

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2026004

激光切削参数对臭冷杉木材切缝尺寸的影响

乔浩鹏¹, 郭旭光², 孙耀星¹, 王卿平¹, 赵洪刚¹

(1. 北华大学材料科学与工程学院, 吉林吉林 132000; 2. 吉林新元木业有限公司, 吉林敦化 133714)



摘要: 为推动激光技术在木材精密加工产业中的应用, 研究以臭冷杉 (*Abies nephrolepis*) 为试验材料, 运用方差分析探究激光切削参数 (工作距离 A 、进给速度 B 和激光功率 C) 对切缝深度 (简称缝深) 与切缝宽度 (简称缝宽) 的影响规律, 并构建数学模型预测切缝尺寸。采用三因素完全随机方差分析、交互效应检验及 Tukey 真实显著差异事后比较等方法对数据进行方差分析, 以确定激光切削参数对切缝尺寸的影响以及切削参数间的交互作用显著性。结果显示, 工作距离、进给速度和激光功率对缝深与缝宽均具有极显著主效应 ($P < 0.001$)。按偏 η^2 值排序, 缝深的主效应大小为 $C > B > A$, 缝宽的主效应大小为 $A > B > C$ 。二阶交互效应及三阶交互效应均达到显著水平, 对缝深和缝宽的影响程度为: $A \times B > A \times B \times C > B \times C > A \times C$; 表明激光切削过程中存在明显的多参数耦合作用。依据建立的激光切削回归预测方程, 发现工作距离与激光切削臭冷杉的切缝尺寸呈非线性关系, 激光功率和进给速度与激光切削臭冷杉的切缝尺寸呈线性关系。采用回归预测方程预测缝深的误差为 21.30%, 缝宽的误差 24.94%。实际生产中可优先考虑固定工作距离。

关键词: 激光切削; 臭冷杉; 工作距离; 进给速度; 激光功率; 切缝深度; 切缝宽度; 交互效应

中图分类号: S791.14; TG485 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2026) 03-0057-08

Effects of Laser Cutting Parameters on Kerf Size of *Abies nephrolepis*

QIAO Haopeng¹, GUO Xuguang², SUN Yaoxing¹, WANG Qingping¹, ZHAO Honggang¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Beihua University, Jilin 132000, Jilin, China;

2. Jilin Xinyuan Wood Industry Co., Ltd., Dunhua 133714, Jilin, China)

Abstract: To promote the application of laser technology in the precision wood processing industry, this study investigated the effects of laser cutting parameters, including working distance (A), feed rate (B), and laser power (C), on kerf depth and kerf width of *Abies nephrolepis*, and established mathematical models to predict the kerf size. Multifactor completely randomized analysis of variance, interaction effect analysis, and Tukey's honestly significant difference *post-hoc* test were used to examine the significance of the main and interaction effects of laser cutting parameters on kerf size. The results showed that the cutting parameters A , B , and C had extremely significant main effects on both kerf depth and kerf width ($P < 0.001$). According to partial η^2 values, the order of main effect size for kerf depth was $C > B > A$, while that for kerf width was $A > B > C$. Both second-order and third-order interaction effects reached significant levels, and their influence on kerf depth and kerf width followed the order $A \times B > A \times B \times C > B \times C > A \times C$,

收稿日期: 2026-01-08; 修改日期: 2026-05-15

基金项目: 吉林省科技发展计划项目“基于机器学习的东北常用商品木材智能识别系统开发与应用”(20250201077GX)。

作者简介: 乔浩鹏 (2000—), 男, 硕士研究生。Email: 15633600603@163.com

通讯作者: 赵洪刚, 男, 教授。Email: mailzhaoyang163@aliyun.com

indicating obvious multi-parameter coupling during laser cutting. Based on the established regression equations, the cutting parameter *A* showed a nonlinear regulatory effect on laser cutting of fir, whereas the cutting parameters *B* and *C* exhibited approximately linear effects. The prediction errors for cutting performance were about 21.30% for kerf depth and 24.94% for kerf width, respectively. Therefore, the cutting parameter working distance, could be preferentially fixed in practical production to improve process stability.

Key words: laser cutting; *Abies nephrolepis*; working distance; feed rate; laser power; kerf depth; kerf width; interaction effect

