

方坯连铸传热模型与二冷水动态控制方法

李东辉 邱以清 刘相华 王国栋

(东北大学轧制技术与连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110004)

摘 要 开发了基于热传输理论的方坯连铸二冷水在线控制模型, 它可以实现二冷段铸坯表面温度及凝固状态的实时监控。以首钢方坯连铸机为研究对象, 分析了拉坯速度对铸坯表面温度和凝固状态的影响。同时也分析了采用不同的二冷水控制方法时, 由于某种原因某段供水量产生波动, 对后续冷却段铸坯温度变化的影响。仿真实验表明, 该控制模型充分考虑了各回路之间的关联, 更有利于稳定铸坯温度, 从而改善了铸坯质量, 对现有国产铸机的改造及研发具有独立知识产权的新铸机具有重大的理论和实际意义。

关键词 方坯 动态控制 热传输 二冷

连铸坯在出结晶器以后的二次冷却区域, 坯壳较薄, 是铸坯缺陷的多发地带, 方坯连铸过程中出现的裂纹、缩孔、鼓肚、菱变等缺陷都与冷却水量的设定有关, 因而进一步研究方坯二冷配水模型对于提高方坯质量、产量有着十分重要的意义。目前连铸二冷水量控制方法主要有以下几种: 人工配水、比例控制、参数控制、温度反馈控制^[1, 2]和理论模型控制^[2, 3]和人工神经网络控制等。国内的二冷水控制方法很大部分为人工配水和比例控制, 铸坯质量不能满足要求, 急需改进。本研究对于我国现有铸机的升级改造以及自主开发二冷水控制模型代替国外引进的模型, 不再重复引进, 意义重大。对于首钢三炼钢 2 号连铸机, 通过将模型计算值与实测值的比较, 证明该控制模型具有可信性, 同时也为正处于单体改造的 4 号连铸机的二冷水过程控制系统的改造提供理论依据。

1 方坯连铸传热数学模型

1.1 导热方程

在结晶器液面处取一铸坯薄片, 研究这一薄片沿铸坯运动方向的凝固传热过程。这里, 忽略铸坯轴向导热以及内外弧换热条件的差异, 下面的微分方程常用来预测铸坯的温度分布^[4]:

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (1)$$

式中 T ——温度, $^{\circ}\text{C}$;

t ——时间, s 。

ρ ——金属密度, kg/m^3 ;

C ——金属比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$;

λ ——金属导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

1.2 边界条件^[4]

1.2.1 结晶器瞬时热流

$$q = 267.52 - B\sqrt{t} \quad (2)$$

式中 q ——边界法线方向的热流率, $\text{J}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$;

B ——常数(根据具体铸机实验求得);

t ——薄片运行至某一位置所需的时间, s 。

另外考虑到角部气隙的存在, 传热是不均匀的, 模型在横向、纵向采用了不同的修正系数对热流密度进行了修正, 模型如下^[5]:

(1) 液面至液面以下 0.1 m 处的紧密接触区, 导出热流在铸坯四周均为 q 。

(2) 液面以下 0.1 m 至 0.23 m 的气隙形成区, 中心区域为 q , 角部为 $0.8q$ 。

(3) 液面以下 0.23 m 至底部的气隙稳定区, 中心区域为 q , 角部为 $0.7q$ 。

1.2.2 二冷区

$$q = h(T_{\infty} - T_{\infty}) \quad (3)$$

式中 T_{∞} ——铸坯表面温度, $^{\circ}\text{C}$;

T_{∞} ——冷却水温度, $^{\circ}\text{C}$;

h ——对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

1.2.3 空冷区

$$q = \varepsilon \sigma [T_{\infty}^4 - T_{\infty}^4] \quad (4)$$

式中 ε ——钢坯黑度系数 (0.7~0.8);

σ ——斯蒂芬-玻耳兹曼常数。

1.3 结晶潜热的等效及热物性参数的处理

通过温度回升法与等效热容法的结合, 处理凝固潜热释放问题, 它能够避免等效热容算法在通过相线时所造成的系统偏差, 同时又采用了适合于数值计算且物理意义很明确的温度回升法^[6]。

