

实验装置与元件 ·

激光诱导放电加工中的延时放电现象实验研究

王之桐 杨明江

(中国科学院力学研究所激光毛化国家中心,北京 100080)

提要:本文研究在空气中使用 1.06 μm YAG 激光在毫米量级上触发和诱导放电的现象。比较了有、无激光触发的 U_{50} , 在不同的延时下测量 U_{50} 和击穿时间, 研究不同延时下等离子体的触发和诱导放电能力, 并分析了激光诱导放电加工的优点。

关键词:1.06 μm YAG 激光, 延时, 激光诱导放电加工, 等离子体

The experimental study of delay time discharge in laser guiding discharge machine

Wang Zhitong Yang Mingjiang

(Institute of Mechanics, Chinese Academic Sciences, National Center for Laser-texturing, Beijing 100080)

Abstract: In this paper triggering and guiding electrical discharges in a air gap of millimeter size by 1.06 μm YAG laser were researched. The U_{50} with laser triggering was compared with the U_{50} without laser triggering. In different delay time the ability of triggering and guiding discharge was researched, and The advantage of laser triggering and guiding discharge were analysed.

Key words: 1.06 μm YAG laser, delay time, triggering and guiding discharge machine, plasma

1 引言*

由激光产生的等离子体通道可以减小空气隙的击穿电压(触发放电能力)和控制气体中的放电通道或放电点的位置(诱导放电能力),例如使用激光在电火花放电开关中开关电流^[1,2],使用激光控制放电通道^[3-5]和使用激光触发和控制闪电^[6-8]。在实际应用中,激光诱导技术用于局部融化和打孔^[9-11],以及应用在焊接方面^[12]。

作为激光诱导放电技术的应用,“激光诱导放电加工(LGDM)”已经被提出了。相对激光加工和电火花加工来说,激光诱导放电加工技术具有很多优点,相对于激光加工的优点是:1. LGD 所需的激光脉冲能量低于材料熔化所需的能量;2. 电能直接耦合转换成热能,没有在激光加工中的电—光—热转换,因此电效率是高的;3. LGD 技术能加工光滑的金属表面,克服了光滑表面反射入射激光的问题。激光诱导放电加工相对于电火花加工的优点是:1. 通过透镜聚焦激光束控制放电通道,可以远距离、静止的放置电极;2. 放电方向可以和电场方向不同,能加工电极不能进入的位置;3. 放电点通过激光束的焦点定位,能够精确加工。

在图 1 中表示了激光诱导放电加工的物理模型。首先脉冲激光束聚焦在电极表面上,然后电极表面金属在高能激光束的作用下汽化生成等离子体团,当等离子体团与电极接触时,在一定的电压下开始放电,电极表面金属在放电能量的作用下发生汽化和熔化,当放电终止时电极表面形成火山口状的放电坑。

目前在激光诱导放电现象的研究中电压多为几十

万伏量级,电极距离多为米的量级,对于低电压和短距离的激光诱导现象还未见报道。本文研究在空气中使用 1.06 μm YAG 激光、电极距离在毫米量级上的激光诱导放电加工现象。在实验中观察到,在激光停止后在一定的延期内仍然能够触发放电,这种现象有必要加以研究。

2 实验装置

图 2 表示了激光诱导放电实验装置。在本次实验中使用的是华北光电研究所制造的 150W YAG 激光器,波长为 1.06 μm ,最大脉冲能量 11.5mJ,半高脉宽 660ns,发散角为 5mRad,聚焦透镜的焦距为 80mm,间隙由针状的圆锥体电极和圆柱形电极组成,圆锥体电极的材料是 Wcu 合金,圆柱体的材料为 45# 钢,使用 Tectronix TDS210 数字示波器采集数据,通过 CCD 捕捉放电坑表面照片。

这里把点燃激光和施加电压脉冲之间的时间间隔称做延迟触发时间(简称延时),如图 3 所示,延时可以分成三种:正延时、零延时和负延时。所谓正延时指激光在施加电压脉冲之前点燃;零延时指点燃激光和施加电压脉冲同时进行;负延时指激光在施加电压脉冲之后点燃。这里把针状电极接正极定义为正极性放电,接负极定义为负极性放电。这里把施加电压和电流出现之间的时间间隔称作击穿时间。

