

单晶连铸技术原理及试验研究^①

范新会 魏朋义 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 单晶连铸技术是一项新型的有色金属连铸技术, 可以连续制造无限长的、表面呈镜面状, 内部无缩孔、缩松、气孔、夹杂等铸造缺陷的单晶线材, 属于近成品形状(near-net-shape)生产技术。其产品金属单晶线材, 具有优异的塑性加工性能和良好的导电性能, 是一种可以满足电子工业要求的导电材料。该文介绍了单晶连铸技术的原理, 以及利用小型单晶连铸设备制造的纯铝单晶线材的工艺试验及性能。

关键词 金属单晶 连续铸造 导电线材 工艺试验 技术原理

电子技术的发展, 对金属导电材料的品质提出了更高的要求。作为集成电路基板材料和半导体元件粘接线的金属导体, 希望采用无晶界、无缺陷的高级材料; 在通信、音像设备中的电缆导体, 采用单晶制品, 可以提高讯号传递的保真性^[1]。因此开发单晶金属制造技术, 使金属单晶产品的生产工程化, 对促进电子技术及通信技术的发展有着十分重要的意义。

单晶连铸技术就是为了满足这一目的、在八十年代首先在日本发展起来的一项新型导电线材生产技术^[2]。该技术将先进的定向凝固技术与高效的连续铸造技术相结合, 产品具有光滑如镜面的表面质量, 内部无任何缩孔、缩松、气孔、夹杂等铸造缺陷, 而且可以实现整个产品为单晶组织。这些优点是传统的连续铸造方法所无法达到的。产品还具有优异的塑性加工性能和良好的导电性能, 可以进一步挖掘金属导体的潜力^[3, 4]。

单晶连铸技术在国外发展很快, 在国内则刚刚起步。我们西北工业大学凝固技术国家重点实验室从1994年起开始开发这一技术, 现已在实验室自行设计制造了一台小型单晶连铸设备, 并已完成了原理性工艺试验, 目前已能成功地每炉拉制出 $d8\text{mm}$ 、长7~10m的单晶

铝线材。

本文将介绍单晶连铸技术的原理及我们的研究进展。

1 单晶连铸技术的原理及特点

单晶连铸技术原理如图1(b)所示。与传统的连续铸造原理相比(图1(a)), 单晶连铸技术

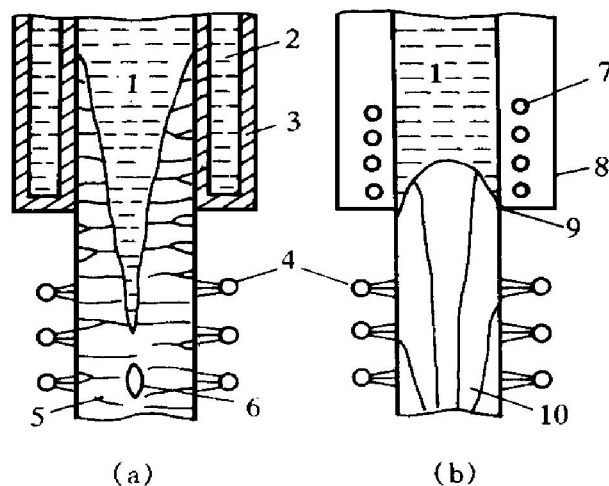


图1 连续铸造原理

- (a) —传统连铸; (b) —单晶连铸;
1—溶液; 2—冷却水; 3—铸型; 4—冷却水喷咀;
5—铸锭; 6—气孔; 7—电炉丝; 8—加热铸型;
9—液体膜; 10—单向凝固铸锭

① 收稿日期: 1996-04-08; 修回日期: 1996-06-05 范新会, 男, 31岁, 讲师, 博士研究生

采用加热铸型和一个与之分离的冷却装置代替传统的水冷结晶器。在冷却装置与加热铸型之间造成一个轴向温度梯度, 从而形成定向凝固条件。该技术的关键在于保持铸型内壁温度高于金属的熔点, 避免型壁形核, 保证晶体单向生长。由于型壁温度高于金属熔体温度, 使型内表层金属液过热, 铸锭中心先于表层凝固, 固液界面向液体中凸出。这样的凝固条件使凝固过程具有与传统连铸完全不同的特点:

(1) 铸锭与铸型之间始终存在一层液体膜, 铸锭表面在离开铸型出口一小段距离之后才自由凝固, 铸锭表面光滑呈镜面状。

(2) 凸出的固液界面有利于凝固过程中析出的气体及夹杂不断排向液体, 不被卷入铸锭, 而且不存在补缩困难的问题。因此, 铸锭组织致密, 无气孔、缩孔、缩松等铸造缺陷。

(3) 凸出的固液界面有利于引晶阶段晶体的竞争生长, 易于实现多晶组织向单晶的演化。

但是, 由于铸锭在离开铸型时, 表面仍呈液体状态, 铸锭的成形依靠液膜表面张力与液体金属静压力和重力的平衡, 使得该技术在具体的工艺方案及工艺控制上有其特殊性。

2 实验设备及其设计原则

自制的实验室小型单晶连铸设备结构如图2所示。设备包括以下几个主要部分:

(1) 熔化保温系统: 熔化保温系统包括加热炉和坩埚。加热炉要求熔化速度快, 且能长时间保持所要求的温度。坩埚要求有良好的导热能力, 抗氧化烧损, 且与熔融金属长时间接触而不发生化学反应, 对金属无污染。

(2) 加热铸型系统: 加热铸型的设计是实现单晶连铸的关键技术。由于冷却器直接冷却铸锭表面, 客观上造成表面比中心散热快的条件, 而从原理上则要求中心先于表层凝固, 固液界面向液体一方凸出。因此合理设计加热铸型的结构, 加热元件的安排, 温度场的精确测控, 就成为实现单晶连铸的工艺关键。

(3) 冷却器: 冷却器的设计要求对铸锭均匀冷却, 并避免引起型壁形核, 出现杂晶。冷却器与铸型的间距应能调整, 以控制温度梯度。

(4) 牵引系统: 要求传动平稳, 速度应在较宽的范围内能实现连续可调。

(5) 液面高度的测控系统: 本设备采用水平连铸方案, 为了能够良好成型, 坩埚内液体金属高度应与铸型型腔上表面齐平, 使铸型出口处液体金属静压力与重力之和能与表面张力相平衡。同时又要保证铸型充满。因此液面高度应严格测控。

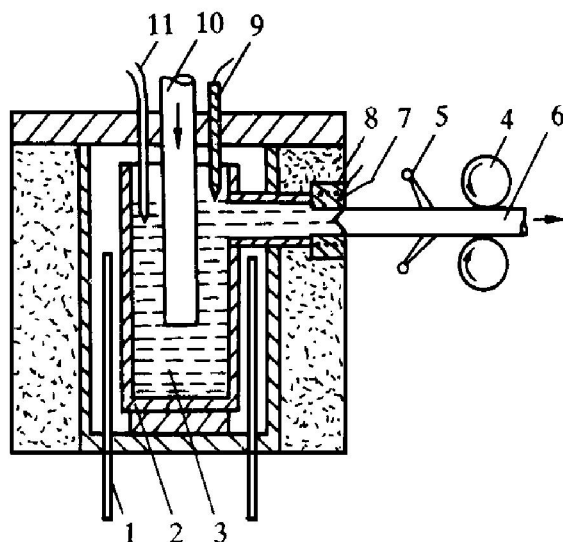


图2 单晶连铸设备结构示意图

1—SiC 加热体; 2—坩埚; 3—液体金属; 4—牵引系统;

5—冷却器; 6—铸锭; 7—热电偶; 8—加热铸型;

9—液面高度探测器; 10—液面高度控制棒; 11—热电偶

3 试验结果

3.1 工艺试验结果

利用自制的实验室小型单晶连铸设备, 以工业纯铝为原料进行了原理性工艺试验。结果表明, 本文所介绍的实验室小型单晶连铸设备, 原理上是成功的, 所制定的工艺操作规程是合理的。在熔化温度 $T_L = 685\text{ }^{\circ}\text{C}$ (纯铝熔点 $660\text{ }^{\circ}\text{C}$)、加热铸型内壁温度 $T_M = 720\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、冷却器到铸型出口间距 $L = 30\text{ mm}$ 、冷却水量为 200 L/h 、水温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的条件下, 以 $V = 149.5$

mm/min 的速度抽拉出 $d8\text{mm}$ 约 9~10m 长的单晶铝棒。单晶棒材直径均匀, 表面光亮呈镜面状态。

3.2 单晶连铸铝棒力学性能

从单晶连铸铝棒上截取试样, 按 GB228-76 标准加工成 $d5\text{mm}$ 拉伸试样, 并与金属型铸造 $d8\text{mm}$ 同种材料多晶试样进行对比拉伸试验, 其结果如附表所示。

4 分析与讨论

4.1 引锭操作规程

原理性工艺试验表明, 合理的引锭操作规程如下: 当炉内金属熔化完毕后, 进行除气、除渣; 调整熔体温度 T_L 及铸型温度 T_M , 使达到试验所要求的温度; 从铸型口插入引晶棒; 启动液面高度测控装置, 提升坩埚内金属液面; 当液面高度达到指定位置, 并已确定铸型及引晶头内被金属液充满时, 启动冷却器冷却引晶棒, 同时启动牵引机构, 连铸过程正式开始。

引锭操作的关键在于牵引开始时速度跟随过程。由于引晶棒与铸锭材质差异和结合部的传热热阻, 开始时引锭速度要慢, 逐步加速, 直到冷却器直接冷却铸锭。铸型温度稳定之后, 进入晶体稳态生长阶段, 牵引系统速度可保持恒定。加速过程要合适, 过快则因冷却能力跟不上, 导致铸锭离开铸型而未凝固部分过长, 发生弯曲甚至漏液; 加速过慢则因冷却太强而使铸锭表层在铸型内凝固发生卡死现象。故初期操作是引锭成功的关键。

