

# 水平连铸纯铜线坯成型技术及机理<sup>①</sup>

刘伯昌

(上海工业大学)

## 摘 要

在300 kg带熔沟低频感应炉内熔炼纯铜,用300 kg带熔沟低频感应保温炉连铸,获得表面光洁、无裂纹和无氧化夹杂的 $d\ 15\text{ mm}$ 紫铜线坯,未经中间退火可顺利地由 $d\ 15\text{ mm}$ 铜线坯直接拉伸成 $d\ 0.15\text{ mm}$ 纯铜线,总延伸率达99.99%,氧含量约45 ppm。另外,还研究了连铸成型机理,计算了铜液的流速和流量,指出连铸成型的关键是固-液相分界面必须处在石墨结晶器内,否则连铸就失败。

**关键词:** 纯铜线坯, 水平连铸, 机理

黄铜线坯水平连铸已经是相当成熟的生产技术了,但纯(紫)铜线坯水平连铸却由于存在以下问题而困难较大<sup>[1,2]</sup>。

(1) 纯铜不含除氟脱氧元素,若工艺不恰当,线坯中就有气孔,氧含量也高;

(2) 纯铜液能在高温下吸氧。若无相应措施就很难获得低氧产品;

(3) 纯铜的熔点高( $1\ 083\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),线坯上表面滞后凝固,凝壳较薄,易于拉漏,而线坯下部表面易拉裂,给连铸成型和操作带来困难。

因此,目前只采用上引连铸法生产优质低氧铜或无氧铜线坯。考虑到水平连铸具有设备较简单,维修和操作较方便等优点,以及水平连铸与上引连铸在成型原理上的相似性,即上引法的石墨结晶器从炉子上方插入铜液向上提拉成型,而水平连铸法的石墨结晶器则从炉子正面插入铜液水平拉出成型,预计用水平连铸法能获得优质低氧铜产品。故本研究着重考察了利用水平连铸获取优质纯铜线坯的可能性及其成型机理。

## 1 水平连铸试验

### 1.1 试验装置

试验装置如图1示,其中水平插入保温炉铜液内的石墨结晶器的安装方法如图2。

试验用的原料有两种配方:(1) 100%的一号电解铜;(2) 50%电解铜加50%回炉料。配好的原料用300 kg带熔沟低频感应炉熔炼,待全部熔化后脱氧、除氧,用焙烧后的木炭严密复盖,再用通保护性氮气的封闭式流槽将铜液倒入300 kg带熔沟低频感应保温炉内。该保温炉也用焙烧后的木炭(或高碳鳞片石墨)严密复盖,让其充分脱氧。要求保温炉内的铜液温度均匀地稳定在 $1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。随后打开连铸冷却水,松开石墨塞棒,使铜液在落差压力下以一定的冲力经石墨套流入石墨结晶器,依靠该石墨结晶器外冷内热形成的温度梯度,铜液内将存在一个园弧形固-液态分布介面,该介面上的温度恰等于铜的熔化温度( $1\ 083\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),因在该介面处插入了引锭棒,此引锭棒又

