

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.01.018

刘涵, 申屠留芳, 孙星钊, 等. 基于响应面法的缢蛏壳肉分离装置工艺参数研究[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(1): 122-129

Liu Han, Shentu Liufang, Sun Xingzhao, et al. Study on the process parameters of the cage meat separation device based on the response surface method [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(1): 122-129

# 基于响应面法的缢蛏壳肉分离装置工艺参数研究<sup>\*</sup>

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>

(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)

**摘要:** 加热开壳是缢蛏壳肉分离作业的关键工序之一, 优化蒸煮工艺, 获得缢蛏蒸煮作业最佳感官评分值, 实现缢蛏高开壳率。以缢蛏为试验原料, 基于蒸煮温度、蒸煮时间、物料堆积层厚开展单因素试验, 以感官评分为响应值, 采用响应面优化分析法, 确定缢蛏蒸煮输送装置最佳工作参数。基于所得参数进行蒸煮装置的 EDEM、Fluent 仿真与场地试验。当蒸汽进气压力为 6 MPa, 缢蛏下料平均速度为 0.375 kg/s, 蒸煮时间为 79 s, 蒸煮温度为 94 ℃, 堆积层厚为 26 mm 时, 开壳效果感官评分为 83.32 分, 仿真输送过程中聚团、碎裂概率小于 5%, 蒸煮装置热力云图表明箱体温度分布满足缢蛏开壳需求; 以开壳率、闭壳肌粘接力为指标开展缢蛏蒸煮性能试验, 开壳率 ≥ 95%, 闭壳肌粘接力小于 2 N。蒸煮装置各工况满足生产需求, 作业后蛏肉品质符合后续作业要求。

**关键词:** 缢蛏开壳; 蒸煮装置; 响应面优化; 离散元; 开壳率

**中图分类号:** S986.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2095-5553 (2024) 01-0122-08

## Study on the process parameters of the cage meat separation device based on the response surface method

Liu Han<sup>1</sup>, Shentu Liufang<sup>1</sup>, Sun Xingzhao<sup>2</sup>, Wang Meng<sup>1</sup>, Zhang Pengcheng<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** Heating shell opening is one of the key processes in the separation of constricted razor shells and meat. The cooking process was optimized to obtain the best sensory score of the constricted clams after the cooking operation, and to achieve a high shell opening rate. In this study, constricted razor was used as the test raw material, and a single-factor experiment was carried out based on the cooking temperature, cooking time, and material accumulation layer thickness. The sensory score was used as the response value, and the response surface optimization analysis method was used to determine the optimal matching of the working parameters of the constricted razor cooking and conveying device. Based on the obtained parameters, EDEM and Fluent simulations and field tests of the cooking device were carried out. When the steam inlet pressure is 6 MPa, the average cutting speed of the constricted razor is 0.375 kg/s, the cooking time is 79 s, the cooking temperature is 94 ℃, and the thickness of the stacking layer is 26 mm, the sensory score of the open shell is 83.32, and the agglomeration is simulated during the conveying process, the probability of fragmentation is less than 5%, and the thermal cloud diagram of the cooking device shows that the temperature distribution in the box meets the requirements for opening the shell of constricted clams. The cooking performance test of constricted clams was carried out with the opening rate and adductor muscle adhesion as indicators, and the shell opening rate was ≥ 95%. The adductor muscle adhesion is less than 2 N. Each working condition of the cooking device meets the production requirements, and the quality of the

收稿日期: 2022 年 4 月 28 日      修回日期: 2022 年 7 月 5 日

<sup>\*</sup> 基金项目: 江苏省现代农机装备与技术示范推广(集成创新类项目)(NI2020-20)

第一作者: 刘涵, 男, 1997 年生, 山东威海人, 硕士; 研究方向为水产品加工装备设计与制造。E-mail: 1071086712@qq.com

通讯作者: 申屠留芳, 女, 1965 年生, 浙江东阳人, 博士, 教授, 硕导; 研究方向为农业装备设计与制造、水产品加工装备设计。E-mail: 747256317@qq.com

constricted clams after the operation meets the requirements for further processing.

**Keywords:** razor clam shell opening; cooking device; response surface optimisation; discrete element; shell opening rate

## 0 引言

我国海洋渔业资源得天独厚,拥有超过 18 000 km 黄金海岸线,同时也是世界缢蛏养殖大国。缢蛏(*Sinonova culaconstricta*)隶属软体动物门、瓣鳃纲、异齿亚纲、帘蛤目、竹蛏科,又名蛏子。缢蛏营养丰富,其肉丰腴脆嫩,鲜美清甜,药物功效显著,对它的研究和开发利用也受到越来越多的科研工作者的重视<sup>[1-4]</sup>。

