

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.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2023.04.031

菱角离散元粘结参数标定与剪切试验

涂鸣¹,曹涛¹,万志华^{1,2},莫泓滔¹,张国忠¹

1. 华中农业大学工学院/农业农村部长江中下游农业装备重点实验室,武汉 430070;
2. 武汉轻工大学机械工程学院,武汉 430023

摘要 针对菱角(*Trapa bispinosa* Roxb.)脱壳初加工装备设计与仿真分析时缺乏有效的离散元模型问题,开展菱角粘结离散元参数标定与样机试验工作。采用三维反求技术获取菱角轮廓模型,测取菱角本征参数及基本接触参数,得到菱角平均剪切力为352.95 N,并以此为标定目标,采用EDEM软件中的Hertz-Mindlin with bonding模型建立菱角离散元模型,通过单因素试验筛选粘结参数标定范围,由二水平析因试验、最陡爬坡试验筛选显著因素及其标定区间,设计响应面试验求解粘结参数,确定离散元模型中的最优粘结参数组合,开展旋转剪切仿真试验及样机验证试验。结果显示:仿真得到的菱角脱壳剪切力为352 N,与实际误差为0.269%;菱角剪切刀具为矩形,转速230 r/min时,剪切力最小值为93.20 N,与预测值92.99 N的误差为0.215%;样机试验中矩形刀具在转速为230 r/min时各项性能指标最优,表明建立的菱角离散元模型可靠。

关键词 菱角;离散元;粘结参数;标定;剪切;仿真试验

中图分类号 S226.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2023)04-0270-09

菱角(*Trapa bispinosa* Roxb.)为菱科一年生草本水生植物^[1],在我国有超过7 000 a的种植历史^[2]。随着生产力水平的不断提高,菱角及菱角粉丝、菱角罐头、菱角果冻等深加工产品逐渐被国民端上餐桌^[3-4],经济效益逐步体现。然而,菱角深加工产品均需手工脱壳预处理,目前暂无成熟适用的菱角脱壳设备替代人工作业,致使产业机械化程度低,生产力有限^[5]。

离散元法及仿真软件EDEM常用于农业物料与机械装备的接触特性研究中^[6-8]。在EDEM中Hertz-Mindlin with bonding接触模型用粘结的形式将颗粒粘结成农业物料模型,颗粒间形成的粘结键可以承受法向和切向剪切应力,以此模拟物料的粘结键断裂和颗粒破碎过程,该模型在农业物料的剪切、挤压过程和触土部件与土壤的耕作机制等研究领域广泛应用,例如,张国忠等^[9-10]借助逆向建模和物理实验,建立了荸荠离散元模型,应用Hertz-Mindlin with bonding模型对粘结参数进行了虚拟标定,并进一步以荸荠芽和根的切削力为评价指标,并以锯齿旋切刀结构和工作参数为影响因素开展优化试

验,得到了旋切刀的最佳参数组合。焦俊等^[11]建立了莲藕主藕体离散元模型,开展了主藕体弯曲破坏离散元单因素和二因子模拟试验,仿真分析了主藕体弯曲破坏的损伤因素。廖宜涛等^[12]对饲料油菜茎秆进行了弯曲破坏仿真试验,通过响应面分析确定了茎秆破碎离散元仿真模型的主要参数,为薹期饲料油菜机械化收获的仿真提供基本参数。余参参等^[13]测定了3种微型薯的物理力学特征和接触力学参数,求取了微型薯间的滚动摩擦因数。郝建军等^[14]建立了麻山药双峰分布离散元模型,标定并验证了沙壤土堆积角和粘结参数间的回归模型,为麻山药收获及后续加工过程的仿真分析提供了基本参数。郭三琴等^[15]建立了硬颗粒饲料离散元模型,通过堆积角、最陡爬坡和响应面优化试验,标定了硬颗粒饲料-钢以及硬颗粒饲料-尼龙间的碰撞恢复系数、静摩擦因数和滚动摩擦因数。袁全春等^[16]选择Hertz-Mindlin with bonding模型建立了肥块模型和碎肥刀仿真模型,通过单因素仿真试验分析了碎肥刀转速、刃口角等参数对刀片阻力及肥块破碎率的影响;基于均匀设计试验得到了最优的碎肥刀和作

收稿日期:2023-04-04

基金项目:国家特色蔬菜产业技术体系专项(CARS-24-D-02);湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划项目(T201934)

涂鸣,E-mail:mingtu@mail.hzau.edu.cn

通信作者:张国忠,E-mail:zhanggz@mail.hzau.edu.cn

业结构参数。赵淑红等^[17]基于EDEM建立了深松铲-土壤-秸秆-根茬的离散元模型,仿真分析了工作参数、根茬状态和秸秆间的相互影响,探究了秸秆在不同状态下的运动规律并分析了扰动比阻。综上所述可知,Hertz-Mindlin with bonding模型多应用在土壤与触土部件的耕作机制及农业物料与工作部件的相互作用机制研究中,目前已有较多农业物料具备准确的粘结参数,但由于各物料粘结参数不尽相同,难以为菱角初加工机具的仿真分析提供准确参数,因此,需对菱角开展离散元参数标定工作。

