

文章编号: 1001-3806(2011)02-0238-04

## YAG 激光参量对刻蚀微坑形貌的影响

占 剑, 杨明江\*

(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 为了增加单次激光脉冲刻蚀微坑的深度, 提高加工效率, 利用双声光调制技术, 通过对比不同能量密度的脉冲激光刻蚀微坑深度, 及对比两种激光器输出的激光脉冲刻蚀微坑形貌, 研究了激光参量对刻蚀微坑形貌的影响。结果表明, 脉冲能量密度为  $20.21\text{J}/\text{cm}^2$  时, 刻蚀微坑深度达到最大值, 继续增加能量密度时, 微坑深度将随之减小; 相比于单腔激光器, 双腔激光器刻蚀微坑深度从  $5\mu\text{m}$  增加至  $10\mu\text{m}$ , 微坑直径从  $161\mu\text{m}$  降至  $134\mu\text{m}$ 。

**关键词:** 激光技术; 激光刻蚀; 脉冲能量密度; 微坑表面形貌

**中图分类号:** TN249; TG665 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.02.026

## Effect of YAG laser parameters on etching crater morphology

ZHAN Jian, YANG Ming-jiang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In order to increase the etching depth with one laser pulse and promote the production efficiency, the effect of laser parameters on the etching depth was studied by means of double acousto-optic modulation technique after comparing the laser pulse etching crater morphology under different pulse energy density and two different lasers. The results showed: when the pulse energy density was  $20.21\text{J}/\text{cm}^2$ , the etching crater depth reached the maximum, and when continuing to increase the energy density, the crater depth would be reduced; compared with single-cavity laser, the crater depth with two-cavities laser increased from  $5\mu\text{m}$  to  $10\mu\text{m}$ , and the crater diameter reduced from  $161\mu\text{m}$  to  $134\mu\text{m}$ .

**Key words:** laser technique; laser etching; pulse energy density; crater surface morphology

### 引 言

激光加工是一种高效的工业加工方法, 它能进行打孔、切割、焊接及打标等加工。在内燃机缸套-活塞环系统中, 引入激光微坑刻蚀技术, 目的是增加油膜承载力, 增加润滑, 收集磨粒, 从而减小摩擦及降低磨损<sup>[1-5]</sup>。而缸套与活塞环是一对摩擦副, 存在硬度匹配问题, 这对激光刻蚀微坑提出如下要求: 有一定的频率, 适用于工业应用, 尽量减小激光再铸层的厚度, 即减小激光处理导致缸套内壁的硬度的增加, 减小激光处理微坑边缘毛刺, 即降低后续抛光工艺的难度。而常规的脉冲 YAG 激光刻蚀微坑存在加工速度慢, 在微坑边缘有较深再铸层, 为此, 国内外研究者从激光参量、不同介质等不同角度研究了刻蚀工艺对微坑质量的影响<sup>[6-10]</sup>。本文中从理论上分析了激光刻蚀的基本原理, 研究了激光与金属材料的相互作用规律, 详细地

分析了激光刻蚀过程各阶段的变化; 对刻蚀微坑过程中激光参量与坑深的关系进行了推导。采用实验室自制的激光刻蚀设备进行了刻蚀微坑实验。通过控制和调节刻蚀过程中的激光参量, 进行了激光微坑刻蚀工艺研究。深入分析了激光脉冲能量密度, 脉冲空间分布等对刻蚀微坑质量的影响。通过对实验结果的分析和研究, 确定了激光微坑刻蚀优化参量, 为激光刻蚀微坑的设计提供了参考数据。

### 1 YAG 激光刻蚀微坑理论

脉冲 Nd: YAG 激光束远场发散角小 (大约  $2\text{mrad}$ ), 脉宽窄 (大约几百纳秒), 功率密度可高达  $10^8\text{W}/\text{cm}^2$ , 脉冲激光对缸套内壁刻蚀主要经过 4 个过程<sup>[11]</sup>, 如图 1 所示: (1) 表面加热: 激光束聚焦到工件

