

对辊式干辣椒脱帽装置设计与试验

王方艳 李凤刚 张鹏程 张良龙 王红提

(青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109)

摘要: 针对辣椒机械化脱帽存在的辣椒损伤大、辣椒蒂去除不净等问题,结合辣椒物理力学特性及机械化加工要求,设计了一种对辊式干辣椒脱帽装置。该装置关键部件包括滚筒、脱帽辊和筛网3部分,采用旋转滚筒和回转辊轴的方式实现辣椒脱帽。通过对脱帽装置工作过程分析,确定了去除辣椒蒂的临界条件。借助辣椒受力及运动特征研究,确定了滚筒及脱帽辊的关键参数。滚筒直径为1.8 m、长度为6.0 m、转速为28.83 r/min,脱帽辊的直径为36.0 mm、间隙为0.5 mm、转速为134.21 r/min。通过对筛面利用系数分析,确定了筛分效率较高的方形筛网,且筛面利用系数为60.5%。通过Design-Expert 12软件进行试验设计及数据处理,明确了滚筒转速、脱帽辊转速对损伤率、脱净率的影响规律,并确定了较优参数组合,为辣椒机械化加工技术及装备研发提供理论依据。试验结果表明,该装置损伤率为0.6%,脱净率为98.8%,符合行业标准且满足辣椒机械加工要求。

关键词: 干辣椒; 对辊式; 脱帽辊; 筛网

中图分类号: S226.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)07-0191-09

OSID:



Design and Experiment of Double Roller Dried Pepper Pedicel Removal Device

WANG Fangyan LI Fenggang ZHANG Pengcheng ZHANG Lianglong WANG Hongti

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

Abstract: Aiming at the problems such as big damage to pepper and unclean removal of pepper pedicel that exist in the mechanised pedicel removal of pepper, the design of a double roller dried pepper pedicel removal device was introduced, taking into consideration of the physical and mechanical properties of pepper and the requirements of mechanized processing. The key components of the device included three parts: drum, pedicel removal roller and screen mesh, using rotating drum and rotating roller to achieve pepper pedicel removal. The process and working principle of the pedicel removal mechanism were thoroughly analyzed to determine the critical conditions for pedicel removal of pepper. Through parameter design and mechanical analysis, optimal specifications were determined. The roller's diameter was set at 1.8 m, with a length of 6.0 m and a rotational speed of 28.83 r/min. The pedicel removal roller, on the other hand, had a diameter of 36.0 mm, a clearance of 0.5 mm, and a rotational speed of 134.21 r/min. A square screen with high screening efficiency was selected based on its screen surface utilization factor, which was determined to be 60.5%. Through the Design-Expert 12 software for experimental design and data processing, the influence of drum speed and pedicel removal roller speed on the damage rate and cleaning rate was clarified, and the optimal parameter combinations were determined to provide theoretical basis for the research and development of pepper mechanized processing technology and equipment. Subsequent pepper pedicel removal tests were conducted, and the results demonstrated that under the test conditions, the device achieved a damage rate of 0.6% and a cleaning rate of 98.8%. These results met industry standards and fulfilled the requirements for pepper processing.

Key words: dried pepper; double roller mode; pedicel removal roller; screen mesh

收稿日期: 2023-11-13 修回日期: 2024-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52275258)、泰山学者青年专家项目、青岛农业大学特色产业技术服务团队项目(QAU2022QY009)和山东省重点研发计划项目(2019GNC106056)

作者简介: 王方艳(1979—),女,教授,博士,主要从事农业装备设计及理论研究,E-mail: wfy_66@163.com

通信作者: 王红提(1988—),女,讲师,博士,主要从事现代农业装备研究,E-mail: lntizi59@163.com

0 引言

干辣椒是我国重要的调味品,产量位居世界第3位,是辣椒素、辣椒粉、辣椒酱等产品的主要来源,具有较高的产品附加值^[1-3]。随着辣椒产业链的快速发展,仅去除辣椒柄已不能满辣椒初加工的要求。干辣椒加工前的脱帽工作,即去除辣椒柄和辣椒蒂,主要依靠人工完成,存在劳动强度大、工作效率低、加工成本高等问题^[4-12]。因此,急需研制一种性能稳定、低损高效的干辣椒脱帽设备,以满足辣椒产业的快速发展。

当前,干辣椒初加工设备,主要集中于干辣椒的除柄装备^[13],无法将辣椒蒂和辣椒柄与辣椒果实分离。如青岛璐璐农业装备有限公司研发的自动辣椒除柄机能够高效实现辣椒柄的去除^[14],但处理后的辣椒仍然会有辣椒蒂及2~4 mm的辣椒柄残留。山东农业大学廖永强^[15]研制的差速式干辣椒摘果机能够实现辣椒果实与茎秆的分离,并且具有清选功能,但分离后的辣椒果实仍存在辣椒柄和辣椒蒂。国外辣椒采摘机器自动化程度高,可一次实现辣椒采摘、梳土、清选、收集等作业^[16],但辣椒脱帽工作仍需人工完成。随着干辣椒加工行业的快速发展,急需设计一种辣椒脱帽装置。本文结合干辣椒加工要求,提出旋转滚筒+回转辊轴的脱帽方式,以一次性实现辣椒柄及辣椒蒂去除。

1 整机结构与工作原理

对辊式干辣椒脱帽装置由三相异步电机提供动力,采用旋转滚筒与回转辊轴的脱帽方式,主要由脱帽辊、滚筒、交流电机、机架、滚动支撑轮、电磁刷、圆形滑轨等组成。整个滚筒由两台功率为3.5 kW电机(以下简称滚筒电机)驱动。多根脱帽辊布置在滚筒外围,且每8根脱帽辊为一组,每组由一台功率为0.75 kW电机(以下简称脱帽辊电机)提供动力。滚筒借助2组圆形滑轨和4个支撑轮立于机架上。滚筒轴线与水平面有倾角,保证辣椒在滚筒内翻转、前行。整机结构如图1所示。

