

利用颗粒速度标量场确定风口回旋区边界

罗志国, 孙野, 刘洪华, 邹宗树

(东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 利用 COREX 熔化气化炉半周冷态模型, 通过跟踪示踪颗粒的运动信息, 得到观察面板处风口回旋区域的颗粒速度场. 通过与目测结果的对比, 确定超过 0.15 m/s 的颗粒速度标量场为风口回旋区域. 实验得到的回旋区边界可为回旋区理论或数学模拟提供准确的边界条件.

关键词: COREX; 熔化气化炉; 风口回旋区; 物理模拟; 颗粒速度标量场

中图分类号: TF557 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-606X(2009)02-0228-05

1 前言

风口回旋区对高炉及 COREX 熔化气化炉冶炼过程起着十分重要的作用, 它的形状和大小决定了其中煤气的一次分布, 反映了焦炭的燃烧状态, 是炉况顺行的基础. 因此, 前人对风口回旋区作了大量的研究. 由于风口回旋区受床层高度、风速、风口大小等诸多因素的影响, 要准确确定风口回旋区的形状与大小是非常困难的.

目前对风口回旋区的研究主要有 3 种方法: (1) 室温下的冷态模拟是最常见的一种方式. 在冷态模拟研究中, 研究者^[1-5]多通过在二维模型或伪三维模型观察面上观察或拍照, 测量回旋区大小, 回归出不同条件下回旋区大小的关系式, 总结出风口回旋区直径与床层高度、风速、风口大小等多个因素的关系; (2) 在实际高炉中, 可通过测定风口回旋区温度研究风口回旋区的性质. 成兰伯等^[6]在首钢用喷填方法把生产状态下试验高炉的风口回旋区完整地保留下来, 然后进行解剖分析, 得到了风口回旋区形状与结构的真实数据, 但代价昂贵且只能考虑其中一种工况下的数据, 应用极为有限; (3) 由于计算机技术的进步, 越来越多的研究者用数值模拟方法描述出风口区域的压力场、应力场、温度场、气相成分浓度场、空隙度场及颗粒速度场等信息, 并利用不同场的等值线准确描述风口回旋区大小与形状. 该方法主要有以下几种: ① 等应力边界法. Rajneesh 等^[7]应用 Navier-Stokes 模型计算出了二维风口区的压力场, 有效应力为总应力减去孔隙压力, 结果发现 1500 Pa 的等应力线恰好位于实验测得的风口回旋区边界上, 据此认为该方法可用于准确估算风口回旋区的大小及边界. 近年来, 一些科研工作者^[8]开始尝试利用 DEM(Discrete Element Method, 离散单元方法)与 CFD(Compute Fluid

Dynamic, 计算流体力学)耦合的方法计算风口区域的应力场, 该方法可考虑颗粒与颗粒、颗粒与流体及颗粒与壁面之间所有的作用力, 但受计算能力的限制依旧不能得到广泛应用, 但前景广阔; ② 等温或等气体成分浓度边界场. 该方法定义温度及气体成分突然改变的区域为风口回旋区的边界^[7]. 张生富等^[9]在分析研究喷煤高炉风口回旋区燃烧状况的基础上, 建立了基于数字图像处理的高炉风口回旋区实时监测系统, 讨论了建立火焰燃烧温度场的算法, 并用于燃烧火焰图像的实例计算, 得到了火焰内部温度场的分布. 在风口回旋区前端边界附近, 碳溶解反应激烈进行, 在边界处 CO₂ 浓度突然降低, 可利用 CO₂ 气体浓度场来确定风口回旋区的边界; ③ 等空隙度场. Apte 等^[10]认为风口回旋区由 3 部分构成, 不同区域具有不同的空隙度, 风口区域空隙度为 1.0, 填充床内的空隙度为在床层顶部测定的值, 约为 0.4, 风口回旋区域空隙度假定为 0.94. 为了获得空隙度数值, 必须获得在风口区域内的所有颗粒的位置. 而对于实际炉体或冷态模型, 事实上很难测定在某一时刻每一个颗粒的位置信息. Umekage 等^[11]利用 CFD+DEM 模拟了实际生产高炉大小的风口回旋区, 可获得任意时刻每一个颗粒的位置, 由此计算出空隙度, 并判断出风口区的大小; ④ 等颗粒速度场. Umekage 等^[11]利用 CFD+DEM 模拟的同时还可得到每一个颗粒的瞬时运动速度, 并由此得到了颗粒瞬时速度的标量场, 可由此准确判断风口回旋区的边界.

