

转炉出钢及涡流形成的数值模拟和水模型研究

王建强¹ 李俊国¹ 韩志杰²

(1 河北联合大学河北省现代冶金技术重点实验室,唐山 063009; 2 河北钢铁股份有限公司唐山钢铁公司,唐山 063016)

摘要 采用商业 CFD 流体模拟软件 Fluent6.3,通过基于压力的分离隐式求解器,以及 $k-\epsilon$ 双方程模拟了50 t 转炉出钢过程,并将模拟结果与几何相似比1:4的水模型模拟结果进行了比较。结果表明,数值模拟和水模型模拟结果具有好的可比性;由于数值模型在构建时忽略流体与壁面间的相互摩擦作用,数值模拟确定的涡流形成和出钢时间要短于水模型模拟结果;在现行出钢口结构形式下,涡流卷渣过程不可避免,涡流的形成主要发生在出钢过程的中后期。

关键词 转炉 出钢 涡流形成时间 数值模拟 水模型

A Study on Numerical Simulation and Water Model of Converter Tapping and Vortex Forming

Wang Jianqiang¹, Li Junguo¹ and Han Zhijie²

(1 Hebei Key laboratory of Modern Metallurgy Technology, Hebei United University, Tangshan 063009, 2 Tangshan Iron and Steel Co., Hebei Iron and Steel Co Ltd, Tangshan 063016)

Abstract The tapping process of a 50 t converter is simulated by using commercial software Fluent 6.3 and based on pressure separated implicit analytic calculation and $k-\epsilon$ bi-equation, and the simulation results is compared with the results of physical simulation with geometric similarity ratio 1:4 water model. Results show that the numerical simulation results are compared to water model simulation results, because of neglecting the interaction of friction between liquid and wall face in numerical model, the vortex forming time and tapping time obtained by numerical simulation are less than that obtained by water model simulation; at current structure of tapping hole, the slag entrained by vortex during tapping is inevitable, and the vortex formed is most at middle and later period of tapping.

Material Index Converter, Tapping, Vortex Forming Period, Numerical Simulation, Water Model

转炉出钢下渣主要发生在3个阶段:出钢初期下渣、中期钢液涡流卷渣和出钢后期下渣,其中钢液涡流卷渣量一般占总下渣量的60%左右^[1]。目前,通过实验室水模型分析出钢过程机理及现场实践,已发明了多种挡渣工具,均在不同程度上减少了下渣量^[2],提高了产品质量。本研究以唐钢50 t转炉为基础,借助 Fluent6.3 软件,从数值模拟的角度对转炉出钢过程中涡流的形成和出钢时间进行分析研究,并与水模拟(表1)实验结果进行比较,分析并明确了涡流卷渣过程对出钢下渣量的影响规律。

1 数值求解和水模型的建立与计算条件

(1)几何模型与网格划分:采用 Gambit2.3 软件建模,考虑到模型的对称性和流体有效作用范围,数值模拟过程中截取了模型的下部分,并沿出钢口中心线截取模型的1/2,转炉模型及实际建模区域如

表1 50 t 转炉原型与模型实验参数

Table 1 Test parameters of 50 t converter prototype and model

类型	熔池直径/mm	炉体高度/mm	出钢口内径/mm	炉内液体	液体密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	液体高度/mm
原型	3 178	5 800	130	钢液/炉渣	6 700/3 000	560/100
模型	795	1 450	32	水/液体石蜡	1 000/885	140/25

图1所示,其中图1(a)为转炉模型网格划分示意图,图1(b)为实际建模计算区域边界条件设置。为了提高计算精度和收敛稳定性,主要采用结构化网格,在出钢口等结构复杂区域采用布尔运算单独分离出来用非结构化网格划分,模型最终划分网格约30万。

(2)边界条件:①取入口压力(Pressure inlet)为一个标准大气压;②钢液凭重力自由流出,压力出口(Pressure outlet)同样取一个标准大气压;③按照无

