

海苔片热压粘合工艺参数试验优化

陈坤杰¹ 贺鑫业¹ 祁恒阳² 杨浩勇³ 於海明¹

(1. 南京农业大学工学院, 南京 210031; 2. 连云港市海贡机械有限公司, 连云港 222100;

3. 江苏省农业机械试验鉴定站, 南京 210017)

摘要: 针对现有夹心海苔生产采用单张海苔片逐张加工导致两张海苔片难以准确对齐、夹心料浪费严重、生产效率低等问题,提出一种采用热压粘合将单张海苔片粘合成带状海苔片的加工方法,对这种海苔片热压粘合工艺进行试验研究及参数优化。首先研究了热压温度、热压时间和酒精体积分数对粘合后海苔片韧性和粘附力的影响;然后通过二次回归正交试验及响应面分析,研究了各因素对评价指标的影响规律并建立了各影响因素与评价指标间的数学模型;最后通过对数学模型的求解,进行了海苔片热压粘合工艺参数优化,并对优化结果进行了试验验证。结果表明,热压温度、热压时间和酒精体积分数均对海苔片的韧性和粘附力有极显著的影响($P < 0.01$),随着热压温度的升高,海苔片韧性降低,粘附力增大;增长热压时间,粘附力增大,但韧性呈现先降后升的趋势;随着酒精体积分数的增加,海苔片韧性逐渐降低,粘附力先升高后降低。优化结果表明,热压粘合的最佳参数组合为:热压温度 208.39℃、热压时间 2.91 s、酒精体积分数 61.52%,此时海苔片韧性可达 8.86 N·mm,粘附力为 1.36 N。验证试验显示,试验结果与优化结果基本一致,说明所建参数优化模型可靠,优化后的参数满足海苔片的加工要求。

关键词: 海苔片; 热压粘合; 试验; 响应面法

中图分类号: S986.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)04-0407-09

OSID:



Optimization and Experiment on Process Parameters of Hot Pressing Bonding of Seaweed Sheet

CHEN Kunjie¹ HE Xinye¹ QI Hengyang² YANG Haoyong³ YU Haiming¹

(1. College of Engineering, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Lianyungang Haigong Machinery Co., Ltd., Lianyungang 222100, China

3. Jiangsu Agricultural Machinery Test and Appraisal Station, Nanjing 210017, China)

Abstract: Aiming at the existing sandwich seaweed production equipment uses a single piece of seaweed to process and produce one by one, there are many problems, such as too many dropped sandwich materials, and it is difficult to accurately align two pieces of seaweed, resulting in serious material waste, poor product quality, and low production efficiency, thus a processing method of bonding a single sheet of seaweed into a ribbon-shaped seaweed sheet by hot pressing bonding was pioneered, and the experimental research and parameter optimization of the hot pressing bonding process of this seaweed sheet was carried out. Firstly, the effects of hot pressing temperature, hot pressing time and alcohol concentration on the toughness and adhesion of the bonded seaweed sheet were studied by single factor experiment. Then, through quadratic regression orthogonal test and response surface analysis, the influence law of each factor on the evaluation index was studied, and the mathematical model between each influencing factor and the evaluation index was established. Finally, through the solution of the mathematical model, the hot pressing bonding process parameters of seaweed tablets were optimized, and the optimization results were verified by experiments. The test results showed that hot pressing temperature, hot pressing time and alcohol concentration had significant effects on the toughness and adhesion of seaweed sheets ($P < 0.01$). With the increase of hot pressing temperature, the toughness of seaweed sheets was decreased and the adhesion was increased. With the increase of hot pressing time, the adhesion was increased, but the toughness was

收稿日期: 2022-07-04 修回日期: 2022-09-11

基金项目: 苏北科技专项富民强县项目(SZ-LYG202023)

作者简介: 陈坤杰(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事农产品加工、无损检测及其智能化装备研究,E-mail: kunjiechen@njau.edu.cn

通信作者: 於海明(1974—),男,副教授,主要从事农业工程和轻工业研究,E-mail: yuhaiming@njau.edu.cn

decreased first and then increased. With the increase of alcohol concentration, the toughness of seaweed sheets was decreased gradually, and the adhesion was firstly increased and then decreased. By optimizing the experiment parameters, the optimal combination of parameters was determined: hot pressing temperature was 208.39℃, hot pressing time was 2.91 s, alcohol concentration was 61.52%, at this time, the toughness of seaweed sheet was 8.86 N·mm, and the adhesion force was 1.36 N. The validation test showed that the test results were basically consistent with the optimization results, indicating that the established parameter optimization model was reliable and the optimized parameters met the processing requirements of seaweed sheets. The research results can provide theoretical and technical support for the processing method of sandwich seaweed.

Key words: seaweed sheets; hot press bonding; experiment; response surface methodology

0 引言

世界紫菜生产基地主要分布于东亚地区,我国是世界上最大的紫菜生产国之一^[1-4],据《2021 中国渔业统计年鉴》数据显示,2020 年我国紫菜产量达到 2.22×10^5 t,同比增长 4.57%;海苔作为紫菜的主要加工制品,其产量达到 2.61×10^4 t,同比增长 6.2%^[5]。海苔富含多糖、氨基酸、矿物质等营养物质,具有增强免疫力、抗衰老及降血脂等功效^[6-13]。以海苔为原料加工生产的夹心海苔,因其风味独特、营养丰富而深受消费者青睐,市场前景十分广阔。

受夹心海苔市场需求的驱动,近些年国内外专家学者对海苔加工机械的研究和开发逐步增加。日本竹下公司研究开发出具有特殊的供料口、独自刮刀机构及智能监控系统的海苔片加工装置^[14]。韩国日信公司研制出可实现海苔片的自动计数及排列、且自动堆积的海苔片加工机械^[15]。文献[16]研究了一种夹心海苔加工装置及其生产工艺,通过同时供给、烘干两列海苔并利用翻转倒扣装置实现夹心,提高了生产效率。文献[17]研发的一种海苔自动夹心设备,利用夹块对海苔进行挤压夹紧,采用自动挤料器向海苔中加入夹心料。文献[18]设计出一种利用两组机械手输送上、下两层海苔片的夹心海苔加工设备,通过传感器检测海苔片的实时位置以提高各部件间协同作业效果,进而提高生产效率。以上研究虽然在一定程度上解决了夹心海苔机械化生产存在的问题,但现有的夹心海苔加工采用单张海苔片逐张加工生产的方式,通过人工辅助进行撒料并扣合上层海苔片,不仅辅助人工多(5 人),生产效率低(≤ 40 张/min),而且存在两张海苔片难以准确对齐、夹心料掉落多、物料浪费严重等突出问题。

