

自适应荔枝果去核力学仿真与性能试验

陈震 彭智康 徐凤英 李长友 蒋卓 罗菊川

(华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

摘要: 去核是制取荔枝灯笼果肉的必备工序,但荔枝核径多变,机械化高效成功去核困难。为解决这一难题,通过测定荔枝果物理性能,设计了一种自适应去核的刀具和机构;并基于 LS-DYNA 动力学仿真和台架试验,量化了荔枝 3 种转速去核过程等效应力和切削应力的时空变化规律;比较了变核径荔枝果不同转速自适应去核成功率和果肉损失率,评价了综合去核效果。仿真结果确定了转速对荔枝果等效应力分布与切削应力极值的影响,且仿真试验与台架试验结果基本一致。随着转速增加,荔枝果最大等效应力与最大切削应力均下降,变核径荔枝果自适应去核成功率提升。3 种转速中,292 r/min 去核综合效果最优,其去核成功率和果肉损失率分别为 100% 和 22.4%。

关键词: 荔枝果; 去核; 变核径; 自适应; LS-DYNA 力学仿真

中图分类号: S226 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2025)03-0503-10

OSID:



Comparison on Mechanical Simulation and Performance Testing for Adaptive Litchi Pitting

CHEN Zhen PENG Zhikang XU Fengying LI Changyou JIANG Zhuo LUO Juchuan

(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education,
South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Pitting is an essential step for producing litchi lantern flesh, while the variable pit size poses a challenge for efficient and successful mechanical pitting. To solve this problem, an adaptive pitting tool and mechanism was designed by measuring the physical properties of litchi fruit, and the spatiotemporal changes of equivalent stress and cutting stress during the pitting process of litchi at three different rotational speeds were investigated, based on the LS-DYNA dynamic simulation and bench tests. Furthermore, it quantified and compared the success rates and pulp loss rates of adaptive pitting for litchi fruit with variable pit sizes at different rotational speeds, and evaluated the overall pitting performance. Lychee fruit and kernel sphericity coefficients of 0.95 and 0.74 were obtained, and their three-dimensional radial dimensions showed normal distributions. The simulation results indicated the effects of rotational speed on the distribution of effective stress and the extreme values of cutting stress in litchi fruit was consistent with the bench test results. As rotational speed increased, both the maximum equivalent stress and maximum cutting stress in the litchi were decreased, leading to improved success rates for adaptive pitting of litchi with variable pit size. Among the three tested rotation speeds (feed with speeds of 100 mm/min and 20 mm depth), pitting at 292 r/min demonstrated the best overall pitting performance, with a 100% success rate and a pulp loss rate of 22.4%, respectively. The revealed adaptive pitting mechanism were significant for developing high-quality and efficient pitting devices for stone fruits, including but not limited to litchi.

Key words: litchi fruit; pitting; variable pit size; adaptive; LS-DYNA dynamic simulation

收稿日期: 2024-10-15 修回日期: 2024-11-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175229, 32372001)

作者简介: 陈震(1970—),男,高级实验师,博士,主要从事现代农业机械装备研究,E-mail: zhenchenid@scau.edu.cn

通信作者: 徐凤英(1970—),女,教授,博士,主要从事农产品加工技术与装备研究,E-mail: xu_fy@scau.edu.cn

0 引言

我国荔枝果产量占世界的60%，2022年已达 2.23×10^6 t^[1]。因荔枝果难储存^[2]，且其采后精深加工水平低，目前常规储存褐劣变量大，经济损失严重。我国在荔枝种植数量优势未能有效转化成为商品优势^[3-4]，制约了其产业发展。

荔枝果由高弹性易变形的果皮、果肉、果核组成，进刀去核是其深加工的重要工序。对荔枝果体去核获取灯笼果肉，可保留其果肉形态风味，利于推进荔枝产业向高品质、多层次深加工方向发展。

荔枝果体、核体结构尺寸及其物理性能均影响其机械进刀去核性能，因品种、个体生长差异，待去核荔枝果径、核径尺寸多变，并常出现同一品种果大小核混杂^[4]，增大了其进刀成功去核难度。为实现荔枝果成功去核，借鉴农业物料性能检测方法^[5-7]，文献[8]测定了桂味荔枝果结构尺寸，获得了其球度系数(0.95)。基于弹性力学挤压模型，文献[9-12]考察了荔枝鲜果弹性模量，为其进刀去核研究提供了理论技术参数。

荔枝果进刀去核一般需完成蒂部定向找正、固定夹紧果、进刀夹离果体、去除刀管孔中果核、打开料夹、取出已去核的果体等工序^[8-10,13]。上述作业工序多，目前多以人工完成，但人工去核劳动强度大、成本高、效率低、卫生差，应用受限。

近年来，为解决人工去核难题，荔枝果机械去核受到重视。捅核、顶针^[8-10]等方法去核果肉完整性差，而以进刀去核刀切入、夹离果核，利于果体内果肉保持灯笼状形态，目前机械进刀去核是高效获取荔枝灯笼果肉的推荐方法^[13-14]。

在机械进刀方面，文献[8]研究了荔枝果去核装置和空心管状钢刀去核效果，在转速10 r/min下平均去核成功率可达81.4%。基于相近转速，文献[9-10]对比了空心管状钢刀、塑料刀、组合刀下的荔枝果去核成功率，其值较文献[8]有较好提升。但荔枝果核尺寸多变，其去核成功率仍存在较大波动，自适应成功去核效果尚未实现。变核径荔枝果的稳定、高效、成功去核研究仍需从试验机理上深入突破。

LS-DYNA数字模拟是研究农业物料采收加工动力学过程的重要手段^[14-16]，但现有研究尚未考察变核径荔枝果去核的弹塑性力学作用，难揭示其稳定、高效、成功的自适应去核机制，不利于其加工品质的提升和应用推广。

本文基于一种自适应去核刀设计、LS-DYNA

软件仿真和台架试验，考察变核径荔枝果不同转速自适应去核等效应力、切削应力时空变化，对比其随机分组的去核性能(去核成功率、果肉损失率)，评价综合去核效果，以期为其预制取灯笼果肉提供稳定、高效的成功去核理论技术参考，以推进荔枝果等核果类水果产业向精深加工技术发展。

1 荔枝果自适应去核刀设计

1.1 荔枝物理特性

荔枝果收获后，其物理特性是决定其去核装置设计及其作业参数选用的重要因素^[5-9]，随机选取并以游标卡尺测量荔枝3个垂直方向果径(纵径、横径、棱径)、核径(纵径、大横径、小横径)，每组随机选36个果进行测量，重复3次，共计测量108个果。因荔枝果及其核球度系数对设计去核装置影响大，因此参考核桃^[6-7]、荔枝果球度计算式^[9]，分别计算荔枝果及其核球度系数，公式为

$$\phi_i = \frac{\sqrt[3]{L_i W_i T_i}}{L_i} \quad (1)$$

式中 ϕ_i ——荔枝果、核球度系数

L_i ——荔枝果、核纵径，mm

W_i ——荔枝果横径、核大横径，mm

T_i ——荔枝果棱径、核小横径，mm

i ——序号(1(果)、2(核))