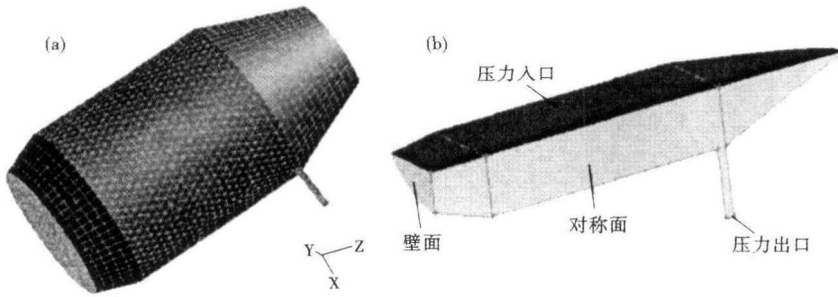


图 1 转炉炉型模型 (a) 与计算区域网格划分 (b) 示意图

Fig. 1 Schematics of geometry converter model (a) and calculated area grid division (b)

湍流方程选择标准 $k-\varepsilon$ 双方程计算^[5,6],如式(4)和式(5)所示:材料属性设置为空气、水和液体石蜡(物理化学参数如表 2 所示)。压力速度采用 PISO 计算方法耦合,并适时调节亚松弛因子,初始化迭代计算完毕后,对模拟结果进行分析。

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (4)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \varepsilon G_k}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

式中: $\varepsilon = \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right) \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \right)$, $G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \right) \left(\frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$, $\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为常数,目前普遍采用 Launder 和 Spalding 的推荐值即: $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1.00$, $\sigma_\varepsilon = 1.30$; μ_t 为湍流动力粘度/(Pa·s), $C_\mu = 0.09$ 。

滑移壁面来处理,取环境温度(Temperature)为 300 K;④壁面边界采用壁面函数(Wall),边界条件设置如图 1(b)所示。

根据数值模拟的特点,对模型做 3 点基本假设:

①实验环境相对稳定,忽略空气流动对液面造成的扰动影响^[3];②转炉容器内壁面均为光滑面,相互摩擦作用可以忽略不计;③试验温度变化细微,因此忽略温度对液体密度和粘度的影响。

出钢过程属于基本流体运动,应满足质量守恒方程(连续性方程)、动量守恒方程(N-S 方程)、能量方程,分别见式(1)、(2)、(3)所示^[4]。

$$\frac{\partial(u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(u_z)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho g - \nabla p \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + T\beta \frac{dp}{dt} + \mu\phi + S \quad (3)$$

式中: u - 流体的速度/($m \cdot s^{-1}$); x 、 y 、 z - 速度 u 在空间 x 、 y 、 z 三个方向分量; ρ - 流体的密度/($kg \cdot m^{-3}$); g - 重力加速度/($m \cdot s^{-2}$); ∇ - 哈密顿算符,其中 $\nabla = \sum_i e_i \frac{\partial}{\partial x_i}$; P - 流体的压强/Pa; c_p - 流体的定压热容/($J \cdot k^{-1}$); T - 流体的温度/K; ϕ - 粘性耗散函数; κ - 流体的热导率/[$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$]。

(3)数值求解:采用 Fluent6.3 进行数值模拟计算,将文件导入并检查网格后,选择基于压力的分离求解器隐式算法求解,采用 VOF 多相流模型计算,

表 2 水和液体石蜡的物理参数

Table 2 Physical parameters of water and liquid wax

项目	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	粘度/ ($Pa \cdot s$)	定压比热/ [$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$]	温度/ K
空气	1.29	1.79×10^{-5}	1 006	298
水	1 000	1.0×10^{-3}	4 182	298
液体石蜡	885	3.0×10^{-2}	3 200	298

(4)水模型模拟:水模型装置采用有机玻璃制作,模型与原型比例为 1:4,实验装置如图 2 所示。为了更准确的确定实验测定参数,减少水和石蜡同色而带来的主观误差,在模型内的水中加入少许溶于水但不溶于液体石蜡的高锰酸钾($KMnO_4$),使处于模型下部的水呈现浅紫色,与上层无色的液体石蜡予以区别。

