

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第9期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.09.022

论文标题：链锯切削毛竹性能试验与机理分析

作　　者：陈 杨，罗武生，邓昭辉，等

收稿日期：2026-01-07

引文格式：陈杨,罗武生,邓昭辉,等.链锯切削毛竹性能试验与机理分析[J].中南林业科技大学学报,2026,46(9):239-250.

Chen Y, Luo W S, Deng Z H, et al. Performance test and mechanism analysis of moso bamboo chainsaw cutting[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2026,46(9):239-250.

相关论文推荐

Recommended articles

切削速度对CrN 涂层刀具铣削饰面刨花板表面质量及磨损的影响

Effect of cutting speed on cutting surface quality and tool wear during the milling of decorative particleboard using CrN coated tool

陶瓷刀具铣削高密度纤维板的磨损分析研究

Research on wear mechanism of ceramic tool in milling high density fiberboard

基于非支配排序与遗传算法的毛边锯材优化下锯算法研究

An optimized sawing study of burr sawn timber based on non-dominated sorting and genetic algorithm

毛边锯材智能加工装备控制系统设计与试验

Design and experiment of intelligent processing equipment control system for burr sawn timber

实木地板榫槽铣削力的试验分析

Experimental analysis on milling force of mortise and groove in solid-wood flooring

锯材/单板层积材混合正交胶合木力学性能研究

Mechanical performances of hybrid cross laminated timber fabricated by lumber/laminated veneer lumber

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.09.022
http: //qks.csuft.edu.cn

链锯切削毛竹性能试验与机理分析

陈 杨[a]，罗武生[a]，邓昭辉[a]，喻胜飞[b]，文 韬[a]
（中南林业科技大学 a. 机械与智能制造学院；b. 化学与化工学院，湖南 长沙 410004）

摘 要：【目的】为探明链锯切削毛竹过程中工艺参数对切削性能的影响规律，并建立适用于中空圆竹结构的机理表征方法。【方法】以 3 ～ 5 年生毛竹为试验对象，搭建链锯切削竹材试验台，选取链锯规格、竹材直径、进给速度和含水率作为试验因素，以峰值切削力和锯切比功为评价指标，开展单因素试验和 $L_9(3^4)$ 正交试验，并引入等效单齿平均切削厚度和归一化峰值切削力进行机理分析。【结果】含水率由 40% 增至 80% 时，峰值切削力由 48.14 N 降至 34.29 N，锯切比功由 13.4 J/cm^3 降至 8.1 J/cm^3；竹材直径由 70 mm 增至 110 mm 时，峰值切削力由 31.18 N 增至 52.4 N；进给速度由 8 mm/s 增至 32 mm/s 时，峰值切削力由 26.44 N 增至约 90 N，锯切比功在 24 mm/s 附近较低。各因素对峰值切削力的影响程度由大到小依次为进给速度、链锯规格、含水率、竹材直径；影响锯切比功的主次顺序为链锯规格、进给速度、含水率、竹材直径。等效单齿平均切削厚度由 0.07 mm 增至 0.41 mm 时，峰值切削力由 18.66 N 增至 101.51 N；归一化峰值切削力随等效单齿平均切削厚度的增大呈线性上升趋势，R^2 为 0.702。【结论】链锯切削毛竹峰值载荷主要受单齿切屑负荷控制，含水率、竹材直径和链锯规格对切削性能具有修正作用。等效单齿平均切削厚度与归一化峰值切削力可用于表征链锯切削毛竹的刀齿负荷和单位有效切削面积受力强度。

关键词：链锯；毛竹；峰值切削力；锯切比功；等效单齿平均切削厚度；归一化峰值切削力
中图分类号：S776 **文献标志码：**A **文章编号：**1673-923X(2026)09-0239-12

Performance test and mechanism analysis of moso bamboo chainsaw cutting

Chen Yang[a], Luo Wusheng[a], Deng Zhaohui[a], Yu Shengfei[b], Wen Tao[a]

(a. School of Mechanical and Intelligent Manufacturing; b. School of Chemistry and Chemical Engineering, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract:【Objective】To explore the effects of process parameters on the cutting performance of moso bamboo during chainsaw cutting, and to establish a mechanism characterization method applicable to hollow round bamboo structures.【Method】3-5-year-old moso bamboo was selected as the test material. A dedicated test bench for bamboo chainsaw cutting was constructed. Chainsaw specification, bamboo diameter, feed speed, and moisture content were selected as experimental factors, and peak cutting force and specific sawing energy were adopted as evaluation indices. Single-factor tests and $L_9(3^4)$ orthogonal array tests were conducted. In addition, the equivalent single-tooth average cutting thickness and normalized peak cutting force were introduced to carry out mechanism analysis.【Result】The results showed that when moisture content increased from 40% to 80%, peak cutting force decreased from 48.14 to 34.29 N, and specific sawing energy decreased from 13.4 to 8.1 J/cm^3. As bamboo diameter increased from 70 mm to 110 mm, peak cutting force increased from 31.18 to 52.40 N. When feed speed increased from 8 mm/s to 32 mm/s, peak cutting force increased from 26.44 to approximately 90 N, and specific sawing energy reached its relatively low value at around 24 mm/s. The orthogonal test results indicated that the factors affecting peak cutting force rank in descending order of influence magnitude as feed speed, chainsaw specification, moisture content and bamboo diameter. For specific sawing energy, the order of factor influence magnitude is chainsaw specification, feed speed, moisture content and bamboo diameter. Mechanism analysis revealed that when the equivalent single-tooth average cutting thickness increased from 0.07 mm to 0.41 mm, the peak cutting force increased from 18.66 to 101.51 N. The normalized peak cutting force exhibits a linear upward trend with the increase of equivalent single-tooth average cutting thickness, with a coefficient of determination R^2 of 0.702.【Conclusion】This study demonstrated that the peak cutting load of moso bamboo during chainsaw

收稿日期（Received）：2026-01-07 **修订日期**（Revised）：2026-04-01
基金项目：国家重点研发计划项目（2024YFD2200703）。
第一作者：陈杨（chenyang001106@163.com），硕士研究生。
通信作者：罗武生（luowusheng@csuft.edu.cn），副教授，博士，硕士研究生导师。
引文格式：陈杨 , 罗武生 , 邓昭辉 , 等 . 链锯切削毛竹性能试验与机理分析 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(9):239-250.
Chen Y, Luo W S, Deng Z H, et al. Performance test and mechanism analysis of moso bamboo chainsaw cutting[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(9):239-250.

cutting is mainly controlled by single-tooth chip load. Moisture content, bamboo diameter, and chainsaw specification exert a modifying effect on cutting performance. The equivalent single-tooth average cutting thickness and normalized peak cutting force can be used to characterize the cutter tooth load and the stress intensity per unit effective cutting area in the chainsaw cutting of moso bamboo.
Keywords: chainsaw; moso bamboo; peak cutting force; specific sawing energy; equivalent single-tooth average cutting thickness; normalized peak cutting force

毛竹是我国重要的竹类资源，具有生长周期短、再生能力强、力学性能优良和生态效益显著等特点，在建筑材料、家具制造、竹纤维制品及林业剩余物利用等领域具有广泛应用价值[1]。随着“以竹代木”“以竹代塑”的市场需求不断提升，毛竹采伐与初加工机械化水平对竹产业高质量发展具有重要影响[2]。然而，毛竹多分布于丘陵、山地等地形复杂的林地环境，传统人工及半机械化采伐仍存在劳动强度大、效率低、安全风险高和切口质量不稳定等问题[3-4]。因此，开展毛竹高效切削装备及切削机理研究具有实际意义。

