

# 缢蛏振动筛分装置的优化与试验

## Optimization and experiment of vibrating screening device for constricted razor

刘 涵<sup>1</sup> 申屠留芳<sup>1</sup> 孙星钊<sup>2</sup> 王 萌<sup>1</sup> 张鹏程<sup>1</sup>

LIU Han<sup>1</sup> SHENTU Liu-fang<sup>1</sup> SUN Xing-zhao<sup>2</sup> WANG Meng<sup>1</sup> ZHANG Peng-cheng<sup>1</sup>

(1. 江苏海洋大学机械工程学院, 江苏 连云港 222005; 2. 连云港市元天农机研究所, 江苏 连云港 222006)

(1. College of Mechanical Engineering, Ocean University of Jiangsu, Lianyungang, Jiangsu, 222005, China;

2. Lianyungang Yuantian Agricultural Machinery Research Institute, Lianyungang, Jiangsu, 222006, China)

**摘要:**目的:提高缢蛏壳肉分离效率。方法:采用参数法对振动筛分装置主要参数进行设计,以连云港双头蛏为试验对象,以振动频率、振幅、筛面倾角为试验因素,以筛分效率和肉中带壳比率为主控目标进行单因素试验,利用 Design-Expert 软件对试验结果进行方差分析,建立频率、振幅、筛面倾角与筛分效率和肉中带壳比率相匹配的回归模型。采用响应面优化分析法,得到了缢蛏壳肉分离筛分装置的最佳工作参数匹配。结果:当出料比率控制为 1.2 kg/s、开壳比率控制为 97%,振动频率设定为 21.6 Hz、振幅设定为 3.6 mm、筛面倾角设定为 9°时,缢蛏筛分效率为 97.60%,肉中带壳比率为 4.52%。结论:所设计的缢蛏振动筛分装置筛分效率高、适应性好,可满足初步加工要求。

**关键词:**缢蛏;壳肉分离;振动;筛分

**Abstract: Objective:** To improve the separation efficiency of constricted clam shell and meat. **Methods:** Taking Lianyungang double-headed razor as the test object, taking frequency, amplitude, and sieve surface inclination as the test factors, and taking the screening efficiency and the ratio of the shell in the meat as the main control targets, a single-factor test was carried out, and the test results were analyzed by Design-Expert software. An analysis of variance was performed to establish a regression model matching the frequency, amplitude, and inclination of the screen surface to the screening efficiency and the ratio of husks in the meat. Using the response surface optimization analysis method, the optimal matching of working

parameters for the separation and screening device of constricted razor shell and meat was obtained. **Results:** When the discharge rate was controlled at 1.2 kg/s, the shell opening rate was controlled at 97%, the frequency was set at 21.6 Hz, the amplitude was set at 3.6 mm, and the screen inclination angle was set at 9°, the screening efficiency of constricted razor was improved, with the screen efficiency of 97.60%, and the shell-on ratio of the meat of 4.52%. **Conclusion:** The designed vibrating screening device for constricted razor has high screening efficiency and good adaptability, which can meet the preliminary processing requirements.

**Keywords:** shellfish; shell meat separation; vibration; sieve

缢蛏,俗称蛏子,属竹蛏科缢蛏属,是生长在近海滩涂的一种双壳贝类软体动物<sup>[1]</sup>。壳肉分离是缢蛏深加工的关键工序,目前中国不少地区仍然采用传统的人工方式进行分离<sup>[2]</sup>,效率低、产品品质差、成本高且难以保证食品卫生安全,极大地制约着缢蛏加工产业的发展<sup>[3]</sup>。

目前国内外有关学者对壳肉分离技术进行了一定研究<sup>[4]</sup>。He 等<sup>[5]</sup>研究表明,当压力参数调节到 311 MPa,保压 0 min 时牡蛎脱壳率达到 100%;经过高压处理过的牡蛎低温保存数周后,其水分含量与 pH 值变化较小,而且超高压处理后的牡蛎色泽、组织结构与气味均优于未处理的样本。谢秋阳<sup>[6]</sup>运用水流剥离闭壳肌并构建数学模型,通过对各种射流类型特点及剥离效果的对比分析,确定了用于闭壳肌剥离的最佳射流类型——非淹没连续水射流,最终搭建了水射流剥离海湾扇贝柱试验样机,样机的喷嘴连接有多自由度装置,喷射作业中喷嘴控制水流沿贝肉与贝壳连接的切线方向移动,实现贝柱的剥离。但以上装备结构复杂,技术难度大,难以推广。