涡流形成时间和出钢时间的确定:待模型内液面稳定时迅速拔下

出钢口处软塞,同时按下秒表,仔细观察红色和无色相接触液面波动情况,待无色液体石蜡显著卷入出钢口时,记录相应时间作为涡流形成时间。继续观察水和液体石蜡相接触的液面,待炉内水即

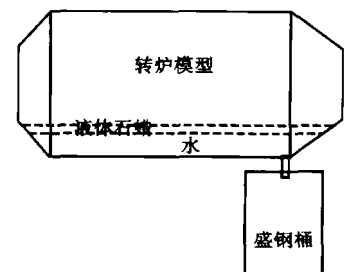


图 2 转炉出钢涡流形成及卷渣量水模拟实验装置示意图

Fig. 2 Schematics of water simulated test device for converter tapping vortex forming and slag entrained amount

将流尽时,再次记录相应时间作为出钢时间。

2 模拟结果分析

2.1 涡流形成时间的模拟结果

由图 3 可见,不同初始液位高度,出钢开始时刻熔渣和钢液互不相溶、分层明确,两相界面清晰,液面呈现稳定状态。随着出钢过程的进行,由于出钢口的特殊形状,使其具备形成涡流的条件,因此在出钢口上方的钢液处逐渐形成涡流,出现钢液卷吸熔渣的现象,此时,可以定义为出钢过程中的涡流形成时间。不同初始液位高度情况下,涡流形成时刻的钢液和熔渣的体积分数云图如图 4 所示。

最常见的涡流就是当流体汇流到中心并经小孔向外排出时形成,这种漩涡经常发生在漏斗、浇注容器以及洗澡缸中,这种漩涡称为汇流漩涡(Sink-Vortex)^[7]。由于出钢口的特殊形状,在转炉出钢中后期,出钢口附近的流体具有了一定初速度,并且各相邻质点流速不一致,流体流线分布复杂,具备了形成涡流的基本条件^[8],因此在出钢后期,钢液流经出钢口时会产生汇流漩涡。转炉内流体流线将重新分布,整个流体截面速度分布很不均匀,构成了涡流形成的必要条件。此外,随着出钢的进行,转炉内钢液液面逐渐降低,形成不稳定流动,这也是涡流形成的另一个重要条件。由图 4 可以发现,在出钢过程中出钢口上方的涡流形成不可避免。因此,涡流形成的早晚以及涡流的强弱决定着转炉出钢下渣量的高低。

2.2 出钢时间的模拟结果

随着出钢的进行,出钢口上方涡流的作用下,熔

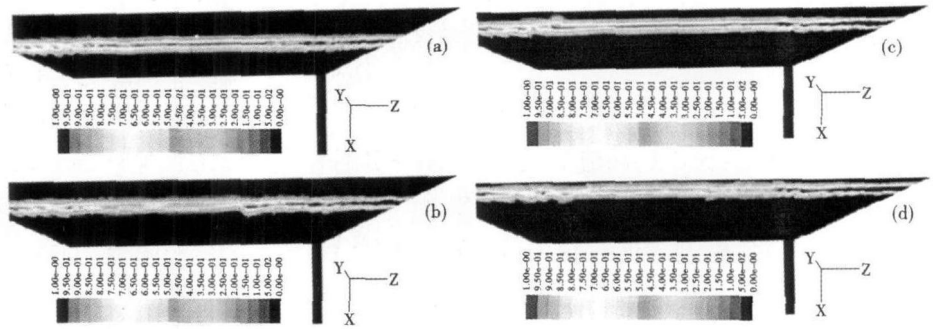


图 3 不同初始液位高度下出钢开始时刻渣钢状态:(a) $h = 80$ mm;(b) $h = 100$ mm;(c) $h = 120$ mm;(d) $h = 140$ mm

Fig. 3 Status of steel and slag at beginning tapping moment with different height of original liquid level: (a) $h = 80$ mm;(b) $h = 100$ mm;(c) $h = 120$ mm;(d) $h = 140$ mm

