

## 异形坯连铸充型凝固过程数值模拟

晋艳娟 崔小朝 张柱

(太原科技大学应用科学学院, 太原 030024)

**摘要** 利用CFD商用软件Flow-3d,对单双水口Q215钢750 mm × 450 mm × 120 mm异形坯连铸结晶器内钢水充型凝固过程进行数值模拟,得到了速度场、温度场的分布图和充填过程自由表面的位置和形状图。分析了单双水口模型对速度场及凝固的影响。结果表明,双水口模型可以减轻结晶器上部回流的强度,减小冲击深度,提高传热效率,加快结晶器内钢液的凝固速度,有助于提高铸坯的质量和拉速。

**关键词** 异形坯连铸 充型 凝固 数值模拟

## Numerical Simulation of Mold Filling and Solidification Process for Shaped Concasting Slab

Jin Yanjuan, Cui Xiaochao and Zhang Zhu

(School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024)

**Abstract** Numerical simulation of mold filling and solidification process of liquid for Q215 steel 750 mm × 450 mm × 120 mm shaped slab concasting mold with single submerged nozzle and double submerged nozzles has been carried out by using CFD commercial software Flow-3d to get the distribution diagrams of velocity field and temperature field and the location and shape diagrams of free-surface during mold filling process. The effect of single and double submerged nozzle model on velocity field and solidification is analyzed. Results show that double submerged nozzle model is available to lighten the intensity of circumfluence at upper part of mold, decrease impact depth, increase heat transfer efficiency and quicken solidification speed of liquid steel in mold, that is favorable to improve quality of slab and increase casting speed.

**Material Index** Shaped Slab Concasting, Mold Filling, Solidification, Numerical Simulation

充型过程中钢液的流动对连铸过程的建立有着重要的影响,平稳的充型过程是获得优质铸坯的必要条件<sup>[1-5]</sup>。本文针对马钢目前采用单水口浇铸现状,提出双水口浇铸设想。运用流体力学分析软件Flow-3d对异形坯连铸非稳态充型凝固过程进行数值模拟。

### 1 异形坯连铸充型过程结晶器内钢水流动和传热数学模型

#### 1.1 基本方程

连续性方程:  $\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$

动量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{\text{eff}} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + F_i$$

能量方程:  $\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + S_T$

式中  $\Gamma_{\text{eff}}$  为有效温度扩散系数,可由下式确定:

$$\Gamma_{\text{eff}} = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_i}{Pr_i}$$

体积函数方程:  $\frac{\partial F}{\partial t} + u_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0$

湍动能方程:  $\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j K)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{u_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + \mu_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \rho \varepsilon$

湍动能耗散率方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{K} \mu_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{K}$$

由  $K$  和  $\varepsilon$  可以确定  $\mu_i$ :  $\mu_i = C_\mu \rho \frac{K^2}{\varepsilon}$

式中:  $C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$  分别为经验常数,目前普遍采用劳德和斯泊汀的推荐值<sup>[6]</sup>,即  $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.33$ ;  $u_i, u_j$  表示  $i$  和  $j$  方向的速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $x_i, x_j$  表示  $i$  和  $j$  方向的节点坐标/m;  $F_i$  表示  $i$  方向的体积力;  $T$ - 温度/K;  $\rho$ - 流体的密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $P$ - 压强/Pa;  $\mu, \mu_i$  表示层

流和湍流的粘度系数/(Pa·s); $Pr, Pr_t$ - 分别为层流和湍流的普朗特数; $S_T$ - 为源项,无内热源时其值为0; $F$ - 流体体积分数; $K$ - 湍动能; $\epsilon$ - 湍动能耗散率。

### 1.2 边界条件

(1)单水口浇铸的入口速度为 3.2 cm/s,双水口浇铸的入口速度为 6.4 cm/s,浇铸温度为1 808 K;(2)结晶器液面处表面切应力很小,可以忽略不计;(3)在结晶器壁面处,采用无滑移边界条件,对 $K, \epsilon$ 设为0;结晶器壁面与冷却水接触,因此施加对流热边界条件;结晶器壁面与钢水的换热系数为 $800 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ;(4)结晶器底部与钢水的换热系数为 $900 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

## 2 异形坯连铸充型凝固过程数值模拟

假设:(1)钢水的流动为粘性、不可压缩流动;(2)忽略密度变化引起的自然对流;(3)忽略结晶器的振动等因素对流场的影响。

Q215 钢成分为(%): 0.09 ~ 0.16C, 0.12 ~ 0.30Si, 0.25 ~ 0.55Mn,  $\leq 0.050\text{S}$ ,  $\leq 0.045\text{P}$ 。

结晶器的截面尺寸<sup>[7]</sup>为 700 mm × 450 mm × 120 mm,结晶器高 800 mm,壁厚 20 mm,结晶器内钢水深度700 mm,浸入式水口直径96 mm,水口浸入深

