

# 复合电极-混粉电火花加工 Ti-6Al-4V 钛合金的研究

刘云, 李丽, 李瑶, 林本刚, 赵林, 张岩

(山东理工大学 机械工程学院, 山东 淄博 255049)

**摘要:** **目的** 采用混粉电火花加工技术, 使用超声电沉积制备的 Cu-SiC 复合电极加工 TC4 钛合金, 在工作液中混入碳粉进行表面改性, 以获取性能优异的加工表面。**方法** 利用 Cu-SiC 复合电极和 Cu 电极对 TC4 钛合金进行成型加工。用扫描电子显微镜 (SEM) 观察加工后工件的表面形貌和熔凝层断面形貌, 并用 TR200 粗糙度仪测量其表面不同位置的粗糙度值。用硬度仪测量工件熔凝层的显微硬度, 用 X 射线衍射仪对材料强化层进行物相分析。并对电极损耗进行对比分析。**结果** Cu 电极加工的 TC4 钛合金表面凹坑深且面积大, 熔凝层疏松, 粘合性较差。Cu-SiC 复合电极加工的 TC4 钛合金表面放电痕迹大, 深度统一, 电蚀产物少, 熔凝层致密好。利用 X 射线衍射仪、硬度测量仪和粗糙度仪对试样测量分析显示, Cu-SiC 复合电极加工后, 表面生成的 TiC 峰相高, 耐磨性好, 表层显微硬度较大, 约为基体的 6 倍, 表面平均粗糙度值  $Ra=2.825\ \mu\text{m}$ 。复合电极损耗比铜电极损耗降低了 18%。**结论** 两种电极加工后, TC4 钛合金表面均得到改善, 且使用超声电沉积 Cu-SiC 复合电极加工后的表面质量更好。

**关键词:** 表面形貌; 熔凝层; 显微硬度; 表面粗糙度; 电极损耗; 混粉电火花加工

**中图分类号:** TG146.2+3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)09-0252-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.09.040

## Composite Electrode-Powder Mixed Electric Discharge Machining Ti-6Al-4V Titanium Alloy

LIU Yun, LI Li, LI Yao, LIN Ben-gang, ZHAO Lin, ZHANG Yan

(School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**ABSTRACT:** The work aims to complete surface modification by processing TC4 titanium alloy with Cu-SiC composite electrode prepared by ultrasonic electrolytic deposition and mixing carbon powder into working fluid, so as to obtain surface with excellent properties. TC4 titanium alloy was formed by using Cu-SiC composite electrode and Cu electrode. Firstly, morphology of the machined workpiece and fracture morphology of the melting layer were observed with scanning electron microscope (SEM), and roughness values in different positions on the surface were measured with TR200 roughness meter. Then micro-hardness of the workpiece's melting layer was measured with FM800 hardness tester, phase analysis of the strengthened layer was carried out by using X-ray diffractometer. Finally, electrode losses were compared and analyzed. The surface of TC4 titanium alloy machined by Cu electrode featured in deep and large pit, loose melting layer and poor adhesion. The surface of TC4

收稿日期: 2017-03-15; 修订日期: 2017-04-20

Received: 2017-03-15; Revised: 2017-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(51105235)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51105235)

作者简介: 刘云 (1990—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为先进制造技术与装备。

Biography: LIU Yun (1990—), Female, Master graduate student, Research focus: advanced manufacturing technology and equipment.

通讯作者: 李丽 (1975—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为先进制造技术与装备。

Corresponding author: LI Li (1975—), Female, P. D., Professor, Research focus: advanced manufacturing technology and equipment.

titanium alloy processed by Cu-SiC composite electrode featured in large traces of discharge, uniform depth, few discharge debris and compact melting layer. Measurement analysis from X ray diffractometer, FM800 hardness tester and roughness tester showed that workpiece surface machined by Cu-SiC composite electrode exhibited higher TiC peak, better abrasion resistance and higher hardness. The surface microhardness was about 6 times of the substrate, and average surface roughness value Ra was 2.825  $\mu\text{m}$ . Loss of the composite electrode was 18% lower than that of copper electrode. The surface of TC4 titanium alloy is improved, surface of TC4 titanium alloy is improved, and the surface quality of Cu-SiC composite electrode subject to ultrasonic-electrodeposition is better than that of Cu electrode.

