

· 试验研究 ·

大圆坯连铸二冷配水设计模型的开发

曾智 韩占光 李景 张家泉

(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

摘要 根据钢厂新建 $\Phi 600$ mm 圆坯连铸机的主要技术参数,建立柱坐标一维非稳态连铸坯凝固传热数学模型,运用有限差分法求解并编制相关程序,分析拉速、过热度、冷却强度对铸坯温度的影响,实现在给定水量下连铸坯温度场的计算。浇铸 $\Phi 500$ mm 轴承钢 GCr15SiMn 计算得出拉速每提高 0.1 m/min,出结晶器处凝固坯壳厚度减薄约 7.9 mm,凝固终点延长 6.7 m。

关键词 $\Phi 600$ mm 圆坯连铸 二次冷却 数学模型

Development of Secondary Cooling Water Distribution Model for Large-Size Round Bloom Casting

Zeng Zhi, Han Zhanguang, Li Jing and Zhang Jiaquan

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract Based on main technical parameters of a new built $\Phi 600$ mm round bloom caster in steel works, a math model for heat transfer and solidification of one-dimensional non-steady state casting bloom with cylindrical coordinates has been established, and the casting speed, superheating degree and intensity of cooling on temperature of casting bloom is analyzed by using finite differential method to solve and assemble program to carry out the calculation of temperature field of bloom with a given water flow rate. It is obtained with calculation on casting $\Phi 500$ mm bearing steel GCr15SiMn bloom that with every increasing casting speed 0.1 m/min, the thickness of solidified shell of bloom at outlet of mold decreases by 7.9 mm and the solidification terminal point is prolonged by 6.7 m.

Material Index $\Phi 600$ mm Round Bloom Casting, Secondary Cooling, Math Model

连铸坯凝固过程主要是传热过程^[1],使用连铸凝固传热数学模型,可以计算出各位置铸坯的表面温度、中心温度、液芯长度和凝固坯壳厚度等重要参数。

连铸圆坯一般生产合金钢,铸坯裂纹敏感性大^[2],主要为高速车轮、无缝钢管及高压钢管等锻压产品提供优质坯料。近年来,大圆坯连铸受到广泛关注,国内外的大圆坯铸机相继被报道^[3,4],大圆坯凝固传热特点及其数值模拟研究日益受到重视^[5]。

1 铸机基本参数

600 mm 大圆坯连铸机基本半径 14 m,4机4流,设计年产量 60 万 t。主要生产优质碳素钢、轴承钢、不锈钢、管线钢、机械工程用钢、模具钢、高合金容器钢、锅炉钢等钢种。铸机采用带液芯连续矫直、结晶器电磁搅拌和动态二冷配水等先进技术,主要设计参数见表1。

二冷区长度为 11.57 m,由足辊段和5个扇形段共同构成,足辊段为全水冷却,其余各段均为气雾冷却。之后设有保温段,以便均匀铸坯温度,消除强制冷却引起的热应力。

表1 大圆坯铸机基本参数

Table 1 Basic parameters of large-size round bloom caster

| 项目 | 技术参数 |
|--------------------------------|---------------------|
| 铸机半径/m | 14 |
| 冶金长度/m | 38.79 |
| 二冷区总长度/m | 11.57 |
| 铸坯断面直径/mm | 600,500,450,400,350 |
| 结晶器长度/mm | 800 |
| 结晶器冷却水量/($m^3 \cdot h^{-1}$) | 340 |
| 铸机拉速范围/($m \cdot min^{-1}$) | 0.1~1.0 |

2 凝固传热数学模型的建立

2.1 基本假设

为简化计算,特忽略影响较小的因素,作出如下假设:(1)忽略拉坯方向上的传热和圆周上的传热的不均匀性,简化为一维传热,只考虑径向温差;(2)凝固壳以传导传热占主导地位,铸坯内对流传热用增大导热系数的方法来等效成传导传热,铸坯表面的辐射传热、与支撑辊的接触传热以及二冷水的冷却传热,采用综合传热系数一并考虑;(3)钢的密度、比热容和导热系数随温度变化很小,在液相区、凝固两相区和固相区分别近似看作一常数。

