

回转容器内炉渣颗粒流动的数值模拟

顾宪宇 刘坤 赵晶

(辽宁科技大学材料与冶金学院, 鞍山 114051)

摘要 通过 Fluent 软件模拟转炉渣 (/% : 40 ~ 60CaO, 10 ~ 20SiO₂, 1 ~ 5Al₂O₃, 7 ~ 10FeO, 5 ~ 10Fe₂O₃, 5 ~ 15MgO, 2 ~ 6MnO, 1 ~ 5P₂O₅, 0 ~ 10f-CaO) 在回转容器 (圆柱体反应器) 内转速 0.3 ~ 2.0 r/s 时的流动规律以分析炉渣颗粒流动特性并建立数学模型, 确定最佳旋转速度消解炉渣中游离氧化钙。结果表明, 炉渣颗粒的流动随回转圆筒转速增加, 由滚动状态发展到小、大瀑布流和环流; 当增至 0.8 r/s 时, 圆筒的中心位置出现涡流的流动状态。

关键词 转炉渣颗粒 回转圆筒 流动 数值模拟

Numerical Simulation on Flowing of Slag Particles in Rotary Container

Gu Xianyu, Liu Kun and Zhao Jing

(School of Materials and Metallurgy, Liaoning University of Science and Technology, Anshan 114051)

Abstract The rule of flowing of converter slag particles (/% : 40 ~ 60CaO, 10 ~ 20SiO₂, 1 ~ 5Al₂O₃, 7 ~ 10FeO, 5 ~ 10Fe₂O₃, 5 ~ 15MgO, 2 ~ 6MnO, 1 ~ 5P₂O₅, 0 ~ 10f-CaO) in rotary container (cylinder reactor) with rotating angular velocity 0.3 ~ 2.0 r/s is simulated by software Fluent to analyze the characteristics of flowing of slag particles. The mathematic model is established to define optimum rotate velocity for removing free calcium oxide. Results show that with increasing rotating velocity of the cylinder the rotating status of flowing of slag particles develops into small, bigger waterfall and circle flowing, and as rotating angle velocity increases to 0.8 r/s, flowing status of eddy occurs in center of cylinder.

Material Index Converter Slag Particles, Rotating Cylinder, Flowing, Mathematical Simulation

炉渣就是指在炼钢的过程中排出来的熔渣, 炉渣可以分为: 转炉渣、电弧炉渣、平炉渣; 按照冶炼过程, 炉渣有: 初期渣、精炼渣、出钢渣及浇铸钢渣; 按照形成形态, 可分为: 水淬粒状渣、块状渣和粉状渣。炉渣特点就是渣中 Fe 的氧化物, 通常以 FeO 和 Fe₂O₃ 两种的形式存在, 并且在炉渣中以 FeO 为主要, 其含量一般在 25% 以下。转炉渣的主要化学成分为 (/%): 40 ~ 60CaO, 10 ~ 20SiO₂, 1 ~ 5Al₂O₃, 7 ~ 10FeO, 5 ~ 10Fe₂O₃, 5 ~ 15MgO, 2 ~ 6MnO, 1 ~ 5P₂O₅, 0 ~ 10f-CaO。

炉渣具有较高的碱度时, 其碱度 $R > 3$, 炉渣中矿物成分含量依次为 $3CaO \cdot SiO_2$ (硅酸三钙 C_3S)、 $2CaO \cdot SiO_2$ (硅酸二钙 C_2S)、RO 相 (RO phase)、 $2CaO \cdot Fe_2O_3$ f-CaO。炉渣具有较低的碱度时, 炉渣中矿物成分含量依次为 C_2S 、RO 相 (FeO、MgO 及 MnO 等形成的固溶体)、 $2CaO \cdot Fe_2O_3$ 、 C_3S 、f-CaO。炉渣的碱度 $R < 1.5$ 时, 在炉渣中还可能有可能有钙镁橄榄石、镁蔷薇辉石、黄长石等矿物的出现^[1-3]。

随着圆筒转速的提高, 圆筒内有 7 种运动状态: 滑移运动 (sliding)、脉动运动 (surging)、塌落运动

(slumping)、滚落运动 (rolling)、泻落运动 (cascading)、抛落运动 (attracting) 和离心运动 (centrifuging)^[4]。

当转筒的转速 < 25 r/min 时, 散体会呈滚动运动状态; 25 r/min 时散体呈小瀑布流的运动状态; 50 r/min 时散体呈大瀑布流的运动状态; 100 r/min 时散体形成典型的环流状态^[4,6]。

