

铝合金电解加工工艺特性实验研究

Technical Experimental Study of Aluminum Alloy in Electrochemical Machining

吴建民, 徐家文, 吴 锐

(南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 南京 210016)

WU Jian-min, XU Jia-wen, WU Rui

(Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-manufacturing

Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘要: 对铝合金电解加工工艺特性进行基础实验研究。通过分析影响电解加工平衡间隙的因素, 利用正交试验对加工电压、电解液温度及工件进给速度对平衡间隙的影响进行了研究。实验表明: 加工电压与工件进给速度的影响较大。并同时利用实验对电解加工中的重要参数平衡状态下的实际体积电化当量 $\eta\omega$ 进行了计算。

关键词: 铝合金; 电解加工; 正交试验; 电化当量

中图分类号: TG662 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)08-0061-03

Abstract: The basic technical characteristics of ECM (Electrochemical Machining) about aluminum alloy were researched. These factors affecting electrochemical machining were analyzed. From the orthogonal experiment, the influence degree of machining voltage, electrolyte temperature and feed speed of workpiece on Equilibrium Inter-Electrode (EIE) gap were studied. The results indicated that machining voltage and feed speed exerted evident effect on EIE gap. And furthermore, practical volume electrochemical equivalent $\eta\omega$ in steady state machining, which was one of the important parameters of ECM, was calculated from experimental results.

Key words: aluminum alloy; electrochemical machining; orthogonal experiment; electrochemical equivalent

铝合金具有优良的综合性能, 在航空航天、汽车等领域广泛应用。目前铝合金通常采用机械铣削或车削、化学腐蚀等方法加工。但是对于某些结构, 例如某型航天装置整体薄壁构件, 由于要在壳体内壁沿圆周均匀加工许多矩形盲槽(减重槽), 采用常规机械加工刀具伸入构件内部进行加工很不方便。虽然电火花可以加工, 但加工后的工件表层, 由于受瞬时高温作用和液体介质的冷却作用, 使得化学成分和金相组织结构发生很大变化, 且存在残余应力等表面质量问题, 同时加工速度很低; 而化学铣削加工, 由于加工精度不高, 且在保护层下的侧面方向上也会产生溶解, 而且加工后表面质量较差^[1], 使加工后的工件不能满足这一整体薄壁构件设计要求。

电解加工由于既没有机械加工中的切削力和切削热的作用, 也没有电火花加工中的热影响, 同时又有加工效率高、加工质量好等众多优点, 是一种有效的加工方法, 并且在加工成型规律、阴极设计以及加工基础规律等方面已经积累了丰富的资料^[2-7]。但是, 目前对

于铝合金的电解研究主要集中在表面处理以及电解抛光等方面^[8,9], 而对电解加工却研究较少, 这使得在铝合金电解加工中可参考的资料不多。因此本工作对铝合金材料的电解加工做了基础实验研究, 以作为参考, 进行后续研究及应用。

1 电解加工参数分析^[10]

在电解加工中, 加工间隙是核心的工艺因素, 它是决定加工精度的主要因素, 直接影响加工效率、表面质量, 它受电场、流场及电化学特性三方面多种复杂因素的影响。主要体现在工件、阴极, 以及加工参数方面。

通常利用式(1)计算加工中的平衡间隙 Δ_b :

$$\Delta_b = \frac{\eta\omega\kappa(U - \delta E)}{v} \tag{1}$$

式中: η 为电流效率; ω 为体积电化当量 ($\text{mm}^3 \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$); κ 为电解液电导率 ($\Omega^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$); U 为阴、阳极之间的电压 (V); δE 为电解加工阴、阳极电极电位

值总和(V); v 为溶解速度($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)。

通常合金材料的 ω 值用式(2) 计算:

$$\omega = \frac{1}{\rho F \left(\frac{n_1}{A_1} a_1 + \frac{n_2}{A_2} a_2 + \dots + \frac{n_j}{A_j} a_j \right)} \quad (2)$$

式中: ρ 为金属密度(g/cm^3); F 为法拉第常数, 其值取为 96500($\text{A} \cdot \text{s}/\text{mol}$); A_1, A_2, \dots, A_j 为对应元素 j 的相对原子质量; n_1, n_2, \dots, n_j 为对应元素 j 的溶解原子价数; a_1, a_2, \dots, a_j 为对应元素 j 的质量分数。从式(2) 可以看出 ω 除了与元素的质量分数、相对原子质量有关外, 还与元素的溶解原子价数有关, 而对于有多种原子价的元素, 在电解加工过程中是难以准确确定元素以何种价态参与反应, 因此根据式(2) 得到的仅是一个参考值。而且在电解加工中, 由于电流效率 η 体积电化当量 ω 都与实际工艺条件密切相关, 故通常把 $\eta\omega$ 的乘积作为一个工艺数据来考虑, 将其称为实际体积电化当量, 一般通过实验测定。

