

滚筒内非等粒径二元颗粒体系增混机理研究^{*}

赵永志¹⁾ 张宪旗^{2)†} 刘延雷¹⁾ 郑津洋¹⁾

1) 浙江大学化工机械研究所, 杭州 310027)

2) 浙江大学医学院附属第二医院, 杭州 310009)

(2009 年 2 月 6 日收到, 2009 年 2 月 27 日收到修改稿)

提出了在圆形滚筒内设置十字形内构件的增混方式, 并采用离散单元方法对设置不同大小内构件的滚筒内非等粒径二元颗粒体系的混合进行了数值模拟试验. 通过模拟结果重点分析了内构件对混合的影响, 讨论了内构件的尺寸对混合效果的作用, 分析和探讨了滚筒内构件对二元颗粒体系的增混机理. 研究发现, 当滚筒内无内构件时, 对流、扩散和离析三种作用机制对颗粒体系的混合和分离都起到了重要作用; 当滚筒内含内构件时, 颗粒的混合则只受到颗粒对流和扩散机制的作用, 而颗粒的离析效应得到了很大程度的抑制. 十字形内构件很大程度上会破坏滚筒内的自由表面流, 从而使发生在自由表面流中的颗粒分离不能发生, 最终可有效地增加颗粒之间的混合. 对于采用在滚筒内设置十字形内构件的方式来增加颗粒间的混合, 存在一个最优的内构件尺寸, 内构件过小或过大都不利于颗粒间的混合.

关键词: 分离, 混合, 离散单元法

PACC: 4610, 0520D, 6120J

1. 引言

将两种颗粒混合是工业中常见的过程, 广泛地应用在制药、化工、能源等领域. 如果两种颗粒的性质不同, 比如材料密度或者颗粒直径不同, 却存在较高的混合难度, 混合过程中很容易出现严重的分层和分离现象^[1-5], 又称为离析现象. 例如水平机械振动^[6]、垂直机械振动^[7-10]、雪崩类流动^[11, 12]、滚筒内流动^[13-15]等都会造成不同颗粒严重的分离或分层. 这些分离和分层基本上可分为两类. 一类为巴西果效应造成的分离, 即大小或密度不同的颗粒在振动床内出现的分离和分层, 较大或者较轻的颗粒会在振动过程中移动到床的上层, 较小或者较重的颗粒会沉到床的下层. 另外一类是在自由表面颗粒流中出现的分离或分层, 雪崩类流动及滚筒内流动的颗粒分层都是由该类分离造成的, 即在自由表面流中, 当颗粒大小或者密度不同时, 较大或者较轻的颗粒会浮在上层而较小或者较重的颗粒会沉到自由表面流的下层. 颗粒在自由表面流动中的分离和分层是一种常见的自然现象, 工业过程中也存在很多这类

现象, 而如何防止这些自由表面流造成的分离在混合过程中发生成为该领域的重要研究内容. 某些学者通过改变颗粒间的黏性力^[16, 17]或者颗粒性质^[18, 19]来控制其中的混合和分离, 但这些方式只适合于某些特殊的体系. 最近, Shi 等^[20]研究了通过在回转体内设置内构件来增混的方法, 发现内构件的结构对混合效果的影响很大, 并成为一个新的研究热点^[21]. 本文即以圆形滚筒为研究对象, 提出了在其内部设置十字形内构件的增混方式, 并采用离散单元方法 (DEM)^[22, 23]对设置不同大小内构件的滚筒内非等粒径二元颗粒体系混合进行了数值仿真试验. 通过模拟结果重点分析了内构件对混合的影响, 讨论了内构件的尺寸对混合效果的作用, 分析和探讨了滚筒内构件对二元颗粒体系的增混机理.

2. 数学模型

颗粒 i 在运动过程中主要受两种力作用, 即自身重力 $m_i g$ 和颗粒间的法向碰撞接触力 $F_{n,ij}$ 及切向碰撞接触力 $F_{t,ij}$. 根据牛顿第二定律, 每个颗粒的平动运动方程为

^{*} 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2007CB209706) 和浙江大学优秀青年教师资助计划资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zhangxianqi2004@yahoo.com.cn

$$m_i \frac{dV_i}{dt} = m_i g + \sum_{j=1}^{n_i} (F_{n,ij} + F_{t,ij}) \quad (1)$$

此外,颗粒还受到两种力矩的作用,即切向力造成的力矩 $T_{t,ij}$ 和滚动摩擦力矩 $T_{r,ij}$,

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} (T_{t,ij} + T_{r,ij}) \quad (2)$$

在上述力和力矩的作用下,颗粒发生移动和滚动。(1)和(2)式中 m 和 I 分别表示颗粒的质量和转动惯量, n_i 表示与颗粒 i 接触的颗粒总数, V 表示移动速度, ω 表示角速度, t 表示时间, g 表示重力加速度。

