

马来松香与双丙酮丙烯酰胺制备共聚膜的研究

韦贻春^{1,3}, 余会成^{1,2*}, 石展望¹, 李浩¹, 雷福厚¹

1. 广西民族大学化学化工学院, 广西林产化学与工程重点实验室, 广西南宁 530006;
2. 广西民族大学化学化工学院, 广西高校食品安全与药物分析化学重点实验室, 广西南宁 530006;
3. 广西民族大学化学化工学院, 广西多糖材料与改性重点实验室, 广西南宁 530006)

摘要:以双丙酮丙烯酰胺(DAAM)为单体、马来松香丙烯酸乙二醇酯(EGMRA)为交联剂,在6063铝合金表面热合成一种共聚膜。利用傅里叶变换红外光谱、扫描电镜分别对共聚膜的结构及形貌进行表征。结果表明,在6063铝合金表面合成了DAAM与EGMRA的共聚膜,该共聚膜表面小、孔较少,并且更平整。在3.5% NaCl溶液中测试了不同浓度EGMRA合成的共聚膜的电化学性能,结果表明,EGMRA的浓度为0.050~0.075 mol/L时,其腐蚀电流密度降至0.34~0.32 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ (裸6063铝合金为6.28 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$),腐蚀电位从-875 V增加到-0.838 V(裸铝合金为-907 V),共聚膜的交流阻抗谱Nyquist图的半圆弧达100~120 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ (裸铝合金为10 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$)。因此,DAAM与EGMRA的共聚膜能更好地保护铝合金。

关键词:铝合金;松香;双丙酮丙烯酰胺;高分子共聚膜;防腐

中图分类号:TQ630.7

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)07-0145-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.07.031

Preparation of a copolymer membrane from maleic rosin acrylate and diacetone acrylamide

WEI Yi-chun^{1,3}, YU Hui-cheng^{1,2*}, SHI Zhan-wang¹, LI Hao¹, LEI Fu-hou¹

1. Guangxi Key Laboratory of Chemistry and Engineering of Forest Products, School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University for Nationalities, Nanning 530006, China;
2. Key Laboratory of Guangxi Colleges and Universities for Food Safety and Pharmaceutical Analytical Chemistry, School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University for Nationalities, Nanning 530006, China;
3. Guangxi Key Laboratory Cultivation Base for Polysaccharide Materials and Modification, School of Chemistry and Chemical Engineering, Guangxi University for Nationalities, Nanning 530006, China)

Abstract: With ethylene glycol maleic rosin acrylate (EGMRA) as crosslinking agent and diacetone acrylamide (DAAM) as monomer, a copolymer membrane is thermally polymerized on an aluminium alloy 6063. The chemical structure and morphology of the copolymer membrane are examined by Fourier-transform infrared spectrum and scanning electron microscopy, respectively. Results confirm that polydiacetone acrylamide-ethylene glycol maleic rosin acrylate (PDAAM-EGMRA) copolymer membrane are formed on aluminium alloy 6063, which has less porous and smoother surface. Electrochemical properties of the copolymer membranes made by using different mole ratios of EGMRA are examined in a 3.5 wt% NaCl solution by means of polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy. It is found that the corrosion current density of the membrane falls to 0.34~0.32 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ from 6.28 $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ of bare aluminium alloy 6063, the corrosion potential of the membrane increases from -875 V to -0.838 V while that of bare aluminium alloy 6063 is -907 V, the loop diameters of the copolymer membrane are approximately 100~120 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ when EGMRA concentration ranges from 0.050 mol·L⁻¹ to 0.075 mol·L⁻¹. It is verified that the prepared PDAAM-EGMRA copolymer membrane can provide more effective protection for aluminium alloy.

