



富 Ce 混合稀土加入量对铝合金组织与导电性能的影响

李红英^{1,2,3}, 赵菲^{1,2,3}, 阳慎兰^{1,2,3}

- (1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;
2. 中南大学 轻质高强结构材料国家级重点实验室, 长沙 410083;
3. 中南大学 有色金属材料科学与工程教育部重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 通过金相显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、室温导电率及高温电阻率测试等方法研究富 Ce 混合稀土对铸态及均匀化态铝合金组织与导电性能的影响。结果表明: 富 Ce 混合稀土对铝合金组织具有细化、变质和净化的作用, 加入量为 0.10%时细化效果最好; 随着富 Ce 混合稀土加入量的增加, 细化效果逐渐减弱, 但对含铁杂质相的变质作用加强, 导电率逐渐升高, 加入量为 0.30%时, 导电率达到 62.10%IACS; 合金在 570 °C 均匀化 24 h 后导电率整体上升, 富 Ce 混合稀土加入量为 0.30%时, 导电率达到 62.30%IACS; 富 Ce 混合稀土对铝合金的高温导电性能有不利影响, 加入量越多, 合金在高温下的电阻率越大, 通过均匀化处理可以减小合金的高温电阻率, 降低合金电阻率对温度的敏感性。

关键词: 富 Ce 混合稀土; 铝合金; 显微组织; 室温导电性能; 高温导电性能

文章编号: 1004-0609(2020)-04-0719-09

中图分类号: TG146.2

文献标志码: A

铝母线在电解铝生产中起传输电流的作用, 在电解槽上的用量很大, 投资约占铝电解槽基建费的 25% 左右, 控制母线的投资成本和电量损耗对电解铝厂的经济效益有着重要影响^[1], 提高经济效益最为直接有效的方法就是提高铝母线的导电率。传统电解铝母线多用工业纯铝^[2], 在室温下的导电率仅有 59.5%IACS, 高温服役环境下的电量损耗更大。此外, 工业纯铝中的针状 FeAl₃ 相、块状 Si 质点以及脆性相 α (Fe₂SiAl₈) 或 β (FeSiAl₅) 等^[3]还会对母线强韧性产生不利影响。在兼顾母线力学性能的同时提高母线导电率尤为必要, 然而这一问题目前还没有得到应有的重视。影响铝母线导电性的因素^[4]很多, 主要为化学成分、化合物夹杂与气体、组织结构与加工工艺, 其中化学成分是最基本的影响因素。稀土元素能够净化合金熔体、去除熔体中的氢和氧化夹杂^[5-7], 起到细化与变质的作用^[8-11], 不仅可以提高铝母线的强度和硬度, 还能提高铝母线的塑性和焊接性能^[12-15]。在铝母线中添加富铈混合稀土(RE)具备一定的价格优势, 但目前对于混合稀土改善铝合金导电性能的影响尚未有统一论, 有研究表明, 当稀土元素 Ce 加入量为 0.066%时, 铝

母线的导电率可比国家标准值提高 4.4%^[16-17], 也有研究表明, 混合稀土对工业纯铝及高强高导铝合金的导电性没有改善作用^[18-19]。因此, 作者通过在硼化处理^[20]后的工业纯铝中加入不同含量的富 Ce 混合稀土, 研究其对铸态及均匀化态铝合金组织、室温及高温下导电性能的影响规律。

1 实验

实验原料为 99.7%工业纯铝(质量分数)、Al-2.5%B、Al-10%RE(35%La+65%Ce)中间合金。将实验原料按照一定配比置于石墨坩埚中, 在 760 °C 进行熔炼, 经机械搅拌、除气扒渣后浇铸, 得到合金铸锭(30 mm×80 mm×1500 mm), 表 1 所列为实验合金的化学成分。

从铸锭距中心部 1/4 处切取方形试样, 尺寸为 15 mm×15 mm×2 mm, 对试样进行 570 °C、24 h 均匀化处理。金相组织采用 Leica DMI300 M 型金相显微镜观察, 第二相形貌及分布采用 FEIQuanta-200 型扫

基金项目: 长沙市科技计划资助项目(kq1801061)

收稿日期: 2019-05-19; 修订日期: 2019-10-10

通信作者: 李红英, 教授, 博士; 电话: 0731-88879341; E-mail: lhying@csu.edu.cn

表1 实验合金的化学成分

Table 1 Composition analysis of experimental alloys

Sample No.	Alloy	Mass fraction/%		
		B	RE	Al
1	Al-0.05B	0.05	0	Bal.
2	Al-0.05B-0.10RE	0.05	0.10	Bal.
3	Al-0.05B-0.20RE	0.05	0.20	Bal.
4	Al-0.05B-0.30RE	0.05	0.30	Bal.

