引用格式:何春华, 刘秀云, 杨从斌. 高电阻电极对微细电火花放电加工影响的研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 237—241
He Chunhua, Liu Xiuyun, Yang Congbin. Influence of micro electrical discharge machining using high electric resistance electrodes[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 237—241

电工技术

高电阻电极对微细电火花放电加工影响的研究

何春华 刘秀云 杨从斌
(青岛大学数据科学与软件工程学院, 青岛 266071)

摘 要 微细电火花放电加工过程中,由于单位脉冲放电的材料去除率(放电凹坑直径)决定了最小加工尺寸以及微细电火花加工的加工表面粗糙度,所以减少单位脉冲放电的材料去除率具有重要作用。为达到此目的,采用具有高电阻材料如单晶硅作为工具电极。分析结果显示,随着工具电极电阻提高,放电电流峰值逐渐降低,脉冲放电时间增加,放电能量减小。另外,研究并测试了硅电极加工不锈钢工件时电阻值对工件表面放电凹坑直径的影响。实验结果表明当硅工具电极电阻值提高时,放电凹坑直径逐渐降低;并达到最小值 0.5 μm;同时降低了工件表面粗糙度值 0.03 μm;提高了表面加工质量。

关键词 微细电火花放电加工 材料去除率 放电凹坑 电阻 表面粗糙度
中图法分类号 TM242; **文献标志码** B

微细电火花加工由于其具有加工难加工材料(DTM)的能力,如合金、复合材料以及模具钢等,是一种重要的非传统加工方法。微细电火花加工过程中,由于单位脉冲放电的材料去除率(放电凹坑直径)决定了最小加工尺寸以及微细电火花加工的加工表面粗糙度;因此,减少单位脉冲放电的材料去除率具有重要作用[1,2]。

微细电火花加工脉冲电源通常情况下使用的是张弛式脉冲电源。由于介质击穿的发生,储存在放电电路电容中的能量会释放出来。放电能量与放电凹坑有直接的关系,最小放电能量主要取决于电路中的杂散电容[3]。杂散电容主要在以下几个部分之间形成:工具电极和工件之间、电极夹具与工件或工件夹具之间等。杂散电容的最小值主要取决于机床装备,但是机床装备的对杂散电容的影响是有限的[4,5]。Kunieda 等[6,7]通过使用静电感应法来减少杂散电容的影响,从而使放电能量最小化。这种方法能使放电坑直径减少到 0.43 μm,工件表面粗糙度可以达到 0.23 μm。另外,微细轴的最小可加工直径减少到 0.8 μm。Egashira 等[8]利用低于 20 V 的开路电压,直径为 1 μm 的微型杆来最小化放电能量。然而,由于开路电压的降低,增加了介质击穿的难度,相应的降低了材料去除率。Uno 等[9]对普通电火花加工单晶硅的加工特性进行了研究。研究表明,相较于高电阻率硅工件的加工,由于电流的减小,放电坑的直径也比较小。Mohri[10]使用单晶硅作为工具电极对大尺寸工件进行加工,并得到了光滑的表面。这是由于工具电极电阻导致了从工件表面与电极之间形成的杂散电容的放电电流减少。

基于以上分析,当具有较高电阻的材料作为工件或者工具电极时,杂散电容流出的放电电流相应地减小。另外,减少了单脉冲放电的微细电火花加工材料去除。为了减少微细电火花加工中单脉冲放电的材料去除率,利用具有较高电阻的材料如单晶硅材料作为工具电极。对放电电路进行理论分析来研究电极电阻对放电电流产生的影响;然后使用单晶硅作为工具电极对放电电流进行测量;单晶硅作为工具电极,硅工具电极电阻对放电凹坑直径产生的影响进行测量;最后,对硅工具电极加工工件的表面粗糙度产生的影响进行研究。

1 等效电路分析

1.1 等效电路

首先,对放电电路进行理论分析来研究电极电阻对放电电流产生的影响进行分析。图 1(a) 为张弛式脉冲电源,杂散电容 C_{S1}、C_{S2} 和 C_{S3} 是该放电电路中形成的,杂散电容和电感分布在放电电路中。为简化图 1 中的张弛式脉冲电源,建立简单的等效电路如图

2017 年 6 月 15 日收到 山东省重点研发计划(2016RKB01074)
第一作者简介:何春华(1969—),硕士,讲师。研究方向:智能控制技术、智能信息处理。E-mail:qddxhech2014@163.com。

