



## 不同钢包底吹氩模式对钢液精炼效果的影响

杨风国<sup>1</sup>, 王晓英<sup>2</sup>, 周明星<sup>1</sup>, 郑冰<sup>3</sup>, 徐东<sup>2,4</sup>

(1 河北太行钢铁集团有限公司河北省高校高端紧固件全流程应用技术研发中心, 邯郸 056305;

2 河北工程大学河北省高品质冷锻钢技术创新中心, 邯郸 056038; 3 辽宁科技大学材料与冶金

学院, 鞍山 114051; 4 河北工程大学河北省高韧性风塔钢工程研究中心, 邯郸 056305)

**摘要:**以 180 t 双孔底吹氩钢包为研究对象, 对 6 种钢包底吹氩模式进行数值模拟, 并结合现场试验与当前采用的吹氩模式进行对比。研究发现: (1) 钢液的混匀时间随吹氩量的增加而减少, 吹氩量一定时, 差流量吹氩模式对钢液的搅拌强于等流量吹氩模式。(2) 不同的钢包底吹氩模式, 渣眼形成的位置不同, 渣眼面积也不同。总流量一定时, 差流量吹氩模式钢液面最大流速大于等流量吹氩模式, 易发生钢液卷渣。(3) 差流量吹氩模式渣线处渣层厚度的波动大于等流量吹氩模式, 且流量差值越大, 波动越剧烈。(4) 差流量吹氩模式通过“强-弱”流股的配合, 进一步强化了钢包底吹氩的钢液精炼效果。工业试验表明, 采取等流量吹氩模式 (500 L/min—500 L/min), 钢中的较大夹杂物的数目明显多于差流量吹氩模式 (400 L/min—600 L/min)。

**关键词:**钢包吹氩; 数值模拟; 混匀时间; 渣眼

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00149 中图分类号:TF769

## Effect of Different Argon Blowing Modes on Refining Effect of Molten Steel

Yang Fengguo<sup>1</sup>, Wang Xiaoying<sup>2</sup>, Zhou Mingxing<sup>1</sup>, Zheng Bing<sup>3</sup>, Xu Dong<sup>2,4</sup>

(1 Whole Processes of High Quality Fastener Application Technology Research Center of Universities in Hebei Province, Hebei Taihang Iron and Steel Group Co., Ltd., Handan 056305, China; 2 Technology Innovation Center for

High Quality Cold Heading Steel of Hebei Province, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

3 College of Materials and Metallurgy, Liaoning Science and Technology University, Anshan 114051, China;

4 Engineering Research Center for High Toughness Wind Tower Steel of Hebei Province, Hebei

University of Engineering, Handan 056035, China)

**Abstract:** In this paper, one 180 t double-hole bottom argon blowing ladle is taken as the research object. Based on the specific production conditions, six modes of argon bottom blowing in ladle are numerically simulated, and combined with the field test, it is compared with the argon blowing mode currently adopted. The results show that: (1) The mixing time of molten steel decreases with the increase of argon blowing amount. When argon blowing amount is constant, the argon blowing mode with differential flow rate is stronger than that with constant flow rate. (2) Different modes of argon blowing at the bottom of ladle have different locations and areas of slag holes. When the total flow rate is constant, the maximum velocity of molten steel surface in the differential flow argon blowing mode is greater than that in the constant flow argon blowing mode, which is easy to cause slag entrapment. (3) The fluctuation of slag layer thickness at the slag line in differential flow argon blowing mode is greater than that in constant flow argon blowing mode, and the greater the flow difference, the more severe the fluctuation. (4) The differential flow argon blowing mode further strengthens the refining effect of molten steel by argon blowing at the bottom of ladle through the cooperation of "strong-weak" streams. And the industrial test shows that the number of larger inclusions in steel is obviously more than that in argon blowing mode (400 L/min—600 L/min) with constant flow rate (500 L/min—500 L/min).

**Key Words:** Ladle Argon Blowing; Numerical Simulation; Mixing Time; Slag Eye

大容量钢包普遍采用双透气砖吹氩模式, 底吹氩透气砖的布置方式和吹氩流量对钢液精炼效果的影响一直是广大冶金工作者的研究重点<sup>[1-3]</sup>。

赵红光等<sup>[4]</sup>以 120 t 钢包为研究对象, 研究发现吹氩孔位于 R 1/2 处, 氩气流量为 100 L/min 时, 钢包

内钢液的搅拌效果最佳; 陈兴华等<sup>[5]</sup>则认为 120 t 钢包的最优底吹布置方案为透气砖布置在圆周 0.67R 且呈 60°; 杨亚迪等<sup>[6]</sup>建立了 180 t 钢包底吹氩数学模型, 研究结果表明, 当两透气砖在钢包底部 R/2 布置, 底吹流量为 600 L/min 时, 钢液搅拌效果最佳。

