doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.S2.036

盐渍裙带菜茎叶分离设备设计与试验

吴树桥[1] 黄伟荣[1] 袁 翔[1] 李秀辰[1,2] 母 刚[1,2] 张寒冰[1,2]
（1. 大连海洋大学机械与动力工程学院，大连 116023；2. 辽宁省海洋渔业装备专业技术创新中心，大连 116023）

摘要：针对我国暂无裙带菜茎叶分离专用设备，人工作业存在劳动强度大、人工成本高、工作环境恶劣的问题，以盐渍裙带菜为研究对象，设计了一种立式对辊裙带菜茎叶分离设备。通过对裙带菜茎叶分离过程进行运动学分析和受力分析，确定了影响裙带菜茎叶分离的主要结构参数与作业参数。利用ANSYS/LS-DYNA建立了裙带菜茎叶分离刚柔耦合模型，对茎叶分离过程进行仿真分析，以剥叶辊长度、嵌入棒直径、嵌入棒个数为仿真试验因素，以剥净率为评价指标进行正交仿真试验，根据试验结果利用Design-Expert软件对茎叶分离装置结构参数进行优化，求取剥净率最高对应结构参数分别为：剥叶辊长度140 mm、嵌入棒直径15 mm、嵌入棒个数10个。以上述结构试制裙带菜茎叶分离设备样机，并开展试验研究，以夹持辊转速、剥叶辊转速、啮合深度为影响因素，以剥净率和破损率为评价指标，开展了正交试验。设定剥净率最高、破损率最低为约束条件得到最佳作业参数为：夹持辊转速60 r/min、剥叶辊转速400 r/min、啮合深度2 mm，此时剥净率为84.3%，破损率为5.5%。以此最优参数进行样机试验验证，得到裙带菜茎叶分离设备的剥净率为87.0%，破损率为5.0%，试验结果与响应面优化后结果相似。综上所述，该裙带菜茎叶分离设备能够满足生产需求，且对裙带菜损伤较小，为裙带菜茎叶分离提供了有效的解决方案和设计参考。

关键词：茎叶分离；剥叶辊；LS-DYNA；剥净率；破损率
中图分类号：S226.9 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-1298(2024)S2-0348-13

Design and Test of Stem-Leaf Separation Device for Salted Wakame (*Undaria pinnatifida*)

WU Shuqiao[1] HUANG Weirong[1] YUAN Xiang[1] LI Xiuchen[1,2] MU Gang[1,2] ZHANG Hanbing[1,2]
(1. *School of Mechanical and Power Engineering, Dalian Ocean University, Dalian* 116023, *China*
2. *Liaoning Province Marine Fisheries Equipment Professional Technology Innovation Center, Dalian* 116023, *China*)

Abstract: In China, the absence of dedicated equipment for separating stems and leaves of wakame leads to issues of high labor intensity, elevated labor costs, and poor working conditions in manual operations. A vertical roller type wakame stem and leaf separation apparatus was designed by using salted wakame as study object. The primary structural characteristics and operational parameters influencing the separation of wakame stem and leaf were identified by performing kinematic and force analyses on the process. ANSYS/LS-DYNA was used to build a stiff flexible coupling model for wakame stem leaf separation, and single factor simulation tests were carried out with structural parameters acting as influencing variables. Using the stripping rate as the assessment index, orthogonal simulation experiments were performed. Using Design-Expert software, the stem leaf separation device's structural characteristics were optimized based on the trial results. The ideal structural parameters were found to be 140 mm for the leaf stripping roller, 15 mm for the embedded rod diameter, and 10 embedded rods. The aforementioned structure was used to construct a prototype of wakame stem and leaf separation apparatus, and experimental study was carried out. Orthogonal experiments were conducted with clamping roller speed, stripping roller speed, and meshing depth as influencing factors, and stripping rate and damage rate as evaluation indicators. To find the ideal operating parameters, the maximum stripping rate and minimum damage rate were established as constraints: a 60 r/min clamping roller speed, a 400 r/min leaf stripping roller speed, and a 2 mm meshing depth. At this point, there was a 5.5% damage rate and an 84.3% stripping rate. After

收稿日期：2024-08-02 修回日期：2024-09-20
基金项目：辽宁省教育厅科学研究经费项目(QL201908)和辽宁省教育厅项目(LJKMZ20221112)
作者简介：吴树桥(1999—)，男，硕士生，主要从事渔业装备研究，E-mail: 1563436656@qq.com
通信作者：张寒冰(1986—)，男，副教授，主要从事渔业装备工程研究，E-mail: zhanghanbing@dlou.edu.cn

experimental verification, a peeling rate of 87.0% and a damage rate of 5.0% were obtained. In conclusion, the wakame stem and leaf separation apparatus may efficiently satisfy production requirements while reducing wakame damage.

Key words: stem-leaf separation; stripping roller; LS-DYNA; stripping rate; damage rate

0　引言

裙带菜(*Undaria pinnatifida*)是褐藻纲海带目翅藻科裙带菜属的一年生大型海藻[1],是世界上最重要的养殖海藻之一[2],普遍应用于食品、医药、化妆品等领域[3-5]。2023年我国裙带菜年产量2.055×10^5 t,养殖面积10 854 hm^2[6]。茎叶分离是裙带菜初加工中的重要环节,但国内无机械化茎叶分离设备,目前仍依靠人工作业方式,存在劳动强度大、人工成本高、工作环境恶劣的问题,机械化茎叶分离已成为产业发展的迫切需求[7-12]。

当前农业所用茎叶分离方法主要分为刀切法、气流法和摩擦冲击法3大类。文献[13]研制的滚筒式烟草茎叶分离机,带有切割法兰,在滚筒旋转过程中,法兰旋转切去烟叶。文献[14]研发的瓜叶分离设备,加入调节机构,使设备能应对作物不同尺寸,可以实现大部分不同尺寸的瓜叶分离作用。文献[15]利用空气动力学特性差异,茎、叶悬浮速度不同,设计了苜蓿干燥与茎叶分离设备,对切碎后的苜蓿先进行干燥,在合适风速下实现茎叶分离。文献[16]基于藜蒿植株特性,设计了一种气力组合式藜蒿脱叶机,通过气吸引导、脱叶辊作用,实现茎叶分离。文献[17]设计了一种甜叶菊脱叶机构,脱叶机构由带式毛刷和粗糙传送带组成,通过较高速运转的带式毛刷与甜叶菊叶片接触并对其搓擦、拉扯,从而完成脱叶过程。文献[18]设计了一种艾草脱叶机,通过输送辊运送及脱叶辊旋转打击,实现整杆式脱叶,脱叶辊采用柔性脱叶元件,提高了脱叶元件使用寿命,减少了艾草茎秆损伤。刀切法通常适用于较规则农作物,气吸法适用于茎叶间连接强度较低的农作物,裙带菜为水生柔性植物,形体不规则,茎叶间连接强度高,可选用摩擦冲击法进行裙带菜茎叶分离,但裙带菜茎叶强度远小于陆生植物,在受到较大冲击力时易受到损伤,因此裙带菜茎叶分离设备在设计时,不仅要解决茎叶分离的问题,同时需要考虑裙带菜损伤的问题,目前关于裙带菜茎叶分离的设备的研究与应用报道较少。

本文以辽宁省大连市生产加工的盐渍裙带菜为研究对象,根据盐渍裙带菜机械化茎叶分离技术要求,在盐渍裙带菜生物力学特性研究基础上,设计一种立式对辊裙带菜茎叶分离设备,并对裙带菜茎叶分离过程进行运动和受力分析,利用ANSYS/LS-DYNA软件对茎叶分离设备的结构参数进行仿真分析和优化,试制样机研究作业参数对剥净率和破损率的影响规律,通过正交试验设计优化作业参数,以期为裙带菜茎叶分离设备提供理论与技术支撑。

1　裙带菜茎叶分离设备结构与工作原理

1.1　裙带菜茎叶分离设备结构

裙带菜茎叶分离设备结构如图1所示,主要由机架和茎叶分离机构组成,机架由铝合金型材搭建,茎叶分离机构包括夹持辊、剥叶辊、嵌入棒、减速电机、推杆电机、导轨、滑块。嵌入棒沿周向均匀分布在剥叶辊上,夹持辊和剥叶辊通过联轴器和T型带座轴承与减速电机相连,左侧移动辊组通过上下滑轨与机架相连,推杆电机位于整机最左侧,可带动移动辊组左右运动。

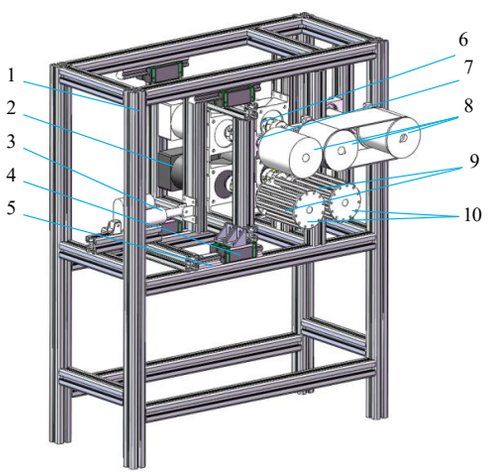


图1　裙带菜茎叶分离设备

Fig. 1　Wakame stem and leaf separation equipment

1. 机架　2. 减速电机　3. 推杆电机　4. 滑块　5. 导轨　6. 联轴器　7. T型带座轴承　8. 夹持辊　9. 嵌入棒　10. 剥叶辊

1.2　工作原理

裙带菜茎叶分离设备工作过程及原理如图2所示,图中绿色部分为裙带菜,蓝色为茎叶分离装置。进行裙带菜茎叶分离时,将裙带菜放置左右两组辊轮中间,接通电机电源,推杆电机推动移动辊组向右移动,夹持住裙带菜茎,此时夹持辊通过滚动摩擦将裙带菜匀速向上输送,同时剥叶辊高速旋转,利用嵌入棒对裙带菜叶的摩擦和冲击作用实现茎叶分离。

