

孙健峰, 邢凯峰, 杨洲, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的果枝修剪过程仿真与试验研究 [J]. 华南农业大学学报, 2022, 43(4): 113-124.  
SUN Jianfeng, XING Kaifeng, YANG Zhou, et al. Simulation and experimental research on fruit branch pruning process based on ANSYS/LS-DYNA[J].  
Journal of South China Agricultural University, 2022, 43(4): 113-124.

# 基于 ANSYS/LS-DYNA 的果枝修剪 过程仿真与试验研究

孙健峰<sup>1</sup>, 邢凯峰<sup>1</sup>, 杨洲<sup>1,2</sup>, 段洁利<sup>1</sup>

(1 华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642; 2 嘉应学院/广东省山区特色农业资源保护  
与精准利用重点实验室, 广东 梅州 514000)

**摘要:**【目的】深入研究果枝修剪过程特性及切割机理, 为优化修剪机具核心剪切部件、提高电动修剪机切割性能提供参考。【方法】以‘石硖’品种龙眼树枝为试验对象, 采用 ANSYS/LS-DYNA 对树枝切割过程进行有限元仿真, 搭建树枝切割试验平台进行切割试验, 验证仿真模型的准确性, 使用高速摄像机观察树枝切割过程, 分析动刀片、树枝、定刀在切割过程中的应力分布及切割机理, 确定最大等效应力出现的区域。【结果】实际试验与仿真试验的切割过程都可分为 5 个阶段: 挤压阶段、切入剪切阶段、稳定剪切阶段、剪断阶段、树枝振动阶段, 实际切割力略大于仿真值, 切割 10、15 和 20 mm 直径树枝刀具峰值切割力实际值与仿真值最大相对误差为 7.8%, 平均相对误差为 7.0%, 试验和仿真切割力曲线趋势大致相同。切割过程中动刀片、树枝和定刀最大等效应力出现在刃刀、树枝和定刀切口附近, 动刀片、定刀最大等效应力均小于刀具材料屈服极限, 刀具不会发生失效。【结论】该有限元模型与实际情况基本符合, 对修剪机具的设计和改进行具有一定的参考价值。

**关键词:** ANSYS/LS-DYNA; 有限元仿真; 果枝修剪; 切割机理; 龙眼; 应力分布

中图分类号: S233.74; S667.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2022)04-0113-12

## Simulation and experimental research on fruit branch pruning process based on ANSYS/LS-DYNA

SUN Jianfeng<sup>1</sup>, XING Kaifeng<sup>1</sup>, YANG Zhou<sup>1,2</sup>, DUAN Jieli<sup>1</sup>

(1 College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2 Jiaying University/Key Laboratory  
of Conservation and Accurate Utilization of Characteristic Agricultural Resources in Mountainous  
Areas of Guangdong Province, Meizhou 514000, China)

**Abstract:** 【Objective】The goal was to in depth study the pruning process characteristics and cutting mechanism of fruit branches, and provide a reference for optimizing the core cutting components of pruning machines and improving the cutting performance of electric pruning machines. 【Method】Taking the branch of ‘Shixia’ variety of longan as the test object, ANSYS/LS-DYNA was used to perform finite element simulation of the branch cutting process. We built a branch cutting test platform for cutting experiments, verified the accuracy of the simulation model, used a high-speed camera to observe the branch cutting process, analyzed

收稿日期: 2021-11-10 网络首发时间: 2022-05-12 16:20:49

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20220512.1135.004.html>

作者简介: 孙健峰, 副教授, 博士, 主要从事农业机械化研究, E-mail: [sunjianfeng@scau.edu.cn](mailto:sunjianfeng@scau.edu.cn); 通信作者: 段洁利, 副教授, 博士, 主要从事水果生产机械研究, E-mail: [duanjieli@scau.edu.cn](mailto:duanjieli@scau.edu.cn)

基金项目: 广东省自然科学基金 (2019A151011039); 广东省重点领域研发计划项目 (2019B020223002); 国家重点研发计划 (2020YFD1000104); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助 (CARS-31-10)

the stress distribution and cutting mechanism of moving blades, branches, and fixed blades in the cutting process, and determined the area where the maximum equivalent stress occurred. 【Result】 The cutting process of actual test and simulation test could be divided into five stages including the extrusion stage, cutting-in shearing stage, stable shearing stage, shearing stage and branch vibration stage. The actual cutting force was slightly higher than the simulation value. The maximum relative error between the actual value and the simulation value of the peak cutting force of the cutter for cutting 10, 15 and 20 mm diameter branches was 7.8%, and the average relative error was 7.0%. The trends of the experimental and simulated cutting force curves were roughly the same. During the cutting process, the maximum equivalent stresses of the moving blade, branch and fixed knife appeared near the cutting edge, branch and fixed knife cut. The maximum equivalent stresses of the moving blade and fixed knife were both less than the yield limits of the tool materials, and the tools would not fail. 【Conclusion】 The finite element model is basically consistent with the actual situation and has certain reference value for the design and improvement of pruning machine.

**Key words:** ANSYS/LS-DYNA; Finite element simulation; Fruit branch pruning; Cutting mechanism; Longan; Stress distribution

中国是水果种植和生产世界第一大国, 2019年果园种植面积为  $1.23 \times 10^7 \text{ hm}^2$ , 水果产量达  $2.74 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[1]</sup>。果树修剪是果园管理过程中的重要环节, 是决定果树能否健康生长的重要因素, 直接影响果实产量及品质<sup>[2-3]</sup>。目前我国果园生产综合机械率不足 30%, 果树修剪机械较少, 修剪作业以人工修剪为主, 修剪效率低, 劳动强度大, 且易造成主枝断裂, 降低水果生产效益<sup>[4-5]</sup>。欧美等发达国家普遍使用标准化果园机械进行修剪作业, 机械化程度高<sup>[6-7]</sup>。我国南方果园多为丘陵山地, 地貌特性严重限制微型修剪机械作业, 同时龙眼、荔枝等主要果树树枝硬度和纤维剪切强度高于一类林果类树枝, 部分果园开始使用便捷高效、剪切强度高的电动修剪机作业<sup>[8-10]</sup>。尽管电动修剪机优势较多, 但成本高、刀具易损坏, 严重制约电动修剪机的普及, 不利于果园机械化的发展与推广<sup>[11-12]</sup>。为解决上述问题, 已有学者针对电动修剪机刀具耐磨性能展开研究<sup>[13-14]</sup>, 但鲜有分析电动修剪机修剪树枝过程特性, 因此研究树枝修剪过程特性及切割机理对提高电动修剪机切割性能具有现实意义。

近年来, 诸多学者对树枝和农作物茎秆的切割过程进行相关研究。王芳等<sup>[15]</sup>采用摆切式切割试验台对向日葵茎秆切割能耗进行试验, 研究切割速度、滑切角、割刀刃角对切割能耗的影响, 结果表明 3 个影响因素对切割能耗影响的顺序为: 切割速度 > 滑切角 > 割刀刃角; 王慰祖等<sup>[16]</sup>通过理论力学和弹性地基梁理论对直刃刀片切割树枝过程进行理论建模, 利用此模型可对刀片切割力作出准确预

测; 康峰等<sup>[17]</sup>通过自制苹果树枝切割试验平台, 探究刀具滑切角、平均切割速度和切割间隙对峰值切割力的影响, 获得最优切割参数组合为: 刀具滑切角  $20^\circ$ 、平均切割速度  $0.4 \text{ m/s}$ 、切割间隙  $1.5 \text{ mm}$ ; 张燕青等<sup>[18]</sup>通过茎秆往复切割试验台对谷子茎秆进行单因素切割试验, 最终得到最优切割参数为: 平均切割速度  $1.19 \text{ m/s}$ 、切割倾角  $7.2^\circ$ 、刀片斜角  $36.4^\circ$ ; Vu 等<sup>[19]</sup>利用自制切割试验平台, 以玉米秸秆作为试验对象, 评价了切割速度、切割角和进给角对切割力和功耗的影响; Mathanker 等<sup>[20]</sup>研究刀片倾角及平均切割速度对甘蔗切割功耗的影响, 结果表明切割功耗随平均切割速度的增大而增大, 当平均切割速度为  $7.9 \text{ m/s}$ 、刀片倾角为  $60^\circ$  时, 切割功耗最小。

