

文章编号: 1006-3471(2007)01-0097-04

钛合金 TC4 电化学加工均匀设计试验研究

张美丽*, 朱 荻, 徐正扬

(南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 电解加工钛合金, 加工表面易形成钝化膜, 致使加工困难, 同时非加工表面又容易形成点蚀而影响表面质量. 如何提高加工表面的质量一直是航空航天业以及其它机械行业迫切需要解决的问题. 本文采用均匀设计法设计试验方案, 试验数据经方差分析确定了以 NaCl 和 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 为主电解液的最佳配比及其相匹配的电参数. 实验表明: 以 10% NaCl + 4% $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ + 某络合剂为电解液, 在电流密度为 $50\text{A}/\text{cm}^2$ 的条件下加工, 能获得很好的表面质量, 表面粗糙度 R_a 值达到 $0.38\ \mu\text{m}$.

关键词: 电解加工; 表面质量; 均匀设计; 方差分析

中图分类号: TG662

文献标识码: A

钛是 20 世纪 50 年代发展起来的一种重要金属, 密度小、比强度高和耐腐蚀性好. 钛和它的合金一直是航空航天工业材料的“脊柱”之一. 钛合金是一种难加工材料, 加工后表面质量差, 如何提高钛合金加工表面的质量一直是航空航天业及其它机械行业迫切需要解决的问题. 随着它在航空产品中愈来愈多的应用, 其加工问题已引起广泛的关注.

钛及其合金制成的零件通常都在高温高压等恶劣环境下工作, 而且还要求使用寿命长及性能可靠. 实践证明这些零件的物理、机械性能在很大程度上取决于它们的表面质量^[1]. 现今, 某些场合也已采用电解加工的方法加工钛合金. 但其加工过程存在特殊性, 表现在加工表面易形成钝化膜使加工困难以及非加工表面易形成点蚀影响表面质量.

本文以电解液、电参数为设计因子, 建立了电解加工钛合金的均匀设计试验方案, 对试验数据作方差分析, 并验证其合理性, 最终确定了以提高表面质量为目的的电解加工最佳工艺方案.

1 电解加工的表面质量影响因素

1.1 电解液

钛合金的电解加工过程是钝化、活化交替发生

的. 如果钝化过强, 交替过程迟滞, 就不能较快地达到全面、均匀的蚀除, 倘若活化过强, 则会产生浸蚀性的强活化效应, 出现选择性斑点腐蚀. 两者均得不到均匀、光整的表面^[1-2]. 因此, 钛合金电解加工过程最关键的技术就是怎样使钝化和活化过程达到一个动态平衡. 而钝性、活性电解液种类的选择是严重影响加工表面质量的因素之一, 也是此关键技术的中中之重.

若以卤素盐作活性电解液, 其阴离子主要起活化阳极表面的作用, 活化能力的顺序为 $\text{I}^- > \text{Br}^- > \text{Cl}^- > \text{F}^-$. Cl^- 可使阳极表面完全活化, 达到高电流密度、高电流效率, 且价廉易得, 已在电解加工中广泛采用. 据此, 本实验即以 NaCl 为主电解液^[2,4].

NaCl 的活化效应强, 加工中为了避免出现选择性斑点腐蚀, 减少杂散腐蚀, 可在工作液中加入某络合剂, 其作用是络合阳极界面上的钛离子, 使它不致生成钝化物^[3].

加工过程中, 阴极表面产生的氢气将造成加工区内电解液电导率不均匀, 从而影响表面质量. 为了减少或控制氢气的产生, 宜再添加对氢原子具有强氧化能力的氧化剂 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$, 这样将有助于提高加工精度.

1.2 加工电流

在钛合金电解加工过程中,电流密度对表面粗糙度有着重要影响.一般而言,随着加工电流密度的提高,表面粗糙度 R_a 值迅速下降.理论上说:电流密度越大越好.然而,电参数与电解液的匹配,同样也影响着样件的表面粗糙度.

据 $i = kU_R/\Delta$ (k 为电解液的电导率, U_R 为电压降)可知,电流密度 i 与加工间隙 Δ 成反比关系,即加工间隙增大,电流密度减小.为了保证试验过程电流密度 i 稳定在某一给定数值,本试验采用恒流、恒间隙加工.

2 试验装置

钛合金电解加工试验装置如图 1 所示.阳极为直径 15 mm 的钛合金 TC4 圆棒,阴极为直径 5mm (加工面积 0.2 cm^2) 的不锈钢 (1Cr18Ni9Ti) 圆棒.试验前阳极表面先用粒度 1000 目的金相砂纸打磨,然后依次用酒精、蒸馏水冲洗.试验中使用 JC17310 直流稳压电源.

