

# Inconel718多通道放电烧蚀铣削加工技术研究\*

傅炯波, 邱明波

(南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**[摘要]** 为了提高高温合金 Inconel718 电火花放电烧蚀加工效率, 改善工件表面质量, 使用多通道放电烧蚀加工新方法对 Inconel718 进行多通道放电烧蚀铣削加工试验。研究表明: 在多通道放电烧蚀加工过程中, 放电通道的个数是随机的; 在一个脉冲放电周期中, 随着通道数目的增加, 电压波形呈阶梯下降, 总回路电流波形呈阶梯上升。对比常规电火花烧蚀加工, 多通道放电烧蚀加工的总回路电流提高, 使得材料去除率提高 73.7%; 同时, 多通道放电分散放电能量, 使得多通道放电烧蚀加工后工件表面粗糙度较常规电火花烧蚀加工下降 14.6%, 工件表面微裂纹变少, 裂纹的宽度和长度变小。

**关键词:** 多通道放电烧蚀; 旋转多通道电极; Inconel718; 表面质量; 加工效率

## Study on Multi-Channel Discharge Ablation Milling Processing of Inconel718

FU Jiongbo, QIU Mingbo

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

**[ABSTRACT]** To improve the electrical discharge machining (EDM) ablation efficiency of superalloy Inconel718 and enhance the post-ablation surface quality of the superalloy, the multi-channel discharge ablation milling experiments with Inconel718 were performed using a new method of multi-channel discharge ablation. The results show that the number of discharge channels was random in the multi-channel discharge ablation process. In a pulse discharge cycle, with an increase in discharge channels, the voltage waveform decreased stepwise while the current waveform rose stepwise. Compared with EDM ablation, the material removal rate (MRR) of Inconel718 with multi-channel discharge ablation increased by 73.7%, as the total loop current of multi-channel discharge ablation increased. In addition, as the multi-channel discharge dispersed the discharge energy, the surface roughness of the workpiece decreased by 14.6%, surface micro-cracks decreased, and recast layer thickness decreased.

**Keywords:** Multi-channel discharge ablation; Rotating multi-channel electrode; Inconel718; Surface quality; Processing efficiency

**DOI:**10.16080/j.issn1671-833x.2019.12.097

高温合金 Inconel718 具有良好的抗疲劳、抗氧化、耐腐蚀性能, 被广泛应用于航空航天、核能及石油工业中, 但镍基高温合金导热性差、强度高, 在传统的机械加工中存在加工硬化、刀具磨损的问题<sup>[1]</sup>。电火花加工利用电能转化为热能去除工件材料, 只与被加工对象的导电性有关, 与加工对象的硬度、强度等力学性能无关, 是金属加工的重要方法<sup>[2]</sup>。Li 等<sup>[3]</sup>用正交法研究了镍基高温合金电火花加工时峰值电流、脉宽、占空比、放电电压对材料去除率的影响, 得出了镍基高、温合金电火花

加工的最优参数。孔令蕾等<sup>[4]</sup>采用由紫铜颗粒经高温烧结获得的多孔材料作为工具电极对 Inconel718 进行电火花加工, 获得了比实体电极更高的材料去除率和更低的电极损耗率。Shen 等<sup>[5]</sup>用干式电火花铣削方法加工 Inconel718, 获得了更低的表面粗糙度, 更少的表面微裂纹。王飞等<sup>[6]</sup>用电火花电弧复合加工方法加工 Inconel718, 加工效率达到传统电火花加工的 18 倍。

相比于机械加工方法, 电火花加工存在加工效率低的劣势。为了提高电火花加工效率, 刘志东等<sup>[7-9]</sup>提出一种电火花放电烧蚀加工方法, 该方法在电火花放电过程中通入氧气, 利用金属燃烧产生的巨大化学能除工

\* 基金项目: 国家自然科学基金 (51675272)。

件,加工效率较传统电火花加工提高 10 倍以上。徐安阳等<sup>[10-11]</sup>对 Inconel718 进行了电火花放电烧蚀加工试验,加工效率为传统电火花加工的 37.3 倍。

