

[文章编号] 1004-0609(2002)S1-0098-05

热加工工艺对 ZLSi7MgA 合金导电性的影响^①

杨涤心, 夏 青, 杨留栓, 刘亚民
(洛阳工学院 材料科学与工程系, 洛阳 471039)

[摘 要] 研究了热处理、压力加工及定向凝固等热加工工艺对 ZLSi7MgA 合金导电性能的影响。研究表明: 压力加工使硅相沿变形方向的相对分布发生变化; 定向凝固工艺可以获得两相平行生长的理想柱状晶组织, 其一次轴方向与电场方向一致; 提高时效温度能够促使 G·P 区从中间相到平衡沉淀相的过渡, 消除了沉淀相周围基体中的畸变。上述工艺均有利于提高合金的导电性能。通过调整时效温度适当提高 ZLSi7MgA 合金的电导率, 是兼顾合金的强度和导电性, 满足工程要求的行之有效的工艺方法。

[关键词] 铝合金; ZLSi7MgA 合金; 热加工工艺; 导电性能

[中图分类号] TG 146.2⁺1; TG 146.4⁺5

[文献标识码] A

铝是地球上蕴藏量最丰富的有色金属, 具有良好的导电性, 价格低于铜、银等金属, 因此, 铝及其合金被广泛地用作导电材料, 除用来制造电线、电缆外, 还常常被用来制造中、高压输变电设备中的零部件。目前, 输变电设备中常用的是 ZLSi7MgA 合金, 该合金是铝-硅-镁系亚共晶型可热处理强化的铸造铝合金, 由于采用高纯度原材料降低杂质含量, 添加细化元素调整合金成分, 因而具有高的力学性能^[1,2]。生产中存在的主要问题是合金的电导率偏低, 常常达不到设计要求, 从而影响到产品的质量及性能, 是一个亟待解决的问题。合金的导电性能不仅与自身的成分有关, 而且还常常受合金制品加工成型工艺的影响^[3,4]。为此, 作者重点考察热加工工艺对合金导电性的影响, 并对这种影响的微观机制进行分析, 在此基础上寻找出进一步提高 ZLSi7MgA 合金导电性能的途径。

1 实验

实验用 ZLSi7MgA 合金, 其主要成分为: Si 6.5% ~ 7.5%, Mg 0.25% ~ 0.45%, Ti 0.08% ~ 0.20%, Fe ≤ 0.2, Al 余量。合金在石墨坩埚炉内熔化, 经精炼除气后浇入金属模具中, 冷凝后得到试块。

将冷凝后的试块加工成 10 mm × 10 mm × 300 mm 的矩形试样, 利用双电桥法测量试样的电

阻, 并按下式计算材料的电导率:

$$K = \frac{0.017241}{\frac{R_t S}{L} [1 + \rho_{20}(20 - t)]} \times 100$$

式中 K 为材料的电导率(IACS); R_t 为温度为 t 时试样的电阻(Ω); L 为试样所测电阻间的长度(mm); S 为试样的平均截面积(mm^2); ρ_{20} 为 20 °C 时材料的电阻温度系数; t 为测定时的温度(°C)。

ZLSi7MgA 合金通常是在 T6 状态(固溶+时效)下使用, 因此, 在试验过程中改变时效温度和时效时间来考察这两个工艺因素对导电性的影响。

将浇注所得的试块先经锻打、T6 处理后再截取加工成电导率测量试样, 以考察压力加工对导电性能的影响。

为了考察合金生长方式对其导电性的影响, 采用定向凝固装置专门制取了测量电导率的圆形试样(d 8 mm × 150 mm)。

将经不同时效温度处理后的试样制成薄膜, 在透射电镜下观察显微组织形貌及其变化, 探讨铝合金的导电微观机理。

2 结果与讨论

2.1 热处理工艺

工业用铝合金一般都要通过热处理进行强化, 通常采用调质工艺, 即固溶加时效处理: 淬火使强化元素过饱和固溶到 $\alpha(\text{Al})$ 基体中, 然后在一定温

① [基金项目] 河南省自然科学基金资助项目(994042800)

[收稿日期] 2001-09-27; [修订日期] 2001-11-20

[作者简介] 杨涤心(1951-), 男, 教授, 硕士。

度下较长时间保温进行时效, 在此过程中过饱和元素以强化相的形式弥散、沉淀析出, 使合金得到强化。固溶使合金的电导率下降, 而时效使电导率提高。

考察了时效温度和时效时间对合金导电性的影响。将经固溶处理(535℃保温6h后水淬)后的 ZLSi7MgA 合金试块加工成试样, 经不同温度和不同时间时效处理后测出其电导率。图 1 和 2 所示是实验结果。可以看出, 电导率随时效温度的提高或时效时间的延长而增大。显然, 时效的温度越高或时间越长, $\alpha(\text{Al})$ 基体中过饱和固溶的溶质原子析出越多, 晶格扭曲减少及回复越彻底, 内应力及微观应力亦随之减少, 从而使合金的导电性不断得到提高^[5]。