激光切削作为一种非接触、高精度、高自动化的先进技术,在木材加工领域显著优势。与传统刀具切削相比,激光切削不仅能避免刀具磨损导致的加工精度下降,还能通过调控工艺参数实现对木材的“任意加工”^[1-3]。激光切削木材是涉及光、热、材料相互作用的复杂过程,木材的热分解、碳化以及不同工艺参数间的耦合作用影响其加工质量^[4-5]。近年来,随着激光器技术的进步,激光切削在木材切割、标刻等方面的应用日益广泛。相关研究表明,CO₂激光切削木材的表面切缝宽度多处于0.3~0.8 mm之间,开槽等加工的有效切削深度通常控制在毫米级,加工质量受激光功率、进给速度、材料厚度和聚焦状态等因素影响。RUŽIAK等^[6]利用人工神经网络预测CO₂激光切割欧洲云杉(*Picea abies*)的效果,发现激光功率、切割速度对切削效果的影响不可忽略;YANG和LIU等^[7-8]研究气体辅助技术对切削效果的影响,发现采用氮气和氦气可以降低氧气浓度,从而减小热影响区,减小碳化面积,改善切削效果;杨春梅等^[9]研究发现,激光功率和切割速度直接决定切缝宽度和断面平整度。但在以往的研究中,激光机参数的取值跨度较大(如镜头高选取为3、8、12.5 mm^[1]),缺乏精细化的梯度设置,导致对切削效果,如切缝深度(试样表面至切缝最深处的垂直距离,表征激光的穿透能力和加工效率)和切缝宽度(试样表面切缝开口两侧边界之间的距离,是衡量加工精度和材料利用率的核心指标)的预测偏差较大,难以满足高精度加工的需求^[1-2, 10-11]。

工作距离指镜头底部到试样表面的距离,影响聚焦光斑直径,从而影响激光在试样表面的聚焦效果,体现激光能量密度。进给速度指激光机工作时激光镜头的行进速度,反映激光对材料的

作用时间。激光功率指激光机的实际输出功率,体现输出的能量水平。现有研究很少聚焦工作距离、进给速度和激光功率这3个关键工艺因素之间的复杂交互作用机制的探讨。这3个因素共同构成调控激光能量输入与耗散的核心体系,任一参数的变动都会影响切削效果。

臭冷杉(*Abies nephrolepis*)是我国东北地区主要的商用针叶树材之一,资源丰富,是家具、建筑内饰和包装材料的常用原料。臭冷杉材质较软,早材至晚材渐变,这有利于减少木材自身结构变异对激光切削的干扰,方便观察不同参数下切缝尺寸(如缝深、缝宽等)的变化,进一步揭示激光参数与切缝尺寸之间的关系。

多因素析因实验法是一种同时考察多个因素及其交互作用的实验设计方法,适用于分析加工参数对响应指标的主效应和交互效应。与单因素实验相比,该方法能够在较少实验次数下揭示不同工艺参数之间的协同或制约关系,适合激光切削这类多参数耦合过程。鉴于此,研究采用多因素析因实验方法,探究工作距离、进给速度和激光功率等激光切削参数对臭冷杉切缝尺寸(缝深、缝宽)的主效应及其交互效应,揭示多参数间的非线性协同机制,构建预测模型,从而实现对切缝尺寸的预测,为优化实木激光加工的参数提供理论依据与数据支持,从而推动激光技术在木材精密加工产业中的应用。

1 材料与方法

1.1 试验材料

臭冷杉,试样尺寸为200 mm(L)×30 mm(T)×13 mm(R),含水率约为11%,共96块。选取无明显缺陷的部位进行径切面横纹切削。

1.2 试验设备

CMA1390型CO₂激光机,最大功率为130 W,聚焦透镜焦距(激光光束通过激光光路末端最后一块镜片汇聚后,镜片到激光最小光斑的直线距离)为50.8±1 mm。Olympus SZX16体式显微镜及配套图像测量系统(图1)。

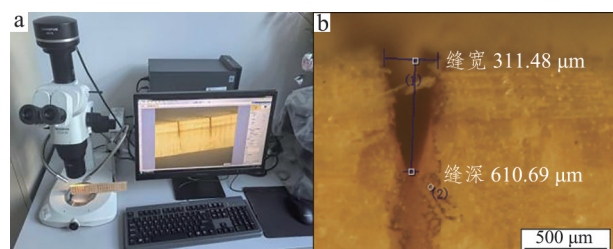


图1 切削数据的测量设备(a)及测量示意图(b)

Fig.1 Equipment (a) and schematic diagram (b) for measuring cutting parameters

1.3 试验设计

采用三因素完全随机方差分析等方法,考察自变量(工作距离、进给速度和激光功率)对因变量(缝深和缝宽)的主效应及交互效应。结合优先数系理论,工作距离按1.06公比,进给速度和激光功率按1.25公比取近似值,3个因素均设置8个水平(表1),共512组。试验每组技术参数设置3次重复,共1 536个试验单元。

表1 激光切削试验的因素和水平

Tab.1 Factors and levels of laser cutting test

因素	水平							
	1	2	3	4	5	6	7	8
A 工作距离/mm	5.2	5.5	5.8	6.3	6.7	7.1	7.5	8.0
B 进给速度/(mm·s ⁻¹)	16	20	25	31.5	40	50	63	80
C 激光功率/W	20.8	26	32.5	41	52	65	81.9	104