工作时,干辣椒由送料装置匀速运送至脱帽装置的滚筒内,滚筒在滚筒电机的带动下转动,同时在脱帽辊电机的带动下,每对由齿轮啮合的脱帽辊做对转。此时滚筒内的辣椒随着滚筒的转动而翻转、流动。在离心力和重力等的综合作用下,较重的辣椒柄一端会竖直向下钻进布满孔洞的筛孔内,并卡在里面。固定在滚筒外围的脱帽辊高速旋转,旋向外的一对脱帽辊会对漏出滚筒外壁的辣椒柄产生向外的拉拔力,将辣椒柄及辣椒蒂从固定在滚筒内

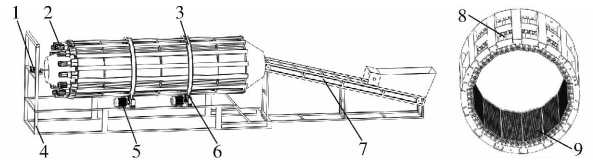


图1 对辊式干辣椒脱帽装置结构示意图

Fig.1 Schematic of double roller dried pepper pedicel removal device

1. 电磁刷 2. 脱帽辊电机 3. 圆形滑轨 4. 机架 5. 滚筒电机
6. 滚动支撑轮 7. 送料装置 8. 脱帽辊 9. 筛网

部的果实上脱离。通过拉拔的方式将辣椒柄及辣椒蒂去除,实现辣椒的脱帽工作。脱帽后的辣椒在重力的作用下,重新回到滚筒内壁,并沿着滚筒内壁移动,实现最终的收拢作业。在整个脱帽过程中,各个机构相互配合,并在各个电机的带动下完成干辣椒的脱帽作业。辊式干辣椒脱帽装置具体参数如表1所示。

表1 技术参数

Tab.1 Technical parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(m×m×m)	6.5×2.0×2.5
滚筒转速/(r·min ⁻¹)	28.83
脱帽辊转速/(r·min ⁻¹)	134.21
滚筒电机输出功率/kW	3.5
脱帽辊电机输出功率/kW	0.75
工作效率/(kg·h ⁻¹)	120
机具质量/kg	3 556

2 关键部件设计

2.1 滚筒结构及参数

滚筒由筛网、滑轨等组成。滚筒外侧装有两组圆形滑轨,借助4个支撑轮的转动,实现回转运动。滚筒的直径及转速影响辣椒柄钻进筛网的比率及效果。滚筒的长度决定辣椒脱帽的生产效率。

2.1.1 滚筒直径

滚筒直径 D 是对辊式干辣椒脱帽装置的重要设计参数,与工作效率及效果密切相关。参照JEFFREY等^[17]的滚筒设计经验,确定滚筒直径满足关系式

$$D = \left(\frac{0.1886Q_m}{d_v FK_v g^{0.5} \tan \delta} \right)^{0.4} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad K_v = \begin{cases} 1.35 & (\delta = 3^\circ) \\ 1.85 & (\delta = 5^\circ) \end{cases} \quad (2)$$

式中 Q_m ——脱帽生产效率,kg/h

δ ——滚筒倾角,(°)

K_v ——旋转速度修正系数

d_v ——容积密度,kg/m³

F ——填充系数

g ——重力加速度, m/s^2

根据生产需要,设定脱帽生产效率 Q_m 为 110 kg/h 。通过试验,测定辣椒容积密度 d_b 为 64.06 kg/m^3 。为了防止辣椒出现堆积、拥堵情况,取滚筒倾角 δ 为 3° ,实现辣椒在滚筒内沿轴线方向运动。根据经验,取旋转速度修正系数 K_v 为 1.35 、填充系数 F 为 0.33 。由式(1)计算得滚筒直径 $D \approx 1.8 \text{ m}$ 。

2.1.2 滚筒长度

在滚筒参数设计中,滚筒长度经验公式为^[17]

$$L = 0.113TD^{0.5}g^{0.5}K_v \tan\delta \quad (3)$$

式中 L ——滚筒长度, m

T ——脱帽时间, s

为了保证辣椒柄顺利插入筛孔内,通常辣椒在滚筒内的停留时间为 $180 \sim 300 \text{ s}$ 。将 $T = 180 \text{ s}$ 、 $D = 1.8 \text{ m}$ 、 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 、 $K_v = 1.35$ 、 $\delta = 3^\circ$ 代入公式(3),确定滚筒长度 $L = 6.04 \text{ m}$ 。一般,滚筒长度为直径的 $2 \sim 6$ 倍。为了运输方便及安装空间,取滚筒长度为 6.0 m 。

2.1.3 滚筒转速

辣椒在滚筒内存在滑动、抛动和离心 3 种状态^[18-19]。在滑动状态下,由于辣椒与钢板之间的摩擦因数较小,辣椒会大量堆积在滚筒底部,起不到辣椒脱帽的效果;在离心状态下,辣椒会紧贴滚筒内壁,辣椒柄不易进入孔洞;在抛动状态下,辣椒会在离心力及重力的作用下沿滚筒内壁爬升至一定高度后被抛落到滚筒底部,并插进筛网孔内。因此,为实现辣椒快速脱帽,需控制滚筒转速,使辣椒始终保持抛动状态。当滚筒顺时针转动时,辣椒会分布在滚筒 $A \rightarrow B \rightarrow C$ 区域内,如图 2 所示。以辣椒为研究对象,分析其在筛网内部的受力及运动状态。

