

TC4 钛合金混粉电火花表面改性研究

赵林, 李丽, 王好臣, 刘云, 林本刚

(山东理工大学 机械工程学院, 山东 淄博 255049)

摘要: **目的** 通过混粉电火花加工方法, 分别使用紫铜和石墨作为工具电极, 获得综合性能较好的 TC4 钛合金表面。**方法** 利用手持式 TR200 粗糙度仪对工件表面的粗糙度进行测量, 用扫描电子显微镜(SEM)、X 射线衍射仪对工件组织形貌和物相结构进行分析, 用 FM800 型显微硬度计对工件表面进行显微硬度测量。**结果** 在相同电参数下, 紫铜电极加工的工件较石墨电极加工的工件表面粗糙度要低, 硬度也相对低。当 $I=4.5$ A、 $t_{ON}=30$ μ s 时, 紫铜电极加工的工件表面平均粗糙度值 $Ra=2.223$ μ m, 表面硬度约为 600HV; 石墨电极加工的工件表面平均粗糙度值 $Ra=2.796$ μ m, 表面硬度约为 700HV。当 $I=9$ A、 $t_{ON}=30$ μ s 时, 紫铜电极加工的工件表面平均粗糙度值 $Ra=2.748$ μ m, 表面硬度约为 650HV; 石墨电极加工的工件表面平均粗糙度值 $Ra=3.705$ μ m, 表面硬度约为 750HV。**结论** 在不同电极条件下混粉电火花加工后, TC4 钛合金工件表面都达到了强化的效果。

关键词: TC4 钛合金; 微观组织; 强化层; 表面粗糙度; 显微硬度; 表面改性

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)02-0138-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.02.022

Surface Modification of TC4 Titanium Alloy by Mixed Powered Electrical Discharge Machine in Different Tool Electrode

ZHAO Lin, LI Li, WANG Hao-chen, LIU Yun, LIN Ben-gang

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

ABSTRACT: The work aims to obtain high surface quality of TC4 titanium alloy by means of mixed powder electrical discharge machining method with red copper and graphite as tool electrodes. The roughness of the workpiece surface was measured by handheld TR200 roughness tester, surface morphology and phase structure were analyzed by using scanning electron microscope (SEM) and X-ray diffraction, and micro hardness of the workpiece was measured by using FM800 micro hardness tester. Provided with the same electrical parameters, the surface roughness and hardness of the workpiece treated with red copper electrode was lower than that treated with graphite electrode. Provided that $I=4.5$ A and $t_{ON}=30$ μ s, the average roughness values of the surfaces treated with red copper and graphite electrodes were 2.223 μ m and 2.796 μ m respectively, while the surface hardness values were 600HV and 700HV respectively. Provided that $I=9$ A and $t_{ON}=30$ μ s, the average roughness values of the surface treated with red copper and graphite electrodes were 2.748 μ m and 3.705 μ m respectively, while the surface hardness values were 650HV and 750HV respectively. Under different electrode conditions, the surfaces of TC4 titanium alloy work-

收稿日期: 2016-08-24; 修订日期: 2016-09-18

Received: 2016-08-24; Revised: 2016-09-18

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: 赵林(1991—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为先进制造技术与装备。

Biography: ZHAO Lin(1991—), Female, Master graduate student, Research focus: advanced manufacturing technology and equipment.

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

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

pieces machined by powder mixed EDM are all strengthened.

