

探秘炼钢炉底的气孔布局： 如何让 210 t 转炉里的 钢水搅拌更均匀？

Gas Inlet Layout in Steel Converters: The Key to Uniform Mixing of 210 t Molten Steel

供稿|张海辰, 程树森 / ZHANG Haichen, CHENG Shusen

内容导读

在炼钢转炉中,从炉底吹入气体(如氮气、氩气)来“搅拌”钢水,是保证钢材质量均匀的关键步骤。这些气体从哪里吹入(底部气孔的位置和角度)、吹多少孔,直接影响着钢水的流动和混合效果。本研究利用计算机模拟技术,详细探究了 210 t 转炉底部气孔的数量、分布位置(离中心的距离)和排列角度对炉内钢水流动模式的影响。模拟发现:(1)气孔数量与流动模式:当气孔少于 8 个时,钢水会形成明显的“双漩涡”流动。但当气孔增加到 12 个时,这种特定的漩涡模式就消失了。总体而言,气孔数量越多、分布越分散,对钢水的搅拌效果就越好。(2)气孔位置:在炉底,气孔距离炉子中心越近(在一定范围内),搅拌混合效果越好。但实际生产中也不能太靠近中心,以免影响其他操作。(3)气孔角度排列:不对称地布置气孔角度,比均匀对称布置更能减少钢水中的“流动死角”(流速极慢的区域),从而显著提升整体的混合均匀度。工厂根据这些模拟结果优化了气孔布置(将 4 孔等角度布置改为 8 孔不等角度布置)。经过实际生产测试,优化后的方案成功降低了钢水关键成分的浓度差异(碳氧积指标下降),证明了这种改进确实能让钢水混合得更均匀。这项研究为优化大型转炉的底吹设计,提高炼钢效率和钢材质量提供了科学依据。

在现代钢铁冶炼工艺中,转炉冶炼是主要方法之一。目前主要采用顶底复吹的方法炼钢,在顶吹氧气的同时从转炉底部吹入氮气或者氩气等气体搅拌钢水,改善熔池的流动性,增加熔池的混匀速率,提高转炉冶炼效率^[1-4]。

转炉底吹过程中的气体分布、流动特性以及其与钢水的相互作用机制均为影响底吹效果的关键因素。底吹孔的布置通过影响转炉熔池的钢水流动,进而影响转炉底吹搅拌效果。通过对底吹过程中的流体动力学特性进行深入分析,可以为转炉的设计

作者单位:北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083

和操作提供更为精确的指导,不少学者对此进行了相关研究^[5-8],汪成义等^[9]针对 210 t 转炉研究了底吹供气元件数量、位置等对熔池混匀的影响,冯强等^[10]对 100 t 转炉不同底吹方式对熔池混匀时间的影响进行了研究,宁林新等^[11]对 100 t 转炉底部透气元件布置对钢水流场的影响进行了数值模拟研究,李姣等^[12]对 210 t 转炉供气元件支数和位置对冶炼的影响进行了数值模拟研究和工业试验分析。随着大废钢比、高效冶炼转炉炼钢需求的进一步提高,转炉底吹技术也在不断改进。

顶底复吹转炉底吹搅拌的强弱对冶炼效果影响显著,底吹搅拌强度越大,钢水混匀效果越好。为进一步研究转炉底吹孔布置对熔池混匀效果的影响,本文设计了不同 210 t 转炉底吹孔布置方案,并采用数值模拟的方法研究了底吹孔数量、底吹孔节圆位置和底吹孔角度布置对转炉流场的影响规律。

210 t 转炉底吹数值模拟

为研究某厂 210 t 转炉不同底吹孔布置方案对转炉熔池流场的影响,建立了转炉底吹钢水和气体流动的数学模型,并开展了数值模拟计算。

转炉底吹数值模拟

➤ 基本假设

钢水在转炉内的流动是复杂的湍流流动,为了建立转炉底吹数学模型,进行以下基本假设:

- (1) 钢水为牛顿流体;
- (2) 钢水不与气体发生化学反应;
- (3) 计算边界为无滑移边界;
- (4) 底吹孔没有堵塞,气体从底吹孔均匀流出。

➤ 控制方程

基于连续介质模型建立某厂转炉底吹数学模型,描述钢水在转炉熔池内流动的控制方程为连续性方程、动量守恒方程、标准 $k-\varepsilon$ 方程、能量守恒方程和体积函数方程。具体如下:

(1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式中: ρ 为钢水密度, kg/m^3 ; u_i 为钢水在 i 方向的流速, m/s ; t 为时间, s ; x_i 为 i 方向的坐标。

(2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (2)$$

式中: p 为静压力, Pa ; μ 为黏度系数, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; g_i 为重力加速度, m/s^2 ; u_i 和 u_j 分别为钢水在 i 、 j 方向的速度分量, m/s ; x_i 和 x_j 分别为 i 、 j 方向的坐标。

