

电脉冲孕育及热处理对 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织及耐蚀性能影响

高子懿 赵作福 李纪元 赵宇擎 刘效廷 吴宛婷 刘 亮

(辽宁工业大学材料科学与工程学院, 锦州 121001)

摘要 采用扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)分析、电化学腐蚀、真实色共聚焦显微镜和电子背散射衍射(EBSD)等测试手段,研究了电脉冲孕育对 Al-Zn-Mg-Cu 合金热处理后的组织和耐蚀性能的影响。结果表明,电脉冲孕育处理(500 V、3 Hz、30 s)可有效细化晶粒,改善枝晶偏析,晶格常数由 4.07 nm 增大到 4.11 nm,第二相在基体中的固溶度明显增加。对比未经电脉冲孕育的热处理合金试样,晶内析出相分布更加均匀,合金耐腐蚀性能得到显著提升。当热处理工艺为 450 °C×1 h+480 °C×30 min 固溶和 120 °C×6 h+160 °C×12 h 时效时,合金平均晶粒尺寸由 96.59 μm 减小到 57.70 μm,是未孕育时的 60.36%, η 相面积分数由 9.60% 增加到 21.40%,是未处理的 2.23 倍。合金自腐蚀电流密度由 4.501×10^{-6} A/cm² 降低到 6.417×10^{-7} A/cm²,降低了约 1 个数量级,平均腐蚀深度由 34.991 μm 减小到 20.851 μm,是未处理时的 59.59%。

关键词 Al-Zn-Mg-Cu 合金;电脉冲孕育;热处理;耐蚀性能

中图分类号 TG166.3;TG178;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250102

Effects of Electric Pulse Modification and Heat Treatment on Microstructure and Corrosion Resistance of Al-Zn-Mg-Cu Alloy

GAO Ziyi, ZHAO Zuofu, LI Jiyuan, ZHAO Yuqing, LIU Xiaoting, WU Wanting, LIU Liang

(School of Materials Science and Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001)

Abstract: The effects of electric pulse modification (EPM) on microstructure and corrosion resistance of Al-Zn-Mg-Cu alloy after heat treatment were investigated by means of SEM, EDS, electrochemical corrosion, true color confocal microscopy and EBSD testing methods. The results indicate that EPM (500 V、3 Hz、30 s) can effectively refine the grain and improve dendritic segregation, where the lattice constant is enhanced from 4.07 nm to 4.11 nm, and the solid solubility of the second phase in the matrix is significantly increased. Compared with those without EPM, the distribution of intragranular precipitates is more uniform, and the corrosion resistance is distinctly improved. With 450 °C×1 h+480 °C×30 min solution and 120 °C×6 h+160 °C×12 h aging, the average grain size of the alloy is reduced from 96.59 μm to 57.70 μm, which is 60.36% of that of untreated ones, and the area fraction of η phase is increased from 9.60% to 21.40%, which is 2.23 times that of untreated ones. The self-corrosion current density of the alloy is declined approximately about one order of magnitude from 4.501×10^{-6} A/cm² to 6.417×10^{-7} A/cm², and the average corrosion depth is decreased from 34.991 μm to 20.851 μm, which is 59.59% of that of untreated ones.

Key Words: Al-Zn-Mg-Cu Alloy, Electric Pulse Modification, Heat Treatment, Corrosion Resistance

Al-Zn-Mg-Cu 合金因其低密度、高比强度、高韧性以及优异的耐腐蚀性能,在航空航天等领域得到了广泛应用^[1-3]。在铸造过程中,因铸造成形工艺和合金成分偏析致使合金凝固组织中的晶界处存在大量的 η -MgZn₃ 和 S-Al₂CuMg 等粗大第二相,使得合金力学性能及耐腐蚀性能降低^[4-5]。为了改善 Al-Zn-Mg-Cu

合金组织、提高耐腐蚀性能,研究者通过优化热处理工艺,促进第二相在基体中的固溶和析出相的均匀分布,解决偏析所造成的材料失效问题,进而提高材料的适用范围和服役时间^[6-7]。孙宁等^[8]对 7055 铝合金进行了单级固溶处理,在 475、479 及 482 °C 固溶处理过程中,除部分难溶 S 相、Al₇Cu₂Fe 相残留外,合金中的 T 相、 η

收稿日期:2025-03-05;修订日期:2025-04-25

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51601086);辽宁省自然科学基金资助项目(2022-MS-381);辽宁省教育厅基本科研资助项目(JYTMS20230870);国家级大学生创新创业训练计划资助项目(202410154008)

第一作者: 高子懿,男,2002 年出生,本科生,E-mail:3161494159@qq.com

通信作者: 赵作福,男,1978 年出生,教授级高级实验师,E-mail:clzhaozf@lnut.edu.cn

引用格式: 高子懿,赵作福,李纪元,等. 电脉冲孕育及热处理对 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织及耐蚀性能影响[J]. 特种铸造及有色合金,2026,46(7):1 089-1 095.

GAO Z Y, ZHAO Z F, LI J Y, et al. Effects of electric pulse modification and heat treatment on microstructure and corrosion resistance of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(7): 1 089-1 095.

