

脉冲 YAG 激光波形对缸套内壁激光刻蚀微坑形貌的影响

占 剑 杨明江 王红才

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 为了减小激光刻蚀微坑表面的再铸层及增加刻蚀微坑的深度, 利用双声光调制技术, 通过对比 0.25, 7.5 和 200 μs 3 个不同量级脉宽, 及对比单峰、双峰和三峰等不同激光脉冲波形的激光脉冲刻蚀微坑形貌, 来研究激光脉宽及脉冲波形对刻蚀微坑形貌的影响。结果表明, 激光脉宽为 0.25 μs 时毛刺较多, 脉宽为 200 μs 时表面熔凝现象明显, 脉宽为 7.5 μs 时表面熔凝现象及毛刺都明显减少; 单峰波形刻蚀微坑表面毛刺较多, 深度为 7.5 μm , 三峰波形刻蚀微坑表面出现熔凝现象, 深度为 10 μm , 双峰波形刻蚀微坑表面毛刺及熔凝最少, 深度为 15 μm 。

关键词 激光技术; 激光波形; 脉宽; 微坑表面形貌; 微坑深度

中图分类号 TN249 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0603032

Effect of YAG Laser Pulse Waveform to Laser Etching Crater Morphology on Cylinder Wall

Zhan Jian Yang Mingjiang Wang Hongcai

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

Abstract In order to reduce the recast layer of the laser etching crater and to increase the etching depth the effect of laser pulse width and waveform on laser etching crater morphology is studied by using double acousto-optic modulation technique, comparing the pulse widths with 0.25, 7.5 and 200 μs , and comparing different waveforms with single peak, two peaks and three peaks. The results show that when the pulse width is 0.25 μs , the burr is more; when it is 200 μs , significant surface melting phenomenon appears; and when it is 7.5 μs the phenomenon of surface melting and the burr are significantly reduced. The surface of laser wave etching with a single peak has more burr with the depth of 7.5 μm , the one with three peaks appears the surface melting phenomenon with the depth of 10 μm , and when using two peaks waveform etching, the surface of burr and melting are the least, and the depth is 15 μm .

Key words laser technique; laser waveform; pulse width; crater surface morphology; crater depth

OCIS codes 140.3530; 160.3900; 350.3390

1 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, 从而减少摩擦及磨损^[1~5]。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: 有较快的加工速度, 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数、不同介质等不同角度研究了刻蚀工艺对微坑质量的影响。A. Kr. Dubey 等^[6]从光束能量、进给速度、脉冲持续时间、频率和辅助气体压力等方面研究了与刻蚀形貌质量的影响关

收稿日期: 2011-01-06; 收到修改稿日期: 2011-02-25

作者简介: 占 剑(1981—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事激光刻蚀微坑工艺及表面形貌摩擦学特性等方面的研究。

E-mail: zhanjian04@mails.gucas.ac.cn

系,发现当降低光束能量,增加进给速度、激光作用时间和辅助气压时可降低热影响层的厚度,当增加光束能量、缩短激光作用时间和增加辅助气压时可减小再铸层的厚度。A. Kruusing^[7]研究发现在第三介质水中进行材料的激光加工时,可增加烧蚀压力,约束等离子体膨胀,增加烧蚀率,减小毛刺现象,减小热影响层从而提高加工质量。L. Tunna 等^[8]通过研究 1064,532 和 355 nm 波长的激光加工质量,发现再铸层厚度随着激光波长的增加而增加,而随着激光功率密度的增加而降低。L. Li 等^[9]研究化学辅助激光加工技术,对在 NaCl 溶液和空气中分别进行激光打孔实验,发现在溶液中可提高加工质量,增加材料的去除率。张华等^[10]研究发现在第三介质中(电解液)进行激光加工,可降低再铸层厚度。

