

# 硅酸钾基复合涂层的协同改性效应与耐蚀机制研究

张小民<sup>1</sup>, 郭晨<sup>1</sup>, 赵刚<sup>1</sup>, 王育路<sup>1</sup>, 陈畅<sup>2,\*</sup>, 陈延信<sup>2</sup>, 李子恒<sup>2</sup>

1. 国网陕西省电力有限公司经济技术研究院, 西安 710075

2. 西安建筑科技大学材料科学与工程学院, 西安 710055

**摘要:** [目的] 钢结构在严苛环境中易发生腐蚀, 传统有机涂层与金属镀层存在耐久性差或环境污染等问题。本研究旨在开发一种高性能、环境友好的硅酸钾基无机防腐涂层, 并通过复合改性策略解决其脆性大、长效防腐机制不明等问题。[方法] 采用硅丙乳液对硅酸钾进行杂化改性以提升柔韧性, 并分别构建以片状白云母/锌粉和球状硅酸锌/铝粉为核心的复合填料体系。系统评价了两种涂层的施工性能、力学性能(如附着力、硬度、耐冲击性等)、微观结构(借助X射线衍射、红外光谱、扫描电镜和热重分析表征)及耐腐蚀性能(包括耐碱、耐酸、耐盐水及电化学测试)。[结果] 锌-白云母改性硅酸钾复合涂层展现出更优的综合性能, 其附着力和耐1 kg冲击性能分别为2.43 MPa和超过50 cm, 显著优于铝-硅酸锌改性硅酸钾复合涂层(1.37 MPa, 40 cm)。这归因于片状白云母定向排列形成的“砖-泥”结构增强了机械互锁与应力分散。微观结构分析证实, 锌-白云母改性硅酸钾复合涂层具有更致密、有序的层状屏障, 且热稳定性更高。电化学测试表明, 两种涂层在3.5% NaCl溶液中均具有极高的阻抗模值( $>10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ), 但锌-白云母改性硅酸钾复合涂层凭借其优异的物理屏蔽与适度的阴极保护作用, 展现出更均衡、持久的防护机制。[结论] 硅丙乳液改性有效提升了硅酸钾涂层的耐冲击性, 而片状白云母与锌粉的复合体系通过协同的物理屏蔽与界面增强效应, 构筑了兼具卓越力学性能和长效耐腐蚀性能的防护涂层, 为钢结构的高效、环保防护提供了有前景的技术解决方案。

**关键词:** 无机防腐涂层; 硅酸钾; 白云母; 硅酸锌; 协同改性; 机制

**中图分类号:** TG172

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-227X(2026)04-0159-10

## Synergistic modification effect and anticorrosion mechanism of potassium silicate-based composite coatings

ZHANG Xiaomin<sup>1</sup>, GUO Chen<sup>1</sup>, ZHAO Gang<sup>1</sup>, WANG Yulu<sup>1</sup>, CHEN Chang<sup>2,\*</sup>, CHEN Yanxin<sup>2</sup>, LI Ziheng<sup>2</sup>

1. State Grid Shaanxi Electric Power Company Limited Research Institute, Xi'an 710075, China

2. College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China

**Abstract:** [Objective] Steel structures are susceptible to corrosion in harsh environments, while traditional organic coatings and metal coatings suffer from poor durability or environmental pollution. This study aims to develop a high-performance and environmentally friendly potassium silicate-based inorganic anticorrosion coating, addressing issues such as high brittleness and unclear long-term protection mechanisms through a composite modification strategy. [Method] A silicone-acrylic emulsion was used to hybridize potassium silicate for improved flexibility. Two composite filler systems were constructed: one based on flaky muscovite/zinc powder and the other based on spherical zinc silicate/aluminum powder. The application performance, mechanical properties (including adhesion, hardness, and impact resistance), microstructure (characterized by X-ray diffraction, Fourier-transform infrared spectroscopy, scanning electron microscopy, and thermogravimetric analysis), and corrosion resistance (including alkali resistance, acid resistance, saline resistance, and electrochemical testing) of the two coatings were systematically evaluated. [Result] The Zn-muscovite modified potassium silicate composite coating demonstrated superior overall performance, with an adhesion strength of 2.43 MPa and impact resistance exceeding 50 cm under 1 kg load, significantly outperforming the Al-zinc silicate modified potassium silicate composite coating (1.37 MPa, 40 cm). This improvement is attributed to the “brick-and-mortar” structure formed by the oriented arrangement of flaky muscovite, which enhanced mechanical interlocking and stress dispersion. Microstructural analysis confirmed that the zinc-muscovite composite coating possessed a more compact, more ordered lamellar barrier, and higher thermal stability. Electrochemical tests revealed that both coatings exhibited extremely high impedance modulus ( $>10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ) in 3.5% NaCl solution; however, the Zn-muscovite composite coating showed a more balanced and durable protection mechanism due to its superior physical

**收稿日期:** 2025-10-03 **修回日期:** 2025-11-20

**基金项目:** 国网陕西省电力有限公司项目(B626JY25Z010)。

**第一作者:** 张小民(1972-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力工程技术、建筑结构、节能减排技术、建筑新材料研究及应用。

**通信作者:** 陈畅(1977-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为钢结构防腐防火材料、先进低碳节能建筑材料。

**引用格式:** 张小民, 郭晨, 赵刚, 等. 硅酸钾基复合涂层的协同改性效应与耐蚀机制研究[J]. 电镀与涂饰, 2026, 45(4): 159-168.

ZHANG X M, GUO C, ZHAO G, et al. Synergistic modification effect and anticorrosion mechanism of potassium silicate-based composite coatings [J]. Electroplating & Finishing, 2026, 45(4): 159-168.

barrier effect and moderate cathodic protection. **[Conclusion]** Silicone-acrylic emulsion modification effectively enhanced the impact resistance of potassium silicate coatings, while the composite system of flaky muscovite and zinc powder, through physical barrier and interface enhancement effects, constructs a protective coating with both excellent mechanical properties and long-term corrosion resistance. This provides a promising technical solution for efficient and environmentally friendly protection of steel structures.

