

难加工合金微细通道电火花加工工艺规律研究

刘巍*, 邹尚博, 张玲瑄, 贾振元

(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)

摘要: 微细电火花加工技术因其非接触加工等显著特点,在难加工合金材料微细制造领域具有突出的优势与潜力.选择对加工性能影响较大的峰值电流、脉宽、脉间及电容4种电参数,开展了难加工合金微细通道电火花加工正交实验,并结合实验结果分析了电参数对加工时间和电极损耗的影响规律.最后,针对两个加工目标,采用多目标优化算法得到了最优电参数组合,并分别在不锈钢、殷钢、钛合金3种难加工合金材料上加工了微细通道.实验结果表明,放电参数对加工时间和加工效率具有显著影响,采用所提出的多目标优化方法可以在保证加工质量的同时有效提高加工效率.

关键词: 微细电火花加工;难加工合金材料;工艺规律;微细通道;多目标优化

中图分类号: TH162 **文献标志码:** A

0 引言

在航空航天、运载、医疗及能源动力等重大工程领域的核心装备中,对具有微尺度结构的零部件的需求日益增多,同时为了适应高温、高压、高荷载等极端工作条件,制造这些装备中具有微尺度结构的关键零部件往往需要采用具有高硬度、高强度、高耐磨性、高韧性等性能优异的合金材料,例如:具有深微孔结构的化纤喷丝板通常采用不锈钢材料,具有微细通道结构的高能激光器反射镜换热器、配备储油槽的发动机高速转子通常采用因瓦合金材料等^[1].这类材料具有导热系数低、高温强度好、韧性好、热态时黏附性强等显著特点,同时又因其热膨胀系数低、耐磨性和耐蚀性强,属于典型的难加工合金材料^[2].

电火花加工主要是利用工具电极和工件之间周期性火花放电过程中产生的瞬时高温、高压蚀除工件材料^[3],从而电参数成为影响放电状态的关键因素.近年来,国内外许多学者针对微细电火花加工中电参数对加工过程的影响开展了深入的研究.于云霞研究了微细电火花加工不锈钢微孔时,开路电压、充放电电容两组电参数对加工效率

和侧面放电间隙的影响规律,但没有涉及对电火花加工影响较大的峰值电流、脉宽、脉间3种电参数^[4].Zhao等深入研究了超声振动辅助电火花加工钛合金微孔的工艺,并研究这种工艺下放电电容对钛合金微孔加工时间和电极损耗的影响规律^[5].Manikandan等研究了在Inconel 718合金上加工微孔时,峰值电流、脉宽、脉间对电极损耗量和材料去除率的影响^[6].Yu等系统研究了在不锈钢材料上加工微槽时,开路电压、电容、分层厚度、进给速度等因素对电极损耗率和材料去除率的影响^[7].然而上述研究只针对单一合金材料且大都针对微孔加工时的情况,由于排屑条件^[8]、电极损耗等情况有很大不同,微细通道、微细三维结构加工与微孔加工时工艺规律有着很大不同.因此,有必要针对此类难加工合金材料开展微细通道的加工实验,对其工艺特性进行深入、系统的研究,以指导该类合金微细通道和微细三维结构高效、高质量的电火花加工.

据此,本文以不锈钢、殷钢和钛合金材料为例,针对加工时间和电极损耗量两个加工指标,结合微细通道正交加工实验研究电参数对加工指标

收稿日期: 2012-12-15; 修回日期: 2013-09-28.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005036);教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090041110031).

作者简介: 刘巍*(1979-),男,博士,副教授,硕士生导师, E-mail:lw2007@dlut.edu.cn;贾振元(1963-),男,教授,博士生导师, E-mail:jzyxy@dlut.edu.cn.

