

## 铝合金高频窄脉冲电化学抛光的研究

石鸽娅, 丁必荣, 沈健

(合肥工业大学机械与汽车工程学院, 安徽 合肥 230009)

**[摘 要]** 为了研究铝合金高频窄脉冲电流电化学抛光中各抛光工艺参数与表面粗糙度之间的关系, 采用正交试验法安排脉宽、抛光电压和抛光间隙等抛光工艺参数, 用极差分析法初步定性分析了各参数对表面质量影响的大小, 然后运用逐步回归分析的方法建立数学模型, 最终确定四次函数的回归方程(最优回归方程)为数学模型, 并通过单因素试验验证了数学模型的可靠性, 从而可对各工艺参数与表面粗糙度的关系作定量分析, 为铝合金脉冲电流电化学抛光的研究和推广应用打下了一定的理论基础。

**[关键词]** 电化学抛光; 脉冲电流; 正交试验; 逐步回归分析; 数学模型

**[中图分类号]** TG175

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 1001-3660(2008)06-0063-03

## Study on High Frequency Short Pulses Electrochemical Polishing of Aluminum Alloy

SHI Ge-ya, DING Bi-rong, SHEN Jian

(School of Mechanical and Mobile Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**[Abstract]** In order to study the influence of each polishing parameter on surface roughness in high frequency short pulses electrochemical polishing of aluminum alloy, polishing parameters such as pulse width, polishing voltage, polishing clearance and etc. were designed by orthogonal experiment scheme. Firstly, the effect of each parameter on surface roughness was analyzed by the difference method qualitatively, and then mathematical model of polishing was obtained by the method of stepwise regression, finally, regressive equation of quartic function (optimum regressive equation) is confirmed to be the mathematical model that had been proved by single factor test. Thus the influence of each polishing parameter on surface roughness can be studied quantitatively, which can be used for reference for investigation and application of electrochemical polishing of aluminum alloy.

**[Key words]** Electrochemical polishing; Pulse current; Orthogonal experiment; Stepwise regression; Mathematical model

## 0 引言

铝和铝合金性能优良, 应用广泛, 为提高其制品抗蚀性和表面装饰效果, 必须进行抛光处理。常用抛光方法中, 电化学抛光方法综合效果最佳<sup>[1,2]</sup>。

脉冲电流电化学抛光是近年兴起的一门新技术, 它是采用周期性间歇供电代替传统的连续直流供电, 利用中性电解液为电解抛光液, 使工具阴极与工件阳极之间保持较小加工间隙的一种工件表面抛光方法。与传统的直流电化学抛光相比, 脉冲电流电化学抛光能引起一系列的脉冲效应, 导致电化学抛光间隙过程理化特性的变化, 从而提高了抛光精度、表面质量和抛光效率<sup>[3]</sup>。试验研究表明, 随着脉冲电流频率提高、脉宽变窄、占空比(数值)变小, 脉冲效应加强, 当频率达到千赫兹后, 抛光效果有明显的提高<sup>[4]</sup>。本文采用微秒级的高频窄脉冲电流对铝

合金进行电化学抛光, 来研究铝合金高频窄脉冲电流电化学抛光的工艺规律, 并建立其数学模型。

## 1 铝合金高频窄脉冲电化学抛光的正交试验和极差分析

针对铝合金 LF21, 通过对比试验, 选择 8% NaNO<sub>3</sub> + 6% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 的复合水溶液 + 少量乙醇、甘油等添加剂作为其脉冲电化学抛光的中性盐电解液。在电解液参数一定的情况下, 脉冲电化学抛光的抛光质量主要与脉冲电流的宽度、脉冲占空比、抛光电压、抛光时间和抛光间隙有关。为了综合分析各影响因素与抛光后工件表面粗糙度  $R_a$  之间的关系, 安排了一组正交试验, 选取 5 个因素: 脉宽  $t_p$ 、脉冲占空比  $t_p/t_s$ 、抛光间隙  $\delta$ 、抛光时间  $t$  和抛光电压  $U$ 。所有因素皆取 5 水平, 选用  $L_{25}(5^5)$  正交表, 各参数的取值和正交试验的试验结果见表 1, 正交试验的极差分析见表 2。