为了同时兼顾烧蚀加工效率与工件表面质量,本文提出了多通道放电烧蚀加工新方法。该方法采用多通道电极进行加工,通过在电极一端串联限流电阻的方法增加集束电极中各电极电势,从而实现一个脉冲多根电极同时放电。多通道放电烧蚀加工在高效加工的同时分散放电能量,从而改善工件表面质量。

## 1 试验原理及方法

### 1.1 多通道放电原理

多通道放电原理如图 1 所示。多通道放电采用如图 2 所示的多通道电极。在多通道电极各电极的一端串联一限流电阻  $R$ ,电阻分压作用使得放电回路中的电荷重新分布,电极中未放电路紫铜管与工件之间依然保持较高电势差。假设在一个脉冲放电周期中,编号为 1 的电极首先发生火花放电,用  $I_{e1}$  表示流经该电极的电流。 $U_z$  为放电电极与工件间火花维持电压,其值一般为 20V 左右。根据欧姆定律可知,未放电电极与工件间的电势差  $U_e$  可表示为:

$$U_e = U_z + I_{e1}R \quad (1)$$

式(1)中,  $U_e$  的值大于电火花极间维持电压 ( $U_e > U_z$ ),如果极间距离合适,该脉冲周期中未放电电极与工件之间可以再次产生火花放电,从而形成多通道放电。

### 1.2 研究方法

为研究多通道放电烧蚀加工对 Inconel718 材料去除率及工件表面质量的影响,进行了多通道放电烧蚀加工和常规电火花烧蚀加工对比试验。两种加工方式均采用多通道电极进行加工。图 3 为常规电火花烧蚀加工示意图。在进行常规电火花烧蚀加工时,每根紫铜电极之间并联,多通道电极中各电极电势相等。假设在一个脉冲放电周期中,编号为 1 的电极首先发生火花放电,未放电电极与工件间的电势差 ( $U_e = U_z \approx 20V$ ),该电

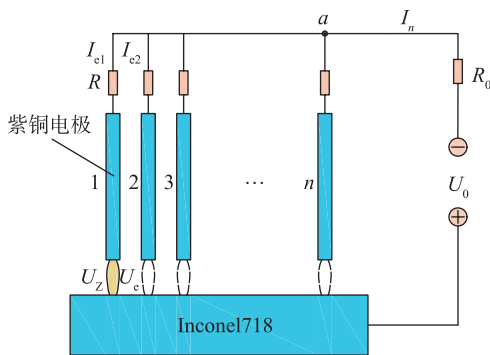


图1 多通道放电原理图

Fig.1 Principle diagram of multi-channel discharge

势差不足以再次产生击穿放电,因此,在一个放电脉冲周期中只有一根电极发生火花放电。为保持放电参数一致,在并联的紫铜电极后串联限流电阻  $R$ ,其阻值等于多通道放电烧蚀加工时限流电阻的大小,使常规电火花烧蚀加工中总回路电流大小等于多通道放电烧蚀加工中只有单根电极放电时的总回路电流大小。

## 2 试验系统

### 2.1 多通道电极

图 2 为多通道电极示意图,多通道电极由 12 根中空紫铜电极进行制备。紫铜管尺寸为外径 2mm,内径为 0.8mm。每根紫铜电极由电极支架进行定位,并由环氧树脂 AB 胶进行固定。电极之间互不接触,相互绝缘,且单独进电。聚四氟乙烯管用来输送烧蚀加工所需的雾化介质。电极支架与聚四氟乙烯管之间涂上密封胶用来保证多通道电极的密封,使雾化介质通过中空紫铜电极进入加工间隙。

### 2.2 试验装置

图 4(a)为试验系统原理图,图 4(b)为试验实物图。水基工作液与氧气通过雾化喷嘴生成雾化介质,并通过中空紫铜电极进入加工间隙;多通道电极在直流电机的带动下作旋转运动;在多通道电极各电极的一端串联一



