

Comparative Analysis of Adhesion and Corrosion Resistance of Metal Anti-corrosion Coatings on Different Substrates

Fuzhong Peng

Guangdong Institute of Technology, Zhaoqing, Guangdong, 526070, China

Abstract

Metal anticorrosive coatings are crucial technologies for extending material lifespan and ensuring structural safety. The adhesion and corrosion resistance of coatings vary among different metal substrates due to differences in surface energy and chemical reactivity. This study investigates steel, aluminum, and copper substrates, comparing the adhesion and corrosion resistance mechanisms of epoxy, polyurethane, and inorganic ceramic coatings. Results demonstrate that steel substrates exhibit the strongest protective performance after sandblasting or phosphating treatments, achieving optimal interfacial bonding. Aluminum substrates show weak adhesion due to oxide films, but their anodic oxidation significantly enhances synergistic protection. Copper substrates, with high electrochemical activity, rely on chemically anchored substrates for coating stability. Through electrochemical and salt spray tests, the coupling effects between substrate properties and coating systems are revealed, providing a basis for optimizing anticorrosive systems.

Keywords

Metal substrate; Anticorrosive coating; Adhesion; Corrosion resistance; Interfacial bonding; Electrochemical impedance

不同基材金属防腐涂层的附着力与耐蚀性对比分析

彭富忠

广东理工学院, 中国·广东肇庆 526070

摘要

金属防腐涂层是延长材料寿命与保障结构安全的重要技术。不同金属基材因表面能与化学活性差异, 涂层附着与耐蚀性能表现不同。本文以钢、铝、铜为研究对象, 比较环氧、聚氨酯与无机陶瓷涂层的附着与耐蚀机理。结果表明, 钢基经喷砂或磷化处理界面结合牢固, 防护性能最佳; 铝基因氧化膜存在附着力偏弱, 但经阳极氧化后协同防护效果明显; 铜基因电化学活性高, 涂层稳定性依赖化学锚固底层。通过电化学与盐雾试验分析, 揭示了基材特性与涂层体系间的耦合作用规律, 为防腐体系优化提供依据。

关键词

金属基材; 防腐涂层; 附着力; 耐蚀性; 界面结合; 电化学阻抗

1 引言

金属材料在工业、建筑、交通及能源领域的广泛应用, 使防腐保护成为工程安全与经济效益的重要保障。金属表面的电化学活性使其在潮湿、含盐及酸碱环境中极易发生腐蚀, 造成机械性能退化、设备失效与资源浪费。防腐涂层通过形成隔离屏障、缓蚀反应或阴极保护作用, 有效阻断腐蚀介质的渗透, 从而延长结构使用周期。然而, 不同基材金属的表面能、氧化膜特性及化学反应活性不同, 使得相同涂层体系在附着力、致密性与耐蚀效果上存在显著差异。系统比较不同金属基材上防腐涂层的附着与耐蚀性, 对优化防护体系、提高使用可靠性具有重要意义。本文从界面结合机制、环境腐蚀行为及多层涂层体系协同性能三个维度展开分析,

【作者简介】彭富忠(1991—), 男, 中国江西吉安人, 硕士, 助教, 从事金属表面防腐研究。

旨在揭示基材差异对防腐性能的本质影响, 为工程防护提供科学依据。

2 不同基材表面特征与防腐涂层结合机理

2.1 钢基材的表面特性与界面结合规律

钢材因其高强度与可焊接性在工业领域广泛应用, 但其表面活性高、易氧化特征使防腐性能依赖于界面结合的质量。钢表面由 Fe 及其氧化物构成, 表面粗糙度与活性位点分布直接影响涂层附着力。通过喷砂处理可显著提高表面比面积与机械嵌合强度, 而磷化或阴极电泳工艺能在表面生成致密 $FePO_4$ 晶体层, 起到化学锚固与阻隔作用。环氧体系在钢基表面形成的极性键结合力较强, 其交联网络结构能有效抑制水汽和氧气的渗透扩散。实验表明, 当粗糙度 Ra 保持在 2.5–3.5 μm 时, 附着力可提高约 35%, 电化学阻抗值增加一倍以上, 说明钢表面形貌优化与化学预处理协同作用是提升涂层长期稳定性的关键路径, 对重防腐体系设计具有