<sup>①</sup>于1992年1月23日收到

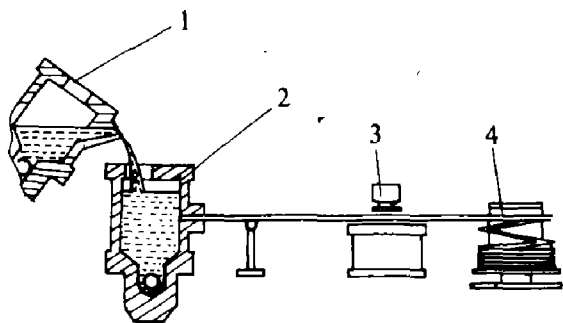


图1 水平连铸试验装置示意图

1—熔炼炉；2—保温炉；3—牵引机；4—收线机

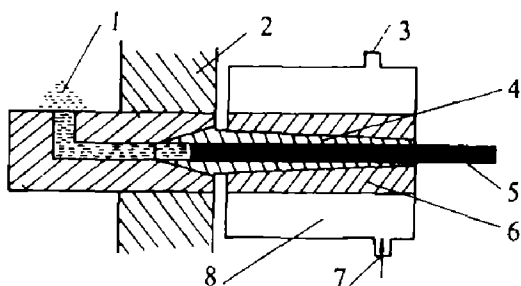


图2 石墨结晶器安装示意图

1—铜液；2—炉壁；3—冷却水出口；4—石墨结晶器；5—铜线坯；6—冷却铜套；7—冷却水进口；8—水冷器外套

与凝结后的铜液固结在一起，通过引锭棒牵引装置便能不断地将铜线坯拉出，而后送入收线机卷曲成一圈圈的线坯。

## 1.2 试验结果

连续线径  $d$  15 mm，节距 4.5~18 mm，速度  $v < 1.25$  m/min。采用一次和二次冷

却，保证线坯表面光洁，无裂纹和无氧化夹杂。

按上述二种原料配比水平连铸的线坯，其化学成份都符合国家标准<sup>[4]</sup>。连铸后的线坯未经中间退火就能顺利地由  $d$  15 mm 一直拉伸到  $d$  0.15 mm 细线，总延伸率高达 99%，氧含量约 30~60 ppm。成型线材做成直径 0.13、0.25、0.31、0.40 和 0.63 mm 的五种聚酯漆包线，所有数据全部符合国家标准<sup>[5]</sup>（见表 1），

## 2 水平连铸参数

### 2.1 流体力学参数

图 3 所示各种参数为：

$p_0$ —铜液面上的大气压力， $p_0 = 1.013 \times 10^5$  MPa；

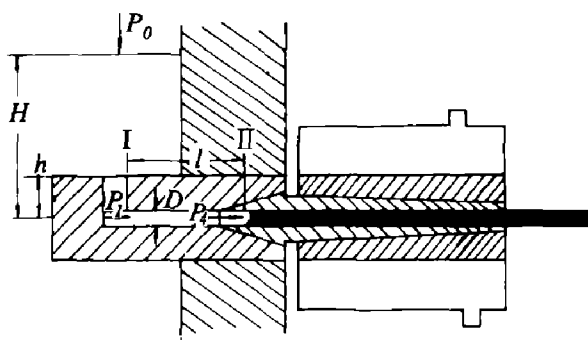


图3 连铸参数示意图

表1 0.25 mm 漆包线性能测试结果<sup>[3-5]</sup>

| 序号 | 试验项目             | GB6104.2-85 标准要求              | 试验结果                     |
|----|------------------|-------------------------------|--------------------------|
| 1  | 外观               | 光滑均匀                          | 合格                       |
| 2  | 漆包线外径, mm        | $< 0.301$                     | 0.289                    |
| 3  | 铜线直径, mm         | $0.25 \pm 0.004$              | 0.251                    |
| 4  | 铜线不圆度            | $< 0.004$                     | 0.002                    |
| 5  | 漆膜厚度, mm         | $> 0.032$                     | 0.038                    |
| 6  | 电阻, $\Omega$ /m  | 0.3345~0.3628                 | 0.3443                   |
| 7  | 伸长率 $\delta$ , % | $> 22$                        | 31                       |
| 8  | 回弹               | $< 56$                        | 43                       |
| 9  | 卷绕试验             | $< 1 d$                       | 1                        |
| 10 | 急拉断试验            | 不开裂                           | 合格                       |
| 11 | 热冲               | $< 5 d$                       | 3                        |
| 12 | 软化击穿温度           | 2 min, 240 $^{\circ}\text{C}$ | 合格                       |
| 13 | 单向耐刮             | 平均 4.5, 最小 3.8 N              | 9.56; 8.61               |
| 14 | 耐溶剂试验            | $> 1 \text{ H}$               | 5                        |
| 15 | 室温击穿, kV         | $> 2.5$                       | 8.1, 10.0, 8.3, 7.2, 7.0 |
| 16 | 高温击穿, kV         | $> 1.9$                       | 5.4, 8.0, 7.8, 7.3, 7.3  |
| 17 | 漆膜连续性            | $< 6$ 孔                       | 0                        |

$p_1$ — I 处石墨结晶器中心的铜液水平压力, MPa;

$p_2$ — II 处石墨结晶器中心的铜液水平压力, MPa

$Q'$ — I 处铜液进入石墨套的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$Q$ — II 处铜液流出石墨结晶器的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$  或  $\text{N}/\text{s}$ ;

$D$  (或  $R$ ) — 石墨结晶器内孔直径 (或半径),  $\text{m}$ ;

$H$ — 石墨结晶器中心线到最高铜液面距离, 取  $H=0.4 \text{ m}$ ;

