

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.S2.017

转盘式对虾开背工艺分析与参数优化

吴海华^{1,2} 李璐^{1,2} 熊师³ 白圣贺^{1,2} 牛康^{1,2} 周利明^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083;
3. 广东省现代农业装备研究所, 广州 510630)

摘要: 针对目前对虾开背环节工艺不完善、实际应用装备缺乏等问题,以中型南美白对虾为研究对象,探究了对虾开背关键工艺方法,建立了对虾开背过程力学模型,获得影响开背效果主要因素为刀具角度、加工中心盘转速和刀具安置距离;采用单因素试验研究和分析了各因素对开背成功率、虾仁损伤率、虾线裸露成功率和感官评分值的影响,确定影响因素最佳区间为:刀具角度 $20^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 、加工中心盘转速 $10 \sim 40$ r/min和刀具安置距离 $9 \sim 11$ mm;利用Design-Expert软件进行多因素响应面试验研究分析,并采用多目标优化方法,得到最优参数组合为:刀具角度 43.838° 、加工中心盘转速 28.391 r/min、刀具安置距离 9.801 mm时,开背成功率为 99.161% 、虾仁损伤率为 2.825% 、虾线裸露成功率为 90.727% 、感官评分值为 86.944 。验证试验结果表明:针对中型南美白对虾,当刀具角度 45° 、加工中心盘转速 28 r/min、刀具安置距离 9.8 mm时,开背成功率为 98.89% 、虾仁损伤率为 3.33% 、虾线裸露成功率为 87.78% 、感官评分值为 85.33 ,与理论优化值的绝对误差均较小,优化后的对虾开背装置性能满足作业要求。研究可为对虾开背工序装置设计和参数选择提供理论基础和科学依据。

关键词: 对虾; 开背工艺; 夹持转盘; 参数优化; 虾线裸露; 刀具位置

中图分类号: S985.2⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)S2-0152-09

Process Analysis and Parameter Optimization of Prawns Open-back Machine with Rotary Plate Clamping

WU Haihua^{1,2} LI Lu^{1,2} XIONG Shi³ BAI Shenghe^{1,2} NIU Kang^{1,2} ZHOU Liming^{1,2}

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machine System Technology, Beijing 100083, China

3. Guangdong Institute of Modern Agricultural Equipment, Guangzhou 510630, China)

Abstract: For prawns in open back processes, and lack of practical equipment, taking *Litopenaeus vannamei* as research object, the key technology of prawn back opening was studied, the factors affecting the effect of back opening were analyzed, and the evaluation index requirements were established, in the rotating disc prawn open back device was carried on the three factors three levels of response surface optimization test, and the optimized drive back parameters were obtained. A validation test was carried out. In order to study the main influencing factors of open-back process of prawn, a mechanical model of open-back process of prawn was established. The main influencing factors were tool angle, machining center disk speed and tool placement distance. The optimal range of influencing factors was determined by single factor test as follows: tool angle of $20^{\circ} \sim 60^{\circ}$, machining center disk speed of $10 \sim 40$ r/min and tool placement distance of $9 \sim 11$ mm. Based on Box-Behnken central composite design theory, the three-factor and three-level response surface test was designed, and the test data were analyzed and optimized. The theoretical optimization results were as follows: under the conditions of 43.838° tool angle, 28.391 r/min tool rotation speed and 9.801 mm tool positioning distance, the success rate of back opening, shrimp damage rate, shrimp line naked success rate and sensory score were 99.161% , 2.825% , 90.727% and 86.944 . Verification test results showed that for medium *Litopenaeus vannamei*, when the tool angle was 45° , the processing center rotation speed was 28 r/min, and the tool placement distance was 9.8 mm, the success rate of back opening was 98.89% , the damage rate of shrimp was

收稿日期: 2022-06-30 修回日期: 2022-08-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD0901801)

作者简介: 吴海华(1981—),男,研究员,博士,主要从事农村发展与农业机械化、农业装备技术创新战略研究,E-mail: caamswhh@163.com

3.33%, the success rate of shrimp line exposure was 87.78%, and the sensory score was 85.33 points, and the absolute error between them and the theoretical optimization value was small. The reliability of the regression model prediction was proved, and the performance of the optimized prawns open-back device met the operation requirements.

Key words: prawns; open-back; clamping wheel; parameter optimization; shrimp line bare; tool position

0 引言

对虾肉质鲜美营养丰富,是全球需求量最大的水产品之一^[1-4]。2019年中国对虾捕捞量达 1.46×10^6 t^[5]。冻虾仁因其易保鲜、方便食用、方便运输等优势占据绝对的市场优势,是对虾在收获后较经济的粗加工产品^[6-7]。目前手工剥壳是常见的加工方式,不仅劳动强度大,生产效率低,还极易污染对虾产品^[8-9]。为提高生产效率和虾仁品质,学者们开展对虾机械化剥壳加工研究。国外对虾机械化研究起步较早,已开发研制了成熟的机器和生产线^[10-13]。现有对虾剥壳机械化主要加工流程包括:清洗→分级→去头→开背→去肠线→取仁^[14-16]。对虾开背作为对虾自动化剥壳的前道工序,其效果直接影响机械化剥壳工艺的实现和剥壳后的虾仁品质。

我国关于对虾机械化剥壳和开背工艺的相关研究还处于理论设计和试验阶段^[17-19]。张秀花等^[20]设计的带式夹持输送对虾开背机,利用输送带形成V型结构夹持完成开背过程,整机可完成对虾夹持、开背工序,但整机机体较大,完成开背过程的机构距离较长,未给后续工序留出安置空间,不能作为独立的剥壳机使用。王利光等^[21]设计的链板式对虾开背装置,利用有托板链条形成的V型空间进行虾体夹持,选用带齿圆盘刀进行试验,加工效率高,但开背所需的压紧力较大,虾体损伤率较高。我国对虾开背研究较少,同时缺乏参数指导也是目前存在的主要问题,主要表现在现有较少的开背机器中,开背效率低、虾仁品质不能保障等。但开背技术在鱼类开膛、作物收获等方面已有较多研究^[22-26],可为对虾开背机构研究和参数优化研究提供理论参考。目前,在对虾开背环节仍缺少实用性装备,因此有必要研究对虾机械化开背工艺方法,并进行对虾开背装置的设计与试验研究。