**KEY WORDS:** surface morphology; melting layer; microhardness; surface roughness; electrode loss; powder mixed edm

TC4 钛合金比强度高、塑性好,具有良好的热强性、耐蚀性和低温韧性,在航空航天、仪器仪表、冶金等领域中得到广泛应用<sup>[1]</sup>。但其导热系数低、耐磨性能差、易粘着等缺陷,使得未经过表面改性处理的钛合金零件使用寿命短,耐磨性差<sup>[2]</sup>。

TC4 钛合金表面改性强化技术主要有:气体保护下的电火花表面合金化和渗碳强化,液体中的电火花表面渗碳、氮、氧<sup>[3]</sup>。混粉电火花加工技术是在工作液中添加一定比例的导电或半导体微细粉末,以改变微细能量下加工时的放电状态。并通过合理控制加工过程中的各影响参数,来提高加工速度,改善加工表面质量,降低表面粗糙度,减少表面缺陷,达到理想加工效果<sup>[4-6]</sup>。影响混粉电火花加工效果的因素有工件及工具材料、粉末特性、电加工参数及其他非电参数<sup>[7-8]</sup>。因此,电极的选用、添加粉末和工作液性能的改进,适合混粉电火花加工的工件材料库以及继续建立电火花混粉加工新标准仍是今后电火花混粉加工技术的重点。

通过特制的半烧结体电极在加工过程中使工件表面迅速形成一层硬质碳化物陶瓷,可以达到改善工件表面性能的目的<sup>[9]</sup>。李敏等<sup>[10]</sup>以石墨为电极,分别在煤油和雾介质中对 TC4 钛合金进行电火花表面强化,强化层表面显微硬度大幅提高。赵林等<sup>[11]</sup>使用紫铜电极混碳化硅粉末加工的钛合金表面粗糙度比石墨电极混硅粉的,但石墨加工钛合金的厚度大,硬度值高。陈文安等<sup>[12]</sup>针对 TC4 钛合金在火花油中放电加工时电极损耗大的问题,以蒸馏水和火花油为工作介质,进行了 TC4 钛合金的放电加工试验,其电极绝对损耗与火花油加工时相差不大,但相对损耗却大大降低。谢志平等<sup>[13]</sup>采用铜电极电火花加工 TC4 钛合金,其加工表面非均匀分布有裂纹、孔洞、大小不一的剥落点、放电凹坑、熔融滴、球状颗粒、非球状颗粒,其变质层平均厚度和表面粗糙度随电流和脉冲宽度增大而增大。在混粉电火花加工硬质合金中,要求电极具有良好的加工性能,即电极损耗小,加工速度快,加工稳定性好。采用电沉积方法制取 Cu-SiC 复合电极并应用于电火花加工

中,可得到较低的损耗<sup>[14]</sup>。  
为了提高电极的耐蚀性和增强钛合金表面的耐磨性,利用超声电沉积法制备 Cu-SiC 复合电极,在工作液中添加碳粉,增大其放电间隙,改变钛合金表面金相组织。采用 Cu-SiC 复合电极与 Cu 电极对钛合金进行成型加工,对比分析研究电极对钛合金表面改性层的影响。

1 实验

1.1 电极和工件

在混粉电火花加工实验中,工具电极的选用尤为重要,其影响工件的加工效率和本身的损耗。超声电沉积试验的电源选用直压稳流电源,根据课题组前期的试验<sup>[15]</sup>,电流密度选为 4 A/dm<sup>2</sup>,超声波频率为 53 Hz,温度为 30 ℃。阳极材料为铜磷板(磷的质量分数为 0.01%~0.02%),阴极材料为铜棒。电极电沉积实验前,首先对阳极铜磷板进行除油脱锈钝化处理,然后对阴极铜电极(16 mm×100 mm)的圆平面依次用不同牌号的砂纸进行打磨,以确保表面足够平滑。再超声清洗并烘干。