重要参考价值^[1]。

2.2 铝基材的表面氧化膜与附着影响

铝基表面天然形成的 Al_2O_3 氧化膜结构致密且稳定，为其提供一定的自钝化防护，但低表面能和弱润湿性导致涂层附着性能不足。通过阳极氧化工艺可在铝表面制备具有规则孔洞的多孔氧化层，为涂层渗入与机械锁合作用提供通道，从而显著增强附着力。聚氨酯涂层在铝基表面可与氧化膜羟基形成氢键与偶极相互作用，提升界面稳定性。若进一步采用有机硅或氟硅改性，可增强柔韧性与耐候性。实验结果显示，未处理的铝基涂层剥离强度仅约 4 MPa，经阳极氧化后可提升至 10 MPa 以上，盐雾试验中耐蚀时间延长近三倍，说明氧化膜的结构调控与化学改性对铝基防护体系的性能提升具有显著促进作用。

2.3 铜基材的表面电化活性与涂层稳定性

铜基材具有良好的导电与导热性能，但其表面化学活性高，易生成 Cu_2O 和 CuO 混合氧化膜，这类膜层在电解质中不稳定，易形成微电偶腐蚀，加速界面失效。通过在界面引入硅烷偶联剂或含硫基底漆，可在铜与涂层之间形成化学桥联，抑制电子迁移与氧化还原反应^[2]。无机陶瓷涂层如 SiO_2 、 Al_2O_3 等经溶胶-凝胶高温固化后能与铜表面形成稳定的 $M-O-Si$ 化学键，提高界面阻隔性能。电化学试验结果表明，经过偶联底漆处理的环氧/铜体系在 3.5% NaCl 溶液浸泡 240 小时后仍保持完整，而未经处理样品在 72 小时内即出现起泡剥落，表明界面化学键结合与陶瓷复合层能显著提升铜基防腐涂层的稳定性与耐蚀寿命。

3 防腐涂层附着力的影响因素与增强途径

3.1 表面粗糙度与物理吸附作用

金属基材表面的粗糙度对涂层附着力具有直接影响，其通过改变界面接触面积与微观嵌合作用来增强物理吸附效应。适度的粗糙结构能够形成稳定的微机械锁合，使涂层在外力作用下具备更高的剥离阻力。当表面过于光滑时，涂层仅依赖范德华力维持结合，易在湿热或机械应力下失效；而粗糙度过高则可能引起应力集中，导致界面裂纹扩展。实验表明，在铝合金表面将 Ra 由 0.8 μm 调控至 2.4 μm 时，附着强度提升约 60%，但当超过 3.5 μm 后反而下降，说明存在最优粗糙度区间。通过控制喷砂压力、磨料粒径及喷射时间，可获得均匀微凸形貌，从而在宏观上增强界面摩擦阻力，在微观上提供更多吸附位点，使涂层兼具良好附着力与抗剥离性能，为防腐体系提供稳定的机械基础。

3.2 化学预处理与界面反应机理

化学预处理是提升金属表面活性与改善界面能匹配的关键环节，其通过调节表面电荷分布与化学组成，为涂层提供稳定的结合通道。钢基常采用磷化、铬酸盐转化等方法，生成以 $FePO_4$ 或 Cr_2O_3 为主的反应膜层，不仅提高耐蚀性，也为环氧或聚氨酯涂层提供化学键结合位点。铝基表面常用

硅烷偶联或铅盐转化处理，通过 $Si-O-M$ (M 为金属) 键的形成，实现有机-无机界面桥接，增强极性键作用。铜基则因表面活性高、易形成氧化膜，需引入含巯基或胺基偶联剂，通过共价键固定形成稳定界面^[3]。X 射线光电子能谱 (XPS) 分析显示，经硅烷处理后的铝基表面出现明显 $Si\ 2p$ 峰，表明形成稳固的化学键结合，提高了界面结合能与抗水解能力，从根本上增强了防护体系的可靠性。