2　关键部件设计

2.1　茎叶分离过程分析

2.1.1　运动分析

裙带菜茎叶分离过程中的运动情况对茎叶分离效果影响显著,裙带菜茎叶分离过程的运动分析模型如图3所示。在茎叶分离过程中,裙带菜茎受到两侧夹持

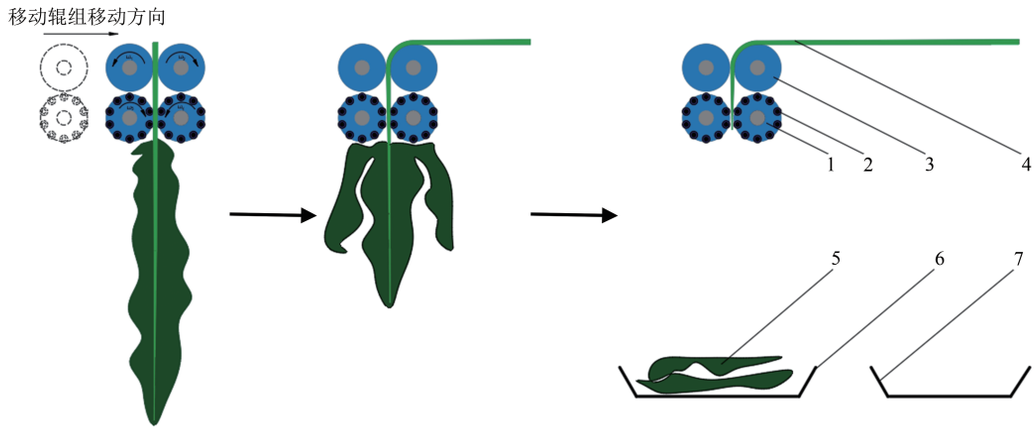


图2 裙带菜茎叶分离工作原理

Fig. 2 Wakame stems and leaves separation works

1. 剥叶辊 2. 嵌入棒 3. 夹持辊 4. 裙带菜茎 5. 裙带菜叶 6. 叶收集箱 7. 茎收集箱

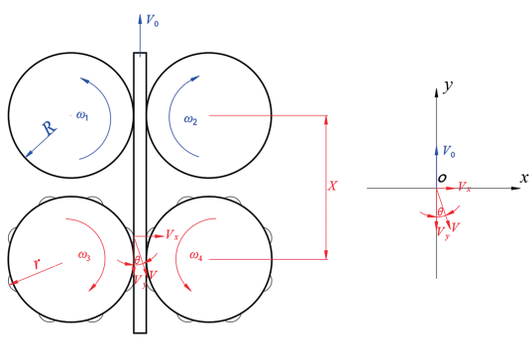


图3 裙带菜茎叶分离过程运动分析图

Fig. 3 Movement analysis diagram of wakame stem and leaf separation process

辊的夹持旋转作用，以速度 V_0 向上匀速输送，两侧剥叶辊高速向下打击裙带菜叶，使裙带菜茎叶分离，嵌入棒在接触裙带菜叶时施加打击力。裙带菜叶的速度可分解为 x 轴方向速度 V_x 和 y 轴方向速度 V_y，V_0 和 V_y 显著影响裙带菜茎叶分离效果和效率。

裙带菜输送速度 V_0 计算公式为

$$V_0 = \omega_1 R \tag{1}$$

嵌入棒的线速度 V 计算公式为

$$V = \omega_3 r \tag{2}$$

式中 ω_1——夹持辊角速度，rad/s

ω_3——剥叶辊角速度，rad/s

R——夹持辊半径，mm

r——剥叶辊整体半径，mm

裙带菜叶沿 x 轴和 y 轴方向速度计算公式为

$$\begin{cases} V_x = V\sin\theta \\ V_y = V\cos\theta \end{cases} \tag{3}$$

式中 θ——嵌入棒对裙带菜的作用方向与竖直方向的夹角，(°)

由式(2)、(3)可知，增大剥叶辊整体半径，减小速度夹角 θ，均可提升嵌入棒 y 方向分速度，提高茎叶分离效率。

根据图3所示，当夹持辊角速度为 ω_1、剥叶辊角速度为 ω_3 时，结合式(1)、(2)，裙带菜在茎叶分离过程中两侧被打击次数 N 计算公式为

$$N = \frac{O\omega_3 L}{\omega_1 \pi R} \tag{4}$$

式中 L——待剥叶部分裙带菜长度，mm

O——剥叶辊上嵌入棒数量

由式(4)可知，打击次数与剥叶辊角速度和嵌入棒个数成正比，与夹持辊角速度和夹持辊半径成反比，提高剥叶辊角速度和嵌入棒个数，减小夹持辊角速度和夹持辊半径可以增大打击次数，从而提高剥净率；但过高的打击次数可能导致裙带菜在剥叶过程中产生破损，出现断尾情况。因此，需要在保证裙带菜不破损的条件下尽量提升打击次数，以获得较高的剥净率。

2.1.2 受力分析

分析裙带菜茎叶分离过程的受力情况，建立裙带菜茎叶分离过程受力模型，如图4所示。裙带菜茎在夹持辊作用下，受到正压力 F_{N1}、F_{N2}，摩擦力 F_{f1}、F_{f2}，H 为单侧夹持辊啮合深度。裙带菜在剥叶辊作用下，受到嵌入棒对裙带菜叶的冲击力 F_{T1}、F_{T2}。

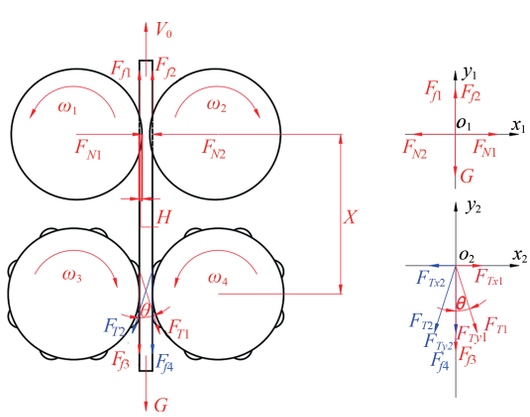


图4 茎叶分离过程中裙带菜受力分析

Fig. 4 Force analysis of wakame during stem and leaf separation

裙带菜茎在夹持辊作用下匀速运动，受力方程为

$$\begin{cases} F_{x1} = F_{N1} - F_{N2} = 0 \\ F_{y1} = F_{f1} + F_{f2} - G = 0 \end{cases} \tag{5}$$

其中

$$\begin{cases} F_{N1} = F_{N2} \\ F_{f1} = F_{f2} \\ F_{f1} = \mu_1 F_{N1} \end{cases} \tag{6}$$

式中　μ_1——夹持辊摩擦因数

F_{x1}——裙带菜茎所受x_1方向合力，N

F_{y1}——裙带菜茎所受y_1方向合力，N

G——裙带菜所受重力，N

由式(6)可知，裙带菜茎在x_1轴方向受两夹持辊的正压力，压力大小相等方向相反，在y_1方向裙带菜茎受到由正压力产生的摩擦力，为保证裙带菜在分离时匀速向上运动，则裙带菜茎竖直方向受合力为0。

裙带菜叶在剥叶辊上嵌入棒作用下受力方程为

$$\begin{cases} F_{x2} = F_{Tx1} - F_{Tx2} = 0 \\ F_{y2} = F_{Ty1} + F_{Ty2} + F_{f3} + F_{f4} > F \end{cases} \tag{7}$$

其中

$$\begin{cases} F_{T1} = F_{T2} \\ F_{Tx1} = F_{T1}\sin\theta \\ F_{Ty1} = F_{T1}\cos\theta \\ F_{f3} = \mu_2 F_{Tx1} \end{cases} \tag{8}$$

式中　F_{x2}——裙带菜叶所受x_1方向合力，N

F_{y2}——裙带菜叶所受y_1方向合力，N

F_{T1}、F_{T2}——剥叶辊上嵌入棒对裙带菜叶施加的冲击力，N

F_{Tx1}、F_{Tx2}——裙带菜叶所受x_1方向分力，N

F_{Ty1}、F_{Ty2}——裙带菜叶所受y_1方向分力，N

μ_2——剥叶辊上嵌入棒摩擦因数

F_{f3}、F_{f4}——嵌入棒对裙带菜叶施加的摩擦力，N

F——茎叶分离力，N

茎叶分离过程中，裙带菜茎在夹持辊的夹持作用下匀速向上运动，剥叶辊以一定的转速打击裙带菜，此时裙带菜叶受到剥叶辊上嵌入棒施加冲击力F_{T1}，可沿x_2轴方向和y_2轴方向分解。由式(7)、(8)可知，裙带菜叶在x_2轴方向受力平衡；裙带菜叶在y_2轴方向受力大于茎叶分离力F。

2.2　夹持辊设计

在茎叶分离过程中，夹持辊主要用于裙带菜茎的夹持和输送，在夹持辊作用下裙带菜受力情况如图5所示，其对裙带菜施加的力主要为一对方向相反的压力以及压力提供的轴向摩擦力。