当两个球形颗粒发生碰撞时,首先在接触点处发生弹性变形,颗粒在前进方向受到阻力,该阻力的大小与法向变形位移、颗粒硬度成正比,达到最大位移变形时颗粒停止运动,沿原来运动的方向反弹,碰撞后颗粒的动能会产生一定的损失,损失的大小与颗粒的弹性阻尼系数及颗粒间的相对速度有关。当两个颗粒发生偏心碰撞时,相撞点处的接触力可分解为法向分力和切向分力,其中切向力的极值受到颗粒表面摩擦系数与法向力乘积的限制,当切向分力大于该极值时,两颗粒在接触表面将发生滑动。同时,颗粒间还存在着滚动摩擦力矩,该力矩与滑动摩擦力类似,受到滚动摩擦系数的限制。上述模型考虑了法向接触力、切向接触力(包括了滑动摩擦力)以及滚动摩擦力矩,将颗粒简化为刚性球体,碰撞时用颗粒间的叠加量表示弹性变形量,每种作用力和力矩都可以简化为一个弹簧、一个阻尼以及一个滑动器,该模型可用三组弹性-阻尼方程式来描述,其中各种力和力矩的详细数学描述参见文献[15]。本文采用了文献[15]中的数学模型、算法及计算程序,对滚筒内的颗粒混合过程进行了模拟研究。

3. 结果分析与讨论

本文所模拟的滚筒内径为 0.15 m,厚度为 0.01 m,所选两种球形颗粒的直径分别为 1.5 mm(小颗粒)和 3 mm(大颗粒),滚筒内二者的体积比为 1:1,颗粒材料的密度为 2600 kg/m³,具体的模拟参数见表 1。

模拟计算的第一步就是将颗粒装填到滚筒内,将小颗粒装到滚筒的下部,大颗粒置于其上部,且大、小颗粒的体积比为 1:1,两种颗粒初始时完全分离,颗粒总装载量为滚筒容积的一半,颗粒总数为

1.5 × 10⁴ 个,其中 3 mm 颗粒为 1666 个,1.5 mm 颗粒为 13334 个。待装填完成后,滚筒开始绕轴做旋转运动,旋转速度为 1 rad/s。本文共做了 6 组数值试验,在第一组数值试验中无内构件,在第 2—6 组数值试验中均设置了十字形内构件,十字形板的长度分别为 0.03, 0.05, 0.07, 0.09 和 0.11 m,板的厚度为 3 mm,宽度与滚筒的长度相同。每次数值试验中模拟时间均为 100 s,以保证混合达到稳定状态。通过试验结果可以考察内构件尺寸对混合效果的影响。

表 1 模拟参数

参量	数值
小颗粒直径/mm	1.5
大颗粒直径/mm	3.0
密度/kg·m ⁻³	2 600
弹性恢复系数	0.9
滑动摩擦系数	0.3
滚动摩擦系数/m	0.00005
滚筒内径 D /m	0.15
滚筒厚度 H /m	0.01
颗粒数量	~ 15000
时间步长/s	5.0 × 10 ⁻⁵

当大小不同的两种颗粒在圆形滚筒内运动时,可以认为是在三种机制的作用下进行混合,分别是对流、扩散和离析。其中对流和扩散机制是有利于混合的,而离析机制是不利于混合的。所谓对流,是指颗粒在外围设备运动的作用下发生的宏观尺度的流动或运动,当颗粒系统为多元体系时,颗粒对流会造成颗粒的混合^[24]。所谓扩散,是指颗粒在运动过程中发生的颗粒尺度的相互穿插和渗透作用,它与流体中的分子扩散类似,是造成颗粒微观尺度混合的重要作用机制^[25]。所谓离析,是指在滚筒内颗粒流的上表面,由于颗粒的不同性质造成的大颗粒上浮小颗粒下沉的分层和分离运动。其分离原因可归结为以下几种机理的共同作用:小颗粒通过大颗粒之间的缝隙逐渐往下部渗流^[26],运动过程中小颗粒较容易填充到大颗粒下部空穴的自组织作用^[27,28],对流造成的大颗粒移动到上部而又被阻止向下运动^[1],以及大、小两类颗粒的不同运动速度^[15]。当两种不同大小的颗粒在滚筒内运动,总是大颗粒运动到外围区域,说明在颗粒流上表面大颗粒的运动速度比小颗粒大,这是因为在颗粒流上表面颗粒移动主要是以滚动模式构成的,同样的滚动角速度,大颗粒向前运动的速度比小颗粒大很多。在对流、扩散和离析三种机制的共同作用下,滚筒内的颗粒最终会

达到相对稳定的混合和分离状态.

