北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

基于抚育整枝目标的毛白杨枝条冲击切割性能适应性分析

吕坤 班以琛 坝仕宏 刘洋 文剑

Adaptability analysis of impact-cutting performance of *Populus tomentosa* branches based on the goal of nurturing and pruning

L ü Kun, Ban Yichen, Ba Shihong, Liu Yang, Wen Jian

引用本文:
吕坤, 班以琛, 坝仕宏, 刘洋, 文剑. 基于抚育整枝目标的毛白杨枝条冲击切割性能适应性分析[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(4):158–166. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230257
L ü Kun, Ban Yichen, Ba Shihong, Liu Yang, Wen Jian. Adaptability analysis of impact–cutting performance of *Populus tomentosa* branches based on the goal of nurturing and pruning[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(4):158–166. doi: 10.12171/j.1000–1522.20230257

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230257

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

油用牡丹茎秆切割本构方程及其参数测定

Cutting constitutive equation and its parameter measurement of oil tree peony stem

北京林业大学学报, 2020, 42(11): 138–144. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200229

割灌机作业噪声及其对园林工人脑波的影响

Investigation on the influence of load of noise from brush cutter on gardeners

北京林业大学学报, 2017, 39(4): 108–114. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20160354

光照处理对‘金羽’桧穗条质量影响的研究

Effects of light treatment on cutting quality of *Juniperus chinensis* ‘Plumosa Aurea’

北京林业大学学报, 2020, 42(8): 132–140. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200007

添加城市排水污泥对竹柳和欧美107杨嫩枝扦插苗生长及养分积累的影响

Effects of urban sewage sludge additive on growth and nutrient accumulation in *Salix americana* and *Populus* × *euramericana* cv. ‘74/76’ softwood cuttings

北京林业大学学报, 2020, 42(10): 84–95. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200093

高产优质毛白杨良种施肥响应特性解析

Analysis of the fertilization response characteristics of improved variety for high yield and high quality *Populus tomentosa*

北京林业大学学报, 2019, 41(8): 19–27. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20180427

人工长白落叶松枝条存活模型

Branch survival models of planted *Larix olgensis* tree

北京林业大学学报, 2018, 40(1): 57–66. https://doi.org/10.13332/j.1000–1522.20170203

DOI:10.12171/j.1000−1522.20230257

基于抚育整枝目标的毛白杨枝条冲击切割性能适应性分析

吕 坤　班以琛　坝仕宏　刘 洋　文 剑
（北京林业大学工学院，林业装备与自动化国家林业和草原局重点实验室，北京 100083）

摘要:【目的】为了提高毛白杨枝条冲击切割效率并改善切割效果，通过研究枝条内部因素对切割性能的影响，对毛白杨枝条的冲击切割性能进行适应性分析。**【方法】**以我国华北地区林场广泛种植的速生林品种毛白杨的枝条为研究对象，使用自制的枝条切割平台进行枝条切割试验。在单因素试验的基础上采用 Box-Benhnken 中心组合试验方法，通过试验和理论研究枝条直径、含水率和分枝角度 3 个内部因素对峰值切割力和断裂效果的影响规律。**【结果】**(1)建立了毛白杨枝条冲击切割性能的切割机理模型；(2)通过对模型进行优化分析，得到最优参数组合为枝条直径 14.7 mm、含水率 14.0%、分枝角度 90°，该组合下的峰值切割力为 370.48 N，断裂效果评分为 4.6 分，峰值切割力和断裂效果分数的预测值与实测值的相对偏差均小于 5%；(3)峰值切割力与枝条直径呈线性增长关系，随枝条含水率的增大呈先增大后减小的趋势，随着分枝角度的增大而小幅增大。**【结论】**选择树龄为 7 年时进行修枝作业，作业的季节选择秋冬季，可以获得较优的修枝质量，该研究可为速生林修枝装备的研发与林木抚育方式的优化结合提供数据支撑。

关键词：机械化；抚育整枝；冲击切割；毛白杨枝条；切割适应性；切割质量参数
中图分类号：S625.5+7; [S777]; S792.117　**文献标志码：**A　**文章编号：**1000−1522(2024)04−0158−09
引文格式：吕坤，班以琛，坝仕宏，等. 基于抚育整枝目标的毛白杨枝条冲击切割性能适应性分析［J］. 北京林业大学学报，2024，46(4)：158−166. Lü Kun, Ban Yichen, Ba Shihong, et al. Adaptability analysis of impact-cutting performance of *Populus tomentosa* branches based on the goal of nurturing and pruning［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(4): 158−166.

Adaptability analysis of impact-cutting performance of *Populus tomentosa* branches based on the goal of nurturing and pruning

Lü Kun　Ban Yichen　Ba Shihong　Liu Yang　Wen Jian
(School of Technology, Beijing Forestry University, Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Forestry Equipment and Automation, Beijing 100083, China)

Abstract:［**Objective**］In order to increase the impact-cutting efficiency and improve the pruning quality of *Populus tomentosa* branches, the adaptability of impact-cutting performance of *P. tomentosa* branches was analyzed by studying the influence of internal factors of the branches on the cutting performance.［**Method**］In this research, the branches of the fast-growing forest species *P. tomentosa*, which were widely planted in forest farms in northern China, were taken as the research object, and a self-developed branch cutting platform was used to carry out branch cutting tests. On the basis of single factor test, based on the Box-Benhnken central combination test method, experimental and theoretical studies were conducted to investigate the influence patterns of three internal factors, namely branch diameter, moisture content and branching angle, on the peak cutting force and fracture effect.［**Result**］(1) Cutting mechanism model of impact-cutting performance of *P. tomentosa* branches was established. (2) Through the optimization analysis

收稿日期: 2023−09−28　**修回日期:** 2024−03−11
基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划重大（重点）项目（2019BBF02009）。
第一作者: 吕坤。主要研究方向：林业机电装备。Email：lyukun@bjfu.edu.cn　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学工学院。
责任作者: 文剑，教授，博士生导师。主要研究方向：树木无损检测的研究。Email：wenjian@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

of the model, the optimal parameter combination was obtained as branch diameter of 14.7 mm, moisture content of 14.0%, and branching angle of 90°. The peak cutting force under this combination was 370.48 N, and the fracture quality score was 4.6, and the relative deviation between predicted and measured values of peak cutting force and fracture quality score was both less than 5%. (3) Peak cutting force increased linearly with branch diameter, tended to increase and then decrease with increasing branch moisture content, and increased slightly with increasing branching angle. [**Conclusion**] Selecting the tree age of 7 years for pruning operation, and choosing the season of operation in autumn and winter can obtain better pruning quality. This study can provide data support for the research and development of pruning equipment for fast-growing forests in combination with the optimization of forest nursery methods.

