

# 方坯连铸机二冷水动态控制模型的研究

李东辉 邱以清 刘相华 王国栋

(东北大学)

**摘 要** 研究和开发基于热传输理论的方坯连铸机二冷水在线控制模型—目标表面温度控制模型,实现二冷区凝固状态的动态模拟,各回路配水参数的实时计算。并以首钢三炼钢厂2号连铸机40Cr方坯为研究对象,分析拉速和过热度等参数对铸坯表面温度和凝固状态的影响,同时也讨论了由于某种原因、某段供水量产生波动时,在不同的控制方法下,对后续冷却段温度变化的影响。

## Research on dynamic control model for secondary cooling zone of billet caster

LI Donghui QIU Yiqing LIU Xianghua WANG Guodong

(Northeastern University)

**ABSTRACT** The dynamic control model for secondary cooling zone of billet continuous caster, based on the heat transfer theory, a target surface temperature control model has been researched and developed. Cooling process is simulated in the secondary cooling zone, and to calculate real-time controlling parameters for every cooling loop in VC++ language. It is useful for the automatic control for billet continuous caster in Capital Iron & Steel Group Company. The influence of casting speed and overheating on the surface temperature and the casting process has been analyzed. In the meantime, it is discussed that the influence of control modes on the surface temperature of succeeding cooling loops is different when water supply of the certain loop has fluctuated.

### 1 前言

铸坯出结晶器后带液心进入二冷区,由于坯壳较薄,是铸坯缺陷的多发地带,例如方坯中出现的表面裂纹、缩孔、疏松、中心偏析、菱变等缺陷的发生率都与各段二冷水量设定有关。因而进一步研究二冷配水模型对于提高方坯质量和产量有重要的意义,同时也为现有铸机的升级改造以及新铸机的设计和各种工艺参数的选择提供参考。首钢三炼钢厂2号连铸机将本模型的计算结果与实测结果比较,证明本模型具有可靠性,同时也为4号连铸机的二冷水控制系统改造提供理论和实践依据。

### 2 二维方坯连铸传热数学模型

#### 2.1 铸坯传热过程的计算假设

(1) 轴向的导热很小,可以忽略,铸坯的传热计算视为二维非稳态导热;

(2) 钢水成分无变化,即固、液相线温度不变;

(3) 弯月面处钢水紧贴结晶器;

(4) 忽略铸坯在矫直前的弧度、锥度及内外弧换热条件的差异。

#### 2.2 导热方程

在结晶器液面处取一铸坯薄片,研究该薄片沿

铸坯运动方向的凝固传热过程。下面的微分方程常用来预测方坯的二维温度场<sup>[1]</sup>。

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\lambda \frac{\partial T}{\partial y})$$

式中  $T$ —温度,℃;  $t$ —时间,s;

$x, y$ —坐标,m;  $\rho$ —密度,kg/m<sup>3</sup>;

$c$ —比热容,J/(kg·℃);

$\lambda$ —导热系数,(m·℃)。

#### 2.3 初始条件

初始温度定为浇注温度  $T_0$ ,即: $t=0$ 时, $T=T_0$ 。

#### 2.4 边界条件<sup>[2]</sup>

(1) 结晶器内 导出热流  $q = a - b\sqrt{\tau}$  W/m<sup>2</sup>

式中  $a$ —结晶器入口截面上的热流密度,W/m<sup>2</sup>;

$\tau$ —铸坯在结晶器内的停留时间,s;

$q$ —边界上各节点的温度沿边界法向  $n$  的热流率;  $b$ —经验常数。

铸坯与结晶器之间存在气隙,由于从角部到中心钢水静压力逐渐增大,所以气隙逐渐减小,故作出下列铸坯表面换热模型:

① 液面至液面以下0.1m处的紧密接触区,导出热流为  $1.05q$ ;

