

## 电火花诱导可控烧蚀放电铣削实验研究

刘志东 王继强 王怀志 王祥志 邱明波

(南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016)

**摘要:**提出了一种电火花诱导可控烧蚀放电铣削加工方法,在中空管状电极中间歇通入氧气,在氧气通入阶段火花引燃金属,利用金属燃烧产生的化学能进行烧蚀加工,氧气关闭阶段进行常规电火花铣削修整,保证表面加工质量与精度。通过实验研究了极性、脉冲宽度、脉冲间隔、低压电流、氧气压力和供氧间隔等工艺规范对电火花诱导可控烧蚀放电铣削加工材料去除率和电极相对损耗率的影响。结果表明:该加工方式适合采用正极性加工;电极相对损耗率保持较低的水平;进行粗加工时,应适当增加氧气通入时间,以增加材料去除率;进行精整加工时,则应减少氧气通入时间,增加电火花放电时间,以提高表面质量与精度。

**关键词:**电火花铣削;火花诱导;可控烧蚀;工艺规律

中图分类号: TG662

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2014)02-0197-07

## Experimental Research of Controllable Spark-Inducing Combustion and EDM Machining

Liu Zhidong, Wang Jiqiang, Wang Huaizhi, Wang Xiangzhi, Qiu Mingbo

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

**Abstract:** A novel machining method named controllable spark-inducing combustion and electrical discharge milling machining (EDM-Milling) is proposed. This machining method, in which the oxygen blows throughout the rotating tubular electrode intermittently, uses chemical energy of spark-inducing combustion to achieve material removal during the oxygen supply and utilizes traditional EDM to accomplish surface finishing when the oxygen is shut off. The influence factors of material removal rate and electrode relative wear rate are discussed, including polarity, discharge duration, discharge interval, peak current, pressure and the interval time of oxygen. The result shows that the workpiece should be connected to the anode, the electrode relative wear rate remains low, and the oxygen ventilation time should be prolonged to achieve high material removal rate in rough machining whereas the sparking discharging time should be increased to reach high surface quality and precision in finish machining.

**Key words:** electrical discharge milling machining (EDM-Milling); spark-inducing; controllable combustion; technological rule

传统电火花铣削加工由于存在电极损耗补偿困难和加工效率低等问题,一直没有得到很快的发展<sup>[1-3]</sup>。文献[4,5]提出了气中电火花加工方法(又

称干式电火花加工),并进行了三维铣削加工研究<sup>[6]</sup>。气中电火花加工可以实现近乎零电极损耗,对于研究电火花铣削加工的应用与发展具有重要

**基金项目:**国家自然科学基金(51175256)资助项目;航空科学基金(2011ZE52060)资助项目;江苏省自然科学基金(BK2011732)资助项目。

**收稿日期:**2014-01-15; **修订日期:**2014-02-15

**作者简介:**刘志东,男,1966年3月生,教授,博士生导师。主要研究方向:高效精密电火花线切割加工、高效电火花烧蚀加工、钛合金电火花加工、激光表面处理、电化学沉积等。近5年发表学术论文近百篇,SCI、EI收录20余篇,编著书籍3部,授权发明专利15项。获“深圳市青年科技带头人”称号(1999年)、“深圳市青年科技奖”二等奖(1997年)。

**通信作者:**刘志东, E-mail: liutim@nuaa.edu.cn。

的意义。因此,许多研究人员都对其展开研究。文献[7,8]提出了超声辅助气中电火花铣削加工方法。文献[9~11]对液中喷气电火花铣削加工方法进行了深入研究。文献[12~14]分别提出采用干式电火花铣削加工和近干式电火花铣削加工作为粗、精加工方法对工件进行加工,取得了一定的成效。这些研究在一定程度上改善了气中电火花铣削加工中加工状态不稳定的问题,但相对于传统电火花铣削加工,材料蚀除率低和加工表面质量较差等问题仍然没有得到解决。