Key words: mechanization; tree nurturing and pruning; impact cutting; *Populus tomentosa* branch; cutting adaptability; cutting quality parameter

林木修枝是获得高质量木材的一种重要途径，修枝效果的优劣会直接影响木材品质，进而影响其经济价值[1]。自动化林业修枝机械设备，可以代替或辅助林场工作人员进行剪枝工作，具有修枝效率高、工作强度低、危险性小等优势，更加贴合作业中的实际需求。目前，国内外修枝剪枝设备的研发主要聚焦于机构设计和控制系统的研究，针对设备修枝的切割品质的评估相对不足，导致修枝效果的差异性较大，采伐后的木材质量参差不齐。研究枝条的切割质量参数是提高冲击切割效率并改善切割效果的重要前提。使用冲击切割式整枝机进行毛白杨修枝作业过程中，枝条内部因素对其切割性能有着不可忽视的影响，故有必要对毛白杨枝条的冲击切割性能进行适应性分析。

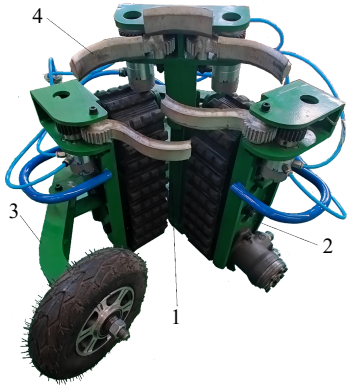
国内外研究人员针对不同类型的林木枝条和其他植物组织的切割性能进行了广泛的研究。丁素明等[2]、丰超[3]、康峰等[4]分别使用各自研制的切割试验台测试了梨树(*Pyrus* spp.)枝条、灌木枝条和苹果树(*Malus pumila*)枝条的切割性能。周敬辉等[5]、莫瀚宁等[6]、Wang 等[7]研究了刀盘轴向振动、输送速度和质心垂直高度等因素对甘蔗(*Saccharum officinarum*)切割质量的影响。Liu 等[8]研究了刀具几何参数和切割速度对牡丹(*Paeonia suffruticosa*)茎条切割力和能量的影响。Tian 等[9]基于马蹄草(*Centella asiatica*)萼片轮廓曲线设计了一种仿生玉米(*Zea mays*)收割机刀具，具备较强的切割能力和良好的切割效果。Chattopadhyay 等[10]建立了高粱(*Sorghum bicolor*)茎收获时冲击切割能量和功率需求的数学模型。Johnson 等[11]使用自行设计的剪切机构研究了切割速度和刀具刃角对芒草(*Miscanthus* × *giganteus*)切割功耗的影响。以上研究主要集中在刀具参数和切割速度等外部因素上，对于内部因素的研究和切割效果的评估相对较少且不系统，并且针对冲击切割式切割原理的速生林枝条切割性能的研究相对较少。

本研究将针对以上问题，对毛白杨枝条的冲击切割性能进行适应性分析，即探究枝条直径、含水率和分枝角度 3 个内部因素对其峰值切割力和断裂效果的影响，通过 Box-Benhnken 中心组合试验方法建立冲击切割式毛白杨(*Populus tomentosa*)修枝的切割机理模型，并通过对模型进行优化分析得到最优参数，明确 3 个内部因素对峰值切割力和断裂效果的影响规律，从而依据毛白杨生长规律，选择在合适的生长年限及修枝季节进行修枝作业，达到提高修枝品质的目的。

1　试验设备与工作原理

1.1　冲击切割式整枝机

冲击切割式的毛白杨整枝机如图 1 所示。修枝作业时，将整枝机环抱与树干下侧，启动位于地面的液压爬升系统，整枝机在高速爬升过程中可利用冲击力进行整枝作业，待达到整枝作业高度后开始回落至初始位置。相比于锯切或剪切式的修枝设备，冲击切割式的整枝机具有修枝速度快、效率高的特点。



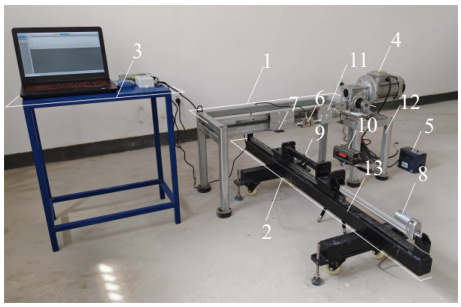
1.机架 Frame; 2.行走机构 Walking mechanism; 3.抱合夹紧机构 Clamping mechanism; 4.切割机构 Cutting mechanism

图 1　冲击切割式的毛白杨整枝机

Fig. 1　Impact-cutting based pruning machine of *Populus tomentosa*

1.2 枝条切割平台及其工作原理

试样枝条切割平台(图 2)主要由切割机构、枝条进给机构和测控系统这 3 部分组成。切割机构主要由机架、交流电机及其减速器、变频器、曲柄滑块、拉压力传感器和切割刀具安装支架构成；枝条进给机构主要由机架、推杆电机和枝条夹具构成。设备工作和结构参数如表 1 所示。



