

文章编号: 1006-2467(2019)01-0111-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.01.016

# 比例-积分-微分压力控制的放电雾化 烧蚀磨削加工方法

邱明波, 史璟云, 俞晓春, 刘志东

(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

**摘要:** 为了提高电火花放电雾化烧蚀加工效率, 以烧结金刚石材料作为加工电极, 利用金刚石颗粒的磨削作用实现了高效雾化烧蚀与机械磨削的复合加工. 其中, 通过测量加工过程中金刚石颗粒与工件之间的机械磨削作用力, 实现了基于压力信号检测的伺服控制, 以保证金刚石颗粒的磨削作用, 并采用反比例、模糊和比例-积分-微分(PID)压力控制方法来维持加工过程中的压力稳定性. 同时, 以高强钢 Q420C 为加工对象进行了 3 组加工效率对比试验. 结果表明: 采用 PID 压力控制方法, 在 30 min 的加工时间内所得加工深度可达 14.5 mm, 最大压力在 1.0 N 以内, 其加工效率和加工稳定性优于其他 2 种控制方法.

**关键词:** 电火花加工; 烧蚀加工; 烧结金刚石; 比例-积分-微分(PID)压力控制; 加工效率

**中图分类号:** TG 661

**文献标志码:** A

## Discharge Atomization Ablation Grinding Based on PID Pressure Servo Control

QIU Mingbo, SHI Jingyun, YU Xiaochun, LIU Zhidong

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

**Abstract:** To improve the efficiency of electrical discharge machining (EDM) ablation, this paper uses a sintered diamond electrode as the machining electrode, making use of grinding action of diamond particles, to achieve machining combined with high efficiency ablation and mechanical grinding. In the study, through gathering mechanical grinding force during machining, a control method based on force signal is proposed to ensure diamond particles grinding. In order to maintain the stability of pressure in the process, three control methods are proposed: inverse proportional control, fuzzy control and PID control. In addition, we use high strength steel as the workpiece and conduct three groups of machining efficiency comparative experiments. From these three groups of experiments, we conclude that the machining depth can reach to 14.5 mm and the force range is less than 1.0 N by using PID control method. PID control method has advantages over the other two in machining efficiency and stability.

**Key words:** electrical discharge machining (EDM); ablation machining; sintered diamond; PID pressure control; machining efficiency

收稿日期: 2017-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(51675272, 51575271)资助项目

作者简介: 邱明波(1982-), 男, 南京市人, 副教授, 目前主要从事特种加工、半导体放电加工和高效加工研究.

电话(Tel.): 025-84892520; E-mail: qiumingbo@nuaa.edu.cn.

为提高电火花加工效率,国内外学者<sup>[1-3]</sup>对加工介质进行了研究.文献[4]中提出雾中电火花加工方法;文献[5]中采用极间混氧的方法来提高钛合金加工效率;文献[6]中提出放电诱导可控的烧蚀加工方法,利用电火花放电诱导金属燃烧释放的巨大化学能蚀除材料,大幅提高了材料去除率.另外,研究人员针对电火花加工伺服控制也进行了研究.例如:文献[7]中提出了平均脉宽电压检测法并设计了相关装置;文献[8]中提出了基于进给速度与电流脉冲概率之间线性关系的伺服控制方法;文献[9]中利用极间放电信号的双路采集电路,并采集平均电压和峰值电压,提出了一种新的信号检测和处理方法.

但是,雾化烧蚀过程中存在反应区滞留大量氧化产物的问题,这些氧化物不具有可燃性,将会降低电火花放电利用率和烧蚀加工稳定性.现有的电火花加工伺服控制主要是基于极间放电电信号,适用于电极与工件不接触的放电加工,因此,本文以内部随机分布金刚石颗粒的管状烧结材料作为加工电极<sup>[10]</sup>,利用电极的金属基体与工件产生放电烧蚀反应和金刚石颗粒在线修整加工后的金属表面,以达到烧蚀反应的持续高效性,从而提高加工效率.同时,提出一种压力检测伺服控制的复合加工方法,以高强钢 Q420C 为工件进行反比例、模糊和比例-积分-微分(PID)压力控制的加工效率对比试验,从而验证了 PID 压力控制的烧蚀磨削加工方法的有效性.

