# 连铸 Ag-28Cu 温度场非稳态过程的数值模拟

杨云峰,谢 明\*,李 艳,陈 松,杨有才,陈永泰 (昆明贵金属研究所 稀贵金属综合利用新技术国家重点实验室,昆明 650106)

摘要:采用 Procast 软件中的 Mile 算法对 Ag-28Cu 合金连铸凝固过程中温度场的非稳态变化进行了 模拟,研究了不同拉速、过热度和换热系数对温度场分布、凝固速率和凝固前沿温度梯度变化的影 响。模拟结果表明:随拉速的增大,铸件中心区域的凝固速率加快,凝固前沿温度梯度变化范围减 小。换热系数的改变在靠近铸件表面区域对凝固速率基本没有影响,但靠近铸件中心区域后,其凝 固速率随换热系数开始大幅度增大。在整个凝固过程中,换热系数越大,凝固前沿温度梯度越大。 随浇注温度的提高,其凝固速率呈振荡式增大,凝固前沿温度梯度呈振荡式减小。 关键词:金属材料;连续铸造;凝固速率;温度梯度 中图分类号:TG293、TF777.3 文献标识码:A 文章编号:1004-0676(2015)04-0037-08

# Numerical Simulation of Unsteady Temperature Field for Ag-28Cu Alloy in Continuous Casting

YANG Yunfeng, XIE Ming<sup>\*</sup>, LI Yan, CHEN Song, YANG Youcai, CHEN Yongtai (State Key Laboratory of Advanced Technologies for Comprehensive Utilization of Platinum Metals, Kunming Institute of Precious Metals, Kunming 650106, China)

**Abstract:** The Mile (Mixed Lagrangian Eulerian) algorithm of procast software was used to simulate the process of unsteady temperature field for Ag-28Cu alloy in continuous casting. The change of the temperature field distribution, solidification rate and the temperature gradient of the solidification front was studied on different pulling speed, degree of superheat and heat transfer coefficient. Simulation results show that the larger the drawing speed is, the faster the solidification rate of the central region is, the smaller the temperature gradient is. A change in heat transfer coefficient has no effect on solidification rate in the area near casting surface. But in the area near the center of the casting, the solidification process, the larger the heat transfer coefficient is, the greater the temperature gradient is. With the rise of pouring temperature, a vibrating increase of the solidification rates occurs while the temperature gradient of solidification front decreases in the way of vibrating.

Key words: metal materials; continuous casting; solidification rate; temperature gradient

Ag-28Cu 合金是典型的共晶合金,具有良好的 流动性、浸润性和抗熔焊性,是应用最广的电子焊 料之一,也是众多科研工作者研究共晶理论的对象。 如 Park 等人<sup>[1]</sup>采用落管法研究了 Ag-28Cu 合金液滴

凝固过程中温度变化对共晶层片间距的影响。Zhao 等人<sup>[2]</sup>采用玻璃熔融净化法研究了不同过冷度对 Ag-28Cu 合金凝固组织的影响。但是,对采用连铸 法制备 Ag-28Cu 合金凝固过程中温度场变化的研究

收稿日期: 2015-01-29

基金项目:国家自然科学基金项目(51164015),云南省重点基金项目(2011FA026),省院所技术开发专项(2011CF012)。

第一作者:杨云峰,男,硕士研究生,研究方向:凝固模拟研究。E-mail: yang\_yunfeng@yeah.net

<sup>\*</sup>通讯作者:谢明,男,研究员,研究方向:贵金属粉末冶金。E-mail: powder@ipm.com.cn

却很少。由于连铸结晶器内熔体的温度和铸件内部 的温度变化很难通过实验测得,而采用计算机模拟 铸件凝固过程中的温度变化却容易的多。在连续铸 造的启动阶段,铸件凝固的温度场存在从非稳定状 态向稳定状态的过渡,其过程对连铸启动阶段的工 艺参数设置影响很大。

