

文章编号: 1001-3806(2009)03-0283-04

## 短脉冲激光微孔制备的双脉冲方法研究

王晓东<sup>1</sup>, MICHALOWSKI Andreas<sup>2</sup>, DAUSINGER Friedrich<sup>2</sup>, 刘劲松<sup>1\*</sup>

(1. 华中科技大学 光电子科学与工程学院 武汉光电国家实验室, 武汉 430074; 2. 斯图加特大学 射线工具研究所, 斯图加特 70569)

**摘要:** 为了提高纳秒短脉冲激光微孔制备的加工效率, 采用了一种新颖的双脉冲方法。通过时域脉冲整形将调 Q 激光器产生的普通纳秒脉冲转换为具有几十纳秒脉冲时间间隔的双脉冲序列。使用这种双脉冲序列对不锈钢试件进行打孔实验, 与传统单脉冲打孔结果对比发现, 在一定条件下双脉冲序列能将打孔烧蚀率提高一个数量级以上。实验中研究了脉冲能量、重复频率以及环境气体压力对双脉冲序列烧蚀率的影响, 并将脉冲烧蚀率提高的原因归结为材料预加热、材料溶液的加速以及瞬时真空环境, 对各种机制分别进行了讨论。结果表明, 采用双脉冲方法替代普通单脉冲进行金属打孔, 可以在相同能量密度, 相同脉冲重复频率的情况下大幅度提高脉冲烧蚀率, 为高效激光微孔制备提供了新方法。

**关键词:** 激光技术; 激光打孔; 双脉冲; 脉冲整形; 烧蚀率  
**中图分类号:** TG665 **文献标识码:** A

### Double-pulse technique for short pulse laser drilling

WANG Xiao-dong<sup>1</sup>, MICHALOWSKI Andreas<sup>2</sup>, DAUSINGER Friedrich<sup>2</sup>, LIU Jin-song<sup>1</sup>

(1. Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Institut für Strahlwerkzeuge, Universität Stuttgart, Stuttgart 70569, Germany)

**Abstract:** In order to improve the efficiency of short pulse laser drilling, a double-pulse technique is put forward. The double-pulse herein represents two neighboring nanosecond pulses with several tens of nanoseconds interpulse separation, acquired by temporal pulse shaping. In the experiments, laser beams from a Q-switched Nd:YLF laser was focused on steel workpieces 0.4mm ~ 1.0mm thick. The influence of energy density, repetition rate and the ambient gas pressure on ablation rate was studied. The experimental results show a significant enhancement of ablation rates using double-pulse instead of conventional single-pulse under the same condition of energy density and pulse repetition frequency. The ablation mechanism of the double-pulse drilling, including material preheating, melt flow accelerating and quasi-vacuum environment, was discussed respectively. These results are important for practical efficient laser drilling.

**Key words:** laser technique; laser drilling; double-pulse; pulse shaping; ablation rate

## 引言

由于短脉冲激光烧蚀热影响区小, 近年来被广泛应用于高质量的材料微细加工领域。研究人员已对影响短脉冲激光烧蚀的各种因素, 诸如激光波长、脉冲宽度、能量密度等进行了广泛的研究<sup>[1-4]</sup>。研究表明, 材料熔液喷溅以及材料汽化是短脉冲激光材料去除的主要途径。为了提高激光加工效率, 出现了一系列技术和方法, 例如使用辅助的高压气体喷嘴来加速材料熔液喷溅和材料汽化物的扩散<sup>[5]</sup>。作者采用双脉冲的新方法促进纳秒脉冲激光在金属材料打孔过程中的烧

