

青核桃脱皮机理及装置设计与试验

Analysis of green walnut peeling mechanism and device design and experiment

李 康¹ 李长河¹ 刘明政¹ 王乐意¹ 范林政¹

LI Kang¹ LI Changhe¹ LIU Mingzheng¹ WANG Leyi¹ FAN Linzheng¹

叶祥瑞¹ 王子文¹ 王仁坤¹ 曹成茂² 邬健康³

YE Xiangrui¹ WANG Ziwen¹ WANG Renkun¹ CAO Chengmao² WU Jiankang³

(1. 青岛理工大学机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520; 2. 安徽农业大学工学院,

安徽 合肥 230036; 3. 山东五康轩现代农林发展有限公司, 山东 邹城 273500)

(1. School of Mechanical and Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China; 2. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China; 3. Shandong Wukangxuan Modern Agriculture and Forestry Development Co., Ltd., Zoucheng, Shandong 273500, China)

摘要:目的:提高核桃初加工过程的机械化水平,解决青核桃脱皮过程中脱净率低、破碎率高等问题。方法:设计一种集刮削挤压、滚刷和清洗于一体的青核桃脱皮装置;对青核桃脱皮过程进行力学与运动学分析,结合理论力学理论建立青核桃空间受力模型,并对关键系统装置进行结构设计。在单因素试验基础上,以转速、对辊末端间距和中心距的取值范围为影响因素,利用 Design-Expert 13 进行三因素三水平试验,优化青核桃脱皮装置工作参数。结果:青核桃脱皮装置的最佳工作参数为转速 64.54 r/min、对辊末端间距 41.7 mm、中心距 9.44 mm,此条件下的核桃脱净率为 91.92%,破碎率为 4.49%。结论:该脱皮装置能满足青核桃脱皮生产要求。

关键词:青核桃;脱皮装置;刮削挤压;力学分析;脱净率

Abstract: Objective: To improve the mechanization of the initial processing of walnuts, and to solve the problems such as low stripping rate and high crushing rate in the process of green walnut peeling. Methods: A green walnut peeling device was designed which was integrated scraping and squeezing, rolling and cleaning. The mechanical and kinematic analysis of the peeling process of green walnuts, was made to establish a spatial force model of green walnuts combined with theoretical

mechanics theory, and the key structural of system devices was designed. Based on the single-factor test, a three-factor, three-level orthogonal test was conducted with Design-Expert 13 to optimize the working parameters of the green pecan peeling device by taking the speed, the range of the spacing between the end of the rollers and the center distance as the influencing factors. Results: The optimal operating parameters of the green walnut peeling device were: rotational speed 64.54 r/min, distance between the ends of the rollers 41.7 mm, and center distance 9.44 mm. Under this condition the debarking rate was 91.92% and the crushing rate was 4.49%. Conclusion: The peeling device can meet the requirements of green walnut peeling production.

Keywords: green walnuts; peeling device; scraping and squeezing; mechanical analysis; debarking rate

核桃是中国主要的林产品之一,作为药食两用的生物资源具有较高的营养价值和经济价值^[1]。青核桃脱皮是核桃采摘后的重要工序,传统的脱皮方法主要包括人工法^[2]和堆沤法^[3],效率低成本高,且因核桃采后产量规模大、加工周期短的限制,传统的方法已不能满足现有核桃初加工行业的需求^[4]。

根据机械与物料之间的力学与运动学特性,目前果蔬去皮的主要方法分为刮削切割去皮法^[5-7]、水射流去皮法^[8]和摩擦挤压去皮法^[9-10]。而有关去皮脱皮问题的研究,需确定物料与装置接触时的受力特性,郑甲红等^[11]模拟了青核桃脱皮过程中的受力情况,确定了青核桃的

基金项目:国家自然科学基金(编号:52105264,51475002)

作者简介:李康,男,青岛理工大学在读硕士研究生。

通信作者:李长河(1966—),男,青岛理工大学教授,博士生导师,博士。E-mail: sy_lichanghe@163.com

收稿日期:2023-02-12

改回日期:2023-06-25

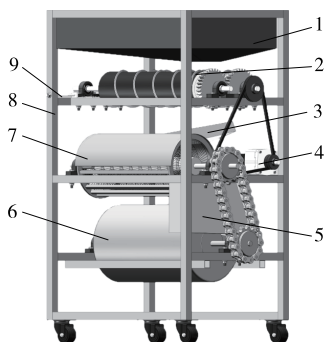
体积并不是影响去脱皮效果的决定因素;朱占江等^[12]通过压缩试验探究了各因素对青皮破裂力的影响,在挤压时可将青皮看作各向同性材料;连文香等^[13]通过碰撞仿真分析了橡胶辊转速对青核桃脱皮的影响;杨忠强等^[14-15]设计了间隙和角度调节机构,实现了青核桃挤压从大到小,减小了破碎率。然而,上述装置存在核桃与青皮分离不彻底、工作过程不连续等问题。同时,青核桃在脱皮过程中会有少量纤维与大量汁液附着在核桃硬壳表面,不及时清洗将对核桃造成污染而降低核桃品质^[16]。

研究拟基于青皮脱除机理分析,确定脱皮装置的结构参数和影响因素,设计一种集刮削挤压、滚刷和清洗于一体的青核桃脱皮装置,并通过正交试验对装置性能进行实验验证,以期促进脱皮装置的机械化进程。

1 青核桃脱皮装置结构与工作原理

1.1 青核桃脱皮装置结构

青核桃脱皮装置主要包括料斗、对辊刮削挤压机构、动力装置、机架、滚刷机构和清洗机构(见图 1)。对辊刮削机构由两个螺旋橡胶辊组成,做相对旋转运动;滚刷机构由螺旋钢丝刷与栅条筒组成;清洗机构由清洗筒和螺旋清洗装置组成。装置整体长 760 mm,宽 560 mm,高 1 200 mm。



1. 料斗 2. 对辊刮削挤压机构 3. 第一落料板 4. 动力装置
5. 第二落料板 6. 清洗机构 7. 滚刷机构 8. 机架 9. 间隙调节机构

图 1 青核桃脱皮装置

Figure 1 Green walnut peeling device

1.2 工作原理

脱皮装置工作时,核桃由料斗下料口进入对辊刮削挤压机构,在螺旋刀片的切割作用与对辊的挤压摩擦作用下青皮剥落[图 2(a)],青皮与核桃混合物经落料板进入滚刷机构一端,在螺旋钢丝刷与栅条作用下核桃壳上残留的青皮与纤维在摩擦力作用下脱落,青皮经栅条之间的间隙落下[图 2(b)],核桃经螺旋运输至清洗机构,在螺旋清洗装置与高压水的作用下翻滚、摩擦,洗净后从出料口排出[图 2(c)],完成整个脱皮工序。

