

引用格式:

范荣巍, 季邦, 王修善, 刘志, 谢方平, 刘大为, 夏威. 南方丘陵地区玉米籽粒联合收获机脱粒装置设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2025, 51(4): 99–106.

FAN R W, JI B, WANG X S, LIU Z, XIE F P, LIU D W, XIA W. Design and test of threshing device for corn kernels combine harvester in southern hilly area[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2025, 51(4): 99–106.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



南方丘陵地区玉米籽粒联合收获机脱粒装置设计与试验

范荣巍¹, 季邦^{1,2,3*}, 王修善^{1,3}, 刘志¹, 谢方平^{1,3}, 刘大为^{1,3}, 夏威¹

(1. 湖南农业大学机电工程学院, 湖南 长沙 410128; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 广东 广州 510642; 3. 智能农机装备湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128)

摘要: 针对南方丘陵地区玉米籽粒直收时存在脱粒装置结构与参数不匹配、籽粒含水率较高等问题, 对脱粒装置关键部件进行理论分析, 确定玉米脱粒装置主要结构参数, 设计一种由柔性弧面杆齿+圆钢栅条凹板筛组成的柔性脱粒装置, 通过开展单因素试验与三因素三水平响应曲面试验确定影响玉米籽粒破碎率和损失率的该装置的最优参数组合, 并使用最优组合参数进行田间验证试验。结果表明: 该装置能够有效降低玉米籽粒的破碎率, 相较于刚性脱粒装置, 玉米籽粒破碎率降低了12.08%; 影响玉米籽粒破碎率和损失率的最优参数组合为滚筒转速为1 027 r/min、脱粒间隙为33 mm、杆齿数为66根, 此时籽粒破碎率与损失率分别为3.49%、2.56%; 田间验证试验中, 籽粒的破碎率与损失率分别为3.61%和2.78%, 各项指标均符合国家标准。

关键词: 玉米籽粒联合收获机; 脱粒装置; 柔性弧面杆齿; 圆钢栅条凹板筛; 破碎率; 损失率; 南方丘陵地区

中图分类号: S226.1

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2025)04-0099-08

Design and test of threshing device for corn kernels combine harvester in southern hilly area

FAN Rongwei¹, JI Bang^{1,2,3*}, WANG Xiushan^{1,3}, LIU Zhi¹, XIE Fangping^{1,3}, LIU Dawei^{1,3}, XIA Wei¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 3. Hunan Key Laboratory of Intelligent Agricultural Machinery Equipment, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: In view of the problems such as the mismatch of the structure and parameters of the threshing device and the high moisture content of the corn kernels during direct harvesting in the hilly area of the south, the key components of the threshing device were analyzed theoretically first, and then the main structural parameters of the corn threshing device were determined. Based on this design, a flexible threshing device composed of flexible arc-shaped bar teeth and round steel bar concave plate screen was created. The optimal combination parameters of the device that affected the corn kernel breakage rate and loss rate were found out through single-factor experiments and three-factor three-level response surface experiment, and the optimal combination parameters were used for field verification experiments. The results showed that the device could effectively reduce the corn kernel breakage rate. Compared with the rigid threshing device, the corn kernel breakage rate was reduced by 12.08%. The optimal combination parameters that affected the corn kernel breakage rate and loss rate included the drum speed of 1 027 r/min, the threshing gap of 33 mm and 66 barbs. With these conditions, the kernel breakage rate and loss rate were 3.49% and 2.56%, respectively. In the field verification experiment, the kernel breakage

收稿日期: 2024-11-15

修回日期: 2025-03-22

基金项目: 湖南省智能农机装备创新研发项目(湘财农指(2023)60号); 湖南省旱粮产业技术体系(HARS-02); 农业装备技术全国重点实验室(华南农业大学)开放基金资助项目(SKLAET-202406)

作者简介: 范荣巍(2000—), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 主要从事农业机械创新设计研究, 1453958873@qq.com; *通信作者, 季邦, 博士, 讲师, 主要从事农业机械装备设计研究, 369370030@qq.com

rate and loss rate were 3.61% and 2.78%, respectively, and all indicators met the national standards.

Keywords: corn kernels combine harvester; threshing device; flexible arc-shaped bar teeth; round steel bar concave plate screen; breakage rate; loss rate; southern hilly area

玉米机械化收获主要分为果穗收获和籽粒直收,其中,籽粒直收已成为玉米机械化收获的发展趋势^[1-3]。在南方丘陵地区,通常采用稻麦联合收获机进行收获作业,玉米植株在切割器以及拨禾轮的作用下,整体被喂入脱粒室内进行脱粒分离。陈志刚^[4]设计了玉米差速脱粒滚筒,前端采用低转速的纹杆齿,降低了籽粒的损伤率;后端采用高转速的杆齿,提高了滚筒的脱粒性能。罗琪^[5]以传统谷物联合收获机为基础,通过加长割台和拨禾轮延长臂,实现了对玉米籽粒的收获,其采用轴流式脱粒滚筒结构,提高了脱粒分离效率。

