

工艺参数对 TC4 钛合金电解加工速率 及加工质量的影响

孙宇博^{a,b}, 周可人^b, 马锦晖^b, 马东东^b, 谢裕权^b

(中国民航大学 a.天津市民用航空器适航与维修重点实验室 b.理学院, 天津 300300)

摘要: **目的** 研究工艺参数对 TC4 钛合金电解加工速率及加工质量的影响。**方法** 采用三因素三水平的正交试验方法, 通过实验研究了频率、占空比及加工间隙对加工速度及加工质量的影响规律, 对正交试验结果进行了 F 检验, 对加工参数的显著性进行了分析。采用激光共聚焦显微镜表征工件表面形貌及测量工件表面粗糙度。建立了电解液内流场数值仿真模型, 获得了电解加工过程中加工区域电解液流动的规律。**结果** 本研究中电解加工频率及加工间隙对电解加工材料去除量的影响显著, 占空比对材料去除量的影响不显著, 在加工间隙为 0.2 mm、加工频率为 100 Hz 的条件下, 材料去除量最大, 为 0.261 g, 表面粗糙度最低, 为 0.484 μm 。降低加工间隙或提高加工频率, 均有利于提高材料去除量, 降低工件表面粗糙度。电解加工区域内的电解液流速分布规律与电解加工区域加工深度具有较好的一致性。**结论** 电解加工频率及加工间隙对电解加工速率及电解加工质量均有较大的影响, 在实际加工过程中, 应减小加工间隙, 提高加工频率, 以提高电解加工速率, 降低加工表面粗糙度。加工区域内, 电解液流速分布的均匀性对工件加工表面的均一性有一定影响, 应合理设计夹具, 以提高加工区域内电解液流速均匀性, 从而提升加工表面均一性。

关键词: TC4 钛合金; 电解加工; 工艺参数; 加工速度; 表面粗糙度; 复制精度

中图分类号: TG662 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)12-0307-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.12.041

Effect of Process Parameters on Electrochemical Machining Speed and Machining Quality of TC4 Titanium Alloy

SUN Yu-bo^{a,b}, ZHOU Ke-ren^b, MA Jin-hui^b, MA Dong-dong^b, XIE Yu-quan^b

(a. Tianjin Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance,
b. School of Science, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

ABSTRACT: The work aims to study the effect of process parameters on the electrochemical machining speed and processing quality of TC4 titanium alloy. The influence laws of frequency, duty and machining gap on machining speed and machining quality were studied by orthogonal experiment with three factors and three levels. The F test was carried out on the orthogonal test results and the significance of the processing parameters was analyzed. The surface morphology and the surface roughness of the workpiece were characterized and measured by laser confocal microscope. The numerical simulation model of the flow field in the electrolyte was established to obtain the flow laws of the electrolyte during the process of electrolysis. The effect of

收稿日期: 2018-04-05; 修订日期: 2018-07-11

Received: 2018-04-05; Revised: 2018-07-11

基金项目: 中国民航局重点科研项目 (MRHD20160106); 中央高校基本科研业务费资助项目 (3122015L002)

Fund: Supported by the Key Scientific Research Projects of China Civil Aviation Administration (MRHD20160106) and the Funding Projects for Basic Scientific Research Services in Central Universities (3122015L002)

作者简介: 孙宇博 (1983—), 男, 硕士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为表面工程。邮箱: amy83767115@163.com

Biography: SUN Yu-bo (1983—), Male, Master, Assistant researcher, Research focus: surface engineering. E-mail: amy83767115@163.com

electrochemical machining frequency and machining gap on the removal of ECM material was significant. The effect of duty ratio on material removal was not significant. The material removal was the largest, the surface roughness is the lowest, the material removal amount reached 0.261 g and the surface roughness of the workpiece reached 0.484 μm under the processing gap of 0.2 mm and the processing frequency of 100 Hz. The reduction of the machining gap or the increase of the machining frequency was beneficial to the improvement of the material removal and the reduction of the surface roughness of the workpiece. The distribution of electrolyte flow velocity in the ECM area was in good agreement with the processing depth of the electrolytic processing area. The frequency and gap of ECM have a great influence on the machining speed of ECM and the machining quality of ECM. In the actual processing, the machining gap rate should be reduced and the machining rate should be improved to increase the machining speed and machining quality. The uniformity of the velocity distribution of the electrolyte in the processing area has a certain influence on the uniformity of the workpiece surface. A fixture should be designed to improve the uniformity of the flow velocity in the processing area in order to improve the uniformity of the processing surface.