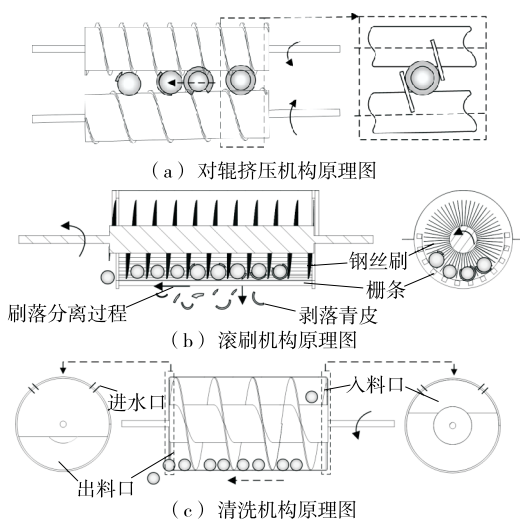


图 2 主要机构工作原理图

Figure 2 Main mechanism working principle diagram

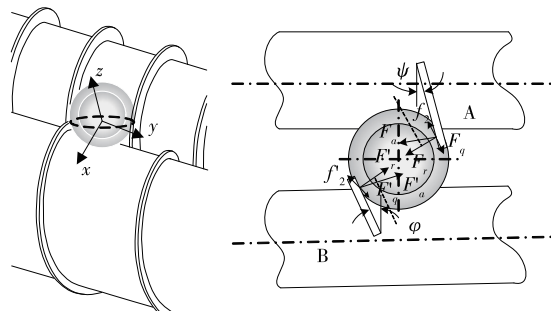
2 青皮脱除机理

2.1 青核桃刮削挤压受力分析

单个青核桃受力情况如图 3 所示,青核桃在刮削挤压机构中受力翻滚,橡胶螺旋辊上的螺旋刀片切入青皮,青皮在挤压切割作用下出现裂口,在橡胶辊面旋转作用下,青皮受到摩擦力而脱落。

如图 3(b)所示,在 $x-y$ 面内,分析螺旋刀片对青核桃脱皮过程的作用,当 A、B 两螺旋刀片切入青皮瞬间,由静力学分析有

$$\begin{cases} F_r = F_a \cos \psi \\ F'_r = F'_a \cos \varphi \end{cases} \quad (1)$$



(a) 青核桃脱皮位置 (b) 螺旋刀片对青核桃作用力

(c) 辊面对青核桃作用力

图 3 青核桃受力分析图

Figure 3 Schematic diagram of the force on green walnut

式中:

F_a, F'_a ——螺旋刀片 A、B 对青核桃的破裂力, N;

F_r, F'_r —— F_a, F'_a 指向青核桃中心的分力, N;

ϕ ——螺旋辊上螺旋刀片 A 的升角, °;

φ ——螺旋辊上螺旋刀片 B 的升角, °。

核桃青皮可看作各向同性材料, 当外部载荷超过壳体承载范围时, 青皮发生破裂^[17-18], 材料破裂时强度极限为

$$P_{cr} = \frac{2E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{\Delta r}{r} \right)^2, \quad (2)$$

式中:

P_{cr} ——青皮破裂强度极限, Pa;

E ——青皮弹性模量, GPa;

ν ——青皮泊松比;

Δr ——青皮平均厚度, mm;

r ——青核桃半径, mm。

朱占江等^[12]研究表明, 青皮破裂具有方向性, 且青皮无明显屈服强度。根据破碎理论, 物料破裂的能耗 W 与其体积 V 及强度极限 P_{cr} 成正比^[19], 则

$$W = \frac{P_{cr}^2}{2E} \cdot V. \quad (3)$$

联立式(2)、式(3)可得青皮破裂能耗(W_I):

$$W_I = \frac{8\pi E \Delta r^4}{9r(1-\nu^2)}. \quad (4)$$

当青皮破裂时, 破裂力 F_a, F'_a 急剧减小, 故假设物料半径减小量为青皮平均厚度 Δr , 此时

$$W_{II} = \frac{8E}{9(1-\nu^2)} \left(\frac{\Delta r}{r} \right)^4 [r^3 - (r-\Delta r)^3]. \quad (5)$$

螺旋刀片所做的功(W_{III})应大于等于青皮全部破裂所需能量(W_{II}), 即 $W_{III} \geq W_{II}$ 。青皮破裂后为避免核桃壳体破裂, 需满足青皮破裂能量小于壳体破裂能量(W_{IV}):

$$\begin{cases} W_{III} = (F_r + F'_r) \Delta r = (F_r \omega_1 \sin \phi + F'_r \omega_2 \sin \varphi) R t \\ W_{IV} = \frac{8\pi E_1 h^4}{9(r-\Delta r)(1-\nu_1^2)} \\ W_{II} \leq W_{III} < W_{IV} \end{cases}, \quad (6)$$

式中:

E_1 ——核桃壳弹性模量, Pa;

h ——核桃壳厚度, mm;

ν_1 ——核桃壳泊松比;

R ——螺旋辊半径, mm;

ω_1, ω_2 ——螺旋辊转速, r/min。

联立式(1)、式(5)、式(6)可得

$$\frac{8E}{9(1-\nu^2)} \left(\frac{\Delta r}{r} \right)^4 [r^3 - (r-\Delta r)^3] \leq (F_r \omega_1 \sin \phi + F'_r \omega_2 \sin \varphi) R t < \frac{8\pi E_1 h^4}{9(r-\Delta r)(1-\nu_1^2)}. \quad (7)$$

根据式(7)可知, 青皮破裂能量与螺旋辊转速 ω_1 和 ω_2 、螺旋升角 ϕ 和 φ 、螺旋辊半径 R 有关。

如图 3(c) 所示, 在 $x-z$ 面内, 分析橡胶辊面转动对青核桃脱皮过程的作用, 根据静力学分析可知

$$\cos \alpha = \frac{2R+l}{2(R+r)}, \quad (8)$$

$$2N \sin \alpha = G_0, \quad (9)$$

$$N = \frac{G_0}{2\sqrt{1 - \left[\frac{2R+l}{2(R+r)} \right]^2}}, \quad (10)$$

$$f_1 = \frac{\mu G_0}{2\sqrt{1 - \left[\frac{2R+l}{2(R+r)} \right]^2}}, \quad (11)$$

式中:

R ——橡胶辊半径, mm;

r ——青核桃半径, mm;

l ——对辊间距, mm;

α ——青核桃与橡胶辊中心连线与水平线夹角, °;

