

三维湍流柔性摩擦对小黄姜去皮效果的影响

孙 芳 陆奎荣 江水泉

(江苏楷益智能科技股份有限公司, 江苏 无锡 214100)

摘要: [目的] 针对小黄姜因异形、分枝密集、薄皮脆嫩等特性导致的工业化去皮难以兼顾高除净率与低损伤率的行业痛点, 研创三维湍流柔性摩擦工艺去皮装备。[方法] 以小黄姜为试验对象, 以果皮除净率和果肉保留率为指标, 通过单因素试验与 $L_9(3^4)$ 正交试验优化加工时间、料水质量比、搅拌转速三项关键参数, 并采用 Origin 完成数据统计分析。[结果] 各因素影响主次顺序为加工时间 > 搅拌转速 > 料水质量比, 最优工艺为加工时间 6 min、料水质量比 1:2、搅拌转速 35 r/min; 此条件下果皮除净率达 98.12%, 果肉保留率 95.86%, 加工能力 2.11 t/h; 与传统毛刷机械去皮、化学碱液去皮相比, 该装备及配套工艺兼具去皮效率高、果肉损伤低、无化学残留、环保性好等优势。[结论] 该装备创新与工艺优化协同可实现小黄姜高效低损工业化去皮, 也可为异形薄皮类果蔬的绿色加工提供参考与技术借鉴。

关键词: 小黄姜; 三维湍流; 柔性摩擦; 装备工艺协同; 去皮效果; 损伤率

Peeling effect of three-dimensional turbulent flexible friction for small yellow ginger

Sun Fang Lu Kuirong Jiang Shuiquan

(Jiangsu Kaiyi Intelligent Technology Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214100, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the industrial bottleneck that the industrial peeling of small yellow ginger cannot balance high peel removal rate and low flesh damage rate due to its irregular shape, dense branches, thin and tender peel, a piece of peeling equipment based on three-dimensional turbulent flexible friction is developed. [Methods] Small yellow ginger is taken as the test material. With peel removal rate and flesh retention rate as evaluation indicators, single-factor and $L_9(3^4)$ orthogonal experiments are carried out to optimize three key parameters: processing time, material-water ratio, and stirring speed. Origin is used for data statistics and analysis. [Results] The influences of factors follow the trend of processing time > stirring speed > material-water ratio. The optimal parameters are determined as follows: processing for 6 min, a material-water ratio of 1:2, and a stirring speed of 35 r/min. Under the above conditions, the peel removal rate, the flesh retention rate, and the processing capacity reach 98.12%, 95.86%, and 2.11 t/h, respectively. Compared with brush mechanical peeling and chemical alkali peeling, the proposed equipment and supporting process present the advantages of high peeling efficiency, low flesh damage, no chemical residue, and favorable environmental performance. [Conclusion] The coordination of equipment innovation and process optimization can realize efficient and low-damage industrial peeling of small yellow ginger and provide references and technical support for the green processing of irregular fruits and vegetables with thin peels.

Keywords: small yellow ginger; three-dimensional turbulence; flexible friction; equipment-process coordination; peeling effect; damage rate

生姜 (*Zingiber officinale* Roscoe) 是中国特色香辛料与食药同源经济作物, 年产量大、出口率占全球 40% 以上^[1-2]。小黄姜是中国常见的生姜品种之一, 常被作为姜汁饮品、干燥姜粉以及休闲姜片蜜饯等制品的加工原料^[3-4], 但其个体小、根茎分枝密集、姜块紧凑^[5-6], 去皮难度较大。

基金项目: “十四五”国家重点研发计划重点专项 (编号: 2023YFD2100900)

通信作者: 孙芳 (1986—), 女, 江苏楷益智能科技股份有限公司高级工程师, 硕士。E-mail: 824529038@qq.com

收稿日期: 2026-02-06 改回日期: 2026-04-28

引用格式: 孙芳, 陆奎荣, 江水泉. 三维湍流柔性摩擦对小黄姜去皮效果的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(7): 180-185.

Citation: Sun Fang, Lu Kuirong, Jiang Shuiquan. Peeling effect of three-dimensional turbulent flexible friction for small yellow ginger[J]. Food & Machinery, 2026, 42(7): 180-185.

