

文章编号 1004-924X(2016)增-0123-06

## 激光烧蚀实木异型表面的微观形貌实验

白岩, 杨春梅\*, 吴哲, 马岩

(东北林业大学机电工程学院, 黑龙江哈尔滨 150040)

**摘要:**为了解决具有异型表面的木雕和高档家具砂磨困难的问题,提出了使用脉冲激光加工系统代替传统人工打磨的方法。首先在理论上考虑基模高斯光束的入射能量和材料比能,得出了单位时间的最大烧蚀深度。然后使用 Nd:YAG 激光器,选取水曲柳和红松两种具有代表性的实木材料作为实验对象,在单脉冲能量为 300, 600 mJ 以及脉冲重复频率为 5, 10 Hz 的条件下进行了激光烧蚀实验。实验结果表明,红松由于密度较小,烧蚀深度变深,激光烧蚀速率也更快;相比于脉冲能量,脉冲重复频率的提高可以更显著地提高烧蚀效率。水曲柳和红松两种试材的最大烧蚀速度分别为 0.20 mm/s 和 0.33 mm/s,基本满足异型表面实木家具的砂光打磨要求。

**关键词:**激光加工;激光烧蚀;异型表面;砂光;实木

**中图分类号:** TG665 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162413.0123

## Microtopography experiment of laser ablation on surface of special-shaped solid wood

BAI Yan, YANG Chun-mei\*, WU Zhe, MA Yan

(College of Mechanical and Electrical Engineering,  
Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

\* Corresponding author, E-mail: ycmnefu@126.com

**Abstract:** To overcome the sanding difficulties in costly furniture and wood carving with special-shaped surface, a method in which the pulse laser processing system replaces the traditional manual sanding was put forward. Firstly, the maximum ablation depth per second was obtained by taking the specific energy of materials and incident energy of fundamental-mode Gaussian beam into account. Then, two representative solid wood materials ashtree and Korean pine were sanded respectively by using the Nd:YAG laser with the single pulse energies of 300, 600 and the pulse repetition frequencies of 5, 10 Hz. The experiments indicate that the Korean pine has a smaller ablation depth and a faster ablation rate due to its lower density. Compared with the increase of the pulse energy, the higher pulse repetition frequency can improve the ablation rate more significantly. The maximum ablation rate of ashtree and Korean pine is respectively 0.20 mm/s and 0.33 mm/s, which basically meets the sanding requirement for solid wood furniture with special-shaped surface.

**Key words:** laser processing; laser ablation; special-shaped surface; sanding; solid wood

收稿日期:2016-05-30;修订日期:2016-06-12.

基金项目:中央高校基本科研业务费资助项目(DL12BB35);黑龙江省自然科学基金资助项目(C2016013)

## 1 引言

我国是世界最大的木雕和高档家具生产国,在木雕和高档家具的精加工过程中,砂光打磨工序是必不可少的。由于木材的各向异性,加工异型表面木雕和高档家具的数控刀具会使实木的表面产生大量微观凸凹不平不规则的毛刺,导致产品表面质量下降,影响木雕和高档家具的装饰效果以及产品价值<sup>[1]</sup>。根据涂饰喷漆的装饰性需要,实木表面需要进行砂光以提高表面光洁度。当前,木雕和高档家具的生产过程已基本实现了机械化和自动化,但软砂光砂带在对具有异型表面的实木木雕和高档家具等进行打磨时,经常出现砂和漏砂的现象,使得砂光打磨不均匀。因此,异型表面实木木雕和高档家具的砂光和打磨很难完全实现机械化和自动化,必须加以手工砂磨。但手工砂磨劳动力成本较高,且效率低下,打磨过程中产生的大量粉尘直接危害作业人员的身体健康,并造成环境污染,当粉尘浓度超标时还会存在火灾和爆炸等安全隐患<sup>[2]</sup>。

