

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.03.011

## 新能源汽车车门富锌水性环氧涂层制备与性能

单仲<sup>1</sup> 翟智凯<sup>2</sup>

(1. 天津中德应用技术大学 汽车与轨道交通学院, 天津 300350; 2. 天津中汽测试技术有限公司, 天津 300354)

**摘要:** 为解决新能源汽车车身金属部件易腐蚀问题, 以水性环氧树脂为基料、锌粉为活性防锈颜料, 制备富锌水性环氧涂层; 通过优化原料配比、改进制备工艺, 深入探究不同因素对涂层性能影响; 通过电化学工作站、盐雾试验箱、扫描电子显微镜等设备, 对镀层的耐蚀性能、微观结构、附着力、硬度等性能进行研究。结果表明, 当锌粉质量分数为 80%、水性环氧树脂与固化剂质量比为 4 : 1、添加 0.5% 分散剂和 0.3% 流平剂时, 涂层综合性能最佳, 在新能源汽车车身防护领域展现出良好应用前景。

**关键词:** 新能源汽车; 富锌水性环氧涂层; 耐蚀性能; 制备工艺

**中图分类号:** TQ341 **文献标志码:** A

## Preparation and properties of Zinc-rich waterborne epoxy coating for new energy vehicle door

SHAN Zhong<sup>1</sup>, ZHAI Zhikai<sup>2</sup>

(1. Automobile & Rail Transportation School, Tianjin Sino-German University of Applied Sciences, Tianjin 300350, China; 2. Tianjin Zhongqi Testing Technology Co., Ltd. Tianjin 300354, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of easy-corrosive metal parts of new energy vehicle body, waterborne epoxy resin as binder and zinc powder as active anti-rust pigment were used to made zinc-rich waterborne epoxy coatings. By optimizing the ratio of raw materials and improving the preparation process, the influence of different factors on the performance of the coatings were deeply explored. The corrosion resistance, microstructure, adhesion, hardness and other properties of the coating were studied by electrochemical workstation, salt spray test box, scanning electron microscope and other equipments. The results show that, when the mass fraction of zinc powder is 80%, the mass ratio of waterborne epoxy resin to curing agent is 4 : 1, and 0.5% dispersant and 0.3% leveling agent are added, the coating has the best comprehensive performance and shows a better application prospect in the field of new energy vehicle body protection.

**Keywords:** new energy vehicles; zinc-rich waterborne epoxy coating; corrosion resistance; preparation process

近年来, 新能源汽车产业因其环保、节能等优势备受关注, 在全球范围内呈现出迅猛发展的态势<sup>[1]</sup>。然而, 新能源汽车的车身、底盘以及电池包

等关键部件大多采用金属材料制造。在复杂使用环境下, 如潮湿、酸雨、盐雾等, 车身金属部件易发生腐蚀, 不仅会对汽车的外观造成损害<sup>[2-3]</sup>, 影响其

收稿日期: 2025-06-30 修回日期: 2025-08-13

通信作者: 单仲(1987—), 男, 硕士, 讲师, 研究方向为汽车技术和车用发动机, e-mail: shanzhong@tsguas.edu.cn

基金项目: 天津中德应用技术大学科技项目(zdkt2016-002)

引用信息: 单仲, 翟智凯. 新能源汽车车门富锌水性环氧涂层制备与性能[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(3): 85-92.

SHAN Zhong, ZHAI Zhikai. Preparation and properties of Zinc-rich waterborne epoxy coating for new energy vehicle door[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(3): 85-92.

美观度,更严重的是会降低车身的结构强度<sup>[4]</sup>,给行车安全带来极大的隐患,同时还会大幅缩短汽车的使用寿命。

为有效解决新能源汽车金属部件的腐蚀问题,开发高性能的防腐涂层成为了关键所在。涂层防护作为目前应对金属腐蚀问题的常用且高效的方法,具有施工操作简便,适用范围广泛等优点<sup>[5]</sup>,在实际应用中不受设备面积和形状的限制,无论是大型的车身结构,还是形状复杂的零部件,都能进行有效的涂层防护。此外,重涂和修复的费用相对较低,并且还可以与阴极保护等其他防腐措施联合使用,从而构建出更为完善的防腐系统<sup>[6-7]</sup>。在众多防腐涂料中,富锌水性环氧涂层具有优异的耐蚀性能、良好的附着力和环保特性,在汽车、船舶、桥梁等领域广泛应用<sup>[8-10]</sup>。其耐蚀原理主要基于锌粉的牺牲阳极保护作用和环氧树脂的屏蔽作用。锌粉的标准电极电位比铁更负,在腐蚀环境中,锌粉优先失去电子被氧化,从而对金属基体起到保护作用<sup>[11]</sup>。环氧树脂形成的连续涂膜可阻挡腐蚀介质与金属基体的直接接触,延缓腐蚀进程<sup>[12]</sup>。

