

微合金化元素 La 对 Al-0.6Mg-0.6Si 合金组织及性能的影响

卢 明¹ 叶中飞¹ 郑秋菊² 江鸿翔² 赵九洲² 何 杰² 张丽丽²
(1.国网河南省电力公司电力科学研究院; 2.中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心)

摘 要 研究了微合金化元素 La 对 Al-0.6Mg-0.6Si 合金组织及性能的影响。结果表明,稀土元素 La 的添加能够同时提高合金的强度和电导率;微量 La 通过减小晶粒尺寸和促进(Mg,Si)相的析出来提高 Al-0.6Mg-0.6Si 合金的强度,通过降低 Al 基体中 Mg 和 Si 元素的含量来提高合金的导电性,为制备具有优良力学性能和导电性能的 Al-0.6Mg-0.6Si 合金提供参考。

关键词 稀土;铝合金;显微组织;力学性能;导电性能

中图分类号 TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.12.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Effects of Micro-alloying Element La on Microstructures and Properties of Al-0.6Mg-0.6Si Alloy

Lu Ming¹, Ye Zhongfei¹, Zheng Qiuju², Jiang Hongxiang², Zhao Jiuzhou², He Jie², Zhang Lili²
(1.Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company; 2.Shi-changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences)

Abstract: The effects of micro-alloying element La on the microstructures and properties of Al-Mg-Si alloy were investigated. The results indicate that the addition of trace rare earth element La can simultaneously improve the strength and conductivity of the alloy. Trace La improve the strength of Al-Mg-Si alloy by reducing the grain size and promoting the precipitation of(Mg, Si) phase, and improve the conductivity by reducing the content of Mg and Si in Al matrix. It presents a reference for the preparation of Al-Mg-Si alloy with excellent mechanical and electrical properties.

Key Words: Rare Earth, Aluminum Alloys, Microstructure, Tensile Properties, Electrical Properties

铝及其合金由于具有优良的导电性、良好的成形性和高的比强度,在电力工业中得到了广泛应用^[1~5]。对于铝合金导线而言,强度和电导率是两个至关重要的性能^[3,4]。以往研究表明,合金化可以提高铝合金的强度,但合金的导电性能对基体中的溶质原子非常敏感,合金化通常会增强电子散射,从而导致材料导电性显著降低。如在铝合金中添加 Mg 和 Si 来增加合金强度,但当 Mg 和 Si 固溶在铝基体之中后会极大的增强电子散射,致使 Al-Mg-Si 合金的电导率明显低于纯铝的电导率(Al-Mg-Si 合金的电导率通常为 30.45~33.35 MS/m,而高纯铝的电导率约为 37.70 MS/m)^[3]。

为了提高铝合金的强度和电导率,研究者做了大量的工作^[6~9]。POZDNIIAKOV A V 等^[10]发现,通过适当添加 Zr 可提高 Al-Er-Y 合金的强度。ZHANG J Y 等^[11]研究了退火处理对 Al-Mg-Si 合金力学性能和电

导率的影响,结果表明,退火处理能够提高 Al-Mg-Si 合金的电导率,但同时会降低其屈服强度。KARABAY S^[6]发现向 6201 铝合金中添加 B 后对其进行一定的人工时效处理可以同时提升其强度和导电性能。

稀土元素常被用于改善合金的凝固组织及性能^[11,12]。近年来,利用稀土元素来调控铝合金的组织与性能得到了广泛关注。然而,以往研究结果也会不一致。JIANG W M 等^[13]报道加入 0.2% 的混合稀土能够增加 A357 合金的抗拉强度,但 DING W W 等^[14]发现稀土 Y 的加入降低了 Al-Cu-Mg-Ag 合金的抗拉强度。LIAO H C 等^[15]发现稀土 Ce 的加入能降低 Fe、Si 在基体中的固溶度,从而提高铝合金的导电性,而 MEDVEDEV A E 等^[16]发现向铝合金中加入稀土 Ce 和 La 后会部分固溶于基体中,从而降低其导电性。这些结果表明,稀土对铝合金组织及性能的影响还有待进

收稿日期:2021-05-17;修改稿收到日期:2021-07-13
基金项目:国家电网有限公司总部科技资助项目(5500-201924129A-0-0-00)
第一作者简介:卢明,男,1975 年出生,教授级高工,郑州(450052),E-mail:361776581@qq.com
通信作者:江鸿翔,男,1988 年出生,副研究员,沈阳(110016),E-mail:hxjiang@imr.ac.cn
引用格式:卢明,叶中飞,郑秋菊,等.微合金化元素 La 对 Al-0.6Mg-0.6Si 合金组织及性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(12):1 494-1 499.
LU M, YE Z F, ZHENG Q J, et al. Effects of micro-alloying element La on microstructures and properties of Al-0.6Mg-0.6Si alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(12):1 494-1 499.