在缸套内壁进行激光加工,通过第三介质如电解液则增加了加工的复杂性,通过降低脉宽,可在一定程度上减小再铸层厚度,但同时也降低了材料的去除率,需要重复加工,这又降低了加工速度。通过激光波形调制来实现微秒级脉冲能量的有效利用,是解决这一矛盾的有效途径。而目前的研究中,微秒级脉冲 YAG 激光的激光波形对加工质量影响的研究显得不足。本文针对 YAG 声光调 Q 激光器脉

冲激光刻蚀微坑的特点,采用实验室自制的激光刻蚀设备进行了微坑刻蚀实验。通过控制和调节刻蚀过程中的激光参数,进行了激光刻蚀工艺研究,深入分析了激光脉冲波形等对刻蚀微坑质量的影响。

2 激光刻蚀微坑机理及实验装置

脉冲 YAG 激光束发散角小,功率密度可高达 10^8 W/cm^2 ,被照射区内的材料瞬时熔化并大量气化蒸发,气压急剧上升,高速气流猛烈向外喷射,在照射点上形成一个小凹坑。随着激光能量的不断输入,凹坑内的气化程度加剧,蒸气量急剧增多,气压骤然上升,对凹坑的四周产生强烈的冲击波作用,致使高压蒸气带着坑中熔融物,从凹坑底部高速向外喷射,在工件上迅速形成一个具有一定锥度的微坑。总之,激光刻蚀微坑是在极短的时间内完成的,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。

实验用激光器为中国科学院力学研究所激光毛化中心研制的双声光调制双腔 YAG 激光器,如图 1 所示,可实现脉宽调节范围在 $0.1 \sim 200 \mu\text{s}$ 内的高重复频率高功率密度加工。



图 1 双声光调制激光器

Fig.1 Double acousto-optic modulated laser

试块刻蚀加工台由中国科学院力学研究所激光毛化中心雕刻机机床改造而成,如图 2 所示。激光刻蚀工艺研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数,可实现各种不同参数形貌及不同次数激光刻蚀实验。

3 实验工艺及结果分析

脉冲激光波形可分为 2 个方面:1)脉冲宽度;2)脉冲峰值数。下面分别研究其对激光刻蚀微坑形貌的影响,实验刻蚀试块为缸套线切割得到,材料为灰铸铁,硬度为 390 HV。



图 2 平面试块刻蚀装置

Fig.2 Flat test block etching device

3.1 激光脉宽的影响

通过调节声光调制器电信号输入波形及声光盒

位置,激光脉冲输出有以下几种典型脉宽:1)窄脉宽高峰值功率脉冲(0.1 μs 量级),如图 3(a)所示;2)典型激光毛化脉冲(1 μs 量级),如图 3(b)所示;3)