(3) $k-\varepsilon$ 方程

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: k 为湍动能; ε 为湍动能耗散率; μ_t 为湍动能黏度; G_k 为由于平均速度梯度产生的湍流动能; G_b 为由于浮力产生的湍流动能; Y_M 为在可压缩湍流中波动膨胀对整体耗散率的贡献; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 和 $C_{3\varepsilon}$ 为常数; σ_k 和 σ_ε 分别为 k 和 ε 的湍流普朗特数。

(4) 能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i T)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

式中: c_p 为定压比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; λ 为热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; T 为钢水温度, K 。

(5) 体积函数

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mu_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \quad (6)$$

式中: F 为体积函数, 当函数 $F=1$ 表示钢水充满状态, 当 $0<F<1$ 表示自由表面, $F=0$ 表示无钢水状态。

➤ 几何模型与网格划分

某厂 210 t 转炉炉膛内径为 5800 mm, 炉底直径 D 为 4200 mm, 熔池深度为 1650 mm, 使用几何建模软件 Pro/E 进行转炉顶底复吹计算区域的三维几何建模, 如图 1(a) 所示。底吹孔数量为 4, 等角度对称分布, 所处节圆(底吹孔布置的圆周, 称为“节圆”)位置为 $0.5D$ 。考虑到计算区域的对称性, 为有效利用计算资源, 建立 1/4 模型并进行网格划分, 如图 1(b) 和 1(c) 所示。通过逐步减小网格的网格无关性测试后, 选择网格尺寸最大为 50 mm, 底吹孔处网格尺寸为 2 mm, 单元总数量共 83692 个。

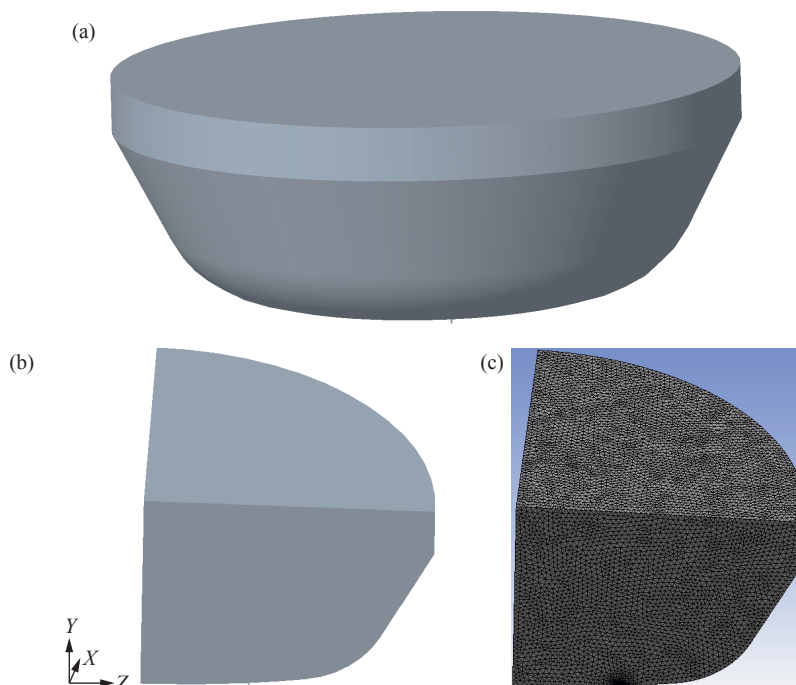


图1 转炉熔池几何模型及网格划分: (a) 几何模型; (b) 1/4 模型; (c) 网格划分

边界条件

某厂 210 t 转炉底吹流量为 700 m³/h，底部供气

元件的等效直径为 16 mm，底吹气体流速通过底部供气元件数量计算得到。转炉底吹数值模拟方案及边界条件如表 1 所示。

表 1 转炉底吹数值模拟方案及边界条件

方案	底吹孔数量	节圆位置	角度布置	底吹压力/MPa	气体流速/(m/s)
1 [#]	4	单节圆0.5D	等分	2.5	323
2 [#]	8	单节圆0.5D	等分	2.5	161.5
3 [#]	12	单节圆0.5D	等分	2.5	108
4 [#]	8	单节圆0.5D	两两一对30°，四对等分	2.5	161.5
5 [#]	12	双节圆0.3D、0.5D	等分	2.5	36
6 [#]	4	单节圆0.2D	等分	2.5	323
7 [#]	4	单节圆0.8D	等分	2.5	323
8 [#]	4	单节圆0.5D	矩形（60°）	2.5	323

