

# 旋转电极电火花沉积/堆焊的放电机理

韩红彪, 郭敬迪, 焦文清  
(河南科技大学, 洛阳 471003)

**摘要:** 为了研究旋转电极电火花沉积/堆焊的放电机理, 文中进行单点间隙放电、单点接触放电和旋转电极连续放电试验, 对放电过程中两极之间的电压和电流波形进行了采集和分析。结果表明, 在一定的电压和间隙条件下, 电极与基体之间的介质能够被击穿出现间隙放电现象。接触放电现象主要包括短路放电和间隙放电两个阶段。旋转电极沉积/堆焊过程中电极与基体的接触状态复杂多变, 放电过程中既存在非接触放电现象, 也存在接触放电和短路放电现象, 其中大部分是接触放电现象。

**关键词:** 旋转电极; 电火花沉积; 接触放电; 间隙放电

中图分类号: TG 456 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.2019400129

## 0 序 言

机械制造正朝着绿色化、智能化和服务化方向发展, 而电火花沉积/堆焊技术是绿色再制造业中一种重要的表面工程技术, 可在基体材料表面上沉积和堆焊特种材料, 能提高基体的硬度、耐磨性、耐热性、耐腐蚀性、疲劳强度和使用寿命等, 还可对精密机械零部件表面的划痕、点蚀、超差等缺陷进行修复<sup>[1-4]</sup>。

国内外学者将电火花沉积/堆焊放电机理分为两种, 即非接触放电和接触放电<sup>[5-10]</sup>。在微细电火花沉积加工过程中主要是非接触放电<sup>[11]</sup>。在旋转电极电火花沉积/堆焊过程中, 电源以连续的脉冲输出, 电极与基体之间在宏观上看是线接触, 在微观上看是微凸峰接触; 由于电极进行旋转运动, 电极与基体之间存在振动, 所以电极与基体之间可能既有接触放电, 还有非接触放电等, 导致其放电机理比较复杂<sup>[12-13]</sup>。电火花沉积/堆焊的放电机理直接影响电极材料的过渡和沉积/堆焊层的质量等, 所以值得深入研究。文中通过试验对放电过程中两极之间的电压、电流波形进行分析, 来研究旋转电极电火花沉积/堆焊的放电机理。

## 1 试验方法

试验方案如图 1 所示, 将电火花沉积堆焊电源的输出连接固定电极(或旋转电极)和基体, 分别进行单点间隙放电试验、单点接触放电试验、旋转电极连续放电试验。电极与基体之间的电压信号接到示波器的通道 1, 电流传感器输出的电压信号接到示波器的通道 2。在不同试验条件下, 电极与基体之间放电脉冲的电压和电流可被示波器检测并存储, 便于进行分析。

电源采用 HMT-09 电火花堆焊修复机, 该电源采用斩波开关技术, 其电阻负载的输出波形如图 2 所示。脉冲电压  $U = 20 \sim 100$  V, 脉冲时间  $t_p = 30 \sim 300 \mu\text{s}$ , 脉冲频率  $f = 50 \sim 500$  Hz。电极材料为直径 3 mm 的 45 钢棒, 基体材料为 20 mm × 20 mm × 3 mm 的 45 钢板, 采用氩气作为保护气体。试验前对电极端部和基体表面依次用 400, 800, 1000 号砂纸进行打磨, 并用丙酮清洗干净。试验后, 对基体上的放电弧坑用体视显微镜进行观察检测。

单点间隙放电试验方案如图 1a 所示, 电极尖端锥角为 30°, 锥角端部直径为 0.2 mm。为了便于对不同试验方案的脉冲波形进行对比, 同时考虑示波器的采样频率和采样周期的数据点数, 选择电火花电源的脉冲频率  $f = 200$  Hz, 脉冲时间  $t_p = 86.5 \mu\text{s}$ , 氩气流量为  $Q = 10 \text{ L/min}$ , 在不同间隙  $d$  的情况下, 逐渐增大脉冲电压  $U$  进行单点间隙放电试验, 发现放电间隙随相应的最小放电电压的变化规律, 分析

