

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.12.009

# 基于多工位的微细长槽电解加工的试验研究

王 龙, 李湘生\*, 吴林烽

(浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 针对如何提高微细长槽批量加工的成型精度和效率问题, 将电解加工的技术应用到微细长槽的批量加工中。依据电解加工原理, 以微细长槽加工的复制精度为评价指标, 建立了微细长槽成型精度的模型分析, 得出了影响成型精度的主要因素有: 底面间隙、侧面间隙和间隙内流场均匀性, 并以此为基础, 分别进行了不同加工方式和阴极刀具进给速度的试验。研究结果表明, 采用群电极倾斜并沿槽纵向移动的加工方式, 以及在保证加工稳定的前提下通过提高阴极刀具的移动速度, 可以提高微细长槽的成型精度和加工效率; 该方法对于微细长槽的批量加工具有一定的指导意义。

**关键词:** 电解加工; 多工位加工; 加工精度; 微细长槽

**中图分类号:** TH16; TG661 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2013)12-1485-05

## Electrochemical machining examination based on multistage minute elongated slot

WANG Long, LI Xiang-sheng, WU Lin-feng

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

**Abstract:** Aiming at the problem of increasing the molding precision and efficiency in batch processing of minute elongated slot, the electrochemical machining technology was applied to process minute elongated slot. Based on the principle of electrochemical machining, the molding precision model of minute elongated slot was established, and judged by its accuracy of replication. Consequently, the factors that had influence on molding precision were listed as follows: surficial gap, slide gap and internal flow field variation. According to the analysis above, the corresponding machining experiments on different processing methods and feeding speed of the cathode tool were conducted. The experimental results indicate that the molding precision and efficiency of minute elongated slot are increased by tilting multistage cathode to traverse longitudinally along the groove. In addition, the results also indicate that increasing the feeding speed of cathode tool is helpful to the molding precision and efficiency of minute elongated slot in the context of machining stability. Thus, the method above is important and significant to the batch processing of minute elongated slot.

**Key words:** electrochemical machining (ECM); multi processing; machining accuracy; minute elongated slot

## 0 引 言

在生物医疗、精密仪器、航空航天等领域, 存在着大量的微细长槽结构, 如何提高其成型精度、加工效率和控制成本, 成为该类结构加工的技术难点。

目前, 微细长槽的加工方法主要有: 微细电火花加工、激光加工、线切割和电解加工等<sup>[1]</sup>。电火花加工

效率很低, 微小工具电极制造成本高且易损耗; 激光加工精度低, 表面质量不理想; 线切割加工效率较低, 无法进行多工位加工<sup>[2]</sup>。此外, 上述几种加工方式是材料的热熔化过程, 加工表面会出现熔凝层、热影响区和热应力等缺陷<sup>[3]</sup>。电解加工过程中, 材料以离子的形式去除, 所以可达到较好的表面粗糙度; 它又是一种非接触式加工技术, 工具电极理论上不存在损耗, 加工表面不会产生冷作硬化层、热再铸层<sup>[4]</sup>。因此

收稿日期: 2013-08-19

作者简介: 王 龙(1988-), 男, 浙江台州人, 主要从事特种加工方面的研究。E-mail: leexsh2000@163.com

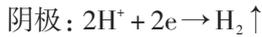
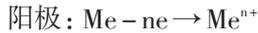
通信联系人: 李湘生, 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: 304799648@qq.com

采用电解加工进行微细长槽的加工,对于提高成型精度和效率意义重大。

本研究以医用针头(材料为不锈钢1Cr18Ni9Ti)为对象,采用群电极进行多工位微细长槽的电解加工试验,探讨阴极刀具不同进给方式和速度对加工表面成型精度的影响,并以复制精度和加工效率作为评价指标,以满足大批量加工的要求。

## 1 试验原理及装置

电解加工(ECM)是指基于电化学溶解蚀除的原理实现零件成型加工的制造技术<sup>[5]</sup>。即阳极金属不断失去电子发生阳极溶解,而阴极表面得到电子析出氢气,其电化学反应方程式如下:



微细长槽电解加工时,工具电极(阴极)连接电源负极,工件(阳极)连接电源正极,工件与工具阴极之间保持必要的加工间隙,加工过程中其间充满电解液。

多工位微细长槽电解加工在自行研制的电解加工机床上进行,其示意图如图1所示。

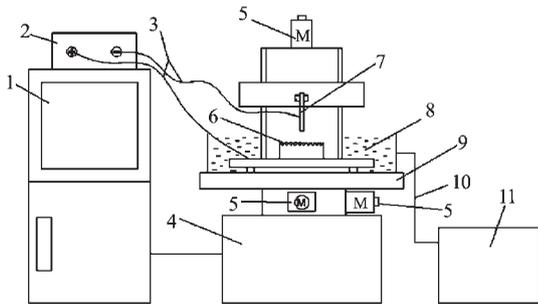


图1 电解加工机床示意图

1—控制柜;2—高频脉冲电源;3—阴阳极连接线;4—机床底座;5—X、Y、Z轴伺服电机;6—组合多工位夹具;7—阴极电极;8—电解液;9—电解加工台;10—电解液供液和回流装置;11—电解液池

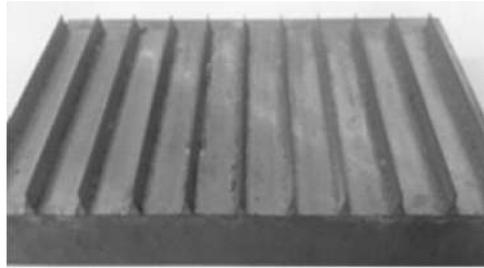
多工位夹具如图2(a)所示,单次可装夹19根工件。本研究中电解加工的长槽尺寸较小,单根阴极刀具的侧面无法进行绝缘处理,所以采用如图2(b)所示的侧面不绝缘的群电极,单个电极宽度为0.19 mm。

## 2 工件成型精度的模型分析

电解加工是在外加电场和加工间隙内电解液流场等多因素复合作用下进行的,电源参数(如加工电压、脉冲频率、脉冲宽度等)会引起被加工面的二次腐蚀而影响工件的成型精度。电解液参数(如温度、电导率、气泡率)因流场沿程变化从而影响槽纵向尺寸



(a) 多工位夹具



(b) 群电极

图2 多工位夹具、群电极

的一致性。

### 2.1 侧面间隙对成型精度的影响

由电化学反应原理可知,电解液流经阳极表面并有电流通过时,该处就可能发生溶解反应,即发生了杂散腐蚀,最终会影响工件的成型精度,其原因是阴极电极和阳极工件之间加工间隙内电场分布的特点所引起的。在微细长槽电解加工的过程中,存在底面间隙和侧面间隙,电解加工的原理决定了底面间隙主要影响工件横截面的复制精度;而侧面间隙主要影响纵截面的成型精度,产生侧面间隙的主要原因为杂散腐蚀<sup>[6]</sup>。因此在加工过程中,必须减小杂散腐蚀对成型精度的影响。

加工过程截面示意图如图3所示,根据底面间隙的公式<sup>[7]</sup>:

$$\Delta_{\theta} = \eta \omega \kappa \frac{U - \delta E}{v_{\theta}} = \frac{C}{v_{\theta}} \quad (1)$$

式中: $\theta$ —工具阴极进给速度与工件法向溶解速度的夹角, $\Delta_{\theta}$ —工件在 $\theta$ 处的法向平衡加工间隙, $\eta$ —电流效率, $\omega$ —体积电化学当量, $\kappa$ —电解液的电导率; $U$ —阴极与阳极之间的外部电压, $\delta E$ —阴极和阳极的极化电位总值, $v_{\theta}$ —工件在 $\theta$ 处的电解腐蚀速度,

