

基于 CFD – DEM 的饲料调质器物料运动模拟与试验

彭 飞¹ 方 芳² 王红英³ 黄志刚¹ 付宗强¹ 高东明¹

(1. 北京工商大学材料与机械工程学院, 北京 100048; 2. 郑州大学化工与能源学院, 郑州 450001;
3. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为探究饲料调质器中物料的运动规律和黏结状态, 基于 CFD – DEM 耦合的方法对调质器的工作过程进行仿真建模和作业参数优化。耦合模型建立方法: 采用 Pro/E 三维软件建立调质器结构模型; 利用 Gambit 软件对其进行网格划分, 利用 Fluent 中的 RNG $k - \varepsilon$ 湍流模型作为流体模型; 利用离散元软件 EDEM 中的 Hertz – Mindlin with bonding 模型建立饲料原料湿黏模型, 并对两种模型进行边界参数和耦合参数等设定。以桨叶安装角、调质轴转速、填充率为试验因素, 以调质器出料量为评价指标, 按照三因素五水平正交旋转组合试验设计方法进行试验研究。利用 Design-Expert 8.0.6 软件回归分析法和响应面分析法, 建立了 3 个因素对调质器作业评价指标影响的数学模型, 对调质器模型作业参数优化并进行了试验验证。结果表明, 各因素对调质器出料量的影响显著性由大到小依次为填充率、调质轴转速、桨叶安装角; 最佳作业参数组合方案为: 桨叶安装角 38.49°、调质轴转速 182.2 r/min、填充率 58.4%, 此时调质器出料量较高, 生产率为 13.1 g/s。

关键词: 饲料; 调质器; 离散元法; 数值模拟

中图分类号: S969.42*9; O242.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)12-0355-09

Numerical Simulation and Experiment on Raw Material in Feed Conditioner Based on Coupled CFD – DEM

PENG Fei¹ FANG Fang² WANG Hongying³ HUANG Zhigang¹ FU Zongqiang¹ GAO Dongming¹

(1. School of Materials Science and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China
2. College of Chemistry and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China
3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Feed conditioner is a key component in the pellet mill, and conditioning is a very process during the pelleting and extrusion. To explore the movement rule and bonding state of materials in feed conditioner, the working process of small axial conditioner was simulated and optimized based on the CFD – DEM gas-solid coupling mathematical model. The method of establishing the coupling model was as follows: the structure model of the conditioner was built by the 3D software Pro/E, and the grid of the model was meshed by the software Gambit. The RNG $k - \varepsilon$ turbulence model in the software Fluent was used as the fluid model. Afterwards, the discrete element model of wet stick feed materials was established by the software EDEM, and then the boundary parameters and coupling parameters of coupling models were set to be the basis of simulation. The blade installation angle, speed of conditioner and filling rate were selected as the influencing factors, and the output result was selected as evaluating indicator, thus the performance optimization experiments were carried out under the quadratic orthogonal rotation design. Based on the software regression analysis of Design-Expert 8.0.6 and response surface analysis method, the relationship between the three influencing factors and evaluating indicator was established. The results of the study showed that speed regulator and filling rate had an extremely significant effect on the evaluating indicator ($P < 0.01$), and blade installation angle had a significant

收稿日期: 2018 – 07 – 16 修回日期: 2018 – 08 – 08

基金项目: 北京市科技创新服务能力建设-基本科研业务费-青年教师科研能力提升计划项目(PXM2018_014213_000033)、北京市优秀人才培养项目(2017000020124G062)和现代农业产业技术体系建设项目(CARS-43-01A)

作者简介: 彭飞(1989—),男,讲师,博士,主要从事农产品加工技术与装备研究,E-mail: feipeng2012zhn@163.com

通信作者: 方芳(1989—),女,副教授,博士,主要从事农副产物资源能源化利用研究,E-mail: fangf@zzu.edu.cn

effect on the evaluating indicator ($P < 0.05$). The output result of raw materials was selected as the chosen target; by using response surface method, the optimal aggregative index could be obtained under the condition that the blade installation angle was 38.49° , speed of conditioner was 182.2 r/min, and filling rate was 58.4%. In this case, the output result of raw materials was 13.1 g/s. Therefore, the conditioner had good practicability in the process of conditioning feed raw materials; the research provided references for performance improvement of feed conditioner and the parameters optimization of processing technology.

Key words: feed; conditioner; discrete element method; numerical simulation

0 引言

饲料作为动物主要的食物来源,是畜禽和水产养殖业的物质基础,2017 年全国饲料总产量达到 2.24 亿 t^[1]。调质是饲料加工过程中非常关键的环节,是影响颗粒饲料质量的重要因素^[2]。但由于调质器作业过程的封闭性、湿黏饲料原料物性的复杂性,目前国内外对调质过程的机理和调质器作业的性能研究较少,难以进行精确的定量分析^[3]。

离散元法 (Discrete element method, DEM) 是分析颗粒离散体物料的一种方法,1971 年由美国 Cundall 教授基于分子动力学原理提出,被大量应用在复杂物理场作用下粉体动力学现象、具备较为复杂结构的材料力学特性和多相混合材料介质等研究中,涉及粉体生产加工、研磨和混合搅拌等生产实践领域^[4-6]。计算流体动力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 能够很好地模拟流体在腔体内的气压分布和特定层面的速度分布,目前针对调质器工作过程的仿真模拟还比较少,前人做过类似调质器结构的建模研究^[7-10]。DEM 能够构建黏性颗粒模型,还可以与 CFD 耦合计算。李洪昌等^[11]通过 CFD-DEM 耦合方法模拟了风筛式清选装置中物料在筛面上的运动,其中物料使用 EDEM 建模,连续流体使用 CFD 建模,研究并分析入口气流速度对该装置筛分性能的影响。刘佳等^[12]基于 CFD-DEM 耦合方法,模拟了机械气力组合式精密排种器的工作过程,模型采用 EDEM 软件中的 bonding 和 API 替换的方法,建立了非球形虚拟玉米颗粒。彭飞^[13]初步构建了调质器 CFD-DEM 耦合模型,但是该模型仅局限于定性描述,缺乏试验数据和定量分析等,模型的可靠性与合理性尚未验证,存在一定的局限和不足。以上文献为深入分析与研究调质器 CFD-DEM 耦合模型提供了理论基础和方法参考。

