

连铸铜单晶工艺参数的匹配 及其对铸棒表面质量和组织的影响^①

许振明 李金山[†] 李建国[†] 傅恒志[†]

(上海交通大学铸造研究所, 上海 200030)

[†](西北工业大学凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

摘 要 在自制的单晶连铸设备上, 通过各工艺参数合理匹配, 成功地制备出了表面光洁、直径 8 mm、长 8~10 m 的铜单晶铸棒。通过理论分析和实验验证发现铜单晶连铸时固-液界面位于铸型内, 并呈凸出形状。铸型温度、连铸速度和冷却距离对固-液界面的位置有很大的影响, 其各工艺参数合理匹配, 可使固-液界面位置位于离铸型出口端 2~3 mm; 并且当连铸速度大于 40 mm/min 时, 固-液界面的形状由凸变凹。当铸型温度逐渐降低(低于铜熔点温度)时, 铸棒表面由粗糙变为拉伤, 甚至出现严重的拉裂; 而随着连铸速度的增加, 形成铸棒表面拉伤(低温时)和条纹状沟槽(高温时)。铸棒内的杂质是由于铸型温度低于铜的熔点(1083 °C)和连铸速度增加所致。当连铸速度大于 40 mm/min 时, 形成定向凝固的柱状晶铸棒。

关键词 铜单晶 连续铸造 工艺参数 固液界面

中图法分类号 TG146.1

单晶连铸是一项把先进的定向凝固技术与高效的连铸技术相结合的新型金属成型技术^[1, 2]。它通过采用一个加热铸型和一个与之分离的冷却器代替传统连铸设备中的冷铸型, 在铸型出口与冷却器之间产生一个轴向温度梯度, 形成定向凝固条件, 可以得到单向生长的柱状晶组织。通过各工艺参数的优化控制, 使其有利于晶体的竞争生长, 则可以实现单晶连续铸造^[3]。因此, 要实现单晶连铸, 首先要成功进行连续铸造, 然后通过工艺参数的合理匹配, 以实现单晶连铸。

铜单晶连铸始于 80 年代初, 并且在日本已开发出相应的工业产品^[3, 4]。但是, 关于铜单晶连铸过程中各工艺参数的研究甚少^[5, 6], 特别是对连铸过程中各工艺参数的匹配以及对单晶质量影响规律的研究还不系统^[7, 8]。本文

的实验研究采用工业电解铜为原料, 利用自制的小型单晶连铸设备探索铜单晶连铸的工艺过程及各工艺参数的匹配, 考察各工艺参数对连铸铜单晶铸棒表面质量和组织的影响规律, 为连铸铜单晶的工程应用提供可靠的工艺参数。

1 实验方法

自制的单晶连铸设备结构详见文献[9]。连铸过程中各工艺参数确定如下:

(1) 在氩气保护下, 工业电解铜在坩埚中熔化, 温度保持在 1300 °C 左右; (2) 铸型的温度(t_M)控制在 1100~1300 °C; (3) 冷却水的流量为 60 mL/min, 冷却距离为 10~30 cm; (4) 连铸速度 R 为 5~40 mm/min; (5) 连铸时铜液的静压头为 5~8 mm。

① 中国博士后基金和航空基金资助项目(97G53078)

收稿日期: 1998-08-01; 修回日期: 1998-10-05

许振明, 男, 33 岁, 博士, 副教授

2 实验结果与分析

2.1 固-液界面的位置和形状

固液界面的位置和形状是影响连铸过程是否成功、晶体的演化过程和铸件晶体质量极其重要的参数,是各工艺参数作用的综合反映。

图1为简化的固-液界面位置及液柱受力分析模型。在该模型中将固-液界面做平面处理,忽略固-液界面张力和液体粘性阻力。设 L_0 为液柱失稳时固-液界面离开铸型口的最大距离,这样,位于铸型出口的液柱受到自身重力 G 和液体金属静压力 F_s 的作用,其中:

$$G = \pi r^2 \rho_g L_0 \quad (1)$$

如图1(b),在垂直方向的分力之和为

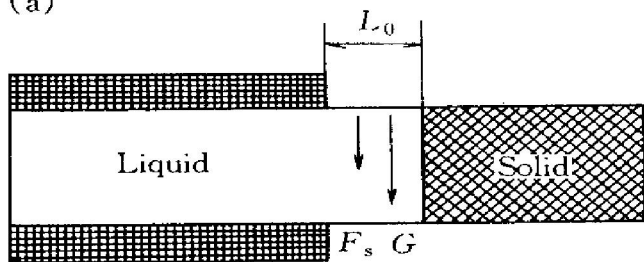
$$F_s = \int_0^{2\pi} \rho_g [r(1 + \cos\theta) + \Delta H] L_0 r d\theta$$

积分得

$$F_s = 2\pi r \rho_g L_0 (r + \Delta H) \quad (2)$$

这样,在液柱垂直方向的作用力为

(a)



(b)

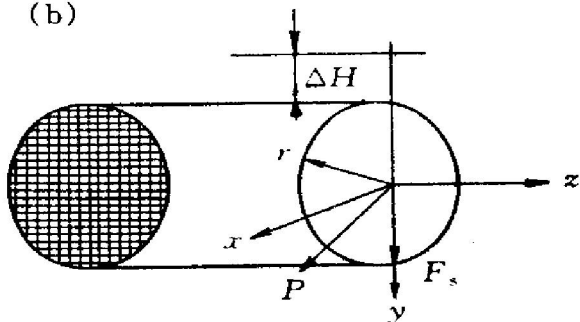


图1 固-液界面位置及液柱受力分析的简化模型(a)和液柱断面上的静压力(b)