针对上述问题,本文基于对虾机械化定向剥壳工艺流程^[27-30],开展对虾开背工艺分析,探究关键工艺方法和影响因素,在转盘式对虾开背装置上进行试验研究,明确开背工艺参数,为对虾机械化剥壳技术装备的深入研究提供依据。

1 转盘式对虾开背装置

对虾开背装置试验台主要基于对虾机械化定向剥壳机开背工序设计,主要适用于中型南美白对虾。主要由机架、夹持中心盘、开背机构和控制系统组成,如图1所示。

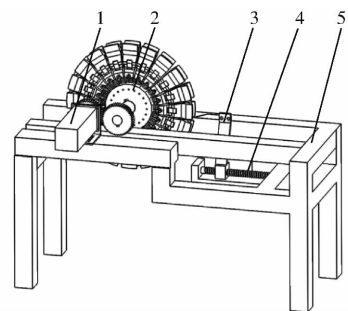


图1 对虾开背试验台

Fig.1 Prawn open-back test bench

1. 电机 2. 夹持中心盘 3. 开背机构 4. 微型滑台 5. 机架

工作过程为夹持中心盘在旋转电机的控制下将对虾体夹持输送,开背刀固定在微型滑台上,虾体随着夹持中心盘旋转至接触刀具到完全划开,完成开背过程。对虾开背试验台根据对虾剥壳机原理设计,并进行了简化,旨在研究对虾开背过程中装置参数对开背效果的影响,并寻找最优参数。

2 对虾开背工艺分析

对虾开背过程根据刀具与虾体的接触状态主要分为接触阶段、破壳阶段、划壳阶段和出壳阶段。对虾开背时开背刀固定,即刀具到夹持爪外轮廓的距离 d 为定值。虾体在夹持机构的作用下顺时针转动,转到图2a位置时,夹持作用下虾体露出部分的长度等于刀具安置距离 d ,虾体与开背刀刚好接触,为对虾开背的接触阶段,此时因为虾体的弹性形变作用,刀具并不能在接触的瞬间完成破壳。如图2b所示,图中实线表示虾体在未受到刀具压力时外轮廓线所在位置,虚线表示虾体受到压力后的形变。当虾体露出部分的长度大于刀具到夹持爪之间的距离 d 和虾体的弹性变形量总和时,进行到破壳阶段。在刀具固定的情况下,虾体相对于刀具做水平向右的运动,直到刀具进入虾体的位移与刀具到夹持爪之间的距离 d 之和等于虾体露出夹持爪部分的距离

时,虾体不再相对刀具做水平运动。虾体在夹持爪的夹持作用下继续运动,此时进入对虾开背过程的划壳阶段,如图2c所示,划壳阶段可分解为虾体相对于刀具的水平向右的运动和围绕夹持机构中心的顺时针圆周运动。当虾体的露出距离小于刀具到夹持爪之间的距离 d ,虾体已完成全部划壳过程时,进入到出壳阶段,图2d中的虚线为虾体完成开背的理论位置。综合以上分析,将开背过程简化如图3所示。

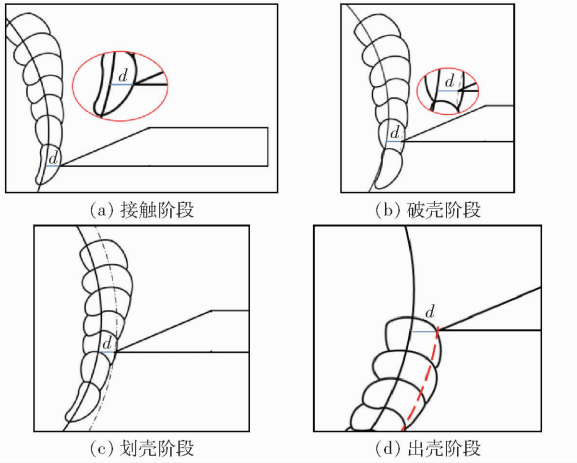


图2 对虾开背过程

Fig.2 Prawn back opening process

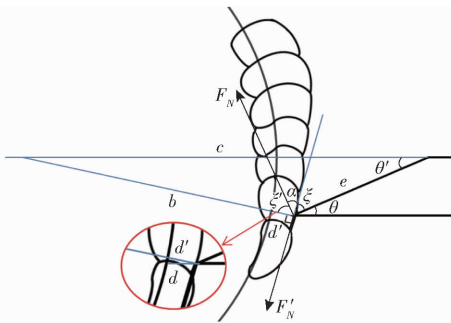


图3 对虾开背过程力学分析

Fig.3 Dynamics model of open-back process of prawns

如图3所示,开背过程中,当虾体初接触开背刀时,加工中心盘电机因虾体受到开背刀阻力而增大扭矩,维持夹持机构的匀速圆周运动。因此在加工中心盘电机垂直于半径方向的力 F'_N 等于开背力在其方向上的分量,则虾体在接触点的受力关系为

$$F'_N = F_N \cos \alpha \quad (1)$$

式中 F'_N ——转盘电机作用于虾体的力,N

F_N ——开背刀作用于虾体的开背力,N

α ——开背力与接触点处虾体速度方向的夹角,($^\circ$)

在构建的对虾开背过程力学分析(图3)中,将刀具安置距离 d 近似等于在半径方向上刀具与夹持机构的距离 d' 。以开背刀刃边长度 e 、夹持转盘半径 b 和 d' 所在的三角形中,运用余弦定理,有

$$\cos \theta = \frac{e^2 + c^2 - (b + d')^2}{2ec} \quad (2)$$

$$\cos(\xi + \alpha + \xi') = \frac{e^2 + (b + d')^2 - c^2}{2e(b + d')} \quad (3)$$

