

网络出版时间:2022-04-13 15:22

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2022.10.015

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20220412.0949.001.html

籽瓜籽瓤离散元模型构建及籽瓤分离过程研究

孙浩博,李声元,黄晓鹏,吴劲锋,万芳新

(甘肃农业大学 机电工程学院,甘肃 兰州 730070)

【摘要】【目的】针对 QW-QZ-2 型籽瓜破碎取籽分离机瓜籽含杂率高和筛网各部分分离效率差异大等问题,采用数值模拟方法研究籽瓜籽瓤分离过程,为籽瓜破碎取籽机的结构优化提供依据。【方法】以甘肃省白银市“靖远一号”品种籽瓜为研究对象,采用试验法测量籽瓜各组分的本征参数,利用 Hertz-Mindlin with JKR 模型,以堆积角为响应标定籽瓜各组分接触参数,进行籽瓜籽瓤分离数值模拟试验,并与试验结果进行对比分析。【结果】利用标定的参数建立籽瓜籽瓤分离数值模拟模型,经试验确定籽瓜破碎取籽机分离辊的较优转速为 110~130 r/min,瓜籽含杂率为 3.98%~4.03%,在该转速下筛筒区域的瓜瓤分离净度均大于 20%且分布较为平均,有效避免了各区域分离效率的差异和分离辊部分区域磨损较大的问题。仿真结果与试验结果基本一致,瓜籽含杂率的最大相对误差为 4.71%,瓜瓤分离净度的最大相对误差为 6.33%,均满足作业要求。【结论】所建立的离散元模型模拟精度较高,能够满足籽瓜籽瓤分离的需求。

【关键词】籽瓜;破碎取籽机;籽瓤分离;离散元模型

【中图分类号】S226.9

【文献标志码】A

【文章编号】1671-9387(2022)10-0144-11

Discrete element model construction and seed-flesh separation process of seed gourd

SUN Haobo, LI Shengyuan, HUANG Xiaopeng, WU Jinfeng, WAN Fangxin

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

Abstract: 【Objective】Aiming at the problems of high impurity rate and large differences in separation efficiency of different parts of crushing and seed extraction machine for QW-QZ-2 seed melon, numerical simulation was used to study the seed and flesh separation process to provide basis for structural optimization. 【Method】Based on the Hertz-Mindlin with JKR model, the contact parameters of each component of seed melon were calibrated using stacking angle as the response, and numerical simulations of seed-flesh separation were carried out. The prediction results were also compared and analyzed with experimental results. 【Result】A numerical simulation model for the separation of seeds and flesh was established using the calibrated parameters. The optimal speed of separating rollers of the crushing and extraction machine was 110—130 r/min and the trash rate was 3.98%—4.03%. The net separation of melon flesh in the sieve barrel area was greater than 20% and more evenly distributed at this speed, which effectively avoided the differences in separation efficiency among areas and the large abrasion in some areas of the separating roller. The simulation results were in general agreement with experimental results with the maximum relative error of 4.71% for seed trash content and 6.33% for flesh separation clarity, both meeting the operational

【收稿日期】2021-10-26

【基金项目】国家自然科学基金项目(51765003)

【作者简介】孙浩博(1997—),男,甘肃庆阳人,在读硕士,主要从事特色林果生产机械化研究。E-mail:hbgsau@163.com

【通信作者】万芳新(1976—),女,甘肃华亭人,教授,主要从事特色林果生产机械化和农产品加工技术与装备研究。

E-mail:wanfx@gsau.edu.cn

requirements. 【Conclusion】 The developed discrete element model had high simulation accuracy and was able to meet the needs of seed and flesh separation for seed melon.

Key words: seed melon; crushing and seed extraction machines; separation of seed and flesh; discrete element model

籽瓜属西瓜的一个变种,在我国西北地区种植面积约 53 万 hm^2 ,年产量约 1 200 万 $\text{t}^{[1]}$ 。目前,籽瓜除少量用于鲜食外,取籽加工为主要用途^[2]。但在取籽加工过程中,瓜瓢和瓜皮因得不到充分利用而被浪费,同时还会造成一定的环境污染。为提高籽瓜整瓜利用率,甘肃农业大学籽瓜综合加工利用技术与装备课题组研制了一种籽瓜破碎取籽机(QW-QZ-2),实现了瓜皮、瓜瓢和瓜籽的有效分离,使瓜皮、瓜瓢和瓜籽可以分类加工。但实际生产中发现,该机仍存在籽瓢分离后瓜籽含杂率高、籽瓢分离辊磨损严重和筛网各部分分离效率差异大等问题,因此有必要采用数值模拟技术对籽瓢分离过程进行深入探究,为优化设计分离装置提供依据。其中,籽瓢和籽瓢分离装置离散元模型的精确程度,对数值模拟结果影响显著,因此确定籽瓜籽瓢的本征参数及其与分离装置的接触参数,建立籽瓜和破碎取籽机的离散元模型,对优化设计籽瓜籽瓢分离机、提高籽瓜整瓜利用率、加速籽瓜产业化发展均具有重要意义。参数的确定对数值模拟模型的建立十分重要,但由于研究对象的形状大多不规则,传统测量方法所得参数的精度较低,不能满足实际生产需求。随着数值模拟技术的发展,离散元法在不规则形状材料的参数标定上得到了广泛应用^[3-5],在农业物料方面,目前对谷物^[6-7]、玉米^[8-11]、马铃薯^[12]和大豆^[13-14]等表面相对干燥无黏性力作物的研究较多,而对表面水糖较多、黏性力较大的柔软作物尚鲜有研究。籽瓜含水率较大并具有一定糖分,瓜瓢质地柔软,籽瓢间存在黏性力作用,其物料特性与已有研究物料差异较大,还缺乏类似物料参考。

为建立籽瓜籽瓢和破碎取籽机的精确离散元模型,本研究采用试验法测量籽瓜各组分本征参数,通过理论分析选取适用于含湿柔软颗粒的接触模型,利用仿真试验确定籽瓢和分离装置的各项接触参数,基于此建立籽瓢和分离装置的离散元模型,然后以瓜籽含杂率、筛筒各部分分离净度为指标,利用籽瓜籽瓢分离试验平台进行籽瓢分离试验,确定分离辊的适宜转速范围,并通过与仿真试验结果的比较验证所建立离散元模型的准确性,以期对籽瓜破碎取籽机的结构优化提供理论依据。

