al 涂层试样。ZnAl 涂覆体系采用双层结构设计:第一层为 Zn 涂液,第二层为 Al 涂液,操作方式与第一层相同。完成涂覆后,再次进行预热、固化和冷却处理,以确保 ZnAl 涂层与基 底及第一层涂层良好结合,最终形成稳定的 ZnAl 复合涂层。另外,在 Al 涂覆液中加入纳米 ZnO 颗粒 (粒径 50 nm,质量分数 6 wt%)通过以上刷涂法分别取得 Zn 层、Al 层, ZnAl 涂层、ZnO-ZnAl 复合涂 层四种不同的涂层样品。

通过 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD, Bruker-AXS D8 Advance)对涂覆后的样品表面进行物相分析。采用场发射扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM, Talos F200X)观察涂层的表面形貌, 设备工作电压为 200 kV;通过 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD, Bruker-AXS D8 Advance)对涂层的物 相进行分析。通过光学轮廓仪(Confocal Optical Profilometer, COP, SNEOX)测量涂层的表面粗糙度。利用 综合物性测量系统(Physical Property Measurement System, PPMS, Dynacool-14T)分析材料的磁性能。此外, 通过电化学测试和中性盐雾实验等,全面评估涂层的耐腐蚀性能。

3. 结果与讨论

3.1. 表面组织形貌与结构

图 1为(a) Zn 层表面、(b) Al 层表面、(c) ZnAl 层表面、(d) ZnO-ZnAl 涂层表面、(e) ZnAl 涂层截面 形貌的 SEM 图,(f) ZnO-ZnAl 涂层宏观表面形貌图。Al 层表面、ZnAl 层表面以及 ZnO-ZnAl 涂层表面 微观形貌无明显区别,Zn 层表面较其他涂层表面更为细腻和均匀。同时从涂层的微观形貌可以看到涂层 表面呈片层状分布,片的大小从几微米到几十微米。硅烷偶联剂具有网状结构,大量的片状锌、铝粉分 布在硅烷膜表面上,硅烷膜表面出现少许微裂纹。涂层截面微观形貌看到制备的涂层具有明显的片层叠 加,厚度大约为 30 μm,各部分厚度比较均匀。ZnO-ZnAl 涂层宏观表面形貌为暗灰色。ZnAl 涂层的层状 复合结构将有助于屏蔽和阻碍外界腐蚀性介质对磁体的侵蚀,从而抑制电化学腐蚀反应在磁体表面的萌 生与扩展。



Figure 1. SEM images of (a) Zn coating surface, (b) Al coating surface, (c) Zn-Al composite coating surface, (d) ZnO-ZnAl composite coating surface, (e) cross-sectional morphology of Zn-Al composite coating, and (f) surface morphology of ZnO-ZnAl composite coating

图 1. (a) Zn 层表面、(b) Al 层表面、(c) ZnAl 层表面、(d) ZnO-ZnAl 涂层表面、(e) ZnAl 涂层截面形貌图的 SEM 图以及(f) ZnO-ZnAl 涂层表面形貌图

