

簇生番茄果梗超声切割过程仿真与试验

张军¹ 辛迪¹ 蓝伟科¹ 党柯华¹ 牛子杰¹ 崔永杰^{1,2}

(1. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100;

2. 农业农村部农业物联网重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要: 为揭示超声技术应用于簇生番茄切割采收的机理及优势, 比较了簇生番茄果梗材料在常规切割和超声切割中的切割力和去除特性。首先测定了簇生番茄果梗和自制超声切割刀的参数, 然后基于 Abaqus 进行仿真, 将果梗纤维化, 在宏观和微观仿真中对比较常规切割和超声切割过程中的应力及去除机理。最后, 自制试验台, 通过改变超声切割刀的激振频率、输入电压、切割速度和切割角度进行切割力测定试验并采用响应面法的 Box - Behnken 进行四因素三水平分析, 随后观察果梗断面形貌。结果表明: 在自制超声刀工作频率 (35 ~ 37 kHz) 和电压 (340 ~ 380 V) 内, 切割速度、角度对切割效果影响最显著, 激振频率和输入电压在特定值附近时切割效果最好; 在 36 kHz、360 V、0.125 cm/s、0° 的条件下, 仿真中超声切割耗时约为 8 s, 平均最大切割力为 0.635 N, 相对于常规切割 (1.019 N) 降低 37.7%; 试验中超声切割耗时约为 5.3 s, 所需切割力最大为 0.543 N, 相较于常规最大切割力 (1.017 N) 降低 46.6%, 同时表面粗糙度降低 20.9%, 试验与有限元仿真的切割力结果误差为 8.9%, 基本吻合。超声切割可以降低切割力, 缩短切割耗时, 同时还提高断面质量, 减少果梗组织损伤、水分散失, 对延长果实保鲜时间具有一定的意义。

关键词: 簇生番茄果梗; 超声振动切割; 有限元; 去除机理

中图分类号: S22; S23

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)03-0153-09

OSID:



Simulation and Experiment on Ultrasonic Cutting Process of Clustered Tomato Stems

ZHANG Jun¹ XIN Di¹ LAN Weike¹ DANG Kehua¹ NIU Zijie¹ CUI Yongjie^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Key Laboratory of Agricultural Internet of Things, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to reveal the mechanism and advantages of ultrasonic technology in cutting and harvesting clustered tomatoes, the cutting force and removal characteristics of clustered tomato stem materials in conventional cutting and ultrasonic cutting were compared. Firstly, the parameters of clustered tomato fruit stalks and self-made ultrasonic cutting knife were measured, and then the fruit stalks were fiberized based on Abaqus simulation. The stress and removal mechanism during conventional cutting and ultrasonic cutting were compared in macro and micro simulation. Finally, the self-made test bench was used to measure the cutting force by changing the excitation frequency, input voltage, cutting speed and cutting angle of the ultrasonic cutting knife, and the Box - Behnken of response surface method was used to analyze the four factors and three levels, and then the cross-section morphology of the fruit stalk was observed. The results showed that within the working frequency (35 ~ 37 kHz) and voltage (340 ~ 380 V) of the self-made ultrasonic scalpel, the cutting speed and angle had the most significant influence on the cutting effect, and the cutting effect was the best when the excitation frequency and input voltage were near a specific value. Under the conditions of 36 kHz, 360 V, 0.125 cm/s, and 0°, the ultrasonic cutting time in the simulation was about 8 s, and the average maximum cutting force was 0.635 N, which was 37.7% lower than that of the conventional cutting (1.019 N). In the experiment, the ultrasonic cutting took about 5.3 s, and the maximum cutting force required was 0.543 N, which was

收稿日期: 2023-12-09 修回日期: 2024-01-15

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目 (U2243235) 和陕西省自然科学基金基础研究计划项目 (2021JQ-156)

作者简介: 张军 (1987—), 男, 讲师, 博士, 主要从事智能农业装备和无人机遥感等研究, E-mail: junzhang@nwfufu.edu.cn

46.6% lower than that of the conventional maximum cutting force (1.017 N), and the surface roughness was 20.9% lower. The error between the experimental and finite element simulation results was 8.9%, which was basically consistent. Ultrasonic cutting can reduce the cutting force, shorten the cutting time, improve the section quality, reduce the damage of fruit stem tissue and water loss, which was of certain significance to prolong the fruit preservation time.

Key words: clusters of tomato stems; ultrasonic vibration cutting; finite element; removal mechanism

0 引言

近些年,我国设施农业发展迅速,对果蔬采收机器人的要求越来越高,果蔬采收机器人关键技术之一为末端执行器设计^[1]。目前果蔬采收机器人末端执行器主要分为两种方式:基于果梗和果实之间结合力较低的力脱落方式;用于剪切果蔬和果梗之间结合力较大的果蔬^[2]。普通的剪切采收方式很少有果蔬掉落的情况,但存在所需作用力大、易损伤果实、切割表面质量难以保证和不利于果蔬保鲜等问题^[3-6],另外,簇生果蔬对于末端执行器尺寸、质量和灵巧性要求很高^[7-9]。在此需求背景下基于超声切割刀体积小、切割省力、切面平整以及切割所需操作空间小,将超声切割技术应用于农业采收,有望解决目前果蔬剪切采收存在的难题。

目前已有基于压电效应的果实采收切割刀机理分析,采用理论-有限元-试验的方式对超声振动切割果梗的机理进行了初步分析^[10],但是没有明确超声相对于常规切割的优势和果梗纤维去除机理的研究^[11-13]。果梗作为一种富含纤维的材料,在切割的过程中,纤维断裂起着决定性作用^[14],为了明确超声切割果梗的内在机理,有必要了解果梗在超声振动切割下的纤维断裂和去除机理。此外,由于纤维被包裹在基体中,现有的显微检测技术很难清楚地捕捉到纤维断裂过程^[15-18]。

