

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.030

秸秆固态发酵回转筒内颗粒混合状态离散元参数标定*

冯俊小^{1,2} 林佳¹ 李十中³ 周敬之¹ 周知星³

(1. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083; 2. 北京科技大学北京市高校节能与环保工程研究中心, 北京 100083;
3. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:为解决秸秆碎料在发酵过程中积热和触氧条件不均的问题,采用离散元法研究回转筒内秸秆颗粒的运动特性。为利用实验值定量对比仿真,基于图像处理法,定量分析实验法和离散元法的滚筒内颗粒混合状态。通过虚拟堆积实验和滚筒内颗粒混合仿真与实验现象进行对比,标定离散元法的颗粒物性参数。结果表明:图像法表征混合状态时,子域大小的划分与颗粒尺寸相关;影响堆积角的主要因素为颗粒间静摩擦因数和密度;影响回转筒内颗粒混合的主要因素为颗粒与壁面粘性系数和颗粒与壁面滚动摩擦因数;验证标定参数结果表明,颗粒参数能用于离散元法描述回转筒内秸秆碎料的运动特性。

关键词: 秸秆颗粒 固态发酵 回转筒 混合特性 离散元 参数标定

中图分类号: TK6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)03-0208-06

Calibration of Discrete Element Parameters of Particle in Rotary Solid State Fermenters

Feng Junxiao^{1,2} Lin Jia¹ Li Shizhong³ Zhou Jingzhi¹ Zhou Zhixing³

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2. Beijing Engineering Research Center for Energy Saving and Environmental Protection, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China 3. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to solve the problem of accumulated heat and uneven condition of contact oxygen during straw fermentation process, the study of mixing motion of straw modeled by the discrete element method (DEM) was conducted. The accuracy of DEM models depends on the model parameters. Based on the image analysis, quantitative analysis of experiment and DEM method's mixing state were conducted. A calibration process was developed to determine the parameter value by experiment of particle's repose angle and motion. The research results showed that the size of subdomain was related to the particle's size when using the image analysis of mixing characteristics. The size of subdomain affected the resolution of image analysis and it could be set as six times of particle's diameter. The order of factors' influence on the straw's repose angle was the coefficient of static friction of particle/particle, the particle density, cohesion coefficient of particle/particle and coefficient of rolling friction of particle/particle. The order of factors' influence on the mixing characteristics of the straw in rotary drum was the cohesion coefficient of particle/wall, the coefficient of rolling friction of particle/wall, coefficient of static friction of particle/wall, coefficient of restitution of particle/wall and coefficient of restitution of particle/particle. The orthogonal test results were compared with the experiment data. The granular material parameters could be used to describe the mixing characteristics of straw.

Key words: Straw particle Solid state fermentation Rotating drum Mixing characteristics DEM Parameter calibration

收稿日期: 2014-05-05 修回日期: 2014-06-11

* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2007AA05Z215)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-SD-12-007B)

作者简介: 冯俊小,教授,博士生导师,主要从事工业设备热诊断和工程热物理交叉领域过程研究,E-mail: jxfeng@ustb.edu.cn

通讯作者: 李十中,教授,博士生导师,主要从事生物燃料与化工研究,E-mail: szli@tsinghua.edu.cn

引言

回转筒是秸秆固态发酵生产乙醇工艺的重要设备,具有可连续发酵、发酵时间短等特点。回转筒壁上均匀镶嵌扬料板、物料被扬料板带起掺混,由于固态发酵易出现代谢热积累导致的过热现象杀死发酵菌^[1],所以需保证筒内秸秆发酵条件均一,即颗粒与筒壁的接触、暴露在料层表层以及在料层中间的机会是均等的^[2]。回转筒中颗粒的运动受到物料本身性质以及转筒状态的影响^[3]。

目前对转筒内颗粒运动的研究包括实验法和离散元法(DEM)。实验法基于图像处理技术,对颗粒的运动进行直观分析^[4-5]。离散元法是从颗粒尺度研究其运动状态的方法。文献[6-12]的离散元法研究主要针对回转筒状态和颗粒形状对运动特性的影响,忽略了与颗粒形状相匹配的DEM模型参数的影响,未利用现实判定参数的合理性。

