

周捷,廖庆喜,万星宇,等.油菜联合收获机籽粒破碎离散元仿真与切碎抛送装置优化[J].华中农业大学学报,2025,44(1):265-275.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2025.01.029

油菜联合收获机籽粒破碎离散元仿真与 切碎抛送装置优化

周捷¹,廖庆喜^{1,2},万星宇^{1,2},袁佳诚^{1,2},李俊豪¹,秦一鸣¹

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

摘要 针对自主研发的油菜联合收获机切碎抛送过程中油菜籽粒易破碎导致作业损失增大的问题,开展籽粒破碎离散元仿真与切碎抛送装置的优化。基于离散元法构建油菜籽粒粘结模型并开展单轴压缩试验,通过最陡爬坡试验和Box-Behnken试验标定油菜籽粒粘结模型的最优参数组合,其法向刚度系数、切向刚度系数、临界法向应力、临界切向应力分别为 7.0×10^9 N/m、 6.82×10^9 N/m、 6.61×10^{10} Pa、 8.18×10^{10} Pa时,油菜籽粒破碎载荷仿真值为12.67 N,与物理值的相对误差为3.59%。结合油菜籽粒粘结模型,建立油菜联合收获机切碎抛送装置的仿真模型,以滚筒转速、切碎间隙、切刀数量为试验因素进行Box-Behnken试验,确定切碎抛送装置的最优参数组合,结果显示:切碎抛送装置的最优参数组合为滚筒转速450 r/min、切碎间隙30 mm、切刀数量10把。切碎抛送装置台架试验结果表明,随着切碎滚筒的转速增加,切碎抛送装置油菜籽粒破碎率呈增长趋势。田间试验结果表明,油菜联合收获机切碎抛送装置油菜籽粒平均破碎率为0.82%,切碎抛送装置作业顺畅。

关键词 油菜; 联合收获机; 切碎抛送装置; 籽粒破碎; 离散元仿真

中图分类号 S225.99 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2025)01-0265-11

油菜是我国食用植物油的重要来源,油菜产业发展对保障我国食用植物油供给安全具有重要作用^[1-2],高质量推进油菜低损高效机械化收获是保障食用油安全的重要措施。油菜联合收获是油菜机械化收获的主要方式之一,可一次性完成切割、输送、脱粒、分离、清选等工序,生产效率高^[3-4]。油菜联合收获过程中油菜籽粒在打击、碰撞、揉搓等作用易产生破碎,破碎的油菜籽粒受到微生物的侵害,影响到油菜籽粒的发芽率和利用率^[5]。因此,开展油菜籽粒破碎机制的研究具有重要意义。

国内外学者对油菜籽粒破碎进行了相关研究,王刚等^[6]研究脱粒元件、脱粒滚筒间隙、脱粒滚筒转速对油菜籽粒损伤的影响,并得到较优组合。Yuan等^[7]采用赫兹接触力学建立了弹塑性模型,研究油菜籽粒的机械损伤规律。由于油菜籽粒在装置内部受力过程复杂,难以通过物理试验准确分析油菜籽粒在装置内部的受力状态^[8],因此采用可视化、参数化的新型研究手段,借助离散元法建立油菜籽粒离散

元模型,利用虚拟试验的方法探索切碎抛送装置与油菜籽粒的相互作用过程。离散元在农业物料建模有广泛应用,张兆国等^[9]用离散元法建立了三七根茎的粘结模型,模拟根茎内部结构的连接。张锋伟等^[10]用离散元法建立了玉米秸秆的粘结模型,对玉米秸秆离散元模型进行破碎仿真。刘磊等^[11]建立玉米果穗剥皮机构相互作用仿真模型,通过对玉米果穗籽粒脱落分析,确定了机构的较优工作范围。范国强等^[12]用离散元法建立羊草模型,对饲草粉碎机进行了优化分析。郝建军等^[13]测定了麻山药物理特性,建立了麻山药双峰分布模型,并对粘结参数进行校核。刘禹辰等^[14]建立离散元玉米秸秆双层粘结双峰分布模型,通过力学试验与仿真试验对比,校正离散元模型。张喜瑞等^[15]建立香蕉秸秆离散元粘结模型并进行参数标定,对仿真剪切力结果与物理试验剪切力进行对比。离散元数值分析还广泛应用于饲料颗粒模型、有机肥散体颗粒模型、土壤模型等^[16-18],但对油菜籽粒破碎的离散元研究较为匮乏。

收稿日期:2024-01-07

基金项目:国家自然科学基金项目(52075210;52205270);湖北省自然科学基金项目(2023AFB852)

周捷,E-mail:1903696028@qq.com

通信作者:廖庆喜,E-mail:liaoqx@mail.hzau.edu.cn

通过油菜籽粒切碎抛送过程离散元仿真,开展油菜籽粒破碎研究,优化切碎抛送装置结构和运行参数,有效缩短开发周期,降低研发成本。

本研究基于离散元法构建油菜籽粒粘结模型,采用预试验、最陡爬坡试验和 Box-Behnken 试验确定油菜籽粒粘结模型最优参数组合;结合油菜籽粒粘结模型和切碎抛送仿真试验开展切碎抛送装置参数优化,确定切碎抛送装置最优参数组合;依托切碎抛送试验台开展切碎抛送台架试验,并开展油菜联合收获机切碎抛送装置田间试验,为油菜联合收获切碎抛送装置结构改进和优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 整机结构与工作原理

自主研发的 4LYZ-2.0 型油菜联合收获机结构如图 1 所示,主要技术参数如表 1 所示。其核心部件包括割台、底盘、切碎抛送装置、脱粒分离装置、旋风分离清选装置、液压驱动系统和底盘等。田间油菜植株在拨禾轮和横竖割刀的共同作用下被切断拨送,进一步被割台上的螺旋搅龙输送到切碎抛送装置中切碎,切碎后的油菜物料在切碎抛送装置的作用下,抛送至纵轴流脱粒分离装置内完成脱粒分离,脱出物进入清选装置内完成籽粒和杂余的分选,至此完成油菜的切割、输送、脱粒分离和清选等过程。

