

文章编号: 1004-0609(1999)03-0577-05

连续铸造铜单晶的力学性能和电阻率^①

许振明¹ 李建国¹ 李金山² 傅恒志²

(1. 上海交通大学铸造研究所, 上海 200030; 2. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 采用自制水平单晶连铸设备制备铜单晶, 并对铜单晶的力学性能和电阻率进行了测试分析。结果表明, 铜单晶与多晶铸棒比, 抗拉强度降低 20.85%, 屈服强度降低 86.54%, 延伸率增加 80.24%, 断面收缩率增加 394.50%; 与轧制棒比, 抗拉强度降低 65.97%, 屈服强度降低 98.27%, 延伸率增加 270.00%, 断面收缩率增加 4.00%; 与多晶铸棒比电阻率降低 15.57%, 与定向凝固铸棒比电阻率降低 4.24%。因此, 连铸铜单晶具有非常优异的塑性加工性能和低电阻率。

关键词: 连续铸造; 铜单晶; 力学性能; 电阻率

中图分类号: TG249, TG146.1

文献标识码: A

单晶连铸技术不仅可以生产出具有外观优美和内部质量好的铸件^[1,2], 而且这些产品还具有非常优异的塑性加工性能。例如, 采用该技术生产的 $d20\text{ mm}$ 的 Al-1% Si 单晶铸棒, 在无任何中间退火时, 可冷拔至 $d100\text{ }\mu\text{m}$ 的细线; $d4\text{ mm}$ 的 Sn-30% Zn 合金棒可冷拔至 $d100\text{ }\mu\text{m}$; 对于加工性能较差的金属镁, 不加任何合金元素而获得单晶板材, 可冲压成 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的薄板, 且不降低其耐蚀性^[3]。然而, 对于高熔点的连铸铜单晶的力学性能和电性能的研究较少^[4~6], 而在音响设备中各种导线都采用铜线, 因此, 研究连铸铜单晶的力学性能和电阻率, 对电子工业的发展更具有实际意义。

本文在自制水平单晶连铸设备^[7,8]上制备铜单晶, 进行力学性能及电性能测试分析, 并同其它组织的棒材进行对比, 为连铸铜单晶的工业应用提供依据。

1 实验

铜单晶的制造方法详见文献[9, 10], 采

用 1 号电解铜为原料。

1.1 力学性能

拉伸试验是在 CSS-1110 电子性能试验机上测定, 试棒尺寸为 $d6\text{ mm} \times 60\text{ mm}$ 。采用连铸定向凝固试棒和轧制铜棒进行对比。

1.2 电阻率的测定

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 $10^{-6}\text{ }\Omega$ 。分别采用连铸多晶、定向凝固试棒作为对比试样, 试棒尺寸为 $d7\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 。其组织如图 1 所示。

2 实验结果与分析

2.1 力学性能

表 1 为连铸铜单晶与其它组织铜铸棒力学性能对比。在拉伸应力-应变图上发现铜单晶与定向凝固多晶有明显的屈服点^[10], 并且两者屈服强度值相当, 这说明定向凝固多晶与单晶都很容易进行塑性加工。铜单晶与多晶铸棒比, 抗拉强度降低了 20.85%, 屈服强度降低了 86.54%, 延伸率增加了 80.24%, 断面收缩

① 中国博士后基金和航空基金资助项目(97G53078) 收稿日期: 1998-07-23; 修回日期: 1998-09-07
许振明(1965-), 男, 副教授, 博士

率增加了 394.50%；连铸铜单晶与轧制棒比，抗拉强度降低了 65.97%，屈服强度降低了 98.27%，延伸率增加了 270.00%，断面收缩率增加了 4.00%；铜单晶与定向凝固铸棒比，抗拉强度降低了 13.70%，屈服强度相当，延伸率增加了 10.81%，断面收缩率增加了 4.82%。