长脉宽激光脉冲(100 μs 量级),如图 3(c)所示,波形由 Tektronix TDS210 示波器采集。

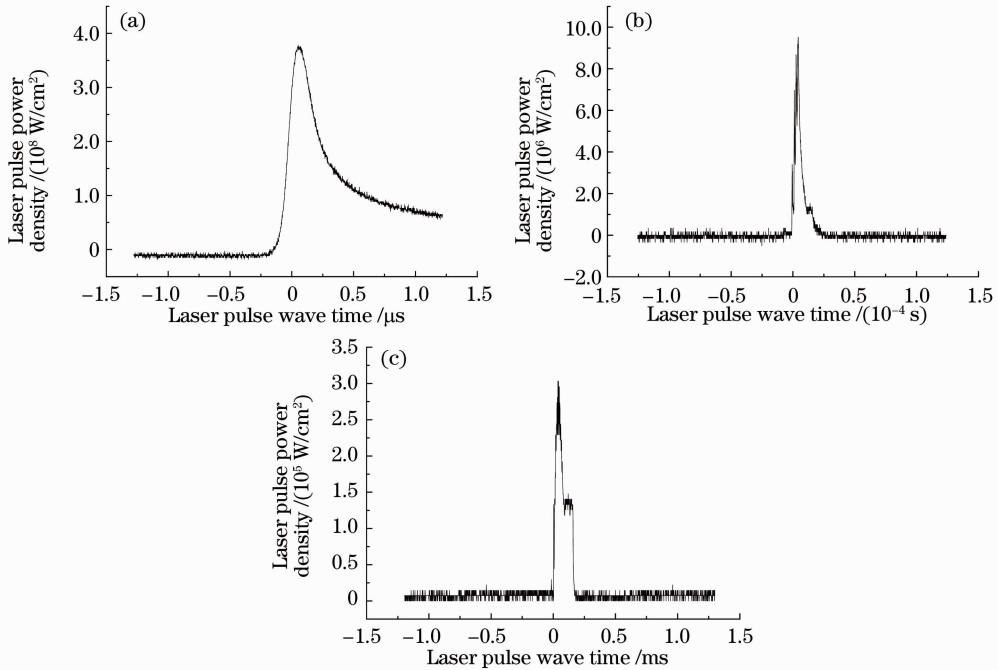


图 3 3 种脉宽激光脉冲波形。(a)窄脉宽,(b)毛化,(c)长脉宽

Fig. 3 Three kinds of laser pulse widths. (a) narrow pulse width, (b) laser texture, (c) long pulse width

图 3~5 中实验所用激光参数如表 1 所示。

表 1 3 种激光参数

Table 1 Three types of laser parameters

Type	Pulse width / μs	Average power / W	f / kHz
Narrow pulse width	0.25	6	0.5
Laser texture	7.5	4	0.6
Long pulse width	200	4	0.6

下面对以上 3 种典型脉宽下的激光脉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 $4.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。实验微坑通过白光干涉仪测量微坑深度及表面形貌,图 4 为不同脉宽激光脉冲刻蚀微坑表面形貌,微坑直径的测量方法为:用一个矩形将微坑外切,取矩形长宽的平均值为微坑的直径。图 5 为刻蚀微坑深度测量情况。

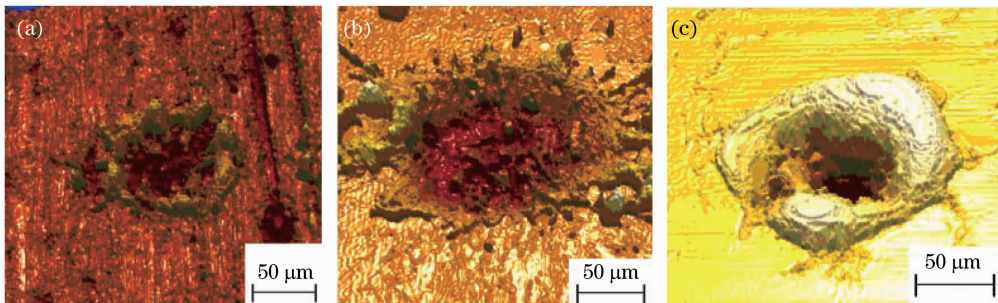


图 4 不同脉宽刻蚀微坑表面形貌。(a)0.25 μs , (b)7.5 μs , (c)200 μs

Fig. 4 Etching pits surface morphology of different laser pulse widths. (a) 0.25 μs , (b) 7.5 μs , (c) 200 μs

当脉宽很窄($\tau=0.25 \mu\text{s}$)时,气化毛刺较多,加工微坑直径 $D=94 \mu\text{m}$,微坑深度 $h=5 \mu\text{m}$,如图 4(a)及图 5(a)所示;增加脉宽,而当脉冲波形为毛化波形 $\tau=7.5 \mu\text{s}$ 时,熔融物及毛刺增多,如图 4(b)及图 5(b)所示,微坑直径 $D=134 \mu\text{m}$,微坑

深度 $h=10 \mu\text{m}$;进一步增加脉宽 $\tau=200 \mu\text{s}$ 时,熔融现象最显著,表面基本无毛刺,如图 4(c)及图 5(c)所示,微坑直径 $D=135 \mu\text{m}$ (包括边缘熔融部分),坑深 $h=20 \mu\text{m}$ 。