本试验的指标为表面粗糙度, 数值越小越好。根据表 2 中极差  $D$  的大小可以看出, 5 个工艺参数对表面粗糙度  $R_a$  的影响

**[收稿日期]** 2008-07-16

**[基金项目]** 国家创新基金(07c26213401449)

**[作者简介]** 石鸽娅(1982-), 女, 安徽安庆人, 助教, 硕士, 主要从事电化学加工方面的研究。

表1 脉冲电流电化学抛光试验结果

Table 1 The results of pulses electrochemical polishing

编号	$t_p/\mu s$	$t_p/t_s$	$U/V$	$t/s$	$\delta/mm$	$I/(A \cdot cm^{-2})$	$Ra/\mu m$
1	50	1:1	12	60	0.5	7.6	0.78
2	50	1:2	14	90	1.0	8.2	0.35
3	50	1:4	16	120	1.5	8.7	0.22
4	50	1:7	18	150	2.0	9.8	0.26
5	50	1:9	20	200	2.5	10.9	0.47
6	100	1:1	14	120	2.0	8.4	0.44
7	100	1:2	16	150	2.5	8.9	0.41
8	100	1:4	18	200	0.5	10.1	0.48
9	100	1:7	20	60	1.0	11.2	0.40
10	100	1:9	12	90	1.5	5.1	0.62
11	200	1:1	16	200	1.0	12.6	0.41
12	200	1:2	18	60	1.5	10.1	0.45
13	200	1:4	20	90	2.0	11.8	0.50
14	200	1:7	12	120	2.5	5.9	0.81
15	200	1:9	14	150	0.5	4.0	0.71
16	500	1:1	18	90	2.5	11.6	0.68
17	500	1:2	20	120	0.5	12.1	0.75
18	500	1:4	12	150	1.0	5.8	0.83
19	500	1:7	14	200	1.5	6.3	0.73
20	500	1:9	16	60	2.0	7.9	0.68
21	800	1:1	20	150	1.5	15	0.72
22	800	1:2	12	200	2.0	8.1	1.02
23	800	1:4	14	60	2.5	8.5	1.00
24	800	1:7	16	90	0.5	9.4	0.83
25	800	1:9	18	120	1.0	13.7	0.59

表2 脉冲电流电化学抛光试验结果极差分析表

Table 2 Range analysis of the results of polishing

工艺参数	$t_p/\mu s$	$t_p/t_s$	$U/V$	$t/s$	$\delta/mm$
$k_1$	0.416	0.606	0.812	0.662	0.710
$k_2$	0.470	0.596	0.646	0.596	0.516
$k_3$	0.576	0.606	0.510	0.562	0.548
$k_4$	0.734	0.606	0.492	0.586	0.580
$k_5$	0.832	0.614	0.568	0.622	0.674
极差 $D$	0.416	0.020	0.320	0.100	0.194

由大到小依次为:脉宽、抛光电压、抛光间隙、抛光时间、脉冲占空比。对试验结果进行比较选优,可以得出表面粗糙度最小时各因素的取值分别为:脉宽 50 $\mu s$ 、脉冲占空比 1:2、电压 18V、时间 120s、间隙 1mm。采用以上优选数据重复进行了 3 次抛光试验,测得加工后的工件表面粗糙度稳定在 0.20 $\mu m$  左右。

## 2 脉冲电流电化学抛光的逐步回归分析

根据正交试验的数据,采用逐步回归分析的方法,建立铝合金 LF21 脉冲电化学抛光的数学模型。在本系统中,回归方程的自变量有 5 个:脉宽  $t_p$ 、脉冲占空比  $t_p/t_s$ 、抛光电压  $U$ 、抛光时间  $t$ 、间隙  $\delta$ 。因变量为抛光工件的表面粗糙度  $Ra$ 。

本文选择了 6 种函数形态(一次函数、二次函数、含交叉项的二次函数、三次函数、四次函数、幂函数)进行逐步回归分析,求得回归方程后进行比较,选择其中可信度和准确度高并且简单的回归方程作为所求的数学模型。取置信度  $\alpha = 0.25$ ,对表 1 中的试验数据进行回归分析,得到如下 6 个回归方程:

一次函数:

$$(Ra/\mu m) = 0.940 + 0.000\ 544(t_p/\mu s) - 0.032\ 1(U/V) \quad (1)$$

二次函数:

$$(Ra/\mu m) = 3.554 + 0.001\ 036(t_p/\mu s) - 0.376\ 1(U/V) - 0.000\ 000\ 584(t_p^2/\mu s^2) + 0.010\ 75(U^2/V^2) \quad (2)$$

含交叉项的二次函数:

$$(Ra/\mu m) = 4.578 + 0.001\ 481(t_p/\mu s) - 0.491\ 1(U/V) - 0.002\ 89(t/s) - 0.000\ 000\ 584(t_p^2/\mu s^2) + 0.014\ 20(U^2/V^2) + 0.000\ 014\ 8(t^2/s^2) - 0.000\ 003\ 59(t_p/\mu s) \times (t/s) \quad (3)$$

三次函数:

$$(Ra/\mu m) = 2.691 + 0.001\ 036(t_p/\mu s) - 0.207\ 8(U/V) - 0.000\ 000\ 584(t_p^2/\mu s^2) + 0.000\ 23(U^3/V^3) \quad (4)$$

四次函数:

$$(Ra/\mu m) = 3.302 + 0.001\ 036(t_p/\mu s) - 0.151\ 9(U/V) - 3.095(\delta/mm) - 0.000\ 000\ 584(t_p^2/\mu s^2) + 3.036(\delta^2/mm^2) - 1.261(\delta^3/mm^3) + 0.000\ 006\ 9(U^4/V^4) + 0.192(\delta^4/mm^4) \quad (5)$$

幂函数:

$$(Ra/\mu m) = e^{0.243}(t_p/\mu s)^{0.282}(U/V)^{-0.842} \quad (6)$$

回归方程中各变量系数小数点后的有效位数是根据该变量的数量级选取的。占空比  $t_p/t_s$  和抛光时间  $t$  对表面粗糙度  $Ra$  的作用不显著,因而在回归方程中不出现。

通过对 6 个回归方程的剩余平方和、相关系数、 $F$  检验值、标准偏差、残差进行分析和比较,确定最优回归方程为四次函数的回归方程(置信度  $\alpha = 0.25$ ):

$$(Ra/\mu m) = 3.302 + 0.001\ 036(t_p/\mu s) - 0.151\ 9(U/V) - 3.095(\delta/mm) - 0.000\ 000\ 584(t_p^2/\mu s^2) + 3.036(\delta^2/mm^2) - 1.261(\delta^3/mm^3) + 0.000\ 006\ 9(U^4/V^4) + 0.192(\delta^4/mm^4)$$

根据最优回归方程,可以对各自变量参数与表面粗糙度  $Ra$  值的关系作定量分析,变动 1 个自变量参数,可得到单个自变量参数变化时的关系曲线,如图 1~图 3 所示。

图 4 为试验数据点和最优回归方程的输出计算值。图 5 为试验数据点与最优回归方程输出计算值的残差图。从图 4 和图 5 可以看到,输出计算值和试验数据点基本吻合。

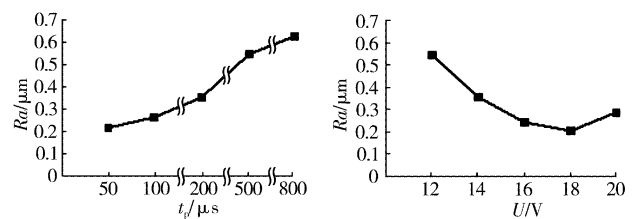
图1  $Ra-f(t_p)$ 关系图(回归方程) 图2  $Ra-f(U)$ 关系图(回归方程)

Figure 1 Variation curve of surface roughness with pulses width on equation Figure 2 Variation curve of surface roughness with voltage on equation

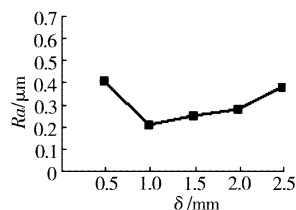


图 3  $Ra-f(\delta)$  关系图 (回归方程)

