

颗粒饲料破损离散元仿真参数标定

牛智有^{1,2} 孔宪锐¹ 沈柏胜¹ 李洪成¹ 耿婕¹ 刘静^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 为了探究气力输送中颗粒饲料的破损机理, 针对当前缺乏颗粒饲料准确破损仿真模型的问题, 利用 EDEM 仿真软件进行颗粒饲料破损离散元仿真参数标定研究。以粒径为 2.50 mm 混养成鱼颗粒饲料为研究对象, 通过基础试验测定了颗粒饲料本征参数; 通过颗粒饲料休止角试验、碰撞恢复系数标定试验和落料时间, 结合试验优化设计方法, 确定了饲料间的碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数为 0.58、0.23、0.12, 饲料和软塑料(软 PVC)间的碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数为 0.69、0.22、0.18; 通过颗粒饲料单轴压缩破碎试验和仿真试验, 结合响应面优化确定了单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、临界法向应力、临界切向应力, 分别为 $2.25 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ 、 $8.05 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 、455 MPa、305 MPa。以确定的参数进行休止角仿真试验、单轴压缩仿真试验, 结果表明, 休止角、破碎力、落料时间的仿真值与实测值相对误差分别为 0.35%、1.43%、2.81%; 通过自由落料、斜面滑动、斜面滚动试验对粘结模型接触参数进行验证, 结果表明, 粘结模型接触参数设置合理。

关键词: 颗粒饲料; 破损; 休止角; 粘结模型; 离散元参数标定

中图分类号: S220.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)07-0132-09 **OSID:** 

Parameters Calibration of Discrete Element Simulation for Pellet Feed Attrition

NIU Zhiyou^{1,2} KONG Xianrui¹ SHEN Bosheng¹ LI Hongcheng¹ GENG Jie¹ LIU Jing^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: The discrete element simulation parameters calibration of pellet feed attrition was carried out by using EDEM simulation software, aiming at the lack of accurate attrition simulation model of pellet feed, so as to explore the damage mechanism of pellet feed in pneumatic conveying. The intrinsic parameters of pellet feed with a particle size of 2.50 mm, which was used as the object and served for polyculture adult fish, were determined through basic experiments. The coefficient of restitution, coefficient of static friction and coefficient of rolling friction between feeds were determined to be 0.58, 0.23 and 0.12, respectively, while these three coefficients between feeds and soft plastics (soft PVC, polyvinyl chloride) were 0.69, 0.22 and 0.18, respectively through AoR (angle of repose) test of pellet feed, coefficient of restitution calibration test and discharge time of pellet feed, combined with the experimental optimization design method. The normal stiffness per unit area, shear stiffness per unit area, critical normal stress and critical shear stress were determined by uniaxial compression breakage test and simulation test of pellet feed, combined with response surface optimization, which were $2.25 \times 10^9 \text{ N/m}^3$, $8.05 \times 10^8 \text{ N/m}^3$, 455 MPa and 305 MPa, respectively. The AoR simulation test and uniaxial compression simulation test were conducted with the determined parameters, whose results showed that the relative errors between the simulated value and the measured value in AoR, breakage force and discharge time were 0.35%, 1.43% and 2.81%, respectively; the contact parameters of the bonding model were verified by tests of free discharge, inclined sliding and inclined rolling, whose results showed that the contact parameters of the bonding model were reasonably set. The model developed could provide a method and theoretical basis for the calibration of discrete element simulation parameters and the study

of attrition mechanism of pellet feed.

Key words: pellet feed; attrition; angle of repose; bonded particle model; parameters calibration of discrete element

0 引言

随着我国水产养殖规模不断增加,投饲需求相应增加,其中,气力输送因其结构简单、输送距离可控等优点而被广泛应用,基于气送式的投饲装置也应运而生^[1-3]。目前,对气送式投饲装置的研究主要围绕定时定量精准投饲、集成化控制、水体信息的感知和远程投饲等功能开展^[3-6],有关饲料在输送过程中破损现象的研究还相对较少。然而,在气力输送过程中饲料破损问题十分显著,大量的破损颗粒被投到养殖水体中,造成饲料浪费严重、水体环境恶化、养殖效率低等诸多问题^[7]。因此,为了降低饲料在气送过程中破损率,进行饲料破损机理的研究十分必要。

早期关于饲料破损问题的研究大都基于传统试验方法^[8-9]。近年来,离散元技术和 CFD-DEM(计算流体力学-离散单元法)耦合技术得到广泛应用^[10-13],为分析颗粒饲料受力、碰撞和破损等问题,探明饲料破损机理提供一种新的方法。由于颗粒饲料种类及其几何结构的多样化,为了确保仿真模型所用参数的准确性,需要对模拟所用参数进行标定。

学者们对农业物料的参数标定进行了大量研究^[14-19]。目前,物料的参数主要存在两种标定方法,一种是整体标定方法,另一种是直接测量方法^[20]。整体标定法是通过现场或实验室测量材料整体特性,按照实际条件进行数值模拟,通过不断调整 DEM 参数来获得相同的整体响应;直接测量法则是通过直接测定粒子或接触水平的属性值作为标定参数^[21]。文献[22]基于试验测量,完成了颗粒饲料的密度、弹性模量、接触参数等的测定,但未进行饲料间碰撞恢复系数的测定;文献[23]确定了两种饲料颗粒的数值模拟模型及一些仿真参数,但未对获取的参数进行标定;文献[24]基于注入截面法,设计了一种新型休止角测量装置,且通过休止角试验与仿真测量结果对比,完成了滑动摩擦因数、碰撞恢复系数、滚动摩擦因数的标定,但未对饲料的破碎物理参数进行标定;文献[25]基于仿真与试验结合,完成了饲料油菜茎秆基本接触参数和破碎参数的标定,但未对破碎模型的接触参数进行验证。

为了探究饲料的破损机理,形成一套合理、完善的颗粒饲料破损评价方案,本文针对混养成鱼颗粒饲料进行试验及仿真参数标定。基于 EDEM 软件,

首先采用 Hertz-Mindlin 模型建立颗粒饲料多球模型,通过休止角试验和碰撞恢复系数标定试验,结合试验优化设计手段,进行颗粒饲料基本接触参数的标定;其次采用 Hertz-Mindlin 粘结模型建立颗粒饲料粘结模型,通过单轴压缩物理试验和仿真试验,结合试验优化设计手段,进行粘结参数的标定。最后,验证粘结模型接触参数的准确性。