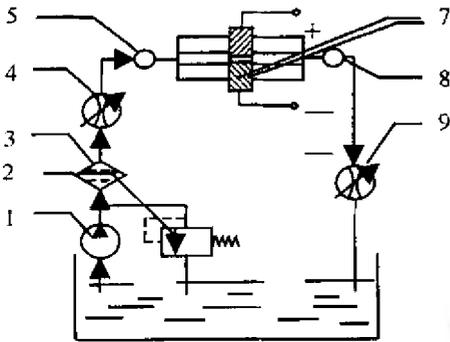


图 1 钛合金加工试验装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus for electrochemical machining of Ti-alloys TC4
1) gear pump 2) overflow valve, 3) filter 4) pressure-regulating valve, 5) manometer 6) anode (titanium alloys), 7) cathode (stainless steel), 8) manometer, 9) pressure-regulating valve

钛合金的导热性差,加工过程易于温升,因此需要较高的流速^[1].试验中设计了夹具板 1、2,并利用两者间的封闭空间来实现高流速.夹具、阴阳极部件照片如图 2 所示.

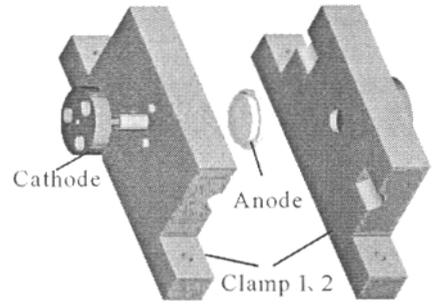


图 2 钛合金电化学加工夹具、阴阳极部件照片
Fig. 2 Photograph of the clamp, cathode and anode for electrochemical machining of Ti-alloys TC4

3 均匀设计试验及其分析

3.1 试验设计

关于多因子分析的试验安排,目前应用较多的是均匀设计^[5].这是一种只考虑试验点在试验范围内均匀散布的设计方法,它与正交试验设计的最大区别在于均匀设计只考虑试验点的“均匀散布”,而不考虑“整齐可比”,因而可以大大减少试验次数^[6].

本试验的目的主要是分析加工工艺参数对钛合金表面质量的影响程度,并找出最优的工艺参数组合.

选取以下参数作为试验因素:NaCl 浓度 (x_1), $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 浓度 (x_2) 和加工电流 (x_3),其试验指标为钛合金表面质量 (y).由此建立一个 7 水平、3 因素的试验,即 $U_7^*(7^3)$.其中,各因素水平值分别对应如下:

- $x_1/\%$: 4.0 5.0 6.0 7.0 8.0 9.0 10.0 ;
- $x_2/\%$: 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 ;
- I/A : 4.0 5.0 6.0 7.0 8.0 9.0 10.0

3.2 试验及其分析

本试验采用综合评分法.首先,选择样件的表面粗糙度,非加工区的点蚀数量,点蚀大小及其深度和样件的域性等 3 个指标作为考核指标,并分别给每一考核指标设定一个比例系数,然后计算所有指标的总分.试验结果如表 1 所示.

表 1 实验方案和结果

Tab. 1 Experimental plan and results of the electrochemical machining of Ti-alloys TC4

Serial number	$x_1/\%$	$x_2/\%$	x_3/A	y
1	6.0	3.0	10.0	78
2	9.0	1.5	9.0	91
3	4.0	4.0	8.0	71
4	7.0	2.5	7.0	81
5	10.0	1.0	6.0	90
6	5.0	3.5	5.0	69
7	8.0	2.0	4.0	83

由表 1 即可看出, 2 号试验的表面质量最好, 与其对应的实验因素为最优的工艺参数. 将以上试验数据作回归分析^[7], 得其回归方程为:

$$y = 2.52 + 7.59x_1 + 7.35x_2 + 0.92x_3 \quad (1)$$

将这一回归方程作方差分析, 检验它的可行性和显著性, 结果如表 2 所列. 表 2 中, 显著性一栏“**”表示 y 与 x_1 、 x_2 、 x_3 之间均有十分良好的线性关系(见式 1). 由此可知, 上述回归方程拟合甚佳, 是可信的.

由回归方程可知 x_1 、 x_2 、 x_3 的系数为正, 表明试验指标 y 随因素 x_1 、 x_2 、 x_3 的增加而增加. 所以, 在确定优方案时, 因素 x_1 、 x_2 、 x_3 的取值应偏上限, 即 NaCl 浓度为 10%, $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 浓度为 4%, 加工电流为 10A. 但此结论的正确性还应经过试验验证. 8 号样件的试验结果(图 3)验证了以上工艺参数的可行性, 其加工后的表面粗糙度 R_a 能达到 3.8 μm . 总之, 以 10% NaCl + 4% $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ + 络合剂为电解液, 在电流密度为 50A/cm² 的条件下进行加工为最佳的工艺方案.