N ——橡胶辊对青核桃支持力, N;

μ ——青核桃与橡胶辊表面摩擦因数。

由式(11)可知, 青皮摩擦剥落过程与橡胶辊半径 R 、青核桃半径 r 、对辊间距 l 和摩擦因数 μ 有关。

青核桃近似为球形^[20], 通过试验观察与分析, 螺旋刀片与橡胶辊面对青核桃的作用位置处于同一圆面内且平行于青核桃最大截面, 以此圆面中心为 O 点, 建立空间直角坐标系 $O-xyz$ 如图 4 所示。

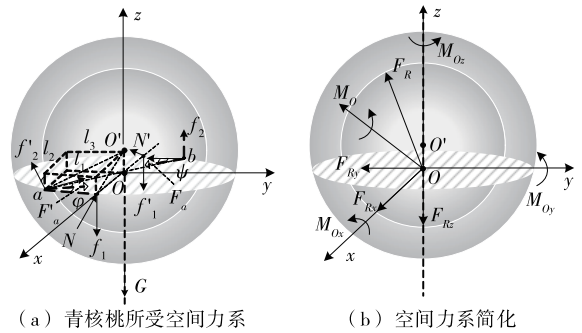


图 4 青核桃空间受力图

Figure 4 Schematic diagram of the spatial forces on green walnut

将空间任意力系向 O 点简化, 可得一力 F_R 与一力偶 M_O 。

$$\begin{cases} F_R = \sum F_x i + \sum F_y j + \sum F_z k \\ M_O = \sum M_i \end{cases}, \quad (12)$$

将此力和力偶矩矢向三坐标轴分解, 得:

$$\begin{cases} F_{Rx} = \sum F_{xi} = F_a \cos\psi \sin\varphi - F'_a \cos\varphi \sin\varphi - f_2 \cos\psi \sin\varphi + f'_2 \cos\varphi \sin\varphi \\ F_{Ry} = \sum F_{yi} = -F_a \cos^2\psi + F'_a \cos^2\varphi + f_2 \cos\psi \sin\varphi - f'_2 \cos\varphi \sin\varphi \\ F_{Rz} = \sum F_{zi} = f_2 \cos^2\psi + f'_2 \cos^2\varphi + 2N \sin\alpha - (f_1 + f'_1) \cos\alpha - G \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} M_{Ox} = (F_a \cos\psi \sin\varphi - F'_a \cos\varphi \sin\varphi) l_3 + (f_2 \cos^2\psi - f'_2 \cos^2\varphi) l_3 \\ M_{Oy} = (F_a \cos\psi \sin\varphi - F'_a \cos\varphi \sin\varphi) l_2 + (f_2 \cos^2\psi - f'_2 \cos^2\varphi) l_2 \\ M_{Oz} = (F_a \cos^2\psi + F'_a \cos^2\varphi) l_2 \end{cases} \quad (14)$$

式中:

F_{Rx} ——侧向挤压力, N;

F_{Ry} ——有效推进力, N;

F_{Rz} ——有效挤入力, N;

M_{Ox} ——扭转力矩, N·m;

M_{Oy} ——滚转力矩, N·m;

M_{Oz} ——偏转力矩, N·m;

l_2, l_3 ——矢径。

由式(13)、式(14)可知,核桃青皮在螺旋刀片与橡胶辊面的空间力系作用下出现裂纹并剥落,其合力在各坐标轴的分力和力矩主要与螺旋辊螺旋刀片参数有关,因此对辊间距的改变,各力系的作用面位置发生改变,从而引起青核桃的运动状态与青皮剥落效果改变。当间距等于物料的直径时,橡胶辊面不再对物料产生作用,为适应青核桃尺寸不一的特性,将对辊间距设置为前端固定末端可调。因此,对辊末端间距是影响脱皮性能的主要因素。

2.2 青核桃在滚刷机构的受力分析

脱皮装置工作时,核桃、青皮与未脱净核桃混合物在滚刷机构中的钢丝刷和栅条的共同作用下,核桃沿钢丝刷螺旋方向滚动,青皮从栅条间隙脱出。由于钢丝刷呈螺旋分布,青核桃的尺寸大于钢丝刷与栅条之间的距离,核桃与未脱净的核桃沿螺旋切线方向滚动的同时向前输送。核桃脱净过程受力分析如图 5 所示。

核桃表面残留的青皮与核桃壳体粘结在一起,而鲜

核桃缝合线结合力较小,一般在缝合线处首先出现裂纹^[21-22]。为取得较好的分离效果,需满足以下受力关系:

$$\begin{cases} F_{cr} > F_1 > F \\ F_{cr} > F_2 > F \\ f_2 > F_p \\ f_3 > F_p \\ \sum F_x \geq 0 \\ \sum F_y = 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} G_1 \sin\theta_1 + f_3 \cos\theta_3 + F_3 \sin\theta_3 + F_1 \sin\theta_1 \geq \\ F_2 \cos\theta_2 + f_2 \\ F_2 \sin\theta_2 + f_3 \sin\theta_3 = G_1 \cos\theta_1 + (F_1 + F_3) \cos\theta_3 \\ F_3 = \frac{G_1}{g} \omega^2 l_4 \end{cases} \quad (16)$$

式中:

F_1 ——钢丝刷对核桃挤压力, N;

F_2 ——栅条对核桃挤压力, N;

f_2 ——栅条作用于核桃的摩擦力, N;

f_3 ——钢丝刷作用于核桃的摩擦力, N;

F ——青皮破裂的挤压力, N;

F_{cr} ——核桃壳破裂临界力, N;

G_1 ——核桃重力, N;

F_3 ——钢丝刷对核桃的离心力, N;

θ_1 ——重力与 y 轴夹角, °;

θ_2 ——栅条对核桃挤压力 F_2 与 x 轴夹角, °;

θ_3 ——y 轴与核桃中心和钢丝刷旋转中心连线的夹角, °;

l_4 ——钢丝刷与核桃接触位置长度, mm;

ω ——钢丝刷转速, r/min。

由式(16)可知,影响滚刷机构脱青皮性能的因素有钢丝刷转速 ω 、钢丝刷与核桃接触位置长度 l_4 和角度 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 , 其中 l_4 和角度 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 均与钢丝刷和滚筒的中心距有关,当转速一定、中心距增大时,钢丝刷对核桃的离心力增大,从而提高脱净率,但当中心距过大时,部分尺寸较小的核桃与钢丝刷接触范围减小,核桃受栅条挤压与碰撞效果减弱,因而脱净率降低。