KEY WORDS: TC4 titanium alloy; electrochemical machining; process parameters; processing speed; surface roughness; replication accuracy

TC4 钛合金具有比强度高、韧性好、耐蚀耐热的特点,已成为民用航空器发动机核心组件的主要构成材料之一^[1-2]。但由于钛合金切削机加工性能差,传统加工方法会导致刀具消耗严重、加工过热等问题,引发加工区域表面产生机械应力、表面微划痕、微裂纹等二次损伤。采用非接触的电解加工方式加工,可以有效克服传统机加工方法的缺点。电解加工是基于电解过程中金属阳极腐蚀溶解,借助预先制备的阴极型面,按一定形状尺寸加工成型的非接触式加工方法^[3-4]。

在电解加工过程中,工件材料去除速率不受加工材料硬度、强度、韧性的影响,工件材料是以离子状态被去除,无冷作硬化层、热再铸层以及由此引起的表面纤维裂纹,具有工件表面光整、无加工纹路、无毛刺等特点^[5-6]。与传统加工方法相比,电解加工没有加工过程中进刀限位的限制,可以根据加工对象的型面要求,制造特定的工具阴极形状,以满足不规则型面及空间曲面的特种加工。

近年来,国内外有很多学者针对工艺参数对电解加工过程的影响做了大量研究。Burger M 等^[7]研究了加工间隙对 TC4 钛合金电解加工工件表面粗糙度的影响,并设计了一种提高加工表面质量的特殊电极。罗震研究团队^[8-9]对 TC4 钛合金电解加工过程中加工区域的电流密度分布进行了数值计算,得到了阳极形状的演化规律,提出了一种校正消除过切的方法。Les LEE 等^[10]研究了占空比对镍-钛记忆合金电解加工材料去除量的影响。孙宇博等^[11]研究了电解液成分对 TC4 钛合金电解加工型面加工质量的影响。电解加工过程中涉及复杂的物理化学过程,加工频率、占空比、加工间隙等加工参数,都会对加工速度及加工质量造成较大影响,且各加工参数之间还会产生非线性交互作用,因此研究电解加工过程需综合考虑多因素的影响。现有研究中大多只考虑单一因素对电解加工过程的影响,未综合考虑多个因素对电解加工的影响。本文采用三因素三水平的正交试验方法,通过实验研究

了低频状态下频率、占空比及加工间隙对电解加工效率及质量的影响,建立了电解液内流场数值仿真模型,获得了电解加工过程中加工区域内电解液的流动规律,结合试验研究了加工过程中电解液流动对加工质量的影响,拟为航空发动机叶片焊接修补后多余堆焊去除、恢复叶片型面尺寸提供技术储备。

1 试验

1.1 方案

采用三因素三水平的正交试验方法,分析频率、占空比及加工间隙对钛合金加工速度及加工质量的影响,实验参数如表 1 所示。

表 1 电解加工试验参数
Tab.1 Test parameters of ECM

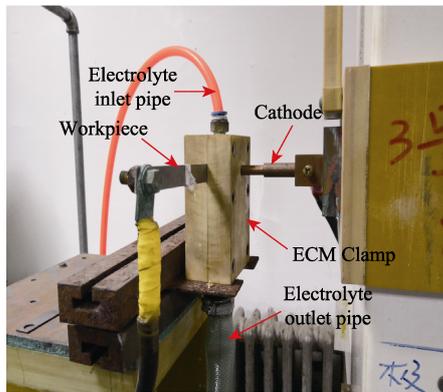
No.	Frequency/Hz	Duty/%	Working gap/mm
1	25	10	0.2
2	25	40	0.5
3	25	70	0.8
4	50	10	0.5
5	50	40	0.8
6	50	70	0.2
7	100	10	0.8
8	100	40	0.2
9	100	70	0.5

