文章编号：1000-5773(2004)02-0130-05

水中薄片激光打孔反常现象的分析*

徐荣青[1,2]，陈 笑[2]，沈中华[2]，陆 建[2]，倪晓武[2]

(1. 华东船舶工业学院电子信息学院，江苏镇江 212003；
2. 南京理工大学应用物理系，江苏南京 210094)

摘要：在其它条件相同的情况下，水中激光在金属薄片上的打孔效率远高于空气中的打孔效率。采用自行研制的基于光偏转原理的力学传感器，分别测量了激光在空气和水中烧蚀薄片时薄片表面所受的力。实验结果表明，激光在空气中烧蚀薄片时，靶材仅受到烧蚀力的作用，而在水中打靶时，靶受到烧蚀力和两次射流冲力等综合作用，且水中的三次冲力在幅值和持续时间均远大于空气中靶材所受的冲力，并用扫描电子显微镜观察了孔的形貌，进而分析了水下激光打孔效率远高于空气中打孔效率的机制。

关键词：力学传感器；激光；打孔效率；烧蚀

中图分类号：TB936 **文献标识码**：A

1 引 言

我们知道激光加工是激光应用的主要方向之一，也一直是人们关注的热点之一[1~3]。通常的激光加工均在空气中进行，对应的基础研究也较为成熟，已建立了较为完整的理论体系和成熟的加工工艺。但不同的环境，如在水下进行激光加工及其对应的加工效果和效率的研究尚不多见，而海洋开发以及一些特殊应用领域(如核电设备的安全维护)已对水下激光加工提出了迫切的需求。

利用周围介质改善加工环境，如在水下进行激光加工而言，已有文献进行了初步的研究。如在对 45# 钢筒外表面进行水下刻槽，这主要是利用水的冷却作用提高加工质量，但此时采用了水下吹气技术，在激光输出端与靶材之间形成一块无水区，激光束是直接照射在固体靶材上的，因而实际上仍是在空气中进行激光加工的[4]；在空气以外介质中进行高分子材料表面处理也有报道，此时主要是使被加工材料在光照射下发生化学反应，改善材料的表面性质，如对聚四氟乙炔材料，在水下用准分子激光器发出的紫外波段激光照射后，可以改善其亲水性[5]。激光加工的效果主要取决于靶的热效应和力学效应，我们通过对金属薄片在空气和水中打孔的对比实验，发现液体中的打孔效率远高于气体中的打孔效率，而水对作用光的吸收系数及对靶的冷却作用都大于空气，故这一现象不是热效应而是力学效应造成的。据此，我们研制了一个基于光偏转原理的光纤力学传感器，并用该传感器测量了空气和水中激光打靶时靶材所受的作用力，进而分析了水中激光打孔的机制。

2 实验装置及机理

2.1 实验装置

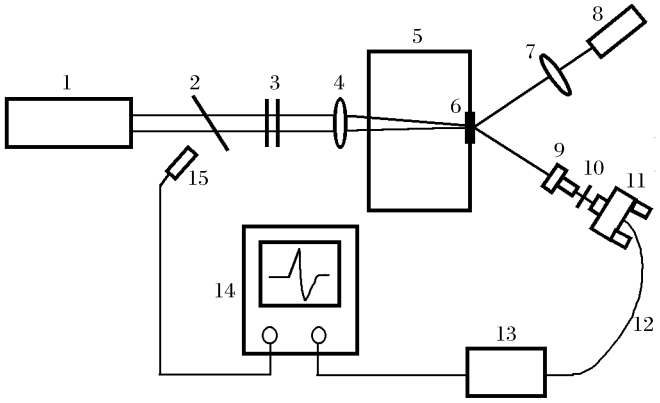
实验装置见图 1。脉冲 Nd:YAG 激光器(波长 1.06 μm，脉宽 10 ns) 单脉冲的能量可以达到 170 mJ。脉冲激光经过分光镜、衰减片后，通过一个会聚透镜(焦距 147 mm)，聚焦在厚度为 0.25 mm

* **收稿日期**：2003-05-12；**修回日期**：2003-08-05

基金项目：国家自然科学基金(60208004)；江苏省自然科学基金(BK2001056)；激光技术国家重点实验室开放基金(2005)；教育部高校优秀青年教师奖励计划资助

作者简介：徐荣青(1966—)，男，博士研究生，副教授，现从事激光与物质相互作用机理与测试技术研究.

