

文章编号: 0258-7025(2007)12-1621-04

离焦量对空气中纳秒激光打孔效率的影响

王广安, 章玉珠, 倪晓武, 陆建

(南京理工大学理学院应用物理系, 江苏 南京 210094)

摘要 用波长 $1.06\ \mu\text{m}$, 脉冲半峰全宽(FWHM)约10 ns的Nd:YAG激光照射在薄铜靶上,研究了打孔效率同离焦量之间的关系。实验中脉冲能量分别为26 mJ, 52 mJ, 85 mJ, 204 mJ和274 mJ,在各脉冲能量下,改变离焦量,测出相应的打孔效率。结果表明,离焦量是影响打孔效率的重要因素;实际打孔过程中,采用较低的激光功率密度和 $+3\sim+4\ \text{mm}$ 的离焦量是合理的选择。当离焦量 $d < 0$ 时,打孔效率主要由激光照射产生的热烧蚀、等离子体屏蔽两个物理机制决定;当离焦量 $d > 0$ 时,打孔效率是激光照射产生的热烧蚀、等离子体屏蔽和焦斑处空气等离子体辐射的促吸收效应共同作用的结果。

关键词 激光技术;纳秒脉冲激光;打孔效率;离焦量

中图分类号 V 261.8 文献标识码 A

Effect of Deviation Distance to Focal Spot on Nanosecond-Pulsed-Laser Drilling Rates in Air

WANG Guang-an, ZHANG Yu-zhu, NI Xiao-wu, LU Jian

(Department of Applied Physics, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

Abstract The effects of deviation distance from the focal spot to the target surface (d) on nanosecond-pulsed-laser drilling rates under different pulse energy were experimentally studied. The laser operated at a wavelength of $1.06\ \mu\text{m}$ and pulse width of 10 ns (full width at half maximum). Pulse energy of 26, 52, 85, 204 and 274 mJ was used respectively. The drilling rate was measured under different pulse energy and d value. The experimental results show that d is one of the important aspects affecting laser drilling rate, and that it is a reasonable choice of using relatively low intensity laser pulses and d at $+3\sim+4\ \text{mm}$. When $d < 0$, the drilling rate is mainly determined by laser-induced thermal ablation and shielding of plasma. And when $d > 0$, the drilling rate is mainly determined by thermal ablation, shielding of plasma and promoting absorption induced by irradiation from the plasma at the beam waist.

Key words laser technique; nanosecond pulsed laser; drilling rate; deviation distance to focus spot

1 引言

激光打孔过程中不可避免地形成熔融层,若熔融金属不能完全排出孔区,会在孔壁和孔的边缘形成再铸层,喷溅出的液体金属也会在孔口周围冷却形成再铸层,这会严重影响工件表面和孔的质量。影响激光打孔质量的因素很多,比如脉宽、脉冲波形、脉冲能量、束截面光强分布、脉冲重复率以及靶

材各项热参数等。文献[1~3]讨论了脉冲激光参数(如重复率、波形等)对孔几何形貌的影响;文献[3~6]对脉冲激光打孔进行了模型建立或数值模拟;文献[7~10]提出了改善打孔质量的具体技术措施。但大多数研究工作中,都是将靶材表面置于焦斑处^[1~4,7~13]。

本文研究了离焦量对空气中脉冲激光打孔效率

收稿日期:2006-12-12;收到修改稿日期:2007-04-12

基金项目:国家自然科学基金(60578015)资助项目。

作者简介:王广安(1974—),男,讲师,博士研究生,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: wangguangan7412@mail. sina. com. cn

导师简介:陆建(1965—),男,教授,博士生导师,目前研究方向为激光和物质相互作用机制与测试技术的研究。

E-mail: lujian@mail. njust. edu. cn

的影响。定义消耗单位激光能量的打孔深度为打孔效率。实验中以靶背面检测到光信号为靶打穿的依据。在每一不同的脉冲能量下,测出打穿一个孔所需的脉冲数目随离焦量的变化关系,讨论了离焦量对打孔效率影响的物理机制。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。Nd:YAG 激光器输出波长 $1.06 \mu\text{m}$, 半峰全宽 (FWHM) 10 ns 的激光束, 经反射率为 95% 的分束器后, 由焦距为 12 cm 的凸透镜会聚到铜片 (厚度 $20 \mu\text{m}$) 上。脉冲激光中约 5% 的能量经分束器反射到能量计的探头上, 用来监测脉冲能量的稳定性。在各脉冲能量下, 测量了不同离焦量处打孔所需的脉冲数目。离焦量的符号规定如图 2 所示, 当靶面位于焦斑处时 $d = 0$; 当靶面位于焦斑前 $d < 0$; 当靶面位于焦斑后 $d > 0$ 。

