

板坯连铸充型过程流场温度场耦合数值模拟

晋艳娟¹ 崔小朝¹ 李 朗¹ 张 柱¹ 刘 才²

(1 太原科技大学应用科学学院, 太原 030024; 2 河北省科学院, 石家庄 050081)

摘 要 利用 CFD 商用软件 Flow-3d, 对内外复合冷却结晶器内钢水充型过程流场温度场耦合作用下的流动和凝固状况进行数值模拟, 得到了流场温度场的分布图和充填过程中自由表面的位置和形状图。分析了板坯连铸充型过程中流场温度场对钢水凝固的影响。结果表明内冷却器可改善钢水的流动, 有利于钢液中的夹杂物上浮, 加快结晶器内钢液的凝固。

关键词 板坯连铸 内冷却器 流场 温度场 数值模拟

Coupled Numerical Simulation of Flow Field and Temperature Field in Slab Concasting Filling Process

Jin Yanjuan¹, Cui Xiaochao¹, Li Lang¹, Zhang Zhu¹ and Liu Cai²

(1 School of Application Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024;
2 Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050081)

Abstract The flow and solidification status of molten steel with coupling flow field and temperature field in inner- outer couple cooling mold has been simulated by using CFD commercial code Flow-3d software to get distributing diagrams of flow field and temperature, and free-surface level and shape diagram. The influence of flow field and temperature field in slab concasting filling process on solidification of molten steel was analyzed. It is indicated that the inner cooler could improve the molten steel flow status which is favourable for inclusion floating up in molten steel and increasing the solidification rate of molten steel.

Material Index Slab Concasting, Inner Cooler, Flow Field, Temperature Field, Numerical Simulation

不少作者^[1-4]利用流体力学分析软件对稳态浇铸过程进行分析。本研究借鉴铸件充型过程数值模拟技术, 应用 CFD 商用软件 Flow-3d, 对内外复合冷却板坯连铸非稳态充型过程结晶器内钢水, 在流场温度场耦合作用下的凝固状况进行数值模拟, 并与无内冷却器的钢水流动及凝固状况进行比较, 从而得到充型过程钢液的流动状况、温度变化和凝固状况。在实验室把内冷却器(3 mm 厚的紫铜管)置于熔化的钢水中, 经过 3 h 的使用, 内冷却器完好无损。

1 板坯连铸充型过程结晶器内钢水流动和传热数学模型

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0$$

动量守恒方程^[5]:

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

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: Γ_{eff} 有效温度扩散系数, 可由下式确定:

$$\Gamma_{\text{eff}} = \frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{Pr_t}$$

体积函数方程^[6]:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0$$

湍动能方程:

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j K)}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] +$$

$$\mu_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \rho \varepsilon$$

湍动能耗散率方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_j \varepsilon)}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$C_1 \frac{\varepsilon}{K} \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - C_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{K}$$

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

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, 即 $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.33$; u_i 和 u_j - i 和 j 方向的速度/($m \cdot s^{-1}$); x_i 和 x_j - i 和 j 方向的节点坐标/ m ; F_i - i 方向的体积力; T - 温度/ K ; ρ - 流体的密度/($kg \cdot m^{-3}$); P - 压强/ Pa ; μ, μ_t - 分别为层流和湍流的粘度系数/($Pa \cdot s$); Pr, Pr_t - 分别为层流和湍流的普朗特数; S_T - 源项, 无内热源时其值为零; F - 流体体积分量; K - 湍动能; ε - 湍动能耗散率。

边界条件为:(1)入口速度为 67 cm/s , 浇铸温度为 1768 K ;(2)将结晶器液面处理为自由表面, 液体直接与大气接触, 为压力入口; 表面切应力很小, 可以忽略不计, 垂直于钢液面的速度分量设为零;(3)在结晶器壁面处, 采用无滑移边界条件, 对 K, ε 设为零; 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 $800 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;(4)在充型过程中, 结晶器底部是封闭的并且放有铁砂, 而钢水可以将

结晶器底部的铁砂熔化, 因此施加加热边界条件, 结晶器底部与钢水的换热系数为 $850 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$;(5)在 U 形冷却器壁面处, 采用无滑移边界条件, 对 K, ε 设为零, 而 U 形冷却器壁面与冷却水接触, 因此需要施加对流热边界条件, U 形冷却器壁面与钢水的换热系数为 $800 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 。

