

引用格式:

侯杰, 王修善, 谢方平, 刘大为, 陈志刚. 基于刚柔耦合的水稻脱粒滚筒仿真分析与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(1): 71-78.

HOU J, WANG X S, XIE F P, LIU D W, CHEN Z G. Simulation analysis and experiment of rice threshing drum based on rigid flexible coupling[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(1): 71-78.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



基于刚柔耦合的水稻脱粒滚筒仿真分析与试验

侯杰¹, 王修善^{1,2}, 谢方平^{1,2*}, 刘大为^{1,2}, 陈志刚¹

(1.湖南农业大学机电工程学院, 湖南 长沙 410128; 2.智能农机装备湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128)

摘要: 为降低4LZ-4.0型联合收割机收作业中籽粒破碎率, 提高清洁度, 依托纵轴流差速分段式脱粒滚筒, 设计了杆齿、弓齿和刀齿3种形状的脱粒元件, 通过改变脱粒元件表面与籽粒碰撞时的接触状态, 刚柔耦合成6种类型脱粒滚筒; 基于冲量-动量定理对籽粒碰撞过程进行分析, 通过仿真试验得到刚性杆齿和刚柔耦合杆齿与水稻籽粒谷物接触时籽粒所受法向力均值分别为28.4 N和22.3 N, 籽粒所受切向力均值分别为14.43 N和8.74 N。以前滚筒齿形、前滚筒转速和前后滚筒转速差为影响因素, 以水稻籽粒破碎率和未脱净率为评价指标进行3因素3水平正交试验。结果表明: 前后滚筒转速差对破碎率的影响最大, 前滚筒齿形对未脱净率的影响最大; 试验得到的最优组合为前滚筒齿形为弓齿、前滚筒转速为600 r/min、前后滚筒转速差为100 r/min; 与刚性脱粒元件相比, 带有聚氨酯橡胶套的刚柔耦合脱粒元件可有效降低水稻籽粒破碎率, 平均可降低18.5%。

关键词: 水稻脱粒; 差速滚筒; 脱粒元件; 刚柔耦合; 破碎率; 未脱净率

中图分类号: S225.4

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)01-0071-08

Simulation analysis and experiment of rice threshing drum based on rigid flexible coupling

HOU Jie¹, WANG Xiushan^{1,2}, XIE Fangping^{1,2*}, LIU Dawei^{1,2}, CHEN Zhigang¹

(1.College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;

2.Hunan Key Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery Equipment, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: In order to reduce the grain crushing rate and improve the cleanliness in the process of rice harvesting, three types of threshing elements, namely rod teeth, bow teeth, and cutter teeth, were designed based on the longitudinal axial flow differential segmented threshing drum. By changing the contact state between the surface of the threshing element and the grain during collision, six types of threshing rollers were obtained by rigid flexible coupling. Based on the impulse momentum theorem, the collision process between grains was analyzed. Through simulation experiments, it was found that the average normal force on grains was 28.4 N and 22.3 N, and the average tangential force on grains was 14.43 N and 8.74 N, respectively, when the rigid rod teeth and the rigid flexible coupling rod teeth came into contact with rice grains. Three-factor and three-level orthogonal test was carried out by taking the tooth shape of front roller, the rotation speed of the front roller and the rotation speed difference between the front and rear rollers as influencing factors, and the broken rate and undrained rate of rice as evaluation indexes. The test results show that the rotation speed difference between the front and rear rollers and the tooth shape of the front roller have the greatest influence on the broken rate and the un-threshing rate, respectively. The optimal combination obtained from the experiment is that the tooth shape of the front roller is bow tooth, the rotation speed of the front roller is 600 r/min, and

收稿日期: 2023-05-04

修回日期: 2023-11-12

基金项目: 湖南省高新技术产业科技引领计划项目(2020NK2002); 湖南省农机装备与技术创新研发项目(湘财农指[2021]47号、湘财农指[2020]107号)

作者简介: 侯杰(1996—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 主要从事农业机械性能创新设计研究, houjie13072252695@163.com; *通信作者, 谢方平, 博士, 教授, 主要从事农业机械性能试验与创新设计研究, hunanxie2002@163.com

the rotation speed difference between the front and rear rollers is 100 r/min. Compared with rigid threshing components, the average grain broken rate of rice can be reduced by 18.5%.