上述研究大多致力于刀具切力、切割功耗、切割运动参数和刀具组合优化等方面, 主要通过参数优化进行研究, 对切割机理的研究相对偏少, 针对南方果园高硬红木树枝切割过程的仿真研究更少, 研究高硬红木树枝切割过程对实现南方果园修剪机械化, 提升龙眼、荔枝的市场竞争力具有重要意义。此外, 与理论试验研究相比, 有限元仿真可以缩短试验周期, 动态分析树枝切割过程及切割机理。本文根据电动修剪机修剪树枝的特征, 以龙眼‘石硖’品种树枝为研究对象, 对树枝切割过程建立有限元模型, 并通过试验验证模型的准确性, 使用高速摄像机观察树枝切割过程, 分析动刀片、树枝、定刀在切割过程中的应力分布、修剪过程特性及切割机理, 为今后修剪机具切割部位的设计和改进行提供一种解决途径。

## 1 仿真模型与试验设计

树枝修剪过程复杂多变,刀具与树枝之间属非连续、非线性、动态大变形接触,常规方法难以分析刀具与树枝之间的相互作用过程。本文根据电动修剪机修剪树枝的特性,通过有限元仿真软件 ANSYS/LS-DYNA 建立树枝切割过程仿真模型,全面阐述模型的建立过程及相关细节。

### 1.1 仿真模型的建立

1.1.1 几何模型 电动修剪机是以蓄电池为动力源的手持式机械化修剪机具,修剪树枝过程是刀具与树枝之间不断相互作用的复杂过程,修剪树枝主要由动刀实现,定刀则起支撑树枝和辅助修剪的作用,动刀在外载荷的作用下向下运动并最终剪断树枝。图1为电动修剪机结构示意图。

为提高仿真的准确性并缩短计算时间,在三维建模软件 SolidWorks 中以 1:1 的比例对电动修剪



图1 电动修剪机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electric pruning machine

机切割部位进行建模。为方便仿真计算,将动刀分为刀柄和动刀片,同时将刀柄设置为转动体<sup>[21]</sup>,忽略模型中倒角、倒圆等结构,并转换为 IGES 文件格式导入到 ANSYS/LS-DYNA 软件中。几何模型中动刀厚度为 6 mm,刀刃倾角为 20°,定刀厚度为 6.5 mm,树枝长度为 120 mm。几何模型如图2所示。

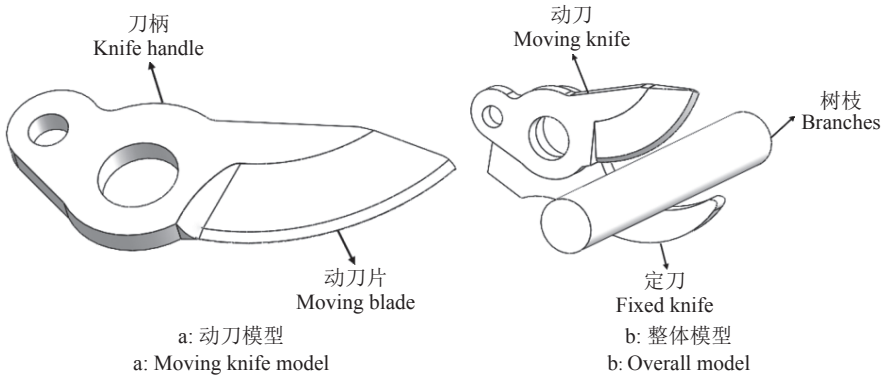


图2 电动修剪机切割部位几何模型

Fig. 2 Geometric model of the cutter part of electric pruning machine

1.1.2 确定材料类型和材料本构 动刀片、定刀、树枝均采用 3D Solid 164 实体单元,刀柄采用 3D Shell 163 薄壳单元。将动刀片和定刀定义为弹性体,采用线弹性各向同性弹性材料模型 (\*MAT\_ELASTIC),为缩短仿真计算时间,刀柄采用刚性体材料模型 (\*MAT\_RIGID),将动刀片和刀柄通过布尔运算连接起来,使动刀片在刀柄的带动下进行转动,刀具材料模型参数按照 SK-5 的参数进行设置。选用龙眼‘石硖’品种树枝作为切割对象,龙眼树枝主要由树皮和树芯组成,近似为圆柱实体,具有非匀质、非线性、正交各向异性等特性,材料性能符合弹性力学的基本要求。龙眼树枝模型选用线弹性正交各向异性材料模型 (\*MAT\_ORTHOTROPIC\_ELASTIC),该模型主要由质量密度和 9 个独立弹性常数组成,这 9 个独立弹性常数包括 3 个弹性模型 ( $E_X$ 、 $E_Y$ 、 $E_Z$ )、3 个泊松比 ( $\mu_{XY}$ 、 $\mu_{XZ}$ 、 $\mu_{YZ}$ ) 和 3 个剪切模量 ( $G_{XY}$ 、 $G_{XZ}$ 、 $G_{YZ}$ ),由文献 [21-23] 确定龙眼

树枝材料本构。刀具和龙眼树枝材料本构:1) 刀具,SK-5,密度  $7900 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ,弹性模量  $2.10 \times 10^5 \text{ MPa}$ ,泊松比 0.275,屈服极限 930 MPa;2) 龙眼,密度  $951.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , $E_X$  为 216.3 MPa, $E_Y$  为 547.2 MPa, $E_Z$  为 52.1 MPa, $\mu_{XY}$  为 0.43, $\mu_{XZ}$  为 0.03, $\mu_{YZ}$  为 0.015, $G_{XY}$  为 56.3 MPa, $G_{XZ}$  为 22.4 MPa, $G_{YZ}$  为 11.0 MPa。

1.1.3 网格划分 本文对动刀片和树枝接触部位的网格进行细化,对刀柄网格尺寸粗化。有限元模型网格划分如图3所示,整个模型共创建 4 个部分,PART1 为动刀片模型,PART2 为定刀模型,PART3 为树枝模型,PART4 刀柄模型。

1.1.4 定义接触算法和边界条件载荷 实际切割中动刀片会将树枝剪断,故在设置接触时,动刀片与树枝间选择面面侵蚀接触,其中动刀片和树枝分别设为主接触体 (MSID) 和从接触体 (SSID),设定静摩擦系数为 0.14,动摩擦系数为 0.26<sup>[22,24]</sup>。定

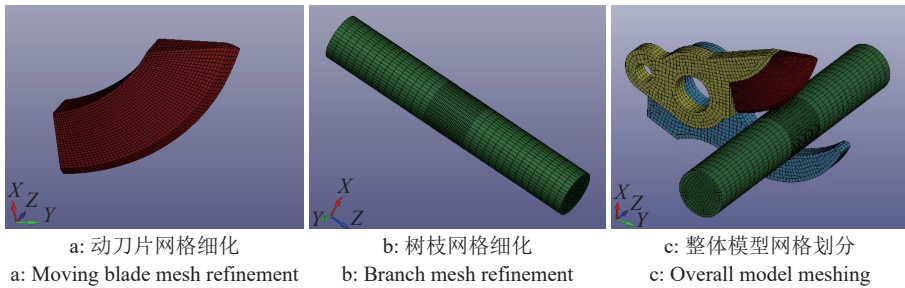


图 3 有限元模型网格划分

Fig. 3 Meshing of finite element model

刀与树枝在实际中发生侵蚀的接触面积较少, 故选择自动面面接触。

在有限元模型中, 对树枝模型 (PART3) 一端的表面和定刀模型 (PART2) 孔内壁表面施加全部自由度约束, 对刀柄模型保留绕 Z 轴的转动自由度, 其余自由度全部约束。设置刀柄模型 (PART4) 绕 Z 轴的转速为 2.5 rad/s。

## 1.2 仿真试验设计

分别对直径为 10、15 和 20 mm 的树枝进行切割仿真, 仿真时间分别为 0.4、0.5 和 0.6 s。通过后处理模块 LS-PREPOST 观察整个模型的切割过程, 提取相关结果信息, 分析切割力数据及各部位模型随时间变化的应力分布情况, 并输出相应曲线。

## 2 验证试验与结果分析

为验证仿真模型的准确性, 本文通过搭建树枝切割试验平台分别对直径为 10、15 和 20 mm 的树枝进行切割试验, 使用高速摄像机观察树枝切割过程, 记录切割力数据, 绘制相应的曲线图, 与仿真模型结果进行对比分析。

### 2.1 试验材料

本试验将‘石硖’品种龙眼树枝作为切割对象, 采样地点为广东省农业科学院果树研究所龙眼果园, 采集的枝条尽量通直, 直径变化连续均匀, 无病虫害, 节数少, 采样后剪去分枝装入帆布