根据式(1)和已测量的荔枝果径、核径，可得到测试荔枝果物性参数(表1)和荔枝核径尺寸分布(图1)。

表1 测试的荔枝果物理性能参数

Tab.1 Physical parameters testing of litchi fruit

参数	最小值/mm	最大值/mm	均值/mm	球度
果纵径	31.4	41.0	36.1 ± 1.9	
果横径	30.0	37.8	34.1 ± 1.6	0.95 ± 0.01
果棱径	29.8	37.8	33.6 ± 1.9	
核纵径	17.2	26.1	21.0 ± 1.8	
核大横径	11.8	18.0	14.5 ± 1.0	0.74 ± 0.03
核小横径	10.1	16.0	11.3 ± 1.0	

由表1和图1可知，试验组荔枝果纵径、横径、棱径均值分别为36.1、34.1、33.6 mm，荔枝果径各尺寸最小值与最大值间差7.8~9.6 mm，彼此接近，试验组玉荷包荔枝果径的球度系数达0.95。荔枝核纵径、大横径、小横径尺寸分布也基本呈正态分布。纵径、大横径、小横径均值分别为21.0、14.5、11.3 mm，其荔枝核径各尺寸最小值与其最大值差5.9~8.9 mm，彼此较接近，试验组玉荷包荔枝核径球度系数达0.74。

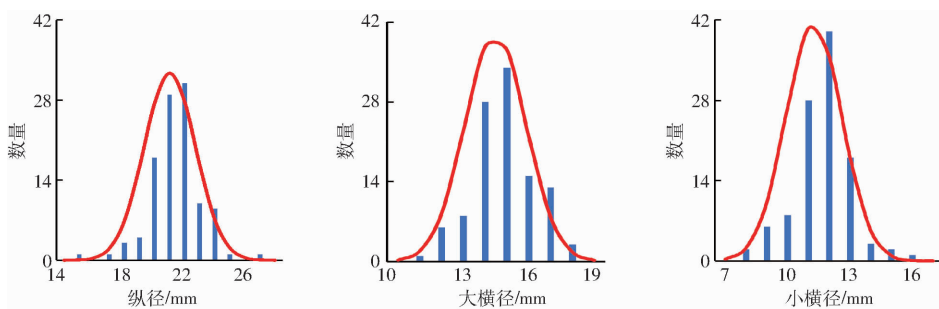


图 1 荔枝核径尺寸分布

Fig. 1 Size distribution of litchi pit diameters

1.2 荔枝果自适应去核分析

1.2.1 自适应去核刀结构分析

因荔枝核在纵径、大横径、小横径均存在尺寸差异,呈现不均匀颗粒物料特点,而不均匀颗粒型物料常以等效直径简化表述。目前等效直径在小麦、荔枝果等的深加工中有较多应用^[9,17],因此本文以等效直径表示荔枝核径。

荔枝果机械进刀去核常采用空心管去核刀,但其核径尺寸随品种、生长条件而改变。荔枝果的核径与去核刀管孔径间尺寸关系影响去核效果,该效果呈 3 种情况:①核径等于去核刀的孔径。机械进刀,果核进入去核刀具管孔并与果肉分离,可成功去核。②核径小于去核刀的孔径。机械进刀,去核刀进入果肉,刀具管孔内含核的果肉未被刀具刃口切断,含核果肉与其他果肉仍相连,果核未能取出而去核失败。③核径大于去核刀孔径。机械进刀,去核刀触碰或切入果核,果核被切裂,整体残留或部分带出,去核整体或部分失败。

目前,一些研究者在匹配荔枝果核尺寸与刀具孔径上做了研究探索,包括设计组合变形去核刀、增加刀具材料弹性等^[8-9],但以上研究仍存在去核刀空心管孔径尺寸难确定,导致去核刀孔径尺寸对荔枝果的随机果核尺寸自适应性差,难稳定实现高效成功去核。

为解决上述问题,本文设计自适应去核刀的结构如下:刀具采用薄壁的空心管结构,端面设锋刃,内置对称折弯条,外部侧壁等间隔镂空。

管孔内的折弯条可变尺寸切断刀具孔管中的果肉,解决荔枝果因其核径小于去核刀孔径而难去核问题。刀具的空心管薄壁与其外部等间隔镂空,可对应变形增大刀具的外径、孔径,使核径大于刀具孔径的果核能顺利进入刀具孔管中,以实现夹离成功去核。去核刀与不同核径荔枝果自适应匹配状态如图 2 所示。

去核刀机械进刀去核过程由自适应荔枝果去核机构实现。该机构由 4 部分组成:机架、去核刀转动

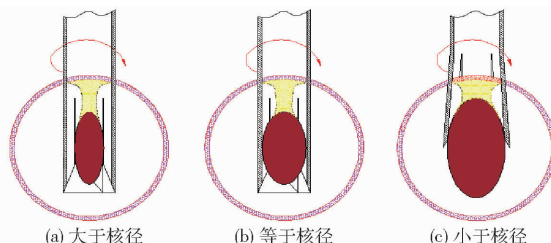


图 2 去核刀与不同核径荔枝果自适应匹配状态

Fig. 2 Adaptive matching status of pitting tool with litchi fruits at different pit diameters

部件、荔枝果装夹部件、垂直移动部件。相对机架,去核刀转动部件(Z 向转动)是通过调速电机、联接轴、紧定螺钉带动去核刀做转速可调的旋转运动。垂直移动部件(Z 向移动)则是通过主电机、减速箱、同步齿轮带组件带动去核刀平稳上下移动。在去核刀转动部件、垂直移动部件、荔枝果装夹部件的共同作用下,去核机构可带动刀具做垂向移动并旋转(转速可变)的去核。去核机构装配结构如图 3 所示。

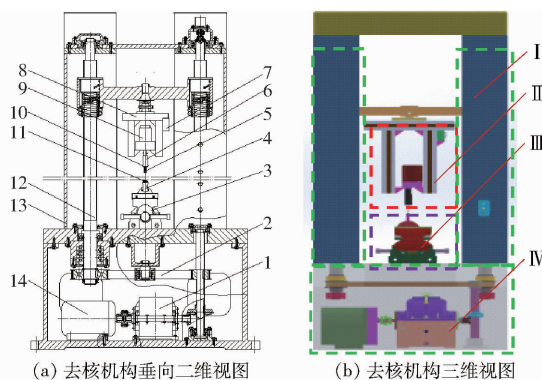


图 3 自适应荔枝果去核机构结构

Fig. 3 Adaptive mechanism structure diagrams for litchi pitting

- 1. 减速箱 2. 同步齿轮带组件 3. 平口钳 4. 弹性料夹 5. 去核刀 6. 联接轴 7. 调速器 8. 支架 9. 调速电机 10. 紧定螺钉 11. 荔枝 12. 滚珠丝杠组件 13. 机架 14. 主电机 I. 机架 II. 去核刀转动部件 III. 荔枝果装夹部件 IV. 去核刀垂直移动部件