作者简介: 杨风国 (1970—), 男, 工程师; E-mail: 15512856289@163.com; 收稿日期: 2023-07-19

通信作者: 徐东 (1984—), 男, 博士, 教授, 博士生导师; E-mail: xudong\_xyz@163.com

在实际生产中,由于透气砖安装位置不合理或吹氩方式或吹氩流量控制不恰当,通常造成钢液二次氧化、卷渣、钢包侵蚀严重等问题<sup>[7-11]</sup>。因此,结合现场具体条件和生产工艺,确定合适的钢包底吹氩参数,对于获得最佳的钢液精炼效果至关重要。

以某厂 180 t 双孔底吹氩钢包为研究对象,结合其具体的生产工艺条件,分别设计了几种不同的吹氩模式,对其钢包底吹氩工艺进行了数值模拟研究,并结合现场试验与当前所采用的等流量吹氩模式进行对比分析,为该厂钢包底吹氩工艺参数的改进提供理论依据。

### 1 数学模型

#### 1.1 模型参数与基本假设

180 t 双孔底吹氩钢包的模型如图 1(a) 所示。透气砖的直径为 200 mm,透气砖分布位置如图 1(b) 所示。采用正六面体结构对计算区域进行网格划分,并对吹氩孔位置附近进行网格加密处理,整个计算区域被划分为约 200 万个网格。钢包内流体的分布主要为钢液、钢渣和吹入的氩气,其中渣层厚度为 200 mm,文中流量均为标准态流量。

为简化数值模拟过程,对钢包底吹氩气-钢液-渣层三相流过程做如下假设:(1)钢包内流体均为不可压缩的牛顿流体,三相流均为各向同性湍流,且密度、粘度恒定;(2)气泡浮力为钢液形成循环流的驱动力;(3)吹入钢包内的气泡大小均匀,VOF 模型决定气泡运动过程中发生聚合或破裂;(4)钢包内不发生任何化学反应。

#### 1.2 控制方程与边界条件

本研究模拟钢包底吹氩过程钢包内流场,选用 VOF 多相流模型 Standard k-ε 双方程湍流模型和描述气泡效应的拉格朗日离散相模型<sup>[12-14]</sup>。控制方程采用非稳态方程,描述钢包底吹氩三相流过程,需满足连续性方程和动量守恒方程。求解钢包混匀时间,需示踪剂的质量传输方程,如式(1)。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mu_i \frac{\partial C}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D_e \frac{\partial C}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

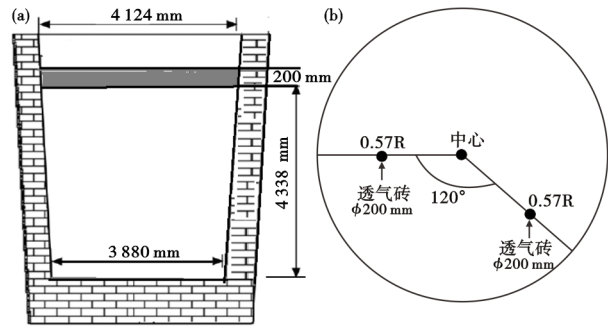


图 1 180 t 钢包模型(a)和透气砖分布位置示意图(b)  
Fig. 1 Geometry model of 180 t ladle(a), schematic diagram of the distribution position of the air brick (b)

式中,  $C$  为示踪剂的质量分数;  $D_e$  为示踪剂的扩散系数;  $\mu_i$  为流速, m/s。模型的边界条件主要考虑气体入口、出口、熔池表面及钢包底面及侧壁面。

- (1) 壁面边界: 钢包底面及侧面设置为无滑移边界, 近壁面处为标准壁面函数。
- (2) 熔池表面: 钢液表面设置为自由流出口。
- (3) 入口边界: 钢包底部的透气砖定义氩气速度入口。

初始时刻, 钢液处于静止状态, 钢液上表面覆盖一层钢渣。氩气由底部透气砖吹入钢包。氩气入口速度根据底吹流量及透气砖表面积确定, 可表示为式(2)

$$V_{in} = \frac{P_s T_L}{(P_s + \rho g h) T_s} \frac{Q_s}{A} \quad (2)$$

式中,  $T_s$  取值 298 K;  $T_L$  取值 1 873 K;  $P_s$  为标准大气压, 取值 101 325 Pa;  $Q_s$  为标准状态下底吹氩气流量, L/min;  $A$  为吹氩孔面积, mm<sup>2</sup>;  $h$  为钢包熔池深度, mm。

入口湍动能  $k$  和湍动能耗散率  $\varepsilon$  分别为式(3)、式(4)。

$$k = 0.04 V_{in}^2 \quad (3)$$

$$\varepsilon = 2 k^{1.5} / D \quad (4)$$

式中,  $D$  为吹氩孔的当量直径, mm。

#### 1.3 求解方案与收敛标准

应用流体计算软件 Fluent 对模型进行求解, 采用二阶隐式空间离散格式和压力速度耦合(PISO)

