

混粉电火花加工过切量研究

王 辉^{1,2}, 赵福令^{*1}, 王元刚¹, 吕战竹³

(1. 大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024;
2. 国家知识产权局 专利局, 北京 100088;
3. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 电火花加工工件的尺寸精度受过切量影响, 而过切量的大小主要取决于放电间隙和电机损耗. 为了获得更好的尺寸精度, 实验研究了在相同工作环境下混粉电火花加工和常规电火花加工过切量的差别, 利用三元线性回归方法分别建立了两种工作液中加工余量的经验公式, 通过实验验证了其可信度. 结果表明粉末的加入降低了加工余量对峰值电流和脉冲宽度的敏感程度.

关键词: 电火花加工; 混粉电火花加工; 过切量; 加工余量

中图分类号: TG661 **文献标志码:** A

0 引言

混粉电火花加工技术是在常规电火花加工工作液中添加一定的导电性粉末, 从而减小工作液的介电强度, 增大放电间隙, 有效地提高工件表面质量^[1], 国内外学者在表面质量方面做了很多研究, 取得丰富的成果^[2,3].

由于放电间隙的存在, 电火花加工的型腔尺寸要大于加工电极的尺寸, 这种电极尺寸和工件型腔尺寸的差被称做过切量. 目前对于电火花加工过切量的研究相对较少, Singh 等分析了不同的加工参数对过切量的影响^[4]. Jain 等给出了用等温线的方式估计电化学加工中孔的双边过切量^[5]. 上述研究仅局限于对过切量的定性分析, 难以满足电火花加工实际生产的需要.

过切量是影响加工尺寸精度的重要因素. 掌握确切的过切量是提高加工精度的重要前提条件. 为了尽量减少过切量对加工精度的影响, 本文以深度尺寸精度为例, 在混粉电火花加工与普通电火花加工对比实验数据的基础上, 利用三元线性回归法拟合出两种电火花加工的加工余量的经验公式.

1 过切量的影响因素分析

对于电火花型腔加工来说, 过切量实际上就是电极和工件型腔尺寸的差. 本文以 Z 方向深度过切量进行计算.

在实际加工过程中, 设定加工深度实质上是设定主轴头的运动范围 L_0 , 当工具电极无损耗时, 加工后工具电极端面到达加工深度的设定值位置, 如图 1 中虚线 a 所示位置. 此时, 过切量在理论上等于加工过程中的放电间隙.

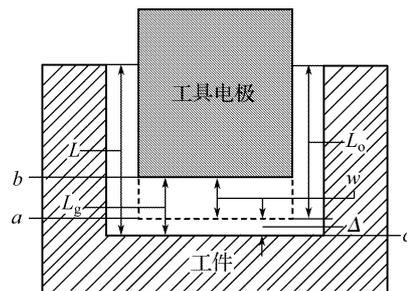


图 1 电火花加工过切量示意图

Fig. 1 Sketch map of the overcut in EDM

但是, 在火花放电过程中, 放电通道产生的大量热量不仅在工件表面蚀除材料, 在工具电极也

收稿日期: 2006-01-19; 修回日期: 2007-12-15.

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金资助项目(10276009); 国家自然科学基金资助项目(重点项目 50635040).

作者简介: 王 辉(1981-), 女, 博士; 赵福令*(1945-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: flzhao@dlut.edu.cn.

会发生蚀除现象,这会引起工具电极损耗.假定工具电极损耗为 w ,当主轴头向下进给 L_0 时,工具电极的端面实际到达图1中实线 b 所示位置.由于对于同一次加工来说,加工条件一定的情况下,其放电间隙 L_g 也一定,因而过切量 Δ 作为加工后实际位置 c 与加工前的设定位置 a 的差值,随着放电间隙的增大而增大,随着电极损耗的减小而增大,过切量在理论上等于放电间隙与电极损耗的差值,如式(1)所示:

$$\Delta = L - L_0 = L_g - w \quad (1)$$

由图1可以看出,直接影响过切量的因素有两个:放电间隙和电极损耗.图2详细描述了影响过切量的因素.其中电参数峰值电流、脉冲宽度和非电参数工作液对放电间隙和电极损耗均有直接影响.

