

# 高频窄脉冲电化学光整加工工艺特性研究

李洪友<sup>1,2</sup>, 郭隐彪<sup>1</sup>, 刘晓梅<sup>2</sup>, 周锦进<sup>3</sup>

- ( 1. 厦门大学机电工程系, 福建厦门 361005;  
2. 华侨大学机电与自动化学院, 福建泉州 362021;  
3. 大连理工大学机械工程学院, 辽宁大连 116024 )

**摘要:** 阐述了高频窄脉冲电化学光整加工原理; 比较了其与传统脉冲电化学加工的区别与联系; 通过实验, 研究及分析了电流密度、加工间隙、工件材料、加工时间及脉冲参数等因素对加工后表面质量的影响。实验结果表明: 在合适的工艺参数情况下, 高频窄脉冲电化学光整工艺可大幅度提高加工效率, 获得镜面级的表面质量, 并能降低加工成本。

**关键词:** 高频窄脉冲电化学光整加工; 脉冲电化学加工; 表面光整加工; 表面质量  
**中图分类号:** TG661

## Study on Technological Characteristics of High Frequency Short Pulse Electrochemical Finishing

Li Hongyou<sup>1,2</sup>, Guo Yinbiao<sup>1</sup>, Liu Xiaomei<sup>2</sup>, Zhou Zhenjin<sup>3</sup>

- ( 1. Xiamen University, Xiamen 361005, China;  
2. Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;  
3. Dalian University of Technology, Dalian 116024, China )

**Abstract:** Surface finishing (or polishing) is a tedious and necessary finishing operation for many products. In this paper, high frequency short pulse electrochemical finishing (HSPECF) is introduced. Experiments were done in a neutral nitrate electrolyte. The influence of interelectrode gap, finishing time, current density, anode material and pulse parameters on the resulting surface finish and rate of smoothing was investigated. Results indicate that pulse parameters have important influence on finishing operations and the proper selection of pulse parameters can lead to both good smoothing efficiency and surface finish simultaneity at low costs.

**Key words:** HSPECF; pulse electrochemical machining; surface finishing; surface quality

按照材料的去除原理来划分, 表面光整加工一般有两类方法, 即传统的机械光整加工和非传统的光整加工。

化学或电化学光整加工技术在加工中不产生表面残余热和机械应力, 也不存在工具或刀具的磨损等现象。如工艺参数选择合适, 电化学加工 (ECM)

也能获得好的加工表面质量, 但它对应用的电流密度和电解液循环系统要求较高, 通常电流密度要达到  $50 \sim 100 \text{ A/cm}^2$ ; 为了带走及消除电解过程中产生的蚀除物及热量, 电解液的流速要求达到  $10 \sim 50 \text{ m/s}$ , 这样势必会增加对电解液循环系统的性能要求。电化学抛光 (ECP) 也是一种十分有效的光整加工技术, 它可用较小的电压和电流密度, 实现对零件表面的光整加工。但它对金属零件的材料成分很敏感, 不同材料应用的电解液成分及其他工艺参数都有很大的不同; 其加工过程是通过强酸及强碱的

收稿日期: 2007-05-17

基金项目: 福建省青年科技人才创新基金资助项目 (2005J031); 福建省自然科学基金计划资助项目 (E0610019)

第一作者简介: 李洪友, 男, 1970年生, 副教授。

电解质介质来完成的,因而操作很不方便,也很不安全,而且它对零件的表面粗糙度值降低有限,这些都限制了它的应用范围。

高频窄脉冲电化学光整加工(HSPECF)技术集ECM和ECP优点于一身,具有高效、低成本及表面质量优等特点。它用中性非线性电解液,光整加工所用平均电流密度与ECP相当。目前,HSPECF已成功应用于零件的平面、沟槽、内孔及外圆等表面光整加工中。

## 1 高频窄脉冲电化学光整加工原理

图1为高频窄脉冲电化学光整加工原理图。在加工过程中,阴极表面与加工工件的表面两者成配对电极,其法向间隙固定不变,根据被光整加工表面的大小及形状,在平行方向上作相对进给运动,实现较大工件表面光整加工。

脉冲电化学光整加工技术是脉冲电化学加工技术的发展和运用,它与脉冲电化学加工技术既有区

别又有联系。二者都以电化学阳极溶解原理为基础,去除规律都遵循法拉第电解定律。由于采用高频、窄脉冲电流取代原来电化学加工的低频脉冲电流,进一步改善了加工状况;其加工的对象是零件表面的光整加工,以提高零件表面质量为主旨,而不是用于零件的成形加工。因此,二者在应用范围、加工效率、精度、表面质量及加工设备、电解液循环系统等方面都有所不同。表1为两种工艺的比较。

