

引用格式:李浩鹏,王邴,王怡然,等. 离子液体中电沉积 Al-Mn 合金及其耐蚀性能研究[J]. 有色设备,2025,39(2):42-49.
LI Haopeng, WANG Ye, WANG Yiran, et al. Research on electrodeposition of Al-Mn alloy in ionic liquid and its corrosion resistance[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment,2025,39(2):42-49.

离子液体中电沉积 Al-Mn 合金及其耐蚀性能研究

李浩鹏^{1,2}, 王邴², 王怡然², 李庆阳^{3*}, 郑勇⁴, 王倩^{2*}

(1. 郑州大学 河南先进技术研究院, 河南 郑州 450001; 2. 中国科学院过程工程研究所, 北京 100190;
3. 暨南大学 先进耐磨蚀及功能材料研究院, 广东 广州 510632;
4. 安阳工学院 化学与环境工程学院, 河南 安阳 450000)

[摘要] 铝-锰(Al-Mn)合金具有优异的塑性、焊接性和抗腐蚀能力,在钢铁的腐蚀防护中具有广阔的应用前景。本文在以1-乙基-3-甲基咪唑氯盐与氯化铝和氯化锰组成的离子液体电解液中,采用循环伏安法和计时电位法研究了 Al-Mn 的电沉积行为。采用扫描电子显微镜、能量色散 X 射线光谱以及 X 射线衍射技术对比研究了不同电流密度下制备 Al-Mn 沉积层的表面形貌、元素组成和晶体结构。采用开路电位曲线和动电位极化曲线评价了 Al-Mn 沉积层在模拟海水中的抗腐蚀能力。此外,还系统研究了不同退火温度和时间对 Al-Mn 沉积层形貌和耐蚀性能的影响。结果表明:随着电流密度的升高,Al-Mn 沉积层经历了由非晶态向晶态的转变;非晶态的 Al-Mn 沉积层相较晶态的沉积层具有更好的耐蚀性能;而适当的热处理可进一步提升其抗腐蚀能力。

[关键词] 铝合金; 离子液体; 电沉积; 耐蚀性能; 晶体结构; 热处理

[中图分类号] TG146.21 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2025)02-0042-08

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.02.005

0 引言

铝-锰(Al-Mn)合金是一种以铝(Al)为基体、锰(Mn)为主要合金元素的材料,具有强度高、塑性好、耐蚀性能良好以及优良的焊接和机械加工性能。因此,广泛应用于建筑、食品包装、电子产品和交通运输等领域^[1-3]。然而,铝是活泼金属,无法从水溶液中直接电沉积出来^[4-6]。离子液体(ILs)具有低熔点、高稳定性和宽电化学窗口等优点,被认为是电沉积 Al-Mn 合金的理想电解液^[7-11],近年来受到学者们的广泛关注^[12-15]。例如,徐静等^[16]在含有氯化锰(MnCl₂)的1-乙基-3-甲基咪唑氯盐(EMIC)

与氯化铝(AlCl₃)组成的离子液体(EMIC-AlCl₃)中,于铜表面电沉积出了 Al-Mn 合金,并通过静态全浸试验和电化学测试证明了其耐蚀性能优于镍沉积层。Ispas 等^[17]采用电化学石英晶体微天平系统研究了离子液体中 Al-Mn 合金的电沉积过程,结果表明:通过改变电流密度和电沉积温度均可实现对合金组成的调控;此外,提高电沉积温度还可减少沉积层中氯和氧等杂质的含量,从而提升沉积层的纯度。Chen 等^[18-19]同样采用 MnCl₂和 EMIC-AlCl₃组成的电解液,于钨铁硼基体上电沉积出了非晶态 Al-Mn 合金,研究发现合金的晶体形态(晶态或非晶态)会随着沉积层中的锰含量变化而发生改变。

[收稿日期] 2025-01-20

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目“离子液体电沉积致密铝层的多物理场耦合调控机制”、“离子液体在低温电沉积制备纳米铝中的应用基础研究”(22378400,21406002),河南省自然科学基金资助项目“高纯铝在离子液体中低温电解精炼制备的反应机理及其调控机制”(232300421209),中国科学院化工冶金低碳变革技术及示范战略性先导科技专项“氯化铝离子液体低温电解铝变革性技术示范”(XDA0390203)。

[第一作者] 李浩鹏(1999—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,主要从事离子液体电沉积铝及合金研究。

[通信作者] 李庆阳(1984—),男,吉林长春人,博士,副研究员,硕士生导师,主要从事金属电沉积与化学沉积研究。

王倩(1982—),女,河北石家庄人,博士,项目研究员,博士生导师,主要从事离子液体电沉积铝及工业应用研究。

目前,关于离子液体电沉积 Al-Mn 合金的研究主要缺乏以下 3 方面的系统工作:①电流密度对沉积层晶体形态的影响;②不同晶体形态 Al-Mn 合金之间的耐蚀性差异;③热处理对沉积层抗腐蚀能力的影响^[20-22]。对上述问题的系统研究与深入理解,有助于沉积层制备工艺和性能的进一步优化与提升,对推动 Al-Mn 合金在材料腐蚀防护领域的应用具有重要意义。

