

Cu-12%Al 线材连续定向凝固最大稳态拉坯速度

刘锦平, 刘雪峰, 黄海友, 谢建新

(1. 北京科技大学 材料先进制备技术教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 北京科技大学 新材料技术研究院, 北京 100083)

摘要: 将结晶器移出感应加热器, 使连续定向凝固时固液界面控制在结晶器出口; 结合传热边界条件, 求解连续定向凝固熔体区、液/固界面、空冷区和水冷区的一维稳态温度场方程, 得出线坯最大稳态拉坯速度随熔体温度、结晶器长度、冷却距离和冷却水流量的变化规律; 并基于直径为 6 mm 的 Cu-12%Al(质量分数)线材制备的工艺条件, 对理论解进行实验验证和讨论。结果表明: Cu-12%Al 线材的最大稳态拉坯速度随熔体温度升高而降低, 且降低速率逐渐减小, 其中在 1 150~1 300 °C 范围内降低 37.3%; 最大稳态拉坯速度随结晶器长度增加而增加, 且增加速率逐渐减小, 其中在 20~40 mm 范围内增加 28.5%; 最大稳态拉坯速度随冷却距离增加而降低, 且降低速率逐渐减小, 其中在 4~12 mm 范围内降低 68.8%; 冷却水流量在 100~400 L/h 范围内最大稳态拉坯速度变化不明显。当固液界面前沿温度梯度小于 2.02 °C/mm 时, 实际拉坯速度无法达到理论最大稳态拉坯速度; 当固液界面前沿温度梯度大于 4.17 °C/mm 时, 最大稳态拉坯速度实验值和理论值吻合较好。

关键词: Cu-12%Al 线材; 拉坯速度; 温度场; 结晶器长度; 温度梯度

中图分类号: TG111.4; TG244.3 文献标志码: A

Maximum steady-state drawing velocity of Cu-12%Al wires during OCC

LIU Jin-ping, LIU Xue-feng, HUANG Hai-you, XIE Jian-xin

(1. Key Laboratory of Advanced Materials and Manufacturing Technologies, Ministry of Education,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2. Institute for Advanced Materials and Technologies,
University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: By moving out of induction heater for crystallizer, the solid-liquid interface was controlled at the exit of crystallizer during Ohno continuous casting(OCC). Based on the temperature field equations of melt region, liquid/solid interface, air cooling region and water cooling region, the relationship was deduced among the maximum steady-state drawing velocity, melt temperature, crystallizer length, cooling distance and water flow rate by using thermal boundary conditions. Through the solidification process of Cu-12%Al(mass fraction) wires with a diameter of 6 mm, the theoretical solutions were verified and discussed. The results show that, the maximum steady-state drawing velocity for Cu-12%Al wire decreases by 37.3% in the range of 1 150–1 300 °C with increment of melt temperature, increases by 28.5% in the scope of 20–30 mm with increment of crystallizer length, and decreases by 68.8% in the range of 4–12 mm with increment of cooling distance, changes weakly with cooling water flow rate in the range of 100–400 L/h. When the thermal gradient at solid-liquid interfaces is lower than 2.02 °C/mm, the experimental drawing velocity cannot reach the theoretical maximum steady-state drawing velocity. When the thermal gradient at solid-liquid interface is higher than 4.17 °C/mm, there is a good agreement between the experimental and theoretical values of the maximum steady-state drawing velocity.

Key words: Cu-12%Al wire; drawing velocity; temperature field; crystallizer length; thermal gradient

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2006CB605200); 国家自然科学基金资助项目(50674008)

收稿日期: 2009-11-13; 修订日期: 2010-07-08

通信作者: 谢建新, 教授, 博士; 电话: 010-62332254; E-mail: jxxie@mater.ustb.edu.cn

连续定向凝固通过对结晶器加热使其温度高于被铸金属或合金的凝固温度, 同时在结晶器出口附近对铸坯进行冷却, 热流仅沿拉坯方向传递, 可获取单一的结晶取向组织^[1-3]。连续定向凝固由于固液界面位于结晶器出口附近而容易出现拉漏现象, 难以获得较大拉坯速度。提高拉坯速度不仅有利于提高生产效率, 还可使固液界面移向结晶器出口, 有效改善铸坯表面质量^[4-6]。但是, 在实际生产中, 由于受到结晶器长度、温度梯度及冷却条件等的限制, 存在一临界速度, 即最大稳态拉坯速度。当拉坯速度大于最大稳态拉坯速度时, 固液界面将移出结晶器外, 在熔体质量、附加压头及机械振动作用下, 易导致连铸失稳^[7]。影响最大稳态拉坯速度的主要因素为熔体温度、结晶器长度、冷却距离和冷却水流量^[8-9]。

