

双辊冷却低过热度浇铸结晶器流场和温度场耦合数值模拟

张俊婷¹ 崔小朝¹ 刘 才² 晋艳娟¹

(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 提出了一种双辊冷却低过热度浇铸 150 mm × 150 mm 方坯的技术, 即使从中间包流出的钢水通过转动的冷却辊浇入结晶器内, 通过降低钢水过热度改善铸坯质量。借助流体力学分析软件, 对 0.45C 钢水的数值模拟结果发现, 通过冷却辊冷却的钢液过热度降低, 结晶器中钢水流冲击深度达 250 mm, 有利于打断凝固前沿的柱状晶, 扩大等轴晶比例, 同时结晶器内的钢液流场和温度场分布均匀, 且铸坯的凝固状况也明显改善。

关键词 低过热度 温度场 流场 连铸方坯 数值模拟

Coupled Numerical Simulation of Flow Field and Temperature Field of Mold Concasting at Low Superheat by Two Rollers Cooling

Zhang Junting¹, Cui Xiaochao¹, Liu Cai² and Jin Yanjuan¹

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

Abstract A technology of low superheat casting for 150 mm × 150 mm billet by two rollers cooling has been put forward, that is the molten steel flowing out from tundish into mold through cooling turning rollers to reduce molten steel superheat and improve quality of casting billet. The results of numerical simulation for a 0.45C steel by hydromechanics analysis software indicated that the superheat of molten steel through cooling roller reduced, the impact depth of molten steel flow in mold was up to 250 mm, it was available to break columnar crystal at forward position of solidification, moreover the molten steel flow field and temperature field in mold distributed homogeneously and the solidification condition of casting billet improved obviously.

Material Index Low Superheat, Temperature Field, Flow Field, Casting Billet, Numerical Simulation

运用流体力学分析软件, 建立双辊冷却低过热度稳态浇铸模型, 并对其进行了数值模拟, 结果发现冷却辊可有效降低浇铸钢液的过热度, 同时可以使钢液顺利浇入结晶器。

1 数学模型

1.1 控制方程

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

动量守恒方程:

$$\rho \frac{\partial(u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S \quad (3)$$

式中: H - 材料的热焓, 等于显热和潜热之和: $H = h + \Delta H$, 而材料的显热 $h = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p dT$, h_{ref} 为参考焓; T_{ref} - 参考温度; C_p - 定压热容, 材料的潜热 $\Delta H = \beta L$ (β 的值在 0 ~ 1 变化); \vec{v} - 流体速度; S - 源项, 无内

热源时其值为 0。

标准 $k-\varepsilon$ 双方程模型^[1] 对应的湍动能方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{u}) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \text{grad} k \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

湍动能耗散方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{u}) = \nabla \cdot \left[\frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \text{grad} \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon}{k} \varepsilon \quad (5)$$

其中: $\mu_{\text{eff}} = \mu + \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$

$$G_k = \mu_t \left[2(\nabla^2 \cdot \vec{u}) + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中: k - 湍动能; ε - 湍动能耗散率; μ_{eff} - 有效粘度系数; G_k - 平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项。根据 Launder 和 Spalding 的推荐值及后来的实验验证, $k-\varepsilon$ 模型常数 $C_1, C_2, C_\mu, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 的取值为: $C_1 =$

1.44、 $C_2 = 1.92$ 、 $C_\mu = 0.09$ 、 $\sigma_k = 1.0$ 、 $\sigma_\epsilon = 1.3$ 。

1.2 模型的建立

选材 45 钢:密度 $7\ 100\ \text{kg/m}^3$, 导热系数 $25.0\ \text{W/(m}\cdot\text{k)}$, 比热容 $690\ \text{J/(kg}\cdot\text{K)}$, 动力粘度 $0.006\ 3\ \text{kg/(s}\cdot\text{m)}$, 凝固潜热 $272\ \text{kJ/kg}$, 固相线温度 $1\ 688\ \text{K}$, 液相线温度 $1\ 763\ \text{K}$, 浇铸过热度为 $30\ \text{K}$ 。结晶器横截面 $150\ \text{mm}\times 150\ \text{mm}$, 高度 $800\ \text{mm}$, 有效长度 $700\ \text{mm}$, 壁厚 $10\ \text{mm}$, 图 1(a) 中钢液入口水力