袋密封保存。

本试验选用 SK-5 碳素工具钢刀片作为电动修剪机刀具, 执行标准为 JIS G4401-2009<sup>[25]</sup>, 其硬度: 退火  $\leq 187$  HB, 压痕直径  $\geq 4.40$  mm, 淬火  $\geq 62$  HRC。刀片主要参数尺寸为: 90 mm  $\times$  30 mm, 刀刃倾角 20°。

### 2.2 试验设备与试验方法

图 4 为数据测试系统逻辑图, 图 5 为本文搭建的树枝切割试验平台。本试验采用电动修剪机作为切割部件, 通过高速摄像机观察修剪过程特性, 刀具在切割树枝时发生轻微形变, 黏贴在动刀表面上的应变片也随之形变, 从而产生电阻的变化改变电位, 动态应变仪将捕捉变化电位进行数据采集, 数据采集卡将其处理并转换为切割力值, 通过 USB 接口线传输到计算机, 最终获得切割力数据。试验时, 使用电动修剪机分别对直径为 10、15 和 20 mm 的树枝进行切割试验, 每组试验重复 3 次, 记录切割力数据, 绘制相应的曲线图。图 5b 为自制电动修剪机切割平台, 该平台树枝导向管可将待切割树枝压紧, 导向作用好, 固定锁紧环可把电动修剪机稳定固定在机架尾端, 使待切割树枝进入电动修剪机的切割工位。图 5c 为应变片接法示意图, 由文献 [26] 可知测试电桥采用半桥接法, 接入 2 个相同阻值应变片。其中一个应变片黏贴在动刀前刀面刀柄上, 黏贴位置需满足: 1) 远离动刀作业区域, 避免剪枝过程中应变片与树枝接触出现失效的情况,

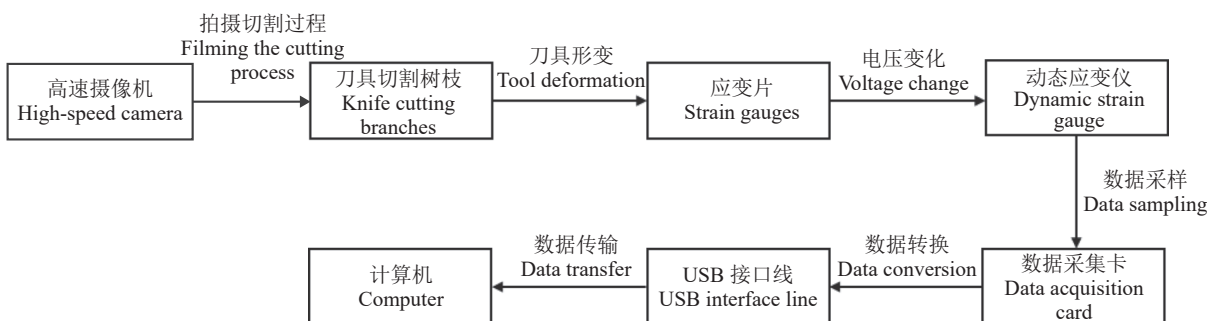
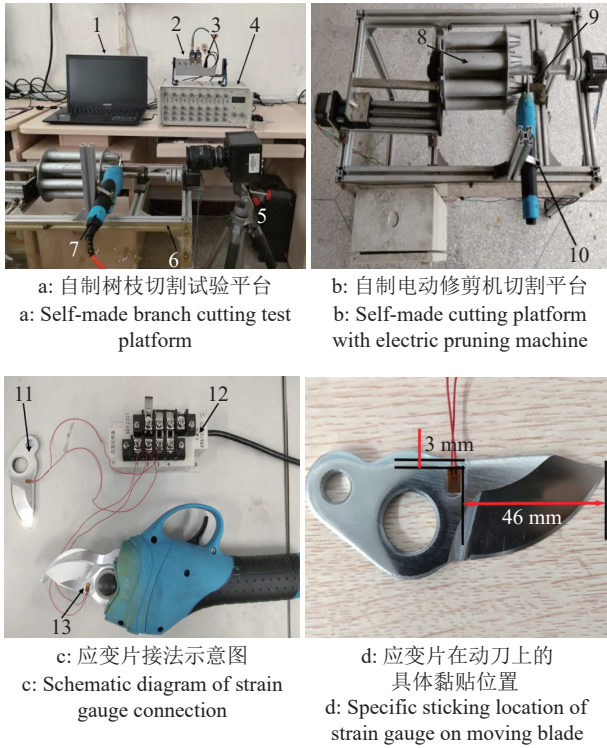


图 4 数据测试系统逻辑图

Fig. 4 Logic diagram of data test system



1: 计算机; 2: cDAQ-9174 型 NI 机箱; 3: NI9234 型模拟量数据采集卡; 4: SDY2301 型动态应变仪; 5: FASTCAM Mini UX50 高速摄影机; 6: 自制电动修剪机切割平台; 7: 舒畅 SC-3601 型电动修剪机; 8: 树枝导向管; 9: 待切割树枝; 10: 固定锁紧环; 11: 未工作的动刀; 12: 动态应变仪桥盒; 13: 应变片

1: Computer; 2: cDAQ-9174 NI chassis; 3: NI9234 analog quantity data acquisition card; 4: SDY2301 dynamic strain gauge; 5: FASTCAM Mini UX50 high-speed camera; 6: Self-made cutting platform with electric pruning machine; 7: Shuchang SC-3601 electric pruning machine; 8: Branch guide tube; 9: Branch to be cut; 10: Fixed locking ring; 11: Unworking moving blade; 12: Dynamic strain gauge bridge box; 13: Strain gauges

图 5 切割试验平台  
Fig. 5 Cutting test platform

2) 应变片所测数据免受刀具变形的影响; 另一个应变片作为标记值贴到未工作动刀上的相同位置, 应变片具体黏贴位置如图 5d 所示。

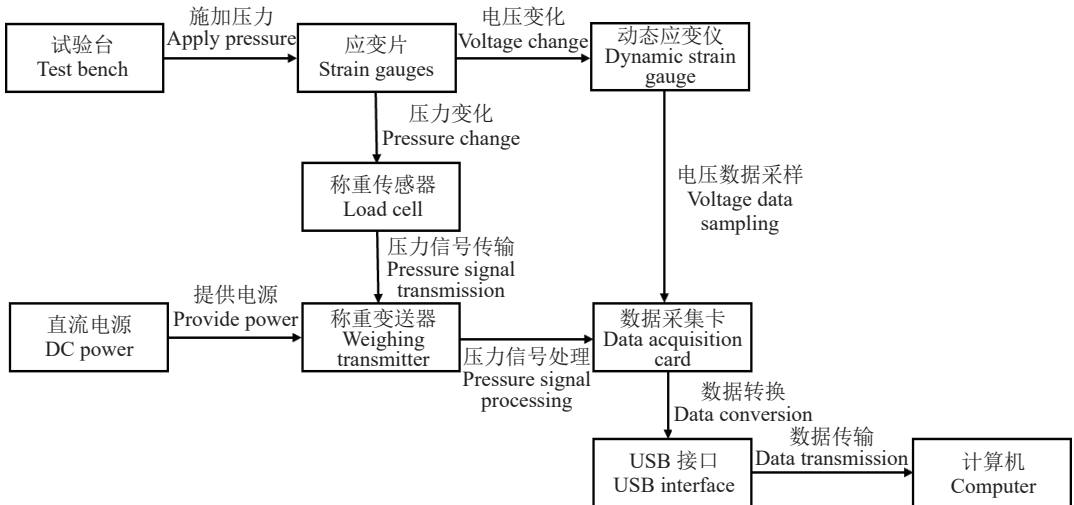
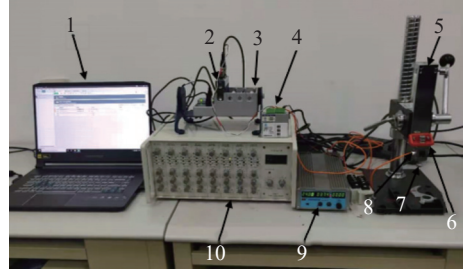


图 7 应变片标定逻辑图  
Fig. 7 Logic diagram of strain gauge calibration

图 6 为自行搭建的应变片标定平台, 为得到准确的剪切力数据, 需要通过应变片标定试验确定桥路输出电压与压力的关系。



1: 计算机; 2: NI9234 型模拟量数据采集卡; 3: cDAQ-9174 型 NI 机箱; 4: 500 系列智能数字称重变送器; 5: 试验台; 6: 3D 打印连接件; 7: 螺栓; 8: DYLY-107 型称重传感器; 9: KPS3010 型直流稳压电源; 10: SDY2301 型动态应变仪

