doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.011

纵轴流双柔性碾搓式谷子脱粒装置设计与试验

李心平　王文哲　赵高源　孙臣臣　胡鹏展　姬江涛
(河南科技大学农业装备工程学院, 洛阳 471003)

摘要: 针对谷子机械收获过程中谷码率高、破损率高、未脱净损失率高的问题,设计了一种纵轴流双柔性碾搓式谷子脱粒装置。该装置采用纵轴流脱粒滚筒,脱粒滚筒上通过安装柔性橡胶辊降低了谷子籽粒破损率,从而实现谷子柔性低损伤脱粒,橡胶圈外表面的波浪形凸起对谷子具有很好的碾搓脱粒性能。柔性凹板筛由空心圆柱旋转筛分单元两两相互交错组成,每组两排空心圆柱旋转筛分单元相互交错配合,形成适合谷子籽粒分离的 U 形孔,凹板筛支撑装置具有微动性,与柔性凹板筛配合形成柔性微动凹板筛,有利于谷子籽粒分离和降低谷码率。选取喂入量、滚筒转速和脱粒间隙为试验因素,以谷码率、破损率、未脱净损失率和功耗为指标,进行了三元二次回归正交旋转组合试验,确定了喂入量、滚筒转速和脱粒间隙的最佳参数组合。结果表明:当喂入量 1.4 kg/s、滚筒转速 735 r/min 和凹板间隙 9 mm 时,谷子籽粒破损率为 0.35%,谷码率为 1.78%,未脱净损失率为 0.64%,功耗为 10.6 kW。

关键词: 谷子脱粒装置; 纵轴流; 双柔性; 柔性橡胶辊; 柔性微动凹板筛
中图分类号: S226.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)07-0113-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Longitudinal Axial Flow Double Flexible Rolling and Kneading Threshing Device for Millet

LI Xinping　WANG Wenzhe　ZHAO Gaoyuan　SUN Chenchen　HU Pengzhan　JI Jiangtao
(*College of Agricultural Equipment Engineering*, *Henan University of Science and Technology*, *Luoyang* 471003, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of high millet agglomerates rate, high damage rate and high undelivered net loss rate in the process of mechanical harvesting, a longitudinal axial flow double flexible rolling threshing device was designed. The device adopted longitudinal axial flow threshing drum, and flexible rubber roller was installed on the threshing drum, which can reduce the damage rate of millet grain and realize the flexible and low damage threshing of millet. The rubber surface had wavy protrusion, which had good milling and threshing performance for millet. The flexible concave grate was composed of two hollow cylindrical nylon screening units, and each group of two rows of hollow cylindrical nylon screening units were mutually staggered to form U-shaped holes suitable for the separation of millet seeds. The support device of concave grate had micro motion, and the flexible micro motion concave grate was formed with the flexible concave grate, which was conducive to the separation of millet seeds and the reduction of grain rate. The feed rate, drum speed and threshing clearance were selected as the experimental factors, and the grain rate, damage rate and net undelivered loss rate were taken as the indexes to carry out the ternary quadratic regression orthogonal rotation combination test, and the optimal parameter combination of feed rate, drum speed and threshing clearance was determined. The results showed that when the feeding rate was 1.4 kg/s, the roller speed was 735 r/min and the concave gap was 9 mm, the damage rate of millet grain was 0.35%, the millet agglomerates rate was 1.78%, and the undelivered net loss rate was 0.64%, power consumption was 10.6 kW, which provided the basis for the further development of a type of millet threshing device.

Key words: millet threshing device; longitudinal axial flow; double flexible; flexible rubber roller; flexible micro motion concave grate

收稿日期: 2021-03-12　修回日期: 2021-04-26
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701800)
作者简介: 李心平(1973—),男,教授,博士,主要从事农产品收获与加工机械研究,E-mail: aaalxp@126.com
通信作者: 姬江涛(1965—),男,教授,博士,主要从事智能化农业装备研究,E-mail: jjt0907@163.com

0 引言

谷子机械化收获是实现谷子生产全程机械化的重要环节。我国谷子种植面积居世界第一,谷子产量占世界产量的 80% 左右[1-2]。从 2008 年到 2017 年,我国谷子总产量从 1.25×10^6 t 增加到 2.55×10^6 t[3],我国谷子产业正在快速发展。但目前我国谷子收获机械化水平总体较低,部分地区依旧采用人工进行收获和脱粒,其生产效率低、劳动强度大、费时费力[4]。现有谷子脱粒机存在谷码率高、破损率高、未脱净损失率高的问题,严重制约了谷子产业的发展。在谷子脱粒过程中,谷子籽粒在脱粒元件的刚性作用下谷码极易脱落,这是现有谷子脱粒机谷码率高的主要原因。脱粒过程中谷子籽粒容易出现破皮、裂纹和破碎的情况,这给谷子籽粒储存和产品的后续加工带来诸多问题。

目前,国内外对谷子脱粒装置的研究均较少。WACKER[5]通过对比轴流脱粒装置与切流脱粒装置得出,轴流脱粒装置脱粒效果更好,且对籽粒损伤更小,该研究为轴流低损脱粒提供了设计依据;BRUCE 等[6]对油菜脱粒过程的籽粒破碎进行研究,发现滚筒转速越高、冲击力越大,籽粒破裂程度越大;POWAR 等[7]对谷子脱粒损伤的研究发现,冲击力是谷子籽粒破损的主要原因,但并未提出进一步的解决方法;武学峰[8]对谷子谷穗进行柔性拍打试验,得出了拍打力与相应脱净时作用次数的关系,初步证明了柔性脱粒系统运用到谷子脱粒中的可行性;谢方平等[9]设计了一种柔性杆齿式脱粒滚筒,与刚性杆齿相比,柔性杆齿可大大降低籽粒的破损率,但柔性杆齿并不适合谷子脱粒;张东明等[10]研制了杆齿式谷子轴流脱粒与分离试验台,但杆齿对谷子谷穗的打击力大,易造成籽粒破损率和谷码率增大,整体脱粒效果较差。

目前,国内外脱粒滚筒的脱粒元件以纹杆、杆齿等刚性元件为主[11-16]。本文脱粒元件材料选用橡胶,脱粒时为柔性冲击,脱粒元件型式为辊式,设计一种纵轴流双柔性碾搓式谷子脱粒装置。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

纵轴流双柔性碾搓式谷子脱粒装置整机结构如图 1 所示。主要由喂入口、脱粒滚筒、凹板筛、顶盖、凹板筛微动支撑装置、接料箱和机架组成。其中,脱粒滚筒由锥形螺旋喂入部分与柔性脱粒部分组成,锥形螺旋喂入部分主要是输送压缩谷物流,柔性脱粒滚筒脱粒单元包有橡胶,橡胶表面的波浪形凸起,对谷子具有很好的碾搓脱粒作用;滚筒顶盖内表面安装导流板,有利于谷子物料的轴向输送;凹板筛由空心圆柱筛分单元两两相互交错组成,每组两排空心圆柱筛分单元相互交错配合,形成适合谷子籽粒分离的 U 形孔,成组与侧弧板配合形成柔性凹板筛,凹板筛支撑装置具有微动性,与柔性凹板筛配合形成柔性微动凹板筛。其下部放置接料箱,收集脱出物,以便进行试验分析。