## 1 试验方法

### 1.1 试验系统及电极

电火花放电雾化烧蚀磨削复合加工采用烧结金刚石材料作为电极,试验系统结构如图 1 所示.加工方法:将电极固定在三爪卡盘上,三爪卡盘连同直流电机固定在竖直主轴滑台上,工件固定在压力信号采集装置并置于水平工作滑台上,工件和电极分别连接脉冲电源的正、负极;将高压氧气和水通入雾化喷嘴<sup>[11]</sup>装置以形成气/液混合介质,并经过 SMC 直

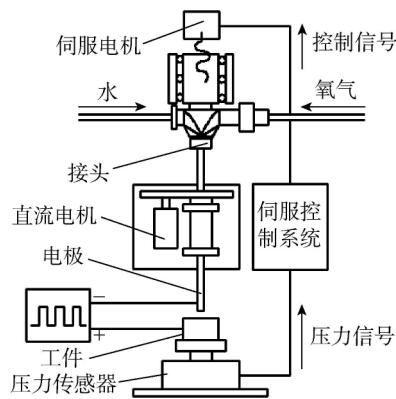


图 1 试验系统

Fig. 1 Test system

通高速旋转气管的气动接头到达中空管状电极,然后,进入加工区域;电极顶部使用密封圈与装置连接,以保证加工过程的气密性;直流电机带动金刚石电极做高速旋转,用压力信号采集装置实时监测加工过程中工件所受的压力并反馈给中央处理机(CPU),CPU 根据采集的信号实时控制电极沿装置竖直主轴的进给或回退.

### 1.2 试验参数

本文研究了 3 种控制方法对烧结金刚石电极放电雾化烧蚀磨削复合加工效率的影响.其中,采用外径 6 mm、内径 1 mm 的烧结金刚石电极,金刚石颗粒直径为 270  $\mu\text{m}$ ,且随机分布在金属基体内,金刚石电极的金属基体由青铜粉末和金属结合剂烧结而成.加工试验中,氧气和水的压力均为 0.2 MPa,开路电压为 250 V,峰值电流为 10 A,脉宽为 250  $\mu\text{s}$ ,脉间为 200  $\mu\text{s}$ .

### 1.3 雾化烧蚀加工过程

在雾化烧蚀反应过程中,加工区域弥散着气/液混合介质,如图 2 所示.在脉冲电源放电诱导作用下,工件在放电点处受到活化作用而处于活化状态(见图 2(a)),活化区金属在富氧的条件下发生燃烧反应,从而高效地去除材料,如图 2(b)所示.另一方面,燃烧反应产生的热量被工件吸收,又不断活化基

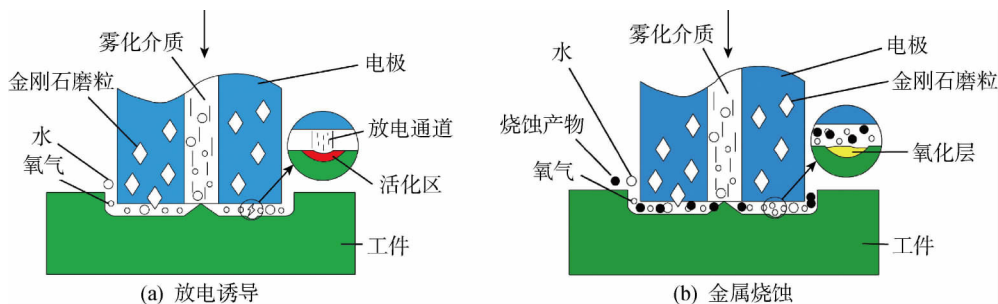


图 2 雾化烧蚀加工过程

Fig. 2 Two processes of aerosol ablation

体金属,从而使得雾化烧蚀反应持续进行.雾化烧蚀的能量主要来源于金属与氧气发生燃烧反应所释放的化学能,电火花放电只起到诱导作用<sup>[12]</sup>.