目前, 使用连续定向凝固技术制备金属或合金时, 普遍采用的加热方式为电阻加热和感应加热。为提高生产效率和节约能源, 高熔点金属或合金常采用感应加热方式进行连续定向凝固。连续定向凝固传统工艺中, 结晶器位于感应加热器内部。由于磁场分布较复杂, 因此, 难以确定结晶器温度分布。而且, 结晶器的温度梯度较低会导致最大稳态拉坯速度较小。为此, 本研究对传统感应加热连续定向凝固工艺进行了改进, 将结晶器移出感应加热器, 并对结晶器侧壁进行保温, 能增加结晶器温度梯度而提高最大稳态拉坯速度。并以此工艺为基础, 探索新工艺条件下, 最大稳态拉坯速度与熔体温度、结晶器长度、冷却距离及冷却水流量等工艺参数的关系, 分析最大稳态拉坯速度随工艺参数的变化规律。

本文作者以 Cu-12%Al(质量分数)线材制备为研究对象, 将凝固模型分为熔体区、液/固界面、空冷区和水冷区, 液/固界面和水冷区有热源或冷源, 而熔体区和空冷区无热源和冷源, 应用边界条件分别求解各区的温度场方程, 得出最大稳态拉坯速度与工艺参数之间的关系, 为制定合理的连续定向凝固工艺提供理论依据。

1 最大稳态拉坯速度

根据连续定向凝固的特点, 建立如图 1 所示的凝固模型, 并将其分为熔体区、液/固界面、空冷区和水冷区 4 个区域。根据连续定向凝固时结晶器温度和被铸金属温度相同的特点, 对系统作如下假设^[10]:

- ① 一定工艺条件下, 连续定向凝固系统温度场不随时间变化($\partial T / \partial t = 0$);
- ② 忽略固相和液相热物性参数的差别;
- ③ 线坯空冷区的温度梯度较大, 线坯热传导远大

于与空气换热, 忽略空气与线坯的换热。

对于下拉式连续定向凝固系统, 当液/固界面移出结晶器出口时, 由于重金属密度较大, 液/固界面强度较低, 在熔体自重、附加压头及机械振动作用下, 铸坯表面易呈节状或出现拉漏现象, 最大稳态拉坯速度即对应于结晶器出口温度等于合金的液相点温度时所对应的拉坯速度。

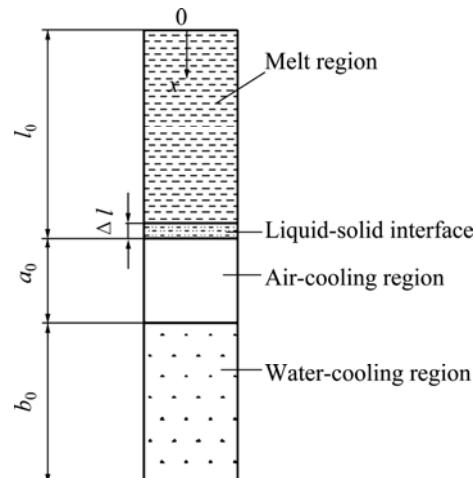


图 1 连续定向凝固模型

Fig.1 Model of Ohon continuous casting

图 1 中 l_0 为结晶器长度, Δl 为液/固界面宽度, a_0 为空冷区长度, b_0 为水冷区长度。沿结晶器入口到出口方向, 熔体区逐渐由熔体温度降低至合金熔点温度, 长度为 $l_0 - \Delta l$ 。当拉坯速度达到最大稳态拉坯速度时, 液/固界面位于结晶器出口。连续定向凝固时熔体区和空冷区均无热源或冷源; 液/固界面处发生液-固相变, 释放凝固潜热, 因而存在热源; 水冷却区存在冷源。一维稳态温度场控制方程可表达为^[11]

$$\lambda \frac{d^2T}{dx^2} - \rho c_p v \frac{dT}{dx} + Q_s - q = 0 \quad (1)$$

式中: λ 为导热系数, ρ 为密度, c_p 为定压比热容, v 为拉坯速度, Q_s 为热源项, q 为冷源项。对各区域进行边界条件的讨论, 即可获得各区的温度场方程。

1) 熔体区

由于熔体区无热源和冷源, 即 $Q_s=0$ 和 $q=0$, 其温度场控制方程可表达为

$$\lambda \frac{d^2T}{dx^2} - \rho c_p v \frac{dT}{dx} = 0 \quad (2)$$

熔体区与液/固界面相邻, 熔体区始端温度为熔体温度 T_0 , 末端温度为合金的液相点温度 T_L , 因此, 熔体区

存在边界条件, 即 $T_{(x=0)} = T_0$, $T_{(x=l_0-\Delta l)} = T_L$ 。

由边界条件可解得熔体区的温度场方程为

$$T = \frac{T_L - T_0 \exp[v(l_0 - \Delta l)/a] + (T_0 - T_L) \exp(vx/a)}{1 - \exp[v(l_0 - \Delta l)/a]} \quad (3)$$

式中: α 为散热系数 ($\alpha = \lambda/(\rho c_p)$)。

2) 液/固界面

液/固界面处由于液相凝固而释放凝固潜热, 即 $Q_s = \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t}$; 无冷源, 即 $q=0$, 其温度场控制方程可表达为

$$\lambda \frac{d^2T}{dx^2} - \rho c_p v \frac{dT}{dx} + \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