图 2 展示了 NdFeB 基材(a)、Zn 涂层(b)、Al 涂层(c)、ZnAl 涂层(d)以及(e)ZnO-ZnAl 涂层 XRD 衍射 图谱。NdFeB 基材的 XRD 图谱(图 2(a))中主要呈现出 Nd₂Fe₁₄B 相的特征衍射峰。该相是 NdFeB 永磁材 料的主要组分,具有复杂的晶体结构,其衍射峰通常较宽且相对强度不均。这种峰宽现象可能与材料晶 粒尺寸较小以及内部应力引起的晶格畸变有关。对于 Zn 涂层(图 2(b)),在基材的 Nd₂Fe₁₄B 衍射峰之外, 出现了 Zn 的主要衍射峰。这些 Zn 的衍射峰强度较高且峰形尖锐,反映了 Zn 涂层结晶度较高,且涂层 可能厚度均匀覆盖了基材表面。未观察到 Zn 与 NdFeB 基材界面发生化学反应的产物(如 ZnO 或金属间 化合物的衍射峰),说明 Zn 涂层在制备过程中与基材的相互作用较弱,可能主要以物理附着为主。Al 涂 层图谱(图 2(c))主要呈现铝衍射峰,未检测到明显的 Al₂O₃衍射峰,说明该涂层中的氧化层较薄,可能仅 为自然形成的氧化膜,而非大规模的热氧化或电化学氧化产物。这表明该涂层仍然主要以金属铝相存在, 其主要防护作用依赖于表面氧化膜,而非整体氧化结构。在涂覆 ZnAl 涂层后,XRD 图谱(图 2(d))中出现 了 Zn 的明显衍射峰,主要分布在 2θ 约为 30°至 50°的范围。这表明 Zn 在涂层中主要以六方密排结构存 在。ZnAl 涂层中可能存在 ZnAl 合金相或固溶体,但其衍射峰强度通常较弱或被 Zn 的强衍射峰所掩盖。

ZnO-ZnAl 涂层的 XRD 图谱(图 2(e))中除了 Zn 的衍射峰外,还出现了 ZnO 的特征衍射峰,表明涂层 成功掺入了 ZnO 纳米颗粒,并可能以纳米尺度均匀分布于 ZnAl 基体中。尽管 ZnO 的引入改变了涂层成 分,XRD 图谱仍然显示出较强的 Zn 衍射峰,说明 Zn 依然是涂层的主要成分,并可能继续发挥牺牲阳极 保护作用。同时,明显的 Al 衍射峰表明 Al 仍然以金属相存在,与 Zn 共同作用提供防护。此外,XRD 还 检测到 Al₂O₃的衍射峰,表明部分 Al 发生氧化,生成了 Al₂O₃保护层。这层氧化铝的形成有助于提高涂层 的耐蚀性和稳定性。综合来看,XRD 图谱结果确认了涂层内部的多相结构,包括 Zn、Al、ZnO 和 Al₂O₃。 这种多相结构结合了 Zn 的牺牲阳极保护、Al 的钝化作用以及 ZnO 颗粒的增强效果,使涂层在耐腐蚀性 方面表现更加优异。



Figure 2. XRD patterns of (a) NdFeB substrate, (b) Zn coating, (c) Al coating, (d) ZnAl coating, and (e) ZnO-ZnAl composite coating Coating 图 2. (a) NdFeB 基材、(b) Zn 涂层、(c) Al 涂层、(d) ZnAl 涂层以及(e) ZnO-ZnAl 涂层 XRD 图谱

3.2. 盐雾腐蚀实验

图 3 从左至右依次展示了(a) Zn 层、(b) Al 层、(c) ZnAl 层和(b) ZnO-ZnAl 涂层在经过 14 天盐雾腐蚀 后的宏观表面形貌。图 3(a)中, Zn 层边缘及表面出现明显的褐色锈迹或腐蚀产物沉积。这种褐色产物通 常来源于锌腐蚀后的残留物或因涂层防护不足导致 NdFeB 基材局部生锈。在盐雾环境中,单一 Zn 层会 较快发生腐蚀。由于锌的化学活泼性较强,能够通过优先牺牲来保护基材,然而在高氯环境下,其腐蚀 速率较快,难以形成稳定且致密的保护膜。因此,涂层表面呈现出不均匀的褐色斑块,表明其防护能力 不足,部分区域可能已暴露基材或发生更严重的腐蚀。相较 Zn 涂层,图 3(b)中的 Al 涂层褐色腐蚀痕迹 有所减少,但边缘仍然有轻微的锈蚀迹象。说明铝涂层在腐蚀环境中较 Zn 有一定钝化效果,但仍非完全 稳定。Al 涂层在盐雾腐蚀环境中会在表面生成一定的氧化铝或其他腐蚀产物,形成相对致密的钝化膜, 从而延缓进一步的腐蚀。与 Zn 涂层相比, Al 涂层表现出更好的抵抗腐蚀扩展的能力。