1 仿真模型参数标定

1.1 物理参数测量

1.1.1 本征参数 试验选用甘肃省白银市靖远县高湾乡旱沙田种植的“靖远一号”品种籽瓜,测量的本征参数包括几何尺寸、泊松比、弹性模量和密度^[15-18]。

(1)几何尺寸和密度。选取 100 个瓜籽试样,用精度为 0.01 mm 的游标卡尺(605A,哈尔滨量具刃具集团有限公司,中国)测量瓜籽的几何尺寸,结果取平均值。经测定,供试瓜籽的几何尺寸为 18.05 mm $\times$ 11.75 mm $\times$ 3.56 mm。通过测定体积与质量,计算得瓜瓢密度为 1 020 kg/m^3 ,瓜籽密度为 1 037 kg/m^3 。

(2)泊松比(ν)。泊松比是反映弹性范围内物体横向形变的系数,可通过测量载荷方向形变量和垂直载荷方向形变量后计算获得。本试验利用质构仪(Stable Micro System Ltd, 型号:TA.XT Express C,英国)P-36R 压缩探头进行压力形变试验,加载速度为 0.1 mm/s,利用电子游标卡尺测量物料加载前后载荷方向和垂直载荷方向上的尺寸,通过公式(1)计算泊松比,得到瓜瓢的泊松比为 0.43,瓜籽的泊松比为 0.35。

$$\nu = \left| \frac{e'}{e} \right| = \left| \frac{W_1 - W_2}{T_1 - T_2} \right| \quad (1)$$

式中: ν 为泊松比, e' 为垂直载荷方向形变量,mm; e 为载荷方向形变量,mm; W_1 、 T_1 分别为加载前垂直载荷方向和载荷方向的形变量,mm; W_2 、 T_2 分别为加载后垂直载荷方向和载荷方向的形变量,mm。

(3)弹性模量。选取 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 10 mm 的瓜瓢试样与瓜籽试样,利用质构仪进行穿刺试验。试验方法如下:1)将待测物料置于质构仪的加载台,使用 P-2 探头施加载荷,加载速度为 0.1 mm/s,加载距离为 3 mm,穿刺深度为 5 mm,触发力设置为 10 N。2)将质构仪连接在一台计算机上,自动采集数据并绘制所受压力 F 与形变 D 的关系曲线。为保证试验精度,在曲线初始弹性范围内截取 1 点,记录所受的压力与形变数据,共进行 20 组试验,结果取平均值。根据公式(2)、(3)分别计算籽、瓢的剪切

模量、弹性模量。各向同性材料在弹性变形阶段内,剪切模量、弹性模量和泊松比 3 个参数的关系为:

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

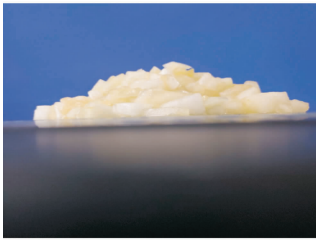
式中: G 为剪切模量, MPa; E 为弹性模量, MPa。

弹性模量由布森聂理论计算,其计算公式为:

$$E = \frac{F}{D} = \frac{(1-\nu^2)}{2r} \quad (3)$$

式中: F 为压力, N; D 为物料形变量, mm; r 为压膜半径, mm。

经测定和计算,得到供试籽瓜瓜瓢的弹性模量为 4.57 MPa, 剪切模量为 1.55 MPa; 瓜籽的弹性模量为 4.66 MPa, 剪切模量为 1.72 MPa。另经查阅资料,确定 304 不锈钢的泊松比为 0.3, 剪切模量为 2.55 MPa, 密度为 2 500 kg/m³。



a. 瓜瓢 Melon flesh



b. 瓜籽 Melon seed



c. 瓜瓢-瓜籽 Melon flesh-seed

图 1 瓜瓢、瓜籽及瓜瓢-瓜籽堆积角的测定

Fig. 1 Determination of flesh, seeds and flesh-seed accumulation angle of melon

1.2 物料间接触参数标定

1.2.1 接触模型选取 籽瓜质地柔软、含水率高、含有糖分,破碎分离过程中含糖瓜汁、瓜籽与瓜瓢之间存在黏性力作用。Johnson 等^[19]指出,JKR 模型适用于柔软或黏附性较强的材料。为此,本研究在建立籽瓜籽瓢离散元模型时选用 Hertz-Mindlin with JKR 模型。该模型是一个内聚力接触模型,其 JKR 法向力基于 Johnson-Kendall-Roberts 理论建立^[20],切向力基于 Mindlin-Deresiewicz 理论建立^[21],该模型可用于计算具有黏附系统的运动受力过程。JKR 法向力的计算公式为:

$$F_{JKR} = -4 \sqrt{\pi \omega E^*} \alpha^{\frac{3}{2}} + \frac{4E^*}{3R^*} \alpha^3 \quad (4)$$

其中:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \quad (5)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (6)$$

式中: F_{JKR} 为 JKR 法向力, N; ω 为接触颗粒的表面能, J; E^* 为接触颗粒间的等效弹性模量, Pa; R^* 为接触颗粒间的等效接触半径, m; α 为法向叠量, m; ν_1 、 ν_2 为接触颗粒的泊松比; E_1 、 E_2 为接触颗粒的弹

1.1.2 堆积角测量 通过堆积角试验标定物料间的接触参数,标定的接触参数包括瓜瓢间、瓜籽间和瓜瓢-瓜籽间接触参数。在进行接触参数标定试验前,需首先采用圆筒提升法测量上述材料的堆积角角度。前期试验测得籽瓜籽瓢的质量比为 4:1,试验时将瓜瓢、瓜籽及籽瓢混合物分别缓慢注入高度 30 mm、内径 30 mm 的 PVC 圆筒,直至圆筒容积的 2/3 处,待物料落入圆筒且稳定后,缓慢提升圆筒,使物料自由下落在堆积板(304 不锈钢)上并形成稳定的积堆(图 1)。待积堆坡面稳定后,采集堆积角图片导入 CAD 软件中测量堆积角。试验重复 10 次,结果取平均值。最终确定瓜瓢间、瓜籽间、瓜瓢-瓜籽间的堆积角分别为 28.07°, 22.15° 和 25.33°。

性模量; R_1 、 R_2 为接触颗粒的半径, m。

当表面能为 0 时,JKR 法向力将转化为 Hertz-Mindlin 法向力 F_H , 有:

$$F_H = F_{JKR} = \frac{4E^*}{3R^*} \alpha^3 \quad (7)$$

式中: F_H 为 Hertz-Mindlin 法向力, N。

当两颗粒间不发生物理接触,且表面间距小于最大作用间距 α_c (法向) 和 δ_c (切向) 时,两颗粒间仍有黏附力作用,则最大作用间距为:

$$\alpha_c = \left[\frac{9\pi\omega R^{*2}}{2E^*} - \left(\frac{3}{4} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \right]^{\frac{3}{2}} \quad (8)$$

$$\delta_c = \frac{\alpha_c^2}{R^*} - \sqrt{\frac{4\pi\omega\alpha_c}{E^*}} \quad (9)$$