由于炉渣还具有一定的粘度与文献中的散体有一定的区别, 所以本文只是借鉴文献中的旋转速度来模拟炉渣在转筒中的运动状态。本文在 Fluent 软件中所设置的转筒转速为 0.3 ~ 2.0 r/s。并根据物料的运动状态确定最佳的旋转速度来进行消解炉渣中的游离氧化钙^[7]。

1 数学模型的建立

$$\text{连续性方程: } \nabla \mu = 0 \quad (1)$$

式中: μ - 速度向量 ($m \cdot s^{-1}$)。

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s v_s) + \nabla (\alpha_s \rho_s v_s v_s) = -\alpha_s \nabla p_s + \alpha_s \rho_s g +$$

$$\beta(v_g - v_s) + \nabla \cdot \tau_s + S_{sg} U_s \quad (2)$$

式中: ∇ - 散度; p_s - 颗粒间的相互碰撞引起的颗粒相压力; τ_s - 颗粒相压力应变张量; β - 动量修正系数; v_i - 流速; S_{sg} - 动量方程的广义源相。

模拟炉渣颗粒流动的假设为:(1)炉渣颗粒为连续流体;(2)气相为湍流流动;(3)颗粒相与回转圆筒筒壁之间不滑动。固相物性参数见表1。

表1 炉渣固相物性参数

Table 1 Physical parameters of solid phase of slag

固相组分	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	温度/ K	比热容/ [$\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$]	热导率/ [$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$]	相对分子量/ [$\text{kg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{mol})^{-1}$]
f-CaO	3 320	300	-	2.25	56
SiO ₂	2 320	300	1.132	2.87	60.08
Al ₂ O ₃	3 800	300	1.215	7.85	102
MgO	3 580	300	0.887	9.7	40
CaO	3 320	300	-	2.25	56
Fe ₂ O ₃	5 242	300	0.622	6.879	159.6
MnO	5 340	300	0.740	2.224	70.94

2 物理结构及其网格的划分

建立一个二维的旋转面,结构简图见图1(a),网格的划分见图1(b)。图1(a)中深黑色部分就是炉渣颗粒的分布,设置圆周壁面为旋转壁面,更改旋转壁面的旋转角速度,得到不同物相分布,通过模拟

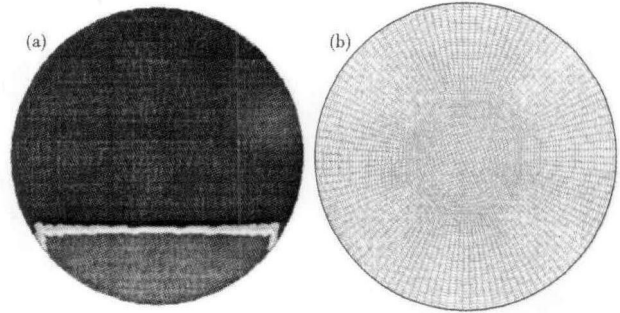


图1 (a)旋转面的结构简图;(b)二维旋转面的网格划分
Fig.1 (a) Schematics of structure of rotating face; (b) two dimensional grids division of rotating face

结果分析炉渣颗粒的流动情况。

3 模拟结果及其分析

3.1 不同旋转角速度的物料体积分数云图

从图2可见,当旋转角速度较小时,物相不能完全分布,有一部分物料都没有完全的散落整个旋转面,如0.3 r/s,大部分的物料(体积分数0.95)还在旋转面的下端(如下端呈颜色较黑的部分),而其它的位置都在0.8左右。当旋转角速度较大(2.0 r/s)时,物相分布会成环流的状态。从整个分布结果上看,当旋转角速度为0.8 r/s,其物相分布较为均匀,和文献中的大瀑布状态相类似。