#### 1.4 烧结金刚石电极的磨削

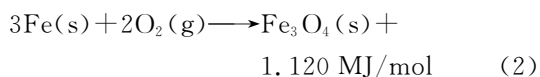
在电火花加工中,单位时间的总蚀除量为<sup>[13]</sup>

$$q = K_a W_M f \varphi \quad (1)$$

式中: $K_a$ 为与电极材料、脉冲参数和工作介质等相关的工艺参数; $W_M$ 为单个脉冲能量; $f$ 为单位时间内发生的脉冲个数; $\varphi$ 为有效脉冲利用率.

当相关电参数都不变,即 $K_a$ 、 $W_M$ 和 $f$ 均为定值时,单位时间内的有效放电脉冲个数决定了 $q$ 值的大小.烧蚀氧化层和金属基体的电阻率分别为 $3.4/0.001 \Omega \cdot \text{cm}$ <sup>[10]</sup>,即氧化产物的导电性能远低于金属基体.因此,氧化产物附着在加工区域会降低 $\varphi$ 值,从而制约 $q$ 值.

高强钢的主要成分是Fe,其发生燃烧反应的方程式为



在富氧的条件下,燃烧产物的量取决于与氧气充分接触的铁的量.由于反应区域附着的氧化产物较多且其不具有燃烧特性,故会降低燃烧反应的程度,减少参与燃烧的基体金属的量,使得加工效率降低.可见,无论是电火花的前期诱导,还是后续的燃烧反应,加工区域附着的氧化产物都是影响加工效率的主要因素.

为了提高雾化烧蚀加工效率,采用烧结金刚石作为加工电极.在高速旋转电机的带动下,使电极中金刚石颗粒在线刮磨氧化层,以去除附着在工件表面的氧化产物,使得新的加工表面被露出,以使燃烧反应持续进行.采用S-4800N型扫描电子显微镜(SEM)对烧结金刚石电极放电雾化烧蚀加工表面形貌进行观测,其结果如图3所示.可见,在金刚石

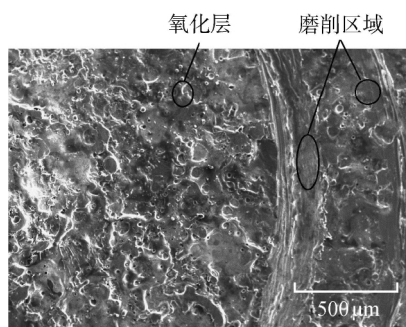


图3 烧结金刚石电极放电烧蚀加工表面形貌 SEM 照片

Fig. 3 SEM image of machined surface by aerosol ablation with sintered diamond electrode

磨粒的磨削作用下,表面氧化层出现了明显的被刮除痕迹,并露出了新的加工基体,从而提高了烧蚀加工效率和加工稳定性.

## 2 压力控制方法的数学模型

### 2.1 压力检测与控制流程

根据上述分析,本文采用以压力检测为基础的伺服控制方法,控制流程示意图如图4所示.其控制方法:在加工过程中,采用压力传感器实时采集工件所受压力;将采集的压力值经过滤波、隔离和A/D转换处理后输入CPU,并与其初始设定值进行比较;CPU根据比较值对伺服电机发出指令,由电机驱动电极的进给或回退.当电极对工件的压力处于某一值时,电极端部随机分布的金刚石颗粒将会磨除一部分氧化层,工件所受压力随之降低;为了维持压力的稳定,系统会驱动电极进给,以使工件所受压力与之前相同;在旋转电机的带动下,加工区域表面的氧化层又将被磨除一部分.如此循环,通过不断采集工件所受压力并控制电极的进给或回退,以维持工件所受压力.这既能够保持高效磨削氧化层,又能够使工件处于一个相对稳定的受力状态,从而保证系统的平稳运行.

