

脉冲磁场与细化剂对石墨型铸造 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金组织及性能的影响

张 平 周 全 曾麟添 彭 聪 袁源平

(南昌航空大学航空材料科学与工程学院, 南昌 330063)

摘 要 采用 OM、SEM、TEM、XRD 及电子万能试验机等手段, 对比研究了 Al-5Ti-1B 细化剂、脉冲磁场以及二者复合处理对 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金铸态和 T6 态组织、力学性能及耐蚀性能的影响, 同时考察了复合处理条件下, 不同的脉冲电压和放电频率对合金铸态组织及其压缩性能的影响。结果表明, 脉冲磁场、细化剂及其复合处理后, 合金铸态和 T6 态组织均得到改善, 其中复合处理对合金组织的细化效果最好。复合处理后, 时效态合金中 $T-Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 相增多且分布更均匀。复合处理条件下, Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金在脉冲电压从 0 向 300 V 变化时, 晶粒尺寸与混合相平均体积分数先降后升, 200 V 是转折点; 脉冲频率在 0 到 10 Hz 间变动时, 同样是先减小后增大, 2.5 Hz 为转折点。铸态合金的压缩性能、T6 态合金的拉伸性能和晶粒尺寸及混合相平均体积分数大致对应, 即晶粒尺寸与混合相平均体积分数越低, 合金压缩与拉伸性能越好。复合处理后的 T6 态合金抗拉强度达 243.88 MPa, 伸长率为 7.3%, 相比未处理的 T6 态合金, 抗拉强度提升了 68.9%, 伸长率提升了 20.4%; 合金的自腐蚀电位及自腐蚀电流均降低, 耐腐蚀性能提高。

关键词 脉冲磁场; 复合处理; Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金; 组织; 性能

中图分类号 TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250089

Effects of Pulse Magnetic Field and Refiner on Solidification Structure and Properties of Al-5Mg-3Zn-1Cu Alloy by Graphite Mold Cating

ZHANG Ping, ZHOU Quan, ZENG Lintian, PENG Cong, YUAN Yuanping

(School of Materials Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063)

Abstract: The effects of Al-5Ti-1B refiner, pulsed magnetic field, and composite treatment of refiner and pulsed magnetic field on microstructure, mechanical properties, and corrosion resistance of as-cast and T6-treated Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy were investigated comparatively by OM, SEM, TEM, XRD, and electronic universal testing machine. Meanwhile, the influence laws of different pulse voltages and discharge frequencies on as-cast microstructure and compressive properties of the alloy under composite treatment condition were examined. The results reveal that the microstructures of as-cast and T6-treated alloy are improved after pulsed magnetic field, refiner, and composite treatment, in which the composite treatment exhibits desirable refinement effect, and the amount of $T-Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ phase in as-aged alloy is increased with uniform distribution after composite treatment. Under composite treatment condition, the grain size and average volume fraction of mixed phase of Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy are firstly decreased and then increased as pulse voltage rises from 0 V to 300 V, with 200 V as turning point, which presents the identical trend as pulse frequency varies from 0 Hz to 10 Hz, with 2.5 Hz as turning point. The compressive properties of as-cast alloy and tensile properties of T6-treated alloy correspond roughly to the grain size and average volume fraction of mixed phase, indicating that compressive and tensile properties are enhanced with the reduction of grain size and average volume fraction of mixed phase. The tensile strength and elongation of T6-treated alloy are 243.88 MPa and 7.3% after composite treatment, which are increased by 68.9% and 20.4%, respectively, compared with the untreated ones. Moreover, the self-corrosion potential and self-corrosion current are declined with enhanced corrosion resistance.

Key Words: Pulse Magnetic Field, Composite Treatment, Al-5Mg-3Zn-1Cu Alloy, Microstructure, Properties

收稿日期: 2025-02-27; 修订日期: 2025-04-17

基金项目: 江西省科技厅重点研发资助项目(20212BBE53018); 南昌航空大学研究生创新专项资金资助项目(YC2024-025)

第一作者: 张平, 女, 2001 年出生, 硕士研究生, E-mail: 2380513828@qq.com

通信作者: 周全, 男, 1976 年出生, 教授, E-mail: 824145477@qq.com

引用格式: 张平, 周全, 曾麟添, 等. 脉冲磁场与细化剂对石墨型铸造 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(4): 596-603.

ZHANG P, ZHOU Q, ZENG L T, et al. Effects of pulse magnetic field and refiner on solidification structure and properties of Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy by graphite mold cating[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(4): 596-603.

Al-Mg 系合金作为中高强度铝合金,其具有塑性好、耐腐蚀性良好且焊接性优良的特点,在航空航天、交通运输与军工制造等领域应用前景广阔^[1-3]。但是,Al-Mg 合金强度处于中等水平,对其工业领域应用受到限制。

