

文章编号:1000-6893(2010)09-1864-08

微细电解铣削加工模型及实验研究

刘勇, 朱荻, 曾永彬, 王少华, 黄绍服

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

Theoretical and Experimental Research on Micro Electrochemical Milling

Liu Yong, Zhu Di, Zeng Yongbin, Wang Shaohua, Huang Shaofu

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

摘要: 对微细电解铣削加工技术进行了深入研究。将分层加工技术应用到微细电解加工过程中,显著改善了加工稳定性;建立了微细电解铣削加工的数学模型;基于电化刻蚀原理,在线制得直径小至 $10\ \mu\text{m}$ 的圆柱电极;分组实验并验证了加工模型中各参数如:电极直径、加工电压、电解液浓度、铣削层厚度等对微细电解铣削加工精度的影响。通过优化加工参数,成功加工出了深三角结构和四棱台微型腔,形状精度高,加工稳定性好。

关键词: 微细电解铣削;电化刻蚀;柱状电极;微三维结构;分层铣削

中图分类号: V261.5; TG662 **文献标识码:** A

Abstract: Micro electrochemical milling is proposed as a new method of micro fabrication. In this article, layer manufacturing technique is applied to the process of electrochemical micromachining to improve machining stability. A mathematical model of micro electrochemical milling by layer is established to ensure high machining accuracy. Because there is no tool wear in electrochemical micromachining, it can be applied easily to the fabrication of micro structures by moving the tool electrode along a programmed path. Micrometer scale cylindrical electrode are fabricated by electrochemical etching. With a tungsten electrode of $10\ \mu\text{m}$ in diameter, sets of experiments are carried out to investigate the influence of some predominant process parameters on machining accuracy, such as the electrode diameter, machining voltage, concentration of electrolyte, cut thickness, etc. After the preliminary experiments, a deep triangular micro structure and a square micro cavity with schnebelia structure are fabricated successfully.

Key words: micro electrochemical milling; electrochemical etching; cylindrical electrode; three-dimensional micro structure; milling by layer

随着微纳机电系统技术的发展,小型零部件的需求在各个行业(航空、汽车、电子、光学、医药、通讯、生物产业等)迅速增加。为了满足这种需求,各种微细制造方法如:微细切削技术、光刻技术、微细电火花加工技术等^[1-2]迅速发展起来,并取得了许多显著成果^[3-7]。

近年来,微细电解加工技术作为制造微型金属零部件的另一种有效方法,成为国内外研究的焦点。自2000年德国MPG发明纳秒超短脉冲电解加工技术^[8]以来,美国、日本、韩国等工业发达国家对微细电解加工技术进行了大量的

科研投入,取得了长足的进展。如美国的A. L. Trimmer加工出了结构尺寸为亚微米级的复杂图案^[9],日本的T. Kurita等利用微细电解技术成功加工出了微菱形电极和复杂结构^[10],韩国的B. H. Kim等加工出了表面粗糙度好的微三维结构^[11]。国内,清华大学、哈尔滨工业大学、南京航空航天大学等科研院所也在微细电解加工领域取得了很多成就^[12-14]。

从原理上讲,微细电解加工技术基于电化阳极溶解原理,以离子形式去除金属材料,与其他加工工艺相比,微细电解加工有许多优势:与微细切削技术相比,不存在刀具发热、易断问题;与光刻、电铸和注塑(LIGA)工艺相比,不需要昂贵的同步辐射源,设备成本低廉;与电火花加工相比,加工时电极无损耗,不需要电极补偿,且已加工表面具有良好的表面粗糙度,无毛刺,无再铸层。采

收稿日期:2009-10-10; 修订日期:2010-01-10

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50635040);国家“863”计划(2009AA04Z302);江苏省自然科学基金(BK2008043)

通讯作者:朱荻 E-mail: dzhu@nuaa.edu.cn

用分层铣削加工技术,可以进行复杂型腔的加工。

本文基于三轴联动微细电解加工系统平台,在线制作微米级圆柱电极,利用微细电解分层加工技术在低加工电压、低浓度酸性电解液和超短脉冲电流等条件下对微细电解加工展开研究。通过优化加工参数,成功加工出了三维微型腔,形状精度高,加工稳定性好。证明纳秒脉冲微细电解加工可以很好地满足微机电系统(MEMS)微器件的加工要求。

1 微细电解铣削加工模型的建立

对于较复杂微三维型腔的电解加工,由于复杂成型微电极的制作和微小加工间隙中电解液更新困难,因此很难用传统的成型电极拷贝的方法实现复杂微结构的微细电解加工。随着科技的不断进步,出现了以精密机械和数控技术为基础,以简单柱状微细电极作为加工工具,通过控制其加工运动轨迹,来实现复杂零件加工的微细电解铣削加工技术,并且可以减小加工过程中释放的热和气体等对电解加工的影响^[13-14]。对于复杂结构和高深宽比三维型腔的加工,可以分多层进行电解铣削。分层铣削加工有两个优点:①首先通过分层技术把复杂形状分割成多层的简单轮廓,然后对各层简单轮廓进行加工;②通过控制铣削层厚度,避免单位时间内的材料去除量过大,从而消除因局部电解产物过多而引起的短路现象,并能提高每层的铣削加工速度,从而获得较好的加工稳定性。另外,由基于分层铣削的微细电解铣削加工工艺加工后的工件表面可以获得较高的形状精度和好的表面加工质量^[11]。