② 液面以下0.1~0.23m的气隙形成区,导出

热流为中心 1.05q、角部 0.8q；

③ 液面以下 0.23m 至结晶器底部的气隙稳定区，导出热流为中心 1.05q、角部 0.7q。

(2) 二冷区 热流密度  $q = h(T_w - T_\infty)$

式中  $T_w$ —铸坯表面温度，℃；

$T_\infty$ —冷却水温度，℃；

$h$ —铸坯与水间的对流换热系数， $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ 。

(3) 空气冷却区  $q = \varepsilon\sigma[T_w^4 - T_\infty^4] + h_c(T_w - T_\infty)$

式中  $\omega$ —铸坯黑度系数，0.7~0.8；

$\sigma$ —斯蒂芬-玻耳兹曼常数， $5.669 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$ 。

### 2.5 热物性参数的处理

#### 2.5.1 内热源项的消除与凝固潜热的等效-温度回升法<sup>[3]</sup>

凝固潜热的处理一般有等效热容法<sup>[4~5]</sup>、转换热焓法和温度回升法，由于温度回升法在处理凝固过程潜热释放问题时的物理意义明确，本软件的结晶潜热处理方法采用温度回升法<sup>[3]</sup>。

#### 2.5.2 凝固液心对流换热的导热等效

考虑液心区对流换热对铸坯传热的影响，采用提高液心区内钢液导热系数值，使液心内的导热计算值高于实际值，多出来的导热热量作为对流换热的等效补偿的处理方法。为了简化计算，实际的导热系数可看作是静止钢液导热系数的整数倍<sup>[6]</sup>，表达式如下<sup>[2]</sup>：

$$\lambda^* = m\lambda \quad (T \geq T_L)；$$

$$\lambda^* = (\lambda + m\lambda)/2 \quad (T_L \geq T \geq T_S)$$

式中  $\lambda^*$ —补偿对流换热的等效导热系数；

$m$ —经验常数，钢液导入区  $m = 4 \sim 8$ ，本模型取  $m = 6$ ；

$\lambda$ —静止钢液的导热系数。

#### 2.5.3 热物性参数的数值处理方法

由于导热系数、比热和密度随温度变化，其处理方法一般有常数法、线形函数法和插值法等。本软件是在不同的温度区间内用二次曲线拟合的方法得到温度-导热系数和温度-比热之间关系的曲线，来确定导热系数、比热值；对于铸坯密度的取值，可在不同相区内取不同的值<sup>[7]</sup>。即：固相区  $\rho = 7.6g/cm^3$ ，固、液相区  $\rho = 7.4g/cm^3$ ，液相区  $\rho = 7.0g/cm^3$ 。

### 3 传热数学模型的求解

#### 3.1 内部节点

采用有限差分法进行数值计算。由于方坯连铸冷却的对称性，研究只取断面的 1/4。设与方坯横断面相垂直的两条边为 X 向和 Y 向，拉坯方向为 Z

向；X、Y 向节点个数为  $XN = YN$  个，采用能量平衡法<sup>[2]</sup>来推导内部节点差分方程为：

$$T_{(i,j)}^t = \frac{1}{w_{(i,j)}} (a \cdot T_{(i-1,j)} + b \cdot T_{(i+1,j)} + c \cdot T_{(i,j+1)} + d \cdot T_{(i,j-1)}) + [1 - \frac{1}{w_{(i,j)}} (a + b + c + d)] \cdot T_{(i,j)} \quad (1)$$

式中  $a = \frac{2\lambda_{(i-1,j)} \cdot \lambda_{(i,j)}}{\lambda_{(i-1,j)} + \lambda_{(i,j)}}; \quad b = \frac{2\lambda_{(i+1,j)} \cdot \lambda_{(i,j)}}{\lambda_{(i+1,j)} + \lambda_{(i,j)}};$   
 $c = \frac{2\lambda_{(i,j+1)} \cdot \lambda_{(i,j)}}{\lambda_{(i,j+1)} + \lambda_{(i,j)}}; \quad d = \frac{2\lambda_{(i,j-1)} \cdot \lambda_{(i,j)}}{\lambda_{(i,j-1)} + \lambda_{(i,j)}};$   
 $w_{(i,j)} = \Delta x^2 \cdot \rho_{(i,j)} \cdot c_{(i,j)} / \Delta \tau;$   
 $i, j$ —节点位置标号 ( $1 \leq i \leq XN, 1 \leq j \leq YN$ );  
 $\rho_{(i,j)}, c_{(i,j)}, \lambda_{(i,j)}$ —控制容积的密度、比热、导热系数；