考虑液芯区对流对传热的影响, 可提高液芯区内钢液导热系数值, 为了简化计算, 实际的导热系

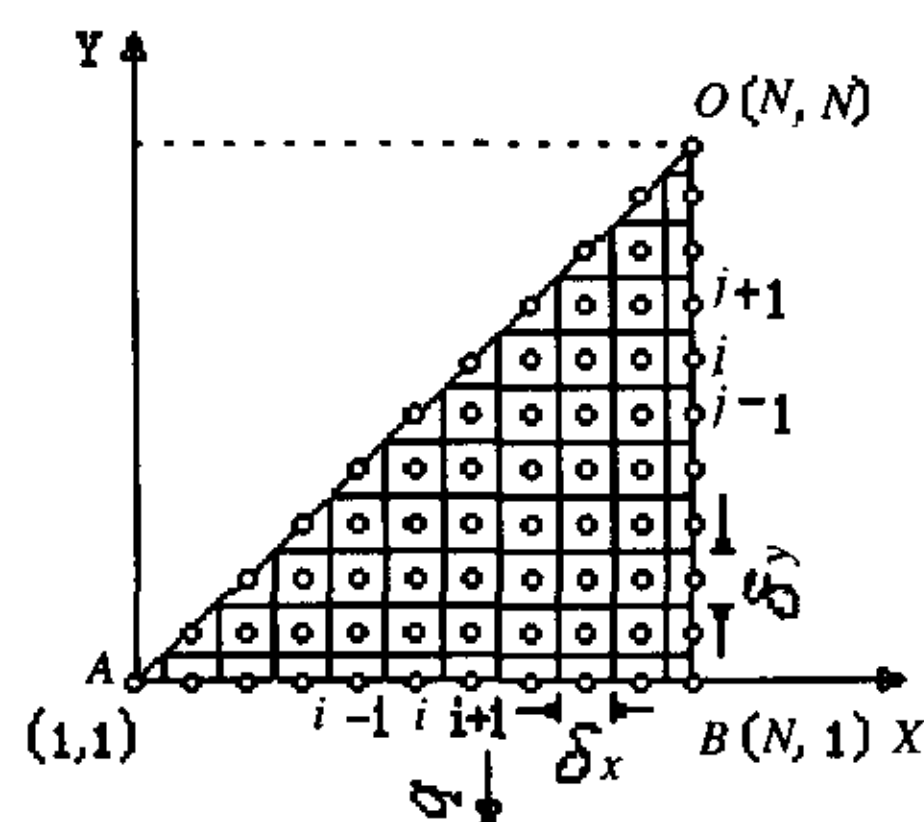


图1 网络划分图

数可看作是静止钢液导热系数的整数倍。

铸坯密度的取值,可在不同相区内取不同的值^[7]。即固相区: $\rho = 7.6 \text{ g/cm}^3$; 固液两相区: $\rho = 7.4 \text{ g/cm}^3$; 液相区: $\rho = 7.0 \text{ g/cm}^3$ 。

2 传热数学模型求解

2.1 内部节点

采用有限差分法进行数值计算。由于方坯的对称性,取截面的八分之一。图1为网格划分图, O 点为铸坯中心, A 点为铸坯角部,对于方坯,取 $\delta x = \delta y$,则内部节点差分方程为:

$$T_{(i,j)}^{n+1} = T_{(i,j)}^n + [(\lambda_{(i,j)}' \cdot \delta t) / (c_{(i,j)} \cdot \rho_{(i,j)} \cdot \delta x^2)] \cdot (T_{(i+1,j)}^n + T_{(i-1,j)}^n + T_{(i,j+1)}^n + T_{(i,j-1)}^n - 4T_{(i,j)}^n) + [(\lambda_{(i,j)}' \cdot \delta t) / (4c_{(i,j)} \cdot \rho_{(i,j)} \cdot \delta x^2)] \cdot [(T_{(i+1,j)}^n - T_{(i-1,j)}^n)^2 + (T_{(i,j+1)}^n - T_{(i,j-1)}^n)^2] \quad (5)$$

式中 δt ——时间步长, S;

