

自交联阳离子丙烯酸乳液对 ADC12 铝合金的钝化研究

叶小乐, 陈均

(安徽工业大学 化学与化工学院, 安徽 马鞍山 243002)

摘 要: **目的** 制备自交联阳离子丙烯酸乳液, 提高 ADC12 铝合金表面树脂钝化膜的耐蚀性能。**方法** 丙烯酸丁酯 (BA) 和甲基丙烯酸甲酯 (MMA) 为单体, 可聚合多羟基有机胺为功能单体, N-羟乙基丙烯酰胺 (HEAA) 为交联剂单体, 使用半连续乳液聚合法制备自交联阳离子型聚丙烯酸酯乳液, 并采用浸渍法在 ADC12 铝合金板上制备钝化膜。通过激光纳米粒度仪和示差扫描量热分析仪 (DSC) 对乳液进行表征。采用电化学 Tafel 极化曲线、交流阻抗 (EIS)、硫酸铜点滴试验及中性盐雾试验, 对比分析添加交联单体前后树脂钝化膜的耐腐蚀性能。**结果** 添加 HEAA 为交联单体制备自交联阳离子聚丙烯酸酯乳液, 乳液平均粒径为 88~96 nm, 粒径分布均匀, 并明显提高了聚丙烯酸酯乳液树脂的玻璃化温度。HEAA 含量为 2% 时, 乳液平均粒径为 88 nm, 粒径分布均匀, 玻璃化温度提高了 18.8 °C, 且钝化膜 24 h 中性盐雾试验后基本无腐蚀, 腐蚀电流密度为 2.609×10^{-7} A/cm², 腐蚀电位为 -0.592 V, 耐硫酸铜腐蚀时间为 53 s。**结论** 交联单体 HEAA 的添加能够有效提高树脂钝化膜的交联密度, 阻碍腐蚀介质的侵入, 提高树脂钝化膜的耐腐蚀性能。

关键词: 铝合金; 无铬钝化; 自交联; 阳离子丙烯酸乳液; N-羟乙基丙烯酰胺; 耐蚀性能

中图分类号: TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)08-0337-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.08.032

Study on Passivation of ADC12 Aluminum Alloy by Self-crosslinking Cationic Acrylic Emulsion

YE Xiao-le, CHEN Jun

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Anhui University of Technology, Ma'an Shan 243002, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare self-crosslinking cationic acrylic emulsion to improve the corrosion resistance of the resin on the ADC12 aluminum alloy surface. Taking butyl acrylate (BA) and methyl methacrylate (MMA) as monomers, polymerizable polyhydroxy organic amine as a functional monomer, and N-hydroxyethyl acrylamide (HEAA) as a crosslinking agent monomer, the self-crosslinking cationic acrylic emulsion was prepared by semi-continuous emulsion polymerization. The

收稿日期: 2020-08-18; 修订日期: 2020-12-08

Received: 2020-08-18; Revised: 2020-12-08

基金项目: 国家自然科学基金 (U1460106)

Fund: National Natural Science Foundation of China (U1460106)

作者简介: 叶小乐 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金属表面工程。

Biography: YE Xiao-le (1996—), Male, Master, Research focus: metal surface engineering.

通讯作者: 陈均 (1980—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为金属表面处理。

Corresponding author: CHEN Jun (1980—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: metal surface treatment.

引文格式: 叶小乐, 陈均. 自交联阳离子丙烯酸乳液对 ADC12 铝合金的钝化研究[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 337-342.

YE Xiao-le, CHEN Jun. Study on passivation of ADC12 aluminum alloy by self-crosslinking cationic acrylic emulsion[J]. Surface technology, 2021, 50(8): 337-342.

passive film was prepared on ADC12 aluminum alloy plate by dipping method. The emulsion were characterized by laser nanoparticle sizer and differential scanning calorimetry (DSC). Tafel polarization curve measurement, AC impedance spectroscopy (EIS), copper sulfate drop corrosion test and neutral salt spray test were used to compare and analyze the corrosion resistance of the resin passivating film with or without crosslinking monomer. The average particle sizes of self-crosslinking cationic acrylic emulsion with HEAA as the crosslinking monomer were 88~96 nm and the particle size distribution were uniform. The glass transition temperature of the acrylic emulsion resin were also significantly increased. When the HEAA content is 2%, the average particle size of the emulsion is 88 nm, the particle size distribution is uniform, the glass transition temperature is increased by 18.8 °C, and the passivating film has no corrosion after 24 h neutral salt spray test, the corrosion current density is $2.609 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, the corrosion potential is -0.592 V , and the corrosion resistance time of copper sulfate is 53 s. The addition of the crosslinking monomer HEAA can effectively increase the crosslinking density of the resin passivating film, hinder the intrusion of corrosive media, and improve the corrosion resistance of the resin passivating film.

