

文章编号: 0258-7025(2010)08-2131-08

# 激光诱导放电材料表面离散处理研究

王之桐 杨明江 周终强 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** 研究了激光诱导放电(LGD)材料表面离散处理的机理和加工方法。在机理研究中发现激光诱导在大尺度上(放电点间隔)和小尺度上(放电点内部)都抑制了放电的随机性,实现了放电点位置的设定,增加了强化深度,提高了放电点的一致性。在 LGD 表面毛化研究中,发现随着峰值电流的升高,毛化坑凸起高度和毛化表面粗糙度(SRa)随之增大,毛化坑凸起的硬度达到 1000 HV。在 LGD 表面强化研究中,发现通过控制放电电流和脉冲宽度能够获得不同径深比的强化点横截面形貌。在长脉冲宽度下强化点的径深比相似,高电流下的强化点直径更大,强化层更深,低电流则相反。在短脉冲宽度下强化点的深度相似,而高电流的径深比更大,低电流则相反。

**关键词** 激光技术;激光诱导放电;表面离散处理;表面毛化;表面强化

中图分类号 TN249; TG156.99 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103708.2131

## Study of Laser-Guided Discharge to Discrete Surface Processing

Wang Zhitong Yang Mingjiang Zhou Zhongqiang 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** The mechanism and method of laser-guided discharge (LGD) to discrete surface processing are studied. In the study of LGD mechanism, it is found that laser guiding controls the randomness of processing by common arc discharge in two sides, including a big scale (spacing of discharge areas) and a small scale (inside of discharge area). The position of discharge areas are controlled by the laser focus according to the design. The deepness of discharge areas are increased. The consistency of discharge areas is improved. In the study of surface texturing by LGD, the highness of rim of textured crater and the SRa of textured surface are increased with the augment of peak current. The hardness of rim of textured craters is about 1000 HV. In the study of surface strengthening by LGD, the cross-section shapes of strengthened areas are controlled with the peak current and pulse width. In long pulse-width of discharge, the ratios of diameter to deepness of strengthened areas are similar. The diameters of strengthened areas with high peak current are bigger than those with low peak current. The deepness of strengthened areas with high peak current are deeper than those with low peak current. In short pulse-width of discharge, the deepness of strengthened areas are similar. The ratios of diameter to deepness of strengthened areas with high current are bigger than those with low peak current.

**Key words** laser technique; laser-guided discharge; discrete surface processing; surface texturing; surface strengthening

## 1 引 言

自从激光诱导放电(LGD)现象在 20 世纪 70 年代发现后<sup>[1]</sup>,很多人对激光等离子体与电场的相互作用机理进行了研究<sup>[2,3]</sup>,包括激光脉冲能量、激光脉冲和放电脉冲之间的延时对诱导效果的影响等内容。

激光诱导放电现象在大气中诱导闪电或长距离的放电也得到很多研究<sup>[4~8]</sup>,同时此现象在材料加工上的应用已经有了报道。例如, Gilgenbach 等<sup>[9]</sup>于 1983 年在大气环境下利用脉冲 CO<sub>2</sub> 激光诱导放电在铝箔上进行了打孔实验。Hoshi 等<sup>[10,11]</sup>于 1999 年在低气

收稿日期: 2009-09-27; 收到修改稿日期: 2009-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(60278023, 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

压下使用 532 倍频 YAG 激光进行了刻字和加工工件内部的研究。打孔和刻蚀是利用激光诱导放电的高峰值功率对材料进行去除加工,同时利用激光诱导放电的熔凝效应进行材料表面处理也值得深入研究。1998 年王之桐<sup>[12]</sup>在大气中使用  $1.06\ \mu\text{m}$  YAG 激光进行了短间隙(小于 1 mm)诱导放电的机理研究,并利用该方法进行了材料表面毛化研究。2009 年王之桐等<sup>[13,14]</sup>在大气中使用  $1.06\ \mu\text{m}$  YAG 激光对材料表面进行了熔凝强化研究。

LGD 作为一种新型的表面离散处理方法,具有下列优点:1)与激光处理相比,该方法使用小能量的激光脉冲来触发和诱导放电,整个加工过程以放电能量为主,能量转换效率高。2)与电火花处理对比,激光诱导克服了放电的随机性,放电点和激光焦点重合,实现了加工点的设定分布。3)点状处理保留了基体的韧性,能够更好地释放应力,避免加工过程中工艺裂纹的产生<sup>[15,16]</sup>。

LGD 离散处理技术适用于摩擦副的表面加工,它的加工表面具有下列优点:1)通过控制放电点的表面形貌实现控制摩擦。通过调整加工中的放电角度可以控制放电点的表面起伏。倾斜放电可以将熔凝物挤出,在材料表面形成凸起和凹陷,而垂直放电可以得到平整的表面,从而控制材料表面的咬合力。

