doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.05.031

移动式制种玉米剥皮机设计与试验

陈俊志[1]　史瑞杰[1]　戴　飞[1]　赵武云[1]　常磊磊[1]　杨　婷[2]
(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070; 2. 酒泉奥凯种子机械股份有限公司, 酒泉 735000)

摘要: 针对目前国内制种玉米机械化剥皮采用普通玉米联合收获机作业籽粒损失大、剥皮生产线建设成本高、晾晒场剥皮装备短缺等问题,设计了一种移动式制种玉米剥皮机,采用柔性输送带喂入装置、全橡胶分段组合式剥皮辊、气固耦合式快速筛选装置和可分离移动式机架设计,以提高剥皮效率,降低籽粒损伤,便于运输和存放。通过对制种玉米剥皮过程进行理论分析与计算,确定了影响剥皮效果的主要因素和关键部件的结构参数,并采用 Box-Behnken 试验设计原理,以剥皮辊转速、剥皮辊倾角和剥皮辊偏置角为试验因素,以苞叶剥净率、籽粒脱落率和籽粒破损率为性能指标,进行三因素三水平试验,最后根据实际工况开展验证试验。多目标优化结果表明:最佳工作参数组合为剥皮辊转速 265.57 r/min、剥皮辊倾角 10.06°、剥皮辊偏置角 19.76°,此时苞叶剥净率为 95.33%,籽粒脱落率为 1.471%,籽粒破损率为 0.661%。验证试验结果表明:在最优参数组合时苞叶剥净率为 94.22%、籽粒脱落率为 1.511%、籽粒破损率为 0.675%,与参数优化结果基本吻合,满足制种玉米机械化剥皮的作业要求。该研究可为制种玉米剥皮机的设计与改进提供参考。

关键词: 制种玉米; 剥皮机; 移动式; 低损柔性剥皮
中图分类号: S225.31　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)05-0331-12　　**OSID**:

Design and Experiment of Mobile Seed Corn Husker

CHEN Junzhi[1]　SHI Ruijie[1]　DAI Fei[1]　ZHAO Wuyun[1]　CHANG Leilei[1]　YANG Ting[2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *China*
2. *Jiuquan OK Seed Machinery Co., Ltd., Jiuquan* 735000, *China*)

Abstract: Aiming at the current domestic mechanized peeling of seed corn using ordinary corn combine harvester operation with large kernel loss, high cost of peeling production line construction, shortage of drying field peeling equipment and other problems, a mobile seed corn husker was designed, using flexible conveyor belt feeding device, full rubber segmented combination peeling rollers, gas-solid coupling type rapid screening device and separable mobile frame design, in order to improve the efficiency of peeling, reduce kernel damage, and facilitate transport and storage. Through theoretical analyses and calculations on the peeling process of seed corn, the main factors affecting the peeling effect and the structural parameters of key components were determined. The Box-Behnken experimental design principle was adopted to conduct a three-factor, three-level experiment by using peeling roller rotational speed, peeling roller inclination angle and peeling roller bias angle as experimental factors, and bract stripping rate, kernel shedding rate and kernel breakage rate as performance indexes, and the verification test was carried out according to the actual working conditions at the end. The results of multi-objective optimization showed that the optimal combination of working parameters was the peeling roller rotational speed of 265.57 r/min, the peeling roller inclination angle of 10.06°, and the peeling roller offset angle of 19.76°, at which time the bract stripping rate was 95.33%, kernel shedding rate was 1.471%, and the kernel breakage rate was 0.661%. The results of the validation test showed that at the optimal parameter combination of the bract stripping rate was 94.22%, the kernel shedding rate was

收稿日期: 2024-10-24　修回日期: 2025-01-03
基金项目: 甘肃省重点研发计划项目(24YFNA019)、甘肃省重大专项(23ZDNA008、24ZD13NA019-05-01、25ZDNF001-1)、甘肃省科技计划中央引导地方科技发展资金项目(23ZYQF305-1)、甘肃省农机研发制造推广应用一体化试点项目(3-1-1)和甘肃省高校教师创新基金项目(2024A-050)
作者简介: 陈俊志(1998—),男,硕士生,主要从事农业工程技术与装备研究,E-mail: chenjunzhi98@163.com
通信作者: 戴飞(1987—),男,教授,博士生导师,主要从事西北特色油料与杂粮收获装备应用研究,E-mail: daifei@gsau.edu.cn

1.511%, and the kernel breakage rate was 0.675%, which was basically consistent with the results of the parameter optimization, meeting the operational requirements for mechanized peeling of seed corn. The research result can be used for the design and improvement of seed corn husker to provide a reference.

Key words: seed corn; husker; mobile; low-loss flexible peeling

0 引言

制种玉米作为玉米生产和发展的基础,对保障国家粮食安全和促进农业经济发展具有重要作用[1-2]。在制种玉米生产过程中,剥皮作为收获后处理的关键环节,其效率与质量直接影响玉米产业的可持续发展和农民的经济收益[3-5]。目前国外一些发达国家如美国、德国、日本等在制种玉米剥皮方面已经取得了显著成果,这些国家的制种玉米剥皮机技术先进、功能完善、效率高且稳定性好,已基本实现制种玉米剥皮的机械化作业[6-8]。然而,由于我国制种玉米在品种、种植模式、农艺性状、地块大小等方面与国外存在较大差异,导致国外机型在我国制种玉米主产区不能充分发挥作业效率和质量,且机具价格昂贵,存在安全风险,无法推广应用[9]。

国内玉米剥皮机研究起步相对滞后,早期多为仿制国外技术,历经多年探索与发展,逐渐开始自主创新[10-11]。尽管在玉米果穗剥皮技术上已有诸多成果,如针对大田玉米[12]、鲜食玉米[13]等的研究,但制种玉米因其特殊种植模式、品种多、收获周期较短和产品价值较高,对剥皮装备的要求更为严苛,与之适配的研究相对不足。现阶段,我国制种玉米果穗的机械化剥皮作业主要依赖于普通玉米联合收获机所配备的剥皮装置及部分地区引入的剥皮流水线[14]作业模式。但实践表明,普通玉米联合收获机剥皮时籽粒损失严重,难以保障种子质量,无法满足制种玉米的高标准需求[15];剥皮流水线作业虽然在一定程度上能够提高剥皮效率,但其运输成本高昂,整体经济效益欠佳。此外,种业公司为降低籽粒损失压低剥净率,催生二次剥皮需求,可晾晒场配套设备短缺。这严重制约了我国制种玉米机械化收获水平的进一步提升。

为提升制种玉米全程机械化水平,解决其使用普通玉米联合收获机作业籽粒损失大、剥皮生产线建设成本高、晾晒场剥皮装备短缺等问题,针对制种玉米的剥皮要求,本文设计一款移动式制种玉米剥皮机,采用柔性喂入、低损剥皮、快速筛选等技术,并结合移动式机架设计,以实现高效低损剥皮作业,降低籽粒损伤,提高设备适应性与经济性,为制种玉米剥皮技术发展提供理论与实践参考。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

移动式制种玉米剥皮机主要由皮带输送机和剥皮机主体构成,通过 2 台调频变速电机分别提供动力。皮带输送机包括机架、喂料斗、橡胶输送带、高度调节机构和脚轮等部分,机架中间连接处为铰接,可以进行折叠。剥皮机主体包括机架、剥皮辊、辅助装置、调节机构、筛选装置、传动系统和控制系统等部分,其中辅助装置包括分流板、限位杆和抛送轮;调节机构包括剥皮辊倾角调节机构和剥皮辊偏置角调节机构;筛选装置包括风机、螺旋输送器、筛网、籽粒仓和排杂口;传动系统包括齿轮、链条、链轮等传动元件;控制系统功能包括剥皮辊的转速调节、电机的启动和停止等。整机结构如图 1 所示,技术参数如表 1 所示。

