

# 水中钛合金电火花加工的辅助电流抑制杂散腐蚀研究

王祥志 刘志东 魏 铮 田宗军 黄因慧

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

**摘要:**提出了水中钛合金电火花加工辅助电流抑制杂散腐蚀的加工方法,利用辅助电源施加阴极电流的方式使金属界面呈负电性并达到足够负的电极电位以抑制杂散腐蚀的发生。研究了杂散腐蚀的产生机理和辅助电流对杂散腐蚀的抑制机理,对添加辅助电流前后钛合金表面进行了电场仿真分析、实验验证、表面形貌及组份分析。结果表明:采用辅助电流的方式能有效地消除水中钛合金电火花加工中存在的杂散腐蚀。

**关键词:**电火花加工;钛合金;辅助电流;杂散腐蚀

**中图分类号:**TG662 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2615(2014)05-0793-06

## Stray Corrosion Restrain of EDM of Titanium Alloy Machined in Water Using Auxiliary Electric Current

Wang Xiangzhi, Liu Zhidong, Wei Zheng, Tian Zongjun, Huang Yin-hui

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** A method of using auxiliary electric current to restrain the stray corrosion of EDM of titanium alloy machined in water is proposed. In the method, an auxiliary power supply is used to provide enough cathode current to make the metal interface electronegative, as a result of which, the stray corrosion is inhibited. The mechanism of stray corrosion and how to restrain it by auxiliary electric current are studied. The surfaces of titanium alloy machined before and after adopting auxiliary electric current are tested by several means, such as electric field simulation analysis, electrical discharge machining tests, surface morphology and component analysis, and so on. The experimental results show that the auxiliary electric current can efficiently eliminate the stray corrosion of EDM of titanium alloy machined in water.

**Key words:** electron discharge machining(EDM); titanium alloy; auxiliary electric current; stray corrosion

钛合金因具有高强度、耐高温、质量轻、耐腐蚀等特性而广泛应用于航空航天工业<sup>[1-3]</sup>。由于钛合金属于难加工金属材料,因此在现有的加工工艺中,电火花加工技术在对钛合金加工中的作用愈发突出。然而钛合金导热性较差,采用煤油等油类工作介质加工时,放电通道内产生的热量不易迅速消除,消电离不彻底,容易引起电弧放电,导致加工不稳定,效率低,电极损耗大,形位公差难以保证。

为解决油中钛合金电火花加工存在的问题,国内外研究人员对采用水作为工作介质进行了大量研究。水具有较好的冷却性能,极间消电离容易,排屑效果好,加工中分解出的氧气可与金属产生氧化放热反应辅助蚀除加工材料,而且加工表面生成的氧化钛比煤油中生成的碳化钛熔点低且因更容易蚀除,同油类工作介质相比,水具有更高的加工效率和较低的相对电极损耗率<sup>[4-6]</sup>。

**基金项目:**国家自然科学基金(51175256, 51205197)资助项目;江苏省自然科学基金(BK2011732)资助项目。

**收稿日期:**2014-05-10;**修订日期:**2014-07-10

**通信作者:**刘志东,男,教授,博士生导师,E-mail:liutim@nuaa.edu.cn。

水是弱电解质,在水中电火花加工时会引起电解反应,在正极性加工时,非加工区域的工件表面发生氧化反应而产生彩色氧化膜,影响表面美观<sup>[7]</sup>;容易形成点蚀,严重影响工件表面质量,且容易成为新的氧化腐蚀的起点。这些杂散腐蚀都对钛合金工件表面产生了破坏性的影响。杂散腐蚀的存在使得水作为钛合金电火花加工放电介质的应用受到限制。

本文提出了一种水中钛合金电火花加工辅助电流抑制杂散腐蚀的方法,即在工件上方电极外围区域,通过辅助直流电源和外加的辅助电极向工件表面提供阴极电流,使工件表面获得足够的电子,促使处于平衡状态的电位产生负偏移,工件界面呈负电性并达到足够负的电极电位,从而抑制型腔外围工件的杂散腐蚀。

## 1 辅助电流抑制杂散腐蚀方法

辅助电流抑制杂散腐蚀加工所用的实验装置如图1所示。采用紫铜电极对钛合金 TC4 进行加工,实验参数和条件如表1所示。辅助直流电源的正极与架设在距工件表面 1 mm 处的环状辅助电极相连,负极接加工工件。脉冲电源正极接工件,负极接工具电极。在机床电源和辅助直流电源之间加有二极管避免两个电源间互相作用。