1 材料与方法

1.1 试验样品

所用样品取自饲料生产企业混养成鱼颗粒饲料。分别采用排沙法和干燥法测定 5 组平行样品的密度和含水率,取平均值,测得颗粒饲料密度为 1 086.15 kg/m³、含水率为 10.78%;随机选取 100 个样品,采用数显式游标卡尺(精度 0.01 mm)测量颗粒直径和长度,经统计计算,获得颗粒平均直径为 2.67 mm、平均长度为 8.89 mm。

1.2 参数测定方法

1.2.1 力学特性参数

为获取颗粒饲料弹性模量和泊松比,利用 TMS-Pro 型质构仪(FTC 公司,美国)对颗粒饲料进行单轴压缩试验和破碎试验,试验过程中压头速度均设置为 10 mm/min。在进行试验前,对试验样品进行预制,采用 360 目细砂纸对其进行打磨,使两端磨平,长度维持在样品测量平均值 8.89 mm 左右。通过单轴压缩试验前后颗粒饲料高度和直径的变化,计算得到其弹性模量和泊松比平均值分别为 245.94 MPa 和 0.387;通过单颗粒压缩破碎试验,获得平均破碎力为 36.22 N。

1.2.2 休止角测定

本文采用漏斗法测量颗粒饲料休止角(Angle of repose, AoR)^[26]。由于气送式饲喂多采用塑料软管作为输送管道,所以采用软塑料(软 PVC)紧贴漏斗内壁,以考察颗粒与软 PVC 间的接触特性。选取颗粒饲料平均质量为 124.04 g,获取 5 次休止角试验的颗粒堆积图像。对原始图像进行灰度化、二值化、轮廓提取、直线拟合及角度识别等处理,获得颗粒饲料休止角,如图 1 所示。通过统计计算,试验样品休止角的平均值为 28.18°。此外,对 5 组试验的落料时间进行记录,落料时间平均值为 1.26 s。

1.2.3 碰撞恢复系数标定试验

为了充分考虑颗粒初始下落状态的随机性以及

颗粒在运动过程中的自旋的影响,本研究搭建一套碰撞恢复系数测量装置^[27],分别进行颗粒-颗粒间和颗粒-软 PVC 间碰撞恢复系数的标定,如图 2 所示。随机选取 200 颗颗粒饲料进行碰撞恢复系数标定试验。操作过程如下,将接收盘划分为 6 个尺寸完全相同的栅格,在释放管上方进行自由落料,每次落料量为 1 颗,直至 200 颗饲料落料完全,统计每个栅格中存在的颗粒饲料的数量,计算平均栅格数 I ,通过平均栅格数间接标定碰撞恢复系数,公式为

$$I=\frac{1}{N_{total}}\sum_{i=1}^n(iN_i)$$

(1)

式中 N_{total} ——总颗粒数量

n ——总栅格数量

N_i ——第 i 个栅格中的颗粒数量

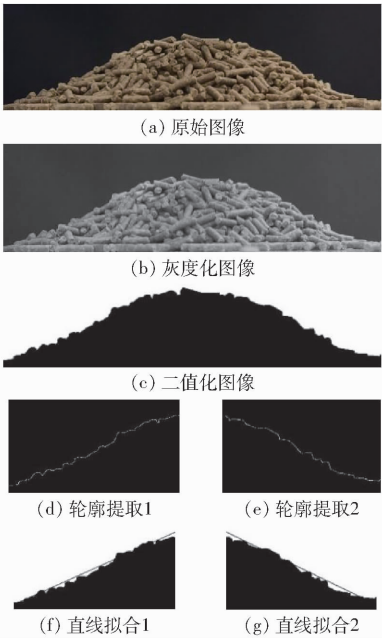


图 1 休止角图像处理

Fig. 1 Image processing of AoR

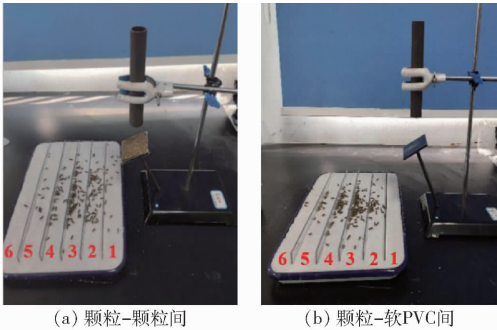


图 2 碰撞恢复系数标定试验装置

Fig. 2 Coefficient of restitution calibration test setup

通过统计,各个栅格饲料颗粒数如表 1 所示。

1.3 仿真模型建立

1.3.1 颗粒饲料休止角仿真模型

本研究采取多球模型建立颗粒饲料离散元模型^[23-24,28],综合考虑形状拟合和颗粒数量两个因

表 1 各栅格颗粒数及平均栅格数

Tab. 1 Particle numbers in each bin and average

测试材料	bin number						平均栅 格数 I
	栅 格 序 号						
	1	2	3	4	5	6	
饲料-饲料 1	22	71	67	37	3	0	2.64
饲料-饲料 2	25	74	63	23	12	3	2.66
饲料- PVC1	0	36	87	53	21	3	3.34
饲料- PVC2	3	30	96	50	20	1	3.29

素,采用 15 个直径为 2.67 mm 的球体相互拼接,形成如图 3 所示的颗粒模型。基于 EDEM 软件中通用材料(Generic EDEM material model, GEMM)数据库以及预仿真试验,确定了颗粒饲料和软 PVC 仿真参数的取值范围,如表 2 所示。

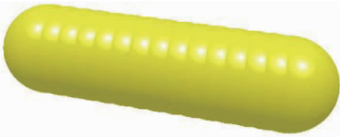


图 3 颗粒饲料多球模型

Fig. 3 Multisphere model of pellet feed

表 2 颗粒饲料休止角仿真模型参数

Tab. 2 Parameters of AoR simulation model for

pellet feed	
参数	数值
颗粒饲料密度 $\rho_1/(kg\cdot m^{-3})$	1 086.15 ^a
软 PVC 密度 $\rho_2/(kg\cdot m^{-3})$	1 282 ^b
颗粒饲料泊松比 ν_1	0.387 ^a
软 PVC 泊松比 ν_2	0.395 ^b
颗粒饲料剪切模量 G_1/Pa	8.87×10^7 ^a
软 PVC 剪切模量 G_2/Pa	2.86×10^6 ^b
颗粒饲料间碰撞恢复系数 A	0.50~0.75 ^c
颗粒饲料间静摩擦因数 B	0.20~0.32 ^c
颗粒饲料间滚动摩擦因数 C	0.05~0.20 ^c
饲料-软 PVC 间碰撞恢复系数 D	0.50~0.70 ^c
饲料-软 PVC 间静摩擦因数 E	0.15~0.35 ^c
饲料-软 PVC 间滚动摩擦因数 F	0.05~0.20 ^c