有限元方法(Finite element method, FEM)作为一种高效、经济的方法,通过计算机辅助计算分析实际收获的动态切割过程,为观察物理场变化(如应力场、应变场等)和材料断裂创造了条件^[19-24]。ZHOU等^[25]使用有限元的方法模拟了SiCp/Al复合材料的常规切割和超声切割过程,并使用扫描电镜观察了切屑形态和表面形貌。试验研究表明,仿真结果和试验结果具有一致性,UVAC技术可以减少刀具磨损,提高表面完整性,降低切削力、表面粗糙度和损伤。YU等^[26]用三维宏观和微观有限元结合的方法,研究了超声振动对FRCMCs-SiC切割过程中纤维束断裂的影响。研究结果表明,无论是在脆性断裂状态还是在宏观脆性断裂状态下,沿切削方向施加超声波振动(UV)都有利于降低切削力和

减小加工表面粗糙度。

综上所述,国内外研究的超声切割对象仍以金属为主,未见对果梗材料纤维断裂机理的研究报道,而且研究只针对于特定参数下超声振动相对常规切割的优势,并未改变超声振动不同的参数对切割力和表面质量进行研究。因此,为探究超声切割相对于常规切割簇生番茄果梗纤维的优势和不同超声切割参数对切割效果的影响,本文比较簇生番茄果梗材料在常规切割和超声切割中的切割力和去除特性。首先测定簇生番茄果梗力学参数和含水率,并测试自制超声切割刀的工作特性,基于Abaqus进行仿真,将果梗纤维化,在宏观和微观仿真中对比常规切割和超声切割过程中的应力、温度变化及去除机理。最后,在自制试验台上通过改变激振频率、电压、切割速度和切割角度进行切割力测定试验,并采用Box-Behnken进行四因素三水平分析,观察代表性参数下的果梗断面形貌,以揭示将超声切割技术应用于簇生番茄采收的优势。

1 材料和方法

1.1 果梗参数和切割环境

为贴近果蔬采收机器人切割果梗的应用场景,保证果梗的含水率,从温室中摘取了30个长势相近的初熟期番茄果梗,当天进行基本参数测试。图1显示了簇生番茄的温室环境、正面和侧面示例。可以看到番茄的主藤、连接主藤的总果梗、番茄的花萼、连接花萼的近端果梗、连接总果梗的远端果梗,为了便于果蔬采收机器人的采收和刀具的切割,选择远端果梗作为机器人采收的切割区。另外对果实不同部分质量进行测量,果实自重占95%,对果梗的切割断裂具有辅助作用。

果梗含水率对于切割效果具有重要影响^[27],在仿真和试验前对簇生番茄果梗含水率进行测试,在HE53型水分活度仪上进行,将番茄果梗取一段剪碎,然后称量待测果梗质量,设置干燥温度为150℃,测试重复3次,剔除异常值后测得初熟期果梗平均含水率为58.2%。

取3个上述新鲜果梗作为样本,分别用天平测量其质量,通过量筒间接测量其体积,通过得到的质

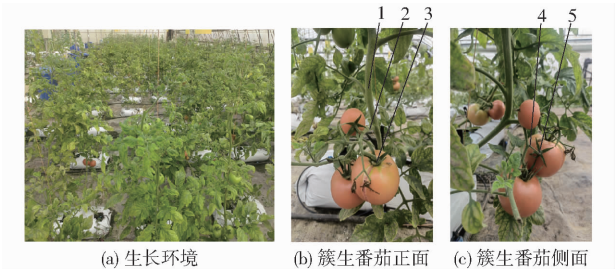


图 1 簇生番茄生长环境和示例

Fig. 1 Growing environment and examples of tomato clusters

1. 主藤 2. 连接主藤的总果梗 3. 番茄花萼 4. 连接花萼的近端果梗 5. 连接总果梗的远端果梗

量和体积计算其密度,剔除异常值后取平均值即可得到密度最终结果。然后在西北农林科技大学力学实验室利用万能试验机对果梗进行拉伸、压缩和剪切试验,将 24 个果梗分为 3 组,每组试验重复 3 次,最终得到初熟期簇生番茄果梗力学参数为:弹性模量 8.8 GPa、泊松比 0.23、密度 478 kg/m³。

1.2 超声切割刀测试

1.2.1 测试过程

超声切割是将电源产生的交流电信号经过逆压电效应转化为纵向机械振动,然后经变幅杆的放大作用,再将振动传递给刀片,刀片与待切割材料进行摩擦接触,从而实现对果梗的切割。激振频率和输入电压是决定超声刀具切割性能的重要因素。通过对自制超声切割刀进行不同激振频率和电压激励下的交叉试验,可知刀具在不同参数下的工作性能,为刀具切割簇生番茄果梗试验提供理论依据。

首先用示波器对所设计超声刀的频率、振幅和波形进行测试,输入电压为 50 V 交流电,采样频率为 40 μs,从示波器可以看出,波形为正弦波,电压峰值一直在增加,最高电压幅值可达 420 V 左右,为了更加准确地测试超声刀具特性,在此基础上利用阻抗分析仪测试共振频率点,谐振频率为 36.25 kHz。

根据超声振动理论可知,谐振频率附近刀具工作性能最好。分别在每种电压下 33 ~ 42 kHz 进行超声刀具的扫频测试,测试在如图 2a 所示的装置上进行,利用功率放大器调节电压和激振频率,将图 2b 所示的刀具正负极连接到示波器的探头上,虎钳夹紧刀具后端头,为了便于观察每种参数下刀片是否振动,使用白纸进行切割测试,示波器上的数据作为辅助判断标准,每组试验重复 3 次。

