

基于高速摄像的脉动态电解加工电流特性研究

王明明,周泽生,姜小琛,刘嘉
(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对脉动态电解加工的电流特性开展多物理场耦合仿真分析,仿真结果显示电流波形以最小加工间隙时刻对称分布。针对在脉动态电解加工实验中观察到的加工电流峰值实际前置于最小加工间隙时刻的现象,采用高速摄像对脉动态电解加工中的产物情况进行观测,并结合图像灰度处理软件对产物在间隙中的比例进行量化分析,分析结果表明产物在加工间隙内的堆积过程特性是引起电流波形峰值前置的主要原因。

关键词:电解加工;脉冲;振动;高速摄像;试验

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2019)06-0007-04

Study of Current Characteristics of Pulse Dynamic Electrochemical Machining Based on High-Speed Camera

WANG Mingming, ZHOU Zesheng, JIANG Xiaochen, LIU Jia

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In this paper, the multi-physical field coupling simulation of current characteristics in PECM is carried out. The simulation results show that the current waveforms are symmetrically distributed at the minimum machining gap. The experimental results show that the peak value pre-position of machining current is in the minimum gap. The high-speed camera is used to observe the product in PECM, and with the image grayscale processing software to quantitatively analyze the proportion of the product in the gap. The results show that the peak current pre-position phenomenon is mainly caused by the stacking of the products in the pulse dynamic machining gap.

Keywords: ECM; pulse current; tool vibration; high-speed camera; experiment

0 引言

脉动态电解加工是一种精密电解加工方法,它将脉冲加工电流和工具阴极的往复振动有机结合,增强了电解液的更新,有效地缓解了微小加工间隙内产物的堆积,较传统电解加工可以实现更小的加工间隙,从而获得更高的电解加工精度和重复性^[1-3]。该方法已经在航空发动机叶片、整体叶盘等复杂型面零部件的精密制造中获得重要应用^[4]。

国内外研究人员针对脉动态电解加工方法开展了很多研究,取得了许多研究成果。例如:BHATTACHARYYA等在微细电解加工研究中指出工具低频振动相比于高频振动能获得更好的材料去除率与加工精度^[5]。HEWIDY等证明了工具的低频振动增强了电解液的更新,允许使用更高的电流密度进行加工^[6]。B. Ghoshal等研究在电解加工中振动对微工具结构的影响,通过调节振动频率与幅值加工出直径更加均匀的微工具^[7]。TOMASZ Paczkowski等搭建了多向振动工作电极电化学试验平台,分析了3种不同加工阶段的流速分布与压力分布^[8]。WANG Feng等利用脉冲和振荡的匹配来提高深窄槽的加工精度和宽度

均匀性^[9]。WAYNE Hung等通过实验研究了振动辅助脉冲电解加工可以显著提高材料去除率^[10]。

目前开展的脉动态电解加工研究主要围绕加工参数对加工效果的影响、加工参数优化等方面,对脉动态电解加工过程的电流波形研究还非常缺乏。本文将脉动态电解加工过程电流波形特性作为主要研究对象,通过电流波形实测试验,观察到了加工电流峰值前置于最小加工间隙时刻的现象。采用高速摄像对脉动态电解加工中产物输运情况进行观测,结合加工电流波形分析,探究引起电流波形峰值前置原因。

1 电流特性多场耦合仿真分析

1.1 脉动态电解加工原理

脉动态电解加工原理示意图如图1所示。工件和工具分别连接电源正负极,它们之间通过高速高压的电解液。工具阴极与往复运动的振动装置相连,一同安装在进给系统中。在加工中,工具电极在向工件进给的同时进行往复振动。当工具振动至靠近工件时施加加工电压,当工具振动远离工件时切断加工电压,电解液在工具远离工件

基金项目:国家自然科学基金(51405230);南京航空航天大学研究生创新基地开放基金项目(kfj20170504)