图 1 为模拟得到当滚筒内无内构件时两种颗粒的混合过程,从中可以看到滚筒内初始状态完全分离的两种颗粒在经过 100 s 的运动后达到了一定程度的混合效果.由于颗粒的大小不同造成的离析效应,在 100 s 时两种颗粒仍没有达到较均匀的混合,基本上呈现大颗粒在外围、小颗粒在内部的运动状

态.在滚筒转动过程中,上述提到的三种作用机制对颗粒体系的混合和分离都起到了重要作用.比如在 $t = 2\text{ s}$ 时可以明显地看到对流所起的作用,而在 $t = 4\text{ s}$ 及 $t = 8\text{ s}$ 时在浅色颗粒区域中存在稀疏的深色颗粒则是由扩散造成的.至于由颗粒性质不同造成的离析作用,则可在 $t = 16\text{ s}$ 及 $t = 100\text{ s}$ 时的滚筒内自由表面流中清晰地看到.

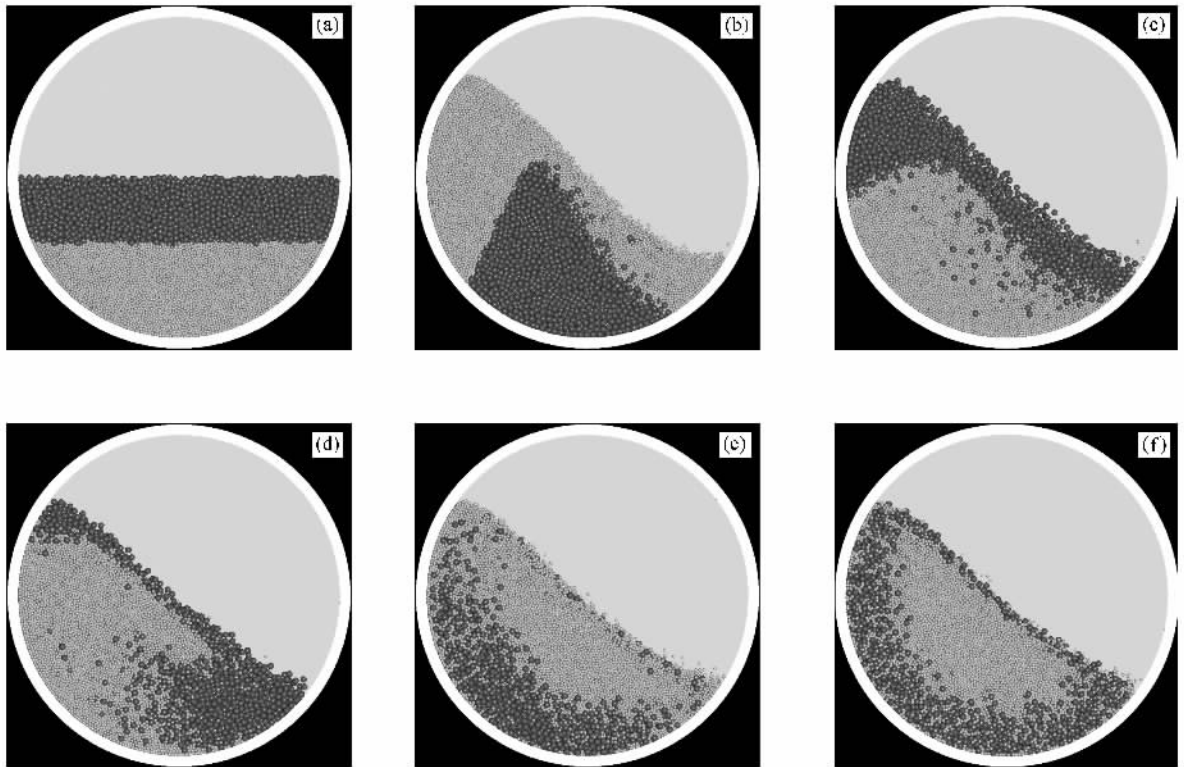


图 1 无内构件滚筒内非等粒径二元颗粒混合过程 (a) $t = 0\text{ s}$ (b) $t = 2\text{ s}$ (c) $t = 4\text{ s}$ (d) $t = 8\text{ s}$ (e) $t = 16\text{ s}$ (f) $t = 100\text{ s}$

为了增加滚筒内颗粒的混合效果,在滚筒内设置了十字形内构件,该内构件固定在滚筒的两端,宽度与滚筒的长度相同,十字形内构件每条边的长度为 0.09 m ,当滚筒转动时该内构件随之转动.图 2 为模拟得到的滚筒内含有内构件时两种颗粒的混合过程.从图 2 可以看到,滚筒内初始状态完全分离的两种颗粒在经过 100 s 的运动后达到了一定的混合状态,且混合得非常均匀(图 2(f)).这说明内构件的设置很大程度上增加了二元颗粒的混合作用.与无内构件滚筒相同的是,含内构件滚筒内颗粒的混合同样受到颗粒对流和扩散机制的作用,这一点在图 2 不同时刻的运动状态中可以看到.但与无内构件滚筒不同的是,含内构件滚筒内颗粒的离析效应得到了很大程度的抑制,从而有效地改善了颗粒的混合效果.由于在滚筒内分离主要是发生在自由表面

流中,增加了内构件后,十字形板很大程度上破坏了颗粒的自由表面流,从而使自由表面流中的颗粒分离不能发生,最终阻止了颗粒分离、加强了颗粒之间的混合.