描电子显微镜观察,配置EDAX Genesis 2000型X射线能谱仪,分辨率 <131 eV,误差为0.1%。室温电导率采用D60K型数字金属电导率测量仪测试,每个样品在20℃下测试10次,取平均值作为测量值。高温

电阻率采用自研的动态电阻测试系统测试,其测试原理如图1所示,测试样品尺寸为 $1\text{ mm}\times 5\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 。

2 结果与讨论

2.1 RE加入量对显微组织的影响

图2所示为铸态合金的金相照片,从图2可以看出,铸态合金存在明显的枝晶偏析。合金1晶粒粗大且大小不均,平均晶粒尺寸约为 $602.27\text{ }\mu\text{m}$,加入不同含量的RE可以不同程度细化晶粒,当添加量为0.10%(质量分数)时,合金晶粒最小,平均晶粒尺寸约

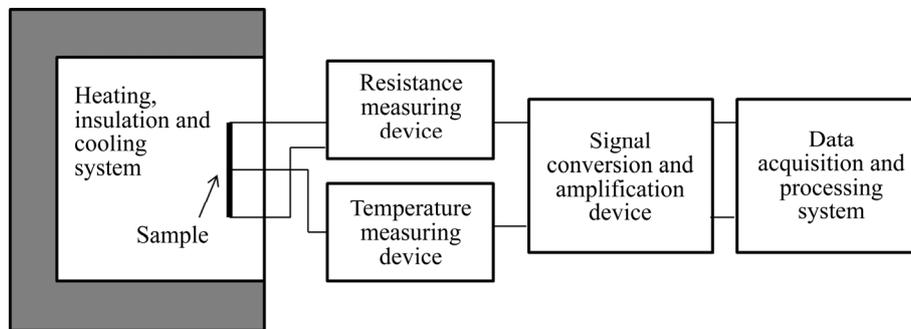


图1 动态电阻测试系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of in-situ electrical resistivity system

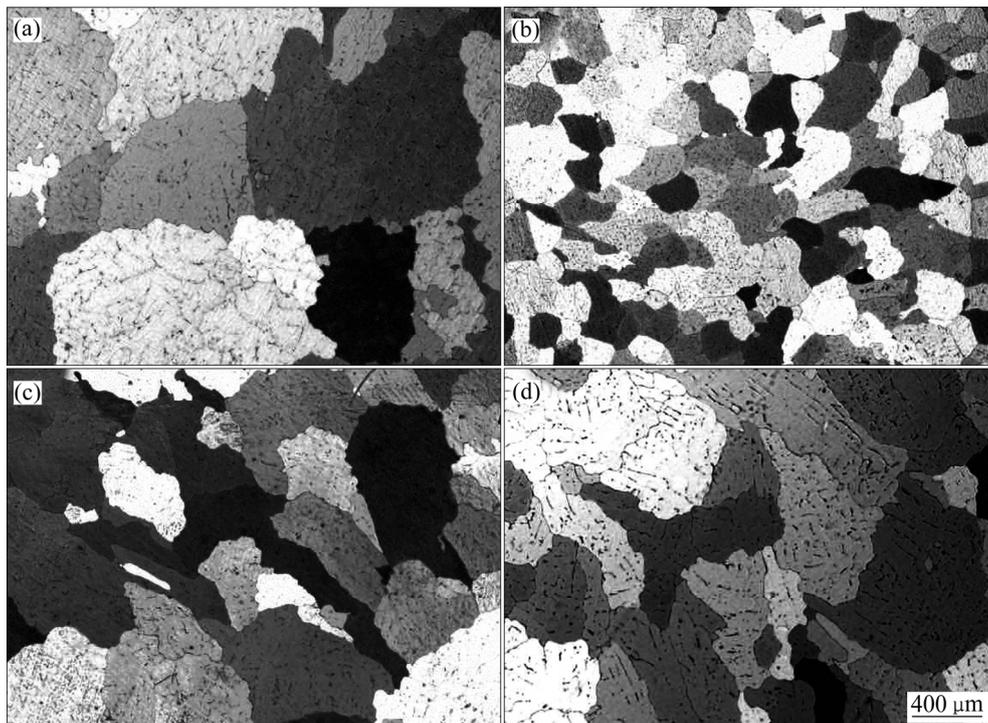


图2 实验合金的铸态金相显微组织

Fig. 2 OM images of as-cast alloys with different RE additions: (a) 0%RE; (b) 0.10%RE; (c) 0.20%RE; (d) 0.30%RE

192.69 μm 。对比图 2(b)、(c)、(d)可知, 随着 RE 加入量的增加, 合金晶粒细化程度降低, 合金 3 的平均晶粒尺寸约为 348.77 μm , 合金 4 的平均晶粒尺寸达 384.15 μm 。由于 La、Ce 在铝中的固溶度较小, 平衡分配系数远小于 1, 在铝液凝固时会富集在固/液界面前沿液相中, 使界面前沿液相中的原子浓度梯度增加, 增大成分过冷, 枝晶缩颈熔断机会增大, 从而提高合金形核率, 细化合金晶粒组织^[21-22]。但是, 当 RE 加入量过多时, La、Ce 会优先形成稀土化合物, 从而减少自由富集在合金固/液界面上的元素原子数, 减小成分过冷, 晶粒细化作用减弱。

图 3 所示为铸态合金的 SEM 像, 表 2 所列为图 3 对应点的 EDS 分析结果。从图 3 可以看出, 合金 1 晶界处的第二相呈连续分布, 晶内存在粗大的初生相, 根据 EDS 分析可知为含铁杂质相。合金 2 中的第二相多为球状、短棒状, 呈点、链状分布。对比图 3(b)、(c)、(d)可知, 随着 RE 加入量的增加, 合金中球状的第二相数量明显增多。这是由于 La、Ce 元素极为活泼, 容易吸附在含铁相表面形成活性膜或进入含铁相形成稀土化合物^[23], 从而阻碍杂质相长大, 改变含铁杂质相的形貌及分布情况等。

