

文章编号 1004-924X(2018)04-0857-09

## 高回转精度多阶柱状微电极电化学高效制备试验研究

刘 勇<sup>\*</sup>, 邓世辉

(山东大学 力学与机电装备联合工程技术研究中心, 山东 威海 264209)

**摘要:**为实现高回转精度多阶柱状微电极的高效加工,对多阶柱状电极电化学刻蚀过程进行了深入的研究与改进。首先,根据电化学刻蚀理论推导了加工电流对电极直径变化的影响规律;通过试验证明了电极旋转可提高电流变化速率及有效起始电流进而提高加工效率,定性分析了电极旋转对电极回转精度的影响,提出了分阶变转速高效加工高回转精度多阶柱状微电极的方法;通过试验分析了各加工参数(电极转速、加工电压和切断电流)对电极形状及尺寸的影响;最后,在优化后的加工参数下,成功加工得到末端直径小于 15  $\mu\text{m}$  且同轴度误差在 1  $\mu\text{m}$  以内的多阶柱状微电极,与常规电化学刻蚀工艺相比,显著提高了加工效率。试验证明旋转电化学刻蚀是一种能够较好地提高微电极加工效率及回转精度的新工艺。

**关键词:**多阶柱状微电极;加工效率;回转精度;电极旋转;加工电流

中图分类号:V261.5; TG662 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20182604.0857

## Experimental research on high-efficiency electrochemical machining of multi-stepped cylindrical microelectrode with high rotating precision

LIU Yong<sup>\*</sup>, DENG Shi-hui

(Associated Engineering Research Center of Mechanics & Mechatronic Equipment,  
Shandong University, Weihai 264209, China)

\* Corresponding author, E-mail: rzliuyong@163.com

**Abstract:** In order to achieve the high-efficiency machining of multi-stepped cylindrical microelectrode with high rotating precision, the electrochemical etching process of multi-stepped electrode was studied and improved deeply. Firstly, according to the principle of electrochemical etching, the effect of machining current on the change of electrode diameter was deduced. Secondly, the experiments proved that the electrode rotation could improve the current change rate and the effective initial current and thus improved the machining efficiency. And then, the influence of electrode rotation on the rotating precision of the electrode was analyzed, and the method of fabricating multi-stepped cylindrical microelectrode with high rotating precision efficiently by different rotation speeds combination was proposed. Thirdly, the influence of machining parameters, such as the rotation speed, the voltage and the cut-off current, on the shape and size of the electrodes were analyzed. Finally, by using the optimized machining parameters, multi-stepped cylindrical microelectrodes with end diameter less than 15

收稿日期:2017-09-12;修订日期:2017-10-09.

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(No. ZR2018MEE018);国家自然科学基金资助项目(No. 51305238);中国博士后基金资助项目(No. 2015M572023);山东大学(威海)青年学者未来计划资助项目(No. 2015WHWLJH03)

$\mu\text{m}$  and the coaxial error within  $1\ \mu\text{m}$  were successfully fabricated. Compared with the conventional electrochemical etching process, the method presented in the paper improves the machining efficiency significantly. It is proved that rotating electrochemical etching is a better method to improve the machining efficiency and rotating precision of microelectrodes.

**Key words:** multi-stepped cylindrical microelectrode; machining efficiency; rotating precision; electrode rotation; machining current

## 1 引言

随着科技的不断发展,微电极已广泛应用于微细加工、测量和医疗等领域,为满足微尺度零部件的加工需求,对电极的尺寸、精度以及加工效率提出了更高的要求<sup>[1-3]</sup>,高效制备高精度微电极已成为微细加工领域的研究热点。