作者简介:王明明(1992—),男,山东聊城人,硕士研究生,主要从事电解加工。

周期中充分更新,彻底排出电解产物。通过小间隙加工、大间隙断电冲刷的脉动式加工过程,有效地缓解了微小加工间隙内产物的堆积,从而实现小加工间隙稳定加工。

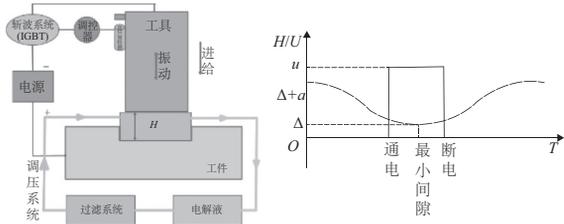


图1 脉动态电解加工示意图

在脉动态电解加工过程中,在每一个振动周期中电解液充分更新、电解产物充分排出,其加工状态在每个加工脉冲之前都能实现“清零”。其加工过程主要是由若干个单脉冲加工过程组合而成,因此要研究脉动态电解加工过程必须研究单个脉冲和振动周期内的电解加工过程。

1.2 多物理场耦合仿真

电解加工属于非接触式加工,加工间隙内属于气、液、固三相混合的复杂状态。为简化研究,在仿真中作如下假设:1) 阴极与工件的电导率比电解液的电导率大得多,可以认为阴极与工件的各自表面为等电位面;2) 温度变化引起的电解质温度变化和能量耗散都被忽略,流体流动受质量守恒方程和动量守恒方程的制约;3) 忽略电解产物对电解液电导率的影响。

多物理场仿真中电解液流动属于湍流运动,其主要由雷诺数决定^[11]:

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (1)$$

式中: d 为管道直径; V 为平均流速; μ 为流动粘性系数,当 $Re > 2000$ 时,可认为湍流。

湍流模型采用RANS $k-\varepsilon$ 模型,湍流输运方程可表示为湍流能量 k 输运方程和能量耗散 ε 输运方程^[12],分别为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \right\} = \tau_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon - \phi_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\rho \varepsilon u_j \right) - \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \right\} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} S_{ij} - C_{\varepsilon 2} f_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \phi_\varepsilon \quad (3)$$

式中:右端项分别表示生成项、耗散项和壁面项; ρ 为流体密度; μ_t 为涡粘性; S_{ij} 为平均速度应变率张量。

模型中各常数定义如下:

$$C_{\varepsilon 1} = 1.45, C_{\mu} = 0.09, C_{\varepsilon 2} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3.$$

阳极边界的消耗进行建模时使用移动边界,其表面法向上的溶解速度为:

$$v_n = \eta \omega i \quad (4)$$

式中: η 表示电流效率; ω 表示体积电化学当量; i 为法向电流密度。

阴极表面的单位时间内、单位面积上产生的氢气

量^[13]:

$$N_{H_2} = \frac{i}{2F} \quad (5)$$

式中 F 为法拉第常数。

电导率的变化忽略温度的影响,主要考虑气泡率的变化^[14]:

$$\kappa(x) = \kappa_0 (1 - \beta(x))^{b_p} \quad (6)$$

式中: κ_0 为进液口电解液电导率; $\beta(x)$ 是气泡沿流程变化的比率; b_p 为Brugeman系数。

网格划分中采用自由三角形网格,选取较为细化的网格,其网格划分见图2。

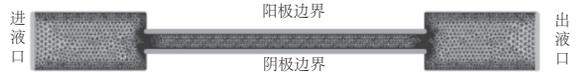


图2 仿真网格划分

阳极边界运动条件为:

$$V = 2A \pi f \cos(2\pi ft + \pi/2) \quad (7)$$

式中: A 为振动幅值,取0.25 mm; f 为振动频率,取值为10 Hz, t 为时间。

阳极边界电势采用脉冲加电的方法,阴极边界设置气体通量,且设置速度为 v_n 的耗散运动,进液口压力设置为4.0 MPa,出液口压力设置为0.1 MPa,最终的仿真结果如图3所示。

