

基于离散元法的黄鳝肉质黏结模型参数标定

刘明勇¹ 朱林¹ 向雪¹ 欧阳周寰¹ 李平²

(1. 湖北工业大学湖北省农业机械工程研究设计院, 湖北 武汉 430068;

2. 荆州市集创机电科技股份有限公司, 湖北 荆州 434025)

摘要: [目的] 建立黄鳝肉质的离散元黏结模型并进行参数标定。[方法] 以新鲜黄鳝肉质为研究对象, 通过物理试验测得基本参数, 并用质构仪对黄鳝肉质进行压缩试验, 获得压缩黄鳝肉质的力学特征曲线, 确定弹性阶段最大破坏力。采用 Hertz-Mindlin with bonding 模型构建黄鳝肉质的离散元黏结模型, 并对相关黏结参数进行虚拟标定试验。通过单因素试验和响应面中心组合设计 (CCD) 法确定黄鳝肉质黏结模型的相关参数, 并将仿真结果与实测最大压缩力进行对比。[结果] 黄鳝肉质黏结模型的最佳组合为单位面积法向刚度 $1.523 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ 、单位面积剪切刚度 $1.024 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ 、临界法向应力 $1.061 \times 10^6 \text{ Pa}$ 和临界切向应力 $6.130 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。[结论] 通过仿真结果与实测结果对比, 二者受力变化趋势相同, 误差仅为 3.48%, 表明黄鳝肉质黏结模型的相关参数是准确的。

关键词: 参数标定; 黏结模型; 黄鳝; 肉质; 离散元

Parameter calibration of bonding model of *Monopterus albus* meat based on discrete element method

LIU Mingyong¹ ZHU Lin¹ XIANG Xue¹ OUYANG Zhouhuan¹ LI Ping²

(1. Hubei Agricultural Machinery Engineering Research and Design Institute, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China; 2. Jingzhou Jichuang Electromechanical Technology Co., Ltd., Jingzhou, Hubei 434025, China)

Abstract: [Objective] This paper aims to establish a discrete element-based bonding model of *Monopterus albus* meat and calibrate the parameters. [Methods] By using fresh *Monopterus albus* meat as the research object, the basic parameters were measured by a physical test, and *Monopterus albus* meat was compressed by a texture analyzer to obtain the mechanical characteristic curve of compressed *Monopterus albus* meat. The maximum destructive force in the elastic stage was determined. The Hertz-Mindlin with bonding model was used to construct the discrete element bonding model of *Monopterus albus* meat, and virtual calibration tests were carried out on the relevant bonding parameters. The relevant parameters of the model were determined by a single factor test and central composite design (CCD) response surface method. Finally, the simulation results were compared with the measured maximum compression force. [Results] The optimal combination of the bonding model of *Monopterus albus* meat was as follows: normal stiffness per unit area, shear stiffness per unit area, critical normal stress, and critical tangential stress were $1.523 \times 10^9 \text{ N/m}^3$, $1.024 \times 10^9 \text{ N/m}^3$, $1.061 \times 10^6 \text{ Pa}$, and $6.130 \times 10^5 \text{ Pa}$. [Conclusion] By comparing the simulation results with the measured results, the stress variation trend of the two is the same, and the error is only 3.48%, which indicates that the relevant parameters of the bonding model of *Monopterus albus* meat are accurate.

Keywords: parameter calibration; bonding model; *Monopterus albus*; meat; discrete element

黄鳝俗称鳝鱼、长鱼、罗鳝等, 是温热带淡水底栖生活鱼类。其体态呈蛇形, 体表光滑无鳞, 前段圆管状, 向后渐侧扁。2022 年中国黄鳝养殖产量为 33.4 万 t, 其中仅湖北省产量就达到了 15.4 万 t, 占全国总产量的 46.2%^[1]。

黄鳝具有较高的营养价值, 肉质细嫩、味美刺少、营养丰富, 且价格较高^[2]。目前, 黄鳝加工机器均采用试验方法, 通过手工调试参数以保证黄鳝在加工过程中肉质不被破坏。

基金项目: 湖北省农机装备补短板核心技术应用攻关项目 (编号: HBSNYT202221)

通信作者: 刘明勇 (1985—), 男, 湖北工业大学副教授, 博士。E-mail: lmy8508@hbut.edu.cn

收稿日期: 2024-05-30 改回日期: 2024-11-26

近年来,随着科技的不断发展,离散元技术为分析物料的破碎、筛分、碰撞、受力提供了一种新的方法。目前,有关离散元法的研究主要是利用EDEM分析物料碰撞以及筛分过程中的受力变化,分析不同振动方式、筛网参数、颗粒速度、颗粒形状对物料筛分效果的影响^[3-4],以及不同工况下分选筛的受力和磨损情况^[5-6]。武涛等^[7]通过离散元法实现了对黏性土壤离散元模型的接触参数标定。刘凡一等^[8-9]采用堆积试验对小麦相关离散元参数进行了标定。而关于破碎、切块、去皮等研究需要建立相关的破碎离散元模型^[10],如苑进等^[11]建立了菠菜根柔性体离散元模型,探究菠菜根、土壤与根切铲之间的相互作用关系。张喜瑞等^[12]用离散元法建立了香蕉秸秆的黏结模型,探究香蕉秸秆的破碎机理。涂鸣等^[13]利用离散元法建立了菱角的黏结模型,分析不同刀具对菱角切削力的影响,并对刀具参数进行优化。张佳喜等^[14]选用Hertz-Mindlin with bonding模型建立了棉花秸秆仿真模型,进行弯曲试验以及粉碎试验验证以确保各参数的准确性。张兆国等^[15]建立了三七根茎及土壤离散元模型,对挖掘过程中的损伤进行研究,验证了仿生结构设计的合理性。王笑丹等^[16]利用EDEM仿真软件建立了牛肉咀嚼破碎模型,并进行参数标定。综上,使用离散元法对物料的破损研究具有可行性,而目前尚未有关于黄鳝肉质的离散元模型研究。

