

# 基于脉冲电源的金属电化学线切割工艺研究

朱晓龙,李湘生\*

(浙江理工大学 机械与自动控制学院,浙江 杭州 310018)

**摘要:**为了提高金属电化学线切割精度,将脉冲电源应用到切割加工中,根据电化学加工原理,并以切割缝宽为切割效果的评价标准,建立了脉冲电源切割理论模型,得出了影响缝宽变化的工艺参数,主要有:电源的电压幅值、脉冲宽度、占空比和进给速度等。并在此基础上对参数进行了优化加工实验。研究表明,在保证加工稳定的条件下,通过降低电压、调小脉冲宽度和占空比的方法,加工出的切割缝宽比直流电源加工出的缝宽明显减小,该方法将有望直接用于小尺寸零件的加工。

**关键词:**金属切割;电化学;脉冲电源;模型分析

中图分类号: TG662; TH16

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)07-0803-03

## Technological research of metal wire electrochemical cutting based on pulse power

ZHU Xiao-long, LI Xiang-sheng

(School of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Aiming at improving the machining precision and surface quality in metal wire electrochemical cutting, the pulse power was applied on cutting machine tool. A theory model based on the pulse power was established, whose evaluation criterion of cutting effects is the width of cutting width. Side width change was mainly affected by voltage, pulse width, duty cycle and feeding speed of tool cathode so on. The optimization of the parameters was tested. The experimental results show that the seam width which is processed by lowering the voltage, reducing pulse width and turning down the duty cycle is smaller than DC power processing width. It is possible to apply this method into processing of small size parts.

**Key words:** metal cutting; electrochemical; pulse power; model analysis

## 0 引 言

金属切割技术在现代机械制造业中占有相当大的比重,切割的质量和效率对机械加工制造影响重大。在生物医疗、航天航空、精密仪器等领域的较小尺寸零件的制造中,如何缩小加工的尺寸、提高加工精度和加工稳定性将会是业界不断探索创新的方向。现在的微细加工中,电火花加工电极损耗严重,损耗机理复杂,补偿困难。激光加工会出现再铸层、锥度等弊端,零件加工出的精度不理想。还有各种其他加工方法,材料的添加和去除是以微小团块的形式存在的,相比之下,

电解线切割是阳极金属在电解液中发生电化学反应失去电子变成金属离子,再以溶解离子的方式去除材料加工零件的。并且,电化学线切割具有多个原理上的优势:①它的加工效率较高;②由于阴极金属不发生化学反应;因而阴极损耗极少;③能切割高硬度的金属材料;④消耗的成本低<sup>[1]</sup>。因此,这种溶解离子去除材料的方式使电化学线切割技术在微小零件的加工制造中具有较大优势。目前用于电化学线切割的电源主要是直流电源,并用于零件毛坯的前期切割加工,切割缝宽大,精度较低,难以直接切割加工零件<sup>[2-4]</sup>;南京航空航天大学研究人员采用在线制造微细电极的方法,实现了微米尺度微小零件的加工;但把电化学线切割

收稿日期:2011-12-27

作者简介:朱晓龙(1988-),男,浙江金华人,主要从事快速成型技术、模具设计与制造方面的研究。E-mail:598400807@qq.com

通信联系人:李湘生,男,博士,教授,硕士生导师。E-mail:leexsh@zstu.edu.cn

用于小尺寸零件直接成形加工的研究较少。

本研究用脉冲电源替换原有直流电源进行金属电化学线切割<sup>[5]</sup>,以提高集中腐蚀能力,切割出的缝宽较直流电源更小,改善了加工精度。

## 1 金属电化学线切割技术原理

金属电化学线切割装置在加工时,脉冲电源的正极连接工件(阳极),脉冲电源的负极连接工具电极丝(阴极),两电极间保持较小间隙,并在加工区喷射电解液。在实验中,本研究采用  $\Phi 0.25$  mm 的导电紫铜丝作为工具电极丝材料。