2)通过控制放电点的横截面形貌保证交变载荷下放电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,可以得到具有不同能量分布特性的热源。从而可以根据疲劳载荷,设计出相应的放电点横截面形貌,保证放电点的疲劳寿命。3)通过控制放电点的表面分布位置,能够调节材料表面的摩擦特性,适应摩擦副的工作要求。

本文研究了在表面离散处理中激光诱导抑制放电随机性的现象和机理,并研究了 LGD 材料表面毛化和表面强化的工艺方法。

## 2 LGD 材料表面处理机理

### 2.1 原理和装置

图 1 所示为 LGD 材料表面处理的原理框图。LGD 系统由两部分组成:激光系统,由 YAG 激光器和外光路组成;放电系统,由电源、可控充电电路、储能电路和可控放电电路组成。该方法是在现有的 YAG 激光聚焦头附近增加放电系统,利用激光脉冲与材料表面相互作用产生的弱电离金属气团进行诱导放电,将光能和电能叠加在一起作用进行材料表面处理。

图 2 为实验装置示意图, $1.06\ \mu\text{m}$  YAG 激光通

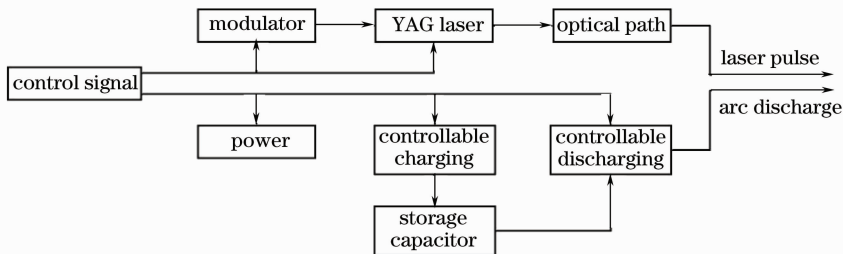


图 1 LGD 材料表面离散处理原理框图

Fig. 1 Block diagram of discrete surface processing by LGD

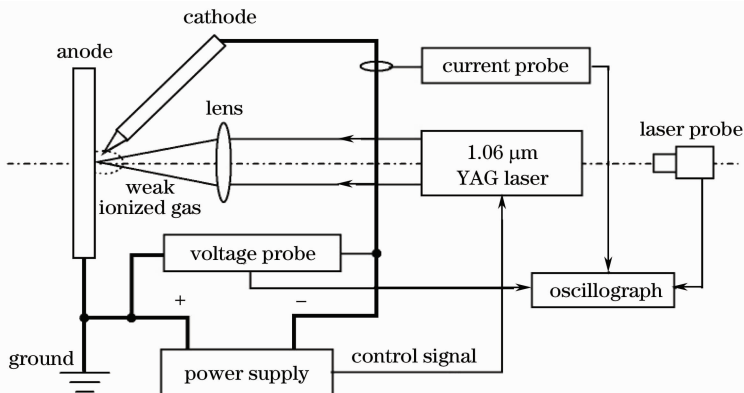


图 2 LGD 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic of experimental equipment by LGD

过聚焦镜会聚在圆柱电极表面,激光脉冲能量为 15 mJ,脉宽 120 ns,焦斑直径 160 μm。采用针-板电极对形式。针状电极材料为 WCu 合金,负极性,为了避免遮挡,激光与光路倾斜放置。板状电极材料为 45# 钢,表面涂机油,接地。信号发生器控制放电电源和激光脉冲同步工作。

本文研究了大尺度上(放电点间隔)激光对放电位置随机性的控制作用,和小尺度上(放电点内部)激光对放电斑点随机移动的控制作用。

### 2.2 激光诱导对放电点位置的控制

在相同放电参数下使用普通电弧放电和激光诱导放电分别加工 6 个点,每次放电电极位置水平移动 2.5 mm,在图 3 中给出了普通电弧放电点和激光诱导放电点的体式显微镜照片。图 3(a)为普通

电弧放电点照片,明显看出放电点的位置不规则,在水平和垂直放电都有一定的分散性。同时放电点的形状也不规则,部分放电点呈椭圆形。图 3(b)为激光诱导放电点照片,可见在激光诱导下放电点位置的随机分布被克服,放电点和激光焦点重合,在水平和垂直方向上放电点均规则排列,放电点的形状为规则的圆形。

激光诱导对放电点位置的控制作用原理如图 4 所示。在激光诱导下放电点和激光焦点重合,电弧方向与试件垂直。放电点的形状比较规则,为圆形。而普通电弧放电时击穿位置由电场强度决定,电极和工件表面粗糙度的存在使放电点的位置存在随机性。当电弧与表面倾斜时,电弧压力会使放电点呈椭圆状。

