

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0332-03

# 高重频 YAG 激光诱导放电毛化坑形貌研究

李正阳, 杨明江

(中国科学院力学研究所, 激光毛化中心, 北京 100080)

**摘要** 利用高重频 YAG 激光作用在固体表面所产生的等离子体使工件和电极之间在大气环境中, 并且电压远低于击穿阈值的条件下产生可控定向放电, 放电坑在工件表面形成一定的坑形分布, 实现毛化加工。放电坑既有单坑结构, 也有多坑结构, 其形貌受到放电波形、电源极性、放电介质等因素的影响。研究了碳钢、铸铁、黄铜等材料的放电坑直径与电源参数的关系。

**关键词** 激光技术; 表面形貌; 放电; 毛化

中图分类号 TG665

文献标识码 A

## Investigation on Crater Morphology by High Repetitive Rate YAG Laser-Induced Discharge Texturing

LI Zheng-yang, YANG Ming-jiang

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

**Abstract** When a high repetitive rate YAG laser pulse acts on a metal surface used as one of two electrodes, a plasma plume is produced, and a discharge occurs between the electrodes at a voltage far below breakdown threshold. So the discharge is controlled by the laser pulse. The metal surface is textured by a distribution of discharge craters. It is shown that the shape of discharge craters is determined by current waveform, electrical polarity and medium between electrodes. The relationship between diameter of craters and parameters of power supplier are investigated, especially for the three electrode materials, such as steel, iron and brass.

**Key words** laser technique; surface morphology; discharge; texturing

### 1 引言

用高重频 YAG 激光对材料表面进行毛化处理, 通常可以得到几微米深的微坑和二十几微米深的相变层<sup>[1]</sup>, 并且已经在冷轧薄板生产中实现了工业应用。但是, 热轧辊等重载磨损部件需要强化层深度需达到 200  $\mu\text{m}$  以上, 这单靠激光毛化技术是难以解决的。为此, 力学所杨明江研究员提出用高重频 YAG 激光诱导放电来进行毛化, 其基本原理是: 激光作用在固体表面产生的等离子体使工件和电极之间在电压远低于击穿阈值的条件下产生放电 (图 1), 放电的截止由电源的开关器件控制, 每个脉冲激光诱导一次放电, 脉冲激光的持续作用使工件表面形成一系列放电坑, 总体上形成一种表面坑形分布。这种表面坑形分布是造型强化和组织强化的有机结合, 是一种新的材料表面加工技术。本文将着重研

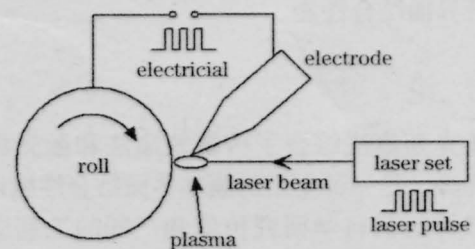


图 1 激光诱导毛化放电原理

Fig.1 Principle of laser-induced discharge texturing  
究放电坑的形貌和直径变化的规律。

### 2 实验条件

实验的工件是小型实验用轧辊, 工件表面有时涂一层很薄的机油, 有时则不涂油, 而工具电极始终处在大气中。工具电极的形状为顶角  $20^\circ \sim 40^\circ$  的圆锥形。工件总是接地, 工具电极有时接电源的正

基金项目: 国家自然科学基金(60278023)资助项目。

作者简介: 李正阳(1963-), 男, 中科院力学所博士研究生, 主要从事激光毛化、气体放电与等离子体方面的研究。

Email: alxzyli@cei.gov.cn

极,有时接电源的负极。电极间隙为 200~300 μm。激光器的功率为 150 W,用声光 Q 开关获得激光脉冲。工件电极材料分别为 45# 钢、球墨铸铁和青铜。放电波形为三角波和矩形波,放电能量均为 1 J。

### 3 实验结果

#### 3.1 放电坑典型形貌

以碳钢为例(图 2~4),放电坑的形貌特征和规律是:1)除了涂油时的阳极放电坑是单坑结构以外,其他条件下的放电坑都是复合多坑结构;2)在大气中,工件为阴极时,放电坑周围总有一个“环”,坑与环之间没有明确的边界;3)波形对于形成单坑或多坑结构基本没有影响。

