

文章编号: 0258-7025(2009)08-2178-04

激光诱导微弧放电对 45[#] 钢的表面强化

王之桐 杨明江 石 茂 韩延良

(中国科学院力学研究所激光毛化技术中心, 先进制造工艺力学重点实验室, 北京 100190)

摘要 使用激光诱导微弧放电的方法对 45[#] 钢进行了表面强化。通过实验对比了高压诱导放电(HVGD)和激光诱导放电(LGD)两种表面强化方法。发现激光诱导放电使电极间隙的击穿电压降低了一个数量级,同时放电点和激光焦点重合,实现了对放电点位置的控制。在两种诱导放电过程中放电点的膨胀速度基本相同,但是受到初始放电点大小的影响,激光诱导放电点直径大于高压诱导放电点。在两种诱导放电过程中强化深度都存在最大值,约为 180 μm 。放电点的强化层由熔凝层和相变硬化层组成,其中熔凝层的硬度最高达到 800 HV。

关键词 材料; 表面强化; 激光诱导微弧放电; 高压诱导微弧放电

中图分类号 TN249; TG156.99 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093608.2178

Surface Strengthening of 45[#] steel by Laser-Guided Micro Discharge

Wang Zhitong Yang Mingjiang Shi Mao Han Yanliang

(Key Laboratory for Mechanics in Advanced Manufacturing, National Center for Laser-Texturing Technology Development and Application, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract This paper studies the method of surface strengthening to 45 steel by laser-guided micro discharge, and compared the method by laser-guided discharge (LGD) with the method by high voltage-guided discharge(HVGD). It was found that the break voltage of electrode gap was decreased a grade, and the discharge pit was completely lapped over the laser focus by laser-guiding. The expanding speed of discharge pit was almost same in two kinds of discharge processing. Because of the effect of the diameter of initial discharge pit, the diameter of laser-guided discharge pit was always bigger than the diameter of high voltage-guided discharge pit. The most thickness of layer-strengthened in two kinds of discharge processing were almost same about 180 μm . The strengthened layer of discharge pit included the melted layer and hardening layer. The most hardness of strengthened layer was about 800 HV.

Key words materials; surface strengthening; laser-guided micro discharge; high voltage-guided micro discharge

1 引 言

在摩擦条件下材料表面的强化能够提高寿命、改善性能,点状强化^[1]和面状强化^[2]是两种常用的强化方式,其中点状强化能(LGD)在表面形成强化点的同时保留基体的韧性,形成一种复合结构,能够适应复杂工作环境的要求。同时点状强化能更好地释放应力,避免加工过程中工艺裂纹的产生^[3],加工速度也更快。

目前,激光诱导放电现象已经在材料加工上开始尝试^[4~6]。本文提出了一种新的表面点状强化方法—激光诱导微弧放电表面强化,这种表面强化方

法具有下列优点:使用小能量的激光脉冲来触发和诱导放电,整个强化过程以放电能量为主,放电系统的高能量转换效率起主导作用;在激光的诱导下克服了电火花表面强化的随机性^[7],放电点和激光焦点重合,能够实现设定式分布。在前期工作中我们研究了激光诱导放电的机理^[8],本文在此基础上进一步研究将激光诱导放电现象用于表面强化的工艺方法。

2 实验装置和方法

图 1 为实验原理图。实验在大气中进行,对高

收稿日期: 2008-08-31; 收到修改稿日期: 2008-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(60877064)资助课题。

