

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.06.005

高温灰渣在斜面冷渣器中的流动分析

陈亚利, 杨学忠

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 210009)

摘要:为了分析工业生产中的高温灰渣在斜面上的流动特性,采用基于离散单元法的颗粒流动程序(PFC2D),建立料仓和斜面的仿真模型,首先分析颗粒通过斜面的临界角,然后针对颗粒在不同斜面倾角,进行了颗粒运动的数值模拟,为下一步分析颗粒传热做准备。通过模拟发现:①颗粒通过斜面的临界角为 $28^{\circ} \sim 29^{\circ}$;②在斜面倾角大于临界角的前提下,颗粒的堆积厚度随着通过斜面的距离的增大而减小,堆积厚度拟合直线的斜率逐渐增大,在 40° 之前呈现直线增长的趋势, $40^{\circ} \sim 50^{\circ}$ 增长速度逐渐平缓,拟合直线的截距随着倾角的增大,逐渐较小。

关键词:冷渣器;灰渣颗粒;颗粒流动程序;离散单元法;数值模拟;临界角

中图分类号:TK264.1

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2014)06-0021-05

Study on Flow Characteristic of High Temperature Slag in Slag Cooler

CHEN Yali, YANG Xuezhong

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China)

Abstract: To analyze flow characteristics of high temperature slag on the inclined plane in industrial production, the procedure of particle flow code (PFC2D) based on discrete element method (DEM) was used to build the discrete element model of the slag cooler and material particle. Firstly, found out material particle critical angle flow on the inclined plane, then the relationship of different angle of the inclined plane with the thickness of the accumulation of particles and the surface particle velocity to preparation for the material particle heat transferred. It is found to have some advantages: ①Material particle critical angle was $28^{\circ} \sim 29^{\circ}$. ②On condition that the inclined plane angle was larger than the critical angle, the thickness particles decreased with the inclined plane angle. In addition, the fitting line slope of the thickness increased with the inclined plane angle. It has grown linearly before 40° and smoothly 40° to 50° , the fitting line intercept increased with the inclined plane angle.

Key words: slag cooler; slag; particle flow; Discrete Element Method (DEM); numerical simulation; critical angle

工业工程中排出的高温灰渣(通常 $800 \sim 900^{\circ}\text{C}$)不仅带走了大量的热量,恶化了现场运行环境,而且灰渣中残留的硫和氮仍可以在炉外释放出二氧化硫和氮氧化物,进一步造成环境污染,高温灰渣含有大量的热量可供回收利用,因此对高温灰渣的冷却是非常有益的^[1]。

1 颗粒流动程序(PFC2D)简介

美国著名学者 Cundall^[2]最早提出了离散单元法(Distinct Element Method, DEM),最初的目的是用来分析岩石边坡的运动,1987年 Cundall 和 Strack 开发了二维圆形块体的 BALL 程序,用来研究颗粒介质的力学行为,所得的结果与 Drescher 等人用光弹技术的实

验结果极为吻合,从而证明了离散单元法由理论到实践的可行性,ITASCA 公司开发出了针对土体颗粒的商用软件 PFC2D/3D^[3]。

颗粒离散单元法的基本原理是将散粒体分离成离散单元—颗粒的组合,根据运动定律(牛顿第二定律)和力-位移定律,用动态松弛法迭代求解,从而求得离散单元的整体运动性态。PFC2D(Particle Flow Code in 2 Dimensions)即二维颗粒流动程序,是通过离散单元法来模拟圆形颗粒介质的运动及其相互作用。PFC2D 既可解决静态问题也可解决动态问题,既可用于参数预测,也可用于在原始资料详细情况下的实际模拟^[4-6]。

收稿日期:2014-04-29;修回日期:2014-05-26

作者简介:陈亚利(1987),女,河北邯郸人,硕士,主要研究方向为高温灰渣流动分析。E-mail:897456649@qq.com

2 数值模拟与结果分析

将高温的灰渣进入斜面冷渣器如图1所示的斜面板,由于重力作用,灰渣沿斜面流动,颗粒流动过程中相互碰撞、混合,同时与外壳管内的冷却水进行热量交换,从而达到灰渣冷却的目的。斜面上的颗粒流的传热特性在很大程度上又取决于斜面上的灰渣颗粒的流动特性,斜面的倾角对灰渣颗粒在斜面的堆积厚度有着重要影响,堆积厚度又影响了灰渣颗粒和冷介质间的传热效果。因此首先分析斜面颗粒流的流层厚度^[7]。

