排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2018 年 8 月 Aug. 2018 | 第 36 卷 第 8 期 Vol. 36 No. 8
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.18.1062

基于离散元法的番茄秸秆立式螺旋混合机理


吴硕

吴硕[1,2*]，李萍萍[3]，张西良[4]，徐云峰[2]，刘继展[1]，王纪章[1]
（1. 江苏大学农业装备工程学院，江苏 镇江 212013；2. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室，江苏 镇江 212013；3. 南京林业大学生物与环境学院，江苏 南京 210037；4. 江苏大学机械工程学院，江苏 镇江 212013）

摘要：对番茄秸秆碎料的本征参数和接触参数进行测定，以物料自然休止角为判断依据，通过正交试验法标定离散元仿真参数组合，并分别进行仿真试验和样机试验，分析发现：桶内物料颗粒宏观上为对流混合过程；物料颗粒与叶片表面法向方向形成一定角度做发散运动，距离叶片越远，颗粒速度越小；上下叶片之间存在很多湍流区域，无明显直径方向上扩散运动过程；叶片转速提高、螺距增大、填充高度降低都有利于物料混合均匀，揭示的高效混合机理为后期设备的开发与优化提供理论基础.

关键词：番茄秸秆；自然休止角；离散元法；参数标定；高效混合机理
中图分类号：S224.2　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2018)08-0719-06

吴硕，李萍萍，张西良，等. 基于离散元法的番茄秸秆立式螺旋混合机理[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(8):719-724.
WU Shuo, LI Pingping, ZHANG Xiliang, et al. Vertical spiral mixing mechanism of tomato straw particles based on discrete element method[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2018,36(8):719-724. (in Chinese)

Vertical spiral mixing mechanism of tomato straw particles based on discrete element method

WU Shuo[1,2*], *LI Pingping*[3], *ZHANG Xiliang*[4], *XU Yunfeng*[2], *LIU Jizhan*[1], *WANG Jizhang*[1]
(1. School of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 3. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China; 4. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: The intrinsic and contact parameters of tomato straw particles were determined. Based on the natural angle of repose of the material, the discrete element method parameters were calibrated by orthogonal test. With these parameters, a series of experiments were carried out. It is found that the particles form a macroscopic convective mixing process. The particles of that material form a certain angle in the normal direction of the surface of the blade to do divergent motion, and the farther away from the blade, the smaller the particle velocity. There are many turbulent regions between the upper and lower blades. The particle movement shows the process of spiral ascending and spiral descending, and there is no obvious diffusion movement in the diameter direction. The increase of blade rotation speed, the increase of pitch and the decrease of filling height are beneficial to the improvement of material mixing effect. The high-efficiency mixing mechanism is revealed, which provides a theoretical basis for the later equipment development and optimization.

收稿日期：2018-04-28；**修回日期**：2018-05-14；**网络出版时间**：2018-06-13
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20180613.1519.028.html
基金项目："十二五"国家科技支撑计划项目(2014BAD08B04)；国家公益性行业(农业)科研专项(201203095)
第一作者简介：吴硕(1990—)，男，江苏盐城人，助理实验师(通信作者，2875514410@qq.com)，主要从事农业工程技术研究.
第二作者简介：李萍萍(1956—)，女，浙江宁波人，教授，博士生导师(lipingping@ujs.edu.cn)，主要从事农业工程技术研究.

Key words: tomato straw; natural angle of repose; discrete element method; parameter calibration; efficient mixing mechanism

就近基质化造肥是设施园艺秸秆资源化处理的高效方法. 秸秆碎料与菌种的快速均匀混合是其急需解决的核心问题之一[1-2]. 目前物料混合设备中,立式螺旋带式混合设备具有体积小,效率高,维护方便等特点,应用广泛[3]. 国内外基于机械结构[4]、功耗[5]和热传递[6]等角度对立式螺旋混合方法的理论研究,都将颗粒群视为连续介质而忽视了其离散性特点. 离散元法作为能准确分析离散颗粒体系运动规律的数值方法,近年来发展迅速,已成功应用于农业工程或混合设备领域[7-10],但其研究都忽略了合适的颗粒模型以及与之相匹配的离散元仿真参数对试验结果的影响,导致仿真试验结果的不准确. 冯俊小等[11]、张涛等[12]分别针对秸秆、大豆种子的离散元仿真进行了参数标定试验,为该研究工作思路提供了启发.