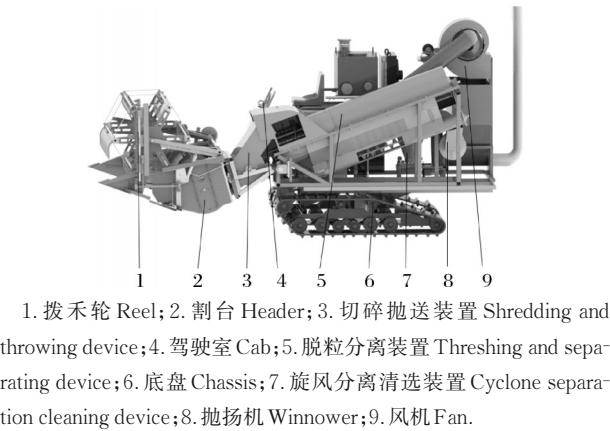


图 1 4LYZ-2.0 型油菜联合收获机总体结构
Fig.1 Overall structure of 4LYZ-2.0 rapeseed combine harvester

1.2 切碎抛送工作过程

油菜联合收获机切碎抛送装置结构与工作过程如图 2 所示,主要由喂入辊、切碎滚筒、罩壳等零部件组成。由割台输送过来的植株,在喂入辊的强制输送作用下进入切碎抛送装置,切碎滚筒在一定的线

表 1 4LYZ-2.0 型油菜联合收获机主要技术参数
Table 1 Main technical parameters of 4LYZ-2.0 rape-seed combine harvesting

参数 Parameter	数值/形式 Numerical value/form
长/mm Length	5 000
宽/mm Width	2 300
高/mm Height	2 800
配套动力/kW Supporting power	72
割幅/mm Cutting width	2 000
行走方式 Walking mode	履带自走式 Crawler self-propelled
留茬高度/mm Stubble height	100~350
驱动方式 Drive mode	液压 Hydraulic

速度下将油菜植株切断,在该过程中部分油菜籽粒发生破碎。切碎滚筒对切断后的物料有一定的推送力,将切碎后的物料往后推送,随着切碎滚筒的转动,切碎后的物料受到切碎滚筒提供的推送力和离心力作用沿着切碎抛送装置壳内壁抛送至脱粒分离装置内,完成油菜物料的输送和切碎过程,切碎抛送装置的参数如表 2 所示。

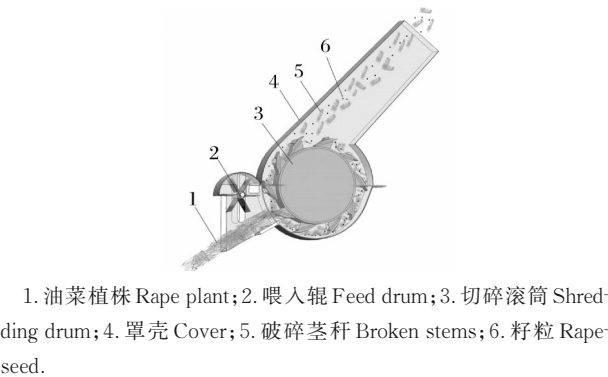


图 2 切碎抛送装置工作过程
Fig.2 Schematic diagram of the working process of the shredding and throwing device

表 2 切碎抛送装置主要参数
Table 2 Main parameters of shredding device

参数 Parameter	数值/形式 Numerical value/form
切碎滚筒宽度/mm Shredding drum width	580
切碎滚筒直径/mm Cutter drum diameter	442
切碎滚筒转速/(r/min) Chopping drum speed	400~600
切碎间隙/mm Shredding gap	20~30
切刀形式 Cutter form	直刃平板刀 Flat knife with straight edge
切刀数量 Cutter quantity	10/20/30

1.3 油菜籽粒单轴压缩物理试验

油菜籽粒为类球形种子,其球形度为

95.38%^[19],因此可将油菜籽粒简化为球体外形。选取外形完好的油菜籽粒20颗,游标卡尺测得直径平均值为1.96 mm。根据标准ASAE S368.4 DEC2000 (R2008),将油菜籽粒放置在质构仪底座上进行单轴压缩试验,压缩时设定加载速度为5 mm/min,触发力为0.1 N(图3)。

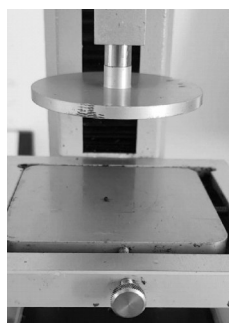


图3 油菜籽粒单轴压缩试验

Fig.3 Rapeseed grain compression test

油菜籽粒单轴压缩试验结果显示,油菜籽粒破碎平均载荷为12.23 N(图4)。由图4可知,油菜籽粒载荷-位移曲线分为3个阶段。第一阶段为单轴压缩开始阶段,油菜籽粒发生变形,载荷随着压缩位移增大呈近似直线增长;第二阶段为油菜籽粒破坏过程,当载荷超过油菜籽粒所能承受的极限时,油菜籽粒主体发生破坏,载荷达到最大值后骤然降低;第三阶段为油菜籽粒破碎后,压缩平板继续向下位移,载荷持续增加。

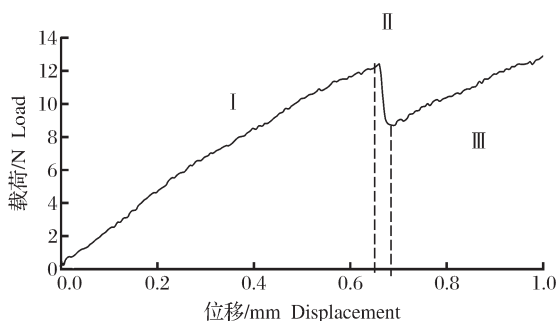


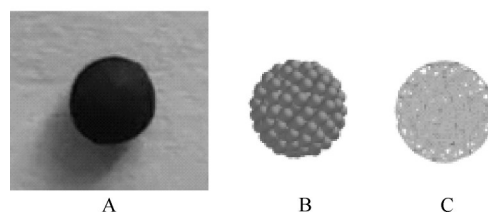
图4 油菜籽粒单轴压缩过程载荷-位移曲线

Fig.4 Load-displacement curve of rapeseed during uniaxial compression

1.4 油菜籽粒单轴压缩仿真模型构建

离散元粘结模型通过使用一定强度的粘结键将微球颗粒粘结填充成颗粒聚集体,微球颗粒之间粘结键强度由法向接触刚度、切向接触刚度、临界法向应力及临界切向应力等参数决定,因此离散元粘结模型可以模拟物料的破碎过程。本研究采用离散元粘结模型建立油菜籽粒的模型,在Solidworks中建立

直径为1.96 mm的球体三维模型,导入到EDEM中用均匀分布的直径0.4 mm微球颗粒填充,微球颗粒由于粘结键的约束而保持油菜籽粒的外形,油菜籽粒模型和粘结键如图5所示。

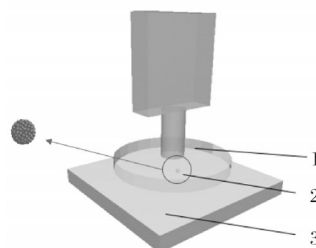


A: 油菜籽粒 Rapeseed; B: 颗粒填充模型 Particle filling model; C: 粘结键模型 Bond model.