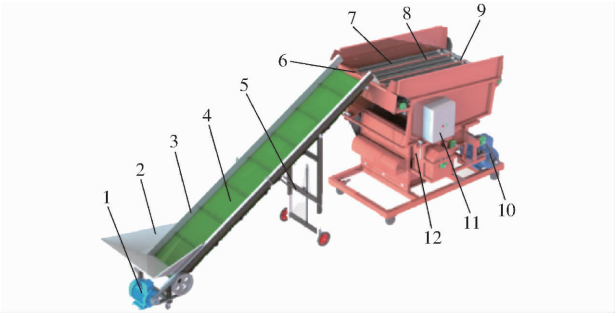


图 1 整机结构示意图

Fig. 1 Schematic of overall structure

1. 输送电机 2. 喂料斗 3. 输送机架 4. 输送带 5. 高度调节机构 6. 分流板 7. 剥皮辊 8. 限位杆 9. 抛送轮 10. 剥皮电机 11. 控制箱 12. 剥皮机架

表 1 主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters

参数	数值/形式
输送机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	3 700×1 140×2 400
剥皮机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	2 200×1 620×2 240
输送电机额定功率/kW	7.5
剥皮电机额定功率/kW	11
剥皮辊排布形式	高低辊式
剥皮辊数量/根	16
生产率/(t·h^{-1})	3~5
苞叶剥净率/%	≥90
籽粒脱落率/%	≤3
籽粒破损率/%	≤3

1.2　工作原理

整机工作过程包括输送、分流、剥皮、筛选等步骤。作业时，制种玉米果穗通过人工方式投入进料口后，经过橡胶输送带的输送，堆积的玉米果穗被送入剥皮机主体，完成果穗输送。随后在分流板的作用下，玉米果穗被均匀分布至剥皮工作区域，避免堵塞和过载现象的发生。当玉米果穗进入剥皮通道时，每对剥皮辊在动力驱动下相向旋转，通过相互挤压和摩擦，将玉米苞叶层层剥离，在剥皮辊的持续作用下，果穗上的苞叶逐渐减少，同时在自身重力和剥皮辊轴向摩擦力的共同作用下，果穗沿着剥皮通道下滑，最后果穗在末端抛送轮的作用下离开剥皮机，完成果穗剥皮。剥皮过程中脱落的玉米籽粒与剥离的玉米苞叶、玉米须等杂物落至筛选装置中，通过螺旋输送器与筛网的配合，较大的杂物顺着筛选通道从排杂口排出，玉米籽粒与较小的杂物则通过筛孔落下，再通过风机的进一步气流分离，玉米籽粒落入籽粒仓中，完成籽粒清选。

1.3　传动系统

移动式制种玉米剥皮机工作时，输送电机通过带传动将动力传输至输送带主动轴，进而带动输送带转动。剥皮电机通过链传动先将动力传输至中间轴，再分别将动力传输至风机轴、抛送轮轴和剥皮输入轴，进而带动风机与抛送轮转动。剥皮输入轴将动力传递至下方一级螺旋输送器轴与二级螺旋输送器轴，带动两螺旋输送器做同向转动；剥皮输入轴与剥皮辊轴之间为锥齿轮传动，剥皮辊与剥皮辊之间为直齿轮传动。整机传动系统如图 2 所示。

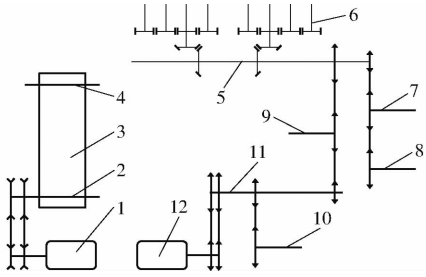


图 2　传动系统示意图

Fig. 2　Schematic of transmission system

1. 输送电机　2. 输送带主动轴　3. 输送带　4. 输送带从动轴　5. 剥皮输入轴　6. 剥皮辊轴　7. 一级螺旋输送器轴　8. 二级螺旋输送器轴　9. 抛送轮轴　10. 风机轴　11. 中间轴　12. 剥皮电机

2　关键部件设计与理论分析

2.1　剥皮辊设计

2.1.1　排布方式选择

目前剥皮辊的排布方式主要有 3 种：平辊式排布、V 形排布和高低辊式排布（图 3）。

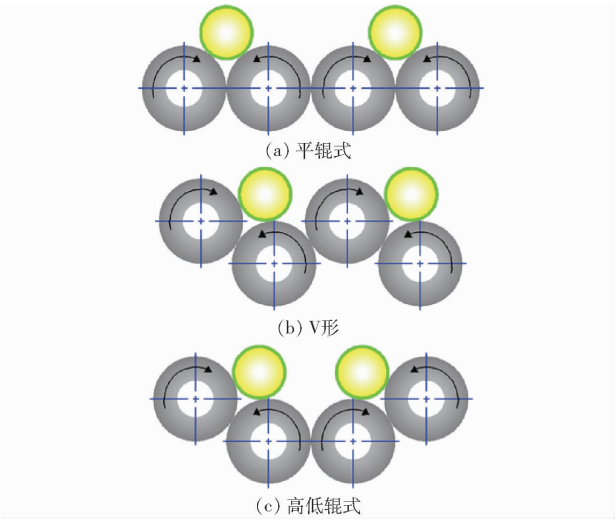


图 3　剥皮辊 3 种排布方式

Fig. 3　Three types of arrangement of peeling rollers

平辊式排布方式如图 3a 所示，所有剥皮辊的轴心均处于同一平面，相邻两辊相向旋转，剥皮辊与玉米果穗间的抓取角度较小，剥皮力度相对柔和，工作时籽粒脱落率与破碎率较低，但相对的苞叶剥净率也较低[16]。该排布方式通常配带星轮式压送器一起作业，整体结构较为复杂，且需要较多的星轮来保证有效的压送效果，这不仅增加了设备制造成本，还提高了维护与保养难度。

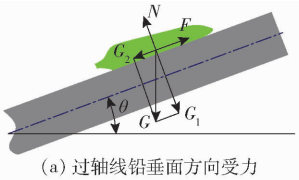
V 形排布方式如图 3b 所示，剥皮辊一高一低交错排列，高辊的旋转方向相同，低辊的旋向与高辊相反。相邻高辊之间有且仅有一条工作沟槽，较小的剥皮空间可以增加对玉米果穗的挤压和摩擦作用，有利于苞叶的剥离，但作业时容易发生堵塞，因此要求果穗严格按一定的角度和方向进入剥皮机构。如果玉米果穗横于高辊上，由于高辊同向旋转，在重力和摩擦力的作用下，会导致果穗向剥皮辊组的一侧偏移，产生堵塞现象且无法剥离苞叶，严重影响工作效率与剥皮效果[17]。

高低辊式排布方式如图 3c 所示，其由 2 个工作槽和 1 个非工作槽组成，两高位剥皮辊之间的距离较大，且旋转方向相反，使得玉米果穗在剥皮辊组上分布较为均匀，不易产生单侧偏移、堵塞、超载等现象，能够提高苞叶剥净率和生产率[18]。

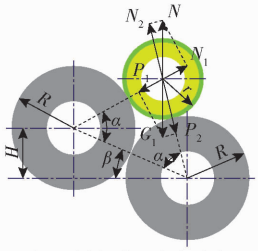
综上所述，高低辊式排布方式结合了平辊式排布和 V 形排布的优点，具有较强的适应性，剥皮过程稳定高效，因此选择高低辊式排布方式。

2.1.2　剥皮过程理论分析

当剥皮辊静止时，制种玉米果穗在重力、支撑力和摩擦力的作用下保持平衡，果穗受力情况如图 4 所示。



(a) 过轴线铅垂面方向受力



(b) 剥皮辊截面方向受力

图 4 静止时玉米果穗受力分析

Fig. 4 Force analysis of corn ear at rest

由图 4a 可知

$$\begin{cases} N = G_1 = G\cos\theta \\ F = \mu N \end{cases} \tag{1}$$

由图 4b 可知

$$\begin{cases} P_1 = N_1 = N\sin(\alpha - \beta) \\ P_2 = N_2 = N\sin(\alpha + \beta) \\ \cos\alpha = \dfrac{R}{R + r} \\ \sin\alpha = \dfrac{\sqrt{r^2 + 2Rr}}{R + r} \\ H = 2R\sin\beta \end{cases} \tag{2}$$

式中 N——剥皮辊对果穗支撑力,N

G——制种玉米果穗重力,N

G_1——果穗垂直于轴线的分重力,N

θ——剥皮辊倾角,(°)