缢蛏加工产业季节依赖性显著,由于缢蛏体内含酶量和含水量特别高,捕捞后极易腐败变质,单靠鲜活缢蛏销售无法维持供需平衡<sup>[5]</sup>,无法及时处理的缢蛏需制作成蛏干、蛏珠等高档营养品进行销售以拓宽市场销售渠道。蛏类制品加工需进行壳肉分离作业,缢蛏的蒸煮开壳在壳肉分离作业中起到关键性作用<sup>[6-8]</sup>。缢蛏进行蒸煮作业过程中,蒸煮时间过短导致无法有效开壳,时间过长导致蛏肉萎缩、营养成分大幅流失,因此研究蒸煮过程中贝肉品相与口感,确定合理的加热温度、加热时间与堆积层厚,可有效提升缢蛏开壳率、提高蛏肉感官评分,有利于后续分离作业及蛏产业市场开拓<sup>[9-10]</sup>。

目前作为缢蛏壳肉分离的辅助装置—蒸煮输送装置的研究较少,作业参数多源于生产实践和经验设计。有关学者围绕贻贝、文蛤等双壳贝类开壳效果需求,从开壳技术种类、开壳结构设计等方面开展研究,解秋阳<sup>[11]</sup>对水射流喷嘴进行仿真分析及试验,设计基于水射流方法剥离海湾扇贝贝柱的样机;胡静艳等<sup>[12]</sup>采用水射流对厚壳贻贝进行试验,确定水流对厚壳贻贝冲击的最佳角度、最佳压强及最佳靶距。朱松明等<sup>[13]</sup>对贻贝超高压脱壳方法进行研究,确定开壳压力为 300 MPa,保压 2 min 为贻贝最佳脱壳参数。上述研究多从固定脱壳装置的有限元分析及贝肉处理加工后生理特性入手,较少结合仿真试验对缢蛏感官评分进行研究。

因此,本文围绕批次缢蛏蒸煮输送装置需求,采用 Box-Behnken Design 响应面法获得缢蛏蒸煮工艺最佳参数组合,建立蒸煮装置 EDEM 仿真模型与箱体热力分布模型,对完成蒸煮作业缢蛏进行开壳率与闭壳肌粘接力测定试验,验证参数设计的合理性,以期对缢蛏壳肉分离品质与蒸煮装置性能的研究提供理论依据。

## 1 缢蛏蒸煮装置结构设计

### 1.1 蒸煮装置结构与工作条件

如图 1 所示,缢蛏经喂料口投入加有高温沸水的蒸煮箱内,蒸煮箱内设有输送网带,缢蛏掉落至输送网带

上随其转运至出料口,该装置进料模式为连续入料,根据文献[4, 7]及沿海加工实际经验,高温水浴存在 20% 的缢蛏无法有效开壳,对后续壳肉分离作业带来不利影响。以往解决办法为通过延长高温水浴行程或减缓输送带输送速度以达到延长加热时间,但会导致装置用料激增或贝肉萎缩、营养物质大幅流失<sup>[14-16]</sup>,故本文考虑上述矛盾,在高温水浴工况后添加蒸汽保温作业流程,在提高总体开壳率的同时有效减小贝肉损伤情况。

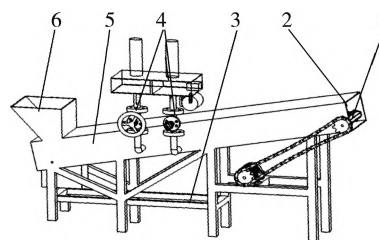


图 1 蒸煮装置结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cooking device structure

1. 输送带 2. 出料口 3. 安装底座 4. 蒸汽输送管路  
5. 蒸煮箱 6. 喂料口

### 1.2 水浴加热与蒸汽保温行程计算

蒸煮装置材料为不锈钢,置于常温下存在散热现象<sup>[17-18]</sup>,蒸煮箱体内水温为 95 ℃,采用变温加热锅进行开壳试验,共选取 5 组,每组 20 个缢蛏进行开壳时间测定。

开壳时间分别为 30 s、35 s、36 s、34 s、35 s,故水浴时间  $t_1 = 30 \sim 35$  s。如图 2 所示,箱体与地面的角度  $\alpha$  为 12°,取平均开壳时间为 35 s,输送带链轮直径  $d_1$  为 20 cm,转速  $n$  为 17 r/min,故水浴行程

