

文章编号: 1000- 582X(2006) 01- 0049- 04

复吹转炉熔池内流体流动的数值模拟*

温良英¹, 周远华², 陈登福¹, 白晨光¹, 董凌燕¹, 张生富¹

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400030; 2. 重庆钢铁股份公司 钢铁研究所, 重庆 400080)

摘要: 建立了描述复吹转炉熔池内流体流动的数学模型, 采用 PHOENICS (Parabolic Hyperbolic or Elliptic Numerical Integration Codes Series) 商用软件模拟计算. 根据模拟计算结果分析了底吹、顶吹、顶底复吹等不同工况下熔池内不同截面流体的流动状况和速度分布, 得出各喷枪正常工作情况下, 熔池内的流动是以转炉中心轴对称的三维流动, 底吹、顶吹搅拌流动的动力主区和流动迟缓的旋涡区, 提出在实际生产中应设法减少或消除的流动“死区”, 转炉采取顶底复吹工艺时, 底吹喷枪的合理布置位置应在熔池直径的 (0.5~ 0.7) 倍圆周上.

关键词: 转炉; 复吹; 熔池; 流动; 数值模拟

中图分类号: TF729.5

文献标识码: A

转炉复合吹炼技术能够改善熔池的搅拌, 从而缩短钢水成分和温度的均匀时间, 降低渣中的氧化铁含量, 可提高钢水的收得率和降低铁合金的消耗而在国内外获得了很大的发展^[1-3]. 目前, 复吹转炉钢的产量占了整个转炉钢产量的大部分. 笔者以某厂改造设计的复吹转炉为对象, 建立描述转炉熔池的数值模拟计算模型, 通过模拟计算了熔池内气体的流动情况.

1 数学描述方法

1.1 模拟条件

为便于数值计算, 假设:

- 1) 熔池表面是水平的, 物性参数不随温度变化, 即常物性;
- 2) 忽略金属液内化学反应的影响;
- 3) 顶、底吹气体为完全气体, 为常物性、稳态流动;
- 4) 底吹喷嘴为等截面环缝;
- 5) 转炉炉衬为绝热体.

1.2 基本计算模型

某厂提供的复吹转炉用顶吹喷头是以顶吹喷枪中

心轴对称的 4孔喷头, 4个底吹喷嘴对称布置, 如图 1 所示, 因此转炉内金属液的流动具有对称性. 选取以顶吹喷枪纵向中心线为轴的圆柱坐标系, $\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} = 0$

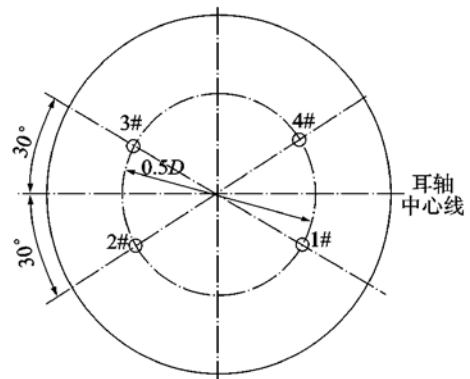


图 1 转炉底吹喷枪的布置图

1.2.1 控制方程

在 $r\theta z$ 坐标系统中, r, θ, z 的 3 个速度分量分别为 u, v, w . 描述转炉内流动的控制方程^[4]可整理为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left(\rho u \phi - \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho w \phi - \Gamma_{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial z} \right] = S_{\phi} \quad (1)$$

方程中各项的具体表达式见表 1

* 收稿日期: 2005- 09- 08

作者简介: 温良英 (1966-), 女, 重庆合川人, 重庆大学副教授, 博士, 主要从事钢铁冶金、节能环保方面的研究.