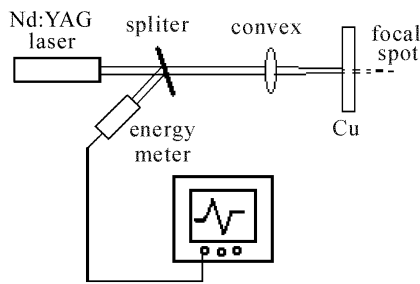


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

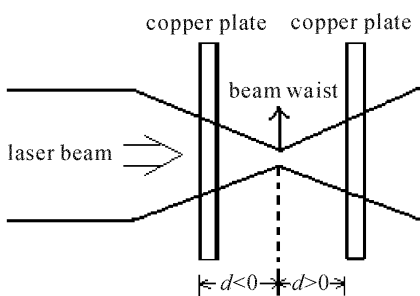


图 2 离焦量的符号规定

Fig. 2 Station of the sign of the deviation distance from target surface to the beam waist

3 结果与讨论

激光打孔过程中, 脉冲能量主要转化为等离子体内能、喷溅物携带的动能和热能以及传导到靶内的热能。其中等离子体内能最终转化为光能和声能。将打孔效率定义为消耗单位脉冲能量的打孔深度, 故打孔效率 η 可表示为

$$\eta = \frac{t}{NE}, \quad (1)$$

式中 t 为靶的厚度 (μm), N 为打孔所需的脉冲数目, E 为脉冲能量 (J)。

图 3 给出了脉冲能量分别为 26 mJ , 52 mJ , 85 mJ , 204 mJ 和 274 mJ 时, 打孔效率随离焦量变化的实验曲线。其中每个数据点为打五个孔数据的平均值。实验结果表明, 在各脉冲能量下, 打孔效率在焦斑前后没有对称性, 打孔效率最高时靶面并非位于焦斑处, 而是在焦斑后 ($d > 0$) 的某一位置处。脉冲能量不同, 打孔效率峰值对应的离焦量也不同。随着脉冲能量的增加, 峰值移近焦斑, 且有饱和现象, 即脉冲能量增加到一定值时, 峰值离焦量在 $d = 3 \text{ mm}$ 处, 再增大脉冲能量, 最高打孔效率的离焦量位于 3 mm 处几乎不再变化。随着脉冲能量的增加, 打孔效率呈下降趋势。

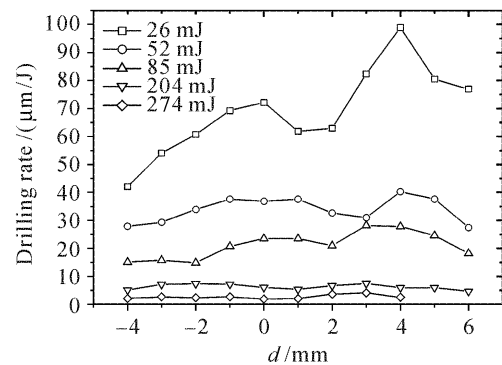


图 3 打孔效率与离焦量的关系曲线

Fig. 3 Drilling rates versus deviation distance from target surface to beam waist

图 3 中脉冲能量不同的五条曲线, 随着脉冲能量的增加, 打孔效率逐渐降低。这是因为脉冲能量越大, 光斑的功率密度越大, 产生的等离子体越强, 对后续激光有明显的吸收和屏蔽效应, 大大降低了脉冲能量与靶的热耦合, 从而减小了打孔效率。每条曲线靶面在焦前和焦后的打孔效率显然是不对称的, 打孔效率的峰值位置都在焦后。这是因为靶位于焦前和焦后时, 打孔的物理机制不同。当靶位于焦前时, 只在靶面处产生一次等离子体; 而当靶位于焦后时, 焦斑处空气也被击穿, 在焦斑和靶面先后两次产生等离子体。脉冲能量为 26 mJ 时, 焦斑处功率密度约 $2.71 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$, 相应产生的等离子体对后续激光已不再完全透明, 有一定的吸收和屏蔽效应。靶面在焦前由 -4 mm 逐渐向焦斑移近时, 光斑面积逐渐减小, 功率密度逐渐增加, 以热效应为主要机制的打孔效率增加, 相应的等离子体吸收和屏