物理参数场可以用来准确确定风口回旋区边界, 迄今为止所有的研究风口回旋区的物理参数场都是由数值模拟确定, 且没有明确的风口回旋区的定义标准. 本研究利用冷态模型实验测定了风口回旋区内颗粒瞬时

速度，得到其标量场，由标量场判断风口回旋区的边界。

2 实验

2.1 实验装置

依据 COREX 熔化气化炉体，按 1:20 的比例设计制作了半周模型，实验装置如图 1 所示，包括熔化气化炉主体、供气系统、气体分配系统、视频图像采集系统。为便于实验观察，熔化气化炉主体用透明有机玻璃制作，14 个风口以侧壁向下 4° 的倾角插入炉内 2 mm。填充颗粒为聚乙烯颗粒，直径约 3.3 mm，密度为 921 kg/m³，由顶部加料漏斗加入熔化气化炉中。压缩空气通过气体

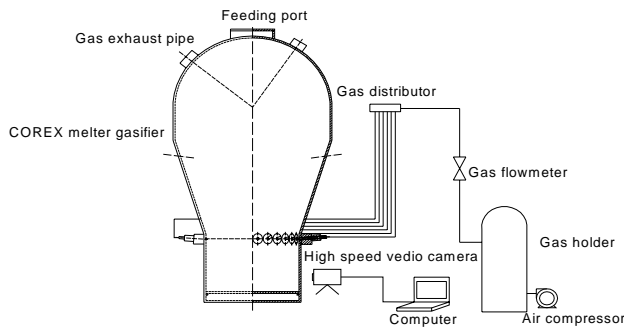


图 1 熔化气化炉实验模型简图
Fig.1 Schematic illustration of melter gasifier experimental apparatus

分配器均匀进入各风口，用转子流量计气体流量。

2.2 实验方法

将加有一定比例红色示踪颗粒的聚乙烯颗粒物料填充至炉内适当位置，打开气路阀门并调节好流量，气体经过风口进入炉内，待颗粒运动稳定后开始排料，风口回旋区运动稳定后用高速动态记录仪获取图片数据。熔化气化炉风口回旋区内颗粒的运动是连续变化的过程，高速摄像实际上是对该连续过程进行时间域内的高频采样，得到一定时间间隔的静止颗粒图像序列。拍摄速度为 100 帧/s。为便于识别颗粒运动，同时满足颗粒实验结果的可信性，拍摄分辨率 512×512 像素。

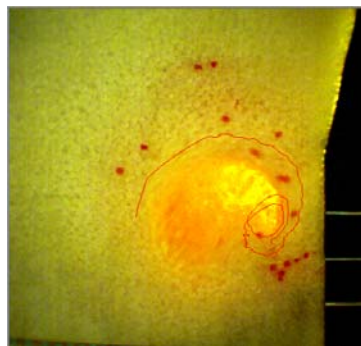
3 结果及讨论

3.1 颗粒速度的提取

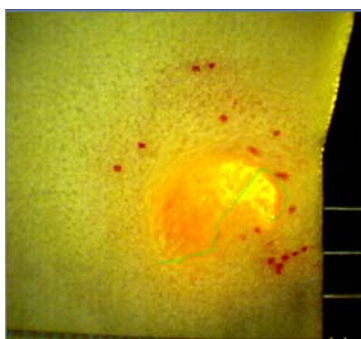
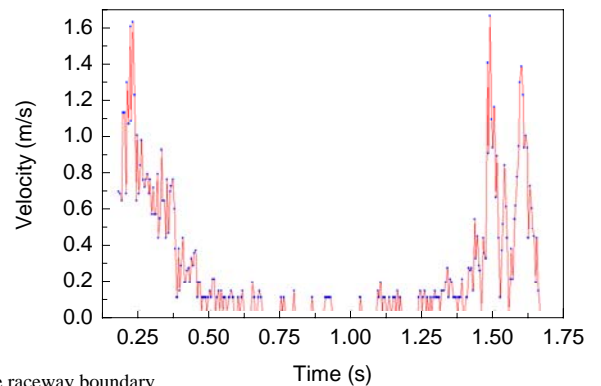
用图像分析软件对所得图片中的示踪颗粒进行跟踪，将相邻 2 张图片中所有颗粒的位置连接起来，根据 2 张图片中颗粒的位移及相应时间计算颗粒的瞬时速度，得到该时刻的瞬时速度分布：

$$dx/dt=u, \quad dy/dt=v,$$

式中， x, y 分别为颗粒在横向与纵向的坐标， u, v 分别为颗粒的横向与纵向速度。图 2(a)描述的是一个围绕风口回旋区边界运动的示踪颗粒的运动轨迹及速度。此颗