式中: α_c 为非接触黏附力作用时的最大法向间距, m; δ_c 为非接触黏附力作用时的最大切向间距, m。

当颗粒未发生物理接触且间距小于黏附力的最大作用间距时,黏附力达到最大值,同时也是最大拔拉力值,即:

$$F_{pullout} = -\frac{3}{2} \pi \omega R^* \quad (10)$$

式中: $F_{pullout}$ 为最大拔拉力, N。

1.2.2 模型建立 根据 1.1 节测量所得的物理参数,在 SolidWorks 2016 软件中建模后导入 EDEM 2018 软件,并用球形颗粒填充,颗粒半径设为 2 mm,半径倍率为 0.8~1.2,得到瓜籽的离散元模型如图 2-a 所示。在研究籽瓤分离过程时,由于瓜瓤混合物中瓜瓤的尺寸大小不一,因此当仿真颗粒数

量很大时,很难在离散元模拟过程中建立与实际瓜瓤尺寸相同的颗粒模型。籽瓜经皮瓤分离装置作用后籽瓜瓜瓤破碎,其各向尺寸均近似为 10 mm,为便于后续瓜瓤与各物料间接触参数的标定,在 SolidWorks 中将瓜瓤建立为 10 mm×10 mm×10 mm 的正方体模型(图 2-b)。

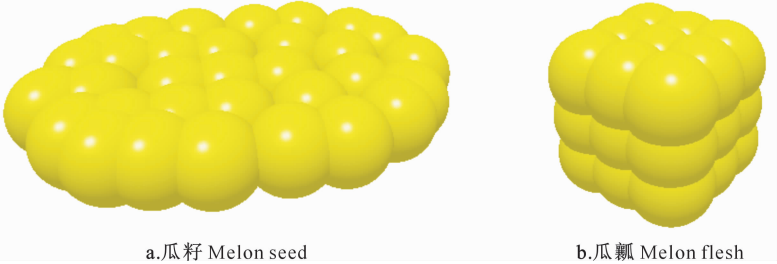


图 2 瓜籽和瓜瓤的离散元仿真模型

Fig. 2 Discrete element simulation model for melon seed and flesh

1.2.3 物料堆积角仿真试验 选用 Hertz-Mindlin with JKR 模型进行物料堆积角仿真试验,颗粒工厂建立在圆筒上方,以随机分布方式在内部生成颗粒,试验方法与实际提桶试验一致,待物料形成稳定堆积角时结束仿真,利用 protractor 工具测定物料的堆

积角^[22-23]。选取恢复系数(A)、静摩擦系数(B)、滚动摩擦系数(C)与 JKR 表面能(D)共 4 个试验因素,以瓜瓤堆积角(Y₁)、瓜籽堆积角(Y₂)和籽瓤堆积角(Y₃)为试验指标,试验因素编码表如表 1 所示,使用 Design-Expert 12.0 进行数据处理与分析。

表 1 物料堆积角仿真试验因素编码表

Table 1 Simulation factors and levels for material stacking angle

编码值 Code value	接触物料 Contact materials	A	B	C	D
		恢复系数 Restitution coefficient	静摩擦系数 Static friction coefficient	滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient	JKR 表面能/(J·m ²) JKR surface energy
2	瓜瓤 Melon flesh	0.50	0.50	0.60	2.60
	瓜籽 Melon seed	0.73	0.85	0.38	0.80
	籽瓤 Melon flesh-seed	0.50	0.50	0.50	4.00
1	瓜瓤 Melon flesh	0.40	0.40	0.50	2.00
	瓜籽 Melon seed	0.50	0.65	0.25	0.60
	籽瓤 Melon flesh-seed	0.40	0.40	0.40	3.00
0	瓜瓤 Melon flesh	0.30	0.30	0.40	1.40
	瓜籽 Melon seed	0.38	0.45	0.18	0.40
	籽瓤 Melon flesh-seed	0.30	0.30	0.30	2.00
-1	瓜瓤 Melon flesh	0.20	0.20	0.30	0.80
	瓜籽 Melon seed	0.20	0.35	0.10	0.20
	籽瓤 Melon flesh-seed	0.20	0.20	0.20	1.00
-2	瓜瓤 Melon flesh	0.10	0.10	0.20	0.2
	瓜籽 Melon seed	0.03	0.05	0.03	0
	籽瓤 Melon flesh-seed	0.10	0.10	0.10	0

1.2.4 仿真试验结果与分析 堆积角仿真试验方案及其结果如表 2 所示,显著性分析见表 3。

表 2 物料堆积角仿真试验方案与结果

Table 2 Simulation program and results of material build-up angle

试验序号 Test No.	A	B	C	D	Y ₁	Y ₂	Y ₃
					瓜瓤堆积角/(°) Melon flesh angle	瓜籽堆积角/(°) Melon seeds angle	籽瓤堆积角/(°) Melon flesh-seeds angle
1	-2	0	0	0	32.54	47.38	30.54
2	-1	-1	1	1	40.76	31.23	31.13
3	-1	-1	-1	-1	21.67	29.92	17.06
4	-1	-1	-1	1	32.46	44.77	22.91
5	-1	1	1	-1	21.48	33.66	31.44
6	-1	1	-1	-1	29.07	46.52	22.41

表 2(续) Continued table 2

试验序号 Test No.	A	B	C	D	Y ₁	Y ₂	Y ₃
					瓜瓢堆积角/(°) Melon flesh angle	瓜籽堆积角/(°) Melon seeds angle	籽瓢堆积角/(°) Melon flesh-seeds angle
7	−1	1	1	1	29.58	48.14	35.91
8	−1	−1	1	−1	28.98	48.61	24.34
9	−1	1	−1	1	26.86	20.76	22.44
10	0	0	0	0	26.50	8.30	21.67
11	0	0	0	0	35.11	45.54	23.07
12	0	0	0	0	28.49	24.83	23.27
13	0	0	0	0	27.62	44.55	24.99
14	0	0	0	0	13.15	49.96	25.61
15	0	0	2	0	37.30	44.39	31.18
16	0	0	−2	0	20.19	53.67	16.92
17	0	−2	0	0	23.79	28.64	14.13
18	0	0	0	0	14.70	48.12	19.65
19	0	0	0	2	26.94	50.17	35.40
20	0	2	0	0	26.09	42.30	27.96
21	0	0	0	−2	27.95	33.09	16.56
22	1	1	1	1	15.26	27.06	22.30
23	1	−1	1	1	28.28	27.45	29.83
24	1	−1	1	−1	21.19	38.44	18.69
25	1	1	−1	1	30.54	32.38	26.51
26	1	−1	−1	−1	23.36	39.59	22.21
27	1	−1	−1	1	20.42	31.09	20.61
28	1	1	1	−1	31.23	46.76	25.52
29	1	1	−1	−1	41.96	47.54	22.04
30	2	0	0	0	31.27	48.25	20.27