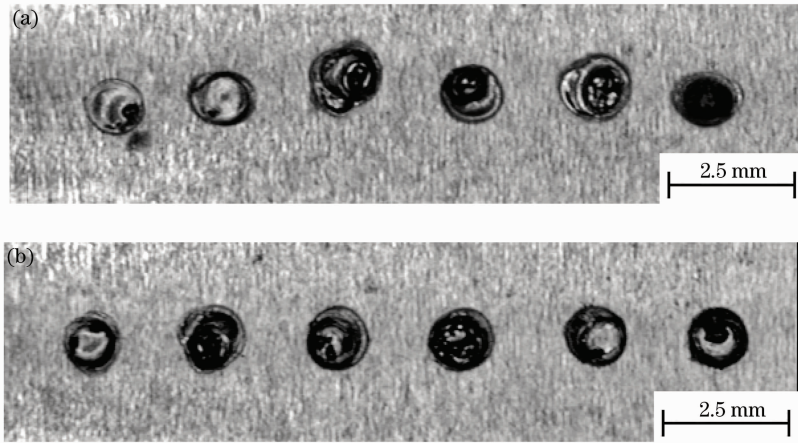


图 3 普通电弧放电点(a)和激光诱导放电点(b)的体式显微镜照片

Fig. 3 Three-dimensional microscope photos of common arc discharge pit (a) and LGD areas (b)

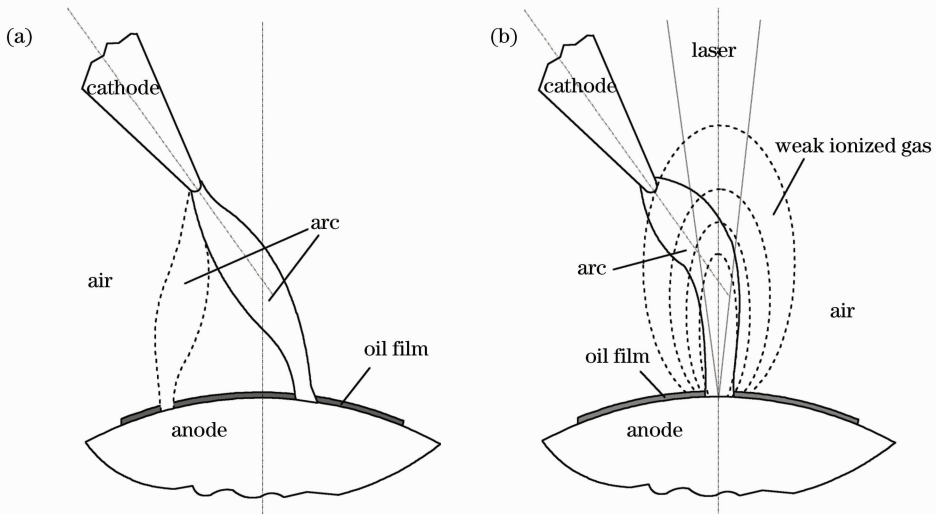


图 4 激光诱导对放电点位置的控制作用示意图。(a)普通电弧放电;(b)激光诱导放电

Fig. 4 Schematic of control of laser guiding in the position of discharge area. (a) common arc discharge; (b) LGD

### 2.3 激光诱导对放电点内部放电斑点随机移动的控制

在普通电弧放电过程中放电点内部放电斑点存在随机移动现象。随机移动后的放电斑点会加热前面的凝固组织,造成凝固组织的重熔和回火。因为回火组织的抗腐蚀能力低于熔凝组织,所以在试样腐蚀以后形成了熔凝组织和回火组织的界面线。在图 5 中对比了 100 A 峰值电流下普通电弧放电点和激光诱导放电点的横截面照片。图 5(a)为普通电弧放电点显微组织照片,箭头所指的位置为熔凝组

织和回火组织的界面线,脉冲宽度 10.73 ms,直径 1.4 mm,强化深度 320  $\mu\text{m}$ 。从图 5(a)可以发现存在多条界面线,这种现象证明了在普通电弧放电过程中放电点内部放电斑点存在多次随机移动现象。而图 5(b)中在激光诱导下放电斑点和激光焦点重合,放电斑点被固定在放电点的中心,脉冲宽度 9.5 ms,直径 1.58 mm,强化层深 392  $\mu\text{m}$ 。因此熔凝组织沿温度梯度向熔池表面中心生长,没有重新熔化和凝固的过程发生。