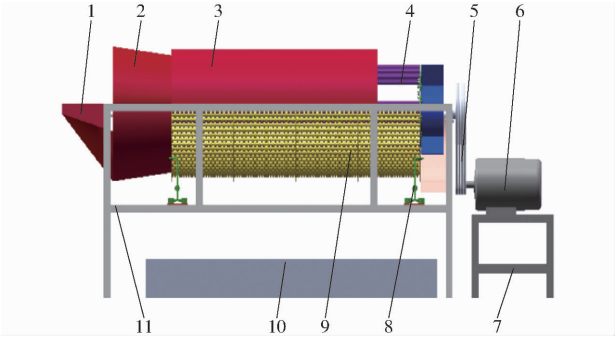

图 1 纵轴流双柔性碾搓式谷子脱粒装置结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of longitudinal axial flow double flexible rolling and kneading threshing device

1. 喂入口 2. 锥形螺旋喂入外壳体 3. 顶盖 4. 柔性脱粒滚筒 5. 传动带 6. 变频电机 7. 电机支架 8. 凹板筛微动支撑装置 9. 柔性凹板筛 10. 接料箱 11. 机架

1.2 工作原理

谷子植株在喂入口处均匀连续喂入,脱粒滚筒前端锥形螺旋喂入部分将松散谷物植株逐步输送压缩,而后强制推送到脱分空间内,在脱分空间内受到物料不断喂入的推送与顶盖上导流板的共同作用下,谷物沿滚筒轴向螺旋运动,同时,物料层被挤压在脱分空间内受脱粒滚筒橡胶辊上脱粒单元与凹板筛上旋转筛分单元差速作用下,在物料层谷穗上形成碾压力与搓擦力的共同作用而脱粒,脱下的谷码继续受到碾压力与搓擦力的作用而完全脱粒;凹板筛相邻旋转筛分单元在其形成的 U 形孔处同一位置产生的速度大小、方向不同,二者与谷码接触的合力沿切向方向的分力指向脱分空间,这使碎谷码不会被旋转筛分单元带到脱分空间之外;同时,旋转筛分单元侧面有螺旋形凸起,其在旋转的过程中对落入 U 形孔的未脱净的谷码有二次脱粒的作用。此外,在脱粒过程中,凹板筛受到物料施加的连续反作用力,会形成水平方向垂直于滚筒轴向的微动,进而减弱脱粒过程中伴随冲击力的作用,也使谷物层变的蓬松,有利于谷粒穿过凹板落入集料箱中,脱粒后的谷子茎秆杂余在排草板的作用下被排出机外。

2　关键部件设计

2.1　脱粒滚筒

脱粒滚筒结构如图 2 所示，由喂入段、脱粒段和排杂段构成。

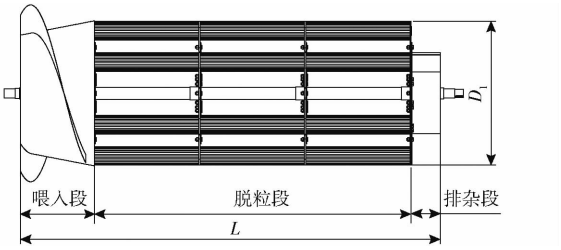

图 2　脱粒滚筒结构示意图

Fig. 2　Structure diagram of threshing roller

脱粒滚筒长度是决定谷子脱粒质量的重要因素之一，当滚筒过长时，谷子在脱分空间的时间更长，虽然能够增强脱粒效果，但是籽粒和茎秆的破碎会大大提高，茎秆破碎后易穿过凹板进入集料箱，杂余率会增大。谷子籽粒小而轻，与杂余不易分离，杂余率的增大更会使清选负荷增大。滚筒长度计算公式[17]为

$$L \geqslant \frac{q}{q_0} \tag{1}$$

式中　L——脱粒滚筒长度，m

q——脱粒系统喂入量，kg/s

q_0——脱粒滚筒单位长度所承受的喂入量，0.7 ~ 0.8 kg/(s·m)

本设计中的脱粒装置的喂入量取 1.5 kg/s，由式(1)可得，滚筒长度 L 取值范围为 1.8 ~ 2.1 m。本次设计取滚筒长度 1.8 m。

脱粒滚筒直径过小时，谷子茎秆易缠绕到滚筒上，不利于谷子脱粒；滚筒直径过大时，功耗会增大。故脱粒滚筒直径也需合理。

为使谷子植株在脱粒滚筒上不出现缠绕，滚筒周长必须大于谷子植株长度。取谷子植株长度 L_1 为 1 100 ~ 1 150 mm，脱粒滚筒直径 D_1 计算公式[18]为

$$D_1 \geqslant \frac{1.5L_1}{\pi} \tag{2}$$

由式(2)可得，滚筒直径 D_1 取值范围为 525 ~ 549 mm。本次设计取滚筒直径 540 mm。

2.1.1　脱粒橡胶辊设计

本研究设计的柔性脱粒橡胶辊及其在滚筒上的装配关系如图 3 所示。其包括辐盘、螺栓组、环形橡胶圈、空心轴和三角固定板。环形橡胶圈和空心轴同心紧配合后与三角固定板上部圆孔同心安装，三角固定板与辐盘通过螺栓组固定安装。

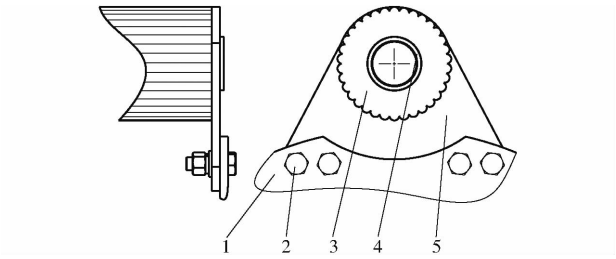

图 3　柔性橡胶辊安装示意图

Fig. 3　Installation diagram of flexible rubber roller

1. 辐盘　2. 螺栓组　3. 环形橡胶圈　4. 空心轴　5. 三角固定板

脱粒元件材料选用高耐磨天然橡胶混炼胶，使谷子脱粒受到的冲击变刚性为柔性，减少谷子的破损率，脱粒元件弧形表面增大与谷穗碰撞的接触面积，减小对谷穗的滑切作用[19]，从而减小谷码从穗柄上断裂的可能性，进而减少谷码率；环形橡胶圈外表面有波浪形凸起，在碾压的过程中，谷穗上的谷粒进入波浪形凸起间的凹槽内，进入凹槽内的谷粒与凹槽外的谷码会产生压力差，该压力差有利于谷粒与谷码的分离，脱粒效果更好。波浪形凸起还可以增大谷子受到的摩擦力，使谷子在脱粒过程中受到的搓擦作用增强，更加有利于提高谷子的脱净率，减少未脱净损失率。