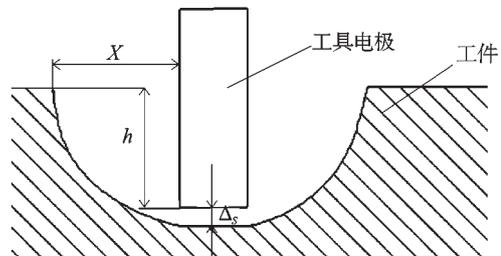


图3 窄槽电解加工过程截面图

C—双曲线常数。

假设进给深度  $h=vt$  时侧面间隙为  $\Delta_s=x$ , 则此处电解速度为  $\eta\omega k(U-\delta E)/x$ , 经过  $dt$  时间后, 该处的侧面间隙产生一个增量  $dx$ , 如下式所示:

$$dx = \frac{\eta\omega k(U-\delta E)}{x} dt \quad (2)$$

对式(2)积分并根据公式(1)可得侧面间隙的表达式如下:

$$\Delta_s = x = \Delta_b \sqrt{\frac{2h}{\Delta_b} + 1} \quad (3)$$

根据式(3)可得:

侧面间隙  $\Delta_s$  与加工深度  $h$  和底面间隙  $\Delta_b$  有关。加工深度  $h$  一定时, 则取决于  $\Delta_b$ , 当  $\Delta_b$  减小, 侧面间隙  $\Delta_s$  随之减小。此外, 当底面间隙  $\Delta_b$  减小, 电解加工的定域性增加, 从而提高成型精度<sup>[8]</sup>。但应避免底面间隙小于下限, 否则加工过程中会产生电火花和短路等不稳定现象。

### 2.2 加工间隙内流场对长槽一致性的影响

在电解加工间隙内, 基于电解液介质存在的电场对工件成型规律起决定性作用。间隙内电解液的成分主要为: 阴极处产生的气体、阳极溶解产生的絮状沉淀物以及电解液。工具阴极以径向进给方式加工时, 间隙内电解液流场模型如图4所示。因为絮状沉淀物的含量相对较低, 可忽略其对电导率和电流密度的影响, 从而可将加工间隙内的流场模型简化为气液两相流模型<sup>[9]</sup>。其中, 槽深的成型规律取决于间隙内电解液的气泡率和沿程流场的温度变化。

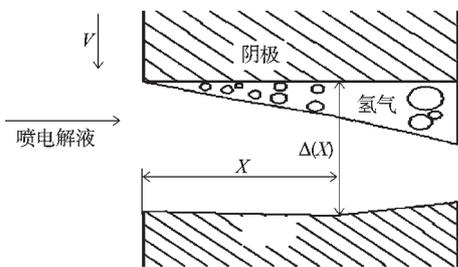


图4 工具阴极径向进给加工, 间隙内电解液流场模型

加工间隙内流场的气泡率  $\beta$  和温度  $T$  沿流程变化的公式如下<sup>[10]</sup>:

$$\beta = \frac{b_g R_g T x}{b_g R_g T x + \Delta_0 u_0 p} \quad (4)$$

$$T = T_0 + a_T x \quad (5)$$

式中:  $R_g$ —氢气的气体状态参数,  $\kappa$ —电解液电导率,  $x$ —电解液的流程,  $\Delta$ —电极间间隙,  $\mu$ —流速,  $p$ —压力,  $\rho_l$ —电解液密度,  $C_l$ —电解液热容,  $\eta_g$ —析氢的电流效率,  $k_g$ —析氢的质量电化当量,  $i$ —电流密度,  $U_R$ —加工间隙中电解液上的欧姆降压。

参数有下标“0”为间隙进口参数, 其中:

$$b_g = \eta_g k_g i, a_T = U_R i / \rho_l C_l u_0 \Delta_0, \Delta_0 = U_R \kappa_0 / i。$$

由式(4,5)可得, 沿电解液流程方向, 电解液温度线性增加, 气泡率成二次方增加, 则电解液沿程的电导率发生变化使得间隙内的流场不再符合均匀流场的要求, 随着电解加工的进行, 槽纵向各处加工间隙不一致, 影响了工件的成型精度。

