

## 环氧磷酸酯/水性环氧涂层的耐蚀性能<sup>\*</sup>

丁纪恒<sup>1,2</sup>, 刘 栓<sup>1</sup>, 顾 林<sup>1</sup>, 赵海超<sup>1</sup>, 余海斌<sup>1</sup>

(1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 a. 中国科学院海洋新材料与应用技术重点实验室, b. 浙江省海洋材料与防护技术重点实验室, 浙江 宁波 315201; 2. 南京理工大学 化工学院, 南京 210094)

**摘 要:** 为研究水性环氧涂层缓蚀剂的制备及其耐蚀性能, 采用化学法将磷酸接到双酚 A 环氧树脂上, 并与 *N,N*-二甲基乙醇胺中和制备水性环氧磷酸酯。将环氧磷酸酯添加到双组份水性环氧树脂中制备 3 种环氧磷酸酯/水性环氧涂层 (E44, 0.2% P-E44 和 0.5% P-E44)。采用极化曲线和交流阻抗谱技术研究了环氧磷酸酯/水性环氧树脂对 Q235 钢基体在 3.5% NaCl 溶液中的防护性能。结果表明: 浸泡 24 h 后, 0.2% P-E44/碳钢体系的自腐蚀电流密度 ( $0.431 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) 低于 E44/碳钢体系 ( $0.928 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) 和 0.5% P-E44/碳钢体系 ( $0.553 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ); 在浸泡 24 h 内, 3 种涂层的涂层电容  $Q_c$  逐渐增大, 涂层电阻  $R_c$  和电荷转移电阻  $R_{ct}$  逐渐减小, 环氧磷酸酯可以显著提高纯水性环氧的  $R_c$  和  $R_{ct}$ , 进而提高水性环氧的耐蚀性能。当水性环氧树脂中环氧磷酸酯的含量为 0.2% 时, 其防护性能较好。

**关键词:** 环氧磷酸酯; 水性环氧涂层; 腐蚀行为; Q235 钢

**中图分类号:** TG174.46; TQ637 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9289(2015)02-0126-06

## Corrosion Resistance of Epoxy Phosphate/Waterborne Epoxy Coatings on Steel

DING Ji-heng<sup>1,2</sup>, LIU Shuan<sup>1</sup>, GU Lin<sup>1</sup>, ZHAO Hai-chao<sup>1</sup>, YU Hai-bin<sup>1</sup>

(1a. Key Laboratory of Marine Materials and Related Technologies, 1b. Zhejiang Key Laboratory of Marine Materials and Protective Technologies, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, Zhejiang; 2. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

**Abstract:** The preparation of an inhibitor used for waterborne epoxy coating and its corrosion resistance were investigated in this research. Waterborne epoxy phosphate was synthesized by the reaction of bisphenol A epoxy resin and phosphoric acid and then neutralization using *N,N*-dimethyl ethanolamine. Three different coatings (E44, 0.2% P-E44 and 0.5% P-E44) were obtained by adding epoxy phosphate into the two-component waterborne epoxy resin. The protective performance of epoxy phosphate/waterborne epoxy coatings based on Q235 steel immersed in 3.5% NaCl solution was investigated by polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). The results show that the corrosion current density of the 0.2% P-E44/Q235 carbon steel system ( $0.431 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) is lower than that of the E44/Q235 carbon steel system ( $0.928 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) and 0.5% P-E44/Q235 carbon steel system ( $0.553 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) after 24 hours. During the immersion of 24 hours, the coating capacitances  $Q_c$  of the three coatings gradually increase, and the coating resistances  $R_c$  and charge transfer resistances  $R_{ct}$  gradually decrease. Epoxy phosphates can significantly improve the corrosion resistance of waterborne epoxy coatings on Q235 steel. The epoxy phosphate content of 0.2% achieves high corrosion protection performance.

