

不同电极运动形式下电火花堆焊的放电机理分析

陈俊潮^a, 韩红彪^{a,b}, 王中豪^a, 王顺^a

(河南科技大学 a.机电工程学院 b.河南省机械设计及传动系统重点实验室, 河南 洛阳 471003)

摘要: **目的** 分析不同电极运动形式下, 电极与基体之间接触状态的变化, 研究其对电火花堆焊放电机理的影响。**方法** 通过旋转电极连续放电试验、超声振动电极连续放电试验、旋转电极与超声振动电极的沉积效率试验, 对旋转电极和超声振动电极的连续放电电压和电流波形、电极与基体的接触状态和相对运动进行了分析。**结果** 旋转电极的放电类型有短路放电、间隙放电和 1 种混合放电, 超声振动电极的放电类型有短路放电、间隙放电和 6 种混合放电。在放电参数相同的条件下, 旋转电极的短路放电平均电流为 11.29 kA, 间隙放电平均电流为 6.9 kA, 转移系数为 79%; 超声振动电极的短路放电平均电流为 6.0 kA, 间隙放电平均电流为 3.66 kA, 转移系数为 92%。**结论** 电极的运动形式直接影响电极与基体接触点之间接触状态(即接触间隙、接触面积和接触电阻等)的变化, 从而影响其放电类型、放电电流和沉积效率等。旋转电极和基体之间为切向旋转运动, 接触点处的电阻小且间隙变化小, 放电电流较大而放电类型较少。超声振动电极与基体之间为上下超声振动, 接触点处的电阻大, 间隙变化范围大且变化速度快, 放电电流较小而放电类型较多。

关键词: 电火花堆焊; 旋转电极; 超声振动电极; 短路放电; 间隙放电; 电流波形

中图分类号: TG456.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)06-0281-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.06.032

Analysis of Discharge Mechanism of Electric Spark Overlaying in Different Modes of Electrode Movement

CHEN Jun-chao^a, HAN Hong-biao^{a,b}, WANG Zhong-hao^a, WANG Shun^a

(a.School of Mechatronics Engineering, b.Henan Key Laboratory of Machinery Design and Transmission System, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the change of contact state between electrode and substrate in different modes of electrode movement and study its influence on the discharge mechanism of electric spark overlaying. The continuous discharge tests of rotating electrode and ultrasonic vibrating electrode, and the deposition efficiency tests of rotating electrode and ultrasonic vibrating electrode were carried out. The continuous discharge voltage and current waveforms of rotating electrode

收稿日期: 2019-12-10; 修订日期: 2020-06-09

Received: 2019-12-10; Revised: 2020-06-09

基金项目: 国家自然科学基金(51375146); 河南省高等学校重点科研项目(17A460012)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51375146) and Key Research Project of Colleges and Universities in Henan Province (17A460012)

作者简介: 陈俊潮(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: CHEN Jun-chao (1992—), Male, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 韩红彪(1971—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为表面工程和增材制造。邮箱: lyhb7157@163.com

Corresponding author: HAN Hong-biao (1971—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface engineering and additive manufacturing. E-mail: lyhb7157@163.com

引文格式: 陈俊潮, 韩红彪, 王中豪, 等. 不同电极运动形式下电火花堆焊的放电机理分析[J]. 表面技术, 2021, 50(6): 281-287.

CHEN Jun-chao, HAN Hong-biao, WANG Zhong-hao, et al. Analysis of discharge mechanism of electric spark overlaying in different modes of electrode movement[J]. Surface technology, 2021, 50(6): 281-287.

and ultrasonic vibrating electrode, the contact state and relative motion between electrode and substrate were analyzed. The discharge types of rotating electrode include short-circuit discharge, gap discharge, and a type of mixed discharge. The discharge types of ultrasonic vibrating electrode are short circuit discharge, gap discharge, and six types of mixed discharge. Under the same discharge parameters, the average current of short circuit discharge of rotating electrode is 11.29 kA and the average current of gap discharge is 6.9 kA. And the transfer coefficient is 79%. the average current of short circuit discharge of ultrasonic vibrating electrode is 6.0 kA and the average current of gap discharge is 3.66 kA and the transfer coefficient is 92%. The movement of electrode affects the state of contact point between electrode and substrate, such as the contact gap, contact area, and contact resistance, etc., thus affecting the discharge type, discharge current, and deposition efficiency. There is a rotational movement in a tangential direction between rotating electrode and substrate, the contact resistance and the change of gap at contact point are small, which results in large circuit discharge and fewer discharge types. There is a up and down ultrasonic vibration between ultrasonic vibrating electrode and substrate, the contact resistance is large and the change of gap at contact point has a wide range and is rapid, which results in more discharge types.

KEY WORDS: electric spark overlaying; rotating electrode; ultrasonic vibration electrode; short circuit discharge; gap discharge; current waveform

电火花堆焊技术是利用两极间脉冲放电过程中发生的各种现象,将电极材料过渡到基体表面形成强化层的表面加工技术,可在基体材料表面沉积和堆焊一层特种材料,增加基体的耐磨性、耐热性和耐腐蚀性等,从而提高零件的使用寿命^[1]。它还是一种再制造技术,可对机械零部件表面的局部磨损、划伤、腐蚀等缺陷进行修复^[2]。