据式(1)将各偏回归系数标准化^[8], 得出 3 个标准化的偏回归系数分别为:

$$P_{x_1} = 1.92$$

$$P_{x_2} = 0.93$$

$$P_{x_3} = 0.23$$

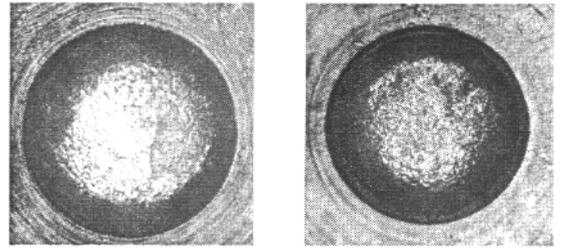


图 3 钛合金电化学加工不同加工条件下的样件显微照片
Fig. 3 Micrograph of the samples in different machining conditions for the electrochemical machining of Ti-alloys TC4
a) sample No. 2 (\varnothing 6.363mm), electrolyte: 9% NaCl, 1.5% $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ and some kind of additive, machining current: 9A
b) sample No. 8 (\varnothing 5.939mm) electrolyte: 10% NaCl, 4% $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ aqueous solution and some kind of additive, machining current: 10 A

标准回归系数越大, 对应的因素越重要, 显然, 表 1 中各因素的主次顺序当为: $x_1 > x_2 > x_3$, 即 NaCl 浓度 > $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 浓度 > 加工电流. 所以如于电解过程当中希望获得较好的表面质量, 需先优化 NaCl 浓度 x_1 和 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 浓度 x_2 , 其他因素则影响较小, 但也需兼顾考虑.

4 结 论

1) NaCl 浓度(x_1)和 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 浓度(x_2)是影响钛合金 TC4 电解加工表面质量的主要因素, 加工过程中须优先考虑.

2) 最佳的加工工艺方案:

电解液 10% NaCl + 4% $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ + 某络合剂, 电流密度 50 A/cm².

表 2 钛合金电化学加工方差分析表

Tab. 2 Variance analysis of the electrochemical machining of Ti-alloys TC4

Difference source	df	SS	MS	F	$F_{0.01}(3, 3)$	Markedness
Regression	3	424.333	141.444	74.569	29.46	**
Error	4	11.380	2.845			
Total	7	435.714				

参考文献(References) :

[1] WANG Jian-ye(王建业) ,XU Jia-wen(徐家文). Electrolysis processing principle and application[M]. Beijing :National Defense Press of Science and Technology , 2001.

[2] LIU Jin-q(刘今起). The anode character of titanium alloys TC4 in electrochemical machining[J]. Aeronautical Manufacturing Technology ,1990 (3) :10 ~ 15.

[3] YANG Yi-sheng(杨怡生). Electrolysis processing handbook of titanium alloy[M]. Beijing :National Defense Press of Science and Technology ,1990.

[4] WANG Tong-sheng(王同生). Photographic ECM of group holes on air conduct damper bushing [J]. Aeronautical Manufacturing Technology 2003(6) 59 ~ 61.

[5] LI Yun-yan(李云雁) ,HU Chuan-rong(胡传荣). Experiment design and data processing [M]. Beijing : Chemical Industry Press 2005.

[6] SONG Ye(宋晔) ,JIANG Wen-sheng(蒋文胜). The application of uniform design in developing working electrolyte[J]. Electronic Components & Materials ,1997 (3) 48 ~ 50.

[7] John William , Wasserman Michael. Application linearity return mode[M]. Beijing :Chinese Statistics Publishing House ,1990.

[8] HE Shao-hua(何少华) ,WEN Zhu-qing(文竹青). Experiment design and data processing[M]. Changsha : National Defense Press of Science and Technology , 2002.

Study on the Electrochemical Machining of Titanium Alloys TC4 with the Method of Uniform Design

ZHANG Mei-li* , ZHU Di , XU Zheng-yang

(*Institute of Mechanical and Electrical Engineering , Nanjing University of Aeronautics & Astronautics , Nanjing 210016 , Jiangsu , China*)

Abstract For the electrochemical machining of titanium alloys , a passivating film tends to form on the machining surface , which holdbacks the process of machining ; and some corrosive pittings can appear on the non-machining surface , which leading to the poor surface quality. So how to improve the machining surface quality , this is a hot problem in aerospace industries. An experiment plan has been made with the method of uniform design and the variance analysis has been carried out using the result data of the previous experiments. The experimental results show that an excellent machining surface with Ra 0.38 μm would be obtained in the electrolyte of 10% NaCl solution , 4% $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ solution and some kind of additive.

Key words : electrochemical machining ; surface quality ; uniform design ; variance analysis