研究拟设计一种缢蛏振动筛分装置,并以连云港双头蛏为试验对象,通过 Box-Behnken 试验设计对装备频

**基金项目:**江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(编号:NI2020-20)

**作者简介:**刘涵,男,江苏海洋大学在读硕士研究生。

**通信作者:**申屠留芳(1965—),女,江苏海洋大学教授,博士。

E-mail: 747256317@qq.com

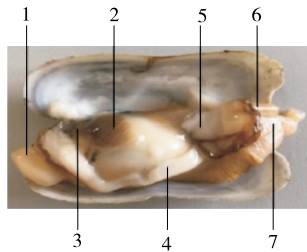
**收稿日期:**2022-03-21 **改回日期:**2022-11-21

率、振幅、筛面倾角进行优化研究, 以期探索一种简洁高效的壳肉分离方式。

## 1 缢蛏壳肉分离原理与振动筛分装置结构设计

### 1.1 闭壳肌特性与分离机理

如图 1 所示, 缢蛏贝肉与贝壳主要是依靠闭壳肌紧密连接<sup>[7]</sup>, 闭壳肌一般呈圆柱形且由两种不同的肌肉组成<sup>[8]</sup>, 缢蛏能够闭合和开张主要得益于闭壳肌规律性的收缩力<sup>[9-11]</sup>。缢蛏壳肉分离后最佳状态是: 蛏肉自然从蛏壳中脱落, 蛏肉与蛏壳分别得到收集, 蛏肉表面无损伤且集中收集的蛏肉中细小蛏壳较少<sup>[12]</sup>。研究所用的是经过蒸煮后的缢蛏, 闭壳肌受高温后失活, 与贝壳内部的附着力减小<sup>[13]</sup>, 经过振动作用后便可实现蛏肉与蛏壳的分离。



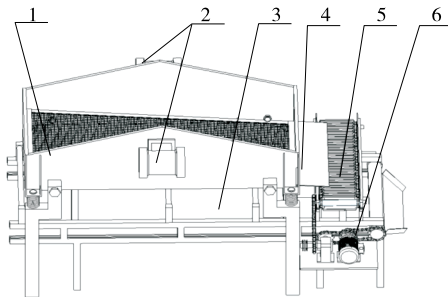
1. 斧足 2. 前闭壳肌 3. 韧带 4. 外套膜 5. 后闭壳肌  
6. 入水管 7. 出水管

图 1 缢蛏生理结构图

Figure 1 Physiological structure of constricted razor

### 1.2 振动筛分装置工作原理

振动筛分装置如图 2 所示。缢蛏振动筛分作业流程为: 振动电机带动振动筛呈上下周期性运动<sup>[14]</sup>, 缢蛏从蒸煮箱体掉落至振动筛中, 缢蛏在振动作用下蛏肉脱离蛏壳<sup>[15]</sup>, 平均尺寸小于筛孔的蛏肉透过筛掉落至下方的蛏肉输送带中<sup>[16-17]</sup>, 平均尺寸大于筛网的蛏壳在筛网上方通过出料口运动至蛏壳输送带, 蛏肉与蛏壳输送带在转



1. 振动筛 2. 振动电机 3. 蛏肉输送带 4. 出料口 5. 蛏壳输送带 6. 转运机构

图 2 缢蛏振动筛分装置

Figure 2 Vibrating screening device for constricted clams

运机构带动下将分离后的物料运送至收集装置中<sup>[18]</sup>。

## 2 筛分装置动力学分析

### 2.1 振动筛动力学分析

直线振动筛的动力学模型如图 3 所示, 是由筛箱、激振器、连接振动部件与基础支撑原件和振动过程中产生阻尼构成的振动系统<sup>[19]</sup>。

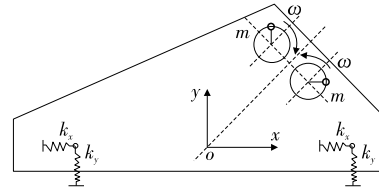


图 3 筛分装置动力学模型

Figure 3 The working principle of the screening device

根据图 3 中振动筛动力学模型, 激振器工作产生的力即为作用在筛体上的力<sup>[20]</sup>, 激振器产生的定向简谐力  $P$  为:

$$P = 2m_0 e \omega^2 \sin \omega t, \quad (1)$$

式中:

$m_0$ ——单轴激振横梁上偏心块的质量, kg;

$e$ ——偏心距, mm;

$\omega$ ——激振角频率, rad/s。

根据达朗贝尔原理, 作用于筛体上的合力应为零, 可得振动方程:

$$\begin{cases} 2m_0 e \omega^2 \cos \beta_0 \sin \omega t - (M + 2m_0) \ddot{x} - f_x \dot{x} - k_x x = 0 \\ 2m_0 e \omega^2 \sin \beta_0 \sin \omega t - (M + 2m_0) \ddot{y} - f_y \dot{y} - k_y y = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

式中:

$M$ ——筛体的计算质量, kg;

$f_x$ —— $x$  方向等效阻尼系数;

$f_y$ —— $y$  方向等效阻尼系数;

$k_x$ ——隔振弹簧  $x$  方向上刚度, N/m;

$k_y$ ——隔振弹簧  $y$  方向上刚度, N/m;

$x, y$ ——筛体在  $x, y$  方向上位移, m;

$\dot{x}, \dot{y}$ ——筛体在  $x, y$  方向上速度, m/s;

$\ddot{x}, \ddot{y}$ ——筛体在  $x, y$  方向上加速度,  $m/s^2$ 。

### 2.2 筛面物料分析

振动筛的筛面应呈倾斜安装状态, 保证物料颗粒受振动筛激振力同时向前运动<sup>[21]</sup> (见图 4), 当进行筛分作业时, 颗粒本身受力的平衡方程式为:

$$\begin{cases} mA\omega^2 \sin \varphi \sin \beta - G \cos \alpha = N \\ mA\omega^2 \sin \varphi \cos \beta + G \sin \alpha = F \end{cases}, \quad (3)$$

式中:

$A$ ——筛面振幅, mm;

$G$ ——物料颗粒所受重力, N;