近年来,国内外学者对电火花堆焊涂层性能方面的研究较多,对电火花堆焊机理的研究相对较少^[1]。PADGURSKAS 等^[3]在 C45 钢表面沉积了包含青铜、钼和铬的复合涂层,研究了该涂层的摩擦学性能。HONG 等^[4]研究了钛合金表面电火花沉积 TiN/Zr 基非晶纳米晶复合涂层的显微结构和耐磨性。SALMALIYAN 等^[5]研究了电火花堆焊工艺参数对 H13 钢沉积 WC-Co 涂层性能的影响。张二亮等^[6]在氮气、氩气和空气气氛下电火花堆焊 TC4 钛合金涂层,研究了三种涂层的组织性能和摩擦学性能。栾程群等^[7]研究了 H13 钢表面电火花沉积 Nb 涂层的组织与性能,发现该涂层能提高 H13 钢表面的显微硬度、耐磨性和耐蚀性。电火花堆焊的新技术也取得了进展。MOHANTY 等^[8]利用二硫化钨粉末悬浮液进行电火花沉积,来改变钛合金表面的性能。Yue 等^[9]利用磁化电极吸附细小粉末进行电火花沉积,改变了放电机理,提高了沉积过程的稳定性和沉积效率。WANG 等^[10]采用计算机数控沉积技术在 TC11 基体上制备 CuNiTiZr 中熵合金涂层,分析了涂层微观结构和硬度等。MURALIDHARAN 等^[11]对单次沉积放电过程建立了热力学模型,可仿真和预测沉积过程中的材料转移机制。MURRAY 等^[12]研究了电火花沉积 TiC-Fe 复合涂层的成形机理。

与电火花去除加工技术不同,电火花堆焊技术常采用旋转电极和超声振动电极与基体不断接触,进行放电和堆焊^[13]。但由于电极与基体的接触状态处于不

断变化之中,其放电机理和质量转移机理比较复杂。掌握电火花堆焊技术的放电机理和质量转移机理,则有利于实现该技术的自动化、质量控制和推广应用^[14-16]。本文采用旋转电极和超声振动电极进行电火花堆焊试验,分析电极与基体的接触状态和相对运动,根据连续放电的电压和电流波形,研究电火花堆焊的放电机理。

1 试验

试验设备采用 9188H3 型电火花堆焊电源,可分别进行超声振动电极与旋转电极的堆焊试验。该电源输出的脉冲电压 $U_p=20\sim 45\text{ V}$,脉冲时间 $t_p=40\sim 2000\ \mu\text{s}$,脉冲频率 $f_p=30\sim 450\text{ Hz}$,旋转电极转速 $n=0\sim 1400\text{ r/min}$,超声振动振幅 $a=0\sim 12\ \mu\text{m}$,超声振动频率 $f_z=20\text{ kHz}$ 。图 1 为连续放电试验的原理图,数字示波器通道 1 测量电流采样电阻 R_s 上的电压 U_1 ,进而获得放电电流 I ;通道 2 测量电极和基体之间的放电电压 U (电压 U_2 减去通道 1 测量的电压 U_1)。电极材料选用直径 3 mm 的 45 钢棒,基体材料选用 15 mm×15 mm×3 mm 的 45 钢板,保护气体使用氩气。试验前,依次用 400、800、1000 号砂纸对电极端部与基体进行打磨,并使用丙酮擦拭电极端部与基体表面。

试验内容包括旋转电极连续放电试验、超声振动电极连续放电试验、旋转电极与超声振动电极沉积效率试验。

旋转电极连续放电试验的原理如图 1a 所示。手工操作旋转电极与基体呈 45° 夹角,轻微接触进行连续放电试验,电极水平移动速度 $v=2.5\text{ mm/s}$,在电源中选择电极旋转速度 $n=220\text{ r/min}$,脉冲电压 $U_p=32\text{ V}$,脉冲宽度 $t_p=216\ \mu\text{s}$,脉冲频率 $f_p=122\text{ Hz}$,氩气流量 $Q=10\text{ L/min}$ 。试验后,对数字示波器记录的放电电压和电流波形进行处理和分析。

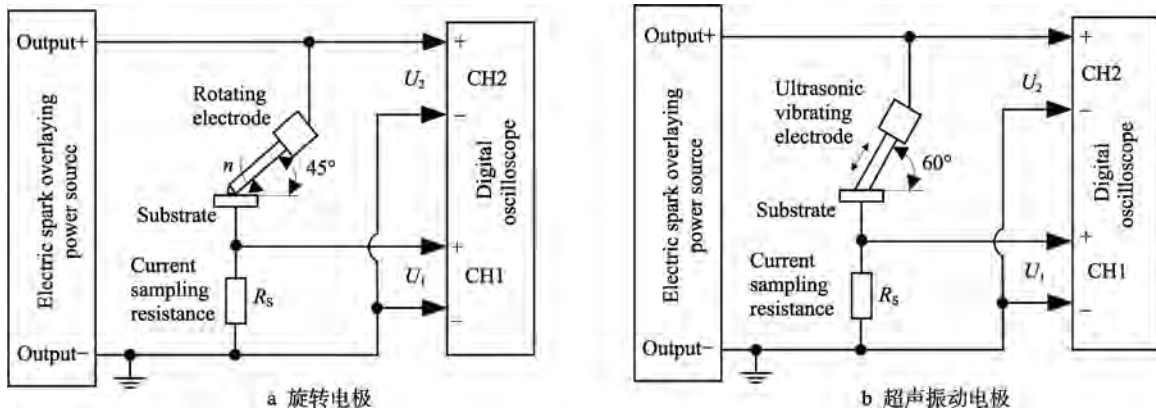


图 1 连续放电试验原理图

Fig.1 Schematic of continuous discharge test: a) rotating electrode; b) ultrasonic vibrating electrode