图2 多通道电极示意图

Fig.2 Schematic diagram of multi-channel electrode

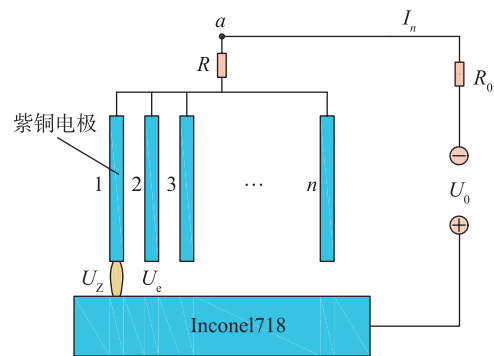


图3 常规电火花烧蚀加工

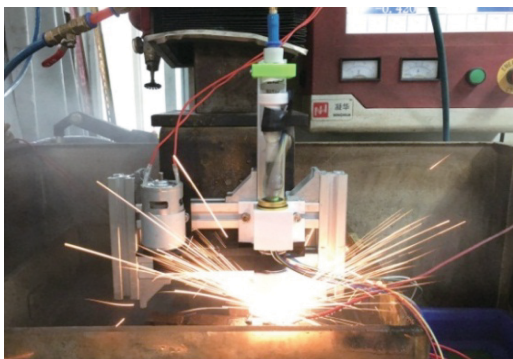
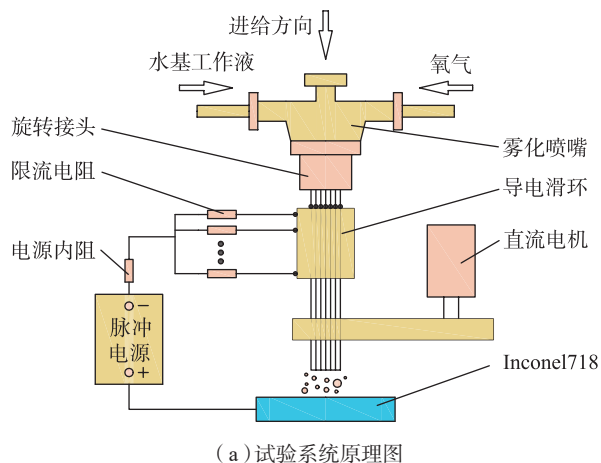
Fig.3 Principle diagram of EDM ablation

限流电阻,用来增加加工中各电极的电势。具体试验参数如表1所示。

### 3 试验结果与讨论

#### 3.1 放电波形对比分析

图5为多通道放电烧蚀加工和常规电火花烧蚀加工的放电波形对比。示波器CH1通道检测图1和图3中a点与工件间的电势差,示波器CH2通道检测放电



(b) 试验实物图

图4 试验系统

Fig.4 Experiment system

表1 多通道放电试验参数

Table 1 Experiment parameter of multi-channel discharge

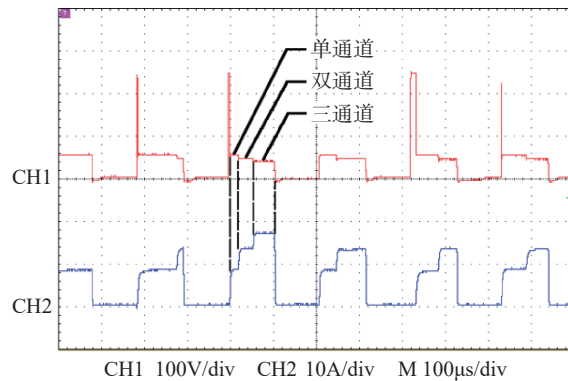
参数	数值
电极	紫铜
工件	Inconel718
空载电压/V	260
脉宽/ $\mu\text{s}$	220
脉间/ $\mu\text{s}$	200
极性	正极性
水基工作液/ $(\text{mL}\cdot\text{min}^{-1})$	80
氧气压强/MPa	0.2
限流电阻/ $\Omega$	5

回路总电流  $I_n$  的大小。从图5中的波形图可以得知,在多通道放电烧蚀加工过程中,放电通道的个数是随机的,它与极间介质状态和极间距离有关。只有单根紫铜电极放电时,未放电电极与工件间的电势差  $U_0$  为60V左右,远大于极间维持电压20V,保证在一个放电脉冲中,其余未放电电极与工件之间可以再次产生火花放电。在一个放电脉冲周期中,随着通道数目的增加,电压波形呈阶梯下降,电流波形呈阶梯上升。放电总回路电流的大小  $I_n$ :