度 150 mm。根据结构的对称性,分别对单水口浇铸和双水口浇铸选取其1/2和1/4为数值模拟分析模型。在充型过程中,液态金属的浇铸温度为1 808 K,液态金属的密度为 $6740 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,导热系数为 $27.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,比热容为 $710 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,固态金属的密度为 $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,导热系数为 $26.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,比热容为 $680 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,运动粘度为 $0.06 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ,结晶潜热为 $277000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,固相线温度为1 660 K,液相线温度为1 764 K。

### 2.1 速度场分析

在相同的时间内要将结晶器充满,因此单水口的浇铸速度是双水口浇铸的 2 倍。由图 1 可以看出,在 100 s 时,单水口浇铸的最大速度为 299 cm/s,而双水口浇铸的最大速度为 209 cm/s;在 220 s 时,单水口浇铸的最大速度为 248 cm/s,而双水口浇铸的最大速度为 173 cm/s。

采用单水口浇铸,水口处于结晶器的一侧,因此在水口一侧钢液的冲击深度较深,速度较大,而另一侧的钢液流动较弱;而采用双水口浇铸,水口处于结晶器的两侧,因此钢液的冲击深度较浅,流动比较均匀,因此双水口浇铸的冲击速度小,冲击深度浅,有

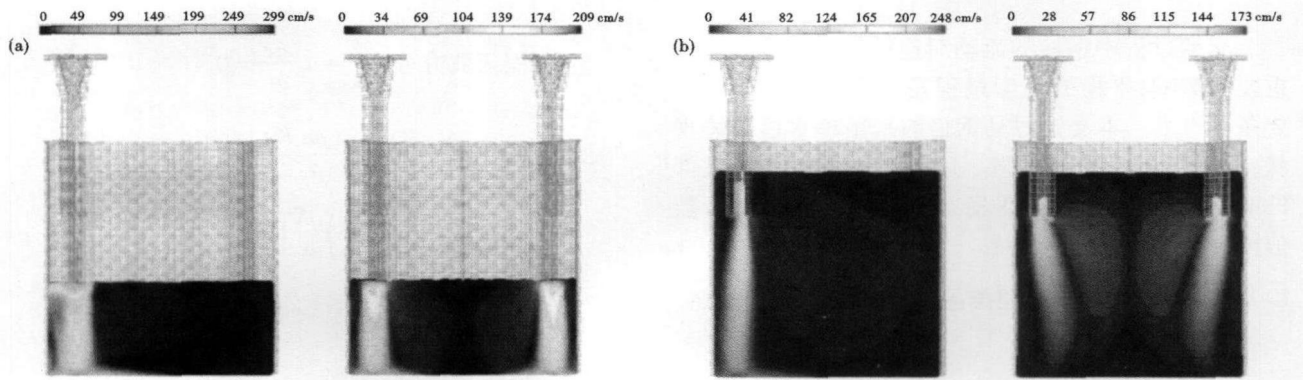


图 1 100 s(a)和 220 s(b)时单、双水口中心纵截面的速度云图

Fig. 1 Velocity contours of center vertical section of single and double submerged nozzle casting for 100 s (a) and 220 s (b)

利于降低钢液的流动速度,加快钢液的凝固。

### 2.2 温度和凝固状况分析

由图 2 可以看出,随着充型时间的增加,结晶器内钢液逐渐增加,凝固坯壳厚度逐渐增加。比较同一时刻单双水口浇铸的情况:当浇铸 100 s 时单水口浇铸的最低固相率为 0.174,而双水口浇铸的最低固相率 0.388,不仅双水口浇铸的最低固相率比单水口浇铸高,而且双水口浇铸的凝固坯壳明显比

单水口浇铸的厚;充型结束时单水口浇铸的最低固相率为 0.02,而双水口浇铸的最低固相率 0.23,双水口浇铸的钢液绝大部分都已凝固。

采用单水口浇铸,高温区位于水口一侧,而且钢液的冲击速度大,温降较慢,此处钢液很难凝固,而在水口的另一侧,钢液的流动比较均匀,温降较快,钢液凝固快,易形成裂纹。采用双水口浇铸时,高温区位于水口的正下方,在结晶器的腹板处先凝固,在