微细电解加工中的电化学反应由双电层上的电势差所驱动,双电层的组成影响着电子的传输速度。双电层结构和它的电容是由电极材料、电解液的种类、离子和分子的吸附程度及温度等参数所决定的。当工具电极和工件材料之间加上纳秒脉冲电压,阴阳极上的双电层的电容就会周期性的充放电^[8,11]。选择了适当的脉宽后,靠近电极的双电层区域就会被脉冲电压强烈的充电,过电位 φ 逐渐增大,脉冲结束时 φ 还未达到稳态值,属暂态加工;而远离电极的区域充电现象则大幅变弱。电化学反应速度和双电层上的电势降呈指数变化关系。因此,强烈的化学反应只限制于极化电极附近几微米的区域,稍微远离极化电极的部分则基本没有进行化学反应,所以纳秒脉冲电解加工的定域性很高。电极过电位变化如图 1 所

示。图中: Φ 为外接电压; t_{on} 为脉冲宽度; t_{off} 为脉冲间隔; Φ_b 为阳极的分解电位; C_d 为双电层电容; R_i 为电化学反应电阻; R_e 为电解液电阻; I_0 为回流中测得的电流。

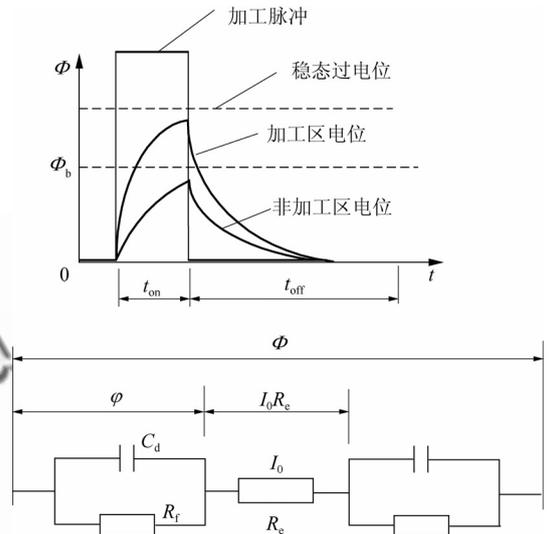


图 1 电极过电位变化及其等效电路

Fig. 1 Potential variety and its equivalent circuit

微细电解分层铣削加工过程可分为两个阶段:①电极沿 Z 轴向下进给加工阶段;②电极进给到指定的铣削层厚度后,沿 XY 平面轨迹进行平面铣削阶段。当平面铣削完毕后,再垂直向下进给,如此不断地进行按层铣削加工,直到加工完毕。

(1) 竖直进给加工阶段(如图 2 所示)

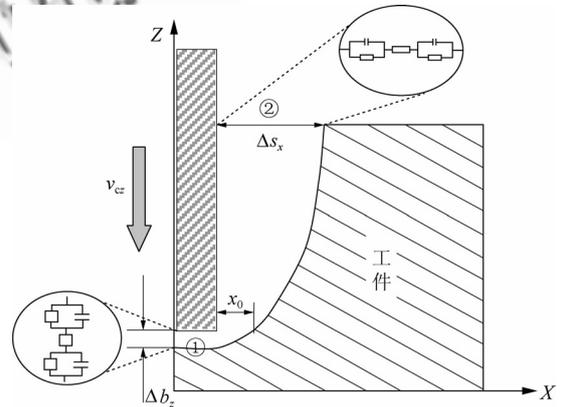


图 2 竖直进给加工示意图

Fig. 2 Sketch of feeding down

由图 1 可知,纳秒脉冲的电化学极化过程中,双电层的充电时间非常短,电极上过电位 φ 随时间 t 的变化为

$$\varphi = \varphi_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \quad (1)$$

式中: φ_0 为稳态过电位; τ 为充电时间常数。 τ 可
© 航空学报杂志社 <http://hkxb.buaa.edu.cn>

以表示为

$$\tau = R_e C_d = \frac{l}{\sigma} C_d \quad (2)$$

式中: 电解液电阻 R_e 可表示为电解液电阻率 $1/\sigma$ 与电极间距离 l 的乘积, $R_e = l/\sigma$ 。

φ_0 可表示为

$$\varphi_0 = \frac{\Phi - \delta E - I_0 R_e}{2} \quad (3)$$

式中: Φ 为外接电压; I_0 为回路中测得电流; δE 为阴阳极电极电位值总和。

将式(1)中的指数项用泰勒级数展开, 并略去高次项, 可得:

$$\varphi = \varphi_0 \frac{t}{\tau} = \left(\frac{\Phi - \delta E - I_0 R_e}{2} \right) \frac{t}{\tau} \quad (4)$$