1.2.2 测试结果

扫频测试结果如表 1 所示,240 ~ 380 V,随着电压的增大,成功扫频范围变大,但从 380 V 开始,扫

频范围随着电压的增大而减小,这说明电压与超声切割效果并不是正相关,由此可得出此刀具最佳工作电压为 360 ~ 380 V。

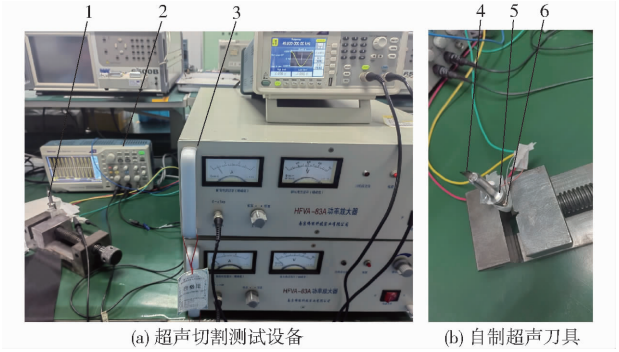


图 2 超声刀测试装置

Fig. 2 Ultrasonic knife test device

1. 超声刀具 2. 示波器 3. 功率放大器 4. 刀片 5. 变幅杆 6. 压电陶瓷

表 1 扫频测试结果

Tab. 1 Swept test results

电压/V	成功扫频范围/kHz	电压/V	成功扫频范围/kHz
240	35.9 ~ 36.8	340	34.0 ~ 40.2
260	35.9 ~ 37.1	360	33.9 ~ 43.5
280	35.4 ~ 38.1	380	33.5 ~ 48.9
300	34.9 ~ 38.7	400	35.1 ~ 37.3
320	34.3 ~ 39.5	420	35.6 ~ 36.9

2 仿真分析

2.1 Abaqus 仿真

在 Solidworks 中建立超声切割刀和簇生番茄果梗的 3D 模型,转化成 step 文件,并导入 Abaqus 中,随后对材料属性进行整合。超声切割刀结构复杂,因此选择 Solid45 作为金属板单元,压电片则采用 Solid5 单元,最后利用 Workbench 的智能尺寸工具生成四面体网格。切割刀的刀片视为细长悬臂梁式结构,材料为 SK-2(高碳工具钢),各部分参数如表 2 所示,其中压电陶瓷的弹性模量为各向异性矩阵,其刚度矩阵、压电矩阵和介电常数矩阵分别为

表 2 超声刀具各部分材料属性和单元类型

Tab. 2 Ultrasonic tool parts, material properties and element types

部件	材料	单元类型	密度/ (kg·m ⁻³)	弹性模 量/GPa	泊松比
盖板	7075-T6	Solid45	2 720	71	0.25
压电陶瓷	PZT-8	Solid5	8 500		0.33
变幅杆	钛合金 BT-4	Solid5	4 420	116.4	0.34
刀片	SK-2	Solid45	7 800	206	0.26

$$\mathbf{c}^E = \begin{bmatrix} 120.6 & 53.5 & 51.5 & 0 & 0 & 0 \\ 53.5 & 120.6 & 51.5 & 0 & 0 & 0 \\ 51.5 & 51.5 & 104.5 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 31.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 31.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 34.6 \end{bmatrix}$$

(1)

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -5.2 \\ 0 & 0 & -5.2 \\ 0 & 0 & 15.1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 12.7 & 0 \\ 12.7 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

(2)

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} 6.04 \times 10^{-9} & 0 & 0 \\ 0 & 6.04 \times 10^{-9} & 0 \\ 0 & 0 & 6.04 \times 10^{-9} \end{bmatrix}$$

(3)

刀具的左侧外壳握把处是固定的,具有 2 420 个单元和 4 717 个节点。在本研究中,分析果梗分别在常规切割和超声切割下的应力和去除机理。

采用 Abaqus/Explicit 模块进行求解,可以定量和定性表述超声切割果梗在宏观上的应力变化和去除机理,但考虑到果梗是生物类材料,仅通过宏观分析无法表征果梗材料和超声切割机理特性,因此需要将果梗进一步纤维化,建立了考虑纤维、基体和界面的三维微观模型。本文研究的变量为激振频率、驱动电压、切割角度和速度,因此为保证其余变量的一致性,簇生番茄果梗固定同一种生育期(初熟期)和相近含水率(58.2%),将果梗简化为圆柱状,直径为 5 mm,刀具设置为离散刚体进行研究。仿真中无法直接设置果梗材料含水率,但可通过设置不同材料参数来反映含水率对仿真的影响。果梗含水率对于生物材料导热系数、机械强度和密度影响很大,平均含水率为 58.2% 的果梗比热容为 28 J/(kg·K)、传导率为 15 W/(m·K)^[28]。材料本构利用 Johnson-Cook 方程构建,即 $\sigma = (A + B\varepsilon^n) \cdot \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \left[1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}}\right)^m\right]$,其中 A、B、C、n、m、T_{room}、T_{melt} 分别设置为 82 Pa、113 Pa、0、0.2 Pa、0.3 Pa、68℃、89℃。为了使仿真和试验相互匹配,在切割角为 0° 的参数下进行仿真。刀具上表面施加 100 Pa 的压力,常规切割的速度分别设置为 0.125 cm/s,超声切割通过施加幅值曲线来实现速度周期性变化,频率为 36 kHz,速度设置为 0.125 + 0.125sin(36 000wt),时间设置为 12 s,刀具比热和

传导率分别设置为 178 J/(kg·K)和 56 W/(m·K)。仿真最终输出结果为应力,而试验中所用力传感器最终输出结果为切割力,为了验证所建立模型和仿真的正确和准确性,利用 $\sigma = F/A_1$ (F 为切割力,N;A₁为接触面积,m²)进行应力-切割力换算。

2.2 仿真结果分析

温度场和力场的有限元模型仿真结果如图 3 所示,切口在果梗表面上方形成。一般来说,切口上方的材料被视为切屑,切口下方的材料是切割表面,通过测量刀尖与果梗的接触参数,得到刀具与果梗的平均接触面积在 0 ~ 1.5 × 10⁻⁷ m²之间变化。