相关研究表明^[19-24],紫菜多糖是紫菜的主要成分之一,包括紫菜胶和琼胶两大类。其中,琼胶(又称琼脂)是由 D-半乳糖和 3,6-脱水-L-吡喃半乳糖等组成的一种高分子多糖,是形成凝胶的重要组分,

具有在 90℃ 以上热水中形成溶胶的特性,常作为胶凝剂用于增加食品粘性。根据琼胶的胶凝特性,通过对润湿后的海苔片进行加热加压,使两张海苔片中的琼胶形成溶胶后再冷却,即可使两张海苔片粘合在一起。

因此,针对现有夹心海苔生产存在的问题,本文根据海苔片所具有的胶凝特性,设计一种通过热压粘合,将单张海苔片连接成带状的新型夹心海苔加工方法及设备,变现有的逐张间歇性生产为连续性生产,以减少辅助用工、提高生产效率。为获得最佳的海苔片热压粘合工艺参数组合,本文对这种方法所涉及的海苔片热压粘合工艺进行试验研究,探究热压温度、热压时间、酒精体积分数对热压粘合后海苔片韧性、粘附力的影响规律,建立试验因素与评价指标间的多元回归模型,对海苔片热压粘合工艺参数进行优化,以期为该新型夹心海苔加工方法提供理论及技术支持。

1 材料与方法

1.1 夹心海苔生产工艺流程

传统夹心海苔生产通常采用单张海苔片逐张间歇式生产,其生产工艺流程如图 1a 所示,海苔片液料的涂敷及上下两层海苔片的扣合均需人工辅助完成,不仅生产效率低,而且两张海苔片难以准确对齐;在撒放夹心料时,由于两张海苔片交界处存在间隙,会造成夹心料浪费。针对上述问题,设计一种通过热压粘合将单张海苔片粘合成带状海苔片用于夹心海苔生产的新工艺,新工艺流程如图 1b 所示,结合海苔片热压粘合机结构示意图(图 2)可知,首先通过供料组件连续供给海苔片,然后由配置载料板的传送带将海苔片输送至喷洒组件处喷洒粘合剂,再通过热压组件对海苔片进行首尾粘合,形成带状海苔片,进而再对带状海苔片喷洒液料及夹心料,最后将上层海苔片与下层海苔片进行扣合后,再进行烘烤、切割和包装等后续工序。带状海苔片加工,将单片加工改为带状整体式加工,不仅利于设备对扣

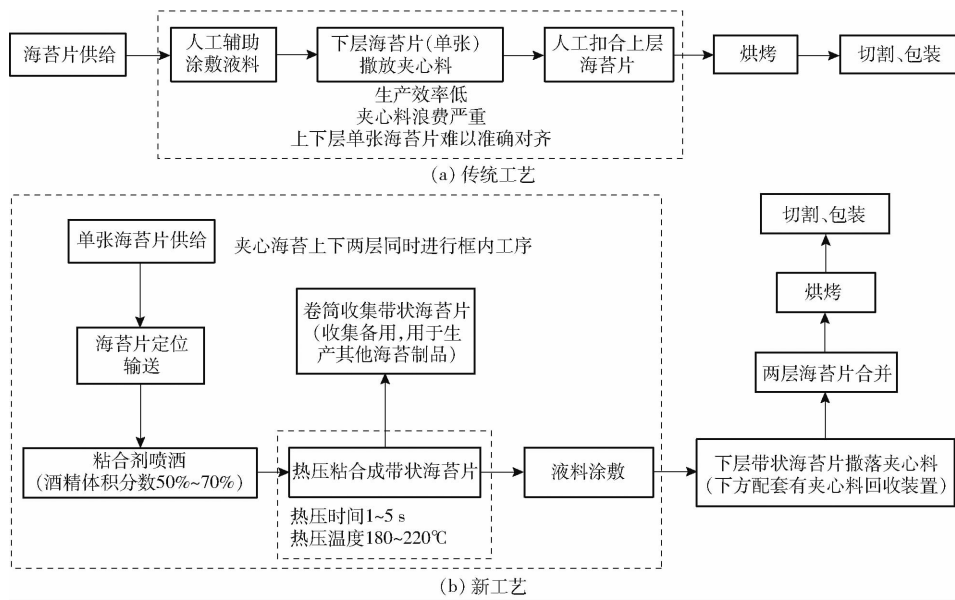


图 1 夹心海苔生产传统工艺和新工艺流程图

Fig. 1 Traditional process and proposed process flow chart of sandwich seaweed production

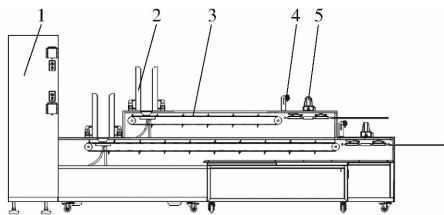


图 2 海苔片热压粘合机结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of seaweed sheet hot press bonding machine

1. 控制柜 2. 单张海苔片供料组件 3. 传送带 4. 喷洒组件
5. 热压组件

合时的上下两层海苔片进行定位对齐,实现连续性生产,提高生产效率,而且由于不存在单张海苔片之间的间隙,明显减少了夹心料的洒落损失。

1.2 试验材料与设备

试验材料:根据文献[25 – 27]及夹心海苔的实际生产要求,试验材料选用夹心海苔生产中常用的 A 级海苔片(连云港小巢海洋食品有限公司提供);粘合剂选用食用酒精。

试验所用仪器设备:海苔片热压粘合机(结构示意图和实物图分别如图 2、3 所示,连云港市海贡机械有限公司),最大允许压力 160 N,温控范围 0 ~ 400℃,调节精度可达 1℃;TMS – Pro 型质构仪(北京盈盛恒泰科技有限公司),探头量程 0 ~ 1 000 N,检测精度 0. 015 %;JCS – 600 型电子天平(凯丰集团有限公司),量程 0 ~ 600 g,精度 0. 01 g;量筒;烧杯等。