机械去皮是当前应用最广泛的果蔬原料去皮方式,主要通过切削、铣削和摩擦3种方式去皮^[7-9]。针对小黄姜原料的工业化去皮加工,摩擦式最为适用。果蔬原料现有摩擦式去皮多采用二维平面摩擦模式^[10-11],其中毛刷去皮机是该模式下的典型设备。但小黄姜外形不规则、分枝多且凹陷沟壑明显,传统摩擦去皮方式难以有效覆盖其凹陷及枝杈部位,加工过程中易出现去皮不彻底、果肉破损率高、加工效率偏低、运行稳定性不足等突出问题。

近年来,果蔬加工装备向柔性化、智能化快速发展,针对异形果蔬的新型装备不断涌现^[12-14]。但行业内普遍存在重结构设计、轻工艺匹配的突出问题。先进装备可提供优质加工的可能性,但无法自动实现最优效果;若缺乏与原料特性、装备结构相匹配的精准工艺参数,即便装备结构先进,仍会出现除净率不足、果肉损耗偏高、批次稳定性差等现象,导致装备性能无法充分释放。

研究拟以前期设计的三维湍流柔性摩擦去皮装备^[15]为研究对象,以小黄姜为原料,采用单因素试验确定关键参数范围,通过 $L_9(3^4)$ 正交试验优化加工时间、料水质量比、搅拌转速,明确因素影响主次与最优工艺组合,并开展验证实验与对比分析,旨在为新型专用去皮装备提供配套工艺,为小黄姜及同类异形薄皮果蔬提供“装备定制—工艺优化—产业化应用”的一体化解决方案。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

小黄姜:市售;

氢氧化钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器

分析天平:AB302型,青岛首丰精密机电有限公司;

电子称:KF-H2型,凯丰集团有限公司;

快速水分测定仪:SN-SH-10A型,尚仪科学仪器(绍兴)有限公司;

游标卡尺:11-504型,青岛首丰精密机电有限公司;

滚筒毛刷去皮机:QGT 800×3型,江苏楷益智能科技股份有限公司。

1.3 去皮设备及其工作原理

三维湍流柔性摩擦去皮机(见图1):自主研发。其工作原理为:小黄姜原料从三维湍流柔性摩擦去皮机上部进料口进入筒体,同时按照设定料水质量比向筒体内部注水。进料、注水完成后,启动设备,搅拌轴开始转动。在筒壁导流管及搅拌轴的搅拌作用下,原料附带的泥及表皮被脱除,在这过程中,原料之间夹杂的碎石及磨下的沉淀物渐渐下沉,通过底部的冲孔板后掉入沉淀隔层。清洗完成后,闸门打开,清洗后的小黄姜及水从桶底闸门口排出,部分来不及排出的小黄姜则被最下层搅拌杆从

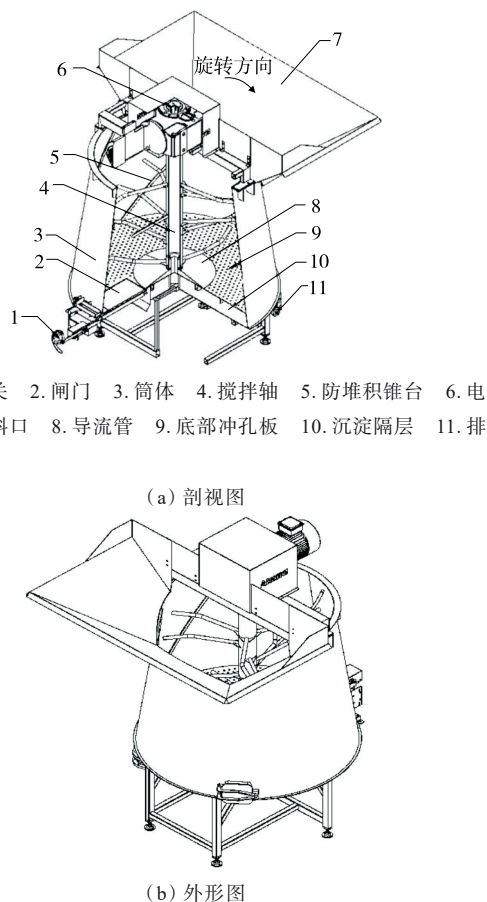


图1 三维湍流柔性摩擦去皮装备结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of 3D turbulent flexible friction peeling device