口的人口速度;(2)出口速度等于拉坯速度;(3)将结晶器液面及冷却辊上平面位置液面处理为自由液面,并设为压力入口,且垂直于钢液面的速度分量设为 0,即: $\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = v = 0$;(4)在结晶器壁面处,采用无滑移边界条件,对壁面附近粘性支层中的流体采用壁面函数法计算,钢液与结晶器壁面的换热系数^[4]为 $12\ \text{kW/(m}^2\cdot\text{K)}$;(5)对冷却辊的壁面采用滚动边界,冷却辊的转速由浇铸速度确定,冷却辊通冷却水,需要施加对流换热边界条件,取换热系数^[5]为 $2.5\ \text{kW/(m}^2\cdot\text{K)}$;(6)浇铸水口壁处绝热。

2 模拟结果的分析

模拟计算了拉坯速度分别为 $0.9, 1.2, 1.5\ \text{m/min}$ 时结晶器内钢液在流场温度场耦合作用下的流场温度场和凝固场状况,发现在不同拉速下,相同结晶器内的钢液流动方式很相似,而双辊冷却低过热度浇铸和浸入式水口浇铸结晶器内钢水的流动和温度变化差别很大。现以 $1.2\ \text{m/min}$ 为例,比较两种浇铸情况下结晶器内流场、温度场及凝固场的分布状态。

2.1 流场的分析

由图 2(a)可知,经冷却辊冷却的钢液注入结晶器形成向下的冲击流(该冲击流在结晶器内为主流股),其中在自由液面以下 $250\ \text{mm}$ 位置处向下冲击主流股与向上回旋流的分界明显,产生的一次上旋回流涡对自由液面有一定的冲击作用,但影响不大;这个回流对夹杂物的去除有一定的影响,同时输送热量有利于保护渣的熔化;且向下的流股可以打断凝固前沿的柱状晶,形成新的形核驱动力,扩大等轴

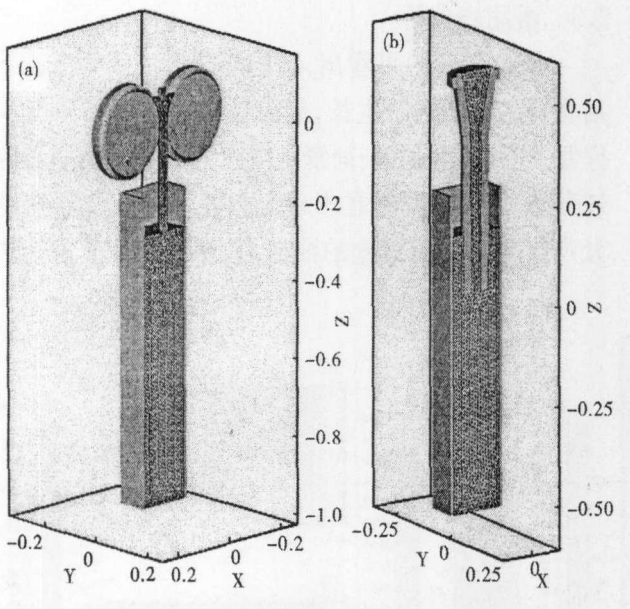


图 1 模拟模型及网格图:(a)双辊冷却;(b)浸入式水口
Fig.1 Simulation model and grid pattern: (a) two rollers cooling; (b) immersed nozzle

直径 $20\ \text{mm}$, 辊子出口直径 $30\ \text{mm}$, 钢液与辊子的接触高度 $72\ \text{mm}$, 钢液从辊子出口位置到结晶器内熔池液面的距离 $270\ \text{mm}$; 图 1(b) 中浸入式水口入口直径 $96\ \text{mm}$, 出口直径 $30\ \text{mm}$, 水口浸入深度 $150\ \text{mm}$, 取二分之一进行分析。