表 1 通用控制方程式(1)中各项的具体表达式

名称	ϕ	Γ_ϕ	S_ϕ
连续性方程	1	0	0
径向动量方程	u	μ_e	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \left[\mu_e \frac{\partial u}{\partial r} \right] \right] + \rho \frac{v^2}{r} - 2\mu_e \frac{u}{r^2}$
周向动量方程	v	μ_e	$-\rho \frac{uv}{r} - \frac{v}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r\mu_e)$
轴向动量方程	w	μ_e	$-\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_e \frac{\partial w}{\partial z} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r\mu_e \frac{\partial w}{\partial z} \right]$
湍动能方程	k	$\frac{\mu_e}{\sigma_k}$	$G - \rho \epsilon$
湍动能耗散率	ϵ	$\frac{\mu_e}{\sigma_\epsilon}$	$\frac{\epsilon}{k} (c_1 G - c_2 \rho \epsilon)$
能量方程	T	$\frac{\mu_e}{\sigma_T}$	0

表 1 中:

$$G = \mu_e \left[2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{u}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial r} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right];$$

$\rho = \alpha \rho_g + (1 - \alpha) \rho_l$; α 为金属液中含气率; ρ_l, ρ_g 分别为金属液和喷吹气体的密度. 湍流粘度采用 $k - \epsilon$ 模型计算, $\mu_e = C_\mu \rho k^2 / \epsilon$ 模型系数见表 2^[4-6]. 在 PHOENICS V 3.3 计算软件系统中选用 KEMODL 湍流模型求解.

表 2 $k - \epsilon$ 模型中的系数

C_μ	C_1	C_2	σ_k	σ_ϵ	σ_T
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3	0.9

1.2.2 边界条件

1) 入口条件. 顶吹氧枪喷头为 4 孔拉瓦尔喷头^[5] $4 - (\phi 32.5 \sim \phi 41.2) \times 12^\circ$; 氧气流股在喷出口处的马赫数 M 为 1.99 假设该流股进入转炉内的切向速度 v_{in} 为 0 径向速度 u_{in} 和轴向速度 w_{in} 均匀分布, 即

$$w_{in} = M a_{20} \cos \alpha, \quad u_{in} = M a_{20} \sin \alpha, \quad v_{in} = 0$$

$k_{in} = 0.05 v_{in}^2, \quad \epsilon_{in} = k_{in}^{1.5} / 0.03, \quad T_{in} = 293 \text{ K} (20^\circ \text{C})$. 式中, M 为气流的出口马赫数; a_{20} 为氧气在 20°C 时的音速; α 为气流喷出口中心线与氧枪中心轴之间的夹角.

底吹喷枪出口最大气体流速为音速 (对应的气流马赫数为 1).

2) 壁面条件. 假设固体壁面为无滑移、不穿透的边界, 即在固体壁面处, 垂直于壁面的速度和切向速度等均为 0

在气流入口壁面及其所在的壁面附近, 速度等参数变化很大, 采用壁面函数法 (Wall Function) 确定.

3) 对称性. 假设所有垂直于对称轴方向的参变量的导数均为 0 即 $r=0$ 时, $\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0$.

4) 钢液面为自由边界.

2 数值求解

对上述控制方程组的求解采用英国著名教授 Spalding 为代表的学派研制的软件 PHOENICS 进行. 具体方法如下:

1) 根据转炉内金属液的流动对称性, 计算可在整个熔池的 1/2 上进行, 建立转炉的几何计算模型, 计算区域划分为 $100 \times 92 \times 50$ 个网格;

2) 紊流求解模型选用工程上广泛应用的 $k - \epsilon$ 双方程模型;

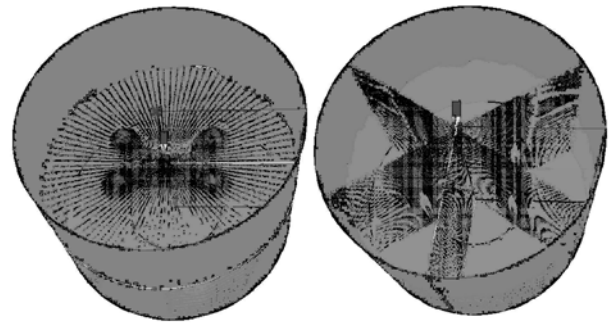
3) 假设转炉顶底喷枪出口截面上的气流速度均匀一致, 紊动能及紊动能耗散为 $k_{in} = 0.05 v_{in}^2, \epsilon_{in} = k_{in}^{1.5} / 0.03$ 出口截面处压力为环境压力, 壁面处启用壁面函数, 钢液的温度设定为 1600°C , 收敛性指标设定为 10^{-3} ;