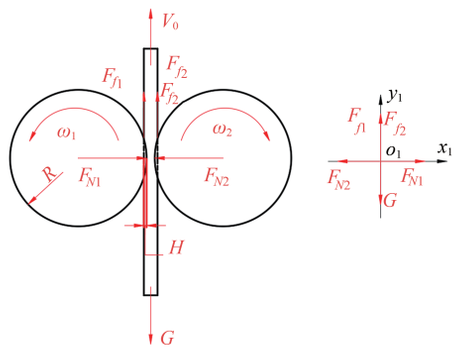


图5　夹持辊作用下裙带菜受力分析图

Fig. 5　Analysis diagram of wakame under action of clamping rollers

由胡克定律可知，物体在受到力时会发生形变[19]，裙带菜在夹持状态下，所受压应力计算公式为

$$p = \frac{\triangle VK}{V_1} \tag{9}$$

式中　p——裙带菜所受压应力，Pa

K——裙带菜体积模量，取2.49MPa

ΔV——裙带菜受压时体积变化量，mm³

V_1——裙带菜受压后体积，mm³

裙带菜受压时体积变化量计算公式为

$$\triangle V = l\left[\frac{\pi R^2 \arccos\dfrac{R-H}{R}}{180^\circ} - \sqrt{R^2-(R-H)^2}\,(R-H)\right] \tag{10}$$

式中　l——裙带菜茎宽，mm

裙带菜受压后体积计算公式为

$$V_1 = \frac{m_1}{\rho} - \triangle V \tag{11}$$

式中　m_1——单根裙带菜质量，g

ρ——裙带菜密度，取0.000 96 g/mm³

在夹持时，夹持辊施加的压力与接触面积有关，裙带菜所受压力F_{N1}计算公式为

$$\begin{cases} F_{N1} = pS \\ S = \dfrac{l\pi R \arccos\dfrac{R-H}{R}}{90^\circ} \end{cases} \tag{12}$$

式中　S——夹持辊接触裙带菜表面积，mm²

整理式(9)~(12)得

$$F_{N1} = \frac{l^2\pi RK\left[\dfrac{\pi R^2\arccos\dfrac{R-H}{R}}{180^\circ} - \sqrt{2RH-H^2}\,(R-H)\right]\arccos\dfrac{R-H}{R}}{\dfrac{90^\circ m_1}{\rho} - 90^\circ l\left[\dfrac{\pi R^2\arccos\dfrac{R-H}{R}}{180^\circ} - \sqrt{2RH-H^2}\,(R-H)\right]} \tag{13}$$

此时裙带菜所受竖直方向合力F_{y1}计算公式为

$$F_{y1} = 2\mu_1 F_{N1} - G \tag{14}$$

根据裙带菜生物特性[20-21]，裙带菜茎宽l最大值为42 mm，最小值为25 mm，为保证裙带菜在茎叶分离过程

中茎始终处于夹持辊接触范围内，夹持辊长度应大于裙带菜茎宽最大值，考虑到作业余量，设计夹持辊长度为120 mm；裙带菜叶柄长度最小值为130 mm，为保证夹持辊顺利进行夹持作业，剥叶辊顺利进行剥叶作业，夹持辊和剥叶辊中心间距X应小于裙带菜最小叶柄长度，考虑作业余量，设计夹持辊半径R为50 mm；考虑到裙带菜茎表面较光滑，且不易破损，为保证裙带菜在夹持过程中不发生向下窜动，夹持辊表面材料选择PVC磨砂颗粒，μ_1取0.40。根据测量，单根裙带菜质量m_1最大值为710 g，最小值为230 g。

将已知条件代入式(13)、(14)，得到单侧夹持辊啮合深度H为0.2 mm~1.8 mm。

2.3 剥叶辊设计

剥叶辊主要用于剥离裙带菜叶，如图6所示，由辊轴、法兰盘、嵌入棒、塞打螺丝和铆螺母构成，法兰盘由紧定螺钉固定在辊轴上。以剥叶辊中嵌入棒接触裙带菜叶为例，进行受力分析，受力情况如图7所示。

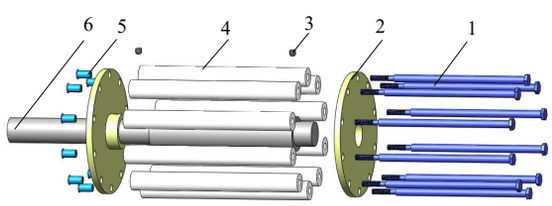


图6 剥叶辊模型展开图

Fig. 6 Unfolding diagram of leaf stripping roller model

1. 塞打螺丝 2. 法兰盘 3. 紧定螺钉 4. 嵌入棒 5. 铆螺母 6. 剥叶辊轴

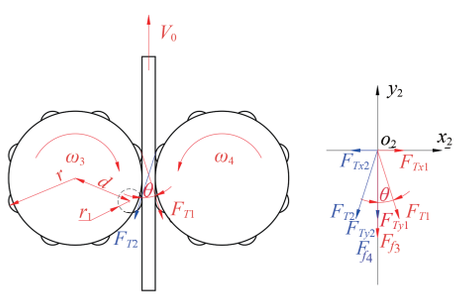


图7 剥叶辊作用下裙带菜受力分析图

Fig. 7 Analysis diagram of Wakame under action of leaf stripping roller

在茎叶分离过程中剥叶辊上嵌入棒在初始接触裙带菜时，会施加的冲击力，如图7所示，此时裙带菜所受冲击力计算公式为

$$F_{T1} = ma = mr\omega_3^2 \tag{15}$$

式中 m——单个嵌入棒质量，g

a——剥叶辊向心加速度，mm/s^2

根据式(7)、(8)裙带菜叶竖直方向合力F_{y2}计算公式为

$$F_{y2} = 2\mu_2 F_{T1}\sin\theta + 2F_{T1}\cos\theta \tag{16}$$

随着剥叶辊的继续转动，嵌入棒施加给裙带菜叶的冲击力F_{T1}与y_2轴夹角θ逐渐减小，当θ为0°时，裙带菜所受的冲击力F_{T1}沿茎方向竖直向下，裙带菜受到y_2轴方向合力为

$$F_{y2} = F_{T1} + F_{T2} \tag{17}$$

根据生物力学特性测试，裙带菜叶拉伸最小断裂力为27.84 N，及裙带菜竖直方向合力不大于27.84 N，代入式(15)，取m为100 g，取r为50 mm，计算得剥叶辊角速度最大为52.75 rad/s，转换为转速为504 r/min，设计剥叶辊转速不大于500 r/min。为满足较大的打击次数，根据式(4)夹持辊转速选择不大于100 r/min。裙带菜自然垂落状态下最大宽度为60 mm，选择剥叶辊长度应大于60 mm；考虑到分离机构设计紧凑，为防止内部结构发生干涉，设计剥叶辊和夹持辊半径R相同，为50 mm；由于裙带菜叶片较薄，抗拉能力较差，茎叶分离过程易破损，为实现茎叶分离并降低裙带菜叶破损率，应选用柔软且湿润条件下摩擦因数较高的材料制作剥叶辊嵌入棒。

初始剥叶辊接触裙带菜时，嵌入棒与裙带菜间θ计算公式为

$$\theta = \arccos\frac{R}{r} \tag{18}$$

其中

$$r = d + r_1 \tag{19}$$

式中 d——剥叶辊与嵌入棒安装中心距，取45 mm

r_1——嵌入棒半径，mm

目前，农业用脱叶机械脱叶辊上周向排布的脱叶元件个数一般为4个[18]，为了提高打击次数，嵌入棒数量初步设定为4~12。当嵌入棒个数最大时，均匀分布于剥叶辊上，当嵌入棒间距最小时，嵌入棒半径最大为10 mm，嵌入棒施加冲击力最大，此时θ最大；当θ最小时，嵌入棒半径为6 mm，嵌入棒施加冲击力最小。根据排布要求，嵌入棒半径取6~10 mm。

3 裙带菜茎叶分离仿真

为了更加准确、高效地模拟裙带菜茎叶分离过程，研究裙带菜的分离情况，仿真中忽略剥叶辊在茎叶分离过程中产生的碰撞变形，设剥叶辊为刚性体，裙带菜作为主要研究对象，设裙带菜为柔性体，基于ANSYS/LS-DYNA建立茎叶分离设备剥叶辊与裙带菜的刚柔耦合模型[22]，对剥叶辊剥离裙带菜叶过程进行仿真试验，以裙带菜茎叶分离剥净率为评价指标，分析剥叶辊长度、剥叶辊嵌入棒个数、嵌入棒直径对裙带菜茎叶分离效果的影响规律并优化裙带菜茎叶分离设备的结构参数。

3.1 仿真模型建立与参数设置

裙带菜茎叶分离设备的作业对象主要为盐渍裙带菜，建立符合实际的盐渍裙带菜模型对保证仿真数据的准确性有重要意义。根据实际测量和文献[20-21]，仿照实物，利用Solidworks建立裙带菜三维模型，如图8所示，裙带菜叶长短不一，且自然状态下会出现多层堆叠的情况，忽略堆叠产生的褶皱弯曲，模型简化为裙带菜叶向两侧展开。