本研究以菱角为研究对象,首先通过物料特性试验获取菱角本征参数及基础接触参数,借助三维反求技术获得菱角外形轮廓,建立EDEM菱角离散元模型;之后采用质构仪获得菱角平均剪切应力,开展立放剪切试验获取Hertz-Mindlin with bonding模型粘结参数,并在EDEM中仿真分析不同刀具旋转剪切菱角的受力情况,确定刀具模型及最佳剪切转速;最后加工试制剪切振动式菱角脱壳样机,验证菱角离散元建模与参数标定的可靠性,旨在为菱角脱壳初加工装备的刀具设计及关键工作参数的确定提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料选用位于涿水县天井湖菱角产业园的华中农业大学水生蔬菜生产机械化试验基地种植的牛角菱,2022年7月2日采摘并挑选颗粒饱满、无损伤无病虫害的菱角作为试验样品,从采摘的菱角中随机选取100个,烘干称质量法测定其平均含水率为74.31%,游标卡尺测量外形尺寸获得菱角的平均长度、厚度与高度尺寸分别为76.01、24.48、34.63 mm。

1.2 本征参数

本征参数包括密度、泊松比和弹性模量,其中密度 ρ 由排水法测得,计算公式为:

$$\rho = \frac{m}{V - V_0} \quad (1)$$

式(1)中, ρ 为菱角密度, g/cm^3 ; m 为菱角单粒质量, g ; V_0 和 V 分别为菱角放入前、后量筒内的体积, mL 。

将菱角表皮水分擦干,电子天平测量质量,再用细线系住其一侧尖角,放入盛水的量筒中测量其体积。为降低读数误差,将100个随机选取的菱角平均分成10组,密度测量结果为 $1.09 \text{ g}/\text{cm}^3$,变异系数为

8.26%。

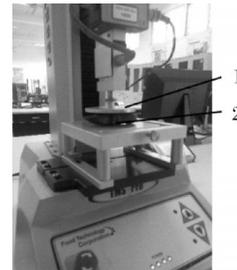
泊松比 μ 是指菱角在单向受拉压力时,其横向变形量和轴向变形量之比,反映了菱角单向变形的弹性指数,计算公式如式(2)所示。弹性模量 E 体现菱角抵抗弹性变形的能力,通过压缩试验获得,计算公式如(3)所示。

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

$$E = \frac{F \times L}{S \times \Delta L} \quad (3)$$

式(2)中, δ_1 和 δ_2 分别为菱角横向和轴向变形量, mm ; W_1 和 W_2 分别为菱角压缩前、后的横向尺寸, mm ; L_1 和 L_2 分别为菱角压缩前、后的轴向尺寸, mm ; F 为菱角弹性变形阶段最大承受力, N ; L 为样本初始长度, mm ; S 为样本横截面积, mm^2 ; ΔL 为样本压缩前后长度差, mm 。

本研究采用TMS-Pro质构仪单轴压缩试验测量菱角泊松比及弹性模量,如图1所示。质构仪末端执行器选取平板压头,加载速率为 $30 \text{ mm}/\text{min}$,试验重复10次,得到的菱角平均泊松比和弹性模量分别为0.30和 9.85 MPa 。



1. 平板压头 Flat press head; 2. 菱角 Water caltrop.

图1 单轴压缩试验

Fig.1 Uniaxial compression experiment

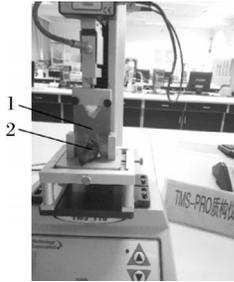
1.3 基本接触参数

EDEM软件中的基本接触参数包含了碰撞恢复系数、静摩擦因素和滚动摩擦因素。碰撞恢复系数表征两物料碰撞后的恢复能力,只与材料本身有关,其数值为碰撞前后两物体在接触点处的法向相对分离速度与法向相对接近速度之比,本研究涉及菱角间的接触以及菱角与钢之间的接触,借助pco.dimax HD高速摄影机和坐标纸对该参数进行测量^[18]。菱角的静摩擦因素和滚动摩擦因素采用艾瑞斯ASR-3009摩擦因数测试仪进行测定,通过更换仪器接触面板材料,测定菱角与菱角、菱角与钢板的摩擦因数^[19]。每组试验重复测量6次,得到的菱角-菱角和菱角-钢间的碰撞恢复系数、静摩擦因素、滚动摩擦因素测定

结果分别为0.43、0.55、0.15和0.45、0.35、0.10。

1.4 粘结参数与标定试验

为获得反应离散元模型剪切情况的准确参考值,通过TMS-Pro质构仪对菱角进行立放剪切试验,测取加载过程中最大剪切力作为目标标定值,如图2所示。质构仪末端执行器采用长60 mm、宽40 mm、厚0.5 mm,刀片刃口夹角为60°的V型剪切刀片,加载速率为30 mm/min,试验重复10次,得到加载曲线峰值的平均值352.95 N,作为目标标定值。



1.V型剪切刀片 V-shaped shearing blade; 2.菱角 Water caltrop.

