

doi: 10.3788/gzxb20124105.0565

# 不同脉冲激光波形在打孔实验上的比较与分析

苏拾<sup>1a</sup>, 安志勇<sup>1a</sup>, 梁伟<sup>1b</sup>, 丛景彬<sup>1b</sup>, 樊帆<sup>2</sup>

(1 长春理工大学 a. 光电工程学院; b. 理学院, 长春 130022)

(2 镇江舰船学院, 江苏 镇江 212003)

**摘 要:** 为了获得高质量小孔, 克服单脉冲激光打孔的不足, 设计了一种能够产生多脉冲激光波形的激光器电源. 并在 1 mm 厚的薄钢片上得到直径小于 1 mm 的小孔. 多脉冲打孔理论分析表明, 多脉冲激光打孔不但减少了熔融物和等离子体的产生, 而且降低了激光打孔对高能量的要求, 获得的小孔质量优于单脉冲激光打孔. 另外脉冲宽度和脉冲间距的选择对激光小孔加工质量起决定性作用, 在加工高质量孔的时候, 应该选用较短的激光脉冲宽度. 实验表明, 利用三脉冲激光输出波形打孔所获得的小孔质量要优于单脉冲激光打孔效果, 有效脉冲平均能量为 350 mJ, 宽度为 100  $\mu$ s, 脉冲间距为 100  $\mu$ s.

**关键词:** 激光器; 激光打孔; 激光电源; 多脉冲

**中图分类号:** TN249; TC665

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2012)05-0565-6

## 0 引言

激光打孔技术是激光加工领域重要应用之一. 在航空航天、电子仪表及医疗器械等高精尖端产品的关键零部件中(如飞机的防冰系统、航空发动机中的涡轮叶片、导流叶片和燃烧室)为了减小器件表面温度和气体湍流效应, 需要微孔多达  $10^4$  个; 另外陀螺仪表零件、计算机的打印头等设计有许多小孔, 其加工质量的好坏直接影响产品的使用性能和寿命. 激光打孔技术由于其能量集中度高、可控性好和不受材料局限性等优势, 自 20 世纪 70 年代产生开始已经在工业生产中得到广泛应用, 成为一种必不可少的加工手段<sup>[1-2]</sup>. 激光打孔的质量包括孔的几何特征和冶金特征, 影响因素包括激光功率、脉宽、脉冲个数、光束质量与离焦量等. 由于激光打孔物理过程复杂, 内部作用机理尚不明确, 许多学者以实验为基础开展大量研究, 探索其规律性<sup>[3-4]</sup>.

现今多采用 Nd:YAG 固体激光器以单脉冲激光输出波形, 通过选模技术进行小孔或微孔加工. 虽然具有很多优点, 但存在加工出的孔形出现锥度、溅污、再铸层和微裂纹, 几何尺寸准确度低等缺陷, 另外打孔的重复性也较差<sup>[5-9]</sup>. 本文在对多脉冲激光打孔进行理论分析的基础上, 提出了一种新型多脉冲激光打孔实验装置. 通过新的激光电源, 使 Nd:YAG 固体激光器产生多脉冲激光波形进行小孔

加工实验, 并分析了不同波形对打孔质量的影响, 寻找能够得到高质量小孔的多脉冲激光输出波形形式.

## 1 多脉冲激光打孔理论分析

多脉冲加工的实质是多个单个脉冲的叠加, 也就是说孔不是由单一脉冲形成的, 而是由多个脉冲对材料共同作用的结果. 这些脉冲具有同样的激光辐射参量, 其中这些脉冲的能量和脉宽可能相同也可不同, 本文探讨的是不同的能量和脉宽组成的多脉冲激光进行打孔实验效果.

利用一组短脉冲进行打孔是多脉冲加工的一个重要特点. 由于这些短脉冲的脉冲周期远远大于材料冷却的时间, 单个短脉冲脉宽决定了热影响区域的特征尺寸, 而且每个脉冲具有的高能量密度能使飞溅物中的熔化物急剧降低<sup>[10-11]</sup>. 在多脉冲加工过程中, 由于在热冲击时间短, 热分布比较均匀, 能够在脆性材料上打出没有裂纹的一系列小孔. 另外采用多脉冲激光打孔由于各种参量的不稳定性影响减弱, 使激光打孔的重复性得以提高<sup>[12-14]</sup>.

