doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.04.023

玉米果穗芯轴内部胀裂预脱粒装置设计与试验

周德义　张成宇　刘大欣　侯鹏飞　张国栋　于春生
（吉林大学生物与农业工程学院，长春 130022）

摘要：针对滚筒式玉米脱粒，在脱粒初期阶段，因玉米果穗籽粒排列紧密导致的籽粒间支撑力较大，致使籽粒受脱粒元件冲击较大、损伤严重的问题，提出一种玉米果穗预脱粒原理，在脱粒前先对果穗进行预处理，将果穗从芯轴内部胀裂成碎块，打破原有的整穗籽粒间的紧密排列结构，实现籽粒松散，减小籽粒间支撑力。基于该原理设计了一种玉米果穗芯轴内部胀裂预脱粒装置，主要由执行气缸、胀裂棱锥和果穗夹具等组成，通过对果穗胀裂过程的分析，明确胀裂棱锥棱数、工作压力及胀裂棱锥与果穗夹具的安装间距等关键参数，并通过单因素试验与 Box－Behnken 响应面试验对各因素影响规律进行探究。试验结果表明，各试验影响因素对小碎块占比和破损率的影响显著性由大到小顺序为胀裂棱锥棱数、胀裂棱锥与果穗夹具的安装间距、工作压力。最优参数组合为胀裂棱锥棱数 8、胀裂棱锥与夹具安装间距 2 cm、工作压力 0.55 MPa，在此参数组合下进行了 5 次验证试验，小碎块占比 74.38%、籽粒破损率 1.07%，与优化结果基本一致。装置可在保证籽粒低损伤的前提下，有效实现果穗裂解，小碎块数量占比大，明显降低了籽粒间的支撑力。预脱粒装置分别搭配往复式柔性脱粒装置和 5TY－45－150 型脱粒机与直接将整穗果穗喂入 5TY－45－150 型脱粒机进行脱粒对比试验。试验结果表明，采用“预脱粒＋5TY－45－150 型脱粒机”和采用“预脱粒＋往复式柔性脱粒装置”的脱粒方式相较于直接将整穗果穗喂入 5TY－45－150 型脱粒机的脱粒方式籽粒破损率分别减少 2.73、2.97 个百分点，降幅分别高达 55.94% 和 60.86%。证明预脱粒装置可显著改善整个脱粒环节的作业质量，研究结果为提升玉米籽粒机械化脱粒质量提供了新思路与技术支撑。

关键词：果穗预脱粒；内部胀裂；胀裂棱锥；籽粒松散；籽粒间支撑力
中图分类号：　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2026)04-0234-12　　**OSID**：

Design and Experiment of Internal Cob-splitting Pre-threshing Device for Maize Ears

ZHOU Deyi　ZHANG Chengyu　LIU Daxin　HOU Pengfei　ZHANG Guodong　YU Chunsheng
(*College of Biological and Agricultural Engineering*, *Jilin University*, *Changchun* 130022, *China*)

Abstract: In conventional drum-type maize threshing, the tightly arranged kernels on the maize ear lead to a high inter-kernel support force during the initial stage of threshing, resulting in strong impacts from the threshing elements and severe kernel damage. To address this issue, a pre-threshing principle for maize ears was proposed. This approach involved pretreating the ear before threshing by inducing internal splitting of the cob from the inside out into fragments, thereby disrupting the original compact kernel arrangement, loosening the kernels, and significantly reducing the inter-kernel support force. Based on this principle, a novel internal cob-splitting pre-threshing device for maize ears was developed. The device consisted primarily of an actuating cylinder, a prismatic splitting wedge, and an ear-holding fixture. Through analysis of the ear-splitting process, key structural parameters were identified, including the number of prism edges, operating air pressure, and fixture spacing. Single-factor experiments and Box－Behnken response surface tests were conducted to investigate the influence of these factors. The results showed that the significance of each factor affecting the proportion of small fragments and kernel breakage rate followed the descending order as follows: number of prism edges, fixture spacing and air pressure. The optimal combination of parameters was determined to be 8 prism edges, 2 cm fixture spacing, and

收稿日期：2025－05－09　修回日期：2025－09－23
基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFD070190103)
作者简介：周德义(1969—)，男，教授，博士生导师，主要从事玉米低损脱粒技术及装备、盐碱地改良装备研究，E-mail：zhoudy@jlu.edu.cn
通信作者：于春生(1969—)，男，高级工程师，主要从事玉米收获装备研究，E-mail：yucs@jlu.edu.cn

0.55 MPa air pressure. Under this configuration, five validation tests were conducted, yielding an average small fragment proportion of 74.38% and a kernel breakage rate of 1.07%, closely aligning with the predicted values. The results confirmed that the device can effectively split the maize ear into fragments with a high proportion of small cob pieces, while maintaining low kernel damage and significantly reducing the inter-kernel support force. Comparative threshing tests were carried out between a pre-threshing unit with a reciprocating flexible threshing unit and a 5TY－45－150 thresher, and a 5TY－45－150 thresher fed directly with the whole cob. The results showed that the threshing method of "pre-threshing + 5TY－45－150 thresher" and the threshing method of "pre-threshing + reciprocating flexible threshing device" were comparable to the threshing method of feeding the whole cob directly into the 5TY－45－150 thresher. The seed breakage rate of the threshing method was reduced by 2.73 percentage points and 2.97 percentage points, respectively. The reductions were as high as 55.94% and 60.86%, respectively. It proved that the pre-threshing device can significantly improve the operation quality of the whole threshing process. The research result can provide an approach and technical support for improving the quality of mechanized maize threshing.

Key words: pre-threshing of maize ears; internal splitting; prismatic splitting wedge; kernel loosening; inter-kernel support force

0　引言

据 2024 年数据，我国玉米机保有量达 6.506×10^5 台，尽管玉米机械化机收率高达 90%，但其中籽粒直收占比却不足 5%[1-2]，这主要是因为籽粒直收过程中机械损伤较大，而籽粒的损伤会增加感染黄曲霉素的风险[3-4]，霉变的籽粒不仅自身会发生变质，还会诱发周围籽粒发生霉变，造成籽粒的后续储藏与粮食生产安全问题[5-7]。这大大阻碍了玉米籽粒直收机的大面积推广应用。因此，降低玉米籽粒收获过程破损率对提高玉米生产效率和国民粮食安全有着重要意义。

玉米果穗在用滚筒式脱粒方式进行脱粒时，会造成一定程度的损伤[8-10]。其原因在于滚筒式脱粒装置在脱粒初期阶段果穗喂入时，果穗与高速旋转的脱粒滚筒瞬时接触，通过冲击、挤压等外力作用在籽粒表面，而果穗特有的籽粒紧密排列结构又需要较大的外力才能使籽粒与芯轴分离，所施外力远远大于籽粒表面承载极限，这也是导致籽粒破损严重的主要因素[11-13]。现有研究多聚焦于优化脱粒滚筒参数以及脱粒元件结构或引入柔性脱粒技术以降低籽粒破损率[14-19]，虽然在一定程度上缓解了籽粒损伤问题，但仍不能满足在玉米果穗脱粒时对籽粒完好性的要求。此外，相关研究表明，多个籽粒支撑状态下脱粒力与单个籽粒相比是成倍数增加的，若能有效减少籽粒间的相互支撑作用力，则可很大程度上减少脱粒时的籽粒破损率[20]。国内一些学者还提出通过预处理的方法削弱籽粒与芯轴的连接强度。李心平等[21]设计仿鸡啄式装置实现籽粒离散，袁海阔[22]研发仿生波纹辊预疏松果穗，以此方式削弱籽粒与芯轴之间的连接力，实现脱粒时降低籽粒破损率的目的。这些预处理方式虽然对降低籽粒破损率起到一定效果，但均未从根本上改变玉米果穗籽粒紧密排列结构，对降低脱粒所需外力仍然有一定局限性。

基于上述分析及课题组前期研究[23]，本文提出一种果穗预脱粒原理，基于该原理，同时结合劈裂岩石时所应用的胀裂技术[24-26]，设计一种玉米果穗芯轴内部胀裂预脱粒装置。该装置突破传统外部施力模式，将果穗从芯轴内部胀裂成碎块，使籽粒充分松散，从而降低脱粒时所需外力，实现低损脱粒。通过理论分析及三因素三水平响应曲面试验，确定预脱粒装置的最优工作参数，并开展样机验证以及脱粒效果试验。

1　整机结构和工作原理

1.1　整机结构

玉米果穗芯轴胀裂装置主要由气泵、电控箱、执行气缸、玉米果穗夹具、胀裂棱锥、碎块收集箱等组成，其结构如图 1 所示。气泵提供稳定的动力；电控箱集成控制单元与操作界面，实现装置运行逻辑的自动控制；执行气缸的推杆推动玉米果穗沿轴线方向运动；果穗夹具起到对果穗的约束固定作用，确保其在胀裂过程的稳定性；胀裂棱锥固定在装置前端的棱锥基座上，其结构如图 2 所示，主要由开槽刀刃、胀裂楔板、导流板以及胀裂锥芯组成，具备初始切槽、劈裂和导向弯折的功能；碎块收集箱安装于装置下方，用于收集经过胀裂的玉米果穗碎块。整机采用模块化设计，便于拆装与维护。