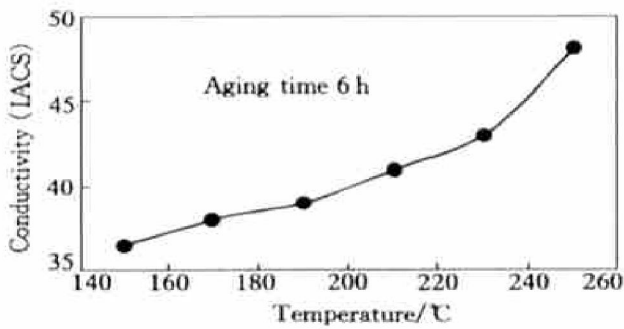


图 1 时效温度对电导率的影响

Fig. 1 Effect of aging temperature on conductivity (IACS)

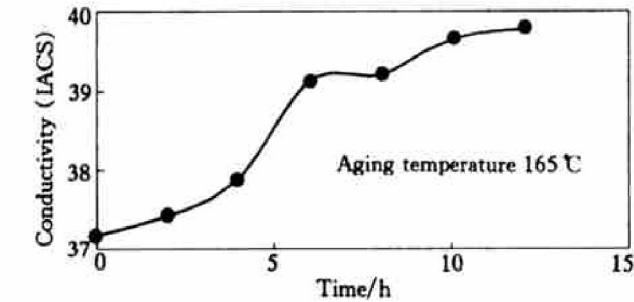


图 2 时效时间对电导率的影响

Fig. 2 Effect of aging time on conductivity (IACS)

2.2 压力加工

压力加工引起大的塑性变形。一般认为, 大的塑性变形使晶格点阵产生缺陷和畸变, 导致电子波的散射增加, 使合金的电导率下降^[6]。为此, 将 ZLSi7MgA 合金先经锻打变形后(变形率为 77%)再加工成试样, 然后测量其电导率, 表 1 为测量结果。和未经锻打的合金相比, 经锻打后合金的电导

率没有降低, 反而略有增加。金相观察可以看到硅相沿变形方向平行排列, 具有明显的方向性特征。由于经锻打塑变后, 合金中的缩松、气孔等缺陷被弥合, 组织致密, 有利于提高合金的导电性, 同时硅相等沉淀物沿变形方向的相对分布的变化, 也有利于提高合金沿变形方向的电导率。综合有利与不利两方面的影响, 使得合金电导率的变化不大。

表 1 成型工艺及铝合金电导率

Table 1 Forming technology and conductivity of aluminium alloy

Alloy	Forming technology	Heat treatment	Conductivity (IACS)
ZLSi7MgA	As forging As cast	T6	41. 19 39. 29

2.3 凝固方式的影响

考虑到定向凝固工艺的特点, 采用了两种不同成分的合金制取试样, 除选用 ZLSi7MgA 合金外, 还使用了含硅量为 12.6% 的共晶成分的合金, 以获得理想的两相平行相间生长的柱状晶组织。图 3 和图 4 分别给出了经定向凝固工艺制得的两种合金试样的金相组织, 可以看出两相平行生长的理想柱状