本文采用离散元法,以杆状颗粒研究秸秆颗粒运动。采用基于图像处理的混合状态分析方法,对实验和模拟的颗粒混合过程进行定量分析。利用堆积实验和转筒内颗粒混合运动实验对离散元法颗粒参数进行标定,为进一步研究回转筒内秸秆发酵条件均匀性提供基础。

1 颗粒混合运动的模型

1.1 接触模型

离散单元法是基于分子动力学原理的一种颗粒离散体物料分析方法,模型中颗粒计算原理其本构关系体现在力与位移的关系,运动方程为经典的牛顿运动第二定律,颗粒*i*的线性运动与转动方程描述为

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = \sum_j (F_{ij}^n + F_{ij}^s + m_i g) \quad (1)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_j (R_i F_{ij}^s - \mu_r R_i |F_{ij}^n| \omega_i) \quad (2)$$

式中 m_i ——颗粒*i*质量

v_i ——颗粒*i*速度

ω_i ——颗粒*i*角速度

μ_r ——滚动摩擦因数

I_i ——颗粒*i*转动惯量

R_i ——接触到颗粒*i*中心的矢量,大小为颗粒半径

F_{ij}^n ——颗粒*i*与颗粒*j*间的接触正应力

F_{ij}^s ——颗粒*i*与颗粒*j*间的接触切应力

本文颗粒接触模型采用 Hertz - Mindlin (no slip) 模型,正应力与正向位移的关系为

$$F_{ij}^n = -K_n \delta_n^{3/2} \quad (3)$$

$$K_n = \frac{4}{3} E_{eq} \sqrt{R_{eq}} \quad (4)$$

式中 δ_n ——正向位移 K_n ——弹性常数

E_{eq} ——等效弹性模量

R_{eq} ——等效半径

接触模型中对切向力的处理,忽略了微滑移现象,切向力与切向位移关系为

$$F_{ij}^s = -K_{t0} \delta_t \quad (5)$$

$$K_{t0} = 8 G_{eq} \sqrt{R_{eq} \delta_n} \quad (6)$$

式中 δ_t ——切向位移

K_{t0} ——初始弹性常量

G_{eq} ——等效剪切模量

考虑颗粒间粘聚力,本文粘性模型采用 Linear Cohesion 模型,即对 Hertz - Mindlin (no slip) 接触模型增加法向结合力

$$F = kA \quad (7)$$

式中 k ——黏附能量密度

A ——颗粒间接触面积

1.2 模拟条件

为了减少计算量,同时重点研究回转式发酵器横向颗粒混合运动状态,简化了回转筒设备的几何模型。采用 EDEM 对水平短筒进行仿真,其轴向采用周期边界方法(PBC),忽略端板效应的影响。采用杆状颗粒,其长径比为8。基本参数见表1。

表1 模拟相关参数

Tab.1 Simulation parameters

参数	数值
回转筒直径 D/mm	400
回转筒长度 L/mm	50
填充率 $f/\%$	20
回转筒转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	10
原型颗粒直径 φ_0/mm	2
原型颗粒长度 L_0/mm	16
颗粒总数 N	6 200
颗粒粒径分布	Random(1, 1.2)
颗粒剪切模量 $/(N \cdot \text{m}^{-2})$	1×10^5
颗粒泊松比	0.25
壁面材料密度 $/(kg \cdot \text{m}^{-3})$	7 870
壁面材料剪切模量 $/(N \cdot \text{m}^{-2})$	1×10^{10}
壁面材料泊松比	0.3
时间步长 $\Delta t/\text{s}$	1.9×10^{-5}

1.3 混合状态定量分析方法

离散元法易从颗粒尺度获取颗粒运动的定量信息,可通过颗粒间接触数、lacey 指数、混合熵等参量^[13-14]对混合状态进行定量分析,而实验无法获得这些参量,即无法利用实验结果对离散元法进行定