Keywords: rice threshing; differential speed roller; threshing component; rigid flexible coupling; broken rate; un-threshing rate

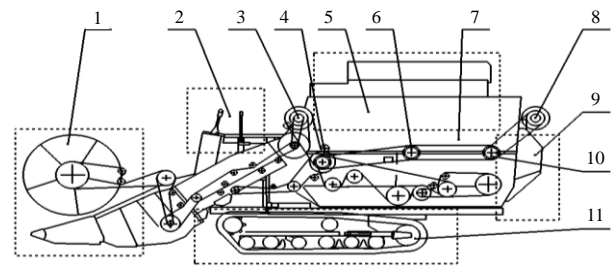
水稻机械化机收过程中仍存在稻谷破碎率高和清洁度较差的问题^[1]。脱粒装置是联合收获机核心部件,其结构和性能决定着整机收获的作业质量的优劣^[2]。GEBREHIWOT等^[3]研究脱粒滚筒转速对谷物损伤率和脱净率的影响,结果表明:当滚筒转速为850 r/min时,稻谷破碎率最高;当滚筒转速为450 r/min时,稻谷破碎率最低。AHORBO^[4]研究钉齿式螺旋脱粒滚筒长度对水稻收获性能的影响,发现当脱粒滚筒长度为1282 mm时收获性能最好。李耀明等^[5]和唐忠等^[6]研究发现,选用钉齿脱粒元件可有效减轻脱粒清选负荷,降低脱粒功耗。李耀明等^[7]在研究脱粒滚筒间隙和转速对作业质量的影响时,得出脱粒间隙为35 mm和转速为800 r/min时脱粒性能较好的结论。戴飞等^[8-9]发现锥形脱粒滚筒可有效降低脱粒功耗。王志明等^[10-11]设计了同轴差速滚筒并对比分析单速与差速对谷物破碎率和含杂率的影响,结果表明差速滚筒脱粒性能优于行业标准。任述光等^[12]通过有限元分析比较刚性齿与柔性齿脱粒过程中冲量矩及对水稻籽粒的打击力,证明柔性齿脱粒相比刚性齿脱粒具有动能损失小、功耗低的特点。谢方平等^[13-14]研制一种柔性杆齿脱粒滚筒,开展柔性齿与刚性齿对比试验,结果表明柔性杆齿质量轻,稻谷破碎率低。

上述这些研究表明,脱粒装置作业质量受脱粒滚筒转速、脱粒间隙、脱粒齿形状以及脱粒齿材料等的影响较大。针对水稻脱粒时的破碎率较高问题,笔者以团队前期研制的4LZ-4.0型联合收割机纵轴流差速分段式脱粒滚筒为基础,设计杆齿、弓

齿和刀齿3种不同形状的脱粒元件,通过改变脱粒元件表面与籽粒碰撞时的接触状态,刚柔耦合组合成6种类型脱粒滚筒,基于籽粒碰撞分析、离散元仿真分析与田间试验,研究前滚筒齿形、前滚筒转速和前后滚筒转速差对水稻籽粒破碎率和未脱净率的影响,以期分段式水稻脱粒装置的设计完善提供参考。

1 4LZ-4.0型联合收割机脱离滚筒的结构与工作原理

4LZ-4.0型联合收割机整机结构如图1所示。由动力行走装置、割台、操纵台、脱粒清选装置、传动装置和出料口等组成。根据水稻生物学特性以及4LZ-4.0型联合收割机实际作业要求,收割机在田间作业时发动机功率为65 kW、割幅为2 m、喂入量为4 kg/s、作业速度为3 km/h。

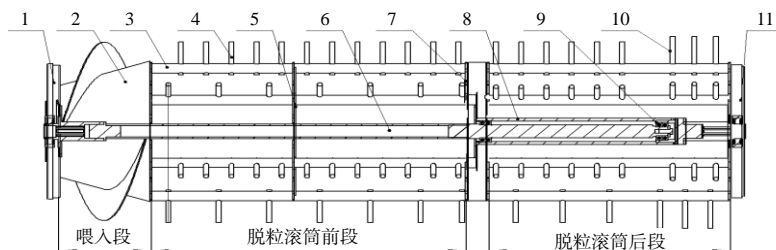


1 割台; 2 操纵台; 3 前T型变速箱带轮; 4 主传动带轮; 5 脱粒清选装置; 6 过渡带轮; 7 传动装置; 8 后T型变速箱带轮; 9 出料口; 10 调速带轮; 11 行走装置。