基于上述考量,本文在以 EMIC-AlCl₃-MnCl₂ 组成的典型离子液体电解液中,对以上问题进行了详细的探讨。具体研究内容包括:采用扫描电子显微镜、X 射线衍射仪以及能量色散 X 射线光谱仪表征不同电流密度下电沉积 Al-Mn 合金的形貌、组成和晶体结构;采用开路电位和动电位极化曲线分析沉积层在模拟海水中的电化学腐蚀行为;以及系统研究热处理工艺对沉积层性能的影响。

1 试验材料

称量物质的量之比为 1:2 的 1-乙基-3-甲基咪唑氯盐(EMIC,来自兰州化物所,99% 纯度)和无水三氯化铝(AlCl₃,来自国药,99%)。然后,将 AlCl₃ 缓慢地加入到 EMIC 中,待 2 种固体完全溶解为深黄色液体时,再以 2 个高纯铝板作为阴、阳极,在 ~1.5 V 下对所得液体进行预电解处理。在此过程中,液体颜色逐渐由深黄色转变为淡黄色,此时即完成 EMIC-AlCl₃ 离子液体的配制。之后,称取一定量的二氯化锰(MnCl₂,国药,99%),并缓慢加入到适量的 EMIC-AlCl₃ 离子液体中,最终得到 MnCl₂ 含量为 10 g/L 的离子液体电解液用于后续电沉积。整个制备和预电解过程均在手套箱中进行。手套箱内为氩气气氛,其中的水含量和氧含量均保持在 1 ppm 以下。

称量 3.5 g 的氯化钠(NaCl,国药,分析纯)置于烧杯中,加入约 50 mL 去离子水,用玻璃棒搅拌至 NaCl 完全溶解;将所得溶液转移至 100 mL 的容量瓶中,并向容量瓶中缓慢加入去离子水至凹液面底部与刻度线相切;最后,盖紧瓶塞,并且反复倒置摇匀,最终得到 NaCl 质量百分比为 3.5 wt.% 的模拟海水,用作沉积层耐蚀性能表征过程中的腐蚀介质。

2 试验方法

2.1 循环伏安测试

所有涉及使用离子液体的试验均在手套箱中进

行,使用辰华 CHI 660D 电化学工作站进行控制,试验温度为室温(~25 ℃)。采用三电极体系测定 MnCl₂ 加入前后 EMIC-AlCl₃ 离子液体的循环伏安曲线。试验时,以铜(Cu)圆盘电极为工作电极,铂(Pt)片电极为对电极,Al 丝为参比电极。测定之前,先测试开路电位,待开路电位稳定后,再从开路电位开始往负电位方向进行扫描;待扫描到 -1 V,再正电位向扫描至 1.8 V;最后回到开路电位,此为一个循环。扫描速率为 20 mV/s,试验结果均选取循环伏安曲线的第 1 圈。

2.2 恒流电沉积

采用三电极体系进行不同电流密度下的 Al-Mn 电沉积。试验过程中,采用 1 cm × 1.5 cm 的 Cu 片(99.9%)作为工作电极,用绝缘胶带覆盖 Cu 片以控制工作电极的暴露面积为 1 cm × 1 cm;Al 丝作为参比电极;Al 片(99.99%)作为辅助电极。Al 片和 Cu 片在使用前均采用 1 200 目和 3 000 目的德国勇士牌 991A 砂纸进行打磨;待打磨后用丙酮进行超声清洗 10 ~ 20 min;随后依次用去离子水和乙醇清洗,清洗后的电极用氮气吹干后,立刻放入手套箱中备用;最后,在室温下,采用不同电流密度(2 mA/cm²、4 mA/cm²、6 mA/cm²、8 mA/cm²、10 mA/cm²),在含有 MnCl₂ 的 EMIC-AlCl₃ 离子液体中进行 Al-Mn 电沉积,沉积时间为 1 h,并对沉积层的形貌和性能进行表征。

2.3 热处理

将 Al-Mn 沉积层放入管式炉中进行不同温度和时间的退火处理。处理时间分别为 2 h、5 h 和 10 h,处理温度分别为 200 ℃、300 ℃ 和 400 ℃,升温速率为 5 ℃/min。处理过程中,所用气氛均为氩气。退火处理之后,待管式炉自然冷却至室温后,再停止通入氩气,并将样品取出,放入手套箱中备用。

3 材料表征

3.1 结构与组成

采用场发射扫描电子显微镜(SEM,英国蔡司 Gemini 300)及其附带的能量色散 X 射线光谱仪(EDS,牛津 Ultim MAX)对 Al-Mn 沉积层的表面形貌和元素组成进行分析;采用 X 射线衍射仪(XRD,日本株式会社 Smartlab 9)对沉积层的组织结构进行表征,以确定其晶体形态。