1.2 设备

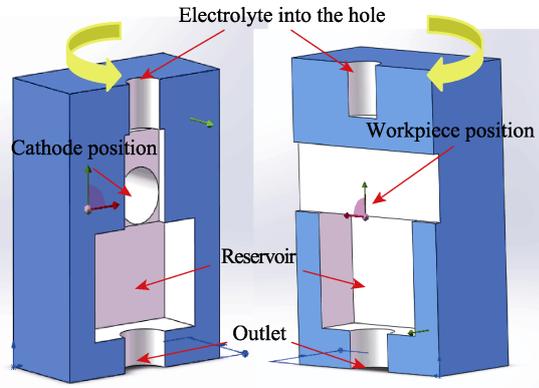
本实验采用低频(100 Hz)脉冲电源,加工电压为 24 V,加工时间为 20 s,电解液为 10%NaCl+10%NaBr,溶液电导率为 196.3 mS/cm。工具阴极为直径 13 mm、长 30 mm 的铜材圆柱,工件阳极为 TC4 钛合金板材,试验设备如图 1a 所示。工装夹具^[12]结

构如图 1b 所示，由两组件构成，包括进液孔、储液槽、出液孔、工具阴极和工件阳极位置。进液孔与出液孔构成了电解液循环路径，储液槽用于缓解电解液高速流过加工间隙产生的压力，防止电解液在工具阴

极孔及工件阳极位置溢出，影响加工间隙电解液的流场分布。工具阴极位置孔与工件阳极位置垂直，保证加工间隙均匀性。采用激光共聚焦显微镜表征工件表面形貌及测量工件表面粗糙度。



a 实物图



b 工装夹具结构

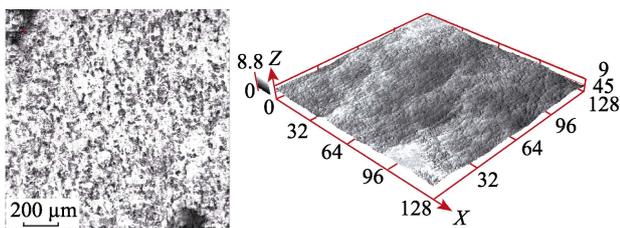
图 1 试验设备实物图及工装夹具结构示意图

Fig.1 Physical map of ECM equipment (a) and sketch map of tooling and fixture (b)

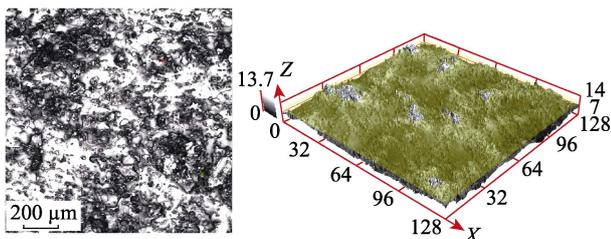
2 电解加工过程分析

2.1 材料去除过程分析

图 2 为电解加工前后工件表面形貌。对比发现，电解加工后，工件表面呈现近似“韧窝”状形貌，这与阳极腐蚀溶解机理相吻合^[13]。初始状态下，工件表面凹凸不平，凸起部位承受的电场强度更高，导致突起位置的材料去除速率相对较快。随着电解加工的进行，凸起部位逐渐被去除，该位置的电场强度降低，而其他位置又出现相对较高的凸起部位，周而复始地发生阳极溶解。



a 电解加工前工件表面形貌

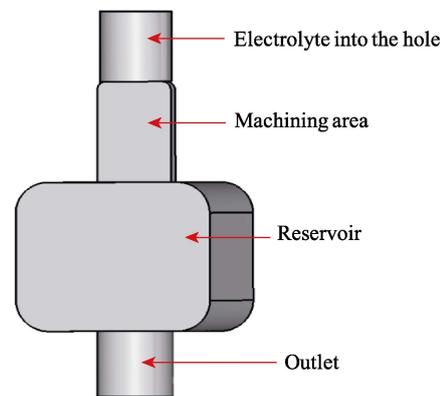


b 电解加工后工件表面形貌

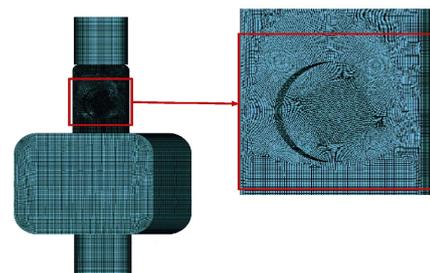
图 2 电解加工前后工件表面形貌对比
Fig.2 Comparison of surface morphology of workpiece before and after ECM