根据电化学极化的 Butler-Volmer 方程, 在脉冲充电阶段, 电化学反应中的电流密度 i 可以表示为

$$i = i^0 \exp\left(\frac{\alpha n F}{RT} \varphi\right) \quad (5)$$

式中: i^0 为交换电流密度; α 为传递系数; n 为原子价数; R 为气体常数; T 为电解液温度。

根据法拉第第一定律: 在电极的两相界面处发生电化学反应的物质质量与通过其界面的电量成正比。因此①区(见图 2)电化学反应去除量 V 可以表示为

$$V = \omega I t = \omega S \frac{t}{t_p} \int_0^{t_{on}} i dt = \omega \frac{\pi d^2 t}{4 t_p} \int_0^{t_{on}} \exp\left(\frac{\alpha n F \varphi_0 t}{RT \tau}\right) dt \quad (6)$$

式中: ω 为体积电化学当量; I 为平均加工电流; S 为加工面积; t 为加工时间; t_p 为脉冲周期; t_{on} 为脉宽时间。

电极底部端面下的阳极溶解速度 v_{az} 可以表示为

$$v_{az} = \frac{V}{St} = \frac{\omega i^0}{t_p} \frac{RT \tau}{\alpha n F \varphi_0} \left[\exp\left(\frac{\alpha n F \varphi_0 t_{on}}{RT \tau}\right) - 1 \right] \quad (7)$$

当加工平衡时, 加工平衡间隙 Δb_z 可以表示为

$$\Delta b_z = \frac{\omega \sigma (\Phi - \delta E)}{v_{cz}} \quad (8)$$

式中: v_{cz} 为阴极进给速度, 当加工平衡时: $v_{az} = v_{cz}$ 。

在阴极侧面不绝缘情况下, ②区(见图 2)进

口处侧面间隙沿 X 轴变化关系式为

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\omega \sigma (\Phi - \delta E)}{x} \quad (9)$$

将式(9)积分得:

$$\int x dx = \int \omega \sigma (\Phi - \delta E) dt \quad (10)$$

由初始条件, $t=0$ 时, $x=x_0$, 得出:

$$x = \sqrt{2\omega \sigma (\Phi - \delta E) t + x_0^2} \quad (11)$$

加工平衡时, 电极底部端面和紧靠端面侧壁的过电位基本一致, 所以其电化学反应速度大致相同, 即微米级侧壁初始间隙 $x_0 \approx \Delta b_z$, 则进口处侧壁间隙 Δs_x 为

$$\Delta s_x = \sqrt{2\omega \sigma (\Phi - \delta E) t + \Delta b_z^2} = \sqrt{\frac{2\omega \sigma (\Phi - \delta E) L_z}{v_{cz}} + \left[\frac{\omega \sigma (\Phi - \delta E)}{v_{cz}} \right]^2} \quad (12)$$

式中: L_z 为电极进给深度。铣削层厚度 $L = L_z + \Delta b_z$, 则

$$\Delta s_x = \sqrt{\frac{2\omega \sigma (\Phi - \delta E) L}{v_{cz}} - \left[\frac{\omega \sigma (\Phi - \delta E)}{v_{cz}} \right]^2} \quad (13)$$

孔径 $D = d + 2\Delta s_x$, d 为电极直径。所以, 孔径大小受电极直径 d 、铣削层厚度 L 和进给速度 v_c 以及外加电压 Φ 、溶液电导率 σ 等众多因素的综合影响。

(2) 平面铣削阶段(如图 3 所示)

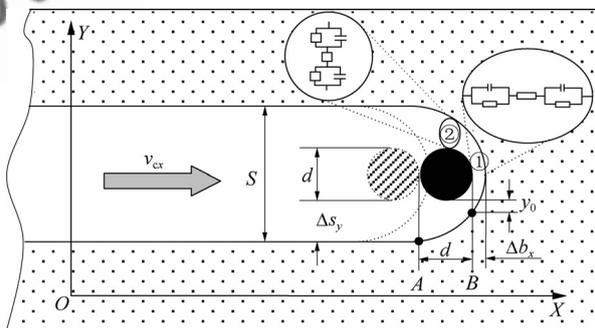


图 3 平面铣削加工示意图

Fig. 3 Sketch of feeding along XY axis

当电极沿 Z 轴进给, 确定了一定的铣削厚度以后, 开始按照 XY 平面的预定轨迹进行 XY 平面铣削加工。平面铣削阶段模型的推导可按照第 1 阶段的推导方式, 通过推导, 可以计算出侧面间隙 Δs_y 为

$$\Delta s_y = \sqrt{2d\Delta b_x + \Delta b_x^2} =$$

$$\sqrt{2d \frac{\omega\sigma(\Phi - \delta E)}{v_{cx}} + \left[\frac{\omega\sigma(\Phi - \delta E)}{v_{cx}} \right]^2} \quad (14)$$

式中: Δb_x 为图3中①区的平衡间隙; v_{cx} 为电极沿 X 轴进给速度。所以, 侧面间隙 Δs_y 的大小主要取决于电极直径 d 、进给速度 v_{cx} 以及外加电压 Φ 、溶液电导率 σ 等因素。