3.2 耐蚀性能

采用开路电位曲线和动电位极化曲线对 Al-Mn 沉积层的耐蚀性能进行表征。通过三电极体系测定沉积层在 3.5 wt.% 的 NaCl 溶液中的腐蚀电位和腐蚀电流密度。试验前,将沉积层依次用乙醇和去离子水清洗;待清洗过后,用氮气将样品吹干,并立即放入手套箱中备用。试验时,以沉积层为工作电极,并用绝缘胶带将其覆盖以控制其暴露面积为 $2\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,以饱和甘汞电极(SCE)为参比电极,Pt 片电极为辅助电极。开路电位的测试时间为 20 h,直至测出稳定的开路电位。动电位极化曲线测试时,扫描范围设定为开路电位的 $\pm 0.25\text{ V}$,扫描速率为 0.1 mV/s 。

4 结果与分析

4.1 电沉积 Al-Mn 合金

图 1 为 EMIC-AlCl₃ 离子液体添加 10 g/L MnCl₂ 前后的循环伏安曲线。如图 1 所示,在 EMIC-AlCl₃ 离子液体中,Al 的还原反应起始于 0 V,随着扫描电位的负移,体系的电流密度急剧升高,并在 -0.6 V 时出现 Al 的还原峰。向 EMIC-AlCl₃ 离子液体中加入 MnCl₂ 后 (EMIC-AlCl₃-MnCl₂),循环伏安曲线在 -0.1 V 时的电流密度明显升高,此时 Al 和 Mn 开始共沉积,并在 -0.5 V 时出现一个 Al-Mn 还原峰。显然,Al-Mn 的还原峰电位明显较 Al 的更正,意味着前者更易于还原。

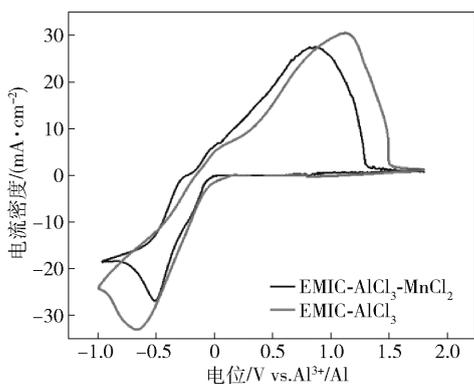


图 1 EMIC-AlCl₃-MnCl₂ 和 EMIC-AlCl₃ 离子液体的循环伏安曲线

Fig.1 Cyclic voltammetry curves of EMIC-AlCl₃-MnCl₂ and EMIC-AlCl₃ ionic liquids

基于上述循环伏安测试结果,在以 Cu、Pt 和 Al 组成的三电极体系下,于 EMIC-AlCl₃-MnCl₂ 电解

液中进行了不同电流密度的 Al-Mn 共沉积。图 2 展示了室温条件下,电流密度分别为 2 mA/cm^2 、 4 mA/cm^2 、 6 mA/cm^2 、 8 mA/cm^2 和 10 mA/cm^2 时 Al-Mn 电沉积过程中的电位变化。可以看出,全部电位-时间曲线呈现先降低而后趋于平缓的势态。这是因为,在初始沉积阶段,电极表面新晶核的形成需克服较高的能量势垒,因此系统需施加较大的过电位以驱动成核过程;随着晶核的生成,沉积机制由成核主导转变为晶核生长主导,此时过电位需求因界面活化能的降低而显著减小;相应的,电位的负移幅度亦随之减弱,并逐步趋于平缓。

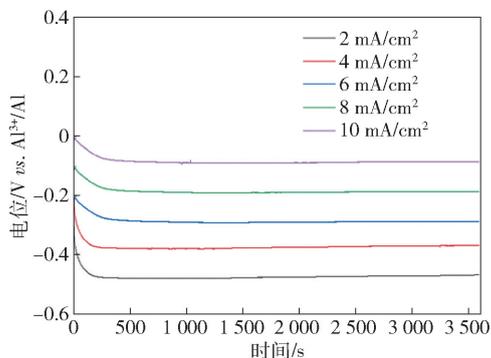


图 2 不同电流密度下的电位-时间曲线

Fig.2 The potential-time curves of different current densities

4.2 沉积层的形貌与组成

不同电流密度下,电沉积 1 h 得到的 Al-Mn 的 SEM 图和 EDS 谱分别如图 3 所示。可以看出,虽然当电流密度为 2 mA/cm^2 时(图 3(a))所制备的沉积层非常致密,但其 Mn 含量较低($\sim 4.34\text{ wt. %}$);当电流密度升高至 4 mA/cm^2 时(图 3(b)),沉积层中的 Mn 含量略有增多($\sim 7.33\text{ wt. %}$),但其形貌变化并不明显;随着电流密度进一步增大至 6 mA/cm^2 时(图 3(c)),沉积层的 Mn 含量得到了显著提升($\sim 18.33\text{ wt. %}$),此时其晶粒排列仍旧非常紧密;变化发生在电流密度为 8 mA/cm^2 时(图 3(d)),此时沉积层的晶粒明显增大,呈现大晶粒分散在小晶粒构成的紧密沉积层上的形态,沉积层中的 Mn 含量也已达到 $\sim 24.61\text{ wt. %}$;之后继续提升电流密度至 10 mA/cm^2 时(图 3(e)),此时沉积层中的 Mn 含量增速明显放缓($\sim 26.80\text{ wt. %}$),沉积层依旧呈现大小晶粒共存的形貌,表面已变得粗糙。