1.3 试验方法

酥脆度是海苔片最主要的质量指标,粘合强度是评价海苔片粘合质量的关键指标,粘合后的海苔



图 3 海苔片热压粘合机实物图

Fig. 3 Physical drawing of seaweed sheet hot press bonding machine

片应保留原有的酥脆度并具有一定的粘合强度。海苔片的酥脆度可通过海苔片的韧性来表征;海苔片的粘附力反映了热压粘合后海苔片的粘合强度。预试验发现,热压温度、热压时间、酒精体积分数是影响热压粘合后海苔片韧性和粘附力的主要因素。

1.3.1 热压温度对海苔片韧性和粘附力影响试验

热压温度过高或过低都将影响粘合后海苔片品质及粘合效果,根据预试验结果,选取热压温度 180、190、200、210、220℃ 共 5 个水平进行试验,试验时,设定热压时间为 3 s,酒精体积分数为 60%,每组试验重复 5 次并取均值,分析热压温度对粘合后海苔片韧性、粘附力的影响规律。

1.3.2 热压时间对海苔片韧性和粘附力影响试验

考虑热压粘合的作业效率及预试验结果,选取热压时间 1、2、3、4、5 s 共 5 个水平进行试验,试验时,设定热压温度为 200℃,酒精体积分数为 60%,每组试验重复 5 次并取均值,分别探究热压时间对粘合后海苔片韧性、粘附力的影响规律。

1.3.3 酒精体积分数对海苔片韧性和粘附力影响试验

在预试验结果的基础上,选取酒精体积分数为50%、55%、60%、65%、70%共5个水平进行试验,试验时,设定热压温度为200℃,热压时间为3 s,每组试验重复5次并取均值,分析酒精体积分数对热压粘合后海苔片韧性、粘附力的影响规律。

1.3.4 海苔片热压粘合工艺参数优化

通过响应面分析法建立热压粘合工艺参数对海苔片韧性、粘附力影响的数学模型,根据单因素试验结果及实际生产要求确定边界约束条件,再通过对模型的求解获得最优工艺参数。

响应面分析法可通过构造一个具有明确表达形式的多项式来表达隐式功能函数^[28],并对构造的多项式进行分析寻求最优参数,以实现对响应值的优化。通常将多项式构建为二阶模型即可实现函数的准确拟合和优化分析^[29],公式为

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_i x_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \beta_{ii} x_i x_j + \sum_{i < j} \sum \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

(1)

式中 y ——试验输出量 β ——系数
 $x_1、x_2、\cdots、x_m$ ——输入变量
 ε ——观测误差

为建立上述模型,通常采用 Box - Behnken 或 Central Composite 方法进行一系列多变量试验,在完成试验后,根据试验结果可将式(1)写成

$$y = X\beta + \varepsilon$$

(2)

其中

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nk} \end{bmatrix}$$
$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_0 \\ \varepsilon_1 \\ \vdots \\ \varepsilon_k \end{bmatrix}$$

式(2)的方差对 β 的偏导数为零时,方差具有极小值,此时拟合曲线和实际值最接近,可得

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'y$$

(3)

因此可获得拟合方程为

$$\hat{y} = X\hat{\beta}$$

(4)

根据参数的实际约束条件,求解拟合方程获得最优响应值,最终确定最优工艺参数。

参考文献[30 - 34],根据 Box - Behnken 试验设计原理进行试验设计。以影响海苔片热压粘合性能的热压温度、热压时间、酒精体积分数为试验因素,

以海苔片韧性、粘附力为评价指标,设计三因素三水平的响应面试验,试验因素水平如表1所示,每组试验重复5次并取均值,对试验结果进行分析并构建回归方程。

表 1 试验因素水平
Tab.1 Test factors and levels

水平	因素		
	热压温度 $X_1/^\circ\text{C}$	热压时间 X_2/s	酒精体积分数 $X_3/\%$
1	190	2	55
2	200	3	60
3	210	4	65

1.4 试验参数测定

1.4.1 韧性

海苔片韧性参考文献[35 - 37]所述的方法,采用质构仪进行测定。选用直径为2 mm圆柱形探头,设置测试速度为1 mm/s,起始力为0.15 N。韧性表示为测试曲线第一峰(锚1)力与运行距离的乘积,单位为N·mm,如图4a所示。

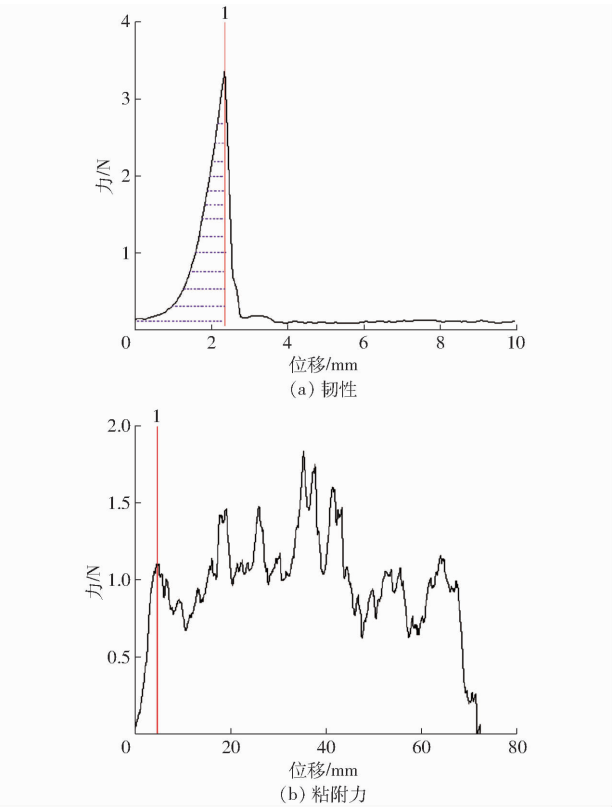


图 4 韧性、粘附力试验测试曲线

Fig.4 Test curves of toughness and adhesion test

1.4.2 粘附力

海苔片粘附力参考文献[38 - 40]所述的方法,采用质构仪进行测定。选用粘附力测试夹具,测试速度设为3 mm/s,起始力设为0.15 N。粘附力表示为测试曲线第一峰(锚1)力值,如图4b所示。