目前,国内外学者在微电极制备方面取得了一定研究成果。日本的 Waida 通过微细研磨技术制备直径  $50\ \mu\text{m}$  的电极<sup>[4]</sup>; Yamagata 采用精密切削技术制备直径为  $10\ \mu\text{m}$  的电极<sup>[5]</sup>; Masuzawa 采用微细电火花线磨削方法制备直径  $5\ \mu\text{m}$  的电极<sup>[6-7]</sup>。美国的 Bryant 利用微细电化学刻蚀技术制备出针尖  $5\ \text{nm}$  的微电极<sup>[8]</sup>; Fotino 提出并使用反拷微细电化学刻蚀法加工出尖端直径  $1\ \text{nm}$  的钨电极<sup>[9]</sup>。韩国的 Lim 提出电化学加工扩散层理论,并制备出长度  $4\ \text{mm}$ 、直径  $50\ \mu\text{m}$  的均匀柱状电极,并提出了通过控制电流密度进而控制微电极最终直径的方法<sup>[10]</sup>。国内,哈尔滨工业大学的黄燕华等,用精密切削技术加工出直径仅有  $7\ \mu\text{m}$  的柱状电极<sup>[11]</sup>; 曹国辉等通过单脉冲放电电火花加工技术,瞬间成型长  $350\ \mu\text{m}$ 、直径  $30\ \mu\text{m}$  的电极<sup>[12]</sup>。浙江工业大学的王明环等,基于电化学腐蚀加工微柱状电极的方法,对加工过程理论建模,进而对加工电流电压等参数进行分析控制,最终加工出直径  $6\ \mu\text{m}$  的柱状电极<sup>[13-14]</sup>。南京航空航天大学的刘勇等,针对单阶电极的不足,建立加工多阶电极的控制模型,成功加工出末端直径  $3\sim 30\ \mu\text{m}$  的多阶柱状电极<sup>[15-17]</sup>。山东大学的李名鸿等,建立了电化学刻蚀过程中控制电极加工的数学模型,成功制备出直径  $100\ \mu\text{m}$  且同轴度较好的单阶柱状电极<sup>[18]</sup>。

常用的微电极加工技术有:微细研磨、精密切削、微细电火花磨削(Wire Electro-discharge Grinding, WEDG)和电化学等,这些加工方法有

各自的优点,同时也存在一定的不足。微细研磨和精细切削属于切削加工,加工过程中电极会承受径向的切削力,因此不易加工出尺寸较小的电极,且设备使用成本太高;WEDG 虽然能加工出精度高的电极,但加工效率低、成本高,不适合大批量生产;电化学刻蚀将材料以离子的形式去除,加工过程中无接触不会产生变形,可以加工出很小的尺寸,是一种成本低且效率较高的方法,受到国内外学者的关注。但是,常规的电化学刻蚀方法,电极的回转精度易受装夹以及电极与工具阴极加工间隙不均匀等因素的影响,加工的电极回转精度一般不高。通过电极旋转加工的单阶柱状电极回转精度较高,但不易加工出较小尺寸。因此本文在常规电化学刻蚀工艺的基础上,加入电极旋转及分阶加工方法,利用转速对加工效率及电极回转精度的影响,提出一种可稳定加工末阶直径十数微米,高效制备高回转精度微柱状电极的方法。

## 2 试验装置及加工原理

### 2.1 试验装置

本文高回转精度多阶柱状电极加工试验平台结构示意图如图 1 所示,试验机床采用双龙门立柱结构,在保证机床刚度的同时,保证机床的加工精度、操作及可维护性。试验加工平台主要包括:微进给系统、微电极系统、升降台、检测与控制系统以及直流电源等。

微进给系统使用的是直线微位移电动工作台。直线位移平台是通过 MP-C154 四轴运动控制卡控制电动滑台 X-Y-Z 方向精密进给,分辨率可达  $0.1\ \mu\text{m}/\text{step}$ ,往复定位精度  $\pm 0.5\ \mu\text{m}$ ,可以实现微米级进给,精确控制加工电极时的浸液深度。试验中电源使用的是 IT6121 线性可编程直流电源,最大输出直流电压  $20\ \text{V}$ ,最大输出电流  $5\ \text{A}$ ,滞后时间小于  $20\ \text{ms}$ ,分辨率  $0.1\ \text{mV}/0.01$