此外,还采用 XRD 技术对不同电流密度下沉积

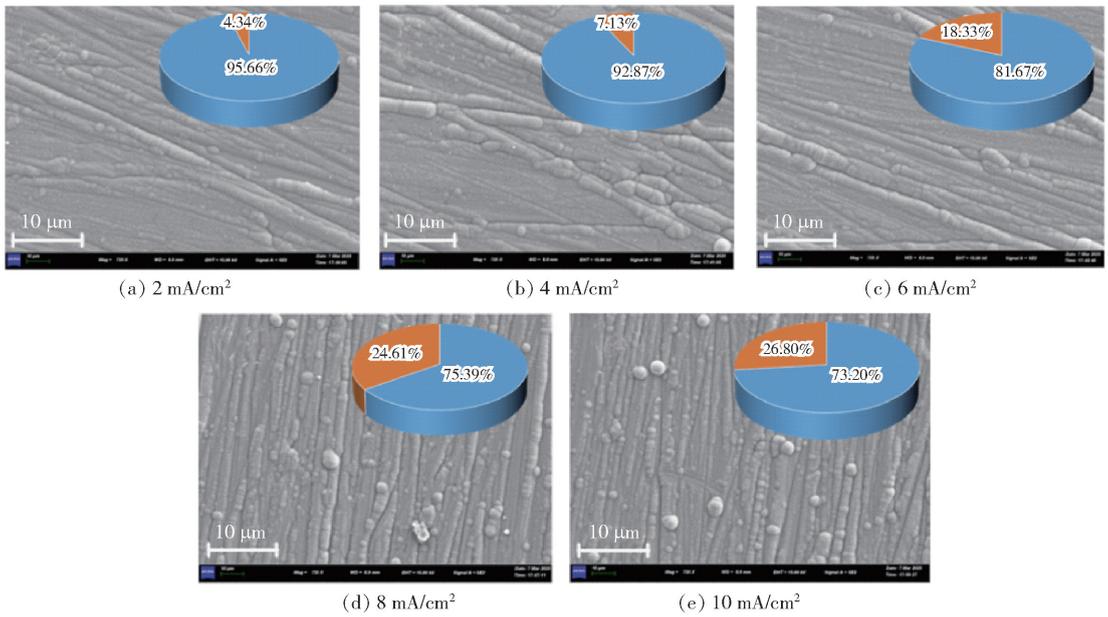


图3 不同电流密度下制备 Al-Mn 沉积层的 SEM 照片和元素分布(插图, 橙色-Mn, 蓝色-Al)

Fig. 3 SEM images and elemental distributions (insert maps, orange-Mn, blue-Al) of Al-Mn coatings deposited with different current densities

Al-Mn 的晶体结构进行了表征, 结果如图 4 所示。从低电流密度下 (2 mA/cm^2 和 4 mA/cm^2) 电沉积 Al-Mn 的 XRD 谱中可以看出, 在 2θ 角在 $40 \sim 45^\circ$ 处有一个明显的宽峰, 表明此时沉积层为非晶态; 随着电流密度从 4 mA/cm^2 增大至 6 mA/cm^2 , $40 \sim 45^\circ$ 处的宽峰位置出现了少量的 Al_8Mn_5 尖峰, 呈现宽峰与尖峰并存的形态, 意味着 Al-Mn 开始由非晶态向晶态转变; 此时, 若进一步增大电流密度 ($8 \sim 10 \text{ mA/cm}^2$), $40 \sim 45^\circ$ 处则仅能观察到 Al_8Mn_5 相的尖峰, 证明高电流密度下电沉积的 Al-Mn 呈晶态。