链锯因具有切削速度快、割刃长度大、适应性强和便携性好等特点，被广泛应用于森林采伐、修枝、造材和农林剩余物处理等作业中[5]。目前，链锯及电链锯的研究主要集中在锯链结构参数[6]、链速[7]、进给速度、切削深度、链条锋利度、张紧状态、能耗和振动[8]等方面。Otto 等[9]指出，切削深度或单齿切屑厚度是影响链锯切削载荷和切削效率的重要因素。Maciak 等[10]发现，链锯切削力具有明显波动特征，刀齿实际接触时间和载荷变化会影响切削稳定性。Poje 等[11]指出，链条锋利度、张紧状态和电链锯类型会影响横切时间与能耗。国内研究则主要围绕电链锯锯切试验平台、锯切比功、锯齿温升和齿形参数优化等方面展开[12-13]。

与木材相比，竹材具有中空圆环结构、径向非均质、纤维分布梯度明显以及竹青、竹黄组织差异显著等特点，其切削过程更加复杂[14-15]。已有竹材切削相关研究表明，竹材的竹龄、含水率、密度、切割方向和切割角度均会影响切割强度与切割能耗[16]。在圆盘锯切、铣削和去枝、去梢等研究中，切削速度、进给速度、切削深度、刀具齿数和刀具角度等参数均会影响竹材切削力、切口质量和材料去除效率[17]。胡晓军等[18]指出，切削深度是影响毛竹铣削力的重要因素。谢文楚等[19]针对链锯切割毛竹时的竹青撕裂问题进行了链条和防撕裂机构优化。马锃宏等[20]分析了锯片转速和进给速度对毛竹去梢效果的影响。可见，毛竹切削过程受工艺参数、刀具结构、竹材结构和材料状态共同影响。

综上所述，现有链锯切削研究多以木材为对象，关于竹材切削研究则多集中于圆盘锯、铣削、去枝和去梢等方面，对链锯切削毛竹过程中的峰值切削力、锯切比功及机理表征研究仍不足。木材通常可近似视为连续实心材料，其链锯切削理论多基于单齿切屑厚度、切削深度和材料去除率等参数建立。而毛竹具有中空薄壁圆筒结构，竹青硬度高，竹壁径向组织梯度明显，锯链切入过程中有效接触路径、刀齿受力状态和撕裂破坏形式均不同于木材。因此，传统木材链锯切削理论难以直接表征毛竹切削过程中几何尺寸变化和局部高硬度组织影响，尤其是毛竹具有中空圆环结构，直接采用原始峰值切削力评价切削难度，难以消除竹材尺寸和锯缝宽度差异对结果可比性的影响。基于此，本文中以毛竹 *Phyllostachys edulis* 为研究对象，搭建链锯切削竹材试验台，开展链锯规格、竹材直径、进给速度和含水率的单因素及 $L_9(3^4)$ 正交试验，并引入等效单齿平均切削厚度和归一化峰值切削力，分析链锯切削毛竹过程中刀齿负荷与竹材结构对切削载荷的修正作用，为参数优化和高效低耗作业提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与参数测定

试验所用毛竹采自湖南宁乡毛竹种植基地，选取长势良好、无病虫害、外观通直的 3 ～ 5 年生毛竹，直径为 7 ～ 11 cm，在距地面 10 cm 处对竹材进行垂直截断，将其加工成长度 1 m 的竹段。新鲜毛竹的实测含水率通常为 50% ～ 60%[21]。

竹材含水率采用烘干称重法测定，测定方法参照 GB/T 15780—1995《竹材物理力学性质试验方法》[22]。为获得不同含水率水平的竹材试样，采伐后的竹段先用塑料薄膜密封保存，以减缓水分散失。低含水率试样采用室温通风阴干方式进行调节，高含水率试样采用喷雾补水后密封均湿的方式进行调节。调湿过程中定期称量竹段质量，并根据质量变化对试样含水率进行初步估算。试

样含水率接近目标水平后，继续密封均湿 24 h，使竹壁内外水分分布趋于稳定。切削试验完成后，在切削区域相邻位置截取小样，采用烘干称重法复测含水率，并以复测结果作为该试样的实际含水率。实测含水率达到相应目标含水率水平时，该组试验结果有效，否则剔除该组数据或重新制备试样进行试验。

除含水率外，竹材截面几何参数也是计算等效最大切削路径长度和归一化峰值切削力的重要基础，因此需对每根试样的外径、内径及壁厚进行测量。竹材外径和内径在切削试验前逐根测量，并采用游标卡尺在预定切削位置附近分别沿相互垂直的两个方向测定外径和内径，同时取 2 次测量结果的算术平均值作为该试样的等效外径（$D_{外}$）和等效内径（$D_{内}$）。考虑到毛竹截面存在椭圆度及壁厚不均匀性，本研究将竹材截面进行简化，近似等效为圆环截面。对于壁厚差异较明显、局部开裂或截面偏心严重的竹段予以剔除。后续等效最大切削路径长度（h_e）、有效切削面积（A_e）和归一化峰值切削力（K_F）均采用每根试样实测的 $D_{外}$和 $D_{内}$计算。

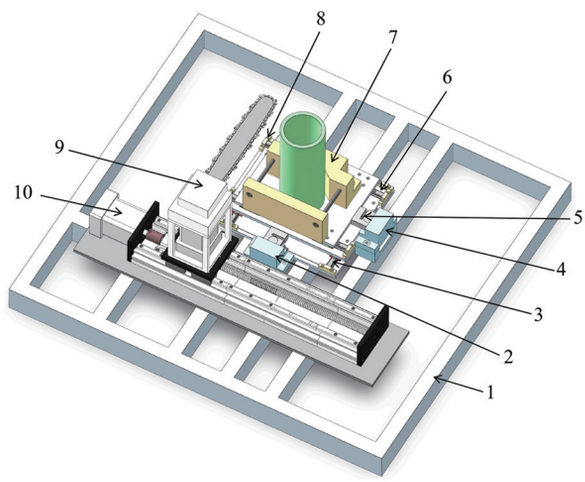
1.2　试验装置与工作原理

为探究各因素对链锯切削竹材切削力的影响规律，搭建链锯切削竹材试验平台。链锯切削力可分解为沿锯链运行方向的切向切削力和沿进给方向的法向切削力。本研究重点分析了切向主载荷，文中所称切削力或峰值切削力均指切向切削力及其峰值。

试验台由框架、数据采集系统、动力系统、传动系统和工件固定系统组成，结构及实物见图 1、图 2。框架采用 80 mm×80 mm 铝型材，数据采集系统包括压拉力传感器、变送器、计算机和 24 V DC 电源；动力系统由 21 V 无刷直流电机、减速机构和驱动链轮组成，传动系统由进给电机和直线模组组成，工件固定系统由安装板、导轨和夹具组成 [23]。

将待测锯链安装至直线模组上，选用额定直流电机实现对链锯驱动电机的控制。通过变频控制器控制直流电机转速，实现对进给速度的控制。试验过程中，压拉力传感器分别用于采集锯链运行方向和进给方向上的切削力信号，数据经采集系统传输至计算机后进行整理与分析 [24]。

为说明链锯切削竹材过程中切削力信号的典型变化特征，并明确峰值切削力的提取方式，选取代表性试验工况下的切削力时域曲线进行分析，结果如图 3 所示。由图 3 可知，链锯切削竹材过程中法向切削力和切向切削力均随刀齿切入和切出竹材而发生明显波动，其中切向切削力曲线的最大值定义为本研究所述峰值切削力。后续各工况下峰值切削力均由切向切削力原始信号中提取获得。在代表性工况下，峰值多出现在刀齿切入后至有效接触路径较大的阶段。



1. 试验台架 ; 2. S 型传感器（切向切削力）；3. 底部导轨；4. 传感器底座；5.S 型传感器（法向切削力）；6. 顶部导轨；7. 夹具；8. 挡板；9. 链锯；10. 进给直流电机。
1. Test bench frame; 2. S-type sensor (tangential cutting force); 3. Bottom guide rail; 4. Sensor base; 5. S-type sensor (normal cutting force); 6. Top guide rail; 7. Clamp; 8. Baffle plate; 9. Chainsaw; 10. Feed DC motor.