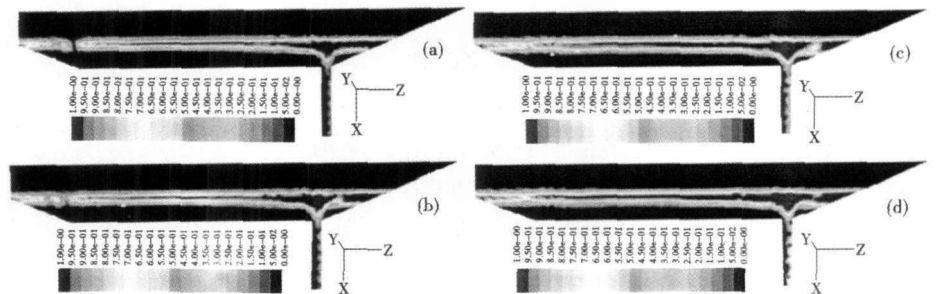


图 4 不同初始液位高度下涡流形成时刻钢液和熔渣的体积分数:(a) $h = 80$ mm;(b) $h = 100$ mm;(c) $h = 120$ mm;(d) $h = 140$ mm

Fig. 4 Volume fraction of steel and slag at vortex forming moment with different height of original liquid level: (a) $h = 80$ mm;(b) $h = 100$ mm;(c) $h = 120$ mm;(d) $h = 140$ mm

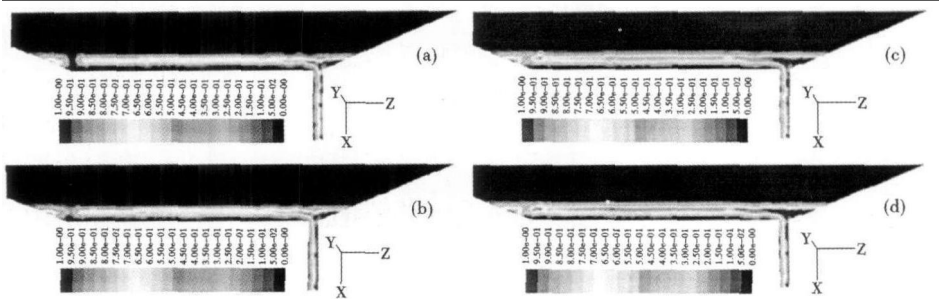


图 5 不同初始液位高度下出钢终了时钢液和熔渣的体积分数:(a) $h = 80$ mm;(b) $h = 100$ mm;(c) $h = 120$ mm;(d) $h = 140$ mm

Fig. 5 Volume fraction of steel and slag at end tapping moment with different height of original liquid level: (a) $h = 80$ mm;(b) $h = 100$ mm;(c) $h = 120$ mm;(d) $h = 140$ mm

渣部分卷入而进入钢包,钢液面逐渐降低,当钢液面降至 0 时钢液出净。

由图 5 可以看出,出钢终了时出钢口处熔渣的体积分数达到了最大值。此时炉内钢液已经基本流尽,炉渣大量流出,是进行挡渣操作的最佳时机。在实际生产过程中,考虑到使尽可能多的钢液流入钢包,从而减少金属损失,将允许一部分渣液进入钢包,因此把握好挡渣时机尤为关键,挡渣太早金属收

得率低,挡渣太晚下渣量过高。若配合先进的出钢示渣技术(如 IRIS 红外检测系统)可明显减少下渣量并提高产品质量⁹。

2.3 涡流形成及出钢时间的模拟结果分析

由表 3 可见,无论是涡流形成时间,还是出钢时间,数值模拟结果均低于水模型模拟结果。这是由于在数值模拟的模型构建过程中,假设了转炉容器内壁面均为光滑面,从而忽略了流体与壁面间的相互摩擦作用。

对于涡流形成时间来说,数值模拟与水模拟结果间的偏差随着初始液位高度的变化较大,初始液位高度为 80 mm 时,二者偏差高达 56.3%,而初始液位高度为 120 mm 和 140 mm 时,二者偏差只有 3.3% 和 7.3%。