相发生充分回溶。随固溶温度升高,基体中残留第二相面积分数逐渐减少,由475℃下的0.63%降低到482℃下的0.58%。李彩琼等^[9]采用双级固溶与三级固溶的热处理工艺,研究了固溶工艺对Al-Zn-Mg-Cu合金强度和耐腐蚀性能的影响,发现Al-Zn-Mg-Cu合金通过三级固溶处理(450℃×30 min+470℃×60 min+485℃×30 min)后,高温残留相Al₂CuMg相被有效消除,且与双级固溶处理(450℃×30 min+470℃×60 min)的合金晶粒尺寸和晶界取向角基本相当,且经过三级固溶处理后,合金时效态试样晶间腐蚀最大侵蚀深度由250.78 μm降至124.22 μm,抗拉强度由601 MPa提升至653 MPa。热处理虽可以有效改善析出相形貌、尺寸和分布,提高合金的综合性能,但热处理工艺会造成固溶阶段粗大第二相的形成,以及时效阶段力学性能和抗应力腐蚀性能无法相互兼顾等问题^[10]。因此,如何从冶金源头控制合金的微观组织、解决合金成分偏析,对后续热处理工艺的优化,合金性能的提高具有积极意义^[11-12]。电脉冲孕育处理(EPM)作为一种细化合金显微组织,改善合金成分偏析,提高材料使用性能的技术手段,在生产过程中得到了广泛应用^[13-14]。WANG J S等^[15]将电脉冲孕育处理应用到Al-Si合金熔体中,发现电脉冲能够增加同类原子团簇的数量,改变金属熔体的内部结构,从而细化晶粒。齐锦刚等^[16]对Al-Cu合金熔体进行了电脉冲孕育处理,发现电脉冲可显著改善Al-Cu合金的微观偏析,晶界处低熔点相减少且断续分布,进而其热裂倾向和耐腐蚀性能明显提升。

本研究以Al-Zn-Mg-Cu合金为研究对象,将电脉冲孕育处理与后续的热处理工艺相结合,对电脉冲孕育后的合金进行热处理,调整热处理工艺参数,为改善Al-Zn-Mg-Cu合金凝固组织和耐腐蚀性能提供参考。

1 试验材料与方法

本试验Al-Zn-Mg-Cu合金均采用纯金属熔炼,其

中 $w(\text{Al})=99.75\%$ 、 $w(\text{Zn})=99.85\%$ 、 $w(\text{Mg})=99.85\%$ 、 $w(\text{Cu})=99.75\%$ 。所制备的Al-Zn-Mg-Cu合金的化学成分(质量分数,下同):Al为88.5%、Zn为6.5%、Mg为2.5%、Cu为2.5%。首先将Al、Cu纯金属放入坩埚中,在SG2-12-13型硅碳棒电阻炉中加热到750℃至完全熔化。加入金属Zn块至完全熔化后,用钟罩将铝箔包好的纯金属Mg压入合金熔体中,放入炉中保温10 min后,采用0.5%的C₂Cl₆对合金熔体进行除气、精炼,扒渣后浇注到金属型中,作为原始试样。然后对剩余Al-Zn-Mg-Cu合金熔体进行电脉冲孕育处理(500 V、3 Hz、30 s),并将金属熔体浇注到金属型中制成铸锭。最后,对电脉冲处理前后的铸锭分别进行取样,见图1。利用CMT5305万能试验机对试样进行挤压变形后再进行热处理,热处理具体工艺流程及参数,见图2和表1。

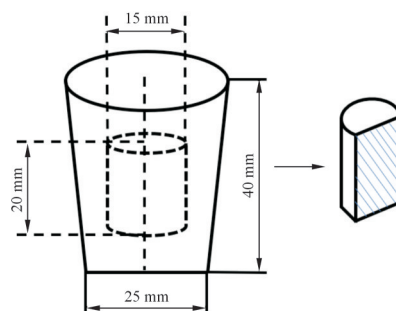


图1 合金取样示意图

Fig.1 Sampling diagram of alloy

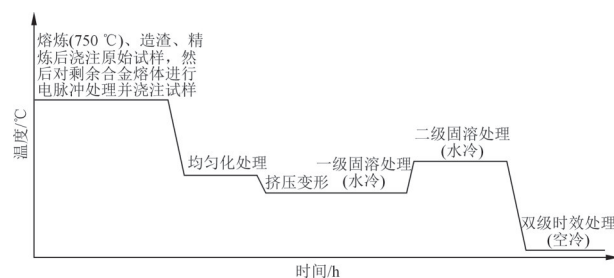


图2 工艺流程示意图

Fig.2 Schematic diagram of process flow chart

表1 热处理工艺参数

Tab.1 Heat treatment processing parameters

试样	电脉冲处理参数	均匀化处理	热挤压变形	一级固溶工艺	二级固溶工艺	双级时效工艺
1	无EPM	—	—	—	—	—
2	500 V、3 Hz、30 s	—	—	—	—	—
3	无EPM	—	—	—	485℃×60 min	—
4	—	—	—	—	485℃×60 min	—
5	—	475℃×12 h	温度为450℃ 变形量为40% 变形速率为0.1 s ⁻¹	450℃×60 min	485℃×30 min	120℃×6 h+160℃×12 h
6	500 V、3 Hz、30 s	—	—	—	480℃×30 min	—
7	—	—	—	—	475℃×30 min	—

将 Al-Zn-Mg-Cu 合金依次经 120~800 目 SiC 砂纸打磨,并采用 EP-06 型电解抛光腐蚀仪进行电解抛光,制备金相试样和物相分析试样。采用 Axio Vert A10 蔡司显微镜进行显微组织观察;利用 Image-Pro Plus 6.0 软件对合金的晶粒尺寸及 η 相面积分数进行测量;采用 Sigma500 扫描电镜对合金试样显微组织的微观偏析进行观察和能谱分析,同时利用此设备进行 EBSD 分析;采用 Channel5 软件对数据进行分析,定义小角度晶界(LAGB)为 $2^\circ\sim 15^\circ$,大于 15° 的为大角度晶界,得到 EBSD 数据;通过 D/AX-2500 X 射线衍射仪分析该合金的物相组成;利用 IVIUMSTAT.XRi 电化学工作站测试该合金的耐腐蚀性能,腐蚀液采用质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液,并采用 3CCD 真实色共聚焦显微镜对电化学腐蚀后的合金试样表面进行腐蚀形貌观察。

