

文章编号: 1001-3806(2009)02-0138-03

## 脉冲 YAG 激光诱导放电击穿电压研究

占 剑, 杨明江\*

(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

**摘要:** 为了研究激光诱导放电击穿的机理及在应用中减小击穿电压以降低加工风险, 通过测得击穿电压随不同激光脉冲能量、极间距和工具电极(阴极)材料的关系, 得出只有当单脉冲激光能量  $W \geq 0.15 \text{ mJ}$ , 即激光在工件表面形成汽化的前提下才能有效放电击穿, 并且当其它条件不变时, 击穿电压  $U_{50}$  随激光单脉冲能量的增大而减小。在电极材料为碳钢并保持不变的情况下, 随着极间距的增大,  $U_{50}$  升高, 并随着单脉冲激光能量增大,  $U_{50}$  升高的趋势渐缓。在其它条件不变下, 改变工具电极材料(紫铜和石墨), 得出相对于石墨, 使用紫铜时能有效地减小击穿电压。结果表明, 增大激光单脉冲能量, 减小极间距和使用逸出功小、低熔点的材料作为阴极时, 能有效地减小击穿电压。

**关键词:** 激光物理; 击穿电压; 激光单脉冲能量; 极间距; 阴极材料

**中图分类号:** TN249; O461.1 **文献标识码:** A

### Investigation on the breakdown voltage induced by YAG pulsed laser

ZHAN Jian, YANG Ming-jiang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** In order to study the principle of laser-induced discharge breakdown and reduce the breakdown voltage ( $U_{50}$ ) to overcome the processing risk, the relationships between  $U_{50}$  and some factors were carried out, including the single pulse energy, the distance between the electrodes and the cathode materials. It was confirmed that the channel could be broken down effectively only when the surface of the workpiece was vaporized by the laser with the single pulse energy  $W \geq 0.15 \text{ mJ}$ . The breakdown voltage would decrease with the increasing of the single pulse energy. When the cathode material was made of 45# steel,  $U_{50}$  rose with the increase of the distance between the electrodes. And when increasing the single pulse energy, the rising trend would be slowed down obviously. Altering the cathode material with other conditions kept unchanged, it was found that the copper could reduce the  $U_{50}$ , compared to graphite. So the effective measure of reducing the  $U_{50}$  is increasing the single pulse energy, decreasing the distance between the electrodes, and using smaller work function and lower melting point material as the cathode materials.

**Key words:** laser physics; breakdown voltage; laser single pulse energy; distance between the electrodes; cathode material

### 引言

激光诱导放电毛化-强化方法的特点是有效利用激光的可控性和放电的大能量来进行加工, 从而达到光电的大能量耦合, 对于重型机械部件和工作环境恶劣的热轧辊等, 可实现大的强化层深。TZORTZAKIS 等人发现激光沿电场方向作用形成的丝状弱电离通道能够减小触发延时<sup>[1]</sup>, ZENG 等人发现在激光打孔时辅助火花放电可以减小孔的锥度, 增加对工件的蚀除量<sup>[2]</sup>, 中国科学院力学研究所激光毛化中心对激光诱导放电现象做了一系列研究<sup>[3-6]</sup>, 发现负极性放电(工具电极接负极)、工件表面涂介质油更有利于缩小放

电坑直径。作者从脉冲 YAG 激光诱导击穿的激励出发, 研究击穿电压随激光单脉冲能量、极间距和工具电极材料的变化关系, 从而进一步优化 YAG 激光诱导放电的参量。

### 1 击穿机理

本实验的装备示意图如图 1 所示, 其中电极结构示意图如图 2 所示。

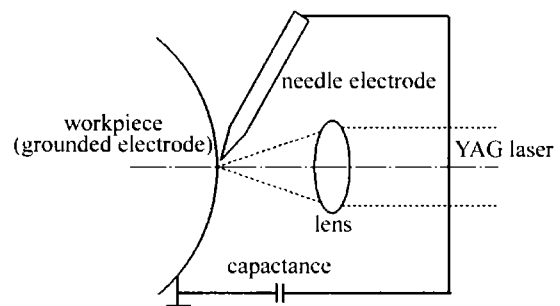


Fig. 1 Schematic of laser-guided discharge

作者简介: 占 剑(1981-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光电能量耦合材料表面强化和材料表面微坑形貌摩擦学。