加工原理及装置如图 1 所示。

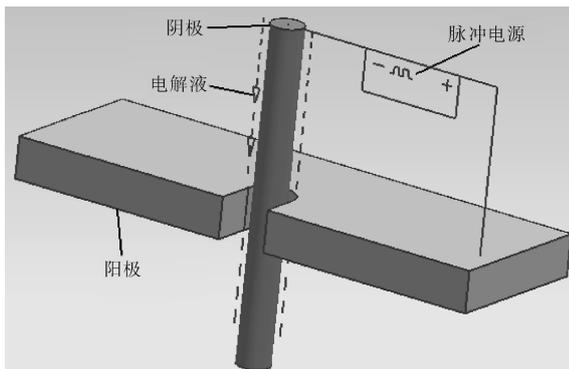
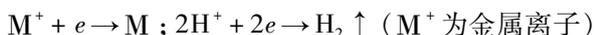
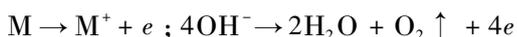


图 1 加工原理示意图

阴极上发生还原反应:



阳极上发生氧化反应:



## 2 脉冲电源下的切割缝宽模型分析

在电极反应过程中,影响加工间隙大小的因素主要是金属电极的浓差极化和电化学极化。本研究采用高频短脉冲电源加工时,工件是分段加工的,每段加工时间极短,有效地减少了金属离子在溶液中扩散层厚度,并且在脉冲间隔时间内利用电解液的流动冲刷使溶液浓度均匀,大大降低了浓差极化。因此本研究在脉冲电源条件下主要考虑电化学极化。根据电化学原理,浸入电解液中的金属电极表面同时存在着还原反应和氧化反应。电极电位处于平衡状态时,还原反应速度等于氧化反应速度,阳极金属的被氧化和被还原的量相等。宏观上看,阳极金属并未发生变化,但从微观上看,物质的交换始终不停地进行着,只是氧化、还原反应速度相等,达到了动态平衡。电极反应速度可用电流密度来表示<sup>[6]</sup>。

还原反应速度:

$$\hat{i} = i^0 \exp\left(\frac{\alpha n F}{R_g T_\alpha} \varphi\right) \quad (1)$$

氧化反应速度:

$$\hat{i} = i^0 \exp\left(\frac{\beta n F}{R_g T_\alpha} \varphi\right) \quad (2)$$

式中: $\alpha$ 、 $\beta$ —传递系数, $\alpha + \beta = 1$ ;  $F$ —法拉第常数; $n$ —电极反应中的电子数量; $R_g$ —气体常数; $T_\alpha$ —绝对温度; $\varphi$ —电极的过电位; $i_0$ —交换电流密度。

由上文分析可知,当采用脉冲电源时,基本可忽略浓差极化对电极的影响。因此通过控制电化学极化就能达到控制电极反应的目的。单位时间内电化学反应未能及时消耗流入电极的带电粒子,过量的带电粒子囤积在电极表面,破坏了可逆的平衡电极反应,产生极化电极电位。同时,电极上进行的电化学反应速度也受到极化电极电位的影响,例如:阳极极化会提高氧化反应的能量,加快氧化反应的速度,抑制还原反应的速度,即  $\hat{i} > \hat{i}$ 。因此,电极的总电流就等于氧化反应电流与还原反应电流之差。于是得到电化学极化方程式,也称为巴特勒-伏尔摩(Butler-Volmer)方程<sup>[7]</sup>:

$$i = i^0 \left[ \exp\left(\frac{\beta n F}{R_g T_\alpha} \varphi\right) - \exp\left(\frac{\alpha n F}{R_g T_\alpha} \varphi\right) \right] \quad (3)$$

当极化电流较大时,电极上的电化学反应平衡被破坏,产生较大电极电位, $\hat{i}$  和  $\hat{i}$  大小差值很大,其中一个可以忽略。阳极表面产生的电化学极化,由于  $\hat{i}$  远大于  $\hat{i}$ ,可忽略  $\hat{i}$ 。由式(3)可得:

$$i = i^0 \exp\left(\frac{\beta n F}{R_g T_\alpha} \varphi\right) \quad (4)$$

阳极溶解金属的体积  $V$  可根据法拉第第一定律和第二定律得到,公式如下:

$$V = \omega \cdot Q = \omega \cdot I \cdot t = \omega \cdot i \cdot \left(\frac{\pi}{2} dl\right) \cdot t \quad (5)$$