Fig. 1 Solid-liquid interface position and forces applied on liquid column (a) and static pressure on liquid column cross section (b)

$$F_s + G = 3\pi r^2 \rho_g L_0 + 2\pi \Delta H L_0 r \rho_g \quad (3)$$

为了保持液柱的形状,不失稳时液柱垂直作用力必须与液柱上由于表面张力引起的附加力 $F_{附}$ 相平衡。由拉普拉斯方程得

$$F_{附} = 2\sigma/r \quad (4)$$

要使液柱不失稳,必须满足

$$F_s + G = F_{附} \quad (5)$$

由式(3)、(5)和(6)得

$$L_0 = \frac{2\sigma}{\pi r^2 \rho_g (3r + 2\Delta H)} \quad (6)$$

本实验中 $r = 4\text{ mm}$,取 $\sigma = 1.3\text{ N/m}$, $\rho = 8.9\text{ g/cm}^3$, $g = 9.8\text{ m/s}^2$, $\Delta H = 2\text{ mm}$,由式(7)计算得 $L_0 = 0.037084\text{ mm}$ 。

由于 L_0 值很小,即液柱刚离开铸型出口时,表面张力引起的附加力不能平衡静压头和自重,因此很难保证形状。图2(a)为固-液界面刚离开铸型出口时,由于铜液表面张力所产生的附加压力不能平衡金属铜液的静压头,液柱不能保持圆柱面,而形成的表面凸出疤痕。当固-液界面在铸型外时,很容易拉漏,连铸工艺过程很难控制,为了保证工艺的可靠性,避免拉漏,必须把固液界面控制在铸型内。若固-液界面进入型内过多,则铸件在型内已凝固结壳,其与型壁的摩擦力过大,易使铸件表面粗糙,甚至拉断。因此,在实验过程中把固-液界面控制在离铸型出口内2~3 mm处。

实验中通过采用铜液压头突然下降法观察固-液界面的形状,其结果如图2(b)所示。可见,铜单晶连铸时固-液界面为凸出形状,这种凸出的形状有利于晶体演化过程中晶体的淘汰^[9],同时凸出的固-液界面也有利于凝固过程中析出气体及夹杂不断排向液体,不会被卷入铸棒,而且不存在补缩的困难。因此,凸出的固-液界面保持铸棒组织致密,无气孔、缩孔、缩松等铸造缺陷^[1]。

2.2 各工艺参数对固-液界面位置的影响

固-液界面的位置是由连铸速度、铸型温度和冷却器的位置所决定的。

2.2.1 铸型温度

图3为铸型温度、连铸速度与固-液界面

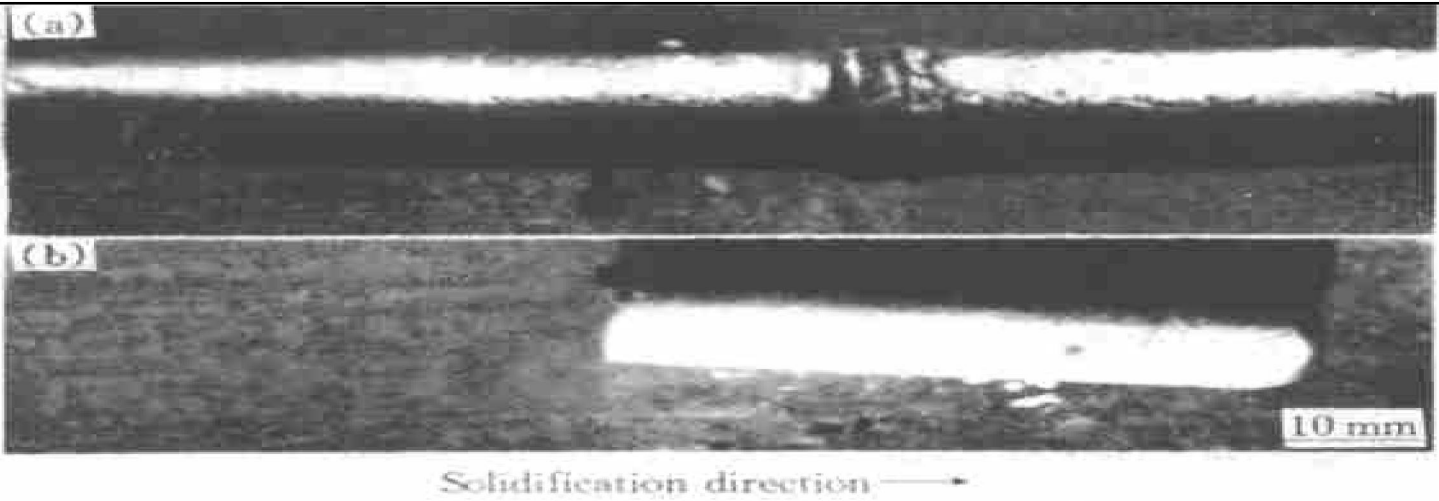


图 2 固-液界面的位置和形状

Fig. 2 Solid-liquid interface positions and morphologies

(a) —Deviating from mould just; (b) —Dropping melt head suddenly

位置的关系。可见，在铸型温度一定时，固-液界面的位置随着连铸速度的增加逐渐移向铸型出口；在连铸速度一定时，随着铸型温度的升高，固-液界面的位置逐渐移向铸型出口。当铸型温度和连铸速度达到图 3 虚线右上方时，会发生拉漏事故，无法进行连铸。