对于出钢时间来说,不同初始液位高度下,数值模拟结果与水模型模拟结果之间的偏差变化较小,基本保持在 20% 左右,这说明两种模拟方法具有很好的可比性。

根据表 3 给出的统计结果,对涡流形成时间占出钢时间的比例进行计算,如图 6 所示,该比例可以表征在整个出钢过程中涡流形成的早晚,比值越小,说明出钢过程中涡流形成越早;比值越大,涡流形成

的时间越晚。

由图 6 可见,转炉内初始液位高度越高,涡流形成的时间越晚。在转炉正常装入量的情况下,转炉出钢时初始液位高度会大于 500 mm,模型内初始液位高于 120 mm,此时涡流形成时间为出钢时间的 50% 以上,这说明在出钢过程中,涡流的形成主要发生在出钢中后期。

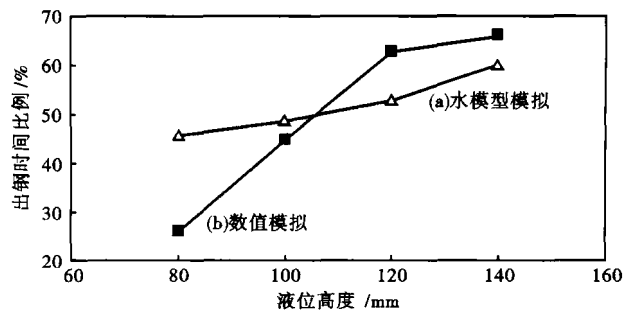


图 6 初始液位高度对涡流形成时间占出钢时间的比例的影响:(a)水模型模拟;(b)数值模拟

Fig. 6 Effect of height of original liquid level on ratio of vortex forming moment to tapping time: (a) water model simulation; (b) numerical simulation

3 结论

(1)数值模拟和水模型研究方法均能够对涡流形成和出钢过程进行模拟,二者具有很好的可比性,为转炉出钢过程下渣量的控制提供理论基础。

(2)数值模拟的模型构建过程中忽略了流体与壁面间的相互摩擦作用,使得数值模拟确定的涡流形成和出钢时间要少于水模型模拟结果。

(3)在现行出钢口结构形式下,涡流卷渣过程不可避免,涡流的形成主要发生在出钢中后期。

表 3 涡流形成和出钢时间的数值模拟水模型试验结果
Table 3 Numerical simulation and water model test results of vortex forming period and tapping time

初始液位高度/ mm	涡流形成时间			出钢时间		
	数值模 拟/s	水模 型/s	偏差/ %	数值模 拟/s	水模 型/s	偏差/ %
80	7	16	56.3	27	34	20.6
100	17	23	26.1	37	47	21.3
120	29	30	3.3	46	56	17.9
140	38	41	7.3	57	68	16.2

参考文献

- 岑永权. 防止炉渣随熔池涡流进入出钢口的方法. 上海金属, 1998, 20(2): 41
- 于华财. 转炉挡渣出钢技术的探讨. 本钢技术, 2005, 44(4): 13
- 吴雨晨, 闫小林, 李俊国, 等. 1700 板坯中间包温度场的数值模拟及其优化. 河北理工大学学报, 2009, 31(3): 34
- 闫小林, 艾立群, 陈伟, 等. 冶金传输原理. 北京: 冶金工业出版社, 2002
- Li Jun-guo, Zeng Ya-nan, Wang Jian-qiang, et al. Simulation of Flow Field of Oxygen Lance Gas Jet Utilized for 50 t Converter. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, 18(4): 11
- 张建, 杨庆山. 基于标准 κ - ϵ 模型的平衡大气边界层模拟. 空气动力学学报, 2009, 27(6): 729
- 杨文熊. 汇流漩涡发生的基本理论. 上海交通大学学报, 1979, 22

(1): 40

- 万恩同. 无漩出钢技术的研究. 武汉工程职业技术学院学报, 2005, 17(1): 6
- Borz M, Jin P O. 转炉出钢口闸板的新型红外摄像控制法 IRIS. 钢铁, 2002, 37(5): 22

王建强(1985-), 男, 硕士研究生, 2009 年中国地质大学毕业, 炼钢工艺研究。

收稿日期: 2011-10-16