文中对番茄秸秆碎料的本征参数和接触参数进行测定,以物料自然休止角为判断依据,通过正交试验法标定离散元仿真参数组合,并以此为基础分别进行单因素仿真试验和样机试验,揭示番茄秸秆碎料立式螺旋带式混合的高效机理,为后期设备的开发与优化提供理论基础.

1 秸秆碎料本征参数测定

1.1 几何尺寸测定

样品原料为江苏省镇江市丹徒区农村合作社种植的成熟期普通番茄藤. 收集后进行 15 d 自然阴干,然后粉碎. ① 使用 MJ33 水分测试仪测得秸秆碎料的含水率为 22.61%;② 使用 0.02 mm 精度游标卡尺统计 200 个碎料样品的长度、直径,其均值分别为(6.93 ± 0.24) mm,(2.09 ± 0.13) mm.

1.2 自然休止角测定

依据 GB/T11986—1989《表面活性剂粉体和颗粒休止角的测量》标准,使用 FT-104B 型休止角测量仪测量物料自然休止角,试验重复 10 次,统计其均值为(36.23 ± 1.04)°.

1.3 堆积密度与真密度测定

采用填充法和替换法,对物料堆积密度与真密度进行测量,具体方法:① 使用精度 0.000 1 g 的 JA31002 电子天平与标准规格烧杯测量 600 cm^3 固定容积物料的质量;② 使用玉米粉填充物料间隙,统计填满时所添玉米粉的体积. 试验重复 5 次,其堆积密度均值为(0.188 2 ± 0.030 0) g/cm^3,孔隙率均值(58.56 ± 0.31)%,真密度均值为(0.453 7 ± 0.110 0) g/cm^3.

1.4 弹性模量与剪切模量测定

如图 1 所示,分别使用 TA. XTPLUS 物性测试仪的拉伸组件与剪切组件对物料进行拉伸剪切试验,拉伸、剪切速度都为 10 mm/min,样品长度均值为(6.93 ± 0.24) mm,对每组样品的同一应变点的应力进行平均值统计,分析应力-应变关系. 试验得到,物料拉伸强度为 8.52 MPa,剪切强度为 0.99 MPa,进行最小二乘法线性拟合,得到物料的弹性模量 E = 235.2 MPa,剪切模量 G = 5.38 MPa.

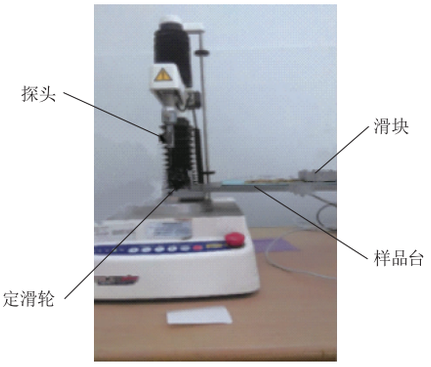


图 1 物性仪摩擦系数测量组件

Fig. 1 Friction coefficient measurement kit for physical instrument

2 番茄秸秆碎料与混合装置接触参数测定

2.1 摩擦系数测定

使用物性仪的摩擦系数测量组件,探头连接金属丝,通过定滑轮以 150 mm/s 的速度拉动粘有样品的滑块在样品台上做水平运动,统计其摩擦系数随时间变化的趋势. 试验得到,粘有番茄秸秆碎料的物料板表面粗糙,导致物料之间摩擦系数、物料与钢材之间的摩擦系数随时间的变化幅度都较大,统计得到物料与钢材之间的静摩擦系数和动摩擦系数分别为 0.96 和 0.84,物料之间静摩擦系数和动摩擦系数分别为 1.17 和 1.02.

