

# 脉冲电化学光整加工建模与机理分析<sup>\*</sup>

马宁<sup>1</sup> 徐文骥<sup>1</sup> 王续跃<sup>1</sup> 庞桂兵<sup>2</sup> 陶彬<sup>1</sup>

(1. 大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 大连 116024;

2. 大连工业大学机械工程与自动化学院, 大连 116034)

**【摘要】** 以轴承内环外表面为光整加工对象,建立了脉冲电化学光整加工中理想光滑表面及实际尖峰状表面数学模型,分析了极间间隙、电流密度、光整时间等因素对阳极整平效果的影响规律。仿真与实验结果表明,所建模型可以解释整平机理,具有较好的加工质量预测能力,可为光整加工参数的合理选取提供依据。

**关键词:** 脉冲电化学光整加工 数学模型 机理 实验

**中图分类号:** TG662

**文献标识码:** A

## Modeling and Mechanism of Anodic Smoothing of Pulse Electrochemical Finishing

Ma Ning<sup>1</sup> Xu Wenji<sup>1</sup> Wang Xuyue<sup>1</sup> Pang Guibing<sup>2</sup> Tao Bin<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China 2. College of Mechanical Engineering and Automation,

Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

### Abstract

The surface of the bearing inner raceway was finished by pulse electrochemical finishing (PECF). A mathematical model was developed and the effects of finishing parameters, such as the interelectrode gap, current density and the finishing time, on the anodic smoothing was analyzed. The results show that predictive results based on the developed mathematical model are in good agreement with the experimental results. The developed model can not only explain the mechanism of anodic smoothing, but also be used as a guideline for accurately choosing finishing parameters.

**Key words** Pulse electrochemical finishing, Mathematical model, Mechanism, Experiment

### 引言

传统手工抛光方法存在着诸如效率低、对操作者技术要求高、表面质量不稳定等问题<sup>[1~2]</sup>。机械光整加工中普遍存在的应力变形、热变形、擦伤、磨伤等问题在电化学光整加工中均不存在,而且电化学光整加工过程不受材料硬度、塑性、脆性等机械特性的影响。

脉冲电化学光整加工基本原理是金属阳极电化学溶解。脉冲电流的引入使得电化学加工过程中电解液流场、极间间隙等特性得到改善,加工过程更稳定,表面质量得到提高,其研究逐渐受到重视<sup>[3~8]</sup>。

但是,现有研究主要集中在电化学光整加工工艺,而对于整平机理的研究还不够深入,加工参数主要靠大量实验确定,制约了该技术的应用。

本文建立理想光滑表面及实际尖峰状表面脉冲电化学光整加工的数学模型,并结合轴承环表面加工实验,对脉冲电化学光整加工的阳极整平机理进行分析,为合理选择光整加工参数提供依据。

### 1 理论模型

#### 1.1 加工原理

轴承环表面脉冲电化学光整加工原理如图1所示。工具接电源的负极,形成工具阴极;工件接电源

的正极,形成工件阳极;极间通以电解液。当工具阴极在工件表面扫过时,正对着工具阴极的工件表面部分的金属就发生了电化学溶解,随着阴极的扫描,工件表面被逐渐整平。

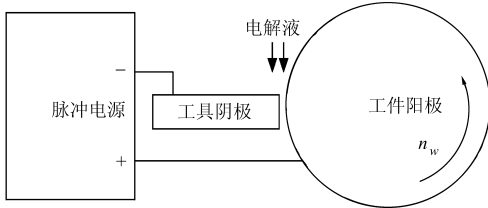


图1 轴承环表面脉冲电化学光整加工原理图  
Fig.1 Principle of PECF of bearing ring raceway

1.2 理想金属表面电化学加工

图2是理想金属表面脉冲电化学光整加工示意图。工具阴极和工件阳极之间初始间隙为  $S_0$ 。在光整加工过程中,工具阴极相对工件表面移动,工件表面金属被去除和整平。