晶粒细化是提高铸造铝合金强度和塑性的常用方式,包括热力学控制法、化学控制法和物理场控制法等^[4]。脉冲磁场是一种常用的物理场,与一些化学处理方法相比,其具有与合金无接触、操作简单、绿色环保等特点。脉冲磁场对 Al 合金凝固组织及力学性能有明显的改善作用。宫美娜等^[5]研究发现,施加 20~40 Hz 的脉冲磁场,Al-0.8Mg-0.8Si-0.1La 铝合金的 α -Al 晶粒明显细化且分布均匀,力学性能得到明显提升;当占空比为 20%,脉冲磁场频率为 20 Hz 时, α -Al 晶粒最为细小。刘奎^[6]研究发现,当脉冲磁场的频率为 20 Hz、占空比为 20% 时, α -Al 晶粒细化效果最好,达到了约 35.7% 的细化率。宋志起等^[7]发现,在 0~50 Hz 的脉冲磁场作用下,A356 铝合金凝固组织中初生 α -Al 相和共晶 Si 相显著细化,其中频率为 30 Hz 的脉冲磁场细化效果最佳,与未处理相比,试样中初生 α -Al 晶粒平均尺寸下降了 39%,共晶 Si 平均尺寸下降了 60%。BAO X M 等^[8]发现,经过频率为 20 Hz、占空比为 20% 的脉冲磁场处理后,6082 铝合金坯料中 α -Al 晶粒的形貌由粗树枝状变为小球状,与其他工艺相比,其尺寸减小了 18.5%~45.4%。袁秀妹等^[9]发现,随着脉冲磁场放电电压的增加,2024Al 合金中的初生 α -Al 平均晶粒尺寸减小,当放电电压为 250 V 时,初生 α -Al 的平均晶粒尺寸达到最小值。此外,脉冲磁场对 Mg 合金、Zn 合金及 Ti 合金的凝固组织也有显著的晶粒细化和力学性能改善效果^[10-13]。

单一的化学控制法和物理场处理法对铝合金凝固组织细化和力学性能提升均有一定的效果。对于 Al-Ti-B 细化剂,TiB₂ 颗粒因与铝合金的密度差比较大(4.5 g/cm³和 2.7 g/cm³),容易在晶界处团聚,增加裂纹源^[14]。脉冲磁场既可以破碎枝晶,也可以将细化剂颗粒均匀分散在熔体中,但脉冲磁场对细晶类铝合金的作用效果有限。为了克服单一处理手段的固有缺陷,结合两种处理工艺的的优点,本研究对比研究不同工艺对 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金铸态和 T6 态组织和性能的影响,同时探讨在复合处理条件下,不同脉冲电压和放电频率对合金铸态组织及压缩性能的影响,旨在为 Al-Mg 系合金力学性能的进一步提供参考。

1 试验材料及方法

试验材料为 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金,合金元素均以纯度为 99.99% 的纯金属锭形式添加。待 Al 金属锭完全熔化后,依次加入 Mg、Zn、Cu 纯金属锭;熔体精炼后,添加 Al-5Ti-1B 细化剂,并将熔体温度控制在 730 ℃并保温 15 min 后,浇入预热至 400 ℃的石墨型中,接着启动脉冲磁场装置,待合金完全凝固后得到尺寸约为 $\phi 48\text{ mm}\times 80\text{ mm}$ 的合金铸锭。脉冲磁场装置主要由脉冲电源、磁场线圈、耐火砖底座等部分组成,其示意图见图 1。具体试验参数见表 1。

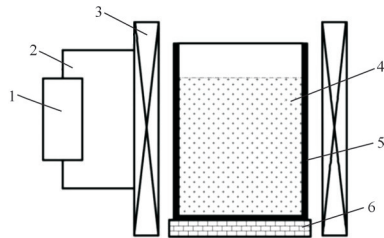


图 1 脉冲磁场装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of pulsed magnetic field device

1. 脉冲电源 2. 导线 3. 线圈 4. 熔体 5. 铸型 6. 耐火砖底座

表 1 试验工艺参数

Tab.1 Process parameters for experiment

试样	电压/V	频率/Hz	浇注温度/℃	w (Al-5Ti-1B)/%
0	0	0	700	0
1	0	0	700	0.4
2	300	5	700	0
3	100	5	700	0.4
4	200	5	700	0.4
5	300	5	700	0.4
6	300	2.5	700	0.4
7	300	10	700	0.4

距铸锭底部约 10 cm、1/2 半径处切取金相试样,经 400~1 500 目砂纸打磨、金刚石研磨膏抛光后,采用 HNO₃、HCl、HF 和 H₂O 体积比为 2.5:1.5:1:95 的凯勒试剂进行腐蚀。采用 XJP-6A 型金相显微镜观察试样的微观组织,利用 S-Viewer 软件测量出合金的平均晶粒尺寸及混合相平均体积分数;采用 FEI Nova Nano SEM450 型扫描电镜观察合金的断口形貌,D8 ADVANCE-A25 型 X 射线衍射仪进行物相分析,Talos F200X 型场发射透射电镜获取 TEM 明场像、SAED 像、HRTEM 像。

在铸锭中部区域处,分别按照 GB/T7314-2017 制取 $\phi 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 的压缩试样和 GB/T228-2002 制备拉伸试样,采用 WH-5000 万能试验材料机进行压缩、拉伸测试。室温拉伸试样尺寸示意图见图 2。

沿铸锭横截面截取 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 2 mm 的试样进行电化学试验。使用 CHI604E 电化学工作站,在质

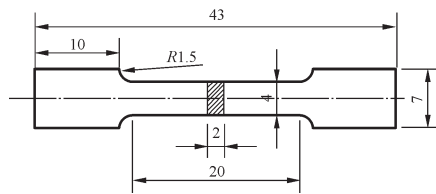


图2 室温拉伸试样的尺寸示意图

Fig.2 Dimension of tensile specimen at room temperature

量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中进行。开路电位测试时间为 30 min,接着以 0.5 mV/s 的扫描速率测定,动电位测定范围为 $-2 \sim 1.5$ V;利用塔菲尔斜率法获取其自腐蚀电位和自腐蚀电流。