图1 4LZ-4.0联合收割机的结构

Fig.1 Structure diagram of 4LZ-4.0 typed combine harvester

脱粒装置为纵轴流差速分段式脱粒滚筒,结构如图2所示。脱粒清选装置作业时,物料由脱粒滚



1 前端盖; 2 螺旋搅龙; 3 辐条; 4 脱粒齿; 5 辅盘; 6 低速轴; 7 法兰盘; 8 高速轴; 9 轴承; 10 排草齿; 11 后端盖。

图2 差速分段式脱粒滚筒的结构

Fig.2 Structural diagram of differential segmented threshing roller

筒前端的螺旋搅龙喂入至脱粒室内，在导流板和脱粒滚筒的作用下向后作螺旋运动，物料在脱粒齿的打击和梳刷作用下完成脱粒，在振动筛和风机的共同作用下完成清选分离排杂。

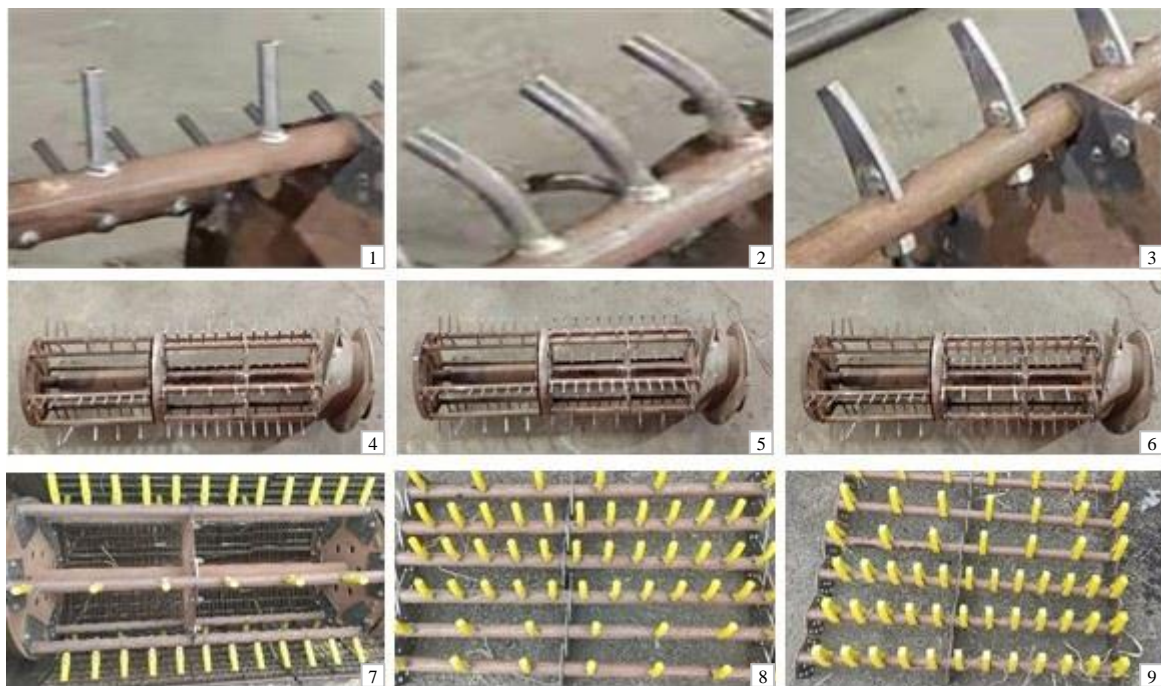
纵轴流差速分段式滚筒主要分为喂入段、脱粒滚筒前段和脱粒滚筒后段 3 部分。物料通过喂入段的正锥形螺旋搅龙输送至脱粒滚筒前段；脱粒滚筒前段为差速滚筒低速段，以较小打击对成熟度较高的水稻植株脱粒；为降低脱粒滚筒功耗，将 3 根焊接 12 个脱粒齿和 3 根焊接 7 个脱粒齿的辐条，通过法兰盘疏密相间固定，且该段辐条可通过螺栓进行拆装更换；脱粒滚筒后段为差速滚筒高速段，该段辐条上的脱粒齿均为刚性齿，滚筒以较高的转速对初脱未净的水稻植株进行脱粒。主要结构参数列于表 1。

表 1 脱粒滚筒的主要结构参数

Table 1 Main structural parameters of threshing drum	
参数	数值
滚筒总长度/mm	1 935
脱粒段长度/mm	1 440
滚筒直径/mm	620
脱粒间隙/mm	15
脱粒滚筒前后段比例	7 : 3

