

刀削结合滚动摩擦进料竹笋剥皮机设计与试验

曹成茂^{1,2} 刘 权^{1,2} 葛 俊^{1,2} 车贵族^{1,2} 张 远^{1,2} 秦 宽^{1,2}

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 210036; 2. 安徽省智能农机装备工程实验室, 合肥 210036)

摘要: 针对目前我国竹笋剥皮机械化程度低的问题,设计一种刀削结合滚动摩擦进料竹笋剥皮机。根据竹笋物理特性参数和人工剥笋原理,对竹笋剥皮过程进行力学与运动学分析,确定了影响剥皮效率、损伤率和剥净率的主要因素为刀片安装倾角、剥皮辊转速以及滚筒与剥皮辊轴心高度差,在此基础上,给出了竹笋剥皮机关键部件的设计依据。为获得样机最佳试验物料,以竹笋长度、基部直径作为试验因素进行单因素试验,确定长度为300~320 mm、基部直径为29~32 mm的竹笋作为剥皮机正交试验物料样本。利用Design-Expert软件设计三因素三水平正交试验,并结合实际工作情况确定最优参数组合,结果表明:当刀片安装倾角为30.12°、剥皮辊转速为229.18 r/min、滚筒与剥皮辊轴心高度差为15.43 mm时,笋肉损伤率为6.81%,笋皮剥净率为94.59%。在该条件下开展验证试验,得到损伤率、剥净率分别为7.10%、93.22%,与优化参数基本一致,满足剥笋要求。

关键词: 竹笋; 剥皮装置; 刀削; 滚动摩擦进料; 正交试验

中图分类号: S226.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)09-0142-09

OSID:



Design and Experiment of Bamboo Shoots Peeling Machine with Rolling Friction Feeding Based on Knife-cutting Method

CAO Chengmao^{1,2} LIU Quan^{1,2} GE Jun^{1,2} CHE Guizu^{1,2} ZHANG Yuan^{1,2} QIN Kuan^{1,2}

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 210036, China

2. Anhui Intelligent Agricultural Machinery Equipment Engineering Laboratory, Hefei 210036, China)

Abstract: A bamboo shoots peeling machine with rolling friction feeding based on knife-cutting method was designed according to the low degree of mechanization of bamboo shoots peeling in China. Based on the physical characteristic parameters of bamboo shoots and the principle of artificial bamboo shoots peeling, the force and movement analysis in the peeling process were described in detail, and the main factors affecting peeling efficiency, damage rate, no-shell rate were identified as the blade installation angle, the rotation speed of the peeling roller, the axis height difference between the roller and the peeling roller. On this basis, the design principle of the key components and the bamboo shoots peeling machine were given. In order to obtain the best experimental materials for the prototype experiment, single factor experiment was carried out with the length and base diameter of bamboo shoots as experimental factors, and the length from 300 mm to 320 mm and the base diameter from 29 mm to 32 mm were selected as orthogonal experimental materials samples for the bamboo shoots peeling machine. The Design-Expert software was used to design the orthogonal experiment and determine the optimal parameter combination of peeling quality according to the actual work situation. The results showed that when the blade installation angle was 30.12°, the rotation speed of the peeling roller was 229.18 r/min, the axis height difference between the roller and the peeling roller was 15.43 mm, the damage rate of bamboo shoots was 6.81%, and the no-shell rate was 94.59%. The verification experiment was carried out under these conditions, and the results showed that the damage rate and no-shell rate were 7.10% and 93.22%, respectively, which were basically consistent with the optimized parameters. This product can meet the requirements of bamboo shoots peeling.

Key words: bamboo shoots; peeling device; knife-cutting; rolling friction feeding; orthogonal experiment

0 引言

我国竹笋产量丰富,市场需求量日益增大,成为山区农民脱贫致富的重要途径。剥皮是竹笋加工的重要环节,传统的手工剥皮效率低,劳动强度大,严重影响笋农收入和生产积极性,制约竹笋产业体系的完善和发展。因此,研究竹笋剥皮机理并设计竹笋剥皮机械具有重要意义。

在甘蔗去皮方面,黄才贵等^[1]研制新型食用甘蔗自动去皮装置,采用旋转控制机构实现甘蔗的间歇性旋转,通过去皮执行机构配合,完成甘蔗去皮,可靠性高,有效提高甘蔗去皮效率;在玉米苞叶剥离方面,徐丽明等^[2]研制玉米通用剥皮机构,优化剥皮机构的通用性和互换性,采用两对旋转的高低偏置的剥离辊快速碾压住玉米苞叶并抓取,直至苞叶被撕离果穗。以上研究成果单独采用刀削式或滚动摩擦式,对果质硬度和表皮厚度有很高要求,不能完全适应于竹笋剥皮^[3-5],表现在损伤率高,剥净率低,远远达不到生产要求。竹笋剥皮相关研究成果多以专利形式呈现^[6-7],相关机型普遍存在体积大、适应性较差或存在安全隐患等问题。对甘蔗和玉米力学及机械特性与竹笋加以对比研究^[8-11],发现竹笋笋肉易损伤且笋皮之间粘结紧密,无法以单独的刀削、摩擦方式去皮。

针对上述问题,本文根据竹笋的物理特性和剥皮要求,设计一款刀削结合滚动摩擦进料竹笋剥皮机,通过建立竹笋-机械动力学模型并进行理论分析,确定剥皮机的结构参数和影响因素,最后制作样机对其工作性能进行试验验证,以期实现对适收期竹笋的机械化剥皮。