2 试验结果与分析

2.1 合金组织

图 3 与图 4 为不同工艺条件下合金典型的 α -Al 相和晶界处混合相的形貌。可以看出,未处理时,合金

的 α -Al 相大部分为树枝状,混合相以连续、粗大的网状形式存在。经过脉冲磁场处理后,合金的 α -Al 相退化为等轴枝晶,混合相细化,且连续网状结构被破坏,转变为断续的杆状组织;经过 Al-5Ti-1B 细化剂处理后,合金的 α -Al 相转变为细小球状或粒状晶粒,混合相显著细化,但仍表现为连续的网状结构;脉冲磁场-细化剂复合处理后,合金中球状或粒状初生晶粒进一步细化,混合相转变为断续、细小的条块状组织,均匀分布在合金基体中。

图 5 和图 6 为复合处理前后合金晶界处混合相的 EDS 分析图。可以看出,未处理时,混合相元素主要为 Al、Cu、Mg、Zn 含量较低,而复合处理后,混合相中 Cu 含量显著减少,Zn、Mg 含量增多,还含有 B。结合 XRD 图谱得出,混合相主要为 $S\text{-Al}_2\text{CuMg}$ 相和 $T\text{-Mg}_{32}(\text{AlZn})_{49}$ 的混合相。

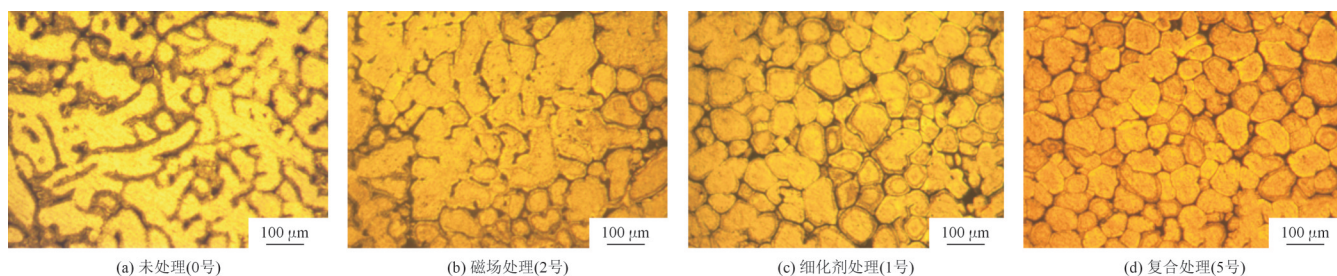

 图3 不同工艺下 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金的 α -Al 相形貌

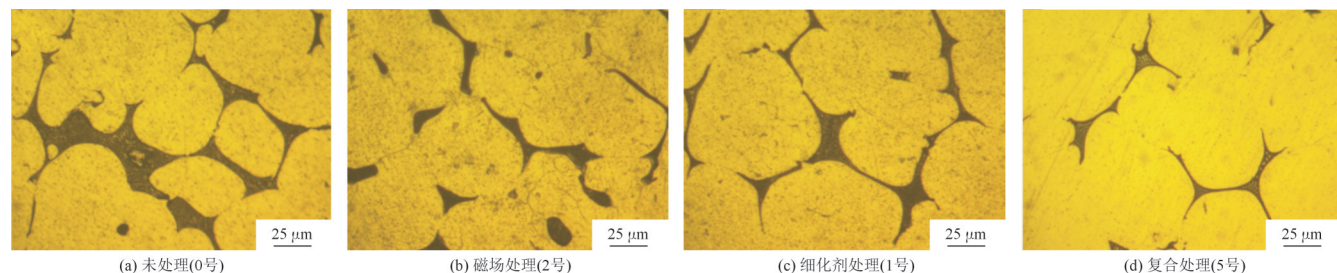
 Fig.3 Morphologies of α -Al phase in Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy under different processes


图4 不同工艺下 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金的晶界处混合相形貌

Fig.4 Morphologies of mixed phases in Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy at grain boundaries under different processes

图 7 为不同工艺下 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金的晶粒尺寸与晶界处混合相平均体积分数。可以看出,经脉冲磁场、细化剂及复合处理后,合金的晶粒尺寸与混合相体积分数均降低,其中复合处理后的合金在这两方面数值均达最小。

图 8 为不同工艺下合金的 X 射线衍射图谱。结合 EDS 图,可以看出,不同工艺条件下,合金均有 α -Al、 Al_2CuMg 和 $T\text{-Mg}_{32}(\text{AlZn})_{49}$ 相,但经细化剂处理及复合处理后,合金中有 TiB_2 相产生。

图 9 与图 10 分别为复合处理时脉冲电压和放电

频率对合金初生晶粒尺寸与晶界处混合相体积分数的影响。可以看出,在脉冲电压处于 $0 \sim 300$ V 区间时,合金的晶粒尺寸与混合相体积分数呈先降低后增加的趋势,且其转折点位于 200 V 处,而当放电频率在 $0 \sim 10$ Hz 范围内变动时,合金的晶粒尺寸与混合相体积分数同样是先减小后增大,其转折点为 2.5 Hz。

图 11 为不同工艺下时效态合金在 $\langle 100 \rangle$ 轴的 TEM 组织及 SAED。可以看出,不同工艺下合金的基体上均分布着近球状颗粒,但复合处理后,合金基体上