电沉积试验中的混合溶液由蒸馏水配制,主要成分:200 g/L 的 CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O,20 g/L 的 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>和 H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>,100 mg/L 的 NaCl,1.5 g/L 的 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。阴极与阳极间距为 30 mm,面积比为 1:3。

为了使电沉积溶液充分混合,在配制的溶液和电沉积过程中添加搅拌器。超声振动和搅拌器的双向搅拌,阻止了溶液中离子的团聚,有利于溶液中 SiC 微粒均匀地沉积在铜基表面。使表层晶粒细小,组织致密,如图 1 所示。TC4 钛合金试样(10 mm×10 mm×4 mm)的组成成分见表 1。

表 1 Ti-6Al-4V 的组成成分  
Tab.1 Composition elements of Ti-6Al-4V

							wt%
Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
6.00	4.25	0.30	0.10	0.05	0.01	0.02	Bal.

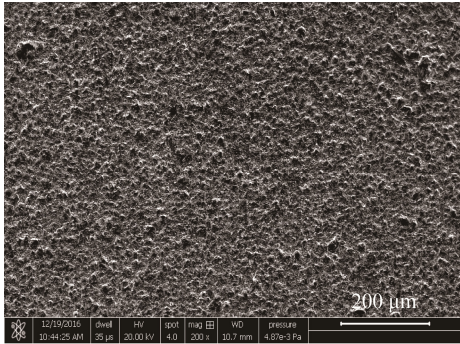


图 1 复合电极 Cu-SiC 铸层表面图  
Fig.1 Composite electrode Cu-SiC casting surface

## 1.2 电火花加工参数

使用的机床为电火花成型机床（北京，DM71 系

列）。为使粉末有效悬浮，在工作槽下添加磁力搅拌器，转子的快速转动使粉末沿着旋流充分悬浮起来。加工面设置在旋流流速最大的位置，不断循环搅拌工作液，避免粉末沉积在底层。在电火花工作液中添加 5 g/L 粒径为 7 μm 的碳粉，其加工参数如表 2 所示。

## 1.3 测试方法

将加工后的工件和电极超声清洗后称重。用荷兰 FEI 公司的 Sirion200 型扫描电子显微镜进行表面形貌和熔凝层剖面形貌分析；用日本 Future teach 公司的 FM800 型显微硬度计测试断面硬度，加载载荷 50 g，加载时间 10 s；用 D8 Advance 型多晶 X 射线衍射仪进行物相分析；用时代集团公司 TR200 粗糙度仪进行粗糙度检测。

表 2 加工参数  
Tab.2 Processing parameters

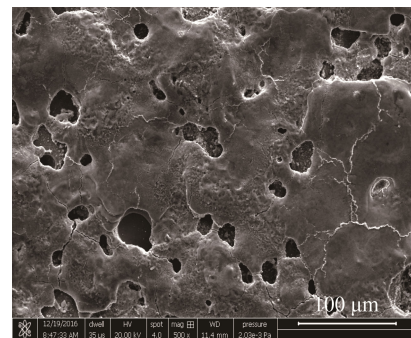
Electrode	Carbon concentration /(g·L <sup>-1</sup> )	Peak current/A	Pulse-on /μs	Pulse-off/μs	Reference voltage/V
Cu-SiC	5	9	90	5	45
Cu	5	9	90	5	45