激光功率密度的计算公式为

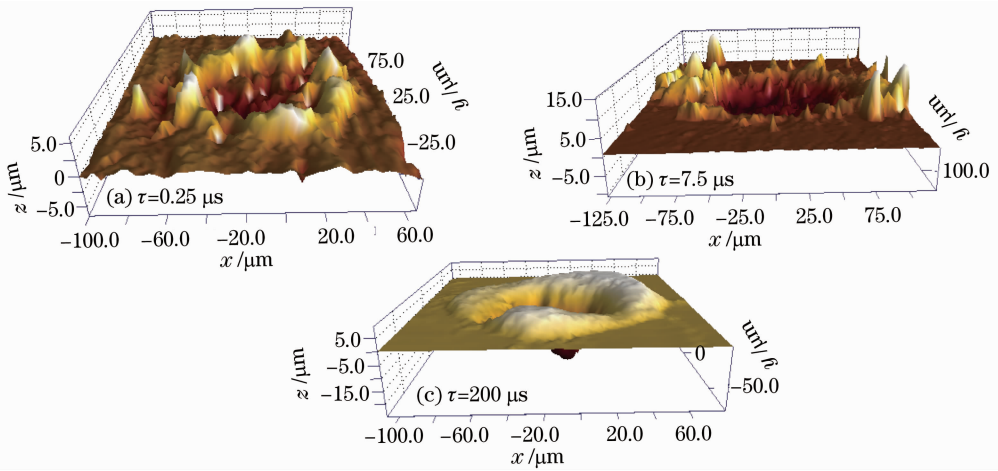


图 5 不同脉宽刻蚀的微坑深度

Fig. 5 Etching crater depth of different laser pulse widths

$$q = W / (\pi \cdot r^2 \cdot f \cdot \tau), \quad (1)$$

式中 W 为脉冲激光平均功率, r 为激光聚焦光斑半径, f 为激光脉冲频率, τ 为脉宽。

根据表 1 及图 4 算出不同脉宽下的激光脉冲功率密度。当脉宽 $\tau = 0.25 \mu\text{s}$ 时, 功率密度 $q = 6.92 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, 加工工件表面在短时间内达到气化温度, 并强烈气化, 可忽略熔化, 产生等离子体, 阻止了加工表面对后续激光的吸收, 导致加工微坑直径及深度最浅; 当脉宽 $\tau = 7.5 \mu\text{s}$ 时, $q = 5.77 \text{ MW/cm}^2$, 加工表面气化和熔凝同时存在, 微坑直径变大, 深度有所增加; 当脉宽 $\tau = 200 \mu\text{s}$ 时, $q = 2.32 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$, 此时加工工件表面以熔凝为主, 可忽略气化作用, 微坑直径较 $\tau = 7.5 \mu\text{s}$ 时略微减小, 微坑深度为 $20 \mu\text{m}$, 达到最大。

随着激光脉宽的增加, 脉冲功率密度降低, 作用时间增加, 导致工件材料表面在刻蚀过程中气化所占比重逐渐降低, 逐步向熔凝转变。强烈气化产生等离子体屏蔽, 导致加工深度不够, 如图 5(a) 所示, 而熔凝使得刻蚀微坑产生较厚再铸层, 如图 5(c) 所示, 这两种情况都应尽量避免。既要保证一定的深度, 同时又要降低激光再铸层的厚度, 缸套刻蚀加工脉宽应为 $1 \sim 10 \mu\text{s}$ 。

由于缸套材料基体硬度较低, 而毛化脉冲波形无法控制气化与熔凝在微坑形成过程中所消耗激光能量的比重, 直接采用毛化波形对缸套进行刻蚀, 能量的利用率较低, 导致微坑直径大, 而深度不够, 这就需要进一步优化毛化波形。