**Keywords:** epoxy phosphate; waterborne epoxy coating; corrosion behavior; Q235 steel

收稿日期: 2014-09-23; 修回日期: 2015-01-16; 基金项目: \* 旗舰人才引进资助(Y30226RA11)

通讯作者: 顾林(1985-), 男(汉), 助理研究员, 博士; 研究方向: 水性防腐涂料; Tel: (0574) 8760 3879; E-mail: gulin@nimte.ac.cn

网络出版日期: 2015-02-14 11:13; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20150311.1009.007.html>

引文格式: 丁纪恒, 刘栓, 顾林, 等. 环氧磷酸酯/水性环氧涂层的耐蚀性能 [J]. 中国表面工程, 2015, 28(2): 126-131. Ding J H, Liu S, Gu L, et al. Corrosion resistance of epoxy phosphate/waterborne epoxy coatings on steel [J]. China Surface Engineering, 2015, 28(2): 126-131.

## 0 引言

随着人们环保意识的不断提高和可持续发展战略的提出,发展低污染、高性能的绿色环保型涂料已逐渐成为涂料行业总的发展趋势。水性防腐涂料在重防腐涂料中占的比重日益上升,最终必将取代传统溶剂型涂料<sup>[1]</sup>。但水性防腐涂料的防护效果远低于溶剂型涂料,主要原因是水性涂料的成膜性能差、亲水性基团残留和容易出现闪锈等<sup>[2]</sup>。水性涂料中,涂料树脂以分子团聚体分散在水中,成膜过程使分子团聚体相互靠拢,界面分子渗透,分子团聚体融合,最终成膜形成涂层,因此很难达到溶剂型涂料那样均一致密的涂膜结构,从而影响了水性涂料的性能。同时,由于水的表面张力较大,配方中会引入一些助剂来改善漆膜对颜料和基料的湿润性,这些水溶性助剂对漆膜的耐水性和渗透性也带来不利影响<sup>[3-5]</sup>。

为了提高水性涂层对金属的防护性能,可以通过添加水溶性缓蚀剂来改善水性涂层。磷酸酯是一类带有亲水基团的化合物,由于其能与金属表面形成致密的磷化膜,具有优异的耐蚀抗锈能力和较好的附着力,从而成为防腐涂料改性研究的热点<sup>[6-9]</sup>。González 等<sup>[8]</sup>以磷酸酯单体 Sipomer PAM 100 作为附着力促进剂,并以甲基丙烯酸乙酰氧基乙酯作为交联剂,采用乳液聚合的方法制备出一种性能优良的水性丙烯酸乳液。研究表明:随着 Sipomer PAM100 量的增加涂膜的附着力也随之增加,当 Sipomer PAM100 的质量分数达到 5% 时,涂膜的耐盐雾性可达 250 h。Zhong 等<sup>[9]</sup>以羟丙基丙烯酸酯为交联单体,将具有防闪蚀作用的羟基磷酸酯功能性单体引入到丙烯酸树脂中,合成了一种性能优良的水性苯丙防腐乳液。当羟基磷酸酯的质量分数为 4%,涂膜的耐盐雾和耐水性时间分别为 240 h 和 300 h,且附着力达到 1 级。因此,在水性树脂中添加磷酸酯化合物,有望提高水性树脂对金属的附着力,从而提高涂层的耐蚀性能。

文中设计合成了水性环氧磷酸酯,将其添加到水性环氧树脂中,采用电化学测试手段研究环氧磷酸酯对水性环氧涂层的作用机理和涂层的失效过程,探讨了环氧磷酸酯提高水性涂层的耐蚀性能和涂层失效机理研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 水性环氧磷酸酯的合成

称取 20 g 双酚 A 环氧树脂 E44 溶于 40 mL 丙酮中,室温下滴加到含磷酸的丙酮溶液中(85%磷酸溶于 20 mL 丙酮,环氧基团与磷酸的摩尔比为 3:2),滴加完后继续反应直到酸值不变,为 73.85 mg KOH/g。然后加入 8.09 g N,N-二甲基乙醇胺进行中和,按照 30% 的固含量加入水,用旋转蒸发仪在 40 °C 真空条件下旋掉丙酮后,体系成乳白色乳液。将乳液样品直接涂膜在 KBr 压片上,进行傅立叶红外光谱测试。

