

文章编号: 0258-7025(2010)04-1118-04

YAG 激光诱导放电表面离散强化形貌实验研究

王之桐 周终强 石 茂 杨明江

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

摘要 实验研究了 YAG 激光诱导放电(LGD)表面离散强化形貌,包括强化点的表面形貌和横截面形貌。利用放电过程中的电弧压力,对强化点表面进行造型。大电流、倾斜放电容易将熔融物吹起形成凹坑和突起,表面起伏更加明显,而小电流、垂直放电则能得到平坦的表面,有利于增大强化深度。随脉冲宽度的增加,强化点的径深比逐渐变小,在相同强化深度下,小电流、长脉冲宽度可以获得小径深比、厚深状的强化点,而大电流、短脉冲宽度可以获得大径深比、扁平状的强化点。在现有实验条件下,在电流 150 A,脉冲宽度 9.83 ms 下得到最大强化深度为 0.479 mm,径深比为 3.9。

关键词 激光技术;表面离散强化;YAG 激光诱导放电;强化点形貌

中图分类号 TN249;TG156.99 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103704.1118

Experimental Study of the Morphology of Surface Disperse Strengthening by Laser-Guided Discharge

Wang Zhitong Zhou Zhongqiang Shi Mao Yang Mingjiang

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

Abstract The morphology of surface disperse strengthening by laser-guided discharge (LGD) is investigated, including the surface morphology and the cross section morphology of the strengthened area. It is found that the arc pressure can form the special morphology on the surface of the strengthened area in the process of arc discharge. The large current with the tilted discharge is liable to blow the melted metal up and forms the pit and bulge on the surface of the strengthened area, while the small current with the perpendicular discharge structure is liable to form the flat surface of the strengthened area and to increase the thickness of layer strengthened. The ratio of diameter versus thickness of the strengthened area is decreased when the discharge pulse-width is increased. In the same thickness of the strengthened layer, the low current and the long discharge pulse-width is liable to form the small ratio of diameter versus thickness of the strengthened area, while the high current and the short discharge pulse-width is liable to form the big ratio of diameter versus thickness of the strengthened area. Under the present experimental condition, the maximum thickness of the strengthened area is 0.479 mm, and the ratio of diameter versus thickness of the strengthened area is 3.9, when the current is 150 A and discharge pulse-width is 9.83 ms.

Key words laser technique; surface disperse strengthening; YAG laser-guided discharge; strengthened area morphology

1 引 言

一些摩擦副的工作条件比较苛刻,既要求表面具有耐磨性,又要求表面具有一定的摩擦性能,例如一些滚动摩擦副之间的相互作用。与面状强化相比,点状离散式强化的工艺方法能够满足这种复杂的要求。首先,点状强化在材料表面形成离散式的强化点,能够减小磨损,提高摩擦副的寿命;其次,通过控制强化点的表面形貌,能够改变摩擦副表面的

摩擦特性,适应摩擦副的工作要求;最后,点状强化保留了基体的韧性,能够更好地释放应力,避免加工过程中工艺裂纹的产生^[1,2]。

激光诱导放电(LGD)是一种新的表面点状强化方法,从工艺方法来看具有下列优点:1)与激光表面强化相比,该方法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,能量转换效率高。2)与电火花表面强化对比,激光诱导克

收稿日期: 2009-04-27; 收到修改稿日期: 2009-07-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(60877064)资助课题。

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

服了放电表面强化的随机性,放电点和激光焦点重合,能够实现设定式分布。

LGD 的工艺方法适合用于摩擦副的表面强化,具有下列优点:1)能够控制强化点的表面形貌,得到不同的摩擦性能。利用电弧压力可以将熔凝物挤出熔池,形成一定的表面形貌,按照摩擦学的要求,实现增加或减小摩擦力的目的。2)能够控制强化点的横截面形貌,在交变载荷下保证强化点和基体的结合强度。LGD 是一种直径随时间变化的表面热源,通过控制放电参数,可以方便地得到不同的热源特性,从而根据不同的疲劳载荷,设计相应的强化点横截面形貌,保证强化点的疲劳寿命,避免强化点的疲劳剥落。

