

水口倾角对 150 mm × 380 mm 矩形坯结晶器流场的影响

马艳杰¹ 李秋京¹ 王 昂² 李 力¹ 刘迎娟¹

(1 华北理工大学迁安学院, 迁安 064400; 2 华北理工大学冶金与能源学院, 唐山 063000)

摘 要 为减少矩形坯角裂、漏钢等缺陷, 提高铸坯质量, 进行改变浸入式水口出口倾角角度以优化结晶器流场的研究。通过 Fluent 软件, 对 150 mm × 380 mm 矩形坯结晶器钢液流动和凝固耦合过程进行数值模拟, 得出水口倾角(15° ~ 30°)对表面流速、表面湍动能和冲击深度的影响。结果表明, 随水口倾角增加, 平均表面流速下降, 冲击深度增加, 有利于稳定液面; 但随倾角增加, 液面波动小, 不利于钢液搅拌和夹杂物去除, 下部回旋区过低, 坯壳变薄, 容易产生漏钢; 综合得出, 150 mm × 380 mm 铸坯的水口倾角宜为 25°。应用结果得出使用优化水口后, 铸坯中夹杂物总数减少 36%。

关键词 150 mm × 380 mm 矩形坯 水口倾角 结晶器 流场 数值模拟

Effect of Nozzle Angle on Flow Field in Mould for 150 mm × 380 mm Rectangular Bloom Casting

Ma Yanjie¹, Li Qiuqing¹, Wang Ang², Li Li¹ and Liu Yingjuan¹

(1 College of Qianan, North China University of Science and Technology, Qianan 064400;

2 College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan 063000)

Abstract In order to reduce the defect such as corner crack of rectangular bloom and breakout to increase the quality of bloom, the study of optimization of mould flow field by changing nozzle angle of submerged nozzle has been carried out. The numerical simulation of liquid flow and solidification coupling process in mould for 150 mm × 380 mm rectangular bloom has been performed by using Fluent software to get the effect of nozzle angle (15° ~ 30°) on surface flow rate, surface turbulent kinetic energy and impact depth. Results show that with increasing nozzle angle the average surface flow rate decreases, the impact depth increases being favourable to stabilize the liquid surface; but with increasing nozzle angle, the liquid surface fluctuation is small, it is unfavourable to stirring liquid and removing inclusions in steel, and in this case the circle round region in lower part of mould is too low and the bloom shell is thinning easily forming breakout; to sum up it is obtained that the suitable nozzle angle for 150 mm × 380 mm bloom casting is 25°. Application results obtain that the total inclusion numbers with using optimized nozzle decrease by 36%.

Material Index 150 mm × 380 mm Rectangular Casting Bloom, Nozzle Angle, Mould, Flow Field, Numerical Simulation

矩形坯广泛应用于建筑结构用螺纹钢筋, 窄热轧钢带, 普通线材、高速线材。由于本身宽厚比介于方坯和板坯之间, 所以生产过程中钢坯既会出现角裂漏钢, 又会出现中心裂纹和粘结漏钢。优化结晶器内流场可以有效降低水口对初生坯壳的冲击, 稳定钢液面, 促进夹杂物上浮排出^[1-2]。

根据断面不同, 矩形坯会使用具有不同倾角、不同侧开面积、不同收口底部结构的侧开型浸入式水口^[3-6]。同一种断面的矩形坯, 使用不同倾角的水口, 结晶器内钢液面高度和稳定程度, 钢液的冲击深度, 结晶器下部回旋区高度, 以及对结晶器器壁产生的冲击压力都会受到不同程度的影响。

钢厂生产的断面为 150 mm × 380 mm 的矩形坯存在严重的结晶器卷渣现象, 为了解决这一问题, 通过 Fluent 软件, 对结晶器内钢液流动和凝固耦合过程进行数学建模, 分析研究不同水口倾角对结晶器

内流场的影响, 优化结晶器结构, 减少夹杂物含量, 提高矩形坯质量。

1 结晶器流动和凝固耦合的数学模型

1.1 基本假设

进行 CFD 计算时需要对实际状态进行一定的假设, 这些假设的建立应当是以不影响最终结果为前提的, 经过查询大量的文献和实际模拟经验^[5,7], 对模型进行了如下所述的假设:

- (1) 结晶器内钢液流动粘性不可压缩流动;
- (2) 忽略钢液成分在钢液中的不同分布;
- (3) 不考虑结晶器振动等因素对流场的影响;
- (4) 忽略结晶器弧度的影响。

1.2 边界条件

边界条件设置有以下几点:

- (1) 自由表面上。

结晶器液面上由于存在有液态的保护渣所以表面的切应力是很小的,采用简化原则,忽略其所造成的影响。所以对液面处使用固壁边界并定义切应力为0。

(2)其他固相壁面。

由于不考虑结晶器振动所带来的影响,所以对固相壁面认为是静止状态,采用无滑移边界处理。

(3)入口。

入口的速度垂直于所在的面,视为稳定的一维流动。忽略铸坯凝固后的密度差,结晶器入口速度 $V_{入口} (m \cdot s^{-1})$ 由结晶器拉速计算,公式如式(1):

$$V_{入口} = \frac{V_{拉速} \times S_{断面}}{S_{入口}} \quad (1)$$

式中: $S_{入口}$ - 水口入口面积/ m^2 ; $S_{断面}$ - 矩形坯断面面积/ m^2 ; $V_{拉速}$ - 矩形坯拉速/ $(m \cdot s^{-1})$ 。

并假定入口截面上速度分布都相同。

(4)出口。

采用自由出流的条件,各变量的法向梯度为0。

(5)近壁区域。

在与壁面相邻的粘性层中,由于湍流的雷诺数 Re 很低,必须要考虑分子粘性的影响,流动可能处于层流状态,所以应该对所用的湍流模型必须加以修正。假设在壁面附近粘性层以外的地方,无量纲速度服从对数规律。

2 模拟方案

使用三维建模软件建立结晶器的三维模型,为减少节点数,加快计算收敛速度,使用1/4模型进行结构网格划分,计算中使用标准 $k-\varepsilon$ 模型,进壁面采用标准面壁函数,水口结构如图1所示。

实验以 40 t 中间包,断面 150 mm × 380 mm 结晶器内流场为研究对象,讨论水口倾角对流场的影响。

首先固定浸入深度为 100 mm,拉速为 1.5 m/min 主要分析水口倾角分别为 15°, 20°, 25°, 30° 时,表面流速和表面温度对窄面的冲击深度的影响。

3 计算结果与讨论

表1为不同倾角下的自由液面参数,从表1中数据可以看出,随着倾角

的增加自由液面的最大表面流速逐渐降低,倾角每增加 5°,最大表面流速分别减小 27%, 23%, 18%, 冲击深度也随着倾角的增加而逐渐增加,但增加的数值不按照线性比例。