的影响规律;同时针对两个加工目标,采用多目标优化方法给出最优电参数组合;最后,采用最优电参数组合分别在不锈钢、殷钢、钛合金 3 种难加工合金材料上加工微细通道。

1 实验条件和实验方案

1.1 实验条件

本文实验在自主研制的高精度三维微细电火花加工实验平台上进行,实验平台如图 1 所示.该实验平台具有三轴联动功能,三轴行程分别为 110 mm(*X*)×110 mm(*Y*)×120 mm(*Z*),其中 *X*-*Y* 轴采用交流伺服电机驱动位移平台,*Z* 轴采用美国 Copley 公司直线电机平台,三轴配合 Renishaw 开放式直线光栅尺,采用全闭环控制可达 0.1 μm 的分辨率和 2 μm 的定位精度;高速电主轴系统在加工过程中使电极做高速旋转运动;采用晶体管控制的 *RC* 脉冲电源,电源原理图如图 2 所示。

工具电极:直径 100 μm 钨电极;工件材料:304 不锈钢,钛合金,殷钢;加工极性:工件正极性;工作液:煤油。

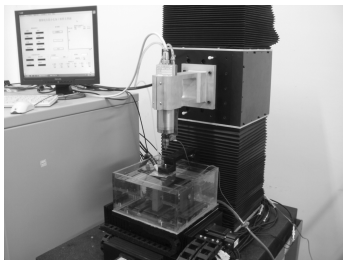


图 1 高精度三维微细电火花加工实验平台
Fig. 1 The high-precision 3D micro-EDM experimental platform

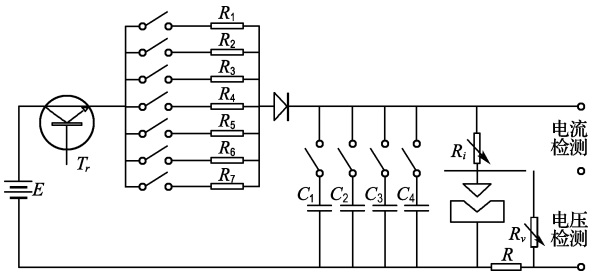


图 2 *RC* 脉冲电源原理图
Fig. 2 The schematic diagram of *RC* pulse generator

1.2 实验方案

由于采用微能 *RC* 脉冲电源,对微细电火花

加工过程影响较大的电参数主要有峰值电流(*I*)、脉宽(*T_{on}*)、脉间(*T_{off}*)、电容(*C*).加工的微细直槽的深度为 100 μm,长度为 1 000 μm.对于每一个放电参数,在其取值范围内给出 5 个水平值,设计了微细直槽正交加工实验,实验方案如表 1 所示。

表 1 四因子五水平正交实验方案

Tab. 1 The orthogonal experiment of 4 factors with 5 levels

水平	<i>I</i> /A	<i>T_{on}</i> /μs	<i>T_{off}</i> /μs	<i>C</i> /pF
1	0.22	5	20	3 200
2	0.41	10	30	3 670
3	0.60	20	40	4 700
4	0.88	30	60	5 700
5	1.26	40	80	6 900

2 电参数对加工时间和电极损耗的影响规律

加工时间和电极损耗量是微细电火花加工中两项重要的工艺指标,这两项工艺指标的优劣能够直接反映加工效率的高低和加工质量的好坏.为研究电参数对难加工合金微细通道加工时间和电极损耗的影响,本文分别进行了深度为 100 μm、长度为 1 000 μm 的不锈钢、殷钢和钛合金微细直槽正交加工实验.由于目前仍没有相对高效的电极相对体积损耗比的测量手段,本文以电极损耗长度反映放电参数对电极损耗的影响程度,利用机床接触感知功能测量的电极加工前后的长度之差作为电极损耗量.3 种材料的加工时间和电极损耗量分别如表 2 所示。

3 种材料的加工时间和电极损耗的对比图分别如图 3、4 所示.由图可知,3 种合金材料的加工时间和电极损耗随工艺参数取值的变化趋势基本相同,可以认为电参数对 3 种材料加工性能的影响规律基本一致.3 种合金材料的熔点(不锈钢约 1 440 ℃、殷钢约 1 350 ℃、钛合金约 1 600 ℃)相差不大且加工性能受电参数的影响规律基本一致,因此将每组电参数下 3 种合金材料的加工时间和电极损耗取平均值,以全面反映出电参数对 3 种合金材料的影响规律.3 种合金材料的平均加工时间 $\overline{t_m}$ 和平均电极损耗量 $\overline{w_e}$ 如表 2 所示。