的铁片。探测光束由氦氖激光器(波长 0.63 μm,功率 5 mW)发出。探测光束由一个非球面镜聚焦到靶材背面偏离对心处(样品激发点的中心垂直正对面为对心点)1 mm。其反射光再由一个显微物镜会聚。在其焦平面附近放置五维光纤微调架(精度 0.1 μm),以便调节单模光纤对反射光进行耦合。从光纤输出的光进入光电倍增管(上升时间 2 ns),转化为电信号,再输入数字式双通道示波器。信号被采样点并存入计算机。



1. Q-switched Nd:YAG laser (wavelength 1.06 μm, width 10 ns); 2. Beam splitter; 3. Attenuator group; 4. Convex lens (f=147 mm); 5. Glass cuvette; 6. 0.25 mm iron plate; 7. Convex lens (L_1, f_1=50 mm); 8. He-Ne laser (Power: 5 mW, Wavelength: 0.63 μm); 9. Microscope objective (20×, L_2, f_2=4 mm); 10. Interference filter (Wavelength: 0.63 μm); 11. Five-dimensional fiber-regulating-stand; 12. Single-mode optical fiber; 13. Photomultiplier (Hamamatsu 5773 with 2 ns rise time); 14. Digital oscilloscope(Tektronix TDS340); 15. PIN photodiode

图 1　实验装置图

Fig. 1　Schematic diagram of experimental setup

2.2　测试原理

当有脉冲力作用在薄铁片上时,作用点的背面会形成微小的锥形凸起,如图 2 所示。锥角 θ 和作用力 F 存在线性关系,即

$$\theta = kF \qquad (1)$$

式中 k 为常数,F 为垂直作用力。

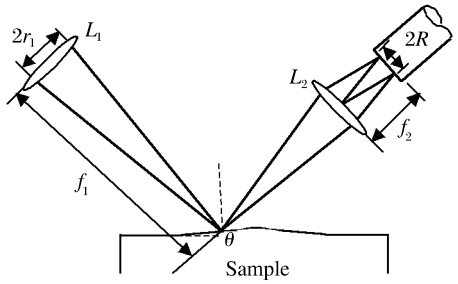


图 2　靶材对心处的探测光反射示意图

Fig. 2　Reflection of the detection beam at the epicenter

由于 0.25 mm 的铁片背面(探测面)预先进行了抛光处理,因此靶材的反射率很高。另外探测光聚焦在靶面上的光斑很小,可以近似认为光束发生镜面反射。当表面形变的倾斜角为 θ,那么光束反射时,偏移原路径的角度即为 2θ。如图 2 所示。相应的反射光束经显微物镜聚焦后所成的光斑偏移的距离如下所示

$$\delta = 2f_2\theta \qquad (2)$$

探测光束的聚焦光斑半径由下式表示

$$R = f_2(r_1/f_1) \qquad (3)$$

r_1 是光束束腰的半径,f_1、f_2 分别是 L_1、L_2 的焦距。这里 r_1=2 mm,f_1=50 mm,f_2=4 mm,那么 R=0.16 mm,而光纤芯径的半径 r=4 μm ,所以有 $R \gg r$。

探测光的反射光束服从高斯分布

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{\xi^2+\eta^2}{R^2}\right) \qquad (4)$$

I_0 是反射光强的最大值,R 为常数,η 和 ξ 为空间坐标。

如图 3 所示,光纤耦合的光通量由下式给出

$$\varphi = I_0 \int_{a-r}^{a+r} \int_{-\sqrt{r^2-(\xi-a)^2}}^{\sqrt{r^2-(\xi-a)^2}} \exp\left(-\frac{\xi^2+\eta^2}{R^2}\right) \mathrm{d}\eta\,\mathrm{d}\xi \qquad (5)$$