作者简介: 王之桐(1972—),男,博士,主要从事金属材料表面强化技术方面的研究。E-mail: ztwang@imech.ac.cn

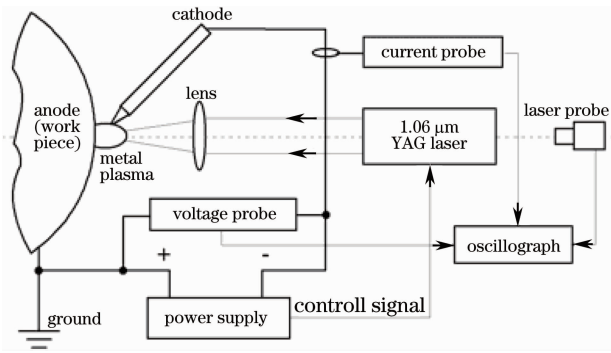


图1 激光诱导放电表面强化示意图

Fig. 1 Schematic of surface strengthening by laser-guided discharge

压诱导放电 (HVGD) 和激光诱导放电方法进行了对比, 电极对形式相同。使用一根尖头的铜棒作为负电极, 为了避开激光铜棒与光路倾斜放置。正极是一根 45# 钢圆柱, 也是表面强化的工件, 电极间隙为 0.5 mm。在高压诱导放电实验中, 放电电源输出电压最高可达 6 kV, 击穿概率 100%。在激光诱导放电实验中, YAG 激光脉冲能量 10 mJ, 脉宽 120 ns, 波长 1.06 μm 。激光聚焦在圆柱电极表面产生等离子体, 电极间隙在等离子体的触发下开始放电, 击穿概率 100%。在放电电流峰值相同的条件下, 分别在 5 种放电脉冲宽度下进行实验: 0.2 ms, 0.5 ms, 1 ms, 1.5 ms 和 2 ms。测量放电点直径和强化层深度, 取 3 个数据的平均值。在电路中使用传感器测

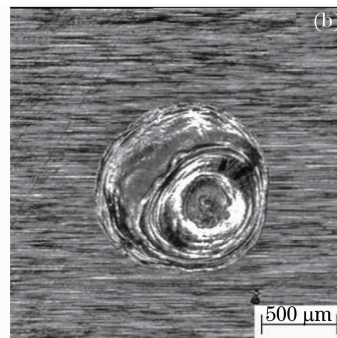
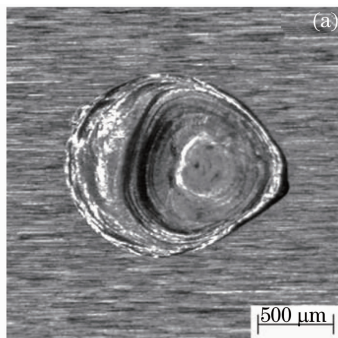


图3 典型的激光诱导放电点(a)和高压诱导放电点(b)表面照片

Fig. 3 Typical surface photos of laser-guided discharge pit (a) and high voltage-guided discharge pit (b)

3.2 激光诱导放电特性

图3给出了典型的激光诱导放电点(7.64 J)和高压诱导放电点(7.32 J)表面照片, 放电方向从左向右。在激光诱导放电过程中, 沿激光等离子体形成的电弧将熔凝物吹出, 形成的凸台具有方向性。而在高压诱导放电过程中, 放电点的位置是随机的, 所以凸台的方向也是随机的。比较两幅照片可知, 在激光诱导下电弧力的作用更加明显, 形成的放电

量放电电压和电流, 使用示波器 Tektronix TSD210 显示和存储波形。由于本次研究的电极间隙比通常的放电间隙要小, 所以定义为微弧放电。

在体视显微镜 Stemi SV11 下拍摄放电点表面型貌照片, 然后制备放电点横截面金相试样, 并拍摄金相照片。

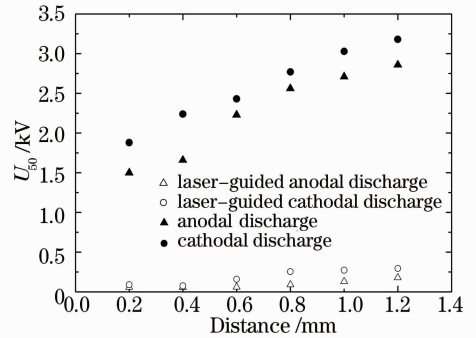


图2 激光触发放电特性

Fig. 2 Property of laser-triggering discharge

3 结果和讨论

3.1 激光触发放电特性

为了研究激光触发降低击穿电压的能力, 进行了有、无激光触发的实验, 图2为不同间隙下有、无激光触发放电的 50% 击穿电压 U_{50} , 可见无论正极性还是负极性放电, 激光触发都使击穿电压降低了一个数量级。

