

文章编号 1004-924X(2009)11-2730-08

分流法小孔电火花加工与试验

王续跃, 李建丽, 周彪, 梁延德, 赵福令
(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:介绍了一种等面积分流小孔电火花加工方法,分析了等面积电极放电的电火花加工过程,研究了在等面积电极条件下,等面积单电极与分流多电极加工对加工速度、电极损耗、放电间隙的影响并进行了验证性试验。研究结果表明:小孔分流法加工与单电极加工相比,加工速度略有减小、放电间隙略有变小、电极损耗略有增加,加工效果具有一致性,而且分流法电火花加工有利于小孔电火花加工的尺寸控制。通过等面积分流法改变加工工艺,用电火花机床稳定加工参数进行了比机床稳定加工临界值尺寸还小的小孔加工,试验中采用单电极 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ (总面积为 1 mm^2)的稳定加工指标,进行等面积分流为3个电极 $0.577\text{ mm}\times 0.577\text{ mm}$ (总面积为 1 mm^2)的小孔加工,获得了稳定电火花加工的 $0.6\text{ mm}\times 0.6\text{ mm}$ 小方孔,表明提出的方法是一种有效的小孔电火花加工方法。

关键词:电火花加工;小孔;等面积;分流法

中图分类号:TG661 **文献标识码:**A

Electrical discharge machining for small-holes by current dividing

WANG Xu-yue, LI Jian-li, ZHOU Biao, LIANG Yan-de, ZHAO Fu-ling

(College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A new method of Electrical Discharge Machining(EDM) for small-holes was presented, in which the critical value of machining could be less than that generated by a primitive EDM system. The characters of small-hole EDM in an area equalization by the current dividing were studied, and the effects of the current dividing on the drilling speed, electrode wear and the discharge gap were researched. Research results provide a deeper understanding for the small-hole EDM in area equalization by the current dividing. Experiments to verify the stability and feasibility of the EDM in area equalization by the current dividing were carried out and experimental results show that the drilling speed and discharge gap decrease a little and the electrode wear increases slightly. Moreover, there is a consistency in process effect between single and double electrodes, which is conducive to the control of a dimension precision. Finally, a $0.6\text{ mm}\times 0.6\text{ mm}$ square is obtained through the current dividing using the process parameters of $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ in the signal electrode EDM, which proves that the method in EDM by the current dividing is effective for the small-hole machining.

Key words: Electrical Discharge Machining(EDM); small-hole; area equalization; current dividing

1 引言

在现代工业产品不断向轻、薄、短、小的方向发展的过程中,其组成零件也越来越趋于小型化和精密化,小孔的应用日趋广泛,对小孔精度和加工速度等方面的要求也越来越高,小孔的加工工艺已成为工业上许多领域的关键技术。为了实现上述小孔加工,电火花微细加工技术日益受到关注。电火花小孔加工主要研究思路有:通过研制新的专用电火花成形机(即微小型加工装置或者微细电极的使用)^[1-3]来降低加工参数,进而寻求更低的电火花小孔加工的临界指标;在一定的加工条件下,通过改变加工工艺方法(如与其它加工方法结合,分流法电火花加工)改善小孔的电加工条件,进而得到更好的小孔加工方法。