210 t 转炉底吹钢水流动的基本特征

使用 ANSYS Fluent 17.1 软件进行 210 t 转炉底吹钢水和气体流动的数值模拟直至残差收敛，得到转炉底吹过程熔池钢水流动分布特征。为直观查看三维转炉钢水数值模拟结果，选择转炉熔池的 4 个特征截面进行数值模拟结果分析，对 $x=0$ 、 $z=0$ 、液面下 0.2 m 及液面下 0.8 m 分别表示为 x_0 、 z_0 、 $y_{0.2}$ 和 $y_{0.8}$ ，如图 2 所示。

转炉熔池特征截面 x_0 和 z_0 的气液相界面分布如

图 3 所示，可见较明显的相界面和底吹气体引起的液面波动，界面处靠近底吹孔位置的钢水波动较高，为底吹气体冲击该处所致。

转炉熔池不同特征截面的钢水速度分布如图 4 和图 5 所示，熔池底部底吹气体在上升过程中带动钢水从熔池底部向上部运动，从图 4 中可以看出钢水速度主要分布在 0~1 m/s，整个熔池内钢水速度分布不均匀，并有多处湍流漩涡。整体来看越靠上部的钢水速度越大，在气液相界面处的钢水速度较

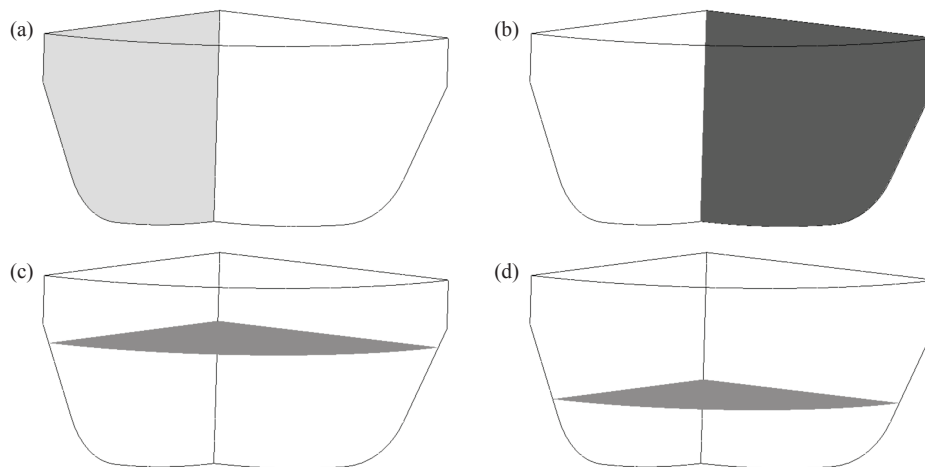
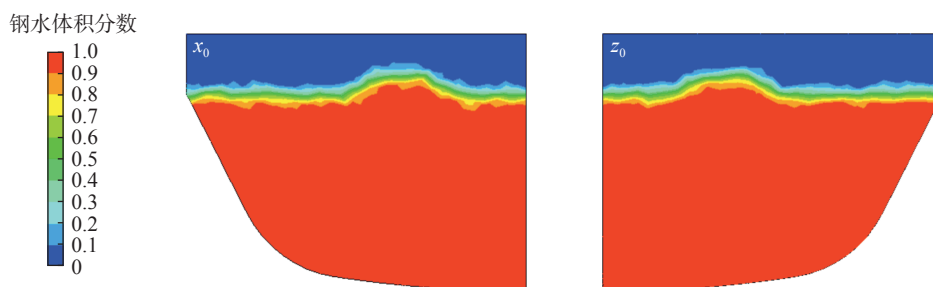
图2 转炉熔池典型截面示意图: (a) x_0 ; (b) z_0 ; (c) $y_{0.2}$; (d) $y_{0.8}$ 

