

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.10.016

石墨烯/水性环氧树脂复合涂层的耐腐蚀性能研究

范宇涵¹, 侯攀超¹, 宋振兴^{1*}, 匡泓², 王亮³,蒋宇欣⁴, 姜戈⁵, 洪琳⁵, 刘文柱⁵

(1. 天津科技大学理学院, 天津 300457; 2. 无锡星亿智能环保装备股份有限公司, 江苏 无锡 214153;
3. 无锡市安能金属制品有限公司, 江苏 无锡 214254; 4. 沈阳东环电镀科技有限公司,
辽宁 沈阳 110172; 5. 丹东市鸭绿江金属表面处理中心, 辽宁 丹东 118009)

摘要: 为提高电镀锌层的耐腐蚀性能, 将氧化石墨烯(GO)分散液加入到水性环氧树脂(WEP)涂料中, 并将其涂覆于电镀锌层表面, 得到GO/WEP复合涂层。采用扫描电子显微镜、红外光谱、电化学测试技术对复合涂层进行了分析。结果表明: 通过扫描电子显微镜发现复合涂层中的GO颗粒之间无明显间隙, 致密性良好; 由红外光谱测试证实GO在WEP中成功掺杂; 通过阳极极化测试发现, 相较于纯WEP涂层, GO/WEP复合涂层的腐蚀电位值正移0.108 V, 腐蚀电流密度值减小 3.454×10^{-5} A/cm²; 交流阻抗测试说明, GO的掺杂提高了复合薄膜的耐腐蚀性能, GO分散液添加量为0.6%的GO/WEP复合涂层耐腐蚀性能最佳。

关键词: 石墨烯; 水性环氧树脂; 复合涂层; 耐腐蚀性能

中图分类号: TQ153.2 **文献标识码:** A

Investigation on the corrosion resistance properties of graphene-reinforced waterborne epoxy composite coatings

Fan Yuhan¹, Hou Panchao¹, Song Zhenxing^{1*}, Kuang Hong², Wang Liang³,
Jiang Yuxin⁴, Jiang Ge⁵, Hong Lin⁵, Liu Wenzhu⁵

(1. College of Science, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;
2. Wuxi Xingyi Intelligent Environmental Protection Equipment Co., Ltd., Wuxi 214153, China;
3. Wuxi An Neng Metal Products Co., Ltd., Wuxi 214254, China; 4. Shenyang Donghuan Electroplating
Technology Co., Ltd., Shenyang 110172, China; 5. Dandong City Yalu River Metal
Surface Treatment Center, Dandong 118009, China)

Abstract: To enhance the corrosion resistance of electro-galvanized coatings, graphene oxide (GO) dispersion was added to waterborne epoxy resin (WEP) coatings and applied to the surface of electro-galvanized layers to obtain GO/WEP composite coatings. The composite coatings were analyzed by scanning electron microscopy, infrared spectroscopy, and electrochemical testing techniques. The results

收稿日期: 2025-04-15 修回日期: 2025-05-16

作者简介: 范宇涵(2001—), 女, 硕士, 研究方向为电化学, email: fyh_you@163.com

通信作者: 宋振兴(1981—), email: szx@tust.edu.cn

引用信息: 范宇涵, 侯攀超, 宋振兴, 等. 石墨烯/水性环氧树脂复合涂层的耐腐蚀性能研究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(10): 121-127.

Fan Yuhan, Hou Panchao, Song Zhenxing, et al. Investigation on the corrosion resistance properties of graphene-reinforced waterborne epoxy composite coatings[J]. Plating and Finishing, 2025, 47(10): 121-127.

showed that no obvious gaps were observed between the GO particles in the composite coatings by scanning electron microscopy, indicating good compactness. Infrared spectroscopy confirmed the successful doping of GO in WEP. Anodic polarization tests revealed that the corrosion potential of the GO/WEP composite coating was positively shifted by 0.108 V compared to the pure WEP coating, and the corrosion current density decreased by 3.454×10^{-5} A/cm². AC impedance tests indicated that the doping of GO improved the corrosion resistance of the composite films. The GO/WEP composite coating with a GO dispersion addition of 0.6% exhibited the best corrosion resistance.