KEY WORDS: TC4 titanium alloy; microstructure; strengthened layer; surface roughness; microhardness; surface modification

TC4 钛合金因具有耐热性好、比强度高、耐腐蚀性好、塑性和韧性好而广泛应用于航空航天、舰船和医疗器械等领域^[1-3], 因此常需在环境比较恶劣的条件下进行工作。钛合金属于难加工材料, 存在导热系数低、耐磨性差、易粘着等缺陷^[4-7], 因此 TC4 钛合金的使用存在一定的局限性。为改善钛合金的某些性能, 许多学者提出了表面改性技术。

混粉电火花加工是在电火花工作介质中加入铝、硅等导电性或半导体性的微细粉末, 改变电火花放电状态, 克服常规电火花加工表面质量差和大面积加工时稳定性差的缺点, 提高工件表面质量^[8]。电火花加工中电极材料的选择尤为重要。电极材料的物理特性对放电腐蚀、加工速度、电极损耗、加工精度、表面质量的影响很大, 在相同参数下使用不同的电极材料对工件有不同的影响。已有许多国内外学者对混粉电火花加工进行了大量的研究。H. K. Kansal 等^[9]对混粉电火花加工进行研究, 结果表明混粉电火花加工生产效率得到提高, 表面质量有所改善。W. S. Zhao 等^[10]发现选择合适的放电参数可以提高混粉电火花加工的效率, 与常规电火花相比可以降低表面粗糙度。S. Tripathy 等^[11]研究发现, 在电介质中加入导电粉末可改善表面形貌, 减少表面缺陷, 如减少表面裂纹和表面粗糙度, 这直接关系到表面凹坑的大小和再铸层的分布。庞海峰^[12]发现向工作液中加入粉末改善了电火花加工后工件的表面质量, 特别是高浓度、高熔点混粉和窄脉冲宽度都有利于加工表面质量的提高。陈建丽等^[13]认为混粉电火花加工工艺适合于大面积精加工表面, 应留取适当的加工余量, 这样能够获得更好的加工表面, 且可以提高加工效率。F. Q. Hu 等人^[14]通过分析和研究, 发现与传统电火花加工相比, 采用混粉电火花加工的表面性能得到了改善——粗糙度下降了约 31.5%, 耐腐蚀性提高了近 100%。文中对 TC4 钛合金进行混粉电火花加工, 对不同条件下电加工后的表面性能进行对比。

1 试验

1.1 混粉电火花加工

基体材料是 TC4 钛合金, 其化学成分(以质量分数计)为: Al 5.5%~6.8%, V 3.5%~4.5%, Fe 0.3%, C 0.1%, N 0.05%, H 0.015%, O 0.20%, Ti 余量。试验在 DM71 系列精密电火花成型机床上进行, 机床

进行了改造, 工作台上安装搅拌系统, 使用负极性加工, 如图 1 所示。分别采用紫铜电极和石墨电极对工件进行强化处理, 两电极经过相同的工艺处理。使用紫铜电极加工时的混粉材料是 SiC 粉末, 使用石墨电极加工时的混粉材料是 Si 粉, 两种粉末的质量浓度都为 12 g/L。电火花试验参数如下: 脉冲宽度 $t_{ON}=30 \mu s$, 脉冲间隔为 $5 \mu s$, 基准电压为 75 V, 峰值电流为 4.5 A 和 9 A。通过改变峰值电流来观察在不同电极材料下的表面性能。

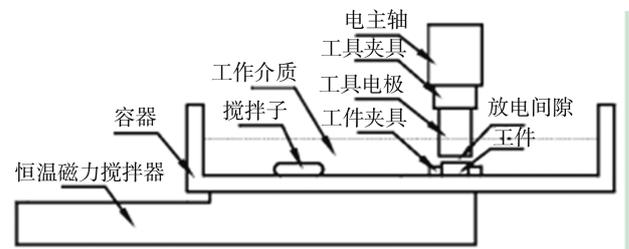


图 1 机床示意图

Fig.1 Diagram of machine

表 1 是紫铜、石墨和 TC4 钛合金的热学物理常数。从表 1 可以看出, 紫铜的熔点虽然较低, 但它的导热性能好, 所以紫铜电极的损耗较小。紫铜能够制成各种形状复杂且比较精密的电极, 在型腔加工用的工具电极中广泛应用。石墨电极的熔点和沸点比较高, 在粗加工宽脉冲时能吸附游离的碳来补偿电极损耗, 所以损耗相对较低, 已广泛应用于型腔加工。