尽管富锌水性环氧涂层在防腐领域已有一定的应用,但目前针对新能源汽车车身防护的相关研究仍存在一些不足之处<sup>[13-15]</sup>。一方面,现有涂层在耐蚀性能、附着力和硬度等综合性能方面,难以完全满足新能源汽车复杂使用环境的要求。另一方面,在涂层制备过程中,对工艺参数和原料配比的优化研究不够深入,导致涂层性能不稳定。部分制备工艺还存在操作复杂<sup>[16]</sup>、成本较高等问题,生产效率低。因此,开发高性能、稳定可靠的富锌水性环氧涂层,对提高新能源汽车车身防护水平,推动新能源汽车产业发展具有重要意义。

本研究旨在通过对富锌水性环氧涂层的原料选择、配比优化及制备工艺改进,制备出适用于新能源汽车车身防护的高性能涂层,并通过电化学工作站、盐雾试验箱、扫描电子显微镜等设备,从耐蚀性能、微观结构、附着力、硬度等多个维度对涂层进行全面且深入的研究。为新能源汽车车身防护提供一套科学、高效且切实可行的解决方案,助力新能源汽车产业提升产品质量,增强市场竞争力,推动行业的可持续发展。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料

实验选用杜邦公司生产的水性环氧树脂及水

性环氧固化剂。锌粉选用新威凌金属新材料有限公司生产的纯度 $\geq 99\%$ 的鳞片状锌粉,平均粒径为 $5\ \mu\text{m}$ ,比表面积为 $1.2\ \text{m}^2/\text{g}$ 。分散剂选用迪高TEGO Dispers 655聚丙烯酸盐类分散剂、流平剂为迪高TEGO Glide 410有机硅类流平剂、消泡剂则是海明斯德谦Defom 825矿物油类消泡剂。去离子水为实验室自制。

基底板材采用Q235低碳钢材质,规格为 $50\ \text{mm} \times 50\ \text{mm} \times 2\ \text{mm}$ 。在实施涂料涂刷工序前,需依次完成表面处理及清洁作业。首先通过喷砂工艺对板材表面进行预处理,随后分别使用丙酮与无水乙醇去除表面残留杂质。涂料施工环节,水性环氧富锌底漆涂刷两遍,经此操作后,涂层总厚度达到 $80\ \mu\text{m}$ 左右。

### 1.2 涂层制备

在涂层制备过程中开展多组对照实验。针对锌粉含量影响因素,设计梯度实验方案。实验所用试剂及设备如表1所示。精确称量锌粉并按不同比例配置,其质量分数分别设定为50%、60%、70%、80%和90%。将相应质量的锌粉,质量比为4:1的水性环氧树脂与固化剂,消泡剂和部分去离子水加入高速分散机中。并引入富锌水性环氧涂层中助剂常规作用阈值范围内的添加量,即0.5%分散剂与0.3%流平剂,使各组分初步混合。随后转移至超声波分散仪超声分散20 min后,在磁力搅拌下,缓慢加入水性环氧固化剂,并继续搅拌10 min,保证固化剂与其他组分充分反应。将制备好的涂料以0.3 MPa压

表1 实验所用试剂及设备

Tab.1 Reagents and equipment used in the experiment

实验材料与仪器	型号及生产厂家
水性环氧树脂	杜邦公司
锌粉	新威凌金属新材料有限公司
磁力搅拌器	上海梅颖浦 85-2, 中国
超声波分散仪	KQ-500DE, 中国
电子天平	赛多利斯 ME204E, 德国
喷枪	岩田 W-71, 日本
电化学工作站	CHI660E, 中国
盐雾试验箱	YWX/Q-750, 中国
扫描电子显微镜	日立 SU8010, 日本
傅里叶变换红外	Nexus 670, 美国
差热-热重分析仪	DTG-60H 型, 日本
铅笔硬度计	QH, 中国
划格器	QFH, 中国

