

文章编号: 1001-3806(2010)05-0577-04

YAG 激光诱导组合脉冲放电对材料表面强化的研究

占 剑, 杨明江*

(中国科学院 力学研究所, 北京 100080)

摘要: 为了增加激光诱导放电坑强化层深度,同时考虑降低由于表面严重气化导致能量的损耗,研究了激光诱导组合脉冲放电的技术。采用多激光诱导放电的方法,通过在脉冲放电过程中增加脉冲激光个数,来增强通道后期激光诱导的能力;采用增加放电脉冲个数的方法,通过控制加工点的温度来控制放电能量的输入方式,减少能量的集中度,来增加强化层深度。结果表明,通过增加诱导激光脉冲个数,放电坑直径从原来的 690 μm 降为 652 μm ,强化层深度从 85 μm 增加到 100 μm ,通过将 1 个单脉冲改为一定间隔的 3 个子脉冲,放电坑直径降为 653 μm ,强化层深度增加到 92 μm 。该方案适合机械部件的表面强化加工。

关键词: 激光技术;激光诱导放电;组合脉冲;材料表面强化

中图分类号: TN249;O461.1 **文献标识码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1001-3806.2010.05.001

Investigation on the material surface strengthened by YAG laser guiding combined-pulse discharge

ZHAN Jian, YANG Ming-jiang

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

Abstract: The method of the laser guiding combined-pulse discharge was studied to increase the phase-change layer depth of the laser guiding discharge pit, and avoid the energy loss induced by serious material surface vaporization. This method includes two schemes. One is increasing laser pulse numbers in the process of discharge to enhance the ability of the laser guiding. The other is increasing discharge pulses, in which the input of discharge energy is controlled by the temperature of the machining point so that the energy concentration is reduced and the depth of the strengthening pit is increased. The results showed that the diameter of the discharge pit reduced from 690 μm to 652 μm and 653 μm , and the depth increased from 85 μm to 100 μm and 92 μm , if increasing laser pulse numbers in the late discharge pulse and combining laser and discharge pulses respectively. These methods are applicable for the surface strengthening process of mechanical components.

Key words: laser technique; laser guiding discharge; combined-pulse; material surface strengthening

引 言

随着工业的发展,对材料表面耐磨性要求越来越高,特别是热轧和大型机械行业上,国内外近些年研究了很多增加表面硬度来提高耐磨性的方法^[1-4]。由于强化层的硬度沿深度方向呈梯度降低,随着摩擦磨损时间的增加,高硬度层逐渐损失,使在磨损后期强化层的作用基本失去,所以,低强化层深度的热加工越来越不能满足对使用寿命的要求。中国科学院力学所激光毛化中心通过多年的研究^[5-7],提出脉冲激光诱导放电加工技术,初步实现了加工工件的大能量钉扎强化,同

时国外学者也对激光诱导放电进行了一系列的研究^[8-10]。为了进一步提高使用寿命,一般要求有较大的强化层深度。传统采用的方法之一就是使用通过加大放电脉宽来实现的大能量放电,而大的输入能量会造成能量过于集中,随之出现加工点温度随之加速升高,引起严重气化,气化相变和热辐射等热损耗也成为能量消耗的主要部分之一,这对于加深强化层深度不利,同时能量过于集中使得加工点还易出现裂纹^[11]。

解决问题的方法是如何提高能量的利用率,增加强化层深度。本文中包括两种试验思路:其一是通过在脉冲放电过程中增加脉冲激光个数,来增强通道后期激光诱导的能力,在脉冲激光聚焦点上增加了放电的诱导能力,从而使得放电在该区集中,抑制通道扩散来增加放电坑强化层深;其二是在加工点温度超过气化温度时熄弧,使得温度降低到熔化温度以下再点弧熄弧,直到强化层深度达到要求,通过控制加工点的温