2.2 加工区域电解液流场分析

根据工装夹具电解液流道实际形状，建立电解液流道几何模型（如图 3a 所示），进行网格无关性验证后，选取 0.1 mm 六面体网格对电解液流道进行网格划分，对电解阴阳极附近区域选用 0.05 mm 六面体网格进行局部加密，获得电解液流道网格模型（如图 3b 所示）。



a 电解液流道几何模型



b 电解液流道网格模型

图 3 电解液流道几何模型及网格模型
Fig.3 Geometric model and mesh model of electrolyte flow channel

利用 Fluent 软件对 3 种不同间隙 (0.2、0.5、0.8 mm) 下电解加工的流场分布情况进行模拟。流场入口采用压力入口边界条件, 出口截面采用自由流 (outflow) 边界条件。选择标准 $k-\epsilon$ 湍流模型模拟电解液的湍流运动, 壁面采用无滑移边界条件, 通过壁面函数法确定近壁处湍动能 k 及湍动能耗散率 ϵ 。采用 SIMPLE 算法和二阶迎风格式, 对电解加工内流场进行求解。

计算得到电解加工区域内电解液速度分布如图 4 所示。由图 4 可知, 电解液流经阴极的过程中, 由于电解加工区域截面面积突然减小, 使得电解液流速急剧增大, 电解液在工件上表面位置的流速达到最大

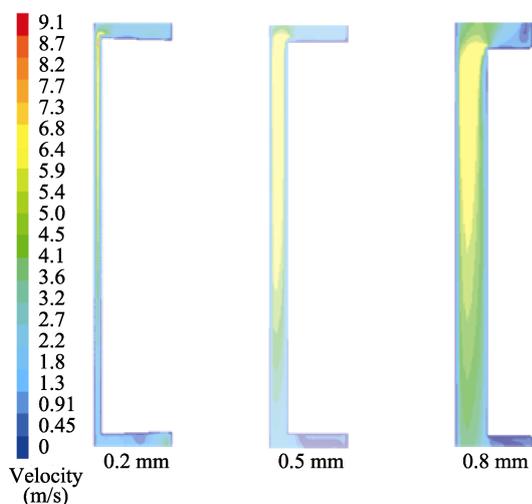


图 4 加工区域电解液流速分布

Fig.4 Velocity distribution of electrolyte in processing area

值; 电解液流向工件下表面的过程中, 由于沿程阻力损失及局部阻力损失, 电解液流速开始逐渐降低。随着加工间隙的减小, 加工区域流体流通面积也逐渐减小, 流体流动速度逐渐增大。电解液运动速度越大, 越容易使电解产物随电解液排出, 电解液得以及时更新, 稳定正负极间的电流强度, 达到较好的加工效果。

电解加工区域湍流强度分布如图 5 所示, 工件上表面区域湍流强度最高, 从工件上表面区域至工件下表面区域, 湍流强度呈下降趋势。随着加工间隙的增加, 电解液湍流强度也随着降低。湍流强度越高, 电解液湍流运动越强烈, 电解液混合越均匀, 有利于去除电解加工极化, 提高加工表面均一性。