式中:a 是聚焦光斑的中心到光纤中心的距离,光纤的耦合通量随表面形变而发生改变,因为 $R \gg r$,所以可作下面的近似

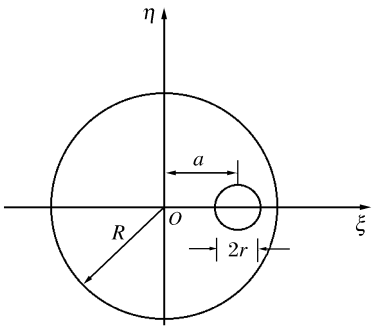


图 3　探测光的耦合

Fig. 3　Detected beam coupling

$$\varphi = I_0 \exp\left[-\frac{(a+\delta)^2}{R^2}\right] s_0 = \varphi_0 \exp\left[-\frac{(a+2\theta f_2)^2}{R^2}\right] \tag{6}$$

$$s_0 = \pi r^2$$

所以 φ 和 θ 之间的相应关系可看作服从高斯函数，为了有最佳的近似线性效果，把工作点取在图 4 的 A 点上，工作区在点 A 附近很小的区域。取 A 点的导数作为线性系数。因此光通量的变化为

$$\Delta\varphi = \varphi_0 \frac{1.666\theta f_2}{R} \tag{7}$$

而光通量的变化转化为交流电信号的电压为

$$U = \eta\Delta\varphi = \eta \frac{1.666\varphi_0\theta f_2}{R} \tag{8}$$

η 是转化因子(单位 V/W)。

由(1)式、(8)式可得

$$F = \frac{RU}{1.666\varphi_0 k\eta f_2} \tag{9}$$

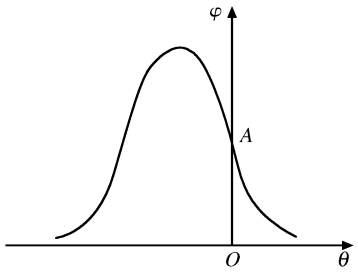


图 4 偏转角 θ 对光纤耦合的影响

Fig. 4 Influence of θ on deflected beam coupling

3 实验结果与分析

3.1 气体和液体环境中打孔的对比实验

激光单脉冲能量为 92 mJ，焦斑半径为 50 μm，对应的辐射功率密度达到 10^{11} W/cm^2。铁靶厚度为 0.1 mm。实验中以在铁片的背面看到闪光作为铁片被打穿的判据，当水槽里没有水时，即在空气中打一孔所需的脉冲次数为 252 次，有水时打一孔所需的脉冲次数仅为 56 次，水对波长为 1.06 μm 激光的吸收及对靶材的冷却作用大于空气，空气的击穿阈值也高于水的击穿阈值，所以空气中打孔效率较低的原因不是因为到达靶上的激光能量较少的缘故，即水中打孔效率较高的原因不是热学效应引起的靶的质量迁移较多，而应该从其力学效应去分析。

3.2 力学特性的测试

当强脉冲激光聚焦于水中靶材时，会在作用区产生等离子体，冲击波和空泡等一系列现象。而空泡在固壁面附近溃灭过程中，会形成指向靶材的高速射流，该射流对材料具有很大的破坏作用[6,7]。为近一步从力学角度分析，采用厚度为 0.25 mm 的铁片。图 5 和图 6 分别为与前面的其它条件相同情况下，用图 1 所示的装置测得的空气和水中激光打靶时，靶所受的力学信号，图 5 中的 a 为烧蚀力，b 为热应力；图 6 中的 a 为烧蚀力，b 和 c 分别为第一和第二次空泡溃灭时产生的射流对靶的冲击力，d 为空泡低频脉动(振荡)分量。由图5和图6可知，烧蚀力的最大值(相对值)和持续时间(半高宽)在空气中分

