

单晶连铸铝线材的导电性能^①

范新会

(西安工业学院材料工程系, 西安 710032)

李建国 傅恒志

(西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

摘 要 测试了单晶连铸铝线材的室温导电性能, 单晶连铸工业纯铝的电阻率平均为 $2.6455 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$, 比金属型多晶试样表面细晶区降低 11.5%, 比中心粗晶区降低 8.1%。晶界的有无对电阻率的影响很大, 而晶界的多少对电阻率的影响较小。晶界对电阻率的影响, 归因于晶界上大量存在的空位、位错及杂质对电子散射的综合效应。

关键词 金属单晶 连续铸造 工业纯铝 电阻率 晶界

中图法分类号 TG113.223

随着电子工业和通讯技术的发展, 对导体金属的性能提出了更高的要求; 尤其是对作为通讯和音响电缆的导体线材, 更要求其减小信号传输的失真性。因此, 人们一方面追求使用高纯金属导体如 6N-OFC^[1], 另一方面则从导体线材的制造工艺入手, 改善金属导体的组织结构, 如在日本先后开发的 LC-OFC^[2] 和 PCOCC^[3] 铜线材, 已用于高保真音像电缆。LC-OFC 是 80 年代初期采用的技术, 它是将无氧铜(OFC)在惰性气氛中加热至接近熔点温度, 进行固相处理使晶粒异常长大, 得到巨大晶粒无氧铜(GC-OFC); 再经过机械拉拔, 使晶粒沿着拉拔方向伸长, 成为平行排列的线性无氧铜组织(LC-OFC)。这种组织使垂直于轴线的横向晶界减少, 做为音像电缆导体, 使音质的效果明显提高。自 80 年代中后期, 单晶连铸技术被开发以后, 采用单晶金属导体制造音像电缆成为可能, 由于完全消除了横向晶界, 其信号传输特性应比 LC-OFC 更高。古河电器公司以单晶连铸技术开发的 PCOCC(Pure Copper by O. C. C.) 系列音像电缆, 被认为是最理想的导体^[4]。

通过对单晶连铸铝线材的导电性能测试,

探讨晶界对导电性能及信号传输性能的影响。

1 试验方法

1.1 试样及其加工

铸态试样从单晶连铸 $d 8 \text{ mm}$ 线材^[5]上截取, 以金属型浇注的同种材料 $d 8 \text{ mm}$ 多晶试棒为对比试样。选用金属型铸棒是考虑到可以得到典型的柱状晶组织, 如图 1(b) 所示。这种柱状晶的方向基本上与试样轴线方向垂直, 因此沿长度方向, 主要为横向晶界, 从而可以研究横向晶界对导电性能的影响。此外, 金属型铸棒内外组织晶粒大小相差较大, 可以研究横向晶界数目对电阻率影响的定量关系。为此, 将铸态试棒先从中间用电火花切割方法取出 1 mm 厚的薄片(如图 2 所示)。再将此薄片沿直径方向切成 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的方条, 长 120 mm 。这样从多晶试样不同位置上切取的方条样内便具有不同数目的横向晶界数。为了使测量具有可比性, 单晶试样也同样切取。试样编号从圆柱试样边缘到中心分别为 1, 2, 3, 4, 单晶试样和多晶试样编号前分别加“S”和“P”区别。

1.2 晶界数量的测定

① 凝固技术国家重点实验室开放课题资助
范新会, 男, 33 岁, 工学博士, 副教授

收稿日期: 1997-12-29; 修回日期: 1998-06-28

从试样的纵剖面金相照片上(图1(b)),在各电阻试样对应位置处,测量3次以上沿长度方向1 cm 线段上的晶界数,取其平均值代表相应电阻试样单位长度的晶界数(个/cm)。由于电阻试样的横截面积较小(与晶粒的最小尺寸相当),故可认为在电阻试样的横截面中只有一个晶粒,即不存在纵向晶界。这样,所测量的单位长度的晶界数即可近似代表单位体积中的晶界面积,即面缺陷密度(cm^2/cm^3)。

1.3 电阻率的测量

由于纯金属铝是电的良导体,电阻率较小,因此要求测量方法及仪器具有较高的精度。

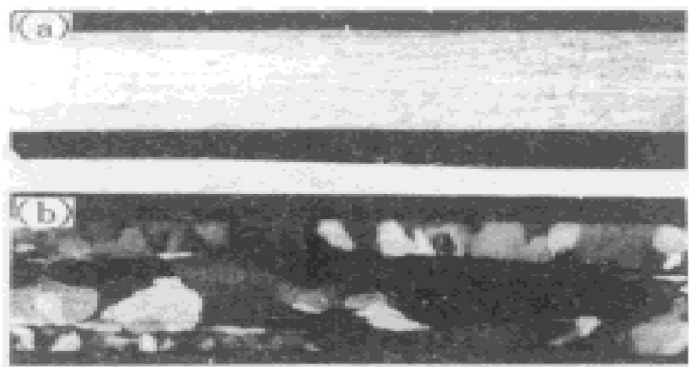


图1 试样的金相组织

Fig. 1 Microstructures of samples

(a) —Single crystal sample $\times 1.2$;