2.2 恢复系数测定

文中使用高速摄像技术,记录测量样品从 50,

40,30 cm 高度下落回弹过程的运动轨迹,根据恢复系数简化式(1),计算得物料之间的恢复系数为 0.202 9 +0.020 0,物料与钢材之间的恢复系数为 0.193 5 +0.030 0.

$$e=\sqrt{\frac{s_2}{s_1}}, \tag{1}$$

式中:s_1 为样品初始下落高度;s_2 为样品回弹高度.

3　离散元仿真参数标定

3.1　离散元参数设置

如图 2 所示,物料仿形颗粒模型由 5 个球形颗粒沿着轴线叠加而成,其总长度为 6.9 mm,可依据实际计算量进行适当放大. 接触模型采用 Hertz – Mindlin(no slip) 模型 + Linear Cohesion 黏性模型(样品中水分有黏结作用,需增加法向结合力).

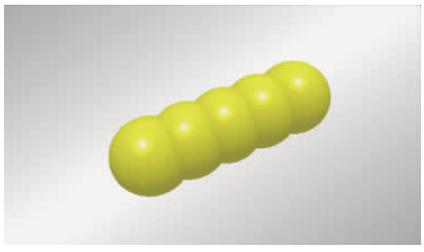


图 2　颗粒模型
Fig. 2　Particle model

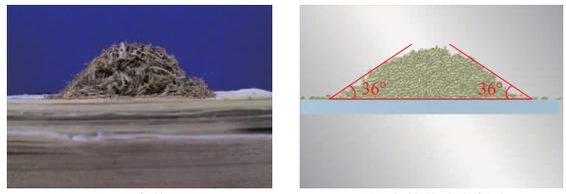
3.2　自然休止角离散元仿真标定

颗粒密度、颗粒间静摩擦因数、颗粒间黏性系数为影响番茄秸秆碎料离散元仿真的主要因素. 文中选用如表 1 的正交试验方案,分析对比仿真试验与实际试验的物料自然休止角,确定最优参数组合. 表中,f 为颗粒间静摩擦系数,ρ 为颗粒密度,λ 为颗粒间黏性系数.

表 1　参数标定正交试验
Tab. 1　Orthogonal test for parameter calibration

试验号	因素		
	f	ρ/(kg · m^{-3})	λ
1	1.0	400	1 000
2	1.0	450	1 500
3	1.0	500	2 000
4	1.1	400	2 000
5	1.1	450	1 000
6	1.1	500	1 500
7	1.2	400	1 500
8	1.2	450	2 000
9	1.2	500	1 000

如图 3 所示,与当前颗粒模型匹配的离散元仿真最优参数组合为颗粒密度 450 kg/m^3,颗粒间静摩擦因数 1.2,颗粒间黏性系数 2 000,该组合条件下物料自然休止角为 36°,与实际试验结果接近.



(a) 实物图　　(b) 自然休止角标定

图 3　堆积角标定结果验证
Fig. 3　Verification of stacking angle calibration results

4　物料混合运动仿真

基于前文物料本征参数和接触参数测定,与离散元参数仿真标定结果,设置仿真参数,其中包括:番茄秸秆碎料密度 0.453 7 g/cm^3,弹性模量 235.2 MPa,剪切模量 5.38 MPa,颗粒之间的静摩擦系数 1.17,颗粒与钢板之间的静摩擦系数 0.97,颗粒之间的恢复系数 0.202 9,颗粒与钢板之间的恢复系数 0.193 5,颗粒之间的滚动摩擦系数 0.98,颗粒与钢板之间的滚动摩擦系数 0.85,物料桶高度 600 mm,物料桶直径 400 mm,并进行试验,试验方案如表 2 所示,研究叶片螺距、转速和填充高度对混合过程与性能的影响. 表中,H 为填料高度,n 为转速,S 为螺距,$C.V$ 为均匀度.