Key words: aluminium alloy; rosin; diacetone acrylamide; copolymer film; corrosion resistance

铝合金材料具有密度小、可焊接、易成型加工及机械强度较高等特性,广泛应用于航空、机械、电子、建筑等领域^[1]。由于铝的电位比较低,容易遭受腐蚀,特别是在氯离子环境中腐蚀更严重,满足不了其工业应用要求^[4-5]。为了提高铝合金的耐蚀性,必须对铝合金进行表面处理。在工业上有很多种保护铝合金的方法,其中六价铬一直被认为是保护铝合金最好的方法。然而,六价铬有毒,严重危害环境和人体健康。因此,必须研究出替代六价铬处理铝合

金的新方法^[2]。

高分子聚合膜低毒,是一种重要的防腐材料^[3]。为了取代六价铬膜,近10多年来,国内外学者对聚苯胺、聚吡咯及其衍生物等聚合物防腐膜进行了大量基础性研究^[4]。由于一种单体形成的单聚膜稳定性较差、结构不致密,膜层容易被腐蚀介质渗透,而共聚膜可克服这个缺陷。

氨基类化合物极性较强,能较好地吸附在金属表面,从而阻挡环境中的各种腐蚀性介质向金属表

收稿日期:2019-09-19;修回日期:2020-05-06

基金项目:广西重点研发计划(桂科 AB18281024);广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA294086);广西中青年教师基础能力提升项目(2017KY0171)

作者简介:韦贻春(1981-),女,硕士,助理研究员,主要从事环境友好型功能材料的研发,123421479@qq.com;余会成(1968-),男,博士,副教授,主要从事环境友好型功能材料的研发,通讯联系人,doyhc@126.com。

面的扩散,且低毒,因此氨基类化合物广泛地用作金属材料的缓蚀剂^[5]。Mousaa 等^[6]研究表明,氨基类化合物氮原子对钢材有良好吸附作用,从而表现出较好的防腐蚀性能。另外,松香是一种重要天然环境友好型林化资源,价格便宜、原料方便易得、天然无毒、环境友好。因此,越来越多学者正在关注松香类产品的研究与开发。因此,笔者以双丙酮丙烯酰胺(DAAM)为单体、马来松香丙烯酸乙二醇酯(EGMRA)为交联剂,在 6063 铝合金基底上合成了一种松香基高分子聚合膜,并利用红外光谱、扫描电镜及电化学技术对聚合膜进行测试。

1 实验部分

1.1 试剂

实验基底材料选用广东省东莞石排水贝尚品铝型材厂生产的 6063 铝合金,主要元素已在文献^[7]中报道;双丙酮丙烯酰胺(DAAM,纯度 $\geq 99\%$),百灵威科技有限公司生产;NaOH(纯度 99.9%)、丙酮(纯度 99.7%)及无水乙醇(纯度 99.7%),天津科密欧化学试剂厂生产;马来松香丙烯酸乙二醇酯(EGMRA),按文献^[8]中所述方法制备;除非特殊说明,所有试剂均为分析纯;实验用水为超纯水(18.3 M Ω ·cm)。

1.2 聚合膜的制备

单体 DAAM 的浓度为 0.5 mol/L,交联剂 EGMRA 的浓度分别为 0、0.035、0.050、0.075、0.090 mol/L,溶剂为无水乙醇。聚合温度分别为 70、80、90℃及 100℃。

将 6063 铝合金加工成圆棒状,用环氧树脂封入玻璃管中作工作电极,裸露面积为 0.785 cm²。然后进行以下处理:1 200#砂纸打磨→除油(5 min)→用去离子水清洗(2 min)→在 5% NaOH 溶液活化(2 min)→用去离子水清洗(2 min)→用无水乙醇清洗(2 min)→在空气中干燥(1 h)→滴涂 20 μ L 制备的聚合膜溶液→热聚合→测试。

1.3 聚合膜涂层的 FT-IR 及 SEM 分析

利用美国 Thermo Nicolet 公司生产的 magna-IR 550 红外光谱仪分析聚合膜的结构,该仪器分辨率为 4 cm⁻¹,采集 32 次;利用德国卡尔蔡司公司生产的 SUPRA 40/40VP 场发射扫描电镜测试聚合膜的表面形貌,加速电压为 20 kV。

1.4 电化学测试

所有的电化学测试在 CHI 仪器 660B 型电化学工作站上进行,使用三电极体系进行测试。圆棒状

6063 铝合金为工作电极,裸露面积为 0.785 cm²,对电极和参考电极分别为铂金片(3 cm²)及饱和甘汞电极,实验在 3.5% 的氯化钠溶液中进行(pH = 6.2)。极化曲线测量的扫描电位范围为 -1 200 ~ -600 mV,扫描速度为 0.5 mV/s,交流阻抗的测试频率范围为 100 kHz ~ 0.01 Hz,幅值为 5 mV,并在开路电位下测量。