本文应用 CFD-DEM 耦合计算方法,分析饲料原料在调质器内的运动和黏结情况。基于构建的调质器耦合模型,通过三因素五水平正交回归模拟试验,分析桨叶安装角、调质轴转速、填充率 3 个因素对其出料量的影响,并利用试验装置进行试验验证,

为调质器结构设计和作业参数优化提供参考。

1 调质器结构和工作原理

如图 1 所示,调质器部件主要由进料单元和调质单元组成,具体包括:进料口、进料螺旋、蒸汽腔、蒸汽进口、调质器外壁、主轴、桨叶、调质腔、出料口及联轴器等^[14-15]。

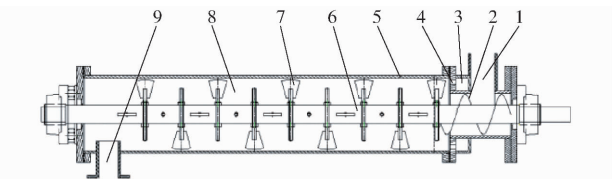


图 1 饲料调质器结构简图

Fig. 1 Structure diagram of feed conditioner

1. 进料口 2. 进料螺旋 3. 蒸汽腔 4. 蒸汽进口 5. 调质器外壁 6. 调质器主轴 7. 桨叶 8. 调质腔 9. 出料口

蒸汽进口位于调质单元物料进入处,并与调质腔体连通。在调质器驱动电动机和变频器的带动下,进口螺旋叶片推动原料至调质腔内;蒸汽发生器产生蒸汽,经蒸汽腔、环形分布的蒸汽加工孔,进入到调质腔内;在调质腔内旋转扇形桨叶的搅拌作用下,饲料原料和蒸汽受到挤压、剪切、翻滚和抛出等强制混合作用,在剧烈的相对运动中均匀混合并产生水热反应,由出料口流出,完成调质过程。

2 调质器 CFD-DEM 数值模拟

2.1 数学模型

利用 CFD-DEM 耦合模拟时,耦合模型主要分为 Lagrangian 模型和 Eulerian 模型^[16]。其中, Eulerian 模型考虑了颗粒对流场的影响(适用于颗粒相占总体积大于 10% 的情况)^[17],根据饲料调质器作业实际工况,原料试验颗粒对流体相的作用明显,因此本文采用 Eulerian 模型对饲料原料调质过程进行模拟。考虑到原料对流场的影响,在守恒方程中加入一个额外的体积分数,即

$$\frac{\partial \varepsilon \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mathbf{u}) = 0$$

(1)

式中 ε ——气体体积分数
 ρ ——气体密度, kg/m³

t ——时间, s
 u ——气体速度, m/s
 ∇ ——哈密顿微分算子
动量守恒方程为

$$\frac{\partial \varepsilon \rho u}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \mu u) = -\nabla \rho + \nabla \cdot (\mu \varepsilon) \nabla u + \rho \varepsilon g - S \quad (2)$$

其中 $S = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{V}$
式中 g ——重力加速度, m/s²
 μ ——气体动力黏度, Pa·s
 S ——动量汇, 即作用在网格单元内流体阻力的总和, N/m³
 F_i ——第 i 颗粒对气流的阻力, N
 V ——网格单元的体积, m³

由于饱和蒸汽对饲料原料的影响主要为曳力, 故选择 Free - stream 阻力模型, 该自由流阻力的计算公式为

$$F_d = 0.5 C_D \rho A |v| v \quad (3)$$

式中 C_D ——单个颗粒单元的曳力系数
 A ——颗粒投影面积, m²
 v ——气体相对颗粒单元的流动速度, m/s

饲料颗粒的曳力系数 C_D 取决于雷诺数 Re , 其计算公式为

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & (Re \leq 0.5) \\ \frac{24(1.0 + 0.25Re^{0.687})}{Re} & (0.5 < Re \leq 1\,000) \\ 0.44 & (Re > 1\,000) \end{cases} \quad (4)$$

其中 $Re = \frac{\alpha \rho L |v|}{\mu}$
式中 L ——原料颗粒直径, m
 α ——CFD 网格单元的自由体积, m³

针对仿真对象的不同, 选择相应的接触模型^[17]。由于饲料原料进入调质器后处于湿黏状态, 为典型的黏性散粒体, 需要引入黏结键来表征颗粒彼此接触时的运动状态。Hertz - Mindlin 计算颗粒间法向和切向黏结力分别定义为 F_n 、 F_t , 法向和切向黏结力矩分别为 T_n 、 T_t , 单个颗粒法向和切向的速度分别为 v_n 、 v_t , 单个颗粒法向和切向的角速度分别为 ω_n 、 ω_t 。黏结力 F_n 、 F_t 和力矩 T_n 、 T_t 随着时间步长的增加, 按公式从零开始增加。

$$\begin{cases} \delta F_n = -v_n S_n A_1 \delta t \\ \delta F_t = -v_t S_t A_1 \delta t \\ \delta T_n = -0.5 \omega_n S_t A_1 R_B^2 \delta t \\ \delta T_t = -0.25 \omega_t S_n A_1 R_B^2 \delta t \end{cases} \quad (5)$$

式中 R_B ——黏结半径, m
 δt ——时间步长, s
 S_n ——颗粒法向刚度, N/m
 S_t ——颗粒切向刚度, N/m
 A_1 ——颗粒间的接触面积, m²