**Keywords:** inorganic anticorrosion coating; potassium silicate; muscovite; zinc silicate; synergistic modification; mechanism

钢结构因其高强度、轻质、施工便捷等优势,广泛应用于建筑、桥梁、船舶、能源、电力等领域<sup>[1-3]</sup>。然而,在潮湿、高温、高盐或含 CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S 等腐蚀性介质的环境中,钢材易发生电化学腐蚀,导致结构性能退化甚至失效,引发严重的经济损失与安全隐患<sup>[4-5]</sup>。

为延长钢结构服役寿命,常采用表面防护技术,如金属镀层、有机涂层、无机涂层等<sup>[6-8]</sup>。金属镀层(如电镀、化学镀)具备良好的屏蔽性与耐磨性,但成本高、工艺复杂,且针孔、微裂纹等缺陷会削弱其长效防护能力。有机涂层施工简便、成本低,但耐热性、耐磨性与抗老化性较差,固化过程中易形成微孔,导致介质渗透;此外,有机溶剂挥发也会造成环境污染。相比之下,无机防腐涂层因其优异的耐热性、高硬度、良好的化学稳定性及环境友好性,已成为研究热点<sup>[9]</sup>。无机涂层常以硅酸盐、磷酸盐或硅溶胶为成膜物质,通过与基材反应形成致密保护层,有效阻隔腐蚀介质。尤其是碱金属硅酸盐涂层,不仅附着力强、耐候性好、可自固化,还能通过添加锌粉、铝粉等活性填料,实现电化学保护与物理屏蔽的双重防腐机制。此外,该类涂层以水为分散介质,几乎不排放挥发性有机物,符合绿色环保要求。

尽管无机涂层优势显著,但仍存在若干问题亟待解决。例如,硅酸盐涂层成膜后脆性大、耐冲击性差;高模数硅酸钾溶液贮存不稳定,施工性能有待改善;单一填料在严苛环境下的长效防腐机制尚不明确<sup>[10-12]</sup>。因此,通过有机-无机杂化改性优化成膜性能,开发新型复合填料体系,并系统研究涂层在模拟服役环境下的腐蚀行为与防护机制,具有重要的理论意义与工程价值<sup>[13]</sup>。本研究旨在开发一种硅酸钾基无机防腐涂层,通过硅丙乳液改性来提升柔韧性与附着力,并系统研究硅酸锌、白云母及金属粉体(铝粉、锌粉)复合填料对涂层力学性能与耐腐蚀性能的影响,为钢结构的高效、环保与长效防护提供新材料与技术支撑。

## 1 实验

### 1.1 原材料

以片状氢氧化钾(分析纯,天津市大茂化学试剂厂)与碱性硅溶胶(固含量 30%,山东优索化工科技有限公司)作为硅酸钾溶液的前驱体,选用硅丙乳液(含量 48%,北京东联)作为有机改性剂。功能性填料包括高径厚比的片状白云母粉(3 000 目,石家庄龙彩矿产品有限公司)、锌粉(200 目,天津市大茂化学试剂厂)、铝粉(200 目,天津市大茂化学试剂厂)及硅酸锌粉末(< 500 目,国药集团化学试剂有限公司)。此外,配方中还添加了磷酸三丁酯(分析纯,国药集团)作为消泡剂,KH560 硅烷偶联剂(分析纯,国药集团)以改善界面相容性,羟丙基甲基纤维素(上海阿拉丁)作为增稠剂,以及陶氏 CF-10 润湿剂(工业级,广州翰奔源新材料有限公司)以提升施工流平性。

### 1.2 制备过程

为系统研究不同协同防腐机制,设计了两组复合填料体系:

1) 锌-白云母体系,旨在利用片状白云母构筑致密物理屏障,并辅以锌粉的阴极保护作用,实现屏蔽与保护的平衡;

2) 铝-硅酸锌体系,旨在通过铝粉提供更强的阴极保护,并借助硅酸锌增强涂层的化学稳定性。

按以下步骤分别制备自固化水性锌-白云母改性及铝-硅酸锌改性硅酸钾复合涂料:

1) 硅酸钾基液的配制:将计量的氢氧化钾、碱性硅溶胶(固含量 30%)与去离子水混合(质量比为 1.00 : 9.82 : 7.04),在 40 °C 恒温水浴条件下以 200 r/min 的转速搅拌 10 min,使其充分反应,得到澄清的硅酸钾溶液。

2) 硅丙乳液杂化:向上一步制得的硅酸钾基液中引入 20%(质量分数)的硅丙乳液,在 30 °C、200 r/min

的温和搅拌条件下持续反应 10 min, 获得有机-无机杂化的改性硅酸钾成膜液。

3) 复合涂料制备: 在改性后的成膜液中, 按设计配方依次加入主体填料(硅酸锌或白云母粉)及各类助剂(包括 3%的 KH560 偶联剂、2%的磷酸三丁酯、1%的羟丙基甲基纤维素和 0.3%的陶氏 CF-10 润湿剂)。随后将体系置于 800 r/min 的转速下高速分散 8 min, 确保混合均匀, 最终制得稳定性良好的复合涂料。为系统研究金属粉体在复合体系中的作用, 设计两种填料组合: 一种是用铝粉部分取代硅酸锌, 另一种是用锌粉部分取代白云母粉。两种复合涂料中主要填料的最终含量见表 1。

表 1 锌-白云母涂层与铝-硅酸锌涂料的主要填料含量  
Table 1 Main filler contents in Zn-muscovite paint and Al-zinc silicate paint

试样	无机填料含量 <sup>①</sup> / %	金属填料含量 <sup>②</sup> / %
锌-白云母涂层	55(白云母)	40(锌粉)
铝-硅酸锌涂层	50(硅酸锌)	40(铝粉)

<sup>①</sup> 相对于硅酸钾溶液的质量分数。

<sup>②</sup> 相对于所替代的无机填料的质量分数。

4) 涂覆与固化: 将预处理钢板浸没于涂料中, 提拉速率 100 mm/min, 室温固化。采用广州兰泰仪器有限公司的 CM-8821 型涂层测厚仪测量干膜厚度。

为便于表述, 下文将“锌-白云母改性硅酸钾复合涂层”简称为“锌-白云母涂层”; 将“铝-硅酸锌改性硅酸钾复合涂层”简称为“铝-硅酸锌涂层”。

### 1.3 表征及检测方法

#### 1.3.1 物理性能测试

依据 GB/T 1728-2020《漆膜、腻子膜干燥时间测定法》测定涂料状态、外观与干燥时间; 采用上海荣计达仪器科技有限公司的 NDJ-8S 旋转黏度计测试黏度; 依据 GB/T 6739-2022《色漆和清漆 铅笔法测定漆膜硬度》测定涂层的铅笔硬度。

#### 1.3.2 力学性能测试

使用美国狄夫斯高公司的 PosiTest AT-A 附着力测试仪, 按 GB/T 5210-2006《色漆和清漆 拉开法附着力试验》测试涂层的附着力; 采用天津科信试验机厂的 QCJ 型冲击试验机, 按 GB/T 20624.2-2006《色漆和清漆 快速变形(耐冲击性)试验 第 2 部分: 落锤试验(小面积冲头)》评价涂层的耐冲击性。

#### 1.3.3 微观结构与热稳定性表征

利用德国 Bruker D8 X 射线衍射仪(XRD)对涂层的物相进行分析, 扫描角度设定为 10°~80°。采用美国 Nicolet Avatar 360 傅里叶变换红外光谱仪在波数 400~4 000 cm<sup>-1</sup> 内检测样品的化学键与官能团。涂层的热行为通过德国 NETZSCH STA 449F3 同步热分析仪进行测试, 温度为 30~500 °C, 升温速率为 10 °C/min。此外, 借助德国 ZEISS EVO 10/LS 10 扫描电子显微镜(SEM)及其附带的能谱仪(EDS), 对涂层的表面、断面形貌及微区元素分布进行观察与分析。