蚀率。

双脉冲方法最初被应用于激光诱导离解光谱分析, 其目的在于通过使激光能量更好地耦合于被烧蚀材料来提高激光诱导离解光谱分析的分析能力<sup>[6-7]</sup>。STRATUS 等人提出, 双脉冲所导致的等离子体强度增加是由于双脉冲对材料的烧蚀作用增强所造成<sup>[8]</sup>。SATTMANN 等人研究了不同脉冲能量的普通单脉冲与双脉冲的材料烧蚀, 发现双脉冲钢材料的烧蚀质量相比单脉冲提高了 8 倍<sup>[9]</sup>。类似双脉冲的方法也被用于激光打孔中。LEHANE 等人使用由脉宽为 3.5ms 和 150 $\mu$ s 的两种光源合成的双脉冲对不锈钢进行打孔, 在没有气体喷嘴辅助的情况下可以穿透厚度约为 3mm 的不锈钢试件, 他们认为双脉冲打孔深度的增加是由于脉宽为 150 $\mu$ s 的激光脉冲与材料作用产生的汽化反冲压力促进了材料熔液的喷溅<sup>[10]</sup>。

作者简介: 王晓东 (1977-), 男, 博士研究生, 现主要从事激光微加工的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: jslu4508@vip.sina.com

收稿日期: 2008-03-27; 收到修改稿日期: 2008-05-05

作者采用脉冲宽度为 21ns 的脉冲激光,通过时域脉冲整形得到脉冲间隔约为 52ns 的双脉冲序列,使用其针对不同厚度的不锈钢试件进行打孔,并将实验结果与单脉冲烧蚀率相比较。结果显示,在一定实验条件下,双脉冲打孔烧蚀率较单脉冲提高一个数量级以上。实验中对脉冲能量、重复频率和环境气压等影响打孔烧蚀率的因素分别进行了研究。最后分析了双脉冲打孔烧蚀率提高的原因。

### 1 实验装置

实验装置如图 1 所示,其包括调 Q 脉冲激光器、

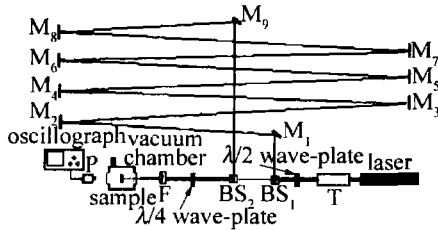


Fig. 1 Experimental setup

准直透镜 T、半波片、 $\lambda/4$  波片、偏振分束镜 ( $BS_1$ ,  $BS_2$ )、聚焦透镜 F、反射镜  $M_1 \sim M_9$ 、真空腔、光电二极管 P 和示波器。实验中使用的激光光源为 Trumpf 公司的调 Q Nd:YLF 激光器,波长 1047nm,最大脉冲能量 4mJ,最大重复频率 15kHz,最短脉宽 21ns(半峰全宽)。

激光器产生的线偏振光束经准直透镜准直,进入由半波片和偏振分束镜构成的比率可调的分束系统,通过调节半波片的旋转角度,可以连续改变垂直反射光束和透射光束的能量分配。垂直反射光束经由反射镜反射延长光路,产生滞后于透射光束约 52ns 的延

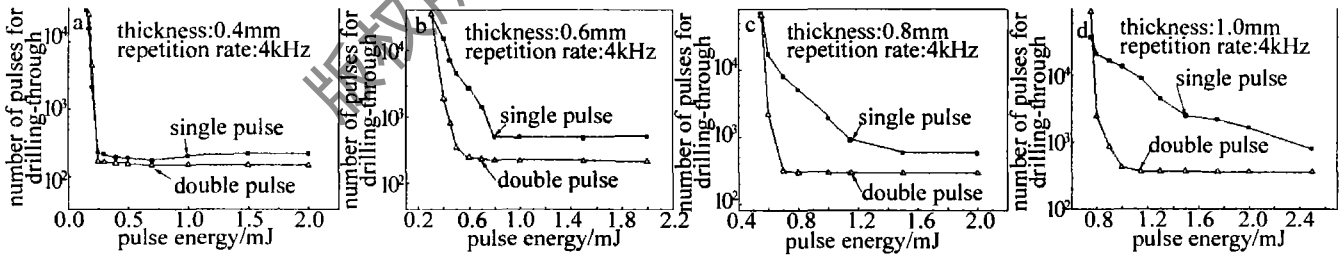


Fig. 3 Dependence of the number of pulses and pulse energy for drilling-through holes on steel workpieces in different thickness