图2 菱角立放剪切试验

Fig.2 Water caltrop vertical shear experiment

在粘结键形成过程中,颗粒间相互作用力及力矩随时间变化可由式(4)计算。

$$\begin{cases} \delta F_n = -v_n x_1 \pi x_5^2 \delta t \\ \delta F_t = -v_t x_2 \pi x_5^2 \delta t \\ \delta M_n = -\omega_n x_2 \frac{\pi x_5^4}{2} \delta t \\ \delta M_t = -\omega_t x_1 \frac{\pi x_5^4}{4} \delta t \end{cases} \quad (4)$$

当粘结键承受的法向及切向承受的应力达到式(5)中临界值时,粘结键断裂:

$$\begin{cases} x_3 < \frac{-F_n}{\pi x_5^2} + \frac{4M_t}{\pi x_5^3} \\ x_4 < \frac{-F_t}{\pi x_5^2} + \frac{2M_n}{\pi x_5^3} \end{cases} \quad (5)$$

式(4)~(5)中, F_n 和 F_t 分别为法向和切向剪切力,N; M_n 和 M_t 分别为法向和切向力矩,N·m; x_1 和 x_2 分别为单位面积法向刚度和单位面积切向刚度,N/m³; x_3 和 x_4 分别为临界法向应力和临界切向应力,Pa; x_5 为粘结半径,mm; v_n 和 v_t 分别为法向和切向速度,m/s; ω_n 和 ω_t 分别为法向和切向角速度,rad/s。

标定菱角剪切破碎模型中的粘结参数,首先需要对EDEM仿真软件中Hertz-Mindlin with bonding模型的 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 和 x_5 等5个因素开展单因素试验以获得各因素对最大剪切力的影响趋势,结合已有研究基础及相近物料的离散元参数模型研究^[5,9],初步设定菱角离散元参数标定范围如表1所示。

表1 菱角粘结仿真参数

Table 1 Bonding simulation parameters for water caltrop

参数 Parameters	数值 Value
x_1 /(N/m ³)	1.0×10 ⁷ ~1.0×10 ⁹
x_2 /(N/m ³)	5.0×10 ⁷ ~1.24×10 ⁹
x_3 /Pa	1.0×10 ⁶ ~1.0×10 ⁸
x_4 /Pa	1.0×10 ⁶ ~1.0×10 ⁸
x_5 /mm	1.2~2.0

各因素具体水平如表2所示,由于 x_1 ~ x_4 各因素取值范围量级较大,为兼顾各个量级,取各因素的量级端点及中间位置作为水平,其中因素 x_2 中由于5.0×10⁹ N/m³量级较大无法顺利生成粘结键,经仿真试验取1.24×10⁹ N/m³作为 x_2 的最大量级开展仿真试验,因素 x_5 平均取5个点作为水平开展试验。

表2 单因素试验水平表

Table 2 Single factor test level

参数 Parameters	水平 Level				
	1	2	3	4	5
x_1 /(×10 ⁸ N/m ³)	0.1	0.5	1.0	5.0	10.0
x_2 /(×10 ⁸ N/m ³)	0.5	1.0	5.0	10.0	12.4
x_3 /×10 ⁷ Pa	0.1	0.5	1.0	5.0	10.0
x_4 /×10 ⁷ Pa	0.1	0.5	1.0	5.0	10.0
x_5 /mm	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0

二水平析因试验结果的方差分析可以在影响因素较多的情况下,确定各个因素对最大剪切力的影响是否显著,根据单因素试验结果,选取各因素参数区间作为二水平析因试验的上下水平,如表3所示,并在Design-Expert 13中设计二水平析因试验共16组。

表3 二水平析因试验水平表

Table 3 Two-level analysis factor experiment levels

参数 Parameters	水平 Level	
	-1	1
x_1 /(×10 ⁷ N/m ³)	1.0	5.0
x_2 /(×10 ⁸ N/m ³)	1.0	5.0
x_3 /×10 ⁷ Pa	1.0	5.0
x_4 /×10 ⁷ Pa	1.0	5.0
x_5 /mm	1.4	1.6

最陡爬坡试验可快速确定显著影响因素的最优标定区间,对二水平析因试验筛选出的显著因素单位面积法向刚度 x_1 和单位面积切向刚度 x_2 开展最陡爬坡试验,试验水平如表4所示。

为得到最佳仿真参数,在Design-Expert 13中选

表4 最陡爬坡试验水平表

Table 4 Steepest climb experiment levels

水平 Level	$x_1/(\times 10^7 \text{ N/m}^3)$	$x_2/(\times 10^8 \text{ N/m}^3)$
-2	4.2	4.2
-1	4.5	4.5
0	4.8	4.8
1	5.1	5.1
2	5.4	5.4

用Central composite 模型开展响应面试验,以最陡爬坡试验中最接近目标标定值的试验水平0和2作为响应面试验上下限,设计试验共9组,试验水平如表5所示。

表5 粘结参数水平表

Table 5 Bonding parameter levels

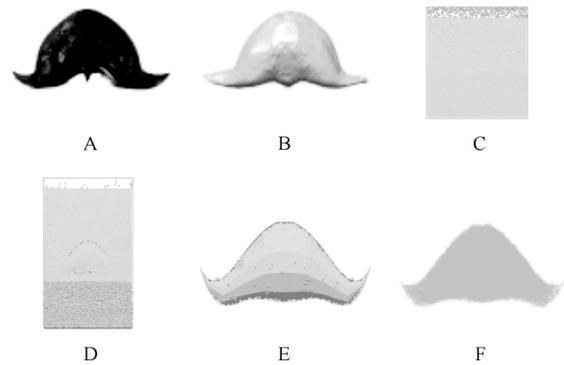
水平 Level	$x_1/(\times 10^7 \text{ N/m}^3)$	$x_2/(\times 10^8 \text{ N/m}^3)$
-1	4.8	4.8
0	5.1	5.1
1	5.4	5.4