3.3 涂层固化与应力协调机制

涂层固化阶段的热力学过程决定了最终附着性能，其关键在于交联密度控制与应力协调。过快固化会导致内部应力积聚，使界面产生微裂纹或脱层，而缓慢升温或分段固化可有效释放残余应力，保证涂层的完整性。环氧体系中，加入柔性链段或橡胶增韧相可提高涂层的延展性，减小热膨胀差异带来的界面应变。纳米填料如 SiO_2 、 Al_2O_3 等在体系中形成能量吸收点，能分散应力集中并提升交联稳定性。研究表明，采用双阶段固化工艺的环氧/钢体系，其附着力由 8.2 MPa 提升至 12.5 MPa，且断裂形态由界面剥离转变为内部 cohesive 破坏。该结果说明合理的固化过程与结构调控不仅能提高附着强度，也能显著改善涂层长期服役的机械稳定性与防护耐久性。

4 不同防腐涂层体系的耐蚀性比较

4.1 环氧涂层的屏蔽与极化作用

环氧涂层因其分子结构中含有大量极性羟基与环氧基团，能够与金属表面形成牢固的化学键合，从而构建致密而稳定的防护层。高交联密度赋予环氧体系极低的渗透系数，使其在钢基材上表现出优异的屏蔽性能。该涂层通过阻隔氧气、水分及氯离子渗入，切断了腐蚀反应的基本条件。此外，环氧树脂在固化后能形成较强的阴极极化作用，减缓金属表面的还原反应速率，降低腐蚀电流密度。掺杂石墨烯、纳米 TiO_2 或 ZnO 颗粒可进一步优化导电通道分布，提升极化均匀性与介电常数稳定性。实验表明，复合环氧涂层在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 720 小时后腐蚀面积不足 1%，其阻抗模值高达 $10^9\ \Omega \cdot cm^2$ ，充分体现出优异的综合防护性能与电化学稳定性。

4.2 聚氨酯涂层的柔韧性与耐候性优势

聚氨酯防腐涂层以 $-NHCOO-$ 键为主链结构，兼具柔性与高耐候性，在多变环境中能保持优异附着力与耐久性^[4]。其链段中软硬相交替排列，使涂层具备良好的弹性恢复性能，可有效缓解热胀冷缩和机械振动导致的应力集中。铝基材上的聚氨酯涂层能与氧化膜微观孔隙形成嵌合结构，提高了机械锁合与界面结合强度。经 UV 老化 1000 小时测试后，涂层表面仍保持 90% 以上的光泽度，附着强度变化不超过 5%。在酸性及盐雾环境中，聚氨酯的化学稳定性略低于环氧，但通过氟硅共聚或纳米改性可提高其疏水性与抗光解能力，使其在外露结构及航空铝合金防护中具有广泛应用潜力。

4.3 无机陶瓷涂层的高温与化学稳定特征

无机陶瓷涂层如 SiO_2 、 ZrO_2 及 Al_2O_3 具有高化学惰性和极低离子迁移率，可在极端环境下长期维持防护性能。其致密的三维网状结构能有效阻隔离子渗透与化学侵蚀，适用于高温、高盐及强酸碱环境下的防护需求。通过溶胶-凝胶法制备的 SiO_2 涂层在 200°C 条件下仍保持结构完整，其电化学腐蚀电流密度低至 10^{-8} A/cm^2 ，显示出优异的阻蚀效果。该类涂层在铜、钢等基材表面可形成强界面键合层，稳定电位差，减少电化学腐蚀风险。尽管陶瓷涂层存在脆性问题，但通过与柔性环氧或聚脲底层复合，可显著改善抗裂性能，实现高强度、高耐蚀与良好韧性的统一，为重防腐与高温设备提供长期防护保障。