示与之对比的单脉冲烧蚀结果,两种脉冲形式的重复频率均为 4kHz。从图 3a 中可以看出,当脉冲能量大于 0.25mJ,双脉冲与单脉冲的烧蚀速度均不再增加。对于其他厚度的试件,如图 3b ~ 图 3d 所示,形成穿透孔所需脉冲数与脉冲能量的依赖关系也有相同变化趋势。从图 3a 中还可以看出,对于 0.4mm 厚的试件,不同脉冲能量的双脉冲和单脉冲在材料上形成穿透孔所需脉冲数基本相同,双脉冲烧蚀的优势并不明显。但随着试件厚度的增加,双脉冲烧蚀的优势逐步显现出来。对于 1mm 厚钢试件,如图 3d 所示,430 个脉冲能

时。随后通过偏振分束镜合并两光束,合并后的光束由  $\lambda/4$  波片将线偏振光变换为圆偏振光。经上述步骤,普通单脉冲被变换为具有 52ns 时间间隔的双脉冲,其波形如图 2 所示。此处定义双脉冲的脉冲能量

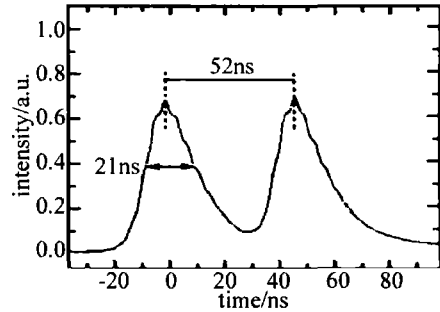


Fig. 2 Pulse shape of double-pulse

为构成双脉冲的两个子脉冲的能量总和。实验中,两个子脉冲的能量总是被调节为相等。

合成的双脉冲通过一个焦距为 150mm 的透镜聚焦于不锈钢 (X10CrNi18-8) 试件上,焦斑直径为  $30\mu\text{m}$ ,焦点位置在试件中距离试件表面  $200\mu\text{m}$  处。实验中所选的试件厚度为 0.4mm,0.6mm,0.8mm 和 1.0mm,试件置于真空腔中。高速光电二极管 (Soliton UPD500) 和与之连接的示波器 (HP54542A, 500MHz, 2GSa/S) 置于试件背后,以记录试件上形成穿透孔的时间。

### 2 实验结果

首先使用不同脉冲能量的双脉冲对不锈钢试件进行打孔实验,形成穿透孔所需脉冲数与脉冲能量的依赖关系如图 3 所示。4 个图分别为不同厚度试件的实验结果,实心方形表示双脉冲烧蚀结果,空心三角形表

量为 1mJ 的双脉冲可以使试件形成穿透孔;若使用 1mJ 的单脉冲,则形成穿透孔所需脉冲数超过 10000 个,这种情况下,双脉冲对烧蚀效率的提升超过 30 倍。

双脉冲和单脉冲在不锈钢试件上形成穿透孔的入口和出口电镜照片见图 4。图 4a、图 4c 为 13000 个单脉冲穿孔后的入口和出口照片,图 4b、图 4d 为 600 个双脉冲的结果照片,脉冲能量均为 1mJ,试件厚度为 1mm。从图中可以看出,大量材料熔液的重凝物堆积在孔的入口处。单脉冲和双脉冲穿孔的入口尺寸均约为  $50\mu\text{m}$ ,出口尺寸分别约为  $16\mu\text{m}$  和  $12\mu\text{m}$ ,可以看出