2 差速分段式滚筒的脱粒元件的设计

为比较不同形状刚性和刚柔耦合脱粒元件对水稻籽粒破碎和未脱净的影响，设计了杆齿、弓齿和刀齿 3 种形状的脱粒元件(分别如图 3-1、图 3-2 和图 3-3 所示)，通过更换脱粒滚筒前段辐条，后端脱粒滚筒均采用同一直径刚性杆齿脱粒元件，组合成 6 种脱粒滚筒。其中刚性杆齿直径 14 mm、齿高 70 mm，焊接在直径为 33 mm 的辐条上(图 3-4)；刚性弓齿直径 14 mm、齿高 70 mm、弧面直径 15 mm(图 3-5)；刚性刀齿齿高 70 mm、齿厚 12 mm、弧面直径 58 mm(图 3-6)；刚柔耦合杆齿采用外径 14 mm、内径 10 mm 的橡胶套固定在直径 10 mm 的刚性杆齿上，橡胶套与刚性齿通过螺栓固定，刚柔耦合弓齿与刀齿的设计与刚柔耦合杆齿的相同，设计的刚柔耦合脱粒元件组成的辐条分别如图 3-7、图 3-8 和图 3-9。依据《农业机械用特殊截面热轧型钢》规定^[15]，刚性元件材料为 45#钢，其弹性模量约为 70 GPa，泊松比约为 0.3。由于聚氨酯材料具有优良的机械性能^[16]，故柔性橡胶套选用聚氨酯材料，其硬度为邵 A60，弹性模量约为 220 MPa，泊松比约为 0.4。



1 杆齿；2 弓齿；3 刀齿；4 刚性杆齿脱粒滚筒；5 刚性弓齿脱粒滚筒；6 刚性刀齿脱粒滚筒；7 刚柔耦合杆齿辐条；8 刚柔耦合弓齿辐条；9 刚柔耦合刀齿辐条。

图 3 6 种脱粒滚筒的脱粒元件

Fig.3 Six types of threshing parts of threshing drum

3 脱粒滚筒脱粒仿真

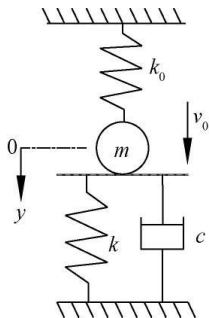
3.1 脱粒过程碰撞分析

脱粒过程中脱粒滚筒高速转动,水稻籽粒与脱粒元件发生碰撞,经梳刷或搓擦作用在碰撞瞬间完成脱粒分离过程。该过程可视为质点碰撞过程,由冲量-动量定理可得:

$$P = \int_{t_0}^{t_0+\Delta t} ma(t)dt = F\Delta t \quad (1)$$

式中: P 为水稻籽粒受到的冲量; F 为碰撞冲击力; m 为水稻籽粒质量; a 为籽粒加速度; t 为碰撞时间。

根据式(1)可知,水稻籽粒在与脱粒元件碰撞瞬间会产生巨大的碰撞冲击力^[17],在冲量 P 一定的情况下,延长碰撞时间可降低接触瞬间的冲击力,继而减少由冲击力造成的籽粒破碎。水稻籽粒与脱粒元件碰撞分离瞬间,将籽粒视作通过粒柄约束在茎秆上的约束体,将脱粒元件视作可发生形变的弹性体,根据文献[18],可将碰撞过程力学模型简化为图4。



k_0 籽粒与枝穗间弹性系数; k 脱粒元件弹性系数; v_0 籽粒碰撞时初始速度; y 籽粒碰撞时产生的位移; c 脱粒元件阻尼系数。

图4 籽粒碰撞力学简化模型

Fig.4 Simplified mechanics model of grain collision

碰撞分离过程中力学模型为单自由度系统,其接触期间运动方程为:

$$\begin{cases} m\ddot{y} + c\dot{y} + (k + k_0)y = 0 \\ y(0) = 0, \dot{y}(0) = v_0 \end{cases} \quad (2)$$

在欠阻尼情况下,式(2)的解集为:

$$y = Ae^{-\zeta\omega_n t} \sin\omega_d t \quad (3)$$

式中: ζ 为黏性阻尼比, $\zeta < 1$; A 为振幅; ω_n 为无阻尼固有频率; ω_d 为有阻尼固有频率。

设籽粒初始位移为 0,联立式(1)~(3),可得:

$$\Delta t = \frac{\pi + \arctan \lambda_2}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \quad (4)$$

$$\lambda_2 = \frac{2\zeta\sqrt{1 - \zeta^2}}{k_0 / \omega_n^2 - (1 - 2\zeta^2)} \quad (5)$$

λ_2 为求解过程变量系数。由上式可知,系统阻尼系数、刚度系数等固有参数决定着籽粒碰撞时间,而系统的阻尼系数与刚度系数由其结构和材料等决定;因此,在外力一定的情况下,可通过改变碰撞系统的结构和材料来增加系统黏性阻尼比,延长碰撞接触时间,继而降低碰撞冲击力,减少籽粒破碎量。