力、20 cm距离喷涂于Q235钢试片,喷涂两遍,每遍间隔15 min,在60 °C温度、50%湿度下干燥24 h固化,得到富锌水性环氧涂层试片。在涂层制备实验中,针对水性环氧树脂与固化剂配比影响因素,设置专项对比实验组。保持较优锌粉质量分数等条件恒定,将水性环氧树脂与固化剂的质量配比依次设定为3:1、4:1和5:1这三个梯度,通过统一规范的工艺流程完成涂层制备,以便系统分析不同配比下的性能差异。助剂添加量实验组则固定锌粉80%、水性环氧树脂与固化剂质量比4:1,改变分散剂、流平剂的添加量。通过相同工艺制备出未添加分散剂、流平剂与添加0.5%分散剂、0.3%流平剂两组试样。

### 1.3 性能测试

#### 1.3.1 傅里叶变换红外(FTIR)测试

为探究环氧树脂与ZrO<sub>2</sub>混合后的官能团变化,选用美国Thermonicolet公司Nexus 670型红外吸收光谱仪开展傅里叶变换红外(FTIR)测试。样品制备采用溴化钾压片法,测试区间设定在500~4 000 cm<sup>-1</sup>。

#### 1.3.2 耐腐蚀性能测试

使用CHI660E电化学工作站测试涂层的极化曲线和电化学阻抗测试(EIS)。测试采用三电极体系,参比电极为饱和甘汞电极(SCE),铂片为对电极。测试溶液为3.5 wt.%的NaCl溶液。极化曲线扫描速率为1 mV/s。EIS的测试频率范围为10<sup>-2</sup>~10<sup>5</sup> Hz,扰动电位为10 mV。

将涂层试片放入盐雾试验箱中,按照GB/T 10125—2012《人造气氛腐蚀试验盐雾试验》标准进行盐雾试验。试验箱内温度控制为(35±2) °C,测试溶液为3.5 wt.%的NaCl溶液。每100 h观察一次试片表面腐蚀情况,记录出现腐蚀现象的时间。

#### 1.3.3 热重(TG)测试

采用日本岛津DTG-60H型差热-热重分析仪,通过测量样品质量随温度变化的关系,分析涂层的热稳定性及分解行为。

#### 1.3.4 微观结构观察

使用扫描电化学显微镜观察富锌涂层的形貌。将涂料涂覆在50 mm×50 mm×2 mm的Q235钢板表面来观察涂层的表面形貌。将涂料涂覆在硅胶片表面,固化后揭下,然后用液氮使涂层脆断,以观察涂层的横截面形貌。

#### 1.3.5 附着力测试

依据GB/T 9286—1998《色漆和清漆漆膜的划格试验》标准,采用划格器在涂层表面划出100个边长

为1 mm的方格,划痕穿透涂层至基体。然后,用黏附力为(10±1) N/cm的3M 610胶带黏贴在划格区域,用辊压装置以5 N/cm的压力辊压3次,迅速垂直拉起胶带,观察方格内涂层脱落情况,按标准评级。

#### 1.3.6 硬度测试

根据GB/T 6739—2006《色漆和清漆铅笔法测定漆膜硬度》标准,使用铅笔硬度计测定涂层硬度。从最硬铅笔(9H)开始,以45°角在涂层表面匀速划动,速度为0.5 cm/s,长度约1~2 cm,每支铅笔划5次,检查划痕情况,以不出现明显划痕的最硬铅笔硬度作为涂层硬度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 FTIR 分析

通过红外测试分析发现不同锌粉含量水性环氧富锌涂层所得到的红外谱图相似,以80%锌粉含量下的红外谱图为例(图1)。3 650 cm<sup>-1</sup>处吸收峰可归属于涂层体系中环氧树脂未反应的羟基,2 410 cm<sup>-1</sup>处吸收峰为测试环境中CO<sub>2</sub>的干扰峰,与涂层本身官能团关联较小。1 710 cm<sup>-1</sup>处是羰基(C=O)的伸缩振动吸收,对应环氧树脂或固化剂中的羰基,为环氧基体的特征官能团,1 512 cm<sup>-1</sup>处为苯环骨架振动峰,因水性环氧多由双酚A型环氧树脂制备,该峰证明了环氧基体中双酚A骨架的存在。774 cm<sup>-1</sup>处特征峰可进一步证明,水性环氧富锌涂层中存在双酚A环氧结构,表明了涂层中环氧相的微观结构具有规整性。