量验证。EDEM 仿真结果见图 1,为了使用实验结果对仿真进行验证,需使用统一的指标定量表征颗粒混合特性。混合状态的评价要求混合物组分间具有明显的理化性质差异且这种差异能够精确检测^[15],本文基于图像处理法,对颗粒的混合过程进行定量描述。实验时将秸秆颗粒染色分组,在透明转筒运行时对其横截面连续拍照,得到颗粒横向混合运动变化图,从而分析其混合过程。

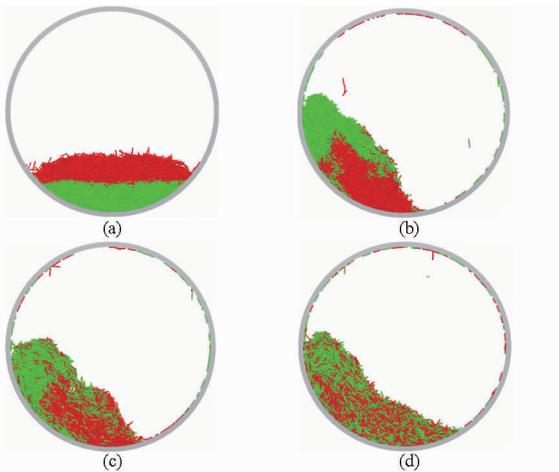


图 1 不同时刻回转式发酵器内杆状颗粒混合情况

Fig.1 Dynamic mixing of slender particle in a rotary drum at different times

(a) 0 s (b) 4.6 s (c) 16 s (d) 32.4 s

混合状态分析时,根据实验和仿真获得的颗粒横向混合运动变化图像,统一限定图像处理的计算域,然后对计算域内像素点进行分组,完成子域的划分,根据子域内颜色比例区分颗粒是否已混合。如图 2 所示,约定目标颗粒,规定当子域中目标颗粒的像素数占比大于 90%,目标颗粒团数量加 1,完全混合时子域中目标颗粒占比约 50%,此时目标颗粒团数量趋近于零。根据目标颗粒团数量和时间关系,得到颗粒混合过程。利用 VB 编写程序,对图像进行处理,获得 i 时刻目标颗粒团数量与初始时刻颗粒团数量比为

$$R_i = \frac{N_i}{N_0} \quad (8)$$

式中 R_i —— i 时刻目标颗粒团数量比
 N_0 ——初始时刻目标颗粒团数量
 N_i —— i 时刻目标颗粒团数量

采用图像处理技术时,像素点分组对统计结果有显著影响^[16]。当子域过小,统计得到单组分概率高,无法有效表征出混合过程;子域过大时,在未混合时也会被误判为混合完成,与直观分析偏差较大。对 DEM 仿真结果进行不同子域方案划分,目标颗粒团数量比例随时间变化如图 3。当子域数量为 22^2 时,混合时间为 15 s,与直观判断存在差异,此时子