KEY WORDS: aluminum alloy; chrome-free passivation; self-crosslinking; cationic acrylic emulsion; N-hydroxyethyl acrylamide; corrosion resistance

世界上每年因腐蚀导致的废旧金属材料约占金属年产量的 30%，所导致的直接经济损失高达 8000 亿美元^[1]。当铝合金暴露在大气中时，会产生自然氧化膜。然而，这种氧化膜的厚度只是纳米尺度，对基板的保护有限。早期人们采用的铬酸盐中包含的六价铬、三价铬，钝化效果虽然比较好，但是严重地危害了人体健康和生态环境。因此，无铬钝化成为人们研究的主要方向。无铬钝化主要包含了两大类：无机物钝化^[2-5]（例如钼酸盐、磷酸盐、钛锆盐、硅酸盐、稀土金属盐等）和有机物钝化^[6-8]（例如植酸、单宁酸、有机硅烷、有机树脂等）。

有机树脂钝化，主要是指有机树脂在金属表面聚合交联，提高膜层致密性，从而降低金属腐蚀速率^[9-10]。丙烯酸酯类树脂能被广泛应用于工业设备、金属防腐和造纸造船等行业，因为其具有良好的耐热性、耐水性和耐光泽性^[11-15]。阴离子丙烯酸酯乳液在市场上的应用比较多，而对于阳离子丙烯酸酯乳液人们研究得比较少^[16-18]。但是，由于阳离子丙烯酸酯乳液中带有正电荷离子，使其在很多方面都优于其他离子型丙烯酸酯树脂乳液。聚丙烯酸酯乳液成膜后存在许多缺点，例如成膜不均匀，膜层有孔洞且容易断裂，膜层耐腐蚀性能、耐水性能差等，这是因为其内部的大分子链之间没有发生交联反应。所以有研究人员在聚合物分子链中引入可以进行反应的官能团，聚合物分子链之间就可以通过其上的官能团进行反应，交联形成三维网状结构，得到自交联乳液，显著提高聚合物的内部聚合力，从而可以充分发挥丙烯酸酯乳液的优异性能^[19-20]。本文以可聚合多羟基有机胺为功能单体，甲基丙烯酸甲酯和丙烯酸丁酯为单体，N-羟乙基丙烯酰胺（HEAA）为交联单体，采用半连续乳液聚合法制备自交联阳离子丙烯酸乳液，并应用于 ADC12 铝合金表面的无铬钝化处理。

1 试验

1.1 主要试剂及仪器

试验主要试剂为：可聚合多羟基有机胺功能单体（自制）、甲基丙烯酸甲酯（工业级，马鞍山九和化工有限公司）、丙烯酸丁酯（工业级，马鞍山九和化工有限公司）、N-羟乙基丙烯酰胺（工业级，广州三旺化工材料有限公司）、氯化钠（分析纯，国药集团化学试剂有限公司）、偶氮二异丁脒盐酸盐（V50 工业级，马鞍山九和化工有限公司）、十六烷基三甲基溴化铵（工业级，广州富飞化工科技有限公司）。

试验主要仪器为：差示扫描量热仪（DSC Q20，美国 TA 仪器有限公司）；恒温水浴锅（B-220，上海亚荣生化仪器厂）；激光纳米粒度仪（Zetasizer Nano ZS90，英国马尔文仪器有限公司）；电化学工作站（CHI760D，上海辰华仪器有限公司）；中性盐雾试验箱（YWX/Q，合肥安科环境实验设备有限公司）。