$l$ — I 和 II 之间的距离,  $\text{m}$

根据流体静力学<sup>[6]</sup>:

$$p_1 = \rho g H + P_0 \quad (1)$$

式中  $\rho$ — 铜的密度 ( $8900 \text{ kg}/\text{m}^3$ );  $g$ — 重力加速度 ( $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$ ), 将  $\rho$ ,  $g$  值代入(1)式得

$$p_1 = 1.36188 \times 10^5 \text{ MPa}$$

当松开石墨塞棒, 铜液流进石墨套 I 处时, 根据托里坭利定理, 其单位时间的流量  $Q'$  为:

$$\begin{aligned} Q' &= S\sqrt{2gH} = nD^2 / 4\sqrt{2gH} \\ &= 4.9455 \times 10^{-4} \text{ N/s} \end{aligned}$$

图 3 中 II 处是石墨结晶器中的固-液分界面, 温度为  $1083^\circ\text{C}$ 。根据测定  $l=0.08 \text{ m}$ , 距离比较小, 可近似认为 II 处铜液流量  $Q=Q'$ 。

根据泊肃叶么式<sup>[3]</sup>, II 处铜液的流速  $v$  和流量  $Q$  为:

$$v = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} (R^2 - r^2) \quad (2)$$

$$Q = \frac{\pi R^4}{8\eta l} (p_1 - p_2) \quad (3)$$

式中  $r$ — II 处到石墨结晶器中心线的距离;  $\eta$ — 铜液粘滞系数,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$

$$\eta_{(1038^\circ\text{C})} = 3.36 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s};$$

$$\eta_{(1200^\circ\text{C})} = 3.12 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

由于  $Q=Q'$ , 根据(3)式得:  $p_2 = 1.36081$

$\times 10^5 \text{ MPa}$  (以铜温  $1200^\circ\text{C}$  计算), (2) 式表示距石墨结晶器中心线为  $r$  处的流速, 若  $r=0$  时

$$v_{\max} = (p_1 - p_2)R^2 / 8\eta l = 2.8 \text{ m/s} \quad (4)$$

若  $r=R$ ,  $v=0$ , 即在结晶器内壁处的流速为零。

根据 (2) 式, 若保温炉内的铜液高度  $H$  和温度  $T$  一定时,  $p_1$ ,  $p_2$  和  $\eta$  均为定值, 故可绘制出  $R=0.003\sim 0.0075 \text{ m}$  及  $l=0.08 \text{ m}$  处的纵截面铜液流速分布图 (见图 4)。由于  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $\eta$  和  $l$  为定值, 则(3)和(4)式变为:

$$Q = \pi(p_1 - p_2)R^4 / 8\eta l = C'R^4 \quad (5)$$

$$v_{\max} = (p_1 - p_2)R^2 / 8\eta l = CR^2 \quad (6)$$

可见,  $Q$  与  $R^4$ ,  $v_{\max}$  与  $R^2$  成正比。流量  $Q$  和最大流速  $v_{\max}$  与连铸线坯尺寸的变化情况如图 5 所示。

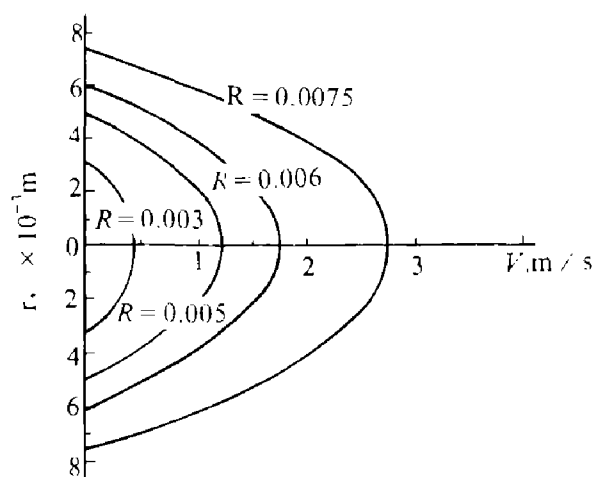


图 4 不同定值和  $l=0.08 \text{ m}$  处纵截面流速分布图

从图 5 可知, 当连铸产品半径  $R=0.0075 \text{ m}$  时, 其最大流速  $v_{\max}=2.8 \text{ m/s}$ , 流量  $Q=4.9445 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 。但若  $R<0.003 \text{ m}$ , 其  $Q$  和  $v_{\max}$  值都小, 表明连铸直径较小的线坯就较困难。