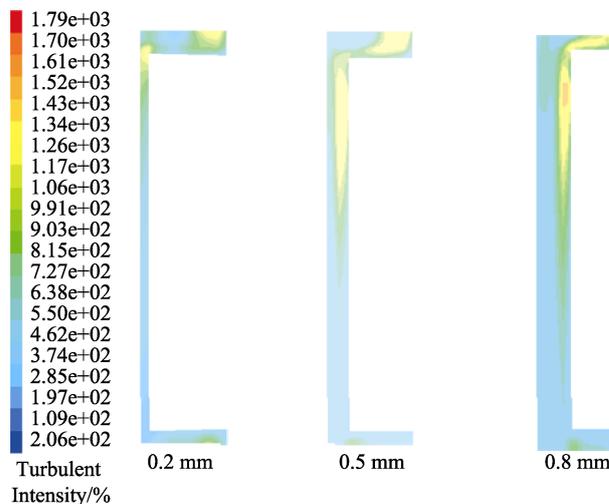


图 5 加工区域电解液湍流强度分布

Fig.5 Distribution of electrolyte turbulence intensity in processing area

3 加工效率影响因素分析

3.1 正交试验结果分析

试样材料的去除量及几何尺寸中心处的加工深度如表 2 所示。对正交试验结果进行方差分析及 F 检验, 结果如表 3 所示。

由表 3 可知, 加工间隙和频率对工件的去除量均有显著影响, 其中加工间隙的影响更显著。加工间隙

的变化直接影响加工电场强度, 间隙越小, 电场强度越大, 阴阳极间的加工电流密度显著增大, 工件的去除量明显增多。而脉冲电流是周期性供电代替传统的连续直流供电, 脉冲频率的大小影响加工电流的输出时间, 频率越高, 单位周期内加工电流输出时间越短, 有利于电解产物的排出, 同时减小周期内工件的去除量, 有利于加工精度的控制与稳定性提高。

本研究中占空比的 $F=11.923 < F_{0.05}(2,2) = 19$, 占空比对材料去除速率的影响不显著。而 Lee E. S.^[10] 的实验结果表明, 占空比越高, 电解加工材料的去除速率越大。造成试验结果差异的原因是: 由于 Lee E. S. 实验采用高频脉冲电源, 脉冲间歇时间较短, 加工

表 2 正交试验结果

Tab.2 Results of orthogonal experiment

No.	Material removal/g	Depth/mm
1	0.192	0.237
2	0.162	0.215
3	0.134	0.165
4	0.173	0.214
5	0.145	0.173
6	0.242	0.32
7	0.160	0.188
8	0.261	0.335
9	0.206	0.271

表 3 去除量方差分析及 F 检验

Tab.3 Variance analysis and F test based on material removal

	SS	df	MS	F	$F_{0.05}(2,2)$
Frequency	0.003 258	2	0.001 629	62.65	19
Duty	0.000 62	2	0.000 31	11.923	19
Working gap	0.011 109	2	0.005 555	213.65	19
Error	0.000 052	2	0.000 026		
Total error	0.150 39	8			

区域内的电解产物、析热、析气在短时间内难以及时排出，从而影响材料的去除速率；而本文实验采用低频脉冲电源，脉冲间歇时间较长，即使在空占比最低的实验条件下，加工区域内电解产物、析热、析气也可在脉冲间歇时间内充分排出，电解液得以及时更新，能达到较好的加工效果，因而导致占空比对材料去除速率的影响不显著。