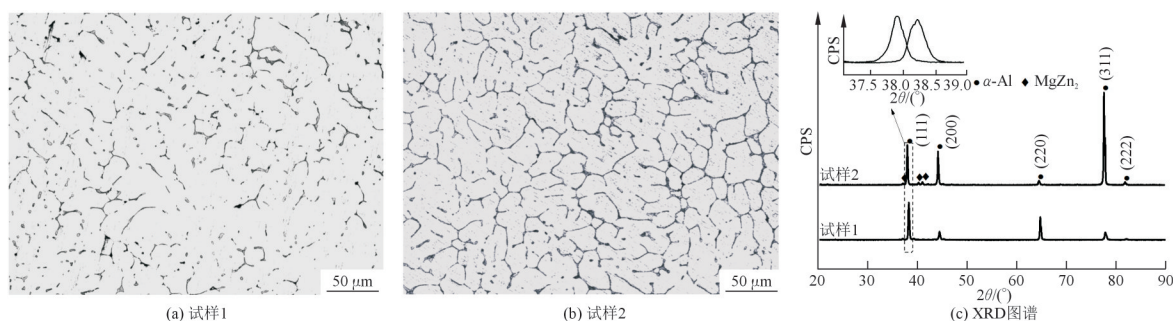


图3 电脉冲孕育前后 Al-Zn-Mg-Cu 合金的显微组织及 XRD 图谱

Fig.3 Microstructure and XRD pattern of Al-Zn-Mg-Cu alloy before and under electrical pulse modification

根据布拉格方程 $2d\sin\theta=\lambda$ 和衍射峰对应的晶面间距 $d=a/\sqrt{h^2+k^2+l^2}$,计算得到 α -Al 固溶体的晶格常数 a :

$$a = \frac{\lambda}{2\sin\theta} \sqrt{h^2 + k^2 + l^2} \quad (1)$$

式中, θ 为衍射峰所对应的角度; λ 为 X 射线的波长, $0.154\,056\text{ nm}$; h, k, l 为晶面指数。

选取 α -Al 基体 (111) 晶面衍射图谱,由式 (1) 计算可以得出,未经电脉冲孕育合金中 α -Al 固溶体的晶格常数为 4.07 nm ,电脉冲孕育后的 α -Al 固溶体的晶格常数为 4.11 nm 。根据电脉冲孕育前后 α -Al 固溶体的晶格常数增大可以确定固溶体中溶质的溶解程度增加。而溶解度的增大,说明电脉冲孕育使得 Zn、Mg、Cu 原子进入 α -Al 晶格中,改变了原来的原子间距,导致 α -Al 晶格发生畸变,因此该合金衍射峰的角度减小。

为进一步观察合金微观偏析情况,对该合金的显微组织进行 SEM 观察及 EDS 能谱分析,见图 4。可以看出, Zn、Mg 及 Cu 元素在晶界处富集,形成针状 η 相,组织粗大,且晶界处分布着网状的非平衡共晶组织。经电脉冲孕育后,微观偏析现象有所改善, η 相和非平衡共晶组织变得细小且分布更加均匀。分析认为,脉

2 试验结果与分析

2.1 电脉冲孕育对 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织的影响

图 3 为电脉冲孕育前后 Al-Zn-Mg-Cu 合金的显微组织及 XRD 图谱。由图 3a 可以看出,未经电脉冲孕育的 Al-Zn-Mg-Cu 合金 (试样 1) 显微组织由粗大且不规则树枝晶组成,且在晶内存在着明显的枝晶偏析,而经电脉冲孕育后 (试样 2),该合金显微组织中的粗大树枝晶向均匀分布的等轴晶转变,枝晶偏析得到了明显改善,见图 3b。经 X 射线衍射测试可以确定,电脉冲孕育前后的 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织均主要由 α -Al 及 η 、 MgZn_2 两相组成,但 α -Al 衍射峰的相对强度和衍射角 2θ 发生了变化,见图 3c。

冲电场的作用,促使该合金熔体中的 Al-Al 原子团簇的外电层发生畸变,降低了 Al-Al 原子团簇与电层外围原子间的位垒,有效促进形核,抑制晶粒的生长速度,导致晶粒细化^[17]。此外,电脉冲孕育为合金凝固过程提供了一个附加的能量来源,增大了原子的振动能,直接导致了原子扩散所需激活能降低,从而促进原子扩散,使晶界处元素含量降低,改善偏析, A、B 两处的能谱分析结果见图 4b 和图 4d。

为了验证微观偏析的改善程度,通过 EBSD 对电脉冲孕育前后的 Al-Zn-Mg-Cu 合金的晶粒取向和小角度晶界比例进行分析,见图 5。在进行 EBSD 检测时,规定凝固方向为 RD 方向,即 $\{110\}$ 晶面为柱状晶的生长方向。晶粒取向的 IPF 图中,蓝色代表 $\{111\}$ 晶面为等轴晶的生长方向,绿色代表 $\{110\}$ 晶面为柱状晶的生长方向,红色代表 $\{100\}$ 晶面,见图 5a 和图 5c。对比图 5a 和图 5c,发现未经电脉冲孕育的合金 (试样 1) $\{110\}$ 晶面占比最大,为 29.75%, $\{111\}$ 晶面占比为 11.80%。经电脉冲孕育后 (试样 2) 该合金 $\{111\}$ 晶面占比最大,为 40.63%, $\{110\}$ 晶面占比有所减少,为 11.80%。可以看出,柱状晶向等轴晶转变,等轴晶数量增多,晶粒尺寸明显减小。此外,IPF 图显示了晶粒