蔽效应也增加,但处于弱势,所以随着靶面移近焦斑,打孔效率缓慢地增加;当靶面移到焦斑后,焦斑处空气被击穿产生等离子体,消耗了部分脉冲能量,转化为等离子体内能并最终转化为光能和声能。焦斑处等离子体复合产生的宽频电磁辐射和剩余部分的脉冲能量入射到靶面,在靶面又产生一次强度相对较弱的等离子体,其吸收和屏蔽效应明显减弱。焦斑处空气击穿产生的等离子体在可见光和 X 射线波段有很强的辐射。金属表面对这些短波电磁辐射的吸收,比微米级的脉冲电磁波大得多。靶面吸收等离子体的短波辐射温度迅速升高,又使其对微米脉冲激光的吸收系数增大,使打孔效率快速增大。随着离焦量逐渐增加,光斑面积增大,激光功率密度减小,靶面等离子体吸收和屏蔽效应削弱,当等离子体对后续激光变为透明时,打孔效率达到最大($d = +4$ mm)。继续将靶面远离焦斑,焦斑处的等离子体辐射到靶面的强度降低,其促吸收效应减弱,同时脉冲激光的功率密度也减小,打孔效率又迅速降低。

脉冲能量为 85 mJ 或更高时,由于等离子体吸收和屏蔽效应显著,靶面在焦斑前移向焦斑过程中,打孔效率只有微弱增加;在焦斑后,等离子体辐射的促吸收效应仍然存在,但效果并不显著,各曲线的峰值打孔效率的离焦量向焦斑移近,大约都在 $d = +3$ mm 处。认为这是焦斑处空气等离子体辐射的促吸收效应和靶面处等离子体吸收与屏蔽效应竞争的结果。

由于等离子体冲击,靶背面产生凸起,且随着脉冲能量的增加,等离子体冲击力增大,靶背面相应的凸起也更显著,如图 4 所示。但脉冲能量越高打孔效率却越低,因此,等离子体的力学效应不是孔形成的主要机制,打孔效率主要取决于热效应产生的熔融和蒸发。激光打孔过程中并不需要产生过高强度的等离子体,只要能将熔融的液体金属排出孔区即

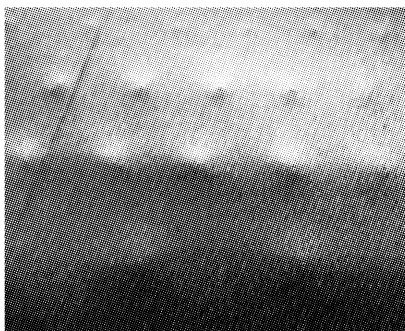


图 4 不同能量脉冲激光打孔后的靶背面图

Fig. 4 Holes image of the back surface under the strikes of laser pulses with different pulse energy

可。

实验装置中,聚焦透镜的焦距为 12 cm。激光束焦斑直径约为 $35 \mu\text{m}$; $d = \pm 6$ mm 时,光斑直径约为 $300 \mu\text{m}$ 。光斑的功率密度 I 为

$$I = \frac{4E}{\tau\pi D^2}, \quad (2)$$

式中 E 为单脉冲能量; τ 为脉宽; D 为靶面光斑直径。所以实验中脉冲激光的功率密度范围约为 $3.67 \times 10^7 \sim 2.86 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, 都超过空气中铜的等离子体点燃阈值。激光打孔过程中,不可避免地会产生熔融的高温金属液体。由于热传导,高温金属液体冷却后会在孔壁形成再铸层,影响了打孔的效率和质量。因此,打孔过程中要产生一定的高温高压蒸气或适当的等离子体冲击波是十分必要的,由它们产生的反冲压将熔融液体在凝固前排出孔外。实验中选择的脉冲能量在不同的离焦量下,靶面光斑的功率密度都超过铜的等离子体点燃阈值,打出的孔具有很好的圆整度,如图 5 所示,但孔周围的靶面处有明显的热影响区,并可看到明显的凝固喷溅物痕迹。其他技术^[7,12],比如辅助吹气法,可以改善孔周围靶面的热影响区和阻止喷溅物的凝固。