柱坐标系的热量传输微分方程^[3]为:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

如将坐标系置于铸坯上,微元体以相同拉速和铸坯一起向下运动,故微元体的相对速度为 0,即式中的 $v=0$,于是式(1)可以化为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

2.2 初始条件及边界条件

初始条件: $t=0$ 时,结晶器中钢水温度等于浇铸温度,即:

$$T(r,0) = T_c \quad (3)$$

边界条件:

(1) 铸坯中心:为轴对称传热,可视为绝热边界条件,不发生热量的传递,即:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0, t \geq 0} = 0 \quad (4)$$

$$(2) \text{ 铸坯表面: } -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=d/2, t \geq 0} = q_s \quad (5)$$

式中: d - 断面直径; q_s - 表面热流密度。

其表达式分别为:

$$(a) \text{ 结晶器 } q_s = A - B\sqrt{t};$$

$$(b) \text{ 二冷区 } q_s = h(T_s - T_w);$$

$$(c) \text{ 辐射区 } q_s = \varepsilon \sigma [(T_s + 273)^4 - (T_0 + 273)^4].$$

式中: A 、 B - 经验常数; h - 铸坯与冷却水之间的传热系数/ $[\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})^{-1}]$; T_s 、 T_w 、 T_0 - 铸坯表面、冷却水和环境温度/ $^\circ\text{C}$; σ - 波尔兹曼常数, $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; ε - 铸坯表面黑度,一般取 0.80。

2.3 程序的编制

上述偏微分方程式(1)加上初始条件式(3)和边界条件式(4)、(5),构成了连铸圆坯凝固传热数学模型。图 1 显示的是内部结点单元的剖面图。使用有限差分法进行离散化求解,将其转换成计算机能够运算处理的算式,具体离散格式推导过程及参数的处理见参考文献[6]。对于某些模型内部参数,比如二冷区综合传热系数的形式以及考虑对流传热时对导热系数的放大倍数,一般是在经验公式的基础上,根据现场实际测温情况进行调整,直至能反映出铸机的真实状况。

使用面向对象的程序设计语言(VC++6.0)编制了大圆坯连铸二冷配水设计系统^[7]和动态在线控制软件^[8]。模型采用窗口式设计,在界面选择或

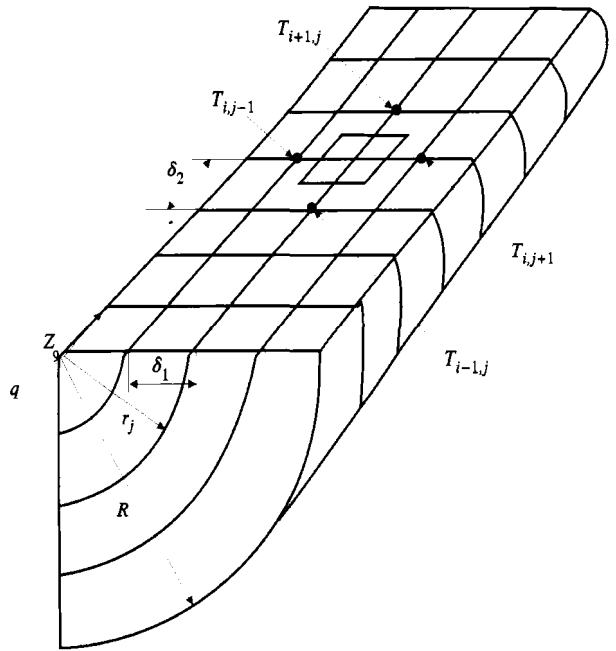


图 1 内部结点单元剖面图

Fig. 1 Profile of internal nodes unit

输入的参数主要包括以下 3 个部分:钢种的热物性参数(液、固相线温度、密度、比热容和导热系数等以钢种的形式保存);工艺参数(浇铸断面、过热度、拉速、冷却水温度、环境温度,结晶器冷却水量和二冷各区水量等);设备参数(结晶器有效长度、二冷区各段长度和空冷区长度等)。利用二冷配水设计系统可模拟计算给定水量下的铸坯温度场和设定目标温度下的水量分配,也可以利用在线控制系统采集并保存的实测数据进行模拟仿真。