表 1 流体物性参数<sup>[11]</sup>

Table 1 Physical properties parameters of the fluids

钢液密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	钢液黏度/ (Pa·s)	钢渣密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	钢渣黏度/ (Pa·s)	氩气密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	氩气黏度/ (Pa·s)	钢-渣表面 张力/(N·m <sup>-1</sup> )	钢-气表面 张力/(N·m <sup>-1</sup> )	渣-气表面 张力/(N·m <sup>-1</sup> )
7 000	0.005 5	2 700	0.13	1.622 8	2.125×10 <sup>-5</sup>	1.4	1.82	0.58

算法,所有变量的残差收敛标准设为  $10^{-4}$ ,时间步长设置为 0.005 s。计算过程中涉及到的流体物性参数见表 1。

### 1.4 研究方案

某厂在 LF 精炼过程中钢包底吹氩总流量最大值为 1000 L/min,生产过程中两个吹氩孔的流量基本控制在 300 L/min~600 L/min。结合具体的生产工艺条件,设计了 9 种不同的吹氩模式,应用流体力学软件 Fluent 进行数值模拟。通过分析钢包内的流场分布、“死区”比例、钢-渣界面行为和混匀时间等情况,研究不同钢包底吹氩模式对钢液精炼效果的影响。钢包底吹氩数值模拟方案见表 2。

表 2 数值模拟方案  
Table 2 Numerical simulation scheme

模拟方案	钢包底吹氩气流量/(L·min <sup>-1</sup> )	
	透气砖 1	透气砖 2
等流量吹氩模式 1	300	300
等流量吹氩模式 2	400	400
等流量吹氩模式 3	500	500
差流量吹氩模式 1	400	600
差流量吹氩模式 2	300	700
差流量吹氩模式 3	300	500

## 2 计算结果与分析

### 2.1 不同钢包底吹氩模式对钢液流场的影响

不同底吹氩模式下,垂直于钢包底部过两个吹氩孔截面的速度流线图如图 2 所示。由图 2 可以看出,氩气的吹入带动了整个钢包内钢液的流动。不同的吹氩模式,在吹氩孔上方均形成了两个流股,每个流股又分别形成两个循环流,一个形成于流股与钢包壁之间,另一个形成于两个流股之间。不同的是,由于底吹氩模式的不同,流股之间的循环流在钢包的中上部相遇,发生了不同程度的碰撞、挤压,导致钢包内流场存在差异。在底吹氩气流量相同的条件下,等流量吹氩模式与差流量吹氩模式相比,钢包内存在较多的流速较小( $<0.01$  m/s)区域,这是由于两吹氩孔形成的流股动能相同,在接近自由表面时容易发生碰撞,钢液动能耗散严重,降低了氩气的利用率。

应用 Tecplot 流体计算软件处理后,抽取并分析了钢液平均速度低于 0.01 m/s 的区域所占比例,即“死区”体积,如图 3 所示。由图 3 可知,采用等流量吹氩模式时,随着吹氩总流量的增加,钢包内死区体积整体呈下降趋势。等流量吹氩模式 1,即两个