其中

$$\alpha + \xi = 90^\circ \quad (4)$$

$$\theta = \theta' \quad (5)$$

$$\xi = \xi' \quad (6)$$

$$d = d' \quad (7)$$

式中 c ——刀具刃边到夹持中心盘中点距离,mm

θ ——刀具角度,($^\circ$)

ξ ——开背刀刃边与接触点处虾体速度方向的夹角,($^\circ$)

联立式(2)~(7)得

$$\cos \alpha = \frac{2(b + d')^2 + e^2 \cos^2 \theta}{2e(b + d')} \quad (8)$$

在接触点处的运动学公式为

$$F' = ma \quad (9)$$

其中 $a = \frac{v^2}{b}$ (10)

$$v = \omega b \quad (11)$$

$$\omega = 2\pi n \quad (12)$$

式中 m ——虾体质量,g

a ——虾体在接触点处在速度方向具有的加速度, m/s^2

v ——夹持中心盘速度,m/s

ω ——夹持中心盘角速度,rad/s

n ——夹持中心盘转速,r/min

联立式(10)~(12)得

$$a = 4\pi^2 bn^2 \quad (13)$$

联立式(1)、(8)、(13)可得

$$F_N = \frac{8\pi^2 be(b + d')mn^2}{2(b + d')^2 + e^2 \cos^2 \theta} \quad (14)$$

由式(14)可知,开背力 F_N 与加工中心盘转速 n 、刀具角度 θ 和刀具安置距离 d 有关。同时根据前期预试验观察得到,刀具在接触虾体初期,虾体接触位置会向刀具反方向和周围形变,当加工中心盘速度较慢时,这种弹性变形更明显;当加工中心盘转速 n 较快时,这种弹性形变较小。因此刀具安置距离 d 不变的情况下,加工中心盘转速 n 不同时,获得的开背深度不同,说明加工中心盘转速 n 和刀具安置位置 d 两个因素具有耦合性。综上所述,刀具角度 θ 、加工中心盘转速 n 和刀具安置距离 d 是影响开背效果的主要因素。

根据对虾开背装置试验台的结构和工作原理,对入刀位置进行分析:开背过程中,入刀位置有两种,即在虾体第6节入刀或第1节入刀。预试验结果表明,虾体在夹持爪夹持后,第6节和第1节所露

出宽度不同,对入刀位置选择影响主要表现在第 1 节相较第 6 节的虾体接触面积明显增大,造成短时间内对刀具产生较大冲击力,在试验过程中,存在夹持爪夹持不稳定的情况,因此综合受力分析和试验结果选择在虾体第 6 节入刀。

3 试验与结果分析

3.1 试验设备

试验设备采用试制的转盘式对虾开背试验台。试验台架如图 4 所示,由夹持机构、开背机构和控制系统构成。开背机构可更换不同角度的刀具,提供 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的角度变化,同时可通过微型滑台进行对刀、定距进给,提供 $0 \sim 20 \text{ mm}$ 的刀具安置距离变化;夹持机构可实现对虾夹持,满足开背夹持需求,机构与对虾剥壳机一致,但在保证不影响试验效果的情况下进行了简化,便于对虾手动上料夹持;控制系统可以实现加工中心盘转动,同时提供 $0 \sim 60 \text{ r/min}$ 的加工中心盘转速。试验于 2022 年 5 月进行,机器放置于实验室调试区。试验现场如图 4 所示。

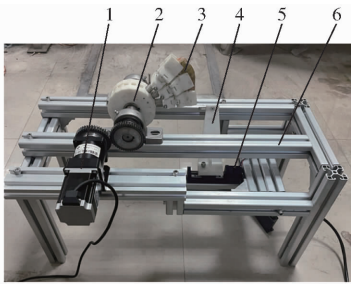


图 4 对虾开背装置试验现场

Fig. 4 Prawn back opening device test site

1. 电机 2. 夹持中心盘 3. 去头对虾 4. 开背机构 5. 微型滑台 6. 机架

3.2 试验材料

试验材料为化冻的中型南美白对虾,即带头质量在 $54 \sim 110 \text{ 只/kg}$ 范围内的对虾^[30]。根据对虾机械化定向剥壳工艺流程中对虾开背工序要求,将冻对虾进行去头处理。处理后的去头冻对虾,要求虾仁断面光洁整齐,对虾虾体第 1 节到第 7 节完整,腹部上至少存在 4 条游泳足。 -40°C 温度下预处理 10 min ,取出后进行净水化冻处理^[31-33]。在试验过程中保证对虾虾体不脱水。

3.3 试验指标

开背质量直接影响后续去肠线工序和取仁工序,所以其试验评价指标与对虾剥壳机的剥壳性能指标相互联系。根据台架试验的条件和样机性能指标的要求,开背部分主要对开背质量进行评价,主要评价指标为开背成功率、虾仁损伤率和虾线裸露成

功率。

根据后续工序考虑,对评价指标定义如下:对虾开背过程中虾体第 1 节到第 5 节虾壳完全开壳情况视为开背成功;对虾开背过程中虾体第 1 节到第 5 节虾壳存在不开壳情况视为开背不成功^[20-21]。对虾开背过程中虾体第 1 节到第 7 节出现断裂,造成虾仁不完整的现象视为虾仁损伤。对虾开背过程中虾体第 1 节到第 5 节的虾线裸露长度超过整体长度的 80% ,视为虾线裸露成功,低于 80% 视为虾线裸露不成功。