F——剥皮辊对果穗的静摩擦力,N

μ——剥皮辊与玉米果穗间的静摩擦因数

P_1、P_2——果穗对高、低剥皮辊正压力,N

N_1、N_2——高、低剥皮辊对果穗支撑力,N

α——高、低剥皮辊抓取角,(°)

R——剥皮辊半径,mm

r——制种玉米果穗半径,mm

β——高、低剥皮辊偏置角,(°)

H——高、低剥皮辊高度差,mm

当剥皮辊工作时,制种玉米果穗以一定的初速度进入剥皮通道,在自身重力和剥皮辊轴向摩擦力作用下沿着剥皮辊轴线向下移动。由于剥皮辊偏置角的存在,玉米果穗对两剥皮辊的正压力不相等,所产生的切向摩擦力也就不同,使果穗自身旋转。剥皮辊表面有螺旋输送花纹,其产生的轴向进给速度为 v_0,计算式为

$$v_0 = \frac{2\pi nR}{\tan\gamma} \tag{3}$$

式中 n——剥皮辊转速,r/min

γ——剥皮辊螺旋升角,(°)

当玉米果穗的前进速度 $v \leqslant v_0$ 时,会受到剥皮辊表面螺旋花纹法向摩擦力的作用,该力可分解为轴向推送力与径向挤压力,此时果穗受力情况如图 5 所示。

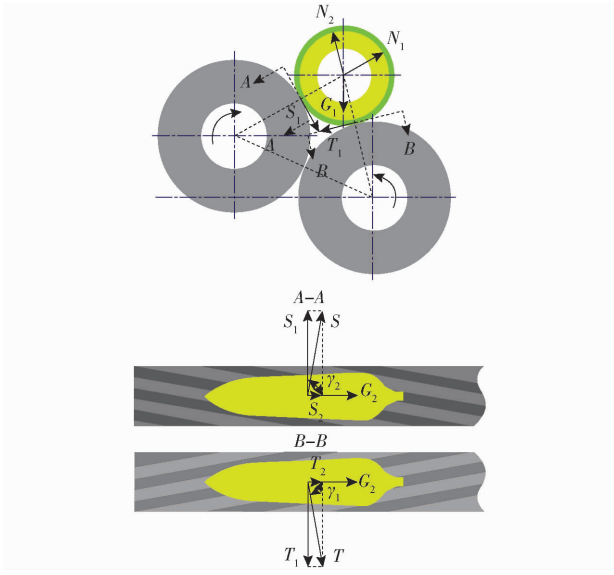


图 5 工作时玉米果穗受力分析

Fig. 5 Force analysis of corn ear at work

由图 5 可知

$$\begin{cases} S = f_1 P_1 \\ S_1 = S\sin\gamma_2 \\ S_2 = S\cos\gamma_2 \\ T = f_2 P_2 \\ T_1 = T\sin\gamma_1 \\ T_2 = T\cos\gamma_1 \\ F_z = G_2 + S_2 + T_2 \\ \tau = (S_1 - T_1)r \end{cases} \tag{4}$$

式中 S、T——高、低剥皮辊对果穗的切向摩擦力,N

S_1、T_1——高、低剥皮辊摩擦力在径向上的分力,N

S_2、T_2——高、低剥皮辊摩擦力在轴向上的分力,N

f_1、f_2——高、低剥皮辊与玉米果穗间的动摩擦因数

γ_1、γ_2——高、低剥皮辊螺旋升角,(°)

F_z——玉米果穗所受轴向合力,N

τ——玉米果穗所受转矩,N·m

结合式(1)、(2)、(4)可得

$$\begin{cases} F_z = G\sin\theta + \dfrac{\sqrt{(2Rr+r^2)(4R^2-H^2)}-HR}{2R(R+r)} f_1 G \cdot \\ \quad \cos\theta\cos\gamma_2 + \dfrac{\sqrt{(2Rr+r^2)(4R^2-H^2)}+HR}{2R(R+r)} \cdot \\ \quad f_2 G\cos\theta\cos\gamma_1 \\ \tau = \left[\dfrac{\sqrt{(2Rr+r^2)(4R^2-H^2)}-HR}{2R(R+r)} f_1 G \cdot \right. \\ \quad \cos\theta\sin\gamma_2 - \dfrac{\sqrt{(2Rr+r^2)(4R^2-H^2)}+HR}{2R(R+r)} \cdot \\ \quad \left. f_2 G\cos\theta\sin\gamma_1 \right] r \end{cases} \tag{5}$$

当玉米果穗的前进速度 $v > v_0$ 时，剥皮辊对果穗作用的摩擦力与 $v \leqslant v_0$ 时大小相等、方向相反，此时 $F_z = G_2 - S_2 - T_2$，$\tau = (T_1 - S_1)r$。若 $F_z > 0$，则玉米果穗将继续沿着剥皮辊轴线加速向前移动；若 $F_z < 0$，则果穗将沿着剥皮辊轴线做减速运动。

由上述理论分析可知，制种玉米果穗在剥皮辊上的运动是一个复杂的动态过程，其剥皮效率和质量受到剥皮辊长度、直径、倾角、偏置角、转速、材料和表面形状等的共同影响。当果穗刚接触剥皮辊时，若其轴向前进速度较小，剥皮辊表面与果穗之间的摩擦力将作为主要的驱动力，此时摩擦力克服果穗的惯性力，使其加速向前运动，随着果穗速度的增加，其动能也逐渐增大，当果穗速度达到一定程度时，果穗开始受到来自剥皮辊的阻力，导致其速度开始减慢，这一变化过程中，剥皮辊的表面形状和转速起到了关键作用。

2.1.3　主要结构参数设计

剥皮辊表面形状直接决定了其与制种玉米果穗间的摩擦力方向，合理的形状设计能够增强摩擦力，提高苞叶剥除效率，同时降低果穗破损和籽粒损失。目前大田玉米剥皮作业所采用的剥皮辊型大多为鱼鳞＋螺旋组合方式，该组合具有较强的剥皮能力和剥皮效率，但对于籽粒损失要求更高的制种玉米并不适用。因此本文针对制种玉米的物理性状和剥皮要求，设计了如图 6 所示的剥皮辊组合。

高位辊整体由输送辊组成，其表面设计为螺旋状条形凸起，有助于增加辊子与果穗间的摩擦力，使果穗能够稳定地前进，还能在一定程度上辅助苞叶剥离。低位辊是一个组合式设计，由减速辊、破皮辊和揉搓辊组成，减速辊表面为小螺距条状凸起，有助于减缓果穗的前进速度，增加玉米果穗在整根剥皮辊上的接触时间，从而提高苞叶剥净率；破皮辊表面为带尖角的大螺距条状凸起，用于撕开较为坚硬或紧密贴合的外层苞叶；揉搓辊表面3/4圆弧段为大

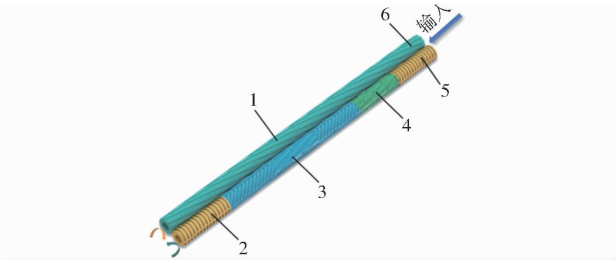


图 6　剥皮辊排列示意图

Fig. 6　Schematic of peeling roller arrangement

1. 输送辊　2. 减速辊　3. 揉搓辊　4. 破皮辊　5. 低位辊　6. 高位辊

螺距条状凸起，1/4 圆弧段为中螺距条状凸起，能够对内层苞叶进行多层次的揉搓和挤压，使苞叶更加松散，更容易从果穗上剥离。

剥皮辊材料决定了其与制种玉米果穗间的摩擦力，目前常用材料主要为铸铁与橡胶，铸铁具有较高的硬度与强度，能承受较大剥皮压力和冲击力，但摩擦因数低且重量大，在剥皮作业中极易造成果穗破损和籽粒损失；而橡胶材料摩擦因数表现良好，可有效抓取玉米苞叶，提高剥皮效率和剥净率，同时还具有较好的弹性，能够适应不同果穗形态，减少损伤。基于此，本文选用橡胶作为剥皮辊材料，经过对各类橡胶型号在性能与价格方面的综合考量，最终选定聚氨酯橡胶。同时，考虑到剥皮作业时苞叶被层层剥离，玉米籽粒会与剥皮辊直接接触，橡胶剥皮辊采用硬度渐变设计，从输入端开始逐渐降低硬度，以减少玉米籽粒损伤。