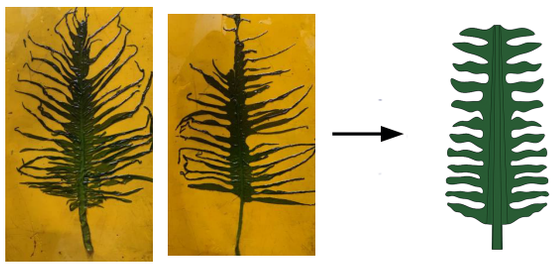


图 8　裙带菜三维模型建立

Fig. 8　Wakame three-dimensional model

在 Solidworks 中建立茎叶分离模型，为提高仿真效率，对三维模型进行简化，将夹持辊对裙带菜的夹持作用等效为剥叶辊匀速向下移动，仅保留两剥叶辊为主要工作部件，导入 ANSYS/LS-DYNA，对模型进行网格划分，如图 9 所示。

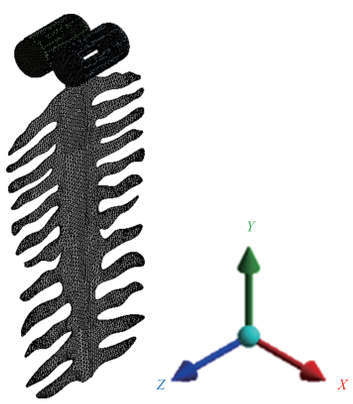


图 9　茎叶分离仿真模型

Fig. 9　Simulation model meshing

剥叶辊设置为刚性体，裙带菜设置为各项同性的柔性体，采用耦合的方法对茎叶分离过程中剥叶辊和裙带菜的有限元模型进行显式动力学分析[22-23]，模型材料参数如表 1 所示[24]。

设定仿真总时间为 0.5 s，为防止裙带菜模型在剥叶辊作用下来回窜动，对裙带菜根部施加固定约束，忽略实际工作中的振动等因素。对剥叶辊添加向裙带菜挤压位移 2 mm，向下移动速度 3 mm/s，旋转速度为 300 r/min。对裙带菜模型薄片添加 Body Contact Tracker 命令，得到其在茎叶分离过程中所受的 Y 方向受力变化曲线如图 10 所示。随着剥叶辊对裙带菜产生的作用，Y 方向的受力峰值为 24.24 N。Y 方向受力大于茎叶分离力，满足茎叶分离基本要求。

表 1　模型材料参数

Tab. 1　Model material parameters

材料	密度/(g·cm^{-3})	弹性模量/MPa	泊松比	拉伸强度/MPa	剪切强度/MPa
裙带菜	0.96	4.78	0.33	1.97	4.64
剥叶辊	7.85	7.69	0.30		

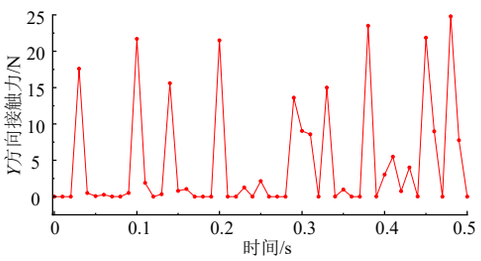


图 10　裙带菜在 Y 方向受力随时间变化曲线

Fig. 10　Wakame force in Y direction as a function of time

3.2　单因素仿真试验

3.2.1　试验评价指标及因素水平确定

为研究剥叶辊长度、嵌入棒直径、剥叶辊嵌入棒个数对裙带菜茎叶分离过程的影响规律，以裙带菜茎叶分离剥净率为评价指标进行单因素试验，仿真中剥净率计算公式为

$$Y = \frac{l_1}{L_1} \times 100\% \tag{20}$$

式中　Y——剥净率，%

l_1——在仿真中剥叶辊剥去叶的长度，mm

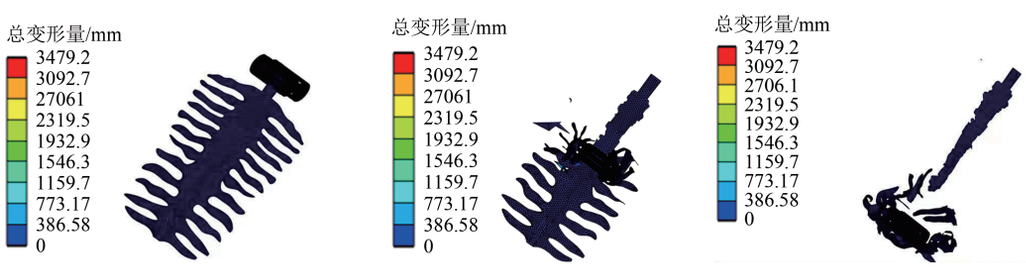
L_1——仿真中裙带菜茎上叶总长度，mm

采用单因素试验探究各因素最佳范围，单因素试验水平如表 2 所示，仿真试验过程如图 11 所示。

表 2　仿真单因素试验水平

Tab. 2　Single factor test level

水平	因素		
	剥叶辊长度/mm	嵌入棒直径/mm	嵌入棒数量
1	70	12	4
2	90	14	6
3	110	16	8
4	130	18	10
5	150	20	12



(a) t=0 s　　(b) t=0. 25 s　　(c) t=0. 5 s

图 11　ANSYS/LS-DYNA 仿真试验过程

Fig. 11　ANSYS/LS-DYNA simulation test process

3.2.2 试验结果与分析

(1)剥叶辊长度

当嵌入棒直径16 mm、嵌入棒数量8个时进行剥叶辊长度单因素试验,试验结果如图12所示,剥净率随着剥叶辊长度的增大呈现先上升后趋于平稳的趋势。原因在于裙带菜在茎叶分离过程中,会受到剥叶辊的影响左右窜动,且裙带菜茎宽呈从上到下依次减小的趋势,剥叶辊长度较低时只会对尾部裙带菜产生分离效果,随着剥叶辊长度的提升,剥叶辊对裙带菜的作用范围逐渐增大,剥净率逐渐增大。因此,选取剥叶辊长度110~150 mm作为多因素试验水平范围。

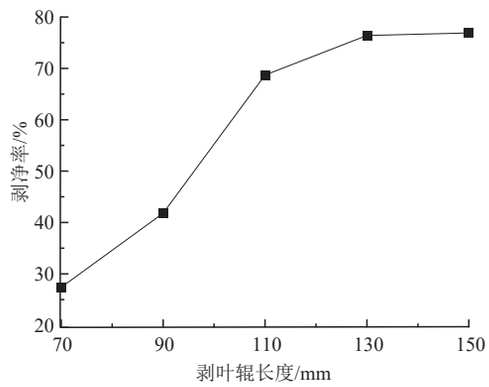


图12 剥叶辊长度单因素仿真结果

Fig. 12 Single factor simulation results of blade stripping roller length

(2)嵌入棒直径

当剥叶辊长度110 mm、嵌入棒数量8时进行嵌入棒直径单因素试验,试验结果如图13所示,剥净率随着嵌入棒直径的增大呈现先增大后减小的趋势。原因在于当转速一定时嵌入棒直径直接影响剥叶辊对裙带菜施加的作用力,进而影响剥叶辊转速对裙带菜的作用力,嵌入棒直径偏小,裙带菜所受作用力偏小,剥净率小;但当嵌入棒直径偏大,裙带菜所受作用力偏大,产生裙带菜尾部断裂现象,导致剥净率降低。因此,选取嵌入棒直径为14~18 mm作为多因素试验水平范围。

(3)嵌入棒数量

当剥叶辊直径110 mm、嵌入棒直径16 mm时进行嵌入棒个数单因素试验,试验结果如图14所示,剥净率随着嵌入棒数量增大呈先增大后减小趋势。原因在于当剥叶辊转速一定时,嵌入棒个数会影响剥叶辊对裙带菜的打击次数,打击次数过小裙带菜所受力影响小,出现尾部茎叶未分离现象;打击次数过大则会使裙带菜出现断尾现象,两者都会使剥净率降低。因此,选取嵌入棒数量为8~12作为多因素试验水平范围。

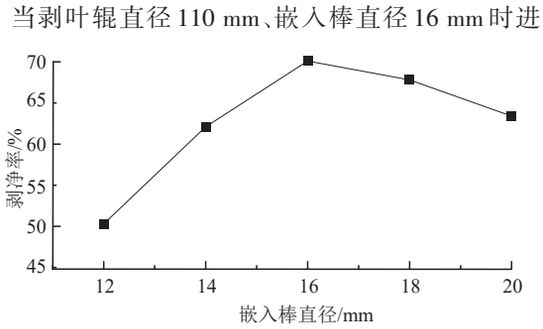


图13 嵌入棒直径单因素仿真结果

Fig. 13 Single factor simulation results for blade stripping roller diameter

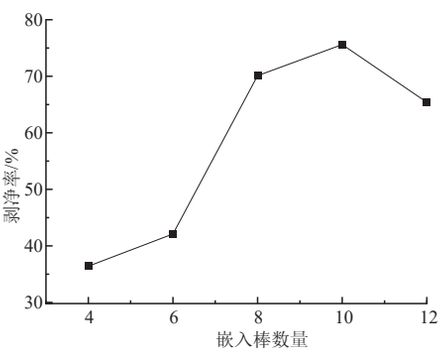


图14 嵌入棒个数单因素仿真结果

Fig. 14 Single factor simulation results for number of embedded rods

3.3 优化仿真试验

3.3.1 试验设计与结果

依据单因素试验结果,利用Design-Expert软件,根据Box-Behnken中心组合试验设计正交试验,试验因素水平编码见表3,试验方案与结果如表4所示,表中A、B、C分别表示剥叶辊长度、嵌入棒直径、嵌入棒数量编码值。研究剥叶辊长度、嵌入棒直径、嵌入棒量在不同水平条件下对裙带菜剥净率的影响,通过软件对试验结果进行方差分析,并在此基础上建立试验指标与各因素之间的关系模型,同时采用响应面分析方法,考察各个因素之间的交互作用效应。