分析表 2 可知, 合金 1 中的第二相为含铁杂质相, 合金 2 的第二相中不含 La、Ce, 在合金 4 中检测到较高含量的 La、Ce。这是由于 RE 加入量较低时, 多固溶于铝基体, 第二相中含量太少而未检测到, 随着 RE 加入量增加, 第二相中的 La、Ce 含量随之增加。对比表中点 1、点 2 的含 Fe 量, 发现合金 2 第二相中的 Fe 元素含量高于未添加 RE 的合金 1。这是由于引入 RE 形成的稀土活性膜或稀土化合物能够有效阻碍杂质相中 Fe 原子的扩散, 减少杂质原子进入铝基体的可能性。

表 2 铸态合金中初生相的能谱分析结果

Table 2 EDS results of primary particles in as-cast alloy shown in Fig. 3

Point No.	Mass fraction/%			
	Al	Fe	La	Ce
1	96.4	3.6	0	0
2	73.5	26.5	0	0
3	60.9	1.8	11.1	26.2
4	76.1	12.2	3.1	8.6

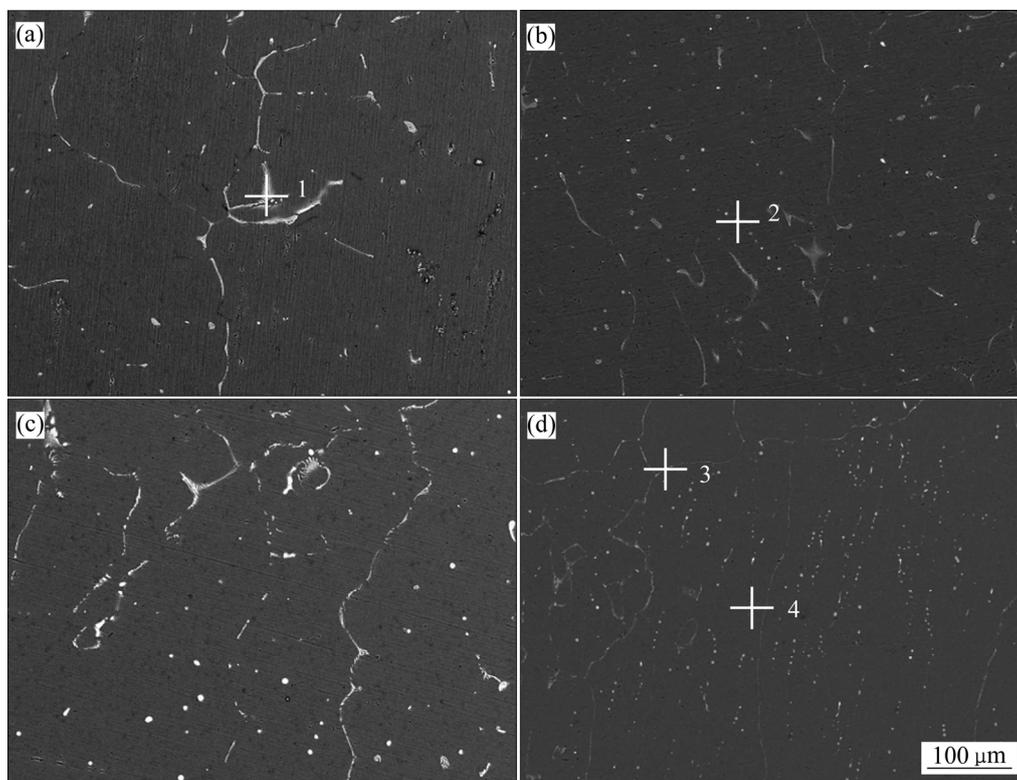


图 3 实验合金的铸态 SEM 像

Fig. 3 SEM images of as-cast alloys with different RE additions: (a) 0%RE; (b) 0.10%RE; (c) 0.20%RE; (d) 0.30%RE

图4所示为均匀化态合金的SEM像,表3所列 为图4对应点的EDS分析结果。从图4可以看出, 合金1经均匀化处理,晶界处的第二相变得不连续, 晶内的球状相尺寸变大。合金2~4经均匀化处理后, 尺寸较小的球状相发生溶解,尺寸较大的球状相发生 粗化。结合EDS分析可知,合金1中的第二相仍为含 铁杂质相,合金2的第二相中存在La、Ce元素,合 金4球状相中的La、Ce含量较铸态明显增加,这说 明基体中的La、Ce原子在均匀化过程中扩散到了第 二相中。

表3 均匀化态合金中初生相的能谱分析结果

Table 3 EDS results of primary particles in homogenized alloy shown in Fig. 4

Point No.	Mass fraction/%			
	Al	Fe	La	Ce
1	96.8	3.2	0	0
2	72.7	20.6	1.6	5.1
3	54.7	19.6	6.4	19.3
4	58.5	11.3	7.7	22.5