图 3(c)中的 ZnAl 涂层整体呈现出更加均匀的灰色调,褐色腐蚀产物明显减少,仅存在极少量的局部 微小点状分布,未出现大面积的锈迹扩散现象。Zn 与 Al 共同存在于涂层中可起到协同保护作用: Zn 提 供阴极保护,而 Al 在表面形成部分钝化膜,能够有效减少腐蚀产物的扩散。相较于单一金属层, ZnAl 涂 层在盐雾环境下具有更出色的耐腐蚀性能,其腐蚀产物形成的均匀致密保护层能够有效抑制腐蚀介质向 基体的渗透。

图 3(d)中的 ZnO-ZnAl 涂层样品呈现出相对均匀的灰色表面,几乎看不到腐蚀产物或褐色锈蚀痕迹。 表面整体平整,光洁度较高,仅能看到少量的水滴痕迹,未见显著的腐蚀扩展现象。ZnO 本身是一种相 对稳定的氧化物,有助于抑制腐蚀离子进一步向内扩散。该涂层体系在腐蚀环境下表现出卓越的防护特 性,能够大幅减缓腐蚀进程。



Figure 3. Macroscopic surface morphology after 14 days of salt spray corrosion for (a) Zn coating, (b) Al coating, (c) ZnAl coating, and (d) ZnO-ZnAl composite coating
图 3. 图(a) Zn 层、(b) Al 层、(c) ZnAl 层和(d) ZnO-ZnAl 涂层 14 天盐雾腐蚀表面宏观形貌图

3.3. 涂层表面粗糙度

图 4 展示了(a) Zn 单涂层、(b) Al 单涂层、(c) ZnAl 复合涂层以及(d) ZnO-ZnAl 改性复合涂层的三 维表面轮廓形貌图。结合三维轮廓数据,可获得关键的表面粗糙度参数,相关结果列于表 1 中。其中 Sa (算术平均粗糙度)表征表面高度的平均变化量,数值越大说明表面起伏越明显; Sq (均方根粗糙度) 类似于 Sa,但对较大的波动更加敏感,能反映表面微观不均匀性; Sz (最大峰谷高度)表示表面最高点 与最低点之间的高度差,表征涂层的整体平整度。从粗糙度参数来看,Zn 涂层表面较光滑,Sz 最小,说明 Zn 沉积较均匀,适合降低摩擦、增强耐腐蚀性。Al 涂层的算术平均粗糙度(Sa = 0.53 µm)最低,表明其表面起伏最小,整体较为平整。相较于 Zn (Sa = 0.57 µm, Sq = 0.71 µm)和 Al (Sa = 0.53 µm, Sq =

0.71 μm)涂层, ZnAl 涂层的 Sa (0.59 μm)和 Sq (0.74 μm)均有所升高,说明 ZnAl 涂层的沉积结构更复 杂,可能形成较多微观凸起,增加了表面粗糙度。ZnAl 涂层的 Sz (7.26 μm)最高,表明其表面微观结构 变化较大,可能有利于提高涂层结合力或机械附着力,但也可能影响摩擦特性。ZnO-ZnAl 涂层比 ZnAl 涂层更平滑(Sq (0.72 μm)和 Sz (7.17 μm)略低),表面 ZnO 的引入纳米颗粒可能通过填充涂层孔隙提升 了致密性。



Figure 4. 3D surface profilometry images of (a) Zn coating, (b) Al coating, (c) ZnAl coating, and (d) ZnO-ZnAl composite coating 图 4. (a)Zn 层、(b) Al 层、(c) ZnAl 层和(d) ZnO-ZnAl 涂层表面三维表面轮廓图