式中: L 为凝固潜热, J/kg; $\partial f_s / \partial t$ 为单位体积和单位时间内固相率的增量。

二元合金凝固时液/固界面处, 固相率 f_s 与温度 T 的关系可能表现为线性、二次、杠杆原理和 Scheil 方程等 4 种形式。当液/固界面温度范围较窄时, 4 种形式的差别很小^[12]。在计算凝固温度场结晶潜热时, 常以线性关系来近似固相率与温度的关系^[13-14]。Cu-12%Al 液/固界面温度范围较窄^[15], 连续定向凝固时液/固界面固相率从液相点处 $f_s=0$ 逐渐增至固相点处 $f_s=1$, 且固相点温度为 T_s , 故可假设 Cu-12%Al 合金连续定向凝固时固相率与温度成线性关系, 即

$$f_s(T) = \begin{cases} 0 & T = T_L \\ \frac{T_L - T}{T_L - T_s} & T_s < T < T_L \\ 1 & T = T_s \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可得: $\frac{\partial f_s}{\partial T} = -\frac{1}{T_L - T_s}$,

$\frac{\partial f_s}{\partial t} = \frac{\partial f_s}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = -\frac{v}{T_L - T_s} \frac{\partial T}{\partial x}$, 将其代入式(4)并两边除以 ρc 可得:

$$\alpha \frac{d^2T}{dx^2} - v[1 + \frac{L}{c_p(T_L - T_s)}] \frac{dT}{dx} = 0 \quad (6)$$

液/固界面存在两个第一类边界条件, 即 $T_{(x=l_0-\Delta l)} = T_L$ 和 $T_{(x=l_0)} = T_s$ 。由此边界条件可以得到式(6)的解为

$$T = \{T_L - T_s \exp(v\beta\Delta l/a) - (T_L - T_s) \exp[v\beta(l_0 - x)/a]\} / [1 - \exp(v\beta\Delta l/a)] \quad (7)$$

式中: $\beta = -[1 + \frac{L}{c(T_L - T_s)}]$ 。

由于连续定向凝固系统温度场控制方程一阶可导且连续, 故熔体区与液/固界面交界处 ($x = l_0 - \Delta l$) 温度梯度相等, 由式(3)和(7)一阶导数相等可得:

$$\frac{T_0 - T_L}{\exp[-v(l_0 - \Delta l)/a] - 1} + \beta \frac{T_L - T_s}{\exp(v\beta\Delta l/a) - 1} = 0 \quad (8)$$

式(8)是关于最大稳态拉坯速度 v_{\max} 和液/固界面宽度 Δl 的指数方程。

3) 空冷区

空冷区无热源和冷源, 即 $Q_s=0$ 和 $q=0$, 空冷区温度场控制方程可表达为

$$\alpha \frac{d^2T}{dx^2} - v \frac{dT}{dx} = 0 \quad (9)$$

式(9)为二阶齐次线性微分方程, 其通解为

$$T = C_1 + C_2 \exp\left(\frac{vx}{a}\right) \quad (10)$$

空冷区存在第一类边界条件 $T_{(x=l_0)} = T_s$, 将其代入式(10)可得:

$$T_s = C_1 + C_2 \exp\left(\frac{vl_0}{a}\right) \quad (11)$$

4) 水冷区

线坯的水冷区有冷源, 即 $q = 2(T - T_w)h/R_0$, 无热源, 即 $Q_s=0$, 其温度场控制方程可表达为

$$\alpha \frac{d^2T}{dx^2} - v \frac{dT}{dx} - \frac{2(T - T_w)h}{\rho c R_0} = 0 \quad (12)$$

式中: h 为冷却水对流换热系数, R_0 为线材半径。式(12)为二阶非齐次线性微分方程, 其通解为

$$T = C_3 \exp(Z_1 x) + C_4 \exp(Z_2 x) + T_w \quad (13)$$

式中:

$$Z_1 = [v + \sqrt{v^2 + 8\alpha h/(\rho c_p R_0)}]/2\alpha,$$

$$Z_2 = [v - \sqrt{v^2 + 8\alpha h/(\rho c_p R_0)}]/2\alpha.$$

由于线坯热焓少, 能被水充分冷却, 故存在第一类边界条件 $T_{(x=l_0+a_0+b_0)} = T_w$, 将其代入式(13)可得:

$$C_3 \exp[Z_1(l_0 + a_0 + b_0)] + C_4 \exp[Z_2(l_0 + a_0 + b_0)] = 0 \quad (14)$$

由于空冷区和水冷区结合处 ($x = l_0 + a_0$) 温度和温度梯度均相等, 由式(10)和(13)可得:

$$C_1 + C_2 \exp[v(l_0 + a_0)/a] = C_3 \exp[Z_1(l_0 + a_0)] + C_4 \exp[Z_2(l_0 + a_0)] + T_w \quad (15)$$

$$\frac{C_2 v}{a} \exp[v(l_0 + a_0)/a] = C_3 Z_1 \exp[Z_1(l_0 + a_0)] + \\ C_4 Z_2 \exp[Z_2(l_0 + a_0)] \quad (16)$$

