

大果沙棘籽和果渣的离散元 仿真参数标定

乔伟豪, 胡靖明, 杨梅, 闫会丽, 张文洁, 王清泽

(甘肃农业大学机电工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:为解决大果沙棘浆果打浆分离原汁后沙棘籽和果渣混合物的机械分离研究缺乏准确接触参数的问题,通过物理试验和仿真试验对大果沙棘籽和果渣的物性参数和接触参数进行标定。通过压缩试验标定了大果沙棘籽的本征参数;通过自由落体试验、斜面滑移试验、斜面滚动试验及仿真分析,得到大果沙棘籽与 Q235 钢板的碰撞恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数分别为 0.550、0.449、0.039;通过最陡爬坡试验和 Box-Behnken 试验优化沙棘籽颗粒间的接触参数组合,通过仿真试验验证确定大果沙棘籽颗粒间的碰撞恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数分别为 0.150、0.344、0.013;设计 Plackett-Burman 试验筛选出与果渣有关且对沙棘籽和果渣混合物料堆积角影响最显著的 3 个参数:果渣剪切模量、果渣-果渣静摩擦系数、果渣-果渣滚动摩擦系数,通过最陡爬坡试验确定 3 个参数的最佳取值范围,通过 Central Composite 试验建立二阶回归方程,对回归方程进行寻优求解得到 3 个显著参数的最优参数组合:果渣剪切模量 1.57×10^6 、果渣-果渣静摩擦系数 0.303、果渣-果渣滚动摩擦系数 0.145。最优参数组合经 EDEM 仿真验证得出仿真堆积角与实际堆积角的相对误差为 2.78%。研究结果可为大果沙棘籽与果渣的分离研究提供相关依据。

关键词:沙棘籽;果渣;堆积角;仿真试验;EDEM

中图分类号:S226.5 **文献标志码:**A

Calibration of discrete element simulation parameters for sea buckthorn seeds and pomace

QIAO Weihao, HU Jingming, YANG Mei, YAN Huili, ZHANG Wenjie, WANG Qingze

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: To address the issue of lacking accurate contact parameters in the mechanical separation of sea buckthorn seed and pomace mixtures after the beating of sea buckthorn berries to extract raw juice, the physical and contact parameters of the seeds and pomace were calibrated through both physical and simulation tests. The intrinsic parameters of sea buckthorn seeds were calibrated through physical tests. Using free fall, inclined plane slip, inclined plane rolling tests, and simulation analysis, the collision recovery coefficient, static friction coefficient, and rolling friction coefficient between the sea buckthorn seed and Q235 steel plate were determined to be 0.550, 0.449, and 0.039, respectively. Through the steepest climb test and Box-Behnken test, the contact parameter combination between sea buckthorn seed particles was optimized, and the collision recovery coefficient, static friction coefficient and rolling friction coefficient between sea buckthorn seed particles were determined by simulation test to be 0.150, 0.344, and 0.013, respectively. The Plackett-Burman test was designed to screen out three parameters related to fruit residue that had the most significant influence on the accumulation angle of the mixed materials of sea buckthorn seeds and fruit residue: Shear modulus of fruit slag, static friction coefficient of fruit slag and rolling friction coefficient of fruit slag were determined by the steepest climb test. The second-order regression equation was

收稿日期:2024-09-04

修回日期:2024-11-08

基金项目:国家自然科学基金(52065006);甘肃省科技计划资助项目(22YF7NA114)

作者简介:乔伟豪(2001-),男,河南襄城人,硕士研究生,研究方向为特色林果加工设备。E-mail:2326779380@qq.com

通信作者:胡靖明(1975-),男,甘肃成县人,副教授,主要从事旱区农业工程技术与装备和特色林果加工设备研究。E-mail:hujm@gsau.edu.cn

established by the Central Composite test, and the optimal parameter combination of the three significant parameters was obtained by optimizing and solving the regression equation; the shear modulus of the slag was 1.57×10^6 , the static friction coefficient between the slag and the slag was 0.303, and the rolling friction coefficient between the slag and the slag was 0.145. The relative error between the simulated stacking angle and the actual stacking angle was 2.78% through EDEM simulation. This study provides theoretical basis and model for the separation technology of sea buckthorn seeds and pomace.

Keywords: sea buckthorn seed; pomace; stacking angle; simulation test; EDEM

沙棘为胡颓子科沙棘属植物,别名酸刺、醋柳、沙枣,我国拥有世界上最丰富的天然沙棘资源,广泛分布于内蒙古、山西、甘肃等地^[1]。沙棘果渣中含有丰富的纤维素、维生素 C 和维生素 E 等,具有增强机体免疫力、抗氧化、促进伤口愈合及预防便秘等功效,在食品、医药、畜牧产业中有着重要作用^[2];沙棘籽油中含黄酮、有机酸、生物碱等多种活性成分,具有抗感染、促进伤口愈合、滋养皮肤等作用^[3]。

沙棘浆果打浆分离原汁后,果渣和沙棘籽混合物仍具有较高的食用和药用价值,需要将果渣、沙棘籽分离后分别加工利用。随着沙棘产业市场规模不断扩大,机械化分离设备需求与日俱增,准确测定沙棘籽和果渣离散元参数可为设备的研发与优化提供参考。生产中的果渣通常采用风选和静置水选方法分离,工序繁杂且分离效率低^[4]。近年来离散元方法发展迅速,并在农业和医药工程等领域被广泛应用,在散体物料的仿真和参数优化当中发挥了重要作用^[5-7]。目前已有诸多学者使用离散元方法对散体物料参数进行了大量研究。侯占峰等^[8]通过物理试验和仿真试验相结合的方法对冰草种子的离散元参数进行了标定;石林榕等^[9]和田剑锋等^[10]通过仿真逼近预测法对胡麻和党参种子的种子-材料滚动摩擦系数和党参颗粒间滚动摩擦系数进行了标定;王清泽等^[11]、李永祥等^[12]和邹洋等^[13]基于颗粒缩放理论,通过堆积角物理试验和响应面优化试验对沙棘茶毫、小麦粉以及生石灰粉的接触参数进行了标定;王黎明等^[14]和韩伟等^[15]基于粘接接触模型标定了猪粪和微米级颗粒的接触参数;王斌斌等^[16]基于 EDEM 离散元仿真软件,选择非线性弹塑性模型 (EEPA) 作为接触模型并通过响应面试验标定了草炭颗粒的接触参数;Janda 等^[17]验证了 EEPA 模型可适用于模拟具有黏性和塑性的土壤颗粒;Sakai 等^[18]提出了大规模离散元模拟的粗颗粒模型,并在流化床中通过数值模拟证明了该模型能精确模拟原颗粒物理特性。纵观已有研究,虽然利用离散元方法标定相关物料参数的

研究已不鲜见,但对大果沙棘籽及果渣物理特性及接触特性标定的研究尚未见报道。

本研究以大果沙棘籽和果渣为研究对象,通过物理试验结合 EDEM 仿真标定了大果沙棘籽-Q235 钢板的接触参数,并通过显著因素筛选试验、最陡爬坡试验和响应面试验标定了大果沙棘籽颗粒间接触参数、果渣-大果沙棘籽接触参数和果渣颗粒之间的接触参数。该研究结果可为后续大果沙棘籽的榨油萃取以及籽渣混合物分离研究提供参考。