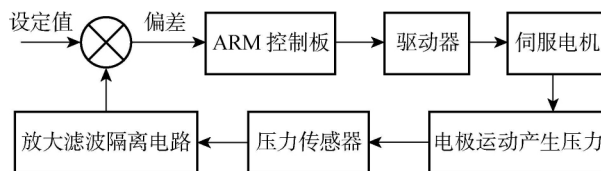


图4 控制流程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of control flow

### 2.2 压力检测与控制数学模型

如前所述,控制系统主要是通过控制电极的运动来维持工件受力稳定性的.本文采用如图5所示的反比例、模糊和PID控制方法对压力进行控制,并对比其加工特性.

(1) 反比例控制方法.假设控制系统的采样周期为 $T$ ,初始设定的参考压力为 $P$ ,该模式要求电极在进给过程中的运行速度与工件所受压力按一定的比例关系变化,即

$$v = \frac{K_A}{P_M} \quad (3)$$

式中: $K_A$ 为比例值; $P_M$ 为压力传感器检测的工件所受压力.

反比例控制方法的控制流程框图如图5(a)所示.预先设置比例值 $K_A$ 和参考压力 $P$ 后,系统开始

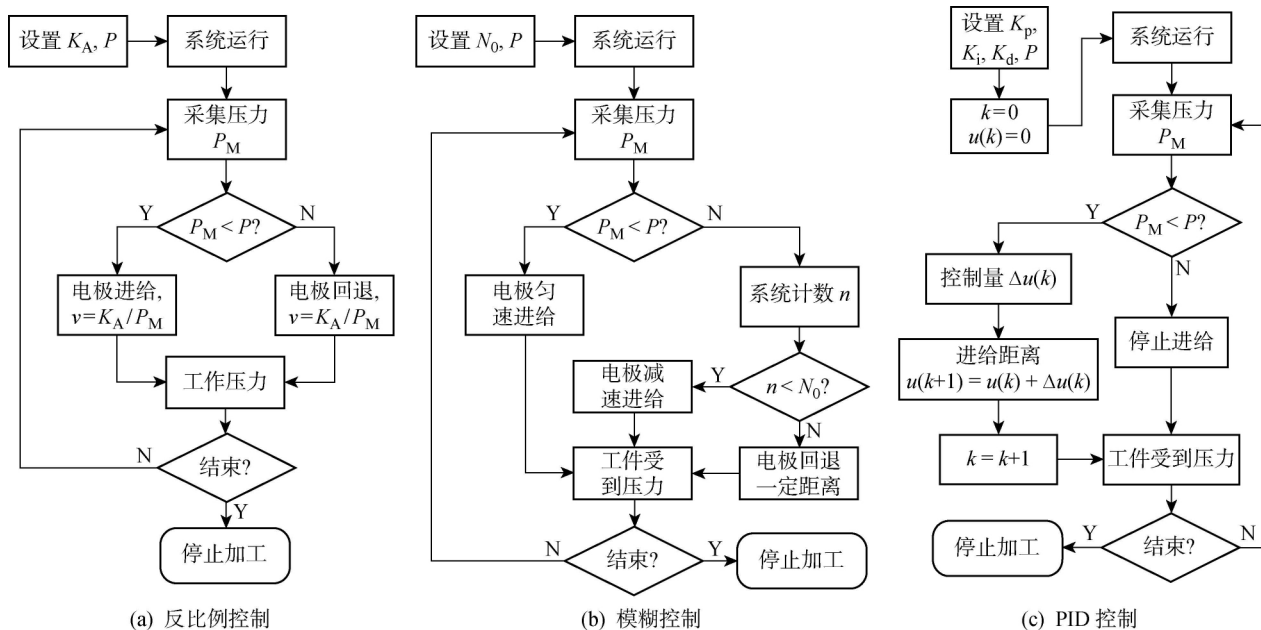


图 5 3 种控制方法的控制流程

Fig. 5 Flowchart of three processing methods

运行,加工开始时电极持续做进给运动,速度和工件所受的压力满足式(3).随着电极进给,系统检测的  $P_M$  不断增大,进给速度不断降低.当  $P_M > P$  时,CPU 发出回退指令,电极开始做回退运动,速度和压力仍满足式(3).随着电极回退,压力不断减小,若  $P_M < P$ ,则电极改变运动方向而做进给运动,速度和压力仍满足式(3).系统循环执行以上流程,从而使得工件与电极持续发生放电雾化烧蚀反应.

(2) 模糊控制方法.其控制流程如图 5(b)所示.预先设置计数次数  $N_0$  和参考压力  $P$  后,系统开始运行,每个采样周期  $T$  进行一次信号采集.当检测的压力  $P_M < P$  时,系统驱动电极做匀速进给运动;当  $P_M > P$  时,系统开始进行计数,且电极减速进给;当系统计数达到设定值后,系统驱动电极立刻回退一定距离.在回退过程中,系统检测的压力将不断减小,当  $P_M < P$  时,电极改变运动方向而做进给运动.系统如此往复循环以上步骤,使得工件与电极持续发生烧蚀反应,从而达到蚀除材料的目的.