开背成功率计算公式为

$$K = \frac{K_1}{K_2} \times 100\% \quad (15)$$

式中 K ——开背成功率, %

K_1 ——每次试验中判定为开背成功的对虾数量,只

K_2 ——每次试验的对虾总数,只

虾仁损伤率计算公式为

$$S = \frac{S_1}{S_2} \times 100\% \quad (16)$$

式中 S ——虾仁损伤率, %

S_1 ——每次试验中判定为虾仁损伤的对虾数量,只

S_2 ——每次试验的对虾总数,只

虾线裸露成功率计算公式为

$$L = \frac{L_1}{L_2} \times 100\% \quad (17)$$

式中 L ——虾线裸露成功率, %

L_1 ——每次试验中判定为虾线裸露成功的对虾数量,只

L_2 ——每次试验的对虾总数,只

在对虾开背过程中,除开背成功率、虾仁损伤率和虾线裸露成功率 3 项评价指标外,还要求虾仁的开背位置与对虾虾体的外轮廓线的重合程度和开背开口光洁整齐程度^[21],采用感官评分值进行对虾开背外观评定,作为参数选择参考。试验由 5 名具有感官评定经验的教师和研究生组成,取 2 项评分的平均值作为综合感官评分,表 1 为感官评分依据。其中,80 分以上为 1 级,表示开背感官效果极佳,65~80 分为 2 级,表示开背感官效果比较满意,65 分以下为 3 级,表示开背感官效果不理想。

3.4 单因素试验

采用刀具角度、加工中心盘转速、刀具安置距离 3 个因素分别对南美白对虾开背环节进行单因素试验,研究同一因素不同水平对开背装置工作效果的影响规律。进行各单因素试验时,该开背装置的其

表1 对虾开背感官评分标准

Tab.1 Open back sensory scoring criteria for prawn

等级	分值		总分
	开口整齐程度	与轮廓线重合程度	
1级	48~55 (开口整齐)	38~45 (基本重合)	≥80
2级	40~48 (开口基本整齐)	30~38 (存在偏差)	65~80
3级	<40 (开口不整齐)	<30 (偏差较大)	<65

他因素均保持不变。每组试验采取样本数30,重复进行两组取平均值。根据预试验分析确定单因素水平如表2所示。

表2 单因素试验因素水平

Tab.2 Single factor test factors and levels

水平	因素		
	刀具角度/ (°)	加工中心盘转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	刀具安置距离/ mm
1	15	5	8
2	30	10	9
3	45	20	10
4	60	30	11
5	75	40	12
6	90	50	
7		55	

3.4.1 刀具角度

取加工中心盘转速20 r/min,刀具安置距离为10 mm,将刀具角度调整为15°~90°实施对虾开背试验。如图5a所示,开背成功率随着刀具角度的增大先增大后减小,当刀具角度为45°时,开背成功率达到96.67%,当角度继续增大时,开背成功率有所下降,这是因为当角度过大时,在戳壳过程中的接触面积较大不容易戳壳;虾仁损伤率和虾线裸露成功率受刀具角度的影响不明显。综合开背成功率、虾仁损伤率、虾线裸露成功率和感官评分值等主要评价指标,刀具角度宜选20°~60°。在进行试验时,为减少刀具磨损对开背效果的影响,进行2组试验

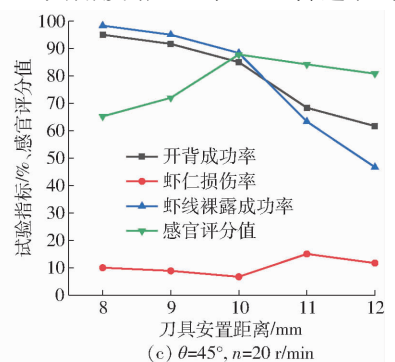
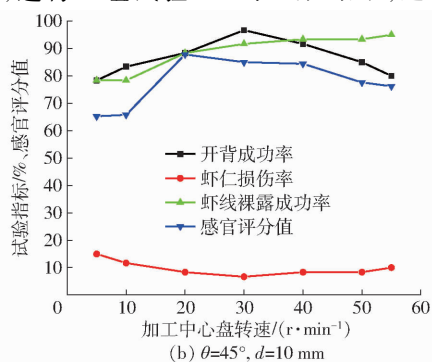
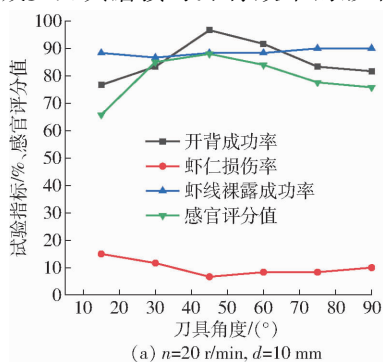


图5 单因素试验结果

Fig.5 Single factor test results

后更换刀具。

3.4.2 加工中心盘转速

取刀具角度为45°,刀具安置距离为10 mm,将加工中心盘转速调整为5~55 r/min 实施对虾开背试验。如图5b所示,南美白对虾开背试验各指标评分值和加工中心盘转速 n 均呈现为非线性。当 n 在5~30 r/min 范围内逐步增大时,开背成功率、虾线裸露成功率也逐步上升,且虾仁损伤率呈减小趋势。当加工中心盘转速达到30 r/min 时,开背成功率达到96.67%。但随着加工中心盘转速继续增大,开背成功率明显下降;虾仁裸露成功率趋于稳定,不再增加。当 n 在5~20 r/min 范围内逐步增大时感官评分值逐渐增大,在10~20 r/min 时,增幅明显,当 n 超过20 r/min 时,感官评分值下降。综合开背成功率、虾仁损伤率、虾线裸露成功率和感官评分值等主要评价指标和加工速度等因素,加工中心盘转速宜选10~40 r/min。

3.4.3 刀具安置距离

取刀具角度为45°,加工中心盘转速为20 r/min,将刀具安置距离 d 调整为8~12 mm,实施对虾开背试验。图5c表明,当 d 在8~10 mm 范围内逐步增大时,感官评分值有明显提升,开背成功率、虾仁损伤率和虾线裸露成功率缓慢下降,说明 d 在8 mm 左右对大部分样本来说距离过近,虾体在和刀具刚接触时开背阻力较大致使虾体从夹持机构上掉落,影响开背效果,同时虾体开口过大影响虾仁品质和美观度。当 d 在10~12 mm 范围内逐渐增大时,开背成功率和虾线裸露成功率明显下降,是因为距离过远,开背刀未完全接触虾体所致。综合开背成功率、虾仁损伤率、虾线裸露成功率和感官评分值等主要评价指标,刀具安置距离 d 宜选9~11 mm。

