

板坯连铸结晶器钢液流场的数值模拟和优化

贾凌锋 乐可襄

(安徽工业大学冶金与资源学院, 马鞍山 243002)

摘要 用 CFD 三维计算软件, 采用 $k-\varepsilon$ 双方程模型在给定的数值计算条件下, 对 900 mm 高的板坯连铸结晶器内钢液流场进行了数值模拟, 研究结晶器工艺参数对结晶器液面湍动能和窄边冲击压力的影响。结果表明: 对于断面尺寸为 220 mm × 900 mm 的板坯结晶器, 水口插入深度为 180 mm, 水口倾角为向下 15°, 拉坯速度为 1.6 ~ 1.8 m/min 时, 结晶器内钢液具有较好的流动方式。

关键词 板坯连铸 结晶器 湍动能 冲击压力 数值模拟

Numerical Simulation of Flow Field in Mould for Slab Continuous Casting and Optimal Operation

Jia Lingfeng and Yue Kexiang

(Metallurgy and Resources School, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243002)

Abstract Fluid field of molten steel in mould with 900 mm height for slab continuous casting has been simulated using $k-\varepsilon$ double equation model under numerical calculation conditions by a 3 dimensional mathematical software CFD to study effect of process parameters of mould on distribution turbulent kinetic energy at liquid level in mould and impact pressure at narrow side of mould. Results showed that for cross section 220 mm × 900 mm slab mould, the molten steel in mould had better flowage condition as immersion depth of nozzle was 180 mm with exit angle 15° and casting speed 1.6 ~ 1.8 m/min.

Material Index Slab Continuous Casting, Mould, Turbulence Kinetic Energy, Impact Pressure, Numerical Simulation

1 模型的建立及计算方法

本实验计算模型是针对宝钢梅山钢铁公司炼钢厂 1# 板坯连铸结晶器设计的, 铸坯断面为 (210 ~ 230) mm × (800 ~ 1 320) mm; 结晶器高 900 mm, 浸入式水口角度为向下 15°; 水口插入深度 160 ~ 190 mm; 拉坯速度 1.4 ~ 2.0 m/min。由于结晶器模型沿中心线左右对称, 故建立模型只取原模型的一半, 网格划分采用多块粘贴, 即将整个复杂的计算区域分为若干个小区域, 每个区域都是规则的形状, 单独划分网格。

钢水在结晶器内的流动是一个复杂的湍流流动过程, 描述该过程的三维稳态不可压缩问题的基本数学表达式见文献[1]。

边界和初始条件为: (1) 水口钢液入口速度等于钢液浇注速度, 即: $u_x = u_y = 0, u_z = v_{inlet}$, 湍流参量 $k_{inlet} = 0.01 v_{inlet}^2, \varepsilon_{inlet} = \frac{k^{1.5}}{(d_0/2)}$ 。式中: u_x, u_y, u_z 分别为速度矢量在 x, y, z 方向的分量/(m · s⁻¹); v_{inlet} 入口速度/(m · s⁻¹); k_{inlet} 入口湍动能/(m² ·

s⁻²); ε_{inlet} 入口湍动能耗散率/(m² · s⁻³); (2) 水口出口处在浸入式水口出口截面; (3) 在结晶器钢液面、模型出口处和对称面上, 各变量的法向微商都等于零。法向速度、切向速度的法向微商及 k, ε 的微商都等于零; (4) 假定在结晶器壁面包括浸入式水口壁面, 垂直于壁面的速度分量设为零; 平行于壁面的速度、压力及 k, ε 采用滑移边界; 与壁面相邻的节点上, 平行于壁面的速度分量 k, ε 由壁面函数确定。

2 计算结果及分析

2.1 结晶器流场基本特征

结晶器宽面、窄面和高度方向分别为 X、Y 和 Z 轴, 结晶器底面中心为坐标原点。由图 1 可以看出, 结晶器内钢液流动实际上是有限空间中的射流, 从水口流出的主流股冲击到窄面后分为上升流和下降流, 然后在主流股上下两侧各形成一个回旋区。上回旋区强度较大, 影响夹杂物上浮、液面波动及卷渣, 其强度取决于水口倾角、拉坯速度、水口插入深度。下部回旋区强度相对较弱。