\* 通讯联系人。E-mail: ymj1@imech.ac.cn

收稿日期: 2008-02-26; 收到修改稿日期: 2008-04-10

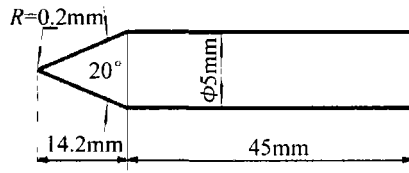


Fig. 2 Sketch of needle electrode

激光诱导放电击穿的原理是:高功率密度的 YAG 脉冲激光与工件表面相互作用,对试件表面加热,加速表面的热发射,使部分表面轻微汽化,产生金属阳离子和自由电子,同时在外电场的的作用,带电粒子发生了相对运动,电场强度在阴极附近急剧增大,从而阴极场致发射电子,激光的作用又向阴极提供种子电子,推动了电子向阳极的运动,当电子从阴极运动到阳极,标志着通道击穿,故发射机理为热-场致发射(见图3)。

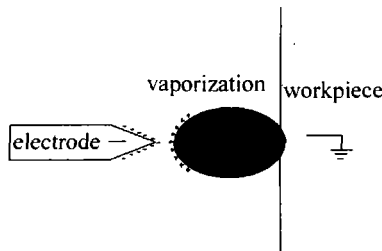


Fig. 3 Schematic of discharge

激光单脉冲能量的大小对应着激光作用后的金属阳离子的密度强弱;在电极两端所加电压一定时,阴极区的电场强度随电极间距的增大而减小,从而当极间距增大到一定程度,影响阴极有效场致发射电子,击穿失效;而阴极材料决定了阴极电子的逸出功,而低逸出功的材料可有效减小击穿电压。

## 2 实验结果及分析

实验中采用脉冲半导体抽运 YAG 激光器,激光单脉冲能量的变化范围是 0mJ ~ 11.5mJ, YAG 激光的脉宽为 150ns,脉冲激光和同步放电频率  $f = 1\text{kHz}$ ,放电脉宽  $\tau = 50\mu\text{s}$ ,激光器的工作温度  $T_1 = 25^\circ\text{C}$ ,室温  $T_2 = 29^\circ\text{C}$ ,放电部分采用高压放电,无低压续流,电极间距的变化范围是 0.3mm ~ 0.8mm,电极材料为碳钢,紫铜和石墨,其中,2.1 节和 2.2 节中实验使用电极为碳钢,而 2.3 节中使用电极为紫铜和石墨。 $U_{50}$  表示 50% 几率能有效放电的电极两端电压。在本次实验中,每放电 20 次中 10 次能有效放电的极间电压为  $U_{50}$ ,实验值为在相同条件下实验反复 3 次所取的平均值。

### 2.1 击穿电压与激光单脉冲能量之间的关系

实验中当单脉冲激光能量  $W \leq 0.15\text{mJ}$  时,脉冲波形见图 4,在外加电压加到 1kV 时无放电现象,即在此激光单脉冲能量下不能击穿。原因是在脉宽为 150ns 左右激光作用下金属表面产生汽化的阈值功率密度为  $10^6\text{W}/\text{cm}^2 \sim 10^7\text{W}/\text{cm}^2$ <sup>[7]</sup>,即试件金属表面无汽化形

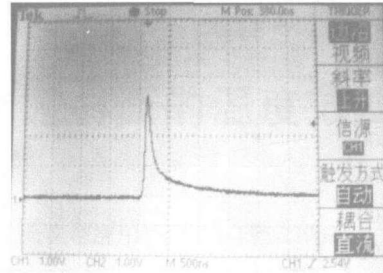


Fig. 4 Laser single pulse waveform

成,无金属阳离子产生,不能有效诱导放电。

根据功率密度  $q = W / (\pi \cdot r^2 \cdot \tau)$ ,故  $q \leq (0.15 \times 10^{-3}) / [3.14 \times (0.008)^2 \times 150 \times 10^{-9}] \approx 5 \times 10^6\text{W}/\text{cm}^2$ 。

当单脉冲激光能量  $W \geq 0.15\text{mJ}$  时,能有效击穿,并且随着激光单脉冲能量的增加,金属表面汽化对通道提供的金属阳离子数就多,由于电场的作用,在阴极附近的电场强度得到增强,从而提高了阴极场致发射电子的能力,击穿电压  $U_{50}$  随之明显降低(见图 5)。当