(3) PID 控制方法<sup>[14]</sup>.前 2 种控制方法中的比例控制存在稳态误差,为了加快系统响应,减小调节时间,本文在系统控制器中引入积分项和微分项,采用 PID 控制方法,其控制器原理框图如图 6 所示.

图 6 中:  $r(t)$  为系统的给定值,表示初始设定的参考压力  $P$  所对应的电压  $V_0$ ;  $c(t)$  为实际输出,在该系统中表示系统实时检测的压力  $P_M$ ;  $u(t)$  为控制量. PID 控制的表达式为

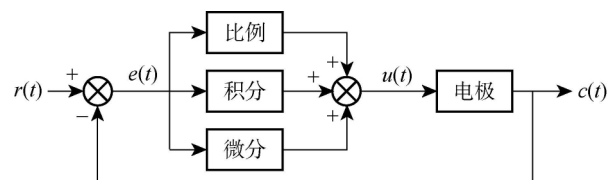


图 6 PID 控制器原理框图

Fig. 6 Principle model of PID control

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

式中:  $e(t) = r(t) - c(t)$ , 为系统偏差;  $K_p$  为比例系数;  $K_i$  为积分系数;  $K_d$  为微分系数.

计算机的采样控制采用离散的采样方式.式(4)中的积分和微分运算可用数值计算的方法来逼近,即将微分项用差分代替,积分项用矩形和式代替,在采样周期  $T$  内的电极进给变化量为

$$u(k) = K_p e(k) + K_i T \sum_{j=0}^k e(j) + K_d (e(k) - e(k-1)) / T \quad (5)$$

系统采用增量式 PID 控制算法,故需要建立位置式 PID 控制的数学模型.由式(5)可得,第  $k-1$  时刻 PID 调节的表达式为

$$u(k-1) = K_p e(k-1) + K_i T \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + \frac{K_d}{T} (e(k-1) - e(k-2)) \quad (6)$$