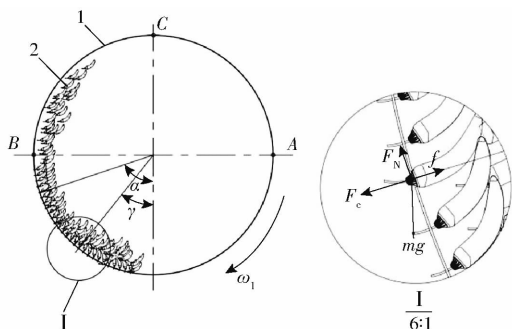


图 2 滚筒内辣椒受力分析

Fig. 2 Force analysis diagram of pepper in roller

1. 筛网 2. 辣椒

为使辣椒在滚筒内实现充分的翻转、筛选动作,辣椒与圆心的连线和垂直中心线之间的夹角 α 需要小于 180° ^[20]。当 α 等于 180° 时,辣椒位于滚筒

的最高处,在临界状态下辣椒所受重力与离心力大小相等方向相反,当辣椒所受重力大于离心力时会使辣椒落回滚筒底部^[21],此时有

$$mg > m\omega_1^2 R \quad (4)$$

式中 m ——辣椒质量, kg

R ——滚筒半径, m

ω_1 ——滚筒角速度, rad/s

得

$$\omega_1 < \sqrt{g/R} \quad (5)$$

由图 2 可知,当辣椒柄穿过筛孔时,辣椒受力满足

$$\begin{cases} mgs\sin\gamma - F_N = 0 \\ mg\cos\gamma + F_c > f \\ f = \mu F_N \\ F_c = m\omega_1^2 R \end{cases} \quad (6)$$

式中 γ ——辣椒柄插入筛孔区域角, rad , 取 $0 \sim \frac{\pi}{2}$

F_c ——滚筒对辣椒的离心力, N

μ ——辣椒与滚筒间的摩擦因数

f ——筛孔对辣椒柄的摩擦力, N

F_N ——筛孔对辣椒柄的支撑力, N

由公式(6)求得

$$\omega_1 > \sqrt{\frac{g(\mu\sin\gamma - \cos\gamma)}{R}} \quad (7)$$

将 $\mu = 0.45$ 、 $R = 0.9 \text{ m}$ 代入公式(7)得

$$\omega_1 > \sqrt{\frac{g\sqrt{481}\sin(\gamma - 65.8)}{18}} \quad (8)$$

由公式(8)可知,在 γ 的有效取值范围内,当 $\gamma = \frac{\pi}{2}$ 时,滚筒角速度 ω_1 取得最大值,将 $\gamma = \frac{\pi}{2}$ 代入公式(7)得到 $\omega_1 > 2.21 \text{ rad/s}$,将 $R = 0.9 \text{ m}$ 、 $\mu = 0.45$ 代入公式(5)、(6)求得滚筒最大角速度为 3.30 rad/s 。因此,对辊式干辣椒脱帽装置滚筒角速度范围为: $2.21 \text{ rad/s} < \omega_1 < 3.30 \text{ rad/s}$,转换为转速为: $21.10 \text{ r/min} < n_1 < 31.51 \text{ r/min}$ 。

2.2 脱帽辊结构及参数

脱帽辊是对辊式干辣椒脱帽装置的核心部件,通过对向旋转实现辣椒脱帽。脱帽辊的结构参数主要包括脱帽辊安装距离 s (脱帽辊表面到筛网的距离)、脱帽辊回转半径 r_1 、脱帽辊间隙 e 、脱帽辊螺旋角 β 等,如图 3 所示。

2.2.1 脱帽辊半径

脱帽辊半径 r_1 主要受辣椒柄长度的影响。脱帽辊半径过大,不利于辣椒柄拉拔;脱帽辊半径过小,不便于脱帽辊加工和刚度要求。由脱帽辊安装距离 s ,确定脱帽辊半径 r_1 满足

$$r_1 < l - s \quad (9)$$

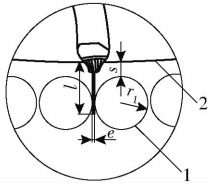


图3 脱帽辊参数示意图

Fig. 3 Schematic of pedicel removal roller

1. 脱帽辊 2. 滚筒筛

式中 l ——最小果柄长度, mm

通过前期试验得新疆红龙板椒、子弹头辣椒、皱皮椒及七星椒的最小果柄长度范围为 24.90 ~ 31.30 mm, 为保证所有辣椒柄均能被脱帽辊夹住并去除, 确定脱帽辊安装距离 s 为 2.0 mm, 得脱帽辊半径 r_1 为 18.0 mm。

2.2.2 脱帽辊螺旋角、脱帽辊间隙单因素试验

辣椒柄进入筛网孔后, 受到脱帽辊的提拉力。通过预试验发现, 辣椒柄在受到倾斜力时更容易从辣椒蒂处脱落。为探究脱帽辊螺旋角 β 、脱帽辊间隙 e 对辣椒脱帽性能的影响, 以脱净率、损伤率为试验指标, 进行脱帽辊性能的单因素试验。选取脱帽辊螺旋角的因素水平为 25°、35°、45°、55°、65°, 脱帽辊间隙的因素水平为 0.1、0.3、0.5、0.8、1.0 mm。试验结果如图 4 所示。

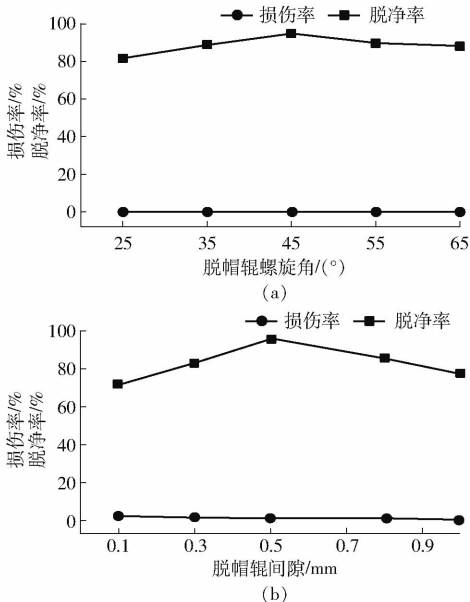


图4 单因素试验结果

Fig. 4 Single factor test results

由图 4a 可知, 当脱帽辊间隙一定时, 随脱帽辊螺旋角增大, 脱净率先增大后减小, 脱帽辊螺旋角为 45° 时, 脱净率最高, 为 95.0%, 而脱帽辊螺旋角对损伤率的影响较小。由图 4b 可知, 当脱帽辊螺旋角一定时, 随脱帽辊间隙增大, 脱净率先增大后减小, 脱帽辊间隙为 0.5 mm 时, 脱净率最高, 为 96.0%,