剥皮辊长度直接影响其与制种玉米果穗间的接触时间，长度过短会减少果穗与剥皮辊间的相互作用时间，无法充分剥除果穗上的所有苞叶；长度过长会导致果穗在剥皮区域停留过久，造成不必要的磨损或损伤，同时还需要更强的支撑结构和更多的设备能耗。根据剥皮辊有效长度[19]，并考虑到剥皮辊所用材料为聚氨酯橡胶，剥皮力度较为柔和，确定剥皮辊长度为 1 500 mm。

剥皮辊直径影响其对玉米苞叶的抓取能力，剥皮辊直径过小，其与玉米果穗形成的抓取角偏小，在剥皮过程中无法充分抓取苞叶，导致剥皮不完全，剥净率降低；直径过大，剥皮辊对果穗的挤压力偏大，易导致果穗破损和籽粒损失。通过查阅文献[20]可知，剥皮辊直径在 60 ~ 80 mm 范围内较为适宜，因此设定剥皮辊最大外圆直径均为 70 mm。

剥皮辊数量直接影响整机生产效率，适当增加辊子数量可以有效提高剥皮效率，加快生产速度[21]，但随着数量的增多，设备的运行负荷和复杂性也相应增加，提高了生产与维护成本，且左右两侧

部分辊子可能在作业中处于闲置状态,造成资源浪费。因此,参照玉米联合收获机上剥皮辊数量,采用16 辊 8 通道的剥皮辊配置。

2.2 筛选装置设计

随着制种玉米果穗剥皮作业的进行,玉米须、茎秆、苞叶等被剥离,同时会有一些脱落的玉米籽粒掺杂其中,为了将籽粒与杂质分离并回收,设计了如图 7 所示的筛选装置。

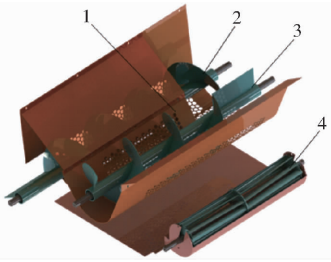


图 7 筛选装置结构示意图

Fig. 7 Schematic of rapid screening device

1. 筛网 2. 二级螺旋输送器 3. 一级螺旋输送器 4. 风机

该装置结合了物理分离与气流分选原理,通过螺旋输送器的旋转运动,将混合物料向前推送的同时进行初步的搅拌和分散,有助于打破物料间的粘连,使玉米籽粒与杂质初步分离。物料经过筛网时,由于玉米籽粒与杂质(如茎秆、苞叶)在尺寸上的差异,大部分杂质会被筛网阻挡并在螺旋输送器的推送下排出,而尺寸较小的玉米籽粒和小部分杂质则通过筛网落入下方的收集区域。在筛分后的籽粒收集区域侧上方设置风机,风机产生的气流根据物料密度的不同进行分选,由于玉米籽粒密度相对较大,而一些轻质杂质(如细小的苞叶碎片、玉米须等)则容易被气流吹起并带走,可以进一步提高收集到的玉米籽粒的纯净度。

其中螺旋输送器分为一级螺旋输送器和二级螺旋输送器,一级螺旋输送器位于上方,叶片旋向为左旋,长度为 1 180 mm,螺旋长度为 860 mm,螺距为 280 mm,螺旋叶片直径为 168 mm;二级螺旋输送器叶片旋向为右旋,长度为 1 370 mm,螺旋长度为 1 060 mm,螺距为 280 mm,螺旋叶片直径为 168 mm。风机叶片形状为圆弧形,长度为 780 mm,数量为 20,叶轮直径为 165 mm。螺旋输送器、风机转速需与剥皮辊转速相匹配,通过试验和计算,确定螺旋输送器、风机与剥皮辊三者间的转速比为 0.375∶2.5∶1 时效果较好。

2.3 抛送轮设计

当制种玉米果穗离开剥皮区域时,若轴向分速度过小,果穗会掉落在下方的发动机和机架上,造成磕碰且存在安全隐患。因此,在剥皮辊尾端设计了一个如图 8 所示的抛送轮,可以确保果穗被平稳、高效地抛离剥皮机,从而保障设备的安全运行和玉米果穗的品质。

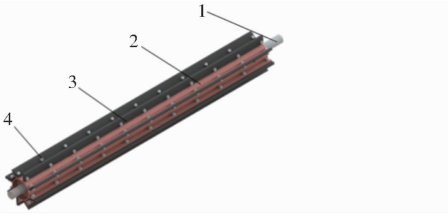


图 8 抛送轮结构示意图

Fig. 8 Schematic of throwing wheel

1. 抛送轴 2. 空心轮 3. 橡胶片 4. 螺栓副

抛送轮主体为空心钢管,其上轴向均匀焊有 8 片薄钢板,为了减少磕碰带来的损失,每片薄钢板上通过螺栓固定有更宽的橡胶板。根据剥皮辊排布宽度与整机结构布置,设定抛送轮长度为 1 120 mm,最大直径为 140 mm,安装高度为 1 550 mm。若要求玉米果穗的水平抛送距离最小为 1 m,计算可知抛送轮转速应不小于 238 r/min,计算式为

$$\begin{cases} X_p = v_p t_p \\ Y_p = \dfrac{1}{2} g t_p^2 \\ v_p = \dfrac{1}{60} \pi n_p d_p \end{cases} \tag{6}$$

式中 X_p——水平方向位移,m

Y_p——竖直方向位移,m

v_p——抛送轮切向线速度,m/s

t_p——飞行时间,s

g——重力加速度,m/s^2

n_p——抛送轮转速,r/min

d_p——抛送轮直径,m

考虑到抛送轮转速需与剥皮辊转速以及果穗接触抛送轮时的速度相匹配,通过试验和计算,确定抛送轮与剥皮辊的最佳转速比为 0.93。

2.4 输送机设计

2.4.1 输送带设计

输送带作为输送机的核心组成部分,直接影响设备的输送效率和果穗的处理质量。根据作业需求和环境特点,选择橡胶输送带作为主要材料,其拥有优良的耐磨性和弹性,能够有效减少滑动损失。

根据输送负载和果穗尺寸,输送带宽度设定为 600 mm,以确保充分的承载能力并防止果穗掉落。输送带长度应尽量缩短,以减少能耗和物料损失,而倾斜角度一般控制在 0°~30°之间,以保证果穗的稳定输送,根据剥皮机喂入高度最终确定输送带输送长度为 3 800 mm。输送速度设定在 0.5~1.5 m/s 之间,可以通过调频变速电机实现无级调节,以适应

不同的作业需求和果穗处理能力。

此外，输送带表面设有如图 9 所示的横条状凸起，凸起高度为 50 mm，间距为 480 mm，该设计能够有效控制玉米果穗喂入量，减少堆积和堵塞现象产生。

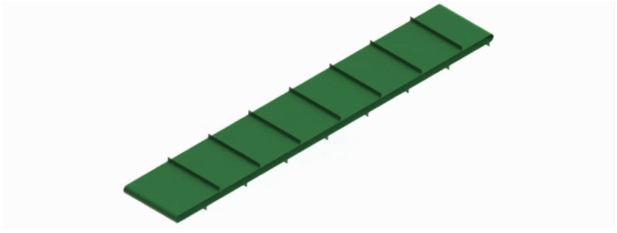


图 9　橡胶输送带示意图

Fig. 9　Schematic of rubber conveyer belt

2.4.2　高度调节装置设计

高度调节装置是确保设备适应不同作业环境和提高作业效率的重要组成部分，通过合理的高度调节设计，能够实现输送带与剥皮机主体间的灵活调节，以适应不同的作业需求。根据升降结构设计要求，设计了一种绳式升降装置，通过调节钢丝绳长度实现升降运动。该装置如图 10 所示，由固定架、支撑杆、钢丝绳、绞盘和移动架等组成，其中固定架与支撑杆一端固定在输送机架上，移动架套在固定架中可以上下移动，绞盘安装在固定架下部，钢丝绳一端固定在固定架横梁上，另一端缠绕于绞盘转轴，并通过定滑轮与移动架相连。