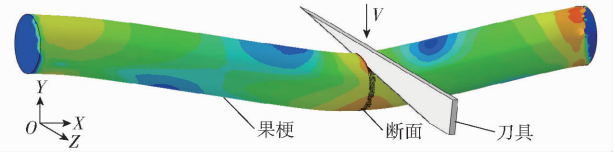


图 3 有限元模型仿真结果
Fig. 3 Simulation results of finite element model

如图 3(XOY 平面)所示,箭头的方向代表超声刀具的移动方向。在超声振动的作用下,刀具和果梗材料交替上下接触。塑性变形和断裂在刀具和果梗材料上下交替接触时发生,材料沿着刀具的上表面和下表面流动,最后形成切割断面。在仿真的过程当中,没有发现明显的材料去除,只剩下切口。随着切割的进行,果梗的纤维被刀具分开,刀具两侧的材料作为整个切屑被切除。根据仿真的结果可知,在切割果梗材料时,微观上没有发现材料去除,但在宏观上,发生材料去除现象。

如图 4 和图 5 所示,提取常规切割和超声切割模拟过程中 4 个时间点的应力图,随着时间的增加,果梗材料切口增大。果梗所受的最大应力发生在切口处,此时接触面积约为 7.9 × 10⁻⁸ m²,超声切割的最大应力为 8.044 × 10⁻³ GPa,切割力为 0.635 N,小于常规切割的 1.29 × 10⁻² GPa、1.019 N,切割力下降 37.7%。在 8 s 时,超声切割果梗断面已经完全分离开,而常规切割断面还有所粘连,这说明超声切割相对于常规切割耗时少。在常规切割的过程中,其整体弯曲程度较超声切割更大,应力分布更宽,这是由于常规切割主要靠施加的压力切割果梗,造成果梗应力范围分布较广且弯曲程度较大。另一方面,超声切割是断续切割,压力对于切口的作用较小,它主要是通过刀具不断地与果梗材料摩擦接触,在摩擦接触的过程当中分离果梗材料以达到切割的目的。这说明了超声刀具断续切割的作用,相对于常规切割,超声切割所需的切割力小,应力分布较窄。

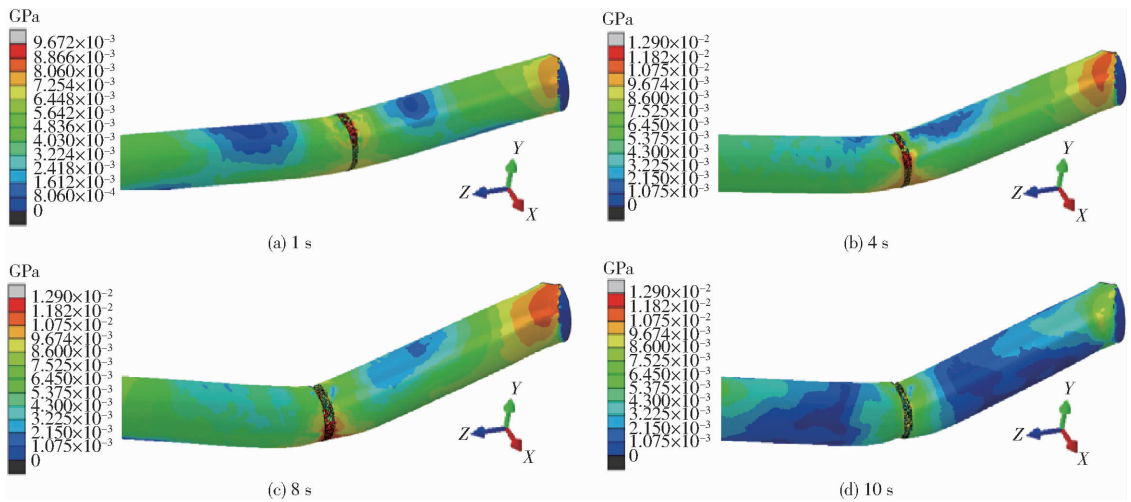


图 4 常规切割宏观仿真结果

Fig. 4 Macro-simulation results of conventional cutting

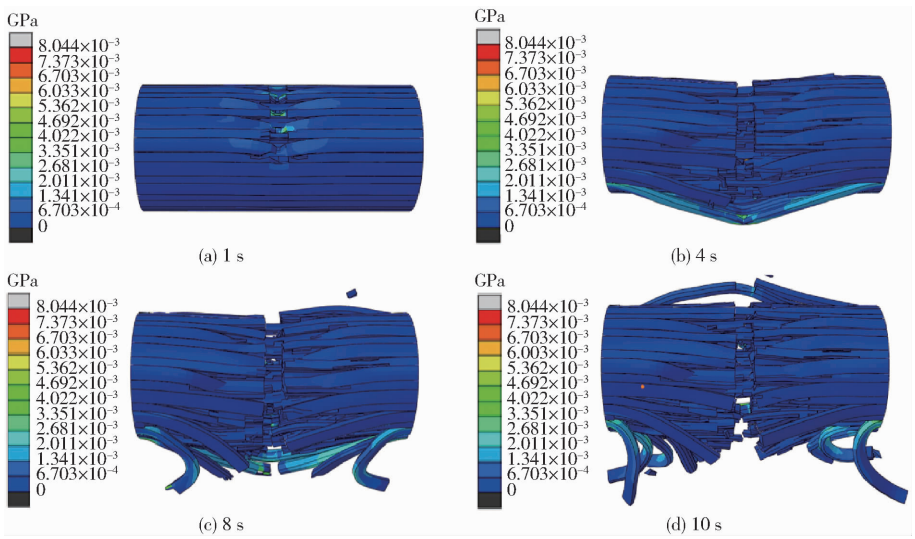


图 5 超声切割微观纤维束仿真结果

Fig. 5 Simulation results of ultrasonic cutting micro-fiber bundle

3 试验

3.1 试验设备及试验参数

为了验证不同切割速度、角度、激振频率和驱动电压对切割过程中簇生番茄果梗纤维断裂机理的影响,如图 6 所示,在自制试验台上进行常规切割和超声切割试验。试验对象为与测试同一批采摘的平均直径为 5 mm、平均含水率为 58.2% 的初熟期番茄果梗,选择方便接触的远端果梗进行切割。在试验中,使用图 2b 所示的自制超声切割刀,刀刃长度为 8 mm,刃角为 15°。在该试验中,由于刀片硬度远大于果梗硬度,刀具切割果梗材料磨损可以忽略。步进电机用于驱动丝杠模组带动 3D 打印的夹具向下切割,步进电机驱动控制模块用以控制电机运行模式,试验台的底端连接有压力传感器,测量的切削力通过数字模组经 USB 转换模块传递到 PC 机。功率放大器用于调节电压和激振频率,示波器用于测量波