为了清晰地对比含内构件和无内构件对颗粒混合效果的影响,本文给出了在 $t = 100\text{ s}$ 时大颗粒在滚筒内的分布,如图 3 所示.从图 3 可以清晰地看到:当滚筒内没有内构件时,大颗粒基本上位于滚筒内的外围及自由表面流的上表面,而在滚筒的内核基本上没有大颗粒存在,这说明在滚筒内存在严重的分离现象.当滚筒内设置内构件时,大颗粒分布则非常均匀,可见内构件对滚筒内二元颗粒体系的混合作用是相当大的.

图 4 为 $t = 100\text{ s}$ 时含内构件和无内构件滚筒内颗粒的运动速度矢量图.从图 4 中可以看到:当滚筒

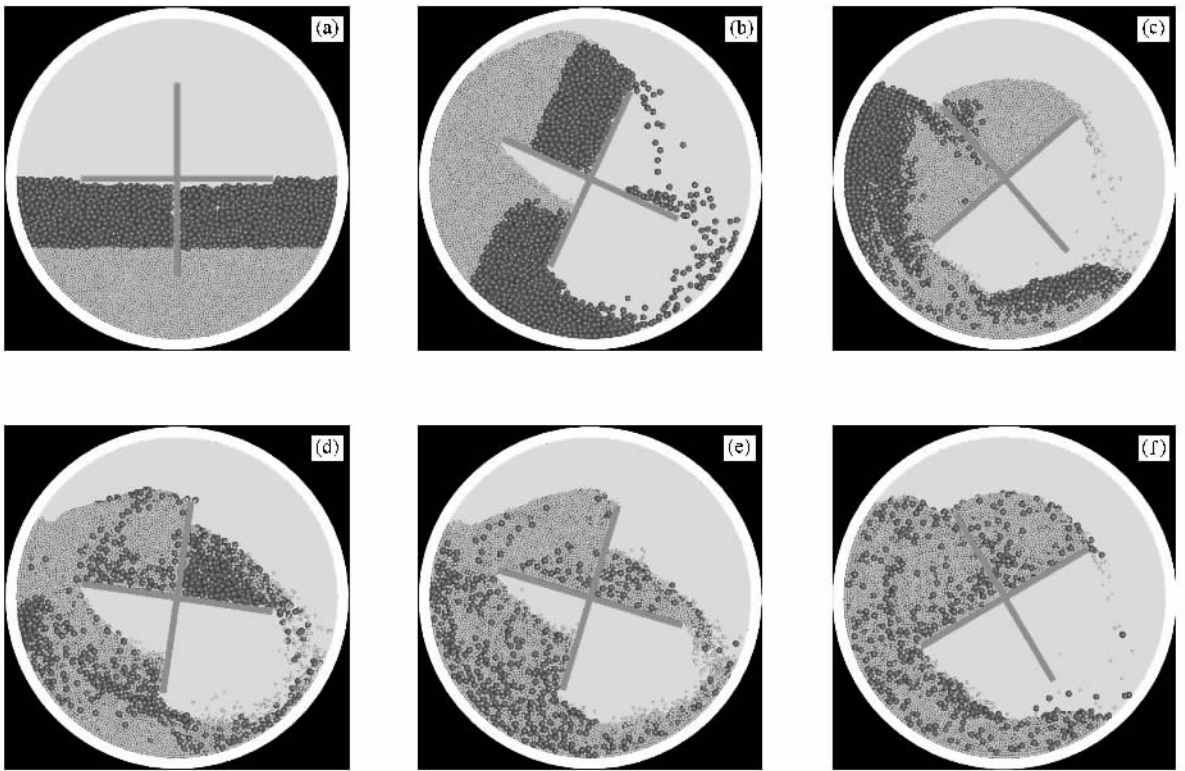


图2 含内构件滚筒内非等粒径二元颗粒混合过程 ($L=0.09\text{ m}$) (a) $t=0\text{ s}$ (b) $t=2\text{ s}$ (c) $t=4\text{ s}$ (d) $t=8\text{ s}$ (e) $t=16\text{ s}$ (f) $t=100\text{ s}$