### 1.2 涂层电极的制备

将基底金属 Q235 钢(山东晟鑫科技公司)加工成 1 cm × 1 cm × 1 cm 的立方体小块,除涂装面外剩余各面用环氧树脂封装。采用 SiC 砂纸将涂装面在抛磨机从 60 μm 逐级打磨至 12 μm,打磨好后立即用无水丙酮浸泡 2 h 脱脂,放在干燥器中干燥 24 h 后涂装。将合成的环氧磷酸酯按重量比加入到双组份水性环氧树脂中,采用线棒涂布器在自制电极上涂装成膜,在空气中固化 48 h 后的涂膜厚度约(30 ± 2) μm。

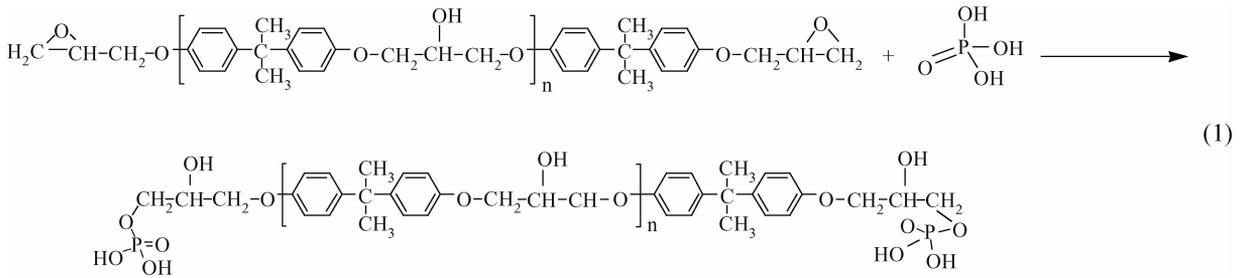
### 1.3 电化学腐蚀性能测试

极化曲线和交流阻抗(EIS)测试采用上海晨华 CHI660E 电化学工作站系统,以 1.5 cm × 1 cm 的铂片为对电极,涂层/碳钢电极为工作电极,带有鲁金毛细管的饱和甘汞电极为参比电极,测试介质为 3.5% NaCl 溶液。在溶液中浸泡使开路电位(OCP)稳定后,在 OCP 下以正弦波扰动幅值 30 mV,频率范围为 100 kHz ~ 10 mHz 进行 EIS 扫描,采用 ZSimpwin3.21 软件解析试验结果。极化曲线的扫描速度为 0.5 mV/s,扫描范围为 -200 ~ 200 mV vs. OCP,以 CHI660E 自带 Special analysis 软件在 Tafel 区拟合,解析电化学腐蚀参数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 环氧磷酸酯的合成与表征

双酚 A 环氧树脂 E44 与磷酸反应,然后用 N,N-二甲基乙醇胺中和,合成水性环氧磷酸树脂,反应方程式如下:



对获得的环氧磷酸酯进行的傅立叶红外光谱 (FT-IR) 表征结果见图 1。其中环氧树脂 (E44) 中  $2964\text{ cm}^{-1}$  ( $-\text{CH}_3$  中 C-H 反对称伸缩振动),  $1049\text{ cm}^{-1}$  (脂肪醚 C-O-C 伸缩振动),  $3053, 1609, 1575, 1512, 828\text{ cm}^{-1}$  (苯环吸收),  $2929\text{ cm}^{-1}$  ( $-\text{CH}_2$  中 C-H 键伸缩振动),  $911\text{ cm}^{-1}$  为环氧基团的特征吸收峰,  $3482\text{ cm}^{-1}$  为羟基特征吸收峰。由图中环氧磷酸酯 (P-E44) 可知,  $911\text{ cm}^{-1}$  处环氧基团的特征峰消失, 出现了  $1022\text{ cm}^{-1}$  处磷酸酯特征吸收峰, 这说明环氧基团与磷酸发生了反应。