2.2 RE加入量对室温导电性能的影响

图5所示为实验合金均匀化前后的室温导电率曲 线。合金1未添加RE,其铸态导电率为61.87%IACS, 合金2加入了0.10%的RE,导电率略微下降,为 61.80%IACS,之后随着RE加入量的增加,导电率逐 渐上升,合金4达到62.10%IACS。经过均匀化处理后, 合金的导电率整体提高,合金4的导电率达到 62.30%IACS。RE元素主要从三方面对铝合金导电性 能产生影响^[24-25],一是使合金基体点阵发生畸变,对 传导电子产生散射作用,降低合金导电率;二是细化 合金组织,晶界增多,而晶界处存在大量空位、位错 等缺陷,降低合金导电率;三是在含铁相表面形成稀 土活性膜或与Al、Fe原子结合形成稀土化合物,有 效减少Fe原子在铝基体中的固溶,提高导电率。当 RE加入量较低时,结合图2(b)、图3(b)可知,合金 晶粒较细、晶界较多,且形成的稀土活性膜或稀土化 合物较少,引起的导电率提升小于晶格畸变及晶界散 射引起的导电率损失,故合金2的导电率低于合金1 的导电率。随着RE加入量的增加,结合图2(c)、(d)、 图3(c)、(d)可知,合金晶粒细化程度逐渐减小、晶界 数量减少,形成的稀土活性膜或稀土化合物数量逐渐 增加,引起的导电率的提升逐渐强于晶格畸变及晶界

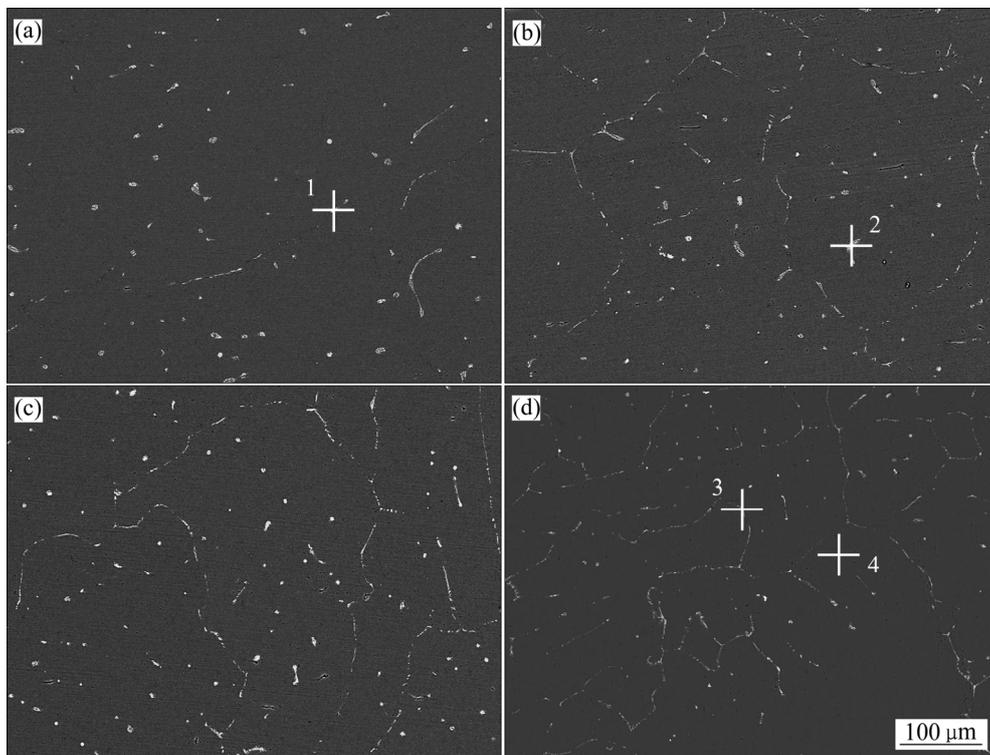


图4 实验合金的均匀化态SEM像

Fig. 4 SEM images of homogenized alloys with different RE additions: (a) 0%RE; (b) 0.10%RE; (c) 0.20%RE; (d) 0.30%RE

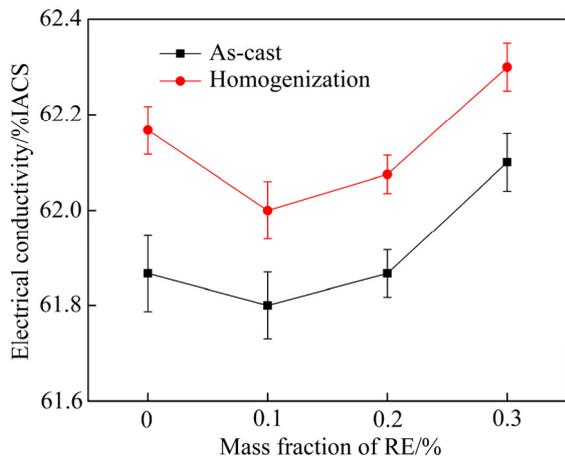


图 5 实验合金的室温导电率曲线

Fig. 5 Electrical conductivity curves of experimental alloys at room temperature

散射造成的导电率损失。因此, 导电率逐渐上升。均匀化能够有效消除枝晶偏析, 减少由于合金元素在铝基体中非平衡偏聚导致的晶格畸变, 从而使合金导电率整体提高。

2.3 RE 加入量对高温导电性能的影响

对铸态及均匀化态合金进行高温电阻率测试, 测试结果如图 6 所示。从图 6 可以看出, 在 100~300 °C 温度范围内, 合金 1~4 的电阻率均随温度的升高不断增大。表 4 列出了铸态及均匀化态合金在 200 °C 的电阻率, 可以看出, 其电阻率随 RE 加入量的增加不断增大, 均匀化后其电阻率明显减小。