1 新鲜竹笋物理特性与力学参数测定

1.1 竹笋主要物理参数

竹笋品种繁多,主要由笋皮和笋肉构成,在整根竹笋中质量所占比例分别为34.55%、65.45%。为确定竹笋剥皮机各部件的结构尺寸,本文选用安徽省宁国市的早竹笋,随机选取100个完整、笋体饱满的竹笋样本,根据竹笋圆锥状外形,对竹笋样本进行了长度 L 、基部直径 D 、锥度 $C(D/L)$ 、笋皮厚度 T 以及质量 m 等物理参数测量(图1)。测量结果为:竹笋长度主要分布在239.60~362.50 mm,平均值为299.74 mm;基部直径主要分布在19.08~38.12 mm,平均值为29.25 mm;锥度主要分布在0.07~0.12,平均值为0.09;竹笋笋皮厚度主要分布在0.30~1.95 mm,平均值为1.15 mm;竹笋质量主要分布在98.60~221.10 g,平均值为151.37 g。

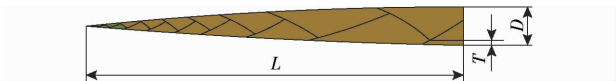


图1 竹笋主要物理参数示意图

Fig.1 Schematic of main physical parameters of bamboo shoot

1.2 力学参数测定

随机选取15根长势均匀的新鲜竹笋,将每根竹笋截成平均长度为100 mm左右的3段,利用TA.XTPlus质构仪对试验样品进行压缩试验,每组重复5次取平均值,试验结果如表1所示。

表1 竹笋各部位受力

Tab.1 Force of different parts of bamboo shoot N			
部位	受力范围	平均值	标准差
竹笋笋尖	5.80~6.34	6.03	0.20
中间部分	4.02~5.16	4.53	0.41
竹笋根部	3.13~3.41	3.24	0.10

根据表1测试结果,得出了竹笋各部位的受力范围,由大到小为竹笋笋尖、中间部分、竹笋根部,其中笋尖部分受力为5.80~6.34 N,高于其他部位,这是由于笋尖部分锥度最大,且笋尖处笋皮在4层以上,而其他部位只有1~3层,因此笋尖处笋皮厚度较大,硬度较大。

2 整机结构与工作原理

2.1 设计要求

剥笋机剥皮是利用刀片作用于竹笋上层表皮,利用剥皮辊摩擦剥离剩余笋皮,以实现竹笋完全剥皮且不损伤笋肉,其设计要求如下:①所设计的剥皮机能够保证在合适的工作速度下保持稳定,减少外界因素、机器振动对剥皮的影响。②根据笋皮厚度,设定削皮厚度为2~3 mm,要求竹笋削皮后损伤率在10%以下。③根据竹笋后期加工要求以及减少二次剥皮的工作,所设计的剥皮机要求剥净率在90%以上。

2.2 整机结构

竹笋剥皮机主要由切削机构、输送机构、动力装置、机架以及落料板组成,外形尺寸(长×宽×高)为0.5 m×0.4 m×0.8 m,如图2所示。输送机构固定于机架上,其下端安装有落料板,切削机构通过心轴安装在输送机构上端,由电机作为配套动力,通过带传动、链传动和齿轮传动带动机器工作。

2.3 工作原理

竹笋剥皮机工作原理是模仿手工剥笋过程,即人工使用刀具将笋皮划开,再由手指缠绕笋皮将其完全脱落,机器工作过程如图3所示。工作时,竹笋

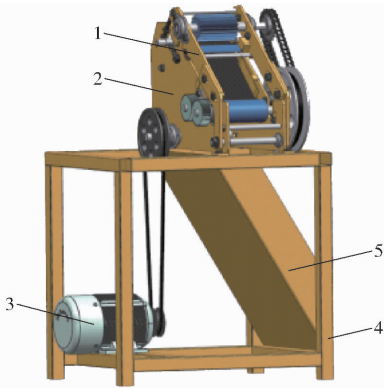
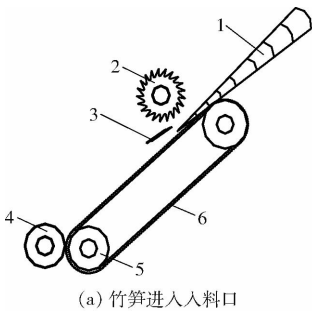


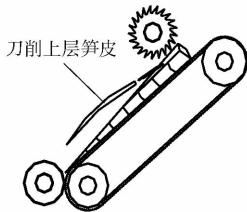
图 2 竹笋剥皮机三维结构图

Fig. 2 Three-dimensional diagram of bamboo shoots peeling machine

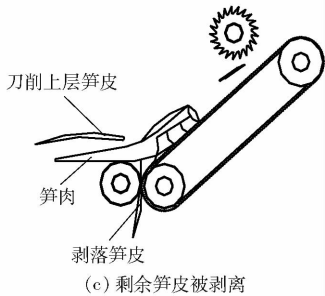
1. 切削机构 2. 输送机构 3. 动力装置 4. 机架 5. 落料板



(a) 竹笋进入入料口



(b) 上层笋皮被切削



(c) 剩余笋皮被剥离

图 3 竹笋剥皮过程示意图

Fig. 3 Schematics of bamboo shoots peeling process

1. 竹笋 2. 拨笋辊 3. 刀片 4. 剥皮辊 5. 滚筒 6. 输送带

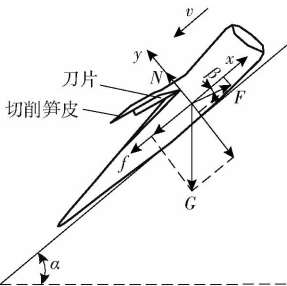


图 4 竹笋切削过程受力分析示意图

Fig. 4 Schematic of force analysis of bamboo shoots cutting process

将竹笋喂入剥皮装置时,以一定加速度 a 沿输送带向下运动,刀片在载荷 F 作用下对竹笋进行切削操作,将竹笋上层笋皮切除,刀削过程受力方程为

$$mgsin\alpha + f - Fcos\beta = ma \quad (1)$$

$$\begin{cases} N = mgcos\alpha + Fsin\beta \\ f = \mu_1 N \end{cases} \quad (2)$$