1: Computer; 2: NI9234 analog quantity data acquisition card; 3: cDAQ-9174 NI chassis; 4: 500 series intelligent digital weighing transmitter; 5: Test bench; 6: 3D printing connector; 7: Bolt; 8: DYLY-107 load cell; 9: KPS3010 DC regulated power supply; 10: SDY2301 dynamic strain gauge

图 6 应变片标定平台  
Fig. 6 Strain gauge calibration platform

图 7 为应变片标定逻辑图, 通过手动转动试验台的摇杆, 使连接在试验台上的螺栓和称重传感器向下运动, 螺栓对刀具黏贴好的应变片施加压力, 应变片产生形变, 称重传感器接受压力信号, 并传输至智能数字称重变送器进行处理, 数据采集卡将其转换为压力值; 同时应变片由于电阻值的变化而改变电位, 动态应变仪将捕捉到的变化电位进行数据采集, 数据采集卡将其处理并转换为电压值, 两者通过 USB 接口线将数据传输到计算机, 最终获得压力和电压数据。

图 8 为应变片标定试验结果, FlexLogger 软件可以直接换算压力值和电压值, 故不必将电压值

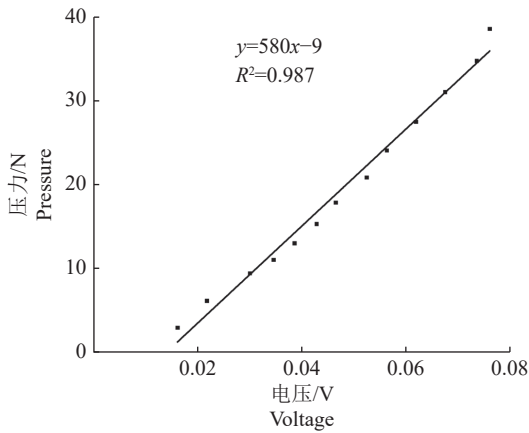


图 8 应变片标定试验结果

Fig. 8 Strain gauge calibration test result

转换成应变值。用 FlexLogger 软件设置对应参数,斜率为 0.58 kN/V,偏移为-0.009 kN。

### 2.3 试验结果与仿真结果对比分析

2.3.1 切割过程对比分析 本文以切割 20 mm 直径树枝为例,将高速摄像机拍摄的试验切割过程(图 9)与仿真切割过程(图 10)结合分析,可知试验切割过程与仿真切割过程都可分为 5 个阶段:挤压阶段、切入剪切阶段、稳定剪切阶段、剪断阶段、树枝振动阶段。

在挤压阶段(图 9a、10a)中,动刀片开始接触

树枝,动刀片刀刃部分和定刀对树枝进行挤压,树枝发生弹塑性变形。

在切入剪切阶段(图 9b、10b)中,动刀片开始切入树枝,树枝出现切口,受到刀具的挤压作用增强,动刀片本身的厚度会挤开两侧的树枝,掉落树枝部分在切口处产生弯折变形。

在稳定剪切阶段(图 9c、10c)中,动刀片平稳切入,树枝切口扩大,倾斜程度增加,动刀片对树枝的挤压和摩擦作用减弱,树枝切口处弯折变形增强,树枝即将断裂。

在剪断阶段(图 9d、10d)中,树枝从残留小部分断口到完全断裂。

在树枝振动阶段(图 9e、10e)中,树枝已经断裂,但动刀片还未完全穿过树枝截面,树枝固定一端仍与动刀片后刀面作用,引起树枝振动。

2.3.2 切割力对比分析 图 11 为 20 mm 直径树枝切割力的试验曲线与仿真曲线,现以试验曲线为例分析,切割过程中刀具受力总体先增加后减少,当切割力达到最大值后开始下降,达到低点后小幅度波动直至为 0。