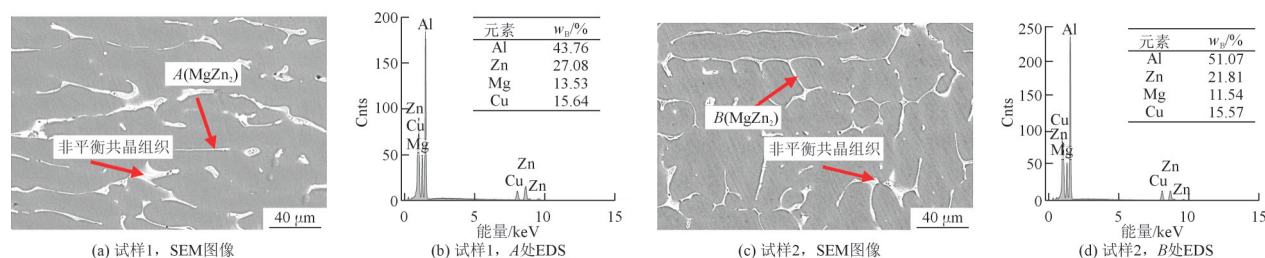


图4 电脉冲孕育前后 Al-Zn-Mg-Cu 合金的 SEM 图像及能谱分析

Fig.4 SEM image and EDS results of Al-Zn-Mg-Cu alloy before and under electrical pulse modification

取向角的分布情况。黑线代表小角度晶界,黄线代表大角度晶界。可见未电脉冲孕育试样小角度晶界比例为 11.2%,经电脉冲孕育后合金的小角度晶界比例为 28.3%,见图 5b 和图 5d。由此可以确定,施加电脉

冲后,合金小角度晶界比例明显提高,而小角度晶界能够减少晶界析出相的数量和尺寸,降低晶界析出相的连续性,进而增强合金的耐腐蚀性能。

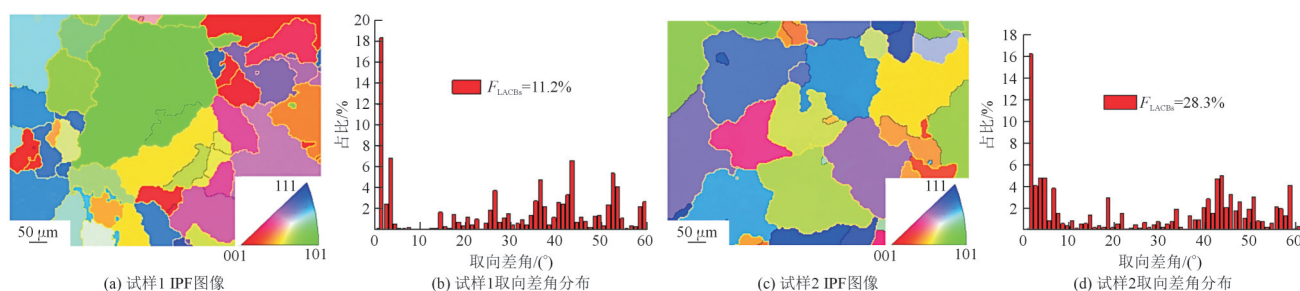


图5 电脉冲孕育前后 Al-Zn-Mg-Cu 合金的 IPF 和取向差角分布

Fig.5 IPF diagram and misorientation angle distribution of Al-Zn-Mg-Cu alloy before and under electrical pulse modification

对比上述结果可知,电脉冲孕育对晶粒有细化作用,且能够增加元素的固溶度,改善微观偏析。为直观分析合金偏析的形成,绘制了合金偏析形成示意图,见图 6。未处理的 Al-Zn-Mg-Cu 合金在凝固过程中,大尺寸 Al-Al 原子团簇在满足过冷条件下,将优先发生形核,在生长过程中,熔体中的 Al 原子向凝固生长界面前沿扩散并生长,形成 α -Al, Mg、Zn、Cu 原子被排出并在凝固界面前沿富集。当凝固继续进行直到达到共晶成分,并过冷到共晶温度后,即在凝固后,Al 原子分布在基体内,由 Mg、Zn、Cu 元素组成的非平衡共晶组织分布在晶界处,合金形成偏析。对 Al-Zn-Mg-Cu 合金熔体施加电脉冲处理,促使 Mg、Zn、Cu 原子进入 Al-Al 晶格点阵中,形成置换固溶体,将导致原来的 Al-Al 晶格点阵发生晶格畸变。畸变的晶格为 Mg、Zn、Cu 原子的沉积提供可能,使得熔体中游离的 Mg、Zn、Cu 原子能够较容易地在晶格畸变处沉积。因此,当 Al-Al 晶格点阵周围有合适的 Mg、Zn 原子时, Mg、Zn 原子便可在畸变处沉积长大。熔体中 Mg、Zn 原子数量远远少于 Al 原子数量,同时由于 Al-Al 原子团簇在凝固初期就消耗了熔体中的 Mg、Zn、Cu 元素,使排到凝固界面前沿的 Mg、Zn、Cu 原子减少,从而减少了晶界处由 Mg、Zn、Cu 元素组成的非平衡共晶组织,使合金偏析得到改善,这解释了图 3 中 XRD 衍射峰及衍射角变化的原因。综