图5 油菜籽粒粘结模型

Fig.5 Rapeseed bonding model

采用Hertz-Mindlin模型进行油菜籽粒单轴压缩仿真试验(图6)。通过三维软件Solidworks建立单轴压缩试验模型并导入EDEM中,初始时压缩头起始位置位于底座正上方2 mm处,压缩时垂直向下运动,设定压缩平板运动速度为5 mm/min。油菜籽粒本征参数和接触参数基本数值如表3所示^[20],设置仿真总时间为6 s、步长为 4.4×10^{-7} s、网格尺寸取3倍最小颗粒半径。



1. 压缩平板 Compression plate; 2. 油菜籽粒模型 Rapeseed bonding model; 3. 底板 Bottom plate.

图6 油菜籽粒单轴压缩仿真试验模型

Fig.6 Uniaxial compression simulation model

1.5 切碎抛送过程仿真模拟的建立

基于表2切碎抛送装置主要参数完成切碎抛送装置的建模,其中切刀数量分别为10、20、30把,切碎间隙分别为20、25、30 mm,根据等效原理对切碎抛送装置进行整体规划,细化模型网格。在切碎抛送仿真试验中,结合油菜籽粒离散元粘结模型的最优参数组合设定油菜籽粒模型的参数,接触参数参照表3设定。在入口区域添加虚拟box作为颗粒工厂,颗粒工厂油菜籽粒生成速度为5 000 个/s,生成的油菜籽粒直径为1.96 mm,油菜籽粒模型直径相等,且以2 m/s的初速度喂入至切碎抛送装置。综合仿真精度与效率,生成的油菜籽粒数量为300个,设定切

表 3 油菜籽粒单轴压缩仿真模型参数
Table 3 Simulation model parameters for
uniaxial compression of rapeseed

参数 Parameter	数值 Value
油菜籽粒泊松比 Poisson's ratio of rapeseed	0.25
油菜籽粒剪切模量/Pa Shearing modulus of rapeseed	1.1×10^7
油菜籽粒密度/(kg/m ³) Rapeseed density	1 060
籽粒-籽粒碰撞恢复系数 Rapeseed-rapeseed collision recovery coefficient	0.3
籽粒-籽粒静摩擦因素 Rapeseed-rapeseed static friction coefficient	0.4
籽粒-籽粒滚动摩擦因素 Rapeseed-rapeseed rolling friction coefficient	0.015
籽粒-钢碰撞恢复系数 Rapeseed-steel collision recovery coefficient	0.62
籽粒-钢静摩擦因素 Rapeseed-steel static friction coefficient	0.215
籽粒-钢滚动摩擦因素 Rapeseed-steel rolling friction coefficient	0.012 5

碎抛送仿真试验时间为 10 s,仿真设置 Rayleigh 时间步长为 6.9×10^{-6} s,网格半径尺寸为 3 倍颗粒半径,总共产生 7 363 200 个网格,如图 7 所示。

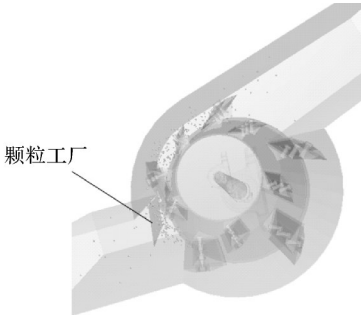


图 7 切碎抛送装置模型

Fig.7 Shredding and throwing device model

油菜籽粒抛送过程相对复杂,在初始阶段,籽粒以一定的初速度喂入至切碎抛送装置内,在喂入口籽粒与切碎滚筒上的刀片产生接触作用;随着籽粒进一步运动,在切碎滚筒与罩壳的切碎间隙内,油菜籽粒与切碎抛送装置刀片、切碎滚筒外壳等产生碰撞作用;最后籽粒在切碎滚筒的回转作用下抛出。此过程中部分油菜籽粒发生破碎,油菜籽粒破碎状态如图 8 所示。

在 EDEM 后处理中添加 Grid Bin Group,监测位置在切碎抛送装置的抛送通道中,调整 Grid Bin Group 区域大小,移动到单个破碎油菜籽粒上。通过使用粘结颗粒方法(bonded particle method),在仿真分析中可以观察到油菜籽粒破碎的外形。油菜籽粒

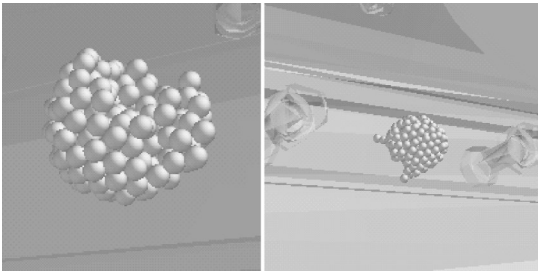


图 8 仿真模型中油菜籽粒破碎状态

Fig.8 Damage state of rapeseed in the simulation model

与油菜籽粒之间距离大,调整 Grid Bin Group 区域大小,使破碎的油菜籽粒在 Grid Bin Group 区域内部,其他完好的油菜籽粒在 Grid Bin Group 区域外部,分离破碎油菜籽粒和完整的油菜籽粒,在 Grid Bin Group 区域内部的油菜籽粒呈现橘黄色,区域外部的油菜籽粒呈现默认颜色。破碎的油菜籽粒数量较少,将 Grid Bin Group 移动到破碎油菜籽粒上,得到单个破碎油菜籽粒质量,并依次统计破碎的油菜籽粒的质量。计算油菜籽粒的破碎率。

$$Y_b=\frac{m_p}{m_0}\times 100\% \tag{1}$$

式(1)中, Y_b 为仿真油菜籽粒破碎率,%; m_p 为仿真试验中破碎油菜籽粒质量,g; m_0 为仿真试验中油菜籽粒总质量,g。

2 结果与分析

2.1 油菜籽粒粘结模型最陡爬坡试验

油菜籽粒模型法向刚度系数 X_1 、切向刚度系数 X_2 、临界法向应力 X_3 、临界切向应力 X_4 是粘结模型的主要参数^[21]。油菜籽粒单轴压缩仿真预试验结果显示, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别为 1.1×10^9 N/m、 1.1×10^9 N/m、 1.1×10^{10} Pa、 1.1×10^{10} Pa 时,油菜籽粒粘结模型压缩破碎载荷为 1.8 N;当 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别为 1.1×10^{10} N/m、 1.1×10^{10} N/m、 1.1×10^{11} Pa、 1.1×10^{11} Pa 时,油菜籽粒粘结模型压缩破碎载荷为 23.6 N。