$A_1B_1$  曲线段为挤压阶段,当动刀片开始接触树枝时,会将树枝推向定刀,动刀片刀刃部分和定刀对树枝进行挤压,树枝发生弹塑性变形,切割力不

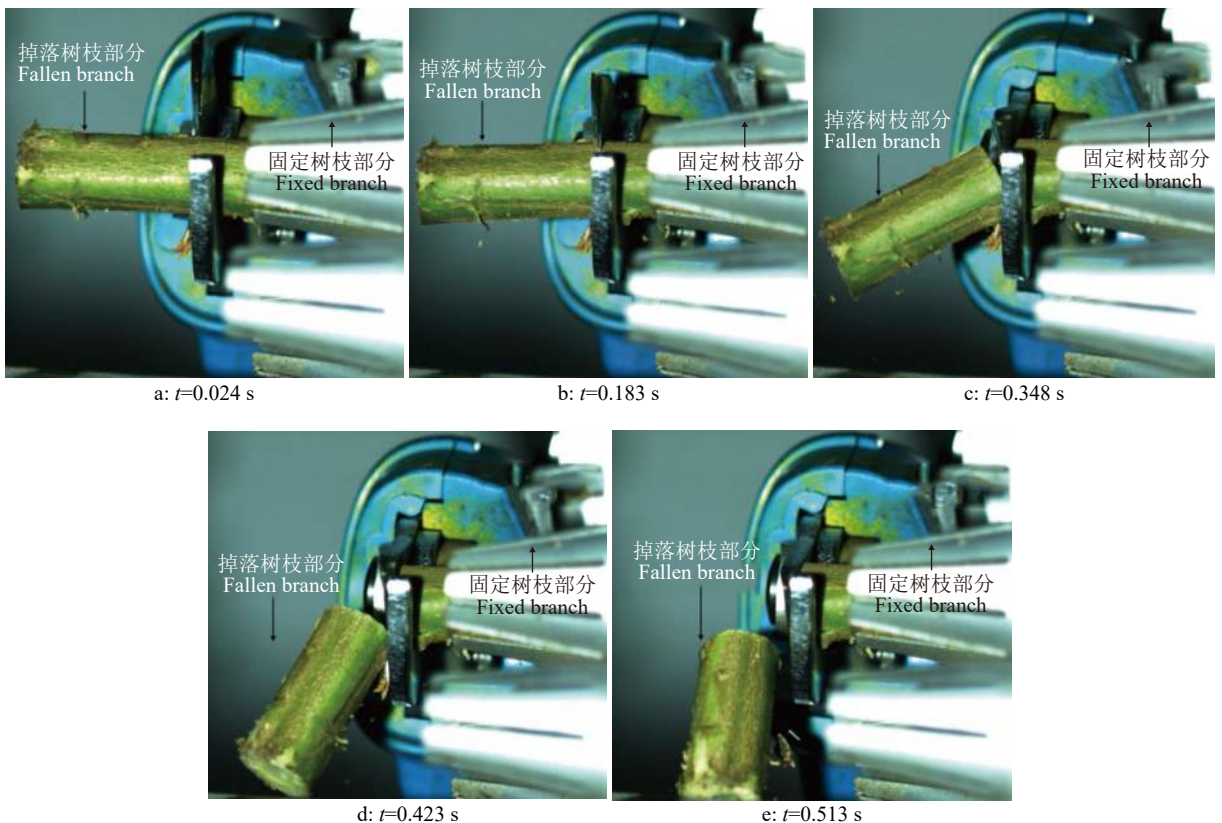


图 9 20 mm 直径树枝的试验切割过程

Fig. 9 Test cutting process of 20 mm diameter branches

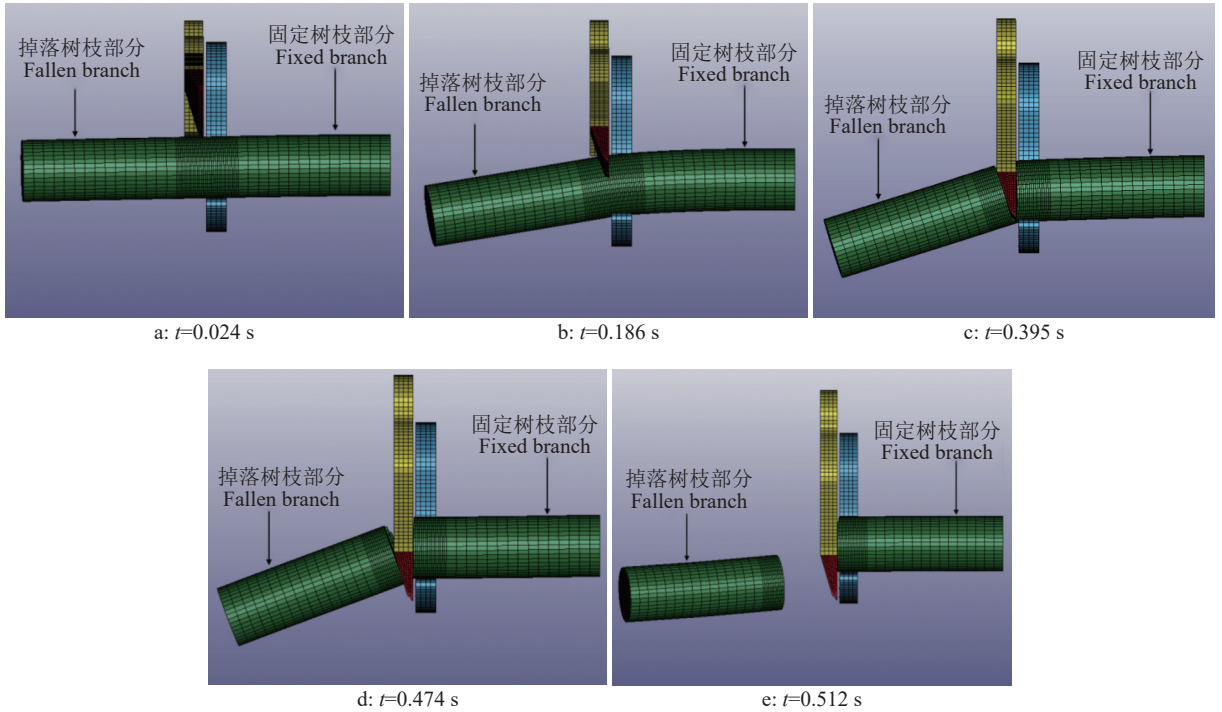


图 10 20 mm 直径树枝的仿真切割过程

Fig. 10 Simulation cutting process of 20 mm diameter branches

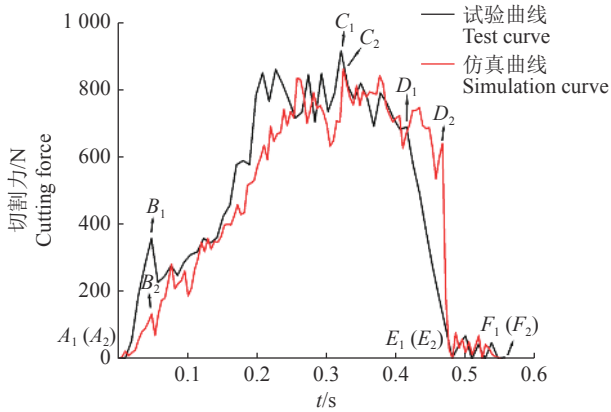


图 11 20 mm 直径树枝切割力的试验曲线与仿真曲线

Fig. 11 Test and simulation curves of cutting force for 20 mm diameter branches

断增大。

$B_1C_1$ 、 $C_1D_1$  曲线段统称为剪切阶段, 刀具受力总体先增加后减少, 当切割力达到最大值后开始下降, 且过程中伴有切割力的突升突降, 这是由于此阶段不是纯剪切状态, 树枝还会受到挤压、弯折等变形。

$B_1C_1$  曲线段为切入剪切阶段, 动刀片开始切入

树枝, 树枝不仅受到动刀片刀刃部分和定刀的挤压, 还受到动刀片前后刀面的挤压, 挤压作用增强, 当树枝所受作用力超过其弹塑性变形后开始发生垂直树枝方向的剪切, 由于刀刃存在厚度会挤开两侧的树枝, 切割过程中掉落树枝部分对切口处产生弯矩, 发生弯折变形, 同时由于弯矩的存在, 树枝出现微小裂纹并不断向内部扩展延伸, 树枝断裂过程是剪切、弯曲和裂纹扩展交替进行。

$C_1D_1$  曲线段为稳定剪切阶段, 随着动刀片的稳定切入, 树枝切口扩大, 树枝倾斜程度增加, 动刀片前刀面对树枝的挤压作用减弱, 同时在掉落树枝部分重力的作用下, 树枝切口处弯折变形增强, 弯矩增加, 裂纹扩展加速, 故刀具受力在达到最大值后减小。

$D_1E_1$  曲线段为剪断阶段, 此阶段从树枝残留小部分断口  $D_1$  点到树枝完全断裂  $E_1$  点, 掉落树枝部分在重力和动刀片作用下与刀具迅速脱离, 切割力迅速下降, 在树枝完全断裂处动刀片与掉落树枝不再发生作用, 切割力达到此阶段最低点。

$E_1F_1$  曲线段为树枝振动阶段, 树枝已经断裂, 但动刀片还未完全穿过树枝截面, 树枝固定一端仍与刀具接触, 树枝掉落的瞬间由于冲击的影响, 引起固定端树枝的振动, 对动刀片后刀面产生水平方向的冲击, 故切割力在达到上一阶段最低点后小幅度波动直至为 0。

由图 11 可知, 仿真曲线与试验曲线趋势大致

相同,但仿真曲线剪断阶段  $D_2E_2$  曲线段切割力下降速率更快,这是由于仿真时树枝被设定为圆柱弹性体,材料均匀,掉落部分树枝能够迅速脱离,而实际试验中树枝在断裂时由于表皮的存在,掉落部分树枝脱离速度减缓。

将实际试验数据与仿真数据进行比较,从表 1 对比可知,当树枝直径为 10、15 和 20 mm 时,刀具实际峰值切割力比仿真峰值切割力分别增加 18.9、38.8 和 61.0 N,相对误差分别为 7.8%、6.5% 和 6.6%。实际试验与仿真试验的刀具峰值切割力最大相对误差为 7.8%,平均相对误差为 7.0%,表明本文所建立的树枝切割过程仿真模型与实际情况基本符合,具有一定的参考价值。实际峰值切割力比仿真峰值切割力略大,且趋势大致相同,实际峰值切割力和仿真峰值切割力产生误差的原因有:1) 仿真时设定树枝材料均匀,而实际树枝材料包括表皮、韧皮部和髓等部分,组成复杂;2) 与仿真模型相比,实际试验切割过程树枝受挤压—剪切—弯曲多种受力形式,受力更加复杂;3) 仿真模型中动、静摩擦因数等参数的设置与实际参数可能存在误差。

表 1 实际试验与仿真试验的峰值切割力

Table 1 Peak cutting force of actual test and simulation test

树枝直径/mm Branch diameter	实际峰值切割力/N Actual peak cutting force	仿真峰值切割力/N Simulated peak cutting force	相对误差/% Relative error
10	241.3	222.4	7.8
15	592.8	554.0	6.5
20	923.0	862.0	6.6

### 3 仿真应力分析

本文通过 LS-PREPOST 后处理模块动态观察树枝切割过程,分析动刀片、树枝、定刀在切割过程中的应力分布、修剪过程特性及切割机理,确定最大等效应力出现的区域。

#### 3.1 动刀片应力分析

图 12 为 20 mm 直径树枝动刀片等效应力-时间曲线,图 13 为 20 mm 直径树枝不同时刻动刀片等效应力分布。由图 12、13 可知:切割过程中动刀片等效应力总体先增加,在达到最大值后降低,随后出现波动,在树枝断裂时等效应力迅速下降达到最低点,然后出现近似直线的波动。动刀片最大等效应力出现在刀刃附近,应力值为 132.86 MPa,远小于刀具材料 SK-5 的屈服极限应力 930 MPa,说明动刀片在切割树枝时不会发生失效。此外

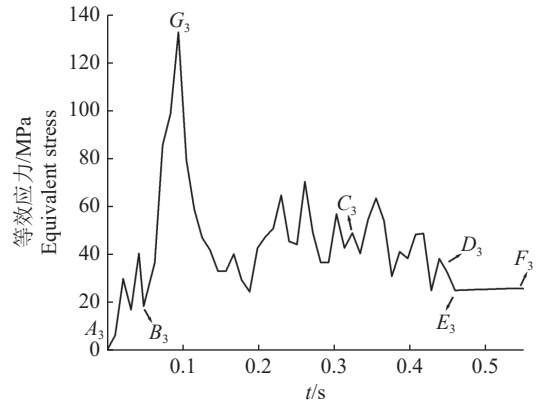


图 12 20 mm 直径树枝的动刀片等效应力-时间曲线

Fig. 12 Equivalent stress-time curve of moving blade for 20 mm diameter branches

10 和 15 mm 直径树枝动刀片最大等效应力分别为 84.35 和 104.26 MPa,不会发生失效。

由图 12 挤压阶段  $A_3B_3$ (对应图 13a) 可知,动刀片刀刃部分开始接触、挤压树枝,树枝发生弹塑性变形,对刀刃部分产生反作用力,动刀片等效应力增加。