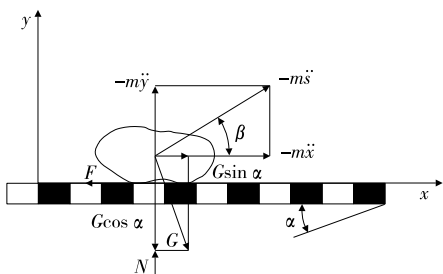


图 4 物料颗粒运动状态

Figure 4 Movement state of material particles

- N——筛面对物料的法相反作用力, N;
- F——物料受到筛面的静摩擦力, N;
- $\alpha$ ——筛面倾角,  $^{\circ}$ ;
- $\psi$ ——筛箱运动相位角, rad;
- $\omega$ ——筛箱运动角速度, rad/s;
- $\beta$ ——筛箱跳动方向角,  $^{\circ}$ 。

### 3 缢蛭振动筛分参数优化

#### 3.1 试验材料与设备

双头蛭:江苏连云港市东海海域捕获,养殖周期为 10 个月,捕捞与试验时间间隔不超过 48 h,长度为 67~70 mm;

- 缢蛭壳肉分离振动筛分装置:自制;
- 游标卡尺:0~150 mm;日本三丰(Mitutoyo)公司;
- 电子天平:ACS-30 型;广州晶博电子科技有限公司。

#### 3.2 参数确定

以连云港市培育的双头蛭作为研究对象,蛭壳、蛭肉平均尺寸分别为 63.6 mm × 22.8 mm × 16.7 mm、62.4 mm × 16.5 mm × 13.8 mm,为了获得最佳透筛效果,筛孔尺寸应大于蛭肉平均粒径的 10% 并小于蛭壳尺寸,故最终选择筛孔尺寸为 18 mm × 15.5 mm。

影响振动筛筛分性能指标主要有振幅、振动频率、筛

面倾角。振幅为振动筛工作行程的 1/2;振动频率为筛体每秒振动次数,直线振动筛的振幅须达到一定值才能使得物料脱离筛面<sup>[22]</sup>,减少堵孔现象的发生;适当的筛面倾角可提升物料的前进速度,增加其筛分效能<sup>[23]</sup>。根据振动机械设计手册,试验设定振幅为 3~5 mm,频率取值为 12.5~25.0 Hz,筛面倾角为 5°~9°。

#### 3.3 评价指标

3.3.1 筛分效率 根据式(4)计算物料的筛分效率。

$$Y_1 = \frac{W_{r1}}{W_{r2}} \times 100\%, \tag{4}$$

式中:

- $Y_1$ ——筛分效率, %;
- $W_{r1}$ ——实际透筛蛭肉数量;
- $W_{r2}$ ——理论透筛蛭肉数量。

3.3.2 肉中带壳比率 根据式(5)计算肉中带壳比率。

$$Y_2 = \frac{W_{r3}}{W_{r1}} \times 100\%, \tag{5}$$

式中:

- $Y_2$ ——肉中带壳比率, %;
- $W_{r3}$ ——透过筛网的完整蛭壳数量。

3.3.3 不完整蛭壳 通过质量比对法计算。

#### 3.4 单因素试验

3.4.1 频率对筛分性能的影响 在筛面倾角为 7°,振幅为 4 mm 的条件下,不同振动频率(12.5, 18.75, 25.0 Hz)工况下筛分性能关系如图 5 所示。

由图 5 可知,随着时间逐渐增加,肉中带壳比率呈先上升后下降趋势。究其原因,振动频率增大可提升筛上物料的松散度,加快物料颗粒的分层,蛭肉颗粒有更多机会与筛网接触并产生透筛效果,筛分能力得到提升。而过大的振动频率导致物料颗粒的筛上速度显著增大,减少蛭肉颗粒与筛面的接触时间,此时部分蛭壳颗粒便可透过筛网,故肉中带壳比率相较于低频工况有所增加。

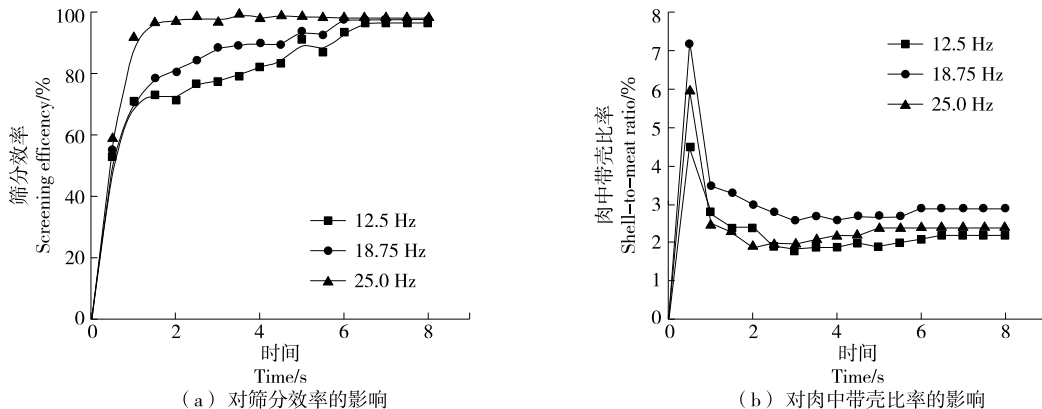


图 5 振动频率对筛分性能影响  
Figure 5 Influence of vibration frequency on screening performance