表 2　单因素试验方案
Tab. 2　Single factor test plan

试验序号	H/mm	n/(r · min^{-1})	S/mm	$C.V$
1	400	30	275	12.6
2	400	60	275	7.9
3	400	90	275	7.1
4	400	60	150	15.2
5	400	60	400	7.0
6	360	60	275	6.3
7	440	60	275	13.1

图 4,5 分别为颗粒 A 与颗粒 B 的位置图和运动轨迹图.

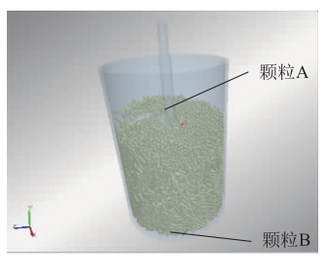
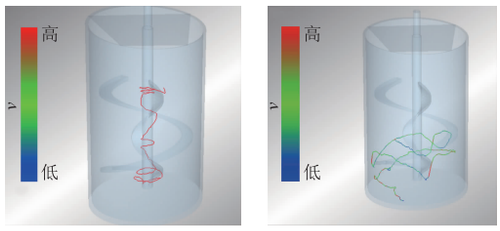


图 4　颗粒 A 与颗粒 B 位置图
Fig. 4　Position diagram of particle A and particle B



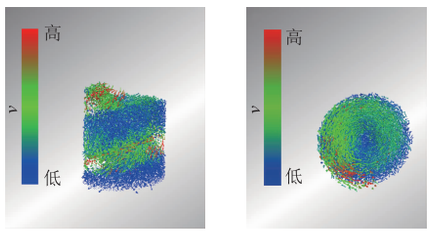
(a) 颗粒A (b) 颗粒B

图5 物料颗粒A与B运动轨迹图

Fig. 5 Material particle A and B movement trajectory diagram

分别标记径向中心区域的颗粒A与径向外部区域的颗粒B,跟踪其运动过程发现,物料混合运动属于非经典介质流动,物料表面摩擦性与条状结构接触性共同构成了颗粒流内部力链结构,并随搅拌叶片所对应的剪切应力而动态变化,这种不断变换结构的力链驱使颗粒A和颗粒B分别沿着内螺旋带、外螺旋带方向做振荡下降、上升运动,形成宏观上的对流混合过程.

图6所示为颗粒流场不同视角.由图6可见,区别于物料颗粒群宏观的对流混合过程,微观上,由于搅拌叶片的剪切作用,物料颗粒与叶片表面法向方向形成一定角度做发散运动,距离叶片越远,颗粒速度越小,上下叶片之间存在很多湍流区域,该区域的颗粒运动复杂,无明显直径方向上扩散运动过程.

