

## 水口扩张角对 230mm × 1 300 mm 板坯结晶器流场及氩气泡行为的影响

肖太平<sup>1</sup> 倪红卫<sup>1</sup> 孔勇江<sup>2</sup> 吴扬<sup>1</sup> 张华<sup>1</sup>

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081;

2 武汉钢铁股份有限公司炼钢总厂, 武汉 430083)

**摘要** 利用离散相模型研究水口扩张角(0~12°)对230mm×1300mm板坯结晶器流场及氩气泡行为影响。并用水模型实验进行了验证。结果表明,扩张角增大,能显著减小注流冲击深度及氩气泡在自由液面上浮区域;尤其当扩张角为9°时,结晶器流场较好,自由液面波动较小,有利于夹杂物去除及减轻界面卷渣几率。双流230mm板坯连铸工业性试验表明,安装扩张角9°的水口一流铸坯较安装无扩张角水口的另一流铸坯表面夹渣发生率降低了5.9%~14.8%。

**关键词** 板坯连铸 水口扩张角 数值模拟 水模型 吹氩

## Influence of Nozzle Divergence Angle on Argon Bubble Behavior and Flow Field in Mould for 230 mm × 1 300 mm Slab

Xiao Taiping<sup>1</sup>, Ni Hongwei<sup>1</sup>, Kong Yongjiang<sup>2</sup>, Wu Yang<sup>1</sup> and Zhang Hua<sup>1</sup>

(1 Key Lab for ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Steelmaking Plant, WISCO, Wuhan 430083)

**Abstract** Influence of nozzle side-hole divergence angle (0~12°) on argon bubble behavior and flow field of liquid in mould for 230 mm × 1 300 mm slab has been studied by using discrete phase model, and verified by water model test. Results show that increasing nozzle divergence angle can significantly reduce the impact depth and floating area of argon bubbles at free surface of liquid; especially with divergence angle 9°, the flow field in mould is better and the free surface of liquid is smaller, it is available to remove the inclusions in liquid and reduce the probability of slag entrapment. The double strands 230 mm slab commercial casting results show that as compared with second strand slab without divergence angle nozzle the occurrence of slag entrapment ratio of first strand slab with installed divergence angle 9° nozzle decreases by 5.9%~14.8%.

**Material Index** Slab Casting, Nozzle Side-Hole Divergence Angle, Numerical Simulation, Water Model, Argon Blowing in Mould

结晶器是控制钢液洁净度的最后环节,其内部钢液的流动状态直接影响铸坯的最终质量。研究表明<sup>[1]</sup>,近80%的表面缺陷起源于结晶器,因此,合理的结晶器流场对提高铸坯质量非常重要。结晶器流场的影响因素主要有水口结构参数、水口浸入深度、拉速和吹氩量等<sup>[2,4]</sup>。

钢厂连铸车间有2台双流板坯连铸机,浇铸断面(800~1600)mm×(210~250)mm,投产后,铸坯表面夹渣发生率较高,因此,有必要对结晶器流场进行优化。本研究以铸坯断面230mm×1300mm的结晶器为研究对象,提出水口侧孔扩张角这一概念,即侧孔基本形状不变,两侧向外扩张一个角度,并通过数值模拟的方法研究不同扩张角对结晶器流场、

自由液面卷渣、氩气泡行为的影响。目前,国内针对侧孔扩张角的研究较少,孙云虎等<sup>[5]</sup>提出了通过增大侧孔扩张角来改善结晶器流场,但不同扩张角对结晶器流场的影响还不是很明显。

### 1 数学模型

#### 1.1 流体控制方程

建立模型时,作如下假设:(1)忽略温度、化学反应、结晶器振动及表面渣层等对流场的影响;(2)忽略气泡间作用力,氩气泡尺寸保持不变,氩气泡在入口处分布均匀;(3)气泡为刚性球体,与钢液等温,取1773K<sup>[6]</sup>。