3.2 离散元仿真分析

为比较刚性和刚柔耦合脱粒元件脱粒时对籽粒的作用力,基于 EDEM 仿真软件,以刚性杆齿和刚柔耦合杆齿为研究对象,对 2 种类型脱粒滚筒进行脱粒仿真试验。

3.2.1 仿真模型建立

将水稻植株简化为单根植株,建立单根水稻植株模型与仿真几何模型。经测量,水稻茎秆直径为 4 mm、长 104 mm,水稻籽粒最大横截面直径为 3.5 mm,长 7.4 mm。选择 Hertz-Mindlin with Bonding V2 模型来建立单根枝穗^[19],仿真设置 Bonding V2 模型的粘结半径为 2.11 mm,选择 Hertz-Mindlin(no slip)模型来分析枝穗和脱粒元件间的相互作用。在 solidworks 软件中绘制实际尺寸大小的脱粒滚筒三维模型,以 x_t 格式导入到离散元仿真软件中,从而建立仿真几何模型。根据文献[20],对模型材料特征仿真参数和接触参数进行设定,如表 2 和表 3。

表 2 模型材料的特征参数

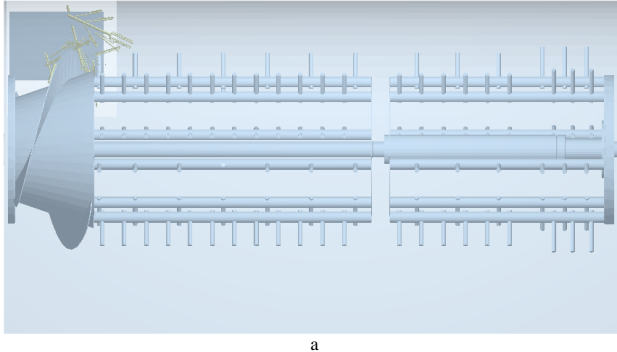
模型	泊松比	剪切模量/MPa	密度/(kg m ⁻³)
籽粒	0.3	26	1 350
茎秆	0.4	10	100
脱粒滚筒	0.3	700 000	7 800
橡胶套	0.4	220	1 110

表 3 籽粒、茎秆、橡胶套、脱粒滚筒相互作用参数

作用对象	碰撞恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
籽粒-籽粒	0.2	1.0	0.01
籽粒-茎秆	0.2	0.8	0.01
籽粒-橡胶套	0.3	0.5	0.01
籽粒-脱粒滚筒	0.5	0.6	0.01
茎秆-茎秆	0.2	0.9	0.01
茎秆-橡胶套	0.3	0.6	0.01
茎秆-脱粒滚筒	0.2	0.8	0.01

3.2.2 仿真结果与分析

在喂入口以 Polygon 形式设置植株颗粒工厂，喂入量为 3 kg/s，初速度在轴向和垂直于轴向上的分量都是 2 m/s，脱粒滚筒转速 620 r/min。仿真计