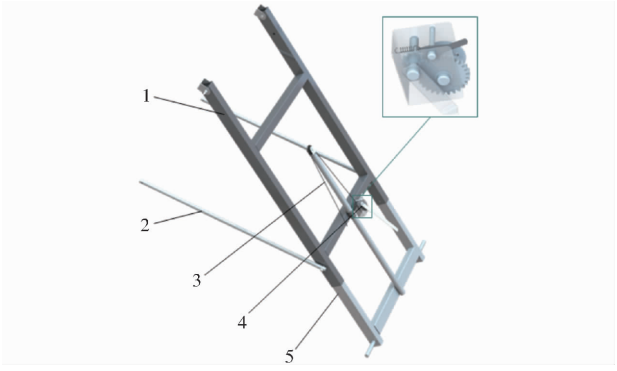


图 10　高度调节装置结构示意图

Fig. 10　Schematic of height regulating device

1. 固定架　2. 支撑杆　3. 钢丝绳　4. 绞盘　5. 移动架

当需要调整输送机高度时，手动旋转手柄，通过齿轮连接带动钢丝绳缠绕或松开，由于钢丝绳与移动架相连，因此移动架会随着钢丝绳长度的变化而伸缩，进而调整输送高度。达到所需高度后松开手柄，绞盘齿轮会在弹簧与卡扣的配合下锁定，从而固定移动架的位置，防止意外下降。该装置结构简单、操作方便且成本较低，可实现 1.5 ~ 3.0 m 范围内任意高度调节。

3　参数优化试验

3.1　试验条件

根据理论分析与模型设计，研制了如图 11 所示的移动式制种玉米剥皮机，参数优化试验于 2024 年 9 月 26 日在甘肃省酒泉市肃州区上坝镇进行，试验所用玉米品种为当地大量种植的“中科玉 505”。随机选取 100 个制种玉米果穗，使用数显游标卡尺测得平均长度为 140.5 mm，平均大端直径为 46.6 mm；使用电子天平测得果穗平均质量为 143.5 g，玉米芯平均质量为 31.2 g，籽粒百粒质量为 45.5 g；使用卤素含水率测量仪测得籽粒含水率为 25.83%。



(a) 轴测图　　(b) 俯视图

图 11　移动式制种玉米剥皮机

Fig. 11　Mobile seed corn husker

3.2　试验因素与评价指标

结合制种玉米剥皮过程的理论分析与实际情况，选取剥皮辊转速、剥皮辊倾角和剥皮辊偏置角作为试验因素。根据 JB/T 11907—2014《玉米剥皮机》[22] 进行试验，以苞叶剥净率、籽粒脱落率和籽粒破损率作为评价指标，计算式为

$$\begin{cases} A = \left(1 - \dfrac{L_1}{L}\right) \times 100\% \\ B = \dfrac{M_1}{M} \times 100\% \\ C = \dfrac{M_2}{M} \times 100\% \end{cases} \tag{7}$$

式中　A——苞叶剥净率，%

L_1——带 3 片及以上苞叶的果穗数，个

L——果穗总数，个

B——籽粒脱落率，%

M_1——脱落籽粒质量，g

M——籽粒总质量，g

C——籽粒破损率，%

M_2——破损籽粒质量，g

3.3　单因素试验

参照大田玉米剥皮机的工作参数范围[23-24]，并结合本机的实际工作条件进行各因素的单因素试验。在剥皮辊倾角 10°、剥皮辊偏置角 20°条件下，对剥皮辊转速分别为 150、200、250、300、350、400 r/min 状态下进行试验；在剥皮辊转速 300 r/min、剥皮辊偏置角 20°条件下，对剥皮辊倾角分别为 6°、8°、10°、12°、14°状态下进行试验；在剥皮辊转速

300 r/min、剥皮辊倾角 10°条件下，对剥皮辊偏置角分别为 18°、19°、20°、21°、22°状态下进行试验。根据单因素试验结果绘制各因素对评价指标影响的变化曲线，如图 12 所示。

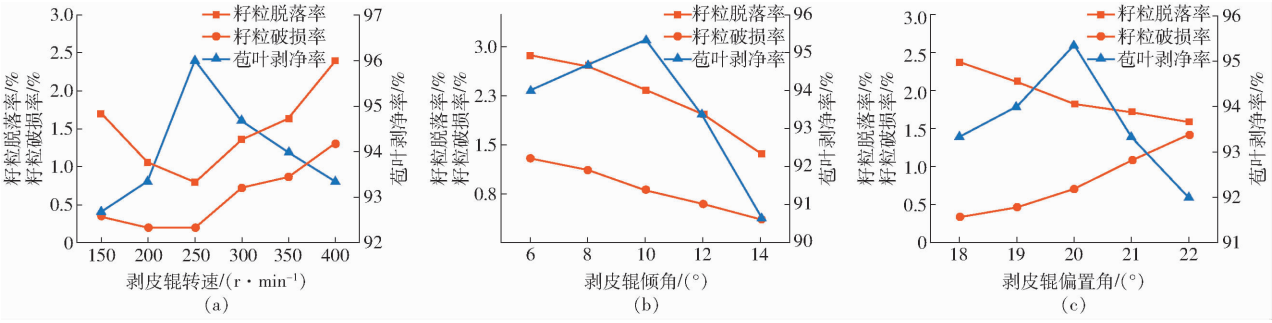


图 12 各因素对评价指标的影响

Fig. 12 Influence of each factor on evaluation indicators

由图 12a 可知，随着剥皮辊转速的增加，苞叶剥净率先增大后减小，籽粒脱落率与破损率则先减小后增大，在 200 ~ 300 r/min 范围内整体效果最好。由图 12b 可知，随着剥皮辊倾角的增大，苞叶剥净率先缓慢增加后迅速降低，籽粒脱落率与破损率则缓慢降低，在 8° ~ 12°范围内整体效果较好。由图 12c 可知，随着剥皮辊偏置角的增大，苞叶剥净率先增大后减小，籽粒脱落率逐渐减小，而籽粒破损率逐渐增大，在 19° ~ 21°范围内整体效果较好。

3.4 正交试验

3.4.1 试验方案与结果

根据单因素试验结果分析，确定剥皮辊转速为 200 ~ 300 r/min，剥皮辊倾角为 8° ~ 12°，剥皮辊偏置角为 19° ~ 21°。利用 Box - Behnken 设计方法[25-26]对其进行三因素三水平正交试验，试验因素编码如表 2 所示。试验共 17 组，每组重复 3 次取平均值，单次试验喂入 50 个大小形状相差不大的制种玉米果穗，试验结束后计算苞叶剥净率 Y_1、籽粒脱落率 Y_2和籽粒破损率 Y_3。正交试验结果见表 3，X_1、X_2、X_3为因素编码值。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Codes of experimental factors

编码	因素		
	剥皮辊转速/(r·min⁻¹)	剥皮辊倾角/(°)	剥皮辊偏置角/(°)
-1	200	8	19
0	250	10	20
1	300	12	21

3.4.2 回归模型建立与显著性检验

根据试验结果建立二次回归模型，苞叶剥净率方差分析结果如表 4 所示，该回归模型极显著（$P < 0.001$），能够描述各因素与响应值之间的关系；失拟项不显著（$P = 0.2204 > 0.05$），说明试验因素与试验指标之间存在显著的二次关系，回归方程与试验数据的拟合程度较高；决定系数 $R^2 = 0.977$，表明回归模型解释了 97% 以上的响应值，模型的预测值与实际值之间存在较高的相关性，试验误差较小。

表 3 试验设计与结果

Tab. 3 Experimental design and results

序号	因素			Y_1/%	Y_2/%	Y_3/%
	X_1	X_2	X_3			
1	0	0	0	94.67	1.382	0.747
2	0	1	1	88.00	2.292	1.485
3	0	-1	-1	92.67	2.927	0.866
4	1	1	0	90.00	1.811	0.951
5	0	0	0	95.33	1.245	0.627
6	1	0	1	91.33	1.726	1.213
7	-1	1	0	88.00	2.180	1.055
8	0	-1	1	89.33	2.927	1.499
9	1	0	-1	93.33	1.846	0.700
10	0	0	0	95.33	1.468	0.754
11	0	0	0	94.00	1.322	0.699
12	-1	-1	0	87.33	2.412	1.283
13	-1	0	-1	87.33	2.069	1.225
14	0	1	-1	90.00	2.180	0.926
15	-1	0	1	88.00	2.326	1.389
16	0	0	0	94.67	1.494	0.875
17	1	-1	0	94.00	1.726	0.961

