

# 喷雾电火花加工稳定性

万东扬 顾琳 薛荣 杨凯

(上海交通大学机械与动力工程学院,上海 200240)

**文 摘** 针对现有雾中电火花加工过程中放电过程稳定性不足的问题,采用去离子水超声雾化及工件端施加辅助超声振动的方式以提高加工过程的稳定性。分别以自来水及纯水产生的雾介质为工作介质进行电火花加工对比实验,结果表明:以超声雾化方式获得的微细雾介质,可有效降低短路率。同时还进行了侧向喷雾加工试验,发现通过侧向喷雾,可以进一步提高加工过程的稳定性,获得更好的加工效果。

**关键词** 加工稳定性,超声雾化,喷雾,电火花加工

## Stability of Mist-Jetting Electric Discharge Milling

Wan Dongyang Gu Lin Xue Rong Yang Kai

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240)

**Abstract** As the Mist-jetting electric discharge milling is lack of discharging stability, an ultrasonic atomizer, which generates micro fog drops, is applied on the machining. And with supersonic vibrator, which offers vibration to work piece, a better performance can be obtained. Experiments on electric discharge milling with mist generated by tap water and deionized water were conducted. The results showed that the micro fog drops attained by ultrasonic atomizer could effectively reduce the short circuit rate. Further, the experiments also illustrated that mist jetting from external side could further improve the stability of the milling and achieve a better performance.

**Key words** Discharging stability, Ultrasonic atomization, Mist-jetting, Electric discharge milling

### 1 引言

电火花加工的工作液对满足加工的效率、成本、加工工件表面质量等要求具有重要作用<sup>[1]</sup>。近年来,加工过程中的健康、安全和环保的因素也越来越受到重视。国内外的科研人员在改进工作液、实现绿色加工等方面进行了大量的尝试和研究,并取得了很大进展。水基工作液可提高加工过程的安全性并降低污染,但生产成本普遍高于普通煤油基的工作液系统<sup>[2-4]</sup>。气中电火花加工技术<sup>[5-9]</sup>的电极损耗低,而且加工过程中不产生有害气体,安全性高。但是所采用的实际加工间隙通常为十余微米,短路率远高于液中电火花加工。1991年, Tanimura等<sup>[10]</sup>提出了通过一个喷嘴向成形电极与工件之间的放电间隙喷雾以提供工作介质的放电加工方案,这种方式得到的雾滴比较大<sup>[11]</sup>,而工件之间的距离比较小,因此容易出现雾滴将两极之间联通的情况,导致短路率升高。美

国密歇根大学的 Tao Jia等<sup>[12-13]</sup>提出了半干式电火花加工(Semi-Dry EDM),利用AMCOL600喷雾器产生气液混合物,通过管状电极喷射到加工间隙,实现放电加工,获得镜面的加工效果。但是由于所采用的石墨电极冷却效果不好,易碎,在放电能量大的情况下,石墨碳粉将工具电极与工件桥接起来,造成拉弧。同时雾化器所产生的雾滴直径在数十微米<sup>[11]</sup>,不利于小间隙的电火花加工。上海交通大学<sup>[14-15]</sup>提出内喷雾式电火花加工,采用带有一定压力的水雾作为工作介质来实现放电加工。采用正极性加工可以获得较高的材料去除率和较小的电极损耗率,但是由于采用气液两相对流的方式产生的雾滴较大,同样存在短路率较高的问题。

针对目前其他雾化方式产生的水雾不均匀、雾滴粒度较大等问题,本文利用超声雾化的方式产生用于内喷雾式电火花加工的水雾。超声雾化可以得到5-

收稿日期:2010-02-08

基金项目:国家自然科学基金(50875170)