#### 1.3.4 耐腐蚀性能评价

参照 GB/T 9265-2009《建筑涂料 涂层耐碱性的测定》, 采用饱和 Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液测试涂层的耐碱性; 采用 pH=4 的 HCl 溶液, 以失重法评价涂层的耐酸性; 依据 GB/T 10834-2008《船舶漆耐盐水性测定 盐水和热盐水浸泡法》, 在 3.5% NaCl 溶液中测试涂层的耐盐水性。用美国 Ametek 公司的普林斯顿 VersaSTAT 4 电化学工作站进行电化学阻抗谱与动电位极化测试: 工作电极为涂层钢板(暴露面积为 1 cm<sup>2</sup>), 对电极为铂片, 参比电极为饱和甘汞电极(SCE), 电解液为 3.5% NaCl 溶液。电化学阻抗谱在开路电位下测量, 频率 100 000~0.01 Hz, 扰动信号幅值 5 mV。动电位极化的扫描速率为 0.5 mV/s。所有测试重复 3 次以确保重现性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 微观形貌与元素分布分析

锌-白云母和铝-硅酸锌两种涂层分别与钢基体结合界面的微观形貌如图 1 所示。比较图 1a 和图 1b 可知, 二者呈现出显著差异。锌-白云母涂层展现出高度有序的微观结构, 片状白云母平行于基体表面定向

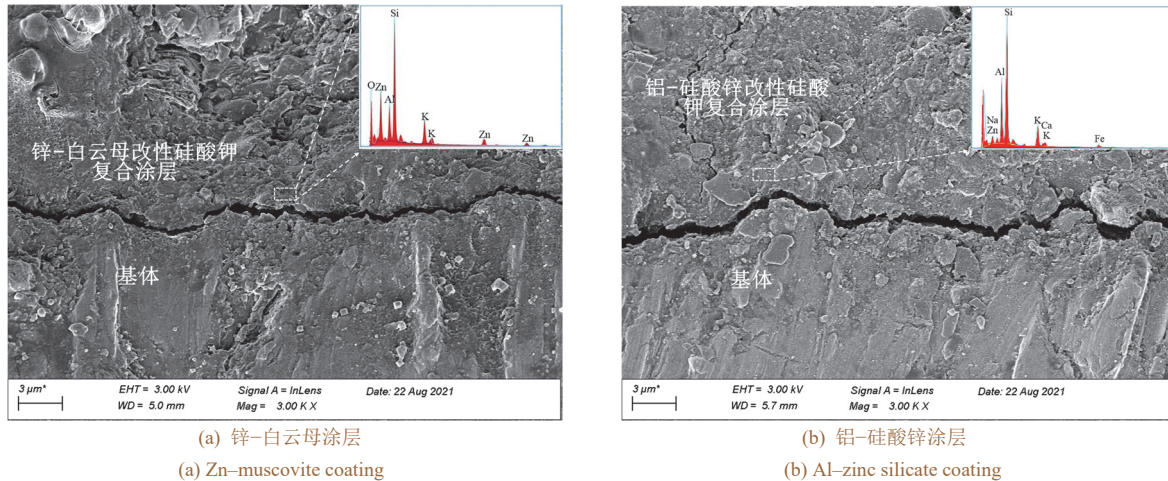


图 1 不同涂层与钢基体结合界面的微观形貌

Figure 1 Microstructure of bonding interface between coating and steel substrate

排列，形成致密且连续的层状屏障。涂层与基体界面结合紧密、平整，无明显缺陷。片状白云母的定向排布创造了巨大的界面接触面积，产生了强烈的机械互锁与界面锚定效应。相比之下，铝-硅酸锌涂层的界面形貌则呈现球状铝粉与硅酸锌颗粒的随机分布，并伴有明显的填料团聚现象。界面处可见不规则的海胆状凸起，经能谱分析证实为铝、锌元素的富集区。同时，界面处存在微米级孔隙等结构缺陷，这源于球状填料的随机分布与由此导致的界面结构不均匀性。综上所述，两种涂层的微观形貌存在显著差异，锌-白云母涂层呈现致密的层状结构，而铝-硅酸锌涂层中球状填料随机分布且存在界面缺陷，这可能会影响介质的扩散路径和界面结合强度。

## 2.2 物相组成与化学结构分析

锌-白云母和铝-硅酸锌两种涂层的 X 射线衍射谱图如图 2 所示。两种涂层的物相组成存在显著差异，反映了填料体系对微观结构的决定性影响。锌-白云母涂层的图谱中可见锌 (Zn)、二氧化硅 (SiO<sub>2</sub>) 及白云母 (KAl<sub>2</sub>(AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>2</sub>) 的清晰衍射峰。白云母衍射峰形尖锐完整，表明其层状晶体结构在制备过程中得以完好保存。同时，图谱背景呈现宽化的非晶弥散包，此为非晶态硅酸钾凝胶基体的典型特征，表明成膜物质固化后保持了非晶网络结构。铝-硅酸锌涂层的图谱则显示出铝 (Al) 与硅酸锌 (Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>) 的明显晶体衍射峰，表明二者以晶态形式存在于涂层中。其图谱背景同样显示非晶弥散特征，且未检测到硅酸钾的结晶峰。

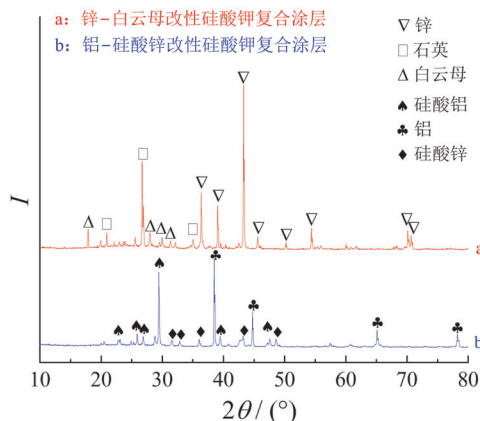


图 2 锌-白云母与铝-硅酸锌涂层的 X 射线衍射谱图

Figure 2 X-ray diffraction patterns of Zn-muscovite coating and Al-zinc silicate coating

两种体系均成功构建了“晶态填料嵌入非晶基体”的复合相结构，是实现功能互补的典型设计。铝-硅酸锌涂层中的晶相 (铝粉、硅酸锌) 主要提供阴极保护与填充效应，而锌-白云母涂层中结构完好的片状白云母，除作为填料外，更以其独特形态发挥物理屏障与增强作用。XRD 图谱中白云母衍射峰形尖锐，表明其在涂层中结晶度良好，结合 SEM 观察到的片层定向排列形貌，可以推断这种高度有序的排列结构有助于提升涂层的力学性能。因此，这种结构使应力在界面处得以均匀传递，避免了局部应力集中，从而显著提升了附着力。相比之下，铝-硅酸锌涂层中球状填料的随机分布及由此导致的界面不连续性，削弱了