Keywords: graphene; waterborne epoxy resin; composite coating; corrosion resistance performance

电镀锌层被广泛用于机械、建筑、汽车、电力及农业等领域的钢铁耐腐蚀涂层, 锌镀层对钢铁来说是阳极性镀层, 能对钢铁提供可靠的电化学保护, 但是在实际使用过程中, 镀层可能出现多种表面缺陷, 容易与湿润的空气作用产生腐蚀, 从而影响镀层质量^[1-5]。为了提高镀锌层的耐腐蚀性, 往往需在镀锌工艺后在镀层表面涂覆防腐涂层, 用以保护锌镀层。根据涂层的性质, 可以分为有机涂层和无机涂层, 有机涂层是以高分子化合物为主要成膜物质所组成的涂层, 在镀层外层进行涂覆形成致密保护膜阻止水和其他物质进入镀层, 常用的种类有环氧树脂、聚氨酯、丙烯酸酯和氯化橡胶等^[6-7]。有机涂层韧性好、分散性好, 结合力强, 但强度、耐水及耐久性较差, 长时间使用易失效^[8-9]。无机涂层可以分为碱金属硅酸盐、硅溶胶、磷酸盐及碳材料, 其具有工艺简单、环境友好、能耗低的优点, 但其韧性、分散性及结合力较差^[10]。因此, 将有机涂层和无机涂层结合起来, 能兼具二者优点, 大幅提高其耐腐蚀性能。

水性环氧树脂(WEP)涂层以微粒形式分散于水中形成均匀稳定的分散体, 是应用最为广泛的金属表面防腐涂层之一^[11-14]。与传统的溶剂型环氧树脂相比, WEP具有适应范围广、更加便利等特点^[15]。WEP具有一定的耐腐蚀性能, 但其所含亲水性基团会促进腐蚀介质的渗入, 在固化的过程中容易产生大量的微孔和缺陷^[16], 影响涂层耐腐蚀时间。因此, 将无机纳米材料引入到WEP涂层中以改善表面性能和提高耐腐蚀能力成为研究热点^[17]。目前, 常用的纳米材料为SiO₂、苯胺(PANI)、六方氮化硼(h-BN)、ZrO₂和石墨烯(GO)。

黄小庆等^[18]将聚间苯二胺(PmPD)与植酸(PA)结合改性SiO₂制备的PA/PmPD-SiO₂复合材料添加到水性环氧树脂中制备防腐涂层。结果表明, 涂层表面平滑、孔隙少、致密性好, 具有高效防腐性能。Zhu等^[19]通过PANI与间氨基苯磺酸和间氨基苯甲

酸共聚, 制备了水分散的自掺杂磺化聚苯胺(SPANI)并将其分散于水性环氧树脂基体中制成复合涂料, 相比于未经改性的PANI, 加入SPANI的复合涂层抗腐蚀性能明显提高。崔明君等^[20]通过高速搅拌法制备不同h-BN含量的水性环氧树脂涂层, 增大了涂层表面接触角, 降低涂层表面与水的相互作用, 延长了涂层对腐蚀介质的阻隔作用。童庆玲等^[21]通过共价键将三聚氰胺接枝到纳米SiO₂表面, 解决了纳米粒子团聚问题, 提升了与环氧树脂的相容性。三聚氰胺改性纳米SiO₂显著提升了水性环氧涂层的防腐性能, 尤其在添加量为1.0%时效果最佳, 该涂层具有优异的物理性能和防腐效果, 在工业防腐领域具有广阔的应用前景。

在提高防腐涂料性能的填料中, 具有独特层状结构的GO, 有较大的比表面积和较小的孔径, 可以形成致密的物理阻挡层, 作为一种功能填料可提升防腐涂料致密性, 保护基材不受外界的腐蚀, 为改善涂层的防腐性能提供了新的途径^[22-27]。GO与WEP具有良好的相容性, 利用GO自身的亲水性, 使得GO均匀分散在WEP中, 在WEP表面充当一层优异的物理隔绝膜, 提高了WEP的耐腐蚀性能和耐酸性能, 可以有效填补涂层孔隙, 增加涂层中扩散通道的曲折性, 延缓侵蚀性介质的扩散^[28]。