1 沙棘籽基本参数测定及离散元仿真模型建立

1.1 试验设备

试验设备主要包括 CP80-3-M/C-540 高速摄像机 (Point Grey 公司,德国)、SHIMADZU AUY220 天平 (岛津公司,日本)、HKSF-2 快速水分仪、(江苏无锡华科仪器仪表有限公司,中国)、TAXT Plus 超技质构仪 (Stable Micro System 公司,英国)、Q235 钢板和圆筒、数显游标卡尺、镊子等。

1.2 沙棘籽基本物理参数

1.2.1 三轴尺寸及百粒重 试验材料为 2023 年 11 月 10 日取自甘肃陇原红沙棘生物科技有限公司打浆生产后经摊晾、风干的‘深秋红’沙棘籽和果渣混合物 (图 1,见 290 页),经人工分离并随机挑选沙棘籽 100 粒,使用数显游标卡尺 (精度 0.02 mm,量程 0 ~ 150 mm) 测得 100 粒沙棘籽长度 (L)、宽度 (W)、厚度 (T) 的平均值分别为 5.68 mm、2.07 mm、1.51 mm,沙棘籽的三轴方向如图 2 所示;另随机取 500 粒沙棘籽,使用天平和烧杯测得百粒重为 1.02 g。

使用 Origin 2021 软件对沙棘籽的三维体积进行拟合,数据显示其体积呈正态分布,且沙棘籽的体积平均值为 17.75 mm^3 ,标准差和方差分别为 2.48 和 6.18。

1.2.2 含水率和密度 使用快速水分仪测得沙棘籽含水率为 1.55%;由于沙棘籽密度小于水,采用排酒精法^[19]测得沙棘籽的密度为 $1.22 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

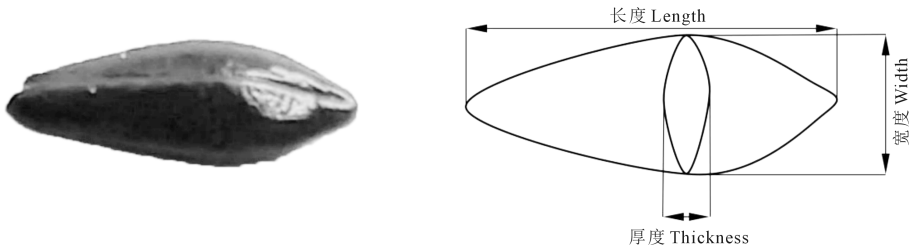


图 2 沙棘籽实物图及三轴方向
Fig.2 Sea buckthorn seed and direction of three axis

1.2.3 泊松比 由于沙棘籽籽粒较小,采用传统方法测量泊松比难度较大,本文通过测量沙棘籽加载前后的宽度和厚度方向的变化量来计算泊松比^[20]。使用质构仪对沙棘籽进行压缩试验计算其泊松比,计算公式如下:

$$\mu = \left| \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \right| = \frac{\Delta T/T}{\Delta W/W} \tag{1}$$

式中, μ 为泊松比; ε_x 为沙棘籽厚度方向的应变; ε_y 为沙棘籽宽度方向的应变; ΔW 为沙棘籽宽度方向的形变量 (mm); W 为沙棘籽宽度方向的原始长度 (mm); ΔT 为沙棘籽厚度方向的形变量 (mm); T 为沙棘籽厚度方向的原始长度 (mm)。使用数显游标卡尺测量压缩前后沙棘籽的宽度方向尺寸和厚度方向尺寸,计算宽度方向和厚度方向的形变量,代入公式计算沙棘籽的泊松比,重复试验 10 次取平均值,得沙棘籽的泊松比为 0.27。

1.2.4 弹性模量 随机取 10 粒沙棘籽使用质构仪对沙棘籽进行压缩试验,应力-应变曲线的弹性变形阶段曲线斜率即为弹性模量^[21-22],弹性模量通过公式(2)计算。重复 10 次试验得到弹性模量的平均值为 80.77 MPa。

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{2}$$

式中, E 为沙棘籽弹性模量 (MPa); σ 为弹性变形阶段最大压应力 (MPa); ε 为线应变。

弹性模量与剪切模量关系式见式(3),将泊松比和弹性模量数值代入式计算得到沙棘籽的剪切模量为 31.8 MPa。

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \tag{3}$$

式中, G 为沙棘籽的剪切模量 (MPa); E 为沙棘籽的弹性模量 (MPa); μ 为泊松比。

2 沙棘籽与钢板接触参数测定

2.1 沙棘籽离散元模型

通过上文已测得沙棘籽的三轴尺寸平均值进行离散元建模,离散元模型如图 3 所示。

2.2 碰撞恢复系数

沙棘籽的碰撞恢复系数采用自由跌落法测定。试验材料采用 Q235 钢板,试验基准高度设置为 25 cm。试验时将沙棘籽从 25 cm 高度处自由下落,使用高速摄像机记录沙棘籽在钢板上弹起的高度,通过坐标纸读出沙棘籽反弹的最大高度,试验过程如图 4 所示。

碰撞恢复系数 f 由公式(4)计算。

$$f = \frac{|v_2 - v_4|}{|v_1 - v_3|} = \frac{|v_2|}{|v_1|} = \sqrt{\frac{h'}{h}} \tag{4}$$

式中, v_1 为沙棘籽前速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); v_2 为沙棘籽碰撞后速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); v_3 为钢板碰撞前速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); v_4 为钢板碰撞后速度 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); h 为沙棘籽碰撞前的高度 (mm); h' 为沙棘籽碰撞后弹起的最大高度 (mm)。

重复试验 10 次,计算得到沙棘籽的平均弹起高度 $h' = 69.88 \text{ mm}$,代入公式(4)得到沙棘籽与钢板的碰撞恢复系数为 0.535。

碰撞恢复系数仿真试验时,沙棘籽与 Q235 钢板静摩擦系数、滚动摩擦系数及沙棘籽颗粒间碰撞恢复系数、静摩擦系数和滚动摩擦系数对沙棘籽与钢板碰撞没有影响,仿真时均设置为 0。

经过初步物理试验确定沙棘籽与 Q235 钢板的碰撞恢复系数范围为 0.4~0.7,设置步长为 0.05,进行 7 组仿真试验,每组试验重复 5 次取平均值,仿真试验过程如图 4 所示,试验方案设计与结果如表 1 所示。

将仿真试验所得弹跳高度与相对应恢复系数进行拟合,如式(5)所示,将物理试验弹跳高度 69.88 mm 代入拟合方程计算得出恢复系数 $x = 0.55$,代入 EDEM 软件进行验证,重复试验 5 次,得到弹跳高度为 67.28 mm,与物理试验的误差为 3.72%,误差处于合理范围,确定沙棘籽-Q235 钢板碰撞恢复系数为 0.55。

$$y = 339.709x^2 - 183.947x + 67.123, \\ R^2 = 0.9959, F = 492.984 \tag{5}$$

表 1 沙棘籽-Q235 钢板碰撞恢复系数仿真试验设计与结果

Table 1 Design and results of simulation test for impact recovery coefficient of sea buckthorn seed-Q235 steel plate		
组别 Group	x	y/mm
1	0.40	47.74
2	0.45	53.40
3	0.50	59.00
4	0.55	70.99
5	0.60	78.44
6	0.65	89.43
7	0.70	105.78

注: x 为沙棘籽-Q235 钢板间的碰撞恢复系数, y 为沙棘籽自由下落与钢板碰撞后弹起的最大高度。

Note: x is the collision recovery coefficient between sea buckthorn seed-Q235 steel plate, and y is the maximum height after the collision between free fall and steel plate.