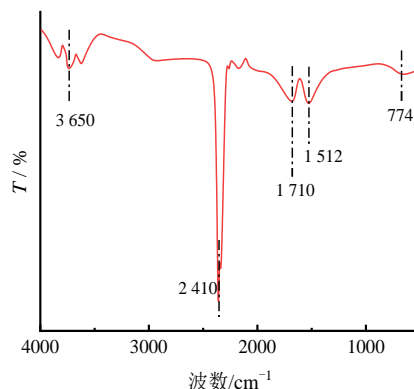


图1 水性环氧富锌涂层红外测试谱图

Fig.1 Infrared test spectra of waterborne epoxy zinc-rich coating

### 2.2 耐蚀性能分析

不同锌粉配比涂层的极化曲线如图2所示。基于这些曲线数据,经计算所得的自腐蚀电位( $E_{\text{corr}}$ )与

自腐蚀电流密度( $i_{corr}$ )如表2所示,以便直观对比分析各涂层的腐蚀特性参数。实验数据显示,涂层的自腐蚀电流密度变化趋势与锌粉添加量密切相关。随着锌粉所占比例逐步提升,自腐蚀电流密度呈现出先降后升的趋势。当锌粉质量占比达到80%时,自腐蚀电流密度降至 $1.61 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ,达到最小值,相较于70%锌粉含量涂层的 $1.66 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ 显著降低。这一数据表明,此配比下的涂层腐蚀速率最慢,展现出最优的耐腐蚀性能。

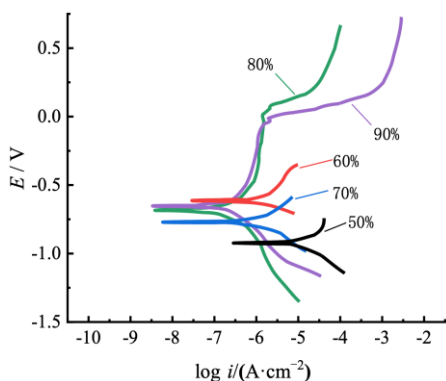


图2 不同锌粉含量涂层的极化曲线

Fig.2 Polarization curves of coatings with different zinc powder contents

表2 不同锌粉含量涂层极化曲线的电化学数据  
Tab.2 Electrochemical data of polarization curves of coatings with different zinc powder contents

锌粉含量/(wt.%)	$E_{corr}/\text{V}$	$i_{corr}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
50	-0.92	$2.61 \times 10^{-5}$
60	-0.64	$1.81 \times 10^{-6}$
70	-0.77	$1.66 \times 10^{-6}$
80	-0.69	$1.61 \times 10^{-7}$
90	-0.63	$4.34 \times 10^{-7}$

当锌粉含量较低时,涂层中锌粉形成的导电通路不完善,无法充分发挥牺牲阳极保护作用,导致腐蚀电流较大<sup>[17]</sup>。而当锌粉含量过高时,锌粉容易发生团聚现象<sup>[18]</sup>,在涂层内部形成孔隙和缺陷。这些孔隙和缺陷为腐蚀介质提供了渗透通道,加速了腐蚀反应的进行,使得自腐蚀电流密度增大,耐腐蚀性能下降。

图3为不同锌粉含量涂层在3.5 wt.% NaCl溶液中浸泡不同时间后的电化学阻抗谱。在Nyquist图中,涂层电阻特性可通过高频区域的容抗弧半径进行表征,而涂层与基底材料界面间的电荷转移电

