

# 板坯连铸机结晶器内流动及传热过程的数学模型

张 岚 贺友多

(包头钢铁学院)

刘建辉 白学军 王国连 杜得宝 吕永博

(首都钢铁集团公司)

**摘要** 应用三维流场和温度场计算软件,对首钢第二炼钢厂的板坯连铸机结晶器内钢液的流场和温度场进行了模拟研究,通过研究得到了在现有操作条件下结晶器内钢液的流动特征及温度分布情况,同时确定出它们对铸坯的影响,为进一步优化操作参数提供了依据。

**关键词** 板坯连铸机结晶器 流场 温度场 数学模型

## MATH MODEL ON FLOWING & HEAT TRANSFER OF LIQUID STEEL IN MOULD OF SLAB CONCASTER

Zhang Yin He Youduo

(Baotou Iron & Steel Institute)

Liu Jianhui Bai Xuejun Wang Guolian Du Debao Lu Yongbo

(Capital Iron & Steel Corp.)

**Synopsis** Simulation study on the flowing field and temperature field of the liquid steel in the mould of slab concaster is carried out in the 2<sup>nd</sup> Steel Plant of Capital Iron & Steel Corp. by application of the software capable of calculating the 3-dimensional flow field and temperature field and the flowing characteristics and temperature distribution of the liquid steel inside the mould under the present operating conditions are obtained and their influence on the slabs determined through the experimental study, thus providing basis for further optimization of the operating parameters.

**Keywords** mould of slab concaster flow field temperature field math model

## 1 前 言

随着生产技术的发展,连铸的比例逐渐提高,目前国内钢铁企业普遍采用了连铸技术。对连铸过程的研究尤其对中间包的优化设计和结晶器内的流动及传热过程研究日益受到广大技术人员和研究工作者的重视<sup>[1-3]</sup>。应用数学模型对研究连铸过程是一种比较经济和实用的研究方法,计算技术和计算机的发展为数学模型研究提供了有力的保证。目前人们已经开始应用计算机对三维情况下的流动及传热过程进行数值模拟。包头钢铁

学院开发的结晶器内三维流动过程计算机软件已经被广泛地应用到各种形式的连铸结晶器内钢液的流动过程中,为结晶器的优化设计提供了理论依据。本文应用该软件对首都钢铁公司第二炼钢厂的板坯连铸机结晶器内钢液的流动、传热及凝固过程进行了研究,通过计算机模拟确定了不同操作条件对过程的影响,进而提出了改进方案。

## 2 模拟条件

首钢总公司第二炼钢厂板坯连铸机结晶器部分主要参数如下:结晶器断面尺寸为1440~

联系人:张 岚,博士,包头市(014010)昆区青年路14-13-13号

1 540 mm × 220 mm; 浸入式水口角度为向下 15°; 插入深度为 270 mm; 拉坯速度为 0.9 m/min; 水口出口尺寸为 80 mm × 40 mm; 铸坯断面尺寸为 1 440 mm × 220 mm。

### 3 计算机模拟采用的数学模型及软件

计算所用的模型包括流场计算的连续性方程、动量方程以及湍流的  $K - \epsilon$  双方程、温度场计算的能量方程(包含有凝固潜热源项<sup>[1]</sup>)。对于稳定态不可压缩流体, 具体方程如下。

$$\text{连续性方程: } \frac{\partial}{\partial X_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial X_i} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left[ \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial u_j}{\partial X_i} + \frac{\partial u_i}{\partial X_j} \right) \right] \quad (2)$$

湍流动能  $K$  方程:

$$\frac{\partial}{\partial X_i} (\rho u_i K - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial K}{\partial X_i}) = G - \rho \epsilon \quad (3)$$