表3 响应面试验因素编码

Tab. 3 Coding of test factors for response surface

编码	因素		
	剥叶辊长度/mm	嵌入棒直径/mm	嵌入棒数量
-1	110	14	8
0	130	16	10
1	150	18	12

3.3.2 方差分析

利用Design-Expert对表4中试验结果进行回归拟合分析,建立各项因素与裙带菜剥净率的关系多项式,得到响应面图,探讨在各因素的交互作用下裙带菜剥净率的影响规律。由响应面试验的方差分析结果(表5)可知,回归模型P小于0.000 1,表明回归模型高度显著,模型失拟项P为0.101 4大于0.05,说明模型失拟项不显著,回归模型与试验结果拟合程度高,该有限元仿真可对裙带菜茎叶分离过程中裙带菜剥净率有较好的

表 4　响应面试验方案及结果

Tab. 4　Scheme and results of response surface testing

序号	因素			剥净率 *Y*/%
	A	*B*	*C*	
1	−1	−1	0	62.1
2	1	−1	0	76.4
3	−1	1	0	65.7
4	1	1	0	62.5
5	−1	0	−1	69.4
6	1	0	−1	76.5
7	−1	0	1	63.5
8	1	0	1	73.5
9	0	−1	−1	68.9
10	0	1	−1	71.9
11	0	−1	1	74.5
12	0	1	1	59.7
13	0	0	0	80.1
14	0	0	0	79.5
15	0	0	0	79.2
16	0	0	0	78.6
17	0	0	0	78.5

表 5　响应面试验的方差分析结果

Tab. 5　ANOVA results for response surface tests

来源	平方和	自由度	均方	*F*	*P*
模型	767.58	9	85.29	83.03	< 0.000 1**
A	99.40	1	99.40	96.77	< 0.000 1**
B	61.05	1	61.05	59.43	0.000 1**
C	30.03	1	30.03	29.24	0.001 0**
AB	76.56	1	76.56	74.53	< 0.000 1**
AC	2.10	1	2.10	2.05	0.195 6
BC	79.21	1	79.21	77.11	< 0.000 1**
A^2	116.72	1	116.72	113.62	< 0.000 1**
B^2	220.71	1	220.71	214.86	< 0.000 1**
C^2	42.85	1	42.85	41.71	0.000 3**
残差	7.19	7	1.03		
失拟项	5.44	3	1.81	4.15	0.101 4
误差	1.75	4	0.4370		
总和	774.77	16			
R^2	0.99				
调整 R^2	0.97				

注：**表示极显著（$P<0.01$），下同。

预估。

在所建模型中，因素 *A*、*B*、*C*、*AB*、*BC*、A^2、B^2、C^2 对裙带菜剥净率的影响极显著，*AC* 对裙带菜剥净率的影响不显著，在建模分析时不加以考虑。建立裙带菜剥净率 *Y* 关于各项因素的多元回归方程为

$$Y = 79.18 + 3.52A - 2.76B - 1.94C - 4.37AB - 4.45BC - 5.26A^2 - 7.24B^2 - 3.19C^2 \quad (21)$$

该二次多项式表明，各因素对剥净率的影响从大到小依次是剥叶辊长度、嵌入棒直径、嵌入棒数量。

由于剥叶辊长度与嵌入棒数量交互作用对裙带菜剥净率的影响不显著，只进行剥叶辊长度与嵌入棒直径交互作用和嵌入棒直径与嵌入棒数量交互作用响应面分析，剥净率与各仿真试验因素之间的响应曲面如图 15 所示。由图 15a 可知：当嵌入棒个数位于中心水平时，剥净率随剥叶辊长度和嵌入棒直径的增大呈先增大后减小的趋势，原因在于剥叶辊长度较低、嵌入棒直径较小时，剥叶辊对裙带菜的作用力较小，而且大多作用于茎上，只对中下部裙带菜茎较窄时才会产生剥离作用；当剥叶辊长度过高、嵌入棒直径过大时，剥叶辊对裙带菜的作用力过大，对整个裙带菜产生剥离作用，但剥叶辊对裙带菜尾部作用力太大会导致尾部破损，剥净率下降。由图 15b 可知：当剥叶辊长度位于中心水平时，剥净率随着嵌入棒直径和嵌入棒个数的增大呈先增大后减小的趋势，原因是当嵌入棒直径较小、嵌入棒个数较少时，剥叶辊对裙带菜作用力较小，打击次数较少，剥离效果较差；当嵌入棒直径较大、嵌入棒个数较多时，剥叶辊对裙带菜作用力较大，打击次数较多，剥离效果较好，但较高的打击次数及较大作用力会导致裙带菜断裂，剥净率下降。

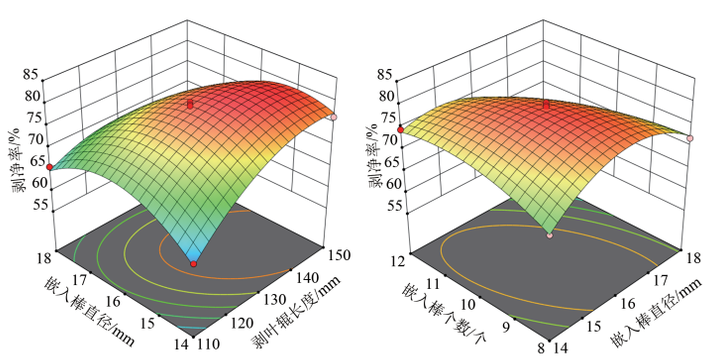


图 15　仿真试验因素交互作用对剥净率影响的响应曲面

Fig. 15　Analysis of response of various factors to separation and stripping rate of wakame stems and leaves

3.3.3　参数优化

根据上述试验结果及回归方程，剥净率最高为优化目标，以剥叶辊长度、嵌入棒直径、嵌入棒个数为优化对象，利用 Design-Expert 软件对回归模型进行寻优。最终得到剥叶辊长度为 140 mm、嵌入棒直径为 15 mm、嵌入棒数量为 10 时，剥净率最大，为 80.2%。

嵌入棒材质对裙带菜茎叶分离效果影响显著，将嵌入棒材料更改为硅胶和橡胶，根据仿真要求更改裙带菜与嵌入棒的接触摩擦因数，剥叶辊转速设置为300 r/min，分析不锈钢、硅胶、橡胶3种食品机械常用材料[25]对剥净率的影响，在剥叶辊结构和运动参数相同时，得到剥净率为80.2%、85.6%、83.9%。嵌入棒在不同材料下的裙带菜茎叶分离剥净率从大到小为硅胶、橡胶、不锈钢，确定嵌入棒材料为硅胶，此时剥净率提升至85.6%。

4 试验

4.1 材料与方法

裙带菜选自2024年3月辽宁省大连经济技术开发区汇才水产加工厂，按照盐渍裙带菜标准SC/T 3211-2002进行初步处理，低温存储，以避免裙带菜中盐分析出及水分变化，经过测量盐渍裙带菜主要物理特性：密度为0.96 g/cm^3、抗拉强度为3.08 MPa、抗剪强度为6.58 MPa。根据仿真优化结果试制裙带菜茎叶分离设备，如图16所示。裙带菜茎叶分离过程，如图17所示。

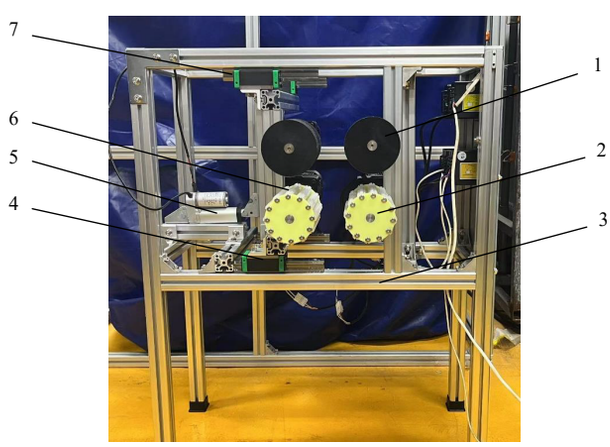


图16 裙带菜茎叶分离设备实物图

Fig. 16 Equipment of wakame stem and leaf separation

1. 夹持辊 2. 剥叶辊 3. 机架 4. 滑块 5. 推杆电机 6. 嵌入棒 7. 滑轨

断裂，则测量断裂点至尾部的长度记为破损长度。计算公式为

$$Y_1 = \frac{M}{M + m_0} \times 100\% \tag{22}$$

式中 Y_1——剥净率，%

M——设备剥去裙带菜叶质量，g

m_0——茎上残留裙带菜叶质量，g

$$Y_2 = \frac{l_2}{L_2} \times 100\% \tag{23}$$

式中 Y_2——破损率，%

l_2——完成一组试验后裙带菜破损长度，mm

L_2——每组试验裙带菜的总长度，mm

4.2 单因素试验

裙带菜茎叶分离设备在作业过程中，夹持辊转速、剥叶辊转速、啮合深度对裙带菜剥净率和破损率均有影响。根据前期仿真结果，选定剥叶辊上嵌入棒材料为硅胶，为进一步研究作业参数对裙带菜剥净率和破损率的影响，以剥净率和破损率为评价指标，选择裙带菜茎叶分离设备的作业参数进行单因素试验，因素水平如表6所示。

表6 裙带菜茎叶分离设备试验单因素水平

Tab. 6 Single factor level for wakame stem and leaf separation equipment experiment