回归项 X_1、X_1^2、X_2^2、X_3^2 为极显著（$P < 0.001$），回归项 X_2为很显著（$P < 0.01$），回归项 X_3、X_1X_2 为显著（$P < 0.05$），其他项不显著，试验因素影响苞叶剥净率的主次顺序为：X_1、X_2、X_3。去除无显著影响的交互项，苞叶剥净率的二次多项回归方程为

$$Y_1 = 94.8 + 2.25X_1 - 0.916\,2X_2 - 0.833\,8X_3 - 1.17X_1X_2 - 2.49X_1^2 - 2.48X_2^2 - 2.32X_3^2 \quad (8)$$

籽粒脱落率方差分析结果如表 5 所示，该回归模型很显著（$P < 0.01$），表明预测量与响应量之间有着较强的关联性；失拟项不显著（$P > 0.05$），说明模型不存在明显的失拟情况；决定系数 $R^2 = 0.944$，表明模型能够解释观测数据中 94% 以上的变异性。

表 4　苞叶剥净率方差分析

Tab. 4　Analysis of variance for bract stripping rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	143. 78	9	15. 98	33. 32	<0. 000 1 ***
X_1	40. 50	1	40. 50	84. 47	<0. 000 1 ***
X_2	6. 72	1	6. 72	14. 01	0. 007 2 **
X_3	5. 56	1	5. 56	11. 60	0. 011 4 *
X_1X_2	5. 45	1	5. 45	11. 37	0. 011 9 *
X_1X_3	1. 78	1	1. 78	3. 72	0. 095 2
X_2X_3	0. 448 9	1	0. 448 9	0. 936 3	0. 365 5
X_1^2	26. 00	1	26. 00	54. 23	0. 000 2 ***
X_2^2	25. 95	1	25. 95	54. 12	0. 000 2 ***
X_3^2	22. 61	1	22. 61	47. 17	0. 000 2 ***
残差	3. 36	7	0. 479 5		
失拟项	2. 12	3	0. 706 9	2. 29	0. 220 4
纯误差	1. 24	4	0. 308 9		
总和	147. 14	16			

注：* 表示显著（P <0. 05），** 表示很显著（P <0. 01），*** 表示极显著（P <0. 001），下同。

表 5　籽粒脱落率方差分析

Tab. 5　Analysis of variance for kernel shedding rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	4. 04	9	0. 449 3	13. 12	0. 001 3 **
X_1	0. 440 9	1	0. 440 9	12. 87	0. 008 9 **
X_2	0. 292 2	1	0. 292 2	8. 53	0. 022 3 *
X_3	0. 007 8	1	0. 007 8	0. 226 3	0. 648 8
X_1X_2	0. 025 1	1	0. 025 1	0. 733 4	0. 420 1
X_1X_3	0. 035 5	1	0. 035 5	1. 04	0. 342 3
X_2X_3	0. 003 1	1	0. 003 1	0. 091 6	0. 771 0
X_1^2	0. 003 8	1	0. 003 8	0. 111 7	0. 748 0
X_2^2	1. 62	1	1. 62	47. 24	0. 000 2 ***
X_3^2	1. 41	1	1. 41	41. 27	0. 000 4 ***
残差	0. 239 8	7	0. 034 3		
失拟项	0. 197 5	3	0. 065 8	6. 22	0. 054 8
纯误差	0. 042 3	4	0. 010 6		
总和	4. 28	16			

其中回归项 X_1、X_2、X_2^2、X_3^2 对籽粒脱落率有显著影响，其余回归项无显著影响，试验因素影响籽粒脱落率的主次顺序为：X_1、X_2、X_3。去除无显著影响的交互项，籽粒脱落率的二次多项回归方程为

$$Y_2 = 1.38 + 0.234\,7X_1 - 0.191\,1X_2 + 0.031\,1X_3 + 0.619\,9X_2^2 + 0.579\,4X_3^2 \quad (9)$$

籽粒破损率方差分析结果如表 6 所示，该回归模型差异很显著（P < 0. 01），失拟项不显著（P > 0. 05），说明模型对数据的拟合程度较高；决定系数 R^2 = 0. 934，表明模型具有很好的相关性和解释度，可以采用该模型进行分析与预测。由表 6 可知，X_1、X_3、X_1^2、X_2^2、X_3^2 对籽粒破损率有显著影响，其他项无显著影响，试验因素影响籽粒破损率的主次顺序为：X_3、X_1、X_2。去除无显著影响的交互项，籽粒破损率的回归方程为

$$Y_3 = 0.740\,4 - 0.140\,9X_1 - 0.024X_2 + 0.233\,6X_3 + 0.129\,9X_1^2 + 0.192\,2X_2^2 + 0.261\,4X_3^2 \quad (10)$$

表 6　籽粒破损率方差分析

Tab. 6　Analysis of variance for kernel breakage rate

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1. 21	9	0. 134 7	11. 02	0. 002 3 **
X_1	0. 158 8	1	0. 158 8	12. 98	0. 008 7 **
X_2	0. 004 6	1	0. 004 6	0. 376 8	0. 558 7
X_3	0. 436 6	1	0. 436 6	35. 70	0. 000 6 ***
X_1X_2	0. 011 9	1	0. 011 9	0. 971 5	0. 357 1
X_1X_3	0. 030 5	1	0. 030 5	2. 49	0. 158 6
X_2X_3	0. 001 4	1	0. 001 4	0. 111 9	0. 747 7
X_1^2	0. 071 1	1	0. 071 1	5. 81	0. 046 7 *
X_2^2	0. 155 5	1	0. 155 5	12. 72	0. 009 1 **
X_3^2	0. 287 8	1	0. 287 8	23. 53	0. 001 9 **
残差	0. 085 6	7	0. 012 2		
失拟项	0. 052 7	3	0. 017 6	2. 13	0. 238 7
纯误差	0. 032 9	4	0. 008 2		
总和	1. 3	16			

3. 4. 3　因素交互作用对评价指标的影响

根据上述回归方程结果，利用 Design-Expert 软件绘制响应面图，并据此分析剥皮辊转速、倾角及偏置角交互作用对评价指标的影响。各因素交互作用对苞叶剥净率影响的响应曲面如图 13 所示。由图 13a 可知，当剥皮辊偏置角为 20°，剥皮辊倾角一定时，苞叶剥净率随剥皮辊转速的增加呈先迅速上升后缓慢下降趋势；当剥皮辊转速一定时，随着剥皮辊倾角的增大，苞叶剥净率先增加后降低。由图 13b 可知，当剥皮辊倾角为 10°，剥皮辊偏置角一定时，随着剥皮辊转速的增加，苞叶剥净率呈先迅速上升后缓慢下降趋势；当剥皮辊转速一定时，苞叶剥净率随剥皮辊偏置角的增大先增加后降低。由图 13c 可知，当剥皮辊转速为 250 r/min，剥皮辊偏置角一定时，苞叶剥净率随剥皮辊倾角的增大呈先升高后降低趋势；当剥皮辊倾角一定时，随着剥皮辊偏置角的增大，苞叶剥净率先升高后降低。在剥皮辊转速为 260 ~ 280 r/min、剥皮辊倾角为 9° ~ 10°、剥皮辊偏置角为 19. 5° ~ 20°时，苞叶剥净率达到最高。

各因素交互作用对籽粒脱落率影响的响应曲面如图 14 所示。由图 14a 可知，当剥皮辊偏置角为 20°，剥皮辊倾角一定时，剥皮辊转速与籽粒脱落率呈正相关；当剥皮辊转速一定时，随着剥皮辊倾角的增大，籽粒脱落率呈先降低后升高趋势。由图 14b 可知，当剥皮辊倾角为 10°，剥皮辊偏置角一定时，籽粒脱落率随剥皮辊转速的增大而增大；当剥皮辊转速一定时，籽粒脱落率随剥皮辊偏置角的增大先