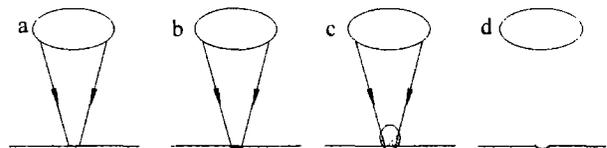


Fig. 1 Principles model of laser etching crater

金属表面上, 光子和金属表层电子发生碰撞, 所产生的能量很快转化成热量传到工件上很薄的表层 (见图

作者简介: 占 剑 (1981-), 男, 博士研究生, 主要从事光电能量耦合材料表面强化、激光刻蚀微坑工艺及表面形貌摩擦损耗特性方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: ymj1@imech.ac.cn

收稿日期: 2010-04-22; 收到修改稿日期: 2010-05-17

1a);(2)表面熔化:激光强度和作用时间充足时,表面的薄层开始熔化,由于激光束的功率密度非常高,这使表面熔化的时间远远短于材料的热传导(见图1b);(3)蒸发:随着激光能量的继续注入,照射区域的表面温度高于材料的沸点时,这时蒸发开始了,当蒸发的材料自由排放到大气中时,蒸气压力比周围压力高,这又导致溢出的蒸气加速(见图1c);(4)熔融物的喷发:喷发作为由刻蚀微坑过程中的成核机制作用引起的剧烈沸腾的一种结果而存在(见图1d)。低于表面的材料能变成过热的蒸气,因此,产生了一种突发的液态-气态的转变,这导致了小气泡在流质表面下迅速形成和扩大。高压和快速膨胀引起了热爆炸,液态金属从坑中破了的气泡区域喷射出来。同时反作用压力导致同轴的熔化物流向入射光束,随着熔化物沿微坑内壁流动,熔化物渐渐冷却凝固成为再铸层,且厚度渐增。

总之,激光刻蚀微坑是在极短的时间内(1μs)完成的,微坑的形成是材料在高功率密度激光束的照射下产生的一系列热物理现象相互作用的结果。

## 2 实验装置

### 2.1 脉冲 YAG 激光器

空间分布方面,增加刻蚀微坑深度的方法为增加脉冲激光中心功率密度,而减小脉冲边缘光的功率密度,即增加激光  $k$  值。同时,减小脉冲激光发散角,减小激光刻蚀微坑直径,也即增加了激光的功率密度:

$$D = f \cdot \theta \quad (1)$$

式中,  $D$  为脉冲激光刻蚀微坑直径,  $f$  为聚焦镜焦距,  $\theta$  为激光光束远场发散角。

减小发散角的方法是将单腔激光器改为双腔激光器,如图2所示。

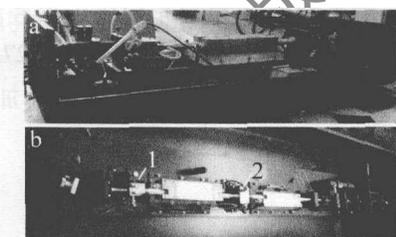


Fig. 2 Two types of lasers

a—single-cavity laser b—two-cavity laser with double acousto-optic modulation(1,2: acousto-optic modulation)

由于单腔激光器存在发散角大,当增加腔长,减小发散角时,激光功率就会降低,影响加工速度,并且,由于激光晶体的热效应导致光束的质量差,在此基础上研制了双腔激光器,可以保证在足够的功率下,增大腔长,并通过热效应补偿,改善了光束质量,使得发散角  $\theta \leq 9\text{mrad}$ ,再通过5倍扩束,使得远场发散角  $\theta \leq 2\text{mrad}$ 。