激光加工基于激光烧蚀原理,使用高功率密度的激光照射在材料表层,引起材料表面的质量迁移、消蚀或散失等现象<sup>[3-4]</sup>。当前的研究热点集中在激光作用于金属或复合材料的烧蚀阈值以及去除机理方面<sup>[5-8]</sup>。韩国的 Jaegu Kim 教授使用 1 mm 直径的飞秒激光束对金属膜进行烧蚀,通过比对不同厚度金属膜烧蚀后的图像建立了温度传热模型<sup>[9]</sup>。郑卜祥等人使用超快脉冲激光对钛合金加工的烧蚀阈值、烧蚀形貌和材料去除机理进行了研究<sup>[10]</sup>。彭国良等人建立了激光辐照玻璃纤维/环氧树脂复合材料的热力学模型,讨论了激光功率密度对烧蚀效率的影响<sup>[11]</sup>。但使用激光对木材异型表面进行砂光的技术和机理研究,目前还未见报道。

激光加工技术可以解决异型表面实木木雕和高档家具砂磨困难的问题。与传统砂光方式相比,使用激光进行实木异型表面砂光具有如下优点:木制品表面的毛刺由各向异性的木纤维构成,激光具有大功率密度,可以使其迅速碳化、消蚀,效率高;激光具有高相干性,光斑直径可小至微米量级,作用时间可控制在纳秒量级甚至更短,所以非常适合进行精密微细加工;激光加工属于非接

触式加工,不存在加工工具磨损的问题;木制品表面不受应力,微观毛刺受热后,木纤维中的水分汽化蒸发,纤维碳化、消蚀,无粉尘产生,不污染环境<sup>[12]</sup>。所以,本文使用激光对具有异型表面的实木制品进行了砂光实验,对激光烧蚀实木异型表面的机理进行了初步探究。

## 2 实验方案

实验方案如图 1 所示。实验设备由激光器、冷却系统、高压电源、控制系统、聚焦准直系统等组成。激光器采用 Nd:YAG 固体激光器,它具有费用低、体积小、维护简便等特点。激光器采用平腔结构,腔镜由两片平面镜组成,其中一片镀 1 064 nm 高反膜,另外一片镀 1 064 nm 部分反射膜,透过率为 15%。为保证基横模输出,在腔内设置孔径可调的小孔光阑。泵浦光由脉冲氙灯产生,通过电源产生高压触发信号为氙灯提供能量,输出光由双凸透镜聚焦在试件表面。试件放置于高精度电动位移台之上,位移台可以对试件进行升降和水平移动,即试件可以在作业平面上进行二维方向的运动。激光器采用 600 W 的循环水冷机进行冷却。

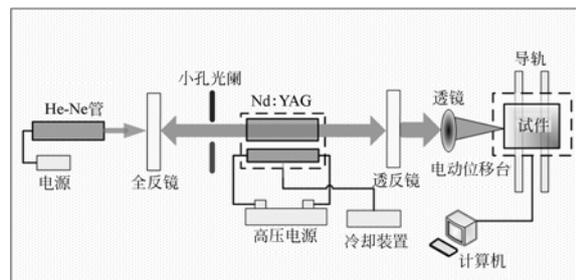


图 1 激光烧蚀实验装置图

Fig. 1 Experimental apparatus of laser ablation

激光器输出的单脉冲能量为 0~2 J,重复频率为 0~20 Hz,聚焦光斑半径设置为 1~5 mm。实验采用水曲柳(硬木,气干密度约为 690 kg/m<sup>3</sup>)和红松(软木,气干密度约为 440 kg/m<sup>3</sup>)作为试件材料,试件尺寸为 150 mm×80 mm×10 mm,夹持在电动位移台上。

## 3 理论计算

使用 Nd:YAG 固体激光器产生基模高斯光

束,其功率密度可表示为:

$$I = \frac{\alpha P}{\pi R^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{R^2}\right], \quad (1)$$