本文采用水性GO分散液复配WEP, 在镀锌铁基体表面上形成GO/WEP复合涂层, 并通过浸泡实验和电化学加速腐蚀实验研究该复合涂层对镀锌层耐腐蚀性能的影响。

1 实验

1.1 电镀锌方法

将45#钢片(20 mm×20 mm×1 mm)经过溶剂溶解试件表面的油污后, 将其浸入酸洗液(25~30 mL/L HNO₃、10~12 mL/L H₃PO₄)中0.5~1.0 min^[29], 溶解附着在表面的铁锈等氧化产物, 对粗糙的表面进行电镀前处理。将锌电极和待镀钢片放入镀液

中, 锌电极接电源正极, 钢片接电源负极, 控制电流密度在 $2\sim 3\text{ A/dm}^2$ 电镀30 min, 取出洗净^[30], 得到表面光滑平整的镀锌层铁片。镀液组成为: 17 g/L ZnO、150 g/L NaOH、15 mL/L 季铵类化合物(NCZA)、1 mL/L 烟酸类磺化盐(NCZB)。镀液稳定控制在 $20\text{ }^\circ\text{C}\sim 30\text{ }^\circ\text{C}$ 。

1.2 复合涂层的制备

采用上述镀锌铁片作为试样用紫外胶封装, 在烧杯中加入1 g纯WEP溶液和9 g去离子水, 在转速1 000 r/min下搅拌分散10 min, 得到10%含量的WEP稀释溶液, 在上述稀释溶液中加入0.05%含量的水性GO分散液, 在转速2 000 r/min下搅拌10 min, 使GO在涂料中充分分散, 得到0.05% GO/WEP的复合溶液。最后, 将混合物涂覆在预处理的镀锌铁片上, 并用超声波处理混合物20 min, 室温固化, 定义为GO/WEP复合涂层。在纯WEP溶液与稀释溶液的质量比为1:10、1:15、1:20、1:25和1:30下, 测定不同含量的WEP涂层(1:10、1:15、1:20、1:25和1:30-WEP)的耐腐蚀性, 确定了最佳性能的WEP涂层的比例后, 再加入不同稀释比(0.05%、0.1%、0.2%、0.4%和0.6%)的水性GO分散液, 定义为0.05%、0.1%、0.2%、0.4%和0.6% GO/WEP复合溶液, 并采用上述方法制得不同含量的GO/WEP复合涂层。

1.3 测试与表征

将制备复合涂层的镀锌铁片放入浓度为3.5%的NaCl溶液中进行浸泡试验, 为短时间内对比不同含量的复合涂层对样品的保护效果, 设置浸泡周期为10 d, 期间每24 h定时补充水, 确保盐水溶液浓度一致, 对试件进行拍照记录, 对比试件的外观变化情况。

电化学测试采用电化学工作站三电极工作系统, 以制备的金属复合涂层(工作面积为 4.0 cm^2)为工作电极, 铂片电极为对电极, 饱和甘汞电极为参比电极, 3.5% NaCl溶液为电解质溶液。EIS的设置参数为: 频率范围为0.01 Hz~100 kHz, 施加5 mV的正弦电压; Tafel极化曲线的设置参数为: 扫描速率为10 mV/s, 电压范围为开路电位(E_{ocp}) $\pm 1\ 000\text{ mV}$ 。

利用Apreo型扫描电子显微镜观察涂层形貌特征; 使用Tensor-27型傅里叶变换红外光谱仪分析涂层结构; 采用CHI-660E型电化学工作站进行阳极极化曲线和交流阻抗测试, 测试数据利用ZSimp Win软件进行拟合和计算。