本文采用 Mile(Mixed Lagrangian-Eulerian)算法 对 Ag-28Cu 合金连铸凝固过程温度场的非稳态变化 过程进行了模拟,研究了不同拉速、过热度和换热 系数对其温度场分布、凝固速率和凝固前沿温度梯 度变化的影响。

## 1 模型的建立

#### 1.1 控制方程

考虑熔融金属三维瞬态流动和传热现象,建立 了基于质量、动量和能量平衡的控制方程;同时考 虑重力的影响,在动量方程中加入重力项,以便于 将方程应用于糊状区和固相区<sup>[3-4]</sup>。其控制方程如下:

(1) 质量守恒方程  
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0$$
(1)

(2) 动量守恒方程

$$\frac{\rho}{f_1}\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\rho}{f_1^2}\left(u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial w}{\partial z}\right) =$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g x + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{u}{f_1} \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{u}{f_1} \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{u}{f_1} \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \left( \frac{u}{K} \right) U \quad (2)$$

(3) 能量守恒方程

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} + \rho \frac{\partial H}{\partial T} \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k_T \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$
(3)

其中:

$$H(T) = \int_{0}^{T} C_{p}(T) dT + L(1 - f_{s})$$
 (4)

式中u、v、w分别为x、y、z方向的速度矢量,m/s; t为时间,s; $f_s$ 为固相率;P为压力,Pa; $g_x$ 为x方 向重力分量,m/s<sup>2</sup>; $\rho$ 为密度,kg/m<sup>3</sup>;U为绝对粘度, Pa·s; $k_T$ 为热传导系数,W/(m·K); $C_p$ 为比热容, J/(kg·K);L为凝固潜热,J/kg;T为节点温度,K;H为热焓,J/mol。

表1为计算所需的Ag-28Cu合金的物性参数。

表1 计算所需 Ag-28Cu 合金的物性参数<sup>[5-6]</sup>

Tab.1 Physical parameters of Ag-28Cu c alloy for calculation

参数	数值
密度 $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	$10^{4}$
共晶温度 <i>T</i> <sub>m</sub> , ℃	779
热传导系数 <i>k</i> <sub>T</sub> , W/(m·K)	352
凝固潜热 L, (kJ/kg)	-166.4
液态比热容 Cp, J/(kg·K)	32
热扩散系数 α, m <sup>2</sup> /s	5.4346×10 <sup>-5</sup>
扩散常量 D <sub>0</sub> , m <sup>2</sup> /s	2.42×10 <sup>-7</sup>
活化能 Q, J/mol	48886

溶质在液相中的扩散系数 *D=D*<sub>0</sub>exp(-*Q*/R*T*),气体常数 R=8.3145 J/(mol·K)。

#### 1.2 模型和网格划分

为了计算模拟真实的连续铸造过程,即结晶区 域随时间扩大的过程,采用 Mile 算法对连续铸造 Ag-28Cu 启动阶段的温度场变化进行了计算。Mile 算法的原理如图1所示。



Fig.1 The principle of Mile algorithm

连铸过程开始前,将铸件区域划分为1、2两个 区域,并在两个区域接触界面间设置一定数量 0 厚 度的可折叠单元层。在连铸过程开始后,1 区域的位 置始终保持不变;而 2 区域以连铸速度向下移动, 为保持两区域间的连续性,两区域接触界面间的可 折叠单元层被赋予一定的厚度,当连铸下移距离达 到设定厚度时,新的一层单元层被展开。随连铸过 程的进行,可折叠单元层被陆续展开,区域 3 不断 增大。该模型中固定区域1采用 Eulerian 算法计算金 属液的流动和传热,移动区域2、3 采用 Lagrangian 算法进行热流力耦合计算。

本文中计算模型如图 2 所示, I、II、III 部分对 应图 1 的 1、2、3 部分。II、III 部分间界面设置可折 叠单元层, 层数为 40,展开后每层厚度设置为 0.2 mm;模型中铸件展开区域III的网格为动态网格,其 余为固定网格。铸件直径为 8 mm,设置结晶器 V 和 拉杆 IV 材料为纯铜。模型中总节点数为 78401,总 六面体单元数为 411998。