多脉冲加工比单脉冲加工有一系列好处, 同时也适合深孔加工. 第一个脉冲打孔之后, 孔径不再较大的增加, 但孔深尺寸随着脉冲个数的增加而变大, 达到一定的极限深度  $h_{level}$ . 这里引入一个多脉冲加工平均能量  $E_{average}$ , 即

$$E_{average} = (\sum_1^n E_i) / n \quad (1)$$

**基金项目:** 长春市科学技术局 05 年的计划项目(No. 05GG29)资助

**第一作者:** 苏拾(1978—), 男, 讲师, 硕士, 主要研究方向为激光器及激光加工技术. Email: sushit@cust.edu.cn

**收稿日期:** 2011-11-22; **修回日期:** 2012-02-28

式中,  $E_i$  为每个脉冲的能量;  $n$  为脉冲个数.

因此多脉冲打孔所得的孔径和孔深极限值为<sup>[4]</sup>

$$d_{\text{limit}} = 2 \left( r_0^3 + \frac{3E_{\text{average}}}{\pi L_B} \tan \varphi \right)^{1/3} \quad (2)$$

$$h_{\text{limit}} = \frac{1}{\tan \varphi} \left( \sqrt{\frac{E_{\text{average}}}{\pi Q^*}} - r_0 \right) \quad (3)$$

式中,  $Q^*$  为脉冲即将结束前, 使被加工材料汽化的阈值能量密度 ( $\text{J}/\text{cm}^2$ ). 对于 45 # 钢材,  $Q^*$  约为  $300 \text{ J}/\text{cm}^2$ .  $r_0$  孔起始半径;  $\varphi$  激光束发散角,  $\tan \varphi = 0.2$ ;  $L_B$  为蒸发比能,  $L_B = 5 \times 10^4 \text{ J}/\text{cm}^4$ ; 脉冲持续时间  $100 \mu\text{s}$ .

### 2 多脉冲 Nd : YAG 激光电源设计

多脉冲激光输出波形的方式通常有: 1) 多个激光器相互合成的方式; 2) 单路激光器的多次放电方式; 3) 单路电源分路充电方式; 4) 连续电源斩波方式等<sup>[7]</sup>. 本文设计了多脉冲 Nd : YAG 激光器的实验电源, 采用单路电源分路充电方式, 如图 1, 共用三个可控硅 (Silicon Controlled Rectifier, SCR).

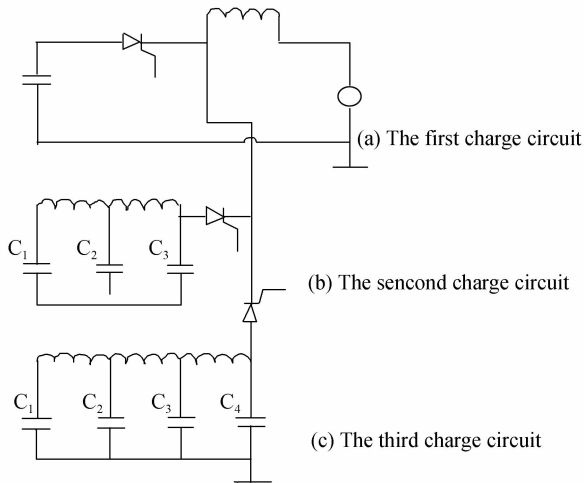


图 1 单路电源分路充电方式  
Fig. 1 The shunt charge method of single channel power

为了充分利用实验现有设备, 对原有的单脉冲激光电源进行改装设计, 如图 2.

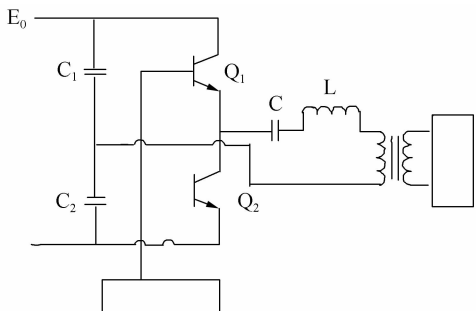


图 2 激光电源设计  
Fig. 2 The design of laser power

在充电电路中, 对储能器进行恒流充电采用由 L-C 谐振变换器组成的逆变器. 由于充电电路对储

能器容量没有体积限制, 因此可以连续不断地对三路储能器进行充电. 另外由于三个储能器所充电量不同, 可获得不同的脉冲能量和形状.