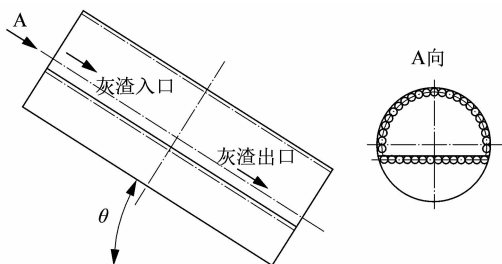


图1 冷渣器示意图

Figure 1 Inclined plane slag cooler schematic diagram

2.1 离散元模型建立及初始状态

实际生产中,灰渣的生成可看做是连续状态,也就是说颗粒是连续不断的流向斜面,可设计为漏斗状的供料仓,根据料仓效应^[8]可认为颗粒通过出口时的速度相同。由于只是为了找到颗粒流的宏观厚度,与颗粒在通道里的分布无关,可简化为二维模型,颗粒单元简化为圆盘,接触类型为线性接触,初始平衡状态为灰渣颗粒重力作用下的自然堆积状态^[9]。

PFC 程序是通过 FISH 语言编写,仿真模型参考国际标准建立,漏斗锥角取标准值 60° 。漏斗的出料直径为 0.05 m ,为了避免漏斗底部与斜面之间的间距过小,而影响颗粒的自由下落,设漏斗出口与斜面之间的距离为 0.1 m ,建立模型后按高斯分布生成颗粒,并在重力作用下,进行静平衡迭代,追踪整个系统的平均不平衡力和平均接触力,见图2。

图2为灰渣颗粒在料仓中由于重力作用下落过程中的平均接触力和平均不平衡力曲线。A曲线表示平均接触力(mcf),B曲线表示平均不平衡力(muf)。由图可知,平均接触力和平均不平衡力曲线接近水平,平均接触力趋于一定值,平均不平衡力趋于0,平均不平

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

颗粒密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	颗粒法向刚度 $\times 10^5 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	颗粒切向刚度 $\times 10^5 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	颗粒摩擦 系数	法向阻尼 系数	切向阻尼 系数	墙法向刚度 $\times 10^5 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	墙切向刚度 $\times 10^5 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
2 650	2 000	1 000	0.5	0.7	0.7	1 000	1 000

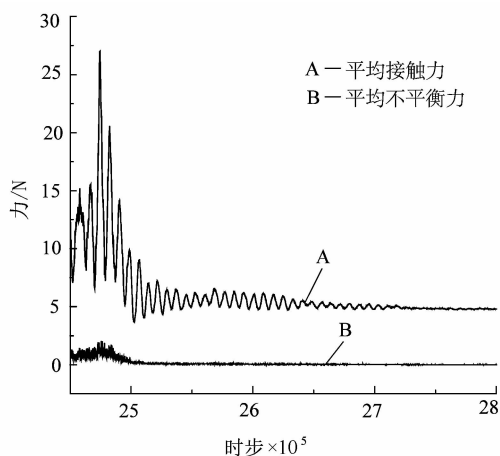


图2 平均接触力和平均不平衡力

Figure 2 Average unbalanced force and contact force
衡力小于平均接触力的 0.01% ,说明料仓内的颗粒已达到稳定的状态,即初始平衡状态。

图3为灰渣颗粒在重力加速度下降落在料仓下方的漏斗后,颗粒在漏斗中呈现自然堆积状态。

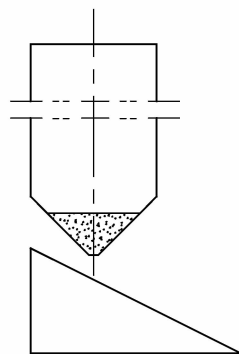


图3 初始平衡状态

Figure 3 Initial state of equilibrium

2.2 参数设定

灰渣颗粒由于原料的选取、参与的化工工艺不同,其中的化学成分比例也就不同,颗粒的性质如颗粒形状、密度、摩擦系数、刚度系数、切向系数等参数不尽相同,这些参数的选取对数值模拟能否更加真实的反映颗粒流动有着至关重要的作用。由于实验条件有限,无法进行标定试验,只能根据有关资料^[11]来确定相关参数,设定仿真所需的一些参数,如几何特性、材料属性、摩擦系数、阻尼系数等,如表1所示。