图 1　链锯切削试验台结构
Fig. 1　Structure diagram of the chainsaw cutting test bench

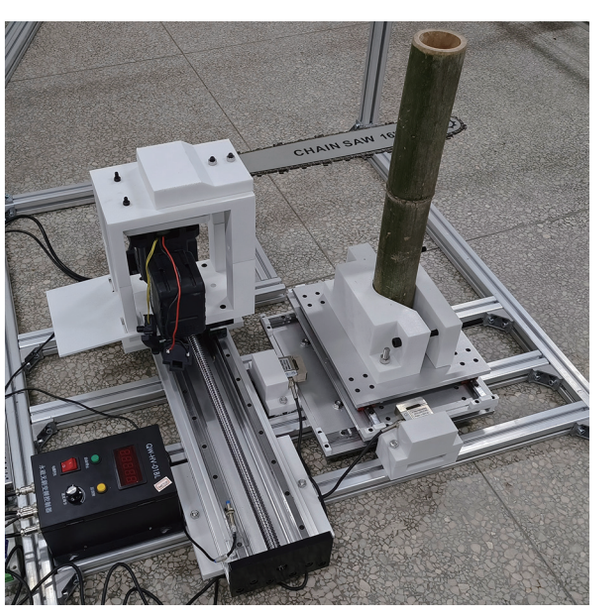


图 2　链锯切削试验台
Fig. 2　Physical image of the chainsaw cutting test bench

试验过程中同时测得进给方向分力和锯链运行方向分力。考虑到链锯切削功率由切向载荷与

链锯切削速度共同决定，且后续锯切比功、等效单齿平均切削厚度与归一化峰值切削力分析均围绕链锯切削主载荷展开，故本文中后续所称切削力或峰值切削力，均指总切削力在锯链运行方向上的分量，即切向切削力。

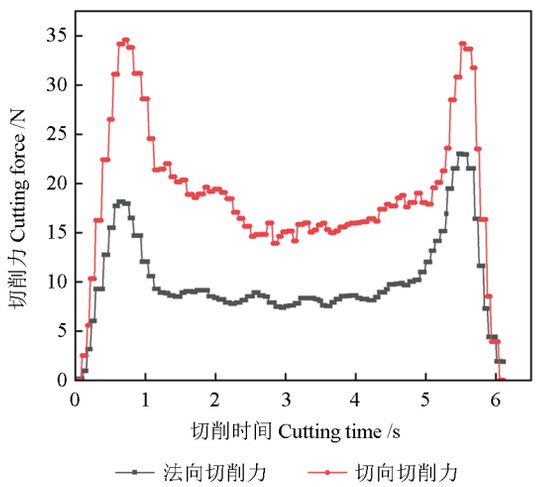


图 3　代表性切削力时域曲线

Fig. 3　Representative time-domain waveform of cutting force in chainsaw cutting

1.3　评价指标与机理表征方法

1.3.1　峰值切削力与锯切比功

峰值切削力反映链锯在切削竹材过程中沿锯链运行方向所需克服的最大载荷，锯切比功反映去除单位体积材料所消耗的能量。二者分别从受力水平和能耗水平评价链锯切削性能，对链锯结构优化及实现高效低耗作业具有重要意义。

由链锯切削原理可知，电链锯的锯切性能主要依据锯切比功（K）评价，锯切比功主要反映了电链锯锯切竹材的速度，锯切比功越小，链锯的工作效率越高，锯切速度越快 [25]。本研究采用峰值切削力与链速计算切削功率，并结合材料去除率计算等效锯切比功，用于不同工况间相对能耗水平的比较。锯切比功的计算公式为：

$$Q=v_f b h_e \text{；} \tag{1}$$

$$P=F_{max} v_c \text{；} \tag{2}$$

$$K=\frac{P}{Q}=\frac{F_{max} v_c}{v_f b h_e} \text{。} \tag{3}$$

式中：Q 为材料去除率，mm^3/s；v_f 为进给速度，mm/s；b 为锯缝宽度，mm；h_e 为等效最大切削路径长度，mm；P 为锯切功率，W；F_{max} 为峰值切削力，N；v_c 为链锯切削速度，m/s；K 为锯切比功，J/mm^3。

计算锯切功率及锯切比功时，链锯切削速度 v_c 采用 m/s；计算等效单齿平均切削厚度时，将链锯切削速度 v_c 换算为 mm/s，以保证各公式的量纲一致。锯切比功最终统一换算为 J/cm^3。

1.3.2　链锯切削速度计算

链锯切削速度取决于驱动链轮齿数、链锯节距和驱动转速，链锯切削速度的计算公式为：

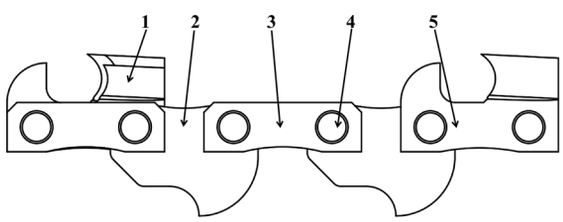
$$v_c=\frac{ztn}{6\times10^4} \text{。} \tag{4}$$

式中：z 为驱动链轮齿数；t 为链锯节距，mm；n 为驱动转速，r/min。

链锯切削速度不仅是锯切比功计算中的基本参数，也是后续等效单齿平均切削厚度表征中不可缺少的中间变量。

1.3.3　等效单齿平均切削厚度

不同链锯规格在节距、链节数和刀齿分布方式上存在差异，这些差异会进一步影响等效刀齿间距和等效单齿平均切削厚度。图 4 为电链锯锯链相关结构示意图 [26]，可反映不同链锯规格在节距、刀齿数量和刀齿排列上的差异。链锯具体参数见表 1。



1. 右切齿链片；2. 传动链片；3. 连接片；4. 链轴；5. 左切齿链片。
1 Right cutter link; 2 Drive link; 3 Connecting link; 4 Chain pin; 5 Left cutter link.

图 4　电链锯锯链结构示意

Fig. 4　Schematic diagram of the structure of the electric chain saw chain

表 1　链锯基本参数

Table 1　Chainsaw Basic Parameters

链锯规格 Chainsaw	链节距 Chain pitch /mm	刀齿数 Number of cutters	链节数 Number of links	锯缝宽度 Kerf width /mm
1/4	6.35	33	66	5
3/8LP	9.525	29	59	7
325	8.255	32	65	9

为减少传统工艺参数表征的离散性，并统一节距、刀齿数、链轮转速和进给速度对切削负载的综合作用，本研究引入等效单齿平均切削厚度作为链锯切削竹材的机理表征变量 [9]。计算公式为：

$$\delta_e=\frac{v_f}{v_c}\lambda \text{；} \tag{5}$$

$$\lambda=\frac{tN_d}{Z_c}。\tag{6}$$

式中：N_d 为链节数；Z_c 为总刀数；λ 为等效单刀齿间距，mm/ 刀；δ_e 为等效单齿平均切削厚度，mm。

1.3.4　归一化峰值切削力

鉴于竹材为中空圆环结构，传统以原始峰值切削力表征切削难度的方法难以消除样材尺寸差异带来的影响，本研究引入单位有效切削面积峰值切削力作为归一化指标，记为 K_F，用于归一化表征链锯切削竹材的受力强度。归一化峰值切削力公式为：

$$A_e=bh_e；\tag{7}$$

$$K_F=\frac{F_{max}}{A_e}。\tag{8}$$

式中：A_e 为有效切削面积，mm^2；K_F 为归一化峰值切削力，N/mm^2。

锯链与竹材的最大接触长度出现在刀具刚进入或刚出竹材不久的位置，对应峰值切削力的发生位置（图 5）。为表征链锯切削竹材过程中外层竹壁的最大有效受力路径，本研究定义竹材最大有效受力路径为等效最大切削路径长度（h_e）。等效最大切削路径长度的计算公式为：