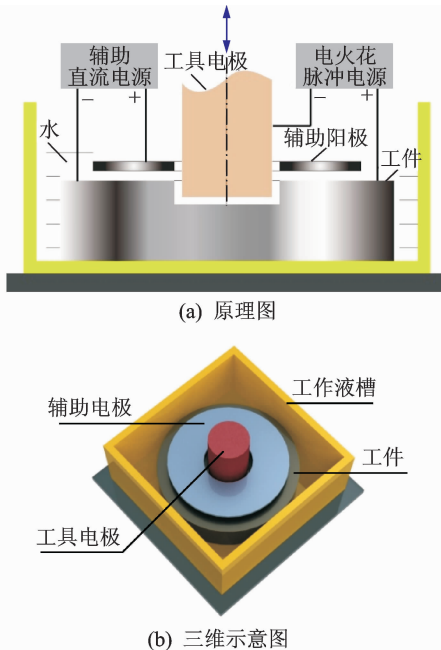


图1 辅助电流电火花加工装置

Fig. 1 Equipment principle diagram of auxiliary electric current EDM

表1 实验条件

项目	参数或条件
工件材料	TC4
电极材料	紫铜
辅助电极材料	不锈钢
工件尺寸/(mm×mm)	30×20
电极直径/mm	Φ10
辅助电极外径/mm	Φ50
辅助电极内径/mm	Φ11
辅助电源	10 V, 直流
工作介质	自来水
极性	正极性

## 2 辅助电流抑制杂散腐蚀机理分析

### 2.1 杂散腐蚀产生机理

以水或者含水液体作为电火花加工放电介质时,在空载期间和放电击穿前均存在一定的电流,称为漏电流,这是产生杂散腐蚀的根源所在,波形显示如图2所示。

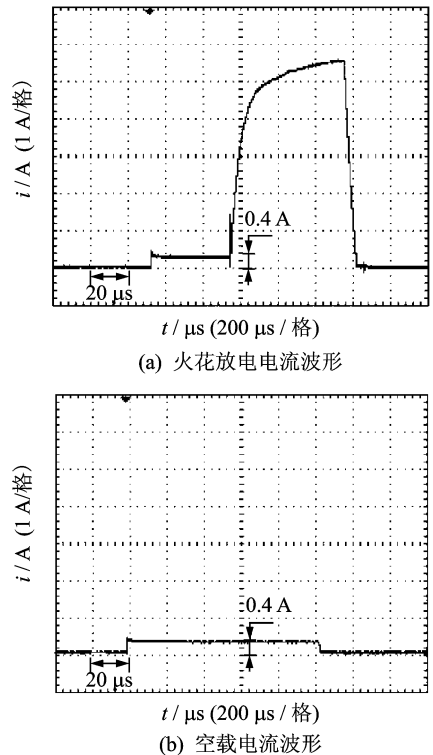
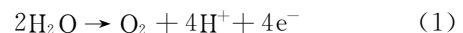


图2 水中电火花加工电流波形

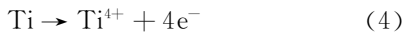
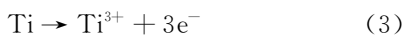
Fig. 2 Current waveform of EDM in water

由于水是弱电解质,在脉冲电源的作用下发生电解,产生  $H^+$  和电子

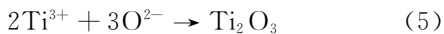


水中的  $H^+$  和电子在电源电压作用下有规律

地向阴阳两极移动,与电源和机床附加电阻形成电流回路,产生漏电流。在漏电流作用下,阳极钛合金表面钛原子失去电子,转变成钛离子



电子留在金属中或者传导到高电位区;一部分钛离子进入溶液,另一部分与水中的氧发生氧化反应,生成钛的氧化物



其过程如图 3 所示。这些氧化物附着在工件表面形成氧化膜,氧化膜表面的反射光与氧化膜—钛界面内部的反射光发生光的干涉作用,外观上呈现出彩色。

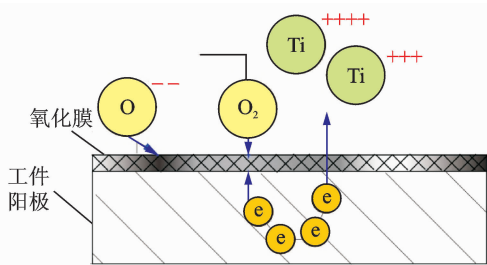


图 3 钛合金表面氧化杂散腐蚀离子迁移过程

Fig. 3 Migration of ions in oxidative and electrolytic corrosion on titanium alloy