由图 12 切入剪切阶段  $B_3C_3$ (对应图 13b) 可知,动刀片刀刃部分切入树枝,树枝产生变形出现切口,等效应力迅速增加,达到整个切割过程的最大值,这是由于树枝切口包裹刀刃部分,刀刃部分受力集中,产生了较大的集中应力<sup>[27-28]</sup>, $G_3$  为应力集中点,应力集中对构件的疲劳寿命影响很大,容易造成刀具刀刃处局部疲劳破损,可能出现刀具崩刃、断裂等现象,为防止刀具因应力集中造成的破坏,可以对刀具刀刃部分作喷丸、氮化处理,增强刀具表面疲劳强度,也可以通过改变刀具的外形降低应力集中系数。随着动刀片不断切入树枝,动刀片与树枝的接触面积增大,刀刃处的应力集中消失,应力迅速下降并趋于均匀,等效应力曲线平稳波动,这是由于树枝在动刀片的剪切、挤压作用下,出现裂纹萌生和扩展,在此过程中树枝在裂纹萌生时受力最大,在裂纹扩展时力值迅速下降<sup>[29]</sup>,而树枝断裂过程是树枝受力和裂纹萌生扩展交替进行,故等效应力曲线平稳波动。

由图 12 稳定剪切阶段  $C_3D_3$ (对应图 13c) 可知, $C_3D_3$  与曲线段  $B_3C_3$  相似,树枝断裂过程是树枝受力和裂纹萌生扩展交替进行,曲线继续波动。

由图 12 剪断阶段  $D_3E_3$ (对应图 13d) 可知,此



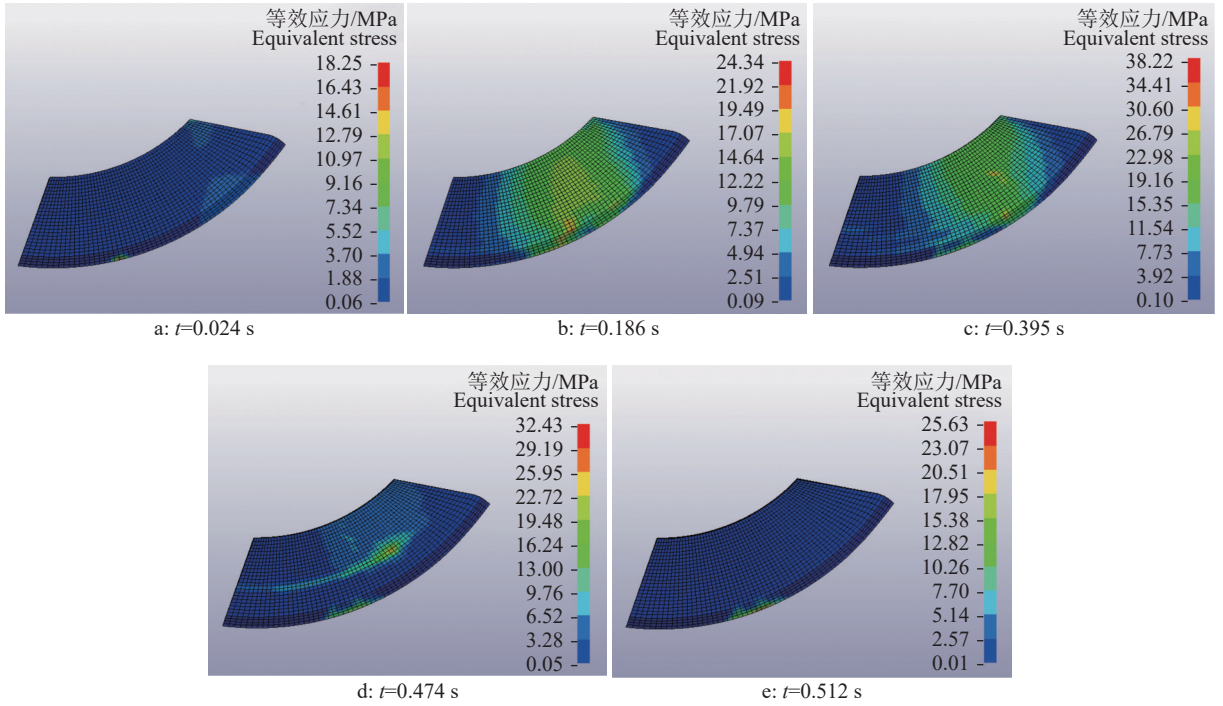


图 13 切割 20 mm 直径树枝不同时刻动刀片等效应力分布

Fig. 13 Equivalent stress distribution on moving blade at different times during cutting 20 mm diameter branches

阶段从树枝残留小部分断口到树枝完全断裂, 掉落树枝部分在动刀片刀刃部分作用下与刀具迅速脱离, 动刀片等效应力迅速下降, 达到此阶段的最低点, 但不为 0, 这是由于在树枝断裂时, 动刀片仍与树枝固定一端接触产生轻微的挤压作用。

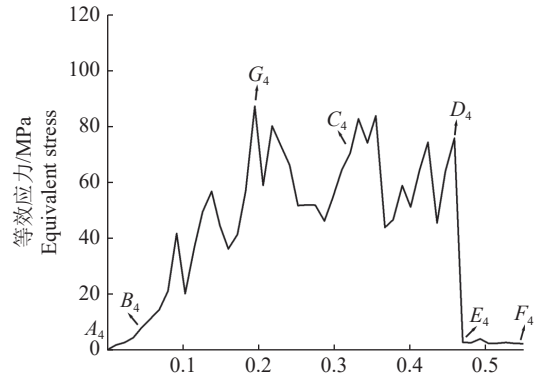
由图 12 树枝振动阶段  $E_3F_3$ (对应图 13e) 可知, 树枝已经断裂, 动刀片继续向下运动, 但还未完全穿过树枝截面, 树枝固定一端断口略不平整, 只有少部分断口与刀具接触, 接触面积少, 同时树枝固定一端存在小幅度摆动, 树枝与刀具存在间断性接触, 故等效应力在达到最低点后出现近似直线的波动。

### 3.2 树枝应力分析

图 14 为 20 mm 直径树枝下树枝等效应力-时间曲线, 图 15 为 20 mm 直径树枝下不同时刻树枝等效应力分布。由图 14、15 可知: 切割过程中树枝等效应力总体先增加后减少, 且伴有等效应力的突升突降, 在树枝断裂时等效应力迅速下降, 在达到最低点后开始小幅度波动。树枝最大等效应力出现在树枝切口附近, 应力值为 95.81 MPa。此外 10 和 15 mm 直径树枝下树枝最大等效应力分别为 111.80 和 121.94 MPa。

由图 14 挤压阶段曲线段  $A_4B_4$ (对应图 15a) 可知, 树枝受到动刀片刀刃部分和定刀的挤压后发生弹塑性变形, 树枝等效应力增加。

由图 14 切入剪切阶段曲线段  $B_4C_4$ (对应图 15b) 可知, 动刀片刀刃部分切入树枝, 当树枝内



$A_4$  为切割起始点;  $B_4$  为挤压阶段切割力峰值点;  $C_4$  为最大切割力点;  $D_4$  表示树枝即将被剪断;  $E_4$  表示树枝完全被剪断;  $F_4$  表示整个切割过程结束

$A_4$  is the cutting starting point;  $B_4$  is the peak point of cutting force at extrusion stage;  $C_4$  is the maximum cutting force point;  $D_4$  indicates the branch is about to be cut;  $E_4$  indicates the branch is completely cut;  $F_4$  indicates the whole cutting process is over

图 14 20 mm 直径树枝的树枝等效应力-时间曲线

Fig. 14 Equivalent stress-time curve of branches for 20 mm diameter branches

应力超过其屈服极限时, 树枝出现切口产生变形, 等效应力迅速增加, 达到整个切割过程的最大值, 这是由于此阶段刀刃部分率先与树枝接触, 树枝表面形状急剧变化, 出现切口, 切口处应力局部增高, 产生较大集中应力,  $G_4$  为应力集中点。随后树枝切口扩大, 树枝倾斜程度不断增加, 掉落树枝部分并不是稳定向下倾斜运动, 而是在来回摆动中运动, 树枝受力不均, 故树枝等效应力曲线会出现突升突