$\Delta \tau$ —时间步长；

$\Delta x$ —正方形网格单元的边长；

$T_{(i,j)}, T_{(i,j)}^t$ —分别为  $\tau$  与  $\tau + \Delta \tau$  时刻节点控制体的温度值。

#### 3.2 边界节点

图 1 为铸坯 1/4 横断面图，左下角为铸坯中心，右上角为铸坯角部。如图所示，将边界分为角边界(图中区域 1~4)和直线边界(图中区域 5~8)；由于对称性  $i = 1, j = 1$  边界为绝热边界， $i = XN, j = YN$  分别按第二类边界条件处理<sup>[4]</sup>，热流密度为  $q_{(i,j)}$ 。

(1) 角边界节点差分方程 下式为角 1 的差分方程，角 2、3、4 的差分方程从略。

$$T_{(i,j)}^t = \frac{1}{w_{(i,j)}} (b \cdot T_{(i+1,j)} + c \cdot T_{(i,j+1)} + [1 - \frac{1}{w_{(i,j)}} (b + c)] \cdot T_{(i,j)} \quad (i = 1, j = 1)$$

(2) 线边界节点差分方程 下式为边 5 的差分方程，边 6、7、8 的差分方程从略。

$$T_{(i,j)}^t = \frac{1}{w_{(i,j)}} (a \cdot T_{(i-1,j)} + b \cdot T_{(i+1,j)} + c \cdot T_{(i,j+1)} + [1 - \frac{1}{w_{(i,j)}} (a + b + c)] \cdot T_{(i,j)} \quad (2 \leq i \leq XN - 1, j = 1)$$

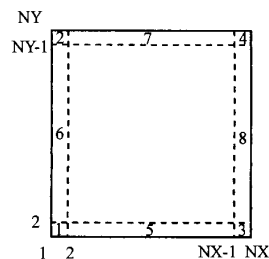


图 1 铸坯 1/4 断面图

### 3.3 稳定性条件

稳定性条件为  $1 - w_{(i,j)}(a + b + c + d) \geq 0$ 。

### 3.4 差分时间步长的选取

计算内部与边界所有单元满足各自稳定性的临界时间步长,从而确定在计算时所取时间步长,本软件根据需要可以使用不同的差分步长。

## 4 二冷配水动态控制模型

### 4.1 目标表面温度控制原理

为了避免产生裂纹等缺陷,要求有合理的二冷制度,要遵守设定的冶金准则<sup>[8]</sup>,对于不同的钢种,要确定不同工况条件下的目标温度曲线,并选出具有代表意义的关键点作为温度跟踪点,使关键点的温度值符合目标温度值。

目标表面温度可以是实测的关键点温度,也可以是模型计算的温度。表面温度分布是铸坯状态在线检测的主要参数,二冷的动态控制实质上就是表面温度的动态控制。由于在二冷区存在着大量的水汽、氧化铁皮等,测量不准确,难于在实际生产中作为反馈目标,只是作为参考值。

研究表明,拉速和钢水过热度是影响二冷水量的关键因素。软件可以通过离线计算,得出一定过热度下拉速与水量关系的配水表,再加以回归得出拉速-水量的函数关系。然后在线检测中间罐钢水温度,对水量加以修正,以获得合理的表面温度分布,其控制模型为:

$$Q_i = (A_i V^2 + B_i V + C_i) \cdot (1 + \alpha_i \Delta T)$$

式中  $Q_i$ —目标水量值;  $i$ —冷却段数;

$\alpha_i$ —过热度的修正系数;

$\Delta T$ —中间罐钢水过热度,℃;