作者简介:万东扬,1984年出生,硕士研究生,主要从事喷雾电火花加工研究。E-mail: wandongyang\_841009@yahoo.com.cn

7  $\mu\text{m}$  的均匀雾滴,可以满足放电间隙在数十微米的电火花加工。

## 2 实验装置

实验机床:北京市电加工研究所 DMC-SOLICK C40 电火花加工机床,可实现三轴联动加工。

超声雾化器:雾量大于 3 L/h,最佳液面高度为 26-45 mm。

电极:外径 3 mm,内径 1 mm 的管状电极,材料为紫铜。

工件: $\Phi 10$  cm,材料:SKD61 模具钢。

工作介质:工业去离子水超声雾化产生的雾介质。

称重具:电子天平,精度为 0.1 mg(北京赛多利斯仪器系统有限公司 BS124S 型)。

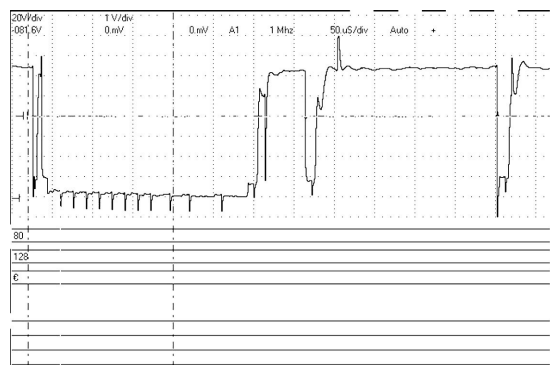
气源:空气压缩机,可提供 0.4-0.8 MPa 压力。

波形检测仪器:数字示波器(北京市迪阳科技发展有限公司 DSO2902 型)。

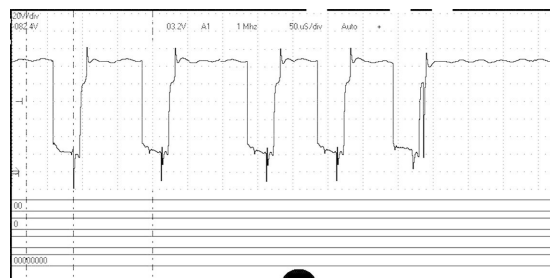
超声波工作台:YS-2000 型提供 27 kHz 的超声振动(振幅在 1-2  $\mu\text{m}$ )。

## 3 雾介质的对比实验

在初期实验中使用自来水产生雾介质进行加工试验,由于自来水的电导率比去离子水高(分别为  $1 \times 10^2$ 、 $5.5 \times 10^{-6}$   $\mu\text{S}/\text{cm}$ ),所以在加工过程中短路率很高。通过示波器对自来水的放电波形进行检测,发现短路率超过 50%。放电电压波形图如图 1 示。



(a) 自来水



(b) 去离子水

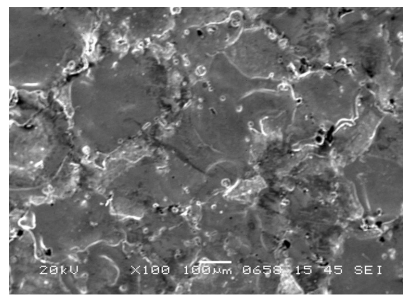
图 1 去离子水和自来水作为雾介质加工的放电波形

Fig. 1 Discharge waveform by e-ionized and tap water

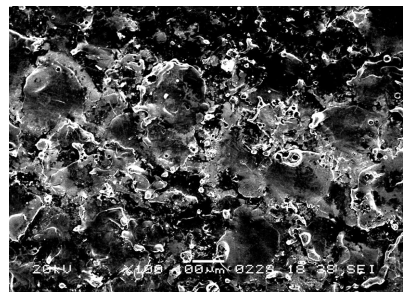
$$(I_p = 75 \text{ A}, t_{on} = 30 \mu\text{s}, t_{off} = 20 \mu\text{s})$$