形、频率和幅值,步进电机转速可调,夹具设计为可旋转,以验证不同的激振频率、电压、切割速度和切割角度对切割力的影响。图 6b 为扫描电镜设备 (SEM, TM3000),用以观察常规切割和超声切割后的果梗断面形貌。

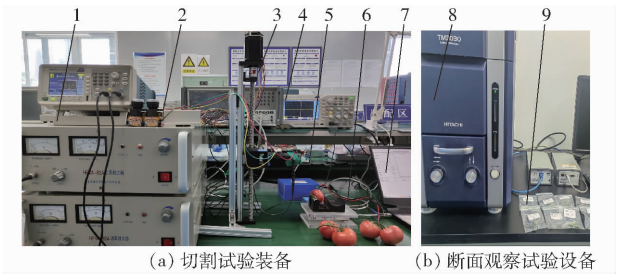


图 6 切割试验平台

Fig. 6 Cutting experimental platform

1. 功率放大器 2. 步进电机驱动控制模块 3. 步进电机丝杠模组 4. 示波器 5. 超声刀具 6. 压力传感器模块 7. PC 机
8. 台式扫描电镜 9. 断面试样

为了深入研究激振频率、驱动电压、切割速度和

角度对切割力的影响,根据表 1 扫频测试的结果,设定激振频率和输入电压的范围,根据前期单因素试验结果设定切割角度和速度的范围,使用 Design-Expert 13.0 设计四因素三水平表,以切割力 Y 为响应值,通过 Box - Behnken 设计响应面试验,以探寻影响切割力的关键参数,以及不同参数对切割力的影响规律,具体数据和结果见表 3、4。

表 3 试验因素水平
Tab.3 Factors and levels of test

编码	因素			
	激振频率	驱动电压	切割角度	切割速度 $D/$
	A/kHz	B/V	$C/(\text{ }^\circ)$	$(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
-1	35	340	0	0.125
0	36	360	15	0.250
1	37	380	30	0.375

表 4 响应面试验设计与结果
Tab.4 Design and results of response surface experiment

序号	因素				Y/N
	A/kHz	B/V	$C/(\text{ }^\circ)$	$D/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	
1	35	360	0	0.250	0.718
2	35	360	30	0.250	0.628
3	36	340	15	0.125	0.520
4	36	360	15	0.250	0.583
5	36	380	15	0.125	0.518
6	36	380	15	0.375	0.671
7	37	340	15	0.250	0.704
8	35	380	15	0.250	0.696
9	36	360	0	0.375	0.699
10	36	340	30	0.250	0.578
11	37	360	0	0.250	0.741
12	36	380	30	0.250	0.571
13	37	360	30	0.250	0.612
14	36	360	30	0.375	0.645
15	35	360	15	0.375	0.701
16	36	360	15	0.250	0.583
17	36	360	0	0.125	0.543
18	36	380	0	0.250	0.607
19	36	360	30	0.125	0.451
20	36	340	15	0.375	0.676
21	37	380	15	0.250	0.698
22	35	360	15	0.125	0.483
23	36	360	15	0.250	0.583
24	36	360	15	0.250	0.583
25	37	360	15	0.375	0.699
26	36	340	0	0.250	0.640
27	36	360	15	0.250	0.583
28	37	360	15	0.125	0.477
29	35	340	15	0.250	0.728

3.2 方差分析

通过对表 4 数据进行拟合,得到各因素与超声

切割力之间的回归方程为

$$Y=0.529\,4-0.002\,4X_1-0.006\,7X_2-0.043\,3X_3+0.184\,3X_4+0.006\,5X_1X_2-0.009\,8X_1X_3+0.001\,5X_1X_4+0.006\,5X_2X_3-0.001\,1X_2X_4+0.014\,3X_3X_4+0.069X_1^2+0.034\,2X_2^2+0.012\,5X_3^2-0.070\,4X_4^2$$

(4)

式中 $X_1、X_2、X_3、X_4$ ——因素编码值

该回归方程方差分析见表 5,由表 5 可知,模型 F 值为 10.57, $P<0.000\,1$,表明模型有效且非常显著;模型决定系数 R^2 为 0.913 6,表明 91.36% 的超声切割力变化可通过此回归方程来解释; $|R_{adj}^2-R_{pred}^2|<0.2$,变异系数为 1.48%,表明模型可信度高。方差分析结果表明,在整个试验区间内,该回归方程对试验具有指导作用。各因素对切割力影响的大小顺序为切割速度、切割角度、输入电压、激振频率,其中切割速度的影响极显著,切割角度的影响显著,这说明在自制超声刀工作频率(35~37 kHz)和电压(340~380 V)内,切割速度和切割角度是影响超声切割性能的关键参数。

表 5 方差分析
Tab.5 Analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.169 9	14	0.012 1	10.57	<0.000 1
A	0.000 1	1	0.000 1	0.034 9	0.854 5
B	0.000 3	1	0.000 3	0.269	0.612 1
C	0.012 9	1	0.012 9	11.22	0.004 8
D	0.063 6	1	0.063 6	55.41	<0.000 1
AB	0.019 2	1	0.019 2	14.73	0.001 69
AC	0.000 4	1	0.000 4	0.331 4	0.574
AD	4.00×10^6	1	4.00×10^6	0.003 5	0.953 8
BC	0.000 2	1	0.000 2	0.147 3	0.706 9
BD	2.25×10^6	1	2.25×10^6	0.002	0.965 3
CD	0.000 4	1	0.000 4	0.314 6	0.583 7
A^2	0.030 8	1	0.030 8	26.88	<0.000 1
B^2	0.007 6	1	0.007 6	6.62	0.022 1
C^2	0.001	1	0.001	0.877 5	0.364 8
D^2	0.006 4	1	0.006 4	5.54	0.033 8
残差	0.016 1	14	0.001 1		
失拟项	0.016 1	10	0.001 6		
纯误差	0.000 2	4	0.000 2		
总离差	0.185 9	28			