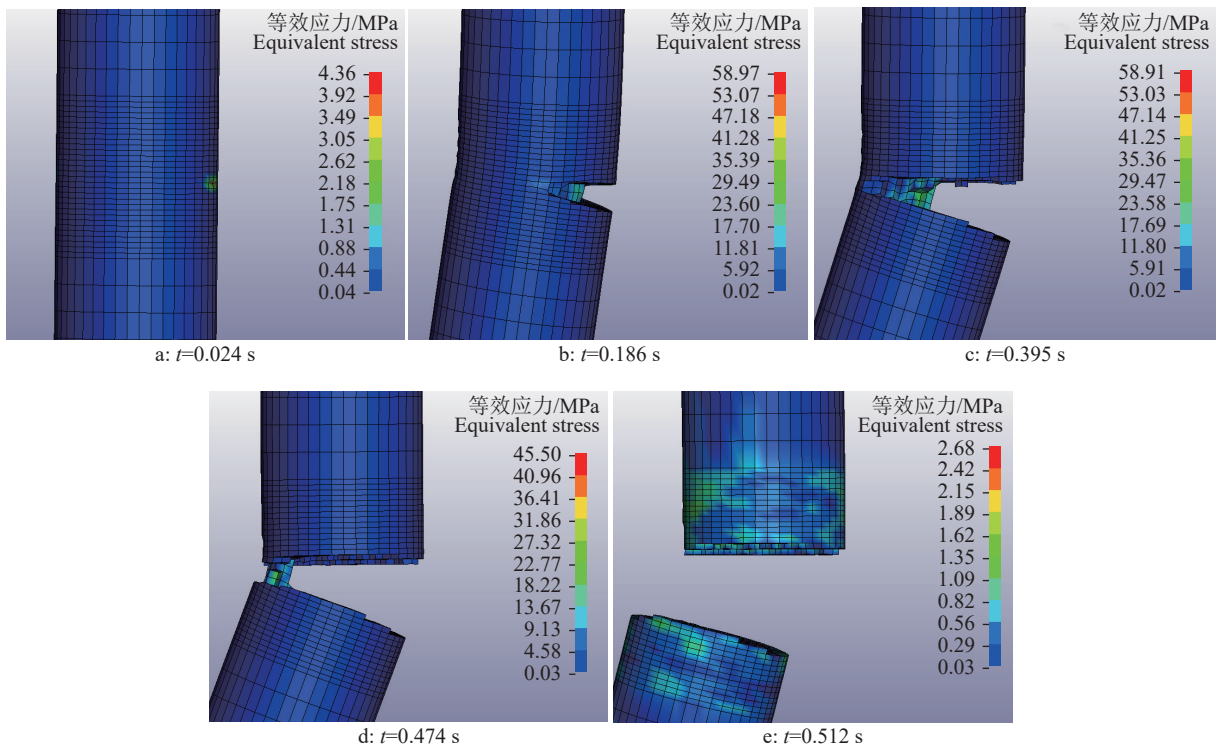


图 15 切割 20 mm 直径树枝不同时刻树枝等效应力分布

Fig. 15 Equivalent stress distribution on branches at different times during cutting 20 mm diameter branches

降现象。

由图 14 稳定剪切阶段曲线段  $C_4D_4$  (对应图 15c) 可知,  $C_4D_4$  与曲线段  $B_4C_4$  相似, 掉落树枝部分在来回摆动中向下运动, 曲线段继续突升突降。

由图 14 剪断阶段曲线段  $D_4E_4$  (对应图 15d) 可知, 此阶段树枝从残留小部分断口到完全断裂, 树枝切口受到动刀片的剪切、挤压作用逐渐消失, 树枝固定一端与动刀片后刀面接触受到轻微的挤压作用, 故树枝等效应力迅速下降, 达到此阶段的最低点。

由图 14 树枝振动阶段  $E_4F_4$  (对应图 15e) 可知, 此阶段树枝已经断裂, 但动刀片还未全部穿过树枝截面, 树枝固定一端因小幅度摆动, 与刀具间断性接触, 故等效应力在达到最低点后开始小幅度波动。

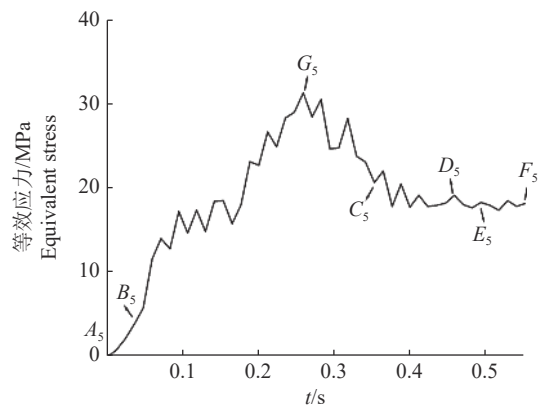
### 3.3 定刀应力分析

图 16 为 20 mm 直径树枝下定刀等效应力-时间曲线, 图 17 为 20 mm 直径树枝下不同时刻定刀等效应力分布。由图 16、17 可知: 切割过程中定刀等效应力总体先增加后减少, 当等效应力达到最大值后, 开始下降至最低点, 然后小幅度波动。定刀最大等效应力出现在定刀切口附近, 应力值为 31.41 MPa, 远小于刀具材料 SK-5 的屈服极限应力 930 MPa, 说明定刀在切割树枝时不会发生失效。此外 10 和 15 mm 直径树枝下定刀最大等效应力分

别为 25.54 和 34.80 MPa, 不会发生失效。

由图 16 挤压阶段曲线段  $A_5B_5$  (对应图 17a) 可知, 定刀受到动刀片施加于树枝作用力的挤压, 定刀等效应力增加。

由图 16 切入剪切阶段曲线段  $B_5C_5$  (对应图 17b) 可知, 动刀片开始切入树枝, 树枝切口包裹刀刃部分, 定刀受到动刀片施加于树枝作用力的挤



$A_5$  为切割起始点;  $B_5$  为挤压阶段切割力峰值点;  $C_5$  为最大切割力点;  $D_5$  表示树枝即将被剪断;  $E_5$  表示树枝完全被剪断;  $F_5$  表示整个切割过程结束

$A_5$  is the cutting starting point;  $B_5$  is the peak point of cutting force at extrusion stage;  $C_5$  is the maximum cutting force point;  $D_5$  indicates the branch is about to be cut;  $E_5$  indicates the branch is completely cut;  $F_5$  indicates the whole cutting process is over