### 2.2 辅助电流抑制杂散腐蚀机理

辅助电流抑制杂散腐蚀的原理是在钛合金电火花加工中,通过引入辅助电流和电源的方式,在加工区域外围和辅助电极之间形成电场,向工件表面提供阴极电流。工件表面在获得足够的电子后,使处于平衡状态的电位产生负偏移,表面呈负电性并达到足够负的电极电位,从而抑制杂散腐蚀反应的进行,原理如图 4 所示。

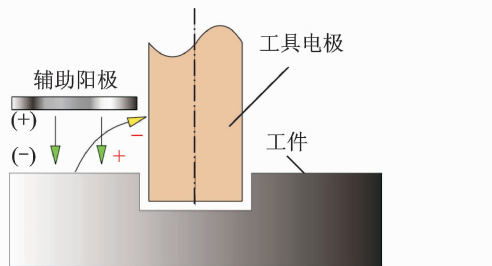


图 4 添加辅助电流示意图

Fig. 4 Schematic diagram of adopting auxiliary electric current

在外加回路中,工件接外加电源负极,辅助电极为正极,以水中  $\text{H}^+$  和  $\text{OH}^-$  作为载体形成电流,辅助电源强制对钛原子提供电子,迫使钛的失电子反

应;式(3,4)右侧电子数增多而向反方向进行,不再向右进行。外部电子到达钛表面,使工件表面带负电,钛离子挣脱金属表面晶格势场进入水中的阻力增大。平衡电位产生负偏移,金属界面呈负电性并达到足够负的电极电位,钛原子的电子难以脱离,从而抑制杂散腐蚀反应的发生,过程如图 5 所示。

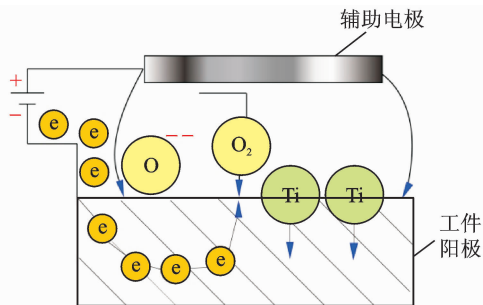


图 5 辅助电流抑制杂散腐蚀离子迁移过程

Fig. 5 Migration of ions in process of auxiliary electric current restraining electrolytic corrosion

### 2.3 电场仿真分析

为了更好地对比加入辅助电流前后工件周围电场的变化情况,文中对模型进行了简化:选取加工中的工件、电极和辅助电极的中间剖面进行电场研究;为了对比效果更加明显,假设去掉右侧的辅助电极剖面,模型如图 6 所示。

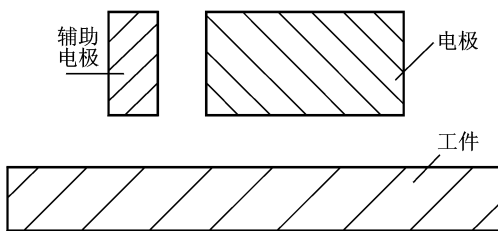


图 6 辅助电流仿真模型示意图

Fig. 6 Model schematic diagram of auxiliary electric current analysis

假设外电场为稳恒电流场,且发生杂散腐蚀的部分满足法拉第定律。电场的分布状态直接影响电流密度的分布,而阳极金属的腐蚀速度与其表面的电流密度成正比。可通过模拟工件加工型腔外围各点的电场强度分布来反映空间点的电流密度,得出杂散腐蚀反应的实际状态。图 7 为建立的电位分布数学模型。

在整个封闭区域内,各点的电势  $\varphi(x,y)$  满足拉普拉斯方程<sup>[8]</sup>

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (7)$$

电火花加工采用正极性加工,工件接阳极,工具电极接阴极。辅助电源的阴极接工件,阳极接辅助电极。由于两个电源均以工件作为参照,边界条

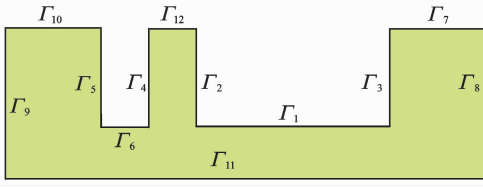


图7 电位分布数学模型

Fig. 7 Mathematical model of potential distribution

件如下:

未加入辅助电流前:

工具电极

$$\varphi|_{r_1} = \varphi|_{r_2} = \varphi|_{r_3} = -U_1 \quad (8)$$

工件

$$\varphi|_{r_{11}} = 0 \quad (9)$$

其他边界条件

$$\left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{r_7} = \left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{r_8} = \left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{r_9} = \left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{r_{10}} = \left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_{r_{12}} = 0 \quad (10)$$

加入辅助电流后,添加边界条件

$$\varphi|_{r_4} = \varphi|_{r_5} = \varphi|_{r_6} = U_2 \quad (11)$$

仿真中选用  $U_1 = 80 \text{ V}$ ,  $U_2 = 10 \text{ V}$ , 采用 ANSYS 对电场进行仿真。

仿真结果如图8所示。可以看出,加入辅助电流后,电火花脉冲电源形成的电场对非加工区域的影响强度降低到零,加工区域的电场分布未产生明显变化。这说明,辅助电流的加入仅作用于非加工区域,对电火花脉冲电源电场在非加工区域起到屏蔽作用。

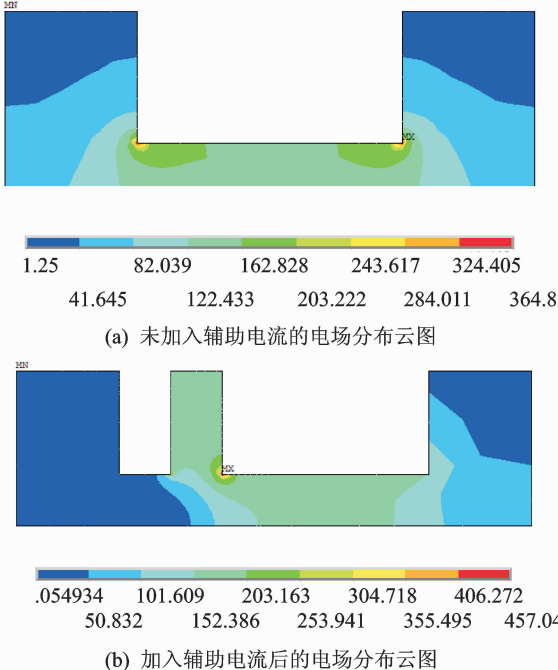
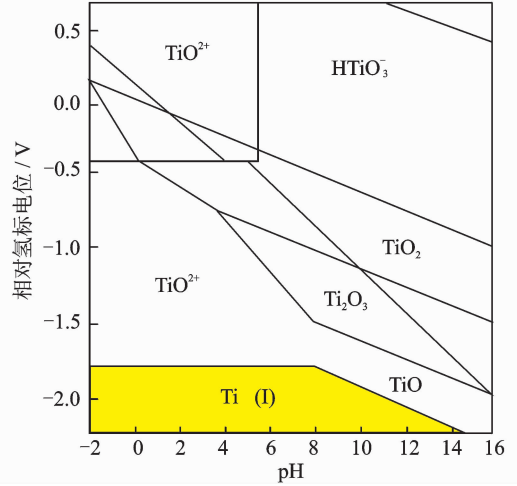


图8 电场有限元仿真

Fig. 8 Finite element simulation of electric field

## 2.4 辅助电流实验电源参数选择依据

辅助电流的电源参数直接影响对钛合金表面的保护效果,需要确定对钛合金进行保护的参数。为解决钛合金保护问题,工程上常用的 Ti-H<sub>2</sub>O 系电位-pH 图(25°C)如图9所示<sup>[9]</sup>,凭借该图可以很好地预测电化学反应的方向和金属的腐蚀倾向。

图9 Ti-H<sub>2</sub>O 系电位-pH 图Fig. 9 Potential-pH graph of Ti-H<sub>2</sub>O

在钛合金电火花加工中,水作为工作介质的 PH 值维持在 6~8 之间,为保证在钛合金电火花加工中表面不被腐蚀,可将钛合金工件的电位维持在 -1.628 V 以下,即在图9中所示(I)区所示范围,此区域属于钛的热力学稳定区,不会发生钛腐蚀。在电火花加工过程中,工作介质的温度会随着加工进行而逐渐升高,钛的电极电位应该更加负一些<sup>[10]</sup>。为充分保证辅助电流的效果,实验中辅助直流电压设置为 -10 V (远低于 -1.628 V 的电极电位电压)。