$V$ —拉速;  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$ —配水参数。

另外,连铸过程的各个环节是相互影响的,上一冷却段的冷却结果将影响下一冷却段的冷却,加上各种扰动因素的存在,需要对二冷水量采用闭环控制。所以,“目标表面温度控制法”是在拉速和过热度确定水量的基础上,再根据仪表检测到的各段水量,通过热传输模型计算获得控制点表面温度,再与

相应目标温度相比较,由差值来调整各段的水量,并换算成控制参数送给仪表执行。

实现的方法如下:选取二冷区各冷却段的最末端处作为温度跟踪点,首先确定二冷区各回路水量关于温度偏差的修正系数  $\beta_i$ 。从浇注开始,计算机收集铸坯尺寸、中间罐钢水温度、拉速等过程数据,运用数学模型每隔  $t$  秒重复计算一次铸坯表面温度,并将各个冷却段计算温度和目标表面温度相比较,根据温差大小计算出调整后的冷却水量。其中,计算铸坯表面温度时依据的数学模型来源于上述的方坯凝固热传输数学模型。为了使  $t$  秒这一周期各冷却段水量能随拉速变化和仪表能对水量进行微调,计算机不是将新设定的冷却水量传送给仪表,而是将水量通过数学回归的方法换算出相应的  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$  值;并将这些参数传递给仪表,仪表在设定一周期内各时刻水量时,根据这些参数,在速度变化时,对水量进行微调。计算公式为:

$$Q_i = (A_i V^2 + B_i V + C_i) \cdot (1 + \alpha_i \Delta T) + \beta_i \cdot \Delta T_i$$

式中  $\beta_i$ —第  $i$  冷却段水量关于温度偏差的修正系数。

图 2 为目标表面温度动态控制原理图。

### 4.2 二冷水自动控制程序框图

二冷水量在线控制程序框图如图 3 所示。

### 4.3 程序的编制

程序的编制是在 Windows 2000 操作系统上,采用 VC++ 6.0 高级语言编制模型运算程序,通过 VC++ 的 ADO 访问数据库的技术实现与 SQL 数据库对象的连接及操作。

### 4.4 模型特点

(1) 考虑了钢种的热物性参数随温度的变化关系,具有较高的精确性;

(2) 采用了变时间步长,在保证差分方程稳定收敛的条件下尽量增大时间步长,以减少计算时间;