本研究在兼顾加工效率和成型精度的前提下, 缩短工具阴极的长度, 采用倾斜阴极刀具并沿电解液流动的反向水平移动来进行加工, 示意图如图5所示。缩短电解液的流程以降低气泡率和温度沿程变化对工件成型精度的影响。

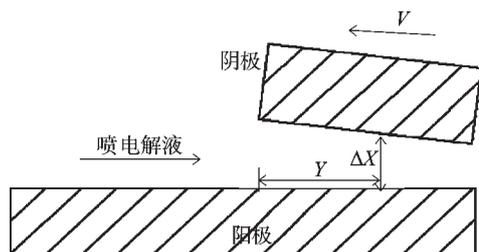


图5 倾斜阴极刀具加工示意图

## 3 试验结果及分析

试验中其他可变参数为: 电解液为 5% 的  $\text{NaNO}_3$  溶液, 沿槽纵向供给; 采用频率为 500 Hz 的脉冲电源, 加工电压为 5 V 恒压; 初始加工间隙为 0.1 mm; 单次试验加工 11 根工件。

### 3.1 进给方式对加工精度的影响

为研究不同进给方式对成型精度的影响, 笔者进行了如下两组对比试验:

(1) 试验一: 采用阴极刀具沿工件径向连续进给方式加工, 进给速度为 0.06 mm/min, 阴极刀具长度为加工槽长, 试验数据如表 1 所示。

表1 试验一工件尺寸

工位编号	槽宽/ $\mu\text{m}$	槽深/ $\mu\text{m}$
1	573.1	251.4
2	581.2	255.0
3	584.3	256.4
4	576.0	253.7
5	594.1	264.8
6	579.6	253.1
7	583.5	254.3
8	590.8	257.3
9	586.7	255.2
10	589.3	254.6
11	574.4	251.1

(2) 试验二:采用阴极刀具沿细长槽纵向移动,并调整阴极刀具使之与夹具平面所成夹角的对应边长等于加工深度。阴极刀具长度为55 mm,为保证工件上同一点加工时间与试验一的相同,移动速度为14 mm/min。试验数据如表2所示。

表2 试验二工件尺寸

工位编号	槽宽/ $\mu\text{m}$	槽深/ $\mu\text{m}$
1	531.9	254.2
2	532.1	255.7
3	542.0	257.4
4	536.4	255.3
5	546.6	260.5
6	533.6	253.1
7	540.3	256.9
8	541.7	259.7
9	529.8	251.6
10	532.1	253.8
11	535.7	254.6

上述尺寸均由槽中点处测得,相同速度、不同进给方式的试验加工如图6所示。根据图6可得,两组试验的槽深相差1%,试验二的槽宽比试验一减小8%;试验二的槽深、槽宽的方差比试验一分别减小45.9%、39.5%。

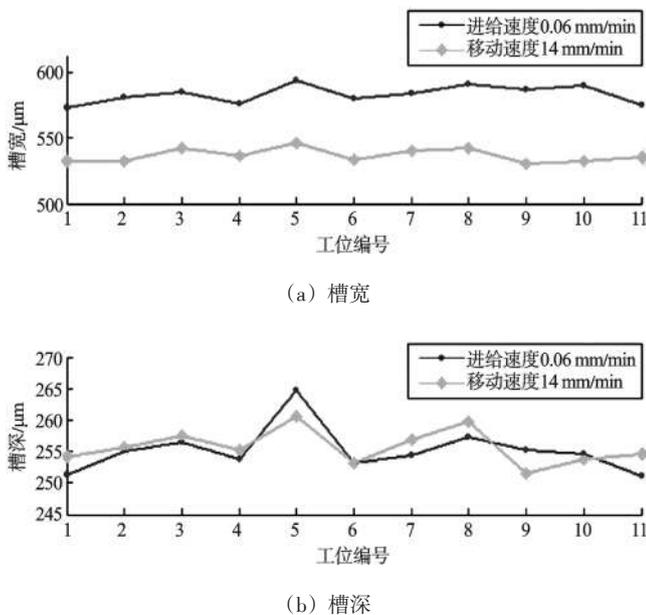


图6 相同速度,不同进给方式的试验加工

试验中的初始加工间隙较小,则对电解液的流动特性要求更高,试验一的电解液流程较试验二长37.5%,电解产物、析热、析氢等沿程积累导致加工电流易超过阈值,阴极刀具快速回退,加工时间增加,根据法拉第定律:

$$M = kIt \tag{6}$$

式中: $M$ —溶解的金属质量,g; $k$ —单位电量溶解的元素质量, $\text{g}/(\text{A}\cdot\text{s})$ 或 $\text{g}/(\text{A}\cdot\text{min})$ ; $I$ —电流强度,A; $t$ —电流通过的时间,s或min。

金属的溶解量与时间成正比。试验一的加工总时间平均为试验二的1.5倍,即槽侧面的二次腐蚀时间增加而导致试验一的槽比试验二宽8%,影响了槽的复制精度。

通过测量得试验二工件前端、中点、末端槽深尺寸偏差范围为0.01 mm,测量试验一工件前、后端的槽深如表3所示,试验一前端、中点(如表1所示)、末端3点的槽深较试验二分别深0.74%、-0.2%、-1.01%,说明试验二的加工方式下,槽深一致性更好。

表3 试验一工件不同点处槽深尺寸

工位编号	前端/ $\mu\text{m}$	末端/ $\mu\text{m}$
1	257.3	254.3
2	259.4	249.8
3	256.8	257.6
4	258.4	245.2
5	253.1	252.6
6	257.6	254.6
7	259.3	253.7
8	256.6	252.6
9	264.5	258.3
10	254.7	251.7
11	256.3	253.6

随着电解液流程的增加和电解反应的进行,沿程的电导率、电流密度都会降低<sup>[11-12]</sup>,而且在试验一流程的末端,电解液压力骤然减小,会出现紊流现象,上述因素共同作用使试验一中槽深不一致;试验二中阴极刀具沿槽纵向移动,槽深取决于阴极刀具的倾斜末端,倾斜的阴极刀具在电解液流程末端形成背压,改善了电解液的紊流现象,使电解液沿程较为均匀,利于提高槽深的一致性。

所以,相比试验一的加工方式,采用试验二的加工方式可以提高槽的复制精度和加工效率,而且降低了出现火花、短路的次数从而提高加工的重复精度。

### 3.2 速度对加工精度的影响

试验二的加工方式可以提高微细长槽的成型精度,但加工效率依旧不够高。有研究表明,一定幅度地提高阴极刀具进给速度,能在缩小加工间隙以提高工件成型精度的同时提高加工效率。不同加工速度下对槽宽与槽深的影响如图7所示。