2.3 数据模拟与分析

2.3.1 临界角

休止角是颗粒流动性能的重要参数之一,是指在重力场中,颗粒堆积体的自由表面处于平衡的极限状态时,自由表面与水平面之间的角度。测量休止角时,颗粒的初始速度为0;本文中的临界角,即颗粒通过斜面的临界角,是指有一定初速度的情况下,颗粒通过斜面的最小角度,颗粒系统为能量耗散体系,因此休止角肯定大于等于临界角。

现用 PFC2D 模拟颗粒通过斜面的临界角,基于

PFC 软件内嵌的 FISH 语言编写灰渣颗粒流进斜面的流量 Q_1 程序和灰渣颗粒流出斜面的流量 Q_2 程序。鉴于 PFC2D 为二维的,用颗粒的面积和速度的乘积表示颗粒流量,颗粒流量取在重力方向上的 0.01 m 的区间内,所有颗粒的面积乘以速度的总和。

通过数值模拟测出灰渣颗粒的休止角 43.95° ,因此临界角一定小于 43.95° ,经过前期多次试算,现选取倾角为 $26^\circ, 27^\circ, 28^\circ$ 及 29° 分别对其仿真模拟,各角度颗粒流入和流出斜面的颗粒流量如图 4 所示。

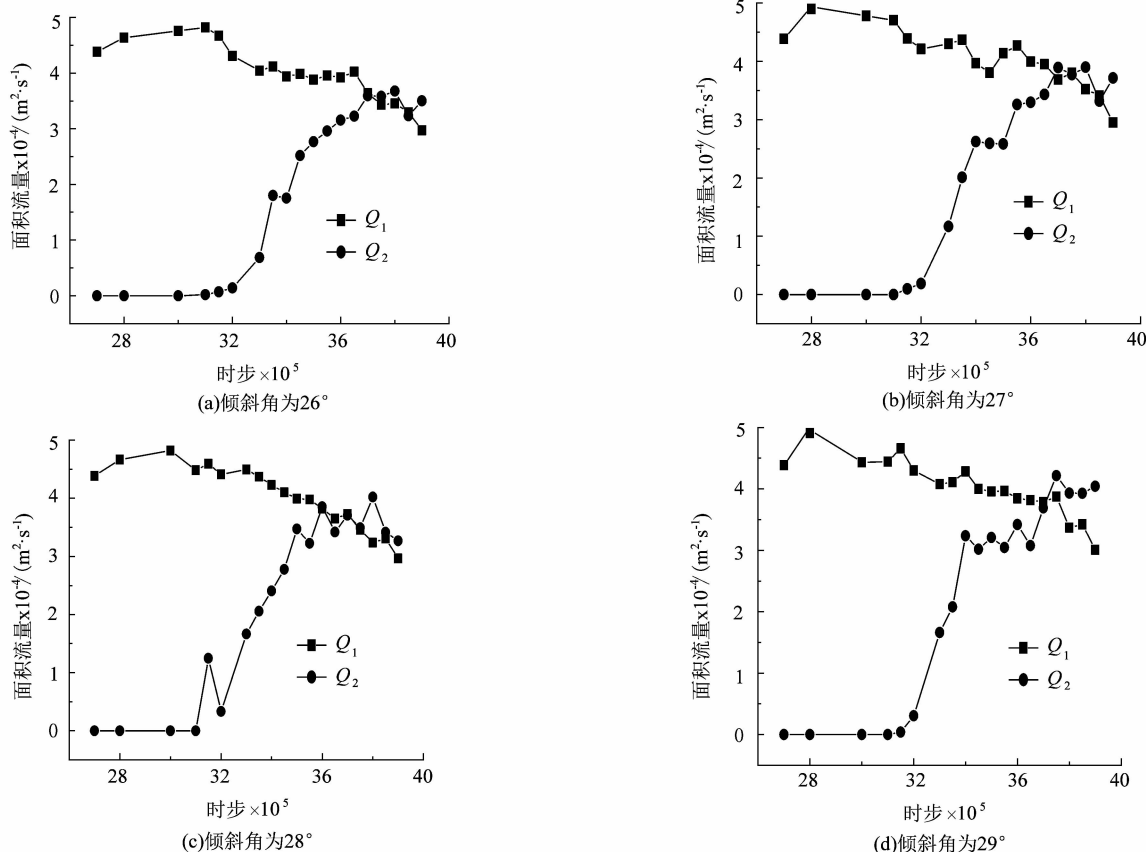


图 4 颗粒流量图

Figure 4 Particles flow diagram

由图 4 可知,当刚打开料仓底部 wall 4 时,灰渣颗粒在重力作用下流进斜面,根据料仓效应可知其颗粒流量 Q_1 保持不变。灰渣颗粒流进斜面和流出斜面有一定的时间差,因此颗粒流出斜面的颗粒流量 Q_2 从 0 开始逐渐增大。当流进斜面的颗粒流量 Q_1 处于稳定时期时,如果颗粒流出斜面的颗粒流量 Q_2 大于等于流进颗粒流量 Q_1 ,说明颗粒在不发生堆积的情况下,都能通过斜面,反之亦然。

对比图 4 各分图可知,在料仓流出颗粒的平稳期,斜面流入颗粒流量 Q_1 即料仓流出的颗粒流量在