## 2.2 温度测定

铜液温度应严格控制在  $1200^\circ\text{C}$ 。当图 2 中的塞棒未松开时, 测定了石墨结晶器内部的温度分布。设沿炉壁外表面对应延伸到结晶器

内部为起始测温点即座标原点。再逐步往炉内方向测温若干点。测温结果列于表2中。

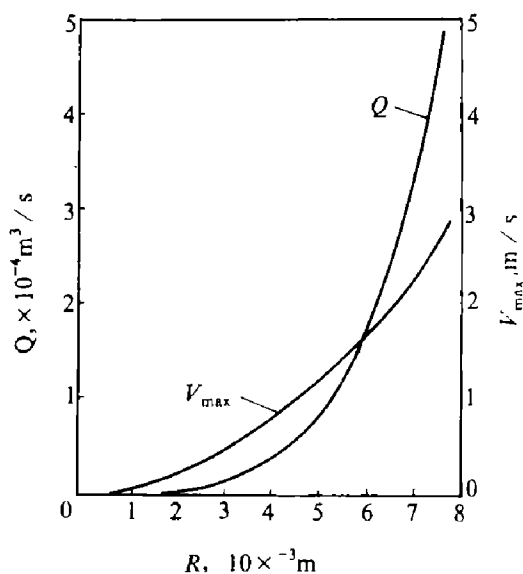


图5 铜液最大流速  $V_{max}$  和流量  $Q$  与连铸产品线坯  $R$  的关系

表2 石墨结晶器内的温度分布

| $s, \text{mm}$      | 0   | 30  | 40   | 60   | 70   | 80   |
|---------------------|-----|-----|------|------|------|------|
| $T, ^\circ\text{C}$ | 800 | 900 | 1015 | 1085 | 1130 | 1175 |

\* 测温时石墨结晶器内无铜液且未装冷却外套

### 3 讨论

#### 3.1 结晶器前沿铜液的流动状态

如图4所示, 由于在  $l=0.08 \text{ m}$  处的温度约  $1083^\circ\text{C}$ , 铜液流到此处时, 便立即结晶成园环状凝壳, 铜液的半径  $R$  越来越小, 流速和流量也随之变小。

由(5)和(6)式可知, 流速与  $R^2$  成正比, 流量与  $R^4$  成正比, 所以  $R$  的微小变化, 就会使流量产生更大的变化, 例如:  $R=0.002 \text{ m}$  时,  $Q=2500 \text{ mm}^3/\text{s}$ , 这将给线坯的成型带来不利影响。

#### 3.2 铜线坯连铸成形的控制

(1) 由表2可知, 与保温炉炉壁外表面对应的石墨结晶器内的温度为  $800^\circ\text{C}$ , 往内  $60 \text{ mm}$  处的温度为  $1083^\circ\text{C}$ , 相当于固-液界面

温度, 因而引锭棒端部必须放进到该处附近, 让其得到预热;

(2) 连铸前由于石墨温度比较低, 开始连铸时不宜开冷却水, 以保证引锭棒端部温度稳定在固-液界面温度附近, 和有利于铜液的结晶成型。否则, 连铸必然失败;

(3) 放入铜液后, 同时启动引锭棒往外拉, 此时速度不宜过快; 随着连铸线坯的顺利进行, 石墨结晶器温度升高, 此时固液界面会往外移动, 拉锭速度可慢慢增大, 但必须保证固-液界面始终处在石墨结晶器内的水冷部分, 线坯方可连铸成形。正常连铸速度为  $< 1.25 \text{ m/min}$ ;

(4) 引锭成功后, 由于固液界面已往前推移, 此时可逐步增大冷却水, 但不可过猛; 否则会使固-液界面后移, 增大线坯与结晶器壁间摩擦距离, 甚至使线坯拉裂。连铸正常后, 最佳水温为: 一次冷却水  $38\sim 40^\circ\text{C}$ , 二次冷却水  $43\sim 45^\circ\text{C}$ ;

(5) 根据上述所算, 一旦连铸正常后, 铜液的流速和流量都较大, 表明允许采用大的连铸速度和节距。直径  $15 \text{ mm}$  线坯曾用  $18 \text{ mm}$  节距和  $1.25 \text{ m/min}$  连铸速度, 都能顺利地拉出表面质量良好的连铸纯铜线坯。