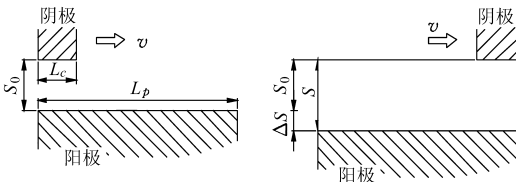


图2 理想表面脉冲电化学光整加工示意图  
Fig.2 Scheme of PECF on ideal surface

根据法拉第定律和欧姆定律,在  $dt$  时间内,阳极表面金属去除量为

$$\Delta S = \frac{\eta \kappa_e k_v (U_0 - \Delta U)}{S} dt \quad (1)$$

式中  $\eta$ ——阳极溶解电流效率  
 $\kappa_e$ ——电解液电导率, S/m  
 $k_v$ ——合金体积电化学当量,  $\text{mm}^3/(\text{A}\cdot\text{min})$   
 $U_0$ ——外加电压, V  
 $\Delta U$ ——过电压, V  
 $S$ ——极间间隙, mm

在脉冲电流上升时间段  $t_p$  范围内,对式(1)两边取积分可以得到极间间隙为

$$S = [S_0^2 + 2\eta \kappa_e k_v (U_0 - \Delta U) t_p]^{1/2} \quad (2)$$

影响电导率的主要因素是温升和气泡率。由于采用旋转电极,工具阴极的面积远小于被加工工件面积,电解液循环系统可以有效控制电解液温升。因此,本文将电导率  $\kappa_e$  视为常数。另外,在将阳极溶解电流效率  $\eta$  和过电压  $\Delta U$  视为常数的条件下,式(2)可以表示为

$$S^2 = S_0^2 + 2\sigma C t \quad (3)$$

其中  $C = \eta \kappa_e k_v (U_0 - \Delta U)$

$$t = \frac{L_c}{\pi d n_w} \quad (4)$$

式中  $\sigma$ ——脉冲因数  
 $t$ ——阳极表面各点光整时间  
 $L_c$ ——阴极厚度, mm  
 $d$ ——工件直径, mm  
 $n_w$ ——工件旋转速度, r/min

则式(3)可以写为

$$S^2 = S_0^2 + 2\sigma C \frac{L_c}{\pi d n_w} \quad (5)$$

1.3 实际金属表面轮廓电化学光整加工

实际金属表面并非理想光滑表面,而是凹凸不平的尖峰状轮廓,如图3所示。当工具阴极扫过阳极表面时,阳极凸出部分与凹入部分溶解速度不同。

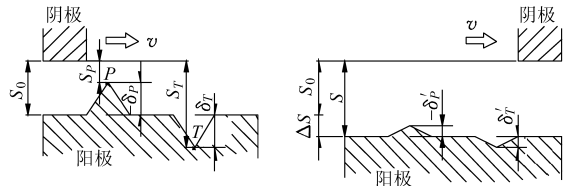


图3 实际金属表面脉冲电化学光整加工示意图  
Fig.3 Scheme of PECF on real surface

由式(1)并结合图3,可以得到波峰 P 点处去除速度

$$v_p = C/S_p \quad (6)$$

波谷 T 点处去除速度

$$v_T = C/S_T \quad (7)$$

由此可见

$$\frac{v_p}{v_T} = 1 + \frac{\delta_p + \delta_T}{S_p} \quad (8)$$

从式(8)可以看出:  $v_p/v_T > 1$ , 即  $v_p > v_T$ 。波峰处的去除速度大于波谷的去除速度,即间隙小的地方整平速度快,这样经过一段时间以后,阳极表面将逐渐被整平。为了对实际金属表面整平机理进行分析,将图3简化成如图4所示,以便采用前述理想表面轮廓状态下推导的公式进行分析。