当法向和切向应力超过某个定义值时, 黏结就会被破坏。因此, 定义法向应力最大值 $\sigma_{\max}$ 和切向应力最大值 $\tau_{\max}$ 为

$$\begin{cases} \sigma_{\max} = \frac{-F_n}{A_1} + \frac{4T_t}{A_1 R_B} \\ \tau_{\max} = \frac{-F_t}{A_1} + \frac{2T_n}{A_1 R_B} \end{cases} \quad (6)$$

2.2 调质器建模与仿真

构建调质器内腔几何模型, 采用 Fluent 12.0 对调质器内腔模型进行参数设置, 采用 Fluent 12.0 中的 DEM 模块对散粒体参数进行设定, DEM 由软件 EDEM 2.2 求解, 两者耦合安装并计算, 耦合方法的基本思路: 利用 CFD 方法计算压力场及流场分布, 利用 DEM 方法计算颗粒系统的受力和运动情况; 两者基于一定的模型进行质量、动量和能量等物理量的作用与交换, 实现耦合计算。

2.2.1 结构模型构建和参数设置

基于调质器尺寸, 构建调质器 Pro/E 模型, 步骤如下:

(1) 调质腔模型主要几何参数: 圆柱腔体直径为 100 mm, 长度为 600 mm; 空心主轴位于腔体中心, 直径 30 mm, 长度与调质腔相同; 扇形桨叶共 18 组, 距离调质腔内壁 2 mm, 按轴向间隔 30 mm、径向间隔 90° 分布, 安装角度可调; 蒸汽进口为 10 组, 直径为 6 mm, 呈环形均匀分布于调质腔进料口处的端盖上; 出料口位于调质腔右端 40 mm, 其结构为 $\Phi 24$ mm 的圆柱体。由于装配体零件较多, 模型导入到 Gambit 软件时, 导致 Gambit 模型中线、面、体较多, 达到上千个, 不便于下一步在 Fluent 软件中设置边界类型和边界条件以及后续的模拟计算, 因此需要对模型进行简化。使用 Pro/E 4.0 建立零件 1 (调质器内腔)、零件 2 (调质轴与桨叶) 这两个零件 (图 2、3), 然后进行装配。

(2) 将装配体保存为 igs 格式并导入到 Gambit 2.4.6 中 (图 4), 得到由 2 个独立构件组成的几何体, 共计 226 个面; 结合实际作业情况和边界类型设定方法, 将这些面定义为 4 种类型: 进气口 (inlet)、出气口 (outlet)、壁面 (wall)、旋转部分 (wall)。对图 4 所示模型进行体网格划分, 网格尺寸为 8 mm, 零件 1 得到 219 205 个网格, 零件 2 得到 21 938 个网格, 结果如图 5 所示; 最后将划分完成后的装配体

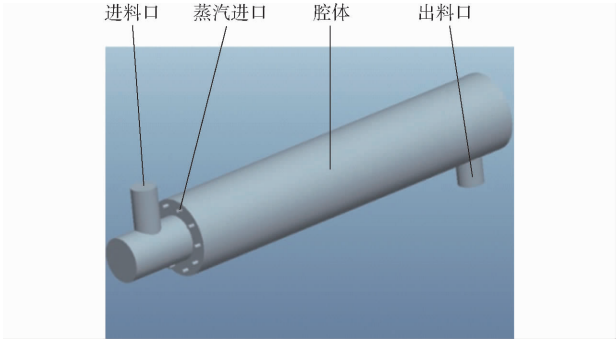


图 2 调质器内腔几何模型

Fig. 2 Geometric model of conditioner inner cavity

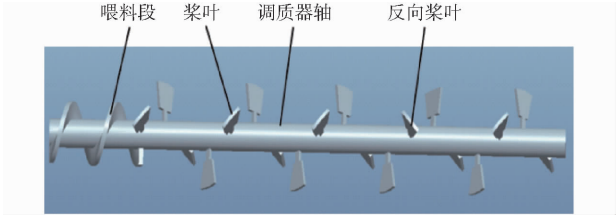


图 3 调质轴与桨叶几何模型

Fig. 3 Geometric model of conditioner shaft and blade

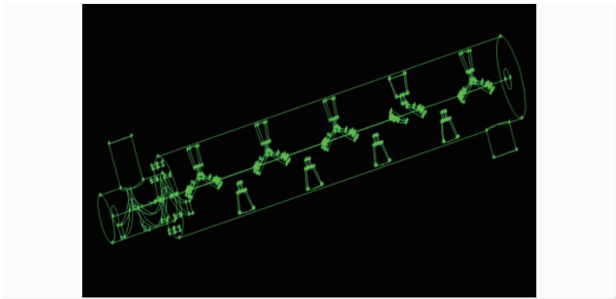


图 4 Gambit 中调质器模型

Fig. 4 Model of conditioner in software Gambit

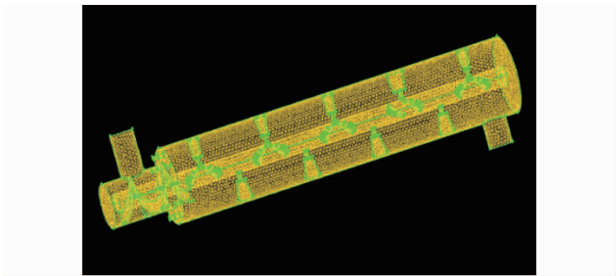


图 5 利用 Gambit 对模型进行边界条件设置和网格划分的结果

Fig. 5 Boundary condition setting and meshing of model by using Gambit

以 mesh 格式保存,作为 Fluent 的 mesh 文件。

(3)将 mesh 文件导入到 Fluent,流体模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 黏性模型;设置进气口为压力入口,出气口为压力出口;基于物料所占腔体体积比例,选择 Eulerian 法进行耦合,耦合参数匹配设置方法参考文献[18-19]。调质过程中,原料与饱和水蒸气发生传热传质反应,原料含水率由 10%~12% 增加到 17%~19%,物料黏度增加;基于容重法国标^[20],测

得该含水率范围条件下,饲料物料密度平均值为 443 kg/m^3 ;在 EDEM 中将物料间离散元参数设置为黏结模型(Hertz-Mindlin with bonding)。EDEM 模型中材料参数设置如表 1 所示。