表 1 试验材料的热学物理常数

Tab.1 Thermal constants of the experimental materials

Materials	Density ($g \cdot cm^{-3}$)	Melting point / $^{\circ}C$	Boiling point / $^{\circ}C$	Thermal conductivity / $(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	Specific heat / $(J \cdot kg^{-1} \cdot ^{\circ}C)$
Copper	8.96	1083	2500	383.3	410.0
Graphite	2.25	3652	4827	129.0	710.0
TC4	4.50	1660	3260	7.955	0.52

1.2 测试

1) 利用时代集团公司 TR200 手持式粗糙度仪对两种混粉方式下加工后的工件进行测量。

2) 利用荷兰 FEI 公司 Sirion200 型扫描电子显微镜对强化层的形貌和组织成分进行分析。对试样进行镶嵌、打磨、抛光处理, 用 HF+HNO₃+水 (10 mg:20 mg:70 mg) 混合溶液腐蚀 5~10 s 后清洗, 再利用扫描电子显微镜对断面组织形貌进行观察分析。

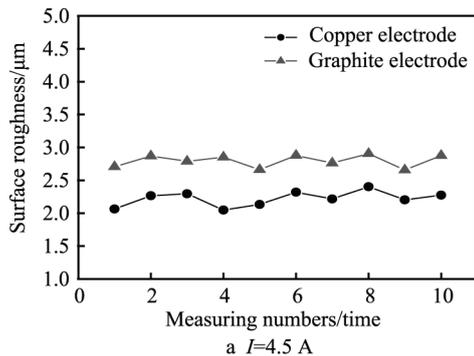
3) 利用 D8Advance 型多晶 X 射线粉末衍射仪对材料强化层进行物相分析。

4) 利用日本 futureteach 公司的 FM800 型显微硬度计对工件进行硬度测试, 加载载荷为 50 g, 加载时间为 15 s。

2 结果与分析

2.1 表面粗糙度

在加工工件表面取 10 个点测量粗糙度值。从图 2 中可以明显看出, 在脉冲能量相同时, 紫铜电极加



工表面要比石墨电极加工表面的粗糙度值低。图 2a 中, 紫铜电极、石墨电极加工表面平均粗糙度值(Ra)分别为 2.223、2.796 μm ; 图 2b 中, 紫铜电极、石墨电极加工表面平均粗糙度值(Ra)分别为 2.748、3.705 μm 。由于在窄脉冲精加工时, 相同的工艺参数下, 石墨电极损耗要比紫铜电极损耗大^[15], 而电火花成型加工是一种“copy”式的加工, 加工工件表面粗糙度与工具电极有直接的关系, 此时石墨电极损耗大, 表面质量变差, 所以紫铜电极加工表面要比石墨电极加工表面的粗糙度值低。