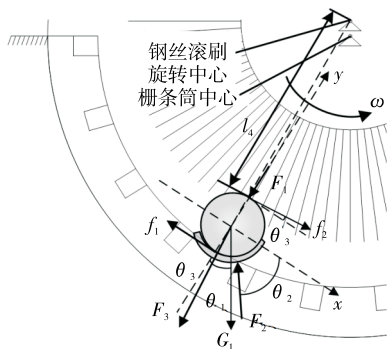


图 5 青核桃在滚刷机构中的受力分析

Figure 5 Force analysis of green walnut in the rolling brush mechanism

3 关键系统装置设计

3.1 对辊刮削挤压机构

如图 6 所示,对辊刮削挤压机构是青核桃脱皮装置的核心工作部件,主要由橡胶螺旋辊 A、B 和间距调节机构组成,其结构参数会影响青核桃脱皮效果。橡胶螺旋辊 A、B 分别通过轴承座安装在机架上,通过齿轮传动两辊做相对旋转运动。橡胶螺旋辊 B 末端设有间距调节机构,在机架上设有槽口,槽口长度为 150 mm,通过旋紧或放松螺母控制丝杠带动轴承座移动来调整 A、B 末端距离,以适应不同大小的青核桃。

对辊刮削机构的结构参数包括橡胶螺旋辊直径 $2R$ 、螺旋刀片 A 直径 l_5 、螺旋刀片 B 直径 l_6 、轴心距 d 、对辊末端间距 $l = d - 2R$ 、螺旋刀片 A 的升角 ψ 及螺旋刀片 B 的升角 φ 。根据式(12),对辊末端间距 l 与橡胶辊直径相比较小,可忽略。为获得较大的摩擦力,提高剥净率,青核桃半径与橡胶辊半径比值 r/R 应尽量取小,当青核桃半径一定时,橡胶辊半径越小,摩擦力越大。青核桃短径在 42~50 mm,脱皮后核桃的周径为 31~40 mm^[23]。根据文献[24],竹笋剥皮辊的直径为 50~60 mm,而核桃周径较竹笋直径大,故橡胶螺旋辊直径确定为 120 mm,螺旋刀片升角 ψ 、 φ 分别为 15° 、 22° 。对辊末端间距需满足脱除青皮后的核桃通过对辊的摩擦作用落入下一机构,同时提供合适的夹持空间,确定初始间距为 30 mm。

对辊刮削挤压机构需满足以下几何关系:

$$\begin{cases} r_1 \leq d - 2R \leq 2r \\ 2r < S_1 < S_2 \\ a_2 < a_1 \leq b \end{cases}, \quad (17)$$

式中:

r_1 ——核桃周径,mm;

S_1 ——螺旋刀片 A 螺距,mm;

S_2 ——螺旋刀片 B 螺距,mm;

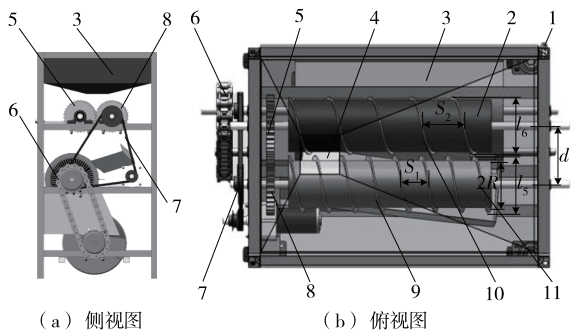


图 6 刮削挤压机构结构图

Figure 6 Scraping and extrusion mechanism

a_1 ——螺旋刀片 A 高度,mm;

a_2 ——螺旋刀片 B 高度,mm;

b ——青皮厚度,mm。

3.2 滚刷机构

如图 7 所示,滚刷机构主要由螺旋钢丝刷、盖板和栅条组成。经刮削挤压机构的青皮与核桃混合物经第一落料板从进料口进入滚刷机构,在螺旋钢丝刷与栅条的作用下,青皮从栅条间隙落入收集器,核桃不断翻滚,最后从出料口经第二落料板进入下一步清洗工序。

滚刷机构的主要结构参数包括螺旋钢丝刷旋转中心与栅条筒中心距 l_7 、栅条间隙 l_8 、栅条筒内径 l_9 和螺旋钢丝刷直径 l_{10} 。根据文献[25],国内三七分离滚筒直径为 234 mm,核桃青皮厚度与三七剪口直径类似,故确定栅条筒内径为 220 mm,螺旋钢丝刷直径为 200 mm。根据核桃青皮碎块外表面光滑内表面粗糙的特点,当栅条间隙大于青皮厚度且小于核桃最小直径时,可实现青皮与核桃的分离,栅条间隙确定为 20 mm。通过青核桃在滚刷机构中受力分析可知,螺旋钢丝刷旋转中心与栅条筒中心距对核桃脱净率产生影响,通过分析与试验,确定初始中心距 0 mm,同时通过增减厚度为 2 mm 的垫片数量调节中心距大小。

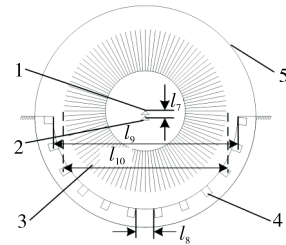


图 7 滚刷机构

Figure 7 Roller mechanism

4 实验验证

4.1 试验条件与评价指标

4.1.1 试验条件 以青核桃为试验对象,产地为山东省邹城市,于 9 月中旬采收,经实际观察青皮表面无裂口。

4.1.2 评价指标 根据 JB/T 12027—2014,试验完成后,以脱净率 y_1 和破碎率 y_2 作为装置性能评价指标,按式(18)进行计算。

$$\begin{cases} y_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \times 100\% \\ y_2 = \frac{m_3}{m} \times 100\% \end{cases}, \quad (18)$$

式中:

y_1 ——脱净率,%;

- m_1 ——完全脱皮的核桃质量, g;
 m_2 ——存在青皮残留的核桃质量, g;
 y_2 ——破碎率, %;
 m ——总质量, g。

4.2 单因素试验

4.2.1 试验设计 以螺旋橡胶辊转速、对辊末端间距与中心距作为试验因素,以脱净率和破碎率作为试验评价指标进行单因素试验,根据 GB/T 20398—2021 检验方法统计未脱净果与破碎果,对脱净率与破碎率进行计算,同时对装置进行清理、调整,若出现损伤但是脱净的核桃,同时计入脱净率与破碎率中。

4.2.2 结果与分析 由图 8(a)可知,随着转速的增加,脱净率整体呈先缓慢增长后缓慢下降趋势,表明随着转速

增加,青核桃在工作区动能增大,其受对辊挤压力与螺旋剪切力增大,从而增加了青皮的剥落;当转速过快时,部分体积较小的青核桃受挤压产生裂纹后仅经过 1~2 次螺旋剪切作用直接从对辊机构缝隙掉落,导致青皮未完全脱落。脱净率变化系数在 2% 以内,说明转速对破碎率影响不大。因此,选取转速为 50~80 r/min。