表 3 物料堆积角仿真试验结果的显著性分析

Table 3 Significance analysis on simulation results of material piling angle

方差来源 Variance source	瓜瓢堆积角(Y ₁)Melon flesh angle				瓜籽堆积角(Y ₂)Melon seeds angle				籽瓢堆积角(Y ₃)Melon flesh-seeds angle			
	平方和 Sum of squared	自由度 Degree of freedom	F	P	平方和 Sum of squared	自由度 Degree of freedom	F	P	平方和 Sum of squared	自由度 Degree of freedom	F	P
模型 Model	1 275.33	14	10.840	<0.000 1 * *	2 898.43	14	6.42	0.000 5 * *	706.22	14	4.360	0.003 8
A	18.68	1	2.220	0.156 7	5.56	1	0.17	0.683 9	68.53	1	5.920	0.027 9 *
B	353.47	1	42.060	<0.000 1 * *	373.55	1	11.58	0.003 9 * *	213.52	1	18.450	0.000 6 * *
C	160.50	1	19.100	0.000 5 * *	414.30	1	12.84	0.002 7 * *	102.32	1	8.840	0.009 5 * *
D	501.47	1	59.670	<0.000 1 * *	209.48	1	6.49	0.022 3 *	179.88	1	15.540	0.001 3 * *
AB	44.44	1	5.290	0.036 3 *	22.60	1	0.70	0.415 8	67.84	1	5.860	0.028 6 *
AC	13.74	1	1.630	0.220 5	0.62	1	0.02	0.891 4	8.49	1	0.734	0.405 2
AD	3.61	1	0.430	0.521 9	32.82	1	1.02	0.329 2	2.45	1	0.212	0.651 8
BC	25.21	1	3.000	0.103 8	418.46	1	12.97	0.002 6 * *	0.02	1	0.001	0.971 5
BD	21.08	1	2.510	0.134 1	4.26	1	0.13	0.721 4	6.66	1	0.576	0.459 7
CD	44.51	1	5.300	0.036 1 *	199.97	1	6.20	0.025 0 *	17.07	1	1.470	0.243 3
A ²	62.29	1	7.410	0.015 7 *	1.94	1	0.06	0.809 4	12.98	1	1.120	0.306 3
B ²	5.23	1	0.623	0.442 3	160.06	1	4.96	0.041 7 *	3.33	1	0.288	0.599 5
C ²	9.17	1	1.090	0.312 9	713.78	1	22.12	0.000 3 * *	4.45	1	0.385	0.544 5
D ²	0.03	1	0.003	0.956 5	542.56	1	16.81	0.000 9 * *	18.94	1	1.640	0.220 2
残差 Residual	126.07	15			484.00	15			173.58	15		
失拟项 Lack of fit	111.58	10	3.85	0.074 8	398.98	10	2.35	0.179 5	149.74	10	3.14	0.109 2
纯误差 Pure error	14.48	5			85.02	5			23.84	5		
总值 Cor total	1 401.40	29			3 382.43	29			879.80	29		

注：“* * *”表示影响极显著($P<0.01$)；“*”表示影响显著($0.01<P<0.05$)。下同。
Note：“* * *”indicates highly significant effect ($P<0.01$)；“*” indicates significant effect ($0.01<P<0.05$). The same below.

由表 3 可知,在瓜瓢堆积角试验中, B 、 C 、 D 对瓜瓢堆积角影响极显著, A 对瓜瓢堆积角影响不显著;交互项中, AB 、 CD 对瓜瓢堆积角影响显著,其余因素影响均不显著;二次方项中,只有 A^2 对瓜瓢堆积角影响显著,其余各因素影响均不显著。回归模型的 P 值小于 0.05 且失拟项的 P 值大于 0.05,即回归模型显著且失拟项不显著,回归有效。将不显著项剔除后得到瓜瓢堆积角 Y_1 的回归方程为:

$$Y_1=26.74+3.84B-2.59C+4.57D+1.67AB-1.67CD+1.51A^2.$$

(11)

瓜籽堆积角试验中, B 、 C 对瓜籽堆积角影响极显著, D 对瓜籽堆积角影响显著;交互项中, BC 对瓜籽堆积角影响极显著, CD 对瓜籽堆积角影响显著,其余因素影响均不显著;二次方项中, A^2 对瓜籽堆积角影响不显著, B^2 对瓜籽堆积角影响显著, C^2 、 D^2 对瓜籽堆积角影响极显著。回归模型的 P 值小于 0.05 且失拟项的 P 值大于 0.05,即回归模型显著且失拟项不显著,回归有效。将不显著项剔除后得到瓜籽堆积角 Y_2 的回归方程为:

$$Y_2=48.13+3.95B+4.15C+2.95D+5.11BC-$$

$$3.54CD-2.42B^2-5.10C^2-4.45D^2.$$

(12)

在籽瓢堆积角试验中, A 对籽瓢堆积角影响显著, B 、 C 、 D 对籽瓢堆积角影响极显著;交互项中,只有 AB 因素对籽瓢堆积角影响显著,其余因素影响均不显著;二次方项中,各因素对籽瓢堆积角影响均不显著。回归模型的 P 值小于 0.05 且失拟项的 P 值大于 0.05,即回归模型显著且失拟项不显著,回归有效。将不显著项剔除后得到籽瓢堆积角 Y_3 的回归方程为:

$$Y_3=23.05-1.69A+2.98B+2.06C+2.74D-2.06AB.$$

(13)

采用 Deign-expert 12.0 软件的 Optimization-Numerical 模块,分别以实测试验所得瓜瓢堆积角(28.07°)、瓜籽堆积角(22.15°)和籽瓢堆积角(25.33°)为目标值,对堆积角回归模型进行寻优,选择与实测试验得到的堆积角最接近的一组进行仿真试验验证,选取的参数如表 4 所示。优化试验对应的堆积角仿真结果分别为 28.08° 、 22.31° 和 25.26° ,与实测试验结果的相对误差分别为 0.04%,0.72%和 0.28%,说明所标定的各组分的接触参数准确可靠。

表 4 瓜瓢、瓜籽和籽瓢接触参数的确定

Table 4 Determination of contact parameters for flesh, seeds and seed-flesh

接触物料 Contact material	恢复系数 Restitution coefficient	静摩擦系数 Static friction coefficient	滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient	JKR 表面能/(J·m ²) JKR surface energy
瓜瓢 Melon flesh	0.10	0.33	0.11	1.27
瓜籽 Melon seed	0.20	0.25	0.25	0.20
籽瓢 Melon seed-flesh	0.23	0.37	0.27	2.21