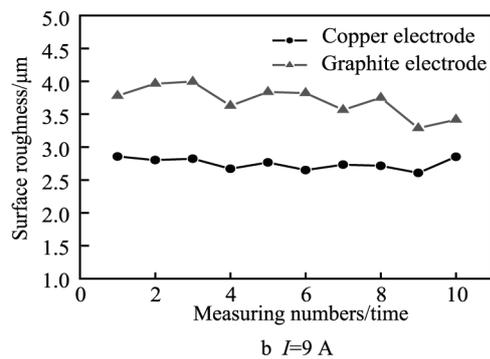


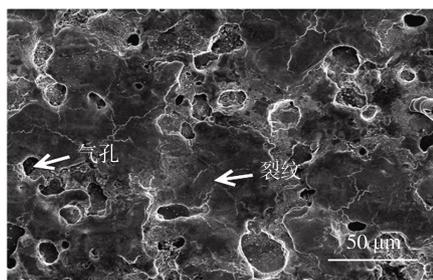
图 2 工具电极对工件表面粗糙度的影响

Fig.2 Effect of tool electrode on the surface roughness of workpiece

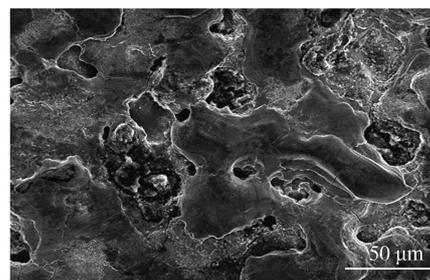
2.2 强化层微观组织形貌

图 3 中, c、d 两图相对 a、b 两图采用了相同的加工参数, 只是工具电极由紫铜改为石墨。对比发现, 使用石墨电极加工的工件表面质量相对要好, a、b 图相对 c、d 图中气孔要多, 且有裂纹产生。这是由于紫铜的熔点和沸点与石墨相比都较低, 火

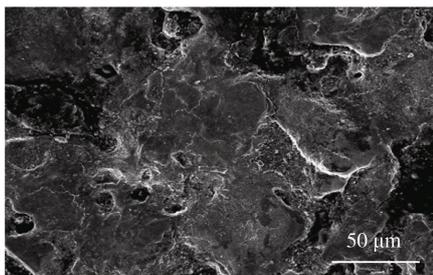
花放电时在瞬时高温的作用下, 紫铜电极达到熔融状态, 由于工作液的冷却作用, 熔融的电极部分发生骤热骤冷现象使气体来不及析出, 从而形成一些小气孔。此外, 在火花放电时的骤冷骤热过程中材料发生热胀冷缩作用, 而金属内部是相互限制的, 这种由于热胀冷缩而产生的热应力是裂纹产生的主要原因。



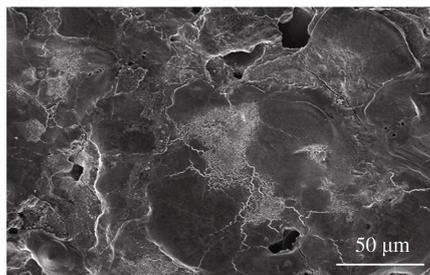
a I=4.5 A, 紫铜电极



b I=9 A, 紫铜电极



c I=4.5 A, 石墨电极



d I=9 A, 石墨电极

图 3 不同工艺条件下 TC4 钛合金微观组织形貌

Fig.3 Microstructure of TC4 alloys under different conditions: a) I=4.5 A, copper electrode, b) I=9 A, copper electrode, c) I=4.5 A, graphite electrode, d) I=9 A, graphite electrode

2.3 不同电极对强化层的影响

图 4 是分别用紫铜电极和石墨电极对工件进行混粉电火花加工后得到的工件断面 SEM 图片。从图中可以看出, 在电参数相同的情况下, 石墨电极加工的工件表层熔融层 (图 4c、d) 比紫铜电极加工的工件表层熔融层 (图 4a、b) 要厚。这是由于使用石墨电极时, 不

仅有在高温作用下从煤油中裂解出来的碳元素, 还有石墨电极溅射的 C 原子与高温下熔融的 Ti 基体发生化合反应而形成的 TiC 硬质相。而使用紫铜电极加工工件时, 只有瞬时高温作用下从煤油中分解出的碳元素参与反应; 此外紫铜电极的导热性能好, 能较多地将瞬时高温产生的热量散发到其他部位, 热量的散失导致发生熔融的金属材料变少, 所以强化层的厚度较薄。

