

水平转筒内大豆颗粒随机运动与混合特性模拟*

王瑞芳 李占勇 窦如彪 郭建忠

(天津科技大学机械工程学院, 天津 300222)

摘要: 基于离散单元法, 利用 EDEM 软件对水平转筒内大豆颗粒运动的随机性与混合特性进行了模拟研究, 分析了转筒转速与装载量对颗粒随机运动及混合特性的影响。结果表明: 转筒转速的提高有利于改善颗粒的随机运动过程, 而且颗粒的混合效果增强, 混合速度加快。装载量的影响相反, 随着装载量的增大, 颗粒在转筒径向方向的随机运动虽有增大, 但堆积现象比较明显, 沿转筒轴向方向的随机运动明显降低, 颗粒的混合速度变慢, 混合效果变差。

关键词: 大豆 水平转筒 EDEM 随机运动 混合特性 模拟

中图分类号: TS210.3; TQ027.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0093-07

Simulation on Random Motion and Mixing Characteristic for Soybean in Rotary Drum

Wang Ruifang Li Zhanyong Dou Rubiao Guo Jianzhong

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: Simulation study on random motion and mixing characteristic of soybean in a horizontal rotary drum was carried out based on discrete element method with EDEM. The effect of the rotation speed and load of the drum on particle random motion and mixing index was analyzed. It was found that the increasing of the rotation speed improved the random motion of particle, enhanced the mixing effect of particles, and speeded up the mixing process. Soybean load had the opposite effect. With the increasing of load, although the particle random motion was increased in the radial direction of the drum, the phenomenon of accumulation was more obvious and the random motion was significantly lower along the rotary drum axis direction. The mixing rate of particles was slow and the mixing effect became poor.

Key words: Soybean Horizontal rotary drum EDEM Random motion Mixing characteristic Simulation

引言

水平转筒装置被广泛地应用于物料的干燥及混合等操作过程。该装置结构简单, 物料处理量大, 并可连续操作。在转筒转动过程中, 颗粒运动的机理取决于一系列的状态因素和物料本身的特性^[1]。颗粒的随机运动及混合特性是影响转筒结构设计的重要参数之一^[2]。

目前, 众多研究者对颗粒在水平转筒中的混合特点进行了研究。欧阳鸿武等对圆筒型混合器进行了研究^[3]。代一心等对转筒干燥器内颗粒物料的滞留时间进行了模拟与试验研究^[1]。耿凡等对滚筒干燥器中的球形颗粒及杆状颗粒的混合运动分别进行了三维数值模拟, 探讨了滚筒转速、抄板半径、抄板数目以及颗粒形状等关键参数对滚筒中颗粒混合特性的影响, 也对球磨机中颗粒的混合运动进行

收稿日期: 2012-06-04 修回日期: 2012-07-23

* 国家自然科学基金资助项目(21106104)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20111208110004)

作者简介: 王瑞芳, 副教授, 博士, 主要从事微波干燥研究, E-mail: wangruifang@tust.edu.cn

通讯作者: 李占勇, 教授, 博士生导师, 主要从事干燥、流态化研究, E-mail: zyli@tust.edu.cn

了数值模拟^[4-6]。孙其诚等采用离散模型模拟了水平圆筒型混合机中1000个颗粒混合的全过程,分析了颗粒流型的变化规律和混合曲线,揭示了混合机内部颗粒的运动规律^[2]。Kwapinska等用离散元方法模拟转筒直径、旋转速度、装载量以及颗粒直径等参数对转筒中颗粒的横向(径向)混合的影响^[7]。

颗粒在水平转筒径向的混合非常容易,而轴向混合比较困难^[8-9]。文献[10~12]针对颗粒在转筒内的径向混合进行了研究。对于轴向方向的混合研究很少,只有文献[8]以离散元方法对球形颗粒在转筒内的轴向混合过程进行了模拟,并将混合过程类似于扩散过程。而对于颗粒在转筒中的随机运动过程的研究也很少有报道。

本文基于商业软件 EDEM^[13-15] 对大豆颗粒在水平转筒中运动的随机性及颗粒在转筒轴向方向的混合特性进行模拟研究。

1 初始参数定义

1.1 颗粒

模拟的大豆颗粒为文献[16~18]中的干大豆,其尺寸的确定方法为:随机取100颗大豆颗粒,分别测定其三轴径尺寸,最后取其平均值。试验测定的大豆颗粒三轴径尺寸分别为长 $l=7.469$ mm、宽 $b=7.17$ mm和高 $h=6.63$ mm。由于大豆颗粒近似为椭球体,模拟中应用 EDEM 中的多球产生不同形状颗粒的方法,大豆颗粒由4个球形颗粒组成,颗粒的半径及相对位置如图1a所示,在 EDEM 中生成的颗粒模型如图1b所示。在模拟中所有的大豆颗粒尺寸是相同的。

