

激光切割木材试验及其加工质量的影响因素分析

姜新波 李晋哲 白岩 吴哲 杨春梅 马岩*

东北林业大学林业与木工机械工程技术中心, 黑龙江 哈尔滨 150040

摘要 采用固体脉冲激光器,研究了激光能量、进给速度及切缝深度对厚度为2 mm的核桃楸、柞木、水曲柳及黄波罗板材的切缝加工质量的影响。试验结果表明,当脉冲激光频率为20 Hz,激光能量为300 mJ,切缝长度为12 mm时,核桃楸切缝表面加工质量最好。在激光能量为116 mJ时,柞木的切缝表面加工质量最好。试验证明,对于同种木材,在激光能量增大时切缝表面熔渣减少,光滑程度提高,加工质量相应提高。激光能量和切割深度不变时,木材气干密度增大,切割的进给速度随之减小,切缝表面加工质量提高。

关键词 激光光学; 木材; 激光切割; 加工质量; 脉冲激光器

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.031403

Laser Cutting Wood Test and Influencing Factors of Processing Quality

Jiang Xinbo Li Jinzhe Bai Yan Wu Zhe Yang Chunmei Ma Yan

Forestry and Woodworking Machinery Engineering Technology Center, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China

Abstract A solid pulse laser laboratory bench is used to study the impact of laser energy, feed rate and kerf depth on slit surface processing quality of *Juglans malle-shurica*, *Quercus mongolica*, *Fraxinus mandshurica* and *Phellodendron amurense* with thickness of 2 mm. The results show that with pulsed laser frequency of 20 Hz, laser energy of 300 mJ and kerf length of 12 mm, the kerf surface quality of *Juglans malle-shurica* is the best. When the laser energy is 116 mJ, the kerf surface quality of *Quercus mongolica* is the best. The tests prove that for the same kind of wood, the increase of laser energy can reduce the molten slag on the kerf surface and improve both of the smoothness and the kerf surface quality. When the laser energy and the depth of kerf are constant, the feed rate is reduced and the processing quality of kerf surface is improved as the air-dry density increases.

Key words laser optics; timber; laser cutting; processing quality; pulsed lasers

OCIS codes 140.3538; 140.3390; 180.5810

1 引言

木材是当今世界四大材料(钢材、水泥、木材、塑料)中唯一可再生和循环再利用的绿色材料,对于国民经济的可持续发展具有重要意义^[1-4]。根据全国第八次森林资源清查统计,我国森林总面积已达2.08亿公顷,森林覆盖率为21.63%,森林蓄积量为151.37亿立方米,其中天然林面积为1.22亿公顷,人工林面积为0.69亿公顷。虽然我国森林总面积位居世界第五位,但我国人均森林面积仅为世界人均水平的25%,这说明我国依旧是一个森林资源贫乏的国家^[5-7]。自改革开放以来,我国木材工业发展迅速,木材产品已覆盖建筑构件、铁路、船舶、车辆、家具、包装用品以及各类人造板等众多领域。而面对森林资源用量的增加,我国木材加工企业的加工水平没有得到明显提高,在一定程度上造成了森林资源的巨大浪费。

近年来,激光技术在木材加工工业中得到了日益广泛的应用。木材工业能耗低、污染少、可再生,而且激

收稿日期: 2015-09-11; 收到修改稿日期: 2015-10-08; 网络出版日期: 2016-01-08

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2572015DB02)、国家自然科学基金(31200434)

作者简介: 姜新波(1967—),男,博士,副教授,主要从事木材机械加工、木材激光加工等方面的研究。

E-mail: jxb-1967@163.com

*通信联系人。E-mail: myan@vip.163.com

光切割极大地提高了木材加工精度及出材率,激光切割的切缝宽度可以达到传统锯切方法切缝宽度的1/10,在加工过程中对加工对象造成的形变小、切割精度高,同时激光具有能量集中性高、方向性好、单色性好、相干性好、节约能源等优点,激光热源对木材又具有良好的加工性,因此激光加工在木材加工工业中的应用愈加广泛^[8-10]。