目前,国内外十分重视小孔加工的研究与开发工作。日本松下公司研制的 MG-ED 01 微小孔电火花成形机,加工孔径为 $\Phi 15 \sim 300 \mu\text{m}$,粗糙度值 R_a 为 $0.1 \mu\text{m}$;其与东京大学联合开发了通用超精密数控小型电火花微细加工机床,加工参数为:最小轴径 $\Phi 4.3 \mu\text{m}$,精度 $0.5 \mu\text{m}$;最小孔径 $\Phi 5 \mu\text{m}$,精度 $1 \mu\text{m}$ ^[4-5]。日本的 Takahata 等人将微细电火花加工技术同 LIGA(光刻)技术相结合,使微细电火花加工进行批量生产成为可能,利用这种技术可以加工出 $\Phi 20 \mu\text{m}$ 铜质电极数组,并加工出 $\Phi 30 \sim 32 \mu\text{m}$ 的小孔数组^[6];日本东京大学生产技术研究所增泽隆久教授加工出的 $\Phi 2.5 \mu\text{m}$ 的微细轴和 $\Phi 5 \mu\text{m}$ 的微细孔,代表了当前这一领域的世界前沿水平^[7]。日本学者毛利尚武等在研究中发现,在电火花加工工作液中添加一定量的 Si、Al 等微细粉末后,工件加工表面粗糙度会显著改善,能够达到近似镜面的效果,且精加工时间也会大大缩短,这就是辊粉电火花加工技术^[8-9]。国内哈尔滨工业大学提出并研制了基于双定子驻波型线性步进声马达的电极直接驱动式电火花加工装置,并对电极直接驱动式电火花加工的工作原理和工艺试验进行了深入系统的研究^[10-11]。清华大学与北京机电研究院共同研制了一种采用蠕动式微进给机构的微细电加工装置,加工最小轴径为 $\Phi 25 \mu\text{m}$,最小孔径为 $\Phi 40 \mu\text{m}$ ^[12]。

上述通过改进机床或者其附属装置而获得细

轴或小孔的方法取得了一定成果,但机床设备复杂,加工成本较高。因此,在一定条件下,通过改变加工工艺进而获得更小孔的电火花加工方法引起作者关注,如在生产中通过改变电火花小孔加工工艺来突破电源的最小脉宽和最小峰值电流的限制,从而提供小孔加工所需要的微小能量。

本文介绍一种电火花小孔加工的新方法,用电火花机床稳定加工参数可实现突破稳定加工的最小尺寸,进行小于机床稳定加工临界值的更小尺寸的加工。分流法小孔电火花加工的原理是在等面积的前提下,采用多电极并联分流的方法来分解机床的峰值电流从而获得微小能量来突破机床的稳定加工指标,进行在原电火花成形机稳定加工指标以下的小孔加工。目前,未见对等面积分流法电火花加工的研究,也未见到分流加工方法及加工方法稳定性的研究报道。因此,探讨分流法电火花加工的稳定性的认识,深化对其加工方法的认识,改善电火花小孔加工工艺,对该技术的应用及推广具有重要的意义。

2 分流法电火花加工试验原理与方法

2.1 等面积分流法电火花加工理论分析

分流法小孔电火花加工,符合电火花加工原理,需要连续多次进行脉冲放电才能完成电火花加工。普通电火花小孔加工时,在液体介质小间隙中进行单次脉冲放电,放电通道等效电路如图 1(a)所示,分流法小孔电火花加工时,单次脉冲放电使得极间介质被击穿并形成极为细小的放电通道,由于使用多电极分流,所以形成电阻并联电路如图 1(b)所示(此时可以同时加工两个工件,或者其中一个作为工件,另一个为作辅助加工),在电加工参数相同的条件下,电极与工件之间的电压几乎没有变化,此时符合基尔霍夫电流定律(KCL),根据 KCL 定律得

$$I = I_1 + I_2 = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right)U = \frac{U}{R} \quad (1)$$

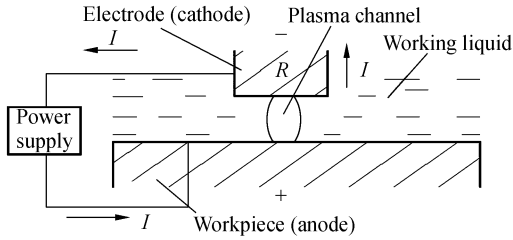
再根据电路的并联分流公式,得并联电路中每一个支路中的电流为:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} I \quad (2)$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I \quad (3)$$