第一个脉冲采用单路放电形式, 图 3(a) 为第一路放电示意图; 第二个脉冲采用方波网络形式, 如图 3(b); 第三路采用能量渐次增加的形式, 如图 3(c), 这些波形都可以由 L-C 网络组成. 另外各个电容器组之间采用 SCR 相互隔离放电, 如图 1. 图 1 中的 (a)~(c) 对应着这三个脉冲波形.

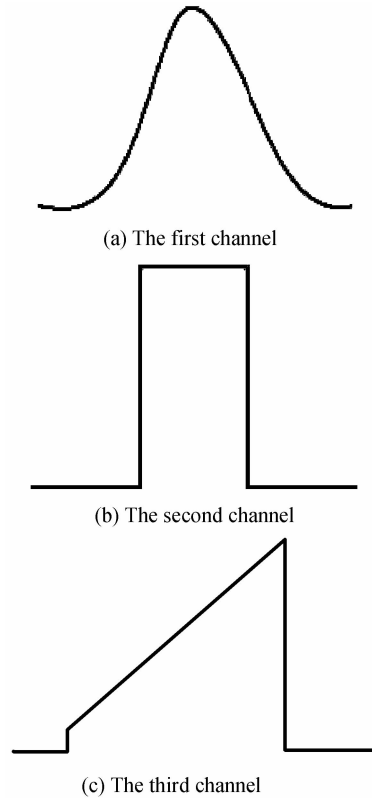


图 3 第 1~3 路放电示意图  
Fig. 3 The situations of discharging for the first channel to the third channel

这种多脉冲输出方式不但解决了重复频率过高带来的问题, 而且克服了独立调节放电脉冲的问题. 不过每个脉冲能量的调节有一定难度.

### 3 实验与结果分析

#### 3.1 实验装置

实验装置如图 4. 激光谐振腔选用平谐振腔, 腔长为  $50 \text{ cm}$ , 腔中采用 Nd : YAG 激光棒作为工作物质, 激光棒的直径为  $6 \text{ mm}$ , 棒长为  $100 \text{ mm}$ . 泵浦光源采用脉冲氙灯, 灯长为  $90 \text{ mm}$ , 直径为  $5 \text{ mm}$ . 聚光腔内表面涂有漫反射的聚四氟乙烯. 全反镜采用反射率为  $100\%$  的平面镜; 输出镜采用透过率为  $90\%$  的白玻璃片.

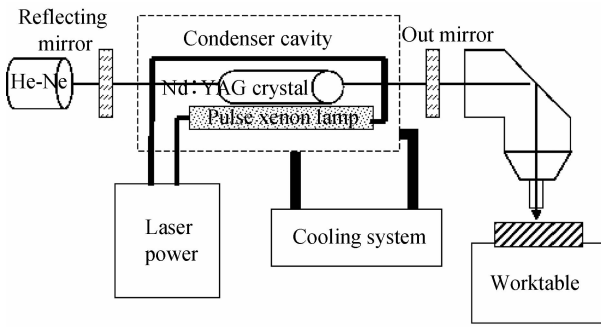


图 4 实验装置  
Fig. 4 Schematic diagram of experimental device

由于被加工材料为 1 mm 厚的薄钢片, 厚度不大, 因此激光光束聚焦在材料表面, 保留一定较小的离焦量. 实验中吹入辅助氮气以提高孔表面质量, 并保护聚焦透镜.

3.2 实验结果与分析

实验主要是利用多脉冲激光电源产生的不同的激光脉冲波形进行小孔加工, 从而比较单脉冲激光和多脉冲激光进行加工的质量.

实验中激光电源充电电压 1 000 V, 电容 100  $\mu$ F, 注入激光脉冲能量 50 J, 选用单个激光脉冲输出 1 J, 脉冲宽度为 100  $\mu$ s. 获得孔形质量由测量准确度为 0.001 mm 的 YG-150 表面分析仪进行测量.

利用传统的单脉冲输出波形激光进行加工所得的 6 个孔形如图 5.