而脱帽辊间隙对损伤率的影响较小。因此在满足脱净率的条件下选取脱帽辊螺旋角 β 为 45°, 脱帽辊间隙 e 为 0.5 mm。

2.2.3 脱帽辊转速

在电机带动下, 脱帽辊将辣椒柄提拉, 并从辣椒蒂与辣椒果实的结合点 M 处断裂。点 M 受到拉应力和弯应力。辣椒受力及坐标系如图 5 所示。

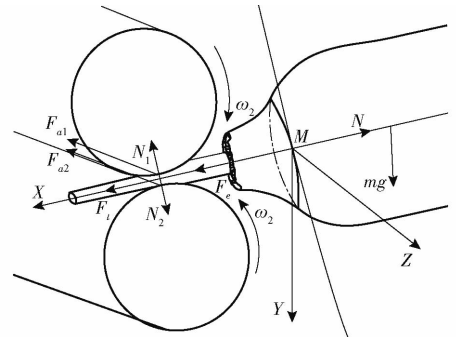


图5 辣椒脱帽过程受力分析

Fig. 5 Force analysis of pepper pedicel removal

图中 N_1 、 N_2 为脱帽辊对辣椒柄的压紧力, N; N 为滚筒筛对辣椒果实的支撑力, N; ω_2 为脱帽辊角速度, rad/s。

由于辣椒柄直径较小、辣椒质量小, 忽略摩擦力 F_t 和辣椒重力对点 M 的矩, 则辣椒柄受到的拉应力为

$$\sigma_t = \frac{F}{A} = \frac{2F_t + m\omega_1^2 R}{\pi r_2^2} \quad (10)$$

式中 A ——辣椒蒂与辣椒果实结合处横截面积, m^2

F ——辣椒柄所受拉力, N

r_2 ——辣椒蒂与辣椒果实结合面半径, m

σ_t ——辣椒柄受到的拉应力, Pa

辣椒柄受到的最大弯曲应力满足

$$\begin{cases} \sigma_m = \frac{M_{\max}}{W_z} \\ M_{\max} = 2(s + r_1) F_{a1} \\ F_{a1} = F_{a2} \\ F_{a1} = F_t \tan \beta \\ W_z = \frac{\pi (2r_2)^3}{32} \end{cases} \quad (11)$$

式中 σ_m ——辣椒柄的最大弯曲应力, Pa

M_{\max} ——辣椒柄所受到的最大弯矩, N·m

W_z ——辣椒蒂与辣椒果实结合面处的抗弯截面系数

F_{a1} 、 F_{a2} ——脱帽辊对辣椒柄的轴向拉力, N

由公式 (11) 求得辣椒柄的最大弯曲应力为

$$\sigma_m = \frac{8(s + r_1) \tan \beta F_t}{\pi r_2} \quad (12)$$

由脱帽辊功率

$$P = F_t v = 2F_t \pi n_2 r_1 \quad (13)$$

式中 P ——脱帽辊电机功率, W
 v ——脱帽辊线速度, m/min
 n_2 ——脱帽辊转速, r/min

$$\text{得} \quad F_t = \frac{P}{2\pi n_2 r_1} \quad (14)$$

分别将 $\omega_1 = 3.30 \text{ rad/s}$ 、 $R = 0.9 \text{ m}$ 、 $r_1 = 0.018 \text{ m}$ 、 $P = 750 \text{ W}$ 、 $s = 0.002 \text{ m}$ 、 $\beta = 45^\circ$ 代入公式(10)、(12)得辣椒柄脱落临界条件为

$$\sigma_t = \frac{7.5 \times 10^5 + 176.418 m n_2 \pi}{18 n_2 \pi^2 r_2^2} \geq [\sigma_t] \quad (15)$$

$$\text{或} \quad \sigma_m = \frac{10^4}{3 n_2 \pi^2 r_2^3} \geq [\sigma_m] \quad (16)$$

式中 $[\sigma_t]$ ——辣椒柄脱落时极限拉应力, MPa

$[\sigma_m]$ ——辣椒柄脱落时极限弯曲应力, MPa

通过前期试验测得辣椒平均质量 m 为 0.00564 kg , 辣椒蒂与辣椒果结合面半径 r_2 为 0.0051 m , 辣椒柄脱落时极限拉应力 $[\sigma_t]$ 为 1.02 MPa 、辣椒柄脱落时极限弯曲应力 $[\sigma_m]$ 为 3.67 MPa , 由公式(15)、(16)求得脱帽辊转速 $n_2 \leq 159.26 \text{ r/min}$ 。

2.3 筛网结构及参数

对辊式干辣椒脱帽装置的脱帽效果很大程度上取决于筛网的形状、排列方式、尺寸等。在农业物料筛分中常见的筛网类型主要有栅格筛、冲孔筛及编织筛^[22]。其中栅格筛较重,加工工艺较为复杂;编织网刚度较小且容易变形。因此,选用厚度为 2 mm 的冲孔筛。冲孔筛的常见筛孔形状主要有方形孔、圆形孔、三角孔及长圆孔。筛孔采用同向交错的排列方式,可提高筛面利用率。