# 2 结果与分析

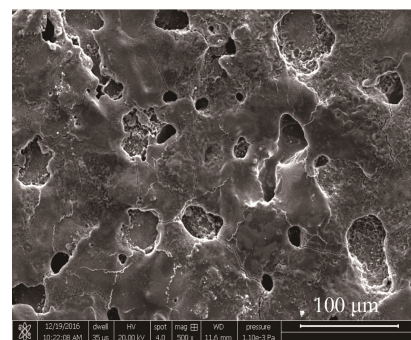
## 2.1 表面形貌和粗糙度分析

图 2 是 Cu-SiC 复合电极和 Cu 电极加工钛合金的表面形貌。由图可知，试样表面均出现不规则放电痕迹、气孔和显微裂纹。这是因为钛合金加工时，表面经受骤冷骤热的温度变化，诱发应力产生而出现显微裂纹。同时，工件材料受高温汽化作用产生气泡，渗入熔凝表层中，冷却凝固后生成显微气孔。在 Cu-SiC 复合电极加工的表面中，放电痕迹较大，深度统一，电蚀产物少。Cu 加工的表面中，放电蚀坑周围有残留物，凹坑深且面积大。说明这与 SiC 的物理性能有密切关系，在火花放电中，复合电极中 SiC 的熔点（2700 ℃）高于 Cu 的熔点（1083 ℃），其在高温下分解 SiC，汽化后进入放电通道，扩大了放电通道，降低了电场的介电参数和能量密度，从而提高了混粉电火花加工的表面质量。SiC 的导热系数（83.6 W/(m·K)）低于铜的导热系数（129 W/(m·K)），热传导性低，火花放电通道产生的热量被 SiC 吸收后大部分散失在工件表面，电蚀产物在高温高压作用下，迅速飞溅到工作液中，增大了材料的去除率。Cu 电极加工的表面，熔融部分电蚀产物累积在工件表面，使熔化金属来不及结晶，内部品格结构发生严重畸变，表面粗糙度和耐磨性降低。

图 3 为工具电极对表面粗糙度的影响。由图 3 可知，在相同的加工参数下，工件的表面粗糙度与电极



a Cu-SiC 复合电极加工



b Cu 电极加工

图 2 Ti-6Al-4V 表面形貌图

Fig.2 SEM of Ti-6Al-4V surface topography: a) Cu-SiC Composite electrode machining, b) Cu electrode machining

有直接关系。Cu-SiC 复合电极加工的工件，表面平均粗糙度  $Ra=2.825\ \mu\text{m}$ 。Cu 电极加工的表面平均粗糙度  $Ra=2.887\ \mu\text{m}$ 。

由上可知，SiC 的存在提高了电极的耐电蚀性，降低了表面粗糙度，改善了试样表面质量。

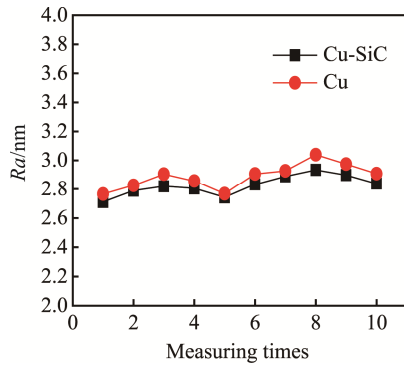


图 3 工具电极对表面粗糙度的影响

Fig.3 Effect of tool electrode on surface roughness.

## 2.2 熔凝层形貌分析

混粉电火花加工试样的耐磨性、耐蚀性以及显微硬度,与试样加工表面层的组织结构和化学成分密切相关。图 4 为 TC4 钛合金熔凝层形貌图。由图可知,试样表层断面金相组织主要由熔凝层和基体组成。熔凝层的最表层是新附着的松散层,易磨损且伴随着微观孔隙;次层熔凝急冷层,是放电熔化后再急剧冷却形成的,硬度非常高;最里层是熔凝冷却层,硬度值比急冷层低。Cu-SiC 复合电极加工的熔凝层致密性较好,而 Cu 电极加工的熔凝层较疏松,粘合性较差。这是因为在高温下, SiC 易分解并进入加工液中, S 与 C 是同族元素, C 与 Si 原子可以交换。其中, Si 与  $H^+$  的亲合力强,可以促使煤油分子内部分解,使