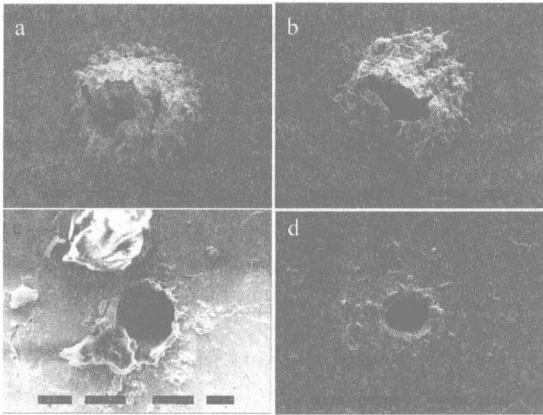


Fig. 4 Entrance and exit of drilled holes in 1mm steel with single-pulse and double-pulse  
a, c—entrance and exit for 13000 single-pulses b, d—entrance and exit for 600 double-pulses

600 个双脉冲和 13000 个单脉冲对于材料的烧蚀去除体积基本相当。

实验中也进行了低气压环境下的脉冲烧蚀,给出了低气压环境与普通空气环境中的实验数据对比,如图 5 所示。由图 5 可见,空气中双脉冲烧蚀效率与

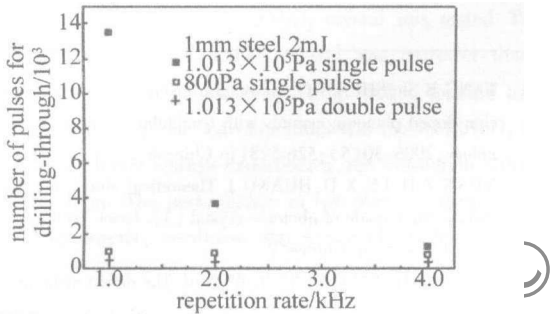


Fig. 5 Dependence of the number of pulses and pulse repetition rate for drilling-through steel at different ambient air pressure

800Pa 气压下单脉冲烧蚀效率相当,且均不随脉冲重复频率变化发生较大改变。然而,空气中的单脉冲烧蚀效率较低,且受重复频率变化影响明显。

### 3 分析讨论

上述实验结果表明,对于空气环境中较厚(大于 0.6mm)不锈钢试件的打孔,双脉冲方法能大幅度提高打孔烧蚀效率。究其原因,认为有以下几点。首先,金属材料在室温时对激光脉冲能量的吸收率较小;当温度升高到接近熔点时,其吸收率可达 40% ~ 50%;如果温度接近沸点,其吸收率可高达 90%<sup>[11]</sup>。使用有限元法对 21ns 激光脉冲与钢材材料作用的传热过程进行数值模拟,得到脉冲作用 52ns 后烧蚀区的材料汽化及熔化边界,如图 6 所示。模拟使用参量及材料热物理属性也示于图中。可以看出,21ns 激光脉冲与钢材材料作用 52ns 后,材料烧蚀区处于熔融状态,温度接近材料沸点,这将大大提高材料对第 2 子脉冲能量的吸

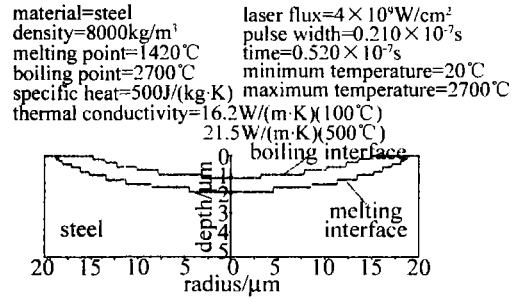


Fig. 6 Numerical simulation of the melting and boiling interfaces at 52ns after the beginning of laser pulse

收率,从而引起烧蚀效率的提高。

其次,由图 6 得知,在第 2 子脉冲到来时,材料烧蚀区存在熔融层。第 2 子脉冲与材料作用产生的汽化反冲压力将加速熔化材料喷溅出烧蚀区外,使烧蚀效率得到提高。对于厚度小于 0.4mm 的试件,单脉冲具有足够的能量使熔液溅射出孔外,因此,双脉冲烧蚀效率与之相比没有明显提高,如图 3a 所示。但随着试件厚度的增加,单脉冲不能使所有材料熔液溅射出孔外,大量金属熔液沉积在孔壁之上阻碍打孔过程的进展,这时双脉冲的优势才显现出来。