$$s_1 = \pi \times d_1 \times n \times 35 / 60 = 6.2 \text{ m}$$

缢蛏加工产业中其物料持续受热时间一般不超过 90 s,本文设定受热时间  $t = 75$  s,故蒸汽保温时间为  $t_2 = 40$  s,蒸汽保温行程

$$s_2 = \pi \times d_1 \times n \times 40 / 60 = 7.1 \text{ m}$$

蒸煮箱体总长为 13.3 m,输送装置速度

$$v = \frac{s_1 + s_2}{t_1 + t_2} = 0.18 \text{ m/s}$$

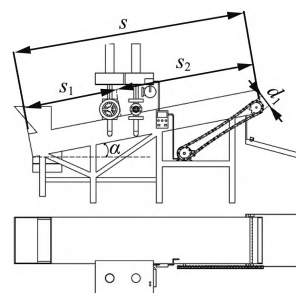


图 2 箱体尺寸示意图

Fig. 2 Graph of box size

2 响应面法缢蛏蒸煮工艺最佳参数选择

2.1 试验材料与设备

选择带壳新鲜双头缢蛏,所属海域为黄海,蛏体长度在 67~70 mm 的鲜活缢蛏进行试验。

试验装置:批次式缢蛏壳肉分离清选机;ACS—

30 电子秤 1 台;游标卡尺 1 把;卷尺一个;弹簧拉力计(1~10 N)一只。

2.2 评价方法

对经过蒸煮工艺处理后缢蛏的开壳难度、开缝程度、蛏肉组织状态为核心观测指标,采用感官评分值对开壳效果进行评定,感官评定如表 1 所示。

表 1 缢蛏开壳效果评价指标

Tab. 1 Evaluation index of the effect of opening the shell of constricted razor

级别	开壳难度	闭壳肌与蛏壳粘结力	蛏肉组织状态	总评分值
一级	开壳容易 (37~45 分)	闭壳肌与蛏壳粘结力 $\leq 4$ N (25~30 分)	颜色鲜亮,蛏肉完整性好 (20~25 分)	$>82$ 分
二级	开壳较容易 (29~37 分)	闭壳肌与蛏壳粘结力 $\geq 4$ N (20~25 分)	蛏肉微浊,蛏肉完整性较好 (15~20 分)	64~82 分
三级	开壳困难 ( $<29$ 分)	闭壳肌与蛏壳粘结力 $\geq 7$ N ( $<20$ 分)	蛏肉浑浊,破碎程度大 ( $<15$ 分)	$<64$ 分

2.3 试验设计

2.3.1 单因素试验

本次试验通过改变批次式缢蛏蒸煮壳肉分离设备参数得到对缢蛏开壳效果的影响因素,并确定最佳工作参数组合。本试验以感官评分为响应指标,采用单因素轮换法依次考察蒸煮温度、蒸煮时间、物料堆积层厚<sup>[19]</sup>对缢蛏开壳效果的影响。

2.3.2 二次回归正交试验

在单因素试验基础上,运用 Box-Behnken Design 设计理论,分析各因素之间交互作用对开壳效果的影响,以组合试验进行三因素三水平响应面优化<sup>[20-21]</sup>。

2.4 结果与分析

2.4.1 单因素实验具体温度

1) 蒸煮温度对缢蛏开壳效果的影响。在蒸煮时间为 76 s、物料堆积层厚度为 22 mm、蒸煮温度在 84℃~96℃ 的条件下进行试验,结果如图 3 所示。

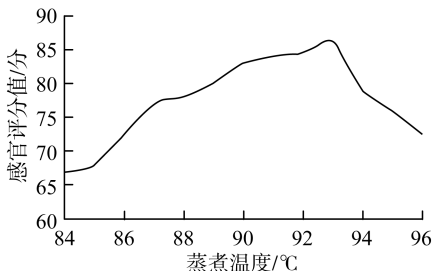


图 3 不同蒸煮温度开壳效果感官评分值

Fig. 3 Sensory score of shell opening effect at different cooking temperatures

随着蒸煮温度的升高,缢蛏开壳效果的感官评分值先升高后降低,呈现非线性关系。结果表明当蒸煮温度为 85℃~93℃ 时,开壳效果的感官评分值随温度上升而增加;当蒸煮温度为 93℃ 时,开壳效果

的感官评分值最高,开壳效果最好,感官评分值达到 85.58 分;随着温度的再次上升,虽开壳率略有增加,但感官评分值有所下降,主要原因是温度达到 93℃ 时,缢蛏开壳率达到 85%,但过高的水浴温度导致闭壳肌变性程度增加,蛏肉开始萎缩。因此,为保证缢蛏最终达到一级品质的总感官评分值,确定蒸煮温度为 90℃~96℃。

2) 蒸煮时间对缢蛏开壳效果的影响。蒸汽发生器压强控制在 6~8 MPa,采用二管路输送布置,在蒸煮温度为 93℃、物料堆积层厚度为 22 mm、蒸煮时间为 60~90 s 的条件下进行开壳试验。不同蒸煮时间下开壳效果的感官评价曲线如图 4 所示。缢蛏开壳效果感官评分值与蒸煮时间呈现非线性关系,蒸煮时间在 60~76 s 区间内,随着加热时间增长,缢蛏开壳感官评价价值逐渐提升,并在 76 s 时开缝程度最大,总体评分值达到 84.12 分。随后感官评分有所下降,这是由于过长的蒸煮时间导致蛏肉变性量增大,同样会使得蛏肉萎缩,组织状态评分值有所下降,进而导致总体感官评分值下降,综合考虑开壳效果与生产效率等因素,蒸煮时间宜选 65~80 s。

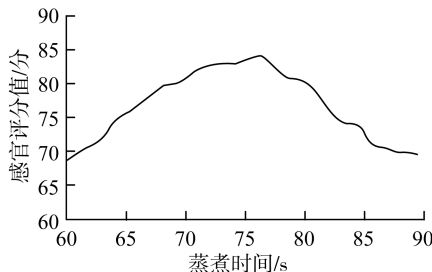


图 4 不同蒸煮时间开壳效果感官评分值

Fig. 4 Sensory score of shell opening effect at different cooking times

3) 堆积层厚度对缢蛏开壳效果的影响。蒸汽发生器压强控制在 6~8 MPa,采用二管路输送布置,通过控制物料投放速度使得堆积层厚度控制在 15~55 mm 条件下进行开壳试验。