表 1 EDEM 模型中材料参数设置		
Tab.1 Material parameter setting of EDEM model		
类型	参数	数值
物料参数	粒径/mm	1.5
	剪切模量/MPa	10
	泊松比	0.45
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	443
设备参数	剪切模量/MPa	1×10^4
	泊松比	0.3
	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 850
颗粒间接触参数	切向黏结刚度/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	1×10^8
	法向黏结刚度/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	5×10^7
	切向剪切应力/Pa	20 000
	法向剪切应力/Pa	20 000
	黏结半径/mm	1.5
	恢复系数	0.000 1
	静摩擦因数	2.75
	滚动摩擦因数	2.75
	与零件 1 黏附能量/($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)	10
	与零件 2 黏附能量/($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)	20
颗粒与设备接触参数	恢复系数	0.001
	静摩擦因数	1.19
	滚动摩擦因数	1.19

(4)其它参数设置:设置离散元模型中时间步长为 $2\times 10^5\text{ s}$,为瑞利时间步长的 14%,该值在瑞利时间步长比例的建议范围之内,保存时间间隔为 0.01 s。设置颗粒生成量为 unlimited number。由于该调质器调质时间为 15~25 s,为便于模拟调质器稳定工作前及稳定工作一段时间后的作业状况,仿真时间应适当大于实际生产达到稳定的调质时间,因此在 EDEM 中将仿真时间设置为 30 s。

2.2.2 调质过程仿真分析

仿真预试验时,试验因素均设定为零水平,分别是:桨叶安装角为 45° 、调质轴转速为 250 r/min、填充率为 35%。图 6 为调质器仿真模拟 30 s 过程中迭代收敛曲线,由图分析可知,仿真收敛性较好,在 0~30 s 内调质器内部的流场速度趋于平稳。在 EDEM 中统计并分析调质器内颗粒数量随时间变化情况,结果如图 7 所示,可以看出,大概在 25 s 以后,整个腔体内的颗粒数目趋向稳定、基本不再增加或减少,即进料口和出料口颗粒数量基本维持平衡,此时调质器模型趋于稳定状态,可以用于模拟调质器实际生产中达到稳定的过程。

2.3 仿真结果与分析

图 8a、8b 分别为 30 s 时调质器速度场与压力场

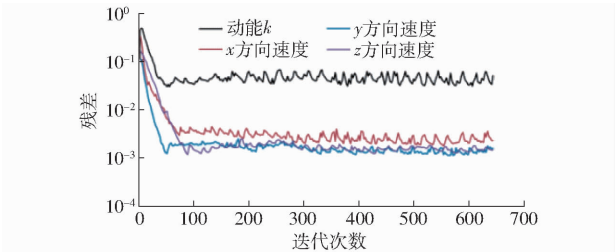


图 6 调质器模拟工作 30 s 过程中迭代收敛曲线

Fig.6 Iterative convergence curves of simulation during 30 s

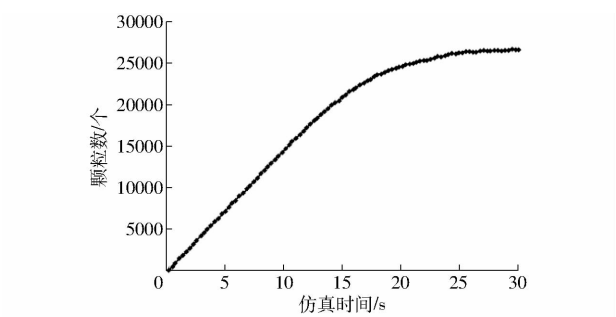


图 7 0 ~ 30 s 过程中调质器内颗粒数量变化曲线

Fig. 7 Changing curve of particle number in conditioner during 0 ~ 30 s

分布图,由垂直的两个截面显示。由图可以看出,10 个蒸汽进口处气体流速较大;随着不断远离蒸汽进口,气体流速逐渐减慢;沿着物料运动方向,速度场与压力场整体变化均匀。在调质器作业过程中,蒸汽与原料颗粒充分接触并发生水热反应,这与该调质器结构和调质工作原理基本一致。