从 SEM 照片(图 2)可看出,去离子水雾的加工

表面质量明显优于自来水雾的加工表面,后者有明显的大量烧蚀痕迹。



(a) 去离子水



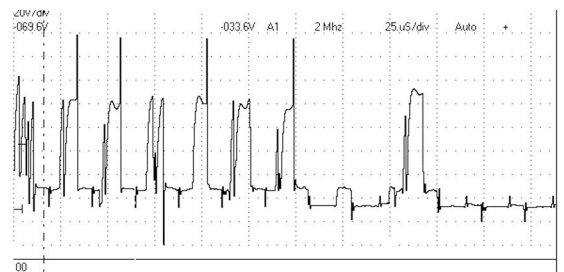
(b) 自来水

图 2 去离子水、自来水作为雾介质加工的电镜照片

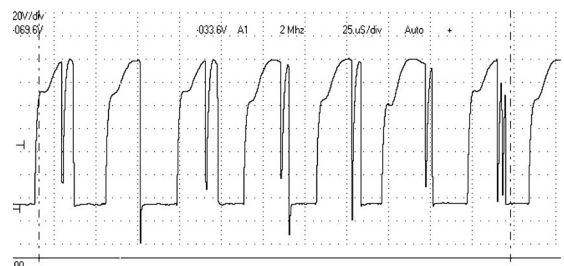
Fig. 2 Electronic microscope photographs of e-ionized and tap water

## 4 超声波工作台

为了获得更加稳定的喷雾电火花加工,采用超声波工作台,辅助工件作振动,以期从减少短路率。提高加工效率。加工条件如下, $I_p = 15 \text{ A}$ ,  $t_{on} = 8 \mu\text{s}$ ,  $t_{off} = 12 \mu\text{s}$ ,对加工 20 s 内的放电波形进行统计,记录产生短路的脉冲数占总脉冲数的百分比(图 3)。结果表明:加入超声波工作台后,短路率从 20% 降到 12%。



(a) 无超声振动



(b) 有超声振动

图 3 加入超声振动工作台的放电波形对比

Fig. 3 Discharge waveforms comparison

同时还测量了在  $I_p = 75 \text{ A}$ ,  $t_{on} = 12 \mu\text{s}$ ,  $t_{off} = 5 \mu\text{s}$ ,

$U_c=80\text{ V}$  时,加入超声波工作台前后的材料去除率分别为  $4.15、6.67\text{ min/mm}^3$ , 电极损耗率分别为  $0.79\%、1.49\%$ 。

加入超声波工作台之后,材料去除率上升,与预计相符。但是电极损耗率也同样上升。当工件作超声振动时,增强了极间电蚀产物排除的同时,也削弱了电蚀产物在工具电极上的覆盖效应<sup>[13]</sup>。

## 5 侧向喷雾

为了获得更稳定的加工效果,尝试了侧向喷雾的电火花加工。加工过程照片如图4所示。

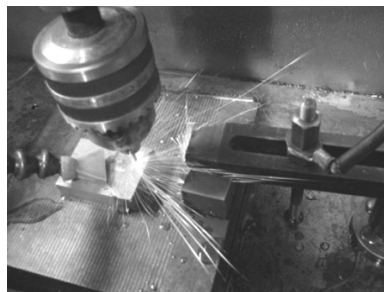


图4 侧向喷雾的加工过程照片

Fig. 4 Machining photo of mist-jetting by side

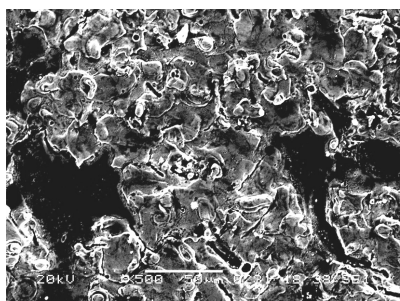
通过对放电波形的采集发现,侧向喷雾的加工稳定性更好,短路率低于  $6\%$ , 如图5所示。侧向喷雾中,高压雾可以从更粗的管径中吹出,大范围的对工件表面进行冷却。侧向喷雾将放电间隙中的蚀除金属吹向空气,而内喷雾中,蚀除金属极易被高压雾冲向工件进而部分弹出。这就使得电蚀产物的排除不够充分。图6为侧向喷雾与内喷雾的SEM照片。可见,侧向喷雾的排屑效果比较好,电蚀坑比较均匀。