湍流动能耗散  $\epsilon$  方程:

$$\frac{\partial}{\partial X_i} (\rho u_i \epsilon - \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_i} \frac{\partial \epsilon}{\partial X_i}) = (C_1 G \epsilon - C_2 \rho \epsilon^2) / K \quad (4)$$

$$\text{其中 } G = \mu_1 \frac{\partial u_i}{\partial X_i} \left( \frac{\partial u_i}{\partial X_j} + \frac{\partial u_j}{\partial X_i} \right) \quad (5)$$

$$\text{有效粘度: } \mu_{\text{eff}} = \mu_1 + \mu_t \quad (6)$$

$$\mu_t = C_0 \rho K^2 / \epsilon \quad (7)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial X_i} (\rho c_p u_i T) = \frac{\partial}{\partial X_i} \left( \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_f} \frac{\partial T}{\partial X_i} + S \right) \quad (8)$$

其中  $S$  在稳定态情况下为:

$$S = \rho H_f u_i \frac{\partial f}{\partial X_i} \quad (9)$$

式中  $H_f$  ——凝固潜热

$f$  ——凝固率

计算机模拟采用包头钢铁学院贺友多教授自行开发的三维流场软件完成, 具体数学模型的处理及计算软件的介绍详见文献[4]及文献[5]。

模拟流场和温度场时格子的划分为  $35 \times 15 \times 70$  的空间网格, 其网格划分如图 1 所示。

在计算温度场时, 计算钢种为 20 号钢, 过热度为 12 ℃, 液相线温度为 1 508 ℃, 固相线温度为 1 465 ℃。边界条件的确定依据首钢二炼钢实际生产中的冷却水量, 并结合一些经验和实测结果进行确定。

凝固潜热的处理方法是把它作为能量方程的源项直接加入到方程中去, 该方法克服了传统等价比热在一些情况下失效的缺陷, 具体处理方法见文献[6]。

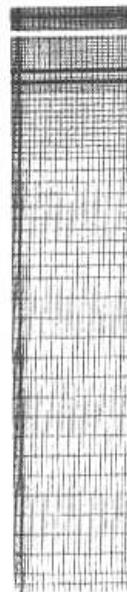


图 1 计算采用的网格划分图

### 4 计算结果与讨论

#### 4.1 板坯连铸结晶器流场特征

计算得到的结晶器纵截面的钢液速度分布如图 2 所示, 水平截面速度分布如图 3 所示。

从图 2 中可以看到, 钢液从水口出来后一面直线运动, 一面扩张流向结晶器的窄面。由于壁面的影响, 流股分成向下和向上两大流股, 其中向下流股是主流股, 在遇到结晶器窄面后沿着结晶器下行, 达到一定冲击深度(可达 2~2.5 m)后, 回流流向中心; 上部流股在结晶器上部形成回流, 这个回流的表面速度对保护渣的熔化起决定性的作用。沿结晶器窄面上流钢液会使钢液表面不平稳, 对保护渣液沿结晶器表面渗入有影响。流股对窄面的冲击点可以由工艺条件采用几何方法决定。下流流股沿窄面向下运动必然对柱状晶生长提供有利条件。图 3 中显示了从浸入式水口流出的钢液由于射流作用流向结晶器的窄面, 由于壁面的作用分成对称的左右流股, 流向结晶器的窄面, 并回流流向结晶器的宽面中心, 形成四个对称的回流循环区。