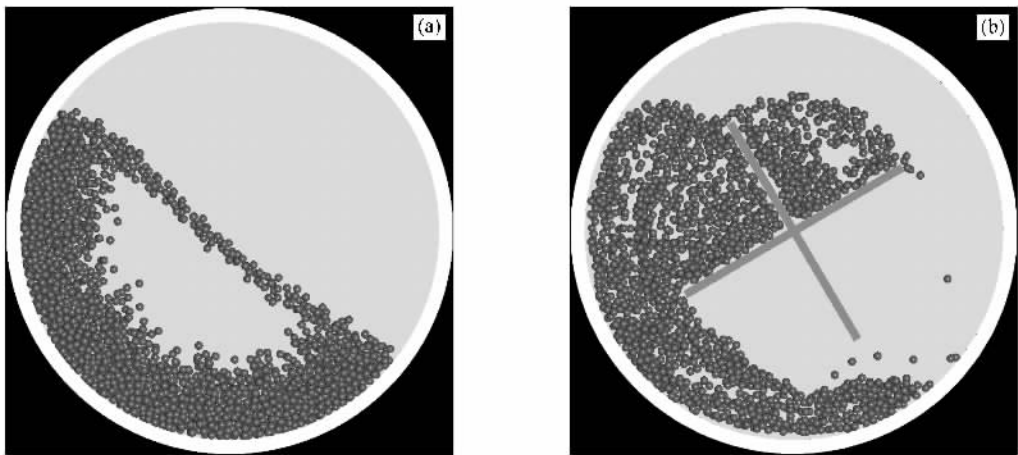


图3 含内构件和无内构件对大颗粒运动的影响 ($t=100\text{ s}$) (a) $L=0\text{ m}$ (b) $L=0.09\text{ m}$

内没有内构件时,下部的颗粒基本随滚筒做旋转运动,而上层的颗粒在上表面呈雪崩状流动,即自由表面流。在含有内构件的滚筒内,类似的自由表面流却不存在,大部分颗粒是随滚筒的转动而转动,只是在十字形内构件中较水平板的两端存在倾泻型的颗粒运动,对于不同性质的颗粒,这类运动也会造成一定的分离效应,但其程度较自由表面流轻很多,这也是滚筒内构件抑制分离、增加混合的根本原因所在。

为了考察内构件尺寸对混合效果的影响,共做了6组数值试验,在第1组数值试验中无内构件,在第2—6组数值试验中均设置了十字形内构件,十字形板的长度分别为0.03 0.05 0.07 0.09和0.11 m。图5为模拟得到的内构件大小对混合效果的影响。从图5可以看到:当内构件较小时,由于十字形挡板无法完全抑制自由表面流,造成分离效应仍然非常强烈,随着内构件尺寸的不断增大,其阻挡自由表面

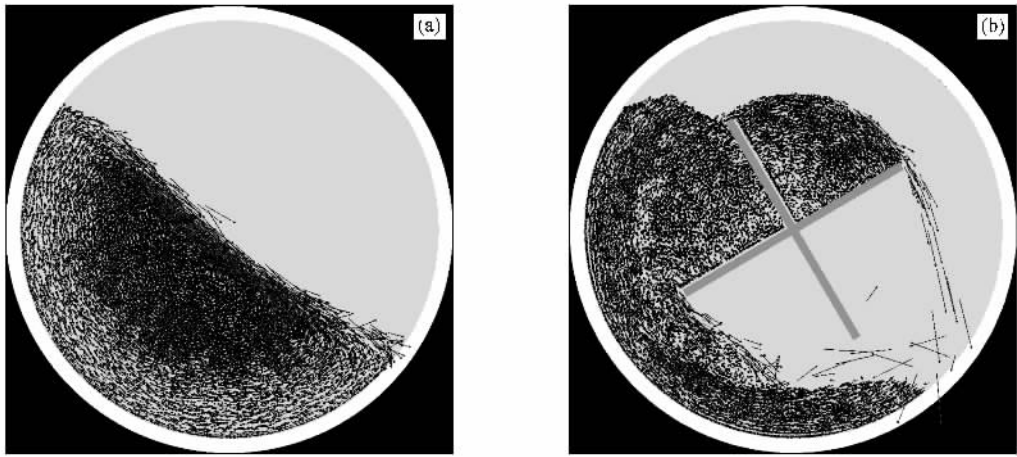


图 4 含内构件和无内构件滚筒内颗粒的不同运动状态 ($t = 100 \text{ s}$) (a) $L = 0 \text{ m}$ (b) $L = 0.09 \text{ m}$