测量前,在固定放大倍率和照明条件下,按配套测量软件的比例尺完成长度标定;同一批次样品的观察、拍摄与判读均保持一致的放大条件和边界标准,以保证不同试样之间测量分辨率和判读口径一致。每个试验单元记录单次测量值。测得的切缝尺寸以显微镜下可辨识的切缝几何边界为准。

切缝深度通过测量试样横截面获得。将切削后的试样沿垂直于切缝方向截断,使切缝截面暴露,然后在显微镜下测量试样表面至切缝最深处的垂直距离,测量时未剔除炭化层。

为确保回归模型的可靠性并验证其泛化能力,研究在收集到的1 536个试验单元数据中,随机抽样约87%的数据(1 336组)作为训练集,用于主效应分析、交互效应检验以及回归建模;约13%的数据(200组)作为独立测试集,用于最终预测效果的验证。

1.4 统计分析

采用三因素完全随机方差分析模型对试验数据进行统计分析,使用IBM SPSS Statistics 25软件完成。重点研究自变量对因变量的主效应、二阶交互效应和三阶交互效应的影响。

在进行方差分析前,采用Levene方差齐性检验对缝深和缝宽数据进行前提假设检验。考虑到木材激光切缝尺寸测量数据受局部碳化、纹理差异等影响,可能存在一定异常值或偏态分布,研究同时比较基于数据均值和中位数的Levene方差齐性检验结果。其中,基于中位数的检验对异常值较不敏感,因此将其作为方差齐性判断的主要依据。

在统计分析过程中,全部因变量的主效应以及交互效应由显著性体现,模型中每一项效应的检验均使用III型平方和。所有效应的显著性水平均设定为 $\alpha=0.05$,若检验得到的 P 值小于0.05,则认为该效应具有统计学意义;还采用偏 η^2 (衡量效应量的指标,值越接近1,效应越强)作为效应量的度量,来量化每一项效应所解释的方差比例。由于试验因素水平较多(8水平),若主效应显著,进一步采用Tukey真实显著差异(honestly significant difference, HSD)事后检验法进行多重比较,以控制族系误差率,精确找出各因素不同水平间的具体差异。

在回归建模过程中,为降低二次项及高阶交互项引起的结构性多重共线性,研究以训练集样本均值为基准对自变量进行中心化处理,公式为:

$$A_c = A - \bar{A} \quad (1)$$

$$B_c = B - \bar{B} \quad (2)$$

$$C_c = C - \bar{C} \quad (3)$$

式中: A 、 B 、 C 分别为工作距离、进给速度和激光功率; A_c 、 B_c 、 C_c 分别为中心化后的工作距离、进给速度和激光功率; $\bar{A}$ 、 $\bar{B}$ 、 $\bar{C}$ 分别为训练集中对应自变量的算术平均值。

根据训练集数据计算得到, $\bar{A}=6.499$ mm, $\bar{B}=40.651$ mm/s, $\bar{C}=40.676\%$, 因此 $A_c=A-6.499$ 、 $B_c=B-40.651$ 、 $C_c=C-40.676$ 。在此基础上建立包含一次项、二次项和交互项的多项式回归模型。模型评价指标包括决定系数 (R^2)、调整决定系数 (调整 R^2) 及整体 F 检验结果; 回归系数采用未标准化系数、标准误差、 t 值和 P 值进行显著性检验; 多重共线性通过方差膨胀因子 (variance inflation factor, VIF) 和条件指数进行诊断; 残差分布则结合标准化残差的正态性检验、偏度和峰度及正态概率图进行综合判断。

Tukey HSD 方法适用于所有组间两两比较, 控制整体第一类错误率, 由于试验设计的 3 个因素都是 8 个水平, 因此, Tukey HSD 方法更适合。通过同质子集分析, 将不具有显著差异的组别归类于同一子集, 直观展示组间相似性与差异性。所有分析均在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下进行, 误差项基于实测平均值和均方误差。

2 结果与分析

2.1 方差分析前提假设检验

为验证方差分析的适用性, 在方差分析前对缝深和缝宽进行基于均值的 Levene 方差齐性检验。结果显示, 缝深和缝宽的显著性水平分别为 $P=0.999$ 和 $P=1.000$, 均大于 0.05, 说明不同处理组间方差差异不显著, 满足方差齐性假设, 可进一步开展方差分析。

2.2 主体间效应检验

2.2.1 主效应分析 切缝尺寸受工作距离、进给速度和激光功率等多因素协同影响。为明确单一因素对缝深、缝宽的主效应, 通过一般线性模型 (general linear model, GLM) 分析各因素的主效应大小 (表 2), 进一步采用估算边际平均值可视化不同因素水平下缝深和缝宽的变化趋势, 可以更直观地展示各因素的影响规律。

表 2 显示, 工作距离、进给速度和激光功率对缝深和缝宽的主效应均极显著 ($P<0.001$)。按 F 值对缝深的效应量大小排序及各因素解释的变异程度为: 激光功率 (99.0%) > 进给速度 (98.8%) > 工作距离 (88.3%)。对缝宽的效应量大小排序及