1.5 数据统计分析

试验数据利用 Excel 2016 软件进行统计整理, Design-Expert 12.0 软件进行方差分析、显著性检验以及拟合回归方程,采用 OriginPro 2021 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 各因素对海苔片韧性和粘附力的影响

2.1.1 热压温度

在热压时间为 3 s、酒精体积分数为 60% 的条件下,对不同热压温度下的海苔片进行热压粘合,分别测得其韧性、粘附力,结果如图 5 所示。随热压温度的升高,海苔片韧性呈逐渐下降而粘附力呈逐渐上升趋势。当热压温度小于 190℃ 时,海苔片的韧性较高、粘附力较低,不满足生产要求。从 190℃ 开始,随着热压温度的升高,海苔片韧性缓慢降低且逐渐趋于平稳,粘附力的增速虽逐渐减缓,但其仍呈显著升高趋势。当热压温度超过 210℃ 时,海苔片虽具有较低的韧性和较高的粘附力,但会产生变色、焦糊现象。因此,从提高海苔片粘附力、降低韧性,同时又保证质量的角度考虑,最佳的热压温度应该在 190 ~ 210℃ 之间。

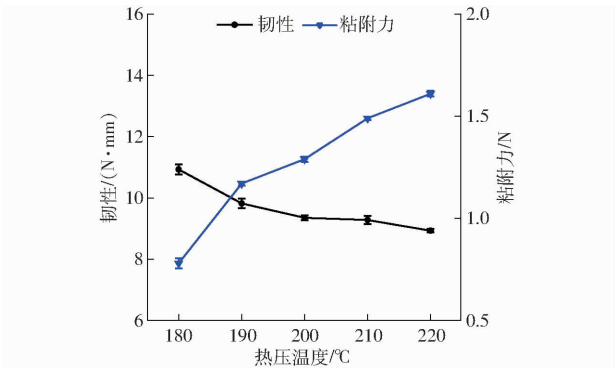


图 5 热压温度对海苔片韧性、粘附力的影响
Fig. 5 Effects of hot pressing temperature on toughness and adhesion of seaweed sheets

2.1.2 热压时间

在热压温度为 200℃、酒精体积分数为 60% 的条件下,测得不同热压时间下热压粘合后海苔片的韧性、粘附力,结果如图 6 所示。随热压时间的增长,海苔片韧性先降低后升高,当热压时间为 1 ~ 3 s 时,海苔片韧性逐渐降低,在 3 s 左右达到最低值,当热压时间为 3 ~ 5 s 时,其韧性逐渐升高。海苔片粘附力随热压时间的增长而逐渐升高,当热压时间超过 3 s 后,海苔片粘附力的增速减缓,但其仍呈升高趋势,因此在适宜的范围内增长热压时间可显著提高海苔片的粘附力。在热压时间小于 2 s 时,海苔片不能有效粘合;在热压时间大于 4 s 时,粘合后

海苔片存在变质现象,使其韧性较高,影响酥脆度,因此最佳的热压时间应该在 2 ~ 4 s 之间。

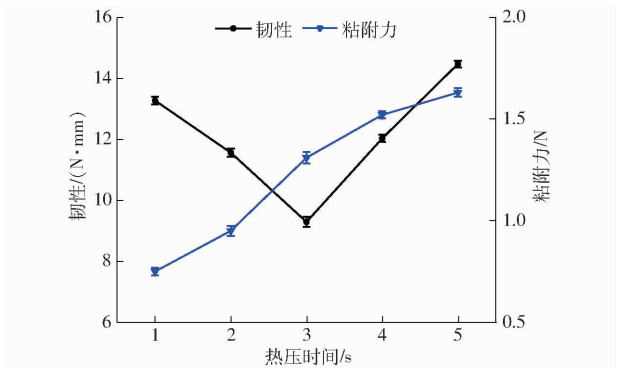


图 6 热压时间对海苔片韧性、粘附力的影响
Fig. 6 Effects of hot pressing time on toughness and adhesion of seaweed sheets

2.1.3 酒精体积分数

在热压温度为 200℃、热压时间为 3 s 的条件下,采用不同酒精体积分数粘合后的海苔片韧性、粘附力变化规律如图 7 所示。随着酒精体积分数的增加,海苔片韧性逐渐降低,海苔片粘附力先升高,当酒精体积分数为 60% 时达到最高值,然后又逐步降低。试验显示,在酒精体积分数小于 55% 时,海苔片的韧性较高、粘附力较低,且粘合后海苔片会产生黏模现象,影响海苔片品质;当酒精体积分数大于 65% 时,海苔片虽具有较低的韧性,但粘附力过低,导致粘合的海苔片容易发生分离。因此,为保证粘合后海苔片具有较低的韧性和较高的粘附力,酒精体积分数最好在 55% ~ 65% 的范围内。

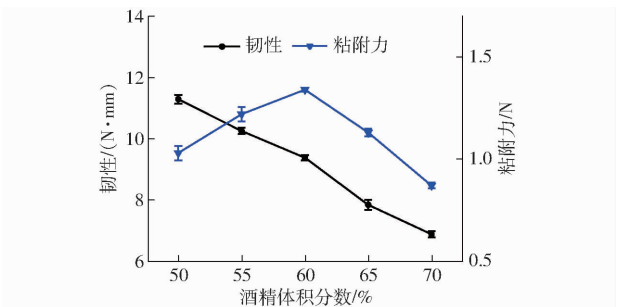


图 7 酒精体积分数对海苔片韧性、粘附力的影响
Fig. 7 Effects of alcohol concentration on toughness and adhesion of seaweed sheets

2.2 海苔片热压粘合响应面试验结果分析

2.2.1 试验结果及回归模型建立

响应面试验结果如表 2 所示。根据试验结果对试验因素和评价指标间的关系进行多元回归拟合分析,分别建立韧性 Y_1 和粘附力 Y_2 关于热压温度 X_1 、热压时间 X_2 、酒精体积分数 X_3 的二次回归模型,并对模型进行方差分析及显著性检验,结果如表 3 所示。