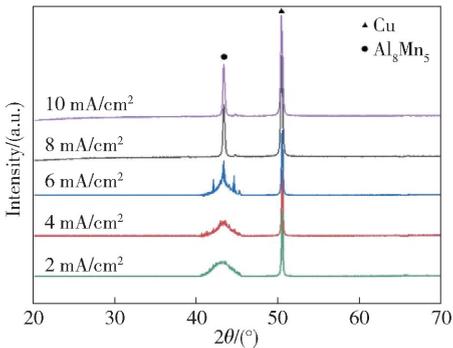


图4 不同电流密度下制备 Al-Mn 沉积层的 XRD 谱

Fig. 4 XRD spectra of Al-Mn coatings deposited at different current densities

4.3 沉积层的耐蚀性能

对比研究了晶态转变对 Al-Mn 沉积层耐蚀性能的影响。典型的, 采用电流密度为 4 mA/cm^2 和 8 mA/cm^2 时制备的非晶态和晶态 Al-Mn 作为工作电极, 分别测量了其在 3.5 wt. % 的 NaCl 溶液中的开路电位和动电位极化曲线, 如图 5 所示。在进行动电位极化曲线测试前, 先在室温下测试 Al-Mn 沉积层的开路电位, 测试时间为 20 h, 结果如图 5(a) 所示, 此时开路电位已基本稳定。随后进行动电位极化曲线测试, 扫描范围从开路电位开始向 $\pm 0.25 \text{ V}$ 方向扫描, 扫速为 0.1 mV/s , 结果如图 5(b) 所示。之后, 利用 Tafel 外推法对二者的腐蚀电位和腐蚀电流密度进行计算, 结果如表 1 所示。显然, 非晶态沉积层的腐蚀电位相较晶态沉积层的更正, 意味着前者在模拟海水中更为稳定; 此外, 非晶态沉积层的腐蚀电流密度明显小于晶态沉积层, 表明前者的腐蚀速率更低; 上述结果一致证明, 非晶态沉积层的耐蚀性能明显优于晶态沉积层。这可能源于非晶合金独特的微观结构和表面特性。如图 3(b) 和 (d) 所示, 晶态沉积层具有更为明显的晶界, 而非晶态沉积层则更为细密, 没有明显的晶界等活性位点, 从而消除了由微观电化学活性差异所引发的局部腐蚀倾向。另外, 非晶态合金表面容易形

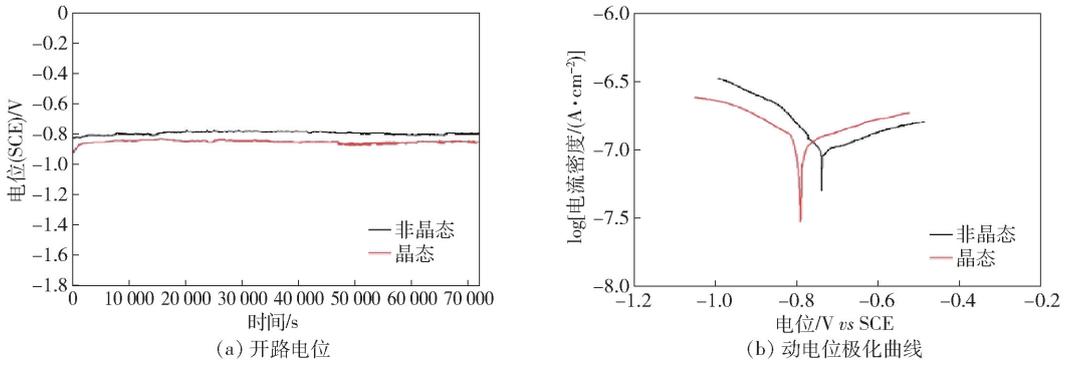


图 5 不同晶体结构 Al-Mn 沉积层的电化学性能

Fig. 5 Electrochemical properties of Al-Mn coatings with different crystal structures

表 1 不同晶体结构 Al-Mn 沉积层的腐蚀电位和腐蚀电流密度

Table 1 Corrosion potential and corrosion current density of Al-Mn coatings with different crystal structures

晶体结构	腐蚀电位/V	腐蚀电流密度/(A·cm ⁻²)
晶态	-0.84	2.84 × 10 ⁻⁷
非晶态	-0.79	2.03 × 10 ⁻⁷

成致密和稳定的腐蚀产物膜,而晶态合金表面的腐蚀产物膜则可能因为晶界的存在而产生缺陷,从而导致了二者抗腐蚀能力的差异。

4.4 热处理对沉积层性能的影响

系统研究了退火处理对非晶态 Al-Mn 沉积层(在电流密度为 4 mA/cm² 条件下沉积得到)形貌和耐蚀性能的影响。如图 6 所示,经过 200 °C 和 300 °C 热处理后,沉积层的形貌变得更加致密,并且随着热