表 2 3 种材料的微细通道加工时间和电极损耗量

Tab.2 The machining time & electrode wear of three materials micro-groove EDM

序号	I/A	Ton/ μ s	Toff/ μ s	C/pF	加工时间 t_m /min			电极损耗量 w_e/μ m			$\bar{t}_m$ /min	$\overline{w_e}/\mu$ m
					不锈钢	殷钢	钛合金	不锈钢	殷钢	钛合金		
1	0.22	5	20	3 200	4.71	2.55	5.44	396	387	441	4.23	408
2	0.22	10	30	3 670	3.58	3.45	3.53	389	379	480	3.52	416
3	0.22	20	40	4 700	4.06	3.70	4.88	395	355	433	4.21	394
4	0.22	30	60	5 700	3.77	3.68	5.52	406	392	438	4.32	412
5	0.22	40	80	6 900	3.64	3.54	4.83	436	338	448	3.98	407
6	0.41	5	30	4 700	5.63	4.64	7.82	409	392	395	6.03	399
7	0.41	10	40	5 700	5.52	4.36	6.88	412	381	422	5.44	405
8	0.41	20	60	6 900	4.75	4.33	5.69	411	325	408	4.67	381
9	0.41	30	80	3 200	3.83	3.79	5.74	406	373	421	4.45	400
10	0.41	40	20	3 670	3.07	3.11	3.50	396	371	426	3.23	398
11	0.60	5	40	6 900	5.59	4.34	6.84	398	389	404	5.59	397
12	0.60	10	60	3 200	4.51	4.13	5.74	372	361	447	4.79	394
13	0.60	20	80	3 670	3.82	3.52	3.77	387	366	394	3.70	382
14	0.60	30	20	4 700	3.58	3.45	6.14	369	349	441	4.39	386
15	0.60	40	30	5 700	3.89	3.54	5.34	375	373	444	4.19	397
16	0.88	5	60	3 670	5.44	4.81	5.62	410	356	413	5.29	393
17	0.88	10	80	4 700	6.39	4.69	7.62	367	329	400	6.23	366
18	0.88	20	20	5 700	5.01	4.10	5.17	404	400	433	4.61	412
19	0.88	30	30	6 900	3.96	3.43	4.69	414	364	431	4.00	403
20	0.88	40	40	3 200	4.53	4.42	3.35	382	329	399	4.13	370
21	1.26	5	80	5 700	9.38	5.72	9.03	409	382	415	8.04	402
22	1.26	10	20	6 900	6.42	4.28	8.13	381	372	456	6.28	403
23	1.26	20	30	3 200	5.15	5.67	3.64	357	324	404	4.82	369
24	1.26	30	40	3 670	4.90	5.71	3.72	390	343	428	4.78	387
25	1.26	40	60	4 700	5.64	5.12	3.57	434	357	438	4.78	410

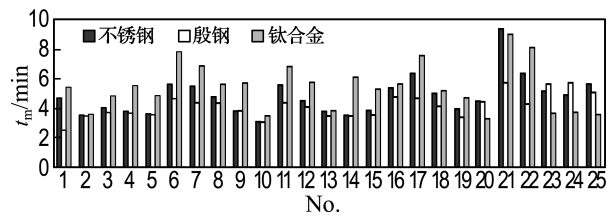


图 3 3 种合金材料加工时间变化趋势

Fig.3 Machining time trend of three alloy materials

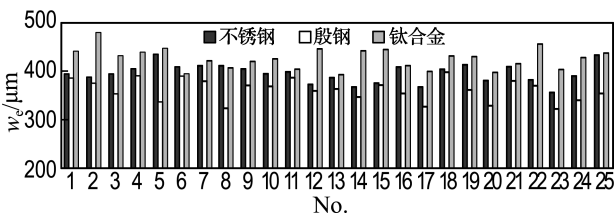


图 4 加工 3 种合金材料电极损耗变化趋势

Fig.4 Electrode wear trend of three alloy materials

加工时间实验分析结果如表 3 所示. 表中 T1~T5 为各电参数在 5 个水平值下的加工时间

总和;M1~M5 为各电参数在 5 个水平值下的加工时间均值; R 为水平值均值的极差, R 越大表示该参数对加工时间的影响越大,反之影响越小^[9]. 由表 3 可知,电参数对加工时间的影响主次关系依次为脉宽、峰值电流、电容和脉间.