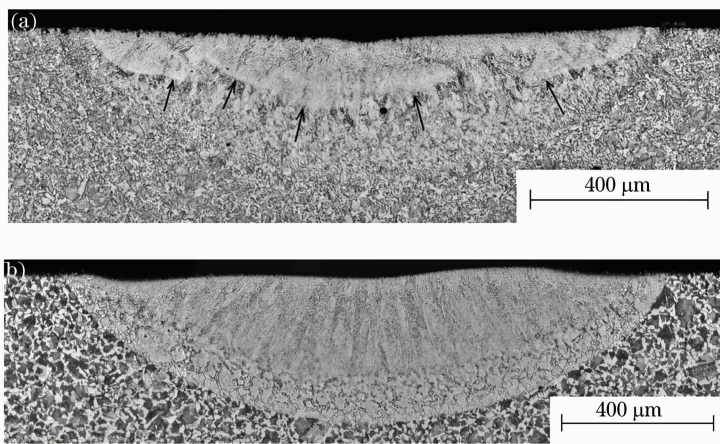


图 5 普通电弧放电点(a)和激光诱导放电点(b)横截面的光学显微镜照片

Fig. 5 Optical microscope cross-section photos between common arc discharge area (a) and LGD area (b)

放电点内部放电斑点的随机移动造成了放电点直径的分散性。同时放电点组织发生的多次随机熔凝过程造成了输入能量的额外损耗,降低了放电点的强化深度,也增加了强化深度的分散性。图 6(a)对比了两种放电方法的放电点直径。激光诱导放电点的直径变化比较规则,而普通电弧放电点的直径分散性很大。图 6(b)对比了两种放电方法的放电点强化深

度。普通电弧放电点强化深度的分散性依然很大,可以明显看出激光诱导放电点的强化深度高于普通电弧放电点。在本文中用放电点直径和强化深度的比值(径深比)来描述强化点的横截面形貌。两种放电方法的放电点径深比表示在图 6(c)中。普通电弧放电点径深比的分散性更大,而激光诱导放电则成功地控制了放电点的横截面形貌。

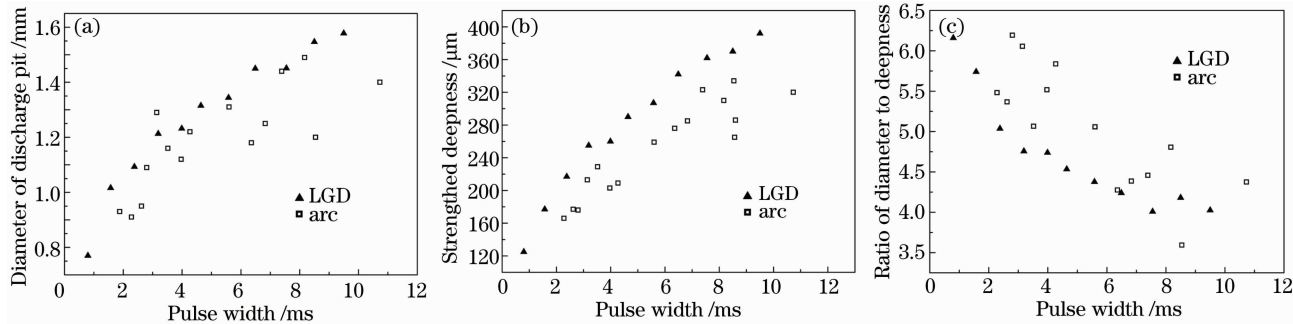


图 6 激光诱导放电点和普通电弧放电点横截面形貌。(a)直径;(b)强化深度;(c)径深比

Fig. 6 Cross section shape between common arc discharge areas and LGD areas. (a) diameter; (b) strengthened deepness; (b) ratio of diameter to deepness



### 3 LGD 表面毛化

#### 3.1 实验装置和方法

实验装置如图 7 所示。工具电极使用纯铜圆盘,与工件表面成一定夹角,负极性。激光与工件表面垂直,参数与机理研究相同。工件为 45# 钢圆柱,正极性,表面涂机油,接地。在加工过程中,工件架在车床上模拟工件回转运动,圆盘电极以一定的转速转动,并沿圆柱工件的轴线平动。圆盘电极的使用,使相邻两次放电发生在圆盘的不同位置上,有利于放电点的散热,能够减小电极腐蚀,保证电极长时间稳定工作。在电路中使用传感器测量电压和电流波形,使用示波器 TektronixTDS210 测量和储存波形。放电电压和电流波形如图 8 所示。