将式(5)、(6)相减可得:

$$\Delta u(k) = K_p (e(k) - e(k-1)) + K_i T e(k) +$$

$$\frac{K_d}{T}(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (7)$$

式(7)即为系统所用PID控制的数学模型,其控制流程如图5(c)所示.预先设置比例、积分、微分参数和压力 $P$ ,在每个采样周期 $T$ 内,由PID控制模型计算电极运动量.当 $P_M < P$ 时,电极做向下的进给运动,由式(7)可得控制变化量 $\Delta u(k)$ ,而控制量 $u(k+1) = u(k) + \Delta u(k)$ 对应于电极向下所要进给的距离 $L$ .可见,采用PID控制方法控制电极进给,其压力变化较小,电极回退的距离也很小,不能抵消丝杠的回程间隙,所以系统并未采用电极回退.当 $P_M > P$ 时,电极保持静止,由雾化烧蚀反应而不断蚀除工件材料,工件所受压力不断降低;当 $P_M < P$ 时,电极又依据之前的增量式PID方式进给.如此循环执行,工件与电极持续发生放电雾化烧蚀反应,从而达到蚀除材料的目的.

### 2.3 参考压力的选取

基于上述分析,为了获取当前条件下的最优参考压力,本文采用PID的伺服控制策略,设置初始参考压力分别为2、4、6、8、10、12 N进行雾化烧蚀试验,每次试验时间为30 min,并绘制如图7所示的加工深度-压力曲线.由图7可见,加工深度随着参考压力增加而先增后减,且在 $P=8$  N时达到最大值,即加工效率最高.这是因为当 $P < 8$  N时,随着 $P$ 增大,金刚石颗粒进入氧化层的深度增大,蚀除氧化层的量逐渐增多,露出的工件基体部分不断增多,单位时间内发生放电烧蚀反应的次数逐渐增加,脉冲的利用率升高,材料的蚀除速度加快,加工效率提高;当 $P > 8$  N且不断增大时,电极的基体部分与工件的接触越来越紧密,导致放电过程中短路和拉弧增多,脉冲利用率降低,蚀除速度变慢,加工效率降低.

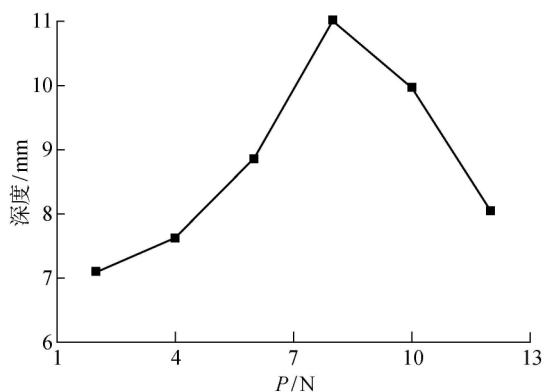


图7 不同参考压力下加工深度的变化情况

Fig. 7 Processing depth variation diagram under different pressure values

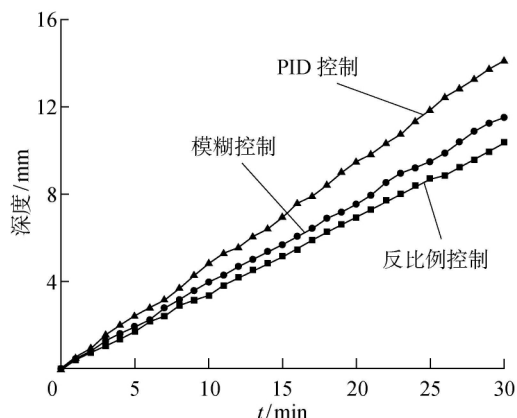
因此,该试验系统的最优参考压力值为8 N.

### 3 工艺试验及结果分析

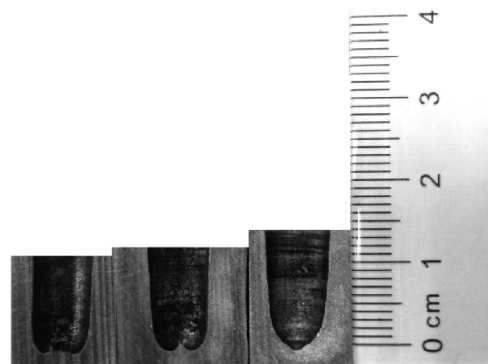
为了进一步对比3种压力控制方法的加工性能,采用3种压力控制方法进行对比试验,加工时间为30 min.