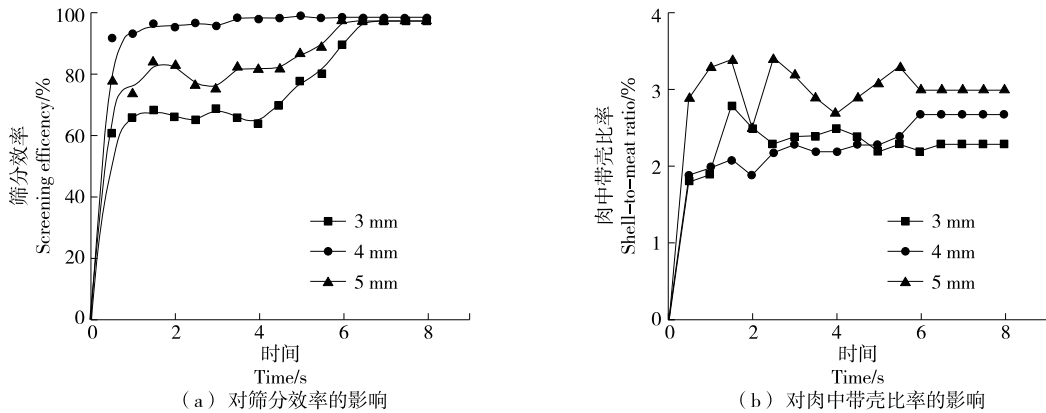
3.4.2 振幅对筛分性能的影响 在振动频率为 18.75 Hz, 筛面倾角为 7° 的条件下, 不同振幅(3, 4, 5 mm) 工况下筛分性能关系如图 6 所示。

由图 6 可知, 相同时间段内, 随振动筛振幅的增大, 筛分效率呈先增大后减小的趋势, 肉中带壳比率呈逐渐增大趋势, 原因是振幅增大导致筛面上物料运动激烈, 分散程度高, 筛分效果更好, 但过大振幅导致物料与筛网接触时间减少, 筛分性能再次下降。

3.4.3 筛面倾角对筛分性能的影响 在振动频率为

18.75 Hz, 振幅为 4 mm 的条件下, 不同筛面倾角(5°, 7°, 9°) 工况下筛分性能关系如图 7 所示。

由图 7 可知, 筛面倾角增大, 筛分效率呈先上升后下降态势, 由于筛面倾角增大, 物料的  $x$  方向运动速度增大, 更易产生分层效果, 筛分效果更好, 但过大的筛面倾角导致混合物料更快透过筛面, 弱化了物料与筛面作用, 更多混合物料从出料口排除, 透筛数量降低, 故筛面倾角为 9° 时的肉中带壳比率降低并不能说明此时筛分性能最佳。

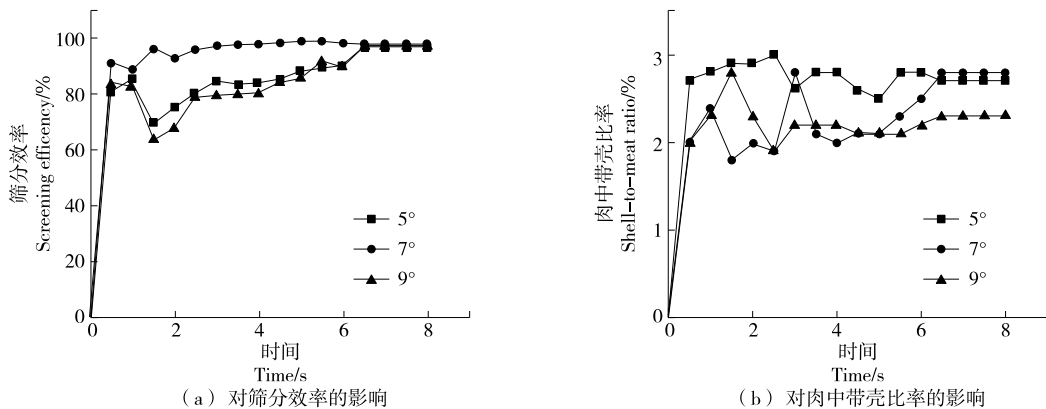


(a) 对筛分效率的影响

(b) 对肉中带壳比率的影响

图 6 振幅对筛分性能影响

Figure 6 Influence of amplitude on screening performance



(a) 对筛分效率的影响

(b) 对肉中带壳比率的影响

图 7 筛面倾角对筛分性能的影响

Figure 7 Influence of screen inclination on screening performance

在振动频率对筛分性能的影响研究中, 当振动频率为 25.0 Hz 时, 筛分效率最高, 而振动频率为 12.5 Hz 时, 肉中带壳比率最低。筛分性能最佳状态所对应的因素值并不统一, 同时观察到不同筛面倾角对筛分性能的影响也有类似趋势, 故要综合考虑并分析各因素对筛分性能的影响强弱顺序, 依此确定筛分性能的最佳参数匹配。

### 3.5 响应面试验

3.5.1 试验因素与水平编码表 在单因素试验的基础上, 设计三因素三水平的 Box-Behnken 试验。因素的水平编码表见表 1。

表 1 因素水平编码表

Table 1 Factor level coding table

编码	X <sub>1</sub> 振动频率/Hz	X <sub>2</sub> 振幅/mm	X <sub>3</sub> 筛面倾角/(°)
-1	12.50	3	5
0	18.75	4	7
1	25.00	5	9