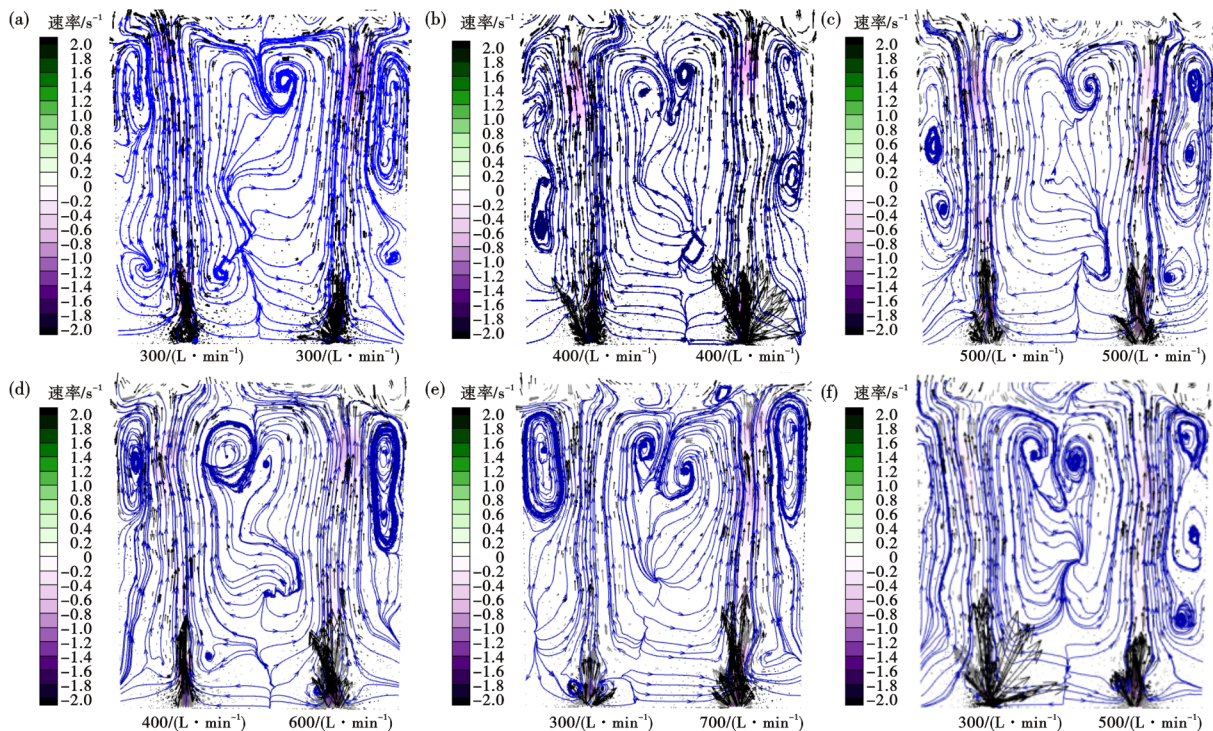


图 2 不同吹氩模式下的速度流线图:(a)等流量模式 1,(b)等流量模式 2,(c)等流量模式 3,(d)差流量模式 1,(e)差流量模式 2,(f)差流量模式 3

Fig. 2 Velocity streamline diagram under different argon blowing modes : (a) equal flow mode 1, (b) equal flow mode 2, (c) equal flow mode 3, (d) differential flow mode 1, (e) differential flow mode 2, (f) differential flow mode 3

吹氩孔流量均为 300 L/min, 钢包内死区体积分数为 37.8% 最大, 其原因可能是针对 180 t 钢包, 底吹氩总流量为 600 L/min, 对钢液的搅拌较弱, 导致包内钢液流速低于 0.01 m/s 的体积较大。分析图 3 还可以看出, 在相同的总吹氩量条件下, 采用合适的差流量吹氩模式, 钢包内的死区体积分数可降为 7% ~ 12%。

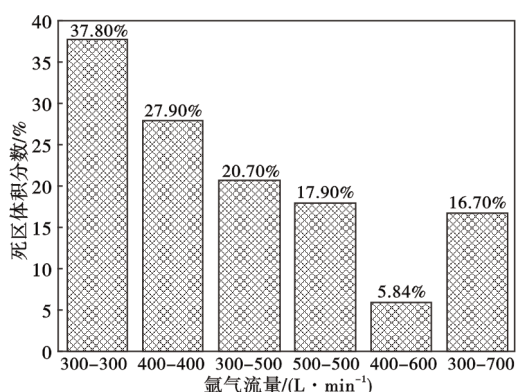


图 3 不同钢包底吹模式下钢包内死区体积

Fig. 3 Dead zone volume in ladle under different ladle bottom blowing modes

## 2.2 不同钢包底吹氩模式对渣眼面积的影响

在钢包底吹氩过程中, 钢包底部吹入的氩气带动钢液的流动, 当钢包下层钢液的流动速度超过临

界速度时, 钢液将会抵达钢-渣界面, 使得钢-渣界面被隆起到一定高度, 此时钢液上层的钢渣极大概率会以液滴形式被卷入钢液层而形成夹渣, 并导致部分钢液表面裸露于空气, 使得钢液被污染, 影响钢液质量。为研究钢包底吹过程中产生的卷渣现象和卷渣强度, 提取不同底吹氩模式下钢-渣界面处的特征值, 即渣眼, 如图 4 所示。这里将钢渣表面 Fe 的体积分数大于 0.2 的区域统计为渣眼。

由图 4 可以看出, 采用不同的钢包底吹氩模式, 渣眼在钢包内形成的位置不同, 同时形成的渣眼面积也不同。钢包采用等流量吹氩模式时, 会形成两个面积相当的渣眼, 且渣眼均分布在垂直于吹氩孔上方的区域。采用差流量吹氩模式时, 由于两个吹氩孔流量不同, 与等流量吹氩模式相比, 钢流在上升的过程中, 动能耗散较小, 导致吹氩流量较大的吹氩孔上方, 钢液冲出渣层并在渣层位置形成渣眼的面积较大, 且在钢流的带动下, 渣眼位置偏向向了包壁位置。与此同时, 吹氩流量较小的吹氩孔上方, 所形成的渣眼面积明显减小; 且两个吹氩孔流量差别越大, 形成的两个渣眼的面积差异越大。

渣眼周围的钢液流速越大, 且大流速分布范围越广, 越容易造成卷渣现象。Asai 等<sup>[15]</sup>通过对水+含苯甲酸机油搅拌体系的研究, 证实界面出现卷渣