2.1.2　谷穗在脱分空间的速度分析

脱粒橡胶辊做旋转运动，在谷物流的作用下，柔性凹板筛分单元也做旋转运动，脱粒橡胶辊的转速大于柔性凹板筛分单元的转速，谷穗在脱分空间内做旋转运动，如图 4 所示。

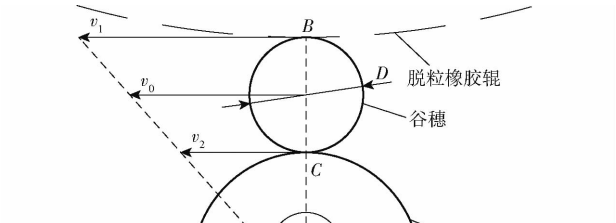

图 4　谷穗速度分析

Fig. 4　Analysis of grain head speed

谷穗绕着虚拟中心 O 以角速度 ω_1 做旋转运动，其计算公式为

$$\omega_1 = \frac{v_2}{L_{OC}} = \frac{v_1}{L_{OB}} \tag{3}$$

式中　v_1——脱粒橡胶辊与谷穗接触点 B 的线速度，m/s

v_2——旋转筛分单元与谷穗接触点 C 的线速度，m/s

L_{OC}——虚拟中心 O 到旋转筛分单元与谷穗接触点 C 的距离，mm

L_{OB}——虚拟中心 O 到脱粒橡胶辊与谷穗接触点 B 的距离，mm

谷穗沿着脱粒装置运动的弧长 S 和谷穗的旋转角 φ 为

$$\begin{cases} S = v_0 t \\ \varphi = \omega_1 t \end{cases} \tag{4}$$

式中 t——脱粒时间，s

v_0——谷穗运动的平均速度，m/s

由式(3)、(4)可得

$$\varphi = \frac{S}{D\left(\frac{v_1}{\Delta v} - \frac{1}{2}\right)} \tag{5}$$

其中 $$\Delta v = v_1 - v_2$$

式中 Δv——脱粒橡胶辊与旋转筛分单元在接触点的线速度差，m/s

D——谷穗横截面直径

由式(5)可知，当 Δv 增大时，谷穗旋转角 φ 也随之增大，旋转角 φ 越大，谷穗在脱分空间内脱粒越充分，脱粒效果越好。

2.2 柔性微动凹板

目前传统的常规凹板与脱粒滚筒配合脱粒时，凹板栅格条为长方体[20]，长方体的棱角易与谷穗发生剪切作用，谷码与穗柄的连接力较小，谷码易从穗柄上断裂；发生剪切作用时，谷子籽粒也易损伤，这是传统栅格式凹板在分离谷子时谷码率和破损率高的原因之一。针对上述存在的问题，本文设计了一种柔性微动凹板，其结构如图 5 所示。柔性凹板由 19 组柔性旋转筛分单元组构成，每组两排空心圆柱筛分单元相互交错配合，形成适合谷子籽粒分离的 U 形孔。柔性凹板下端与凹板支撑装置相连，支撑装置具有微动性，共同配合组成柔性微动凹板。

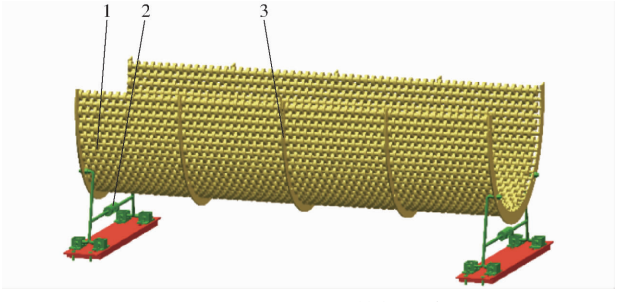

图 5 柔性微动凹板结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of flexible micro motion concave

1. 柔性旋转筛分单元组 2. 凹板支撑装置 3. 侧弧板

2.2.1 柔性旋转筛分单元设计

柔性旋转筛分单元组结构如图 6 所示。空心圆柱筛分单元外径为 26 mm，内径为 8.25 mm，筛分单元连接轴外径 8 mm，定位套筒内径 8 mm，空心圆柱筛分单元内径略大于连接轴外径，保证其可以绕着连接轴旋转，定位套筒内径与连接轴外径相等，起定位作用，保证两个相邻的空心圆柱筛分单元的间距相等，从而保证柔性旋转筛分单元间相互交错配合后，形成适合谷子籽粒分离的 U 形孔尺寸一致。U 形孔的尺寸设计可以保证谷子籽粒顺利地从 U 形孔中落下而阻挡谷码的下落，大大增加脱净率与分离率，减少谷码率与未脱净损失率。

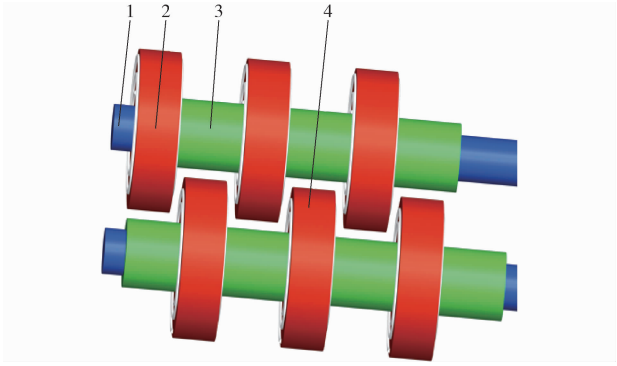

图 6 柔性旋转筛分单元组结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of flexible rotary screening unit group

1. 筛分单元连接轴 2. A 型空心圆柱筛分单元 3. 定位套筒 4. B 型空心圆柱筛分单元

A 型、B 型空心圆柱筛分单元侧面结构分别如图 7a 和图 7b 所示。

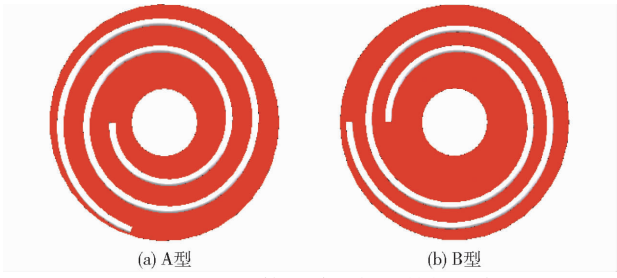

图 7 空心圆柱筛分单元侧面结构示意图

Fig. 7 Side structure diagrams of hollow cylinder screening unit

凹板筛相邻旋转筛分单元在 U 形孔处同一位置产生的速度大小、方向不同，二者与谷码接触的合力沿切向方向的分力指向脱分空间，这使碎谷码不会被旋转筛分单元带到脱分空间之外。同时，旋转筛分单元侧面有螺旋形凸起，在旋转的过程中对落入 U 形孔的未脱净的谷码有二次脱粒的作用。A 型空心圆柱筛分单元的螺旋形凸起旋向为逆时针，B 型空心圆柱筛分单元的螺旋形凸起旋向为顺时针，相邻的筛分单元螺旋形凸起在同一位置产生的推进力指向脱分空间，可以进一步减小谷码率。

空心圆柱筛分单元的材料选用尼龙，与传统的刚性元件相比，本身具有柔性，可以大大减小谷穗与其接

触时的冲击作用；空心圆柱筛分单元在与谷子谷穗接触时，接触类型为弧面接触。而传统的栅格式凹板筛的接触类型为线接触。弧面接触时接触面积增大，谷穗受到的滑切作用减小，谷穗受到的剪切力变小，谷码从穗柄上断裂的可能性减少，谷码率变小；接触类型的改变也使谷子籽粒受到的机械损伤减小，破损率也会减小。此外，与传统栅格式凹板相比，空心圆柱筛分单元组的组数少于栅格式凹板的栅格条数，减少了谷子谷穗与其的碰撞次数，进而降低破碎率与谷码率。

