离散单元法模拟颗粒在斜板上运动及分离过程

刘 石1,何玉荣2,赵云华2,李志宏1

(1. 华北电力大学 能源与动力工程学院,北京 102206; 2. 哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院,哈尔滨 150001, rong@ hit. edu. cn)

摘 要:为了考察颗粒流的分离机制,基于离散单元法数值模拟了颗粒流在斜板上的运动和分离过程.进行 了不同粗糙度斜板上等密度不同粒径的颗粒流,以及等粒径不同密度的颗粒流分离状况的模拟.结果表明: 等密度不同粒径的颗粒流在斜板上流动时出现了明显的分离情况,且在表面粗糙度大的斜板上颗粒流的分 离更加明显,而等粒径不同密度的颗粒流在斜板上流动时没有明显的分离情况.研究结果对理解颗粒流的分 离机制具有指导作用.

关键词:离散单元法;颗粒流;斜板;分离 中图分类号:0347 文献标志码:A

文章编号: 0367-6234(2010)09-1491-04

Simulation of particle segregation on an inclined plane with discrete element method

LIU Shi¹, HE Yu-rong², ZHAO Yun-hua², LI Zhi-hong¹

1. Dept. of Thermal Power, North China Electric Power University, Beijing, 102206, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, China, rong@ hit. edu. cn)

Abstract: Based on discrete element method (DEM), the segregation of granular flow on an inclined plane was numerically investigated in order to investigate its mechanism. The flows with the granular mixture with the same density and different sizes and the mixture with the same size and different densities were simulated respectively on an inclined plane with different roughness. Numerical results show that the granular flow with the same density and different sizes segregates obviously and it gets more obviously when the roughness of the plane is larger. However, the flow with the same size but different densities mixes well in the current study. **Key words**: discrete element method; granular flow; inclined plane; segregation

工业过程以及自然界中普遍存在的颗粒通常 具有不同的大小、形状和性质,在外力和内部应力 的共同作用下会产生类似于流体的运动状态,这 种颗粒流的运动和分离现象广泛存在,如雪崩、沙 丘流、泥石流、流化床和滚筒内颗粒分层等^[1-4]. 研究人员们已经对颗粒流的运动和分离进行了一 系列的研究,并取得了大量对实际具有指导性的 研究成果.然而,对于斜板上颗粒流的运动和分离 现象的研究少见报道^[5-11]. 本文拟应用离散单元法对斜板上颗粒流的运 动和分离现象进行剖析.通过数值模拟工作,探讨 不同表面粗糙度斜板上不同性质的颗粒的运动和 分离过程,尝试揭示颗粒分离的机理.

1 离散单元方法

颗粒运动方程包括平移运动和转动运动,分 别表现为如下形式:

$$m dv/dt = \vec{F} - mg,$$

$$M = I d\omega/dt.$$

其中: \vec{F} 为两颗粒接触的作用力,M为动量矩,I为转动惯量,m为颗粒质量,v为颗粒平动速度, ω 为颗粒转动速度,t为时间,g为重力加速度.

力 - 位移法则包括发生在颗粒间的接触作用

收稿日期: 2008-12-21.

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50736002);中国科学院 知识创新工程重要方向资源项目(KZCX2-YW-302).

作者简介:刘 石(1956—),男,教授,博士生导师; 何玉荣(1976—),女,副教授,博士生导师.

力和相对位移两部分.两个颗粒在接触点发生相 互作用,它们受到来自沿接触面方向的摩擦力、法 向挤压力和阻尼作用.计算接触力可采用刚度、阻 尼系数和摩擦系数来描述.颗粒接触点位于重叠 区的中心处:

 $x_c = x_a + (r_A - 0.5\delta)\vec{n}.$

其中: δ 是两颗粒接触时的重叠量, x_c, x_a 分别为颗 粒接触位置坐标以及a颗粒中心位置坐标, r_A 为a颗粒半径, \vec{n} 为法向向量.两颗粒相接触的作用力 \vec{F} 可分解为法向力 \vec{F}_a 和切向力 \vec{F}_i ,

 $\vec{F} = \vec{F}_n + \vec{F}_t.$ 其中,法向力和切向力分别写成如下形式: $\vec{F}_n = -k_n \vec{\delta}_n - \eta_n \vec{v}_n,$ $\vec{F}_t = -k_t \vec{\delta}_t - \eta_t \vec{v}_t.$ 当切向力满足下列关系时, $|\vec{F}_t| > \mu |\vec{F}_n|,$ 颗粒间发生滑动摩擦,摩擦力为 $\vec{F}_t = -\mu |\vec{F}_n| \vec{v}_t / |\vec{v}_t|.$

式中: μ 是滑动摩擦系数, k_n 和 k_t 分别是法向和切向刚性系数, δ_n 和 δ_t 分别是颗粒在法向和切向上的位移, η_n 和 η_t 分别是法向和切向上的阻尼系

数, v_n 和 v_t 分别是接触时速度在法向切向上的分量, 它们的方向与阻尼力运动方向相反.