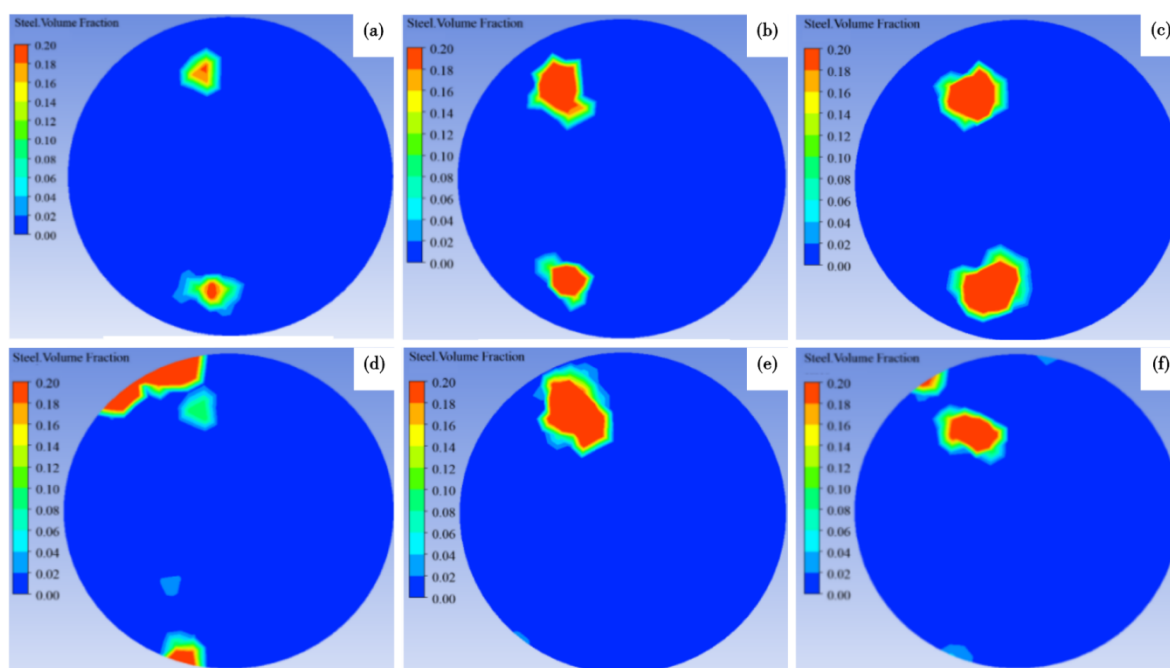


图 4 不同底吹氩模型下形成渣眼形貌: (a) 等流量模式 1, (b) 等流量模式 2, (c) 等流量模式 3, (d) 差流量模式 1, (e) 差流量模式 2, (f) 差流量模式 3

Fig. 4 Morphology of slag holes formed under different bottom argon blowing models: (a) equal flow mode 1, (b) equal flow mode 2, (c) equal flow mode 3, (d) differential flow mode 1, (e) differential flow mode 2, (f) differential flow mode 3

的临界条件是韦伯数(We)为 12.3,如式(5)。

$$W_{e_{bc}} = \frac{v_{steel}^2 \rho_{steel}}{\sigma_{steel-slag} (\rho_{steel} - \rho_{slag})^{1/2}} \quad (5)$$

式中,  $\sigma_{steel-slag}$  为渣-钢界面的表面张力, N/m;  $v_{steel}$  为钢液表面水平流速, m/s;  $\rho_{steel}$  为钢液密度,  $kg/m^3$ ;  $\rho_{slag}$  为炉渣密度,  $kg/m^3$ 。

当界面湍动时,渣-钢界面表面张力  $\sigma_{steel-slag}$  由 1.2 N/m 降至 0.12 N/m,对应的钢液表面水平流速为 0.34 m/s, 可视为钢液面发生卷渣的临界速度。图 5 给出了不同钢包底吹氩模式所形成渣眼周围钢液的最大水平流速。由图 5 可知, 等流量吹氩模式 2 (400 L/min—400 L/min) 和差流量吹氩模式 2 (300 L/min—700 L/min)、差流量吹氩模式 3 (300 L/min—500 L/min), 所形成的渣眼附近钢液的水平流速均超过了发生卷渣的临界速度, 因此, 可以推测该三种吹氩模式, 容易造成钢液的卷渣, 进而影响钢液的纯净度。分析图 5 数据可知, 在底吹氩总量相同的情况下, 差流量吹氩模式钢液表面的最大流速大于等流量吹氩模式, 且两吹氩孔之间流量差别越大, 钢液表面的最大水平流速越大。

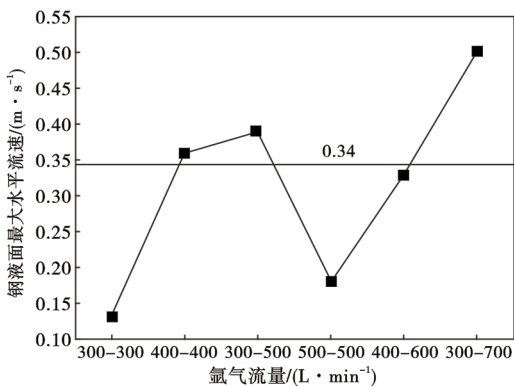


图 5 不同钢包底吹氩模式渣眼周围钢液的最大水平流速  
Fig. 5 Maximum horizontal velocity of molten steel around slag hole in different ladle argon blowing modes