$0.004 \text{ m}^3/\text{s}$ 附近,随着时步的增加,由于料仓颗粒减少导致颗粒流量减少, Q_1 逐渐减少,而斜面流出颗粒流量 Q_2 在随着时步的增大逐渐增大。图 4 中(a),(b),(c)在流入斜面的颗粒流量 Q_1 处于平稳期时,流出颗粒流量 Q_2 一直小于等于 $0.004 \text{ m}^3/\text{s}$,之后也没有大于流入的颗粒流量 Q_1 ,说明颗粒在斜面上会不断堆积,直至堵塞。从图 4(d)可知在流入的颗粒流量 Q_1 处于 $0.004 \text{ m}^3/\text{s}$ 附近时,流出的颗粒流量 Q_2 大于等于流入的颗粒流量 Q_1 ,并且之后维持在 $0.004 \text{ m}^3/\text{s}$ 附近,说

明流出的颗粒流量 Q_2 等于流入的颗粒流量 Q_1 , 流入的颗粒都能流出, 因此颗粒通过斜面的临界角为 $28^\circ \sim 29^\circ$ 之间。

2.3.2 厚度分析

达到初始平衡状态后如图 3 所示, 打开漏斗底部的出口, 颗粒由于重力作用, 从漏斗流出至斜面, 灰渣颗粒在重力作用下在斜面上流动, 当斜面上的颗粒所受的沿斜面向下的重力和颗粒本身的粘滞力平衡时, 即颗粒宏观厚度达到最大且恒定时, 颗粒呈现均匀、平衡、稳定的流动, 此时颗粒处于平稳状态, 即稳定状态, 是测量宏观厚度和表层速度的最佳状态^[11]。

由上节可知颗粒通过斜面的临界角为 $28^\circ \sim 29^\circ$ 之间, 将斜面的斜角分别设为 $30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 和 50° , 结合 MATLAB 和 Origin 找出不同倾角与灰渣宏观厚度之间的关系并拟合成曲线。在用 PFC2D 软件模拟颗粒流动过程中, 每隔 50 000 步长保存一个 sav 文件, 对每个 sav 文件, 提取其颗粒球心坐标, 然后通过 Excel 导出各个颗粒的球心坐标, 利用 MATLAB 对球体的球心信息进行处理: 将颗粒沿 y 轴划分成宽度相等的竖直区间, 并在每个区间中找出 y 值最大的颗粒。把得到的颗粒汇集在一起就得到了颗粒外表面坐标, 最后导入 Origin 画图软件, 对表面颗粒的坐标的近似曲线进行线性拟合, 拟合区间不包括颗粒刚流出的部分, 因为这个区域受出口颗粒的影响呈弧形。5 个角度对应斜面上的颗粒堆积厚度及其拟合直线见图 5。