2.2.2 连铸速度

图 4 为连铸速度对固-液界面位置的影响

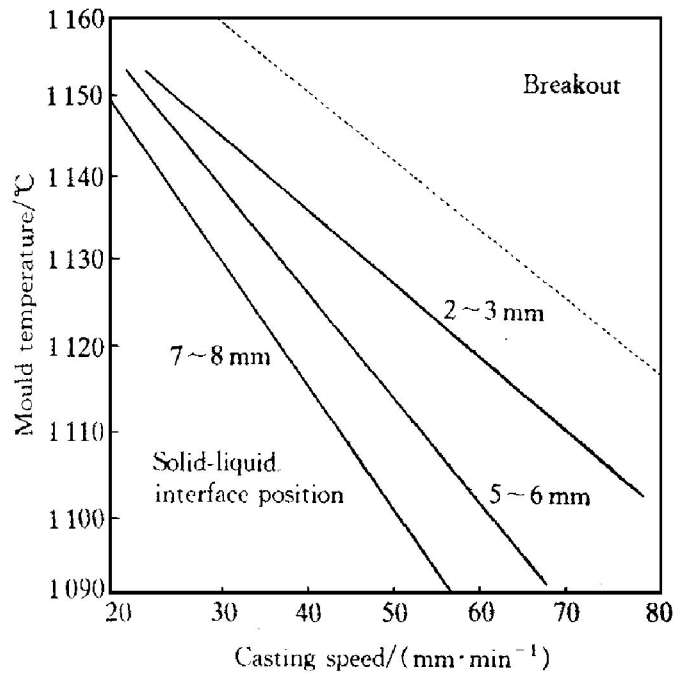


图 3 铸型温度、连铸速度与固-液界面位置的关系

Fig. 3 Solid-liquid interface position in terms of casting speed and mould temperature

规律。可见，连铸速度对固-液界面位置的影响与图 3 的规律是一致的。即在铸型温度一定时，固-液界面的位置随着连铸速度的增加，逐渐移向铸型出口。这是因为连铸速度增加，凝固时释放的结晶潜热增加，结果使铸型温度增加；要使铸型温度不变，须使固液界面向外移动来增加散热，以平衡结晶潜热的增加。同样，在连铸速度一定时，随着铸型温度的增加，固液界面向铸型外移动。

2.2.3 冷却距离

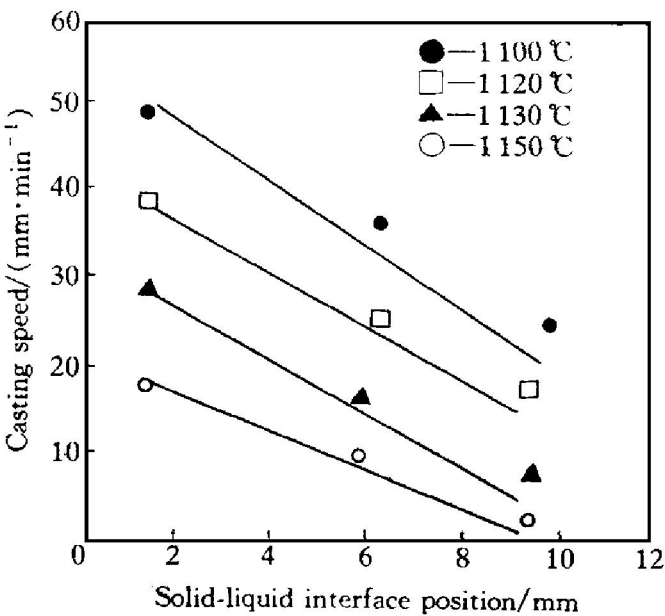


图 4 连铸速度对固-液界面位置的影响
Fig. 4 Effect of casting speed on solid-liquid interface position

图5示冷却距离对固-液界面位置的影响规律。可见,随着冷却距离的增加,固-液界面距铸型出口距离越小。这是因为随着冷却距离的增加,冷却器的冷却能力减弱,导热能力降低,使铸型内的熔体温度升高,从而迫使固-液界面移向铸型出口。

综上所述,通过改变铸型温度、连铸速度和冷却距离来调节固-液界面的距离,可使连铸时固-液界面位于离铸型出口端2~3mm处。

2.3 各工艺参数对单晶质量的影响

当铸型表面光洁度一定时,铸棒的表面质量主要取决于铸型温度 t_M 、连铸速度 R 和铜液的压头。

2.3.1 铸型温度和压头

图6示铸型温度对铜铸棒表面质量的影响。可见,在 t_M 低于铜的熔点时,铸棒表面有拉伤。这是因为当 t_M 降低时,固-液界面逐渐向型内移动,使铸件与型壁间的摩擦阻力逐渐增大,导致铸棒表面粗糙、拉伤,甚至出现严