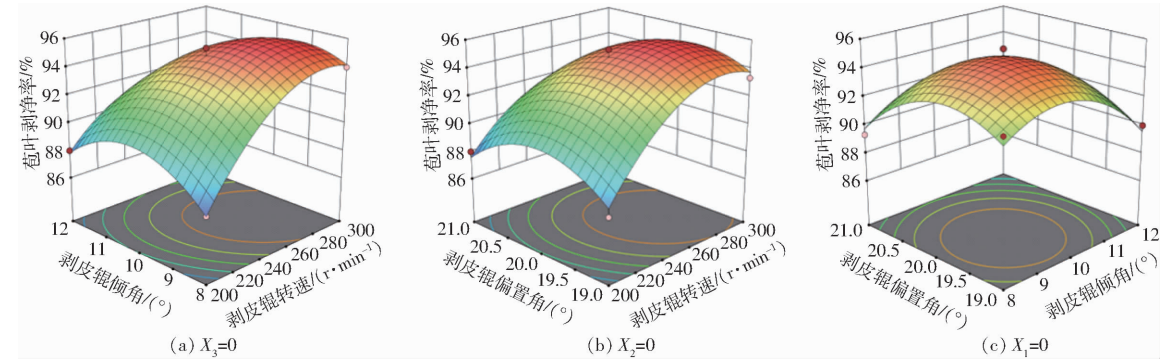


图 13 因素交互作用对苞叶剥净率影响的响应曲面

Fig. 13 Response surfaces for effect of factor interactions on bract stripping rate

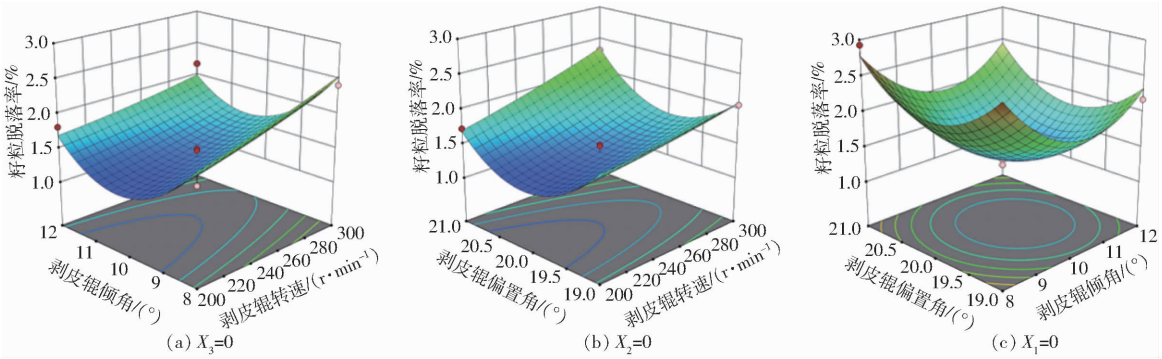


图 14 因素交互作用对籽粒脱落率影响的响应曲面

Fig. 14 Response surfaces for effect of factor interactions on kernel shedding rate

降低后升高。由图 14c 可知,当剥皮辊转速为 250 r/min,剥皮辊偏置角一定时,籽粒脱落率随剥皮辊倾角的增大呈先降低后升高趋势;当剥皮辊倾角一定时,随着剥皮辊偏置角的增大,籽粒脱落率先降低后升高。在剥皮辊转速为 200 ~ 220 r/min、剥皮辊倾角为 9.5° ~ 10.5°、剥皮辊偏置角为 19.5° ~ 20.5°时,籽粒脱落率达到最低值。

各因素交互作用对籽粒破损率影响的响应曲面如图 15 所示。由图 15a 可知,当剥皮辊偏置角为 20°,剥皮辊倾角一定时,籽粒破损率随剥皮辊转速的增加呈先迅速下降后缓慢上升趋势;当剥皮辊转速一定时,随着剥皮辊倾角的增大,籽粒破损率先降低后增加。由图 15b 可知,当剥皮辊倾角为 10°,剥皮辊偏置角一定时,随着剥皮辊转速的增加,籽粒破损率呈先减小后增大趋势;当剥皮辊转速一定时,籽粒破损率随剥皮辊偏置角的增大先缓慢降低后迅速升高。由图 15c 可知,当剥皮辊转速为 250 r/min,剥皮辊偏置角一定时,籽粒破损率随剥皮辊倾角的增大呈先降低后升高趋势;当剥皮辊倾角一定时,随着剥皮辊偏置角的增大,籽粒破损率先缓慢降低后迅速升高。在剥皮辊转速为 260 ~ 280 r/min、剥皮辊倾角为 9.5° ~ 10.5°、剥皮辊偏置角为 19° ~ 19.5°时,籽粒破损率达到最低值。

3.5 参数优化与试验验证

根据响应面试验结果,以获得最大苞叶剥净率,最小籽粒脱落率、破损率为优化目标,结合试验因素的约束条件,对回归模型进行多目标优化求解。目标函数和约束条件为

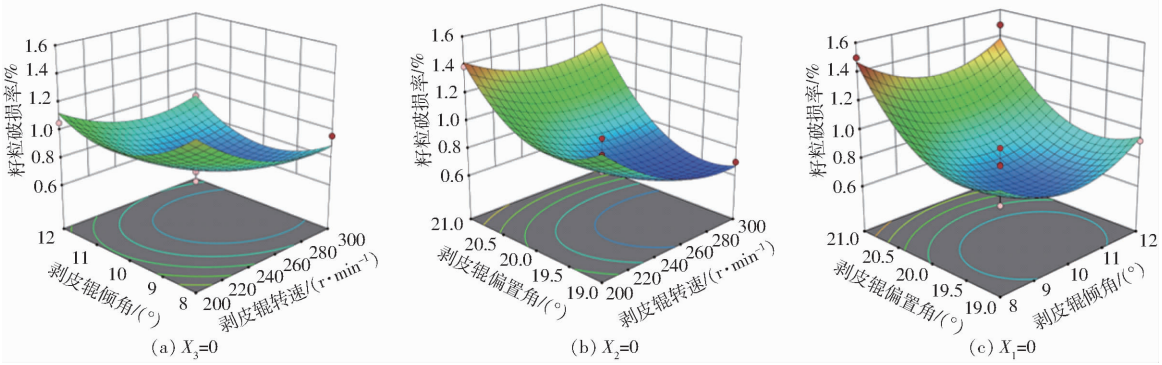


图 15 因素交互作用对籽粒破损率影响的响应曲面

Fig. 15 Response surfaces for effect of factor interactions on kernel breakage rate

$$\begin{cases} \max Y_1 \\ \min Y_2 \\ \min Y_3 \\ \text{s.t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{11}$$

通过求解可得移动式制种玉米剥皮机的最佳工作参数组合为：剥皮辊转速 265.57 r/min、剥皮辊倾角 10.06°、剥皮辊偏置角 19.76°。该条件下苞叶剥净率预测值为 95.33%，籽粒脱落率预测值为 1.471%，籽粒破损率预测值为 0.661%。

根据实际试验情况将移动式制种玉米剥皮机的工作参数修正为剥皮辊转速 266 r/min、剥皮辊倾角 10°、剥皮辊偏置角 20°，并在此工况下进行重复试验验证，结果如表 7 所示。试验所得苞叶剥净率平均值为 94.22%，比预测值低 1.11 个百分点；籽粒脱落率平均值为 1.511%，比预测值高 0.04 个百分点；籽粒破损率平均值为 0.675%，比预测值高 0.014 个百分点。验证试验结果与参数优化结果基本一致，验证了优化结果的可靠性。

表 7　验证试验结果

Tab.7　Verification experiment results　%

序号	苞叶剥净率	籽粒脱落率	籽粒破损率
1	94.00	1.515	0.675
2	95.33	1.533	0.708
3	93.33	1.487	0.643
平均值	94.22	1.511	0.675