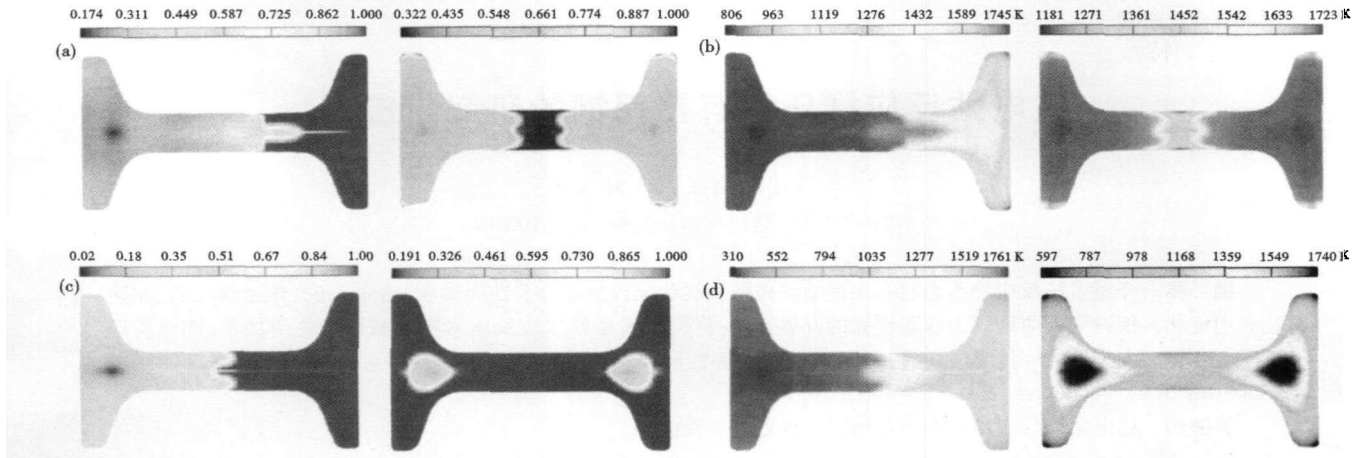


图2 100 s(a,b)和220 s(c,d)单双水口浇铸结晶器底部的凝固图(a,c)和温度图(b,d)

Fig. 2 Solidification contours (a, c) and temperature contours (b, d) at bottom of mold with single and double submerged nozzle casting for 100 s (a, b) and 220 s (c, d)

充型结束时结晶器底部,除了水口的正下方,别的区域已凝固。采用双水口浇铸,结晶器内钢液的冲击速度小,流动比较均匀,有利于改善铸坯的内部质量。

由图3可见,在单水口浇铸时,水口一侧形成的坯壳较薄,在凝固过程中形成凝固薄弱区;在水口另一侧,易形成凝固坯壳,因此形成

的坯壳厚度较厚。在双水口浇铸时,靠近结晶器壁处的钢液温度很快降至固相线温度以下,形成初生坯壳。沿着水口方向,由于高温钢液的冲击,凝固速度较慢。在铸坯芯部环流涡心的温度低于主冲击流股的温度,其凝固速度较水口冲击部位要快。

单水口浇铸时,水口另一侧的钢液流动较弱,凝固过快,易形成裂纹等缺陷,而水口一侧因钢液冲击,流动增强,存在大的环流,将成为凝固薄弱区;双水口浇铸时,翼板中心处流动减弱,角部钢液流动增强,改善了角部的凝固状态。

### 3 结论

(1) 双水口浇铸可以减缓钢液的流动速度,减小冲击深度,并使钢液的流动更加均匀。

(2) 双水口浇铸可以提高传热效率,加快坯壳的增长速度,改善铸坯的内部组织。

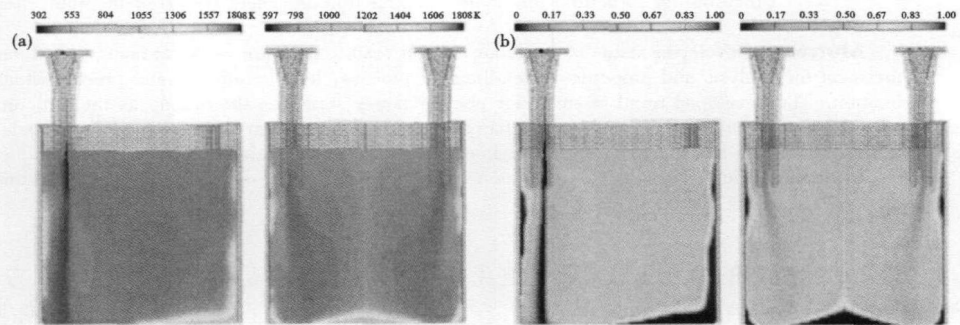


图3 220 s时单双水口中心纵截面的温度图(a)和凝固图(b)

Fig. 3 Temperature contours (a) and solidification contours (b) of center vertical section of single and double submerged nozzle casting for 220 s

山西省青年基金项目资助(2008021035)

### 参考文献

- Kim K. Analysis of Surface and Internal Cracks in Continuously Cast Beam Blank. *Ironmaking and Steelmaking*, 1997, 24(3): 249
- Lee Jungeui. 3-dimensional Mathematical Model for the Analysis of Continuous Beam Blank Casting Using Body Fitted Coordinate System. *ISIJ International*, 1998, 38(2): 132
- 娄娟娟,包燕平,刘建华,等. 连铸异形坯凝固过程的数值模拟. *北京科技大学学报*, 2005, 27(2): 173
- 杨建伟,杜艳平,史荣,等. 异形坯连铸结晶器内三维流场的数值模拟. *中国有色金属学报*, 2001, 11: 248
- 杜艳平,杨建伟,崔小朝,等. 异形坯连铸结晶器内钢液流动状况的三维数值模拟. *钢铁研究学报*, 2002, 14(5): 21
- 晋艳娟,崔小朝,李朗,等. 板坯连铸充型过程流场温度场耦合数值模拟. *特殊钢*, 2006, 27(5): 6
- 杜艳平. 异形坯连铸流场与温度场耦合三维数值模拟系统: [硕士学位论文]. 太原:太原重型机械学院, 1999

晋艳娟(1979-),女,博士生,讲师,钢铁冶金。

收稿日期:2010-03-09