Figure 3 Variation curve of surface roughness with clearance on equation

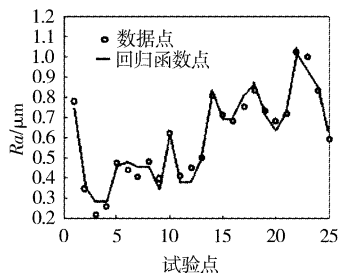


图 4 试验数据点和最优回归方程的输出计算值

Figure 4 The data points and outputs of optimal regression equation

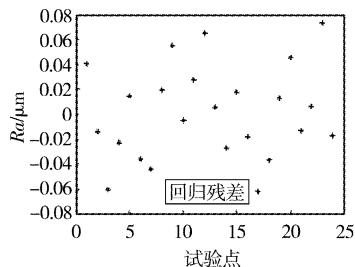


图 5 回归残差图

Figure 5 Residual difference of optimal regression equation

### 3 工艺参数对表面粗糙度的影响

#### 3.1 脉冲宽度

如图 1 所示,随着脉冲宽度的减小,抛光质量有明显提高的趋势。在微秒级脉冲电流电化学抛光中,由于脉冲电流的间隙作用、阶跃变化,使加工间隙内的电解液发生振荡,产生压力波,压力波的搅拌作用大大地改善了加工间隙中电解液的流动条件,加速了间隙内电解液的更新,消除了加工间隙内电解液电导率分布的不均匀,从而提高了加工精度,减小了表面粗糙度。同时由于间隙内电解液的周期性更新,使间隙内的电化学反应能及时充分地排除,降低了电解液系统对加工质量的不利影响。

#### 3.2 抛光电压

分析图 2 可知,在一定的条件下,存在着使表面粗糙度达到最小值的最佳抛光电压范围。电压过小,在较短时间内不能去除原表面上的微观不平度,生产率低,达不到迅速整平的目的;电压过大,阳极溶解太剧烈,超过了钝化区部分,而转向超钝化区,这不是抛光中希望出现的。故电压取 18V 左右效果最好。

#### 3.3 抛光间隙

从图 3 可以看到,在其它因素固定时,抛光间隙也有一个最适宜的值。在实际抛光中,如果抛光间隙过大,当电流密度一定时,则极间电压需要随之增大,大量的电能要消耗于电解液的欧

姆电阻,降低了电能的利用率,会使电解液温度升高,影响抛光质量;但抛光间隙也不能过小,否则易引起电化学抛光产物的阻塞,特别是产生的气体和热量排除不畅通,从而降低抛光质量。在我们的试验中,适宜的抛光间隙为 1mm。

#### 3.4 脉冲空占比

在微秒级脉冲宽度的情况下,脉冲电流的空占比对表面粗糙度的影响不明显,取 1:2 时可以兼顾抛光表面质量和抛光生产率。

#### 3.5 抛光时间

抛光时间对表面质量也有一定的影响,随着抛光时间的延长,工件表面粗糙度开始是逐步减小的,但超过一定时间后又逐步增大,所以要恰当地选取抛光时间才能得到较好的抛光效果,选择 120s 时即能达到较好的加工质量。

### 4 单因素试验的验证

为了验证最优回归方程中的单个自变量参数变化时的关系曲线是否与实际情况一致,进行了一组单因素试验。在其它自变量参数最优的情况下,分别研究脉宽、抛光电压、抛光间隙这 3 个对抛光质量影响较大的因素与表面粗糙度之间的影响。结果如图 6 ~ 图 8 所示。

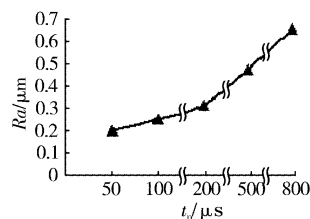


图 6  $Ra-f(t_p)$  关系图 (试验)

Figure 6 Variation curve of surface roughness with pulses width on testing

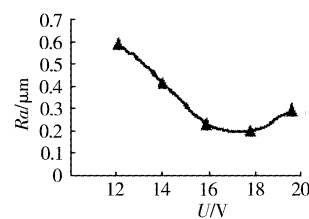


图 7  $Ra-f(U)$  关系图 (试验)