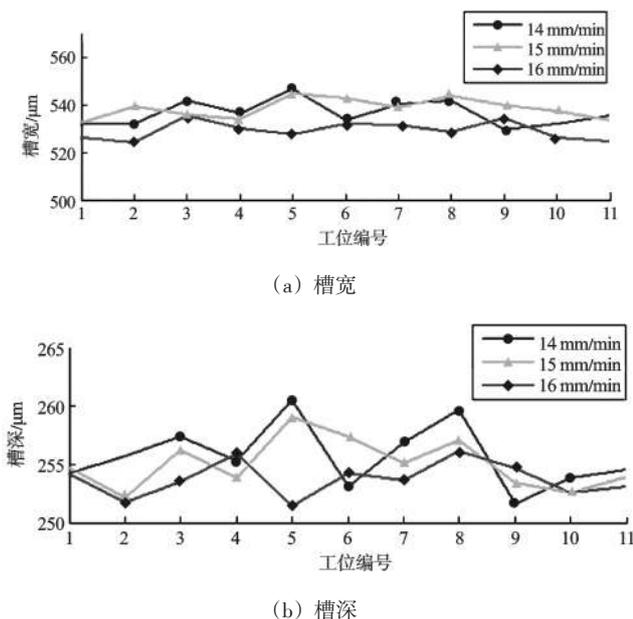


图7 阴极刀具不同移动速度的试验对比

阴极刀具不同移动速度、同组工件方差如图8所示。

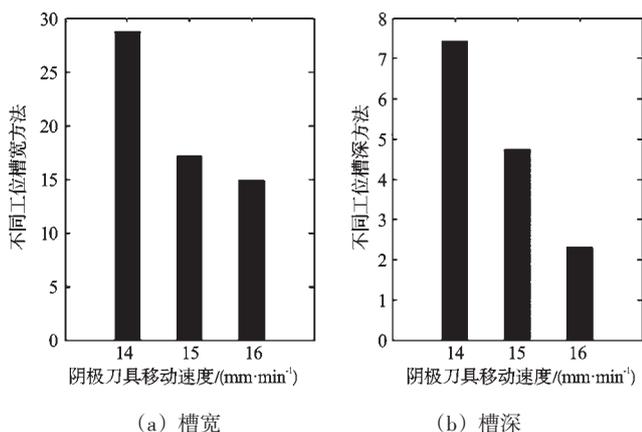


图8 阴极刀具不同移动速度、同组工件方差

图8中,随着阴极刀具移动速度的增加,槽深和槽宽都变小,同组试验工件的槽宽、槽深的方差也减小。随着阴极速度增加,根据公式(1)得加工间隙变小,则电解加工的定域性相应增加;阴极移动速度增加,加工时间缩短,则对槽侧壁的二次腐蚀程度降低,提高了工件的成型精度。

### 4 结束语

为了提高微细长槽批量加工的成型精度和效率,本研究进行了多工位微细长槽的电解加工实验研究,发现相对于沿槽径向进给的加工方式,采用沿槽纵向移动的方式加工和提高阴极刀具的移动速度,降低了二次蚀除对槽成型精度的影响,在很大程度上改善了因电解液沿程均匀性变化和温升对槽深一致性的影响,减小了同组工件尺寸的方差。

此外,本研究在提高加工效率的同时,得到了更好的复制精度,使得大批量加工微细长槽成为可能。

### 参考文献 (References):

- [1] 朱鹏翔,干为民,许 越. 整体叶轮叶间槽数控电解加工的试验研究[J]. 机械制造,2013,51(2):52-54.
- [2] 诸跃进,闫 伟,张卫华,等. 工作液对电解电火花复合加工工艺效果影响的试验研究[J]. 苏州科技学院学报,2013,26(1):76-80.
- [3] 朱晓龙,李湘生. 基于脉冲电源的金属电化学线切割工艺研究[J]. 机电工程,2012,29(7):803-805.
- [4] 王 磊,朱 荻,曲宁松,等. 微细群孔电解加工试验研究[J]. 机械科学与技术,2006,25(2):52-56.
- [5] 曹凤国. 电化学加工技术[M]. 北京:北京科学技术出版社,2007.
- [6] 张朝阳,朱 荻. 微细电解加工的精度及定域性研究[J]. 机械科学与技术,2006,25(2):242-245.
- [7] 王建业,徐家文. 电解加工原理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2001.
- [8] 徐家文,云乃彰,王建业,等. 电化学加工技术[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [9] 朱晓龙. 电解窄槽类工件的加工规律研究[D]. 杭州:浙江理工大学机械与自动控制学院,2013.
- [10] 范志坚,王天诚. 电解加工技术及其研究方法[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
- [11] 张长富,王发光,张 涛. 小型磁驱动电解加工机床的结构设计[J]. 组合机床与自动化加工技术,2012(9):91-93.
- [12] 王明环,刘望生,彭 伟. 螺旋深小孔电解加工间隙多相流场特性及实验研究[J]. 兵工学报,2013,34(6):748-753.

[编辑:张 翔]

### 本文引用格式:

王 龙,李湘生,吴林烽. 基于多工位的微细长槽电解加工的试验研究[J]. 机电工程,2013,30(12):1485-1489.

WANG Long, LI Xiang-sheng, WU Lin-feng. Electrochemical machining examination based on multistage minute elongated slot[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2013,30(12):1485-1489. [《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn](http://www.meem.com.cn)