根据已测荔枝核径及其尺寸分布,设计去核刀外径、内径、长度分别为 15、14、50 mm,材料为弹簧钢,变核径荔枝果自适应去核刀结构如图 4a 所示。

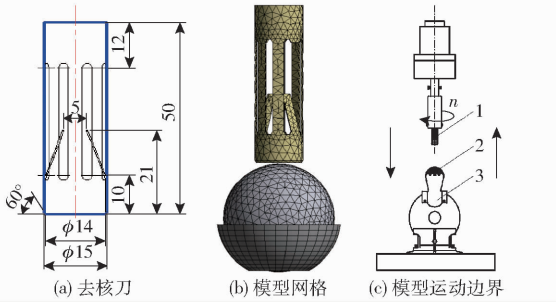


图4 荔枝去核仿真模型

Fig. 4 Simulation models of litchi pitting

1. 去核刀 2. 荔枝 3. 弹性料夹

1.2.2 去核过程静力学分析

荔枝果肉、核与去核刀的力学作用与其去核性能相关。在去核过程中,去核刀的前端面、内表面均受到荔枝果肉、核的压力、摩擦力、重力、扭矩等力学作用。其受力分析如图5所示。

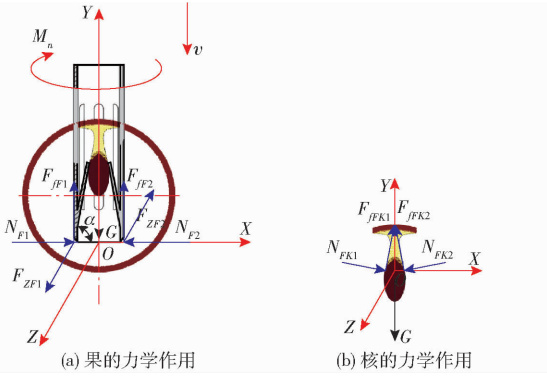


图5 去核过程刀具对荔枝果肉、核的力学作用

Fig. 5 Mechanical interactions between pitting tool and litchi pulp and pit during pitting process

匀转速去核条件下,去核刀与荔枝果的肉、核平衡状态力学方程为

$$N_{F1} - N_{F2} = 0 \quad (2)$$

$$F_{fF1} + F_{fF2} - G = 0 \quad (3)$$

$$F_{ZF1} - F_{ZF2} = 0 \quad (4)$$

$$F_{ZF1}R + F_{ZF2}R - M_n = 0 \quad (5)$$

$$F_{fFi} - \mu N_{Fi} = 0 \quad (6)$$

$$N_{FK1} \sin \alpha - N_{FK2} \sin \alpha + F_{fFK1} \cos \alpha - F_{fFK2} \cos \alpha = 0 \quad (7)$$

$$-N_{FK1} \cos \alpha - N_{FK2} \cos \alpha + F_{fFK1} \sin \alpha + F_{fFK2} \sin \alpha - G = 0 \quad (8)$$

$$F_{fFKi} - \mu N_{FKi} = 0 \quad (9)$$

式中 F_{fFi} ——刀具 i 处端面所受摩擦力, N
 F_{fFKi} ——刀具孔 i 处侧面的摩擦力, N
 G ——刀具孔内含核果肉重力, N
 F_{ZF_i} ——刀具 i 处端面 Z 向压力, N
 M_n ——扭矩, N·m
 N_{Fi} ——刀具 i 处端面 X 向压力, N

N_{FKi} ——刀具 i 处端面压力, N

R ——刀具半径, m

i ——序号(1(左)、2(右))

μ ——摩擦因数

联立式(2)~(9),求解可得

$$N_{Fi} = G/(2\mu) \quad F_{fFi} = G/2 \quad F_{ZF_i} = M_n/(2R)$$

$$N_{FKi} = G/[2(\mu \sin \alpha - \cos \alpha)]$$

$$F_{fFKi} = \mu G/[2(\mu \sin \alpha - \cos \alpha)]$$

无扭转机械进刀去核, F_{ZF1} 、 F_{ZF2} 均为零。

2 自适应去核仿真试验

2.1 自适应去核仿真模型

2.1.1 荔枝果物理模型

为研发稳定、高效、成功的变核径荔枝果去核装置,根据实测玉荷包荔枝果及其核的球度系数,以及参考对核桃^[6-7]、荔枝等果为球状果理想物理模型的设定^[9-12],假定荔枝果及其核为理想球体。

因荔枝果由果皮、果肉、果核组成,其结构具有各向异性特点。但荔枝果肉、果核组织分别由均匀分布的薄壁细胞、石细胞构成^[18-19],其对应的组织结构具有各向同性特点。另外,荔枝果皮组织结构较为复杂,即由外果皮(薄壁细胞角质层组成)、栅状组织、海绵组织、维管束和内果皮等组成,但其微观结构仍是由薄壁细胞、厚壁细胞、角质层等组成^[18-20]。文献[4]也显示玉荷包荔枝果皮由分布较均匀的峰楔型龟裂片构成,其龟裂片中等大、隆起、缝隙小,缝合线不明显,因此在理想状态下,荔枝果皮可视为各向同性材料。

借鉴文献[9]、[12]等研究者对荔枝果的力学参数模型假定,本文设定荔枝果为各向异性材料,但设定其果皮、果肉、果核结构分别为局部组织个体的各向同性。

2.1.2 弹塑性力学模型

基于力学虚功原理,研究变核径荔枝果各组成结构的等效应力,由此构建其去核加工的弹塑性动力学方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} = \mathbf{P} - \mathbf{F} \quad (10)$$

式中 \mathbf{M} ——整体质量矩阵

\mathbf{C} ——整体阻尼矩阵

\mathbf{P} ——外力节点力矩阵

\mathbf{F} ——整体节点力矩阵

$\dot{\mathbf{U}}$ ——整体节点的速度矩阵

$\ddot{\mathbf{U}}$ ——整体节点的加速度矩阵

经构建的仿真模型由荔枝果各组成结构、去核刀、弹性料夹等组成,因模型内结构件较多,降低了

仿真速度。为提升变核径荔枝果自适应去核的仿真速度,在保证仿真质量前提下,对仿真精度影响小的模型内结构件以简化形式表示。

2.2 试验指标与参数设置

2.2.1 试验指标

以等效应力描述具有相同损伤应变能的材料平均应力,可准确预测其在复杂力作用下的损伤和断裂状态,有效指导工程设计。参考桑树枝切削的仿真试验安排^[15],以等效应力为指标,考核不同转速自适应去核过程各组成结构的等效应力分布,比较变核径荔枝果成功去核作业参数,以便确定稳定、高效、成功的去核机制。

2.2.2 仿真模型构建与参数设置

仿真模型(荔枝果、去核刀、弹性料夹)经 Solidworks 2016 软件完成 3 维模型构建后,由 ANSYS Workbench 18.0 软件划分网格(图 4b),经划分网格仿真模型节点数为 4 646,单元数为 13 924。对已划分网格的仿真模型增加以下边界约束条件:弹性料夹、去核刀为固定支撑实体,去核刀与荔枝果间为体接触;去核刀沿垂向移动和旋动(图 4c),其表面侵蚀类型为刚体约束,其余参数采用系统默认值。

基于仿真模型,考察 2 种核径荔枝果在不同转速去核过程的力学作用。去核刀进给速度、进给深度分别为 1.67 mm/s、20 mm。仿真试验与台架切削应力试验的参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真试验与台架切削应力试验参数设置