1.5 菱角剪切破碎模型

图3为菱角剪切破碎模型建立流程,图3A为试验采用的牛角菱,其外形不规则,呈牛角状,难以采用常规方法建模,因此,首先通过三维反求技术获取菱角轮廓三维点云数据,通过曲线与曲面拟合后抽壳优化处理,获得菱角外形空壳(图3B)。之后在EDEM中生成边长100 mm的立方体并设置颗粒工厂,将立方体内填充落满直径为1 mm的颗粒(图3C)后导入空壳菱角模型,通过重力作用落去多余的颗粒(图3D),获得充满颗粒的菱角模型(图3E),设置bonding参数生成菱角粘结模型(图3F)。生产后的模型包含物理半径1 mm、接触半径1.6 mm的颗粒3 886个,有效粘结键共16 899个,平均每个颗粒有效粘结键超过4.3,粘结充分。最后导入剪切破碎模型,调整空间位置,设置运动参数,完成模型建立,如图4所示。

1.6 刀具模型及转速试验

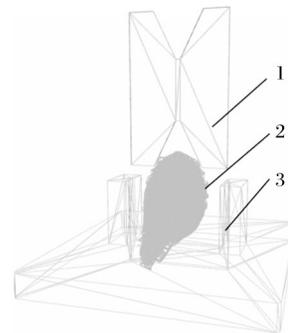
在建立菱角旋转剪切模型的基础上开展试验,获取不同剪切刀具的最优工作转速及剪切力,从中筛选出剪切力最小的刀具,建立刀具转速与剪切力之间的拟合方程。由拟合参数表筛选出刀具受到最小剪切力时的对应转速,在EDEM模型中得到刀具仿真受力,并计算误差。通过仿真预测剪切菱角的最优刀具模型及工作转速,为菱角初加工装备的刀具设计提供参考。



A:牛角菱角 Water caltrop; B:三维反求模型 3D inverse model; C:颗粒箱 Pellet box; D:填充颗粒 Filling particles; E:菱角模型 Water caltrop model; F:粘结模型 Bonding model.

图3 菱角剪切破碎模型建立流程

Fig.3 Water caltrop shear model setup process



1.V型剪切刀片 V-shaped shear blade; 2.菱角离散元模型 Water caltrop discrete element model; 3.剪切基座 Shear base.

图4 EDEM 立放剪切破碎模型

Fig.4 EDEM vertical shear crushing model

2 结果与分析

2.1 单因素试验

菱角立放剪切单因素试验结果如图5所示,图5A中, x_1 随量级的增大剪切力逐渐增大, x_2 随量级的增大剪切力先增大,在 $1 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ 时达到最大值后减小,结果表明 x_1 对剪切力具有增量作用, $x_2 < 1 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ 时对剪切力具有增量作用, $x_2 > 1 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ 时具有减量作用;图5B中, x_3 和 x_4 在不同量级的临界应力试验结果均趋近于 x_1 、 x_2 和 x_5 的单因素试验中间水平的仿真结果,表明 x_3 和 x_4 对剪切力影响不明显;图5C中, x_5 随量级增大剪切力增大,表明 x_5 对剪切力具有增量作用。

2.2 二水平析因试验

二水平析因试验结果显示,剪切力范围在40.6~391.1 N,包含目标标定值,验证各因素水平取值合理。表6为在Design-Expert 13中的试验结果方差分析,表6中模型、 x_1 和 x_2 的P值均小于0.01, x_3 、 x_4 和 x_5

的 P 值均大于0.05,表明在菱角离散元粘结参数中, x_1 不显著,因此对影响极显著的因素 x_1 和 x_2 开展最陡爬坡试验,以快速筛选出 x_1 和 x_2 最优粘结参数区间。