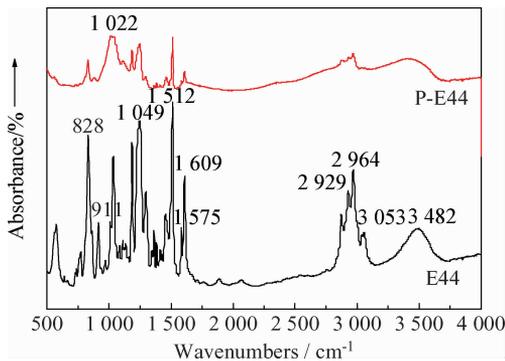


图 1 双酚 A 环氧树脂 E44 和环氧磷酸酯 P-E44 红外图谱

Fig. 1 FTIR spectra of the bisphenol A epoxy resin E44 and epoxy phosphate P-E44

## 2.2 动电位极化曲线

图 2 是质量分数不同的环氧磷酸酯水性环氧树脂/Q235 在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 24 h 后的动电位极化曲线。对极化曲线 Tafel 区进行拟

合所得到的电化学腐蚀参数 (腐蚀电位、自腐蚀电流密度、阴极和阳极极化率及极化电阻) 见表 1。通过图表可知, 环氧磷酸酯的加入提高了涂层/Q235 钢体系的开路电位 (OCP), 降低了其腐蚀倾向。随着环氧磷酸酯的加入, 涂层体系的极化电阻 ( $R_p$ ) 增大, 自腐蚀电流密度 ( $I_{\text{corr}}$ ) 减小, 说明环氧磷酸酯的加入提高了水性环氧涂层对 Q235 钢的防护。纯环氧涂层在浸泡 24 h 后的自腐蚀电流密度为  $0.928\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ; 环氧磷酸酯的质量分数为 0.2% 时, 涂层的防护效果较好 ( $R_p$  为  $47.1\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ ,  $I_{\text{corr}}$  为  $0.431\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ); 而当环氧磷酸酯的质量分数为 0.5% 时, 涂层的防护效果有所降低 ( $R_p$  为  $38.7\text{ k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ ,  $I_{\text{corr}}$  为  $0.553\text{ }\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ), 这可能是环氧磷酸酯含量过高, 影响了水性环氧涂层的成膜性能。

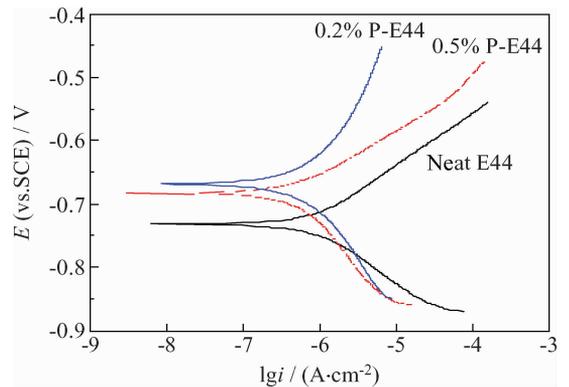


图 2 不同环氧涂层/Q235 钢在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 24 h 后的 Tafel 极化曲线

Fig. 2 Tafel polarization curves of different epoxy coating/Q235 steel immersed in 3.5% NaCl solution after 24 h

表 1 不同环氧涂层在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 24 h 后的腐蚀参数

Table 1 Corrosion parameters of different epoxy coating immersed in 3.5% NaCl solution after 24 h

	$E_{\text{corr}}$ (vs. SCE) / V	$I_{\text{corr}}$ / ( $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	$\beta_a$	$\beta_c$	$R_p$ / ( $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ )
Neat epoxy	-0.732	0.928	11.93	-12.01	19.1
0.2% P-E44/epoxy	-0.668	0.431	13.94	-6.38	47.1
0.5% P-E44/epoxy	-0.682	0.553	5.82	-6.13	38.7

### 2.3 交流阻抗谱

为研究所制备涂层对 Q235 钢在模拟海水中的防护机理和失效过程,采用交流阻抗谱技术(EIS)对含不同环氧磷酸酯的水性环氧树脂/Q235 钢体系在 3.5% NaCl 溶液中不同浸泡时间进行测试,EIS 结果见图 3。Bode 图可知,3 种涂层体系在浸泡时间范围内都出现两个时间常数,表明 3 种涂层体系的防水性能不好,可能是树脂