图2为不同倾角下的自由液面处的湍动能分布云图,液面湍动能主要表征结晶器自由液面的波动

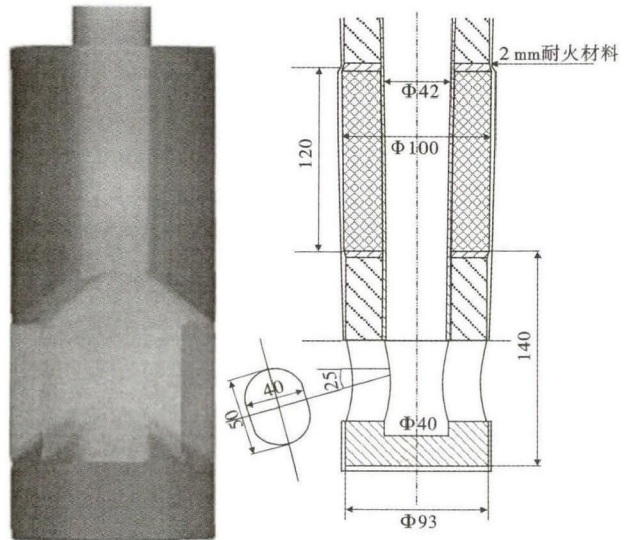


图1 结晶器水口结构示意图
Fig.1 Schematic drawing of structure of nozzle in mould

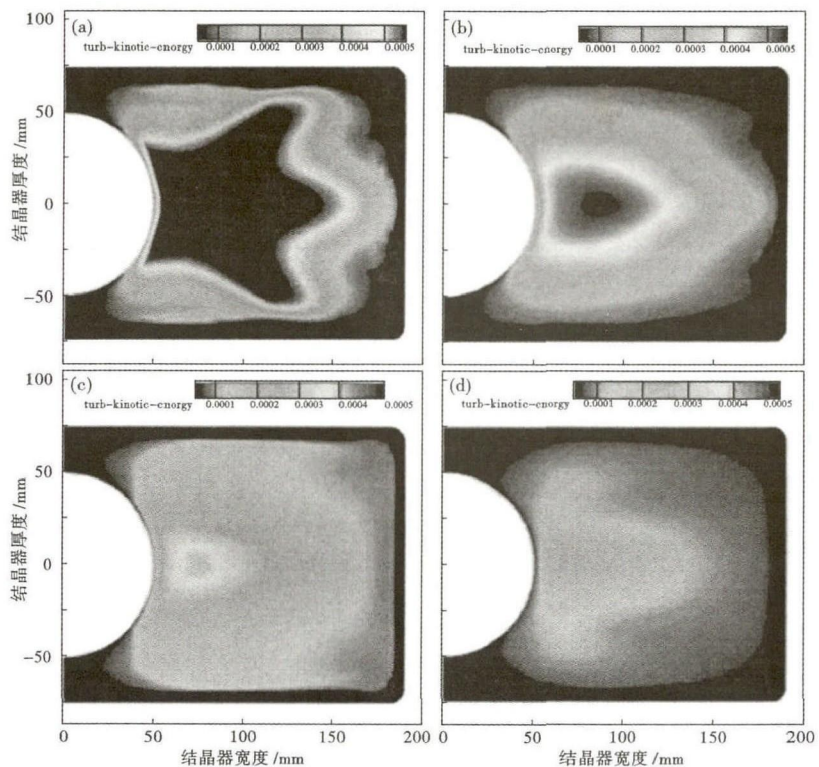


图2 自由液面处的湍动能分布云图,水口倾角 15°(a), 20°(b), 25°(c), 30°(d)
Fig.2 Cloud diagram of distribution of turbulent kinetic energy at free surface with nozzle angle 15° (a), 20° (b), 25° (c) and 30° (d)

表 1 倾角 15° ~ 30° 自由液面参数

Table 1 Free surface parameters with nozzle angle 15° ~ 30°

倾角	表面流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	表面湍动能/ ($10^{-4} m^2 \cdot s^{-2}$)	冲击深度/ mm
15°	0.080 3	3.61	175
20°	0.064 0	2.75	180
25°	0.051 1	1.31	195
30°	0.039 5	1.22	220

状况,湍动能较大的地方说明液面的波动较为剧烈,合理的湍动能应当平均分布在结晶器的自由液面上,在不产生卷渣的前提下(即保证表面流速在合理范围之内)尽量地提高。

从图 2 中可以看出,随着水口倾角的增加,表面的湍动能逐渐减小,并且湍动能的较大区域集中在液面的 1/4 处。

图 3 为不同水口倾角下的自由液面温度与速度由结晶器窄面向中心到水口处的速度变化曲线,从图 3 中看出,倾角不同影响着液面的温度与速度分

布,温度由窄面中心到水口处逐渐降低,温度差值较小。而速度先增加后减小,在断面的 1/4 处最大。

图 4 为不同倾角下的流场流线图。从图 4 中看出,随着倾角的增加,下部回旋区逐渐降低,分别为 330,360,400,450 mm。同时发现,随着倾角的增加,上部回旋区也逐渐增大,较大的上部回旋区有利于钢液均匀温度和成分,并且有效的分散液面上的速度分布,使其产生较大高速区同时不产生过大的速度极限值,使速度的变化平缓,有利于提高液面的平均温度,促进保护渣的熔化,形成均匀的液渣层。

4 生产中的应用及效果

150 mm × 380 mm 的 Q235 矩形坯存在严重的结晶器卷渣现象,研究采用元素示踪法来判断矩形坯中非金属夹杂物来源。结晶器内利用保护渣中 Na_2O 和 K_2O 作为示踪剂。取水口优化前后的矩形坯样进行大样电解,对得到大型夹杂物进行成分