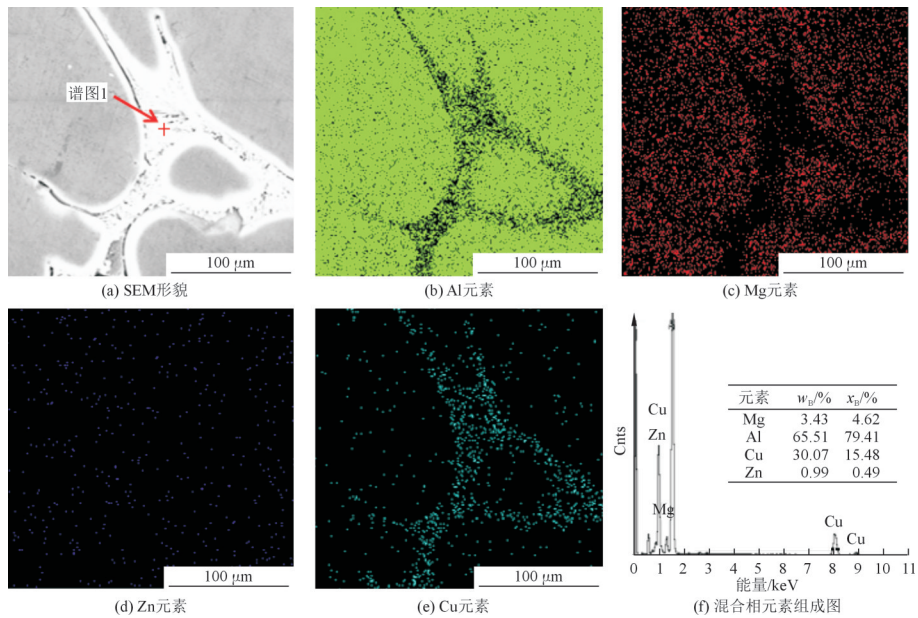


图5 未处理 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金(0号)晶界处混合相EDS面扫描结果

Fig.5 EDS mapping results of mixed phases in untreated Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy at grain boundaries

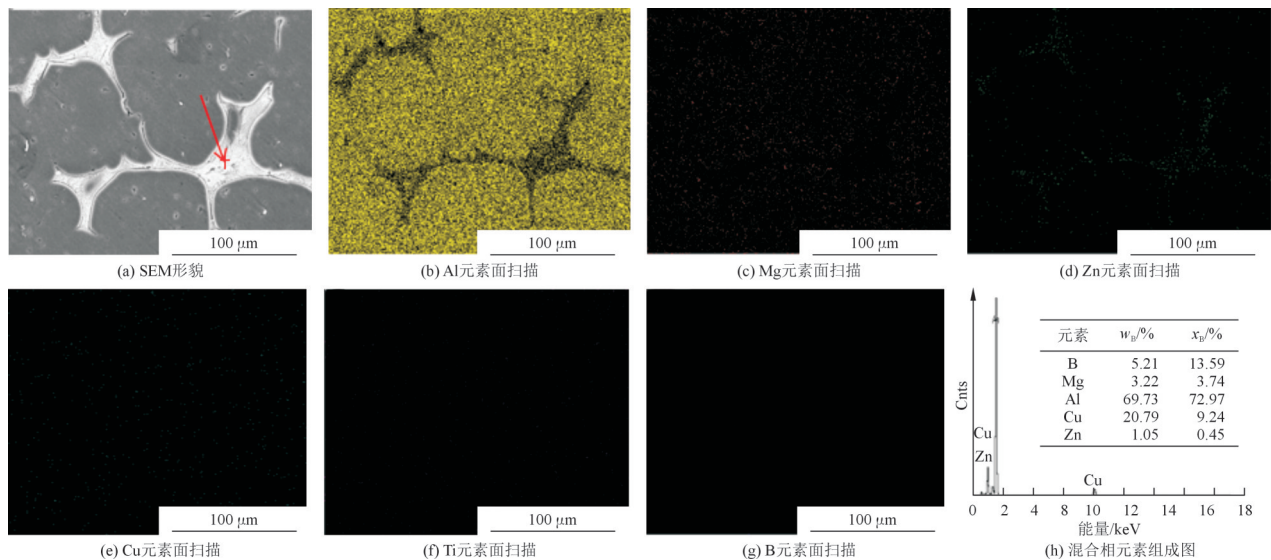


图6 复合处理 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金(4号)晶界处混合相EDS面扫描结果

Fig.6 EDS mapping results of mixed phases in composite-treated Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy at grain boundaries

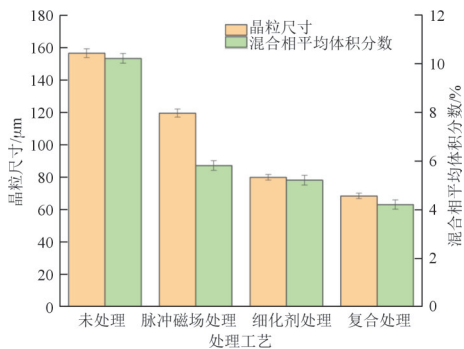


图7 不同工艺下 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金的晶粒尺寸及晶界处混合相平均体积分数

Fig.7 Grain sizes of Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy and average volume fraction of mixed phase at grain boundaries under different processes