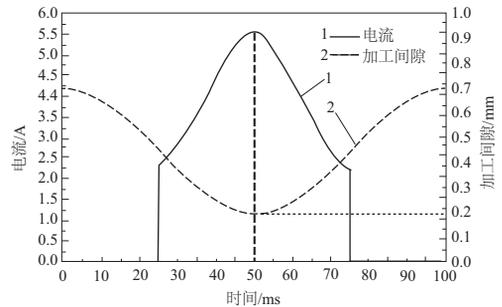


图3 多物理场耦合仿真电流波形

由多物理场耦合仿真结果可知,加工电流峰值出现在工具和工件最小间隙时刻,加工电流以该时刻为轴线近似对称分布。影响加工电流的主要因素是加工间隙大小。为了验证仿真结果是否正确,开展脉动态电解加工工艺试验,实测单个脉冲和振动周期内的电流波形,并对加工过程进行高速摄像视频观测。

2 电流实测试验及高速摄像观测分析

2.1 试验装置

脉动态电解加工试验在本单位自行研制的脉动态电解加工机床上进行。如图4所示,该机床进给系统往复振动的输出振幅为0.25 mm,振动频率可在0~50 Hz调整。加工中通过检测工具阴极的振动状态实时通、断加工电流。

脉动态电解加工电流实测及高速摄像观测的试验装置如图5所示。该装置主要由工具阴极、加工间隙可见的



图4 电解加工机床与斩波系统

工装夹具、位移传感器、电流传感器、信号记录仪、高速摄像装置及光源组成。工具阴极为宽度 8 mm、厚度 1.8 mm 的不锈钢片 (SS304)。

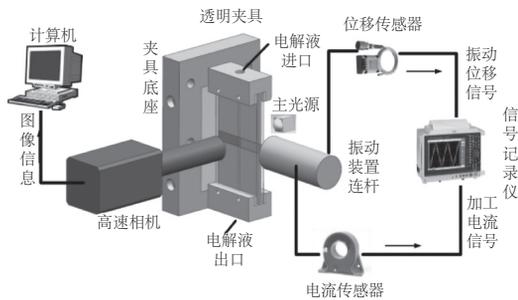


图5 电流实测及高速摄像观测装置示意图

2.2 脉动态电解加工电流实测试验

试验中,加工电压选取 10 V,振动频率为 10 Hz。电解液为 NaNO_3 ,温度控制在 30°C 左右,进口压力为 0.4 MPa。在一个运动周期内 25 ms 时电源开通,50 ms 时工具运动到最小间隙,75 ms 时电源断开,并通过调速法使加工间隙稳定在 0.2 mm。脉动态电解加工电流实测试验所测得的电流波形如图 6 所示。

由图 6 可知,脉动态电解加工中电流波形的峰值在到达最小加工间隙之前达到峰值,其后缓慢下降,在最小加工间隙后电流迅速下降。脉动态电解加工电流波形峰值前置于最小加工间隙时刻的现象,与多物理场耦合仿真的结果不同。为了进一步研究电流波形峰值前置于最小加工间隙现象,开展高速摄像观测试验研究。

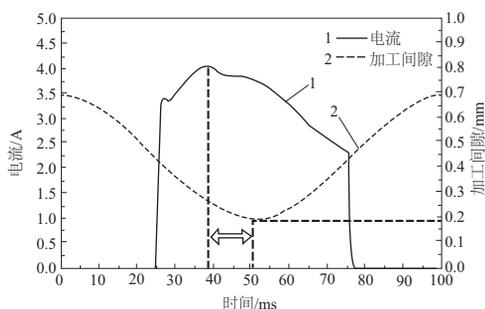


图6 脉动态电解加工实测电流波形

2.3 脉动态电解加工高速摄像观测试验

为了能通过高速摄像清晰地观测到加工间隙内的气泡和产物情况,本文采用背投式光源的拍摄模式,拍摄中

清澈的电解液在图像中呈白色。加工时电化学反应产生的电解产物与气泡都会影响加工间隙内的透光度,在图像中呈灰色或黑色。脉动态电解加工高速摄像观测试验采用和电流实测试验相同的加工参数和电解液参数,拍摄到的脉动态电解加工间隙内产物产生和演变情况如图 7 所示。