3.2 脉冲激光波形(峰值数)的影响

当激光脉冲为单个峰值脉冲情况时, 峰值功率密度很高, 导致在极短的时间内(脉冲波形的上升沿

阶段), 加工件处理区域温度骤升至气化温度, 在增加材料对激光吸收率的同时, 也产生强烈的等离子体, 屏蔽了加工区域对后续激光的吸收; 为了降低等离子体对加工微坑深度的影响, 采用降低脉冲峰值功率密度的方法, 将激光脉冲展宽为两个波峰形式, 前一个波峰通过升高激光微坑加工区域的表面温度来增加材料对激光的吸收率, 中间波形部分作用是在抑制等离子体下吸收激光能量, 使得加工区域温度维持在气化温度以上, 后面的波峰增加气化膨胀力, 使得激光刻蚀微坑底部的液态熔融部分从坑底抛出, 增加刻蚀微坑深度。展脉宽可有效抑制等离子体, 展脉宽的同时, 可根据需要增加波峰的数目, 波峰数目越多, 激光脉冲的峰值功率密度越小, 在近似同样的能量下, 峰值功率密度降低至一定值, 将会影响工件的升温速度, 并使得加工区域的熔化增多, 降低了气化层深度, 需要进行优化激光脉冲波形。

利用双声光调制技术, 激光脉冲可调制成图 6 所示 3 种典型的波形: (a) 单峰结构; (b) 双峰结构; (c) 3 峰结构。针对 3 种激光脉冲波形, 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 $4.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。实验微坑通过白光干涉仪测量微坑深度及表面形貌, 图 7 为不同激光脉冲波形下刻蚀的微坑表面形貌, 图 8 为刻蚀微坑的深度测量。

当激光脉冲波形为单峰时, 气化毛刺较多, 加工微坑直径 $D = 125 \mu\text{m}$, 如图 7(a) 所示; 激光脉冲波形为双峰时, 熔凝物及毛刺均较少, 如图 7(b) 所示, 微坑直径 $D = 124 \mu\text{m}$; 激光脉冲波形为 3 峰时, 表面熔凝物较多, 如图 7(c) 所示, 微坑直径 $D = 125 \mu\text{m}$ 。