* 2001 年 11 月 1 日收稿

3 实验结果

在图 4 中表示出有、无激光触发的 U_{50} 。实验参数为:激光脉冲能量 11.0mJ,电压 400V,延时 - 6 μ s,针状

电极前端直径 0.3mm,共击发 10 次。从图中可以看出,无论正极性还是负极性在激光触发后都显著降低了击穿电压,而正极性击穿电压低于负极性击穿电压。



图 1 激光诱导放电物理模型 图 2 激光诱导放电实验装置 图 3 延时定义示意图(1. 电压;2. 激光) (a)负延时;(b)零延时;(c)正延时

在图 5 中表示出在激光坑、放电痕和激光诱导放电坑的表面照片。图 5a 是激光坑,由于光脉冲能量小,坑径在 100 μ m 左右;图 5b 是放电痕,可以看出放电痕的形状不规则,大致呈细长条状;图 5c 是激光诱导放电坑,在激光诱导下放电能量作用在激光焦点处,使坑径达到了 300 μ m,放电坑形状规则。通过比较三幅图象可以看出激光克服了放电的随机性,并把放电能量诱导到激光焦点处,增大了放电坑直径,这表明激光等离子体具有很好的诱导放电能力。

量 11.0mJ;共击发十次取平均值。可以看出,随着延时的增大,击穿时间增大。当负延时,击穿时间保持在 100ns 左右。当正延时在 10 μ s 以内时时击穿时间保持在 800ns 左右,正延时 10ns 后击穿时间逐渐上升^[8]。

图 6 表示了延时和 U_{50} 之间的关系。实验参数为:负极性放电,电极距离 0.4mm,激光脉冲能量 11.0mJ,共击发 10 次。从图中可以看出,当负延时, U_{50} 稳定在 40V 左右,当正延时在 2 μ s 到 10 μ s 之间时, U_{50} 稳定在 250V 左右,当正延时大于 10 μ s 时, U_{50} 逐渐上升。

在图 8 中表示在不同延时下激光诱导放电坑的照片。实验参数为:电压: - 400V;电极距离:0.2mm;延时:分别为 - 5 μ s、- 1 μ s、1 μ s、5 μ s、10 μ s、15 μ s 和 20 μ s;测量脉冲宽度、脉冲能量和放电坑直径,共测 10 次取平均值,在图 9 中表示了延时和脉宽的关系,在图 10 中表示了延时和脉冲能量的关系,在图 11 中表示了延时和放电坑直径的关系。可以看出负延时和正延时在 10 μ s 以内时,放电脉宽、放电能量和放电坑直径基本稳定,当正延时大于 10 μ s 时,放电脉宽、放电能量和放电坑直径开始下降,当正延时大于 20 μ s 时,激光等离子体已经不能有效的触发放电。

在图 7 中表示了延时和击穿时间之间的关系。实验参数为:电压 - 400V;电极距离 0.4mm;激光脉冲能

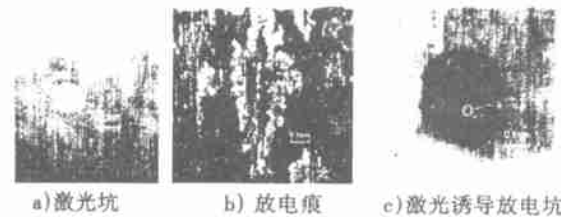


图 5 激光等离子体的诱导放电能力 a)激光坑(激光脉冲能量 11.0mJ);b)放电痕(负极性放电,放电电压 300V,电极距离 1mm);c)激光诱导放电坑(负极性放电,激光脉冲能量 11.0mJ;电极距离 0.4mm;负延时 6 μ s)

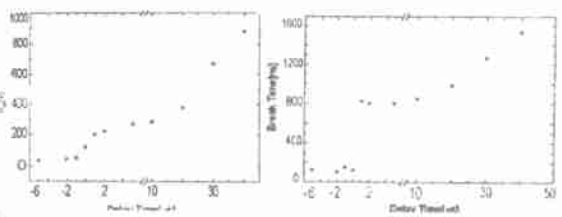


图 6 延迟时间和击穿电压的关系 图 7 延时和击穿时间的关系

4 分析

4.1 激光触发降低击穿电压的意义

从图 4 中可以看出,激光等离子体有效的降低了击穿电压。在各个距离下,激光触发的击穿电压均比没有激光触发的击穿电压低一个数量级。

激光触发后降低了击穿电压这一特性具有重大的

实际意义。

激光触发放电装置不需要高电压设备和精密调节电极间隙的装置,设备简单可靠。当其它条件相同时,电场强度 E 决定了放电的发生。当电极距离大时,必须提供高电压才能保证足够的电场强度,当电压低时,电极距离必须小才能保证足够的电场强度。这样在大的电极距离下工作时,为了触发放电,必须提供高

电压装置,设备复杂,安全性差,不利于工业化生产;而在低电压下工作时,电极距离必须很小,这样就需要精密调节电极距离的装置,设备昂贵,操作复杂。而激光触发放电降低了击穿电压,这样在合适的电极距离下使用较低的电压就可以击穿放电,解决了电压和电极距离的矛盾,同时使用简单的设备就可以进行激光诱导放电加工,具有很强的实用性。