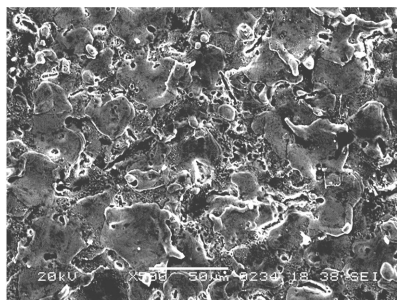
图5 侧向喷雾的放电波形

Fig. 5 Discharge waveform of mist-jetting by side

( $I_p=75\text{ A}, t_{on}=30\text{ μs}, t_{off}=20\text{ μs}$ )



(a) 内喷雾



(b) 侧向喷雾

图6 电蚀坑的对比照片

Fig. 6 Electric Erosion Pits comparison

( $I_p=15\text{ A}, t_{on}=10\text{ μs}, t_{off}=10\text{ μs}$ )

在  $I_p=75\text{ A}, t_{on}=20\text{ μs}, t_{off}=15\text{ μs}$  的条件下,侧喷的MRR和TWR均优于内喷。但是减小脉冲能量时, ( $I_p=9\text{ A}, t_{on}=10\text{ μs}, t_{off}=10\text{ μs}$ ) 侧喷的电极损耗率明显增大, TWR达到  $1.34\%$ , 加工表面附有一层铜。从放电电压波形可以看出,小脉冲的时候拉弧、虚假放电现象严重,如图7所示。这使得工件没有被有效的蚀除,这也影响了电极的覆盖效应,使得电极损耗增加。

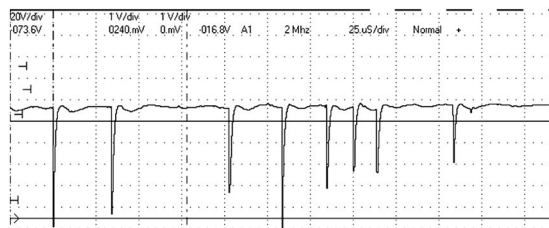


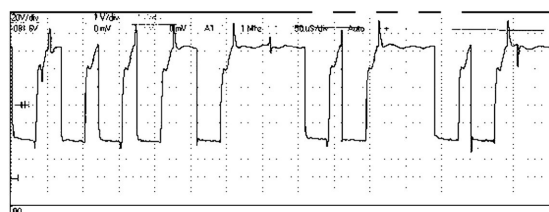
图7 小脉冲时放电波形

Fig. 7 Discharge waveform of small discharge pulse

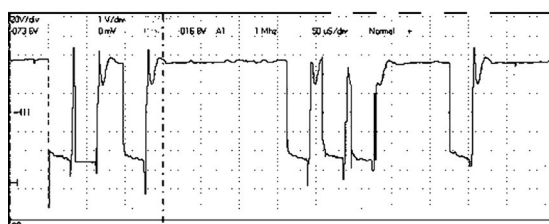
( $I_p=9\text{ A}, t_{on}=2\text{ μs}, t_{off}=4\text{ μs}$ )

## 6 与油中的对比实验

在相同参数下,  $I_p=15\text{ A}, t_{on}=20\text{ μs}, t_{off}=20\text{ μs}$ , 铣削分层厚度依次为  $5、3、1\text{ μm}$  的条件下,侧向喷雾与油中加工的对比实验结果见图8。放电波形中,二者短路率相近。但油中的放电频率较雾中的高。