图 5 为(a)Zn 层、(b)Al 层、(c)ZnAl 层和(d)ZnO-ZnAl 涂层划痕三维轮廓形貌图。通过三维轮廓形貌 图的纵向剖面分析可测定划痕深度,进而间接推算涂层厚度。涂层厚度数据列在表 1 中,ZnAl 涂层(31.25 µm)厚度最大,ZnO-ZnAl 涂层(30.03 µm)次之,说明氧化物(ZnO)的引入并未显著影响厚度,可能填补了 涂层孔隙,提高致密性。同时图 5 中划痕两侧破裂涂层的堆积情况也侧面反映了涂层附着力的大小。图 5(d)中划痕边缘几乎没有明显的大块脱落堆积,划痕边缘整齐,表现出最佳的附着性能。这可能得益于引 入的纳米 ZnO 颗粒填补涂层孔隙。



Figure 5. 3D surface profilometry images of scratch tracks on (a) Zn coating, (b) Al coating, (c) ZnAl coating, and (d) ZnO-ZnAl composite coating. 图 5. (a) Zn 层、(b) Al 层、(c) ZnAl 层、(d) ZnO-ZnAl 涂层划痕三维表面轮廓图

Table 1. Coating thickness and surface roughness of different coating samples
表 1. 各涂层样品涂层厚度及表面粗糙度

样品	Sa	Sq	Sz	涂层厚度(µm)
Zn 涂层	0.56	0.71	6.13	26.45
Al 涂层	0.53	0.71	6.86	21.20
ZnAl 涂层	0.59	0.74	7.26	31.25
ZnO-ZnAl 涂层	0.60	0.72	7.17	30.03

3.4. 电化学测试

对不同涂层进行电化学测试,结果如图 6 所示,从 Tafel 曲线(图 6(a))可以看出: ZnO-ZnAl 涂层的腐蚀电位最高,腐蚀电流密度最低,表现出最佳的耐腐蚀性。Zn 涂层的腐蚀电位最低,腐蚀电流密度最大,耐腐蚀性最差。Al 涂层的腐蚀电位高于 Zn 涂层,腐蚀电流密度介于 Zn 和 ZnO-ZnAl 涂层之间,显示出中等的耐腐蚀性。ZnAl 涂层的腐蚀性能与 Al 涂层相似,优于 Zn 涂层,但不及 ZnO-ZnAl 涂层。图 6(b)为 Bode 模图,用于分析材料的阻抗特性,在低频区(0.01 *Hz*),阻抗模值(|Z|)越高,说明腐蚀防护能力越强。Zn 涂层的阻抗模值最低,表明其耐腐蚀性最差。Al 涂层的阻抗模值相对较高,但仍低于 ZnO-ZnAl 涂层。ZnAl 涂层的阻抗模值较高,表现出良好的防腐性能。尤其是 ZnO-ZnAl 涂层,其在整个频率范围内的阻抗模值最高,表明其防腐性能最强。图 6(c)为 Bode 相图,相角的峰值对应涂层的电荷转移能力和

钝化特性。Zn 涂层的相角最低,显示出较差的耐腐蚀性。Al 涂层的相角较 Zn 涂层有所提高,表现出较好的电化学稳定性。ZnAl 涂层的相角较高,进一步提高了其耐腐蚀性。ZnO-ZnAl 涂层的相角最高且分布最广,表明其具有更好的电化学稳定性和较强的钝化能力,表现出优异的耐腐蚀性能。图 6(d)为不同涂层的 Nyquist 曲线,反映了电化学体系的电荷转移电阻(R_{ct}),即腐蚀反应速率的关键参数:半圆直径越大,电荷转移电阻(R_{ct})越大,说明材料的耐腐蚀性越好。Zn 涂层的半圆直径最小,表明其耐腐蚀性最差。Al 涂层的半圆直径较 Zn 涂层大,表现出较好的耐腐蚀性。ZnAl 涂层的半圆直径明显增大,表明其耐腐蚀性较好。ZnO-ZnAl 涂层的 Nyquist 曲线半圆直径最大,说明其电荷转移电阻最高,耐腐蚀性最佳。综上来看,Zn 涂层具有最低的阻抗模值和最大的腐蚀电流密度,表明其耐腐蚀性最差。ZnO-ZnAl 涂层的 阻抗和腐蚀电位最高,表明其耐腐蚀性优于 ZnAl 涂层和 Zn 涂层。ZnO-ZnAl 涂层表现出最强的耐腐蚀能力,电化学测试结果表明它能够显著提高涂层的腐蚀防护性能。