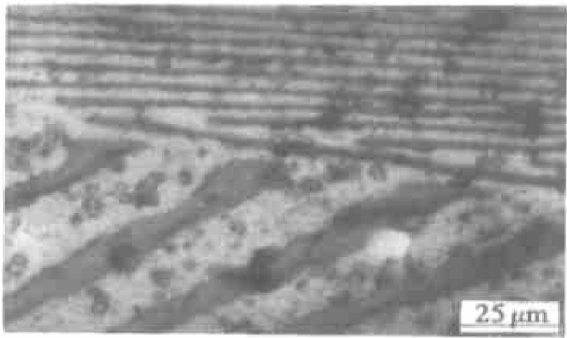


图 3 ZLSi12 合金的定向凝固组织

Fig. 3 Microstructure of ZLSi12 alloy solidifying along definite direction

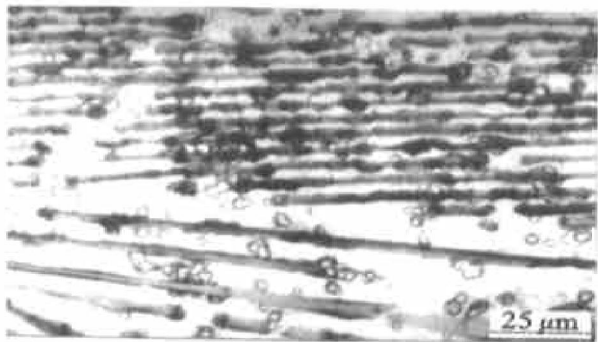


图 4 ZLSi7MgA 合金的定向凝固组织

Fig. 4 Microstructure of ZLSi7MgA alloy solidifying along definite direction

晶组织。测得试样的电导率见表 2, 作为对比, 表中还同时给出了正常凝固条件下相同合金的电导率。由表中的数据可以看出, 采用定向凝固工艺有利于提高合金的电导率。分析其原因, 由于柱状晶的一次轴都是 $\langle 001 \rangle$ 方向, 与晶体学方向一致^[7], 即与电场方向一致, 有利于改善其导电性; 此外, 定向凝固有利于固溶体的有序化, 改善了离子场的规整性, 减少了电子散射几率; 再者, 定向凝固工艺基本消除了气泡、缩松等缺陷, 这些都有利于提高合金的导电性能。

表 2 铝合金成型工艺及电导率

Table 2 Forming technology and conductivity of aluminium alloys

Alloy	Forming technology	Heat treatment	Conductivity (IACS)
ZLSi7MgA	Oriented solidifying	T6	41.51
ZLSi7MgA	Permanent casting	T6	39.62
ZLSi12	Oriented solidifying		37.26
ZLSi12	Permanent casting		34.50

2.4 讨论

由以上实验结果可知, 可以通过调整生产工艺来改变铝合金的导电性能。就具体的生产工艺而言, ZLSi7MgA 作为铸铝在加工成型过程中一般不承受大的塑性变形。定向凝固工艺由于设备要求高, 生产周期长, 成型受限等因素, 在一般铝合金制品的生产中很少采用。而热处理工艺在铝合金加工成型过程中被广泛采用, 如前所述, 在热处理过程中, 合金的导电性发生了明显的变化, 因此, 通过调整热处理工艺改变铝合金的导电性是一种简便而行之有效的方法, 问题的关键是如何兼顾强度和导电性能的不同要求。

以最常用的调质工艺为例, 时效温度对铝合金力学性能的影响见图 5 和图 6^[8]。在时效温度较低时(例如低于 180 °C), 过饱和固溶溶质原子的扩散慢, 析出及聚集长大的速度慢, 主要形成一些与基体共格的溶质原子的聚集区(G·P 区)或中间过渡相^[9,10]。一方面, 溶质原子析出, 固溶强化减弱, 基体产生回复与再结晶, 合金强度下降, 导电性提高; 另一方面, 与基体成共格关系的 G·P 区或中间过渡相的存在, 引起基体晶格的畸变, 导致强度上升, 延伸率下降, 电导率亦随之降低。两方面综合作用的结果, 使得合金的强度上升, 导电性能虽有所改善, 但并不明显。

当时效温度较高时(例如大于 180 °C), 溶质原子的扩散速度提高, 在相同的时效时间内, 较多的

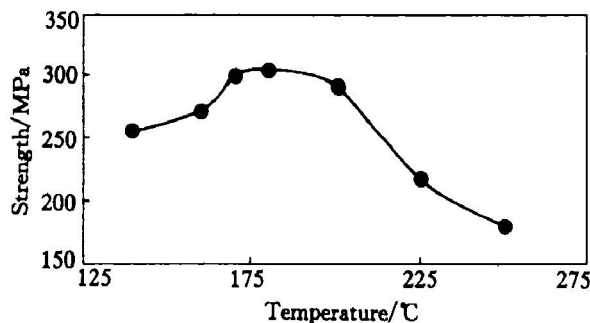


图 5 时效温度对强度的影响

Fig. 5 Effect of aging temperature on strength

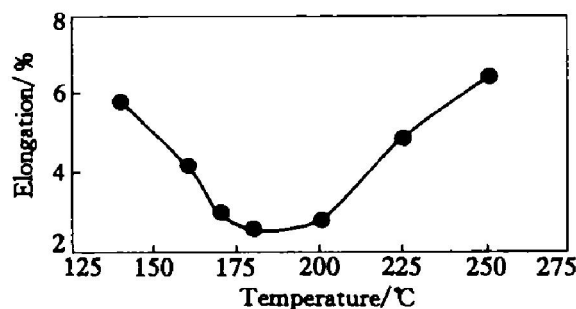


图 6 时效温度对延伸率的影响

Fig. 6 Effect of aging temperature on elongation

G·P 区可以完成从中间相到平衡沉淀相的过渡, 平衡沉淀相进一步粗化, 与基体的共格关系破坏, 沉淀相周围基体已不再存在较大的畸变, 基体的回复与再结晶进一步加强, 导致合金强度下降, 塑性上升, 导电性能得到较为明显的改善。图 7 是铝硅化镁合金在不同时效温度时的电子显微镜衍衬图像, 可以看出, 随着时效温度的升高, 沉淀析出相数量增加, 中间相向平衡相转变。