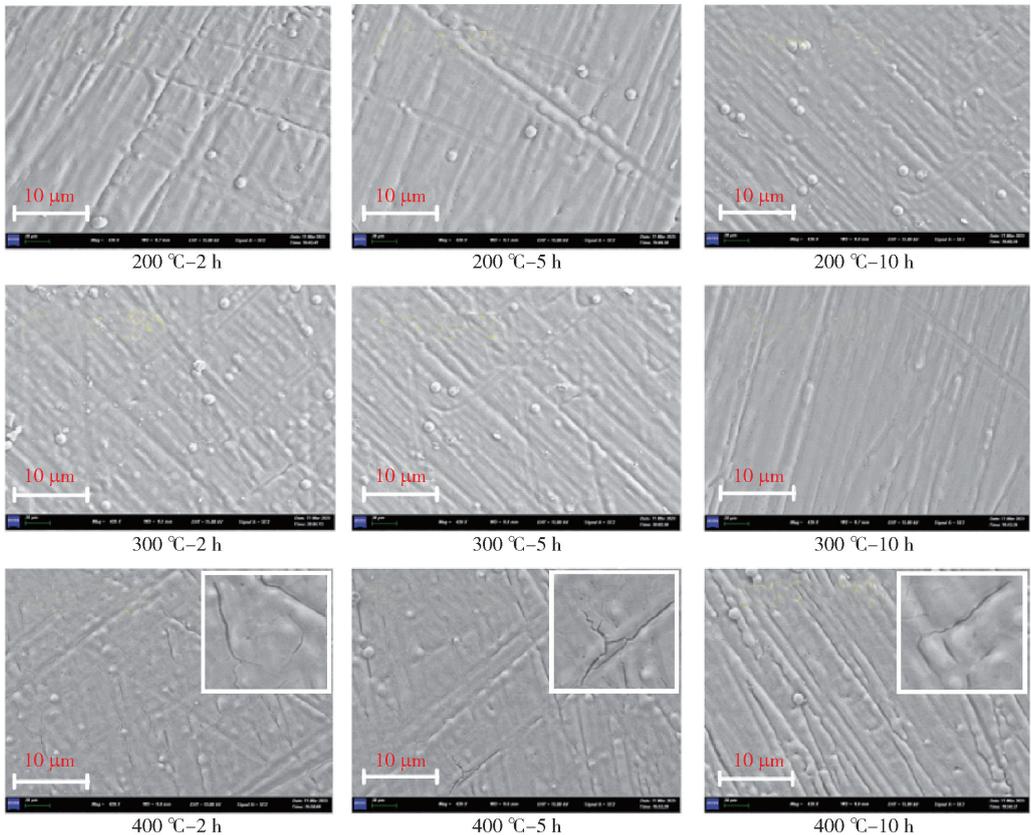


图 6 不同热处理条件下 Al-Mn 沉积层的 SEM 图

Fig. 6 SEM images of Al-Mn coatings under different heat treatment conditions

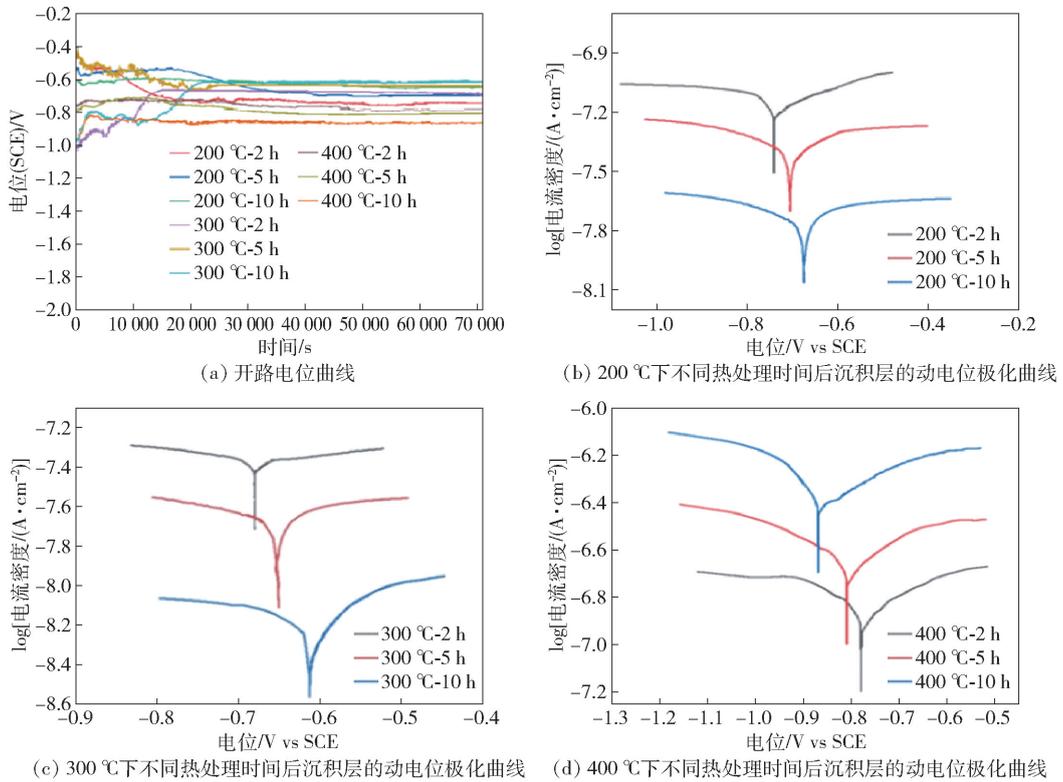


图7 不同热处理条件下 Al-Mn 沉积层的电化学分析结果

Fig. 7 Electrochemical analysis results of Al-Mn coatings under different heat treatment conditions