随着温度升高, 金属的晶格原子热振动加剧, 激发的声子数增加, 电子波在传播过程中的散射随之增强, 导致合金的电阻率增大。对于铸态合金, 引入 RE 形成的稀土活性膜或稀土化合物不稳定, 在较高温度下容易发生扩散, 故合金 2~4 在 200 °C 的电阻率均高于合金 1 的。随着 RE 加入量的增加, 导致合金在 200 °C 的电阻率不断升高。合金经均匀化处理后, 减少了由于成分偏析引起的晶格畸变, 同时合金中的稀土活性膜或稀土化合物稳定化, 在较高温度下的扩散量较铸态合金的减少, 从而使得合金电阻率低于铸态合金电阻率。

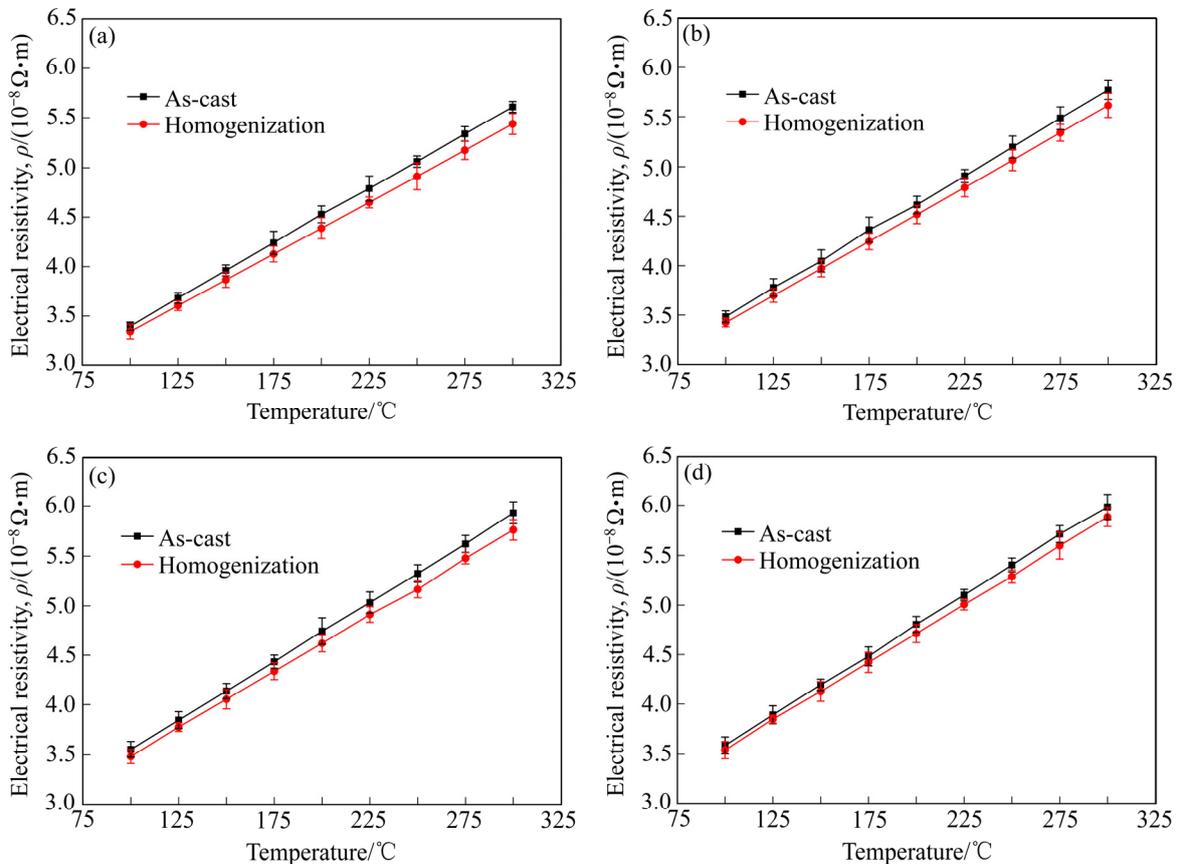


图 6 实验合金的高温电阻率曲线

Fig. 6 Electrical resistivity curves of alloys with different RE additions at high temperature: (a) 0%RE; (b) 0.10%RE; (c) 0.20%RE; (d) 0.30%RE

表4 实验合金在 200 °C 的电阻率

Table 4 Electrical resistivity of experimental alloys at 200 °C

Alloy No.	$\rho/(10^{-8}\Omega\cdot\text{m})$	
	As-cast	Homogenization
1	4.52954	4.38903
2	4.61644	4.51840
3	4.74314	4.61996
4	4.80558	4.71165

MATTHIESSEN^[26]经大量实验研究发现, 金属的电阻可以分为两个部分, 如式(1)所示:

$$\rho = \rho' + \rho_L(T) \quad (1)$$

式中: ρ 是金属的电阻率; ρ' 是与杂质浓度、点缺陷、位错有关的电阻率, 称为剩余电阻率; $\rho_L(T)$ 是与温度有关的电阻率, 称为本征电阻率, 当 $T \rightarrow 0$ K 时, $\rho_L(T) \rightarrow 0$ 。

由式(1)可以看出: 当金属处于高温时, $\rho_L(T)$ 项起主导作用, 金属晶格振动所激发的声子数与温度 T 成正比, 而电子被声子散射的概率正比于平均声子数, 故 $\rho \propto T$ 。若以 ρ_0 和 ρ_T 分别表示金属在 0 °C 和 T °C 的电阻率, 则金属的电阻率与温度的关系如式(2)所示:

$$\rho_T = \rho_0(1 + \alpha T) \quad (2)$$

式中: α 为电阻温度系数, 表示温度每升高 1 °C 时电阻率增大的百分数, 反映了金属电阻对温度的敏感性。

由式(2)可以看出, 高温下合金的电阻率受温度系数影响较大。对图 6 所示的高温电阻率数据进行线性拟合, 结果如图 7 及表 5 所示, 得到合金的电阻温度系数 α 。由表 5 可以看出, 合金的电阻温度系数 α 值随 RE 加入量的增加不断增大, 均匀化后合金的电阻温度系数 α 值明显减小。