3.3 响应面分析

影响显著的各因素交互作用对切割力影响的响应面如图 7 所示。从图 7 可以看出,激振频率和输入电压对切割力的影响相近,切割力在 36 kHz、360 V 附近时最小;前期单因素试验结果见文献[29],此处取其中代表性图进行对比,如图 8 所示,可以发现,随着输入电压和激振频率的升高,切割力变化没有明显规律,再根据上述谐振频率的测

定试验结果,表明超声切割刀只在特定电压、激振频率(36.25 kHz)附近时切割效果最好,与响应面分析结果相同,证明了所设计四因素三水平响应面试验结果的准确性。

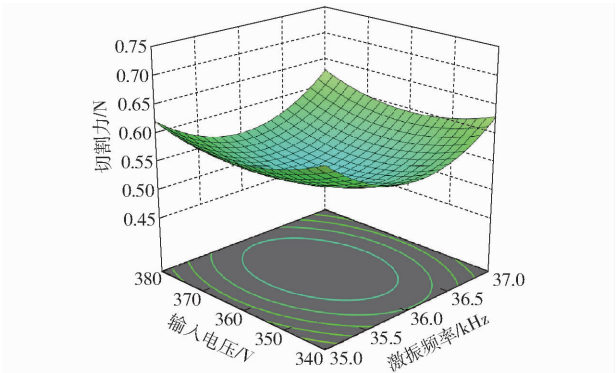


图 7 各因素交互作用对切割力影响的响应面
Fig. 7 Response surface of influence of interaction of various factors on cutting force

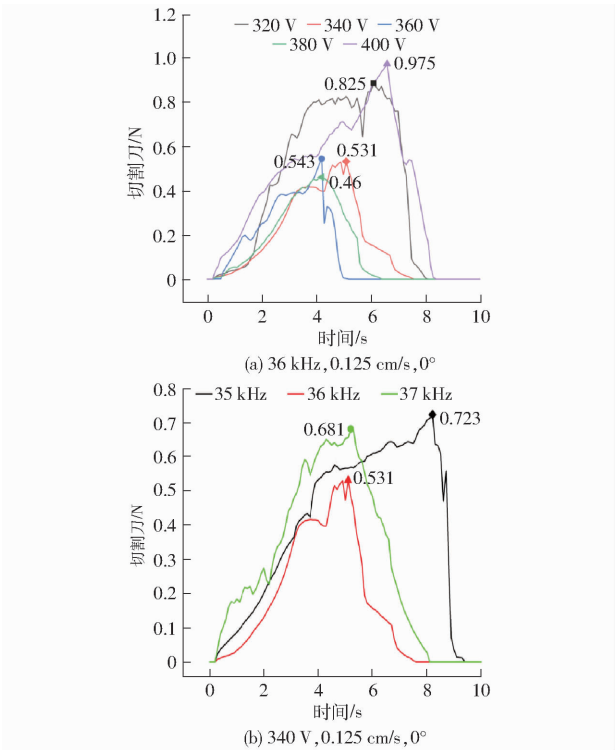


图 8 不同电压和频率下的切割力曲线
Fig. 8 Cutting force curves under different voltages and frequencies

由图 8 可以看出,在 36 kHz、360 V、0.125 cm/s、0°的条件下,所得平均切割力最大值为 0.543 N,0.543 N 相对于常规切割成功切断的最小切割力(1.017 N)降低 46.6%,与有限元仿真结果(0.65 N)的误差为 8.9%,切割耗时相对较短,为 5.3 s。由于刀具与果梗接触面积的计算存在较大误差,因此有限元仿真结果存在一定局限性。此外,上述试验在不添加超声切割的条件下,若施加小于 0.95 N 的力均切割失败,平均切割成功的最小切断

力为 1.017 N,通过与超声切割果梗的试验进行对比,更进一步验证了理论和仿真的结果:超声切割可以有效地降低切割力。后续可根据响应面的优化结果设计出所需切割力更小的切割簇生番茄果梗的采收切割刀。

3.4 断面观察

切割试验结束后,对果梗进行了留样、冻干、切片,在西北农林科技大学生物能源实验室用台式扫描电镜观察断面,研究超声振动对果梗材料去除机理的影响。图 9 为代表性超声切割参数下与常规切割的断面形貌。在宏观下可以发现超声切割果梗的断面普遍都比较黑且平整,这是因为在断续摩擦切割过程中产生了大量的热,使果梗断面熔化断裂。从放大了 600 倍后的断面(第 2 行图),可以发现只要是施加了超声振动,其断面的锯齿、凹坑均比常规切割少,脱粘更多,表面更平整。常规切割下,材料去除明显处于微脆断裂和宏观脆性断裂的过渡阶段,而沿切割方向施加超声振动时,果梗纤维往往发生微脆性断裂,即脱粘导致的延性断裂,切割断面更光滑。结合仿真分析结果,在常规切割下,果梗断面易于发生宏观脆性断裂,导致断面质量低,而在超声振动下,纤维与刀具接触区域的应力集中效应会导致应变率增加,应力分布较窄,使纤维材料以微观断裂的形式被去除。从放大 1 000 倍后的图像(第 3 行图),可以看出常规切割下存在的气孔数量过多,而超声切割由于切割过程中会产生大量的热,导致气孔封闭,几乎观察不到气孔。这种现象说明,施加超声振动切割可以使果梗断面的伤口愈合,避免水分流失,对于防止微生物入侵、延长果实保鲜时间具有一定的意义。