表 2 试验方案与结果
Tab.2 Test scheme and results

试验 序号	因素			评价指标	
	$X_1/^\circ\text{C}$	X_2/s	$X_3/\%$	韧性 $Y_1/$ ($\text{N}\cdot\text{mm}$)	粘附力 Y_2/N
1	190	4	60	12.37	1.22
2	190	3	55	10.48	1.03
3	200	2	65	11.02	0.93
4	200	4	55	12.14	1.24
5	200	4	65	11.96	1.13
6	210	3	55	10.25	1.25
7	200	3	60	9.29	1.32
8	200	3	60	9.36	1.36
9	200	2	55	12.24	1.14
10	190	3	65	10.17	0.83
11	200	3	60	9.05	1.35
12	190	2	60	12.40	0.95
13	200	3	60	9.18	1.34
14	210	4	60	12.38	1.36
15	210	3	65	8.26	1.18
16	200	3	60	9.15	1.31
17	210	2	60	11.08	1.33

表 3 方差分析
Tab.3 Analysis of variance

评价 指标	方差 来源	平方和	自由 度	均方	F	P
韧性	模型	32.14	9	3.57	92.80	<0.0001**
	X_1	1.49	1	1.49	38.66	0.0004**
	X_2	0.5565	1	0.5565	14.46	0.0067**
	X_3	1.71	1	1.71	44.47	0.0003**
	X_1X_2	0.4422	1	0.4422	11.49	0.0116*
	X_1X_3	0.7056	1	0.7056	18.33	0.0036**
	X_2X_3	0.2704	1	0.2704	7.03	0.0329*
	X_1^2	0.6762	1	0.6762	17.57	0.0041**
	X_2^2	25.29	1	25.29	657.12	<0.0001**
	X_3^2	0.1414	1	0.1414	3.67	0.0968
	残差	0.2694	7	0.0385		
	失拟	0.2105	3	0.0702	4.76	0.0829
	误差	0.0589	4	0.0147		
粘附力	总和	32.41	16			
	模型	0.4480	9	0.0498	148.58	<0.0001**
	X_1	0.1485	1	0.1485	443.32	<0.0001**
	X_2	0.0450	1	0.0450	134.33	<0.0001**
	X_3	0.0435	1	0.0435	129.89	<0.0001**
	X_1X_2	0.0144	1	0.0144	42.99	0.0003**
	X_1X_3	0.0042	1	0.0042	12.61	0.0093**
	X_2X_3	0.0025	1	0.0025	7.46	0.0293*
	X_1^2	0.0264	1	0.0264	78.94	<0.0001**
	X_2^2	0.0073	1	0.0073	21.91	0.0023**
	X_3^2	0.1429	1	0.1429	426.68	<0.0001**
	残差	0.0023	7	0.0003		
	失拟	0.0006	3	0.0002	0.4845	0.7110
	误差	0.0017	4	0.0004		
	总和	0.4503	16			

注：*表示差异显著(0.01 < P < 0.05)，**表示差异极显著(P ≤ 0.01)。

表 3 表明,构建的海苔片韧性及粘附力二次回归模型均表现为极显著($P < 0.01$),说明回归模型模拟情况与实际情况相符,拟合较好,模型有效。各因素对海苔片韧性影响的主次顺序为:酒精体积分数、热压温度、热压时间;各因素对海苔片粘附力影响的主次顺序为:热压温度、热压时间、酒精体积分数。韧性回归模型中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 影响极显著($P \leq 0.01$), X_1X_2 、 X_2X_3 影响显著($0.01 < P < 0.05$),其他项影响不显著。因此,海苔片韧性回归预测模型可表示为

$$Y_1 = 159.8445 - 1.2419X_1 - 24.2108X_2 + 0.5519X_3 + 0.0333X_1X_2 - 0.0084X_1X_3 + 0.0520X_2X_3 + 0.0040X_1^2 + 2.4508X_2^2 \quad (5)$$

粘附力回归模型中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_1X_2 、 X_1X_3 、 X_1^2 、 X_2^2 、 X_3^2 影响极显著($P \leq 0.01$), X_2X_3 影响显著($0.01 < P < 0.05$),海苔片粘附力回归预测模型可表示为

$$Y_2 = -54.2368 + 0.3096X_1 + 1.2255X_2 + 0.7247X_3 - 0.0060X_1X_2 + 0.0007X_1X_3 + 0.0050X_2X_3 - 0.0008X_1^2 - 0.0418X_2^2 - 0.0074X_3^2 \quad (6)$$

2.2.2 试验因素间交互作用对海苔片韧性及粘附力的影响

为进一步探究各因素间的交互作用对海苔片韧性及粘附力的影响规律,分别绘制海苔片韧性和粘附力的响应面曲线,如图 8、9 所示。

热压时间、热压温度对海苔片韧性交互作用的响应面曲线如图 8a 所示,当酒精体积分数为 60% 时,海苔片的韧性随热压温度的升高而降低,随热压时间的增长呈先降低后升高的趋势。其原因可能是,热压温度的升高和热压时间的增长都有利于海苔片中的琼胶等成分形成溶胶,溶胶混合得越充分使得粘合后海苔片的韧性越低。但过长的热压时间可能会使海苔片中琼胶成分变质,从而导致韧性升高。

热压温度、酒精体积分数对海苔片韧性交互作用的响应面曲线如图 8b 所示,当热压时间为 3 s 时,提高热压温度与酒精体积分数均会使韧性降低。出现该现象的主要原因是,酒精体积分数及热压温度的升高,会降低海苔片的含水率,使海苔片变得更脆,从而使其韧性降低。

酒精体积分数、热压时间对海苔片韧性交互作用的响应面曲线如图 8c 所示,当热压温度为 200℃ 时,海苔片的韧性随着热压时间的增长先降低后升高,随着酒精体积分数升高呈降低趋势。原因可能是,热压时间和酒精体积分数的增加,降低了海苔片的含水率,因此使得粘合处海苔片的韧性降低,但加热时间过长,将导致海苔片变质,从而使韧性升高。