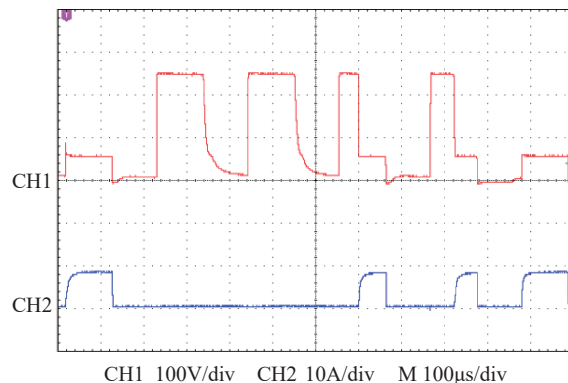
$$I_n = \frac{U_0 - U_z}{R_0 + \frac{R}{n}} \quad (2)$$

式(2)中,  $U_0$  为脉冲电源电压;  $U_z$  为放电时电极与工件间火花维持电压,其值一般为20V左右,  $R_0$  为电源内阻,  $R$  为限流电阻,  $n$  为放电通道数目。

由式(2)可以得知,放电回路总电流的大小随着通道数目的增加而增大,并且趋于极限值,该极限值的大小与电源内阻  $R_0$  的大小有关。



(a) 多通道放电烧蚀加工



(b) 常规电火花烧蚀加工

图5 两种加工方式的放电波形图对比

Fig.5 Discharge waveform of multi-channel discharge ablation and EDM ablation

用  $I_e$  表示多通道放电时单根电极回路中放电电流的大小:

$$I_e = \frac{I_n}{n} = \frac{U_0 - U_z}{nR_0 + R} \quad (3)$$

由式(3)可以得知,多通道放电时单根紫铜电极回路中放电电流的大小随着通道数目的增加而减小。

### 3.2 加工效率对比分析

如图6所示,用多通道放电烧蚀加工方法和常规电火花烧蚀加工方法加工 Inconel718 的材料蚀除率分别为  $12.14\text{mm}^3/\text{min}$  和  $6.99\text{mm}^3/\text{min}$ 。材料蚀除率由单位时间内工件加工前后的质量差比上工件密度计算得出。对比常规电火花放电烧蚀加工,多通道放电烧蚀加工 Inconel718 的加工效率提高 73.7%。在多通道放电烧蚀加工过程中,单根紫铜电极回路中放电电流的大小随着通道数目的增加而减小,单个放电通道的材料蚀除量也随之减小。然而由于在一个脉冲周期中有多个放电通道同时蚀除工件,使得放电总回路电流增加,多通道放电烧蚀加工的材料蚀除率较常规电火花烧蚀加工有所提高。

### 3.3 表面形貌对比分析

图7(a)~(b)为多通道放电烧蚀加工和常规电火花烧蚀加工后 Inconel718 的表面形貌对比。对比常规电火花烧蚀加工,多通道放电烧蚀加工后 Inconel718 工件表面的电蚀坑显得更密集且工件表面电蚀坑的大小不一,这是由于多通道放电分散了放电能量,单个通道的放电能量变小,使得放电坑变小。在加工过程中,单个放电通道的放电能量随着放电通道数目的增加而减少。通道数目的改变使得多通道放电烧蚀加工后的工件表面存在不同大小的电蚀坑。试验使用粗糙度仪对 Inconel718 工件表面进行检测,如图8所示,多通道放电烧蚀加工和常规电火花烧蚀加工后 Inconel718 工件表面的粗糙度值分别为  $3.97\mu\text{m}$  和  $4.65\mu\text{m}$ ,多通道放