本文主要根据激光能量和木材种类的变化分析激光切割中木材加工表面质量的影响因素。

2 激光切割木材的影响因素

激光切割是在工件上照射聚焦的高功率密度激光束,使工件在超过激光阈值的激光功率密度作用下将激光束以及切割过程中产生的其他形式的热能吸收,在激光作用点位置将工件汽化并形成孔洞,随着激光束与工件的相对运动,最终使工件形成切缝,完成切割^[11-14]。影响激光木材切割的主要因素包括激光光束特性、木材材性以及激光设备加工工艺变量。其中激光光束特性包括激光能量、波形、极化强度和稳定性;木材材性包括含水率、密度、纤维方向和木材强度等;激光设备加工工艺变量包括激光器类型、透镜焦点位置、进给速度和切削深度等^[15-18]。

2.1 激光功率

当对薄木板进行切割时,木材的厚度不大于激光光束的有效切割深度,木材将所有吸收的激光能量用于熔化和汽化,随后汽化残留为炭化层。此时忽略辐射、对流和传热损失,则由文献[19]可知:

$$\frac{P}{Ut} = \eta W \rho (C \Delta T + L_f + m' L_v), \quad (1)$$

式中 P 为吸收功率, $P = P_i(1 - \gamma_r)$, P_i 为入射功率, γ_r 为反射率, U 为进给速度, t 为切割深度, η 为过程效率的倒数, W 为切缝宽度, ρ 为工件密度, C 为工件比热, ΔT 为升至熔点 T_m 的温度区间, L_f 为熔化潜热, m' 为熔化后再汽化的质量百分数, L_v 为汽化潜热。

当切割深度 t 与工件厚度一致时,此时的进给速度 U 为最大切割速度,对于确定的工件材料,(1)式中右侧各项可近似为常数,因此可知 P/Ut 亦为常数。由此可知,在确定工件材料的情况下,激光功率增大则木材吸收功率 P 增大,进给速度 U 也随之增大;在进给速度 U 一定时,激光功率增大则切割深度 t 增大,可切割的材料厚度也随之增大。

2.2 木材材性

木材密度、含水率以及纤维方向等因素在激光切割木材过程中对激光能量的吸收具有一定的影响。当激光功率与切割进给速度一定时,木材密度的增加使得激光去除切缝材料所需的能量增加,在切缝处产生的温度梯度加大,从而导致板材的切割深度和切缝宽度同时减小。木材含水率越高,导热性越好,切割表面的炭化程度越小,作用在木材切缝处的激光能量散失得越多。随着激光功率的提高,在保证切割深度和切缝宽度不变的情况下,含水率越高切割速度越慢。根据木材纤维方向的不同,切割方法分为顺纤维切割和横纤维切割。在其他条件相同的情况下,顺纤维切割时热破坏区与导管直径相当;横纤维切割时,导管端部因受热燃烧影响具有明显的卷曲现象,细胞腔内有固体沉积物附着,热破坏区深度偏大。

3 试验材料与方法

3.1 试验材料

试验所用试材的规格、含水率等参数如表1所示。

表1 试验材料参数指标

Table 1 Test material parameters

Species	<i>Juglans maldshurica</i>	<i>Quercus mongolica</i>	<i>Fraxinus mandshurica</i>	<i>Phellodendron amurense</i>
Specification /mm ³	150×20×2			
Number of kerf	3			
Air-dry density /($g \cdot cm^{-3}$)	0.527	0.766	0.686	0.449
Moisture content /%	9.4	8.9	9.1	9.6

3.2 试验方法

利用GP10-1A纳秒激光发生器调节不同电压参数对上述试验材料分别进行切割,对切割后的试样进行研究,分析激光能量、树种对切割表面形貌及切缝微观状态的影响。试件尺寸如图1所示,试验切缝长度为12 mm。利用美国FEI公司生产的Quanta 200型环境扫描电子显微镜对切割表面进行观察。