采用稻麦联合收获机进行收获作业,机具体积较小,可灵活应对复杂地势和田块,但脱粒装置结构与参数不匹配,籽粒含水率较高,极易造成籽粒破碎,破碎的玉米籽粒容易产生霉变的风险,严重影响经济效益。针对此问题,笔者在4YZ-2型玉米籽粒联合收获机基础上,开展适用于南方丘陵地区的脱粒分离装置关键部件结构优化与参数匹配研究,以为南方丘陵地区脱粒装置改进及性能优化提供依据。

1 柔性脱粒装置设计

1.1 柔性脱粒滚筒设计

1.1.1 脱粒元件设计

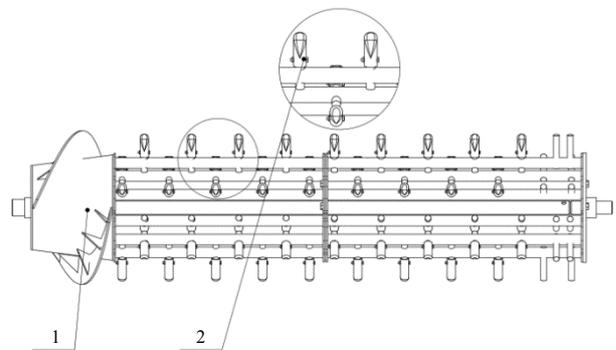
在脱粒过程中,玉米籽粒与脱粒齿的碰撞可以分为弹性变形和破坏阶段^[6]。由于脱粒滚筒内物料成分复杂,为了便于分析,以籽粒为研究对象,基于Hertz理论对脱粒齿与籽粒碰撞进行分析,建立脱粒齿对玉米籽粒产生机械损伤时的数学模型^[7]。

$$V_0 = \left[\frac{10.2\pi^3 Q^3 R^2}{1000(m_1 + m_2)E^4} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: V_0 为玉米籽粒发生破碎时的临界破碎速度; m_1 为脱粒元件质量; m_2 为籽粒质量; R 为等效半径; E 为等效弹性模量; Q 为玉米籽粒发生破碎时的极限强度。

由式(1)可知,为降低籽粒的破碎率,提高脱粒

质量,当脱粒元件以相同的工作参数作用在玉米籽粒上时,改变脱粒元件的形状及材料会影响收获效果^[8-9]。常规的圆柱杆齿与玉米籽粒的接触面积较小,在脱粒过程中,对玉米果穗的刚性冲击较大,为降低籽粒的破碎率,设计一种柔性弧面杆齿,如图1所示。柔性弧面杆齿能增大与玉米籽粒的接触面积,减小对玉米籽粒的滑切作用,在杆齿表面包裹聚氨酯橡胶,在籽粒直收时,使籽粒受到的刚性冲击转化为柔性冲击,增加杆齿与籽粒碰撞的时间,降低籽粒的破碎率。



1—螺旋喂入头; 2—柔性弧面杆齿。

图1 脱粒滚筒结构

Fig.1 Structure of the threshing cylinder

1.1.2 脱粒滚筒结构参数确定

1) 螺旋喂入头螺旋升角。螺旋喂入头是脱粒滚筒关键部件之一,螺旋喂入头可分为圆柱喂入头与圆锥喂入头,其中圆锥喂入头具有较好的喂入与输送效果,因此,本研究中,采用2头圆锥螺旋喂入头。参照文献^[10],玉米果穗与螺旋叶片之间摩擦角为 17° ,玉米茎秆与螺旋叶片之间的摩擦角为 24° ;参照文献^[11]的方法,计算得出螺旋喂入头螺旋升角约为 20° 。

2) 脱粒滚筒长度。脱粒滚筒的长度由喂入量与机具实际功耗决定,脱粒滚筒越长,所能处理喂入量越大,但功耗增大,机具体积也增大。参照文献^[12],根据脱粒滚筒长度计算公式(式(2))可知,脱粒滚筒长度至少要大于400 mm,轴流式脱粒滚筒长度约为1~3 m,参考机具实际尺寸,将脱粒滚筒长度设计为1 350 mm。

$$l \geq \frac{q}{q_0} \quad (2)$$

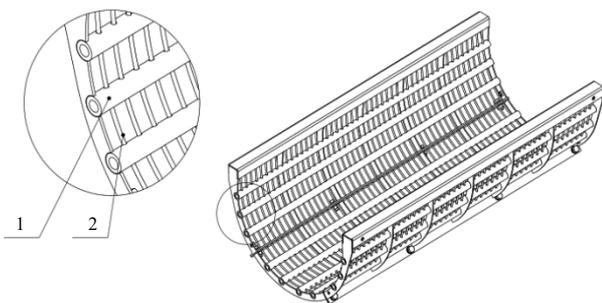
式中： l 为脱粒滚筒长度； q 为脱粒滚筒喂入量，为 1.6 kg/s； q_0 为脱粒滚筒单位长度允许喂入量，为 3~4 kg/(s·m)。