表 2 三因素对缝深和缝宽影响的方差分析

Tab.2 Variance analysis of three factors on kerf depth and kerf width

效应	因变量	自由度	均方	F 值	显著性	偏 η^2
修正模型	X^a	511	11 546 787.30	407.13	***	0.996
	Y^b	511	39 833.36	185.12	***	0.992
工作距离 A	X	7	22 745 715.04	802.00	***	0.883
	Y	7	1 279 894.33	5 948.34	***	0.982
进给速度 B	X	7	255 192 046.73	8 997.96	***	0.988
	Y	7	273 338.60	1 270.34	***	0.923
激光功率 C	X	7	305 492 965.64	10 771.54	***	0.990
	Y	7	264 793.64	1 230.63	***	0.920
$A \times B$	X	49	14 302 030.88	504.28	***	0.971
	Y	49	70 754.03	328.83	***	0.956
$A \times C$	X	49	894 247.35	31.53	***	0.674
	Y	49	4 560.86	21.20	***	0.582
$B \times C$	X	49	3 242 979.48	114.35	***	0.882
	Y	49	5 720.41	26.59	***	0.630
$A \times B \times C$	X	343	727 321.78	25.65	***	0.922
	Y	343	4 918.19	22.86	***	0.913

注 1: ***表示极显著相关; 注 2: X 表示缝深, Y 表示缝宽。

a 表示 $R^2=0.996$ (调整后 $R^2=0.994$), b 表示 $R^2=0.991$ (调整后 $R^2=0.987$)。

各因素解释的变异程度为: 工作距离 (98.2%) > 进给速度 (92.3%) > 激光功率 (92.0%)。

为更清楚地了解各主效应对切缝尺寸的影响, 进一步展示缝深与缝宽的主效应估算边际平均值, 如图 2 所示。

图 2 显示, 进给速度由 16 mm/s 增至 80 mm/s, 缝深和缝宽的估算边际平均值呈下降趋势; 随着激光功率由 20.8 W 升至 104 W, 估算边际平均值呈上升趋势。这表明进给速度增大会缩短激光作用时间, 降低单位长度能量输入, 从而减小切缝尺寸; 而增大激光功率会增加能量输入, 使木材热解、气化和烧蚀程度增强, 从而增大切缝尺寸。这与对 0.1~0.3 mm 厚的黑胡桃 (*Juglans nigra*) 薄木的切削结果一致, 即缝深与激光功率成正比、与切割速度成反比^[10-11]。工作距离对缝深和缝宽的影响均呈波动变化, 说明其作用并非简单线性关系。工作距离变化会改变激光聚焦状态、光斑直径及能量密度分布, 从而影响切缝形成。其中, 工作距离为 8.0 mm 时缝宽明显增大, 可能与离焦状态下光斑扩大、横向受热范围增加有关。