3.5.2 试验设计及结果 单因素试验中确定试验因素与选取水平范围后, 采用 Design-Expert 软件选择 Box-Behnken Design 进行响应面分析的试验设计<sup>[24]</sup>, 试验结

果如表 2 所示。

根据表 2 中的试验数据,构建各因素对筛分效率和肉中带壳比率的回归方程:

$$Y_1 = 97.49 + 1.63X_1 - 0.97X_2 + 0.37X_3 - 0.60X_1X_2 + 0.075X_1X_3 + 0.23X_2X_3 - 0.70X_1^2 - 0.91X_2^2 - 0.22X_3^2, \quad (6)$$

$$Y_2 = 4.06 + 0.46X_1 - 0.20X_2 - 0.39X_3 + 0.013X_1X_2 - 0.20X_1X_3 + 0.050X_2X_3 + 0.20X_1^2 - 0.020X_2^2 + 0.26X_3^2. \quad (7)$$

3.5.3 方差分析 由表 3 和表 4 可知,所建模型的显著性水平均小于 0.01,两试验指标回归模型均极显著,数据相关性良好。失拟项  $P$  值均大于 0.05,不显著,说明筛分效率和肉中带壳比率两试验指标回归模型程度均较高,拟合效果良好。调整决定系数均大于 0.95,说明上述模型可解释 95% 以上的试验指标,从另一方面表明此模型能够反映响应值变化。

3.5.4 响应面分析 由图 8(a)和图 8(d)可知,当筛面倾角一定时,频率与筛分效率呈正相关关系,频率与肉中带壳率呈抛物线关系,即肉中带壳率随频率增大而先增加后减小。由图 8(b)和图 8(e)可知,频率一定时,振幅与筛分效率呈正相关关系,与肉中带壳比率呈抛物线关系。由图 8(c)和图 8(f)可知,振幅一定时,筛面倾角与筛分效率呈正相关,与肉中带壳比率呈正相关。

3.5.5 参数优化与实验验证 为了确保作业时筛分效率最高并且肉中带壳比率最低,采用 Design-Expert 中 optimization 模块进行多目标优化,最终优化可以得到最

表 2 缢蛭筛分性能 Box-Behnken 试验结果分析

Table 2 Analysis of Box-Behnken test results for screening performance of constricted razor

试验编号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	筛分效率/%	肉中带壳比率/%
1	-1	-1	0	94.43	4.04
2	0	1	1	95.96	3.82
3	-1	0	1	95.13	3.68
4	-1	0	-1	94.81	4.27
5	0	0	0	97.87	4.15
6	0	1	-1	94.49	4.29
7	1	0	1	98.48	4.38
8	0	0	0	97.12	3.94
9	1	-1	0	98.95	4.75
10	0	-1	1	97.77	4.21
11	-1	1	0	94.00	3.70
12	0	0	0	97.84	4.00
13	1	1	0	96.13	4.46
14	0	0	0	96.99	4.16
15	0	0	0	97.63	4.03
16	0	-1	-1	97.20	4.88
17	1	0	-1	97.86	5.76

优组合为振动频率 21.58 Hz,振幅 3.64 mm,筛面倾角 8.78°,回归模型曲面响应值最佳,此条件下的最优筛分效率为 98.53%,肉中带壳比率为 4.14%。

表 3 筛分效率回归模型方差分析†

Table 3 Analysis of variance for sieving efficiency  $Y_1$  regression model

方差源	平方和	自由度	均方	$F$ 值	$P$ 值	显著性
模型	37.88	9	4.21	28.49	0.000 1	* *
$X_1$	21.29	1	21.29	144.10	<0.000 1	* *
$X_2$	7.55	1	7.55	51.09	0.000 2	* *
$X_3$	1.11	1	1.11	7.51	0.028 9	*
$X_1X_2$	1.43	1	1.43	9.67	0.017 1	*
$X_1X_3$	2.30E-002	1	2.30E-002	0.15	0.707 9	
$X_2X_3$	0.20	1	0.20	1.37	0.280 0	
$X_1^2$	2.06	1	2.06	13.92	0.007 4	* *
$X_2^2$	3.52	1	3.52	23.80	0.001 8	* *
$X_3^2$	0.21	1	0.21	1.40	0.276 1	
残差	1.03	7	0.15			
失拟项	0.36	3	0.12	0.71	0.123 6	
误差	0.67	4	0.17			
总和	38.91	16				

† \* \*  $P < 0.01$  为极显著; \*  $P < 0.05$  为显著;  $R_{adj}^2 = 0.973 4$ ; 信噪比为 17.657。

表 4 肉中带壳比率回归模型方差分析<sup>†</sup>

Table 4 Analysis of variance for the regression model of the ratio  $Y_2$  of shells in meat

方差源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	3.87	9	0.43	14.80	0.000 9	**
$X_1$	1.67	1	1.67	57.70	0.000 1	**
$X_2$	0.32	1	0.32	11.16	0.012 4	*
$X_3$	1.21	1	1.21	41.66	0.000 3	**
$X_1 X_2$	6.25E-004	1	6.25E-004	2.20E-002	0.887 5	
$X_1 X_3$	0.16	1	0.16	5.38	0.053 5	
$X_2 X_3$	1.00E-002	1	1.00E-002	0.34	0.575 6	
$X_1^2$	0.17	1	0.17	5.92	0.045 2	*
$X_2^2$	1.77E-003	1	1.77E-003	6.10E-002	0.812 1	
$X_3^2$	0.29	1	0.29	10.15	0.015 4	*
残差	0.20	7	0.03			
失拟项	0.17	3	0.06	6.00	0.058 0	
误差	3.70E-002	4	9.23E-003			
总和	4.07	16				