一步研究。

本课题研究了微量稀土元素 La 对 Al-Mg-Si 合金显微组织、力学性能和导电性能的影响,并阐明了影响机理。提出了通过添加元素 La 来提高 Al-Mg-Si 合金强度和导电性的措施,为制备具有优良力学性能和导电性能的 Al-Mg-Si 合金提供参考。

1 试验材料及方法

以纯铝(99.7%,质量分数,下同)、Al-12Si、Al-12La 和 Mg(99.9%)为原料,配制不同 La 含量的 Al-0.6Mg-0.6Si 合金。具体试验过程如下:将纯铝和 Al-12Si 中间合金放入石墨粘土坩埚内,利用电阻炉加热熔化并升温至1 023 K,搅拌并保温 30 min 以确保熔体充分混合;降温至 973 K,将 Mg 用铝箔包裹后加入熔体中并保温 15 min;将熔体升温至 1 023 K,加入精炼剂对熔体除气除渣;以 Al-12La 中间合金的形式向熔体中加入不同量的稀土 La,保温 10 min,在保温过程中进行搅拌;随后降温至 993 K,将熔体浇注到预热至 423 K 的金属型中,获得 $\phi 20\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 的铸锭;将合金铸锭在 793 K 下保温 120 min 后进行淬火处理;用轧机将淬火处理后的试样轧至 4 mm 厚;最后,对轧制后的试样进行时效处理,时效温度和时间分别为 448 K 和 120 min。

将获得的试样进行研磨、抛光,制备金相试样。利用 2.5%(体积分数)的 HBF_4 水溶液进行阳极覆膜处理,利用光学显微镜(OM,Zeiss Axio Observer Z1)、扫描电镜(SEM,Zeiss Supra 55)和电子背散射衍射(EBSD,Zeiss Merlin Compact)观察合金的显微组织。采用 SISC IAS V8.0 定量金相分析软件统计平均晶粒尺寸。采用 XRD(Rigaku D/max 2500)确定合金试样的物相。在 Ar 气保护下利用差热分析仪(DTA,Setaram Setsys Evolution 18)研究合金的凝固行为,首先将约 15 mg 的试样以 5 K/min 的升温速率加热到 993 K,保温 10 min,随后以 5 K/min 的降温速率冷却至室温。根据 GB/T228.1-2010 标准加工拉伸试样,室温拉伸试验在 Z150 试验机上进行,拉伸速率为 1 mm/min。采用 D60K 型数字金属材料电导率测量仪测量试样的电导率。

2 试验结果与方法

2.1 微量 La 对合金组织的影响

图 1 和图 2 分别为不同 La 含量的 Al-0.6Mg-0.6Si 合金铸锭的 OM 图和 Al 的平均晶粒尺寸。可以看出,添加微量 La 可以显著细化 $\alpha\text{-Al}$ 晶粒,随着 La 含量增

加,细化效果进一步增强。当 La 含量超过 0.08% 后,平均晶粒尺寸基本保持不变,表明添加 0.08% 的 La 即能实现很好的晶粒细化效果。图 3 为 Al-0.6Mg-0.6Si 合金和 Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La 合金轧制变形后的 EBSD 形貌。可以看出,对于轧制变形后的试样,未添加 La 的合金晶粒尺寸达到了 μm 级,通过稀土 La 微合金化后,其晶粒尺寸降低至几百 nm,即稀土元素 La 的添加能显著降低变形试样的晶粒尺寸。