为进一步确定各因素水平较优值区间,进行最陡爬坡试验,以 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 为因素,以破碎载荷 Y 为指标进行试验。油菜籽粒破碎平均物理载荷为 12.23 N,仿真预试验破碎载荷 1.8~23.6 N,此外根据预试验结果可知, X_1 、 X_2 对压缩破碎力的影响为正相关, X_3 、 X_4 对压缩破碎力的影响为负相关,因此设定 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 的初值分别为 1.1×10^9 N/m、 1.1×10^9 N/m、 1.1×10^{11} Pa、 1.1×10^{11} Pa,设置步长为预试验区间值的 20%,最陡爬坡试验结果如表 4 所示。

表 4 最陡爬坡试验设计与结果

Table 4 Steepest climb test plan design and results

序号 No.	$X_1/(\times 10^9 \text{ N/m})$	$X_2/(\times 10^9 \text{ N/m})$	$X_3/(\times 10^{10} \text{ Pa})$	$X_4/(\times 10^{10} \text{ Pa})$	Y/N
1	1.1	1.1	11	11	1.80
2	3.1	3.1	9	9	6.06
3	5.1	5.1	7	7	10.38
4	7.1	7.1	5	5	14.86
5	9.1	9.1	3	3	18.45
6	11.1	11.1	1	1	20.70

由表 4 可知,油菜籽粒粘结模型单轴压缩仿真最陡爬坡试验中破碎载荷逐渐增加,仿真试验中破碎载荷和真实值之间的误差先减后增,物理破碎载荷在 2 号和 4 号试验数值之间。

2.2 油菜籽粒粘结模型 Box-Behnken 试验

根据最陡爬坡试验结果,选取 2 号和 4 号试验分别作为低水平和高水平,进行四因素三水平 Box-Behnken 试验(表 5、表 6)。

表 5 单轴压缩试验因素编码值

Table 5 Uniaxial compression test factors coding

编码 Code	$X_1/(\times 10^9 \text{ N/m})$	$X_2/(\times 10^9 \text{ N/m})$	$X_3/(\times 10^{10} \text{ Pa})$	$X_4/(\times 10^{10} \text{ Pa})$
-1	3.1	3.1	5	5
0	5.1	5.1	7	7
1	7.1	7.1	9	9

由表 7 可知, X_1 、 X_2 对油菜籽粒粘结模型破碎载荷影响极显著; X_3 对油菜籽粒模型破碎载荷影响显著, $P<0.05$ 表明该模型的各个参数与响应值之间的关系显著,失拟项 $P=0.224\ 7$,大于 0.05,表明该模型拟合良好。对试验结果进行多元回归拟合,剔除不显著项得出的油菜籽粒模型破碎载荷与因素的回归方程为:

$$Y=9.53+2.29X_1+1.21X_2-0.52X_3$$

(2)

2.3 油菜籽粒粘结模型参数优化与验证

为准确取得油菜籽粒粘结模型中各个因素较优参数组合,以油菜籽粒物理破碎载荷为优化目标,对法向刚度系数、切向刚度系数、临界法向应力和临界切向应力进行参数优化。结合 Box-Behnken 试验中各因素的低水平和高水平取值,确定约束条件,建立目标及约束函数,如式(3)所示。

$$\begin{cases} Y=12.23\text{ N} \\ 3.1\times 10^9\text{ N/m}\leqslant X_1\leqslant 7.1\times 10^9\text{ N/m} \\ 3.1\times 10^9\text{ N/m}\leqslant X_2\leqslant 7.1\times 10^9\text{ N/m} \\ 5.0\times 10^{10}\text{ Pa}\leqslant X_3\leqslant 9.0\times 10^{10}\text{ Pa} \\ 5.0\times 10^{10}\text{ Pa}\leqslant X_4\leqslant 9.0\times 10^{10}\text{ Pa} \end{cases}$$

(3)

表 6 Box-Behnken 单轴压缩试验结果

Table 6 Box-Behnken uniaxial compression test results

序号 No.	$X_1/(\times 10^9 \text{ N/m})$	$X_2/(\times 10^9 \text{ N/m})$	$X_3/(\times 10^{10} \text{ Pa})$	$X_4/(\times 10^{10} \text{ Pa})$	Y/N
1	5.1	3.1	7	5	7.95
2	7.1	5.1	9	7	13.43
3	3.1	7.1	7	7	9.41
4	5.1	7.1	9	7	10.67
5	5.1	5.1	9	9	10.65
6	5.1	3.1	9	7	10.04
7	3.1	5.1	7	5	6.58
8	5.1	5.1	5	5	9.83
9	5.1	5.1	7	7	9.77
10	5.1	5.1	9	5	9.35
11	7.1	5.1	7	9	11.47
12	3.1	5.1	7	9	6.22
13	5.1	7.1	5	7	9.73
14	3.1	5.1	9	7	8.26
15	5.1	5.1	7	7	8.55
16	7.1	5.1	5	7	11.94
17	7.1	3.1	7	7	10.01
18	3.1	5.1	5	7	7.10
19	5.1	5.1	5	9	10.27
20	5.1	3.1	5	7	7.28
21	5.1	5.1	7	7	9.90
22	5.1	7.1	7	9	10.38
23	5.1	5.1	7	7	9.29
24	5.1	3.1	7	9	7.97
25	5.1	5.1	7	7	9.68
26	5.1	7.1	7	5	10.59
27	7.1	5.1	7	5	11.19
28	7.1	7.1	7	7	12.88
29	3.1	3.1	7	7	5.86

利用 Design-Expert 软件进行优化求解,得到与物理试验测定结果相近的一组解,优化求解的数值与物理试验破碎载荷的相对误差为 0.06%,求解结果为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 分别为 $7.0\times 10^9\text{ N/m}$ 、 $6.82\times 10^9\text{ N/m}$ 、 $6.61\times 10^{10}\text{ Pa}$ 、 $8.18\times 10^{10}\text{ Pa}$ 。

油菜籽粒单轴压缩过程如图 9 所示,油菜籽粒粘结模型与压缩平板刚接触时,油菜籽粒模型未发生形变(图 9A);随着压缩头的继续下移,油菜籽粒粘结模型受到的载荷也逐渐增大,导致油菜籽粒产生形变(图 9B);随着压缩头移动到一定距离,油菜籽粒受到的载荷超过油菜籽粒的强度极限,油菜籽粒粘结模型中的粘结键断开,油菜籽粒破碎(图 9C)。