描述了吹氩条件下钢液三维湍流流动的方程包

通讯作者:倪红卫,教授,博士生导师,武汉科技大学材料与冶金学院,武汉430081

E-mail: nihongwei@wust.edu.cn

表 1 钢液与氩气的物理参数

Table 1 Physical parameter of liquid and argon

项目	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	动力粘度/ ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	摩尔质量/ ( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
钢液	7 000	0.006 5	55.85
氩气	0.27	$7.42 \times 10^{-5}$	40

括连续性方程、动量方程,以及气泡运动方程等<sup>[7]</sup>。

### 1.2 边界条件和计算条件

入口采用速度入口,入口速度根据拉速由质量守恒求得,入口湍动能和耗散率的求解方法可参考文献<sup>[8]</sup>;出口为压力出口;氩气泡离散相模型计算中,壁面为反射边界条件,自由液面、入口及出口为逃逸边界条件,气泡速度与钢液流速相同<sup>[9-10]</sup>;结晶器壁面采用无滑移边界条件。由于结晶器的对称形,计算域取结晶器体积的 1/4。钢液和氩气的物

理参数如表 1。

### 1.3 求解方法

计算过程中,湍流模型采用标准  $k-\varepsilon$  模型,采用 SIMPLE 算法,一阶迎风格式;时间步长设为 0.005 s,流场计算时间为 300 s<sup>[11]</sup>;选用非稳态颗粒跟踪及耦合计算的方法求解氩气泡运动方程,采用随机轨道模型跟踪粒子轨迹。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水口扩张角对结晶器流场的影响

在计算过程中,拉速固定为 1.2 m/min,吹氩量 10 L/min,浸入深度 150 mm。由图 1 和图 2 可看出,扩张角为 0°时,注流在垂直方向的宽度较有扩张角的大,注流冲击深度较深,上回流区域较宽;上回流区靠近水口处钢液向上的流速较大,说明氩气

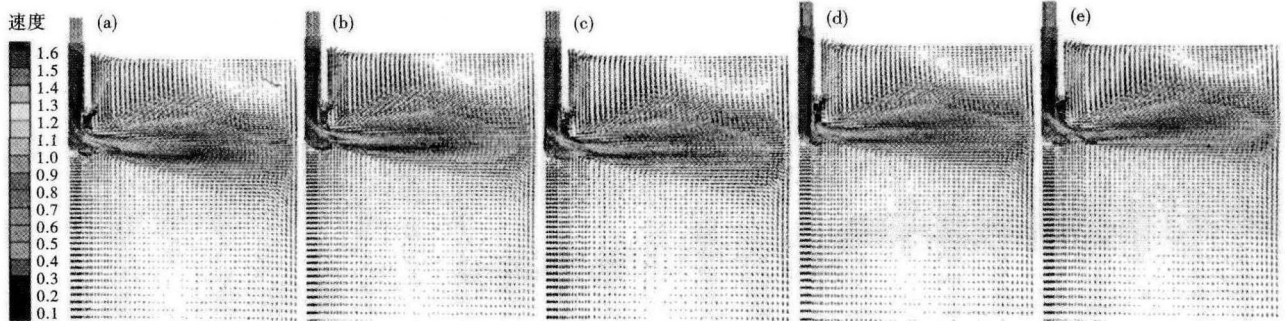


图 1 水口侧孔扩张角 0°(a), 3°(b), 6°(c), 9°(d) 和 12°(e) 时结晶器流场

Fig. 1 Flow field in mould with nozzle side-hole divergence angle 0° (a), 3° (b), 6° (c), 9° (d) and 12° (e)