图 1 沙棘籽-果渣混合物
Fig.1 Sea buckthorn seed-pomace mixture

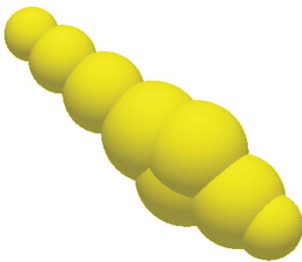
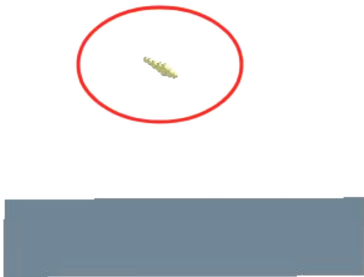


图 3 沙棘籽离散元模型
Fig.3 Sea buckthorn seed discrete element model

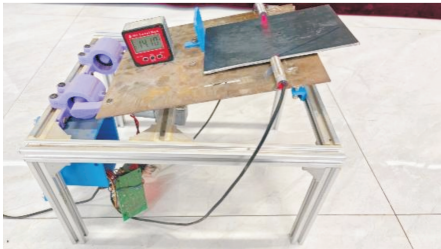


(a) 物理试验 Physical test

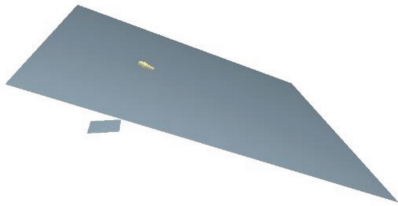


(b) 仿真试验 Simulation test

图 4 沙棘籽碰撞试验与仿真
Fig.4 Impact test and simulation of sea buckthorn seeds



(a) 静摩擦试验台 Static frition test bench



(b) 静摩擦仿真试验 Static friction simulation test

图 5 沙棘籽-Q235 钢板静摩擦系数试验与仿真
Fig.5 Static friction coefficient test and simulation of sea buckthorn seed-Q235 steel plate

2.3 沙棘籽-Q235 钢板静摩擦系数

本文采用斜面滑动法测量沙棘籽与 Q235 钢板之间的静摩擦系数,实验仪器为实验室自制静摩擦测量仪。试验时先将钢板水平置于测量板上,使钢板底部与试验台挡板接触,角度测量仪读数归零,将沙棘籽置于钢板上,开动开关使测量板匀速缓慢升高至沙棘籽有下滑趋势时停止,记录此时角度测量仪的数值,其正切值即为沙棘籽与钢板之间的静摩擦系数,静摩擦系数计算公式如下:

$$mg\sin\theta = fmg\cos\theta \tag{6}$$

试验随机选取 10 粒沙棘籽进行 10 组试验,每组试验对同一颗沙棘籽进行 5 次重复试验,取平均值得到沙棘籽与钢板静摩擦系数为 0.458。

物理试验测得沙棘籽与 Q235 钢板的静摩擦系数取值范围为 0.25~0.65,以 0.05 为步长设置 9 组仿真试验,每组试验重复 5 次取平均值,物理试验与仿真试验如图 5 所示。

为避免干扰,除沙棘籽与钢板的碰撞恢复系数设置为上述标定值外,其余参数均设置为 0,试验设计与结果如表 2 所示。

将仿真试验所得钢板倾角与静摩擦系数进行拟合,如式(7)所示,该方程拟合度高。实测钢板倾角平均值为 24.62°,代入拟合方程得静摩擦系数为 0.449,经 EDEM 仿真试验验证,测得钢板的倾斜角度为 25.071°,与实际值相对误差为 1.845%,表明仿真试验结果与实际试验结果基本吻合,确定沙棘籽-Q235 钢板静摩擦系数为 0.449。

$$y = -31.62692x^2 + 77.51742x - 3.82184,$$
$$R^2 = 0.9961, F = 771.476 \quad (7)$$

2.4 沙棘籽-Q235 钢板之间滚动摩擦系数测定

物体与接触面间滚动摩擦系数测量一般根据能量守恒定律通过斜面滚动法测量^[23]。本文通过仿真逼近法标定沙棘籽与钢板的滚动摩擦系数。经预试验初步确定两者之间滚动摩擦系数的范围为 0.01~0.1,以 0.01 为步长设置 10 组仿真试验,每组试验重复 10 次,EDEM 中建立仿真模型如图 6 所示。仿真试验时沙棘籽从倾角 $\theta=30^\circ$,距离底部 $S=150\text{ mm}$ 的位置上以 $0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的初速度沿斜面滚下,最终在水平钢板上停止,测量沙棘籽在水平面上滚动距离,试验设计与结果如表 3 所示。

将仿真试验所得滚动距离与滚动摩擦系数进行拟合,如式(8)所示。预实验测得沙棘籽在 Q235 钢板上的平均滚动距离为 140.06 mm。代入拟合方程得到滚动摩擦系数为 0.039。代入 EDEM 中进行

10 次仿真试验验证,测得水平滚动距离为 144.37 mm,与实际值相对误差为 3.07%,确定沙棘籽与 Q235 钢板的滚动摩擦系数为 0.039。

$$y = 3065.681x^2 - 1629.613x + 199.002,$$
$$R^2 = 0.984, F = 216.265 \quad (8)$$

3 沙棘籽颗粒间接触参数标定

由于沙棘籽粒较小,其颗粒间的接触参数难以采用物理试验测定。本文通过堆积角试验并结合仿真逼近标定沙棘籽颗粒间的碰撞恢复系数、静摩擦系数及滚动摩擦系数^[24]。

3.1 堆积角测量

试验采用圆筒提升法测量堆积角。试验时,将圆筒置于钢板中央并在圆筒中装满沙棘籽,缓慢匀速提升圆筒,沙棘籽在重力作用下落到底板上,形成堆积现象。等待颗粒稳定后进行拍照记录,使用 Origin2021 软件对试验图片进行二值化处理,处理后导入 AutoCAD2020 中测量堆积角度如图 7(见 296 页)

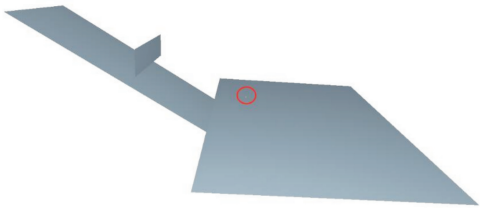


图 6 沙棘籽-Q235 钢板滚动摩擦系数仿真试验

Fig.6 Simulation test of rolling friction coefficient of sea buckthorn seed-Q235 steel plate

表 2 沙棘籽-Q235 钢板静摩擦系数仿真试验设计与结果
Table 2 Design and results of simulation test of static friction coefficient of sea buckthorn seed-Q235 steel plate

组别 Group	x_2	$\theta/(^\circ)$
1	0.25	13.82
2	0.30	16.79
3	0.35	18.55
4	0.40	21.95
5	0.45	25.15
6	0.50	27.17
7	0.55	29.51
8	0.60	31.07
9	0.65	33.12

注: x_2 为沙棘籽与钢板的静摩擦系数; θ 为沙棘籽开始滑动时的钢板倾角。

Note: x_2 is the coefficient of static friction between sea buckthorn seeds and steel plate; and θ is the inclination angle of the steel plate when the sea buckthorn seeds start to slide.