槽宽 S 可表示为

$$S = d + 2\Delta s_y = d + 2\sqrt{2d \frac{\omega\sigma(\Phi - \delta E)}{v_{cx}} + \left[\frac{\omega\sigma(\Phi - \delta E)}{v_{cx}} \right]^2}$$

为保证加工过后的形状和尺寸精度, 竖直加工阶段加工精度参数进口孔径 D 与平面加工阶段加工精度参数槽宽 S 应当有以下关系: $D \leq S \Rightarrow \Delta s_x \leq \Delta s_y$, 即

$$\frac{2\omega\sigma(\Phi - \delta E)L_c}{v_{cz}} + \left[\frac{\omega\sigma(\Phi - \delta E)}{v_{cz}} \right]^2 \leq \frac{2d \frac{\omega\sigma(\Phi - \delta E)}{v_{cx}} + \left[\frac{\omega\sigma(\Phi - \delta E)}{v_{cx}} \right]^2}{v_{cx}} \quad (15)$$

为简化上述模型, 令加工进给速度保持不变, 即当 $v_{cz} = v_{cx}$ 时, 式(15)可简化为

$$L_c \leq d \quad (16)$$

即保持进给速度不变时, 电极每次沿 Z 轴向下的进给距离 L_c 不大于电极直径 d 才能保证获得较好的形状和尺寸精度。

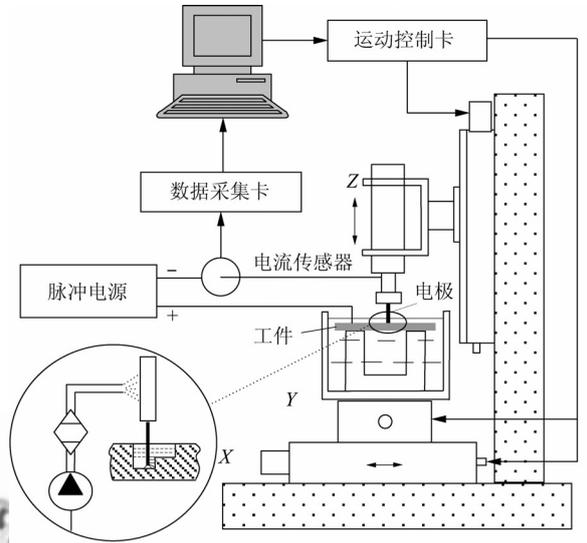
2 加工系统及装置

2.1 微细电解铣削加工系统

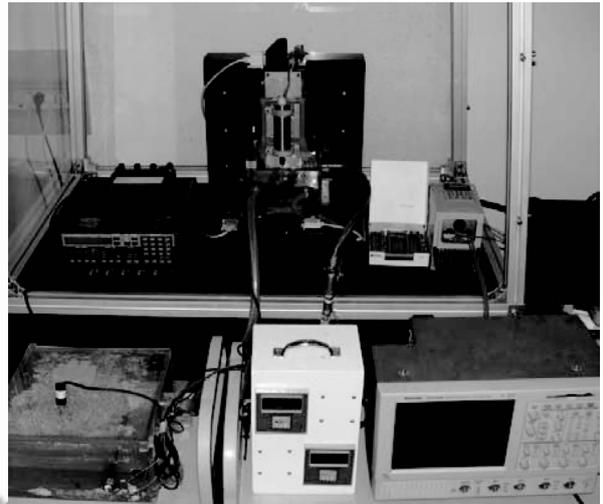
本文实验系统由纳秒脉冲电源、电极系统、电解液循环系统、温度控制系统、加工状态检测系统和运动控制系统组成, 实验系统示意图和实物照片如图4所示。

电极系统由工具阴极、电极夹具和工件阳极组成。实验采用微米级柱状钨电极作为工具阴极, 工具阴极由电极夹具与主轴 Z 螺纹连接; 工件固定于电解液槽内, 电解液槽安装在 X-Y 二维工作台上可作平面运动。实验中, 纳秒脉冲电源的正负极分别接工件和工具电极, 电解液采用低浓度的酸性电解液(如: H_2SO_4 、 HCl 等)。电解液采用循环流动方式, 用微量泵将电解液抽出, 经过过滤后沿工具电极竖直进给方向平缓流入加工区, 避免侧面冲液造成的电极振动。

运动控制系统由 X、Y、Z 直线运动轴组成,



(a) 示意图



(b) 实物照片

图4 微细电解加工系统示意图和实物照片

Fig. 4 Schematic diagram and real photo of the electrochemical micromachining system

分别由各自的电机驱动器驱动。3个直线运动轴采用德国PI公司的C843运动控制卡作为运动控制系统核心, 控制M4XX.CG系列高精度三轴运动平台实现X、Y、Z三个方向的伺服联动进给, 可以保证加工时 $0.1 \mu\text{m}/\text{step}$ 的进给分辨率和 $1 \mu\text{m}$ 的往复定位精度, 能够满足微米级初始加工间隙和往复定位的要求。

实验中使用的电源为纳秒级脉冲发生器, 可以输出峰值电压为 $\pm 10 \text{ V}$, 最小脉宽为 5 ns 的脉冲电流。加工检测系统主要负责电路中的信号检测, 加工过程中电流的变化直接反映加工处的状态, 加工电流的检测和由此作出的控制策略是保证加工稳定性的重要环节。检测过程通过在电路中串联小欧姆值的采样电阻, 然后