由以上实验结果可知, 虽然合金的强度和导电性能是一对矛盾, 但在输变电设备中, 铝合金铸件一般是当作结构件使用, 并不承受大的(动)载荷(表 3 是此类铸件通常要求的力学及电学性能), 由此, 适当降低合金的强度以满足对导电性的特殊要求, 是一种获得高导电性零(部)件的行之有效的方法。

表 3 输变电设备用铝合金性能指标

Table 3 Properties indexes of aluminium alloy used for transmit and transform electricity devices

Alloy	σ_b /MPa	HB	δ /%	Conductivity (IACS)
As-cast	226~245	75~85	3~5	40~41

根据以上分析, 作者尝试在保证合金力学性能满足基本要求的前提下, 适当提高热处理时的温度

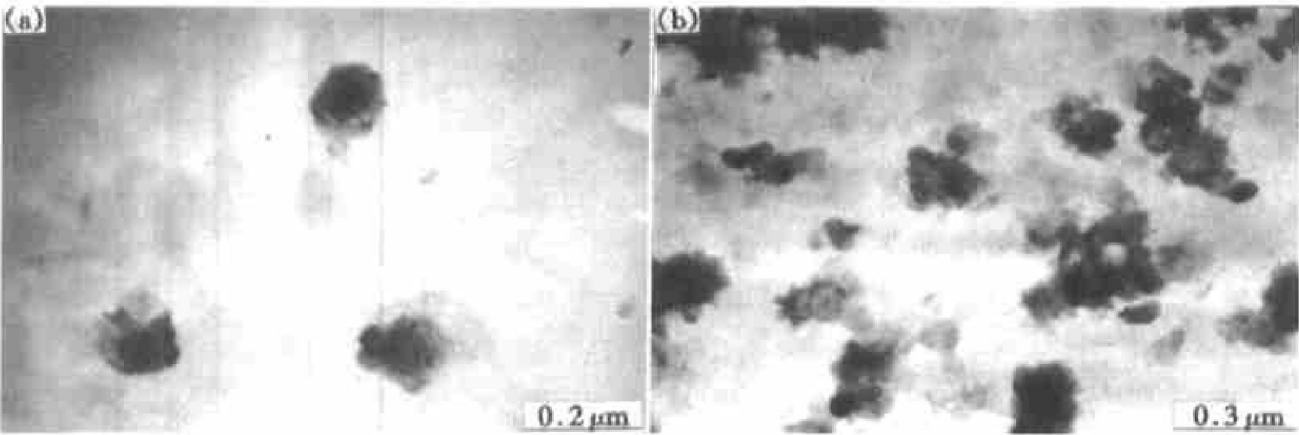


图 7 经不同时效温度处理后的 ZLSi7MgA 合金的 TEM 照片

Fig. 7 TEM morphologies of ZLSi7MgA alloy under difference aging temperature
(a) -165 °C, 8 h; (b) -210 °C, 8 h

以改善合金的电学性能。从表 4 给出的实验结果可以看出, 该工艺可以满足输变电设备对铝合金的力学及电学性能的要求。显然, 直接提高 T6 的时效温度, 也可以获得同样的效果。

表 4 热处理工艺及铝合金力学、电学性能的关系

Table 4 Relation between heat treatment and mechanical, electrical properties of aluminium alloy

Alloy	Heat treatment	Conductivity (IACS)	Mechanical property		
			HB	σ_b /MPa	δ /%
ZLSi7MgA	T6	38.63	90	270~ 280	3
	T6+ 300 °C, 1.25 h	39.20	82	228~ 260	2.5~ 5
	T6+ 300 °C, 1.50 h	40.14	80		
	T6+ 300 °C, 1.75 h	40.70	72		
	T6+ 300 °C, 2.00 h	41.16	61		