1.2　工作原理

玉米果穗芯轴内部胀裂预脱粒装置运行前，首先将玉米果穗以尾部朝前方式置于果穗夹具内，通

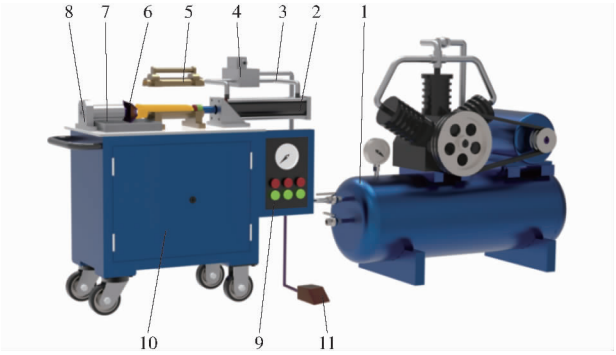

图 1 玉米果穗芯轴内部胀裂预脱粒装置结构

Fig. 1 Structure of internal expansion pre-threshing device for corn ear cobs

1. 气泵 2. 执行气缸 3. 连接管 4. 电磁阀 5. 玉米果穗夹具 6. 胀裂棱锥 7. 落料口 8. 棱锥基座 9. 电控箱 10. 碎块收集箱 11. 脚踏开关

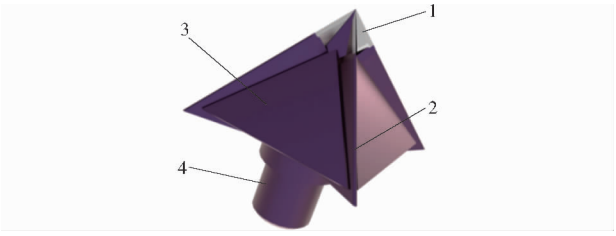

图 2 胀裂棱锥结构

Fig. 2 Expansion prism structure

1. 开槽刀刃 2. 胀裂楔板 3. 导流板 4. 胀裂锥芯

过果穗夹具夹紧定位。电控箱选择手动或自动模式启动装置,通过脚踏开关向控制系统发出指令后,气泵向执行气缸提供高压气体,推动果穗向前运动。初始果穗尾部接触并嵌入胀裂棱锥的开槽刀刃,在芯轴尾端形成初始槽口。随着果穗被进一步推进,胀裂楔板逐步嵌入果穗芯轴内部,产生径向胀裂力,裂纹在胀裂楔板作用下不断扩展,使果穗沿轴向产生裂解。在导流板的限制与导向下,裂解的果穗逐步弯折断裂为若干段碎块,经落料口落入下方的碎块收集箱,装置胀裂过程如图 3 所示。胀裂后的果穗碎块很大程度上减小了籽粒间的支撑力,提高了边缘籽粒占比,使籽粒充分松散,脱粒所需外力较小,后续通过揉搓等相对柔和的方式脱粒,可大大降低籽粒损伤风险。此外,在果穗胀裂过程中,部分籽粒直接剥落,减少了后续脱粒需处理的籽粒数量,从而降低脱粒负荷与难度。因此,在后续脱粒作业中能较好地保证籽粒的低损伤率以及脱净率。

2 关键部件设计

2.1 玉米果穗参数测定与夹具设计

2.1.1 玉米果穗基本参数测定

试验材料选用 2024 年 10 月于吉林大学农学实验基地(125°E,43°N)采摘的先玉 335 玉米果穗。

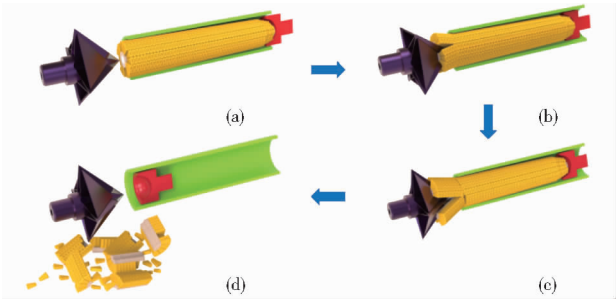

图 3 装置胀裂过程

Fig. 3 Device rupture process

果穗尺寸影响果穗夹具尺寸参数,对玉米果穗首、中、尾段直径、果穗长度以及籽粒行数进行测量,随机取 20 个果穗测量并进行统计。根据玉米果穗长度将其三等分,取首、中、尾段每段中间测量玉米果穗直径,如图 4 所示,使用游标卡尺分别测量其长度、直径等物理尺寸,结果如表 1 所示。

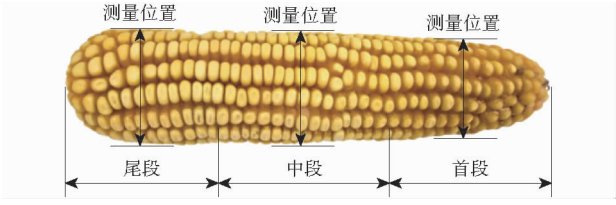

图 4 玉米果穗分段示意图

Fig. 4 Schematic of corn cob segmentation

表 1 玉米果穗尺寸参数

Tab. 1 Ear size parameters

统计量	穗长/mm	行数	尾段直径/mm	中段直径/mm	首段直径 mm
最小值	198.00	14	51.00	48.74	44.40
最大值	235.00	20	56.16	54.5	49.82
平均值	216.10	16.6	54.28	52.59	47.83

由表 1 可知,先玉 335 玉米果穗穗长为 198 ~ 235 mm,平均值为 216.10 mm,其中大部分果穗穗长介于 198 ~ 230 mm 之间,所占比例高达 90%,故认为大部分果穗穗长介于 198 ~ 230 mm 之间;先玉 335 果穗 16 行所占比例为 55%,18 行所占比例为 30%,16 和 18 行所占比例高达 85%。

2.1.2 果穗夹具设计

夹具主要用于对玉米果穗进行轴向限位与径向包裹支撑,先玉 335 玉米果穗平均穗长为 216.10 mm,果穗首段、中段、尾段平均直径分别为 47.83、52.59、54.28 mm。为了确保夹具能适应大多数果穗尺寸并实现稳定夹持,夹具设计时应兼顾典型值与边界尺寸,综合考虑其适配性与定位精度,设计的结构如图 5 所示。

(1)夹具内径d_2。夹具内径取 57 mm,略大于尾段平均直径,适配 90% 以上果穗,内衬 2 mm 硅胶垫片减少籽粒磨损,该尺寸既可适应 90% 以上中等至

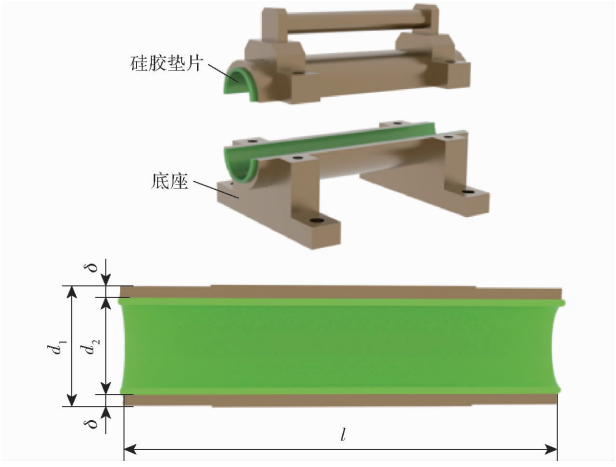

图 5　果穗夹具结构

Fig. 5　Grape cluster fixture structure

大尺寸果穗，又可通过内衬柔性材料实现自适应包容小一号果穗。

(2)夹具外径d_1与壁厚δ。考虑夹具结构强度和材料刚度，夹具外径设计为 67 mm，壁厚为 5 mm。该结构尺寸兼顾夹具整体强度、加工性与装置内部空间匹配性，能有效抵抗胀裂过程所产生的横向应力。

(3)夹具长度l。从表 1 可知，绝大多数果穗穗长分布在 198 ~ 230 mm 区间。为确保夹具能稳定夹持并限制果穗轴向运动，夹具有效长度设计为 250 mm，留出尾端 20 ~ 30 mm 用于安置执行气缸活塞杆。

2.2　胀裂棱锥设计

2.2.1　果穗胀裂机理

图 6 为果穗胀裂原理，玉米果穗在圆筒夹具中受到一个沿轴线方向的推力F。当胀裂棱锥与果穗接触后，果穗会先经历开槽，然后被楔板劈裂，最后在导流板及夹具的双重作用下弯折破断。可将其分为 3 个主要阶段：开槽、胀裂和弯折阶段。