作者简介:占 剑(1981-),男,博士研究生,主要从事光电能量耦合材料表面强化、激光刻蚀微坑工艺及表面形貌摩擦损耗特性方面的研究工作。

* 通讯联系人。E-mail: ymj1@imech.ac.cn

收稿日期:2010-01-04;收到修改稿日期:2010-01-19

度来控制放电能量的输入方式,它的作用是增加能量的利用率,减少能量的集中度,增大能量的耦合,在满足加深强化层深度的同时,可抑制后续放电通道扩散,箍缩通道,减少单脉冲能量抑制了裂纹的萌生。

1 实验材料及方法

1.1 激光诱导组合脉冲放电方法实现

实验用激光器为 YAG 激光器,单脉冲能量为 15mJ,放电电源采用高/低压组合方式实现,高压的作用是放电击穿形成通道,低压的作用是续流,为通道提供大能量放电,本实验装配原理见图 1。整个电路由

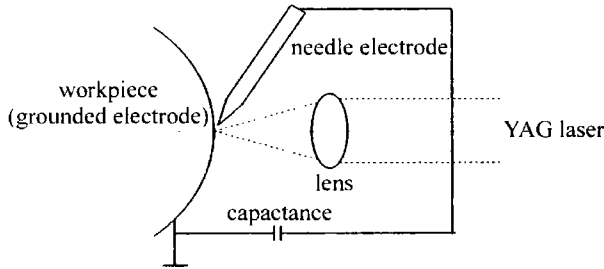


Fig. 1 Schematic of laser-guided discharge

IGBT 控制高/低压的充/放电,在此实验中,编写 VC++ 程序调用 PCI2361,产生脉冲信号,再经过 5V→15V 电平转换器 (MC14504BCP) 和反相缓冲器 (MC14069UBCP),输入到 IGBT 的驱动模块 EXB841 上,实现各种形式的组脉冲放电,通过对单个放电脉冲中激光脉冲个数、放电脉冲个数、子放电脉宽及放电总脉宽来确定输入信号。

1.2 材料及工艺

实验用材料为 45# 钢,激光与放电脉冲控制信号如图 2 所示,其中图 2a 为单个激光脉冲诱导放电,图 2b 为在图 2a 的基础上增加两个激光脉冲诱导放电,目的是增加放电坑通道的诱导能力,抑制通道的扩散;图 2c 为将图 2b 中的放电脉冲分为 3 段,其目的是减少放电坑的能量集中度,增加能量的有效利用。在设计中,保证图 2a、图 2b 和图 2c 中的放电能量一致。由于激光的能量相比于放电能量很小,在计算中可忽略不计,故图 2b 中放电脉宽与图 2a 保持一致。

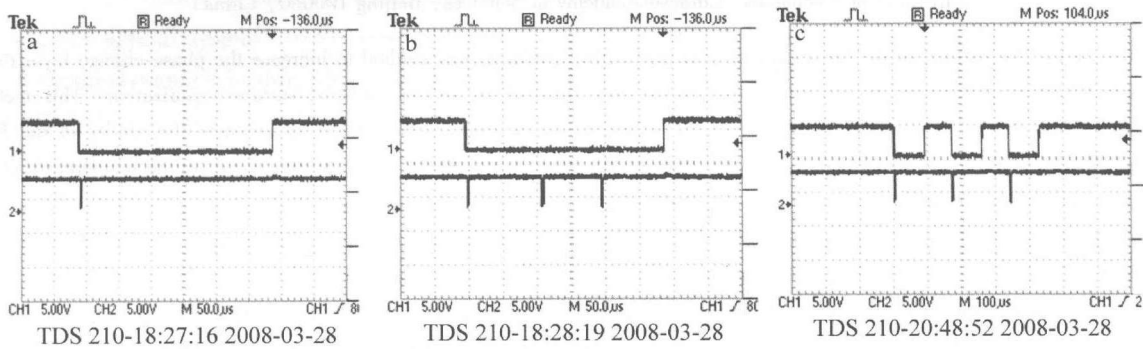


Fig. 2 Laser and discharge control signal

a—single laser pulse b—increasing two laser pulses c—increasing two discharge pulses

1.3 实验检测

放电的能量由电流和电压信号乘积对时间的积分得到。放电通道的电流和电压信号由 Tektronix TDS210 示波器采集,经过 OpenChoice Desktop 软件处理,得到可积分的数据。如图 3 所示,放电脉宽为 300μs,