整理得

$$a = g(\sin\alpha + \mu_1 \cos\alpha) + \frac{F}{m}(\mu_1 \sin\beta - \cos\beta) \quad (3)$$

式中 m ——未剥皮竹笋质量,kg

g ——重力加速度

f ——输送带作用于竹笋的摩擦阻力,N

N ——输送带对竹笋的支撑力,N

由入料口进入(图 3a),入料口安装有拨笋辊和刀片,在拨笋辊配合下,刀片将竹笋上层局部笋皮切除,再由输送带带其继续向下运动(图 3b),当竹笋尖部喂入到相向旋转的剥皮辊和滚筒之间时,由于剥皮辊和滚筒存在高度差且材质不同,对笋皮的摩擦力也不同,进而由剥皮辊将剩余笋皮剥离经落料板排出剥皮装置(图 3c),剥净笋肉继续向下滑行并被送出机外,从而完成全部剥皮过程。

3 竹笋-机械力学模型建立

3.1 竹笋刀削受力分析

刀片在竹笋剥皮过程的载荷变化与其安装倾角等因素有关,竹笋刀削过程受力状况如图 4 所示。

μ_1 ——输送带与竹笋间摩擦因数

α ——输送带倾角, (°)

β ——刀片与输送带的夹角, (°)

竹笋在输送带中为匀变速直线运动,则

$$S = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (4)$$

式中 S ——上下两滚筒中心距离,m

v_0 ——喂入竹笋初速度,m/s

t ——竹笋剥皮时间,s

将式(3)代入式(4)整理得到竹笋切削所需的力 F 为

$$F = \frac{m[2(S - v_0 t) - gt^2(\sin\alpha + \mu_1 \cos\alpha)]}{t^2(\mu_1 \sin\beta - \cos\beta)} \quad (5)$$

由式(5)可知,刀片与输送带的夹角 β 是影响剥皮质量的关键因素,根据对竹笋物理参数和力学参数的测定,由式(5)结合剥皮机设计尺寸可确定 β 的取值范围,从而确定刀片与水平面的倾角为 $25^\circ \sim 35^\circ$ 。

3.2 竹笋摩擦去皮受力分析

工作时,调整竹笋位姿,使其垂直于拨笋辊轴向由入料口送入,在拨笋辊和输送带推动下,将竹笋拨送到刀片下方,由刀片将竹笋上层局部笋皮切除;笋尖喂入剥皮辊和滚筒之间时,由于剥皮辊和滚筒轴

心高度差使其作用于笋皮不同的摩擦力矩,此力矩使偏离剥皮辊径向的竹笋位姿得到矫正,当剥皮辊对笋皮的抓取力大于笋皮与笋肉的粘结力时笋皮被剥离,并随着剥皮辊和滚筒的相向旋转从间隙中被拉出;笋肉则在输送带推动下滑出剥皮装置。由上述过程可知,竹笋在剥皮装置上运动主要就是在输送带上沿剥皮辊径向的滑移。

竹笋沿输送带至剥皮辊的下滑与剥皮条件可通过分析竹笋在剥皮装置上受力得出。竹笋摩擦去皮过程受力分析如图 5 所示。

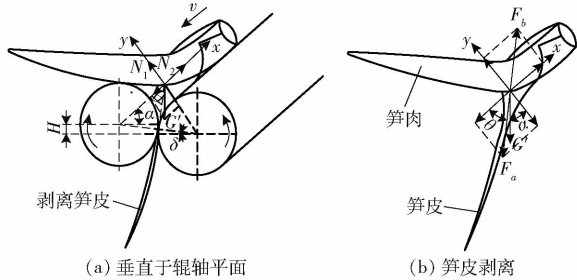


图 5 竹笋受力分析
Fig. 5 Force analysis of bamboo shoots

由图 5 可知,竹笋沿输送带下滑及剥皮条件为

$$\begin{cases} \sum F_y = 0 \\ \sum F_x < 0 \end{cases} \quad (6)$$

则

$$\begin{cases} G' \cos \alpha + f_2 = F_b \sin \theta + N_1 \\ G' \sin \alpha + f_1 > F_b \cos \theta + N_2 \end{cases} \quad (7)$$

由几何关系知

$$\theta = \alpha + \delta \quad (8)$$

- 式中 G' ——刀削局部笋皮后竹笋重力, N
 F_b ——笋肉与笋皮间粘结力, N
 f_1 ——输送带作用于削皮后竹笋的摩擦阻力, N
 f_2 ——剥皮辊作用于削皮后竹笋的摩擦阻力, N
 N_1 ——滚筒对竹笋支撑力, N
 N_2 ——剥皮辊对竹笋支撑力, N
 θ ——滚筒与竹笋中心连线和滚筒与剥皮辊中心连线垂直线夹角, ($^\circ$)
 δ ——滚筒与剥皮辊中心连线与水平夹角, ($^\circ$)

竹笋受到的摩擦阻力可根据图 5a 剥皮装置中剥皮辊和滚筒对竹笋的支撑力得出,其具体公式为

$$f_1 = \mu_1 N_1 \quad (9)$$

$$f_2 = \mu_2 N_2 \quad (10)$$

式中 μ_2 ——剥皮辊与竹笋间摩擦因数

由图 5a 可知, N_1 、 N_2 、 G' 之间存在关系

$$\frac{N_1}{\sin(\delta + \theta)} = \frac{N_2}{\sin(\delta - \theta)} = \frac{G'}{\sin(180^\circ - 2\theta)} \quad (11)$$