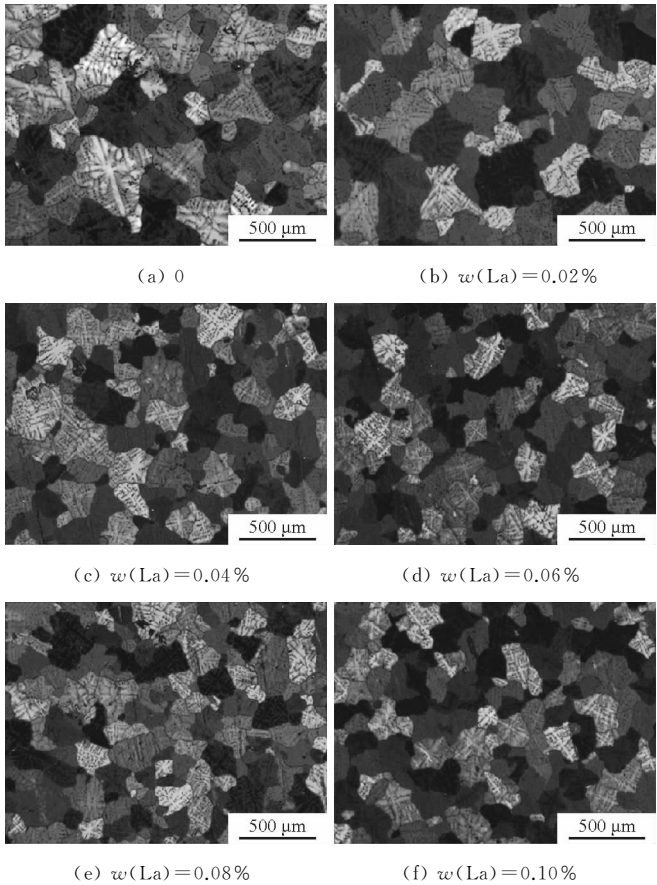


图 1 不同 La 含量的 Al-0.6Mg-0.6Si 合金晶粒形貌的 OM 图
Fig.1 OM images of the grain morphology of the Al-0.6Mg-0.6Si alloys with different La addition

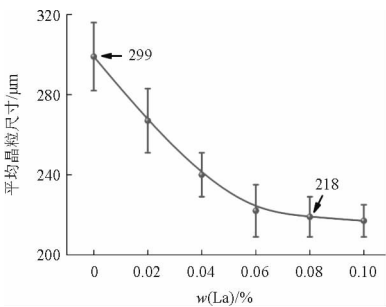


图 2 Al-0.6Mg-0.6Si 合金平均晶粒尺寸随 La 含量的变化曲线
Fig.2 Average grain size variation of Al-0.6Mg-0.6Si alloys with different La addition

图 4 和图 5 分别为未添加 La 和 La 含量为 0.08% 的 Al-0.6Mg-0.6Si 合金铸锭的 XRD 结果和微观组织。

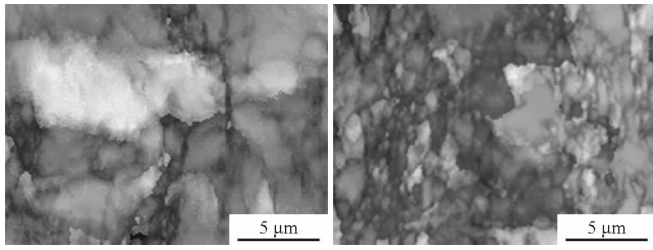


图 3 Al-0.6Mg-0.6Si 合金和 Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La 合金的 EBSD 像

Fig.3 EBSD images of Al-0.6Mg-0.6Si alloy and Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La alloy

由图 4 可以看出,两种合金均主要由 α -Al 和 Mg_2Si 相组成, Mg_2Si 相的峰值位置没有发生改变,这表明微量 La 的添加不改变 Mg_2Si 析出相的种类和结构。从图 5 看出,基体为 α -Al 相,弥散相主要为 Mg_2Si 相(含有少量的共晶 Si),稀土 La 的添加能够显著增加球形弥散相的数量密度和面积分数,即稀土 La 的添加能够促使 Mg、Si 溶质从基体中析出形成 (Mg, Si) 相。为了解稀土加入铝合金后的分布,对 Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La 合金进行了能谱分析(见图 6),结果表明,稀土 La 加入后主要分布在 Mg-Si 相附近,结合图 4 可以得出,稀土 La 主要分布在 Mg-Si 相表面。

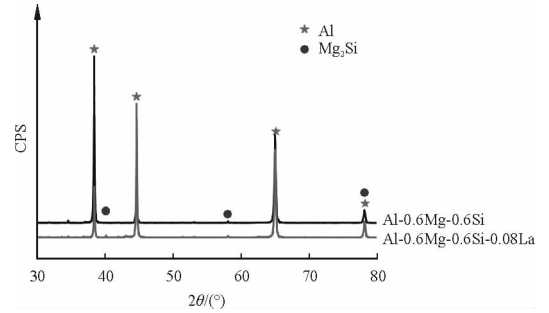


图 4 Al-0.6Mg-0.6Si 合金和 Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La 合金的 XRD 分析结果