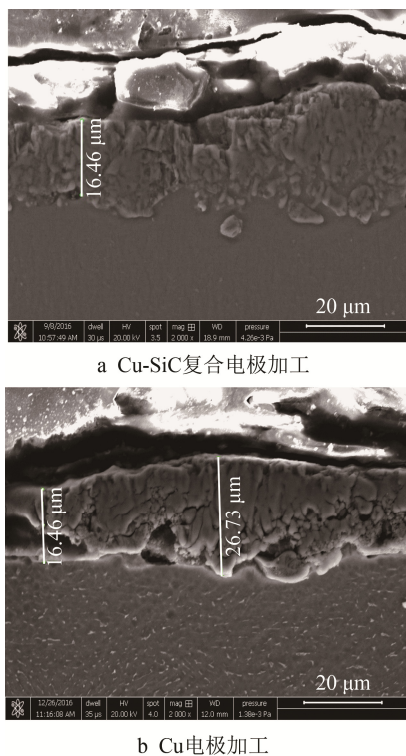


图 4 Ti-6Al-4V 熔凝层形貌图

Fig.4 Ti-6Al-4V morphology of melted layer: a) Cu-SiC Composite electrode machining, b) Cu electrode machining

工作液的介电强度降低。在高温下,工作液中混入游离碳粉可以充分提供 C 离子,与  $Ti^{4+}$  结合生成 TiC。此外, SiC 微粒具有高熔点性,熔化时要吸收更多的热量,降低了温度梯度变化,既保护了电极的耐蚀性,也促进了 TiC 物质的生成。

## 2.3 显微硬度和 X 衍射物相分析

钛合金硬度的变化与熔凝层的金相组织密不可分,尤其是熔凝层的致密性。熔凝层的组织越细密,硬度越大,耐磨性越好。图 5 为工具电极对显微硬度的影响。由图可知,钛合金基体硬度约为 350HV,两种电极加工后的硬度均随着距表层距离的增加而逐渐降低,直至趋于基体硬度,其中, Cu-SiC 复合电极加工后的表层硬度约为基体的 6 倍,铜电极加工后的表层硬度约为基体的 4 倍。Cu-SiC 复合电极加工后的表层硬度明显高于 Cu 电极加工后的表层硬度,这是因为在 Cu-SiC 复合电极加工表面, C、Si 等跟基体元素互相作用产生了高硬度层,生成了大量具有弥散强化作用的 TiC。

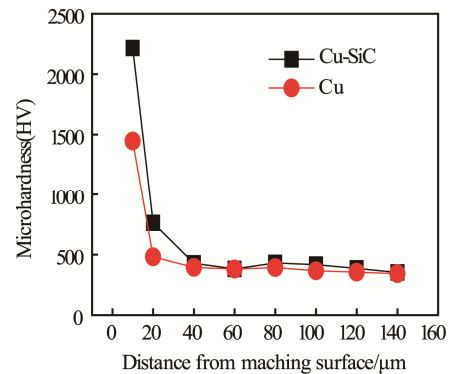


图 5 工具电极对显微硬度的影响

Fig.5 Effect of tool electrode on micro-hardness

图 6 为两种电极加工后试样的 XRD 图。由图可知,两种电极加工的表面均有 TiC 强峰出现,且峰相和位置相似。在电火花放电过程中,碳粉有两种作用:一种是扩大放电通道,使放电痕迹变大;另一种是在高温作用下转化成游离的碳,与熔融试样中的 Ti 发生化合反应并生成 TiC。TiC 峰相对应的峰值均反映了其本身含量,也间接反映了工件硬度和耐磨性。

## 2.4 电极损耗

评价工具电极损耗指标的公式为式(1)。

$$\theta = \frac{v_e}{v_m} \times 100\% = \frac{M_{1q} - M_{1h}}{M_{2q} - M_{2h}} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $v_e$  为工具电极的损耗速度, g/min;  $v_m$  为工件材料能达到的加工速度, g/min;  $M_{1q}$ 、 $M_{1h}$  为电火花电极加工前、后的质量, g;  $M_{2q}$ 、 $M_{2h}$  为电火花工件加工前、后的质量, g。在相同电参数下,将工件加工 30 min,由式(1)可得: Cu-SiC 电极损耗