超声振动电极连续放电试验的原理如图 1b 所示。手工操作超声电极与基体呈 60° 夹角，轻微接触进行连续放电试验，电极水平移动速度 $v=2.5\text{ mm/s}$ ，在电源中选择超声振动振幅 $a=7.2\text{ }\mu\text{m}$ ，脉冲电压 $U_p=32\text{ V}$ ，脉冲宽度 $t_p=216\text{ }\mu\text{s}$ ，脉冲频率 $f_p=122\text{ Hz}$ ，氩气流量 $Q=10\text{ L/min}$ 。试验后，对数字示波器记录的放电电压和电流波形进行处理和分析。

采用图 1a、1b 所示的试验原理和规范参数，分别进行旋转电极和超声振动电极的沉积效率对比试验。每次连续沉积的时间为 5 min，每次试验前后分别记录电极和基体的质量，并计算出沉积效率（如式 (1) 所示）。旋转电极和超声振动电极的沉积效率试验各进行 5 次，求出沉积效率的平均值，并进行对比，同时对试验后基体和电极的表面形貌进行对比分析。

$$K = \frac{\Delta m_k}{\Delta m_a} \times 100\% \quad (1)$$

式中， K 为转移系数， Δm_k 为基体试样增加的质量， Δm_a 为电极试样减少的质量。

2 试验结果

2.1 旋转电极的连续放电波形

旋转电极连续放电的电压和电流波形如图 2 所示。

从图 2 中可以看出，放电脉冲的电压和电流有高低，试验时观察到较大的火花和飞溅。本次试验共采集到 84 个放电脉冲波形，对每个放电脉冲的电压和电流波形在时间轴上进行放大分析，每个放电波形的具体参数各不相同。通过分析其波形特征，发现了三种典型的放电类型，其电压和电流波形图如图 3 所示。

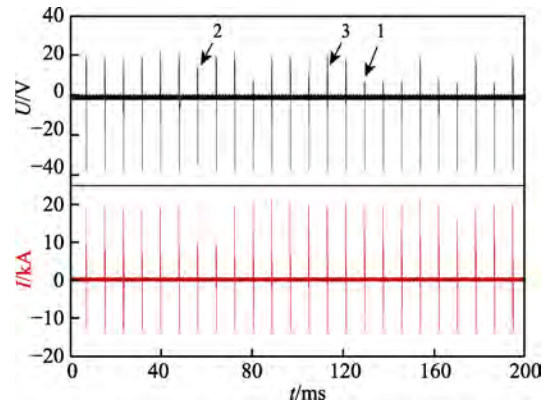


图 2 旋转电极连续放电的电压和电流波形

Fig.2 Voltage and current waveforms of continuous discharge of rotating electrode

图 3a—c 所示的放电类型分别是图 2 中箭头 1—3 所指的放电脉冲的电压和电流波形图。图 3a 在整个脉冲宽度中都是短路放电，其放电波形的大电流和小电压。图 3b 在整个脉冲宽度中都是间隙放电，

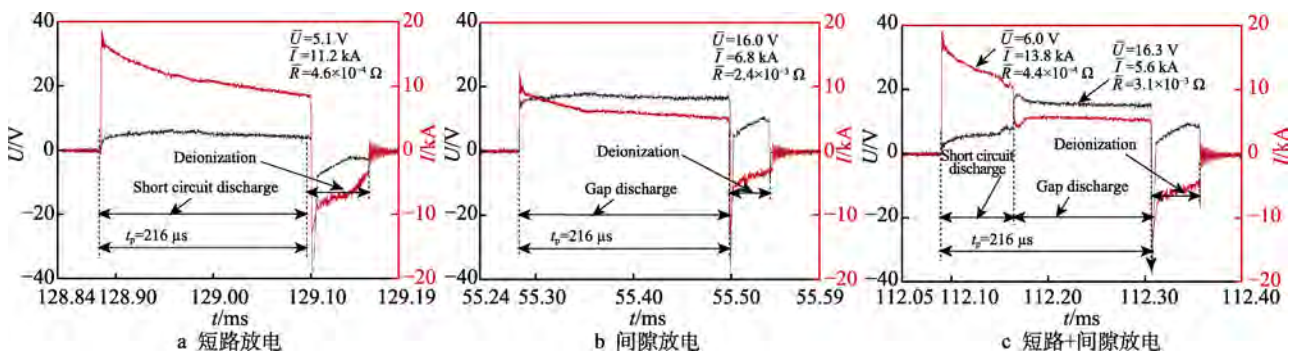


图 3 旋转电极三种典型放电类型的电压和电流波形图

Fig.3 Voltage and current waveforms of three typical discharge types of rotating electrode: a) short circuit discharge; b) gap discharge; c) short circuit+gap discharge

其放电波形的特点是小电流和大电压。图 3c 在整个脉冲宽度中先出现短路放电,再转化为间隙放电,是一种混合放电类型,在图 2 中看其放电波形的特点是大电流和大电压^[13]。

对采集的 84 个放电波形进行统计和分析,混合放电类型有 53 个,短路放电类型有 24 个,间隙放电类型有 7 个。这说明旋转电极的电火花堆焊类型主要是电极和基体相接触而引起的短路放电和混合放电。

2.2 超声振动电极的连续放电波形

超声振动电极连续放电的电压和电流波形如图 4 所示。从图 4 中可以看出,放电脉冲的电压和电流的变化没有规律,试验时观察到的火花和飞溅相对较小。本次试验共采集到 84 个放电脉冲波形,对每个放电脉冲的电压和电流波形在时间轴上进行放大分析,观察到每个放电波形的具体参数各不相同。通过