3 模型的计算和分析

以生产断面 $\Phi 500 \text{ mm}$ 轴承钢 GCr15SiMn 为例,讨论连铸工艺参数对铸坯温度带来的影响。由钢种实际化学成分计算,液相线温度为 $1442.2 \text{ }^\circ\text{C}$,固相线温度为 $1369.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。根据某浇次的实际生产记录,正常拉速范围为 $0.25 \sim 0.50 \text{ m}/\text{min}$,过热度控制在 $15 \sim 55 \text{ }^\circ\text{C}$,结晶器水量平均值为 $3850 \text{ L}/\text{min}$,比水量基本上保持在 $0.18 \text{ L}/\text{kg}$,模型计算的基本参数设定见表 2。

3.1 拉速的影响

表 2 模型计算工艺参数

Table 2 Process parameters for calculation by model

| 项目 | 工艺参数 |
|---|------|
| 拉速/ $(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$ | 0.45 |
| 过热度/ $^\circ\text{C}$ | 35 |
| 结晶器水量/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$ | 3850 |
| 比水量/ $(\text{L} \cdot \text{kg}^{-1})$ | 0.18 |
| 二冷水温/ $^\circ\text{C}$ | 10 |

由图2可见,随着拉速的提高,铸坯的表面温度和中心温度都有明显的提升。另外,拉速的提高会减小凝固坯壳厚度,在凝固初期坯壳厚度过薄容易产生内裂纹和其它质量缺陷,严重时造成漏钢。拉速每提高0.1 m/min,出结晶器处凝固坯壳厚度减薄约7.9 mm,减薄率可达16.1%,凝固终点将回移6.7 m。

3.2 过热度的影响

由图3可以发现,增加过热度对铸坯表面温度的影响较小。在拉速相同的情况下,随着过热度的增加,表面温度略微增加,出结晶器坯壳厚度减小,铸坯液相穴长度增大。在凝固初期,过热度太高会增加铸坯表面温度,使得凝固壳生长变缓,其厚度也相对减薄,此时应通过降低拉速来稳定铸坯温度,减

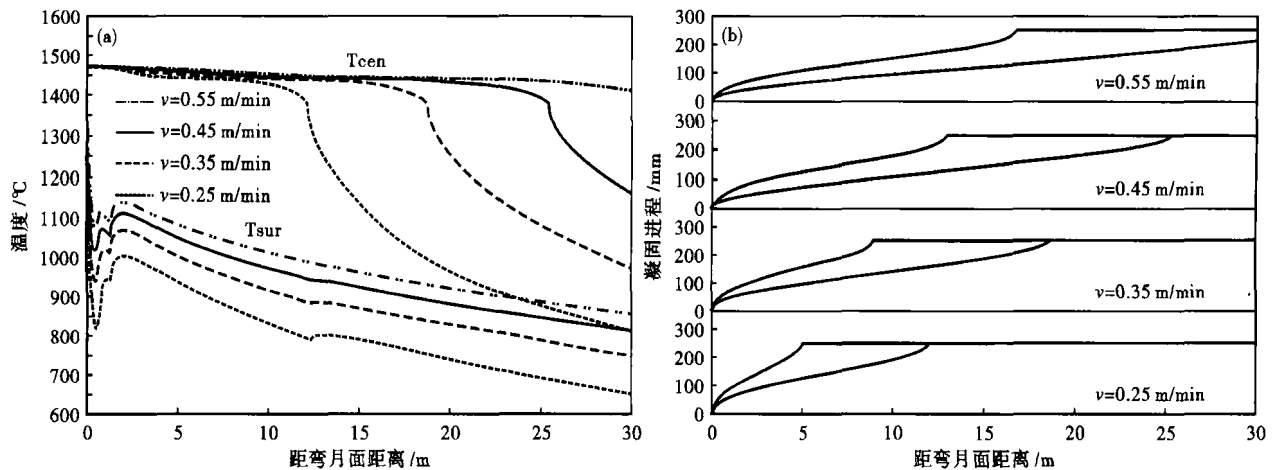


图2 拉速对铸坯温度(a)和凝固进程(b)的影响
Fig.2 Effect of casting speed on temperature (a) and solidification process (b) of casting bloom

