

文章编号:1671-6833(2005)04-0062-04

热型连铸过程的二维稳态传热模型

王 维,倪 锋

(河南科技大学材料学院,河南 洛阳 471003)

摘 要: 根据热型连铸技术原理,充分考虑冶金单元三传过程,对一些微小部分传热做了近似计算,建立了热型连铸凝固过程二维稳态温度场的物理、数学模型.编制了计算铸型出口温度、冷却距离、拉铸速度和喷水冷却强度等工艺参数应用程序,并在 VC++6.0 环境下迭代运行,理论上得出了以上工艺参数对铸坯固液界面位置的影响程度.做了多次纯铜热型连铸实验,计算结果与实验所测数值及文献上报道的实验结果吻合较好,同时也说明了该二维模型的正确性.

关键词: 热型连铸; 传热模型; 数值分析; 固液界面

中图分类号: TG 249.7 文献标识码: A

0 引言

热型连铸(Ohno Continuous Casting,简称 OCC<sup>[1]</sup>)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近净成型(near-net-shape)技术,其原理如图 1 所示.其技术特点是<sup>[2,3]</sup>:将铸型加热到被铸金属的液相线温度以上,在铸型外对铸锭直接喷水冷却,使热量沿拉铸方向由铸型出口向冷却区传输,金属与铸型保持液态接触,在铸型出口处液态金属靠表面张力维持形状并在连续拉出过程中逐渐凝固.如何确定合理的工艺参数,准确控制铸坯固液界面的位置是热型连铸成功的关键之一.工艺参数对固液界面位置的影响归因于凝固过程中温度场的变化.对温度场的研究,涉及到铸坯凝固区域及其与外界环境之间复杂的传热过程分析,数值计算则是一种最有力且有效的方法<sup>[4]</sup>.目前,在热型连铸温度场模拟计算中,大多以一维温度场计算为主,如文献<sup>[4]</sup>不考虑径向传热,使得计算与实验数据之间存在较大的误差.本文通过分析热型连铸凝固过程中铸坯与周围环境的热交换,建立了热型连铸装置二维稳态温度场的物理模型及数学模型,用以研究热型连铸中各个工艺参数之间的关系,从而将工艺参数和固液界面位置定量地联系起

来,为合理确定工艺参数和装置设计提供理论依据.包裹法和常压烧结制备铜材料<sup>[9]</sup>,该实验用热型连铸法拉制铜材料.

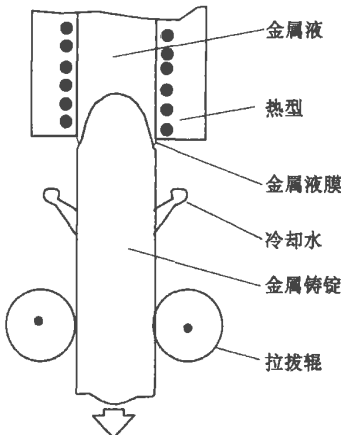


图 1 热型连铸原理图  
Fig. 1 Ohno continuous casting principle

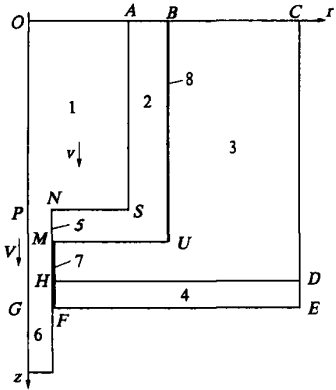
1 物理模型

在热型连铸技术中由于采用了加热铸型消除了铸型内壁形核的可能性,这样,只有在引锭棒端部形核的晶体才可以逆着热流,单向生长<sup>[4]</sup>.由于加热铸型不断的向铸锭表面提供热量,使表层液体过热,同时,由于型外冷却器的冷却作用,使

收稿日期:2005-06-18;修订日期:2005-09-22  
基金项目:河南省自然科学基金资助项目(0111040400);河南科技大学青年基金资助项目(2003QY003)  
作者简介:王 维(1971-),男,河南南阳人,河南科技大学讲师,硕士,主要从事连铸温度场模拟方面的研究.

热流沿着拉铸方向由铸型出口向冷却区传输,从而形成了定向凝固条件,固液界面呈现中部略向液体中凸出的形状<sup>[2,3]</sup>,如图1所示.热型连铸凝固过程固液界面上下金属状态及其与周围环境热交换的物理模型如图2所示.由于铸锭与铸型及其外界散热条件轴向对称,因此假设温度场是轴对称的,计算只考虑一半的二维情况<sup>[3]</sup>.