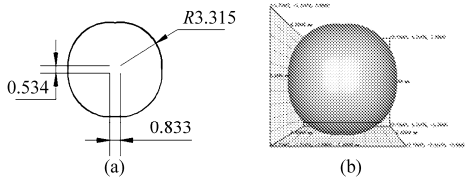


图1 颗粒模型

Fig.1 Particle model

(a) 颗粒模型定义 (b) EDEM 中生成的颗粒模型

大豆颗粒的物性为:质量 2.429×10^{-4} kg,体积 2.024×10^{-7} m³,密度1200 kg/m³,泊松比0.4,剪切模量2 MPa。其中质量与密度由试验测定,泊松比及弹性模量参照文献[19~20],剪切模量由弹性模量计算而得。

1.2 转筒

模拟中的水平转筒为文献[16~18]中的转筒,直径为150 mm、轴向长度为200 mm,在转筒上均匀分布有直径为3 mm的小孔(约630个),转筒内部

分布有6个与轴平行的宽为20 mm、厚度为4 mm的抄板,如图2所示。

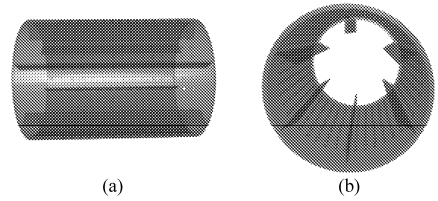


图2 转筒定义

Fig.2 Drum definition

(a) 轴向 (b) 径向

模拟中水平转筒的材质为有机玻璃,其物性参数为:密度1190 kg/m³、泊松比0.35和剪切模量10 GPa^[21]。

大豆颗粒与大豆颗粒、大豆颗粒与水平转筒之间的碰撞参数如表1所示^[22]。

表1 大豆的碰撞参数

Tab.1 Parameters of collision of soybean

参数	大豆与大豆	大豆与有机玻璃
恢复系数	0.5	0.5
静摩擦因数	0.30	0.25
滚动摩擦因数	0.01	0.01

2 研究方法

2.1 水平转筒内颗粒随机运动

采用的模型为 Hertz - Mindlin 接触模型。颗粒运动的随机性研究主要是通过跟踪颗粒群中某一颗粒在运动过程中的位置,进而分析颗粒在运动过程中到达某一位置的概率。

首先在转筒内产生一定装载量的颗粒群。为了研究颗粒群中任意颗粒的随机运动过程,在转筒中间位置单独定义一个颗粒工厂(颗粒工厂为产生颗粒的虚拟空间),产生一颗颗粒(称作单颗粒),如图3所示。需要说明的是该颗粒在不同的已知条件下,其初始位置略有不同。主要原因是 EDEM 模拟中颗粒产生的位置在定义的颗粒工厂中是随机放置的。在转筒运动过程中,跟踪该颗粒的空间位置。

颗粒在转筒内的运动状态主要取决于颗粒尺

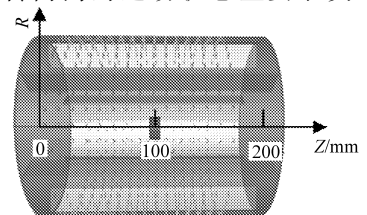


图3 单颗粒的颗粒工厂及颗粒位置坐标定义

Fig.3 Definition of single particle position and corresponding particle factory

寸、转筒尺寸、转速以及装载量^[7,23]。本文主要研究在一定装载量 L 及一定转筒转速 n 下颗粒的运动轨迹及运动位置。颗粒的随机性由颗粒位于转筒各个位置的概率及标准偏差进行分析。概率表示颗粒在运动区间内占据某一位置的几率。颗粒在运动过程中,一定时间内运动范围越大,概率越均一,表明颗粒运动的随机性越强,也说明颗粒不会长久地停滞于某一位置。标准偏差表示颗粒相对于平均位置的离散程度。标准偏差越大,表明颗粒的随机运动程度越大。颗粒位置的变化主要分析颗粒在转筒的径向半径 R 和颗粒在转筒的轴向坐标 Z 。

