

## 板坯结晶器内流场作用下钢液传热凝固的数值模拟

许长军<sup>1</sup> 汪琦<sup>1</sup> 胡林<sup>1</sup> 刘良元<sup>2</sup>

(1 辽宁科技大学材料与冶金学院,鞍山 114051; 2 鞍钢集团朝阳鞍凌钢铁有限公司,朝阳 122000)

**摘要** 以钢厂 230 mm × 2 150 mm 板坯连铸机为研究对象,通过三维数值模拟分析了拉坯速度(0.8 ~ 2.3 m/min)、水口浸入深度(100 ~ 200 mm)、铸坯宽度(1 100 ~ 2 150 mm)对结晶器内流场作用下的钢液传热、凝固特征的影响。结果表明,拉坯速度等参数变化不会改变结晶器内钢液流动的基本特征,但会显著影响到结晶器内窄边坯壳的发育状况。水口浸深、铸坯宽度和拉坯速度的变化对于结晶器熔池液面钢水过热度也有不同程度影响:小断面,大拉速和水口浸入深度较小时熔池液面过热度较大,最大达 6.2 K。

**关键词** 结晶器 数值模拟 传热 凝固

## Numerical Simulation of Heat Transfer and Solidification of Liquid at Action of Flow Field in Mold for Slab

Xu Changjun<sup>1</sup>, Wang Qi<sup>1</sup>, Hu Lin<sup>1</sup> and Liu Liangyuan<sup>2</sup>

(1 School of Material and Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051;  
2 Anling Iron and Steel Co Ltd, Angang Group, Chaoyang 122000)

**Abstract** With a 230 mm × 2 150 mm slab caster at steelmaking works as an object of study, the effect of cast speed (0.8 ~ 2.3 m/min), immersion depth of submerged nozzle (100 ~ 200 mm) and slab width (1 100 ~ 2 150 mm) on heat transfer and solidification of liquid at action of flow field in mold has been analyzed by 3 dimensional numerical simulation. Results show that the change of casting speed and other parameters has no influence on basic characteristics of liquid flowing in mold, but can effect the development of slab shell at narrow side in mold. The change of immersion depth of submerged nozzle, slab width and casting speed effects overheat extent of liquid on surface of bath in mold in varying degrees, i. e. with smaller cross section, larger casting speed and smaller immersion depth of submerged nozzle, the overheat extent of liquid on surface of bath is larger, maximum value is up to 6.2 K.

**Material Index** Mold, Numerical Simulation, Heat Transfer, Solidification

结晶器被认为是连铸机的“心脏”,钢液通过结晶器将完成由液相向固相转变的第一步,结晶器内钢液的传热、凝固与连铸坯的产量、质量有着密切联系<sup>[1,2]</sup>。为此,研究者们针对不同工况条件下结晶器内钢液的流动<sup>[1-9]</sup>以及传热、凝固<sup>[7-9]</sup>过程进行了数值模拟研究。

### 1 计算方法

数值模拟工作在 CFD 商业软件上进行。计算时所用数学模型包括湍流的  $\kappa$ - $\epsilon$  双方程,连续性方程、动量方程和能量方程<sup>[10]</sup>。模拟时不考虑结晶器内的化学反应及其铜板的振动,假设钢水液面高度及金属流入、流出量均保持不变,忽略保护渣对钢液产生的各种应力以及弯月面和自由表面的变形,固、液相金属均按牛顿不可压缩稳态流体处理。因体系几何关系和动力条件的对称性,实际空间体系的 1/4 被用作模拟计算的对象。采用 6 面体划分网格,浸入

式水口吐出孔附近适当加密网格。浸入式水口工作端结构及其网格划分见图 1。

模拟计算所涉及的主要参数见表 1。计算时按各节点质量残差之和、进出口质量流量差小于  $10^{-3}$  控制<sup>[6-8]</sup>。设置边界条件时,对称面、自由表面和水口壁面边界条件按绝热处理,入口速度通过拉坯速度、铸坯断面和入口截面积按质量守恒关系计算确定。