将传感器检测到的采样电阻两端电压值转换为相应的电流值,再由多功能数据采集卡 NIPCI-6221 将检测的信号经 A/D 转换器转换后,实时输入到控制计算机中,在计算机中通过对数据进行分析处理,实现加工状态的实时检测与反馈控制。

2.2 微细柱状电极的在线制备

高精度的微细电解加工需要微米级的工具电极,本文选用校直钨丝作为工具电极,能够承受一定的短路电流。把校直钨丝固定在可导电的夹具上,利用电化学刻蚀^[15]的方法将钨丝加工到所需的尺寸和形状精度。这样,工具电极的制作和工件的加工能够统一在微细电解加工系统中连续完成,电极装夹后不必拆卸,以提高电解加工精度。

电极制作时,钨丝与直流电源的正极相连;不锈钢筒作为工具阴极。钨丝装夹在机床主轴上穿过筒的中心,并共同浸入碱性溶液中,其加工原理如图 5 所示。阳极和阴极通电后发生电化学反应,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,从而被溶解。实验表明电极的形状精度,尤其是工作端的形状精度对加工过程及结果有很重要的影响,工作端形状越规则、尺寸越一致,电极周围的电场就越均匀,从而使加工过程稳定、加工尺寸均匀。通过控制加工电压、钨丝的浸入深度,可以建立起加工电流和电极直径变化的数学模型,从而制备出直径数微米、尺寸均匀的柱状工具电极。图 6 是用初始直径 $300\ \mu\text{m}$ 的钨丝在外加电压 $5\ \text{V}$, $2\ \text{mol/L}$ 的 KOH 溶液中在线制备的多阶柱状电极,最前端工作部分长 $150\ \mu\text{m}$,直径 $10\ \mu\text{m}$,尺寸均匀、形状精度好。

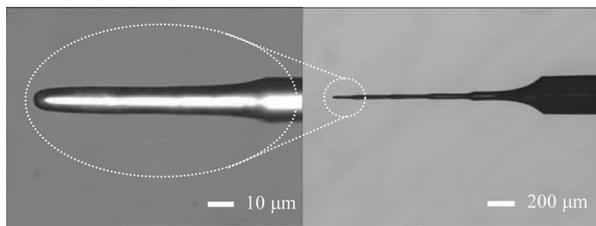


图 6 多阶柱状电极

Fig. 6 Stepped cylindrical micro-electrode

3 实验结果及分析

本文通过多组微细电解加工实验来验证微细电解铣削加工数学模型中各加工参数(如:电极直径、加工电压、电解液浓度、铣削层厚度等)对加工精度和形状精度的影响。加工精度以单层平面铣削加工过程中的侧面加工间隙作为衡量标准。侧面间隙可表示为

$$\Delta s = (S - d) / 2 \quad (17)$$

式中: Δs 为侧面间隙; d 为工具电极的直径; S 为加工后的槽宽。

3.1 电极直径对侧面间隙的影响

根据本文平面铣削加工模型,侧面间隙会随着电极直径的增大而增大,为验证电极直径对侧面间隙的影响,进行以下对比实验。实验参数:工件材料为厚度 $100\ \mu\text{m}$ 的镍板,电解液为 $0.2\ \text{mol/L}$ 的 H_2SO_4 溶液,加工电压为 $4.5\ \text{V}$,脉冲宽度为 $45\ \text{ns}$,脉冲周期为 $1\ \mu\text{s}$,进给速度为 $0.2\ \mu\text{m/s}$,向下进给深度为 $10\ \mu\text{m}$,电极直径取 $3\sim 20\ \mu\text{m}$ 。

由图 7 可知,侧面间隙总体随着电极直径的增大而增大,与数学模型中的描述相符。电极直径在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 范围变化时侧面间隙变化不大,随着电极直径的大幅度增大,侧面间隙也随之急剧变大,加工精度降低,所以采用直径尽可能小的电极是提高微细电解加工精度最关键的工艺措施之一。