3.5 正交试验

为研究多因素交互作用对开背效果的影响,获取试验台最优参数组合,开展正交试验。根据单因素试验结果,选取刀具角度、加工中心盘转速、刀具

安置距离为试验因素,每个因素设置 3 个水平,因素编码如表 3 所示。

表 3 试验因素编码
Tab. 3 Test factors' coding

编码	因素		
	刀具角度 $X_1/(\circ)$	加工中心盘转速 $X_2/(r \cdot \min^{-1})$	刀具安置距离 X_3/mm
-1	20	10	9
0	40	25	10
1	60	40	11

基于 Box - Benhnken 中心组合设计理论进行三因素三水平响应曲面试验设计。根据试验方案安排 17 组试验,每组试验重复进行 3 次,对结果取平均值。试验结果如表 4 所示,其中 $R_1 \sim R_4$ 分别为开背成功率、虾仁损伤率、虾线完全裸露率和感官评分值。

表 4 正交试验结果
Tab. 4 Test plan and test results

序号	因素			评价指标			
	$X_1/(\circ)$	$X_2/(r \cdot \min^{-1})$	X_3/mm	$R_1/\%$	$R_2/\%$	$R_3/\%$	R_4
1	40	25	10	98	2	90	87
2	40	25	10	96	4	90	84
3	40	40	9	90	8	86	66
4	60	25	11	92	6	89	84
5	60	25	9	98	10	92	78
6	40	25	10	96	2	89	88
7	40	25	10	100	2	88	88
8	20	25	9	94	6	90	65.5
9	60	40	10	90	10	88	85.5
10	20	10	10	76	14	70	71
11	40	10	11	72	10	65	69
12	20	40	10	86	8	86	79.5
13	60	10	10	76	12	70	68
14	40	10	9	86	14	75	65.5
15	20	25	11	82	4	83	81
16	40	40	11	80	6	89	80.5
17	40	25	10	98	2	87	89

(1) 显著性分析

应用 Design-Expert 软件对表 4 中的数据拟合并进行方差分析,得到的显著性检验结果如表 5 所示。经检验发现 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 4 个模型都显著,做进一步分析 R_1 的模型显著性检验 $F = 20.64, P < 0.001$, R_2 的模型显著性检验 $F = 25.11, P < 0.001$, R_3 的模型显著性检验 $F = 69.31, P < 0.001$, R_4 的模型显著性检验 $F = 15.12, P = 0.001$,说明这 4 个指标的二次回归方程检验达到高度显著,且 R_1 的失拟项检验 $F = 4.17, P = 0.101$, R_2 的失拟项检验 $F = 2.08, P =$

0.245 , R_3 的失拟项检验 $F = 1.13, P = 0.438$, R_4 的失拟项检验 $F = 4.10, P = 0.103$,这 4 个检验指标的失拟项均不显著,说明在试验范围内这 4 个模型的拟合度非常好,因此可以用此模型对刀具角度 X_1 、加工中心盘转速 X_2 以及刀具安置距离 X_3 这 3 个因素的影响效果进行分析和预测。

由表 5 可知,刀具角度、加工中心盘转速以及刀具安置距离对开背成功率 R_1 均有显著性影响, X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 均显著,但是交互项均不显著,说明这 3 个因素对 R_1 的影响交互作用很弱。 X_2 、 X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 对虾仁损伤率 R_2 影响均显著,但交互项均不显著,说明这 3 个因素对 R_2 的影响交互作用很弱。对虾线裸露成功率 R_3 进行显著性分析可知这 3 个因素也均有显著性影响,且 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_2X_3 、 X_2^2 均显著,说明加工中心盘转速和刀具安置距离对虾线裸露成功率影响存在交互项。同样可知,加工中心盘转速 X_2 和刀具安置距离 X_3 对感官评分值 R_4 有显著性影响,但刀具角度 X_1 对感官评分没有显著影响, X_2 、 X_3 、 X_2^2 、 X_3^2 也显著。

去除其中的不显著项后得到的二次多项式回归模型为

$$R_1 = -163.96 - 0.11X_1 + 2.29X_2 + 51.08X_3 - 0.01X_1^2 - 0.06X_2^2 - 3.05X_3^2 \quad (18)$$

$$R_2 = 178.633 - 1.91X_2 - 27.33X_3 + 0.01X_1^2 + 0.03X_2^2 + 1.3X_3^2 \quad (19)$$

$$R_3 = 137.56 - 0.42X_1 + 0.57X_2 - 9.04X_3 + 0.22X_2X_3 - 0.04X_2^2 \quad (20)$$

$$R_4 = -793.89 + 0.19X_2 + 163.35X_3 - 0.04X_2^2 - 7.91X_3^2 \quad (21)$$

(2) 贡献率分析

贡献率可以反映单个因素对所建立模型的影响程度。贡献率越大,影响程度越大。根据方差分析结果中的 F 值,计算对虾开背参数对不同评价指标的贡献率如表 6 所示。

由表 6 可知,对虾开背参数对开背成功率和虾线裸露成功率的贡献率从大到小的顺序为加工中心盘转速、刀具安置距离、刀具角度;对虾开背参数对虾仁损伤率的贡献率从大到小的顺序为加工中心盘转速、刀具角度、刀具安置距离;对虾开背参数对感官评分值的贡献率从大到小的顺序为刀具安置距离、加工中心盘转速、刀具角度。