表 3 沙棘籽-Q235 钢板滚动摩擦系数仿真试验设计与结果
Table 3 Design and results of simulation test of rolling friction coefficient of sea buckthorn seed-Q235 steel plate

组别 Group	x_3	S/mm
1	0.01	186.36
2	0.02	162.56
3	0.03	148.68
4	0.04	141.77
5	0.05	131.09
6	0.06	117.84
7	0.07	91.83
8	0.08	83.88
9	0.09	79.95
10	0.10	67.80

注: x_3 为沙棘籽与 Q235 钢板间滚动摩擦系数; S 为沙棘籽在水平钢板上的滚动距离。

Note: x_3 is the rolling friction coefficient between sea buckthorn seeds and Q235 steel plate; and S refers to the rolling distance of sea buckthorn seeds on the horizontal steel plate.

所示,对 10 组试验图片测量角度取平均值,得到沙棘籽的堆积角度为 28.02°。

3.2 仿真试验设计与分析

3.2.1 最陡爬坡试验 最陡爬坡试验可以使显著因素快速逼近中心点,缩小因素的最优响应区间,以了解显著因素变化对试验结果的影响^[25]。最陡爬坡试验前进行预试验,确定沙棘籽粒碰撞恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数的取值范围分别为 0.05~0.3、0.15~0.65、0.005~0.03,据此设计最陡爬坡试验及结果如表 4 所示。

3.2.2 Box-Behnken 试验及回归模型 由表 4 可知,3 号试验堆积角的相对误差最小,2~4 号试验的相对误差由大变小再变大,根据最陡爬坡试验结果及响应面设计原理,选 3 号试验为中心点,2 号试验为低水平、4 号试验为高水平进行响应面试验设计,试验设置 3 个中心点对误差进行评估。Box-Behnken 试验结果如表 5 所示。

表 4 最陡爬坡试验方案及结果					
Table 4 Test scheme and results of steepest climb					
序号 Code	试验因素 Experimental factor			试验结果 Result	
	A	B	C	$\theta'/(^{\circ})$	$\omega/\%$
1	0.05	0.15	0.005	23.12	17.49
2	0.10	0.25	0.010	24.52	12.50
3	0.15	0.35	0.015	28.94	3.28
4	0.20	0.45	0.020	35.26	25.83
5	0.25	0.55	0.025	36.62	30.69
6	0.30	0.65	0.030	37.35	33.29

注:A 为沙棘籽颗粒间碰撞恢复系数;B 为沙棘籽颗粒间静摩擦系数;C 为沙棘籽颗粒间滚动摩擦系数; θ' 为仿真试验堆积角度; ω 为堆积角相对误差。

Note: A refers to the collision recovery coefficient between seed particles of sea buckthorn; B is the static friction coefficient between seed particles of sea buckthorn; C is the rolling friction coefficient between seed particles of sea buckthorn; θ' is the simulation stacking angle; ω is the relative error of pile angle.

表 5 Box-Behnken 试验设计及结果					
Table 5 Design and results of Box-Behnken experiment					
序号 Code	试验因素 Experimental factor			评价指标 Evaluation index	
	A	B	C	$\theta'/(^{\circ})$	$\omega/\%$
1	0.10	0.35	0.010	28.415	0.01
2	0.10	0.25	0.015	27.310	0.03
3	0.15	0.35	0.015	28.610	0.02
4	0.10	0.45	0.015	31.710	0.13
5	0.15	0.35	0.015	28.120	0.00
6	0.15	0.45	0.020	31.845	0.14
7	0.15	0.45	0.010	31.030	0.11
8	0.20	0.35	0.010	28.735	0.03
9	0.20	0.25	0.015	27.080	0.03
10	0.15	0.35	0.015	28.340	0.01
11	0.20	0.45	0.015	31.835	0.14
12	0.15	0.25	0.010	25.920	0.07
13	0.10	0.35	0.020	30.530	0.09
14	0.20	0.35	0.020	29.365	0.05
15	0.15	0.25	0.020	26.650	0.05

利用 Design Expert 13 软件对试验数据进行多元回归拟合,以 A、B、C 为自变量,堆积角为响应值,得到二次回归方程如式(9)所示。

$$R = 28.36 - 0.1188A + 2.43B + 0.5362C + 0.0887AB - 0.3713AC + 0.0213BC + 0.7635A^2 + 0.3635B^2 + 0.1410C^2 \quad (9)$$

回归模型的方差分析见表 6。由表可知该模型的 $P=0.0002$,说明该模型显著,失拟项 $P=0.3184$,说明无其他显著因素影响试验指标, $R^2=0.99$,接近于 1,说明回归方程的实际值和预测值拟合程度较高,变异系数为 1.13%,说明试验可靠性高,精确度为 22.6029,说明回归模型精度高,此模型可以预测沙棘籽颗粒模型和堆积角的关系。

3.2.3 最优参数组合的确定与验证 利用 Design Expert 13 软件的优化模块,以实际试验堆积角度 28.02°为目标值进行求解,得到最优参数组合为沙棘籽颗粒间碰撞恢复系数 0.15,静摩擦系数 0.344,滚动摩擦系数 0.013。最优参数组合经 EDEM 仿真试验验证,测得仿真堆积角度为 28.207°,与实际值相对误差为 0.67%,表明标定参数可以用于离散元法研究沙棘籽的物料特性,堆积角物理试验和仿真试验对比如图 8(见 296 页)所示。

表 6 Box-Behnken 回归模型方差分析					
Table 6 Variance analysis of Box-Behnken regression model					
方差来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方 Mean square	F	P
模型	52.8500	9	5.8700	54.9600	0.0002 **
A	0.1128	1	0.1128	1.0600	0.3513
B	47.3400	1	47.3400	443.0400	<0.0001 **
C	2.3000	1	2.3000	21.5300	0.0056 **
AB	0.0315	1	0.0315	0.2949	0.6104
AC	0.5513	1	0.5513	5.1600	0.0723 *
BC	0.0018	1	0.0018	0.0169	0.9016
A ²	2.1500	1	2.1500	20.1500	0.0065 **
B ²	0.4880	1	0.4880	4.5700	0.0856 *
C ²	0.0735	1	0.0735	0.6874	0.4448
残差 Residual	0.5342	5	0.1068		
失拟项 Lack of fit	0.4138	3	0.1379	2.2900	0.3184
纯误差 Pure error	0.3120	2	0.0602		
总和 Total	53.3800	14			

注: ** 表示极显著 ($P<0.05$); * 表示显著 ($P<0.1$)。下同。
Note: ** indicates extremely significant ($P<0.05$); * indicates significant ($P<0.1$). The same below.