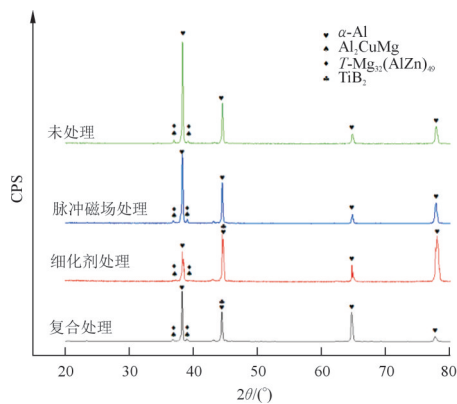


图8 不同工艺下 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金的X射线衍射图谱

Fig.8 X-ray patterns of Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy under different processes

的黑色近球状混合相颗粒明显有所增多。在 $\langle 022 \rangle_{\text{Al}}$ 的2/5和3/5位置都存在衍射斑点,可以确定合金中的近球状颗粒为 $T\text{-Mg}_{32}(\text{Al}, \text{Zn})_{49}$ 相。

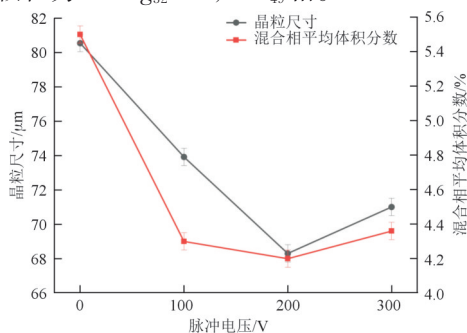


图9 不同脉冲电压下Al-5Mg-3Zn-1Cu合金的晶粒尺寸及晶界处混合相平均体积分数

Fig.9 Grain sizes of Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy and average volume fraction of mixed phase at grain boundaries under different pulsed voltages

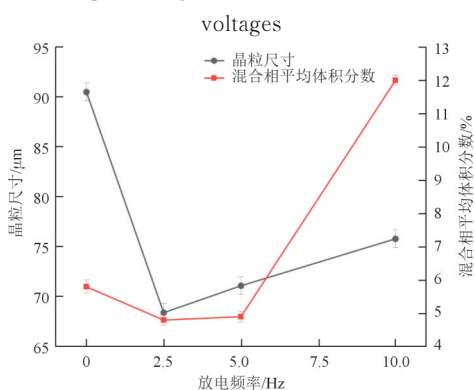


图10 不同放电频率下Al-5Mg-3Zn-1Cu合金的晶粒尺寸及混合相平均体积分数

Fig.10 Grain sizes of Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy and average volume fraction of mixed phase under different discharge frequencies

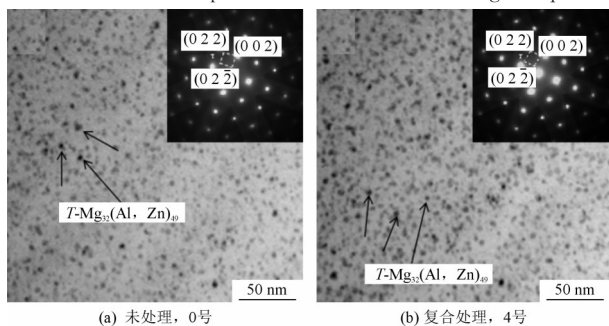


图11 不同工艺条件下时效态合金在 $\langle 100 \rangle$ 轴的TEM组织及SAED

Fig.11 TEM structures and SAED patterns of as-aged alloy along $\langle 100 \rangle$ zone axis under different processes

2.2 合金性能

图12为不同工艺对合金压缩性能的影响。可以看出,经脉冲磁场、细化剂及两者复合处理后,合金的压缩性能均得到提高。其中,复合处理后合金的压缩性能最优,其抗压强度和压缩率分别达到607.1 MPa和38.7%,与未处理合金相比,分别提升了13.6%和8.81%。

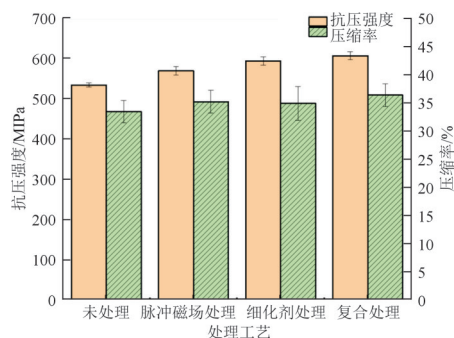


图12 不同工艺下Al-5Mg-3Zn-1Cu合金的压缩性能

Fig.12 Compressive properties of Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy under different processes

图13和图14分别为脉冲电压、放电频率对合金压缩性能的影响。可以看出,当电压从0~300 V变化时,铸态合金的抗压强度和压缩率均先减小后增大,转折点均为200 V;当脉冲电压为200 V时,合金的抗压强度和压缩率分别达到632.5 MPa和36.21%;当放电频率从0~10 Hz变化时,合金的抗压强度和压缩率均先增加后减小,转折点均为2.5 Hz。

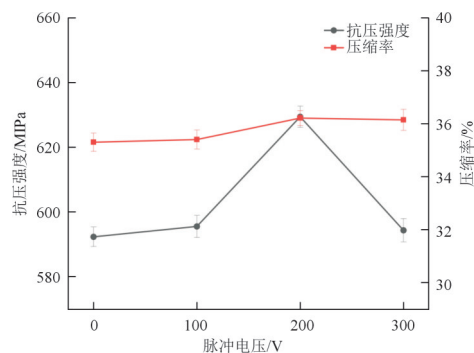


图13 脉冲电压对Al-5Mg-3Zn-1Cu合金压缩性能的影响

Fig.13 Effects of pulse voltage on compressive properties of Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy

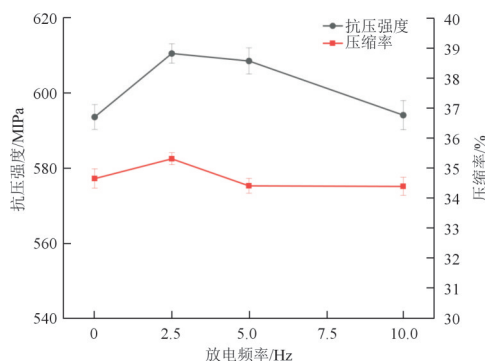


图14 放电频率对Al-5Mg-3Zn-1Cu合金压缩性能的影响

Fig.14 Effects of discharge frequency on compressive properties of Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy

图15和图16分别为不同工艺对时效态合金力学性能的影响以及试样的拉伸应力-应变曲线。可以看出,脉冲磁场、细化剂及其复合处理均有效提高了合金的拉伸性能,其中复合处理提升效果最显著,抗拉强度

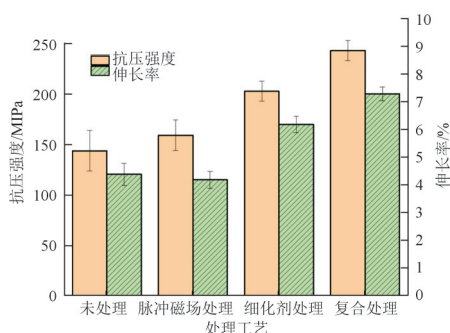


图 15 不同工艺下时效态 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金的力学性能
Fig.15 Mechanical properties of as-aged Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy under different processes

最高可达 243.88 MPa,同时伸长率最大值为 7.3%。相较于未处理的时效态合金,抗拉强度提升幅度为 68.9%,伸长率则提高了 20.4%。

图 17 为不同工艺对时效态合金拉伸断口形貌产生的影响。可以看出,在不同工艺条件下,合金的拉伸断裂方式均呈现为准解理断裂类型。未处理时,拉伸断

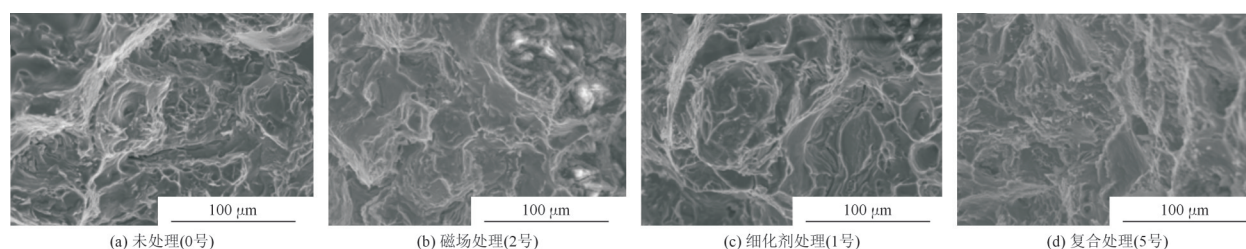


图 17 不同工艺下时效态 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金的拉伸断口形貌

Fig.17 Tensile fracture morphologies of as-aged Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy under different processes

图 18 和表 2 为不同工艺对时效态合金电极化曲线及其参数的影响。可以看出,未处理时,合金的自腐蚀电位最高,脉冲磁场处理、细化剂处理及复合处理后,合金的自腐蚀电位及自腐蚀电流密度(J)均有所降低,其中,单一细化剂处理后合金的自腐蚀电流最低,这说明脉冲磁场、细化剂及复合处理工艺均能提高合金的耐腐蚀性能,其中细化剂处理对合金耐腐蚀性能

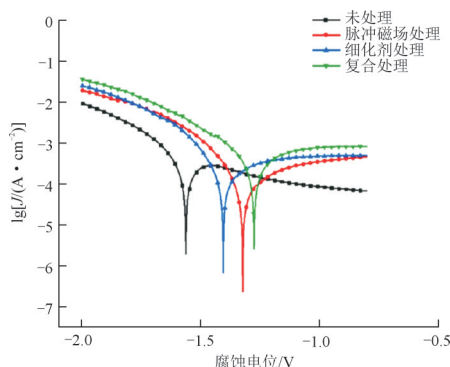


图 18 不同工艺下时效态 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金的极化曲线
Fig.18 Polarization curves of as-aged Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy under different processes

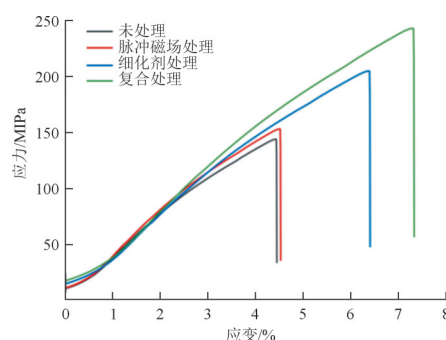


图 16 不同工艺下时效态 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金的拉伸应力-应变图

Fig.16 Tensile stress-strain curves of as-aged Al-5Mg-3Zn-1Cu alloy under different processes