1.切割机构 Cutting mechanism；2.枝条进给机构 Branch feeding mechanism；3.测控系统 Measurement and control system；4.交流电机及其减速器 AC motor and reducer；5.变频器 Frequency converter；6.拉压力传感器 Tensile pressure sensor；7.切割刀具安装支架 Cutting tool bracket；8.推杆电机 Pusher motor；9.枝条夹具 Branch clamp；10.高速摄像机 High-speed camera；11.曲柄滑块 Crank slider；12.切割机构机架 Cutting mechanism frame；13.枝条进给机构机架 Branch feeding mechanism frame

图 2 枝条切割平台

Fig. 2 Branch cutting platform

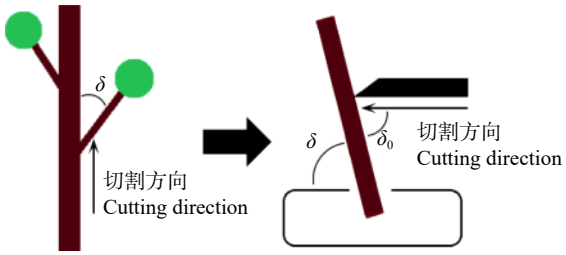
表 1 设备结构和工作参数

Tab. 1 Equipment structure and working parameters

参数 Parameter	值 Value
切割机构尺寸 Cutting mechanism size	1 500 mm × 500 mm × 800 mm
枝条进给机构尺寸 Branch feeding mechanism dimension	1 800 mm × 500 mm × 350 mm
最大切割速度 Maximum cutting speed/(m·s^{-1})	2.5
平均进给速度 Average feeding speed/(m·s^{-1})	2.0
刀具行程 Tool stroke/mm	140
拉压力传感器量程 Tensile force transducer range/kg	± 1 000
数据采集频率 Data acquisition frequency/Hz	100

将试验用刀具和枝条分别安装于刀具安装支架和枝条夹具上。交流电机由变频器控制转速，经减速器驱动，带动曲柄滑块机构在位于切割机构机架的滑轨上做往复运动。当变频器显示屏显示电机转速达到指定数值后，启动枝条进给机构的推杆电机，将枝条进给到刀具移动路径上，完成枝条切割过程。拉压力传感器经变送器，将采集的数据传输给测控系统，对试验数据进行查看和记录。整个切割过程由高速摄像机对枝条的断裂过程进行拍摄，并在切割试验完成后，通过枝条的断口情况判断枝条切割效果。

枝条进给机构安装有可调节的枝条夹具，枝条夹具可任意调节夹紧程度以适应不同直径的试样枝条。侧枝的分枝角度可被描述为其生长方向与竖直方向之间在修枝设备异侧的夹角 δ，如图 3 左侧所示；将枝条与水平方向在切割刀具的异侧的夹角定义为刀具切入角度 δ_0，如图 3 右侧所示。在试验中，我们使用刀具切入角度作为分枝角度的替代指标，这两个角度之间存在相等的关系。试验平台的枝条夹具可以通过自由改变枝条的夹持角度，以改变分枝角度。



δ 表示分枝角度，即枝条生长方向与竖直方向之间在修枝设备异侧的夹角；δ_0 表示刀具切入角度，即枝条与水平方向在切割刀具的异侧的夹角，当刀具沿竖直向上的方向进行切割时，二者数值相等。δ is the branching angle, which is the angle between the branch growth direction and the vertical direction on the opposite side of the pruning equipment. δ_0 is the tool cut-in angle, which is the angle between the branch and the horizontal direction on the opposite side of the cutting tool. The two values are equal when the tool is cutting in the vertical upward direction.

图 3 分枝角度示意图

Fig. 3 Schematic diagram of branching angle

枝条切割平台使用量程为 0 ~ 10 000 N 的拉压力传感器测量切割过程中的峰值切割力。试验时分别测量切割试验台空载运转和切割枝条时拉压力传感器的测量值，两者相减即得到峰值切割力。拉压力传感器通过变送器对信号进行放大处理，并将数据转换为范围是 0 ~ 5 V 的模拟电信号，使用 Adruino Nano 开发板进行数据采集并通过串口发送到 PC 端，进行数据记录。

2 材料与方法

2.1 试验材料

试样枝条取自河北省木兰围场国有林场龙头山林木良种苗木繁殖场(117°41′42″E，41°59′12″N)，品种为毛白杨，林场环境和试样枝条如图 4 所示。为确保试验设置的含水率水平涵盖各时期修枝作业的含水率，选择在毛白杨含水率较高的初夏季进行枝条采集。所选枝条无病虫害和明显缺陷，枝条基本通直，直径范围为 11.0 ~ 24.0 mm，长度不小于 50 cm。采样完成后，将枝条分组编号，用保鲜膜对枝条进行密封保存。

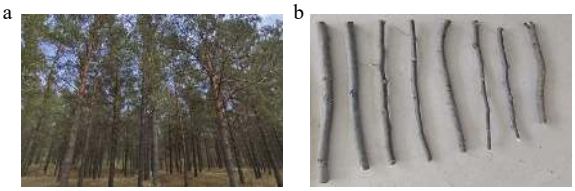


图 4　林场环境(a)和试样枝条(b)

Fig. 4　Forest farm environment (a) and specimen branches (b)

依据滑切理论自行设计试验用枝条切割刀具。切割刀具刃口高度为 12 mm，刀柄长度为 52 mm，刀具宽度为 38 mm，厚度为 5 mm，楔角为 30°，材质为 45 钢。