应力传递效率并引入了结构薄弱点。X 射线衍射分析表明, 锌-白云母涂层具有优异的机械与屏障性能。这源于白云母片晶通过强烈的界面相互作用与几何约束效应, 与非晶基体形成了更稳固、更完整的复合结构。

锌-白云母和铝-硅酸锌两种涂层的傅里叶变换红外光谱如图 3 所示。图中揭示了二者在化学结构与成膜机制上存在根本差异。对于铝-硅酸锌涂层, 其光谱在约  $464\text{ cm}^{-1}$  处呈现出明显的 Si—O 键弯曲振动吸收峰, 同时在  $1\ 000\sim 1\ 100\text{ cm}^{-1}$  范围内展现出宽而强的吸收带, 这是 Si—O—Si 键不对称伸缩振动的典型特征。这两个关键信号共同证实了硅酸钾作为成膜物质, 已通过充分的水解-缩合反应, 形成了连续且致密的三维无机网络结构, 构成了该涂层主要的化学防护基础。相比之下, 锌-白云母涂层的光谱特征则截然不同: 上述归属于硅酸钾网络的特征吸收峰( $464\text{ cm}^{-1}$  及  $1\ 000\sim 1\ 100\text{ cm}^{-1}$  范围)强度显著减弱甚至近乎消失, 表明其基体硅酸钾的连续三维网络结构发育程度相对较低, 或因其微观结构特性导致信号被掩盖。与此同时, 该涂层在大约  $3\ 600\text{ cm}^{-1}$  处出现了一个清晰可辨的吸收峰, 该峰位确切归属于白云母晶体层间结构羟基(—OH)的伸缩振动。这一特征峰的存在, 是片状白云母填料被成功引入并保留其固有晶体结构的直接证据。此外, 其光谱在  $900\text{ cm}^{-1}$  附近出现的肩峰, 可能与硅酸锌( $\text{Zn}_2\text{SiO}_4$ )中的 Zn—O—Si 振动模式有关。综合来看, 红外分析表明, 铝-硅酸锌涂层的防护性能主要依赖于发育完善的无机硅酸钾网络结构实现的物理化学屏蔽; 而锌-白云母涂层则可能更多地依赖于片状白云母填料自身构筑的致密物理屏障效应, 以及填料与基体界面相互作用的增强, 这为其表现出更优的附着力和长期屏障性能提供了分子层面的解释。

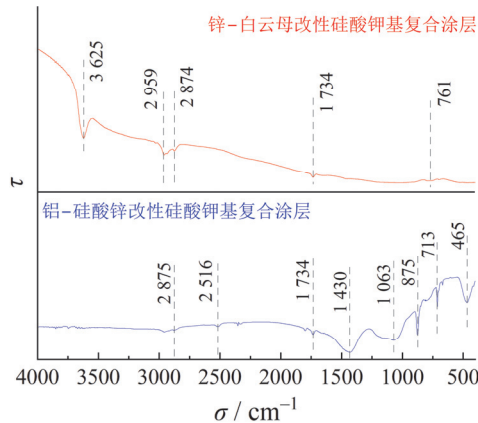


图 3 锌-白云母与铝-硅酸锌涂层的傅里叶变换红外光谱图

Figure 3 Fourier-transform infrared spectra of Zn-muscovite coating and Al-zinc silicate coating

### 2.3 热分析

锌-白云母和铝-硅酸锌两种涂层的热重与微分热重曲线如图 4 所示。两种涂层的热行为在  $30\sim 500\text{ }^\circ\text{C}$  内存在一定差异, 但均经历 3 个主要失重阶段:  $50\sim 150\text{ }^\circ\text{C}$  区间主要为涂层中物理吸附的水分脱附与蒸发;  $250\sim 350\text{ }^\circ\text{C}$  区间对应于硅酸钾凝胶结构水脱除及硅丙乳液残留物分解;  $350\sim 450\text{ }^\circ\text{C}$  区间则与硅酸盐网络进一步缩合相关。锌-白云母涂层的微分热重曲线峰形更宽缓, 总质量损失率(约 5.2%)显著低于铝-硅酸锌

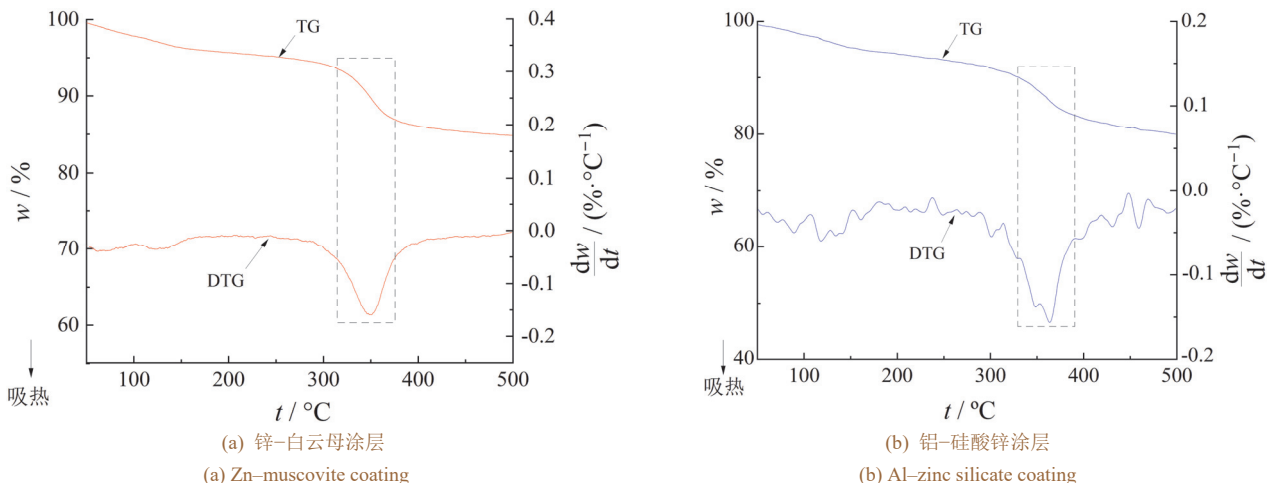


图 4 不同涂层的热重(TG)与微分热重(DTG)曲线

Figure 4 Thermogravimetric (TG) and derivative thermogravimetric (DTG) curves of different coatings