联立式(11)、(14)、(15)和(16)可求得系数 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 :

$$C_1 = \{T_S[(aZ_1 + v)\exp(Z_3) + (aZ_2 - v)\exp(Z_4)]\exp[v(l_0 + a_0)/a] - aT_W[Z_1 \exp(Z_3) + Z_2 \exp(Z_4)]\exp(vl_0/a)\} / \{a \exp(vl_0/a)[\exp(a_0/a) - 1][Z_1 \exp(Z_3) + Z_2 \exp(Z_4)] + v \exp[v(l_0 + a_0)/a][\exp(Z_3) - \exp(Z_4)]\} \\ C_2 = \{a(T_W - T_S)[Z_1 \exp(Z_3) + Z_2 \exp(Z_4)]\} / \{a \exp(vl_0/a)[\exp(a_0/a) - 1][Z_1 \exp(Z_3) + Z_2 \exp(Z_4)] + v \exp[v(l_0 + a_0)/a][\exp(Z_3) - \exp(Z_4)]\} \\ C_3 = v(T_S - T_W)\exp[Z_2(l_0 + a_0 + b_0) + v(l_0 + a_0)/a] / \{\exp[v(l_0 + a_0)/a][(Z_1 a + v)\exp(Z_3) + (Z_2 a - v)\exp(Z_4)] - a[Z_1 \exp(Z_3) + Z_2 \exp(Z_4)]\exp(vl_0/a)\} \\ C_4 = \{v(T_W - T_S)\exp[v(l_0 + a_0)/a + Z_1(l_0 + a_0 + b_0)]\} / \{\exp[v(l_0 + a_0)/a][(Z_1 a + v)\exp(Z_3) + (Z_2 a - v)\exp(Z_4)] - a \exp(vl_0/a)[Z_1 \exp(Z_3) + Z_2 \exp(Z_4)]\}$$

式中:

$$Z_3 = Z_1(l_0 + a_0) + Z_2(l_0 + a_0 + b_0),$$

$$Z_4 = Z_1(l_0 + a_0 + b_0) + Z_2(l_0 + a_0)。$$

将系数 C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 代入式(10)和(13)即可求得空冷区和水冷区的温度场方程。

由于液/固界面与空冷区结合处温度梯度相等, 由式(7)和(10)可得:

$$-\beta(T_L - T_S) / [1 - \exp(v\Delta l\beta/a)] + a \exp(vl_0/a) \cdot (T_S - T_W)[Z_1 \exp(Z_3) + Z_2 \exp(Z_4)] / \{a \exp(vl_0/a)[\exp(a_0/a) - 1][Z_1 \exp(Z_3) + Z_2 \exp(Z_4)] + v \exp[v(l_0 + a_0)/a][\exp(Z_3) - \exp(Z_4)]\} = 0 \quad (17)$$

式(17)也是有关最大稳态拉坯速度 v_{\max} 和液/固界面宽度 Δl 的方程, 与式(8)联立即可求解一定工艺条件下的最大稳态拉坯速度 v_{\max} 。

2 实验过程

图 2 所示为本研究所采用的实验装置简图。定向凝固系统包括加热系统和定向冷却系统。通过控温热电偶来调节加热器的加热状况, 以控制结晶器入口的熔体温度; 在结晶器的侧壁采用保温棉抑制结晶器的侧向散热, 确保定向凝固系统单向传热特征; 使用冷却水对铸锭进行冷却, 建立线坯的轴向温度梯度; 结

晶器和水冷区之间存在隔热垫, 以减小结晶器和铸坯与空气间的对流换热和辐射热; 采用测温热电偶测量结晶器出口铸坯的温度; 通过调节导轮转速来控制拉坯速度。连续定向凝固时, 首先将准备好的原料放入坩埚, 对炉体进行抽真空, 然后开启中频感应电源, 进行金属合金的熔炼。原料完全熔化后, 充入氩气保护气体, 使炉体内压力与外界大气压相平衡。保温 30 min 后, 开动牵引机构, 进行合金线材的制备。

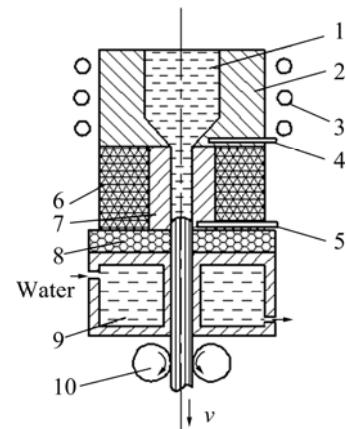


图 2 连续定向凝固装置简图

Fig.2 Schematic diagram of Ohon continuous casting equipment: 1—Metal melt; 2—Drainage tube; 3—Induction heater; 4—Thermocouple to control temperature; 5—Thermocouple to measure temperature; 6—Heat preservation cotton; 7—Crystallizer; 8—Insulation pad; 9—Cooling water box; 10—Guide wheel