2.2　内部因素测定与处理方法

使用游标卡尺测量待测毛白杨枝条的直径，选出符合试验需求的枝条，记录对应编号。使用数显角度尺测量分枝角度 δ。为模拟不同地区、不同修枝季节的枝条生长状况，试验中需要设置不同水平的含水率。基于同一树种在相同地理环境和季节条件下含水率较为接近的原理[12]，参照 GB/T 1931—2009《木材含水率测定方法》[13]采用烘干法测定试验枝条的初始含水率，并在烘干过程中每隔 2 h 测量 1 次质量，即可计算得到对应烘干时间(t)下的枝条含水率。利用 Origin 2018 软件对试验结果进行指数函数 ExpAssoc 模型拟合，得到含水率(W, %)的预估模型。

$$W = 0.914\,81 - 0.465\,71(1 - \exp(-t/2.645\,13)) - 0.465\,71(1 - \exp(-t/2.645\,1)) \quad (1)$$

2.3　试验方法

2.3.1　单因素试验

为探明各内部因素对枝条切割质量的影响，分别以枝条直径 D、枝条含水率 W 和分枝角度 δ 为影响因素，设计了共 3 组单因素试验。因毛白杨枝条在适宜修枝的树龄时，多数枝条直径不超过 25.0 mm，且较大的枝条直径在实际修枝作业中会影响修枝设备的作业效果，为完整地研究枝条直径与切割性能的关系，单因素试验中直径 D 范围取 11.0 ~ 25.0 mm，并设为 11.0、13.0、15.0、17.0、20.0、24.0 mm 共 6 个水平；进行其他单因素试验时，枝条直径取 13.0 mm。在含水率的单因素试验中，将毛白杨的枝条含水率设定在 11.0% ~ 33.0% 的区间范围，并设为 11.0%、14.0%、18.0%、22.0%、27.0%、33.0% 共 6 个水平；进行其他单因素和多因素试验时，枝条的含水率取 18.0%。毛白杨分枝角度不小于 50°，随冠层部位的降低，其平均分枝角度逐渐增大，故在分枝角度单因素试验中分枝角度 δ 设为 50°、60°、70°、80°和 90° 共 5 个水平；进行其他单因素试验时，分枝角度取 90°，以保证较优的切割质量。切割速度取 2.5 m/s，切割间隙为 1 cm，每组试验重复 3 次。

2.3.2　Box-Benhnken 中心组合试验

为进一步分析不同参数组合下切割质量的差异，依据单因素试验结论，在单因素试验结果的基础上，根据 Box-Behnken 原理设计 3 因素 3 水平分析试验，枝条直径 D 设为 13.0、15.0、17.0 mm，枝条含水率 W 设为 14.0%、18.0%、22.0%，分枝角度 δ 设为 50°、70°、90°。以峰值切割力 F 和切割断裂评分作为各因素对切割效果影响程度的评判指标，从而确定不同参数组合下切割质量的差异。每组试验重复 3 次后取其平均值。切割速度取 2.5 m/s，切割间隙为 1 cm。

2.4　评价指标

整枝机在修枝过程中所提供的切割力受到一定的限制，因此需要在相对较低的切割力作用下实现较为优异的断裂效果，故采用切割力学特性与断裂效果作为衡量枝条切割质量的主要指标。切割力学特性以峰值切割力 F 作为评价指标。断裂效果可以用枝条断裂形式中切割深度或劈裂深度占断面深度的比例作为评估标准，主要包括完全切割、以切割为主、以劈裂为主和完全劈裂。试验采用感官评分法，组织 5 名试验人员成立感官评定小组，根据枝条切割质量、切口损伤程度，对试验结果依次进行综合打分并取平均值。为了便于指标的优化，本文对断裂效果进行了数值量化，对试验结果进行综合评分，如表 2 所示。

3　结果与分析

3.1　单因素试验结果

3.1.1　枝条直径对枝条切割质量的影响

在枝条含水 18.0%、分枝角度 90°的情况下，毛白杨枝条的峰值切割力与枝条直径均呈明显线性关系(R^2 = 0.928 07)，如图 5a 所示。随枝条直径增大，被切割的纤维数量增多，峰值切割力随之增大。

从断裂效果方面分析，在 11.0 ~ 24.0 mm 的直径范围内，毛白杨枝条的断裂效果的评分值呈现先增后减的趋势，并且在直径为 15.0 mm 时达到最优(表 3)。当枝条直径较小时，枝条强度较低，因此仅部分深度被切割后，就因较大的碰撞冲击造成枝条折断，形成以劈裂为主的断裂效果；枝条强度随其直径增大而增大，枝条不易发生碰撞折断，因此在其直径在 13.0 ~ 20.0 mm 时，断裂效果评分均 > 3.0 分，属于完全切割或以切割为主；当枝条直径达到 24.0 mm 时，这个功率无法保证枝条能够被完全切断。

3.1.2　枝条含水率对枝条切割质量的影响

在枝条直径 13.0 mm、分枝角度 90°的情况下，

表 2 断裂效果的评分标准

Tab. 2 Scoring criteria for fracture quality

断裂效果 Fracture effect	评分标准 Scoring criteria	断裂效果图 Fracture effect picture	评分 Score
完全切割 Complete cutting	枝条完全通过切割方式断裂，断面平顺 Branches broken completely by cutting, with a smooth cross-section		（4.0, 5.0]
以切割为主 Cutting-based	枝条主要通过切割方式断裂，断面存在小范围的劈裂，面积小于50% Branches broken primarily by cutting, with splits in the cross-section, less than 50% of the area		（3.0, 4.0]
以劈裂为主 Cleavage-based	枝条只有部分深度通过切割方式断裂，断面存在范围大于或等于50%的劈裂 Branches broken only partially by cutting, with splits in the cross-section, more than or equal to 50% of the area		（2.0, 3.0]
完全劈裂 Complete cleavage	枝条完全通过劈裂方式断裂，断面粗糙 Branches broken completely by cleavage, with a rough cross-section		（0, 2.0]
未切断 Fail to cut off	切割仅对枝条造成部分破坏，未能切断 Branches damaged but failed to cut off		0

注：断裂效果图比例尺为1∶1.3。Note: fracture effect pictures are on a scale of 1∶1.3.