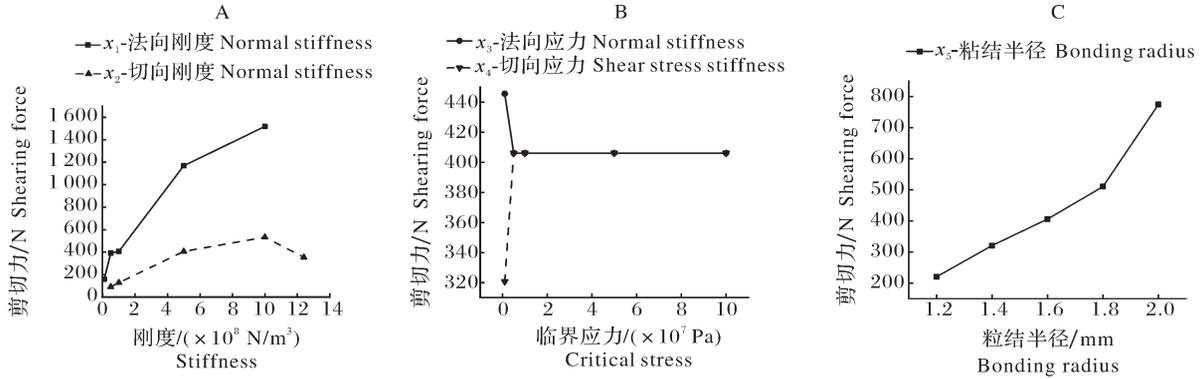


图5 菱角立放剪切单因素试验结果

Fig.5 Results of single factor experiment for water caltrop vertical shear

表6 二水平析因试验方差分析

Table 6 Analysis of variance of two-level factor experiment

来源 Source	平方和 Sum of squares	自由度 Free degree	均方 Mean square	F值 F-value	P值 P-value
模型 Model	203 100.00	5	40 619.28	14.170 0	0.000 3
x_1	33 773.25	1	33 773.25	11.780 0	0.006 4
x_2	156 900.00	1	157 000.00	54.740 0	<0.000 1
x_3	32.21	1	32.21	0.011 2	0.917 7
x_4	1 658.53	1	1 658.53	0.578 5	0.464 4
x_5	10 717.43	1	10 717.43	3.740 0	0.082 0
残差 Residuals	28 667.98	10	2 866.80		

注 Note: $P<0.01$ 极显著 Extremely significant; $P<0.05$,显著 Significant;下同 The same as below.

2.3 最陡爬坡试验和响应面试验

图6为 x_1 和 x_2 最陡爬坡试验结果,随着 x_1 、 x_2 量级增大,菱角剪切力先减小再增大,随之再减小,试验剪切力与菱角立放剪切试验的目标标定值352.95 N有2处交点,对应 x_1 、 x_2 的取值范围分别在 $4.8 \times 10^7 \leq x_1 \leq 5.4 \times 10^7$ 、

$4.8 \times 10^8 \leq x_2 \leq 5.4 \times 10^8 \text{ N/m}^3$ 量级区间内。为进一步研究在此量级区间内 x_1 、 x_2 对剪切力影响的具体规律,设计Central composite响应面试验,取 x_1 、 x_2 量级区间上下限作为响应面试验的高低水平。

对Central composite响应面试验结果进行回归拟合,得到以剪切力 Y 为响应, x_1 、 x_2 为变量的回归方程,如式(6)所示。

$$Y = 325.31 - 5.68x_1 + 41.92x_2 + 15.45x_1x_2 \quad (6)$$

表7为响应面试验方差分析,结果显示该模型显著($P<0.05$), x_2 对剪切力影响极显著, x_1 及 x_1 与 x_2 的交互项对剪切力影响不显著。

2.4 粘结参数求解

1)最优参数求解及验证。依据Central composite响应面试验结果,在Design-Expert 13中运用剪切力回归拟合方程,设置剪切力目标值为352.95 N,求解出 x_1 与 x_2 的87组最优组合解。对87组最优组合解中的粘结参数依次开展仿真验证试验,要求误差小于1%,得到 x_1 为 $4.818 \times 10^7 \text{ N/m}^3$ 、 x_2 为 $5.343 \times$

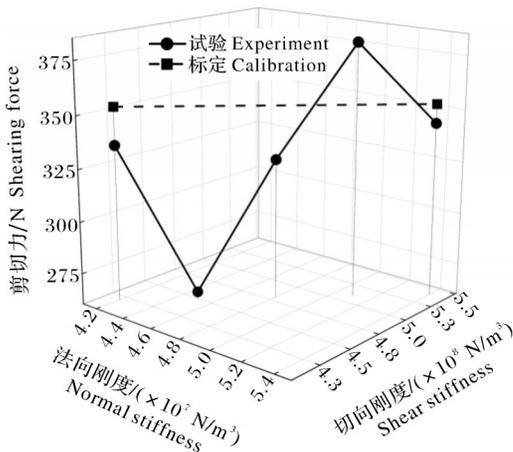


图6 最陡爬坡试验结果

Fig.6 Results of steepest climb experiment

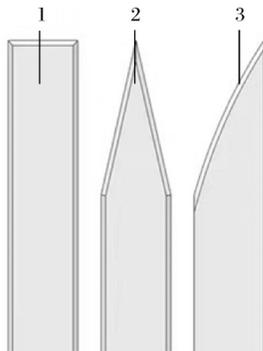
10^8 N/m^3 时的最优解剪切力为 352 N, 仿真误差为 0.269%, 符合验证要求, 表明该组粘结参数建立的菱角离散元模型可靠, 能够满足离散元仿真需求。

表7 Central composite 试验方差分析

Table 7 Analysis of variance for the Central composite experiment

来源 Source	平方和 Sum of Squares	自由度 Free degree	均方 Mean square	F值 F-value	P值 P-value
模型 Model	11 587.87	3	3 862.62	6.680 0	0.033 6
x_1	205.33	1	205.33	0.355 2	0.577 1
x_2	10 458.38	1	10 458.38	18.090 0	0.008 1
x_1x_2	924.16	1	924.16	1.600 0	0.261 8
残差 Residual	2 890.29	5	578.06		