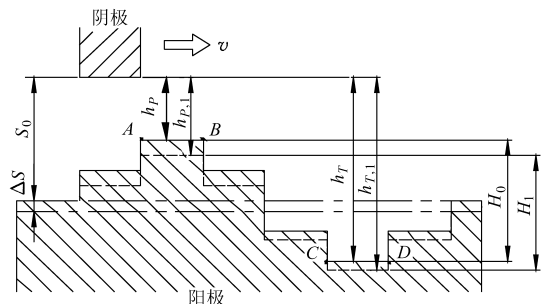


图4 实际金属表面简化模型

Fig.4 Simplified model of real metal surface

根据式(5)并结合图4,  $n$  次扫描后总去除量为

$$S_n = \left( S_0^2 + 2n\sigma C \frac{L_c}{\pi d n_w} \right)^{1/2} - S_0 \quad (9)$$

扫描前,表面轮廓波峰和波谷之间高度差的最大值  $H_0 = h_T - h_P$ 。  $h_T, h_P$  分别为取样长度内阳极轮廓最低点和最高点 to 阴极的距离。

一次扫描后

$$H_1 = h_{T,1} - h_{P,1} = (h_T^2 + \Delta)^{1/2} - (h_P^2 + \Delta)^{1/2} \quad (10)$$

其中  $\Delta = 2\sigma C \frac{L_c}{\pi d n_w}$

$n$  次扫描后

$$H_n = h_{T,n} - h_{P,n} = (h_T^2 + n\Delta)^{1/2} - (h_P^2 + n\Delta)^{1/2} \quad (11)$$

其中  $n = n_w t$

可见,随着光整时间  $t$  的不断增加,阳极表面波峰与波谷之间高度差的最大值  $H_n$  逐渐减小,表面轮廓逐渐趋于平整。

## 2 数值模拟

由以上分析可知,脉冲电化学阳极整平效果主要受极间间隙、光整时间、电流密度等因素的影响。下面将借助所建立的阳极整平数学模型,对以上影响因素进行数值分析。设定的主要参数见表1。

表1 输入参数

Tab.1 Input parameters

参数	数值
外加电压 $U_0/V$	10~25
初始间隙 $S_0/mm$	0.1, 0.2, 0.3
体积电化学当量 $k_v/mm^3 \cdot (A \cdot min)^{-1}$	1.7
电导率 $\kappa_e/S \cdot m^{-1}$	13
脉冲上升时间 $t_p/ms$	0.5
脉冲下降时间 $t_o/ms$	2
阴极厚度 $L_c/mm$	5

图5给出了波峰和波谷之间的最大差值  $H_n$  与光整时间、极间初始间隙之间关系的计算结果。可以看出,随着光整时间的增加,  $H_n$  逐渐减小。实际上,根据表面粗糙度的评定参数定义可知,表面轮廓波峰和波谷之间高度差的最大值  $H_n$  即为评定参数

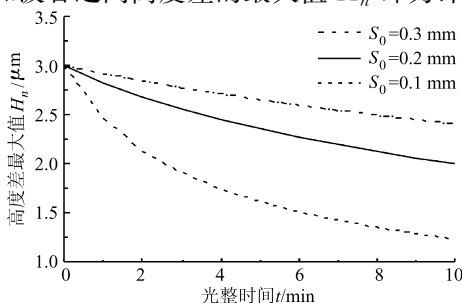


图5 光整时间对高度差最大值影响的仿真曲线  
Fig.5 Simulation curves of the effect of finishing time on maximum height  $H_n$

中的轮廓最大高度  $Rz^{[9]}$ 。

图6给出了总的去除量与极间间隙、光整时间关系的计算结果。可以看出,极间间隙越小,单位时间内去除量越大,整平速度越快。但实际操作中间隙不能太小,否则会引起打火或者短路而破坏工件表面质量。