### 2.3 不同钢包底吹氩模式对耐火材料侵蚀的影响

不同吹氩模式下钢包壁处渣层体积分布云图如图 6 所示。可以发现, 不同吹氩模式下, 包壁处渣层厚度均呈如下规律: 靠近吹氩孔上方的包壁渣层较薄, 而远离吹氩孔上方的包壁渣层较厚, 这一点与实际生产过程产生的渣线处耐火材料的侵蚀情况一致。分析图 6 还可以看出, 在底吹氩总流量一致的情况下, 差流量吹氩模式, 渣线处渣层厚度的

波动要高于等流量吹氩模式, 且两吹氩孔氩气流量差值越大, 渣线处渣层厚度的波动越剧烈。

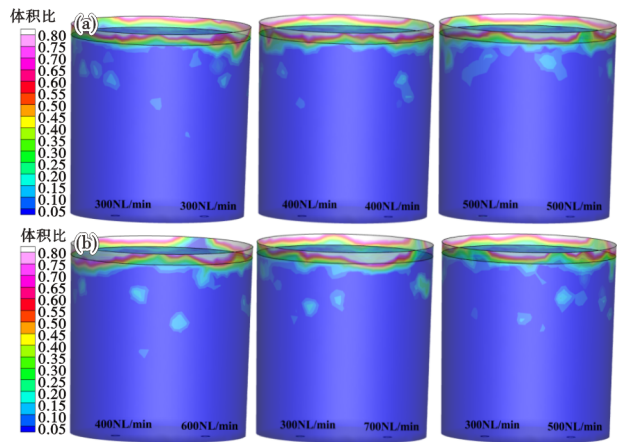


图 6 不同吹氩模式下钢包壁渣层体积分布云图: (a)等流量模式, (b)差流量模式  
Fig. 6 Volume distribution of slag layer on ladle wall under different argon blowing modes: (a) equal flow mode, (b) differential flow mode

### 2.4 不同钢包底吹氩模式对钢液混匀时间的影响

选择向底吹钢包内加入饱和 KCl 溶液作为示踪剂, 跟踪 KCl 浓度变化, 以示踪剂浓度最后达到均匀值 5% 偏差内的时间为混匀时间。示踪剂添加位置及示踪剂浓度监测位置如图 7 所示。

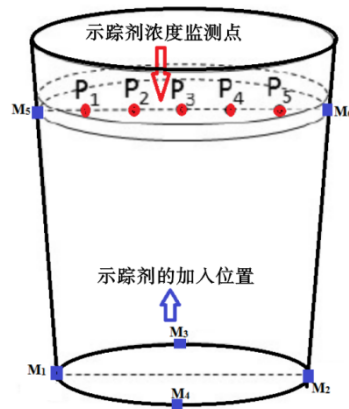
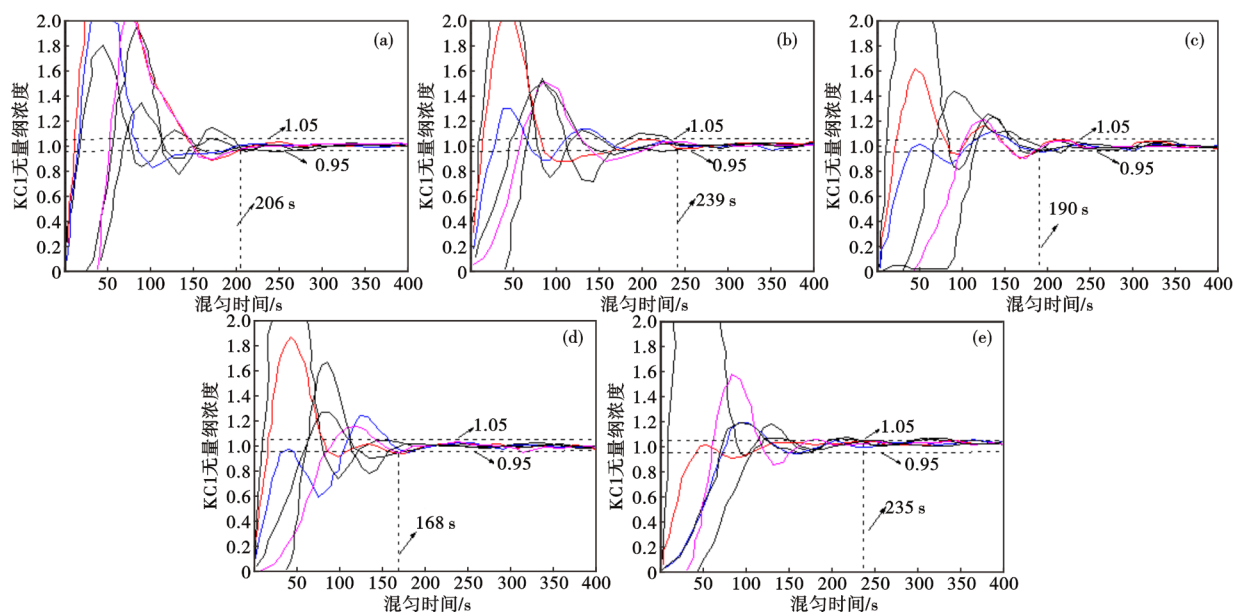