对于电解液电导率 κ , 主要决定于电解液组分、浓度和温度, 在本实验中, 确定利用质量分数为 20% ~ 24% 的硝酸钠(NaNO_3) 电解液, 这样影响电导率的因素仅为温度, 电导率与温度的关系可用式(3) 计算:

$$\kappa_t \approx \kappa_{18} [1 + \alpha(t - 18)] \quad (3)$$

式中: κ_t, κ_{18} 分别为溶液在 $t^\circ\text{C}$ 和 18°C 时的电导率; α 为温度系数, 中性盐一般取 $0.02(^\circ\text{C}^{-1})$ 。

2 正交试验及结果分析

根据上述分析, 加工间隙是工件、阴极和加工参数综合作用的结果, 在工件特征以及阴极确定的情况下, 只需考虑加工参数的影响。在加工参数中, 本工作利用正交试验法考察加工电压、电解液温度和加工进给速度对平衡间隙影响的规律, 而将影响加工精度的重要因素, 即底面平衡加工间隙的大小作为考察指标。

2.1 正交试验

正交试验法是利用正交表科学地安排与分析多因素试验的方法, 是最常用的试验设计方法^[11]。本文利用 $L_9(3^4)$ 正交表进行三因素三水平正交试验, 研究加工电压(A)、电解液温度(B) 和加工进给速度(C) 对铝合金电解加工特性的影响规律。

试验因素水平、试验方案及测量结果分别示于表 1, 2。

2.2 结果及分析

利用表 2 中得到的底面平衡间隙值, 可以计算得到试验方差分析结果, 如表 3 所示。

表 1 正交试验因素水平表

Table 1 Factor level of orthogonal tests

Level	Factor		
	Machining voltage	Electrolyte temperature	Feed speed
	(A)/V	(B)/ $^\circ\text{C}$	(C)/(mm \cdot min $^{-1}$)
1	11	25	0.55
2	13	30	0.65
3	15	35	0.75

表 2 $L_9(3^4)$ 正交试验及试验结果

Table 2 $L_9(3^4)$ orthogonal and experimental results

No	Factor			
	A	B	C	Equilibrium inter-electrode gap/mm
1	1(11)	1(25)	1(0.55)	0.30
2	1	2	2	0.25
3	1	3	3	0.10
4	2(13)	1	3	0.14
5	2	2(30)	1	0.50
6	2	3	2(0.65)	0.35
7	3(15)	1	2	0.40
8	3	2	3(0.75)	0.50
9	3	3(35)	1	0.74

表 3 正交试验方差分析

Table 3 Variance analysis of orthogonal experiment

Resource of variance	SS	df	MS	F
Voltage	0.1687	2	0.08435	38.34
Temperature	0.0327	2	0.01635	7.43
Feed speed	0.1110	2	0.0555	25.23
Error	0.0044	2	0.0022	
Total	0.3168	8		

查 F 分布表, 得到两个临界值:

$$F_{0.01}(2, 2) = 99$$

$$F_{0.05}(2, 2) = 19$$

对比两个临界值, 由表 3 方差分析可知, 显然进给速度 v 与加工电压 U 对加工间隙的影响均十分显著, 而温度对加工间隙影响较小。从各因素对加工间隙影响的重要程度方面看, 电压的影响最为显著, 进给速度次之, 温度影响最小。

同时还在实验中还发现, 虽然温度对铝合金的加工间隙影响最小, 但却对电解加工质量有影响。在电解液温度低于 25°C 时比较容易出现流纹, 有短路的危险, 这是不允许的。而当电解液的温度高于 30°C 后,

流纹就不会出现。而通过实验研究,加工温度以 30~40℃为宜。

3 平衡状态 $\eta\omega$ 值的计算

根据电解加工基本理论,在进入平衡加工状态后,阳极溶解速度与工具阴极进给速度达到动态平衡,在理论上认为二者在数值上相等,利用式(4):

$$\eta\omega = \frac{v}{i} = \frac{v \cdot S}{I} \quad (4)$$

通过测定加工面积 S 上的电流 I ,就可计算出相对应的实际体积电化当量 $\eta\omega$ 。但是在一般电解加工过程中,电流 I 在加工全过程中并不恒定,即使在平衡状态加工过程中,电流 I 也是随着时间 t 波动,即 $I = I(t)$,若定义波动幅度 δ 为:

$$\delta = \frac{wp - wt}{(wp + wt)/2} \quad (5)$$

式中: wp 为波动的波峰; wt 为波动的波谷,则当 δ 很小时(本文取 δ 小于 2.5%),此时应该可以认为加工进入平衡状态,时间为 $t \in [t_1, t_2]$,求取总电量 Q :