(3) 响应曲面分析

由表 5 可知,对于评价指标虾线裸露成功率 R_3 、加工中心盘转速和刀具安置距离因素的交互作用显著,其他交互项均不显著。图 6 为加工中心盘

表5 显著性检验结果
Tab.5 Significance test results

方差来源	开背成功率 R_1				虾仁损伤率 R_2				虾线裸露成功率 R_3				感官评分值 R_4			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	1 226.27	9	20.64	<0.001 **	264.74	9	25.11	<0.001 **	1 118.39	9	69.31	<0.001 **	1 173.17	9	15.12	0.001 *
X_1	40.50	1	6.14	0.042 *	4.50	1	3.84	0.091	12.50	1	6.97	0.033 *	42.78	1	4.96	0.061
X_2	162.00	1	24.55	0.002 *	40.50	1	34.57	0.001 *	595.13	1	331.94	<0.001 **	18 050	1	20.93	0.003 *
X_3	220.50	1	33.41	0.001 *	18.00	1	15.37	0.006 *	36.13	1	20.15	0.003 *	195.03	1	22.62	0.002 *
X_1X_2	4.00	1	0.61	0.462	4.00	1	3.41	0.107	1.00	1	0.56	0.479	20.25	1	2.35	0.169
X_1X_3	9.00	1	1.36	0.281	1.00	1	0.85	0.386	4.00	1	2.23	0.179	22.56	1	2.62	0.150
X_2X_3	4.00	1	0.61	0.462	1.00	1	0.85	0.386	42.25	1	23.57	0.002 *	30.25	1	3.51	0.103
X_1^2	39.17	1	5.93	0.045 *	33.01	1	28.18	0.001 *	0.32	1	0.18	0.686	19.69	1	2.28	0.175
X_2^2	663.17	1	100.48	<0.001 **	141.64	1	120.91	<0.001 **	423.16	1	236.03	<0.001 **	343.90	1	39.88	<0.001 **
X_3^2	39.17	1	5.93	0.045 *	7.12	1	6.07	0.043 *	0.00	1	0.00	0.971	263.61	1	30.57	0.001 *
残差	46.20	7			8.20	7			12.55	7			60.36	7		
失拟	35.00	3	4.17	0.101	5.00	3	2.08	0.245	5.75	3	1.13	0.438	45.56	3	4.10	0.103
误差	11.20	4			3.20	4			6.80	4			14.80	4		
总和	1 272.47	16			272.94	16			1 130.94	16			1 233.53	16		

注: ** 表示极显著 ($P < 0.001$), * 表示显著 ($P < 0.05$)。

表6 各因素对不同指标贡献率

Tab.6 Contribution rates of various factors to different indicators

因素	贡献率			
	R_1	R_2	R_3	R_4
X_1	1.802	2.058	1.132	1.956
X_2	1.949	2.316	2.472	2.572
X_3	1.935	1.770	1.705	2.589

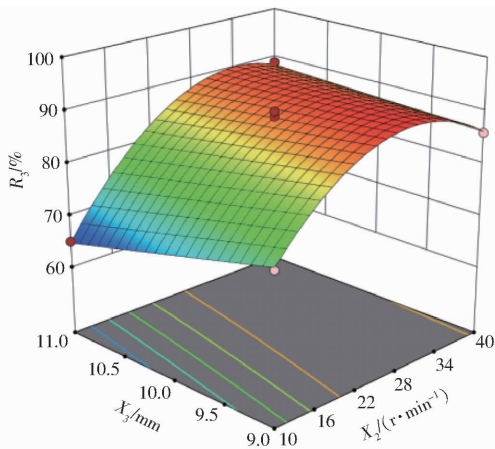


图6 交互作用显著项响应曲面

Fig.6 Influence of different factors on performance index of open back

转速和刀具安置距离对虾线裸露成功率 R_3 交互作用响应曲面。由图6可以看出,刀具安置距离 X_3 对虾线裸露成功率 R_3 基本为线性影响,刀具安置距离越近,虾线裸露成功率越高。且交互项显著验证了加工中心盘转速对虾体变形量的影响,即在刀具安置距离 d 确定的情况下,加工中心盘转速 n 越大,获得的开背深度越深。

(4) 参数优化

根据上述试验结果分析,不同的开背参数对开背效果具有较大的影响,为获得对虾开背的最优工作参数,利用 Design-Expert 软件的优化模块进行优化求解。开背是对虾剥壳的前道工序,其开背成功与否直接影响后续取仁工序,因此保证样机开背成功率的重要性高于其虾线裸露的重要性。所以本文确立开背成功率的权重为 0.5,虾仁损伤率的权重为 0.2,虾线裸露成功率的权重为 0.2,感官评分值的权重为 0.1。开背成功率和虾线裸露成功率是评价整机性能的主要指标,越高越好;而虾仁损伤率越低越好。利用 Design-Expert 软件的寻优功能,设置目标函数为

$$\begin{cases} \max R_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min R_2(X_1, X_2, X_3) \\ \max R_3(X_1, X_2, X_3) \\ \max R_4(X_1, X_2, X_3) \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} 20^\circ \leq X_1 \leq 60^\circ \\ 10 \text{ r/min} \leq X_2 \leq 40 \text{ r/min} \\ 9 \text{ mm} \leq X_3 \leq 11 \text{ mm} \end{cases}$$

对目标函数优化求解得到对虾开背的最优工作参数组合为:刀具角度 43.838° 、加工中心盘转速 28.391 r/min 、刀具安置距离 9.801 mm ,在此参数组合下开背成功率为 99.161% ;虾仁损伤率为 2.825% ;虾线裸露成功率为 90.727% ;感官评分值为 86.944 。

3.6 验证试验

考虑到机器的实际情况,对影响因素进行微调,取刀具角度 45° 、加工中心盘转速 28 r/min 、刀具安

置距离 9.8 mm, 进行验证试验。每次试验选取已分级的中型虾, 进行去头、速冻、解冻等预处理操作, 每组试验样本数为 30 只, 试验重复进行 3 次, 试验结果取平均值, 对数据进行处理与分析后, 得到的试验结果如表 7 所示。

表 7 验证试验结果
Tab.7 Validation test results

检验指标	预测值	验证试验值	绝对误差	相对误差/ %
R_1	99.15%	98.89%	0.26%	0.27
R_2	2.82%	3.33%	0.51%	15.40
R_3	90.72%	87.78%	2.94%	3.36
R_4	86.96	85.33	1.63	1.90