水平	因素		
	夹持辊转速 /(r·min^{-1})	剥叶辊转速 /(r·min^{-1})	啮合深度 /mm
1	20	100	0
2	40	200	1
3	60	300	2
4	80	400	3
5	100	500	4

(1)夹持辊转速对剥净率和破损率的影响

由图18可知，随着夹持辊转速的增大，剥净率呈先增大后减小的趋势，破损率呈逐渐减小的趋势，原因在于当夹持辊转速较低，会使剥叶辊上的嵌入棒对裙带菜打击次数增多，使破损率增大，剥净率减小，随着夹持辊



(a) 裙带菜茎叶分离开始 (b) 裙带菜茎叶分离进行 (c) 裙带菜茎叶分离结束

图17 茎叶分离过程示意图

Fig. 17 Schematic of stem and leaf separation process

为探讨分离效果，以裙带菜茎叶分离试验剥净率Y_1和破损率Y_2作为评价指标。先测量设备剥去裙带菜叶的质量，再测量手工剥去残留裙带菜叶的质量。若产生

转速继续增大，嵌入棒对裙带菜打击次数逐渐减小，剥净率逐渐增大，破损率逐渐减小，但夹持辊转速过大，嵌入棒对裙带菜打击不充分，打击次数低，导致裙带菜茎

叶不能充分分离，此时破损率也处于较低水平。夹持辊转速在40~60 r/min范围内，剥净率和破损率处于较优水平。

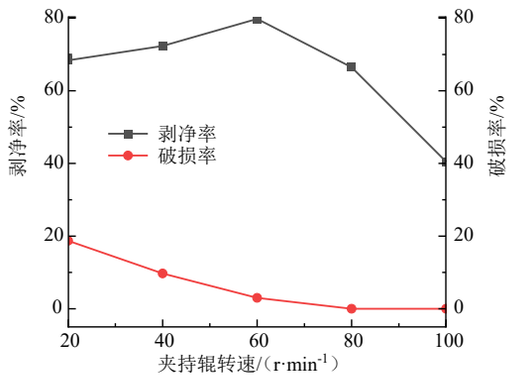


图18　夹持辊转速对茎叶分离剥净率和破损率的影响

Fig. 18　Effect of rotation speed of clamping roller on stripping rate and damage rate of stem and leaf separation

(2)剥叶辊转速对剥净率和破损率的影响

由图19可知，随着剥叶辊转速的增大，剥净率呈先增大后减小的趋势，破损率呈逐渐减小的趋势。原因在于随着剥叶辊转速的增大，剥叶辊上的硅胶棒对裙带菜打击次数逐渐增大，剥净率逐渐增大，破损率逐渐增大，当剥叶辊转速继续增大时，裙带菜尾部在承受高频次的打击时会产生断尾的情况，导致剥净率减小，破损率增大。剥叶辊转速在300~500 r/min范围内，剥净率和破损率处于较优水平。

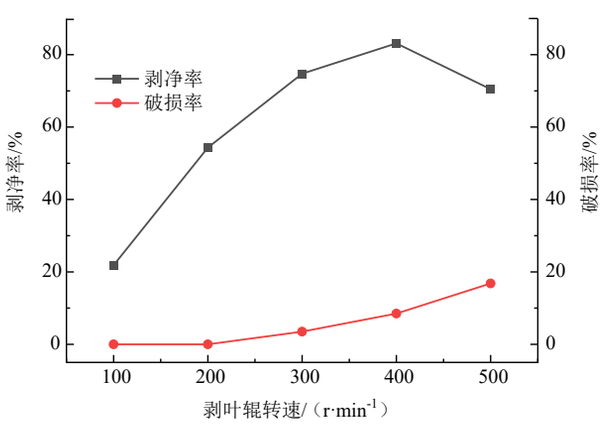


图19　剥叶辊转速对茎叶分离剥净率和破损率的影响

Fig. 19　Effect of rotation speed of stripping roller on stripping rate and damage rate of stem and leaf separation

(3)啮合深度对剥净率和破损率的影响

由图20可知，随着啮合深度的增大，剥净率呈先增大后减小的趋势，破损率呈逐渐减小的趋势。原因在于随着啮合深度增大，剥叶辊对裙带菜的摩擦力逐渐增大，剥净率和破损率逐渐增大，当啮合深度过大时，裙带菜尾部在承受较大的摩擦时会产生断尾的情况，此时破损率急剧升高，剥净率出现急剧下降。啮合深度在1~3 mm范围内，剥净率和破损率处于较优水平。

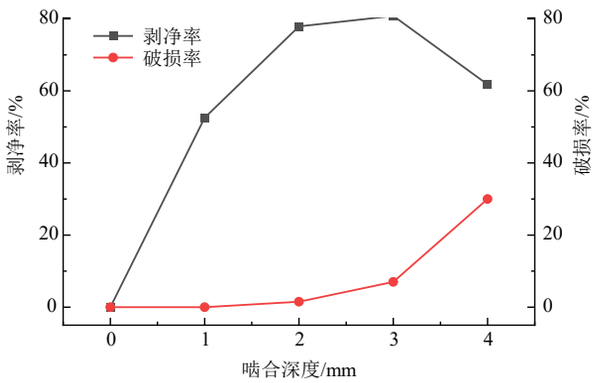


图20　啮合深度对茎叶分离剥净率和破损率的影响

Fig. 20　Effect of engagement depth on stripping rate and damage rate of stem and leaf separation

4.3　正交试验

4.3.1　试验设计与结果

根据单因素试验确定夹持辊转速、剥叶辊转速、啮合深度的取值范围，以剥净率Y_1和破损率Y_2作为评价指标，以夹持辊转速、剥叶辊转速、啮合深度为试验因素，利用Design-Expert软件，根据Box-Behnken中心组合试验设计原理，开展三因素三水平正交实验，试验因素编码如表7所示，试验设计方案及结果如表8所示，表中D、E、F分别表示夹持辊转速、剥叶辊转速、啮合深度编码值。

表7　试验因素编码

Tab. 7　Response surface test factor level coding

编码	因素		
	夹持辊转速/(r·min⁻¹)	剥叶辊转速/(r·min⁻¹)	啮合深度/mm
1	80	500	3
0	60	400	2
−1	40	300	1

4.3.2　方差分析

由表8试验结果，运用Design-Expert进行回归分析，结果如表9所示。剥净率回归模型高度显著，模型的拟合程度较好，失拟项的P值为0.646 2大于0.05，失拟项不显著，回归模型与试验结果拟合程度高。破损率回归模型高度显著，模型的拟合程度较好，失拟项的P值为0.231 4大于0.05，失拟项不显著，回归模型与试验结果拟合程度高。

剔除不显著项后，建立剥净率Y_1、破损率Y_2关于各因素的回归方程为

$$\begin{cases} Y_1 = 85.50 - 0.737\,5D - 2.57E + 1.94F + 3.15DE + 4.13DF - 8.25EF - 10.64D^2 - 9.61E^2 - 10.39F^2 \\ Y_2 = 5.23 - 2.72D + 2.29E + 6.46F - 2.07DE - 2.33DF + 2.50EF - 1.66D^2 + 2.07F^2 \end{cases} \tag{24}$$

式(24)表明，夹持辊转速D、剥叶辊转速E、啮合深度F对裙带菜剥净率影响从大到小依次为：E、F、D；对裙带菜破损率影响从大到小依次为：F、D、E。

在所建立的模型中，夹持辊转速与剥叶辊转速、夹

表8 试验方案及结果

Tab. 8 Experiment scheme and results

序号	因素			Y_1/%	Y_2/%
	D	*E*	*F*		
1	−1	−1	0	72.1	2.1
2	1	−1	0	64.1	0
3	−1	1	0	60.1	10.4
4	1	1	0	64.7	0
5	−1	0	−1	67.1	0
6	1	0	−1	57.6	0
7	−1	0	1	63.1	16.8
8	1	0	1	70.1	7.5
9	0	−1	−1	57.8	0
10	0	1	−1	69.7	0
11	0	−1	1	77.8	8.7
12	0	1	1	56.7	18.7
13	0	0	0	84.3	6.4
14	0	0	0	85.4	6.1
15	0	0	0	85.6	5.2
16	0	0	0	86.1	5.4
17	0	0	0	86.1	4.8

持辊转速与啮合深度、剥叶辊转速与啮合深度的交互作用对剥净率影响显著；夹持辊转速与剥叶辊转速、夹持辊转速与啮合深度、剥叶辊转速与啮合深度的交互作用对破损率影响显著。利用Design-Expert软件对交互作用显著的项进行响应面分析。

(1)剥净率

剥净率与各试验因素之间的响应曲面如图21所示，从图21a可知：剥净率随夹持辊转速、剥叶辊转速的增大呈先增大后减小的趋势；当夹持辊转速为50~65 r/min、剥叶辊转速为350~400 r/min时，剥净率较高。从图21b可知：剥净率随夹持辊转速、啮合深度的增大呈先增大后减小的趋势；当啮合深度为1.5~2.5 mm、夹持辊转速为50~65 r/min时，剥净率较高。从图21c可知：剥净率随剥叶辊转速、啮合深度的增大呈先增大后减小的趋势；当啮合深度为2~2.5 mm、剥叶辊转速为350~400 r/min时，剥净率较高。