表 3 加工时间实验分析结果

Tab.3 Experimental result analysis of machining time

序号	I/A	Ton/ μ s	Toff/ μ s	C/pF
T1	20.26	29.18	22.74	22.42
T2	23.82	26.26	22.56	20.52
T3	22.66	22.01	24.15	25.64
T4	24.26	21.94	23.85	26.60
T5	28.70	20.31	26.40	24.52
M1	4.052	5.836	4.548	4.484
M2	4.764	5.252	4.512	4.104
M3	4.532	4.402	4.830	5.128
M4	4.852	4.388	4.770	5.320
M5	5.740	4.062	5.280	4.904
R	1.688	1.774	0.768	1.216

电极损耗实验分析结果如表 4 所示. 由表可知:电参数对电极损耗的影响主次关系依次为峰值电流、电容、脉宽和脉间.

表 4 电极损耗实验分析结果

Tab. 4 Experimental result analysis of electrode wear

序号	I/A	$T_{\text{on}}/\mu\text{s}$	$T_{\text{off}}/\mu\text{s}$	C/pF
T1	2 037.0	1 999.0	2 007.0	1 941.0
T2	1 983.0	1 984.0	1 984.0	1 976.0
T3	1 956.0	1 938.0	1 953.0	1 955.0
T4	1 944.0	1 988.0	1 990.0	2 028.0
T5	1 971.0	1 982.0	1 957.0	1 991.0
M1	407.4	399.8	401.4	388.2
M2	396.6	396.8	396.8	395.2
M3	391.2	387.6	390.6	391.0
M4	388.8	397.6	398.0	405.6
M5	394.2	396.4	391.4	398.2
R	18.6	12.2	10.8	17.4

电参数对加工时间和电极损耗的影响规律及分析如下:

(1)峰值电流对加工时间和电极损耗的影响规律

由图 5 可知,随着峰值电流的增大,加工时间基本呈现上升趋势;电极损耗先减小后增加. 分析认为:①微细电火花加工中放电间隙很小,峰值电流的增加导致单位时间内材料蚀除量增大,由于此类合金材料具有高温热黏性,过大的材料去除率导致排屑不畅,致使消电离不充分,造成加工过程不稳定从而降低了加工效率. ②来不及排出的电蚀产物部分黏附到工具电极表面一定程度上减缓了电极的损耗. 当峰值电流大于 0.88 A 后,由于加工时间增加,电极损耗略微增加.

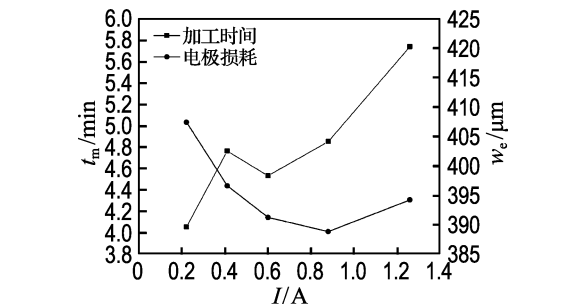


图 5 峰值电流与加工时间和电极损耗的关系
Fig. 5 Relationship of discharge peak current-machining time & electrode wear

(2)脉宽对加工时间和电极损耗的影响规律

由图 6 可知,随着脉宽的增大,加工时间不断变短;电极损耗量则先减小而后增大. 分析认为:①脉宽增大导致脉冲能量增大,致使材料蚀除量增大,同时极间爆破力也随之增大,辅助蚀除产物的排出,加工效率得以提高. Kojima 等^[10]通过高速摄像机拍摄放电通道过程,发现放电通道中电弧等离子体的直径随脉宽持续时间增加而增大,并且放电凹坑在本实验参数范围内也随脉间增加而增大,从加工机理角度说明了脉宽对加工效率的影响. ②加工时间缩短,使得电极的损耗量减小. 当脉宽大于 20 μs 后,材料蚀除率提高的同时电极的损耗也增加了.

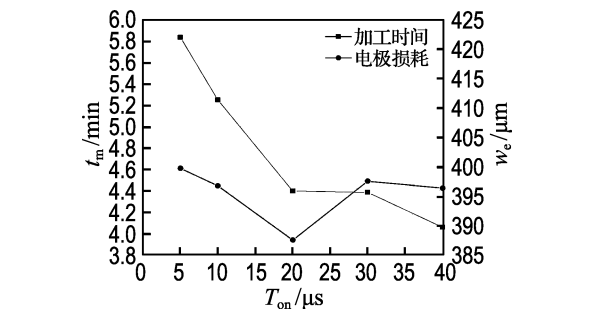


图 6 脉宽与加工时间和电极损耗的关系
Fig. 6 Relationship of pulse duration-machining time & electrode wear