图3 转炉熔池气液相界面云图分布

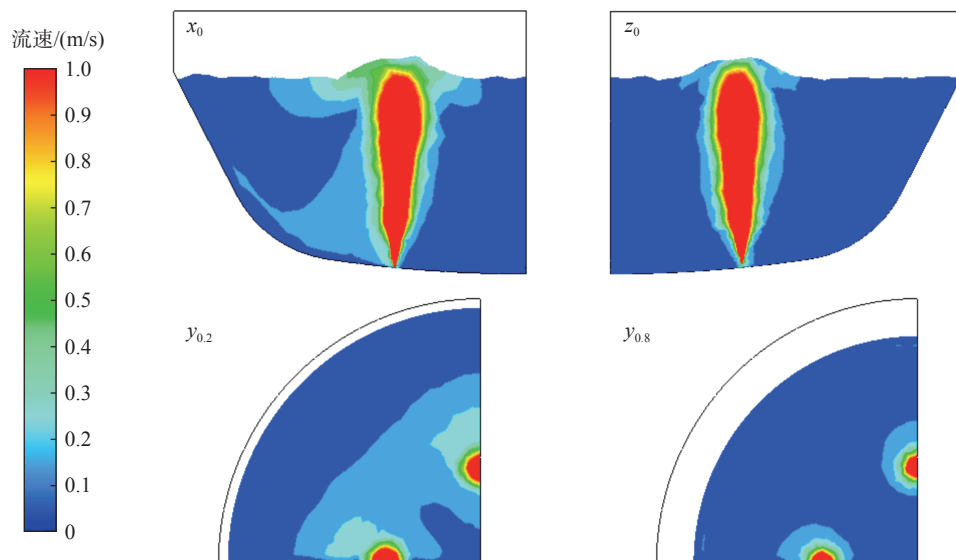


图4 转炉熔池钢水流速分布云图

大。从图5可以看出,钢水在底吹气体的上浮作用下形成2个区域的循环流,靠近底吹气相的钢水在气体上浮运动的带动下向上流动,到达液面后分别向中心和炉壁流动,然后循环向下流动。尽管该循