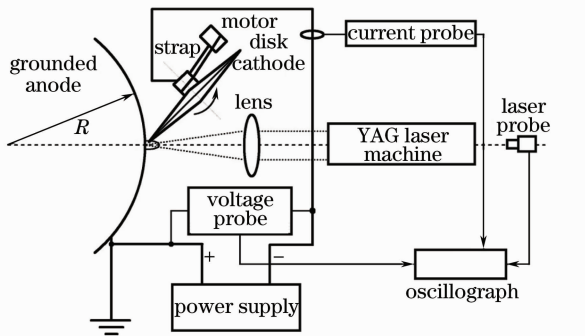


图 7 激光诱导放电表面毛化装置示意图

Fig. 7 Schematic of equipment of surface texturing by LGD

LGD 毛化表面的形貌特征是本部分研究的重点。实验手段包括使用体视显微镜 Stemi SV11 拍摄毛化表面形貌照片,测量毛化坑直径。使用 Micro-XAM 非接触式表面三维形貌仪测量毛化表面 3D 形貌,测量毛化坑的凸峰高度和凹坑深度,求得表面粗糙度(SRa)数据。制备毛化坑横截面试样,分析毛化坑组织特征和测量毛化坑的硬度。

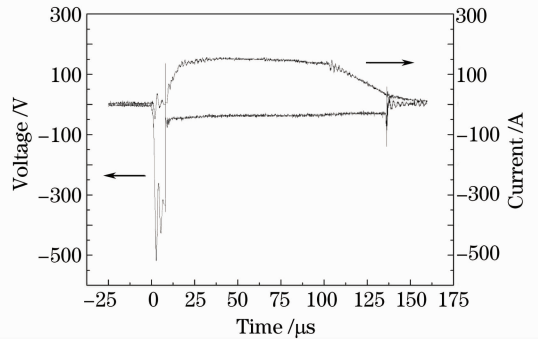


图 8 LGD 表面毛化放电波形

Fig. 8 Discharge waveforms of surface texturing by LGD

#### 3.2 实验结果分析

工艺参数和实验结果如表 1 所示。毛化表面照片如图 9(a)所示。185 A 峰值电流的毛化坑的 3D 形貌如图 9(b)所示。毛化坑按照  $0.66 \text{ mm} \times 0.78 \text{ mm}$  矩阵排列。当峰值电流从 132 A 增大到 185 A 时,毛化坑凸起的高度从  $38.9 \mu\text{m}$  增加到  $51.9 \mu\text{m}$ 。毛化坑凹陷的深度从  $-21.6 \mu\text{m}$  减小到  $-16.8 \mu\text{m}$ 。对于设定式分布的毛化表面,普通一维的 SRa 不能准确表达毛化表面形貌,这里使用三维表面粗糙度  $f_{\text{SRa}}$  进行描述, $f_{\text{SRa}}$  的定义为<sup>[17]</sup>

$$f_{\text{SRa}} = \frac{1}{L_1 \times L_2} \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} |f(x, y)| dx dy, \quad (1)$$

式中  $L_1$  和  $L_2$  为毛化坑间距, $f(x, y)$  为表面起伏数据。当峰值电流从 132 A 增大到 185 A 时, $f_{\text{SRa}}$  从  $6.03 \mu\text{m}$  增大到  $8.46 \mu\text{m}$ 。

因为毛化坑的凸起和凹陷是由电弧压力挤出熔化金属形成的,这里对不同电流下的电弧压力进行分析。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<sup>[18]</sup>

$$P_a \propto I \cdot j, \quad (2)$$

式中  $P_a$  为电弧压力, $I$  为放电电流, $j$  为电流密度。

表 1 实验参数和结果

Table 1 Experimental parameters and results

Peak current /A	132	150	166	185
Pulse width / $\mu\text{s}$	124	127	135	138
Discharge energy /J	0.445	0.524	0.608	0.698
Diameter of textured crater /mm	0.555	0.587	0.621	0.65
Height of rim of textured crater / $\mu\text{m}$	38.9	44.8	42.6	51.9
Deepness of pit of textured crater / $\mu\text{m}$	-21.6	-23.8	-17.6	-16.8
$f_{\text{SRa}} / \mu\text{m}$	6.03	6.26	7.53	8.46

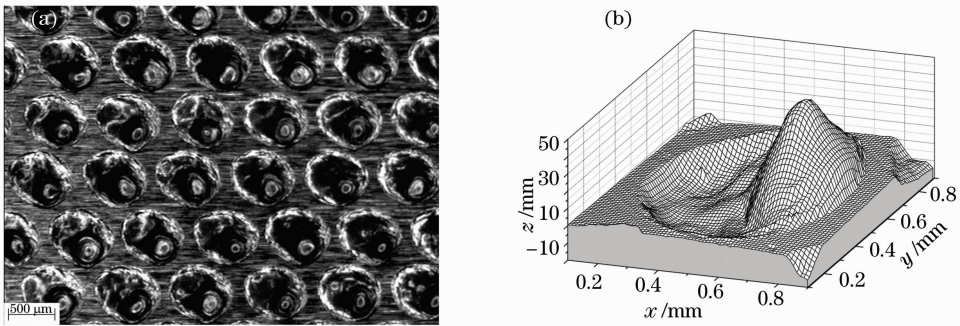


图 9 185 A 峰值电流毛化坑表面形貌。(a)毛化表面体式光学显微镜照片;(b)毛化坑 3D 形貌

Fig. 9 Surface morphology of textured crater with peak current of 185 A. (a) three-dimensional microscope photo of textured surface; (b) 3D scanning map of textured crater