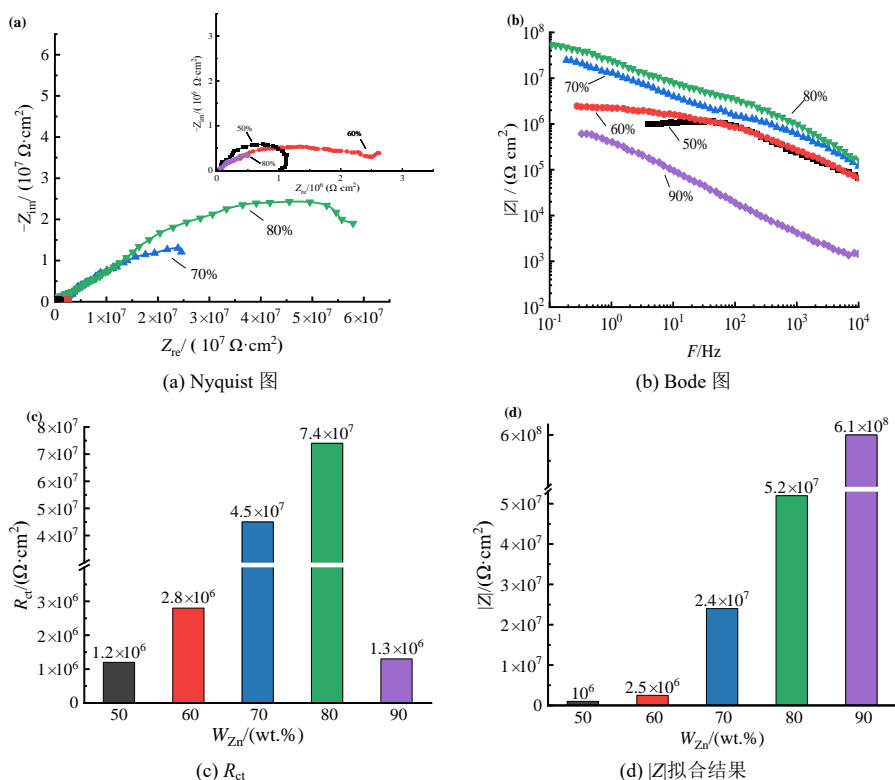


图3 不同锌粉含量涂层在3.5 wt.% NaCl溶液中浸泡后的电化学阻抗谱

Fig.3 Electrochemical impedance spectroscopy of coatings with different zinc powder contents after immersion in 3.5 wt.% NaCl solution

阻,则主要体现在图谱低频段容抗弧的半径大小上<sup>[19]</sup>。从图3(a)可以看出,涂层均呈现出阻抗弧,说明涂层具有防护作用。其中锌粉含量为50%的涂层阻抗弧半径较小,耐蚀性较差,这是因为锌粉的添加较少,涂层内部的锌粉无法形成紧密结构,影响锌粉作为阳极牺牲。随着锌粉的加入,容抗弧半径逐渐增大,在80%锌粉添加量时达到最大值,这是因为此时锌粉在涂层中形成了连续且致密的导电网络,增强了涂层的屏蔽作用和电化学保护能力。当锌粉添加量达到90%时,容抗弧半径减小,此时锌粉含量过高,涂层中锌粉容易发生团聚现象,从而形成孔隙,这些孔隙会为腐蚀介质提供渗透通道,加速腐蚀进程,导致涂层耐蚀性能下降。

图3(b)为不同片状锌粉含量涂层的Bode图。从图3(b)中可以看出在低频区,随着锌粉含量的增加涂层阻抗模值在增加,在锌粉含量为80%时达到峰值。在锌粉含量为90%时达到最低值。这说明80%锌粉含量的涂层耐腐蚀性能最好,这也与Nyquist图得出的结果一致。

### 2.3 热重(TG)分析

从图4中不同锌粉含量涂层的热重曲线发现,随着温度升高,各涂层失重率逐渐增加,其中锌粉含量为80%的涂层在中温区失重速率最慢、平台更平稳,而50%和90%含量的涂层失重率波动较大。这是因为80%锌粉含量时,锌粉在涂层中形成连续导电网络,既能快速导热减少环氧树脂局部过热分解,又能通过高温下生成的氧化锌阻隔氧气,且此时环氧树脂与固化剂形成的致密交联网络进一步增强了结构稳定性。锌粉含量过低时环氧树脂基体占比高、高温下分子链易断裂,过高则因锌粉团聚导致涂层孔隙增多、加速热量和氧气渗透,均使热

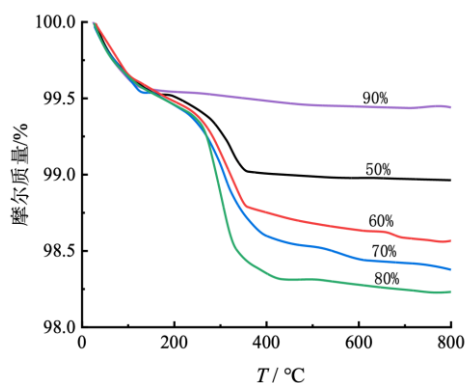


图4 不同锌粉含量涂层的热重曲线

Fig.4 Thermogravimetric curves of coatings with different zinc powder contents

稳定性下降。该结果与涂层耐蚀性测试结论一致,证实了80%锌粉含量时涂层结构的优越性。

### 2.4 盐雾试验结果

观察图5可发现锌粉含量为50%的涂层,“X”划痕处锈蚀严重,锈迹呈树枝状蔓延,整体腐蚀程度深。60%锌粉含量的涂层,“X”划痕处有少量锈迹,虽腐蚀相对较轻,但已出现腐蚀迹象。这两种涂层由于锌粉含量较低,牺牲阳极保护作用不足,难以有效抵御盐雾侵蚀。