环流可以促进钢水成分和温度均匀,但是仍存在一定低速流动的区域,如在靠近转炉壁面区域,此处钢水流速低,与其他区域的对流交换较弱,容易导致局部温度和成分不均匀。

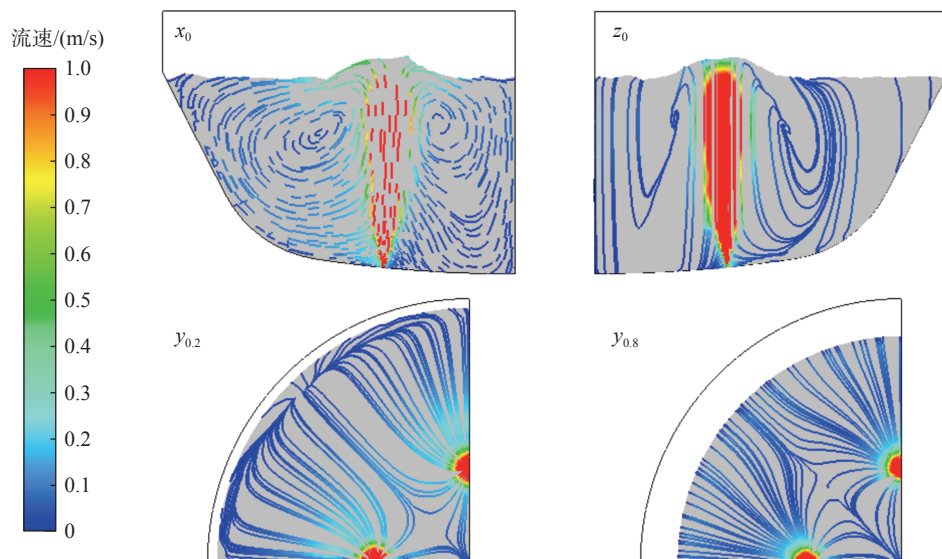


图5 转炉熔池钢水流线分布

底吹孔布置参数对转炉熔池流场的影响

为研究底吹孔布置因素如底吹孔数量、底吹孔节圆位置和底吹孔角度布置对转炉熔池流场的影响，设计不同的底吹孔布置方案，采用数值模拟的方法对各个因素分别开展研究。

底吹孔数量影响

为研究底吹孔数量对转炉熔池流场的影响，分别设计了底吹孔数量为4、8和12的组合方案，如表1（1#~5#方案）和图6所示，并分别针对各方案开展了数值模拟计算。

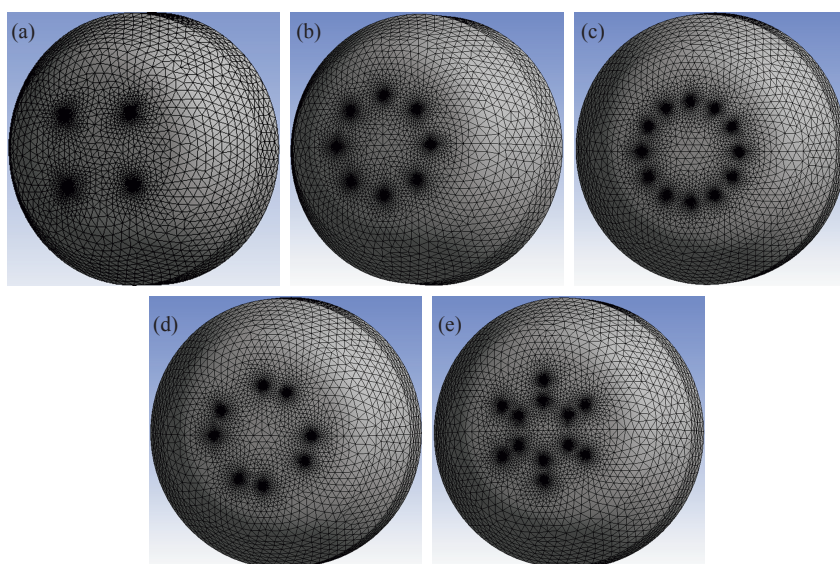
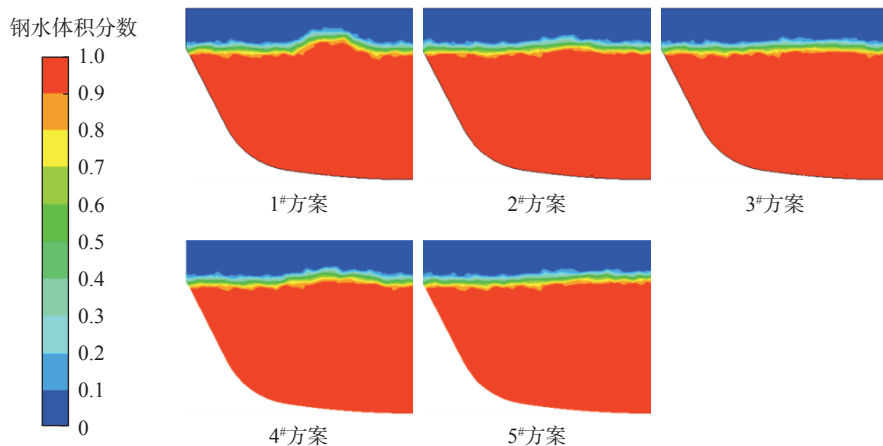
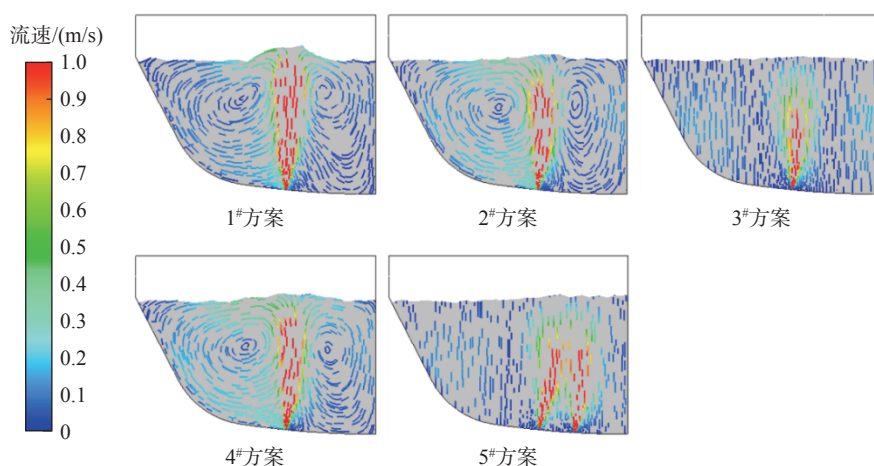


图6 不同底吹孔数量方案的数值模拟方案的网格划分: (a) 1#方案; (b) 2#方案; (c) 3#方案; (d) 4#方案; (e) 5#方案

不同底吹孔数量方案的截面 x_0 处气液相界面分布云图如图7所示，可以看出，除了底吹孔数量为4时钢水液面波动较大，底吹孔数量为8和12时的钢水液面均比较平稳。

图8所示为不同底吹孔数量方案的截面 x_0 处钢

水流线分布，可以看出，底吹孔数量为4和8时，转炉熔池内部均存在明显的循环流，该循环流基本特征一致，均为钢水在底吹孔附近向上流动，到达液面后向中心和炉壁分散然后向下回流。底吹孔数量为12的3#方案和5#方案的转炉熔池并没有呈现类

图7 不同底吹孔数量方案的截面 x_0 处气液相界面分布云图图8 不同底吹孔数量方案的截面 x_0 处钢水流线分布

似的循环流。

不同底吹孔数量方案下的钢水速度分布如图9和表2所示,可见不同底吹孔数量方案下的钢水速度区别较大。采用钢水的速度作为判定底吹效果的主要指标,钢水速度小于0.04 m/s时表明钢水对流

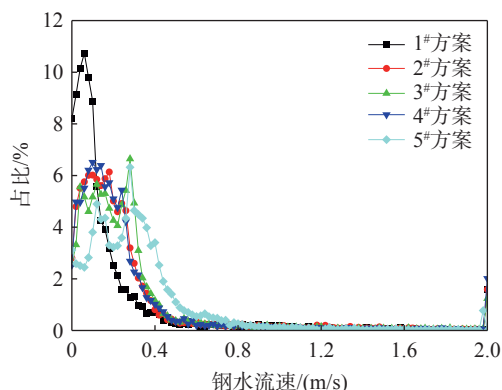


图9 不同底吹孔数量方案的钢水速度分布

较弱,难以有效混合;钢水速度大于0.5 m/s表明钢水对流较强,混合效果充分。底吹孔数量为4时,流速小于0.04 m/s的钢水比例远大于底吹孔数量为8和12的方案;而且底吹孔数量为4时,流速大于0.5 m/s的钢水比例也小于底吹孔数量为8和12的方案。钢水速度是钢水对流交换强弱的主要指标,流速越大说明钢水之间对流交换温度和溶质的程度越激烈,反之亦然,因此可以认为底吹孔数量为4的方案的底吹搅拌效果没有底吹孔数量为8和12的效果好。