实验材料选用纯度为 99.7%Al 和 99.95%Cu 并按质量比 12:88 进行熔炼。实验时可控工艺参数有熔体温度 T_0 、结晶器长度 l_0 、拉坯速度 v 、冷却距离即空冷区长度 a_0 和冷却水流量 Q 。应用 NETZSCH STA 409 差热分析仪测量 Cu-12%Al 熔化潜热, 样品尺寸为 $d5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$, 升温速率为 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 保护气氛为氩气。在一定工艺条件(熔体温度、结晶器长度、冷却距离和冷却水流量)下进行实验时, 逐步提高拉坯速度, 并记录所对应的结晶器出口温度, 结晶器出口温度达到合金的固相点所对应的拉坯速度即为最大稳态拉坯速度。

3 实验验证与讨论

本研究所采用的定向凝固工艺参数如下: 熔体温度 $1150\text{--}1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 结晶器长度 $20\text{--}40 \text{ mm}$, 冷却距离

为4~12 mm, 冷却水温20 °C, 水流量100~400 L/h, 相对对流换热系数273.8~518.8 W/(m²·°C)^[16], 水冷区长度为120 mm, 线坯直径为6 mm。

涉及最大稳态拉坯速度计算的材料物性参数有密度 ρ 、导热系数 λ 、定压比热容 c_p 和结晶潜热 L 。Cu-12%Al合金密度为7 520 kg/m³, 定压比热容为444 J/(kg·°C), 热导率为69.5 W/(m·°C)^[17]。采用差热分析法测得Cu-12%Al合金固相点温度为1 032 °C, 液相点温度为1 060 °C, 熔化潜热为3 294 J/kg。由于同种合金的熔化潜热与结晶潜热相同, 因此, Cu-12%Al结晶潜热也为3 294 J/kg。将工艺参数和材料物性参数代入式(8)和(17), 即可求解出不同工艺条件下Cu-12%Al合金最大稳态拉坯速度。

3.1 熔体温度对最大稳态拉坯速度的影响

图3所示为不同熔体温度所对应的最大稳态拉坯速度的理论曲线和实验值。由图3可知, 当结晶器长度为30 mm, 冷却距离为8 mm, 冷却水流量为400 L/h时, 最大稳态拉坯速度随着熔体温度升高而降低, 当熔体温度由1 150 °C增至1 300 °C时, 最大稳态拉坯速度减小了37.3%。这是由于在相同工艺条件下, 熔体温度越高, 温度梯度越大, 固液界面越靠近结晶器出口端, 故最大稳态拉坯速度随着熔体温度的升高而降低。同时, 提高熔体温度会使固液界面至冷却水距离减小, 增强冷却水对固液界面的影响, 而减弱了熔体温度对固液界面的影响, 因此, 最大稳态拉坯速度随着熔体温度的升高而降低的速率逐渐减小。另外, 所计算的理论值均小于实验值, 这是由于实验过程中, 结晶器周围不可避免的存在一定侧向散热, 而且熔体温度越高, 侧向散热越严重, 所造成的实验值与理论曲线的偏差也越大。

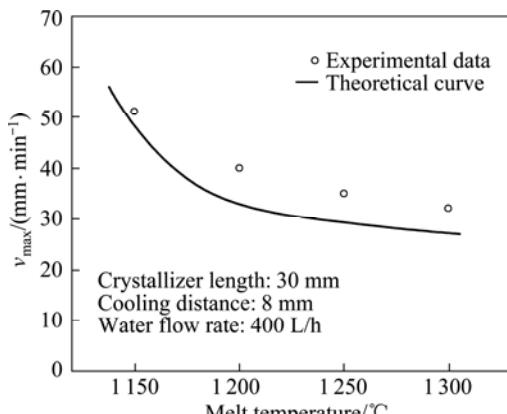


图3 熔体温度对最大稳态拉坯速度的影响

Fig.3 Effect of melt temperature on maximum steady-state drawing velocity

3.2 结晶器长度对最大稳态拉坯速度的影响

图4所示为不同结晶器长度所对应的最大稳态拉坯速度的理论曲线和实验值。由图4可知, 当熔体温度为1 150 °C, 冷却距离为8 mm, 冷却水流量为400 L/h时, 最大稳态拉坯速度随结晶器长度增加而增加, 结晶器长度由20 mm增至40 mm时, 最大稳态拉坯速度增加了28.5%。在相同的工艺条件下, 结晶器越长, 固液界面离结晶器出口越远, 故最大稳态拉坯速度随结晶器长度增加而增加。而且, 与结晶器较长的温度梯度相比, 结晶器长度较短时给定一个很小的长度增量而导致结晶器温度梯度变化更明显, 因而对固液界面的位置的影响也更大。因此, 结晶器长度越短时, 最大稳态拉坯速度随结晶器长度变化越明显, 随结晶器长度增加, 最大稳态拉坯速度的增加速率逐渐减小。