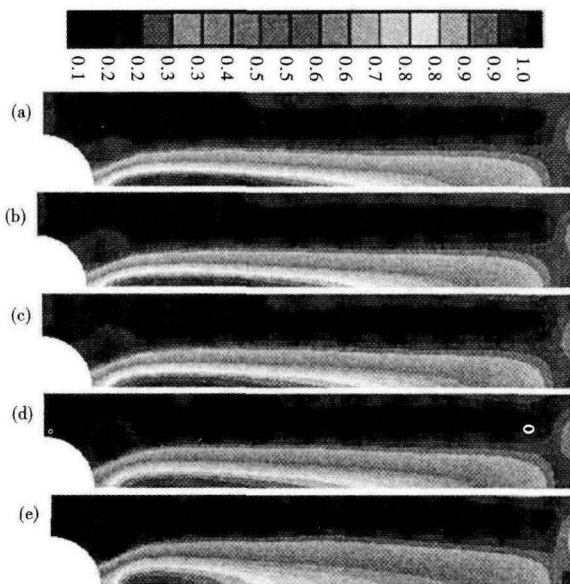


图 2 结晶器自由液面下 250 mm 处钢液流动状态:水口侧孔扩张角 0°(a), 3°(b), 6°(c), 9°(d) 和 12°(e)

Fig. 2 Liquid flow status at depth distance 250 mm from liquid free surface in mould with nozzle side-hole divergence angle 0° (a), 3° (b), 6° (c), 9° (d) and 12° (e)

泡对此处扰动剧烈;随着扩张角的增大,注流在水平方向上的宽度逐渐增大,在垂直方向宽度逐渐减小,这是由于扩张角增大使得钢液出侧孔的流量增大;射流平均速度有所减小,射流集束程度有所下降,冲击深度减小。扩张角由 3°增加到 9°的过程中,上回流区略有减小,上回流窝心略微向窄面偏移,上回流区的减小,有助于减轻气泡被坯壳捕获的几率;扩张角增大到 12°时,上回流区明显减小,注流出侧孔后,几乎垂直冲向窄面,这对凝固坯壳的形成不利,氩气泡也将会在水口附近聚集,增大了界面卷渣的几率。

由图 2 可知,扩张角增大时,注流到达结晶器窄面时呈发散趋势,有助于减轻注流对窄面的冲刷,对凝固坯壳的均匀生长有利;当扩张角增大至 12°时,注流几乎充满整个结晶器断面,注流对结晶器前后壁面的扰动加强,这将可能导致结晶器液面波动加强,增加卷渣几率。综合上述分析,扩张角 9°时,注流对窄面冲刷较小,液面波动较小,流场较理想。

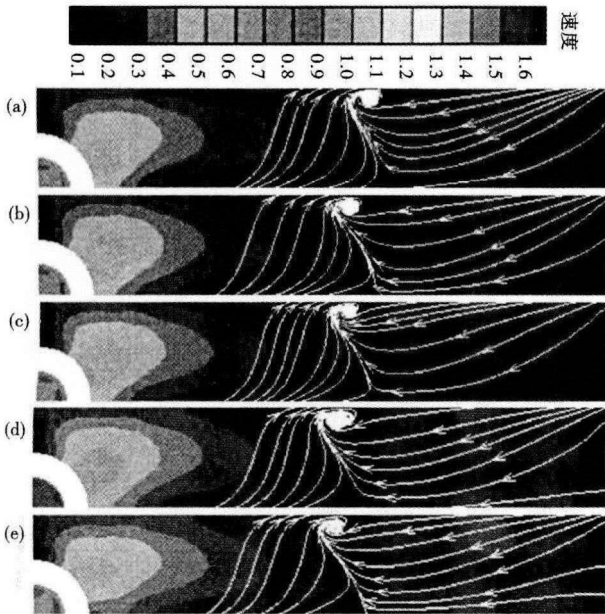


图 3 水口侧孔扩张角 0° (a), 3° (b), 6° (c), 9° (d) 和 12° (e) 时结晶器自由液面钢液流动状态

Fig. 3 Liquid flow status at liquid free surface in mould with nozzle side-hole divergence angle 0° (a), 3° (b), 6° (c), 9° (d) and 12° (e)