不同堆积层厚度对应开壳效果感官评价曲线如图 5 所示。缢蛏开壳效果感官评分值与堆积层厚度呈现非线性关系,随着堆积层厚度的增加,缢蛏开壳感官评价价值先是上升后下降,当堆积层厚处于 15~22 mm 区间时,开壳效果感官评分值逐渐升高,并在 22 mm 时,评分值达到 86.88 分,这是由于此时开壳率和蛏肉组织为最佳状态。但随着堆积层厚度继续增加,位于输送装置底部的缢蛏受热不均匀,开壳率显著下降,感官评分有所降低。保证最终达到一级品质的总感官评分值,最终确定堆积层厚宜选 17~35 mm。

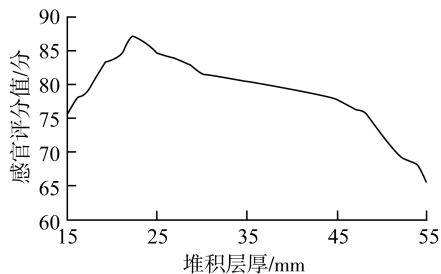


图 5 不同堆积层厚开壳效果感官评分值

Fig. 5 Sensory score of shell opening effect with different stacking layer thicknesses

2.4.2 Box-Behnken Design 组合试验结果分析

按照 Box-Behnken Design 试验设计方案,在单因素试验基础上,采用缢蛏开壳效果的感官评分为响应值,以蒸煮温度、蒸煮时间、堆积层厚度为考察因素,试验因素与水平见表 2,试验结果见表 3,其中 A、B、C 为因素编码值。

表 2 开壳因素水平编码表

Tab. 2 Sensory evaluation standard of shell opening effect			
编码	蒸煮温度/℃	蒸煮时间/s	堆积层厚/mm
-1	90	65	17
0	93	75	26
1	96	85	35

极差 R 的大小反映了各试验参数的作用大小<sup>[22-24]</sup>,根据表 3 可判断各试验参数对开壳效果感官评分值的影响强度依次为:蒸煮温度、蒸煮时间、堆积层厚。

运用 Design-Expert 软件对表 3 中感官得分进行拟合,得回归方程

$$Y = 83.18 + 0.96A + 0.50B + 0.18C - 0.34AB - 0.37AC + 0.32BC - 0.97A^2 - 1.46B^2 - 1.49C^2$$

对上述回归方程进行方差分析,结果见表 4。

表 3 缢蛏开壳效果 Box-Behnken 试验结果分析

Tab. 3 Analysis of the Box-Behnken test results of the shell-opening effect of constricted razor

序号	A	B	C	感官得分 Y
1	0	-1	-1	79.65
2	0	-1	1	79.51
3	0	0	0	83.23
4	0	0	0	82.87
5	1	-1	0	81.75
6	0	0	0	83.12
7	-1	0	-1	79.33
8	1	0	1	81.36
9	0	0	0	83.21
10	0	1	1	81.53
11	1	0	-1	81.98
12	-1	-1	0	79.14
13	-1	1	0	80.42
14	0	0	0	83.45
15	-1	0	1	80.19
16	1	1	0	81.69
17	0	1	-1	80.32
评分值 Y	$T_{-1}$	79.77	80.01	80.32
	$T_0$	81.88	82.08	81.99
	$T_1$	81.70	80.99	80.65
	$K_{-1}$	319.08	320.05	321.28
	$K_0$	736.89	738.74	737.88
	$K_1$	326.78	323.96	322.59
	极差 R	1.93	0.98	0.33

注: $T_i$  表示为各因素的第  $i$  水平所在试验对应评分值的平均值, $K_i$  表示为各因素的第  $i$  水平所在试验对应的评分值总和。 $R$  为极差,即水平平均值最大值与最小值之差。

表 4 开壳效果感官评分方差分析

Tab. 4 Analysis of variance for sensory score of shell opening effect

方差源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	35.79	9	3.98	47.47	<0.000 1	**
A	7.41	1	7.41	88.47	<0.000 1	**
B	2.00	1	2.00	23.88	0.001 8	**
C	0.25	1	0.25	2.92	0.131 0	
AB	0.45	1	0.45	5.36	0.053 8	
AC	0.55	1	0.55	6.54	0.037 7	*
BC	0.40	1	0.40	4.74	0.066 0	
$A^2$	3.97	1	3.97	47.34	0.000 2	**
$B^2$	8.92	1	8.92	106.48	<0.000 1	**
$C^2$	9.35	1	9.35	111.67	<0.000 1	**
残差	0.59	7	0.084			
失拟项	0.41	3	0.14	3.11	0.150 8	
误差项	0.18	4	0.044			
总和	36.37	16				
$R^2_{Adj} = 0.963\ 2$ 信噪比(S/N)=19.027						