70%锌粉含量的涂层,表面部分区域出现白色腐蚀产物,部分区域开始有轻微锈蚀,整体腐蚀程度相对可控,当时间达到800 h时,“X”划痕处锈蚀明显,表面腐蚀程度加深。80%锌粉含量的涂层耐蚀性表现最佳,在300 h与500 h时试样表面基本无明显变化,“X”划痕处也未出现锈蚀,当时间达到800 h时,在“X”划痕边缘处试样出现少量锈点,整体耐蚀性仍较为突出展现出良好的耐蚀性。90%锌粉含量的涂层,初期表面整体状态较好,但“X”划痕处在500 h时出现锈迹,且随着试验进行,锈迹扩大、锈点面积增大,耐蚀性不如80%锌粉含量的涂层。这是因为锌粉含量过高,可能导致锌粉团聚,使涂层内部产生更多缺陷,加速了腐蚀介质的渗透。

综合盐雾试验结果可知,各涂层的腐蚀劣化程度呈现出随测试时长递增的趋势。随着暴露时间的不断累积,涂层表面的腐蚀损伤持续加剧。锌粉含量为80%的涂层在整个试验过程中耐盐雾腐蚀性能最佳,能长时间有效保护金属基体。锌粉含量过低(如50%和60%),牺牲阳极保护作用不足,涂层很快被腐蚀,而锌粉含量过高(如90%),可能因锌粉团聚等导致涂层内部缺陷增多,腐蚀介质易渗透,耐蚀性反而下降。

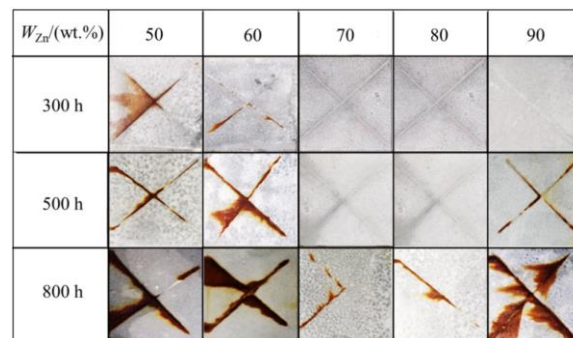


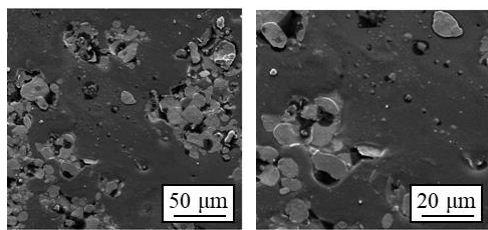
图5 不同锌粉含量涂层盐雾试验后的照片

Fig.5 Photos of coatings with different zinc powder contents after salt spray test

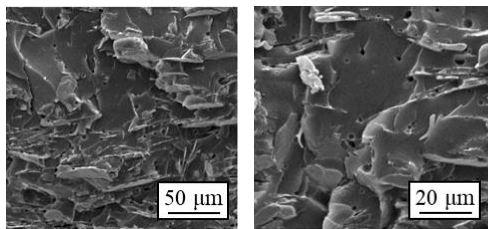
### 2.5 微观结构分析

通过扫描电子显微镜获取的微观图像(图6),直观展示了锌粉含量达80%的涂层表面及断面的微观特征。从图6(a)中可观察到涂层表面的,锌粉颗粒的分布虽并非绝对均匀,但整体上没有出现大面积的团聚现象。锌粉呈鳞片状分布,且鳞片间搭接紧密,形成连续的导电网络。局部放大后可以发现,锌粉鳞片之间的搭接更为紧密,在环氧树脂基体中形成了连续的导电网络。在腐蚀环境中,这种导电网络的存在使得锌粉能够更有效地发挥牺牲阳极保护作用。当涂层局部发生腐蚀时,锌粉可以迅速提供电子,使周围的金属基体得到保护,从而减缓腐蚀进程。同时,从图中也能看出涂层表面相对平整,没有明显的大尺寸气孔、裂纹等缺陷,有效地避免了因缺陷产生而降低涂层防护性能的情况。

通过图6(b)可以发现锌粉与环氧涂层之间并非简单的机械结合,而是形成了具有显著互渗特征的过渡区域。该界面处发生的物质交融与结构整合,有效提升了锌粉与环氧涂层之间的界面结合强度,从而赋予涂层优异的附着性能,显著增强了其在服役过程中的抗剥离能力。从图中可进一步观察到涂层的厚度相对均匀,使得腐蚀介质在渗透过程中面临相对一致的阻碍,提高了涂层整体的防护效果,保证了涂层在不同部位的防护性能一致性。此外,从断面结构还能看出涂层内部结构较为致密,这进一步增强了涂层对腐蚀介质的屏蔽作用,有助于提升涂层的耐蚀性能。



