

微细电解线切割加工模型分析与试验研究

王 昆¹, 朱 荻²

(1. 同济大学 机械工程学院, 上海 201804; 2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 基于电化学原理, 讨论微细电解线切割加工的机理, 建立了加工的理论模型, 得出微米尺度线电极进给速度的理论上限. 通过电解线切割加工试验, 分析各种加工参数对加工精度的影响规律, 并加工出缝宽为 20 μm 左右的微型桨叶结构. 试验结果表明, 微细电解线切割加工技术能为特殊性能材料的微细加工提供有效的新途径.

关键词: 微细电解线切割加工; 线电极; 理论模型; 试验研究
中图分类号: TG 662 **文献标识码:** A

Theoretical Model and Experiments of Wire Electrochemical micro-machining

WANG Kun¹, ZHU Di²

(1. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Wire electrochemical micro-machining (WEMM) is proposed as a new method of precision machining. Because of no electrode wear in this process the micrometer scale metal wire can be used as the wire electrode in WEMM, and the micrometer or tens micrometer structure can be fabricated. Base on the principle of electrochemical, the mechanism of wire electrochemical micro-machining is investigated, the theoretical model of the method is founded and the top limit of feed speed of the micron scale wire electrode is studied. Effects of process parameters on the machining accuracy in the electrochemical micro-machining have been studied theoretically and experimentally, and micro blades with the slit width of 20 μm are machined. It is proved experimentally that WEMM can provide a new effective manufacturing method for machining high-performance materials.

Key words: wire electrochemical micro-machining; wire electrode; theoretical model; experimental research

微细加工技术是本世纪最活跃的科学研究方向之一. 金属材料的微细加工有着广泛的发展需求. 在某些微器件中, 为了提高性能或者得到特定性能, 需要采用金属微部件代替硅结构来实现高反射率、高质量密度、低电阻率、特定强度要求以及特殊形状的结构. 现有的金属材料微加工技术还存在很大的局限性, 不能满足发展的需求, 发展新的金属材料微细加工技术是非常重要和迫切的.

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 nm 级的加工精度, 具有高效、低成本、与材料硬度无关等原理上的优势, 在微细加工方面存在着巨大的发展潜力. 当采用超短脉冲电流时, 微细电解加工间隙可缩小到 μm 级. 国外对此方向的研究非常重视, 发展很快, 但也处于起步阶段^[1-5].

基于超短脉冲电流技术的微细电解线切割加工技术是一种精密、微细加工新方法^[6]. 微细电解线切割加工技术可用于导电材料的复杂微结构件的加工制造, 既可以制造带有微槽道微缝的零件、又可以制造 2 维复杂形状高精度的微小零件. 例如: 电涡流传感器或其他微型电磁元件中需要的微型平面线圈, 微型化学反应器中的微流道板, 某些异型化纤喷丝板, 微齿轮, 微播叉, 微缝网板, 微小型系统, 以及宏观尺度系统中的很多精密零部件. 韩国国立汉城大学研究人员首先提出采用铂丝电极电解切割不锈钢材料, 并获得了缝宽 20 μm 左右的微细结构. 但是, 文献[6]既没有对这一新的微细加工方法进行深入理论模型研究, 也没有对试验中的加工参数对加工精度的影响规律进行讨论.

本文对这种微细加工新方法进行了理论和试验研究, 首先基于电化学原理, 讨论了超短脉冲微细电解线切割加工的机理, 建立了加工的理论模型. 然后通过试验分析了各种加工参数对加工精度的影响规律, 并进行了微细结构的切割试验.

收稿日期: 2008-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50575105); 同济大学青年优秀人才培养行动计划资助项目(2008KJ024)

作者简介: 王 昆(1981—), 男, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为特种加工技术. E-mail: kunwang@tongji.edu.cn

1 加工模型分析

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2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.

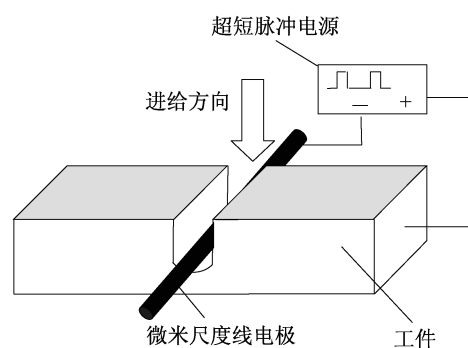


图1 微细电解线切割加工原理图
Fig.1 Schematic diagram of WEMM

金属电极在电极反应过程中会发生电化学极化和浓差极化,它们都是影响加工间隙大小的重要因素.当采用纳秒脉宽的脉冲电源进行电解加工时,由于电流持续时间非常短,电极反应过程还未达到稳定状态就进入了脉冲间歇,浓差极化非常小^[7].

为了保证较高的加工精度,必须尽可能地缩小微细电解线切割的切缝宽度.缩小切缝宽度的前提是缩小微细电解的加工间隙,即提高电解加工的定域蚀除能力.采用高频超短脉冲电源,能够缩短加工电流持续的有效时间,大大减小扩散层厚度,降低浓差极化.此方法也称暂态法,同样能使电化学反应成为控制步骤,进而提高电解加工的定域蚀除能力.微细电解线切割加工静态模型如图2所示.

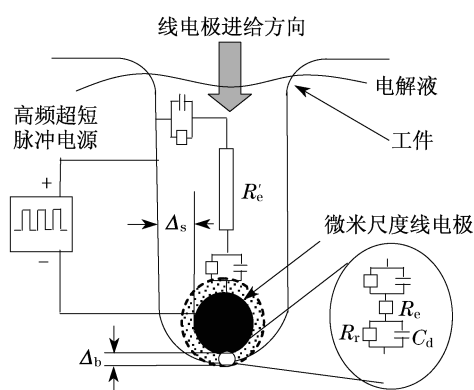


图2 微细电解线切割加工静态模型
Fig.2 Static model of WEMM

图中, C_d 为双电层电容; R_r 为电化学反应电阻; R_e 为加工区域的电解液电阻; R'_e 为非加工区域的电解液电阻; Δ_b 为电解加工的端面间隙; Δ_s 为电解加工的侧面间隙.对于高频脉冲的电化学极化过程,双电层的充电时间非常短,电极上过电位 η 随时间变化,总是处于暂态过程中,公式如下:

$$\eta = \eta_{\infty} \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad (1)$$

式中: η_{∞} 为稳态过电位; t 为极化时间; τ 为电极等效电路的时间常数.

当极化时间 $t \geq 5\tau$ 时,电极电位将达到稳态过电位的99%.可将式(1)中的指数项用泰勒级数展开,并略去高次项后,可以得到如下简化式:

$$\eta = \eta_{\infty} t / \tau \quad (2)$$

根据电路原理,电极等效电路充放电的时间常数为

$$\tau = RC \quad (3)$$

式中: R 为等效电路电阻; C 为电极或溶液界面双电层的微分电容.

等效电路电阻 R 与电解液种类、浓度和电极间的加工间隙有关.工件上的加工区域极间间隙最小,电解液电阻 R_e 也最小,决定双电层电容充电的时间常数 $\tau_1 = R_e C$;非加工区域离工具阴极较远,电解液电阻 R'_e 较大,时间常数 $\tau_2 = R'_e C$.正是由于 $\tau_1 < \tau_2$,造成了加工区和非加工区双电层上不同的过电位^[5].

根据电化学极化的Butler-Volmer方程,电极上双电层的过电位 η 影响电化学反应的电流密度 i 为

$$i = i_0 \exp\left(\frac{\beta n F}{H \Theta} \eta\right) \quad (4)$$

式中: i_0 为交换电流密度; β 为电极反应的传递系数; n 为电极反应中的电子数; F 为法拉第常数; H 为气体常数; Θ 为热力学温度.

根据法拉第定律,电极界面上发生电化学反应物质的体积 V 与通过电量和材料的电化学当量成正比,即

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

式中: ω 为单位电量溶解的元素体积,即元素的体积电化学当量; l 为工件厚度; d 为线电极直径.

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 Δt 内进给确定的位移.微细电解线切割加工动态模型描述了在加工过程中 $T = t$ 和 $T = t + \Delta t$ 相邻时刻间

隙的对比状态,如图 3 所示.图中, d 为微米尺度线电极的直径, v_c 为线电极的进给速度, S 为切割缝宽; Δ_s 为电解加工的端面间隙; h 为线电极进给量.

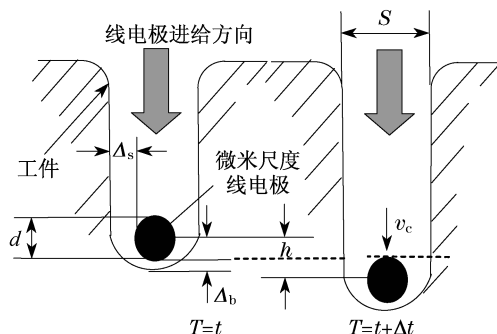


图 3 微细电解线切割加工动态模型
Fig.3 Dynamic model of WEMM

对于脉冲电解加工,一个脉冲周期内电极电位随充放电过程变化,使得阳极发生电化学反应的物质质量随时间变化.而在不同周期之间,由于电源提供的电量相同,阳极电解蚀除的物质质量也相同.将式(4)代入式(5),可以得出在时间 Δt 内阳极电化学溶解的金属体积,即微细电解线切割加工的理论模型为

$$V = \frac{\pi \Delta t}{2T} i_0 \omega dl \int_0^{t_{on}} \exp\left(\frac{\beta n F}{H\Theta} \eta\right) dt \quad (6)$$

式中 t_{on} 为电源脉冲宽度.

从图 3 可以看出,对于微细电解线切割加工,电化学反应被限制在微尺度线电极周围的很小的尺寸范围内,切缝靠加工侧面间隙成形,加工面积基本不变.所以,在加工 t 时刻,设线电极的瞬时进给速度为 v_t ,则线电极在微尺度间隙中扫掠过的体积为

$$V = v_t \frac{\pi(d + 2\Delta_s)}{2} l \Delta t \quad (7)$$

为了使加工稳定进行,进给量与蚀除量必须达到平衡,侧面间隙 Δ_s 也达到平衡,其大小随着加工中设定的进给速度 v_t 的大小而变化,当进给速度增大时,由于单位时间的工件蚀除总量一定,侧面间隙必然减小,由此带来了加工稳定性的恶化.即使不论无限减小侧面间隙 Δ_s 在工艺上能否实现,及其给加工稳定性带来的问题,进给速度也不可能无限增大,即 Δ_s 趋近于零时所得的进给速度,此数值就是进给速度的理论上限,合并式(6)和(7),得出进给速度的理论上限为

$$v_t \leq A \frac{\tau}{T\eta_{\infty}} \left[\exp\left(B \frac{t_{on} \eta_{\infty}}{\tau}\right) - 1 \right] \quad (8)$$

式中: $A = \frac{i_0 \omega H \Theta}{\beta n F}$; $B = \frac{\beta n F}{H \Theta}$; A, B 均为常数.

由式(8)可知:加工参数(脉冲周期、脉冲宽度、加工电压幅值)、双电层等效电路时间常数、电解液和工件材料等因素共同决定了微细电解线切割加工的进给速度的理论上限.在进给速度小于理论上限和保证加工稳定性的前提下,为了提高加工精度和加工效率必须尽量提高线电极的进给速度.上述模型和分析为后续的试验研究提供了理论依据.

2 加工系统

通过对微细电解线切割加工中金属工件蚀除方式的分析,本文建立了微细电解线切割加工试验系统,其示意图如图 4 所示.系统由 4 个硬件部分组成:电极系统;电解液;加工状态检测硬件;伺服运动平台.加工系统的实物图如图 5 所示.

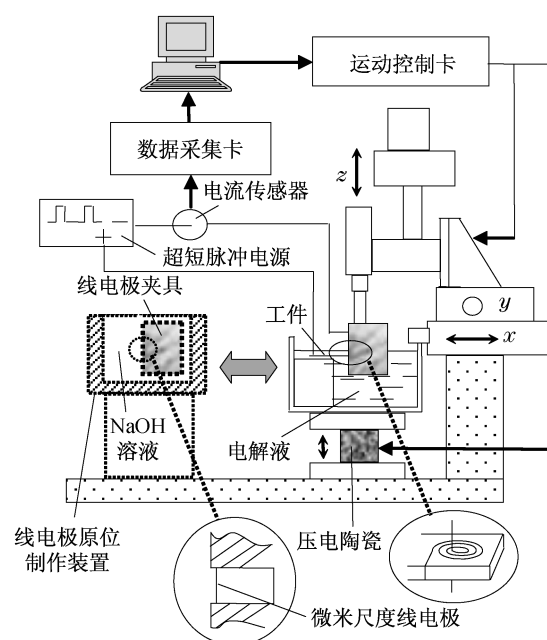


图 4 加工系统示意图

Fig.4 Sketch of experimental system

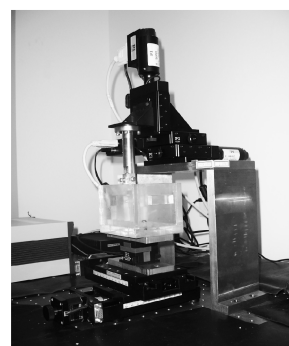


图 5 加工系统实物图

Fig.5 Photo of experimental system

电极系统由工具线电极、工件阳极和纳秒脉冲电源组成.采用 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的钨丝作为线电极.由于电解加工没有电极损耗,所以先将钨丝直接固定在电极夹具上,然后把线电极夹具装夹在自行研制的微细电解线切割加工机床主轴 z 上.工件固定于电解液槽内,而电解液槽则安装在 x, y 2 维工作台上作平面运动,当 x, y 工作台运动时,线电极就相对于工件做 2 维的切割运动.试验中采用的纳秒脉冲电源的正负极分别接工件和工具线电极,它可以输出最高频率达 100 MHz 的脉冲信号,电压幅值为 $\pm 5\text{ V}$,最小脉宽为 5 ns .电解液采用酸性溶液(如 HCl , H_2SO_4 等),工件阳极在电解加工过程中的产物可以溶解在电解液中,不会由于生成的沉淀物堵塞加工间隙,而阻碍电解反应的继续进行.

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.本文采用 $0\sim 20\text{ mA}$ 测量范围的电流传感器检测加工中的电流.电流传感器将 mA 级的加工电流隔离放大转换成 $0\sim 5\text{ V}$ 电压信号,可以使加工回路和检测回路相隔离,放大后的电压信号经过数据采集卡实时输入到工业控制计算机中,实现加工状态的实时检测.

本文采用德国 PI 公司的 C843 运动控制卡作为运动控制系统的核心,控制 M126 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,可以保证加工时每步 $0.125\text{ }\mu\text{m}$ 的进给分辨率和 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的重复定位精度.

3 加工试验

从上述理论模型分析中可以看出,在某一组线电极直径、工件材料、工件厚度以及加工参数确定的情况下,线电极都有一个理论上的进给速度上限,当加工中的进给速度超过这个最大值时,会发生加工机理性短路,并且使加工无法进行.实验条件如下:线电极均为直径 $15\text{ }\mu\text{m}$ 的钨丝,工件材料厚度为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的镍板,电解液为 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 溶液,加工电压为 4.5 V ,脉冲频率为 0.5 MHz ,脉冲宽度为 40 ns ,切割深度为 $100\text{ }\mu\text{m}$.加工侧面间隙随线电极进给速度变化曲线如图 6 所示.

由电解加工平衡间隙公式可知,在相同的加工电压下,线电极进给速度的增加导致了端面加工间

隙的减少,而端面间隙和线电极直径共同决定着侧面间隙的大小,所以侧面间隙也相应地减少.

为了研究脉冲宽度对加工工艺的影响,进行以下对比实验.实验参数:线电极均为直径 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的钨丝,工件材料厚度为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的镍板,电解液为 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 溶液,电压幅值分别为 4 V 和 5 V ,脉冲频率为 0.5 MHz ,切割深度为 $50\text{ }\mu\text{m}$,脉冲宽度分别为 $40, 60, 80$ 和 100 ns .不同脉冲宽度下的侧面间隙大小如图 7 所示.从图可知,当电压幅值不论是 4 V 还是 5 V ,侧面间隙都随着脉冲宽度的增大而增大.

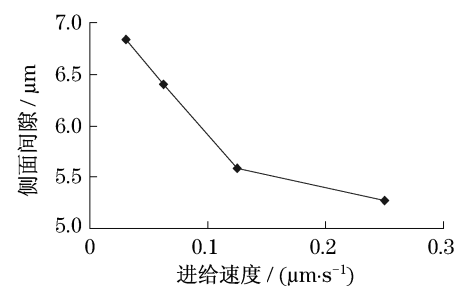


图 6 线电极进给速度对侧面间隙的影响

Fig.6 Variation in machining gap with the feed rate

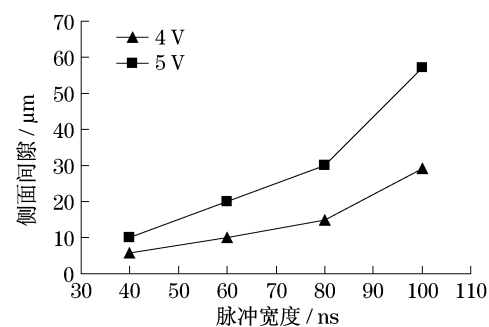


图 7 脉冲宽度对侧面间隙的影响

Fig.7 Variation in machining gap with pulse on-time

本文进行典型微细零件的切割加工.以微型桨叶结构为例,其设计轮廓由直线和圆弧组成,考虑微细电解线切割加工的侧面间隙和线电极直径的影响,对该理论轮廓进行等距偏移而形成的连续封闭的图形,作为线电极的运动轨迹.试验参数:线电极均为直径 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的钨丝,工件材料为厚度 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的镍板,电解液为 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 HCl 溶液,进给速度为 $0.125\text{ }\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,加工电压为 4.2 V ,脉冲宽度为 50 ns ,脉冲频率为 1 MHz .切割加工所得的微型桨叶结构 45° 角侧面观测扫描电子显微镜照片如图 8 所示.

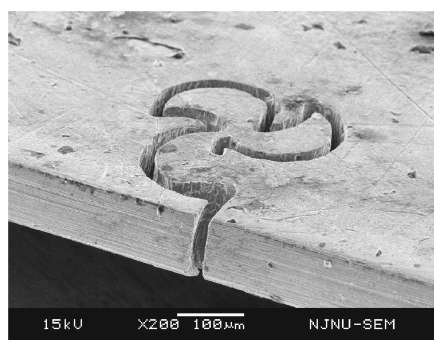


图 8 微型桨叶结构

Fig.8 Micro blades by WEMM

4 结语

电解加工是利用金属在电解液中可以发生阳极溶解的原理将零件加工成形的,其材料的减少过程以离子的形式进行.由于金属离子的尺寸非常微小,使得电解加工技术在微细制造领域有着很大的发展潜力.