<sup>†</sup> \*\*  $P < 0.01$  为极显著; \*  $P < 0.05$  为显著;  $R_{adj}^2 = 0.950 1$ ; 信噪比为 15.307。

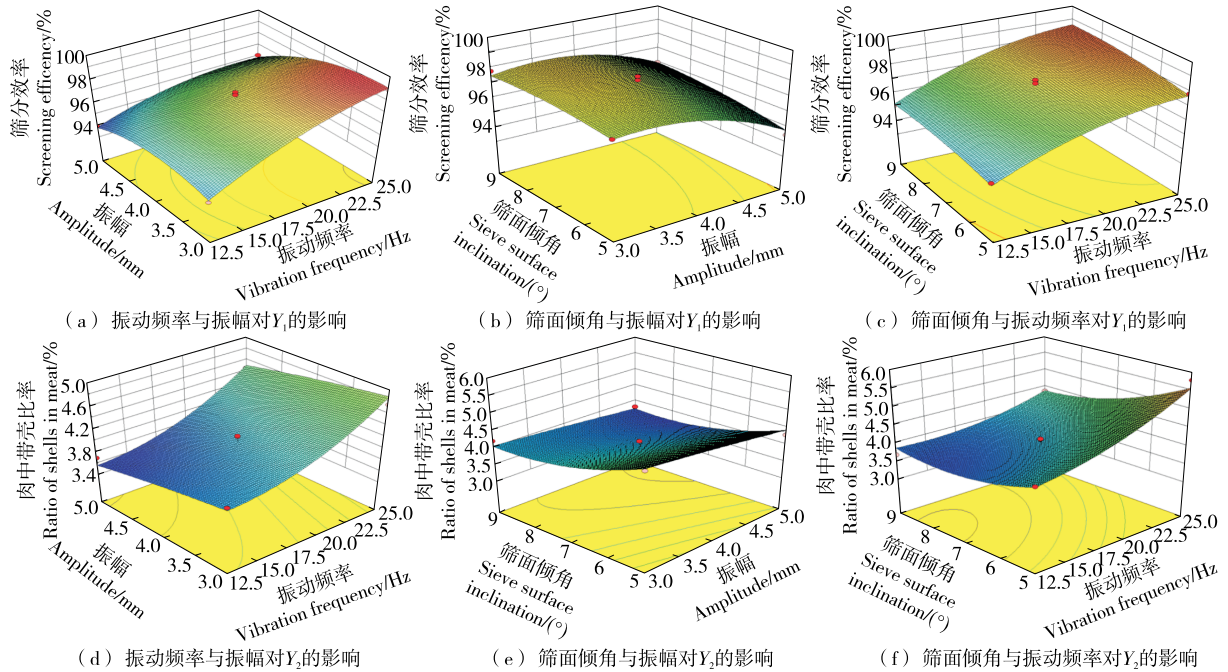


图 8 各因素间交互作用对筛分性能的影响

Figure 8 Influence of interaction among various factors on sieving performance

为了验证预测模型结果的准确性,将优化后的参数应用到在东方水产加工有限公司进行样机试验,考虑机构实际状况,圆整优化结果,取振幅为 3.6 mm,频率为 21.6 Hz,筛面倾角为 9°,经 5 次实验验证,其筛分效率达 97.60%,肉中带壳比率为 4.52%,与模型预测接近,进一步验证了所设计模型的可靠性。

#### 4 结论

研究设计了一种振动筛分装置,基于蛭壳与蛭肉的参数采集确定了振动筛的动力学参数。通过工艺优化得出其最优组合为出料比率 1.2 kg/s、开壳比率 97%,振动频率 21.6 Hz、振幅 3.6 mm、筛面倾角度 9°,该组合下筛分效率为 97.60%,肉中带壳比率为 4.52%。

基于 EDEM 构建的缢蛭虚拟筛分试验系统中,为简化仿真过程所采用的 Herzlin-Mlindlin 接触理论未考虑蛭壳与蛭肉颗粒具有弹性形变等因素,仿真结果与实际结果有所差异。在后期开展 EDEM 仿真试验中,考虑碎裂情况,采用不同粒径分布定义细小贝壳的振动工况仿真,综合仿真分析多颗粒共同作用下不同颗粒的运动轨迹、速度变化规律等,进一步提高缢蛭壳肉分离机理仿真的精度。