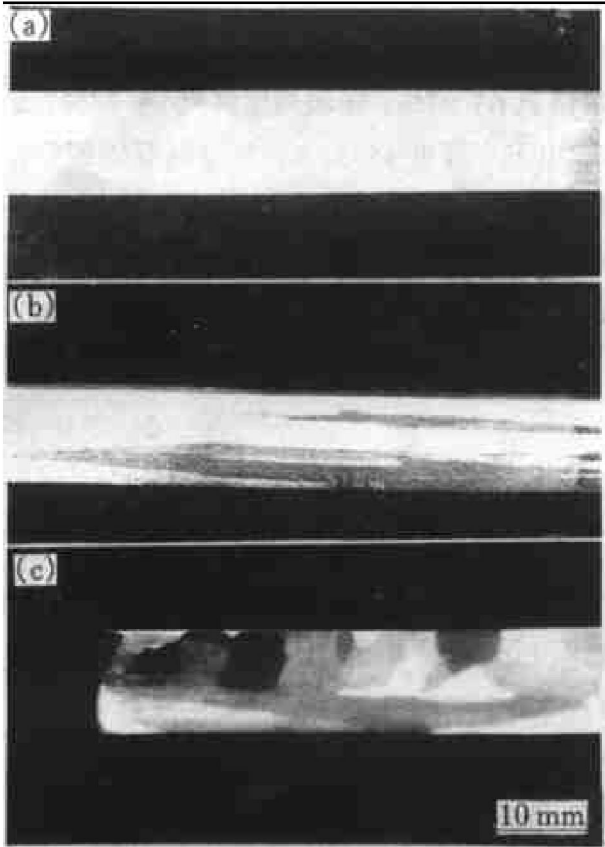


图 1 测定电阻率的试样的组织

Fig. 1 Microstructures of samples for measuring resistivity

(a) —Single crystal; (b) —Unidirectional crystal;
(c) —Polycrystal

图 2 为拉断后的试样。由图中可以看出，轧制试样在断裂前只发生了局部颈缩，而连铸

单晶和定向凝固试样均发生均匀的变形，最后局部颈缩而断裂，只不过铜单晶变形程度比定向凝固试样较大；并且在变形过程中有很明显的滑移线，轧制多晶试样则很难观察到。

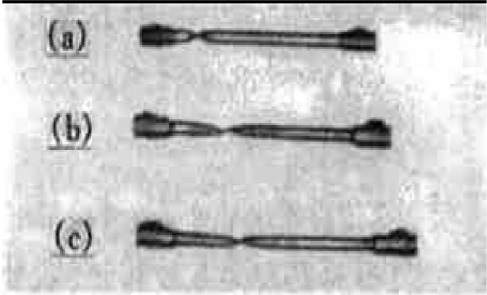


图 2 拉伸实验断裂后的试样

Fig. 2 Tensile samples after tensing

(a) —Rolling polycrystal; (b) —Unidirectional crystal;
(c) —Single crystal

图 3 为拉伸试样拉断后的断口形貌。从图中可以看出，连铸单晶和定向凝固试样的断口有明显的塑性变形；轧制多晶试样断口为圆形，虽然断口为韧性断口，但韧窝要比连铸单晶和定向凝固的浅。这也证明了连铸单晶和定向凝固组织的塑性要好于轧制多晶。

定向凝固组织断口为三角形，而单晶为扁尖状，这是由于单晶和定向凝固晶体具有一定取向，在变形时滑移沿着一定方向进行，因此，变形具有一定的方向性。

从图 4 观察发现，在连铸铜单晶试样断口附近存在滑移带和由于变形而产生的滑移相区的棱线。

2. 1. 1 滑移

从图 4 可以看出，连铸铜单晶的滑移线相互平行且分布均匀，而轧制多晶与连铸铜单晶不同，没有方向性、且分布不均匀。

表 1 连铸铜单晶与其它组织铸棒机械性能对比

Table 1 Mechanical properties of single crystal copper and other crystal copper rods

	σ_s / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	σ_b / MPa	φ	δ
Single crystal	6.73		134.56	89.01%	30.64%
Unidirectional crystal	7.18		155.92	84.92%	27.65%
Polycrystal by rolling		389.96	395.42	85.59%	8.27%
Polycrystal as cast		50.00	170.00	18.00%	17.00%



图 3 拉伸试样断口形貌

Fig. 3 Fracture morphologies of tensile samples
(a) —Rolling polycrystal; (b) —Unidirectional crystal;
(c) —Single crystal