由试验结果可知开背成功率为 98.89%、感官评分值为 85.33, 与理论优化结果相对误差均小于 2%, 说明所建模型与优化参数的可行性与准确性较高; 而虾仁损伤率为 3.33%, 其相对误差超过 10%, 但指标值较低, 且 4 个评价指标的试验值与预测值之间的绝对误差均较小, 也说明建立的模型与优化的参数具有一定的参考价值, 优化后的对虾开背装置总体上满足作业要求。

4 结论

(1) 进行了对虾开背工艺分析, 通过对虾与刀具的互作关系建立对虾开背过程力学模型, 理论分析表明对虾的开背过程是刀具纵向切入与对虾横向运动协同的模式, 刀具从虾体第 6 节切入有利于对

虾的开背, 同时确定影响对虾开背效果的主要因素为刀具角度、加工中心盘转速和刀具安置距离。通过单因素试验确定影响因素最佳区间为: 刀具角度 $20^\circ \sim 60^\circ$ 、加工中心盘转速 $10 \sim 40$ r/min 和刀具安置距离 $9 \sim 11$ mm。利用 Design-Expert 软件设计三因素三水平 Box-Behnken 响应面法试验, 以开背成功率、虾仁损伤率、虾线裸露成功率和感官评分值为评价指标进行试验。试验结果表明: 对开背成功率和虾线裸露成功率的贡献率从大到小的顺序为: 加工中心盘转速、刀具安置距离、刀具角度; 对虾仁损伤率的贡献率从大到小的顺序为加工中心盘转速、刀具角度、刀具安置距离; 对虾开背参数对感官评分值的贡献率从大到小的顺序为刀具安置距离、加工中心盘转速、刀具角度。

(2) 利用 Design-Expert 软件的优化模块对作业参数进行优化, 优化后得到最佳开背参数组合为刀具角度 43.838° 、加工中心盘转速 28.391 r/min、刀具安置距离 9.801 mm, 在此参数组合下开背成功率为 99.161%、虾仁损伤率为 2.825%、虾线裸露成功率为 90.727%、感官评分值为 86.944。

(3) 进行了试验台验证试验, 设置刀具角度 45° 、加工中心盘转速 28 r/min、刀具安置距离 9.8 mm, 得出开背成功率 98.89%、虾仁损伤率 3.33%、虾线裸露成功率 87.78% 和感官评分值 85.33。各项指标的试验结果与理论预测结果的绝对误差均较小, 验证了模型与所优化参数的合理性, 优化后的对虾开背装置性能满足作业要求。

参 考 文 献

- [1] 孙松, 孙琛, 车斌. 我国对虾产业竞争力分析[J]. 中国渔业经济, 2020, 38(5): 56-66. SUN Song, SUN Chen, CHE Bin. Analysis on the competitiveness of shrimp industry[J]. Chinese Fisheries Economics, 2020, 38(5): 56-66. (in Chinese)
- [2] 李明爽. 第九届对虾产业论坛在湛江举办围绕各环节探讨发展新动向[J]. 中国水产, 2017(5): 10-12.
- [3] 包特力根白乙. 我国对虾产业生产发展、市场基础及前景展望[J]. 中国渔业经济, 2022, 40(1): 41-52. BAO Teligenbaiyi. The prospect of prawn industry, market basis and development in China[J]. Chinese Fisheries Economics, 2022, 40(1): 41-52. (in Chinese)
- [4] 刘乐丹, 赵永锋, 魏友海. 南美白对虾产业现状分析及新技术应用[J]. 科学养鱼, 2022(4): 20-23. LIU Ledan, ZHAO Yongfeng, WEI Youhai. Analysis of industry status and application of new technology of *Penaeus vannamei* [J]. Scientific Fish Farming, 2022(4): 20-23. (in Chinese)
- [5] 农业农村部渔业渔政管理局. 2020 中国渔业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
- [6] 周井娟. 我国水产品加工业的演变轨迹及发展预测[J]. 中国渔业经济, 2017, 35(3): 42-47. ZHOU Jingjuan. Analysis on the evolution law of aquatic products processing industry and future development trend[J]. Chinese Fisheries Economics, 2017, 35(3): 42-47. (in Chinese)
- [7] 余招龙, 梁前才, 杜洪平. 冻干南美白对虾加工技术[J]. 科学养鱼, 2018(9): 74. SHE Zhaolong, LIANG Qiancai, DU Hongping. Processing technology of freeze-dried *Penaeus vannamei* [J]. Scientific Fish Farming, 2018(9): 74. (in Chinese)
- [8] 弋景刚, 马骏原, 王泽河, 等. 对虾加工装备现状与发展[J]. 现代农业装备, 2020, 41(1): 2-11. YI Jinggang, MA Junyuan, WANG Zehe, et al. Status and development of shrimp processing equipment [J]. Modern Agricultural Equipments, 2020, 41(1): 2-11. (in Chinese)
- [9] 易俊洁, 丁国微, 胡小松, 等. 南美白对虾脱壳工艺比较及其对虾仁品质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(17): 287-292. YI Junjie, DING Guowei, HU Xiaosong, et al. Comparison of shucking techniques for white shrimp and its effect on quality of peeled shrimp[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(17): 287-292. (in Chinese)
- [10] XIN Dong, VIJAYA R. Recent advances of selected novel processing techniques on shrimp allergenicity: a review[J]. Trends