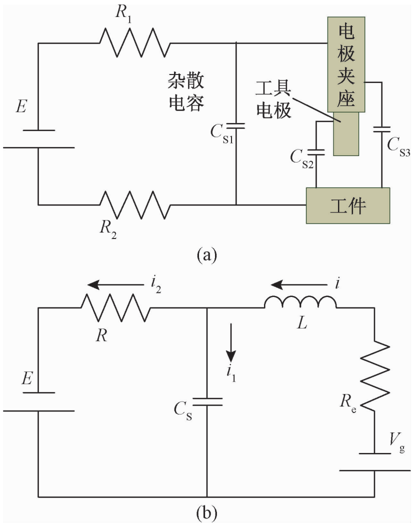

图 1　电路示意图

Fig. 1　Schematic circuit

1(b)。图 1(b)中, C_S 表示电路中的杂散电容,L 表示电感,电阻 R_e 表示最为工件或工具电极的硅电极电阻。根据等效电路可以得到以下等式:

$$E + \frac{1}{C_S}\int i_1 \mathrm{d}t - Ri_2 = 0 \tag{1}$$

$$\frac{1}{C_S}\int i_1 \mathrm{d}t + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} + R_e i + V_g = 0 \tag{2}$$

$$i = i_1 + i_2 \tag{3}$$

式中, i 、i_1 、i_3 分别表示电流; V_g 为放电电压。利用有限差分法对电路中的电流 i 进行计算,同时对电路中电阻 R_e 的影响进行研究。使用不锈钢工件以及钨电极的理论结果与实验结果大致一致时计算放电电路的杂散电容 C_s 以及电感 L。

1.2　分析结果

由计算可知,当电极电阻 R_e 增加,放电电流的峰值也会随之减小,因而脉冲的持续时间就会增大。另外,电极电阻增加,放电电路中电流的峰值减小,单位脉冲放电的持续时间相应地增大,这是由于电阻阻值的增加限制了电路中杂散电容中的电流;同时,由于电阻的增大使电流在流经电阻是会消耗更大的能量,产生更多的热量造成放电能量减小。即使是相同的放电能量下,由于较高的热通量会在放电点造成较高的材料去除率,所以一个更高的峰值电流和更短的脉冲持续时间会导致单位脉冲放电产生更高的材料去除率。因此,由于电极的放电电流峰值较低,具有较高电阻的工具电极会产生较低的单位脉冲放电材料去除率,以及直径较小、深度较浅的放电凹坑。

2　测量放电电流

2.1　实验方法

对电路中电流进行测量以检验电极电阻的影响以及对分析结果进行鉴定。在硅材料作为工件与工具电极的两种情况下,电极电阻限制了从杂散电容流出的放电电流。本实验中,采用硅材料分别作为工件和工具电极。图 2(a)为实验装备图。其中,工具电极固定在由 V 型导轨支撑的工具电极夹座底部,工具电极夹座通过橡皮带联接滑轮,V 型导轨可以带动工具电极做精密旋转运动。装置整体放置在微细电火花加工实验室中,在几秒钟的时间内,钨工具电极和硅晶片工件之间产生连续放电。表 1 显示了硅材料的参数,实验中应用了电阻值范围为$2.0\times10^{-4}\sim6.5\times10^{-3}\ \Omega\cdot\mathrm{m}$ 的硅材料作为不同工件,硅工件通过平压弹簧固定在金属工作台上。

作为对比,使用不锈钢(AISI 304)作为工件对其结果进行对比,不锈钢工件电阻为 $7.2\times10^{-7}\ \Omega\cdot\mathrm{m}$。图 2(b)为实验装置的等效电路图。电阻器 R_1,R_2 分别与工具电极夹座和工件相连,用来限制杂散电容流出的电流。然而,由工具电极夹座与工件、工具电极与工件之间的杂散电容流出的电流是难以用电阻器 R_1、R_2 来限制。放电电流通过电流传感器(tektronix, CT-1)和数字存储示波器(tektronix, TDS2024C)进行测量与现实。这种方法虽然不能精确测量工具电极与工件之间形成的杂散电容电流,但能够测量得到工件电极夹座与工件之间杂散电容电流。实验中用到的示波器带宽为 200 MHz,工具电极放置在电流传感器的小孔中。电流传感器厚度为 10 mm,工具电极的长度尽量的缩短。电源提供的电压为 60 V,电流中电容器仅为产生的杂散电容,直径为 300 mm 的钨棒作为工具电极。