一般认为,阴极放电坑中的若干小坑是由快速

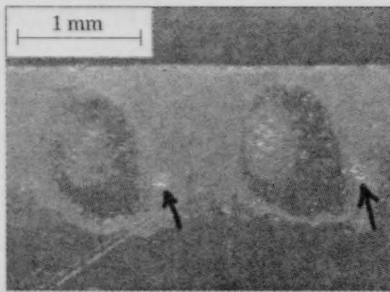


图 2 坑形 1: 大气阴极矩形波

Fig.2 Crater morphology 1: Air, cathode and rectangular waveform

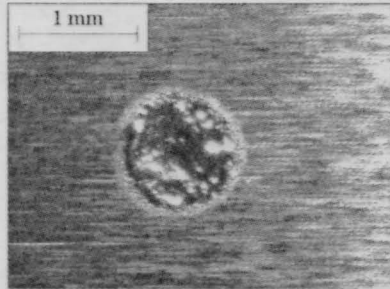


图 3 坑形 2: 涂油阴极矩形波

Fig.3 Crater morphology 2: Oil film, cathode and rectangular waveform

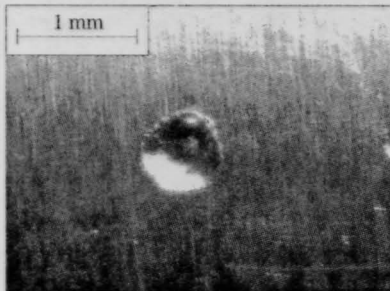


图 4 坑形 3: 涂油阳极三角波

Fig.4 Crater morphology 3: Oil film, anode and triangular waveform

移动的阴极斑点造成的,而阳极的多坑结构是由分割脉冲造成的<sup>[2]</sup>,其本质是等离子体的振荡<sup>[3,4]</sup>。但是,对于激光诱导放电,当激光照射工件产生等离子体时,电极与工件之间充满了种子电子,流注可以在等离子体膨胀范围内的许多点同时或先后发展,这就大大增加了各点形成放电通道的机会。因此,阳极的多坑结构,可以认为是多通道放电的结果。当阳极涂油时,只有那些沿激光照射形成的通道发展的流注才有可能最终形成放电通道,油膜限制了多通道的发展。

#### 3.2 放电坑直径的实验规律

为了深入了解放电坑直径的变化规律,使三角波的脉宽不变,只改变电流峰值;对于矩形波,则使电流峰值不变,只改变脉宽。在显微镜下观察放电坑,通过图像分析软件测得放电坑的等效直径。