固化过程中有水分子残留,或者在浸泡初期,就有水分子渗入到涂层中。其中高频区容抗弧对应于涂层电阻( $R_c$ )和电容( $Q_c$ ),中低频区容抗弧对应于碳钢腐蚀反应的电荷转移电阻( $R_{ct}$ )和双电层电容( $Q_{dl}$ ), $n_1$  和  $n_2$  为常相位角指数,表征弥散效应程度<sup>[10]</sup>。为了定量探讨其涂层失效过程,采用等效电路  $R(Q(R(QR)))$ (见图 4)对其进行拟合,所得电化学拟合结果见表 2。

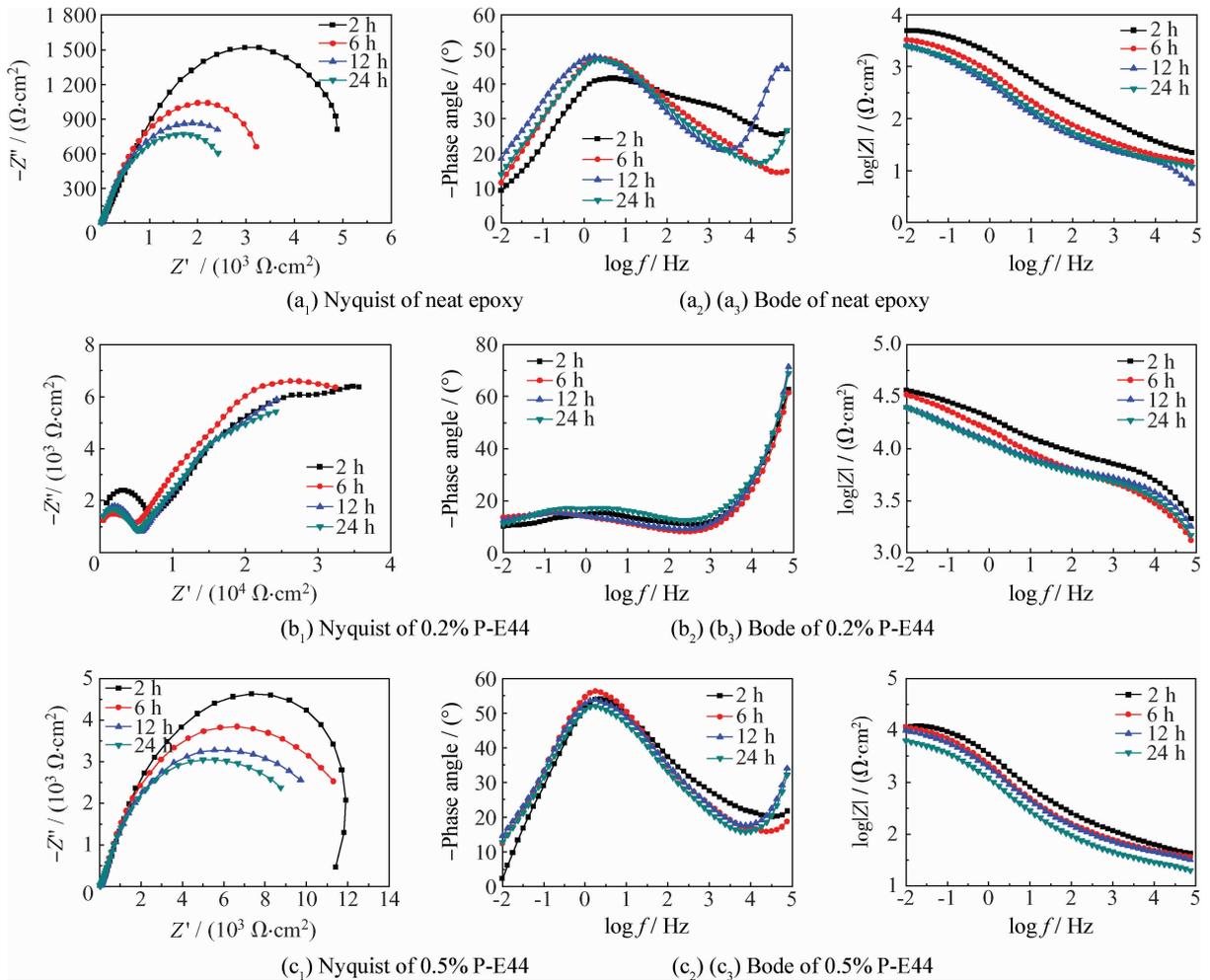


图 3 纯水性环氧、0.2%P-E44/水性环氧和 0.5%P-E44/水性环氧在 3.5% NaCl 溶液中浸泡不同时间后的 EIS 谱图  
Fig. 3 Nyquist and bode plots of neat epoxy, 0.2%P-E44 modified epoxy, and 0.5%P-E44 modified epoxy coating systems immersed in 3.5% NaCl solution under different times

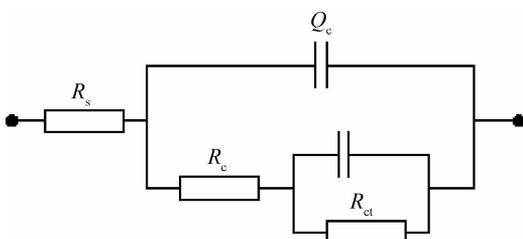


图 4 EIS 谱图的等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuits used to fit the EIS data

在盐水浸泡试验中,有机涂层的涂层电容可以表征涂层的隔水效果。随着介电常数较大的水分子逐渐向涂层内部渗透,涂层电容逐渐增大。E44 涂层电容随着浸泡时间的延长而逐渐增大,浸泡 24 h 后,涂层电容为  $799 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ 。而 0.2% P-E44 和 0.5% P-E44 涂层电容随浸泡时间的延长变化不大,且电容远小于纯水性环氧涂层,说明环氧磷酸酯的加入提高了水性环氧涂层的隔水性能。

表2 磷酸酯改性环氧涂层在3.5%NaCl溶液中浸泡不同时间的电化学参数

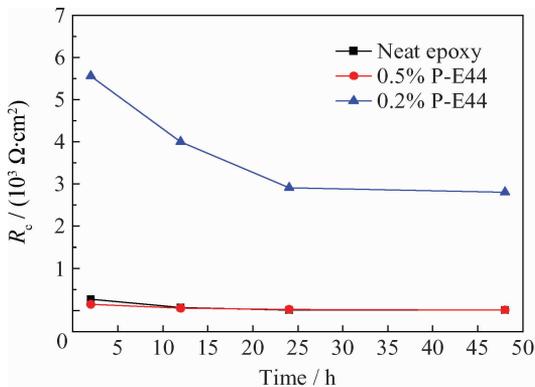
