

280 mm × 380 mm 铸坯结晶器内钢水凝固与传热仿真研究

任子平 姜茂发

(东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004)

摘要 通过 CFX4.4 商用软件对 280 mm × 380 mm 连铸坯结晶器内 70L 钢水流动传热、凝固过程进行了数值模拟, 评估浸入式水口结构对结晶器综合冶金效果的影响。结果表明, 随两侧孔浸入式水口插入深度和倾角的增加, 坯壳厚度由宽面中心到角部逐渐减薄, 但厚度比较均匀, 高温区面积随之增大, 位置下移; 拉坯速度增加, 宽面到窄面的坯壳厚度均有明显减薄。

关键词 280 mm × 380 mm 连铸坯 两侧孔浸入式水口 凝固与传热 数值模拟

A Study on Simulation of Heat Transfer and Solidification of Molten Steel in Mold for 280 mm × 380 mm Billet Casting

Ren Ziping and Jiang Maofa

(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract The flow heat transfer and solidification process of 70L molten steel in a mold for 280 mm × 380 mm billet casting have been numerically simulated by a commercial software CFX4.4 to review the effect of immersed nozzle structure on comprehensive metallurgy effect. The results showed that with increasing immersed depth and obliquity of two side immersed nozzle, the thickness of cast billet shell continuously decreased from middle of wide surface to edge angle but the thickness was rather uniform, and the area of high temperature zone increased which location was moving down; and with increasing casting rate, the thickness of cast billet shell at wide and narrow surface decreased obviously.

Material Index 280 mm × 380 mm Cast Billet, Two Side Immersed Nozzle, Heat Transfer and Solidification, Numerical Simulation

以鞍钢大方坯连铸结晶器为对象, 在商业软件 CFX4.4 的平台上对结晶器内钢水流动传热、凝固过程进行了数值模拟。针对两孔浸入式水口在不同的侧孔倾角、浸入深度和拉速下, 数值模拟对结晶器内钢水流动传热、凝固作出了较为详细的预报。

1 数学模化和边界条件

对大方坯连铸结晶器内钢水流动和传热凝固行为的研究, 主要考察以下三部分金属: (1) 结晶器内的钢水和坯壳; (2) 浸入式水口内腔中的钢水; (3) 结晶器下方铸坯坯壳及其包围的钢水。

模拟计算涉及的基本方程^[1,2]有: (1) 连续方程; (2) 时均化的 Navier-Stokes 方程; (3) 标准 $k-\epsilon$ 模型。

基于湍流时均化的 Navier-Stokes 方程和能量守恒方程, 构造能够分别描述液相、固相以及两相区金属流动和传热凝固的统一结构模型。其要点

包括: (1) 假设结晶器内各部分金属的密度相同, 按单相流计算液固相金属的运动, 由呈空间分布的液相率 f_l 的大小来界定金属凝固状态; (2) 采用标准 $k-\epsilon$ 模型描述液相钢水的湍流特性; (3) 两相区中流体承受的附加阻力按多孔介质模型处理; (4) 能量方程中将两相区凝固潜热的释放作为源项处理。

湍流流动边界条件为:

(1) 水口壁面上所有速度分量均为零; k 和 ϵ 在近壁区域采用壁函数进行处理;

(2) 坯壳壁面上除拉坯方向速度分量按拉坯速度设定外, 其它速度分量均设为零; k 和 ϵ 在近壁区域采用壁函数处理;

(3) 垂直于对称面或自由表面的法向速度分量为零, 对称面上的 k 和 ϵ 取 $\partial\phi/\partial x_i = 0$ (x_i 为垂直于对称面坐标方向), 自由表面上的动量方程和 k, ϵ 按零剪切力滑移壁面处理;

(4) 进口处的法向速度按进口流量的平均值

设定, k, ϵ 分别取如下两式的计算值:

$$k_{inlet} = 0.01 \cdot u_{inlet}^2 \quad (1)$$

$$\epsilon_{inlet} = k_{inlet}^{3/2} / r_0 \quad (2)$$

(5) 按坐标局部单向化的要求, 取出口法线正方向上所有变量的梯度为零。

传热边界条件为:

(1) 结晶器冷却条件由铸坯表面平均热流密度 Q 给出, 考虑到冷却收缩使铸坯角部形成了较大的气隙, 结晶器铜板上热流密度被设定为由中心向角部呈线性变化的形式, 角部热流密度为中心的 80%; 计算区域涉及二冷区上部喷水冷却的部分, 按照二冷配水制度以换热系数 h 的形式给出冷却条件;

(2) 取 $\partial T / \partial x_i = 0$ (x_i 为垂直于对称面或自由表面的坐标方向), 即绝热条件;

(3) 水口壁面按绝热进行处理;