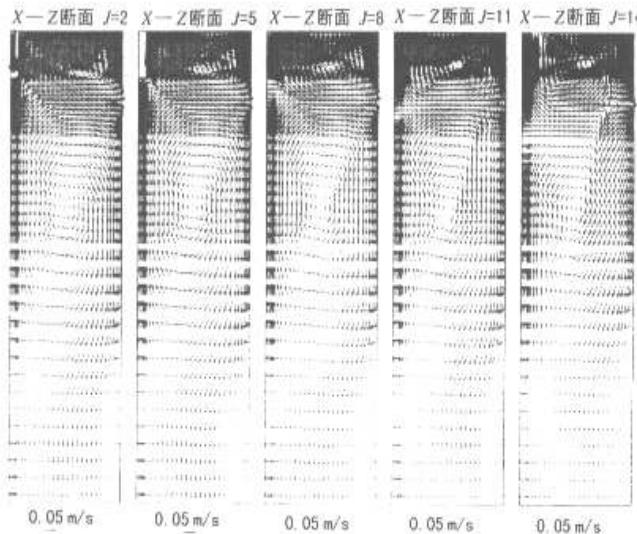


图 2 结晶器纵截面速度分布

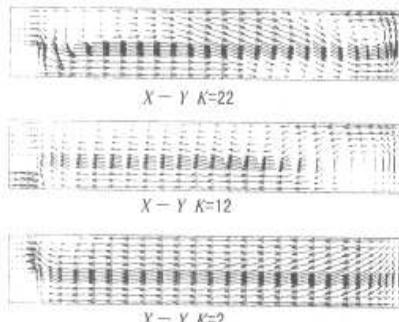


图 3 结晶器水平截面速度分布

注:坐标原点在结晶器钢液面浸入式水口的中心处,水平面为 X-Y 截面,结晶器高度方向为 Z 方向,图中  $k=2, 12, 22$  为不同高度的水平面

#### 4.2 温度场的基本特征

在流场计算的基础上,耦合能量方程和凝固率计算方法等,进行钢液和钢坯内部温度场和凝固情况的联合计算。

从等温线分布看,等温线的分布必然与流场的形式相互影响的。由于有上、下两个回流存在,则有两个温度最低的区域存在,温度分布呈现与流场分布形态类似的形状,分为上下两个区域。1520 °C 的钢液从水口流出后被从水口下方中心回流和上方的回流钢液所混合,温度迅速降低。在主截面上钢液下回流区中心的温度约 1471 °C,而上回流区的温度约为 1477 °C,比下回流区高一些。图中边缘处的线条密集,说明此处温度梯度

很大,这是很容易理解的,因为钢液的回流要保持温度均匀,而结晶器和二冷区的冷却是热流损失的地方,所以此处温度梯度很大。

上回流的最低温度位置在接近窄面处角部,该部位容易产生热量补充不足的现象,在实际操作中需要采取一定的保温措施。而在上回流的中心处是一个低温区,这与流动特征是相对应的。从中心截面上的等温线可看出最低温度约为 1477 °C,说明在上回流区上开始出现结晶条件,中心截面上的下回流区最低温度约 1471 °C。

图 4 给出了模拟条件下水平截面平均温度随高度的变化关系。

从图中可以看出,水平截面平均温度的变化趋势是在整体随高度降低的情况下,1.5 m 距离内出现了两个温度回升现象,其中第一个温度回升是由于水口出来的射流冲击造成的,第二个回升是由于下循环区造成的。从流场分布图和温度分布图中可以看出,在下循环区中心高度上出现了低温区,该低温区是平均温度出现局部低谷的主要原因。另外对照流场图可以发现,平均温度出现低谷的位置正好是下循环区的中心位置。

#### 4.3 凝固壳的基本形状

由于不同情况下等温线的形状基本相同,为了直观,用凝固壳厚度(认为只有当某个节点的钢液全部凝固时,该节点才为凝固,即当温度低于固相线温度为凝固壳)作为分析基准。

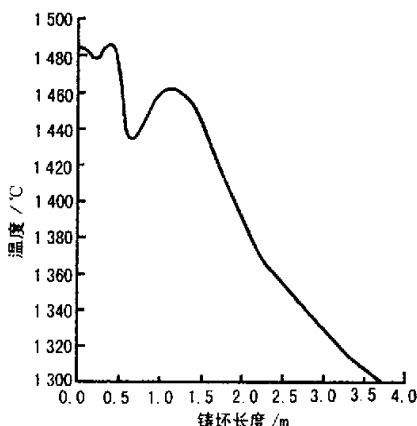


图4 铸坯水平截面平均温度随铸坯长度的变化

图5给出了根据计算结果回归得到的主截面( $J=2$ )上凝固壳厚度随铸坯长度的变化关系。图中显示了随着铸坯长度的增加,凝固壳厚度增加。从图中可以发现,对于该计算所给的热边界条件,在结晶器出口处均能形成至少15 mm的凝固壳,而在所计算的长度上(3.7 m坯长)可形成约58 mm左右的凝固壳。中心截面均呈现大面中心附近凝固壳较边缘处厚,而距离角部附近处较薄,是容易发生漏钢的位置。