(a) A particle moving around the raceway boundary



(b) A particle passing through the raceway center

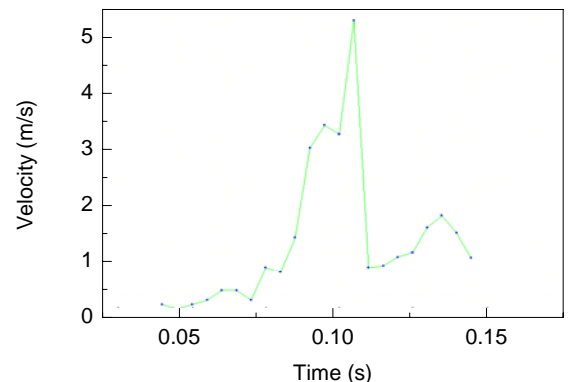


图 2 两个典型示踪颗粒的轨迹及速度

Fig.2 Track and velocity profiles of two typical tracer particles

粒在开始拍摄后的 0.2 s 被追踪到, 此时颗粒位置靠近冲击区域, 运动速度很快; 随后此颗粒被推离冲击区域, 速度逐渐降低至 0.1 m/s(开始拍摄后 0.5 s 时); 在 1.4 s 时颗粒移动至风口回旋区内部, 速度急剧加大.

图 2(b)是一横穿风口回旋区中心区域开始拍摄后 0.04 s 被追踪到的示踪颗粒. 此时其处于风口回旋区外, 颗粒速度较低; 在开始拍摄后的 0.08 s 移动至风口回旋区内部并开始横穿风口回旋区中心, 颗粒速度变得很大(最大接近 5 m/s), 随后该颗粒在开始拍摄后的 0.11 s 时与风口回旋区边壁发生碰撞, 速度急剧降低.

3.2 颗粒速度标量场的提取

在某一时刻得到的所有示踪颗粒的位置及速度信息如图 3 所示, 其中箭头方向表示速度方向, 长短表示速度大小. 由图可见, 在风口回旋区内存在 2 个颗粒循环区域, 一个在风口位置上方, 另一个在风口位置下方. 实验过程中可以清楚地发现一些示踪颗粒从风口回旋区中心飞过, 在图 3 中心处并未有颗粒信息. 由于此处位于风口回旋区中心, 远离边界, 所以忽略此处的颗粒

信息不会对结果造成任何影响.

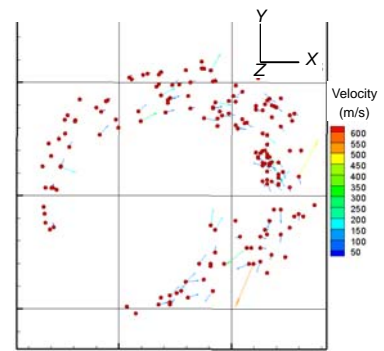


图 3 风口回旋区内某一时刻追踪到的示踪颗粒的速度及位置
Fig.3 Velocity and position of tracer particles at one moment in raceway

当风量及其他条件固定时, 所形成的风口回旋区是十分稳定的. 所以将一段时间内得到的不同图片内的示踪颗粒的位置及速度信息整合至一张图片中, 如图 4 所示. 这样就可以获得足够量的实验信息, 得到风口回旋区域的颗粒速度标量场.

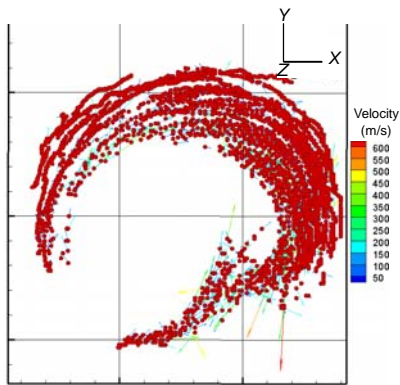


图 4 一段时间内追踪到的风口回旋区内的所有示踪颗粒的速度及位置
Fig.4 Velocity and position of tracer particles during a period of time in raceway