在 DEM 模型中分别统计 0、5、10、15、20、25 s 情况下调质器内颗粒的运动和分布情况,结果如图 9 所示。由图可知,在该时间段内,颗粒一直不断生

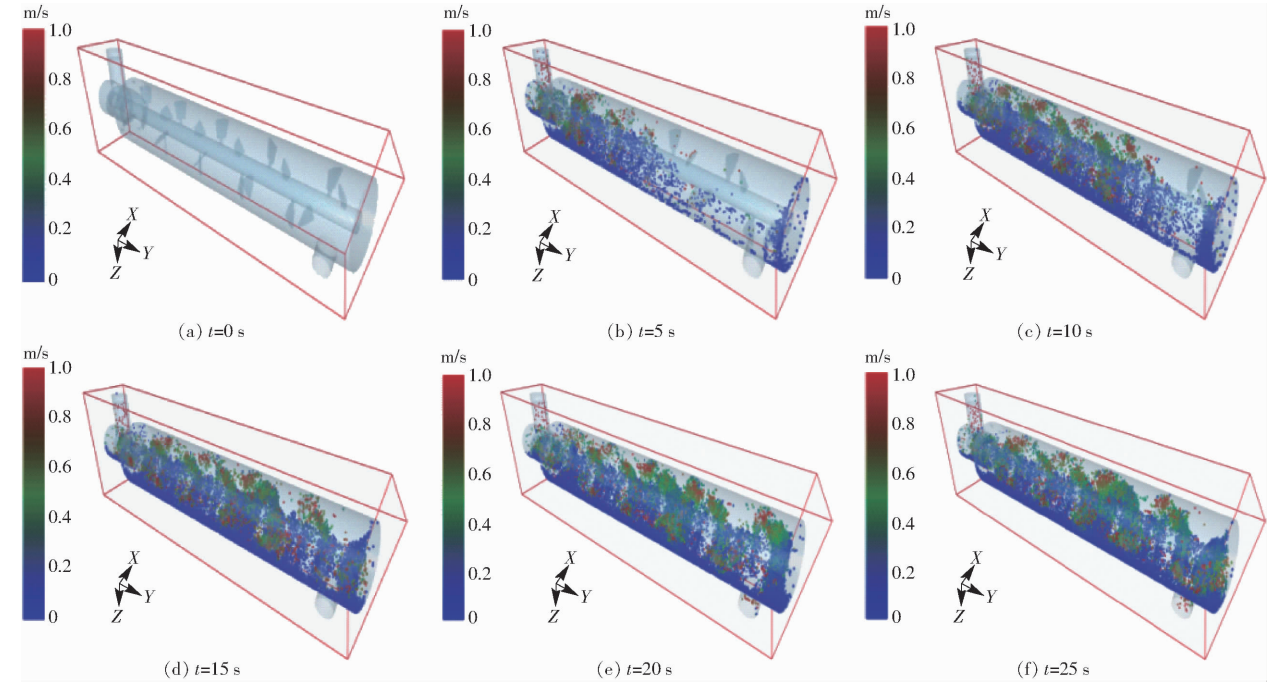


图 9 0 ~ 25 s 调质器稳定工作前颗粒分布和运动状态

Fig.9 Particle distribution and movement during 0 ~ 25 s

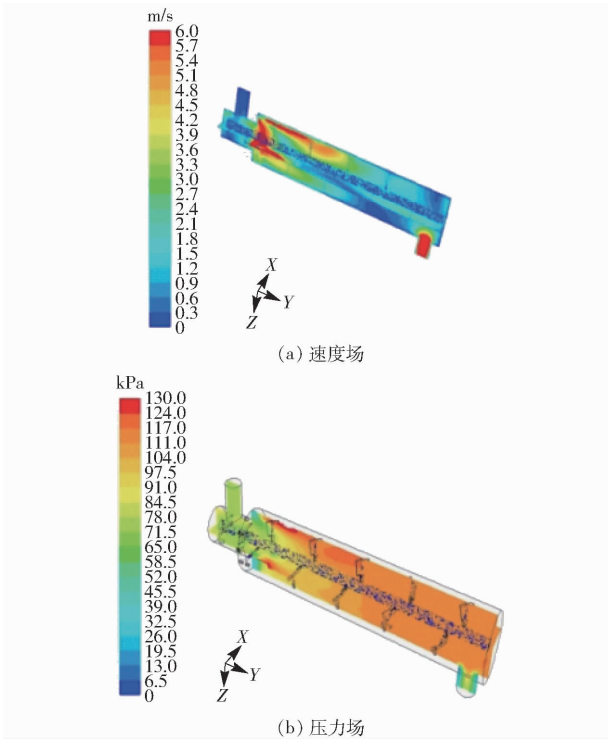


图 8 30 s 时调质器速度场与压力场分布图

Fig. 8 Velocity and pressure field in conditioner at 30 s

成,调质器进料速率大于出料速率,因此调质腔内颗粒物料不断增多,腔体物料填充率不断提高;同时调质轴旋转并带动桨叶搅拌颗粒物料,桨叶有一定的安装角度,旋转的桨叶起到搅拌、抛起并推动物料前进的作用,在 25 s 左右进出调质器腔的颗粒数量基本持平,此时填充率基本不再变化,这与调质器开始作业阶段的真实状态基本一致。图 10 为调质器稳

定工作过程阶段,此阶段腔体内颗粒数目和填充度变化不大,基本处于稳定的状态。由图 10f 可知,颗粒黏结在一起呈团簇状,调质反应后的物料也呈团簇状被翻起搅拌,与实际生产情况相符合,可知选用的颗粒黏结模型基本合理;由颗粒速度分布规律可知,颗粒受到桨叶的搅拌作用,不断被抛起并向前推进,在调质腔中部及上部、靠近桨叶末端处速度较

快;靠近调质器底部颗粒的运动速度较慢,有可能导致物料黏附在该处内壁上、产生积料现象,该模拟过程基本与调质器作业过程一致。物料速度场与压力场分布均匀,颗粒前进方向与蒸汽进气方向一致、两者接触较充分,该模型整体作业过程较为合理,可以用于模拟调质器作业时饲料原料的分布和运动情况。