由图 8(b)可知,脱净率随对辊末端间距的增加先增加后减小,在间距为 40 mm 左右出现峰值;破碎率呈逐渐减小趋势,在对辊末端间距超过 45 mm 后急剧降低,同时脱净率也呈减小趋势,表明对辊末端间距过小时核桃更容易破碎。随着对辊末端间距的增加,青核桃与对辊的接触角度发生变化,当变化至某一值时,青核桃受双辊的挤压力与剪切力达到最大,青皮剥落更加充分;当对辊末端间距过大时,青核桃受挤压力与螺旋剪切作用效果减弱,脱净率与破碎率同时降低。因此,选取对辊末端间距为 35~45 mm。

由图 8(c)可知,随着中心距的增加,脱净率先缓慢增加后减小;破碎率呈上下波动,变化系数在 2% 以内,表明青核桃受栅条的摩擦力与钢丝刷的挤压力变化趋势与脱净率变化趋势一致,同时中心距变化对破碎率的影响不大。因此,选取中心距为 0~20 mm。

4.3 正交试验设计

在单因素试验基础上,以核桃脱青皮装置的转速、对辊末端间距和中心距为因素,采用 Design-Expert 13 软件的 Box-Behnken 响应法进行试验设计,分别建立评价指标脱净率 y_1 、破碎率 y_2 与各因素之间的数学模型,并进行显著性检验与交互影响分析。各因素水平见表 1,试验设计及结果见表 2。

4.4 试验结果与分析

4.4.1 回归模型与分析 对试验结果进行多元回归拟合分析与方差分析(表 3),得到青核桃脱净率 y_1 和破碎率 y_2 的二次多项式回归模型为:

$$y_1 = 92.64 + 0.83x_1 - 0.83x_2 - 1.17x_3 - 1.30x_1x_2 + 1.13x_1x_3 - 0.91x_2x_3 - 1.60x_1^2 - 4.30x_2^2 - 2.36x_3^2, \quad (19)$$

$$y_2 = 5.18 + 0.13x_1 - 2.28x_2 - 0.64x_3 + 0.51x_1x_2 + 0.56x_1x_3 - 0.03x_2x_3 + 0.80x_1^2 + 0.47x_2^2 - 0.08x_3^2. \quad (20)$$

真实值的二次多项式回归模型为:

表 1 试验因素水平

Table 1 Experimental factor levels

水平	x_1 转速/ (r · min ⁻¹)	x_2 对辊末端 间距/mm	x_3 中心距/mm
-1	50	35	0
0	65	40	10
1	80	45	20

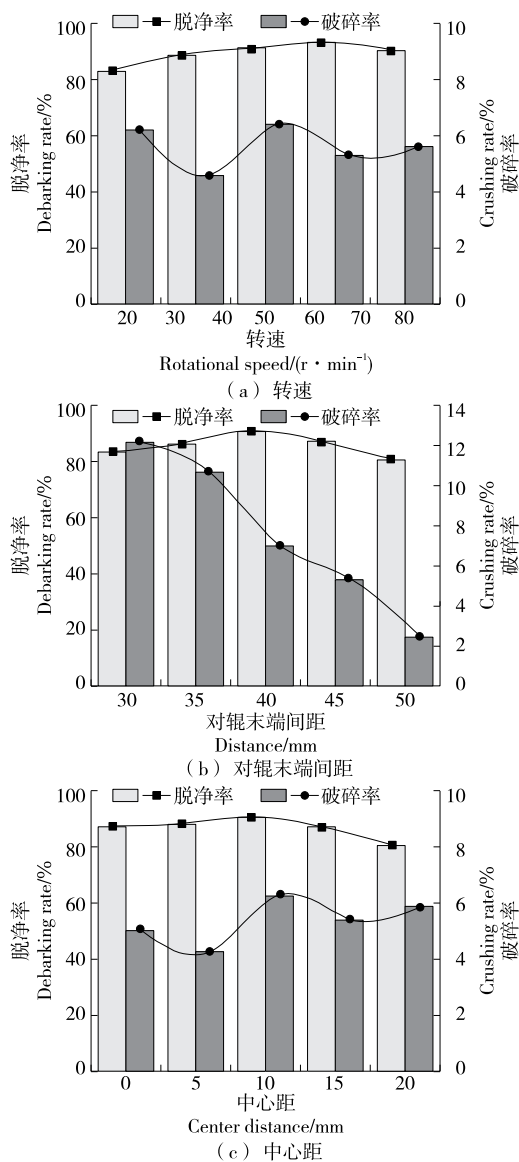


图 8 单因素试验结果

Figure 8 Single factor test results

表 2 试验设计与结果

Table 2 Arrangement and results of orthogonal tests

试验号	x_1	x_2	x_3	$y_1/\%$	$y_2/\%$
1	0	0	0	92.23	4.77
2	0	1	-1	86.37	3.72
3	0	-1	1	87.41	7.82
4	0	0	0	93.72	5.31
5	0	0	0	93.05	4.35
6	1	0	-1	89.94	6.73
7	-1	1	0	86.56	3.44
8	0	0	0	91.83	5.37
9	1	0	1	88.79	5.63
10	-1	-1	0	84.96	9.15
11	-1	0	-1	90.83	7.64
12	1	1	0	85.92	4.78
13	0	0	0	92.35	6.12
14	0	-1	-1	86.87	8.07
15	-1	0	1	85.16	4.29
16	1	-1	0	89.52	8.45
17	0	1	1	83.26	3.34

$$y_1 = -258.11 + 1.596x_1 + 14.9x_2 + 0.59x_3 - 0.017x_1x_2 + 0.007x_1x_3 - 0.018x_2x_3 - 0.007x_1^2 - 0.17x_2^2 - 0.236x_3^2, \quad (21)$$
$$y_2 = 88.42 - 0.76x_1 - 2.38x_2 - 0.30x_3 + 0.007x_1x_2 + 0.004x_1x_3 - 0.0006x_2x_3 + 0.003x_1^2 + 0.019x_2^2 + 0.0008x_3^2. \quad (22)$$