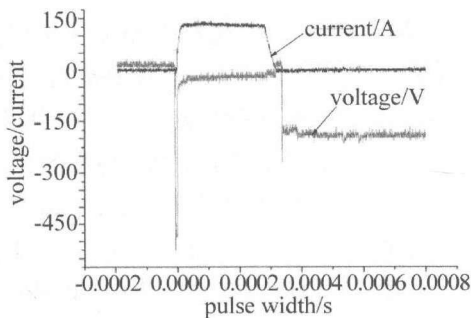


Fig. 3 Voltage (current) waveform of single laser pulse guiding discharge channel

平均弧压为 22.61V,平均放电电流为 125.31A,放电能量为 0.85J。

每种工艺条件下放电 3 次,得到 3 个放电坑,线切割将放电坑从试件上切下,制成试块,在显微镜下观察放电坑的表面形貌,采集其图像,根据放大倍率,制作标尺,如图 4a 所示,为单个激光脉冲诱导的放电坑形貌,在软件中用矩形框框住放电坑,将测得周长除以 4 为放电坑的等效直径。将试块镶样,在磨样机上用从粗到细的砂纸进行磨样,因放电坑基本呈上下对称,观察对称面(最大直径处)的剖面图最有代表性,故在接近最大直径处磨样结束,在磨样机上加上抛光布进行抛光,再用 3% 的硝酸酒精进行腐蚀数秒钟,得到剖面金相图。45# 钢熔凝组织分为两层,第 1 层为熔凝层,第 2 层为相硬化层,热影响层不明显。其中熔凝层对应着白亮层,为枝晶组织,由隐晶马氏体和残余奥氏体组成;中间层是经过不完全奥氏体化的淬火组织,由铁素体、马氏体和残余奥氏体组成;下面为基体,由铁素体和珠光体组成。图 4b 为单个激光脉冲诱导放电坑的剖面图。

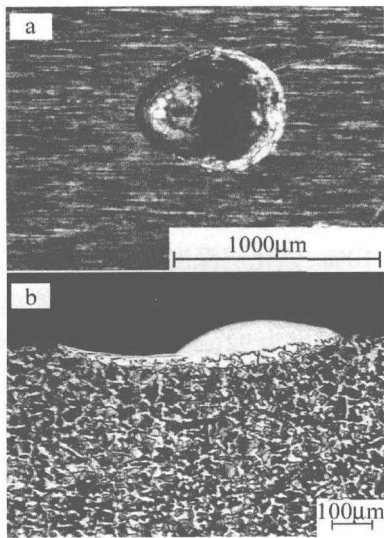


Fig. 4 Single laser pulse

a—laser guiding discharge texturing b—profile of discharge pit

图 5a 为图 4b 中熔凝层较厚部分的局部放大图,在此局部沿熔凝物凸起最高点往下依次进行硬度测量,其数值见图 5b,横坐标为离熔凝凸起最高点的位移值,它包括了强化层深度及熔凝物的凸起部分的高度,可见熔凝层硬度值最高,在 850HV 左右,而相变硬化层区硬度值在 600HV 左右,基体的硬度值最低,为 250HV 左右,以下其它方法所得的加工区域硬度值分布与此一致,就不再给出图示。

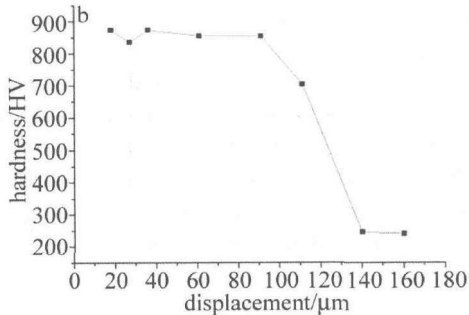
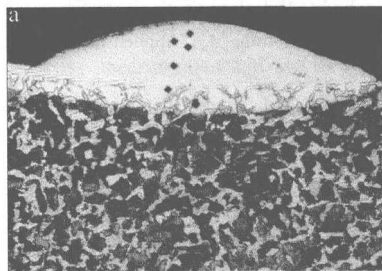