为保证辣椒果顺利卡在筛孔中且不被脱帽辊拔出,筛孔的尺寸规格由辣椒果直径决定。以新疆红龙板椒为例,通过试验测得新疆红龙板椒的辣椒果直径在 $16 \sim 21 \text{ mm}$ 之间,确定方形孔边长为 14 mm 、圆形孔直径为 14 mm ;对于三角孔(等边三角形),其内切圆直径设计为 14 mm ,求得三角形边长为 $14\sqrt{3} \text{ mm}$;长圆孔其长度取 16 mm ,宽度取 14 mm 。其他品种辣椒可根据自身物理特性重新调整筛孔尺寸。为保证整个筛网结构的强度与刚度,筛孔间隙 j 取 4 mm 。

在实际工作中,辣椒柄进入筛孔机率与筛面利用系数 k_d 有关。筛面利用系数越高,辣椒柄进入筛孔的机会越大,越有利于辣椒的脱帽。筛面利用系数 k_d 为

$$k_d = \frac{a}{hd} \times 100\% \quad (17)$$

式中 d ——横向孔距, mm

h ——纵向孔距, mm

a ——筛孔面积, mm^2

通过公式(17)计算得到方形孔、圆形孔、三角孔及长圆孔筛面利用系数 k_d 分别为 60.5% 、 47.5% 、 36.1% 、 50.5% 。采用筛面利用系数最高的方形孔作为本次设计的孔型。

3 试验

3.1 试验目的

对对辊式干辣椒脱帽装置的整机性能进行考核验证,确定对辊式干辣椒脱帽装置的设计指标是否满足要求,进一步优化和改进辣椒脱帽装置各项参数。

3.2 试验条件

2023年10月26日在胶州市青岛璐璐农业装备有限公司进行干辣椒脱帽试验。试验对象为新疆红龙板椒,根据 T/CAAMM 47—2020《辣椒除柄机》标准及加工要求,干辣椒原料含水率在 $18\% \sim 30\%$ 之间,测得试验辣椒含水率为 21.60% ,符合加工要求。辣椒柄平均长度为 31.90 mm ,辣椒果实平均直径为 18.35 mm ,单果平均质量为 5.64 g 。试验设备为对辊式干辣椒脱帽机 1 台,按照不同参数组合下的数据进行试验,并分别记录每次试验所用的时间、损伤率、脱净率等数据。按照 T/CAAMM 47—2020《辣椒除柄机》标准及加工要求,观察辣椒脱帽质量以及损伤情况,并记录脱帽辣椒总质量 M 、损伤辣椒质量 M_1 、未脱帽辣椒质量 M_2 。辣椒损伤率 y_1 、脱净率 y_2 计算式为

$$y_1 = \frac{M_1}{M} \times 100\% \quad (18)$$

$$y_2 = \frac{M - M_2}{M} \times 100\% \quad (19)$$

3.3 试验设计

根据上述分析,确定以滚筒转速 x_1 、脱帽辊转速 x_2 为试验因素,以辣椒损伤率 y_1 、脱净率 y_2 为试验指标进行样机试验^[23-25]。根据上述理论分析,考虑到现实与理想运行条件下的误差,选取辣椒脱帽装置滚筒转速范围为 $20 \sim 30 \text{ r/min}$,脱帽辊转速为 $120 \sim 150 \text{ r/min}$ 。根据 Central Composite 试验原理进行两因素三水平二次回归正交旋转组合试验设计,因素编码见表 2。

3.4 试验结果与分析

采用 Design-Expert 12 软件进行试验设计及数据处理,寻找辣椒脱帽最优的参数组合及影响规律,减少脱帽辊对辣椒的损伤,提高辣椒脱帽装置的性能及脱帽效果,具体试验结果如表 3 所示。

表2 试验因素编码
Tab.2 Test factors coding

编码	因素	
	滚筒转速 x_1 /	脱帽辊转速 x_2 /
	($r \cdot \min^{-1}$)	($r \cdot \min^{-1}$)
-1	20	120
0	25	135
1	30	150

采用 Design-Expert 12 软件对试验结果进行多元回归拟合分析,将不显著的交互作用项的回归平方及自由度并入残差项,得到损伤率及脱净率的回归二次方程

$$y_1 = 60.74 + 0.91x_1 - 1.15x_2 - 0.01x_1x_2 + 0.01x_2^2 \quad (20)$$

$$y_2 = -261.60 + 17.91x_1 + 1.93x_2 - 0.32x_1^2 - 0.01x_2^2 \quad (21)$$

对回归方程进行方差分析,结果见表4,可知回归模型 $P < 0.05$ 和失拟不显著,数学回归模型与实

表3 试验方案与结果

Tab.3 Test scheme and results

序号	因素		$y_1/\%$	$y_2/\%$
	$x_1/(r \cdot \min^{-1})$	$x_2/(r \cdot \min^{-1})$		
	1	25		
2	25	135	0.6	98.3
3	25	135	1.4	96.5
4	30	150	2.3	91.5
5	20	150	4.6	78.0
6	25	135	0.9	97.6
7	20	120	0.6	84.0
8	30	120	0.7	98.0
9	25	135	0.8	96.0
10	25	135	0.8	98.7
11	32	135	0.7	93.1
12	18	135	1.5	68.90
13	25	156	6.2	89.1

际工作情况拟合精度高,可用于滚筒转速及脱帽辊转速的参数优化分析。

表4 方差分析

Tab.4 Analysis of variance

来源	损伤率					脱净率				
	平方和	自由度	均方	F	P	平方和	自由度	均方	F	P
模型	35.63	5	7.13	41.67	<0.000 1	1013.48	5	202.70	122.51	<0.000 1
x_1	1.39	1	1.39	8.11	0.024 8	476.23	1	476.23	287.84	<0.000 1
x_2	22.37	1	22.37	130.82	<0.000 1	80.45	1	80.45	48.63	0.000 2
x_1x_2	1.44	1	1.44	8.42	0.022 9	0.063	1	0.063	0.038	0.851 4
x_1^2	0.01	1	0.01	0.08	0.788 3	453.32	1	453.32	273.99	<0.000 1
x_2^2	10.33	1	10.33	60.42	0.000 1	21.24	1	21.24	12.84	0.008 9
残差	1.20	7	0.17			11.58	7	1.65		
失拟项	0.84	3	0.28	3.10	0.151 5	6.27	3	2.09	1.58	0.327 2
纯误差	0.36	4	0.09			5.31	4	1.33		
总和	36.82	12				1 025.06	12			