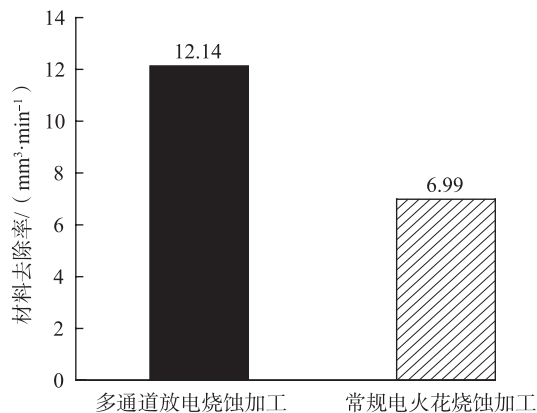


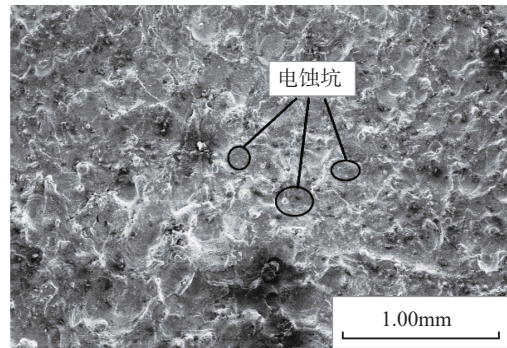
图6 两种加工方式的材料去除率对比

Fig.6 MRR of multi-channel discharge ablation and EDM ablation

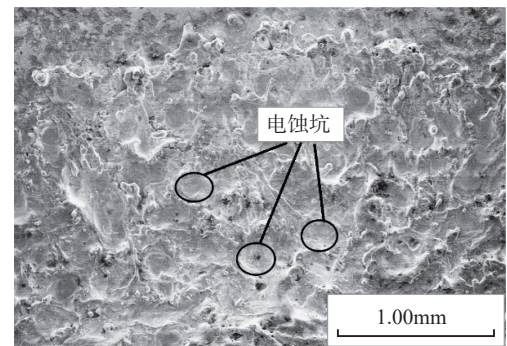
电烧蚀加工后的工件表面粗糙度值较常规电火花烧蚀加工下降 14.6%。

### 3.4 表面微裂纹对比分析

图9(a)~(b)为多通道放电烧蚀加工和常规电火花烧蚀加工后 Inconel718 的表面微裂纹对比。多通道放电烧蚀加工后工件表面的微裂纹数量相对较少,且裂纹的宽度和长度都远小于常规电火花烧蚀加工后工



(a)多通道放电烧蚀加工



(b)常规电火花烧蚀加工

图7 两种加工方式的表面形貌对比

Fig.7 Workpiece surface of multi-channel discharge ablation and EDM ablation

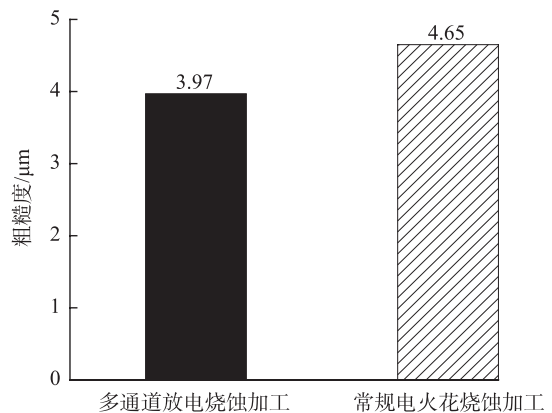
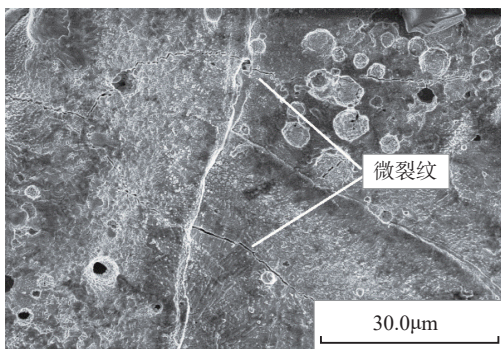
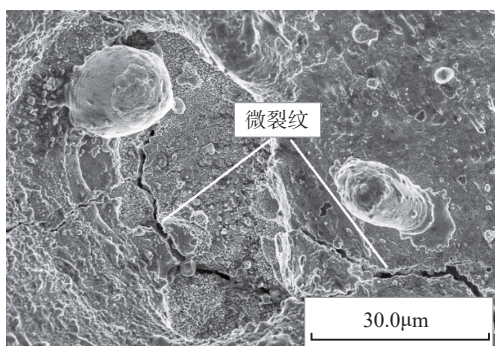