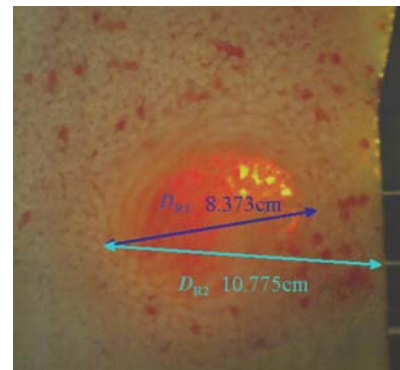
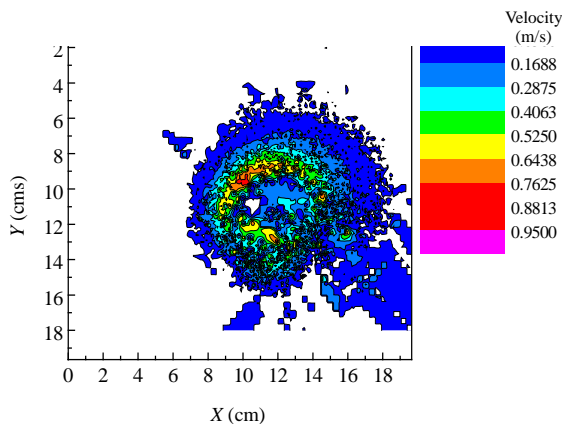
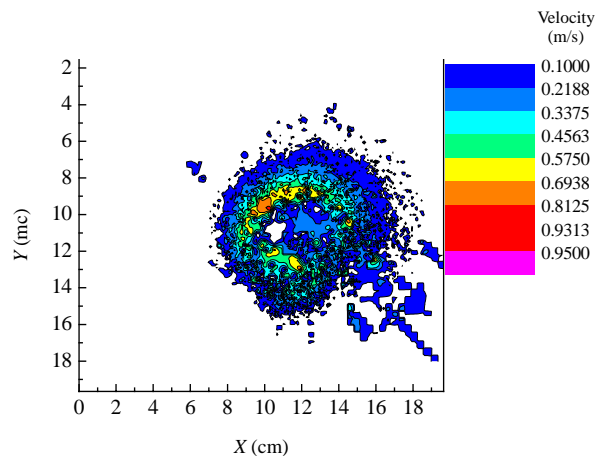


图 5 依据本研究对风口回旋区定义而确定的大致边界
Fig.5 The approximate raceway boundary determined according to the definition in this study



(a) The particle velocity contour beyond 0.05 m/s



(b) The particle velocity contour beyond 0.10 m/s

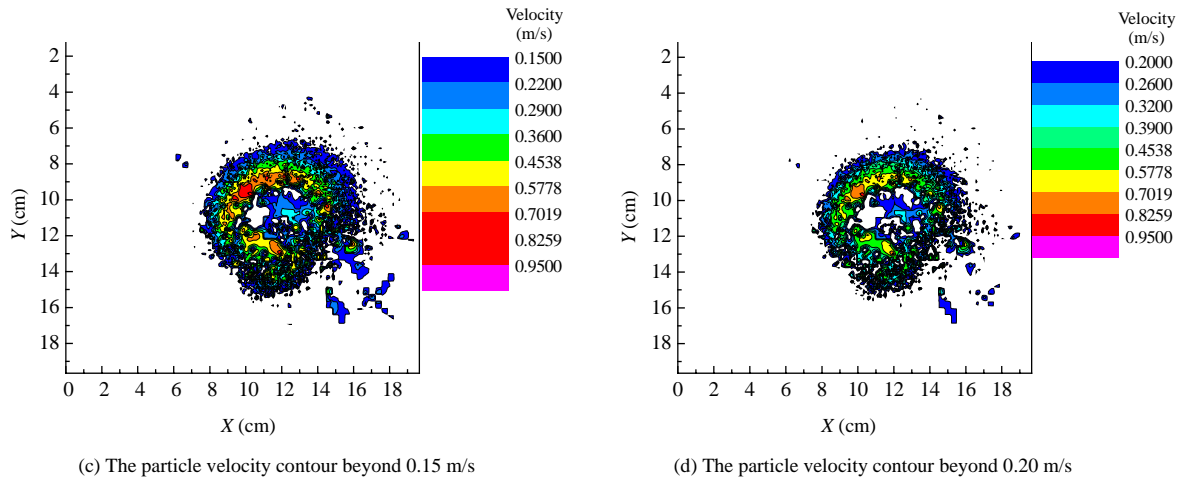


图 6 根据颗粒速度云图确定的风口回旋区边界

Fig.6 The determination of raceway boundary using particle velocity contour

3.3 利用颗粒速度标量场确定风口回旋区边界

将紧密排列的静止颗粒区域与紧邻快速移动颗粒的略微松散的蠕动区域之间的分界线定义为风口回旋区边界^[12]。据此，某一工况条件下的风口回旋区边界可大致确定如图 5 所示。图中 D_{R1} 为风口回旋区区域孔洞的最大直径， D_{R2} 为从风口端点至冲击点的距离。