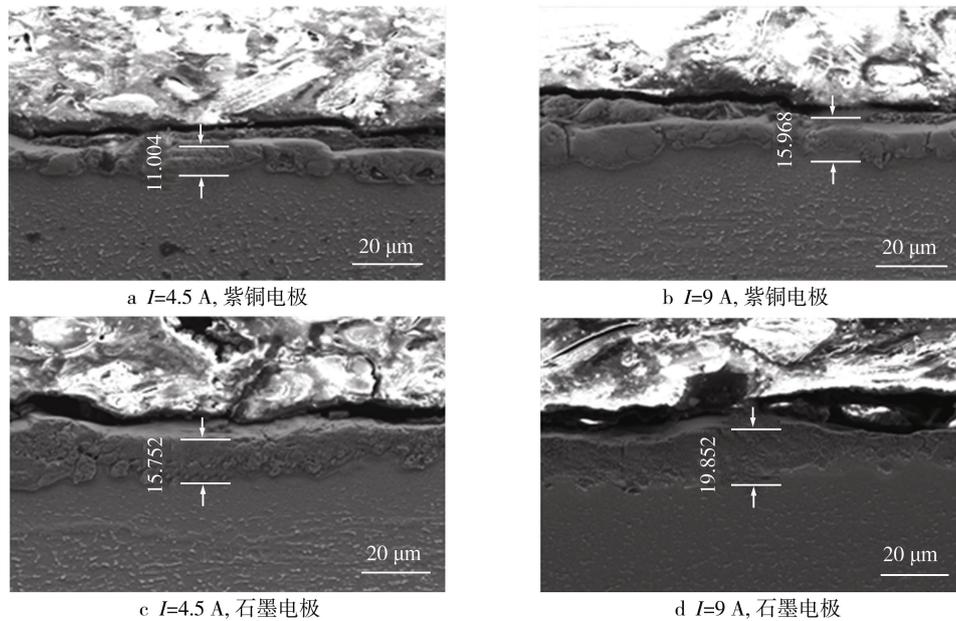


图 4 工件截面 SEM 照片

Fig.4 Sectional picture: a) $I=4.5$ A, copper electrode, b) $I=9$ A, copper electrode, c) $I=4.5$ A, graphite electrode, d) $I=9$ A, graphite electrode

2.4 X 射线衍射分析

对工件做 X 射线衍射的目的是为了确定加工后的工件表层有没有生成 TiC 强化相。从图 5 可以看出,

用不同电极在相同电参数下加工出的工件表层都有 TiC 强化相生成。两图中出现的衍射峰不仅位置相同, 并且形状也相似, 但强度有所不同, 说明生成碳化钛的含量有所不同。

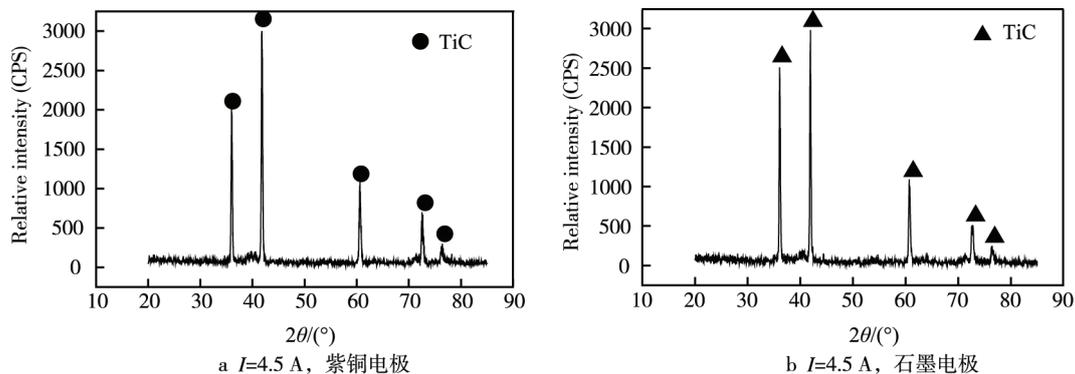


图 5 TC4 钛合金加工后的 X 射线衍射图

Fig.5 X-ray diffraction pattern of TC4 titanium alloy after machining: a) $I=4.5$ A, copper electrode, b) $I=9$ A, copper electrode