Tab.2 Parameter settings for simulation experiment and bench cutting stress test

仿真试验 编号	台架试验 编号	转速/ (r·min ⁻¹)	果径/mm	核径/mm
Y1AS	Y1AT	0	34.87	14.69
Y1BS	Y1BT	0	34.13	15.03
Y2AS	Y2AT	95	34.87	14.69
Y2BS	Y2BT	95	34.13	15.03
Y3AS	Y3AT	292	34.87	14.69
Y3BS	Y3BT	292	34.13	15.03

参考荔枝物性测定值^[9,11-12,21-23]和钢铁性能参数^[24],本文仿真模型中设置的荔枝果各组成结构、去核刀、弹性料夹的材料属性如表 3 所示。仿真求解时间步的安全因子、粘性阻尼系数均为 10.0,求解时间为 24 s。

2.3 仿真试验数据处理

各仿真模型数据均由 Excel 软件数据处理。核径 14.69 mm 荔枝果经转速 95 r/min 去核,其各组成结构在 6、24 s 时刻的应力如图 6 所示。2 种核径

表 3 荔枝果去核仿真模型的参数设置

Tab.3 Parameter settings for litchi fruit pitting simulation model

名称	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
果皮	883.25	2.50	0.30
果肉	967.62	0.53	0.30
果核	927.57	4.00	0.28
去核刀	7 820	2.11 × 10 ¹¹	0.29
弹性料夹	7 850	2.00 × 10 ¹¹	0.30

(14.69、15.03 mm)荔枝果以不同转速进刀去核,其果核在 24 s 时刻的等效应力分别如图 7 所示,其去核过程等效应力变化如图 8 所示。

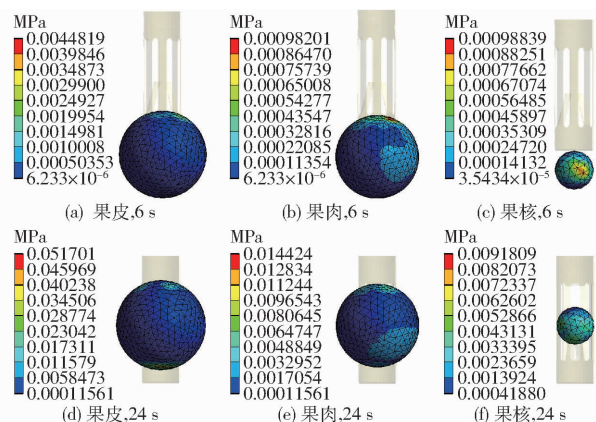


图 6 去核过程荔枝各组成结构的等效应力云图

Fig.6 Equivalent stress contour of each component structure of litchi during pitting process

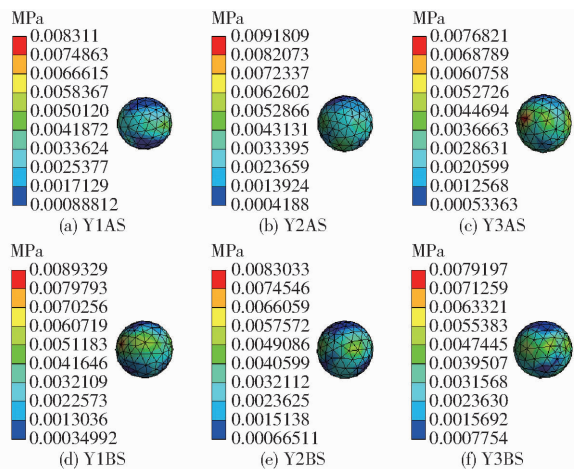


图 7 3 种转速下不同核径荔枝果在去核 24 s 时刻的等效应力云图

Fig.7 Pitting equivalent stress contour at 24 s of different pit diameters for litchi fruit at three different rotational speeds

2.4 仿真试验结果

由图 6 可知,随着去核过程时间增加,荔枝果皮、肉、核最大等效应力快速增大后小幅增加。各时段果皮等效应力依次大于果肉、果核的对应值。进刀 6 s,去核刀切入荔枝果体,果皮蒂部区域的等效应力区小;果肉在上端蒂部区域及中部区域出现了

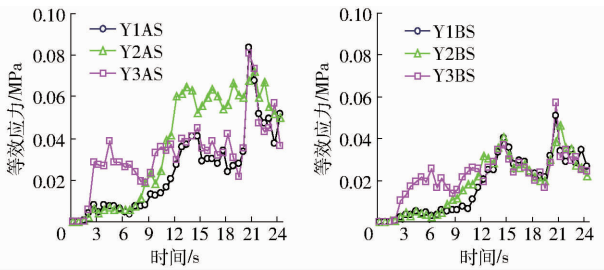


图8 去核过程荔枝各组成结构的等效应力

Fig. 8 Equivalent stress of each component structure of litchi during pitting process

连片较大的等效应力区,且随边缘扩展;但果核在中部区域的等效应力大。

进刀24 s,荔枝果皮在其上下两端均出现受载应力集中区,其果皮下部等效应力区进一步增大。果肉在其上部、下部均形成受载等效应力集中区,其果肉在下端部的等效应力区的分布面积较上部区大。受切削进刀挤压作用,果核进入刀具管孔中,利于实现成功去核。除核在两端等效应力较小外,荔枝果核表面的等效应力基本布满全核,且在其与去核刀接触位置的应力大。

进刀24 s时,荔枝果皮、肉、核最大等效应力分别为其6 s对应值的11.54、14.89、9.29倍。

由图7可知,随着转速增加,核径14.69 mm荔枝果机械进刀24 s,等效应力分布区由中间区向上、下两端逐渐降低;最大等效应力峰值小幅增大后减小,292 r/min机械进刀去核的最大应力在3种转速中最小。

随转速增加,核径15.03 mm荔枝果机械、进刀24 s的等效应力分布区均由中间区向上、下两端部逐渐增大,其对应的最大等效应力依次小。292 r/min机械进刀去核的最大应力在3种转速中最小,与核径14.69 mm的结果一致。

由图8可知,3种转速对核径14.69 mm荔枝果去核,它们的等效应力均随去核时间增加先缓慢增加、再快速增大后呈波动变化状态。除292 r/min去核的等效应力在其作业中后期平稳波动外,其余两种转速去核(0、95 r/min)均在后期逐步升至峰值后下降。

对核径15.03 mm荔枝果,尽管其以292 r/min(Y3BS)去核的等效应力形态在作业后期出现与Y3AS的平稳波动略有不同,但3种转速去核过程的等效应力随时间变化均与其14.69 mm对应去核的形态相近,且在结束阶段各转速的等效应力出现重叠。