2.2.2 交互效应分析 采用 GLM 的主体间效应检验分析工作距离、进给速度和激光功率的交互效

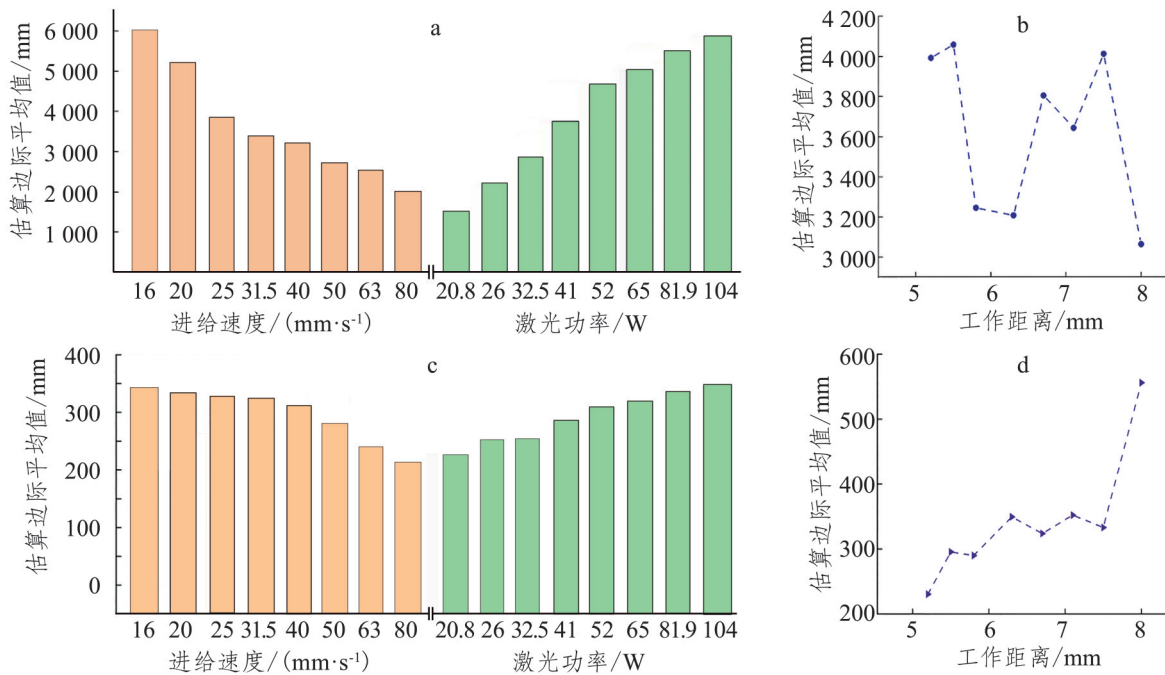


图2 不同因素水平下缝深(a、b)和缝宽(c、d)的估算边际平均值

Fig.2 Estimated marginal mean values of kerf depth (a, b) and kerf width (c, d) under various factor levels

应, 对缝深与缝宽的影响显著性及效应强度, 结果列于表2。所有二阶交互作用(工作距离 $\times$ 进给速度、工作距离 $\times$ 激光功率、进给速度 $\times$ 激光功率)以及三阶交互作用(工作距离 $\times$ 进给速度 $\times$ 激光功率)均极显著, 表明任一参数对切缝的影响并非独立存在, 而是依赖于其他参数的设定水平。

1) 二阶交互效应。所有二阶交互效应量大小排序为: 工作距离 $\times$ 进给速度 $>$ 进给速度 $\times$ 激光功率 $>$ 工作距离 $\times$ 激光功率。

工作距离 $\times$ 进给速度对切缝尺寸的影响最为突出, 即激光聚焦效果与能量作用时间之间存在紧密的耦合关系。在激光聚焦状态不变的情况下, 进给速度越慢, 对切缝的影响越大。进给速度 $\times$ 激光功率的交互效应同样非常关键, 这是能量作用时间与能量强度之间的动态平衡。当激光功率不变时, 进给速度过快则会导致能量输入不足, 过慢则可能造成能量过剩。工作距离 $\times$ 激光功率的交互作用也为极显著水平, 共同解释约70%的缝深变异, 这表明激光聚焦状态会显著影响能量利用率。相同激光功率时, 若焦点位置不当, 能量无法高效集中于材料表面, 其切割能力也会下降。

前文的方差分析和主效应结果表明, 3因素对缝深和缝宽的交互效应具有相似性, 因此, 后续

仅探究3因素对缝深的影响。

为避免激光聚焦对试验结果的影响, 在进行二阶交互分析时, 固定工作距离, 研究进给速度与激光功率对缝深的二阶交互效应。根据主效应分析结果, 工作距离为5.2 mm时缝深较大, 因此, 作为观察进给速度与激光功率耦合作用的典型水平。图3为固定工作距离为5.2 mm时, 激光功率与进给速度对缝深的二阶交互效应。固定工作距离时, 随着激光功率的减小或者进给速度的增大, 缝深随之降低, 这与3因素主效应的分析结果一致。

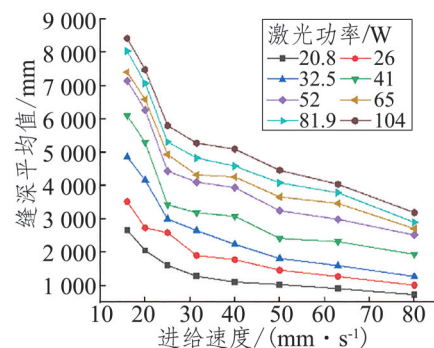


图3 工作距离为5.2 mm时, 进给速度与激光功率对缝深的交互效应

Fig.3 Interactive effect of feed rate and laser power on kerf depth under working distance of 5.2 mm

在低进给速度区间 (16~31.5 mm/s), 激光作用时间充足, 增大激光功率可以提高能量利用率, 从而增大缝深。进入高进给速度区间 (40~80 mm/s) 后, 高激光功率 (如 104 W) 时, 曲线较陡, 而低激光功率 (如 20.8 W) 时, 曲线下降相对平缓。这表明在有限作用时间内, 高激光功率的利用率急剧下降。由图3可知, 当进给速度大于 25 mm/s 时折线下降趋势变缓, 当进给速度过快时, 激光与臭冷杉的作用时间不足以完成能量的充分吸收与热传导过程, 导致部分能量浪费。这说明激光切削臭冷杉试验中存在能量利用率边界, 当进给速度超过某一阈值时, 单纯地提高激光功率对增大缝深的效果有限。

2) 三阶交互效应。工作距离×进给速度×激光功率的三阶交互效应对缝深与缝宽的影响均为极显著。3个因素的交互作用形成“激光聚焦效果—能量作用时间—能量强度”复杂的影响机制。