3) 脱粒滚筒直径。脱粒滚筒直径太小，容易缠绕作物，同时会减少凹板分离面积；但滚筒直径过大，则机具体积较大，脱粒功耗会增大^[13]。参照文献^[14]，轴流脱粒滚筒直径至少要大于 350 mm，故设计脱粒滚筒直径为 370 mm。

1.2 脱粒凹板筛设计

1.2.1 圆钢栅条凹板筛设计

栅格栅条凹板筛栅格表面存在大量棱角，在脱粒过程中容易与物料发生剪切作用，而南方丘陵地区玉米籽粒含水率高，玉米籽粒临界破碎的剪切强度较小，棱角容易导致籽粒破碎率升高^[15-17]。针对该问题，为降低玉米籽粒的破碎率，提高脱粒质量，将栅格替换为没有锐边的圆管结构，增大凹板部件与玉米果穗接触面积，降低对玉米籽粒的碰撞强度和冲击力度，从而降低籽粒的破碎率，并保留原有栅条，减少茎秆、玉米芯等杂质进入清选系统。圆钢栅条凹板筛结构如图 2 所示。



1—圆钢；2—栅条。

图 2 圆钢栅条凹板筛结构

Fig.2 Round steel bar concave plate screen structure

1.2.2 圆钢栅条凹板筛主要结构参数

凹板筛是脱粒装置的核心部件之一，影响籽粒的脱粒分离能力。脱粒分离能力与凹板包角、筛孔长度、筛孔宽度等结构参数有关。参照文献^[14]，谷物联合收获机凹板筛筛孔长为 30~40 mm，筛孔宽为 8~15 mm，凹板筛包角为 180°~240°。当凹板筛包角增大时，脱粒分离能力增大，但玉米籽粒、玉米芯

轴、玉米茎秆破碎概率也会增大。经综合考虑，选择凹板筛包角为 200°。相较于水稻、小麦，玉米籽粒尺寸较大，为保证脱粒分离效率，选择圆钢间距为 40 mm，栅条间距为 15 mm。

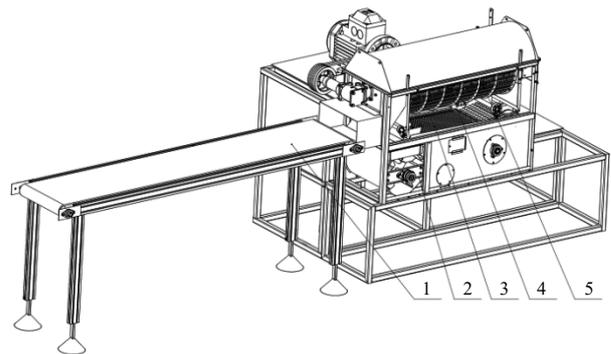
1.3 脱粒分离影响因素的确定

物料在脱粒杆齿打击作用与凹板筛搓擦作用下完成籽粒脱粒分离过程。根据脱粒分离数学模型^[18]和文献^[19-22]的研究结果，选取杆齿数量、脱粒间隙、滚筒转速为试验因素。

2 脱出物分布规律试验

2.1 试验装置

在课题组研制的 4YZ-2 型玉米籽粒联合收获机基础上，搭建脱粒试验台架。试验台架主要由皮带输送线、风机、振动筛、凹板筛、脱粒滚筒等组成，其结构如图 3 所示。



1—皮带输送线；2—风机；3—振动筛；4—凹板筛；5—脱粒滚筒。

图 3 脱粒试验台架结构

Fig.3 Structure of the threshing test bench

2.2 试验材料

在浏阳沙市镇映昌农机合作社进行试验。供试玉米品种为‘登海 605’，试验前对玉米植株基本特征参数进行测量，结果如表 1 所示。

表 1 玉米植株基本特性

Table 1 Basic characteristics of corn plants	
参数	数值
作物平均高度/mm	2 122
籽粒平均含水率/%	33.6
果穗平均长度/mm	200
果穗平均大端直径/mm	48
果穗平均中端直径/mm	44
果穗平均小端直径/mm	39
谷草比	0.46