重的热裂。图6(d)为压头不足时,铸棒表面形成的粗细不均,这是由凝固收缩时得不到充分轴向补缩和充填不足所形成的。

2.3.2 连铸速度

从图7(a), (b)可以看出,当铸型温度一

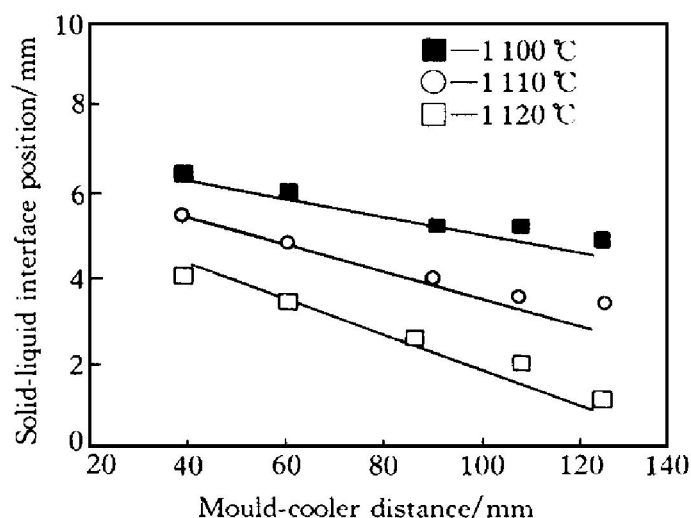


图5 冷却距离对固-液界面位置的影响

Fig. 5 Effect of mould-cooler distance on solid-liquid interface position

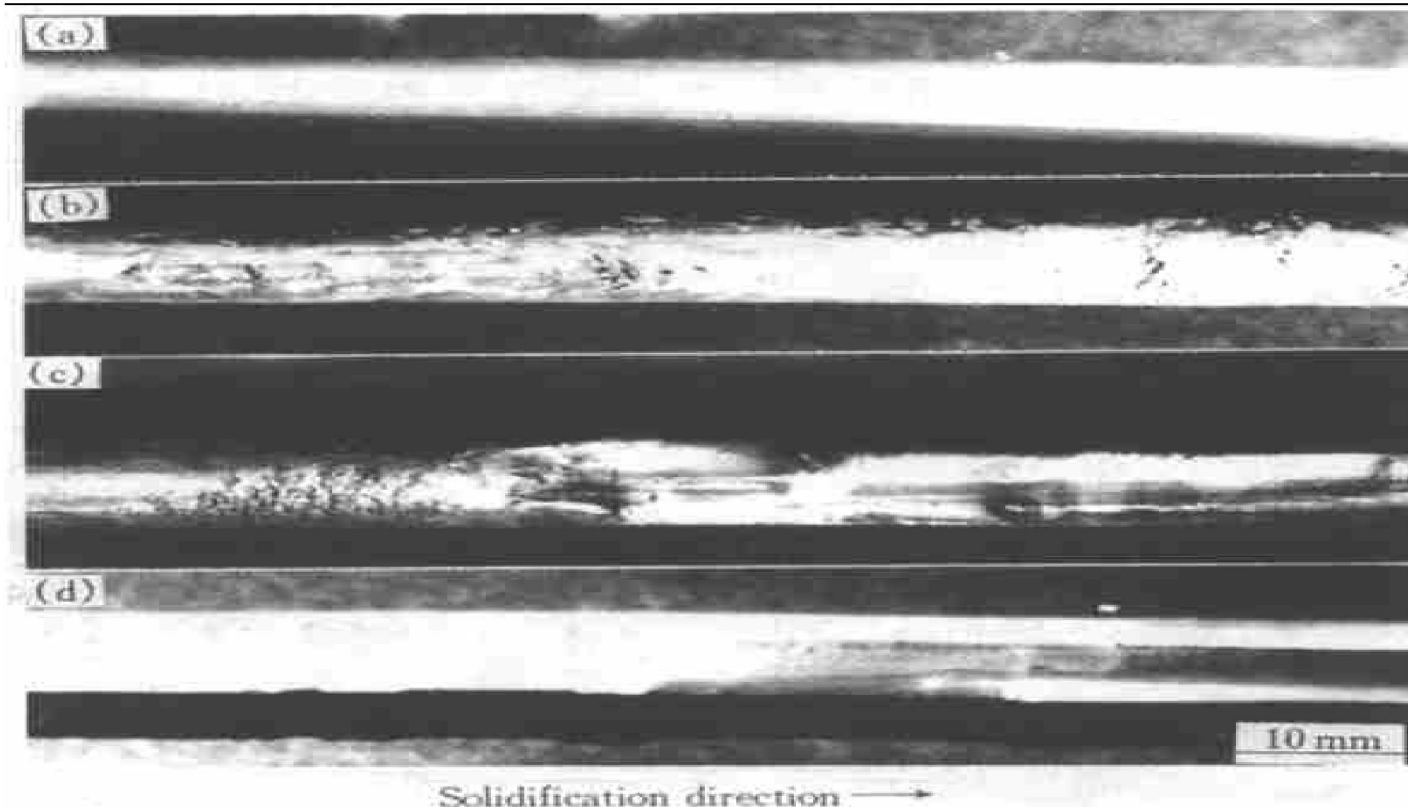


图6 铸型温度对铜铸棒表面质量的影响

Fig. 6 Effect of mould temperature on surface quality of casting rod

(a) $-t_M = 1120\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R = 30\text{ mm/min}$; (b) $-t_M = 1083\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R = 30\text{ mm/min}$;