(a) 不同倍率下涂层表面 SEM 图



(b) 不同倍率下涂层断面 SEM 图

图 6 锌粉含量为 80%涂层的 SEM 图

Fig.6 SEM images of the coating with 80 % zinc powder content

综合涂层表面和断面的SEM分析可知,锌粉含量为80%的涂层在微观结构上具有明显优势。这种结构使得涂层不仅能够充分发挥锌粉的牺牲阳极保护作用,还能借助环氧树脂基体的屏蔽功能,有效阻挡腐蚀介质的侵入,为涂层具备优异的耐蚀性能、良好的附着力等综合性能提供了微观层面的有力支撑。

### 2.6 附着力测试结果

表3汇总了不同比例的水性环氧树脂与固化剂所制备涂层的附着力检测结果。当质量比为3 : 1时,涂层附着力为2级。当质量比调整为4 : 1时,附着力提升至1级,而当质量比为5 : 1时,附着力又降为2级。

当水性环氧树脂与固化剂以4 : 1的质量配比进行混合时,二者得以实现充分的化学反应,进而构建起高度致密的交联网络<sup>[20]</sup>。在此结构体系下,涂层内部的分子间作用力显著增强,不仅使得涂层内部的分子间作用力增强,还促使其与基体表面形成更为牢固的结合,从而使得涂层的附着性能得到显著提升。而当质量比为3 : 1时,固化剂相对过量,可能会导致部分固化剂未参与有效反应,影响交联结构的形成。当质量比为5 : 1时,固化剂相对不足,无法使环氧树脂充分交联,导致交联密度降低,进而使涂层附着力下降。

综合上述实验数据与分析,基于附着力性能的量化评估结果,将水性环氧树脂与固化剂的配比参数优化确定为4 : 1。此配比条件下,涂层与金属基底间形成的化学-物理复合界面结构,能够显著增强界面结合强度,确保涂层在服役过程中保持稳固附着状态,从而有效发挥其防腐蚀等防护功能。

表 3 不同水性环氧树脂与固化剂质量比涂层的附着力测试结果

Tab.3 Adhesion test results of coatings with different mass ratios of waterborne epoxy resin to curing agent

水性环氧树脂与固化剂质量比	附着力等级
3 : 1	2
4 : 1	1
5 : 1	2

### 2.7 硬度测试结果

添加不同助剂涂层的硬度测试结果如表4所示。未添加助剂的涂层硬度为2H,添加0.5%分散剂和0.3%流平剂后,涂层硬度提升至3H,划痕表面无

明显损伤。分散剂通过降低颜料表面自由能,促使锌粉在涂料体系中实现均匀分散。锌粉的均匀分散能够有效促进形成更加致密的涂层结构,减少涂层内部的缺陷,从而提高涂层的硬度流平剂则可以改善涂层表面张力梯度,使涂层在干燥过程中能够更加均匀地铺展,减少表面缺陷。表面缺陷的减少不仅提高了涂层的外观质量,还增强了涂层的硬度。两者协同作用,显著提高了涂层的硬度和表面质量。

表4 添加不同助剂涂层的硬度测试结果

Tab.4 Hardness test results of coatings with different additives

助剂添加情况	硬度
未添加	2H
添加0.5%分散剂和0.3%流平剂	3H

### 3 结论

本文围绕新能源汽车车身防护需求,对富锌水性环氧涂层开展系统研究,探究了原料配比对涂层性能的影响,成功制备出高性能涂层,并得出以下结论:

(1) 锌粉含量对涂层耐蚀性能影响显著,极化曲线、电化学阻抗谱及盐雾试验等表明当锌粉含量为80%时,涂层综合耐蚀性能最佳。适量的锌粉可形成良好导电网络,与环氧树脂屏蔽作用协同,有效抵御腐蚀介质侵蚀。

(2) 水性环氧树脂与固化剂质量比为4:1时,涂层附着力达到1级,此时交联结构最佳。添加0.5%分散剂和0.3%流平剂可提高涂层硬度至3H。

本研究探究了原料配比富锌水性环氧涂层性能的影响,并发现锌粉质量分数为80%、水性环氧树脂与固化剂质量比为4:1,且添加0.5%分散剂和0.3%流平剂时涂层具有优异的耐蚀性能、良好的附着力和较高的硬度,在新能源汽车车身防护领域具有良好的应用前景,有望提高新能源汽车车身的耐腐蚀性能和使用寿命。后续研究可进一步优化涂层配方和制备工艺,探索涂层在更复杂环境下的长期性能,以及与其他防护技术的协同应用。

### 参考文献

[1] XU Z, YU Q, ZHAN Z, et al. Effect of regularly arranged reduced graphene oxide on the anti-corrosion performance of waterborne silicate zinc-rich coatings[J]. Corrosion

Engineering, Science and Technology, 2023, 58 (1): 61-72.