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt \quad (6)$$

这样可求出这一时间段的平均电流:

$$I = \frac{Q}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

然后利用式(4)可以解出平衡状态下的 $\eta\omega$ 值。

在实验中,通过记录一定时间间隔的电流值,得到一组数据 (I_k, t_k) ($k=1, 2, \dots, n$),利用软件 MATLAB 求出这组数据的最小二乘 m ($m < n$) 次多项式拟合方程 $I_m(t)$ [12]:

$$I_m(t) = a_m t^m + a_{m-1} t^{m-1} + \dots + a_1 t + a_0 \quad (8)$$

使得

$$\sum_{k=1}^n \delta_k^2 = \sum_{k=1}^n [I_k - I_m(t_k)]^2 \quad (9)$$

为最小。式中, $a_m, a_{m-1}, \dots, a_1, a_0$ 为待定系数。

这样则可由式(6)和(7)求出平均电流值,然后利用公式(4)可以解出平衡状态下的 $\eta\omega$ 值。

实验中,通过调整加工电压和进给速度的不同参数,得到很多的数据,图 1 是加工结果照片,图 2 是部分由测得的电流值以及相应的拟合方程所绘曲线。图 2 中标注数据为加工电压,电解液温度,进给速度。

通过数据点及拟合曲线,可以看出在进行加工一定的时间后,电流的波动已经很小,这种情况应该可以认为加工进入了平衡状态。通过计算可以求得使用质量分数为 20%~24% 的硝酸钠 (NaNO_3) 电解液时,平衡状态下的实际体积电化当量 $\eta\omega$ 等于 $2(\text{mm}^3/\text{A} \cdot$

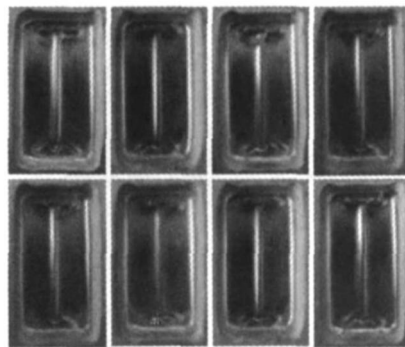


图 1 铝合金电解加工实验照片

Fig. 1 Experimental photographs of machined aluminum alloy using ECM

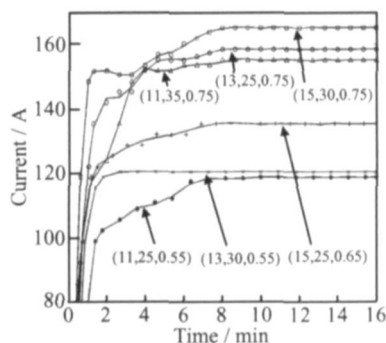


图 2 电流-时间数据点及拟合曲线

Fig. 2 Data and fitting curves of current with time

min), 误差不大于 5%。

4 结论

(1) 在加工工艺参数方面,进给速度和加工电压对底面平衡间隙影响最大,应优先考虑。温度影响较小。

(2) 在铝合金的电解加工中要考虑温度的影响。在电解液温度较低(小于 25℃)时,易产生流纹,有短路危险。而当电解液温度在 30~40℃变化时,加工表面光滑平整,无流纹出现。

(3) 在加工进入稳定状态后,得到了实际体积电化当量 $\eta\omega$ 的数值,在电流密度 $i = 20 \sim 40 \text{ A/cm}^2$ 时 $\eta\omega = 2(\text{mm}^3/\text{A} \cdot \text{min})$ 。

参考文献

- [1] 赵长喜,李继霞. 航天器整体壁板结构制造技术[J]. 航天制造技术, 2006, (4): 44-48.
- [2] XU Jia-wen, YUN Nai-zhang, TANG Ya-xin, et al. The modeling of NG-electrochemical contour evolution machining using a rotary tool-cathode[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 159(2): 272-277.

(下转第 68 页)

4 结论

(1) 连续测量棒状 A3 钢分别在 0.1M/L 和 0.5M/L H_2SO_4 溶液中的电阻可获得其连续的腐蚀深度。在腐蚀深度(失重法获得)为 7.07 μm 范围内, 电阻法与失重法获得的腐蚀深度的差值小于 0.90 μm , 平均差值为 0.70 μm 。

(2) 连续测量板状 A3 钢分别在 0.1M/L 和 0.5M/L H_2SO_4 溶液中的方块电阻可获得其连续的腐蚀深度。在腐蚀深度(失重法获得)为 7.07 μm 范围内, 方块电阻法与失重法获得的腐蚀深度的差值小于 0.75 μm , 平均差值为 0.42 μm 。