本文提出了电火花诱导可控烧蚀放电铣削加工方法(简称可控烧蚀铣削加工),在圆形中空电极中间歇通入高压氧气,电火花放电将金属激发至活化状态,利用电火花放电电能和活化的金属与氧气燃烧产生的化学能来实现材料的高效烧蚀蚀除;在氧气关闭阶段进行常规电火花铣削对烧蚀表面进行修整加工,从而在保证较好加工表面质量的同时实现高效材料蚀除。

## 1 实验条件和实验原理

### 1.1 实验条件

自主搭建的间歇供氧铣削加工平台如图1所示,具体实验条件如表1所示。

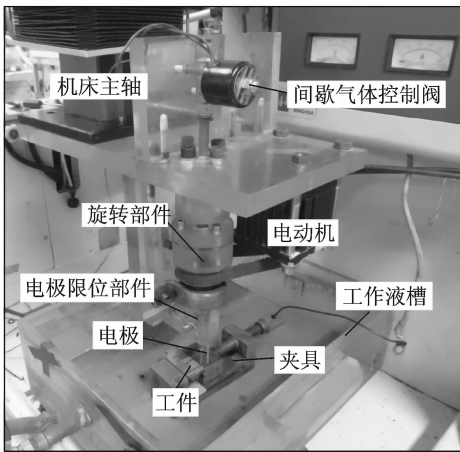


图1 实验平台

Fig. 1 Experimental platform

表1 实验条件

Tab. 1 Experimental condition

| 项目   | 内容                                    |
|------|---------------------------------------|
| 机床   | 凝华 NH7125CNC 数控电火花机                   |
| 称重量具 | FA1004 电子秤                            |
| 电极   | 紫铜管; 外径 $\Phi 2$ mm, 内径 $\Phi 0.7$ mm |
| 工件   | Cr12                                  |
| 工作液  | 自来水                                   |

### 1.2 实验原理

可控烧蚀铣削加工原理如图2所示,在旋转的圆形中空电极中间歇通入高压氧气。在氧气通入阶段,极间首先发生常规气中电火花放电,瞬时的高温 and 放电爆炸力使得加工区域局部工件材料熔化、气化形成活化区(图2(a))。其次,达到燃点温度以上的活化基体材料与通入极间的氧气发生剧烈燃烧反应,燃烧产生的热量大部分作用于基体材料上,使得基体材料温度升高,高温活化区进一步扩大。借助于产生的燃烧热膨胀力、放电爆炸力和气体冲刷作用将熔化的金属材料 and 燃烧产物排出,从而极大地提高材料蚀除率(图2(b))。第三,在氧气关闭阶段仍进行常规电火花铣削,对烧蚀加工表面进行修整(图2(c))。随着氧气的周期性通入与关闭,高效烧蚀加工和常规电火花铣削修整交替进行,从而在保证表面加工质量与精度的同时,获得较高的加工效率。