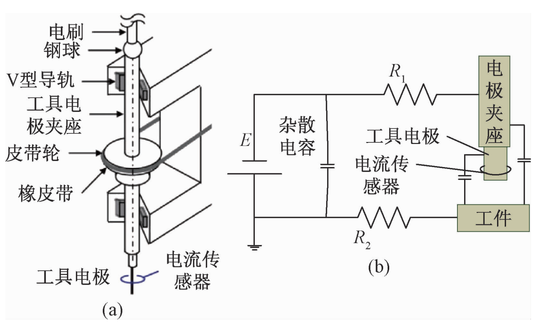

图 2　实验装置图

Fig. 2　Experiment setup

表 1　硅材料属性

Table 1　Properties of silicon materials

类型	1	2	3	4
电阻/(Ω·m)	2.0×10^{-4}	3.6×10^{-4}	1.2×10^{-3}	6.5×10^{-3}
厚度/mm	0.55	0.21	0.21	0.64

2.2　放电电流

图 3 为微细电火花加工的放电电流测量曲线结

果。当加工工件为不锈钢材料时，放电电流的电流峰值和脉冲持续时间分别为 184 mA 和 4.5 ns；相反，当加工工件电阻值为 $6.5\times10^{-3}\,\Omega\cdot m$ 的硅材料时，加工时放电电流的电流峰值和脉冲持续时间分别为 68 mA 和 7.7 ns。图 4 为工件电阻值的改变对放电电流的影响曲线，其中，图 4(a)为工件电阻值对放电电流峰值的影响，图 4(b)为其对脉冲放电时间的影响。随着电阻值的提高，放电电流的峰值降低，脉冲持续时间增加。图 4(c)为放电电压为 20 V 时根据电流计算得到的放电能量值，由图可知，随着电阻值提高，放电能量缓慢降低，这些结论与理论计算结果一致。根据前面得到的理论结果，放电凹坑直径也会随着低电流而减低。

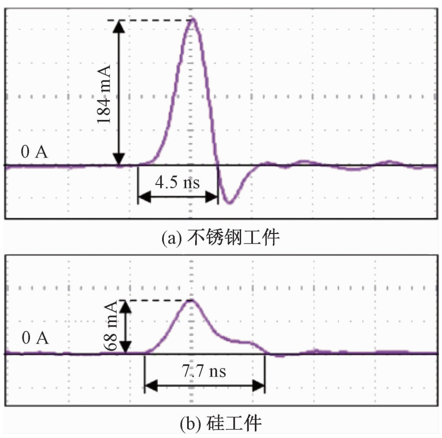

图 3　放电电流

Fig. 3　Discharge current waveforms

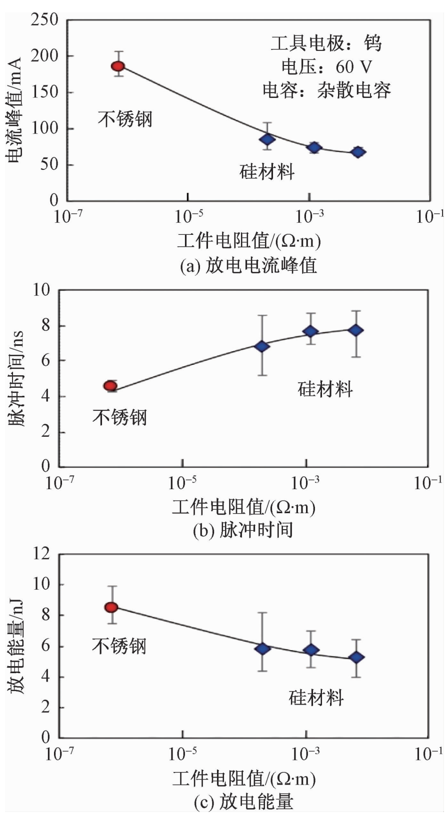

图 4　工件电阻值对放电电流的影响

Fig. 4　Influence of resistivity of workpiece on discharge current

3　高电阻工具电极加工实验

3.1　实验方法

之前的研究实验中，验证了微细电火花加工硅工件时，放电电流增加，脉冲持续时间减少。为了验证工具电极使用硅材料时也具有相同的加工效果，以及加工的放电凹坑直径会相应地减小；因此对硅工具电极进行加工测试实验。实验过程中，微细电火花加工的工件不局限于材料属性，测量硅工具电极电阻值对加工工件产生的放电凹坑直径进行测量。利用之前的实验装置，硅晶片加工成长方体形状使用紧定螺钉固定安装在工具电极夹座上。表 2 为本实验的加工条件，四种类型的硅材料作为工具电极，其电阻值分别为 $2.0\times10^{-4}\sim6.5\times10^{-3}\,\Omega\cdot m$。由于工具电极端与工件之间会产生杂散电容，工具电极的截面积设置为相同尺寸，工件材料采用不锈钢工件(AISI 304)。同样，采用钨棒工具电极作为对比实验组。手工操作工具电极向工件方向进给，电极和工件之间连续性放电。然后，对不锈钢工件上的放电凹坑直径进行测量。另外，由于进给过程是手工操作的，所以会存在间隙宽度的误差。但是由于微细电火花加工过程中工具电极和工件之间的距离一直保持相对较小的间隙距离，所以间隙宽度误差的影响可以忽略。