- in Food Science & Technology, 2022, 124:334 - 344.
- [11] JONSSON G. Shrimp processing machine and method; US3751766[P]. 1973 - 08 - 14.
- [12] LEDET B A, LAPEYRE G C. Apparatus for and method for improving the yield of peeled shrimp meat obtained with roller type shrimp peeling machinery; US5120265[P]. 1992 - 06 - 09.
- [13] VEDSTED L S. Apparatus and method for cleaning peeling machines; US2010062697(A1)[P]. 2010 - 03 - 11.
- [14] 张进疆, 张林泉, 赵锡和, 等. 虾剥壳装备研究与设计[J]. 现代农业装备, 2011, 32(7): 50 - 52.
ZHANG Jinjiang, ZHANG Linquan, ZHAO Xihe, et al. Research and design of shrimp shell equipment[J]. Modern Agricultural Equipments, 2011, 32(7): 50 - 52. (in Chinese)
- [15] 张秀花, 赵玉达, 王泽河, 等. 对虾剥壳机的设计[J]. 大连海洋大学学报, 2014, 29(2): 198 - 200.
ZHANG Xiuhua, ZHAO Yuda, WANG Zehe, et al. Design of shrimp sheller[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2014, 29(2): 198 - 200. (in Chinese)
- [16] 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)
- [17] 张秀花, 赵庆龙, 赵玉达, 等. 对虾对辊挤压式剥壳工艺参数及预处理条件优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 308 - 314.
ZHANG Xiuhua, ZHAO Qinglong, ZHAO Yuda, et al. Parameter and pretreatment condition optimization of dual rollers extrusion peeling device for *Litopenaeus vannamei*[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(14): 308 - 314. (in Chinese)
- [18] 马道宽, 龚丽, 张汉月, 等. 辊轴式虾剥壳机开发设计与试验[J]. 现代农业装备, 2021, 42(1): 70 - 75.
MA Daokuan, GONG Li, ZHANG Hanyue, et al. Design and experiment of roller type shrimp shelling machine[J]. Modern Agricultural Equipments, 2021, 42(1): 70 - 75. (in Chinese)
- [19] 张泽明, 王泽河, 张秀花, 等. 一种连续式对虾剥壳装置的设计与试验研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 115 - 118.
ZHANG Zeming, WANG Zehe, ZHANG Xiuhua, et al. Design and test on continuous peeling device for shrimp[J]. Food & Machinery, 2015, 31(3): 115 - 118. (in Chinese)
- [20] 张秀花, 王利光, 弋景刚, 等. 带式夹持输送对虾开背机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(20): 284 - 291.
ZHANG Xiuhua, WANG Liguang, YI Jinggang, et al. Design and experiment of shrimp backside cutting machine formed by belt clamping and conveying[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(20): 284 - 291. (in Chinese)
- [21] 王利光, 张秀花, 李纪刚, 等. 链板式对虾开背装置的试验研究[J]. 河北农业大学学报, 2017, 40(2): 93 - 96, 101.
WANG Liguang, ZHANG Xiuhua, LI Jigang, et al. Experimental study on the shrimp-cutting device formed by chain plate[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2017, 40(2): 93 - 96, 101. (in Chinese)
- [22] 莫盛秋. 一种鱼类去鳞开膛机的设计[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(6): 236 - 238.
MO Shengqiu. Design of one kind of machine for scrape the scales and sipper[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(6): 236 - 238. (in Chinese)
- [23] 张燕青, 崔清亮, 郭玉明, 等. 谷子茎秆切割力学特性试验与分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 146 - 155, 162.
ZHANG Yanqing, CUI Qingliang, GUO Yuming, et al. Experiment and analysis of cutting mechanical properties of millet stem[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 146 - 155, 162. (in Chinese)
- [24] MOOD Y, JAMES A. Apparatus for removing internal organs of fish—comprises transferring part which holds fish with belly opened from both sides and scratch off apparatus[J]. Food Control, 1998, 9(5): 315 - 316.
- [25] LARS A, EMIL B, TROND L, et al. Experimental study of effectiveness of robotic cleaning for fish-processing plants[J]. Food Control, 2019, 100: 269 - 277.
- [26] 李天华, 孟志伟, 丁贺贺, 等. 甘蓝切根作业力学分析与参数优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7): 63 - 72.
LI Tianhua, MENG Zhiwei, DING Hehe, et al. Mechanical analysis and parameter optimization of cabbage root cutting operation[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(7): 63 - 72. (in Chinese)
- [27] 熊师, 赵博, 胡小鹿, 等. 对虾逐只分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 357 - 365.
XIONG Shi, ZHAO Bo, HU Xiaolu, et al. Design and experiment on prawn single separation device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 357 - 365. (in Chinese)
- [28] 熊师, 李佳, 周利明, 等. 辊轴式对虾剥壳机控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 457 - 465.
XIONG Shi, LI Jia, ZHOU Liming, et al. Design and test of control system for roller shrimp peeling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 457 - 465. (in Chinese)
- [29] 熊师, 李璐, 董鑫, 等. 对虾腹背定向系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 449 - 456.
XIONG Shi, LI Lu, DONG Xin, et al. Design and experiment of orientation system of abdomen and back for shrimp[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 449 - 456. (in Chinese)
- [30] 熊师, 方宪法, 牛康, 等. 对虾定向输送装置设计与参数优化试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(5): 324 - 331.
XIONG Shi, FANG Xianfa, NIU Kang, et al. Design and parameter optimization of directional conveying device for shrimp[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 324 - 331. (in Chinese)
- [31] 李秀霞, 马莹莹, 赵利爽. 中国对虾冻藏期间新鲜度和质构的变化[J]. 食品工业, 2019, 40(1): 122 - 126.
LI Xiuxia, MA Yingying, ZHAO Lishuang, et al. Changes of freshness and texture of *Fenneropenaeus chinensis* during frozen storage[J]. The Food Industry, 2019, 40(1): 122 - 126. (in Chinese)
- [32] 高学礼, 李月娟. 对虾加工鲜度控制及检验[J]. 中国酿造, 2009(6): 144 - 145.
GAO Xueli, LI Yuejuan. Control and inspection of shrimp freshness during processing[J]. China Brewing, 2009(6): 144 - 145. (in Chinese)
- [33] 李慢, 马晓彬, 王文骏, 等. 解冻方式对中国对虾品质的影响[J]. 中国食品学报, 2019, 19(5): 182 - 190.
LI Man, MA Xiaobin, WANG Wenjun, et al. Effects of thawing methods on the quality of Chinese shrimp[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(5): 182 - 190. (in Chinese)