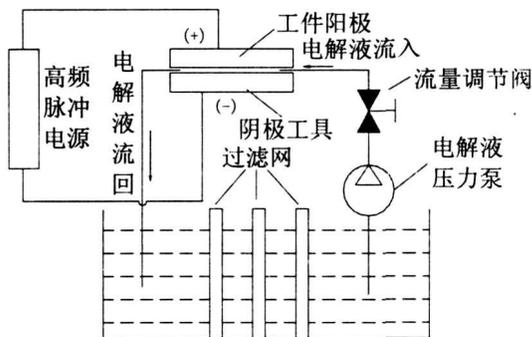


图1 高频窄脉冲电化学光整加工原理图

表1 脉冲电化学加工与高频窄脉冲电化学光整加工的比较

项目	脉冲电化学加工	高频窄脉冲电化学光整加工
金属去除机理	电化学阳极溶解	电化学阳极溶解
应用范围	零件的成形加工,如型腔、型孔、叶片等。	表面光整加工,如模具、工具等的光整加工
加工效率	效率较高	效率更高
加工成本	一般	较低
加工精度	优于一般电化学加工	可适当修正或保证原有的加工精度
表面质量	可能出现晶间腐蚀、流纹、麻点、黑膜等缺陷	表面平整光滑,光泽度好,一般没有缺陷
表面粗糙度	$Ra0.16 \sim 1.25 \mu m$	可达 $Ra0.04 \mu m$ 以下
阴极工作方式	作进给加工运动	固定不动或作平行进给运动
电解液及循环方式	中性盐电解液,高速循环	非线性电解液,循环系统要求低
加工设备	机床,低频、宽脉冲大容量脉冲电源	简单的工装,高频、窄脉冲中等容量脉冲电源
工具制造及寿命	制造复杂,可长期使用	制造较为简单,可长期使用
适用范围	不具有互换性,只能单独使用	具有一定的互换性

## 2 高频窄脉冲电化学光整加工机理分析

(1) 脉冲的间隙作用增强。脉冲电流可使间隙中电解液在脉冲的间歇时间内得以更新,进而使电导率分布基本均匀,获得理想的电化学加工过程。高频脉冲电流增强了脉冲间歇作用,改善了加工间隙中的流场状况。

(2) 压力波作用增强。脉冲电流的阶跃变化是压力波产生的根本原因,且它们之间的幅值呈线性关系<sup>[6]</sup>。电流使阴极表面生成大量氢气需占有空间,而电解液流在让出这一空间时又有一定的惯性,致使压力骤然上升。这一惯性与气体的弹性之间构成了振荡系统,而阻尼是流体的粘滞阻力,尤其是紊

流搅动,使压力波冲击能量很快释放,压力波很快衰减,这就是压力波产生的原因。高频脉冲电流使压力波的搅拌作用增强,改善了加工间隙中电解液流动状况。

(3) 为优化工艺参数创造了条件。脉冲参数对光整加工过程有着重要影响,选择合适的脉冲参数可获得高加工效率和高质量的表面。高频窄脉冲电流的引入,为加工过程中工艺参数的选择及优化创造了方便的条件。

## 3 高频窄脉冲电化学光整加工工艺参数的实验研究

采用中性非线性  $NaNO_3$  电解液进行了加工间

隙、加工时间、电流密度、工件材料和脉冲参数对光整加工表面质量及加工效率的影响实验。

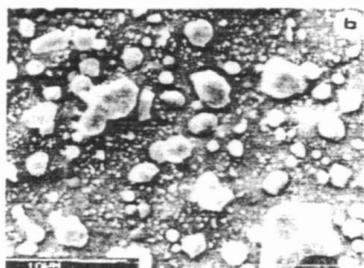
电流密度特别是峰值电流密度对表面质量有很大影响。与 ECM 工艺相比, HSPECF 可在较小的平均电流密度下进行, 得到近似于电抛光工艺得到的优良的表面质量; 且当峰值电流密度达到某一确定的数值时, 可得到镜面的表面质量, 这时的电流密度值称为极限电流密度。

加工间隙对光整加工过程的影响也很大。一般选择较小的加工间隙(0.1~0.5 mm)对提高加工精度及表面质量有利, 但此时需选择合适的脉冲参数及电解液流速, 使加工过程中的产物及热量得到及时排除。