式中: $\omega$ —元素的体积电化学当量,即单位电量溶解的元素体积,  $\text{cm}^3 \cdot (\text{A} \cdot \text{s})^{-1}$ ;  $d$ —线电极直径,  $\text{m}$ ;  $l$ —工件厚度,  $\text{m}$ ;  $I$ —电极反应的电流强度,  $\text{A}$ ;  $Q$ —通过电极界面的电量,  $\text{A} \cdot \text{s}$ ;  $t$ —电流通过的时间,  $\text{s}$ 。

在电解线切割加工过程中,本研究使阴极线电极匀速进给,在时间  $\Delta t$  内,进给的位移相等为  $h$ 。将式(4)代入式(5)中,可以得出阳极金属在  $\Delta t$  时间内电化学反应溶解的体积量:

$$V = \frac{\pi \Delta t}{2T} \omega dl \int_0^{t_{\text{on}}} \exp\left(\frac{\beta n F}{R_g T_\alpha} \varphi\right) dt \quad (6)$$

$$V = hSl = v_t Sl \Delta t = v_t \varphi \frac{\pi(d + 2\Delta s)}{2} l \Delta t \quad (7)$$

由式(6,7)可得切割缝宽为:

$$S = \frac{i^0 \omega d}{TV_t} \int_0^{t_{\text{on}}} \exp\left(\frac{\beta n F}{R_g T_\alpha} \varphi\right) dt \quad (8)$$

由此可知,在采用高频脉冲电源进行电化学线切割加工过程中,影响切割缝宽大小的因素有:加工电源的参数(电压、脉冲宽度、脉冲周期)、线电极的进给速度、电解液参数的大小以及上述参数在加工过程中的稳定性。

### 3 金属电化学线切割加工实验研究

电化学线切割加工的两极不直接接触,而是留有一条微小的加工间隙,间隙内存在不断变化的电解液,无法通过溶解蚀除将工具电极的型面精确地复制到工件被加工面上,从而必须考虑重复精度和复制精度。因此电解加工精度的高低和加工间隙的大小密切相关<sup>[8-9]</sup>,在实际加工中要尽量减小缝宽来达到提高精度的目的。在用高频率脉冲电源电解加工时,其电源的加工工艺参数(如电压幅值、脉冲宽度和脉冲周期)直接影响加工精度、工件的表面质量和加工的稳定性等。

#### 3.1 电压对加工的影响

为了研究加工电压幅值对切割缝宽的影响,本研究进行以下实验来对比分析。实验参数:线电极均为直径 0.25 mm 的紫铜丝,工件材料为厚度 7 mm 的 45# 碳素结构钢,电解液为 14.6% NaCl 溶液,脉冲频率为 50 Hz,脉冲宽度为 8 ms,切割深度为 15 mm,电压幅值从 20 V 增大到 24 V,得到的电压幅值与平均缝宽关系图如图 3 所示<sup>[10]</sup>。

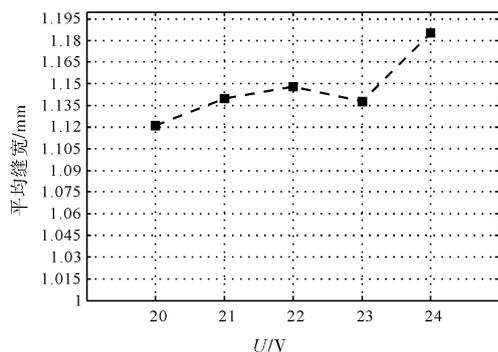


图3 不同电压幅值下缝宽变化图

从图3可知,切割缝宽随着加工电压的增大而逐渐变宽。这是因为电极的过电位与电压幅值成正比提高关系,导致电极的反应电流变大,扩大了工件上发生溶解蚀除的范围,阳极材料的电化学去除速度显著加快,定域性下降,杂散腐蚀变大,表面质量也会降低。所以为了获得较好的切割加工表面质量和精度,应该在保证稳定加工的前提下,尽量减少加工电压幅值。