1.3 籽瓜各成分与破碎取籽机接触参数的标定

在籽瓢分离过程中,籽瓢分离机分离辊与籽瓜各组分(瓜瓢、瓜籽)的接触最多,因此需测量籽瓜各组分与分离辊(304 不锈钢)之间的接触参数^[24]。

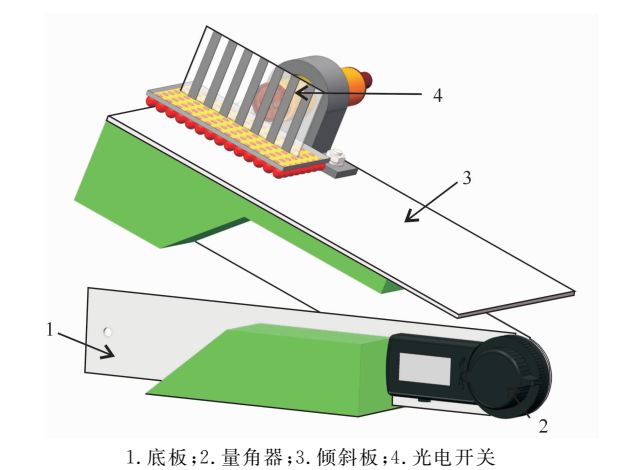
1.3.1 静摩擦系数试验 利用如图 3 所示的自制光电感应式测量平台测定静摩擦系数。该平台主要由底板、量角器、倾斜板和光电开关等组成,试验时将瓜瓢、瓜籽分别置于正对光电开关发射口处斜面位置,此时光电开关断路,指示灯熄灭。缓慢抬升上斜面,直至光电开关指示灯亮起,表明瓜瓢、瓜籽在斜面上发生滑动,记录此时电子量角器数值即为上斜面与水平面的夹角,瓜瓢、瓜籽与 304 不锈钢的静摩擦系数即为该角的正切值。每组试验重复 20 次,结果取平均值。根据公式(14)计算得到瓜瓢与 304 不锈钢的静摩擦系数为 0.35,瓜籽与 304 不锈钢的静摩擦系数为 0.21。

$$\mu=f/mg\cos \theta=\tan \theta.$$

(14)

式中: μ 为静摩擦系数; f 为静摩擦力,N; m 为待测

物料质量,kg; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; θ 为上斜面与水平面的夹角, $(^\circ)$ 。



1. Bottom plate; 2. Protractor; 3. Tilt plate; 4. Photoelectric switch
图 3 自制静摩擦系数光电感应式测量平台
Fig. 3 Self-made photoelectric inductive measuring stage for static friction coefficient

1.3.2 滚动摩擦系数与恢复系数的测定 由于瓜

瓢、瓜籽颗粒属于含湿颗粒,黏性较大,因此与籽瓢分离机材料之间的滚动摩擦系数与恢复系数不易直接测定。本研究采用图 3 的自制光电感应式测量平台进行瓜瓢、瓜籽滑落试验^[25-26]。实测试验分别取 200 g 瓜瓢、瓜籽试样,将试样放在倾斜试验装置的倾斜板顶端,缓慢抬起倾斜板,记录瓜瓢、瓜籽在斜面完全滑落时对应的倾斜角度,此角即为瓜瓢、瓜籽的滑动摩擦角,每组试验重复 10 次,结果取平均值。

仿真试验在 EDEM 软件中进行,根据倾斜试验装置建立其简化几何模型并导入 EDEM 软件,分别进行瓜瓢、瓜籽滑落试验。试验时颗粒工厂分别生成 200 g 瓜瓢、瓜籽模型,待颗粒生成完毕并稳定后,设置斜面绕底部旋转轴以 10 rad/s 的速度转动。当颗粒在斜面上完全滑落形成稳定的倾斜角时,通过 EDEM 后处理 Protractor 工具测量斜面的倾斜角度,该倾斜角度即为滑动摩擦角的仿真值。

在瓜瓢、瓜籽滑落仿真试验中,分别以瓜瓢、瓜

籽和光电感应式测量平台斜面(304 不锈钢)之间的恢复系数(E)和滚动摩擦系数(F)为试验因素,以对应的滑动摩擦角为评价指标,分别进行二因素通用旋转中心组合仿真模拟试验,仿真试验的因素水平编码值如表 5 所示,13 组模拟试验的方案与结果如表 6 所示。

表 5 瓜瓢、瓜籽滑落仿真试验的因素水平编码表

Table 5 Factors and levels for flesh and seed slip simulation test

编码值 Code value	E 恢复系数 Restitution coefficient	F 滚动摩擦系数 Rolling friction coefficient
1.414	0.58	0.93
1	0.50	0.80
0	0.30	0.48
-1	0.10	0.15
-1.414	0.02	0.02

表 6 瓜瓢、瓜籽滑落仿真试验方案与结果

Table 6 Protocol and results of flesh and seed slip simulation

试验序号 Test No.	E	F	Y_4	Y_5
			瓜瓢-材料滑动摩擦角/(°) Melon-sliding friction angle of contact material	瓜籽-材料滑动摩擦角/(°) Melon seed-contact material sliding friction angle
1	1	1	42.10	32.90
2	1	-1	43.00	34.10
3	-1	1	43.30	33.30
4	-1	-1	40.00	34.00
5	1.414	0	43.00	33.90
6	-1.414	0	40.80	34.40
7	0	1.414	45.50	33.00
8	0	-1.414	38.00	34.00
9	0	0	41.50	33.40
10	0	0	41.80	34.00
11	0	0	41.90	33.41
12	0	0	42.00	33.90
13	0	0	40.00	33.30

应用 Design-expert 12.0 软件对仿真试验结果进行显著性分析,结果如表 7 所示。由表 7 可知,在 2 个试验因素中,瓜瓢、瓜籽与材料之间的恢复系数 E 均不显著,瓜瓢、瓜籽与材料之间的滚动摩擦系数 F 均极显著。交互项与二次方项各因素对滑动摩擦角影响均不显著。回归模型 P 值小于 0.05 且失拟项 P 值大于 0.05,即回归模型显著且失拟项不显著,回归有效。将不显著项剔除后,瓜瓢在材料上的滑动摩擦角 Y_4 与瓜籽在材料上的滑动摩擦角 Y_5 的回归方程分别为:

$$Y_4=41.76+1.63F,$$

(15)

$$Y_5=33.2-0.414F.$$

(16)

