

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2024.3299

Mn 微合金化 Al-Si-Cu-Mg 合金显微组织及耐蚀性能研究

陈浩^{1,2}, 李天宇¹, 王瑞^{1,2}, 王东涛^{1,2}, 张鸣鹤^{1,2}, 赵新宇^{1,2}, 施昊^{1,2}, 蔡伟涛^{1,2}, 长海博文^{1,2}

(1. 苏州大学高性能金属结构材料研究院, 江苏苏州 215131; 2. 苏州大学沙钢钢铁学院, 江苏苏州 215137)

摘要: Al-Si-Cu-Mg 系列合金具有优异的强韧性, 但其中的含 Cu 强化相极大地影响了该系合金的耐蚀性能。因此, 本文通过对不同 Mn 含量的 Al-7Si-2Cu-0.6Mg 合金进行显微组织观察和电化学分析, 探究 Mn 元素的添加对 T6 热处理状态下合金微观结构和耐蚀性的影响。结果表明, Mn 添加量的提高对合金显微硬度几乎没有影响, 但在合金基体中可以观察到弥散相。随着 Mn 含量升高, 合金的耐蚀性呈现先升高后降低的趋势。添加 0.360%Mn(质量分数)合金具有最佳耐蚀性, 腐蚀电流密度比基础合金减少了 54%。腐蚀形貌观察结果表明, Mn 的添加可以显著减弱合金的点蚀趋势。

关键词: Al-Si-Cu-Mg 合金; Mn 含量; 耐蚀性; 电化学分析

中图分类号: TG146.2+1; TG113.23+1

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)05-0452-07

Effect of Mn on the Microstructure and Corrosion Resistance of Al-Si-Cu-Mg Alloys

CHEN Hao^{1,2}, LI Tianyu¹, WANG Rui^{1,2}, WANG Dongtao^{1,2}, ZHANG Minghe^{1,2}, ZHAO Xinyu^{1,2},
SHI Hao^{1,2}, CAI Weitao^{1,2}, NAGAUMI Hiromi^{1,2}

(1. High-Performance Metal Structural Materials Research Institute, Soochow University, Suzhou 215131, China; 2. School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou 215137, China)

Abstract: Al-Si-Cu-Mg series alloys have excellent strength and toughness, but the presence of Cu-containing hardening nanoprecipitates greatly affects their corrosion resistance. For this purpose, microstructure observation and electrochemical analysis of Al-7Si-2Cu-0.6Mg alloys with different Mn alloying additions were carried out to investigate the effect of Mn addition on the microstructure and corrosion resistance of the alloys under T6 heat treatment. The results indicate that the increase in Mn addition has almost no effect on the microhardness of the alloy, but a dispersed phase can be observed in the matrix of the alloys. The corrosion resistance of the alloy tends to increase and then decrease with increasing Mn content. Compared with the base alloy, the alloy with 0.360 wt. %Mn has the best corrosion resistance, and the corrosion current density is reduced by 54%. The observation of the corrosion morphology indicates that the addition of Mn can significantly weaken the pitting corrosion trend of the alloy. The present work provides a new approach for improving the corrosion resistance of Al-Si-Cu-Mg alloys and extends the application range of these alloys.

Key words: Al-Si-Cu-Mg alloy; Mn content; corrosion resistance; electrochemical analysis

Al-Si合金具有质量轻、铸造性能好、耐磨损、耐腐蚀等优点, 广泛应用于汽车、建筑等领域^[1-3]。但 Al-Si合金的强度较低, 通常需要通过Cu和Mg的微合金化来提高, 然而Cu和Mg又会对耐蚀性造成不利影响^[4], 缓蚀剂法、阴极保护法、涂层法虽然可改

善铝合金耐蚀性能, 但较高的成本和苛刻的处理工艺限制了其工业化应用^[5-6]。微合金化元素的添加能够显著提高Al-Si-Cu-Mg合金的耐蚀性能, 目前改善铝合金耐蚀性主要分为2种思路: 其一是添加如Ce、Y、Er等稀土元素, 对晶粒尺寸或析出相尺寸和形貌

收稿日期: 2023-12-11

基金项目: 国家重点实验室开放课题(32115007, 2022RALKFKT008); 苏州市基础研究计划项目(前沿技术研究)(SYG202324)

作者简介: 陈浩, 2000年生, 硕士生。研究方向为铸造铝合金。

通讯作者: 王东涛, 1991年生, 副研究员。研究方向为铝合金材料。Email: dtwang@suda.edu.cn

引用格式: 陈浩, 李天宇, 王瑞, 王东涛, 张鸣鹤, 赵新宇, 施昊, 蔡伟涛, 长海博文. Mn 微合金化 Al-Si-Cu-Mg 合金显微组织及耐蚀性能研究[J]. 铸造技术, 2024, 45(5): 452-458.