铜为面心立方晶体，滑移面为(111)，滑移方向为[110]，滑移时原子移动的距离是原子间距的整数倍，滑移后晶体各部分的位相不变，滑移的结果使大量原子逐步从一个稳定位置移到另一个稳定位置，从而产生宏观塑性变形，如 4(c) 所示。

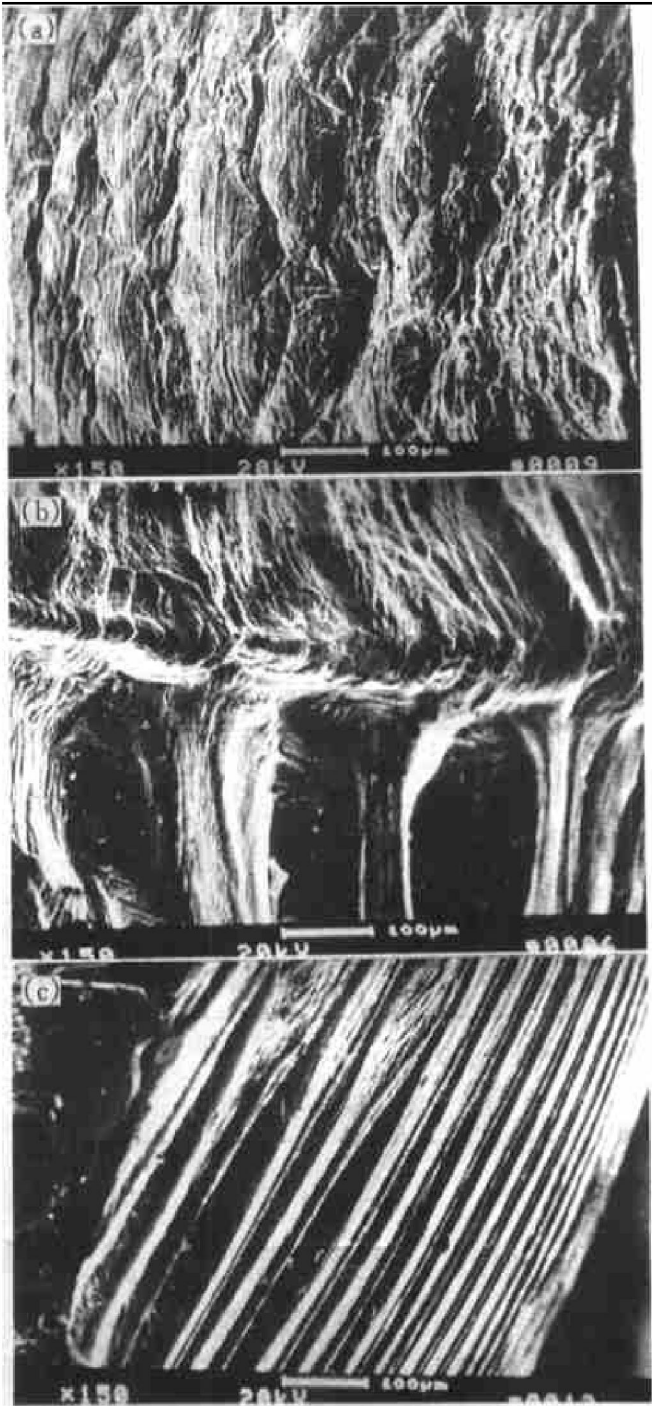


图 4 拉伸试样表面的滑移情况

Fig. 4 Slip morphologies on surface of tensile samples
(a) —Rolling polycrystal; (b) —Unidirectional crystal;
(c) —Single crystal

2. 1. 2 孪生

从图 4(c) 可见，经塑性变形后，在试样的横截面组织中明显存在因晶体发生转动形成的棱面。经 X 射线衍射分析得知，变形前截面为(200)，变形后为(200)和(311)，如图 5 所示。这说明连铸铜单晶除了以上述滑移方式发生塑性变形外，还以孪生方式发生变形。