Table 2 Electrochemical parameters of the phosphate modified epoxy coating in 3.5%NaCl solution under different immersion times

Coating	Time/h	$R_c/$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$Q_c/$ ( $\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Hz}^{1-n_1}$ )	$n_1$	$R_{ct}/$ ( $\Omega \cdot \text{cm}^2$ )	$Q_{dl}/$ ( $\mu\text{F} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{Hz}^{1-n_2}$ )	$n_2$	$R_{ct}/$ ( $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ )
Epoxy	2	0.01	113	0.52	272.3	57.3	0.64	5.9
	6	0.01	241	0.54	71.7	140	0.67	3.9
	12	0.01	946	0.51	20.6	50.4	0.58	3.5
	24	0.01	799	0.76	18.6	73.1	0.58	3.2
0.2% P-E44	2	0.01	0.0082	0.85	5555	26.1	0.34	43.6
	6	0.01	0.0061	0.86	4002	68.5	0.81	65.1
	12	0.01	0.0024	0.95	2917	72.4	0.39	63.8
	24	0.01	0.0046	0.92	2801	39.6	0.29	52.5
0.5% P-E44	2	0.01	27.92	0.62	154.6	49.1	0.71	14.5
	6	0.01	140	0.61	65.4	160	0.78	13.6
	12	0.01	18.42	0.55	29.5	142	0.65	12.6
	24	0.01	17.93	0.64	21.3	120	0.61	10.5