1.2 乳液制备

甲基丙烯酸甲酯（MMA）和丙烯酸丁酯（BA）按 3 : 2（体积比）比例混合均匀，可聚合多羟基有机胺功能单体水溶液与一定比例的 HEAA 交联单体混合均匀。将 30%（质量分数，下同）的功能单体混合水溶液、10%丙烯酸单体混合液、乳化剂十六烷基三甲基溴化铵以及水作为打底物质，加入四口烧瓶中，75 °C 水浴，搅拌 15 min 后加入 30%V50 引发剂，引发聚合反应，全程处于氮气保护下。10 min 后出现蓝光，再将剩余的引发剂、功能单体混合液以及单体混合液同时滴加到聚合体系中，2.5 h 滴加完毕。反应 15 min 后，升温至 85 °C 并恒温反应 90 min，自然冷却、过滤，制得自交联阳离子聚丙烯酸酯阳离子乳液。

1.3 防腐涂层制备

试验所用基材为 ADC12 铝合金板。钝化液的制备过程为：称取一定量的丙烯酸乳液，用去离子水稀释一定比例，即得到防腐钝化液。基材处理包括：ADC12 铝合金板→砂纸打磨光滑→水洗→碱洗剂超声 5 min→水冲洗待用。防腐涂层制备：将铝合金板浸入钝化液中 90 s，随后拿出在 100 ℃下烘烤 30 min，即得到阳离子丙烯酸乳液防腐涂层。

1.4 测试与表征

1.4.1 乳液性能测试及表征方法

使用激光粒径分析仪（Zetasizer Nano ZS90）检测样品乳液的粒径及分布。测试前，样品乳液用蒸馏水配制成 1%的水溶液，先将激光粒径分析仪预热 120 s，样品池温度设置 25 ℃，循环 45 次。取适量乳液烘干成乳胶膜，剪取少量放入载物盘中；将载物盘放入示差扫描量热仪（DSC Q20，美国 TA 仪器有限公司）中，在氮气保护下以 10 ℃/min 的升温速率对其进行差热分析，升温过程中温度从 0 ℃升至 120 ℃。

1.4.2 防腐膜层性能测试

1) 硫酸铜点滴试验。取一滴硫酸铜溶液（硫酸铜点滴液每 10 g 含 CuSO₄ 5g、H₂O 4 g、NaCl 0.35 g、0.1 mol/L 的 HCl 0.13 mL）滴在涂膜后的铝板上，观察铝板表面液滴由蓝色变为黑色所需时间，来判断膜层防腐性能。每个样本测 3 次，取平均时间作为评判标准。

2) 中性盐雾试验(NSS)。按照 GB/T 10125—1997 进行盐雾试验，盐雾箱实验温度为(35±2) ℃，NaCl

质量浓度为(50±5) g/L，pH 值为 6.5~7.2。

3) 电化学测试(EIS)。电化学测试通过 CHI660E 电化学工作站，在 3.5%的氯化钠水溶液中进行。面积为 1 cm²的铝合金板的涂层表面用作工作电极，饱和甘汞电极用作参考电极，辅助电极为铂丝电极，其构成用于检测交流阻抗谱和 Tafel 极化曲线的三电极系统。

2 结果与讨论

2.1 HEAA 含量对乳液的影响

表 1 列出了聚合试验结果。加入 HEAA 后，乳液无结渣，单体转化率均达到 98%。Zeta 电位值为 28.9~36.2 mV，表明获得了稳定的阳离子聚丙烯酸酯乳液。图 1 为 HEAA 含量（质量分数，全文同）分别为 0%（图 1a）、1%（图 1b）、2%（图 1c）、3%（图 1d）和 4%（图 1e）的乳液粒径图。粒径在 HEAA 含量为 2%时最小(88 nm)。但 HEAA 用量继续增加时，大量的 HEAA 在水相中发生自聚的可能性增大，会自聚成能溶于水的聚合物，生成的聚合物会消耗大量

表 1 乳液聚合试验结果

Tab.1 Experimental results of emulsion polymerization					
Serial number	HEAA /%	Solid /%	Slagging rate/%	Monomer conversion/%	Zeta potential/mV
1	0.0	39.41	0.073	98.11	28.9
2	1.0	39.32	0	98.31	33.8
3	2.0	39.56	0	98.72	36.2
4	3.0	39.28	0	98.26	35.1
5	4.0	39.16	0	98.18	35.5