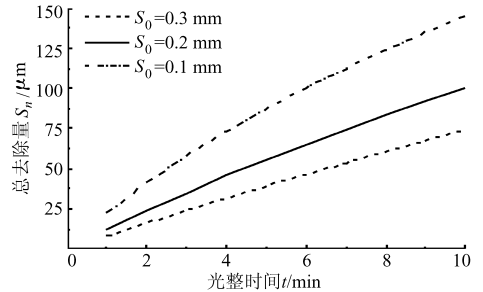


图6 光整时间对总去除量影响的仿真曲线

Fig.6 Simulation curves of the effect of finishing time on total removal thickness  $S_n$

除了极间间隙和光整时间以外,电流密度对加工结果也有重要影响。

从图7可以看出,随着电流密度的增加,表面粗糙度下降,表面质量提高。电流密度越大,加工精度也会随之提高。但是电流密度不能过大,否则会导致极间发热量增加,影响加工质量。

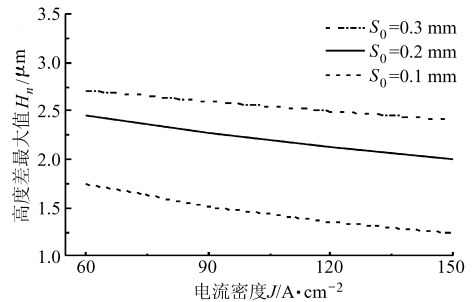


图7 电流密度对高度差最大值影响的仿真曲线

Fig.7 Simulation curves of the effect of current density on maximum height  $H_n$

## 3 实验验证及讨论

轴承内环外表面光整加工实验装置如图8所示。

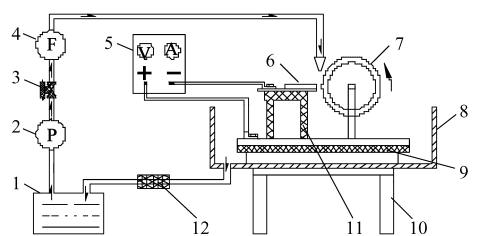


图8 实验装置简图

Fig.8 Experimental set-up

1. 电解液池
2. 泵
3. 节流器
4. 流量计
5. 脉冲电源
6. 工具阴极
7. 工件阳极
8. 罩体
- 9, 11. 绝缘体
10. 工作台
12. 过滤器

工件阳极和工具阴极分别固定在卡盘和夹具上,并且通过绝缘装置与工作台绝缘。电解液流过工具阴极和工件阳极之间,带走电解产物和加工产生的热量。电解液循环系统包括过滤器、泵、电解液池。主要实验参数如表2所示。

表2 主要实验参数

Tab.2 Main experimental parameters

参数	数值
工件直径/mm	70
工件厚度/mm	20
工件初始表面粗糙度 $Rz/\mu\text{m}$	3
脉冲电源频率/kHz	5~20
最大电流输出/A	400
外加电压 $U_0/V$	0~50
初始间隙 $S_0/\text{mm}$	0.1, 0.2, 0.3
工件旋转速度 $n_w/r\cdot\text{min}^{-1}$	120~380
电解液中 $\text{NaNO}_3$ 质量分数/%	15

工件选用硬度为60HRC的GCr15轴承钢。电解液主要成分为 $\text{NaNO}_3$ ,并加入适量添加剂。

图9和图10给出波峰波谷最大差值 $H_n$ 计算结果与实验结果的对比。初始间隙 $S_0 = 0.2\text{ mm}$ ,电压25V,工件转速 $n_w = 200\text{ r/min}$ ,其余参数见表2。测得的粗糙度 $Rz$ 由 $3\mu\text{m}$ 减小到 $2.01\mu\text{m}$ ,实验结果和计算结果变化趋势吻合。