3.2 加工间隙对加工速率的影响

有研究表明^[14-15]，电解加工速率与电解加工电流成正比。图 6 为电解加工试验过程中加工电流随时间

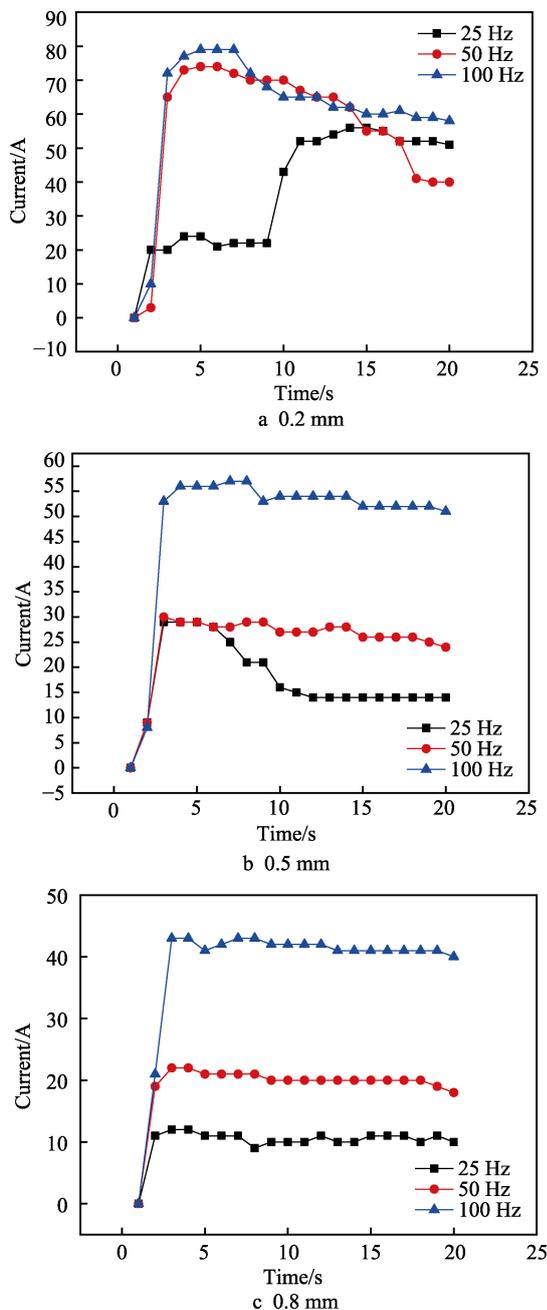


图 6 不同加工间隙下加工电流随时间的变化曲线
Fig.6 Curve of processing current along with time at different machining gaps

的变化规律，由图 6 可以发现：（1）在相同的电参数条件下，当初始间隙为 0.2 mm 时，加工电流最大，即初始加工间隙越小，加工电流越大。这是由于加工间隙越小，电极间电解液电阻越小，加工电流强度越大，加工速率越快。（2）加工间隙越大，加工电流随时间的波动越小。这是由于增大加工间隙，有利于电解液在加工区域平稳经过，反应产物有一定的释放空间，使加工电流稳定输出，如图 6b、c；反之加工间隙变小，工件所在位置的电场强度增大，加工区域内的电化学反应加剧，反应产物由于释放空间有限，使得阴阳极之间的电解液浓度不稳定，引起加工电流变化波动较大，如图 6a 所示。（3）频率的提高也有助于提高加工电流的输出，提高加工速率。（4）随着时间的延长，阴阳极之间的间隙逐渐增大，电极间导电液电阻增大，使后期加工电流逐渐下降，使得加工速率逐渐下降。

3.3 工件材料去除量分析

图 7 是各组试验的工件材料实际去除量与理论去除量对比图。在材料均匀去除的理想情况下，电解加工工件的实际去除量应与加工深度成正比，但图 7 结果表明，根据试样中心加工深度计算出的材料理论去除量与材料实际去除量有一定的偏差。这表明加工区域工件阳极处于非均匀性阳极腐蚀溶解。通过加工表面不同位置的去除深度测量发现，试样上表面加工深度要大于下表面的加工深度，见图 8。材料上下表面加工深度分布与电解液流场仿真速度分布结果有较好的一致性：电解液在工件上表面位置流速达最大值，该区域电解产物随电解液排出，电解液得以及时更新，使得该区域电解加工速率快，加工深度大；电解液流向工件下表面过程中，流速开始逐渐降低，电解加工深度也逐渐降低，造成工件加工表面材料非均匀性溶解。

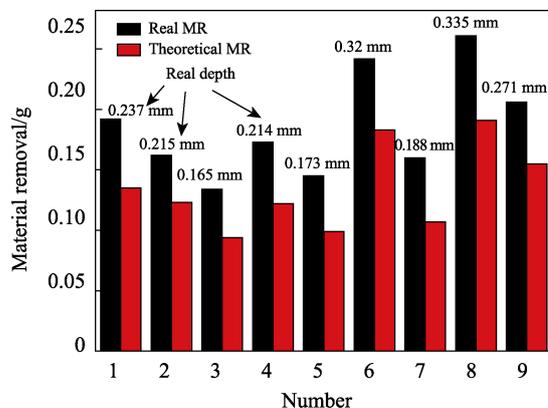


图 7 电解加工材料实际去除量与理论去除量对比
Fig.7 Comparison between actual removal amount and theoretical removal amount of ECM materials