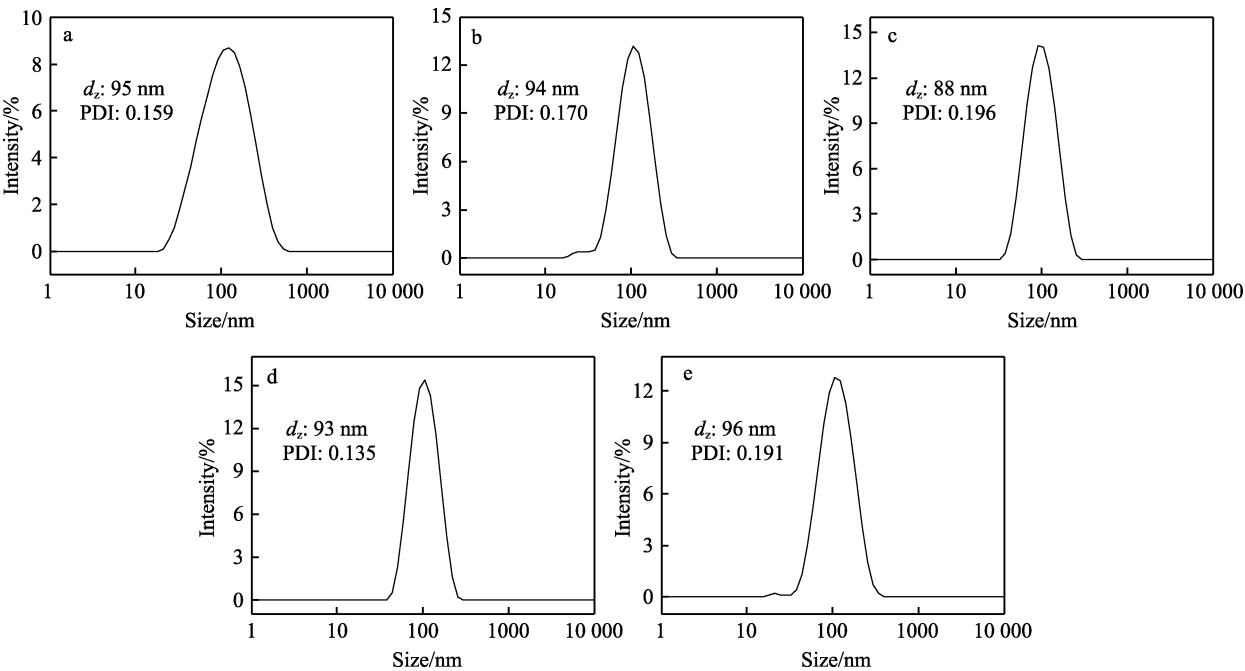


图 1 不同 HEAA 含量乳液粒径图
Fig.1 Particle size diagram of emulsion with different HEAA content

的乳化剂,导致乳液内整体乳胶粒的个数减少,从而使整体乳胶粒的平均粒径增大^[21]。

2.2 HEAA 含量对树脂玻璃化温度的影响

图2为不同HEAA含量的DSC曲线图。丙烯酸酯乳液的最低成膜温度(MFFT)与玻璃化温度(T_g)设计相关,可设计不同的单体比例,以满足不同成膜温度的要求。图2研究了不含HEAA以及HEAA含量为1%~4%的乳液的 T_g 变化。从图可知,不含HEAA的 T_g 为29.8℃,在加入HEAA得到的自交联丙烯酸乳液的 T_g 明显提高,且在含量为2%时达到最大的48.6℃。这是因为聚丙烯酸酯乳液在加入交联单体后,在铝合金板上成膜过程中,乳胶粒之间形成交联型网状结构,能够限制分子不规则运动,从而使乳液的玻璃化转变温度上升。

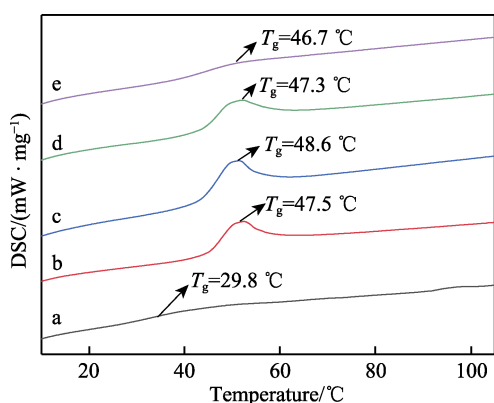


图2 不同HEAA含量乳液DSC曲线图

Fig.2 DSC curve of emulsion with different HEAA content

2.3 ADC12 铝合金表面树脂钝化膜的耐腐蚀性能

表2为膜层硫酸铜点滴试验结果。由表2可知,加入HEAA的乳液膜层硫酸铜点滴时间较不含HEAA乳液提升很高,HEAA含量为2%时达到53 s。图3为不同N-羟乙基丙烯酰胺(HEAA)含量的丙烯酸乳液涂层的塔菲尔极化曲线图,塔菲尔参数列于表