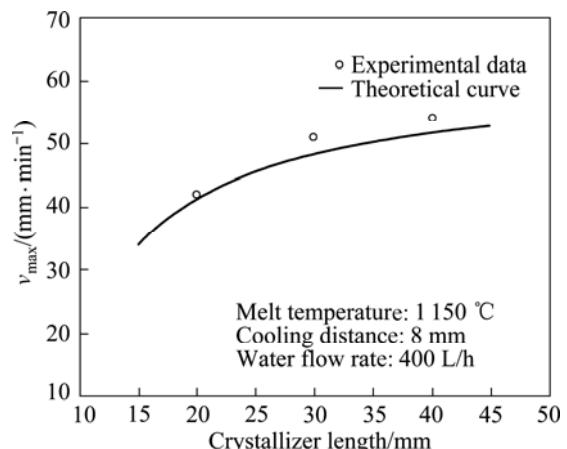


图4 结晶器长度对最大稳态拉坯速度影响

Fig.4 Effect of crystallizer length on maximum steady-state drawing velocity

3.3 冷却距离对最大稳态拉坯速度的影响

图5所示为不同冷却距离所对应的最大稳态拉坯速度的理论曲线和实验值。由图5可知, 当熔体温度为1 150 °C, 结晶器长度为30 mm, 冷却水流量为400 L/h时, 最大稳态拉坯速度随冷却距离增加而降低。当冷却距离由4 mm增至12 mm时, 最大稳态拉坯速度减少了68.8%。在相同工艺条件下, 冷却距离越大, 固液界面越靠近结晶器出口, 故最大稳态拉坯速度随冷却距离增加而降低。而且, 冷却距离越大, 冷源对固液界面的影响越弱, 因此, 最大稳态拉坯速度随冷却距离增加而降低的速率逐渐减小。另外, 当冷却距离小时, 隔热垫厚度小, 隔热效果差, 结晶器散热更严重, 导致最大稳态拉坯速度实验值与理论值相差较大, 如冷却距离为4 mm时。

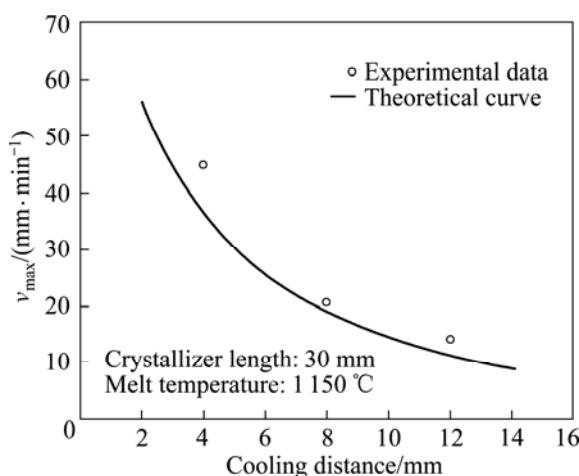


图 5 冷却距离对最大稳态拉坯速度影响

Fig.5 Effect of cooling distance on maximum steady-state drawing velocity

3.4 冷却水流量对最大稳态拉坯速度的影响

图 6 所示为不同冷却水流量所对应的最大稳态拉坯速度理论曲线和实验值。由图 6 可知, 当熔体温度为 1150 °C, 结晶器长度为 20 mm, 冷却距离为 8 mm 时, 最大稳态拉坯速度随冷却水流量增加趋势较缓慢, 当冷却水流量由 100 L/h 增至 400 L/h 时, 最大稳态拉坯速度仅增加了 6 mm/min。在相同工艺条件下, 随冷却水流量增大, 固液界面上移, 远离结晶器出口, 故最大稳态拉坯速度随冷却水流量增大而增加。但是, 冷却水流量对最大稳态拉坯速度的影响较小, 这是由于线材直径较小, 热焓少, 需冷却热量少, 故冷却水流量对最大稳态拉坯速度的影响较小。