转筒装载量为

$$L = \frac{V_p}{V} \times 100\% \quad (1)$$

式中 L ——转筒装载量, %

V_p ——转筒内装载大豆颗粒体积, m^3

V ——转筒体积, m^3

颗粒位置概率为

$$\begin{cases} P_R = \frac{N_{Ri}}{N_R} \\ P_Z = \frac{N_{Zi}}{N_Z} \end{cases} \quad (2)$$

式中 P_R, P_Z ——颗粒在径向、轴向方向占据某一位置的概率

N_{Ri}, N_{Zi} ——颗粒位于某一径向、轴向坐标的次数

N_R, N_Z ——颗粒径向、轴向坐标的总取样次数(取样时间为 120 s, 每 0.01 s 取样一次)

标准偏差为

$$\begin{cases} S_R = \sqrt{\frac{\sum (X_{Ri} - \bar{X}_R)^2}{N_R - 1}} \\ S_Z = \sqrt{\frac{\sum (X_{Zi} - \bar{X}_Z)^2}{N_Z - 1}} \end{cases} \quad (3)$$

式中 S_R, S_Z ——颗粒在径向、轴向方向的位置标准偏差, mm

\bar{X}_R, \bar{X}_Z ——颗粒径向、轴向坐标的平均值, mm

X_{Ri}, X_{Zi} ——颗粒某一径向、轴向坐标, mm

2.2 水平转筒内颗粒混合特性

沿着转筒轴向分别建立 2 个对称的圆柱形颗粒工厂(图 4),并分别按一定的装载量以动态模式产生相同颗粒数、相同物性的 2 组颗粒,如图 5 所示。考虑到 2 种颗粒相互混合的条件相同,只研究其中的一种颗粒(图 5 中的左边颗粒,后面称作左颗粒)

向另一种颗粒(图 5 中的右边颗粒,后面称作右颗粒)的混合过程。将转筒的右半部分沿着轴向分为 10 等分,每等分厚度为 10 mm,以转筒轴向对称线为轴向坐标的起点,则 10 等分的轴向坐标范围为 0 ~ 100 mm(图 5 与图 3 的坐标定义略有不同)。

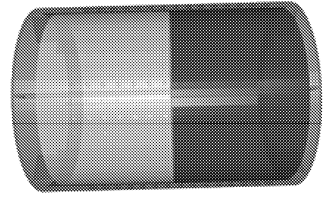


图 4 颗粒工厂定义

Fig. 4 Definition of particle factory

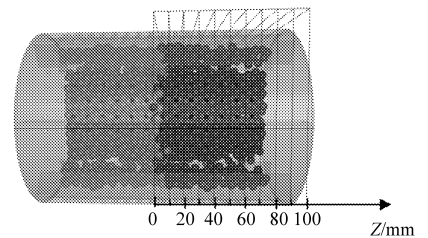


图 5 颗粒在转筒轴向的产生及坐标定义

Fig. 5 Particles generation and coordinate definition along axial direction of rotary drum

颗粒混合特性主要用混合指数 M 来表示。混合指数定义为在一个取样区域内取样颗粒数占总体颗粒数的比例,即

$$M = \frac{N_s}{N_T} \quad (4)$$

式中 N_s ——取样区域内的取样颗粒数(左颗粒数)

N_T ——取样区域内的总体颗粒数(取样区域内的左颗粒数与右颗粒数的总和)

当达到随机完全混合状态时,混合指数为 0.5。

3 模拟结果与分析

3.1 颗粒随机运动模拟

3.1.1 转筒转速

图 6 和图 7 为不同转速下颗粒群中单颗粒在转筒径向与轴向的运动轨迹。由图可直观地看到,随着转速的增加,颗粒在径向与轴向上的运动区域均增大。这说明转速的增大有利于颗粒位置的随机变化。但轨迹图只能看到颗粒在运动中所能到达的范围,对于颗粒占据每一个位置的概率却无法说明。

图 8 和图 9 为颗粒在不同转速下运动过程中占据某一位置的概率变化曲线。由图 8 可知,位于转筒半径 30 mm 以内的颗粒概率很小,这主要是由于装载量较小,颗粒无法到达该区域。另外,不论在什么转速下,越接近于转筒壁的颗粒概率越大。这主