通过计算 4 种电流参数下平均电弧压力的比值为 1:1.15:1.26:1.57, 可见电弧压力随着峰值电流的升高而增大。因此随着峰值电流的升高, 毛化表面起伏加剧。毛化坑突起的高度随电流升高而增大, 毛化坑凹陷的深度逐渐变浅。同时毛化坑直径也随电流的增大而增大。毛化坑直径、突起高度和凹陷深度的综合作用导致毛化表面  $SR_a$  随着电流的升高而增大。

图 10 给出了 185 A 峰值电流的毛化坑横截面照片。毛化坑的熔凝组织大致可以分成两部分: 由熔凝组织形成的凸起和下面较薄的固态相变组织。沿最高凸起处向基体方向测量了毛化坑显微组织的硬度, 测量结果如图 11 所示。毛化坑凸起的显微硬度达到了 1000 HV, 毛化坑凸起底部的硬化深度达到了 20  $\mu\text{m}$ 。

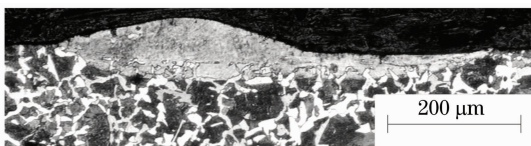


图 10 185 A 峰值电流的毛化坑横截面照片

Fig. 10 Cross-section photo of textured crater with a peak current of 185 A

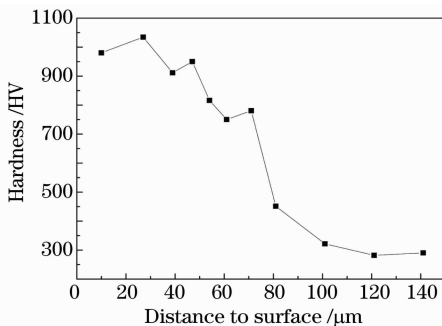


图 11 毛化坑显微组织硬度

Fig. 11 Hardness of microstructures of textured crater

毛化坑的凸起在轧制过程中会复制到板材表面, 在板材表面形成有利于摩擦性能的凹坑, 因此毛化坑凸起的高度、硬度和凸起底部的强化深度是决定毛化质量的关键指标。利用 LGD 方法得到的毛化坑凸起高度达到了 38.9  $\mu\text{m}$  以上, 同时具有高达 1000 HV 的显微硬度。凸起底部的强化深度达到 20  $\mu\text{m}$  左右, 能够保证毛化表面的使用寿命。

## 4 LGD 表面强化

### 4.1 实验装置和方法

实验装置如图 2 所示。平板试样材料为 45<sup>#</sup> 钢, 正极性, 表面涂机油, 接地。针状电极材料为钨合金, 垂直平板试样。激光与平板试样成一定夹角实施诱导, 参数与机理和表面毛化相同。在相似的脉冲宽度下, 比较了 4 种峰值电流下 (50, 100, 150 和 200 A) 强化点横截面形貌的变化, 包括强化点直径、强化深度和径深比。放电电压和放电电流波形如图 8 所示。

### 4.2 实验结果分析

图 12 给出了不同电流下的强化点横截面形貌, 发现随着峰值电流的升高, 强化点直径曲线的间隔大致相同, 成线性增大关系, 而强化层深度的增加速度随电流升高而变慢。观察 50, 100 和 150 A 3 条曲线。在长脉冲宽度放电阶段, 例如 8~10 ms 之间, 不同电流下的放电点径深比接近一致。此时高电流的强化点具有大直径和深的强化深度, 而低电流下的强化点则具有小直径和浅的强化深度。在短脉冲宽度放电阶段, 例如小于 3 ms, 不同电流下放电点的强化深度基本相同。高电流下的放电点具有大直径和高的深径比, 反之低电流下放电点具有小直径和低的深径比。200 A 下的径深比曲线和另外 3 条曲线略有不同。随着脉冲宽度的增大, 曲线下

降速度变慢。在脉冲宽度大于 4 ms 的放电阶段，放电点的径深比大于另外 3 条曲线。这是因为随着电流峰值的升高，放电过程中的气化现象更加明显，导致能量利用率的下降。这导致了 200 A 的径深比曲线与其他 3 条电流曲线的不同。