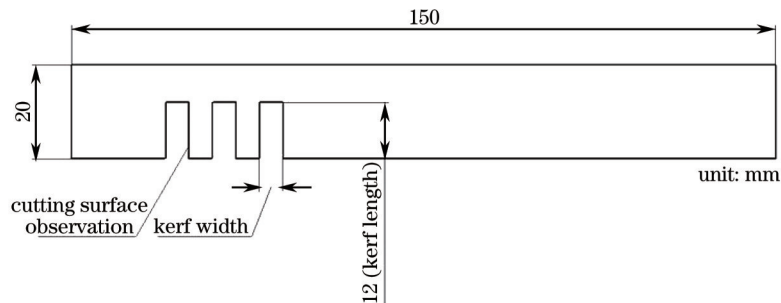


图1 试件尺寸示意图

Fig.1 Diagram of specimen size

3.3 试验仪器设备

采用由GP10-1A型纳秒激光发生器、Nd:YAG固体激光器、OTBB39-1精密光学试验平台组成的装置。脉冲激光器频率为20 Hz,透镜焦距为15 mm,交点处光斑直径为0.5 mm。

4 试验结果与分析

4.1 激光能量对切割性能的影响

利用固体激光器对厚为2 mm的核桃楸板试样进行切割,在激光能量分别为51、116、202、300 mJ时进行实验。切割时激光能量对切缝外观质量的影响如图2所示。

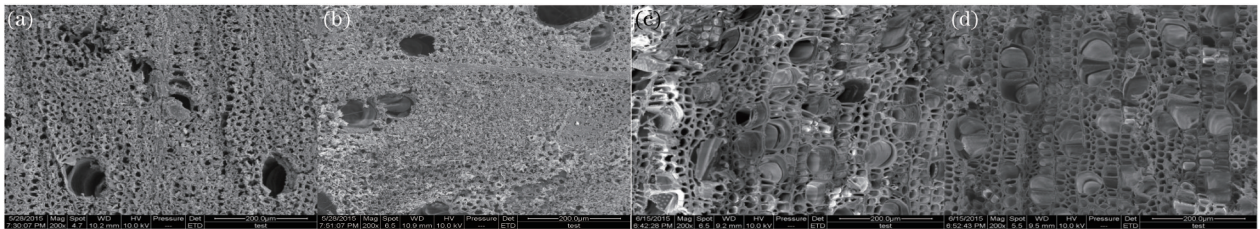


图2 激光能量对切缝外观质量的影响。(a) 51 mJ; (b) 116 mJ; (c) 202 mJ; (d) 300 mJ

Fig.2 Effect of laser energy on kerf appearance quality. (a) 51 mJ; (b) 116 mJ; (c) 202 mJ; (d) 300 mJ

根据试验结果,如图3所示,当激光能量为51 mJ时,切割时间为372 s,切缝表面光滑程度低,木材炭化现象明显,残留的熔渣很多;当激光能量为116 mJ时,切割时间为274 s,切缝表面光滑程度有所改善,但木材炭化现象仍然较为严重,残留的熔渣依旧较多;当激光能量为202 mJ时,切割时间为108 s,切割过程加快,切缝表面光滑程度明显提升,木材炭化程度得到较好控制,在切缝表面以及细胞内部的残留熔渣较少;当激光能量为300 mJ时,切割时间为81 s,切缝表面光滑程度无较大改变,但木材炭化现象进一步减弱,在切缝表面及细胞内部基本不存在残留熔渣。由此可知,随着激光能量的提高,木材的熔化汽化速度加快,切割时间随之缩短,在切缝处造成的炭化程度降低,从而使得木材表面更加光滑,切割效果显著提高。