图 2 计算模型网格划分 Fig.2 Griding of computational domain

#### 1.3 边界条件的设定

边界条件的设定如图3所示。

(1) 在区域 I 顶部设置固定温度条件,即浇注温度。

(2) 区域 I、II 与区域 V 接触面以及区域 II 与

区域 IV 接触面设置固定热交换条件。

(3) 连铸开始后,区域 II、III 离开结晶器部分 外表面热交换条件设置为空冷 *h*=20 W/(m<sup>2</sup>·K),区域 II、III 热交换条件的变化通过外接 C 语言程序控制。



图 3 边界条件的设定 Fig.3 Setting of boundary conditions

(4) 结晶器 V 外表面与冷却水的热交换条件, 根据连铸的工艺参数确定,其确定条件如下: 在结晶器内采用平均热流密度表示对流换热的 强弱<sup>[7]</sup>:

$$q = \rho_{\rm w} c_{\rm w} W \Delta T / S \tag{5}$$

同时,换热系数和平均热流密度存在以下关系:

$$h = q/(T_s - T_w) \tag{6}$$

式中, q 为结晶器平均热流密度,  $W/m^2$ ;  $\rho_w$  为冷却 水密度,  $kg/m^3$ ;  $c_w$  为冷却水比热容,  $J/(kg\cdot k)$ ; W 为 结晶器冷却水流量,  $m^3/s$ ;  $\Delta T$  为结晶器进出口水温 差, K; S 为金属液与结晶器有效接触面积,  $m^2$ 。

## 2 模拟结果分析

图 4 为浇注温度(T)为 810℃,换热系数(h)为 3000 W/(m<sup>2</sup>·K),拉速(v)为 4 mm/s 时的温度场分布 结果,图 4 中(a)~(d)分别对应连铸过程启动 0.1、1、 1.5 和 2 s 后的温度场分布情况。从图 4 可以看到随 连铸过程的进行,铸件温度逐渐下降,其温度差分 布范围也随之变化。



Fig.4 The distribution results of temperature field on solidification process starts with different time

为了便于分析,采用多点测量的方法对连铸过 程温度场变化的模拟结果进行了统计,如图 5 所示。 图 5(a)为测温点分布位置。从壁面沿半径到铸件中心 分别取点 A~E,两个测温点之间间隔 1 mm。通过各 测温点采集的温度数据可绘制出如图 5(b)所示的凝 固冷却曲线示意图。







[(a). Location distribution of temperature measuring points; (b). The diagram of solidification cooling curve]

从图 5 可以看出其凝固冷却曲线主要分为 3 个 区域: I 为快速冷却阶段,金属液进入结晶器后,温 度迅速下降至共晶点,并开始形核; Ⅱ 为等温凝固 阶段,在晶体的长大过程中不断释放凝固潜热,当 结晶潜热的释放速度等于金属的散热速度时就会出 现等温平台,即共晶平台,共晶平台消失即凝固过 程完成; Ⅲ 为完全凝固后的冷却阶段。

对于共晶合金来说,凝固速率越大,共晶组织的层片间距则越细,合金强度也就越高。为研究不同工艺条件下凝固速率的变化,定义 2 个相邻测温  $点 x_i n x_{i+1}$ 离侧壁的距离差 $(x_{i+1}-x_i=1 \text{ mm})$ 除以这两个 测温点等温平台结束时的时间差 $(t_{i+1}-t_i)$ 得到的值为 距离侧壁 $(x_{i+1}+x_i)/2$ 处的凝固速率。