由表 3 可知,脱净率 y_1 与破碎率 y_2 的二次回归方程 P 值均 <0.01 ,失拟项 P 值均 >0.05 ,说明回归方程在 99% 的置信区间显著;同时,回归方程决定系数 R^2 分别为 0.966 4,0.933 1,说明回归方程与实际情况拟合较高。 x_3 对 y_1 的影响高度显著 ($P<0.01$),说明中心距对脱净率的影响最大,转速变化对脱净率影响最小。 x_2 对 y_2 的影响高度显著 ($P<0.01$), x_3 的影响显著,说明对辊末端间距对破碎率影响最大,中心距的次之,转速的最小。

4.4.2 交互作用分析 由图 9 可知,转速、对辊末端间距与中心距的交互作用对脱净率的影响极显著。当中心距为 10 mm 时,脱净率随对辊末端间距的增加先升高后降低,随转速的增加而增加,当对辊末端间距变化时,脱净率变化区间较大,对辊末端间距对脱净率的影响更加显著;当对辊末端间距为 40 mm 时,脱净率随转速的增加呈先增加后降低趋势,随中心距的增加呈先增加后降低趋势,当中心距变化时,脱净率变化区间较大,中心距对脱净率的影响更加显著;当转速为 65 r/min 时,脱净率随对辊末端间距的增加先增加后减小,随中心距的增加先增加后减小,当对辊末端间距变化时,脱净率区间变化较大,对辊末端间距对脱净率的影响更加显著。

由图 10 可知,转速、对辊末端间距与中心距的交互作用对破碎率的影响极显著。当中心距为 10 mm 时,破碎率随对辊末端间距的增加呈降低趋势,随转速的增加先降低后增加,当对辊末端间距变化时,破碎率变化区间较大,对辊末端间距对破碎率的影响更加显著;当对辊末端间距为 40 mm 时,破碎率随转速的增加呈先降低后增

表 3 方差分析[†]

Table 3 Analysis of variance

方差来源	y_1				y_2			
	平方和	自由度	F 值	P 值	平方和	自由度	F 值	P 值
模型	159.72	9	22.37	0.000 2***	51.05	9	10.85	0.002 4***
x_1	5.54	1	6.99	0.033 2**	0.14	1	0.27	0.617 0
x_2	5.53	1	6.97	0.033 4**	41.45	1	79.26	$<0.000 1$ ***
x_3	11.02	1	13.90	0.007 4***	3.23	1	6.17	0.042 0**
x_1x_2	6.76	1	8.52	0.022 4**	1.04	1	1.99	0.201 3
x_1x_3	5.11	1	6.44	0.033 8**	1.27	1	2.42	0.163 7
x_2x_3	3.33	1	4.20	0.079 6*	0.00	1	0.01	0.930 9
x_1^2	10.74	1	13.53	0.007 9***	2.71	1	5.19	0.056 8*
x_2^2	77.83	1	98.12	$<0.000 1$ ***	0.92	1	1.76	0.225 9
x_3^2	23.44	1	29.55	0.001 0***	0.03	1	0.06	0.815 3
残差	5.55	7			3.66	7		
失拟	3.31	3	1.97	0.261 0	1.87	3	1.39	0.368 0
误差	2.24	4			1.79	4		
总和	165.28	16			54.71	16		

[†] *** 为高度显著 ($P<0.01$); ** 为显著 ($P<0.05$); * 为极显著 ($P<0.1$)。

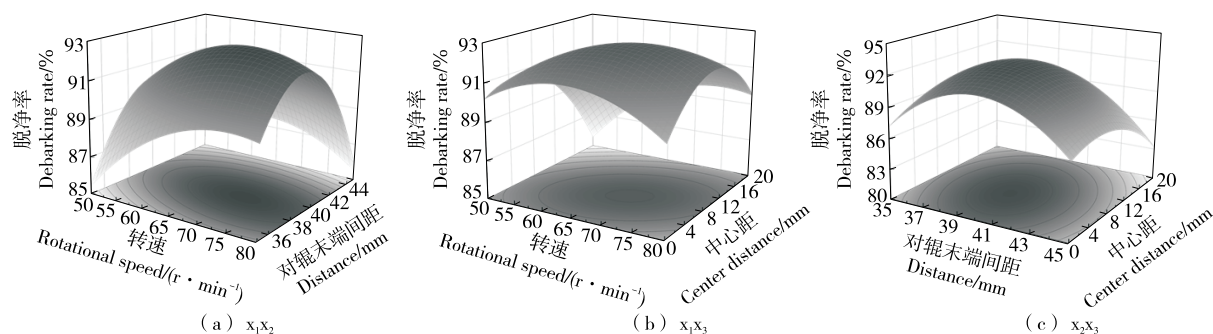


图 9 各因素对脱净率影响的响应曲面

Figure 9 Response surface of the effect of the test factors on the debarking rate

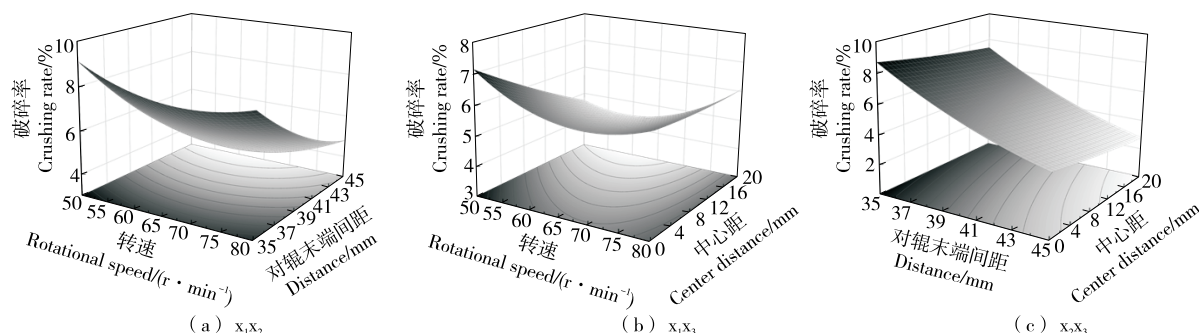


图 10 各因素对破碎率影响的响应曲面

Figure 10 Response surface of the effect of test factors on crushing rate

加趋势,随中心距的增加而降低;当转速变化时,破碎率变化区间较大,转速对破碎率的影响更加显著;当转速为 65 r/min 时,破碎率随对辊末端间距的增加而降低,随中心距的增加而降低,当对辊末端间距变化时,破碎率变化区间较大,对辊末端间距对破碎率的影响更加显著。

4.4.3 验证实验 为了确定各因素的最佳组合,根据实际工况,在脱皮性能回归模型的多目标优化解中,得到约束条件与目标函数为

$$\begin{cases} \max y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \min y_2(x_1, x_2, x_3) \\ 50 \text{ r/min} \leq x_1 \leq 80 \text{ r/min} \\ 35 \text{ mm} \leq x_2 \leq 45 \text{ mm} \\ 0 \text{ mm} \leq x_3 \leq 20 \text{ mm} \end{cases} \quad (23)$$