研究拟基于离散元法,通过物理试验方法测得其相关的基本参数。选用Hertz-Mindlin with bonding模型建立黄鳝肉质的黏结模型,分析黄鳝肉质在压缩过程中的压缩力变化规律,通过仿真分析对黏结参数进行标定,并采用回归分析获得黄鳝肉质仿真模型参数的最佳组合,为黄鳝加工机器的研发提供依据。

1 试验材料及设备

1.1 试验材料

选取市售的成熟鲜活黄鳝。由于黄鳝尺寸存在较大差异,随机选取中等体积、质量为75~100 g的黄鳝共8条。去除黄鳝头部、尾部,将身体部位随机剪断,长约30 mm。鱼体截面及其截面结构如图1所示。

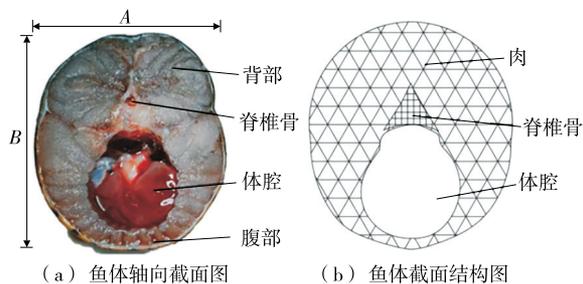


图1 黄鳝与鱼体轴向截面及其结构图

Figure 1 Axial section and structure of *Monopterus albus*

自然状态下黄鳝鱼体截面呈椭圆形,其体宽 A 为 $[11.0, 14.2]$ mm,体高 B 为 $[13.9, 16.0]$ mm。体腔形状近似圆形,脊椎骨头呈三角形,其背部肉较厚,为 $[4.1, 5.2]$ mm,腹部肉厚度约为1.8 mm。试验时将切断后的黄鳝重新进行处理,去除体腔中的内脏,用剔骨刀将其脊椎骨剔除,仅留下肉质。

1.2 仪器与设备

电子天平:AB104-N型,上海第二天平仪器厂;

高速摄像机:MV-CS004-10UM型,杭州海康威视数字技术股份有限公司;

质构仪:TMS-PRO型,美国FTC公司。

1.3 黄鳝肉质基本参数测定

1.3.1 本征参数 本征参数包括密度、泊松比和弹性模量等。30组样本密度取值范围为 $[1.068, 1.195]$ g/cm³,平均值为1.132 g/cm³,标准差为0.03,符合正态分布。为保证所取结果的准确性,按式(1)确定求解参数最终结果。

$$\begin{cases} \bar{x} - \sigma \leq x_n \leq \bar{x} + \sigma \\ f(x) = \min \sum_{n=1}^n (x - x_n)^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中:

\bar{x} ——参数平均值;

σ ——标准差;

$f(x)$ ——参数最终值与所有试验值误差的最小平方和;

x ——参数最终值;

x_n ——参数试验值。

根据式(1)求得黄鳝肉质密度 $\rho=1.132$ g/cm³。

泊松比 ν 是反映黄鳝肉质横向变形的弹性指数^[17]。试验时,将黄鳝肉质制成10 mm×10 mm×5 mm样品,按式(2)计算泊松比。

$$\nu = \left| \frac{\delta_1}{\delta_2} \right| = \frac{W_1 - W_2}{L_1 - L_2} \quad (2)$$

式中:

ν ——泊松比;

δ_1 ——黄鳝肉质横向变形量,mm;

δ_2 ——黄鳝肉质轴向变形量,mm;

W_1 ——黄鳝肉质压缩前横向尺寸,mm;

W_2 ——黄鳝肉质压缩后横向尺寸,mm;

L_1 ——黄鳝肉质压缩前轴向尺寸,mm;

L_2 ——黄鳝肉质压缩后轴向尺寸,mm。

弹性模量 E 和剪切模量 G 可通过TMS-Pro质构仪压缩试验获得,计算式为:

$$\begin{cases} E = \frac{FL}{S\Delta L} \\ G = \frac{E}{2(1+\nu)} \end{cases} \quad (3)$$

式中:

- F ——黄鳝肉质弹性变形阶段最大承受力, N;
- L ——样本初始长度, mm;
- S ——样本横截面积, mm²;
- ΔL ——样本压缩前后长度差, mm。

通过质构仪压缩试验测定黄鳝肉质泊松比和弹性模量, 平板压头加载速度 1 mm/s, 进行 30 组样品试验。

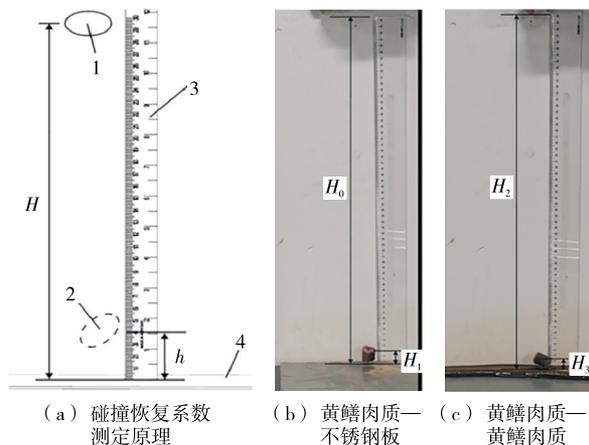
30 组样品泊松比 ν 取值范围为 [0.242, 0.333], 平均值为 0.288, 标准差为 0.026。弹性模量 E 取值范围为 [3.522, 5.133] MPa, 平均值为 4.356 MPa, 标准差为 0.394。剪切模量 G 取值范围为 [1.323, 1.979] MPa, 平均值为 1.691 MPa, 标准差为 0.150。为保证所取结果的准确性, 根据式(1)~式(3)求得泊松比 $\nu=0.286$, $E=4.378$ MPa, $G=1.702$ MPa。