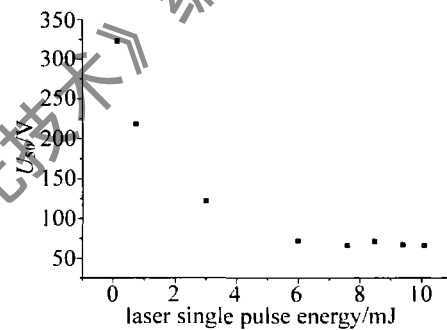


Fig. 5 Relation between  $U_{50}$  and laser single pulse energy

$W \geq 6\text{mJ}$  时,曲线基本平稳。这是因为当  $W = 6\text{mJ}$  时,  $q \approx 2.0 \times 10^8\text{W}/\text{cm}^2$ ,此时,由于工件表面严重汽化(见图 6),并随着激光能量的增加,金属阳离子的浓度

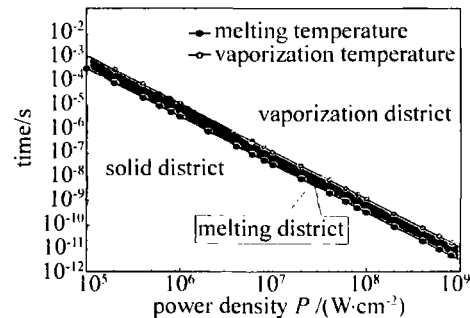


Fig. 6 Relation among the material phase change, the laser power density and the processing time

达到超饱和状态,使得后续激光作用不明显<sup>[8]</sup>。

### 2.2 击穿电压与极间距之间的关系

在工具电极材料(碳钢)不变的情况下,图 7 为在单脉冲激光能量在 0.15mJ 下,击穿电压  $U_{50}$  随极间距之间的关系曲线。随着极间距的增大,击穿电压明显增大。击穿是由于工具电极与激光作用后带电粒子之间场致发射的电子引起的,故电场强度  $E$  是决定因

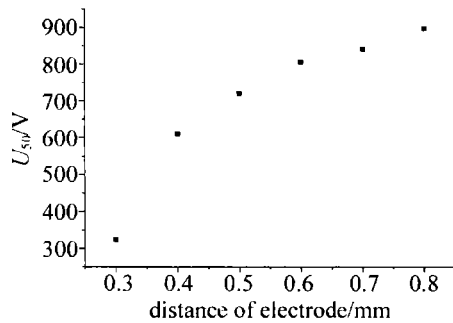


Fig. 7 Relation between  $U_{50}$  and the distance of electrodes

素,在极间电压已定下, $E$ 与极间距 $d$ 成反比,故随着 $d$ 的增大, $U_{50}$ 增大。

图8为改变激光单脉冲能量, $U_{50}$ 随激光单脉冲能量和极间距(极间距变化范围为0.3mm~0.5mm)之间的关系,当激光单脉冲能量比较低的时候 $W \leq 3\text{mJ}$ ,

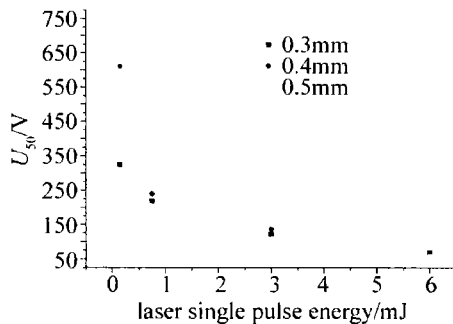


Fig. 8 Relation among  $U_{50}$ , the distance of electrodes and laser single pulse energy

$U_{50}$ 随电极间距的增大而明显增大,随着激光单脉冲能量的进一步加大,击穿电压增大趋势渐缓。可以得出,在极间距在0.3mm~0.5mm变化时,在电极材料相同的情况下,相对于极间距,激光单脉冲能量是影响击穿电压的主要因素。

### 2.3 击穿电压与工具电极材料之间的关系

根据较高电极温度下场致发射的电场击穿阈值 $E$ 满足: $E > 8.83 \times 10^3 \varphi^{1/2} T^{[9]}$ 。取极限值 $E_{\min} = 8.83 \times 10^3 \varphi^{1/2} T^{[9]}$ ,式中, $\varphi$ 为材料的逸出功, $T$ 为阴极温度。即在激光单脉冲能量、极间距等参量不变情况下,击穿电压 $U_{50} \propto \varphi^{1/2} T$ 。