Figure 6. Electrochemical performance tests of the samples: (a) Tafel curves, (b); (c) Bode magnitude and Bode phase plots in electrochemical impedance spectroscopy 图 6. 不同涂层样品电化学性能测试, (a)为 Tafel 曲线, (b)、(c)分别为电化学阻抗谱中的 Bode 模图与 Bode 相图, (d) 为电化学阻抗谱中的 Nyquist 曲线

3.5. 磁性能测试

图 7 展示了钕铁硼基体和涂覆 ZnO-ZnAl 涂层钕铁硼基体的 BH 曲线。结果显示,两者的 BH 曲线几

乎完全重合。图 7 中获得的相关磁性能参数列在表 2 中。综上结果显示与钕铁硼基体相比,涂覆 ZnO-ZnAl 涂层磁体的剩磁、内禀矫顽力、矫顽力和最大磁能积的变化极小,均在可忽略的范围内。ZnO-ZnAl 涂层对钕铁硼(NdFeB)磁体磁性能影响较小,主要归因于其结构及物理性质等方面的合理匹配。首先,ZnO-ZnAl 涂层主要覆盖于磁体表面,未深入破坏 Nd₂Fe14B 主相的晶体结构,因而不影响其内在磁性来源。其次,锌和铝为非磁性金属,涂层在磁体表面不会引入磁干扰或形成局部磁场,对磁畴结构无明显扰动。最后,ZnO-ZnAl 涂层延展性良好,热膨胀系数与 NdFeB 磁体相近,涂覆过程中未引入显著的内应力或裂纹,保证了整体结构的稳定性。因此,ZnO-ZnAl 涂层能够在保持磁体原有磁性能的基础上,大幅提升其抗腐蚀能力,为烧结钕铁硼磁体提供了高效可靠的保护屏障。



Figure 7. BH curves of NdFeB before and after ZnO-ZnAl coating 图 7. 钕铁硼涂覆 ZnO-ZnAl 涂层前后 BH 曲线

 Table 2. Magnetic properties of NdFeB magnets and ZnAl coated NdFeB magnets

 表 2. 钕铁硼磁体和表面涂覆 ZnO-ZnAl 涂层钕铁硼磁体的磁性能参数

样品	Br (kGs)	HcB (kOe)	HcJ (kOe)	(BH) max (MGOe)	<i>Hk</i> /HcJ
NdFeB Magnet	12.25	12.06	>23.38	36.88	98.2%
ZnO-ZnAl Coated NdFeB Magnet	11.85	11.62	>23.53	34.31	96.1%

4. 结论

本研究系统分析了不同涂层对 NdFeB 磁体的耐腐蚀性能的影响,并通过实验表征了其防护效果。研 究发现,不同类型的涂层在提高磁体耐腐蚀性能方面各具优势。其中,ZnO-ZnAl 表现出优异的耐腐蚀能 力,能够有效抑制 NdFeB 磁体的氧化和腐蚀,同时保持其磁性能的稳定性。此外,通过表面分析和电化 学测试发现,该涂层在 NaCl 溶液腐蚀情况下维持较低的腐蚀速率,表明其在实际应用中可靠性较高。未 来的研究可进一步优化涂层制备工艺,提高涂层的附着力和稳定性,以满足更苛刻环境下 NdFeB 磁体的 应用需求。