4) 在 PHOENICS V3.3 环境下调用 Earth 运行求解转炉熔池中的气流流动速度和温度的变化规律, 在 P4.2 6G 处理器的微机上的运行时间约为 12 h

3 数值模拟结果与讨论

3.1 底吹气流在转炉熔池内的流动

图 2(a) 是底吹引起的熔池表面 ($z = 1309 \text{ mm}$, $r - \theta$ 横截面) 的流动状况, 图 2(b) 是底吹喷枪位置所在 $r - z$ 截面和底吹喷枪间 $r - z$ 截面上的流动状况. 由图 2 可见, 底吹的 4 个喷枪按设计要求正常工作时, 转炉内的流动是以转炉中心轴对称的三维流动, 通过底吹喷枪的 $r - z$ 截面上的流动是相似的, 在底吹喷枪间的各 $r - z$ 截面上的流动状况不同. 底吹气体从底吹喷枪喷出后在熔池内向上运动并沿流股的径向扩展, 随着底吹气体的上浮其影响范围逐渐扩大, 且底吹气体在上浮过程中带动了周围钢液的流动, 越靠近气流中心流速越大 (见图 2(b)).



(a) $r - \theta$ 面, $z=1309 \text{ mm}$ (b) $r - z$ 面, $\theta=30, 90, 150, 210, 330^\circ$

图 2 转炉底吹熔池内的流动状况

图 3 中 (a)、(b)、(c)、(d) 分别为底吹喷枪所在的截面 $\theta = 30^\circ$ 和远离底吹喷枪所在的截面 $\theta = 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ (与耳轴中心连线的夹角), 熔池内 $r-z$ 截面上的速度分布. 可以看出, 在底吹流股的牵引下, 底吹喷枪圆以内的流体始终由下向上运动. 底吹喷枪圆以外的流体, 靠近底吹流股轴线附近随流股由下向上运动, 随距轴线中心距离的增加流体逐渐改为由上向下运动. 由图 3 还可以看出, 在本模拟条件下, 转炉熔池底部中心是底吹搅拌的死区, 在死区中钢液流动迟缓, 动力学条件差, 将成为影响底吹搅拌混匀条件的限制性环节.