表5 实验合金高温电阻率的线性拟合结果

Table 5 Linear fitting results of electrical resistivity of experimental alloys at high temperature

Alloy No.	As-cast		Homogenization	
	Fitting curve	$\alpha / 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Fitting curve	$\alpha / 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
1	$\rho = 2.30384(1 + 4.792T)$	4.792	$\rho = 2.29361(1 + 4.569T)$	4.569
2	$\rho = 2.34611(1 + 4.863T)$	4.863	$\rho = 2.33748(1 + 4.627T)$	4.627
3	$\rho = 2.36047(1 + 5.033T)$	5.033	$\rho = 2.35205(1 + 4.821T)$	4.821
4	$\rho = 2.38371(1 + 5.059T)$	5.059	$\rho = 2.37528(1 + 4.922T)$	4.922

稀土改善合金导电性能的原因在于形成了稀土活性膜或稀土化合物, 减少了 Fe 原子在铝基体中的固溶, 但这种活性膜或化合物不稳定, 在较高温度下容易发生扩散。RE 加入量增加, 合金中的稀土活性膜或稀土化合物数量增多, 在高温下的扩散量相对增多, 合金每升高 1 °C 的电阻率增大百分比升高, 因此, 合金的电阻温度系数 α 值随着 RE 加入量的增加不断增大。均匀化处理后, 合金中的稀土化合物较稳定, 合

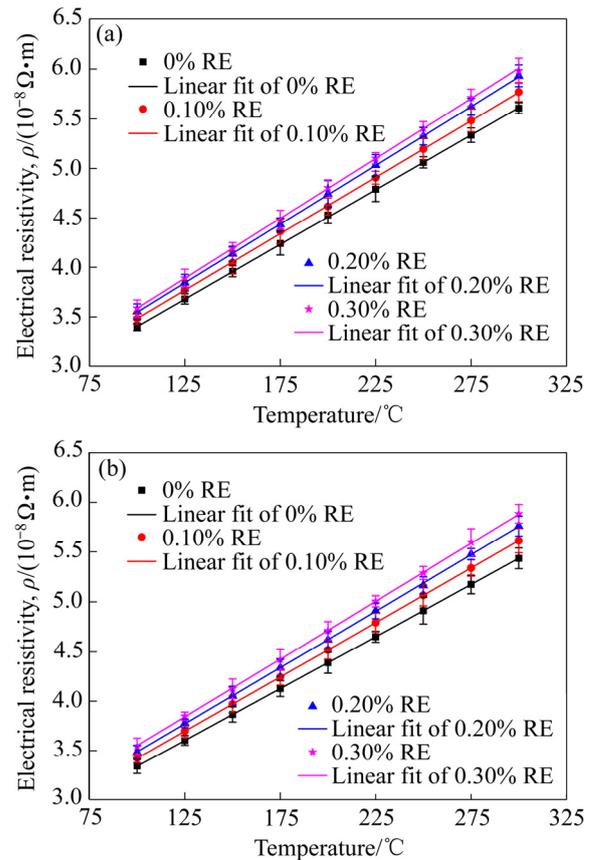


图7 实验合金的高温电阻率拟合曲线

Fig. 7 Electrical resistivity fitting curves of alloys with different RE additions at high temperature: (a) As-cast; (b) Homogenization

金每升高 1 °C 的原子扩散量较铸态减少,电阻率对温度的敏感性降低,故均匀化后合金的电阻温度系数 α 值变小。综上可知,加入 RE 对合金的高温导电性能有不利作用,通过均匀化处理可以减小合金的高温电阻率,降低合金电阻率对温度的敏感性。

3 结论

1) 加入 0.10% 富 Ce 混合稀土对铝合金的细化效果最好,晶粒平均尺寸为 192.69 μm ; 随着富 Ce 混合稀土加入量的增多,细化效果逐渐减弱,但对合金中含铁杂质相的变质作用逐渐加强,合金的导电率逐渐升高,加入量为 0.30% 时,导电率达到 62.10% IACS。

2) 加入富 Ce 混合稀土的铝合金在 570 °C 均匀化 24 h 后会使得合金导电率升高,加入量为 0.30% 时,导电率升至 62.30% IACS。

3) 加入富 Ce 混合稀土对铝合金的高温导电性能产生不利作用,加入量越多,合金在高温下的电阻率越大,通过均匀化处理可以减小合金的高温电阻率,降低合金电阻率对温度的敏感性。