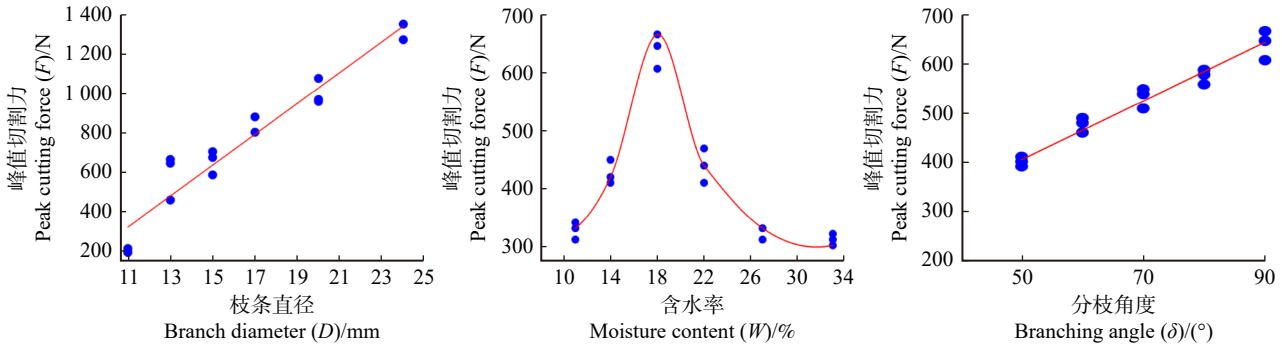


图 5 枝条直径(a)、含水率(b)和分枝角度(c)分别与峰值切割力关系

Fig. 5 Relationship between branch diameter (a), moisture content(b), branching angle (c) and peak cutting force, respectively

表 3 断裂效果的评分

Tab. 3 Scores of fracture effect

项目 Item	枝条直径 Branch diameter (*D*)/mm						含水率 Moisture content (*W*)/%						分枝角度 Branching angle (*δ*)/(°)				
	11.0	13.0	15.0	17.0	20.0	24.0	11.0	14.0	18.0	22.0	27.0	33.0	50	60	70	80	90
评分 Score	2.8	4.1	4.4	4.4	3.9	0	3.9	4.3	4.1	3.7	3.3	2.1	3.7	3.7	4.0	3.9	4.1

峰值切割力随枝条含水率的增大，峰值切割力先逐渐增大，后逐渐减小，且减小趋势逐渐平缓(图 5b)。这是由于枝条的含水率增大，其强度减小的同时，由于其弹性增大，枝条韧性增加，因此在含水率较低的水平下，切割力的大小受到枝条弹性变形的影响，峰值切割力随含水率增大而增大；强度进一步下降时，在超过临界范围后，内部纤维抗拉强度的减小成为峰值切割力下降的主要的影响因素，枝条容易造成劈裂而使得峰值切割力逐步减小。这一特点也在断裂效果的评分结果中体现出来(表 3)。当试样枝条含水率 ≤ 18.0% 时，枝条断裂效果评分均 > 3.0 分，属于完全切割或以切割为主；当试样枝条含水率继续增大时，枝条断裂效果评分明显降低，出现以劈裂为主的情况。

3.1.3 分枝角度对枝条切割质量的影响

在枝条直径为 13.0 mm、枝条含水率为 18.0% 的情况下，峰值切割力与分枝角度呈现为线性关系（R^2 = 0.965 17），如图 5c 所示。这是由于随刀具切入增大，刀具的实际切割面积增大，被切割的纤维数量增多，峰值切割力随之增大。断裂效果方面，不同分枝角度水平的试样枝条的断裂效果评分均 > 3.0 分，属于完全切割或以切割为主，评分变化不大(表 3)。

3.2　Box-Benhnken 中心组合试验结果

3.2.1　切割机理模型的建立

Box-Benhnken 中心组合试验的方案和结果如表 4 所示。利用 Design Expert 13 软件对表 4 的试验结果进行二次多项式回归拟合，得到峰值切割力 F(N)和断裂效果评分 S 的预估模型，即毛白杨枝条冲击切割性能的切割机理模型。

$$F = 652.98 + 163.73D + 40.32W + 37.88\delta + 83.09DW + 14.66D\delta + 17.10W\delta + 51.07D^2 - 185.97W^2 - 63.78\delta^2 \tag{2}$$

$$S = 4.16 - 0.012\,5D - 0.162\,5W + 0.125\,0\delta - 0.125\,0DW + 0.100\,0D\delta - 0.050\,0W\delta - 0.242\,5D^2 + 0.007\,5W^2 + 0.132\,5\delta^2 \tag{3}$$

式中：D 为枝条直径(mm)，W 为含水率(%)，δ 为分枝角度(°)。

3.2.2　切割机理模型的显著性分析和简化

对多因素试验结果及峰值切割力和断裂效果评分的预估模型进行回归方差分析，结果如表 5 所示。由表 5 分析可知：峰值切割力 F 和断裂效果评分 S 的响应面模型的 P 值分别为 0.000 1 和 0.003 2(均小于 0.01)，表明回归模型高度显著；失拟项 P 值均大于 0.05(分别为 0.382 4 和 0.896 6)，表明回归方程拟合度高；其决定系数 R^2 值分别为 0.993 7 和 0.927 1，说明峰值切割力和评分的变化有 92% 以上来源于所选因素。因此，可以用该模型对最优切割参数进行优化分析。