上,电脉冲孕育处理既能使 α -Al 晶核数量增多从而细化组织,还能改善元素偏析。

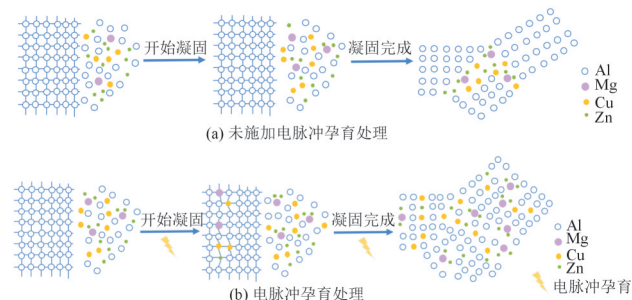


图6 Al-Zn-Mg-Cu 合金的凝固过程中偏析形成示意图

Fig.6 Schematic diagram of segregation formation of Al-Zn-Mg-Cu alloy during solidification process

2.2 热处理对电脉冲孕育后的 Al-Zn-Mg-Cu 合金显微组织影响

图 7 为热处理条件下的 Al-Zn-Mg-Cu 合金(试样 3~试样 7)显微组织, α -Al 的平均晶粒尺寸及 η 相的面积分数图。其中 α -Al 的平均晶粒尺寸及 η 相利用 Image-Pro Plus 6.0 软件进行测量,结果见图 7f。对比图 7a 和图 7b 可以看出,电脉冲孕育的 Al-Zn-Mg-Cu 合金热处理后的显微组织中晶粒变得细小,其平均晶粒尺寸由未孕育时的 95.59 μm 减小至 76.20 μm ,为未孕育时的 79.72%, η 相面积分数由未孕育时的 9.6% 增加

到 17.34%, 提高了 81%。随着热处理参数中二级固溶温度的降低及固溶时间的缩短, 显微组织中 α -Al 的平均晶粒尺寸呈下降趋势, η 相面积分数则呈先增加后减少的趋势, 见图 7f。当二级固溶参数为 $480\text{ }^{\circ}\text{C} \times 30\text{ min}$ 时(试样 6), 该合金显微组织中 α -Al 的平均晶粒尺寸为 $57.70\text{ }\mu\text{m}$, 为原始试样经热处理后的 60.36%, η 相面积分数由 9.6% 增加至 21.4%, 为原始试样经热处理后的 2.23 倍。

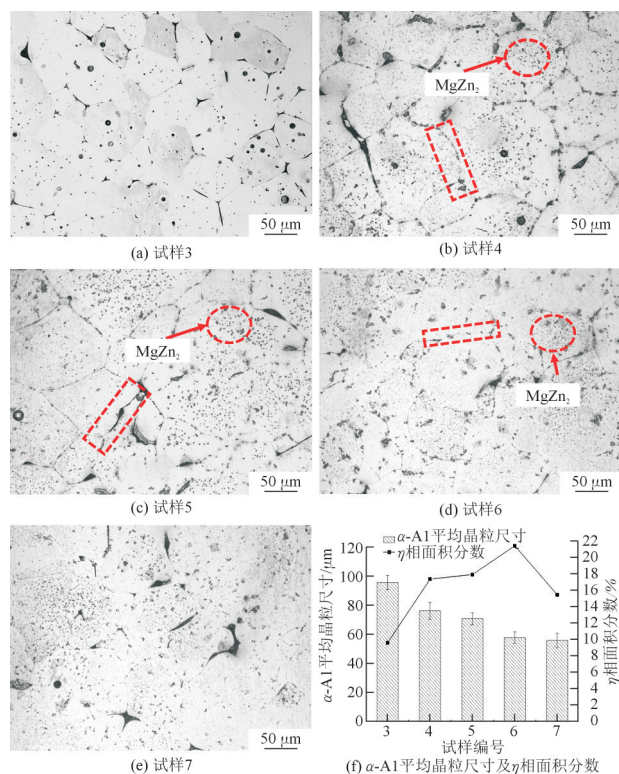


图 7 不同热处理参数下 Al-Zn-Mg-Cu 合金的显微组织

Fig.7 Microstructure of Al-Zn-Mg-Cu alloy under different heat treatment parameters

图 8~图 10 为不同热处理参数下 Al-Zn-Mg-Cu 合金的 SEM 组织及面扫图。从图 8 可以看出, 原始试样经热处理后(试样 3) η 相呈长条状连续分布, 且 Zn、Mg 和 Cu 元素在晶界处偏聚, 仍存在偏析现象。经电脉冲孕育后进行热处理的 Al-Zn-Mg-Cu 合金试样, 其 Zn、Mg 和 Cu 元素固溶到 α -Al 基体中, 各元素均匀分布。对比表 2 中(A~F)的 EDS 点扫结果可以看出, 当二级固溶参数为 $480\text{ }^{\circ}\text{C} \times 30\text{ min}$ 时(试样 6), 显微组织中的各溶质原子回溶程度最为充分, 见图 10。分析认为, 电脉冲孕育后的合金在固溶过程中得到了充分溶解, 促进了该合金成分的均匀化。经电脉冲孕育后, 该合金的显微组织形核质点数量增加, 时效析出过程中更容易形成细小的析出相, 从而改善微观偏析, 提高合金的耐腐蚀性能。由此可以确定, 在保证热处理效果的前提下, 对 Al-Zn-Mg-Cu 合金熔体进行电脉冲孕育