采用 Deign-expert 12.0 软件的 Optimization-Numerical 模块,分别以实测的瓜瓢与材料、瓜籽与材料之间的滑动摩擦角 38.98°和 33.21°为目标值进行寻优,选取与滑动摩擦角最接近的 1 组参数,即瓜瓢与 304 不锈钢的恢复系数和滚动摩擦系数分别为 0.10 和 0.15,瓜籽与 304 不锈钢的恢复系数和滚动摩擦系数分别为 0.36 和 0.75,该组数据所得滑动摩擦角分别为 39.52°和 33.23°,与实测试验结果的相对误差分别为 1.38%和 0.06%,说明所得瓜瓢与材料、瓜籽与材料的接触参数准确可靠。

表 7 滑动摩擦角仿真试验结果的显著性分析

Table 7 Significance analysis on simulation results of sliding friction angle

滑动摩擦角 Sliding friction angle	方差来源 Source	平方和 Sum of Squares	自由度 Degree of freedom	F	P
瓜 瓤与材料 Melon flesh and material	模型 Model	24. 16	2	7. 20	0. 011 6 *
	E	3. 02	1	1. 80	0. 209 9
	F	21. 15	1	12. 60	0. 005 3 **
	残差 Residual	16. 79	10		
	失拟项 Lack of fit	14. 06	6	3. 43	0. 126 5
	纯误差 Pure error	2. 73	4		
	总值 Cor total	40. 95	12		
瓜 籽与材料 Melon seed and material	模型 Model	1. 50	2	6. 80	0. 013 7 *
	E	0. 13	1	1. 15	0. 309 0
	F	1. 37	1	12. 44	0. 005 5 **
	残差 Residual	1. 10	10		
	失拟项 Lack of fit	0. 78	6	1. 63	0. 331 0
	纯误差 Pure error	0. 32	4		
	总值 Cor total	2. 60	12		

2 籽瓤分离试验

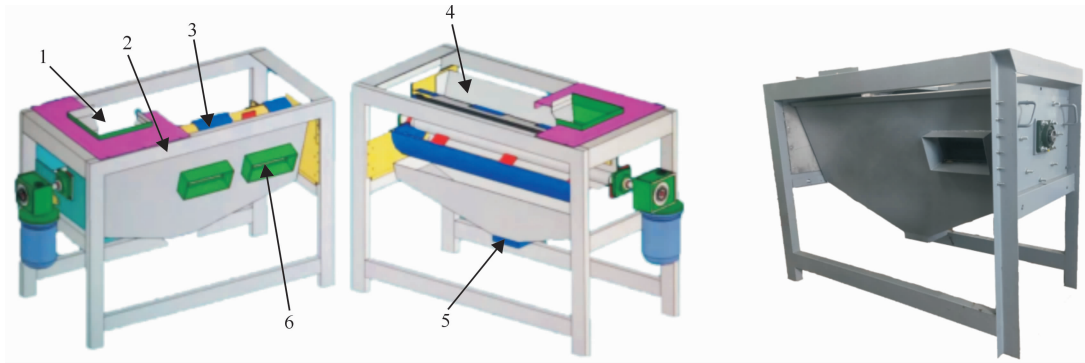
2.1 试验目的

籽瓤分离机作业时,分离辊先将瓜瓤打碎,再通过筛筒分离破碎的瓜瓤和瓜籽。因此,所建立的模型不仅要反映出瓜瓤的破碎分离效果,而且要反映出瓜瓤与瓜籽之间的分离效果。通过籽瓤分离试验

平台进行分离试验,验证所建立离散元模型的可靠性与准确性。

2.2 籽瓤分离试验平台

为验证标定参数的准确性,课题组试制了一种籽瓤分离试验平台,整机主要由入料口、机架、分离辊、筛筒、瓜籽出料口、瓜汁出料口、电机、减速器、变频器等部分组成。实物及其三维结构如图 4 所示。



1. 入料口;2. 机架;3. 分离辊;4. 筛筒;5. 瓜汁出料口;6. 瓜籽出料口

1. Material inlet;2. Frame;3. Separation roller;4. Screen cylinder;5. Melon juice outlet;6. Melon seed outlet

图 4 籽瓜籽瓤分离试验平台(左)及其三维模型(右)

Fig. 4 Test bed (left) and its 3D model (right) for seed and flesh separation

工作时,将瓜瓤和瓜籽混合物由入料口喂入,在分离辊刮板轴向和周向力作用下,瓜瓤被破碎细化后落入筛筒网孔,经由瓜汁出料口流出后收集,瓜籽输送至瓜籽出料口排出机外,最终实现瓜瓤与瓜籽的分离作业。

2.3 籽瓤破碎分离试验

以瓜籽含杂率和轴向瓜瓤分离净度为指标进行籽瓤破碎分离试验。试验时,籽瓤混合物喂入量为 10 kg,籽瓤分离辊转速分别设定为 70,90,110,130 和 150 r/min,2 min 后停止运行,统计出料口的瓜

籽质量与杂质质量,通过式(17)计算瓜籽含杂率。同时在筛筒下部建立 4 个收集箱组,统计轴向瓜瓤在筛筒内的破碎分离情况,收集箱组由左向右依次为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ区,统计 4 个收集箱内经筛筒作用流出的瓜瓤质量,根据式(18)计算瓜瓤分离净度,仿真过程如图 5 所示。每组试验重复 5 次,最终结果取平均值。

瓜籽含杂率表示瓜籽出料口所产物料中杂质所占的比例。计算公式为:

$$T_1=\frac{M_1}{M}\times 100\%。$$

(17)

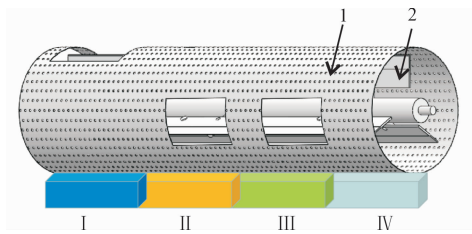
式中： T_1 为瓜籽含杂率，%； M_1 为瓜籽中的杂质质量，kg； M 为含杂瓜籽总质量，kg。

瓜瓢分离净度表示轴向瓜瓢在筛筒的破碎分离程度。计算公式为：

$$T_2=\frac{M_2}{M_0}\times 100\%。$$

(18)

式中： T_2 为瓜瓢分离净度，%； M_2 为收集箱内的瓜瓢质量，kg； M_0 为瓜瓢总质量，kg。



1. 筛桶;2. 籽瓢分离辊; I ~ IV. 收集箱
1. Sieve drum;2. Seed and flesh separating roller;
I ~ IV. Collection box