在前期工作中,研究了激光诱导放电的机理^[3,4]和离散式表面强化的工艺方法^[5],本文对该方法在摩擦副表面强化的应用做了进一步的研究。

2 实验装置和方法

图 1 给出了实验示意图。实验在大气中进行,使用一根尖头的钨棒作为工具电极(阴极),工件是 45 # 钢平板试样(阳极,接地),电极间隙为 0.5 mm。工具电极和工件之间的夹角可以通过旋转工具电极和激光头的底座来改变,其间激光光路和工具电极的夹角保持不变。用于诱导放电的 YAG 激光参数为:脉冲能量 10 mJ,脉宽 300 ns,波长 1.06 μm。激光聚焦在工件表面产生等离子体,电极间隙在等离子体的触发下开始放电,击穿概率为 100%。在电路中使用传感器测量放电电压和电流,使用示波器 Tektronix TSD210 显示和存储波形,在体视显微镜 Stemi SV11 下拍摄放电点表面形貌照片,制备放电点横截面金相试样,并拍摄金相照片。

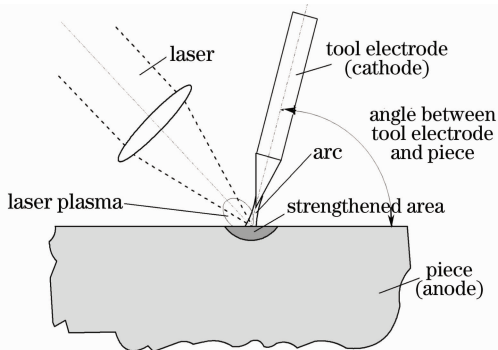


图 1 LGD 强化点形貌实验示意图
Fig. 1 Schematic of experiment of the strengthened area by LGD

研究内容包括两部分:1)放电参数对表面形貌的影响,包括 3 种实验条件:100 A 下垂直放电,100 A 下 45°放电,200 A 下 45°放电。2)放电参数对强化点横截面形貌的影响。比较 50,100 和 150 A 3 种峰值电流下强化点横截面形貌的变化。

3 结果和讨论

3.1 强化点表面形貌

在 LGD 表面离散强化过程中,电弧压力对强化点表面形貌的影响很大。电弧压力由电磁场对等离子体流的加速作用产生,是电弧等离子体压力的总和,与放电电流和电流密度分布有关,即

$$P \propto I \cdot j, \quad (1)$$

式中 P 为电弧压力, I 为放电电流, j 为电流密度^[6]。

图 2 给出了 3 种实验条件下的放电点横截面照片和数据,其中实验条件分别为:(a)脉冲宽度 0.5 ms,电流 200 A,能量 3.48 J,直径 1.05 mm,倾斜 45°放电,工具电极在左侧;(b)脉冲宽度 2 ms,电流 124 A,能量 4.16 J,直径 1.13 mm,倾斜 45°放电,工具电极在左侧;(c)脉冲宽度 2.4 ms,电流 102 A,能量 4.4 J,直径 1.09 mm,垂直放电,工具电极在中央。观察图 2 的强化点横截面照片,在 100 A 下,电弧压力较小,垂直放电的强化点表面比较平坦,45°放电时受到电弧压力分布的影响,强化点表面略有起伏。而在 200 A 下 45°放电时,根据(1)式估算,平均电弧压力比 100 A 下的增大 3~4 倍,熔池中的金属被电弧吹出,形成了明显的凹坑和突起。通过分析实验结果认为,利用大电流、短脉冲宽度下的电弧压力,结合倾斜放电可以对强化点进行表面造型,得到不同的表面形貌,适应摩擦副的工作要求。而从强化层的深度来考

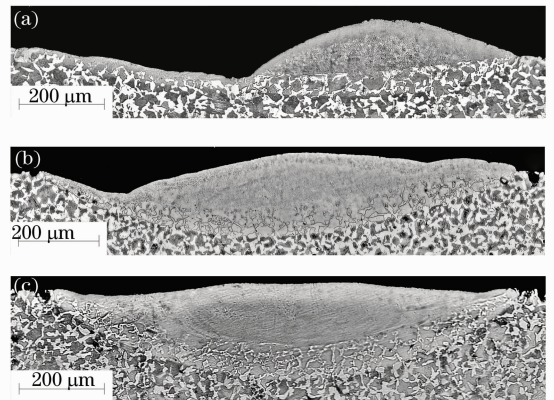


图 2 LGD 强化点表面形貌对比
Fig. 2 Comparison of surface morphology of the strengthened area by LGD