4　结论

（1）针对制种玉米机械化剥皮采用普通玉米联合收获机作业籽粒损失大、剥皮生产线建设成本高、晾晒场剥皮装备短缺等问题，设计了一种移动式制种玉米剥皮机。整机采用移动式机架设计，喂入与剥皮部分相互独立，剥皮机主体配备全橡胶组合式剥皮辊和气固耦合筛选装置。通过理论分析与计算，确定关键部件的结构参数，保证了低损高效剥皮和快速低杂筛选。

（2）根据制种玉米剥皮过程的理论分析与实际情况，确定了影响制种玉米剥皮效果的可调工作参数为剥皮辊转速、剥皮辊倾角、剥皮辊偏置角。通过单因素试验确定了其较优工作范围分别为 200 ~ 300 r/min、8° ~ 12°、19° ~ 21°。并利用响应面法分析了各因素对剥皮性能的影响，得出试验因素对苞叶剥净率和籽粒脱落率的影响由大到小依次为剥皮辊转速、剥皮辊倾角、剥皮辊偏置角；对籽粒破损率的影响由大到小依次为剥皮辊偏置角、剥皮辊转速、剥皮辊倾角。

（3）对回归模型进行多目标优化与试验验证，得到剥皮机最佳工作参数组合为：剥皮辊转速 266 r/min、剥皮辊倾角 10°、剥皮辊偏置角 20°，该条件下的苞叶剥净率为 94.22%、籽粒脱落率为 1.511%、籽粒破损率为 0.675%，满足制种玉米的剥皮要求。验证试验结果与参数优化结果基本一致，验证了优化结果的可靠性。

参　考　文　献

[1] 唐遵峰，刘淑平，周福君，等. 制种玉米种穗收获机设计与试验[J]. 农业机械学报，2021，52(7)：102－112.
TANG Zunfeng，LIU Shuping，ZHOU Fujun，et al. Design and experiment of ear harvester for seed corn[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(7)：102－112.（in Chinese）

[2] 刘海启. 我国玉米制种产业发展现状及战略选择[J]. 中国农业资源与区划，2015，36(1)：9－14.
LIU Haiqi. Current situation of the development of maize seed industry in China and the strategic choice[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning，2015，36(1)：9－14.（in Chinese）

[3] 刘磊，刘理汉，杜岳峰，等. 基于 TRIZ 理论的种子玉米剥皮机构设计与试验[J]. 农业机械学报，2022，53(9)：131－141.
LIU Lei，LIU Lihan，DU Yuefeng，et al. Design and experiment of seed corn peeling mechanism based on TRIZ theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2022，53(9)：131－141.（in Chinese）

[4] 杜岳峰，贺诗，毛恩荣，等. 基于知识工程的玉米果穗剥皮装置设计[J]. 农业机械学报，2020，51(增刊 2)：249－260.
DU Yuefeng，HE Shi，MAO Enrong，et al. Design of corn ear peeling device based on knowledge-based engineering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(Supp.2)：249－260.（in Chinese）

[5] 陈俊志，史瑞杰，戴飞，等. 制种玉米与剥皮机构互作过程仿真与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(4)：91－100.
CHEN Junzhi，SHI Ruijie，DAI Fei，et al. Simulation and experiment on interaction process between seed corn and corn husking mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(4)：91－100.（in Chinese）

[6] PISHGAR-KOMLEH S H，KEYHANI A，MOSTOFI-SARKARI M R，et al. Assessment and determination of seed corn combine harvesting losses and energy consumption[J]. Elixir Agriculture，2013，54：12631－12637.

[7] 赵一鸣，戴飞，史瑞杰，等. 自走式制种玉米联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(5)：121－134.
ZHAO Yiming，DAI Fei，SHI Ruijie，et al. Design and experiment of self-propelled seed corn combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(5)：121－134.（in Chinese）

[8] YANG F，DU Y F，FU Q F，et al. Design and testing of seed maize ear peeling roller based on Hertz theory[J]. Biosystems

Engineering, 2021, 202:165 – 178.
[9] 陈志, 郝付平, 王锋德, 等. 中国玉米收获技术与装备发展研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12):44 – 50.
CHEN Zhi, HAO Fuping, WANG Fengde, et al. Development of technology and equipment of corn harvester in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12):44 – 50. (in Chinese)
[10] 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)
[11] 陈志. 玉米全价值收获关键技术与装备[M]. 北京:科学出版社, 2014.
[12] 李振晔. 玉米果穗收获机低损高净剥皮关键技术与智能识别研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
LI Zhenye. Research on key technologies and intelligent recognition for low-damaged-high-stripping peeling of corn ear harvester[D]. Changchun: Jilin University, 2023. (in Chinese)
[13] 陈舜, 易克传, 张新伟, 等. 高低辊组合式鲜食玉米柔性剥皮装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊2): 30 – 42.
CHEN Shun, YI Kechuan, ZHANG Xinwei, et al. Design and test of longitudinal axial flow high and low roller type fresh corn flexible peeling device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp.2):30 – 42. (in Chinese)
[14] 朱旭阳. 甜糯玉米剥皮生产线关键技术研究[D]. 无锡: 江南大学, 2022.
ZHU Xuyang. Research on the key technologies of peeling production line for sweet and waxy corn[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2022. (in Chinese)
[15] 杨万忠, 张吉龙, 杨晓明, 等. 制种玉米种子机械化收获的实践与思考[J]. 中国种业, 2022(2):70 – 72.
YANG Wanzhong, ZHANG Jilong, YANG Xiaoming, et al. Practice and thinking on mechanized harvest of maize seeds for seed production[J]. China Seed Industry, 2022(2):70 – 72. (in Chinese)
[16] 崔俊伟. 玉米联合收获机剥皮装置结构及运动参数的优化设计[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2009.
CUl Junwei. Optimal design of structure and motion parameters of husking device of corm combine harvester[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2009. (in Chinese)
[17] 马健飞. 玉米剥皮装置的设计与试验研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2018.
MA Jianfei. Design and experimental study on corn peeling device[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[18] 徐丽明, 王应彪, 张东兴, 等. 玉米通用剥皮机构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊):14 – 20.
XU Liming, WANG Yingbiao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of corn universal husker mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.):14 – 20. (in Chinese)
[19] 张亮, 赵德荣, 王兴鹏, 等. 低破碎多通道玉米剥皮机关键技术研究与设计[J]. 中国种业, 2023(3):65 – 68.
ZHANG Liang, ZHAO Derong, WANG Xingpeng, et al. Research and design of key technology of low crushing multi channel corn husker[J]. China Seed Industry, 2023(3):65 – 68. (in Chinese)
[20] 陈庆文. 玉米联合收获机剥皮装置的优化设计[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2014.
CHEN Qingwen. Optimal design of husking device of corn combine harvester[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2014. (in Chinese)
[21] 赵玉强, 何晓鹏, 师建芳, 等. 鲜食玉米剥皮机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2):114 – 118.
ZHAO Yuqiang, HE Xiaopeng, SHI Jianfang, et al. Design and experiment of sweet and waxy corn husker[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2):114 – 118. (in Chinese)
[22] JB/T 11907—2014 玉米剥皮机[S]. 2014.
[23] 朱忠祥, 岳小微, 杜岳峰, 等. 玉米果穗剥皮的运动仿真与高速摄像试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6):42 – 48.
ZHU Zhongxiang, YUE Xiaowei, DU Yuefeng, et al. Motion simulation and high-speed camera experiment of husking of corn ears[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6):42 – 48. (in Chinese)
[24] 刘磊, 杜岳峰, 栗晓宇, 等. 基于离散元法的种子玉米剥皮过程籽粒损失分析与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊2):28 – 38.
LIU Lei, DU Yuefeng, LI Xiaoyu, et al. Analysis and experiment of grain loss in husking process of seed maize based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.2):28 – 38. (in Chinese)
[25] 王功亮, 姜洋, 李伟振, 等. 基于响应面法的玉米秸秆成型工艺优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 223 – 227.
WANG Gongliang, JIANG Yang, LI Weizhen, et al. Process optimization of corn stover compression molding experiments based on response surface method[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(13):223 – 227. (in Chinese)
[26] 丁力, 杨丽, 张东兴, 等. 基于 DEM – CFD 的玉米气吸式排种器种盘设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5):50 – 60.
DING Li, YANG Li, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of seed plate of corn air suction seed metering device based on DEM – CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5):50 – 60. (in Chinese)