为降低二次项及高阶交互项引起的结构性多重共线性, 研究以训练集样本均值为基准对自变量进行中心化处理。设 $A_c = A - 6.499$ 、 $B_c = B - 40.651$ 、 $C_c = C - 40.676$, 则缝深 (X) 与缝宽 (Y) 的完整回归预测方程分别为:

$$X = 3\,623.601 - 139.487A_c - 69.695B_c + 78.526C_c + 21.336A_c^2 + 1.237B_c^2 - 1.267C_c^2 + 7.952A_cB_c + 5.537A_cC_c - 0.651B_cC_c - 0.046A_cB_cC_c \quad (4)$$

$$Y = 336.367 + 75.759A_c - 1.464B_c + 2.251C_c + 33.056A_c^2 - 0.023B_c^2 - 0.029C_c^2 - 0.380A_cB_c + 0.161A_cC_c - 0.008B_cC_c + 0.005A_cB_cC_c \quad (5)$$

对于缝深模型, 模型整体显著 ($R=0.866$, $R^2=0.749$, 调整 $R^2=0.747$, 标准估计误差为 1 090.968, $F=372.725$, $P<0.001$)。除 A_c^2 ($t=0.505$, $P=0.614$) 和三阶交互项 $A_cB_cC_c$ ($t=-0.594$, $P=0.552$) 外, 其余项均达到显著水平。

对于缝宽模型, 模型整体同样显著 ($R=0.757$, $R^2=0.573$, 调整 $R^2=0.569$, 标准估计误差为 83.809, $F=167.283$, $P<0.001$)。其中, A_c 、 B_c 、 C_c 、 A_c^2 、 B_c^2 、 C_c^2 及 A_cB_c 均达到显著水平, 除 A_cC_c ($t=1.303$, $P=0.193$)、 B_cC_c ($t=-1.468$, $P=0.142$) 和 $A_cB_cC_c$ ($t=0.840$, $P=0.401$) 外, 其余项均未达到显著水平。

共线性诊断结果表明, 缝深与缝宽模型中各

变量的 VIF 均介于 1.001~1.492 之间, 最大条件指数为 4.688, 说明中心化处理后多重共线性已得到有效控制, 模型参数估计较为稳定。

为科学评估回归预测方程对未知数据的泛化能力, 采用 200 组独立测试集代入方程中, 计算预测值, 并与实测值进行对比。采用均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和平均绝对百分误差 (mean absolute percentage error, MAPE) 作为评价指标。结果显示, 缝深 (X) 与缝宽 (Y) 的 MAPE 分别为 21.30% 和 24.94%, RMSE 分别为 699.77 μm 、83.67 μm 。实测值与预测值的散点分布呈现出高度线性相关性 (图4), 证明模型能够捕捉激光工艺参数对加工效果的主要影响趋势。图中散点表示测试集样本, 红色虚线表示预测值与实测值完全一致时的理想参考线。散点越接近红色虚线, 说明模型预测结果与实测值越接近。

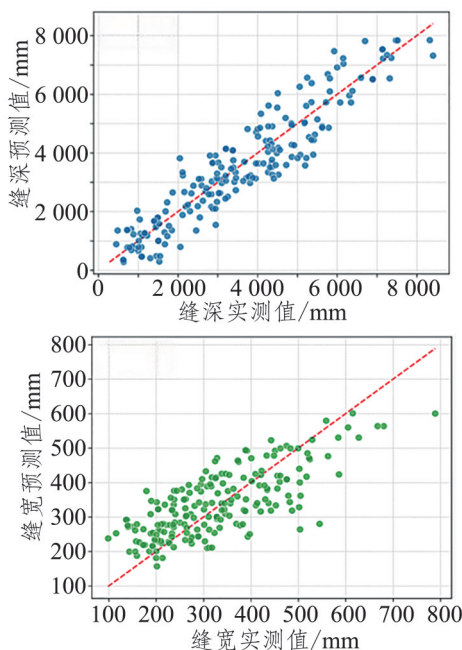


图4 缝深和缝宽的预测值vs实测值散点图

Fig.4 Scatter plot of predicted values vs measured values of kerf depth and kerf width

臭冷杉作为针叶树材, 其早材管胞细胞直径大、壁薄且密度低, 晚材管胞壁厚、腔小、密度高。激光切削过程本质上是高能量密度光束与木材的瞬时热化学反应, 由于切削路径经过多个早晚材交替区域, 激光束在不同密度区域的气化程度存在差异。在切缝形成过程中, 侧壁产生的碳

化层对激光有吸收和衰减作用，导致MAPE指标较高且存在一定预测误差，但模型在描述切缝尺寸变化趋势上的高度一致性表明，该模型能够有效揭示激光切削参数间的交互规律。

2.3 事后检验

三因素完全随机方差分析已证实各因素主效应及交互效应存在统计学显著性 ($P < 0.05$)，但该统计模型仅能判断组间存在差异，无法判定具体哪些水平组合的效应显著。事后比较主要用于辅助识别因素不同水平间的差异，具体交互作用规律仍以交互效应图和简单效应解释为主。