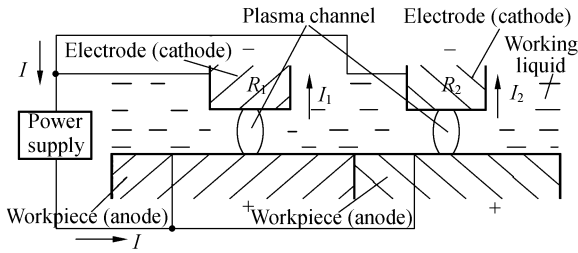
式中, $I(A)$ 为节点总电流, $I_1(A)$ 为一个电极电

流, I_2 为另一个电极的电流, R_1 为一个电极等效电阻, R_2 为另一个电极的等效电阻, U 为端电压, R 为并联总电阻。



(a) 单电极电火花放电通道等效电路

(a) Equivalent circuit of plasma channel in EDM of single electrode



(b) 分流法电火花放电通道的等效电路

(b) Equivalent circuit of plasma channel in EDM by current dividing

图 1 放电通道等效电路

Fig. 1 Equivalent circuits of plasma channel

由上式可以看出,分流法电火花加工在放电加工时分解了峰值电流。而在液体介质小间隙中进行单次脉冲放电时,单次脉冲放电能量为 $W = \int_0^T U(t)I(t)dt$, 分流法小孔电火花加工由于减小了峰值电流从而减小了单次脉冲放电所需的能量,而峰值电流与放电通道半径,放电凹坑直径及深度,表面粗糙度之间具有密切关系。随着峰值电流的减小,放电通道半径、放电凹坑直径、深度和粗糙度值都减小;峰值电流对放电通道半径、放电凹坑直径以及表面粗糙度值有决定性的影响。因此,可以通过分流法减小峰值电流从而达到减小表面粗糙度值、减小蚀除物的体积以及改善加工条件等目的。由图 1(b)可知,为了进行验证试验需要保证在相同加工参数下进行,而加工中端电压几乎不变,电流的保证需要使得并联总电阻

相等:

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \quad (4)$$

其中 R' 为并联电路等效电阻,而每个电阻

$$R = \rho \frac{l}{A}, \quad (5)$$

其中: ρ 为电阻率, l 为电阻长度, A 为电阻面积, R 为电阻。

并联电路的总电阻为:

$$\frac{1}{R'} = \frac{A_1}{\rho l} + \frac{A_2}{\rho l} = \frac{A_1 + A_2}{\rho l}, \quad (6)$$

$$R' = \rho \frac{l}{A} = \frac{\rho l}{A_1 + A_2}. \quad (7)$$

在电极材料与总长度相等的前提下,只要保证各个分面积的和与原来电极面积相同(即等面积),节点处的总电阻相同即相等,从而保证总的峰值电压和峰值电流相同,即可进行相同电参数的验证试验。

2.2 分流法电火花加工试验条件

为验证可以突破机床稳定加工指标进行了电火花小孔加工和分流法小孔电火花加工试验。利用现有的试验条件,在等面积条件下,采用单、双电极进行了对比试验,试验条件如下:

机床: EDM-7125 型号的电火花成形机(机床的主要参数如表 1 所示);

电源: 利用大功率的高频晶体管控制的弛张式脉冲电源 Tr-RC 精微电源;

电极材料: 紫铜电极;

工件材料: 1Cr18Ni9 奥氏体不锈钢(其物理化学参数如表 2 所示)。

图 2 所示为试验装置的示意图。

表 1 EDM 机床的主要参数

Tab. 1 Main parameters of EDM machine tool

机床主要参数	具体资料	机床主要参数	具体资料
工作台尺寸	280×450	最大工件重量	250
(mm)		(kg)	
工作液槽内径	730×480	电极板距工作	370-570
尺寸 (mm)	×310	台面 (mm)	
X 轴行程 (mm)	250	过滤箱容量 (L)	375
Y 轴行程 (mm)	150	机床重量 (kg)	700
Z 轴行程 (mm)	200	机床外形尺寸	970×1 130
		(mm)	×2 050
最大电极重量	25		
(kg)			