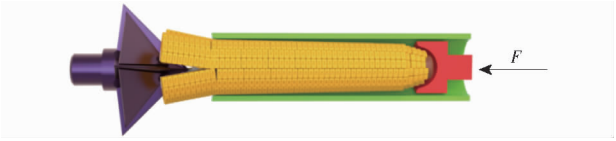

图 6　果穗胀裂原理

Fig. 6　Principle of maize ear expansion cracking

(1)开槽阶段。当果穗尾部与开槽刀刃接触，形成初始切口时，切削力F_c近似计算式为

$$F_c = k_s A_c \tag{1}$$

其中　$A_c \approx bh$

式中　k_s——材料切削强度常数，MPa

A_c——切削截面积，mm^2

h——瞬时切削深度，mm

b——刀刃有效切削宽度，mm

(2)胀裂楔板作用与裂纹扩展阶段。胀裂楔板的作用可视为一楔形块插入果穗内部，施加径向胀裂力F_w，若果穗与楔板摩擦因数为μ_1，则摩擦角ϕ为 arctan μ_1，如图 7a 所示，将此阶段简化为经典楔块力学模型进行分析。理想情况下，楔板的工作面与果穗横截面平行。这样，果穗受到的径向胀裂力F_w可看作是N在垂直于果穗方向的分量，即

$$F_w = N\cos\alpha \tag{2}$$

式中　α——楔板半锥角，(°)

N——楔板对果穗的法向作用力，N

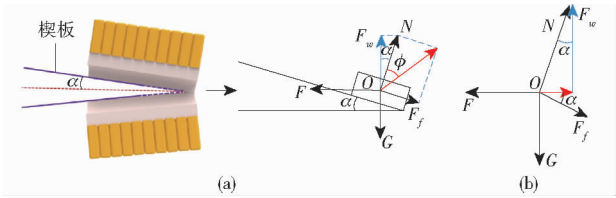

图 7　果穗裂纹扩展过程受力分析

Fig. 7　Force analysis of expansion process of cob cracks

由于楔板与果穗之间存在摩擦，摩擦力F_f为

$$F_f = \mu_1 N = N\tan\phi \tag{3}$$

在推动果穗时，外加推力F的一部分用于克服因楔板斜面引起的分力，另一部分则用于克服摩擦阻力，如图 7b 所示，此时有

$$F = N\sin\alpha + F_f\cos\alpha \tag{4}$$

将式(2)、(3)代入式(4)得

$$F = F_w(\tan\alpha + \tan\phi) \tag{5}$$

已知正切和角公式为

$$\tan(\alpha + \phi) = \frac{\tan\alpha + \tan\phi}{1 - \tan\alpha\tan\phi} \tag{6}$$

在实际工程中，如果楔角和摩擦角都较小，则$\tan\alpha\tan\phi$项可以认为较小，从而可近似为

$$\tan(\alpha + \phi) \approx \tan\alpha + \tan\phi \tag{7}$$

将式(7)代入式(5)得到

$$F_w = \frac{F}{\tan(\alpha + \phi)} \tag{8}$$

为使裂纹在果穗内部继续向前、向外扩展，需要径向胀裂力F_w超过果穗材料的临界破坏力P_{cr}，若以抗拉强度σ_t估算，假设果穗相当于一段圆柱形结构，其受力截面积为A_e(与果穗直径、楔板作用范围有关)，则

$$P_{cr} \approx \sigma_t A_e \tag{9}$$

当$F_w \geqslant P_{cr}$时，裂纹才会继续扩展。

(3)导流板作用与弯折裂解阶段。当果穗被胀裂楔板撑开后，已产生或扩展的裂纹部位与导流板接触，此时对果穗碎块进行受力分析，如图 8 所示。

在实际受力分析中，果穗与导流板的接触面通常存在一定的面积分布，为了简化计算，采用集中力

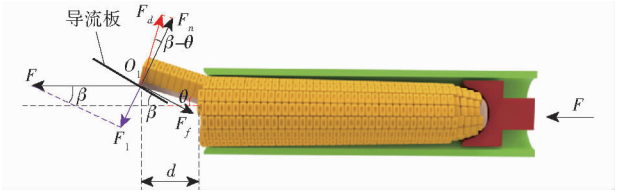

图 8 果穗弯折过程受力分析

Fig. 8 Force analysis of bending process of cob

模型,将导流板施加的法向力视为集中作用于特定接触点O_1。该接触点一般选取在果穗与导流板接触区域的中部或局部应力集中的位置,并假定从该作用点到果穗固定或约束点存在一个有效转矩臂d,此时法向力F_d在果穗上产生的弯矩M为

$$M = F_d d = F_n \cos(\beta - \theta) d \tag{10}$$

式中 F_n——导流板对果穗支撑力,N

β——导流板与轴向之间安装倾角,(°)

θ——果穗与轴向之间夹角,(°)

此时推力F在沿导流板垂直方向的分力F_1为

$$F_1 = F\sin\beta = F_n \tag{11}$$

将式(11)代入式(10)得

$$M = F\sin\beta\cos(\beta - \theta) d \tag{12}$$

此时最大弯曲应力σ_b位于果穗外层,为

$$\sigma_b = \frac{MR}{I} = \frac{F\sin\beta\cos(\beta - \theta) d}{\frac{\pi}{4}R^3} \tag{13}$$

式中 R——果穗半径,mm

I——果穗横截面惯性矩,mm^4

推力F与气泵向执行气缸提供的工作压力p之间的关系可表示为

$$F = p\frac{\pi D^2}{4} \tag{14}$$

式中 D——活塞直径,mm

将式(14)代入式(13)得

$$\sigma_b = \frac{pD^2\sin\beta\cos(\beta - \theta) d}{R^3} \tag{15}$$

当$\sigma_b \geqslant \sigma_y$时,果穗断裂,其中$\sigma_y$为玉米果穗的屈服强度。

导流板通过施加F_d使得果穗在受力点产生弯曲。当F_d作用在距离固定支撑点d处时,会在果穗内部形成一个弯矩。随着弯矩逐步增大,当其达到或超过果穗材料的局部极限弯曲应力时,就会导致裂纹的形成与扩展,最终实现弯折裂解。

2.2.2 胀裂棱锥参数

(1)楔板数。根据课题组前期研究表明,胀裂棱锥的楔板数对玉米果穗的裂解效果有显著影响。不同楔板数的胀裂棱锥如图 9 所示。

果穗胀裂完所得到的碎块数以及籽粒的破损率都将有显著变化。因此在保证裂解效果的前提下,

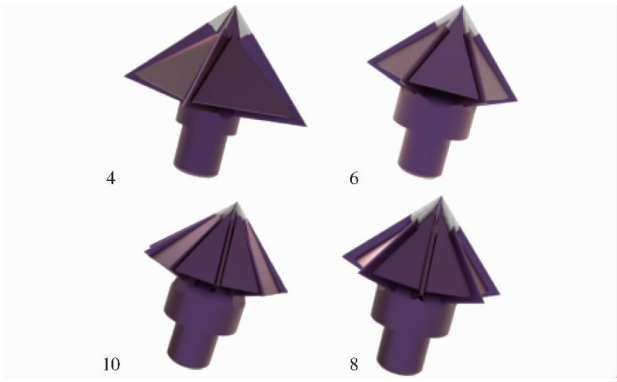

图 9 不同楔板数的胀裂棱锥结构

Fig. 9 Expanding crack pyramid structures with different numbers of wedge plates

根据所测的果穗行数规律,将胀裂棱锥设计 4、6、8、10 不同的棱锥棱数,即楔板数量,对装置进行优化。

(2)胀裂楔板半锥角。如图 10a 所示,根据图 7 中对楔板劈裂阶段的简化力学模型分析,轴向推力一定的情况下,半锥角α越小,径向胀裂力越大,果穗更易产生裂纹扩展,但同时也加大对籽粒的潜在破坏风险;反之,若α过大,则对推力的需求更大。经过前期预试验将初始样机半锥角α定为 15°,以保证裂解效果的均匀性与推动效率,该半锥角兼顾了有效劈裂能力与控制裂解力路径方向的目标,有助于裂纹沿芯轴径向扩展。

(3)导流板与轴向之间的安装倾角。如图 10b 所示,导流板倾角β是影响果穗碎块弯折裂解的关键参数。依据图 8 力学分析模型,果穗在导流板限制下发生弯曲,且其产生的最大弯曲应力σ_{max}与导流板倾角成正比关系。为确保弯曲应力达到果穗屈服强度σ_y,需控制倾角β在一定范围内。若β过小,弯矩不足,不能有效断裂果穗;若β过大,则裂解突发、控制力差,易造成籽粒挤压破损。通过前期试验研究,最终将导流板与轴向安装倾角β设计为 45°。