1.3.2 基本接触参数

(1) 碰撞恢复系数: 碰撞恢复系数表征物料碰撞后的恢复能力, 只与材料本身有关。研究涉及黄鳝肉质之间的接触以及黄鳝肉质和不锈钢板之间的接触, 借助高速摄影机和刻度尺进行测量^[18]。如图 2 所示, 物体自由落体与挡板碰撞后反弹, 记录初始高度 H 与反弹高度 h , 碰撞

$$\text{恢复系数 } e = \sqrt{\frac{h}{H}}$$

测量黄鳝肉质与不锈钢板之间的碰撞恢复系数时, 将黄鳝肉质放置于固定高度 H_0 , 释放时呈自由落体运动并与不锈钢碰撞, 下落固定高度 H_0 为 60 cm, 记录反弹高度 H_1 , 黄鳝肉质与不锈钢板之间的碰撞恢复系数 e_1 。在不锈钢板上铺上一层黄鳝肉质, 将黄鳝肉质于相同高度释放, 下落固定高度 H_2 为 60 cm, 反弹高度为 H_3 , 黄鳝肉质与黄鳝肉质之间的碰撞恢复系数 e_2 。



1. 物体初始位置 2. 物体反弹后位置 3. 刻度尺 4. 挡板

图 2 碰撞恢复系数测定

Figure 2 Determination of collision recovery coefficient

按式(4)计算碰撞恢复系数。

$$\begin{cases} e_1 = \sqrt{\frac{H_1}{H_0}} \\ e_2 = \sqrt{\frac{H_3}{H_2}} \end{cases} \quad (4)$$

30 组样本反弹高度 H_1 取值范围为 [3.400, 4.700] mm, 平均值为 4.063 mm, 标准差为 0.353。反弹高度 H_3 取值范围为 [2.900, 4.000] mm, 平均值为 3.453 mm, 标准差为 0.297。为保证所取结果的准确性, 根据式(1)、式(4)求得 $e_1=0.260$, $e_2=0.240$ 。由于黄鳝肉之间有缓冲作用, 故 $e_2 < e_1$ 。

(2) 静摩擦因数: 测量黄鳝肉质一不锈钢板的静摩擦因数时, 将不锈钢板放置于水平试验台架上, 将黄鳝肉质放置于不锈钢板中央, 缓缓抬起不锈钢板, 通过高速摄像机拍摄到黄鳝肉质发生滑移时的图像^[19]。考虑到黄鳝肉质表面分泌较多黏液且含有水分, 试验主要研究其在干燥状态下的摩擦参数, 用纸巾擦去其表面黏液后进行试验。

如图 3 所示, 不锈钢板与水平试验台架之间的倾角 θ_1 为黄鳝肉质与不锈钢板之间的静摩擦角。在测定黄鳝肉质之间的静摩擦因数时, 只需在不锈钢板上平铺一层黄鳝肉质, 黄鳝肉质发生滑移时的倾角记为 θ_2 。

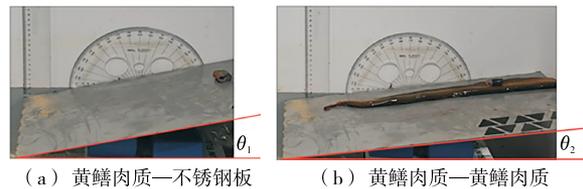


图 3 静摩擦因数测定

Figure 3 Determination of static friction coefficient

按式(5)计算静摩擦因数。

$$\begin{cases} \mu_1 = \tan \theta_1 \\ \mu_2 = \tan \theta_2 \end{cases} \quad (5)$$

30 组样本摩擦角 θ_1 取值范围为 [19.5°, 26.8°], 平均值为 22.9°, 标准差为 1.481。摩擦角 θ_2 取值范围为 [9.6°, 17.9°], 平均值为 13.6°, 标准差为 2.159。为保证所取结果的准确性, 根据式(1)、式(5)求得 $\mu_1=0.426$, $\mu_2=0.241$ 。

(3) 滚动摩擦因数: 滚动摩擦因数是指一个物体在另一个物体表面作无滑移的纯滚动或有滚动趋势时, 物体在接触面产生的形变对滚动的阻碍作用^[20]。参考牛肉的离散元模型滚动摩擦因数^[16], 二者材料均为肉类且内部结构组成相似, 因此将黄鳝肉质与不锈钢板之间的滚动摩擦因数 μ_{11} 设为 0.2, 将黄鳝肉质之间的滚动摩擦因数 μ_{22} 设为 0.2。

结合本征参数和接触参数测定结果, 黄鳝肉质相关材料参数见表 1。

表 1 试验材料基本参数

Table 1 Basic parameters of test materials

参数	单位	数值
黄鳍肉质泊松比 ν		0.286
黄鳍肉质密度 ρ	g/cm ³	1.132
黄鳍肉质弹性模量 E	Pa	4.378 × 10 ⁶
黄鳍肉质剪切模量 G	Pa	1.702 × 10 ⁶
不锈钢泊松比		0.300
不锈钢密度	kg/cm ³	7 850
不锈钢剪切模量	Pa	7.940 × 10 ¹⁰
黄鳍肉质—不锈钢碰撞恢复系数 e_1		0.260
黄鳍肉质—不锈钢静摩擦 μ_1		0.426
黄鳍肉质—不锈钢滚动摩擦 μ_{11}		0.200
黄鳍肉质—黄鳍肉质碰撞恢复系数 e_2		0.240
黄鳍肉质—黄鳍肉质静摩擦 μ_2		0.241
黄鳍肉质—黄鳍肉质动摩擦 μ_{22}		0.200

1.4 黄鳍肉质压缩力学特性测定

将黄鳍剪成长 35 mm 的条状,剔除鱼体中的脊椎骨,用纸巾擦去表面黏液。将腹部肉质与背部肉质视作相同性质进行压缩试验。考虑到背部与腹部之间的体腔间隙较大,设定圆柱压头速度为 1 mm/s,触发力为 1 N,消除体腔大部分间隙以及刀具与黄鳍肉质之间的间隙后进行压缩试验,如图 4 所示。