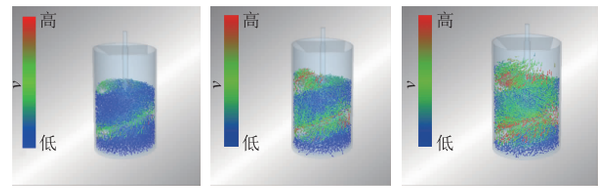


(a) 主视图 (b) 俯视图

图6 颗粒流场的主视图与俯视图

Fig. 6 Front and top views of particles flow field

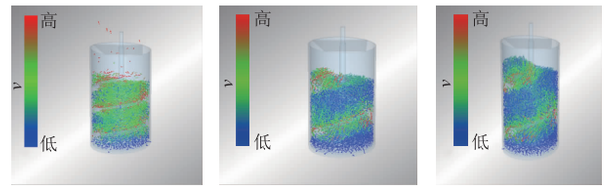
图7-9分别为不同转速、不同螺距和不同填料高度下颗粒流场图.由图可知,不同转速条件下,颗粒的运动分布规律无明显差异,但随着叶片转速的提高,颗粒流场的高速区域越多,越有利于搅拌混合;当叶片螺距规格为150 mm时,叶片之间颗粒流高速区域大,但是颗粒的运动速度都缺少轴向分量,物料的螺旋升运和下降过程不明显;而叶片螺距规格为275 mm与400 mm时,叶片之间虽存在少量低速区域,但颗粒运动的螺旋升运和螺旋下降过程明显,混合效果显著;不同填料高度对物料颗粒流场的差异不明显,但是填料高度降低意味着物料量的减少,并且在叶片上边缘多了抛洒过程,有利于物料混合.



(a) n=30 r/min (b) n=60 r/min (c) n=90 r/min

图7 不同转速条件下的颗粒流场图

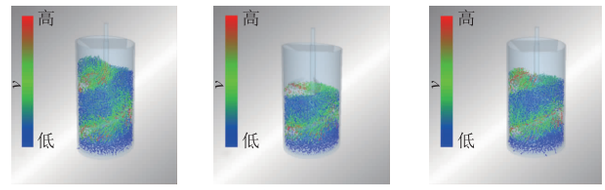
Fig. 7 Particle flow field diagram at different rotational speeds



(a) S=150 mm (b) S=275 mm (c) S=400 mm

图8 不同螺距条件下的颗粒流场图

Fig. 8 Particle flow field diagram at different pitch sizes



(a) H=360 mm (b) H=400 mm (c) H=440 mm

图9 不同填料高度下的颗粒流场图

Fig. 9 Particle flow field diagram under different packing conditions

5 样机试验

5.1 搅拌试验平台搭建

搭建立式螺旋带式混合试验平台,如图10所示,该平台包括动力装置、升降装置、测控系统,可实现叶片转速的精确控制和扭矩的实时测量与及时更换.

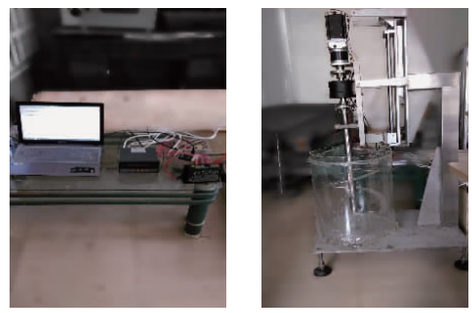
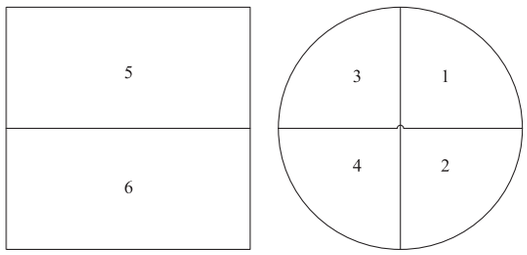


图10 搅拌试验平台

Fig. 10 Mixing test platform

5.2　均匀度的测量方法及试验方案

试验以小麦颗粒为示踪颗粒,采样区域如图 11 所示.