表 4　Box-Benhnken 中心组合试验设计方案和结果

Tab. 4　Design and results of the Box-Benhnken central combination test

序号 No.	枝条直径 Branch diameter/mm	含水率 Moisture content/%	分枝角度 Branching angle /(°)	峰值切割力 Peak cutting force/N	评分 Score
1	13.0	14.0	70	381.23	4.0
2	17.0	14.0	70	566.96	4.2
3	13.0	22.0	70	303.03	3.9
4	17.0	22.0	70	821.11	3.6
5	13.0	14.0	50	469.21	4.0
6	17.0	18.0	50	742.91	3.8
7	13.0	18.0	90	508.31	4.1
8	17.0	18.0	90	840.66	4.3
9	15.0	18.0	50	342.13	4.3
10	15.0	14.0	50	381.23	4.1
11	15.0	22.0	90	391.01	4.6
12	15.0	14.0	90	498.53	4.2
13	15.0	22.0	70	645.16	4.3
14	15.0	18.0	70	625.61	4.2
15	15.0	18.0	70	674.49	4.1
16	15.0	18.0	70	664.71	4.2
17	15.0	18.0	70	654.94	4.0

表 5　回归方程方差分析

Tab. 5　Regression equation analysis of variance

来源 Source	峰值切割力 Peak cutting force					评分 Score				
	平方和 Sum of square	自由度 Freedom	均方值 Mean square	F_v	P	平方和 Sum of square	自由度 Freedom	均方值 Mean square	F_v	P
模型 Model	4.429×10^5	9	49 215.14	121.99	< 0.000 1	0.758 1	9	0.084 2	9.91	0.003 2
D	2.145×10^5	1	2.145×10^5	531.60	< 0.000 1	0.020 8	1	0.020 8	2.45	0.161 4
W	13 006.43	1	13 006.43	32.24	0.000 8	0.100 8	1	0.100 8	11.86	0.010 8
δ	11 478.40	1	11 478.40	28.45	0.001 1	0.000 2	1	0.000 2	0.018 3	0.896 3
DW	27 614.13	1	27 614.13	68.45	< 0.000 1	0.062 5	1	0.062 5	7.35	0.030 1
$D\delta$	859.96	1	859.96	2.13	0.187 7	0.04	1	0.04	4.71	0.066 7
$W\delta$	1 170.32	1	1 170.32	2.90	0.132 3	0.01	1	0.01	1.18	0.314 0
D^2	10 983.38	1	10 983.38	27.22	0.001 2	0.247 6	1	0.247 6	29.13	0.001 0
W^2	1.456×10^5	1	1.456×10^5	360.96	< 0.000 1	0.000 2	1	0.000 2	0.027 9	0.872 1
δ^2	17 129.83	1	17 129.83	42.46	0.000 3	0.073 9	1	0.073 9	8.70	0.021 4
残差 Residual	2 824.07	7	403.44			0.059 5	7	0.008 5		
失拟 Misfitting	1 409.69	3	469.90	1.33	0.382 4	0.007 5	3	0.002 5	0.192 3	0.896 6
误差 Error	1 414.38	4	353.60			0.052	4	0.013 0		
总和 Total	4.458×10^5	16				0.817 6	16			

注：$P < 0.01$表示回归模型极显著，$0.01 \leqslant P < 0.05$表示回归模型显著，$P > 0.05$表示回归模型显著不显著。Notes: $P < 0.01$ indicates that the regression model is highly significant, $0.01 \leqslant P < 0.05$ indicates that the regression model is significant, $P > 0.05$ indicates that the regression model is not significant.

各参数的 P 值大小可以反映其对回归方程的影响作用，P 值小于 0.01 表明参数对模型影响极显著，P 值小于 0.05 表明参数对模型影响显著。峰值切割力模型中，一次回归项枝条直径 D、枝条含水率 W 和分枝角度 δ 对峰值切割力影响极显著，二次回归项 DW、D^2、W^2 和 δ^2 项对峰值切割力影响极显著；模型交互项 $D\delta$ 和 $W\delta$ 对峰值切割力影响不显著。断裂效果评分模型中，一次回归项枝条含水率 W 对评分影响极显著，二次回归项 D^2 对评分影响极显著；二次回归项 δ^2、DW 对评分影响显著；回归项 D、δ、W^2、$D\delta$ 和 $W\delta$ 对评分影响不显著。

分析后可知，各因素对峰值切割力贡献率为枝条直径 > 含水率 > 分枝角度，各因素对断裂效果评分贡献率为含水率 > 分枝角度 > 枝条直径。通过逐步回归分析，剔除式(2)、(3)中的不显著项，保留显著项，简化模型得式(4)、(5)。

$$F = 652.98 + 163.73D + 40.32W + 37.88\delta + 83.09DW + 51.07D^2 - 185.97W^2 - 63.78\delta^2 \quad (4)$$

$$S = 4.16 - 0.125\,0DW - 0.242\,5D^2 + 0.132\,5\delta^2 \quad (5)$$

各因素交互作用对峰值切割力和断裂效果评分的影响如图 6 所示。峰值切割力随枝条直径或分枝角度的增大呈增大趋势；随着枝条含水率的增大，峰值切割力先增大后减小，含水率在 18.5% 左右时峰值切割力达到最大，峰值切割力和断裂效果评分与单因素试验相关结论基本一致。

本文针对峰值切割力小的切割作业要求，进行切割装置工作参数优化。为得到最小峰值切割力和最高断裂效果评分的最优切割参数组合，利用 Design-Expert 13 软件对模型进行合意性多重优化响应方法优化，该方法利用目标函数计算所有变换响应的几何平均值。

$$D(X) = (d_1 \cdot d_2 \cdot \ldots \cdot d_n)^{\frac{1}{n}} = \left(\prod_{i=1}^{n} d_i\right)^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

式中：d_i 表示各响应值的意向范围，其范围 [0,1]（分别是最不理想到最理想）；n 表示响应值个数。

限定作为目标值的峰值切割力的最小值 F_{min} > 0，同时限定枝条直径 D 范围为 [13.0, 17.0]，限定枝条含水率 W 范围为 [14.0, 22.0]，限定分枝角度 δ 范围为 [50, 90]，得到试验范围内最优切割参数组合为枝条直径 14.7 mm、含水率 14.0%、分枝角度 90°，此时峰值切割力为 370.48 N，断裂效果评分为 4.6。