## 3 实验结果

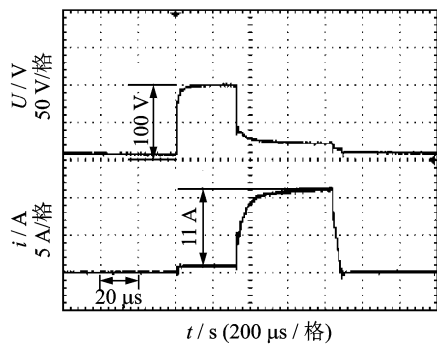
### 3.1 辅助电流对放电加工状态的影响

图10为加入辅助电流前后放电电流波形的对比。在加入辅助电流后,波形并未产生明显变化,放电加工中产生的漏电流依然存在并且加工工艺指标未出现变化。由此可以得出,辅助电流的加入并未影响原有的加工状态,它对工件的保护是通过给电极表面一个负电压,使得工件处于负电位来实现的,而非抑制漏电流的产生。

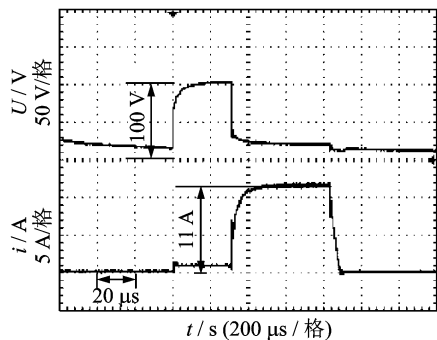
### 3.2 辅助电流对杂散腐蚀的抑制效果

图11为加入辅助电流前后的放电加工外围表面状态,图中+为对应图12的光学显微图取样点。在加入辅助电流前,由于漏电流作用于非加工区





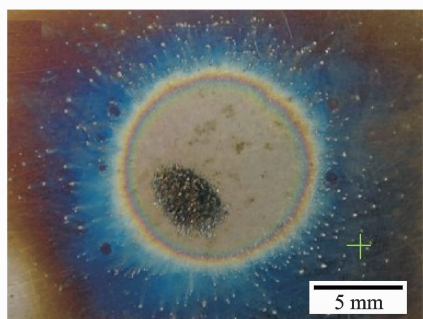
(a) 未加入辅助电流的放电波形



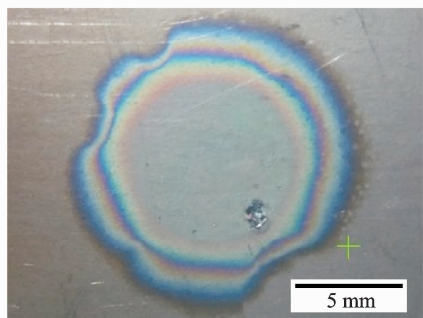
(b) 加入辅助电流后的放电波形

图 10 加入辅助电流前后的放电波形

Fig. 10 Discharge waveform before and after adopting auxiliary electric current



(a) 加入辅助电流前

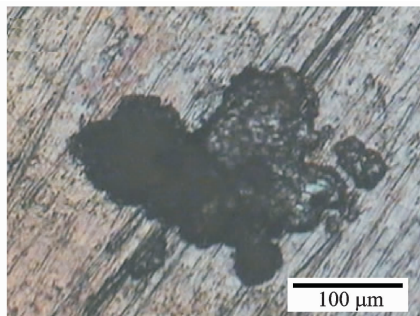


(b) 加入辅助电流后

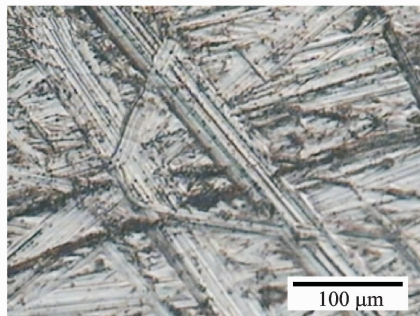
图 11 加工后工件表面

Fig. 11 Workpiece surfaces after machining

域,表面出现了大量的彩色氧化膜和飞溅的钛合金微粒;增加了辅助电流后,非加工区域无彩色氧化膜和飞溅现象产生。说明辅助电流可有效抑制加工



(a) 加入辅助电流前



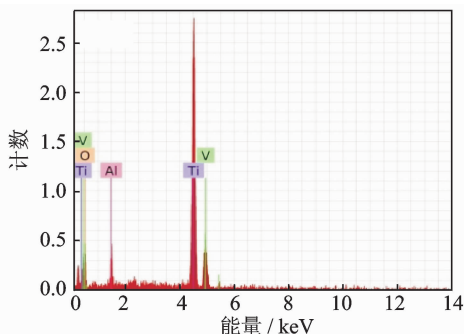
(b) 加入辅助电流后

图 12 加工型腔外围局部放大图

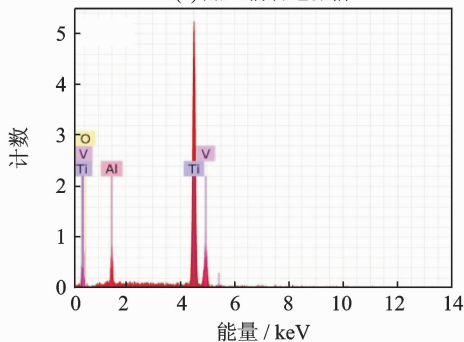
Fig. 12 Partially enlarged view of periphery of cavity

外围工件表面的氧化,抑制彩色氧化膜的产生并防止微粒飞溅对表面的破坏。实验结果与仿真一致。

图 13 和表 2 为加工后工件外围表面成分对比,可以看出,加入辅助电流前工件表面含氧量达到 36%,而加入辅助电流后表面的含氧量仅为 0.26%。



(a) 加入辅助电流前



(b) 加入辅助电流后

图 13 加工型腔外围成分能谱曲线

Fig. 13 Spectrum curve of elements of periphery of cavity

由此可知,加入辅助电流能有效地抑制杂散腐蚀,保护工件表面。

表2 辅助电流加入前后工件表面元素含量

Tab.2 Elemental content of workpiece surface before and after adopting auxiliary electric current %