注:\*\* (P 值<0.01)为极显著;\* (P 值<0.05)为显著。



对回归方程进行  $F$  检验和失拟性分析,结果表明:所建立模型  $P$  值 $<0.000\ 1$ ,回归方程检验达到了显著,表明数据的相关性较好;失拟项  $P$  值 $>0.05$ ,不显著,表明模型具有较高的可靠性;调整决定系数  $R^2_{Adj}=0.963\ 2$ ,拟合度 $>95\%$ ,表明缢蛭开壳效果感官评分变化有  $96.32\%$  来源于蒸煮温度、蒸煮时间、堆积层厚;信噪比  $(S/N)=19.027>4$ ,也从另一方面表明此模型能够反映响应值变化,试验误差小,可用此模型

对缢蛭开壳效果感官评分进行分析和预测。

2.5 开壳效果感官评分值响应面分析

根据试验数据生成响应图,分析蒸煮温度、蒸煮时间、堆积层厚交互作用对缢蛭开壳效果感官评分值的影响。如图 6 所示,在试验范围内,分别固定堆积层厚、蒸煮温度、蒸煮时间,等高线图呈现椭圆形,响应面曲线呈现凸形,说明三因素交互作用对感官评分均极显著( $P<0.01$ )或显著( $P<0.05$ )。

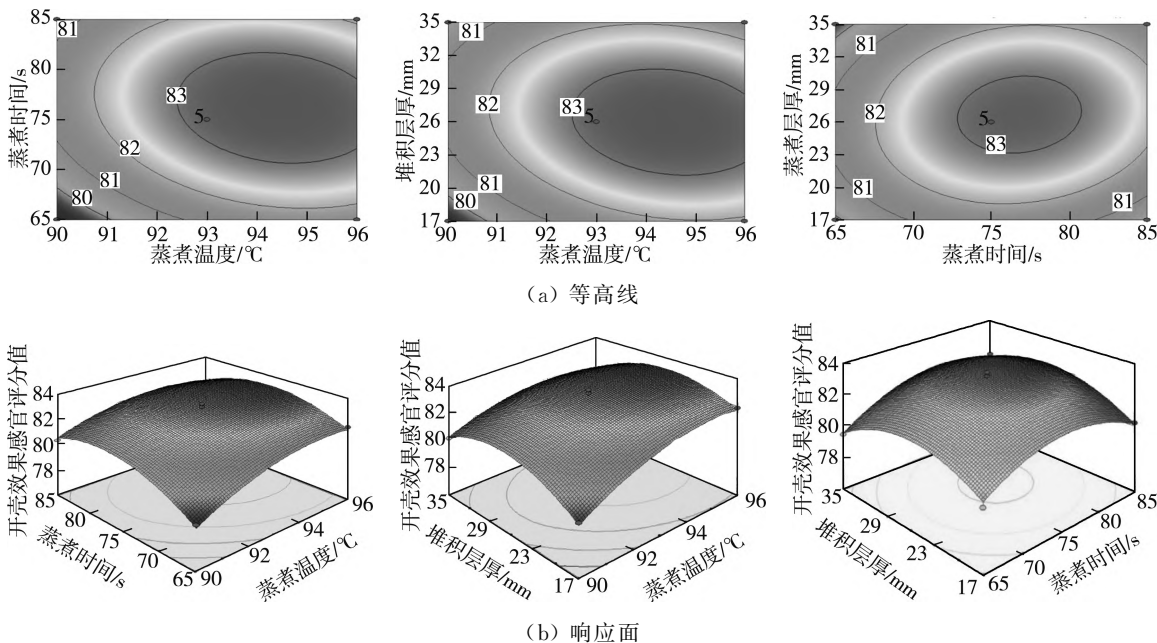


图 6 各因素交互作用对缢蛭开壳效果感官评分影响的响应面与等高线

Fig. 6 Response surface and contour line of the interaction of various factors on the sensory score of the shell-opening effect of constricted razor

利用 Design-Expert 软件对结果进行优化分析,由于回归方程预测的感官效果评分值的各项组合结果中,将各因素水平换算为对应实测值<sup>[25-27]</sup>,在 NumberalSolution 模块中确定最佳工艺参数为蒸煮温度  $94.42\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,蒸煮时间  $79.19\text{ s}$ ,堆积层厚  $26.11\text{ mm}$ ,此时缢蛭开壳效果感官得分预测值为  $83.43$  分。为了方便后续实际试验验证,修订最佳工艺参数为蒸煮温度  $94\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,蒸煮时间  $79\text{ s}$ ,堆积层厚为  $26\text{ mm}$ ,感官得分为  $83.32$  分,与模型预测的分值( $83.43$ )基本一致,同时进一步验证了模型的可靠性。

3 蒸煮作业流程模拟与测定

为了准确模拟缢蛭蒸煮作业的输送过程,验证 Design-Expert 响应面优化参数的合理性,采用 Hertz-Mindlin 接触理论建立蒸煮装置 EDEM 仿真模型,设定物料输送测定模型,对比喂料量与出料量,以期形成有效缢蛭输送模拟方法<sup>[28]</sup>。