坑呈椭圆状, 而高压诱导放电点明显更圆些。

3.3 两种诱导放电过程中强化层深度的比较

图4对比了激光诱导放电点和高压诱导放电点的直径变化趋势。可见, 两条曲线上升的速度基本相同, 而激光诱导放电点的直径大于高压诱导放电。在激光诱导放电过程中, 激光聚焦在电极表面产生等离子体, 放电沿激光等离子体进行, 所以激光焦斑直径可认为就是初始放电点大小, 本实验中激光焦

斑直径为 $160\ \mu\text{m}$ 。而高压诱导放电过程比较复杂,认为初始放电点直径只有几十微米^[9],小于激光焦斑。因为在两种放电过程中电弧膨胀的外部条件是相同的,考虑到实验结果,可以认为与电弧内部膨胀趋势相比,初始放电点的大小对放电点直径的影响更大。

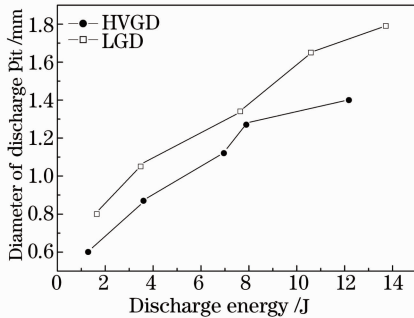


图 4 激光诱导放电点和高压诱导放电点的直径对比

Fig. 4 Comparison between the diameters of laser-guided discharge pit and high voltage-guided discharge pit

图 5 给出了两种放电过程中强化层深度的变化。高压诱导放电强化层深度增大的速度高于激光诱导放电过程,并在 8 J 左右先于激光诱导放电达到最大值,而激光诱导放电强化层深度在 10 J 左右达到最大值。两种诱导放电方法的强化层深度最大值均为 $180\ \mu\text{m}$ 。考虑图 4 的放电点直径变化,当脉冲能量相同时,高压诱导放电点的直径小于激光诱导放电点,则放电点的功率密度更高,所以在相同的作用时间 1.5 ms 时,高压诱导放电用更小的能量 8 J 就达到与激光诱导放电 10 J 相同的强化层深度。

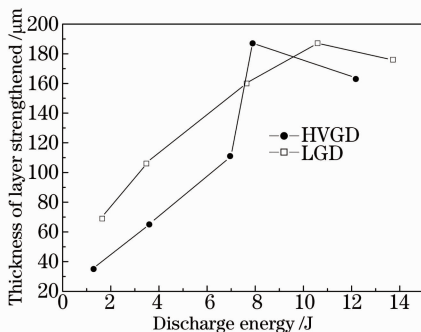


图 5 激光诱导放电和高压诱导放电强化层深度对比

Fig. 5 Comparison between the thicknesses of layer strengthened by laser-guided discharge and high voltage-guided discharge

3.4 激光诱导放电强化层组织分析

图 6 为强化层组织照片和硬度曲线。对强化层组织进行分析,认为 45[#] 钢的强化层组织分为两层:第一层为熔凝层,第二层为相变硬化层,由于基体是

退火态,所以不存在热影响层。熔凝层为快速熔凝的枝晶组织,由隐晶马氏体和残余奥氏体组成,硬度在 800 HV 左右;相变硬化层是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,硬度从 700 HV 逐渐下降到 400 HV,高于基体的硬度 200 HV。