4 沙棘果渣离散元参数标定

本文采取仿真逼近预测法标定果渣的离散元参数,以果渣和沙棘籽混合物的实际堆积角度为响应值开展试验。试验前使用镊子分离足够量果渣和沙棘籽混合物,由于果渣小颗粒和大颗粒尺寸差距较大,因此按尺寸对果渣进行分级。使用 10 目和 18 目振动分级筛对果渣进行筛选分级,被 18 目筛下的果渣标记为小;之后将剩余果渣用 10 目标准筛筛选,被筛下果渣标记为中;未被 10 目标准筛筛下的剩余果渣标记为大。使用游标卡尺测得小果渣的长、宽、厚尺寸平均值分别为 0.84、0.62、0.44 mm;中果渣的长、宽、厚尺寸平均值分别为 2.30、1.43、1.03 mm;大果渣的长、宽、厚尺寸平均值分别为 8.42、7.09、2.78 mm。使用天平分别测量三组果渣质量,测得三种果渣的质量占比为小果渣 22.5%,中果渣 27.5%,大果渣 50%。沙棘籽与果渣混合物中三种果渣混合质量和沙棘籽质量占比为:沙棘籽 45.28%,混合果渣 54.72%。EDEM 仿真设置沙棘籽的生成总质量为 4.85 g,生成速度为 $0.97\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$;三种果渣的生成总质量为 5.875 g,生成速度为 $1.175\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$;生成时间均为 5 s。

参考果渣外形及尺寸在 EDEM 软件中建立离散元模型。果渣实物和离散元模型分别如图 9、10 所示。

试验测得果渣的密度为 $210\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,由于果渣尺寸形态差异较大,通过物理试验测得三种果渣与钢板的接触参数差异较大,且泊松比和弹性模量测量存在较大困难。本文参考其他物料预估参数范围^[26-27],并结合预实验预估果渣物性参数范围如表 7 所示。

4.1 显著因素筛选试验

Plackett-Burman 试验(以下简称 PB 试验)为显著因子筛选试验。通过各因子二水平交互对堆积角的影响进行分析,以确定各影响因子的显著性^[28-29]。试验的高低因素水平如表 7 所示,试验设置 3 个中心点,PB 试验设计及结果见表 8,通过对数据进行多元回归拟合,得到拟合方程为式。

$$\theta' = 38.01 + 0.2754X_1 + 1.82X_2 + 0.4713X_3 + 4.41X_4 + 5.72X_5 - 1.68X_6 + 0.9537X_7 + 0.9321X_8 - 0.2829X_9 - 0.1379X_{10} - 1.30X_{11}$$

(10)

使用 Design Expert 13 软件对 PB 试验结果进行显著性分析得到结果如表 9 所示。

由表 9 可知果渣-果渣滚动摩擦系数(X_5)、果

渣-果渣静摩擦系数(X_4)及果渣剪切模量(X_2)为对堆积角影响率最高的 3 个因素,且 3 个因素对堆积角度影响均为正效应,随着 X_5 、 X_4 、 X_2 的增大,仿真堆积角度逐渐增大,其余参数对堆积角影响程度极小。因此后续试验选择上述三个参数进行爬坡试验,其余参数均取中间水平。

4.2 最陡爬坡试验

根据拟合方程计算得到 X_5 、 X_4 、 X_2 的爬坡步长分别为 0.125、0.23、 1.43×10^6 ;根据步长设计最陡爬坡试验及结果见表 10。

由表 10 可知,前三组仿真试验堆积角度和相对误差随参数值增加而增加,实际堆积角度为 34.18° ,位于前两组仿真堆积角度之间,为提高仿真精确度,以表 10 前两组参数值范围进行第 2 次爬坡试验,第 2 次爬坡试验设计及结果见表 11。

由表 11 可知,仿真试验堆积角度逐渐增大,与实际值的误差先减小再增大,2 号试验的相对误差最小,即最优值区间位于第 2 组试验水平附近。

表 7 离散元仿真参数

Table 7 Discrete element simulation parameter

编号 Code	仿真参数 Simulation parameter	数值范围 Value range
X_1	果渣泊松比	0.1~0.4
	Pomace poisson's ratio	
X_2	果渣剪切模量/Pa	$1.0\times10^6\sim1.0\times10^7$
	Pomace modulus of elasticity	
X_3	果渣-果渣碰撞恢复系数	0.1~0.4
	Pomace-pomace collision recovery coefficient	
X_4	果渣-果渣静摩擦系数	0.2~0.8
	Pomace-pomace coefficient of static friction	
X_5	果渣-果渣滚动摩擦系数	0.05~0.30
	Pomace-pomace coefficient of rolling friction	
X_6	果渣-钢板碰撞恢复系数	0.1~0.5
	Pomace-steel plate collision recovery coefficient	
X_7	果渣-钢板静摩擦系数	0.4~1.0
	Pomace-steel plate coefficient of static friction	
X_8	果渣-钢板滚动摩擦系数	0.05~0.30
	Pomace-steel plate coefficient of rolling friction	
X_9	果渣-籽碰撞恢复系数	0.1~0.4
	Pomace-seed collision recovery coefficient	
X_{10}	果渣-籽静摩擦系数	0.1~0.6
	Pomace-seed coefficient of static friction	
X_{11}	果渣-籽滚动摩擦系数	0.05~0.20
	Pomace-seed coefficient of rolling friction	

表 8 Plackett–Burman 试验设计及结果
Table 8 Plackett–Burman test design and results

序号 Serial number	试验因素 Experimental factor											堆积角 $\theta'/(^{\circ})$ Accumulation angle
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	27.46
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38.59
3	1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	26.98
4	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	40.34
5	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	31.78
6	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	37.55
7	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	36.29
8	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	1	37.96
9	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	1	1	1	-1	35.62
10	-1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	1	31.37
11	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	48.27
12	-1	1	1	1	1	-1	1	1	1	-1	-1	54.57
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40.48
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38.68
15	1	-1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	44.16

表 9 Plackett–Burman 试验显著性分析
Table 9 Significance analysis of Plackett–Burman test

参数 Parameter	效应 Effect	均方和 Sum of squares	影响率 % Contribution	显著性排序 Significance ranking
X_1	0.5508	0.9103	0.1207	10
X_2	3.6458	39.8763	5.2860	3
X_3	-0.9425	2.6649	0.3532	8
X_4	8.8141	233.0690	30.8957	2
X_5	11.4442	392.9070	52.0839	1
X_6	-3.3642	33.9529	4.5008	4
X_7	1.9075	10.9157	1.4469	6
X_8	1.8642	10.4254	1.3819	7
X_9	-0.5658	0.9605	0.1273	9
X_{10}	-0.2758	0.2283	0.0302	11
X_{11}	-2.6058	20.3711	2.7004	5