(2)破损率

破损率与各试验因素之间响应曲面如图22所示。由图22a可知，破损率随夹持辊转速的增大而减小，随剥叶辊转速增大而增大；当夹持辊转速为70~80 r/min、剥叶辊转速为300~350 r/min时破损率较小，因为裙带菜受到打击次数较低，较低的剥叶辊转速对裙带菜的作用力也较小。由图22b可知：啮合深度对破损率的影响较夹持辊转速更明显，破损率随啮合深度增大而增大，随夹持辊转速的增大缓慢减小；当啮合深度为1~2 mm、夹持辊转速为60~90 r/min时，破损率较小，这是由于较低的啮合深度会导致剥叶辊对裙带菜的作用力较低，而较高的夹持辊转速也会降低裙带菜的被打击次数。由图22c可知，在剥叶辊转速最小、啮合深度最小的条件下破损率最低。

表9 回归模型的方差分析

Tab. 9 Variance analysis of regression models

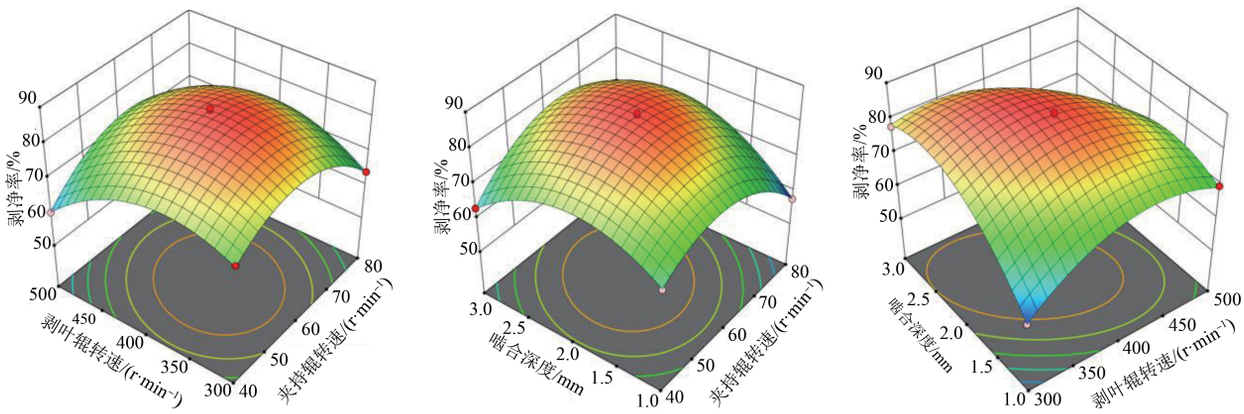
来源	剥净率					破损率				
	平方和	自由度	均方差	*F*	*P*	平方和	自由度	均方差	*F*	*P*
模型	1 942.12	9	215.79	476.89	< 0.000 1**	530.31	9	58.92	90.25	< 0.000 1**
D	4.35	1	4.35	9.62	0.017 3*	59.40	1	59.40	90.98	< 0.000 1**
E	53.04	1	53.04	117.23	< 0.000 1**	41.86	1	41.86	64.11	< 0.000 1**
F	30.03	1	30.03	66.37	< 0.000 1**	334.11	1	334.11	511.71	< 0.000 1**
DE	39.69	1	39.69	87.71	< 0.000 1**	17.22	1	17.22	26.38	0.001 3**
DF	68.06	1	68.06	150.41	< 0.000 1**	21.62	1	21.62	33.12	0.000 7**
EF	272.25	1	272.25	601.66	< 0.000 1**	25.00	1	25.00	38.29	0.000 5**
D^2	476.45	1	476.45	1 052.92	< 0.000 1**	10.98	1	10.98	16.82	0.004 6**
E^2	389.05	1	389.05	859.79	< 0.000 1**	2.97	1	2.97	4.55	0.070 4
F^2	454.32	1	454.32	1 004.01	< 0.000 1**	18.75	1	18.75	28.71	0.001 1**
残差	3.17	7	0.452 5			4.57	7	0.652 9		
失拟项	0.987 5	3	0.329 2	0.604 0	0.646 2	2.84	3	0.947 5	2.19	0.2314
误差	2.18	4	0.545 0			1.73	4	0.432 0		
总和	1 945.28	16				534.88	16			
R^2	0.998 4					0.991 5				
调整R^2	0.996 3					0.980 5				

注：*表示该项显著(0.01≤*P*<0.05)。

4.4 参数优化与验证试验

4.4.1 样机参数优化

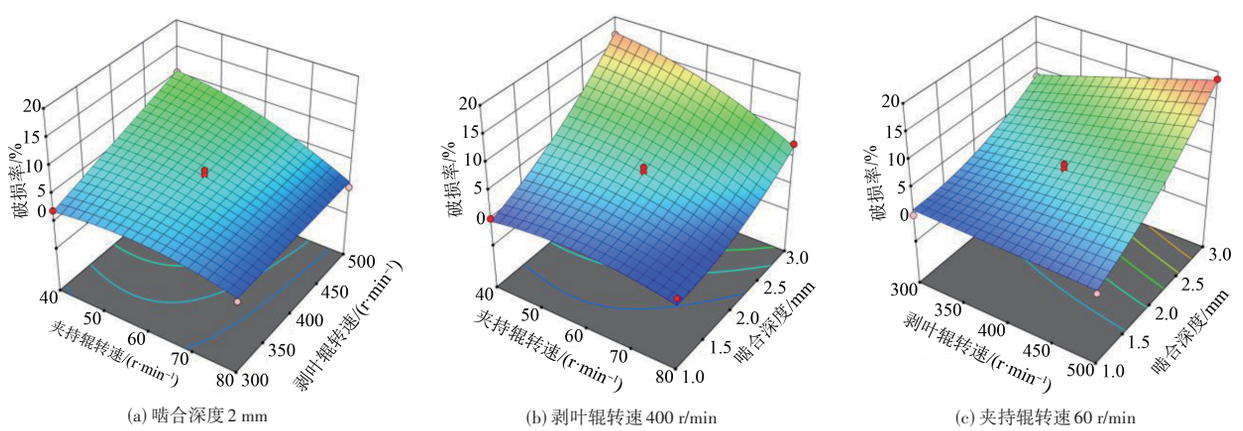
为了使裙带菜茎叶分离设备作业效果最佳，则要求茎叶分离剥净率最大，裙带菜破损率最小。根据响应面试验结果及回归方程，以最大剥净率与最小破损率为优化目标，对裙带菜茎叶分离设备的作业参数进行优化。优化后裙带菜茎叶分离设备夹持辊转速为60 r/min、剥叶辊转速为400 r/min、啮合深度为2 mm，此时裙带菜剥



(a) 啮合深度 2 mm　(b) 剥叶辊转速 400 r/min　(c) 保持辊转速 60 r/min

图 21　试验因素交互作用对剥净率影响的响应曲面

Fig. 21　Analysis of response of various factors to separation and stripping rate of wakame stems and leaves



(a) 啮合深度 2 mm　(b) 剥叶辊转速 400 r/min　(c) 夹持辊转速 60 r/min

图 22　试验因素交互作用对破损率影响的响应曲面

Fig. 22　Analysis of response of various factors to separation and damage rate of wakame stems and leaves

净率达 84.3%，破损率为 5.5%。

4.4.2　验证试验

为验证设计的盐渍裙带菜茎叶分离设备的作业性能，以剥净率与破损率为试验指标，进行茎叶分离试验，设置夹持辊转速为 60 r/min、剥叶辊转速为 400 r/min、啮合深度为 2 mm，试验重复 3 次，统计结果如表 10 所示。

表 10　验证试验结果

Tab. 10　Validation test results　%

参数	理论值	实测值	绝对误差
剥净率	84.3	87.0	2.7
破损率	5.5	5.0	0.5

裙带菜茎叶分离验证试验结果可知，最优参数组合下剥净率平均实测值为 87.0%，理论值为 84.3%，绝对误差为 2.7%；破损率的平均实测值为 5.0%，理论值为 5.5%，绝对误差为 0.5%，验证了基于 Design-Expert 的立式对辊裙带菜茎叶分离设备设计优化方法的准确性，表明研制的裙带菜茎叶分离设备在满足剥净率的同时，对裙带菜损伤较小，具有较好的分离效果，能满足茎叶分离作业需求。

5　结论

（1）设计了一种立式对辊裙带菜茎叶分离设备，根据裙带菜生物特性，确定夹持辊半径为 50 mm、长度为 120 mm，夹持辊表面材料选择 PVC 磨砂颗粒，剥叶辊半径为 50 mm，两辊中心间距小于 130 mm，并对裙带菜茎叶分离过程进行了运动和受力分析，确定了影响裙带菜茎叶分离的主要因素。

（2）利用 ANSYS/LS-DYNA 软件，对茎叶分离分离过程进行了仿真，以剥净率为评价指标，以剥叶辊长度、嵌入棒直径、嵌入棒数量为试验因素，开展单因素及正交试验，确定剥叶辊结构参数对裙带菜茎叶分离剥净率影响从大到小依次为剥叶辊长度、嵌入棒直径、嵌入棒数量，最优结构参数组合为剥叶辊长度 140 mm、嵌入棒直径 15 mm、嵌入棒数量 10、剥叶辊材质为硅胶，此时剥净率最大值为 85.6%。

（3）通过裙带菜茎叶分离设备的试验，探究了夹持辊转速、剥叶辊转速、啮合深度对裙带菜茎叶分离剥净率和破损率的影响，正交试验结果表明，剥叶辊转速对剥净率的影响最大，啮合深度对破损率的影响最大，优化得到最佳作业参数为：夹持辊转速 60 r/min、剥叶辊转

速400 r/min、啮合深度2 mm，在此参数下进行验证试验，此时剥净率为87.0%，破损率为5.0%，试验值与理论值相对误差小，表明样机设计合理。试验结果为裙带菜茎叶分离设备提供理论与技术支撑。

参 考 文 献

[1] 苌钊. 裙带菜的综合利用研究[D]. 青岛：中国海洋大学，2013.
CHANG Zhao. The study on the comprehensive utilization of *Undaria pinnatifida*[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. (in Chinese)

[2] FAO. The state of world fisheries and aquaculture 2022[R]. Towards Blue Transformation. Rome, 2022.