图 16 20 mm 直径树枝的定刀等效应力-时间曲线

Fig. 16 Equivalent stress-time curve of fixed knife for 20 mm diameter branches

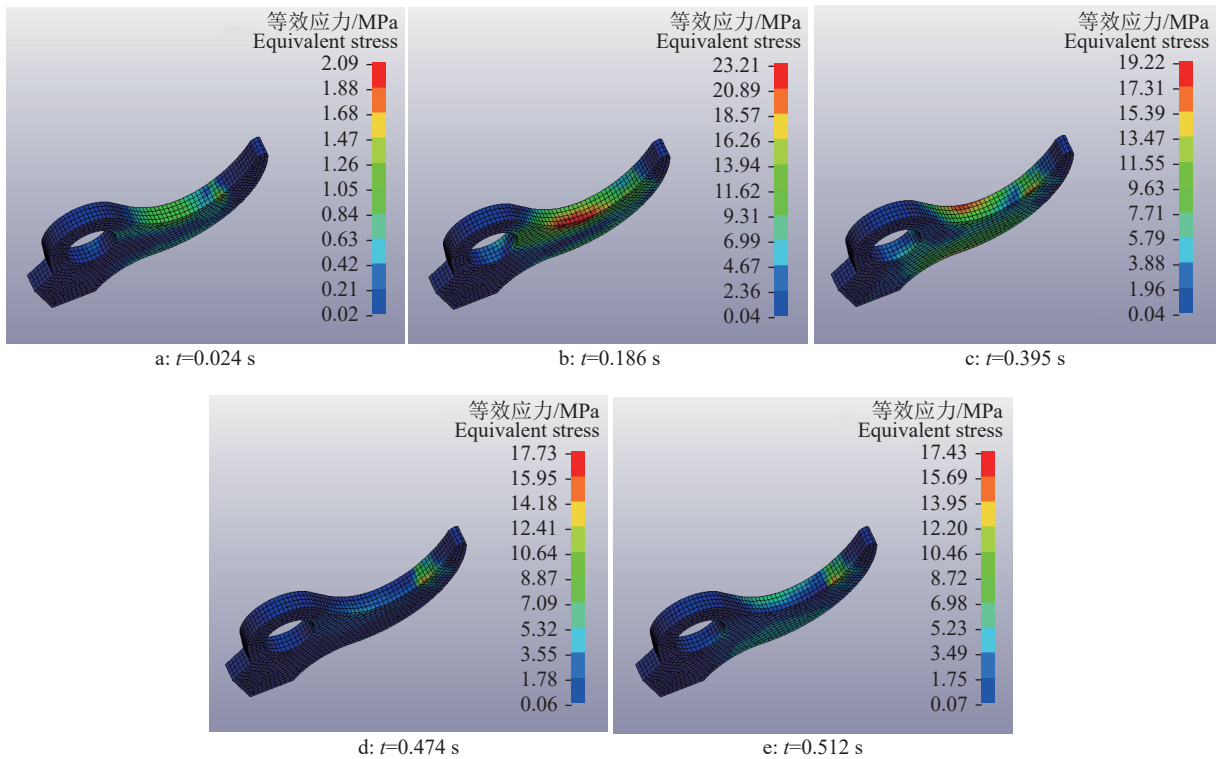


图 17 切割 20 mm 直径树枝不同时刻定刀等效应力分布

Fig. 17 Equivalent stress distribution on fixed knife at different times during cutting 20 mm diameter branches

压增强,定刀等效应力增加,同时动刀片会挤开两侧的树枝,掉落树枝部分在切口处发生弯曲,对定刀切口与刀背相交附近产生作用,此处同时受树枝挤压和树枝弯曲的作用,定刀切口附近应力局部增高,产生应力集中,等效应力达到最大值,  $G_5$  为应力集中点。随着动刀片切入深度的增加,在动刀片刀刃倾角的影响下,刀刃部分受到的挤压力和摩擦力减小<sup>[30]</sup>,故定刀受到动刀片施加于树枝作用力的挤压同样减小,又由于树枝在切割过程中一直处于小浮动摆动状态,定刀与树枝存在间断性接触且受力不均,定刀等效应力波动下降。

由图 16 稳定剪切阶段曲线段  $C_5D_5$ (对应图 17c)可知,  $C_5D_5$  与曲线段  $B_5C_5$  相似,定刀受到动刀片施加于树枝作用力的挤压减小,同时定刀与树枝存在间断性接触且受力不均,等效应力继续波动下降。

由图 16 剪断阶段曲线段  $D_5E_5$ (对应图 17d)可知,由于树枝处于断裂过程,定刀受到掉落树枝部分的压缩、挤压作用逐渐消失,仅轻微受到动刀片后刀面施加于树枝固定一端作用力的挤压,故树枝等效应力缓慢下降,达到此阶段的最低点但不为 0。

由图 16 树枝振动阶段  $E_5F_5$ (对应图 17e)可知,树枝已经断裂,但动刀片还未完全穿过树枝截面,因树枝固定一端小幅度摆动,定刀与其间断性接

触,故等效应力在达到最低点后开始小幅度波动。

## 4 结论

1) 树枝切割过程可分为 5 个阶段:挤压阶段、切入剪切阶段、稳定剪切阶段、剪断阶段、树枝振动阶段。

2) 实际试验切割力比仿真试验略大,当树枝直径分别为 10、15 和 20 mm 时,刀具实际峰值切割力比仿真峰值切割力分别增加 18.9、38.8 和 61.0 N,相对误差分别为 7.8%、6.5% 和 6.6%,实际试验与仿真试验的刀具峰值切割力最大相对误差为 7.8%,平均相对误差为 7.0%,实际试验与仿真试验所得切割力曲线吻合,树枝切割过程仿真模型准确。

3) 切割过程中动刀片、树枝和定刀最大等效应力出现在刀刃、树枝和定刀切口附近。10、15 和 20 mm 直径树枝下动刀片最大等效应力分别为 84.35、104.26 和 132.86 MPa,树枝最大等效应力分别为 111.80、121.94 和 95.81 MPa,定刀最大等效应力分别为 25.54、34.80 和 31.41 MPa,动刀片、定刀最大等效应力远小于刀具材料屈服极限,刀具不会发生失效。

### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版

- 社, 2020.
- [2] 周冬菊. 果树整形修剪技术[J]. *现代农业科技*, 2021(14): 87-88.
- [3] 程新辉, 孙红梅, 史洪丹. 新时期果树修剪的意义及技术要领初探[J]. *农业开发与装备*, 2021(4): 118-119.
- [4] 秦喜田, 刘学峰, 任冬梅, 等. 我国果园生产机械化现状及其发展趋势[J]. *农业装备与车辆工程*, 2019, 57(S1): 35-38.
- [5] 马静, 梁堃. 果树枝条修剪机械化及自动化研究进展[J]. *广东蚕业*, 2020, 54(9): 84-86.
- [6] PONI S, TOMBESI S, PALLIOTTI A, et al. Mechanical winter pruning of grapevine: Physiological bases and applications[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 204: 88-98.
- [7] ALENCAR A S C, ROCHA NETO A R, GOMES J P P. A new pruning method for extreme learning machines via genetic algorithms[J]. *Applied Soft Computing*, 2016: 44101-44107.
- [8] 郑永军, 江世界, 陈炳太, 等. 丘陵山区果园机械化技术与装备研究进展[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(11): 1-20.
- [9] 夏侯炳, 盛玲玲, 宋淑然, 等. 基于层次分析的山地果园生产机械化评价研究[J]. *农机化研究*, 2020, 42(5): 250-257.
- [10] 孙健峰, 霍东飞, 李波, 等. 基于仿生微结构的电动修剪机刀具磨损性能研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(S2): 593-602.
- [11] 吴良军, 段洁利, 郭海龙, 等. 果园电动修剪机剪切功耗影响因素的试验研究[J]. *农业装备与车辆工程*, 2020, 58(6): 39-43.
- [12] SUN J, LI B, XING K, et al. Study on anti-friction mechanism of canna-leaf biomimetic micro-textured fruit tree[J]. *Agronomy*, 2020, 10(12): 1866.
- [13] 刘晓敏, 赵登超, 罗林辉, 等. 仿生物体表非光滑微结构形态刀具应用及发展[J]. *机械设计与研究*, 2019, 35(3): 114-118.
- [14] 孙健峰, 杨洲, 张庆茂, 等. 果园电动修剪刀片摩擦磨损性能研究[J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(4): 371-373.
- [15] 王芳, 付业彬, 杨铮, 等. 向日葵茎秆切割能耗实验研究[J]. *农机化研究*, 2022, 44(6): 194-198.
- [16] 王慰祖, 吴良军, 杨洲, 等. 树枝直刃剪切数学模型与试验[J]. *华南农业大学学报*, 2016, 37(4): 105-111.
- [17] 康峰, 仝思源, 张汉石, 等. 苹果枝条往复式切割剪枝参数分析与试验[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(16): 9-16.
- [18] 张燕青, 崔清亮, 郭玉明, 等. 谷子茎秆切割力学特性试验与分析[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(4): 146-155.
- [19] VU V D, NGO Q H, NGUYEN T T, et al. Multi-objective optimisation of cutting force and cutting power in chopping agricultural residues[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 191: 107-115.
- [20] MATHANKER S K, GRIFT T E, HANSEN A C. Effect of blade oblique angle and cutting speed on cutting energy for energycane stems[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 133: 64-70.
- [21] 刘威威. 荔枝采摘机器人末端执行器优化设计及仿真分析[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.
- [22] 吴良军. 龙眼树枝剪切机理与修剪机具优化研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2014.
- [23] KOLLMANN F F P, COTE W A JR. 木材学与木材工艺学原理: 实体木材[M]. 江良游, 译. 北京: 中国林业出版社, 1991: 55-67.
- [24] 黄汉东, 王玉兴, 唐艳芹, 等. 甘蔗切割过程的有限元仿真[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(2): 161-166.
- [25] 日本工业标准调查会. JIS G4401-2009: 碳素工具钢[S]. 东京: 日本规格协会, 2009.
- [26] 赵锋. 微型气力式砍蔗器的设计与研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2007.
- [27] 庞声海. 盘刀式切碎器设计的数学解析法[J]. *农业机械学报*, 1981, 12(2): 43-51.
- [28] 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选用[J]. *华中农学院学报*, 1982, 1(2): 64-69.
- [29] 任宁. 木材微观构造对受载断裂的影响方式研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.
- [30] 李波. 基于仿生凸包型微结构果树修剪刀具减摩机理研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2020.

【责任编辑 庄 延】