由表4可知,滚筒转速 x_1 、脱帽辊转速 x_2 对损伤率 y_1 及脱净率 y_2 影响均显著,由 F 可以看出,各因素对辣椒损伤率的影响为:脱帽辊转速大于滚筒转速,各因素对辣椒脱净率的影响为:滚筒转速大于脱帽辊转速。

采用响应面法,对评价指标影响因素进行研究^[26],各因素对辣椒脱帽装置评价指标影响的响应曲面如图6所示。由图6a可知,在试验因素范围内,辣椒损伤率随着滚筒转速的增大而缓慢增大,随着脱帽辊转速的增大而显著增大。由图6b可知,在试验因素范围内,辣椒脱净率随着滚筒转速的增大先增加后减小,随着脱帽辊转速的增大而减小。

3.5 参数优化与验证

针对辣椒脱帽装置在作业过程中存在的漏脱、少脱及辣椒损伤等问题,以辣椒损伤率、脱净率为指

标,借助 Design-Expert 12 软件的寻优功能,建立目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \min y_1(x_1, x_2) \\ \max y_2(x_1, x_2) \\ \text{s. t.} \begin{cases} 20 \text{ r/min} < x_1 < 30 \text{ r/min} \\ 120 \text{ r/min} < x_2 < 150 \text{ r/min} \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$

确定较优参数组合:辣椒脱帽装置滚筒转速为 28.83 r/min,脱帽辊转速为 134.21 r/min。圆整后,滚筒转速为 29 r/min,脱帽辊转速为 134 r/min,在此参数组合下,通过试验测定对辊式干辣椒脱帽装置的辣椒脱净率为 98.8%,损伤率为 0.6%,生产效率为 120 kg/h,约为人工脱帽效率的 11 倍;与人工脱帽效果相比,该装置的脱净率略低,损伤率略高,但各个指标都符合辣椒加工指标要求;作业过程中,对

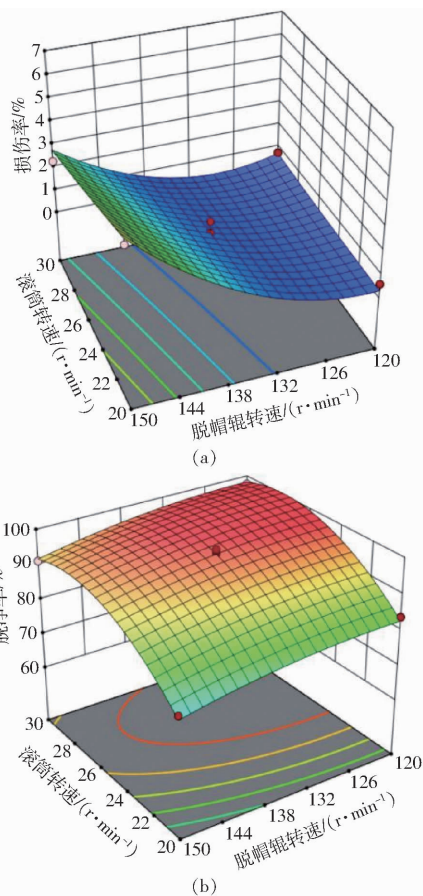


图 6 交互因素对评价指标影响的响应曲面

Fig. 6 Response surfaces for influence of interaction factors on evaluation index

辊式干辣椒脱帽装置运动灵活,对辣椒的脱帽去柄效果好,且未出现筛网堵塞问题,解决了辣椒加工行业中辣椒脱帽难的问题,工作状态及效果如图 7 所示。

4 结论

(1) 针对辣椒机械化脱帽需求,设计了一种对辊式干辣椒脱帽装置,可以完成辣椒去柄、去蒂等作业。该机器采用旋转滚筒+回转辊轴的脱帽方式,有效解决了干辣椒脱帽难、辣椒易损伤等问题。

(2) 对辊式干辣椒脱帽装置由脱帽辊、滚筒、交流电机、机架、滚动支撑轮、走线防缠绕装置、圆形滑



(a) 对辊式干辣椒脱帽装置



(b) 脱帽效果

图 7 对辊式干辣椒脱帽装置工作状态及效果图

Fig. 7 Working state and effect diagrams of double roller dried pepper pedicel removal device

轨等组成。通过辣椒受力分析,确定滚筒转速范围为 $21.10 \text{ r/min} < n_1 < 31.51 \text{ r/min}$;通过对脱帽过程中辣椒柄进行受力分析,确定脱帽辊转速范围为 $n_2 \leq 159.26 \text{ r/min}$;通过对不同筛网筛面利用系数计算,得到同向交错排列的方形孔筛面利用系数最高(60.5%)。

(3) 借助 Design-Expert 12 软件进行数据处理,得到各因素与评价指标的数学回归模型。各因素对辣椒损伤率的影响为:脱帽辊转速大于滚筒转速,滚筒转速的二次项对辣椒损伤率的影响不显著。各因素对辣椒脱净率的影响为:滚筒转速大于脱帽辊转速,滚筒转速与脱帽辊转速的交互项对辣椒脱净率的影响不显著。确定了较优参数组合:滚筒转速为 28.83 r/min ,脱帽辊转速为 134.21 r/min 。在较优参数组合下进行了脱帽试验,测得辣椒损伤率为 0.6%、脱净率为 98.8%,生产效率为 120 kg/h ,符合 T/CAAMM 47—2020《辣椒除柄机》标准及加工要求。