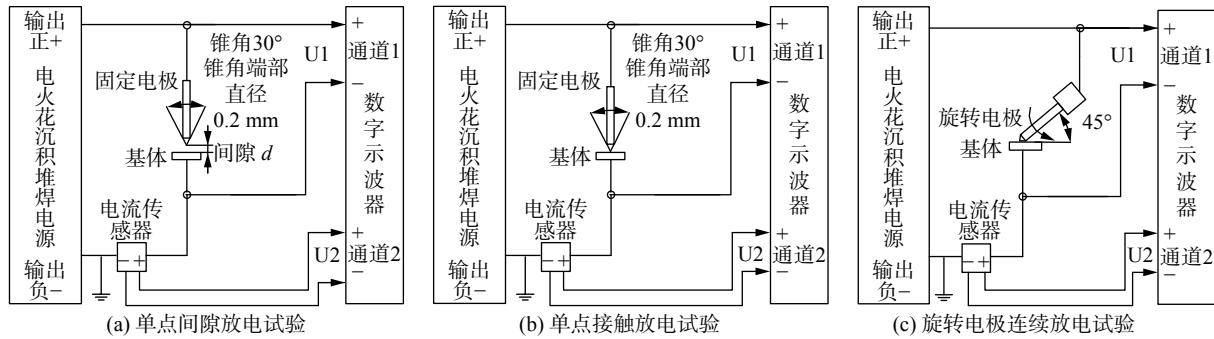
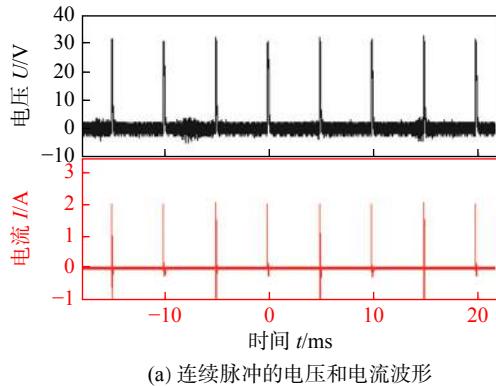
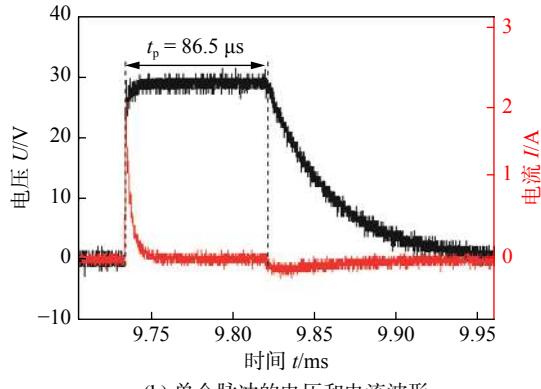


图 1 试验方案

Fig. 1 Schematic diagram of test



(a) 连续脉冲的电压和电流波形



(b) 单个脉冲的电压和电流波形

图 2 电源的电阻负载的输出波形图 (负载电阻  $R = 10 \Omega$ ,  $U = 30 V$ ,  $f = 200 Hz$ ,  $t_p = 86.5 \mu s$ )

Fig. 2 Output waveform of power source with ohmic load

间隙放电时电压和电流波形的特征。

单点接触放电试验方案如图 1b 所示。采用与单点间隙放电试验相同端部尺寸的电极, 脉冲电压  $U=30 V$ , 脉冲频率  $f=200 Hz$ , 脉冲时间  $t_p=86.5 \mu s$ , 氩气流量为  $Q=10 L/min$ , 在电极自身重力作用下使电极端部与基体轻微接触, 然后固定好电极进行单点接触放电试验, 分析接触放电时电压和电流波形的特征。

旋转电极连续放电试验方案如图 1c 所示。采用与单点接触放电试验相同的放电脉冲参数, 电极

转速  $n=200 r/min$ , 电极移动速度  $v=2.5 mm/s$ , 旋转电极与基体呈  $45^\circ$  情况下进行旋转电极连续放电试验, 分析连续放电时电压和电流的波形。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 单点间隙放电试验结果与分析