表 10 第 1 次最陡爬坡试验设计及结果
Table 10 Design and results of the first steepest climb test

序号 Serial number	X_2	X_4	X_5	堆积角 $\theta'/(^{\circ})$ Accumulation angle	相对误差 $\omega/\%$ Relative error
1	1.00×10^6	0.20	0.050	26.085	18.96
2	2.43×10^6	0.43	0.175	42.805	25.23
3	3.86×10^6	0.66	0.300	52.495	53.58
4	5.29×10^6	0.89	0.425	53.195	55.63

表 11 第 2 次最陡爬坡试验设计及结果
Table 11 Design and results of the second steepest climb test

序号 Serial number	X_2	X_4	X_5	堆积角 $\theta'/(^{\circ})$ Accumulation angle	相对误差 $\omega/\%$ Relative error
1	1.00×10^6	0.20	0.05	26.085	18.96
2	1.57×10^6	0.29	0.10	34.695	1.51
3	2.14×10^6	0.38	0.15	36.945	8.09
4	2.71×10^6	0.47	0.20	40.360	18.08

4.3 二次回归正交旋转组合试验

二次回归正交旋转组合试验通过设计合理的有限次数试验,建立一个包括各显著因素的一次项、平方项和任意两个因素之间的一级交互作用项的数学模型,精确研究各因素与响应值之间的关系,快速有效地确定多因素系统的最佳条件^[30]。

为寻找 EDEM 仿真试验的最佳参数组合,以 2 号试验为中心点、1 号试验为低水平、3 号试验为高水平作为二次回归正交旋转组合试验的-1、0、1 水平。试验因素编码表如表 12 所示。以果渣和沙棘籽混合物堆积角为响应值,进行 Central Composite 试验设计,仿真试验设计方案与结果如表 13 所示。

对试验数据进行多元回归拟合,得到多元回归拟合方程为式:

$$\theta' = 32.57 + 0.4260X_2 + 2.44X_4 + 1.49X_5 + 0.2453X_2X_4 - 0.5297X_2X_5 - 0.0034X_4X_5 + 0.3035X_2^2 + 0.0491X_4^2 - 0.0167X_5^2 \quad (11)$$

对表 13 试验数据进行二次回归模型方差分析得结果如表 14 所示。

由表 14 可知,该模型 $P<0.0001$ 说明模型极显著;失拟项 $P=0.1075>0.05$,说明没有其他因素显著影响试验指标; $R^2=0.9666$,接近 1;变异系数为 1.81%,说明本次试验可靠性较高;精确度为 20.0035,因此该模型能够反映真实情况。

利用 Design-Expert 13 软件的寻优功能,得到最优参数组合为果渣剪切模量 (X_2) 1.57×10^6 、果渣-果渣静摩擦系数 (X_4) 0.303、果渣-果渣滚动摩擦系数 (X_5) 0.145。为验证最优参数组合的可靠性,将最优参数组合带入 EDEM 进行仿真验证,仿真试验重复 3 次,得到仿真堆积角为 35.13° ,与实际堆积角度的相对误差为 2.78%,表明仿真试验可以较好地预测堆积角度。仿真试验和物理试验结果如图 11 所示。

5 结 论

本文通过压缩试验等测得沙棘籽基本物性参数(三轴尺寸、百粒重、密度、含水率、弹性模量),通过物理试验与仿真试验相结合,进行自由落体碰撞试验、斜面滑移试验、斜面滚动试验测得大果沙棘籽与 Q235 钢板的碰撞恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数分别为 0.55、0.449、0.039。

借助堆积角试验,设计最陡爬坡试验及 Box- Behnken 试验,通过响应面寻优对回归方程求解得到大果沙棘籽颗粒间的碰撞恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数分别为 0.15、0.344、0.013。

以堆积角为响应值,通过 Plackett-Burman 试验筛选显著因素,最陡爬坡试验缩小显著因素参数范围,Central Composite 试验求解显著因素最佳参数组合,确定显著因素最优参数组合为果渣剪切模量 1.57×10^6 、果渣-果渣静摩擦系数 0.303、果渣-果渣滚动摩擦系数 0.145。

表 12 仿真试验因素编码

Table 12 Simulation test factor coding

编码 Code	因素 Factor		
	X_2	X_4	X_5
-1.682	6.11×10^5	0.1386	0.0159
-1	1.00×10^6	0.2000	0.0500
0	1.57×10^6	0.2900	0.1000
1	2.14×10^6	0.3800	0.1500
1.682	2.53×10^6	0.4413	0.1841

以上参数经 EDEM 仿真验证,得出大果沙棘籽仿真堆积角与实际堆积角相对误差为 0.67%,沙棘籽和果渣混合物仿真堆积角度和实际堆积角度相对误差为 2.78%,表明大果沙棘籽和果渣的离散元参数可以为大果沙棘籽和果渣混合物的机械分离研究提供参考。

表 13 Central Composite 试验设计及结果

Table 13 Experimental design and results of Central Composite

序号 Serial number	试验因素 Experimental factor			堆积角 $\theta'/(^\circ)$ Accumulation angle
	X_2	X_4	X_5	
1	1.00×10^6	0.2000	0.0500	27.70
2	2.14×10^6	0.2000	0.0500	30.22
3	1.00×10^6	0.3800	0.0500	33.20
4	2.14×10^6	0.3800	0.0500	35.33
5	1.00×10^6	0.2000	0.1500	32.50
6	2.14×10^6	0.2000	0.1500	31.54
7	1.00×10^6	0.3800	0.1500	36.62
8	2.14×10^6	0.3800	0.1500	38.00
9	6.11×10^5	0.2900	0.1000	32.89
10	2.53×10^6	0.2900	0.1000	33.33
11	1.57×10^6	0.1386	0.1000	28.79
12	1.57×10^6	0.4413	0.1000	35.99
13	1.57×10^6	0.2900	0.0159	29.79
14	1.57×10^6	0.2900	0.1841	34.62
15	1.57×10^6	0.2900	0.1000	32.97
16	1.57×10^6	0.2900	0.1000	32.59
17	1.57×10^6	0.2900	0.1000	32.34
18	1.57×10^6	0.2900	0.1000	33.17
19	1.57×10^6	0.2900	0.1000	32.12
20	1.57×10^6	0.2900	0.1000	32.35