从以上分析可知, 连铸铜单晶的塑性变形主要机制为滑移与孪生。

2.2 电阻率

从表 2 可以看出, 连铸铜单晶与多晶铸棒相比电阻率降低了 15. 57%, 与定向凝固铸棒相比电阻率降低了 4. 24% 。

表 2 连铸铜单晶与其它组织电阻率值对比
Table 2 Comparison of resistivities of single crystal copper with other crystal copper rods

Sample	Resistivity/ Ω
Polycrystal	2.139×10^{-8}
Continuous casting unidirectional crystal	1.886×10^{-8}
Continuous casting single crystal	1.806×10^{-8}

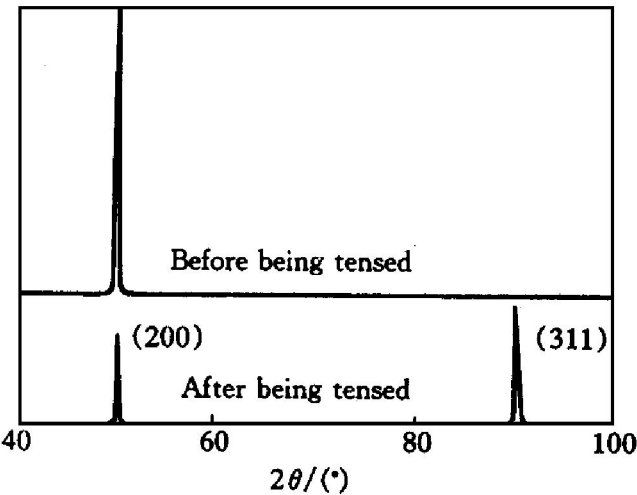


图 5 拉伸试样拉伸前后横截面的 X 射线衍射谱

Fig. 5 XRD spectra for cross section of samples before and after being tensed

金属电子理论认为, 只有晶体点阵完整性遭到破坏的地方, 电子波才受到散射, 散射是金属产生电阻的根本原因。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。因此, 金属的电阻率由 Matthiessen 定律可表示为

$$\rho = \rho_l + \rho_p + \rho_c$$

式中 ρ_l 一晶格热振动引起的电阻率;
 ρ_p 一晶格物理缺陷引起的电阻率;
 ρ_c 一金属化学不纯引起的电阻率。

其中 ρ_l 的影响与温度有关, ρ_c 与纯度有关。在本研究中, 多晶试样、定向凝固试样、单晶试样都采用同一炉铜液制备, 并且测试条件相同。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归结于晶格的缺陷, 也就是晶粒的晶界(晶粒内部的纯度是相同的)。从表 2 中实验结果可以看出, 连铸铜单晶与多晶铸棒相比电阻率降低了 15. 57%, 而与定向凝固铸棒相比电阻率只降低了 4. 24%。这说明横向晶界对电阻值的变化起到很大的作用。从金属物理学的观点来看, 金属的晶界中存在着大量的空位、位错等缺陷。同时, 从凝固理论得知, 在晶界处存在溶质元素的偏析, 因此, 金属的晶界可以看作是含有杂质的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, 引入散射, 电阻增加。

金相组织中杂质微粒对导电特性的影响可以被看成如图 6 所示, 将可能发生 3 种情况:

- (1) 图 6(a) 中没有杂质, 金属的晶格没有被破坏, 自由电子的空间移动没有障碍;
- (2) 图 6(b) 中相当于定向凝固组织, 杂质只是破坏了一些金属晶格, 但并没有对自由电子的定向移动造成多大的障碍;