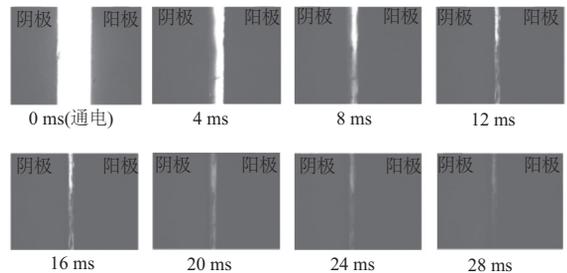


图7 电源开通不同时刻拍摄图

为了能较为准确地反映产物在加工间隙中所占的比例,本文采用 Image J 软件对图像中加工间隙中由气泡和产物所引起的图像灰度比例进行了量化分析,分析结果如图 8 所示。

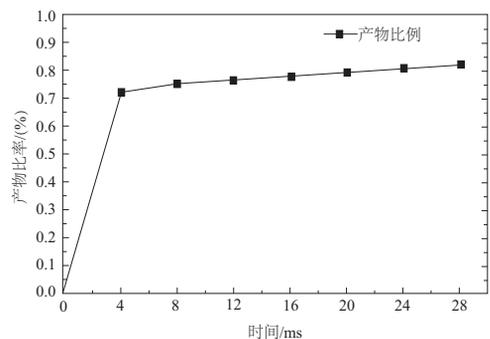


图8 加工间隙内产物比例变化

由拍摄结果和图像分析可知,通电后 4 ms 内加工间隙内产物比例急剧增加并趋于稳定。其后随加工间隙的逐步减小,产物比例也在缓慢增加。当工具电极运动至最小加工间隙后,产物比例没有随着加工间隙的逐渐增大而减小,而是进一步增加。由此可以推断,在脉动态电解加工施加加工电压至最小加工间隙过程中,起初加工间隙占主导作用,电流不断上升。随着产物比例不断增加,阳极产物和气泡的影响逐渐占据上风,电流达到峰值并逐步开始下降。当工具阴极经过最小间隙位置后,阳极产物和气泡比例还在增加,加工电流迅速下降,从而引起了电流波形峰值前置于最小加工间隙现象。

分析结果可知,加工电流是加工间隙以及阳极产物和气泡比例共同作用,相互博弈的结果。

3 加工间隙对电流特性的影响分析

3.1 不同加工间隙电流实测试验

不同的加工间隙会影响到电解反应进行的剧烈程度,使阳极产物与气泡的比例发生改变,进而引起电流变化。

本文分别选取了 0.1 mm、0.15 mm、0.2 mm、0.25 mm 与 0.3 mm 的最小加工间隙进行了试验研究,重点研究两电极相互靠近阶段的电流波形,其他加工参数与电流实测试验参数保持一致。不同最小加工间隙的电流波形如图 9 所示(本刊为黑白印刷,如有问题请咨询作者)。

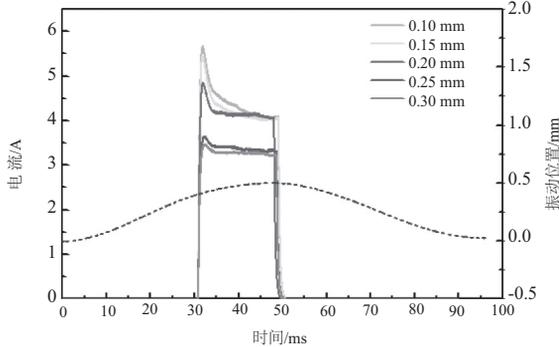


图 9 不同最小加工间隙的电流波形

从整体上看,电源开通后加工电流迅速达到峰值,并且随着加工间隙的减小,峰值电流逐渐增加,但电流随后迅速下降。加工间隙越小,电流达到峰值电流后下降的趋势越明显。为了解释该现象随即进行了高速相机拍摄试验。