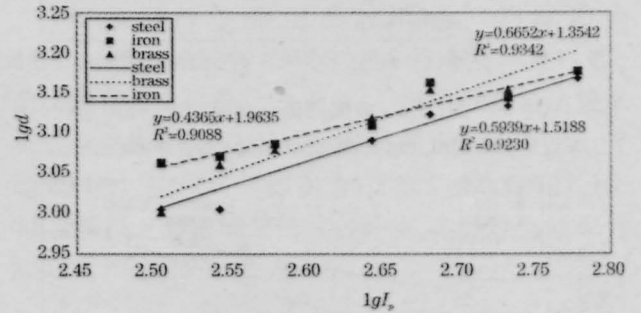


图 5 大气阳极三角波

Fig.5 Air, anode and triangular waveform

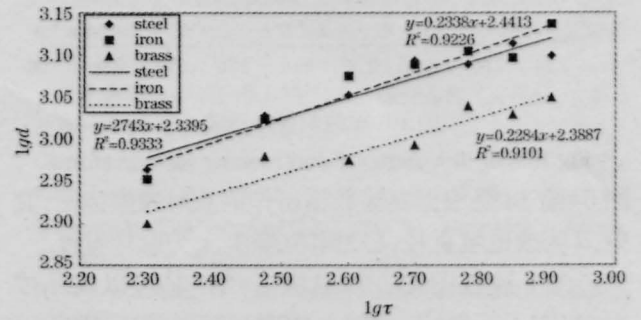


图 6 大气阳极矩形波

Fig.6 Air, anode and rectangular waveform

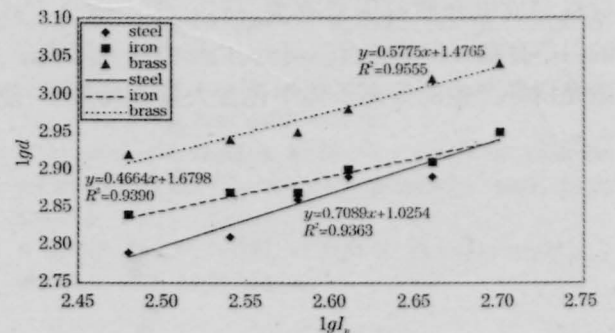


图 7 涂油阳极三角波

Fig.7 Oil film, anode and triangular waveform

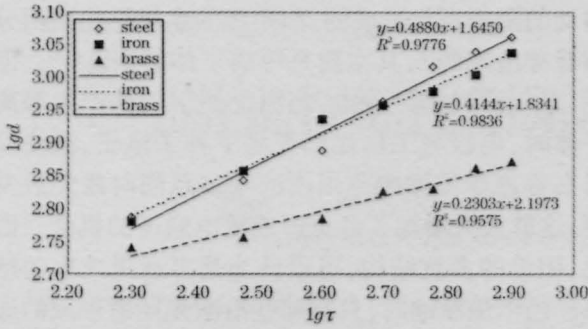


图8 涂油阳极矩形波

Fig.8 Air, anode and rectangular waveform

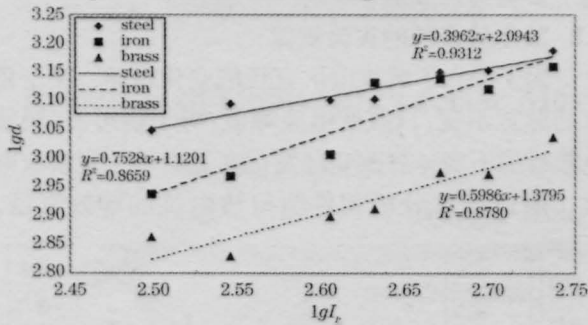


图9 涂油阴极三角波

Fig.9 Oil film, cathode and triangular waveform

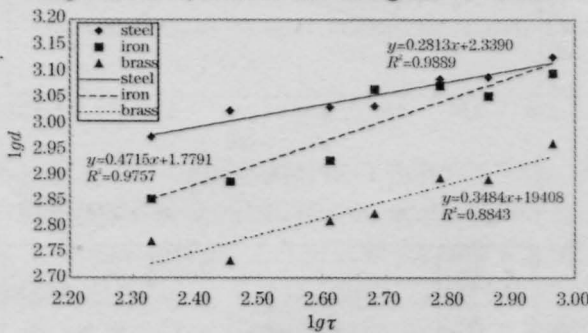


图10 涂油阴极矩形波

Fig.10 Oil film, cathode and rectangular waveform

图5~图10是根据实验数据所作的双对数坐标图,其中, $d$ 为放电坑直径, $I_p$ 为电流峰值, $\tau$ 为脉冲宽度。

由上述各图知,放电坑直径 $d$ 总可以表示成 $d \propto I_p^\alpha$ (对于三角波),或 $d \propto \tau^\beta$ (对于矩形波)。当然,放电坑直径并不仅仅取决于电源的参数,它还与电极材料和放电介质等因素有关,所以,图中拟合直线的斜率存在一定的差异。另外,由于电极间隙很小,激光诱导产生的等离子体中包含大量金属离子,使

得放电通道的电导率与电极材料、放电介质密切相关,根据 Braginskii 的理论<sup>[6]</sup>,电导率对放电通道的半径是有影响的,这在一定程度上也会影响到放电坑的直径。

### 4 结 论

1) 除了涂油时的阳极放电坑是单坑结构以外,其他条件下的放电坑都是复合多坑结构;放电波形对于形成单坑或多坑结构基本没有影响。

2) 形成多坑结构的机理是等离子体振荡和多通道放电。

3) 对于碳钢、铸铁、黄铜三种材料,放电坑直径 $d$ 与电源参数的关系可以表示成 $d \propto I_p^\alpha$ (对于三角波),或 $d \propto \tau^\beta$ (对于矩形波)。 $\alpha$ 的范围在0.40~0.71, $\beta$ 的范围在0.23~0.47。

### 参 考 文 献

- 1 Guan Zhenzhong. Technical Handbook of Laser Processing[M]. Beijing: China Metrology Press, 1998. 338  
关振中主编. 激光加工工艺手册[M]. 北京: 中国计量出版社, 1998, 338
- 2 Pan Yongjiang, Hu Chuanjin. Investigation of multi-pit erosion phenomenon by a rectangular pulse discharge[C]. *Proceedings of Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences, Edited by Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences*, 1988(15), Beijing, 96~105  
潘永江, 胡传锦. 矩形单脉冲放电时多凹坑蚀除现象的研究[C]. 中国科学院电工所论文报告集, 1988(15), 北京, 96~105
- 3 Qi Liwei, Lou Leming, Li Minghui. Mechanism of electrical discharge machining and wave characteristics of plasma channel[J]. *J. Shanghai Jiaotong University*, 2001, 35(7):989~992, 997  
亓利伟, 楼乐明, 李明辉. 放电通道的波动性与电火花加工机理[J]. 上海交通大学学报, 2001, 35(7):989~992, 997
- 4 Yu Xuewen, Huang Difei, Jin Yuhui. Discussion in discharge channel of electrical discharge machining [J]. *Electrical Discharge Machining*, 1984,(2):8~13  
于学文, 黄涤非, 金玉惠. 电火花加工放电通道的探讨[J]. 电加工, 1984,(2):8~13
- 5 J. M. Meek, J. D. Craggs. *Electrical Breakdown of Gases*[M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1978.810