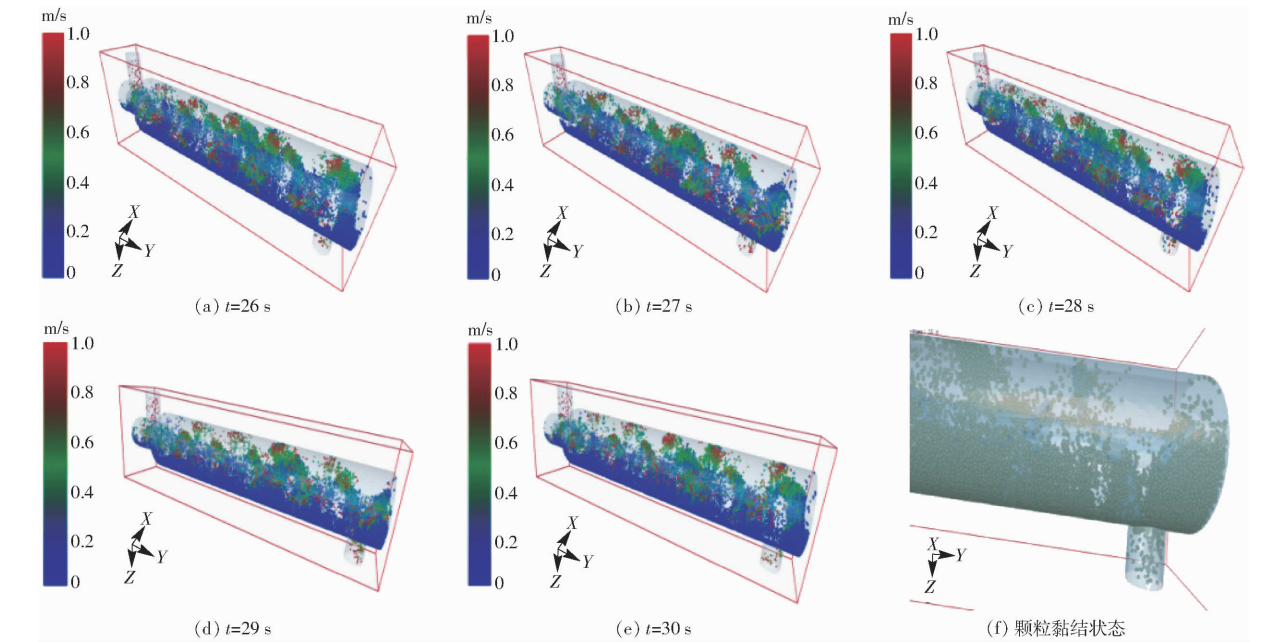


图 10 26 ~ 30 s 调质器稳定工作后颗粒分布和运动状态
Fig. 10 Particle distribution and movement during 26 ~ 30 s

3 试验设计与指标测定

3.1 试验设计

由预试验及文献[21-22]可知,调质器工作性能的主要影响指标为桨叶安装角、调质轴转速、填充率,故本文选择上述 3 个因素进行仿真试验研究。根据理论分析、单因素预试验结果、调质器结构参数与生产实际,确定各试验因素的取值范围为:桨叶安装角 10°~80°、调质轴转速 150~350 r/min、填充率 10%~60%。以桨叶安装角 X_1 、调质轴转速 X_2 、填充率 X_3 为试验变量,基于二次正交旋转组合试验原理,建立因素编码表如表 2 (x_1 、 x_2 、 x_3 为各变量真实值)所示。

表 2 二次回归正交试验设计因素编码

Tab. 2 Factors and levels of quadratic regression orthogonal rotating experiment design

编码	因素		
	桨叶安装角	调质轴转速	填充率
	$x_1/(^{\circ})$	$x_2/(r \cdot \min^{-1})$	$x_3/\%$
-1.682	10	150	10
-1	24	190	20
0	45	250	35
1	66	310	50
1.682	80	350	60

3.2 指标测定

调质器在调质作业过程中的工作效率可以通过出料口处的出料量来检测。通过 EDEM 软件的数据导出工具 Export Results Data, 导出数据并计算出仿真过程中调质器的出料量。

4 试验结果与分析

4.1 回归模型建立

以各影响因素编码值为自变量,以仿真结果测得的出料量 Y 为评价指标,依据二次回归正交旋转组合设置不同试验组的模型参数,基于 CFD-DEM 耦合仿真试验,结果如表 3 所示 (X_1 、 X_2 、 X_3 为各变量编码值)。

运用 Design-Expert 软件对表 3 中数据进行方差分析,结果如表 4 所示。由表 4 可知,对 Y 的方差分析结果显示, $F = 16.80$, $P < 0.001$, 回归极显著;决定系数 $R^2 = 0.92$, 校正决定系数 $R^2_{adj} = 0.87$, 说明回归方程的拟合度较好,可以采用该回归方程对试验结果进行分析。对决定系数进行显著性检验,由回归方程中 P 值可知, X_2 和 X_3 对出料量 Y 的影响极显著, X_1 对 Y 的影响显著。各因素影响顺序由大到小依次为 X_3 、 X_2 、 X_1 。

表 3 二次回归正交旋转组合试验设计与结果

Tab.3 Experimental design and results of quadratic regression orthogonal rotating test

试验序号	X_1	X_2	X_3	$Y/(g \cdot s^{-1})$
1	1	1	1	14.57
2	1	1	-1	10.32
3	1	-1	1	12.68
4	1	-1	-1	7.64
5	-1	1	1	11.36
6	-1	1	-1	8.21
7	-1	-1	1	9.85
8	-1	-1	-1	7.39
9	1.682	0	0	10.53
10	-1.682	0	0	8.81
11	0	1.682	0	15.66
12	0	-1.682	0	9.75
13	0	0	1.682	16.45
14	0	0	-1.682	7.23
15	0	0	0	12.67
16	0	0	0	13.21
17	0	0	0	11.95
18	0	0	0	12.37
19	0	0	0	12.52
20	0	0	0	12.69
21	0	0	0	12.75
22	0	0	0	12.42
23	0	0	0	12.64

表 4 出料量回归方程系数显著性检验结果

Tab.4 Significance test results for regression coefficient of angle of repose

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	129.13	9	14.35	16.80	<0.000 1
X_1	9.34	1	9.34	10.93	0.005 7
X_2	20.76	1	20.76	24.31	0.000 3
X_3	67.70	1	67.70	79.27	<0.000 1
X_1X_2	0.63	1	0.63	0.73	0.407 0
X_1X_3	1.69	1	1.69	1.98	0.182 6
X_2X_3	0	1	0	0	0.970 1
X_1^2	24.95	1	24.95	29.21	0.000 1
X_2^2	0.52	1	0.52	0.60	0.451 3
X_3^2	3.75	1	3.75	4.39	0.056 3

采用 Design-Expert 软件对试验进行回归分析,得到桨叶安装角 X_1 、调质轴转速 X_2 、填充率 X_3 与调质器出料量 Y 的回归方程

$$Y = 12.60 + 0.83X_1 + 1.23X_2 + 2.23X_3 + 0.28X_1X_2 + 0.46X_1X_3 - 0.012X_2X_3 - 1.25X_1^2 - 0.18X_2^2 - 0.49X_3^2 \quad (7)$$

4.2 回归模型寻优

为直观地分析试验因素与评价指标之间的关系,根据各回归项对评价指标的影响,结合简化回归模型,用“降维法”将任意 1 个因素固定中心水平^[23-24],得到另外 2 个试验因素与评价指标之间的降维回归模型,由 Design-Expert 软件绘制响应面图,分析各因素对出料量的影响,结果如图 11 所示。