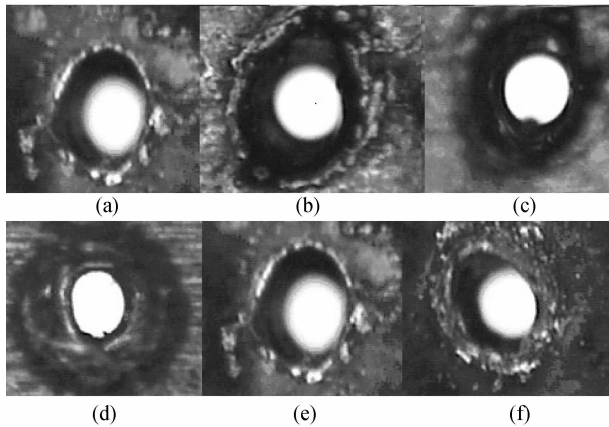


图 5 单脉冲激光打孔的 6 个孔形  
Fig. 5 Six holes' shapes of single pulse laser drilling

从图 5 观察得到:孔的表面溅射严重,孔的内壁有残留物;孔的形状发生畸变,热影响区域较大. 如果用这种波形激光对非金属材料进行加工极易造成材料表面开裂,产生裂纹. 较好的图 5(c)质量如表 1.

分析其原因主要是传统 Nd : YAG 固体激光器激光打孔技术中, 采用单脉冲激光波形, 这种脉冲的能量范围一般为几个焦耳, 高能量带来熔融物在孔中的体积相当大, 产生了较大的孔径误差. 另外由于飞溅物对激光的吸收、光束的散焦、激光脉冲终止瞬间辐射功率减小等原因使打孔过程中激光功率

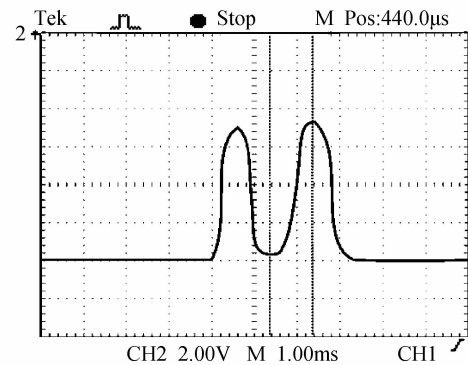
密度降低, 不能在打孔成形期间继续对加工区注入足够能量, 直接导致了汽化速度下降、孔内压力不足, 由此形成的熔融物只有部分飞出, 余下的可能堵塞小孔.

表 1 不同激光脉冲波形加工的小孔孔形质量

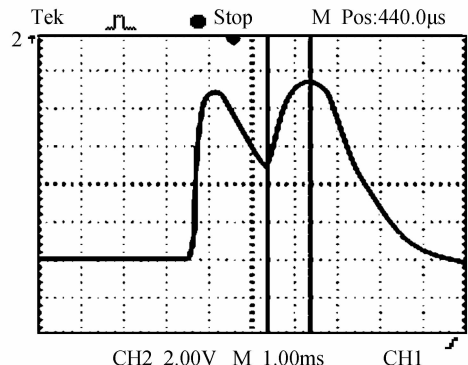
Table 1 Hole shape quality of different pulse laser drilling

	Single pulse processing hole shape	Double pulse processing hole shape	Three pulse processing hole shape
Dimension/mm	0.252	0.187	0.154
Roundness/mm	0.022	0.013	0.003
Taper/mm	0.009	0.005	0.002

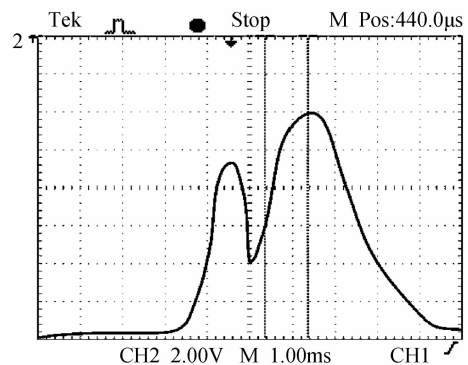
正是由于单脉冲激光打孔的这些不足, 实验中采用多脉冲激光输出波形. 其脉冲输出波形如图 6 和图 7. 多脉冲激光输出波形可看作由多个单脉冲



(a) The first output waveform



(b) The second output waveform



(c) The third output waveform

图 6 双脉冲激光输出波形 1~3  
Fig. 6 The first to the third output waveforms of double pulse laser

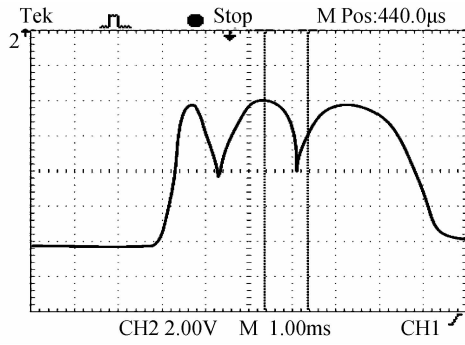


图7 三脉冲激光输出波形

Fig.7 Output waveform of three double pulse laser 叠加形成的一个较大脉宽的单脉冲.