2 结晶器内钢水流场温度场耦合数值模拟

为了便于研究充型过程结晶器内钢水的流动和凝固情况, 假设^[7]: 钢水的流动为粘性、不可压缩流动; 忽略密度变化引起的自然对流。

2.1 模型的建立

针对 1Cr18Ni9Ti 不锈钢进行分析, 结晶器的截面尺寸为 $124 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$, 高度 80 cm , 壁厚 2 cm , 水口直径 4 cm , 内置冷却器高 26 cm , 弯曲半径 6 cm , 水口插入深度 13 cm , 结晶器内钢水深度 70 cm , 具体模型如图 1(a) 所示。根据结构的对称性, 取结晶器的 $1/4$ 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 1768 K , 密度为 7900 kg/m^3 , 导热系数为 $26.8 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, 比热容为 $580 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)}$, 运动粘度为 $0.059 \text{ m}^2/\text{s}$, 结晶潜热为 272000 J/kg , 固相线温度为 1698 K , 液相线温度为 1723 K 。

2.2 模拟结果

为了便于分析比较, 选取 $t = 142.5 \text{ s}$ 时刻钢水的流场、温度场和凝固情况进行分析:

(1)由图 1(b)(c) 可以看到, 钢水在惯性流的作用下, 流动速度逐渐增加, 到达水口的最下端速度达到最大, 受到水口侧开口的影响和重力的

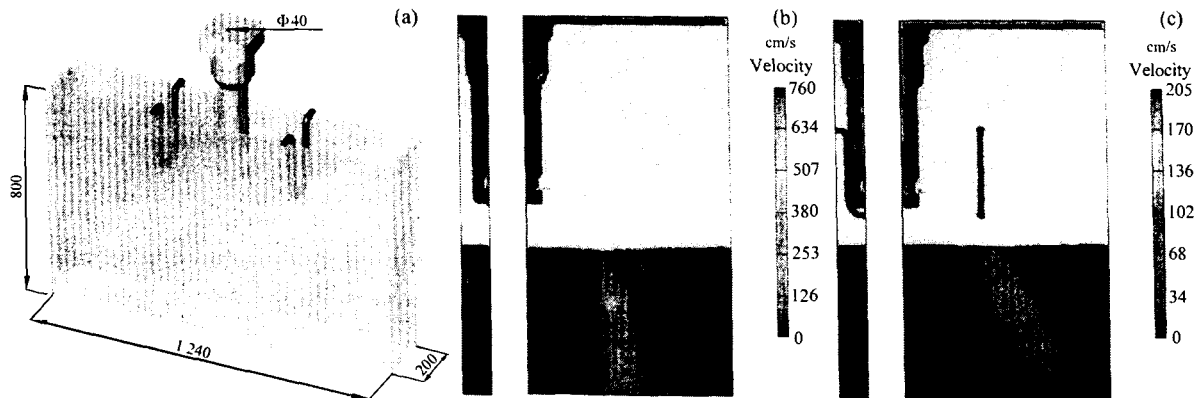


图 1 模型图 (a), 无内冷却器 (b) 和有内冷却器 (c) 的钢水速度图

Fig. 1 Diagram of model (a), velocity diagram of molten steel without inner cooler (b) and with inner cooler (c)

作用,钢水沿抛物线流出,然后流向结晶器底部,由于结晶器内液体的阻碍速度继续减小,在结晶器壁面的影响下形成大量的漩涡,在涡流的作用下,能量降低,速度减小;而在内置内冷却器的结晶器内,钢液从侧开口处沿抛物线出,冲击到 U 形冷却器,然后流向结晶器底部,在结晶器内形成大量的漩涡。无内冷却器时钢液的最大速度达到 760 cm/s,有内置冷却器时其最大速度为 205

cm/s。

(2) 结晶器内钢液和凝固坯壳的温度分布如图 2(a)(b) 所示,由于结晶器的角部有 x, y 两个方向的传热,所以角部区域温度变化最剧烈,温度也最低,而对称面只有单方向的热流传热,所以温度明显高于角部区域,因此结晶器壁面的温度比中心的温度高,其温度成梯度变化。无内冷却器的结晶器内钢液最低温度值为 976K,有内置冷却