击穿电压的降低有利于高频放电的实现,实现

快速加工。高电压装置充电缓慢,难以实现高频放电加工,同时在高电压下开关器件工作时,在分布电感的作用下,电路中会产生很高的过电压脉冲,对电路中的开关器件提出很高的要求。在激光诱导下降低了击穿电压,这样可以降低系统的工作电压,系统在高频下工作时,分布电感造成的过电压脉冲比较小,可以采用适当的吸收回路加以保护,能够保证系统在高频下正常工作。

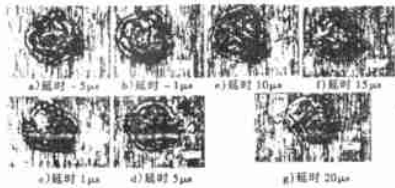


图 8 在不同延时下激光诱导放电坑的照片

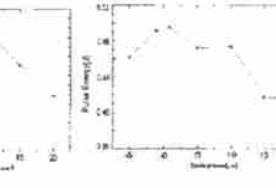
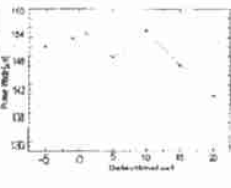


图 9 延时和脉冲宽度的关系

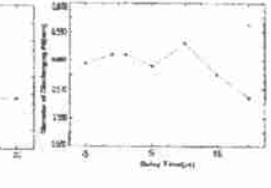


图 10 延时和脉冲能量的关系

在激光诱导放电过程中,激光脉冲的作用是利用高的功率密度在工件表面产生等离子体来诱导放电位置,而放电脉冲提供了熔化金属的能量。这样在高频下工作时不需要使用大功率激光器,克服了大功率声—光开关“瓶颈”的限制,而放电设备功率容易做大,放电参数调节灵活、方便,可以满足加工工件的要求。由于激光器工作效率低,放电设备工作效率高,所以把小功率的激光器和大功率的放电设备组合起来使用提高了整个系统的工作效率。

4.2 延时对等离子体触发放电能力的影响

当负延时,激光脉冲在电压施加后点燃,放电通道由电子和正离子组成,电子在电场的作用下漂移碰撞形成电子崩并形成流注导致击穿,因此我们认为负延时的触发特性是由电子来决定的。当正延时,激光在电压脉冲施加前点燃,自由电子通过吸附在 O₂ 分子上形成负离子。电子附着过程的基本方程如下:

$$\frac{dn_e}{dt} = - n_e$$

$$n_e = n_0 e^{-t/\tau}$$

在大气中,电子的附着过程和速率常数在表 1 中示出,而 $n(N_2) = 2.12 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$, $n(O_2) = 5.3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 有效附着常数 $= n^2(O_2) + n(N_2)n(O_2)$, $\tau = 1/20.4 \text{ns}$ 。通过计算得出正延时 100ns 时电子几乎全部消失,这时通道由正、负离子组成。负离子在电场作用下运动,在碰撞的过程中吸收能量吸附释放出自由电子,然后电子在电场的作用下形成电子崩并形成流柱导致击穿,这样在触发放电过程中起主导作用的是负离子。

表 1 电子附着过程和速率常数^[6]

附着过程	速率常数 (cm ⁶ s ⁻¹)
e + O ₂ + O ₂ O ₂ ⁻ + O ₂	= 1.34 × 10 ⁻³⁰
e + O ₂ + N ₂ O ₂ ⁻ + N ₂	= 1 × 10 ⁻³¹

从图 6 和图 7 中可以看出正、负延时等离子体触发放电能力差别很大,负延时的触发放电能力远大于正延时,因此可以认为电子触发放电的能力大于负离子。

从图 9 到图 11 中可以看出在延时 10μs 以内时,放电脉宽和脉冲能量大致不变,因此放电坑直径也大致不变,结合图 8 的放电坑照片可以认为在一定的延时效内放电时实际放电效果变化不大。

当延时大于 10μs 时, U₅₀ 和击穿时间开始显著增大,放电脉宽和脉冲能量开始下降,放电坑直径也开始减小,这表明延时 10μs 时等离子体中的带电粒子密度具有一个阈值,当延时大于 10μs 时带电粒子密度低于该阈值,因此触发放电能力下降。

5 结论

在本文中研究了在大气中和不均匀电场中 YAG 激光延时触发放电的能力,得出以下结论:

激光触发放电装置不需要高电压设备和精密调节电极间隙的装置,设备简单可靠。激光触发放电降低了击穿电压,这样在合适的电极距离下使用低电压就可以击穿放电,解决了电压和电极距离的矛盾,使激光诱导放电加工具有很强的实用性。