图8所示为采用3种压力控制方法所得加工深度及其实物.可见,PID控制方法相比于其他2种方法具有明显优势,整个过程保持稳定、高效的加工状态,在30 min的加工时间内,其加工深度达到14.5 mm,相比于其他2种方法的加工效率较高.

在加工试验中,每隔30 s记录1次工件所受的平均压力,并绘制图9所示的压力-时间变化曲线.由图9(a)可见,反比例控制方法通过调节速度来控制电极运动,即CPU只对当前的压力值响应,加工过程中的受力相较于标准压力值的振幅偏差较大,最大压力的变化量在3.1 N以内,但其结构简单,



(a) 深度-时间曲线



反比例控制 模糊控制 PID控制

(b) 内孔实物

图8 3种压力控制方法的加工结果对比

Fig. 8 Comparison of processing results of three pressure control methods

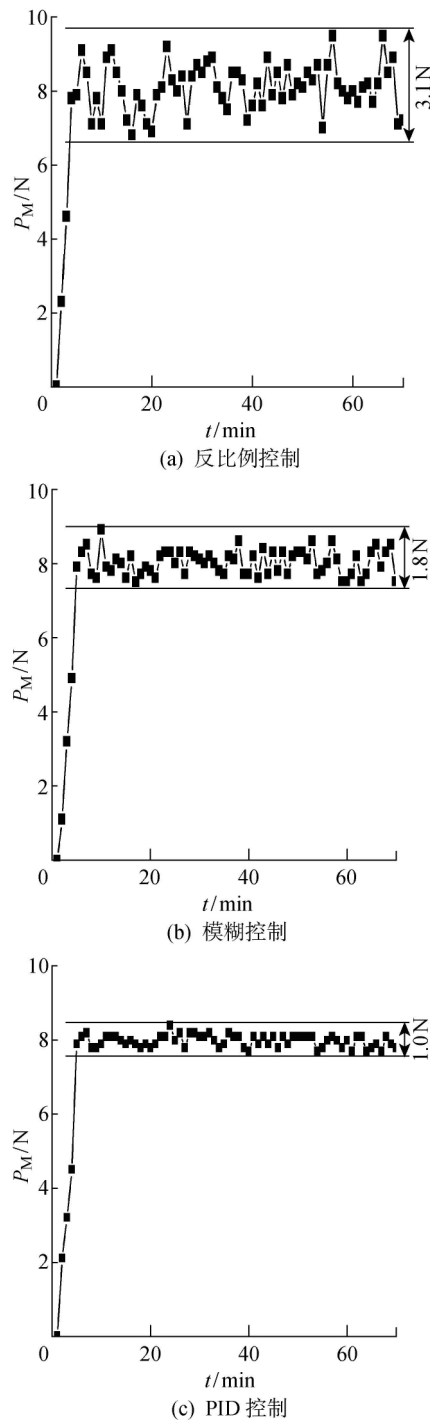


图 9 3 种控制方法的压力对比

Fig. 9 Force analysis of three pressure control methods

CPU 计算量较小,系统反应相对较快,在某些场合具有较好的加工效果;由图 9(b)可见,相比于反比例控制,模糊控制方法通过计数给电极 1 个滞后的反应过程,以较好地控制电极的进给和回退运动,尽可能使得工件受力维持在一个相对稳定值,其最大压力的变化量在 1.8 N 以内;由图 9(c)可见,采用 PID 控制方法所得最大压力的变化量在 1.0 N 以内.这是因为比例作用决定了系统的响应速度,加入

积分控制消除了采集信号过程中的信号干扰,再加入微分作用,能够超前控制雾化烧蚀加工中反应区域氧化产物的量等因素,使其在误差出现前就被消除.因此,采用 PID 控制能够保证更高的加工稳定性,最大限度地维持压力的稳定性.