CHEN H, LI T Y, WANG R, WANG D T, ZHANG M H, ZHAO X Y, SHI H, CAI W T, NAGAUMI H. Effect of Mn on the microstructure and corrosion resistance of Al-Si-Cu-Mg alloys[J]. Foundry Technology, 2024, 45(5): 452-458.

起到改善作用,从而提高合金的耐蚀性^[7-9],但这些稀土元素高昂的价格使其难以大规模应用;其二是添加过渡族元素如Zr、Zn、Cr等,这些元素具有相对活跃的外层电子,可以与含Cu相相互吸引保护,从而避免其对基体的过度破坏^[10-12],而Mn同样作为过渡族元素,目前还缺乏详细研究。同时,改善耐蚀性的另一个思路是改善基体表面的钝化膜,这要求所添加的微合金化元素电极电势至少要低于Cu(标准电极电势 $E_{Cu}^0=0.34\text{ V}$),而Mn的标准电极电势($E_{Mn}^0=-1.19\text{ V}$)介于Cu和Al($E_{Al}^0=-1.66\text{ V}$)之间,这意味着其可能具有改善钝化膜的作用,从而提高耐蚀性。相关研究表明^[13],Mn/Fe比超过2.18时就会析出富Mn相,在Mn/Fe比为3.19时,富Mn相析出峰明显;此外当Mn含量过多时,会影响合金的性能。因此,本文在Al-7Si-2Cu-0.6Mg合金中添加不同含量的Mn元素(Mn/Fe=0,2,3,4),研究Mn含量对Al-Si-Cu-Mg-Mn合金微观结构和耐蚀性的影响,为Al-Si-Cu-Mg系合金提高耐蚀性提供新的思路,扩展了该系合金的应用范围。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

研究所用合金原料为纯铝(99.99%,如无特别提及,论文中合金元素百分含量均为质量分数)、纯Cu(99.99%)、纯Mg(99.99%)及Al-20Si、Al-10Mn中间合金。合金原料在加热至740℃的电阻炉中熔化,完全熔化后保温30 min,~730℃时使用高纯氩气对合金熔体进行精炼,持续时间为20 min。使用TCB合金作为晶粒细化剂,使用Al-10Sr合金作为变质剂,在浇铸前加入。当熔体温度稳定在~690℃时,将熔体倒入尺寸为100 mm×200 mm×20 mm的水冷铜模中得到铸锭。所有合金均进行T6热处理,其中固溶处理温度为500℃,时间为6 h,随后在25℃水中淬火,时效处理温度为180℃,时间为18 h^[14]。表1为合金化学成分。

表1 合金化学成分
Tab.1 Chemical composition of alloy
(mass fraction/%)

Number	Si	Cu	Mg	Fe	Mn	Sr	Al
G0	7.25	2.10	0.57	0.12	0.002 1	0.021 6	Bal.
G1	7.15	2.15	0.63	0.12	0.218 0	0.023 8	Bal.
G2	7.00	2.08	0.56	0.12	0.360 0	0.017 7	Bal.
G3	6.97	2.12	0.61	0.12	0.478 0	0.027 5	Bal.

1.2 微观组织表征及显微硬度测试

首先使用SiC砂纸将样品打磨至5 000#,随后使用50 nm的SiO₂悬浮液进行抛光处理。使用装备有能

谱仪(EDS)的扫描电子显微镜(SEM)Phenom X1和JEOL-T800观察微观组织,用Wilson VH1102维氏显微硬度计测试样品显微硬度,加载压力50 g,保压时间10 s。

1.3 电化学测试及腐蚀形貌表征

实验用电化学样品为直径16 mm、厚度2 mm的圆片,使用夹具保证暴露面积为1 cm²作为工作电极。在测试前用SiC砂纸将样品打磨至2 000#,使用乙醇清洗后立即进行测试。电化学测试设备为Princeton VersaSTAT3,采用三电极系统,测试样品为工作电极,纯铂片(20 mm×20 mm)为对电极,Ag/AgCl(饱和KCl)为参比电极。电化学研究中所用电解液为人工海水(3.5%NaCl溶液)。开路电位(open circuit potential, OCP)监测至少10 min后,再进行后续试验。浸泡48 h后监测电化学阻抗谱(electrochemical impedance spectroscopy, EIS),在OCP电位下,使用频率范围为100.00~0.05 Hz,振幅10 mV。采用Zsimpwin 3.60软件完成等效电回路(electrical equivalent circuit, EEC)曲线拟合分析。浸泡48 h后,扫描速率为1 mV/s,在OCP±250 mV电位范围内进行动电位极化研究^[15]。