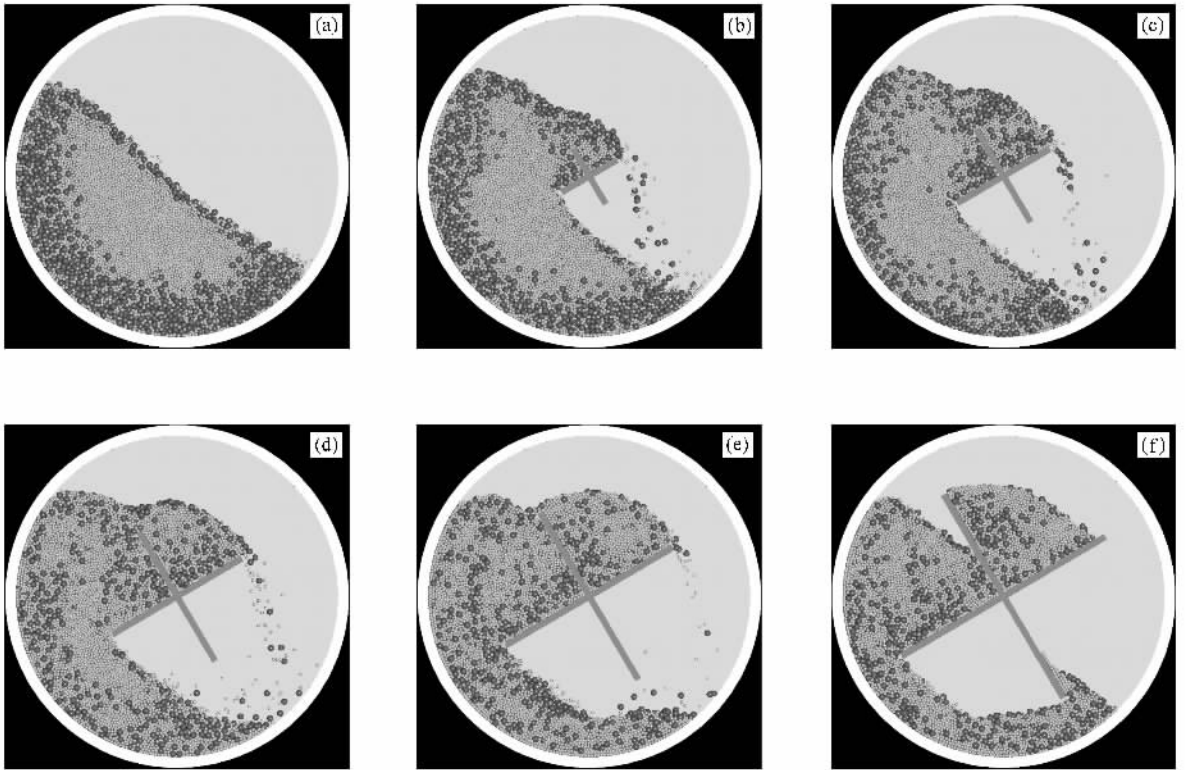


图 5 内构件大小对混合效果的影响 ($t = 100 \text{ s}$) (a) $L = 0 \text{ m}$ (b) $L = 0.03 \text{ m}$ (c) $L = 0.05 \text{ m}$ (d) $L = 0.07 \text{ m}$ (e) $L = 0.09 \text{ m}$ (f) $L = 0.11 \text{ m}$

流的效果越来越明显,当挡板的尺寸增加到 0.09 及 0.11 m 时,滚筒内的混合已变得相当均匀.但如果内构件的尺寸过大,无疑会阻碍颗粒在滚筒内的对流运动,这对混合不利.因此,如何选择尺寸适中的内构件将是滚筒装置改进设计的关键.

为了定量地描述滚筒内两种粒径颗粒整体的混合程度,本文采用 Lacey 混合指数^[29]对通过模拟得到的含有不同尺寸内构件滚筒内颗粒的混合状况进

行了统计分析.该指数的表达式为

$$M = \frac{S_0^2 - S^2}{S_0^2 - S_R^2}, \quad (3)$$

其中 S^2 为两种颗粒的实际混合方差, S_0^2 为完全分离状态的方差, S_R^2 为完全混合状态的方差.

$$S_0^2 = pq, \quad (4)$$

$$S_R^2 = \frac{pq}{N}, \quad (5)$$

其中 p 和 q 分别表示两种颗粒的体积分数, N 为一个样本内的平均颗粒数。(3)–(5)式是针对均一粒径体系的,但本文中所研究的颗粒系统含有两种不同大小的颗粒,因此(5)式中的 N 必须采用“等效颗粒数”的方法得到。首先将小颗粒直径设为基准直径,大颗粒按体积确定其等效颗粒数,本系统中大颗粒直径是基准颗粒的 2 倍,那么其体积为基准颗粒的 8 倍,即等效为 8 个颗粒。

为了得到 Lacey 混合指数,首先需将滚筒划分成有限数量的样本,然后再进行统计分析。根据滚筒内颗粒大小以及滚筒的尺寸,每个样本取宽和高均为 0.5 cm,厚度为 1 cm 的网格。但是,由于每个样本内的颗粒数相差很大,在滚筒上半部的样本网格可能不含颗粒,因此我们采用了加权方案来解决这一问题,含有较多颗粒的样本具有较大的权重,而含有较少颗粒的样本具有较小的权重,如果样本网格内没有颗粒,那么其权重为零。在此原则上,可求得两类颗粒的实际混合方差为

$$S^2 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^{N_s} k_i (a_i - \bar{a})^2, \quad (6)$$