2 结果与讨论

2.1 形貌分析

采用扫描电镜(SEM)对涂层的微观形貌进行测试, 图1(a)是GO的SEM图片, GO是一种褶皱状的材料, 片层非常薄, 呈半透明薄纱状。图1(b)是GO/WEP复合涂层的SEM图片, 片层上均匀附着纳米颗粒, 有大面积的平展部分, 表面结构致密, 涂覆效果好, 这说明经过高速搅拌处理后, GO片层已经充分分散在WEP中, 利用GO良好的亲水性与WEP进行物理结合^[31], 未改变WEP的结构, 但提高了涂层的致密性, 促使复合涂层表面更为完整, 增强了材料的耐腐蚀性能。

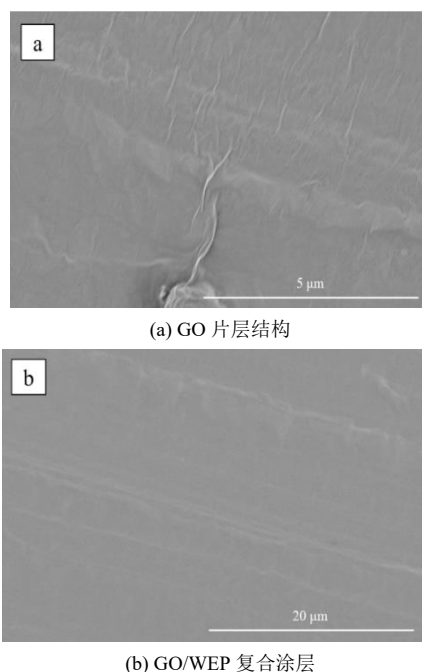


图1 GO和GO/WEP复合涂层的微观结构

Fig.1 The microstructure of GO and GO/WEP composite coatings

2.2 泡片实验

图2是不同WEP和GO/WEP复合涂层的泡锌镀锌铁片试验效果, 由图2可知, 随着浸泡时间的增加, 涂覆有WEP涂层的试件, 涂层颜色发生明显变化, 表面发生腐蚀黑化; 而涂覆有GO/WEP涂层的试件, 涂层颜色未发生明显变化, 表面未出现破损, 添加量为0.6% GO/WEP的复合涂层表面耐腐蚀效果最佳。GO/WEP涂层较WEP涂层表现优异的原因主要是GO/WEP复合涂层中添有GO, 减少了涂层的孔隙缺陷, 提高了涂层的致密性, 有效阻止腐蚀性离子的入侵, 在基底表面形成较好的保护层。而单一的

WEP涂层在浸泡过程中，涂层内部存在的孔缝导致腐蚀性离子进入基底，侵蚀试样表面，使涂层产生腐蚀、黑化现象。

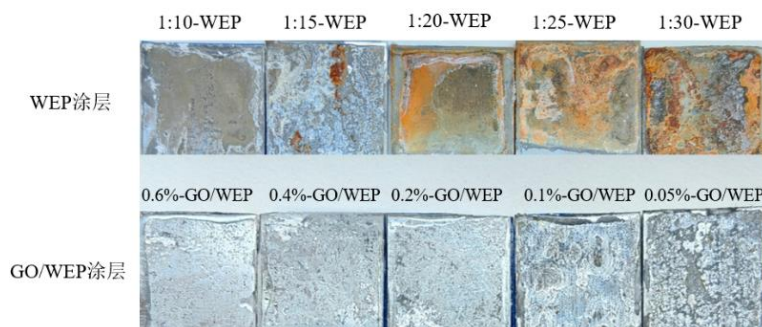


图2 WEP与GO/WEP涂层泡片实验后的表现形貌

Fig.2 Apparent morphology after experiments with WEP and GO/WEP coated foam sheets

2.3 红外光谱

采用红外光谱对GO/WEP的结构进行分析，如图3所示，在GO的平面结构中， 1056 cm^{-1} 处的特征峰源于环氧基(C—O—C)的伸缩振动， 1600 cm^{-1} 处的特征峰对应羧基(—COOH)的伸缩振动， 1730 cm^{-1} 处的特征峰反映了羰基(C=O)的伸缩振动，而 3425 cm^{-1} 处的特征峰属于羟基(—OH)的伸缩振动。当将GO加入WEP体系后，观察到GO平面结构中—OH、C=O和—COOH的特征峰强度显著减弱，而C—O—C的特征峰强度则明显增强，这些特征峰的强度变化证实了GO与WEP之间发生了化学反应。