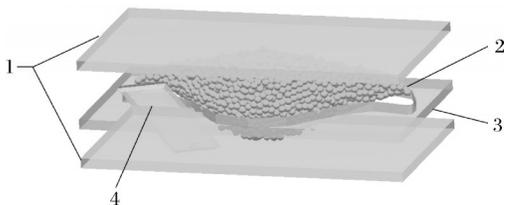
2) 刀具模型选择与参数分析。农业物料剪切刀具多为矩形刀具、三角形刀具、弧形刀具, 因此选用以上3种刀具模型开展仿真实验, 如图7所示。建立菱角旋转剪切模型, 在离散元参数模型中, 调整各几何体空间位置, 得到的菱角旋转剪切模型如图8所示, 设置刀具转速分别为 25、50、100、150、200、250 r/min 进行仿真试验。



1. 矩形刀具 Rectangular cutter; 2. 三角形刀具 Triangle cutter; 3. 弧形刀具 Arc cutter.

图7 不同刀具模型对比

Fig.7 Comparison of different tool models



1. 上下压板 Upper and lower pressure plate; 2. 菱角离散元模型 Water caltrop discrete element model; 3. 模具 Mold; 4. 矩形刀具 Rectangular cutter.

图8 菱角旋转剪切模型

Fig.8 Rotary shear model with water caltrop

仿真试验中, 3种刀具分别各设置6个水平转速, 得到不同刀具在不同水平转速下的菱角旋转剪切仿真试验结果如图9所示。结果显示, 矩形刀具在各转速下受力均比其他2种刀具小, 因此, 选定矩形刀具作为旋转剪切菱角刀具, 对仿真试验结果进行多项式曲线拟合, 拟合方程如式(7)所示。

$$Y=205.092-0.917x+0.017x^2+4.417 \times 10^{-4}x^3+2.811 \times 10^{-6}x^4+5.394 \times 10^{-9}x^5 \quad (7)$$

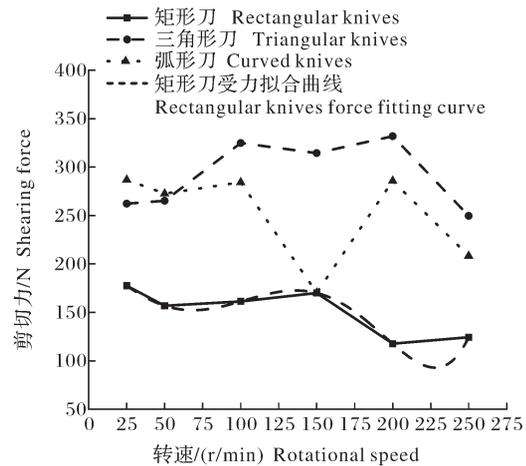


图9 不同刀具剪切力图

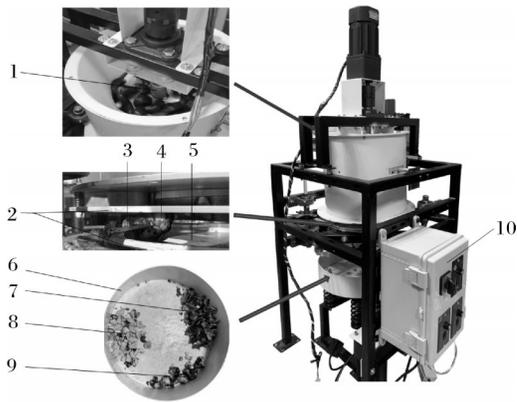
Fig.9 Diagram of the shearing forces on different tools

对拟合方程的参数表进行筛选得到矩形刀具最小受力为 92.99 N, 对应的矩形刀具转速为 230 r/min, 将此转速代入矩形刀具旋转剪切菱角模型中, 得到的刀具受力为 93.20 N, 误差为 0.215%。

2.5 样机验证试验

设计试制的剪切振动式菱角脱壳样机如图10所示, 样机工作原理为: 首先将菱角倒入料筒, 料筒内立式螺旋搅龙均匀布料, 在差速带动下菱角落入下方切料转盘, 同时上下压板压紧菱角, 2组刀轴成对角线布置在压板两侧, 每组刀轴上均布4组矩形刀具, 菱角随切料转盘转动至矩形刀具时被转动的刀具切开; 切开后的菱角继续运动至下料口落入振动盘中, 经高频振动实现菱壳与菱仁分离。样机螺旋搅龙、切料转盘和振动盘的转速均可由控制电箱分别独立控制。

为验证设计的矩形刀具及最优转速实际工作效果, 选取完好无病虫害菱角 600 个, 平均分为 3 组, 每组分别设置刀轴转速为 180、230 和 280 r/min, 每次倒入 20 个菱角开展重复试验, 结果如表 8 所示。表 8 中剪切率为剪切的菱角与总菱角数量之比, 完切率为完整切开的菱角与剪切的菱角数量之比, 菱仁获得率为机具剪切获得菱仁质量与总获得质量(总获



1. 立式螺旋搅龙 Vertical spiral churn; 2. 上下压板 Upper and lower pressure plate; 3. 矩形刀具 Rectangular cutter; 4. 菱角 Water caltrop; 5. 切料转盘 Cutting material turntable; 6. 振动盘 Vibrating plate; 7. 菱角壳 Water caltrop shell; 8. 菱仁 Water caltrop nuts; 9. 残切菱角 Residual water caltrop; 10. 控制电箱 Control box.