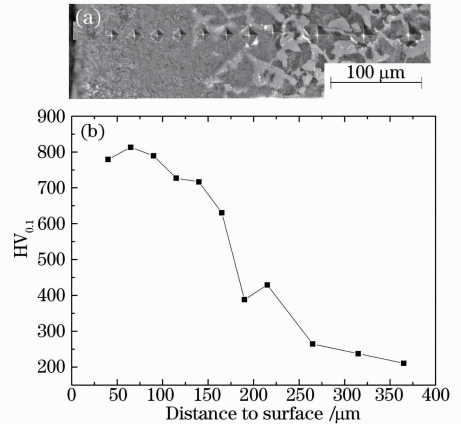


图 6 强化层组织照片(a)和硬度曲线(b)

Fig. 6 Structure photo (a) and hardness curve (b) of layer strengthened

4 结 论

利用激光诱导放电的方法进行了 45[#] 钢表面强化研究,并和高压诱导放电方法进行了对比。发现在两种诱导放电过程中随着放电能量的增大,放电点直径的增大速度基本相同。受初始放电点大小的影响,激光诱导放电点直径大于高压诱导放电点。高压诱导放电强化层深度增加速度高于激光诱导放电,并在 8 J 左右先于激光诱导放电点达到最大值,激光诱导放电点强化层深度在 10 J 左右达到最大值。两种诱导放电方法的最大强化层深度均为 $180\ \mu\text{m}$,强化层组织分为熔凝层和相变硬化层,最大硬度达到 800 HV。

参 考 文 献

- 1 Ba Fahai, Gan Cuihua, Wu Wei *et al.*. Study of surface modification by pulse laser of ductile iron [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30** (7): 663~667
- 2 巴发海,甘翠华,吴 炜等. 球铁材料脉冲激光表面强化的实验研究[J]. *中国激光*, 2003, **30** (7): 663~667
- 3 Qian Zhaoyong, Zhong Minlin, Liu Wenjin *et al.*. High Wear-resistant particulate reinforced composite coatings for corrugated rollers by laser cladding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35** (8): 1271~1276
- 4 钱兆勇,钟敏霖,刘文今等. 瓦楞辊高耐磨激光熔覆颗粒增强铁基复合涂层[J]. *中国激光*, 2008, **35** (8): 1271~1276
- 5 Zhao Yafan, Chen Chuangzhong. Mechanism of the deformation and preventive measures of the cracks in metal ceramics cladding

layer [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(1): 16~19, 22

赵亚凡, 陈传忠. 激光熔覆金属陶瓷涂层开裂的机理及防止措施 [J]. *激光技术*, 2006, **30**(1): 16~19, 22

4 R. M. Gilgenbach, O. E. Ulrich, L. D. Horton. Localized metallic melting and hole boring by laser guided discharges [J]. *American Institute of Physics*, 1983, **54**(10): 109~113

5 Y. Hoshi, H. Yoshida. Application of laser-guided discharge to processing [J]. *Appl. Phys. A*, 1999, **68**(1): 93~98

6 Y. Hoshi, H. Yoshida, Y. Tsutsui. Electric discharge image marking using laser guided discharge [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, **28**(10): 1771~1774

7 Zhang Weiping, Ye Guopin, Feng Xin. Microstructure and properties of 45 steel strengthened with silicon electrode by EDM

[J]. *Surface Technology*, 2007, **36**(4): 17~19

张维平, 叶国萍, 冯新. 硅电火花表面强化 45 钢组织性能的研究 [J]. *表面技术*, 2007, **36**(4): 17~19

8 Wang Zhitong, Yang Mingjiang. The experimental study of delay time discharge in laser guiding discharge machining [J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(2): 29~32