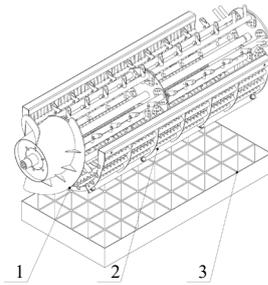
2.3 试验指标

根据GB/T 21962—2020《玉米收获机械》要求,选择籽粒破碎率(S_p)、损失率(S_s)为试验评价指标。

2.4 试验方法

对刚性脱粒装置(刚性杆齿+栅格栅条凹板筛)与柔性脱粒装置(柔性弧面杆齿+圆钢栅条凹板筛)开展脱出物分布规律试验,以验证所设计的脱粒装置性能。

试验开始前,将振动筛拆除,在振动筛位置处放入物料接料盒。物料接料盒由50个长、宽各为100 mm的接料小盒组成(图4),沿滚筒径向布置5个,沿滚筒轴向布置10个。通过人工割茬,选取植株大小相近的玉米植株进行试验。试验滚筒转速为1 000 r/min,脱粒间隙为30 mm,喂入量为1.6 kg/s,喂入时间为5 s。完成1次试验后,称量每个接料盒内脱出物的质量,并收集排草口损失籽粒,计算籽粒损失率,同时将试验器具清理干净,避免影响后续试验数据准确性。



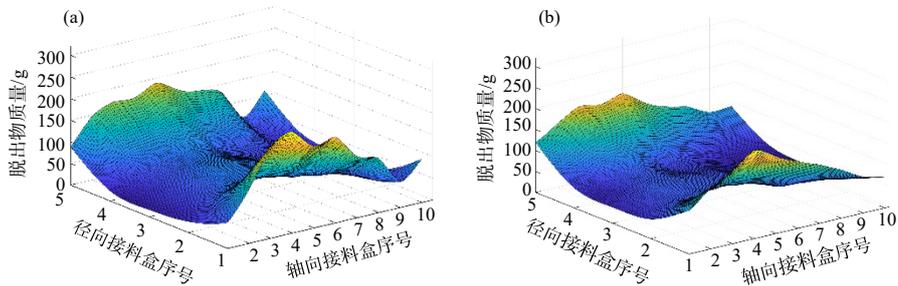
1—脱粒滚筒; 2—凹板筛; 3—接料盒。

图4 接料盒分布情况

Fig.4 Distribution of receiving boxes

2.5 试验结果与分析

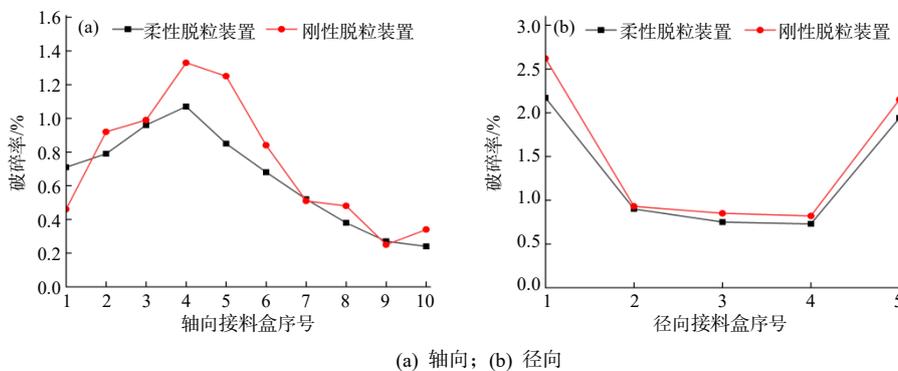
对2种脱粒装置的脱出物质量数据进行整理,利用MATLAB软件中cftool功能绘制脱出物轴向和径向质量分布三维曲面图,如图5所示。由图5可以看出,刚性脱粒装置和柔性脱粒装置的脱出物分布均在轴向方向呈现前面多后面少、径向方向呈现两边多中间少(U字形分布)的规律,脱出物质量主要分布在脱粒装置前端,这说明2种脱粒装置都具有良好的脱粒能力。对破碎率进行轴向与径向的对比分析,结果(图6)表明,柔性脱粒装置、刚性脱粒装置的籽粒平均破碎率分别为6.48%和7.37%,相较于刚



(a) 刚性脱粒装置; (b) 柔性脱粒装置

图5 不同脱粒装置脱出物质量分布曲面

Fig.5 The surface of the mass distribution of excavated products of different threshing devices



(a) 轴向; (b) 径向

图6 不同脱粒装置轴向和径向的玉米籽粒破碎率

Fig.6 Axial and radial corn kernels breakage rates of different threshing devices

性脱粒装置, 柔性脱粒装置的籽粒破碎率降低了 12.08%, 明显优于刚性脱粒装置的。这是由于柔性脱粒装置接触面积增大, 能够有效防止刚性脱粒装置上棱角对玉米籽粒的损伤。另外, 柔性弧面杆齿表面包裹了聚氨酯橡胶, 能够有效降低对籽粒的刚性冲击, 有效降低玉米籽粒的破碎率。对尾部损失率进行统计发现, 柔性脱粒装置与刚性脱粒装置的平均损失率分别为 3.42% 和 3.30%, 柔性脱粒装置损失率略高于刚性脱粒装置的, 但整体相差不大。