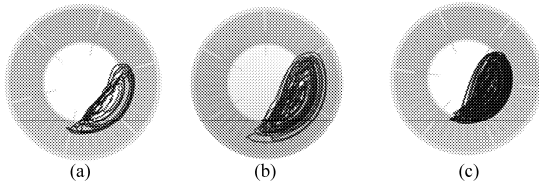


图6 不同转速下颗粒在转筒径向的运动轨迹
($t = 60 \text{ s}$, $L = 10\%$)

Fig. 6 Particle radial trajectory at different rotation speeds in rotary drum ($t = 60 \text{ s}$, $L = 10\%$)
(a) 5 r/min (b) 15 r/min (c) 25 r/min

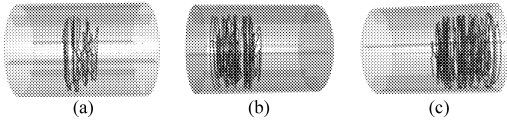


图7 不同转速下颗粒在转筒轴向的运动轨迹
($t = 60 \text{ s}$, $L = 10\%$)

Fig. 7 Particle longitudinal trajectory at different rotation speeds in rotary drum ($t = 60 \text{ s}$, $L = 10\%$)
(a) 5 r/min (b) 15 r/min (c) 25 r/min

要是由于颗粒在转筒中的运动状态分为静止区和滑移区,在静止区颗粒像刚体一样随着转筒以相同的角速度转动,该层较厚;而在滑移区,颗粒与静止区的颗粒产生相对运动,该层相对较薄^[7]。随着转筒转速的提高,颗粒所能达到的径向范围虽然增大,但颗粒概率的均一性并没有明显提高,其集聚现象仍较为明显。

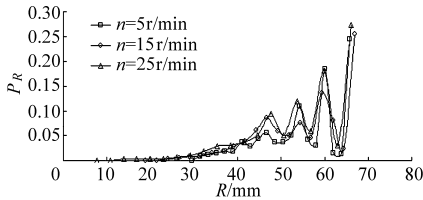


图8 不同转速下颗粒径向概率变化曲线
($t = 120 \text{ s}$, $L = 10\%$)

Fig. 8 Effect of rotation speed on particle location probability in radial direction ($t = 120 \text{ s}$, $L = 10\%$)

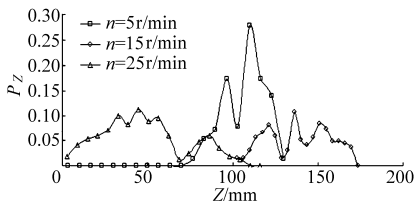


图9 不同转速下颗粒轴向概率变化曲线
($t = 120 \text{ s}$, $L = 10\%$)

Fig. 9 Effect of rotation speed on particle probability in longitudinal direction ($t = 120 \text{ s}$, $L = 10\%$)

由图9可知,在不同转速下,颗粒沿转筒轴向概率的差异较明显。首先,当转速 $n = 5 \text{ r/min}$ 时,颗粒在某些位置的概率非常大,这表明颗粒在运动中集

中于某些位置。相比较,当 n 为 15 r/min 和 25 r/min 时,颗粒概率比较均一,这表明当转速增大时颗粒占据各个位置的概率较一致,颗粒的集中现象减弱。另外,从图中可看出,随着转速的增大,颗粒的运动范围也相应增大,进一步说明颗粒的随机性增强。因此,转筒转速的增大有利于增强颗粒沿转筒轴向的随机性,同时降低颗粒的集中现象。

由图10可知,随着转筒转速的增大,颗粒在径向的随机性有所增大,但差异不是很明显,但在轴向,颗粒的离散程度明显增大,即随机性增强。

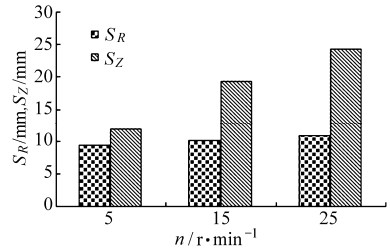


图10 不同转速下颗粒在径向与轴向的位置标准偏差
($t = 120 \text{ s}$, $L = 10\%$)

Fig. 10 Effect of rotation speed on standard deviation of particle position changes in radial and longitudinal directions ($t = 120 \text{ s}$, $L = 10\%$)