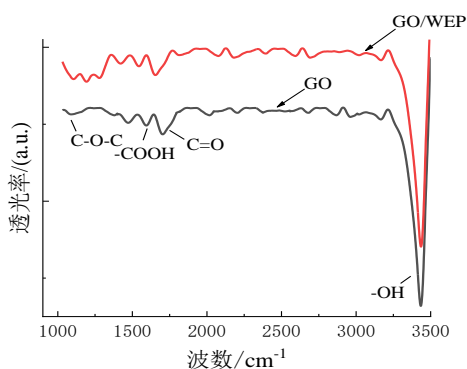


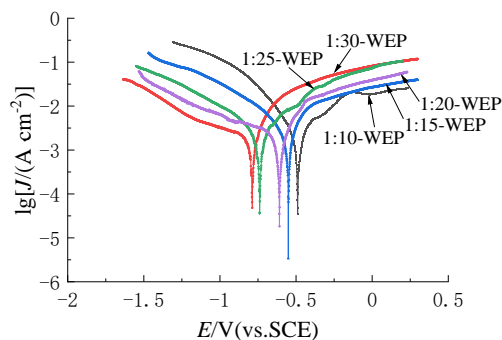
图3 红外光谱图

Fig.3 Diagram of infrared spectrum

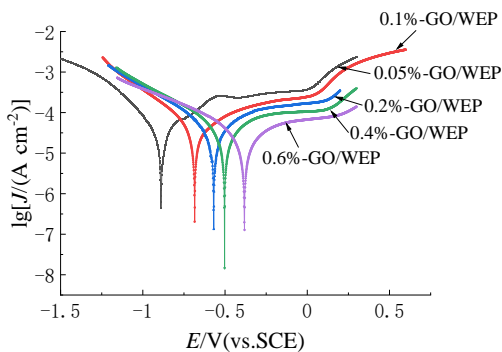
2.4 阳极极化测试分析

图4(a)为不同含量的WEP涂层在3.5% NaCl溶液中的极化曲线，由图4(a)分析可知，随着WEP溶液含量的增加，纯WEP涂层的腐蚀电位值右移至 -0.490 V ，腐蚀电流密度值降低至 $3.467 \times 10^{-5}\text{ A/cm}^2$ ，表明了1：10-WEP涂层的防腐蚀性能最佳，但涂料表面仍存在的微孔和缺陷会导致腐蚀介质的渗入，影响涂层的长效防护能力。

图4(b)为1：10-WEP涂层基础上添加不同含量GO的极化曲线图，表1所示为其拟合数据，根据拟合数据分析可知，随着GO添加量的增加，复合涂层腐蚀电位比未添加前提高，在添加量为0.6%时腐蚀电位达到最高值 -0.382 V 。添加GO分散液后的腐蚀电流密度也比未添加前减小，在添加量为0.6%时达到最小值 $1.288 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2$ 。GO分散液的添加对腐蚀介质展现了一定的屏蔽作用，涂层的耐腐蚀性能得到了提高，与1：10-WEP涂层性能相比，0.6%GO/WEP复合涂层的腐蚀电位值正移了 0.108 V ，腐



(a) 不同含量的WEP涂层



(b) GO/WEP复合涂层

图4 WEP与GO/WEP涂层的Tafel曲线

Fig.4 Tafel curves of WEP versus GO/WEP coatings

表1 不同水性GO分散液添加量的复合涂层电化学腐蚀参数

Tab.1 Electrochemical corrosion parameters of composite coatings with different amounts of aqueous GO dispersion added

水性GO分散液添加量/%	$E/V(\text{vs. SCE})$	$J/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
0.05	-0.890	4.830×10^{-7}
0.10	-0.685	2.037×10^{-7}
0.20	-0.569	1.336×10^{-7}
0.40	-0.503	1.459×10^{-8}
0.60	-0.382	1.288×10^{-7}