根据式(23),利用 Design-expert 13 软件中参数优化模块求解,得到最佳工作参数组合为转速 64.54 r/min、对辊末端间距 41.7 mm、中心距 9.44 mm,此时脱净率为 91.92%,破碎率为 4.49%。为进一步验证最佳工作参数组合的可靠性,在最佳参数组合下进行 5 次重复试验并取平均值,测得脱净率为 93.47%,破碎率为 3.35%,与理论值的误差分别为 1.55%,1.14%,说明理论值与实际值基本一致,可以用该模型优化青核桃的脱皮效果。

5 结论

研究设计了一种集刮削挤压、滚刷和清洗于一体的

青核桃脱皮装置,并结合理论力学建立了青核桃空间受力模型,得到了不同力系对脱皮的作用效果;通过螺旋刀片与橡胶辊实现了青皮的剥落,通过螺旋钢丝滚刷与栅条实现了核桃与表面残余青皮的分离。基于单因素试验,利用 Design-Expert 13 进行试验,优化得到青核桃脱皮装置的工作参数为转速 64.54 r/min、对辊末端间距 41.7 mm、中心距 9.44 mm,此条件下的脱净率为 91.92%,破碎率为 4.49%,且与理论值基本一致,满足实际生产要求。研究尚未考虑青核桃成熟度、含水率等因素,需进一步试验论证;此外,装置中对辊刮削挤压机构对不同品种的青核桃适应性有待进一步提升,可通过改善螺旋刀片的角度和表面微结构的设计予以提高。

参考文献

- [1] ZHANG H, LIU H L, ZENG Y, et al. Design and performance evaluation of a multi-point extrusion walnut cracking device[J]. Agriculture, 2022, 12(9): 1 494.
- [2] 张永成, 马佳乐, 唐玉荣, 等. 我国核桃初加工现状与分析[J]. 食品工业, 2020, 41(7): 198-202.
ZHANG Y C, MA J L, TANG Y R, et al. Status and analysis of walnut primary processing in China[J]. The Food Industry, 2020, 41(7): 198-202.
- [3] 张志宏, 王秀芝, 刘玉乐, 等. 去除核桃青皮的方法综述[J]. 科技创新与应用, 2017(10): 86.

- ZHANG Z H, WANG X Z, LIU Y L, et al. Overview of methods for removing green skin from walnuts[J]. Technology Innovation and Application, 2017(10): 86.
- [4] 杨忠强, 郭辉, 马月虹, 等. 卧式青核桃脱皮机链板输送机构的设计与有限元分析[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(3): 63-71.
- YANG Z Q, GUO H, MA Y H, et al. Design and finite element analysis of chain plate conveying mechanism of horizontal green walnut peeling machine[J]. Storage and Process, 2022, 22(3): 63-71.
- [5] 梁方, 马丽筠, 郭洲, 等. 荸荠去皮机设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 163-168.
- LIANG F, MA L J, GUO Z, et al. Design and experiment of water chestnut peeler[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(4): 163-168.
- [6] 刘明政, 李长河, 曹成茂, 等. 核桃副产物加工关键技术与装置研究现状[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(5): 55-74.
- LIU M Z, LI C H, CAO C M, et al. Research status of key technologies and devices for walnut by-products processing [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(5): 55-74.
- [7] LIU M Z, LI C H, CAO C M, et al. Walnut fruit processing equipment: academic insights and perspectives [J]. Food Engineering Reviews, 2021, 13(4): 822-857.
- [8] 徐谐庆, 丁为民, 张万里, 等. 鲜莲子去皮机设计与参数优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(1): 338-349.
- XU X Q, DING W M, ZHANG W L, et al. Design and parameter optimization of fresh lotus seeds peeling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(1): 338-349.
- [9] 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 L, LIU L H, DU Y F, 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.
- [10] 潘海兵, 王振亚, 陈红, 等. 宽皮柑橘对辊式剥皮机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 239-245.
- PAN H B, WANG Z Y, CHEN H, et al. Design and experiment on dual rollers peeling machine for satsuma mandarin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(12): 239-245.
- [11] 郑甲红, 吴东泽, 梁金生, 等. 青核桃去皮过程的受力分析[J]. 农机化研究, 2015, 37(8): 153-156.
- ZHENG J H, WU D Z, LIANG J S, et al. Green walnuts peeled stress analysis process[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(8): 153-156.
- [12] 朱占江, 杨忠强, 李源, 等. 青核桃脱皮力学特性分析[J]. 中国农业科技导报, 2017, 19(6): 83-89.
- ZHU Z J, YANG Z Q, LI Y, et al. Peeling mechanical properties analysis of green walnut[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2017, 19(6): 83-89.
- [13] 连文香, 席海亮, 杨亚联, 等. 橡胶辊不同转速对青核桃脱皮的影响分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2021, 56(4): 170-177.
- LIAN W X, XI H L, YANG Y L, et al. Influence of different rotation speed of rubber roller on peeling performance of green walnut[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2021, 56(4): 170-177.
- [14] 杨忠强, 郭辉, 马月虹, 等. 卧式青核桃脱皮机设计与性能分析[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(8): 35-42.
- YANG Z Q, GUO H, MA Y H, et al. Design and performance analysis of horizontal green walnut peeling machine[J]. Storage and Process, 2021, 21(8): 35-42.
- [15] 杨忠强, 郭辉, 马月虹. 卧式青核桃脱皮机关键部件优化与试验[J]. 食品与机械, 2021, 37(2): 139-144.
- YANG Z Q, GUO H, MA Y H. Optimization and experiment of key components of horizontal green walnut peeling machine[J]. Food & Machinery, 2021, 37(2): 139-144.
- [16] 石章成. 小型高效核桃脱青皮机设计与数值模拟[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019: 1-4.
- SHI Z C. Design and numerical simulation of a small and efficient walnut peeler[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2019: 1-4.
- [17] 刘明政, 李长河, 张彦彬, 等. 柔性带剪切挤压核桃破壳机理分析与性能试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 266-273.
- LIU M Z, LI C H, ZHANG Y B, et al. Shell crushing mechanism analysis and performance test of flexible-belt shearing extrusion for walnut[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 266-273.
- [18] 刘明政, 李长河, 张彦彬, 等. 柔性带差速挤压核桃脱壳性能试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 99-107.
- LIU M Z, LI C H, ZHANG Y B, et al. Performance test of walnut shelling using flexible-belt and differential velocity extrusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 99-107.
- [19] 陈桂斌, 王庆杰, 李问盈, 等. 对辊差速式块状有机肥破碎施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(12): 65-76.
- CHEN G B, WANG Q J, LI W Y, et al. Design and experiment of double roller differential speed crushing fertilizer device for block organic fertilizer [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 65-76.
- [20] 陈秀文, 李文彬, 白效鹏, 等. 香玲核桃青皮破裂力学特性试验研究[J/OL]. 中国油脂. (2022-09-28) [2023-02-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1099.TS.20220927.0917.004.html>.
- CHEN X W, LI W B, BAI X P, et al. Experimental study on cracking mechanical properties of xiangling walnut green peel [J/OL]. China Oils and Fats. (2022-09-28) [2023-02-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1099.TS.20220927.0917.004.html>.
- [21] XUE T T, LIU J, SHEN Y B, et al. The microstructure of the suture in the pecan endocarp [J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2017, 93(4): 441-448.