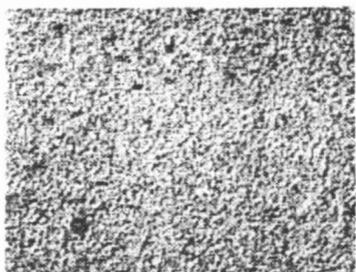
图 2 为几种不同材料的零件光整加工后表面 SEM 照片。HSPECF 工艺对加工材料不敏感, 一般来说该工艺对大多数金属材料都适用。当采用中性



(a) 中碳钢



(b) 高碳钢



(c) 不锈钢(1Cr18Ni9Ti)

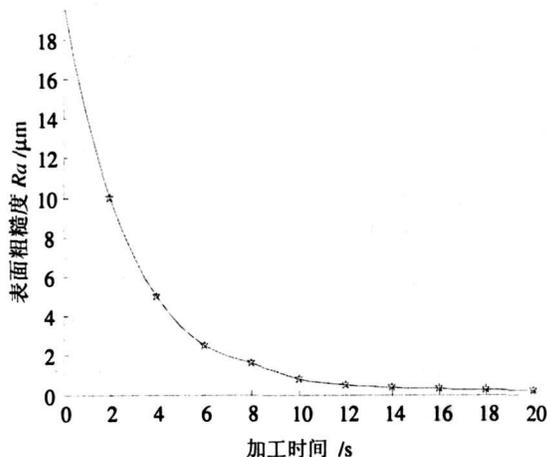
$w(\text{NaNO}_3) = 20\%$ , 峰值电流密度:  $100 \text{ A/cm}^2$ ,  
占空比: 0.20

图 2 不同材料的零件光整加工后表面 SEM 照片比较

非线性电解液时, 金属的含碳量对光整加工过程有很大的影响。随着金属基体含碳量的增加, 由于不溶解的碳化物的脱落, 有使表面质量恶化的趋势存在。

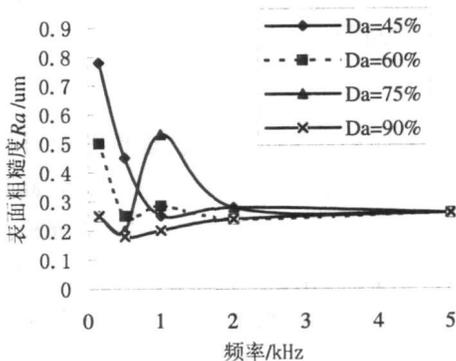
加工时间对光整加工后零件的表面粗糙度也有一定的影响。通常 HSPECF 的加工过程很短(5~30 s), 且光整加工开始阶段, 表面粗糙度值下降得很快, 然后逐渐减缓, 并最终达到某一极限值。图 3 为光整加工时间对表面粗糙度的影响曲线。

脉冲参数对光整加工过程有着重要影响。高频窄脉冲电流使脉冲间歇及压力波搅拌作用都增强了, 电场及流场状况得到显著改善, 使减小光整加工间隙成为可能; 同时, 高频脉冲电流的引入也为优化工艺过程创造了方便的条件。选择合适的脉冲参数可获得高加工效率和高质量的加工表面。图 4 为脉冲参数对表面粗糙度的影响曲线。



材料: 45 钢,  $w(\text{NaNO}_3) = 20\%$ , 峰值电流密度:  $100 \text{ A/cm}^2$ ,  
占空比: 0.20

图 3 光整加工时间对表面粗糙度的影响



材料: GCr15,  $w(\text{NaNO}_3) = 20\%$ , 峰值电流密度:  $100 \text{ A/cm}^2$

图 4 脉冲参数对光整加工后表面粗糙度的影响

(下转第 31 页)

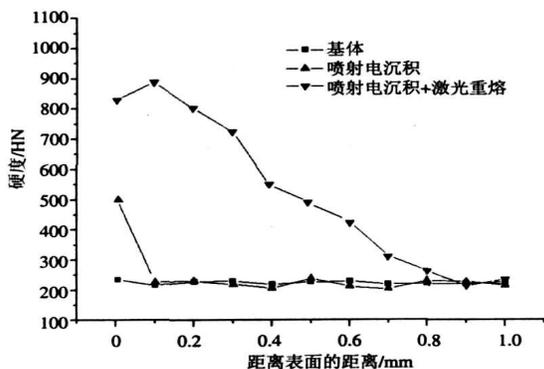


图5 试样深度方向显微硬度分布

由Hall Petch公式可知晶粒尺寸越小材料硬度越高。激光重熔试样具有最高的硬度,原因是在激光重熔过程中,基体也有部分熔化,与镍涂层形成镍基合金,另外激光重熔也细化了晶粒。测量中激光重熔试样表面显微硬度值有一定的波动,在激光作用区中心位置超过800 HV,而平均硬度只有672.5 HV,说明硬度受到激光光斑能量均匀性的影响很大,材料表面硬度的均匀性还有待进一步改善。文献[10]的研究表明,积分镜聚焦光带能使功率密度分布明显均匀化,有利于保证重熔层温度的均匀一致,从而保证组织性能的均匀一致。激光重熔试样在深度方向硬度也有明显提高,主要原因是在基体中形成了相变硬化区。