3 结论

- 1) 铝合金电导率随热处理时效温度的提高或时效时间的延长而增大。当时效温度较高时, G·P 区可以完成从中间相到平衡沉淀相的过渡, 与基体的共格关系破坏, 沉淀相周围基体已不再存在较大的畸变, 合金导电性能得到较为明显的改善。
- 2) 压力加工使硅相等沉淀物沿变形方向的相对分布发生了变化, 这有利于提高合金沿变形方向的电导率。
- 3) 定向凝固工艺可获得两相平行生长的理想柱状晶组织, 其一次轴为 $\langle 001 \rangle$ 方向, 与晶体学方向一致, 即与电场方向一致, 有利于提高合金的电导率。
- 4) 调整热处理工艺提高铝合金的导电性是一

种简便而行之有效的工艺, 适当提高热处理时效温度可以兼顾合金的强度和导电性能, 满足工程上的要求。

[REFERENCES]

[1] 黄恢元. 铸造手册第 3 卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. 78- 80.
HUANG Huī-yuan. Casting Handbook Vol. 3 [M]. Beijing: Machine Industry Press, 1993. 78- 80.

[2] 张冀粤, 黄积荣, 王智民. 合金元素对铸造 AlSi7Mg 合金电导率的影响[J]. 西安理工大学学报, 1999, 15 (1): 106- 110.
ZHANG Jī-yue, HUANG Jī-rong, WANG Zhī-mín. Ef-
fect of alloy elements on casting AlSi7Mg alloy electrical
conductivity [J]. Journal of Xi'an University of Technol-
ogy, 1999, 15(1): 106- 110.

[3] 周 玉. 材料分析方法[M]. 北京: 机械工业出版社,
2000. 216- 220.
ZHOU Yu. Material Analyzing Method [M]. Beijing:
Machine Industry Press, 2000. 216- 220.

[4] 刘 祥. 铸造合金的力学和物理性能[M]. 北京: 机
械工业出版社, 1981.
LIU Xiang. Mechanical and Physical Properties of
Casting Alloy [M]. Beijing: Machine Industry Press,
1981.

[5] Mondolfo L F. 王祝堂译. 铝合金的组织与性能[M].
北京: 冶金工业出版社, 1988. 82.
Mondolfo L F. WANG Zhū-tang transl. Aluminium Al-
loys: Structure and Property [M]. Beijing: Metallurgical
Industry Press, 1988. 82.

[6] 谢希文, 路若英. 金属学原理[M]. 北京: 航空工业出
版社, 1989. 178.

- XIE Xi-wen, LU Ruo-yin. Metallography Principle [M]. Beijing: Aeronautical Industry Press, 1989. 178.
- [7] 胡汉起. 金属凝固原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1991. 165.
- HU Han-qi. Metal Solidifying Principle [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1991. 165.
- [8] 余应梅, 杨 凯. PL4 导弹抛面反射体研制总结[Z]. 北京: 航空材料研究院, 1986.
- YU Ying-mei, YANG Kai. Development of PL4 guided missile projecting surface reflecting body [Z]. Beijing: Institute of Aeronautical Material, 1986.
- [9] 罗丰华, 尹志民, 王明朴, 等. 冷变形 Cu-8~13Zn 合金的电阻率及其在退火过程中的恢复[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(Suppl. 1): 83-87.
- LUO Feng-hua, YIN Zhi-min, WANG Ming-pu, et al. Resistivity of cold deformed Cu-8~13Zn alloys and its restoring during annealing process [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(Suppl. 1): 83-87.
- [10] 林高用, 张胜华. Cu-Ni-Si-Cr-Fe 合金时效强化特性的研究[J]. 金属热处理, 2001, 4: 28-30.
- LIN Gao-yong, ZHANG Sheng-hua. Study on age strengthening characteristic of Cu-Ni-Si-Cr-Fe alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2001, 4: 28-30.

Effect of heat working technology on ZLSi7MgA alloy electrical conductivity

YANG Di-xin, XIA Qing, YANG Liu-shuan, LIU Ya-min

(Department of Materials Science and Engineering, Luoyang Institute of Technology,
Luoyang 471039, China)

[Abstract] The effect of heat working technologies, heat treatment, press working and solidifying along the definite direction etc. on electrical conductivity of ZLSi7MgA alloy was studied. The results shows that, press working makes the relative distribution of silicon phases along the deformed direction take place change; the ideal columnar crystal can be obtained by technology solidifying along the definite direction; the raising aging temperature can impel the transition from middle phases to equilibrium precipitate phases, and eliminate the distortion of matrix round the precipitate phases. Above-mentioned technologies all can raise the alloy electric conductivity. The engineering need can be satisfied to both the strength and electric conductivity through suitable rising ageing temperature to improve the alloy electrical property.

[Key words] aluminium; ZLSi7MgA alloy; heat working technology; electrical conductivity

(编辑 吴家泉)