(3) 方块电阻法与电阻法相比, 方块电阻法获得的测量数据稳定性高, 可获得更接近于实际的腐蚀深度。

参考文献

- [1] 尹桂勤, 张莉华, 常守文, 等. 土壤腐蚀研究方法概述[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(6): 367–370.
- [2] 武俊伟, 李晓刚, 杜翠薇, 等. X70 钢在库尔勒土壤中短期腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(1): 15–19.
- [3] HA-WON SONG, VELU SARASWATHY. Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag-an overview[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 138(2): 226–233.
- [4] 陈友治, 徐瑛, 丁庆军, 等. 酸性介质对钢筋混凝土腐蚀机理研究[J]. 武汉理工大学学报, 2001, 23(8): 4–6.
- [5] JOHN P B. The use of permanent corrosion monitoring in new and existing reinforced concrete structures[J]. Cement & Concrete Composites, 2002, 24: 27–34.

- [6] PERNICE P, ARPAIA M, COSTANTINI A. Steel corrosion rate in soils by a.c. and d.c. electrochemical methods[J]. Materials Chemistry and Physics, 1990, 26(3/4): 323–330.
- [7] 杜爱玲, 侯文涛. 线性极化方法测量混凝土中钢筋的腐蚀速度[J]. 电化学, 2000, 6(3): 297–304.
- [8] 孙成, 韩恩厚, 张淑泉. 土壤中硫酸盐还原菌对 1Cr13 不锈钢腐蚀的影响[J]. 材料研究学报, 2003, 13: 192–197.
- [9] DAROWICKI K. Corrosion rate measurements by non-linear electrochemical impedance spectroscopy[J]. Corrosion Science, 1995, 37(6): 913–925.
- [10] RODRIGUEZ P. Use of the coulstatic method for measuring corrosion rates of embedded metal in concrete[J]. Magazine of Concrete Research, 1994, 46(167): 91–95.
- [11] 刘新福, 孙以材, 刘东升. 四探针技术测量薄层电阻的原理[J]. 半导体技术, 2004, 29: 48–52.
- [12] 孙以材. 半导体测试技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984. 17–19.
- [13] 刘新福, 孙以材, 张艳辉, 等. 用改进的 Rymaszewski 公式及方形四探针法定微区的方块电阻[J]. 物理学报, 2004, 53: 2461–2465.
- [14] 李荻. 电化学原理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2000. 10–12.

基金项目: 国家科技基础条件平台建设资助项目(2005DKA10400-Z6); 江西省教育厅资助项目(赣教技字(2006)315)

收稿日期: 2007-11-28; 修订日期: 2008-03-26

作者简介: 冯长杰(1977—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为金属自然环境腐蚀与防护, 联系地址: 江西省南昌市丰和南大道 696 号南昌航空大学材料学院(330063)。E-mail: chjfgengniat@126.com

(上接第 63 页)

- [3] DAMME S VAN, NELISSEN G, VAN DEN B BOSSCHE, et al. Numerical model for predicting the efficiency behaviour during pulsed electrochemical machining of steel in $NaNO_3$ [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2006, 36(1): 1–10.
- [4] BEJAR M A, GUTIERREZ F. On the determination of current efficiency in electrochemical machining with a variable gap[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1993, 37(2): 691–699.
- [5] HAISCH T, MITTEMEIJER E J, SCHULTZE J W. High rate anodic dissolution of 100Cr6 steel in aqueous $NaNO_3$ solution[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2004, 34: 997–1005.
- [6] MOUNT A R, ELEY K L, CLIFTON D. Theoretical analysis of chronoamperometric transients in electrochemical machining and characterization of titanium 6/4 and inconel 718 alloys[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2000, 30: 447–455.
- [7] 葛媛媛, 徐家文, 赵建社, 等. 镍基高温合金 GH4169 电解加工 η_{ω_i} 曲线测定[J]. 宇航材料工艺, 2006, (4): 38–41.

- [8] 张士林, 任颂赞. 简明铝合金手册[M]. 第 2 版. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2006. 444–500.
- [9] CRITCHLOW G W, BREWIS D M. Review of surface pretreatments for aluminium alloys[J]. Int J Adhesion and Adhesives, 1996, (16): 255–275.
- [10] 王建业, 徐家文. 电解加工原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001. 40–65.
- [11] 庄楚强, 吴亚森. 应用数理统计基础[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002. 383–495.
- [12] 王沫然. MATLAB 6.0 与科学计算[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. 218–220.

收稿日期: 2007-12-19; 修订日期: 2008-03-26

作者简介: 吴建民(1970—), 男, 博士研究生, 主要从事特种加工技术研究, 联系地址: 南京市御道街 29 号南京航空航天大学 305 信箱(210016)。E-mail: wujianmin@nuaa.edu.cn