在3种转速中,2种核径(14.69、15.03 mm)荔枝果去核,无转速去核等效应力均最大,但

292 r/min去核的对应值均最小。核径15.03 mm荔枝果各转速去核的最大等效应力均大于核径14.69 mm去核的对应值。

3 台架试验结果与讨论

3.1 试验材料

本文台架试验的荔枝果材料为大核品种的玉荷包,各试验材料均由市场购买。

3.2 试验仪器与设备

万能力学测试平台具有高精度的位移和力学检测传感器,可高效、高精度获取农业物料运动过程中的力学参数。因基于万能力学试验机改造的试验平台已在沙果、小麦秸秆等力学特性测试中应用^[22-23]。为此,借鉴上述研发经验,本文改造构建了一种台架试验测控平台(图9),以完成变核径荔枝果自适应去核过程的参数检测。荔枝果去核台架试验测控平台由机械部件和测控部件等组成。机械部件由精准移动台、荔枝果、去核刀、弹性料夹、调速电机等构成。精准移动台由WD-20KE型万能力学试验机(广州市广材试验仪器有限公司)的移动工作台改造而成。在精准移动台的上座另安装去核刀和5GU-3K型60 W调速电机(台力电机有限公司),在精准移动台下座安装弹性料夹,以便固定装夹玉荷包荔枝果。各果试验前,人工打开弹性料夹并摆正放置一待去核荔枝果(果径可不同),经弹性料夹固定夹紧后,进行去核刀相对荔枝果蒂部的垂向对刀。完成去核后松开弹性料夹,取出已去核试验果,更换放入另一个待试验果。台架试验测控平台的数据采集、自动控制均由测控部件的位移传感器、力学传感器检测数据,上述数据再由电缆、计算机硬件和控制软件经转换后存储。去核刀与调速电机相连,其运动启停动作作为手动控制,并与精准移动

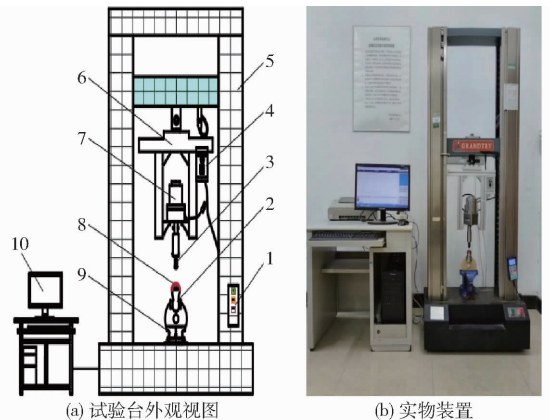


图9 荔枝果去核台架试验测控平台

Fig. 9 Control platform for litchi fruit pitting bench test
1. 控制开关 2. 弹性料夹 3. 去核刀 4. 调速器 5. 力学试验机 6. 支架 7. 调速电机 8. 荔枝 9. 平口钳 10. 计算机

台的进刀过程同步。

本文研发的变核径荔枝果自适应去核台架试验包括两类:切削应力检测试验和随机分组试验。切削应力检测试验安排与仿真试验模型设置一致(表2)。

随机分组试验检测3种转速下变核径荔枝果自适应去核性能。基于研发平台的精准移动平台上具有位移传感器、力学传感器、时间计数器,均可以通过控制软件实时采集去核切削力随进给深度、时间的变化,形成动态过程数据图,经每0.2 s的数据读取,可形成3种转速随机试验组去核过程的切削应力。

各转速随机分组荔枝果数均为12,重复3次。各试验组的切削应力均在试验开始前,设定试验组样品序号,在装夹好荔枝并垂向对刀后,并在测控软件中设定进给速度(1.67 m/s)、进给深度(20 mm)、切削转速。启动试验台控制开关,并同时启动控制软件,自动记录变形量、切削力、作业时间。计时达18 s后,软件停止记录,启动试验平台控制开关返回至初始高度,随后停止,重复进行下一荔枝果试验。

随机分组试验进给速度、进给深度均与台架切削应力试验安排一致,即切削速度、进给深度分别为1.67 m/s和20 mm。随机分组试验前,均先测定各荔枝果的质量、果径及去核试验完成后的荔枝果质量、核质量及其核径,检测去核结果(去核成功率、果肉损失率)。各荔枝果及其核3种径向尺寸均由游标卡尺测量,再转成等效直径下果径、核径。去核前后果质量、核质量均由电子天平(双杰兄弟公司生产,精度为0.01 g)称量获得。变核径荔枝果去核随机分组试验参数设置如表4所示。

表4 荔枝果去核随机分组试验参数设置

Tab.4 Pitting parameter settings of random group experiment for litchi fruit

编号	转速/ (r·min ⁻¹)	最小果质 量/g	最大果质 量/g	最小核质 量/g	最大核质 量/g
YL1	0	17.84	29.56	1.28	3.49
YL2	95	16.52	29.86	1.25	3.51
YL3	292	16.26	26.83	1.50	3.69

3.3 试验指标

因荔枝核密度固定,其球形体直径的3次方与核质量呈等比例变化,因此果核的等效直径可对应其核质量。基于荔枝核质量分级可缩短其获得等效直径的测量转换时间,提升单果去核的工作效率。因此,随机分组试验检测均以核质量分级,分级质量区间为1~4 g,间隔为1 g。荔枝果随机分组试验去

核性能指标定义如下:

(1) 去核荔枝果切削应力

去核过程荔枝果切削应力指标为去核果单位面积承载的切削压力。

(2) 平均去核成功率

在以核质量分级统计区间内,分组荔枝果去核成功率占区间组总数的比例即平均去核成功率。

(3) 极值质量核去核成功率

在以荔枝果核质量的分级统计区间内,具有极值(最大、最小)质量核的荔枝果去核成功率。

(4) 果肉损失率

果肉损失率为去核荔枝果的损失质量相对于其果质量的比例。果肉损失质量是初始果质量减去加工去核后果质量、果核质量(含蒂部果肉)剩余值。

(5) 去核性能综合评分

各去核性能综合指标(平均去核成功率、极值质量核的去核成功率、果肉获得率),均能不同程度影响变核径荔枝果自适应去核效果。因此,基于各去核性能指标对成功率评分的影响,依次设定平均去核成功率、2种极值(最小、最大)质量核去核成功率、果肉获得率评分权重依次为0.6、0.05、0.05、0.3。

$$S_p = 60\eta_{kav} + 5\eta_{kmin} + 5\eta_{kmax} + 30\eta_F \quad (11)$$

式中 S_p ——去核性能综合评分

η_{kav} ——试验组平均去核成功率

η_{kmin} ——试验组最小质量核的去核成功率

η_{kmax} ——试验组最大质量核的去核成功率

η_F ——果肉获得率

3.4 变核径荔枝果去核台架试验

基于台架试验测控平台,对2种核径荔枝果进行不同转速去核的切削应力检测试验和随机分组试验。两类台架试验数据均由Excel 2016软件转化处理。不同转速去核性能显著性比较采用SPSS 2019 Duncan法完成。荔枝果去核过程切削应力变化如图10所示,最大等效应力(仿真试验)与最大切削应力(台架试验)比较如表5所示,荔枝果自适应去核过程随机分组试验结果及综合评分结果分别如表6、7所示。

3.5 试验结果

3.5.1 切削应力时空变化

由图10可知,2种核径荔枝果在不同转速下去核,切削应力形态相近。随着转速增加,切削应力先到达极值后小幅降低,在缓速波动后至平稳。在无转速下,2种核径荔枝果其初始达到极值时间较滞后于其他转速对应值,且它们去核过程最大切削应力也比其他转速对应值高。3种转速中,两种核径