蚀电流密度值减小了 $3.454\times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$, 说明GO与WEP具有更好的相容性和分散性, 从而展现出更优异的耐腐蚀性能。

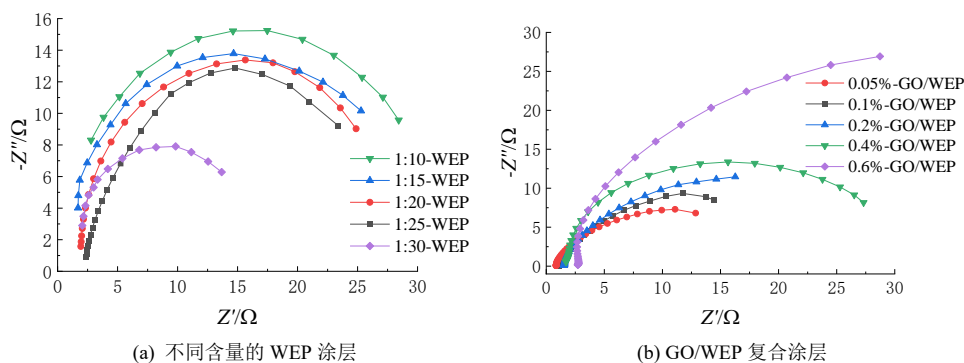


图5 WEP和GO/WEP涂层的电化学交流阻抗图谱

Fig.5 Electrochemical AC impedance profiles of WEP and GO/WEP coatings

3 结论

本文通过高速搅拌方法将水性GO分散液添加到水性环氧树脂中, 制备了不同GO含量(0.05%、0.1%、0.2%、0.4%和0.6%)的复合涂层。对GO/WEP复合涂层表面形貌进行表征, 并利用红外光谱测试发现GO添加到WEP后结构并未受到影响。GO/WEP复合涂层降低了基底表面与盐水的相互作用, 延长了复合涂层对腐蚀介质的阻隔作用。经阳极极化测试及交流阻抗测试发现, 与纯WEP涂层相比, GO/WEP复合涂层的腐蚀电位值正移0.108 V, 腐蚀电流密度值减小了 $3.454\times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$; 复合涂层的半圆弧直径大于掺杂前的半圆弧直径, 证明了加入的GO提高了复合薄膜的耐腐蚀性能。当1:10-WEP涂料中GO分散液添加量为0.6%时, 电化学交流阻抗Nyquist图低频区容抗弧半径最

2.5 交流阻抗测试分析

采用EIS方法对涂层在3.5% NaCl溶液电化学腐蚀性能进行了表征, 由图5(a)可知, 涂层的Nyquist图在不同含量WEP下拟合后为一个低频区容抗弧, 涂层低频区容抗弧半径与交流阻抗呈正比, 当半径越大时, 涂层的电化学腐蚀阻力越大, 耐腐蚀性越强。随着WEP含量的增加, 半径逐渐增大, 在1:10-WEP时达到最大。

为提高WEP涂层耐腐蚀性, 引入不同含量的GO分散液, 图5(b)为GO/WEP复合材料的电化学交流阻抗图谱。涂层掺杂GO后的半圆弧直径均远大于WEP的半圆弧直径, 在0.6% GO/WEP复合涂层的直径达到最大, 说明复合涂层的电荷转移电阻 R_{ct} 值增大, 进一步证实了GO的加入增加了电荷转移电阻, 提高了电极的耐腐蚀性能。

大, 腐蚀电流密度为 $1.288\times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, 耐腐蚀性均有显著提升, 表明添加GO分散液可以明显提高WEP涂层的电阻, 改善涂层的防护性能, 提高WEP涂层的耐腐蚀性能。

参考文献

- [1] 曾连连, 常强, 钟细明, 等. 热镀锌表面超疏水膜层构筑及其耐腐蚀性能研究[J]. 材料保护, 2025, 58(1): 40-48.
- [2] 喻济兵. 电镀锌技术在工业中的发展和应用[J]. 船电技术, 2018, 38(2): 35-36, 49.
- [3] 曹楚南. 中国材料的自然环境腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 10-17.
- [4] Marcus P. Corrosion mechanisms in theory and practice[M]. Boca Raton: Crc Press, 2011: 938-941.