在该模型的建立过程中,为了简化计算,对物理模型作如下简化假设<sup>[6~9]</sup>:①在连铸时加热铸型保持恒温,为此,加热铸型的内壁表面作恒温处理;②型腔内的流动为层流,铸型内轴向无对流传热;③了简化计算,忽略固液相物性值(密度、导热系数和比热容等)的差别;④不考虑金属过冷,假设凝固在熔点时进行;⑤喷水冷却部分与铸锭之间为强制对流换热.



1. 金属液;2. 坩锅;3. 保温层;4. 炉底板;  
5. 铸型;6. 铸锭;7. 间隙;8. 加热元件

图2 热型连铸过程温度场物理模型

Fig.2 Physics model of temperature field of OCC process

2 数学模型

2.1 温度场传热微分方程

根据假设,选取如图3所示单元体,采用柱坐标方程在无结晶潜热时,其微分方程为

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{C\rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) - a \cdot \frac{\partial T}{\partial z} + b \cdot \frac{Q_s}{C\rho} \quad (1)$$

式中: $a$  取为0,1,即金属液体运动散发热量的区域OASNFCPO为1,其它部分为0; $b$  取为0,1,即结晶潜热的区域PNRLP为1,其它部分为0; $T$  为温度场中某点的温度,K; $r, x$  为温度场中某点的坐标,m; $\lambda, \rho, C$  分别为铸造金属液、坩埚、保温层、炉底板材料的导热系数( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )、密度( $\text{kg} / \text{m}^3$ )、比热容( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ); $Q_s$  为单位时间单

位体积结晶潜热, $\text{W} / \text{m}^3$ ; $v$  为拉铸速度, $\text{m} / \text{s}$ .

2.2 边界条件的处理

边界条件按第三类边界条件的处理.

$$\frac{\partial T}{\partial r} \bigg|_{r=r_f} = f \cdot (T_f - T) \quad (2)$$

式中: $f$  为综合换热系数(对流与辐射), $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $T_f$  为环境温度,有水强制冷却部分为水温.

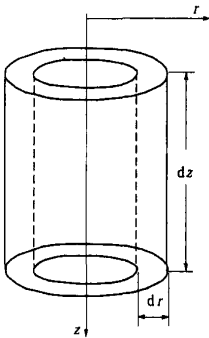


图3 网格划分单元体示意图

Fig.3 The corresponding cylinder represented by cell

2.3 结晶潜热

金属凝固过程是一个含有相变潜热释放的传热过程,结晶潜热在整个传输的热量中占有很大的比重,因此在计算温度场的过程中,结晶潜热不容忽视.计算出金属结晶区域,然后采用等价比热法从结晶区域开始对金属进行潜热补偿,计算时加入金属的结晶潜热项

$$Q_s = \vartheta L_m / dz \quad (3)$$

式中: $L_m$  为单位质量金属凝固所释放的结晶潜热 $\text{J} / \text{kg}$ .

3 工艺参数对固液界面位置的影响

计算了金属铜在进行热型连铸时的温度场.计算过程中金属铜的热物性参数值见表1.

表1 金属Cu 数值计算所用的热物性参数值

Tab.1 The heat physical character parameter of Cu for numerical analysis

熔点/ /K	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	潜热/ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	比热/ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	导热系数/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	水冷却 热系数/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )
1 356	8 920	205	483	336	2 200

在计算时考虑喷水冷却对热型连铸铸坯温度场的影响,按冷却水以一定的换热系数与铸坯进行热交换进行计算.而在实验中只能通过测冷却水的流量来确定其冷却强度的大小,因此需要把

热型连铸工艺条件相同时的水冷换热系数和冷却水流量对应联系起来. 由于纯铜的铸坯平均温度较低, 在 800 ℃ 以下, 换热边界层水的定性温度低于 370 ℃, 因此可以作外掠平板水的强制对流换热处理, 计算过程如下<sup>[1]</sup>:

$$Re = \frac{v \infty h}{\nu} \tag{4}$$

$$Nu = (0.037 Re^{0.8} - 871) Pr^{1/3} \tag{5}$$

$$\alpha = Nu \frac{\mu}{l} \tag{6}$$

式中:  $Re$  为雷诺数;  $v \infty$  为水流速度  $m/s$ ;  $h$  为水冷铸坯长度,  $m$ , 计算中取  $h = l - x_l$ ;  $\nu$  为定性温度下饱和水的运动粘度,  $m^2/s$ ;  $Nu$  为努赛尔数;  $Pr$  为普朗特数;  $\mu$  为沿程阻力系数.