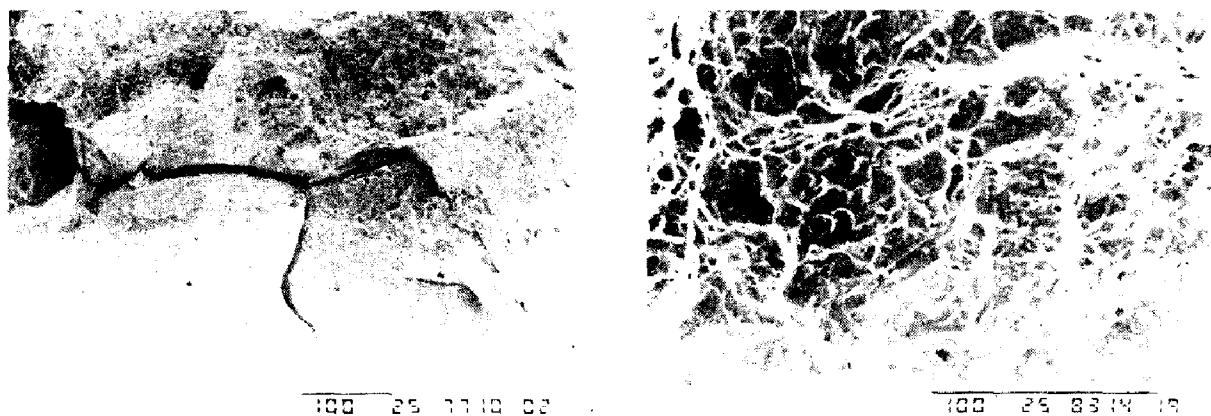
### 4 结论

(1) 采用水平连铸法, 可以获得表面光洁的优质低氧或无氧铜线坯。线坯能从  $d15 \text{ mm}$  直接连续拉伸到  $d0.15 \text{ mm}$  细线, 漆包后所有性能指标都达到国家标准;

(2) 在连铸速度  $< 1.25 \text{ m/min}$ 、节距  $4.5\sim 18 \text{ mm}$ 、一次水温  $38\sim 40^\circ\text{C}$ 、二次水温  $43\sim 45^\circ\text{C}$  条件下, 可得到优质的连铸线坯;

(3) 线坯连铸成型的关键, 是固-液界面必须保持在石墨结晶器内。铜液温度高和冷却速度比较小有利于连铸成型。

(下接 P94)

图5 轧盘冲击断口照片,  $\times 500$ 

#### 4.3 轧盘的最佳退火工艺是 $820^{\circ}\text{C}$ , 60 min, AC

盘材的技术要求是 $\sigma_b$ 为902 MPa,  $\delta_1\%$ 为10%。为了满足这一性能要求, 用 $820^{\circ}\text{C}$ , 60 min AC退火时, 应使盘材的各项性能有机匹配。从图5(b)的金相照片看到, 用该退火工艺得到的组织约有25%为块状 $\alpha_c$ 晶, 75%为呈针状分布的 $\beta$ 转变组织。在该退火过程中没有发生再结晶, 若把退火温度提高 $85^{\circ}\text{C}$ 以上查发生部分再结晶, 材料的性能特点是 $\sigma_b$ 和 $\sigma_{0.2}$ 均有一定程度的降低, 而 $Q_k$ 值提高较明显。从图5(a)中见到, 在冲击负荷下, 这种组织的裂纹扩展常发生较大偏转, 并因分叉而形成次生裂纹。由于这种裂纹扩展方式使裂纹总长度的增加所需要的冲击功更大, 故冲击值高。

## 5 结论

(1) “4-1-4”制等延伸系数轧盘工艺的精度高, 金属利用率提高20%以上, 可用来轧制钛合金管板;

(2) 轧盘的组织与性能均优于锻盘;

(3) 杂质(O+N)含量(wt.-%)的增加能显著提高TC4钛合金的强度, 生产TC4轧盘时, (O+N)的含量不应低于0.1 wt.-% 否则易出现强度偏低问题;

(4) 轧盘采用 $820^{\circ}\text{C}$ 、60 min退火工艺, 其性能可满足技术要求。

## 参考文献

- 1 E. A. 鲍利索娃等著, 《钛合金金相学》, 陈石卿编, 北京: 国防工业出版社, 1986, 246

(上接 P90)

## 参考文献

- 1 Outohumpu unimec company, Copper upcast. (Finland)

- 2 Alfred Wertli LTD: Horiyontal contiinous carting
- 3 上海电缆研究所: 漆包线测试报告
- 4 中国国家标准: GB468—83
- 5 中国国家标准: GB6109.2—85 (聚酯漆包线国家标准)