图 5 籽瓜籽瓢分离仿真模型

Fig. 5 Simulation model of seed and flesh separation

表 8 不同分离辊转速时的瓜籽含杂率试验结果

Table 8 Test results of impurity rate with different separation roller speed %

分离辊转速/ ($r\cdot\min^{-1}$) Separation roller speed	含杂率 Impurity		相对误差 Relative error	分离辊转速/ ($r\cdot\min^{-1}$) Separation roller speed	含杂率 Impurity		相对误差 Relative error
	试验值 Test value	仿真值 Simulation value			试验值 Test value	仿真值 Simulation value	
70	7.01	7.25	3.42	130	4.03	4.22	4.71
90	5.52	5.43	1.63	150	5.20	5.14	1.15
110	3.98	4.08	2.51				

瓜瓢分离净度的试验结果如表 9 所示。由表 9 可见，I 和 II 区瓜瓢分离净度在分离辊低转速时较低，但随着转速提高而逐渐升高；III 和 IV 区瓜瓢分离净度在分离辊低转速时较高，但随着转速提高而逐渐降低。综合瓜籽含杂率试验和瓜瓢分离净度试验可知：当转速为 110~130 r/min 时，各区域瓜瓢分离净度较高且比较平均，该转速下分离辊有效工作长度较长，利用率较高，避免了各区域分离效率差异

表 9 不同分离辊转速时的瓜瓢分离净度试验结果的比较

Table 9 Test results of flesh separation cleanliness with different separation roller speed %

分离辊转速/ ($r\cdot\min^{-1}$) Separation roller speed	I			II			III			IV		
	试验值 Test value	仿真值 Simulation value	相对误差 Relative error	试验值 Test value	仿真值 Simulation value	相对误差 Relative error	试验值 Test value	仿真值 Simulation value	相对误差 Relative error	试验值 Test value	仿真值 Simulation value	相对误差 Relative error
70	15.32	16.04	4.70	28.58	28.20	1.33	24.56	26.08	6.19	27.24	26.63	2.24
90	21.42	20.98	2.05	25.57	24.17	5.48	26.66	25.69	3.64	22.75	21.82	4.09
110	26.33	25.32	3.84	27.18	27.02	0.59	22.57	22.05	2.30	21.32	19.97	6.33
130	30.08	31.3	4.06	26.90	27.52	2.30	21.25	19.98	5.98	18.17	18.77	3.30
150	38.72	36.84	4.86	29.26	29.07	0.65	21.01	22.11	5.24	9.81	9.78	0.31

在 Solidworks 中建立籽瓢分离机三维模型并按 1 : 1 比例导入 EDEM。通过前期预试验，测得瓜瓢与瓜籽比例为 4 : 1，采用已标定的瓜瓢、瓜籽参数在颗粒工厂生成总质量为 8 kg 的瓜瓢模型与 2 kg 的瓜籽模型。接触材料选用 304 不锈钢，并保证仿真试验参数与实测试验参数一致。依据籽瓢分离试验条件，在前处理界面设定籽瓢混合物喂入量为 10 kg，分离辊转速分别为 70，90，110，130 和 150 r/min。由于 Hertz-Mindlin with JKR 模型对时间步长精度要求较高，故在求解器模块设定仿真时间步长为 1.00×10^{-6} s (即 Rayleigh 时间步长的 20%)，仿真时间为 10 s，网格单元尺寸为颗粒平均直径的 5 倍，在瓜籽出料口部位建立网格箱组，仿真完成后计算瓜籽含杂率和轴向瓜瓢分离净度。

2.4 试验结果与分析

含杂率试验结果如表 8 所示。表 8 显示，随着分离辊转速增大，瓜籽含杂率迅速减小后缓慢增加，并且当分离辊转速为 110 r/min 时，瓜籽含杂率达到最小值 3.98%。实测试验与仿真试验含杂率变化趋势大体一致，二者最大相对误差为 4.71%。

3 结 论

以甘肃白银特产“靖远一号”籽瓜为研究对象,选用 Hertz-Mindlin with JKR 接触模型,采用实测试验与仿真试验相结合的方法,对籽瓜籽瓢离散元模型参数和籽瓜破碎取籽分离机常用材料(304 不锈钢)的接触参数进行了标定,并通过破碎取籽分离试验与仿真试验进行对比验证,得到如下结论:

1)以瓜籽、瓜瓢、籽瓢间的恢复系数、静摩擦系数、滚动摩擦系数与 JKR 表面能为因素,设计通用旋转中心组合模拟试验,对试验结果进行的回归分析表明:在瓜瓢、瓜籽堆积角试验中,只有恢复系数影响不显著,其余接触参数均有显著影响;在籽瓢间堆积角试验中,4 个因素对籽瓢间的堆积角均有显著影响。

2)以堆积角为优化目标值,利用响应面法获得各接触参数。结果显示:瓜瓢间恢复系数为 0.10,静摩擦系数为 0.33,滚动摩擦系数为 0.11,JKR 表面能为 1.27 J/m^2 ;瓜籽间恢复系数为 0.20,静摩擦系数为 0.25,滚动摩擦系数为 0.25,JKR 表面能为 0.20 J/m^2 ;籽瓢间恢复系数为 0.23,静摩擦系数为 0.37,滚动摩擦系数为 0.27,JKR 表面能为 2.21 J/m^2 ;

3)利用自制的光电感应式摩擦系数测定平台,测得瓜瓢、瓜籽与 304 不锈钢间的静摩擦系数分别为 0.35 和 0.21。采用滑动摩擦角标定法,测得瓜瓢与 304 不锈钢的恢复系数为 0.10,滚动摩擦系数为 0.15;瓜籽与 304 不锈钢的恢复系数为 0.36,滚动摩擦系数为 0.75,并依此建立了籽瓜籽瓢的离散元模型。

4)以含杂率和分离净度为指标,分别进行实测试验和仿真试验,得到较优的分离辊转速为 $110 \sim 130 \text{ r/min}$,此时瓜籽含杂率为 $3.98\% \sim 4.03\%$,分离辊上各区域瓜瓢分离净度较高且较为平均,试验结果与仿真结果的最大相对误差为 6.33% ,表明所建立的离散元模型精确度较高,可用于籽瓜籽瓢分离的仿真分析。

[参考文献]

- [1] 牛长河. 基于籽瓜力学特性的籽瓜收获机优化设计 [D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2014.
Niu C H. Optimized design of seed melon harvester based on mechanical characteristics of seed melon [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2014.
- [2] 宋 萍. 用籽瓜汁鉴定生物组织中有还原糖 [J]. 中国教育技

术装备,2013(17):128-129.

Song P. Identification of reducing sugars in biological tissues using seed gourd juice [J]. China Educational Technology & Equipment, 2013(17):128-129.