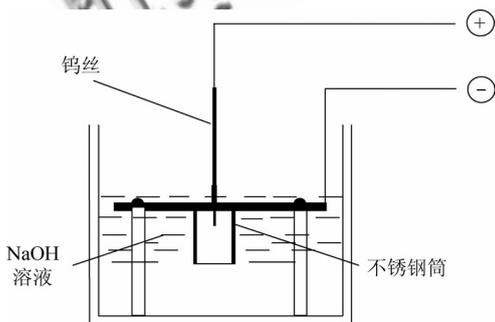


图 5 柱状电极制作原理图

Fig. 5 Schematic diagram of fabricating cylindrical micro-electrode

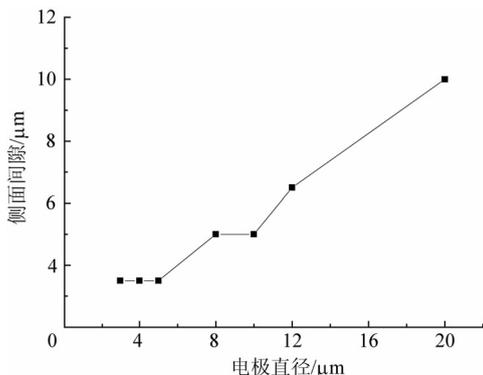


图 7 电极直径对侧面间隙的影响

Fig. 7 Effect of electrode diameter on side gap

3.2 加工电压对侧面间隙的影响

加工电压是微细电解加工中很重要的参数,是维持加工得以顺利进行的原动势能,为研究加工电压幅值对加工精度的影响,进行下组对比实验。该组实验参数为:工件材料为厚度 $100\ \mu\text{m}$ 的镍板,电极直径为 $10\ \mu\text{m}$,电解液为 $0.2\ \text{mol/L}$ 的 H_2SO_4 溶液,脉冲宽度为 $45\ \text{ns}$,脉冲周期为 $1\ \mu\text{s}$,进给速度为 $0.2\ \mu\text{m/s}$,向下进给深度为 $10\ \mu\text{m}$,电压幅值取 $3.5\sim 5.0\ \text{V}$ 。

从图 8 可知,电压幅值从 $3.5\ \text{V}$ 增加到 $5.0\ \text{V}$,侧面间隙逐渐增大,加工精度下降,与数学模型中的描述相符。这是因为随着脉冲电压幅值的提高,双电层过电位增大导致电极暂态过程的反应电流变大,单位时间内阳极材料的电化去除量增大,定域性下降。

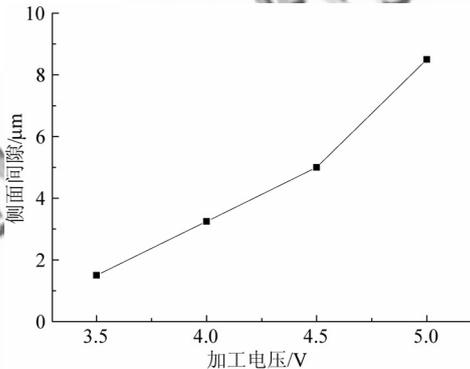


图 8 加工电压对侧面间隙的影响

Fig. 8 Effect of applied voltage on side gap

3.3 电解液浓度对侧面间隙的影响

电解液浓度直接关系着溶液的电导率,是微细电解加工中很重要的参数,为研究电解液浓度对加工精度的影响,进行下组对比实验。该组实验参数为:工件材料为厚度 $100\ \mu\text{m}$ 的镍板,电极直径为 $10\ \mu\text{m}$,电压为 $4.5\ \text{V}$,脉冲宽度为 $45\ \text{ns}$,脉冲周期为 $1\ \mu\text{s}$,进给速度为 $0.2\ \mu\text{m/s}$,向下进给深度为 $10\ \mu\text{m}$, H_2SO_4 溶液浓度取值范围为 $0.1\sim 0.6\ \text{mol/L}$ 。

从图 9 可知,随着电解液浓度增加,侧面间隙迅速增大,加工精度下降剧烈。这是因为随着溶液浓度的提高,溶液的电导率大幅上升,导致电极暂态加工过程的电流密度变大,单位时间内阳极材料的电化去除量增大,定域性急剧下降。所以,在保证一定进给速度加工稳定的前提下,应取浓度尽量低的 H_2SO_4 溶液。

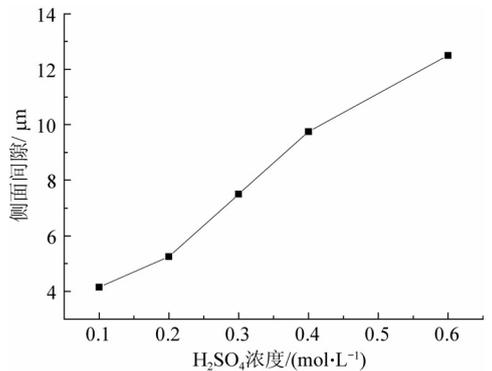


图 9 电解液浓度对侧面间隙的影响

Fig. 9 Effect of electrolyte concentration on side gap

3.4 铣削层厚度对形状精度的影响

根据本文加工数学模型,单次进给深度(铣削层厚度),要不大于电极直径才能保证良好的形状精度。为验证铣削层厚度对形状精度的影响,进行了以下对比实验。实验参数:工件材料为厚度 $300\ \mu\text{m}$ 的镍板,电极直径为 $10\ \mu\text{m}$,电解液为 $0.2\ \text{mol/L}$ 的 H_2SO_4 溶液,加工电压为 $4.5\ \text{V}$,脉冲周期为 $1\ \mu\text{s}$,进给速度为 $0.2\ \mu\text{m/s}$,图 10(a)向下进给深度为 $15\ \mu\text{m}$,图 10(b)向下进给深度为 $10\ \mu\text{m}$,其中白虚线方框中所示的是加工起始点位置。