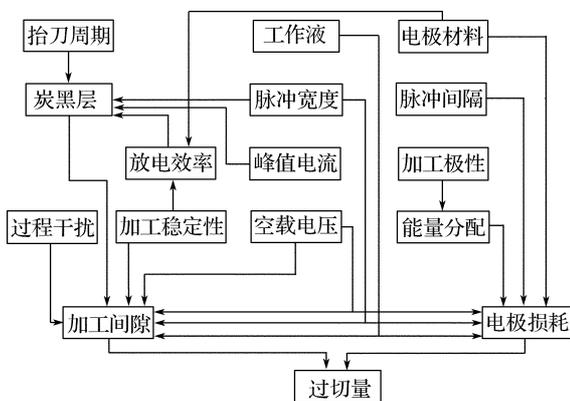


图2 加工参数对过切量的影响

Fig. 2 Effects of machining parameters on the overcut

2 实验设计

2.1 实验条件与方法

实验在日本沙迪克 A35R 精密电火花加工机床上进行.工件为 NAK80 接负极,电极为紫铜($\phi 12\text{mm}$);工作液分别为煤油以及浓度为 4 g/L 的硅粉(粒度约 $10\ \mu\text{m}$)煤油混合液;设定加工深度为 $200\ \mu\text{m}$.电参数:脉间 $t_0 = 40\ \mu\text{s}$,电压 $U = 180\text{ V}$.

在本次实验中,分别进行常规电火花加工和混粉电火花加工.使用电感测位仪测量实际的加工深度,将实际的加工深度与加工前所设定的加工深度 $200\ \mu\text{m}$ 之差作为过切量的测量值.实验分别对峰值电流和脉冲宽度这两个因素取 5 个水平值,如表 1 所示,进行全因素实验.实验过程

中,在必要时取下电极精磨,以减少对加工结果的影响.

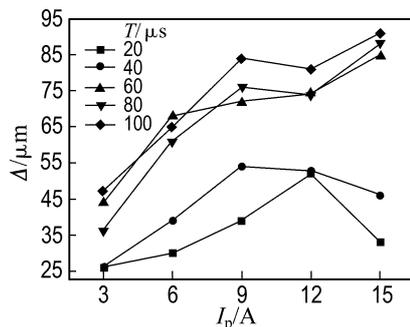
表 1 加工参数及实验值

Tab. 1 Process parameters and corresponding values for experiments

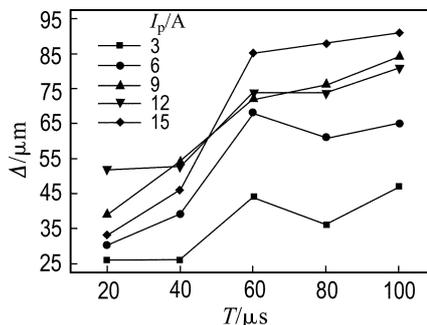
代号	参数	水平值				
		1	2	3	4	5
IP	I_p/A	3	6	9	12	15
ON	$T/\mu\text{s}$	20	40	60	80	100

2.2 实验结果与分析

两种电火花加工实验结果如图 3、4 所示,过切量均随峰值电流和脉冲宽度的增大而增大.这是因为,无论普通电火花加工还是混粉电火花加工,随着峰值电流和脉冲宽度的增大都会使单次放电脉冲能量增大.在其他实验条件相同的情况下,单次放电脉冲能量的增大使得工作介质易于击穿,放电间隙增大.同时,放电能量的增大产生的大量热量会加速两极材料的蚀除,由于在加工过程中一般选用散热性较好的材料作为工具电极,这样放电能量的增大虽然会引起工具电极损