(下转第 185 页)

- WANG Y F, ZHANG J G. Application of red yeast pigment in meat products[J]. Meat Industry, 2002(12): 4-7.
- [34] 童群义. 红曲霉产生的生理活性物质研究进展[J]. 食品科学, 2003(1): 163-167.
- TONG Q Y. Progress in the study of physiologically active substances produced by *Aspergillus oryzae*[J]. Food Science, 2003(1): 163-167.
- [35] KIM C S, KIM H Y. Physicochemical properties of emulsion-type sausage added red yeast rice powder[J]. Korean Journal of Food Science and Technology, 2017, 49(4): 396-400.
- [36] IJHUI C, HYUK K J, KI K B, et al. Physicochemical properties of chicken thigh meat sausage manufactured with red yeast rice powder[J]. Korean Journal of Poultry Science, 2019, 46(1): 11-15.
- [37] 葛磊, 乔峰, 陈育红, 等. 红曲藜麦高蛋白饼干的研制[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(10): 42-45.
- GE L, QIAO F, CHEN Y H, et al. Development of red quinoa high-protein biscuits[J]. Grain and Fats, 2019, 32(10): 42-45.
- [38] 陈晶晶, 李佳根, 李兆琦, 等. 红曲米粉对香卤鲟鱼中晚期糖基终产物的影响[J]. 肉类工业, 2022(9): 19-23.
- CHEN J J, LI J G, LI Z Q, et al. Effect of red yeast rice flour on the mid-and late-stage glycosylated end products of aromatic marinated squid[J]. Meat Industry, 2022(9): 19-23.
- [39] 吴康. 红曲菌发酵半干鲟鱼研制及其风味分析[D]. 广州: 暨南大学, 2020: 3-9.
- WU K. Development and flavor analysis of red yeast fermented grass carp[D]. Guangzhou: Jinan University, 2020: 3-9.
- [40] 王乃富, 李春阳, 阎征, 等. 红曲霉发酵对鲟鱼肉糜品质和生物活性影响研究[J]. 广西农学报, 2010, 25(2): 54-57.
- WANG N F, LI C Y, YAN Z, et al. Study on the effect of red *Aspergillus* fermentation on the quality and biological activity of bighead carp minced meat[J]. Guangxi Journal of Agriculture, 2010, 25(2): 54-57.
- [41] 余之蕴, 黄宝莹, 刘海卿, 等. 牛津杯法测定食品添加剂对五种益生菌的抑菌活力[J]. 食品工业, 2016, 37(1): 171-174.
- YU Z Y, HUANG B Y, LIU H Q, et al. Determination of the antibacterial activity of food additives against five probiotic bacteria by Oxford cup method[J]. Food Industry, 2016, 37(1): 171-174.
- [42] PHETSANG H, PANPIPAT W, UNDELAND I, et al. Comparative quality and volatilomic characterisation of unwashed mince, surimi, and pH-shift-processed protein isolates from farm-raised hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* × *Clarias gariepinus*) [J]. Food Chemistry, 2021, 364: 130365.
- [43] YANG J, LU J, ZHU Q Z, et al. Isolation and characterization of a novel *Lactobacillus plantarum* MMB-07 from traditional Suanyu for *Acanthogobius hasta* fermentation[J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2021, 132(2): 161-166.
- [44] 曾雪峰, 夏文水. 湘西传统酸鱼中乳酸菌的分离及特性研究[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(12): 40-44.
- ZENG X F, XIA W S. Isolation and characterization of lactic acid bacteria from traditional sour fish in Xiangxi [J]. Food and Fermentation Industry, 2012, 38(12): 40-44.
- [45] 王华娟. 酸鱼中乳酸菌的分离鉴定及其可控发酵工艺研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2016: 3-36.
- WANG H J. Isolation and identification of lactic acid bacteria from sour fish and its controlled fermentation process [D]. Wuhan: Wuhan Light Industry University, 2016: 3-36.
- [46] 王艳婷. 戊糖片球菌 C-2-1 产细菌素的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016: 3-12.
- WANG Y T. Study on the production of bacteriocins by *Pentachybotrys* spp. C-2-1 [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016: 3-12.
- [47] WANG W X, XIA W S, GAO P, et al. Proteolysis during fermentation of Suanyu as a traditional fermented fish product of China[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20: S166-S176.
- [48] ZENG X F, XIA W S, JIANG Q X, et al. Effect of autochthonous starter cultures on microbiological and physico-chemical characteristics of Suanyu, a traditional Chinese low salt fermented fish[J]. Food Control, 2013, 33(2): 344-351.
- (上接第 97 页)
- [22] 李康, 李长河, 刘明政, 等. 多工位定向挤压鲜核桃破壳装置设计与试验[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2023, 41(3): 265-273.
- LI K, LI C H, LIU M Z, et al. Design and experiment of multi-station directional extrusion shell breaking device for fresh walnut [J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2023, 41(3): 265-273.
- [23] 石明村, 刘明政, 李长河, 等. 凸轮摇杆双向挤压核桃破壳装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 140-150.
- SHI M C, LIU M Z, LI C H, et al. Design and experiment of cam rocker bidirectional extrusion walnut shell breaking device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(1): 140-150.
- [24] 曹成茂, 刘权, 葛俊, 等. 刀削结合滚动摩擦进料竹笋剥皮机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 142-150.
- CAO C M, LIU Q, GE J, et al. Design and experiment of bamboo shoots peeling machine with rolling friction feeding based on knife-cutting method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 142-150.
- [25] 赖庆辉, 袁海阔, 胡子武, 等. 滚筒板齿式三七种苗分离装置结构设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(4): 121-129.
- LAI Q H, YUAN H K, HU Z W, et al. Design and experiment on seedling separation device of panax notoginseng seedlings based on roller zigzag mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 121-129.