铸件凝固过程中,凝固前沿固液两相区的温度

梯度是影响柱状晶生长的主要原因,因为温度梯度 越大,将会为晶粒的择优生长创造条件,越有利于 柱状晶的生长,铸件中柱状晶的比例也就越高。为 研究不同工艺条件下,凝固前沿温度梯度的变化, 定义某一测温点 *x*<sub>i</sub>等温平台结束时,对应下一相邻 测温点*x*<sub>i+1</sub>的温度值减去共晶温度的差值除以2个测 温点离侧壁的距离差(*x*<sub>i+1</sub>-*x*<sub>i</sub>=1 mm)为凝固前沿的温 度梯度,对应的位置为(*x*<sub>i+1</sub>+*x*<sub>i</sub>)/2 处。

#### 2.1 不同拉速对温度场分布的影响

拉速的快慢直接影响着连铸的生产效率,所以 在保证铸件质量的情况下,提高拉速一直是生产者 期待的目标。本文在相同浇注温度(810℃)和换热系 数(3000W/(m<sup>2</sup>·K))的情况下,选择3种不同的拉速(4、 6和8mm/s),分析了不同拉速对温度场分布的影响, 其冷却曲线如图6所示。



Fig.6 Cooling curve (a~c) and solidification rate curve under different drawing speed(d)

从图 6(a~c)可以看出,测温点 A 即铸件表面位 置不存在等温平台;从 B 点到 E 点的过程中,其等 温平台逐渐增长,铸件在横截面方向从外到内依次 凝固。当 E 点等温平台开始下降时,铸件完全凝固。 在 II 阶段,当拉速依次递增时,E 点的等温平台明 显增长,铸件完全凝固所需时间从 0.735 s、0.751 s 延长到 0.767 s,其对应随拉杆拉出铸件中的液芯长 度也随之增长。等温平台以下,同一时刻各点之间 冷却曲线的距离越短,说明温度场越均匀;随拉速 的增加,温度场的均匀性下降。

图 6(d)为铸件凝固速率随离侧壁距离的变化曲 线,可以看出,4 mm/s条件下,其凝固速率存在较 大波动,在铸件 1/4~5/8 阶段凝固速率迅速增大到最 大值,其后又迅速下降。而 6、8 mm/s条件下,凝 固速率呈整体上升趋势,在铸件中心达到最大值。 在 4 mm/s条件下,由于拉速较慢,铸件在结晶器内 停留时间较长,结晶器内热交换强度很大,铸件释 放了大部分的凝固潜热,并快速凝固;但当铸件被 拉出结晶器后,空冷条件下热交换条件强度明显减 弱,液芯位置的凝固速率也随之明显减弱。在铸件 前 3/4 阶段,4 mm/s条件下凝固速率最大,8 mm/s 条件下其值最小;但在靠近铸锭中心位置时,4 mm/s 条件下的凝固速率下降为最小值。拉速为 4、6、8 mm/s 条件下的凝固速率最大值分别为 15.625、 7.813、10.417 mm/s。

图 7 为不同拉速下铸件的凝固前沿温度梯度随 离侧壁距离的变化曲线。





从图 7 可以看出,其温度梯度整体呈下降趋势; 开始凝固阶段,4 mm/s条件下温度梯度最大,但是 下降速率也最大,进入 1/2 阶段后,其值小于 8 mm/s 条件但大于 6 mm/s 条件。进入铸件 3/4 阶段后 4 mm/s 条件下的温度梯度基本没有变化,直接导致了其凝 固速率的迅速下降。综述所述,提高拉速可以使铸 件中心区域凝固速率提高,有利于晶粒的细化;同 时,凝固前沿温度梯度范围变小,有利于抑制柱状 晶的生长,有利于合金性能的提高。

## 2.2 不同换热系数对温度场分布的影响

换热系数的大小决定了结晶器内冷却水流量的 大小和对流换热的强弱,所以研究不同换热系数对 温度场分布的影响显得尤为重要。本文在相同浇注 温度(810℃)和拉速(8 mm/s)的情况下,选择 3 种不同 的换热系数(3000、3250 和 3500 W/(m<sup>2</sup>·K)),分析了 不同换热系数对温度场分布的影响,结果见图 8。