图 4 所示的是对金属纯铜铸坯计算出的温度场分布. 温度分布曲线较为客观地反映了喷水冷却铸坯时的实际情况. 从图中可以看出, 在给定的喷水流量下, 拉铸速度较低时, 喷水冷却的能力较强, 铸坯的温度下降较快; 随着拉铸速度的提高, 喷水冷却能力渐渐变弱, 铸坯的温度下降也渐渐变慢.

固液界面位置是热型连铸过程稳定和连铸件质量的极其重要的控制目标. 若固液界面进入铸型内过多, 则连铸件在铸型内已凝固结壳, 其与铸型壁的摩擦力增大, 易使铸件表面粗糙甚至拉断, 若固液界面在铸型外过多, 则易拉漏. 求解温度场的目的, 就是要确定固液界面位置及了解影响其变化的各种因素. 通常, 进行金属热型连铸时, 其固液界面位置的变化范围应控制在距铸型出口处 1~3 mm 内<sup>[3]</sup>. 影响固液界面位置的主要工艺参数是: 铸型出口温度  $TM$ 、冷却距离  $x_l$ 、水冷换热系数、拉铸速度  $v$ . 适当地调整这四个工艺变量, 以

达到适合的固液界面位置, 就能获得表面非常光洁的热型连铸件. 图 5 所示为纯铜实验中不同的工艺参数所对应的固液界面位置曲面图, 该图比较直观的表达了工艺参数对固液界面位置的综合影响. 图 6 所示为纯铜实验中不同的工艺参数所对应的固液界面位置图. 图中显示了在不同工艺参数情况下所对应的固液界面位置为 1~3 mm 的区域. 图中各点为实验点集合, 这些点来自于已有的文献<sup>[7,9]</sup>. 由试验数据和模拟计算数据比较可知, 实验点很好的落在计算的合适固液界面位置对应的区域内, 计算结果能够和实验结果相吻合.

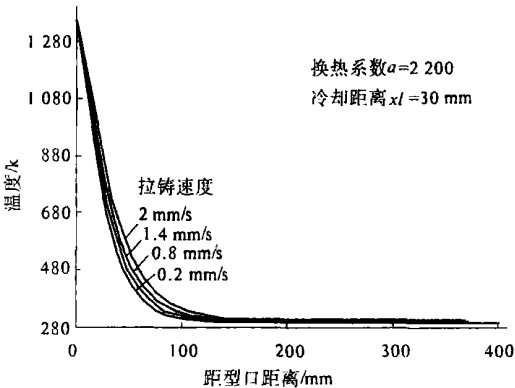


图 4 纯铜温度场分布情况

Fig. 4 Temperature field of pure copper

4 结论

(1) 根据热型连铸技术的原理和传热特点, 建立了二维稳态传热模型, 该模型较为准确地反映了热型连铸的传热特点.

(2) 采用数值计算的方法分析了各工艺参数对固液界面位置的影响, 计算结果与文献中的实验结果相吻合.