- [2] ZHANG M, YANG C, BAI W, et al. Enhanced corrosion resistance and corrosion identification function of the rare-earth fluorescence-waterborne epoxy zinc-rich coatings[J]. Coatings, 2025, 15(2): 207-207.
- [3] HUANG X, YANG C, CHEN J, et al. Enhanced protective performance of carbon nanotube-reinforced waterborne epoxy zinc-rich coatings for corrosion protection of steel structures[J]. Coatings, 2024, 14(12): 1493-1493.
- [4] FANG X, YUAN Y, WANG Q, et al. Effect of zinc powder reduced graphene oxide on the corrosion resistance of waterborne inorganic zinc-rich coatings[J]. Coatings, 2024, 14(10):1321-1321.
- [5] LV B Q, GUO Y F, HUANG M Z, et al. Improvement of corrosion resistance of waterborne potassium silicate zinc-rich coating by addition of nano-ZnO/graphene[J]. Chemical Papers, 2024(3): 1-10.
- [6] LIN D, WANG R, GAO S, et al. A waterborne zinc-rich epoxy anti-corrosion coating with electron transport pathways constructed by conductive potassium titanate whiskers[J]. Corrosion Science, 2024, 236: 112250.
- [7] ZUO A, HUANG Y, XU X, et al. Degradation behavior of zinc-rich epoxy coatings in simulated marine tidal zone[J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 108175.
- [8] MENG C, CAN H, WEN L, et al. Polydopamine-modified  $Ti_3C_2Tx$  to enhance anticorrosion of waterborne zinc-rich epoxy coating[J]. Carbon, 2023, 215: 118467.
- [9] HUA Z, LEI Y, LIANG Q L, et al. Degradation damage of stress corrosion in epoxy zinc-rich coating/steel substrate systems[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2023, 35(5): 04023084.
- [10] Cathodic protection performance of zinc-rich epoxy coatings[J]. Focus on Powder Coatings, 2022, 2022(1): 6.
- [11] GUO S, YANG B, HE J. Preparation and corrosion properties of graphene oxide modified waterborne epoxy zinc-rich coatings[C]. Proceedings of 2021 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City(ICITBS 2021) PartII. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology,Guangzhou Special Pressure Equipment Inspection and Research Institute, 2021: 22-25.
- [12] SUN W, XING C, TANG X, et al. Comparative study on the degradation of a zinc-rich epoxy primer/acrylic polyurethane coating in different simulated atmospheric

- solutions[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2020(6): 1-17.
- [13] CHUN W, ZHAO Q, KANG F, et al. CeO<sub>2</sub> modified graphene nanoplatelets composite powders enhanced the cathodic protection of waterborne zinc-rich epoxy coatings[J]. *Journal of Polymer Research*, 2020, 27(12): 367-375.
- [14] XIAO W. Application of EIS and transmission line model to study the effect of arrangement of graphene on electromagnetic shielding and cathodic protection performance of zinc-rich waterborne epoxy coatings[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2020, 15(5): 4089-4101.
- [15] AL-HUSEINE A, KASI R. Study of the physical and electrochemical properties of hybrid paint system based on zinc-rich primer for mild steel protection[J]. *Pigment & Resin Technology*, 2020, 49(1): 33-40.
- [16] CHO S, CHIU T. Electrical and electrochemical behavior of a zinc-rich epoxy coating system with carbon nanotubes as a diode-like material[J]. *Electrochemical Acta*, 2019, 316: 189-201.
- [17] ANONYMOUS H. Zinc-rich epoxy primer uses glass spheres, zinc activator to enhance corrosion resistance[J]. *Materials Performance*, 2015, 54(11): 16-18.
- [18] ANONYMOUS H. The effect of zinc-rich epoxy coatings on the corrosion and cracking resistance of armored military vehicles[J]. *Materials Performance*, 2015, 54(1): 22-23.
- [19] ARMAN Y S, MEHDIPOUR M. Anticorrosion properties of an epoxy zinc-rich composite coating reinforced with zinc, aluminum, and iron oxide pigments[J]. *Journal of Coatings Technology and Research*, 2014, 11(5): 727-737.
- [20] GERGELY A, PFEIFER É, BERTOTI I, et al. Corrosion protection of cold-rolled steel by zinc-rich epoxy paint coatings loaded with nano-size alumina supported polypyrrole[J]. *Corrosion Science*, 2011, 53(11): 3486-3499.