2.2.2　凹板筛支撑装置设计

凹板筛支撑装置结构如图 8 所示。由滚轮、连接杆、支撑底座、微动调节螺栓、等腰调节手柄、固定板组成。

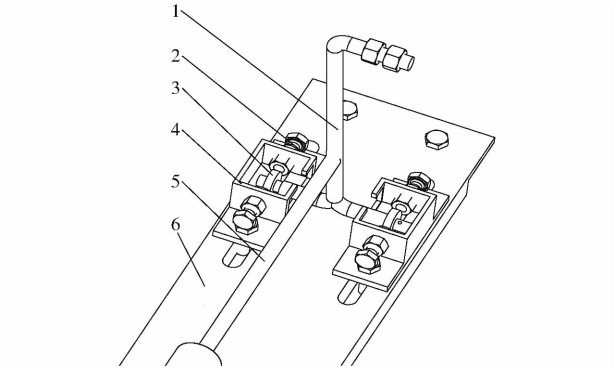

图 8　凹板筛支撑装置结构示意图

Fig. 8　Structural diagram of concave grate support device

1. 连接杆　2. 微动调节螺栓　3. 滚轮　4. 支撑底座　5. 等腰调节手柄　6. 固定板

滚轮在支撑底座轨道内滚动，用于凹板筛在脱粒过程中实现左右微动的往复运动；微动调节螺栓设置在支撑底座的两侧，通过调节微动调节螺栓深入支撑底座内部的长度来控制滚轮左右移动的距离；通过调节等腰调节手柄可以调节连接杆的开度并保证连接杆开度在调整过程中始终保持一致，即保证了调节过程中凹板筛始终关于竖直方向对称，又增强了连接杆的强度，形成等腰结构增强支撑装置的稳定性。通过调节连接杆开度可以方便地调节凹板筛与滚筒的间隙，脱粒间隙可调范围为 5 ~ 25 mm。

柔性微动凹板直径 D_2 计算公式[21]为

$$D_2 = D_1 + 2\delta \tag{6}$$

式中　δ——柔性微动凹板与滚筒的间隙，mm

取柔性微动凹板与滚筒的间隙为 10 mm，得到柔性微动凹板直径 560 mm。

综合上述设计，柔性脱粒滚筒与柔性微动凹板的配置如图 9 所示。考虑到不同的谷子品种、喂入量、谷穗尺寸、含水率以及后续试验对脱粒间隙的要求，本试验装置通过调节支撑装置的连接杆开度来调节脱粒间隙。

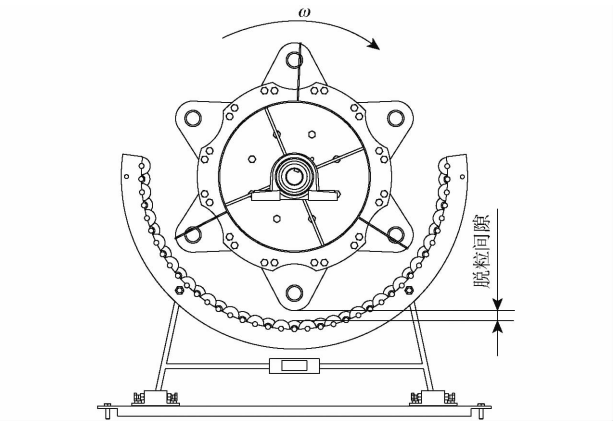

图 9　柔性脱粒滚筒与柔性微动凹板配置示意图

Fig. 9　Configuration diagram of flexible threshing drum and flexible micro motion concave

2.2.3　物料在凹板侧的动力学分析

利用凹板柔性旋转筛分单元组与脱粒滚筒柔性橡胶辊的差速搓动原理，使谷子谷穗受到碾搓作用而脱粒。应用达朗贝尔原理建立物料在凹板侧的动力学模型，对位于脱粒间隙内的物料在任意位置 A 进行受力分析，如图 10 所示。

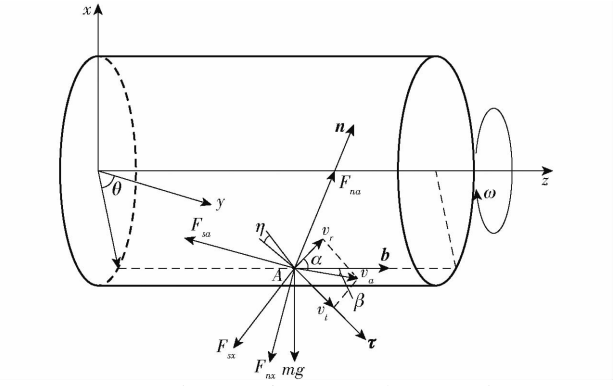

图 10　脱出物混合物在凹板侧受力示意图

Fig. 10　Schematic of force on concave side of mixture

图中 $\boldsymbol{\tau}$ 为沿滚筒横截面切线方向的单位向量，$\boldsymbol{n}$ 为滚筒横截面主法线方向的单位向量，$\boldsymbol{b}$ 为沿滚筒轴线方向的单位向量。v_r 为物料沿径向的速度，v_t 为物料沿切向的速度，v_a 为二者的合速度。F_{sa} 为凹板对物料的摩擦力，F_{sx} 为橡胶辊对物料的摩擦力。设物料与滚筒间的相对角位移为 θ，轴向位移为 z，θ、z 均是时间 t 的函数。则有

$$\begin{cases} mR\dot{\theta}^2 = F_{na} - F_{nx}\cos\eta + f_1 F_{nx}\sin\alpha\sin\beta - mg\sin\theta \\ mR\ddot{\theta} = F_{nx}\sin\eta - f_2 F_{na}\sin\beta + f_1 F_{nx}\sin\alpha\sin\eta + mg\cos\theta \\ m\ddot{z} = F_{na}\sin\beta - f_2 F_{na}\cos\beta - f_1 F_{nx}\cos\alpha \\ \tan\alpha = \dfrac{R(\omega - \dot{\theta})}{\dot{z}} \\ \tan\beta = \dfrac{R\dot{\theta}}{\dot{z}} \end{cases} \tag{7}$$

式中 m——质点 A 处物料的质量,kg

F_{na}——凹板对物料的法向约束力,N

F_{nx}——橡胶辊对物料的法向约束力,N

f_1——物料与橡胶辊的动摩擦因数

f_2——物料与凹板的动摩擦因数

α——物料相对橡胶辊的螺旋角,(°)

β——物料相对凹板的螺旋角,(°)

η——物料运动螺旋角,(°)

ω——滚筒角速度,rad/s

R——滚筒半径,mm

由式(7)可得,与刚性元件相比,滚筒脱粒元件选用橡胶辊,使物料与橡胶辊的动摩擦因数 f_1 增大,物料受到的摩擦力 f_1F_{nx} 增大,搓擦作用增强,有利于谷子的脱粒;橡胶辊在碾压谷子的过程中会产生弹性形变,谷子受到的碾压力合力增大,有利于谷子的碾压脱粒。柔性微动凹板筛的旋转筛分单元材料选用尼龙,使物料与凹板筛动摩擦因数 f_2 增大,物料受到的凹板给予的摩擦力 f_2F_{na} 增大,物料受到的搓擦作用进一步增大;在轴向方向,f_1 和 f_2 共同增大导致物料受到的合力减小,物料的轴向方向加速度 $\ddot{z}$ 减小,物料在脱分空间停留的时间变长,更有利于脱粒。