注:a 表示该项通过物理试验测定,b 表示该项从文献[29]中获取,c 表示该项为试验变量,下同。

为了保证颗粒粒度的随机分布,在 EDEM 软件中选择颗粒尺寸分布为正态分布,其标准差为 0.05。为了限制最大最小粒度,Cap 低值设置为 0.96,高值设置为 1.05。在 EDEM 中建立圆锥体作为颗粒工厂,采用静态生成方法,生成颗粒质量为 124.04 g,待颗粒完全静止后,给定抽板运动设置,颗粒开始下落。仿真模型如图 4 所示。

1.3.2 碰撞恢复系数测量装置仿真模型

将实际模型中的释放管简化为圆形颗粒工厂,冲击板分别由饲料和软 PVC 组成,按照实际厚度绘

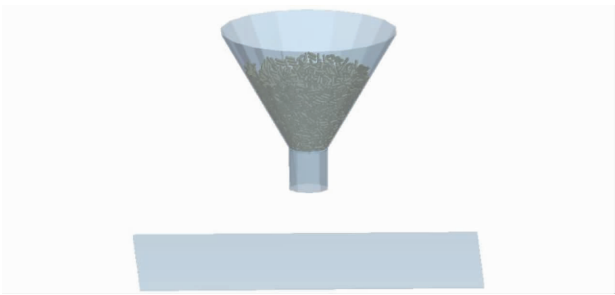


图 4 颗粒饲料休止角仿真模型

Fig. 4 Simulation model of AoR for pellet feed

制。栅格采用硬 PVC 材料参数进行设置,石英砂按照其材料参数进行设置。所得仿真模型如图 5 所示。

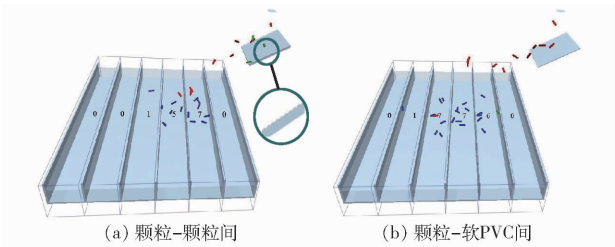


图 5 碰撞恢复系数标定试验仿真模型

Fig. 5 Simulation models for coefficient of restitution calibration test

1.3.3 颗粒饲料破损仿真模型

在 EDEM 中,基于 Hertz - Mindlin 粘连接触理论,用微粒粘结生成如图 6 所示的粘结模型,替代原有的多球模型。具体流程如下,建立半径为 0.20 mm 的微粒模型和直径为 2.67 mm、长度为 8.89 mm、关于原点中心对称的圆柱颗粒模型,使用小颗粒对圆柱体进行填充;然后,建立压头和支撑板模型,设定压头运动速度为 10 mm/min,颗粒最大压缩距离为 3 mm。

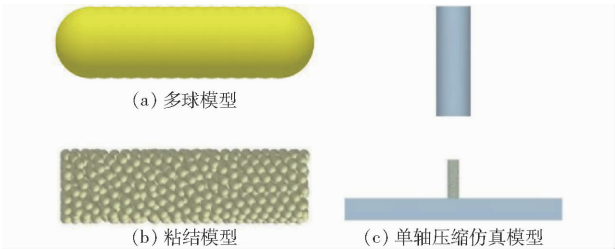


图 6 颗粒饲料单轴压缩破坏仿真模型

Fig. 6 Simulation model of feed breakage under uniaxial compression

微粒基本接触参数采用已有参数,通过径向压缩和轴向压缩预仿真试验获得的粘结参数取值范围如表 3 所示。为了保证粘结模型的质量等于实际饲料质量,采用密度放大法^[30],将微粒的密度由 1 086.15 kg/m³放大至 2 045.74 kg/m³,其余参数保持不变,以保证粘结模型的质量与实际饲料质量相等。

表 3 颗粒饲料粘结参数

Tab. 3 Bonding parameters of pellet feed

参数	取值范围
单位面积法向刚度 $x_1 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	$1.00 \times 10^9 \sim 4.00 \times 10^9$
单位面积切向刚度 $x_2 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-3})$	$3.60 \times 10^8 \sim 1.44 \times 10^9$
临界法向应力 x_3 / MPa	10 ~ 900
临界切向应力 x_4 / MPa	10 ~ 600

1.4 参数标定试验设计

1.4.1 休止角试验参数标定

首先,通过 Design-Expert 软件进行二水平因子试验设计筛选出对休止角影响显著的参数,选择表 2 中参数 A ~ F 的上下限作为高低水平展开仿真试验,试验共 16 次;其次,对影响显著的参数进行爬坡试验设计,开展一系列休止角仿真试验,以确定最优值的取值范围。其中,影响不显著的参数取中间水平,显著因素按照给定步长逐步增加;最后,基于上述试验结果,根据 BBD (Box - Behnken design) 设计原理,取显著因素的高、中、低 3 个水平开展休止角仿真试验。非显著性参数取值同最陡爬坡试验^[25]。

1.4.2 碰撞恢复系数标定

使用 Design-Expert 进行单因素试验设计,在表 2 给定的碰撞恢复系数的取值范围中选择一系列参数水平进行仿真试验。以实测平均栅格数为目标,利用 Numerical 模块进行参数预测,并将预测参数进行仿真验证。

1.4.3 滚动摩擦因数标定

使用 Design-Expert 进行单因素试验设计,在表 2 给定的颗粒饲料-软 PVC 滚动摩擦因数的取值范围中选择一系列参数水平进行仿真试验。以实测落料时间为目标,利用 Numerical 模块进行参数预测,并将预测参数进行仿真验证。

1.4.4 粘结参数标定

首先进行预仿真试验,将 x_1 、 x_2 设定为 $1 \times 10^9 \text{ N/m}^3$,其余两参数不断变化,得出临界应力影响不显著,如表 4 所示,故将其设定为中间值 455 MPa 和 305 MPa。

表 4 单轴压缩破碎预仿真试验

Tab. 4 Pre-simulation test of uniaxial compression breakage

x_3 、 x_4 / MPa	破碎力/N
10、10	28.30
64.8、64.8	28.00
200、200	27.90
400、400	28.30

为保证标定参数的可靠性,避免参数值超过取值范围,根据 CCD (Central composite design) 原理进

行响应曲面试验设计,以标定的接触参数和待标定的粘结参数建立模型,开展颗粒饲料单轴压缩破碎仿真试验,粘结参数编码如表 5 所示。

表 5 粘结模型参数编码

Tab.5 Coding of bonding parameters		
编码	参数	
	$x_1/(N\cdot m^{-3})$	$x_2/(N\cdot m^{-3})$
-1.414	3.78×10^8	1.36×10^8
-1	1.00×10^9	3.60×10^8
0	2.50×10^9	9.00×10^8
1	4.00×10^9	1.44×10^9
1.414	4.62×10^9	1.66×10^9