击穿电压的降低有利于高频放电的实现,能够实现快速加工。高电压装置充电缓慢,难以实现高频

放电加工,同时开关器件在低电压下工作,开关过程中分布电感造成的过电压脉冲比较小,可以采用适当的吸收回路加以保护,能够保证系统在高频下正常工作。

激光诱导放电具有放电点位置可控和放电能量、激光能量空间叠加的特点。在激光诱导下放电点和激光焦点重合,克服了放电的随机性,使放电点可控,同时把放电能量诱导到激光焦点处,增大了能量的输入。

激光诱导放电中不需要大功率激光器,克服了高重频激光加工中大功率声—光开关“瓶颈”的限制,并提高了整个系统的工作效率。在激光诱导放电过程中,激光脉冲的作用是利用高的功率密度在工件表面产生等离子体来诱导放电位置,这样不需要大的激光脉冲能量,而能量主要由放电脉冲提供,这样在高频下不需要使用大功率激光器,克服了大功率声—光开关“瓶颈”的限制,而放电设备功率容易做大,放电参数调节灵活、方便,可以满足加工工件的要求。由于激光器工作效率低,放电设备工作效率高,所以把小功率的激光器和大功率的放电设备组合起来使用提高了整个系统的工作效率。

激光等离子体中电子触发放电的能力大于负离子,在激光等离子体中能够触发放电的带电粒子密度具有一个阈值,大于该阈值时,等离子体才具有良好的触发放电能力。在负延时激光等离子体由正离子和电子组成,电子起主导作用,流注容易形成,因此具有最好的触发放电特性;正延时激光等离子体由正负离子组成,负离子起主导作用,触发放电能力小于电子。

参考文献

- [1] A H Guenther, J R Bettis. The Laser triggering of high - voltage switches. Journal of Physics D: Applied Physics, 1978, 11(12) :1577 - 1613
- [2] R A Dougal, P F Williams. Fundamental processes in laser - triggered electrical breakdown of gases. Journal of Physics D: Applied Physics, 1984, 17(5) :903 - 918
- [3] David W Koopman, K A Saum. Formation and guiding of high - velocity electrical streamers by laser - induced ionization. Journal of Applied Physics, 1973, 44(12) :5328 - 5336
- [4] Megumu Miki, Atsushi Wada. Guiding of electrical discharges under atmospheric air by ultraviolet laser - produced plasma channel. Journal of Applied Physics, 1996, 80(6) :3208 - 3214
- [5] Megumu Miki, Takatoshi Shindo, Yoshinori Aihara. Mechanisms of guiding ability of CO₂ laser - produced plasmas on pulsed discharges. Journal of Physics D: Applied Physics, 1996, 29(7) :1984 - 1996
- [6] Megumu Miki, Atsushi Wada, Takatoshi Shindo. Model experiments of the laser - triggered lightning using an intense CO₂ laser pulse. Proceeding of SPIE, 2000, v 3886 :680 - 690
- [7] Yoshinori Shimada, Shigeaki Uchida, Chiyoie Yamanaka. Experiments of discharge guiding using strongly and weakly ionized plasma channels for laser - triggered lightning. Proceedings of SPIE, 2000, v 3886 :663 - 670
- [8] Takatoshi Shindo, Yoshinori Aihara, Megumu Miki. Model experiments of laser - triggered lightning. IEEE transactions on power delivery, 1993, 8(1) :311 - 317
- [9] R M Gilgenbach, O E Ulrich, L D Horton. Localized metallic melting and hole boring by laser guided discharges. Review Scientific Instruments, 1983, 54(1) :109 - 113
- [10] 曾传相, 周业为, 谢建. 火花放电辅助下激光破坏材料的研究. 激光技术, 1998, 22(1) :3 - 7
- [11] 王家金主编. 激光加工技术, 第一版. 北京: 中国计量出版社, 1992. 577 - 580
- [12] (日) 滨崎正信. 实用激光加工, 第一版. 北京: 机械工业出版社, 1992. 177 - 181
- [13] J Sasaki, S Kubodera, R Ozaki. Characteristics of interelectrode flashover in air with the existence of a weakly ionized plasma channel induced by a KrF laser (248nm). Journal of Applied Physics, 1986, 60(11) :3845 - 3849

关于本刊加入中国学术期刊(光盘版)和中国期刊网的声明

为适应我国信息化建设的需要,扩大作者的学术交流渠道,本刊已加入“中国学术期刊(光盘版)”、“中国期刊网”等数字化期刊,从加入之日起,本刊即实行作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付的规定。如有的作者不同意将其文章编入该数据库,则请在来稿时提出声明,本刊将做适当处理。谢谢!