(c) $-t_M = 1010\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R = 30\text{ mm/min}$; (d) $-t_M = 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R = 30\text{ mm/min}$ (not enough melt head)

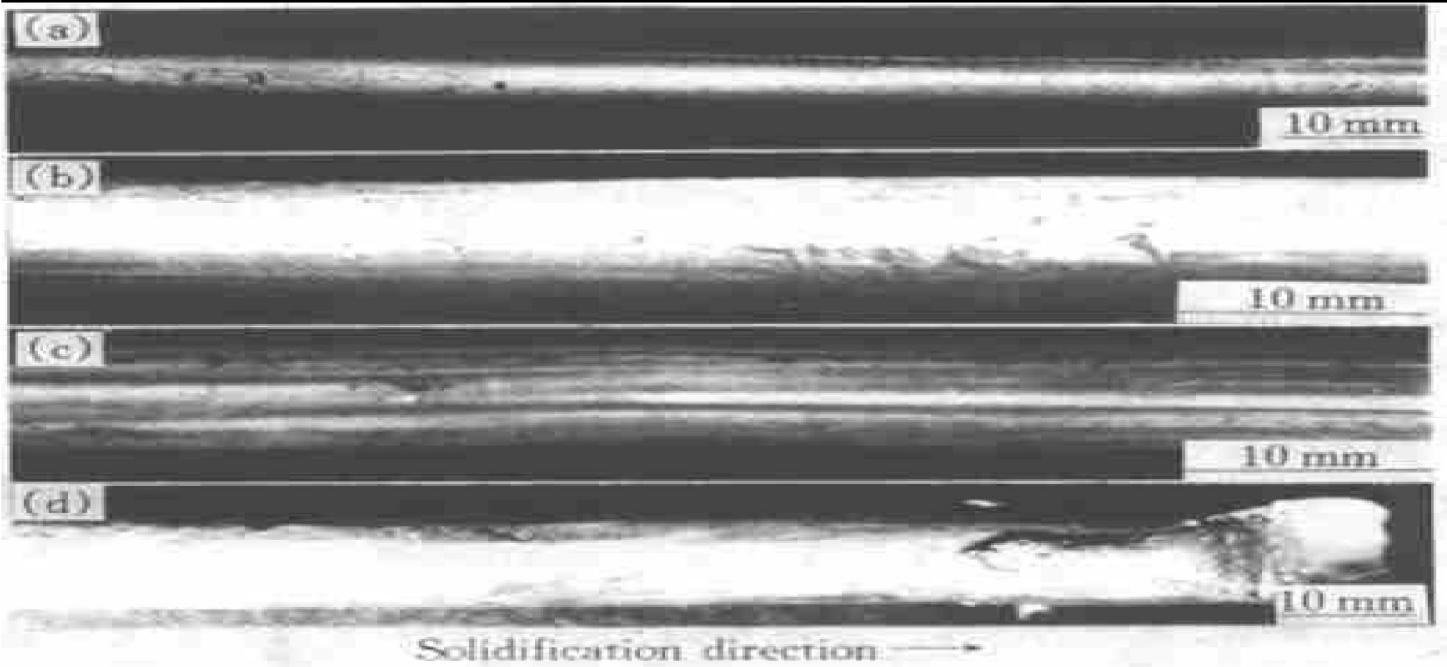


图 7 连铸速度对铸棒表面质量的影响

Fig. 7 Effect of casting speed on surface quality of casting rod

(a) $-t_M = 1120\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R = 30\text{ mm/min}$; (b) $-t_M = 1120\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R = 40\text{ mm/min}$;
(c) $-t_M = 1140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R = 40\text{ mm/min}$; (d) $-t_M = 1140\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R = 50\text{ mm/min}$

定时随着连铸速度 R 的增加，在铸棒表面形成拉裂痕迹，这是因为在铸型温度不是很高时，随着连铸速度的增加，铸棒表面与铸型的摩擦力增加，导致铸棒表面发生拉伤痕迹。图 7(c) 为铸型温度和连铸速度都比较高时，在铸棒表面形成的条状沟槽，这是由于拉晶速度增加时，结晶潜热来不及导出，使铸棒表面温度过高，这样在摩擦力作用下铸棒表面发生塑性变形。因此，在高的铸型温度和连铸速度条件下铸棒表面形成沟槽状条纹。图 7(d) 为 $t_M = 1140\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $R = 50\text{ mm/min}$ 时的拉漏情况，可以发现固-液界面的形状由凸变凹，这对晶体的生长和铸棒的组织有很大的影响，将在以下详细讨论。

通过以上分析和综合实验结果，可以得出为获得表面光洁的铸棒各工艺参数应有的范围，如图 8 的实线范围所示。

2.4 各工艺参数对铸棒组织的影响

2.4.1 铸型温度

图 9 为铸型温度对铸棒组织的影响。其中，图 9(a) 说明当铸型温度和连铸速度一定

时，可以得到无杂晶的铸棒；图 9(b) 表示当铸型温度等于熔点温度时，在铸棒表面上形成了不连续小杂晶；图 9(c) 显示当铸型温度低于熔点($1083\text{ }^{\circ}\text{C}$)时，铸棒内的杂晶很难淘汰，只有当铸型温度 t_M 高于熔点时铸棒内的杂晶才能被淘汰。这是因为当铸型温度低于熔点时，熔