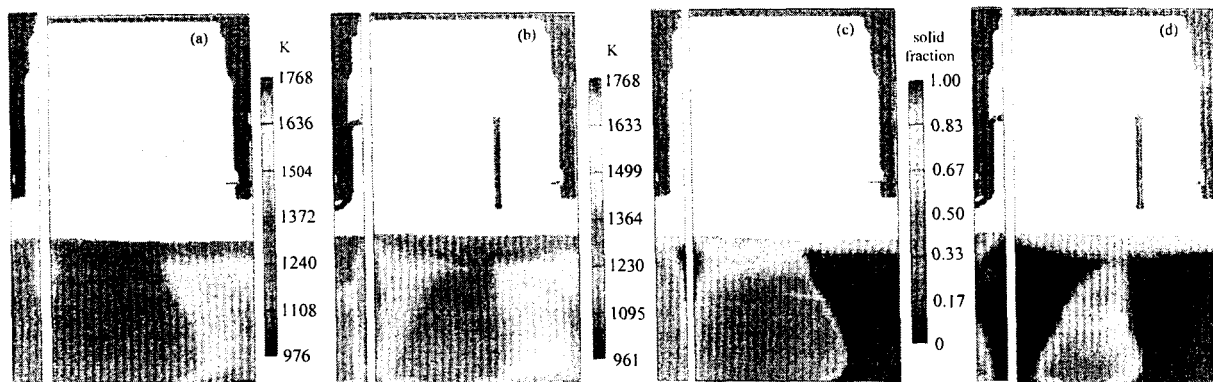


图 2 无内冷却器(a)和有内冷却器(b)的钢水温度图;无内冷却器(c)和有内冷却器(d)的钢水凝固图

Fig. 2 Temperature diagram of molten steel without inner cooler (a) and with inner cooler (b); solidification diagram of molten steel without inner cooler (c) and with inner cooler (d)

器的结晶器内钢液最低温度值为 961 K。

结晶器内钢液凝固的分布状况是通过固相率的变化来反映钢液的凝固情况,见图 2(c,d)。由图 2(c,d) 可见,由于结晶器的角部有 x, y 两个方向的传热,所以角部区域凝固的较多,而对称面只有单方向的热流传热,所以钢液凝固的少于角部区域;有内置 U 形冷却器比无内置 U 形冷却器的结晶器内钢液凝固的多,可见内冷却器可以绕过气隙,加速传热过程和加快结晶过程,从而加快钢液的凝固,增加凝固层的厚度。

3 结论

(1) 内冷却器可以阻碍液态金属的冲击深度,减小钢液的冲击速度,起到电磁制动之功效。

(2) 内置 U 形冷却器可以减小对凝固坯壳的冲刷作用,加快钢液的凝固速度。

(3) 内冷却器可绕过占 80% 热阻的气隙,加速传热过程和加快结晶过程,增加冷却效率,加快连铸坯的凝固速度;增加凝固层的厚度,降低拉漏率。

(4) 内冷却器可以加快钢液的冷却速度,而

冷却速度的加快,可以使铸坯有更好的微观组织,有利于获得良好的铸坯表面质量。

国家自然科学基金资助项目(编号 50474013)

河北省科技攻关项目(编号 05242226d)

参考文献

- 1 孙于萍,李杰,乐可襄,等. 板坯连铸结晶器内钢液流场的数学模拟. 特殊钢, 2005, 26(2): 12
- 2 马范军,文光华,李刚,等. 板坯连铸结晶器内钢液流动数值模拟. 金属学报, 2000, 36(4): 399
- 3 于会香,张炯明,王万军,等. 板坯连铸浸入式水口出口速度对结晶器流场影响的数值模拟. 北京科技大学学报, 2002, 24(5): 492 2005, 21(3): 51
- 4 李宝宽,李东辉. 连铸结晶器内钢液涡流现象的水模型观察和数值模拟. 金属学报, 2002, 38(3): 315
- 5 朱苗勇,萧泽强. 钢的精炼过程数学物理模拟. 北京:冶金工业出版社, 1998
- 6 柳百成,荆涛. 铸造工程的模拟仿真与质量控制. 北京:机械工业出版社, 2001
- 7 张乔英,王书桓,王立涛,等. SEN 壁厚对结晶器内钢液流场和温度场的影响. 炼钢, 2005, 21(3): 51

晋艳娟(1979-),女,硕士研究生,液态金属流动多场耦合数值模拟研究。

收稿日期:2006-03-22