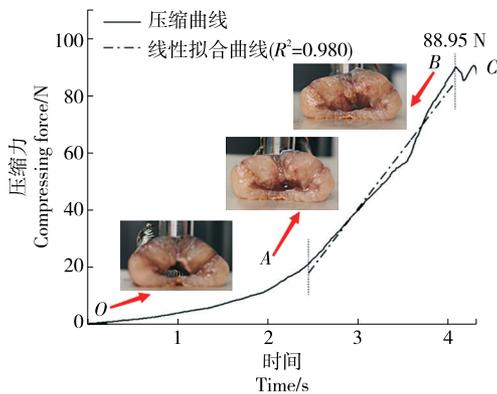


图 4 黄鳍肉质压缩试验

Figure 4 Compression test of *Monopterus albus* meat

在黄鳍肉质压缩过程中,OA 段压缩力缓慢增加是因为黄鳍肉质体腔内存在一定间隙,通过压缩消除肉质之间的间隙,将黄鳍肉质压实。AB 段压缩力急剧增加是由于压实后的黄鳍肉质开始发生弹性形变,压缩力呈线性变化,弹性阶段发生破坏时的最大压缩力为 88.95 N。BC 段压缩力产生波动,是因为该阶段已超过了黄鳍肉质的弹性变形阶段而进入塑性变形阶段。在压缩过程中将黄鳍肉质压缩至破坏,以弹性阶段发生破坏时的最大压缩

力 88.95 N 为试验结果建立黄鳍肉质的黏结模型。

1.5 黄鳍肉质离散元模型的建立

1.5.1 离散元接触模型选择 在 EDEM 软件中,Hertz-Mindlin with bonding 接触模型是在 Hertz-Mindlin 接触模型^[21]的基础上,加入了颗粒间黏结作用,可以形成具有一定机械强度的黏连颗粒体模型。如图 5 所示,颗粒之间通过 Bonding 键黏结成一体,该模型使相邻两颗粒在接触点处发生黏结,球形颗粒周围形成一组弹簧模型^[22]。

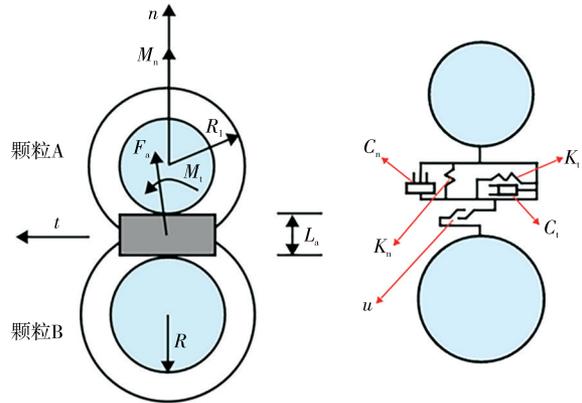


图 5 颗粒黏结模型

Figure 5 Particle bonding model

该模型使相邻两颗粒在接触点处发生平行黏结,平行键作用效果相当于一组分布在球形颗粒周围上的一组弹簧。Bonding 键的力学属性是影响仿真模型抵抗破坏的关键因素,其主要取决于单位面积法向刚度 K_n 、单位面积切向刚度 K_t 、临界法向应力 C_n 和临界切向应力 C_t 4 个参数,其计算式为:

$$\begin{cases} F_n = - \int V_n \cdot K_n \cdot A \cdot \delta_t \\ F_t = - \int V_t \cdot K_t \cdot A \cdot \delta_t \\ M_n = - \int \omega_n \cdot K_t \cdot J \cdot \delta_t \\ M_t = - \int \omega_t \cdot K_n \cdot \frac{J}{2} \cdot \delta_t \end{cases} \quad (6)$$

式中:

- F_n ——颗粒 Bond 键所受法向力, N;
- F_t ——颗粒 Bond 键所受切向力, N;
- M_n ——颗粒 Bond 键所受法向力矩, N·m;
- M_t ——颗粒 Bond 键所受切向力矩, N·m;
- V_n ——颗粒法向速度, m/s;
- V_t ——颗粒切向速度, m/s;
- ω_n ——颗粒法向角速度, rad/s;
- ω_t ——颗粒切向角速度, rad/s;
- A ——接触面积, mm²;
- J ——黏结球形空间惯性矩, m⁴;

δ_t ——时间步长, s。

当黏结键所受的法向应力和切向应力大于法向极限应力或切向极限应力设定值时^[23], 黏结键发生断裂, 如式(7)所示。

$$\begin{cases} C_n < \frac{-F_n}{A} + \frac{2M_t}{J} R_1 \\ C_t < \frac{-F_t}{A} + \frac{2M_n}{J} R_1 \end{cases} \quad (7)$$

1.5.2 压缩仿真模型的建立 利用UG绘制黄鳍肉质样本三维模型, 导入至EDEM中用球形颗粒进行填充。分别用半径为0.2, 0.3, 0.4 mm填充进行仿真, 其最终结果误

差 $\leq 5\%$, 但三者的运算时间成倍增加^[24]。在仿真模拟中需要对每个颗粒进行运动受力分析, 颗粒越多分析量越大。因此, 综合考虑离散元模型精度与计算效率, 选用半径为0.4 mm的球形颗粒对黄鳍肉质模型进行填充。提取黏结成黄鳍肉质的全部颗粒共4 746个。在EDEM中创建元颗粒, 导入每个颗粒的坐标, 填充成黄鳍肉质的离散元模型。颗粒黏结半径一般为颗粒半径的1.2~2.0倍^[25], 设置黏结半径为0.50 mm, 共生成黏结键18 892个, 平均每个颗粒黏结键数量为4, 模型黏结稳定。黄鳍肉质的黏结键外形如图6所示。