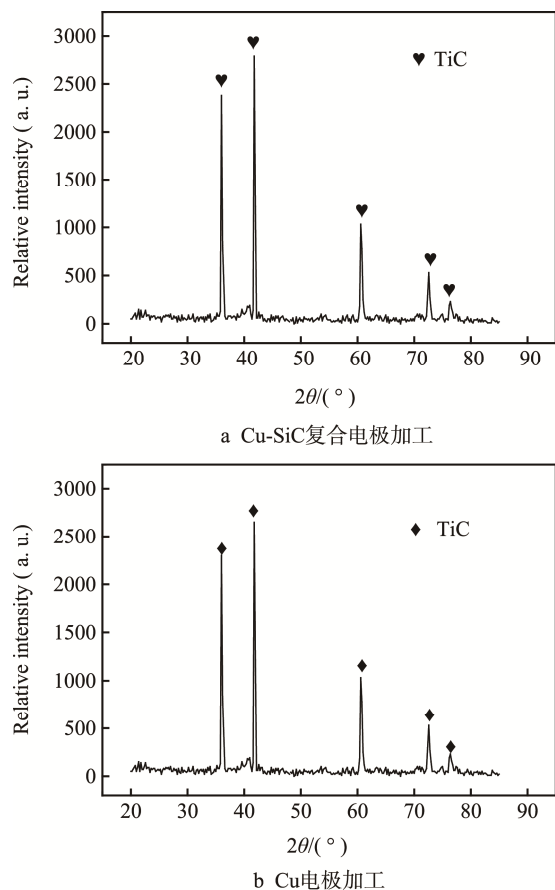


图6 TC4 X射线衍射分析

Fig.6 TC4 X-ray diffraction analysis: a) Cu-SiC Composite electrode machining, b) Cu electrode machining

$\theta=12\%$ , Cu 电极的电极损耗  $\theta=30\%$ 。这是因为火花放电瞬间主要以微凸点 SiC 为中心进行火花放电, SiC 的熔点比铜的熔点高, 大部分热量消耗在溶解 SiC 微粒上。当熔融的电极材料被抛到工作液中时, 均布在铜基体上的 SiC 起到了“骨架”的作用, 阻止大量铜被抛出, 以减少电极损耗。

### 3 结论

1) 在相同加工条件下, 试样表面形貌和表面粗糙度与电极有直接关系。Cu-SiC 复合电极加工的表面, 放电痕迹较大, 深度统一, 电蚀产物少。Cu 加工的表面中放电蚀坑周围有残留物出现, 凹坑深且面积大。这与 SiC 的熔点和导热系数有密切关系, SiC 的存在提高了电极的耐电蚀性, 降低了表面粗糙度, 改善了试样表面质量。

2) 混粉电火花加工试样的耐磨性、耐蚀性以及显微硬度, 与试样加工表面层的组织结构和化学成分密切相关。Cu-SiC 复合电极加工的熔凝层致密性较好, 耐磨性好, 最大硬度约为基体的 6 倍。Cu 电极加工的熔凝层疏松, 粘合性较差, 最大硬度约为基体的 4 倍。加工表面均有 TiC 生成, TiC 峰相的峰值均

反映了其本身的含量, 也间接反映了工件硬度和耐磨性。

3) 在相同电参数下, Cu-SiC 电极损耗  $\theta=12\%$ , Cu 电极的电极损耗  $\theta=30\%$ 。主要是均布在铜基体上的 SiC 起到了“骨架”的作用, 减少了电极损耗。