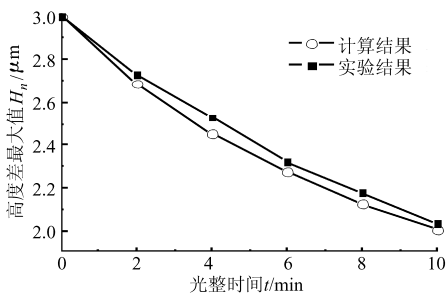


图9 光整时间对高度差最大值影响的结果对比

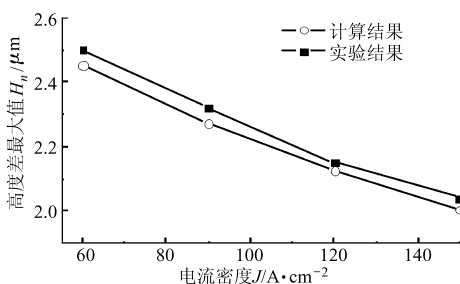
Fig.9 Effect of finishing time on the maximum height  $H_n$  ( $Rz$ )

图10 电流密度对高度差最大值影响的结果对比

Fig.10 Effect of current density on the maximum height  $H_n$  ( $Rz$ )

图11给出了总去除量计算结果与实验结果的对比。可以看出, $t > 6\text{ min}$ 后去除速度有所下降,这主要是由于钝化产生的氧化膜阻止了反应的进行所致。计算结果与实验结果之间存在的误差是由多方面原因造成的:实际工件材料通常不是单一元素,而是含有多种元素的合金;零件表面存在程度不同的机械加工痕迹;模型建立中一些变化不大的参数被理想化等。这些需要在以后的研究中逐步加以修正、完善。

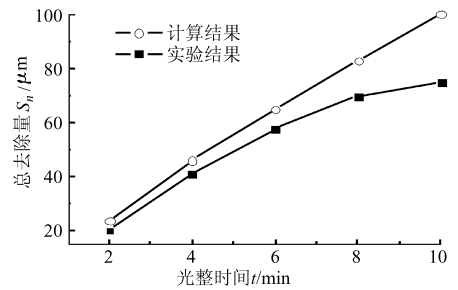


图11 光整时间对总去除量影响的结果对比

Fig.11 Effect of finishing time on the total removal thickness  $S_n$ 

图12给出了加工前、后表面微观轮廓检测结果对比。可以看出,经过电化学光整加工后的零件表面与纯机械加工的表面微观几何轮廓有很大差异,前者为尖峰状,而后者较为平缓,这与式(8)分析相吻合,即在脉冲电化学光整加工中,波峰处溶解速度大于波谷处溶解速度。

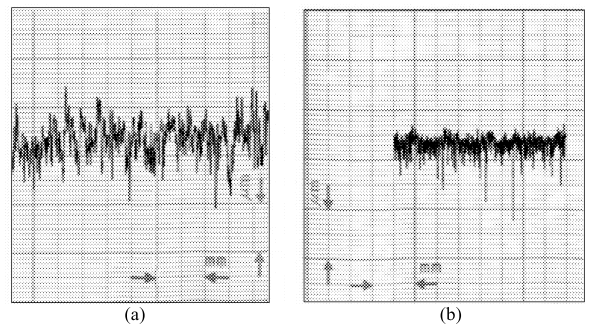


图12 表面微观轮廓检测结果对比

Fig.12 Comparison of the surface micro-topography of workpiece before and after PECF