Fig. 5 Single laser pulse guiding discharge texturing hardness curve

a—profile of discharge pit b—hardness curve

放电坑强化层深度 h 为工件表面无突起物的边缘与相变层底部的高度差。所有数据为 3 次实验测量的平均值。图 4 中放电坑直径 $D = 690\mu\text{m}$, 强化层深度 $h = 85\mu\text{m}$ 。

图 6a 为在图 3 的基础上增加 2 个激光脉冲的电流电压波形,平均弧压为 24.31V,平均放电电流为

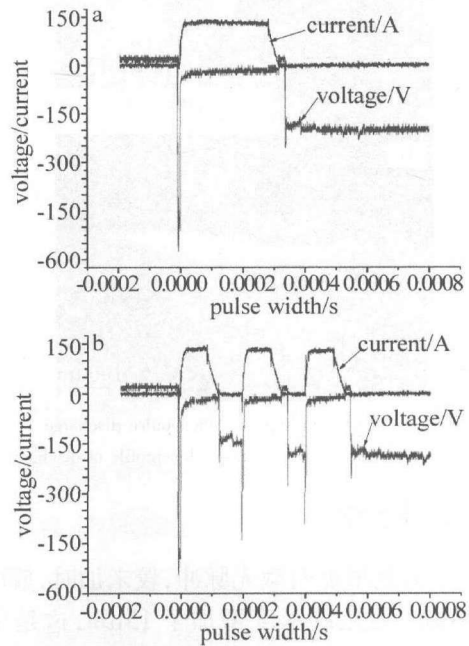


Fig. 6 Laser guiding combined-pulse discharge

a—increasing two laser pulses b—dividing three-pulse discharge

117.92A。图 6b 为将图 6a 中放电脉宽分为 3 段,形成 3 个连续子脉冲的诱导放电电流电压波形,每个子脉宽为 $90\mu\text{s}$,脉冲间隔 $110\mu\text{s}$ 。

图 7a 为图 6a 的放电坑形貌图,图 7b 为其剖面图。测得放电坑直径 $D = 652\mu\text{m}$, 强化层深度 $h = 100\mu\text{m}$ 。

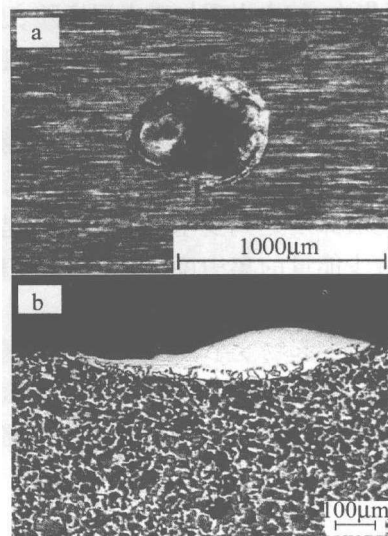


Fig. 7 Increasing two laser pulses

a—laser guiding discharge texturing b—profile of discharge pit

图 8a 为图 6b 的放电坑形貌图,图 8b 为其剖面图。测得放电坑直径 $D = 653\mu\text{m}$, 强化层深度 $h = 92\mu\text{m}$ 。

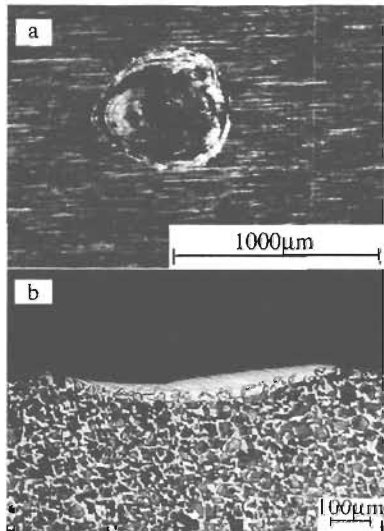


Fig. 8 Laser guiding combined-pulse discharge
a—laser guiding discharge texturing b—profile of discharge pit