表 2 不锈钢工件的物理化学参数

Tab. 2 Physical and chemical parameters of workpieces

工件材料	热传导率 (W/(m·K))	密度 (kg/m ³)	比热 (J/(kg·K))
Cr18Ni9	16.3	7 800-7 900	500
C%	Ni%	Cr%	熔点(°C)
≤0.15	8-10	17-19	1 500-1 600

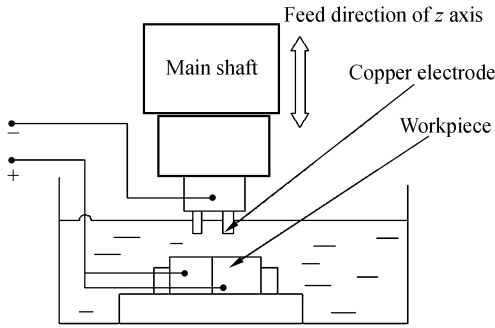


图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Illustration of experimental setup

3 分流法电火花加工试验

3.1 等面积分流法电火花加工试验

在加工参数相同条件下,用横截面积相等的单、双电极分别加工同一块不锈钢薄板,对其加工后的电极损耗、放电间隙、加工时间等因素进行检测分析与计算,并分析等横截面积的双电极在分流法小孔电火花加工中的可行性。为了加工方便,使用车床直接车出直径 $\Phi 5$ mm、 $\Phi 4$ mm和 $\Phi 3$ mm电极,其中 $\Phi 5$ mm用作单电极, $\Phi 4$ mm和 $\Phi 3$ mm用作一端螺纹连接的双电极。电极与工件尺寸如下表 3 所示。

表 3 电极与工件尺寸

Tab. 3 Sizes of electrode and workpiece

名称	公称尺寸
单电极直径(mm)	5
双电极直径(mm)	4-3
工件厚度(mm)	1.88

在电火花成形机 EDM-7125 上用公称直径 $\Phi 5$ mm和 $\Phi 4\sim 3$ mm的单、双电极分别加工孔,加工参数为:脉宽 $5\ \mu\text{s}$,脉冲间隔 $60\ \mu\text{s}$,极间电压 $40\ \text{V}$,峰值电流 $6\ \text{A}$,试验完成后比较单、双电极

的加工速度、放电间隙、以及电极损耗,试验结果如表 4 所示。

表 4 分流法电火花加工试验结果

Tab. 4 Experimental results of EDM by current dividing

电极	加工速度 (mm ³ /min)	电极绝对损耗 (mm)	单边放电 间隙(mm)
单电极	9.435	0.03	0.060
双电极	9.049	0.04	0.052

由以上试验结果可以看出等面积电火花小孔加工时,双电极加工的加工速度比单电极加工的略有减小;双电极加工的电极损耗比单电极加工的略有增加,但电极相对损耗 $<1\%$,属于加工损耗允许的范围;而双电极加工时的单边放电间隙要小于单电极加工时的放电间隙,虽然减小的比例不大,但对于电火花小孔加工的尺寸控制是很有利的。因此,从加工速度、电极损耗、放电间隙等指标来分析,等面积分流法小孔电火花加工是可行的,为后续小孔加工试验提供了分流依据。

3.2 小圆孔的等面积分流法电火花加工试验

本次试验是在前次试验的基础上进一步减小加工孔的尺寸,用电火花机床稳定加工参数,在接近机床稳定加工指标附近进行小孔加工试验,证明前次试验结论的正确性,从而验证了等面积分流法小孔电火花加工的可行性。其方案设计与前次试验一致,采用的单电极直径为 $\Phi 1$ mm,双电极直径为 $\Phi 0.6\sim 0.8$ mm(如图 3 所示),加工工件的厚度为 0.35 mm。图 4 为加工后试件在数字测量仪下的放大图,表 5 为加工试验结果。