2 结果与讨论

2.1 FT-IR 分析及扫描电镜分析

DAAM 的浓度为 0.5 mol/L,交联剂 EGMRA 的浓度为 0.050 mol/L,溶剂为无水乙醇溶液,滴涂 20 μ L 在 6063 铝合金片上,在温度 90℃的条件下进行热聚合 60 min,从 6063 铝合金片上刮下样品进行红外光谱测试,DAAM、EGMRA 及其共聚膜(PDAAM-EGMRA)的傅里叶变换红外光谱如图 1 所示。

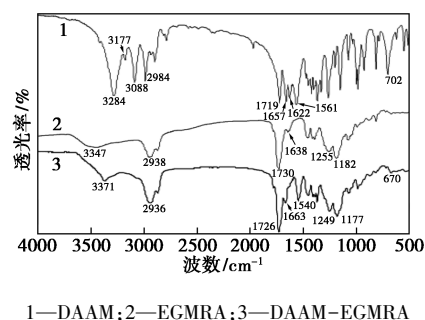


图 1 DAAM、EGMRA 和 DAAM-EGMRA 的红外光谱图

从图 1 中谱线 1 可以看出,在 3 177~3 284 cm⁻¹ 处有 2 个吸收峰,这是 DAAM 的仲酰胺的 N—H 伸缩振动;在 3 088 cm⁻¹ 处的吸收峰为双丙酮丙烯酰胺 C=C 双键上的碳氢(=C—H)伸缩振动;在 1 719 cm⁻¹ 及 1 657 cm⁻¹ 处的 2 个强峰分别为酮羰基及酰胺的酮羰基的吸收峰;在 1 622 cm⁻¹ 处为 C=C 双键的伸缩振动;在 1 651 cm⁻¹ 处是 N—H 的面内弯曲振动;在 702 cm⁻¹ 处为 OCN 的弯曲振动。从图 1 中谱线 2 可以看出,在 3 347 cm⁻¹ 处有 1 个吸收峰,这是松香菲环上的 O—H 的伸缩振动引起的吸收带;在 1 730 cm⁻¹ 处有 1 个吸收峰,这是 EGMRA 的 C=O 的特征吸收峰;在 1 638 cm⁻¹ 处有 1 个吸收峰,是 EGMRA 的碳碳双键(C=C)伸缩振动,由于共轭发生了负移;在 1 255 cm⁻¹ 及 1 182 cm⁻¹ 存在 2 个吸收带,这是 EGMRA 的 C—O—C 酯基的碳氧耦合相互作用的吸收峰。然而,从图 1 中谱线 3 可以看出,DAAM 及 EGMRA 的大多数特征峰都存在,只是频率位置有些移动,如在 1 249 cm⁻¹ 及 1 177 cm⁻¹ 处的

吸收符合 C—O—C 酯基的碳氧耦合相互作用的吸收峰,但与 EGMRA 在 $1\ 255\ \text{cm}^{-1}$ 及 $1\ 182\ \text{cm}^{-1}$ 处的 C—O—C 吸收峰相比,共聚膜的 C—O—C 酯基吸收峰位置较低。说明 DAAM 的酰基 (CONH) 与 EGMRA 的羧基 (COOH) 及酯基 (COO) 在聚合过程中形成氢键,共聚使吸收峰向低波数移动。从图 1 中谱线 3 还可以看出,聚合后 DAAM 的碳碳双键 ($\text{C}=\text{C}$) 的吸收峰 ($1\ 622\ \text{cm}^{-1}$) 及 EGMRA 的碳碳双键 ($\text{C}=\text{C}$) 吸收峰 ($1\ 638\ \text{cm}^{-1}$) 都消失了,表明 DAAM 与 EGMRA 共同聚合在铝合金基底上。

制备条件如红外光谱分析中所述,6063 铝合金、不含与含有 EGMRA 的 PDAAM 电极的扫描电镜图如图 2 所示。从图 2 可以看出,有涂层的图 2 (b) 及图 2 (c) 与没有涂层的图 2 (a) 有显著区别。表明已经在 6063 铝合金表面上制备了一层 PDAAM 基聚合性涂层。比较图 2 (a)、图 2 (b) 与图 2 (c) 可以发现,有 EGMRA 的聚合涂层表面小孔较少,并且更平整、均匀。