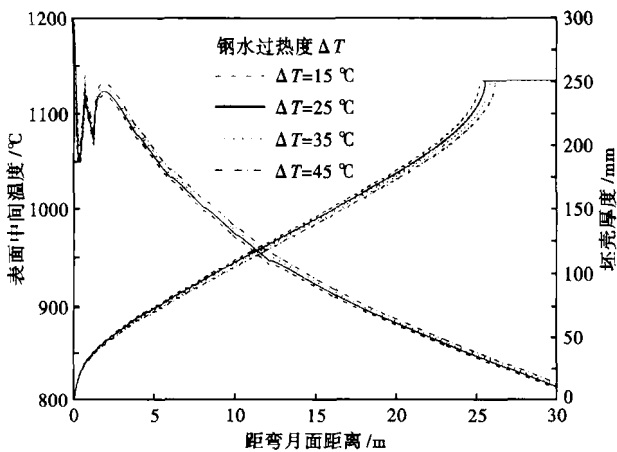


图3 过热度对大圆坯温度和凝固坯壳厚度的影响
Fig.3 Effect of superheat degree on temperature and thickness of solidified shell of large-size round bloom

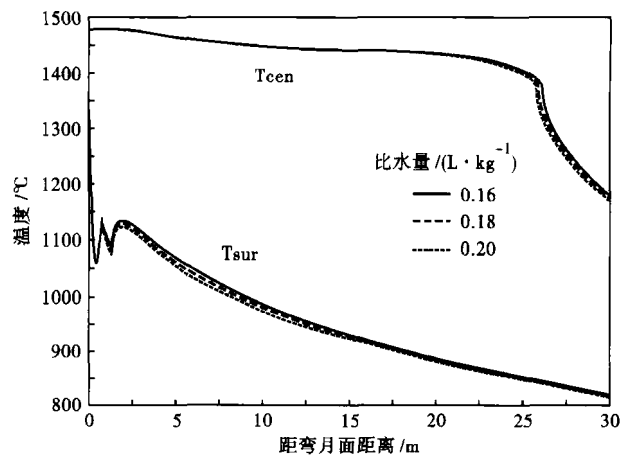


图4 比水量对大圆坯温度的影响
Fig.4 Effect of specific water flow rate on temperature of large-size round bloom

少质量缺陷的产生和避免漏钢事故的发生。在稳定操作的前提下,过热度应控制得越低越好,也有利于稳定铸机生产率。

3.3 冷却强度的影响

由图4可见,随着比水量的增加,中心温度和表面温度均下降。比水量微小的变动对铸坯温度影响不大,特别是在浇铸大圆坯时采取弱冷的冷却方式,比水量小,且拉速低,比水量改变时对水量的改变也

不大,因此温度波动不大。

4 模型的应用讨论

4.1 二冷水的初步设计

与方坯和板坯相比,圆坯的比表面积最小,当量断面同等冷却强度下,圆坯的散热面积小,冷却最慢,因此坯壳表面温度高,坯壳较薄,所以拉速要控制低一些。同时,圆坯初生坯壳在结晶器内无固定支撑,圆坯凝固壳过早而不规则脱离结晶器,产生气

隙,流场和温度场的不稳定变化极容易引起凝固坯壳厚薄不一,因此圆坯对冷却均匀性的要求更高。

在充分认识到圆坯连铸工艺特点的基础上,水量的设计一般有两种方法:(1)采用比水量法计算基础水量,先按钢种和断面确定出比水量的大致范围,然后按一定的比例将总的水量分配到各个二冷区,运用数学传热模型计算出该组水量在不同拉速下的铸坯温度场,通过不断调整水量的分配直至铸坯冷却均匀;(2)预先制定目标温度曲线,通过数学传热模型不断迭代求出二冷各回路的水量。这两种方法都需要有相当的工程设计经验,而使用二冷配水模型将会起到事半功倍的效果。

4.2 制定目标控制温度

动态二冷配水在线控制系统^[8]是基于目标表面温度控制法的思想来编制的。在二冷水设计时,会对产品大纲中所有钢种按其化学成分和高温特性进行分类,并选择不同的冷却模式控制,如强冷、中冷、弱冷等。表 3 给出了 $\Phi 500$ mm 断面大圆坯在中等冷却强度时的目标表面温度值。