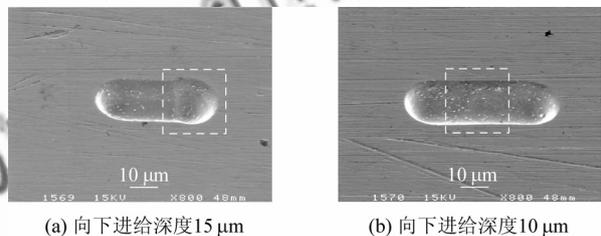


图 10 铣削层厚度对形状精度的影响

Fig. 10 Effect of layer thickness on shape accuracy

由图 10(a)可以看出,当铣削层厚度大于电极直径时,加工起始点周围侧壁的二次加工时间过长,使得竖直进给加工阶段孔的侧面间隙 Δs_x 大于平面铣削过程的侧面间隙 Δs_y ,致使加工起始点的形状精度变差,起始点加工缺陷明显。由图 10(b)可以看出,当铣削层厚度小于等于电极直径时,无明显起始点加工缺陷,可取得较好的形状精度,实际加工效果与数学模型式(15)的描述相符。所以要保持较好的形状精度,铣削层厚度的取值必须小于或等于电极直径。

3.5 实验结果

基于以上加工参数的优化,本文进行了较复
© 航空学报杂志社 <http://hkxb.buaa.edu.cn>

杂三维型腔的微细电解分层铣削加工,图11是在 $0.2\text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ 电解液,加工电压为 4.5 V ,脉宽为 45 ns ,脉冲周期为 $1\text{ }\mu\text{s}$,加工进给速度为 $0.2\text{ }\mu\text{m/s}$ 的加工条件下,在厚度为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 镍片上分4层铣削加工出的深三角结构,三角形边长 $50\text{ }\mu\text{m}$,深 $35\text{ }\mu\text{m}$ 。表面形貌仪沿A-A截面扫描的底部表面形貌显示,表面波峰与波谷的最大落差小于 $0.8\text{ }\mu\text{m}$,测得的表面粗糙度值 $R_a=0.1387\text{ }\mu\text{m}$;图12所示四棱台型腔结构的加工条件同图11,型腔深为 $40\text{ }\mu\text{m}$,其中棱台顶端正方形尺寸约为

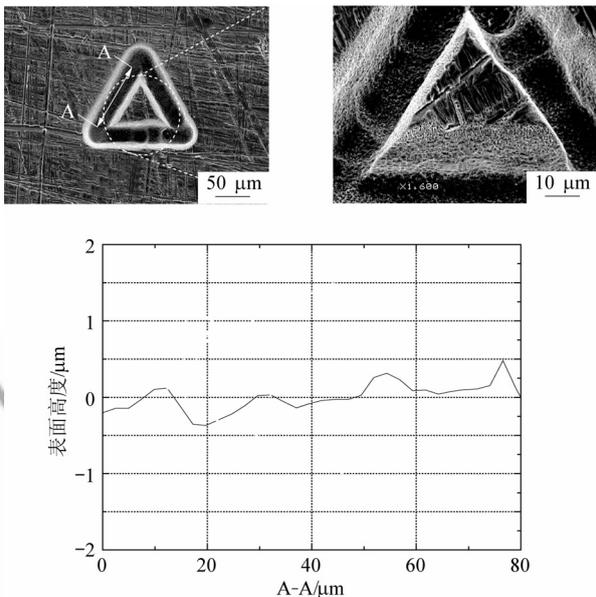


图11 微三角结构

Fig. 11 A micro triangular structure

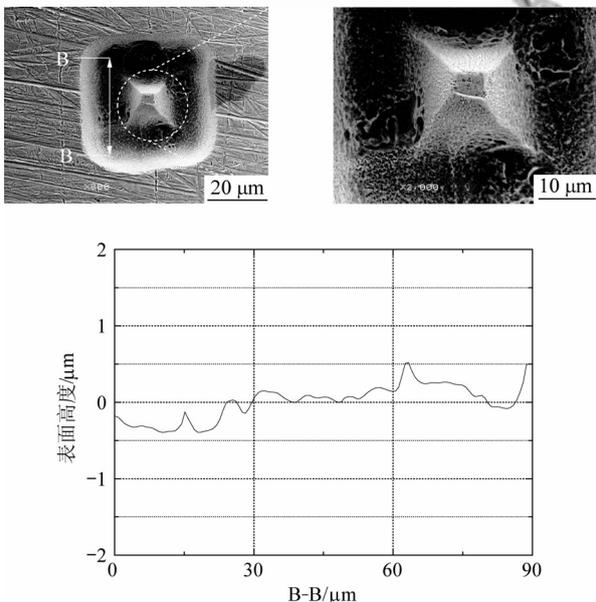


图12 微四棱台结构

Fig. 12 A micro square cavity with schneblia structure

$7\text{ }\mu\text{m}\times 7\text{ }\mu\text{m}$ 。表面形貌仪沿B-B截面扫描的底部表面形貌如图所示,表面波峰与波谷的最大落差小于 $0.8\text{ }\mu\text{m}$,测得的表面粗糙度值 $R_a=0.1844\text{ }\mu\text{m}$ 。从结果可以看出所加工的微结构无明显加工起始点缺陷,加工表面平整,具有较好的形状精度和较大的深宽比,显示了微细电解铣削加工很强的定域性加工效果。