#### 2.1.1 单点间隙放电试验结果

单点间隙放电脉冲的电压和电流波形与基体上放电弧坑如图 3 所示。在  $t_1$  时刻前, 电极与基体之间的电压  $U$  达到  $30 V$ , 但电流  $I$  一直为零, 说明电极与基体之间间隙尚未被击穿, 可认为该阶段是充电阶段。在  $t_1$  时刻, 电压发生了陡降, 而电流也发生了陡升, 达到了  $15 kA$  左右, 随后电流又迅速下降。这说明电极与基体之间间隙内的氩气介质在  $t_1$  时刻被击穿形成放电通道, 高温高压的离子气体极速扩展而产生爆炸冲击波, 放电通道两端的材料也被迅速熔化和汽化, 并随着爆炸而抛出, 形成了火花放电现象<sup>[1]</sup>。在  $t_2$  时刻电源输出电路上储存的电量被释放完, 火花放电结束, 电极与基体之间重新为开路状态。在  $t_2$  和  $t_3$  时刻之间, 电压和电流逐渐恢复到零, 已电离的气体也会逐渐恢复为中性, 为极间介质的消电离阶段(图 3a)。

单点间隙放电后基体上的放电弧坑如图 3b 所示, 火花放电在基体上形成的熔化弧坑的直径约  $150 \mu m$ , 则可推测放电通道的电流密度可达到  $8.5 \times 10^7 A/cm^2$ 。熔化弧坑的周围是翻边凸起, 基体上有少量的飞溅颗粒, 爆炸所产生的离子气体溅射区的直径约  $1100 \mu m$ 。

单点间隙放电的主要特征是放电前电极与基体是开路状态, 电压达到电源脉冲电压的额定值; 当发生间隙放电时, 电源输出脉冲已经关闭(即放

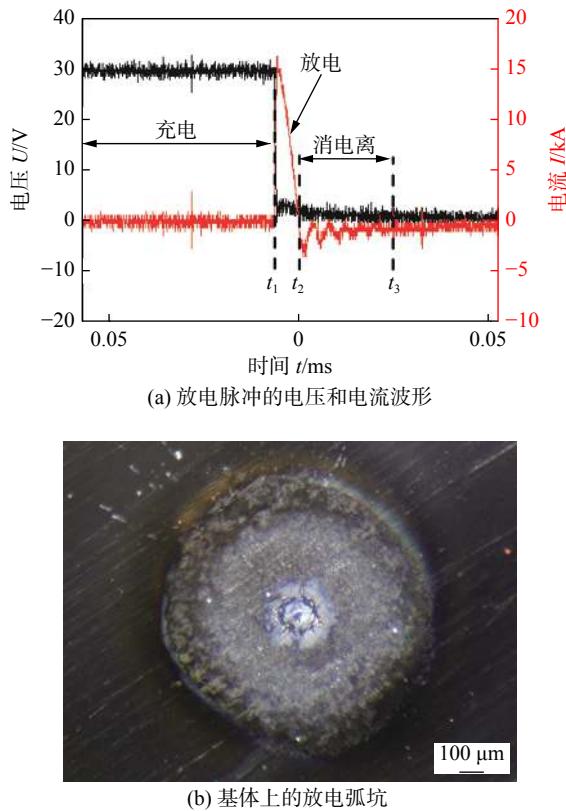


图 3 单点间隙放电的电压和电流波形与基体上的放电弧坑 ( $d = 1.25 \mu\text{m}$ ,  $U = 30 \text{ V}$ ,  $f = 200 \text{ Hz}$ ,  $t_p = 86.5 \mu\text{s}$ )

Fig. 3 Waveform of voltage and current in single point gap discharge and crater picture on substrate