表 2　实验条件

Table 2　Machining conditions

材料	电阻/(Ω·m)	尺寸/mm	长度/mm
硅	2.0×10^{-4}	0.55×0.33	8
	3.6×10^{-4}	0.21×0.86	
	1.2×10^{-3}	0.21×0.86	
	6.5×10^{-3}	0.64×0.28	
钨	5.5×10^{-8}	$\phi30$	
工件	不锈钢(AISI 304)	$\phi30$	

3.2　放电凹坑

图 5(a) 为分别使用钨电极和硅电极 $1.2\times10^{-3}\,\Omega\cdot m$ 对不锈钢工件进行微细电火花加工的工件表面凹坑图。由图可知，使用硅电极加工得到的工件表面放电凹坑明显小于使用钨电极加工的到的放电凹坑。图 5(b)显示了放电凹坑直径和工具电极电阻值之间的关系，钨电极加工的到的放电凹坑平均直径大约为 1.2 μm，而硅电极加工得到的放电凹坑平均直径范围为 0.5～0.8 μm 之间。随着硅电极电阻值的提高，放电凹坑直径相应减小。当硅电

极电阻为 $6.5\times10^{-3}\ \Omega\cdot m$ 时,放电凹坑直径达到了最小值 0.5 μm。这是由于微细电火花加工过程中,硅电极电阻限制了杂散电容的放电电流。

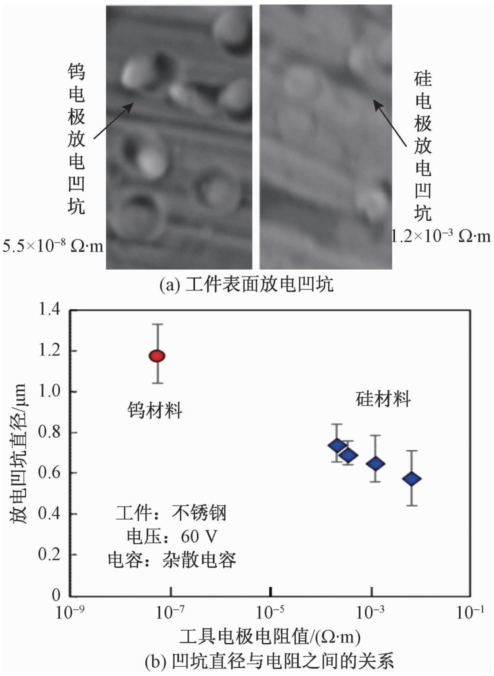

图 5 实验结果

Fig. 5 Discharge craters generated on workpiece

3.3 表面粗糙度测量

微细电火花加工的原理是在待加工工件表面累积放电凹坑得到最终的加工表面,因此放电凹坑的直径越小,相应得到的表面粗糙度值也会越小。以硅为工具电极,电极电阻值分别为 $2.0\times10^{-4}\ \Omega\cdot m$ 和 $6.5\times10^{-3}\ \Omega\cdot m$,对几微米深度的微孔进行了钻孔,用表面粗糙度测量系统测量微孔底表面的粗糙度。

图 6 为测量得到的加工表面粗糙度值。

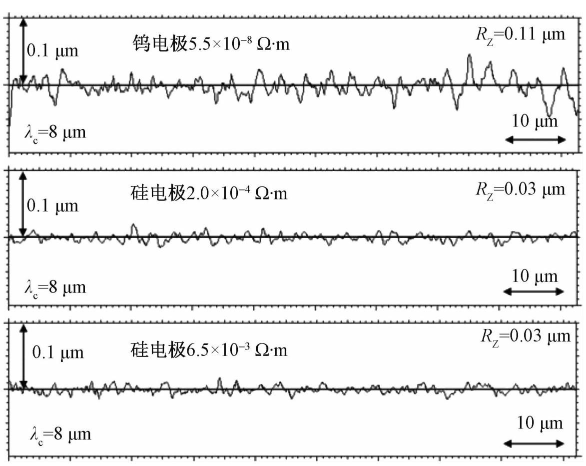

图 6 工件表面粗糙度值

Fig. 6 Roughness profile of surface of workpiece

图 6(a)为钨电极加工得到的表面粗糙度测量曲线,表面粗糙度值为 0.11 μm;相反,图 6(a)和图 6(b)两种不同电阻值的硅电极加工得到的表面粗糙度值相对较低,为 0.03 μm。然而,这两个工件表面的粗糙度值相同,这可能是由于硅工件电极加工后的放电凹坑直径较小,造成粗糙度值大致相同。