(3)脉间对加工时间和电极损耗的影响规律

由图 7 可知,随着脉间的增加,加工时间整体上缓慢增加;电极损耗则先减小而后略微增加. 分析认为:①脉间增加,导致单位时间内工作脉冲数目减少,加工效率降低. ②脉间小于 40 μs 时,脉间的增大使电极的损耗下降,分析原因可能为 3

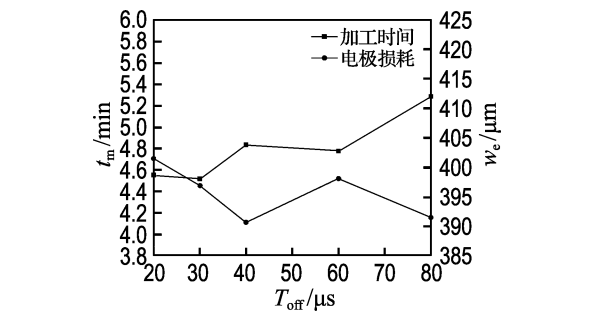


图 7 脉间与加工时间和电极损耗的关系
Fig. 7 Relationship of pulse interval-machining time & electrode wear

种难加工合金材料由于熔点相对较高,导热系数低,金属未完全熔化就被抛出,脉间增大使极间的散热和消电离时间增加,造成更多电蚀碎屑在排出过程中黏结到电极表面从而降低电极损耗.然而随着脉间的持续增大,加工时间增加,使得电极损耗略微增大.在 4 个参数中,脉间对电极损耗的影响最弱.

(4) 电容对加工时间和电极损耗的影响规律

由图 8 可知,随着电容的增大加工时间先减小而后急剧增加;电极损耗呈波动上升趋势.分析认为:①电容增加,使得放电能量增加,有利于金属的熔化和产物的排出.但电容持续增大,导致材料蚀除量过大,由于材料的高温黏性,极间排屑困难造成加工效率降低.②电容增大使放电能量增加,加大了电极的损耗;同时加工时间增加,也会增大电极损耗.

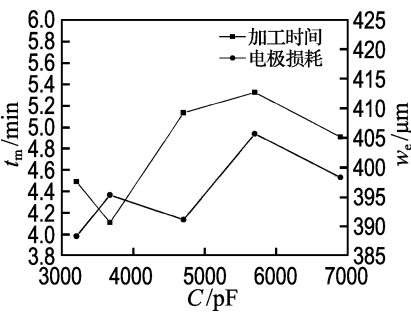


图 8 电容与加工时间和电极损耗的关系
Fig. 8 Relationship of capacity-machining time & electrode wear

综上所述,影响加工时间的关键因素是脉宽和峰值电流;影响电极损耗的关键因素是峰值电流和电容.通过本实验可得出获得难加工材料微细直槽所需最短加工时间的最优参数组合为峰值电流 0.22 A,脉宽 40 μs,脉间 30 μs,电容 3 670 pF;采用该组参数分别在不锈钢、殷钢、钛合金上进行微细直槽加工实验,其平均加工时间为 2.83 min,比表 2 中最优组(第 10 组)效率提高了 12.4%.获得最小电极损耗的最优参数组合为峰值电流 0.88 A,脉宽 20 μs,脉间 40 μs,电容 3 200 pF;采用该组参数分别在不锈钢、殷钢、钛合金上进行微细直槽加工实验,其平均电极损耗量为 355 μm,比表 2 中最优组(第 17 组)减小了 3%.

3 电参数的多目标优化

为了在难加工合金微细通道电火花加工中获

得较高的加工效率和较小的电极损耗,需要对加工时间及电极损耗这两项指标同时进行优化.然而电参数对这两项工艺指标的影响往往是相互矛盾的,为此,本文采用基于支持向量机回归和非支配排序遗传算法的多目标优化方法^[11],同时对两个加工目标进行优化.其基本思想为:首先,利用前文开展的微细通道正交加工实验提供建立支持向量机工艺模型所需的样本数据;其次,结合正交加工实验的结果,建立微细电火花加工工艺模型的支持向量机模型,为后续的多目标优化算法提供工艺关系模型;最后,根据非支配排序遗传算法,以支持向量机工艺模型的误差传递函数作为遗传算法的适应度函数,以支配关系评价个体的优劣,开展工艺参数取值全局范围内的多目标寻优,实现兼顾加工效率和电极损耗的微细电火花加工工艺参数多目标优化.