同时,在激光腔中应用双声光调制器,使得激光脉

冲波形调节范围增加,如图2b所示,可实现脉宽调节范围在  $0.1\mu\text{s} \sim 200\mu\text{s}$  内的高重频高功率密度加工。

### 2.2 试块刻蚀加工台及控制软件

试块刻蚀加工台是由中国科学院力学研究所毛化中心雕刻机机床改造而成,见图3。激光刻蚀工艺研

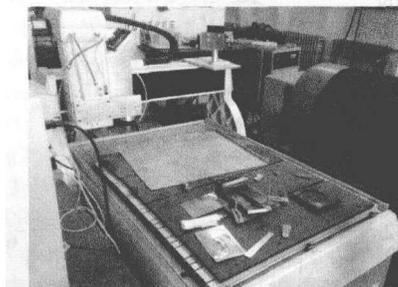


Fig. 3 Flat test block etching device

究是在平面试块刻蚀装置上进行的,应用外光路将脉冲激光引入平面实验台上,通过软件编程及调整脉冲激光参量,可实现各种不同参量形貌及不同次数激光刻蚀实验。

下面就影响微坑形貌的激光刻蚀参量(激光能量密度、脉冲空间分布)进行讨论。实验中所用材料为缸套灰铸铁,从锡柴6110缸套上线切割出平面试块,并将两面用砂纸磨平。

## 3 激光脉冲能量密度的影响

使用单腔激光器,激光脉宽固定为  $0.4\mu\text{s}$ ,由于单次激光刻蚀微坑深度值较小,不便于测量,故此次试验为同一点重复加工5次的结果。

图4中各小图所对应的激光参量如表1所示,所

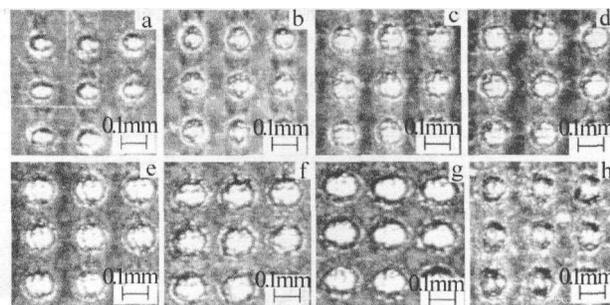


Fig. 4 Laser pulse etching crater morphology with different energy density

Table 1 Laser parameters

	single-pulse energy/mJ	crater diameter/ $\mu\text{m}$	crater depth / $\mu\text{m}$	energy density /( $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ )
Fig. 1a	0.6	100	16.78	7.64
Fig. 1b	1.2	121	21.24	10.44
Fig. 1c	1.8	129	24.29	13.78
Fig. 1d	2.6	128	26.03	20.21
Fig. 1e	3.4	133	25.66	24.48
Fig. 1f	5.6	140	23.79	36.4
Fig. 1g	8.8	154	22.59	47.27
Fig. 1h	6.2	125	18.10	50.55

测量的微坑深度是指加工表面至微坑最深处的高度,不包括毛刺凸台部分。

激光刻蚀微坑深度与激光脉冲能量密度关系如图5所示。

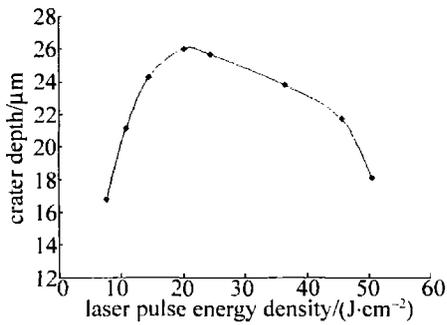


Fig. 5 Relationship between crater depth and laser pulse energy density

由图5及表1,在脉宽为0.4μs下,能量密度在达到20.21J/cm²之前,微坑深度随能量密度基本呈线性增加,之后再增加激光脉冲能量密度,则微坑深度随之减小。这是因为增加激光脉冲能量密度时,当能量密度过高,在一定的脉冲作用时间下,导致脉冲的峰值功率密度过大,就会出现等离子体屏蔽,影响材料对后续激光的吸收,故存在上限。并且随着激光能量密度的增加,可见微坑边缘的毛刺也增多,这对激光刻蚀微坑的后续处理不利,应尽量避免。