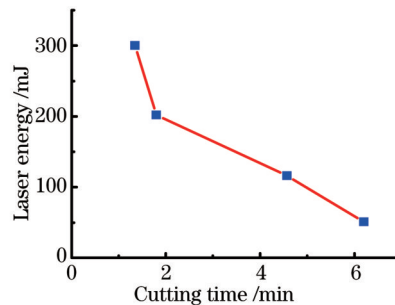


图3 激光能量对切割时间的影响

Fig.3 Effect of laser energy on cutting time

4.2 木材种类对切割性能的影响

利用固体激光器对厚为 2 mm 的核桃楸、柞木、水曲柳及黄波罗板试样分别进行切割,激光能量为 116 mJ。切割时木材种类对切缝外观质量的影响如图 4 所示。

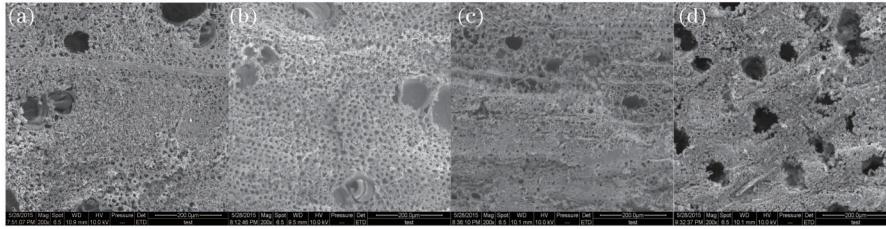


图 4 木材种类对切缝外观质量的影响。(a) 核桃楸;(b) 柞木;(c) 水曲柳;(d) 黄波罗

Fig.4 Effect of wood species on kerf appearance quality. (a) *Juglans mandschurica*; (b) *Quercus mongolica*; (c) *Fraxinus mandshurica*; (d) *Phellodendron amurense*

根据试验结果可以发现,激光能量为 116 mJ 时,木材种类对切缝外观的影响程度不同。图 4(a)所示为核桃楸切缝表面,进给速度为 2.0 mm/min。核桃楸为半散孔材,管孔弦径一般为 154~210 μm ,且多数为单一管孔,少数为 2~4 个管孔组成的复管孔。材质略轻软,气干密度为 0.527 g/cm^3 。图 4(b)所示为柞木切缝表面,进给速度为 1.3 mm/min。柞木为环孔材,管间纹孔密集,在弦切面上的晚材管孔甚小,呈辐射状排列。材质坚硬,不易切削,气干密度为 0.766 g/cm^3 。图 4(c)所示为水曲柳切缝表面,进给速度为 1.9 mm/min。水曲柳为环孔材,晚材管孔甚小,分散或呈短斜线状排列。晚材导管壁厚,纹孔呈圆形且排列较为密集。材质略重硬,易加工,气干密度为 0.686 g/cm^3 。图 4(d)所示为黄波罗切缝表面,进给速度为 2.3 mm/min。黄波罗为环孔材,弦切面上晚材管孔小至甚小,呈单独至集团状分布,在近轮缘处多团聚呈断续的弦向波浪排列。材质轻软,易加工,气干密度为 0.449 g/cm^3 。

核桃楸、柞木、水曲柳及黄波罗均属于阔叶树材,如图 5 所示,在激光能量以及切割深度一定的情况下,激光切割进给速度随木材气干密度的增大而减小。这是由于木材气干密度增大则强度及硬度相应提高,激光在去除切缝处单位体积的材料时消耗的能量也随之提高。如图 4 所示,相比于其余 3 种木材,核桃楸切缝表面及细胞内残留了大量燃烧后的卷曲状熔渣,这是由于核桃楸为半散孔材,管孔为单穿孔,底壁倾斜,导管壁薄,易导致熔渣残留。柞木、水曲柳及黄波罗为环孔材,管孔分布均匀,纹孔密集,且木材气干密度大,在切缝处的材料汽化更充分,残留的熔渣较少,切割效果更佳。

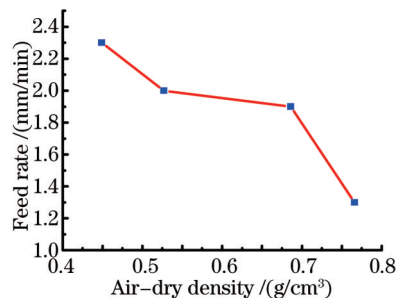


图 5 木材气干密度对进给速度的影响

Fig.5 Effect of air-dry density of wood on feed rate

5 结 论

1) 对单一木材而言,在切割深度不变时,激光能量的增强可以加快切割速度,改善切缝表面质量,减小切缝处热影响区深度。在微观状态下,木材切缝表面及管孔内熔渣显著减少,加工表面质量明显提高。

2) 在激光能量与切割深度一定的情况下,激光切割的进给速度随木材气干密度增大而降低。进给速度下降致使切割时间延长,木材切缝表面热影响区扩大,烧痕明显。在微观状态下,木材细胞的破坏程度增大,加工表面光滑程度更高。