4 结论

(1) 基于电化学双电层的暂态反应过程,建立了微细电解铣削加工数学模型,指出了影响加工精度的因素,为后续的加工实验奠定了理论基础。

(2) 搭建了高精度微细电解加工平台,并在线制作了直径 $10\text{ }\mu\text{m}$ 、加工端形状均匀的柱状电极,采用此种电极作为加工工具进行了多组实验,并分析了电极直径、加工电压、电解液浓度、铣削层厚度等对加工精度和形状精度的影响,确定了加工的优化参数。

(3) 基于上述加工参数的优化,成功加工出了深三角结构和四棱台微型腔,具有良好的形状精度和已加工表面质量,棱角分明,说明微细电解铣削工艺具备很强的加工定域性,可以很好地满足微器件的加工要求。

参 考 文 献

- [1] McGenough J A, Leu M, Rajurkar K P, et al. Electroforming process and application to micro/macro manufacturing[J]. Annals of the CIRP, 2001, 50(2): 499-514.
- [2] Rajurkar K P, Levy G, Malshe A, et al. Micro and nano machining by electro-physical and chemical processes[J]. Annals of the CIRP, 2006, 55(2): 643-666.
- [3] Yu Z Y, Masuzawa T, Fujino M. 3D micro-EDM with simply shaped electrode[J]. Annals of the CIRP, 1997, 46(1): 1-8.
- [4] Yu Z Y, Masuzawa T, Fujino M. Micro-EDM for three-dimensional cavities[J]. Annals of the CIRP, 1998, 47(1): 169-172.
- [5] Meeusen W, Reynaerts D. The machining of freeform micro moulds by micro EDM[EB/OL]. (2003-06-18)[2009-10-01]. http://www.mech.kuleuven.ac.be/pma/research/mpe/pub/prod/default_en.phtml.
- [6] 李文卓. 微细电火花加工系统及其相关技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学机电工程学院, 2002. Li Wenzhuo. Research on a micro EDM system and its key techniques[D]. Harbin: School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, 2002. (in Chinese)
- [7] 赵万生, 李志勇, 王振龙, 等. 微三维结构电火花铣削加工[J]. 航空学报, 2008, 29(12): 2053-2058. Zhao Wansheng, Li Zhiyong, Wang Zhenlong, et al. Micro three-dimensional structure EDM milling[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(12): 2053-2058.

- 键技术研究[J]. 微细加工技术, 2003, 9(3): 49-55.
- Zhao Wansheng, Li Zhiyong, Wang Zhenlong, et al. Research on key techniques of 3D micro-EDM milling[J]. Microfabrication Technology, 2003, 9(3): 49-55. (in Chinese)
- [8] Schuster R, Kirchner V, Allongue P, et al. Electrochemical micromachining[J]. Science, 2000, 289(5476): 98-101.
- [9] Trimmer A L. Electrochemical machining of micro and nanostructures with ultra-shot voltage pulse[D]. Virginia: University of Virginia, 2005.
- [10] Kurita T, Chikamori K, Kubota S, et al. A study of three-dimensional shape machining with an EC μ M system [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46(12): 1311-1318.
- [11] Kim B H, Ryu S H, Choi D K, et al. Micro electrochemical milling[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2005, 15(1): 124-129.
- [12] Li Y, Zheng Y F, Yang G, et al. Localized electrochemical micromachining with gap control[J]. Sensors Actuators A: Physical, 2003, 108(1-3): 144-148.
- [13] 李小海, 王振龙, 赵万生. 基于多功能加工平台的微细电解加工工艺[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(6): 909-913.
Li Xiaohai, Wang Zhenlong, Zhao Wansheng. The electrochemical micromachining based on multifunction tool for micromachining[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2006, 40(6): 909-913. (in Chinese)
- [14] 张朝阳, 朱荻, 王明环. 纳秒脉冲微细电化学加工的理论及实验[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1): 208-213.
Zhang Zhaoyang, Zhu Di, Wang Minghuan. Theoretical and experimental research into electrochemical micro-machining using nanosecond pulse[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(1): 208-213. (in Chinese)
- [15] Lim Y M, Kim S H. An electrochemical fabrication method for extremely thin cylindrical micropin[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(15): 2287-2296.

作者简介:

刘勇(1982—) 男, 博士研究生。主要研究方向: 微细制造技术及其微机电控制。

Tel: 025-84895912

E-mail: rzliuyong@163.com

朱荻(1954—) 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 特种加工和微细特种加工技术。

Tel: 025-84896866

E-mail: dzhu@nuaa.edu.cn

曾永彬(1977—) 男, 博士, 讲师。主要研究方向: 特种加工和微细特种加工技术。

Tel: 025-84896601

E-mail: binyz@nuaa.edu.cn

王少华(1981—) 男, 博士研究生。主要研究方向: 微细特种加工技术。

Tel: 025-84895912

E-mail: shaohuafei2008@yahoo.cn

黄绍服(1974—) 男, 博士研究生, 副教授。主要研究方向: 特种加工技术。

Tel: 025-84895912

E-mail: shfhuang@nuaa.edu.cn

(编辑: 蔡斐)