涂层(约 8.5%), 表明其热稳定性更优, 所含热不稳定组分更少。锌-白云母涂层的最大失重速率对应的温度向高温偏移约 15 °C, 且在整个测试区间表现出更优的质量保留率。这表明, 片状白云母填料不仅自身热稳定性优异, 其在涂层中形成的致密层状拓扑结构有效抑制了热分解过程中挥发性产物的扩散与基体网络的收缩。这种稳定的微观架构使该涂层在热冲击或长期高温环境下能更好地保持结构完整性, 有效抑制因热应力导致的微裂纹萌生。而对于铝-硅酸锌涂层, 其球状填料体系难以构建同等有效的物理阻隔网络, 因而热稳定性相对较低。热重与微分热重分析从热行为角度证实, 锌-白云母体系具有更优的热稳定性, 这为其在高温环境下的应用提供了依据。

## 2.4 成膜状态

锌-白云母与铝-硅酸锌涂层的关键参数——黏度高度接近, 前者为(3 087 ± 35) mPa·s, 后者为(3 158 ± 43) mPa·s, 均处于黏性适中的理想范围。其涂层状态分别为“平整光滑”与“平整较光滑”, 表明二者均具备良好的流平性与成膜质量, 适用性相当, 可兼容浸涂、喷涂等工艺。尽管填料体系有差异显著, 但通过配方优化, 二者的基础流变性能相近。由此可见, 硅酸钾基体的流变性在体系中起主导作用, 优选范围内的填料类型与比例对其黏度的影响有限, 这使涂层在保有功能特性的同时, 具备优异的工艺适应性。

## 2.5 力学性能

锌-白云母和铝-硅酸锌两种涂层的力学性能测试结果见表 2。二者的铅笔硬度相当(均为 6H), 但锌-白云母涂层在附着力与耐冲击性上更具优势。该涂层的附着力显著高于铝-硅酸锌涂层(提升约 77%), 耐 1 kg 冲击性能也更优。锌-白云母涂层优异的力学性能归因于片状白云母在成膜时的定向排列, 由此所形成的“砖-泥”结构增强了涂层与基体的机械互锁与应力分散<sup>[14]</sup>。相比之下, 铝-硅酸锌涂层中的球状铝粉与硅酸锌颗粒以点接触形式分布, 对界面结合的增强作用较弱。尽管基体树脂赋予了两种涂层足够的刚性与韧性, 但附着力的显著差异直接影响其长期服役可靠性。更高的附着力能有效抑制因环境应力引起的起泡或剥落, 是长效防护的关键。因此, 锌-白云母涂层展现出更优的力学耐久性, 更适用于严苛的腐蚀环境。

表 2 锌-白云母与铝-硅酸锌涂层的力学性能

Table 2 Mechanical properties of Zn-muscovite coating and Al-zinc silicate coating

试样	附着力/MPa	耐冲击性(1 kg)/cm	铅笔硬度
锌-白云母涂层	2.43 ± 0.11	>50	6H
铝-硅酸锌涂层	1.37 ± 0.07	40	6H

## 2.6 施工性能

除了力学性能, 涂层的施工与应用性能同样重要。锌-白云母和铝-硅酸锌两种涂层的厚度与干燥时间见表 3。锌-白云母涂层的干膜厚度显著大于铝-硅酸锌涂层, 但二者的干燥时间较为接近, 表明其固化速率基本一致。锌-白云母涂层的更大厚度归因于片状白云母的定向堆叠结构, 该结构有利于形成高堆积密度的层状屏障, 从而在单次涂覆中获得更厚的涂膜<sup>[15]</sup>。尽管膜厚差异显著, 但干燥时间相近, 表明白云母与锌粉的复配未阻碍体系固化, 在保持快速实干的同时, 实现了涂层的有效增厚。该特性使锌-白云母涂层在工程应用中优势显著: 更厚的涂膜可延长介质扩散路径, 增强屏蔽性能, 且不牺牲干燥效率, 有利于缩短施工周期。

表 3 锌-白云母与铝-硅酸锌涂层的施工性能

Table 3 Application performance of Zn-muscovite paint and Al-zinc silicate paint

试样	厚度/μm	表干时间/min	实干时间/min
锌-白云母涂层	456 ± 15	105	≤120
铝-硅酸锌涂层	137 ± 8	100	≤120

值得注意的是, 锌-白云母与铝-硅酸锌涂层的干膜厚度存在显著差异。这主要归因于二者填料体系的几何形态与堆叠方式不同。锌-白云母涂层中的片状白云母在成膜过程中易于定向平行排列, 形成高堆积密度的“砖-泥”结构, 因此在单次涂覆中能够实现更大的膜厚。而铝-硅酸锌涂层中的球状填料(包括铝粉与硅酸锌)以随机点接触方式分布, 其堆积密度较低, 限制了涂层的最大可成膜厚度。因此, 本次研究中的膜厚差异是本征填料特性所导致的结果。尽管膜厚对涂层的绝对屏蔽性能有影响, 但本研究的主要目的在

于对比两种协同防腐机制的差异。后续讨论将表明，锌-白云母涂层在附着力等力学性能上的优势，主要源于其独特的微观结构，而非单纯依赖于膜厚。

## 2.7 耐腐蚀性能

### 2.7.1 耐碱性

锌-白云母和铝-硅酸锌两种涂层在饱和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液中的耐碱性能对比如图 5 所示。锌-白云母涂层表面出现了局部锈蚀斑点，表明  $\text{OH}^-$  已渗透涂层并引发了基体腐蚀。与之相反，铝-硅酸锌涂层在相同条件下仍保持表面完整，未观察到锈蚀迹象，表现出更优异的耐碱性能。铝-硅酸锌涂层的优异耐碱性归因于硅酸锌填料在碱性环境中的化学惰性，其与硅酸钾基体形成的复合界面能有效抵抗  $\text{OH}^-$  侵蚀。而对于锌-白云母涂层而言，尽管片状白云母本身具有良好的化学稳定性，但涂层中锌粉的活性较高，在强碱性环境中可能发生反应，破坏涂层的完整性，从而为介质渗透提供通道。该结果从腐蚀形貌学角度揭示了填料在特定腐蚀环境中的化学稳定性是决定涂层长效性能的关键因素之一，片状填料的物理屏障作用在强碱性环境下可能因电化学因素而减弱。