为了消除孔堵塞的这一问題,应该在打孔终止瞬间注入比打孔成形期间更高的峰值功率.为此提出了如图6(b)双脉冲激光输出波形,该波形由两个脉宽约为250µs的脉冲组成,两个脉冲间距为250µs,脉冲平均能量550mJ,利用该双脉冲激光输出波形进行打孔实验所得的4个孔形如图8.可以看到采用双脉冲输出波形要比采用单脉冲波形对薄钢板进行打孔获得的孔形要好.

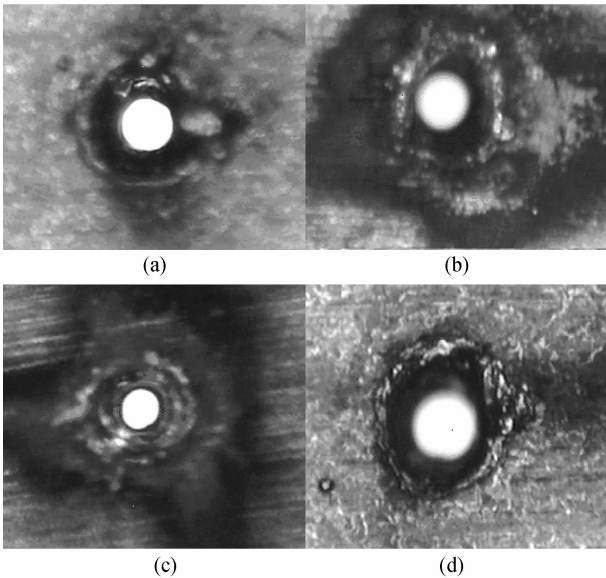


图8 双脉冲激光打孔的4个孔形

Fig.8 Four holes' shapes of double pulse laser drilling

这是因为金属材料的吸收率随温度升高而升高.双脉冲激光输出波形正好可以对金属材料进行预热,改变其吸收条件并寻找最佳预热温度,提高吸收率.第一个脉冲在加工起始阶段对材料起预热作用,大大加强材料对激光能量的吸收的能力;而第二个脉冲正好清除打孔时孔内存有残留物,因此孔形的圆度及加工质量明显变好.较好的图8(c)质量如表1.

如图6(c)所示的激光波形正好是脉冲宽度稍大于250µs的两个脉冲叠加而成,采用这种脉冲波形进行实验获得的孔径为0.15mm小孔如图9.

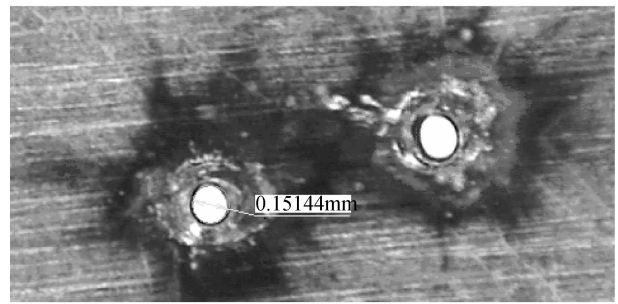


图9 双脉冲激光打孔孔形

Fig.9 Hole shapes of double pulse laser drilling

从图9观察到:打孔过程中溅射较多杂质,且获得的孔的几何尺寸准确度不好,打孔质量较差.

为了进一步提高打孔质量,采用如图7所示的波形,两个脉冲波形间隔约为100µs,后一个脉冲比前一个脉冲的脉宽要大.用该脉冲波形进行打孔获得的孔形如图10.可见孔的几何尺寸准确度较理想,热影响区域面积较小,但孔表面材料溅射得仍然比较厉害.