从表2中可以看出,流速小于0.04 m/s的钢水占比最小的方案和流速大于0.5 m/s的钢水占比最大的方案均为5#方案,说明底吹孔数量越多,分布越分散,对转炉熔池的搅拌效果就越好。

底吹孔节圆位置影响

为研究底吹孔节圆位置对转炉熔池流场的影

表 2 不同底吹孔数量方案的钢水流速分布统计

方案	占比/%		
	<0.04 m/s	>0.1 m/s	>0.5 m/s
1 [#]	17.32	52.00	9.99
2 [#]	7.61	75.13	11.41
3 [#]	5.89	78.77	10.45
4 [#]	7.51	75.80	11.11
5 [#]	5.70	86.52	13.52

响, 分别设计了底吹孔数量为 4, 节圆位置为 0.2D、0.5D 和 0.8D 的 3 种方案, 如表 1 (6[#]、1[#]和 7[#]方案) 和图 10 所示, 并分别针对各方案开展了数值模拟计算。

不同底吹孔节圆位置方案的截面 x_0 处气液相界面分布云图如图 11 所示, 可以看出, 不同底吹孔节圆位置方案的钢水液面均存在明显的液面波动, 并且液面波峰位置与底吹孔位置有较强的对应关系。

图 12 为不同底吹孔节圆位置方案的截面 x_0 处钢水流线分布, 可以看出, 底吹孔节圆位置为 0.5D 和 0.8D 时, 转炉熔池内部均存在明显的循环流, 循环流方向以底吹孔位置为界限分为 2 个不同的方向。底吹孔节圆位置为 0.2D 时, 转炉熔池钢水的上述循环特征几乎消失, 这是由于底吹孔位置距离转炉中心太近, 此时不同底吹孔气体上浮过程中容易聚合为一股气流。

不同底吹孔节圆位置方案的钢水流速分布如图 13 和表 3 所示, 可以看出, 流速小于 0.04 m/s 的钢水比例随着底吹孔节圆位置的增加而增加, 并且流速大于 0.5 m/s 的钢水比例也随着底吹孔节圆位置的增加而减小。该结果表明底吹孔节圆位置越小, 底吹搅拌的混匀效果越好。然而在实际转炉吹炼生产中, 底吹孔位置不能太靠近转炉中心, 否则容易与氧枪顶吹搅拌发生作用, 从而减弱对钢水的搅拌效果。