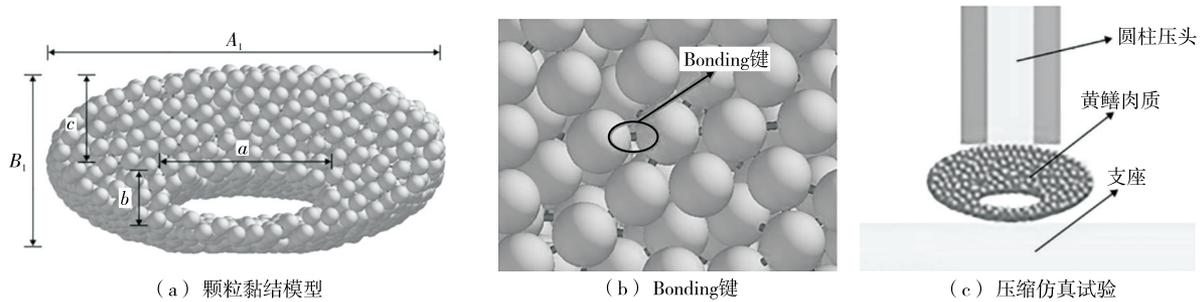


图6 压缩试验仿真模型

Figure 6 Compression test simulation model

由图6可知, 模型整体呈椭球形, 黄鳍肉质长轴 A_1 为16 mm, 短轴 B_1 为7 mm, 背部肉厚度 c 为4.5 mm, 体腔长轴 a 为6 mm, 短轴 b 为1.5 mm。圆柱压头直径为10 mm, 向下运动速度为1 mm/s, 仿真时间为 8×10^{-7} s, 总仿真时间为4.3 s。

88.95 N为仿真值, 实际试验中弹性阶段破坏时最大压缩力的相对误差为评价指标, 考察 x_1, x_2, x_3, x_4 对仿真结果的影响, 单因素试验水平见表3, 试验结果如图7所示。

2 试验结果与分析

表3 单因素试验水平

Table 3 Single factor test levels

水平	$x_1/(N \cdot m^{-3})$	$x_2/(N \cdot m^{-3})$	x_3/Pa	x_4/Pa
1	1.0×10^8	8.0×10^7	1.0×10^5	1.0×10^5
2	5.0×10^8	2.0×10^8	5.0×10^5	4.0×10^5
3	1.5×10^9	1.0×10^9	1.5×10^6	8.0×10^5
4	2.5×10^9	1.8×10^9	2.5×10^6	1.2×10^6
5	3.5×10^9	3.5×10^9	3.5×10^6	1.6×10^6

2.1 单因素试验

根据Hertz-Mindlin with bonding模型, 颗粒间黏结键的断裂与单位面积法向刚度 x_1 、单位面积切向刚度 x_2 、临界法向应力 x_3 和临界切向应力 x_4 有关。结合预试验并参考淡水鱼鱼肉力学性能参数^[26], 初步设定黄鳍肉质离散元仿真黏结参数范围见表2。

由图6可知, 随着 x_1, x_2, x_3, x_4 数值的增大, 仿真结果与实际结果的相对误差呈先减小后增大趋势。其中单位面积法向刚度 x_1 , 单位面积法向刚度 x_2 取不同水平时, 相对误差变化极显著, 表明其对仿真结果影响较大。当 x_1 为 $5.0 \times 10^8 \sim 2.5 \times 10^9 N/m^3$, x_2 为 $2.0 \times 10^8 \sim 1.8 \times 10^9 N/m^3$ 时, 仿真结果与实际结果最为接近。当 x_3 为 $5.0 \times 10^5 \sim 2.5 \times 10^6 Pa$, x_4 为 $4.0 \times 10^5 \sim 1.2 \times 10^6 Pa$ 时, 仿真结果与实际结果最为接近。

表2 黄鳍肉质压缩仿真模型黏结参数

Table 2 Bonding parameters of compression simulation model of *Monopterus albus* meat

参数	单位	数值
单位面积法向刚度 x_1	N/m^3	$1.0 \times 10^8 \sim 3.5 \times 10^9$
单位面积切向刚度 x_2	N/m^3	$8.0 \times 10^7 \sim 3.5 \times 10^9$
临界法向应力 x_3	Pa	$1.0 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^6$
临界切向应力 x_4	Pa	$1.0 \times 10^5 \sim 1.6 \times 10^6$

2.2 响应面中心组合设计(CCD)试验

2.2.1 响应面CCD试验 结合单因素试验中各参数对仿真结果的影响, 并考虑参数取值范围, 根据中心组合设计

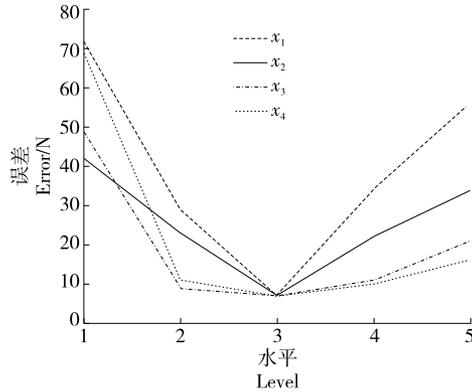


图7 单因素试验结果

Figure 7 Results of single factor test

原理设计响应曲面试验,试验因素编码见表4,试验设计及结果见表5。

由表6可知,二次多项式拟合回归模型 $P < 0.01$, 极显著,说明模型具有普遍性。失拟项 $P > 0.05$, 不显著,说明拟合的回归方程能准确地反映各因素对试验结果的影响。决定系数 R^2 为 0.988 3, 表明模型拟合程度较好,得到回归方程为:

$$F = 96.52 + 15.05x_1 + 12.71x_2 + 1.55x_3 + 4.85x_4 - 1.25x_1x_2 + 0.0662x_1x_3 + 2.30x_1x_4 + 0.04x_2x_3 + 3.09x_2x_4 -$$

表4 响应面试验因素编码

编码	$x_1/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	$x_2/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	x_3/Pa	x_4/Pa
-2	5.0×10^8	2.0×10^8	5.0×10^5	4.0×10^5
-1	1.0×10^9	6.0×10^8	1.0×10^6	6.0×10^5
0	1.5×10^9	1.0×10^9	1.5×10^6	8.0×10^5
1	2.0×10^9	1.4×10^9	2.0×10^6	1.0×10^6
2	2.5×10^9	1.8×10^9	2.5×10^6	1.2×10^6

$$0.26x_3x_4 - 1.73x_1^2 - 2.74x_2^2 - 0.0723x_3^2 - 0.6135x_4^2。$$

(8)