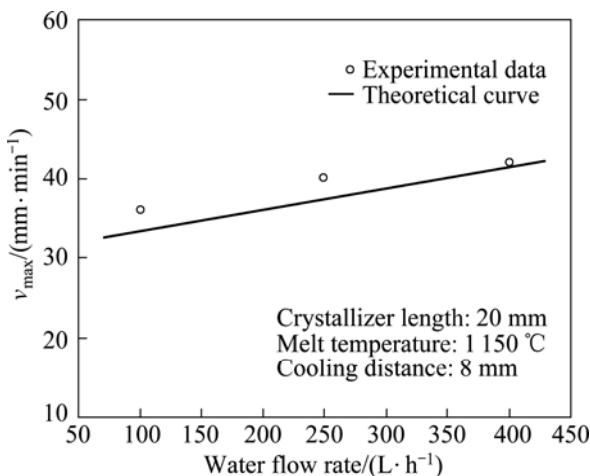


图 6 水流量对最大稳态拉坯速度影响

Fig.6 Effect of water flow rate on maximum steady-state drawing velocity

3.5 拉坯速度与凝固速度的关系

综上所述, 通过降低熔体温度、增加结晶器长度、缩短冷却距离及提高水流量, 可使最大稳态拉坯速度增加。其中熔体温度、结晶器长度、冷却距离对最大稳态拉坯速度的影响较大, 而水流量的影响较小。熔体温度和结晶器长度直接影响结晶器内固液界面前沿的温度梯度, 当冷却条件一定时, 降低熔体温度或增加结晶器长度均使固液界面前沿温度梯度降低, 由此可知, 固液界面前沿温度梯度越小, 最大稳态拉坯速度越大。当熔体温度 T_0 等于 T_L 时, 即固液界面前沿温度梯度为零, 由式(8)可知, 理论最大稳态拉坯速度为无穷大。然而, 在实际生产中, 最大稳态拉坯速度还受到熔体凝固速度的影响。由于温度梯度越大, 凝固时固液界面前沿过冷度也越大, 而且过冷度与凝固速度近似为线性关系^[18-19], 故温度梯度与最大稳态拉坯速度 v_{\max} 和凝固速度 v_s 的关系可表达为如图 7 所示。从图 7 可以看出, 最大稳态拉坯速度随着固液界面前沿温度梯度增加而降低, 而熔体凝固速度随温度梯度的增加而增加, 两线条在点 m 处相交。当温度梯度小于点 m 所对应的温度梯度时, 熔体的凝固速度小于理论最大稳态拉坯速度(见图 7 中 I 区)。此时, 较大速度进行实验将导致线坯出现拉断, 如图 8(c)和(d)中的 A、B 处所示, 因此, 实际拉坯速度无法达到理论最大稳态拉坯速度; 当温度梯度大于点 m 所对应的温度梯度时, 熔体的凝固速度大于理论最大稳态拉坯速度(见图 7 中 II 区), 拉坯速度可达到理论最大稳态拉坯速度。实验表明, 当熔体温度为 1100 °C、结晶器长度为 40 mm、冷却距离为 8 mm, 拉坯速度为 40 mm/min 时出现拉断, 实际拉坯速度无法达到理论最大稳态拉坯速度(100.9 mm/min), 固液界面前沿温度梯度为 2.02 °C/mm; 当熔体温度为 1130 °C, 结晶器长度为 40 mm,

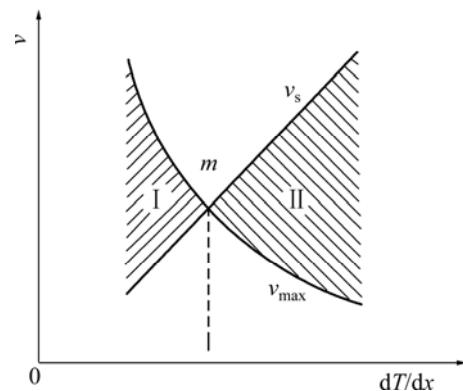


图 7 凝固速度和最大稳态拉坯速度与温度梯度的关系

Fig.7 Relationship between solidification rate or maximum steady-state drawing velocity and thermal gradient

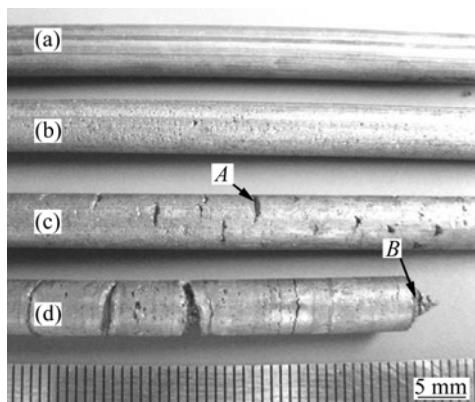


图 8 不同拉坯速度所制备线材的照片

Fig.8 Photos of wire billets cast by various drawing velocities:
(a) 10 mm/min; (b) 20 mm/min; (c) 30 mm/min; (d) 40 mm/min

冷却距离为 8 mm 时, 实际拉坯速度能达到理论最大稳态拉坯速度 62.6 mm/min, 固液界面前沿温度梯度为 4.17 °C/mm。由此可知, 点 *m* 所对应的温度梯度位于 2.02~4.17 °C/mm 之间。

4 结论

1) 将线坯分为熔体区、液/固界面、空冷区和水冷区, 应用边界条件分别求解各区的温度场方程, 得出最大稳态拉坯速度 v_{\max} 和液/固界面宽度 Δl 的方程。

2) 直径为 6 mm 的 Cu-12%Al 线材最大稳态拉坯速度随熔体温度或冷却距离增加而降低, 且降低速率逐渐减小; 最大稳态拉坯速度随结晶器长度的增加而增加, 且增加速率逐渐减小; 最大稳态拉坯速度随冷却水流量变化不明显。熔体温度由 1 150 °C 增至 1 300 °C 时最大稳态拉坯速度降低 37.3%; 结晶器长度由 20 mm 增至 40 mm 时最大稳态拉坯速度增加 28.5%; 冷却距离由 4 mm 增至 12 mm 时最大稳态拉坯速度降低 68.8%。

3) 当固液界面前沿温度梯度小于 2.02 °C/mm 进行连续定向凝固时, 熔体的凝固速度小于理论最大稳态拉坯速度, 实际拉坯速度无法达到理论最大稳态拉坯速度; 当固液界面前沿温度梯度大于 4.17 °C/mm 时, 熔体的凝固速度大于理论最大稳态拉坯速度, 最大稳态拉坯速度实验值和理论值吻合较好。