3.1.2 转筒装载量

图11和图12为不同装载量下颗粒群中单颗粒在转筒径向与轴向的运动轨迹。由图可直观看到,随着装载量的增加,颗粒在径向的运动区域增大,而在轴向运动范围有所减小。

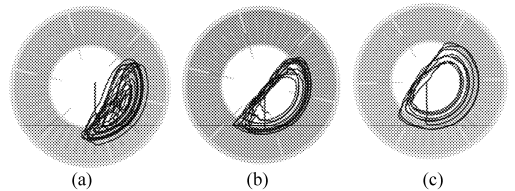


图11 不同装载量下颗粒在转筒径向的运动轨迹
($t = 30 \text{ s}$, $n = 15 \text{ r/min}$)

Fig. 11 Particle radial trajectory at different particle loads ($t = 30 \text{ s}$, $n = 15 \text{ r/min}$)
(a) 10% (b) 20% (c) 30%

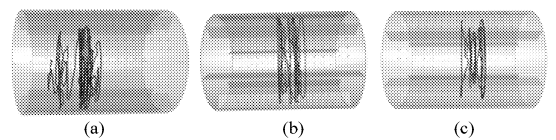


图12 不同装载量下颗粒在转筒轴向的运动轨迹
($t = 30 \text{ s}$, $n = 15 \text{ r/min}$)

Fig. 12 Particle longitudinal trajectory at different particle loads ($t = 30 \text{ s}$, $n = 15 \text{ r/min}$)
(a) 10% (b) 20% (c) 30%

图13和图14为不同装载量下颗粒在径向和轴向运动过程中占据位置概率的变化曲线。由图13

可知,在转筒径向上,随着装载量的增加,颗粒概率较均一,而且位于转筒中心的颗粒概率增大,颗粒在总体的运动范围内随机性有所增强。

由图 14 可明显看出,在转筒轴向上,当装载量较小时(10%),颗粒的运动范围较大,其随机性较强。而且从概率的均一程度可看出,装载量增大时均一程度减弱,颗粒比较集中。因此,装载量对颗粒随机性的影响表现为:随着装载量的增大,颗粒在转筒径向上的随机性增强,但在转筒的轴向上,颗粒的随机性变差。由图 15 可知,颗粒在转筒径向上,标准偏差随着装载量的增大而增大,说明随机性增大,但在轴向上,情况却相反。

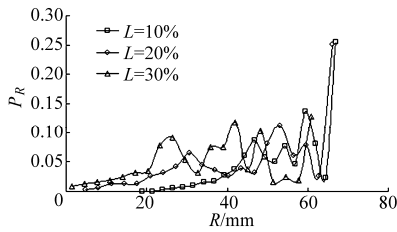


图 13 不同装载量下颗粒径向概率变化曲线
($t = 60 \text{ s}, n = 15 \text{ r/min}$)

Fig. 13 Effect of loads on particle location probability in radial direction ($t = 60 \text{ s}, n = 15 \text{ r/min}$)

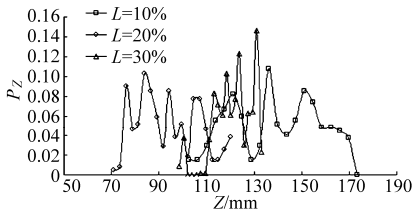


图 14 不同装载量下颗粒轴向概率变化曲线
($t = 60 \text{ s}, n = 15 \text{ r/min}$)

Fig. 14 Effect of loads on particle location probability in longitudinal direction ($t = 60 \text{ s}, n = 15 \text{ r/min}$)

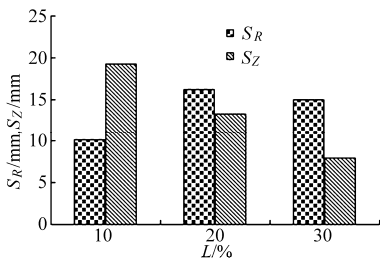


图 15 不同装载量下颗粒在径向与轴向的位置标准偏差 ($t = 60 \text{ s}, n = 15 \text{ r/min}$)

Fig. 15 Effect of loads on standard deviation of particle position changes in radial and longitudinal directions ($t = 60 \text{ s}, n = 15 \text{ r/min}$)