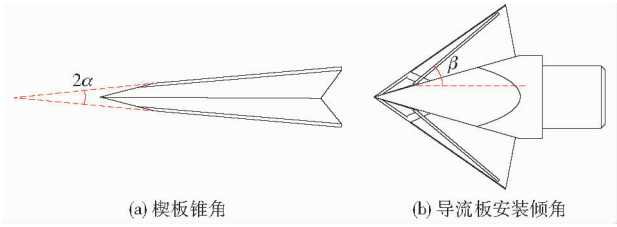

图 10 楔板锥角及导流板安装倾角

Fig. 10 Wedge plate cone angle and guide plate installation inclination angle

2.2.3 胀裂棱锥与果穗夹具的安装间距

对于玉米果穗,在胀裂过程中,胀裂棱锥与果穗夹具的轴向间距同样会影响果穗的裂解效果,如图 11 所示,在同一段玉米果穗胀裂过程,若两者安

装间距过长，其相应的果穗与轴向之间的夹角 θ 会变小，结合式(15)可知，随着果穗与轴向之间的夹角 θ 变小，导流板与轴向之间的安装倾角 β 不变，则相应的玉米果穗的弯曲应力会随之变小，此时若使果穗达到屈服强度，需继续推进玉米果穗，同时果穗碎块尺寸也会相应的发生变化；同理，若两者安装间距过短，果穗碎块受到的弯曲应力会提前达到果穗的极限屈服应力，同样会改变胀裂后的碎块尺寸。结合前期样机预试验，确定胀裂棱锥与果穗夹具的轴向安装间距为 1 ~2 cm 时，装置对果穗有较好的胀裂效果。

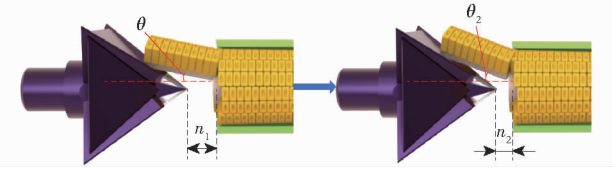

图 11　安装间距对果穗弯折的影响

Fig. 11　Effect of spacing on ear curvature

2.3　控制系统设计

试验装置的控制系统硬件由 PLC 控制器、脚踏开关、自动运行旋钮、开关电源、气动换向阀和执行气缸组成。PLC 控制器作为控制系统的核心，型号为 CP1H－XA40DR－A；开关采用德力西电气公司 EKW－5A－B 型脚踏开关。当选择手动模式时，通过脚踏开关向 PLC 控制器发出执行信号，PLC 控制器向气动换向阀发出换向信号，执行气缸的活塞杆推动玉米果穗，通过胀裂棱锥对玉米施加作用力进行胀裂；松开脚踏开关后，气缸回位，完成胀裂。当选择自动模式时，PLC 控制器按设计的程序，自动进行胀裂动作，可实现自动作业。试验装置控制系统流程图如图 12 所示。

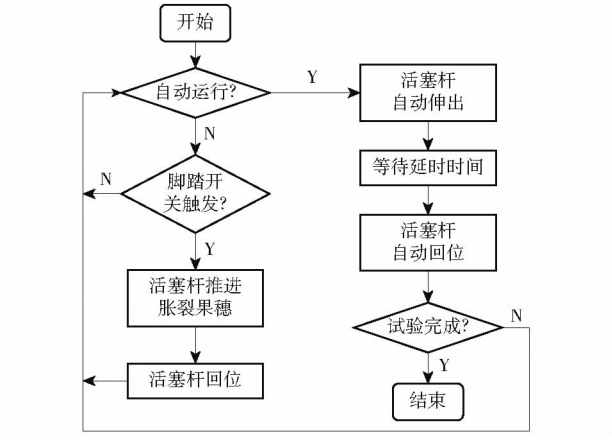

图 12　控制系统流程图

Fig. 12　Flowchart of control system

3　样机试验

3.1　试验条件

试验材料选用 10 月份于吉林大学农学实验基地同批次采集的先玉 335。通过 AS－DHS－10A 型电子水分仪测量其籽粒含水率为 25% ~28%，芯轴含水率为 43% ~47%。试验所用样机为自制的玉米果穗芯轴内部胀裂预脱粒装置，如图 13 所示。

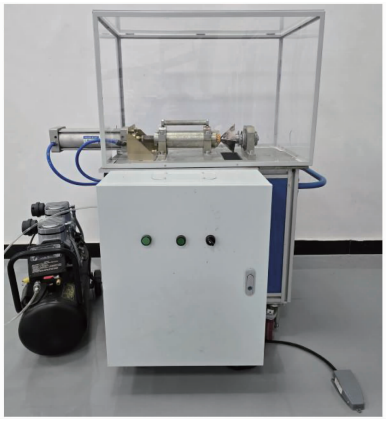

图 13　试验样机

Fig. 13　Experimental prototype

3.2　试验因素和指标

为了研究不同作业参数条件下预脱粒装置的作业效果，根据理论分析结果，以胀裂棱锥棱数、胀裂棱锥与果穗夹具的安装间距、工作压力为试验因素。根据现有研究，果穗上支撑籽粒越多，所需的脱粒作用力越大[27]，故需尽可能减少碎块上支撑籽粒的数量，所以将胀裂完成后的果穗碎块中小碎块占比作为衡量装置工作性能的指标之一，同时根据 GB/T 21962—2020《玉米收获机械》[28] 和 GB/T 5982—2017《脱粒机试验方法》[29] 的检验标准，对试验样品进行称量处理，将籽粒破碎率作为试验指标。

(1)规定玉米果穗碎块最外围的籽粒为边缘籽粒，次外围籽粒为次边缘籽粒(边缘籽粒内侧，至少有一侧表面直接与边缘籽粒接触的籽粒)，其余籽粒为内部籽粒，如图 14 所示。定义只有边缘籽粒的碎块为小碎块，含有边缘籽粒和次边缘籽粒的碎块为中碎块，其余为大碎块，以此定义碎块大小，根据胀裂完成后的果穗碎块的籽粒排列方式将碎块分为小、中、大 3 种尺寸，如图 15 所示。

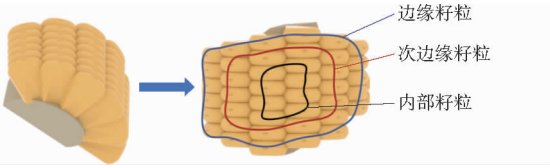

图 14　籽粒排列方式示意图

Fig. 14　Schematic of how seeds were arranged

小碎块占比 Y_1 计算公式为

$$Y_1 = \frac{n}{N_1} \times 100\% \tag{16}$$

式中　n——小碎块个数

N_1——碎块总数

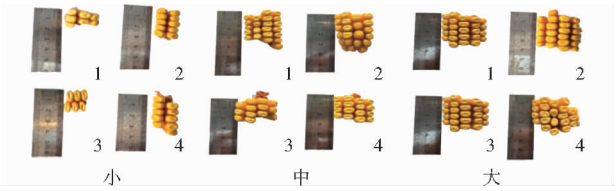

图 15 碎块分类

Fig. 15 Fragment classification

(2)将胀裂完成的玉米果穗碎块收集完成,将碎块上的籽粒一并脱下,分拣出破损籽粒和完好籽粒,如图 16 所示。



图 16 籽粒分拣

Fig. 16 Seed sorting

籽粒破损率 Y_2 计算公式为

$$Y_2 = \frac{m}{M_3} \times 100\% \tag{17}$$

式中 m——破损籽粒质量,g

M_3——籽粒总质量,g

3.3 籽粒与芯轴含水率对胀裂的影响

结合现有研究及理论分析,玉米芯轴和籽粒的含水率处于不同区间范围时,可能会对果穗胀裂产生影响:玉米芯轴的弹性模量会随含水率的降低而增大,此时芯轴更脆硬,更易弯曲断裂成碎块。对于籽粒来说,高含水率籽粒由于自身强度较低,抗压能力较弱,更易受到损伤[30];相反,低含水率籽粒强度较高,抗压能力较强,损伤程度相对较小。

为进一步探究芯轴以及籽粒含水率对胀裂结果的影响,对不同含水率的果穗进行了胀裂试验。试验选用先玉 335 品种的玉米果穗,通过保鲜以及自然晾晒等方式,选取 8 组不同含水率的玉米果穗进行试验。设置胀裂锥棱数为 6、安装间距为 1.5 cm,工作压力为 0.65 MPa,利用预脱粒试验台对这些果穗进行胀裂试验,试验结果如图 17 所示。

由图 17 可以看出,籽粒含水率以及芯轴含水率的变化对试验指标存在一定影响,但果穗芯轴以及籽粒含水率波动幅度在 5% 以内时,小碎块占比变化区间在 5% 左右,籽粒破损率的变化区间在 0.5% 左右,2 个试验指标的变化趋势较为平缓且波动较小。结合胀裂试验中玉米芯轴和籽粒的含水率区间来看,其对预脱粒测试结果的影响并不显著。在此前提下,开展后续试验,保证结果的可靠性。