图 7 示踪剂添加位置及示踪剂浓度监测点示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of tracer addition position and tracer concentration monitoring point

等流量吹氩模式 3,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ 、 $P_5$  示踪剂监测点处示踪剂的质量浓度随时间的变化曲线如图 8 所示。钢液的混匀时间通过对 5 个示踪剂监测位置的混匀时间取平均值确定。由图 8 可知, 采用等流量吹氩模式 3 时, 钢液的平均混匀时间为 208 s, 与等

图8 各监测点示踪剂浓度变化及混匀时间:(a)P<sub>1</sub>, (b)P<sub>2</sub>, (c)P<sub>3</sub>, (d)P<sub>4</sub>, (e)P<sub>5</sub>Fig. 8 Variation of tracer concentration and mixing time at each monitoring point: (a) P<sub>1</sub>, (b) P<sub>2</sub>, (c) P<sub>3</sub>, (d) P<sub>4</sub>, (e) P<sub>5</sub>

流量吹氩模式相比,差流量吹氩模式,对钢液的搅拌较强,钢液的混匀时间缩短 20~40 s。由此可得出,不同钢包底吹氩模式时对应的平均混匀时间,如图 9 所示。

由图 9 可知,随着吹氩总流量的增加,钢液的混匀时间整体呈下降趋势,与流场分析结果一致。等流量吹氩模式 1,即两个吹氩孔流量均为 300 L/min,钢包内钢液的平均混匀时间最长为 286 s;差流量吹氩模式 1,即两个吹氩孔流量分别为 400 L/min 和 600 L/min,钢包内钢液的平均混匀时间最短为 208 s。在总吹氩流量相同的条件下,与等流量吹氩模式相比,差流量吹氩模式更有利于钢液的混匀,这是因为由于两吹氩孔气体流量不同,在钢包内形成的流股碰撞减少,更有利于形成沿某一方向的大的环流,从而加强了熔池的搅拌,利于钢液的混匀。

### 3 工业试验

为了验证等流量吹氩模式和差流量吹氩模式的钢包精炼效果,在其他工艺条件均相同的条件下,在含硼钢 10B21 上,分别跟踪了一个浇次的生产过程,并分别在 LF 精炼结束软吹 15 min 时,在钢包内取桶样进行夹杂物分析。其中等流量吹氩模式,每个吹氩孔的流量均为 500 L/min;差流量吹氩模式,两个吹氩孔的流量分别设置为 400 L/min—600 L/min。为了对比两种吹氩模式对钢液的精炼效果,不同吹氩模式下所取桶状试样进行小样电解的

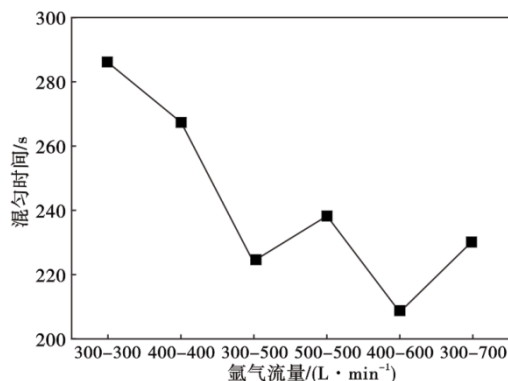


图9 不同吹氩模式下的钢液平均混匀时间

Fig. 9 Average mixing time of molten steel under different argon blowing modes

夹杂物统计数据见表 3,两种不同吹氩模式下所取桶状试样进行小样电解的典型照片如图 10 所示。为了便于比较,所有电解的小样,均加工为直径 10 mm,高 100 mm 的圆柱体,且电解时间均为 10 h。

结合表 3 数据和图 10 可以看出,在总吹氩流量为 1 000 L/min 时,采取等流量吹氩模式时,钢中存在的最大夹杂物尺寸为 302 μm,而采取差流量吹氩模式时,钢中夹杂物的尺寸均在 100 μm 以下。从等重量的试样电解出的非金属夹杂物的数量来看,采取等流量吹氩模式时,钢中存在较大夹杂物的数目明显多于差流量吹氩模式。这说明采用差流量吹氩模式时,强吹流股氩气对包内钢液的搅拌,更有利于非金属夹杂物的碰撞长大,弱吹流

表 3 小样电解夹杂物的统计数据

Table 3 Statistical data of electrolytic inclusions in small samples

吹氩模式 (L·min <sup>-1</sup> )	炉号	非金属夹杂物统计数目/个				
		≥300 μm	> 100~ 300 μm	> 50~ 100 μm	> 20~ 50 μm	≤20 μm
500—500	6221407410	1	9	25	37	41
	6221407411	0	14	31	28	29
	6221407412	2	7	21	31	19
	6221407413	1	6	19	24	27
	6221407414	0	8	16	20	31
400—600	6221408711	0	0	20	28	34
	6221408712	0	0	14	21	38
	6221408713	0	0	9	19	33
	6221408714	0	0	18	25	46
	6221408715	0	0	12	26	28