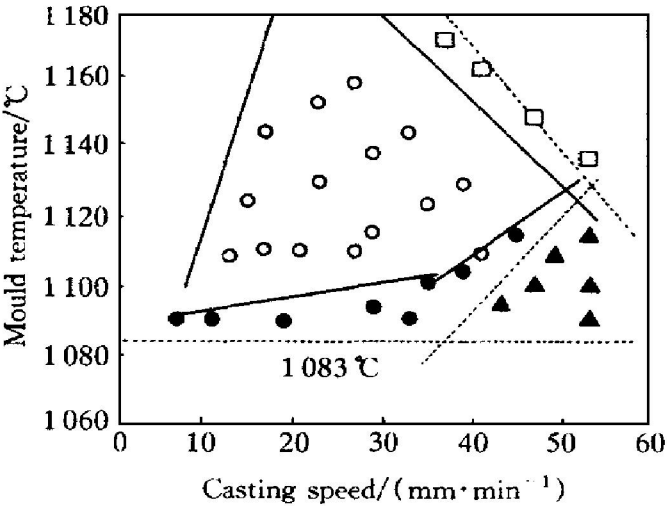


图 8 获得表面光洁的铸棒的工艺参数范围

Fig. 8 Regime of casting conditions for a rod with smooth casting surface

□—Ripple; ○—Good; ▲—Crack; ●—Streak

体极易在型壁上形核,形成离散的杂晶。因此,要想获得无杂晶的铸棒,铸型的温度必须高于铜的熔点温度。

2.4.2 连铸速度

图10表示连铸速度对铸棒组织的影响。从图可以看出,当连铸速度增加时,铸棒内首先形成定向凝固的柱状晶(图10(a)),然后随着连铸速度的继续增加形成定向凝固的柱状晶和表面小等轴杂晶(图10(b))。其主要原因为:

(1) 当凝固前沿液相的温度梯度 G_L 与连铸速度 R 之比 (G_L/R) 逐渐减小时,晶体形貌由平面向树枝晶转变。因此,当连铸速度 R 增加时,导致 G_L/R 减小,使铸棒表面易形成定向凝固的柱状晶。

(2) 当连铸速度增加时,由于铸型热辐射造成的热损失增加,致使横向温度梯度增大,造成凝固界面严重凹陷,如图7(d)所示,固-液界面的形状由凸变凹,这样铸棒固-液界面

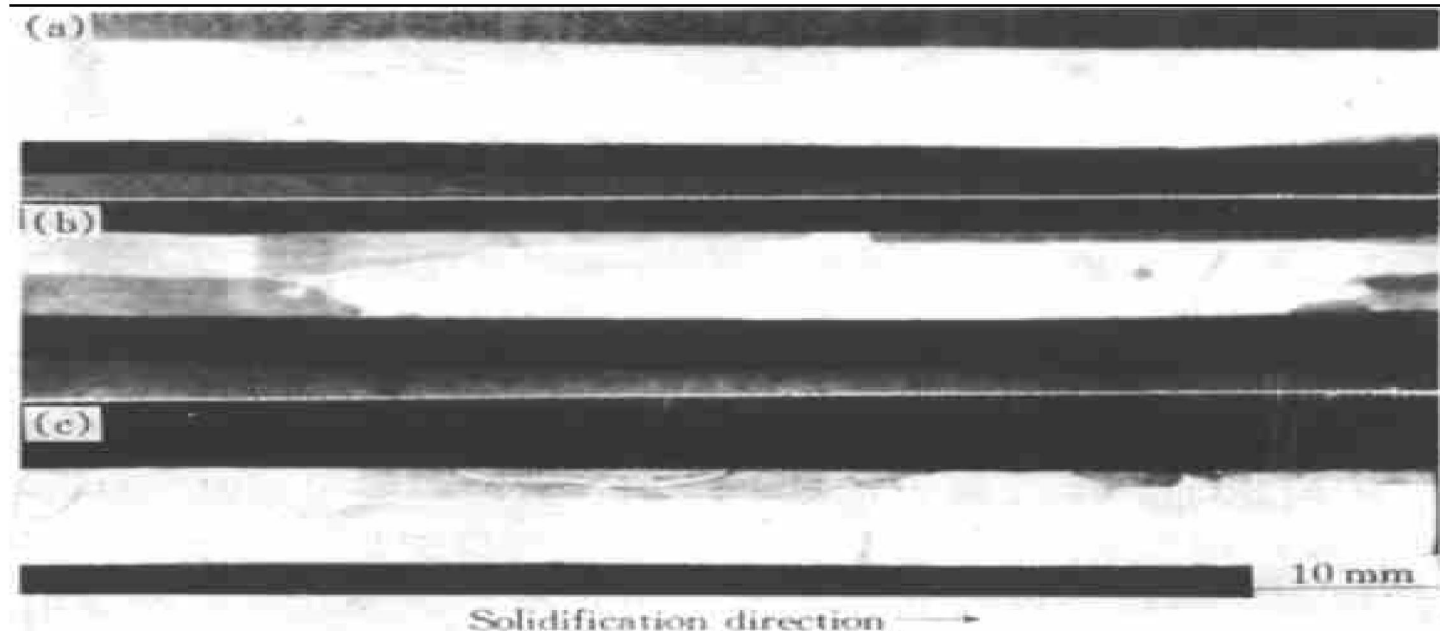


图9 铸型温度对铸棒组织的影响

Fig. 9 Effect of mould temperature on microstructures of casting rod

(a) $-t_M = 1120\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R = 30\text{ mm/min}$; (b) $-t_M = 1083\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R = 30\text{ mm/min}$;