λ' ——热传导系数对温度的导数。

2.2 边界节点

下式为 AO 线上节点的离散方程,其它情况从略:

$$T_{(i,j)}^{n+1} = T_{(i,j)}^n + [(2\lambda_{(i,j)}' \delta t) / (c_{(i,j)} \rho_{(i,j)} \delta x^2)] \cdot (T_{(i,j-1)}^n - 2T_{(i,j)}^n + T_{(i,j+1)}^n) + [(\lambda_{(i,j)}' \delta t) / (2c_{(i,j)} \rho_{(i,j)} \delta x^2)] \cdot (T_{(i+1,j)}^n - T_{(i,j-1)}^n)^2 \quad (6)$$

3 二冷水配水动态控制模型

控制原理为:根据设定的冶金准则^[8],确定不同钢种的目标温度曲线,选出具有代表性的关键点作为温度跟踪点,使该点的温度符合目标温度。

因二冷区大量的水汽、氧化皮等,所以温度

的准确测定是很困难的,它一般不作为反馈目标,仅作为参考值,而将模型计算的温度作为控制点的实际温度。

由于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。本研究提出的控制方法为“目标表面温度控制法”,它是在拉速、过热度确定水量的基础之上,再通过热传输模型计算获得的控制点温度与目标温度的比较,由差值来进一步调整水量。对于拉速、过热度的水量控制法,水量的计算公式为:

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

式中 A_i 、 B_i 、 C_i ——第 i 段配水参数;

α_i ——过热度的修正系数;

ΔT ——中间包钢水的过热度, $^{\circ}\text{C}$;

V ——拉速, m/min ;

Q_i ——水量, L/min 。

对于目标表面温度动态控制法,首先选取温度跟踪点,确定各段水量关于温度偏差的修正系数 β_i ,水量关于过热度的修正系数 α_i , α_i 、 β_i 的取值,需要根据实际铸机的情况及生产数据通过热传输模型来确定,使其适用于不同的钢种。从浇注开始,计算机通过上述凝固传热数学模型每隔 t 秒重复计算一次铸坯的表面温度,根据温差大小调整水量,第 i 段新设定水量 Q_i' 的计算公式为:

$$Q_i' = (A_i V^2 + B_i V + C_i) \cdot (1 + \alpha_i \Delta T) + \beta_i \cdot \Delta T_i$$

式中 Q_i' ——新设定的水量, L/min ;

ΔT_i ——控制点温度与目标温度的差值, $^{\circ}\text{C}$;

β_i ——第 i 段水量关于温度偏差的修正系数。

然后,计算机将新设定的水量通过数学回归的方法换算出新的 A_i 、 B_i 、 C_i 等配水参数值,传递给仪表,仪表在一个周期内根据速度、过热度的变化对水量进行微调。图2为目标表面温度动态控制原理图。

4 应用实例

4.1 热传输模型的温度计算与生产验证

对首钢 $160 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 的 40Cr 方坯进行了温度计算,各冷却段的水量分配为:足辊 63 L/min ,冷却一段 173 L/min ;冷却二段 64 L/min ;冷却三段