$$h_e=\sqrt{D_{外}^2-D_{内}^2}。\tag{9}$$

式中：$D_{外}$ 为竹材外径，mm；$D_{内}$ 为竹材内径，mm。

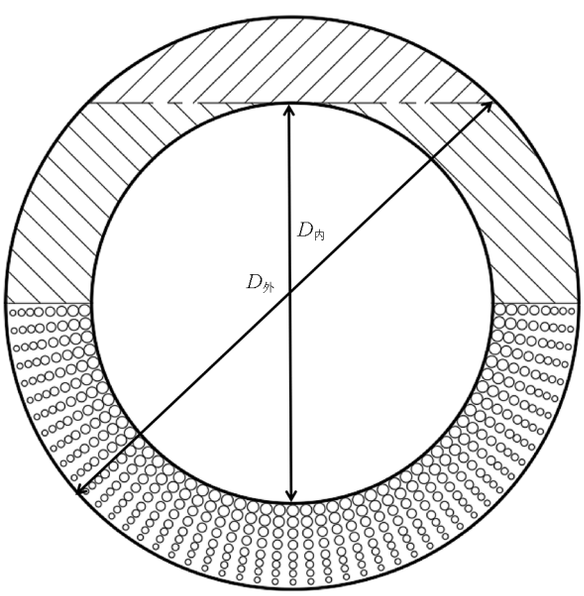


图 5　锯切过程中锯缝壁变化的示意

Fig. 5　Schematic diagram of kerf wall variation during the sawing process

由上述分析可知，竹材直径、锯缝宽度、进给速度及链速均可作为已知条件代入相关表征公式，因此试验台主要采集切削力信号，进一步计算锯切比功、等效单齿平均切削厚度和归一化峰值切削力。基于上述评价指标与机理表征方法，进一步设计单因素试验和正交试验，分析各因素的主效应及其综合影响对链锯切削竹材性能的影响。

1.4　试验设计

1.4.1　单因素试验设计

为研究链锯规格、竹材直径、进给速度和含水率对链锯切削毛竹性能的独立影响，采用单因素试验法开展试验。其中，竹材直径采用名义直径水平，竹材直径设置为 70、80、90、100、110 mm，实际外径和内径以试验前实测值为准。含水率设置为 40%、50%、60%、70%、80%，进给速度设置为 8、16、24、32 mm/s，链锯规格为 1/4、3/8LP 和 325。单因素试验采用控制变量法，每次仅改变一个试验因素，其余 3 个因素均固定在基准工况，即竹材直径 90 mm、含水率 50%、进给速度 16 mm/s 和锯链规格 3/8LP。单因素试验中每个因素水平重复 3 次，试验结果以平均值 ± 标准差（Mean±SD，n=3）表示，并以各工况平均值分析因素水平变化对峰值切削力和锯切比功的影响规律。具体因素及水平见表 2。

表 2　单因素试验的因素和水平

Table 2　Factors and levels of single factor test

水平 Level	含水率 Moisture content /%	竹材直径 Bamboo diameter /mm	进给速度 Feed speed / ($mm\cdot s^{-1}$)	链锯规格 Chainsaw
1	40	70	8	1/4
2	50	80	16	3/8LP
3	60	90	24	325
4	70	100	32	
5	80	110		

1.4.2　多因素试验设计

在单因素试验的基础上，为考察链锯规格、竹材直径、含水率和进给速度的组合效应，采用正交试验方法进行多因素分析。试验选取链锯规格、竹材直径、含水率和进给速度为试验因素，各因素设置 3 个水平 [24]，每组重复 3 次，共完成 27 次试验。具体方案见表 3。各组合峰值切削力和锯切比功均采用 3 次重复试验结果的算术平均值，并用于主效应和极差分析。方差分析则采用 27 次重复试验的原始数据，以同一因素组合内重

复试验的随机波动作为试验误差，对各因素主效应进行显著性检验。由于 $L_9(3^4)$ 正交设计未单独设置交互作用列，故本研究方差分析主要评价各因素主效应，并假定高阶交互作用相对较弱。

表 3 多因素试验的因素和水平
Table 3 Factors and levels of the multi-factor test

水平 Level	含水率 Moisture content /%	竹材直径 Bamboo diameter /mm	进给速度 Feed speed / (mm·s^{-1})	链锯规格 Chainsaw
1	40	90	8	1/4
2	50	100	16	3/8LP
3	60	110	24	325

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果与分析

为明确各因素对链锯切削毛竹性能的独立影响，分别考察含水率、竹材直径、进给速度和链锯规格对峰值切削力和锯切比功的作用规律，结果如图 6 所示。

由图 6 可知，竹材含水率由 40% 增加至 80% 时，峰值切削力和锯切比功均呈持续下降趋势。其中，峰值切削力由 48.14 N 下降至 34.29 N，锯切比功由 13.4 J/cm^3 下降至 8.1 J/cm^3。这表明高含水率竹材更易被链锯切削。究其原因，在本试验设定的含水率范围内，随着含水率的升高，竹材细胞壁及纤维组织出现一定程度的塑化，纤维刚度和局部抗剪阻力随之降低，由此减小刀齿切入竹材时所需克服的阻力。与此同时，切削过程中的局部摩擦和撕裂损耗有所降低，致使锯切比功同步下降。因此，含水率升高有助于改善链锯切削竹材的受力状态，并降低能耗。

由图 6 可知，竹材直径由 70 mm 增加至 110 mm 时，峰值切削力持续增大，而锯切比功呈先升后降的变化趋势。峰值切削力由 31.18 N 增加至 52.4 N，表明链锯切削较大直径竹材时所承受的最大阻力明显增大。竹材直径增大后，链锯与竹材的有效接触路径增长，参与切削的刀齿数量增多，切削过程中压缩阻力、剪切阻力和摩擦阻力同步增强，因此峰值切削力持续升高。与之不同，锯切比功在中等直径区间达到较大值后有所下降，说明竹材直径对单位体积能耗的影响并非简单的单调关系。究其原因，当竹材由小直径增大至中等直径时，切削接触路径和局部阻力增长较快，单位体积能耗随之升高。当直径继续增大时，材料去除量同步增加，且多刀齿连续参与切削的可能性提高，使单位体积能耗有所降低。该解释仍需结合刀齿实际参与数量、排屑状态和动态功率信号进一步验证。

由图 6 可知，进给速度由 8 mm/s 增加至 32 mm/s 时，峰值切削力持续增大，而锯切比功呈先下降后上升的变化趋势。峰值切削力由 26.44 N 增加至约 90 N，说明进给速度提高后刀齿承担的切削负荷明显增加，从而使链锯切削阻力明显增大。锯切比功则由 13.7 J/cm^3 下降至 10 J/cm^3，并在 24 mm/s 左右达到最小值，随后回升至 11.8 J/cm^3。这说明链锯切削竹材并非进给速度越大越高效，而是存在较优进给区间。当进给速度较低时，单齿切屑厚度较小，单位时间材料去除量偏低，刀齿空行程和摩擦作用所占比例较大，导致单位体积能耗偏高。当进给速度提高至 24 mm/s 左右时，刀齿负荷与材料去除效率之间达到较好匹配，锯切比功最低。当进给速度继续升高至 32 mm/s 时，单齿负荷进一步增大，系统可能出现局部过载、摩擦和排屑阻力增加等现象，导致锯切比功回升。

由图 6 可知，链锯规格由 1/4 调整为 3/8LP 时，峰值切削力和锯切比功均明显升高。当链锯规格由 3/8LP 调整为 325 后，峰值切削力有所下降，而锯切比功明显降低。从试验结果来看，1/4 链条对应最低的峰值切削力，3/8LP 链条对应最高的峰值切削力和锯切比功，而 325 链条则表现出最低的锯切比功。链锯规格不仅影响单齿切削负荷，也影响刀齿排列、锯缝宽度和材料去除效率。1/4 链条切削力较小，但能量效率并非最优。3/8LP 链条单齿负荷较大，导致切削阻力和能耗较高。综上，325 链条在切削负荷与材料去除效率之间匹配较好，综合表现较优。