电容的输出开关管已经关闭), 电极和基体两极电路中储存的电量较少, 所以其放电脉冲时间很短, 只有短短的几个微秒。

#### 2.1.2 不同间隙下的单点放电试验

依次改变电极与基体之间的间隙进行单点间隙放电试验, 获得氩气环境下放电间隙随最小放电电压变化的曲线如图 4 所示。

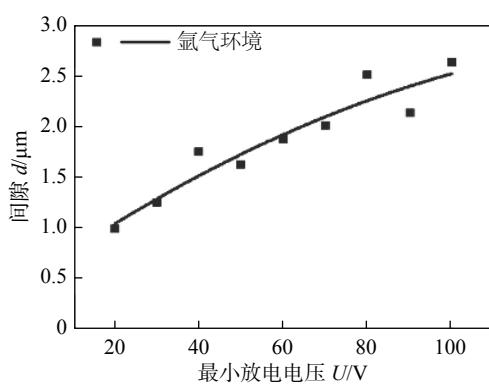


图 4 放电间隙随最小放电电压变化的曲线

Fig. 4 Variations of discharge gap along with minimum discharge voltage

一定条件下临界放电间隙的经验公式<sup>[14]</sup>为

$$S = K_U U + K_R W_M^{0.4} + S_m \quad (1)$$

式中:  $S$  为临界放电间隙 ( $\mu\text{m}$ );  $U$  为放电电压 (V);  $K_U$  为与工作介质介电强度有关常数, 氩气的  $K_U$  为 1.000 56;  $K_R$  为常数, 与加工材料有关, 铁的  $K_R = 2.5 \times 10^2$ ;  $W_M$  为单个脉冲能量 (J);  $S_m$  为考虑到热膨胀、收缩、振动等影响的机械间隙 ( $\mu\text{m}$ ). 从式 (1) 可以看出,  $K_U, K_R$  为正的常数, 放电电压  $U$  增大, 单个脉冲放电能量  $W_M$  增大, 临界放电间隙  $S$  也随放电电压  $U$  的增加而增加. 这与图 4 所示的变化规律相一致.

#### 2.2 单点接触放电试验结果与分析

单点接触放电的电压和电流波形与基体上放电弧坑如图 5 所示. 在  $t_1$  时刻电源输出脉冲, 由于电极端部与基体接触在一起而发生短路, 所以在  $t_1$  时刻与  $t_2$  时刻之间的电压较低而电流较大, 为短路放电阶段. 该阶段平均电压  $\bar{U} = 3 \text{ V}$ , 平均电流  $\bar{I} = 13.6 \text{ kA}$ , 接触区的电流密度可达  $4.3 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ , 在极短时间内和微小接触区产生的焦耳-楞次热使接触区的材料迅速熔化. 在  $t_2$  时刻, 接触区熔融的金属被瞬时汽化, 在较大的压力作用下形成爆炸, 将熔融的材料快速抛出形成火花; 电极与基体之间

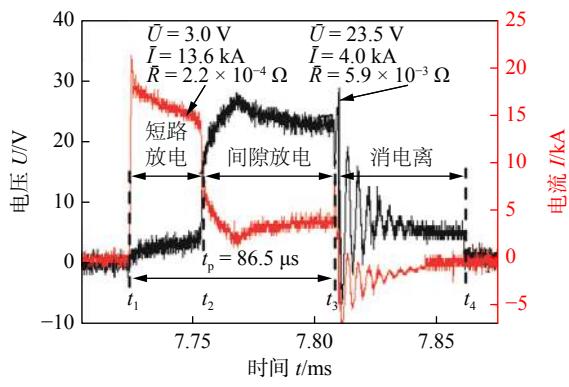


图 5 单点接触放电的电压和电流波形与基体上的放电弧坑 ( $U = 30 \text{ V}$ ,  $f = 200 \text{ Hz}$ ,  $t_p = 86.5 \mu\text{s}$ )

Fig. 5 Waveform of voltage and current in single point contact discharge and crater picture on substrate