### 2 研究结果与讨论

#### 2.1 板坯连铸结晶器内钢液流动的基本特征

由于结晶器宽度方向、浸入式水口两侧的对称性,故给

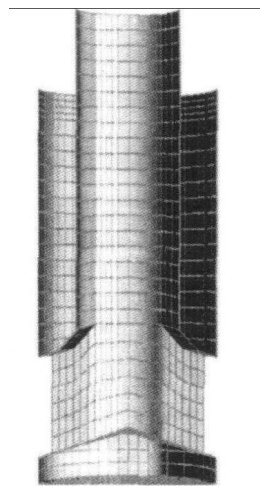


图 1 浸入式水口工作端结构

Fig. 1 Working tip structure of submerged nozzle

表1 数值模拟计算参数  
Table 1 Calculation parameters for numerical simulation

项目	参数	项目	参数	项目	参数
结晶器长度/mm	900	浇铸钢种	Q235	水口浸深/mm	100~200
垂直段长度/mm	2 561	浇铸温度/K	1 815	水口长度,内径/mm	890,100(80)
铸坯厚度/mm	230	液相线/K	1 790	水口侧孔倾角/°	15
铸坯宽度/mm	1 100~2 150	固相线/K	1 743	水口吐出孔形状	椭圆形
拉坯速度/(m·min <sup>-1</sup> )	0.8~2.3	过热度/K	25	吐出孔面积/mm <sup>2</sup>	4 860
				底部形状	凸锥形

出了结晶器中心垂直截面钢水流场半侧分布图(图2)。由图2可见,钢液从水口吐出孔喷射到结晶器窄面坯壳后分离成两个部分,分别在上、下两个方向各形成两个大旋涡。上旋涡是由钢液射流到坯壳后折向上方的流股造成的,其范围、流速都比较小,它直接影响到熔池液面的起伏波动、过热度及夹杂物的上浮情况,其表面速度和液面过热度对保护渣的熔化快慢起决定性作用;而下旋涡是由钢液射流到坯壳后折向与向上循环方向相反的流股造成的,其范围比较大,基本占据了结晶器高度上水口下方的部分,同时流速、冲击深度也比较大,其强度随着向下距离的延伸而减弱。拉坯速度、铸坯宽度和水口浸深的变化没有改变结晶器内钢液流态的基本特征。

### 2.2 板坯结晶器内钢液流场作用下的温度分布

图3示出了水口浸深为100 mm、铸坯宽度为1 100 mm、不同拉速时的结晶器中心垂直截面钢液的温度分布。由图3可见,1 815 K的钢液从水口吐出孔射出以后与周围钢液迅速混合并进行对流换热,冲击结晶器窄面坯壳时的温度可达1 803 K左右,水口射流以外其他绝大部分钢液的过热都因强烈的对流和湍流扩散而消失,温度在液相线(1 790 K)上基本保持恒定。拉速提高,水口吐出钢液的射流速度与强度增大,导致对结晶器凝壳(尤其是对窄面凝壳)的冲刷作用愈加强烈,结晶器内高温钢液的驱动面积和熔池平均温度增加,窄面凝壳厚度减薄程度比宽面大(图4a)。水口