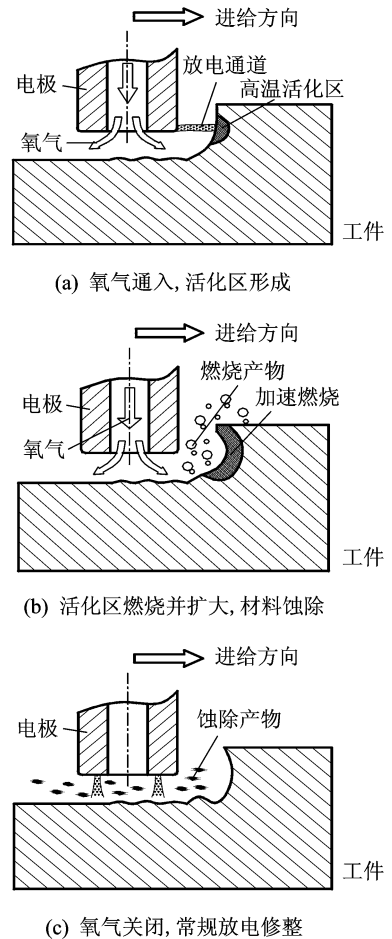


图2 可控烧蚀铣削加工原理图

Fig. 2 Processing principle diagram of controllable combustion milling

## 2 极性效应的影响

电火花加工中存在极性效应,极性效应对材料蚀除率和电极损耗率有直接的影响。由于电火花诱导可控烧蚀放电铣削加工是借助于常规铣削放电产生的活化金属与氧气燃烧产生的化学能来实现材料高效烧蚀蚀除,其加工性能在采用不同极性加工时呈现出很大的差异。为了更好地研究其加工性能,本实验分别采用正、负极性(工件接正极时为正极性加工)加工方式进行对比实验。极性实验选择 Cr12 为工件材料,氧气压力为 0.3 MPa,氧气每次通入时间为 0.5 s,供氧间隔为 1 : 1,电规准实验条件如表 2 所示,结果如图 3 所示。

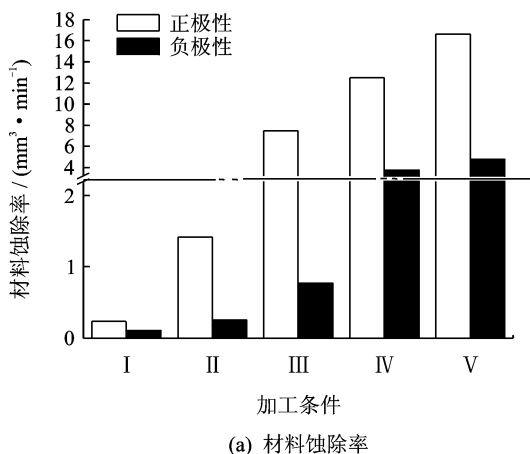
表 2 电规准条件

Tab. 2 Electric parameter condition

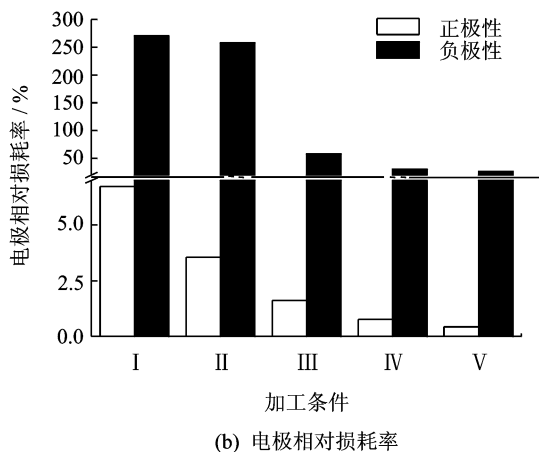
| 实验条件 | 脉冲宽度/ $\mu\text{s}$ | 脉冲间隔/ $\mu\text{s}$ | 低压电流/A |
|------|---------------------|---------------------|--------|
| I    | 20                  | 10                  | 2      |
| II   | 50                  | 40                  | 4      |
| III  | 100                 | 80                  | 8      |
| IV   | 150                 | 120                 | 12     |
| V    | 200                 | 150                 | 16     |

从图 3 中不难看出,不论在哪组电规准下,正极性加工的材料蚀除率都远远大于负极性加工,电极相对损耗率却远远低于负极性加工。分析认为:烧蚀加工是在氧气氛围中进行的,烧蚀加工材料蚀除率与气中常规放电产生的活化金属量有关,即气中电火花放电铣削加工的材料蚀除率的高低直接影响烧蚀加工材料蚀除率的大小。由于气中放电的放电通道中粒子的运动形式以电子运动为主<sup>[15-16]</sup>,电子轰击正极的能量远远大于离子轰击负极的能量,因此,加工过程中的气中常规电火花铣削放电产生的材料蚀除率在正极性加工条件下较大,即正极性加工条件下产生的可以发生燃烧反应的活化基体材料较多,燃烧反应释放出更多的热量,因此,在正极性加工条件下进行电火花诱导可控烧蚀放电铣削加工较负极性加工可以获得更高的材料蚀除率。