图10 样机验证试验

Fig.10 Prototype verification tests

得质量=机具剪切获得菱仁质量+人工二次清捡获得质量)之比。

表8 样机验证试验结果

刀轴转速/ (r/min) Cutter shaft speed	剪切率 Shear rate	完切率 Com- pletion rate	菱仁获得率 Nuts acquisi- tion rate
180	80.00	31.25	41.88
230	100.00	70.00	74.55
280	100.00	40.00	52.43

试验结果表明,样机能够完成菱角的剪切脱壳,实现菱壳与菱仁的振动分离。当刀轴转速分别为230和280 r/min时,可以达到100%的菱角菱壳的剪切,其中转速为230 r/min时,菱角完切率达到70.00%、菱仁获得率达到74.55%,各项指标表现最优。

3 讨论

本研究经测量获得菱角平均含水率为74.31%,菱角长度、厚度和高度的平均值分别为76.01、24.48、34.63 mm,密度为1.09 g/cm³,泊松比为0.30、弹性模量为9.85 MPa,菱角间的碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别是0.43、0.55、0.15,菱角与钢之间的碰撞恢复系数、静摩擦因数、滚动摩擦因数分别是0.45、0.36、0.10。通过单因素试验确定了各因素大概标定范围,采用二水平析因试验方差分析得到显著性因素为:单位面积法向刚度 x_1 、单位面积切

向刚度 x_2 。由最陡爬坡试验筛选出 x_1 、 x_2 的标定区间,根据Central composite响应面法试验建立 x_1 、 x_2 与剪切力之间的回归方程,得到最佳参数组合:单位面积法向刚度 x_1 为 4.818×10^7 N/m³、单位面积切向刚度 x_2 为 5.343×10^8 N/m³时的仿真剪切力为352 N,误差为0.269%(<1%),符合验证要求,验证了菱角建模与标定参数的可靠性。

对不同刀具开展不同转速的菱角旋转剪切试验,筛选出矩形刀具转速为230 r/min时,刀具受力最小为93.20 N,与预测值92.99 N的误差为0.215%。样机试验在刀轴转速为230 r/min时,机具剪切率、菱仁完切率及菱仁获得率分别为100%、70.00%、74.55%,表明所建立菱角离散元粘结参数模型可靠,可用于菱角脱壳初加工装备刀具的设计与关键参数的确定,下一步可针对提升完切率及菱仁获得率开展机具优化设计研究。

本研究采用整菱一体的建模与标定思路,在仿真时可准确反映整菱的力学及接触特性,但针对菱角在含水率、冷藏温度等初加工条件差异较大时,菱仁和菱壳更为准确的粘结特性参数,将为样机的设计提供重要参考,后续将在整菱标定的基础上,开展菱仁、菱壳区分的标定工作,为菱角在脱壳过程中菱仁、菱壳的分离过程提供更为详细的设计和工作参数。

参考文献References

- [1] 左袁袁,吕寒,简曦昱,等. 菱角壳化学成分及其药理作用研究进展[J]. 辽宁中医药大学学报,2019,21(4):94-99. ZUO Y Y, LÜ H, JIAN T Y, et al. Advance in studies on the chemical constituents of water chestnut shells and their pharmacological effects[J]. Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 2019, 21(4): 94-99 (in Chinese with English abstract).
- [2] 严守雷,王清章. 水生蔬菜保鲜加工学[M]. 北京:科学出版社,2017. YAN S L, WANG Q Z. Fresh-keeping processing of aquatic vegetables[M]. Beijing: Science Press, 2017 (in Chinese).
- [3] 关键,何建军,薛淑静,等. 菱角软罐头制作工艺研究[J]. 长江蔬菜,2015(22):161-163. GUAN J, HE J J, XUE S J, et al. Study on retort pouch processing of water chestnut[J]. Journal of Changjiang vegetables, 2015(22): 161-163 (in Chinese with English abstract).
- [4] 李丽,王洪斌,张泽英,等. 菱角保健果冻的研制[J]. 食品研究与开发,2017,38(6):104-107. LI L, WANG H B, ZHANG Z Y, et al. The development of water chestnut jelly[J]. Food research and development, 2017, 38(6): 104-107 (in Chinese).