由表 5 可知双电极加工时,加工速度比单电极加工时略有减小;电极损耗比单电极加工时略有增大,增大幅度较小仅为 0.01mm ;双电极放



图 3 单电极与分流法用双电极

Fig. 3 Single and double electrodes

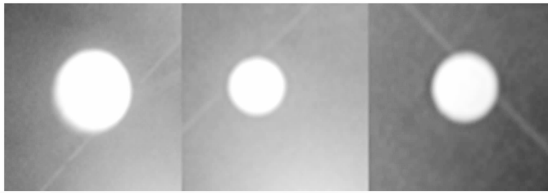


图 4 加工后的试件在数字测量仪下的放大图(10×)

Fig. 4 Specimens after process in DDC-3000

表 5 小圆孔的分流法电火花加工试验结果

Tab. 5 Experimental results of holes in EDM by current dividing

电极	加工速度 (mm ³ /min)	电极绝对损耗 (mm)	单边放电 间隙(mm)
单电极	0.076	0.22	0.035
双电极	0.060	0.23	0.026
			0.031

电间隙均减小。对照可行性试验可知,本次试验所得结果与可行性试验结果一致,验证了在等面积条件下,分流法小孔试验结果的正确性,即分流法小孔电火花加工试验可行。通过对加工过程和所得试验结果的观察,发现等面积分流法小孔加工在本试验条件下加工较稳定。

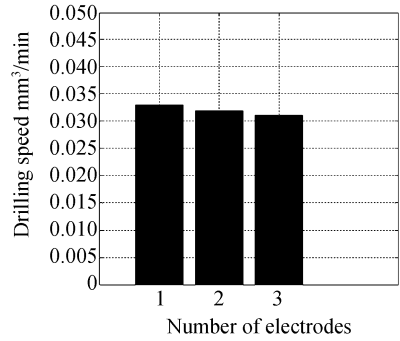
3.3 小方孔的等面积电火花加工试验

本次试验是在前两次试验的基础上进一步减小加工孔的尺寸,证明前两次试验结论的正确性,从而验证了分流法小孔电火花加工的稳定性。本次试验不仅采用了等面积分流法加工的思想,而且在总面积相等的条件下,使分电极的面积也相



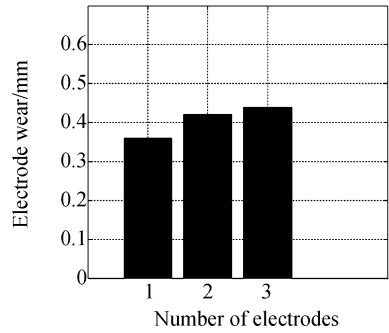
图 6 从左至右为 1、2、3 号电极对应加工的方孔照片(15×)

Fig. 6 Square holes marked 1, 2 and 3 after process



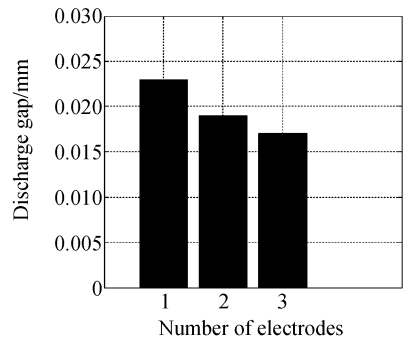
(a) 分流法对加工速度的影响

(a) Effect of current dividing on drilling speed



(b) 分流法对电极损耗的影响

(b) Effect of current dividing on electrode wear



(c) 分流法对放电间隙的影响

(c) Effect of current dividing on discharge gap

图 7 分流法加工的影响

Fig. 7 Effects by current dividing

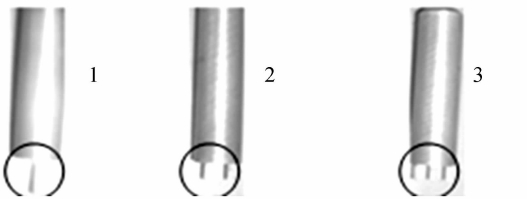


图 5 1、2、3 号电极(5×)