3 脱粒性能试验

3.1 试验材料与设备

试验材料选用的谷子品种为豫谷 23 号,其形态结构如图 11 所示。图 11a 为谷子植株,图 11b 为谷穗,图 11c 为谷码,其基本参数如表 1 所示。

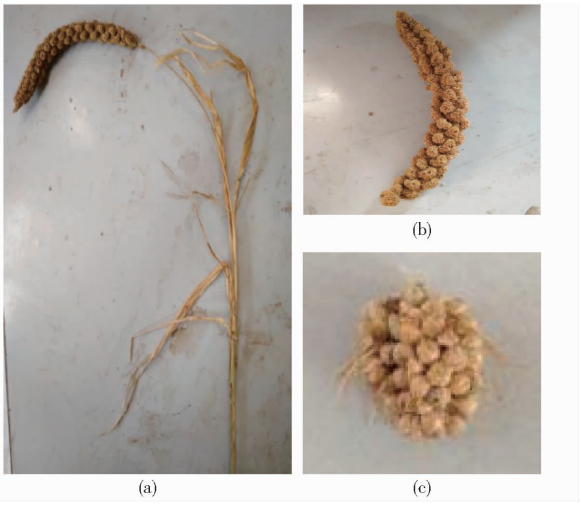

图 11 豫谷 23 号谷子

Fig. 11 Yugu 23 millet

纵轴流双柔性碾搓式谷子脱粒装置试验台实物如图 12 所示。

表 1 试验谷子基本参数

Tab. 1 Basic parameters of experimental millet

参数	数值
植株平均长度/mm	1 107
谷穗平均长度/mm	192
谷穗上谷码数量/个	80 ~ 100
谷码平均直径/mm	8.9
籽粒平均直径/mm	1.52
植株含水率/%	27.4 ~ 29.8
籽粒含水率/%	15.3 ~ 17.8
千粒质量/g	3.02



图 12 谷子脱粒装置试验台实物图

Fig. 12 Physical drawing of test bench of threshing device of millet

为保证脱粒过程中滚筒运转稳定,对滚筒进行动平衡校核,使其满足国家标准[22]。试验的谷子采用人工收割打捆的方式来保证谷子植株的完整性。

3.2 试验方法

试验前,首先根据单次试验谷物量需求称量相应质量的谷物,然后将谷子茎秆平行于喂入输送方向,通过变频器控制输送带电机转速进而控制输送带的速度,输送带应预留 3 m 的加速区。谷物均匀铺放,谷物铺放厚度、输送速度保证试验时喂入量与试验确定喂入量一致;调整脱粒滚筒转速,待其运转稳定后,启动输送带,完成输送、喂入、脱粒分离和接料过程。

采用三元二次回归正交旋转组合优化试验方法[23-25],以喂入量 A、滚筒转速 B 和脱粒间隙 C 为试验因素,以谷码率 y_1、未脱净损失率 y_2、破损率 y_3 和功耗 y_4 为评价指标,共完成 23 组试验。试验按照国家标准 GB/T 5982—2017《脱粒机 试验方法》实施,每次试验重复 3 次,试验结果取平均值。根据预试验确定各因素水平范围,因素水平编码表如表 2 所示。

参考国家标准 GB/T 5982—2017《脱粒机 试验方法》,谷码率 y_1、未脱净损失率 y_2 和破损率 y_3 计算式为

$$y_1 = \frac{m_g}{m_1} \times 100\% \tag{8}$$

$$y_2 = \frac{m_w}{m_1} \times 100\% \tag{9}$$

表 2　试验因素编码

Tab. 2　Coad of factor level

编码	因素		
	A/(kg·s^{-1})	B/(r·min^{-1})	C/mm
1.682	2.0	900	15
1	1.8	839	13
0	1.5	750	10
−1	1.2	661	7
−1.682	1.0	600	5

$$y_3 = \frac{m_p}{m_0} \times 100\% \tag{10}$$

式中　m_g——脱出物中谷码籽粒质量，g

m_w——未脱净损失籽粒质量，由排草口排出的残留在谷穗上的籽粒，g

m_p——样品中破损籽粒质量，包括机械损伤、裂纹和破皮的籽粒，g

m_1——籽粒总质量，g

m_0——取样籽粒总质量，g

3.3　试验结果

试验方案及结果如表 3 所示。其中，x_1、x_2、x_3为因素 A、B、C 的编码值。

表 3　试验方案与结果

Tab. 3　Test scheme and results

序号	因素			指标			
	x_1	x_2	x_3	y_1/%	y_2/%	y_3/%	y_4/kW
1	−1	−1	−1	3.64	0.64	0.31	10.9
2	1	−1	−1	2.98	0.71	0.32	11.0
3	−1	1	−1	3.88	0.41	0.70	14.8
4	1	1	−1	4.06	0.69	1.05	18.2
5	−1	−1	1	1.05	0.82	0.20	9.9
6	1	−1	1	0.63	0.76	0.35	11.3
7	−1	1	1	4.98	0.53	0.49	12.2
8	1	1	1	2.65	0.65	0.71	15.2
9	−1.682	0	0	3.99	0.49	0.43	11.9
10	1.682	0	0	0.43	0.84	0.58	13.9
11	0	−1.682	0	0.40	0.81	0.11	9.3
12	0	1.682	0	5.01	0.47	0.97	17.4
13	0	0	−1.682	3.32	0.46	0.37	11.6
14	0	0	1.682	2.01	0.71	0.10	9.2
15	0	0	0	1.02	0.52	0.43	12.4
16	0	0	0	1.53	0.51	0.40	12.2
17	0	0	0	0.82	0.61	0.28	10.7
18	0	0	0	1.62	0.49	0.48	12.6
19	0	0	0	1.21	0.57	0.38	11.5
20	0	0	0	1.31	0.58	0.41	12.2
21	0	0	0	0.93	0.62	0.42	12.0
22	0	0	0	1.01	0.48	0.36	11.5
23	0	0	0	2.51	0.54	0.31	11.1

应用软件 Design-Expert 10.0.7 对试验数据进行多元回归分析，谷码率 y_1、未脱净损失率 y_2、破损率 y_3和功耗 y_4二次项模型有意义（$P < 0.0001$），将回归系数在置信度 0.05 下进行 F 检验，将不显著项剔除后得到的回归方程为

$$y_1 = 1.30 + 0.67x_1 + 1.10x_2 - 0.55x_3 + 0.58x_2x_3 + 0.40x_1^2 + 0.57x_2^2 + 0.56x_3^2 \tag{11}$$

$$y_2 = 0.55 + 0.073x_1 - 0.089x_2 + 0.053x_3 + 0.049x_1x_2 + 0.045x_1^2 + 0.036x_2^2 \tag{12}$$

$$y_3 = 0.38 + 0.072x_1 - 0.24x_2 + 0.079x_3 + 0.061x_2x_3 + 0.060x_1^2 + 0.073x_2^2 \tag{13}$$

$$y_4 = 13.89 + 0.72x_1 + 2.29x_2 - 0.70x_3 + 0.59x_1x_2 - 0.56x_2x_3 + 0.58x_1^2 + 0.63x_2^2 \tag{14}$$

3.4　回归模型方差分析

对式(11)～(14)进行方差分析，其结果如表 4 所示。由表 4 可知，模型失拟项 $P > 0.05$，不显著，表明模型拟合效果好，回归方程 $P < 0.0001$，表明回归方程极其显著。

表 4　方差分析

Tab. 4　Analysis of variance

指标	变异来源	均方	自由度	平方和	F	P
y_1	回归	42.73	9	4.75	10.39	0.0001
	剩余	5.94	13	0.46		
	失拟	3.77	5	0.75	2.78	0.0957
	误差	2.17	8	0.27		
	总和	48.67	22			
y_2	回归	0.31	9	0.035	12.31	<0.0001
	剩余	0.036	13	0.0029		
	失拟	0.016	5	0.0031	1.21	0.3864
	误差	0.021	8	0.260		
	总和	0.35	22			
y_3	回归	1.12	9	0.12	21.32	<0.0001
	剩余	0.075	13	0.0058		
	失拟	0.043	5	0.0086	2.15	0.1601
	误差	0.032	8	0.0040		
	总和	1.20	22			
y_4	回归	103.83	9	11.54	21.28	<0.0001
	剩余	7.05	13	0.54		
	失拟	4.08	5	0.82	2.20	0.1540
	误差	2.97	8	0.37		
	总和	110.88	22			