单轴压缩仿真试验载荷-位移曲线如图 10 所示,在油菜籽粒破碎前,单轴压缩仿真试验和物理试验中的油菜籽粒受到载荷均随位移增大而增大。在物

表 7 破碎载荷模型方差分析

Table 7 Variance analysis of crushing load model

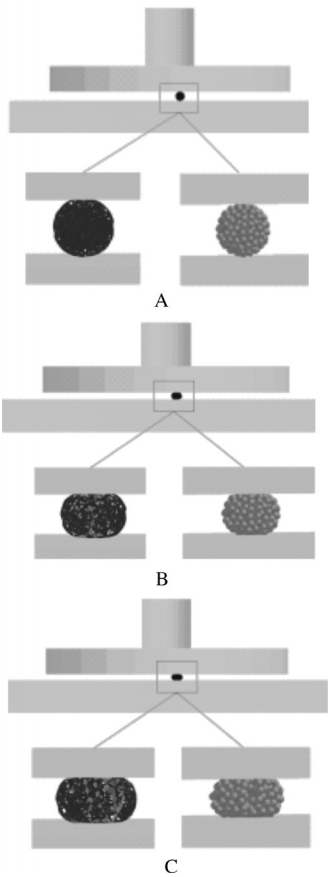
方差来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom	均方 Mean square	<i>F</i>	<i>P</i>
模型 Model	88.32	14	6.31	11.15	<0.000 1**
<i>X</i> ₁	62.98	1	62.98	111.25	<0.000 1**
<i>X</i> ₂	17.64	1	17.64	31.17	<0.000 1**
<i>X</i> ₃	3.26	1	3.26	5.75	0.031 0*
<i>X</i> ₄	0.18	1	0.18	0.32	0.581 7
<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₂	0.12	1	0.12	0.20	0.658 3
<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₃	0.027	1	0.027	0.048	0.829 6
<i>X</i> ₁ <i>X</i> ₄	0.1	1	0.10	0.18	0.677 1
<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₃	0.83	1	0.83	1.46	0.246 5
<i>X</i> ₂ <i>X</i> ₄	0.013	1	0.013	0.023	0.880 7
<i>X</i> ₃ <i>X</i> ₄	0.18	1	0.18	0.33	0.576 7
<i>X</i> ₁ ²	0.006 07	1	0.006 07	0.011	0.919 0
<i>X</i> ₂ ²	0.18	1	0.18	0.32	0.581 0
<i>X</i> ₃ ²	2	1	2.00	3.54	0.081 0
<i>X</i> ₄ ²	0.28	1	0.28	0.49	0.495 1
残差 Residual	7.92	14	0.57		
失拟项 Lack of fit	6.73	10	0.67	2.26	0.224 7
纯误差 Pure error	1.19	4	0.30		
总和 Total	96.25	28			

理试验和仿真试验中,当油菜籽粒压缩位移分别为 0.72、0.67 mm 时,油菜籽粒达到承受载荷极限,油菜籽粒发生破碎,载荷急剧下降;随着压缩平板继续向下运动,油菜籽粒承受的载荷继续升高。由图 10 可知,开始时单轴压缩仿真试验载荷-位移曲线的整体趋势与单轴压缩物理试验载荷-位移曲线接近。

对优化后的参数组合进行验证试验,此时油菜籽粒粘结模型的破碎载荷为 12.67 N,油菜籽粒粘结模型破碎载荷与籽粒破碎载荷物理值的误差为 3.59%,表明油菜籽粒粘结模型的参数标定较为可靠。油菜籽粒压缩破碎物理试验和仿真试验如图 11 所示,油菜籽粒模型仿真试验痕迹与油菜籽粒破碎物理试验接近。

2.4 基于 EDEM 的切碎抛送装置参数优化

以滚筒转速 *A*、切碎间隙 *B*、切刀数量 *C* 为影响因素,以油菜籽粒破碎率 *Y*₂ 为评价指标,开展 Box-Behnken 试验,根据表 2 切碎抛送装置的参数确定滚筒转速、切碎间隙和切刀数量的试验水平范围,试验因素及编码如表 8 所示,试验结果如表 9 所示。



A: 初始接触 Initial contac; B: 油菜籽粒受载未破碎 Rape seeds are loaded and not broken; C: 油菜籽粒破碎 Rape seeds broken.

图 9 油菜籽粒模型单轴压缩过程
Fig.9 Uniaxial compression process of rapeseed grain model

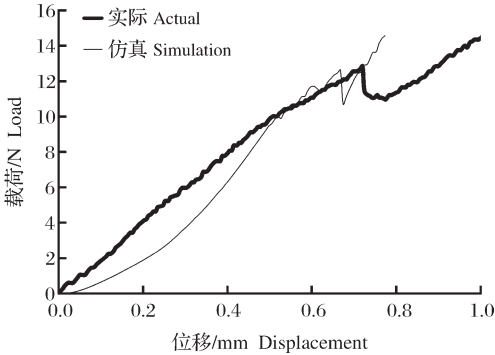


图 10 油菜籽粒单轴压缩仿真与物理试验曲线
Fig.10 Comparison curve of rapeseed uniaxial compression test

利用 Design-Expert 8.0 软件进行多元回归拟合分析,剔除不显著项后建立油菜籽粒破碎率 *Y*₂ 与滚筒转速、切碎间隙、切刀数量之间的回归模型,如式 (4) 所示,并进行方差分析。由表 10 可知, *A* 对切碎抛送装置籽粒破碎率影响极显著, *B* 和 *C* 对切碎抛送

表 8 切碎抛送装置优化试验因素水平

Table 8 Optimization test factor level of chopping and throwing device

水平 Level	A/(r/min)	B/mm	C
1	450	20	10
2	500	25	20
3	550	30	30

表 9 切碎抛送装置优化试验结果

Table 9 Optimal results of chopping and throwing device

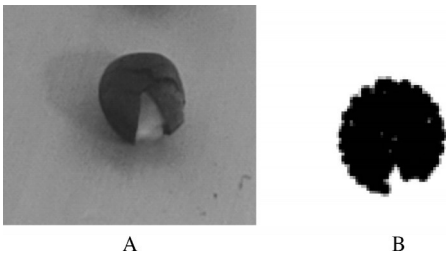
序号 No	A/(r/min)	B/mm	C	Y ₂ /%
1	500	25	20	1.68
2	500	20	10	1.42
3	500	30	10	1.08
4	550	25	30	2.12
5	450	30	20	1.06
6	500	25	20	1.53
7	500	20	30	1.82
8	450	20	20	1.16
9	500	25	20	1.36
10	550	30	20	1.81
11	550	20	20	1.92
12	450	25	10	0.98
13	500	25	20	1.31
14	450	25	30	1.26
15	550	25	10	1.80
16	500	30	30	1.32
17	500	25	20	1.55