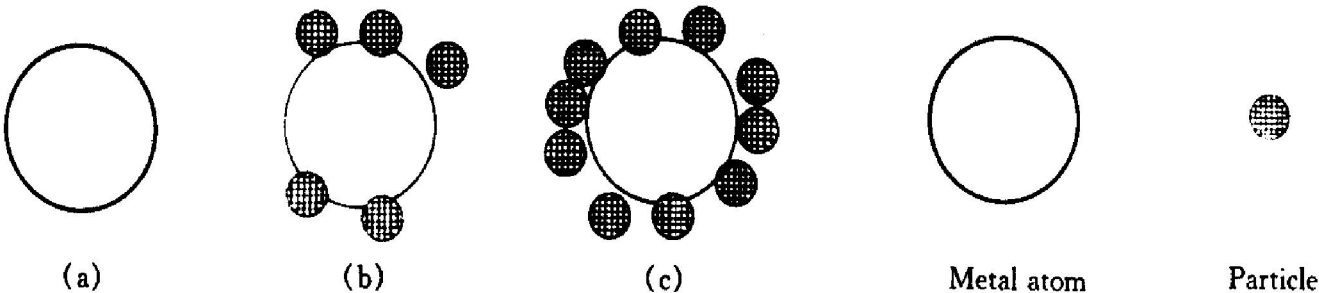


图 6 杂质对金属原子的影响

Fig. 6 Influence of inclusions on metal atoms

(3) 图 6(c) 中相当于多晶情况, 金属晶格周围被杂质包围, 破坏了金属晶格, 自由电子的定向移动造成很大的障碍。

当然, 这些情况发生在导体表面和导体内部深层中, 对电流的传输所造成的影响是不同的, 在表面的影响要严重得多。在图 6(a) 中, 自由电子可以从晶体小颗粒中自由通过; 图 6(b) 中, 自由电子尚可以从晶体小颗粒之中自由通过, 所造成的影响要小于图 6(c) 情况; 图 6(c) 中杂质粒子将使自由电子通路隔断, 被隔离的金属晶体小颗粒已与金属母体形成了电容。由于电容的作用, 使电能损耗大为增加。因此, 多晶的电阻率大于定向凝固组织和单晶。

综上所述, 连铸铜单晶由于消除了晶界, 提高了导电性, 是电子工业和通讯技术的优质导体材料。

REFERENCES

1 Ohno A. Casting of Near Net Shape Products. The Metallur-

gical Society, 1988, 177~ 184.

2 Ohno A. Journal of Metals, 1986, 38: 14.

3 Ohno A and Soda H. In: Weinberg F. International Symposium on Solidification Processing, The Metall Soc of CIM Proc, 1990, 215~ 228.

4 Kamedu A and Ohno A. Materias Japan, (in Japanese), 1988, 27(5): 388.

5 Soda H, McLean A and Wang Z. Journal of Materials Science, 1995, 30: 5438.

6 Soda H, Motoyoyasa G and McLean A. J Cast Metals Res, 1996, 9(9): 37.

7 Fan Xinhui(范新会), Wei Pengyi(魏朋义), Li Jianguo(李建国) *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1996, 6(4): 106.

8 Fan Xinhui(范新会), Wei Pengyi(魏朋义), Li Jianguo(李建国) *et al.* The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1997, 7(2): 134.

9 Xu Zhenming(许振明), Li Jianguo(李建国) and Fu Hengzhi(傅恒志). Trans Nonferrous Met Soc China. 1998, 8(2): 277.

10 Xu Zhenming(许振明). Continuous Casting Technology of Single Crystal Copper. Northwestern Polytechnical University Postdoctor Report, 1998, 4.

Mechanical properties and electrical resistivity of continuous casting single-crystal copper

Xu Zhenming¹, Li Jianguo¹, Li Jinshan², Fu Hengzhi²

1. Research Institute for Casting,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, P. R. China

2. State Key Laboratory of Solidification Processing,

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

Abstract: The single-crystal copper is casted by self-made horizontal continuous casting equipment. The mechanical properties and resistivity of the single-crystal copper were studied. It was shown that the tensile strength and the yield strength of the continuous casting single-crystal copper rod decrease 20.85% and 86.54%, respectively, while the elongation and the reduction of cross-section area increase 80.24% and 394.50%, respectively, than those of the polycrystal copper rod. Compared with the rolling polycrystal copper, the tensile strength and the yield strength of the continuous casting single-crystal copper rod decrease 65.97% and 98.27%, respectively, while the elongation and the reduction of cross-section area increase 270.00% and 4.00%, respectively. The resistivity of single-crystal copper rod are 15.57% and 4.24%, respectively, which are lower than those of polycrystal and unidirectionally solidified polycrystal copper rods. The continuous casting single crystal copper rod have excellent properties for cold working and lower resistivity.

Key words: continuous casting; single-crystal copper; mechanical properties; electrical resistivity (编辑 黄劲松)