表 3 $\Phi 500$ mm 圆坯中冷强度的目标表面温度

Table 3 Aimed surface temperature of $\Phi 500$ mm round bloom with medium cooling intensity

| 控制模式 | 各冷却区出口温度/℃ | | | | | 液芯长度/m | |
|------|------------|-------|-------|-------|-------|--------|------|
| | 足辊区 | 扇形段 | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | | 5 |
| 中冷 | 1 199 | 1 146 | 1 092 | 1 046 | 1 004 | 966 | 23.8 |

4.3 校核喷嘴选型

铸机主体设备和喷淋结构不便调整,为确保二冷配水的有效实施,喷嘴的选型设计倍显关键。实际上,在设计铸机时就已经考虑到喷嘴的初步选型,这个过程主要是凭设计者的经验。现在通过配水模型计算到的各区水量,除以各区的喷嘴数量,可以得到单个喷嘴的需求流量范围,从而准确判断喷嘴选型是否满足二次冷却的需要。各断面下的扇形 1 段喷嘴选型见表 4。

4.4 确定设备安装位置

表 4 扇形 1 段的喷嘴选型

Table 4 Selection of nozzle on segment 1

| 喷嘴最大需求流量/(L·min ⁻¹) | 喷嘴直径(Φ)/mm | | | | | 数量/个 |
|---------------------------------|-------------------|-----|-----|---------------|-----|------|
| | 350 | 400 | 450 | 500 | 600 | |
| 1.22 | PZWH1.5-70QZ2 | | | PZWH1.5-90QZ2 | | 80 |

为更好地解决连铸大圆坯的中心缩孔等内部缺陷,铸机设计者提出了一项“电磁加速”的技术,在功能上类似于连铸轻压下,用于钢液填充凝固末端附近体积空隙。这项技术在该铸机上进行开创性试验。确定出合理的电磁设备安装位置区间,是顺利应用该技术的前提条件之一。为此,必须获得铸坯的凝固坯壳厚度和中心固相率在拉坯方向上的变化规律,以及两相区位置和液芯长度等,这些都可以通过配水模型的运算来实现。

5 结论

(1)针对新建 $\Phi 600$ mm 大圆坯连铸机,通过建立柱坐标一维大圆坯连铸非稳态传热数学模型,并自行开发出大圆坯连铸二冷配水设计模型来制定相关连铸工艺以满足工业应用要求。该模型采用面向对象的程序设计语言(VC++6.0)编制,窗口式设计,能够实现给定水量下的温度场的计算以及设定目标温度后反算水量。

(2)拉速是影响铸坯温度和凝固坯壳厚度的最大因素,以浇铸 $\Phi 500$ mm 轴承钢 GCr15SiMn 为例,拉速每提高 0.1 m/min,出结晶器处凝固坯壳厚度减薄约 7.9 mm,减薄率可达 16.1%,凝固终点将延长 6.7 m。

(3)该模型不仅有助于指导工艺设计,为二冷动态配水控制模型的开发与应用提供基础,也助于连铸相关设备的选型或安装。

参考文献

- 1 史宸兴.实用连铸冶金技术.北京:冶金工业出版社,2007
- 2 张家泉.圆坯连铸,工艺及其冷却控制技术特点与要求.中国金属学会连铸分会圆坯连铸技术研讨会特邀报告,营口:2009
- 3 Muniente F.马钢达涅利高质量圆坯连铸机.钢铁,2006,41(3):88
- 4 Carlo Travaglini. Casting of Large Diameter Round Blooms at Jangsu Huaigang. Millennium Steel Publishing, London, 2008(5):137
- 5 李永林,赵沛.车轮钢圆坯表面温度和坯壳温度的数值分析.钢铁,2006,41(1):32
- 6 朱虹霓.连铸圆坯凝固传热数学模型的建立及其应用的研究:[硕士学位论文].北京:北京科技大学,1994
- 7 北京科技大学.大圆坯连铸二冷配水设计系统.国家版权局:2009SRBJ2373,2009
- 8 北京科技大学.大圆坯连铸二冷动态在线控制软件.国家版权局:2009SRBJ2375,2009

曾智(1986-),男,博士研究生,2006年武汉科技大学毕业,现代先进连铸技术。

收稿日期:2010-11-22