2 结果与分析

2.1 休止角参数标定试验

2.1.1 休止角影响参数筛选

将影响休止角的基本接触参数 $A\sim F$ 作为试验因素,进行二水平因子试验设计,试验水平设置与仿真结果如表 6 所示。

表 6 休止角二水平因子试验设计与结果
Tab.6 Two-level factorial design and results of angle of repose

试验序号	A	B	C	D	E	F	休止角 $\theta/(^{\circ})$	落料时 间 t/s
1	0.50	0.32	0.20	0.50	0.15	0.05	30.88	1.36
2	0.50	0.32	0.05	0.50	0.35	0.20	30.95	1.25
3	0.50	0.32	0.20	0.70	0.15	0.20	30.91	1.34
4	0.75	0.32	0.20	0.70	0.35	0.20	33.48	1.36
5	0.50	0.20	0.20	0.50	0.35	0.20	28.85	1.83
6	0.75	0.20	0.05	0.70	0.35	0.20	25.92	1.16
7	0.75	0.32	0.20	0.50	0.35	0.05	36.39	1.42
8	0.75	0.32	0.05	0.50	0.15	0.20	19.88	1.11
9	0.50	0.20	0.05	0.50	0.15	0.05	11.88	1.02
10	0.50	0.20	0.20	0.70	0.35	0.05	31.39	1.16
11	0.50	0.32	0.05	0.70	0.35	0.05	31.25	1.24
12	0.75	0.20	0.20	0.70	0.15	0.05	20.16	1.09
13	0.75	0.20	0.05	0.50	0.35	0.05	27.08	1.18
14	0.75	0.20	0.20	0.50	0.15	0.20	19.60	1.17
15	0.50	0.20	0.05	0.70	0.15	0.20	11.35	1.00
16	0.75	0.32	0.05	0.70	0.15	0.05	26.72	1.19

采用方差分析方法对各个参数显著性进行检验,结果如表 7 所示。

由表 7 可知,根据影响率进行显著性排序,在颗粒饲料休止角试验中, $B、C、E$ 对休止角有显著影响,其余参数影响极小。因此,选取 $B、C、E$ 作为后续试验的优化参数。无显著影响参数 $A、D、F$ 取中间值,即 A 取 0.625, D 取 0.60, F 取 0.125。

表 7 休止角试验参数显著性分析
Tab.7 Analysis of parameter significance in angle of repose test

参数	效应值	均方和	影响率	显著性排序
A	0.22	0.20	0.02	6
B	8.03	257.84	31.09	2
C	5.83	135.90	16.39	3
D	0.71	2.01	0.24	5
E	9.24	341.60	41.19	1
F	-1.85	13.71	1.65	4

2.1.2 最陡爬坡试验

由上述二水平因子试验可知, $B、C、E$ 对休止角的效应为正值,即休止角随参数的增大而增大,故进行最陡爬坡试验设计,以各仿真试验所得休止角与实际休止角的相对误差为参照,进一步确定最优参数取值区间,试验设计与结果如表 8 所示。

表 8 休止角最陡爬坡试验设计与结果
Tab.8 Experimental results in the steepest ascent test of angle of repose

试验序号	B	C	E	休止角 $\theta/(^{\circ})$	相对误差 $\delta/\%$
1	0.22	0.07	0.18	19.68	30.15
2	0.24	0.10	0.22	28.51	1.17
3	0.26	0.13	0.26	30.91	9.69
4	0.28	0.16	0.30	33.10	17.46
5	0.30	0.19	0.34	36.13	28.21

随着 $B、C、E$ 的逐渐增大,休止角仿真值也逐渐增大,与休止角实际值的相对误差呈先减小后增大的趋势。其中,第 2 组试验相对误差最小,故以第 2 组试验为后续试验的中心点,第 1 组和第 3 组试验分别为低水平和高水平进行后续响应面试验设计。

2.1.3 响应面试验

根据最陡爬坡试验所得参数取值范围,结合 BBD 原理,利用 Design-Expert 软件进行三因素三水平响应面试验设计,中心水平设置 5 组重复,总共进行 17 组颗粒饲料休止角仿真试验。试验因素、因素水平及试验结果如表 9 所示。

使用 Design-Expert 软件对所得试验结果进行分析,对不同的数学拟合模型进行比较,结果表明,使用二次全模型方程拟合效果较好,模型显著 ($P=0.0003$),决定系数 $R^2=0.9711$,校正决定系数 $R^2_{adj}=0.9340$,且 $B、C、E$ 及其交互项和 $B、E$ 平方项对休止角的影响显著, C 平方项的 P 值大于 0.05。因此,回归方程拟合程度较好,可以用该回归方程进行试验分析,方程为

$$\theta=28.62+1.2B+0.58C+1.38E-0.87BC-2.21BE+1.01CE-0.87B^2-0.1C^2-2.53E^2$$

(2)

表 9 休止角响应面试验设计与结果

Tab.9 Design and results of response surface test of angle of repose

试验序号	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>E</i>	休止角 $\theta/(^{\circ})$	相对误差 $\delta/\%$
1	0.22	0.10	0.18	20.59	26.93
2	0.26	0.13	0.22	27.98	0.71
3	0.22	0.13	0.22	27.68	1.77
4	0.24	0.07	0.26	25.73	8.69
5	0.26	0.10	0.18	27.78	1.42
6	0.24	0.10	0.22	28.33	0.53
7	0.26	0.07	0.22	29.36	4.19
8	0.24	0.10	0.22	28.64	1.63
9	0.24	0.13	0.26	29.69	5.36
10	0.24	0.10	0.22	28.54	1.28
11	0.24	0.10	0.22	28.89	2.52
12	0.24	0.07	0.18	24.32	13.70
13	0.24	0.10	0.22	28.72	1.92
14	0.22	0.10	0.26	27.09	3.87
15	0.22	0.07	0.22	25.58	9.23
16	0.24	0.13	0.18	24.25	13.95
17	0.26	0.10	0.26	25.43	9.76

求解二次回归方程(式(2)),使目标值为实际测量休止角,即 28.18°,得 *B*、*C*、*E* 分别为 0.23、0.12、0.22。为验证最优参数组合的可行性与准确性,采用上述参数进行仿真试验,5 次重复试验测得颗粒饲料平均休止角分别为 27.64°、27.86°、28.40°、28.39°、28.13°,平均值为 28.08°,与实际测量休止角 28.18°相对误差为 0.35%,模拟结果与试验结果接近,表明试验所得颗粒饲料基本接触参数可用于模拟实际情况。