比较图 8(a~c)可知, 换热系数的改变对温度场分 布的均匀性影响较小。在 II 阶段, 随换热系数的增 加,铸件完全凝固所需时间减短,分别为 0.767、0.703 和 0.686 s。从图 8(d)中可以看出, 3 种条件下其凝固 速率呈上升趋势。3000 W/(m<sup>2</sup>·K)条件下的凝固速率 上升趋势较为缓慢。而 3250、3500 W/(m<sup>2</sup>·K)条件下 的凝固速率在铸件前半段变化较小, 但是进入铸件 3/4 阶段以后,其凝固速率开始大幅度增大, 且 3500 W/(m<sup>2</sup>·K)条件下的凝固速率大于 3250 W/(m<sup>2</sup>·K)条 件。3 种条件下,凝固速率都在铸件中心位置达到最 大值,其值分别为 10.417、19.532、26.948 mm/s。

图 9 为不同换热系数条件下,凝固前沿的温度 梯度随离侧壁距离的变化曲线。

从图 9 可以看出其温度梯度呈下降趋势。在整 个过程中,3500 W/(m<sup>2</sup>·K)条件的温度梯度最大,3250 W/(m<sup>2</sup>·K)条件次之,3000 W/(m<sup>2</sup>·K)条件最小。综上 所述,增大铸件表面换热系数能大幅提高铸件中心 区域的凝固速率,有利于晶粒的细化;但同时也使 凝固前沿温度梯度增大,促进了柱状晶的生长,不 利于合金整体性能的提高。



Fig.9 Curves of temperature gradient on the solidification front under different heat transfer coefficient

#### 2.3 不同浇注温度对温度场分布的影响

浇注温度越高,感应炉需要的功率就越大,生 产成本也就越高。所以,在满足生产要求的前提下, 选择相对较低的浇注温度可降低生产成本。为分析 不同浇注温度对温度场分布的影响,本文在3个相同的几何模型中设置相同的拉速和换热系数(v=8 mm/s, h=3000 W/(m<sup>2</sup>·K),选择3种不同的浇注温度(810、830、850℃)对其进行了对比分析,见图10。



Fig.10 Cooling curve (a~c) and solidification rate curve under different pouring temperature(d)

从图 10 可以看出,提高浇注温度即过热度可以 提高温度场分布的均匀性。随过热度的增加,I阶段 快速冷却至共晶点所需的时间增长,在相同换热系 数和拉速下,其热量散失能力相同,所以过热度越 高,熔体温度下降到相同温度所需时间越长。在 Ⅱ 阶段,随浇注温度的增大,铸件完全凝固所需时间 分别为0.767、1.10 和 1.03 s。图 10(d)为不同浇注温 度下的凝固速率曲线,其整体依然呈上升趋势;但 是,铸件在从侧壁向铸件内部凝固的过程中,810℃ 条件和850℃条件呈交替领先状态。在铸件前 1/2 阶 段和靠近铸件中心阶段,850℃条件凝固速率最大, 830℃条件次之,810℃条件最小;而在铸件 3/4 阶段, 凝固速率分布情况与上述情况相反。不同浇注温度 条件下的凝固速率最大值都出现在铸锭中心处,其 值分别为 10.417、13.254、15.625 mm/s。

图 11 为不同浇注温度条件下凝固前沿的温度梯 度变化曲线。

由图 11 可以看出,温度梯度整体依然呈下降趋势。但其变化曲线存在交互点。铸件前 1/2 阶段 810

℃条件温度梯度最大,850℃条件最小;而后1/2阶段850℃条件温度梯度最大,810℃条件最小。





综上所述,浇注温度的提高,使铸件 1/2~3/4 区域的凝固速率下降,不利于晶粒的细化;但是在铸件的前半部分,凝固前沿温度梯度的下降,有助于

抑制柱状晶的生长,有利于凝固组织的改善。

## 3 结论

(1) 采用 Mile 算法模拟 Ag-28Cu 共晶合金的连 铸凝固过程时,其凝固冷却曲线存在等温平台;从 铸件侧壁到中心,凝固速率呈上升趋势,温度梯度 呈下降趋势。