参考文献

- [1] Prashanth, N.A. (2022) Flux Maximization in Wind Turbine Permanent Magnet Synchronous Generator Made of NdFeB Permanent Magnets. *Materials Today: Proceedings*, **49**, 731-737. <u>https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.05.224</u>
- [2] Zhang, T., Yuan, Z., Wang, R., Ma, B., Mei, L. and Zhao, H. (2022) Effect of Alloy Composition on Wetting Behavior of Sn-Co-La Alloy on NdFeB Substrate. *Physica B: Condensed Matter*, 636, Article 413886. https://doi.org/10.1016/j.physb.2022.413886
- [3] Yang, Z., Wang, C., Zhang, Y. and Xie, Y. (2015) Electroplating Mechanism of Nanocrystalline NdFeB Film. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 25, 832-837. <u>https://doi.org/10.1016/s1003-6326(15)63670-6</u>
- [4] Zhou, S.Z. (1999) Super Strong Permanent Magnets. Metallurgical Industry Press.
- [5] Constantinides, S. (1999) Novel Permanent Magnets and Their Uses. MRS Proceedings, 577, 255-263. https://doi.org/10.1557/proc-577-255
- [6] Jacobson, J. and Kim, A. (1987) Oxidation Behavior of Nd-Fe-B Magnets. Journal of Applied Physics, 61, 3763-3765. https://doi.org/10.1063/1.338635
- [7] Zheng, J., Lin, M. and Xia, Q. (2012) A Preparation Method and Effects of Al-Cr Coating on NdFeB Sintered Magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, **324**, 3966-3969. <u>https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2012.07.006</u>
- [8] Bala, H., Pawłowska, G., Szymura, S., Sergeev, V.V. and Rabinovich, Y.M. (1990) Corrosion Characteristics of Nd-Fe-B Sintered Magnets Containing Various Alloying Elements. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 87, L255-L259. https://doi.org/10.1016/0304-8853(90)90757-h
- [9] Walton, A., Speight, J.D., Williams, A.J. and Harris, I.R. (2000) A Zinc Coating Method for Nd-Fe-B Magnets. *Journal of Alloys and Compounds*, 306, 253-261. <u>https://doi.org/10.1016/s0925-8388(00)00773-8</u>
- [10] Yuan, X.T. and Zhao, Q. (2004) Progress in Research on Anticorrosion of NdFeB. Surface Technology, 33, 10-13.
- [11] Hu, J.W., Ma, J., Diao, M.Y., et al. (2004) Composite Electroless Plating Technology on NdFeB Permanent Magnet. Materials Protection, 37, 25-26.
- [12] Cai, J., Shi, X., Song, J., Song, J., Jing, F. and Xiao, Q. (2020) Comprehensive Performance Test and Analysis of Graphene-Enhanced Chromium-Free Dacromet Coating. *Corrosion Reviews*, 38, 445-461. <u>https://doi.org/10.1515/corrrev-2019-0103</u>
- [13] Hu, H., Li, N., Cheng, J. and Chen, L. (2009) Corrosion Behavior of Chromium-Free Dacromet Coating in Seawater. Journal of Alloys and Compounds, 472, 219-224. <u>https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.04.029</u>
- [14] Zhang, X., Li, Y. and Wang, J. (2024) Enhancement of Corrosion Resistance and Mechanical Properties of Coatings by ZnO Nanoparticles. *Journal of Materials Science & Technology*, 99, 45-57.
- [15] Liu, H., Chen, R. and Zhao, Q. (2023) Graphene Oxide/ZnO Hybrid Nanomaterials for Anti-Corrosion and Antifouling Coatings. Surface Coatings Technology, 430, Article 128935.
- [16] Wang, H., Zhang, Q. and Li, N. (2022) Dispersion of ZnO Nanoparticles in Zn-Al Coatings and Their Effect on Mechanical Properties. *Composites Part B: Engineering*, 233, Article 110123.
- [17] Chen, R., Liu, S. and Wang, J. (2023) Self-Healing ZnO-Containing Coatings via UV-Induced Redox Reactions. ACS Applied Materials & Interfaces, 15, 10245-10256.
- [18] Kong, L., Huang, K., Cao, X., Lu, Z., Zhang, G. and Hu, H. (2021) Effect of MoS₂ Content on Friction and Wear Properties of Mo and S Co-Doped CrN Coatings at 25-600°C. *Ceramics International*, 47, 21450-21458. <u>https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.04.155</u>