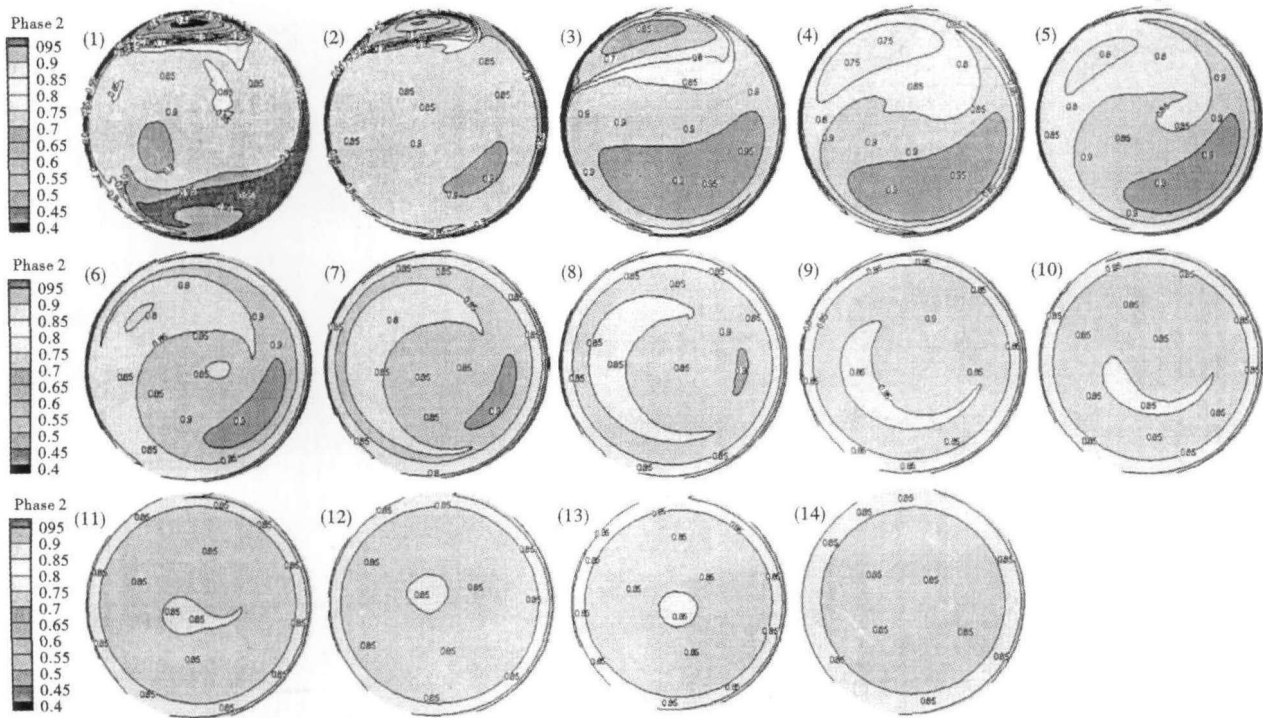


图2 物料体积分数分布云图,旋转角速度/($\text{r} \cdot \text{s}^{-1}$):(1)0.3;(2)0.4;(3)0.5;(4)0.6;(5)0.7;(6)0.8;(7)0.9;(8)1.0;(9)1.1;(10)1.2;(11)1.3;(12)1.4;(13)1.5;(14)2.0

Fig.2 Cloud diagram of distribution of material volume fraction with angular velocity of rotation /($\text{r} \cdot \text{s}^{-1}$): 0.3 (1); 0.4 (2); 0.5 (3); 0.6 (4); 0.7 (5); 0.8 (6); 0.9 (7); 1.0 (8); 1.1 (9); 1.2 (10); 1.3 (11); 1.4 (12); 1.5 (13); 2.0 (14)

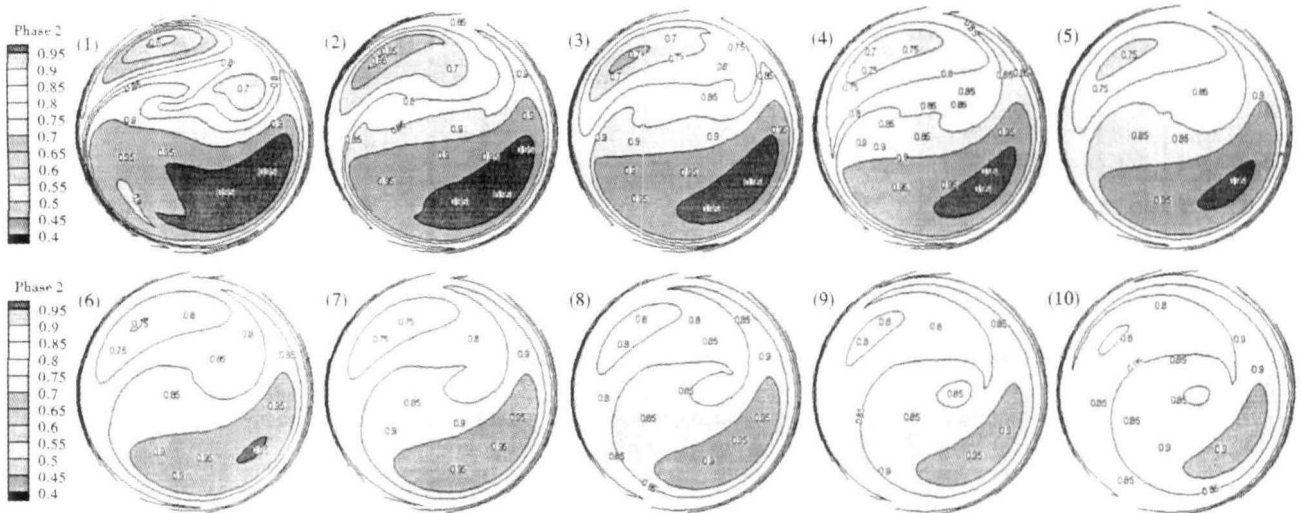


图 3 旋转角速度 0.8 r/s 时每分钟物料体积分数分布云图 /min: (1) 1; (2) 2; (3) 3; (4) 4; (5) 5; (6) 6; (7) 7; (8) 8; (9) 9; (10) 10
 Fig. 3 Cloud diagram of distribution of material volume fraction per minute with angular velocity of rotation 0.8 r/s, /min: (1) 1; (2) 2; (3) 3; (4) 4; (5) 5; (6) 6; (7) 7; (8) 8; (9) 9; (10) 10