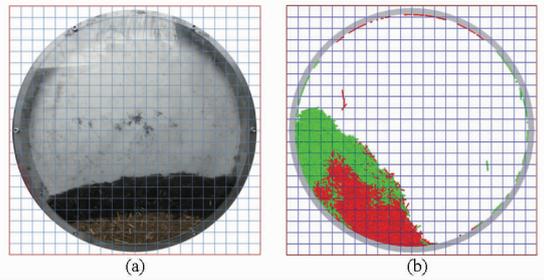


图 2 颗粒混合状态分析的子域划分

Fig.2 Subdomain division of statistical domain

(a) 实验结果 (b) 仿真结果

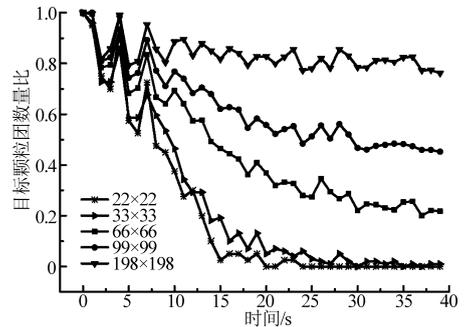


图 3 混合状态与子域划分关系

Fig.3 Relation between mixing characteristics and scale of subdomain

域过大,造成混合时间偏小。当子域数量为 198^2 时,统计尺度过小,无法表征混合过程。秸秆颗粒宽为 2.4 mm,子域边长需大于颗粒宽,则子域的最大数量为 166^2 。当子域数量为 $33^2 \sim 99^2$,此时子域边长为 2~6 倍颗粒宽,即 $2\varphi_0 \sim 6\varphi_0$,混合状态曲线形式类似,混合时间都为 30 s。子域数量增加,统计得到目标颗粒团的概率大大增加,最终混合状态中目标颗粒团数量占比大于零。因此,图像法混合状态分析时,可选择 $6\varphi_0$ 作为子域尺寸。

2 参数标定及结果分析

秸秆碎料组成复杂,秸秆芯为类海绵的多孔介质材料,其密度小,摩擦因数较大;秸秆表皮层表面光滑,质地较致密。两者材料物性和力学性能差异较大,秸秆碎料的粒度均匀性极差,同时物性参数与秸秆含水率相关,则测量获得的秸秆碎料物性参数存在一定范围。为保证离散元法研究秸秆碎料运动过程的准确性,则需通过实验现象对仿真颗粒的参数进行修正,即离散元法的颗粒参数标定过程。

颗粒参数的本征参数包括颗粒密度;接触参数包括颗粒间静摩擦因数、颗粒间滚动摩擦因数、颗粒间碰撞恢复系数、颗粒与壁面间碰撞恢复系数、颗粒与壁面间静摩擦因数、颗粒与壁面间滚动摩擦因数;接触模型参数包括:颗粒间粘性系数、颗粒与壁面间粘性系数。根据 DEM 参数标定方法,本征参数和接

触参数是依据测量获得的秸秆碎料物性参数来确定范围,接触模型参数是通过单因素试验计算,确定粘性系数的范围。颗粒参数的标定采用正交分析思路,选择秸秆碎料堆积角和滚筒内颗粒混合为研究对象,将仿真和实验结果的偏差作为正交分析指标^[17]。

2.1 堆积实验

实验测得秸秆碎料堆积角 $47^\circ \pm 2^\circ$, 秸秆碎料堆积密度为 $80 \sim 200 \text{ kg/m}^3$, 颗粒间静摩擦因数 $0.53 \sim 0.73$, 颗粒间滚动摩擦因数 $0.01 \sim 0.11$ ^[18]。秸秆的内摩擦角比静态堆积角小, 秸秆原料自身存在一定的黏聚力。参数标定采用正交试验法, 4 因素 3 水平, 选择 $L_9(3^4)$ 正交表^[19], 正交分析指标为仿真和实验的堆积角偏差。通过单因素分析, 确定了粘性系数的范围, 水平设置如表 2 所示。正交试验的因素组合仿真结果如表 3 所示, 根据仿真和实验的堆积角偏差进行极差分析, 如表 4 所示。

根据极差分析, 参数影响从大到小依次为: 颗粒间静摩擦因数、颗粒密度、颗粒间粘性系数、颗粒间滚动摩擦因数。如图 4 所示, 颗粒间静摩擦因数越大, 堆积角偏差越小; 颗粒间滚动摩擦因数越大, 堆积角偏差越大。正交最优组合: 颗粒密度 140 kg/m^3 、

表 2 正交试验因素及水平

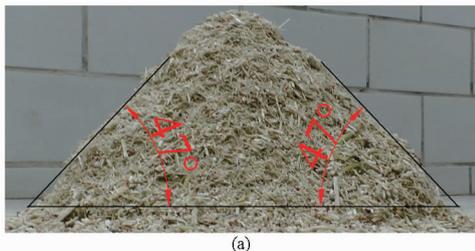
Tab. 2 Factors and levels for orthogonal experiment

水平	因素			
	颗粒密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	颗粒间静 摩擦因数	颗粒间滚动 摩擦因数	颗粒间粘 性系数
1	80	0.53	0.01	1 000
2	140	0.63	0.06	1 500
3	200	0.73	0.11	2 000