王之桐, 杨明江. 激光诱导放电加工中的延时放电现象实验研究 [J]. *激光杂志*, 2002, **23**(2): 29~32

9 Shimada Yoshinori, Uchida Shigeaki, Yamanaka Chiyoie *et al.*. Experiments of discharge guiding using strongly and weakly ionized plasma channels for laser-triggered lightning [C]. *SPIE*, 2002, **3886**: 663~670

激光二极管抽运自主研制钕玻璃实现 325 mW 连续激光输出

1.54 μm 波段激光在军事、医疗、通讯等领域有重要应用,而钕玻璃激光器以其能直接获得 1.54 μm 波长激光输出受到广泛关注。中国对钕玻璃激光器进行研究的单位主要有:上海光学精密机械研究所,南开大学和西南技术物理所。对于连续抽运钕玻璃微片激光器,目前中国报道的最大输出功率低于 100 mW,国际上报道的最大输出功率约 350 mW。我们实验室在 2002 年实现了激光二极管(LD)抽运自制钕玻璃连续激光运转,其中最大输出功率 43 mW,斜率效率 10.6%。在原有钕共掺磷酸盐玻璃基础上,通过对玻璃组分和稀土离子掺杂浓度的优化,目前我们实现了 LD 抽运最大输出功率 325 mW 的连续激光输出。

采用发射波长在 978 nm 的 LD 作为抽运源,经光纤耦合聚焦到钕玻璃上的抽运光光斑约 175 μm 。掺钕磷酸盐玻璃的尺寸为 13 mm \times 13 mm \times 2 mm,无镀膜,吸收系数 $\alpha=6.82\text{ cm}^{-1}$ 。谐振腔采用标准的平凹腔,输入耦合镜镀全反膜 $R>99.9\% @ 1530\sim 1560\text{ nm}$,输出耦合镜的反射率 $R=99\% @ 1530\sim 1560\text{ nm}$,腔长 $l=15\text{ mm}$ 。钕玻璃两大面经铜片自然冷却。输出功率由功率计进行探测,其中约 3% 的输出功率来源于输出耦合镜透过的未被钕玻璃吸收的抽运光。

图 1 为连续抽运下,激光输出功率随抽运功率变化的曲线,从图 1 看出当抽运功率达到 1.96 W 时,输出饱和,最大输出功率达到 325 mW。增加抽运功率至 2.01 W,钕玻璃没有出现损伤,输出功率保持在 300 mW。其能量转换效率约为 25.92%。

由于钕玻璃激光器没有进行任何改善光束质量的工作,高输出功率时激光束的发散角大于 6 mrad。激光实验数据表明:我们自主研发的钕玻璃经改良后质量得到很大改善,尤其抗热冲击性能有了大幅度提高,有利于获得更高功率激光输出。

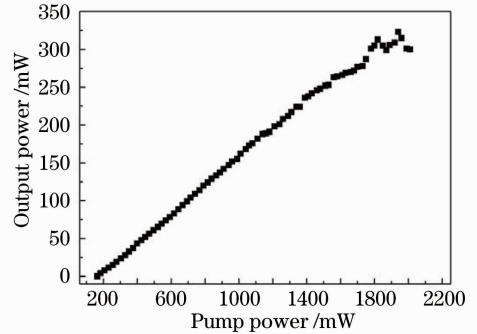


图 1 输出功率随抽运功率变化曲线

Fig. 1 The dependence of output power on pump power

即使未对激光腔设置进行优化,且钕玻璃没有镀膜,仍然获得了高的激光输出功率及能量转换效率。另外,玻璃抗热冲击性能的提高,可以进一步提高抽运功率,获得更高的激光输出功率。目前,提高钕玻璃质量的工作正在进一步进行中。

冯素雅 李顺光 陈力 王标
胡丽丽 陈伟

(中国科学院上海光学精密机械研究所,
中国科学院强激光材料重点实验室,上海 201800)
上海市科委中法合作项目(05S207103)资助课题。

收稿日期: 2009-06-17; 收到修改稿日期: 2009-07-02