(3) 考虑到结晶器工作面上纵、横向上气隙的存在,使纵、横向的传热具有不均匀性,引入与气隙有关的换热模型。

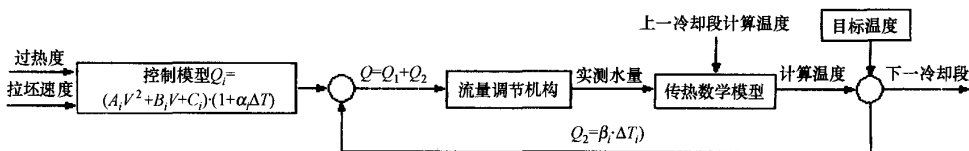


图 2 控制原理图

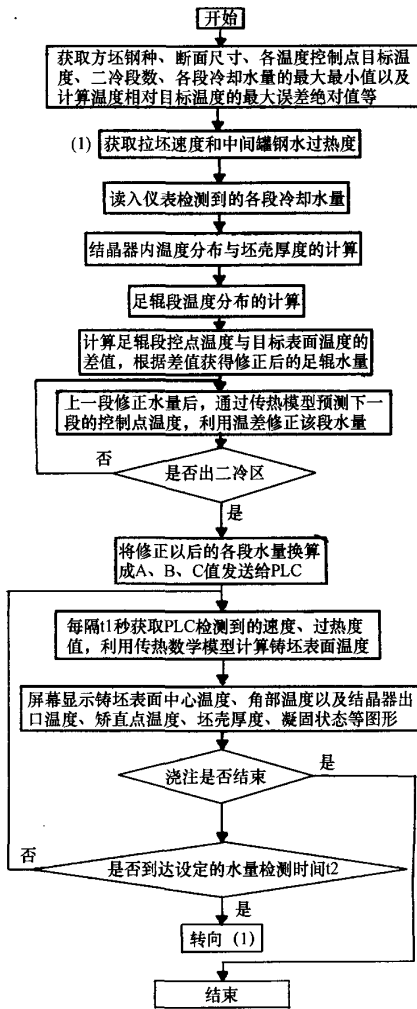


图3 二冷水量在线控制程序框图

### 5 应用实例

采用本软件对首钢三炼钢厂2号连铸机160mm×160mm方坯进行铸坯温度的计算,经验证与实测结果符合较好。

#### 5.1 计算用参数列表

计算用参数见表1,各冷却段水量分配见表2。

表1 计算用参数列表

钢种	铸坯尺寸/mm	结晶器长度/mm	液面位置/mm	矫直半径/m
40Cr	160×160	1000	距结晶器上沿100	10.3/19.0

表2 各冷却段水量分配

冷却段	足辊	1段	2段	3段	4段
长度/mm	300	2000	2500	2500	1500
水量/L·min <sup>-1</sup>	63	173	64	53	26

结合铸机确定各段热流密度的经验公式如下:

$$q = 2688 - 227\sqrt{\tau}, \text{ kW/m}^2;$$

$$h = 581\omega^{0.451}(1 - 0.0075T_w)$$

式中  $\omega$ —水流密度, L/(m<sup>2</sup>·s);

$T_w$ —冷却水温度, 本例取 25℃。

### 5.2 程序运行结果

(1) 不同拉速下的铸坯表面温度分布(图1节点3位置)及凝固状态曲线如图4。由图4可以看出,在浇注温度和水量不变的条件下,随着拉速的升高,铸坯表面温度升高,液相穴加长,出结晶器坯壳厚度减薄。

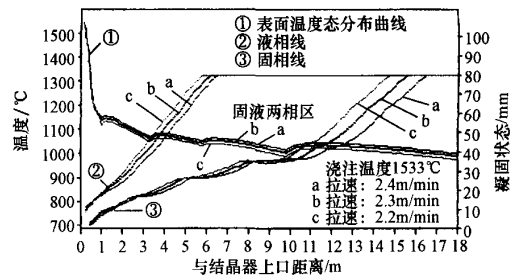


图4 不同拉速的铸坯表面温度分布、凝固状态图

(2) 不同浇注温度下的铸坯表面温度分布(图1节点3位置)及凝固状态曲线如图5。由图5可以看出,在拉速和水量不变的条件下,随着浇注温度的提高,铸坯表面温度提高,液相穴加长,出结晶器坯壳厚度减薄。

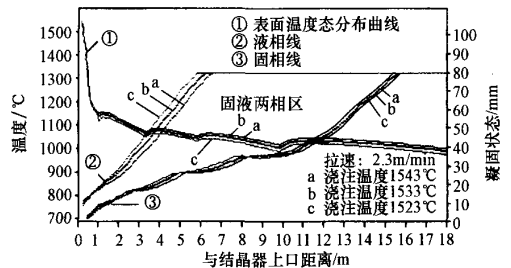


图5 不同浇温的铸坯表面温度分布、凝固状态图

另外,因实际生产中过热度的变化一般限制在20~30℃,从两组曲线的分布可以看出,过热度对凝固的影响较拉速小得多。为了符合实际情况,对于不同的铸机,要根据实际情况对模型进行调整。

(3) 目标表面温度控制系统的动态模拟结果。为了验证二冷动态配水模型的准确性,进行了计算机仿真实验。假定某一段的喷嘴出现堵塞现象或因操作不当,使水量高于(或低于)目标水量,造成这一段的过冷(或冷却不足),这将影响后续各段的冷却水量分布。采用上述目标表面温度控制方法对二冷