3 脱粒性能参数优化试验

3.1 试验装置与试验材料

在浏阳沙市镇映昌农机合作社进行试验, 试验装置和材料与脱出物分布规律试验的相同, 籽粒含水率略低, 为 28.6%。

3.2 试验方法

为寻找柔性脱粒装置最优参数组合, 在玉米籽粒脱粒试验台架上开展单因素与响应曲面试验, 选择滚筒转速(A)、杆齿数量(B)、脱粒间隙(C)为试验因素, 以破碎率(S_p)、损失率(S_s)为试验指标。通过电机控制滚筒转速来实现转速的调节。脱粒齿杆通过螺栓与脱粒滚筒辐盘连接, 通过调节螺栓安装的孔位来实现脱粒间隙的调节。前期制造了 4 个含有不同数量脱粒杆齿的脱粒滚筒, 通过更换脱粒滚筒来实现杆齿数量的调节。

试验开始前, 通过更换滚筒以及控制柜调节相关参数, 将人工割茬玉米植株均匀铺放在皮带输送线上, 每组试验喂入量为 1.6 kg/s, 喂入时间为 5 s, 以模拟割台收割及喂入过程。玉米籽粒在脱粒滚筒与凹板筛作用下完成脱粒分离, 大部分杂质在导流板作用下向排草口排出, 少部分杂质及籽粒在风机和振动筛配合下完成清选分离。试验结束后, 收集排草口损失籽粒, 对脱出玉米籽粒进行取样处理, 每次取样 900 g, 挑出破碎玉米籽粒, 后续试验操作以此类推。

3.3 单因素试验

3.3.1 滚筒转速对脱粒性能的影响

在脱粒间隙为 30 mm、杆齿数量为 60 根的条件下, 对滚筒转速进行单因素试验, 滚筒转速分别取 750、800、850、900、950、1 000、1 050 r/min。试

验结果如图 7 所示。由图 7 可知, 随着滚筒转速的增大, 籽粒破碎率先减小再增大, 当转速为 1 000 r/min 时, 破碎率最低。当滚筒转速由 700 r/min 增至 800 r/min 时, 籽粒损失率急剧减小; 当滚筒转速达 900 r/min 时, 损失率达到国家标准($\leq 4\%$)的要求; 当滚筒转速为 1 050 r/min 时, 损失率最低。综合考虑籽粒损失率和破碎率, 响应曲面试验选择滚筒转速范围为 950~1 050 r/min。

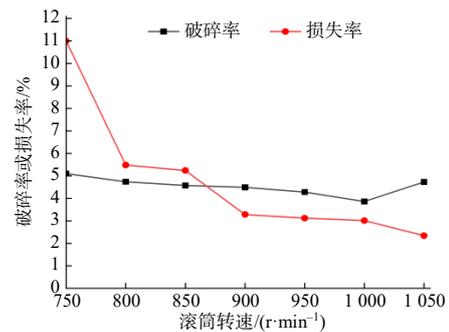


图 7 不同滚筒转速下的玉米籽粒损失率和破碎率

Fig.7 Loss rate and breakage rate of corn kernels under different drum speeds

3.3.2 脱粒间隙对脱粒性能影响

在滚筒转速为 900 r/min、杆齿数量为 60 根的条件下, 对脱粒间隙进行单因素试验, 脱粒间隙分别取 20、25、30、35、40 mm。试验结果如图 8 所示。由图 8 可知, 随着脱粒间隙的增大, 籽粒破碎率先减小后增大, 损失率则上下波动, 脱粒间隙为 20~25 mm 时, 破碎率高于国家标准($\leq 5\%$)。综合考虑籽粒损失率和破碎率, 响应曲面试验选择脱粒间隙范围为 30~40 mm。

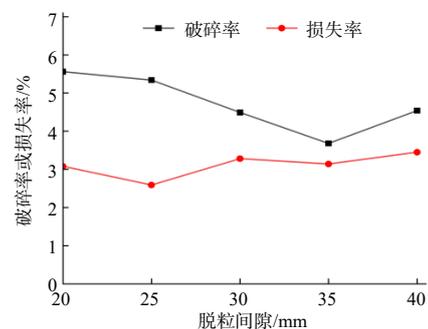


图 8 不同脱粒间隙下的玉米籽粒损失率和破碎率

Fig.8 Loss rate and breakage rate of corn kernels under different threshing gap

3.3.3 杆齿数量对脱粒性能影响

在滚筒转速为 900 r/min、脱粒间隙为 30 mm 条

件下,对杆齿数量进行单因素试验,杆齿数量分别取54、60、66、72根。试验结果如图9所示。由图9可知,随着杆齿数量的增大,破碎率呈现先下降后上升的趋势,当杆齿数量为66根时,破碎率最低。损失率则逐渐下降,当杆齿数量为54根时,损失率高于国家标准;当杆齿数量为72根时,损失率最低。综合考虑籽粒损失率和破碎率,响应曲面试验选择杆齿数量为60~72根。