(b) —Polycrystal sample $\times 1.6$

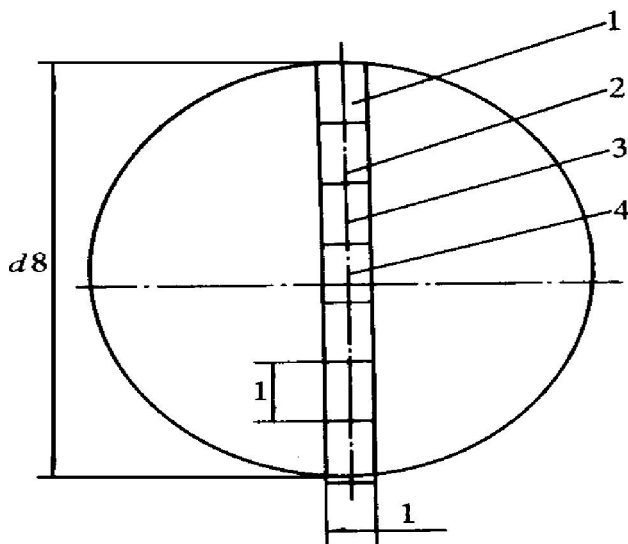


图2 电阻测量试样的切取方法及编号

Fig. 2 Method of cutting out samples and numbering from 1 to 4

本实验采用的测试仪器为 QJ19 型四点式

双臂电桥,其测量电阻的精度可达 $10^{-6} \Omega$ 。所有试样的电阻统一在同一温度下测量(测量当日室温 $\sim 18^\circ\text{C}$),电阻率按欧姆定律计算:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L} \quad (1)$$

式中 ρ —计算的试样电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; R —测量的试样电阻, Ω ; S —试样的截面积, m^2 ; L —测量电阻时电压测取点之间的距离, m 。

2 试验结果

图3是晶界数与电阻率的关系。从图中可以看出,单晶铝具有很低的电阻率,而多晶铝试样随着横向晶界数目的增加电阻率增加。单晶铝的电阻率平均为 $2.6455 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ (误差小于1%),比金属型多晶试样表面细晶区降低11.5%,比中心粗晶区降低8.1%。从而说明横向晶界对导电性能有显著影响。

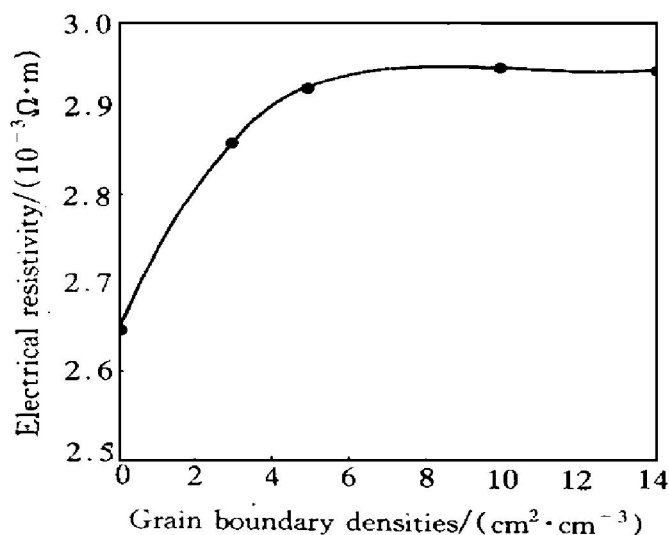


图3 晶界数与电阻率的关系

Fig. 3 Influence of grain boundary densities on electrical resistivity

3 分析及讨论

3.1 金属的电阻率

金属电子理论认为散射是金属产生电阻的根本原因^[6],当电子通过一个理想晶体点阵时,它将不受散射;只有晶体点阵完整性遭到

破坏的地方, 电子波才受到散射。可能引起散射的因素很多, 诸如温度、压力、杂质、塑性变形及晶体的物理缺陷等^[7]。因此, 金属的电阻率由 Matthiessen 定律一般地可表示为

$$\rho = \rho_{\text{therm}} + \rho_{\text{phys}} + \rho_{\text{chem}} \quad (2)$$

式中 ρ_{therm} — 晶格热振动引起的电阻率, ρ_{phys} — 晶格物理缺陷引起的电阻率, ρ_{chem} — 金属化学不纯引起的电阻率。

其中 ρ_{therm} 的影响与温度有关, ρ_{chem} 与纯度有关。在本文的试验中, 多晶试样和单晶试样成分相同, 测试条件相同, 因此这两项引起的电阻率变化可以忽略, 出现电阻率的差异应主要归因于晶格的物理缺陷, 也就是晶粒的晶界。从试验结果可以看出多晶试样表层细晶区的电阻率高于中心粗晶区, 都高于单晶试样, 从而证明晶界对于电阻率的确有比较大的影响。