其中一次项 x_1, x_2, x_4 , 二次项 x_2^2 及交互项 x_2x_4 对压缩力影响极显著 ($P < 0.01$); 一次项 x_3 , 二次项 x_1^2 和交互项 x_1x_4 对压缩力影响显著 ($P < 0.05$)。

2.2.2 交互因素对仿真结果的影响 根据回归方程分别得到各因素交互作用对最大压缩力和相对误差的影响如图8所示。

由图8可知,当单位面积法向刚度不变时,压缩力随着单位面积切向刚度的增大而增加,相对误差呈先减小后增大趋势。当保持单位面积切向刚度不变时,压缩力随着单位面积法向刚度的增大而增加,相对误差先减小后增大。当单位面积法向刚度不变时,压缩力随着临界

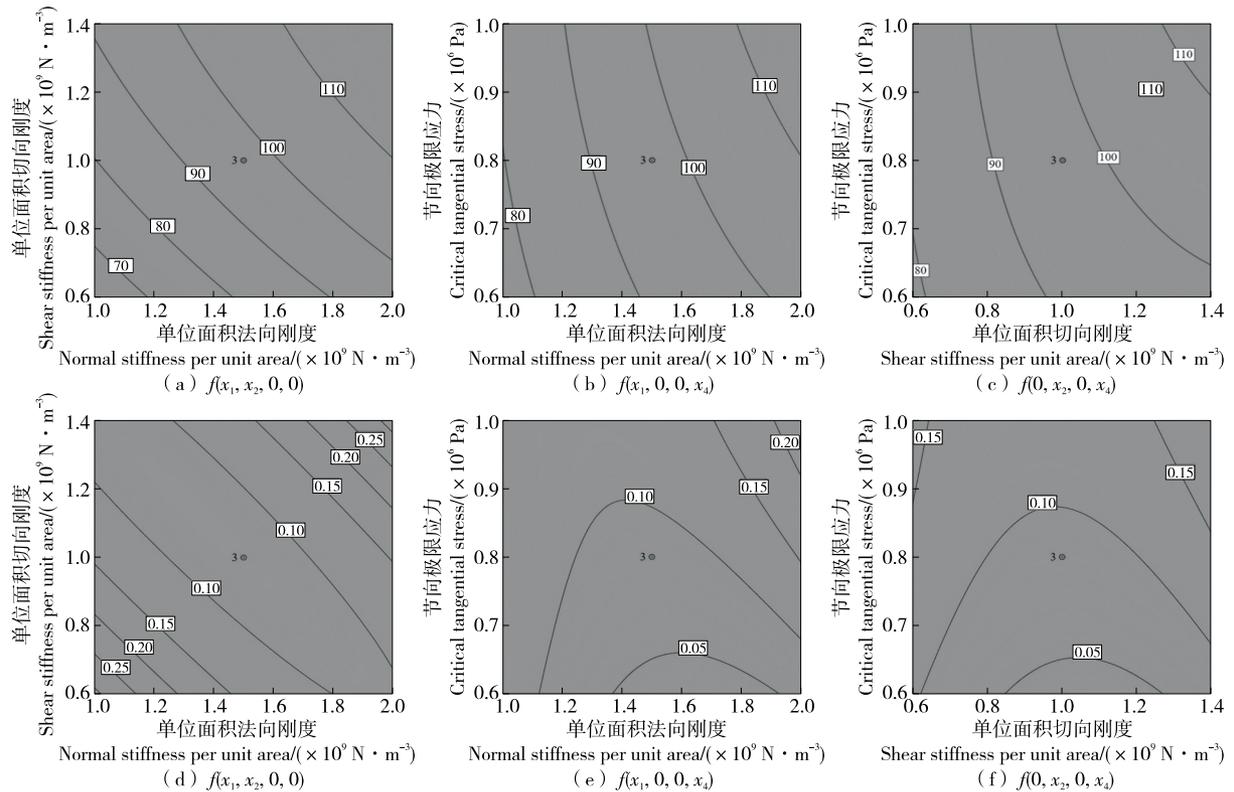


图8 交互因素对压缩力和相对误差的影响

Figure 8 Influence of interaction factors on compressive force and relative error

表 5 黏结参数 CCD 试验设计与结果

Table 5 CCD test design and results of bonding parameters

编码	x_1	x_2	x_3	x_4	压缩力/N
1	1	1	1	-1	107.52
2	0	0	0	0	95.50
3	0	0	0	0	96.81
4	1	-1	1	1	102.76
5	0	2	0	0	113.12
6	1	-1	-1	1	100.07
7	0	0	0	-2	88.88
8	0	0	0	0	97.26
9	-1	1	1	-1	83.39
10	-1	1	-1	-1	81.11
11	-1	1	1	1	98.83
12	0	0	0	2	99.17
13	-1	-1	-1	1	63.37
14	1	1	-1	1	127.72
15	-1	-1	1	1	62.23
16	1	-1	1	-1	90.59
17	-1	-1	-1	-1	62.31
18	0	-2	0	0	57.89
19	0	0	-2	0	90.07
20	0	0	2	0	102.31
21	1	1	1	1	127.77
22	1	-1	-1	-1	88.11
23	1	1	-1	-1	105.85
24	-1	-1	1	-1	64.32
25	-2	0	0	0	58.91
26	2	0	0	0	120.17
27	-1	1	-1	1	96.15

法向应力的增大而增加,相对误差呈先减小后增大趋势。当保持临界法向应力不变时,压缩力随着单位面积法向刚度的增大而增加,相对误差先减小后增大。当单位面积切向刚度不变时,压缩力随着临界切向应力的增大而增加,相对误差呈先减小后增大趋势。当保持临界切向应力不变时,压缩力随着单位面积切向刚度的增大而增加,相对误差先减小后增大。