2.2 碰撞恢复系数标定试验

由预仿真试验可知,参数 *A* 取值范围为 0.50 ~ 0.75,参数 *D* 取值范围为 0.55 ~ 0.70,故分别取 *A* 为 0.50、0.55、0.60、0.65、0.70、0.75 进行饲料间碰撞恢复系数标定,分别取 *D* 为 0.55、0.60、0.65、0.70 进行饲料-软 PVC 间碰撞恢复系数标定,其余参数保持恒定,即饲料间静摩擦因数 0.23、饲料间滚动摩擦因数 0.12、饲料-软 PVC 间静摩擦因数 0.22、饲料-软 PVC 间滚动摩擦因数 0.125。仿真试验结果如表 10 所示。

分别以平均栅格数 2.65、3.31 为目标值,采用 Design-Expert 软件进行回归分析,得出 *A*、*D* 取值分别为 0.58、0.69。分别以 *A* = 0.58、*D* = 0.69 进行试验验证,求得平均栅格数分别为 2.62、3.29。将仿真结果与物理试验测量结果进行比较,如图 7 所示。

由图 7a 可知,参数 *A* 标定试验的仿真值与试验值的趋势基本吻合。但仿真中栅格 2 的颗粒数量略小于试验中栅格 2 的颗粒数量,仿真中栅格 3 的颗

表 10 碰撞恢复系数仿真试验结果

Tab.10 Simulation test results of coefficient of restitution

测试水平	栅格序号						平均栅格数 <i>I</i>
	1	2	3	4	5	6	
<i>A</i>	0.50	0	0	16	52	127	2.40
	0.55	0	2	19	61	109	2.48
	0.60	0	7	22	96	70	2.78
	0.65	2	14	27	101	46	2.98
	0.70	7	14	54	91	28	3.32
	0.75	8	30	77	70	11	3.70
<i>D</i>	0.55	1	2	19	60	110	2.50
	0.60	0	7	17	68	103	2.59
	0.65	2	15	37	78	65	3.01
	0.70	9	10	57	101	22	3.40

粒数量略大于试验中栅格 3 的颗粒数量。这可能是因为在实际试验中,由颗粒粘结而形成的碰撞板上存在一定的粘结缝隙,故经释放管下落的颗粒与缝隙进行碰撞会导致颗粒碰撞后的动能降低,从而落在栅格 2 中的颗粒数量相对增加,而仿真中粘结缝隙少于实际试验,故落在栅格 3 中的颗粒会相应增加。由图 7b 可知,参数 *D* 标定试验的仿真值与试验值的趋势基本一致。但仿真中栅格 3、4 的颗粒数量与试验中栅格 3、4 的颗粒数量存在一定的差异,这可能是因为大多数颗粒最终下落位置靠近栅格 3 和 4 间的隔板处,当颗粒在接收盘中与隔板碰撞时会产生反弹现象,使得颗粒的运动趋势产生变化,从而影响颗粒最终的停留位置。

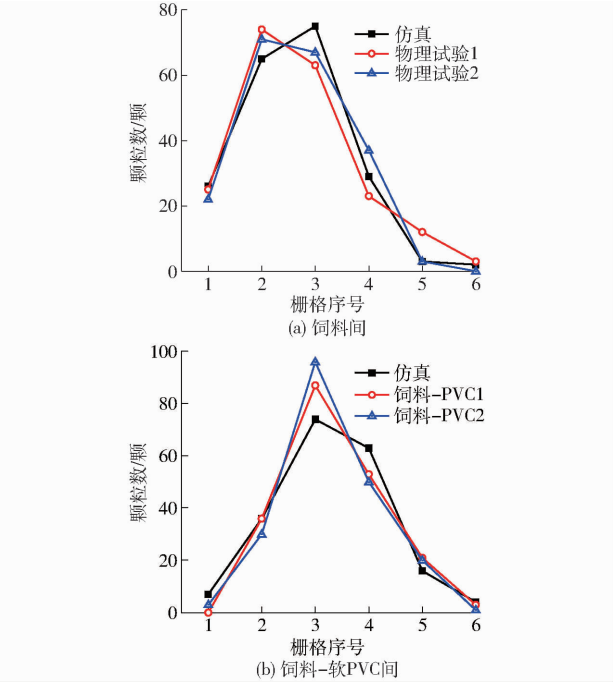


图 7 碰撞恢复系数标定结果

Fig.7 Calibration results of coefficient of restitution

虽然仿真与试验中各栅格颗粒数量存在一定的

差异,但是整体趋势以及平均栅格数基本相同,故认为标定的颗粒饲料间碰撞恢复系数、颗粒饲料-软PVC 间碰撞恢复系数可靠。

2.3 滚动摩擦因数标定试验

由上文可知,颗粒饲料标定参数 A 为 0.58、 B 为 0.23、 C 为 0.12、 D 为 0.69、 E 为 0.22。为了保证标定参数的准确性,有必要确定 F 取 0.125 的合理性。根据表 6 分析可知, F 对休止角试验中的落料时间有显著影响,故可以通过实际落料时间标定参数 F 。由休止角物理试验可知,颗粒饲料的平均落料时间为 1.26 s。

根据前文所得参数 F 取值范围 0.05 ~ 0.20,设置水平 0.06、0.08、0.10、0.12、0.14、0.16、0.18、0.20 进行休止角仿真试验,所得落料时间如表 11 所示。由表 11 可知,当 $F = 0.18$ 时。落料时间为 1.23 s,与实际落料时间相对误差为 2.81%,故确定 0.18 为颗粒与 PVC 材料间的滚动摩擦因数。

表 11 滚动摩擦因数标定试验设计与结果

Tab.11 Experimental design and results of calibration for coefficient of rolling friction

试验序号	F	落料时间 t/s
1	0.06	1.15
2	0.08	1.11
3	0.10	1.13
4	0.12	1.21
5	0.14	1.20
6	0.16	1.20
7	0.18	1.23
8	0.20	1.15

综上所述,可以获得标定后颗粒饲料间、颗粒饲料与 PVC 材料间的接触参数 $A \sim F$ 依次为 0.58、0.23、0.12、0.69、0.22、0.18。

2.4 粘结参数标定试验

为确定合适的粘结参数组合,根据中心组合设计原理,结合表 5 中参数取值范围进行响应面试验设计。根据参数取值范围,进行颗粒饲料压缩破坏仿真试验,中心水平设置 5 组重复,总共进行 13 组仿真试验。试验设计与仿真结果如表 12(表中 X_1 、 X_2 为 x_1 、 x_2 的编码值)所示。