其中: $\alpha$ 为试件材料对激光的吸收率, $P$ 为激光器的输出功率, $R$ 为光强下降到中心值的 $1/e^2$ 时对应的聚焦光斑半径。

设激光重复频率为 $k$ ,根据式(1),单位时间内激光的入射能量 $E_b$ 可表示为:

$$E_b = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\alpha P}{\pi R^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{R^2}\right] ds \cdot k. \quad (2)$$

毛刺的化学成分以碳水化合物为主,在高功率密度激光的照射下,激光能量快速沉积,毛刺表面受热温升,其内水分迅速汽化升华,纤维碳化进而熔融消蚀,分解这部分材料所需要的能量 $E_g$ 为:

$$E_g = \rho \cdot (C_p(T_v - T_a) + L_v + mL_f) \cdot D \cdot S, \quad (3)$$

其中: $\rho$ 为材料密度, $D$ 为烧蚀深度, $C_p$ 是比热, $T_v$ 是汽化温度, $T_a$ 是环境温度, $L_v$ 为熔化潜热, $m$ 为熔化后再汽化的质量百分数, $L_f$ 为汽化潜热。

由于非金属材料的热导率很低,通常只有金属材料的几分之一,为简化分析,不考虑热导损失,此时由能量守恒有:

$$E_b = E_g. \quad (4)$$

联立式(2)~(4),可得烧蚀深度为:

$$D = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\alpha k P}{\pi R^2} \exp\left[-\frac{x^2 + y^2}{R^2}\right] ds}{\rho(C_p(T_v - T_a) + L_v + mL_f) S}. \quad (5)$$

经推导化简可得最大烧蚀深度为:

$$D = \frac{\alpha k P}{\sqrt{\pi} \rho (C_p(T_v - T_a) + L_v + mL_f) R^2}. \quad (6)$$

令 $Q = \rho(C_p(T_v - T_a) + L_v + mL_f)$ ,它是一个与材料特性有关的量,称为材料比能,则单位时间的最大激光烧蚀深度为:

$$D_{\max} = 0.564 \cdot \frac{\alpha k P}{QR^2}, \quad (7)$$

式中: $\alpha, Q$ 是与材料特性有关的量; $k, P, R$ 是激光参数。

#### 4 烧蚀实验与结果

根据理论计算结果,需要设置的激光参数有激光功率 $P$ 、重复频率 $k$ 以及光斑半径 $R$ 。通过改变腔镜透过率和改变高压电源的泵浦电压可以改变激光的输出功率 $P$ 。激光脉冲的重复频率由脉冲氙灯的闪光频率决定,通过调整高压电源的触发频率来改变激光脉冲的重复频率 $k$ ;通过改变透镜的位置来改变聚焦光斑半径 $R$ 。

令激光器输出的单脉冲能量为300 mJ,重复频率为5 Hz。通过微调电动位移台进行多次试验,使用扫描电子显微镜观察微观图像,结果如图2所示。两种材料在激光作用下产生不同程度的破坏,图2(a)为作用时间为3 s的水曲柳表面图像,水曲柳由于密度较大,与红松相比,在3 s的作用时间内,烧蚀深度相对较浅,切口不够齐整。增加作用时间至5 s,水曲柳表面图像如图2(b)所示,可以看到切口变得较为齐整,烧蚀深度有所增加;图2(c)为作用时间为3 s的红松表面图像,可以看到红松由于密度较小,烧蚀深度较深,切口较为齐整。