4.2 稳定生长阶段工艺参数的配合

单晶连铸进入稳态以后, 可调整的主要工

艺参数如铸型温度 T_M , 液体金属温度 T_L , 冷却器与铸型出口间距 L 、冷却水量及牵引速度 V 可在一定范围内适当调整, 以期达到最佳配合。工艺参数配合是否恰当, 可以通过直接观察固液界面位置来判定。试验表明, 当固液界面与铸锭表面交线距离铸型出口约 2~3mm 时, 得到的铸锭表面光亮, 呈镜面状。工艺参数是否合理的另一个判据是检查铸锭初期单晶组织演化情况。合理的工艺参数应能较快得到单晶组织。

4.3 单晶连铸铝棒塑性特点

从附表可以看出, 单晶连铸铝棒抗拉强度比多晶铸棒低 38.8%, 屈服强度则稍高, 屈服比 $\sigma_{0.2}/\sigma_b$ 提高 93%, 延伸率提高 117%。从拉伸试样断后形貌(图 3)可以看出, 单晶试验断口收缩成针尖状。屈服比的提高, 一方面说明单晶铸棒的加工硬化程度很小, 可以预言其具有很高的塑性加工性能; 另一方面, 如通过该技术, 对合金进行改进, 使 σ_b 保持不变, 屈服比的提高则可使零件在机械设计时许用应力提高^[5]。因此有必要采用该技术对其它金属和合金进行深入研究。

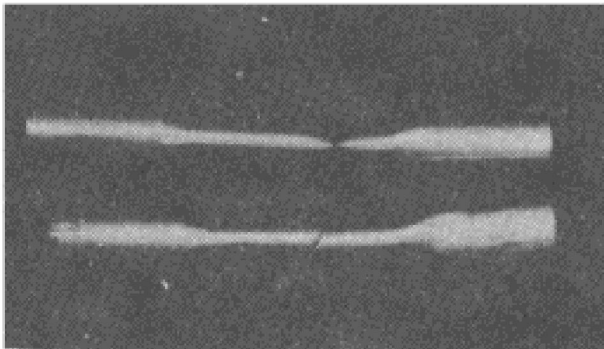


图 3 铝棒拉伸试验断后照片
(a) —单晶连铸棒; (b) —金属型铸棒

附表 工业纯铝试样的力学性能

试样	抗拉强度	屈服强度	延伸率	断面收缩率	屈服比
	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta/\%$	$\Psi/\%$	$\sigma_{0.2}/\sigma_b$
单晶连铸棒	52.8	40.5	32.7	—	0.767
金属型铸棒	91.0	37.9	15.1	13.1	0.397

5 结论

(1) 单晶连铸技术是一项新型的金属成形加工技术, 属于 near-net-shape 成型技术, 可进一步挖掘金属材料的潜力, 使金属单晶的应用工程化。

(2) 本研究设计制造的实验室小型水平单晶连铸设备, 经原理性工艺试验证明, 技术原理是正确的, 工艺规程是成功的。

(3) 工业纯铝单晶连铸棒材表现出高的延伸率和高屈服比, 预示其具有优异的塑性加工性能。

参考文献

- 1 星川雄. 日本音响学会志, 1991, 47(2): 112-118.
- 2 Ohno A. US 4 515 204. 1985.
- 3 Ohno A. In: Bahai Y (ed), Casting of Near Net Shape Products. The Metallurgical Society, 1988: 177-184.
- 4 大野笃美. 轻金属, 1989, 39(10): 735-740.
- 5 许镇宗等编. 机械零件. 北京: 高等教育出版社, 1986: 8.

THE PRINCIPLE AND TECHNOLOGY OF CONTINUOUS CASTING OF SINGLE CRYSTAL METALS

Fan Xinhui, Wei Pengyi, Li Janguo, Fu Hengzhi
*State Key Laboratory of Solidification Processing,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072*

ABSTRACT The technique of continuous casting of single crystal metals (CCSC) is a new near-net-shape processing for continuous casting of nonferrous metal wires. The product of CCSC has a smooth surface like mirror and has a characteristic of no casting defects such as shrinkage porosity, gaseous porosity and impurities. The principle of CCSC and the experimental equipment designed and manufactured by the authors specially for the experiment have been introduced. Using this equipment, the technological test of CCSC of industrial pure aluminum was completed and a single crystal Al rod, 8 mm in diameter and 8~10 m in length, was obtained. Mechanical property measurements showed that although the σ_b of CCSC rod is lower than that of the die casting rod by 38%, the $\sigma_0.2/\sigma_b$ is increased by 93% and the elongation ratio, δ_5 , is increased by 117%. It can be predicted that the product of CCSC has excellent properties for cold working.

Key words single crystal metal continuous casting electric wire technology test principle

(编辑 李克敌)