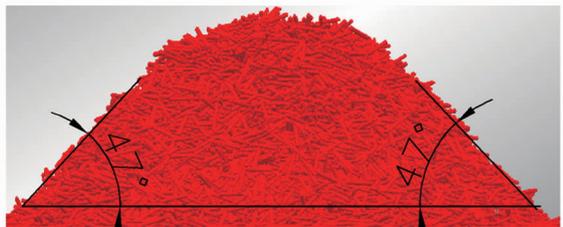
表 3 正交试验结果

Tab. 3 Results of orthogonal experiment

试验 序号	堆积角/ ($^\circ$)	试验 序号	堆积角/ ($^\circ$)	试验 序号	堆积角/ ($^\circ$)
1	36	4	38	7	26
2	39	5	46	8	51
3	44	6	49	9	42



(a)



(b)

图 5 堆积角标定结果验证

Fig. 5 Calibration experiment of repose angle

(a) 秸秆碎料堆积角 (b) 秸秆颗粒仿真参数标定结果

表 4 堆积角偏差的直观分析

Tab. 4 Visual analysis of repose angle

参数	颗粒密度	颗粒间静 摩擦因数	颗粒间滚动 摩擦因数	颗粒间粘 性系数
K_1	7.451	13.785	5.627	5.785
K_2	4.039	4.373	7.451	10.373
K_3	10.039	3.373	8.451	5.373
R	6	10.412	2.824	5

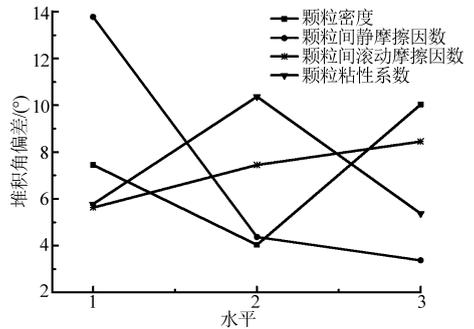


图 4 堆积角正交试验影响因素

Fig. 4 Effects of design variables on experiment of repose angle

颗粒间静摩擦因数 0.73、颗粒间滚动摩擦因数 0.01、颗粒间粘性系数 2 000。采用上述组合, 进行验证实验, 如图 5 所示, 秸秆颗粒堆积角为 47° , 表明上述参数合理。

2.2 回转筒内颗粒混合

填充率 20%, 滚筒转速为 10 r/min , 滚筒内秸秆颗粒完全混合时间为 28 s 。回转筒内颗粒混合标定的参数及范围: 颗粒间碰撞恢复系数 $0.1 \sim 0.5$ 、颗粒与壁面间碰撞恢复系数 $0.1 \sim 0.5$ 、颗粒与壁面间静摩擦因数 $0.45 \sim 0.65$ 、颗粒与壁面间滚动摩擦因数 $0.01 \sim 0.11$ 、颗粒与壁面间粘性系数 $500 \sim 2 500$ 。5 因素 3 水平, 查表选择 $L_{18}(3^7)$ 正交表, 正交分析的指标为仿真和实验的完全混合时间偏差。通过单因素分析, 确定粘性系数的范围, 水平设置如表 5 所示。正交试验的因素组合仿真结果如表 6 所示, 根据仿真和实验的完全混合时间偏差进行极差分析, 如表 7 所示。

通过极差分析, 参数影响从大到小依次为: 颗粒

表5 回转筒秸秆颗粒混合正交试验因素及水平

Tab.5 Factors and levels for orthogonal experiment of dynamic mixing in a rotary drum

水平	因素				
	颗粒间碰撞恢复系数	颗粒与壁面碰撞恢复系数	颗粒与壁面间静摩擦因数	颗粒与壁面间滚动摩擦因数	颗粒与壁面间粘性系数
1	0.1	0.1	0.45	0.01	500
2	0.3	0.3	0.55	0.06	1 500
3	0.5	0.5	0.65	0.11	2 500