#### 3.2 脉冲宽度对加工的影响

为了研究脉冲宽度对切割缝宽的影响,本研究使其他参数保持不变,脉冲宽度分别为 8 ms、10 ms、12 ms、14 ms。不同脉冲宽度下的平均缝宽大小如图4所示。

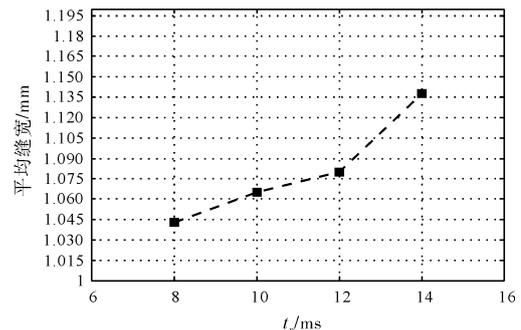


图4 不同脉冲宽度对切割缝宽的影响

在脉冲宽度内,脉冲电流对电极/溶液界面的双电层不断地充电,极化电极电位逐渐增大。脉冲宽度内电流持续时间非常短,极化电极电位未达到平衡状态就进入脉冲间隙,使极化电极电位迅速下降至零。所以电化学反应条件不断变化,总是处于暂态过程中。如果增加脉冲宽度,相当于在脉冲周期内延长双电层的充电时间。原来靠近线电极的可分解区域的极化电极电位将变大(甚至达到稳态过电位),会继续快速蚀除工件,但是充电时间的延长使原来分解区域外的电极电位也高于金属的分解电压并开始腐蚀工件,所以加工区域增大,定域性下降,因此脉冲宽度的调节直接反映了集中腐蚀区域的大小,应根据加工条件,尽量调低脉冲宽度,提高集中蚀除能力,从而减小切割缝宽。

#### 3.3 占空比对加工的影响

一个脉冲周期内分为两个时间段:一段为加有电压的脉冲宽度;一段为电压为零的脉冲间隙。在一个脉冲周期内脉冲宽度与脉冲间隙各自所占时间的比值就是占空比。脉冲电源电解加工时,本研究通过在脉冲宽度内产生电流来蚀除工件材料,在脉冲间隙内使电极去极化(浓差极化和电化学极化),并且利用电解液流动来带走加工产物,使加工能稳定地进行。为了研究加工脉冲占空比对切割缝宽的影响,本研究其他参数保持不变,占空比分别为 0.4、0.5、0.6 和 0.7。不同占空比下的平均缝宽的大小如图5所示。

由图5可知,占空比从 0.4 增大到 0.7 时,切割缝宽也逐渐增大。因为占空比的增大导致单位时间内给电极溶液界面的双电层充电的电量增加,即用于反应的电量增加,由法拉第第一定律可知,工件蚀除量也变

(下转第 813 页)

国电力出版社,2011.

- [2] 顾伯勤,李新华,田 争. 静密封技术[M]. 北京:中国标准出版社,2004.
- [3] 布赫特. 工业密封技术[M]. 北京:化学工业出版社,1988.
- [4] 王小刚. 管路锥形密封结构的稳健设计[D]. 绵阳:中国工程物理研究院,2009.
- [5] 冉光斌,张方晓. 双锥形管接头角度参数对管路密封的影响分析[J]. 环境技术,2005,23(2):4-6.
- [6] 潘仁度. 从分子密封学角度分析密封条件与泄露原因[J]. 润滑与密封,2006,31(1):172-173.
- [7] 杜平安,于亚婷,刘建涛. 有限元法:原理、建模及应用[M]. 2版. 北京:国防工业出版社,2011.
- [8] 张朝晖. ANSYS 12.0 结构分析工程应用实例解析[M].