3.2 颗粒混合特性模拟

3.2.1 转筒转速

图 16 是装载量 L 为 10%、转速 n 分别为 5、15

和 25 r/min 时,颗粒的混合指数随混合时间的变化关系。轴向位置以 10 mm 为一单位区域,轴向坐标由 10 mm 至 100 mm。

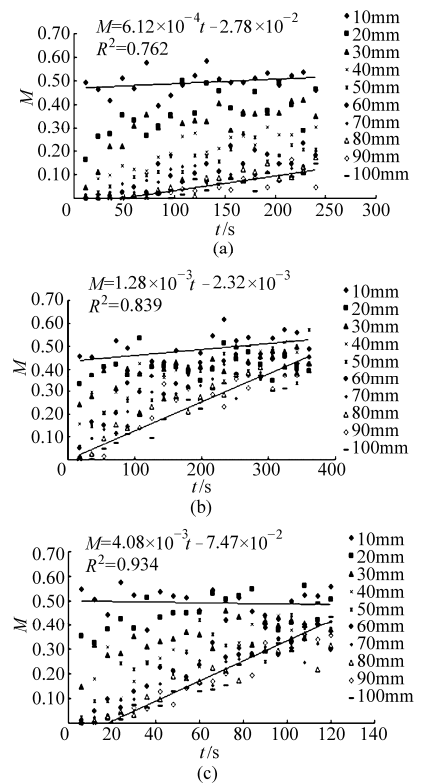


图 16 不同转速下混合指数随时间和轴向位置的变化
Fig. 16 Variations of longitudinal mixing index with time and axial coordinate at different rotation speeds
(a) 5 r/min (b) 15 r/min (c) 25 r/min

对最小轴向坐标(10 mm)与最大轴向坐标(100 mm)时混合指数随时间的变化进行线性回归。其中回归线的斜率表示混合指数的变化率,可代表颗粒的混合速度。

由于在轴向坐标较小时,颗粒很快达到均匀混合,因此对轴向方向混合效果的研究具有代表性的是最大轴向坐标时颗粒的混合效果。最大轴向坐标(100 mm)时的回归函数及决定系数如图中所示。从上、下两条回归线的区域可明显看出,转速越大,区域随着时间的收敛速度越快,说明颗粒混合得越好。另外从回归函数的斜率也可看出,随着转速 n 从 5、15 增大至 25 r/min,斜率分别从 6.12×10^{-4} 、 1.28×10^{-3} 增加至 4.08×10^{-3} ,且具有较好的线性度(决定系数 R^2 较大)。由于斜率可以表征颗粒混合速度,所以随转速的增大,颗粒在轴向上的混合速度加快。

3.2.2 转筒装载量

当转筒转速为 15 r/min 时,对装载量 L 为 10%、20% 和 30% 进行模拟。模拟结果如图 17 所示。

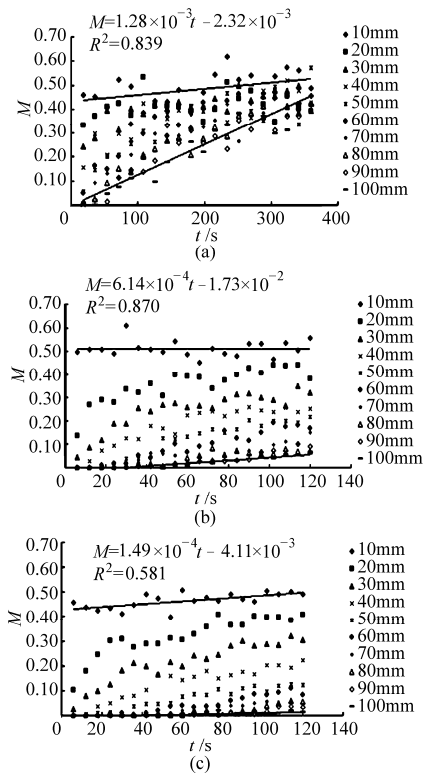


图 17 不同装载量下混合指数随时间和轴向位置的变化

Fig. 17 Variations of longitudinal mixing index with time and axial coordinate at different loads

(a) 10% (b) 20% (c) 30%

图中可见,随着装载量从 10%、20% 增加至 30%,上、下两条回归线区域随混合时间的收敛性变差,且回归函数中的斜率降低,分别从 1.28×10^{-3} 、 6.14×10^{-4} 降至 1.49×10^{-4} ,这说明沿着轴向方向混合速度变慢。因此,装载量的增大不利于颗粒沿转筒轴向方向的混合,装载量越大,轴向方向的混合效果越差。

颗粒的混合特性间接说明了颗粒运动的随机性。其分析结论与颗粒的随机运动结论相同。

4 结论

(1) 转筒转速的增加对颗粒沿转筒径向方向随机运动的改善不是很明显,但对颗粒沿转筒轴向方向的随机运动却大有改善。而装载量的影响相反,增大转筒装载量,颗粒在转筒径向方向的随机运动增大,而沿转筒轴向方向的随机运动降低。