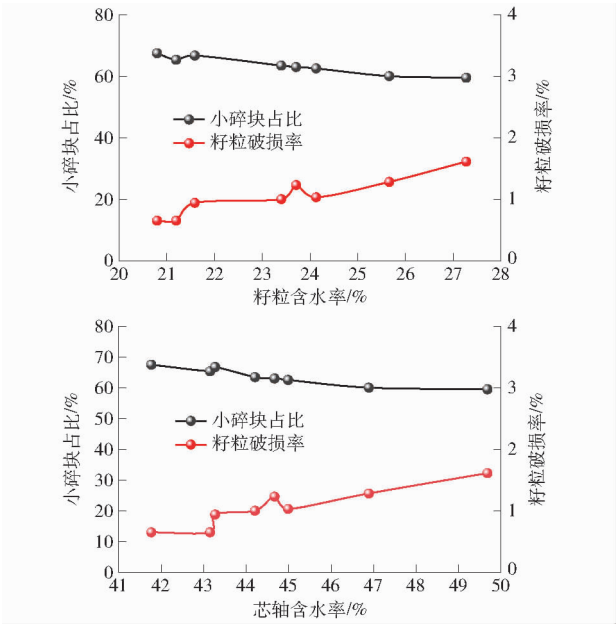

图 17 籽粒及芯轴含水率对胀裂结果的影响

Fig. 17 Influence of seed and mandrel moisture content on swelling and cracking results

3.4 单因素试验

根据前文对果穗胀裂过程的机理分析,结合在胀裂预脱粒装置的实际作业效果,确定胀裂棱锥棱数、胀裂棱锥与果穗夹具的安装间距以及气泵的工作压力是影响果穗胀裂效果的主要因素,为探究这 3 个因素对胀裂预脱粒装置作业效果的影响,开展了单因素试验,试验结果如图 18 所示。

由图 18a 可以看出,随着胀裂棱锥棱数的增加,果穗胀裂后的小碎块占比以及籽粒破损率均呈现上升趋势,但当棱数达到 10 时,籽粒破损率已经接近 3.5%,原因是胀裂棱锥棱数增加,胀裂过程胀裂楔板与籽粒直接接触的概率相应增加,所以导致籽粒破损率明显升高,在对果穗预处理阶段达到如此高破损率,显然不符合装置设计需求,因此综合选择胀裂棱锥棱数为 4 ~ 8。

由图 18b 可以看出,小碎块占比随着安装间距增加逐渐减少,这是因为随着安装间距的增加,果穗达到屈服强度时所需的推进距离增加,相应的碎块尺寸也会变大,得到小碎块的概率便会降低;籽粒破损率则呈先减小后增加趋势,原因是若安装间距过短,则会使果穗在胀裂时遭受夹具与胀裂棱锥之间的挤压过大,导致籽粒破损率显著增加。当安装距离过长时,受果穗自身各段直径具有差异性的影响,果穗在推进过程中易发生轴线偏移,使得果穗与胀裂棱锥轴线无法完全重合,进而增加了籽粒与胀裂棱锥直接接触的概率,所以籽粒破损率变高,因此综合考虑小碎块占比及后续脱粒损失,选择胀裂棱锥与果穗夹具的安装间距为 1 ~ 2 cm。

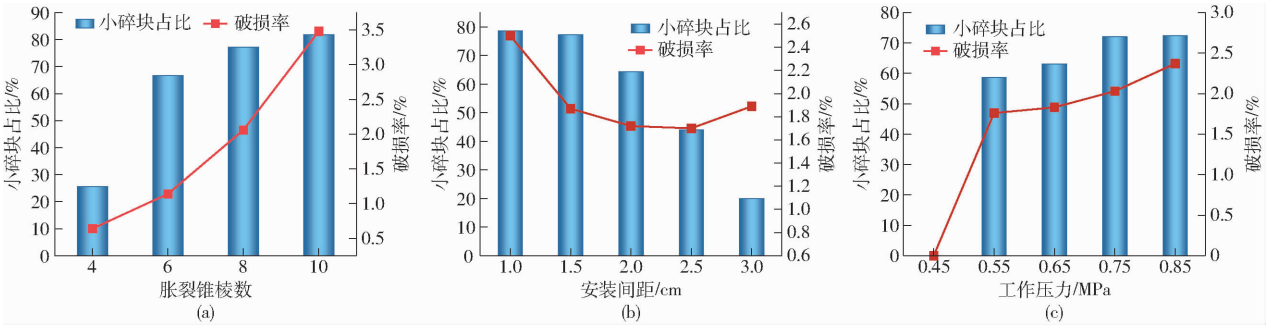

图 18　单因素试验结果

Fig. 18　Results of single factor tests

由图 18c 可知，工作压力过小（<0.55 MPa）时，玉米果穗受到的推力较小，并不能使果穗裂解，胀裂效果并不理想，工作压力达到 0.85 MPa 时，此时小碎块占比并没有明显升高，但籽粒破损率却仍然增加，原因是随着气压的增大，玉米果穗在胀裂时所受推力逐渐增大，使得果穗尾端在接触胀裂棱锥时所受到的棱锥的反作用力增大，此时更易造成籽粒损伤，因此综合选择工作压力为 0.55 ~ 0.75 MPa。

3.5　响应面优化试验

3.5.1　试验设计

为确定各因素优化参数组合，选取胀裂棱锥棱数 X_1、胀裂棱锥与果穗夹具的安装间距 X_2、工作压力 X_3 为试验因素，以小碎块占比 Y_1 和籽粒破损率 Y_2 为指标进行三因素三水平 Box - Behnken 试验。因素编码见表 2。

表 2　试验因素编码

Tab. 2　Test factors and coding

编码	因素		
	棱锥棱数	安装间距/cm	工作压力/MPa
-1	4	1.0	0.55
0	6	1.5	0.65
1	8	2.0	0.75

3.5.2　试验结果与分析

试验方案与结果见表 3，X_1、X_2、X_3 为因素编码值。通过 Design-Expert 分别对小碎块占比 Y_1 和破损率 Y_2 进行方差分析。

小碎块占比方差分析结果如表 4 所示，整体模型极显著（$P<0.01$），且失拟项不显著（$P>0.05$），表明该模型拟合良好，模型可信。X_1、X_2、X_3、X_1^2、X_2^2、X_3^2 影响极显著，X_2X_3 影响显著。各因素对小碎块占比影响由大到小顺序为 X_1、X_2、X_3。

对试验结果进行多元回归拟合，可得到各因素对小碎块占比的回归方程为

$$Y_1 = 61.43 + 31.10X_1 - 4.49X_2 + 4.07X_3 + 0.1425X_1X_2 + 0.4875X_1X_3 + 2.58X_2X_3 - 16.18X_1^2 + 3.10X_2^2 + 3.95X_3^2 \quad (18)$$

表 3　试验设计方案与结果

Tab. 3　Experimental design and results

试验序号	因素			小碎块占比 Y_1/%	破损率 Y_2/%
	X_1	X_2	X_3		
1	0	0	0	60.94	2.21
2	0	0	0	61.94	2.10
3	0	0	0	60.15	2.16
4	-1	-1	0	21.80	1.02
5	0	-1	-1	71.91	1.63
6	0	1	1	70.21	1.74
7	1	0	-1	76.53	1.59
8	1	-1	0	82.59	2.53
9	0	1	-1	56.47	1.54
10	0	-1	1	75.33	1.89
11	-1	0	1	20.90	1.20
12	0	0	0	60.13	2.28
13	1	1	0	75.19	1.50
14	-1	1	0	13.83	1.04
15	1	0	1	85.19	1.97
16	0	0	0	63.97	1.96
17	-1	0	-1	14.19	1.14

表 4　小碎块占比方差分析

Tab. 4　Analysis of variance for percentage of small fragments

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	9 224.87	9	1 024.99	433.36	<0.000 1 **
X_1	7 736.44	1	7 736.44	3 270.93	<0.000 1 **
X_2	161.37	1	161.37	68.23	<0.000 1 **
X_3	132.28	1	132.28	55.93	0.000 1 **
X_1X_2	0.081 2	1	0.081 2	0.034 3	0.858 2
X_1X_3	0.950 6	1	0.950 6	0.401 9	0.546 2
X_2X_3	26.63	1	26.63	11.26	0.012 2 *
X_1^2	1 101.67	1	1 101.67	465.78	<0.000 1 **
X_2^2	40.52	1	40.52	17.13	0.004 4 **
X_3^2	65.76	1	65.76	27.80	0.001 2 **
残差	16.56	7	2.37		
失拟项	6.28	3	2.09	0.814 0	0.549 2
纯误差	10.28	4	2.57		
总和	9241.42	16			

注：** 表示影响极显著（$P<0.01$），* 表示影响显著（$0.01 \leqslant P<0.05$），下同。

破损率方差分析结果如表 5 所示，整体模型极

显著($P<0.01$),且失拟项不显著($P>0.05$),表明该模型拟合良好,模型可信。X_1、X_1^2影响极显著,X_2、X_1X_2、X_2^2、X_3^2影响显著。各因素对破损率影响由大到小为 X_1、X_2、X_3。