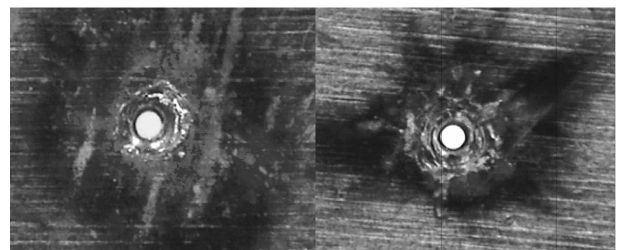


图10 双脉冲激光打孔孔形

Fig.10 Hole shapes of double pulse laser drilling

根据上述分析,在接下来的实验中改变激光电源,使之产生具有三个脉冲的激光输出波形,如图3(c).三脉冲波形每个脉冲脉宽大约在100µs左右,脉冲间距大约为100µs,脉冲平均能量350mJ.

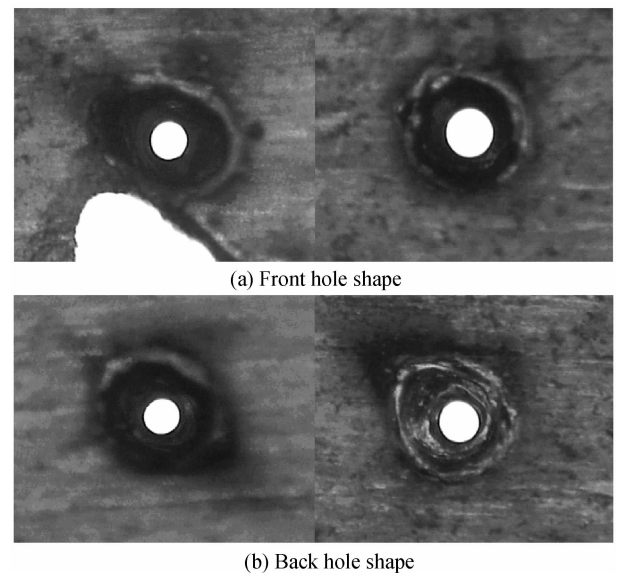


图11 三脉冲激光打孔的反面孔形

Fig.11 Front and back holes' shapes of three pulse laser drilling

三脉冲激光打孔不但减少了熔融物和等离子体的产生,而且降低了激光打孔对高能量的要求,符合在激光打孔过程中向加工区域输入所需能量的规律性,理论上比常单脉冲激光打孔更有利,获得的孔形正反面如图 11。

可以看到孔的几何尺寸准确度理想,热影响区域小。此外,孔圆度误差和锥度误差都大为减少,表明小孔的横截面和纵向截面形状有较大的改善。图 11(a)中较好的左边小孔孔形质量如表 1。

对表 1 所列的三种不同激光脉冲波形进行小孔加工实验所获得的孔形质量进行比较与分析,采用三脉冲激光波形是获得高质量孔形的有效方式。

## 4 结论

本文针对 Nd:YAG 激光器采用单脉冲激光波形打孔的不足,在摒弃选模技术的情况下,提出了一种新型的能够产生多脉冲激光输出波形的实验装置进行小孔加工。

通过对不同激光脉冲波形打孔效果的比较分析得出:多脉冲激光打孔不但减少了熔融物和等离子体的产生,而且降低了激光打孔对高能量的要求,获得的小孔质量优于单脉冲激光打孔。另外脉冲宽度和脉冲间距的选择对激光小孔加工质量起决定性作用,在加工高质量孔的时候,应该选用较短的激光脉冲宽度。本文采用单路电源分路充电方式设计了一种能够产生多脉冲激光输出波形的实验电源,并在 1 mm 厚的薄钢片上进行了激光加工实验,成功获得了直径小于 1 mm 的高质量小孔。实验得出,采用三脉冲激光波形进行打孔较单脉冲激光打孔质量更好,有效的激光脉冲宽度为 100  $\mu\text{s}$ ,脉冲平均能量 350 mJ,有效多脉冲间距为 100  $\mu\text{s}$ 。目前国内外对微孔加工的方法多采用单脉冲激光选模技术,但还未见到有关采用多脉冲激光技术进行打孔的报道。

### 参考文献

[1] MCNALLY C A, FOLKE J, PASHBY I R. Laser drilling of cooling hole in aeroengines: state of the art and future challenges[J]. *Materials Science and Technology*, 2004, **20**

(7): 805813-805819.