分析其波形特征,发现了八种典型的放电类型,其电压和电流波形如图 5 所示。

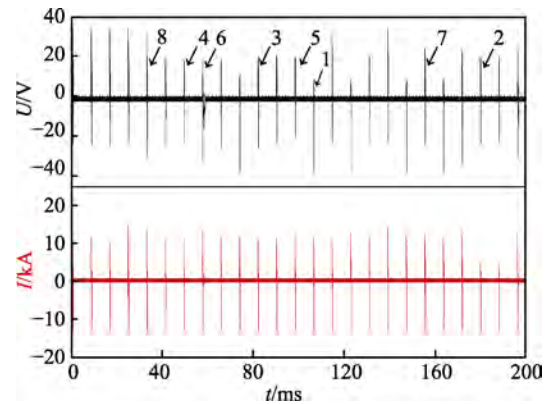


图 4 超声振动电极连续放电的电压和电流波形
Fig.4 Voltage and current waveforms of continuous discharge of ultrasonic vibrating electrode

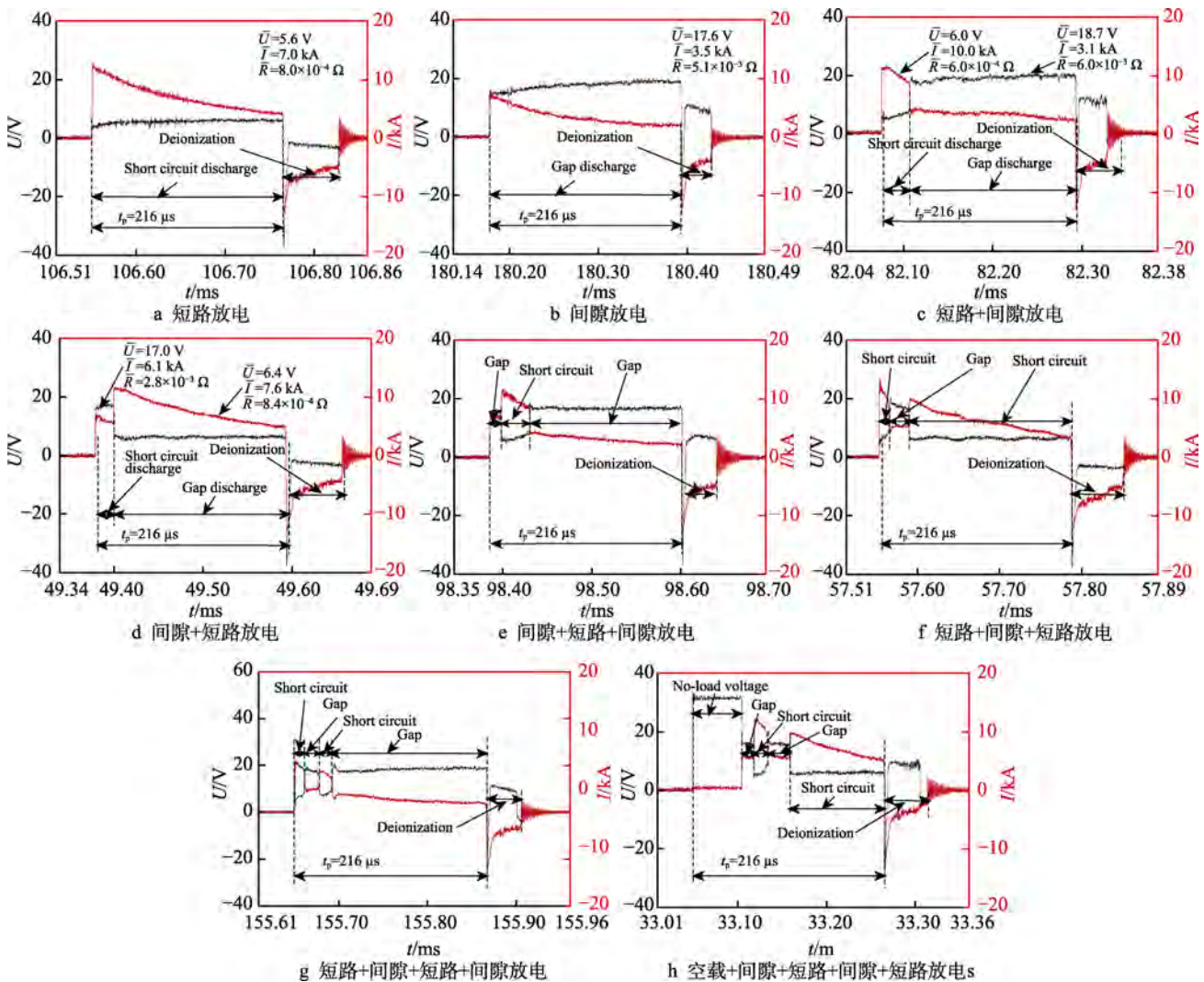


图 5 超声振动电极八种典型放电类型的电压和电流波形图

Fig.5 Voltage and current waveforms of eight typical discharge types of ultrasonic vibrating electrode: a) short circuit discharge; b) gap discharge; c) short circuit + gap discharge; d) gap + short circuit discharge; e) gap + short circuit + gap discharge; f) short circuit + gap + short circuit discharge; g) short circuit + gap + short circuit + gap discharge; h) no-load + gap + short circuit + gap + short circuit discharge

图 5a—h 所示的放电类型分别是图 4 中箭头 1—8 所指放电脉冲的电压和电流波形图。图 5a 在整个脉冲宽度中都是短路放电, 图 5b 在整个脉冲宽度中都是间隙放电, 图 5c—h 都是混合放电类型。其中图 5c、d 在整个脉冲宽度中出现两个放电脉冲, 分别是短路+间隙放电和间隙+短路放电; 图 5e、f 在整个脉冲宽度中出现三个放电脉冲, 分别是间隙+短路+间隙放电和短路+间隙+短路放电, 图 5g、h 在整个脉冲宽度中出现四个放电脉冲, 分别是短路+间隙+短路+间隙放电和空载+间隙+短路+间隙+短路放电。图 5h 中第一脉冲的电压等于脉冲输出电压 32 V, 电流为零, 说明电极和基体在这个阶段没有接触, 没有产生放电现象, 为空载阶段。