出现间隙, 电压迅速升高到 24 V 左右, 而电流则迅速下降, 其中熔化的金属飞溅、金属蒸气和电离的气体等形成放电通道而产生微弧放电, 从而进入到间隙放电阶段; 该阶段平均电压  $\bar{U} = 23.5$  V, 平均电流  $\bar{I} = 4.0$  kA。在  $t_3$  时刻, 电源停止脉冲输出, 间隙放电结束, 放电过程进入到消电离阶段。在  $t_4$  时刻, 电压和电流都逐渐趋近于零, 消电离结束, 为下一次放电做好准备(图 5a)。

单点接触放电后基体上的放电弧坑如图 5b 所示, 火花放电在基体上形成的熔化弧坑的直径约 300  $\mu\text{m}$ , 熔化弧坑的周围有明显的呈溅射状的翻边凸起, 爆炸所产生的离子气体溅射区的直径约 1 400  $\mu\text{m}$ 。由于放电时间长, 单点接触放电所产生的火花爆炸要明显比单点间隙放电时强烈, 声音较大, 产生的金属飞溅也较多。

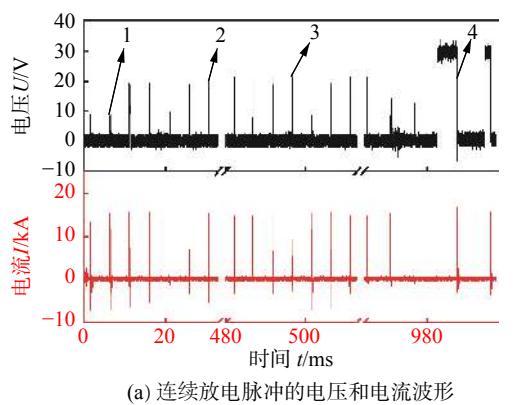
单点接触放电的主要特征是放电过程由短

路放电和间隙放电组成, 两者之和等于脉冲时间。在短路放电阶段电阻很小(平均电阻  $\bar{R} = 2.2 \times 10^{-4} \Omega$ ), 在间隙放电阶段电弧电阻较大(平均电阻  $\bar{R} = 5.9 \times 10^{-3} \Omega$ ), 所以电压在短路放电阶段较小而在间隙放电阶段较大, 电流在短路放电阶段较大而在间隙放电阶段较小, 电压和电流波形出现了明显的翻转。

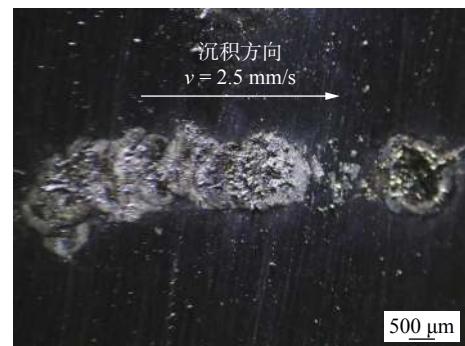
## 2.3 旋转电极连续放电试验结果与分析

### 2.3.1 旋转电极连续放电试验结果

连续放电的电压和电流波形和基体上的沉积层如图 6 所示, 电压波形有高有低, 电流波形大部分较高, 但也有较低的波形; 基体上的沉积层是由许多电弧坑相互叠加而形成的, 弧坑明显比较大, 形状不规则, 而且飞溅颗粒较多。从总体上看还无法分清楚旋转电极连续放电的放电机理, 需要下面进一步进行分析和研究。



(a) 连续放电脉冲的电压和电流波形



(b) 基体上的沉积层

图 6 旋转电极连续放电的电压和电流波形与基体上的沉积层 ( $U = 30$  V,  $f = 200$  Hz,  $t_p = 86.5$  μs)

Fig. 6 Waveform of voltage and current in continuous discharge with rotary electrode and deposition layer on substrate

### 2.3.2 旋转电极连续放电接触状态分析

在单点间隙放电和单点接触放电试验中由电极端部的单点对基体平面进行放电, 而在旋转电极连续放电试验时, 电极与基体的接触状态如图 7 所示, 呈线状微凸峰接触, 同时电极旋转并对基体有向下的接触力  $F$ , 接触微凸峰的位置在不断变化, 接触点的接触状态和间隙在脉冲放电过程中也会不断变化。所以, 在连续脉冲输出和微凸峰接触动态变化情况下, 接触和放电情况比较复杂, 沉积过程中可能既有接触放电, 也有间隙放电等情况。由于脉冲连续输出而电极移动速度相对较慢, 在一个放电弧坑内将发生多点、多次的火花放电。