表 10 籽粒破碎率模型方差分析

Table 10 Variance analysis of grain breakage rate model

方差来源 Source of variance	自由度 Freedom	均方 Mean square	F	P
模型 Model	9	0.180	8.880	0.004 4**
A	1	1.270	61.860	0.000 1**
B	1	0.140	6.700	0.036*
C	1	0.190	9.350	0.018 4*
AB	1	0.000 025 0	0.001 21	0.973
AC	1	0.000 4	0.019	0.893
BC	1	0.064	0.310	0.594
A ²	1	0.018	0.880	0.378
B ²	1	0.017	0.840	0.388
C ²	1	0.000 5	0.028	0.871
残差 Residual	7	0.020		
失拟项 Misfitting term	3	0.017	0.780	0.560
纯误差 Pure error	4	0.023		
总和 Total	16			

装置籽粒破碎率影响显著,影响主次顺序为A>C>B。回归模型P<0.01,表明回归模型高度显著,模型失拟项>0.05,表明回归模型的拟合度较高。



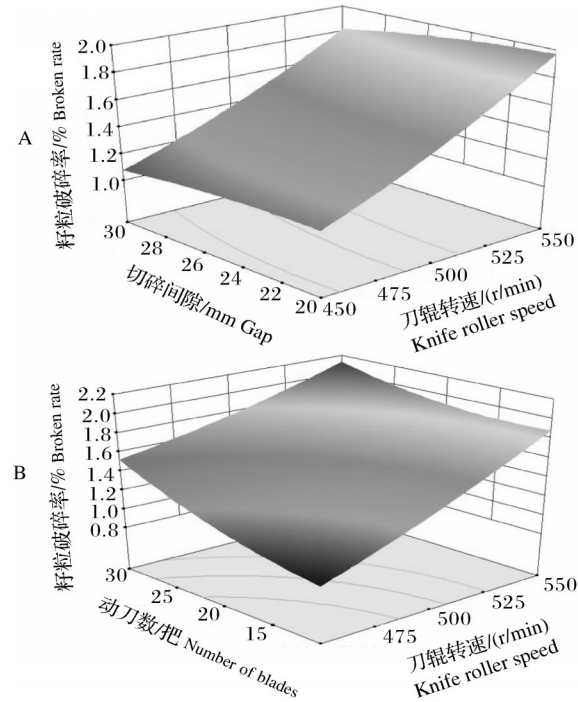
A:物理试验 Physical test;B:仿真试验 Simulation test.

图 11 油菜籽粒单轴压缩物理与仿真试验

Fig.11 Comparison of rapeseed compression test and simulation test

$$Y_2 = 1.48 + 0.4A - 0.13B + 0.16C \quad (4)$$

根据 Box-Behnken 试验结果生成响应面图(图 12)。切碎滚筒转速和切碎间隙的交互影响规律表明:当切碎滚筒转速增加时,籽粒破碎率逐渐增加,并且变动幅度相对较大。切碎滚筒转速和切刀数量的交互影响规律表明:随着切碎滚筒转速增加,油菜籽粒破碎率呈增长趋势;随着切刀数量增加,油菜籽粒破碎率呈增长趋势。



A:A 与 B 对籽粒破碎率的影响 Effect of interaction between A and B on broken rate;B:A 与 C 对籽粒破碎率的影响 Effect of interaction between C and A on broken rate.

图 12 各因素对籽粒破碎率的影响

Fig.12 Effect of various factors on the crushing rate of grain

为寻求切碎抛送装置最优参数组合,对回归模型进行求解,根据切碎抛送装置工作条件、性能要求设定优化函数与约束条件,如式(5)所示。

$$\begin{cases} \text{Min } Y_2 \\ 450 \text{ r/min} \leq A \leq 550 \text{ r/min} \\ 20 \text{ mm} \leq B \leq 30 \text{ mm} \\ 10 \leq C \leq 30 \end{cases} \quad (5)$$

经求解得到优化参数组合为:刀辊转速 451.78 r/min、切碎间隙 29.24 mm、切刀数量 10.59 把,此时目标函数求解结果为 0.89%。为便于实际应用,对最优参数组合进行圆整,切碎抛送装置最优参数组合为刀辊转速 450 r/min、切碎间隙 30 mm、切刀数量 10 把。

2.5 切碎抛送装置台架试验

切碎抛送装置试验台主要包括机架、螺旋搅龙、罩壳、切碎滚筒、传动机构、驱动电机等(图 13),切碎抛送装置试验台切碎刀辊由电机带动,转速无级可调。试验材料为人工收割挂藏的成熟期油菜,品种为华油杂 62,分支数为 6~8,茎秆直径为 12.4~16.1 mm,切碎抛送装置台架试验中刀片数量为 10 把,切碎间隙为 30 mm。将油菜铺放在试验台输送带上,并调节切碎抛送装置关键部件转速,试验过程中设定切碎滚筒转速分别为 400、450、500、550、600 r/min。启动各部件完成油菜植株的喂入、切碎和抛送作业,并收集切碎抛送装置排料口处的物料。



1. 输送带 Conveyor belt; 2. 油菜植株 Rape plant; 3. 割台喂入搅龙 Header feeding auger; 4. 喂入辊 Feeding drum; 5. 切碎滚筒 Shredding drum; 6. 罩壳 Cover; 7. 出料口 Material export.