2.2 影响液面湍动能的因素和液面湍流分布

联系人: 乐可襄, 教授, 安徽工业大学冶金与资源学院, 马鞍山 243002

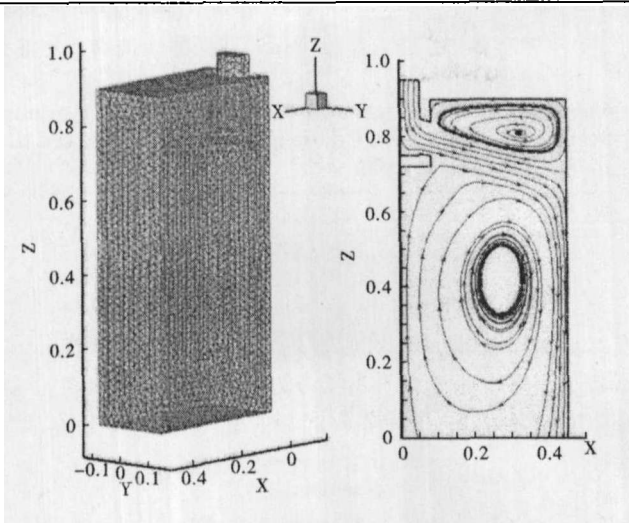


图 1 结晶器网格划分和流动场迹线图

Fig. 1 Schematic of grid partition and trace of flow field in mould

2.2.1 拉坯速度

由图 2 可见,钢液面的湍动能随着拉速的增大而明显增大,湍动能最大值均出现在靠近结晶器窄边区域^[2]。因为当拉速增大时,水口的出口钢流量增大,动能增大,从而增大向上流股对液面的扰动。因此,在高拉速条件下,结晶器液面会变得不稳定,更容易产生过大的液面速度而导致液面保护渣的覆盖不均匀。因此,拉速控制在 1.6 ~ 1.8 m/min 的流场比较合理。

2.2.2 水口倾角

由图 3(a) 可见,随着水口倾角的增加,结晶器液面湍动能明显减小。当水口倾角增加以后,水口出口钢液流股向下流动的趋势加强,对窄边的冲击点下移,流股冲击到窄边后向上流动的动能会减少,从而液面湍动能和流速都降低,液面的波动减弱。但水口倾角不能太大,否则不利于保护渣熔化和夹

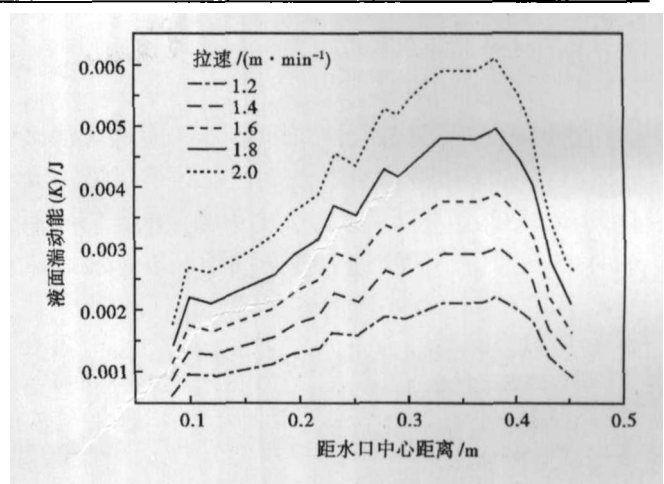


图 2 拉坯速度对结晶器液面湍动能的影响,倾角 15°,插入深度 180 mm,断面 220 mm × 900 mm

Fig. 2 Effect of casting speed on turbulent kinetic energy at liquid level in mould, exit angle 15°, immersion depth of nozzle 180 mm, cross section 220 mm × 900 mm

杂物的上浮。适宜的倾角为 15°。

2.2.3 水口插入深度

由图 3(b) 可见,随着水口插入深度的增加,结晶器液面湍动能明显减小,液面速度也相应减小。当插入深度过小时 (≤ 140 mm),流股冲击窄边后向上流动的距离较短,动能较大,液面扰动剧烈。随着插入深度增加,水口出口流股冲击深度增加,使上回流区域空间增加,结晶器自由液面处波动幅度明显减小,液面流速减小,这有利于液面的稳定,减少保护渣的卷入。但是,插入深度过大 (≥ 220 mm),结晶器内下部循环区整体下移,造成热中心下移,上部不利于保护渣的熔化,影响坯壳与结晶器壁的润滑和传热;下部不利于凝固坯壳的均匀生长,引起表面裂纹,严重时会发生漏钢。插入深度过大,使液相穴深处夹杂物含量较大,夹杂物不容易上浮。因此,插