REFERENCES

- [1] 冯成华. 铝母线——资源节约型社会的新选择[J]. 建筑电气, 2006(4): 6–10.
FENG Cheng-hua. Aluminium bus is a new selection in resources saving society[J]. Building Electricity, 2006(4): 6–10.
- [2] 解延龙, 刘民章. 用电解铝液直接生产母线的探讨[J]. 青海科技, 2011(3): 135–137.
HAI Yan-long, LIU Min-zhang. Discussion on production of busbar with electrolytic aluminum liquid[J]. Qinghai Science and Technology, 2011(3): 135–137.
- [3] 刘东雨, 郭强, 严康骅, 袁晓娜, 刘静静, 侯世香, 李宝让, 冯砚厅, 徐雪霞. 杂质元素和微合金化元素对纯铝导体导电性能的影响[J]. 热处理技术与装备, 2015, 36(2): 7–11.
LIU Dong-yu, GUO Qiang, YAN Kang-hua, YUAN Xiao-na, LIU Jing-jing, HOU Shi-xiang, LI Bao-rang, FENG Yan-ting, XU Xue-xia. Influence of impurity elements and micro-alloying elements on electrical conductivity of pure aluminum conductor[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2015, 36(2): 7–11.
- [4] 胡谢君, 张仁国, 张晓燕, 林廷艺, 张俊杰, 黄鑫, 巩向鹏, 鄢俊. 形变时效对不同 Cu 含量的稀土铝电工圆杆的影响[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(8): 1597–1602.
HU Xie-jun, ZHANG Ren-guo, ZHANG Xiao-yan, LIN Ting-yi, ZHANG Jun-jie, HUANG Xin, GONG Xiang-peng, YAN Jun. Effect of strain aging on rare earth electrical round aluminum rods with different Cu contents[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(8): 1597–1602.
- [5] YU H, CHEN S N, YANG W, ZHANG Y L, CHEN S H. Effects of rare element and pressure on the microstructure and mechanical property of AZ91D alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 589: 479–484.
- [6] 黄高仁, 孙乙萌, 张利, 刘玉林. 微量 Ce 对亚快速凝固 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织与性能的影响[J]. 材料工程, 2018, 46(3): 105–111.
HUANG Gao-ren, SUN Yi-meng, ZHANG Li, LIU Yu-lin. Effect of trace Ce on microstructure and properties of near-rapidly solidified Al-Zn-Mg-Cu alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(3): 105–111.
- [7] 王明峰. 稀土 La-Ce 合金对铝合金 ENAC-44300 晶粒细化及针孔度影响的试验分析[J]. 机电工程技术, 2017, 46(8): 31–33.
WANG Ming-feng. Experimental analysis on the influence of rare earth La-Ce alloy on grain refinement and pinhole degree of ENAC-44300 aluminum alloy[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2017, 46(8): 31–33.
- [8] 李庆林, 李斌强, 李进宝, 兰峰, 夏天东. 混合稀土对过共晶 Al-20Si 合金显微组织与力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(12): 2443–2450.
LI Qing-lin, LI Bin-qiang, LI Jin-bao, LAN Ye-feng, XIA Tian-dong. Effect of mischmetal on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-20Si alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(12): 2443–2450.
- [9] ZHU M, JIAN Z Y, YAO L J, LIU C X, YANG G C, ZHOU Y H. Effect of mischmetal modification treatment on the microstructure, tensile properties, and fracture behavior of Al-7.0%Si-0.3%Mg foundry aluminum alloys[J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(8): 2685–2694.
- [10] ZU F Q, LI X Y. Functions and mechanism of modification elements in eutectic solidification of Al-Si alloys: A brief review[J]. China Foundry, 2014, 11(4): 287–295.
- [11] LI H Y, LI D W, ZHU Z X, CHEN B A, CHEN X, YANG C L, ZHANG H Y, KANG W. Grain refinement mechanism of as-cast aluminum by hafnium[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(12): 3059–3069.