Figure 7 Variation curve of surface roughness with voltage on testing

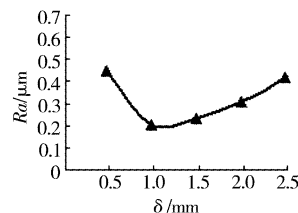


图 8  $Ra-f(\delta)$  关系图 (试验)

Figure 8 Variation curve of surface roughness with clearance on testing

由图 6 可以看到,当其它因素固定时,增加脉宽,表面粗糙度数值由小变大,这也验证了前人试验所得出的结论:高频窄脉冲电流对改善抛光区中的流场是有利的。由图 7 可知,随着电压的升高,表面粗糙度先减小后增大,在 18V 时,表面粗糙度达到最小值。在单因素变化曲线图 8 中,表面粗糙度是随着间隙的增大而先减小后增大的,故在进行电化学抛光时适宜的间隙为 1mm。

由图 6 ~ 图 8 可以看到,由回归方程得到的表面粗糙度  $Ra$  与  $t_p$ 、 $U$  和  $\delta$  的关系曲线图与由单因素试验得到的结论相吻合,而且与前面极差分析得到的结果是一致的,这说明了用逐步回归分析进行建模是成功的。

(下转第 77 页)

#### 4.4 瓷层自熔覆防护法

由于瓷层是耐高温的无机材料,其软化温度为700~800℃,如果采用合适的焊接工艺,瓷层非但不会像有机涂层那样被焊接电弧烧损,反而会在焊接热作用下软化并向焊缝流动、覆盖焊缝,焊接完成后在接头区形成覆盖层,焊后不用补口。瓷层在焊接热作用下软化,向焊缝流动,在整个接头区形成完整无缺陷的防护层的性能称为瓷层的自熔覆性能。利用瓷层的自熔覆性能可达到焊后无内补口的目的,而且接头区与管道内壁均为瓷层防护,其寿命相当,提高了整条管线的使用寿命。为了增加焊缝区瓷层的厚度,在焊前可在管端内壁预先粘上一些釉料,焊接时这些釉料熔化,向焊缝区流布,焊接完成后形成瓷层并与管道内壁瓷层成为一体。整个焊口焊接完成后还可利用环形管口加热器从管道外壁对接头区进行加热,使瓷层重熔、进一步流布,消除焊接时瓷层产生的一些缺陷,提高瓷层质量。笔者在实验室内利用瓷层的自熔覆性能,通过焊前管端添加釉料,焊后重熔处理等方法对喷瓷管道的焊接接头进行了防护,焊后不用补口,获得了性能优良、保护效果良好的接头<sup>[12]</sup>。该技术是传统补口技术的一次创新,尤其适合无机防护涂层管道和一些小口径、无法进行焊后内补口的管道。不过虽在实验室取得了很好的效果,但要在现场大规模应用还需要进一步完善。

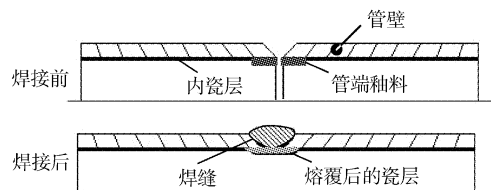


图6 瓷层自熔覆防护法示意图  
Figure 6 Protection method by self-deposition of the enamel

## 5 结 语

搪瓷涂层具有优异的耐蚀性,其耐冷、耐热性能好,永不老化,寿命长,是有机涂层的替代产品。将传统搪瓷生产技术应用用于管道防腐产生了搪瓷管道。搪瓷管道还具有瓷面光滑,摩擦因数小,增强了管道的通过能力,降低了输送成本,不沉积石蜡、聚合物和其它沉积物等优点。随着表面改性和热喷涂技术的发展,

热喷涂技术和搪瓷管道生产相结合诞生了喷瓷管道技术。喷瓷管道技术将涂搪釉浆、烘干及搪烧等流程合为一体,实现连续化生产,简化了传统搪瓷生产工序。其操作简单、自动化程度高,设备简单,而且管道内外壁可同时涂覆,因而生产效率高,成本较搪瓷管道大为下降。可以预见,喷瓷管道将会替代有机涂层管道,广泛应用于石油化工、能源、化学等工业。