参 考 文 献

- [1] 马振,黄勇,胡斌,等. 辣椒籽皮分离装置的设计研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(11): 89-92.
MA Zhen, HUANG Yong, HU Bin, et al. Design and analysis of pepper's seed and skin separator device [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(11): 89-92. (in Chinese)
- [2] 吉旭,唐勇,林蜀云,等. 山地履带自走式辣椒收获机底盘动力学仿真与试验[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(7): 72-80.
JI Xu, TANG Yong, LIN Shuyun, et al. Dynamic simulation and test of the tracked chassis of the mountainous self-propelled pepper harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(7): 72-80. (in Chinese)
- [3] 孙正,薛龙,何梁,等. 辣椒穴盘苗自动取投苗装置设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(7): 48-54.
SUN Zheng, XUE Long, HE Liang, et al. Design and experiments of automatic taking and throwing device for chili plug seedlings [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(7): 48-54. (in Chinese)

- [4] 胡双燕,胡敏娟,张文毅,等. 辣椒穴盘苗取苗栽植过程动力学分析与试验[J]. 中国农机化学报, 2023,44(7):40-47,54.
HU Shuangyan, HU Minjuan, ZHNAG Wenyi, et al. Dynamic analysis and experiment of seeding taking and planting process of pepper hole tray[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023,44(7):40-47,54. (in Chinese)
- [5] 邹道钟. 4JZ-3600A型辣椒收获机关键部件的设计与试验研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2021.
ZOU Daozhong. Design and experiment study on key components of type 4JZ-3600A pepper harvester[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University,2021. (in Chinese)
- [6] 刘宇,张学军,朱兴亮,等. 色素辣椒机械振动分离机理及试验研究[J]. 农机化研究, 2022,44(10):7-13.
LIU Yu, ZHANG Xuejun, ZHU Xingliang, et al. Vibration separation mechanism and experimental study of pigment of chile[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022,44(10):7-13. (in Chinese)
- [7] 袁小伟,蒋志琴,杨双平,等. 辣椒切片机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2023,44(3):82-87,116.
YUAN Xiaowei, JIANG Zhiqin, YANG Shuangping, et al. Design and experiment of pepper slicer[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023,44(3):82-87, 116. (in Chinese)
- [8] 沈晓凯,阿力木·买买提吐尔逊,李谦绪,等. 辣椒复脱装置设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2023,44(12):80-86.
SHEN Xiaokai, ALIMU·MAIMAITITUERXUN, LI Qianxu, et al. Design and experiment of pepper re-removal device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023,44(12):80-86. (in Chinese)
- [9] 邹道钟,阿力木·买买提吐尔逊,韩长杰,等. 辣椒收获机采摘台的设计与试验[J]. 农机化研究, 2022,44(8):105-109.
ZOU Daozhong, ALIMU·MAIMAITITUERXUN, HAN Changjie, et al. Design and experiment of picking table of pepper harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022,44(8):105-109. (in Chinese)
- [10] 袁小伟,杨双平,金若成,等. 双螺旋对辊式辣椒收获装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021,37(15):1-9.
YUAN Xiaowei, YANG Shuangping, JIN Ruocheng, et al. Design and experiment of double helix pair roller pepper harvesting device[J]. Transactions of the CSAE, 2021,37(15):1-9. (in Chinese)
- [11] 苏安晋,杜婵,杜娟. 自走式辣椒收获机械研制与试验[J]. 农业工程, 2021,11(6):17-19.
SU Anjin, DU Chan, DU Juan. Development and experiment of self-propelled capsicum harvester[J]. Agricultural Engineering, 2021,11(6):17-19. (in Chinese)
- [12] 李鹏斌,颜华,王品隆,等. 移栽机小株距栽植机构杆件优化与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(增刊2):72-78.
LI Pengbin, YAN Hua, WANG Pinlong, et al. Optimization and test of small plant spacing planting mechanism rod for transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(Supp.2):72-78. (in Chinese)
- [13] 徐明芬. 带除尘降噪的辣椒除柄机:202110903814.6[P]. 2023-08-22.
- [14] 李璐璐,李志敏,孙传祝. 滚筒式辣椒除柄机改进设计[J]. 农机化研究, 2020,42(11):103-107.
LI Lulu, LI Zhimin, SUN Chuanzhu. Improved design of drum type pepper handle remover[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020,42(11):103-107. (in Chinese)
- [15] 廖永强. 对辊差速式干辣椒摘果机的设计与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2023.
LIAO Yongqiang. Design and test of differential dry pepper picking picker with double roller[D]. Taian: Shandong Agricultural University,2023. (in Chinese)
- [16] LEHNERT C, MCCOOL C, SA I, et al. Performance improvements of a sweet pepper harvesting robot in protected cropping environments[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(7): 1197-1223.
- [17] JEFFREY W S, RODFERS M H, JAMES F S. The place of the trommel in resource recovery[C]//National Waste Processing Conference, United States,1992.
- [18] 蔡玉良,杨学权,丁晓龙,等. 滚筒筛内物料运动过程的分析[J]. 水泥工程, 2010(2):5-8.
CAI Yuliang, YANG Xuequan, DING Xiaolong, et al. Analysis of the material's movement in rotating sieve[J]. Cement Engineering, 2010(2):5-8. (in Chinese)
- [19] 盛金良,高君. 垃圾滚筒筛参数设计[J]. 建筑机械化, 2004(3):62-63.
SHENG Jinliang, GAO Jun. Parameter design of rotating sieve for disposing of garbage[J]. Construction Mechanization, 2004(3):62-63. (in Chinese)
- [20] 万星宇,舒彩霞,徐阳,等. 油菜联合收获机分离清选差速圆筒筛设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018,34(14):27-35.
WAN Xingyu, SHU Caixia, XU Yang, et al. Design and experiment on cylinder sieve with different rotational speed in cleaning system for rape combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(14):27-35. (in Chinese)
- [21] 胡永光,李建钢,陆海燕,等. 等直径滚筒式茶鲜叶分级机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2015,46(增刊):116-121.
HU Yongguang, LI Jian'gang, LU Haiyan, et al. Design and experiment of equant-diameter roller screening machine for fresh tea leaves[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(Supp.):116-121. (in Chinese)
- [22] 张胜伟,张瑞雨,曹庆秋,等. 油莎豆收获机双层滚筒筛式果杂分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023,54(3):148-157.
ZHANG Shengwei, ZHANG Ruiyu, CAO Qingqiu, et al. Design and experiment of double-deck roller sieve type fruit impurity separation device for tiger nut harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(3):148-157. (in Chinese)
- [23] 王方艳,张振宇,张钦,等. 甜菜收获机齿板式切顶装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020,51(11):168-175.
WANG Fangyan, ZHANG Zhengyu, ZHANG Qin, et al. Design optimization and experiment of tooth-plate topping device of sugar beet harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(11):168-175. (in Chinese)