表面元素	Ti	O	Al	V
加入前	58.35	35.96	2.90	2.79
加入后	91.82	0.26	5.45	2.47

## 4 结 论

本文提出了辅助电流抑制水中钛合金电火花加工杂散腐蚀的方法,进行了理论分析和实验验证,得出如下几点结论:

(1) 提出了采用添加辅助电流的方式解决水中钛合金电火花加工的杂散腐蚀问题。

(2) 辅助电流的加入,使工件表面处于平衡状态的电位产生负偏移,抑制杂散腐蚀反应的进行。

(3) ANSYS 有限元分析表明,辅助电流的加入仅作用于非加工区域,对电火花脉冲电源电场在非加工区域起到屏蔽作用。

(4) 实验结果分析表明,采用辅助电流的方式能有效地消除杂散腐蚀。

### 参考文献:

[1] 刘志东,高长水. 电火花加工工艺及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2011.  
[2] 陈顺隆,黄豊元,铃木康夫,等. 蒸馏水加工液と

した Ti-6Al-4V 合金の放电加工特性[J]. 軽金属, 1997,47(4): 226-231.

- [3] 萧至君. 不同加工液(煤油,蒸馏水,混合液)对钛合金(Ti-6Al-4V)放电加工特性之影响[D]. 台湾:国立中央大学,2000.  
[4] Kunieda M, Furuoya S, Taniguchi N. Improvement of EDM efficiency by supplying oxygen gas into gap [J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 1991, 40(1): 215-218.  
[5] Chen S L, Yan B H, Huang F Y. Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 87(1/2/3):107-111.  
[6] 王祥志,刘志东,薛荣媛,等. 介质电导率对钛合金电火花加工性能的影响研究[J]. 电加工与模具, 2013(4):19-22.  
Wang Xiangzhi, Liu Zhidong, Xue Rongyuan, et al. Study on influence by the conductivity of dielectrics on EDM performance of Titanium alloy[J]. Electro-machining & Mould, 2013(4):19-22.  
[7] 郑铸,迟恩田. 钛合金水中电火花加工的研究[J]. 航空工艺技术, 1986(4): 31-36.  
[8] 范植坚,李新忠,王天诚. 电解加工与复合电解加工[M]. 北京:国防工业出版社,2008.  
[9] 辛湘杰,薛峻峰,曹敏. 钛的腐蚀、防护及工程应用[M]. 安徽:安徽科学技术出版社,1988.  
[10] 胡士信. 阴极保护工程手册[M]. 北京:化学工业出版社,1999.