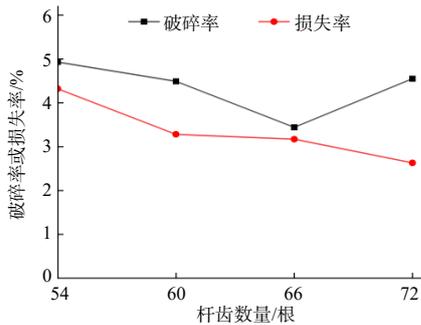


图9 不同杆齿数量下的玉米籽粒损失率和破碎率

Fig.9 Loss rate and breakage rate of corn kernels under different bar teeth number

3.4 响应曲面试验

为找出柔性脱粒装置最优参数组合,根据单因素试验结果,运用Design-Expert软件设计试验方案,响应曲面试验设计和结果如表2所示。

表2 响应曲面试验设计和结果

Table 2 Response surface test design and results

序号	试验因素水平			响应值	
	滚筒转速/ (r·min ⁻¹)	杆齿数 量/根	脱粒间 隙/mm	破碎率/%	损失率/%
1	1 050	60	35	5.38	2.93
2	1 000	60	30	4.06	3.40
3	1 000	60	40	5.28	4.01
4	950	60	35	3.91	3.84
5	1 000	66	35	3.33	3.04
6	1 000	66	35	3.28	2.85
7	950	66	30	3.26	4.02
8	1 000	66	35	3.13	2.76
9	1 050	66	30	4.06	2.39
10	950	66	40	3.65	3.56
11	1 050	66	40	4.15	3.36
12	1 000	72	30	4.80	3.02
13	1 000	72	40	4.75	3.01
14	950	72	35	4.40	3.77
15	1 050	72	35	4.47	2.66

3.4.1 破碎率分析与检验

通过Design-Expert对破碎率进行方差分析,由结果(表3)可知,破碎率模型极显著,失拟项不显著,模型决定系数 $R^2=0.9811$,表明回归模型拟合效果好。在破碎率回归模型中,滚筒转速(A)的影响极显著,杆齿数量(B)的影响不显著,脱粒间隙(C)的影响显著,根据P判断,滚筒转速、脱粒间隙、杆齿数量对破碎率的影响依次降低;在交互项中,AB项的影响极显著,BC项的影响显著,AC项的影响不显著;在二次项中, A^2 项的影响不显著, B^2 、 C^2 项的影响极显著。通过Design-Expert获得破碎率回归方程为 $S_p=3.25+0.33A-0.0263B+0.0263C-0.35AB-0.075AC-0.3175BC+0.1754A^2+1.12B^2+0.3579C^2$ 。

表3 玉米籽粒破碎率回归模型方差分析结果

Table 3 Analysis result of variance of the regression model of corn kernels breakage rate

误差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	7.180	9	0.798	28.900	0.0009
A	1.010	1	1.010	36.530	0.0018
B	0.006	1	0.006	0.200	0.6736
C	0.340	1	0.340	12.330	0.0171
AB	0.490	1	0.490	17.750	0.0084
AC	0.023	1	0.023	0.815	0.4080
BC	0.403	1	0.403	14.610	0.0123
A^2	0.114	1	0.114	4.120	0.0982
B^2	4.610	1	4.610	167.200	<0.0001
C^2	0.473	1	0.473	17.140	0.0090
残差	0.138	5	0.028		
失拟项	0.116	3	0.039	3.580	0.2260
纯误差	0.022	2	0.001		
总离差	7.320	14			

根据表3对显著项进行响应曲面分析,结果如图10所示。由交互项AB可知,当滚筒转速由950 r/min增加到1 000 r/min时,破碎率逐渐降低,这是因为玉米籽粒与玉米芯分离能力加强,进入脱粒滚筒内的玉米植株能够及时完成茎秆与果穗以及玉米芯轴与籽粒的脱粒分离,所以破碎率降低;随着滚筒转速进一步提高,虽然提高了籽粒与玉米芯的分离效率,但滚筒对玉米籽粒打击力加大,易造成籽粒破损。随着杆齿数量的增大,破碎率逐渐降低,这是由于脱粒杆齿数量增大,加强了脱粒滚筒对物料的处理能力,籽粒与芯轴分离效率提高,降低了破碎率;当杆齿数量进一步增大时,脱粒滚筒对籽粒