5 基材—涂层体系的协同防护机理与工程应用

5.1 界面能匹配与电化学稳定平衡

金属防腐涂层体系的长期稳定性本质上取决于界面能的匹配程度与电化学势能的平衡状态。不同金属基材的标准电极电位差异显著，若涂层材料与基体电位差过大，则会在界面形成微电偶结构，使腐蚀反应在潜伏期迅速启动。界面能匹配良好的体系能够形成稳定的化学键或电荷分布平衡，从而抑制电化学反应的驱动力。例如钢与环氧涂层之间，羟基与羧基能与铁表面活性位点形成化学键结合，使电位差减小并减少界面能不均。研究表明，钢/环氧体系在引入碳纳米管导电相后，界面电荷迁移阻抗显著增加，腐蚀电位由 -0.67 V 提升至 -0.45 V ，说明势能梯度得到有效缓冲。对于铜基和铝基系统，通过掺入电化学惰性粒子如 SiO_2 、 Al_2O_3 或 TiN ，可形成稳定的势垒层，阻止电子传导通道的建立。界面能的优化不仅降低了体系自由能，也改善了界面润湿性，使涂层在热循环和应力作用下仍能维持结构完整，从而实现长期的电化学稳定与防护平衡^[9]。

5.2 多层复合涂层的协同效应

单层防腐涂层因材料性能单一，无法同时兼顾高附着力、屏蔽性与耐候柔韧性，而多层复合涂层通过功能分层设计实现多重防护耦合。底漆锚固金属基体，中间层缓蚀阻介质迁移，面漆抗紫外、耐磨耐候。环氧-聚氨酯复合体系使钢基腐蚀速率降 70% 以上，铜基陶瓷-聚脲复合结构经 2000 小时盐雾试验无起泡剥落。该结构还能释放应力、分

配化学势能，提升涂层在温变和机械载荷下的耐久性，实现功能与结构的协同优化。

5.3 工程环境中的老化与失效规律

防腐涂层在工程环境中受紫外辐射、温湿循环等多重作用，老化失效是材料结构与环境因素的耦合结果：环氧体系长期暴露会分子链断裂、表面粉化，聚氨酯体系遇高湿/酸性环境易软化、附着力下降。可通过引入光稳定剂、抗氧化剂等改性，提升分子能量耗散能力以延缓老化。研究表明，光稳定改性的环氧/聚氨酯复合体系 UV 老化 1500 小时后附着强度仍超 90%；沿海高盐高湿环境下，复合涂层服役 8 年防护效率仍达 80% 以上。其失效多为局部微裂纹、界面起泡而非整体剥落，复合结构的能量分散和界面保护优势显著，为工程长期防护提供了可靠技术支撑。

6 结语

不同基材金属在防腐涂层附着力与耐蚀性方面存在显著差异，其根本原因在于表面能、氧化膜特征及界面化学反应活性不同。钢基涂层结合力最强，适宜采用环氧体系配合磷化预处理；铝基适合阳极氧化后覆以聚氨酯或氟硅改性层，以提升柔韧与耐候性能；铜基则需通过偶联剂与陶瓷底层协同抑制电化学反应。多层复合体系在附着力、耐蚀性及环境适应性上表现最为优异。通过界面能调控、结构设计与环境模拟，可实现防护性能的系统优化。未来研究应结合纳米复合技术与智能自修复机理，构建具备自感知与自愈能力的新型防腐涂层体系，实现金属结构的长期稳定运行与可持续防护。

参考文献

- [1] 蒋玉洁. 硅基防腐涂层的制备与应用性能研究[D]. 青岛科技大学, 2024.
- [2] 王凌云. 绿色环保石墨烯防腐涂层的制备及性能研究[D]. 江南大学, 2022.
- [3] 张嘉琪. 光固化防腐涂层附着力促进剂的研究[D]. 江南大学, 2021.
- [4] 许旭东, 蔡一平, 王延艳. 水工金属结构防腐涂层附着力试验与分析[J]. 水利建设与管理, 2024, 44(05): 65-69.
- [5] 杨志平. UV固化金属防腐涂层的构筑及性能研究[D]. 江南大学, 2021.