2.2 多因素试验结果与分析

在单因素试验基础上，进一步采用 $L_9(3^4)$ 正交试验对链锯规格、竹材直径、含水率和进给速度 4 个因素进行多因素分析。9 组因素组合均独立重复 3 次，以峰值切削力为主评价指标、锯切比功为辅助评价指标，通过主效应分析、极差分析和基于重复试验误差的方差分析综合评价各因素对链锯切削毛竹性能的影响。

本次分析预先设定显著性水平 α=0.05。当 $P < 0.05$ 时认为因素影响显著，当 $P < 0.01$ 时认为因素影响高度显著，当 $P \geq 0.05$ 时判定该因素影响不显著。为更直观地反映各因素水平变化对峰值切削力和锯切比功的影响规律，根据正交试

验结果分别绘制峰值切削力和锯切比功主效应图，结果如图 7 所示。

由图 7 可知，不同因素对峰值切削力和锯切比功的影响幅度存在明显差异，其中进给速度对应的峰值切削力曲线斜率最大，链锯规格对应的锯切比功曲线变化幅度最明显，说明二者是影响峰值切削力和锯切比功的关键因素。为进一步定量评价各因素的影响程度，结合极差分析和方差分析对正交试验结果进行讨论。

不同因素组合下峰值切削力和锯切比功存在明显差异，表明链锯切削毛竹性能受到链锯规格、竹材尺寸、含水状态及进给速度等多个因素的共

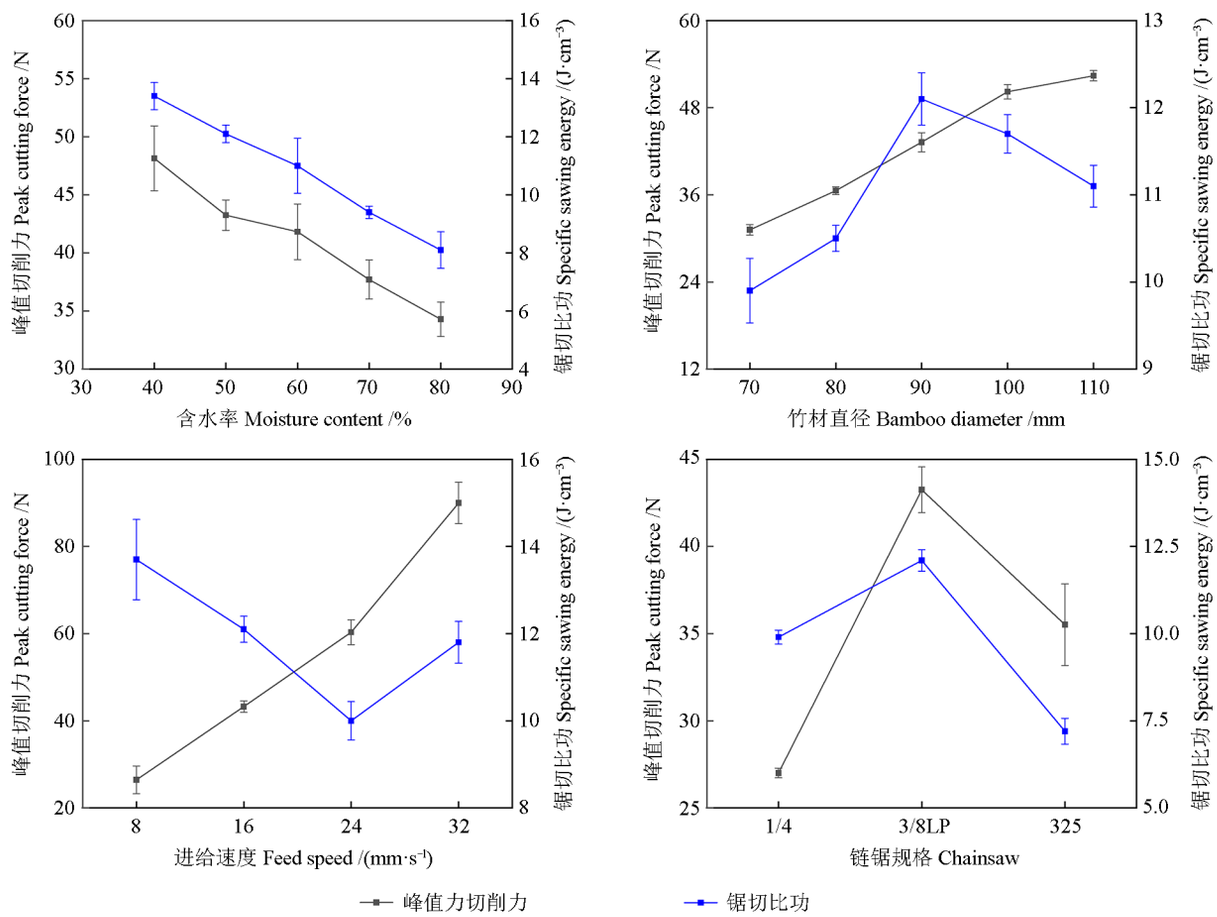


图 6　各因素对峰值切削力与锯切比功的影响

Fig. 6　Effect of various factors on peak cutting force and specific sawing energy (single-factor test)

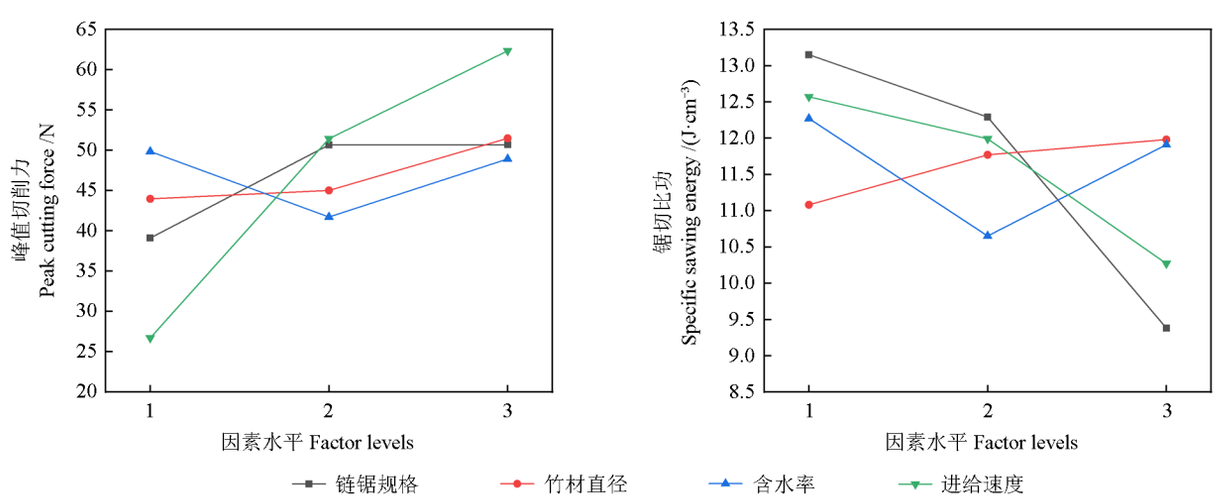


图 7　峰值切削力与锯切比功的主效应

Fig. 7　Main-effect plots of peak cutting force and specific sawing energy in orthogonal test

同影响。对峰值切削力进行极差分析，可得链锯规格的 R_j=11.59，竹材直径的 R_j=7.52，含水率的 R_j=8.14，进给速度的 R_j=35.64（表 4）。由极差大小规律可知，影响峰值切削力的因素由大到小为进给速度、链锯规格、含水率、竹材直径。其中，进给速度的极差远大于其他因素，说明进给速度变化能够明显改变单齿切削负荷，是决定峰值切削力变化幅度的主要因素。根据各因素水平均值大小规律，峰值切削力的较优水平组合为 $A_1B_1C_2D_1$，即链锯规格（A）为 1/4，竹材直径（B）为 90 mm，含水率（C）为 50%，进给速度（D）为 8 mm/s。该组合下有利于获得较低的峰值切削力，降低链锯瞬时受力和结构负荷。