其中 N_s 为样本总数, a_i 为两类颗粒中任意一类颗粒在样本 i 内的体积分数, \bar{a} 为相应颗粒在滚筒内的体积分数, k 可表示为

$$k = \sum_{i=1}^{N_s} k_i. \quad (7)$$

这里 k_i 为样本 i 的权重,可表示为

$$k_i = \frac{N_i}{N_t}, \quad (8)$$

其中 N_i 为样本 i 内等效颗粒数, N_t 为所有样本内等效颗粒数之和。

图 6 是通过统计分析得到的设置不同尺寸内构件时滚筒内两种颗粒间混合指数随时间的变化。从图 6 可以看到,在滚筒旋转 30 s 后(即 30 rad,约 5 周)基本上达到稳定状态,更长时间的旋转对混合基本上不起作用。图 7 是统计得到的时均混合指数与内构件大小的关系,统计数据取自 50—100 s 间的稳定状态。从图 7 可以看到:当滚筒内无内构件时,最终达到的混合指数约为 0.5 左右,混合的程度非常差。当设置 0.03 m 的十字形内构件时,混合指数增加到 0.6 附近,随着内构件尺寸的不断增大,混合指数也不断地提高,直到内构件的尺寸增加到 0.09 m,混合指数达到最大值(约为 0.9);随着内构件尺寸进一步增加到 0.11 m,最终达到的混合指数反而

有所下降。正如以上所述,如果内构件的尺寸过大,将会阻碍颗粒在滚筒内的对流运动,这不利于颗粒间的混合。对于采用在滚筒内设置内构件的方式来增加颗粒间的混合,存在一个最优的内构件尺寸,在该尺寸内构件的作用下可以使颗粒达到相对较优的混合状态。

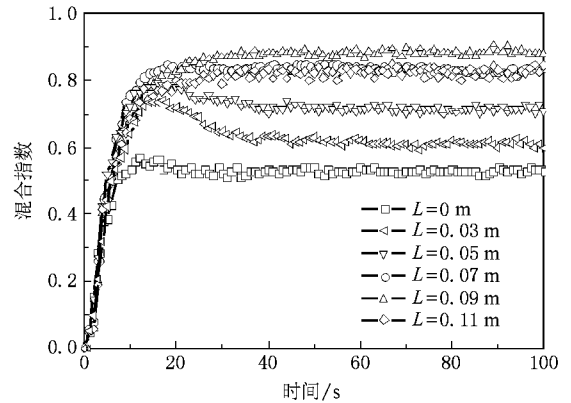


图 6 设置不同尺寸内构件滚筒内颗粒混合程度随时间的变化

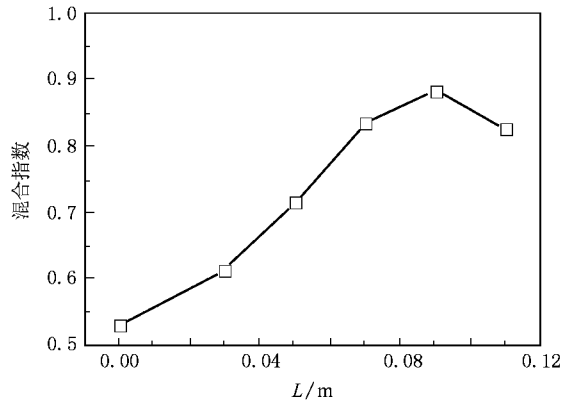


图 7 稳定后的时均混合指数与内构件尺寸的关系

4. 结 论

本文以圆形滚筒为研究对象,提出了在其内部设置十字形内构件的增混方式,并采用离散单元方法对设置不同大小内构件的滚筒内非等粒径二元颗粒体系混合进行了数值仿真试验,分析了内构件的尺寸对混合效果的影响,探讨了滚筒内构件对二元颗粒体系的增混机理,得到结论如下(1)采用计算颗粒力学方法可对复杂颗粒系统内颗粒的运动行为进行准确预测,运用三方方程离散单元法可准确地模拟出圆形滚筒内的颗粒混合和分离现象。(2)当滚筒

内没有内构件时,大颗粒基本上位于滚筒内的外围及自由表面流的上表面,而在滚筒的内核基本上没有大颗粒存在,在滚筒内存在严重的分离现象。(3)在圆形滚筒内,大小不同的颗粒是在对流、扩散和离析三种机制的作用下进行混合,滚筒内的颗粒最终会达到相对稳定的混合和分离状态。(4)当滚筒内无内构件时,对流、扩散和离析三种作用机制对颗粒体系的混合和分离都起到重要作用;当滚筒内含

内构件时,颗粒的混合只受到颗粒对流和扩散机制的作用,而颗粒的离析效应会得到很大程度的抑制。(5)十字形内构件可很大程度上破坏颗粒的自由表面流,从而使发生在自由表面流中的颗粒分离不能发生,最终阻止颗粒分离、有效增加颗粒之间的混合。(6)对于采用在滚筒内设置十字形内构件的方式来增加颗粒间的混合,存在一个最优的内构件尺寸,内构件过小和过大都不利于颗粒间的混合。