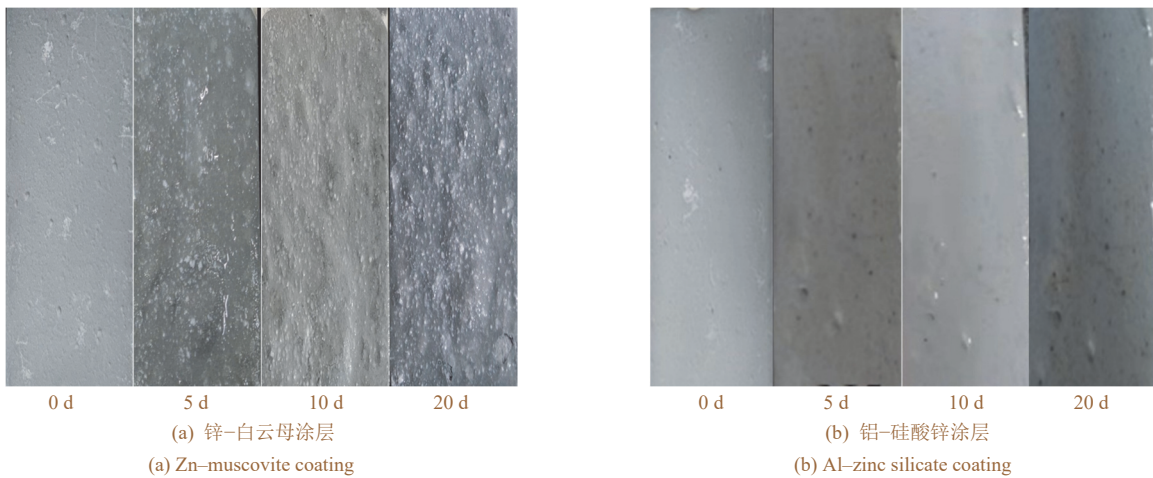


图 5 在饱和氢氧化钙溶液中浸泡不同时间后涂层的表面形貌

Figure 5 Surface morphologies of coatings after immersion in saturated  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  solution for different time

### 2.7.2 耐酸性

锌-白云母和铝-硅酸锌两种涂层在  $\text{pH} = 4$  的  $\text{HCl}$  溶液中浸泡不同时间后的质量损失曲线如图 6 所示。在整个浸泡期(10 d)内，两种涂层均表现出极低的质量损失，展现出优异的耐酸性。锌-白云母涂层的最终质量损失率为 0.07%，而铝-硅酸锌涂层的最终质量损失率为 0.22%。值得注意的是，从曲线趋势可以看出，锌-白云母涂层的质量损失始终低于铝-硅酸锌涂层，且其质量变化曲线更为平缓，表明其在酸性环境中具有更稳定的化学惰性与结构完整性。两种涂层优异的耐酸性主要缘于硅酸钾基体固有的化学稳定性，其  $\text{Si-O-Si}$  三维网络结构在弱酸环境中能够有效保持完整。

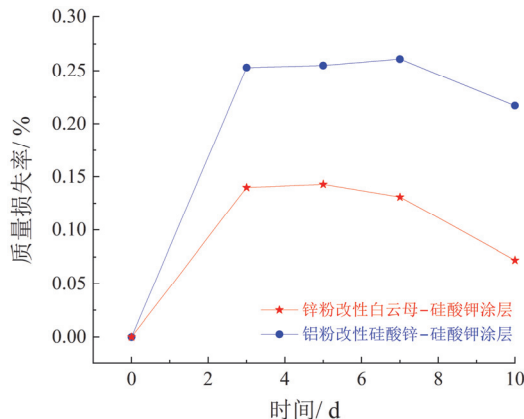


图 6 在  $\text{pH} = 4$  的  $\text{HCl}$  溶液中浸泡不同时间后锌-白云母与铝-硅酸锌涂层的质量损失

Figure 6 Mass losses of Zn-muscovite coating and Al-zinc silicate coating after immersion in  $\text{HCl}$  solution ( $\text{pH} = 4$ ) for different time

此外,两种涂层的质量损失差异揭示了不同填料体系的影响机制:锌-白云母涂层中片状白云母的致密排列结构可能更有效地延缓了  $H^+$  的纵向与横向扩散,并对内部活性锌粉提供了更佳的物理屏蔽,减少了介质对锌粉的侵蚀。相比之下,铝-硅酸锌涂层中球状填料的随机分布所形成的微观结构可能为  $H^+$  提供了相对便捷的渗透路径,导致其质量损失相对较高。该结果与前述力学性能及微观结构表征相吻合。尽管锌-白云母涂层在酸性环境中更有稳定性,但结合耐碱性测试结果可知,该涂层在强碱性环境中因锌粉的化学反应活性而导致防护性能下降。综上所述,锌-白云母涂层的防护效能与腐蚀介质类型有很大关联,其致密的物理屏障结构在酸性环境中优势显著,但在强碱性环境中,其电化学稳定性将成为制约因素。因此在实际应用中必须结合具体的服役环境来选择合适的涂层。

### 2.7.3 耐盐性

锌-白云母和铝-硅酸锌两种涂层在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 20 d 的表面形貌变化如图 7 所示。浸泡后,两种涂层均未引发基体钢材的明显锈蚀,表明它们都具备合格的耐盐性能。然而,二者表面形貌的完整性存在显著差异。锌-白云母涂层表面出现因侵蚀而导致的轻微粗糙化现象,但整体依然致密完整。相比之下,铝-硅酸锌涂层的表面则可观察到局部微孔和更为明显的侵蚀粗糙化迹象。上述形貌差异的根源在于两种填料体系的微观结构及其对  $Cl^-$  渗透路径的影响。锌-白云母涂层中片状白云母的平行定向排列构筑了高度致密且迂曲的“砖-泥”式物理屏障,极大地延长了  $Cl^-$  的纵向与横向扩散路径,从而更有效地维持了涂层在盐水中的结构完整性。相比之下,铝-硅酸锌涂层中球状填料(铝粉与硅酸锌)的随机分布与点接触堆叠模式易于在填料/基体界面形成微观孔隙和结构缺陷(见图 1b),这些缺陷可能优先成为  $Cl^-$  局部富集与快速渗透的通道,导致其涂层表层更早发生劣化。因此,在长期盐水浸泡环境中,锌-白云母涂层凭借其片状填料构筑的完善物理阻隔网络,展现出更优的  $Cl^-$  阻隔能力和更持久的腐蚀防护能力。

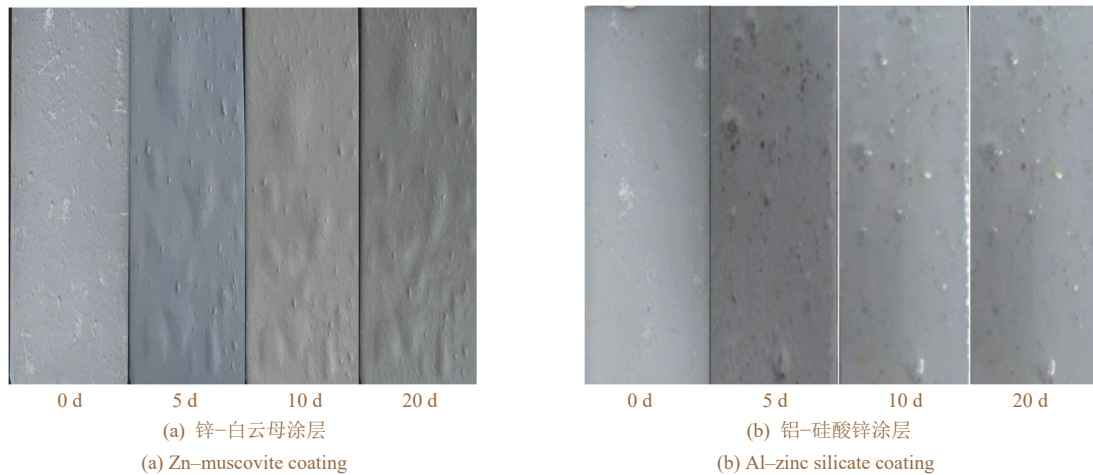


图 7 在 3.5% NaCl 溶液中浸泡不同时间后涂层的表面形貌  
Figure 7 Surface morphologies of coatings after immersion in 3.5% NaCl solution for different time