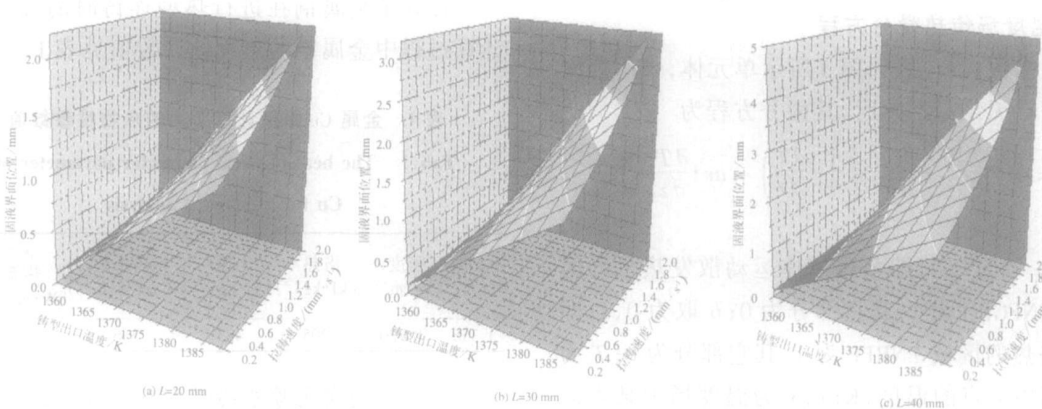


图 5 工艺参数所对应的固液界面曲面

Fig. 5 The curve of the liquid-solid interface for process parameter

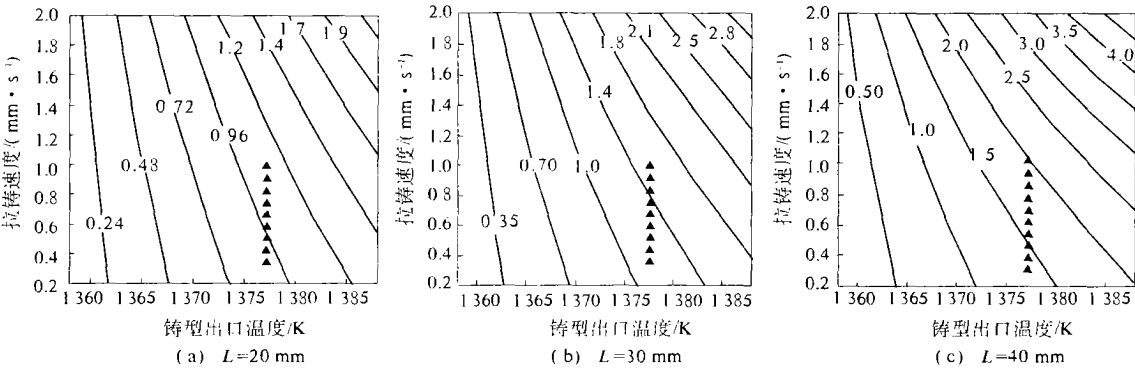


图 6 不同的工艺参数所对应的固液界面位置

Fig · 6 The position of the liquid —solid interface for different process parameter

参考文献:

[ 1 ] OHNO A ·Continuous casting of single crystal ingots by the OCC process[J] · Journal of Metals Jan , 1986, 18; 14 ~ 16.

[ 2 ] 岳留振,倪 锋,张永振,等. 热型连铸技术的发展与应用[J] · 铸造设备研究, 2004,( 1) :14~18.

[ 3 ] 许振明,耿关祥,李建国. 铜单晶连铸过程中固液界面位置和形状的数值分析[J] · 上海交通大学学报, 2001,35( 3) :406~410.

[ 4 ] 范新会,李建国,许振明,等. 单晶连铸凝固过程温度场数值模拟(I) —温度场的物理模型及数学模型 [J] · 西安工业学院学报, 2002,18( 1) :46~52.

[ 5 ] MORMAN S A, YOUNG G W. An asymptotic to the mathematical modeling of ohno continuous casting of cored rod[J] · Journal of Engineering Mathematics , 2000, 38 ( 1) :51~76.

[ 6 ] 卫超,庞维诚.圆坯连铸温度场模拟[J] · 铸造,2002, 21( 2) :106~108.

[ 7 ] 许广济,丁雨田,阎威武,等.热型连铸工艺凝固过程的数值模拟[J] · 甘肃工业大学学报,1999,25( 2) :17 ~21.

[ 8 ] 许振明,耿关祥,李建国. 铜单晶连铸过程中固液界面位置和形状的数值分析[J] · 上海交通大学学报, 2001,35( 3) :406~410.

[ 9 ] 张 锐,王海龙,付元中,等.SiC/Cu 纳米包裹粉体及其复合材料的制备[J] · 郑州大学学报( 工学版) , 2004,25( 3) :74~76.

Two —d mensional Mdel of Heat Transfer in Steady Process of Ohno Continuous Casting

WANG Wei , NI Feng

(School of Material Science & Engineering ,Henan University of Science & Technology , Luoyang 471003,China )

**Abstract :** Based upon the principle of Ohno Continuous Casting( OCC) process , with enough lonsideration of king metallurgical transfer process , computing on minor heat transfer a physics —mathematical model of the steady tem- perature filed with two —dimensional heat transfer is established . Programming on model temperature , cooling dis - tance ,casting speed and cooling intensity their programme being done under VC ++6.0repeatedly , we have suc - ceeded in these process parameter effects on the position of the liquid —solid interface . Experimenting on pure cop - per 's ohno continuous casting , and the result of the computation is in accordance with the experiment result from literatures .

**Key words :** ohno continuous casting ; heat transfer model ; numerical analysis ; liquid —solid interface