气中放电通道中粒子的运动形式以电子运动为主,正极性加工时电极受到带电离子的撞击作用较弱,损耗较小,能够与氧气发生反应的活化金属很少;另外,对加工后表面进行能谱分析(见图 4 及表 3)表明,电极表面含有大量的 Fe 和 O,还有一定的 Cr。这说明加工过程中存在蚀除产物飞溅覆



(a) 材料蚀除率



(b) 电极相对损耗率

图 3 极性效应实验

Fig. 3 Experiment of polarity effect

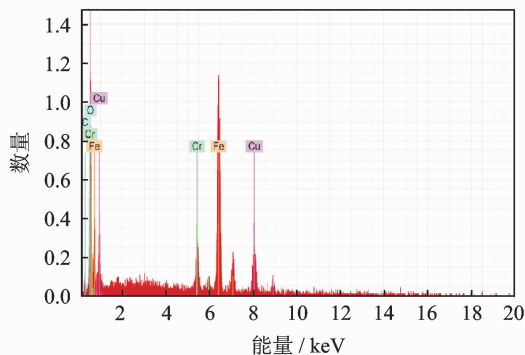


图 4 电极表面能谱分析图

Fig. 4 Energy spectrum of electrode surface

表 3 电极端面主要成分表

Tab. 3 Main ingredients on surface of electrode end

| 主要元素 | 成分比例/% |
|------|--------|
| Fe   | 45.82  |
| O    | 26.94  |
| Cr   | 6.92   |
| Cu   | 20.32  |

盖效应,工件材料受到瞬时高温作用熔化、气化,其中一部分被抛离工件表面在工作介质中冷却凝固,还有一小部分飞溅粘附在电极的表面,对电极起到保护作用,大大降低了电极损耗,故正极性加工条件下的电极相对损耗率较负极性小很多。

由于正极性加工条件下电火花诱导可控烧蚀放电铣削加工的材料蚀除率较负极性高,而电极相对损耗率较负极性小很多,因此,在下文的工艺规范实验中均采用正极性加工方式。

### 3 加工规范的影响

本文分别进行了电规准及非电规准对电火花诱导可控烧蚀放电铣削加工影响的工艺实验。电规准实验研究部分研究了脉冲宽度、脉冲间隔、低压电流等因素,电规准工艺实验研究选择 Cr12 为工件材料,氧气压力为 0.3 MPa,氧气每次通入时间为 0.5 s,供应间隔为 1:1,实验条件如表 4 所示。非电规准部分研究了气体压力,氧气间隔对加工的影响规律,进行非电规准实验研究时选择 Cr12 为工件材料,电规准选择脉冲宽度  $T_{on}=100 \mu\text{s}$ ,脉冲间隔  $T_{off}=80 \mu\text{s}$ ,设定低压电流  $I_p=8 \text{ A}$ ,氧气通入时间为 0.5 s,实验条件如表 5 所示。

表 4 电规准实验条件

Tab. 4 Experimental condition of electric parameters

| 规准组 | 脉冲宽度/ $\mu\text{s}$   | 脉冲间隔/ $\mu\text{s}$  | 低压电流/A      |
|-----|-----------------------|----------------------|-------------|
| I   | 20,50,100,<br>150,200 | 80                   | 8           |
| II  | 100                   | 10,40,80,<br>120,150 | 8           |
| III | 100                   | 80                   | 2,4,8,12,16 |

表 5 非电规准实验条件

Tab. 5 Experimental condition of non-electric parameters

| 规准组 | 氧气压力/MPa                | 氧气关闭时间/s                |
|-----|-------------------------|-------------------------|
| I   | 0.1,0.2,0.3,<br>0.4,0.5 | 0.5                     |
| II  | 0.3                     | 0.3,0.5,1.0,<br>1.5,2.0 |