采用Tukey HSD事后比较结果进一步分析不同参数水平对缝深的影响。工作距离对缝深的事后检验同质子集列于表3。8个工作距离水平被划分为6个具有统计显著性的同质子集。子集2（工作距离为5.8、6.3 mm）与子集5（工作距离为5.2、7.5 mm）内部组间差异不具统计学意义（显著性 P 值分别为0.295、0.922），说明在这些组中，工作距离的变化并未引起缝深的显著改变。在进给速度与激光功率方面，8个水平被划分为8个独立的同质子集，每个子集仅包含一个水平（显著性 P 值均为1.000），其中随着进给速度降低以及激光功率增大，缝深显著递增，均符合主效应的检验结果，这也表明进给速度和激光功率对缝深的调控作用具有高度一致性。

表3 工作距离对缝深的同质子集

Tab.3 Homogeneous subset of working distance versus kerf depth

同质子集	工作距离/mm	缝深平均值/ μm	所属组别数量	显著性
1	8.0	3 065.12	1	1.000
2	5.8, 6.3	3 208.59~3 246.29	2	0.295
3	7.1	3 645.16	1	1.000
4	6.7	3 806.65	1	1.000
5	5.2, 7.5	3 994.50~4 014.74	2	0.922
6	5.5	4 060.12	1	1.000

缝宽的Tukey HSD事后检验结果显示，不同工作距离水平下缝宽仍存在显著差异，其中工作距离为8.0 mm时缝宽最大，工作距离为5.2 mm时缝宽最小，仅6.3 mm与7.1 mm之间差异不显著。

激光切削木材的本质是“能量输入-热解气化-材料去除”的连续过程。在3因素调控体系中，工

作距离通过改变激光焦点与木材表面的相对位置，直接调控光斑直径与能量密度，从而影响切缝尺寸。当工作距离处于5.2~5.8 mm的近聚焦区间时，激光能量高度集中，形成窄而深的切缝；而当工作距离增至8.0 mm的严重离焦状态时，光斑直径增大导致能量分散，易形成宽而浅的切缝。工作距离对缝宽的影响（偏 $\eta^2=0.982$ ）强于对缝深（偏 $\eta^2=0.883$ ）的影响，进一步证实光斑直径变化对缝宽的影响更为直接。

2.4 激光切削参数对切缝尺寸影响的分析

激光切削木材的本质是由表面能量密度引发的热解与气化过程，其中单位面积能量输入是决定材料去除机制的核心参数。为辅助解释工作距离对切削结果的影响，研究基于理想光束传播模型^[12]，对焦点附近的最小光斑尺寸进行理论估算。根据衍射极限模型并考虑光束质量因子，焦点处最小光斑直径为：

$$d=4M^2f\lambda/\pi D \quad (6)$$

式中： d 为焦点处光斑直径， μm ； M^2 为光束质量因子，取1.5； f 为聚焦透镜焦距，取50.8 mm； λ 为激光波长，取10.6 μm ； D 为入射光束直径，取8 mm。

结合试验参数计算得到最小光斑直径约为128.6 μm 。进一步由：

$$W=P/A \quad (7)$$

式中： W 为能量密度， W/cm^2 ； P 为激光机实际输出功率， W ； A 为激光光斑面积， cm^2 。

可得在试验功率范围（20.8~104 W）下，焦点附近能量密度最小为 $1.59 \times 10^5 \text{ W}/\text{cm}^2$ ，最大为 $7.96 \times 10^5 \text{ W}/\text{cm}^2$ 。

结合试验结果可知，随着激光功率增大或进给速度降低，单位长度木材获得的能量增加，材料去除更充分，缝深总体呈增大趋势；当工作距离偏离最后透镜焦距时，试样表面的有效作用区域扩大，能量集中度下降，更容易表现为缝宽增大和缝深减小。这一规律与主效应分析、交互效应分析及回归模型揭示的总体趋势一致，也与已有木材激光加工研究中关于“增大功率有利于去除材料、增大速度不利于深入切削、离焦会削弱能量集中性”的结论相吻合^[1-3]。

基于上述机理，建议在实际生产中可优先调

控工作距离来实现针对性加工。如,追求大的切缝深度时,优选5.2~5.8 mm聚焦区间,配合高激光功率与较慢进给速度以增强能量积累;需要较大切缝宽度时,则选择大于7.0 mm的离焦状态,搭配中等激光功率与较快进给速度以控制热输入。对于批量化生产,5.5~7.5 mm区间因对工作距离波动不敏感,有助于提高切削工艺稳定性,降低调试难度。结合所建预测方程,可通过目标切缝尺寸反向快捷推导可行的切削参数。