表 5 破损率方差分析

Tab. 5 Analysis of variance for breakage rate

来源	平方和	自由度	均方差	F	P
模型	3.150 0	9	0.350 5	12.07	0.001 7 **
X_1	1.270 0	1	1.270 0	43.79	0.000 3 **
X_2	0.195 3	1	0.195 3	6.72	0.035 8 *
X_3	0.101 2	1	0.101 2	3.49	0.104 2
X_1X_2	0.275 6	1	0.275 6	9.49	0.017 8 *
X_1X_3	0.025 6	1	0.025 6	0.881 2	0.379 1
X_2X_3	0.000 9	1	0.000 9	0.031 0	0.865 3
X_1^2	0.750 7	1	0.750 7	25.84	0.001 4 **
X_2^2	0.163 8	1	0.163 8	5.64	0.049 3 *
X_3^2	0.252 2	1	0.252 2	8.68	0.021 5 *
残差	0.203 4	7	0.029 1		
失拟项	0.144 5	3	0.048 2	3.27	0.141 1
纯误差	0.058 9	4	0.014 7		
总和	3.36	16			

对试验结果进行多元回归拟合,可得到各因素对破损率的回归方程为

$$Y_2=2.14+0.398\,7X_1-0.156\,2X_2+0.112\,5X_3-0.262\,5X_1X_2+0.08X_1X_3-0.015X_2X_3-0.422\,3X_1^2-0.197\,3X_2^2-0.244\,7X_3^2 \quad (19)$$

3.5.3 响应面分析

由表 4、5 可知胀裂棱锥棱数、胀裂棱锥与果穗夹具的安装间距、工作压力之间存在交互影响,为了进一步探究各因素对评价指标的影响,忽略不显著的交互影响因素,利用软件 Origin 对试验数据进行处理后绘制因素交互作用响应曲面,如图 19 所示,以直观地分析各因素对小碎块占比和籽粒破损率的作用规律。

由图 19a 可知,当胀裂棱锥与果穗夹具安装间距不变时,小碎块占比随着工作压力增大而增大,在工作压力为 0.7 ~ 0.75 MPa 附近小碎块占比较大,这是因为工作压力的增加使推力增大,有利于果穗的裂解。当工作压力一定时,随着安装间距减小,小碎块占比同样呈逐渐增加趋势,原因是安装间距减小使果穗在胀裂过程中受到的挤压增大,使果穗受到的弯曲应力提前达到其极限弯曲应力,此时果穗提前裂解,进而提高了小碎块占比。当胀裂棱锥与果穗夹具的安装间距为 1 cm、工作压力为 0.75 MPa 时,小碎块占比达到最大值。

由图 19b 可知,当胀裂棱锥与果穗夹具的安装间距保持不变时,籽粒破损率随胀裂棱锥棱数的增加而增大。虽然棱数的增加使果穗受到的多向扩张力更均匀,但过多的棱数会增加胀裂过程胀裂楔板与籽粒直接接触的概率,导致籽粒破损率升高。同时,胀裂棱锥与果穗夹具的安装间距的增加使果穗在胀裂过程受到的挤压减小,有利于降低籽粒破损率。在胀裂棱锥棱数与安装间距的交互作用中,主要影响籽粒破损率的因素是胀裂棱锥棱数。

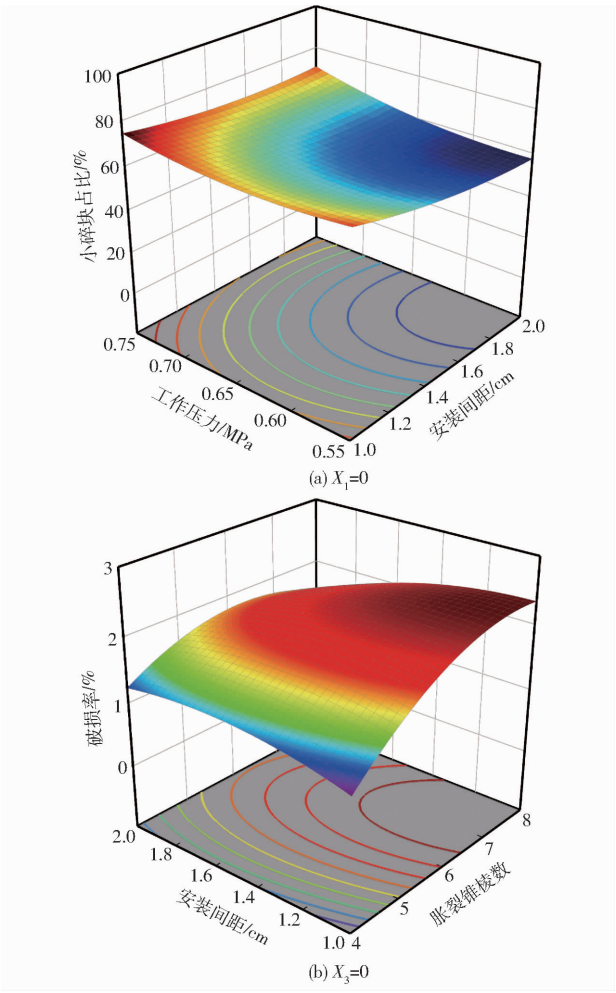

图 19 因素交互作用对评价指标影响的响应曲面

Fig. 19 Response surfaces for effect of factor interactions on evaluation metrics

3.5.4 参数优化

为了得到玉米果穗芯轴内部胀裂预脱粒装置的最优工作参数组合,采用多目标变量优化方法,对影响小碎块占比和破损率的各因素进行优化设计,根据实际作业要求,在目标范围内,以提高小碎块占比和降低籽粒破损率为原则,根据各试验因素的边界条件,建立参数优化目标函数为

$$\begin{cases}\max Y_1\\ \min Y_2\\ \text{s.t.}\begin{cases}-1\leqslant X_1\leqslant 1\\ -1\leqslant X_2\leqslant 1\\ -1\leqslant X_3\leqslant 1\end{cases}\end{cases} \quad (20)$$

基于 Design-Expert 软件中 Optimization 模块对目标函数进行参数优化并求解，得到最优参数组合，即胀裂棱锥棱数为 8、胀裂棱锥与果穗夹具安装间距为 2 cm、工作压力为 0.55 MPa，此时，胀裂装置小碎块占比为 71.92%，破损率为 1.08%。

3.6　验证试验与脱粒试验

3.6.1　验证试验

为验证选取的较优参数组合的合理性，在确定的玉米果穗内部胀裂预脱粒装置优化参数条件下进行果穗胀裂试验，试验对象选取同批次采集的先玉 335 品种玉米。试验前将样机工作参数分别调定为胀裂棱锥棱数为 8、胀裂棱锥与果穗夹具的安装间距为 2 cm 和工作压力 0.55 MPa。启动胀裂装置，通过高速摄像机观察并记录玉米果穗在胀裂棱锥逐渐深入的胀裂过程，如图 20 所示。

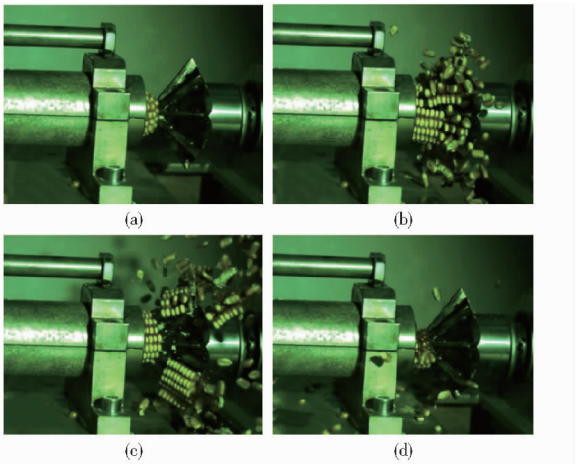

图 20　高速摄像下的果穗胀裂过程

Fig. 20　High-speed videotaping of cob swelling and cracking process

共进行 5 组重复试验验证，主要测定了预脱粒过程小碎块占比与籽粒破损率 2 个关键指标。结果如表 6 所示，各组样机试验中小碎块占比在 71.43% ~77.78%之间，平均值约为 74.38%，而籽粒破损率则保持在 0.72% ~1.40%之间，平均值约为 1.07%。与优化试验预测值小碎块占比 71.92%，破损率 1.08%，基本吻合。整机验证试验结果表明所选参数组合能够在实际工况下有效实现果穗裂解，得到较多的小碎块数，大大增加了边缘籽粒的数量，减弱了果穗中籽粒之间的相互支撑作用，同时保证了籽粒的低损伤。为后续脱粒作业提供了较为理想的初步条件。

表 6　验证试验结果

Tab. 6　Validation test results　　%

试验号	小碎块占比	破损率
1	77.78	1.17
2	73.33	0.84
3	75.00	0.72
4	74.36	1.22
5	71.43	1.40
平均值	74.38	1.07