Fig.4 XRD patterns of Al-0.6Mg-0.6Si alloy and Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La alloy

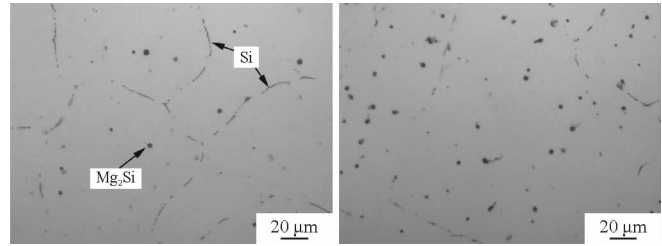


图 5 Al-0.6Mg-0.6Si 合金和 Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La 合金的微观组织形貌

Fig.5 Microstructure of the Al-0.6Mg-0.6Si alloy and Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La alloy

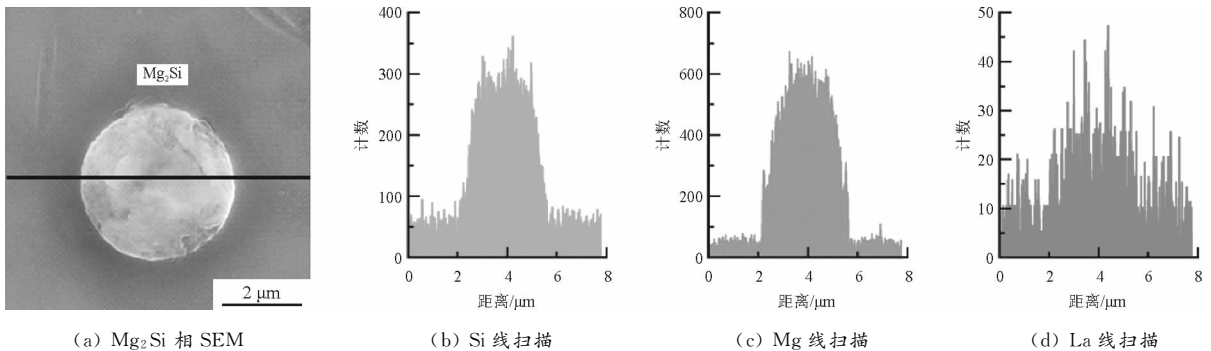


图 6 Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La 合金能谱分析结果

Fig.6 EDS results of Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La alloy

2.2 微量 La 对合金凝固过程的影响

图 7 为不同 La 含量的 Al-0.6Mg-0.6Si 合金的差热分析冷却曲线。可以看出,Al-0.6Mg-0.6Si 合金和 Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La 合金的冷却曲线在 923 和 873 K 附近出现 2 个放热峰 A 和 B,分别对应于 α -Al 相的形成和 Mg_2Si 相的形成。对于 Al-0.6Mg-0.6Si 合金而言, α -Al 和 Mg_2Si 相的起始形核温度分别约为 918.75 和 870.35 K;向合金中添加微量的稀土 La 后, α -Al 和 Mg_2Si 相的起始形核温度分别升高至 924.95 和 878.65 K,由于试验中 La 含量仅为 0.08%,其对合金相图的影响较小, α -Al 和 Mg_2Si 相的形核起始温度的升高意味着微合金化元素 La 添加能够减小 α -Al 相和 Mg_2Si 相

的形核过冷度,促使 α -Al 相和 Mg_2Si 相的形成。

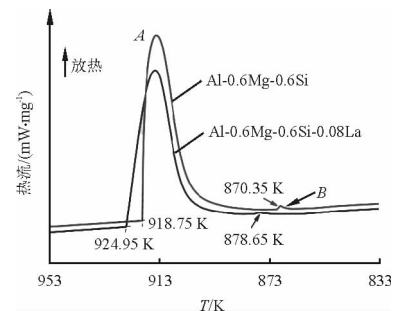


图 7 Al-0.6Mg-0.6Si 合金和 Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La 合金的差热分析冷却曲线

Fig.7 Differential thermal analysis cooling curves of Al-0.6Mg-0.6Si alloy and Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La alloy