阻尼常数由粘性阻尼的特征值临界阻尼比和 临界阻尼常数共同确定:

$$\boldsymbol{\eta}_n = \boldsymbol{\beta}_n \boldsymbol{c}_{n, \text{crit}}, \quad \boldsymbol{\eta}_t = \boldsymbol{\beta}_t \boldsymbol{c}_{t, \text{crit}}.$$

式中: β_n 和 β_t 分别是法向和切向上的临界阻尼 比, $c_{n,crit}$ 和 $c_{t,crit}$ 分别是法向和切向上的临界阻尼 常数,如下所示:

$$c_{n, \operatorname{crit}} = 2m\omega_n = 2\sqrt{mk_n},$$

 $c_{t, \operatorname{crit}} = 2m\omega_t = 2\sqrt{mk_t}.$

式中: ω_n 和 ω_t 是无阻尼系统中的自然频率;m是有效系统质量,由所接触的颗粒质量计算

$$m = m_A m_B / (m_A + m_B) .$$

接触球间的相对速度在法向和切向上为

$$\overrightarrow{v_n} = \overrightarrow{v_B} - \overrightarrow{v_A},$$

$$\overrightarrow{v_i} = (\overrightarrow{v_B} - \overrightarrow{v_A}) - \overrightarrow{v_n} + (\overrightarrow{r_A \omega_A} + \overrightarrow{r_B \omega_B}) \times \overrightarrow{n}.$$

式中: r_A 、 r_B 是颗粒半径; ω_A 和 ω_B 分别为物体A、B的角速度.

在数值模拟计算中,计算参数与条件见表1. 计算工况及坐标选择示于图1中.

表1 计算参数与条件

颗粒密度/ (kg・m ⁻³)	颗粒直径/mm	切向刚度/ (N・m ⁻¹)	倾斜板倾角/ (°)	总颗粒数	摩擦系数	法向刚度/ (N・m ⁻¹)	重力加速度/ (kg・m・s ⁻²)
2 000	1~3	1.0×10^{3}	30	8 000	0.3	1×10^{3}	9. 8



图1 初始颗粒堆积

模拟过程中计算求解的详细程序如下:1)判断每个颗粒与其他的哪些颗粒发生接触;2)求出每个颗粒的受力;3)根据受力求出颗粒的运动加速度;4)求出颗粒的运动速度和新位置;5)回步骤1)开始循环,进入下一时间步.其中颗粒搜索技术采用格子法^[1].颗粒和斜板之间作用采用与颗粒与颗粒之间作用相似处理方法.颗粒沿斜面进出口采用周期性边界条件.颗粒初始时刻采用随机沉降堆积,如图1所示.计算时间步长选取1×10⁻⁶s.数值模拟持续100 s.

2 结果与讨论

下面分别考察等密度不同粒径颗粒流以及等 粒径不同密度颗粒流的分离情况.为了分析颗粒流 分离的机理,本文考察了颗粒流在具有不同粗糙度 (轮廓算术平均偏差 *R*_a = 0 m 和 *R*_a = 0.000 6 m) 的斜板上的运动和分离情况.

为了便于考察颗粒在斜板上运动时的分离情况,以下模拟工况均具有颗粒源补充,模拟中斜板 两边颗粒运动情形采用了周期性边界条件.

2.1 等密度不同粒径颗粒流的分离

图 2 中给出的是等密度 (ρ_s = 2 500 kg/m³) 不同粒径 (d_s = 0.5,1.5,2.5 mm)下颗粒流在不 同粗糙度斜板上瞬时流动图.由图中可见,大颗 粒、中等尺寸颗粒和小颗粒在初始时刻分布较均 匀,随着时间的发展,大颗粒逐渐向下运动,小颗 粒和中等尺寸颗粒相对于大颗粒而言集中在斜板 上部区域较多.颗粒流形成了明显的分离情形.比 较斜板表面粗糙度不同的图(a)和(b),从中可见, 斜板板面粗糙度大时颗粒流分离快,分离效果好.



图 2 等密度不同粒径颗粒流的流动 *t* = 100 s 图 3 给出了等密度不同粒径尺寸颗粒流在斜

板上运动过程中瞬时颗粒平均高度随时间分布图.





大颗粒经过初始阶段的震荡后,主要停留在 斜板下部区域,而小颗粒逐渐缓慢向上运动,相对 于大颗粒,集中在床层上部,中等粒径颗粒经过了 较小的震荡后相对于大颗粒而言,主要集中在床 层上部区域.斜板上等密度不同粒径尺寸颗粒流 形成了明显的分离.比较斜板粗糙度不同的图 3 (a)和(b),从中可见,斜板板面粗糙度大时颗粒 流分离快,分离效果好,并且大颗粒主要集中在床 层下部,中等尺寸颗粒主要集中在床层上部,而小 颗粒平均床层高度居于中间位置,这是由于小颗 粒分布在床层不同空间位置处.而当颗粒流在粗 糙度小的斜板上流动时,虽然颗粒流也出现了分 离现象,但是主要是大颗粒分离到床层底部,中等 尺寸颗粒和小颗粒在床层空间的分布区域也较 大,颗粒分离效果相对较差.