### 2.2 水口扩张角对结晶器卷渣影响

由图 3 可以看出,吹入氩气后,结晶器自由液面会形成一个漩涡,这是由于吹入氩气后,靠近水口附近的钢液流速向上且略偏向窄面方向,而靠近窄面处钢液流速为水平方向,指向水口,这两处钢液相互剪切则形成漩涡。扩张角由 0° 增大到 6° 时,漩涡处速度逐渐增大,增大到 9° 时,速度有所减小,当扩张角为 12° 时,漩涡处速度达到最大,且自由液面整体速度较大。当自由液面漩涡速度较大时容易产生漩涡卷渣,从而使铸坯产生夹渣缺陷。

由图 4 可看出,水口湍动能较大,弯月面处较小,从水口处到弯月面处湍动能先减小后略微增大。由于吹氩量较大,所以不同扩张角下自由液面湍动能区别不是很明显,但还是可以看出,扩张角为 9° 时,自由液面湍动能较小,说明扩张角为 9° 时自由液面波动较小,发生卷渣几率较小。

### 2.3 水口扩张角对氩气泡行为的影响

由图 5 可见,氩气泡直径为 1 mm 时,气泡在上回流区分布范

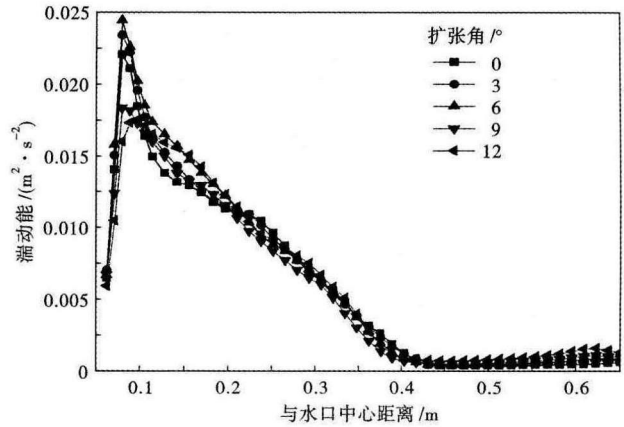


图 4 结晶器自由液面中心线处湍动能曲线

Fig. 4 Curves of turbulent kinetic energy of liquid at center line of liquid free surface in mould

围较广,扩张角为 0° 时,气泡基本在整个自由液面均有逸出,气泡在自由液面分布较均匀,气泡在钢液夹带下冲击深度较深,气泡容易进入结晶器下回流区而被凝固坯壳捕获形成气泡缺陷。随着扩张角增大,气泡冲击深度逐渐减小,扩张角从 3° 增加到 9° 时,气泡在自由液面逸出范围基本不变,分布较均匀;扩张角增至 12° 时,氩气泡出侧孔后基本直接向上逸出,冲击深度大大减小,氩气泡在自由液面逸出范围向水口靠近,这将造成更多的气泡在水口附近聚集,气泡对此处的扰动大大增强。

氩气泡直径为 2 mm 时,气泡在上回流区分布范围较窄,基本都在水口附近上浮,这是由于气泡在钢液里主要受自身浮力和注流冲击力的共同作用,气泡直径增大时,浮力作用强于注流冲击力,所以气