2.3 微量 La 对合金性能的影响

图 8 为经轧制、时效处理后 Al-0.6Mg-0.6Si 合金和 Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La 合金的力学性能。可以看出,与不含 La 的铝合金相比,含 La 的铝合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率均显著提高。此外,电导率测试结果表明,在未添加 La 时,其电导率为 32.13 MS/m,而添加 La 后,其电导率增加到 32.65 MS/m。以上结果表明,添加适量 La 能同时提高合金的力学性能和导电性能,打破合金强度与电导率之间的倒置关系。

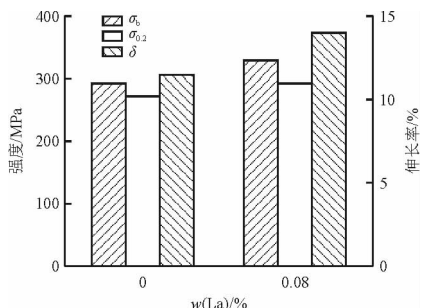


图 8 经轧制、时效处理后 Al-0.6Mg-0.6Si 合金和 Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La 合金的力学性能

Fig.8 Mechanical properties of Al-0.6Mg-0.6Si alloy and Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La alloy processed by roll deformation and aging treatment

3 分析讨论

3.1 La 对铝合金中 Al 晶粒的影响

当添加微量 La 时可能从两个方面来促进 α -Al晶粒的细化:①抑制 α -Al 生长;②作为表面活性元素降低 α -Al 与 Al 熔体之间的界面能,提高 Al 的形核率^[2,17]。

La 的原子半径约为 0.187 7 nm,远大于 Al 的原子半径(0.118 0 nm)^[2]。从原子半径的角度看,La 与 Al 的错配度约为 59%,因此 La 几乎不溶于 Al 基体。在合金凝固过程中,La 从 Al 中析出并在凝固界面富集,抑制了 α -Al 晶粒的长大。为了反映溶质富集对 Al 生长的抑制效果,引入了生长限制因子 Q ^[18,19]:

$$Q = C_{La}^m (k - 1) \quad (1)$$

式中, C_{La} 为溶质浓度; $m = -2.034$ 和 $k = 0.003$,分别为 Al-La 二元体系中的液相线斜率和平衡溶质分配系数。计算结果表明,当稀土 La 含量为 0.08% 时,生长限制因子 Q 仅为 0.16 K,可忽略不计。因此,微量 La 只能作为表面活性元素促进 Al 的形核与细化。

用 JMatPro 软件计算的 Al-0.6Mg-0.6Si 合金的液相线温度(T_m)为 927.8 K,结合图 7 的 DTA 结果可得,Al-0.6Mg-0.6Si 合金凝固过程中 Al 的形核过冷度约为 8.9 K,Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La 合金凝固过程中 Al 的形

核过冷度降至 2.7 K,均远小于 $0.2 T_m$,这意味着 Al 在凝固过程中以异质形核的方式形核^[17]。由经典形核理论可知,决定异质形核的关键因素是形核基体与晶核的润湿角(θ),可用下式计算^[17]:

$$f(\theta) = (2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta)/4 = \frac{27(\Delta T^{\alpha-Al})^2 T_N^{\alpha-Al}/4(T_L^{\alpha-Al})^3}{27(\Delta T^{\alpha-Al})^2 T_N^{\alpha-Al}/4(T_L^{\alpha-Al})^3} \quad (2)$$

式中, $T_N^{\alpha-Al}$ 和 $T_L^{\alpha-Al}$ 分别为 α -Al 相的形核温度和熔体的液相线温度; $\Delta T^{\alpha-Al}$ 为 α -Al 相的形核过冷度。计算表明,当不添加 La 时,形核基体与晶核的润湿角为 13.8° ,添加稀土元素后润湿角减小至 7.6° 。即微量 La 作为表面活性元素降低了形核基体与 α -Al 晶核的润湿角,提高了 α -Al 的异质形核率,最终获得更细小的 α -Al 晶粒组织。

3.2 La 对析出相的影响

为了研究 La 对 Al-Mg-Si 合金中(Mg,Si)少数相析出动力学的影响,分析了不同元素间的混合焓。结果表明,La 与 Mg 的混合焓(-7 kJ/mol)比 Al 与 Mg 的混合焓(-2 kJ/mol)更负,La 与 Si 的混合焓(-73 kJ/mol)比 Al 与 Si 的混合焓(-19 kJ/mol)更负^[20],说明 La 的加入可以促进 Si 和 Mg 从 Al 基体中析出,有助于 Al-Mg-Si 合金中 Mg-Si 少数相的形成。