3.2 不同加工间隙高速摄像观测试验

对不同的最小加工间隙进行了高速摄像观察,其加工过程产物变化情况如图 10 所示,图 11 为相应的间隙气泡比例变化。

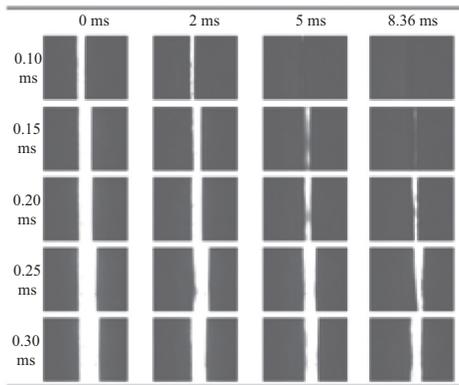


图 10 不同最小加工间隙的产物变化

由试验结果可以明显看出:随着加工间隙的不断减小,电流的波峰越来越高;加工间隙内的产物比例上升越来越快,比例值也越来越高;导致加工间隙内电解液的电导率迅速下降,加工电流也迅速下降。

因此,随着加工间隙不断减小,虽然电流峰值越来越高,但受产物比例激增的影响,产物占据主动使电流下降的时间也越早,下降的幅度也越大,前置现象也越明显。该试验结果进一步证明了脉动态电解加工中间隙作用和产物堆积作用共同形成电流波形前置于最小间隙现象的结论。

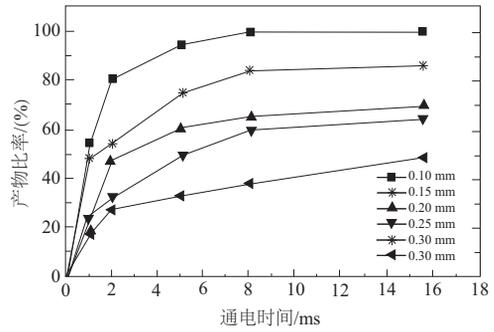


图 11 不同最小加工间隙产物比例变化

4 结语

1) 开展了脉动态电解加工电流特性多物理场耦合仿真分析和电流实测试验,试验观测到电流峰值前置于最小间隙时刻的现象,该结果不同于电流仿真结论。

2) 通过高速摄像拍摄,发现脉动态电解加工中产物比例越过最小间隙后仍然保持上升趋势,加工间隙变化和产物比例变化综合影响引起了电流峰值前置。试验结果表明多场耦合仿真应当充分考虑产物的作用,并对其进行补偿。

3) 开展了不同最小加工间隙的电流实测和高速摄像拍摄试验。试验结果表明,随着加工间隙的减小,产物比例上升越快、比例值越高,产物的影响越早越占据主动,电流峰值前置现象越显著。

参考文献:

- [1] UK Su Kim, YOON Jun Jung, JEONG Woo Park. Vibration electrochemical micromachining based on coulometric analysis[J]. International Journal of Applied Physics and Mathematics, 2013, 3(2): 123-126.
- [2] 朱永伟,万胜美,朱树敏. 振动进给、脉冲电流电解加工设备及其工艺研究[J]. 电加工与模具,1996(5):15-18.
- [3] 徐家文,王建业,田继安,等. 电解加工在航空制造业中的应用及发展[J]. 航空制造技术,2002(4):27-30.
- [4] 王宁峰,朱增伟,王登勇,等. 旋印电解加工辅助阳极设计和试验研究[J]. 机械制造与自动化,2017,46(5):73-78.
- [5] BHATTACHARYYA B, MALAPATI M, MMUDA J, et al. Influence of tool vibration on machining performance in electrochemical micro-machining of copper[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2007, 47(2):335-342.
- [6] M.S. Hewidy, S.J. Ebeid, K.P. Rajurkar, et al. Electrochemical machining under orbital motion conditions[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001,109(3): 339-346.
- [7] B. Ghoshal, B. Bhattacharyya. Influence of vibration on micro-tool fabrication by electrochemical machining[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2013,64: 49-59.
- [8] TOMASZ Paczkowski, ADAM Troszynski. The effect of multidirectional vibration on electrochemical machining[J]. Manufacturing, 2018,22: 41-48.

(下转第 28 页)