回归方程偏回归系数检验[26]结果表明，各因素对谷码率 y_1影响的主次关系为：滚筒转速、喂入量和脱粒间隙；各因素对未脱净损失率 y_2影响的主次关系为：滚筒转速、喂入量和脱粒间隙；各因素对破损率 y_3影响的主次关系为：滚筒转速、脱粒间隙和喂入量；各因素对功耗 y_4影响的主次关系为：滚筒转速、喂入量和脱粒间隙。

3.5 各因素对性能指标的影响分析

3.5.1 对谷码率的影响

各因素与谷码率 y_1 的关系曲面如图 13 所示。由图 13a 可知,随着滚筒转速从 661 r/min 增加到 839 r/min,谷码率逐渐升高。这是因为滚筒转速增加,会使柔性橡胶辊与凹板旋转筛分单元的速度差变大,谷穗上的谷码所受到的剪切力增大,导致谷码与穗柄断裂后更容易穿过凹板进入集料箱,谷码率增大。当滚筒转速固定到某一水平时,喂入量从 1.2 kg/s 增加到 1.8 kg/s,谷码率呈下降趋势。这是因为,随着喂入量的增加,脱分空间内的谷物层变厚,谷物流密度增加,谷穗谷码受到的剪切力被缓解减低,降低了谷码从穗头上断裂的可能性,同时谷物流密度增加,也在一定程度上阻止了谷码穿过凹板进入集料箱,故谷码率降低。

由图 13b 可知,随着脱粒间隙从 13 mm 减小到 7 mm,谷码率逐渐升高。这是因为脱粒间隙减小,位于脱分空间内的谷物受到的碾压和搓擦作用就越强,谷穗谷码受到的搓擦力增大,谷码在搓擦力的撕扯下与谷穗分离,脱粒间隙减小,与谷穗分离的谷码在脱分空间内的运动空间变小,更容易穿过凹板进入集料箱,谷码率增大。

由图 13c 可知,当脱粒间隙固定到某一水平时,随着滚筒转速的增加,谷码率逐渐升高,表明滚筒转速与谷码率呈正相关关系。

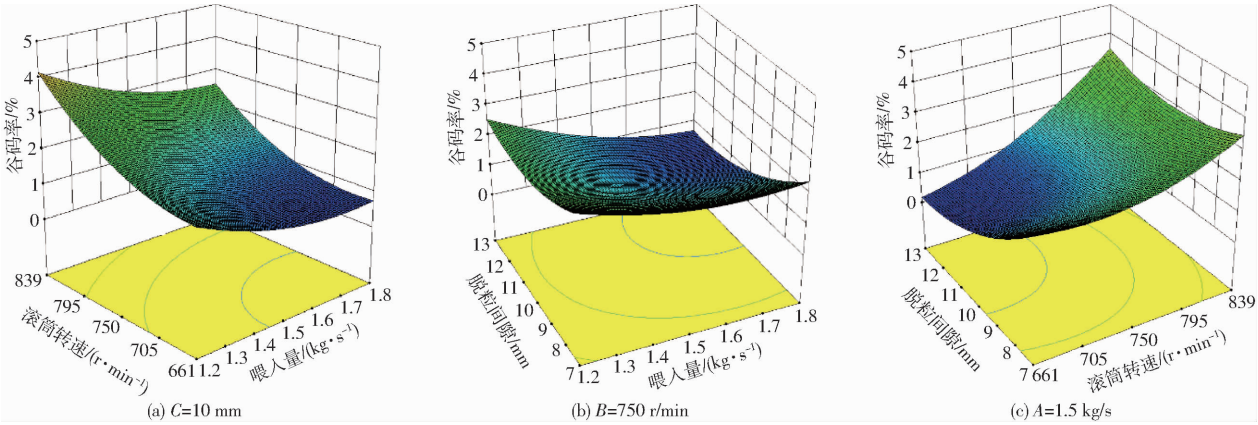

图 13 各因素对谷码率影响的响应曲面

Fig. 13 Response surfaces of factors effect on millet agglomerates rate

3.5.2 对未脱净损失率的影响

各因素与未脱净损失率 y_2 的关系曲面如图 14 所示。由图 14a 可知,随着滚筒转速从 661 r/min 增加到 839 r/min,未脱净损失率逐渐降低。这是因为滚筒转速增加,位于脱分空间内的谷物受到碾压和搓擦作用强度和频率均增强,脱粒作用增强,谷子籽粒更容易从谷穗上脱落下来,未脱净损失率减小。当滚筒转速固定到某一水平时,喂入量从 1.2 kg/s 增加到 1.8 kg/s,未脱净损失率呈上升趋势,这是因为,随着喂入量的增加,脱分空间内的谷物层变厚,脱粒元件对谷物脱粒不完全,同时掺杂在谷物层中间的谷穗受到的搓擦力减小,导致未脱净损失率升高。

由图 14b 可知,随着脱粒间隙从 7 mm 增加到 13 mm,未脱净损失率逐渐升高。这是因为脱粒间隙增加,位于脱分空间内的谷物受到的碾压和搓擦作用减弱,谷子谷穗受到的搓擦力进而减小,谷子籽粒不易从谷穗上脱落下来,致使未脱净损失率升高。

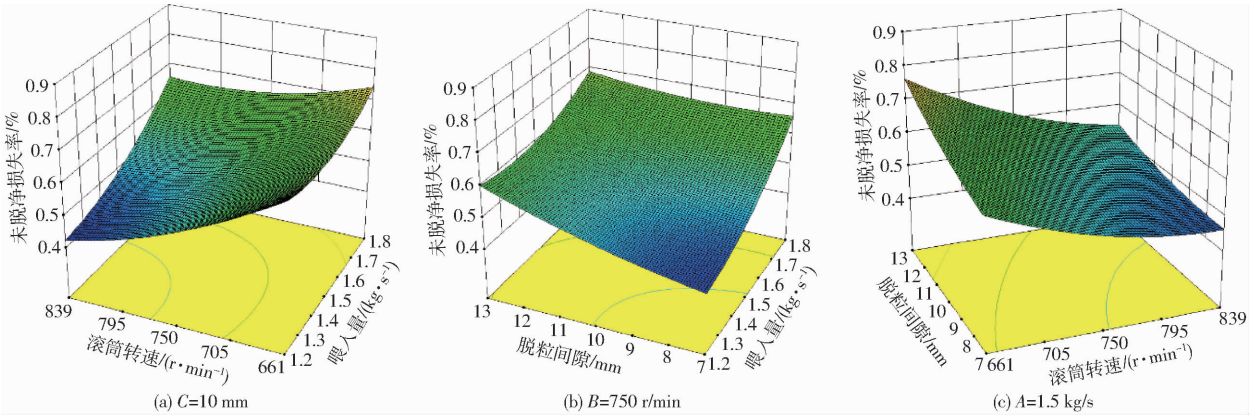

图 14 各因素对未脱净损失率影响的响应曲面

Fig. 14 Response surfaces of factors effect on undelivered net loss rate

由图 14c 可知，当脱粒间隙固定到某一水平时，随着滚筒转速的增加，未脱净损失率逐渐降低，表明滚筒转速与未脱净损失率呈负相关关系。

3.5.3　对破损率的影响

各因素与破损率 y_3 的关系曲面如图 15 所示。由图 15a 可知，随着滚筒转速从 661 r/min 增加到 839 r/min，破损率逐渐变大。这是因为随着滚筒转速增大，脱粒元件对脱分空间内的谷子的冲击、碾压和搓擦等作用的强度和频率均增大，增加了谷子籽粒的破损率。当滚筒转速固定到某一水平时，喂入量从 1.2 kg/s 增加到 1.8 kg/s，破损率缓慢升高且增幅不大，分析认为，喂入量增加，谷物层变厚，变厚的谷物层导致与脱粒元件直接接触的谷穗受到的碾压力增大，碾压作用增强导致破损率升高。