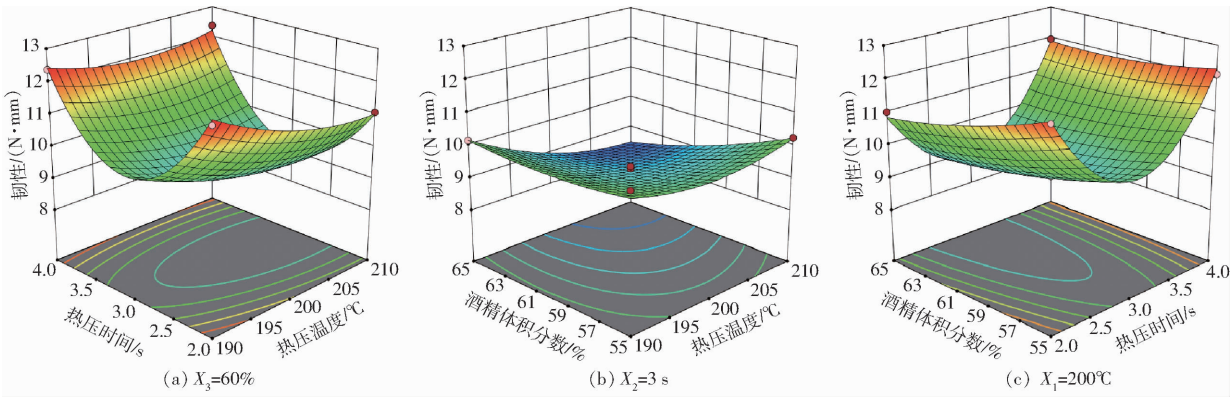


图8 各因素间交互作用对韧性的影响

Fig. 8 Influence of interaction among various factors on toughness

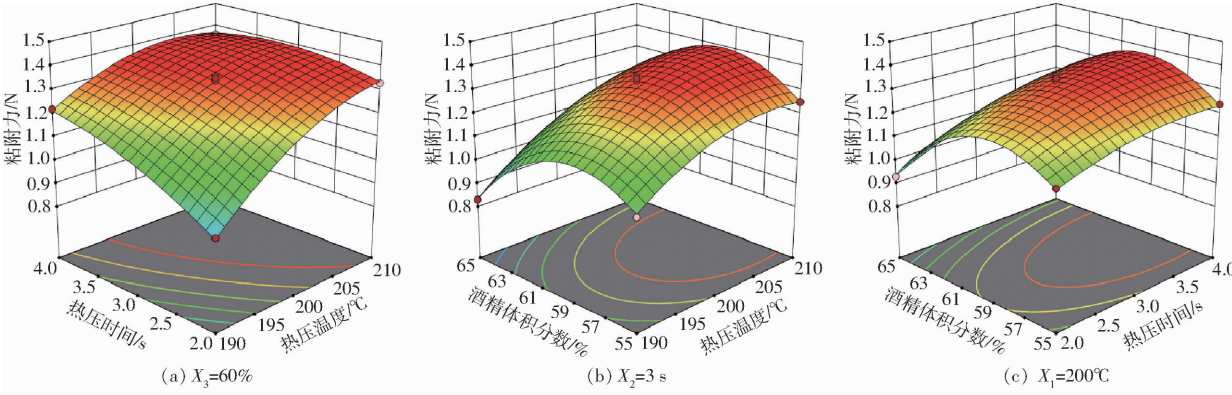


图9 各因素间交互作用对粘附力的影响

Fig. 9 Influence of interaction among various factors on adhesion

热压时间、热压温度对海苔片粘附力交互作用的响应面曲线如图 9a 所示,当酒精体积分数为 60% 时,热压温度的升高与热压时间的增长均会使粘附力升高。原因可能是,热压温度越高、热压时间越长,越利于海苔片中的琼胶等成分形成溶胶,从而更有助于两张海苔片粘合在一起,进而提高海苔片的粘附力。

热压温度、酒精体积分数对海苔片粘附力交互作用的响应面曲线如图 9b 所示,当热压时间为 3 s 时,海苔片的粘附力随酒精体积分数的升高呈先升高后降低的趋势,随热压温度的升高而升高。出现该现象的原因可能是,酒精体积分数和热压温度的升高,利于在海苔片粘合处形成溶胶,使粘附力增大。但过高体积分数的酒精在高温下易蒸发,影响海苔片粘合处溶胶的形成,从而降低其粘附力。

酒精体积分数、热压时间对海苔片粘附力交互作用的响应面曲线如图 9c 所示,当热压温度为 200℃ 时,海苔片的粘附力随热压时间的增长而升高,随酒精体积分数的升高先升高后降低。其原因可能为,热压时间越长,海苔片中的琼胶等成分形成溶胶越多,因此粘合越紧密;在低体积分数范围内,升高酒精体积分数将利于溶胶形成,提高海苔片的粘附力,但当酒精体积分数过高时,将限制溶胶的形

成,从而降低海苔片的粘附力。

2.3 热压粘合工艺参数优化及验证

为获得具有较高脆度及较好粘合效果的海苔片,以韧性最小值与粘附力最大值为优化目标,采用响应面法对热压温度、热压时间和酒精体积分数进行优化。根据单因素试验结果、响应面分析结果及实际生产要求,用参数优化的约束条件(190~210℃,2~4 s,55%~65%)对拟合的回归方程(5)、(6)进行求解,得到热压粘合效果最佳的工艺参数组合为:热压温度 208.39℃、热压时间 2.91 s、酒精体积分数 61.52%,此时海苔片韧性为 8.86 N·mm,粘附力为 1.36 N。为验证参数优化结果的可靠性,在海苔片热压粘合机上对优化结果进行试验验证。设定热压温度 208.4℃,热压时间 2.9 s,酒精体积分数 61.5%,进行 5 组重复试验,试验结果如表 4 所示。统计分析表明,在最佳参数组合条件下,海苔片韧性均值为 8.24 N·mm,粘附力均值为 1.39 N,与优化结果基本一致,说明参数优化结果可靠。

表4 验证试验结果

Tab. 4 Verification results of test

参数	均值	最大值	最小值	标准差
韧性/(N·mm)	8.24	8.89	8.03	0.34
粘附力/N	1.39	1.46	1.32	0.05

3 结 论

(1)设计的通过热压粘合,将单张海苔片粘合成带状海苔片的全新工艺可行、高效,可将现有的夹心海苔逐张间歇性生产变为连续性生产,能有效解决传统夹心海苔生产存在的夹心料掉落多、两张海苔片难以准确对齐等问题。