处理时间的延长,其致密程度呈逐渐增大的趋势。然而,当热处理温度升至 400 °C 时,沉积层表面开始出现裂纹,致使沉积层的完整性变差,随着热处理时间的进一步延长,裂纹变得更加明显,沉积层的完整性遭受了更为严重的损害。耐蚀性能方面,如图 7(a) 所示,热处理温度和时间亦对沉积层的电化学稳定性具有显著影响,其中在 300 °C 下热处理 10 h 后,沉积层的开路电位最正,这意味着此时沉积层在模拟海水中最稳定。动电位极化曲线结果亦与开路电位测试结果相吻合,如图 7(b)、(c) 和 (d) 所示。与此同时,表 2 汇总了通过动电位极化曲线计算得出的不同热处理条件下沉积层的腐蚀电位和腐蚀电流密度。可以看出,热处理温度在 200 ~ 300 °C 范围内,随着温度的升高和热处理时间的延长,沉积层的腐蚀电位呈现出明显的正移,同时腐蚀电流密度也逐渐减小,这表明在这一温度区间内,热处理能够有效增强沉积层的抗腐蚀能力。然而,当热处理温度升至 400 °C 时,沉积层的腐蚀电位则出现明显的负移,腐蚀电流密度亦显著增加,并且这种趋势会随着热处理时间的延长而进一步加剧,这表明 400 °C

表 2 不同热处理条件下 Al-Mn 沉积层的腐蚀电位和腐蚀电流密度

Table 2 The corrosion potential and current density of Al-Mn coating after heat treatment under different conditions

热处理条件	腐蚀电位/V	腐蚀电流密度/ ($A \cdot cm^{-2}$)
未处理	-0.79	2.03×10^{-7}
200 °C - 2 h	-0.74	9.98×10^{-8}
200 °C - 5 h	-0.70	5.76×10^{-8}
200 °C - 10 h	-0.67	2.02×10^{-8}
300 °C - 2 h	-0.69	5.37×10^{-8}
300 °C - 5 h	-0.66	4.67×10^{-8}
300 °C - 10 h	-0.61	1.15×10^{-8}
400 °C - 2 h	-0.78	1.23×10^{-7}
400 °C - 5 h	-0.81	1.57×10^{-7}
400 °C - 10 h	-0.87	1.73×10^{-7}

的热处理条件会对沉积层的耐蚀性能产生负面影响。尤为值得注意的是,在 300 °C 下进行 10 h 退火

处理的沉积层展现出最正的腐蚀电位和最小的腐蚀电流密度。这一结果表明,该热处理条件下的沉积层具有最佳的耐蚀性能。因此,300 °C 退火处理 10 h 对于进一步提升非晶态 Al-Mn 沉积层的抗海洋腐蚀能力最为有效。

5 结论

本文以 EMIC- AlCl_3 离子液体作为电解质,采用不同电流密度制备了一系列 Mn 含量各异的 Al-Mn 合金沉积层,而后对其形貌、晶体结构以及抗腐蚀能力进行了详细观察与比较研究。此外,还对非晶态 Al-Mn 沉积层实施了不同条件的退火处理,并对比分析了热处理前后沉积层的形貌和耐蚀性能变化。最终得出以下结论。

1) 在室温条件下,于含有 MnCl_2 的 EMIC- AlCl_3 离子液体中进行了恒电流沉积试验,电流密度分别为 2 mA/cm^2 、 4 mA/cm^2 、 6 mA/cm^2 、 8 mA/cm^2 和 10 mA/cm^2 ,所得 Al-Mn 沉积层致密,并且合金中的 Mn 含量随着电流密度的增大而增多。

2) 在 2 mA/cm^2 和 4 mA/cm^2 电流密度下,所得沉积层呈现非晶态。当电流密度增大至 6 mA/cm^2 时,沉积层开始从非晶态向晶态转变,而在 8 mA/cm^2 和 10 mA/cm^2 电流密度下沉积的 Al-Mn 则完全为晶态。

3) 低 Mn 含量的非晶态 Al-Mn 沉积层相较于高 Mn 含量的晶态沉积层表现出更为优异的耐蚀性能。并且,在 300 °C 下热处理 10 h 后,低 Mn 含量非晶态沉积层的抗腐蚀能力将得到进一步提升。

[参考文献]

[1] THIRATHIPVIWAT P, KOTAKE T, SUZUKI T, et al. Effect of fine dispersoids on dislocation density and dislocation rearrangement of Al-Mn alloy during tensile deformation [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2025, 927: 147997-148005.

[2] YANG F, ZHAO S, MA B, et al. Elastocaloric effect and magnetic properties of rare earth Ce-doped Cu-Al-Mn alloy [J]. *Solid State Communications*, 2025, 395: 115745-115753.

[3] SAMRAH E G M, NABIL M I, SHAMEKH E M, et al. Microstructure and radiation shielding capabilities of Al-Cu and Al-Mn alloys [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): 26721-26737.

[4] BÖTTCHER R, ISPAS A, BUND A. Investigation of the

electrochemical kinetics of aluminum deposition from ionic liquids [J]. *ECS Meeting Abstracts*, 2019, 17: 956-961.

[5] SCHOETZ T, LEUNG M O, EFIMOV I, et al. Aluminium deposition in EMImCl- AlCl_3 ionic liquid and ionogel for improved aluminium batteries [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2020, 167(4): 40516.

[6] YITZHACK N, TERESCHUK P, SEZIN N, et al. Aluminium electrodeposition from a non-aqueous electrolyte - a combined computational and experimental study [J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2020, 24: 1-14.