2.5 显微硬度

TC4 钛合金的基体硬度约为 320HV, 经过强化处理后, 工件表面的硬度得到明显提高, 约为基体硬

度的 2 倍。图 6 是在不同加工参数下石墨电极和紫铜电极对工件表面硬度的影响。由图可知, 不同工艺条件下处理后, 工件表面的硬度都有所提高, 但随着测点到表层距离的增大, 显微硬度值有所降低, 最终达

到一个平稳值,也就是基体材料的显微硬度值。石墨电极加工的工件表面硬度要高于紫铜电极加工的工件,这是由于紫铜电极加工工件表层的强化层只是由钛合金中的钛元素在火花放电过程中与工作介质中裂解的碳元素发生化合反应生成的碳化钛^[16]。而由于

电极材料成分的不同,在电火花加工过程中的瞬时高温作用下,电极发生熔融现象,熔融状态的电极材料和工件表面发生合金化反应生成新的强化相,石墨电极中含有较多的碳元素,与钛合金中的钛元素发生化合反应,生成了更多的碳化钛。

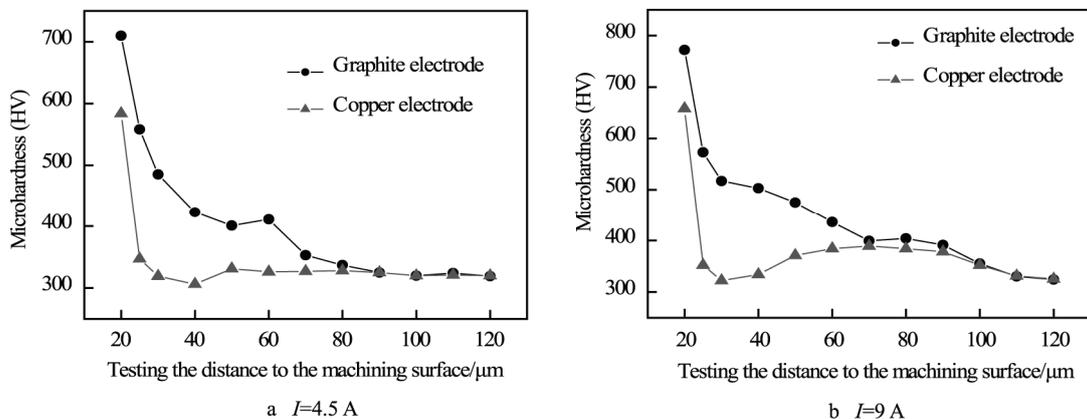


图6 工具电极对显微硬度的影响

Fig.6 Effect of tool electrode on micro-hardness

3 结论

1) 在相同电参数下,紫铜电极加工出的表面要比石墨电极加工出的表面粗糙度值低。与石墨电极相比,紫铜电极加工出的工件表层有气泡析出且伴随细微裂纹的产生。

2) 在电参数相同的情况下,石墨电极加工后的工件表层熔融层比紫铜电极加工后的工件表层熔融层要厚。

3) 对混粉电火花加工后的工件进行 XRD 分析发现,无论是用紫铜电极,还是用石墨电极,加工后的工件表层都生成了碳化钛硬质相。石墨电极加工后的工件较紫铜电极加工后的工件表层硬度要高,且两种电极加工后的工件表面硬度均约为基体硬度的 2 倍。

参考文献:

- [1] 宛琼,李付国,李超玲,等. 钛合金筒形件强力旋压工艺模拟[J]. 热加工工艺, 2012, 41(1): 98—100.
WAN Qiong, LI Fu-guo, LI Chao-ling, et al. Simulation on Power Spinning Process for Cylindrical Parts of Titanium Alloy[J]. Hot Working Technology, 2012, 41(1): 98—100.
- [2] 王怀峰,肖田,武文革. Ti-6Al-4V 车削温度的有限元仿真研究[J]. 机械设计与制造, 2012(9): 48—50.
WANG Huai-feng, XIAO Tian, WU Wen-ge. Finite Element Simulation on Cutting Temperature During Turning Ti-6Al-4V[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(9): 48—50.
- [3] 屠振密,朱永明,李宁,等. 钛及钛合金表面处理技