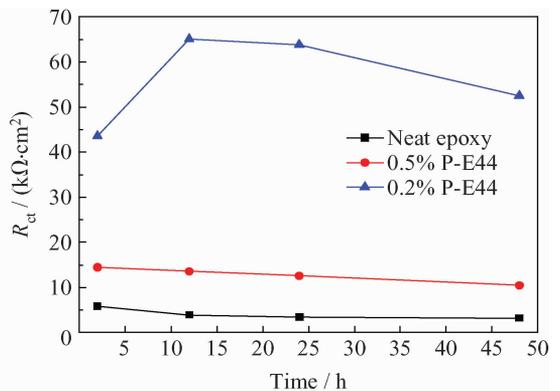
图5是不同环氧涂层体系的涂层电阻( $R_c$ )和电荷转移电阻( $R_{ct}$ )在3.5%NaCl溶液中浸泡24 h内的变化情况。 $R_c$ 和 $R_{ct}$ 都随浸泡时间延长逐渐减小;随着 $R_c$ 逐渐降低, $R_{ct}$ 变成整个腐蚀反应的控制步骤<sup>[11-12]</sup>。原因是随着浸泡时间的延长,介电常数较大的水分子和侵蚀性氯离子逐渐向涂层内部扩散,导致涂层电容逐渐增大,涂层电阻逐渐减小<sup>[13]</sup>。当水分子渗透涂层后,会直接与基底金属Q235钢发生腐蚀反应。当磷酸酯的质量分数为0.2%时,涂层电阻 $R_c$ 在浸泡24 h后从5 555  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 降低到2 801  $\Omega \cdot \text{cm}^2$ ,但远高于相同浸泡时期内的纯环氧体系。

当环氧树脂中加入磷酸酯后,磷酸酯可以显

著提高环氧树脂对金属基底的附着力并增大漆膜的交联密度;同时,磷酸酯在金属基底上发生化学反应,形成一层致密的磷化膜,增加基底金属腐蚀反应的阻力,使涂层的耐水性和抗闪蚀能力逐渐增强<sup>[14]</sup>。因此,当磷酸酯的质量分数为0.2%和0.5%时,其 $R_{ct}$ 明显高于纯水性环氧体系,当浸泡24 h后,其 $R_{ct}$ 分别为52.5  $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 和10.5  $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ,而纯环氧体系的 $R_{ct}$ 为3.2  $\text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ ;当磷酸酯的含量过高(0.5%)时,其 $R_c$ 和 $R_{ct}$ 均小于含0.2%磷酸酯环氧体系,可能是由于过多的磷酸酯会破坏涂层的致密性,EIS结果与极化曲线结果一致。因此,磷酸酯在水性环氧体系中的质量分数为0.2%时,对基底金属的防护效果较好。



(a) Coating resistance



(b) Charge transfer resistance

图5 涂层电阻( $R_c$ )和电荷转移电阻( $R_{ct}$ )随浸泡时间的变化Fig. 5 Changes of the  $R_c$  and  $R_{ct}$  curves as a function of immersion times

### 3 结 论

(1) 采用化学法合成了一种缓蚀剂环氧磷酸酯,将其加入到水性环氧树脂中能够明显提高树脂对金属基体的防护性能。

(2) 环氧磷酸酯的加入提高了水性环氧涂层的涂层电阻和电荷转移电阻,降低了涂层/碳钢体系的自腐蚀电流密度。当环氧磷酸酯在水性环氧体系中的质量分数为 0.2% 时,对基底金属的防护效果较好。