a 0.05 s 时开始脱粒；b 2.00 s 时完成脱粒。

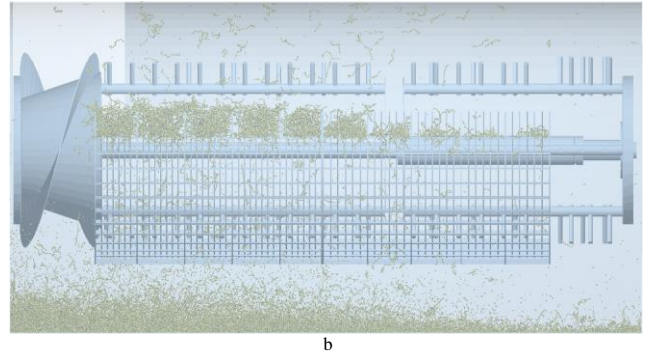


图 5 水稻滚筒脱粒仿真

Fig.5 Simulation of threshing process by rice threshing drum

通过 EDEM 仿真模拟稻穗在脱粒室中脱粒的全过程，提取该过程中刚性杆齿和刚柔耦合杆齿与枝穗接触时受到的法向力为 28.4、14.43 N，切向力均值为 22.3、8.74 N。仿真结果显示，与刚性杆齿相比，刚柔耦合杆齿与枝穗接触时受到的法向力均值和切向力均值分别降低 21.48%、39.43%，说明刚柔耦合杆齿在一定程度上可以降低脱粒齿与水稻籽粒接触时的打击力，从而降低破碎率。统计仿真过程中枝穗 Bonding V2 接触数量(图 6)，得到仿真时间在 1.00 s 时颗粒全部生成，脱粒室中刚性杆齿与刚柔耦合杆齿产生的 Bonding V2 接触数量分别为 38 763 个和 36 975 个；2.00 s 时脱粒室内的 Bonding V2 接触数量分别 14 790 个和 13 567 个，计算可得 2.00 s 时刚性杆齿滚筒与刚柔耦合杆齿滚筒的未脱净率分别为 38.15%和 36.69%，此时未脱净率较高，这是由于仿真未考虑风机气流场对脱粒的影响以及颗粒分离后模型在脱粒室内发生再次黏结的缘故。仿真过程中 2 种类型脱粒滚筒脱粒室内 Bonding V2 接触数量曲线变化大致相同，表明 2 种类型脱粒杆齿对水稻脱粒时的未脱净率影响差别不大，可能是由于脱粒滚筒转速对未脱净率的影响显著性在一定程度上高于脱粒齿材料，使得枝穗在仿真脱粒过程中 Bonding V2 接触数量变化规律大致相同。

算时间步长和输出时间步长分别为 20%和 0.01 s，仿真总时间为 2.00 s。以最小颗粒尺寸的 3 倍为基础网格尺寸，对几何模型整体进行网格划分，共计 33 298 512 个网格，仿真过程如图 5。

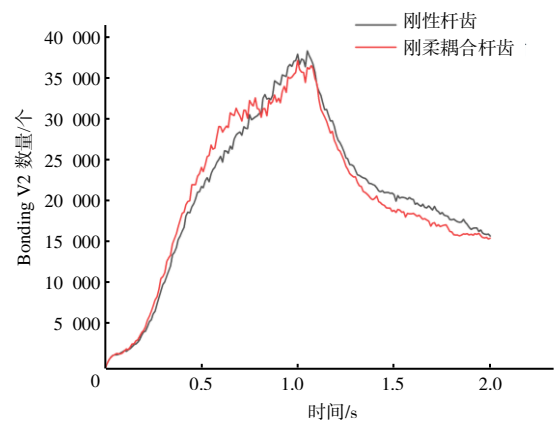


图 6 枝穗 Bonding V2 接触数量

Fig.6 Quantity of spike Bonding V2 contact

4 滚筒脱粒田间试验

试验在湖南省娄底市双峰县印塘乡进行。选用水稻品种‘晶两优 1125’，依据 GB/T 5262—2008《农业机械试验条件测定方法的一般规定》，测得水稻籽粒含水率(18.95±1.50)%、茎秆含水率(63.37±1.70)%、株高(968±63) mm、穗长(181±30) mm、千粒质量(27.2±2.5) g、草谷比 1.59±0.50。

联合收割机以中速档行走，待空转正常后开始收割，每次收割 2 m×30 m 区域；试验完成后，称量籽粒，并收集未脱净水稻植株；待所有试验完成后依据样品中的破碎籽粒质量和收割机排草口排出的未脱净的水稻籽粒质量，计算籽粒破碎率和未

脱净率。

基于 4LZ-4.0 型水稻联合收割机, 以前滚筒齿形(A)、前滚筒转速(B)和前后滚筒转速差(C)为试验因素, 以破碎率和未脱净率为评价指标, 选用 $L_9(3^4)$ 进行 3 因素 3 水平正交(表 4)田间试验。试验结果列于表 5。

表 4 3 因素 3 水平正交田间试验设计

Table 4 Orthogonal experimental design with three factors and three levels

脱粒元件 类型	水平	前滚筒 齿形(A)	前滚筒转速(B)/ ($r \text{ min}^{-1}$)	滚筒转速差(C)/ ($r \text{ min}^{-1}$)
刚性	1	杆齿	500	0
	2	弓齿	550	50
	3	刀齿	600	100
刚柔耦合	1	耦合杆齿	500	0
	2	耦合弓齿	550	50
	3	耦合刀齿	600	100