(4) 进口处钢水温度为常数, 取相应钢种的浇铸温度 T_0 , 等于钢水液相线温度 T_l 与过热度之和 ΔT ;

$$T_0 = T_l + \Delta T \quad (3)$$

(5) 按坐标局部单向化的要求, 取出口法线正方向上的温度梯度为零。

2 研究工作涉及的钢种及其物性参数

本研究工作选择 70L 钢种作为研究对象, 研究工作涉及的物性参数如表 1 所示。

表 1 70L 钢热物性参数

Table 1 Heat physical properties of steel 70L

项目	参数
液相线温度 $T_l / ^\circ\text{C}$	1 471
固相线温度 $T_s / ^\circ\text{C}$	1 209
浇铸温度 $T_c / ^\circ\text{C}$	1 496
分子粘度 $\mu / \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	0.006 2
密度 $\rho / \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	7 000
凝固潜热 $L / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$	2.7×10^5
比热 $C_p / \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	678

3 大方坯连铸机结晶器和浸入式水口参数

方坯连铸机结晶器基本设备工艺参数见表 2。两孔浸入式水口(图 1), 工作端为两开孔 180° 对称分布式, 开孔倾角为 30°。实际应用时, 两孔水口各开孔在竖直面上与结晶器铜板保持垂直, 控制水口浸入深度为 175 ~ 225 mm。

表 2 方坯连铸机结晶器基本设备工艺参数

Table 2 Basic process parameters of mold of billet concaster

项目	参数
冶金长度/m	27.12
铸坯断面尺寸/mm × mm	280 × 380
结晶器工作长度/mm	800
连铸机工作拉速/ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	0.8 ~ 1.2
中间包容量/t	30
流数	4
流间距/mm	1 650
铸坯定尺长度/m	5.5 ~ 7.5
矫直方式	三点矫直
二次冷却方式	水冷 + 水雾
电磁搅拌(M-EMS)	有
铸流保护	有
铸机平均作业率/%	90
铸机连浇铸罐数	15
平均浇铸时间/min	40
生产能力/ $10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$	110

CFX

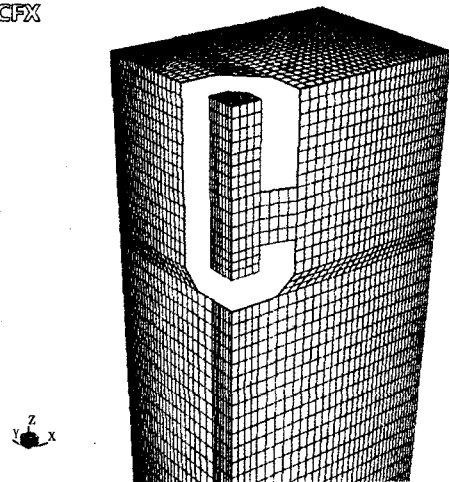


图 1 两孔浸入式水口工作端简化结构图

Fig.1 Schematic of structure of two side immersed nozzle service area

4 计算结果与讨论分析

研究两孔浸入式水口结构及工艺参数对结晶器内钢水流动与传热凝固影响的计算方案:(1) 拉速恒为 0.8 m/min, 水口侧孔角度不变, 调节水口插入深度;(2) 拉速恒为 0.8 m/min, 水口插入深度不变, 改变水口侧孔角度;(3) 保持水口侧孔角度不变, 拉速由 0.8 m/min 变到 1.2 m/min。

针对两孔浸入式水口插入深度在 175 ~ 225 mm 的条件, 结晶器内钢水冷却和凝固相关计算结果分别示于图 2、图 3。其中图 2 为中心面 X-Z 上的温度分布, 图 3(a) 为结晶器出口面上的液相率分布, 图 3(b, c) 为结晶器窄墙壁面上的温度分布。

图 2 所示温度分布来看, 采用两孔浸入式水

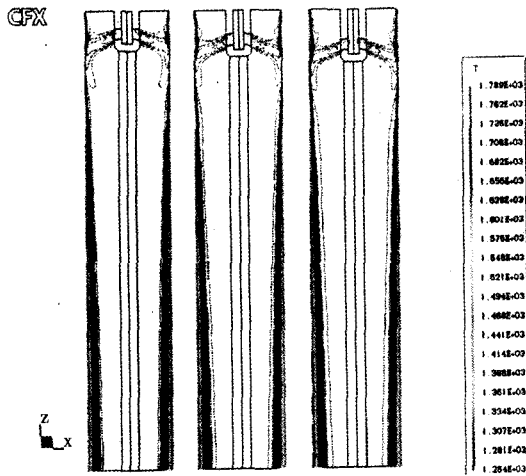


图 2 结晶器中心面 X-Z 温度分布:拉速 0.8 m/min,倾角 10°,水口插入深度 175 ~ 225 mm

Fig.2 Distribution of temperature of mold centre surface X-Z: cast speed- 0.8 m/min, obliquity- 10°, immersed depth- 175 ~ 225 mm