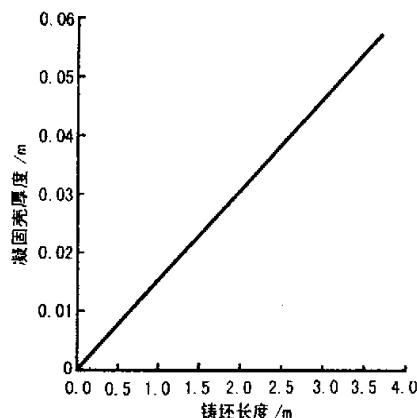


图5 主截面铸坯凝固壳厚度随铸坯长度的变化

凝固壳厚度的变化规律:(1)窄面中心坯壳最薄,以后向边部单调上升,到角部最厚,此处是两边受热的缘故;(2)宽面中心位置坯壳相对较薄(当考虑中心有气泡上浮时,此处的凝固壳厚度会更小)。从中心往窄边方向,由于上回流低温钢水被水口钢水射流卷吸,此处钢壳的厚度比较厚,之

后又逐渐减小(由于上回流钢水的原因),到达离角部有一定距离的位置时凝固壳厚度达到最小,这是由于从窄面上升的钢水在宽度方向上扩展,钢水遇到结晶器壁而变为近壁方向平行流动,这个钢水相遇的点也是钢壳较薄的点,之后由于角部的双向冷却,厚度又增加。

通过以上计算和分析,宽面中心是凝固壳最容易拉漏的一个位置;另一个容易拉漏的位置是距角部有一定距离的最薄凝固壳处。

## 5 结 论

根据以上计算结果及分析可以得出以下几点结论。

(1)板坯连铸机结晶器内的流场一般可分为两个回流区,向下的回流是主动回流,而向上的回流是从动回流。向下回流影响结晶过程,影响凝固壳的厚度,而上回流区的作用主要是提供熔化保护渣的热量。向上回流对宽面角部的冲击使该处的凝固壳厚度变薄,同时其强度还会影响弯月面的形状,从而对铸坯质量产生影响。

(2)结晶器内的温度场分布与流场分布很相似,温度分布在上回流区中心有一个低温区域。下回流区的回流中心处同样有低温区存在,所以在板宽方向上温度分布呈W形。

(3)铸坯的凝固壳厚度可以近似认为是线性变化,在计算条件下凝固壳出结晶器时的厚度达到15 mm左右,具体来说,凝固壳厚度在窄面上是从中心向角部单调增加,而在宽面上,有二个最薄弱的点,即中心和离角部有一定距离的地方。

## 参 考 文 献

- 1 Yin Zhang, Liguo Cao, Youduo He, et al. Flow and Temperature Fields in Slab Continuous Casting Molds. Journal of University of Science and Technology Beijing (English Edition), 2000, 7(2): 103~106
- 2 朱苗勇,雷方,汪温泉等.连铸结晶器内钢液流动与传热过程的计算.东北大学学报,1994,15(4):102~105
- 3 张炯明,赫冀成,李宝宽.吹入气体对连铸结晶器内流场的影响.金属学报,1995,31(6):269~274
- 4 贺友多.传输过程的数值方法.北京:冶金工业出版社,1991
- 5 贺友多.传输理论和计算.北京:冶金工业出版社,1999
- 6 张胤,丁立刚,李保卫等.钢锭冷凝过程仿真及试验研究.工业加热,1996,(3):6~9

(收稿日期:2001-03-20)