2 实验结果分析

在放电后期增加两激光脉冲,较未加时,放电坑径减少了 $48\mu\text{m}$,强化层深度增加了 $15\mu\text{m}$,这是由于放电通道在无外界约束时,总是向外膨胀,导致放电坑径大,能量损失严重。在放电脉冲中增加激光脉冲,作用是增加放电后期通道中的电子密度,使得后期的诱导能力增强,从而使后期放电能量再次集中,抑制了通道后期的扩散趋势,增加了能量的利用率。

采用组脉冲放电,本实验中所用的组脉冲为子脉冲宽 $90\mu\text{s}$,子脉冲间隔 $110\mu\text{s}$,在相同放电能量下,较单脉冲放电,放电坑径减少了 $47\mu\text{m}$,大的输入能量会造成能量过于集中,随之出现加工点温度随之加速升高,引起严重气化,气化相变和热辐射等热损耗也成为能量消耗的主要部分之一。

采用组合脉冲的方法,在加工点温度超过气化温度时熄弧,使得温度降低到熔化温度以下,再点弧熄弧,直到强化层深度达到要求。它的作用是增加能量的利用率,减少能量的集中度,增大能量的耦合,可抑制后续放电通道扩散,箍缩通道。

另外,放电突起物变小,可满足在强化层深度不变的情况下降低表面粗糙度的某些机械加工要求。强化层深度的变化不明显,这是后面的实验中需要进一步

优化参量。

3 结论

在相同的放电脉冲能量(0.85J)下,有如下结论:
(1)单一的激光诱导放电坑径为 $690\mu\text{m}$,强化层深度为 $85\mu\text{m}$,通过在放电后期通道中加两个激光脉冲,放电坑直径为 $652\mu\text{m}$,强化层深度为 $100\mu\text{m}$,使得放电坑径减少了10%,强化层深度增加了20%;
(2)将1个单脉冲改为一定间隔的3个子脉冲,放电坑直径为 $653\mu\text{m}$,强化层深度为 $92\mu\text{m}$ 。相比于单一的激光诱导放电,放电坑径减少了大约10%,突起物明显减少,适合机械部件的表面强化加工。

参考文献

- [1] XU J Y, SONG Y M, GAO Y, *et al.* Investigation on microstructure and property of low-carbon steel surface strengthened layer[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(6): 1068-1071 (in Chinese).
- [2] YIN L M, LIU D H. Study of hot mill rolls by surfacing strengthen [J]. Welding Technology, 2004, 33(2): 21-22 (in Chinese).
- [3] LÜ J M, WU Zh D. Laser surface strengthening of hot-rolling blooming rolls [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2003(2): 56-57 (in Chinese).
- [4] TANG J M, QIAO Sh R. Study on wear resistance of 40Cr steel strengthened layer by electrical discharge [J]. Hot Working Technology, 2006, 35(22): 52-55 (in Chinese).
- [5] 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).
- [6] LI Zh Y, YANG M J. Investigation on crater morphology by laser-induced discharge texturing [J]. Applied Laser, 2004, 24(1): 9-12 (in Chinese).
- [7] ZHAN J, YANG M J. Investigation on crater morphology by laser-induced discharge texturing [J]. Applied Laser, 2007, 27(2): 85-87 (in Chinese).
- [8] TZORTZAKIS S, PRADE B, FRANCO M, *et al.* Femtosecond laser-guided electric discharge in air [J]. Phys Rev, 2001, 64(057401): 1-4.
- [9] VIDAL F, COMTOIS D, CHIEN Ch Y, *et al.* Modeling the triggering of streamers in air by ultrashort laser pulses [J]. IEEE Trans Plasma sci, 2000, 28(2): 418-432.
- [10] YAMAURA M, WATANABE T, HAYASHI N, *et al.* Effect of triggered discharge using an excimer laser with high-repetition-rate of the order of kilohertz [J]. A P L, 2005, 86(13): 131502/1-131502/3.
- [11] WANG Zh T. Study on the mechanism of laser-guided discharge and complex texturing [D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2002: 57-69 (in Chinese).