3.1 缢蛭仿真参数确定

缢蛭密度采用质量—体积法确定为  $1\ 100\text{ kg/m}^3$ ,

缢蛭外壳主要成分为碳酸钙,泊松比取值为  $0.25$ ,剪切模量取值为  $1\times10^7\text{ Pa}$ ,缢蛭颗粒间恢复系数、缢蛭与刚体碰撞恢复系数通过碰撞试验及参考文献获得<sup>[29-30]</sup>,主要仿真参数如表 5 所示。

表 5 缢蛭模型的仿真参数及取值  
Tab. 5 Simulation parameters and values of the constricted razor model

参数	取值
缢蛭颗粒密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 100
钢密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 850
缢蛭颗粒半径比例	0.98、1.02、1.05
缢蛭泊松比	0.25
钢泊松比	0.3
缢蛭剪切模量/MPa	10
钢剪切模量/MPa	7 000
缢蛭颗粒间碰撞恢复系数	0.6
缢蛭与钢碰撞恢复系数	0.3

3.2 缢蛭蒸煮输送仿真流程及结果

完成基本参数设定后,在 Simulator 模块中设置

好仿真步长与总时长以及网格尺寸,这对于结果收敛性起到重要作用<sup>[31]</sup>。考虑颗粒接触行为与运行时长,其中 Cell Size 设置为 5R,共计划分  $3 \times 10^5$  网格,考虑计算机性能与仿真时长,设置入料总质量为 30 kg,物料流速为 0.35 kg/s,如图 7 所示,在质量分布图中,颗粒均匀分布在一起,物料未出现明显分层现象;在速度分布图中,输送带表面以均匀灰色颗粒为主,表明缢蛏于输送带上方稳定运动。后处理设置整体网格与出口局部网格,缢蛏进入箱体后完成约为 13 m 行程的蒸煮作业,故在 80 s 左右到达出口,在 85 s 左右出料质量趋于稳定,根据导出 csv 数据,测得均匀质量分布与集中质量分布分别为 29.48 kg、29.41 kg,考虑加工过程中物料颗粒泄露,仿真结果与估测结果基本一致。

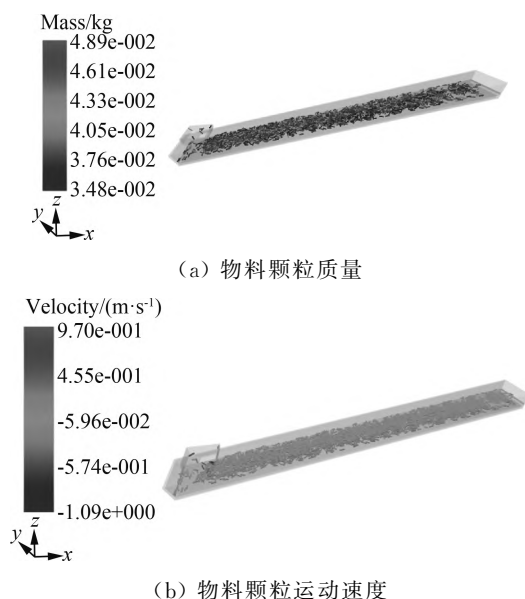


图 7 EDEM 物料颗粒动力学状态分布

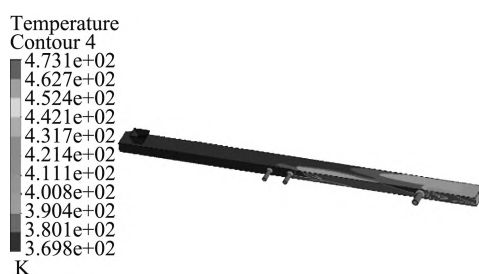
Fig. 7 EDEM material particle dynamic state distribution

### 3.3 蒸煮装置热力仿真

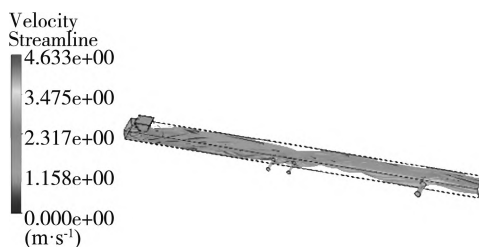
基于 Ansys Workbench Fluent 仿真分析软件,模拟蒸煮箱体温度分布与流体流速情况,在 Geometry 中导入建立的三维模型,建立 solid 与 fluid 两个部分,并设置 inlet、outlet、wall 等介质流入平面<sup>[32]</sup>,启动能量模型 Energy,选择 k-epsilon 模型,进入 boundary conditions 模块中,设置边界覆盖材料为 steel,厚度为 8 mm,对流换热系数为  $8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,边界温度设置为 296 K。

初始化与前处理完成后,入口设置水温为 373 K,蒸汽管道入口产生的过热蒸汽温度设为 473 K,步数设为 1 000,基于上述所设定的边界条件,进入 run calculation 计算,仿真结果如图 8 所示。

从图 8 中可以看出,箱体水浴蒸煮区域温度在  $94^\circ\text{C} \sim 97^\circ\text{C}$  之间,蒸汽蒸煮温度在  $100^\circ\text{C} \sim 110^\circ\text{C}$  之间,空间温度分布均匀,符合缢蛏蒸煮作业温控要求。