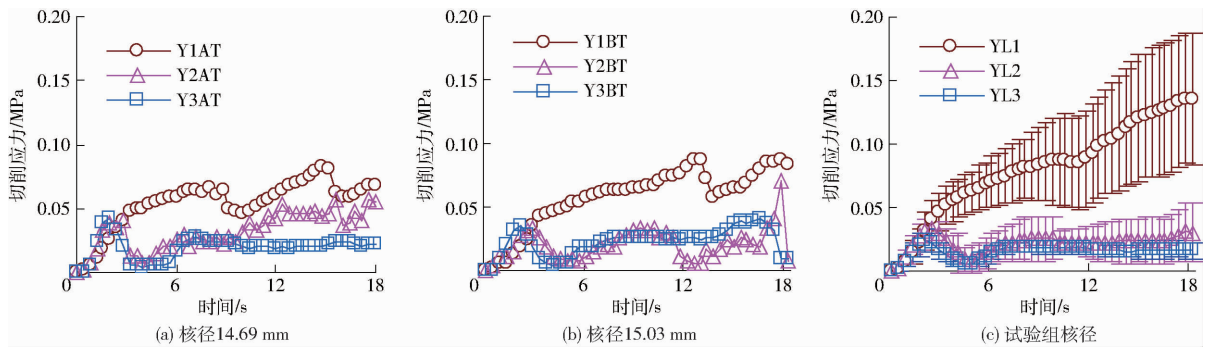


图10 不同核径荔枝果不同转速去核过程切削应力

Fig. 10 Cutting stress during pitting process at different speeds for litchi fruits with two pit diameters

表5 仿真最大等效应力与台架试验最大切削应力比较

Tab. 5 Comparison of maximum equivalent stress from simulation and maximum cutting stress from bench test

编号	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	核径/ mm	最大等效 应力/MPa	最大切削 应力/MPa	应力差/ MPa
Y1AT	0	14.69	0.086	0.085	0.001
Y1BT	0	15.03	0.057	0.061	-0.004
Y2AT	95	14.69	0.084	0.062	0.022
Y2BT	95	15.03	0.051	0.047	0.004
Y3AT	292	14.69	0.075	0.033	0.042
Y3BT	292	15.03	0.046	0.031	0.015

表6 不同转速荔枝自适应分级去核性能对比

Tab. 6 Comparison of adaptive grading pitting performance for litchi fruits at different speeds

编号	分级核质量/g	平均核质量/g	平均核径/mm	平均果质量/g	核分布率/%	去核成功率/%	果肉损失率/%
YL1	2.0	2.0 ± 0.1	14.4 ± 0.4	24.6 ± 2.2	8.3	0	17.0 ± 6.7
YL2	2.0	1.8 ± 0.2	13.8 ± 0.4	24.1 ± 1.7	33.3	100	23.3 ± 6.8
YL3	2.0	1.7 ± 0.1	13.9 ± 0.5	21.3 ± 1.2	36.1	100	22.5 ± 2.0
YL1	3.0	2.6 ± 0.1	15.6 ± 0.3	22.9 ± 0.9	72.2	0	8.7 ± 2.2
YL2	3.0	2.3 ± 0.1	14.9 ± 0.2	24.5 ± 2.5	47.2	96.3	28.1 ± 16.8
YL3	3.0	2.2 ± 0.1	14.8 ± 0.3	21.3 ± 1.4	61.1	100	23.2 ± 0.5
YL1	4.0	3.3 ± 0.1	16.9 ± 0.1	26.5 ± 2.4	19.4	0	7.8 ± 1.3
YL2	4.0	3.3 ± 0.2	17.0 ± 0.7	25.3 ± 1.6	19.4	88.9	26.3 ± 20.0
YL3	4.0	3.7 *	15.5 *	23.2 *	2.8 *	100 *	13.3 *
YL1	均值	2.6 ± 0.5	15.7 ± 1.0	23.7 ± 3.4	69.4	0	9.3 ± 5.1
YL2	均值	2.3 ± 0.6	14.9 ± 1.3	23.7 ± 3.0	66.7	94.4	27.5 ± 17.0
YL3	均值	2.1 ± 0.4	14.5 ± 1.0	21.5 ± 2.7	80.6	100	22.4 ± 5.3

注: * 表示仅有一个数据,不计算方差。

表7 不同转速自适应分级去核性能综合比较

Tab. 7 Comprehensive comparison of adaptive grading pitting performance at different speeds

名称	最小核 质量/g	最大核 质量/g	去核成功率/%			果肉获 得率/%	去核效 果评分
			平均值	最小核	最大核		
YL1	1.28	3.49	0	0	0	90.7	27.2
YL2	1.25	3.51	94.4	100	100	72.5	88.4
YL3	1.50	3.69	100	100	100	77.6	93.3

由表5可知,仿真试验值与台架切削应力试验结果较一致。去核过程中,随转速增加,2种核径荔枝果去核最大等效应力与其最大切削应力均逐渐下

荔枝果 292 r/min 去核最大切削应力均对应最小。

相比无转速荔枝果随机去核,试验组去核切削应力均值与其两种核径荔枝果去核结果相近。即先快速增加,再缓慢平稳增大,最后波动增大至结束,方差也随均值增大而增加。试验组2种转速去核切削应力均值初始随时间增大而快速增至峰值后降低,再小幅增大后趋于平稳。在该去核过程中,切削应力形态与对应转速下2种核径波动变化较小,但总体形态较相近,其去核切削应力方差呈两个阶段相似变化,在0、10 s位置分别小幅增大后渐至平稳。

降。在同转速下,核径 14.69 mm 的荔枝果最大等效应力与最大切削应力均大于核径 15.03 mm 的对应值。核径 14.69 mm 荔枝果最大等效应力由 0.086 MPa 逐步降至 0.075 MPa,其降幅小于核径 15.03 mm 荔枝果对应值。

3种转速去核,仿真最大等效应力居于 0.046 ~ 0.086 MPa。在2种核径去核中,转速 292 r/min 的最大等效应力较无转速对应值减小 0.011 MPa,降幅超 14.6%,核径 14.69 mm 荔枝果切削应力降幅大。2种核径去核对应的台架试验,其切削应力为 0.031 ~ 0.085 MPa,292 r/min 去核切削应力相近,

分别为 0.033、0.031 MPa,无转速进刀去核,其仿真试验最大等效应力与台架试验最大切削应力差为 $-0.004 \sim 0.001$ MPa。

3.5.2 随机分组去核结果

由表 6、7 可知,随分级核质量增加,3 种转速试验组平均核质量与其平均核径增值同向变化。随着分级核质量增加,各试验组在 2.0 ~ 3.0 g 核质量区的核分布率高,超过 47.2%,该核质量分级区间对整体去核成功率影响较大,是保证随机分组稳定成功去核的关键。

不同于核径随核质量分级递增,3 种转速随机分组试验的果质量均波动变化,一些质量大的核仍存于小质量的荔枝果中,难以果质量分级确定其核质量或核径,从而增加了去核难度。这也说明前期开展自适应去核刀结构设计的必要性。