3.3 La 对合金力学性能的影响

对于金属材料而言,其强度可估算如下^[2]:

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_{gb} + \sigma_d + \sigma_s + \sigma_p \quad (3)$$

式中, $\sigma_0 = 10$ MPa,为 Peierls-Nabarro 应力^[3]; σ_{gb} 、 σ_d 、 σ_s 和 σ_p 分别为晶界(晶粒细化)、位错、固溶元素和析出相对材料的强化作用。基于 Al-0.6Mg-0.6Si 合金和 Al-0.6Mg-0.6Si-0.08La 合金经历了同样凝固、固溶、轧制、时效工序,可以认为两种合金中的位错密度相同。晶粒细化对强度的贡献可以用 Hall-Petch 公式来计算^[3]:

$$\sigma_{gb} = k_{hp} d^{-0.5} \quad (4)$$

其中, $k_{hp} = 0.068$ MPa $\cdot$ m^{0.5},为 Hall-Petch 系数; d 为合金的晶粒尺寸。计算表明,La 通过减小晶粒尺寸可以促使合金强度增加约 14 MPa。此外,La 的添加有助于 Mg、Si 从基体中析出,这一方面会减弱溶质元素的固溶强化作用,另一方面又会增加析出相的强化作用。

3.4 La 对合金导电性能的影响

基于 Mattissen-Flemming 关系,Al-0.6Mg-0.6Si 合金的电阻率可用下式表示^[4]:

$$\rho = \rho^{\text{Alpure}} + \rho^{\text{precipitates}} + S_{GB} \Delta \rho^{GB} + L_{dislo} \Delta \rho^{dislo} + C_v \Delta \rho^{vac} + \sum_i C_{solu}^i \Delta \rho_{solu}^i \quad (5)$$

式中, $\rho^{\text{Alpure}} = 2.655 \times 10^{-8}$ $\Omega \cdot$ m 为纯铝的电阻率^[4];

$\rho^{\text{precipitates}}$ 为析出相对电阻率的贡献, 由于固溶时效后 Al-Mg-Si 合金中的析出相尺寸和体积分数通常较小, 析出相对电阻率的贡献可忽略不计^[4]; $S_{\text{GB}}\Delta\rho^{\text{GB}}$ 、 $L_{\text{dislo}}\Delta\rho^{\text{dislo}}$ 、 $C_v\Delta\rho^{\text{vac}}$ 和 $\sum_i C_{\text{solu}}^i\Delta\rho_{\text{solu}}^i$ 分别为晶界、位错、空位和溶质原子对合金电阻率的影响, 其中, S_{GB} 为单位体积内的晶界分数, L_{dislo} 为位错密度, C_v 为空位浓度, C_{solu}^i 为溶质 i 的溶度, $\Delta\rho^{\text{GB}} = 2.6 \times 10^{-16} \Omega \cdot \text{m}^2$, $\Delta\rho^{\text{dislo}} = 2.7 \times 10^{-25} \Omega \cdot \text{m}^3$, $\Delta\rho^{\text{vac}} = 26 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}/\%$, $\Delta\rho_{\text{solu}}^{\text{Si}} = 0.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}/\%$, $\Delta\rho_{\text{solu}}^{\text{Mg}} = 0.58 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}/\%$ ^[4,21]。

通过计算 $S_{\text{GB}}\Delta\rho^{\text{GB}}$ 的值, 可以估算晶界对电阻率的贡献, 结果表明, 晶界导致 Al-Mg-Si 合金和 Al-Mg-Si-La 合金电阻率的增量分别约为 $4.6 \times 10^{-10} \Omega \cdot \text{m}$ 和 $6.8 \times 10^{-10} \Omega \cdot \text{m}$, 这说明, La 导致的晶粒细化将促使电阻率略有增加。

以往研究表明, 铝合金经大变形后其位错密度和空位浓度能达到 10^{14} m^{-3} 和 0.001%, 该位错密度和空位浓度将促使合金电阻率增加 $2.7 \times 10^{-11} \Omega \cdot \text{m}$ 和 $2.6 \times 10^{-11} \Omega \cdot \text{m}$, 两者仅约为纯铝电阻率的 0.1%, 即位错和空位对 Al-Mg-Si 合金电阻率的贡献极小^[4]。

金属合金的电阻率对合金中固溶原子的浓度非常敏感。计算结果表明, 对于 Al-Mg-Si 合金而言, 基体中固溶的 Mg、Si 含量每减小 1%, 合金的电导率将增加 5.8 和 7.0 MS/m。由于 La 的加入会促使 Mg、Si 溶质从基体中析出, 因此, La 的加入将有利于合金电导率的增加。