在试验范围内,将填充率 X_3 固定在中心水平上,得到桨叶安装角 X_1 和调质轴转速 X_2 的交互作用对调质器出料量的影响。由图 11a 可知,桨叶安装角和调质轴转速对出料量的影响为上凸型曲面;当调质轴转速一定时,出料量随桨叶安装角的增加呈现先增大后减小的趋势,这是因为物料在调质器中主要有轴向和径向两种运动形式,当桨叶安装角较小时,桨叶主要带动物料围绕调质轴转动,轴向推动力较小,因此物料轴向向前运动较弱,出料量较小;随着桨叶安装角的增大,物料轴向推进作用增强,出料量随之增加;随着桨叶安装角的进一步增大,桨叶对物料轴向推进作用减弱,主要起到切割物料作用,既不能推进也不能抛起物料。 X_1 和 X_2 的交互作用不显著。

在试验范围内,将调质轴转速 X_2 固定在中心水平上,得到桨叶安装角 X_1 和填充率 X_3 的交互作用对调质器出料量的影响。由图 11b 可知,桨叶安装角和填充率对出料量的影响为上凸型曲面;当桨叶安装角一定时,出料量随填充率的增加呈现增大的趋势,且变化幅度随安装角的增大呈现先逐渐加剧、后逐渐减缓的规律。根据仿真情况及调质器输送机理分析,这可能是因为原料靠近桨叶部分出现的翻滚现象造成的。当填充率较低时,大量物料集中于远离调质轴的区域,径向速度低而轴向速度高;随着填

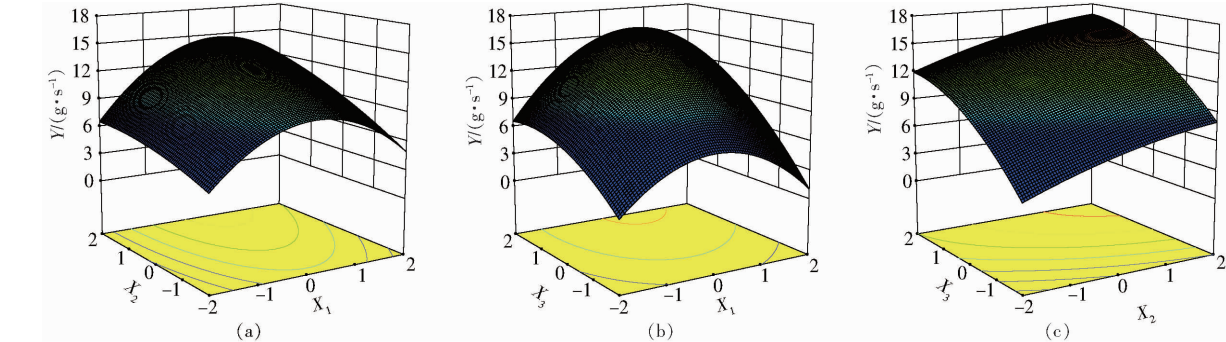


图 11 基于响应面法的参数组寻优结果

Fig. 11 Optimization of parameter group by using response surface method

充率的增大,更多的原料堆积使得靠近调质轴的原料增多,物料轴向速度变慢,因此出料量增加,但是增长速度变小。杨洋^[25]基于离散元法和正交试验研究了粮食输送器的输送效率,罗胜等^[26]研究了螺旋不连续加料装置的出料量变化,有相似的规律和结论。 X_1 和 X_3 的交互作用不显著。

在试验范围内,将桨叶安装角 X_1 固定在中心水平上,得到调质轴转速 X_2 和填充率 X_3 的交互作用对调质器出料量的影响。由图 11c 可知,调质轴转速和填充率对出料量的影响为上凸型曲面;调质轴转速一定时,出料量随填充率的增加呈现增大的趋势;填充率一定时,出料量随桨叶安装角的增加呈现先增大后减小的趋势。 X_2 和 X_3 的交互作用不显著。

4.3 最优参数组合的确定及验证

由于该调质器最大生产率为 50 kg/h,取最大生产率的 90%~95% 为宜,故 Y 在该范围内为宜。基于响应面法,运用 Design-Expert 软件中 Optimization 模块进行参数优化,在 $-1.682 \leq X_i \leq 1.682$ ($i = 1, 2, 3$) 范围内对各参数进行进一步寻优,获得调质器最优作业参数组合为: $X_1 = -0.31$ 、 $X_2 = -1.13$ 、 $X_3 = 1.56$,即 $x_1 = 38.49^\circ$ 、 $x_2 = 182.2 \text{ r/min}$ 、 $x_3 = 58.4\%$,此时调质器出料量 Y 可获得最优目标值,仿真预测值为 13.1 g/s。

5 样机试验

取最优参数组合,在北京市密云区昕三峰饲料厂进行调质器部件车间试验,如图 12 所示;加工对象为正常生产的乳猪料原料,物理想化指标良好。调整设备至最优参数组合,待调质器工作稳定后,测得调质器出料量实测值为 12.8 g/s,其它指标性能良好,测得效果基本与优化试验结果一致,满足调质



图 12 调质器生产试验
Fig. 12 Prototype working in workshop

器实际生产需求。

6 结论

(1) 基于离散单元法建立了饲料原料黏结颗粒模型,运用 CFD-DEM 耦合计算方法,对调质器原料颗粒进行运动和分布、颗粒黏结情况的耦合仿真。分别统计 0~30 s 阶段时调质器内颗粒的运动和分布情况,由仿真分析可知,原料受桨叶的搅拌作用,不断被抛起并向前推进,在调质腔中部及上部、靠近桨叶末端处速度较快;靠近调质器底部颗粒的运动速度较慢,有可能导致物料黏附在该处内壁上、产生积料现象。