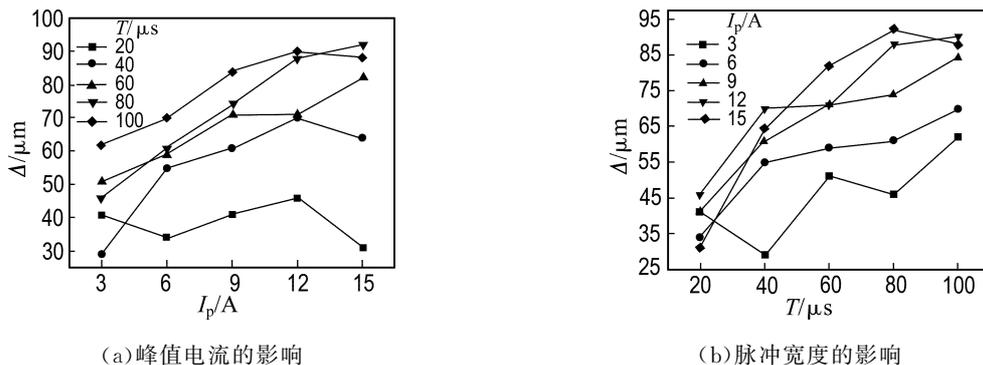
(a) 峰值电流的影响



(b) 脉冲宽度的影响

图3 电火花加工中峰值电流与脉冲宽度对过切量的影响

Fig. 3 The effects of peak current and pulse duration on the overcut in EDM



(a)峰值电流的影响 (b)脉冲宽度的影响
图 4 混粉电火花加工中峰值电流与脉冲宽度对过切量的影响
Fig. 4 The effects of peak current and pulse duration on the overcut in powder-mixed EDM

耗增大,但是这种增大程度总是小于放电间隙的增大程度,因而过切量增大。

利用 BP 神经网络^[6]训练实验结果,生成两种电火花加工的过切量对比曲面图,如图 5 所示。图 5 中上面的曲面是混粉电火花加工的过切量拟合曲面,下面的曲面是普通电火花加工的过切量拟合曲面。从图 5 中可以很明显地看出,混粉电火花加工的过切量普遍大于普通电火花加工。这是因为放电间隙增大和电极损耗减小都会使得电火花加工过切量增大。由于粉末的加入,一方面减小了寄生电容的影响,增大了放电间隙^[7],另一方面在放电过程中细化了放电能量,减小了电极损耗。因而,混粉电火花加工的过切量大于普通电火花加工的过切量。

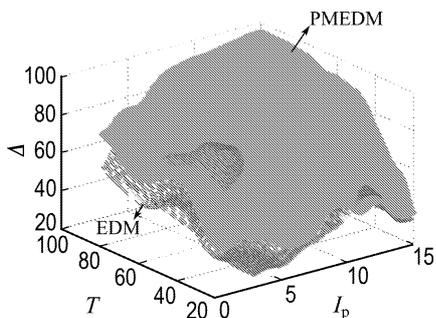


图 5 两种电火花加工过切量对比图
Fig. 5 Comparison of the overcut between EDM and powder-mixed EDM

3 常规电火花加工余量经验公式

3.1 公式的建立

在电火花加工领域,过切量的存在,会影响加工工件的尺寸精度。为了减小过切量对电火花加

工精度的影响,有必要在加工前根据过切量预留出加工余量,加工余量的值实际上等于过切量的值。由于导致产生电火花加工过切量的直接因素——放电间隙和电极损耗均受放电能量影响较大,根据放电能量公式(2)^[8]:

$$W = I_p \cdot U \cdot T \quad (2)$$

式中:W 为单次放电脉冲能量;U 为工作液击穿电压,与工作液的成分有关;I_p 为峰值电流;T 为脉冲持续时间。

由此可知,峰值电流和脉冲宽度的设定与过切量密切相关,即与加工前所要预留出的加工余量密切相关。同时,对于电火花加工结果,电极损耗值是整个加工过程电极损耗的累积,故加工所要达到的加工深度也与加工过切量密切相关。因此,假定加工余量的经验公式为式(3)形式:

$$Z_e = \Delta = K_e \cdot L_o^\alpha \cdot I_p^\beta \cdot T^\gamma \quad (3)$$

对式(3)两边取对数,得

$$\ln Z_e = \ln K_e + \alpha \ln L_o + \beta \ln I_p + \gamma \ln T$$

设 $Y = \ln Z_e$, $K = \ln K_e$, $X_1 = \ln L_o$, $X_2 = \ln I_p$, $X_3 = \ln T$, 则

$$Y = K + \alpha X_1 + \beta X_2 + \gamma X_3 \quad (4)$$

由式(4)可以看出, X₁、X₂ 和 X₃ 对 Y 的影响都是线性的,故这是个三元线性回归问题。利用最小二乘拟合的方法,取部分实验数据,可以拟合出普通电火花加工余量的经验公式:

$$Z_e = 11.3649 \cdot L_o^{-0.1339} \cdot I_p^{0.4018} \cdot T^{0.3713} \quad (5)$$

3.2 实验验证

利用拟合普通电火花加工余量公式未使用的部分实验数据对该公式进行验证,对比结果如表 2 所示。方差分析如表 3 所示。

表2 普通电火花加工中计算结果与实验结果的比较

Tab.2 Comparison of calculated results and experimental results in EDM

项目	I_p/A	$T/\mu s$	$Z_c/\mu m$			误差率/%
			实验	计算	误差	
1	9	20	39	41.106	2.106	5.400
2	3	60	44	39.751	4.249	9.657
3	15	60	85	75.897	9.103	10.709
4	6	80	61	58.440	2.560	4.197
5	12	80	74	77.211	3.211	4.339
6	15	80	88	84.454	3.546	4.030
7	3	100	47	48.054	1.054	2.243
8	12	100	81	83.881	2.881	3.557

表3 普通电火花加工中的误差分析

Tab.3 Error analysis of the results in EDM

平方和	剩余平方和	方差	标准方差
36.393	144.203	5.881	2.2699

4 混粉电火花加工余量经验公式

4.1 公式的建立

同样,利用三元线性回归方法,在混粉电火花加工实验数据的基础上可以建立混粉电火花加工余量的经验公式:

$$Z_p = 21.1914 \cdot I_o^{-0.0814} \cdot I_p^{0.2442} \cdot T^{0.2649} \quad (6)$$

4.2 实验验证

利用拟合混粉电火花加工余量公式未使用的部分实验数据对该公式进行验证,验证结果如表4所示.方差分析如表5所示.

表4 混粉电火花加工中计算结果与实验结果的比较

Tab.4 Comparison of calculated results and experimental results in powder-mixed EDM

项目	I_p/A	$T/\mu s$	$Z_p/\mu m$			误差率/%
			实验	计算	误差	
1	9	20	52	52.056	0.056	0.108
2	6	40	57	56.649	0.351	0.616
3	3	60	59	53.249	5.751	9.747
4	6	80	70	68.065	1.935	2.764
5	12	80	88	80.620	7.380	8.386
6	15	80	94	85.136	8.864	9.430
7	3	100	64	60.964	3.036	4.744
8	12	100	92	85.529	6.471	7.034

表5 混粉电火花加工中的误差分析

Tab.5 Error analysis of the results in powder-mixed EDM

平方和	剩余平方和	方差	标准方差
43.474	221.071	11.128	3.120

5 加工余量计算公式对比分析

对比式(5)与式(6)可以很容易看出,对于混粉电火花加工来说,峰值电流与脉冲宽度的指数分别为0.2442、0.2649,均小于普通电火花加工峰值电流与脉冲宽度的指数0.4018、0.3713.这说明粉末的加入,使得峰值电流与脉冲宽度对电火花加工余量的影响降低.可以认为粉末的加入降低了加工余量对电参数的敏感性,公式中的系数和加工深度的指数不同,则表明这与在相同条件下,混粉电火花加工余量大于普通电火花加工余量并不矛盾.