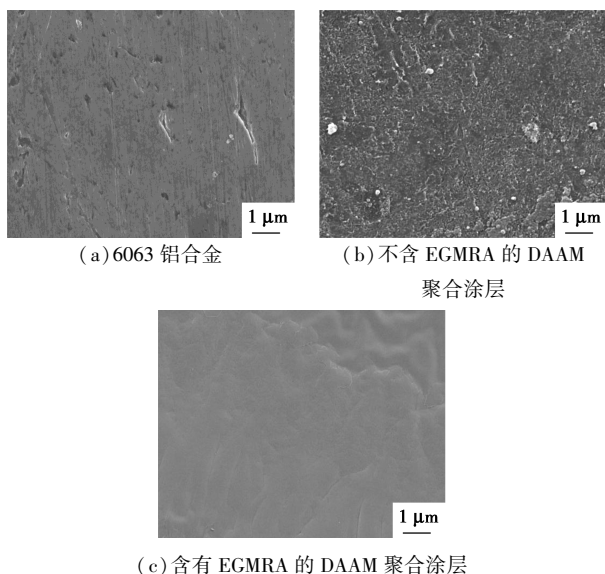


图 2 6063 铝合金、不含与含有 EGMRA 的 DAAM 聚合涂层电极的扫描电镜图

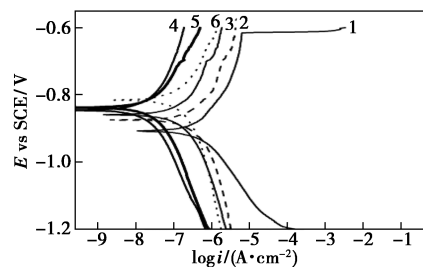
2.2 反应条件的考察

2.2.1 马来松香丙烯酸乙二醇酯 (EGMRA) 浓度对电化学性能的影响

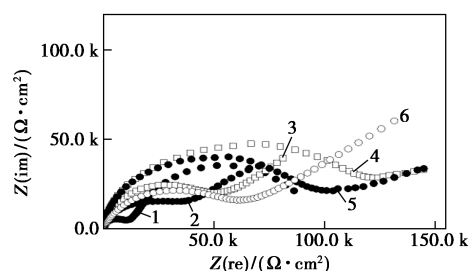
在 DAAM 浓度为 $0.5\ \text{mol/L}$, EGMRA 浓度分别为 0 、 0.035 、 0.050 、 0.075 、 $0.090\ \text{mol/L}$, 溶剂为无水乙醇, 温度为 90°C 的条件下热聚合 $60\ \text{min}$, 然后在 3.5% 的氯化钠溶液中进行极化曲线及交流阻抗测试, 结果如图 3 所示。从极化曲线得出腐蚀电位 (E_{corr})、腐蚀电流 (i_{corr}) 参数, 如表 1 所示, 其中保护效率 (PE) 计算式为:

$$PE = (i_{\text{corr}} - i_{\text{corr}}^*) / i_{\text{corr}}$$

式中: i_{corr} 为没有涂层的裸铝合金 (Bare Al alloy) 的腐蚀电流密度; i_{corr}^* 为铝合金表面聚合膜的腐蚀电流密度。



(a) 极化曲线



(b) 交流阻抗谱 Nyquist 图

1—没有涂层的裸铝合金; 2— $0\ \text{mol/L}$ EGMRA;
3— $0.035\ \text{mol/L}$ EGMRA; 4— $0.050\ \text{mol/L}$ EGMRA;
5— $0.075\ \text{mol/L}$ EGMRA; 6— $0.090\ \text{mol/L}$ EGMRA

图 3 不同浓度 EGMRA 聚合膜的极化曲线及交流阻抗谱 Nyquist 图

表 1 从不同浓度 EGMRA 聚合膜的极化曲线获得的腐蚀参数

$c(\text{EGMRA}) / (\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$E_{\text{corr}} / \text{mV}$	$i_{\text{corr}} / (\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2})$	$PE / \%$
裸铝合金	-907	6.28	—
0	-875	1.30	79.3
0.035	-859	1.12	82.2
0.050	-846	0.32	94.9
0.075	-838	0.34	94.6
0.090	-816	1.45	76.9