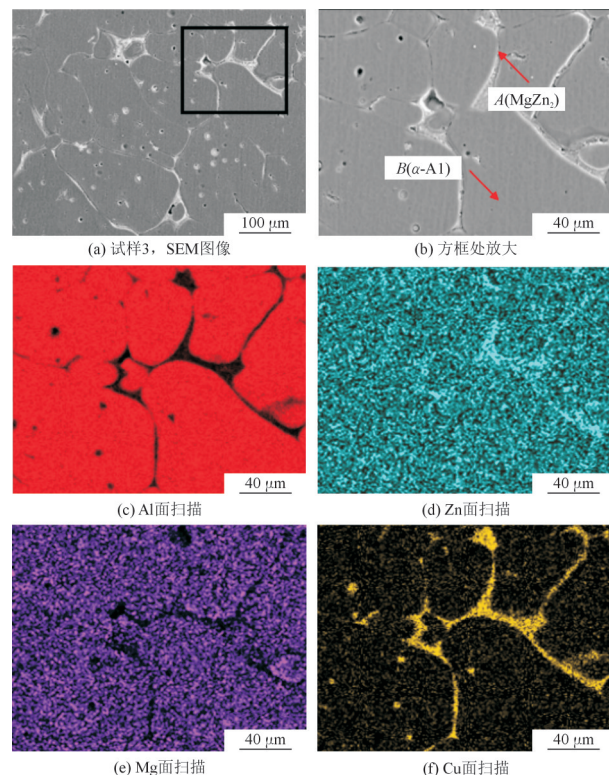


图 8 试样 3 的 SEM 组织及元素分布

Fig.8 SEM microstructure and EDS mapping of specimen 3

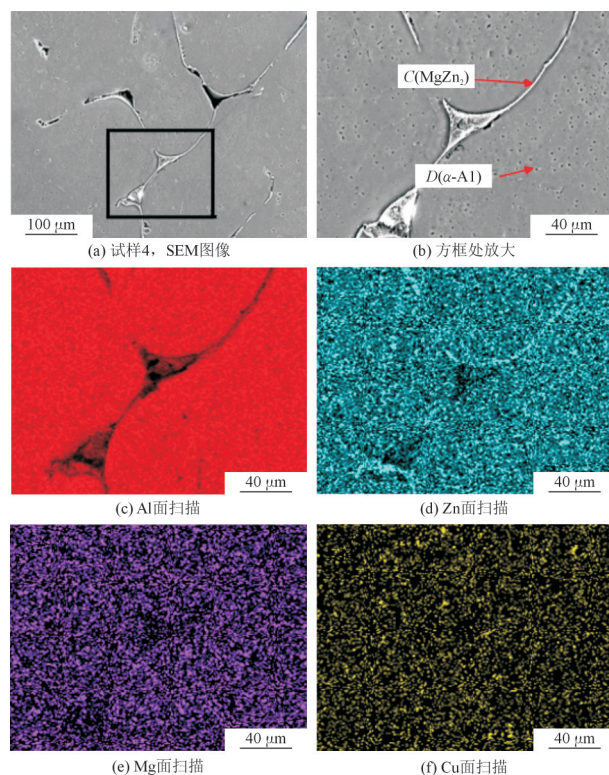


图 9 试样 4 的 SEM 组织及元素分布

Fig.9 SEM microstructure and EDS mapping of specimen 4

处理, 可以实现对该合金后续热处理工艺的优化, 达到降低固溶温度、缩短固溶时间, 提高生产效率的目的。

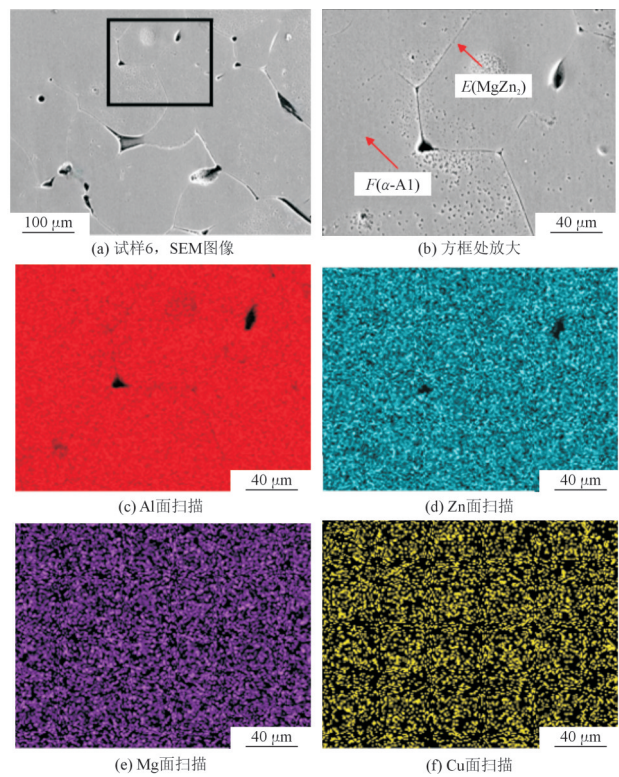


图 10 试样 5 的 SEM 组织及元素分布

Fig.10 SEM microstructure and EDS mapping of specimen 5

表 2 Al-Zn-Mg-Cu 合金的不同区域 EDS 结果

Tab.2 EDS results of Al-Zn-Mg-Cu alloy in different regions %

点	x_B			
	Al	Zn	Mg	Cu
A	88.15	6.79	2.82	2.24
B	89.29	7.18	1.33	2.21
C	83.88	6.55	7.36	2.20
D	88.89	5.41	2.42	3.28
E	90.58	4.72	2.65	2.05
F	87.65	5.93	2.61	3.81