4 结论

利用高电阻材料单晶硅作为微细电火花加工的工具电极对工件进行放电加工,加工得到的工件表面放电凹坑较小,表面粗糙度值较低,相应的工件表面也相对平滑。分析结果显示当工具电极电阻提高,放电电流的电流峰值降低,脉冲持续时间增加。另外,放电能量也随着电阻值的提高而降低。实验结果显示,当单晶硅材料作为工具电极时,加工得到的不锈钢工件表面放电凹坑直径相对较小,且凹坑直径随着硅电极电阻值提高而减小,提高了工件表面的表面质量。

参 考 文 献

1 Singh J, Sharma R K. Green EDM strategies to minimize environmental impact and improve process efficiency. Journal for Manufacturing Science and Production, 2016; 16(4): 273—290

2 张昭瑞, 朱 磊, 黄燕华, 等. 柱腔上微孔电火花加工技术. 科学技术与工程, 2012;20(1): 151—153
Zhang Zhaorui, Zhu Lei, Huang Yanhua, *et al.* Micro-hole EDM technology in pillar. Science and Technology and Engineering, 2012; 20 (1): 151—153

3 Kunieda M, Lauwers B, Rajurkar K P, *et al.* Advancing EDM through fundamental insight into the process. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2005; 54(2): 64—87

4 李志彬, 冯光磊, 杨晓冬. 基于电容耦合的微细电火花加工杂散电容测量方法的研究. 电加工与模具, 2015; (4): 22—24
Li Zhibin, Feng Guanglei, Yang Xiaodong. Study on the measurement method of stray capacitance of micro EDM based on capaciy coupled. Electromachining & Mould, 2015; (4): 22—24

5 孙术发, 韦东波, 狄士春, 等. 一种测量微细电火花机床杂散电容的方法. 电加工与模具, 2011; (4): 23—26
Sun Shufa, Wei Dongbo, Di Shichun, *et al.* A method for measuring stray capacitance of micro EDM machine tools. Electrical & Mould, 2011; (4): 23—26

6 Kunieda M, Hayasaka A, Yang X D, *et al.* Study on nano EDM using capacity coupled pulse generator. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2007;56(1): 213—216

7 Kimori M, Kunieda M. Miniaturization of micro EDM using electrostatic induction feeding method. Journal of the Japan Society for Precision Engineering, 2010; 76(10): 1151—1155

8 Egashira K, Mizutani K. EDM at low open-circuit voltage. International Journal of Electrical Machining, 2005;(10): 21—26

9 Uno Y, Okada A, Nakanishi H, *et al.* Fundamental study on electrical discharge machining of single crystalline silicon. Journal Japan so-

ciety for Precision Engineering, 1997; 63: 1459—1463
10 Mohri N, Saito N, Ohtake H, *et al*. Finishing on the large area of work surface by EDM. Journal Japan Soc Precis Eng, 1987; 53(1): 124—130

Influence of Micro Electrical Discharge Machining Using High Electric Resistance Electrodes

HE Chun-hua, LIU Xiu-yun, Yang Cong-bin
(Qingdao University School of Data Science and Software Engineering, Qingdao 266071, China)

[**Abstract**] In micro electrical discharge machining (EDM), decreasing the material removal per single pulse discharge is important as a result of the material removal per single pulse discharge (discharge crater) mainly determines the minimum machinable size and surface roughness of the micro EDM. For this purpose, high resistance materials such as single-crystal silicon are used as tool electrodes. Analytical results show that the peak value of the discharge current are decreasing with the increase of electrode resistance, whereas the pulse duration increases. In addition, the influence of resistance value on the diameter of crater on workpiece surface was studied and tested when machining stainless steel workpiece using the silicon electrode. Experimental results reveal that the diameter of discharge craters decreases and achieves to 0.5 μm with the increase silicon electrode resistivity, at the same time, the surface roughness of workpiece is reduced to 0.03 μm, and the surface processing quality is improved.

[**Key words**] the micro electrical discharge machining　the material removal　discharge crater　resistance　surface roughness