### 3 结论

(1)在所定的工艺参数下,喷射电沉积制备的纳米晶镍涂层的结合较致密,根据XRD衍射曲线中的(111)和(200)衍射峰的半高宽,利用谢乐公式计算出纳米晶镍的平均晶粒尺寸为13.7 nm。

(2)喷射电沉积镍涂层经激光重熔后,形成重熔区、相变硬化区和回火区,重熔层中形成致密、细小的晶体结构,涂层与基体由机械结合变为冶金结合。

(3)45钢基体、喷射电沉积镍涂层和激光重熔喷射电沉积镍涂层的表面显微硬度分别为243.4、520.6、672.5 HV,激光重熔后涂层硬度比原喷射电沉积涂层提高约30%。

### 参考文献:

[1] Pavlatou E A, Stroubouli M, Gyftou P, et al. Hardening effect induced by incorporation of SiC particles in nickel electrodeposits [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2006, 36: 385- 394.  
 [2] Yousefpour Mardali, Afshar Abdollaha, Yang Xi-dong, et al. Nano-crystalline growth of electrochemically deposited apatite

coating on pure titanium [J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2006, 589: 96- 105.

- [3] Bakonyi I, Toth-Kadar E, Pogany L, et al. Preparation and characterization of d. c.-plated nanocrystalline nickel electrodeposits [J]. Surface and Coatings Technology, 1996, 78(1): 124- 136.  
 [4] Qiao Guiying, Jing Tianfu, Wang Nan, et al. High-speed jet electrodeposition and microstructure of nanocrystalline Ni-co alloy [J]. Electrochimica Acta, 2005, 51(1): 85- 92.  
 [5] 梁志杰. 现代表面镀膜技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 23- 29.  
 [6] 王恩哥. 薄膜生长中的表面动力学问题 [R] // 2002 科学发展报告. 北京: 科学出版社, 2002: 52- 54.  
 [7] 张立德, 牟季美. 纳米材料与纳米结构 [M]. 北京: 科学出版社, 2001: 148.  
 [8] Lima M S F, Folio F, Mischler S. Microstructure and surface properties of laser remelted titanium nitride coatings on titanium [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 199(1): 83- 91.  
 [9] 花国然, 黄因慧, 王蕾, 等. 激光熔覆纳米 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等离子喷涂陶瓷涂层 [J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(2): 119- 203.  
 [10] 肖荣诗, 王智勇, 杨晓, 等. 同步送粉大功率激光表面宽带熔覆技术 [J]. 应用激光, 2000, 20(3): 115- 116.

(上接第27页)

### 4 结论

HSPECF可弥补和消除传统光整加工技术的缺点和不足之处,提高效率和表面质量。实验研究了加工间隙、加工时间、电流密度、工件材料和脉冲参数对加工后表面质量的影响。与其他光整加工技术相比,高频窄脉冲电化学光整加工技术采用高频窄脉冲电流,显著地改善了加工过程,可大幅度提高加工效率,降低加工成本,获得镜面级的表面质量。

### 参考文献:

[1] Rosset E, Datta M, Landolt D. Pulse polishing of die steels in neutral solutions [J]. Plating and surface finishing, 1985(7): 60- 64.  
 [2] Masuzawa T, Sakai S. Quick finishing of WEDM products by ECM using Mate electrode [J]. Annals of the CIRP, 1987, 36(1): 123- 126.  
 [3] Masuzawa T, Kimura M. Electrochemical surface finishing of tungsten carbide alloy [J]. Annals of the CIRP, 1991, 40: 199- 202.  
 [4] Datta M, Landolt D. Electrochimica acta [J]. Electrochemical machining under pulsed current conditions, 1981, 26(7): 899- 907.  
 [5] König W, Aachen/D(1) TH. Surface generation in electrochemical machining [J]. Annals of the CIRP, 1978, 27: 97- 100.  
 [6] 余承业, 等编著. 特种加工新技术. 北京: 国防工业出版社, 1995.