3。从塔菲尔极化曲线(图3)可以看出,不同HEAA含量对涂层的防腐效果有一定的影响,腐蚀电位越偏正,腐蚀电流越小,膜层的抗腐蚀性能越强^[22]。腐蚀电流密度在HEAA含量为2%时达到最低为 $2.0609 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$,腐蚀电位为-0.592 V,此时乳液涂层的耐蚀性能最优。图4a中,高频端交联后的乳液钝化膜的阻抗值随频率的减小上升得较快,说明阻抗值较大,同时交联后的钝化膜的相位角高于未交联,说明交联后的钝化膜的耐腐蚀性能很好。图4b

表2 不同HEAA含量乳液膜层硫酸铜点滴试验

Tab.2 Drop test results of copper sulfate in emulsion film with different HEAA content

HEAA content/wt%	0	1	2	3	4
Bit time/s	22	42	53	49	48

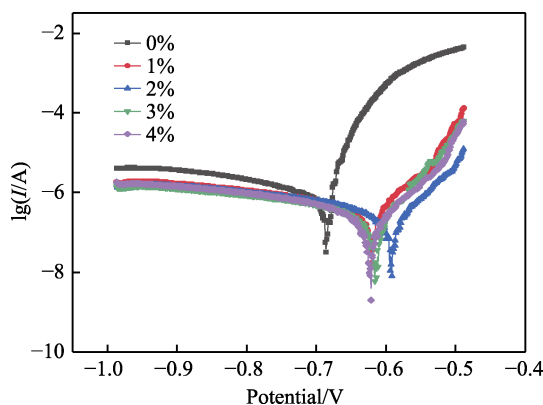


图3 不同HEAA含量乳液膜层塔菲尔曲线

Fig.3 Tafel curve of emulsion film with different HEAA content

表3 Tafel 曲线相关数据

Tab.3 Tafel curve related data

HEAA content/wt%	Corrosion potential E_{corr}/V	Corrosion current density $J_{\text{corr}}/(\times 10^{-7} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2})$
0.0	-0.692	18.31
1.0	-0.641	3.254
2.0	-0.592	2.609
3.0	-0.624	3.138
4.0	-0.630	3.274

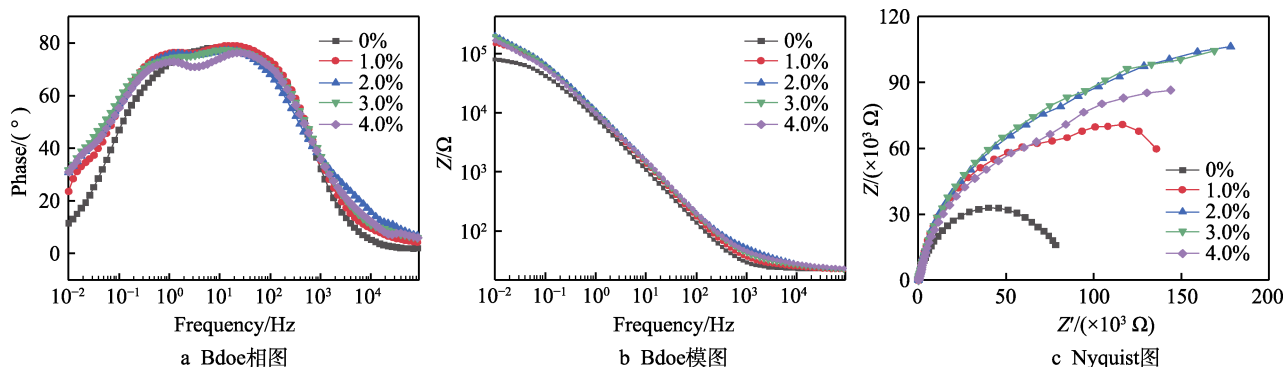


图4 不同HEAA含量乳液膜层的Bode图、Nyquist图

Fig.4 Bode diagram and Nyquist diagram of emulsion film with different HEAA content