(2)热压温度、热压时间和酒精体积分数是影响海苔片韧性和粘附力的极显著因素($P < 0.01$),其中,影响韧性的主次顺序为酒精体积分数、热压温度、

热压时间;影响粘附力的主次顺序为热压温度、热压时间、酒精体积分数。随着热压温度升高,海苔片韧性降低,粘附力增大;增长热压时间,粘附力增大,但韧性呈现先降后升的趋势;随着酒精体积分数的增加,海苔片韧性逐渐降低,粘附力先升高后降低。

(3)经优化,海苔片热压粘合的最佳参数组合为:热压温度 208.39℃、热压时间 2.91 s、酒精体积分数 61.52%,在此条件下,粘合海苔片韧性为 8.86 N·mm,粘附力为 1.36 N。验证试验表明优化结果可靠,可为海苔片热压粘合工艺优化提供参考。

参 考 文 献

[1] BUSCHMANN A H,CAMUS C,INFANTE J,et al. Seaweed production: overview of the global state of exploitation, farming and emerging research activity[J]. European Journal of Phycology,2017,52(4):391-406.

[2] 王联珠,殷邦忠,戴卫平,等. 紫菜国际标准制定对我国紫菜产业的影响[J]. 渔业科学进展,2013,34(6):143-148. WANG Lianzhu,YIN Bangzhong,DAI Weiping,et al. The impact of formulation of international standards for laver products on Chinese laver industry[J]. Progress in Fishery Sciences,2013,34(6):143-148. (in Chinese)

[3] 李晓川. 我国紫菜产业发展、标准状况及安全性评价[J]. 中国渔业质量与标准,2011,1(3):9-12. LI Xiaochuan. Industry development, standard and safety assessment of seaweed in China[J]. Chinese Fishery Quality and Standards,2011,1(3):9-12. (in Chinese)

[4] 朱文嘉,王联珠,郭莹莹,等. 我国紫菜产业现状及质量控制[J]. 食品安全质量检测学报,2018,9(13):3353-3358. ZHU Wenjia,WANG Lianzhu,GUO Yingying,et al. Industry status and quality control of laver in China[J]. Journal of Food Safety & Quality,2018,9(13):3353-3358. (in Chinese)

[5] 农业农村部渔业渔政管理局. 2021 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社,2021.

[6] 李晓楠,张钟元,王春艳,等. 微波联合红外烘烤对夹心海苔品质的影响[J]. 食品工业科技,2021,42(6):56-61. LI Xiaonan,ZHANG Zhongyuan,WANG Chunyan,et al. Effect of microwave combined with infrared baking on the quality of sandwich seaweed[J]. Science and Technology of Food Industry,2021,42(6):56-61. (in Chinese)

[7] 杨贤庆,黄海潮,潘创,等. 紫菜的营养成分、功能活性及综合利用研究进展[J]. 食品与发酵工业,2020,46(5):306-313. YANG Xianqing,HUANG Haichao,PAN Chuang,et al. Advances on nutrient components, biological activities and comprehensive utilization of *Porphyra*[J]. Food and Fermentation Industries,2020,46(5):306-313. (in Chinese)

[8] 汪磊,朱波,田文洁,等. 即食片状复合海苔的研制[J]. 食品研究与开发,2013,34(4):40-43. WANG Lei,ZHU Bo,TIAN Wenjie,et al. The development of instant sheet composite seaweed[J]. Food Research and Development,2013,34(4):40-43. (in Chinese)

[9] CHO T J,RHEE M S. Health functionality and quality control of laver (*Porphyra*, *Pyropia*): current issues and future perspectives as an edible seaweed[J]. Marine Drugs, 2020,18(1):23-53.

[10] 张卫兵,徐加达,端木怡燕,等. 日韩两国紫菜产业分析及启示[J]. 食品科技,2005(10):9-12. ZHANG Weibing,XU Jiada,DUANMU Yiyen,et al. Analysis of laver industry in Japan and South Korean[J]. Food Science and Technology,2005(10):9-12. (in Chinese)

[11] DEL OLMO A,PICON A,NUÑEZ M. Preservation of five edible seaweeds by high pressure processing:effect on microbiota, shelf life,colour,texture and antioxidant capacity[J]. Algal Research,2020,49:101938.

[12] 姜鹏飞,王绅,郭敏强,等. 以海带为原料制作海苔的工艺优化[J]. 食品研究与开发,2019,40(24):91-99. JIANG Pengfei,WANG Shen,GUO Minqiang,et al. Process optimization of seaweed product made of *Laminaria japonica*[J]. Food Research and Development,2019,40(24):91-99. (in Chinese)

[13] 牛犇,刘青梅,章雅琴,等. 果仁夹心调味海苔的研制[J]. 食品工业,2016,37(1):149-152. NIU Ben,LIU Qingmei,ZHANG Yaqin,et al. The development of the embedded nuts seasoning seaweed[J]. The Food Industry,2016,37(1):149-152. (in Chinese)

[14] 竹下产业株式会社. 全自动干海苔制造装置[EB/OL]. <https://www.takeshita-ind.co.jp>,2017-04.

[15] IL SHIN Machinery Shop. Cutting edge technology,quality satisfaction,consumer impression[EB/OL]. <http://il-shin.co.kr/m/main/main.html>,2016.

[16] 李宁波,梁挺帅,李莉莉. 一种夹心海苔及其生产工艺:CN108464462B[P]. 2021-09-17.

[17] 盐城海瑞食品有限公司. 一种海苔自动夹心设备:CN201822224686.9[P]. 2019-11-05.

[18] 南通丁布林海苔食品有限公司. 夹心海苔新型制备设备:CN201720699872.0[P]. 2018-04-17.