3.2 0.8 r/s 时每分钟的物料体积分数分布云图

从图 3 看出,从第 1 分钟开始模拟到第 10 分钟结束,物料炉渣从底部逐渐向上运动,并且随着转筒的转动而运动,但其运动的状态和文献[4]中散体的运动状态不相同,本文中的物料运动状态是慢慢的布满整个旋转面。这是由于炉渣具有一定的粘度,所以炉渣才会慢慢由旋转面的带动,沿着旋转壁面运动,但是由于炉渣具有重力的原因,炉渣颗粒会慢慢散落整个旋转面。再从中心位置上看,类似于文献中所提到的大瀑布的运动状态。

3.3 0.8 r/s 时炉渣颗粒速度矢量分布云图

从图 4 中可以看出,由于炉渣具有一定的粘度,10 min 旋转炉渣颗粒是随着转筒的转动而一起旋转

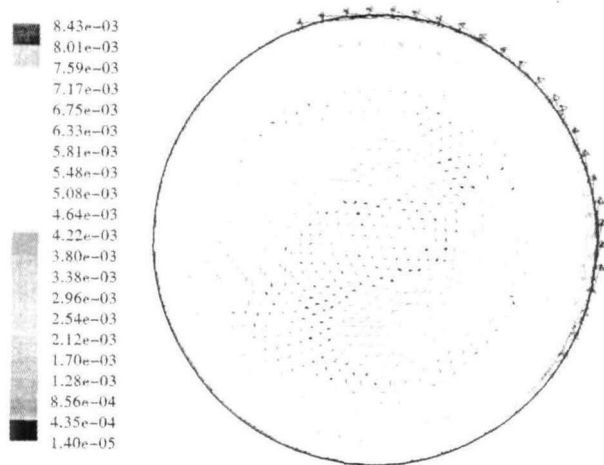


图 4 10 min 时颗粒速度矢量分布云图
 Fig. 4 Cloud diagram of distribution of particle velocity vector in 10 min

运动的,靠近旋转壁面的颗粒速度要大一些,使得炉渣随着转筒的转动而转动,越靠近旋转面的中心位置,旋转速度会下降,在重力作用下,炉渣会慢慢布满整个旋转面,所以炉渣颗粒的旋转速度就会下降。在中心位置会产生漩涡的流动状态。

4 结论

(1) 本文采用的模型模拟结果与文献有一定差别,由于炉渣具有一定粘度,所以模拟结果能够较为客观的反应炉渣颗粒在回转的圆筒内的流动状态。

(2) 回转圆筒内炉渣颗粒的流动随着转速的加快,运动形式类似于文献中的由滚动状态发展到小、大瀑布流和环流。当旋转到一定时间,回转圆筒内部会出现涡流的流动状态。

辽宁省科技攻关计划项目资助 (No. 2010230003)

参考文献

[1] 舒型武. 钢渣特性及其综合利用技术[J]. 钢铁技术, 2007(6): 48-51.
 [2] 赵爱新, 宋青伟, 黄炳仁, 等. 钢渣处理技术及钢渣粉的综合利用[C]. 济南: 2005 年学术年会论文集, 2005.
 [3] 李欣, 胡加学, 李东. 钢渣处理工艺的技术特点与选择应用[J]. 设计技术, 2011(3): 11-17.
 [4] 车辉坤, 屈一新. 回转容器内模拟散体流动[J]. 计算机应用化学, 2011, 28(2): 209-212.
 [5] Mellmann J. The Transverse Motion of Solids in Rotating Cylinders-Forms of Motion and Transition Behavior[J]. Powder Technology, 2001, 118: 251-270.
 [6] Ergun S. Fluid Flow through Packed Columns[J]. Chemical Engineering Progress, 1952, 48(2): 89-94.
 [7] 顾宪宇. 消解钢渣中游离氧化钙的实验及模拟研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学研究生院, 2012: 48-50.

顾宪宇 (1987-), 男, 硕士研究生, 钢渣的处理和综合利用。

收稿日期: 2013-01-04