由图 15b 可知，随着脱粒间隙从 7 mm 增加到 13 mm，破损率逐渐降低，这是因为随着脱粒间隙增加，位于脱分空间内的谷物受到的碾压和搓擦的作用减弱，谷子谷穗受到冲击时有更大的缓冲空间，致使破损率变小。

由图 15c 可知，当脱粒间隙固定到某一水平时，随着滚筒转速的增加，破损率随之增加，表明滚筒转速与破损率呈正相关关系。

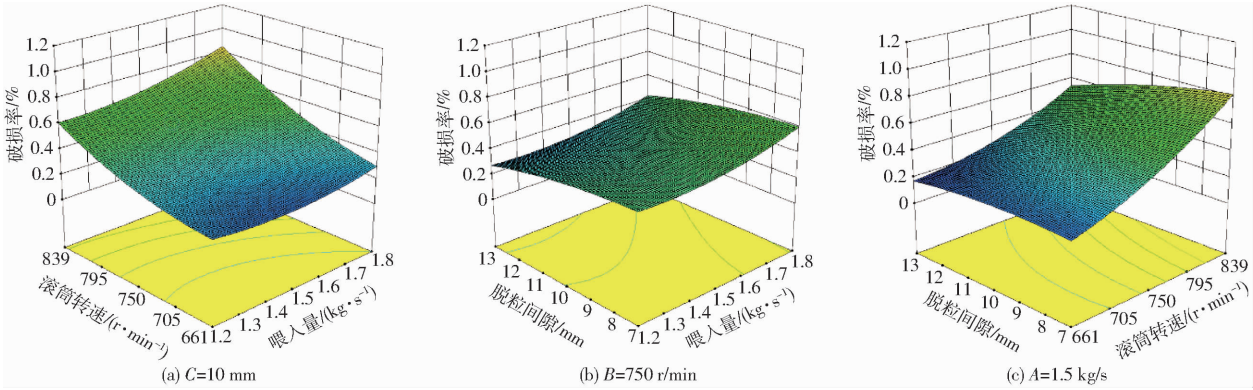

图 15　各因素对破损率影响的响应曲面

Fig. 15　Response surfaces of factors effect on crush rate

3.5.4　对功耗的影响

各因素与功耗 y_4 的关系曲面如图 16 所示。由图 16a 可知，随着滚筒转速从 661 r/min 增至 839 r/min，功耗逐渐变大。当滚筒转速固定到某一水平时，喂入量从 1.2 kg/s 增加到 1.8 kg/s，功耗逐渐增加，分析认为，喂入量增加，谷物层变厚，谷物与脱粒滚筒之间的碾压力增大，脱粒滚筒的脱粒力矩增大，功耗增大。

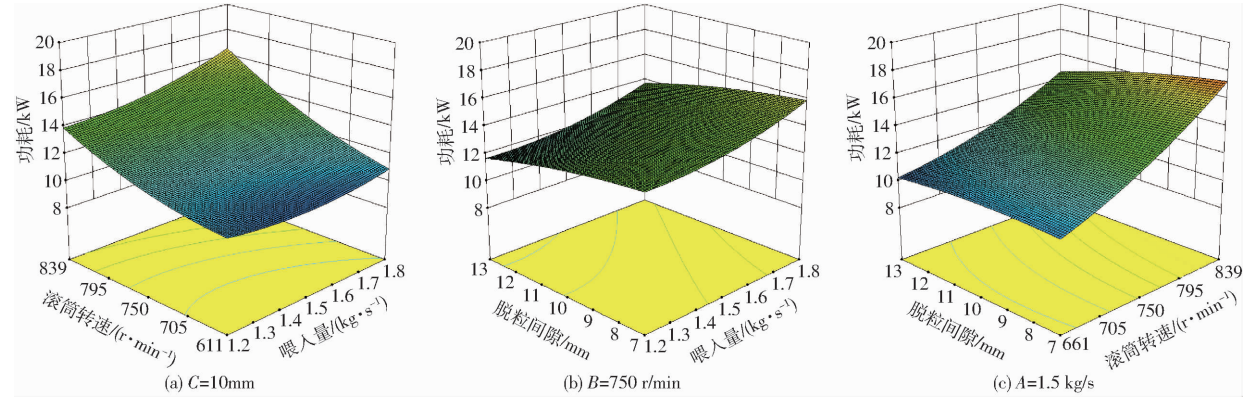

图 16　各因素对功耗影响的响应曲面

Fig. 16　Response surfaces of influence of various factors on power consumption

由图 16b 可知，随着脱粒间隙从 7 mm 增加到 13 mm，功耗逐渐降低，这是因为随着脱粒间隙增加，位于脱分空间内的谷物受到的碾压作用减弱，脱粒滚筒的脱粒力矩减小，功耗减小。

由图 16c 可知，当脱粒间隙固定到某一水平时，随着滚筒转速的增加，功耗随之增加，表明滚筒转速与功耗呈正相关关系。

3.6　参数优化

利用多元统计分析理论与方法，建立数学模型对谷码率、破损率、未脱净损失率进行优化分析。

（1）目标函数

以数学模型（11）~（14）为基础，谷码率、未脱净损失率、破损率和功耗分别在约束条件下取得最小值，建立目标函数 $\min y_1$、$\min y_2$、$\min y_3$ 和 $\min y_4$。

(2)约束条件

y_1、y_2、y_3和 y_4在取得最小值的同时应均大于 0,各因素的编码值不能超出试验选取的范围,故约束条件为

$$\begin{cases} y_j \geqslant 0 & (j=1,2,3,4) \\ -1.682 \leqslant x_i \leqslant 1.682 & (i=1,2,3) \end{cases} \tag{15}$$

根据建立的回归数学模型(15),利用 Design-Expert 10.0.7 软件进行优化求解,其中谷码率 y_1、未脱净损失率 y_2、破损率 y_3和功耗 y_4的权重为 0.2、0.3、0.3 和 0.2。最终优化后确定最佳参数组合为:喂入量 1.4 kg/s、滚筒转速 735 r/min 和凹板间隙 9 mm,此时谷子籽粒破损率为 0.35%,谷码率为 1.78%,未脱净损失率为 0.64%,功耗为 10.6 kW。

3.7 验证试验

经过软件优化求解的最佳参数组合并没有出现在试验结果中,故需对其进行进一步的验证试验,结果如表 5 所示。验证试验结果与软件优化后得到的结果接近,在误差允许的范围内,试验结果与软件预测的结果具有可靠性。

表 5 验证试验结果

Tab.5 Verification test results

试验号	指标			
	y_1/%	y_2/%	y_3/%	y_4/kW
试验 1	1.82	0.65	0.32	10.5
试验 2	1.76	0.66	0.34	10.7
试验 3	1.79	0.63	0.35	10.9
预测值	1.78	0.64	0.35	10.6