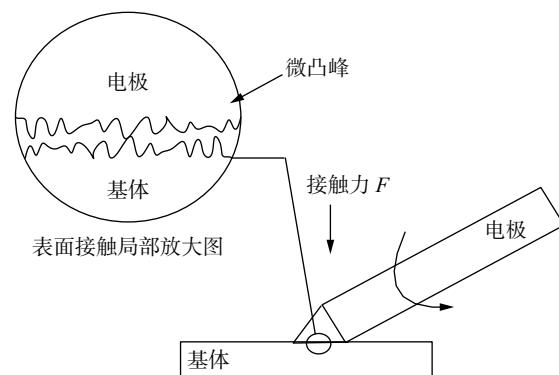


图 7 旋转电极连续放电的接触模型

Fig. 7 Contact model of continuous discharge with rotary electrode

### 2.3.3 旋转电极连续放电机理分析

对旋转电极连续放电过程中的众多放电脉冲

的电压和电流波形在时间轴上进行放大分析, 发现了四种典型的放电现象, 其电压和电流的波形如图 8 所示。

图 8a 所示的波形与图 5a 的波形变化相似, 都由短路放电和间隙放电两个阶段组成, 两个阶段中平均电阻也都相近, 所以属于接触放电现象。图 8b

所示的整个放电脉冲周期中的电压与电流的变化及大小与图 8a 中短路放电阶段相类似, 平均电阻也很接近, 所以属于短路放电现象; 即在整个脉冲放电过程中一直处于短路状态, 并未出现间隙放电现象, 所以也不会出现有熔滴爆炸飞溅和弧光的电火花现象。