需要特别指出的是,上述 d 和 W 均为基于设备标称参数和理想模型得到的理论估算值,仅用于说明工作距离变化可能引起的能量分布趋势,并不等同于不同工作距离下试样表面的实际有效光斑尺寸和真实能量密度。研究主要围绕切缝尺寸开展析因试验与统计建模,试验阶段未同步建立实际光斑测试、炭化层厚度定量测量和切缝侧壁微观形貌标准化表征方案。因此,关于热解、炭化与气化相对作用的分析属于基于切缝几何结果、理论估算及相关文献的机理推断。后续研究仍需结合实际光斑表征、切缝截面显微观察及炭化层测量,对相关推断作进一步验证。

3 结论

1) 在本试验条件下,工作距离、进给速度和激光功率对臭冷杉激光切缝尺寸均具有极显著影响($P<0.001$)。缝深的主效应大小为:激光功率>进给速度>工作距离;缝宽的主效应大小为:工作距离>进给速度>激光功率;各因素间交互效应显著,表明切削过程存在明显的多参数耦合作用。

2) 建立的包含二次项和交互项的臭冷杉激光切削回归预测模型对缝深和缝宽的预测误差为21%~25%,模型能够捕捉激光工艺参数对加工效果的主要影响趋势。由于不同树种在密度、导热性和纹理结构等方面的差异,该模型参数不宜直接套用于其他树种木材。

3) 工作距离通过改变离焦量和光斑能量密度对切削质量产生非线性影响。在本试验条件下,若追求较大切缝深度,建议将工作距离控制在5.2~5.8 mm范围内;若强调工艺稳定性,可选择5.5~7.5 mm区间。

本研究方法可推广应用于其他生物质材料的激光加工研究中,通过重新标定特征参数,即可快速建立相应材料的“材料属性-工艺参数-加工质量”预测模型,为实现木材加工的数字化与智能化控制提供通用的理论框架。

参考文献:

- [1] 赵洪刚,孙玮鸿,梁鹏鹏,等.基于响应面法激光切削柞木效果[J].林业科学,2025,61(8):172-179.
ZHAO H G, SUN W H, LIANG P P, et al. Effect of laser cutting of oak wood based on response surface methodology[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(8): 172-179.
- [2] 赵洪刚,覃胜,赵梓旭,等.激光机加工落叶松技术参数的优化[J].机床与液压,2021,49(4):27-30.
ZHAO H G, QIN S, ZHAO Z X, et al. Optimization for parameters of larch laser processing technology[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(4): 27-30.
- [3] 李庆增,赵昊民,赵洪刚,等.基于等效代换法激光切削桦木极速燃烧特性的研究[J].林业工程学报,2025,10(2):67-71.
LI Q Z, ZHAO H M, ZHAO H G, et al. Study of rapid combustion characteristics of laser-cut birch wood based on the equivalent substitution method[J]. Journal of Forestry Engineering, 2025, 10(2): 67-71.
- [4] ANISZEWSKA M, MACIAK A, ZYCHOWICZ W, et al. Infrared laser application to wood cutting[J/OL]. Materials, 2020. <https://doi.org/10.3390/ma13225222>.
- [5] 彭晓瑞,侯晓鹏,孟凡丹,等.木地板紫外激光标刻加工工艺研究[J/OL].林业工程学报,2025-04-15. <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.202407030>.
PENG X R, HOU X P, MENG F D, et al. Study on UV laser marking processing technology of wood floor[J/OL]. Journal of Forestry Engineering, 2025-04-15. <https://doi.org/10.13360/j.issn.2096-1359.202407030>.
- [6] RUŽIAK I, IGÁZ R, KUBOVSKÝ I, et al. ANN prediction of laser power, cutting speed, and number of cut annual rings and their influence on selected cutting characteristics of spruce wood for CO₂ laser processing[J/OL]. Materials, 2024. <https://doi.org/10.3390/ma17133333>.
- [7] YANG C M, TIAN X C, XUE B, et al. Research on the wood processing method of helium-assisted laser process[J/OL]. Journal of Wood Science, 2022. <https://doi.org/10.1186/s10086-022-02051-4>.
- [8] LIU Q W, YANG C M, XUE B, et al. Processing technology and experimental analysis of gas-assisted laser cut micro thin wood[J]. BioResources, 2020, 15(3): 5366-5378.
- [9] 杨春梅,蒋婷,刘九庆,等.红松水导纳秒激光烧蚀机制及加工试验[J].林业科学,2020,56(8):201-208.
YANG C M, JIANG T, LIU J Q, et al. Ablation mechanism and experiment of Korean pine by water-jet guided nanosecond laser[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(8): 201-208.
- [10] 马岩,缪骞,杨春梅,等.基于LOM技术激光切割薄木模型构建[J].西北林学院学报,2020,35(1):268-272.
MA Y, MIAO Q, YANG C M, et al. Modeling of laser cutting of thin wood based on LOM technology[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(1): 268-272.

(下转第75页)