根据表 2 难加工合金微细直槽正交加工实验结果,针对两个优化目标,分别采用两个独立的支持向量机建立加工时间和电极损耗的工艺模型(分别为 PT_SVM 和 EW_SVM).在表 2 中随机抽取 5 组数据(实验号 18、13、20、21、25)预留为模型的测试样本,剩余 20 组作为模型的训练样本.两个支持向量机的核函数均选择高斯型,核函数参数均为 0.8,回归算法的条件参数根据经验均选为 e^{-7} .根据交叉验证实验,PT_SVM 模型的 C 和 ϵ 分别取 6 000 和 0.03;EW_SVM 模型的 C 和 ϵ 分别选取为 8 000 和 0.02.经过样本训练后,实际加工结果与两个支持向量机模型测试结果的平均误差分别为 8.677% 和 2.046%,可见误差较小,此关系模型可以作为多目标遗传算法的目标函数.

在多目标遗传优化实验中,种群个体采用实数编码,将个体表示为 $[I, T_{on}, T_{off}, C]$,种群数量取 200,交叉概率设为 0.8,变异率为 0.1,种群进化代数 100 代.电参数及其取值范围如表 5 所示.

表 5 电参数及取值范围
Tab. 5 Electrical parameters and corresponding value ranges

电参数	取值范围
峰值电流 I/A	0.2~1.5
脉宽 $T_{on}/\mu s$	5~100
脉间 $T_{off}/\mu s$	15~100
电容 C/pF	[470,1 000,1 470,2 200,3 200,4 700,6 900]

经过 100 代的遗传操作后,得到 Pareto 最优解集,如图 9 所示. 其中“*”代表前 99 代的解,“o”代表第 100 代的解.

经过优化后的非支配解集的决策变量及相应的目标值见表 6. 由于遗传操作进行到最后一代已经完全收敛,第 100 代种群个体间差异很小,故只列出了前 5 个参数组合及相应的目标值. 根据表 6,取峰值电流 0.88 A,脉宽 25 μs ,脉间 50 μs ,电容 3 200 pF,分别在不锈钢、殷钢和钛合金工件上进行微细直槽加工实验,平均加工时间 2.42 min,平均电极损耗量 345 μm . 可见,优化得到的目标值相比加工实验,其优化结果的误差分别为 3.3% 和 1.4%,说明优化结果是准确可靠的. 同时,采用该组电参数与采用正交实验方法的单目标优化结果相比,加工效率提高了 14.5% 且电极损耗降低了 2.8%. 因此,将此电参数组合作为开展难加工合金微细通道电火花加工的最优电参数组合.

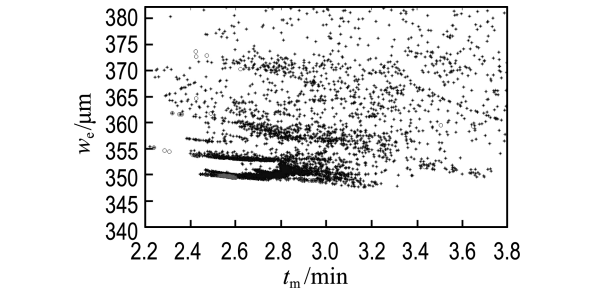


图 9 多目标遗传算法优化结果
Fig. 9 Optimized results of multi-objective GA algorithm

表 6 优化后的工艺参数组合及优化结果
Tab. 6 Optimized combinations of parameters and results

序号	工艺参数				优化结果	
	I/A	$T_{\text{on}}/\mu\text{s}$	$T_{\text{off}}/\mu\text{s}$	C/pF	t_{m}/min	$w_{\text{e}}/\mu\text{m}$
1	0.90	24	50	3 200	2.495	349.72
2	0.90	24	50	3 200	2.500	349.65
3	0.90	24	49	3 200	2.495	349.79
4	0.90	27	49	3 200	2.500	349.66
5	0.90	25	49	3 200	2.500	349.69

4 难加工合金微细通道加工实例

选择峰值电流 0.88 A,脉宽 25 μs ,脉间 50 μs ,电容 3 200 pF,分别在不锈钢、殷钢及钛合金工件上进行了微细通道加工,并采用日本 KEYENCE VHX-600 超景深显微镜测量了微细通道的特征尺寸. 3 种难加工合金微细通道的显

微照片如图 10~12 所示.
如图 10 所示,在不锈钢工件上加工了 6 条并行的微细曲槽,单条曲槽长度 7 mm,组合加工共用时约 104 min,电极损耗 11.595 mm.