表 5 正交试验的破碎率和未脱净率

Table 5 Broken rate and un-threshing rate obtained by orthogonal test

脱粒元件	序号	前滚筒齿形(A)	前滚筒转速(B)/ ($r \text{ min}^{-1}$)	前后滚筒转速差(C)/ ($r \text{ min}^{-1}$)	破碎率/%	未脱净率/%
刚性	1	杆齿	500	0	0.125	0.057
	2	杆齿	550	50	0.187	0.041
	3	杆齿	600	100	0.192	0.035
	4	弓齿	550	100	0.196	0.034
	5	弓齿	600	0	0.121	0.046
	6	弓齿	500	50	0.116	0.063
	7	刀齿	600	50	0.217	0.048
	8	刀齿	500	100	0.201	0.043
	9	刀齿	550	0	0.212	0.069
极差分析	k_{11}	0.168	0.147	0.153		
	k_{12}	0.144	0.198	0.173		
	k_{13}	0.210	0.177	0.196		
	R_1	0.066	0.051	0.043		
	k_{21}	0.044	0.054	0.057		
	k_{22}	0.048	0.048	0.051		
	k_{23}	0.053	0.043	0.037		
	R_2	0.009	0.011	0.020		
	刚柔耦合	1	杆齿	500	0	0.101
2		杆齿	550	50	0.151	0.053
3		杆齿	600	100	0.154	0.054
4		弓齿	550	100	0.157	0.053
5		弓齿	600	0	0.107	0.055
6		弓齿	500	50	0.093	0.069
7		刀齿	600	50	0.169	0.060
8		刀齿	500	100	0.154	0.058
9		刀齿	550	0	0.161	0.071
极差分析	k_{11}	0.135	0.116	0.123		
	k_{12}	0.119	0.156	0.138		
	k_{13}	0.161	0.143	0.155		
	R_1	0.042	0.040	0.032		
	k_{21}	0.058	0.065	0.065		
	k_{22}	0.059	0.059	0.061		
	k_{23}	0.063	0.056	0.055		
	R_2	0.005	0.009	0.010		

结果(表 5)表明,前滚筒脱粒齿选用刚性与刚柔耦合脱粒元件对破碎率和未脱净率的影响基本相同。前后滚筒转速差对破碎率的影响最大,前滚筒齿形对破碎率的影响最小,在前滚筒齿形为弓齿、前滚筒转速 500 r/min、前后滚筒转速差为 0 时达到最优,破碎率最小。前滚筒齿形对未脱净率的影响最大,前滚筒转速差对未脱净率影响最小,在前滚筒齿形为杆齿、前滚筒转速 550 r/min、前后滚筒转速差为 100 r/min 时达到最优,此时未脱净率最小。因在本试验研究中,着重考虑的是收割机滚筒脱粒元件对水稻籽粒的破碎率的影响,单从降低破碎率方面考虑,前后滚筒转速差对破碎率的影响最大,在前后滚筒转速差为 0 时破碎率最低,再考虑试验对未脱净率的影响,结合极差分析,选取最优组合为前滚筒齿形弓齿、前滚筒转速 650 r/min、前后滚筒转速差 100 r/min。

在前滚筒齿形为弓齿、前滚筒转速 600 r/min、前后滚筒转速差 100 r/min 条件下进行刚性脱粒元件验证试验,结果水稻籽粒破碎率为 0.119%,未脱净率为 0.052%,与正交试验结果相比,破碎率明显降低,未脱净率相近,而最优组合试验是在着重考虑破碎率情况下进行的:因此,该试验组合条件可满足试验设计要求。

经统计,刚性杆齿、弓齿、刀齿的破碎率分别为 0.168%、0.144%、0.210%,未脱净率分别为 0.044%、0.048%、0.053%;刚柔耦合杆齿、弓齿、刀齿的破碎率分别为 0.135%、0.119%、0.161%,未脱净率分别为 0.058%、0.059%、0.063%。杆齿的破碎率大于弓齿的,而杆齿未脱净率小于弓齿的,表明杆齿对水稻籽粒的最大接触压力大于弓齿的,与理论分析相同;刀齿的破碎率和未脱净率都大于杆齿和弓齿的,表明刀齿的脱粒效果不佳。使用 45#杆齿的破碎率为 0.168%,未脱净率为 0.044%;45#弓齿的破碎率为 0.144%,未脱净率为 0.048%,二者的效果差别小。使用聚氨酯橡胶套杆齿的破碎率为 0.135%,未脱净率为 0.058%,与 45#杆齿相比,籽粒破碎率降低 19.64%,但籽粒未脱净率增加了 24.14%;使用聚氨酯橡胶套弓齿的破碎率为 0.119%,未脱净率为 0.059%,与 45#弓齿相比,

籽粒破碎率降低 17.36%,而籽粒未脱净率增加 18.64%。综上,使用刚柔耦合脱粒元件降低了籽粒破碎率,未脱净率虽有增加,但仍远小于 GB/T 5262—2008《农业机械试验条件测定方法的一般规定》中所规定的 1%,说明脱粒效果较好。