REFERENCES

- [1] ZHANG Z M, LI T, XU C J, GUO X F. Microstructure of binary Mg-Al eutectic alloy wires produced by the Ohno continuous casting process[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2008, 21(4): 275~281.
- [2] OKAYASUA M, YOSHIEB S. Mechanical properties of Al-Si₁₃-Ni_{1.4}-Mg_{1.4}-Cu₁ alloys produced by the Ohno continuous casting process[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2010, 527(13/14): 3120~3126.
- [3] 刘雪峰, 李卫河, 谢建新. 连续柱状晶组织 CuAlNi 合金管材的短流程制备[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(7): 1248~1253. LIU Xue-feng, LI Wei-he, XIE Jian-xin. Compact processing of containing CuAlNi alloy pipes with continuous columnar crystals[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2008, 18(7): 1248~1253.
- [4] 王建, 邢建东, 王德义, 姜红喜. 热型连铸单晶 Sn 带材制备工艺及其性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(9): 1610~1613. WANG Jian, XING Jian-dong, WANG De-yi, JIANG Hong-xi. Research on the processing and performance of single crystal tin strips using a heated mould[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(9): 1610~1613.
- [5] 季灯平, 刘雪峰, 谢建新, 余均武, 李卫河, 荣鸣雷. Cu-12%Al 铝青铜线材的连续定向凝固制备[J]. 金属学报, 2006, 42(12): 1243~1247. JI Deng-ping, LIU Xue-feng, XIE Jian-xin, YU Jun-wu, LI Wei-he, RONG Ming-lei. Preparation of Cu-12%Al albronz wires by continuous unidirectional solidification[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006, 42(12): 1243~1247.
- [6] SODA H, MCLEAN A, MOTOYASU G. Studies of the solid-liquid interface location during heated mould continuous casting of metals and alloys[J]. *International Journal of Cast Metals Research*, 2005, 18(3): 163~173.
- [7] 许振明, 李金山, 李建国, 傅恒志. 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[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(1): 221~228. XU Zhen-ming, LI Jin-shan, LI Jian-guo, FU Heng-zhi. Matching of technological parameters and its effect on surface quality and cast structure of copper single crystal rod during continuous casting[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1999, 9(1): 221~228.
- [8] 赵干, 倪峰, 魏世忠, 龙锐, 李兴霞. 纯铜热型连铸的工艺问题与缺陷[J]. 特种铸造及有色合金, 2007, 27(5): 373~376. ZHAO Gan, NI Feng, WEI Shi-zhong, LONG Rui, LI Xing-xia. Process problems and defects in Ohno continuous casting pure copper[J]. *Special Casting and Nonferrous Alloys*, 2007, 27(5): 373~376.
- [9] SHEN X, ZHANG H, WANG Z D, LOU H F, JIA Y M, HU P X. Macrostructure and properties of thin walled copper tubes prepared by the downward continuous unidirectional solidification method[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2010, 17(1): 63~68.
- [10] 常国威, 袁军平, 王自东, 吴春京, 胡汉起. 电渣感应连续定

- 向凝固过程温度场计算与实验研究[J]. 人工晶体学报, 1999, 28(2): 182-187.
- CHANG Guo-wei, YUAN Jun-ping, WANG Zi-dong, WU Chun-jing, HU Han-qi. Analysis of temperature field and verification tests on electro-slag induct continuous unidirectional solidification process[J]. Journal of Synthetic Crystals, 1999, 28(2): 182-187.
- [11] 戴锅生. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 28.
- DAI Guo-sheng. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 28.
- [12] VOSS M J, TASI H L. Effects of the rate of latent heat release on fluid flow and solidification patterns during alloy solidification[J]. International Journal of Engineering Science, 1996, 34(6): 715-737.
- [13] GUSTAFSSON E, HOFWING M, STRBERG N. Residual stresses in a stress lattice-experiments and finite element simulations[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(9): 4320-4328.
- [14] KANG C G, KIM Y D. Model experiments for the determination of the heat-transfer coefficient and transition thermal analysis in the direct rolling process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 84(1/3): 210-224.
- [15] SWANN P R, WARLIMONT H. The electron-metallurgy and crystallography of copper-aluminum martensites[J]. Acta Metallurgical, 1963, 11(6): 511-527.
- [16] 黄作勤. 镍钛形状记忆合金连续定向凝固温度场数值模拟及设备设计[D]. 北京: 北京科技大学, 2006: 29-32.
- HUANG Zuo-qin. Numerical simulation on temperature field and device design for continuous unidirectional solidification of NiTi shape memory alloy[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2006: 29-32.
- [17] 马胜军. 高铝青铜线材制备加工过程的数值模拟与实验研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2008: 23-25.
- MA Sheng-jun. Numerical simulation and experimental research on the process of high aluminium bronze wires[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2008: 23-25.
- [18] 胡汉起. 金属凝固原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 99-101.
- HU Han-qi. Metal solidification principle[M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 99-101.
- [19] ALTGILBERS A, HOFMERSTER W, BAYUZICK R. The dendrite growth kinetics of nickel-based alloys[J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 360(1/3): 26-34.

(编辑 何学锋)