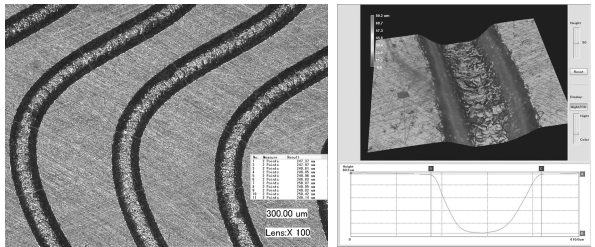


图 10 不锈钢工件微细阵列曲槽显微照片(局部)
Fig. 10 The micrograph of machined stainless steel curved groove array (part)

如图 11 所示,在殷钢工件上加工了微细直槽、曲槽,其中曲槽长 17 mm,两条平行微细直槽长 14 mm;组合加工共用时约 80 min,电极损耗 7.649 mm.

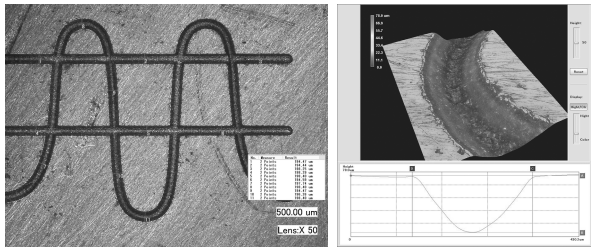


图 11 殷钢微细直槽、曲槽显微照片
Fig. 11 The micrograph of machined invar alloy straight and curved grooves

如图 12 所示,在钛合金工件上加工两个同心圆形微细曲槽和 6 条放射形直槽,其中大圆周长为 9.42 mm,单条直槽长 6 mm;组合阵列加工时间共为 112 min,电极损耗 22.080 mm.

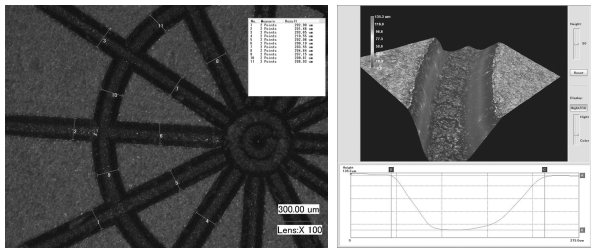


图 12 钛合金组合阵列微细直槽、曲槽显微照片(局部)
Fig. 12 The micrograph of machined titanium alloy straight and curved groove array (part)

分别在不锈钢、殷钢及钛合金微细通道任意选择 11 个位置测量微细通道的槽宽和槽深,测量结果如图 13 所示. 由图可知,利用多目标优化得到的电参数组合加工 3 种难加工合金微细通道的宽度和深度具有良好的一致性.

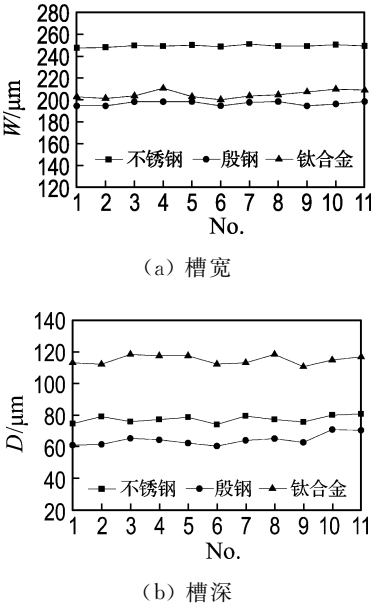


图 13 3 种难加工合金微槽槽宽、槽深变化
Fig.13 Width and depth variations of micro-channels of three kinds of difficult-to-cut alloy materials

5 结 论

(1)针对不锈钢、殷钢和钛合金 3 种难加工合金材料的微细通道电火花加工,选择峰值电流、脉宽、脉间及电容 4 种电参数,通过正交加工实验分析了电参数对加工效率和电极损耗的影响规律,分别得到了获得最高加工效率和最小电极损耗的电参数组合.