另外,双脉冲在空气中的高烧蚀效率与低气压环境中单脉冲烧蚀效率相似的现象说明,瞬时低气压环境可能是引起双脉冲烧蚀效率提高的原因之一。一些研究工作也表明,双脉冲中的第 1 个子脉冲能够耗尽激光作用区域上方的空气,产生准真空环境,有利于材料对激光能量的吸收和材料喷溅<sup>[12]</sup>。按实验参量,由计算机模拟得到脉冲开始作用 52ns 后激光烧蚀区周围气体密度分布,如图 7 所示。模拟结果显示,脉冲开

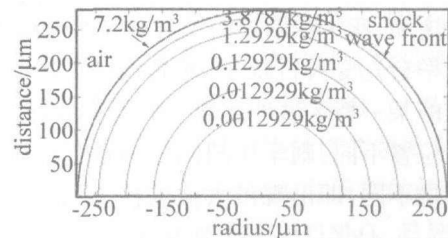


Fig. 7 Density distribution behind shock wave front at 52ns later after the beginning of laser pulse(pulse width is 21ns, pulse energy is 1mJ)

始作用 52ns 后激光冲击波波前扩张半径为 278μm,激光冲击波范围内所有受扰动气体的质量都集中于冲击波波前附近,在距离冲击波中心 200μm 的范围内气体密度  $\rho < 0.1\rho_{\text{air}}$ 。即当第 2 个脉冲作用于试件时,在作用区域上方已形成了一个低密度准真空环境,因此,第 2 脉冲能量能被材料更好地吸收,被烧蚀材料也易于从作用区向外扩散。

### 4 小结

实验结果表明,对于空气环境中较厚不锈钢试件的打孔,双脉冲方法能大幅度提高烧蚀效率。双脉冲

烧蚀率提高的原因在于:(1)第1子脉冲预加热材料至高温相变状态,提高材料对第2子脉冲能量的吸收率;(2)第2子脉冲能加速由第1子脉冲产生的材料熔液飞溅出孔外;(3)第1子脉冲使激光作用区上方产生瞬时真空环境,使得第2子脉冲能量能更好地被材料吸收,同时使得被烧蚀材料更易于向孔外扩散。

使用本文中介绍的双脉冲方法替代普通单脉冲进行金属打孔,可以在较低能量密度、较低脉冲重复频率的情况下得到高的烧蚀效率,这对降低加工成本有着重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] BREITLING D, RUF A, DAUSINGER F. Photon processing in microelectronics and photonics III [J]. Proc SPIE, 2004, 5339: 49-63.
- [2] JACKSON M J, NEILL W O. Laser micro-drilling of tool steel using Nd: YAG lasers [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142(2): 517-525.
- [3] BREITLING D, SCHITTENHELM H, BERGER P, *et al.* Shadowgraphic and interferometric investigations on Nd: YAG laser-induced vapor/plasma plumes for different processing wavelengths [J]. Appl Phys, 1999, A69(s1): 505-508.
- [4] KLIMENTOV S M, KONONENKO T V, PIVOVAROV P A, *et al.* Role