- 术的应用及发展[J]. 表面技术, 2009, 38(6): 76—78.
TU Zhen-mi, ZHU Yong-ming, LI Ning, et al. Applications and Advances on Surface Treatment for Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2009, 38(6): 76—78.
- [4] COSTA M, VENDITTI M, VOORWALD H, et al. Effect of WC-10%Co-4%Cr Coating on the Ti-6Al-4V Alloy Fatigue Strength[J]. Materials Science and Engineering, 2009, 507(1/2): 29—36.
- [5] 高霁,宋德阳,冯俊文. 工艺参数对钛合金激光熔覆 CBN 涂层几何形貌的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 77—80.
GAO Ji, SONG De-yang, FENG Jun-wen. Influence of Processing Parameters on Geometrical Features of CBN Coatings by Laser Cladding on Titanium Alloy Surface[J]. Surface Technology, 2015, 44(1): 77—80.
- [6] 王振霞,陈丽红,单小林,等. TC4 表面等离子 Ni 改性层摩擦磨损研究[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 92—95.
WANG Zhen-xia, CHEN Li-hong, SHAN Xiao-lin, et al. Study on Friction and Wear of Plasma Ni Modified Layer on Surface of TC4[J]. Surface Technology, 2015, 44(1): 92—95.
- [7] 白清友,刘海萍,毕四富,等. 船用钛合金微弧氧化膜的性能及其研究进展[J]. 中国表面工程, 2013, 26(1): 1—5.
BAI Qing-you, LIU Hai-ping, BI Si-fu, et al. Performance and Research Progress of Oxide Ceramic Coatings by Micro-arc Oxidation on Shipbuilding Titanium Alloy [J]. China Surface Engineering, 2013, 26(1): 1—5.
- [8] SIMAO J, LEE H G, ASPINEALL D K, et al. Workpiece Surface Modification Using Electrical Discharge Machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 42(2): 121—128.

- [9] KANSAL HK, SEHIJPAL S, PRADEEP K. Technology and Research Developments in powder Mixed Electric Discharge Machining(PMEDM)[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 184(1—3): 32—41.
- [10] ZHAO W S, MENG Q G, WANG Z L. The Application of Research on Powder Mixed EDM in Rough Machining[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 129(1—3): 30—33.
- [11] TRIPATHY S, TRIPATHY D K. Multi-attribute Optimization of Machining Process Parameters in Powder Mixed Electro-discharge Machining Using TOPSIS and Grey Relational Analysis[J]. *Engineering Science and Technology: An International Journal*, 2016, 19(1): 62—70.
- [12] 庞海峰. 混粉电火花加工表面特性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
PANG Hai-feng. Surface Characteristic Analysis of Workpiece Machined by Powder Mixed EDM[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [13] 陈建丽. 混粉电火花加工应用技术探讨[J]. *机电工程*, 2013, 42(9): 118—119.
- CHEN Jian-li. The Explore of Powder Mixed EDM Application Technology[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2013, 42(9): 118—119.
- [14] HU F Q, CAO F Y, SONG B Y, et al. Surface Properties of SiC_p/Al Composite by Powder-mixed EDM[J]. *Procedia CIRP*, 2013: 101—106.
- [15] 魏引焕, 张晓燕. 电极材料对电火花加工质量影响的分析[J]. *制造技术与机床*, 2006(1): 64—68.
WEI Yin-huan, ZHANG Xiao-yan. Analysis on the Influences of Electrode Material in EDM on Manufacturing Quality[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2006(1): 64—68.
- [16] 赵伟, 任延华, 任中根, 等. 钛合金 TC4 的电火花放电研究[J]. *机械科学与技术*, 2003, 22(增刊): 167—168.
ZHAO Wei, REN Yan-hua, REN Zhong-gen, et al. Research on Ti-Alloy TC4 Machined by EDM[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2003, 22(suppl.): 167—168.