(2)为了同时获得较高的加工效率和较低的电极损耗,针对两个加工指标,采用基于支持向量机回归和非支配排序遗传算法的多目标优化方法对微细通道电火花加工的电参数进行了多目标优化,得到了 3 种难加工合金微细通道电火花加工的最优电参数组合.

(3)采用最优电参数组合分别在不锈钢、殷钢和钛合金 3 种难加工材料上进行了微细通道的加工实验,表明采用该组电参数,在保证微细通道深度和宽度具有良好一致性的同时显著提高了其加工效率.

参考文献:

[1] 邓 波,韩光炜,冯 涤. 低膨胀高温合金的发展及在航空航天业的应用[J]. 航空材料学报, 2003, 23(S1):244-249.

DENG Bo, HAN Guang-wei, FENG Di. Development of low thermal expansion superalloys and their applications in aerospace [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2003, 23(S1):244-249. (in Chinese)

[2] 邹喜洋. 难加工材料的特性及其应用前景[J]. 金属热处理, 2003, 28(4):44-47.

ZOU Xi-yang. Characteristics and application prospect of hard to machine materials [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2003, 28(4): 44-47. (in Chinese)

[3] Schumacher B M. After 60 years of EDM the discharge process remains still disputed [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 149(1-3):376-381.

[4] 于云霞. 微细电火花加工实验及工艺规律研究[J]. 电加工与模具, 2004(3):24-26.

YU Yun-xia. The technical study and tests of micro-EDM machining [J]. *Electromachining & Mould*, 2004(3):24-26. (in Chinese)

[5] ZHAO Wan-sheng, WANG Zhen-long, DI Shi-chun, *et al.* Ultrasonic and electric discharge machining to deep and small hole on titanium alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 120(1-3):101-106.

[6] Manikandan R, Venkatesan R. Optimizing the machining parameters of micro-EDM for inconel 718 [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2012, 12(10): 971-977.

[7] YU Zu-yuan, Rajurkar K P, Narasimhan J. Effect of machining parameters on machining performance of micro EDM and surface integrity [C] // *Proceedings of Annual ASPE Meeting*. Portland: ASPE, 2003.

[8] 郑新毅. 深微孔电火花加工关键技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2010.

ZHENG Xin-yi. Key technology of high-aspect-ratio

micro hole EDM [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2010. (in Chinese)

[9] 茆诗松,周纪芾,陈颖. 试验设计[M]. 北京:中国统计出版社, 2004.

MAO Shi-song, ZHOU Ji-xiang, CHEN Ying. **Design of Experiment** [M]. Beijing:China Statistics Press, 2004. (in Chinese)

[10] Kojima A, Natsu W, Kunieda M. Spectroscopic measurement of arc plasma diameter in EDM [J]. **CIRP Annals — Manufacturing Technology**, 2008, **57**(1):203-207.

[11] ZHANG Ling-xuan, JIA Zhen-yuan, WANG Fu-ji, *et al.* A hybrid model using supporting vector machine and multi-objective genetic algorithm for processing parameters optimization in micro-EDM [J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2010, **51**(5-8):575-586.

Research on machining characteristics of micro-groove EDM
on difficult-to-cut alloy materials

LIU Wei* , ZOU Shang-bo, ZHANG Ling-xuan, JIA Zhen-yuan

(Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education,
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Due to its contact-less process, micro-electrical discharge machining (EDM) enables very small machining forces between the electrode and workpiece, and it has been one of the most important technologies in micro-manufacturing field of difficult-to-cut alloy materials. Discharge peak current (I), pulse duration (T_{on}), pulse interval (T_{off}) and capacitance (C) are selected as experimental parameters, and an orthogonal experiment of micro-channels on difficult-to-cut alloy materials is carried out. Moreover, the machining characteristics of the electrical parameters on machining time and electrode wear are analyzed according to the results of experiments. Finally, a multi-objective optimization method is employed to achieve the highest processing efficiency and the lowest electrode wear, and micro-channels on the three kinds of difficult-to-cut materials, stainless steel, invar steel, titanium alloy, are machined with the optimal parameters. The experimental results show that the electrical parameters have a great impact on processing efficiency and quality, and the processing efficiency can be improved greatly without losing machining quality by the proposed multi-objective optimization method.

Key words: micro-EDM; difficult-to-cut alloy materials; machining characteristics; micro-groove; multi-objective optimization