(a) 轴向　　(b) 横截面方向

图 11　取样点示意图

Fig. 11　Schematic diagram of sampling points

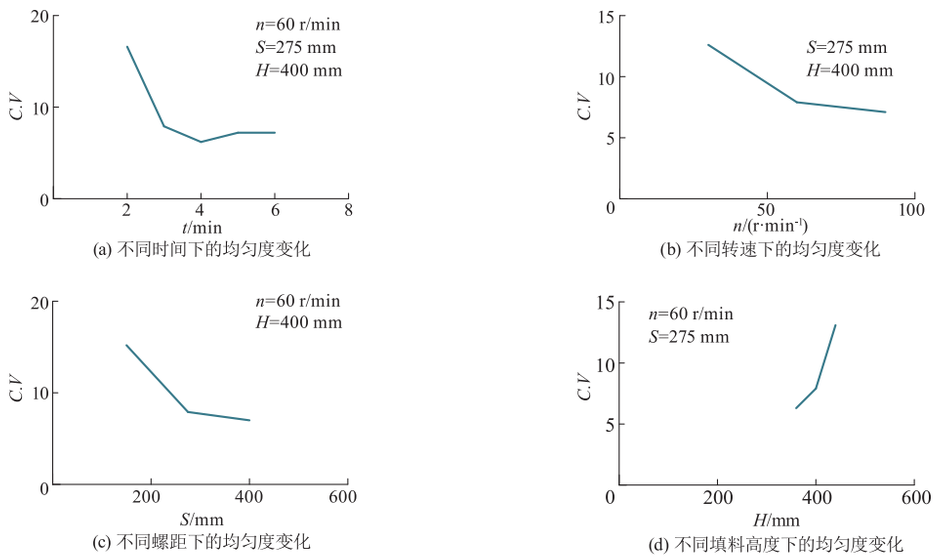
在规定时间,于采样区域内随机取出物料样品,按照式(2)统计物料样品中示踪粒子数量的变异系数,其方案与结果见表 2.

$$C.V=\frac{S_d}{M_n}\times 100\%\,, \tag{2}$$

式中:S_d 为小麦颗粒数量的标准差;M_n 为小麦颗粒数量的平均值.

5.3　不同因素对混合均匀度的影响

图 12 为不同因素对均匀度的影响. 由图 12a 可知,在 0—3 min 阶段,叶片对物料的搅拌混合已基本完成;在 3—6 min 阶段,叶片对物料包含扩散与集聚作用,物料混合均匀度浮动,属于过度搅拌. 由图 12b 可知,叶片转速越高,混合均匀度越好;由图 12c 可知,叶片螺距增加,物料运动轴向速度越大,混合均匀度越好;由图 12d 可知,填料高度降低,混合均匀度越好;离散元仿真流场分布情况基本符合样机试验所呈现的变化规律.



(a) 不同时间下的均匀度变化　　(b) 不同转速下的均匀度变化

(c) 不同螺距下的均匀度变化　　(d) 不同填料高度下的均匀度变化

图 12　不同因素对均匀度的影响

Fig. 12　Effects of different factors on uniformity

6　结　论

1) 对番茄秸秆碎料的本征参数和接触参数进行测定,其中包括几何尺寸、自然休止角、堆积密度、真密度、弹性模量、剪切模量、摩擦系数、恢复系数,揭示了番茄秸秆碎料的材料特性,同时也为离散元仿真模型建立基础.

2) 基于番茄秸秆碎料的本征参数和接触参数,建立其仿形颗粒模型,选取 Hertz – Mindlin(no slip)接触模型,考虑水分的黏结作用,添加 Linear Cohesion 法向力黏结模型;采用正交试验方案,分析对比仿真试验与实际试验的自然休止角,标定离散元仿真参数组合:颗粒密度 450 kg/m^3,颗粒间静摩擦因数 1.2,颗粒间黏性系数 2 000,为进一步进行搅拌过程离散元模拟仿真试验建立基础.

3) 径向中心区域与径向外部区域的颗粒分别沿着内螺旋带、外螺旋带方向做振荡下降、上升运动,形成宏观上的对流混合过程;物料颗粒与叶片表面法向方向形成一定角度做发散运动,距离叶片越远,颗粒速度越小,上下叶片之间存在很多湍流区域,该区域的颗粒运动复杂,无明显直径方向上

扩散运动过程;转速提高,螺距增大,填充高度降低都有利于物料混合效果的提高.

4)叶片对物料的搅拌混合在较早时间段内已基本完成,存在过度搅拌现象;叶片转速越高,混合均匀度越好;叶片螺距增加,物料运动轴向速度越大,混合均匀度越好;填料高度降低,混合均匀度越好;样机试验所呈现的变化规律基本验证了离散元仿真流场分布情况.