对完成电化学测试的样品,首先进行表面腐蚀形貌表征,随后使用树脂保护腐蚀表面,沿垂直于腐蚀表面的方向切断样品后,打磨纵截面并抛光,所有操作步骤与设备使用与1.2节中一致。

2 实验结果及讨论

2.1 Al-7Si-2Cu-0.6Mg-xMn合金显微组织分析

图1为不同Mn含量Al-Si-Mg-Cu合金的SEM图。从图1a中可以发现,合金主要由块状的灰色基体α-Al相,球状的共晶Si相,浅灰色的AlSiCuMg相及针状的含Fe相构成。随着Mn含量的增加,合金中出现了少量的白色颗粒状相,同时针状的含Fe相有所减少。图2对这些相进行了EDS能谱分析,所得结果列于表2。从EDS结果可知,浅灰色的相为AlSiCuMg相,而位置1和位置2中较亮的相为AlSiFeMn四元相,这说明部分针状含Fe相随着Mn的添加转变为四元AlSiFeMn相^[16]。

表2 Al-7Si-2Cu-0.6Mg-0.36Mn合金不同位置EDS分析
Tab.2 EDS analysis of the Al-7Si-2Cu-0.6Mg-0.36Mn alloy at different positions
(mass fraction/%)

Position	Al	Si	Cu	Mg	Fe	Mn
1	62.4	26.7	1.4	-	2.8	6.6
2	73.5	9.3	1.8	1.5	4.3	9.7
3	42.5	22.0	8.0	27.3	-	0.2

合金均进行了T6热处理,因此合金基体中存在

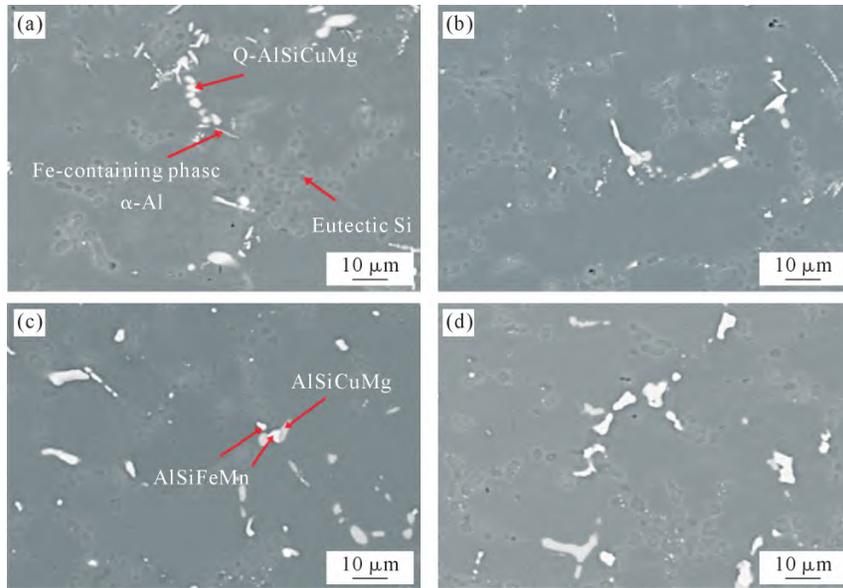


图1 不同 Mn 含量 Al-Si-Cu-Mg 合金的 SEM 图:(a) G0;(b) G1;(c) G2;(d) G3
Fig.1 SEM images of Al-Si-Cu-Mg alloys with different Mn contents: (a) G0; (b) G1; (c) G2; (d) G3

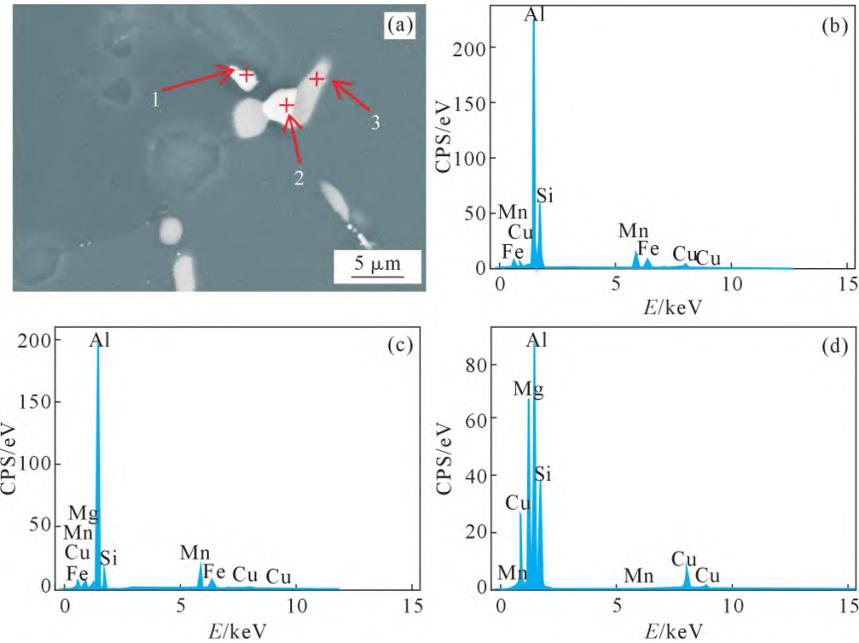


图2 G2 合金的 EDS 图谱:(a) 扫描电镜图像;(b~d) 图 2a 中位置 1~3 的 EDS 结果
Fig.2 EDS spectra of the G2 alloy: (a) SEM image; (b~d) elemental analysis of spots 1 to 3 shown in (a)

大量的纳米析出相。文献[17]指出,Al-Si-Cu-Mg合金中Mn的添加会在基体中形成弥散相,实验时仅在G3合金中发现了少量的含Mn弥散相,结果如图3所示。由图可知,合金基体中存在大量的针状析出相,这些析出相的尺寸为100 nm左右,结合尺寸及形貌可以判断这些析出相为 θ' -Al₂Cu^[18]。同时,基体中存在一些尺寸为200 nm左右的亮色不规则析出相,结合文献[17]可知这些相为含Mn弥散相,在G1和G2合金中没有发现这些弥散相,可能是由于添加的Mn含量较少。这些弥散相的尺寸比纳米相大得多,因此其可能影响耐蚀性^[19]。

2.2 Mn对显微硬度的影响

对合金基体进行显微硬度测试以分析Mn对

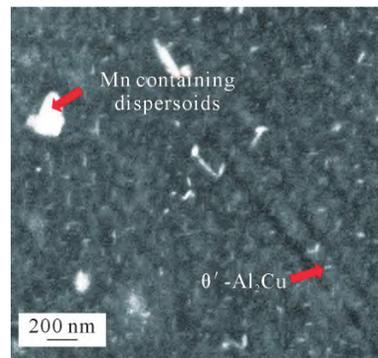


图3 G3 合金的 SEM 微观组织
Fig.3 SEM image of the G3 alloy

合金力学性能的影响,表3给出了不同Mn含量的Al-7Si-2Cu-0.6Mg合金显微硬度。随着Mn含量从

表3 不同Mn含量合金的显微硬度
Tab.3 Microhardness of alloys with different Mn contents

Number	Microhardness(HV)
G0	148.27
G1	148.18
G2	148.44
G3	148.69

0.002 1%提高到0.478%,合金的硬度都在148 HV左右,基本上不会随着Mn含量的增加而改变,由此可知,实验中添加的Mn含量对合金力学性能几乎没有影响。

2.3 Mn对耐蚀性的影响

图4描绘了不同Mn含量的Al-Cu-Mg-Mn合金在3.5%NaCl溶液中的动电位极化曲线。根据图中的曲线拟合出合金的腐蚀电位(E_{corr})和腐蚀电流密度(I_{corr})值列于表4。通常认为,腐蚀电位是在没有外加电流时金属达到一个稳定腐蚀状态测得的电位,腐蚀电流密度是指单位面积金属表面上的腐蚀电流强度。腐蚀电位越高,材料的耐蚀性能越好;当材料的腐蚀电位相差不大时,腐蚀电流越小,材料的耐蚀性能越好。

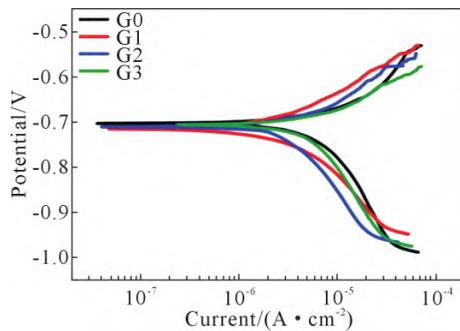


图4 合金在3.5%NaCl溶液中暴露48h后的动态电位极化曲线

Fig.4 Nyquist plots of the Al-Si-Cu-Mg alloy exposed to 3.5 wt. %NaCl solution for 48 h

表4 E_{corr} 和 I_{corr} 的拟合值
Tab.4 E_{corr} and I_{corr} values obtained from dynamic polarization studies

Number	E_{corr}/V	$I_{corr}/(\mu A \cdot cm^{-2})$
G0	-0.702	7.6
G1	-0.714	4.4
G2	-0.710	3.5
G3	-0.705	4.7

对比发现,随着Mn含量从0.002%增加到0.360%,合金的腐蚀电位几乎没有变化,说明Mn的添加对合金的腐蚀倾向性没有明显影响^[20]。而随着Mn含量的提高,合金的 I_{corr} 值从7.6 $\mu A/cm^2$ 降低到3.5 $\mu A/cm^2$,合金的耐蚀性增强。当Mn含量增加到0.478%时,合金的 I_{corr} 值有所提升,但仍低于G0基础合金,说明添加适量的Mn元素可以提高合金的耐蚀性。

从合金在3.5%NaCl溶液中浸泡48h的Nyquist图(图5)中发现,所有合金的Nyquist曲线均显示了高频区和低频区的2个电容环,其中前者代表溶液/膜层界面,而后者代表膜层/基体界面,通常认为高频区电容环的直径越大,合金的表面膜层越稳定,具有更好的耐蚀性^[11]。从图中可以看出,随着合金中Mn含量的增加,高频区电容环直径先增加后减小,Nyquist图所展示的合金耐蚀性变化趋势与动电位极化曲线一致,即Mn含量的增加使合金耐蚀性先提高后下降。

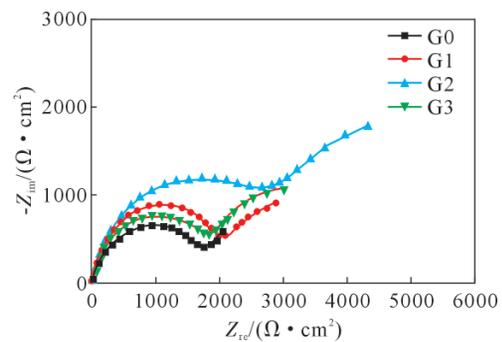


图5 Al-Si-Cu-Mg合金在3.5%NaCl溶液中浸泡48h后的Nyquist图

Fig.5 Nyquist plots of Al-Si-Cu-Mg alloy exposed in 3.5 wt. % NaCl solution for 48 h

为了进一步探究合金的腐蚀行为,使用图6的拟合电路对腐蚀过程进行拟合。等效电路曲线拟合参数结果列于表5。拟合电路所用元件为: R_s (溶液电阻), R_1 和 Q_1 代表膜层的电阻和对应的恒相元件CPE, R_2 和 Q_2 代表电荷转移电阻和对应的恒相元件CPE。所用的恒相元件CPE具有一个可变的参数 n ,当 n 分别为0或1时,CPE分别代表一个纯电阻或纯电容。各合金的 R_s 溶液电阻基本保持一致,说明合金耐蚀性的变化可以排除溶液的干扰。在NaCl溶液中腐蚀48h后, R_1 值会随着Mn含量的增加先增加后降低,表明在Mn含量为0.360%的G2合金上形成的钝化膜比其

表5 等效电路曲线拟合参数
Tab.5 Fitting parameters of the equivalent circuit curve

Alloy	$R_s/(\Omega \cdot cm^2)$	$Q_1/(S \cdot s^n \cdot cm^{-2})$	n_1	$R_1/(\Omega \cdot cm^2)$	$Q_2/(S \cdot s^n \cdot cm^{-2})$	n_2	$R_2/(\Omega \cdot cm^2)$	χ^2
G0	13.77	3.852×10^{-5}	0.865	1 853	1.882×10^{-3}	0.895	1 824	9.84×10^{-4}
G1	13.30	3.337×10^{-5}	0.887	2 153	1.751×10^{-3}	0.918	1 823	1.091×10^{-3}
G2	13.99	3.723×10^{-5}	0.886	2 579	2.039×10^{-3}	0.834	2 476	1.925×10^{-4}
G3	13.74	3.887×10^{-5}	0.877	1 880	1.233×10^{-3}	0.842	2 433	1.277×10^{-3}

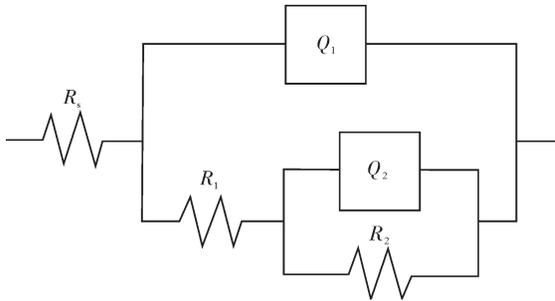


图 6 Al-Si-Cu-Mg 合金模拟实验 EIS 数据的等效电路
Fig.6 Equivalent circuit of EIS data of Al-Si-Cu-Mg alloy in simulation experiment

他合金更稳定。另一方面,通过分析代表电荷转移电阻的 R_2 可以发现,Mn含量达到0.360%时, R_2 的值快速升高,这说明电荷转移过程变慢。由此可以得出,Mn的加入可能通过影响钝化膜而改变其耐蚀性。此外,电荷转移电阻 R_2 值与 R_1 值呈现相同的趋势,说明该合金具有最佳的耐蚀性。

2.4 腐蚀形貌分析

由于G2合金具有最佳的耐蚀性,对G0和G2合金的腐蚀表面和截面SEM图进行对比分析,如图7所示。从图7a和b中可以看出,G0合金表面明显不平整且存在多处较深的裂纹,说明G0合金Al基体的腐蚀更严重。同时,从G0合金的截面图中可以看到,腐蚀裂纹主要是沿着Si相扩展。而在含0.360%Mn的G2合金中(图7c和d),合金的表面更为平整并且没有明显的裂纹,说明该合金的耐蚀性更好,腐蚀仅发生在合金表面附近,并没有深入,总体看来对Al基体的破坏较小。尽管加入Mn后析出的含Mn相是相对于基体的阴极相,但可能由于电势差不大,因此对基体的破坏作用不明显。

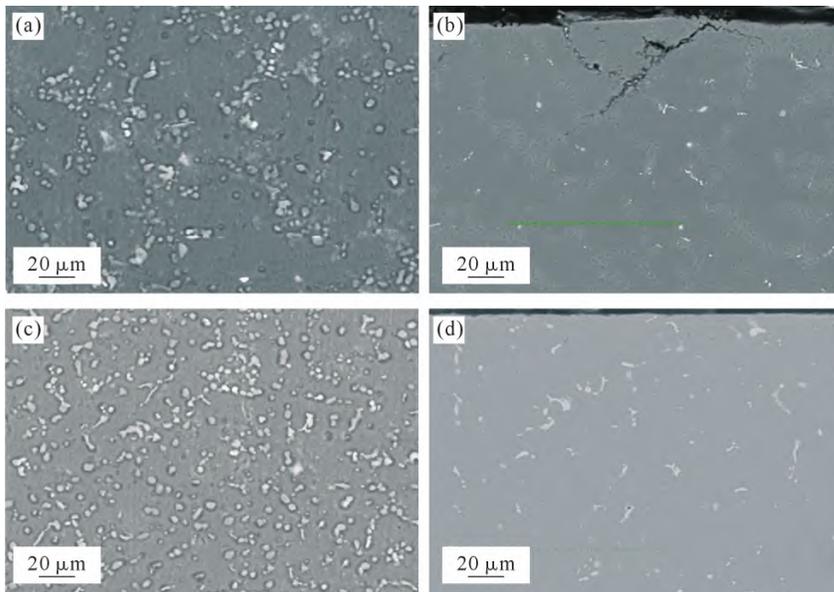


图 7 G0 和 G2 合金的腐蚀表面和截面 SEM 图:(a) G0 表面;(b) G0 截面;(c) G2 表面;(d) G2 截面
Fig.7 SEM images of the corrosion surfaces and cross sections of the G0 and G2 alloys: (a) surface of G0; (b) cross section of G0; (c) surface of G2; (d) cross section of G2

2.5 讨论

当Al-Si-Cu-Mg合金未添加Mn时,腐蚀裂纹围绕Si相产生并扩展,最终在Si聚集区周围发生表面腐蚀和点蚀。从电化学结果可知, R_1 值的增加可以解释为加入Mn元素后促进了钝化膜的形成和稳定,对合金与溶液之间的腐蚀过程产生了一定的阻碍效果,而 R_2 值的增加意味着Mn的加入减弱了Al基体与阴极相之间的电荷转移过程。Danaie等^[21]发现,在浸泡过程中,Mn会从 Al_3Mn_5 金属间化合物中溶解,形成 Mn_3O_4 夹层,这可以提高合金的耐蚀性。结果表明,Mn的加入可以增加含Mn相的数量,并促进Al-Mn化合物中Al和Mn在浸泡过程中的溶解,加厚内部 Mn_3O_4 和外部 Al_2O_3 钝化层,从而提高Mg-5Al合金的耐蚀性^[22]。随着Mn的添加,合金中 I_{cor} 的降低也与细小且均匀分布的颗粒有关。在本实验中,也可能存在着类似机制,即部分溶解的Mn增强了钝化膜的稳定性。此外,锰的标准电极电位略高于Al,部分Mn固溶后, α -Al的腐蚀电位略有增加。因此,添加锰后,析出物与 α -Al基体间的电位差可以减小,从而降低腐蚀速度。

综上所述,Mn的加入一方面固溶在基体中,减弱了基体和阴极相之间的电位差,从而减少点蚀的发生;另一方面,随着腐蚀的进行,溶解的Mn元素可能促进了钝化膜的形成和稳定,从而减弱了基体的腐蚀行为,提高了合金的耐蚀性。但合金中固溶的Mn含量有限,过多Mn的加入并不能提高基体中的固溶量。因此,从动电位极化曲线可以看出,从G0到G1合金,腐蚀电流密度快速下降,G1到G2合金的腐蚀电流密度虽然有所下降但不大。而Mn含量进一步

提高的G3合金存在一定数量的含Mn弥散相,这些相远大于纳米相的尺寸,使其作为阴极促使周围的Al基体溶解。但较少的Mn含量下,这些弥散相的数量较少,因此G3合金中存在较多的弥散相可能是其耐蚀性下降的原因。

3 结论

(1)显微组织观察结果表明,Al-7Si-2Cu-0.6Mg-xMn合金主要由 α -Al、共晶Si、AlSiCuMg相及针状的含Fe相组成。Mn元素的添加促使部分含Fe相形貌发生转变,且在0.478%Mn含量的合金基体中发现少量含Mn弥散相。Mn的添加对合金显微硬度几乎没有影响。

(2)电化学研究结果表明,合金的腐蚀电流密度值随Mn含量的增加先降低后升高,合金耐蚀性先增强后减弱,对耐蚀性改善效果最好的Mn含量为0.360%。拟合结果表明,Mn的添加同时提高了膜层电阻和电荷转移电阻。

(3)腐蚀形貌观察发现,基础合金表面腐蚀明显,且腐蚀裂纹较深,易在Si聚集区周围发生,而含0.360%Mn的合金没有观察到明显的腐蚀裂纹。Mn的添加可能同时通过减弱基体与阴极相间的电荷转移过程,以及提高基体表面钝化膜的稳定性提升了合金的耐蚀性,过量Mn添加产生的含Mn弥散相可能是导致耐蚀性下降的原因。

参考文献:

- [1] YE K F, CAI X L, SUN B, ZHOU L, MA S L, YUE Y C, XU F S, TAN J H, CHEN Y P. Microscopic mechanism of mechanical property improvement of the casted Al-7Si-0.4Mg-0.3Y alloy [J]. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2023, 8(4): 100630.
- [2] 蓝凯,杨弋涛. 铸造铝硅系合金的时效研究与应用进展[J]. *精密成形工程*, 2022, 14(3): 124-132.
LAN K, YANG Y T. Research and application progress on aging of cast Al-Si alloy [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2022, 14(3): 124-132.
- [3] IBRAHIM M F, ABDELAZIZ M H, SAMUEL A M, DOTY H W, SAMUEL F H. Effect of rare earth metals on the mechanical properties and fractography of Al-Si-Based alloys [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2020, 14: 108-124.
- [4] 黄桂桥,杨海洋,刘雯. 海水中铜试样溶出的铜离子对铝合金腐蚀的影响[J]. *装备环境工程*, 2017, 14(2): 1-5.
HUANG G Q, YANG H Y, LIU W. Influences of copper ions dissolved out of copper samples on corrosion of aluminum alloys in seawater [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2017, 14(2): 1-5.
- [5] 王慧婷,史娜,刘章,邢亚龙,赵耀,邵闯江,邢亚哲. 6XXX系铝合金表面腐蚀及其防腐的研究现状[J]. *表面技术*, 2018, 47(1):