4 结论

(1)根据谷子脱粒要求,采用理论与试验相结合的方法,设计了一种纵轴流双柔性碾搓式谷子脱粒装置。该装置区别于传统的刚性脱粒滚筒与刚性固定式凹板,其柔性滚筒采用柔性耐磨橡胶辊作为脱粒元件,凹板采用柔性微动凹板,利用碾压和差速搓擦原理,可以满足谷子脱粒低破损率、低谷码率和低未脱净损失率的要求。

(2)对纵轴流滚筒及其柔性脱粒部件的结构参数进行了设计,并设计了新型柔性微动凹板,利用达朗贝尔原理对位于凹板侧任意时刻的谷物进行了动力学分析,研究发现:在轴流脱分空间内,脱粒橡胶辊和凹板对物料的作用不仅与物料的重力、脱粒部件及柔性微动凹板与物料间的摩擦特性、脱粒橡胶辊的结构参数有关,还与物料在脱分空间内的运动轨迹、加速度有关。

(3)通过试验分析发现,各因素对谷码率、未脱净损失率和功耗的影响主次顺序均为滚筒转速、喂入量和脱粒间隙,各因素对破损率影响的主次顺序为滚筒转速、脱粒间隙和喂入量。

(4)对于籽粒含水率在 15.3% ~17.8% 范围内的谷子植株,纵轴流双柔性碾搓式谷子脱粒装置的最佳结构和工作参数组合为:喂入量 1.4 kg/s、滚筒转速 735 r/min 和凹板间隙 9 mm,此时谷子籽粒破损率为 0.35%,谷码率为 1.78%,未脱净损失率为 0.64%,功耗为 10.6 kW。

参 考 文 献

[1] 李顺国,刘斐,刘猛,等.我国谷子产业现状、发展趋势及对策建议[J].农业现代化研究,2014,35(5):531 - 535.
LI Shunguo, LIU Fei, LIU Meng, et al. Current situation, development trend and countermeasures of millet industry in China [J]. Research of Agricultural Modernization, 2014,35(5): 531 - 535. (in Chinese)

[2] 李瑜辉,郭二虎,范惠萍,等.谷子产业发展探讨[J].现代农业科技,2019(22):28 - 29.
LI Yuhui, GUO Erhu, FAN Huiping, et al. Discussion on the development of millet industry [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(22): 28 - 29. (in Chinese)

[3] 刁现民,程汝宏.十五年区试数据分析展示谷子糜子育种现状[J].中国农业科学,2017,50(23):4469 - 4474.
DIAO Xianmin, CHENG Ruhong. Fifteen year regional test data analysis shows the current situation of millet millet breeding [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017,50(23): 4469 - 4474. (in Chinese)

[4] 张东明.单轴流谷子脱粒与分离装置设计与性能试验研究[D].大庆:黑龙江八一农垦大学,2020.
ZHANG Dongming. Design and performance test of single axial flow threshing and separating device for millet [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[5] WACKER P. Maize grain damage during harvest[J]. Harvest Technology,2005,60(2):84 - 85.

[6] BRUCE D M, HOBSON R N, MORGAN C L, et al. Threshability of shatter-resistant seed pods in oilseed rape[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,2001,80(4):343 - 350.

[7] POWAR R V, AWARE V V, SHAHARE P U. Optimizing operational parameters of finger millet threshing drum using RSM [J]. Journal of Food Science and Technology,2019,56(7):65 - 73.

[8] 武学峰.新型谷子脱粒机相关力学特性分析与试验研究[D].太谷:山西农业大学,2005.
WU Xuefeng. Analysis and experimental study on mechanical properties of new type millet thresher [D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2005. (in Chinese)

[9] 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.
XIE Fangping, LUO Xiwen, LU Xiangyang, et al. Threshing mechanism of flexible rod tooth cylinder[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(8): 110 – 114. (in Chinese)

[10] 张东明,衣淑娟,陶桂香,等. 谷子轴流脱粒与分离试验台的研制[J]. 农机化研究,2019,41(11):62 – 67.
ZHANG Dongming, YI Shujuan, TAO Guixiang, et al. Development of millet axial flow threshing and separation test bed[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019,41(11): 62 – 67. (in Chinese)

[11] 孙成龙,左杰文,卢富运,等. 燕麦脱粒组合式轴流滚筒设计与试验[J]. 农机化研究,2021,43(6):135 – 141,151.
SUN Chenglong, ZUO Jiewen, LU Fuyun, et al. Design and experiment of combined axial flow cylinder for oat threshing[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021,43(6): 135 – 141,151. (in Chinese)

[12] 卢文涛. 谷子脱粒系统性能试验研究[J]. 农业机械,2020(6):100 – 103.
LU Wentao. Experimental study on performance of millet threshing system[J]. Agricultural Machinery, 2020(6): 100 – 103. (in Chinese)

[13] TANG Zhong, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Experiment and evaluating indicators of wheat threshing and separating on test-bed of longitudinal axial-threshing unit[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(3):14 – 19.

[14] WANG Jiawei, LI Zhiwei, SADDAM H, et al. Design and threshing outputs study of internal and external rotary roller buckwheat thresher[J]. Inmateh-Agricultural Engineering,2020,60(1):24 – 32.

[15] LACHUGA Y F, BUR'YANOV A I, PAKHOMOV V I, et al. Adaptation of threshing devices to physical and mechanical characteristics of harvested crops[J]. Russian Agricultural Sciences,2020,46(2):52 – 63.

[16] AKINWONMI A S, KOLAWOLE A A, SECKLEY E M, et al. Development of a threshing device for pearl millet[J]. Current Journal of Applied Science and Technology,2019,33(1):1 – 12.

[17] 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/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):113 – 123.
FAN Chenlong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of low damage combined corn threshing and separating device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(4): 113 – 123. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190413&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.013. (in Chinese)

[18] 李耀明. 谷物联合收割机的设计与分析[M]. 北京:机械工业出版社,2014.

[19] 王占滨,王振伟,张银平,等. 纵轴流柔性锤爪式玉米脱粒装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(增刊 2):109 – 117.
WANG Zhanbin, WANG Zhenwei, ZHANG Yinping, et al. Design and experiment of longitudinal axial flow flexible hammer claw corn threshing device [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp.2):109 – 117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2020s213&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.013. (in Chinese)

[20] 陈美舟,徐广飞,王传旭,等. 纵轴流辊式组合玉米柔性脱粒分离装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(10):123 – 131.
CHEN Meizhou, XU Guangfei, WANG Chuanxu, et al. Design and experiment of longitudinal axial flow roller combined corn flexible threshing and separation device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10):123 – 131. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20201014&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.014. (in Chinese)

[21] 王勋威. 脱粒间隙可调节的脱粒分离系统研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2019.
WANG Xunwei. Research on threshing separation system with adjustable threshing clearance [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2019. (in Chinese)

[22] GB/T 9239.2—2006　机械振动恒态(刚性)转子平衡品质要求 第 2 部分:平衡误差[S]. 北京:中国标准出版社,2006.

[23] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2009.

[24] 任露泉. 试验设计及其优化[M]. 北京:科学出版社,2009.

[25] SINGH K P, PARDESHI I L, KUMAR M, et al. Optimization of machine paraneters of a pedal-operated paddy thresher using RSM[J]. Biosystems Engineering,2008,100(4):591 – 600.

[26] 徐中儒. 回归分析与试验设计[M]. 北京:中国农业出版社,1998.