(2) 转筒转速与装载量对颗粒的混合具有一定的影响,随着转速的增大,颗粒的混合效果增强,混合速度加快。而装载量的增大不利于颗粒在轴向方向的混合,其混合速度随着装载量的增大而减小。颗粒的混合特性也间接的说明了颗粒运动的随机性。

参 考 文 献

- 代一心,黄志刚,肖君. 转筒干燥器内颗粒物料运动的模拟与实验研究[J]. 北京工商大学学报:自然科学版,2005,23(4):20~22.
Dai Yixin, Huang Zhigang, Xiao Jun. Simulation and test on particulate materials flow in rotary dryers[J]. Journal of Beijing Technology and Business University: Natural Science Edition, 2005,23(4):20~22. (in Chinese)
- 孙其诚,王光谦,杨宁. 水平圆筒型混合机中颗粒混合的离散模拟[J]. 中国粉体技术,2002,8(1):6~9.
Sun Qicheng, Wang Guangqian, Yang Ning. Simulation of flow and mixing of particles in a fast rotating cylinder[J]. China Powder Science and Technology,2002,8(1):6~9. (in Chinese)
- 欧阳鸿武,何世文,廖奇音,等. 圆筒型混合器中颗粒混合运动的研究[J]. 中南大学学报:自然科学版,2004,35(1):26~30.
Ouyang Hongwu, He Shiwen, Liao Qiyin, et al. Research on granular mixing in rotating drum blender[J]. Journal Center South University: Natural Science,2004,35(1):26~30. (in Chinese)
- 耿凡,徐大勇,袁竹林,等. 滚筒干燥器中颗粒混合运动的三维数值模拟[J]. 应用力学学报,2008,25(3):529~534.
Geng Fan, Xu Dayong, Yuan Zhulin, et al. Three dimensional numerical simulation of mixing process of particles in rotary dryer[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics,2008,25(3):529~534. (in Chinese)
- 耿凡,袁竹林,孟德才,等. 球磨机中颗粒混合运动的数值模拟[J]. 热能动力工程,2009,24(5):623~629.
Geng Fan, Yuan Zhulin, Meng Decai, et al. Numerical simulation of particle mixing movement in a ball mill[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power,2009,24(5):623~629. (in Chinese)
- 耿凡,徐大勇,袁竹林,等. 滚筒干燥器中杆状颗粒混合特性的三维数值模拟[J]. 东南大学学报:自然科学版,2008,38(1):116~122.
Geng Fan, Xu Dayong, Yuan Zhulin, et al. Three dimensional numerical simulation of mixing characteristics of slender particles in rotary dryer[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition,2008,38(1):116~122. (in Chinese)
- Kwapinska M, Saage G, Tsotsas E. Mixing of particles in rotary drums: a comparison of discrete element simulations with experimental results and penetration models for thermal processes[J]. Powder Technology, 2006,161(1):69~78.
- Finnie G J, Kruyt N P, Ye M, et al. Longitudinal and transverse mixing in rotary kilns: a discrete element method approach[J]. Chemical Engineering Science, 2005,60(15):4083~4091.
- Nityanand N, Manley B, Henein H. An analysis of radial segregation for different sized spherical solids in rotary cylinders[J]. Metallurgical Transactions B, Process Metallurgy, 1986,17(2):247~257.