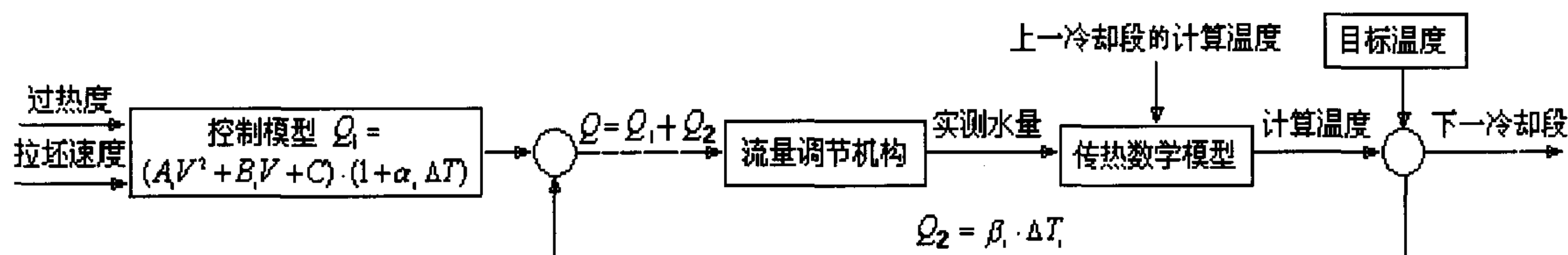


图2 目标表面温度的控制原理

53 L/min; 冷却四段 26 L/min。图 3 为不同拉坯速度下的铸坯表面温度分布 (图 1 的节点 3) 及凝固状态曲线。

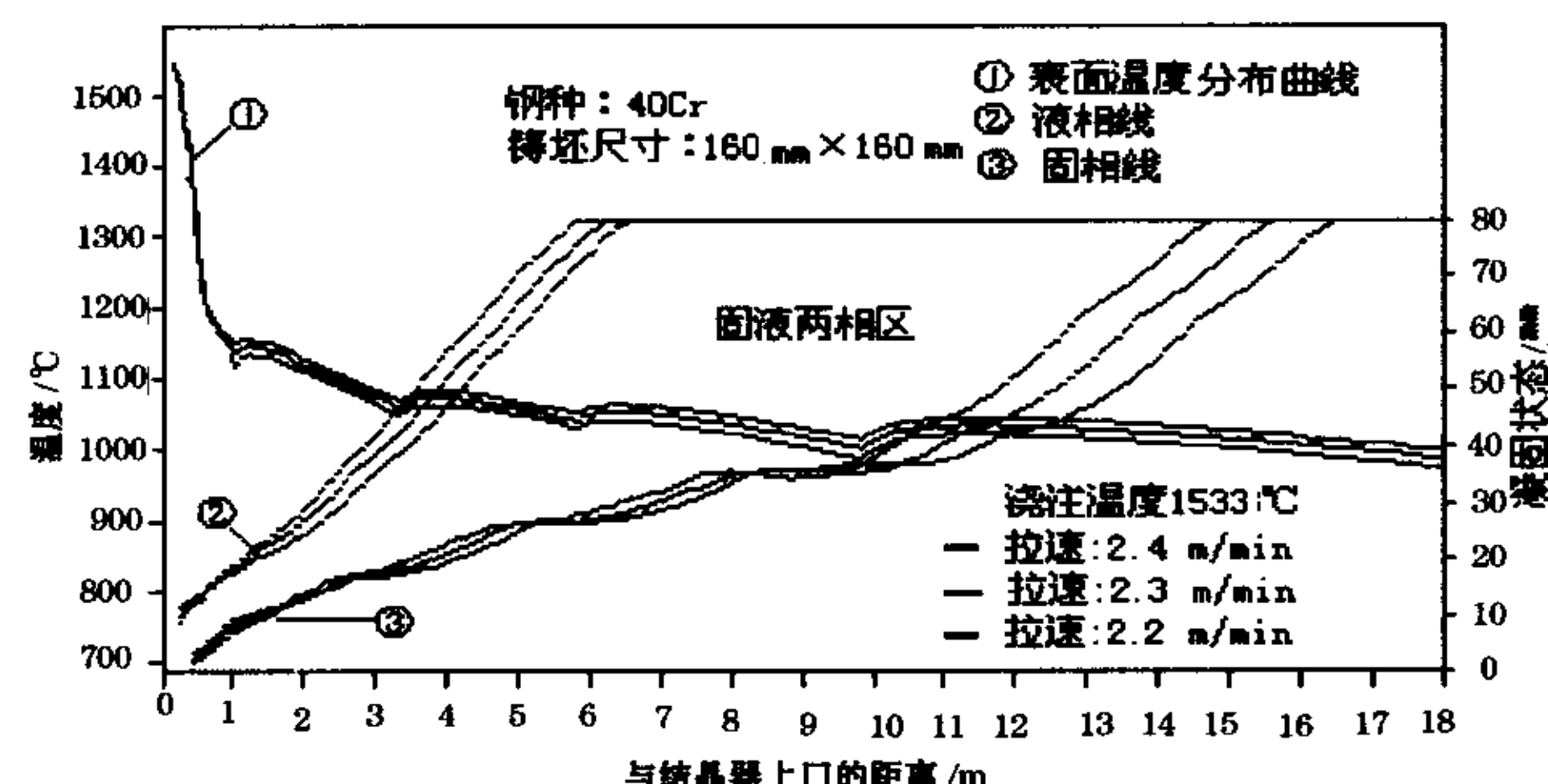


图 3 不同拉速下的温度分布、凝固状态图

从图 3 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, 铸坯的表面温度提高, 液相穴的长度加大, 出结晶器时坯壳的厚度变薄。