模图也印证了交联后的钝化膜的耐腐蚀性能很好。图 4c 是乳液膜层的交流阻抗 Nyquist 图, 随着 HEAA 含量的增加, 容抗半径先增大后减小, 在 HEAA 含量为 2% 时, 容抗半径最大, 阻抗模值最大表明此时膜层的抗腐蚀性能最好^[23]。而高含量的 HEAA 乳液膜层阻抗减小, 可能由于 HEAA 含量增大, 引入了较多的亲水基团, 导致膜层耐水性下降, 腐蚀介质渗入

膜层, 降低了膜层的耐腐蚀性能。图 5 为不同 N-羟乙基丙烯酰胺 (HEAA) 含量的乳液膜层的 24 h 中性盐雾试验图。由图 5 可知, 不含 HEAA 的乳液膜层在盐雾试验 24 h 后, 表面已经出现点蚀现象, 表明膜层已经被腐蚀介质渗透进去, 膜层耐盐雾效果差。而加入 HEAA 乳液膜层在盐雾试验 24 h 后, 表面没有出现腐蚀现象, 其 24 h 耐盐雾效果较好。

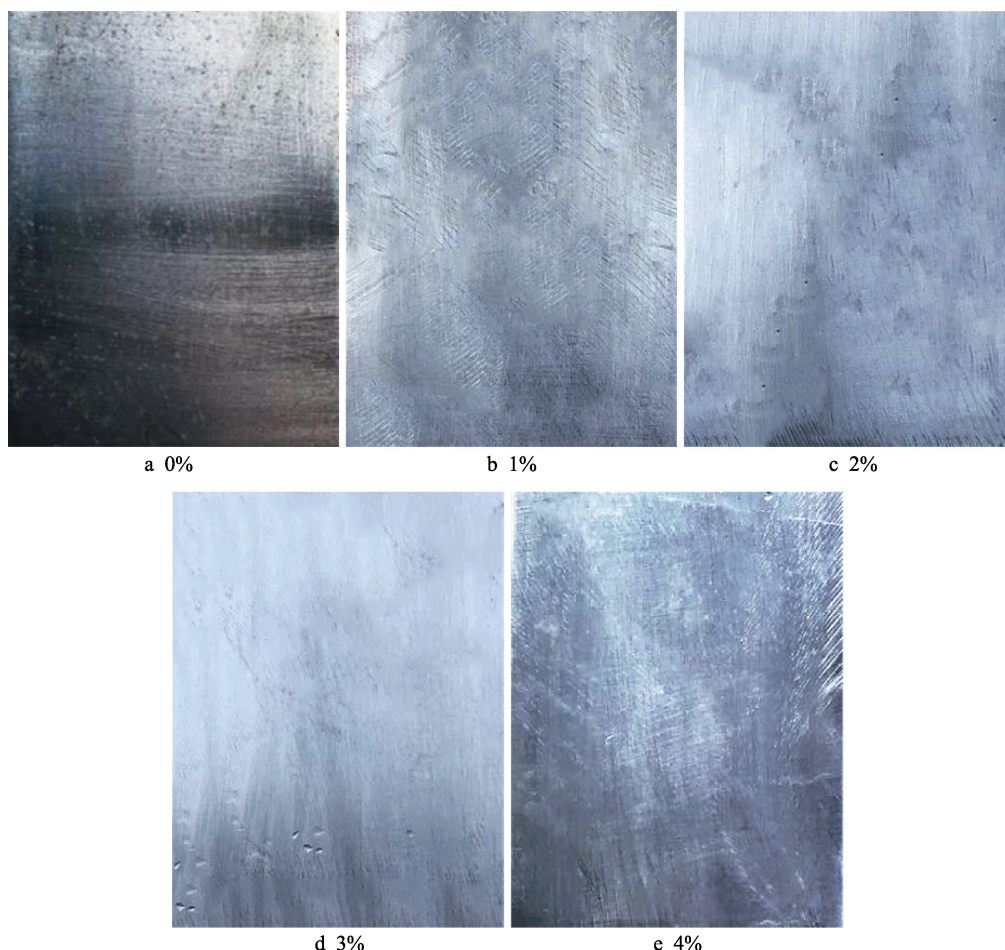


图 5 不同 HEAA 含量乳液膜层 24 h 中性盐雾试验后的形貌
Fig.5 24 h neutral salt spray diagram of emulsion film with different HEAA content