改变工具电极材料时, $\varphi$ 及 $T$ 也相应地改变,石墨的逸出功 $\varphi = 4.81\text{eV}$ ,阴极温度大约为3500K;紫铜的逸出功 $\varphi = 4.43\text{eV}$ ,阴极温度大约为2200K<sup>[10]</sup>。考虑平稳区,即 $W \geq 6\text{mJ}$ 的情况时几种材料的击穿电压 $U_{50}$ 的变化情况(见图8),其中单脉冲激光能量的单位为mJ,击穿电压的单位为V。而由上式得: $V_{50C}/V_{50Cu} = (4.81)^{1/2} \times 3500 / [(4.43)^{1/2} \times 2200] = 1.66$ ,比较实验值(见图9),当击穿电压稳定后, $V_{50C}/V_{50Cu} = 150/89 = 1.69$ ,两者基本近似,从而也证明了热-场致发射机理的正确性。

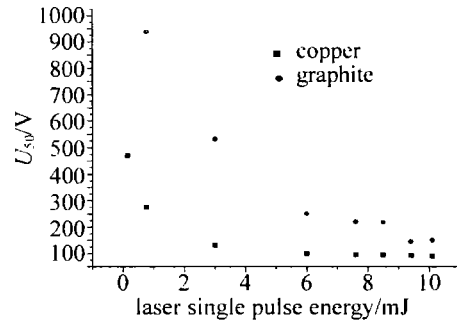


Fig. 9 Relation between  $U_{50}$  and the electrode material

## 3 结论

(1)仅当单脉冲激光能量 $W > 0.15\text{mJ}$ 时,金属阳离子的产生是能有效击穿的关键,并且随着激光单脉冲能量的增加,击穿电压 $U_{50}$ 随之降低,随着进一步增加到 $W \geq 6\text{mJ}$ ,逐步趋于稳定。(2)当激光单脉冲能量 $W \leq 3\text{mJ}$ 时,随着极间距的增大,击穿电压增大明显,随着激光单脉冲能量的进一步加大,当 $W > 3\text{mJ}$ 时,极间距从0.3mm增大到0.5mm时,击穿电压增大趋势渐缓。可以得出在电极材料相同的情况下,相对于极间距,激光单脉冲能量是影响击穿电压的主要因素。(3)在其它条件相同的情况下,选择较小逸出功及低电弧阴极斑点温度的材料作为工具电极,可有效降低击穿电压,通过理论计算石墨的 $U_{50}$ 约是紫铜的1.66倍,与实验值近似。

### 参 考 文 献

- [1] TZORTZAKIS S, PRADE B, FRANCO M, *et al.* Femtosecond laser-guided electric discharge in air [J]. *Phys Rev*, 2001, E64 (5): 057401/1-057401/4.
- [2] ZENG Ch X, ZHOU Y W, XIE J. Investigation of laser damage of materials assisted by DC spark discharge [J]. *Laser Technology*, 1998, 22(1): 3-7 (in Chinese).
- [3] LI Zh Y, YANG M J, LIU W J, *et al.* Investigation on crater morphology by high repetitive rate YAG laser-induced discharge texturing [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 200(14/15): 4493-4499.
- [4] WANG Zh T, YANG M J. The experimental study of delay time discharge in laser guiding discharge machine [J]. *Laser Journal*, 2002, 23(2): 29-32 (in Chinese).
- [5] LI Zh Y, YANG M J. Investigation on crater morphology by laser-induced discharge texturing [J]. *Journal of Applied Laser*, 2004, 24(1): 9-12 (in Chinese).
- [6] ZHAN J, YANG M J. Investigation on crater morphology by YAG laser guiding discharge texturing [J]. *Journal of Applied Laser*, 2007, 27(2): 85-87 (in Chinese).
- [7] SHEN R Q, YE Y H, TU J. Effects of plasma and ablation on ignition processes of energetic materials under pulsed laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(11): 1323-1326 (in Chinese).
- [8] GUAN Zh Zh. *Laser processing handbook* [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1998: 39, 341 (in Chinese).
- [9] YANG J J. *The gas discharge* [M]. Beijing: Science Press, 1983: 60-64 (in Chinese).
- [10] XU X J, ZHU D Ch. *Principle of gas discharge* [M]. Shanghai: Fudan University Press, 1996: 166-171 (in Chinese).