3.6.2　脱粒试验

为进一步验证果穗经优化后预脱粒装置胀裂后的脱粒效果，将该装置胀裂完成的果穗碎块喂入由课题组设计的针对果穗碎块进行脱粒的往复式柔性脱粒装置中进行脱粒试验，如图 21a 所示，装置设有上下 2 个脱粒板，脱粒板上交错分布有圆台结构的柔性脱粒元件，如图 21b 所示。2 脱粒板设有一定夹角，以适应喂入的不同尺寸的果穗碎块，装置运行时是通过上下 2 个脱粒板来回揉搓果穗碎块，在保证对籽粒施加较小外力的条件下，使籽粒与芯轴之间产生疲劳断裂，实现脱粒。

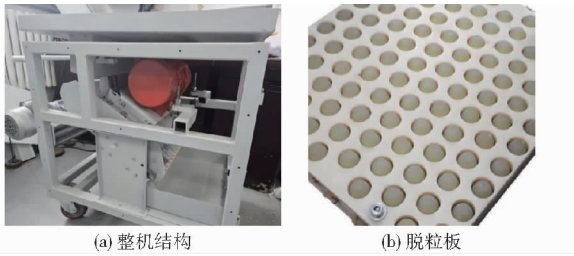

图 21　往复柔性脱粒装置

Fig. 21　Reciprocating flexible threshing device

与国内现有 5TY－45－150 型传统直脱式玉米脱粒机进行对比，如图 22a 所示。装置以短而粗的锤式脱粒元件对果穗进行冲击脱粒，其结构如图 22b 所示。同时，为了综合评估预脱粒装置对整个脱粒环节的影响，将由预脱粒装置胀裂完成的果穗碎块同样喂入 5TY－45－150 型脱粒机进行对比试验。

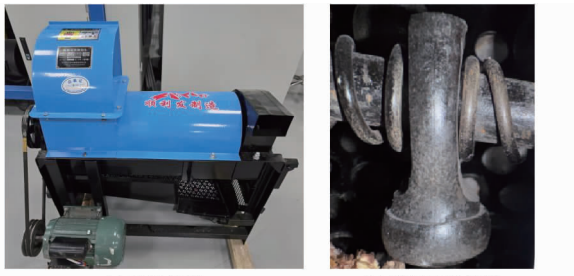

图 22　5TY－45－150 型脱粒机

Fig. 22　5TY－45－150 type threshing machine

脱粒试验以籽粒总破损率P_1和果穗未脱净率P_2为评价指标，计算公式为

$$P_1 = \frac{m_1}{M_1} \times 100\% \tag{21}$$

$$P_2 = \frac{m_2}{M_2} \times 100\% \tag{22}$$

式中 m_1——总破损籽粒质量,g

m_2——未脱净籽粒质量,g

M_1——脱粒后籽粒总质量,g

M_2——脱出籽粒总质量,g

试验时,设置往复柔性脱粒装置工作参数为脱粒板作业频率 38 Hz,出口处脱粒板间距 14 mm。设置 5TY-45-150 型脱粒机主轴转速为 1 200 r/min,凹版间隙为 40 mm。采用“预脱粒+往复式柔性脱粒装置”A、“预脱粒+5TY-45-150 型脱粒机”B 以及“5TY-45-150 型脱粒机”C 3 种组合脱粒方式进行对比脱粒试验,每种组合果穗喂入量均为 0.5 kg/s,喂入时间 3 s,且每组试验重复 3 次取平均值,脱粒试验结果如表 7 所示。

表 7 脱粒试验结果

Tab.7 Threshing test results %

试验组合	平均破损率	平均未脱净率
A	1.91	1.95
B	2.15	2.31
C	4.88	1.97

由表 7 可知,将预脱粒装置处理后的果穗碎块喂入 5TY-45-150 型脱粒机进行脱粒相较于将整穗喂入该脱粒机进行脱粒,破损率降低 2.73 个百分点,降低幅度为 55.94%,虽然未脱净率有一定程度的增大,但综合籽粒损失率仍然优于传统的直脱式脱粒机。若采用“预脱粒+往复式柔性脱粒装置”A 的脱粒方式,其籽粒破损率相较于利用 5TY-45-150 型脱粒机整穗直脱降低 2.97 个百分点,降幅高达 60.86%,同时保证了较为理想的未脱净率。该结果表明将果穗经预脱粒装置胀裂处理成碎块后再进行脱粒,可显著降低脱粒过程的籽粒破损率,若搭配后续用于果穗碎块脱粒的往复柔性脱粒装置,可综合改善脱粒效果。证明了将预脱粒装置应用于脱粒作业中,可显著提高整个脱粒环节作业质量。

3.6.3 讨论

通过优化-对比试验,已成功验证预脱粒装置在降低籽粒破损率方面的显著效果,其核心原理与试验装置的可行性得到充分证实,为玉米低损脱粒提供了全新思路。在此基础上,装置参数优化与效率提升成为后续研究的重点方向。

作业效率方面,预脱粒装置可通过提前脱落部分籽粒、降低籽粒间支撑力减少后续脱粒负荷,未来可采用多装置并行作业或与往复式脱粒装置集成,构建胀裂-脱粒同步系统,为效率提升提供解决方案。

清选环节中,由于胀裂过程会产生果穗碎块,在脱粒完成后的脱出物中,破碎芯轴比例会高于传统脱粒装置所产生的破碎芯轴比例,但胀裂产生的碎块芯轴尺寸均匀(2~4 cm),虽占比高于传统脱粒产物,但只需调控风压、风量及筛孔开度至稳定状态,即可高效实现籽粒与芯轴分离,规避芯轴尺寸差异导致的清选不彻底问题。

4 结论

(1)为解决因玉米果穗籽粒排列紧密而造成的籽粒间支撑力较大,致使籽粒在滚筒脱粒初期阶段受脱粒元件冲击较大,损伤严重的问题,设计了一种玉米果穗芯轴内部胀裂预脱粒装置,通过分析果穗胀裂过程,确定了主要部件结构参数与工作参数,实现对玉米果穗脱粒前的预处理。

(2)以含水率 25%~28%的“先玉 335”玉米果穗为研究对象,开展了单因素与 Box-Behnken 优化试验。单因素试验确定了各因素的取值范围,胀裂棱锥棱数 4~8、工作压力 0.55~0.75 MPa、安装间距 1~2 cm。Box-Behnken 优化试验结果表明各因素对小碎块占比和籽粒破损率的影响由大到小顺序为胀裂棱锥棱数、胀裂棱锥与果穗夹具的安装间距、工作压力。确定了玉米果穗芯轴内部胀裂预脱粒装置最优工作参数组合,胀裂棱锥棱数 8、胀裂棱锥与果穗夹具的安装间距 2 cm、工作压力 0.55 MPa,此时小碎块占比为 71.92%,破损率为 1.08%。在此最优参数组合下,进行 5 组样机验证试验,得到小碎块占比为 74.38%,破损率为 1.07%,与优化结果基本一致。

(3)3 种脱粒组合方式脱粒试验结果对比表明,“5TY-45-150 型脱粒机”脱粒后的籽粒破损率为 4.88%;“预脱粒+5TY-45-150 型脱粒机”脱粒后籽粒破损率为 2.15%;“预脱粒+往复式柔性脱粒装置”脱粒后籽粒破损率为 1.91%,证明预脱粒装置可显著降低玉米脱粒时的籽粒破损率。为玉米低损脱粒提供新的理论依据与原型机参考,对玉米籽粒直收技术的推广具有重要意义。

参 考 文 献

[1] 崔涛,樊晨龙,张东兴,等.玉米机械化收获技术研究进展分析[J].农业机械学报,2019,50(12):1-13.
CUI Tao, FAN Chenlong, ZHANG Dongxing, et al. Research progress of maize mechanized harvesting technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 1-13. (in Chinese)