其中

$$\sin \delta = \frac{H}{2R} \quad (12)$$

$$\sin \theta = \frac{R}{R + l} \quad (13)$$

联立式(11)~(13)可得

$$N_1 = \frac{G'(R + l)(R\sqrt{4R^2 - H^2} + H\sqrt{l^2 + 2Rl})}{4R^2\sqrt{l^2 + 2Rl}} \quad (14)$$

$$N_2 = \frac{G'(R + l)(R\sqrt{4R^2 - H^2} - H\sqrt{l^2 + 2Rl})}{4R^2\sqrt{l^2 + 2Rl}} \quad (15)$$

式中 R ——滚筒(剥皮辊)半径, m

l ——竹笋与滚筒表面以及与剥皮辊表面的距离, m

H ——滚筒和剥皮辊轴心高度差, m

联立式(6)~(10)、(14)、(15)可得

$$\frac{1}{G'(R + l)} [R(\mu_1 N_1 - N_2) - \sqrt{l^2 + 2Rl}(\mu_2 N_2 - N_1)] > \cos(2\alpha + \delta) \quad (16)$$

为方便计算,令

$$P = \frac{1}{G'(R + l)} [R(\mu_1 N_1 - N_2) - \sqrt{l^2 + 2Rl}(\mu_2 N_2 - N_1)] \quad (17)$$

联立式(16)得

$$P > \cos(2\alpha + \delta) \quad (18)$$

其中 $\delta = \arcsin \frac{H}{2R} \quad (19)$

整理得 $\alpha < \frac{1}{2} \left(\arccos P - \arcsin \frac{H}{2R} \right) \quad (20)$

由式(20)可知,竹笋摩擦去皮过程与输送带倾角 α 、剥皮辊半径 R 、竹笋与滚筒表面的距离 l 、滚筒与剥皮辊轴心高度差 H 以及摩擦因数 μ 有关。

根据上述理论分析,随着剥皮辊转速的增大,与之关联的滚筒转速也增大,导致它们对竹笋支撑力明显增大,笋皮与剥皮辊摩擦增大,竹笋剥净率增加。因此可知,剥皮辊转速为影响笋皮脱落的主要因素,但剥皮辊转速并不是越大越好,当转速大到一定程度时,虽然剥净率较高,但笋肉损伤率也会明显增加。

4 关键部件设计

4.1 滚筒与剥皮辊轴心高度差调节机构

竹笋剥皮效果与滚筒和剥皮辊之间高度差 H 有关,而 H 可通过滚筒与剥皮辊轴心高度差调节机构进行调节。 H 小,则剥净率低;反之,则剥净率高。但当 H 大于剥皮辊半径时,竹笋轴线与滚筒和剥皮辊中心连线夹角增大,导致笋肉极易撞击剥皮辊,从

而剥净率降低,损伤率提高。通过分析和试验可知, H 取值范围应在剥皮辊半径范围之内,该范围可使竹笋尖部成功喂入到滚筒与剥皮辊间隙内,同时避免笋肉撞击剥皮辊碎裂现象发生。设计滚筒与剥皮辊轴心高度差调节机构,用于固定轴承座的螺栓通过在长圆弧形孔中滑动实现滚筒和剥皮辊中心连线与水平面夹角的改变,从而改变两轴之间高度差,如图6所示。

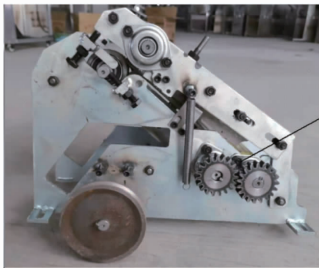
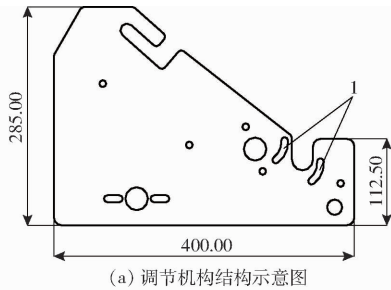


图6 轴心高度差调节机构

Fig. 6 Axis height difference adjusting mechanism

1. 长圆弧形孔 2. 螺栓

4.2 剥皮装置

该装置包括切削机构和输送机构,其中切削机构主要由轴承座、刀片、刀架及拨笋辊等组成,输送机构主要由输送带、滚筒及剥皮辊等组成,其结构如图7所示。切削机构一端通过轴承座与输送机构连接,另一端可绕心轴作定轴转动,以适应在一定尺寸范围内竹笋的进料。

根据文献[12]可知,国内大多数玉米联合收获机使用的剥皮辊直径为60~80 mm,竹笋基部直径相对玉米直径较小,故本竹笋剥皮机剥皮辊直径确定为50~60 mm;输送带倾角 α 直接影响竹笋下滑速度,进而影响剥皮性能和生产效率,根据竹笋上尖下粗的圆锥形状特点,输送带倾角为 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 时,笋尖可顺利喂入剥皮辊和滚筒间隙内,为简化条件,确定剥皮辊直径为50 mm、输送带倾角为 38° 。刀片安装在刀架上,可通过刀架上的螺栓调节刀架的位置,从而调节物料入切时与刀片的角度,一般根据加工竹笋的大小,预先调整刀片角度,保证刀片在入切时只削去笋皮而不伤及笋肉。竹笋在剥皮过程中做直线运动,在与刀片产生碰撞时可能会发生偏移导致笋肉损伤和剥皮不理想,因此在剥皮装置中设计了挡

板,以提高竹笋运动过程的稳定性,改善剥皮效果。

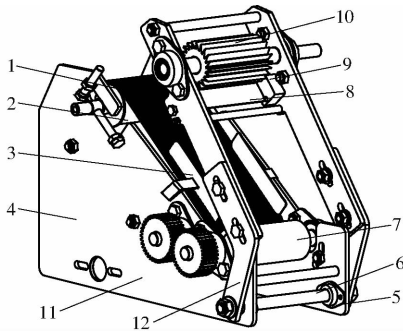


图7 剥皮装置示意图

Fig. 7 Schematic of peeling device

1. 输送带 2. 滚筒 3. 挡板 4. 轴心高度差调节机构 5. 轴承座 6. 固定心轴 7. 剥皮辊 8. 刀片 9. 刀架 10. 拨笋辊 11. 输送机构 12. 切削机构