图8 两种加工方式的表面粗糙度对比

Fig.8 Roughness of multi-channel discharge ablation and EDM ablation



(a) 多通道放电烧蚀加工



(b) 常规电火花烧蚀加工

图9 两种加工方式的表面微裂纹对比

Fig.9 Micro-cracks of multi-channel discharge ablation and EDM ablation

件表面的微裂纹。电火花放电烧蚀加工后工件表面产生微裂纹主要由火花放电时金属的融化、重凝固所产生的热应力所引起,而多通道放电分散了放电能量,单个放电通道的放电能量变小,使得瞬时的冷热变化较常规电火花放电诱导烧蚀加工变小,热应力变小,因而工件表面的微裂纹变少,裂纹的宽度和长度变小。

#### 4 结论

(1) 在多通道放电烧蚀加工过程中,放电通道的个数是随机的。在一个脉冲放电周期中,随着通道数目的增加,电压波形呈阶梯下降,总回路电流波形呈阶梯上升。

(2) 对比常规电火花烧蚀加工,在多通道放电烧蚀加工中有多个放电通道同时蚀除工件,总回路电流增加,使得多通道放电烧蚀加工的材料蚀除率较常规电火花烧蚀加工提高 73.7%。

(3) 多通道放电分散放电能量,单个放电通道的放电能量随着放电通道数目的增加而减少,使得多通道放电烧蚀加工后工件表面粗糙度值较常规电火花烧蚀加工下降 14.6%,且工件表面微裂纹变少,裂纹的宽度和长度变小。

#### 参考文献

- [1] KUMAR S, DHINGRA A K, KUMAR S. Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining for nickel-based superalloy inconel-800 using response surface methodology[J]. *Mechanics of Advanced Materials & Modern Processes*, 2017, 3(1): 1-17.
- [2] 刘志东. 特种加工 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2012.  
LIU Zhidong. *Non-traditional machining*[M]. Beijing: Peking University Press, 2012.
- [3] LI Y, FU J J, YANG L G. Experimental study on electro-discharge machining of nickel-based superalloy[J]. *Key Engineering Materials*, 2017, 723: 51-55.
- [4] 孔令蕾, 蒋毅, 平雪良, 等. 镍基高温合金多孔质电极电火花加工实验研究[J]. *电加工与模具*, 2015(2): 8-12.  
KONG Linglei, JIANG Yi, PING Xueliang, et al. Experimental study on electro-discharge machining of ni-based high temperature alloy with porous electrode[J]. *Electromachining & Mould*, 2015(2): 8-12.
- [5] SHEN Y, LIU Y, DONG H, et al. Surface integrity of Inconel 718 in high-speed electrical discharge machining milling using air dielectric[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 90(1-4): 691-698.
- [6] 王飞, 刘永红, 申洪, 等. 镍基高温合金 Inconel 718 的超高效电火花电弧复合加工[J]. *电加工与模具*, 2013(6): 32-35.  
WANG Fei, LIU Yonghong, SHEN Yang, et al. Combined machining of inconel718 by super high efficient EDM milling and arc machining[J]. *Electromachining & Mould*, 2013(6): 32-35.
- [7] 刘志东. 难加工金属材料放电诱导可控烧蚀高效加工技术 [J]. *航空制造技术*, 2016, 59(22): 34-39.  
LIU Zhidong. High efficient machining technology of electrical discharge machining ablation for difficult-to-cut metal[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, 59(22): 34-39.
- [8] LIU Z D, YIN C J, CHEN L H, et al. Efficient combined machining of electrospark-induced controllable combustion and turning dressing for TC4[J]. *Advanced Manufacturing Processes*, 2014, 29(5): 614-620.
- [9] SHI J, QIU M, SHEN L, et al. Discharge ablation grinding machining based on constant pressure feeding[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, 91(1-4): 257-264.
- [10] 徐安阳, 刘志东, 李文沛, 等. 功能电极烧蚀加工典型难加工材料实验研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2014, 46(5): 763-768.  
XU Anyang, LIU Zhidong, LI Wenpei, et al. Experimental study on function electrode ablation machining of difficult-to-machine materials[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2014, 46(5): 763-768.
- [11] XU A, LIU Z, LI W, et al. Study of high-efficiency electrical discharge machining-induced ablation machining of titanium alloy TC4 using a multi-function electrode[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 72(1-4): 377-385.

通讯作者: 邱明波, 博士, 副教授, 研究方向为高效放电技术、电火花线切割、半导体加工, E-mail: qiumingbo@nuaa.edu.cn.

(责编 古系)