(a) 加工前,  $Rz = 3\mu\text{m}$  (b) 加工后,  $Rz = 2.01\mu\text{m}$ 

## 4 结论

(1) 建立的脉冲电化学光整加工数学模型可以解释阳极的整平机理,该方法可得到平缓光滑的微观几何形貌的根本原因在于:波峰处的溶解速度大于波谷处的溶解速度。

(2) 借助所建模型,可以较好地预测脉冲电化学光整加工表面轮廓最大高度值 $Rz$ ,并有助于合理选择极间间隙、电流密度和光整时间等加工参数。

## 参 考 文 献

- 1 Zhou J, Pang G, Wang H, et al. Research on pulse electrochemical finishing using a moving cathode[J]. International Journal Manufacturing Technology and Management, 2005, 23(4): 352~365.
- 2 Tsuneeo K, Mitsuro H. A study of EDM and ECM/ECM-lapping complex machining technology[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(14): 1 804~1 810.
- 3 Rajurkar K P, Wei B, Kozak J, et al. Modelling and monitoring interelectrode gap in pulse electrochemical machining[J]. Annals of CIRP, 1995, 44(1): 177~180.
- 4 Rosset E, Datta M, Landolt D. Pulse polishing of die steels in neutral solutions[J]. Plating and Surface Finishing, 1985, 72(7): 60~64.
- 5 Klocke F, Sparer M. Electrochemical finishing-the fast way to finished dies and molds[J]. International Journal of Manufacturing Science, 1998, 1(4): 247~256.
- 6 Sun J J, Taylor E J, Srinivasan R. MREF-ECM process for hard passive materials surface finishing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 108(3): 356~368.
- 7 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. Zhou Jinjin, Zhai Xiaobing, Pang Guibing, et al. Microscopic shape of surface generation in pulse electrochemical finishing [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(3): 150~153. (in Chinese)
- 8 周锦进,庞桂兵,徐文骥,等. 脉冲电化学齿轮齿面光整加工实验研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(24): 2 187~2 190. Zhou Jinjin, Pang Guibing, Xu Wenji, et al. Experimental study on pulse electrochemical finishing of gear teeth surface[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(24): 2 187~2 190. (in Chinese)
- 9 GB/T 3505—2000 产品几何技术规范表面结构轮廓法表面结构的术语、定义及参数[S]. GB/T 3505—2000 Geometrical product specifications (GPS)-surface texture: profile method-terms, definitions and surface texture parameters[S]. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 165 页)

## 参 考 文 献

- 1 Mattingly J D, Heiser W H, Pratt D T. Aircraft engine design (second edition)[M]. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 2002.
- 2 袁佐云,毛志怀,魏青. 基于计算机视觉的作物行定位技术[J]. 中国农业大学学报, 2005, 10(3): 69~72. Yuan Zuoyun, Mao Zhihui, Wei Qing. Orientation technique of crop rows based on computer vision[J]. Journal of China Agricultural University, 2005, 10(3): 69~72. (in Chinese)
- 3 Marchant J A, Brivot R. Real-time tracking of plant rows using a Hough transform[J]. Real-time Imaging, 1995, 1(5): 363~371.
- 4 Woebbecke D M, Meyer G E, Von Bargen, et al. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(1): 259~269.
- 5 李婧,黄进. 一种图像测量中的快速中值滤波算法[J]. 微计算机信息, 2007, 23(7): 299~300, 310. Li Jing, Huang Jin. A fast median filter algorithm in image measuring system[J]. Microcomputer Information, 2007, 23(7): 299~300, 310. (in Chinese)
- 6 Aubtale A S. Automatic thresholding of gray level picture using two-dimensional entropy[J]. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1989, 47(1): 22~23.
- 7 姜国权,柯杏,杜尚丰,等. 基于机器视觉和随机方法的作物行提取算法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(11): 85~88, 93. Jiang Guoquan, Ke Xing, Du Shangfeng, et al. Detection algorithm of crop rows based on machine vision and randomized method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11): 85~88, 93. (in Chinese)
- 8 Lamm R D, Slaughter D C, Giles D K. Precision weed control system for cotton[J]. Transactions of the ASAE, 2002, 45(1): 231~238.
- 9 孙元义,张绍磊,李伟. 棉田喷药农业机器人的导航路径识别[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2007, 47(2): 206~209. Sun Yuanyi, Zhang Shaolei, Li Wei. Guidance lane detection for pesticide spraying robot in cotton fields[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2007, 47(2): 206~209. (in Chinese)
- 10 张红霞,张铁中,陈兵旗. 基于模式识别的农田目标定位线检测[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 107~111. Zhang Hongxia, Zhang Tiezhong, Chen Bingqi. Detection algorithm for orientation lines based on pattern recognition[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 107~111. (in Chinese)