显微组织硬度显示在图 14 中。从组织形态上来看，强化层可分为熔凝层和固态相变层两层。在表面下 260 μm 以内为熔凝层，显微组织的平均硬度接近 1000 HV。在 260~400 μm 之间为固态相变区，随着距离的增加硬度从 800 HV 快速下降到基体硬度 260 HV。

图 13 给出了一个强化点横截面照片。强化点

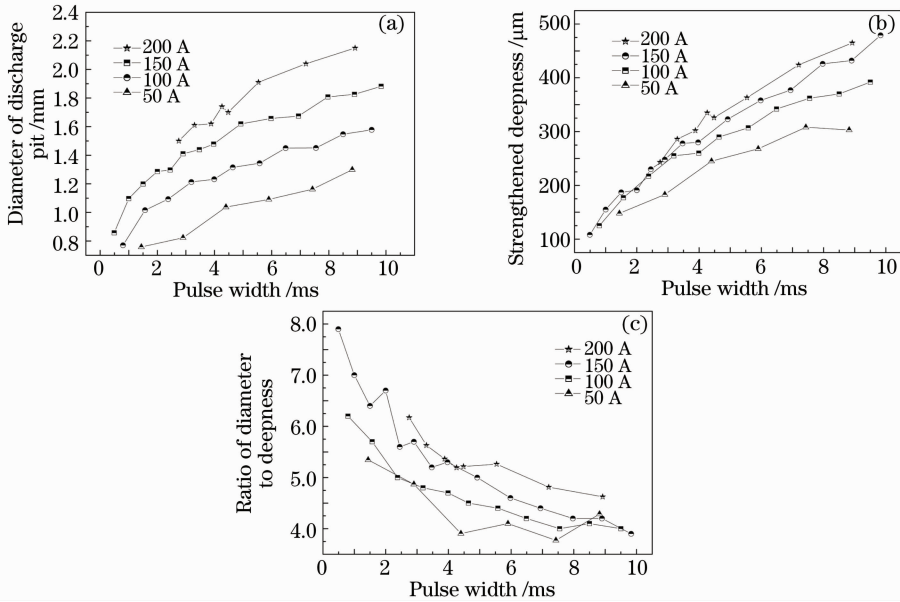


图 12 不同峰值电流的放电点横截面照片。(a)直径;(b)强化深度;(c)径深比

Fig. 12 Cross-section shape of strengthened areas with different peak currents. (a) diameter; (b) strengthened deepness; (c) ratio of diameter to deepness

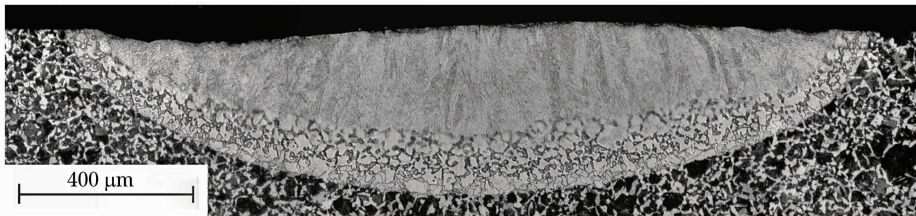


图 13 强化点横截面形貌(峰值电流 100 A,脉冲宽度 8.5 ms)

Fig. 13 Cross section shape of strengthened area (100 A peak current, 8.5 ms pulse width )

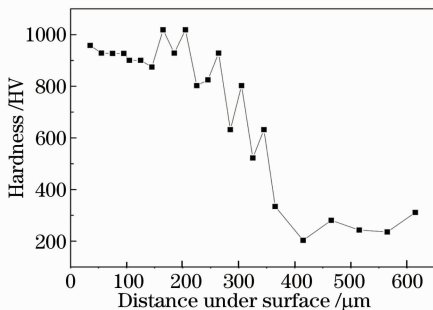


图 14 强化点显微组织硬度(峰值电流 100 A, 脉冲宽度 8.5 ms)

Fig. 14 Hardness of microstructures of strengthened area (100 A peak current, 8.5 ms pulse width )

### 5 结 论

研究了表面离散处理中激光诱导抑制放电随机性的现象和机理,和 LGD 材料表面毛化和表面强化的加工方法,得出:

1) 在机理研究中发现激光诱导从两方面抑制了放电的随机性:首先,在大尺度上(放电点间隔)放电点和激光焦点重合,抑制了放电点位置的随机分布,对放电点位置实现了设定;其次,在小尺度上(放电点内部)激光诱导抑制了放电斑点的随机移动,避免了放电点显微组织的重复熔凝现象,提高了能量利用率,增大了强化深度,保证了放电点横截面形貌