闸门口慢慢扫出,底部中央设有防堆积锥台,利于将筒底积料彻底排净。

去皮机构(见图2)是三维湍流柔性摩擦去皮机的核心装置,由主搅拌轴、搅拌杆与驱动电机构成。搅拌杆端部为钝角拐角,杆身开设螺纹以增大摩擦、强化表皮剥离。搅拌杆逆时针周向等角度布设,层间交错偏转,实现物料多向揉搓。螺纹搅拌杆布置于三层光滑不锈钢搅拌杆之间,轴向高度差异化排布,杆层间距可根据原料厚度调节;所有搅拌杆采用阶梯式螺旋结构,兼具摩擦去皮与轴向导流输送功能。设备通过腔内湍流搓洗及小黄姜—小黄姜、小黄姜—不锈钢构件间的耦合摩擦,实现小黄姜精准去皮。

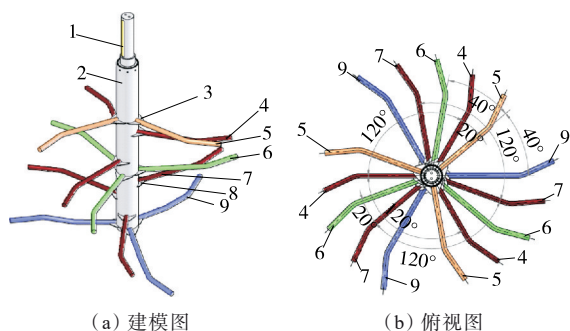
1.4 试验方法

1.4.1 去皮工艺流程

原料拣选→称重→进料→加水→三维湍流柔性摩擦去皮→卸料→沥干

1.4.2 评价指标及计算方法

(1) 含水率:参照GB 5009.3—2016中的第一法测定。



1. A型平键 2. 搅拌轴 3. 搅拌杆筋板 4. 搅拌杆L1 5. 搅拌杆3 6. 搅拌杆2 7. 搅拌杆L2 8. 搅拌杆筋板2 9. 搅拌杆A

图2 三维湍流柔性去皮装备核心去皮装置建模图及俯视图

Figure 2 Modeling drawing and top view of core peeling device of 3D turbulent flexible peeling equipment

(2) 容重:采用排水法测定原料容重。每组测试5~8块原料,重复3次试验,并取其平均值为产品容重值。

(3) 原料果肉占比:随机抽取10个样品,称取质量后,采用手动柔性摩擦的方式去除果皮,并清洗表面果皮后沥干水分,称取去皮后的质量,计算其与去皮前的质量的比值即为该原料中的果肉占比。

(4) 外观特性:随机抽取100个姜块,测定长度、宽度、厚度、分枝角度。

(5) 加工能力:按式(1)计算三维湍流柔性摩擦去皮设备的加工能力。

$$P = \frac{m}{T} \times 60, \quad (1)$$

式中:

P ——三维湍流柔性摩擦去皮设备的加工能力,kg/h;

m ——一定加工时间内的小黄姜质量,kg;

T ——加工时间,min。

(6) 果皮除净率:采用拓印法测定,以标准网格试纸拓印染色面积,按式(2)计算果皮除净率。

$$F = \frac{S - S_0}{S} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

F ——果皮除净率,%;

S ——去皮前果皮总面积,cm²;

S_0 ——去皮后未除净果皮面积,cm²。

(7) 果肉保留率:按式(3)计算果肉保留率。

$$K = \frac{m_0}{m \times 0.96} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

K ——果肉保留率,%;

m_0 ——去皮沥干后的原料质量,kg;

m ——去皮前的原料质量,kg。

0.96——原料加工特性分析测定的原料果肉占比。

1.4.3 单因素试验设计

(1) 加工时间对小黄姜去皮效果的影响:固定料水质量比1:2,搅拌转速35 r/min,考察加工时间(2,4,6,8,10 min)对果皮除净率和果肉保留率的影响。