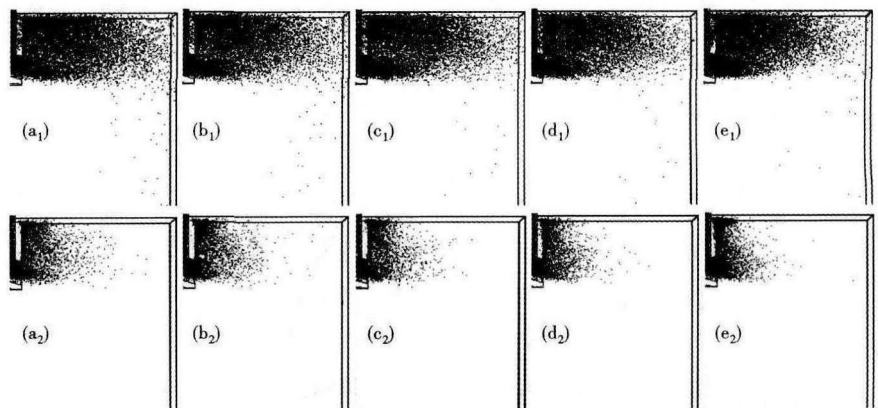


图 5 水口侧孔扩张角 0° (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>), 3° (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>), 6° (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>), 9° (d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>) 和 12° (e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub>) 时结晶器钢液中直径 1 mm (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub>, e<sub>1</sub>) 和直径 2 mm (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>, d<sub>2</sub>, e<sub>2</sub>) 氩气泡分布

Fig. 5 Distribution of diameter 1 mm argon bubbles (a<sub>1</sub>, b<sub>1</sub>, c<sub>1</sub>, d<sub>1</sub> and e<sub>1</sub>) and diameter 2 mm argon bubbles (a<sub>2</sub>, b<sub>2</sub>, c<sub>2</sub>, d<sub>2</sub> and e<sub>2</sub>) in liquid of mould with nozzle side-hole divergence angle 0° (a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>), 3° (b<sub>1</sub>, b<sub>2</sub>), 6° (c<sub>1</sub>, c<sub>2</sub>), 9° (d<sub>1</sub>, d<sub>2</sub>) and 12° (e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub>)

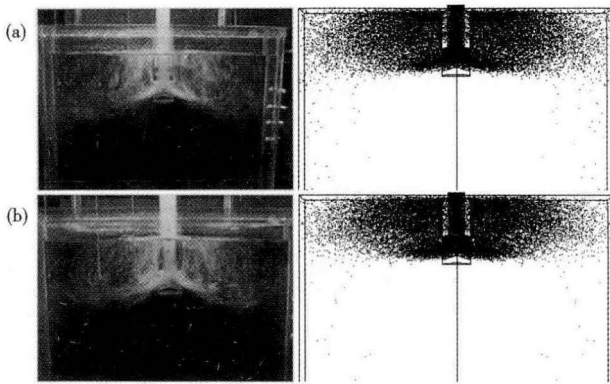


图 6 水模型试验(左)和数值模拟(右)结晶器内氩气泡轨迹:(a)扩张角 $0^\circ$ 和扩张角 $9^\circ$ (b)

Fig. 6 Argon bubble trace in liquid of mould by water model test (left) and numerical simulation (right): divergence angle  $0^\circ$  (a) and  $9^\circ$  (b)

泡出水口即开始上浮。扩张角从 $0^\circ$ 增大到 $12^\circ$ 的过程中,气泡在自由液面上浮区域略有减小,气泡冲击深度逐渐减小,扩张角为 $12^\circ$ 时,气泡基本沿着水口外壁上浮,使得水口附近液面速度增大,气泡以较大速度穿透渣层时容易破裂,从而发生大气泡卷渣。

#### 2.4 模型验证

图 6 为扩张角分别为 $0^\circ$ 和 $9^\circ$ 时,结晶器内氩气泡分布的数值模拟与水模型试验结果。扩张角为 $0^\circ$ 时,氩气泡冲击深度较深,氩气泡在整个自由液面均有逸出;扩张角增加到 $9^\circ$ 时,氩气泡冲击深度有所减小,导致氩气泡上浮区域略微向水口移动。数值模拟结果与水模型实验结果吻合良好。