股氩气更有利携带夹杂物的上浮排除,“强-弱”流股的配合强化了钢包底吹氩搅拌的钢液精炼效果。

#### 4 结论

(1)采用等流量吹氩模式时,随着吹氩总流量的增加,钢包内死区体积整体呈下降趋势。钢包底吹氩总量一定时,与等流量吹氩模式相比,差流量吹氩模式,对钢液的搅拌较强,钢液的混匀时间缩短 20 ~ 40 s,死区体积分数降低 7% ~ 12%。

(2)吹氩总量一定的前提下,差流量吹氩模式

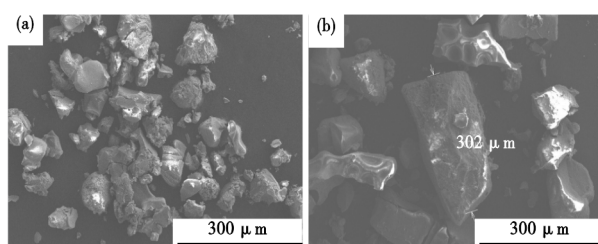


图 10 两种不同吹氩模式下试样小样电解照片:(a)差流量模式,(b)等流量模式

Fig. 10 Electrolysis photos of sample under two different argon blowing modes : (a) differential flow mode, (b) equal flow mode

下渣线处渣层厚度的波动大于等流量吹氩模式,且两吹氩孔氩气流量差值越大,渣线处渣层厚度的波动越剧烈,对渣线侵蚀越严重。

(3)钢包底吹氩总量为 1 000 L/min 时,差流量吹氩模式下钢液表面的最大流速比等流量吹氩模式高 0.15 ~ 0.33 m/s。两吹氩孔之间流量差别越大,钢液表面的最大水平流速越大,越容易发生卷渣、二次氧化等现象。

(4)差流量吹氩模式通过“强-弱”流股的配合,进一步强化了钢包底吹氩的钢液精炼效果。工业试验表明,采取差流量吹氩模式(400 L/min—600 L/min),钢中的非金属夹杂物粒径均在 100 μm 以下,且较大夹杂物的数目明显少于等流量吹氩模式(500 L/min—500 L/min)。

#### 参考文献

- [1] 王时松,郭晓晨,姜文欢,等. 100t 底吹氩钢包流场数值模拟及现场实践[J]. 中国冶金, 2018, 28(12): 51-55.
- [2] 马骏,沈巧珍,阳方,等. 底吹氩钢包内三维流场的数值模拟[J]. 武汉科技大学学报, 2010, 33(2): 124-128.
- [3] 张真铭,蔡茜娜,熊辉辉,等. 120 t 钢包底吹氩工艺优化水模型研究[J]. 特殊钢, 2017, 38(4): 9-12.
- [4] 赵红光,王宏丹,任兵芝,等. 120 t 钢包底吹氩混匀过程的数值模拟研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47(11): 76-78+83.
- [5] 陈兴华,胡志勇,李家通,等. 120 t 吹氩钢包流场与温度场的优化[J]. 材料与冶金学报, 2022, 21(3): 157-161.
- [6] 杨亚迪,赵晶,崔剑征. 180t 钢包底吹氩过程钢液流场特性数值模拟[J]. 特殊钢, 2021, 42(5): 6-10.
- [7] 钟良才,李壮,梁锋,等. 120t 精炼钢包底吹氩物理模拟[J]. 过程工程学报, 2010, 10(S1): 103-107.
- [8] 胡群,李小松,张家泉,等. 差流量吹氩模式对 150 t 钢包混匀与顶渣行为的影响[J]. 钢铁, 2020, 55(12): 31-38.
- [9] 卢叶,唐萍,文光华,等. 透气砖布置和吹氩流量对钢包内钢液流动行为的影响[J]. 钢铁研究学报, 2014, 26(7): 41-47.
- [10] Tang H Y, Liu J W, Zhang S, et al. A novel dual plugs gas blowing mode for efficient ladle metallurgy [J]. Ironmaking & Steelmaking, 2019, 46(5): 405-415.
- [11] 刘凤刚,任英,段豪剑,等. 钢包软吹过程优化数学模拟和工业试验研究[J]. 炼钢, 2019, 35(6): 24-30.
- [12] 肖震,郑淑国,朱苗勇. 浇注钢包环出钢口四孔透气塞吹氩控制下渣工艺[J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(2): 133-141.
- [13] 任英,张立峰,李燕龙,等. 底吹氩钢包内钢液流动与合金扩散的数值模拟[J]. 钢铁研究学报, 2014, 26(7): 28-34.
- [14] 巨建涛,王睿,折媛,等. 钢包底吹氩去除钢中夹杂物的数值模拟[J]. 过程工程学报, 2015, 15(1): 68-73.
- [15] Asai S, Kawachi M, Muchi I. Mass transfer rate in ladle refining process[J]. Injection Metallurgy, 1983, 12: 4-9.