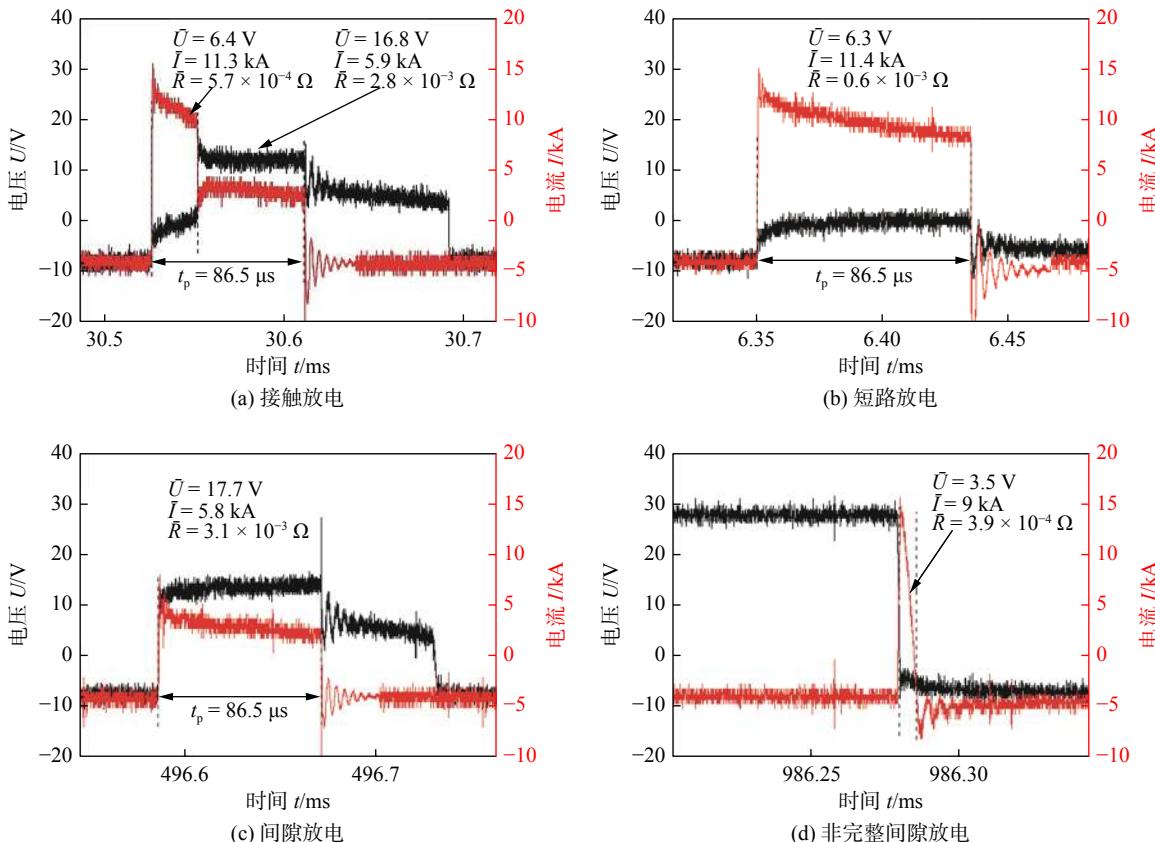


图 8 旋转电极连续放电过程中四种典型放电现象的电压和电流波形 ( $U = 30 \text{ V}$ ,  $f = 200 \text{ Hz}$ ,  $t_p = 86.5 \mu\text{s}$ ,  $v = 2.5 \text{ mm/s}$ )

Fig. 8 Four typical waveform of voltage and current in continuous discharge with rotary electrode

图 8c 所示的整个放电脉冲周期中的电压与电流的变化及大小与图 8a 中的间隙放电阶段相类似, 平均电阻也较接近, 所以属于间隙放电现象; 即电极与基体的微凸峰之间存在很小间隙, 放电脉冲刚输出时就将间隙击穿形成放电通道, 整个脉冲输出过程中都是间隙放电过程。

图 8d 所示的波形与图 3a 的波形变化相似, 属于间隙放电过程。但是其放电脉冲时间极短, 远小于脉冲时间, 放电前电压达到脉冲电压额定值, 说明间隙击穿时放电开关管已经关闭, 放电过程只是将两电极上的电量释放, 属于非完整间隙放电现象。

图 8a, b, c, d 分别是图 6a 中箭头 2, 1, 3, 4 所对应的放大的电压和电流波形。通过对众多放电脉

冲电压和电流波形的分析和统计发现: 与图 8a 类似的波形在图 6 中显示的峰值电压较大, 达到脉冲电压额定值的 60% 左右, 峰值电流也较大, 达到 15 kA 左右; 这种大电压大电流的波形占绝大多数, 说明旋转电极连续放电过程中主要是接触放电现象。与图 8b 类似的波形在图 6 中显示的峰值电压很小, 达到脉冲电压额定值的 20% 左右, 峰值电流也较大, 达到 15 kA 左右; 这种小电压大电流的波形出现较少, 一般在沉积开始阶段和接触力较大的时候才会出现这种短路放电现象。与图 8c 类似的波形在图 6 中显示的峰值电压较大, 达到脉冲电压额定值的 60% 左右, 而峰值电流较小, 达到 10 kA 左右; 这种大电压小电流的波形出现不多, 一般在连

续沉积阶段电极温度上升而发红的时候才会出现这种间隙放电现象。与图 8d 类似的波形在图 6 中显示的峰值电压达到脉冲电压额定值, 而峰值电流较大, 达到 15 kA 左右; 这种满电压大电流的波形出现很少, 一般在连续沉积结束阶段电极离开工件的时候才会出现这种非完整间隙放电现象。

由以上分析可以看出, 旋转电极沉积/堆焊过程中由于在电极和基体之间施加了持续的接触力, 所以其放电过程主要是接触放电现象, 也存在短路放电和间隙放电现象。在一定材料和电参数条件下, 如何控制接触力来控制接触放电过程中的金属飞溅和质量过渡是需要进一步研究的问题。