[19] 张全斌,赵婷婷,蔡慧敏,等. 紫菜的营养价值研究概况[J]. 海洋科学,2005,29(2):69-72. ZHANG Quanbin,ZHAO Tingting,QI Huimin,et al. Review of the nutritional properties of nori[J]. Marine Sciences,2005,29(2):69-72. (in Chinese)

[20] 王治. 紫菜生物活性成分研究进展[J]. 食品研究与开发,2017,38(10):215-218. WANG Zhi. Research progress of bioactives from *Porphyra yezoensis*[J]. Food Research and Development,2017,38(10):215-

218. (in Chinese)
- [21] 邱伟芬,杨文建,薛梅,等. 条斑紫菜多糖的纯化、理化性质及其免疫活性研究[J]. 食品科学,2013,34(23):51–56.
QIU Weifen, YANG Wenjian, XUE Mei, et al. Purification, physicochemical properties and immunomodulatory activity of polysaccharides from *Porphyra yezoensis*[J]. Food Science,2013,34(23):51–56. (in Chinese)
- [22] 李琴梅,戚勃. 琼脂的物化特性及其在食品工业中的应用[J]. 中国食品添加剂,2009(6):170–174.
LI Qinmei, QI Bo. The physicochemical properties of agar and application in the food industry[J]. China Food Additives,2009(6):170–174. (in Chinese)
- [23] 刘思岐,杨贺祺,周慧,等. 食用海藻膳食纤维的分离与表征研究进展[J]. 食品工业科技,2020,41(16):346–352.
LIU Siqi, YANG Heqi, ZHOU Hui, et al. Research progress on isolation and characterization of dietary fiber from edible seaweeds[J]. Science and Technology of Food Industry,2020,41(16):346–352. (in Chinese)
- [24] 童金华,刘晓婷,安凤平,等. 响应面法优化改性制备低溶点、软凝胶琼脂[J]. 食品研究与开发,2018,39(20):90–94.
TONG Jinhua, LIU Xiaoting, AN Fengping, et al. Response surface methodology optimization for modifying agar with low solution temperature and soft gelling properties[J]. Food Research and Development,2018,39(20):90–94. (in Chinese)
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 海苔:GB/T 23596—2009[S]. 2009.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 干紫菜:GB/T 23597—2009[S]. 2009.
- [27] 连云港市海贡海苔食品有限公司. 紫菜片张自动接合装置及采用该装置的夹心海苔烤制机组:CN201810326196.1[P]. 2018–08–24.
- [28] 王永菲,王成国. 响应面法的理论与应用[J]. 中央民族大学学报(自然科学版),2005,14(3):236–240.
WANG Yongfei, WANG Chengguo. The application of response surface methodology[J]. Journal of Minzu University of China (Natural Sciences Edition),2005,14(3):236–240. (in Chinese)
- [29] ANDRE I K, SIULI M. Response surface methodology[J]. WIREs Computational Statistics,2010,2(2):128–149.
- [30] 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)
- [31] 王相友,张蒙,李学强,等. 辊式导流马铃薯定重装袋机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6):159–168.
WANG Xiangyou, ZHANG Meng, LI Xueqiang, et al. Design and test of roller-guided potato fixed weight bagging machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(6):159–168. (in Chinese)
- [32] 李建平,边永亮,霍鹏,等. 喷雾机风送式环形喷管喷雾装置设计与试验优化[J]. 农业机械学报,2021,52(9):79–88.
LI Jianping, BIAN Yongliang, HUO Peng, et al. Design and experimental optimization of spray device for air-fed annular nozzle of sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(9):79–88. (in Chinese)
- [33] 王铁军,王铁良,崔红光,等. 喂入调节式秸秆破包揉丝机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6):148–158.
WANG Tiejun, WANG Tieliang, CUI Hongguang, et al. Design and experiment of adjustable feeding straw bale-breaking and rubbing filament machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(6):148–158. (in Chinese)
- [34] 王德福,王沫,李利桥. 锤片式粉碎机粉碎玉米秸秆机理分析与参数优化[J]. 农业机械学报,2017,48(11):165–171.
WANG Defu, WANG Mo, LI Liqiao. Mechanism analysis and parameter optimization of hammer mill for corn stalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(11):165–171. (in Chinese)
- [35] 马庆华,王贵禧,梁丽松. 质构仪穿刺试验检测冬枣质地品质方法的建立[J]. 中国农业科学,2011,44(6):1210–1217.
MA Qinghua, WANG Guixi, LIANG Lisong. Establishment of the detecting method on the fruit texture of Dongzao by puncture test[J]. Scientia Agricultura Sinica,2011,44(6):1210–1217. (in Chinese)
- [36] 姜松,贾瑜,石吉勇,等. 韧性饼干脆性评价方法的研究[J]. 食品科学,2010,31(15):60–63.
JIANG Song, JIA Yu, SHI Jiyong, et al. Methods for the evaluation of biscuit crispy[J]. Food Science,2010,31(15):60–63. (in Chinese)
- [37] 郝红涛,赵改名,柳艳霞,等. 利用硬度、脆性和黏着性对火腿肠等级的判别分析[J]. 中国农业科学,2010,43(10):2182–2188.
HAO Hongtao, ZHAO Gaiming, LIU Yanxia, et al. Discriminant analysis of the grades of ham sausages based on hardness, fracturability and adhesiveness properties[J]. Scientia Agricultura Sinica,2010,43(10):2182–2188. (in Chinese)
- [38] 刘禹辰,张锋伟,宋学锋,等. 基于离散元法玉米秸秆双层粘结模型力学特性研究[J]. 东北农业大学学报,2022,53(1):45–54.
LIU Yuchen, ZHANG Fengwei, SONG Xuefeng, et al. Study on mechanical properties for corn straw of double-layer bonding model based on discrete element method[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2022,53(1):45–54. (in Chinese)
- [39] 周阳,黄海东,张国忠,等. 艾草脱叶机设计与试验研究[J]. 农机化研究,2022,44(2):197–202.
ZHOU Yang, HUANG Haidong, ZHANG Guozhong, et al. Design and experiment research of *Artemisia argyi* leaves removing machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2022,44(2):197–202. (in Chinese)
- [40] 王洋,张国忠,涂鸣,等. 不同成熟度荷叶力学特性试验研究[J]. 安徽农业大学学报,2021,48(4):694–700.
WANG Yang, ZHANG Guozhong, TU Ming, et al. Experimental study on mechanical properties of lotus leaves with different maturity[J]. Journal of Anhui Agricultural University,2021,48(4):694–700. (in Chinese)