(a) 热力分布云图



(b) 流速分布云图

图 8 热力与流速分布云图

Fig. 8 Heat and velocity distribution cloud map

## 4 蒸煮开壳试验

### 4.1 试验方法

将鲜缢蛏经过水浸泡并进行过滤处理,通过控制输送装置设定合理转速,本次试验共投入 1.4 t 缢蛏。选用物料品种为大竹蛏,给料速度为 23 kg/min,初始泥沙去除率为 92%,蒸煮温度为  $94^\circ\text{C}$ ,蒸煮时间为 79 s,待箱体内水温达到预设值并且出料流速稳定后,将收集框置于出料端下方,每 10 s 收集量设定为一组标准测量数据,共测量 5 组。从完成蒸煮试验的缢蛏中每组随机抽取 100 个样品采用弹簧拉力计进行后闭壳肌拉断力学试验。

### 4.2 试验指标

蒸煮装置主要作用是对缢蛏进行开壳作业,本文以开壳率与闭壳肌附着力为考核指标<sup>[21-23]</sup>。

开壳率

$$p = \frac{P_{\text{开}}}{P_{\text{总}}} \times 100\%$$

式中:  $P_{\text{开}}$ ——单位时间内蒸煮箱体出料端所收集缢蛏总数量;

$P_{\text{总}}$ ——单位时间内自蒸煮箱体出料端收集缢蛏开壳数量。

闭壳肌附着力:双壳贝类闭壳肌在高温蒸煮后失活,闭壳肌与贝壳黏附力不超过 2 N,即可达到贝肉熟制标准<sup>[24]</sup>。

### 4.3 试验结果与分析

试验数据如表 6 所示。蒸煮装置正常工作时内部沸水及高温蒸汽对大竹蛏闭壳肌形成有效的松弛及溶

断作用,大竹蛭两壳体失去粘附力呈张开状态,竹蛭便达到开壳效果。

表 6 开壳试验数据  
Tab. 6 Open shell test data

试验号	总数量/个	开壳数量/个	开壳率/%
1	150	146	97.3
2	168	164	97.4
3	164	162	98.7
4	158	154	97.5
5	160	156	97.5

从表 6 可以看出,开壳效率大于 95%,能够满足产业化生产需求。闭壳肌拉断试验结果如表 7 所示。可以看出,拉断力测量数据最大值为 1.5 N,小于上限值 2 N,符合闭壳肌失效设定,同时为后续振动壳肉分离工艺提供数据支撑。

表 7 闭壳肌拉断试验结果  
Tab. 7 Results of the closed-shell muscle tensile test

试验号	拉断力/N
1	1.3
2	1.5
3	0.9
4	1.2
5	1.2

5 结论

1) 针对目前缢蛭蒸煮设备缺陷提出了基于混合加热介质的蒸煮开壳模型,对缢蛭生理参数及开壳作业参数进行采集,设计了蒸煮装置模型。

2) 创建不同工况下缢蛭蒸煮开壳效果指标对试验因素的回归模型,通过响应面法分析所选因素交互作用对试验指标的影响,当蒸汽进气压力为 6 MPa,蒸煮温度为 94 ℃,蒸煮时间为 79 s,堆积层厚为 26 mm,缢蛭开壳效果的感官评分为 83.32 分,与模型预测结果(83.43 分)基本一致。

3) 采用 Creo 进行简化模型的三维建模,建立蒸煮装置 EDEM 耦合仿真模型,箱体内物料呈均匀分布,无聚集与结块现象发生,仿真投入 30 kg 物料,整体与单元格测量结果表明,箱内分布 29.4~29.5 kg 物料,分布误差为 1.67%~2%,能够满足蒸煮装置高温作业模拟要求。采用 Fluent 对蒸煮箱体内温度分布进行仿真,通过热力云图分析,箱体内温度分布保证缢蛭受热均匀,在保证开壳需求同时减少贝肉营养物质的流失。

4) 开展了缢蛭开壳率与闭壳肌粘附力性能测定

试验,试验结果表明:物料开壳率高于 95%,闭壳肌拉断试验数据均小于 2 N,符合缢蛭连续蒸煮作业标准,同时满足后续振动壳肉分离作业物料的初始需求。

5) 所设计的蒸煮箱体可用于批次式黄蛤、贻贝、缢蛭等双壳贝类海产品的开壳作业,研究提出的基于开壳率测定与贝肉粘结力的评估方法也可用于双壳贝类开壳性能的检测,为缢蛭开壳作业机理与蒸煮装置参数设计及研究提供了方法与参考。

参 考 文 献

[1] 中国水产科学研究院. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.

[2] 中国水产科学研究院. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.

[3] 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 Yuan, Wang Jian, Sun Jianfeng, et al. Utilization status of the resource of marine shellfish in China and preliminary study on its development [J]. Modern Food Science and Technology, 2013, 29(3): 673—677.

[4] 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 Ruiyi. Effects of furrow depth on pond culture of Sinonovacula constricta [J]. Fishery Modernization, 2021, 48(5): 55—61.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 芦新春, 孙星钊, 王伟. 双壳贝类脱壳预处理技术现状及发展趋势[J]. 当代农机, 2015(9): 74—76.