的打击频率加大,籽粒受到杆齿打击、碰撞的概率增大,易造成籽粒破碎。

由交互项BC可知,当脱粒间隙较小时,籽粒受到凹板筛与脱粒滚筒的作用力强,籽粒受到的碰撞

次数增大,从而使得其破碎率增大;而脱粒间隙较大时,脱粒室内部空间增大,凹板筛的脱粒能力减弱,籽粒从芯轴上脱落时间延长,籽粒滞留在脱粒滚筒内,从而导致破碎率增大。

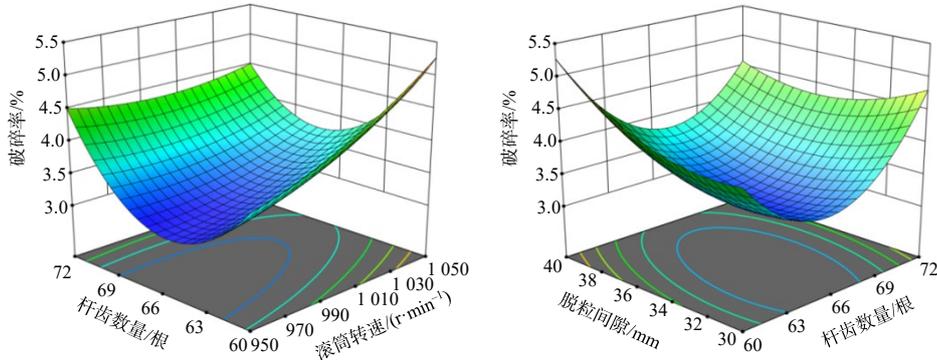


图10 玉米籽粒破碎率各显著影响因素的响应曲面

Fig.10 Response surface for significant factors affecting the corn kernels breakage rate

3.4.2 损失率分析与检验

通过Design-Expert对损失率进行方差分析,由结果(表4)可知,破碎率模型极显著,失拟项不显著,模型决定系数 $R^2=0.9504$,表明回归模型拟合效果好。在损失率回归模型中,A的影响极显著,B的影响显著,C的影响不显著,根据P判断,滚筒转速、杆齿数量、脱粒间隙对损失率的影响依次降低;在交互项中,AB、BC项的影响不显著,AC项的影响显著;在二次项中, A^2 、 B^2 、 C^2 项的影响均不显著。通过Design-Expert获得损失率回归方程为 $S_5=2.88-0.4813A-0.215B+0.1388C-0.055AB+0.3575AC-0.155BC+0.1946A^2+0.2221B^2+0.3575C^2$ 。

表4 玉米籽粒损失率回归模型方差分析结果

Table 4 Analysis result of variance of the regression model of corn kernels loss rate

误差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	3.480	9	0.387	10.650	0.0009
A	1.850	1	1.850	51.020	0.0008
B	0.370	1	0.370	10.180	0.0242
C	0.154	1	0.154	4.240	0.0945
AB	0.010	1	0.010	0.275	0.6222
AC	0.511	1	0.511	14.080	0.0133
BC	0.096	1	0.096	2.650	0.1647
A^2	0.140	1	0.134	3.850	0.1070
B^2	0.182	1	0.182	5.010	0.0753
C^2	0.239	1	0.239	6.590	0.0502
残差	0.182	5	0.036		
失拟项	0.141	3	0.047	2.300	0.3178
纯误差	0.041	2	0.020		
总离差	3.660	14			

根据表4对显著项进行响应曲面分析,结果如图11所示。由交互项AC可知,随着滚筒转速降低,脱粒滚筒对玉米籽粒的打击力降低,造成玉米籽粒与玉米芯不能及时分离,导致损失率逐渐增大;当杆齿数量和滚筒转速固定,脱粒间隙由30 mm增大到40 mm时,损失率逐渐增大,这是由于当脱粒间隙较大时,脱粒室内部空间较大,籽粒与芯轴脱粒分离能力减弱,杆齿对物料层搅拌、疏散作用减弱,损失率升高。

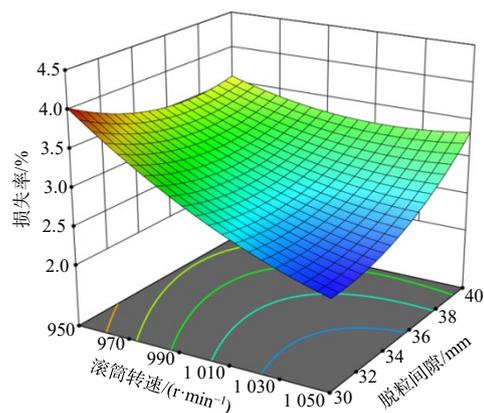


图11 玉米籽粒损失率各显著影响因素的响应曲面

Fig.11 Response surface for significant factors affecting the corn kernels loss rate

3.5 最优参数组合及验证

为得到最佳作业参数,利用Design-Expert对回归模型进行约束优化求解(式(3))。由式(3)可获得优化结果:当玉米籽粒含水率为28.6%,滚筒转速为1027 r/min、脱粒间隙为33 mm、杆齿数量为66根