口存在较大解理面以及少量撕裂棱,而经过在脉冲磁场处理后,断口处依旧有大量解理面,不过撕裂棱数量有所增加。当采用细化剂处理后,解理面面积缩减,撕裂棱数量显著增多,而经过复合处理,合金断口处的解理面变小,撕裂棱不但数量增多,且更为细小。

表 2 不同工艺下时效态合金的电极化曲线参数

Tab.2 Parameters of polarization curves of as-aged alloy under different processes

处理工艺	腐蚀电位/V	腐蚀电流密度/($\times 10^{-4}$ A·cm $^{-2}$)
未处理	-1.565 $\pm$ 0.06	3.471 $\pm$ 0.311
脉冲磁场处理	-1.407 $\pm$ 0.06	1.549 $\pm$ 0.276
细化剂处理	-1.325 $\pm$ 0.06	0.887 $\pm$ 0.297
复合处理	-1.276 $\pm$ 0.06	1.548 $\pm$ 0.251

提升效果最好。

2.3 分析与讨论

2.3.1 细化剂和脉冲磁场对合金组织的影响

脉冲磁场能对铝合金熔体起到电磁搅拌、电磁振荡以及产生焦耳热等诸多作用,从影响晶粒生长过程与形核率这两方面来细化合金组织^[14-15]。添加 Al-5Ti-1B 细化剂后,细化剂中的 TiB₂ 粒子具有高熔点并与 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金有良好的润湿性,可以为 α -Al 的形核提供大量的位点,从而增加了形核率,细化了晶粒尺寸^[16]。细化剂和脉冲磁场复合处理 Al-5Mg-3Zn-1Cu 合金能够发挥两者的协同作用,实

现形核与晶体生长的双重优化,进一步改善了合金的组织性能。一方面,Al-5Ti-1B细化剂为Al-5Mg-3Zn-1Cu合金提供了充足的形核点,增加了形核率,为脉冲磁场下合金的组织细化奠定了基础;另一方面,脉冲磁场增强了Al-5Ti-1B细化剂的形核效果,其产生的强制对流可以将Al-5Ti-1B细化剂颗粒分散在熔体中,增加细化剂与熔体的接触面积,进一步提高Al-5Ti-1B细化剂的形核效率^[17]。此外,脉冲磁场通过电磁搅拌、电磁振荡以及产生焦耳热等诸多作用,破碎了枝晶,提高了形核率,进一步改善了合金组织的细化效果。

复合处理条件下,当脉冲电压在0~200 V范围内或脉冲频率在0~2.5 Hz范围内,随着脉冲电压或脉冲频率增加,脉冲磁场对熔体做功逐渐增加,电磁搅拌和电磁振荡作用、焦耳热效应逐渐增强,同时脉冲磁场对细化剂的分散作用增强,使得形核率逐渐提高,因此,Al-5Mg-3Zn-1Cu合金晶粒逐渐细化。但当脉冲电压超过200 V或脉冲频率超过2.5 Hz时,虽然洛伦兹力进一步加强,熔体受到的电磁搅拌及电磁振动效应更剧烈,分散作用更强,但同时脉冲磁场释放出大量焦耳热促使晶粒长大,电磁搅拌、电磁振动及对细化剂分散效应对合金晶粒的细化作用小于焦耳热促进晶粒长大效应,故合金晶粒粗化。

固溶处理时,合金中大量混合相固溶到基体中形成过饱和固溶体;时效处理时,过饱和固溶体中析出球状 $T-Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相。由于复合处理合金的晶粒、混合相更细小,同时混合相体积分数变少,固溶处理时,形成的过饱和度更大,而时效处理时,与未处理合金相比,基体中析出的 $T-Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相更多。

2.3.2 细化剂和脉冲磁场对合金性能的影响

Al-5Mg-3Zn-1Cu合金的力学性能与晶粒尺寸以及晶界处混合相密切相关。通常而言,合金若具备更小的晶粒尺寸、更小且分布更均匀的混合相,其综合力学性能更佳,并且较小的晶粒尺寸有助于促使混合相分布更为均匀。当混合相以细小、弥散且均匀地分布在晶界处时,可有效强化基体,提高合金的力学性能,此时混合相平均体积分数越高,合金的力学性能越高,但当混合相以连续网状或条块状分布于基体中,混合相的平均体积分数越高,合金的力学性能越差^[18]。

在不同工艺的处理下,铸态合金的晶粒、混合相均有所细化,混合相体积分数均有所下降,所以合金的力学性能都有所提高。由于复合处理后,合金的晶粒尺寸及混合相尺寸最小,且混合相体积分数最小,

因此复合处理合金的力学性能最高。对于T6态合金,经过复合处理后,合金的晶粒显著细化, $T-Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相呈细小球状并且显著增多,因此其抗拉性能显著提高。复合处理条件下,随着脉冲电压以及放电频率的增加,铸态合金的晶粒尺寸和混合相的平均体积分数均先减小后增大,所以合金的抗压性能先升高后下降。

在晶间腐蚀时,容易沿着大角度晶界进行腐蚀,而晶粒细化后,晶界数量增多,晶界处的原子排列不规则,存在较多缺陷和能量,这些因素使得晶界成为腐蚀过程中物质传输的阻碍,增加了腐蚀介质扩散的难度,从而降低了腐蚀速率,因此,不同处理工艺均能提高T6态合金的耐腐蚀性能。复合处理合金的晶界处混合相均匀分布,容易为晶界腐蚀提供扩展通道,故对耐腐蚀性能提升效果小于单一细化剂处理合金。