## 2.8 腐蚀机理分析

为深入揭示涂层在典型腐蚀环境中的防护机制,将结合其在酸、碱、盐介质中的耐受性(见图 5 至图 7)与在 3.5% NaCl 溶液中的电化学行为进行综合分析。两种涂层在不同介质中的性能差异根源在于其防护机制的主导类型不同:锌-白云母涂层凭借片状填料构筑的致密物理屏障(见图 1a),在酸、盐及长期碱性环境中展现出以高效屏蔽为主的均衡防护;而铝-硅酸锌涂层的防护机制在具备良好物理屏障作用的同时,更侧重于电化学保护,然而其存在缺陷的屏障结构(见图 1b)可能使其在长期浸泡中更易失效。因此,将通过在中性 NaCl 溶液中的电化学测试,定量揭示这两种主导机制的特征。

图 8 展示了锌-白云母和铝-硅酸锌两种涂层在 3.5% NaCl 溶液中的塔菲尔曲线,二者均表现出优异的耐蚀性能,腐蚀电流密度极低(锌-白云母涂层为  $0.11 \mu A/cm^2$ , 铝-硅酸锌涂层为  $0.48 \mu A/cm^2$ ),表明二者均能有效抑制钢基体的电化学腐蚀。值得注意的是,锌-白云母涂层的腐蚀电位更负,表明其具备更强的阴极保护能力,这源于锌粉的牺牲阳极作用。尽管铝-硅酸锌涂层的腐蚀电流密度略高,但仍处于极低水平。即使该涂层的附着力相对较低且存在微观缺陷,但其防护机制仍以物理屏障为主,并辅以电化学保护。

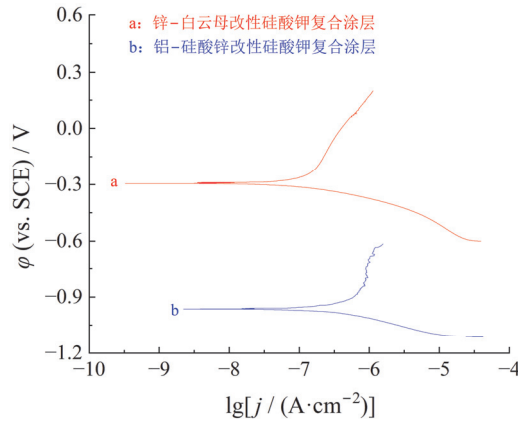


图8 锌-白云母与铝-硅酸锌涂层在 3.5% NaCl 溶液中的动电位极化曲线

Figure 8 Potentiodynamic polarization curves of Zn-muscovite coating and Al-zinc silicate coating in 3.5% NaCl solution

结合微观结构分析, 锌-白云母涂层中片状白云母构建的“砖-泥”结构有效延长了  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{O}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  等介质的扩散路径, 增强了屏障性能。尽管铝-硅酸锌涂层在电化学上表现出更强的阴极保护能力, 但其球状填料分布不均及界面缺陷可能引发局部腐蚀, 尤其在长期服役中屏障性能易衰退。综上, 锌-白云母涂层在保持优异屏障性能的同时, 兼具一定的阴极保护作用, 展现出更为均衡和持久的防护优势。该结果从电化学角度进一步证实了微观结构与宏观性能之间的内在联系, 也体现了片状填料在构建长效无机防腐涂层中的结构优势。

锌-白云母和铝-硅酸锌两种涂层在 3.5% NaCl 溶液中的电化学阻抗谱如图 9 所示。奈奎斯特图显示, 两种涂层均呈现出巨大的容抗弧半径, 且未出现明显的扩散特征, 表明其腐蚀过程主要由电荷转移过程控制, 涂层本身具备极高的屏障阻力。伯德图进一步表明, 在低频区 (0.01 Hz) 两种涂层的阻抗模值均达到  $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$  量级, 相较于未保护的钢材提升了几个数量级, 证实二者均能提供卓越的腐蚀防护。尽管低频阻抗模值相当, 但两种涂层的相位角-频率分布在中频区 (1 ~ 100 Hz) 存在差异。锌-白云母涂层的相位角曲线更为宽缓, 且最大相位角更高, 表明其介电响应更接近理想电容器, 反映了更为均匀致密的微观结构。这一优异的介电特性与片状白云母在成膜过程中形成的高度有序的几何排列密切相关。片晶的平行取向对硅酸钾凝胶的收缩产生了强烈的几何约束效应, 有效抑制了微裂纹的产生, 从而形成了更为完整、缺陷更少的屏障相。此外, 片状白云母巨大的比表面积及其表面的活性位点, 与硅酸钾基体形成了广泛的界面锚定效应。这种强界面相互作用不仅贡献了更高的附着力, 也显著优化了界面区的离子迁移阻力, 使涂层表现出更均匀的电化学响应。

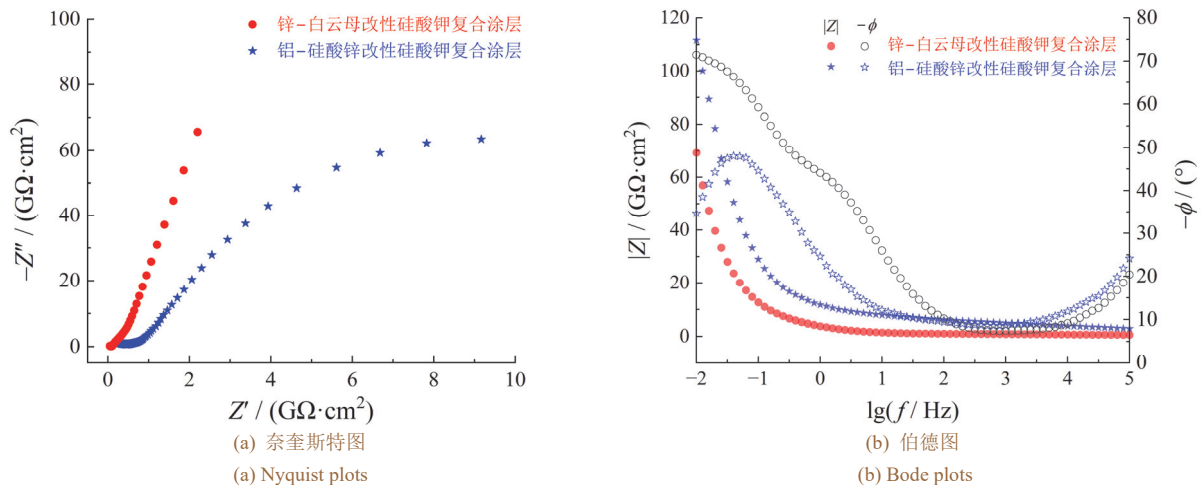


图9 锌-白云母与铝-硅酸锌涂层在 3.5% NaCl 溶液中的电化学阻抗谱

Figure 9 Electrochemical impedance spectra of Zn-muscovite coating and Al-zinc silicate coating in 3.5% NaCl solution