使用 Design-Expert 软件对试验结果进行分析,比较不同的数学拟合模型,结果表明,使用二次全模型方程拟合效果较好,模型显著($P = 0.001$),模型决定系数 $R^2 = 0.994\,4$,校正决定系数 $R^2_{adj} = 0.990\,4$,其中 X_1 和 X_2 及其交互项和 X_1 、 X_2 的平方项对破碎力的影响显著。因此,回归方程拟合程度较好,可以用该回归方程进行试验分析。方程为

$$f = 40.12 + 11.12X_1 + 11.22X_2 + 1.60X_1X_2 - 2.88X_1^2 - 1.83X_2^2$$

(3)

表 12 粘结参数响应面试验设计与结果

Tab.12 Response surface test design and results of bonding parameters

试验序号	X_1	X_2	破碎力 f/N
1	0	0	40.50
2	0	1.414	52.40
3	0	0	39.70
4	0	0	40.00
5	-1	-1	16.31
6	1	-1	35.40
7	0	0	40.10
8	-1.414	0	17.73
9	1.414	0	49.10
10	0	-1	18.61
11	0	0	40.30
12	-1	1	34.10
13	1	1	59.60

求解二次回归方程(式(3)),使目标值为实际测量破碎力,即 36.22 N,结合法向刚度与切向刚度关系^[31],得 x_1 、 x_2 分别为 2.25×10^9 、 8.05×10^8 N/m³。为验证最优参数组合的可行性与准确性,采用 1.3.3 节中已建立的仿真模型和颗粒模型进行单轴压缩破碎仿真试验,具体步骤如下:初始状态时,压头底部距颗粒模型顶部 10 mm;在 EDEM 软件中对压头进行线性运动设置,为减少仿真时间,在接触颗粒模型之前,压缩速度设置为 60 mm/min,在接触颗粒模型之后,压缩速度设置为 10 mm/min;对压头的运动时间进行设置,使得压头总位移为 13 mm;通过后处理界面,获取压头上力的最大值即为颗粒饲料的破碎力。5 次重复试验获得颗粒饲料破碎力分别为 36.50、37.10、36.70、37.00、36.40 N,平均值为 36.74 N,与实际测量破碎力 36.22 N 相对误差为 1.43%,模拟结果与试验结果接近,表明标定参数有效。

2.5 颗粒饲料破损模型验证

为了探究多球模型标定参数应用于粘结模型的可行性,分别使用多球模型和粘结模型开展如图 8 所示的单颗粒自由落料试验、斜面滑动试验和斜面滚动试验,通过对比多球模型和粘结模型的运动状态以表征各接触参数的差异。

针对自由落料试验,通过颗粒与底板第 1 次碰撞后的最大势能与初始势能之比以表征碰撞恢复系数;针对斜面滑动试验和滚动试验,设置斜面从水平位置以恒定角速度开始转动,通过记录饲料开始滑动和滚动的时间以表征静摩擦因数和滚动摩擦因数,所得结果如表 13、14 所示。

由表 13 可得,两种模型表征参数 A 的结果分别

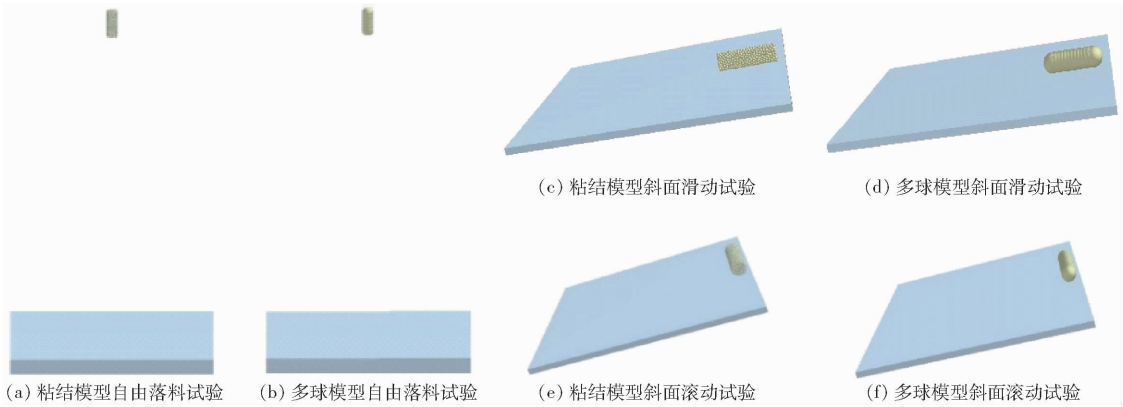


图 8 两种颗粒模型对比验证

Fig. 8 Comparison and validation of two particle model

表 13 不同颗粒模型自由落料试验结果
Tab. 13 Experimental results of free fall with different particle models

试验因素	碰撞后势能/初始势能	
	粘结模型	多球模型
A	25. 60/28. 07	29. 40/31. 39
D	23. 80/26. 27	22. 80/24. 81

表 14 不同颗粒模型斜面滑动和滚动试验结果
Tab. 14 Experimental results of inclined sliding and rolling of different particle models

试验因素		开始滑动或滚动时间点	
		粘结模型	多球模型
斜面滑动试验	B	1. 14	1. 15
	E	1. 12	1. 14
斜面滚动试验	C	1. 15	1. 17
	F	1. 11	1. 12

为 0. 91、0. 94, 相对误差为 3. 20%; 表征参数 *D* 的结果分别为 0. 91、0. 92, 相对误差为 1. 10%。

由表 14 可得, 两种模型表征参数 *B* 的结果分别为 1. 14、1. 15 s, 相对误差为 0. 87%; 表征参数 *E* 的结果分别为 1. 12、1. 14 s, 相对误差为 1. 70%; 表征参数 *C* 的结果分别为 1. 15、1. 17 s, 相对误差为 1. 71%; 表征参数 *F* 的结果分别为 1. 11、1. 12 s, 相对误差为 0. 89%。

由试验结果对比可得, 粘结模型与多球模型的运动状态基本一致, 故将多球模型的接触参数运用在粘结模型上是合理的。

3 结论

(1) 通过试验测定, 获得试验样品颗粒饲料平均直径为 2. 67 mm、平均长度为 8. 89 mm, 密度为

1 086. 15 kg/m³, 弹性模量、泊松比平均值分别为 245. 94 MPa、0. 387; 基于休止角试验并结合图像处理方法获得颗粒饲料休止角平均值为 28. 18°, 通过单轴压缩破碎试验获得颗粒饲料破碎力平均值为 36. 22 N。