表6 回转筒秸秆颗粒混合正交试验结果

Tab.6 Results of orthogonal experiment of dynamic mixing in a rotary drum

试验序号	完全混合时/间/s	动态休止角/(°)	试验序号	完全混合时/间/s	动态休止角/(°)	试验序号	完全混合时/间/s	动态休止角/(°)
	1	38		41	7		26	44
2	31	40	8	45	48	14	31	43
3	45	49	9	24	37	15	22	44
4	31	45	10	20	46	16	24	40
5	28	51	11	30	42	17	35	46
6	34	41	12	37	43	18	20	48

表7 回转筒秸秆颗粒混合正交试验直观分析

Tab.7 Visual analysis of effects of design variables on experiment of mixing

参数	颗粒间碰撞恢复系数	颗粒与壁面碰撞恢复系数	颗粒与壁面间静摩擦因数	颗粒与壁面间滚动摩擦因数	颗粒与壁面间粘性系数
	K_1	8.167	7.667	5.333	5.167
K_2	6.167	5.333	6.833	7.000	4.833
K_3	7.000	8.333	9.167	9.167	5.167
R	2.000	3.000	3.834	4.000	6.500

与壁面粘性系数、颗粒与壁面滚动摩擦因数、颗粒与壁面间静摩擦因数、颗粒与壁面碰撞恢复系数、颗粒间碰撞恢复系数。如图6所示,颗粒与壁面间静摩擦因数和滚动摩擦因数越大,完全混合时间偏差越大。正交最优组合:颗粒间碰撞恢复系数0.3、颗粒与壁面碰撞恢复系数0.3、颗粒与壁面间静摩擦因数0.45、颗粒与壁面滚动摩擦因数0.01、颗粒与壁面粘性系数1 500。采用优参数组合,进行验证实验,得到了回转筒颗粒混合状态曲线如图7所示,参数标定结果与实验值相差较小,验证了上述参数合理性。

参 考 文 献

- 1 韩冰,王莉,李十中,等. 先进固体发酵技术(ASSF)生产甜高粱乙醇[J]. 生物工程学报,2010,26(7):966-973.
Han Bing, Wang Li, Li Shizhong, et al. Ethanol production from sweet sorghum stalk by advanced solid state fermentation(ASSF) technology[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2010, 26(7): 966-973. (in Chinese)
- 2 耿欣,李天成,李十中,等. 甜高粱秸秆固态发酵制取燃料乙醇过程分析与中试研究[J]. 太阳能学报,2010,31(2):257-262.
Geng Xin, Li Tiancheng, Li Shizhong, et al. Studies on the process parameters of solid state fermentation for fuel ethanol production from sweet sorghum stalks and pilot test[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2010, 31(2): 257-262. (in Chinese)

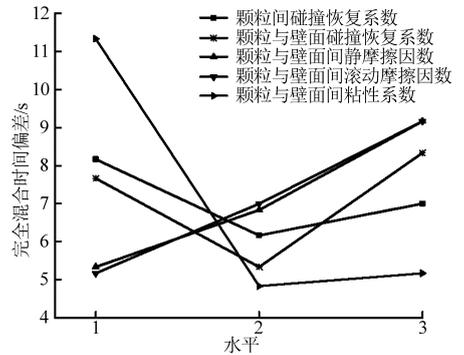


图6 回转筒正交试验影响因素

Fig.6 Effects of design variables on experiment of mixing

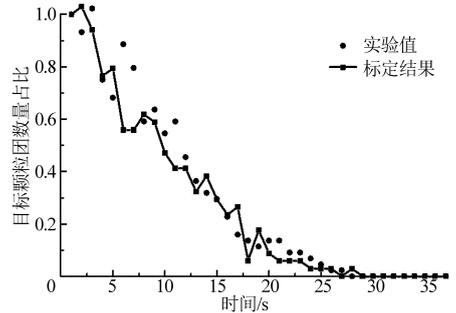


图7 参数标定结果和实验结果对比验证

Fig.7 Verify the calibrated parameters with the experimental result

3 结 论

(1) 基于图像处理的混合状态分析方法,其子域大小对混合状态判断影响显著。子域划分过大时,误判混合过早完成,与直观分析存在差异;子域过小时,无法表征混合过程。可选择 $6\varphi_0$ 为子域尺寸。