5 结论

基于冲量-动量定理的籽粒碰撞分析表明,通过改变脱粒元件的形状和籽粒与脱粒元件碰撞时的接触状态,可延长碰撞接触时间,从而减小最大冲击力,继而降低籽粒破碎率。

仿真分析表明,刚性杆齿和刚柔耦合杆齿与水稻枝穗接触时受到的法向力均值分别为 28.4 N 和 22.3 N,切向力均值分别为 14.43 N 和 8.74 N,说明刚柔耦合杆齿在一定程度上可减小脱粒齿与水稻籽粒接触时的打击力。仿真过程中 Bonding V2 接触数量变化表明,刚性和刚柔耦合杆齿对水稻脱粒时未脱净率的影响大致相同。

分析正交试验的极差表明,刚性与刚柔耦合脱粒元件对水稻籽粒的破碎率和未脱净率的影响一致,前后滚筒转速差对破碎率的影响最大,前滚筒齿形对破碎率的影响最小;前滚筒齿形对未脱净率的影响最大,前滚筒转速差对未脱净率影响最小。脱粒元件为弓齿、工作时前滚筒转速为 600 r/min、前后滚筒转速差为 100 r/min,水稻籽粒破碎率和未脱净率取得最优值。

田间试验结果表明,脱粒元件材料对脱粒效果影响较大,与刚性杆齿和弓齿相比,刚柔耦合杆齿和弓齿的破碎率分别降低 19.64%和 17.36%,未脱净率虽有增加,但整体脱粒效果要好于国家标准。

参考文献:

- [1] 高焕文,李问盈,李洪文.我国农业机械化的跨世纪展望[J].农业工程学报,2000,16(2):9-12.
- [2] 屈哲,张东兴,杨丽,等.纵轴流玉米脱粒分离装置喂入量与滚筒转速试验[J].农业机械学报,2018,49(2):58-65.
- [3] GEBREHIWOT M G, DE BAERDEMAEKER J, BAELMANS M. Effect of a cross-flow opening on the performance of a centrifugal fan in a combine harvester: computational and experimental study[J]. Biosystems

- Engineering, 2010, 105(2): 247–256.
- [4] AHORBO G K. Design of a throw-in axial flow rice thresher fitted with peg and screw threshing mechanism[J]. International Journal of Scientific & Technology Research, 2016, 5(7): 171–177.
- [5] 李耀明, 李洪昌, 徐立章. 短纹杆-板齿与钉齿脱粒滚筒的脱粒对比试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 139–142.
- [6] 唐忠, 李耀明, 徐立章, 等. 不同脱粒元件对切流与纵轴流水稻脱粒分离性能的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 93–97.
- [7] 李耀明, 王建鹏, 徐立章, 等. 联合收获机脱粒滚筒凹板间隙调节装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 68–75.
- [8] 戴飞, 高爱民, 孙伟, 等. 纵轴流锥型滚筒脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(1): 74–78.
- [9] 戴飞, 韩正晟, 赵武云, 等. 纵轴流双滚筒小区育种脱粒分离装置设计与试验[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(5): 1015–1020.
- [10] 王志明. 横置差速轴流脱分选系统工作机理及设计研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [11] 王志明, 吕彭民, 陈霓, 等. 横置差速轴流脱分选系统设计及试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 53–61.
- [12] 任述光, 谢方平, 罗锡文, 等. 柔性齿与刚性齿脱粒水稻功耗比较分析与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 12–18.
- [13] 谢方平, 罗锡文, 卢向阳, 等. 柔性杆齿滚筒脱粒机理[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 110–114.
- [14] 谢方平, 罗锡文, 苏爱华, 等. 刚性弓齿与杆齿及柔性齿的脱粒对比试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2005, 31(6): 648–651.
- [15] GB 1466—1978 农业机械用特殊截面热轧型钢[S].
- [16] 刘芳, 吴小华, 刘安石, 等. 减磨耐磨聚氨酯复合材料摩擦性能的研究[J]. 塑料工业, 1997, 25(4): 20–22.
- [17] 付乾坤, 付君, 王锋德, 等. 轮式刚柔耦合减损玉米摘穗割台的设计与参数优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(7): 21–30.
- [18] WANG Q R, MAO H P, LI Q L. Modelling and simulation of the grain threshing process based on the discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 178(3): 101–112.
- [19] 谢方平, 吴正阳, 王修善, 等. 基于无侧限抗压强度试验的土壤离散元参数标定[J]. 农业工程学报, 2020, 36(13): 39–47.
- [20] 谢干. 鼓形杆齿式纵轴流脱粒分离装置设计与试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 吴志立