时,玉米籽粒破碎率与损失率分别为3.49%和2.56%。对优化后的参数进行台架验证试验(每组重复3次,数据取平均值),测得玉米籽粒破碎率与损失率分别为3.54%和2.71%。

$$\begin{cases} \min S_1 \\ \min S_2 \\ 950 \text{ r/min} \leq A \leq 1050 \text{ r/min} \\ 60 \text{ 根} \leq B \leq 72 \text{ 根} \\ 30 \text{ mm} \leq C \leq 40 \text{ mm} \end{cases} \quad (3)$$

4 田间试验

将所设计的柔性脱粒装置装配在4YZ-2型玉米籽粒联合收获机上,然后按照GB/T 29162—2020《玉米收获机械》,以破碎率与损失率为试验指标,进行田间试验。试验地位于浏阳映昌农机合作社,试验田为大豆、玉米带状复合种植田(3+2种植模式),试验玉米品种为‘东单808’,株距为12 cm,行距为39 cm,最低结穗高度为120 cm,籽粒含水率为27.8%。在台架试验最优参数组合下即当喂入量为1.6 kg/s、滚筒转速为1 027 r/min、脱粒间隙为33 mm、杆齿数量为66根时,机具以0.5 m/s的行进速度收割20 m,测得籽粒的破碎率和损失率分别为3.61%和2.78%,各项指标均符合国家标准。

5 结论

1) 对玉米籽粒联合收获机的脱粒部件进行理论分析,设计了由“柔性弧面杆齿+圆钢栅条凹板筛”组成的柔性脱粒装置,发现柔性脱粒装置具有良好的脱粒能力,且能够有效降低玉米籽粒的破碎率,该装置的籽粒破碎率相较于刚性脱粒装置的降低了12.08%。

2) 由响应曲面试验结果可知,影响玉米籽粒破碎率和损失率的最优参数组合为滚筒转速为1 027 r/min、脱粒间隙为33 mm、杆齿数量为66根,此时籽粒破碎率与损失率分别为3.49%、2.56%;最优参数组合的田间验证试验结果表明,当籽粒含水率为27.8%时,籽粒的破碎率和损失率分别为3.61%和2.78%,各项指标均满足国家标准。

参考文献:

- [1] 何珂. 玉米柔性脱粒装置设计与试验[D]. 淄博: 山东理工大学, 2019.
[2] 相姝楠, 付君, 张屹晨. 玉米脱粒技术及装置研究进

- 展[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(3): 95–101.
[3] 耿爱军, 杨建宁, 张兆磊, 等. 国内外玉米收获机械发展现状及展望[J]. 农机化研究, 2016, 38(4): 251–257.
[4] 陈志刚. 玉米脱粒装置减损试验研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
[5] 罗琪. 玉米联合收获机割台优化设计与试验研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.
[6] 康家鑫. 南方大豆联合收获机脱粒分离装置设计与机理研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2022.
[7] 徐立章, 李耀明, 丁林峰. 水稻谷粒与脱粒元件碰撞过程的接触力学分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 146–149.
[8] 李义博, 姜建军, 徐杨, 等. 高含水率玉米橡胶复合钉齿制备与脱粒性能试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 158–167.
[9] 苏媛, 刘浩, 徐杨, 等. 轴流式玉米脱粒装置钉齿元件优化与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 258–265.
[10] 张帅. 玉米籽粒收获机蚯蚓仿生筛清选装置颗粒清选机理研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
[11] 康家鑫, 王修善, 谢方平, 等. 大豆联合收获机对称可调式凹板筛设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(2): 11–22.
[12] 张红梅, 胡经营, 何勋, 等. 基于纵轴流开式玉米脱粒装置的优化设计与试验[J]. 河南农业大学学报, 2025, 59(1): 122–135.
[13] 王升升, 卢梦晴, 胡金鹏, 等. 弹性短纹杆-板齿组合式大白菜种子脱粒装置研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 86–94.
[14] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
[15] 屈哲. 低损伤组合式玉米脱粒分离装置的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
[16] 樊晨龙, 崔涛, 张东兴, 等. 低损伤组合式玉米脱粒分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 113–123.
[17] 谭云峰, 陈霖, 胡森, 等. 纵轴流柔性弯齿式大豆脱粒装置的设计与试验[J]. 浙江农业学报, 2023, 35(12): 2954–2965.
[18] 王勋威, 谢方平, 任述光, 等. 横轴流脱粒分离装置的数学模型的建立与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(4): 480–487.
[19] 杨欢, 杜勇利, 陈平, 等. 小喂入量大豆收割机纵轴流脱粒装置参数优化[J]. 甘肃农业大学学报, 2018, 53(4): 184–189, 196.
[20] 滕悦江, 金诚谦, 陈艳普, 等. 稻麦联合收获机分段式脱粒装置设计与优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 1–12.
[21] 彭煜星, 李旭, 刘大为, 等. 单纵轴流脱粒滚筒的设计与性能试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(5): 554–560.
[22] 邵永明. 玉米籽粒收获机低损伤脱粒装备设计与试验研究[D]. 滁州: 安徽科技学院, 2020.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳正