

文章编号 1004-924X(2009)11-2738-06

基于线电极原位制作的微细电解线切割加工

王 昆¹, 朱 荻²

(1. 同济大学 机械工程学院, 上海 200092;
2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:微细电解线切割加工是一种微细加工新方法。为了提高加工精度,该方法将微米尺度线电极的制作与后续加工集成在一个工艺系统中完成,进行了基于线电极原位制作的微细电解线切割加工技术的研究。从理论上分析了线电极直径大小对微细电解线切割加工精度的影响,提出了原位制作微米尺度线电极的方法,并制作出直径为 $5\ \mu\text{m}$ 的钨丝线电极。通过试验,加工出缝宽为 $20\ \mu\text{m}$ 左右的微型浆叶结构和曲率半径在 $1\ \mu\text{m}$ 以下的微细尖角结构。试验结果表明:线电极的原位制作技术能提高微细电解线切割的加工精度,工艺兼容性好,能满足微米尺度微细结构的加工要求。

关键词:微细电解线切割加工;线电极;原位制作

中图分类号:TG662 **文献标识码:**A

Wire electrochemical micro machining by using in situ fabricating wire electrode

WANG Kun¹, ZHU Di²

(1. *College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;*
2. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*)

Abstract: Wire Electrochemical Micromachining (WEMM) is a new method of micro fabrication. In order to improve the machining accuracy, the in situ fabrication of a wire electrode and the following process of the WEMM are integrated into one system, and the WEMM technology by using in situ fabricating wire electrode is investigated in this paper. Effects of the diameter of wire electrode on the machining accuracy of WEMM are investigated theoretically. Then, the in situ fabrication of wire electrode is proposed to fabricate a micro meter scale wire electrode, and the tungsten wire electrode with a diameter of $5\ \mu\text{m}$ is electrochemically fabricated in situ for the production of micro structures. Micro blades with a slit width of $20\ \mu\text{m}$ and micro sharp-angle structures with a radius of $1\ \mu\text{m}$ are machined experimentally. Experimental results indicate that because of the compatibility of the technologies, the in situ fabrication of wire electrode can improve the machining accuracy of WEMM, and the micrometer scale structures can be fabricated.

Key words: wire electrochemical micro-machining; wire electrode; in situ fabrication

收稿日期:2008-09-24;修订日期:2008-11-26.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50575105);同济大学青年优秀人才培养行动计划资助项目(2008KJ024)

1 引 言

微细电解加工是基于电化学离子去除原理来微量溶解工件的技术, 理论上可以达到纳米级的加工精度。微细电解加工是非接触加工, 表面质量好, 无工具损耗, 是理想的微细加工方法之一。当采用超短脉冲电流时, 加工间隙可缩小到微米级, 可以实现微米、亚微米级精度的加工, 能够满足微细加工的要求^[1-10]。

微细电解线切割加工技术是最近出现的一种微细加工新方法^[11-13], 它是微细电解加工技术和线切割加工思想的完美结合, 因其低成本高效率的特点倍受同行关注。和微细电火花线切割相比, 它的线电极没有损耗, 所以原理上可以使用直径更小的线电极, 切割加工的精度也会随之提高。但是, 定位在加工系统中的微米尺度线电极较难保持一定张力, 而且在加工短路中容易损坏。为了解决此问题, 本文提出了基于线电极原位制作的微细电解线切割加工方法, 在加工系统中集成微米尺度线电极的原位制作模块, 使线电极在电极制作和后续加工的整个过程中位置保持不变, 从而大大提高了微细电解线切割的加工精度。

本文首先从理论上分析了线电极直径大小对微细电解线切割加工精度的影响, 提出了原位制作微米尺度线电极的方法。通过电解线切割加工试验, 加工出缝宽为 20 μm 左右的微型浆叶结构和曲率半径在 1 μm 以下的微细尖角结构。

2 加工原理

微细电解线切割加工是利用金属在电解液中发生电化学阳极溶解的原理, 通过线电极的数控运动将工件切割加工成形的。当采用超短脉冲电流时, 加工间隙可缩小到微米级, 可加工两维复杂形状、高深宽比的微小零件和各种形状的微细缝槽, 其加工原理如图 1 所示。

在微细电解线切割加工过程中, 线电极的进给运动采用恒速间歇性进给方式, 即在单位时间内 Δt 进给确定的位移 h。单位时间 Δt 前后间隙状态的变化如图 2 所示。

图 2 描述了在加工过程中 T=t 和 T=t+Δt 相邻时刻间隙的对比状态, 图中 d 是微米尺度线

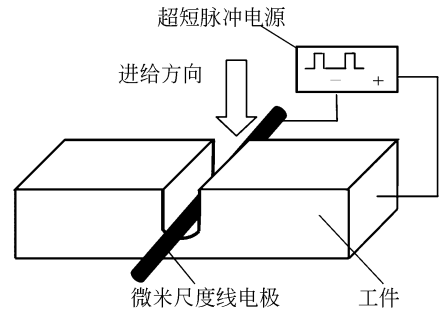


图 1 微细电解线切割加工原理图

Fig. 1 Block diagram of wire electrochemical micromachining

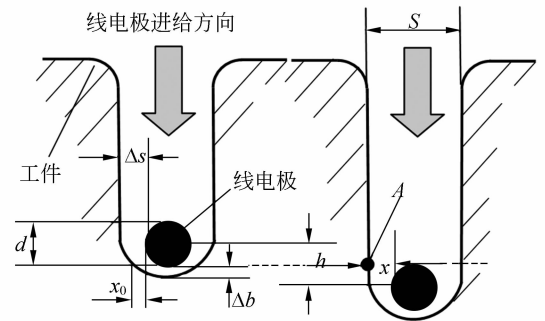


图 2 加工过程中间隙状态对比图

Fig. 2 Sketch of gap in machining process

电极的直径, S 是切割缝宽, Δ_b 是电解加工端面间隙, Δ_s 是电解加工侧面间隙, v_c 是线电极进给速度。

设在 A 点处的加工侧面间隙为 x, 则在 A 点处的金属蚀除速度 v_A 为:

$$v_A = \frac{dx}{dt} = \frac{\eta\omega\sigma U}{x}, \tag{1}$$

得:

$$x dx = \eta\omega\sigma U \cdot dt, \tag{2}$$

式中 η 为电流效率, ω 为电化学当量, σ 为电导率, U 为加工电压。当 Δt=0 时 x=x₀, 解式(2)得:

$$\frac{x^2}{2} = \eta\omega\sigma U \cdot \Delta t + \frac{x_0^2}{2}, \tag{3}$$

根据电解加工基本理论, 线电极的平衡进给速度为:

$$v_c = \frac{\eta\omega\sigma U}{\Delta_b}, \tag{4}$$

当线电极进给量 h 满足以下情况的:

$$h = v_c \cdot \Delta t, \tag{5}$$

可得:

$$x_0 \approx \Delta_b, \tag{6}$$

$$\Delta_s = x, \quad (7)$$

从式(3)到(7)计算可得:

$$\Delta_s \approx \Delta_b \sqrt{\frac{2d}{\Delta_b} + 1}, \quad (8)$$

因此,得到加工缝宽 S :

$$S = d + 2\Delta_s \approx d + 2\Delta_b \sqrt{\frac{2d}{\Delta_b} + 1}, \quad (9)$$

从式(8)、(9)可以看出线电极直径大小对侧面间隙以及加工缝宽的大小具有决定性的影响,而加工缝宽越小,加工精度也会越高。因此,为了提高微细电解线切割的加工精度,应该尽可能地减小线电极的直径。

3 加工系统

微细电解线切割加工系统包括运动系统、加工检测系统、线电极原位制作装置、超短脉宽电源、电解液系统和加工控制系统,如图 3 所示。

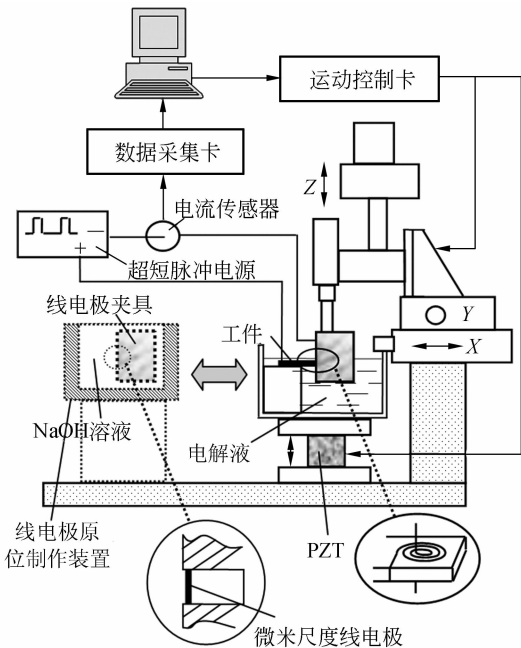


图 3 微细电解线切割加工系统示意图

Fig. 3 Framework of experimental system

(1)运动系统采用运动控制卡控制高精度三轴运动平台,实现 X - Y - Z 3 个方向加工的伺服进给,此外采用压电陶瓷产生微小幅度的低频振动传递给工件,排出微尺度间隙中的加工产物,提高加工稳定性;(2)线电极原位制作系统由线电极、线电极夹具和线电极在线制作模块组成,线电极两端固

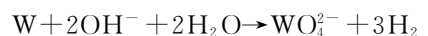
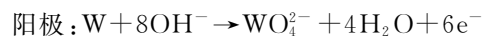
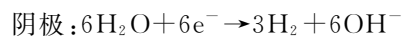
定在夹具中,定位在加工系统的 Z 轴上;(3)加工检测系统由对刀电路和加工过程检测电路组成。加工过程中电流的变化直接反映着加工所处的状态,加工电流的检测和由此作出的控制策略是保证电解加工精度的必要环节;(4)工件固定于电解液槽内,当 XY 工作台运动时,线电极就相对于工件做二维的切割运动。电解液采用酸性溶液,工件阳极在电解加工过程中的产物可以溶解在电解液中,不会由于生成沉淀物堵塞加工间隙,阻碍电解反应的继续进行。(5)在加工过程中,加工控制系统对以上各个加工子系统进行控制,把它们有机结合成一个完整的系统,实现工艺目标。

4 线电极原位制作

对于直径在 $20 \mu\text{m}$ 以下的微细线电极,其定位、装夹和加工都比较困难。为了提高加工精度,必须将电极制作和工件加工统一在微细电化学加工系统中连续完成,不但解决了微细电极的制作和装夹问题,而且工具和工件安装后不必拆卸,能够有效的减少误差的产生。

本文提出了一种基于电化学腐蚀原理原位制作微米尺度线电极的新方法,不但解决了微细线电极制作和装夹的问题,而且工具和工件安装后不必拆卸,能够有效地减少误差,工艺兼容性好,对于提高微细加工精度十分有利。选用能够承受一定短路电流的钨丝作为线电极,实时测量钨丝自身电阻变化来控制它腐蚀到所需的尺寸。利用电化学反应原理进行线电极在线制作,实验装置原理如图 4 所示,包括两个部分:加工回路和测量回路。

加工回路中,待加工钨丝为阳极,承载 NaOH 溶液的不锈钢圆筒为阴极。钨丝装在夹具上,并使钨丝定位在不锈钢圆筒的中心线上。在阳极和阴极之间通电后,电化学反应开始进行,阴极不锈钢圆筒上有气泡(H_2)冒出。钨丝在强碱溶液中发生电化学反应,被氧化成 WO_4^{2-} 离子进入溶液,从而使钨丝被溶解,阴阳两极发生的电化学反应如下:



测量回路由测量电源、钨丝及其导电夹具、电

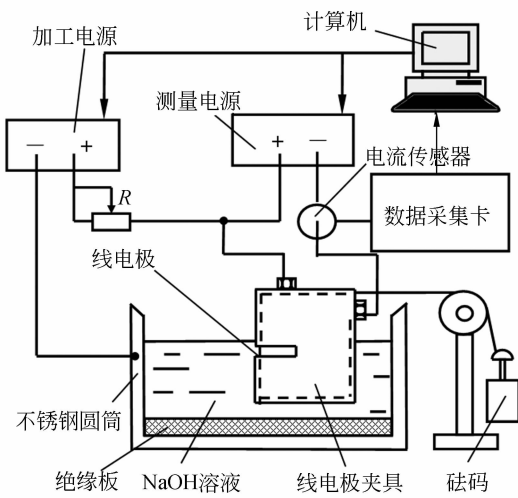


图 4 线电极原位制作原理图

Fig. 4 Block diagram of wire electrode in situ fabrication

流传感器、数据采集卡和计算机组成。测量电源输出加在整个钨丝的两端的恒定电压。电流传感器将溶解中的钨丝的电阻变化实时反映成测量回路中的电流变化。传感器可将毫安级的小电流线性放大成相应的电压值输出给数据采集卡,并最终由计算机实时计算出钨丝的电阻变化,进而能获得实时的钨丝直径估计值。

对微细钨丝进行电化学腐蚀的关键问题就是要有一套精密的直径检测装置,能够在加工过程中不断检测钨丝直径的变化。而钨丝电阻的大小即反映腐蚀过程中钨丝直径的变化,进而进行精确的尺寸控制。其测量原理如下:

根据电阻定律:

$$R = \rho \frac{L}{S} = \rho \frac{L}{\frac{\pi}{4} d^2}, \quad (9)$$

式中, R 为钨丝的电阻; ρ 为钨丝的电阻率; L 为钨丝的长度; S 为钨丝的截面积; d 为钨丝的直径。所以,随着钨丝被腐蚀,其电阻慢慢变大,电阻变化量为:

$$\Delta R = \rho \frac{L}{\frac{\pi}{4} d_i^2} - \rho \frac{L}{\frac{\pi}{4} d_0^2}, \quad (10)$$

式中, d_i 为钨丝在腐蚀加工 t 时刻的直径; d_0 为钨丝的初始直径。电阻变化量又可用测量回路中的电流变化来表示:

$$\Delta R = \frac{V}{I_i} - R_0, \quad (11)$$

式中, V 为测量电源的恒定电压; I_i 为测量回路中

t 时刻的电流; R_0 为钨丝的初始电阻,合并式(10)、(11)得:

$$d_i = \frac{1}{\sqrt{\pi \left(\frac{V}{I_i} - R_0 \right) + \frac{1}{4\rho L}}}, \quad (12)$$

由式(12)可知,腐蚀过程中测量回路电流的变化能准确地表征出钨丝直径的变化,并且两者成指数关系。

需要说明的是,实际测量是浸在碱溶液中进行的,因此测出的电阻 R 应为钨丝和钨丝周围电解液的并联等效电阻。由于电解液的电阻率远远大于金属的电阻率,故并联部分的电解液电阻可忽略不计。

线电极制作试验采用初始直径为 $10 \mu\text{m}$ 的钨丝为原料,电解液为 2 mol/l NaOH 溶液。线电极直径测量值随电流变化如图 5 所示。由图 5 可知,电流值的变化与钨丝自身的电阻值变化一一对应。腐蚀加工刚开始时,由于钨丝表面有一层很薄的氧化层,它在 NaOH 溶液中会慢慢腐蚀掉,这段时间的钨丝的电阻变化很小,所以对应的测量回路电流的变化也很小。腐蚀加工结束时,钨丝自身的电阻直线下降,迅速达到目标直径。线电极在线制作结果如图 6 所示。

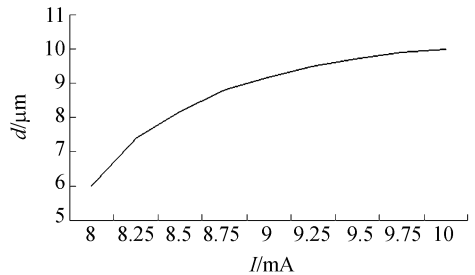


图 5 线电极直径测量值随电流的变化

Fig. 5 Diameter of wire electrode vs current in measurement

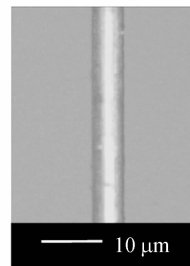


图 6 线电极原位制作结果图

Fig. 6 In situ fabricated micro wire electrode

5 加工试验

本文在原位制作微米尺度线电极的基础上,进行了微细电解线切割加工试验。实验参数为线电极均为直径 $5\ \mu\text{m}$ 的钨丝,工件材料为厚度 $100\ \mu\text{m}$ 的镍板,电解液为 $0.1\ \text{mol/L}$ 的 HCl 溶液,线电极进给速度为 $0.125\ \mu\text{m/s}$,加工电压为 $4.2\ \text{V}$,脉冲宽度为 $50\ \text{ns}$,脉冲频率为 $1\ \text{MHz}$ 。

切割加工所得的微细浆叶结构 45° 角侧面观测 SEM 照片如图 7 所示。切缝宽度为 $20\ \mu\text{m}$ 左右,且比较均匀。加工出的微型浆叶结构长 $300\ \mu\text{m}$ 宽 $300\ \mu\text{m}$,高 $100\ \mu\text{m}$ 左右,各个线条周围无杂散腐蚀,3 个叶片形状清晰,电化学反应被集中在电极周围不足 $10\ \mu\text{m}$ 的加工区域内,说明实验具有突出的定域蚀除能力,能满足复杂微细结构的加工要求。

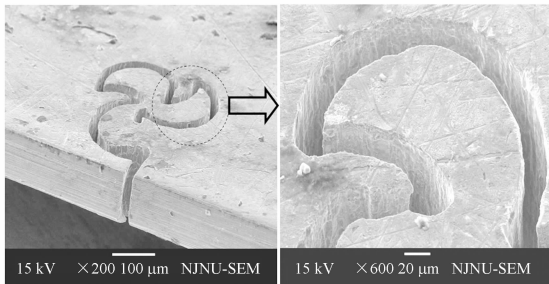


图 7 微细浆叶结构

Fig. 7 Micro blades by wire electrochemical micromachining

切割加工所得的微细尖角结构 45° 角侧面观测 SEM 照片如图 8 所示。切缝宽度为 $20\ \mu\text{m}$ 左右,尖角结构的加工表面质量很好,结构棱线清晰,周围无杂散腐蚀。每个尖角的曲率半径都在 $1\ \mu\text{m}$ 以下,可见本加工系统的成型精度可达到 $1\ \mu\text{m}$,且加工重复性好,能达到尖角的切割要求。

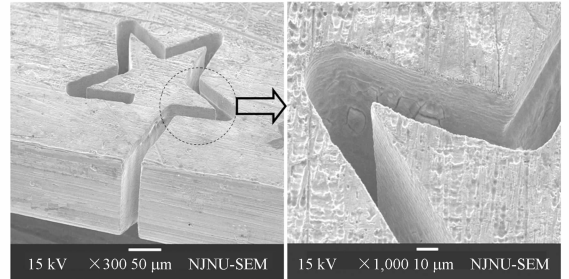


图 8 微细尖角结构

Fig. 8 Micro sharp-angles by wire electrochemical micromachining

6 结论

本文提出了一种微细加工新方法—基于线电极原位制作的微细电解线切割加工。首先从理论上分析了线电极直径大小对微细电解线切割加工精度的影响,提出了原位制作微米尺度线电极的方法。建立了微细电解线切割加工系统,并加工出缝宽为 $20\ \mu\text{m}$ 左右的微型浆叶结构和曲率半径在 $1\ \mu\text{m}$ 以下的微细尖角结构。试验表明,基于线电极原位制作的微细线切割加工技术具有较强的微细加工能力。

参考文献:

- [1] YU Z Y, KOZAK J, RAJURKAR K P. Modeling and simulation of micro EDM process [J]. *CIRP Manufacturing Technology*, 2003,52(1):143-146.
- [2] MASUZAWA T, OKAJIMA K, TAGUCHI T. EDM-lathe for micromachining [J]. *CIRP Manufacturing Technology*, 2002,51(1):355-358.
- [3] RAJURKAR K P, ZHU D, MCGEOUGH J A, et al.. New developments of electrochemical machining, keynote paper [J]. *CIRP Manufacturing Technology*, 1999,48(1):567-570.
- [4] MCGEOUGH J A, LEU M, RAJURKAR K P, et al.. Electroforming process and application to micro/macro manufacturing [J]. *CIRP Manufacturing*, 2001,50(1):499-502.
- [5] SCHUSTER R, KIRCHNER V, ALLONGUE P, et al.. Electrochemical micromachining [J]. *Science*, 2000,289(5476):98.
- [6] LI Y, ZHENG Y F, YANG G, et al.. Localized electrochemical micromachining with gap control [J]. *Sensors and Actuators A*, 2003,108(1):144-148.
- [7] NAKAMURA Y, MERA Y, MAEDA Y. A reproducible method to fabricate atomically sharp tips for scanning tunneling microscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999,70(8):3373-3376.
- [8] MINETA T. Electrochemical etching of a shape

memory alloy using new electrolyte solutions [J]. *Journal of Micromechanic and Microengineering*, 2004,14:76-80.

- [9] FASCIO V, WUTHRICH R, BLEULER H. Spark assisted chemical engraving in the light of electrochemistry [J]. *Electrochimica Acta*, 2004, 49: 3997-4003.
- [10] ZHU D, WANG K, YANG J M. Design of electrode profile in electrochemical manufacturing process [J]. *CIRP Manufacturing Technology*, 2003,52(1):169-172.
- [11] KIM B H, NA C W, LEE Y S, *et al.*. Micro electrochemical machining of 3D micro structure using

dilute sulfuric acid [J]. *CIRP Manufacturing Technology*, 2005,54(1):191-194.

- [12] WANG K, ZHU D, QU N S. Basic research of wire electrochemical micro-machining [C]. *IET Conference Publications, International Technology and Innovation Conference*, 2006, 524: 1070-1074.
- [13] WANG K, ZHU D, QU N S. Investigation on wire electrochemical micro machining [C]. *Proceedings of the International Conference on Integration and Commercialization of Micro and Nanosystems*, 2007:1277-1282.

作者简介:



王 昆(1981—),男,江西景德镇人,博士,讲师,分别在 2004 年、2007 年于南京航空航天大学获得硕士、博士学位,主要从事微细加工技术、精密测量与控制等方面的研究。E-mail: wknuaa@gmail.com

朱 荻(1954—),男,辽宁人,博士,教授,长江学者,主要从事特种加工技术、微细加工技术方面的研究。E-mail: dzhu@nuaa.edu.cn

●下期预告

膜片式微型 F-P 腔光纤压力传感器

于清旭,贾春艳

(大连理工大学 物理与光电工程学院,辽宁 大连 116024)

为满足工业和生物医学领域对微型化传感器的需求,对基于 Fabry-Perot(F-P)干涉仪原理的膜片式微型光纤压力传感器的制作工艺进行了实验研究。在单模光纤端面上直接熔接外径约 175 μm 的毛细石英管,在石英管的另一端制作敏感膜片,从而在光纤端面与膜片内表面之间形成 F-P 干涉腔。首先采用电弧熔接、切割、腐蚀膜片的方法制作了石英膜片式压力传感器,该传感器在 0~3.1 MPa 压强时 F-P 腔的腔长变化灵敏度为 41.09 nm/MPa,压强测量分辨率为 681 Pa,并具有很小的温度敏感系数。在 30~140 $^{\circ}\text{C}$,温度交差敏感 <1.07 kPa/ $^{\circ}\text{C}$ 。为了克服石英膜片减薄困难的缺点,选用聚合物材料(PSQ)作为压力敏感膜片制作了 F-P 传感器,室温下在 0.1~2.1 MPa 时 PSQ 膜片的 F-P 腔长变化灵敏度达到 1 886.85 nm/MPa,压强测量分辨率达到 53 Pa,十分接近用于人类或其他动物体内各种压强测量的水平。