[3] JOSE A P, YEON W B, OH C T. An improved protocol for protoplast production, culture, and whole plant regeneration of the commercial brown seaweed *Undaria pinnatifida*[J]. Algal Research,2022, 67: 102851

[4] 刘剑波. 我国裙带菜加工利用技术研究进展[J]. 河北渔业，2021(3)：42－44，46.
LIU Jianbo. Research on processing and utilization technology of *Undaria pinnatifida* in China[J]. Hebei Fisheries, 2021(3): 42-44, 46. (in Chinese)

[5] 刘世永，侯晓宇，吴梅娇，等. 裙带菜在食品加工产业中的发展研究[J]. 食品工程，2022(2)：12－15.
LIU Shiyong, HOU Xiaoyu, WU Meijiao, et al. Study on the development of *Undaria pinnatifida* in food processing industry[J]. Food Engineering, 2022(2): 12－15. (in Chinese)

[6] 农业农村部渔业渔政管理局，全国水产技术推广总站，中国水产学会. 2024中国渔业统计年鉴[M]. 北京：中国农业出版社，2024.

[7] 邢刚. 即食裙带菜产品的开发[D]. 大连：大连工业大学，2013.
XING Gang. Development of instant *undaria pinnatifida* products[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2013. (in Chinese)

[8] 長谷川勝男，鈴木四郎. 養殖ワカメの収穫および塩蔵加工作業の概要[J]. 海洋水産エンジニアリング：漁船・機関・漁労・加工・流通機器の総合情報誌，2005，5(5)：14－37.

[9] 孙建富，申天恩. 大连海水增养殖业发展对策[J]. 大连海事大学学报（社会科学版），2010，9(2)：22－25.
SUN Jianfu, SHEN Tianen. Countermeasures for development of Dalian seawater breeding industry[J]. Journal of Dalian Maritime University(Social Science Edition), 2010, 9(2): 22－25. (in Chinese)

[10] 张鸿鹏. 裙带菜的收获加工[J]. 农村新技术，2017(2)：54.

[11] 李涵，青平，张晓恒，等. 我国藻类产业发展现状、问题及对策建议[J]. 中国农业科技导报，2021，23(1)：12－20.
LI Han, QING Ping, ZHANG Xiaoheng, et al. Current status, problems and countermeasures of algae industry development in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(1): 12－20. (in Chinese)

[12] 包特力根白乙. 新中国成立70周年渔业经济发展的分期、脉络与转型[J]. 中国渔业经济，2019，37(6)：103－113.
BAO Te-li-gen-bai-yi. The developmental stages, processes and transformation of fishery economy from 1949 to 2019[J]. Chinese Fisheries Economics, 2019, 37(6): 103－113. (in Chinese)

[13] PAPUSHA S K, PAPUSHA V K, PESTRYAKOVA Y A. Theoretical research of process of separating tobacco leaf from stem [J]. E3S Web of Conferences, 2019,126: 300－301.

[14] EVANS J D, JAIN A, DUVEKOT L T, et al. Cured leaf separator:US2016331019[P]. 2016-11-17.

[15] 宁国鹏，王德成，王光辉，等. 苜蓿干燥与茎叶分离设备设计与CFD模拟[J]. 农业机械学报，2011，42(1)：84－89，133.
NING Guopeng, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Design and CFD simulation of quad-pass rotary drum dryer-separator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 84－89, 133. (in Chinese)

[16] 万星宇，武安阳，廖庆喜，等. 气力机械组合式藜蒿脱叶机设计与试验[J]. 农业机械学报，2023，54(8)：132－142.
WAN Xingyu, WU Anyang, LIAO Qingxi, et al. Design and experiment of pneumatic-mechanical combined leaves removing machine for *Artemisia selengensis*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 132－142. (in Chinese)

[17] 康丽春，祝城城，邓勇杰，等. 甜叶菊的脱叶机构试验研究[J]. 农机化研究，2022，44(4)：201－204，230.
KANG Lichun, ZHU Chengcheng, DENG Yongjie, et al. Experimental research on defoliation mechanism of *Stevia rebaudiana*[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(4): 201－204, 230. (in Chinese)

[18] 王栋. 高效艾草脱叶机结构设计与试验分析[D]. 武汉：湖北工业大学，2020.
WANG Dong. Structural design and test analysis of high-efficiency wormwood defoliator[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020. (in Chinese)

[19] 王志伟. 立式玉米脱粒装置试验与参数优化[D]. 淄博：山东理工大学，2023.
WANG Zhiwei. Experiment and parameter optimization of vertical corn threshing device[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023. (in Chinese)

（下转第388页）

[J]. Clinical Biomechanics, 2001, 16(Supp.1): 31 - 44.

[24] KIM T H, KIM Y T, YOON Y S. Development of a biomechanical model of the human body in a sitting posture with vibration transmissibility in the vertical direction[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2005, 35(9): 817 - 829.

[25] 倪伟强, 江庆, 许良元, 等. 悬挂装置参数对拖拉机振动特性的影响[J]. 华中农业大学学报, 2020, 39(4): 175 - 181.
NI Weiqiang, JIANG Qing, XU Liangyuan, et al. Effects of suspension parameters on vibration characteristics of tractor[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(4): 175 - 181. (in Chinese)

[26] ZHANG Xiaolu, YU Peijin, LI Yuejuan, et al. Dynamic interaction between the human body and the seat during vertical vibration: effect of inclination of the seat pan and the backrest on seat transmissibilities[J]. Ergonomics, 2021, 65(5): 51 - 54.

[27] LIU Chi, QIU Yi. Mechanism associated with the effect of backrest inclination on biodynamic responses of the human body sitting on a rigid seat exposed to vertical vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2021, 510(1): 116299.

[28] 宋增峰, 赵晓昱. 某轿车复合材料座椅骨架轻量化研究[J]. 机械设计与制造, 2020 (7): 84 - 88.
SONG Zengfeng, ZHAO Xiaoyu. Study on the lightweight of a car composite seat[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020 (7): 84 - 88. (in Chinese)

[29] 毛恩荣, 齐道新, 顾进恒, 等. 基于分层控制的大功率拖拉机前桥悬架减振系统研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 404 - 413.
MAO Enrong, QI Daoxin, GU Jinheng, et al. Design and experiment of vibration system for front axle suspension of high-power wheeled tractor based on hierarchical control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 404 - 413. (in Chinese)

[30] 李春雨. 面向静态体压分布和垂向振动响应的坐姿人体模型建模[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
LI Chunyu. The seated human modeling based on body pressure distribution and vertical vibration response[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)

[31] NAWAYSEH N, GRIFFIN M J. Non-linear dual-axis biodynamic response to vertical whole-body vibration[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 268(3): 503 - 523.

[32] 罗巧, 贺岩松, 邱茂昌, 等. 机械冲击下坐姿人体舒适性主客观评价[J]. 声学学报, 2024, 49(2): 238 - 245.
LUO Qiao, HE Yansong, QIU Maochang, et al. Subjective and objective evaluation of seated human discomfort caused by mechanical shocks[J]. Acta Acustica, 2024, 49(2): 238 - 245. (in Chinese)

[33] 丁翰韬, 陈树人, 周巍伟, 等. 喂入量扰动下联合收获机振动特性机理研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(增刊2): 20 - 27, 51.
DING Hantao, CHEN Shuren, ZHOU Weiwei, et al. Mechanism analysis of combine harvester's vibration characteristics under feeding interference[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp.2): 20 - 27, 51. (in Chinese)

[34] 郑航, 傅童, 薛向磊, 等. 茶叶机械化采摘技术研究现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2023, 44(9): 28 - 35.
ZHENG Hang, FU Tong, XUE Xianglei, et al. Research status and prospect of tea mechanized picking technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(9): 28 - 35. (in Chinese)

[35] International Organization for Standardization, ISO 2631 - 1. Mechanical vibration and shock - evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 1: general requirements[S]. 1997.

(上接第360页)

[20] 李晓东. 经济海藻裙带菜品种培育和养殖相关问题的研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2021.
LI Xiaodong. Study of the economic alga *Undaria pinnatifida*: on its breeding and cultivation of cultivar related issues[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)

[21] 芦莹. 裙带菜优良品系选育的研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2018.
LU Ying. Study on improvedstrains breeding of *Undaria pinnatifida*[D]. Dalian: Dalian Ocean University, 2018. (in Chinese)

[22] 曹卫彬, 孙胃岭, 牛驰, 等. 基于ANSYS/LS-DYNA的梳夹式红花采摘装置研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 123 - 131.
CAO Weibin, SUN Weiling, NIU Chi, et al. Combed safflower picking device based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 123 - 131. (in Chinese)

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

[24] ZHANG Hanbing, HUANG Weirong, KANG Huanyu, et al. Research on the biomechanical characteristics of salted wakame (*Undaria pinnatifida*)[J]. Processes, 2023, 11(2): 552 - 569.

[25] 中国人民共和国国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 16798-2023 食品机械安全要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.