图 10 显示了常规切割和 360 V、0°、0.125 cm/s 参数下不同激振频率对切割力和果梗表面粗糙度的影响,表面高度由图 6b 中的扫描电镜测量。沿切割方向施加超声振动可以显著降低切割力,这种切割力的降低是由于施加超声振动后,其切割速度呈周期性变化,刀片和果梗材料不断摩擦接触,产生大量的热而引起的。在一定范围内降低切割速度和增加切割角度,切割力会降低,而超声频率和电压参数只在特定的值附近切割效果最好。从图 10 可以看出,激振频率为 36 kHz 时,断面粗糙度最低,为 1.48 μm,此时超声切割相对于常规切割表面粗糙度降低 20.9%。这是因为,激振频率为 36 kHz 时,超声刀具工作性能最好,切割过程中,纤维会因为微脆性断裂而脱落,纤维的断面几乎与刀具切割平面平行,凹坑数量减小,气孔封闭。

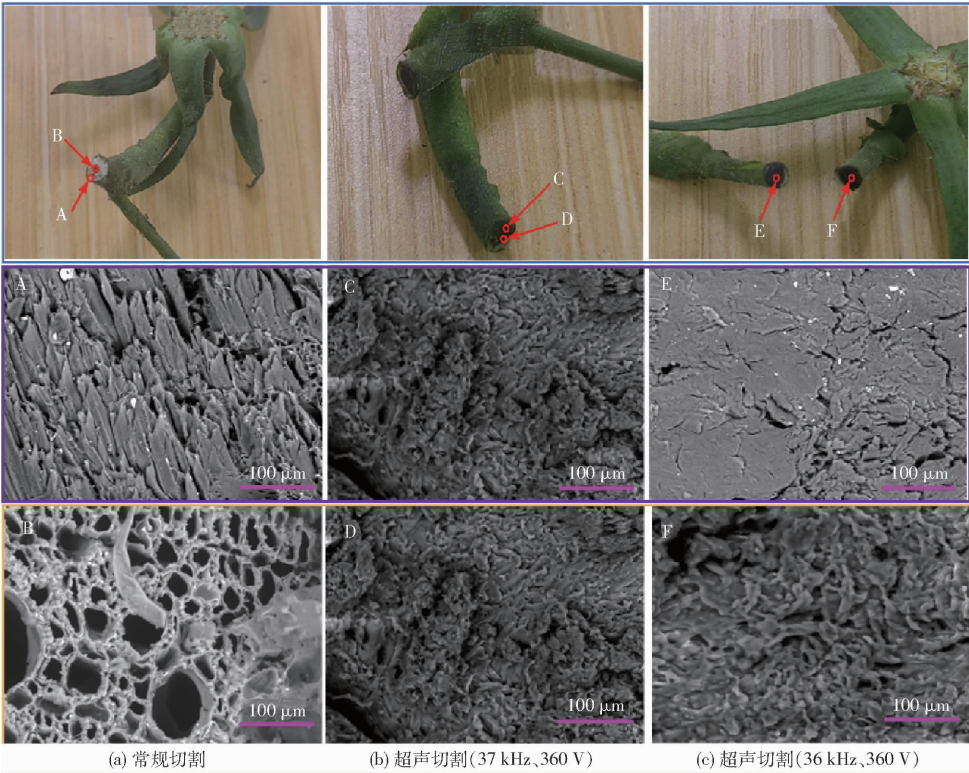


图9 扫描电镜下常规切割和超声切割的断面形貌

Fig.9 Cross-sectional morphologies of conventional and ultrasonic cutting under SEM

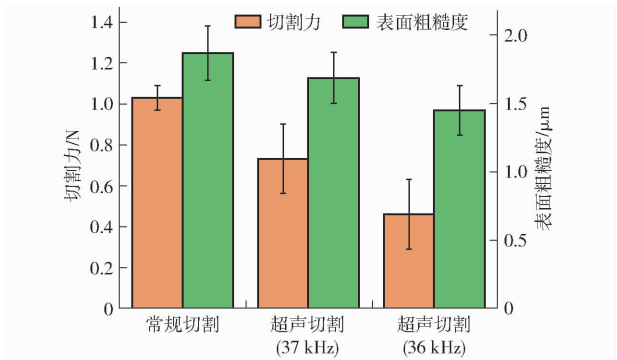


图10 不同切割方式时切割力和断面粗糙度

Fig.10 Cutting force and section roughness under different cutting methods

4 结论

(1)基于宏观和微观有限元仿真的方法发现，超声切割主要是通过刀具不断地与果梗纤维材料摩

擦接触,在此过程中分离果梗材料以达到切割的目的;在 36 kHz、360 V、0.125 cm/s、0°的条件下沿切割方向施加超声振动,超声切割耗时约为 8s,耗时比常规切割少。超声切割和常规切割的最大切割力分别为 0.635、1.019 N,与试验结果 0.543、1.017 N 相近。

(2)根据单因素和响应面试验结果,切割速度和切割角度与超声切割效果有关,激振频率和电压只在特定的值附近切割效果好;在 36 kHz、360 V、0.125 cm/s、0°时,切割耗时为 5.3 s,相对常规切割,超声切割力降低 46.6%,表面粗糙度降低 20.9%,试验与仿真切割力结果的误差为 8.9%,基本吻合。表明超声切割可以有效地降低切割力,促进断面伤口的愈合,表面质量较高,可以避免水分流失,延长果实保鲜时间。

参 考 文 献

[1] 刘继展. 温室采摘机器人技术研究进展分析[J]. 农业机械学报,2017,48(12):1-18.
LIU Jizhan. Analysis on the research progress of greenhouse picking robot technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12):1-18. (in Chinese)

[2] 苑进. 选择性收获机器人技术研究进展与分析[J]. 农业机械学报,2020,51(9):1-17.
YUAN Jin. Research progress and analysis of selective harvesting robot technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020,51(9):1-17. (in Chinese)

[3] 刘成良,贡亮,苑进,等. 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报,2022,53(7):1-22.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN Jin, et al. Research status and development trend of key technologies of agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(7):1-22. (in Chinese)

[4] WANG X,KANG H,ZHOU H,et al. Geometry-aware fruit grasping estimation for robotic harvesting in apple orchards[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2022, 193:106716.