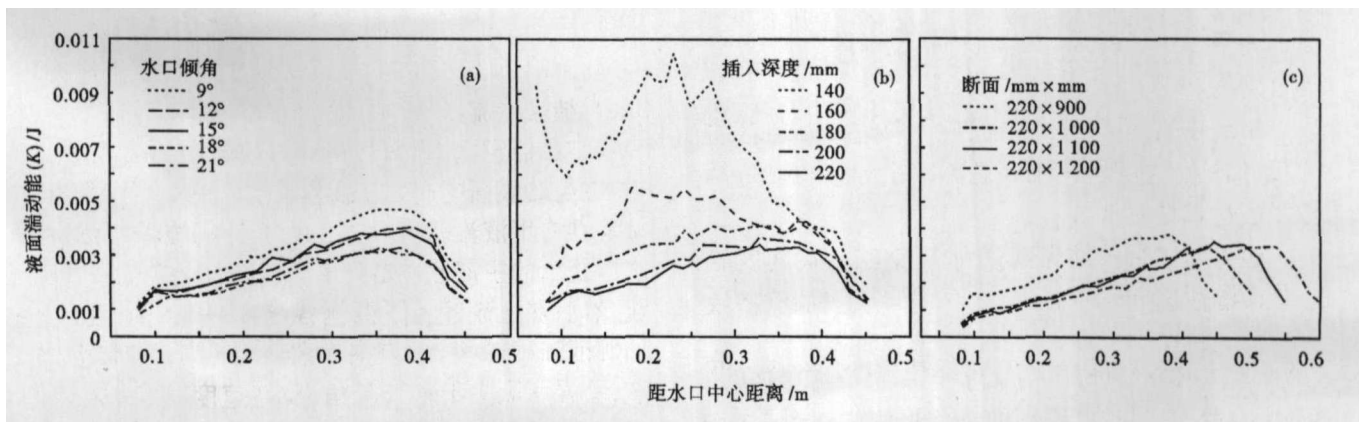


图 3 水口倾角(a- 插入深度 180 mm,拉速 1.6 m/min),水口插入深度(b- 水口倾角 15°,拉速 1.6 m/min)和拉速(c- 水口倾角 15°,插入深度 180 mm)对结晶器液面湍动能的影响

Fig. 3 Effect of nozzle exit angle (a- immersion depth 180 mm, casting speed 1.6 m/min), immersion depth (b- exit angle 15°, casting speed 1.6 m/min) and casting speed (c- exit angle 15°, immersion depth 180 mm) on turbulent kinetic energy at liquid level in mould

入深度在 180 mm 左右较为理想。

2.2.4 结晶器的断面

由图 3(c) 可见,断面不同时,湍动能最大值均在结晶器宽面靠近窄边区域,表明在该区域液面波动最大。结晶器液面速度过大会引起液面卷渣和钢水的裸露;而过小的液面速度会使结晶器钢液面热交换不足,不利于保护渣的熔化,引起润滑不良。一般认为,结晶器液面最大速度在 0.1 ~ 0.3 m/s 范围内,铸坯表面缺陷最少^[3]。从表 1 可知,断面 220 mm × (900 ~ 1 200) mm 时,结晶器液面最大速度 0.20 ~ 0.25 m/s。

2.3 结晶器分布及影响窄边冲击压力的因素

窄边注流冲击压力大,注流对初生凝固坯壳的冲刷剧烈,引起冲击点处凝固坯壳生长不均匀。而且结晶器内高温区下移,不利于保护渣的熔化,引起润滑不良,高温区过低会造成坯壳太薄,引起鼓肚或

表 1 各断面在拉速 1.6 m/min 时液面最大湍动能和最大速度

Table 1 Maximum turbulent kinetic energy and maximum velocity at liquid level in mould with casting speed 1.6 m/min for different slab section