虑,小电流、长脉冲宽度、垂直放电能够得到更深的强化层。

3.2 强化点横截面形貌

强化点横截面形貌包括强化点直径、强化深度两方面,通常可以用径深比来描述横截面的形态。观察图 3,4,发现在大电流下放电点在初始阶段的膨胀速度很快,进入稳定阶段后 3 种电流的放电点膨胀速度基本相同,而强化深度增大的速度基本稳定。将数据处理成径深比表示在图 5 中,发现径深比随着放电时间的增加逐渐下降,这表明强化深度比强化点直径增加得快。在图 6 中给出 3 种电流下有相似强化深度的强化点横截面照片。其中实验条件分别为:(a) 电流 50 A,脉冲宽度 5.9 ms,能量 4.09 J,直径 1.09 mm,深度 0.268 mm,径深比 4.1;(b) 电流 100 A,脉冲宽度 3.99 ms,能量 7.16 J,直径 1.23 mm,深度 0.26 mm,径深比 4.7;(c) 电流 145 A,脉冲宽度 2.9 ms,能量 7.78 J,直径 1.41 mm,深度 0.248 mm,径深比 5.7。可以看出小电流、长脉冲宽度得到小径深比的强化点,强化点的横截面形状更加厚深,而大电流、短脉冲宽度可以获得大径深比、扁平状的强化点。在现有实验条件

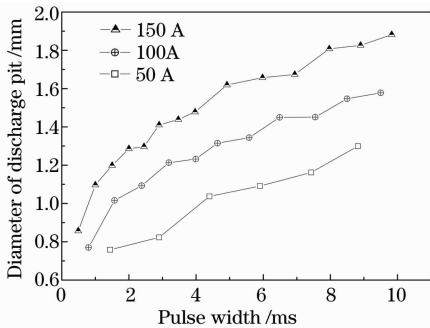


图 3 不同电流下的强化点直径

Fig. 3 Diameter of the strengthened area in different currents

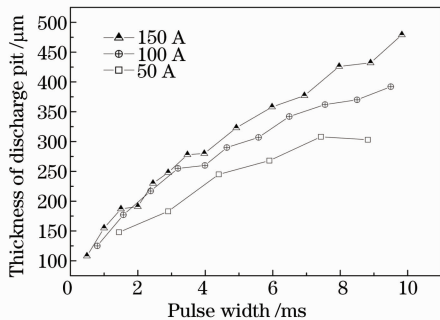


图 4 不同电流下的强化点深度

Fig. 4 Thickness of the strengthened area in different currents

下,当放电电流 150 A,脉冲宽度 9.83 ms 时得到最大强化深度 0.479 mm,径深比为 3.9。

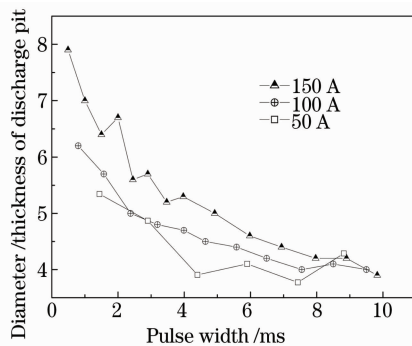


图 5 不同电流下的强化点径深比

Fig. 5 Diameter versus thickness of the strengthened area in different currents

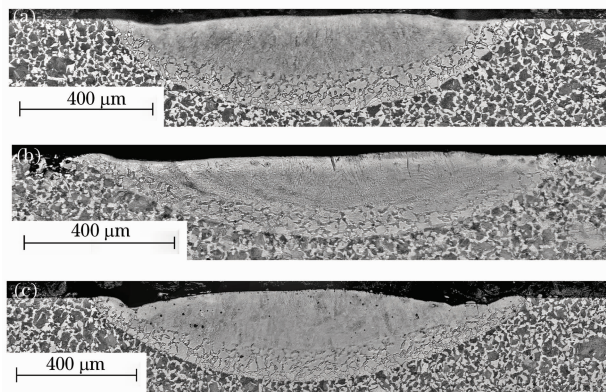


图 6 LGD 强化点横截面形貌对比

Fig. 6 Comparison of cross section morphology of the strengthened area by LGD

当强化表面承受交变载荷时,强化点的横截面形貌直接影响到强化点和基体的结合强度。在下一步工作中,将对这一规律做进一步的研究。

3.3 强化层组织分析

LGD 表面强化属于快速熔凝过程,强化组织经过高温奥氏体化、快速淬火的过程,强化层组织分析大致分成两部分:表层的熔凝区和相邻固态相变区。由于基体是退火态,所以不存在热影响区。在图 7(a)中表示了沿强化点中心拍摄的金相照片,图 7(b)对图 7(a)中的照片进行了纹理增强,以便更清楚地表示出高温奥氏体和淬火马氏体的组织结构。从图 7(b)中可以清晰看出,照片左侧的强化点表层存在粗大的柱状枝晶组织,沿温度梯度规则生长,厚度约为 50 μm。亚表层为细小的枝晶组织,取向凌乱,厚度约为 35 μm,可以认为是胞枝晶组织。再向下是从固态相变区外延生长的胞晶组织,厚度约为 70 μm。固态相变区的厚度约为 100 μm,从固液界