(2) 基于 CFD-DEM 耦合模型,通过三因素五水平正交组合试验,得出各因素对其出料量的影响显著性顺序依次为:填充率、调质轴转速、桨叶安装角。通过 Design-Expert 软件对试验结果进行回归分析和响应面分析,得到调质器最优作业参数组合为:桨叶安装角 38.49°、调质轴转速 182.2 r/min、填充率 58.4%,此时出料量仿真值为 13.1 g/s,试验值为 12.8 g/s。通过对比仿真值和试验值,验证了仿真试验与回归模型的有效性。

参 考 文 献

1 全国畜牧总站,中国饲料工业协会. 2017 年全国饲料工业运行情况分析[J]. 中国饲料,2018(11):1-7.
2 CUTLIP S E, HOTT J M, BUCHANAN N P, et al. The effect of steam-conditioning practices on pellet quality and growing broiler nutritional value[J]. Journal of Applied Poultry Research, 2008, 17(2): 249-261.
3 王永昌. 饲料调质工艺与设备的讨论[J]. 饲料工业,2005,26(15):1-6.
4 徐泳,孙其诚,张凌,等. 颗粒离散元法研究进展[J]. 力学进展,2003,33(2):251-260.
XU Yong, SUN Qicheng, ZHANG Ling, et al. Advances in discrete element methods for particulate materials[J]. Advances in Mechanics, 2003, 33(2): 251-260. (in Chinese)
5 于建群,付宏,李红,等. 离散元法及其在农业机械工作部件研究与设计中的应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 1-6.
YU Jianqun, FU Hong, LI Hong, et al. Application of discrete element method to research and design of working parts of agricultural machines[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 1-6. (in Chinese)
6 曹丽英,张跃鹏,张玉宝,等. 筛片参数优化对饲料粉碎机筛分效率的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 284-288.
CAO Liying, ZHANG Yuepeng, ZHANG Yubao, et al. Influence of screen parameters optimization on screening efficiency of feed hammer mill[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 284-288. (in Chinese)
7 郭飞强,董玉平,景元琢,等. 主动配气式生物质气化炉流场模拟与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(3): 93-96.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120318&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.018.

- GUO Feiqiang, DONG Yuping, JING Yuanzhuo, et al. Flow fields simulation of biomass gasifier under active air distribution[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(3): 93-96. (in Chinese)
- 8 石林榕, 吴建民, 赵武云, 等. 基于 CFD-EDEM 耦合的小区玉米帘式滚筒干燥箱数值模拟[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 273-278.
- SHI Linrong, WU Jianmin, ZHAO Wuyun, et al. The numerical simulation for corn curtain roller drying box based on CFD-EDEM coupling[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(6): 273-278. (in Chinese)
- 9 蒋梅胜, 李恒, 李林书, 等. 基于 CFD-DEM 耦合的灭火机风筒优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 104-111.
- JIANG Meisheng, LI Heng, LI Linshu, et al. Simulation optimization and test of fire extinguisher funnel based on CFD-DEM coupling method[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8): 104-111. (in Chinese)
- 10 喻黎明, 谭弘, 邹小艳, 等. 基于 CFD-DEM 耦合的迷宫流道水沙运动数值模拟[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 65-71. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160810&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.010.
- YU Liming, TAN Hong, ZOU Xiaoyan, et al. Numerical simulation of water and sediment flow in labyrinth channel based on coupled CFD-DEM[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 65-71. (in Chinese)
- 11 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/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 79-84. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120217&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.017.
- 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 79-84. (in Chinese)
- 12 刘佳, 崔涛, 张东兴, 等. 机械气力组合式玉米精密排种器[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 43-47. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20120209&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.02.009.
- LIU Jia, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Mechanical-pneumatic combined corn precision seed-metering device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 43-47. (in Chinese)
- 13 彭飞. 小型制粒系统优化设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- PENG Fei. Optimazation design and experiment research on small-scale pelleting system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- 14 中国农业大学. 小型试验用调质器: 201110460460.9 [P]. 2011-12-31.
- 15 彭飞, 康宏彬, 王红英, 等. 小型轴向多点进气式饲料制粒调质器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 121-127. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161116&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.016.
- PENG Fei, KANG Hongbin, WANG Hongying, et al. Design and experiment on small-scale axial multi-point gas intake conditioner for pellet mill[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 121-127. (in Chinese)
- 16 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010.
- 17 王国强, 郝万军, 王继新, 等. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- 18 JAJCEVIC D, SIEGMANN E, RADEKE C, et al. Large-scale CFD-DEM simulations of fluidized granular systems[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 98: 298-310.
- 19 QIU L, WU C. A hybrid DEM/CFD approach for solid-liquid flows[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014, 26(1): 19-25.
- 20 GB/T 5498—2013 粮油检验容重测定[S]. 2014.
- 21 刘凡. 桨叶式饲料调质器性能试验方法研究及其行业标准制定[D]. 郑州: 河南工业大学, 2012.
- 22 李利桥, 王德福, 李超, 等. 转筒与桨叶组合式日粮混合机设计与试验优化[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 67-75. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171008&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.008.
- LI Liqiao, WANG Defu, LI Chao, et al. Design and experimental optimization of combined-type ration mixer of drum and blade[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 67-75. (in Chinese)
- 23 王志明, 吕彭民, 陈霓, 等. 横置差速轴流脱分选系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 53-61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161208&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.008.
- WANG Zhiming, LÜ Pengmin, CHEN Ni, et al. Design and experiment on axial-flow differential-speed threshing-separating-cleaning unit[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 53-61. (in Chinese)
- 24 葛宜元. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2015.
- 25 杨洋. 基于 EDEM 的输粮搅龙输送性能仿真研究与优化[D]. 成都: 西华大学, 2016.
- 26 罗胜, 张西良, 许俊, 等. 螺旋不连续加料装置结构优化与性能仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 250-257.
- LUO Sheng, ZHANG Xiliang, XU Jun, et al. Structure optimization and performance simulation of screw discontinuous feeding device[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 250-257. (in Chinese)