表 4 设计方案及试验结果 †

Table 4 Design scheme and experimental results

试验号 Test No.	链锯规格 Chainsaw	竹材直径 Bamboo diameter /mm	含水率 Moisture content /%	进给速度 Feed speed /(mm·s^{-1})	峰值切削力 Peak force /N	锯切比功 Specific sawing energy /(J·cm^{-3})
1	1/4	90	40	8	19.14±0.64	14.23±0.25
2	1/4	100	50	16	36.78±0.59	12.74±1.40
3	1/4	110	60	24	61.37±3.07	12.48±1.83
4	3/8LP	90	50	24	58.20±1.35	9.46±0.22
5	3/8LP	100	60	8	30.83±0.95	13.71±0.25
6	3/8LP	110	40	16	62.96±5.21	13.70±1.09
7	325	90	60	16	54.53±3.09	9.53±0.55
8	325	100	40	24	67.42±7.78	8.87±0.38
9	325	110	50	8	30.11±1.28	9.75±0.21
$\overline{K_j}$	39.10	43.96	49.84	26.69	峰值切削力（N）	
$\overline{M_j}$	50.66	45.01	41.70	51.42		
$\overline{N_j}$	50.69	51.48	48.91	62.33		
R_j	11.59	7.52	8.14	35.64		
$\overline{K_j}$	13.15	11.08	12.27	12.57	锯切比功（J·cm^{-3}）	
$\overline{M_j}$	12.29	11.77	10.65	11.99		
$\overline{N_j}$	9.38	11.98	11.91	10.27		
R_j	3.77	0.90	1.61	2.30		

† 每组工况独立重复 3 次，试验结果以平均值 ± 标准差表示（n=3）；$\overline{K_j}$、$\overline{M_j}$、$\overline{N_j}$ 分别为各因素第 1、2、3 水平下指标的算术平均值；R_j 为极差。

Each condition was independently repeated 3 times. Data are presented as Mean ± SD (n = 3): $\overline{K_j}$, $\overline{M_j}$ and $\overline{N_j}$ represent the average value of indexes at each level of factors; R_j denotes the range.

本试验 9 组因素组合均进行了 3 次独立重复，共获得 27 个数据。方差分析采用各重复试验原始数据，以同一因素组合内的重复变异作为随机误差，因此无需将某一试验因素合并为误差项。由于 $L_9(3^4)$ 设计未设置独立交互作用列，本研究仅对各因素主效应进行统计检验，不对因素间交互作用进行独立解释。

峰值切削力方差分析结果（表 5）表明，在 α=0.05 的显著性水平下，链锯规格、竹材直径、含水率和进给速度均对峰值切削力具有显著影响，其中各因素均达到极显著水平（$P < 0.01$）。进给速度的 F 值为 241.68，明显高于其他因素，说明其对峰值切削力的影响最为显著，与极差分析中进给速度具有最大值的结果一致。虽然链锯规格、含水率和竹材直径的极差小于进给速度，但其组间变化仍显著高于重复试验随机误差，因此其主效应同样不可忽略。

对锯切比功进行极差分析，可得链锯规格的 R_j=3.77，竹材直径的 R_j=0.90，含水率的 R_j=1.61，进给速度的 R_j=2.30。由此可知，各因素对锯切比功的影响程度由大到小依次为链锯规格、进给速度、含水率和竹材直径。链锯规格的极差最大，说明不同链条在节距、刀齿数量、刀齿布置及锯缝宽度等方面的综合差异对单位体积材料去除能耗具有较大影响。根据各因素水平的均值大小规律，锯切比功的较优水平组合为 $A_3B_1C_2D_3$，即链

锯规格（A）为 325，竹材直径（B）为 90 mm，含水率（C）为 50%，进给速度（D）为 24 mm/s。根据主效应分析预测，该组合对应较低的锯切比功。

锯切比功方差分析结果（表 6）表明，链锯规格、含水率和进给速度对锯切比功均具有显著影响，其中链锯规格（F=44.18，P ＜ 0.001）、进给速度（F=16.16，P ＜ 0.001）和含水率（F=8.14，P=0.003）均达到极显著水平（P ＜ 0.01），竹材直径的影响未达到显著水平（F=2.53，P=0.107）。结合极差分析可知，链锯规格对锯切比功的影响幅度最大，进给速度次之，含水率再次之，而竹材直径的影响相对较弱。

表 5　峰值切削力的方差分析 †
Table 5　ANOVA for peak cutting force

影响因子 Factor	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F 值 F-value	P 值 P-value	显著性 Significance
链锯规格 Chainsaw	803.96	2	401.98	32.38	＜ 0.001	**
竹材直径 Bamboo diameter	298.66	2	149.33	12.03	＜ 0.001	**
含水率 Moisture content	357.24	2	178.62	14.39	＜ 0.001	**
进给速度 Feed speed	6 001.32	2	3 000.66	241.68	＜ 0.001	**
误差 Error	223.49	18	12.42			
总和 Total	7 684.67	26				

† * 表示 P ＜ 0.05（α=0.05 水平显著），** 表示 P ＜ 0.01（α=0.01 水平高度显著）。
* denotes P ＜ 0.05 (significant at α=0.05 level), ** denotes P ＜ 0.01 (highly significant at α=0.01 level).

表 6　锯切比功的方差分析 †
Table 6　ANOVA for specific sawing energy

影响因子 Factor	平方和 Sum of squares	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F 值 F-value	P 值 P-value	显著性 Significance
链锯规格 Chainsaw	70.20	2	35.10	44.18	＜ 0.001	**
竹材直径 Bamboo diameter	4.03	2	2.01	2.53	0.107	
含水率 Moisture content	12.94	2	6.47	8.14	0.003	**
进给速度 Feed speed	25.68	2	12.84	16.16	＜ 0.001	**
误差 Error	14.30	18	0.79			
总和 Total	127.15	26				

† * 表示 P ＜ 0.05（α=0.05 水平显著），** 表示 P ＜ 0.01（α=0.01 水平高度显著）。
* denotes P ＜ 0.05 (significant at α=0.05 level), ** denotes P ＜ 0.01 (highly significant at α=0.01 level).

峰值切削力和锯切比功对应的较优组合并不一致。以峰值切削力为目标时，较优工况倾向于较小的切削负荷，即 1/4 链条、较小竹材直径和较低进给速度；而以锯切比功为目标时，较优工况倾向于在适中切削负荷条件下提高材料去除效率，即 325 链条、较小竹材直径和较高进给速度。这说明链锯切削竹材过程中低负荷与高效率并不完全统一，二者之间存在一定权衡关系。上述组合为基于主效应分析得到的预测较优水平组合，其实际性能仍需进一步通过试验验证。因此，单纯基于原始工艺参数和统计结果尚不足以完整揭示链锯切削竹材的受力本质，后续将进一步引入等效单齿平均切削厚度和归一化峰值切削力，对刀齿负荷主导作用及竹材结构修正作用进行分析。

2.3　竹材机理分析

2.3.1　等效单齿平均切削厚度对峰值切削力的影响

由图 8 可知，进给速度单因素、链锯规格单因素及正交试验数据总体上表现出峰值切削力随等效单齿平均切削厚度（δ_e）增大而升高的趋势。当 δ_e 由 0.07 mm 增大至 0.41 mm 时，峰值切削力由 18.66 N 增加至 101.51 N，表明在链锯切削竹材过程中，单个刀齿的平均切屑负荷是峰值切削力的决定性因素。其中，进给速度单因素数据分布规律最为清晰，随 δ_e 增大峰值切削力近似单调上升，表明提高进给速度后刀齿切屑厚度随之增加，从而提高链锯切削竹材的局部压缩阻力和剪切阻力。链锯规格单因素数据虽然集中于较窄的 δ_e 区间，但总体仍表现出正相关。不同链锯规格对应的等效单齿平均切削厚度及峰值切削力存在差异，表明链锯规格对峰值切削力的影响与单齿负荷变化密切相关。同时，不同规格链条在锯缝宽度、刀齿数量和排列方式等结构参数方面存在差异，因此链锯规格的作用不能完全由等效单齿平均切削厚度单一参数解释。在含水率单因素和竹材直径单因素试验中，链锯规格与进给速度基本保持