在工作液中添加粉末颗粒,使工作液中的电场发生畸变,电场畸变的程度与粉末的粒度浓度等特性有关,火花放电会首先在场强最大处发生,这使得火花放电的放电间隙对电参数峰值电流和脉冲宽度的依赖性有所降低.同时,粉末的参与放电,使放电点分散,细化了放电能量,使得峰值电流和脉冲宽度对放电能量的影响减小,降低了其对加工间隙和电极损耗的影响程度.另外,在火花放电过程中,悬浮在工作液中的粉末颗粒会吸收一部分能量,这进一步降低了峰值电流和脉冲宽度对放电能量的影响程度,也降低了电极损耗值.因此,混粉电火花加工的加工余量对峰值电流和脉冲宽度的敏感程度也有所降低.这与公式的计算结果相符.

同时,混粉电火花加工余量计算公式中加工深度的指数-0.0814要大于电火花加工余量计算公式中加工深度的指数-0.1339,这说明加工余量随着加工深度的增大而减小,混粉电火花加工余量减小的速度比普通电火花加工余量减小的速度要慢.这进一步说明,混粉电火花加工中粉末的加入降低了加工余量对加工参数的影响程度.

6 结论

(1) 两种电火花加工的过切量均随峰值电流

和脉冲宽度的增大成上升趋势。

(2) 对比两个公式,可以认为粉末的加入,使得峰值电流与脉冲宽度对加工余量的影响降低。

参考文献:

- [1] SIMAO J, LEE H G, ASPINWALL D K, *et al.* Workpiece surface modification using electrical discharge machining [J]. *J Mater Proces Technol*, 2003, **43**(1): 121-128
- [2] 索来春,孟庆国,刘维东. 混粉电火花加工表面粗糙度的经验公式[J]. *制造技术与机床*, 1999(9):31-33
- [3] TSAI K M, WANG P J. Semi-empirical model of surface finish on electrical discharge machining [J]. *J Mater Proces Technol*, 2001, **41**(8):1455-1477
- [4] SINGH S, MAHESHWARI S, PANDEY P C. Some investigations into the electric discharge machining of hardened tool steel using different electrode materials [J]. *J Mater Proces Technol*, 2004, **149**(6): 272-277
- [5] JAIN V K, DIXIT P M, PANDEY P C. On the analysis of the electrochemical spark machining process [J]. *Int J Mach Tools & Manuf*, 1999, **39**(1): 165-186
- [6] ZHAO F L, WANG Y G, WANG H. Application of artificial neural networks coupled with an orthogonal design to simulation for powder mixed EDM[C] // *1st International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2006:1122-1125
- [7] 王 辉,赵福令,吕战竹,等. 混粉电火花加工中粉末对极间电容和放电间隙的影响[J]. *航空制造技术*, 2004(6):100-102
- [8] 雷鸣达. 电火花加工用脉冲电源[M]. 北京:机械工业出版社,1988:4-6

Study of overcut in powder mixed EDM

WANG Hui^{1,2}, ZHAO Fu-ling^{*1}, WANG Yuan-gang¹, LÜ Zhan-zhu³

(1. Key Lab. for Precise & Non-tradit. Mach. Technol. of Minist. of Edu. ,

Dalian Univ. of Technol. , Dalian 116024, China;

2. Patent Office, State Intell. Property Office of P. R. China, Beijing 100088, China;

3. China Univ. of Geosci. , Beijing 100083, China)

Abstract: The dimensional accuracy of electrical discharge machining (EDM) is greatly influenced by the overcut resulting from the discharge gap and electrode wear. To obtain better dimensional accuracy, experiments in both conventional dielectric fluid and powder mixed dielectric fluid were carried out in the same conditions. Empirical formulas were achieved based on the experimental results by ternary linear regression method. The method was proved feasible by the further experimental data. It is concluded that the effect of peak current and pulse duration on the machining allowance is decreased owing to the powder suspending in working fluid.

Key words: electrical discharge machining(EDM); powder mixed EDM; overcut; machining allowance