- 10 van Puyvelde D R, Young B R, Wilson M A, et al. Experimental determination of transverse mixing kinetics in a rolling drum by image analysis[J]. Powder Technology, 1999,106(3): 183 ~ 191.
- 11 Mellman J. The transverse motion of solids in rotating cylinders-forms of motion and transition behavior[J]. Powder Technology, 2001, 118(3): 251 ~ 270.
- 12 van Puyvelde D R, Wilson M A, Young B R, et al. Modelling transverse mixing in a rolling drum[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2000,78(4): 635 ~ 642.
- 13 陈进,周韩,赵湛,等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报,2011,42(10):79 ~ 83.
Chen Jin,Zhou Han,Zhao Zhan, et al. Analysis of rice seeds motion on vibrating plate using EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(10):79 ~ 83. (in Chinese)
- 14 李媛华. 基于离散元技术的球磨机参数优化研究[D]. 长春:吉林大学,2009.
Li Yuanhua. Study on the parameter optimization of ball mills based on the technology of distinct element method [D]. Changchun: Jilin University,2009. (in Chinese)
- 15 李洪昌,李耀明,唐忠,等. 风筛式清选装置振动筛上物料运动 CFD-DEM 数值模拟[J]. 农业机械学报,2012,43(2): 79 ~ 84.
Li Hongchang,Li Yaoming,Tang Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(2):79 ~ 84. (in Chinese)
- 16 Wang R F, Li Z Y. Soybean drying characteristics in microwave rotary dryer with forced convection[J]. Frontiers of Chemical Engineering in China, 2009, 3(3): 289 ~ 292.
- 17 Wang R F, Li Z Y, Su W G, et al. Comparison of microwave drying of soybean in static and rotary conditions[J]. International Journal of Food Engineering, 2010, 6(2):12.
- 18 Wang R F, Li Z Y, Wu L, et al. Effects of MW-hot air parameters on drying soybeans[J]. Transactions of the TSTU, 2012, 18(1):115 ~ 127.
- 19 刘传云,张强,毛志怀. 大豆表观接触弹性模量的测定[J]. 粮食与饲料工业,2007(10):12 ~ 14.
Liu Chuanyun, Zhang Qiang, Mao Zhihui. Determination of apparent contact elastic modulus of soybean kernels[J]. Cereal & Feed Industry, 2007(10):12 ~ 14. (in Chinese)
- 20 Misra R N, Young J H. A model for predicting the effect of moisture content on the modulus of elasticity of soybeans[J]. Transactions on the ASAE, 1981,24(5): 1 241 ~ 1 338,1 347.
- 21 刘雪慧. 结构实验模型材料有机玻璃的某些机械性能的研究[J]. 西北工业大学学报,1965(2):47 ~ 57.
- 22 徐志宝. 基于离散元法的大豆碰撞过程仿真分析[D]. 长春:吉林大学,2006.
Xu Zhibao. Simulation analysis of collision process of soybean based on the DEM [D]. Changchun: Jilin University,2006. (in Chinese)
- 23 Henein H, Brimacombe J K, Watkinson A P. Experimental study of transverse bed motion in rotary kiln[J]. Metallurgical Transactions B,1983,14(2):191 ~ 205.

(上接第 87 页)

- 5 迟媛,蒋恩承. 履带车辆差速式转向机构性能试验[J]. 农业机械学报,2008,39(7): 15 ~ 17.
Chi Yuan, Jiang Encheng. Performance tests on differential steering mechanism of tracked vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(7):15 ~ 17. (in Chinese)
- 6 日高茂实. 强制デフ式操舵システムの開発:第1報 [J]. 農業機械学会誌, 2002,64(2):111 ~ 116.
- 7 翁家昌,高宗英,谭正三,等. 拖拉机构造、原理和计算[M]. 北京:中国工业出版社,1964:72 ~ 82.
- 8 镇江农业机械学院,洛阳农业机械学院. 拖拉机理论[M]. 北京:中国农业机械出版社,1981:123 ~ 141.
- 9 高行方. 几种中小型履带自走式水稻联合收割机转向机构的性能介绍[J]. 粮油加工与食品机械,1975(8):64 ~ 82.
- 10 陈霓,熊永森,胡华东,等. 联合收割机用零半径转向行走变速箱:中国,ZL 2010 1 0574927. 8[P]. 2012-12-19.
- 11 陈德俊,陈霓,马广,等. 履带式稻麦联合收割机 0 轴转向变速箱:日本,PCT/CN2011/077888[P]. 2012-05-31(WIPO).
- 12 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:下册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- 13 李勇,姚宗伟,王国强. 四履带车辆转向性能仿真研究[J]. 农业机械学报,2011,42(2): 34 ~ 38.
Li Yong, Yao Zongwei, Wang Guoqiang. Steering performance simulation of four-tracked vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(2): 34 ~ 38. (in Chinese)
- 14 张广庆,朱思洪,李伟华,等. 铰接摆杆式大功率拖拉机原地转向仿真与实验[J]. 农业机械学报,2012,43(10): 25 ~ 30.
Zhang Guangqing, Zhu Sihong, Li Weihua, et al. Simulation and experiment of in-situ steering of large wheel tractor with hinge swing link [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(10): 25 ~ 30. (in Chinese)
- 15 姚克恒,刘世豪,夏拥军,等. 开沟机作业功耗的正交试验分析及优化设计[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(6): 529 ~ 535.
Yao Keheng, Liu Shihao, Xia Yongjun, et al. Orthogonal experiment analysis and optimization design for operation power of ditcher[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011,29(6): 529 ~ 535. (in Chinese)