不变，因此 δ_e 基本恒定。正交试验数据整体沿同一方向分布，但在相同 δ_e 附近存在一定离散性，表明除单齿负荷外，竹材含水率、竹材直径及链锯规格等因素仍会对峰值切削力产生附加修正作用。

等效单齿平均切削厚度作为链锯切削竹材峰值切削力变化规律的机理变量，用于揭示不同工艺参数组合下刀齿负荷与受力之间的内在联系。但同时也应看到，原始峰值切削力仍受到竹材几何尺寸差异的影响，后续还需引入归一化峰值切削力作深入分析。

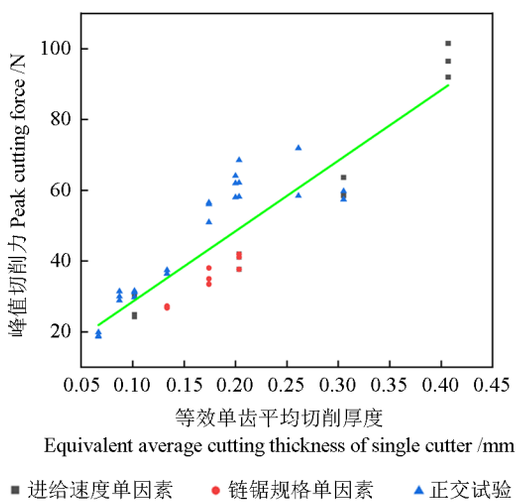


图 8 等效单齿平均切削厚度对峰值切削力的影响

Fig. 8 Effect of equivalent single-tooth average cutting thickness on peak cutting force

2.3.2 等效单齿平均切削厚度对归一化峰值切削力的影响

由图 9 可知，进给速度单因素、链锯规格单因素及正交试验数据总体上表现出归一化峰值切削力（K_F）随等效单齿平均切削厚度增大而升高的趋势。使用 Origin 软件进行线性拟合，K_F=0.03+0.501δ_e，决定系数 R^2=0.702，回归模型整体达到显著水平（F=108.66，P < 0.000 1），其中斜率为 0.501，且显著大于 0（P < 0.001），表明在试验参数范围内，归一化峰值切削力随等效单齿平均切削厚度增加呈显著正线性变化。总的来看，归一化峰值切削力随等效单齿平均切削厚度增大呈显著线性上升趋势。当 δ_e 由 0.07 mm 增大至 0.41 mm 时，K_F 由 0.07 N/mm^2 增加至 0.25 N/mm^2，说明经有效切削面积归一化修正以弱化竹材几何尺寸差异影响后，链锯切削竹材单位有效切削面积上的受力强度仍主要受单齿切屑负荷控制。

从不同试验类型来看，进给速度单因素数据上升趋势最为明显，表明提高进给速度后，单个刀齿承担的平均切屑厚度增大，导致单位面积上的受力强度显著增加。链锯规格单因素数据虽集中于较窄的 δ_e 区间，但总体仍表现出正相关关系，说明链锯规格对受力强度的影响本质上也来源于单齿负荷差异。正交试验数据整体沿同一趋势分布，但在相同 δ_e 附近仍存在一定离散性，表明除单齿负荷外，竹材含水状态、中空圆环几何特征及链条组织方式等因素仍会对归一化峰值切削力产生附加修正作用。因此，等效单齿平均切削厚度可作为链锯切削毛竹单齿负荷水平的特征表征变量，而归一化峰值切削力则可进一步表征单位有效切削面积上的受力强度。

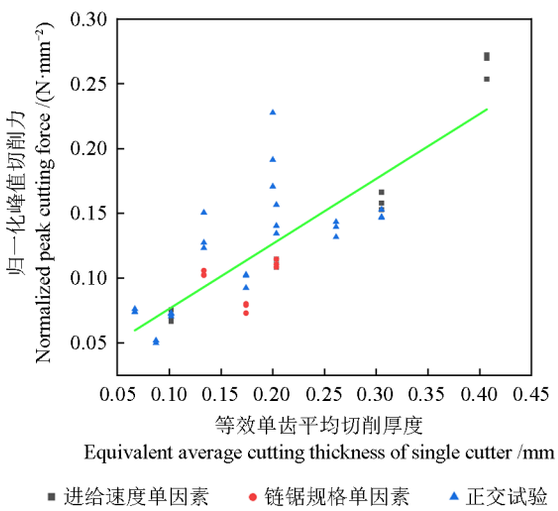


图 9 等效单齿平均切削厚度对归一化峰值切削力的影响

Fig. 9 Effect of equivalent single-tooth average cutting thickness on normalized peak cutting force

3 讨 论

针对丘陵山地毛竹机械化采伐的理论与技术需求，现有链锯切削研究多聚焦木材，关于竹材链锯切削机理与表征方法的研究存在明显不足，本研究搭建了链锯切削竹材专用试验台，开展工艺参数对毛竹切削性能的影响试验，引入等效单齿平均切削厚度与归一化峰值切削力，揭示链锯切削毛竹的载荷控制机理，建立适配毛竹中空圆竹结构的切削表征方法，为毛竹采伐链锯优化与高效作业提供理论支撑。等效单齿平均切削厚度与峰值切削力总体呈正相关关系，说明单齿切屑负荷是影响链锯切削毛竹载荷的重要因素。同时，正交试验方差分析表明，链锯规格、竹材直径、含水率和进给速度均会对峰值切削力产生显著主效应，其中进给速度影响最为显著。对于锯切比功，链锯规格、进给速度和含水率影响显著，而竹材直径影响相对较弱，这说明链锯切削毛竹载

荷既受到单齿负荷控制，也受到材料状态、竹材几何尺寸及链条结构参数的共同修正。本研究仍存在一定局限：仅围绕峰值切削力和锯切比功展开分析，未纳入切口质量、竹青撕裂、振动、动态功率等指标；所提表征指标虽能反映整体趋势，但无法完全消除材料状态、壁厚分布等带来的数据离散性，拟合关系仅用于趋势表达，而非高精度预测模型。后续可结合切口质量、动态信号与精细化竹壁结构参数，构建更完善的链锯切削竹材综合性能评价方法。此外，本研究采用 $L_9(3^4)$ 饱和正交设计，虽然通过重复试验获得了独立随机误差并能够检验各因素主效应，但未单独设置因素交互作用项，因此不同因素之间的交互作用尚不能独立量化，后续可通过增加交互作用试验或响应面试验进一步分析各因子间的交互作用规律。

4　结　论

1）竹材含水率的升高有利于降低链锯切削竹材的峰值切削力和锯切比功。竹材直径增大将明显提高峰值切削力，并使锯切比功呈先升后降的变化趋势。链锯规格和进给速度同时影响切削负荷和能耗表现，其中进给速度对峰值切削力最为敏感，链锯规格对锯切比功影响更明显。

2）在所选因素水平范围内，影响峰值切削力的因素主次顺序为进给速度、链锯规格、含水率和竹材直径，4 个因素对峰值切削力均具有显著影响，其中进给速度的影响最为显著；影响锯切比功的因素主次顺序为链锯规格、进给速度、含水率和竹材直径，其中链锯规格、进给速度和含水率影响显著，竹材直径影响不显著。根据主效应分析，降低峰值切削力的预测较优组合为 1/4 链条、竹材直径 90 mm、含水率 50% 和进给速度 8 mm/s；降低锯切比功的预测较优组合为 325 链条、竹材直径 90 mm、含水率 50% 和进给速度 24 mm/s。

3）引入等效单齿平均切削厚度作为链锯切削毛竹单齿负荷的特征表征变量。进给速度单因素、链锯规格单因素及正交试验数据总体表现出峰值切削力随等效单齿平均切削厚度增大而升高的趋势，说明单齿平均切屑负荷是影响链锯切削毛竹峰值载荷的重要因素。同时，材料状态、竹材尺寸和链条结构仍会对峰值载荷产生附加影响。

4）构建的归一化峰值切削力指标，可在一定程度上削弱竹材中空几何结构和试样尺寸差异对峰值载荷比较的影响。归一化峰值切削力随等效单齿平均切削厚度增大呈显著正线性变化，线性拟合决定系数 R^2=0.702（$P < 0.001$），说明单齿平均切屑负荷是影响单位有效切削面积受力强度的重要因素。同时，竹材材料状态、几何结构及链条结构参数仍会产生附加影响。

参考文献：

[1] 费叶琦 , 刘英 , 陈甲伟 , 等 . 竹材采运机械发展探究 [J]. 世界林业研究 ,2021,34(1):31-36.
Fei Y Q, Liu Y, Chen J W, et al. Development of bamboo cutting and transporting machinery[J]. World Forestry Research,2021, 34(1):31-36.