对采集的 84 个放电波形进行统计和分析, 得到混合放电类型有 69 个, 短路放电类型有 10 个, 间隙

放电类型有 5 个。这说明超声振动电极电火花堆焊的主要放电类型也是电极和基体相接触而引起的短路放电和混合放电, 且混合放电的类型较多, 在一个脉冲宽度中可出现 2—4 个放电脉冲。

2.3 沉积效率试验结果

进行旋转电极和超声振动电极的沉积效率试验, 经过计算获得旋转电极的转移系数 $K=79%$, 超声振动电极的转移系数 $K=92%$ 。这说明在相同的电参数情况下, 超声振动电极的沉积效率高于旋转电极的沉积效率。

图 6 是旋转电极沉积效率试验后的沉积/堆焊层和电极的形貌图, 图 7 是超声振动电极沉积效率试验后的沉积/堆焊层和电极的形貌图。从表面形貌可以看出, 沉积/堆焊层和电极表面很不平整, 都是呈现高低不平的微凸峰。

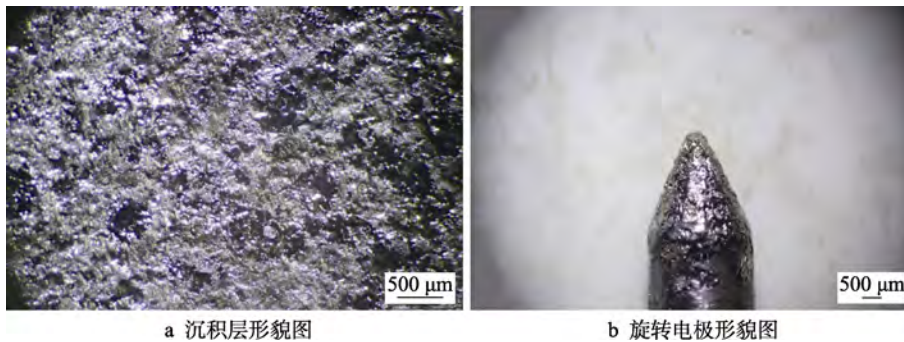


图 6 旋转电极沉积效率试验后的沉积层和电极的形貌图

Fig.6 Sediment layer and electrode morphology after deposition efficiency test with rotating electrode: a) sediment layer morphology of substrate; b) morphology of rotating electrode

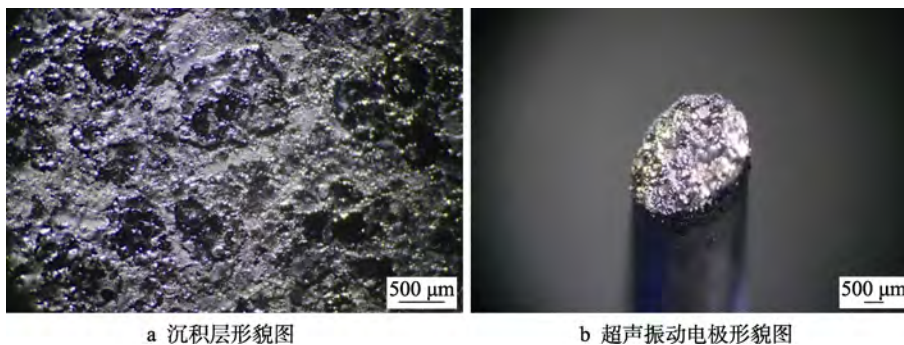


图 7 超声振动电极沉积效率试验后的沉积层和电极的形貌图

Fig.7 Sediment layer and electrode morphology after deposition efficiency test with ultrasonic vibrating electrode: a) sediment layer morphology of substrate; b) morphology of ultrasonic vibration electrode

3 分析与讨论

3.1 放电机理对比分析

从以上试验结果可以看出: 电火花堆焊最基本的放电形式是短路放电和间隙放电。在电源的一个脉冲宽度中, 不同的放电类型都是由这两种放电形式组成, 混合放电是由短路放电和间隙放电脉冲组成的 2—4 个放电脉冲。与旋转电极相比, 超声振动电极

的混合放电类型明显较多。

将所有放电脉冲中的短路放电阶段和间隙放电阶段的参数进行统计分析, 获得短路放电和间隙放电阶段的平均电阻、平均电流和平均功率, 如表 1 所示。旋转电极在短路放电和间隙放电阶段的平均电阻, 要明显小于超声振动电极的平均电阻, 所以旋转电极的放电电流和平均功率都较大。旋转电极和超声振动电极的间隙放电平均功率都明显大于短路放电平均功率。

表 1 短路放电和间隙放电的参数
Tab.1 Parameter table of short circuit discharge and gap discharge

Type	Short circuit discharge			Gap discharge		
	Average resistance/mΩ	Average current/kA	Average power/kw	Average resistance/mΩ	Average current/kA	Average power/kw
Rotating electrode	0.45	11.29	57.65	2.3	6.9	110.67
Ultrasonic vibrating electrode	1.08	6.0	39.06	4.7	3.66	63.61