### 参考文献

- [1] 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019: 19-23.  
Chinese Academy of Fishery Sciences. China fishery statistics yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019: 19-23.
- [2] 刘媛, 王健, 孙剑峰, 等. 我国海洋贝类资源的利用现状和发展趋势[J]. 现代食品科技, 2013, 29(3): 673-677.  
LIU Y, WANG J, SUN J F, et al. Utilization status and development trend of marine shellfish resources in my country[J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(3): 673-677.
- [3] 沈军樑. 贻贝热压脱壳及其品质控制技术研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015: 21-22.  
SHEN J Y. Research on hot-pressed shelling of mussels and its quality control technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015: 21-22.
- [4] 徐林通, 郝俊, 郑艳坤, 等. 中国贝类资源现状及管理问题探讨[J]. 科技创新导报, 2018, 15(16): 201-203.  
XU L T, HAO J, ZHENG Y K, et al. Discussion on the status quo and management of shellfish resources in China[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2018, 15(16): 201-203.
- [5] HE H, ADAMS R, FARKAS D, et al. Use of high-pressure processing for oyster shucking and shelf-life extension[J]. Journal of Food Science, 2002, 67(2): 640-645.
- [6] 解秋阳. 水射流剥离海湾扇贝闭壳肌的试验研究与样机设计[D]. 保定: 河北农业大学, 2015: 30-31.  
XIE Q Y. Experimental research and prototype design of water jet stripping bay scallop adductor muscle [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2015: 30-31.
- [7] 孔德刚, 弋景刚, 姜海勇, 等. 海湾扇贝开壳取贝柱工艺方案的研究[J]. 中国农机化学报, 2014, 35(2): 230-234.  
KONG D G, GE J G, JIANG H Y, et al. Research on the process plan of bay scallops from shell opening and scallop column[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2): 230-234.
- [8] 芦新春, 孙星钊, 王伟. 网带式缢蛭蒸煮开壳机主要工作参数试验研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(7): 101-105.  
LU X C, SUN X Z, WANG W. Experimental study on main working parameters of mesh-belt type constricted razor clam cooking and shelling machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(7): 101-105.
- [9] 尹欣玲, 孔德刚, 杨淑华, 等. 锯片切割式扇贝开壳试验台的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(5): 118-121.  
YIN X L, KONG D G, YANG S H, et al. Design and experiment of the scallop shell opening test bench with sawblade[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(5): 118-121.
- [10] 弋景刚, 吴红雷, 姜海勇, 等. 蒸汽式扇贝开壳装置工作参数优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 70-77.  
GE J G, WU H L, JIANG H Y, et al. Optimization of working parameters of steam scallop shell opening device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(18): 70-77.
- [11] 贾振超, 张锋, 孔凡祝, 等. 我国扇贝加工装备现状及发展趋势[J]. 农业装备与车辆工程, 2019, 57(S1): 218-220.  
JIA Z C, ZHANG F, KONG F Z, et al. Current Situation and Development Trend of Scallop Processing Equipment in my country[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2019, 57(S1): 218-220.
- [12] 胡静艳, 谭锦凌, 李振华. 水射流贻贝单边脱壳装备喷嘴内流场数值仿真研究[J]. 机电工程, 2018, 35(8): 828-832.  
HU J Y, TAN J L, LI Z H. Numerical simulation study of flow field in nozzle of water jet mussel unilateral shelling equipment[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(8): 828-832.
- [13] 杨淑华, 张志军, 弋景刚, 等. 对辊式海湾扇贝分级设备的设计[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(12): 220-224.  
YANG S H, ZHANG Z J, GE J G, et al. Design of double roller bay scallop grading equipment [J]. Food Research and Development, 2016, 37(12): 220-224.
- [14] 李江滨, 侯敢. 翡翠贻贝多糖对衰老模型小鼠的抗氧化和免疫功能调节作用[J]. 检验医学与临床, 2010, 7(12): 153-154, 156.  
LI J B, HOU G. Antioxidant and immune function regulation of green mussel polysaccharide in aging model mice[J]. Laboratory Medicine and Clinic, 2010, 7(12): 153-154, 156.
- [15] 刘瑞义. 畦间沟深度对缢蛭池塘养殖效果的影响[J]. 渔业现代化, 2021, 48(5): 55-61.  
LIU R Y. The effect of furrow depth on constricted razor pond culture effect[J]. Fishery Modernization, 2021, 48(5): 55-61.
- [16] 王敏. 超高压对贻贝脱壳及品质的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 25-28.  
WANG M. Effects of ultra-high pressure on shelling and quality of mussels[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 25-28.
- [17] 申屠留芳, 刘涵, 吴旋, 等. 贻贝壳肉分离技术与装备的应用现状及发展趋势[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(5): 8-11.  
SHENTU L F, LIU H, WU X, et al. Application status and development trend of mussel shell and meat separation technology and equipment[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(5): 8-11.

(下转第 146 页)