(2) 料水质量比对小黄姜去皮效果的影响:固定加工时间6 min,搅拌转速35 r/min,考察料水质量比(1:1,1:1.5,1:2,1:2.5,1:3)对果皮除净率和果肉保留率的影响。

(3) 搅拌转速对小黄姜去皮效果的影响:固定加工时间6 min,料水质量比1:2,考察搅拌转速(25,30,35,40,45 r/min)对果皮除净率和果肉保留率的影响。

1.4.4 正交试验设计 在单因素试验的基础上,选取加工时间、料水质量比、搅拌转速3个因素,采用 $L_9(3^4)$ 正交表设计试验。为兼顾果皮去皮洁净度与果肉低损保留效果,采用加权综合评分法构建评价模型,并以综合评价值作为优化试验的指标值。结合小黄姜去皮工艺实际需求,以果皮除净率为主要评价指标,设置权重值为0.6,果肉保留率为次要评价指标,设置权重值为0.4。

1.4.5 不同去皮方式效果对比 将同一规格的小黄姜作为加工原料,分别采用三维湍流柔性摩擦去皮、传统毛刷去皮以及化学碱液去皮加工方式对小黄姜进行去皮加工,测定加工后的果皮除净率和果肉保留率,并评价加工后的产品品质,对比不同的去皮加工方式对小黄姜去皮效果的影响。其中,传统滚筒毛刷去皮的工艺参数为电机转速15 r/min,喷淋水压力0.02 MPa;化学碱液去皮工艺参数为NaOH质量浓度1.0 g/100 mL,温度80℃、浸泡60 s;三维湍流柔性摩擦去皮工艺参数为清洗时间6 min,料水质量比1:2,搅拌转速35 r/min。

1.5 数据处理与统计分析

采用Origin进行数据绘图;采用SPSS进行正交试验极差分析与方差分析, $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 小黄姜基础物料特性

随机抽取100个小黄姜测定其外观特性,包括含水率、容重、果肉占比、长度、宽度、厚度以及分枝角度,结果见表1。

由表1可知,小黄姜含水率为82.4%,含水率较高,原料肉质脆嫩,去皮加工过程中易受机械损伤;小黄姜容重为450 kg/m³,表明原料在清洗水中易悬浮翻滚,适合湍流搓洗^[16-17],可在柔性接触下去除表皮而不造成过度损伤。同时,姜块外形各特性变异系数范围为18.20%~26.70%,说明外形极不规则,容重的变异系数(13.62%)也可以佐证该特性。不规则的外形说明传统二维平面装备难以适配去皮加工。

表1 小黄姜特性参数

Table 1 Parameters of small yellow ginger ($n=3$)			
参数	单位	平均值	变异系数/%
含水率	%	82.4	3.27
容重	kg/m ³	450	13.62
果肉占比		0.96	4.58
长度	mm	47.21	20.91
宽度	mm	31.26	19.42
厚度	mm	28.87	18.20
分支角	(°)	15.26	26.70

2.2 单因素试验

2.2.1 加工时间对去皮效果的影响 由图3可知,试验范围内,随加工时间延长,果皮除净率逐步上升,加工6 min后趋于平缓。由于长时间的清洗会导致果肉保留率逐渐下降,确定4~8 min为适宜加工时间。

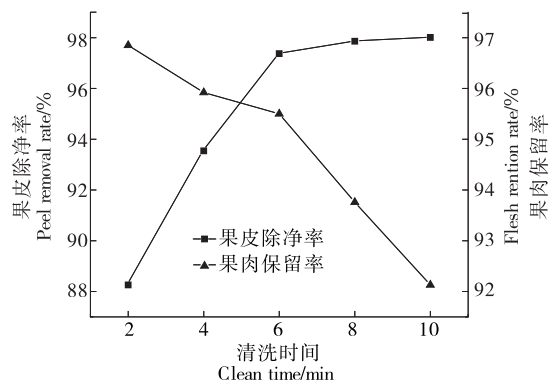


图3 加工时间对小黄姜果皮除净率、果肉保留率的影响
Figure 3 Effects of processing time on peel removal rate and flesh retention rate of small yellow ginger ($n=3$)