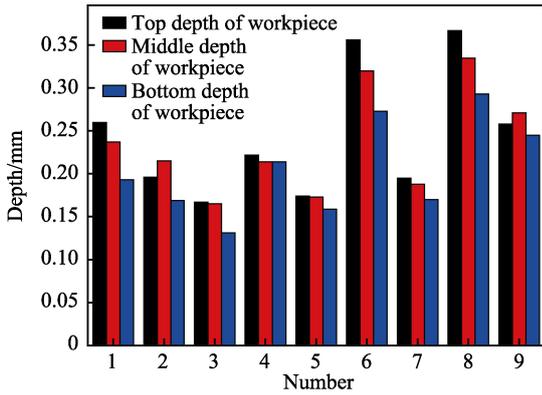


图8 试样不同位置加工深度

Fig.8 Processing depth of different positions on the sample

4 电解加工质量分析

4.1 加工表面粗糙度分析

图9是不同加工间隙条件下,工件表面的粗糙度柱状图。当加工间隙为0.2 mm、频率为100 Hz时,工件表面粗糙度最低(0.484 μm);当加工间隙为0.5 mm时,工件表面粗糙度随着频率的提高而逐渐增大;加工间隙为0.8 mm时,工件表面的粗糙度趋于稳定。为获得高质量的加工表面,可以通过控制每个周期内的电解加工时间,即通过提高电源的输出频率来减少脉冲电流的加工时间,周期内的加工时间缩短,材料去除量降低,便于实现加工表面高低起伏的控制,从而降低工件表面粗糙度。而加工间隙过大(0.8 mm)时,工件材料的去除量较低,加工区域的反应程度降低,因此表面粗糙度趋于稳定。

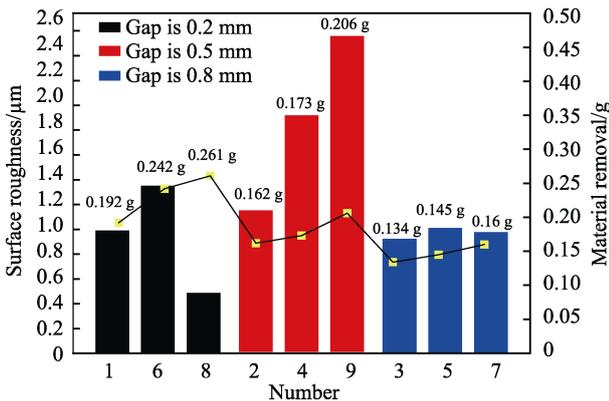


图9 表面粗糙度测量结果

Fig.9 Measurement results of surface roughness

4.2 复制精度分析

复制精度是指工具阴极形状与加工后工件阳极表面形貌的相似程度,是电解加工型面尺寸质量评定的重要参数。通过多段线无限逼近工件表面的加工轨迹,测绘工件加工区域轮廓,与工具阴极轮廓标准值进行比较,结果如表4所示。

表4 实际加工轨迹的误差值
Tab.4 Error of actual processing path

Working gap/mm	No.	Length/mm	Error/%
0.2	1	39.38	3.5
	6	39.98	3.5
	8	40.62	5.2
0.5	2	44.72	15.8
	4	40.16	4.0
	9	41.78	8.2
0.8	3	/	/
	5	/	/
	7	41.98	8.7

Note: Standard length is 38.62 mm, “/” means the processing profile is not clear, it can not be mapped

由表4结果可知,实际加工轨迹轮廓尺寸要大于标准工具阴极的轮廓尺寸,这是由电解加工过程中工具阴极边界的电场效应引起的,为降低该现象的发生,可以将工具阴极非加工区域进行绝缘处理。通过误差数值可知:加工间隙越小,误差越低,表明复制精度越高;而加工间隙过大,误差越大(加工间隙为0.8 mm时,两组试样由于加工轨迹不清晰,无法测绘)。由此可知,减小加工间隙有利于改善工件阳极加工形貌。

5 结论

- 1) 正交试验结果表明,对加工速率的影响程度有:加工间隙>频率>>占空比。低频电流源的电解加工中,占空比对加工速率的影响较小。同时,在加工间隙固定的条件下,提高频率可以提升加工速度。
- 2) 加工区域内电解液流速分布的均匀性对工件加工表面的均一性有一定影响,在工装夹具设计时使电解液的流场分布更均匀,有助于提高加工表面的均一性。
- 3) 加工间隙较小时,提高输出频率有利于获得较小的表面粗糙度。
- 4) 加工间隙的控制有助于提高复制精度,加工间隙越小,工件表面加工轮廓尺寸精度越高。

参考文献:

[1] 张美娟, 南海, 鞠忠强, 等. 航空铸造钛合金及其成型技术发展[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 13-19.
ZHANG Mei-juan, NAN Hai, JU Zhong-qiang, et al. Aeronautical cast Ti alloy and forming technology development[J]. Journal of aeronautical materials, 2016, 36(3): 13-19.