4 结 论

(1) 微量稀土 La 的添加能够同时提高 Al-0.6Mg-0.6Si 合金的强度和电导率, 打破了金属材料强度和电导率之间的倒置关系。为制备具有优良力学性能和电性能的 Al-Mg-Si 合金提供参考。

(2) 微量 La 通过减小晶粒尺寸和促进 (Mg, Si) 相的析出来提高 Al-0.6Mg-0.6Si 合金的强度, 通过降低 Al 基体中 Mg 和 Si 的含量来提高其导电性。

参 考 文 献

- [1] MAJCHROWICZ K, PAKIELA Z, CHROMINSKI W, et al. Enhanced strength and electrical conductivity of ultrafine-grained Al-Mg-Si alloy processed by hydrostatic extrusion[J]. Materials Characterization, 2018, 135: 104-114.
- [2] JIANG H X, LI S X, ZHENG Q J, et al. Effect of minor lanthanum on the microstructures, tensile and electrical properties of Al-Fe alloys[J]. Materials & Design, 2020, 195: 108 991.
- [3] VALIEV R Z, MURASHKIN M Y, SABIROV I. A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity[J]. Scripta Materialia, 2014, 76: 13-16.
- [4] SAUVAGE X, BOBRUK E V, MURASHKIN M Y, et al. Opti-

mization of electrical conductivity and strength combination by structure design at the nanoscale in Al-Mg-Si alloys[J]. Acta Materialia, 2015, 98: 355-366.

- [5] JIANG H X, LI S X, ZHANG L L, et al. The influence of rare earth element lanthanum on the microstructures and properties of as-cast 8176 (Al-0.5Fe) aluminum alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 859: 157 804.
- [6] KARABAY S. Modification of AA-6201 alloy for manufacturing of high conductivity and extra high conductivity wires with property of high tensile stress after artificial aging heat treatment for all-aluminium alloy conductors[J]. Materials & Design, 2006, 27: 821-832.
- [7] LIU L, JIANG J T, ZHANG B, et al. Enhancement of strength and electrical conductivity for a dilute Al-Sc-Zr alloy via heat treatments and cold drawing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35: 962-971.
- [8] MURASHKIN M Y, SABIROV I, MEDVEDEV A E, et al. Mechanical and electrical properties of an ultrafine grained Al-8.5%RE (RE=5.4% Ce, 3.1% La) alloy processed by severe plastic deformation[J]. Materials & Design, 2016, 90: 433-442.
- [9] LIAO H C, LIU Y, LV C L. Mechanisms for Ce-induced remarkable improvement of conductivity in Al alloys[J]. Journal of Materials Research, 2017, 32: 566-574.
- [10] POZDNIakov A V, BARKOV R Y, PROSVIRYAKOV A S, et al. Effect of Zr on the microstructure, recrystallization behavior, mechanical properties and electrical conductivity of the novel Al-Er-Y alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 765: 1-6.
- [11] ZHANG J Y, MA M Y, SHEN F H, et al. Influence of deformation and annealing on electrical conductivity, mechanical properties and texture of Al-Mg-Si alloy cables[J]. Materials Science and Engineering, 2018, A710: 27-37.
- [12] KAIRY S K, ROUXEL B, DUMBRE J, et al. Simultaneous improvement in corrosion resistance and hardness of a model 2xxx series Al-Cu alloy with the microstructural variation caused by Sc and Zr additions[J]. Corrosion Science, 2019, 158: 108 095.
- [13] JIANG W M, FAN Z T, DAI Y C, et al. Effects of rare earth elements addition on microstructures, tensile properties and fractography of A357 alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2014, A597: 237-244.
- [14] DING W W, ZHAO X Y, CHEN T L, et al. Effect of rare earth Y and Al-Ti-B master alloy on the microstructure and mechanical properties of 6063 aluminum alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 830: 154 685.
- [15] LIAO H C, LIU Y, LÜ C L, et al. Effect of Ce addition on castability, mechanical properties and electric conductivity of Al-0.3Si-0.2Mg alloy[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2015, 28: 213-220.
- [16] MEDVEDEV A E, MURASHKIN M Y, ENIKEEV N A, et al. Enhancement of mechanical and electrical properties of Al-RE alloys by optimizing rare-earth concentration and thermo-mechanical treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 745: 696-704.