(2) 通过休止角仿真试验, 采取二水平因子试验、最陡爬坡试验和响应面试验等方法, 标定对休止角影响显著的参数, 即饲料间静摩擦因数 0. 23、饲料间滚动摩擦因数 0. 12、饲料-软 PVC 间静摩擦因数 0. 22, 利用所得参数进行休止角仿真试验, 仿真结果与实测值相对误差 0. 35%; 通过碰撞恢复系数标定试验, 完成饲料间碰撞恢复系数和饲料-软 PVC 间碰撞恢复系数的标定, 分别为 0. 58、0. 69; 基于休止角仿真试验的落料时间与实际试验中的落料时间对比, 完成了饲料-软 PVC 间滚动摩擦因数的标定, 即 0. 18。

(3) 为了考虑饲料破损问题, 建立了颗粒饲料粘结模型, 根据 CCD 原理, 建立了粘结参数与破碎力之间的回归模型, 由方差分析可知, 单位面积法向接触刚度和单位面积切向接触刚度及其平方项、交互项对破碎力影响显著。以实测破碎力 36. 22 N 为目标值进行参数寻优, 获得单位面积法向刚度、单位面积切向刚度、临界法向应力和临界切向应力分别为 2. 25 × 10⁹ N/m³、8. 05 × 10⁸ N/m³、455 MPa 和 305 MPa, 利用所得参数进行单轴压缩仿真试验, 所得结果与实际值相对误差为 1. 43%。

(4) 通过仿真模拟单颗粒自由落料、斜面滑动和斜面滚动试验, 对比粘结模型和多球模型的运动状态, 结果表明, 接触参数相同的粘结模型和多球模型运动状态基本一致, 故可认为将多球模型接触参数运用至粘结模型是合理的。

参 考 文 献

[1] 王永鼎, 王岩. 投饲范围可控的自动投饲机研究[J]. 渔业现代化, 2014, 41(4): 45-48.

- WANG Yongding, WANG Yan. Research on aquaculture feeding range controllable automatic feeding machine[J]. Fishery Modernization, 2014, 41(4): 45–48. (in Chinese)
- [2] 王志勇, 谌志新, 江涛. 集中式自动投饵系统的研制[J]. 渔业现代化, 2011, 38(1): 46–49.
WANG Zhiyong, CHEN Zhixin, JIANG Tao. Centralized automatic feeding system in pond aquaculture[J]. Fishery Modernization, 2011, 38(1): 46–49. (in Chinese)
- [3] 陈晓龙, 田昌凤, 杨家朋, 等. 高密度养殖池塘自动气力投饲机的设计试验[J]. 渔业现代化, 2016, 43(5): 18–22.
CHEN Xiaolong, TIAN Changfeng, YANG Jiapeng, et al. Research on pneumatic automatic feeding machine for intensive pond aquaculture[J]. Fishery Modernization, 2016, 43(5): 18–22. (in Chinese)
- [4] 李康宁, 李南南, 刘利, 等. 淡水网箱养殖自动投饵机设计[J]. 河北渔业, 2018(4): 48–51.
LI Kangning, LI Nannan, LIU Li, et al. The design of automatic feeding machine for freshwater cage culture[J]. Hebei Fisheries, 2018(4): 48–51. (in Chinese)
- [5] MEHMET Y G. Design improvements on rotary valve particle feeders used for obtaining suspended airflows[J]. Powder Technology, 2004, 139(1): 76–80.
- [6] LÓPEZ M, MARTÍNEZ S, GÓMEZ J M, et al. Wireless monitoring of the pH, NH_4^+ and temperature in a fish farm[J]. Procedia Chemistry, 2009, 1(1): 445–448.
- [7] 苗淑彦, 王际英, 张利民, 等. 水产动物残饵及粪便对养殖水环境的影响[J]. 饲料研究, 2009(2): 64–67.
MIAO Shuyan, WANG Jiying, ZHANG Limin, et al. The influence of aquatic animal residual bait and faces on the aquaculture environments[J]. Feed Research, 2009(2): 64–67. (in Chinese)
- [8] AARSETH K A, PEREZ V, BØE J K, et al. Reliable pneumatic conveying of fish feed[J]. Aquacultural Engineering, 2006, 35(1): 14–25.
- [9] AAS T S, OEHME M, SØRENSEN M, et al. Analysis of pellet degradation of extruded high energy fish feeds with different physical qualities in a pneumatic feeding system[J]. Aquacultural Engineering, 2011, 44(1): 25–34.
- [10] 彭飞, 方芳, 王红英, 等. 基于 CFD-DEM 的饲料调质器物料运动模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 355–363.
PENG Fei, FANG Fang, WANG Hongying, et al. Numerical simulation and experiment on raw material in feed conditioner based on coupled CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 355–363. (in Chinese)
- [11] 赵思琪, 丁为民, 赵三琴, 等. 基于 EDEM-Fluent 的气动式鱼塘投饲机性能优化[J]. 农业机械学报, 2019, 50(9): 130–139.
ZHAO Siqi, DING Weimin, ZHAO Sanqin, et al. Performance analysis and optimization of pneumatic fishpond feeder based on EDEM-Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 130–139. (in Chinese)
- [12] ZHOU J W, LIU Y, DU C L, et al. Effect of the particle shape and swirling intensity on the breakage of lump coal particle in pneumatic conveying[J]. Powder Technology, 2017, 317(16): 438–448.
- [13] ZHOU J W, LIU Y, DU C L, et al. Numerical study of coarse coal particle breakage in pneumatic conveying[J]. Particology, 2018, 38(3): 204–214.
- [14] 张荣芳, 焦伟, 周纪磊, 等. 不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 1): 227–235.
ZHANG Rongfang, JIAO Wei, ZHOU Jilei, et al. Parameter calibration and experiment of rice seeds discrete element model with different filling particle radius[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 227–235. (in Chinese)
- [15] 刘瑞, 李衍军, 刘忠军, 等. 包衣玉米种子离散元参数分析与标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 1–8, 18.
LIU Rui, LI Yanjun, LIU Zhongjun, et al. Analysis and calibration of discrete element parameters of coated maize seed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 1–8, 18. (in Chinese)
- [16] 田辛亮, 丛旭, 齐江涛, 等. 黑土区玉米秸秆-土壤混料离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 100–108, 242.
TIAN Xinliang, CONG Xu, QI Jiangtao, et al. Parameter calibration of discrete element model for corn straw-soil mixture in black soil areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 100–108, 242. (in Chinese)
- [17] 王韦韦, 蔡丹艳, 谢进杰, 等. 玉米秸秆粉料致密成型离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 127–134.
WANG Weiwei, CAI Danyan, XIE Jinjie, et al. Parameters calibration of discrete element model for corn stalk powder compression simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 127–134. (in Chinese)
- [18] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 1–20.
ZENG Zhiwei, MA Xu, CAO Xiulong, et al. Critical review of applications of discrete element method in agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 1–20. (in Chinese)
- [19] MONTELLANO C G, FUENTES J M, TÉLLEZ E A, et al. Determination of the mechanical properties of maize grains and olives required for use in DEM simulations[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 111(4): 553–562.
- [20] COETZEE C J. Review: calibration of the discrete element method[J]. Powder Technology, 2017, 310(16): 104–142.
- [21] MICHELE M, HUGH S E. Discrete element method (DEM) for industrial applications: comments on calibration and validation for the modelling of cylindrical pellets[J]. KONA Powder and Particle Journal, 2015, 32: 236–252.
- [22] 杨杰. 基于 DEM 的立式干燥机颗粒流仿真模拟研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.
YANG Jie. Simulation study of particles flow on the vertical dryer based on DEM[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012. (in Chinese)