从图 3 (a) 及表 1 可以看出, 随着 EGMRA 浓度增加, 聚合膜的腐蚀电流从 $1.30\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 降至 $0.32\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 保护效率达 94.9% ; 随后又从 $0.34\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 升至 $1.45\ \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 说明 EGMRA 在适当的浓度范围 ($0.050 \sim 0.075\ \text{mol/L}$) 可以增加 DAAM 聚合膜的防腐蚀性能。从图 3 (b) 中也可以看到有类似规律, 随着 EGMRA 浓度的增加 (从 $0 \sim 0.090\ \text{mol/L}$), 聚合膜的交流阻抗谱 Nyquist 图的半圆弧开始时增加, 从 $40\ \text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$ 升至 $120\ \text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$, 然后又减小到 $50\ \text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2$, 说明 EGMRA 的浓度在适当范围

(0.050~0.075 mol/L)可以更有效地阻挡氯离子的侵蚀。从图 3 还可看出,在铝合金基底上聚合 DAAM 膜后,腐蚀电流明显减小,交流阻抗谱 Nyquist 图的半圆弧明显增大,说明 DAAM 聚合膜可以为铝合金提供一定的保护作用。但添加 EGMRA 后腐蚀电流更小、半圆弧更大,EGMRA 的添加能更好地改善 DAAM 聚合膜的防腐能力,为铝合金基底提供更好的保护作用。

2.2.2 聚合温度对电化学性能的影响

在 DAAM 浓度为 0.5 mol/L,交联剂 EGMRA 浓度为 0.050 mol/L,溶剂为无水乙醇,温度分别为 70、80、90、100℃ 的条件下热聚合 60 min,然后在 3.5%的氯化钠溶液中进行极化曲线及交流阻抗测试,结果如图 4 所示。从极化曲线得到的腐蚀电位 (E_{corr})、腐蚀电流 (i_{corr}) 及保护效率 (PE) 如表 2 所示。

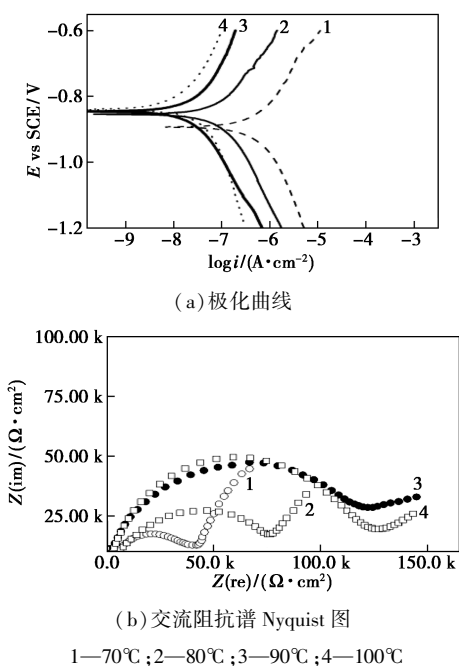


图 4 不同热聚合温度下的 EGMRA 聚合膜的极化曲线及交流阻抗谱 Nyquist 图

表 2 从不同热聚合温度下的 EGMRA 聚合膜的极化曲线获得的腐蚀参数

聚合温度/℃	E_{corr}/mV	$i_{corr}/(\mu A \cdot cm^{-2})$	PE/%
裸铝合金	-907	6.28	—
70	-894	1.28	79.6
80	-855	1.10	82.5
90	-846	0.32	94.9
100	-840	0.30	95.2

从图 4(a) 及表 2 可以看出,随着热聚合温度的增加 (70~100℃),聚合膜的腐蚀电流开始时从

1.28 $\mu A/cm^2$ 减至 0.32 $\mu A/cm^2$,保护效率从 79.6% 增至 94.9%;但达到 90℃ 以后,减小幅度比较小,从 0.32 $\mu A/cm^2$ 减至 0.30 $\mu A/cm^2$,保护效率也变化较小,从 94.9% 变至 95.2%。说明开始时温度还没有达到 DAAM 与交联剂 EGMRA 的热聚合温度,聚合度也较低;但升到 90℃ 以后,已经达到 DAAM 与交联剂 EGMRA 的聚合温度,温度继续升高,聚合度变化较小,聚合膜的腐蚀电流变化也较小。从图 4(b) 中也可以看出有类似规律,随着热聚合温度的增加 (从 70~100℃),聚合膜的交流阻抗谱 Nyquist 图的半圆弧开始时增加的幅度比较大,从 42 $k\Omega \cdot cm^2$ 升至 120 $k\Omega \cdot cm^2$,然后升幅较小,从 120 $k\Omega \cdot cm^2$ 升至 125 $k\Omega \cdot cm^2$,说明 90℃ 已经达到了 DAAM 的热聚合温度。因此,选择 90℃ 为制备 DAAM 与 EGMRA 的热聚合温度。