图 13 切碎抛送台架试验

Fig.13 Chopping and throwing bench test

从收集的油菜籽粒中取 20 g 油菜籽粒,将出现破碎的油菜籽粒挑出,对试验后出现破碎的油菜籽粒进行称量,计算油菜籽粒破碎率:

$$Y_2 = \frac{m_4}{m_3} \times 100\% \quad (6)$$

式(6)中, Y_2 为台架试验油菜籽粒破碎率,%; m_4 为台架试验中破碎油菜籽粒质量, g; m_3 为台架试验中油菜籽粒样品质量, g。

切碎抛送装置台架试验和仿真试验结果如图 14 所示,切碎抛送仿真试验中油菜籽粒破碎率为 0.67%~2.33%,切碎抛送台架试验中油菜籽粒破

碎率为 0.48%~1.78%。随着滚筒转速增加,切碎抛送仿真试验中油菜籽粒破碎率呈升高趋势,切碎抛送台架试验中油菜籽粒破碎率呈升高趋势。

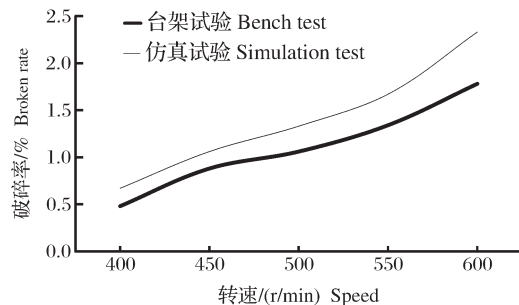
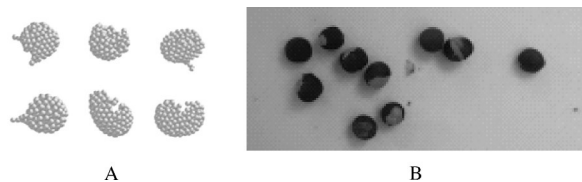


图 14 不同转速下油菜籽粒破碎率

Fig.14 Rapeseed broken rate at different rotational speed

切碎抛送仿真试验中油菜籽粒粘结模型破碎状态如图 15A 所示,台架中部分油菜籽粒破碎状态如图 15B 所示,切碎抛送仿真试验中油菜籽粒破碎状态与切碎抛送台架试验中油菜籽粒破碎状态接近。



A: 仿真试验 Simulation test; B: 台架试验 Bench test.

图 15 油菜籽粒切碎抛送破碎状态对比

Fig.15 Comparison of rapeseed grain damage state

2.6 田间试验

根据优化分析所得最优参数组合,试制加工切碎抛送装置,并安装到油菜联合收获机上进行田间试验,田间试验于 2023 年 5 月在湖北省武汉市华中农业大学现代农业科技试验基地开展(图 16)。适收期油菜基本无倒伏现象,油菜品种为华油杂 62,油菜平均种植密度为 42 株/m²;设置切碎抛送装置滚筒转速为 450 r/min、切碎间隙 30 mm、切刀数量 10 把。由于田间作业地表工况复杂,油菜植株长势、种植密度不一致等原因,导致实际作业速度是波动变化的,机具前进速度为 1.2~3.6 km/h。在田间试验过程中收集切碎抛送装置出料口处物料,并对出口处的籽粒进行筛分,挑选出破碎籽粒质量,计算籽粒破碎率的平均值。田间试验过程中油菜联合收获机在不同机组前进速度范围内,切碎抛送装置作业顺畅,切碎抛送装置油菜籽粒破碎率平均值为 0.82%。



图16 田间试验

Fig.16 Field test

3 讨论

本研究基于离散元法建立了油菜籽粒粘结模型,并进行了单轴压缩仿真试验,以单轴压缩破碎载荷为响应值,开展预实验、最陡爬坡试验和 Box-Behnken 试验,标定了油菜籽粒粘结模型的最优参数组合,结果显示油菜籽粒模型的法向刚度系数、切向刚度系数、临界法向应力、临界切向应力分别为 7.0×10^9 N/m、 6.82×10^9 N/m、 6.61×10^{10} Pa、 8.18×10^{10} Pa 时,油菜籽粒破碎载荷仿真值为 12.67 N,与油菜籽粒破碎载荷物理值的相对误差为 3.59%,表明油菜籽粒模型参数标定较为可靠。单轴压缩仿真试验载荷-位移曲线的整体趋势与单轴压缩物理试验载荷-位移曲线接近,单轴压缩仿真试验中油菜籽粒模型与物理试验油菜籽粒破碎痕迹接近。

结合标定的油菜籽粒粘结模型,建立了油菜联合收获机切碎抛送装置的仿真模型,以滚筒转速、切碎间隙、切刀数量为试验因素进行 Box-Behnken 试验,确定了切碎抛送装置的最优参数组合,结果显示切碎抛送装置的最优参数组合为滚筒转速 450 r/min、切碎间隙 30 mm、切刀数量 10 把。

切碎抛送装置滚筒转速与油菜籽粒破碎率关系试验结果表明,切碎抛送装置滚筒转速 400~600 r/min 时,随着滚筒转速增加,切碎抛送仿真试验中油菜籽粒破碎率呈升高趋势,切碎抛送台架试验中油菜籽粒破碎率呈升高趋势,仿真试验中的油菜籽粒模型破碎状态与台架试验中油菜籽粒破碎状态接近。田间试验结果表明,油菜联合收获机切碎抛送装置油菜籽粒平均破碎率为 0.82%,切碎抛送装置作业顺畅。

油菜联合收获机切碎抛送过程中物料更具复杂性,物料不同组分混杂、油菜籽粒直径存在差异、油

菜籽粒外部有果荚等。因此,后续应结合物料特征,建立合适的物料仿真模型,为优化切碎抛送装置的优化设计提供更准确的指导。

参考文献 References

- [1] 万星宇,袁佳诚,廖庆喜,等.油菜联合收获机凸块扰流式旋风分离清选装置研究[J].农业机械学报,2023,54(1):159-172.WAN X Y, YUAN J C, LIAO Q X, et al.Design and experiment of cyclone separation cleaning device with raised cylinder disturbing airflow field for rapeseed combine harvest[J]. Transactions of the CSAM, 2023, 54(1): 159-172(in Chinese with English abstract).
- [2] 王汉中.以新需求为导向的油菜产业发展战略[J].中国油料作物学报,2018,40(5):613-617.WANG H Z.New-demand oriented oilseed rape industry developing strategy[J].Chinese journal of oil crop sciences, 2018, 40(5): 613-617(in Chinese with English abstract).
- [3] 万星宇,廖宜涛,袁佳诚,等.油菜联合收获机组式旋风分离清选参数分析与试验[J].农业机械学报,2020,51(S2):202-211.WAN X Y, LIAO Y T, YUAN J C, et al.Parameter analysis and experiment of combined cyclone separation and cleaning of rape combine harvester[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(S2): 202-211(in Chinese with English abstract).
- [4] 廖庆喜,徐阳,袁佳诚,等.油菜联合收获机切抛组合式纵轴流脱离装置设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(7):140-150.LIAO Q X, XU Y, YUAN J C, et al.Design and experiment on combined cutting and throwing longitudinal axial flow threshing and separating device of rape combine harvester[J]. Transactions of the CSAM, 2019, 50(7): 140-150(in Chinese with English abstract).
- [5] 吴明亮,官春云,方耿,等.挤压及剪切作用对油菜籽粒发芽率的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2009,35(3):329-330.WU M L, GUAN C Y, FANG G, et al.Influence of extrusion and shear force on rate of rapeseed germination[J].Journal of Hunan Agricultural University (natural sciences), 2009, 35(3): 329-330(in Chinese with English abstract).
- [6] 王刚,关卓怀,沐森林,等.油菜联合收获机种子籽粒脱粒装置结构及运行参数优化[J].农业工程学报,2017,33(24):52-57.WANG G, GUAN Z H, MU S L, et al.Optimization of operating parameter and structure for seed thresher device for rape combine harvester[J].Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 52-57(in Chinese with English abstract).
- [7] YUAN J C, WAN X Y, LIAO Q X, et al.Mechanical compression characteristics of rapeseed based on continuous damage theory[J].Biosystems engineering, 2022, 224: 301-312.
- [8] WANG L J, LI R, WU B X, et al.Determination of the coeffi-