- [5] Seré P R, Banera M, Egli W A, et al. Effect on temporary protection and adhesion promoter of silane nanofilms applied on electro-galvanized steel[J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2016, 65: 88-95.
- [6] Samarah V H, Sandra H P, Celso V S, et al. A comparative study on graphene oxide and carbon nanotube reinforcement of PMMA-Siloxane-silica anticorrosive coatings[J]. *Acs Applied Materials*, 2016, 8(25): 16339-16350.
- [7] Ali H, Majid R A, Majid M, et al. Recent advances and future perspectives for carbon nanostructures reinforced organic coating for anti-corrosion application[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2021, 23: 100994.
- [8] Wu K, Gui T, Dong J, et al. Synthesis of robust polyaniline microcapsules via UV-initiated emulsion polymerization for self-healing and anti-corrosion coating[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2022, 162: 106592
- [9] Han R, He H, Liu X, et al. Anti-corrosion and self-healing coatings with polyaniline/epoxy copolymer-urea-formaldehyde microcapsules for rusty steel sheets [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 616: 605-617.
- [10] 丁言祯. 无机建筑涂料的发展趋势[J]. *中国涂料*, 2022, 37(5): 60-64.
- [11] Huo S Q, Wang J, Yang S, et al. Synthesis of a novel phosphorus-nitrogen type flame retardant composed of maleimide, triazine-trione, and PHO phosphaphenanthrene and its flame retardant effect on epoxy resin[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2016, 131: 106-113.
- [12] 孔庆华. 环氧树脂材料在建筑工程中的应用研究进展 [J]. *合成材料老化与应用*, 2025, 54(1): 69-72.
- [13] Ai D, Mo R, Wang H H, et al. Preparation of waterborne epoxy dispersion and its application in 2K waterborne epoxy coatings[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 136: 105258.
- [14] Zhang J, Huang H, Ma J, et al. Preparation and properties of corrosion-resistant coatings from waterborne polyurethane modified epoxy emulsion[J]. *Frontiers in Materials*, 2019, 6: 185.
- [15] Xu L L, Ren J, Lu J H, et al. Preparation of double linked waterborne epoxy resin coating using titanium curing agent and aminopropyltriethoxysilane and its anticorrosive properties[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2021, 16(7): 210768.
- [16] Wang X, Gao K, Caldona E B, et al. Cellulose nanocrystals-reinforced waterborne epoxy coatings with enhanced corrosion resistance for steel[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 257:128755.
- [17] Chen Y N, Ren B H, Gao S Y, et al. The sandwich-like structures of polydopamine and 8-hydroxyquinoline coated graphene oxide for excellent corrosion resistance of epoxy coatings[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 565: 436-448.
- [18] 黄小庆, 杨建军, 吴庆云, 等. 植酸/聚间苯二胺修饰纳米 SiO₂ 制备水性环氧复合涂层及其防腐性能[J]. *高分子材料科学与工程*, 2024, 40(1): 34-44.
- [19] Zhu K, Li J Y, Wang H H, et al. Comparative study on anticorrosion enhancement of carboxylated and sulfonated self-doped polyaniline on waterborne epoxy coating[J]. *Journal of Macromolecular Science Part A*, 2020, 58(4): 249-261.
- [20] 崔明君, 任思明, 张广安, 等. 六方氮化硼掺杂水性环氧树脂耐腐蚀性能的研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2016, 36(6): 566-572.
- [21] 童庆玲, 黄小庆, 杨建军, 等. 三聚氰胺改性纳米 SiO₂ 水性环氧涂层的制备及防腐性能[J]. *精细化工*, 2025, 1-11.
- [22] Kyhl L, Nielsen S F, Cabo A G, et al. Graphene as an anti-corrosion coating layer[J]. *Faraday Discuss*, 2015, 180: 495-509.
- [23] Cai H, Li X, Zhang Y, et al. A high corrosion-resistant waterborne epoxy resin coating improved by addition of multi-interface structured zinc phosphate particles[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 7829-7844.
- [24] Chamberland J P, Sellathurai A J, Parent J S, et al. Optimized hydrogel electrodes for supercapacitors from high-concentration aqueous graphene nanoplatelet dispersions[J]. *Journal of Power Sources*, 2024, 605: 234435.
- [25] Guo S, Chen J, Zhang Y, et al. Graphene-based films: Fabrication, interfacial modification, and applications[J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(10): 2539.
- [26] Kyhl L, Nielsen S F, Cabo A G, et al. Graphene as an anti-corrosion coating layer[J]. *Faraday Discuss*, 2015, 180: 495509.
- [27] Gearba R I, Mueller K M, Veneman P A, et al. Atom-scale covalent electrochemical modification of single-layer graphene on SiC substrates by diaryliodonium salts[J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2015, 753: 9-15.
- [28] Ramezanzndeh B, Niroumandrad S, Ahmadi A, et al. Enhancement of barrier and corrosion protection performance