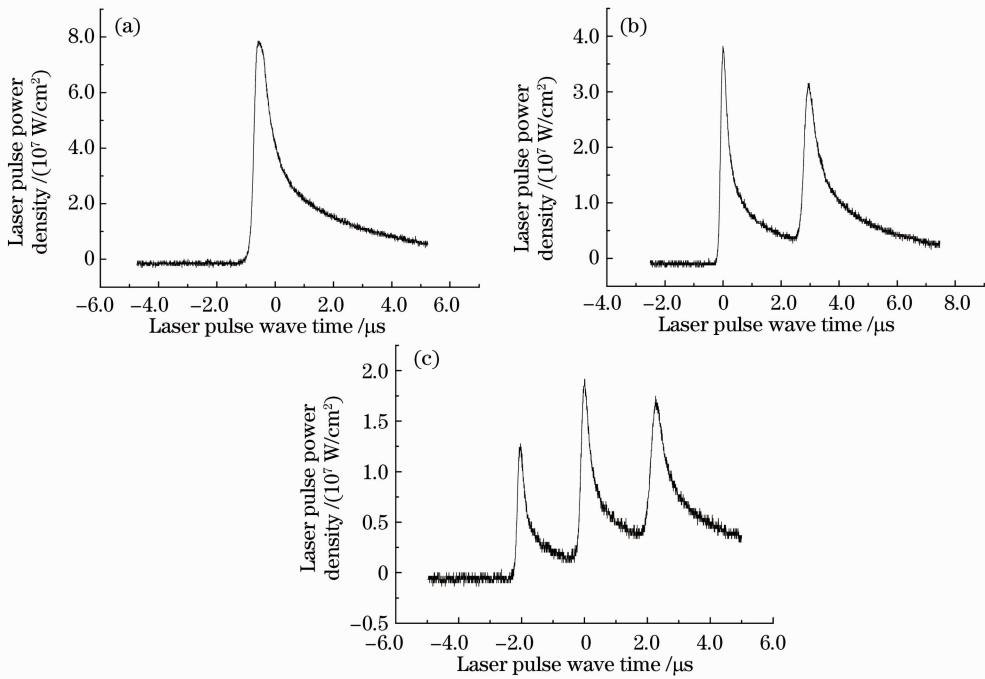


图 6 3 种激光脉冲波形。(a)单峰,(b)双峰,(c)三峰

Fig. 6 Three kinds of laser pulse waveform. (a) single peak, (b) two peaks, (c) three peaks

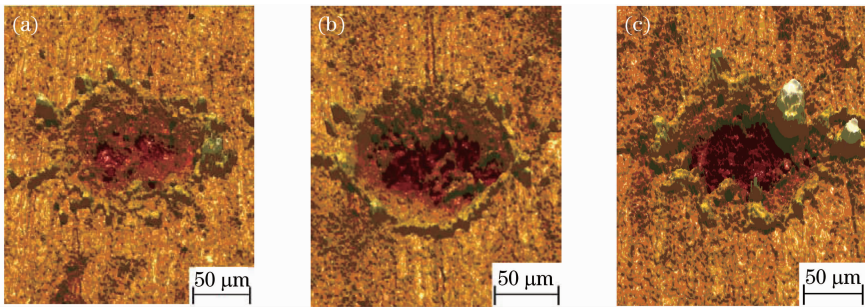


图 7 3 种不同波形的刻蚀微坑表面形貌。(a)单峰,(b)双峰,(c)三峰

Fig. 7 Etching pits surface morphology of different laser waveforms. (a) single peak, (b) two peaks, (c) three peaks

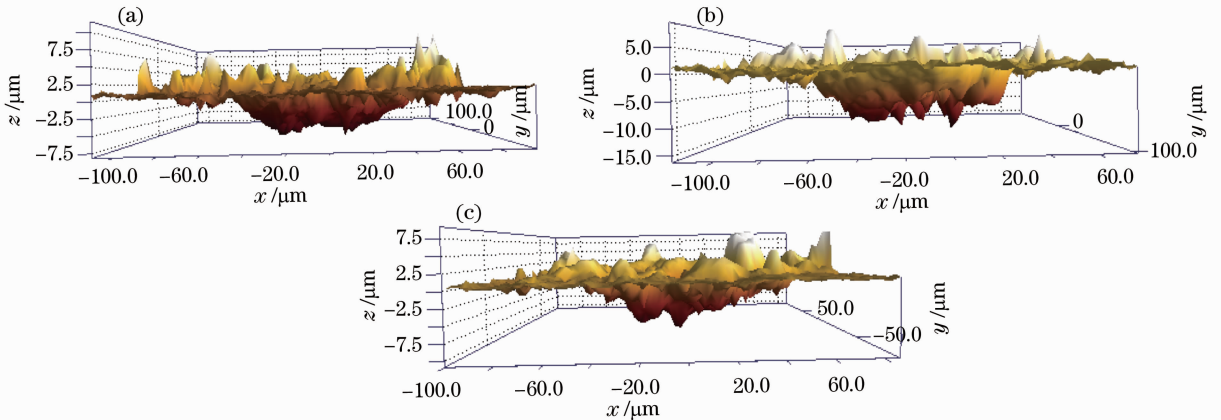


图 8 3 种不同波形刻蚀的微坑深度。(a)单峰,(b)双峰,(c)3 峰

Fig. 8 Etching crater depth of different laser pulse waveforms. (a) single peak, (b) two peaks, (c) three peaks

当激光脉冲波形为单峰时,加工微坑深度 $h = 7.5 \mu\text{m}$,如图 8(a)所示;当激光脉冲波形为双峰时,微坑深度 $h = 15.0 \mu\text{m}$,如图 8(b)所示;当激光脉冲