(2) 在相同条件下,提高连铸的拉速会降低温 度场分布的均匀性,但是能提高铸件中心区域的凝 固速率;随拉速的增大,凝固前沿温度梯度变化范 围减小。

(3) 在相同条件下,增大连铸结晶器的换热系数对温度场分布均匀性的影响较小。凝固速率在靠近铸件表面区域基本没有变化,但靠近铸件中心区域后,其凝固速率随换热系数的增大开始大幅度增大。在整个凝固过程中,换热系数越大,凝固前沿温度梯度越大。

(4) 在相同条件下,提高连铸的浇注温度可以 改善温度分布的均匀性。其凝固速率呈振荡式增大, 凝固前沿温度梯度呈振荡式减小。

(5) 由于本文中忽略了结晶器中石墨衬里和气隙的影响,同时使用的 Ag-28Cu 合金热力学数据大部分为常数,对模拟的计算精度造成了一定的影响。

#### 参考文献:

 Park E M, Song G A, Lee J K, et al. Effect of solubility on strengthening of Ag-Cu ultrafine eutectic composites
 [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(37): 9015-9018.

- [2] Zhao S, Li J, Liu L, et al. Eutectic growth from cellular to dendritic form in the undercooled Ag-Cu eutectic alloy melt[J]. Journal of Crystal Growth, 2009, 311(5): 1387-1391.
- [3] Kattner U R. The thermodynamic modeling of multicomponent phase equilibria[J]. JOM, 1997, 49(12): 14-19.
- [4] 庞瑞朋, 王福明, 张国庆, 等. 基于 3D-CAFE 法对 430 铁素体不锈钢凝固热参数的研究[J]. 金属学报, 2013, 49(10): 1234-1242.
  Pang Ruipeng, Wang Fuming, Zhang Guoqing, et al. Study of solidification thermal parameters of 430ferrite stainless steel based on 3D-CAFE method[J]. Acta
- [5] Cagran C, Wilthan B, Pottlacher G Enthalpy, heat of fusion and specific electrical resistivity of pure silver, pure copper and the binary Ag-28Cu alloy[J]. Thermochimica Acta, 2006, 445(2): 104-110.

Metallurgica Sinica, 2013, 49(10): 1234-1242.

- [6] 赵素. Ag-28.1Cu-xSb 共晶合金的过冷凝固[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
  Zhao S. Solidification of undercooled Ag-28.1Cu-xSb eutectic alloys[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [7] Alizadeh M, Jahromi A J, Abouali O. A new semianalytical model for prediction of the strand surface temperature in the continuous casting of steel in the mold region[J]. ISIJ International, 2008, 48(2): 161-169.

## 【上接第36页】

[14] 杜作娟,杨天足,古映莹,等.银氧化锡触点材料的水 热制备及组织分析[J].北京科技大学学报,2007, 29(10):1023-1026.

Du Zuojuan, Yang Tianzu, Gu Yingying, et al. Hydrothermal preparation and microstructure analysis of silver tin oxide contact materials[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(10): 1023-1026.

[15] 徐爱斌, 王亚平, 丁秉钧, 等. 新型 AgSnO<sub>2</sub> 触头材料
 的制备和电弧侵蚀特性[J]. 材料研究学报, 2003, 17(2):
 156-161.

Xu Aibin, Wang Yaping, Ding Bingjun, et al. Preparation and arc erosion characteristics of new type of AgSnO<sub>2</sub> alloys[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2003, 17(2): 156-161.

[16] 张昆华,孙加林,管伟明,等. 热挤压工艺对反应合成
 AgSnO<sub>2</sub> 材料显微组织的影响[J]. 贵金属, 2005, 26(4):
 1-5.

Zhang Kunhua, Sun Jialin, Guan Weiming, et al. Effect of hot extrusion on microstructure of AgSnO<sub>2</sub> prepared by reaction synthesis processing[J]. Precious Metals, 2005, 26(4): 1-5.