电脉冲时效时间对 Al-7Si-0.55Mg 合金组织和性能的影响

张 雷¹ 康凯娇² 石德全²

(1.东北轻合金责任有限公司熔铸厂; 2.哈尔滨理工大学材料科学与工程学院)

摘 要 以 Al-7Si-0.55Mg 合金为研究对象,在时效过程中施加电脉冲,保持脉冲电流、脉冲频率及占空比一定,改变时效时间进行试验。结果表明,Al-7Si-0.55Mg 合金通过电脉冲时效能有效地缩短时效时间,使合金进行快速时效。与常规热处理相比,Al-7Si-0.55Mg合金经过电脉冲时效处理(4~7 h)后的硬度和电导率显著提高。电脉冲时效处理 5 h 后合金的伸长率为 3.15%,高于常规热处理的 3%,时效时间缩短 3 h。获得了 Al-7Si-0.55Mg 合金的最佳电脉冲时效工艺参数:脉冲电流为 8 A、脉冲频率为 700 Hz、占空比为 0.5、时效温度为 160 ℃、时效保温为 5 h。

关键词 电脉冲;时效处理;Al-7Si-0.55Mg 合金;组织性能

中图分类号 TG166.3;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.12.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Electric Pulse Aging Time on Microstructure and Properties of Al-7Si-0.55Mg Alloy

Zhang Lei¹, Kang Kaijiao², Shi Dequan²

(1.Melting and Casting Plant, Northeast Light Alloy Co., Ltd.;

2.School of Materials Science and Technology, Harbin University of Science and Technology)

Abstract: The electric pulse was applied on Al-7Si-0.55Mg alloy during the aging process with the fixed pulse current, pulse frequency and duty ratio, and variable aging time. The results indicate that the aging time of Al-7Si-0.55Mg alloy can be effectively shortened by electric pulse, leading to the rapidly aging. Compared with conventional heat treatment, the hardness and electrical conductivity of Al-7Si-0.55Mg alloy are significantly improved after electric pulse aging treatment for 4~7 h. The elongation is 3.15% after electric pulse aging treatment for 5 h, which is higher than that of 3% of ones after conventional heat treatment, and the aging time is shortened by 3 h. The optimum process parameters of Al-7Si-0.55Mg alloy can be presented as follows: pulse current of 8 A, pulse frequency of 700 Hz, duty ratio of 0.5, aging temperature of 160 ℃ and aging holding time of 5 h.

Key Words: Electric Pulse, Aging Treatment, Al-7Si-0.55Mg Alloy, Microstructure and Properties

Al-7Si-0.55Mg 合金具有优良的铸造工艺性能、良好的力学、耐腐蚀以及焊接性能,被广泛应用在航空航天、交通运输等领域^[1,2]。工业的发展对 Al-7Si-0.55Mg合金的综合性能也提出了更高的要求。由于铸

收稿日期:2021-05-14;修改稿收到日期:2021-05-27

第一作者简介:张雷,男,1978 年出生,工程师,哈尔滨(150060),E-mail:dc7539700@163.com

通信作者:石德全,男,1977 年出生,教授,哈尔滨(150040),E-mail:shidequan2008@163.com

引用格式:张雷,康凯娇,石德全. 电脉冲时效时间对 Al-7Si-0.55Mg 合金组织和性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(12):1 499-1 503.

ZHANG L, KANG K J, SHI D Q. Effects of electric pulse aging time on microstructure and properties of Al-7Si-0.55Mg alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(12):1 499-1 503.

[17] ZHENG Q J, ZHANG L L, JIANG H X, et al. Effect mechanisms of micro-alloying element La on microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 47: 142-151.

[18] EASTON M A, STJOHN D H. Partitioning of titanium during solidification of aluminium alloys[J]. Materials Science and Technology, 2000, 16: 993-1 000.

[19] WANG T M, CHEN Z N, FU H W, et al. Grain refinement mechanism of pure aluminum by inoculation with Al-B master alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2012, A549: 136-143.

[20] TAKEUCHI A, INOUE A. Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference, heat of mixing and period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element[J]. Materials Transactions, 2005, 46: 2 817-2 829.

[21] MULAZIMOGLU M H, DREW R A L, GRUZLESKI J E. Electrical conductivity of aluminum-rich Al-Si-Mg alloys[J]. Journal of Materials Science Letters, 1989(8): 297-300.

(编辑:栗万仲)