表 14 回归模型方差分析

Table 14 Analysis of variance of regression model

方差来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方 Mean square	F	P
Model	102.6800	9	11.4100	32.1100	$<0.0001^{**}$
X_2	1.1000	1	1.1000	3.1000	0.1088
X_4	71.9500	1	71.9500	202.5400	$<0.0001^{**}$
X_5	24.7300	1	24.7300	69.6100	$<0.0001^{**}$
X_2X_4	1.9000	1	1.9000	5.3600	0.0431^*
X_2X_5	0.6598	1	0.6598	1.8600	0.2028
X_4X_5	0.4572	1	0.4572	1.2900	0.2831
X_2^2	1.8100	1	1.8100	5.1000	0.0474^*
X_4^2	0.1449	1	0.1449	0.4079	0.5374
X_5^2	0.0171	1	0.0171	0.0481	0.8308
残差 Residual	3.5500	10	0.3553		
失拟项 Lack of fit	2.7300	5	0.5456	3.3100	0.1075
纯误差 Pure error	0.8245	5	0.1649		
总和 Total	106.2300	19			

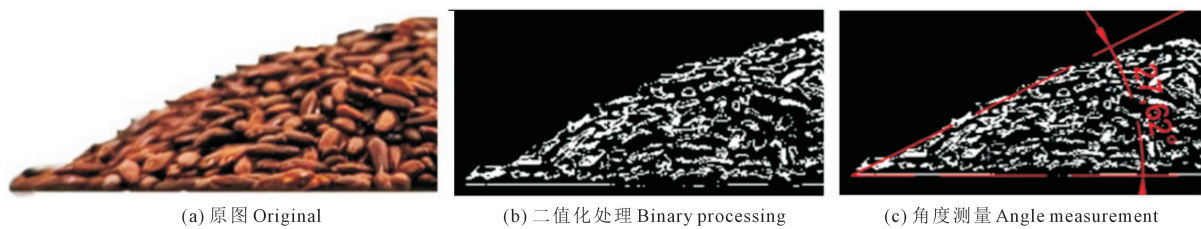


图 7 堆积角测量

Fig.7 Accumulation angle measurement



图 8 沙棘籽堆积角仿真试验与物理试验

Fig.8 Simulation test and physical test of sea buckthorn seed accumulation angle



图 9 沙棘果渣实物

Fig.9 Real fruit residue of sea buckthorn

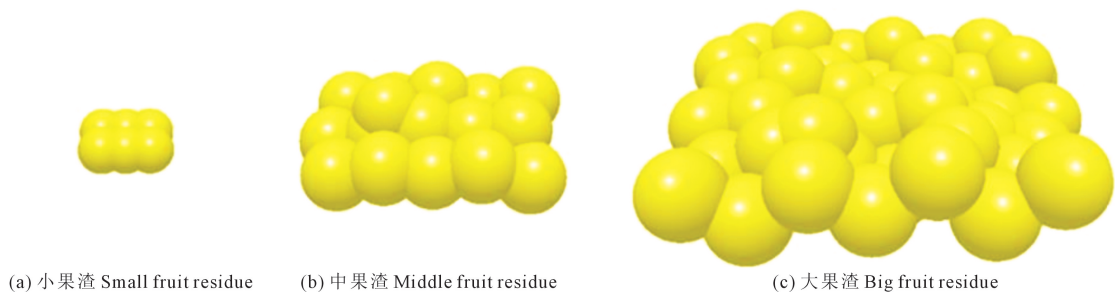


图 10 沙棘果渣离散元模型

Fig.10 Sea buckthorn residue discrete element model



图 11 沙棘籽-果渣混合物堆积角试验与仿真

Fig.11 Test and simulation of stacking angle of sea buckthorn slag and seed mixture

参考文献:

- [1] 张文洁, 杨梅, 张强林, 等. 沙棘物料离散元仿真参数标定与试验验证[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(10): 59-69.
- ZHANG W J, YANG M, ZHANG Q L, et al. Discrete element simulation parameter calibration and experimental verification of sea buckthorn material[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023, 54(10): 59-69.
- [2] 赵学旭, 武蕊, 衣春敏, 等. 沙棘果渣粉的超微冷冻粉碎制备及其理化性质与结构特性[J]. 现代食品科技, 2022, 38(5): 87-95.
- ZHAO X X, WU R, YI C M, et al. Sea buckthorn pomace powder preparation by superfine freeze pulverization and characterization of its physicochemical and structural properties[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(5): 87-95.
- [3] 尤利霞, 侯霄. 沙棘籽油的检测分析[J]. 中国现代中药, 2015, 17(12): 1288-1291.
- YOU L X, HOU X. Detection and analysis of sea buckthorn seed oil[J]. Modern Chinese Medicine, 2015, 17(12): 1288-1291.
- [4] 冯丽丹, 盛文军, 胡靖明, 等. 一种快速分离沙棘果籽的装置及方法:CN201610000811.0[P]. 2016-01-04.
- FENG L D, SHENG W J, HU J M, et al. The invention relates to a device and a method for rapidly separating sea buckthorn fruit seeds: CN201610000811.0[P]. 2016-01-04.
- [5] 曾百功, 李敏, 姚亮华, 等. 基于图像重建的黄连根系-土壤复合体力学特性仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2023, 39(19): 75-84.
- ZENG B G, LI M, YAO L H, et al. Simulation and experiment on the mechanical properties of coptis *chinensis* root-soil composites based on image reconstruction[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(19): 75-84.
- [6] 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 Z W, MA X, CAO X L, 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.
- [7] 李焕正, 唐雪芳, 林雨, 等. 桂枝茯苓胶囊混合过程离散元仿真研究:参数标定[J]. 中国中药杂志, 2023, 48(15): 4007-4014.
- LI H Z, TANG X F, LIN Y, et al. Discrete element simulation study of mixing process of Guizhi Fuling capsules: parameter calibration[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2023, 48(15): 4007-4014.
- [8] 侯占峰, 戴念祖, 陈智, 等. 冰草种子物性参数测定与离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 46-54.
- HOU Z F, DAI N Z, CHEN Z, et al. Measurement and calibration of physical property parameters for agropyron seeds in a discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(24): 46-54.
- [9] 石林榕, 马周泰, 赵武云, 等. 胡麻籽粒离散元仿真参数标定与排种试验验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 25-33.
- SHI L R, MA Z T, ZHAO W Y, et al. Calibration of simulation parameters of flax seeds using discrete element method and verification of seed-metering test[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(20): 25-33.
- [10] 田剑锋, 石林榕, 杨小平, 等. 党参种子的离散元仿真参数标定与试验验证[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(2): 240-249.
- TIAN J F, SHI L R, YANG X P, et al. Calibration and experimental validation of discrete element simulation parameters for *Codonopsis pilosula* seed[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(2): 240-249.
- [11] 王清泽, 杨梅, 向金田, 等. 基于颗粒缩放理论的沙棘茶毫离散元参数标定[J]. 干旱地区农业研究, 2024, 42(2): 284-292.
- WANG Q Z, YANG M, XIANG J T, et al. Discrete element parameters calibration of *Hippophae rhamnoides* based on particle scaling theory[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(2): 284-292.
- [12] 李永祥, 李飞翔, 徐雪萌, 等. 基于颗粒缩放的小麦粉离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2019, 35(16): 320-327.
- LI Y X, LI F X, XU X M, et al. Parameter calibration of wheat flour for discrete element method simulation based on particle scaling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(16): 320-327.
- [13] 邹洋, 汤佟, 高自成, 等. 基于颗粒缩放理论的生石灰粉离散元参数标定[J]. 中国粉体技术, 2023, 29(2): 81-91.
- ZOU Y, TANG T, GAO Z C, et al. Discrete element parameter calibration of quicklime powder based on particle scaling theory[J]. China Powder Science and Technology, 2023, 29(2): 81-91.
- [14] 王黎明, 范盛远, 程红胜, 等. 基于 EDEM 的猪粪接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 95-102.
- WANG L M, FAN S Y, CHENG H S, et al. Calibration of contact parameters for pig manure based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(15): 95-102.
- [15] 韩伟, 王绍宗, 张倩, 等. 基于 JKR 接触模型的微米级颗粒离散元参数标定[J]. 中国粉体技术, 2021, 27(6): 60-69.
- HAN W, WANG S Z, ZHANG Q, et al. Discrete element parameter calibration of micron sized powder particles based on JKR contact model[J]. China Powder Science and Technology, 2021, 27(6): 60-69.
- [16] 王斌斌, 何智, 丁辛亭, 等. 基于单轴密闭压缩试验的草炭离散元参数标定[J]. 农业机械学报, 2024, 55(5): 87-97.
- WANG B B, HE Z, DING X T, et al. Calibration of peat discrete element parameters based on uniaxial closed compression test[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5): 87-97.
- [17] JANDA A, OOI J Y. DEM modeling of cone penetration and unconfined compression in cohesive solids[J]. Powder Technology, 2016, 293: 60-68.
- [18] SAKAI M, TAKAHASHI H, PAIN C C, et al. Study on a large-scale discrete element model for fine particles in a fluidized bed[J]. Advanced Powder Technology, 2012, 23(5): 673-681.
- [19] 肖颖妮, 李高科, 李坤, 等. 甜玉米籽粒体积和粒重的全基因组关联分析[J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(7): 12-25.
- XIAO Y N, LI G K, LI K, et al. Genome-wide association study of kernel volume and weight in sweet corn[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(7): 12-25.
- [20] 王晓梅. 基于多球充填的玉米籽粒群体建模方法研究[D]. 长春:

吉林大学, 2017.

WANG X M. A multi-sphere based modelling method for maize grain assemblies[D]. Changchun: Jilin University, 2017.

[21] 赵环帅, 潘永泰, 乔鑫, 等. 不同加载速率下青砂岩破裂演化规律及能量利用效率分析[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(6): 69-78.

ZHAO H S, PAN Y T, QIAO X, et al. Fracturing evolutionary law and energy utilization efficiency of green sandstones under different loading rates[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(6): 69-78.

[22] GERGES N N, ISSA C A, KHALIL N J, et al. Effects of recycled waste on the modulus of elasticity of structural concrete[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 16189.

[23] 张克平, 侯传凯, 孙步功, 等. 收获期豌豆籽粒离散元仿真参数标定[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6): 286-294.

ZHANG K P, HOU C K, SUN B G, et al. Discrete element simulation parameter calibration of pea grains at harvest time [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(6): 286-294.

[24] 李修银, 廖敏, 杨杰, 等. 羌活籽粒和珍珠岩的离散元参数标定及排种验证[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(8): 40-46.

LI X Y, LIAO M, YANG J, et al. Calibration and seed arrangement verification of discrete element parameters of *Notopterygium* seed and pearlite[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(8): 40-46.

[25] 程功, 徐建中, 郭燕风, 等. 常压室温等离子体诱变选育 L-精氨酸生产菌及发酵条件优化[J]. 微生物学通报, 2016, 43(2): 360-369.

CHENG G, XU J Z, GUO Y F, et al. Breeding and fermentation optimization of L-arginine producing strains[J]. Microbiology, 2016, 43(2): 360-369.

[26] 于淼, 周海宾, 丁京涛, 等. 基于 EDEM 的餐厨垃圾组成颗粒间接触参数标定[J]. 中国农业科技导报, 2023, 25(12): 111-120.

YU M, ZHOU H B, DING J T, et al. Calibration of interparticle contact parameters of kitchen waste composition based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(12): 111-120.

[27] 邬备, 钱怀源, 黄天赐, 等. 基于 EDEM 的生猪粥料离散元模型参数标定[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(3): 726-736.

WU B, QIAN H Y, HUANG T C, et al. Calibration of discrete element model parameters of pig porridge based on EDEM[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2023, 45(3): 726-736.

[28] NAZHA H M, AMMAR B, DARWICH M A, et al. Response surface analysis of Zn-Ni coating parameters for corrosion resistance applications: aplackett-burman and box-behnken design of experiments approach [J]. Journal of Materials Science, 2023, 58(30): 12465-12480.

[29] QIN Q Q, HU S M, DONG J J, et al. Application of plackett-burman experimental design for investigating the effect of eight phytohormones on malt quality parameters[J]. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 2023, 81(3): 416-423.

[30] 张荣. 一株棘孢木霉的筛选, 鉴定及其在沼气发酵生物预处理中的应用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.

ZHANG R. Study on isolation and identification of *Trichoderma asperellum* and its application of bio-pretreatment in biogas fermentation[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.

(上接第 277 页)

[22] 王硕, 贾潇倩, 何璐, 等. 作物对干旱胁迫的响应机制及提高作物抗旱能力的调控措施研究进展[J]. 中国农学通报, 2022, 38(29): 31-44.

WANG S, JIA X Q, HE L, et al. Response mechanism of crops to drought stress and measures for improving drought resistance of crops: research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(29): 31-44.

[23] 刘轩, 栗晓玲, 姜田亮, 等. 基于水分利用效率的生态干旱敏感性评估[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 81-90.

LIU X, SU X L, JIANG T L, et al. Assessment of ecological drought sensitivity based on water use efficiency[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2023, 51(6): 81-90.

[24] 申燕玲, 赵梦凡, 赵彤, 等. 青海省春小麦和油菜播种期气象条件分析及预测模型构建[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(6): 232-241.

SHEN Y L, ZHAO M F, ZHAO T, et al. Study on meteorological conditions and prediction models of sowing date for spring wheat and rape in Qinghai Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(6): 232-241.

[25] 高红霞, 张晓磊, 吴淑梅, 等. 内蒙古中部马铃薯干旱灾害风险分析与区划[J]. 江西农业学报, 2022, 34(2): 20-26.

GAO H X, ZHANG X L, WU S M, et al. Risk analysis and regionalization of potato drought disaster in central inner mongolia[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2022, 34(2): 20-26.

[26] 汤青川, 李军乔. 干旱胁迫对蕨麻克隆构件的可塑性反应[J]. 中国农学通报, 2005, 21(11): 205-207.

TANG Q C, LI J Q. Plasticity of clonal architecture in response to drought menace in the stoloniferous herb *Juema*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(11): 205-207.

[27] 郝帅, 宋艳玲, 孙爽, 等. 气候变化对青藏高原青稞生产影响的研究综述[J]. 中国农业气象, 2023, 44(5): 398-409.

HAO S, SONG Y L, SUN S, et al. Review on the impacts of climate change on highland barley production in Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2023, 44(5): 398-409.