[7] 张欣, 张丽鹏, 于先进. 室温离子液体电沉积铝及其合金的研究进展 [J]. *中国有色冶金*, 2009(2): 63-66.

[8] 钟熊伟, 熊婷, 陆俊, 等. 离子液体电解质体系铝及铝合金电沉积与铝精炼研究进展 [J]. *有色金属科学与工程*, 2014(2): 44-51.

[9] PRADHAN D, REDDY R G. Dendrite-free aluminum electrodeposition from AlCl_3 -1-ethyl-3-methyl-imidazolium chloride ionic liquid electrolytes [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2012, 43(3): 519-531.

[10] LU X, ZHANG Z, HIRAKI T, et al. A solid-state electrolysis process for upcycling aluminium scrap [J]. *Nature*, 2022, 606(7914): 511-515.

[11] HUAN S, WANG Y, PENG J, et al. Recovery of aluminium from waste aluminum alloy by low-temperature molten salt electrolysis [J]. *Minerals Engineering*, 2020, 154: 106386-106393.

[12] HALLETT J P, WELTON T. Room-temperature ionic liquids: Solvents for synthesis and catalysis [J]. *Chemical Reviews*, 2011, 111(5): 3508-3576.

[13] OLIVIER-BOURBIGOU H, MAGNA L, MORVAN D. Ionic liquids and catalysis: Recent progress from knowledge to applications [J]. *Applied Catalysis A-General*, 2010, 373(1-2): 1-56.

[14] GALINSKI M, LEWANDOWSKI A, STEPNIAK I. Ionic liquids as electrolytes [J]. *Electrochimica Acta*, 2006, 51(26): 5567-5580.

[15] LOTO R T, SOLOMON M M. Corrosion resistance and passivation behavior of 3004 AlMnMg and 4044 AlSi aluminum alloys in acid-chloride electrolytes [J]. *Materials Research Express*, 2021, 8(9): 652-675.

[16] 徐静, 刘启星, 裘嘉豪, 等. 电镀铝-锰合金的耐人工汗液腐蚀性能 [J]. *电镀与涂饰*, 2020, 39(13): 844-849.

[17] ISPAS A, BUND A. Electrodeposition in ionic liquids [J]. *The Electrochemical Society Interface*, 2014, 23

- (1): 47–53.
- [18] CHEN J, XU B, LING G. Amorphous Al-Mn coating on NdFeB magnets: Electrodeposition from AlCl_3 -EMIC-MnCl₂ ionic liquid and its corrosion behavior [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2012, 134: 1067–1071.
- [19] DING J, XU B, LING G. Al-Mn coating electrodeposited from ionic liquid on NdFeB magnet with high hardness and corrosion resistance [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 305: 309–313.
- [20] 刘风国, 王博, 章莲玉, 等. 离子液体在电沉积铝及铝合金中的应用 [J]. *化学进展*, 2020, 32(12): 2004–2012.
- [21] 吴江, 阚洪敏, 王文鑫. 离子液体电沉积铝及铝合金镀层的研究进展 [J]. *中国有色冶金*, 2024, 53(6): 69–78.
- [22] ASLAM M S, AHMED N, KHAN Z. High performance aluminumized monel coatings with prolonged corrosion resistance in saline environment [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2024, 313: 12869–12880.

Research on electrodeposition of Al-Mn alloy in ionic liquid and its corrosion resistance

LI Haopeng^{1,2}, WANG Ye², WANG Yiran², LI Qingyang^{3*}, ZHENG Yong⁴, WANG Qian^{2*}

(1. Henan Institute of Advanced Technology, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Institute of Advanced Wear & Corrosion Resistant and Functional Materials, Jinan University, Guangzhou 510632, China;

4. College of Chemical and Environmental Engineering, Anyang Institute of Technology, Anyang 450000, China)

Abstract: Aluminum-manganese (Al-Mn) alloy possesses good plasticity, weldability and corrosion resistance, thus showing broad application prospects for corrosion protection of steel. Herein, the electrodeposition behavior of Al-Mn is investigated by cyclic voltammetry and chronopotentiometry in the ionic liquid electrolyte composed by 1-ethyl-3-methylimidazolium chloride, aluminum chloride and manganese chloride. Scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray spectroscopy, and X-ray diffraction techniques are employed to compare the surface morphology, elemental composition, and crystal structure of Al-Mn coatings electrodeposited at different current densities. The corrosion resistance of Al-Mn coatings in the simulated seawater is evaluated using open circuit potential and potentiodynamic polarization curves. Meanwhile, the effects of annealing temperature and time on the surface morphology and anti-corrosion ability of Al-Mn coatings are also studied, systematically. The results demonstrate that Al-Mn coating undergoes a structural transformation from amorphous state to crystalline state with the increase of current density. Among them, the amorphous coating displays a better corrosion resistance than the crystalline counterpart, while appropriate heat treatment can further improve its anti-corrosion property.

Keywords: aluminum alloy; ionic liquid; electrodeposition; corrosion resistance; crystal structure; thermal treatment