与有机涂层管道类似,搪瓷(喷瓷)管道焊接时会破坏接头处瓷层,国内外发展了焊接接头内壁牺牲阳极防护法、用综合冶金治理代替焊后补口技术、不锈钢工艺接头连接法、瓷层自熔覆防护法等方法实现搪瓷(喷瓷)管道的连接,解决焊接接头补口问题。

#### [参 考 文 献]

- [1] 王志昌. 输气管道工程[M]. 北京:石油工业出版社,1997.1-5
- [2] 陈洪玉,刘兴,教立新. 埋地煤气管道局部腐蚀原因分析[J]. 表面技术,2006,35(4):80-81
- [3] 张晞,孟立新. 金属热喷涂防腐技术在管道运输业应用展望[J]. 表面技术,2000,29(6):23-25
- [4] Bouchet J. SEM, EDS and waxd microstructural characterizing of a new enamel used as a protecture and thermal barrier[J]. Sci. Technol, 2001, 15 (3): 345-369
- [5] 吴国华. 俄罗斯的搪瓷管道生产技术概况[J]. 中国搪瓷,1996,17(6):20-25
- [6] Кирсанов В М, Кармазин В Я, Лвриненко Л Н. Эмалирование внутреннеповерхноститруб[J]. Met. Oct., 1996, (10): 17-18
- [7] 邵文古,王礼泉. 金属-玻璃(釉)热喷复合防腐管道[P]. 中国专利:CN1051075A, 1991-05-01.
- [8] 陈玉华,王勇,韩涛. 玻璃涂层管道的生产及性能研究[J]. 石油工程建设,2003,29(1):25-27
- [9] 王勇. 喷瓷管道及其焊接性能试验[J]. 石油工程建设,1997,23(5):12-14
- [10] Гаочао Л И, Стеклов О И, Сюй Шпро, et al. Технология протекторный защиты сварных соединений эмалированных трубопроводов[J]. Защита Металлов, 1999, 35(3):250-254
- [11] 王勇,吴开源. 管道焊后无内补口焊接新技术[J]. 新技术新工艺,1999,(5):26-27
- [12] 陈玉华,王勇,韩涛,等. 喷瓷管道焊接接头的自熔覆防护[J]. 焊接学报,2005,26(2):49-51

3) 通过单因素试验验证了最优回归方程,建立了微秒级高频窄脉冲电流电化学抛光的数学模型,为今后铝合金电化学抛光技术的研究和推广提供了参考借鉴。

#### [参 考 文 献]

- [1] 陈祖秋,方炳福,胡肆福,等. 铝制品无铬酸电化学抛光技术[J]. 表面技术,2002,31(4):48-50
- [2] 焦树强,周海晖,陈金华,等. 铝及铝合金的表面抛光[J]. 电镀与涂饰,2001,20(6):32-35
- [3] 安军,周锦进. 脉冲电化学光整加工的机理及影响因素[J]. 中国机械工程,2002,13(14):1189-1192
- [4] 周锦进,翟小兵,庞桂兵,等. 脉冲电化学光整加工表面微观形貌的研究[J]. 农业机械学报,2004,35(3):150-153

(上接第65页)

## 5 结 论

1) 采用正交试验的方法可以用较少的试验次数得到比较全面的试验数据,采用极差分析可以对抛光的工艺规律作定性的分析:各因素对表面粗糙度  $R_a$  的影响由主到次顺序为  $t_p \rightarrow U \rightarrow \delta \rightarrow t \rightarrow t_p/t_s$ ; 较优的抛光参数为:脉宽 50  $\mu s$ 、脉冲占空比 1:2、电压 18V、时间 120s、间隙 1mm。

2) 根据正交试验的试验数据,采用逐步回归分析的方法,可以得到表面粗糙度  $R_a$  的最优回归方程(置信度  $\alpha = 0.25$ )。根据最优回归方程,可以对各自变量参数与  $R_a$  值的关系作定量分析。