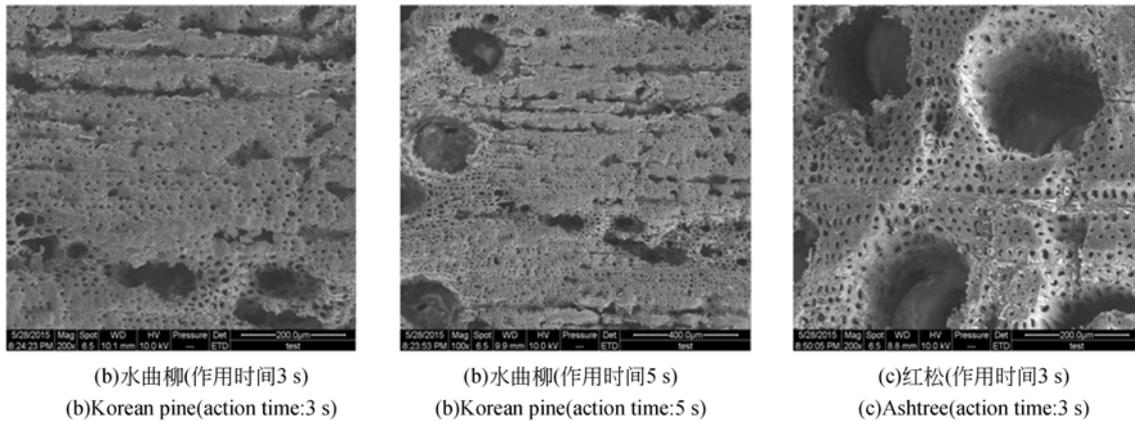


图 2 激光烧蚀后实木表面的微观图像

Fig. 2 Microscopic images of solid woods' surface after laser ablation

水曲柳和红松两种试件的烧蚀深度与作用时间的对应关系,如图 3 所示。可以看到在激光作用初期,试件表面有一个能量累积的过程,激光能量在木纤维表面快速沉积,烧蚀深度并无明显变化;当激光辐照区域超过某一阈值时,木材细胞中的水分汽化升华,木纤维发生碳化、消蚀,随着作用时间的增加烧蚀深度逐渐增大;当作用时间超过 10 s 之后,烧蚀速度放缓,这是由于当达到一定深度时,熔融残渣通过汽化的方式排出作业区,消耗了更多的能量。相对来说,红松由于材质较软,相同时间内可以比水曲柳达到更深的烧蚀深度,但是二者在激光作用下随时间变化的规律是基本相同的。

木材表面可认为是漫射灰表面,其全波长法向发射率等于全波长法向吸收率。木材作为非金属材料,其发射率较高,在 0.82~0.92 之间,但木材受激光烧蚀时在高温作用下其发射率随温度变化,采用 Mardini 等<sup>[13]</sup>的实验结果,发射率取值 0.65。经计算,两种试件材料材料比能分别为  $4.49 \times 10^8 \text{ J/m}^3$  和  $2.86 \times 10^8 \text{ J/m}^3$ 。根据式(7),若单脉冲能量为 300 mJ,重复频率为 5 Hz,聚焦光斑半径为 2 mm,则计算可得水曲柳和红松的烧蚀速度分别为 0.31 mm/s 和 0.48 mm/s。将此计算结果与图 3 的实验数据进行比较,发现即使在 3~12 s 的线性区域,两种试材的最大烧蚀速度也只能达到 0.20 mm/s 和 0.33 mm/s。这是由于在理论分析中没有考虑木材导热损失的影响,另外也与木纤维在温升过程中的吸收率一直变化有关。