3版. 北京:机械工业出版社,2010.

- [9] 屠胜立,张 宪. 膜式水冷壁焊接变形热弹塑性有限元分析[J]. 轻工机械,2011,29(5):11-13.
- [10] 朱红建. 基于 ANSYS 的粉料罐有限元分析及结构优化[J]. 现代制造技术与装备,2011(2):57-59.
- [11] TOM L, RALPH I G, LOIS M Y. Improved performance seals for pipeline applications [J]. **Lubrication Engineering**,2003,59(4):18-29.
- [12] YAN Hong-wei ,KOU Zi-ming, WU Juan, et al. Based on risk source pipe leakage emergency device and sealing method research [J]. **Advanced Materials Research**,2011(287-290):2834-2839.

[编辑:张 翔]

(上接第 805 页)

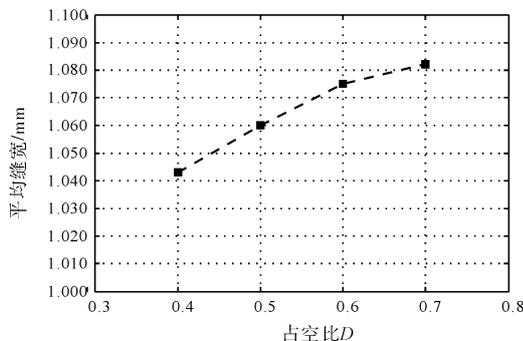


图5 不同占空比对切割缝宽的影响

大,而此时线电极进给速度保持不变,所以切割缝宽会增大。由以上分析可知,在保证加工稳定的条件下,要提高加工精度,可尽量减小加工脉冲电源的占空比。

### 3.4 与直流电源加工的对比分析

通过以上分析,本研究对脉冲电源的参数进行优化,同时进行直流电源的切割实验并加以对比。笔者将脉冲电压设置成 23 V,脉冲宽度设定为 8 ms,占空比设定为 0.5。其他主要参数及电解液与直流电源相同。脉冲电源加工出的工件切割缝宽在整个轨迹上的平均值为 1.536 mm,上下波动范围仅 0.12 mm。而直流电源的平均缝宽为 2.145 mm。因此本次脉冲电源工件切割加工在缝宽值上比直流电源加工减小了 0.609 mm,显著提高了加工精度,并且加工过程较稳定。

## 4 结束语

本研究用脉冲电源替换了解剖切割电源系统的直流电源,分析了脉冲电源切割的理论缝宽模型,并进行了切割实验,实验结果表明采用脉冲电流进行电化学

线切割可以有效地缩小切割缝宽,在脉冲电流条件下,电源的电压、脉冲宽度和占空比对切割缝宽有显著的影响。其实验规律验证了本研究对加工机理的分析。

在上述工作基础上,对于如何提高切割加工的稳定性以及采用更高频率的脉冲电源来进一步缩小切割缝宽,从而提高精度,还有待作进一步的研究。

### 参考文献(References):

- [1] 徐家文. 电化学加工技术—原理·工艺及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [2] 相 奎,李湘生,程 松,等. 金属电化学线切割工艺参数优化分析[J]. 机械工程师,2010(8):6-10.
- [3] 陈里龙,李湘生,李高飞,等. 金属电化学线切割加工装置的设计及其实现[J]. 机械工程师,2009(11):8-10.
- [4] 陈里龙. 金属电化学快速线切割技术研究[D]. 杭州:浙江理工大学机械与自动控制学院,2010.
- [5] 王建业. 脉冲电解加工技术在精微加工领域中的新发展[J]. 中国机械工程,2007,18(1):114-119.
- [6] 王凤平. 腐蚀电化学原理、方法及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [7] 杨 辉,卢文庆. 应用电化学[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [8] 范植坚. 电解加工技术及其研究方法[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [9] 范植坚. 电解加工测试方法的研究进展[J]. 电加工与模具,2005(5):1-4,11.
- [10] 郑冀鲁. Matlab 与化学—作图、计算与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2009.

[编辑:张 翔]