(c) $-t_M = 1010\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R = 30\text{ mm/min}$

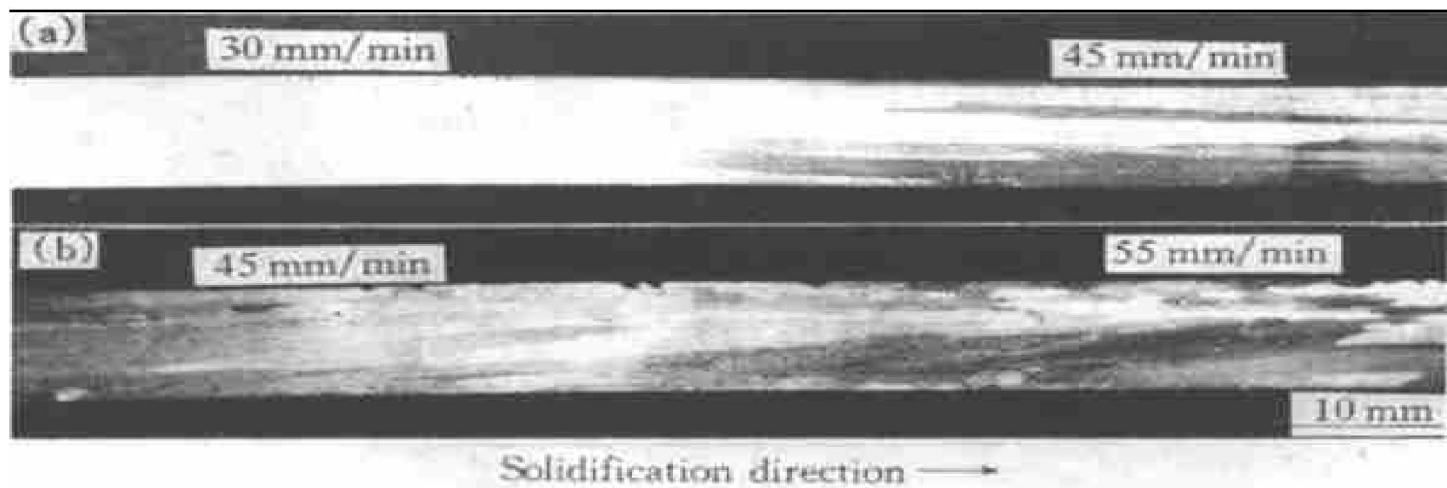


图10 连铸速度对铸棒组织的影响

Fig. 10 Effect of casting speed on microstructures of casting rod

(a) $-t_M = 1120\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R = 30\sim 45\text{ mm/min}$; (b) $-t_M = 1110\text{ }^{\circ}\text{C}$, $R = 45\sim 55\text{ mm/min}$

前沿的温度分布如图 11 所示。发现,凝固前沿与铸型表面的接触温度等于铜的熔点温度。由于连铸过程是一个非稳定过程,这时若固-液界面前沿的温度场分布发生波动,使熔体与铸型表面接触温度低于铜的熔点时,铸型壁便形核而形成离散的等轴晶和小柱状晶。因此,当连铸速度增加时,形成定向凝固的柱状晶和表面小等轴杂晶。

综上所述,只要各工艺参数合理匹配,可以得到表面光洁的铜单晶棒材。图 12(a), (b)

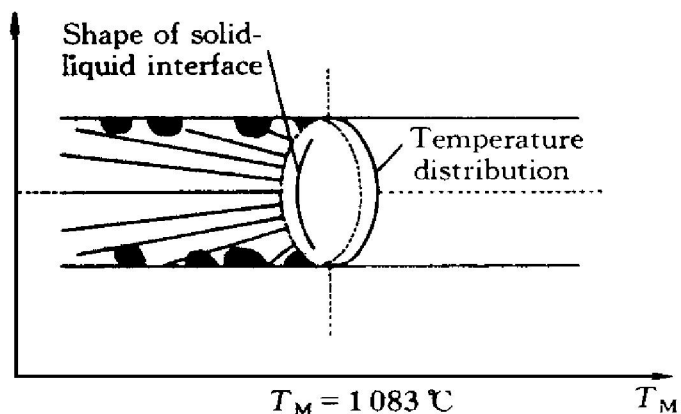


图 11 当固-液界面为凹形时结晶前沿温度分布及晶体生长

Fig. 11 Temperature distribution in crystallization front and crystal growing when solid-liquid interface being concave in shape

为连续铸造铜单晶棒材和表面情况。

3 结论

在自制的水平单晶连铸设备上,进行铜单晶连铸的工艺性实验,得如下结论:

(1) 通过理论分析和实验验证发现铜单晶连铸时固-液界面位于铸型内,并呈凸出形状。铸型温度、连铸速度和冷却距离对固-液界面的位置有很大的影响,其各工艺参数合理匹配,可使固-液界面位置调整到离铸型出口端 2 ~ 3 mm 处,此时若连铸速度大于 40 mm/min,固-液界面的形状由凸变凹。

(2) 当铸型温度逐渐降低(低于铜的熔点温度)时,铸棒表面由粗糙变为拉伤,甚至出现严重的拉裂;而随着连铸速度的增加,会形成铸棒表面拉伤(低温时)和条纹状沟槽(高温时)。