3 结论

1) 采用半连续乳液聚合法制备了自交联阳离子聚丙烯酸酯乳液。交联单体 HEAA 的添加能够有效提高树脂钝化膜的交联密度, 阻碍腐蚀介质的侵入, 提高树脂钝化膜的耐腐蚀性能, HEAA 含量为 2% 时, 乳液平均粒径为 88 nm, 粒径分布均匀, 玻璃化温度提高了 18.8 °C。

2) 上述乳液在 ADC12 铝合金板上制得的钝化膜经 24 h 中性盐雾试验后, 基本无腐蚀, EIS 显示乳液膜层的腐蚀电流密度为 2.609×10^{-7} A/cm², 腐蚀电位为 -0.592 V, 耐硫酸铜点滴腐蚀时间为 53 s, 乳液膜层的耐蚀性能最佳。

参考文献

- [1] LIU Z H, LIU C, XU Z F, et al. Electrochemical corrosion behavior of chromium-free composite passivation film on galvanized steel[J]. International journal of electrochemical science, 2018, 13(7): 6473-6483.
- [2] LIU Qi, CAO Xiao-ming, DU An, et al. Investigation on adhesion strength and corrosion resistance of Ti-Zr aminotrimethylene phosphonic acid composite conversion coating on 7A52 aluminum alloy[J]. Applied surface science, 2018, 458: 350-359.
- [3] FARID R, RAJAN K, SARKAR D K. Enhanced corrosion protection of aluminum by ultrasonically dip coated