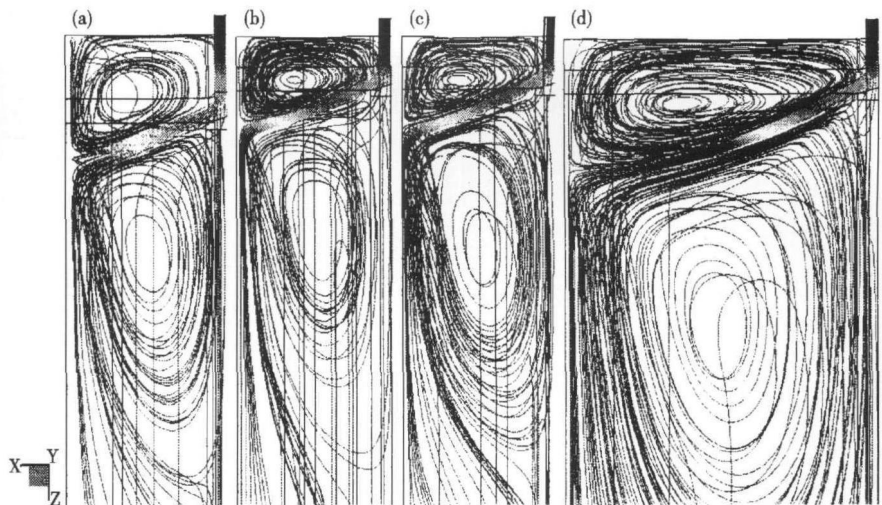


图2 结晶器中心垂直截面钢水流场分布,铸坯宽度/mm-水口深度/mm-拉坯速度/(m·min<sup>-1</sup>):(a)1 100-200-0.8;(b)1 100-100-0.8;(c)1 100-100-2.3;(d)2 150-100-0.8  
Fig.2 Distribution of fluid flow field on center vertical section of mold, slab width /mm-nozzle depth /mm- casting speed (m·min<sup>-1</sup>):(a)1 100-200-0.8;(b)1 100-100-0.8;(c)1 100-100-2.3;(d)2 150-100-0.8

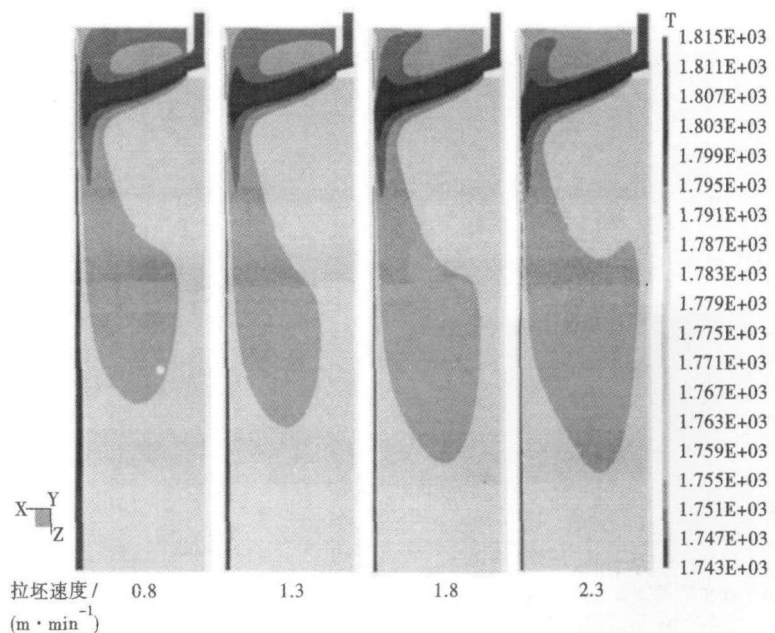


图3 不同拉速时结晶器中心垂直截面钢液温度(K)分布  
Fig.3 Distribution of liquid temperature (K) on center vertical section of mold with different casting speed

浸入深度增加,熔池内靠近窄面附近的高温区域随旋涡涡心一同下移,且其高温区面积增大并向水口中心

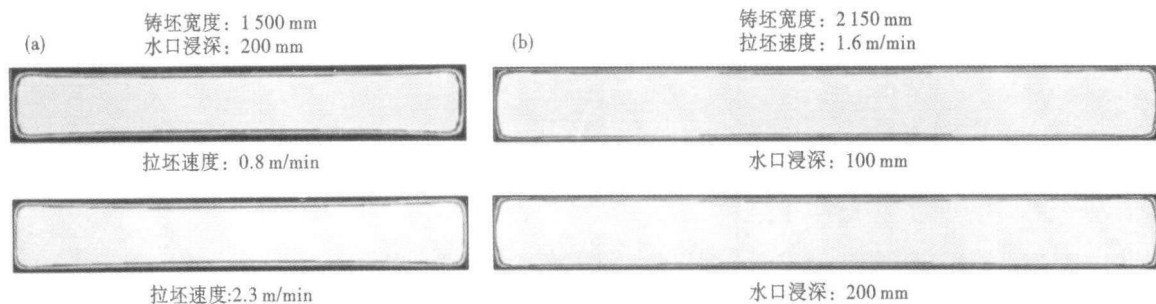


图4 结晶器出口断面凝固坯壳发育状况  
Fig.4 Growth status of solidifying shell on mold exit section