- [3] 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.
- [4] Alon M, Luca O, Abderrahim M, et al. A combined DEM & FEM approach for modelling roll compaction process [J]. Powder Technology, 2018, 337:3-16.
- [5] Mustafa U, Chris S, John M. Discrete element modelling of top soil burial using a full scale mouldboard plough under field conditions [J]. Biosystems Engineering, 2017, 160:140-153.
- [6] Horabik J, Wicak J, Parafiniuk P, et al. Calibration of discrete-element-method model parameters of bulk wheat for storage [J]. Biosystems Engineering, 2020, 200:298-314.
- [7] 刘羽平,张 拓,刘 好. 稻谷颗粒模型离散元接触参数标定与试验 [J]. 中国农业科技导报,2019,21(11):70-76.
Liu Y P, Zhang T, Liu Y. Calibration and experiment of contact parameters of rice grain based on discrete element model [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(11):70-76.
- [8] 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 W W, Cai D Y, Xie J J, et al. Parameters calibration of discrete element model for corn stalk powder compression simulation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural, 2021, 52(3):127-134.
- [9] Wang L, Li R, Wu B, et al. Determination of the coefficient of rolling friction of an irregularly shaped maize particle group using physical experiment and simulations [J]. Particuology, 2018, 38:185-195.
- [10] Wang L J, Zheng Z H, Yu Y T, et al. Determination of the energetic coefficient of restitution of maize grain based on laboratory experiments and DEM simulations [J]. Powder Technology, 2020, 362:645-658.
- [11] Mohammad M, Tekeste M Z, Rosentrater K A. Calibration and validation of a discrete element model of corn using grain flow simulation in a commercial screw grain auger [J]. Transactions of the Asabe, 2017, 60(4):1403-1415.
- [12] 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 EDEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural, 2018, 49(5):125-135, 142.
- [13] Ghodki B M, Patel M, Namdeo R, et al. Calibration of discrete element model parameters; soybeans [J]. Computational Particle Mechanics, 2018, 5:1-8.

[14] Bhupendra M G, Manish P, Rohit N, et al. Calibration of discrete element model parameters: soybeans [J]. Computational Particle Mechanics, 2019, 6, 3-10.

[15] 宿 辉, 杨家琦, 胡宝文, 等. 颗粒离散元岩石模型的颗粒尺寸效应研究 [J]. 岩土力学, 2018, 39(12): 4642-4650.
Su H, Yang J Q, Hu B W, et al. Study of particle size effect of rock model based on particle discrete element method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(12): 4642-4650.

[16] Wei H, Nie H, Li Y, et al. Measurement and simulation validation of DEM parameters of pellet, sinter and coke particles [J]. Powder Technology, 2020, 364: 593-603.

[17] 陈 啸, 孔丹丹, 王红英, 等. 基于本构模型的颗粒饲料成型特性研究 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 267-275.
Chen X, Kong D D, Wang H Y, et al. Analysis of forming properties based on pellet feed forming constitutive model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(23): 267-275.

[18] 曹 波. 湿式滚抛磨块的参数标定及接触模型分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
Cao B. Parameter calibration of wet media and contact model analysis [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.

[19] Johnson K L, Greenwood J A. An adhesion map for the contact of elastic spheres [J]. Journal of Colloid And Interface Science, 1997, 192(2): 326.

[20] Lin Y Y, Chang C F, Lee W T. Effects of thickness on the largely-deformed JKR (Johnson-Kendall-Roberts) test of soft elastic layers [J]. International Journal of Solids & Structures, 2008, 45(7): 2220-2232.

[21] Li Y, Yong X, Thornton C. A comparison of discrete element simulations and experiments for ‘sandpiles’ composed of spherical particles [J]. Powder Technology, 2005, 160(3): 219-228.

[22] 王美美, 王万章, 杨立权, 等. 基于 EDEM 的玉米子粒建模方法的研究 [J]. 河南农业大学学报, 2018, 52(1): 80-84, 103.
Wang M M, Wang W Z, Yang L Q, et al. Research of discrete element modeling method of maize kernel based on EDEM [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2018, 52(1): 80-84, 103.

[23] Viktor M, Munkholm L J, Chen Y, et al. Modelling approach for soil displacement in tillage using discrete element method [J]. Soil & Tillage Research, 2018, 183: 60-71.

[24] 丁启朔, 任 骏, Belal Eisa Adam, 等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 38-48.
Ding Q S, Ren J, Belal E A, et al. DEM analysis of subsoiling process in wet clayey paddy soil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural, 2017, 48(3): 38-48.

[25] Zeng Z W, Chen Y, Zhang X R. Modelling the interaction of a deep tillage tool with heterogeneous soil [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 143: 130-138.

[26] 马 帅, 徐丽明, 袁全春, 等. 葡萄藤防寒土与清土部件相互作用的离散元仿真参数标定 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(1): 40-49.
Ma S, Xu L M, Yuan Q C, et al. Calibration of discrete element simulation parameters of grapevine antifreezing soil and its interaction with soil-cleaning components [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(1): 40-49.

(上接第 143 页)

[29] 孙 超, 范 文. 泾河南岸黄土抗拉强度试验研究 [C]//中国地质学会. 第十届全国工程地质大会论文集. 中国地质学会: 《工程地质学报》编辑部, 2016: 1303-1306.
Sun C, Fan W. Study on the test of tensile strength of loess in the south of Jinghe [C]//Geological Society of China. Proceedings of the 10th National Engineering Geology Conference. Geological Society of China: Editorial Department of Journal of Engineering Geology, 2016: 1303-1306.

[30] 云海浪, 尹思雨, 韩文喜, 等. 基于正交试验的重塑黄土抗拉强度影响分析 [J]. 四川建筑科学研究, 2020, 46(6): 70-79.
Yun H L, Yin S Y, Han W X, et al. Analysis of influence on tensile strength of remolded loess based on orthogonal test [J]. Sichuan Building Science, 2020, 46(6): 70-79.

[31] 张 云, 王惠敏, 鄢丽芬. 击实黏土单轴拉伸特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2151-2157.
Zhang Y, Wang H M, Yan L F. Test research on tensile properties of compacted clay [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2151-2157.

[32] 吕东东, 李彦荣, 赵金贵. 山西晋中马兰黄土劈裂特性及抗拉强度研究 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2021, 40(2): 173-178.
Lv D D, Li Y R, Zhao J G. Study on splitting characteristics and tensile strength of Malan loess in Jinzhong, Shanxi Province [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science Edition), 2021, 40(2): 173-178.

[33] 袁中夏, 王兰民, 邓 津. 电镜图像在黄土结构性研究中的应用的几个问题 [J]. 工程勘察, 2005, 195(4): 1-4, 12.
Yuan Z X, Wang L M, Deng J. Several problems on application of SEM image in the structure properties study of loess [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2005, 195(4): 1-4, 12.