5 试验

5.1 试验材料与方法

根据 GB/T 5262—2008《农业机械试验条件测定方法的一般规定》,于2021年3月应用制造的竹笋剥皮机进行样机试验。试验地点在安徽省宁国市,每组试验使用20 kg竹笋,以当地早竹笋为试验对象,挑选完整、长势均匀以及新鲜无虫害的竹笋作为试验物料。

试验时,由人工喂入竹笋至机器入料口处,并在剥皮辊排出口接取完成剥皮作业的笋肉,每进行一组试验时,预先清理试验区域内的笋肉和笋皮,并调整各试验因素水平,稳定后进行竹笋剥皮。本次试验将笋肉损伤率 Y_1 和笋皮剥净率 Y_2 作为判断剥皮机性能的主要指标,根据 GB/T 30762—2014《主要竹笋质量分级》的感官评定法确定竹笋损伤个数和未剥净个数,统计试验结果并分别计算出每组竹笋损伤率和剥净率,若笋肉出现损伤又带有笋皮,将该笋肉同时计入到损伤率和剥净率中,竹笋剥皮后物料如图8所示。

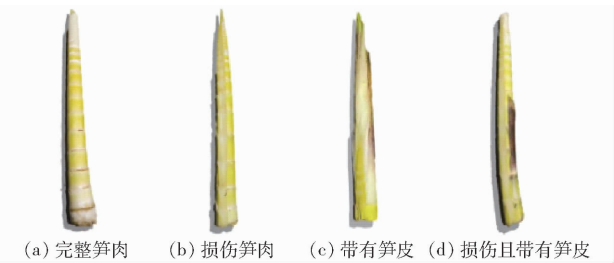


图8 竹笋剥皮物料

Fig. 8 Materials after bamboo shoots peeled

5.2 单因素试验与分析

5.2.1 试验设计

针对竹笋物理特性复杂的问题,为确定竹笋长

度、基部直径不同组合对剥皮效果的影响,以及为竹笋剥皮机正交试验确定最佳试验物料,进行单因素试验。根据竹笋圆锥形状特点,选取竹笋长度和基部直径作为试验因素;通过预试验,定义机器各参数的固定值为:刀片安装倾角为 30°、剥皮辊转速为 240 r/min、滚筒与剥皮辊轴心高度差为 15 mm。以笋肉损伤率和笋皮剥净率为试验指标,对其分别进行单因素试验,研究竹笋不同尺寸对剥皮机性能评价指标的影响规律。

5.2.2 试验结果与分析

根据竹笋物理参数的测定,设定竹笋基部直径为 30 mm,将竹笋长度分布范围取 6 个水平;设定竹笋长度为 300 mm,将竹笋基部直径分布范围取 6 个水平(表 2),将物料分类并分别进行单因素试验后,各性能评价指标与竹笋长度、基部直径的关系曲线如图 9 所示。

表 2 单因素试验因素水平

Tab.2 Factors and levels of single factor experiment

水平	因素	
	长度	基部直径
1	240 ~ 260	20 ~ 23
2	260 ~ 280	23 ~ 26
3	280 ~ 300	26 ~ 29
4	300 ~ 320	29 ~ 32
5	320 ~ 340	32 ~ 35
6	340 ~ 360	35 ~ 38

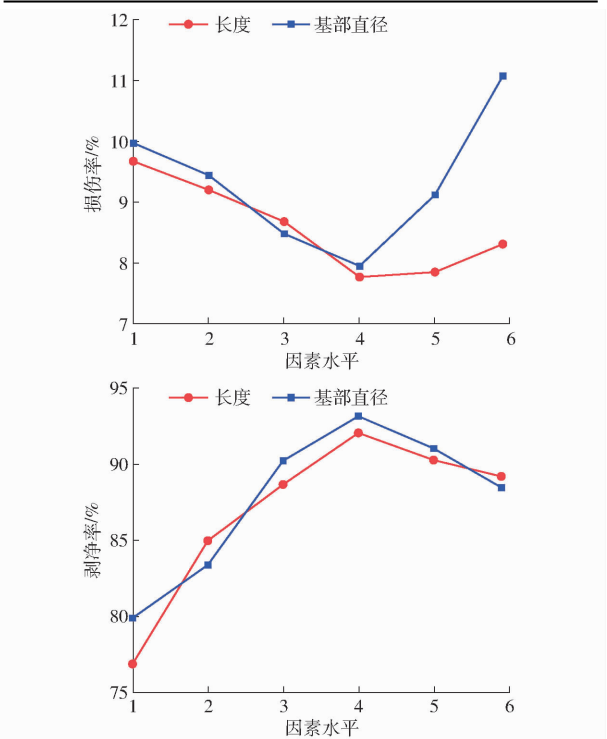


图 9 单因素试验结果

Fig.9 Results of single factor experiment

由图 9 分析可得,在所选水平范围内,随着竹笋长度的增大,笋肉损伤率先缓慢下降后缓慢上升,笋皮剥净率先急剧上升后缓慢下降;随着基部直径的增大,笋肉损伤率先缓慢下降后急剧上升,笋皮剥净率先急剧上升后缓慢下降。造成损伤率过大的原因是当竹笋直径过大时,切削深度也随之变大,导致笋肉容易损伤;造成剥净率过低的原因是当竹笋长度过小时,竹笋偏移或笋尖翘起,当竹笋基部直径过小时,难以切削到竹笋,因此都会导致残留笋皮。其中,当竹笋长度为 300 ~ 320 mm 时,笋肉损伤率最小,为 7.78%,剥净率最大,为 92.04%;当竹笋基部直径在 29 ~ 32 mm 时,笋肉损伤率最小,为 7.96%,剥净率最大,为 93.14%。因此最终确定长度在 300 ~ 320 mm、基部直径为 29 ~ 32 mm 的竹笋作为剥皮机正交试验的物料样本。