- [1] Knight J B , Jaeger H M , Nagel S R 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 3728
- [2] Möbius M E , Lauderdale B E , Nagel S R , Jaeger H M 2001 *Nature* **414** 270
- [3] Shinbrot T , Muzzio F J 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 4365
- [4] Savage S B , Lun C K K 1988 *J. Fluid Mech.* **189** 311
- [5] Ulrich S , Schröter M , Swinney H L 2007 *Phys. Rev. E* **76** 042301
- [6] Mullin T 2002 *Science* **295** 1851
- [7] Burtally N , King P J , Swift M R 2002 *Science* **295** 1877
- [8] Jiang Z H , Lu K Q , Hou M Y , Chen W , Chen X J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2244 (in Chinese) [姜泽辉、陆坤权、厚美瑛、陈唯、陈相君 2003 物理学报 **52** 2244]
- [9] Liang X W , Li L S , Hou Z G , Lü Z , Yang L , Sun G , Shi Q F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2300 (in Chinese) [梁宣文、李粮生、侯兆国、吕震、杨雷、孙刚、史庆藩 2008 物理学报 **57** 2300]
- [10] Zhao Y Z , Jiang M Q , Zheng J Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1812 (in Chinese) [赵永志、江茂强、郑津洋 2009 物理学报 **58** 1812]
- [11] Makse H A , Havlin S , King P R , Stanley E 1997 *Nature* **386** 379
- [12] Gray J M N T , Hutter K 1997 *Continuum Mech. Thermodyn.* **9** 341
- [13] Zuriguel I , Gray J M N T , Peixinho J , Mullin T 2006 *Phys. Rev. E* **73** 061302
- [14] Hill K M , Gioia G , Amaravadi D 2004 *Phys. Rev. Lett.* **93** 224301
- [15] Zhao Y Z , Cheng Y 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 322 (in Chinese) [赵永志、程易 2008 物理学报 **57** 322]
- [16] Samadani A , Kudrolli A 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 5102
- [17] Li H , McCarthy 2003 *Phys. Rev. Lett.* **90** 184301
- [18] Félix G , Thomas N 2004 *Phys. Rev. E* **70** 051307
- [19] Jain N , Ottino J M , Lueptow R M 2005 *Phys. Rev. E* **71** 051301
- [20] Shi D , Abatan A A , Vargas W L , McCarthy J J 2007 *Phys. Rev. Lett.* **99** 148001
- [21] Ottino J M , Lueptow R M 2008 *Science* **319** 912
- [22] Cundall P A , Strack O D L 1979 *Geotechnique* **29** 47
- [23] Iwashita K , Oda M 1998 *J. Eng. Mech. ASCE* **124** 285
- [24] Cisar S E , Ottino J M 2007 *AIChE J.* **53** 1151
- [25] McCarthy J J , Khakhar D V , Ottino J M 2000 *Powder Technol.* **109** 72
- [26] Chowhan Z T 1995 *Pharm. Technol.* **19** 56
- [27] Visscher W M , Bolsterli M 1972 *Nature* **239** 504
- [28] Duran J , Rajchenbach J , Clément E 1993 *Phys. Rev. Lett.* **70** 2431
- [29] Lacey P M C 1954 *J. Appl. Chem.* **4** 257

Augmenting the mixing of size-type binary granular systems in a rotating horizontal drum^{*}

Zhao Yong-Zhi¹⁾ Zhang Xian-Qi^{2)†} Liu Yan-Lei¹⁾ Zheng Jin-Yang¹⁾

¹⁾ *Institute of Process Equipment, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*

²⁾ *The Second Affiliated Hospital, College of Medicine, Zhejiang University, Hangzhou 310009, China*

(Received 6 February 2009 ; revised manuscript received 27 February 2009)

Abstract

Cross shaped baffles are set in the horizontal drum to augment mixing of the size-type binary particles, and the discrete element method was employed to study the mixing of the size-type binary granular systems in the rotating horizontal drums with different sized cross shaped baffles. The influences of the baffle and the size of the baffle on the mixing were discussed. The mechanisms of the augmenting of mixing of the baffles were discussed in this paper. The simulation results show that the convection, the diffusion and the segregation controlled the mixing and demixing of the binary granular systems in the rotating horizontal drum without baffle. When the baffle was set in the drum, only the convection and the diffusion operated, and the segregation of the binary particles were suppressed, because the cross shaped baffles can break the free-surface flow in the drum and the segregation of the binary particles in the free-surface flow can not occur, and the mixing can be enhanced. An optimum size of the baffle exists for the augmenting mixing of the size-type binary granular systems in the drum with baffles. The oversized and undersized baffles are unfavorable for the mixing of binary particles in the drum.

Keywords : segregation, mixing, discrete element method

PACC : 4610, 0520D, 6120J

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2007CB209706) and the Excellent Young Teachers Program of Zhejiang University, China.

[†] Corresponding author. E-mail : zhangxianqi2004@yahoo.com.cn