3) 在激光能量与切割深度一定的情况下,柞木、水曲柳、黄波罗等环孔材切缝表面熔渣卷曲残留较少,加工质量优于核桃楸等半散孔材。

参考文献

- 1 Xie Deyan. Analysis to situation and countermeasure of wood manufacture industry of our country[J]. Forest Investigation Design, 2013, (3): 85-92.
解德艳. 我国木材加工产业现状及对策分析[J]. 林业勘查设计, 2013, (3): 85-92.
- 2 Liu Nian, Chen Zihong, Lü Chao. Research on the factors of affecting the precision of laser cutting[J]. Applied Laser, 2014, 34(3): 238-242.
刘念, 陈子宏, 吕超. 影响薄板激光切割精度因素的研究[J]. 应用激光, 2014, 34(3): 238-242.
- 3 Hua Yinqun, Xiao Tao, Xue Qing, *et al.*. Experimental study about laser cutting of carbon fiber reinforced polymer[J]. Laser Technology, 2013, 37(5): 265-270.
花银群, 肖淘, 薛青, 等. 激光切割碳纤维复合材料的实验研究[J]. 激光技术, 2013, 37(5): 265-270.
- 4 王炳云. 激光切割在木材加工中的应用[J]. 林业科技开发, 1994, (1): 25-27.
- 5 钱小瑜. 中国林业资源与非木纤维供给分析[J]. 中华纸业, 2014, (9): 23-27.
- 6 古国伦, 潘锋. 林业资源与林业造林方法简述[J]. 南方农业, 2015, 9(6): 85-87.
- 7 唐霞辉. 激光加工技术的应用现状及发展趋势[J]. 金属加工(热加工), 2015, (4): 16-19.
- 8 Sun Lingfang, Yan Chunshou. Application of laser in wood cutting[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2000, 28(5): 11-15.
孙玲芳, 严椿绶. 激光技术在木材切割中的应用[J]. 林业机械与木工设备, 2000, 28(5): 11-15.
- 9 Wen Jianmin, Liu Yiqun. Advanced wood processing technology[J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2011, 39(1): 8-11.
温建民, 刘逸群. 木材加工先进技术[J]. 林业机械与木工设备, 2011, 39(1): 8-11.
- 10 曹平祥. 木材激光切割及影响因素[J]. 木工机床, 1995, (3): 1-7.
- 11 李斌. 影响激光切割木材的因素[J]. 木工机床, 1989, (2): 32-34.
- 12 Xu Guojian, Li Hongli, Hang Zhengxiang, *et al.*. Performance of 6 mm mild steel sheet laser cutting[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(4): 040601.
徐国建, 李宏利, 杭争翔, 等. 6 mm 碳钢板的激光切割性能[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(4): 040601.
- 13 Tang Yuanji. Current status of the application of laser cutting in industry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2002, 39(1): 53-56.
唐元冀. 激光切割在工业上应用的现状[J]. 激光与光电子学进展, 2002, 39(1): 53-56.
- 14 Su Yongsheng, Li Liang, He Ning, *et al.*. Experimental research on laser machining of surface micro-textures of carbide cutting tool[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0603002.
苏永生, 李亮, 何宁, 等. 激光加工硬质合金刀具表面微织构的试验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603002.
- 15 Chen Cong, Gao Ming, Gu Yunze, *et al.*. Study on fiber laser cutting of aluminum alloy sheet[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0603004.
陈聪, 高明, 顾云泽, 等. 光纤激光切割铝合金薄板工艺特性研究[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603004.
- 16 Chen Hua, Xue Shoulong, Hu Hong. Experimental and theoretical analysis of cutting packaging materials by laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 52(1): 011404.
陈华, 薛守龙, 胡泓. 包装材料激光切割数学建模与实验研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 52(1): 011404.
- 17 Zhang Wei, Li Guozhu, Wang Chunming, *et al.*. Process optimization and design of fiber laser cutting aluminium-lithium alloy[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(2): 0203003.
张威, 李国柱, 王春明, 等. 铝锂合金光纤激光切割的工艺优化与设计[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203003.
- 18 Liu Qibin. The Laser Processing Technology and Its Applications[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 170-171.
刘其斌. 激光加工技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 170-171.
- 19 Shen Zongqi. Wood Science[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1998: 327-328.
申宗圻. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998: 327-328.

栏目编辑: 吴秀娟