5.3 正交试验方案

刀片安装倾角:刀片与水平面倾角大于 35°时,难以接触竹笋,刀片与水平面倾角小于 25°时,对笋肉损伤过大。为保证切削上层笋皮,刀片安装倾角调节为 25°~35°,设定 3 个水平为 25°、30°、35°。

剥皮辊转速:当剥皮辊转速大于 220 r/min 时,笋皮脱落,剥皮辊转速大于 260 r/min 时,剥皮机整机会发生轻微振动。为保证安全性,剥皮辊转速调节范围为 220 ~ 260 r/min,设定 3 个水平为 220、240、260 r/min,通过 HMI 与变频调速器通讯控制电动机实现转速调节。

滚筒与剥皮辊轴心高度差:当滚筒与剥皮辊轴心在同一高度时,笋尖无法喂入,高度差大于 20 mm 时,笋肉尖部会撞击剥皮辊造成断裂。为保证笋肉完整,高度差范围为 10 ~ 20 mm,设定 3 个水平为 10、15、20 mm。

为得到各个因素最优值,设计多因素正交试验,因素编码如表 3 所示。获取竹笋损伤率和剥净率回归模型,求解剥皮装置最优参数组合。

表 3 试验因素编码

Tab.3 Experimental factors codes

编码	因素		
	刀片安装倾角/ (°)	剥皮辊转速/ (r·min ⁻¹)	轴心高度差/ mm
-1	25	220	10
0	30	240	15
1	35	260	20

5.4 试验结果与分析

5.4.1 回归模型方程及显著性检验

根据表 4 的数据样本,通过 Design-Expert 8.0.6 软件得到竹笋损伤率和剥净率二次多项式回归模型为

$$Y_1 = 7.07 + 1.96X_1 + 1.31X_2 + 1.20X_3 + 0.26X_1X_2 + 0.52X_1X_3 + 0.29X_2X_3 + 2.16X_1^2 + 1.04X_2^2 + 1.71X_3^2 \quad (21)$$

$$Y_2 = 94.61 + 3.80X_1 + 0.94X_2 + 3.40X_3 - 0.53X_1X_2 + 1.30X_1X_3 + 0.23X_2X_3 - 5.62X_1^2 + 0.48X_2^2 - 3.84X_3^2 \quad (22)$$

式中 X_1 、 X_2 、 X_3 ——因素编码值

由表 5 可知,笋肉损伤率 Y_1 和笋皮剥净率 Y_2 两个回归方程高度显著,且回归方程失拟不显著,说明在所选试验参数范围内,回归模型与实际情况拟合度较高;损伤率 Y_1 、剥净率 Y_2 回归方程决定系数 R^2 分别为 0.908 7、0.985 4,表明回归方程预测值与实际值之间的一致性高度合理,故可用损伤率 Y_1 、剥净率 Y_2 回归模型对剥皮装置剥皮性能进行分析和预测。

由方差分析可知,对于损伤率 Y_1 的回归模型,其回归项 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_3^2 影响极显著,回归项 X_2^2 影响显著,而回归项 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_2X_3 影响不显著;

表 5 方差分析

Tab.5 Variance analysis of experimental results								
差异来源	Y_1				Y_2			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	98.01	9	25.14	0.000 2	428.16	9	155.35	<0.000 1
X_1	30.81	1	71.03	<0.000 1	115.22	1	376.24	<0.000 1
X_2	13.70	1	31.63	0.000 8	7.09	1	23.14	0.001 9
X_3	11.50	1	26.54	0.001 3	92.68	1	302.66	<0.000 1
X_1X_2	0.28	1	0.64	0.451 3	1.11	1	3.63	0.098 3
X_1X_3	1.07	1	2.47	0.159 8	6.79	1	22.16	0.002 2
X_2X_3	0.35	1	0.80	0.399 8	0.22	1	0.72	0.423 8
X_1^2	19.62	1	45.29	0.000 3	132.85	1	433.81	<0.000 1
X_2^2	4.52	1	10.43	0.014 5	0.95	1	3.11	0.121 2
X_3^2	12.33	1	28.46	0.001 1	62.07	1	202.69	<0.000 1
残差	3.03	7			2.14	7		
失拟	0.31	3	0.15	0.923 1	0.20	3	0.14	0.930 9
误差	2.72	4			1.94	4		
总和	101.04	16			430.3	16		

对于剥净率 Y_2 的回归模型,其回归项 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_3 、 X_1^2 、 X_3^2 影响极显著,而回归项 X_1X_2 、 X_2X_3 和 X_2^2 影响不显著。

5.4.2 因素分析

由表 5 中各试验因素的 F 可知,影响损伤率 Y_1 主次因素依次为: X_1 、 X_1^2 、 X_2 、 X_3^2 、 X_3 、 X_2^2 ;影响剥净率 Y_2 主次因素依次为: X_1^2 、 X_1 、 X_3 、 X_3^2 、 X_2 、 X_1X_3 。可见,在试验参数范围内,影响笋肉损伤率、笋皮剥净率两大性能评价指标的试验因素显著性顺序有所差异,为更清晰直观描述各试验因素及其交互作用对试验评价指标的影响效应,根据回归模型分析结果,绘制

表 4 正交试验设计与结果

Tab.4 Experimental design and results					
试验 编号	因素			$Y_1/\%$	$Y_2/\%$
	X_1	X_2	X_3		
1	1	-1	0	10.53	92.63
2	0	-1	-1	7.45	87.23
3	-1	0	-1	8.33	79.17
4	-1	1	0	9.47	87.37
5	0	0	0	7.14	93.88
6	-1	-1	0	7.37	84.21
7	0	1	-1	9.47	88.42
8	0	-1	1	9.57	93.61
9	0	0	0	7.07	93.94
10	0	0	0	6.74	95.51
11	0	1	1	12.77	95.74
12	0	0	0	8.33	94.79
13	1	0	-1	11.46	84.38
14	0	0	0	6.06	94.95
15	1	1	0	13.68	93.68
16	1	0	1	14.38	93.75
17	-1	0	1	9.38	83.33