[2] 王贺. 高含水率玉米单纵轴流板齿脱粒装置技术研究[D]. 长春：吉林大学，2022.
WANG He. Research on the technology of single axial flow plate tooth threshing device for corn with high percentage of moisture [D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
[3] 纪晓琦，耿端阳，姚艳春，等. 玉米收获机激振摘穗装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊 2)：126 - 133.
JI Xiaoqi, GENG Duanyang, YAO Yanchun, et al. Design and experiment of corn harvester vibration picking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 126 - 133. (in Chinese)
[4] TAO F, YAO H, HRUSKA Z, et al. A novel hyperspectral-based approach for identification of maize kernels infected with diverse Aspergillus flavus fungi[J]. Biosystems Engineering, 2020, 200: 415 - 430.
[5] DINOLFOM I, MARTÍNEZ M, CASTAÑARES E, et al. Fusarium in maize during harvest and storage: a review of species involved, mycotoxins, and management strategies to reduce contamination[J]. European Journal of Plant Pathology, 2022, 164(2): 151 - 166.
[6] STOEVS D. Foodborne diseases due to underestimated hazard of joint mycotoxin exposure at low levels and possible risk assessment[J]. Toxins, 2023, 15(7): 464.
[7] 金柳艳，郭宁，石洁，等. 黄淮海夏玉米区玉米籽粒带菌检测分析[J]. 中国农业科学，2018，51(18)：3508 - 3519.
JIN Liuyan, GUO Ning, SHI Jie, et al. Detection and analysis of fungi carried by maize grain in Huang-huai-hai summer maize region[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(18): 3508 - 3519. (in Chinese)
[8] 江涛，李海同，黄鸣辉，等. 联合收获机螺旋交错排布式脱粒滚筒设计与试验[J]. 农业机械学报，2025，56(2)：314 - 324.
JIANG Tao, LI Haitong, HUANG Minghui, et al. Design and experiment of spiral interlaced threshing cylinder for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 314 - 324. (in Chinese)
[9] 杨亮，王卓，白晓平. 基于形态特征的破碎玉米籽粒识别及检测装置设计[J]. 农机化研究，2024，46(11)：21 - 28.
YANG Liang, WANG Zhuo, BAI Xiaoping. Recognition of the broken corn kernels based on morphology feature and design of detection device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(11): 21 - 28. (in Chinese)
[10] 姚传鑫，崔凯，宫金良，等. 玉米锥形脱粒装置仿真优化设计[J]. 中国农机化学报，2024，45(6)：13 - 19.
YAO Chuanxin, CUI Kai, GONG Jinliang, et al. Simulation and optimization design of corn cone threshing device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(6): 13 - 19. (in Chinese)
[11] VOLKOVAS V, PETKEVICIUS S, SPOKAS L. Establishment of maize grain elasticity on the basis of impact load[J]. Mechanika (Kaunas), 2006, 62(6): 64 - 67.
[12] 高连兴，李心平. 玉米种子脱粒损伤机理与脱粒设备研究[M]. 北京：北京师范大学出版社，2012.
[13] 接鑫，李晓峰，孙亮，等. 种子玉米机械脱粒最佳施力方式试验[J]. 农业机械学报，2009，40(12)：71 - 75，29.
JIE Xin, LI Xiaofeng, SUN Liang, et al. Experiment on optimal forcing method for seed-corn thresher[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 71 - 75, 29. (in Chinese)
[14] PUŽAUSKAS E, STEPONAVIČIUS D, JOTAUTIENĖ E, et al. Substantiation of concave crossbar shape for corn ear threshing [J]. Mechanics, 2017, 22(6): 553 - 561.
[15] SRISON W, CHUAN-UDOM S, SAENGPRACHATANARAK K. Effects of operating factors for an axial-flow corn shelling unit on losses and power consumption[J]. Agriculture and Natural Resources, 2016, 50(5): 421 - 425.
[16] 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(增刊)：258 - 265.
SU Yuan, LIU Hao, XU Yang, et al. Optimization and experiment of spike-tooth elements of axial flow corn threshing device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 258 - 265. (in Chinese)
[17] 王镇东，崔涛，张东兴，等. 玉米联合收获机纹杆式脱粒元件设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(9)：115 - 123.
WANG Zhendong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of rasp bar threshing element of corn combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 115 - 123. (in Chinese)
[18] 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.
LI Yibo, JIANG Jianjun, XU Yang, et al. Preparation and threshing performance tests of rubber composite nail teeth under maize with high moisture content[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 158 - 167. (in Chinese)
[19] 王镇东，崔涛，张东兴，等. 玉米收获机低损变径脱粒滚筒设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(8)：98 - 105.
WANG Zhendong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of low damage corn threshing drum with gradually changing diameter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(8): 98 - 105. (in Chinese)
[20] 李心平，李玉柱，高吭，等. 种子玉米籽粒仿生脱粒机理分析[J]. 农业机械学报，2011，42(2)：99 - 103.
LI Xinping, LI Yuzhu, GAO Hang, et al. Bionic threshing process analysis of seed corn kernel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 99 - 103. (in Chinese)
[21] 李心平，马义东，金鑫，等. 玉米种子仿生脱粒机设计与试验[J]. 农业机械学报，2015，46(7)：97 - 101.
LI Xinping, MA Yidong, JIN Xin, et al. Design and test of corn seed bionic thresher[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 97 - 101. (in Chinese)

(下转第 256 页)

[18] 贺小伟,刘金秀,徐杨,等. 4MB－6 型密植棉秆对行铲拔铺放机改进设计[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 2):21－30.
HE Xiaowei, LIU Jinxiu, XU Yang, et al. Improvement design of 4MB－6 row-controlled shoveling and drawing placement machine for cotton-stalks in close planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 21－30. (in Chinese)
[19] 贺小伟,刘金秀,王旭峰,等. 密植棉秆对行铲拔铺放机设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(10):142－151.
HE Xiaowei, LIU Jinxiu, WANG Xufeng, et al. Design and experiment of row-controlled shoveling and drawing placement machine for cotton-stalks based on agronomy of close planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 142－151. (in Chinese)
[20] 颜利民,吴涛,蒋德莉,等. 侧抛式棉秆粉碎还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 216－226.
YAN Limin, WU Tao, JIANG Deli, et al. Design and experiment of side-throwing cotton stalk crushing and returning device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 216－226. (in Chinese)
[21] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007:1050－1051.
[22] 刘彩玲,张福印,都欣,等. 水平涡轮叶片式精量排肥器设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊 1): 165－174.
LIU Cailing, ZHANG Fuyin, DU Xin, et al. Design and experiment of precision fertilizer distribution mechanism with horizontal turbine blades[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 165－174. (in Chinese)
[23] 蒲平. 图像中对数螺旋线的拟合[J]. 微型机与应用,2011(12):44－46.
PU Ping. Fitting logarithmic spiral in image[J]. Microcomputer and Application, 2011(12): 44－46. (in Chinese)
[24] 章志强. 玉米秸秆粉碎抛撒还田机的设计与秸秆运动特性研究[D]. 北京:中国农业大学, 2018.
ZHANG Zhiqiang. Research on corn straw chopping and spreading machine design and dynamic characteristic of straw[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[25] 毛罕平,陈翠英. 秸秆还田机工作机理与参数分析[J]. 农业工程学报, 1995, 11(4): 62－66.
MAO Hanping, CHEN Cuiying. Working mechanism and parameters determination of field straw chopper[J]. Transactions of the CSAE, 1995, 11(4): 62－66. (in Chinese)
[26] 陈伟,刘旋峰,蒋永新. 后抛式棉秸秆粉碎抛送装置设计与试验[J]. 中国农机化学报,2025,46(8):192－201.
CHEN Wei, LIU Xuanfeng, JIANG Yongxin, et al. Design and experiment of a rear-throwing cotton straw crushing and conveying device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(8): 192－201. (in Chinese)
[27] 罗文杰,张海春,刘旋峰,等. 二次抛送式秸秆粉碎还田及残膜回收联合作业机的研制[J]. 新疆农业科学,2024,61(增刊 1):142－146.
LUO Wenjie, ZHANG Haichun, LIU Xuanfeng, et al. Development of a combined operation machine for secondary conveying straw crushing and returning to field and residual film recovery[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(Supp. 1): 142－146. (in Chinese)
[28] SHUAI Zhijun, JIANG Chenxing, WANG Donghua, et al. Numerical simulation of dynamic flow characteristics in a centrifugal water pump with three-vaned diffuser[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2015, 7(8): 1－12.

(上接第 245 页)

[22] 袁海阔. 玉米脱粒降损增效机理与仿生关键技术研究[D]. 长春:吉林大学,2022.
YUAN Haikuo. Research on the mechanism and bionic key technology of corn mechanical threshing to reduce losses and increase efficiency[D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
[23] ZHOU D, HOU P, ZHANG J, et al. Mechanism of low damage rate maize ear pre-threshing based on cob internal expansion cracking[J]. Biosystems Engineering, 2025, 255: 104157.
[24] 邹久群. 深井复杂条件下镶齿滚刀破岩规律研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
ZOU Jiuqun. Research on the law of rock fragmentation with inserted tooth hob under complicated conditions in deep shafts [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020. (in Chinese)
[25] JIANG H, CAI Z, WANG O, et al. Experimental and numerical investigation of hard rock breakage by indenter impact[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 1－12.
[26] 付永领,德力根. 新型液压式岩石分裂器的研制[J]. 机床与液压,2008(5):65－67.
FU Yongling, DE Ligen. The development of novel rock knapper of hydraulic pattern[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2008 (5): 65－67. (in Chinese)
[27] 虞顺成. 玉米脱粒过程中的籽粒破损试验与分析[D]. 镇江:江苏大学,2019.
YU Shuncheng. Corn kernel damage test and analysis of corn threshing process[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)
[28] 全国农业机械标准化技术委员会. 玉米收获机械:GB/T 21962—2020[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
[29] 全国农业机械标准化技术委员会. 脱粒机试验方法:GB/T 5982—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
[30] 高连兴,李飞,张新伟,等. 含水率对种子玉米脱粒性能的影响机理[J]. 农业机械学报,2011,42(12):92－96,42.
GAO Lianxing, LI Fei, ZHANG Xinwei, et al. Mechanism of moisture content affect on corn seed threshing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 92－96, 42. (in Chinese)