- 160-167.
WANG H T, SHI N, LIU Z, XING Y L, ZHAO Y, SHAO C J, XING Y Z. Surface corrosion and corrosion prevention of 6xxx-series aluminium alloy [J]. *Surface Technology*, 2018, 47(1): 160-167.
- [6] FADLI N C, BAMBANG S. Effect of solution heat treatment of aluminum alloy 4032 on the structure and corrosion resistance in 3.5% and 10.5% NaCl solution [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 694: 012043.
- [7] ZHANG J C, DING D Y, XU X L, GAO Y J, CHEN G Z, CHEN W G, YOU X H, HUANG Y W, TANG J S. Effect of Ce addition on the mechanical and electrochemical properties of a lithium battery shell alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 617: 665-669.
- [8] YAN P, ZHANG Z Y, ZHOU C X, XIAO Q, FANG J W, SI H G, WANG W J, YANG Y Q. Enhancement of corrosion resistance of a high Zn-yttrium aluminum alloy [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 817: 152744.
- [9] COLOMBO M, BUZOLIN R H, GARIBOLDI E, VALLANT R, SOMMITSCH C. Characterization of localized corrosion of heat treated Er- and Zr-containing A356 alloys in 3.5 wt% NaCl aqueous solution [J]. *Materials and Corrosion*, 2019, 70(2): 246-258.
- [10] WANG R, WANG D T, NAGAUMI H, WU Z B, ZHANG X Z, LI X Z. Effect of Zn content on corrosion resistance of as-cast Al-6Si-3Cu alloy [J]. *Materials Letters*, 2022, 312: 131658.
- [11] WANG R, WANG D T, NAGAUMI H, ZHANG M H, LI X Z, WU Z B, ZHANG X Z, ZHOU P F, ZHANG B. The novel strategy for enhancing mechanical properties and corrosion resistance via regulating multi-scale microstructure characteristics in Al-Si-Cu-Mg-Zr cast alloy [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 180: 102-117.
- [12] ZHOU P F, WANG R, WANG D T, NAGAUMI H, ZHANG M H, LI X Z, WU Z B, ZHANG X Z, HUA F A, ZHANG B. Mechanical properties and corrosion behavior of trace Cr-containing Al-9Si-1.2Cu-0.5Mg casting alloy [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 5059-5069.
- [13] 陆从相,杨彦,周鹏飞. Mn/Fe对Al-Si-Mg-Fe合金组织和性能的影响[J]. *铸造*, 2021, 70(4): 454-459.
LU C X, YANG Y, ZHOU P F. Effect of Mn/Fe ratio on microstructure and properties of Al-Si-Mg-Fe alloy [J]. *Foundry*, 2021, 70(4): 454-459.
- [14] SJÖLANDER E, SEIFEDDINE S. The heat treatment of Al-Si-Cu-Mg casting alloys [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(10): 1249-1259.
- [15] SHUI Y F, LIU J X, HUANG W Q, ZHAO N, REN P R, ZHAO C Z. Corrosion mechanism and fatigue behavior of aluminum alloy with high silicon content [J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2023, 296: 127211.
- [16] ZHANG X Z, WANG D T, NAGAUMI H, ZHOU Y X, YU W, CHONG X Y, LI X Z, ZHANG H T. Morphology, thermal stability, electronic structure and mechanical properties of α -AlFeMnSi phases with varying Mn/Fe atomic ratios: Experimental studies and DFT calculations [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 901: 163523.
- [17] 李凯,任飞,鲁强,朱凯,李世晨,兰新月,李院斌,吴皇,颜宁,马

- 春德, 杜勇. Al-Mg-Si合金中 α -Al(FeMn)Si弥散相和力学性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(6): 661-668.
- LI K, REN F, LU Q, ZHU K, LI S C, LAN X Y, LI Y B, WU H, YAN N, MA C D, DU Y. Effects of α -Al(FeMn)Si dispersoids on mechanical properties of Al-Mg-Si alloys [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(6): 661-668.
- [18] WANG R, WANG D T, NAGAUMI H, WU Z B, LI X Z, ZHANG H T. Understanding the corrosion behavior by passive film evolution in Zn-containing Al-Si-Cu cast alloy [J]. Corrosion Science, 2022, 205: 110468.
- [19] FANG N, ZOU C M, WEI Z J, WANG H W, ZHANG X J, CHANG T. Effect of Ge and Mg additions on the aging response behavior and mechanical properties of Al-Si-Cu alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 811: 141024.
- [20] BIRBILIS N, BUCHHEIT R G. Electrochemical characteristics of intermetallic phases in aluminum alloys: An experimental survey and discussion [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2005, 152(4): B140.
- [21] DANAIE M, ASMUSSEN R M, JAKUPI P, SHOESMITH D W, BOTTON G A. The cathodic behaviour of Al-Mn precipitates during atmospheric and saline aqueous corrosion of a sand-cast AM50 alloy[J]. Corrosion Science, 2014, 83: 299-309.
- [22] ZHANG Z M, MA Y, XI Z Z, XU C J, LYU Z L. Effect of Mn on microstructure and corrosion properties of extruded Mg-1%Zn alloy[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 182(1): 012048.