3.2 旋转电极与基体的接触状态和相对运动

旋转电极与基体的接触状态和相对运动如图 8 所示,在接触力 F 的作用下,电极圆锥面与基体平面的接触形式为线接触,相对运动形式为切向旋转运动。由于电极表面和基体表面都是高低不平的微凸峰,所以其接触状态为单点或两点接触。假设在图 8a 中 A-A 截面处电极和基体的微凸峰相互接触,接触点处电极相对基体的运动是水平干摩擦运动,则会造接触微凸峰之间的剪切运动,相互挤压产生塑形变形,去除掉表面的氧化膜,增大接触面积,减小接触短路电阻,所以旋转电极的短路放电电流较大,平均功率也较大,造成飞溅较大。此外,平均功率较大也会带来较大的热输入,也能增加沉积效率,但影响

相对较小,两种因素综合作用下造成沉积效率较低。但这种干摩擦运动有利于将沉积层上的高点磨平,使沉积层较为平整和致密。

假设圆锥截面 A-A 的圆半径 $R_1=1\text{ mm}$, 旋转电极的转速 $n=220\text{ r/min}$, 一个放电脉冲宽度 $t_p=216\text{ }\mu\text{s}$ 对应的电极转动角度 $\theta=0.285^\circ$, 对应电极接触点转动的弧长 $L=4.97\text{ }\mu\text{m}$, 形成电极与基体的间隙 $e=0.012\text{ }\mu\text{m}$, 即在一个脉冲宽度中,由于电极转动引起的间隙变化很小。假设电极转速 n 达到最高转速 1400 r/min , 且电极半径增大到 2 mm 时,计算可得 $L=63.3\text{ }\mu\text{m}$ 、 $e=1\text{ }\mu\text{m}$ 。所以,在接触力 F 的作用下,旋转电极与基体的接触状态和相对运动造成电极与基体之间的间隙变化很小,其混合放电类型只有一种,即短路放电+间隙放电。一部分是由于短路电流较大,将接触点熔爆,在电极和基体之间形成间隙,从而转变为间隙放电;另一部分是由于电极接触点旋转离开,与基体之间形成间隙,从而转变为间隙放电。这两种形成的间隙都比较小,所以旋转电极的间隙放电平均电阻较小,放电电流较大,平均功率较高。

3.3 超声振动电极与基体的接触状态和相对运动

超声振动电极与基体的接触状态和电极振幅如图 9 所示。在接触力 F 的作用下,电极端部平面与基体平面的接触形式为面接触。由于电极表面和基体表面都是高低不平的微凸峰,所以其接触状态为单点、两点或三点的多点接触。对比旋转电极,超声振动电极相对于基体上下振动,接触微凸峰之间没有剪切运动,而垂直的接触力 F 较小,所以它们产生的塑形变形很小,总的接触面积也不大,无法有效去除表面的氧化膜,接触短路电阻较大,因此造成超声振动电极的短路放电电流小于旋转电极的短路放电电流。此外,短路放电的平均功率也较小,造成飞溅较小,沉积效率较高。

如图 9b 所示,超声振动电极的振幅 $a=7.2\text{ }\mu\text{m}$ 时,对应电极与基体之间垂直距离的变化范围为 $0\sim 6.2\text{ }\mu\text{m}$, 这造成电极与基体之间的间隙较大,间隙放电的电阻也较大。所以,超声振动电极的间隙放电电流小于旋转电极的间隙放电电流,间隙放电的平均功率也较小。由于超声振动频率较高 ($f_z=20\text{ kHz}$), 在一个脉冲宽度内,电极和基体之间会出现多次的间隙变化,

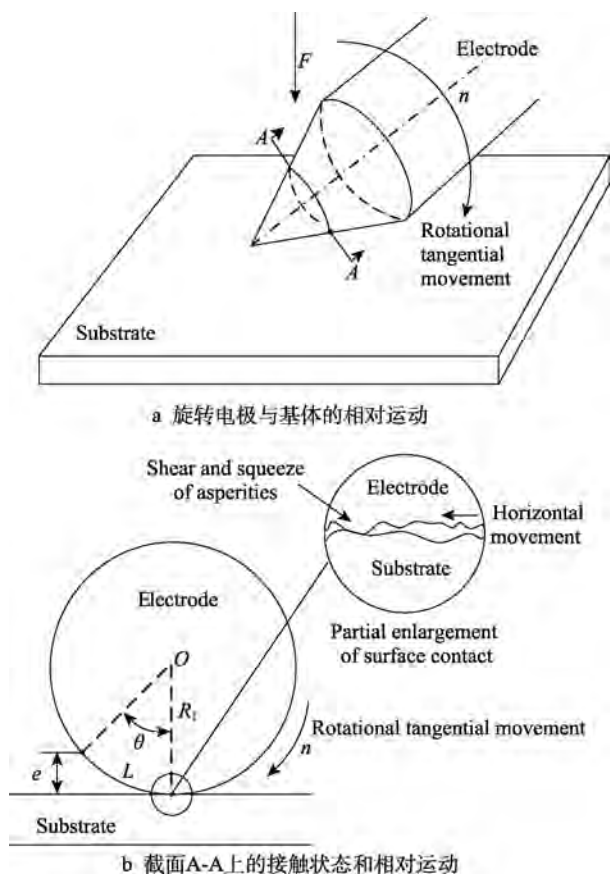


图 8 旋转电极与基体的接触状态和相对运动

Fig.8 Contact state and relative movement between rotating electrode and substrate: a) relative movement between rotating electrode and substrate; b) contact state and relative movement on section A-A