Fig. 5 Electrodes marked 1, 2 and 3

表 6 方孔试验中电极与工件的尺寸

Tab. 6 Sizes of electrodes and workpieces in square holes

名称	公称尺寸(mm)	个数	总面积(mm ²)
1号直径	1×1	1	1
2号直径	0.707×0.707	2	1
3号直径	0.577×0.577	3	1
工件厚度	0.35		

等,并且采用方孔加工。考虑到分电极加工精度以及车床车削电极尺寸有限等问题,所以采用电火花线切割方式加工方电极。线切割出的电极分别标号为 1、2、3,如图 5 所示,电极及工件尺寸如表 6 所示。

在电火花成形加工机床 EDM-7125 上,用上述 1、2、3 三个电极,在相同加工参数条件下加工小孔,加工所得小孔在数字式测量投影仪下的图像照片如图 6 所示,1、2、3 三个电极的加工速度、电极损耗、放电间隙的试验结果及变化规律分别如图 7(a)、7(b)、7(c)所示。

3.4 等面积分流法电火花加工性能分析

3.4.1 分流法对加工速度的影响

由以上试验结果可以看出等面积分流法电火花加工小孔时,三电极的加工速度比双电极加工时略低,而双电极的加工速度又比单电极加工时略低,随着电极数增加,加工速度逐渐减小。影响电火花加工速度的因素很多,主要有脉宽、脉间、峰值电流、极性效应、面积效应,以及工作液循环情况等。由于 3 次试验都是在相同的加工参数下,在同种工作液中采用同极性进行加工的,这样排除了脉宽、脉间、极性效应以及工作液的影响。而三电极和双电极(即分流法)加工时减小了峰值电流,其相当于减小单次脉冲放电能量,但同时需要被蚀除的蚀除物的面积也在减小,即单位面积上的能量是没有很大变化的,所以这并不是加工速度减小的原因。

加工速度减小的主要原因是加工面积越来越小,导致在单位面积上的脉冲放电过于集中,致使放电间隙的产物排出不畅;同时,会产生气体排除液体的现象,造成放电加工在气体介质中进行,而气体中放电极易发生短路,使有效的放电次数大减,导致加工速度降低。

3.4.2 分流法对电极损耗的影响

由以上试验结果可以看出在等面积电火花加工小孔时,三电极加工的电极损耗要大于双电极加工时的电极损耗,而双电极加工时电极损耗又大于单电极加工时的电极损耗,即随着电极数增加,电极损耗逐渐增大,但电极相对损耗都 $<1\%$,属于加工损耗允许的范围。影响电火花加工电极损耗的因素主要有脉宽、脉间、峰值电流、面积效应、工作液循环情况以及电极和工件材料性能和极性效应等。由于 3 次试验都在相同的加工参数

下在同种工作液中,采用同极性进行加工的,这样排除了脉宽、脉间、极性效应以及工作液的影响。而三电极和双电极(即分流法)加工时减小了峰值电流,减小峰值电流相当于减小单次脉冲放电能量,但同时工具电极的面积也在减小,使得单位时间内,工具电极的损耗基本不变。

受面积效应影响,当加工面积小于某一临界值时,电流在同一点放电的几率就会加大,造成电弧放电不稳定等加工因素出现;同时加工的孔径小,使得排屑困难,在电极与工件之间引起二次放电,这样又增大了电极损耗。但虽然电极损耗略有增加,不过相对损耗都 $<1\%$,在加工损耗允许的范围之内。