- [30] HE L, JIANG Z W, CHEN Z X, et al. Assimilation of temporal-spatial leaf area index into the CERES - Wheat model with ensemble Kalman filter and uncertainty assessment for improving winter wheat yield estimation [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, 16(10): 2283 - 2299.
- [31] 姚荣江, 杨劲松, 郑复乐, 等. 基于表观电导率和 Hydrus 模型同化的土壤盐分估算[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(13): 91 - 101.
YAO Rongjiang, YANG Jinsong, ZHENG Fule, et al. Estimation of soil salinity by assimilating apparent electrical conductivity data into Hydrus model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(13): 91 - 101. (in Chinese)
- [32] 刘昭, 周艳莲, 居为民, 等. 基于集合卡尔曼滤波同化方法的农田土壤水分模拟[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 2943 - 2953.
LIU Zhao, ZHOU Yanlian, JU Weimin, et al. Simulation of cropland soil moisture based on an ensemble Kalman filter[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11): 2943 - 2953. (in Chinese)
- [33] 冯文哲, 王新涛, 韩佳, 等. 基于卫星和无人机遥感数据尺度转换的土壤盐渍化监测研究[J]. *节水灌溉*, 2020(11): 87 - 93, 104.
FENG Wenzhe, WANG Xintao, HAN Jia, et al. Research on soil salinization monitoring based on scale conversion of satellite and UAV remote sensing data[J]. *Water Saving Irrigation*, 2020(11): 87 - 93, 104. (in Chinese)
- [34] 刘卓, 李志杰, 胡柳明, 等. 基于集合卡尔曼滤波的湖泊富营养化模型 Delft3D - BLOOM 数据同化[J]. *湖泊科学*, 2017, 29(5): 1070 - 1083.
LIU Zhuo, LI Zhijie, HU Liuming, et al. Ensemble Kalman filter based data assimilation in the Delft3D - BLOOM lake eutrophication model[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, 29(5): 1070 - 1083. (in Chinese)
- [35] 褚楠, 黄春林, 杜培军. 基于双 EnKF 的土壤水分与土壤属性参数同时估计[J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(2): 214 - 220.
CHU Nan, HUANG Chunlin, DU Peijun. State and parameter estimation in soil moisture data assimilation based on dual ensemble Kalman filter[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2016, 31(2): 214 - 220. (in Chinese)
- [36] 熊春晖, 张立凤, 关吉平, 等. 集合-变分数据同化方法的发展与应用[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(6): 648 - 656.
XIONG Chunhui, ZHANG Lifeng, GUAN Jiping, et al. Development and application of ensemble - variational data assimilation methods[J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(6): 648 - 656. (in Chinese)
- [37] YANG E G, KIM H M. A comparison of variational, ensemble-based, and hybrid data assimilation methods over East Asia for two one-month periods[J]. *Atmospheric Research*, 2021, 249: 105257.

(上接第 140 页)

- [23] 闫银发, 孟德兴, 宋占华, 等. 槽轮式补饲机颗粒动力学数值模拟与试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(增刊): 249 - 253.
YAN Yinfa, MENG Dexing, SONG Zhanhua, et al. Particle kinetic simulation and experiment for flute-wheel feeding machine [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(Supp.): 249 - 253. (in Chinese)
- [24] 彭飞, 王红英, 方芳, 等. 基于注入截面法的颗粒饲料离散元模型参数标定[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(4): 140 - 147.
PENG Fei, WANG Hongying, FANG Fang, et al. Calibration of discrete element model parameters for pellet feed based on injected section method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(4): 140 - 147. (in Chinese)
- [25] 廖宜涛, 廖庆喜, 周宇, 等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(6): 73 - 82.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(6): 73 - 82. (in Chinese)
- [26] 向伟, 吴明亮, 吕江南, 等. 基于堆积试验的黏壤土仿真物理参数标定[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(12): 116 - 123.
XIANG Wei, WU Mingliang, LÜ Jiangnan, et al. Calibration of simulation physical parameters of clay loam based on soil accumulation test[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(12): 116 - 123. (in Chinese)
- [27] CHEN Z P, WASSGREN C, VEIKLE E, et al. Determination of material and interaction properties of maize and wheat kernels for DEM simulation[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 195: 208 - 226.
- [28] CAULKIN R, TIAN W, PASHA M, et al. Impact of shape representation schemes used in discrete element modelling of particle packing[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2015, 76: 160 - 169.
- [29] 温翔宇, 袁洪方, 王刚, 等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(2): 115 - 122, 142.
WEN Xiangyu, YUAN Hongfang, WANG Gang, et al. Calibration method of friction coefficient of granular fertilizer by discrete element simulation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(2): 115 - 122, 142. (in Chinese)
- [30] 杨贵, 许建宝, 刘昆林. 粗粒料颗粒破碎数值模拟研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(11): 3301 - 3306.
YANG Gui, XU Jianbao, LIU Kunlin. Numerical simulation of particle breakage of coarse aggregates[J]. *Rock & Soil Mechanics*, 2015, 36(11): 3301 - 3306. (in Chinese)
- [31] 蔡改贫, 肖洪力, 郭进山, 等. 基于多尺度内聚颗粒模型的挤压分级破碎研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(增刊): 3557 - 3567.
CAI Gaipin, XIAO Hongli, GUO Jinshan, et al. Research on extrusion crushing based on multi-scale cohesive particle model [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(Supp.): 3557 - 3567. (in Chinese)