(2) 对杆状颗粒物性参数进行标定,其中对物料堆积影响的顺序为:颗粒间静摩擦因数、颗粒密度、颗粒间粘性系数、颗粒间滚动摩擦因数。

(3) 影响回转筒内颗粒混合参数的顺序:颗粒与壁面粘性系数、颗粒与壁面滚动摩擦因数、颗粒与壁面间静摩擦因数、颗粒与壁面碰撞恢复系数、颗粒间碰撞恢复系数。验证参数标定结果表明,颗粒参数能表征实验现象,为进一步研究回转筒内秸秆发酵条件均匀性提供了基础。

- 3 耿凡. 细长柔性丝状颗粒运动特性的研究[D]. 南京: 东南大学, 2010.
Geng Fan. Study on dynamic s behavior of flexible filamentous particles[D]. Nanjing: Southeast University, 2010. (in Chinese)
- 4 van P 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.
- 5 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 of Central South University: Natural Science, 2004, 35(1): 26 - 30. (in Chinese)
- 6 Mellmann J. The transverse motion of solids in rotating cylinders—forms of motion and transition behavior[J]. Powder Technology, 2001, 118(3): 251 - 270.
- 7 Gröger T, Tüzün U, Heyes D M. Modeling and measuring of cohesion in wet granular materials[J]. Powder Technology, 2003, 133(1): 203 - 215.
- 8 Höhner D, Wirtz S, Scherer V. A study on the influence of particle shape and shape approximation on particle mechanics in a rotating drum using the discrete element method[J]. Powder Technology, 2014, 253: 256 - 265.
- 9 Ketterhagen W R. Modeling the motion and orientation of various pharmaceutical tablet shapes in a film coating pan using DEM [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2011, 409(1): 137 - 149.
- 10 Lu G, Third J R, Müller C R. Effect of wall roughness on cross-sectional flow characteristics for non-spherical particles in a horizontal rotating cylinder[J]. Particuology, 2014, 12: 44 - 53.
- 11 王瑞芳, 李占勇, 窦如彪, 等. 水平转筒内大豆颗粒随机运动与混合特性模拟[J]. 农业机械学报, 2013, 44(6): 93 - 99.
Wang Ruifang, Li Zhanyong, Dou Rubiao, et al. Simulation on random motion and mixing characteristic for soybean in rotary drum[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(6): 93 - 99. (in Chinese)
- 12 Geng F, Yuan Z, Yan Y, et al. Numerical simulation on mixing kinetics of slender particles in a rotary dryer[J]. Powder Technology, 2009, 193(1): 50 - 58.
- 13 Jiang M, Zhao Y, Liu G, et al. Enhancing mixing of particles by baffles in a rotating drum mixer[J]. Particuology, 2011, 9(3): 270 - 278.
- 14 Liu P Y, Yang R Y, Yu A B. DEM study of the transverse mixing of wet particles in rotating drums[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 86: 99 - 107.
- 15 彭勇. 基于数字图像处理技术沥青混合料均匀性指标研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
Peng Yong. Study homogeneity of HAM based on digital image disposal technology[D]. Shanghai: Tongji University, 2005. (in Chinese)
- 16 骆培成, 辛传贤, 曹翠翠, 等. 一种计算混合过程尺度变化的新方法[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(6): 1238 - 1242.
Luo Peicheng, Xin Chuanxian, Cao Cuicui, et al. A new method for determining scale changes in mixing process[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2012, 42(6): 1238 - 1242. (in Chinese)
- 17 Coetzee C J, Els D N J. Calibration of granular material parameters for DEM modeling and numerical verification by blade-granular material interaction[J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46(1): 15 - 26.
- 18 霍丽丽, 孟海波, 田宜水, 等. 粉碎秸秆类生物质原料物理特性试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 189 - 195.
Huo Lili, Meng Haibo, Tian Yishui, et al. Experimental study on physical property of smashed crop straw[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(11): 189 - 195. (in Chinese)
- 19 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.