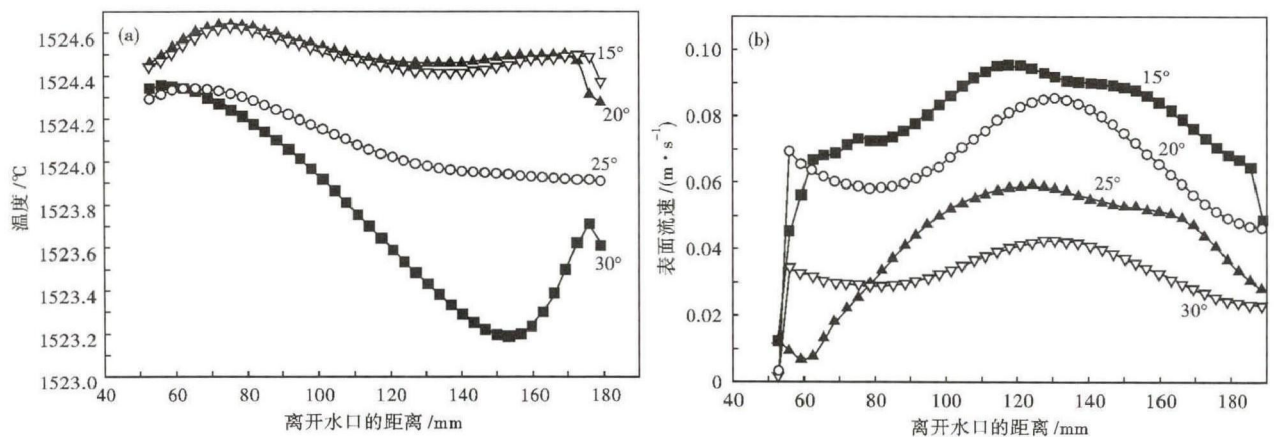


图 3 倾角 15° ~ 30° 时窄面中心到水口处的温度 (a) 和表面流速 (b) 变化曲线

Fig. 3 Change curves of temperature (a) and surface flow velocity (b) from narrow face center to nozzle with nozzle angle 15° ~ 30°

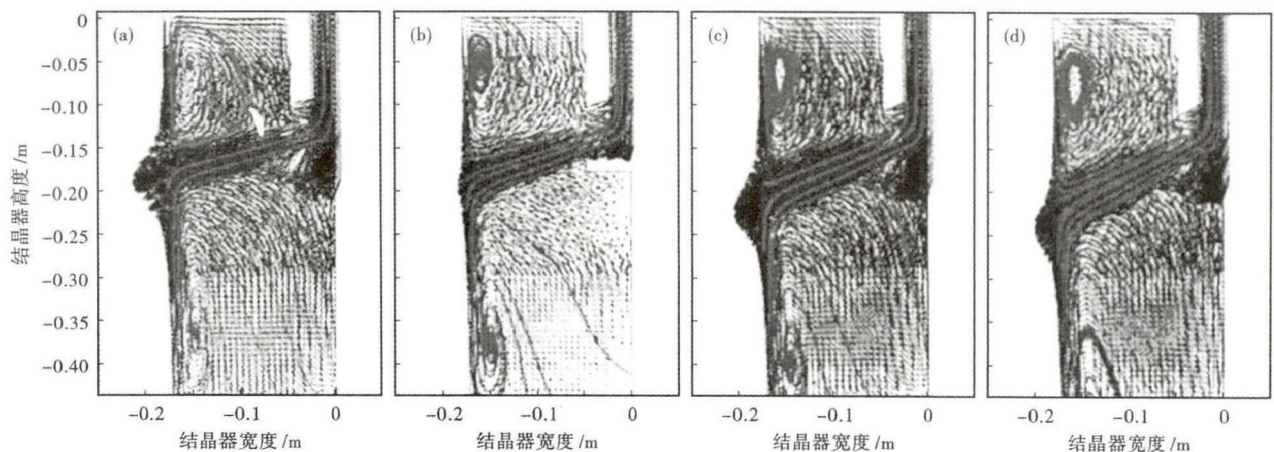


图 4 结晶器纵截面的流线图,倾角 15° (a), 20° (b), 25° (c) 和 30° (d)

Fig. 4 Flow line chart of longitudinal section of mould flow field, nozzle angle: 15° (a), 20° (b), 25° (c) and 30° (d)