2.2.2 料水质量比对去皮效果的影响 由图4可知,料水质量比1:2时果皮除净率最高;水偏少时物料碰撞剧烈,果肉损伤大;水偏多时水流缓冲过强,摩擦不足,而且水过多会增加废水回收利用的成本。经综合分析,确定1:1.5~1:2.5为适宜料水质量比范围。

2.2.3 搅拌转速对去皮效果的影响 由图5可知,搅拌转速过低时,设备对原料加工搓洗强度不足,果皮除净率偏低;而搅拌转速过高时,易产生机械撞击,导致果肉保留率下降。因此,搅拌转速取30~40 r/min最适宜。

2.3 正交试验

正交试验因素水平取值见表2,试验设计及结果见表3,方差分析见表4。

由表3和表4可以看出,加工时间和搅拌转速对小黄姜综合去皮效果评价的影响极显著($P<0.01$);料水质

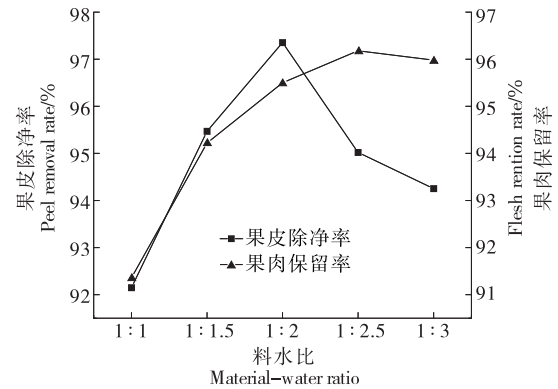


图4 料水质量比对小黄姜果皮除净率、果肉保留率的影响
Figure 4 Effects of material-water ratio on peel removal rate and flesh retention rate of small yellow ginger ($n=3$)

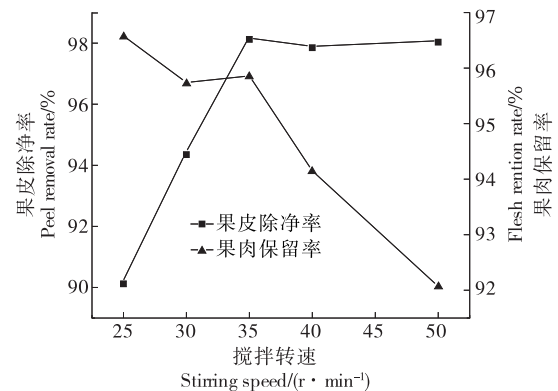


图5 搅拌转速对小黄姜果皮除净率、果肉保留率的影响
Figure 5 Effects of stirring speed on peel removal rate and flesh retention rate of small yellow ginger ($n=3$)

表2 正交试验因素水平表

Table 2 Factors and levels of orthogonal experiment			
水平	A 加工时间/ min	B 料水质量比	C 搅拌转速/ (r·min ⁻¹)
—1	4	1:1.5	30
0	6	1:2	35
1	8	1:2.5	40

量比通过缓冲作用调控损伤程度,对小黄姜综合去皮效果评价的影响显著($P<0.05$)。各因素对于加工效果的影响顺序为:搅拌转速>加工时间>料水质量比,最佳的加工工艺组合为加工时间6 min、料水质量比1:2、搅拌转速35 r/min。

在清洗时间6 min,料水质量比1:2,搅拌转速35 r/min的工艺条件下进行3次平行验证实验,其果皮除净率平均值为98.12%(相对标准偏差为0.07%),果肉保留率平均值为95.86%(相对标准偏差为0.07%),加工能

表 3 正交试验设计与结果

Table 3 Orthogonal experimental design and results					
试验号	A	B	C	D(空白)	综合评价得分
1	1	1	1	1	94.60
2	1	2	2	2	96.84
3	1	3	3	3	95.26
4	2	1	2	3	97.35
5	2	2	3	1	97.41
6	2	3	1	2	95.82
7	3	1	3	2	95.67
8	3	2	1	3	95.79
9	3	3	2	1	96.04
k_1	95.566	95.873	95.402	96.017	
k_2	96.863	96.682	96.745	96.110	
k_3	95.831	95.705	96.112	96.133	
R	1.297	0.977	1.343	0.116	