2.3 热处理对电脉冲孕育后 Al-Zn-Mg-Cu 合金耐蚀性能影响

图 11 为不同处理工艺条件下的 Al-Zn-Mg-Cu 合金试样进行电化学腐蚀后的极化曲线及 Nyquist 曲线。由图 11a 可知,阳极极化曲线上存在 4 个特征区:活性溶解区、活化钝化区、稳定钝化区和过钝化区。采用 Corrview Version3.0 拟合软件,通过 Tafel 曲线外推法对所测极化曲线进行拟合,得到合金的自腐蚀电位(E_{corr})及自腐蚀电流密度(J),见表 3。可见电脉冲孕育合金经热处理后的耐蚀性能明显优于未经孕育的合金,经电脉冲孕育合金热处理后的自腐蚀电位和自腐蚀电流密度分别为 $-0.864\ 9\ \text{V}$ 和 $3.328\times 10^{-6}\ \text{A}/\text{cm}^2$ 。结合图 11a 和表 3 数据可以看出,随二级固溶温度降低及时间的缩短,自腐蚀电位先增大后减小,自腐蚀电流密度先降低后增大。其中,二级固溶参数为 $480\ ^\circ\text{C}\times 30\ \text{min}$ 时(试样 6),合金的自腐蚀电位由未孕育的

$-0.976\ 0$ 提高至 $-0.832\ 7\ \text{V}$,自腐蚀电流密度由 $4.501\times 10^{-6}\ \text{A}/\text{cm}^2$ 降低至 $6.417\times 10^{-7}\ \text{A}/\text{cm}^2$,较经热处理后的原始试样降低了约一个数量级,耐腐蚀性最佳。合金表面钝化膜被击穿的难易程度和发生点蚀程度的高低是由容抗弧半径值来表示,半径越大表明合金耐蚀性能越好。由图 11b 的 Nyquist 曲线可以看出,未经电脉冲孕育合金的阻抗弧直径最小,二级固溶处理参数为 $480\ ^\circ\text{C}\times 30\ \text{min}$ (试样 6)合金的阻抗弧直径最大。由此可以确定,电脉冲孕育与热处理工艺相结合,能够有效提高 Al-Zn-Mg-Cu 合金的耐腐蚀性能。

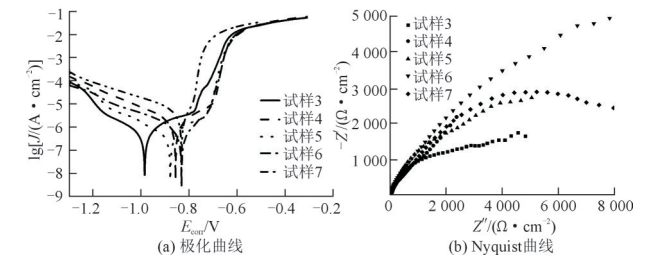


图 11 不同热处理参数下 Al-Zn-Mg-Cu 合金的腐蚀性能

Fig.11 Corrosion properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys under different heat treatment parameters

表 3 不同热处理工艺下合金的电化学性能

Tab.3 Electrochemical corrosion properties of alloys under different heat treatment processes

试样	自腐蚀电位/V	自腐蚀电流密度 $[J/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})]$
3	$-0.976\ 0$	4.501×10^{-6}
4	$-0.864\ 9$	3.328×10^{-6}
5	$-0.896\ 8$	9.043×10^{-7}
6	$-0.832\ 7$	6.417×10^{-7}
7	$-0.847\ 0$	3.266×10^{-6}

电化学腐蚀后 Al-Zn-Mg-Cu 合金表面三维形貌及深度见图 12。经电化学腐蚀后,该合金表面出现了不同程度的点蚀坑,电脉冲孕育合金经热处理后的平均点蚀坑深度均小于未经孕育的合金。经电脉冲孕育合金热处理后的平均点蚀坑深度为 $34.241\ \mu\text{m}$ 。随二级固溶温度降低及固溶时间的缩短,平均腐蚀深度先减小后增大。当二级固溶参数为 $480\ ^\circ\text{C}\times 30\ \text{min}$ 时(试样 6),合金的平均点蚀坑深度由未孕育的 $34.991\ \mu\text{m}$ 减小到 $20.851\ \mu\text{m}$,为原始试样经热处理后的 59.59% ,耐腐蚀性能得到了较大的提高。分析认为,在腐蚀环境下,点蚀是由晶界析出相与无沉淀析出带形成的原电池所引起的。电脉冲孕育的合金经热处理后,点状残留相分布更均匀,减小了点蚀发生的概率,晶界变得断续,抑制了腐蚀的扩展^[18],有效提高了 Al-Zn-Mg-Cu 合金的耐蚀性能,这与上述极化曲线和 Nyquist 曲线相吻合。由此可见,细化合金铸态组织后,由于显微组织结构的变化,能够改善微观偏析,从而提高合金的耐蚀性能。