断面尺寸/(mm × mm)	最大湍动能(K)/J	最大速度/(m · s ⁻¹)
220 × 900	0.003 892 24	0.238 073
220 × 1 000	0.003 452 11	0.222 803
220 × 1 100	0.003 651 52	0.234 516
220 × 1 200	0.003 477 63	0.227 777

拉漏。注流冲击深度小时,液面波动和液面湍动能增大,易引起卷渣和保护渣分布不均。

2.3.1 水口倾角

由图 4(a) 计算结果可见,随着水口倾角的增大,流股对窄边的冲击压力减小,冲击深度加深。

2.3.2 插入深度

图 4(b) 可见,插入深度增加,窄边冲击压力明

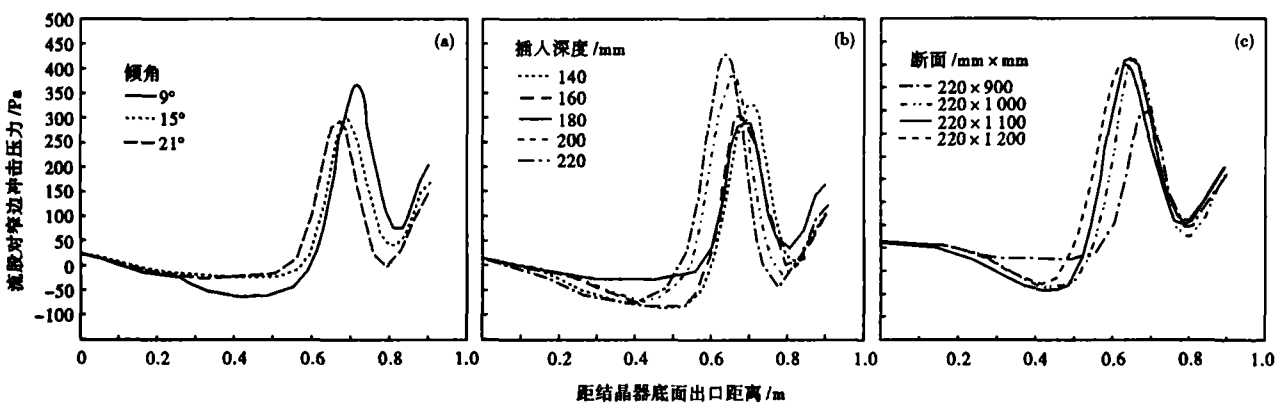


图 4 水口倾角(a)、插入深度(b)和结晶器断面尺寸(c)对窄边冲击压力的影响

Fig.4 Effect of nozzle exit angle (a), immersion depth (b) and cross section size of mould (c) on impact pressure at narrow side of mould

显增加,其最大冲击点位置即冲击深度增加,强度不断加大。导致冲击深度增加的原因是由于插入深度的增加而导致的冲击点的下移。冲击深度增加就更有利于结晶器液面的稳定。在实际生产中若液面波动过大,可根据情况增加插入深度。

2.3.3 断面

图 4(c) 为水口倾角向下 15°, 插入深度 180 mm, 拉速 1.6 m/min 时,断面对结晶器窄边冲击压力的影响。由图 4(c) 可知,拉速和出口角度不变,断面增大时,水口出口钢流量增大,流股对窄面的冲击压力增大,同时流股的冲击深度增大。但宽面大于 1 100 mm 时,窄边所受压力变化不很明显。

3 结论

合理的结晶器水口倾角为 15°、插入深度为 180

mm 和拉坯速度为 1.6 ~ 1.8 m/min。运用模型可对连铸结晶器的操作工艺参数进行优化,使连铸结晶器内钢液流动更为合理,以达到生产高质量连铸坯的目的。

参考文献

- 1 贾凌锋,孙于萍,乐可襄.板坯连铸中间包钢液流场的数值模拟和操作优化.特殊钢,2006,27(2):34
- 2 马范军,文光华,李刚.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 Kubota J. Mechanism of Level Fluctuation and Mold Powder Catching in Slab Continuous Casting at High Speeds. Sixth International Iron and Steel. Congress Proceeding, Nagoya, 1990:356

贾凌锋(1981-),男,在读硕士研究生,从事冶金、热能、冶金过程仿真节能技术研究。

收稿日期:2007-01-22