表 4 正交试验方差分析表[†]

Table 4 Analysis of variance for orthogonal experiment					
来源	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F 值	显著性
修正模型	7.165 ^a	6	1.194	105.296	0.009
截距	83 093.443	1	83 093.443	7 327 176.960	0.000
加工时间	2.816	2	1.408	124.176	0.008
料水质量比	1.638	2	0.819	72.238	0.014
搅拌转速	2.710	2	1.355	119.473	0.008
误差	0.023	2	0.011		
总计	83 100.631	9			
修正后总计	7.187	8			

[†] $R^2=0.997, R^2_{Adj}=0.987$ 。

力平均值为 2.11 t/h(相对标准偏差为 0.47%)。表明最优工艺重复性好、稳定性强,可用于工业化生产。

2.4 不同去皮方式效果对比

将三维湍流柔性摩擦与传统毛刷、化学碱液去皮进行对比,结果见表 5。对比三维湍流摩擦和传统滚筒毛刷去皮结果可以看出,三维湍流摩擦在果皮除净率和果肉保留率两项指标中,加工效果均优于毛刷去皮,这是因为小黄姜具有分枝多、缝隙深、外形不规则的特性,二维运动仅能实现表面摩擦,难以覆盖凹陷区域。三维湍流柔性摩擦通过多向紊流运动,使姜块在筒体中持续翻滚、碰撞、搓擦,实现小黄姜—小黄姜、小黄姜—不锈钢全域接触,配合柔性水流缓冲,在去除薄皮的同时最大程度保护果肉。而化学碱法去皮虽然能呈现较好的去皮效果,但是加工后的产品存在化学试验残留风险且有一定的废水处理压力。综合而言,三维湍流柔性摩擦去皮较为理想。

表 5 不同去皮方式加工效果的对比

Table 5 Comparison of processing effects of different peeling methods ($n=3$)			
去皮方式	果皮除净率/%	果肉保留率/%	品质评价
三维湍流柔性摩擦	98.12±0.06	95.86±0.07	无异味,组织结构完整
传统滚筒毛刷	86.85±2.13	89.23±1.62	局部损伤,缝隙去皮差
化学碱液去皮	95.12±1.05	97.80±0.38	有碱味,需大量冲洗

3 结论

小黄姜分枝密集、外形不规则、皮薄质脆,传统二维机械去皮存在加工死角,化学去皮存在安全隐患。而三维湍流柔性摩擦去皮技术可实现物料全域摩擦,并通过水流缓冲作用,兼顾去皮效果与果肉保护,更适用于小黄姜加工。其最佳去皮工艺条件:加工时间 6 min、搅拌转速 35 r/min、料水质量比 1:2。该工艺条件下小黄姜果皮除净率达 98.12%,果肉保留率 95.86%,设备加工能力为 2.11 t/h。该研究主要围绕特定品种原料下的工艺参数开展优化,后续可针对不同品类、不同成熟度的小黄姜原料开展适配性探究,进一步完善技术体系,拓展该装备与工艺的产业化应用场景。

参考文献

[1] 陈荣秀. 生姜高效种植技术分析[J]. 种子科技, 2026, 44(2): 75-77.
Chen R X. Analysis on efficient planting technology of ginger [J]. Seed Science & Technology, 2026, 44(2): 75-77.

[2] 任清盛, 李承永. 我国生姜产业现状及发展分析[J]. 中国蔬菜, 2021(8): 8-11.
Ren Q S, Li C Y. Analysis on current situation and development of ginger industry in China[J]. China Vegetables, 2021(8): 8-11.

[3] 高栏. 姜黄—小黄姜—生姜三元复合调制乳的开发与品质评价[J]. 食品工业, 2026, 47(4): 8-12.
Gao L. Development and quality evaluation of turmeric, small yellow ginger and common ginger ternary compound blended milk[J]. The Food Industry, 2026, 47(4): 8-12.

[4] 陈佳妮, 刘广宇, 葛永辉, 等. 不同分切形状对贵州小黄姜真空冷冻干燥效率及品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(1): 138-145.
Chen J N, Liu G Y, Ge Y H, et al. Effects of different cutting shapes on the vacuum freeze-drying efficiency and quality of Guizhou *Zingiber officinale* Roscoe vacuum freeze-drying[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(1): 138-145.