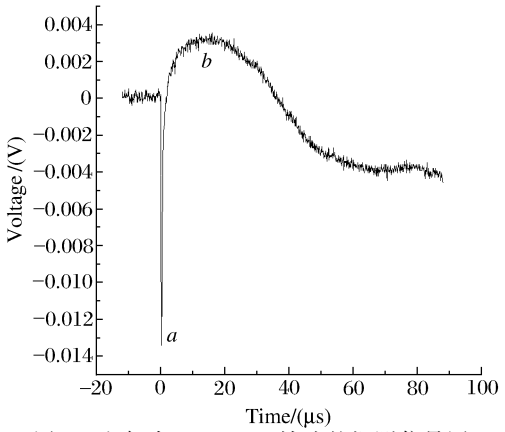


图 5 空气中 0.25 mm 铁片的探测信号图

Fig. 5 Detected signal of 0.25 mm-thick iron plate in air

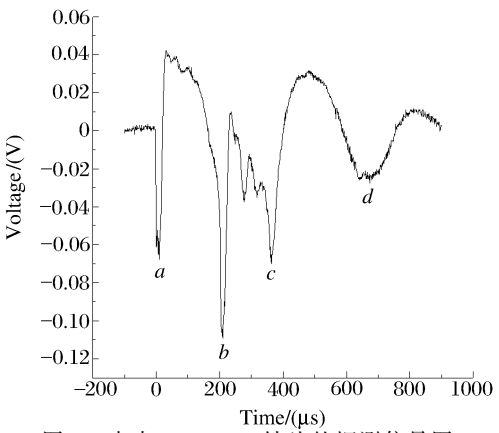


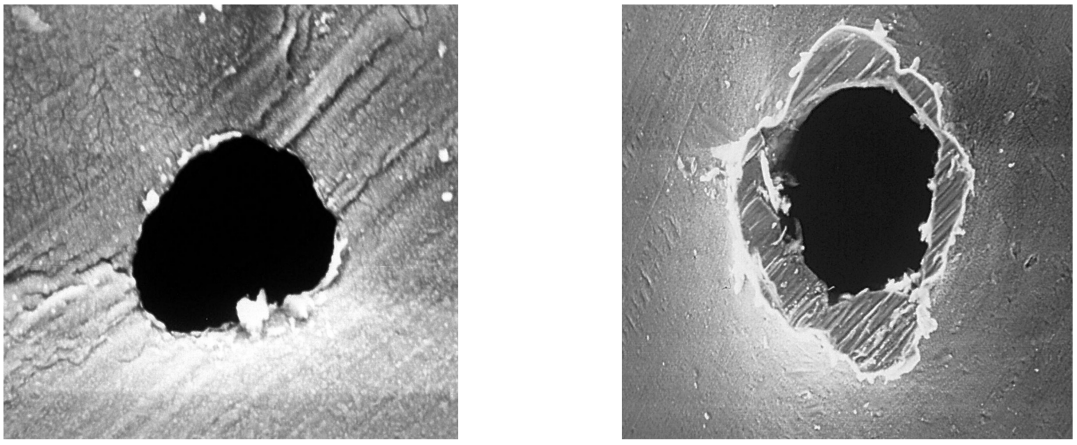
图 6 水中 0.25 mm 铁片的探测信号图

Fig. 6 Detected signal of 0.25 mm-thick iron plate in water

别为 0.0134 和 1.8 μs,在水中分别为 0.0676 和 16 μs;第一次射流冲击力的最大值(相对值)和持续时间(半高宽)分别为 0.106 和 19 μs;第二次射流冲击力的最大值(相对值)和持续时间(半高宽)分别为 0.07 和 28 μs。水中第一次射流冲力的最大值及持续时间是空气中烧蚀力的 7.9 倍和 10 倍,水中的烧蚀力及第一次射流的幅值也远大于空气中烧蚀力的幅值和持续时间,由此我们可以推断水中打孔效率远大于空气中打孔效率的原因是由冲击机制而非烧蚀机制造成的。

3.3　孔的形貌观察

采用扫描电子显微镜观察 0.1 mm 铁片在空气中和水中的打孔形状,发现其形貌有明显不同。观察孔的正面,空气中孔成锥形,孔的进口比较大,熔融金属重新凝固在孔的边沿,使孔有如火山口一样,孔口的形状也不规则;在水中打的孔,形状是比较规则的圆,并且十分光滑,很少有熔渣凝固的痕迹。观察孔的背面,在空气中孔的尺寸小而平整,在水中孔的尺寸大,有明显的撕裂,十几个脉冲后,材料有明显的突起。这一观察结果进一步证实了前面的结论。图 7 为 0.1 mm 铁片在空气和水中的背面显微照片。