波形为 3 峰时,微坑深度 $h = 10 \mu\text{m}$,如图 8(c)所示。激光脉冲波峰数目从一个增加到两个时,脉冲峰值功率密度降低,第一个波峰使得材料表面达到

气化,此时材料对激光的吸收系数达到最大,开始去除材料,之后降低功率密度,使得材料表面保持该温度,抑制加工点温度继续上升,抑制了气化等离子体屏蔽现象,而后一个脉冲可增加加工点材料蒸气的瞬时压力,使得坑底材料气化沉积物和熔融液喷出,从而加深刻蚀微坑的深度;而当激光脉冲波峰数目增加到3个时,脉冲峰值功率密度进一步减小,此时材料的去除机制中熔凝部分已不可忽略,这样导致刻蚀微坑再铸层增加,同时降低了微坑刻蚀深度。最合理的激光脉冲波形为双峰形式,如图6(b)所示。

4 结 论

1)对比脉宽分别为0.25,7.5及200 μs 的脉冲激光刻蚀微坑表面形貌及深度,脉宽为0.25 μs 时,毛刺较多,微坑深度为5 μm ;脉宽为200 μs 时表面基本无毛刺,微坑深度为20 μm ,而表面熔凝现象最明显,也即刻蚀微坑再铸层最厚,不适合刻蚀微坑;最适合微坑刻蚀的激光脉宽为7.5 μs ,表面熔凝现象明显减少,表面微坑深度为10 μm 。

2)对比激光脉冲波形中波峰个数分别为单峰、双峰及3峰对刻蚀微坑形貌的影响,单峰波形刻蚀微坑表面毛刺最多,深度为7.5 μm ,3峰波形刻蚀微坑表面出现熔凝现象,深度为10 μm ,双峰波形刻蚀微坑表面毛刺及熔凝最少,深度为15 μm ,达到最大值,最适合缸套内壁的激光微坑刻蚀。

参 考 文 献

- 1 Y. Kligerman, I. Etsion, A. Shinkarenko. Improving tribological performance of piston rings by partial surface texturing[J]. *Journal of Tribology*, 2005, **127**(3): 632~638
- 2 G. Ryk, Y. Kligerman, I. Etsion *et al.*. Experimental investigation of partial laser surface texturing for piston-ring friction reduction[J]. *Tribology Transactions*, 2005, **48**(4): 583~588
- 3 E. Tomanik. Friction and wear bench tests of different engine liner surface finishes [J]. *Tribology International*, 2008, **41**(11): 1032~1038
- 4 G. Ryk, Y. Kligerman, I. Etsion. Experimental investigation of laser surface texturing for reciprocating automotive components [J]. *Tribology Transactions*, 2002, **45**(4): 444~449
- 5 A. Kovalchenko, O. Ajayi, A. Erdemir *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 A. Kr. Dubey, V. Yadava. Experimental study of Nd:YAG laser beam machining-an overview [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, **195**(1-3): 15~26
- 7 A. Kruusing. Underwater and water-assisted laser processing: Part 2-etching, cutting and rarely used methods[J]. *Opt. and Laser in Engng.*, 2004, **41**(2): 329~352
- 8 L. Tunna, A. Kearns, W. O' Neill *et al.*. Micromachining of copper using Nd:YAG laser radiation at 1064, 532 and 355 nm wavelengths [J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2001, **33**(3): 135~143
- 9 L. Li, C. Achara. Chemical assisted laser machining for the minimisation of recast and heat affected zone[J]. *CIRP Annals ~ Manufacturing Technology*, 2004, **53**(1): 175~178
- 10 Hua Zhang, Jiawen Xu, Jiming Wang. Investigation of a novel hybrid process of laser drilling assisted with jet electrochemical machining[J]. *Opt. and Laser in Engng.*, 2009, **47**(11): 1242~1249