[5] 洪勇. 小黄姜分枝数与产量关系初探[J]. 耕作与栽培, 2023, 43(1): 90-92.

- Hong Y. Preliminary study on the relationship between the number of branches and yield of yellow ginger[J]. Tillage and Cultivation, 2023, 43(1): 90-92.
- [6] 王金艳, 李喜林. 云南小黄姜与焦作怀姜的农艺性状和品质性状对比分析[J]. 种业导刊, 2025(2): 56-59.
- Wang J Y, Li X L. Comparative analysis of agronomic traits and quality traits of Yunnan Xiaohuangjiang and Jiaozuo Huaijiang [J]. Journal of Seed Industry Guide, 2025(2): 56-59.
- [7] 郭洲. 组合式荸荠去皮机设计与试验[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020: 2-7.
- Guo Z. Design and testing of combined water chestnut peeling machine[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020: 2-7.
- [8] 杨昕哲, 唐学鹏, 陈信, 等. 瓜果类去皮技术与装置研究进展[J]. 南方农机, 2025, 56(22): 130-132, 150.
- Yang X Z, Tang X P, Chen X, et al. Research progress of peeling technology and equipment for fruits and melons[J]. South Agricultural Machinery, 2025, 56(22): 130-132, 150.
- [9] 曾荣, 陈亚欣, 赵状状, 等. 莲藕回转式仿形去皮装置设计与试验[J]. 华中农业大学学报, 2025, 44(5): 241-248.
- Zeng R, Chen Y X, Zhao Z Z, et al. Design and testing of a rotary contour peeling device for roots of lotus[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2025, 44(5): 241-248.
- [10] 谢为俊, 陈科颖, 姜雨, 等. 胡萝卜去皮装置设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2025, 46(12): 154-161, 185.
- Xie W J, Chen K Y, Jiang Y, et al. Design and experiment of carrot peeling device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2025, 46(12): 154-161, 185.
- [11] 曹光鑫, 杜志龙, 程跃胜, 等. 薯类作物去皮技术及设备研究进展与展望[J]. 农业工程, 2020, 10(5): 8-14.
- Cao G C, Du Z L, Cheng Y S, et al. Research progress and prospect of potato crop peeling technology and equipment[J]. Agricultural Engineering, 2020, 10(5): 8-14.
- [12] 陈立明. 荸荠去皮关键技术研究及装置设计[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023: 57-69.
- Chen L M. Research of key technology and device design for peeling water chestnut[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023: 57-69.
- [13] 王林鸣, 高睿, 杜传贺, 等. 马铃薯清洗去皮一体机的优化与设计[J]. 河北农机, 2026(5): 10-12.
- Wang L M, Gao R, Du C H, et al. Optimization and design of integrated potato cleaning and peeling machine[J]. Hebei Agricultural Machinery, 2026(5): 10-12.
- [14] 吴俊飞, 尹强. 一种小型机械式马铃薯去皮机的设计[J]. 数字农业与智能农机, 2026(3): 49-53.
- Wu J F, Yin Q. Design of a small mechanical potato peeling machine[J]. Digital Agriculture and Intelligent Agricultural Machinery, 2026(3): 49-53.
- [15] 尤陈浩, 陆奎荣, 刘镜平. 一种洗姜桶: 201920757840.0[P]. 2020-04-11.
- You C H, Lu K R, Liu J P. A ginger washing barrel: 201920757840.0[P]. 2020-04-11.
- [16] 王维军, 王洋, 李贵东, 等. 射流自吸式离心泵三维湍流数值模拟与实验分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(3): 54-60.
- Wang W J, Wang Y, Li G D, et al. Numerical simulation and testing analysis of three dimensional turbulence flow in flow-ejecting self-priming centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(3): 54-60.
- [17] 邓学莹, 忻鼎定. 在三维湍流边界层中摩擦应力的测量研究[J]. 空气动力学学报, 1989(2): 200-207.
- Deng X Y, Xin D D. The investigation of the skin friction measurements in 3D-turbulent boundary layer flows[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1989(2): 200-207.