等密度不同粒径颗粒流沿斜板表面的瞬时颗

粒速度分布 (*t* = 200 s)示于图 4 中. 从图 4 可以 看出,当斜板表面粗糙度小时,颗粒沿斜板表面的 速度梯度很小,而当斜板表面粗糙度大时,颗粒沿 斜板表面的速度梯度较大. 如果将颗粒流看成类 似于流体的运动,由于粗糙度小斜板上颗粒流看成类 似于流体的运动,由于粗糙度小斜板上颗粒流症 度梯度很小,因而,颗粒流层与层之间的摩擦应力 就小,分离效果就相对较差,而粗糙度大斜板上颗 粒流速度梯度大,因而,颗粒流层与层之间的摩擦 应力也就大,所有具有很好的分离效果.



图 4 等密度不同粒径颗粒流的瞬时颗粒速度分布 (t = 200 s)

2.2 等粒径不同密度颗粒流的分离

图 5 给出了等粒径 (*d*_s = 0.75 mm)不同密 度 (*ρ*_s = 1 500,2 000,2 500 kg/m³)下颗粒流在 斜板上运动过程中瞬时颗粒平均高度随时间分布 图. 由图中可见,初始时刻,经过自由沉降后的 3 种颗粒分布较均匀. 随着时间的发展,3 种颗粒的 平均床层高度没有明显的变化. 斜板上等粒径不 同密度颗粒流未形成明显的分离. 斜板表面粗糙 度并未对该工况下颗粒流分离起到明显作用.

等密度不同粒径颗粒流沿斜板表面的瞬时颗 粒速度分布 (*t* = 100 s)示于图 6 中. 从图 6 可以 看出,颗粒流沿斜板表面的速度梯度很小,斜板表 面粗糙度并未对该工况下颗粒流的分离起到明显 作用. 同理,如果将颗粒流看成类似于流体的运 动,斜板上颗粒流速度梯度很小,因而,颗粒流层 与层之间的摩擦应力就小,分离效果就相对较差.



图 6 等粒径不同密度颗粒流的瞬时颗粒速度分布(t = 100 s)

3 结 论

1)本文应用离散单元法数值模拟了颗粒流 在斜板上的运动和分离情况.针对等密度不同粒 径颗粒流以及等粒径不同密度颗粒流在不同粗糙 度的斜板上的分离情形进行了考察.

2)斜板上等密度不同粒径尺寸颗粒流形成 了明显的分离.大颗粒主要停留在斜板下部区域, 而小颗粒相对于大颗粒,集中在床层上部,中等粒 径颗粒相对于大颗粒而言,主要集中在床层上部 区域.

3)斜板上等粒径不同密度颗粒流未形成明 显的分离.

4)颗粒近壁面处速度梯度对颗粒流的分离 具有明显的作用,近壁面处速度梯度大的颗粒流 动分离效果好.

参考文献:

- [1] 赵永志,程易.水平滚筒内二元颗粒体系径向分离模式 的数值模拟研究[J].物理学报,2008,57(1):322-328.
- [2] HE Yurong, CHEN Haisheng, DING Yulong, et al. Solids Motion and Segregation of Binary Mixtures in a Rotating Drum Mixer [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2007, 85(7): 963-973.
- [3] ZHANG Yong, JIN Baosheng, ZHONG Wenqi. Experimental investigation on mixing and segregation behavior of biomass particle in fluidized bed[J]. Chemical Engineering and Processing, 2009, 48: 745 - 754.
- [4] MAJID M, WALZEL P. Convection and segregation in vertically vibrated granular beds [J]. Powder Technology, 2009, 192(3):311-317.
- [5] 周迪文,陈十一,蔡庆东.两种不同尺度的颗粒在水 平振动容器内分离规律的模拟[J].计算物理,2006, 23(5):559-563.
- [6] 袁竹林,马明. 稀疏气固两相流动中颗粒分离特性的数值模拟[J]. 燃烧科学与技术,2001,7(4):235-238.
- [7]梁宣文,李粮生,侯兆国,等. 垂直振动作用下二元混 合颗粒分层的动态循环反转[J]. 物理学报,2008,57
 (4):2300-2305.
- [8] MULLIN T. GRANULAR MATERIALS: Mixing and De-mixing[J]. Science, 2002, 295 (5561): 1851.
- [9] 姜泽辉,陆坤权,厚美瑛,等,振动颗粒混合物中的三明 治式分离[J]. 物理学报,2003,52(9):2244-2248.
- [10] PALAPPAN K G, SAI P S T. Studies on segregation of binary mixture of solids in a continuous fast fluidized bed Part I Effect of particle density[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 138(1-3): 358-366.
- [11] PALAPPAN K G, SAI P S T. Studies on segregation of binary mixture of solids in a continuous fast fluidized bed Part II Effect of particle size[J]. Chemical Engineering Journal, 2008, 139(2): 330 - 338.

(编辑 杨 波)