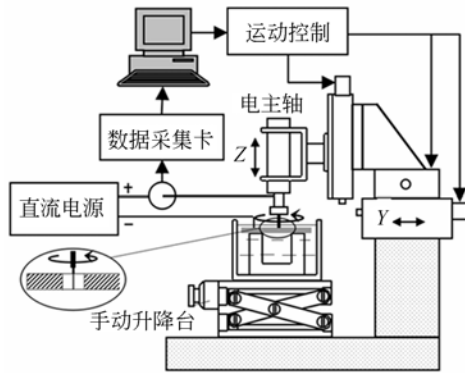


图 1 试验机床结构

Fig. 1 Structure of machine tool

mA,可以快速调节输入电压,保证输入稳定的加工电压。

微电极系统包括:带孔不锈钢板(阴极)、待加工电极(阳极)、弹性夹头及电主轴。试验中钨丝作为阳极,通过弹性夹头装夹在电主轴上;带孔阴极板装夹在放置于升降台上的电解液槽内,通过调节升降台实现电解液槽上下运动。

检测与控制系统主要采集加工过程中的电信号,本文使用的是 NI 公司生产的 PCI-6221 数据采集卡,与虚拟仪器平台上开发的一套加工检测系统相匹配,把检测到的加工电流导入计算机中进行分析处理,实时检测加工电流,便于控制电极加工的最终状态。

多阶柱状微电极直径及同轴度测量装置使用的是日本 Nikon SMZ1270 体视显微镜,平行光学系统,提供  $12.7 \times (0.63-8x)$  同等级最高变倍比。

### 2.2 加工原理

多阶电极加工基于电化学刻蚀原理,阴极使用的是厚 2 mm 带有直径  $\Phi 5$  mm 圆孔的不锈钢板,阳极是直径  $500 \mu\text{m}$  的校直钨丝,置于孔的中心,加工原理如图 1 所示。加工电极时,钨丝通过弹性夹头装夹在电主轴前端,校直后通过直线位移平台进给,穿过浸没于一定浓度 NaOH 溶液的不锈钢板小孔中心到一定深度后,电主轴旋转,在外加直流电源的作用下,进行电化学刻蚀加工。为了将电极原料加工成多阶电极,需要将电极刻蚀加工一段时间后提起,再进行加工,加工过程如图 2 所示。因为加工每一阶电极的浸液深度不同,为保证电极圆柱状,加工过程中需要按阶改变加工电压。多阶柱状电极制备可以看作一个电极原料上进行多次不同浸液深度单阶柱状电极加

工,文中理论与试验仅对一阶电极加工过程进行研究。

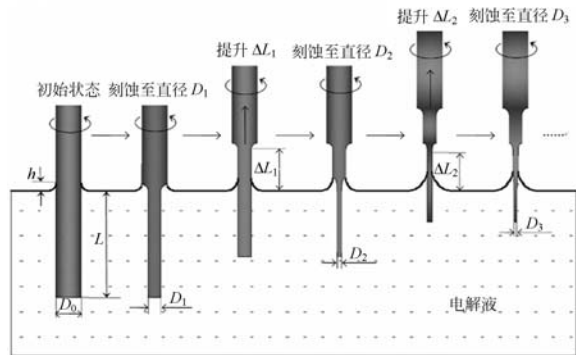


图 2 多阶柱状电极加工过程示意图

Fig. 2 Machining process of multi-stepped cylindrical electrode

根据法拉第定律,电化学加工过程中阳极材料的蚀除量由消耗的电荷量决定,而阳极电极被溶解的金属量与通过的电流大小和时间成正比。在试验过程中消耗的具体电荷量难以测得,但电流变化及加工时间可以检测,加工电流是影响电化学刻蚀加工效率的一个重要参数。