无转速进刀去核,各分级核质量区及其平均去核成功率均为 0,平均果肉损失率为 9.3%。以转速 95 r/min 去核,其随机分组试验递增核质量分级区去核成功率依次达 100%、96.3%、88.9%,平均去核成功率达 94.4%,但果肉损失率在不同核质量分级区间差别大,其对应平均果肉损失率为 27.5%。进一步提升至 292 r/min,荔枝果各组内分级核质量下平均去核成功率均为 100%,对应的果肉损失率也均稳定,随机分组试验下平均果肉损失率为 22.4%。有转速自适应去核,刀具通过旋转切入荔枝果中,其去核成功率大幅稳定提升,尤其是对于相距去核刀孔径差值大的极值质量核(最小、最大)去核成功率,也均能达到 100%。YL1、YL2、YL3 转速下果肉获得率分别为 90.7%、72.5%、77.6%。结合其平均去核成功率、2 种极值核质量去核成功率,采用 YL3 去核,其去核效果评分达 93.3 分,高于 YL2 的 88.4 分和 YL1 的 27.2 分。

3.6 讨论

荔枝果变径去核获取灯笼果肉利于其深加工向高品质、高层次方向发展。但荔枝果因品种、生长差异,其果核尺寸差异变化大,目前研究较少、转速也较低。

本文设计的去核刀采用薄壁空心管孔结构,并带端面锋刃,管孔内置对称折弯条,外侧面均匀间隔镂空。该设计不仅增加了去核刀孔径对大核径果核的弹性包容夹离效果,而且增强了对于小核径(小于刀具孔径)荔枝果在刀具管孔内果肉的切断分离效果,在有转速情况下,相比文献[8]采用钢刀 81.4%的去核成功率、文献[9]采用组合刀接近 90%的去核成功率均有较好提升。说明增加刀具自适应性,是实现变核径荔枝果高效成功去核的重要

条件。

研究显示,增加转速,可降低去核过程的切削应力、改善去核刀孔径对小核径荔枝果的适应性,促进果核进入刀具管孔内而能够稳定、高效、成功去核。本文研究获得的最大等效应力(仿真试验)与最大切削应力(台架切削应力试验)均随转速增加而波动降低,2 种核径荔枝果以 3 种转速去核,292 r/min 去核的最大等效应力与最大切削应力均最小,其值与沙果剪切去核径向剪切强度 0.040 ~ 0.068 MPa、轴向剪切强度 0.036 ~ 0.061 MPa 结果^[23]基本一致。

转速增加可增强匹配刀具的自适应性,这表现为:在无转速直接切入下,因缺乏切削扭矩作用,不能实现有效的刀具内孔果肉旋转切断,蒂部果皮与果核未分离,去核过程的切削应力大,去核均失败。但转速由 95 r/min 增加至 292 r/min,去核成功率由 94.4% 升至 100%,其对应切削应力减小。

变核径荔枝果自适应去核成功率较现有的去核速度、成功率均高且稳定,已试验 292 r/min 去核的果肉损失率与文献[9]的对应结果相近。结合力学仿真与台架性能试验比较,292 r/min 是自适应变径去核优选的工艺参数。

4 结论

(1)研究了荔枝物质特性,得出荔枝果纵径大于横径,横径大于棱径,核纵径大于大横径,大横径大于小横径,果与核球度系数分别达 0.95 和 0.74,其对应的 3 维径向尺寸分布均较符合正态分布。

(2)根据荔枝果不同核径与去核刀孔径匹配关系的分析,设计了一种可自适应荔枝果变核径去核旋转进刀机构和薄壁管去核刀,通过夹持旋转切断(或变形)去除核径小于(或大于)刀具孔径的荔枝核。

(3)应用 ANSYS/LS-DYNA 软件动力学仿真,确定了去核过程不同转速下变核径荔枝果自适应去核过程的果皮、果肉、果核最大等效应力均依次减小;以 3 种转速去核仿真应力为 0.046 ~ 0.086 MPa。在 3 种转速中,2 种核径荔枝果去核最大等效应力随转速增加而降低,转速 292 r/min 最大等效应力较无转速对应值减小 0.011 MPa,降幅达 14.6% 以上。

(4)仿真试验最大等效应力与台架试验 3 种不同转速去核(对应核径、试验组平均核径)的最大切削应力基本一致,2 种核径去核台架试验去核切削应力为 0.031 ~ 0.085 MPa。其去核切削应力与试验组去核的结果形态基本一致,平均组去核切削应力方差随