图中的纵坐标分别表示是颗粒层的厚度/ m , 横坐标表示颗粒从料仓落到斜面后, 在斜面上运动的距离/ m 。由图 5 可以看到颗粒表层颗粒分散, 这是因为重力分力引起颗粒的竖直振动, 震动导致颗粒的波纹形成, 表层颗粒不平滑; 通过斜面过程中颗粒的厚度层变化不大, 但是颗粒尺寸很小, 相对于尺寸来说, 厚度变化很大。对比图 5 中各个角度的堆积厚度图, 可知随着角度的增大, 堆积厚度逐渐减小, 这是由于颗粒流入斜面的流量是一定的, 斜面倾角增大导致重力加速度在沿斜面方向的分加速度增大, 从而速度增大, 因此厚度也随之变小。

图 5 中堆积厚度拟合直线的斜率和截距, 如图 6 所示。由图中可知随着斜面倾角的增大, 拟合直线的斜率逐渐增大, 在 40° 之前呈直线增长的趋势, $40^\circ \sim 50^\circ$ 增长速度逐渐平缓, 拟合直线的截距随着倾角的增大, 逐渐较小。假设知道某一个斜面的角度, 通过图 6 可知, 颗粒层厚度拟合直线的斜率和截距, 也就得到了颗粒层厚度在斜面上的分布。

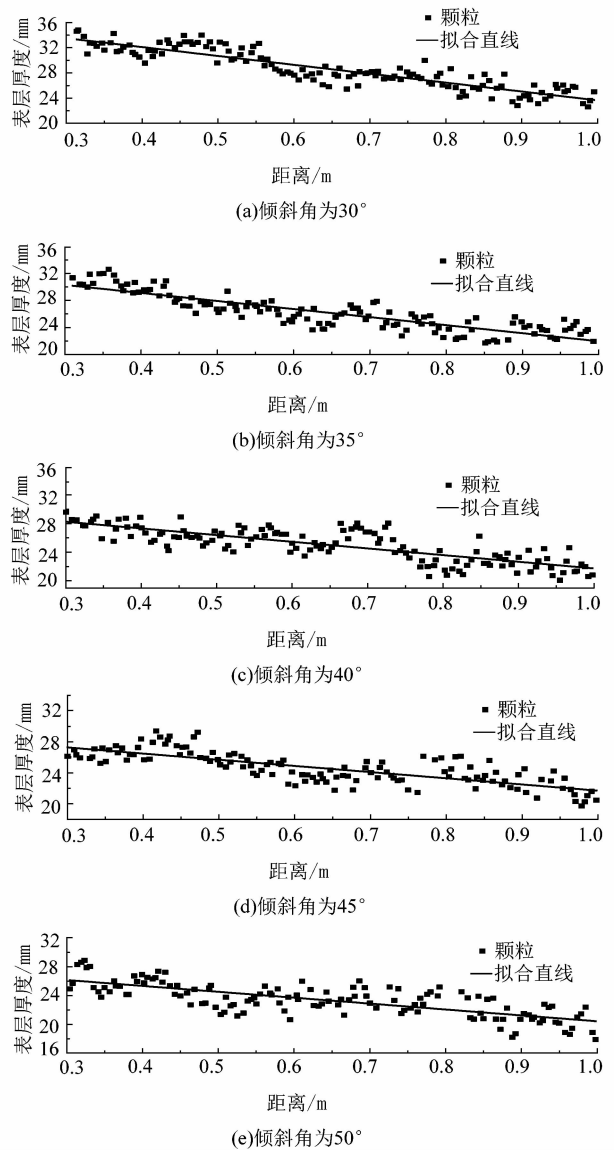


图 5 斜面上颗粒的堆积厚度

Figure 5 Thickness of particles accumulation on inclined plane

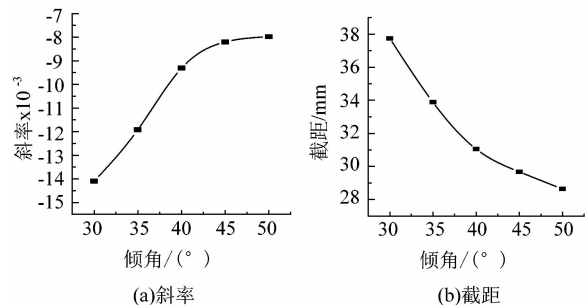


图 6 颗粒层厚度拟合直线的斜率和截距

Figure 6 Slope and intercept of fitting line

(下转第 28 页)