- [12] XIAO W L, JIA S S, WANG J L, YANG J, WANG L M. The influence of mischmetal and tin on the microstructure and mechanical properties of Mg-6Zn-5Al-based alloys[J]. *Acta Materialia*, 2008, 56(5): 934–941.
- [13] KANG W, LI H Y, ZHAO S X, HAN Y, YANG C L, MA G. Effects of homogenization treatments on the microstructure evolution, microhardness and electrical conductivity of dilute Al-Sc-Zr-Er alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 704: 683–692.
- [14] 张海锋, 郑子樵, 林毅, 薛喜丽, 罗先甫, 钟警. 微量 Sc 对 2099 铝锂合金组织与性能的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2014, 45(5): 1420–1427.
- ZHANG Hai-feng, ZHENG Zi-qiao, LIN Yi, XUE Xi-li, LUO Xian-fu, ZHONG Jing. Effects of small addition of Sc on microstructure and properties of 2099 Al-Li alloy[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2014, 45(5): 1420–1427.
- [15] HU X W, JIANG F G, AI F R, YAN H. Effects of rare earth Er additions on microstructure development and mechanical properties of die-cast ADC12 aluminum alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 538: 21–27.
- [16] 朱长榕, 张炳根. 稀土在电工用铝母线中的应用实践[J]. *轻合金加工技术*, 2004, 32(6): 40–42.
- ZHU Chang-rong, ZHANG Bing-gen. Application of rare earths in aluminum bus bars for electrical purposes[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2004, 32(6): 40–42.
- [17] 孙彦华, 杨钢, 胥福顺, 谭国寅, 吴云峰. 金属元素与稀土复合添加对铝合金性能影响的研究进展[J]. *轻合金加工技术*, 2017, 45(7): 15–17.
- SUN Yan-hua, YANG Gang, XU Fu-shun, TAN Guo-yin, WU Yun-feng. Research progress of the effects of metal elements and rare earth on the properties of aluminum alloy[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2017, 45(7): 15–17.
- [18] 秦兴国, 吴玉程, 黄新民, 杨明, 晏广华, 王艳青. 稀土元素对高强高导铝合金的性能影响[J]. *金属功能材料*, 2010, 17(6): 17–21.
- QIN Xing-guo, WU Yu-cheng, HUANG Xin-min, YANG Ming, YAN Guang-hua, WANG Yan-qing. Effect of rare earth elements on properties of aluminum alloy with high conductivity and strength[J]. *Metallic Functional Materials*, 2010, 17(6): 17–21.
- [19] 刘顺华, 王桂芹, 吴爱民, 高洪吾, 李长茂. 稀土元素对工业纯铝导电性的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2000, 10(3): 334–339.
- LIU Shun-hua, WANG Gui-qin, WU Ai-min, GAO Hong-wu, LI Chang-mao. Effects of rare earth elements on electrical conductivity of industrial aluminum[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2000, 10(3): 334–339.
- [20] 侯雅尘, 杨昇, 蔡彬, 赖存明. Er、Zr、B 对耐热导电铝合金组织和性能的影响[J]. *特种铸造及有色合金*, 2017, 37(5): 550–553.
- HOU Ya-chen, YANG Sheng, CAI Bin, LAI Cun-ming. Effect of Er, Zr and B on microstructure and properties of heat-resistance conductive aluminum alloy[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 2017, 37(5): 550–553.
- [21] 李红英, 孙远, 宾杰, 刘洋, 曹俊. Ce 对耐热铝导体材料铸态组织和性能的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2011, 42(10): 3026–3032.
- LI Hong-ying, SUN Yuan, BIN Jie, LIU Yang, CAO Jun. Effect of cerium on as-cast microstructure and properties of heat-resistant aluminum conductor[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 2011, 42(10): 3026–3032.
- [22] 钟江伟, 张鸿, 陈彦旭. 稀土元素 La、Ce 含量对 Cu-0.4Cr-0.2Zr-0.15Mg 合金组织和性能[J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26(5): 1092–1099.
- ZHONG Jiang-wei, ZHANG Hong, CHEN Yan-xu. Effects of Ce and La contents in rare earth elements on microstructure and properties of Cu-0.4Cr-0.2Zr-0.15Mg alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(5): 1092–1099.
- [23] 傅高升, 孙锋山, 任立英, 陈文哲, 钱匡武. 微量稀土对工业纯铝中杂质相的变质行为[J]. *中国稀土学报*, 2001, 19(2): 133–137.
- FU Gao-sheng, SUN Feng-shan, REN Li-ying, CHEN Wen-zhe, QIAN Kuang-wu. Modification behavior of trace rare earth on impurity phases in commercial pure aluminum[J]. *Journal of the Chinese Rare Earths Society*, 2001, 19(2): 133–137.
- [24] 陈德斌, 胥福顺, 王荣莉, 何正夫. 杂质元素对电工圆铝杆导电性能的影响[J]. *轻合金加工技术*, 2009, 37(6): 33–36.
- CHEN De-bin, XU Fu-shun, WANG Rong-li, HE Zheng-fu. Effects of impurity elements on conductivity of the electric circular aluminum rod[J]. *Light Alloy Fabrication Technology*, 2009, 37(6): 33–36.
- [25] 杨钢, 何正夫, 张红耀, 郑兴贵, 王吉坤. 含稀土、硼的高导电率电工圆铝杆试验研究[J]. *轻合金加工技术*, 2005,

33(7): 38–40.

YANG Gang, HE Zheng-fu, ZHANG Hong-yao, ZHENG Xing-gui, WANG Ji-kun. Research on high conductivity Al-RE-B electrical pole[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2005, 33(7): 38–40.

[26] 田 蔚. 材料物理性能[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006.

TIAN Shi. Physical properties of materials[M]. Beijing: Beihang University Press, 2006.

Effect of Ce-rich rare earth addition on microstructure and electrical conductivity of aluminum alloy

LI Hong-ying^{1,2,3}, ZHAO Fei^{1,2,3}, YANG Shen-lan^{1,2,3}

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. State Key Laboratory on Lightweight High-strength Structural Material, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Key Laboratory of Nonferrous Metal Materials Science and Engineering, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The microstructure and electrical conductivity of as-cast and homogenized aluminum alloys with Ce-rich rare earth addition were investigated by OM, SEM, room temperature conductivity and high temperature resistivity test. The results show that RE can refine, modify and purify the microstructure of the aluminum alloy. The grain refinement is the best with 0.10% RE. With the increase of RE addition, the grain refinement is gradually weakened, while the metamorphism of the impurity phase with Fe is strengthened, and the conductivity is gradually increased. When the addition is 0.30%, the electrical conductivity increases to 62.10% IACS. The electrical conductivity increases after homogenization at 570 °C for 24 h, and the conductivity can reach 62.30% IACS with 0.30% RE. RE has an adverse effect on the high temperature conductivity of the aluminum alloy, and the more the addition, the greater the resistivity of the alloy at high temperature. The homogenization treatment can reduce the high temperature resistivity and the temperature sensitivity of the alloy.

Key words: RE; aluminum alloy; microstructure; room temperature conductivity; high temperature conductivity

Foundation item: Project(kq1801061) supported by the Science and Technology Program of Changsha City, China

Received date: 2019-05-19; **Accepted date:** 2019-10-10

Corresponding author: LI Hong-ying; Tel: +86-731-88879341; E-mail: lhying@csu.edu.cn

(编辑 龙怀中)