#### 3.1 脉冲宽度

脉冲宽度实验的电规准条件如表 4 的第一组实验数据所示,结果如图 5 所示。由图可见,材料蚀除率随着脉冲宽度的增加而增加,增速逐渐放缓,电极相对损耗率则快速降低,并维持在较低的水平。分析认为:放电铣削加工的材料蚀除率与气中常规电火花铣削放电产生的活化基体材料量有

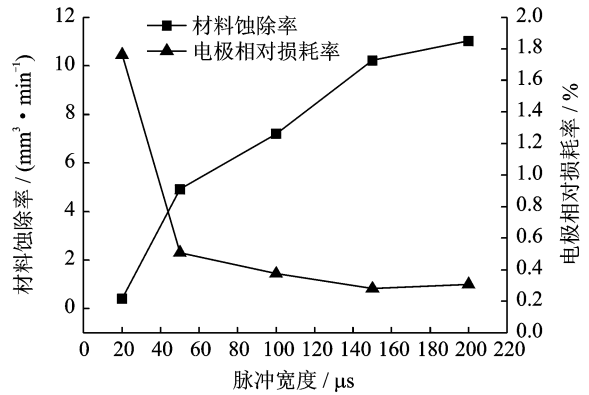


图 5 脉冲宽度实验

Fig. 5 Pulse width test

关,即与单次脉冲放电的能量有关。单次脉冲放电能量是关于脉冲放电电压、放电维持电流和脉冲宽度的函数:  $W = \int_0^{T_{on}} u(t)i(t)dt$ 。因而,随着脉冲宽度的增加,单次放电产生的活化基体材料增多,可以参与燃烧反应的活化金属增多,燃烧反应释放出更多的热量,大大地扩大了熔融活化区域,使得材料蚀除率显著提高;在较大电规准时,电火花放电产生的活化基体材料较多,不过能够发生燃烧反应的只是表层与氧气接触的活化金属,此时进一步增大电规准,电火花放电产生的活化基体材料量虽有所增加,但发生燃烧反应的活化金属量变化不大,所以,此时材料蚀除率随着电规准增加变化不大。另一方面,电火花诱导可控烧蚀放电铣削加工由于材料去除率迅速增大,相对电极损耗反而减小。另外,这种加工方法具有极高的材料蚀除率,大量的蚀除产物对电极的飞溅覆盖保护作用较强,故在较大脉冲宽度(如  $150 \mu\text{s}$ )时,电火花诱导可控烧蚀放电铣削加工可以保持极低的电极相对损耗率。

#### 3.2 脉冲间隔

脉冲间隔实验的电规准条件如表 4 的第二组实验数据所示,结果如图 6 所示。从图中不难发现,随着脉冲间隔的增大,材料蚀除率呈现下降的趋势,而电极相对损耗率保持较低水平,基本变化不大。这是因为在其他参数不变的条件下,随着脉冲间隔的增大,单位时间内发生的气中常规电火花放电减少,使得能够与氧气发生燃烧反应的活化基体材料减少,燃烧反应放出的热量减小,烧蚀产生的熔融基体材料减少,因此,材料蚀除率和电极损耗率随着脉冲间隔的增大而有所下降;只是由于电火花诱导可控烧蚀放电铣削加工的材料蚀除率较高,相对电极损耗是电极损耗率与材料蚀除率的比

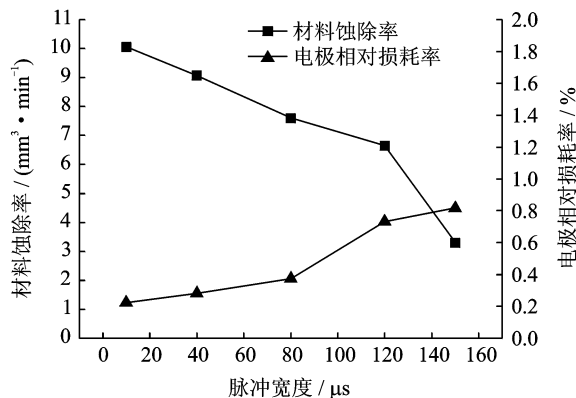


图 6 脉冲间隔实验

Fig. 6 Pulse interval test

值,其随着放电间隔时间的增大反而增大。不过电极放电时存在的蚀除产物飞溅覆盖作用降低了损耗,因此随着间隔的增大,相对电极损耗只有一定程度的增大。如果在加工中想获得较高的加工效率,脉冲间隔应尽可能取较小值。