面向内铁素体依次为完全溶解、部分溶解、不溶解。

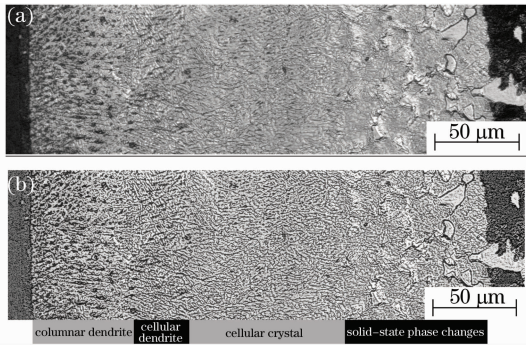


图 7 强化层组织。(a)金相照片;(b)纹理增强照片

Fig. 7 Microstructure of the strengthened layer.

(a) microstructure photo; (b) textured photo

在快速熔凝过程中,熔凝物的对流和碳的扩散忽略不计,可以认为熔凝组织的含碳量基本一致。在胞晶内部能够清晰地看出取向基本一致的板条马氏体组织,熔凝区的显微硬度在 849~986 HV 之间小范围变化,因此可以认为整个熔凝区的组织由板条马氏体和残余奥氏体组成。相变硬化层是不完全奥氏体化的淬火组织,由马氏体、未熔铁素体和残余奥氏体组成,平均硬度从 849~566 HV 逐渐下降^[7],如图 8 所示。

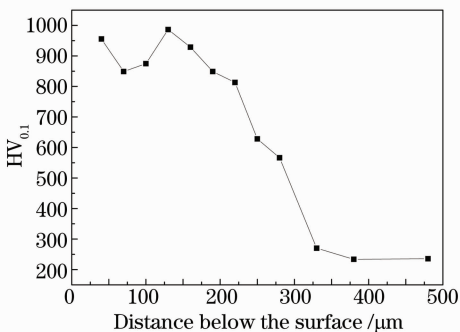


图 8 强化层硬度曲线

Fig. 8 Hardness curve of the strengthened layer

4 结 论

利用放电过程中的电弧压力,可以对强化表面造型,满足摩擦学的要求。大电流、短脉冲宽度、倾斜放电容易将熔凝物吹起形成凹坑和突起,表面起伏更加明显,而小电流、长脉冲宽度、垂直放电则有

利于增大强化深度。

随脉冲宽度的增加,强化点的径深比逐渐变小。在相同强化深度下,小电流、长脉冲宽度可以获得小径深比的强化点,而大电流、短脉冲宽度可以获得大径深比的强化点。在现有实验条件下,在 150 A, 9.83 ms 时得到最大强化点深度 0.479 mm,径深比为 3.9。

强化区的组织大致分成熔凝区和相变区,熔凝区的高温奥氏体组织从表面向内依次为柱状枝晶、胞枝晶和胞晶结构,熔凝区的常温组织由板条马氏体和残余奥氏体组成,显微硬度在 849~986 HV 之间变化,固态相变区是不完全奥氏体化的淬火组织,平均硬度按照未熔铁素体的比例在 849~566 HV 范围内逐渐下降。

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
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
- 2 Zhao Yafan, Chen Chuansong. Mechanism of the deformation and preventive measures of the cracks in metal ceramics cladding layer[J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(1): 16~22
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): 16~22
- 3 Wang Zhitong, Yang Mingjiang. The experimental study of delay time discharge in laser guiding discharge machine[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
- 4 Wang Zhitong, Zhan Jian, Yang Mingjiang. Effect of surface condition of electrode on the surface melting of material by laser-guided micro-arc discharge[J]. *IEEE T. Plasma Sci.*, 2008, **36**(5): 2816~2819
- 5 Wang Zhitong, Yang Mingjiang, Shi Mao *et al.*. Surface strengthening of 45# steel by laser-guided micro discharge[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2178~2181
王之桐,杨明江,石 茂等. 激光诱导微弧放电 45# 钢的表面强化[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2178~2181
- 6 Sun Junsheng, Wu Chuansong. The influence of arc pressure on the MIG weldpool dimensions[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2001, **37**(4): 434~438
孙俊生,武传松. 电弧压力对 MIG 焊接熔池几何形状的影响[J]. *金属学报*, 2001, **37**(4): 434~438
- 7 Li Chao. Principles of Metallography[M]. Harbin: The Press of Harbin Institute of Technology, 1989. 186~199
李 超. 金属学原理[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1989. 186~199