由法拉第第一定律可知,电化学加工金属溶解的理论重量为:

$$W = KQ, \quad (1)$$

式中:  $W$  为金属溶解的重量,  $Q$  为加工过程消耗的电荷量,  $K$  为元素的电化学当量。

在电解加工过程中,当电极被加工得到均匀圆柱状时,电极被腐蚀部分的体积和所消耗的电荷量之间的关系为:

$$V = W/\rho = (K/\rho)Q = \omega Q, \quad (2)$$

式中:  $V$  为电解蚀除的体积,  $\rho$  为电极材料密度。

同时,所消耗的电荷量可由加工电流来表示:

$$Q = \int_0^t I dt. \quad (3)$$

设被腐蚀后,电极的直径为  $D$ ,初始直径为  $D_0$ ,浸液深度为  $L$ ,由于表面张力液面上升的高度为  $h$ ,液面上腐蚀轮廓为抛物线型,则被腐蚀的体积为:

$$V = - \left[ \frac{\pi}{4} L + \frac{2\pi}{15} h \right] D^2 - \frac{\pi D_0 h}{15} D + \left[ \frac{\pi}{4} L + \frac{\pi}{5} h \right] D_0^2, \quad (4)$$

将式(3)和式(4)代入式(2),然后两边对时间  $t$  求导,可得电极直径变化率  $D'$ :

$$D' = \frac{-I\omega}{(\pi/2L + 4\pi/15h)D + \pi D_0 h/15} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,在电极直径  $D$  为某一值时,电极直径变化率  $D'$  的绝对值随着加工电流  $I$  的增大而增大,在加工电流为某一值时,电极直径变化率  $D'$  的绝对值随电极直径  $D$  的减小而增大。则可得出,在加工电流越大时电极直径变化越快,电极直径越小直径变化得越快。

由于加工电流随时间呈线性变化<sup>[13]</sup>,所以加

$$t = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 2k[(\frac{\pi}{4}L + \frac{2\pi}{15}h)D^2 + \frac{\pi D_0 h}{15}D - (\frac{\pi}{4}L + \frac{\pi}{5}h)D_0^2]}/\omega}{k} \quad (8)$$

将式(8)带入式(6)可得:

$$D = \frac{-\frac{\pi D_0 h}{15} + \sqrt{(\frac{\pi D_0 h}{15})^2 - 4(\frac{\pi}{4}L + \frac{2\pi}{15}h)[\frac{\omega(I^2 - b^2)}{2k} - (\frac{\pi}{4}L + \frac{\pi}{5}h)D_0^2]}}{2(\frac{\pi}{4}L + \frac{2\pi}{15}h)} \quad (9)$$

式中液面上升高度  $h$  跟电解液性质有关,其计算公式为:

$$h = \frac{4\sigma\cos\theta}{\rho g D_0} \quad (10)$$

式中: $\sigma$  为表面张力系数, $\theta$  为切角, $\rho$  为电解液密度。

由式(8)和式(9)可以看出微电极的直径与加工时间以及加工电流成一定函数关系,理论上可以通过控制加工时间或加工电流来控制加工电极的直径。但是实际由于电极材料本身的原因,在电化学刻蚀过程中阳极可能会存在块状的脱落,并不完全是离子状态的溶解;这一现象加快了电极直径的变化速度,缩短了加工时间,本试验加工的末阶电极直径在  $15 \mu\text{m}$  以内,如果通过加工时间控制加工电极的直径,很容易导致最后一阶电极断掉。加工电流与加工电压、电极直径以及加工间隙内电解液有关,而这些外界因素波动较小,更容易控制。所以本试验通过切断电流来反馈控制加工电极的直径。

### 3 试验与分析

#### 3.1 电极转速对加工电流的影响

为研究电极转速对加工电流的影响规律,进行 4 组不同电极转速下的对比试验。试验参数:钨丝初始直径  $500 \mu\text{m}$ 、加工电压  $1.4 \text{ V}$ 、浸液深度  $3 \text{ mm}$ ,得到加工电流随时间变化情况如图 3。