3.2 金属晶界的物理本质

金属物理学告诉我们, 金属的晶界中存在着大量的空位、位错等缺陷, 是一种面缺陷。凝固理论也指出, 在晶界处存在着溶质元素的偏析^[8]。因此, 金属的晶界可以看作是含有杂质和大量晶体缺陷的单晶体隔离层, 成为电子传输中的一个散射中心^[7], 引入散射, 并增加电阻。谦田长生^[9]在研究晶界对无氧铜导电性的影响时, 通过高倍电子显微分析, 认为晶界是一个真空沟槽, 可以把晶界看作介于单晶体之间的电容。并指出, 当铜中含有[O]时, 则在晶界处存在着 Cu_2O 电介质, 晶界的电容性质影响更加强烈。因此, 金属的晶界不仅对电阻率有影响, 对于音频信号的传输, 由于增加了导体的交流阻抗, 影响更加严重, 使信号的衰减和失真增加。进一步通过实验证明, 尽管非晶态的水银(Hg)导体的电导率只有铜的十分之一, 但却具有十分优美的音质传输效果。因此, 日立公司一直在倡导“晶界音质恶化”论, 率先在 80 年代初期开发了线性无氧铜产品, 并开始注意到单晶导线的开发^[10]。

3.3 晶界对导电性能的影响

从图 3 可以看出, 晶界对电阻率的影响不

象空位和位错那样具有简单的线性关系^[6]。晶界从无到有, 对电阻率的影响很大, 一旦有了晶界, 金属便以多晶体形式出现; 而晶界多少对电阻率的影响则比较小, 这也是长期以来人们不太重视晶界对导电性影响的一个原因。对这一现象的解释, 涉及到晶界的散射机理, 有待于进一步深入研究。但这一结果证明了开发单晶连铸技术, 消除金属晶界, 是提高金属导电性, 为电子工业和通讯技术提供优质导体材料的一条重要而且有效的途径。

4 结论

(1) 单晶连铸工业纯铝的电阻率平均为 $2.6455 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$, 比金属型多晶试样表面细晶区降低 11.5%, 比中心粗晶区降低 8.1%。

(2) 导电性能测试结果表明, 晶界的有无对电阻率的影响很大, 而晶界的多少对电阻率的影响较小。

(3) 晶界对电阻率的影响, 归因于晶界上大量存在的空位、位错及杂质对电子散射的综合效应。

REFERENCES

- 1 Miyake Y. (三宅保彦). J Japan Inst Metals (日本金属学会志), 1992, 31(4): 267–276.
- 2 谦田长生. J JAS, 1983, 23(5): 39.
- 3 斋腾宏嗣. Copper (铜), 1991, (13/14): 4.
- 4 谦田长生. J JAS, 1983, 23(9): 43–44.
- 5 Fan Xinhui (范新会), Wei Pengyi (魏朋义), Li Jianguo (李建国) *et al.* Chinese Journal of Nonferrous Metals (中国有色金属学报), 1996, 6(4): 106–109.
- 6 Tian Shi (田莪), Li Xiuchen (李秀臣) and Liu Zhengtang (刘正堂). Physical Properties of Metals (金属物理性能). Beijing: Aviation Industry Press, 1994, 36–50.
- 7 Dugdale J S. Electrical Properties of Metals and Alloys (金属与合金的电学性质). Beijing: Higher Education Press, 1988, 114–118.
- 8 Kurz W and Fisher D J. Principle of Solidification (凝

- 固原理). Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1987: 83– 90. (10): 184– 186.
- 9 谦田长生. Radio Tech. (ラジオ技术). 1983, 37 10 星川雄. J Japan Inst Acoustic (日本音响学会志), 1991, 47(2): 112– 118.

ELECTRICAL PROPERTY OF CCSC ALUMINUM WIRE

Fan Xinhui

Department of Material Engineering,

Xi'an Institute of Technology, Xi'an 710032, P. R. China

Li Jianguo and Fu Hengzhi

State Key Laboratory of Solidification Processing,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China

ABSTRACT The electrical properties of single crystal aluminum wire made by the technique of continuous casting of single crystal (CCSC) metals were measured and analyzed. The results indicated that the effect of with or without grain boundary is significant to specific resistance, but the effect of quantity of grain boundaries is much smaller. The specific resistance of CCSC single crystal aluminum is $2.6455 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, which is 11.5% lower than that of fine crystal sample cut out near the surface of die casting rod, and 8.1% lower than that of the coarse crystal sample cut out at the central of die casting rod. The influence of grain boundary to specific resistance is the combination emission effects of dislocations, lattice vacant sites and impurities, which are largely gathered at grain boundary.

Key words single crystal continuous casting aluminum electric resistance grain boundary

(编辑 朱忠国)