均值施加略有波动增加。

(5)荔枝果台架试验自适应随机分组去核,其去核性能随转速增加而改善,并趋稳定。以进给速

度 100 mm/min 和进给深度 20 mm 去核,转速 292 r/min 去核成功率和果肉损失率分别为 100% 和 22.4%,综合去核效果最好。

参 考 文 献

- [1] 刘晓珂,李灯华,刘佳佳,等. 我国荔枝产业发展形势及对策建议[J]. 江西农业学报,2023, 35(8):209-216.
LIU Xiaoke, LI Denghua, LIU Jiajia, et al. Development situation and countermeasures of litchi industry in China[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2023, 35(8):209-216. (in Chinese)
- [2] SOMBOONKAEW N, TERRY L A. Influence of temperature and packaging on physiological and chemical profiles of imported litchi fruit[J]. Food Research International, 2011, 44(7):1962-1969.
- [3] WANG W, ZHANG S, FU H, et al. Evaluation of litchi impact damage degree and damage susceptibility[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 173:105409.
- [4] 吴淑娴. 中国果树志,荔枝卷[M]. 北京:中国林业出版社,1998.
- [5] 马小愚,雷得天. 大豆籽粒力学性质的试验研究[J]. 农业机械学报,1988, 19(3):69-75.
MA Xiaoyu, LEI Detian. Experimental investigation of mechanical properties for soybeans kernels[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1988, 19(3):69-75. (in Chinese)
- [6] 李康,李长河,刘明政,等. 青核桃脱皮机理及装置设计与试验[J]. 食品与机械,2023, 39(8):89-97, 185
LI Kang, LI Changhe, LIU Mingzheng, et al. Analysis of green walnut peeling mechanism and device design and experiment [J]. Food & Machinery, 2023, 39(8):89-97, 185. (in Chinese)
- [7] 李康,李长河,刘明政,等. 多工位定向挤压鲜核桃破壳装置设计与试验[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2023, 41(3):265-273.
LI Kang, LI Changhe, LIU Mingzheng, et al. Design and experiment of multi-station directional extrusion shell breaking device for fresh walnut[J]. Journal of Shihezi University(Natural Science), 2023, 41(3):265-273. (in Chinese)
- [8] 王旭东,李长友,张韶回,等. 荔枝去核机的设计[J]. 农业机械学报,2005, 36(9):167-170.
- [9] 程红胜,李长友,鲍彦华,等. 荔枝柔性去核刀具的设计与试验[J]. 农业工程学报,2010, 26(8):123-129.
CHENG Hongsheng, LI Changyou, BAO Yanhua, et al. Design and experiment for flexible cutter of litchi denucleating machine [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(8):123-129. (in Chinese)
- [10] 李长友,马兴灶,程红胜,等. 荔枝定向去核剥壳机设计与试验[J]. 农业机械学报,2014, 45(8):93-100.
LI Changyou, MA Xingzao, CHENG Hongsheng, et al. Design and experiment of litchi denucleating and decorticating machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8):93-100. (in Chinese)
- [11] 陈震,徐凤英,李长友,等. 荔枝力学特性参数测试研究[J]. 农机化研究,2008, 30(9):128-131.
CHEN Zhen, XU Fengying, LI Changyou, et al. Test on the characteristic parameter of litchi's mechanics [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(9):128-131. (in Chinese)
- [12] 陈燕,蔡伟亮,邹湘军,等. 荔枝鲜果挤压力学特性[J]. 农业工程学报,2011, 27(8):360-364.
CHEN Yan, CAI Weiliang, ZOU Xiangjun, et al. Extrusion mechanical properties of fresh litchi [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8):360-364. (in Chinese)
- [13] 李明,连文伟,邓干然. 我国核果类水果去核机具的现状与亟待研究的技术问题探讨[J]. 粮油加工与食品机械,1999 (3):2-5.
- [14] 梁健,曾杰华,曾杰豪,等. 基于气压定向定位的荔枝旋转去皮脱核装置设计[J]. 机电工程技术,2023, 52(8):216-220.
LIANG Jian, ZENG Jiehua, ZENG Jiehao, et al. Design of a rotating peeling and denucleating device for litchi based on air pressure directional positioning [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2023, 52(8):216-220. (in Chinese)
- [15] MENG Y, WEI J, WEI J, et al. An ANSYS/LS-DYNA simulation and experimental study of circular saw blade cutting system of mulberry cutting machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157:38-48.
- [16] 韩明兴,李淼,段宏兵,等. 植物茎秆柔性夹持装置刚柔耦合仿真与试验[J]. 农业机械学报,2024, 55(2):109-118.
HAN Mingxing, LI Miao, DUAN Hongbing, et al. Rigid-flexible coupling simulation and experiment of plant stem clamping device based on ADAMS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2):109-118. (in Chinese)
- [17] AL-MAHASNEH M A, RABABAH T M. Effect of moisture content on some physical properties of green wheat[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(4):1467-1473.
- [18] 刘庆庭,林志超,胡平,等. 作物多尺度力学初探[J]. 农业工程学报,2023,39(11):295-304.
LIU Qingting, LIN Zhichao, HU Ping, et al. Preliminary study on crop multi-scale mechanics [J]. Transactions of the CSAE, 2023,39(11):295-304. (in Chinese)
- [19] 刘庆庭,胡平,郑明轩,等. 作物组织结构与力学性能研究[J]. 华南农业大学学报,2024, 45(3):446-456.
LIU Qingting, HU Ping, ZHENG Mingxuan, et al. Research on crop tissue structure and mechanical properties [J]. Journal of South China Agricultural University, 2024, 45(3):446-456. (in Chinese)

Reconfigurable Mechanisms and Robots. ReMAR2021, 2021: 192.

- [15] SONG Z, LUO Z, WEI G, et al. A portable six-wheeled mobile robot with reconfigurable body and self-adaptable obstacle-climbing mechanisms[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2022, 14(5): 051010.
- [16] SONG Z, LUO Z, WEI G, et al. Self-adaptive obstacle crossing of an AntiBot from reconfiguration control and mechanical adaptation[J]. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 2024, 16(2): 021002.
- [17] LUO Z, SHANG J, WEI G, et al. A reconfigurable hybrid wheel-track mobile robot based on Watt II six-bar linkage[J]. *Mechanism & Machine Theory*, 2018, 128: 16–32.
- [18] LI J, WANG J, WANG S, et al. Parallel structure of six wheel-legged robot trajectory tracking control with heavy payload under uncertain physical interaction[J]. *Assembly Automation*, 2020, 40(5): 675–687.
- [19] CHEN Z, LI J, WANG J, et al. Towards hybrid gait obstacle avoidance for a six wheel-legged robot with payload transportation [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2021, 102(3): 1–21.
- [20] CHEN Z, WANG S, WANG J, et al. Control strategy of stable walking for a hexapod wheel-legged robot [J]. *ISA Transactions*, 2020, 108(3): 367–380.
- [21] CHEN Z, LI J, WANG S, et al. Flexible gait transition for six wheel-legged robot with unstructured terrains[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2022, 150: 103989.
- [22] BOXERBAUM A S, WERK P, QUINN R D, et al. Design of an autonomous amphibious robot for surf zone operation: part I mechanical design for multi-mode mobility [C] // *Proceedings, 2005 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. IEEE, 2005: 1459–1464.
- [23] MOORE K L, FLANN N S. A six-wheeled omnidirectional autonomous mobile robot[J]. *IEEE Control Systems*, 2001, 20(6): 53–66.
- [24] CHUGO D, KAWABATA K, KAETSU H, et al. 3D odometry based on body configuration [C] // *2008 SICE Annual Conference*. IEEE, 2008: 695–700.
- [25] ZHU Q, SHANG J, ZENG X, et al. Modeling and simulation analysis of a six wheel multimodal mobile robot[C] // *2023 8th Asia-Pacific Conference on Intelligent Robot Systems (ACIRS)*. IEEE, 2023: 52–58.
- [26] GRIGORE L Ş, GORGOTEANU D, MOLDER C, et al. A dynamic motion analysis of a six-wheel ground vehicle for emergency intervention actions[J]. *Sensors*, 2021, 21(5): 1618.
- [27] MOORE K L, DAVIDSON M, BAHL V, et al. Modelling and control of a six-wheeled autonomous robot[C] // *Proceedings of the 2000 American Control Conference*. ACC (IEEE Cat. No. 00CH36334). IEEE, 2000: 1483–1490.
- [28] JIANG Y, XU X, ZHANG L. Heading tracking of 6WID/4WIS unmanned ground vehicles with variable wheelbase based on model free adaptive control[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 159: 107715.
- [29] PICO N, JUNG H, MEDRANO J, et al. Climbing control of autonomous mobile robot with estimation of wheel slip and wheel-ground contact angle[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2022, 36(2): 959–968.

(上接第 512 页)

- [20] 潘洵操, 谢宝贵. 荔枝果皮结构与果实贮藏性能关系的探讨[J]. *广西植物*, 1997, 17(1): 80–85.
PAN Xuncao, XIE Baogui. Study on the relationship between the peel structure and storage quality of litchi fruits[J]. *Guihaia*, 1997, 17(1): 80–85. (in Chinese)
- [21] 徐凤英. 荔枝真空红外热辐射干燥传热传质机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2006.
XU Fengying. Study on mechanism heat and mass transfer in litchi vacuum & IR combined drying[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [22] ESEHAGHBEYGI A, HOSEINZADEH B, KHAZAEI M, et al. Bending and shearing properties of wheat stem of Alvand variety[J]. *World Applied Sciences Journal*, 2013, 6(8): 1028–1032.
- [23] 施彦宇. 沙果去核切分特性及其设备设计研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
SHI Yanyu. Related study on characteristic parameters of crab-apple and design of processing device[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2022. (in Chinese)
- [24] 闻邦椿. 机械设计手册(第1卷)[M]. 5版. 北京: 机械工业出版社, 2010.