方向延伸,窄面凝壳厚度略有减薄,而宽面凝壳厚度无明显变化(图4b)。

从初生凝固坯壳质量的角度而言,结晶器熔池液面钢水过热度大有两方面作用:(1)有利于促进保护渣熔化并向结晶器壁与铸坯凝固坯壳之间渗入形成

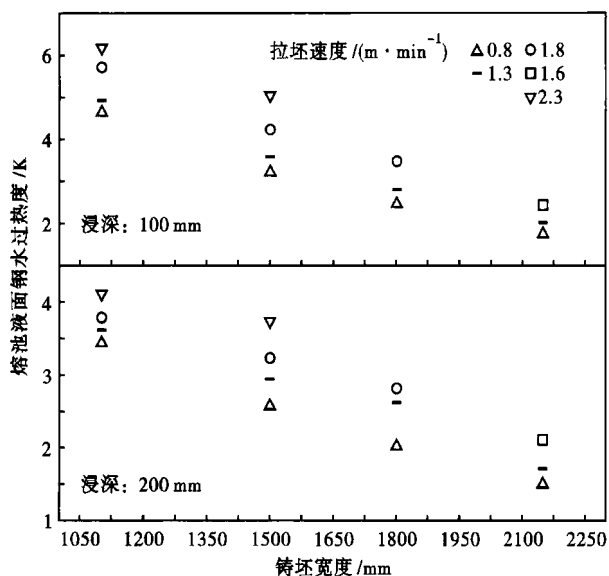


图5 结晶器熔池液面钢水过热度与工艺参数的关系  
Fig.5 Relation between overheat extent of liquid on surface of bath in mold and process parameters

渣膜,使铸坯凝壳尽可能地被润滑,保证连铸坯表面质量和连铸工艺的正常进行<sup>[11,12]</sup>; (2)有助于提高弯月面的传热量,减缓弯月面处坯壳生长速度,有利于整个连铸坯的均匀生长。由图5可见,水口浸深、铸坯宽度一定时,熔池液面波动随拉速提高而愈加强烈,熔池液面钢水过热度增大,最大可达6.2 K,而此时的拉坯速度为2.3 m/min;水口浸深、拉坯速度一定时,铸坯宽度增加,上旋涡涡心与熔池液面距离增加,熔池液面波动变缓,高温钢水得不到及时更新,钢水最大过热度降低,最低为1.5 K;同样,拉坯速度、铸坯宽度一定时,水口浸深增加,结晶器熔池高温区下移,熔池液面过热度降低,小断面、大拉速时差值较大,最大可达2 K。

### 3 结论

(1)拉坯速度、铸坯宽度等变化并不会改变结晶器内钢液流态的基本特征,但对于结晶器内的传热、凝固行为却有很大影响,尤其是结晶器窄面凝壳厚度会随拉坯速度的提高而呈现出显著减薄趋势。

(2)研究条件下小断面、大拉速,水口浸深较小时,熔池液面钢水过热度较大,最大可达6.2 K。

### 参考文献

- 张义才. 浸入水口对结晶器内温度场的影响. 现代冶金, 2009, 37(3): 19
- Hideko Nakada, Masahiro Susa, Yusuke Seko, et al. Mechanism of Heat Transfer Reduction by Crystallization of Mold Flux for Continuous Casting. ISIJ International, 2008, 48(4): 446
- 雷方, 赫冀成, 李宝宽. 板坯连铸机结晶器内钢液流动的数值分析. 东北大学学报, 1994, 15(4): 408
- 武文斐, 郑坤灿, 李义科. 数值模拟研究钢液入口速度对结晶器流场的影响. 铸造技术, 2003, 24(2): 143
- 沈昶, 周俐. 异型坯结晶器流场的数值模拟. 安徽工业大学学报, 2004, 21(1): 4
- 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
- 张胤, 樊俊飞, 张立, 等. 拉坯速度对结晶器内钢液流动和温度分布的影响. 过程工程学报, 2009, 9(1): 317
- 刘从港, 周书才, 杨治立. 方坯连铸结晶器凝固传热的有限元数值模拟. 冶金能源, 2009, 28(4): 21
- 赵连刚, 张慧. 连铸结晶器内过程综合冶金行为的数值模拟. 钢铁研究学报, 2007, 19(5): 29
- 陶文铨. 数值传热学. 第2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001
- 李桂军, 张桂芳, 陈永, 等. 连铸钢水过热度对大方坯凝固的影响. 钢铁钒钛, 2005, 26(1): 1
- 蔡开科. 连铸结晶器. 北京: 冶金工业出版社, 2008

许长军(1981-), 男, 博士研究生, 炼钢、连铸工艺研究。

收稿日期: 2010-02-01