[2] 孙宇博, 雷娟娟. 航空发动机叶片 TC4 钛合金振动疲劳裂纹扩展研究及剩余寿命预测[J]. 表面技术, 2016, 45(9): 207-213.

- SUN Yu-bo, LEI Juan-juan. Research on fatigue crack propagation and remain fatigue life prediction of aero-engine blade TC4 titanium alloy[J]. Surface technology, 2016, 45(9): 207-213.
- [3] 王建业, 张永俊, 余艳青, 等. 脉冲电解加工技术在精微加工领域中的新发展[J]. 中国机械工程, 2007, 18(1): 114-119.
- WANG Jian-ye, ZHANG Yong-jun, YU Yan-qing, et al. Recent advances of PECM (pulse ECM) in the precision/micro machining areas [J]. China mechanical engineering, 2007, 18(1): 114-119.
- [4] MCGEOUGH J A, PAJAK P T, DE S A K M, et al. Recent research and developments in electrochemical machining[J]. International journal of electrical machining, 2003, 8: 1-14.
- [5] KOZAK J, ZYBURA S M. Some problems of surface roughness in electrochemical machining (ECM)[J]. Procedia cirp, 2016, 42: 101-106.
- [6] NASTU W, OSHIRO S, KUNIEDA M. Research on generation of three-dimensional surface with micro-electrolyte jet machining[J]. Cirp journal of manufacturing science & technology, 2008, 1(1): 27-34.
- [7] BURGER M, KOLL L, WERNER E A, et al. Electrochemical machining characteristics and resulting surface quality of the nickel-base single-crystalline material LEK94[J]. Journal of manufacturing processes, 2012, 14(1): 62-70.
- [8] 刘为东, 罗震, 敖三三, 等. 基于涡轮叶片修复的电解修型非加工面保护工艺[J]. 材料工程, 2016, 44(11): 16-21.
- LIU Wei-dong, LUO Zhen, AO San-san, et al. Non-machined surface protection process of electrochemical machining based on repaired turbine blade[J]. Journal of materials engineering, 2016, 44(11): 16-21.
- [9] 刘为东, 罗震, 敖三三, 等. TC4 钛合金涡轮叶片修复层的电解修形技术[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(1): 49-53.
- LIU Wei-dong, LUO Zhen, AO San-san, et al. Electrochemical machining of TC4 turbine blades repaired layer[J]. Journal of Tianjin University, 2017, 50(1): 49-53.
- [10] LEE E S, SHIN T H, KIM B K, et al. Investigation of short pulse electrochemical machining for groove process on Ni-Ti shape memory alloy[J]. International journal of precision engineering & manufacturing, 2010, 11(1): 113-118.
- [11] 孙宇博, 丘珍珍. 电解加工中电解液对钛合金 TC4 型面加工质量的影响研究[J]. 电加工与模具, 2015(5): 31-34.
- SUN Yu-bo, QIU Zhen-zhen. Effect of electrolyte on machining quality of titanium alloy TC4 surface during electrochemical machining[J]. Electric machining & mould, 2015(5): 31-34.
- [12] XU A, LIU Z, LI W, et al. Study of high-efficiency electrical discharge machining-induced ablation machining of titanium alloy TC4 using a multi-function electrode[J]. International journal of advanced manufacturing technology, 2014, 72(1-4): 377-385.
- [13] SCHUSTER R, KIRCHNER V, ALLONGUE P, et al. Electrochemical micromachining [J]. Science, 2000, 289: 98-101.
- [14] 陆永华, 赵东标, 云乃彰, 等. 基于电流信号的电解加工间隙在线检测试验研究[J]. 中国机械工程, 2008(24): 2999-3002.
- LU Yong-hua, ZHAO Dong-biao, YUN Nai-zhang, et al. Experimental research of on-line monitoring interelectrode gap of electrochemical machining (ECM) based on current[J]. China mechanical engineering, 2008(24): 2999-3002.
- [15] PATEL J B, FENG Z, VILLANUEVA P P, et al. Quality enhancement with ultrasonic wave and pulsed current in electrochemical machining[J]. Procedia manufacturing, 2017, 10: 662-673.