工电流随时间变化的表达式为:

$$I = kt + b \quad (6)$$

式中  $k, b$  分别为加工电流随时间变化直线斜率和截距,可通过试验测得。

加工初始时刻  $t=0$ ,所以消耗电荷量  $Q=0$ ,由式(3)和式(6)可得:

$$Q = \frac{1}{2}kt^2 + bt \quad (7)$$

由式(2)、式(4)和式(7)可得:

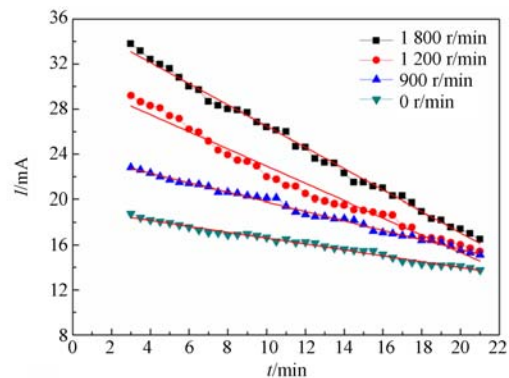


图 3 加工电流随加工时间的变化规律

Fig. 3 Variation of current with machining time

由图 3 可知,无论电极是否旋转,加工电流随加工时间的变化基本呈线性关系,即电极旋转时电流与时间也满足关系式:  $I = kt + b$ ; 同时,电极转速越大,初始时刻电流(有效起始电流)越大,电流变化率也略微增大。

为进一步验证电极转速对有效起始电流的影响,在相同的浸液深度及电解液浓度下,测得的不同加工电压下,有效加工电流初始值(开始加工后  $3 \text{ min}$  测得)随电极转速的变化规律,如图 4 所示。

由图 4 可知,在固定的加工电压下,一定范围内有效起始电流随转速的增大而增大;对于同一电极转速,随着加工电压的增大有效起始电流也随之增大。由于电极的旋转对周围的电解液产生了扰动作用,促进了电化学刻蚀的传质过程,使电

解过程能高效地进行,有效起始电流增大,因此电极旋转能提高有效起始电流。

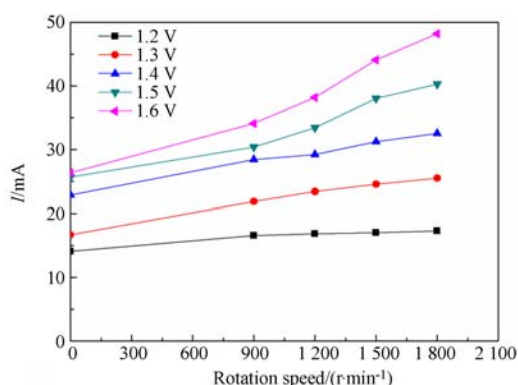


图4 有效起始电流随电极转速的变化规律

Fig. 4 Variation of initial machining current with rotation speed

由上述试验可知,电极旋转能提高有效起始电流及电流变化率,在一定范围内转速越高,有效起始电流越大,电流变化率会有小幅度提高。由图3和公式(5)可知,有效起始电流越大,电极直径变化越快,相同时刻电极直径越小,进一步提高电极直径的变化速率即加工效率。从消耗电荷量分析,相同加工条件下,转速越高,相同加工时间内电流与时间积分面积越大即消耗的电荷量 $Q$ 越多,蚀除材料越多,电极直径越小,加工效率越高。因此为了提高电化学刻蚀加工的效率,理论上在一定转速范围内可使用较高的电极转速。

### 3.2 电极旋转对加工效率及同轴度的影响

为验证电极转速对加工效率的影响规律,进行5组不同转速下的对比试验。试验参数:电解液为2 mol/L的NaOH溶液、钨丝初始直径500  $\mu\text{m}$ 、浸液深度3 mm、加工电压1.4 V、加工时间21 min,得到电极平均直径随电极转速的变化情况如图4所示。