导致短路放电和间隙放电反复出现，所以其混合放电的类型较多。

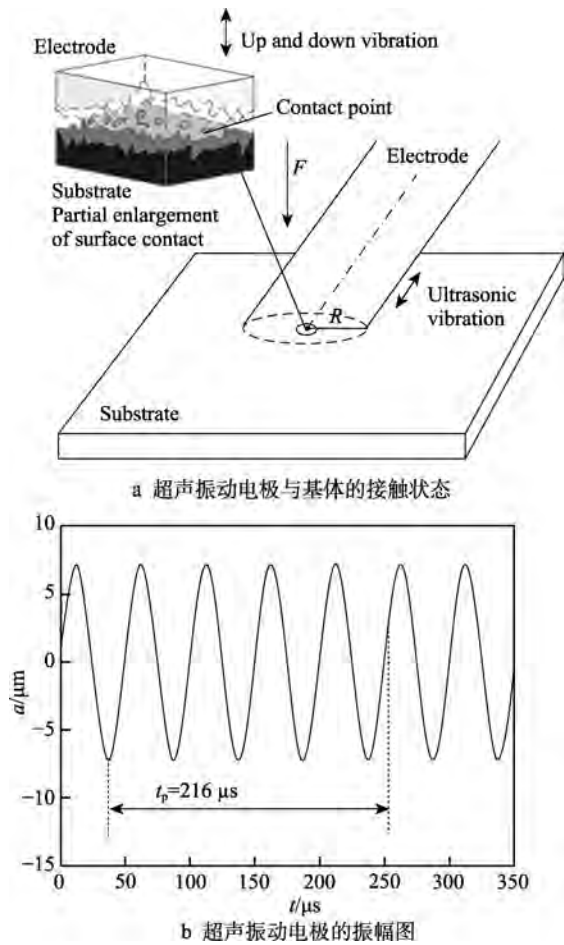


图 9 超声振动电极与基体的接触状态和电极振幅图
Fig.9 Contact state between ultrasonic vibrating electrode and substrate and amplitude diagram of electrode: a) contact state between ultrasonic vibrating electrode and substrate; b) amplitude diagram of ultrasonic vibrating electrode

4 结论

1) 电极的运动形式直接影响了电极与基体接触点之间接触状态（即接触间隙、接触面积和接触电阻等）的变化，从而影响其放电类型、放电电流和沉积效率等。

2) 旋转电极和基体之间为切向旋转运动，接触点处的间隙变化小，只有一种短路放电+间隙放电的混合放电类型。

3) 超声振动电极与基体之间为上下超声振动，接触点处的间隙变化范围大且变化速度快，产生较多的混合放电类型。

4) 在相同放电参数条件下，旋转电极的短路放电电流和间隙放电电流要大于超声振动电极的短路放电电流和间隙放电电流，产生的火花和飞溅较大，其沉积效率小于超声振动电极的沉积效率。

参考文献：

- [1] 辛昊, 王海涛, 高立, 等. 电火花沉积技术研究现状及发展[J]. 热加工工艺, 2018, 47(20): 25-29.
XIN Hao, WANG Hai-tao, GAO Li, et al. Research status and development of electro-spark deposition technology[J]. Hot working technology, 2018, 47(20): 25-29.
- [2] 汪瑞军, 孙颖, 黄小鸥, 等. 电火花堆焊工艺在电厂设备关键部件修复中的应用[J]. 中国电力, 2003(6): 63-65.
WANG Rui-jun, SUN Ying, HUANG Xiao-ou, et al. Application of electric spark build-up welding technology in the restoration of key components of power plant equipment[J]. Electric power, 2003(6): 63-65.
- [3] PADGURSKAS J, KREIVAITIS R, RUKUIZA R, et al. Tribological properties of coatings obtained by electro-spark alloying C45 steel surfaces[J]. Surface & coatings technology, 2017, 311: 90-97.
- [4] HONG X, TAN Y, WANG X, et al. Microstructure and wear resistant performance of TiN/Zr-base amorphous-nanocrystalline composite coatings on titanium alloy by electrospark deposition[J]. Surface & coatings technology, 2016, 305: 67-75.
- [5] SALMALIYAN M, GHAENI M F, EBRAHIMNIA M. Effect of electro spark deposition process parameters on WC-Co coating on H13 steel[J]. Surface and coatings technology, 2017, 321: 81-89.
- [6] 张二亮, 张平, 蔡志海, 等. 不同气氛下电火花沉积钛合金涂层的组织性能[J]. 中国表面工程, 2011, 24(6): 28-34.
ZHANG Er-liang, ZHANG Ping, CAI Zhi-hai, et al. Microstructure and properties of titanium alloy coating prepared by electric spark deposition under different atmospheres[J]. China surface engineering, 2011, 24(6): 28-34.
- [7] 栾程群, 王文权, 邝厘祥. H13 钢表面电火花沉积 Nb 涂层组织与性能研究[J]. 表面技术, 2019, 48(1): 298-303.
LUAN Cheng-qun, WANG Wen-quan, KUANG Li-xiang. Microstructures and properties of niobium coating on H13 steel substrate by electrospark deposition[J]. Surface technology, 2019, 48(1): 298-303.
- [8] MOHANTY S, KUMAR V, DAS A K, et al. Surface modification of Ti-alloy by micro-electrical discharge process using tungsten disulphide powder suspension[J]. Journal of manufacturing processes, 2019, 37: 28-41.
- [9] YUE T M, LIU J W. Magnetic-aided electrospark deposition[J]. The international journal of advanced manufacturing technology, 2019, 105(1-4): 1507-1517.
- [10] WANG X R, WANG Z Q, LI W S, et al. Preparation and microstructure of CuNiTiZr medium-entropy alloy coatings on TC11 substrate via electrospark-computer numerical control deposition process[J]. Materials letters, 2017, 197: 143-145.
- [11] MURALIDHARAN B, CHELLADURAI H, SINGH P, et al. Single-spark analysis of electro-discharge deposition process[J]. Materials and manufacturing processes, 2016, 31(14): 1853-1864.