### 4 单腔、双腔激光刻蚀的影响

2.1节中已经详细阐述了相比于单腔激光器,双腔激光器对于增加激光脉冲空间集中度及降低光束发散角的贡献更大,这里将用实验方法研究两者对于刻蚀微坑加工上的区别。实验中将两激光器的激光脉冲波形调制为典型毛化波形,波长为7.5μs,见图6。

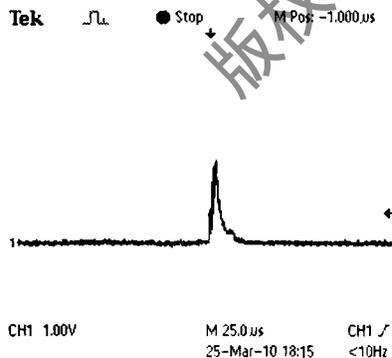


Fig. 6 Typical laser texturing waveform

下面对两种不同激光器冲进行激光微坑刻蚀实验,采用同轴吹气,所用气体为压缩空气,压力为4.04 × 10<sup>5</sup>Pa。实验微坑通过白光干涉仪测量微坑深度及表面形貌,图7为不同脉宽激光脉冲刻蚀微坑表面形貌,图8为刻蚀微坑深度测量情况。

从图7和图8可以得出:单腔激光器脉冲激光刻蚀的微坑直径D = 161μm,微坑深度h = 5μm;双腔激

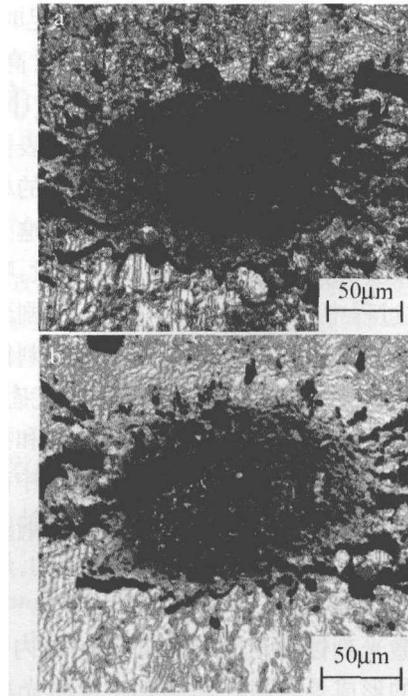


Fig. 7 Laser pulse etching crater morphology with different lasers  
a—single-cavity laser b—two-cavity laser

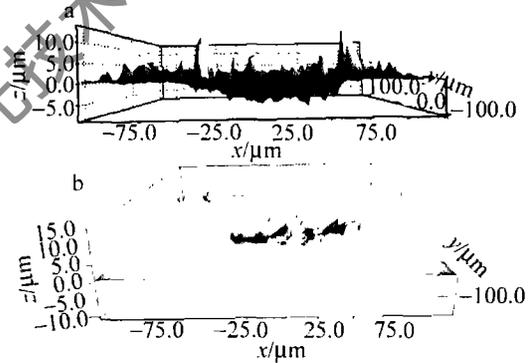


Fig. 8 Laser etching crater depth with different lasers  
a—single-cavity laser b—two-cavity laser

光器脉冲激光刻蚀的微坑直径D = 134μm,微坑深度h = 10μm。双腔激光器的脉冲激光相比于单腔激光器的脉冲激光,由于发散角的降低,微坑直径27μm,同时由于脉冲空间集中度的增加,微坑深度增加了1倍。双腔激光器对微坑刻蚀贡献更大。

### 5 结论

(1)通过采用双声光调制双腔激光器技术,可实现脉宽调节范围在0.1μs ~ 200μs内的高重频高功率密度加工。

(2)对比激光脉冲宽度为0.4μs时不同能量密度刻蚀的微坑深度,得到能量密度存在上限20.21J/cm²,在达到上限值前,微坑深度基本随能量密度呈线性增加,当能量密度超过此值,并继续增加时,由于气化导致等离子体屏蔽,使得微坑深度反而减小。