3.4.3 分流法对放电间隙的影响

由以上试验结果可以看出在等面积电火花加工小孔时,三电极加工的单边放电间隙要小于双电极加工时的放电间隙,而双电极加工的单边放电间隙又小于单电极加工时的放电间隙,即随着电极数增加,单边放电间隙渐减。影响电火花加工单边放电间隙的因素主要有脉宽、脉间、峰值电流、面积效应、工作液循环情况以及极性效应。由于 3 次试验都是在相同的加工参数下,在同种工作液中,采用同极性进行加工的,这样排除了脉宽、脉间、极性效应以及工作液的影响。

同样由于三电极和双电极(即分流法)加工时减小了峰值电流,即相当于减小了单次脉冲放电能量,同时工具电极的面积也在减小,而单边放电间隙基本与半径成比例,这样使得单边放电间隙减小。但由于面积效应,电流过于集中使得排屑困难引起二次放电,从而有增大放电间隙的趋势。在二者的共同作用下,三电极和双电极(即分流法)加工的单边电极放电间隙逐渐减小。

3.5 等面积分流法电火花加工结果分析

通过方孔加工试验与圆孔加工试验的综合比较,可知等面积分流法加工与不分流法加工时,加工过程中的加工速度、电极损耗、放电间隙变化很小,趋于一致。主要是因为相同放电参数下加工时,由于总的加工面积相等,所以在总面积上的电流(即总能量)是相等的,根据电流的迭加原理,分流法加工时,只是将电流(能量)按照与每个分电极的面积成比例关系进行分流,在单位面积电极上获得的电流(能量)并没有改变,所以加工中的加工速度、电极损耗、放电间隙等趋于一致。因

此,在电火花小孔加工中,用等面积分流法电火花加工可以采用稳定电火花加工参数,进行小于临界尺寸的小孔加工。即用等面积分流法加工可以对临界面积以下小孔进行稳定加工;进一步试验证明:分流法电火花加工的可行性及稳定性能满足小孔加工的精度和质量要求。

4 结 论

根据分流法小孔电火花加工的理论分析及其试验验证,做了如下几项工作:

(1)对等面积分流法电火花加工进行了理论分析,得到在加工参数相同的条件下,分流法小孔电火花加工的电阻并联等效电路,其中每个电阻获得的电流都小于原来的峰值电流,即减小了峰值电流从而减小了单次脉冲放电能量。因此,可以通过分流法减小电火花加工尺寸、表面粗糙度值等并改善加工条件,为分流法小孔电火花加工提供了理论依据。

(2)分别进行了小孔的单、双电极的圆孔与突破稳定加工指标的单、多电极的圆孔与方孔的等面积加工试验,得到以下结论:多电极分流法加工时加工速度略有减小,电极损耗略有增加,放电间隙略有减小,具有加工一致性,有利于加工出孔径较小的孔。所以,可以通过等面积分电流的方法用电火花机床稳定加工参数,在机床临界加工面积上,通过分流稳定加工出临界面积以下的小孔。例如:试验中采用 $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$ (总面积为 1 mm^2) 单电极稳定加工参数,进行等面积分流为 3 个 $0.577\text{ mm} \times 0.577\text{ mm}$ (总面积为 1 mm^2) 电极的小孔加工,获得了稳定电火花加工的 $0.6\text{ mm} \times 0.6\text{ mm}$ 小孔。总之,在放电参数不变的条件下,用机床稳定加工参数,进行分流法小孔电火花加工可以突破原有机床的稳定加工尺寸,加工出临界尺寸以下的小孔,为小孔加工提供了一个新的工艺方法和新的加工思路,可为微小孔加工的发展提供借鉴。

参考文献:

- [1] 郭锐,赵万生,李刚,等.微细电火花加工的微细电极在线检测[J].光学精密工程,2006,14(6):998-1003.
- GUO R, ZHAO W SH, LI G, *et al.*. Micro electrodes on-line measurement in micro EDM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6):998-1003. (in Chinese)
- [2] 李勇,郭旻,周兆英,等.特种微型机械加工技术[J].光学精密工程,2000,8(3):287-291.
- LI Y, GUO M, ZHOU ZH Y, *et al.*. Overview of non-traditional micromachining technologies [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(3):287-291. (in Chinese)
- [3] 钟先信,李建蜀,肖沙里,等.微系统集成技术研究的动向[J].光学精密工程,1998,6(4):1-6.
- ZHONG X X, LI J SH, XIAO SH L, *et al.*. Progress in microsystems in tegrated technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1998, 6(4):1-6. (in Chinese)
- [4] MASUZAWA T. An approach to micro-machining through machine tool technology [C]. *14th International Symposium on Electro machining. Edinburgh*, 2004:185-190.
- [5] 李刚,赵万生.微细电火花加工及其关键技术[J].机械工程师,2004,2:3-7.
- LI G, ZHAO W SH. Micro-EDM and its key techniques [J]. *Mechanical Engineer*, 2004, 2:3-7. (in Chinese)
- [6] TAKAHATA K, GIANCHANDANI Y B. Batch mode micro-electro-discharge machining [J]. *Journal of Micro-electromechanical Systems*, 2002, 11(4):102-111.
- [7] MASUZAWA T. State of the art of micro-machining [J]. *Annals of the CIRP*. 2000, 49(2):473-488.
- [8] 吕战竹,赵福令,张龙,等.混粉电火花加工机理的分析[J].模具工业,2003,(8):49-52.
- LÜ ZH ZH, ZHAO F L, ZHANG L, *et al.*. Analysis of the mechanism of powder-mixed EDM [J]. *Die & Mould Industry*, 2003, (8):49-52. (in Chinese)
- [9] 王辉,赵福令,吕战竹,等.混粉电火花加工中粉末对工件表面的影响[J].中国机械工程,2005,16(7):618-622.
- WANG H, ZHAO F L, LÜ ZH ZH, *et al.*. Influences of powder on the surface of workpiece in powder-mixed EDM [J]. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(7):618-622. (in Chinese)
- [10] 张勇,赵航,张广玉,等.微细电火花加工系统及其工艺技术[J].中国机械工程,2008,19(5):526-

530.

ZHANG Y, ZHAO H, ZHANG G Y, *et al.*. Research on a Micro-EDM system and its techniques [J]. *China Mechanical Engineering*, 2008,19(5): 526-530. (in Chinese)

- [11] 韩福柱,陈丽,周晓光.微细电火花加工用晶体管脉冲电源的研究[J].中国机械工程,2006,17(20):2094-2097.

HAN F ZH, CHEN L, ZHOU X G. Study on the transistor type pulse generator for Micro-EDM

[J]. *China Mechanical Engineering*, 2006, 17(20):2094-2097. (in Chinese)

- [12] 李立青,郭艳玲,白基成,等.电火花加工技术研究的发展趋势预测[J].机床与液压,2008,36(2):174-178.

LI L Q, GUO Y L, BAI J CH, *et al.*. The development forecast of electrical discharge machining technology [J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2008,36(2):174-178. (in Chinese)

作者简介:



王续跃(1960—),男,辽宁大连人,副教授,主要研究方向为特种加工和精密加工。E-mail:wbzdz@dlut.edu.cn



梁延德(1953—),男,教授,主要研究方向为精密加工。E-mail:lydjx@dlut.edu.cn



李建丽(1983—),女,河北唐山人,大连理工大学机械工程学院硕士研究生,主要从事特种加工方面的研究。E-mail:lijianlifly@126.com



赵福令(1946—),男,教授,主要研究方向为特种加工。E-mail:flzhao@dlut.edu.cn



周彪(1987—),男,大连理工大学机械工程学院本科四年级学生。E-mail:zhoubiao@126.com