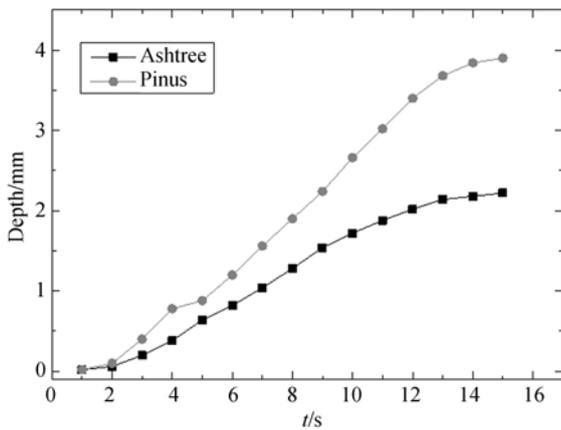


图 3 烧蚀深度与作用时间的关系

Fig. 3 Relationship between ablation depth and action time

以红松为实验对象,研究了单脉冲能量对烧蚀效果的影响。调整激光器输出的单脉冲能量为 600 mJ,脉冲重复频率仍为 5 Hz,与之前在 300 mJ 时的测量曲线进行对比,结果如图 4 所示。可以发现,600 mJ 时的烧蚀速度并没有达到 300 mJ 时的两倍,只是略有加快。之后恢复单脉冲能量为 300 mJ,调整脉冲重复频率为 10 Hz,与之前的 300 mJ、5 Hz 的曲线进行对比,如图 5 所示。可以看到虽然单脉冲能量不变,但由于重复频率加倍,在 2~10 s 内,烧蚀深度迅速增加,速度接近 5 Hz 时的两倍,在 10 s 以后烧蚀速度有所下降。对比图 4 和图 5 的实验结果可知,重复频率相比单脉冲能量更能提高烧蚀效率,由于在本质上作业区域的质量消蚀是由于材料吸收激光能量引起的,热效应是发生质量迁移的根本原因,较高的重

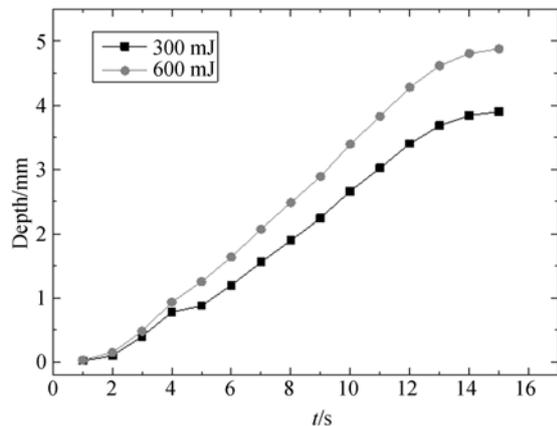


图 4 不同单脉冲能量作用的烧蚀深度

Fig. 4 Ablation depths with different single pulse energies

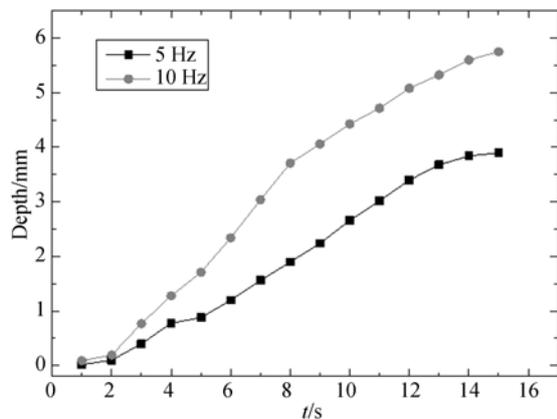


图 5 不同重复频率作用的烧蚀深度

Fig. 5 Ablation depths with different repetition frequencies

复频率有助于热能的快速积累,从而实现提高烧蚀效率的目的。

## 5 结 论

本文对激光烧蚀实木异型表面进行了理论与实验研究。理论上考虑基模高斯光束和材料比能,得出单位时间的最大烧蚀深度。以水曲柳和

红松为试材,使用 Nd:YAG 激光器进行激光烧蚀实验研究。实验结果表明,烧蚀速率与材料密度有关,软木相对硬木的烧蚀速率更高;较高的脉冲重复频率有助于热能的快速累积,可以更好地提高烧蚀效率。实测两种试材的最大烧蚀速率为 0.20 mm/s 和 0.33 mm/s。下一步研究要在理论计算中考虑热导损失的影响,以期理论结果更加接近实验结果。