- of an epoxy coating through wet transfer of aminofunctionalized graphene oxide[J]. *Corrosion Science*, 2016, 103: 283-304.
- [29] 李晓征, 吴茹梦, 张红军, 等. 一种铝及铝合金氰化镀银前处理酸洗工艺研究[J]. *电镀与精饰*, 2024, 46(11): 30-35.
- *****
- *上接 89 页*
- surface superhydrophobicity[J]. *Chemical Communications*, 2008, 7(7): 877-879.
- [9] 师浩洋. 基于模板沉积法制备超疏水表面微细电极的工艺研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- [10] Lee S M, Kwon T H. Mass-producible replication of highly hydrophobic surfaces from plant leaves[J]. *Nanotechnology*. 2006, 17(13): 3189-3196.
- [11] 朱鑫睿, 高永盛, 张衍, 等. 模板法制备耐久性疏水环氧涂层[J]. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 47(3): 272-277.
- [12] 李静, 李利军, 高艳芳, 等. 模板法制备纳米材料[J]. *材料导报*, 2011, 25(2): 5-7.
- [13] 张维, 邢红立, 皇甫志杰. 基于层层自组装技术构筑棉织物超疏水表面[J]. *针织工业*, 2019(10): 23-27.
- [14] Tao N, Xu W, Lu S. One-step controllable fabrication of superhydrophobic surfaces with special composite structure on zinc substrates[J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2011, 361(1): 388-396.
- [15] 刘韬, 底月兰, 王海斗, 等. 化学刻蚀法制备金属超疏水表面的方法及机理研究[J]. *表面技术*, 2019, 48(11): 226-235.
- [16] Wu R, Liang S, Pan A, et al. Fabrication of nano-structured super-hydrophobic film on aluminum by controllable immersing method[J]. *Applied Surface Science*, 2012, 258(16): 5933-5937.
- [17] 江向荣, 陈梁, 马兰, 等. 具有装饰性的超疏水铝合金表面电化学制备方法及其性能研究[J]. *广东化工*, 2023, 50(9): 33-36.
- [18] Han J T, Jang Y, Dong Y L, et al. Fabrication of a bionic superhydrophobic metal surface by sulfur-induced morphological development[J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2005, 15(30): 3089-3092.
- [19] 王帅. 静电纺丝法制备功能性超疏水材料[D]. 吉林: 吉林大学, 2013.
- [20] 滕乐天, 赵康, 金龙, 等. 静电纺丝法制备 ZnO 纳米纤维膜及其超疏水性能[J]. *中国陶瓷*, 2014, 50(11): 12-15, 24.
- [21] Hardman S J, Muhamadsarih N, Riggs H J, et al. Electrospinning superhydrophobic fibers using surface segregating end-functionalized polymer additives[J]. *Macromolecules*, 2011, 44(44): 6461-6470.
- [22] 朱耿增, 杜宝帅, 姜波, 等. 不同制备方法对疏水涂层性能的影响[J]. *山东工业技术*, 2023(6): 69-74.