3.3 模型预测结果验证

为验证模型预测的准确性，采用上述参数在切割试验台上进行 3 次重复试验。考虑试验的可行性，设置枝条直径 15.0 mm、含水率 14.0%、分枝角度 90°，在此优化方案下进行试验，结果如表 6 所

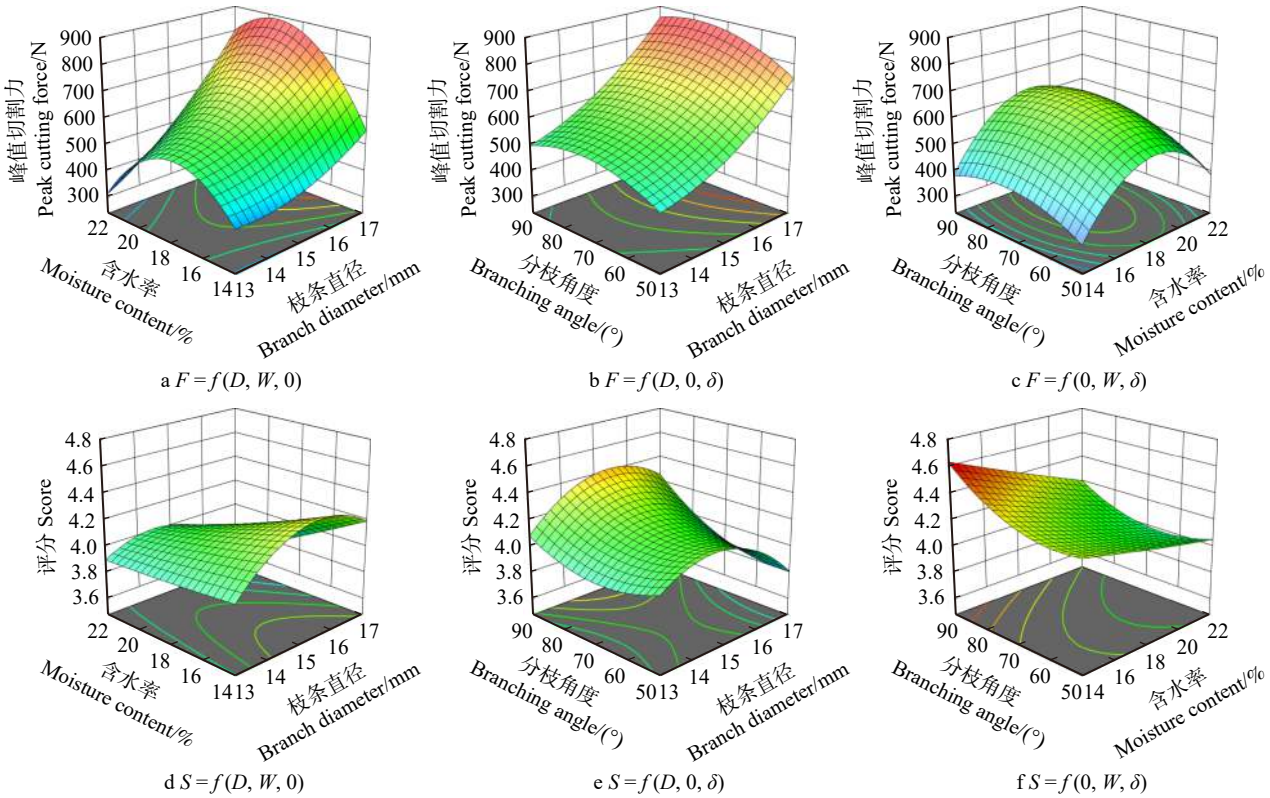


图 6 峰值切割力(a, b, c)和断裂效果评分(d, e, f)对各试验因素交互作用的响应曲面

Fig. 6 Response surfaces of peak cutting force (a, b, c) and fracture effect scores (d, e, f) to the interaction of test factors

示。试验结果表明，实测峰值切割力与通过式(3)预测峰值切割力的相对偏差小于 3%，实际断裂效果评分与预测值的相对偏差小于 5%，模型可靠。

表 6　试验验证结果

Tab. 6　Results of validation test

序号 No.	峰值切割力 Peak cutting force/N	评分 Score
1	322.58	4.4
2	293.26	4.1
3	342.13	4.6
平均值 Average	319.32	4.4
相对偏差 Relative deviation/%	2.68%	4.35%

4　讨　　论

本试验所得峰值切割力随含水率的变化关系为先增大后减小的趋势，不同于文献 [14] 得出的枝条含水率减小导致剪切力增加的规律，这是由于本试验在设定含水率时范围分布更广，在含水率较低的范围内，切割力的大小受到枝条弹性变形的影响，使得峰值切割力呈增大趋势，而在超过临界范围后，内部纤维抗拉强度的减小成为峰值切割力下降的主要的影响因素。通过拟合曲线可知在含水率 18.0% ~ 26.0% 的范围内，变化规律与两篇文献基本相符。此外，本试验对毛白杨枝条直径、含水率和分枝角度开展多因素分析，由于本试验仅仅考虑了内部因素，对切割速度、刀具参数等因素未全面开展相应试验，以上外部因素皆对峰值切割力和断裂效果具有显著的影响，但本研究目的是依据毛白杨生长规律，使速生林的生长状态适应修枝设备以提高修枝质量，因此应在考虑上述因素的基础上对切割技术进行综合探讨。

综合考量 3 个内部因素，毛白杨人工林胸径的平均值大约在 7 年时达到 19 cm[15]，其茎干–胸径的生物量分配比例约为 2.4，由此推算在树龄为 7 年时进行修枝可以获得较优的切割质量。采集并选取直径约为 15.0 mm 的秋冬季毛白杨枝条，同样参照 GB/T 1931—2009《木材含水率测定方法》[13]采用烘干法测定试验枝条的含水率，测定其含水率约为 20%，相比于春夏季采集的毛白杨枝条，较接近理论最优值(14.0%)，因此秋冬季更适宜进行修枝作业。毛白杨分枝角度的平均值随冠层部位的降低而逐渐增大，但由于分枝角度的改变对切割质量的影响不大，因此在上述条件下使用冲击切割式整枝机进行毛白杨人工林修枝作业，可以获得较优的修枝质量。考虑到不同施肥条件和土壤水分条件等因素对枝条直径和含水率的影响，实际作业应结合林场环境综合考虑。