相比之下, 铝-硅酸锌涂层的相位角在中频区出现下降, 这与其球状填料的点接触分布有关。该模式难以有效约束基体收缩, 且易在填料/基体界面形成应力集中点, 从而诱发微观缺陷, 导致电化学响应出现不均匀性。这可与扫描电镜观察到的界面孔隙及海胆状的凸起形貌相互印证。综合塔菲尔曲线与微观形貌

分析可知, 尽管两种涂层体系均表现出优异的防护性能, 但其作用机制各有侧重: 铝-硅酸锌涂层的防护更依赖于铝粉提供的阴极保护作用; 锌-白云母层则主要凭借片状白云母通过几何约束与界面锚定构筑的增强型物理屏障, 在维持极高阻抗的同时, 提供了更稳定的界面结构与预期的长期耐久性。因此, 电化学阻抗谱分析从电极过程动力学角度证实了锌-白云母体系在构建长效、可靠防护涂层方面展现出更优的应用潜力。

### 3 结论

本研究通过硅丙乳液杂化改性与复合填料体系设计, 成功制备了锌-白云母与铝-硅酸锌涂层, 系统分析了其施工性能、力学性能、微观结构及耐蚀行为。锌-白云母涂层凭借片状白云母定向排列所形成的“砖-泥”结构, 展现出更优异的附着力(2.43 MPa)与耐冲击性(1 kg, >50 cm), 并构筑了致密有序的层状屏障。尽管在强碱性环境中其防护性能略逊于铝-硅酸锌涂层, 但该涂层能显著延缓  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{H}^+$  等腐蚀介质的渗透, 使其具有更长效的耐盐水性与耐酸性。电化学分析进一步揭示, 锌-白云母涂层在 3.5% NaCl 溶液中具备极高的阻抗模值(达到  $10^{10} \Omega \cdot \text{cm}^2$  量级)与一定的阴极保护能力, 实现了物理屏蔽与电化学保护的协同作用。综上, 硅丙乳液的引入有效改善了硅酸钾涂层的耐冲击性, 而片状白云母与锌粉的复合体系通过界面增强与结构致密化, 成功克服了传统无机涂层脆性大、长效防护机制不明确的关键问题, 为钢结构在严苛腐蚀环境下的高效、环保防护提供了可靠的材料解决方案与理论依据。

#### 参考文献:

- [1] 陈星. 钢结构重防腐有机涂层的力学特性及本构模型研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.  
CHEN X. Study on mechanical properties and constitutive model of organic coatings for heavy-duty anti-corrosion of steel structures [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2024.
- [2] LYU Z L, JIANG X, QIANG X H. State-of-the-art review on fatigue strengthening solutions in orthotropic steel bridge decks [J]. Structures, 2025, 79: 109597.
- [3] 李庆伟, 岳清瑞, 金红伟, 等. 双碳背景下钢结构碳排放研究进展[J]. 建筑结构, 2023, 53 (17): 1-7.  
LI Q W, YUE Q R, JIN H W, et al. Research progress on carbon emission of steel structure buildings based on carbon peak and carbon neutral [J]. Building Structure, 2023, 53 (17): 1-7.
- [4] 余玉洁, 温家森, 段瑞飞, 等. 钢结构电化学酸雾加速腐蚀试验方法设计[J]. 实验技术与管理, 2025, 42 (7): 188-194.  
YU Y J, WEN J S, DUAN R F, et al. Design of electrochemical acid spray accelerated corrosion test method for steel structures [J]. Experimental Technology and Management, 2025, 42 (7): 188-194.
- [5] XIE T, XIAO L, WANG Y Y, et al. Corrosion behavior in novel lightweight steel produced by additive manufacturing using electrochemical methods and neutral salt spray test [J]. Corrosion Science, 2025, 253: 112996.
- [6] 周建桥. 钢结构表面热喷镀锌防护涂层研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.  
ZHOU J Q. The research on steel structure surface protective coating of thermal spraying zinc [D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [7] LIANG Q Y, DING Z P, WU L J, et al. Enhanced dispersion of graphene in polyurethane composites via wet ball milling for erosion protection of steel structures in ports [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2025, 727: 138423.
- [8] HUA Y, DUAN L P, ZHAO J C. Performance-based fire protection of clustered individual members within a steel frame structure [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 218: 108691.
- [9] 丁铸, 肖炳斐, 王明燕. 硅溶胶对磷酸盐无机防腐涂层性能的影响[J]. 电镀与涂饰, 2022, 41 (2): 144-151.  
DING Z, XIAO B F, WANG M Y. Effect of silica sol on properties of phosphate-based inorganic anticorrosive coating [J]. Electroplating & Finishing, 2022, 41 (2): 144-151.
- [10] DU Y, CHEN Z, LU Y L, et al. Differences among  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ , and Ti in the anti-foaming mechanism of chemically bonded silicate coatings [J]. Ceramics International, 2024, 50 (12): 21926-21936.
- [11] 战兴晓, 李保山, 刘建军. 水性硅丙乳液对硅酸盐富锌涂层防腐性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42 (12): 29-38.  
ZHAN X X, LI B S, LIU J J. Effects of aqueous silicone-acrylate emulsions on the corrosion resistance of silicate zinc-rich coatings [J]. Corrosion & Protection, 2021, 42 (12): 29-38.
- [12] YAO Z C, HUANG Z H, YU S Y, et al. Thermal cleaning of the paint coatings for recovering silicate municipal solid waste and the analysis of coating dissociation mechanism [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 382: 135317.
- [13] LI C Q, ZHANG Y J, ZUO Z J, et al. Insights into the hybrid coatings derived from stellerite based organic/inorganic composite with synergistic antibacterial activity [J]. Progress in Organic Coatings, 2025, 204: 109271.
- [14] XIA T, CUI S K, YANG Z Y, et al. Experimental and numerical investigation on crack propagation in biomimetic nacreous composites with gradient structures [J]. Composite Structures, 2024, 345: 118346.
- [15] 黄哲伟, 姜来旭, 朱一鸣, 等. 定向石墨烯复合防腐涂层研究进展[J]. 精细化工, 2025, 42 (8): 1653-1660.  
HUANG Z W, JIANG L X, ZHU Y M, et al. Research process on oriented graphene composite corrosive coatings [J]. Fine Chemicals, 2025, 42 (8): 1653-1660.

【编辑: 温靖邦】