口,结晶器宽度方向存在两个高温区,并呈现出沿着结晶器窄面向下延伸。水口射流对结晶器窄墙的冲击作用比较强,可使凝固坯壳熔化,导致凝固坯壳的不均匀。

图 3(a)显示了结晶器出口端面上凝固坯壳形状,坯壳的厚度存在明显的差异,随着插入深度和倾角的增加,坯壳厚度存在由宽面中心到角部逐渐减薄,但厚度比较均匀。

从图 3(b,c)反映的钢水凝固情况来看,在相同的冷却条件下,拉坯速度的增加明显导致铸坯整体发育减缓(厚度减小,且随插入深度和倾角的增加而下移)。水口高温钢水射流对坯壳的冲刷在温度分布图上显得非常清楚,表现出了冲击产生的“热点”的形状、大小和位置,其中随拉坯速度增加和吐出口倾斜角度的增加,“热点”面积增大,

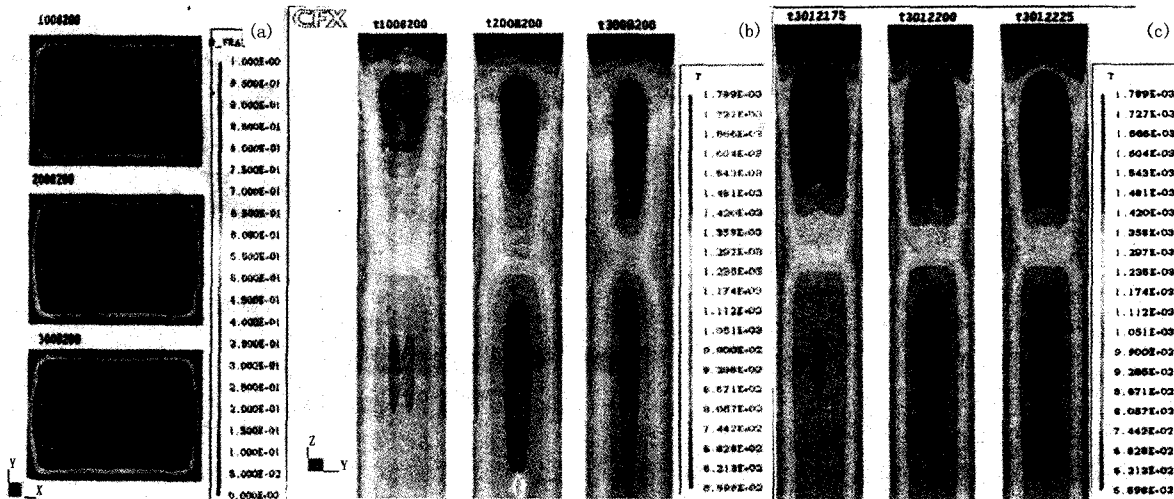


图 3 (a) 结晶器出口液相率分布:拉速 0.8 m/min,倾角 10° ~ 30°,插入深度 200 mm; (b,c) 结晶器窄墙温度分布:

(b) 拉速 0.8 m/min,倾角 10° ~ 30°,插入深度 200 mm; (c) 拉速 1.2 m/min,倾角 30°,插入深度 175 ~ 225 mm

Fig.3 (a) Distribution of liquid rate of mold exit surface: cast speed- 0.8 m/min, obliquity- 10° ~ 30°, immersed depth- 200 mm; (b,c) Distribution of temperature of mold narrow wall: (b) cast speed- 0.8 m/min, obliquity- 10° ~ 30°, immersed depth- 200 mm; (c) cast speed- 1.2 m/min, obliquity- 30°, immersed depth- 175 ~ 225 mm

位置也有所下移。事实上,“热点”正是坯壳受水口射流冲击而被高温钢水熔化的部位。

5 结论

(1) 水口射流对结晶器窄墙的冲击作用较强,可使凝固坯壳熔化,初生凝固坯壳发育不均匀。

(2) 结晶器出口断面上坯壳整体发育受插入深度的影响较小,受侧孔倾角、拉速的影响很大。

(3) 水口倾角增大时,坯壳厚度存在由宽面中心到角部逐渐减薄,但厚度比较均匀。高温区面积随之增大,位置也有所下移。

(4) 拉坯速度的增加明显导致铸坯整体发育减缓,坯壳厚度在宽面到窄面均有明显的减薄。

参考文献

1 于 勇,仇胜桃.连续铸钢过程数学物理模拟.北京:冶金工业出版社,2001
2 陈 雷.连续铸钢.北京:冶金工业出版社,1993

任子平(1964-),男,高级工程师,北京科技大学硕士毕业,从事冶金技术研究。

收稿日期:2005-09-21