通过前期测定的弹性阶段破坏时的最大压缩力为 89.95 N 并设置为目标值,借助 Design-Expert 得到最佳参数组合即黏结模型参数标定结果: $x_1=1.523 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ 、 $x_2=1.024 \text{ N/m}^3$ 、 $x_3=1.061 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、 $x_4=6.130 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

2.3 仿真模型验证

为验证黄鳝肉质离散元模型的准确性以及黏结参数的可靠性,进行仿真验证。由图 9 可知,0~2 s 内,仿真试

表 6 响应面二次全模型方差分析†

Table 6 Quadratic full model variance analysis of response surface

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	10 405.06	14	743.22	72.27	<0.000 1**
x_1	5 436.06	1	5 436.06	528.59	<0.000 1**
x_2	3 877.06	1	3 877.06	377.00	<0.000 1**
x_3	57.66	1	57.66	5.61	0.035 5*
x_4	563.38	1	563.38	54.78	<0.0001**
$x_1 x_2$	24.80	1	24.80	2.41	0.146 4
$x_1 x_3$	0.07	1	0.07	0.01	0.935 5
$x_1 x_4$	84.64	1	84.64	8.23	0.014 1*
$x_2 x_3$	0.03	1	0.03	0.00	0.961 0
$x_2 x_4$	153.14	1	153.14	14.89	0.002 3**
$x_3 x_4$	1.08	1	1.08	0.11	0.751 3
x_1^2	64.20	1	64.20	6.24	0.028 0*
x_2^2	160.58	1	160.58	15.61	0.001 9**
x_3^2	0.11	1	0.11	0.01	0.918 8
x_4^2	8.03	1	8.03	0.78	0.394 2
残差	123.41	12	10.28		
失拟项	121.74	10	12.17	14.56	0.065 9
纯误差	1.67	2	0.84		
总和	10 528.47	26			

† **表示极显著($P < 0.01$); *表示显著($0.01 \leq P < 0.05$)。

验与实际试验的压缩力均缓慢增加,是因为黄鳝肉质的体腔存在一定的间隙,通过压缩将黄鳝肉质压实。2~4 s 内,黄鳝肉质发生弹性变形,当压缩力到达极限压力时发生破坏。仿真过程与实际过程的压缩力变化规律与趋势大致相同,仿真得到的弹性变形阶段最大压缩力为 86.82 N,与实际结果的相对误差为 3.48%,证明黄鳝肉质黏结模型具有可靠性。

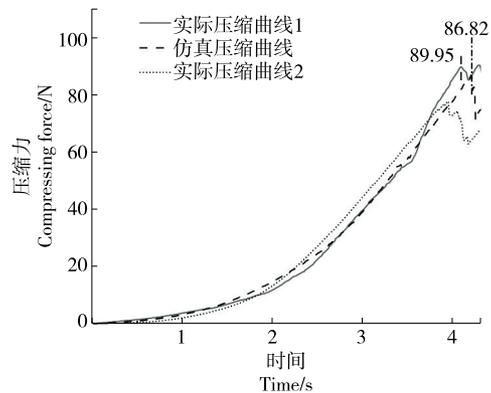


图 9 压缩仿真试验与实际对比图

Figure 9 Comparison between compression simulation test and actual test

3 结论

(1) 通过碰撞恢复系数测定试验、摩擦角测定试验和黄鳝肉质压缩试验获取创建了黄鳝肉质离散元接触模型的基本参数,并提取了弹性变形阶段的最大压缩力用于仿真对比。

(2) 通过单因素试验将单位面积法向刚度 x_1 、单位面积法向刚度 x_2 、临界法向应力 x_3 、临界切向应力 x_4 4个参数从较大范围中筛选出最佳取值范围,便于响应面试验的设计。

(3) 利用CCD响应面方法,建立4个黏结参数的回归模型,获得最优参数组合为单位面积法向刚度 x_1 为 $1.523 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ 、单位面积法向刚度 x_2 为 $1.024 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ 、临界法向应力 x_3 为 $1.061 \times 10^6 \text{ Pa}$ 、临界切向应力 x_4 为 $6.130 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

(4) 通过实际试验结果曲线与EDEM仿真结果曲线对比,二者的压缩力随时间的变化趋势大致相同,且弹性变形阶段的最大压缩力的误差仅为3.48%,验证了黄鳝肉质的离散元黏结模型的可靠性。