- cient of rolling friction of an irregularly shaped maize particle group using physical experiment and simulations[J]. *Particuology*, 2018, 38: 185-195.
- [9] 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 CSAM*, 2022, 53(5): 100-111 (in Chinese with English abstract).
- [10] 张锋伟,宋学锋,张雪坤,等.玉米秸秆揉丝破碎过程力学特性仿真与试验[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(9): 58-65. ZHANG F W, SONG X F, ZHANG X K, et al. Simulation and experiment on mechanical characteristics of kneading and crushing process of corn straw[J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(9): 58-65 (in Chinese with English abstract).
- [11] 刘磊,杜岳峰,栗晓宇,等.基于离散元法的种子玉米剥皮过程籽粒损失分析与试验[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(S2): 28-38. LIU L, DU Y F, LI X Y, et al. Analysis and experiment on kernel loss of seed corn during peeling based on DEM[J]. *Transactions of the CSAM*, 2022, 53(S2): 28-38 (in Chinese with English abstract).
- [12] 范国强,王忠宇,王保兴,等.旋筒供料锤式饲草粉碎机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(12): 43-53. FAN G Q, WANG Z Y, WANG B X, et al. Design and experiment of rotary feed tube hammer grinder[J]. *Transactions of the CSAM*, 2021, 52(12): 43-53 (in Chinese with English abstract).
- [13] 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).
- [14] 刘禹辰,张锋伟,宋学锋,等.基于离散元法玉米秸秆双层粘结模型力学特性研究[J]. *东北农业大学学报*, 2022, 53(1): 45-54. LIU Y C, ZHANG F W, SONG X F, et al. Study on mechanical properties for corn straw of double-layer bonding model based on discrete element method[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2022, 53(1): 45-54 (in Chinese with English abstract).
- [15] 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 CSAM*, 2023, 54(5): 121-130 (in Chinese with English abstract).
- [16] 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. Parameter calibration and experiment of fish feed simulation based on discrete element[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2022, 41(6): 286-295 (in Chinese with English abstract).
- [17] 田辛亮,丛旭,齐江涛,等.黑土区玉米秸秆-土壤混料离散元模型参数标定[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(10): 100-108. TIAN X L, CONG X, QI J T, et al. Parameter calibration of discrete element model for corn straw-soil mixture in black soil areas[J]. *Transactions of the CSAM*, 2021, 52(10): 100-108 (in Chinese with English abstract).
- [18] 袁全春,徐丽明,邢洁洁,等.机施有机肥散体颗粒离散元模型参数标定[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(18): 21-27. YUAN Q C, XU L M, XING J J, et al. Parameter calibration of discrete element model of organic fertilizer particles for mechanical fertilization[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(18): 21-27 (in Chinese with English abstract).
- [19] 饶罡,赵武云,石林榕,等.双低油菜籽粒离散元仿真参数标定与试验验证[J]. *中国农业大学学报*, 2023, 28(11): 192-207. RAO G, ZHAO W Y, SHI L R, et al. Calibration and experimental validation of discrete element simulation parameters for double-low rapeseed[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(11): 192-207 (in Chinese with English abstract).
- [20] 舒彩霞,杨佳,万星宇,等.联合收获油菜脱出物离散元仿真参数标定与试验[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(9): 34-43. SHU C X, YANG J, WAN X Y, et al. Calibration and experiment of the discrete element simulation parameters of rape threshing mixture in combine harvester[J]. *Transactions of the CSAE*, 2022, 38(9): 34-43 (in Chinese with English abstract).
- [21] 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).

Discrete element simulation and optimization of seed crushing in shredding and throwing device for rapeseed combined harvester

ZHOU Jie¹, LIAO Qingxi^{1,2}, WAN Xingyu^{1,2}, YUAN Jiacheng^{1,2}, LI Junhao¹, QIN Yiming¹

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

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

Abstract The discrete element simulation of seed crushing in the rapeseed combined harvester and optimization of shredding and throwing device were conducted to solve the problems of increased operational losses caused by the breakage of rapeseed seeds during the shredding and throwing process of the self-developed rapeseed combined harvester. A rapeseed seed bonding model was constructed based on discrete element method and uniaxial compression tests were carried out. The optimal combination of parameters for rapeseed seed bonding model was calibrated through the steepest climbing experiment and Box-Behnken experiment. A simulation model of the shredding and throwing device for the rapeseed combined harvester was established based on the rapeseed seed bonding model. Box-Behnken experiment with three-factor and three-level was conducted with the rotating speed of the drum, the shredding clearance and the number of cutters as experimental factors to determine the optimal combination of parameters for the shredding and throwing device. Bench experiment and field experiment of the rapeseed shredding and throwing device were performed as well. The results showed that the simulated value of rapeseed seed crushing load was 12.67 N, and the relative error with the physical value was 3.59% when the normal stiffness coefficient, tangential stiffness coefficient, critical normal stress, and critical tangential stress was 7.0×10^9 N/m, 6.82×10^9 N/m, 6.61×10^{10} Pa, 8.18×10^{10} Pa, respectively. The optimal combination of parameters for the shredding and throwing device was a rotating speed of the drum of 450 r/min, a shredding clearance of 30 mm, and 10 cutters. The crushing rate of rapeseed seeds in the shredding and throwing device showed a trend of linear increase with the increase of the rotation speed of the shredding drum. The average crushing rate of rapeseed seeds in the shredding and throwing device for the rapeseed combined harvester was 0.82%, and the operation of the shredding and throwing device was smooth. It will provide a reference for the improvement and optimization of the structure of the shredding and throwing device for the rapeseed combined harvester.

Keywords rapeseed; combined harvester; shredding and throwing device; seed crushing; discrete element simulation

(责任编辑:陆文昌)