- of gas environment in the process of deep-hole drilling by ultrashort laser pulses [J]. Proc SPIE, 2003, 4830: 515-520.
- [5] FIERET J, TERRY M J, WARD B A. Aerodynamic interactions during laser cutting [J]. Proc SPIE, 1986, 668: 53-62.
  - [6] ST-ONGE L, DETALLE V, SABSABI M. Enhanced laser-induced breakdown spectroscopy using the combination of fourth-harmonic and fundamental Nd: YAG laser pulses [J]. Spectrochimica Acta, 2002, B57(1): 121-135.
  - [7] SCAFFIDI J M, ANGEL S, CREMERS D A. Emission enhancement mechanisms in dual-pulse LIBS [J]. Analytical Chemistry, 2006, 78(1): 24-32.
  - [8] STRATIS D N, ELAND K L, ANGEL S M. Effect of pulse delay time on a pre-ablation dual-pulse LIBS plasma [J]. Applied Spectroscopy, 2001, 55(10): 1297-1303.
  - [9] SATTMANN R, STURM V, NOLL R. Laser-induced breakdown spectroscopy of steel samples using multiple Q-switch Nd: YAG laser pulses [J]. J Phys, 1995, D28(10): 2181-2187.
  - [10] LEHANE C, KWOK H S. Enhanced drilling using a dual-pulse Nd: YAG laser [J]. Appl Phys, 2001, A73(1): 45-48.
  - [11] WANG J J. Laser processing technique [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1992: 114-115 (in Chinese).
  - [12] PETTER L, NOLL R. Material ablation and plasma state for single and collinear double pulses interacting with iron samples at ambient gas pressures below 1 bar [J]. Appl Phys, 2007, B86(1): 159-167.

(上接第268页)

时,透射率达到最大,为30084.75,然后减小,当消光系数达到0.01稍强时,其透射率低于0.5。

### 3 结 论

通过对具有吸收的零平均折射率材料作为缺陷层的1维光子晶体的数值计算和理论分析,发现随着消光系数的增加,孪生缺陷模的位置并没有发生变化,但是其透射率会先变大再减小,使高低频处的缺陷模在消光系数的某一特定值处出现一最大值。而且引入消光系数的位置不同,则孪生缺陷模的透射率的响应曲线也会随之不同,即出现最大值的位置和最大值的大小不同。

### 参 考 文 献

- [1] YABLONVICHE E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(20): 2059-2061.
- [2] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric super lattices [J]. Phys Rev Lett, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [3] QI J X, WEN Sh Ch. Research of optical properties of one-dimension photonic crystals constructed by positive-negative refractive materials [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 504-506 (in Chinese).
- [4] JIN Y, HUANG Zh Y, CHEN X F, *et al.* Study on polarization properties of the photonic crystal defect mode [J]. Laser Technology, 2007, 31(3): 277-280 (in Chinese).

- [5] TANG B Sh, SHEN T G. Study on transmission property of two-dimension doped photonic crystals with triangular lattices [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 526-528 (in Chinese).
- [6] YUAN Z H, LU X D, HUANG J. Theoretical study of reflective phase compensator made of photonic crystal [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 476-478 (in Chinese).
- [7] WANG Y H, TANG L, NI Zh W, *et al.* The defect mode and bistability in the nonlinear Bragg microcavity composed of one-dimension photonic crystal [J]. Laser Technology, 2006, 30(5): 462-464 (in Chinese).
- [8] XU G W, OUYANG Zh B. A new double-wavelength photonic crystal resonator [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(3): 429-433 (in Chinese).
- [9] LI J S, ZHOU L, CHAN C T, *et al.* Photonic band gap from a stack of positive and negative index materials [J]. Phys Rev Lett, 2003, 90(8): 083901-083904.
- [10] JIANG H T, CHEN H, LI H Q, *et al.* Omnidirectional gap and defect mode of one-dimensional photonic crystals containing negative-index materials [J]. A P L, 2003, 83(26): 5386-5388.
- [11] SHI Zh H, GENG J G, YAN K Zh. Defect mode of one-dimensional photonic crystals containing negative refraction materials [J]. Acta Sinica Quantum Optica, 2007, 13(2): 129-133 (in Chinese).
- [12] LIU Q N. Absorb influence to the photonic bandgap of photonic crystal [J]. Laser & Infrared, 2007, 37(6): 543-545 (in Chinese).
- [13] LIU Q N. Effect of impurity absorption on one-dimensional photonic crystal defect mode [J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(6): 777-780 (in Chinese).
- [14] WANG H, LI Y P. An eigen matrix method for obtaining the band structure of photonic crystals [J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50(11): 2172-2178 (in Chinese).