在颗粒速度标量中，颗粒速度超过 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 m/s 的区域分别表示如图 6(a)~6(d)所示，其中图 6(c)所示的风口回旋区与图 5 大小相近(两图叠加如图 7 所示)。因此，在本冷态模拟研究中，将风口回旋区区域边界的颗粒速度标量确定为 0.15 m/s。通过此方法，可得到风口回旋区的准确边界，而不是风口回旋区的几个特征点。对于高炉及其他类似的反应器均可采用此方法确定风口回旋区的边界。

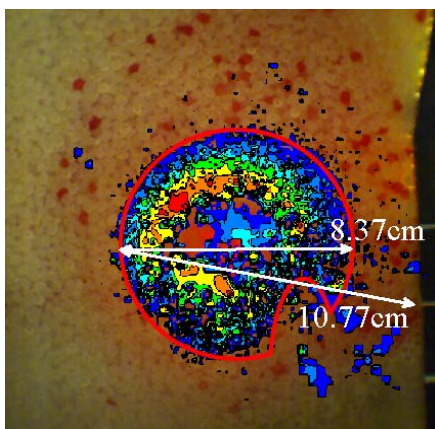


图 7 图 5 及图 6(c)的叠加图

Fig.7 The superimposition of Figs.5 and 6(c)

4 结论

提出了利用冷态模型研究 COREX 熔化气化炉风口

回旋区的新方法。通过跟踪示踪粒子得到在风口回旋区内的颗粒速度，得到颗粒速度标量场。通过与目测结果的对比，确定超过 0.15 m/s 的颗粒速度标量场为风口回旋区的准确边界，可为风口回旋区的理论分析或数值模拟提供准确的边界条件。

参考文献：

- [1] Sarkar S, Gupta G S, Litster J D, et al. Prediction of Raceway Shape and Size [J]. ISIJ Int., 2007, 47(12): 1738–1744.
- [2] Gardner G C. A New Correlation of Blast Penetration in a Blast Furnace [J]. Trans. AIME, 1960, 218: 423–428.
- [3] Taylor J, Lonie G, Hay R J. A Study of the Tuyere Combustion Zone [J]. Iron Steel Inst., 1957, 187: 330–341.
- [4] Wagstaff J B, Holman W H. Comparison of Blast Furnace Penetration with Model Studies [J]. Trans. AIME, 1957, 210: 370–376.
- [5] Szekely J, Poveromo J A. Mathematical and Physical Representation of the Raceway Region in the Iron Blast Furnace [J]. Metall. Trans. B, 1975, 6B: 119–129.
- [6] 成兰伯, 曾祥明. 高炉风口回旋区工作状况的初步研究 [J]. 钢铁, 1982, 17(11): 54–63.
- [7] Rajneesh S, Sarkar S, Gupta G S. Prediction of Raceway Size in Blast Furnace from Two Dimensional Experimental Correlations [J]. ISIJ Int., 2004, 44(8): 1298–1307.
- [8] Xu B H, Yu A B, Chew S J, et al. Numerical Simulation of the Gas-Solid Flow in a Bed with Lateral Gas Blasting [J]. Powder Technol., 2000, 109(1/3): 13–26.
- [9] 张生富, 温良英, 白晨光, 等. 基于数字图像处理的高炉风口回旋区的监测 [J]. 钢铁研究学报, 2006, 18(3): 56–59.
- [10] Apte V, Wall T, Truelove J. Gas Flows in Raceways Formed by High Velocity Jets in a Two-dimensional Packed Bed [J]. Chem. Eng. Res. Des., 1988, 66: 357–362.
- [11] Umekage T, Kadowaki M, You S. Numerical Simulation of Effect of Tuyere Angle and Wall Scaffolding on Unsteady Gas and Particle Flows Including Raceway in Blast Furnace [J]. ISIJ Int., 2007, 47(5): 659–668.
- [12] Flint P J, Burgess J M. A Fundamental Study of Raceway Size in Two Dimensions [J]. Metall. Trans. B, 1992, 23B: 267–283.

Determination of Raceway Boundary with Particle Velocity Contour

LUO Zhi-guo, SUN Ye, LIU Hong-hua, ZOU Zong-shu

(School of Materials Sciences and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China)

Abstract: A new method has been developed to determine the raceway boundary in cold model of COREX melter gasifier, so as in blast furnace, granular drying, etc. The particle velocity contour criterion of raceway boundary definition is 0.15 m/s, and the precise raceway boundary can be obtained through this method. It is very important for the theoretical and mathematical modeling of gas and solid flow and chemical reaction in and around the raceway region.

Key words: COREX; melter gasifier; raceway; physical simulation; particle velocity contour