各因素交互效应响应曲面图,如图 10、11 所示。

根据回归方程和响应曲面可得,刀片安装倾角、剥皮辊转速、滚筒与剥皮辊轴心高度差之间存在交互作用,并且对损伤率和剥净率影响较为显著。当刀片安装倾角一定时,损伤率随剥皮辊转速增大而增大;当剥皮辊转速一定时,损伤率随刀片安装倾角增大而增大;当刀片安装倾角变化时,损伤率变化区间较大,刀片安装倾角对损伤率指标影响更为显著(图 10a)。当刀片安装倾角一定时,损伤率随滚筒与剥皮辊轴心高度差增大先减小后增大;当轴心高度差一定时,损伤率随刀片安装倾角增大而增大;当

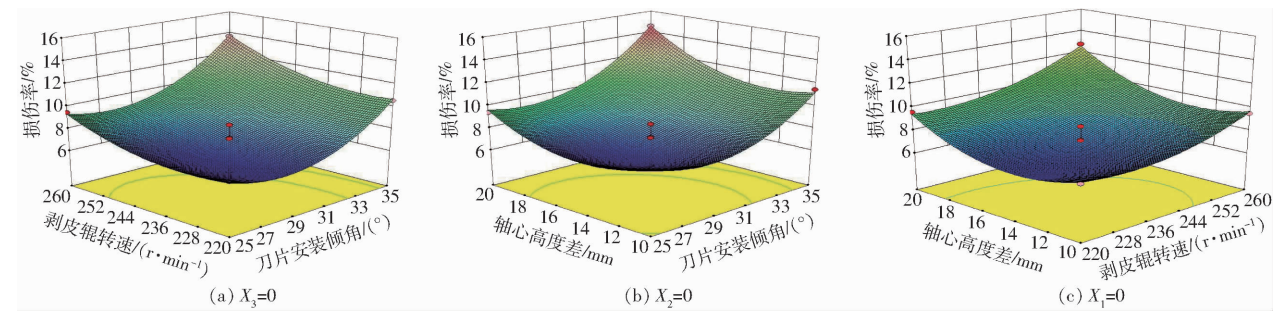


图 10 试验因素对笋肉损伤率影响的响应曲面

Fig. 10 Response surface of experimental factors to breakage ratio of bamboo shoots

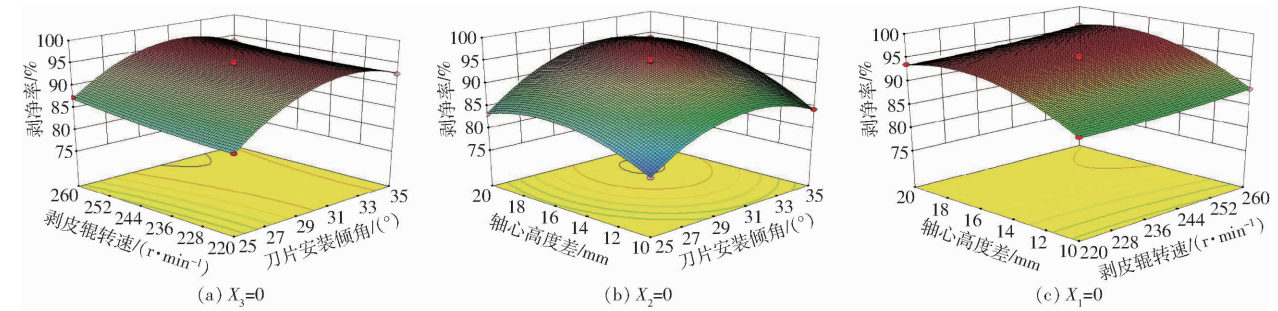


图 11 试验因素对笋皮剥净率影响的响应曲面

Fig. 11 Response surfaces of experimental factors to no-shell ratio of bamboo shoots

刀片安装倾角变化时,损伤率变化区间较大,刀片安装倾角对损伤率指标影响更为显著(图 10b)。当剥皮辊转速一定时,损伤率随轴心高度差增大先减小后增大;当轴心高度差一定时,损伤率随剥皮辊转速增大而增大;当剥皮辊转速变化时,损伤率变化区间较大,剥皮辊转速对损伤率指标影响更为显著(图 10c)。

当刀片安装倾角一定时,剥净率随剥皮辊转速增大而增大;当剥皮辊转速一定时,剥净率随刀片安装倾角增大先增大后减小;当刀片安装倾角变化时,剥净率变化区间较大,刀片安装倾角对剥净率指标影响更为显著(图 11a)。当刀片安装倾角一定时,剥净率随滚筒与剥皮辊轴心高度差增大先增大后减小;当轴心高度差一定时,剥净率随刀片安装倾角增大先增大后减小;当刀片安装倾角变化时,剥净率变化区间较大,刀片安装倾角对剥净率指标影响更为显著(图 11b)。当剥皮辊转速一定时,剥净率随轴心高度差增大而增大;当轴心高度差一定时,剥净率随剥皮辊转速增大而增大;当轴心高度差变化时,剥净率变化区间较大,轴心高度差对剥净率指标影响更为显著(图 11c)。

5.4.3 验证试验

根据损伤率 Y_1 和剥净率 Y_2 的数学模型,在约束条件范围内对竹笋剥皮机的试验因素进行优化,为获得竹笋剥皮机性能最优参数组合,结合试验因素边界条件,对损伤率和剥净率 2 个评价指标的回归方程进行分析,建立竹笋剥皮机优化数学模型为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \max Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \quad (23)$$