- [14] 叶健明. 鹰嘴豆多肽的制备及其生物活性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2019: 3-11.  
YE J M. Study on preparation of chickpea polypeptides and its biological activities[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2019: 3-11.
- [15] HAN L, MENG J, YANG Y, et al. Antioxidant and anti-fatigue activities of seed oil from the berries of three indigenous plants in tibetan plateau[J]. Journal of Food and Nutrition Research, 2015, 7(3): 445-457.
- [16] KIM J, HWANG H, PARK J, et al. Silk peptide treatment can improve the exercise performance of mice [J]. Journal of the International Society of Sports Nutrition, 2014, 11: 35-41.
- [17] PERDIGON G, DE MACIAS M E N, ALVAREZ S, et al. Effect of perorally administered lactobacilli on macrophage activation in mice[J]. Infection & Immunity, 1986, 53: 404-410.
- [18] ZHANG Y, YAO X B, BAO B L, et al. Anti-fatigue activity of a triterpenoid-rich extract from Chinese bamboo shavings (Caulis bambusae in taeniam) [J]. Phytotherapy Research, 2006, 20(10): 872-876.
- [19] KOO H N, LEE J K, HONG S H, et al. Herbkinases increases physical stamina in mice[J]. Biolog Pharmaceutical Bulletin, 2004, 27(1): 117-119.
- [20] PAN Z, JING W, WEI Z, et al. Antifatigue and antiaging effects of Chinese rice wine in mice[J]. Food Science & Nutrition, 2018, 6(8): 2 386-2 394.
- [21] KANG N, KIM S Y, RHO S, et al. Anti-fatigue activity of a mixture of seahorse (*Hippocampus abdominalis*) hydrolysate and red ginseng[J]. Fisheries and Aquatic Sciences, 2017, 20(1): 3-10.
- [22] WANG J J, SHIEH M J, KUO S L, et al. Effect of red mold rice on antifatigue and exercise-related changes in lipid peroxidation in endurance exercise [J]. Applied Microbiology & Biotechnology, 2006, 70: 247-253.
- [23] VAN LOON L J, SARIS W H M, VERHAGEN H, et al. Plasma insulin responses after ingestion different amino acid or protein mixtures with carbohydrate[J]. The American Journal of Clinical Nutrition, 2000, 72(1): 96-105.
- [24] CALBERT J A L, MACLEAN D A. Plasma glucagon and insulin responses depend on the rate of appearance of amino acids after ingestion of different protein solution in humans[J]. The Journal of Nutrition, 2002, 132(8): 2 174-2 182.
- [25] FINAUD J, LAC G, FILAIRE E. Oxidative stress relationship with exercise and training[J]. Sports Medicine, 2006, 36(4): 327-358.
- [26] BOSCA L, ARAGA N J J, SOLS A. Modulation of muscle phosphofructokinase at physiological concentration of enzyme[J]. Journal of Biological Chemistry, 1985, 260(4): 2 100-2 107.
- [27] ZHANG W, XIANG Q, ZHAO J, et al. Purification, structural elucidation and physicochemical properties of a polysaccharide from *Abelmoschus esculentus* L. (okra) flowers[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 155: 740-750.
- [28] COLLADO-HIDALGO A, BOWER J E, GANZ P A, et al. Inflammatory biomarkers for persistent fatigue in breast cancer survivors[J]. Clinical Cancer Research, 2016, 12(9): 2 759-2 766.
- [29] KIM Y S, AHN C B, JE J Y. Anti-inflammatory action of high molecular weight *Mytilus edulis* hydrolysates fraction in LPS-induced RAW264.7 macrophage via NF- $\kappa$ B and MAPK pathways [J]. Food Chemistry, 2016, 202: 9-14.
- [30] YE J, SHEN C, HUANG Y, et al. Anti-fatigue activity of sea cucumber peptides prepared from *Stichopus japonicus* in an endurance swimming rat model[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(13): 4 548-4 556.
- [31] HIRANO T. Interleukin 6 in autoimmune and inflammatory diseases: A personal memoir[J]. Proceedings of the Japan Academy Series B Physical and Biological Sciences, 2010, 86(7): 717-730.
- [32] CANNON J G, ANGEL J B, BALL R W, et al. Acute phase responses and cytokine secretion in chronic fatigue syndrome[J]. Journal of Clinical Immunology, 1999, 19(6): 414-421.
- (上接第 84 页)
- [18] 沈建, 林蔚, 郁蔚文, 等. 我国贝类加工现状与发展前景[J]. 中国水产, 2008(3): 73-75.  
SHEN J, LIN W, YU W W, et al. Current situation and development prospect of shellfish processing in my country[J]. China Fisheries, 2008(3): 73-75.
- [19] 杨炬, 付宗国, 于晓龙, 等. 新型贻贝加工设备设计研究[J]. 机械工程师, 2016(2): 95-98.  
YANG J, FU Z G, YU X L, et al. Design and research of new mussel processing equipment[J]. Mechanical Engineer, 2016(2): 95-98.
- [20] 张馨丹, 王慧慧, 芦金石, 等. 贝类预煮加工设备结构设计及运动仿真[J]. 食品与机械, 2016, 32(7): 69-71, 201.  
ZHANG X D, WANG H H, LU J S, et al. Structural design and motion simulation of shellfish pre-cooking processing equipment [J]. Food & Machinery, 2016, 32(7): 69-71, 201.
- [21] 李府谦, 李兰英, 王艾泉, 等. 贝类蒸煮肉壳分离组合技术研究[J]. 现代制造技术与装备, 2019(5): 99-100, 103.  
LI F Q, LI L Y, WANG A Q, et al. Research on separation and combination technology of shellfish cooking meat shell[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2019(5): 99-100, 103.
- [22] 鲍振东. 基于力学蚬贝超高压脱壳机理的分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2015: 44-50.  
BAO Z D. Analysis on the mechanism of ultra-high pressure shelling of clams based on mechanics [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2015: 44-50.
- [23] 申屠留芳. 一种智能化贝类蒸煮开壳设备: CN202111177238.8 [P]. 2021-12-31.  
SHENTU L F. A kind of intelligent shellfish cooking equipment: CN202111177238.8[P]. 2021-12-31.
- [24] 刘文卿. 试验设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 48-60.  
LIU W Q. Test design [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007: 48-60.