- [5] FENG Q, WANG X, WANG G, et al. Design and test of tomatoes harvesting robot[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Information and Automation, 2015; 949–952.
- [6] 钱少明, 杨庆华, 王志恒, 等. 黄瓜抓持特性与末端采摘执行器研究[J]. 农业工程学报, 2010, 26(7): 107–112.
QIAN Shaoming, YANG Qinghua, WANG Zhiheng, et al. Study on cucumber grasping characteristics and end picking actuator[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(7): 107–112. (in Chinese)
- [7] FENG Q, ZHANG M, XU R, et al. Design and test of robotic harvesting system for cherry tomato[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(1): 96–100.
- [8] RINGDAHL O, KURTSE P, EDAN Y. Evaluation of approach strategies for harvesting robots; case study of sweet pepper harvesting[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2019, 95: 149–164.
- [9] LEE B K, KAM D H, MIN B R, et al. A vision servo system for automated harvest of sweet pepper in Korean greenhouse environment[J]. Applied Sciences, 2019, 9(12): 2395.
- [10] 辛迪, 党柯华, 邓家锋, 等. 基于压电效应的果实采收切割刀机理分析[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊2): 91–100.
XIN Di, DANG Kehua, DENG Jiafeng, et al. Mechanism analysis of fruit harvesting cutter based on piezoelectric effect[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 91–100. (in Chinese)
- [11] RAO P R, RAMAKRISHNA G. Experimental investigation on mechanical properties of oil palm empty fruit bunch fiber reinforced cement mortar[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 471–477.
- [12] 张川, 张玉锴, 李淑芳, 等. 干湿交替下木纤维重构红壤的水力特性[J]. 农业工程学报, 2023, 39(8): 103–110.
ZHANG Chuan, ZHANG Yukai, LI Shufang, et al. Hydraulic characteristics of red soil reconstructed by wood fiber under dry-wet alternation[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(8): 103–110. (in Chinese)
- [13] 张喜瑞, 王超, 梁栋, 等. 滚筒刮拉式香蕉茎秆纤维刮取装置参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2016, 32(20): 55–62.
ZHANG Xirui, WANG Chao, LIANG Dong, et al. Parameter optimization and test of drum scraping device for banana stalk fiber[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(20): 55–62. (in Chinese)
- [14] LV D X, SHI P C, CHEN M D, et al. Effects of fiber orientations on fracture mechanisms in rotary ultrasonic drilling of carbon fiber reinforced plastic laminates[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 105: 199–212.
- [15] QUAN D, LIU J M, YAO L J, et al. Interlaminar and intralaminar fracture resistance of recycled carbon fiber/PPS composites with tailored fiber/matrix adhesion[J]. Composites Science and Technology, 2023, 239: 110051.
- [16] 刘环宇, 江连洲, 陈海涛, 等. 水稻秸秆纤维制取机工作参数优化与性能试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10): 161–169.
LIU Huanyu, JIANG Lianzhou, CHEN Haitao, et al. Optimization of working parameters and performance test of rice straw fiber making machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 161–169. (in Chinese)
- [17] YANG Y, LV J J, WANG W H, et al. Improvement of UHMWPE fibers interfacial properties by aminosilane/silica synergistic modification[J]. Materials Letters, 2024, 354: 135364.
- [18] YU H, LI K Z, LU J H. Study on the mechanical properties of C/C composites reinforced by different types of carbon fibers[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 5696–5706.
- [19] 田佳, 曹兵, 金楠, 等. 花棒根-土复合体直剪试验的有限元数值模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 152–158.
TIAN Jia, CAO Bing, JIN Nan, et al. Finite element numerical simulation and verification of direct shear test of flower stick root-soil composite[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16): 152–158. (in Chinese)
- [20] ZHANG Y B, SONG S J, LIU F. Thermo-kinetic characteristics on stabilizing hetero-phase interface of metal matrix composites by crystal plasticity finite element method[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 169: 53–67.
- [21] YU Z Y, YANG K, HU Z C, et al. Parameter optimization and simulation analysis of floating root cutting mechanism for garlic harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107521.
- [22] AHMAD C, WILLIAM C, MICHAEL K. A coupled implicit MPM-FEM approach for brittle fracture and fragmentation[J]. Computers & Structures, 2023, 288: 107143.
- [23] 刘莉, 陶亮, 孙小明, 等. 基于 ABAQUS 的测力车轮有限元建模与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(5): 387–394.
LIU Li, TAO Liang, SUN Xiaoming, et al. Finite element modeling and test of dynamometer wheel based on ABAQUS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 387–394. (in Chinese)
- [24] 李佟, 金先龙, 王小卫, 等. 基于重叠边界的有限元与离散元耦合异步并行计算方法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(6): 419–426.
LI Tong, JIN Xianlong, WANG Xiaowei, et al. Asynchronous long parallel calculation method of finite element and discrete element coupling based on overlapping boundary[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(6): 419–426. (in Chinese)
- [25] ZHOU J K, LU M M, LIN J Q, et al. Investigation of surface integrity transition of SiCp/Al composites based on specific cutting energy during ultrasonic elliptical vibration assisted cutting[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 50(3): 654–665.
- [26] YU W W, CHEN J, AN Q L, et al. Investigations on the effect of ultrasonic vibration on fiber fracture and removal mechanism in cutting of fiber reinforced silicon carbide ceramic matrix composites[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2023, 94: 359–373.
- [27] 张茂健. 玉米芯和玉米籽粒果柄的力学性质研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
ZHANG Maojian. Study on mechanical properties of corn cob and corn stalk[D]. Changchun: Jilin University, 2019. (in Chinese)
- [28] ALSHAHRANI H, ARUN V R. Mechanical, thermal, viscoelastic and hydrophobicity behavior of complex grape stalk lignin and bamboo fiber reinforced polyester composite[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 223(A): 851–859.
- [29] XIN D, DONG K, LAN W, et al. Ultrasonic cutting mechanism of clustered tomato stems fiber based on the piezoelectric effect[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014(218): 108749.