### 3 结 论

(1) 在一定的电压和间隙条件下, 电极与基体之间的介质能够被击穿出现间隙放电现象。

(2) 接触放电现象主要包括短路放电和间隙放电两个阶段。

(3) 旋转电极沉积/堆焊过程中电极与基体的接触状态复杂多变, 放电过程中既存在非接触放电(间隙放电)现象, 也存在接触放电和短路放电现象, 其中大部分是接触放电现象。

### 参考文献:

- [1] Staia M H, Fragiel A, Cruz M, et al. Characterization and wear behavior of pulsed electrode surfacing coatings[J]. Wear, 2001, 251(1): 1051 – 1060.
- [2] Hong X, Tan Y, Wang X, et al. Effects of nitrogen flux on microstructure and tribological properties of in-situ TiN coatings deposited on TC11 titanium alloy by electrospark deposition[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(10): 3329 – 3338.
- [3] 吴公一, 张占领, 孙凯伟, 等. TA2 表面电火花沉积 Zr/WC 复合涂层特性及界面行为研究 [J]. 表面技术, 2016, 45(1): 96 – 100.  
Wu Gongyi, Zhang Zhanling, Sun Kaiwei, et al. Coating characters and interface behavior between TA2 and Zr/WC coating produced by electro-spark deposition[J]. Surface Technology, 2016, 45(1): 96 – 100.
- [4] 韩红彪, 李向阳. 电容充放电脉冲数字控制型电火花沉积电源 [J]. 焊接学报, 2014, 35(3): 23 – 26.  
Han Hongbiao, Li Xiangyang. Digital control of capacitance charge-discharge pulse in electro-spark deposition power supply[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(3): 23 – 26.
- [5] Burkov A A, Pyachin S A. Formation of WC–Co coating by a novel technique of electrospar granules deposition[J]. Materials & Design, 2015, 80: 109 – 115.
- [6] 张留伟, 邵俊. 电火花沉积技术研究现状及发展趋势 [J]. 装备制造技术, 2017(8): 76 – 79.  
Zhang Liuwei, Shao Jun. Research status and development trend of electro-spark surface deposition technology[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2017(8): 76 – 79.
- [7] Jin Guo, Lu Bingwen, Hou Dingding, et al. Influence of rare earths addition on residual stress of Fe-based coating prepared by brush plating technology[J]. Journal of Rare Earths, 2016, 34(3): 336 – 340.
- [8] 方瑞. 超声冲击复合电火花处理改善材料性能的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2015.
- [9] Zhang Fuju, Ma Liqing, Zhang Guodong, et al. Interface behavior and microstructure transformation of welded joint of 35CrMo steel by electro-spark deposition[J]. China Welding, 2005, 14(1): 15 – 18.
- [10] Alexander V R, Orhan S. The use of bipolar current pulses in electrospark alloying of metal[J]. Surface and Coatings Technology, 2003(168): 129 – 135.
- [11] 彭子龙, 方东, 刘永红, 等. 微细放电沉积金属微结构增材制造工艺及装备 [J]. 电焊机, 2015, 45(10): 73 – 76.  
Peng Zilong, Fang Dong, Liu Yonghong, et al. Process and equipments design of micro metal structure additive manufacturing by micro electrical discharge deposition[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(10): 73 – 76.
- [12] Tang S K. The process fundamentals and parameters of electro-spark deposition[D]. Ontario, Canada: University of Waterloo, 2009.
- [13] 何鹏, 吴承东, 钱乙余, 等. 钛合金表面电火花沉积 WC 电极的粘连行为分析 [J]. 焊接学报, 2006, 27(4): 25 – 28.  
He Peng, Wu Chengdong, Qian Yiyu, et al. Adhesion behavior of WC coating deposited on titanium alloy by electrospark deposition[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(4): 25 – 28.
- [14] 刘晋春. 特种加工 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.

**第一作者简介:** 韩红彪, 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要从事电火花沉积和金属增材制造方面的研究。发表论文 60 余篇。Email: lyhhb7157@163.com