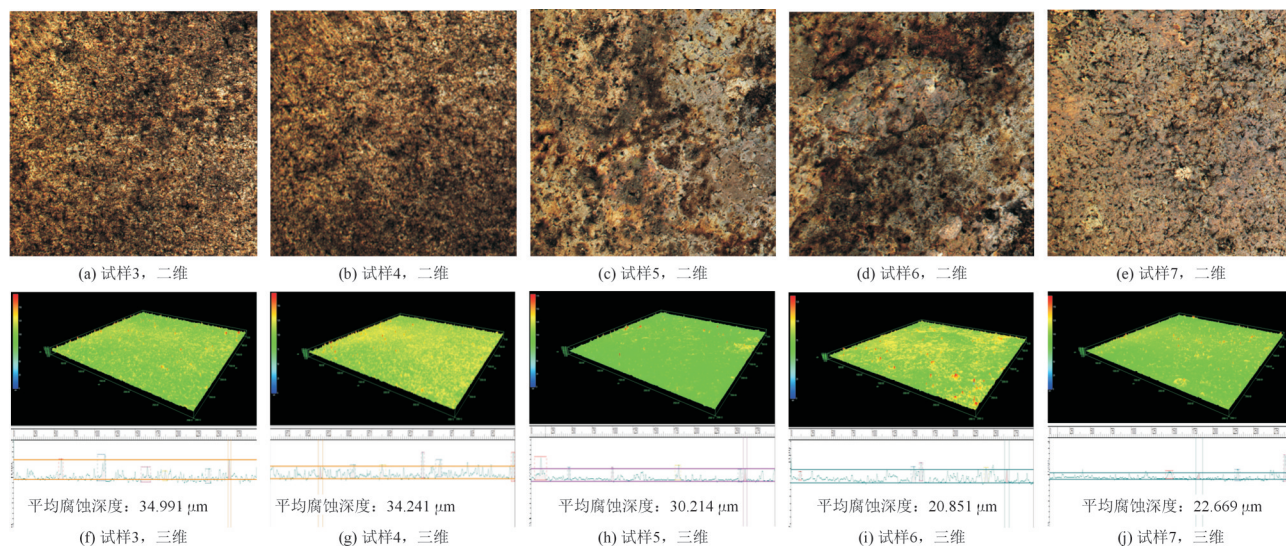


图12 不同热处理工艺下合金的腐蚀形貌

Fig.12 Corrosion morphologies of alloys under different heat treatment processes

3 结 论

(1)对电脉冲孕育后的 Al-Zn-Mg-Cu 合金进行热处理,元素固溶度提高,偏析现象得到明显改善,组织均匀度显著提高。当二级固溶参数为 $480\text{ }^{\circ}\text{C}\times 30\text{ min}$ 时,该合金平均晶粒尺寸由 $96.59\text{ }\mu\text{m}$ 减小到 $57.70\text{ }\mu\text{m}$,为未孕育合金的 60.36%。 η 相面积分数由 9.60% 增加到 21.40%,是未处理时的 2.23 倍。

(2)对电脉冲孕育后的 Al-Zn-Mg-Cu 合金进行热处理后合金的耐腐蚀性能均优于未处理合金。当二级固溶参数为 $480\text{ }^{\circ}\text{C}\times 30\text{ min}$ 时,合金的自腐蚀电流密度为 $6.417\times 10^{-7}\text{ A/cm}^2$,较未孕育时的降低了约 1 个数量级,且平均点蚀坑深度为 $20.851\text{ }\mu\text{m}$,为未孕育时的 59.59%。

(3)电脉冲孕育后的合金经 $450\text{ }^{\circ}\text{C}\times 1\text{ h}+480\text{ }^{\circ}\text{C}\times 30\text{ min}$ 固溶+ $120\text{ }^{\circ}\text{C}\times 6\text{ h}+160\text{ }^{\circ}\text{C}\times 12\text{ h}$ 时效后,性能达到最优。

参 考 文 献

- [1] 范才河,李济,胡泽艺,等. 超高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金的形变热处理研究进展[J]. 热加工工艺, 2025, 46(6): 1-10.
- [2] LI Y, WANG Y, LU B, et al. Effect of Cu content and Zn/Mg ratio on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 19: 3 451-3 460.
- [3] 张博涛,贺永东,赵亿坤,等. 复合添加 Sc、Er、Be 对 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织与性能影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(10): 1 409-1 415.
- [4] JIANG H T, XING H, XU Z H, et al. Effect of Zn content and Sc, Zr addition on microstructure and mechanical properties of Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 947: 169 246.
- [5] 段志英,张芊芊,方舟,等. 添加 Yb 对 Al-Zn-Mg-Cu-Zr-Cr 合金组织性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2023, 28(5): 413-426.
- [6] 覃铭,石登陆,武磊,等. 双级固溶温度对 7059 铝合金组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2023, 52(22): 151-154.
- [7] 姜中涛,汪鑫,周志明,等. 双级固溶工艺对 7050 铝合金组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(3): 102-106.
- [8] 孙宁,王芝东,王经涛,等. 单级固溶对 Al-Zn-Mg-Cu 合金厚板组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(11): 235-240.
- [9] 李彩琼,夏琳,王明刚,等. 固溶工艺对 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织与性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(11): 52-61.
- [10] 张维,朱必武,肖罡,等. 钕含量和固溶工艺对 Al-Zn-Mg-Cu-Sc-Zr 合金组织和性能的影响[J]. 机械工程材料, 2023, 47(12): 6-11, 18.
- [11] 邓红玲,张思雨,钟辉隆,等. 固溶处理对稀土改性 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织及性能的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(3): 32-38.
- [12] 张博涛,贺永东,赵亿坤,等. 复合添加 Sc、Er、Be 对 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织与性能影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(10): 1 409-1 415.
- [13] ZHAO Z F, LI X, YUAN H, et al. Influence of pulse frequency on the wear and corrosion resistance of Al-4.5Mg-3Si alloy[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 32(24): 11 448-11 456.
- [14] 曾麟添,吴晗,周全,等. 低压脉冲磁场对 Al-Mg-Si 合金中 Mg_2Si 相的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(10): 1 400-1 404.
- [15] WANG J S, XUE Q G, CHANG G W, et al. Effect of electric pulse on microstructure of Al-Si alloy in liquid and solid state[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2004, 11(2): 123-126.
- [16] 齐锦刚,王建中,王冰,等. 脉冲电场对 Al-5wt% Cu 合金熔体的孕育形核作用[J]. 金属热处理, 2007, 32(10): 59-61.
- [17] KANG K J, JIANG S D, LI D Y, et al. Effect of electric pulse and rotating magnetic field on solidification microstructure and properties of Al-Zn-Mg-Cu alloy[J]. Materials Characterization, 2023, 200: 112 906.
- [18] 刘敬福,叶建军,周祥春. 双级时效对 Al-7.02Zn-2.6Mg-0.35Mn 合金组织及性能的影响[J]. 功能材料, 2022, 53(1): 1 077-1 084.

(编辑:陈志辉)