本文结合微细电解加工技术和线切割的基本思想,提出微细电解线切割加工技术.基于电化学原理,分析微细电解线切割加工的机理,分别建立加工的静态和动态理论模型.设计由运动系统、加工检测系统、线电极系统、超短脉宽电源、电解液系统组成的微细电解线切割加工试验系统.进行了微细电解

线切割加工工艺的实验研究,分析进给速度、脉冲宽度和加工电压等加工参数对加工精度的影响规律,并成功加工出缝宽为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 左右的微型桨叶结构.

本文对微细电解线切割加工这一微细加工新技术进行了模型分析和试验研究.试验结果表明,提出的加工技术能为特殊性能材料的微细加工提供了新的加工途径.

参考文献:

- [1] Yu Z Y, Kozak J, Rajurkar K P. Modeling and simulation of micro EDM process[J]. Annals of the CIRP, 2003, 52(1):143.
- [2] Masuzawa T, Okajima K, Taguchi T. EDM-lathe for micromachining[J]. Annals of the CIRP, 2002, 51(1):355.
- [3] Rajurkar K P, Zhu D, McGeough J A, et al. New developments of electrochemical machining[J]. Annals of the CIRP, 1999, 48(1):567.
- [4] McGeough J A, Leu M, Rajurkar K P, et al. Electroforming process and application to micro/macro manufacturing [J]. Annals of the CIRP, 2001, 50(1):499.
- [5] Schuster R, Kirchner V, Allongue P, et al. Electrochemical micromachining[J]. Science, 2000, 289:98.
- [6] Kim B H, Na C W, Lee Y S, et al. Micro electrochemical machining of 3D micro structure using dilute sulfuric acid[J]. Annals of the CIRP, 2005, 54(1):191.
- [7] 田昭武. 电化学研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1984.

TIAN Zhaowu. Method of electrochemical research[M]. Beijing: Science Press, 1984.

(上接第 1637 页)

参考文献:

- [1] YANG Xin, SHANG Chi. Chlorination byproduct formation in the presence of humic acid, model nitrogenous organic compounds, ammonia, and bromide [J]. Environ Sci Technol, 2004, 38(19):4995.
- [2] Amench L. Fractionation of NOM from surface water using macroporous resins[J]. Water Research, 1997, 31(9):2987.
- [3] Amy G L, Sierka R A, Bedessem J. Molecular size distribution of dissolved organic matter [J]. Journal of AWWA, 1992, 84(6):67.
- [4] Bunyarit P, Taha F M, Vorapot K. Characterization of precursors to trihalomethanes formation in Bangkok source water[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 120(1/2/3):229.
- [5] 孙青萍. 分别测定含氯水样中的各种氯胺[J]. 中国给水排水, 2005, 21(11):98.

SUN Qingping. Separate determination of chloramines in chlorinated water [J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(11):98.

- [6] 伍海辉, 高乃云, 万蓉芳, 等. 高级氧化技术降解卤乙酸效果及动力学研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(12):1974.
- [7] WU Haihui, GAO Naiyun, WAN Rongfang, et al. Effect and kinetics of haloacetic acids degradation by advanced oxidation processes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(12):1974.
- [7] Barber L B, Leenheer J A, Noyes T I, et al. Nature and transformation of dissolved organic matter in treatment wetlands[J]. Environ Sci Technol, 2001, 35(24):4805.
- [8] Singer P C. Formation and control of disinfection byproducts in drinking water [M]. Denver: American Water Works Association, 1999.
- [9] HUA Guanghui, Reckhow D A. Characterization of disinfection byproduct precursors based on hydrophobicity and molecular size[J]. Environ Sci Technol, 2007, 41(9):3309.