2.2.3 聚合时间对电化学性能的影响

DAAM 与交联剂 EGMRA 热聚合条件与前面的实验相似,在温度 90℃ 的条件下热聚合 30、60、90 min,然后在 3.5%的氯化钠溶液中进行极化曲线及交流阻抗测试,结果如图 5 所示。从极化曲线得到的腐蚀电位 (E_{corr})、腐蚀电流 (i_{corr}) 及保护效率 (PE) 如表 3 所示。

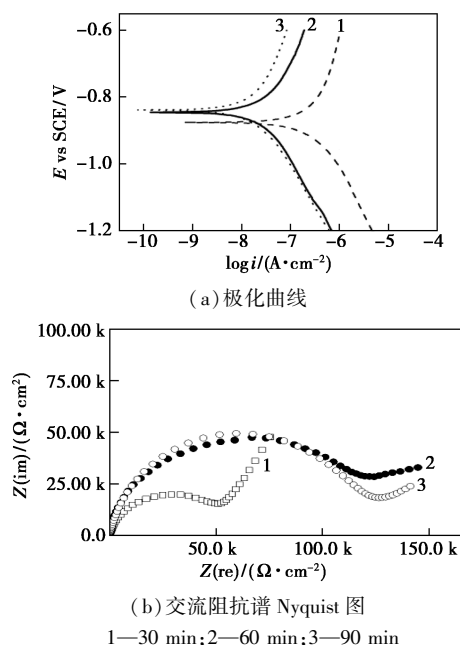


图 5 不同热聚合时间下 EGMRA 聚合膜的极化曲线及交流阻抗谱 Nyquist 图

从图 5(a) 及表 3 可以看出,随着热聚合时间的增加 (从 30~90 min),聚合膜的腐蚀电流开始时减小幅度比较大,从 1.10 $\mu A/cm^2$ 减至 0.32 $\mu A/cm^2$,保护效率从 82.5% 增至 94.9%;但达到 60 min 以

表3 从不同热聚合时间下EGMRA聚合膜极化曲线获得的腐蚀参数

聚合时间/min	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$i_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	PE/%
裸铝合金	-907	6.28	—
30	-874	1.10	82.5
60	-846	0.32	94.9
90	-837	0.31	95.1

后,减小幅度比较小,从 $0.32 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 减至 $0.31 \mu\text{A}/\text{cm}^2$,保护效率也变化不大。说明开始时聚合还没有达到 DAAM 与交联剂 EGMRA 的聚合度,但聚合时间增加 60 min 以后,聚合度变化较小,所以聚合膜的腐蚀电流变化也较小。从图 5(b) 也可以看出有类似规律,随着热聚合时间的增加(从 30~90 min),聚合膜的交流阻抗谱 Nyquist 图的半圆弧开始时增加的幅度比较大,从 $50 \text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 升至 $120 \text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$;随后增幅较小,从 $120 \text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 升至 $130 \text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$;说明 60 min 已经足够达到了 DAAM 与交联剂 EGMRA 的热聚合度,因此,选择 60 min 为制备 DAAM 与 EGMRA 的热聚合时间。

3 结论

(1)傅里叶变换红外光谱分析结果表明,制备了双丙酮丙烯酰胺(DAAM)与马来松香丙烯酸乙二醇酯(EGMRA)交联共聚膜;扫描电镜测试结果表明,DAAM 聚合膜能改变铝合金的粗糙程度,提高铝合金表面的均匀性,但 DAAM 与 EGMRA 交联共聚膜呈现出更好的均匀性。

(2)极化曲线及交流阻抗谱测试结果表明,当

单体 DAAM 的浓度为 0.5mol/L ,交联剂 EGMRA 的浓度为 $0.050\sim 0.075 \text{mol/L}$,温度为 90°C 的条件下热聚合 60 min 获得的聚合膜表现出较好的腐蚀性能。