(3)相比于单腔激光器,双腔激光器刻蚀微坑深

度从  $5\mu\text{m}$  增加至  $10\mu\text{m}$ , 微坑直径从  $161\mu\text{m}$  降至  $134\mu\text{m}$ 。

#### 参 考 文 献

- [1] KLIGERMAN Y, ETSION I, SHINKARENKO A. Improving tribological performance of piston rings by partial surface texturing[J]. *Journal of Tribology*, 2005, 127(3):632-638.
- [2] RYK G, KLIGERMAN Y, ETSION I, *et al.* Experimental investigation of partial laser surface texturing for piston-ring friction reduction [J]. *Tribology Transactions*, 2005, 48(4):583-588.
- [3] TOMANIK E. Friction and wear bench tests of different engine liner surface finishes[J]. *Tribology International*, 2008, 41(11):1032-1038.
- [4] RYK G, KLIGERMAN Y, ETSION I, *et al.* Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive components [J]. *Tribology Transactions*, 2002, 45(4):444-449.
- [5] KOVALCHENKO A, AJAYI O, ERDEMIR A, *et al.* The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact[J]. *Tribology International*, 2005, 38(3):219-225.
- [6] KRUSING A. Underwater and water-assisted laser processing: part 2—Etching, cutting and rarely used methods [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2004, 41(2):329-352.
- [7] DUBEY A K, YADAVA V. Experimental study of Nd: YAG laser beam machining—an overview [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 195(1/3):15-26.
- [8] ZHANG H, XU W, WANG J. Investigation of a novel hybrid process of laser drilling assisted with jet electrochemical machining[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2009, 47(11):1242-1249.
- [9] TUNNA L, KEARNS A, ONEILL W, *et al.* Micromachining of copper using Nd: YAG laser radiation at 1064, 532 and 355nm wavelengths[J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, 33(3):135-143.
- [10] LI L, CHARA C. Chemical assisted laser machining for the minimisation of recast and heat affected zone[J]. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2004, 53(1):175-178.
- [11] LIU D H. Laser drilling[J]. *Laser Journal*, 1992, 13(3):151-155 (in Chinese).
- (上接第 237 页)
- 迅速, 准直波束正好相反, 总体上, 准直波束比会聚波束下降要快得多。在不同传输距离下时, 随着传输距离的减小, 会聚波束与准直波束的互相关函数随之下降, 总体上, 准直波束比会聚波束下降要快得多。强度协方差函数的变化规律与互相关函数的变化规律基本一致。这样, 激光光束特点以及对应的传输距离对激光雷达目标探测及识别散斑的效应的影响就有了理论依据, 这对激光雷达目标成像过程中散斑噪声的消除有一定的应用价值。
- 参 考 文 献
- [1] DAINTY J C. *Laser speckle and related phenomena* [M]. Springer: Berlin Press, 1975: 10-77.
- [2] DAINTY J C. *Progress in optics XIV* [M]. North-Holland: Amsterdam Press, 1976: 1-70.
- [3] BRIERS J D. Laser doppler and time-varying speckle: Reconciliation [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1996, 13(2):345-350.
- [4] YANG H, YANG X L. Analysis of characteristics of light propagation through clouds and Monte Carlo simulation [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(5):477-479 (in Chinese).
- [5] LI Y Y, SUN D S. Study of clouds multiple scattering influences on lidar measurement [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(6):611-638 (in Chinese).
- [6] GUO G J, SHAO Y. Rough surfaces induced speckle effects on detection performance of pulsed laser radar [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(7):2089-2093 (in Chinese).
- [7] GUO G J, SHAO Y. Statistical properties of the back-scattered signal from ground in laser radar applications [J]. *Acta Physica Sinica*, 2002, 51(2):228-233 (in Chinese).
- [8] WANG M J. Statistical characteristics of the laser scattering intensity's covariance on the horizontally moving and rotating targets [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5):810-813 (in Chinese).
- [9] GUO G J, LI Sh K, TAN Q. Statistical properties of laser speckles generated from far rough surfaces [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2001, 22(8):1177-1191.