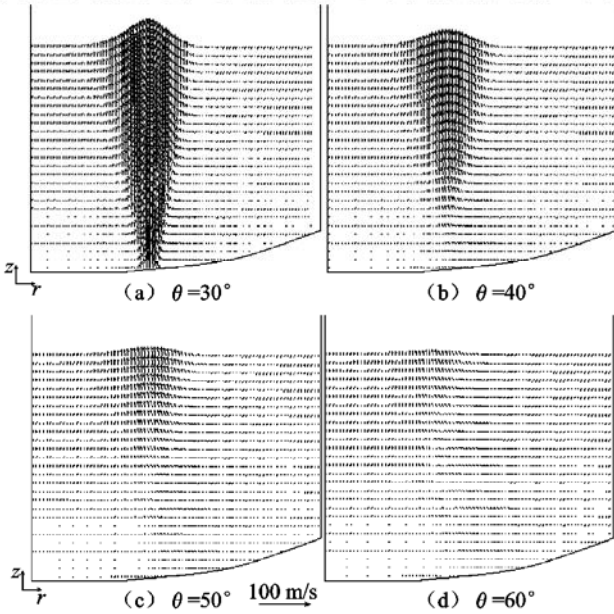


图 3 转炉底吹流股在熔池内的 $r-z$ 截面上速度分布

3.2 顶吹流股在转炉熔池内的流动

图 4 中 (a)、(b)、(c)、(d) 分别为与转炉耳轴中心连线夹角 $\theta = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ 时, 顶吹流股在转炉熔池内 $r-z$ 截面上的速度分布情况. 可见, 在周向 θ 不同的 $r-z$ 截面上流动是相似的, 即顶吹转炉熔池内的流动基本上可认为是以中心轴对称的流动. 在顶吹喷枪的下方中心位置区域, 由于流股巨大的冲击动能的作用, 击穿熔池表面在熔池内向下运动, 同时带动周围的钢液随流股一起向下运动. 但由于钢液与顶吹气体间存在较大的密度差, 钢液对气体的上浮作用加快了气流沿径向扩张, 使顶吹流体的冲击动能很快耗散, 在熔池的中下部逐渐转向, 沿熔池周边变为由下向上运动, 整个熔池内流体的流动速度比底吹时大得多, 这主要因为顶吹流股的流量、动能和压力均比底吹流股的流量、动能和压力大得多的缘故.

比较图 3 和图 4 也可看出, 顶吹流股较底吹流股扩张得快, 轴向动能耗散得更快, 尽管在此模拟条件下顶吹流股的喷吹动能比底吹流股的喷吹动能大得多, 但顶吹流股并未向底吹流股那样边流动边扩张穿过熔池, 顶吹流股远未达到熔池底部就已向四周散开, 然后向上运动溢出熔池进入转炉熔池上方.

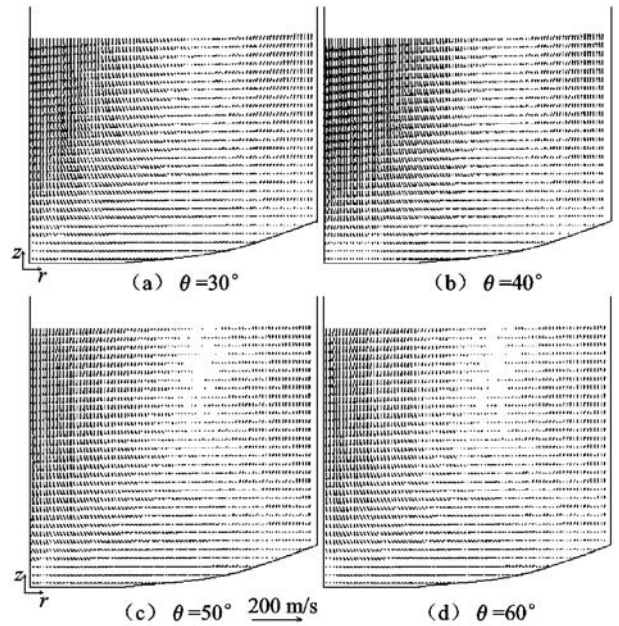


图 4 转炉顶吹熔池内 $r-z$ 截面上的速度分布

由图 4 还可以看出, 转炉熔池底部中心, 特别是熔池中上部距转炉轴中心 (0.5~0.7) 倍半径的区域相对于其它区域, 形成了速度小流动迟缓的旋涡区, 其动力学条件差, 是顶吹搅拌的“死区”, 在实际生产中应设法减少或消除该流动死区.

3.3 转炉复吹熔池内的流动

图 5 中 (a)、(b)、(c)、(d) 分别为与转炉耳轴中心连线夹角 $\theta = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ$ 时, 转炉复吹熔池内 $r-z$ 截面上的速度分布情况. 可见, 顶吹流股由于其强大的流量、动能和压力 (与底吹流股比较) 在熔池内起到了绝对主导作用, 使复吹熔池内各截面上流动速度的总体分布与顶吹熔池的情况相近, 流动迟缓的旋涡区缩小, 特别是熔池底部中心部位基本上消除, 这说明虽然底吹流股的流量、速度等参数相对于顶吹流股的对应参数小得多, 但在熔池中所起的作用非常明显.