### 参考文献:

- [1] 马岩.我国数控木工机械的发展现状及自动化技术的研发方向[J]. 林业机械与木工设备,2012,40(1):4-9.  
MA Y. Development status of China's CNC woodworking machinery and the development direction of automation technology[J]. *Forestry Machinery and Woodworking Equipment*, 2012, 40(1):4-9. (in Chinese)
- [2] 张杰.木门异形表面砂光工艺研究[D].北京:中国林业科学研究院,2011.  
ZHANG J. *Study on surface sanding technology of special-shaped wooden door*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011. (in Chinese)
- [3] 刘友强,曹银花,李景,等.激光加工用 5 kW 光纤耦合半导体激光器[J].光学精密工程,2015,23(5):1279-1287.  
LIU Y Q, CAO Y H, LI J, et al.. 5 kW fiber coupling diode laser for laser processing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5):1279-1287. (in Chinese)
- [4] 贾威,罗义鸣,宋有建,等.脉冲激光加工高分子材料[J].纳米技术与精密工程,2015,13(3):205-210.  
JIA W, LUO Y M, SONG Y J, et al.. Laser Micromachining of Polymer[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2015, 13(3):205-210. (in Chinese)
- [5] 贾振元,赵凯,刘巍,等.工程塑料表面金属覆层的激光定域精细去除[J].光学精密工程,2016,24(1):94-101.  
JIA ZH Y, ZHAO K, LIU W, et al.. Localized and precision removal of metal coating on engineering plastics using NC laser milling[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(1):94-101. (in Chinese)
- [6] LIU F R, ZHAO J J, ZHANG Q, et al.. Processing and characterizations of 2%PF/silica sand core-shell composite powders by selective laser sintering with a higher transmittance fiber laser[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2012, 60:52-58.
- [7] PIASECKA M. Laser texturing spark erosion and sanding of the surfaces and their practical applications in heat exchange devices[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 874:95-100.
- [8] 韩丰明,徐世珍,宋文亮,等.纳秒激光对铝合金和不锈钢的烧蚀特性研究[J].中国激光,2016,43(2):77-83.  
HAN F M, XU SH ZH, SONG W L, et al.. Study of nanosecond laser ablation on aluminum and stainless steel targets[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(2):77-83. (in Chinese)
- [9] KIM J, NA S. Metal thin film ablation with femtosecond pulsed laser[J]. *Optics&Laser Technology*, 2007, 39(7):1443-1448.
- [10] 郑卜祥,姜歌东,王文君,等.超快脉冲激光对钛合金的烧蚀特性与作用机理[J].西安交通大学学报,2014,48(12):1-9.  
ZHENG B X, JIANG G D, WANG W J, et al.. Ablation characteristics and interaction mechanism of ultra-fast pulse laser-induced damage in titanium alloy[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(12):1-9. (in Chinese)
- [11] 彭国良,张相华,高银军,等.激光辐照玻璃纤维/环氧树脂复合材料的力学剥蚀研究[J].中国激光,2015,42(1):0106001.  
PENG G L, ZHANG X H, GAO Y J, et al.. Research to mechanics erosion effect of laser irradiating glass/epoxy composites[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(1):0106001. (in Chinese)
- [12] 蒙文,韩晓飞,李云霞,等.激光辐照下尼龙纤维材料的热烧蚀规律[J].光学精密工程,2014,22(8):2014-2019.  
MENG W, HAN X F, LI Y X, et al.. Thermal ab-

lation law of nylon materials under laser irradiation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22 (8): 2014-2019. (in Chinese)

[13] MARDINI J A, LAVINE A S, DHIR V K. Heat

and mass transfer in wooden dowels during a simulated fire; an experimental and analytical study[J]. *Heat and Mass Transfer*, 1996, 39 (13): 2641-2651.

作者简介:



白 岩(1982—),男,黑龙江东宁人,博士,讲师,2008年、2012年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事木材激光加工方面的研究。E-mail: baiyan@nefu.edu.cn