3 结 论

(1)脉冲磁场、细化剂及其复合处理后,Al-5Mg-3Zn-1Cu合金在铸态的组织均得到改善,其中复合处理对合金组织的细化效果最好。复合处理后,时效态合金 $T-Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ 相增多且分布更均匀。

(2)复合处理条件下,在脉冲电压由0增加到300 V时,Al-5Mg-3Zn-1Cu合金的晶粒尺寸与混合相平均体积分数随电压升高呈先降后升态势,200 V为转折点;脉冲频率从0增至10 Hz时,该合金晶粒尺寸和混合相平均体积分数也先减后增,转折点是2.5 Hz。

(3)铸态合金压缩性能、T6态合金拉伸性能与晶粒尺寸及混合相平均体积分数基本匹配,即晶粒尺寸与混合相平均体积分数越小,合金的抗压和拉伸性能越好。

(4)经复合处理后,T6态合金的抗拉强度达243.88 MPa,伸长率为7.3%,相较于未处理的T6态合金,其抗拉强度提升幅度为68.9%,伸长率提升20.4%,其自腐蚀电位及自腐蚀电流均降低,耐腐蚀性能提高。

参 考 文 献

- [1] 赵飞,黄文森. Al-Mg系合金中合金化元素作用及其对力学性能的影响[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2024, 42(1): 1-11, 18, 134.
- [2] ZHENG G Y, LUO X, HUANG B, et al. Distributions of grains and precipitates in gradient lamellae Al-Zn-Mg-Cu alloy by ultrasonic surface rolling processing[J]. Materials Science and Engineering, 2021, A825: 141 911.
- [3] XU W, ZHANG B, LI X Y, et al. Suppressing atomic diffusion with the Schwarz crystal structure in supersaturated Al-Mg alloys

- [J].Science, 2021, 373(6 555): 683-687.
- [4] 王晓彤. 细化剂与旋转磁场复合处理对铝合金显微组织及力学性能的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2023.
- [5] 宫美娜, 贺晨, 杨帆. 脉冲磁场对 Al-0.8Mg-0.8Si-0.1La 铝合金凝固组织和力学性能的影响[J]. 中国稀土学报, 2025, 43(6): 1 263-1 270.
- [6] 刘奎. 脉冲磁场对 Al-Mg-Si-La 铝合金凝固组织的影响[D]. 内蒙古包头: 内蒙古科技大学, 2023.
- [7] 宋志起, 赵旭东, 王军, 等. 脉冲磁场孕育处理下 A356 铝合金凝固组织的演变规律[J]. 材料导报, 2024, 38(13): 196-202.
- [8] BAO X M, YONG L, LIU Y Z, et al. Microstructure evolution in a 6082 alloy under pulsed magnetic field melt treatment[J]. Engineering Proceedings, 2023, 43:1-30.
- [9] 袁秀妹, 左志立, 王图宏, 等. 低压脉冲磁场对 2024 铝合金凝固组织的细化[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(12): 1 168-1 171.
- [10] 刘武平, 陈乐平, 周全, 等. 脉冲磁场对 Mg-4Y-2.5Nd-0.5Gd-0.5Zr 合金凝固组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(8): 1 137-1 143.
- [11] 刘厚清, 彭聪, 袁源平, 等. 脉冲磁场对 Zn-3Cu 合金凝固组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2024, 45(2): 93-101.
- [12] 陈梦浩, 王哲峰, 韩劲, 等. 脉冲磁场对 TC4 钛合金表面硬度及微观组织的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(6): 41-46.
- [13] 陈志堂, 周全, 谢东原, 等. 脉冲磁场对石墨型铸造 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(6): 814-818.
- [14] 李亚龙, 刘志伟, 董志武, 等. TiB₂ 颗粒增强 A356 复合材料的组织及力学性能研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(10): 1 326-1 332.
- [15] 张磊, 刘栩瑞, 黄浩, 等. 脉冲磁场对镁铜合金组织、力学性能及生物腐蚀行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(11): 2 540-2 548.
- [16] ZHANG L L, JIANG H X, HE J, et al. Kinetic behaviour of TiB particles in Al melt and their effect on grain refinement of aluminium alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(8): 2 035-2 044.
- [17] 李鹏, 周全, 陈炯, 等. Zr 和脉冲磁场对 Mg-Y-Zn-Ca 合金组织及压缩性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(4): 431-435.
- [18] 黄金角, 陈乐平, 周全. Sr 对 AZ91 镁合金凝固组织和力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2016, 45(20): 104-107.

(编辑: 栗万仲)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊, 是对国内外公开发行的中文核心期刊, 中国科技论文统计与分析用刊, INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊, 并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验, 并报道各相关学科和交叉学科, 如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊接、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和最新技术信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告, 业务范围: 铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊, 标准(大)16 开, 邮发代号 38-109。邮发订价每期 20 元, 全年 240 元。全国各地邮局均可订阅, 也可直接向本刊编辑部邮购, 本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址: 武汉市江岸区建设大道融玺 1001 大厦 10 楼

邮编: 430019

电话: 027-85358206, 85486024, 85358127

投稿网址: www.special-cast.com

邮箱: tzzz@special-cast.com