(a) 油中加工

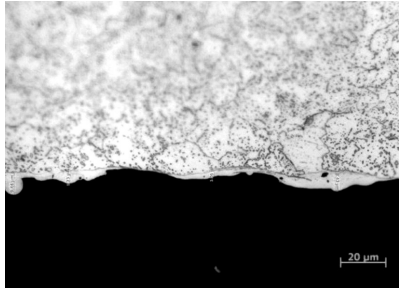


(b) 侧喷加工

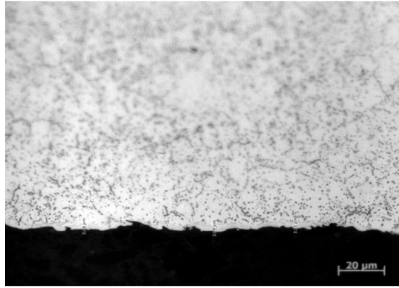
图8 油中加工与侧向喷雾加工的放电波形

Fig. 8 Discharge waveforms comparison

从图9中可以看出,在上述试验参数下,油中加工的白层厚度为侧喷雾的两到三倍。而且油中加工的白层厚度不均匀。这就说明侧向喷雾对工具的冷却效果优于油中加工。



(a) 油中加工



(b) 雾中加工

图9 雾中加工与油中加工的工件白层  
Fig.9 White layers of workpiece comparison

## 7 结论

采用去离子水可以实现稳定加工,是喷雾加工的首选。

采用工件端施加超声振动,使得短路率大幅度降低,进一步提高加工稳定性,获得更高的材料去除率和较小的电极损耗率。

采用侧向喷雾,加工过程更加稳定,材料去除率与电极损耗率均优于内喷雾。问题是侧向喷雾在小脉冲的时候,工具电极损耗率增加,加工表面被铜覆盖。

侧向喷雾电火花加工的稳定性与油中加工相差甚微,放电频率依然略低于油中。从工件的金相照片可以看出,侧喷的白层厚度是相同条件下油中加工的三分之一。

## 参考文献

[1] 赵万生,刘晋春,等.实用电加工技术[M].北京:机械工业出版社,2002:18

[2] Fábio N. Leo, Ian R. Pash. A review on the use of environmentally-friendly dielectric fluids in electrical discharge machining[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 149:341-346

[3] King W, Klocke F, et al. EDM-sinking using water-based dielectrics and electropolishing—a new manufacturing sequence in tool-making[C]. In: Proceedings of the 11th International Symposium on Electromachining (ISEM XI), Lausanne, Switzerland, 1995: 225-234

[4] Dünnebacke G. High performance electrical discharge machining using a water-based dielectric[C]. In: Proceedings of the 10th International Symposium for Electromachining (ISEM X), Magdeburg, Germany, 1992:170-182

[5] Leao F N, Pashby I R. A review of environmentally-friendly dielectric fluids in electrical discharge machining[J]. Journal of material processing Technology, 2004, 149(1-3):341-346

[6] Kunieda M, Yoshida M. Electrical discharge machining in gas[J]. Annals of the CIRP, 1997, 46(1):143-146

[7] 李立青,王振龙,赵万生. 气体放电加工机理分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(3):359-362

[8] 王彤,陈玉全,国枝正典. 气中电火花线切割加工技术研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(5):76-80

[9] Zhang Q H, Zhang J H, Deng J X, et al. Ultrasonic vibration electrical discharge machining in gas[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 29(1/3):123-138

[10] Tanimura T, Isuzugawa K, Fujita I, et al. Development of EDM in the Mist[C]. // Proc. ISEM9, 1989:313-316

[11] 曹建明. 喷雾学[M]. 北京:机械工业出版社, 2005: 182

[12] Tao J, Ni J. Experimental study of the dry and near-dry electrical discharge milling processes[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2008, 130/011002-1-011002-9

[13] Kao C C, Tao J, Shih A J. Water mist near dry wire and drilling electrical discharge machining and gap distance modeling [C]//Proceeding of the ISEM XV, 15th International Symposium on Electromachining (ISEM XV, 15th), 2007:280-286

[14] 顾琳,赵万生,张志华,等. 喷雾电火花铣削加工及其机理的分析[J]. 电加工与模具, 2006(2):1-4

[15] 李利,顾琳. 内喷雾式电火花铣削加工的实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(10):1569-1572

(编辑 任涛)