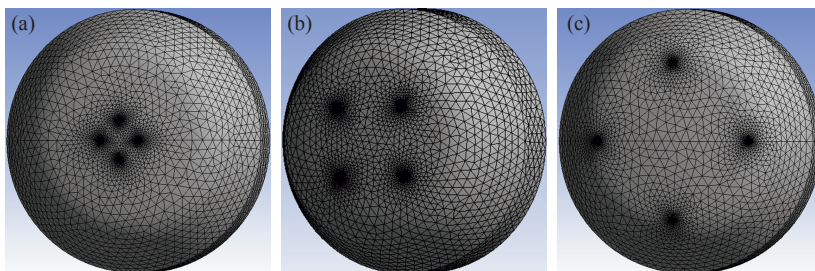


图 10 不同底吹孔节圆位置的数值模拟方案的网格划分: (a) 6[#]方案; (b) 1[#]方案; (c) 7[#]方案

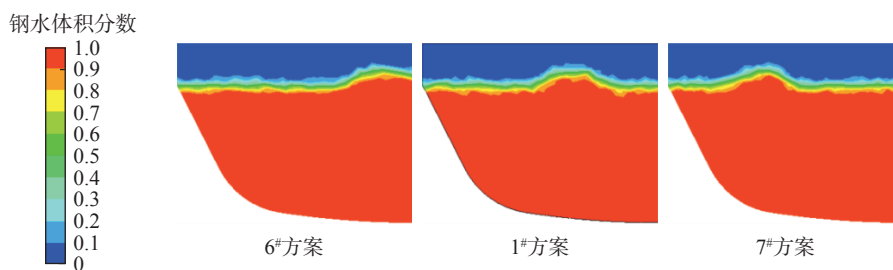


图 11 不同底吹孔节圆位置方案的 x_0 处气液相界面分布云图

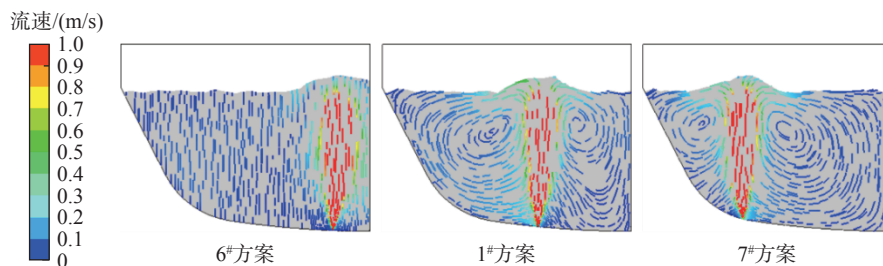


图 12 不同底吹孔节圆位置方案的 x_0 处钢水流线分布

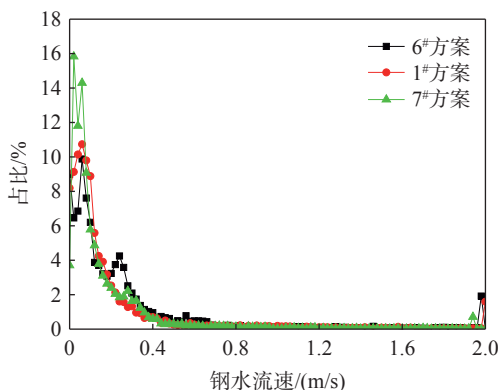


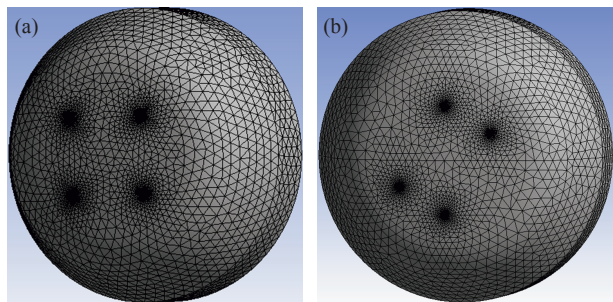
图 13 不同底吹孔节圆位置方案的钢水流速分布

表 3 不同底吹孔节圆位置方案的钢水流速分布统计

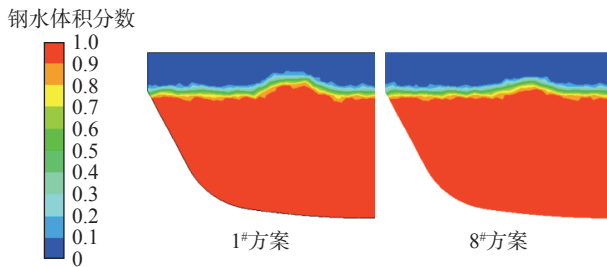
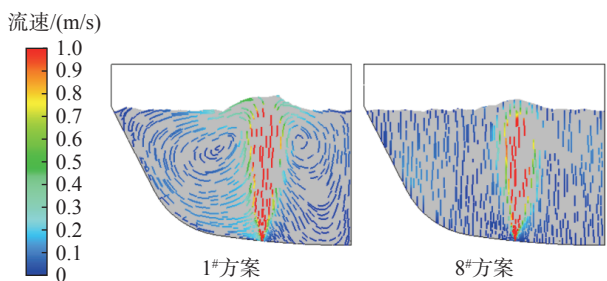
方案	占比/%		
	<0.04 m/s	>0.1 m/s	>0.5 m/s
6 [#]	15.45	60.20	11.80
1 [#]	17.32	52.00	9.99
7 [#]	19.53	45.29	6.49

底吹孔角度布置影响

为研究底吹孔角度布置对转炉熔池流场的影响,分别设计了底吹孔角度布置为底吹孔夹角 90° 等分和 60° 矩形的 2 种方案,如表 1 (1[#]和 8[#]方案)和图 14 所示,并分别针对各方案开展了数值模拟计算。

图 14 不同底吹孔角度布置的数值模拟方案的网格划分: (a) 1[#]方案; (b) 8[#]方案

不同底吹孔角度布置方案的截面 x_0 处气液相界面分布云图如图 15 所示,可以看出,不同底吹孔角度布置方案的钢水液面均存在一定程度的波动,底吹孔 60° 矩形布置的 8[#]方案的液面波动较小。图 16 为不同底吹孔角度布置方案的截面 x_0 处钢水流线分布,可以看出,8[#]方案的转炉熔池未呈现如 1[#]方案所示的双循环流,表明底吹孔为非等分对称分布时,不易在转炉熔池内部形成双循环流。

图 15 不同底吹孔角度布置方案的 x_0 处气液相界面分布云图图 16 不同底吹孔角度布置方案的 x_0 处钢水流线分布

不同底吹孔角度布置方案下的钢水流速分布如图 17 和表 4 所示,可以看出,底吹孔角度布置对流速小于 0.04 m/s 的钢水比例有较大影响,1[#]和 8[#]方案的底吹孔数量及节圆直径均一致,8[#]方案条件下流速小于 0.04 m/s 的钢水比例远小于方案 1[#]的,说明底吹孔角度不对称布置能有效减少转炉熔池死区比例,增强转炉底吹混匀效果。