为了验证模型的准确性, 生产中, 采用远红外测温仪进行铸坯表面温度测试 (图 1 的节点 B), 在上述配水条件下, 当拉速为 2.3 m/min 时, 结果见表 1。从表 1 可以看出, 实测温度比计算温度低 7 °C~20 °C, 这主要是由于铸坯表面不是理想光滑的缘故。

另外, 在生产现场收集某次拉漏的出结晶器时坯壳厚度的数据, 然后将有关参数输入模型中, 与计算的坯壳厚度相比较, 结果实测值为 10.1 mm, 模型计算值为 9.8 mm, 误差约为 3 %。

表 1 温度的测试值与计算值的比较 °C

位置	计算值	实测平均值
结晶器出口处	1117	1100~1110
距结晶器上沿 13 m	1048	1028~1038
距结晶器上沿 18 m	996	977~987

4.2 目标表面温度控制法的计算机仿真实验

假定这样一种情况: 某一段的喷嘴出现堵塞现象, 使该段水量低于目标水量, 造成这一段的冷却不足, 它必然会影响到后续各段的温度分布。如果没有上述的动态调节, 仅使用拉速、过热度调节, 后续冷却段控制点的实际温度肯定会高于目标表面温度, 就会出现温度波动的不稳定现象, 采用这里叙

述的动态控制方法以后, 计算机将根据温差来调节后续冷却段的水量分布, 使实际的表面温度波动很小。下面是两种方法的对比实验, 表 2 为当拉速为 2.3 m/min, 中包温度为 1533 °C 时, 足辊段水量减少 10 L/min 以后, 模型计算得出的各温度控制点的温度; 表 3 为相同条件下冷却一段水量减少 25 L/min 时, 各温度控制点的温度。

表 2 足辊段水量减少 10 L/min 时各温控点温度的比较

	目标温度 °C	拉速、过热度 调节的温度/°C	水量修正后 的温度/°C
足辊段出口处	1140	1151	—
冷却一段出口	1080	1088	1078
冷却二段出口	1040	1045	1038
冷却三段出口	1020	1022	1021
冷却四段出口	1000	998	1000

表 3 冷却一段水量减少 25 L/min 时各温控点温度的比较

位置	目标温度 °C	拉速、过热度 调节的温度/°C	水量修正后 的温度/°C
足辊段出口处	1140	1141	—
冷却一段出口	1080	1092	—
冷却二段出口	1040	1047	1041
冷却三段出口	1020	1025	1021
冷却四段出口	1000	1002	1000

从表 2、表 3 的数据可以看出, 某一段的水量波动, 对后续所有冷却段的表面温度都产生影响, 对与其临近的冷却段影响最显著; 进行目标表面温度的动态调节以后, 铸坯表面温度的波动较拉速、过热度调节法明显减小。

5 结 论

(1) 实验数据表明, 铸坯表面温度的测量值与计算值偏差在 20 °C 以下, 某次拉漏的数据表明, 结晶器出口处坯壳厚度的误差为 3 %, 证明本模型真实可信。

(2) 仿真实验表明, 采用本模型动态调节以后, 温度波动现象较拉速、过热度调节法明显减小。该方法有利于稳定铸坯表面温度, 减少二冷区质量缺陷。

参 考 文 献

- 1 Jiang G S, Boyle J R. Computer Dynamic Control of the Secondary Cooling during Continuous Casting. Conference on Continuous Casting of Steel in Developing Countries. Beijing: 1993. 567.
- 2 Laitinen E, Neittaanmaki P. On Numerical Simulation of the Continuous Casting Process. Journal

- of Engineering Mathematics, 1988, 22:335~354.
- 3 Kawasaki S, Arita H. Secondary Cooling Control Model for Continuous Casting-Direct Rolling Process. Seitetsu Kennkyu, 1984, 313:13~19.
- 4 陈家祥. 连续铸钢手册. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- 5 闰小林. 连铸过程原理及数值模拟. 河北科学技术出版社, 2001.
- 6 荆 涛. 凝固过程数值模拟. 北京: 电子工业出版社, 2002.
- 7 蔡开科. 水平连铸热应力模型研究. 钢铁研究学报, 1993, 5(2):1~8.
- 8 梁爱生. 连铸坯二冷区目标温度曲线的确定. 重型机械, 1999, (6)