### 3.3 低压电流

由于此机床采用低压复合电源进行加工,低压电流主要起到蚀除作用。其实验条件如表 4 第三组所示,实验结果如图 7 所示。不难看出,随着低压电流增加,材料蚀除率呈现增加的趋势,在较大电规准时,增加趋势有所减缓。进一步的实验也表明,再增加低压电流时这种减缓的趋势会更加明显。

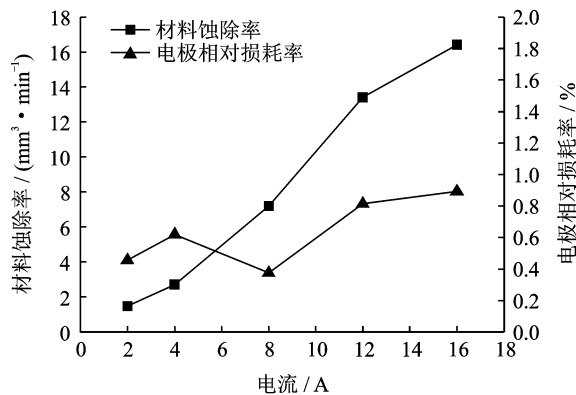


图 7 低压电流实验

Fig. 7 Peak current test

分析认为:氧气通入的烧蚀加工阶段,随着低压电流的增加,气中电火花铣削放电能量增加,即电流密度增大,对应的材料蚀除率增加,更多的活化基体材料参与燃烧反应释放出大量的热,因此,随着低压电流的增加,材料蚀除率呈现增加的趋

势,在较大电规准时,由于能够发生燃烧反应的只是与氧气接触的表层活化金属,所以,此时再增大电规准,即使放电产生的活化基体材料量有所增加,参与燃烧反应的活化金属量基本不变,所以,此时材料蚀除率随着低压电流增加变化不大。另一方面,随着低压电流的增大,电极相对损耗率保持着极低的水平,基本变化不大,并在低压电流为 8 A 时相对电极损耗最低,这与前面得到的结论一致。

### 3.4 氧气压力

电火花诱导可控烧蚀放电铣削加工中,氧气起到关键作用,氧气压力的大小对于加工性能的影响较大。氧气压力实验条件如表 5 第一组所示,结果如图 8 所示。从图 8 中可以发现,随着氧气压力的增加,材料蚀除率呈现先增大后减小的趋势。

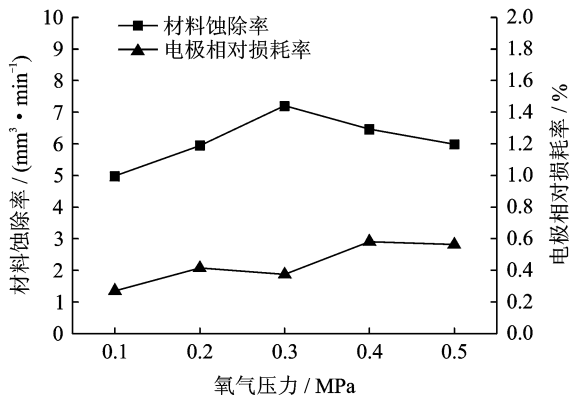


图 8 氧气压力实验

Fig. 8 Oxygen pressure test

分析认为:在加工过程中,氧气所流经的线路基本保持不变,氧气压力越高,氧气分子密度越高,流速也越快,流量也越大。在同一电规准下,常规电火花铣削放电能量是固定的,放电产生的活化金属量是固定的,氧气压力较小时,随着氧气压力的增加,氧气与活化金属发生反应的速度增加,能够与活化金属发生燃烧反应的氧气量也增加,燃烧释放的热量增加,从而提高材料蚀除率;氧气压力大于 0.3 MPa 时,由于放电产生的活化金属量是一定的,随着氧气压力的进一步增大,能够发生燃烧反应的活化金属量仍然保持不变,即燃烧释放出的热量没有增加,但是较大压力的氧气流会带走部分的燃烧热,因此,随着氧气压力的进一步增大,材料蚀除率不但没有增加,反而呈现出有所下降的趋势。电极相对损耗率如前面所述,保持着极低的水平。在氧气压力为 0.3 MPa 时,材料蚀除率最高,相对电极损耗最低。