(3) 环氧磷酸酯可能与金属基底形成一层致密的磷化膜,使涂层的耐水性和抗闪蚀能力增强。

### 参考文献

- [1] Liu X Q, Wang Y, Cao Y, et al. Study of dextrin-derived curing agent for waterborne epoxy adhesive [J]. Carbohydrate Polymer, 2011, 83(3): 1180-4.
- [2] Xiao X Y, Hao C C. Preparation of waterborne epoxy acrylate/silica sol hybrid materials and study of their UV curing behavior [J]. Colloids and Surfaces A Physicochemical and Engineering Aspects, 2010, 359(1/2/3): 82-87.
- [3] Deepti S, Kamani P K, Shukul M C. Studies on synthesis of water-borne epoxy ester based on RBO fatty acids [J]. Progress in Organic Coatings, 2003, 47: 87-94.
- [4] 王晓艳, 高延敏, 孟祥玲, 等. 金属用水性环氧涂料及缓蚀剂的研究 [J]. 中国涂料, 2008, 23(12): 47-50.  
Wang X Y, Gao Y M, Meng X L, et al. Study on water-borne epoxy coatings and corrosion inhibitors for metal [J]. China Coatings, 2008, 23(12): 47-50 (in Chinese).
- [5] 薛丽莉. 水性环氧涂层/碳钢体系腐蚀电化学行为研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.  
Xue L L. Investigation on corrosion electrochemical behavior of waterborne epoxy coating/carbon steel system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2008 (in Chinese).
- [6] 钟泽钦, 余倩, 姚煌, 等. 水性防腐涂料用磷酸酯改性丙烯酸体系的研究进展 [J]. 上海涂料, 2012, 50(2): 37-40.  
Zhong Z Q, Yu Q, Yao H, et al. Waterborne anticorrosive

coatings research progress of phosph-ate ester modified acrylic system [J]. ShangHai coatings, 2012, 50(2): 37-40 (in Chinese).

- [7] Li Y F, Zhu J J, Gao X H, et al. Preparation and properties of phosphate-fluorocarbon acrylate anticorrosion emulsion [J]. Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry, 2013, 50(2): 248-254.
- [8] González I, Mestach D, Leiza J R, et al. Adhesion enhancement in waterborne acrylic latex binders synthesized with phosphate methacrylate monomers [J]. Progress in Organic Coating, 2008, 6: 38-44.
- [9] Zhong Z Q, Yu Q, Yao H, et al. Study of the strene-acrylic emulsion by hydroxyl-phosphate ester and its stoving varnish [J]. Progress in Orgnic Coatings, 2013, 76: 858-862.
- [10] Zhao X, Liu S, Wang X T, et al. Surface modification of nano-ZrO<sub>2</sub> with styrene coupling agent and investigation of its effect on the corrosion behavior of epoxy coating [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014, 33(5): 1163-71.
- [11] Liu S, Sun H Y, Sun L J, et al. Effects of pH and Cl<sup>-</sup> concentration on corrosion behavior of the galvanized steel in simulated rust layer solution [J]. Corrosion Science, 2012, 65: 520-527.
- [12] 刘栓, 赵霞, 孙虎元, 等. 纳米 TiO<sub>2</sub> 改性环氧涂层的交流阻抗谱研究 [J]. 电镀与涂饰, 2013, 32(10): 61-64.  
Liu S, Zhao X, Sun H Y, et al. A C impedance spectroscopic study on nano-TiO<sub>2</sub> modified epoxy coatings [J]. Electroplating and Finishing, 2013, 32(10): 61-64 (in Chinese).
- [13] 刘栓, 孙虎元, 孙立娟. 海水中 Zn(OH)<sub>2</sub> 对镀锌钢腐蚀行为的影响 [J]. 材料工程, 2013(4): 21-25.  
Liu S, Sun H Y, Sun L J. Effects of Zn(OH)<sub>2</sub> on corrosion behavior of galvanized steel in seawater [J]. Journal of Materials Engineering, 2013(4): 21-25 (in Chinese).
- [14] 余倩, 姚煌, 余林, 等. 羟基磷酸酯共聚聚丙烯乳液的合成及其防腐性能 [J]. 精细化工, 2011, 28(8): 821-825.  
Yu Q, Yao H, Yu L, et al. A study on the synthesis of strene-acrylic emulsion with hydroxyl phosphate and its anti-corrosion property [J]. Fine Chemicals, 2011, 28(8): 821-825 (in Chinese).

(责任编辑: 常青)