5　结　　论

(1)使用自制的枝条切割平台进行枝条切割试验，并采用单因素试验和 Box-Benhnken 中心组合试验进行了试验研究，以峰值切割力、断裂效果评分为目标值，建立了的冲击切割式毛白杨修枝的切割机理模型。通过对模型进行优化分析，得到最优参数组合为枝条直径 14.7 mm、含水率 14.0%、分枝角度 90°，该组合下的峰值切割力为 370.48 N，断裂效果评分为 4.6 分，峰值切割力和断裂效果分数的实测值与预测值的相对偏差均小于 5%，表明模型可靠性较高。

(2)峰值切割力与枝条直径均呈线性关系，随枝条直径增大，峰值切割力随之增大，断裂效果的评分值呈现先增后减的趋势；峰值切割力随枝条含水率的增大,峰值切割力先逐渐增大，然后逐渐减小，断裂效果的评分值在含水率超过 18.0% 后明显下降；随分枝角度增大，峰值切割力有小幅的增大，断裂效果评分变化不大。各因素对峰值切割力影响的顺序为枝条直径 > 含水率 > 分枝角度；各因素对断裂效果评分影响的顺序为含水率 > 枝条直径 > 分枝角度。

(3)在速生林修枝装备的研发与林木抚育方式的优化相结合方面，为使速生林的生长状态适应修枝设备以提高修枝质量，选择树龄为 7 年时进行修枝作业，作业的季节选择秋冬季，可以获得较优的修枝质量。该研究可为速生林修枝装备的研发与林木抚育方式的优化结合提供数据支撑。

参　考　文　献

[1] 任世奇, 陈健波, 邓紫宇, 等. 修枝对尾巨桉生长动态及单板质量的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(3): 126−132.
Ren S Q, Chen J B, Deng Z Y, et al. Effects of pruning on growth dynamic and veneer quality of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015, 37(3): 126−132.

[2] 丁素明, 薛新宇, 蔡晨, 等. 梨树枝条切割装置刀片参数优化与试验 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 2): 75−82.
Ding S M, Xue X Y, Cai C, et al. Optimization and experiment of blade parameter for pear branches cutting device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(Suppl.2): 75−82.

[3] 丰超. 降低林木抚育剩余物枝条切断能耗研究及仿真 [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
Feng C. Research of reducing cutting energy consumption and simulation analysis for certain-length branch cutter[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.

[4] 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.

Kang F, Tong S Y, Zhang H S, et al. Analysis and experiments of reciprocating cutting parameters for apple tree branches[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(16): 9−16.

[5] 周敬辉, 李尚平, 杨代云, 等. 甘蔗收获机刀盘轴向振动对甘蔗宿根切割质量的影响 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(2): 16−24.
Zhou J H, Li S P, Yang D Y, et al. Influence of sugarcane harvester cutterhead axial vibration on sugarcane ratoon cutting quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(2): 16−24.

[6] 莫瀚宁, 李尚平, 邱辰, 等. 刀盘轴向振动和切割参数对甘蔗收获机切割质量的影响 [J]. 农业工程学报, 2022, 38(18): 62−71.
Mo H N, Li S P, Qiu C, et al. Effects of the blade disk vibration in axial and cutting parameters on the cutting quality of sugarcane harvesters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(18): 62−71.

[7] Wang Q, Zhou G, Huang X, et al. Experimental research on the effect of sugarcane stalk lifting height on the cutting breakage mechanism based on the sugarcane lifting-cutting system (SLS)[J]. Agriculture, 2022, 12(12): 2078.

[8] Liu J, Zhao D, Zhao J. Study of the cutting mechanism of oil tree peony stem[J]. Forests, 2020, 11(7): 760.

[9] Tian K, Li X, Zhang B, et al. Design and test research on cutting blade of corn harvester based on bionic principle[J/OL]. Applied Bionics and Biomechanics, 2017. [2017−07−31]. https://doi.org/10.1155/2017/6953786.

[10] Chattopadhyay P S, Pandey K P. Impact cutting behaviour of sorghum using a flail-cutter: a mathematical model and its experimental verification[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 78(4): 369−376.

[11] Johnson P C, Clementson C L, Mathanker S K, et al. Cutting energy characteristics of *Miscanthus* × *giganteus* stems with varying oblique angle and cutting speed[J]. Biosystems Engineering, 2012, 112(1): 42−48.

[12] 乔栋, 刘勇, 田书勇, 等. 不同土壤水势对毛白杨苗木生长节律和苗木质量的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(4): 12−23.
Qiao D, Liu Y, Tian S H, et al. Effects of different soil water potentials on seedling growth rhythm and seedling quality of *Populus tomentosa*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(4): 12−23.

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 木材含水率测定方法: GB/T 1931—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspecttion and Quarantine of the People's Republic of China. Method for determination of the moisture content of wood: GB/T 1931−2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

[14] 姜岳忠. 毛白杨人工林丰产栽培理论基础与技术体系研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2006.
Jiang Y Z. Basic theory and technique systems on fast-growing and high-yield poplar (*P. tomentoas* Carr.) plantation forest[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2006.

[15] 陈玉香, 周道玮, 张玉芬, 等. 玉米茎剪断力研究 [J]. 作物学报, 2005, 31(6): 766−771.
Chen Y X, Zhou D W, Zhang Y F, et al. Shearing force of maize stem[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(6): 766−771.

（责任编辑 吴 娟
责任编委 李文彬）