基于 Design-Expert 8.0.6 软件多目标参数优化模块对数学模型进行分析求解,得到最优参数组合为:刀片安装倾角为 30.12° 、剥皮辊转速为 229.18 r/min 、轴心高度差为 15.43 mm ,此时笋肉损伤率和笋皮剥净率分别为 6.81% 、 94.59% 。

为方便实际操作中参数的调节,各参数取整后得到最优组合为:刀片安装倾角为 30° 、剥皮辊转速为 230 r/min 、轴心高度差为 15 mm 。为进一步验证参数优化结果的正确性,将试验样机调整为取整后的参数进行竹笋剥皮机的验证试验(图 12),每组试验选取 20 kg 当地早竹笋,连续喂入直至全部完成



图 12 竹笋剥皮试验现场

Fig. 12 Experimental field of bamboo shoots peeling

剥皮工作,保证其他因素不变的情况下,重复3次取平均值,试验验证结果如表6所示,即笋肉损伤率、笋皮剥净率分别为7.10%、93.22%,参数优化结果与验证试验结果基本一致。

表 6 试验验证结果
Tab. 6 Experimental results of verification %

试验号	损伤率	剥净率
1	7.01	94.69
2	7.34	93.58
3	6.96	91.38
平均值	7.10	93.22

每一批竹笋尺寸各有不同,笋皮厚薄也不均匀,因此在剥皮过程中会出现笋肉损伤或笋皮未剥净的现象,通过对试验结果分析得知:笋肉损伤的原因是竹笋尺寸过大,则入切角度大,导致刀片切削至笋肉部分;笋皮未剥净的原因是竹笋尺寸过小,则入切角度小,刀片与笋皮难以接触,因此切削不到笋皮,从而也无法剥除笋皮。

6 结论

(1)为解决竹笋剥皮效率低下、笋肉损伤率高且笋皮剥净率低等问题,基于竹笋的物理特性参数,设计一款刀削结合滚动摩擦进料竹笋剥皮机,适用于基部直径为20~38 mm、长度为240~360 mm的早竹笋等品种。通过理论分析竹笋-机械动力学模型,确定剥皮机结构参数以及影响其工作性能的主要因素。

(2)为得到剥皮机的最佳工作参数,通过制造样机分别进行了单因素和正交剥皮试验。通过单因素试验确定剥皮机正交试验的物料样本长度为300~320 mm、基部直径为29~32 mm;利用Design-Expert 8.0.6软件进行数据处理,对评价指标回归方程综合优化,得出竹笋剥皮机最佳工作组合为:刀片安装倾角30.12°、剥皮辊转速229.18 r/min、轴心高度差15.43 mm,此时竹笋笋肉损伤率为6.81%,笋皮剥净率为94.59%。验证试验中笋肉损伤率为7.10%,笋皮剥净率为93.22%,试验值与理论值基本一致,表明机器满足设计要求。

参 考 文 献

[1] 黄才贵,常青青,蒋正忠,等.一种新型食用甘蔗自动去皮装置的设计与研究[J].包装与食品机械,2021,39(3):85-88.
HUANG Caigui, CHANG Qingqing, JIANG Zhengzhong, et al. Design and research of a new automatic peeling device for edible sugarcane[J]. Packaging and Food Machinery, 2021, 39(3): 85-88. (in Chinese)

[2] 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)

[3] 张秀花,赵庆龙,王泽河,等.可调五辊式对虾剥壳机剥壳参数优化试验[J].农业工程学报,2016,32(15):247-254.
ZHANG Xiuhua, ZHAO Qinglong, WANG Zehe, et al. Parameter optimization experiment of adjustable five rollers shrimp peeling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(15): 247-254. (in Chinese)

[4] 曹成茂,周敏,毕海军,等.柔性揉搓式板栗剥苞机设计与试验[J].农业机械学报,2015,46(9):118-121.
CAO Chengmao, ZHOU Min, BI Haijun, et al. Design and experiment of flexible rubbing type chestnut husker[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 118-121. (in Chinese)

[5] 俞国红,郑航,薛向磊.自适应仿形甘薯削皮机优化设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(3):135-142.
YU Guohong, ZHENG Hang, XUE Xianglei. Optimization design and experiment of auto-adaptive profiling sweet potato peeler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 135-142. (in Chinese)

[6] 蒋灵华,丁敏,毛朝明,等.一种竹笋剥皮装置:CN210610939U[P].2020-05-26.

[7] 仇雪珍,李春东.一种竹笋剥皮机:CN104106831A[P].2014-10-22.

[8] 谢卢鑫,王俊,程绍明,等.整秆式甘蔗收割机剥叶过程仿真分析与试验[J].农业工程学报,2020,36(18):56-65.
XIE Luxin, WANG Jun, CHENG Shaoming, et al. Simulation analysis and experiments of leaf stripping process for whole stalk sugarcane harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(18): 56-65. (in Chinese)

[9] 牟向伟.弹性齿对甘蔗茎秆的动态打击力与叶鞘剥离机理研究[J].农业机械学报,2015,46(3):103-109.
MOU Xiangwei. Study on dynamic hitting force of elastic dentation for sugarcane stalk mechanism of leaf sheath stripping[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 103-109. (in Chinese)

[10] 万鹏,赵伟松,龙超,等.甘蔗去皮与切断特性试验[J].农业机械学报,2012,43(增刊):141-145.
WAN Peng, ZHAO Weisong, LONG Chao, et al. Experiment of peeling and cutting characteristics for sugarcane[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 141-145. (in Chinese)

[11] LI Z, FU J, LUO X. Tensile properties and fracture mechanisms of corn bract for corn peeling device design[J]. Agriculture, 2021, 11(8): 796.

[12] 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. Dynamic simulation and high-speed photography experiment on corn husking[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 42-48. (in Chinese)