(3)DAAM 聚合膜能提高铝合金的防腐蚀性性能,加入 EGMRA 后聚合膜的防腐蚀性性能进一步得到改善。

参考文献

- [1] Prabhuraj P, Rajakumar S, Balasubramanian V. Optimising salt fog corrosion parameters to minimising the corrosion rate of AA7075-T651 alloy[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(6): 14573-14582.
- [2] Öztürk İ, HapçıAğaoğlu G, Erzi E, et al. Effects of strontium addition on the microstructure and corrosion behavior of A356 aluminum alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, 763: 384-391.
- [3] 胡宗贵,朱桂生,高延敏,等. 铝离子交联剂固化水性环氧树脂涂层防腐性能的研究[J]. *现代化工*, 2019, 39(7): 167-169.
- [4] Hu C, Li Y, Yin Y, et al. Fabrication of poly(alkyl-aniline)-SiC/zinc bilayer coatings and evaluation of their corrosion resistance properties[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 551: 137-147.
- [5] 任屹,李勇明,高文明,等. 醇胺复合缓蚀剂制备方法及缓蚀性能影响因素研究[J]. *现代化工*, 2017, 37(9): 102-106.
- [6] Mousaa I M. Gamma irradiation processed (epoxidized soybean fatty acids/ ρ -substituted aromatic amines) adducts as corrosion inhibitors for UV-curable steel coatings[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2017, 111: 220-230.
- [7] Yu H, Chen B, Wu H, et al. Improved electrochemical performance of trivalent-chrome coating on Al 6063 alloy via urea and thiourea addition[J]. *Electrochimica Acta*, 2008, 54(2): 720-726.
- [8] 雷福厚,赵慷,李小燕,等. 脱氢枞胺分子印迹聚合物的吸附性能研究[J]. *精细化工*, 2010, 27(1): 11-15. ■
- [9] Modi A, Tayade P. Enhancement of dissolution profile by solid dispersion (kneading) technique[J]. *Aaps Pharmscitech*, 2006, 7(3): E87-E92.
- [10] 鄢寒,黄月英,沈一唯,等. 无定型固体分散体载体及制备技术研究进展[J]. *中国新药杂志*, 2017, (4): 71-76.
- [11] 付静静. 难溶性药物增溶技术的研究进展[J]. *科技信息*, 2010, 27(26): 425-428.
- [12] 卢瑞,莫宇星,曹莉慧,等. 功夫菊酯固体分散体的制备及性能分析[J]. *南方农业学报*, 2016, 47(2): 234-240.
- [13] 王春鑫,崔博,曾章华. 农药固体纳米分散体及其制备方法的研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2017, 19(3): 108-114.
- [14] Dos Santos K M, Barbosa R M, Vargas F G A, et al. Development of solid dispersions of β -lapachone in PEG and PVP by solvent evaporation method[J]. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 2018, 44(5): 750-756.
- [15] Kanaze F I, Kokkalou E, Niopas I, et al. Dissolution enhancement of flavonoids by solid dispersion in PVP and PEG matrixes: A comparative study[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2006, 102(1): 460-471.
- [16] 汤晶晶,苏为科. 高分子材料在固体分散体中应用的研究进展[J]. *浙江化工*, 2018, 49(6): 1-3.
- [17] 张心怡,徐艳,狄留庆,等. 姜黄素固体分散体的制备及体外评价[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2019, 55(3): 511-517.
- [18] Mingthau S, Chingmin Y, Sokoloski T. Characterization and dissolution of fenofibrate solid dispersion systems[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 1994, 103(2): 137-146.
- [19] 彭志刚,刘高峰,冯茜,等. 氨基磺酸乙基纤维素微胶囊的制备及缓释性能[J]. *现代化工*, 2019, 39(1): 119-122, 124.
- [20] 王冰,黄晓斌,赵姗,等. 联合载体用于改善白藜芦醇固体分散体性能[J]. *应用化学*, 2016, 33(12): 1383-1388.
- [21] 黄华,王显著. 表面活性剂对葛根素固体分散体外溶出的影响[J]. *中国药科大学学报*, 2004, 35(4): 315-317.
- [22] Paradar A, Ambike A A, Jadhav B K, et al. Characterization of curcumin-PVP solid dispersion obtained by spray drying[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2004, 271(1): 281-286.
- [23] 周龙祥,王保明,田玉提,等. 二氧化钛包覆石蜡相变微胶囊的制备及表征[J]. *现代化工*, 2019, 39(3): 82-86. ■

(上接第 144 页)