图 5 孔的形貌(40×)

($d = +3$ mm, 脉冲能量: 30 mJ)

Fig. 5 Image of drilled hole (40×)

($d = +3$ mm, pulse energy: 30 mJ)

4 结 论

实验研究了离焦量对空气中脉冲激光打孔效率的影响。结果表明离焦量是影响打孔效率的重要因素,当脉冲能量为 26 mJ, 52 mJ 时,打孔效率峰值位于 $d = +4$ mm 处;脉冲能量为 85 mJ 或更高时,打孔效率峰值在大约 $d = +3$ mm 处几乎不变。脉冲能量越高,打孔效率越低,表明等离子体的力学效应不是孔形成的主要机制。孔的形成主要取决于热效应产生的熔融和蒸发。用靶面处等离子体的吸收、屏蔽效应和焦斑处空气等离子体辐射的促吸收效应,

对实验曲线进行了合理的解释。因此,在空气中实际打孔时,采用相对较低的功率密度(适当超过靶材等离子体点燃阈值),并将靶置于焦斑后+3~+4 mm处是合理的选择。

参 考 文 献

- 1 C. Chaléard, V. Detalle, S. Kocon *et al.*. Influence of laser pulse duration on the ablation efficiency of metals [C]. *SPIE*, 1998, **3404**:441~448
- 2 G. K. L. Ng, L. Li. The effect of laser peak power and pulse width on the hole geometry repeatability in laser percussion drilling [J]. *Optics & Laser Technology*, 2001, **33**:393~402
- 3 X. Zhu, D. M. Villeneuve, A. Yu. Naumov *et al.*. Experimental study of drilling sub-10 μm holes in thin metal foils with femtosecond laser pulses [J]. *Applied Surface Science*, 1999, **152**:138~148
- 4 Pablo Solana, Phiroze Kapadia, John Dowden *et al.*. Time dependent ablation and liquid ejection processes during the laser drilling of metals [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **191**:97~112
- 5 V. V. Semak. Numerical prediction of drilling rates for ultra-high intensity laser pulses [C]. *SPIE*, 2006, **6107**:610708-1~610708-7
- 6 Ram K. Ganesh, Wallace W. Bowley, Robert R. Bellantone *et al.*. A model for laser hole drilling in metals [J]. *J. Computational Physics*, 1996, **125**:161~176
- 7 Guo Shangyong, Chen Tao, Liu Shibing. Study on a method of improving the quality of excimer laser drilling [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(6):625~627
郭商勇,陈涛,刘世炳. 提高准分子激光打孔质量的方法研究 [J]. *激光技术*, 2006, **30**(6):625~627
- 8 C. Lehane, H. S. Kwok. Enhanced drilling using a dual-pulse Nd:YAG laser [J]. *Appl. Phys. A*, 2001, **73**:45~48
- 9 A. C. Forsman, P. S. Banks, M. D. Perry *et al.*. Double-pulse machining as a technique for the enhancement of material removal rates in laser machining of metals [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, **98**:033302-1~033302-6
- 10 B. Tan, K. Venkatkrishnan, N. R. Sivakumar *et al.*. Laser drilling of thick material using femtosecond pulse with a focus of dual-frequency beam [J]. *Optics & Laser Technology*, 2003, **35**:199~202
- 11 Aart Schoonderbeek, Cornelis A. Biesheuvel, Ramon M. Hofstra *et al.*. Shadowgraphic imaging of metal drilling with a long pulse excimer laser [C]. *SPIE*, 2003, **5063**:395~400
- 12 E. Stürmer, M. von Allmen. Influence of laser-supported detonation waves on metal drilling with pulsed CO₂ lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1978, **49**(11):5648~5654
- 13 A. A. Bugayev, M. C. Gupta, M. El-Bandrawy. Dynamics of laser hole drilling with nanosecond periodically pulsed laser [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2006, **44**:797~802