- with English abstract).
- [5] 万志华. 鲜菱角脱壳机理及脱壳关键技术研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022. WAN Z H. Study on the shelling mechanism and key technology of fresh water caltrop [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022 (in Chinese with English abstract).
- [6] 于建群, 付宏, 李红, 等. 离散元法及其在农业机械工作部件研究中的应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 1-6. YU J Q, FU H, LI H, et al. Application of discrete element method to research and design of working parts of agricultural machines [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(5): 1-6 (in Chinese with English abstract).
- [7] 顿国强, 范芯蕊, 杨永振, 等. 基于离散元的插装式大豆排种器改进设计及试验[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(3): 135-144. DUN G Q, FAN X R, YANG Y Z, et al. Improved design and experiment of a plug-in soybean seed metering device based on discrete element [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(3): 135-144 (in Chinese with English abstract).
- [8] HORABIK J, MOLEND A M. Parameters and contact models for DEM simulations of agricultural granular materials: a review [J]. Biosystems engineering, 2016, 147: 206-225.
- [9] 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 CSAE, 2022, 38(11): 41-50 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张国忠, 陈立明, 刘浩蓬, 等. 旋刀式荸荠芽根同步切除装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 10-19. ZHANG G Z, CHEN L M, LIU H P, et al. Design and experiment of the rotary blade type synchronous cutting device for water chestnut buds and roots [J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(13): 10-19 (in Chinese with English abstract).
- [11] 焦俊, 张国忠, 杜俊, 等. 莲藕主藕体弯曲破坏离散元仿真分析[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(5): 217-225. JIAO J, ZHANG G Z, DU J, et al. Discrete element simulation of bending failure of main lotus root [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(5): 217-225 (in Chinese with English abstract).
- [12] 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 Y T, LIAO Q X, ZHOU Y, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage [J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(6): 73-82 (in Chinese with English abstract).
- [13] 余参参, 段宏兵, 蔡兴奎, 等. 基于离散元仿真参数的微型薯物料测定[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(1): 210-217. YU C C, DUAN H B, CAI X K, et al. Discrete element simulation parameters-based measurement of materials for potato minituber [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(1): 210-217 (in Chinese with English abstract).
- [14] 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 CSAE, 2019, 35(20): 34-42 (in Chinese with English abstract).
- [15] 郭三琴, 万鹏, 杨俊, 等. 基于离散元的鱼饲料仿真参数标定与试验[J]. 华中农业大学学报, 2022, 41(6): 286-295. GUO S Q, WAN P, YANG J, et al. Discrete element based calibration and test of simulation parameters for fish feed [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(6): 286-295 (in Chinese with English abstract).
- [16] 袁全春, 徐丽明, 马帅, 等. 有机肥深施肥肥块破碎刀设计与试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 44-51. YUAN Q C, XU L M, MA S, et al. Design and test of sawtooth fertilizer block crushing blade of organic fertilizer deep applicator [J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(9): 44-51 (in Chinese with English abstract).
- [17] 赵淑红, 高连龙, 袁溢文, 等. 基于离散元法的深松作业玉米秸秆运动规律[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 53-62. ZHAO S H, GAO L L, YUAN Y W, et al. Maize straw motion law in subsoiling operation using discrete element method [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 53-62 (in Chinese with English abstract).
- [18] 王立军, 刘天华, 冯鑫, 等. 农业和食品领域中颗粒碰撞恢复系数的研究进展[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20): 313-322. WANG L J, LIU T H, FENG X, et al. Research progress of the restitution coefficients of collision of particles in agricultural and food fields [J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(20): 313-322 (in Chinese with English abstract).
- [19] 朱广飞, 任嘉嘉, 王振, 等. 油茶果脱壳机的设计与工作参数优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 19-27. ZHU G F, REN J J, WANG Z, et al. Design of shelling machine for *Camellia oleifera* fruit and operating parameter optimization [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(7): 19-27 (in Chinese with English abstract).

Calibration and shear experiments of discrete element bonding parameters for water caltrop

TU Ming¹, CAO Tao¹, WAN Zhihua^{1,2}, MO Hongtao¹, ZHANG Guozhong¹

1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-Lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China;

2. School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China

Abstract To address the problem of the lack of effective discrete element models in the design and simulation analysis of water caltrop dehulling primary processing equipment, this paper carries out the research work of water caltrop discrete element parameter calibration and prototype test. The 3D inverse technique was used to obtain the water caltrop profile model, and the water caltrop intrinsic parameters and basic contact parameters were measured by physical tests. The average shearing force of the water caltrop was obtained from the uniaxial compression test as 352.95 N, and this was used as the calibration target. Based on the Hertz-Mindlin with bonding model, a water caltrop discrete element model was established to carry out virtual calibration tests on bonding parameters, and the calibration range of each parameter was initially screened by single-factor tests. The two-level analysis factor test and the steepest climb test were used to quickly screen the significant factors and their calibration intervals, and the Central composite response surface test was designed to solve the bonding parameters to determine the optimal combination of parameters in the discrete element model, and a rotary shear water caltrop simulation model was established to study the effects of different tools on water caltrop shear at different rotational speeds, which was used as a basis to design a shear vibration-type water caltrop sheller to carry out prototype tests to verify the reliability of the model. The results show that, the significant effect on the shearing force of the factor normal stiffness per unit area is 4.818×10^7 N/m³, shear stiffness per unit area is 5.343×10^8 N/m³, the remaining insignificant factors are taken as the middle level, that is, the normal stress per unit area is 1×10^7 Pa, shear stress per unit area is 1×10^7 Pa, bond radius of 1.6 mm. The shearing force of the simulated test is 352 N, with an error of 0.269%; the minimum shearing force of the rectangular tool screened from the rotary shear test is 93.20 N at 230 r/min, with an error of 0.215% from the predicted value of 92.99 N; the prototype test shows that the rectangular tool has better performance than other rotational speeds in shearing water caltrop angles at 230 r/min; the comprehensive demonstration shows that the established discrete element model of water caltrop can provide a reference basis for the design of dehulling tools and the determination of key parameters for water caltrop primary machining equipment.

Keywords Chinese water caltrop; discrete elements; bonding parameters; calibration; shear; simulation tests

(责任编辑:陆文昌)