(3) 铸棒内的杂晶是由于铸型温度 t_M 低于铜的熔点(1083 °C)和连铸速度增加所致。当连铸速度 R 大于 40 mm/min 时,形成定向凝固的柱状晶铸棒。

(4) 各工艺参数合理匹配,可成功地制备出表面光洁、内部无杂晶,直径 8 mm、长 8~10 m 的铜单晶铸棒。

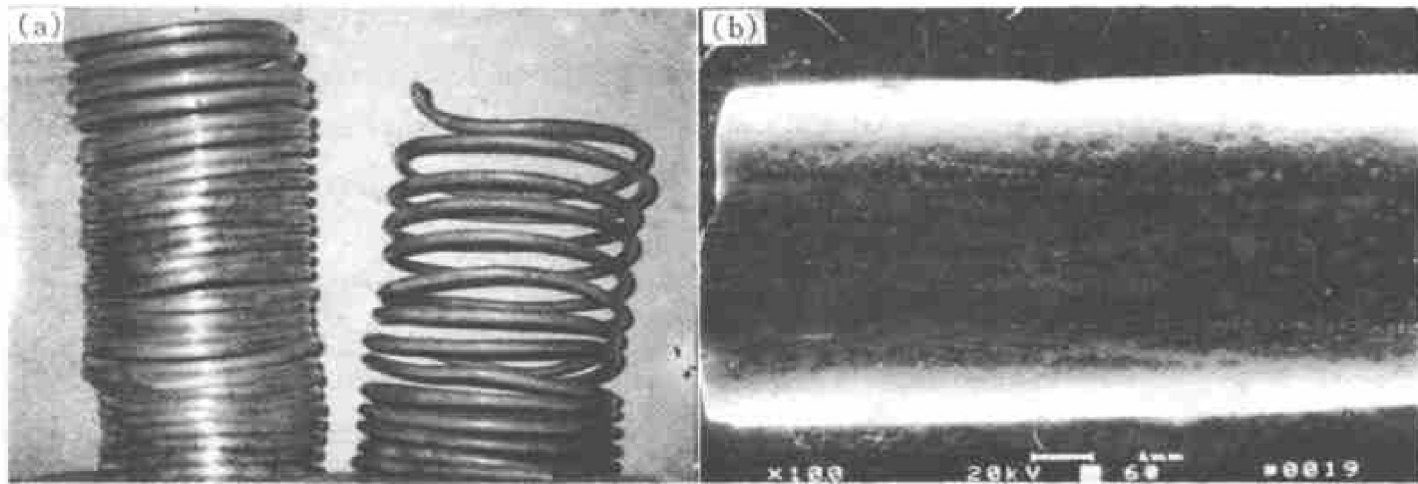


图 12 连续铸造铜单晶棒材(a)和连铸铜单晶棒材的表面状况(b)

Fig. 12 Single crystal copper rod by continuous casting (a) and surface condition of single crystal rod (b)

REFERENCES

- 1 Ohno A and Soda H. In: Weinberg F ed. International Symposium on Solidification Processing. The Metall Soc of CIM, Proc, 1990: 215– 228.
- 2 Kim Y J and Kou S. Metallurgical Transactions, 1988: 19A: 1849.
- 3 Ohno A. Casting of Near Net Shape Products. The Metallurgical Society, 1988: 177– 184.
- 4 Ohno A. Journals of Metals, 1986, 38: 14.
- 5 Soda H, McLean A, Wang Z *et al.* Journal of Materials Science, 1995, 30: 5438.
- 6 Soda H, Motoyoyasu G and McLean A. Journal 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(1): 134.
- 9 Xu Zhenming, Li Jianguo and Fu Hengzhi. Trans Nonferrous Met Soc China, 1998, 8(2): 277.

MATCHING OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS AND ITS EFFECT ON SURFACE QUALITY AND CAST STRUCTURE OF COPPER SINGLE CRYSTAL ROD DURING CONTINUOUS CASTING

Xu Zhenming

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

Li Jinshan, Li Jianguo and Fu Hengzhi

State Key Laboratory of Solidification Processing,

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

ABSTRACT Single crystal copper rod, 8 mm in diameter and 8~ 10 m in length with mirror-smooth surface has been obtained by using a self-made equipment under rational match of technological parameters. The solid-liquid interface is a convex shape and located in the inside of the mould during the continuous casting. It has been found that the mould temperature, the casting speed and the mould-cooler distance have effects on the solid-liquid interface position. The solid-liquid interface can be located at the inside of the mould extending 2~ 3 mm from the mould exit under rational match of technological parameters, and at a casting speed above 40 mm/min the shape of solid-liquid interface turns from convex shape to concave shape. When the mould temperature is less than 1083 °C, which is the temperature of copper melting point, the surface appearance of the cast rod turns from rough surface to streaked surface, even forms cracked surface by drawing. With increasing casting speed, crack pits (low temperature) and ripple marks (high temperature) on the cast rods are formed. Stray crystals (equiaxed grains and columnar grains) in surface of the rod is formed because of lower mould temperature (< 1083 °C) at location of the solidification front and increment of casting speed. At casting speed above 40 mm/min, the rod contains unidirectional subtexture and occasional stray crystals.

Key words single crystal copper continuous casting solid-liquid interface technological parameter

(编辑 袁赛前)