### 3.5 氧气供应间隔

氧气供应间隔的实验条件如表5第二组所示,结果如图9所示,加工实物图如图10所示。不难发现,在保持氧气通入时间不变的情况下,随着氧气关闭时间的增大,材料蚀除率呈现下降的趋势,加工表面由黑色烧蚀加工表面向常规电火花铣削加工表面转变,加工表面质量呈现出变好的趋势。

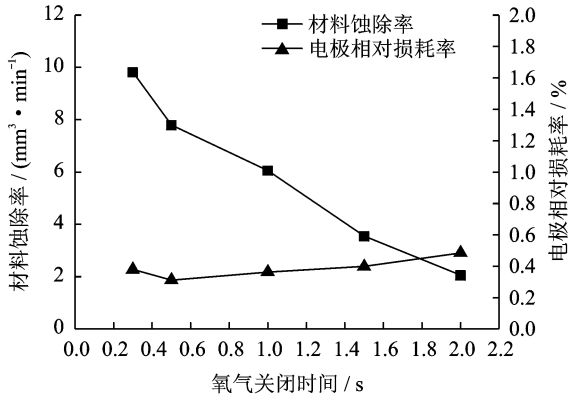


图9 氧气供应间隔实验

Fig. 9 Oxygen supply interval test

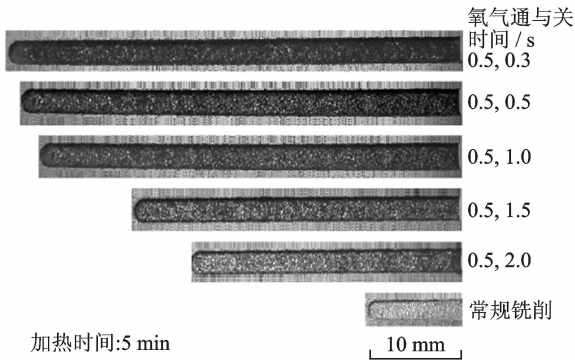


图10 实验加工实物图

Fig. 10 Diagram of processing surface in experiment

分析认为:电火花诱导可控烧蚀放电铣削加工是利用氧气通入阶段的活化金属与氧气燃烧产生的化学能实现材料高效烧蚀蚀除的,在氧气关闭阶段的常规液中电火花铣削加工起到修整烧蚀加工表面的作用,整个加工过程是高效烧蚀加工和常规液中电火花铣削修整交替进行的效果。当烧蚀加工占据的时间较长而常规电火花铣削修整时间较短时,材料蚀除率较高,加工表面较差,反之,则材料蚀除率下降,加工表面较好,因此,随着氧气关闭时间的增加,常规液中电火花铣削修整时间增加,高效烧蚀加工时间缩短,故材料蚀除率下降而加工表面质量变好。由此可见,电火花诱导可控烧蚀放电铣削加工可以满足不同的加工需求:进行粗加工

时,可以选择烧蚀加工为主,常规电火花铣削修整为辅的加工方式;进行精加工时,可以减少烧蚀加工的作用,增加常规电火花铣削修整过程。另一方面,电极相对损耗率随着氧气关闭时间的增加,变化不大,保持着极低的水平,这与前面所得到的结论一致。

## 4 结 论

本文提出了电火花诱导可控烧蚀放电铣削加工方法,并进行了工艺实验研究,得出如下几点结论:

(1)可控烧蚀铣削加工在正极性加工条件下的材料蚀除率较负极性高,且电极相对损耗率低。

(2)可控烧蚀铣削加工的电极相对损耗率随着工艺规准的变化基本保持不变,始终保持较低的水平。

(3)如果进行粗加工,应适当增加氧气通入时间,以增加材料蚀除率;如进行精整加工,则减少氧气通入时间,增加电火花放电时间,以提高表面质量与精度。

### 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.  
Liu Zhidong, Gao Changshui. The technology and application of electric discharge machining[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2011.
- [2] 衣建刚,刘正坝. 电火花数控仿铣加工研究现状与展望[J]. 电加工,1998(1):5-8.  
Yi Jiangan, Liu Zhengxun. The current researching situation and prospect of NC-EDM mill[J]. Electromachining, 1998(1):5-8.
- [3] 刘光壮,杨晓冬,赵万生. 电火花铣削加工的电极损耗补偿[J]. 制造技术与机床,1998(8):34-36.  
Liu Guangzhuang, Yang Xiaodong, Zhao Wansheng. Tool wear compensation for EDM milling[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 1998(8):34-36.
- [4] Kunieda M, Yoshida M, Taniguchi N. Electrical discharge machining in gas[J]. CIRP Annals—Manufacturing Technology, 1997,46(1):143-146.
- [5] 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.
- [6] Kunieda M, Miyoshi Y, Takaya T, et al. High speed 3D milling by dry EDM[J]. CIRP Annals—

- Manufacturing Technology, 2003,52(1):147-150.
- [7] Zhang Q H, Du R, Zh J H, et al. An investigation of ultrasonic-assisted electrical discharge machining in gas[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006,46(12/13):1582-1588.
- [8] 苏树朋,张勤河,张建华,等. 超声辅助气中电火花铣削加工研究[J]. 中国机械工程, 2008(18):2227-2230.
- Su Shupeng, Zhang Qinhe, Zhang Jianhua, et al. Investigation of ultrasonic vibration electrical discharge milling in gas[J]. China Mechanical Engineering, 2008(18):2227-2230.
- [9] 丁林松,康小明,赵万生. 液中喷气电火花铣削的加工性能实验研究[J]. 电加工与模具, 2009(4):6-8.
- Ding Linsong, Kang Xiaoming, Zhao Wansheng. Research on subersed gas-jetting electrical discharge milling[J]. Electromachining & Mould, 2009(4):6-8.
- [10] 汤传建,康小明,赵万生. 液中喷气电火花加工试验研究[J]. 电加工与模具, 2008(3):16-20.
- Tang Chuanjian, Kang Xiaoming, Zhao Wansheng. Experimental study of submerged Gas-jetting EDM [J]. Electromachining & Mould, 2008(3):16-20.
- [11] 陈焕杰,康小明,赵万生,等. 放电介质对液中喷气电火花加工的影响[J]. 航空精密制造技术, 2010,46(3):29-37.
- [12] Kao C C, Tao J, Shih A J. Near dry electrical discharge machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007,47(15):2273-2281.
- [13] Tao J, Shih A J, Ni J. Experimental study of the dry and near-dry electrical discharge milling processes [J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2008,130:11002.
- [14] 夏永高,顾琳,赵万生. 干式和准干式电火花加工技术及应用[J]. 电加工与模具, 2007(6):22-25.
- Xia Yonggao, Gu Lin, Zhao Wansheng. Developments and applications of Dry-EDM and Quasi-Dry-EDM[J]. Electromachining & Mould, 2007(6):22-25.
- [15] 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.
- Li Liqing, Wang Zhenlong, Zhao Wansheng. Mechanism analysis of electrical discharge machining in gas [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004,36(3):359-362.
- [16] 李立青,赵万生,狄士春,等. 气体放电加工基础工艺试验研究[J]. 机械工程学报, 2006,42(2):203-207.
- Li Liqing, Zhao Wansheng, Di Shichun. The fundamental processing experimental research in electrical discharging machining in gas[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006,42(2):203-207.