Chinese)

- [24] 陈桂斌,董超,张立,等.对辊挤压式砂姜黑土整地机设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(3):50-59.
CHEN Guibin,DONG Chao,ZHANG Li,et al. Design and experiment of Shajiang black soil preparation machine with double pressing roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(3):50-59. (in Chinese)
- [25] 杨然兵,田光博,尚书旗,等.马铃薯收获机辊组式薯土分离装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(2):107-118.
YANG Ranbing,TIAN Guangbo,SHANG Shuqi,et al. Design and experiment of roller group type potato soil separator for potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(2):107-118. (in Chinese)
- [26] 侯加林,张二鹏,张康博,等.基于DEM-MFBD的辣椒移栽机取投苗装置设计与试验[J].农业机械学报,2023,54(12):46-57,87.
HOU Jialin,ZHANG Erpeng,ZHANG Kangbo,et al. Optimization design and test of seedling picking and throwing device of plug seeding transplanter based on DEM-MFBD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(12):46-57,87. (in Chinese)

(上接第190页)

- [20] 李金川,郑毅敏,尚欣,等.基于Mathematica的宝塔菜收获机二阶平面铲倾角的优化设计[J].干旱地区农业研究,2017,35(2):282-288.
LI Jinchuan,ZHEN Yimin,SHANG Xin,et al. Optimization of the angle of artichoke harvester's second-order flat shovel based on mathematica[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017,35(2):282-288. (in Chinese)
- [21] 殷彦强,尹健,罗雨戈,等.山地鱼腥草联合收获机挖掘机构设计及试验[J].机械设计与制造,2021(6):236-239.
YIN Yanqiang,YIN Jian,LUO Yuge,et al. Design and test of digging mechanism of *Houttuynia cordata* combine harvester for hilly fields[J]. Machinery Design & Manufacture, 2021(6):236-239. (in Chinese)
- [22] 程一启,张兆国,张丹,等.三七收获机组合式挖掘铲减阻效果研究——基于EDEM[J].农机化研究,2019,41(2):55-60.
CHENG Yiqi,ZHANG Zhaoguo,ZHANG Dan,et al. Research of resistance reduction effect of *Panax notoginseng* harvest combined digging shovel—based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019,41(2):55-60. (in Chinese)
- [23] 樊昱.基于离散元法的马铃薯挖掘机理研究及仿生铲设计[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.
FAN Yu. Research on potato digging mechanism based on discrete element method and design of bionic shovel[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [24] 张智泓,甘帅汇,左国标,等.以砂鱼鳃头为原型的仿生深松铲尖设计与离散元仿真[J].农业机械学报,2021,52(9):33-42.
ZHANG Zhihong,GAN Shuaihui,ZUO Guobiao,et al. Bionic design and performance experiment of sandfish head inspired subsoiler tine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(9):33-42. (in Chinese)
- [25] 乔屹涛.铲式挖掘部件仿生设计及减阻脱附性能研究[D].太原:太原理工大学,2022.
QIAO Yitao. Research on bionic design of shovel excavation components and its performance of drag reduction and desorption [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [26] 于庆旭,刘燕,陈小兵,等.基于离散元的三七种子仿真参数标定与试验[J].农业机械学报,2020,51(2):123-132.
YU Qingxu,LIU Yan,CHEN Xiaobing,et al. Calibration and experiment of simulation parameters for *Panax notoginseng* seeds based on DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(2):123-132. (in Chinese)
- [27] 刘彩玲,王亚丽,宋建农,等.基于三维激光扫描的水稻种子离散元建模及试验[J].农业工程学报,2016,32(15):294-300.
LIU Cailing,WANG Yali,SONG Jiannong,et al. Experiment and discrete element model of rice seed based on 3D laser scanning[J]. Transactions of the CSAE, 2016,32(15):294-300. (in Chinese)
- [28] 张兆国,薛浩田,王一驰,等.基于离散元法的三七仿生挖掘铲设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(5):100-111.
ZHANG Zhaoguo,XUE Haotian,WANG Yichi,et al. Design and experiment of *Panax notoginseng* bionic excavating shovel based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(5):100-111. (in Chinese)
- [29] 曾繁地,李旭英,李祥,等.基于高速摄影技术穴盘苗抛投运动试验与分析[J].中国农业大学学报,2021,26(9):168-176.
ZENG Fandi,LI Xuying,LI Xiang,et al. Experiment and analysis of high-speed photographic techniques for throwing motion of seedlings[J]. Journal of China Agricultural University, 2021,26(9):168-176. (in Chinese)
- [30] 王法安,温博,谢晓红,等.三七收获机输送分离装置作业机理分析与参数优化[J].农业机械学报,2023,54(增刊1):201-211,259.
WANG Faan,WEN Bo,XIE Xiaohong,et al. Operation mechanism analysis and parameter optimization of conveying and separating device of *Panax notoginseng* harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(Suppl.1):201-211,259. (in Chinese)