参考文献(References)

[1] 常蕊. 农作物秸秆综合利用技术[J]. 农业工程, 2015, 5(2):39-41.
CHANG Rui. Comprehensive utilization technology of crop straw [J]. Agricultural engineering, 2015,5 (2): 39-41. (in Chinese)

[2] 李萍萍, 吴硕, 张西良,等. 番茄秸秆与发酵菌种立式螺旋混合设备参数优化[J]. 农业机械学报, 2016,47(11):114-120.
LI Pingping, WU Shuo, ZHANG Xiliang, et al. Parameter optimization of vertical spiral mixing device of tomato straw and fermentation strain [J]. Transactions of the CSAM, 2016,47 (11): 114-120. (in Chinese)

[3] 崔守娟,张西良,徐云峰,等. 基于LS-SVM的螺旋定量加料预测及试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(12): 1099-1104.
CUI Shoujuan,ZHANG Xiliang,XU Yunfeng,et al. Experimental research and prediction of screw dosing based on least squares support vector machine[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2016, 34 (12): 1099-1104. (in Chinese)

[4] 姚维祯. 垂直搅龙的临界转速和最佳参数[J]. 饲料工业, 1984(4):4-10.
YAO Weizhen. Critical speed and optimal parameters of vertical auger [J]. Feed industry, 1984 (4):4-10. (in Chinese)

[5] 饶应昌. 混合机的混合原理和计算[J]. 饲料工业, 1983(2):25-29.
RAO Yingchang. Mixing principle and calculation of mixer [J]. Feed industry, 1983 (2):25-29. (in Chinese)

[6] NIEDZIELSKA A, KUNCEWICZ C. Heat transfer and power consumption for ribbon impellers. Mixing efficiency[J]. Chemical engineering science, 2005, 60 (8/9):2439-2448.

[7] 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.

[8] 贺一鸣, 吴明亮, 向伟,等. 离散元法在农业工程领域的应用进展[J]. 中国农学通报, 2017, 33(20): 133-137.
HE Yiming, WU Mingliang, XIANG Wei, et al. Application progress of discrete element method in agricultural engineering[J]. Chinese agricultural science bulletin, 2017, 33(20):133-137. (in Chinese)

[9] 芦萤萤. 离散元法在玉米脱粒机优化设计中的应用研究[J]. 中国农机化学报, 2012(3):93-95.
LU Yingying. Application study on the optimal design of corn thresher discrete element method[J]. Chinese agricultural mechanization, 2012 (3): 93-95. (in Chinese)

[10] 施卫东,张铃杰,周岭,等. 基于DEM的流化床气固两相流瞬态数值模拟与验证[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(5): 404-409.
SHI Weidong,ZHANG Lingjie,ZHOU Ling, et al. DEM-based numerical simulation of unsteady gas-solid two phase flow in a fluidized bed and experimental validation [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2017, 35(5): 404-409. (in Chinese)

[11] 冯俊小, 林佳, 李十中,等. 秸秆固态发酵回转筒内颗粒混合状态离散元参数标定[J]. 农业机械学报, 2015, 46(3):208-213.
FENG Junxiao, LIN Jia, LI Shizhong, et al. Calibration of discrete element parameters of particle mixing state in straw solid-state fermentation rotary drum [J]. Transactions of the CSAM, 2015,46 (3): 208-213. (in Chinese)

[12] 张涛, 刘飞, 赵满全,等. 大豆种子与排种器接触物理参数的测定与离散元仿真标定[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(9):86-92.
ZHANG Tao, LIU Fei, ZHAO Manquan, et al. Determination of physical parameters of contact between soybean seeds and seed metering device and discrete element simulation calibration [J]. Journal of China Agricultural University, 2017,22 (9): 86-92. (in Chinese)

(责任编辑 盛杰)