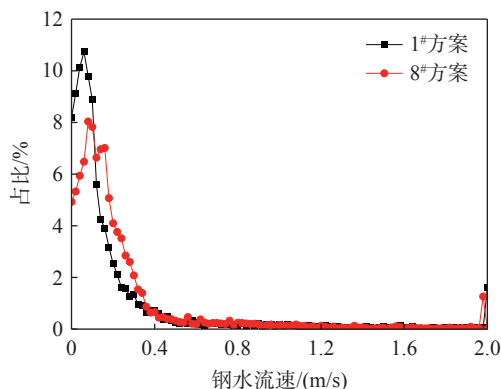


图 17 不同底吹孔角度布置方案下的钢水流速分布

表 4 不同底吹孔角度布置方案下的钢水流速分布统计

方案	占比/%		
	<0.04 m/s	>0.1 m/s	>0.5 m/s
1 [#]	17.32%	52.00%	9.99%
8 [#]	10.25%	69.30%	10.11%

工业验证试验

某厂目前采用的转炉底吹孔数量为4, 节圆位置为 $0.5D$, 底吹孔角度为 90° 等分布置, 统计2023年下半年转炉冶炼出钢终点钢水的碳氧积 $w([C]) \cdot w([O])$ 为0.0021。根据数值模拟研究和理论分析得到的转炉底吹孔数量、底吹孔节圆位置和底吹孔角度布置因素对钢水流场影响规律, 对转炉底吹孔数量和布置进行了优化, 将转炉底吹孔数量改为8, 节圆位置保持 $0.5D$, 底吹孔两两一对 30° , 四对等分布置, 即4#方案, 并开展了40炉现场生产试验。统计发现转炉冶炼出钢终点钢水的碳氧积为0.0020。转炉冶炼出钢终点钢水的碳氧积是转炉终点钢水混匀程度的一个重要标志, 转炉钢水混匀程度越好, 则转炉终点碳氧积越低。从现场初步试验结果来看, 优化转炉底吹孔布置后的吹炼终点钢水混匀程度得到提高。

结束语

(1) 底吹孔数量小于等于8个时, 转炉熔池内部均存在明显的双循环流, 底吹孔数量达到12个时, 该双循环流消失。底吹孔数量越多, 分布越分散, 其对转炉熔池的搅拌效果就越好。

(2) 在一定范围内, 底吹孔节圆位置越小, 底吹搅拌的混匀效果越好。

(3) 底吹孔角度不对称布置能有效减少转炉熔池死区比例, 增强转炉底吹混匀效果。

参考文献

- [1] 高攀, 李海波, 王新华. 从炼钢转炉的发展历史看转炉底吹搅拌的未来//第八届中国金属学会青年学术年会论文集. 沈阳, 2016
- [2] 高旭, 于瑞波, 王怀刚. 120 t转炉底吹系统的优化. 山东冶金, 2019, 41(5): 76
- [3] 陈连军. 转炉底吹系统工艺优化探讨. 中外企业家, 2018(20): 135
- [4] 宁知常, 苗振鲁, 赵友虎, 等. 转炉底吹系统工艺优化实践. 山东冶金, 2017, 39(6): 6
- [5] 张燕超, 张彩军, 曾凯, 等. 300 t复吹转炉底吹系统优化模拟. 钢铁, 2021, 56(5): 31
- [6] 杨晨. 120吨顶底复吹转炉水力学模型优化研究[学位论文]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2016
- [7] 姚柳洁. 300 t复吹转炉全炉役熔池流动特性变化和炉衬演变规律研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2020
- [8] 陈均. 半钢炼钢转炉底吹工艺优化研究. 炼钢, 2020, 36(5): 21
- [9] 汪成义, 吴巍, 姜周华, 等. 210 t转炉底吹供气参数优化模拟研究. 钢铁研究学报, 2021, 33(3): 202
- [10] 冯强, 朱荣, 姚柳洁, 等. 底吹布置模式对100 t转炉熔池动力学条件的冷态研究. 工业加热, 2020, 49(2): 14
- [11] 宁林新, 解家英, 张利君, 等. 100 t复吹转炉底吹透气砖分布的数值模拟. 中国冶金, 2018, 28(7): 8
- [12] 李姣, 于会香, 王新华, 等. 转炉底吹枪优化布置的数值模拟. 钢铁, 2018, 53(2): 32

作者简介: 张海辰(1988—), 男, 北京人, 北京科技大学生态与冶金工程学院硕士研究生, 主要研究方向: 钢铁冶金, 转炉炼钢。E-mail: zhanghaichen008@163.com。