(下转第 316 页)

- engineering, 2016, 34(8): 686-692.
- [22] 任小增. 高压水射流清洗用扇形喷嘴的结构及磨损研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
REN Xiao-zeng. The structure and abrasion research of flat-shaped nozzle used in high-pressure water jet cleaning [D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [23] 于兰英, 周万阳, 邓斌, 等. 基于 CFD 的清洗用扇形喷嘴清洗参数研究[J]. 机床与液压, 2016, 44(13): 164-167.
YU Lan-ying, ZHOU Wan-yang, DENG Bin, et al. Study in cleaning parameters of flat fan nozzle used in cleaning based on CFD[J]. Machine tool & hydraulics, 2016, 44(13): 164-167.
- [24] 张洋凯, 苗思忠, 李长鹏, 等. 前混合磨料水射流喷嘴外流场磨料加速过程研究[J]. 流体机械, 2017, 45(8): 29-32.
ZHANG Yang-kai, MIAO Si-zhong, LI Chang-peng, et al. The flow field process research of abrasive acceleration in the pre-mixed abrasive water jet outside the nozzle[J]. Fluid machinery, 2017, 45(8): 29-32.
- [25] AND C M P, MACMILLAN N H. Effect of microstructure on the erosion behavior of carbon steel[J]. Wear, 2015, 332: 1080-1089.
- [26] GUO Lian-huan, DENG Song-sheng, YANG Xin. Numerical simulation of abrasive water jet cutting chemical pipeline based on SPH coupled FEM[J]. Chemical engineering transactions, 2016, 51: 73-78.

(上接第 235 页)

- [18] 田雪梅, 邹李华, 乔红斌. 不同填料填充的 PTFE 基粘结固体润滑涂层的摩擦磨损性能[J]. 材料保护, 2013, 46(5): 51-53.
TIAN Xue-mei, ZOU Li-hua, QIAO Hong-bin. Friction and wear behavior of polytetrafluoroethylene-based bonded solid lubricant coatings containing different fillers[J]. Material protection, 2013, 46(5): 51-53.
- [19] PENG Shi-guang, GUO Yue, XIE Guo-xin, et al. Tribological behavior of polytetrafluoroethylene coating reinforced with black phosphorus nanoparticles[J]. Applied surface science, 2018, 441: 670-677.
- [20] LEE Jeong-yeop, LIM Dong-phil, LIM Dae-soon. Tribological behavior of PTFE nanocomposite films reinforced with carbon nanoparticles[J]. Composites part B, 2006, 38(7-8): 810-816.
- [21] JIA Zhi-ning, YANG Yu-lin. Self-lubricating properties of PTFE/serpentine nanocomposite against steel at different loads and sliding velocities[J]. Composites part B, 2012, 43(4): 2072-2078.
- [22] WANG Wei, LYU Yan, XIE Guo-xin, et al. Self-lubricating PTFE-based composites with black phosphorus nanosheets[J]. Tribology letters, 2018, 66(2): 61.
- [23] KUANG Tai-rong, LI Kai-can, CHEN Bin-yi, et al. Poly(propylene carbonate)-based in situ nanofibrillar biocomposites with enhanced miscibility, dynamic mechanical properties, rheological behavior and extrusion foaming ability[J]. Composites part B, 2017, 123: 112-123
- [24] 杨广磊, 李庆忠. 几种含氟润滑剂摩擦学性能研究[J]. 润滑与密封, 2009, 34(10): 58-61.
YANG Guang-lei, LI Qing-zhong. Research on tribological properties about kinds of polytetrafluoroethylene lubricants[J]. Lubrication engineering, 2009, 34(10): 58-61.
- [25] 宋宝玉, 王劭, 尹继辉, 等. 含纳米 PTFE 颗粒润滑脂的润滑性能研究[J]. 润滑与密封, 2011, 36(12): 6-8.
SONG Bao-yu, WANG Meng, YIN Ji-hui, et al. Research on the lubricating properties of grease with nano-PTFE particles[J]. Lubrication engineering, 2011, 36(12): 6-8.
- [26] 李来红. 复合铝基润滑脂的研制[J]. 炼油与化工, 2006(1): 23-26.
LI Lai-hong. The Development of aluminum complex grease[J]. Refining and chemical industry, 2006(1): 23-26.

(上接第 287 页)

- [12] MURRAY J W, ALGODI S J, FAY M W, et al. Formation mechanism of electrical discharge TiC-Fe composite coatings[J]. Journal of materials processing technology, 2017, 243: 143-151.
- [13] 张平, 马琳, 梁志杰, 等. 超声振动对电火花表面强化的作用[J]. 焊接学报, 2011, 32(3): 37-40.
ZHANG Ping, MA Lin, LING Zhi-jie, et al. Experimental investigation of ultra-assisted electrode sparkles depositing process[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(3): 37-40.
- [14] 韩红彪, 郭敬迪, 焦文清. 旋转电极电火花沉积/堆焊的放电机理[J]. 焊接学报, 2019, 40(5): 67-72.
HAN Hong-biao, GUO Jing-di, JIAO Wen-qing. Discharge mechanism of electro-spark deposition with rotary electrode[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(5): 67-72.
- [15] 刘峰. 铸铁轧辊电火花表面强化自动化设备及工艺的研究[D]. 上海: 东华大学, 2003.
LIU Feng. Investigation on the automatic equipment and techniques of electrospark surface strengthening for cast iron roll[D]. Shanghai: Donghua University, 2003.
- [16] 郭敬迪. 摩擦条件对电火花沉积堆焊机理及表面质量的影响[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2018.
GUO Jing-di. Influence of friction conditions on the discharge mechanism and surface quality of electric spark deposition[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2018.