水进行动态调节,并与通常的拉速、过热度调节方法作比较。结果如下:足辊段水量减少 10L/min 时,各温度控制点温度如图 6 所示;冷却一段水量减少 25L/min 时,各温度控制点温度如图 7 所示。从两图中可以看出,某一段的水量波动,会对后续所有冷却段的表面温度产生影响,并且对与其临近的冷却段影响最显著;进行动态调节以后,铸坯各段表面温度的波动较传统的拉速、过热度调节明显减小。

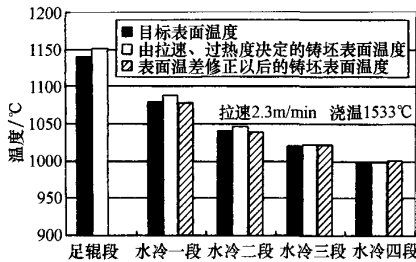


图 6 足辊段水量波动 10L/min 时,各温控点温度

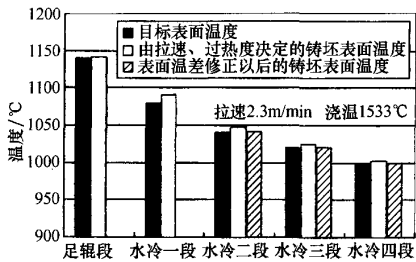


图 7 冷却一段水量波动 25L/min 时,各温控点温度

为了验证模型的准确性,生产中采用远红外测温仪进行不同点的温度测试,在表 1 和表 2 的配水条件下,拉速为 2.3m/min 时,结果如表 3。

表 3 铸坯表面温度测试结果与计算结果的比较

测试位置(图 1 节点 3)	计算值/°C	实测平均值/°C
距结晶器上沿 13m	1048	1028 ~ 1038
距结晶器上沿 18m	996	977 ~ 987

从实测结果可以看出,实测温度比计算温度值偏低,约相差 10 ~ 20℃,可能是由于铸坯表面不是理想光滑所致。因该铸机采用的配水方式为静态查表法,故对于“目标表面温度”的动态控制法,已经过上述计算机仿真实验验证。

### 6 结束语

首钢三炼钢厂 4 号八流方坯连铸机,原二冷水调节为静态查表法,拉速单回路,没有通过局域网与上位机相连,基于设备现状,在整个铸机的升级改造过程中,对于二冷过程控制系统的改造,建议采用二级(基础自动化和过程自动化)网络式管理系统,通过上述数学模型完成二冷水的在线控制。

仿真结果表明,本文提出的二冷水在线控制方法具有好的控制效果,它的应用将有利于稳定铸坯表面温度,减少二冷区质量缺陷,对于连铸工艺参数的选择及二冷过程控制系统的改造具有指导意义。

### 参考文献

- 1 陈青海等. 铸件凝固过程数值模拟. 重庆大学出版社, 1991.
- 2 闫小林. 连铸过程原理及数值模拟. 河北科学技术出版社, 2001.
- 3 李东辉. 铸件凝固过程三维数值模拟软件的开发与应用. 东北大学硕士学位论文, 2000.
- 4 Thomas B. G., Samarasera I. V., Brimacombe J. K. . Comparison of Numerical Modeling Techniques for Complex, Two - Dimensional Transient Heat - Conduction Problems. Metall. Trans. , 1984, 15B, 307 ~ 311.
- 5 Mietlinen. J. . Mathematical Simulation of Interdendritic Solidification of Low - Alloyed and Stainless Steel. Metall. Trans. , 1992, 23A, 1155 ~ 1161.
- 6 Mizikar E. A. . Mathematical Heat transfer model for Solidification of CC Steel Slab. Trans. Met. Soc. AIME. 1967, (239) : 1747 ~ 1753.
- 7 蔡开科. 水平连铸热应力模型研究. 钢铁研究学报, 1993, No. 1.
- 8 梁爱生. 连铸坯二冷区目标温度曲线的确定. 重型机械, 1999, No. 6.
- 9 Lait J. E. , Brimacombe J. K. , Weinberg F. . Mathematical Modelling of Heat Flow in the Continuous Casting of Steel. Ironing and Steeling, 1974, (2) : 90 ~ 94.