参考文献

- [1] 湖北日报. 湖北仙桃黄鳝“拱”出30公里产业带[J]. 渔业致富指南, 2023(11): 8-9.
Hubei Daily. Hubei Xiantao monopterus albus "arch" out of the 30 km industrial belt[J]. Fishery Rich Guide, 2023(11): 8-9.
- [2] 万鹏, 汪荣, 李梦珂, 等. 鲜活黄鳝剖切装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(22): 220-228.
WAN P, WANG R, LI M K, et al. Design and experiments of the sectioning device for the fresh *Monopterus albus*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(22): 220-228.
- [3] DONG H L, LIU C S, ZHAO Y M, et al. Influence of vibration mode on the screening process[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(1): 95-98.
- [4] JAFARI A, SALJOOGHI NEZHAD V. Employing DEM to study the impact of different parameters on the screening efficiency and mesh wear[J]. Powder Technology, 2016, 297: 126-143.
- [5] JAVAHERI M, JAFARI A, BARADARAN G H, et al. Effects of rollers speed regime on the roller screen efficiency[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2022, 43(5): 648-655.
- [6] JIANG H S, DUAN C L, WU J D, et al. Kinematics characteristics of the vibrating screen with rigid-flexible screen rod and the behavior of moist coal particles during the dry deep screening process[J]. Powder Technology, 2017, 319: 92-101.
- [7] 武涛, 黄伟凤, 陈学深, 等. 考虑颗粒间黏结力的黏性土壤离散元模型参数标定[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(3): 93-98.
WU T, HUANG W F, CHEN X S, et al. Calibration of discrete element model parameters for cohesive soil considering the cohesion between particles[J]. Journal of South China Agricultural University, 2017, 38(3): 93-98.
- [8] 刘凡一, 张舰, 李博, 等. 基于堆积试验的小麦离散元参数分析及标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 247-253.
LIU F Y, ZHANG J, LI B, et al. Calibration of parameters of wheat required in discrete element method simulation based on repose angle of particle heap[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(12): 247-253.
- [9] 刘凡一, 张舰, 陈军. 小麦籽粒振动筛分黏弹性接触模型构建及其参数标定[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 37-43.
LIU F Y, ZHANG J, CHEN J. Construction of visco-elastoplasticity contact model of vibratory screening and its parameters calibration for wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(15): 37-43.
- [10] 郝建军, 龙思放, 李浩, 等. 机收麻山药离散元模型构建及其仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 34-42.
HAO J J, LONG S F, LI H, et al. Development of discrete element model and calibration of simulation parameters for mechanically-harvested yam[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(20): 34-42.
- [11] 苑进, 李金光, 邹亮亮, 等. 基于离散元的菠菜收获机根切铲优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S2): 85-98.
YUAN J, LI J G, ZOU L L, et al. Optimal design of spinach root-cutting shovel based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(S2): 85-98.
- [12] 张喜瑞, 胡旭航, 刘俊孝, 等. 香蕉秸秆离散元仿真粘结模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 121-130.
ZHANG X R, HU X H, LIU J X, et al. Calibration and verification of bonding parameters of banana straw simulation model based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 121-130.
- [13] 涂鸣, 曹涛, 万志华, 等. 菱角离散元粘结参数标定与剪切试验[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(4): 270-278.
TU M, CAO T, WAN Z H, et al. Calibration and shear experiments of discrete element bonding parameters for water caltrop[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(4): 270-278.
- [14] 张佳喜, 张彭, 张虎, 等. 新疆棉花秸秆离散元仿真参数标定研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(1): 76-84, 108.
ZHANG J X, ZHANG P, ZHANG H, et al. Discrete element simulation parameters calibration for Xinjiang cotton straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(1): 76-84, 108.
- [15] 张兆国, 薛浩田, 王一驰, 等. 基于离散元法的三七仿生挖掘铲设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(5): 100-111.

- ZHANG Z G, XUE H T, WANG Y C, et al. Design and experiment of *Panax notoginseng* bionic excavating shovel based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 100-111.
- [16] 王笑丹, 王洪美, 韩云秀, 等. 基于离散元法的牛肉咀嚼破碎模型构建[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 228-234.
- WANG X D, WANG H M, HAN Y X, et al. Structure of beef chewing model based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(4): 228-234.
- [17] 张荣芳, 周纪磊, 刘虎, 等. 玉米颗粒粘结模型离散元仿真参数标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(S1): 69-77.
- ZHANG R F, ZHOU J L, LIU H, et al. Determination of interspecific contact parameters of corn and simulation calibration of discrete element[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(S1): 69-77.
- [18] 刘羊, 宗望远, 马丽娜, 等. 采用高速摄影技术测定油菜籽粒三维碰撞恢复系数[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 44-53.
- LIU Y, ZONG W Y, MA L N, et al. Determination of three-dimensional collision restitution coefficient of oil sunflower grain by high-speed photography[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4): 44-53.
- [19] 刘文政, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元的微型马铃薯仿真参数标定[J]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 125-135, 142.
- LIU W Z, HE J, LI H W, et al. Calibration of simulation parameters for potato minituber based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 125-135, 142.
- [20] 陈涛, 衣淑娟, 李衣菲, 等. 苜蓿现蕾期茎秆离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 91-100.
- CHEN T, YI S J, LI Y F, et al. Establishment of discrete element model and parameter calibration of alfalfa stem in budding stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 91-100.
- [21] 勾富强, 尹志宏, 牛宪伟, 等. 基于虚拟堆积试验的食用玫瑰花瓣离散元参数标定[J]. 食品与机械, 2022, 38(8): 106-110, 130.
- GOU F Q, YIN Z H, NIU X W, et al. Discrete element parameter calibration of edible rose petals based on virtual stacking test[J]. Food & Machinery, 2022, 38(8): 106-110, 130.
- [22] 王雷, 张永林, 李彬, 等. 基于离散元法的颗粒饲料粘结参数标定及其破碎过程分析[J]. 饲料工业, 2023, 44(1): 10-17.
- WANG L, ZHANG Y L, LI B, et al. Bonding parameter calibration and crushing process analysis of pellet feed based on discrete element method[J]. Feed Industry, 2023, 44(1): 10-17.
- [23] 任宁, 王中营, 白晓丽, 等. 基于离散元法的往复振动筛运动参数优化[J]. 食品与机械, 2023, 39(2): 63-67, 80.
- REN N, WANG Z Y, BAI X L, et al. Motion parameter optimization of reciprocating vibrating screen based on discrete element method[J]. Food & Machinery, 2023, 39(2): 63-67, 80.
- [24] 张国忠, 陈立明, 刘浩蓬, 等. 荸荠离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11): 41-50.
- ZHANG G Z, CHEN L M, LIU H P, et al. Calibration and experiments of the discrete element simulation parameters for water chestnut[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(11): 41-50.
- [25] 谢伟, 彭磊, 蒋蘋, 等. 收获期油菜茎秆双层粘结离散元模型建立与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 112-120.
- XIE W, PENG L, JIANG P, et al. Discrete element model building and optimization of double-layer bonding of rape shoots stems at harvest stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 112-120.
- [26] 张程皓. 淡水鱼开腹去脏与切片加工机设计研究[D]. 天津: 天津农学院, 2021: 13.
- ZHANG C H. Design and Research of fresh water fish defilement and slicing machine[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural College, 2021: 13.
- [27] 刘程, 王旺平, 宋少云. 基于离散元 EDEM 的米粒破碎特性分析[J]. 食品与机械, 2022, 38(9): 88-92.
- LIU C, WANG W P, SONG S Y. Analysis of rice grain breakage characteristics based on discrete element EDEM[J]. Food & Machinery, 2022, 38(9): 88-92.