1.3 假设条件

本模型对结晶器内钢液的流动作了以下假设^[2,3]: 结晶器内钢液的流动为稳态粘性不可压缩流动; 不计结晶器液面的波动, 把液面设置为自由液面; 钢液在凝固过程中只考虑热传导、热对流而不考虑热辐射; 忽略传热对流动的影响; 忽略因密度变化引起的自然对流; 钢液在流动过程中只受质量力(重力)的作用; 忽略结晶器振动及锥度等因素的影响。

1.4 边界条件

(1)根据铸速和流量平衡确定水

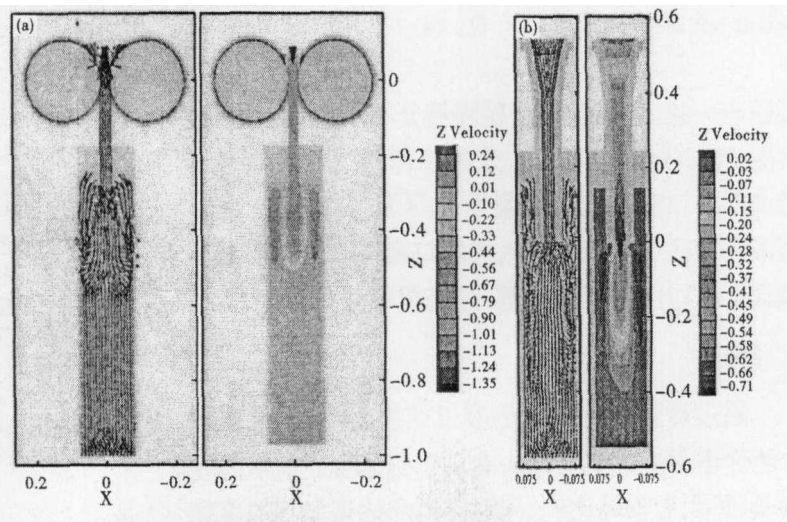


图 2 结晶器中心纵截面的流场矢量图和云图:(a)双辊冷却;(b)浸入式水口
Fig.2 Flow field vector pattern and cloud atlas at longitudinal section of mold: (a) two rollers cooling; (b) immersed nozzle

晶的形成范围,有利于改善铸坯的质量。

由图 2(b)可知,经浸入式水口浇铸的钢液在惯性流的作用下流动速度逐渐增加,在水口的出口位置速度达到最大,结晶器内钢液在该深处产生大量漩涡,一方面不利于该位置处凝固壳的形成,同时这些漩涡对自由液面也有一定的扰动作用。另外从水口流出的钢液由于结晶器内液体的阻碍速度逐渐减小,该主流股的冲击深度大致为水口出口截面以下 300~400 mm 位置处,这一冲击主流股对结晶器壁处的凝固壳有一定的冲击作用,致使凝固壳的厚度分布不均匀,并且也不利于夹杂物的去除。

2.2 温度场的分析

由于冷却辊的冷却作用,图 3(a)中注入结晶器的钢液温度降低,过热度变小,结晶器内钢液在 1.2 m/min 拉速下过热度降到 14.7 K(中间包出钢温度

为 1 793 K,过热度 30 K),且自由液面位置处钢液的平均温度降为 1 777.7 K。同时比较图 3(a)和图 3(b)可知,双辊冷却低过热度浇铸下结晶器内钢液温度场明显比浸入式水口浇铸下结晶器内钢液温度场分布均匀;结晶器角部温度最低,铸坯中心温度最高,由温度场条图可知,图 3(a)中最高温度低于图 3(b),而最低温度高于图 3(b),所以双辊冷却低过热度浇铸结晶器内钢液的温度场梯度明显变小,且均匀程度明显提高。

2.3 凝固场分析

由图 3(c,d)可看出,双辊冷却低过热度浇铸下结晶器内坯壳均匀生长,越是远离结晶器自由液面位置,坯壳厚度越厚;而浸入式水口浇铸下结晶器内坯壳凹凸不平,同时在水口出口位置由于流场速度大产生对结晶器器壁的冲击力,所以在该位置处的