[2] 李晓晓 , 王茂安 , 杨涛 , 等 . 手持式竹林采伐机设计 [J]. 成都大学学报 (自然科学版),2020,39(2):199-203.
Li X X, Wang M A, Yang T, et al. Design of handheld bamboo forest harvester[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition),2020,39(2):199-203.

[3] 王茂安 . 一种竹林采伐机械设计 [D]. 成都 : 成都大学 ,2020: 6-7.
Wang M A. Design of a bamboo forest harvesting machine[D]. Chengdu: Chengdu University,2020:6-7.

[4] 杨春梅 , 张振宇 , 马岩 . 自走式轻型竹材采伐机的设计与分析 [J]. 林产工业 ,2019,46(6):23-28.
Yang C M, Zhang Z Y, Ma Y. Design and analysis of self-propelled light type bamboo cutting machine[J]. China Forest Products Industry,2019,46(6):23-28.

[5] 肖飞 , 张子康 , 陈忠加 , 等 . 链锯研究现状、发展展望及其在伐竹领域的应用思考 [J]. 林业机械与木工设备 ,2025,53(11): 16-21,26.
Xiao F, Zhang Z K, Chen Z J, et al. Research status, development prospects of chain saws and their application considerations in bamboo felling[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment,2025,53(11):16-21,26.

[6] Pandur Z, Bačić M, Šušnjar M, et al. Energy consumption and cutting performance of battery-powered chainsaws[J]. Forests, 2023,14:1329.

[7] Maciak A, Kubuśka-Orłowska M. The effect of selected operation factors on cutter deflection angles, instantaneous speeds, and accelerations while cutting wood with a petrol chainsaw[J]. Forests,2025,16:859.

[8] Pandur Z, Bačić M, Grden G, et al. Round-shaped vs. hexagonally shaped saw chain: cutting efficiency and vibration comparison[J]. Forests,2025,16:1066.

[9] Otto A, Parmigiani J. Velocity, depth-of-cut, and physical property effects on saw chain cutting[J]. BioResources,2015,10(4): 7273-7291.

[10] Maciak A, Kubuśka M, Moskalik T. Instantaneous cutting force variability in chainsaws[J]. Forests,2018,9:660.

[11] Poje A, Mihelič M. Influence of chain sharpness, tension adjustment and type of electric chainsaw on energy consumption and cross-cutting time[J]. Forests,2020,11:1017.

[12] 张骏杰 . 小径材电链锯锯切性能的研究与设计优化 [D]. 哈尔滨 : 东北林业大学 ,2022:47-65.
Zhang J J. Research and design optimization of sawing performance of electric chain saw for small diameter timber[D]. Harbin: Northeast Forestry University,2022:47-65.

[13] 刘九庆 , 张骏杰 , 朱斌海 . 电链锯锯齿温度场的仿真分析与实验探究 [J]. 林产工业 ,2022,59(2):33-38.
Liu J Q, Zhang J J, Zhu B H. Study simulation analysis and experimental research on the temperature field of saw chain of electric chain saw[J]. China Forest Products Industry,2022,59(2):33-38.

[14] 杨喜 . 梁山慈竹多尺度力学性能研究 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2014:7-21.
Yang X. The research on multi-scale mechanical properties of *Dendrocalamus farinosus*[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2014:7-21.

[15] 李文玥 . 基于锯切声学特性预测毛竹竹材物理力学性能的技术研究 [D]. 福州 : 福建农林大学 ,2023:1-7.
Li W Y. Technical research on predicting physical and mechanical properties of bamboo based on sawing acoustic characteristics[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University,2023:1-7.

[16] 夏旭光 . 竹子茎秆切割机理的研究 [D]. 杭州 : 浙江农林大学 ,2018:27-42.
Xia X G. Study on cutting mechanism of bamboo stems[D]. Hangzhou: Zhejiang A & F University,2018:27-42.

[17] 杨梦迪 . 竹材去枝机的设计分析与试验研究 [D]. 南京 : 南京林业大学 ,2024:17-43.
Yang M D. Design analysis and experimental research of bamboo branch removal machine[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University,2024:17-43.

[18] 胡晓军 , 田泽 , 徐云杰 , 等 . 铣削参数对毛竹切削力及维管束纤维提取质量的影响 [J]. 浙江农林大学学报 ,2025,42(3):622-630.
Hu X J, Tian Z, Xu Y J, et al. Effect of milling parameters on cutting force and quality of vascular bundle fiber extraction in bamboo[J]. Journal of Zhejiang A & F University,2025,42(3):622-630.

[19] 谢文楚 , 叶敏辉 . 一种毛竹锯的优化设计分析 [J]. 南方农机 ,2024,55(20):88-92.
Xie W C, Ye M H. Optimization design and analysis of a moso bamboo saw[J]. China Southern Agricultural Machinery,2024,55(20):88-92.

[20] 马锃宏 , 赵胤 , 王冠凯 , 等 . 无人机吊挂式毛竹去梢装置优化设计与试验 [J]. 农机化研究 ,2026,48(6):130-139.
Ma Z H, Zhao Y, Wang G K, et al. Optimization design and experiment of UAV hanging moso bamboo tip removal device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2026,48(6):130-139.

[21] 吉思阳 . 原态毛竹材力学特性及结构优越性验证分析 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2024:10-14.
Ji S Y. Investigation on the mechanical properties and structural advantages of natural bamboo[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2024:10-14.

[22] GB/T 15780—1995 竹材物理力学性质试验方法 [S].
GB/T 15780-1995 Testing methods for physical and mechanical properties of bamboos[S].

[23] 于航 , 傅万四 , 张长青 , 等 . 竹材切割试验台的设计 [J]. 林业机械与木工设备 ,2019,47(3):41-44.
Yu H, Fu W S, Zhang C Q, et al. Design of a bamboo cutting test bench[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment,2019,47(3):41-44.

[24] 刘九庆 , 张骏杰 , 朱斌海 . 电链锯锯切试验台设计及影响锯切性能因素的遴选 [J]. 东北林业大学学报 ,2021,49(11):116-120.
Liu J Q, Zhang J J, Zhu B H. Design of sawing test bench for electric chain saw and selection of factors affecting sawing performance[J]. Journal of Northeast Forestry University,2021,49(11):116-120.

[25] 甘英俊 , 许林云 , 林石 .LQ-18 型锯链切削性能试验台研制 [J]. 森林工程 ,2010,26(4):53-56.
Gan Y J, Xu L Y, Lin S. Design of LQ-18 type saw chain cutting performance test bed[J]. Forest Engineering,2010,26(4):53-56.

[26] 刘九庆 , 张天翼 , 金攀 , 等 . 基于 Design-Expert 的电链锯锯齿结构参数优化 [J]. 森林工程 ,2024,40(2):142-150.
Liu J Q, Zhang T Y, Jin P, et al. Optimization of sawtooth structure parameters for electric chain saws based on design-expert[J]. Forest Engineering,2024,40(2):142-150.

[本文编校：谢荣秀]