### 参考文献:

- [1] 王一龙, 俞伟元, 路文江, 等. 激光气体渗氮工艺对 TC4 钛合金表面性能的影响[J]. 电焊机, 2016, 46(11): 45-49.  
WANG Yi-long, YU Wei-yuan, LU Wen-jiang, et al. Effect of Laser Gas Nitriding Process on the Surface Properties of Titanium Alloy TC4[J]. Electric Welding Machine, 2016, 46(11): 45-49.
- [2] 李卫民, 曹秀洪. 影响钛合金机械加工因素的分析与研究[J]. 泰州职业技术学院学报, 2003(1): 18-20.  
LI Wei-min, CAO Xiu-hong. Analysis and Research about Influence Elements of Mechanical Processes of Titanium Alloys[J]. Journal of Taizhou Polytechnical Institute, 2003(1): 18-20.
- [3] 陈长军. 电火花表面加工新技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 59-64.  
CHEN Chang-jun. New Surface Processing Technology of Electrosark[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011: 59-64.
- [4] JANMANEE P, MUTTAMARA A. Surface Modification of Tungsten Carbide by Electrical Discharge Coating (EDC) Using a Titanium Powder Suspension[J]. Applied Surface Science, 2012, 258: 7255-7265.
- [5] MURAHARI K, KUMAR A. Effect of Dielectric Fluid with Surfactant and Graphite Powder on Electrical Discharge Machining of Titanium Alloy Using Taguchi Method[J]. Int J Eng Sci Technol, 2015, 18: 524-535.
- [6] KUMAR A, MAHESHWARI S, SHARMA C, et al. Research Developments in Additives Mixed Electrical Discharge Machining (AEDM): A State of Art Review[J]. Materials & Manufacturing Processes, 2010, 25(10): 1166-1180.
- [7] 赵万生. 先进电火花加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 45-74.  
ZHAO Wan-sheng. Advanced Electrical Discharge Machining Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 45-74.
- [8] 杨晓欣, 郭常宁, 裴景玉. 电火花成型原理及工艺应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 153-167.  
YANG Xiao-xin, GUO Chang-ning, PEI Jing-yu. Principle and Application of Electrical Discharge Machining [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2015: 153-167.
- [9] 方宇, 赵万生, 王振龙, 等. 利用 TiC 半烧结体电极进行电火花表面处理的实验研究[J]. 电加工与模具, 2004(5): 7-9.  
FANG Yu, ZHAO Wan-sheng, WANG Zhen-long, et al.

- Experimental Research on Surface Modification by EDM Through TiC Semi-sintered Electrode[J]. *Electromachining & Mould*, 2004(5): 7-9.
- [10] 李敏, 王宏伟, 蔡兰蓉, 等. 电火花表面强化 TC4 钛合金的组织与性能[J]. *宇航材料工艺*, 2013(3): 95-99.
- LI Min, WANG Hong-wei, CAI Lan-rong, et al. Micro-structure and Properties of TC4 Alloy with Electrical Discharge Surface Strengthening[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2013(3): 95-99.
- [11] 赵林, 李丽, 王好臣, 等. TC4 钛合金混粉电火花表面改性研究[J]. *表面技术*, 2017, 46(2): 138-143.
- ZHAO Lin, LI Li, WANG Hao-chen, et al. Surface Modification of TC4 Titanium Alloy by Mixed Powered Electrical Discharge Machine in Different Tool Electrode[J]. *Surface Technology*, 2017, 46(2): 138-143.
- [12] 陈文安, 刘志东, 王祥志, 等. 钛合金 TC4 放电加工电极损耗研究[J]. *电气与自动化*, 2012, 41(4): 163-166.
- CHEN Wen-an, LIU Zhi-dong, WANG Xiang-zhi, et al. Research on Tool Wear of Titanium Alloy TC4 by EDM[J]. *Machine Building & Automation*, 2012, 41(4): 163-166.
- [13] 谢志平, 苏明, 郑继明, 等. 电火花加工 Ti-6Al-4V 合金表面组织和性能[J]. *热加工工艺*, 2012, 41(18): 121-123.
- XIE Zhi-ping, SU Ming, ZHENG Ji-ming, et al. Micro-structure and Properties of Ti-6Al-4V Alloy Surface Processed by EDM[J]. *Hot Working Technology*, 2012, 41(18): 121-123.
- [14] 李丽, 殷凤仕, 牛宗伟, 等. 电沉积 Cu 基 SiC 复合电极材料[J]. *功能材料*, 2013, 44(8): 1188-1190.
- LI Li, YIN Feng-shi, NIU Zong-wei, et al. Electrodeposition of Cu-SiC Composite Electrode Material[J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(8): 1188-1190.
- [15] 王飞飞. 超声电沉积复合电极的实验研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2012.
- WANG Fei-fei. Experimental Investigation of Ultrasonic Electroforming Cu-SiC Composite Electrode[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2012.