#### 2.5 冶金效果

连铸车间工业试验时在双流连铸机的一流安装

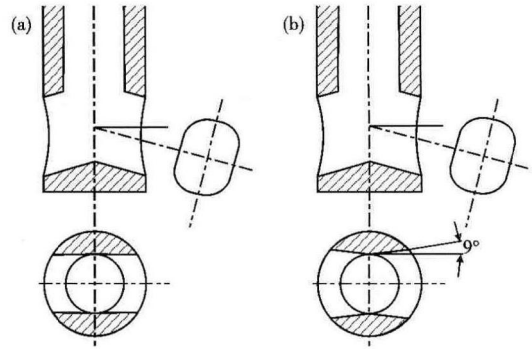


图 7 扩张角 $0^\circ$ (a)和 $9^\circ$ (b)时的水口剖视图

Fig. 7 Sectional view of nozzle with divergence angle  $0^\circ$  (a) and  $9^\circ$  (b)

扩张角为 $9^\circ$ 的水口,另一流安装无扩张角水口(水口示意图如图 7 所示)。试用一个浇次后,交换两种水口的流号,浇完两炉钢后发现,有扩张角水口与无扩张角水口相比表面夹渣发生率(出现夹渣铸坯数与总浇注的铸坯数之比)分别降低了 $5.9\%$ 和 $14.8\%$ 。

#### 3 结论

(1)用离散相模型建立了钢液-氩气的两相流数学模型,描述了不同扩张角下结晶器流场变化及氩气泡运动行为,为合理选择水口扩张角提供理论依据。

(2)随着水口侧孔扩张角的增大,注流冲击深度逐渐减小,液面波动有减小趋势,但当扩张角增大到 $12^\circ$ 时,液面波动加强,且液面易发生漩涡卷渣。扩张角为 $9^\circ$ 时,液面波动较小,注流冲击点较小有利于夹杂物上浮去除,对现场生产有利。

#### 参考文献

- [1] Hintikka S, Kontinen J, Leiviska K. Optimization of Molten Steel Flow in Continuous Casting Mold[C]. Steelmaking Conference Proceedings, 1992: 887-891.
- [2] Ho Yeong-Ho, Chen Chi-Hung, Hwang Weng-Sing. Analysis of Molten Flow Steel in Slab Continuous Caster Mold[J]. ISIJ International, 1994, 34(3): 255-264.
- [3] 雷 洪,朱苗勇,邱同榜,等. 板坯连铸结晶器流场优化[J]. 炼钢, 2000, 16(3): 29-31.
- [4] 王维维,张家泉,陈素琼,等. 水口侧孔倾角对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.
- [5] 孙云虎,罗传清,王延峰,等. 低碳钢板坯表面夹渣的研究与控制[J]. 炼钢, 2013, 29(5): 30-33.
- [6] 曹 娜,朱苗勇. 吹氩板坯连铸结晶器内钢/渣界面行为的数值模拟[J]. 金属学报, 2008, 44(1): 79-84.
- [7] 王 军,于海岐,朱苗勇. 中薄板坯连铸结晶器钢/渣界面行为数值模拟[J]. 材料与冶金学报, 2008, 7(4): 243-248.
- [8] 于海岐,朱苗勇. 板坯结晶器电磁制动和吹氩过程的钢/渣界面行为[J]. 金属学报, 2008, 44(9): 1141-1148.
- [9] 陈登福,张献光,张立峰,等. 板坯连铸结晶器内氩气泡行为的模拟研究[J]. 钢铁, 2010, 45(4): 20-25.
- [10] 刘崇林,罗志国,张 铸,等. 板坯结晶器水模型内气泡运动行为的数学模拟[J]. 钢铁研究, 2013, 41(2): 9-12.
- [11] Ramirez Lopez Pavel Ernesto, Jalali Pooria Nazem, Björkqvall Johan. Recent Developments of a Numerical Model for Continuous Casting of Steel: Model Theory, Setup and Comparison to Physical Modelolting with Liquid Metal[J]. ISIJ International, 2014, 54(2): 342-350.

肖太平(1989-)男,硕士研究生(武汉科技大学),2012年武汉科技大学(本科)毕业,连铸结晶器数值模拟。

E-mail: 987121582@qq.com

收稿日期: 2014-10-15