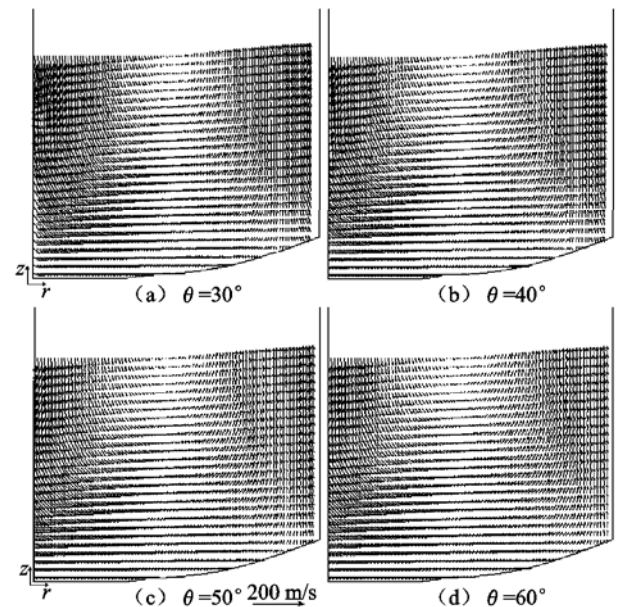


图 5 转炉复吹熔池内 $r-z$ 截面上的速度分布

4 结 论

1) 在底吹喷枪圆以内的流体始终由下向上运动。在底吹喷枪圆以外的流体, 靠近底吹流股轴线附近随流股由下向上运动, 随距轴线中心距离的增加流体逐渐改为由上向下运动。在本模拟条件下, 转炉熔池底部中心是底吹搅拌的死区, 在死区中钢液流动迟缓, 动力学条件差, 将成为影响底吹搅拌混匀条件的限制性环节。

2) 在顶吹转炉熔池底部中心, 特别是熔池中上部距转炉轴中心(0.5~0.7)倍半径的区域相对于其它区域, 形成了速度小流动迟缓的旋涡区, 其动力学条件差, 是顶吹搅拌的“死区”, 在实际生产中应设法减少或消除该流动死区。鉴于此, 建议转炉采取顶底复吹工艺时, 将底吹喷枪布置在熔池直径的(0.5~0.7)倍圆周上。

3) 转炉复吹熔池内各截面上流动速度的总体分布与顶吹熔池的情况相近, 流动迟缓的旋涡区缩小, 特

别是熔池底部中心部位基本上消除, 这说明虽然底吹流股的流量、速度等参数相对于顶吹流股的对应参数小得多, 但在熔池中所起的作用非常明显。

参考文献:

- [1] 崔健, 杨文远. 宝钢 300 t 转炉溅渣护炉工艺研究 [J]. 钢铁, 1998, 33(10): 15-18
- [2] JUNG SM, RHEE C H, MIN D J. Thermodynamic Properties of Manganese Oxide in BOF Slags [J]. ISIJ International, 2002, 42(1): 63-70
- [3] MATTI J L, TMO M J E, ESA O V. Splashing and Spitting Behaviour in the Combined Blown Steelmaking Converter [J]. ISIJ International, 2002, 42(9): 944-949
- [4] 周远华. 重钢转炉复吹的模拟研究 [D]. 重庆: 重庆大学材料科学与工程学院, 2004: 21-32
- [5] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988: 433-438
- [6] 李宝宽, 赫冀成. 炼钢中的计算流体力学 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998: 20-21

Numerical Simulation of Fluid Flow in Converter Combined Blown Bath

WEN Langying¹, ZHOU Yuanhua², CHEN Dengfu¹,
BAI Chenguang¹, DONG Lingyan¹, ZHANG Shengfu¹

(1. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China
2. Steel and Iron Facility, Chongqing Steel and Iron Joint Stock Company, Chongqing 400080, China)

Abstract The fluid flow mathematic models in converter combined blown are set up. It is simulated for flow state and velocity distribution of gas and stir action in different behaviours of bottom blown, top blown and combined blown by software PHOENICS (Parabolic Hyperbolic or Elliptic Numerical Integration Codes Series). In normal operation condition of ejection guns, the fluid flow in bath is axisymmetric three-dimensions flow. The results reveal out dynamic main area and slowness cyclone zones, also asked *dead zone* abating or erasing in practice. These shows that bottom blown gun ought to 0.5~0.7 circumference diameter of fused bath using top-bottom combined blown process.

Key words converter; combined blown; fused bath; flow; numerical simulation

(编辑 李胜春)