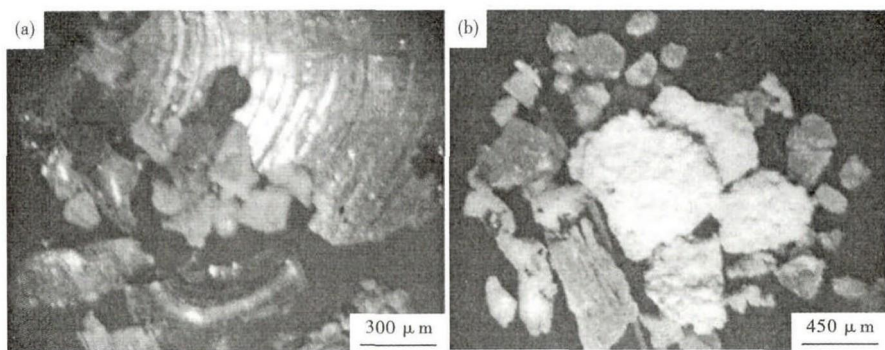


图 5 水口倾角优化前(a)和优化后(b)矩形坯中大型夹杂物形貌

Fig.5 Morphology of large inclusions in casting bloom before (a) and after (b) nozzle angle optimization

分析。

工艺优化前矩形坯中大型夹杂物形貌如图 5(a)所示,含有大量的尺寸较大的黑色和黄色透明不规则块状夹杂及少量的球形夹杂。通过扫描电镜及能谱分析夹杂物成分,其中,矩形坯中含 K、Na 的夹杂物数量占总夹杂物数量的 71.4%,表明结晶器存在严重的卷渣现象。

工艺优化后矩形坯中大型夹杂物形貌如图 5(b)所示,含有不规则块状黄色透明夹杂及少量的球形夹杂。工艺优化后矩形坯中夹杂物含 K、Na 的数量占总夹杂物数量的 35%,减少约 36%,结晶器卷渣现象得到明显改善。

5 结论

(1)随着水口倾角的增加,平均表面流速下降,较小的倾角能增加表面活跃度。

(2)随着水口倾角的增加,冲击深度增加,冲击点下移,形成的上部回旋区到达自由液面的钢液减少,动能减小,有利于稳定液面。

(3)倾角增加,下部回旋区降低,上部回旋区增

加,有利于均匀钢液成分和温度,促进保护渣熔化。

(4)倾角增加,结晶器液面波动小,不利于钢液搅拌和夹杂物上浮排除,下部回旋区过低,坯壳变薄,容易产生漏钢。

(5)实际生产中,经过工艺优化的结晶器,卷渣现象得到明显改善,矩形坯中来源于结晶器保护渣的含 K、Na 的大型夹杂物,减少了约 36%。

(6)倾角对结晶器表面流速影响很大,对于断面为 150 mm × 380 mm 的结晶器,建议使用倾角为 25°。

参考文献

- [1] Thomas B G, Mika L J, Najjar F M. Simulation of Fluid flow inside a Continuous Slab-Casting Machine[J]. Metall Trans B, 1990, 21B: 387-400.
- [2] 王维维, 张家泉, 陈素琼, 等. 水口侧孔倾角大方坯结晶器流场和液面波动的影响[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(8): 816-821.
- [3] 张胤, 贺友多, 刘建辉, 等. 板坯连铸机结晶器内流动及传热过程的数学模型[J]. 钢铁研究, 2001(5): 31-34.
- [4] 雷洪, 周骏, 金永丽, 等. 板坯连铸机内钢液流动和夹杂物行为[J]. 工业加热, 2011(1): 44-46.
- [5] 徐海伦, 文光华, 唐萍, 等. 板坯连铸结晶器内非对称流动现象的数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(6): 770-776.
- [6] 肖年根, 倪升起, 付辉杰. 板坯结晶器内钢液综合冶金行为的数值模拟[J]. 钢铁钒钛, 2009, 30(3): 64-67.
- [7] 杜艳平, 杨建伟, 梁爱生, 等. 水口倾角对带钢铸轧结晶器内流场的影响[J]. 太原重型机械学院学报, 2002, 23(3): 64-67.

马艳杰(1988-),女,硕士(2014年河北联合大学),2011年河北联合大学(本科)毕业,凝固理论和钢质量控制研究。
E-mail:lanhudie.20@163.com

收稿日期:2015-11-16

欢迎订阅 2016 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社