[8] 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 Degang, Yi Jinggang, Jiang Haiyong, et al. Research on the process scheme to the bay scallop of shellfish opening for adductor [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014, 35(2): 230—234.

[9] 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.

[10] 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 Xinling, Kong Degang, Yang Shuhua, et al. Design and experiment of saw cutting shells opening tester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(5): 118—121.

[11] 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.

[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 Jingyan, Tan Jinling, Li Zhenhua. Numerical



- simulation of nozzles' internal flow field of water jet single-side shucking [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(8): 828—832.
- [13] 朱松明, 杨徽, 李建平, 等. 一种基于超高压技术的虾脱壳预处理工艺[P]. 中国专利: CN101773156A, 2010—07—14.
- [14] 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 Xiandan, Wang Huihui, Lu Jinshi, et al. Structure design and motion simulation of shellfish precooked processing equipment [J]. Food & Machinery, 2016, 32(7): 69—71, 201.
- [15] 兰峰, 刘涛, 苏子昊, 等. 油茶果脱壳清选成套设备的研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(11): 85—93. Lan Feng, Liu Tao, Su Zihao, et al. Research on shelling and sorting complete sets of Camellia oleifera fruit [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(11): 85—93.
- [16] 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.
- [17] 李小博. 新型带式输送机转运站设计[D]. 太原: 太原科技大学, 2014.
- [18] 侯俊铭, 何涛, 白晶波, 等. 农业物料脱壳脱粒机理及设备现状[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(7): 30—38. Hou Junming, He Tao, Bai Jingbo, et al. Review of the mechanism and machinery of agricultural material shelling [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(7): 30—38.
- [19] 芦新春, 孙星钊, 王伟. 网带式缢蛏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 Xinchun, Sun Xingzhao, Wang Wei. Experimental study of key working parameters of shelling equipment for razor clam [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(7): 101—105.
- [20] 陈忠, 王涛, 赵乐然, 等. 橡胶籽脱壳试验机工作参数优化与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(12): 68—74. Chen Zhong, Wang Tao, Zhao Leran, et al. Optimization and test of working parameters of rubber seed shelling tester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(12): 68—74.
- [21] 汤晶宇, 王东, 寇欣, 等. 四通道全自动油茶成熟鲜果脱壳机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 109—116, 229. Tang Jingyu, Wang Dong, Kou Xin, et al. Design and experiment of four-channel fully automatic shelling machine for ripe fresh Camellia oleifera fruit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 109—116, 229.
- [22] 杨亚洲, 顾炳龙, 刘宽厚, 等. 花生脱壳机关键部件的设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(10): 57—60. Yang Yazhou, Gu Binglong, Liu Kuanhou, et al. Design and experiment of key components of peanut sheller [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(10): 57—60.
- [23] 郑晓伟, 沈建. 南极磷虾捕捞初期适宜挤压脱壳工艺参数[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 252—257. Zheng Xiaowei, Shen Jian. Appropriate shelling process parameters of Antarctic krill at initial stage of fishing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(2): 252—257.
- [24] 朱广飞, 任嘉嘉, 王振, 等. 油茶果脱壳机的设计与工作参数优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 19—27. Zhu Guangfei, Ren Jiajia, Wang Zhen, et al. Design of shelling machine for camellia oleifera fruit and operating parameter optimization [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(7): 19—27.
- [25] 王建楠, 谢焕雄, 胡志超, 等. 滚筒凹板筛式花生脱壳机关键部件试验研究及参数优化[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(14): 191—196. Wang Jiannan, Xie Huanxiong, Hu Zhichao, et al. Experimental study and parameter optimization of key components of drum-cylinder peanut shelling machine [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(14): 191—196.
- [26] 骆航, 王文渊, 尹素娟, 等. 响应面法优化高压脉冲电场提取火棘果活性成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(2): 373—380. Luo Hang, Wang Wenyuan, Yin Sujuan, et al. Optimization of eattraction of active components from pyracantha fortuneana fruit by high voltage pulsed electric field by response surface methodology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(2): 373—380.
- [27] 梅玉立, 黄先智, 丁晓雯. 响应面法优化发酵对桑叶生物碱、黄酮和多糖含量的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(6): 1764—1772. Mei Yuli, Huang Xianzhi, Ding Xiaowen. Effects of optimal fermentation on the content of alkaloids, flavonoids and polysaccharide in mulberry leaves by response surface methodology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(2): 373—380.
- [28] 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 Shuhua, Zhang Zhijun, Yi Jinggang, et al. Design of bay scallop grading equipment [J]. Food Research and Development, 2016, 37(12): 220—224.
- [29] 侯东芳, 周根树, 任凤章, 等. 贝壳珍珠层不同取向弹性模量的研究[J]. 生物物理学报, 2003, 19(2): 203—206.
- [30] 母刚. 蛤仔力学特性测试与采收机械关键问题研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [31] 刘鹏宇. 木制滚筒花生种子脱壳机的设计与试验研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2021.
- [32] 陆荣. 直立锥滚筒式花生脱壳机脱壳原理与关键技术研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020.