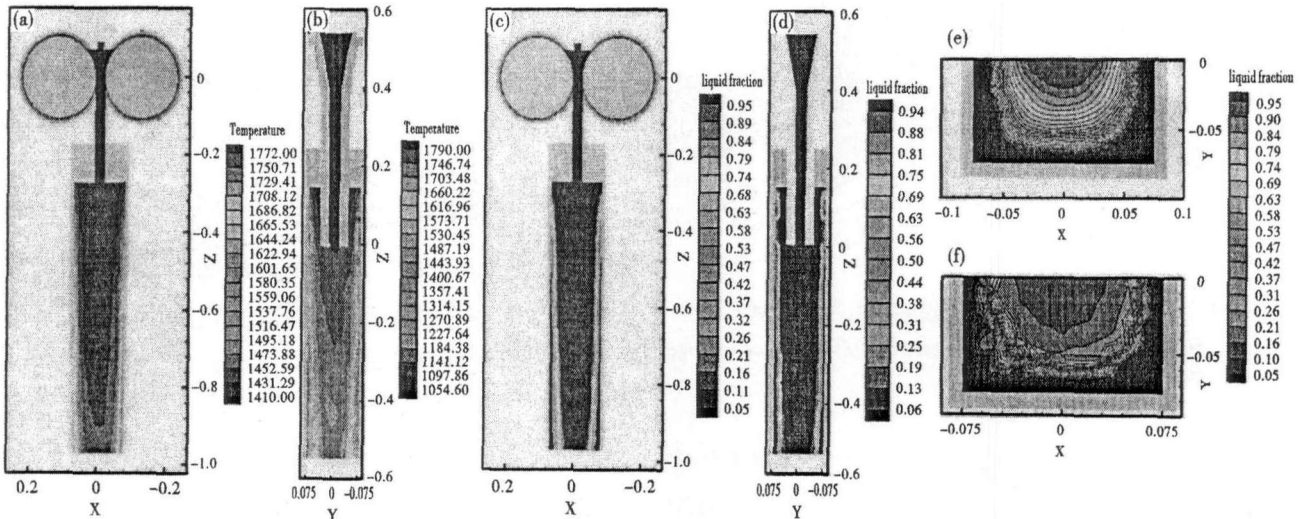


图 3 结晶器中心纵截面的温度场(a,b);结晶器中心纵截面凝固场(c,d)和结晶器出口截面凝固场(e,f)的分布:(a)(c)(e)双辊冷却;(b)(d)(f)浸入式水口

Fig.3 Distribution of temperature field (a, b) and solidification field (c, d) at center longitudinal section of mold, and solidification field at exit section of mold (e, f): (a) (c) (e) two rollers cooling; (b) (d) (f) immersed nozzle

凝固有一缺口出现,致使凝固场分布不连续。另外,由图 3(e,f)也可以看出,双辊冷却低过热度浇铸下结晶器出口截面上不但凝固壳厚度分布均匀,同时固液两相区也明显比浸入式水口浇铸下结晶器出口截面上的固液两相区要宽,且液相率分布均匀。

3 结论

通过冷却辊冷却的钢液过热度降低,结晶器钢水流冲击深度达 250 mm,有利于打断凝固前沿的柱状晶,扩大等轴晶比例,同时结晶器内流场和温度场分布均匀,且明显改善铸坯凝固状况。

山西省青年基金资助项目(2008021035)

参考文献

- 1 萧泽强,朱苗勇. 冶金过程数值模拟分析技术的应用. 北京:冶金工业出版社,2006
- 2 崔小朝,晋艳娟,张柱,等. 板坯连铸内外复合冷却流场和温度场耦合数值模拟. 钢铁研究学报,2007,19(8):14
- 3 崔小朝,刘梓才,宋静,等. 内外复合冷却高效结晶器内钢水三维流场数值模拟. 特殊钢,2005,26(1):9
- 4 陈家祥. 连续铸钢手册. 北京:冶金工业出版社,1991
- 5 崔小朝,史荣,曾建潮. 变形体凝固传热熔式有限元数学模型与过程仿真. 系统仿真学报,1997,9(4):29
- 6 崔小朝,王宥宏,林金宝,等. 一种内外复合冷却高效连铸结晶器. 中国专利:2004,2,0016771.1

张俊婷(1981-),女,硕士生,助教,2003年中北大学(华北工学院)毕业,液态金属流动性和传热研究。

收稿日期:2007-11-30