#### 4 结论

(1) 在电火花放电雾化烧蚀加工过程中,附着在烧蚀加工反应区域的氧化产物是制约其可持续加工的主要因素.金刚石电极中的金刚石颗粒能够有效磨除覆盖在加工区域的氧化产物,使其露出新的金属基体,从而保证烧蚀加工的可持续性.

(2) 采用恒压力进给放电烧蚀加工的方法是可行的.

(3) 采用 PID 压力控制方法,在 30 min 的加工时间内所得加工深度为 14.5 mm,工件所受最大压力的变化量在 1.0 N 以内,其加工效率和加工稳定性均优于其他 2 种压力控制方法.

#### 参考文献:

- [1] 刘志东. 特种加工[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 6-8.  
LIU Zhidong. Non-traditional machining [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 6-8.
- [2] KUNIEDA M, YOSHIDA M, TANIGUCHI N. Electrical discharge machining in gas [J]. *CIRP Annals*, 1997, 46(1): 143-146.
- [3] 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.
- [4] TANIMURA T, ISUZUGAWA K, FUJITA I, et al. Development of EDM in the mist [J]. *Proc. IJEM*, 1989(9): 313-316.
- [5] 王祥志, 刘志东, 薛荣媛, 等. 极间自混氧改善钛合金电火花加工特性研究 [J]. 航空学报, 2013, 34(10): 2419-2426.  
WANG Xiangzhi, LIU Zhidong, XUE Rongyuan, et al. Research on self-mixed oxygen in discharge gap to improve the processing characteristics of titanium alloy electrical discharge machining [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(10): 2419-2426.
- [6] 刘志东. 放电诱导可控烧蚀高效加工典型工艺方法 [J]. 电加工与模具, 2012(1): 1-6.

- LIU Zhidong. Series typical efficient machining methods of controllable burning by discharge-induced [J]. **Electromachining and Mould**, 2012(1): 1-6.
- [7] 耿春明, 赵万生, 赵家齐, 等. 电火花加工中间隙放电状态检测的一种新方法[J]. **电加工与模具**, 2001(3): 27-29.
- GENG Chunming, ZHAO Wansheng, ZHAO Jiaqi, *et al.* A new method of testing spark states of the gap in EDM[J]. **Electromachining and Mould**, 2001(3): 27-29.
- [8] LIU Z D, CHEN H R, PAN H J, *et al.* Automatic control of WEDM servo for silicon processing using current pulse probability detection[J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2015, 76(1/2/3/4): 367-374.
- [9] 吴光河. 基于模糊自适应 PID 的电火花成型加工伺服控制系统研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.
- WU Guanghe. Research of EDM servo control system based on fuse control of PID [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012.
- [10] 邱明波, 凌加健, 陈龙海, 等. 金刚石烧结电极放电烧蚀加工蚀除机理[J]. **机械工程学报**, 2015, 51(3): 190-195.
- QIU Mingbo, LING Jiajian, CHEN Longhai, *et al.* The mechanisms of processing by spark-induced combustion with sintered diamond electrode[J]. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, 2015, 51(3): 190-195.
- [11] 安庆龙. 低温喷雾射流冷却技术及其在钛合金机械加工中的应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- AN Qinglong. Cryogenic mist jet impinging cooling and its application in machining of titanium alloy[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [12] CAO Z L, LIU Z D, LING J J, *et al.* Deep-type hole machining by inner jetted aerosol dielectric ablation [J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2015, 78(9/10/11/12): 1989-1998.
- [13] 赵万生. 先进电火花加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 20-21.
- ZHAO Wansheng. Advanced EDM technology [M]. Beijing: National Defence Industrial Press, 2003: 20-21.
- [14] PEREIRA R D O, VERONESI M, VISIOLI A, *et al.* Implementation and test of a new auto-tuning method for PID controllers of TITO processes[J]. **Control Engineering Practice**, 2017, 58: 171-185.