- [2] 张国顺. 现代激光制造技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 10-16.
- [3] VOISEV K, CHENG C, CLONE T. Quantification of melt ejection phenomena during laser drilling [C]. *Laser-Solid Interactions for Materials Processing*. Materials Research Society, San Francisco, 200. J5. 6.
- [4] VOISEY K T, KUDESIA S S, RODDEN W S, *et al.* Melt ejection during laser drilling of metals[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2003, **356**(1-2): 414-424.
- [5] YANG Yi-min. Pulsed Nd:YAG laser applications in precision machining[J]. *Laser and Infrared*, 1997, **27**(6): 333-336.  
杨逸民. 脉冲 Nd:YAG 激光在精密加工中的应用[J]. *激光与红外*, 1997, **27**(6): 333-336.
- [6] KELBASSA I, WAHHER K, TRIPPE L, *et al.* Potentials of manufacture and repair of nickel base turbine components used in aero engines and power plants by laser metal deposition and laser drilling[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, **22**(5): 739-748.
- [7] 梁国忠, 梁作亮. 激光电源电路[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1955: 73-80.
- [8] SONG Lin-sheng, SHI Guo-quan, LI Zhan-guo. Laser drilling temperature field analysis and simulation [J]. *Tooling Engineering*, 2006, **40**(8): 12-14.  
宋林森, 史国权, 李占国. 激光打孔温度场的数值分析与仿真[J]. *工具技术*, 2006, **40**(8): 12-14.
- [9] FANG Jian-cheng, WANG Xu-yue, DENG Qi-lin, *et al.* Measures to improve the quality of laser drilling [J]. *Manufacturing Technology*, 1997(11): 22-24.  
方建成, 王续跃, 邓琦林, 等. 提高脉冲激光打孔质量的措施[J]. *制造技术与机床*, 1997(11): 22-24.
- [10] BANK P S, FEIT M D, RUBENCHIK A M, *et al.* Material effects in ultra-short pulse laser drilling of metals [J]. *Applied Physics A*, 1999, **69**(S1): 375-380.
- [11] KUO T Y. Effect of pulsed and continuous Nd:YAG laser beam waves on welding of Inconel alloy [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2005, **10**(5): 557-565.
- [12] CHEN W T, LOSTSHAW A L, ORTIZ, *et al.* Laser drilling of advanced materials: effects of peak power, pulse format and waveleneth[J]. *Journal of Laser Applications*, 1996, **8**(5): 233-239.
- [13] ARSHED G M, SHUJA S Z, YILBAS B S, *et al.* Transient helium jet expansion into stagnant air in relation to laser drilling[J]. *Mechanical Engineering Science*, 2005, **219**(7): 667-683.
- [14] WANG X D, MICHALOWSKI, WALTER D, *et al.* Laser drilling of stainless steel with nanosecond double-pulse[J]. *Optics & Laser Technology*, 2009, **41**(2): 148-153.

## Comparisons and Analysis of Drilling Experiment Using Different Pulse Laser Waveforms

SU Shi<sup>1a</sup>, AN Zhi-yong<sup>1a</sup>, LIANG Wei<sup>1b</sup>, CONG Jing-bin<sup>1b</sup>, FAN Fan<sup>2</sup>

(1 a. *School of OptoElectronic Engineering*; b. *School of Science*,  
*Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China*)  
(2 *Zhenjiang Ships and Boats College, Zhenjiang, Jiangsu 212003, China*)

**Abstract:** In order to obtain the high-quality small holes and overcome the shortcomings of single pulse laser drilling, a new multi-pulse laser wave is introduced. Using the new manner, the hole of which the diameter is less than 1 mm, is obtained in 1mm-thick steel. Depending on the basic of theoretical analysis of multi-pulse drilling, the multi-pulse drilling can reduce the generation of melt interest and plasma, and the requirement of high energy for laser drilling. And it can also obtain the higher quality of drilling than the single laser drilling. In addition, the option of pulse width and pulse spacing is important for machining quality of laser drilling. It should choose shorter laser pulse width, when machine the high-quantity hole. Through the comparison and analysis of drilling results which are generated by waveforms of single pulse laser and multi-pulse laser, it is known that the quality of drilling results generated by waveform of three-pulse laser is superior to those of single pulse laser. And it is found that the average energy of effective pulse is 350 mJ, and the optimum pulse width and the best pulse interval are both 100  $\mu$ s.

**Key words:** Laser; Laser drilling; Laser power; Multi-pulse