(a) Air surrounding　　(b) Water surrounding

图 7　0.1 mm 铁片在空气和水中所打孔的形貌照片

Fig. 7　Holes in 0.1 mm-thick-iron drilled by pulse laser in air and water

4　结　论

(1) 我们自行研制的传感器经济,结构简单,易于调节,分析力的时间特性有优势,根据所测的射流的冲力大小还可计算出射流的速度。该传感器还可用来测量能引起微形变的其它物理量,如用于激光超声的测量。

(2) 根据对实验现象的分析,结果表明,激光无论在空气和水的环境中对材料作用时,都存在烧蚀作用,而在周围介质为空气时该作用机制占主要因素。而在水中时,激光还具有较强的冲击力,该冲击作用力无论是作用时间还是作用幅值均远大于空气中的烧蚀作用力。因而可以认为水中激光加工效率高于空气中加工效率的原因应该是冲击作用的结果,而非烧蚀机制。不同能量下,水中打孔的效率都高于空气中打孔的效率,但打孔效率提高的倍数在不同能量下有较大的变化,这里面涉及靶材的击穿,水的击穿,水的击穿位置,等离子体发展过程,泡的能量及泡的无量纲数 γ,有关这方面的详细研究,我们将另有报道。

(3) 我们的研究对激光与液态物质或液态环境中物质的作用有直接的指导作用,如对激光眼科手术。过去人们一直认为眼科的虹膜手术是激光等离子体冲击力的作用,我们的研究表明,空泡射流的作用超过冲击波的作用,这将会丰富激光加工和激光医学。

References:

[1] Luxon J L, Parker D E. Industrial Laser and Their Application(2ed) [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1992.

[2] Oros C. Laser-Plasmas Generation and an Application: Laser Hardfacing [J]. UPB Scientific Bulletin, Series A: Applied Mathematics and Physics, 2000, 62 (1): 107－117.

[3] Fabbro R, Peyre P, Berthe L, et al. Physics and Applications of Laser Shock Processing of Materials [J]. SPIE, 2000, 3888: 155－164.

[4] Li Y W, Liu J Z, Li W X. Study of CO_2 Laser Grooving under Water on the Outside of a Cylinder Casting [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(5): 455－460. (in Chinese)
李彦文, 柳进转, 李维新. 45# 钢圆筒外表面水下刻槽工艺研究 [J]. 中国激光, 1999, 26(5): 455－460.

[5] Huang F, Lou Q H, Xu J Q, et al. Polymer Surface Treatment by XeCl Excimer Laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 1999, 26(8): 745－748. (in Chinese)
黄 峰, 楼祺洪, 徐剑秋, 等. 高分子材料的准分子激光表面处理 [J]. 中国激光, 1999, 26(8): 745－748.

[6] Vogel A, Busch S, Parlitz U. Shock Wave Emission and Cavitation Bubble Generation by Picosecond and Nanosecond Optical Breakdown in Water [J]. J Acou Soc Am, 1996, 100(1): 148－165.

[7] Philipp A, Lauterborn W. Cavitation Erosion by Single Laser-Produced Bubbles [J]. J Fluid Mech, 1998, 361: 75－116.

Abnormal Phenomenon of Laser-Drilling a Plate Underwater

XU Rong-Qing[1,2], CHEN Xiao[2], SHEN Zhong-Hua[2],
LU Jian[2], NI Xiao-Wu[2]

(1. *Department of Electronics & Information, East China Shipbuilding Institute, Zhenjiang* 212003, *China*;
2. *Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing* 210094, *China*)

Abstract: The efficiency of laser-drilling a metal plate in water was observed higher than that in air. A new mechanical sensor based on optical deflection technique was applied to investigate the force acting on a metal in water and air respectively during laser-matter interaction. It is shown that in air the sample is only affected by laser-induced ablation, while underwater it is impacted not only ablation, but also two liquid-jet impulses. Both the amplitude and duration of three forces underwater are much larger than those in air. By scanning electronic microscope, the shape of laser-drilling holes is observed and their different mechanisms in water and air are analyzed in detail.

Key words: mechanical sensor; laser; drilling efficiency; ablation