的一致性。

2) 在 LGD 表面毛化研究中,重点分析毛化坑的表面形貌特征。发现激光垂直诱导、倾斜放电时,利用电弧压力可以将熔凝物吹起,对材料表面进行造型。随着峰值电流从 132 A 增大到 185 A, LGD 毛化坑的凸起高度从 38.9  $\mu\text{m}$  增大到 51.9  $\mu\text{m}$ ,毛化表面的 SRa 从 6.03  $\mu\text{m}$  增大到 8.46  $\mu\text{m}$ 。凸起的硬度达到 1000 HV,凸起底部的强化深度达到 20  $\mu\text{m}$ ,能够保证毛化表面的使用寿命。

3) 在 LGD 表面强化研究中,重点分析强化点的横截面形貌特征。发现在峰值电流 50~150 A 范围内在长脉冲宽度放电阶段(8~10 ms),强化点的径深比基本相同,而高电流下强化点直径更大,强化层更深,低电流则相反。在短脉冲宽度放电阶段(小于 3 ms),强化层深度基本相同,高电流可以获得大直径的强化点,而低电流则相反。当峰值电流提高到 200 A 时,由于气化过程的加剧,造成能量利用率下降,在长脉冲放电阶段(大于 4 ms)径深比增大。

### 参 考 文 献

- 1 D. W. Koopman, K. A. Saum. Formation and guiding of high-velocity electrical streamers by laser-induced ionization[J]. *J. Appl. Phys.*, 1973, **44**(12): 5328~5336
- 2 Y. Hoshi, H. Yoshida, Kazushi Yamanaka *et al.*. Time delay in laser-guided discharge at low air pressure[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1996, **24**(3): 1137~1146
- 3 Bruno La Fontaine, Francois Vidal, Daniel Comtois *et al.*. The influence of electron density on the formation of streamers in electrical discharges triggered with ultrashort laser pulses[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1999, **27**(3): 688~700
- 4 T. Shindo, Y. Aihara, M. Miki *et al.*. Model experiments of laser-triggered lightning [J]. *IEEE Trans. Power Delivery*, 1993, **8**(1): 341~347
- 5 Alain Desparois, Bruno La Fontaine, Anne Bondiou-Clergerie *et al.*. Study of laser-induced breakdown in a 30 cm air gap under a uniform field[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2000, **28**(5): 1755~1762
- 6 François Vidal, Daniel Comtois, Ching-Yuan Chien *et al.*. Modeling the triggering of streamers in air by ultrashort laser pulses[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2000, **28**(2): 418~433
- 7 S. Tzortzakis, B. Prade, M. Franco *et al.*. Femtosecond laser-guided electric discharge in air[J]. *Phys Rev. E*, 2001, **64**(10): 057401
- 8 Bruno La Fontaine, Daniel Comtois. Guiding large-scale spark discharges with ultrashort pulse laser filaments[J]. *J. Appl. Phys.*, 2000, **88**(7): 610~615
- 9 R. M. Gilgenbach, O. E. Ulrich, L. D. Horton. Localized metallic melting and hole boring by laser guided discharges[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1983, **54**(10): 109~113
- 10 Y. Hoshi, H. Yoshida. Application of laser-guided discharge to processing[J]. *Appl. Phys. A-Mater.*, 1999, **68**(8): 93~98
- 11 Y. Hoshi, H. Yoshida, Y. Tsutsui. Electric discharge image marking using laser guided discharge[J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2000, **28**(5): 1771~1774
- 12 Wang Zhitong. Study on the Mechanism of Laser-Guided Discharge and Complex Texturing [D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2002  
王之桐. 激光诱导放电复合毛化机理和技术研究[D]. 北京:中国科学院力学研究所, 2002
- 13 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 Trans. Plasma Sci.*, 2008, **36**(5): 2816~2819
- 14 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. 激光诱导微弧放电对 45# 钢的表面强化[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2178~2181
- 15 Dang Gang, Yu Gang. Intensity distribution design of two-dimensional spot-array for pulsed laser transformation hardening [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 287~290  
党 刚, 虞 钢. 脉冲激光相变硬化中的二维点阵光强分布设计 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 287~290
- 16 Zhao Yafan, Chen Chuanzhong. 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
- 17 S. Ujihara, T. Hisatsune, Y. Hishida. Application of laser-textured steel sheets for autobody panels [J]. *Iron and Steel Engineer*, 1991, **68**(8): 52~56
- 18 Jiang Huanzhong. Arc Welding & Electroslag Welding [M]. Beijing: China Machine Press, 1988  
姜焕中. 电弧焊及电渣焊[M]. 北京:机械工业出版社, 1988