- sodium silicate thin films[J]. Surface and coatings technology, 2019, 374: 355-361.
- [4] DEYAB M A, EL-REHIM S S A, HASSAN H H, et al. Impact of rare earth compounds on corrosion of aluminum alloy (AA6061) in the marine water environment[J]. Journal of alloys and compounds, 2020, 820: 153428.
- [5] 冯瑞沁, 衣守志, 董世文, 等. 硅烷无铬钝化膜的耐腐蚀性能及成分探究[J]. 表面技术, 2014, 43(6): 53-58.
- FENG Rui-qin, YI Shou-zhi, DONG Shi-wen, et al. Study on corrosion resistance and composition of silane chromium-free passivation film[J]. Surface technology, 2014, 43(6): 53-58.
- [6] SHI Hong-wei, HAN En-hou, LIU Fu-chun, et al. Protection of 2024-T3 aluminium alloy by corrosion resistant phytic acid conversion coating[J]. Applied surface science, 2013, 280: 325-331.
- [7] XU ZHEFENG, LIU SHAN, GAN GUOYOU, et al. The film forming mechanism of chromium-free passivation process in the tannic acid system for hot dip galvanizing coating[J]. Optoelectronics and advanced materials-rapid communications, 2015, 9(11-12): 1487-1490.
- [8] YAO Meng-meng, TANG Er-jun, GUO Cui-cui, et al. Synthesis of waterborne epoxy/polyacrylate composites via miniemulsion polymerization and corrosion resistance of coatings[J]. Progress in organic coatings, 2017, 113: 143-150.
- [9] LI Jing-yi, LI Xiao-rui, ZHU Ke, et al. Reinforcement of phosphorylated graphene oxide on the anticorrosive properties of waterborne acrylate-epoxy resin coatings[J]. Journal of macromolecular science, part A, 2018, 55(9): 649-657.
- [10] 郭纯, 邹啸虎, 张丽娟, 等. 丙烯酸酯改性环氧树脂乳液合成与性能研究[J]. 中国胶粘剂, 2019, 28(2): 21-25.
- GUO Chun, ZOU Xiao-hu, ZHANG Li-juan, et al. Synthesis and properties of acrylate modified epoxy resin emulsion[J]. China adhesives, 2019, 28(2): 21-25.
- [11] 罗源军, 罗源兵, 刘波, 等. 核壳乳液聚合制备阳离子型含氟苯丙乳液的研究[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 150-155.
- LUO Yuan-jun, LUO Yuan-bing, LIU Bo, et al. Preparation of cationic fluorinated poly-styrene-acrylic latex by core-shell emulsion polymerization[J]. Surface technology, 2017, 46(7): 150-155.
- [12] WANG Yue, FANG Shi-jiang. Preparation and characterization of cationic silicone-acrylic latex surface sizing agent[J]. Progress in organic coatings, 2015, 88: 144-149.
- [13] WU Yu-min, ZHU Chuan-cong, YANCHEN Zheng-zhe, et al. A type of silicone modified styrene-acrylate latex for weatherable coatings with improved mechanical strength and anticorrosive properties[J]. Reactive and functional polymers, 2020, 148: 104484.
- [14] 林锐, 刘朝辉, 林壮文, 等. 水性丙烯酸涂料的改性及其功能化应用研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 133-140.
- LIN Rui, LIU Zhao-hui, LIN Zhuang-wen, et al. Research progress of modification and functional application of waterborne acrylic coating[J]. Surface technology, 2017, 46(1): 133-140.
- [15] LI Wen, BAO Zhong-bin, CHEN Li-jun, et al. Synthesis and properties of novel self-crosslinked cationic fluorinated acrylic latex prepared with novel emulsified system[J]. Pigment & resin technology, 2016, 45(4): 259-264.
- [16] PARVATE S, MAHANWAR P. Insights into the preparation of water-based acrylic interior decorative paint: Tuning binder's properties by self-crosslinking of allyl acetoacetate-hexamethylenediamine[J]. Progress in organic coatings, 2019, 126: 142-149.
- [17] FANG Cheng, ZHU Kai, ZHU Xin-bao, et al. Preparation and characterization of self-crosslinking fluorinated polyacrylate latexes and their pressure sensitive adhesive applications[J]. International journal of adhesion and adhesives, 2019, 95: 102417.
- [18] 孟婷婷, 吕正伟, 姜金梅, 等. 耐水性阳离子丙烯酸酯乳液的制备[J]. 涂料工业, 2015, 45(7): 63-67.
- MENG Ting-ting, LV Zheng-wei, JIANG Jin-mei, et al. The preparation of water-resistant cationic acrylate emulsion[J]. Paint & coatings industry, 2015, 45(7): 63-67.
- [19] 杨妍, 崔艳艳, 苏嘉辉, 等. 耐水性有机硅改性自交联丙烯酸酯乳液的合成[J]. 高分子材料科学与工程, 2018, 34(8): 31-36, 42.
- YANG Yan, CUI Yan-yan, SU Jia-hui, et al. Synthesis of water resistance silicone modified self-crosslinking acrylate emulsion[J]. Polymer materials science & engineering, 2018, 34(8): 31-36, 42.
- [20] 李亚敏, 强西怀, 刘爱珍, 等. 室温自交联胺醚-丙烯酸乳液的合成及性能[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(2): 81-85.
- LI Ya-min, QIANG Xi-huai, LIU Ai-zhen, et al. Synthesis and properties of ambient temperature self-crosslinkable amine ether-acrylic emulsion[J]. Electroplating & finishing, 2017, 36(2): 81-85.
- [21] 卞政, 方永勤. 三官能团交联剂改性苯乙烯-丙烯酸乳液的制备及其防腐性能研究[J]. 化工新型材料, 2019, 47(6): 176-179.
- BIAN Zheng, FANG Yong-qin. Study on preparation and anticorrosion property of trifunctional crosslinking agent modified styrene-acrylic emulsion[J]. New chemical materials, 2019, 47(6): 176-179.
- [22] 汪玉添, 陈志达, 乔永洛, 等. 金属防腐漆用双重自交联丙烯酸乳液的制备及其性能研究[J]. 涂料工业, 2016, 46(10): 27-32.
- WANG Yu-tian, CHEN Zhi-da, QIAO Yong-luo, et al. Preparation and properties of dual self-crosslinking acrylate emulsion for metallic anticorrosive paint[J]. Paint & coatings industry, 2016, 46(10): 27-32.
- [23] 安成强, 李庆鲁, 郝建军. 纳米二氧化钛硅烷接枝密度对水性环氧涂层耐蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 248-254.
- AN Cheng-qiang, LI Qing-lu, HAO Jian-jun. Effect of grafting density of nano-TiO₂ silane on corrosion resistance of waterborne epoxy coatings[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 248-254.