由于1.4 V的加工电压,并不是每个转速下最优的加工电压,加工的电极并不全是均匀圆柱状,所以图5中的电极直径为电极平均直径。由图5可知,一定范围内转速越大,相同加工时间内电极平均直径越小,加工效率越高。

电极旋转使得电极表面上每个点的位置成周期性变化,因此即使电极不在阴极孔正中心位置,也会使得电极周围的流场和电场动态均匀,电极同一截面上每一点处电极蚀出速率近似相等,所以加工得到的电极可具有较高的同轴度<sup>[18]</sup>。图6

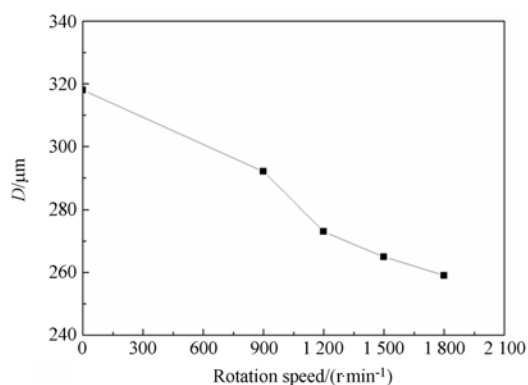
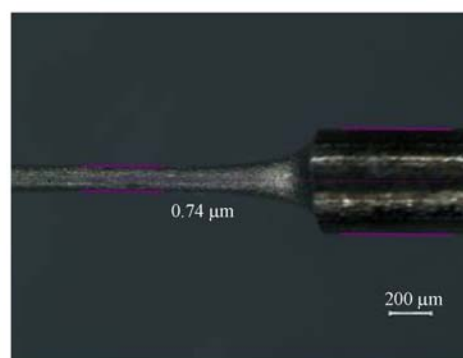


图5 电极平均直径随电极转速的变化规律

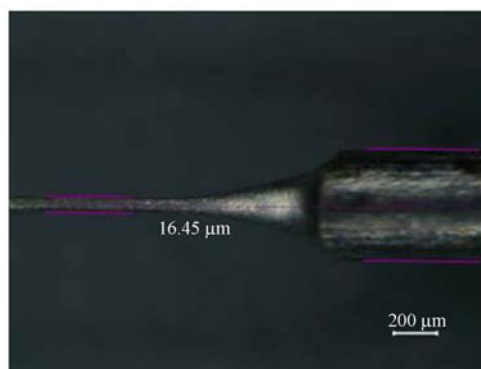
Fig. 5 Variation of average diameter with rotation speed

(a)所示为旋转电化学刻蚀加工的电极,同轴度误差为0.74  $\mu\text{m}$ ;图6(b)所示为常规电化学刻蚀加工的电极,同轴度误差为16.45  $\mu\text{m}$ 。



(a) 旋转电化学刻蚀加工的电极

(a) Electrode fabricated by rotating electrochemical etching



(b) 常规电化学刻蚀加工的电极

(b) Electrode fabricated by conventional electrochemical etching

图6 两种电化学刻蚀方法加工的电极同轴度对比  
Fig. 6 Comparison of electrodes' coaxiality of two different electrochemical etching machining

### 3.3 电极转速对加工电压的影响

根据多阶电极的制备原理可知,电极的浸液深度会分段变化,由于在固定的浸液深度下,只有一个最优的加工电压能将电极加工至呈均匀柱状,而不同的电极转速下加工电压也不同,为保证电极加工成均匀圆柱状,需要合理组合加工电压和电极转速。为揭示柱状电极加工电压与电极转速之间的关系,在电解液为 2 mol/L 的 NaOH 溶液,浸液深度分别为 1 500  $\mu\text{m}$ , 2 000  $\mu\text{m}$ , 3 000  $\mu\text{m}$  的条件下进行分组试验。

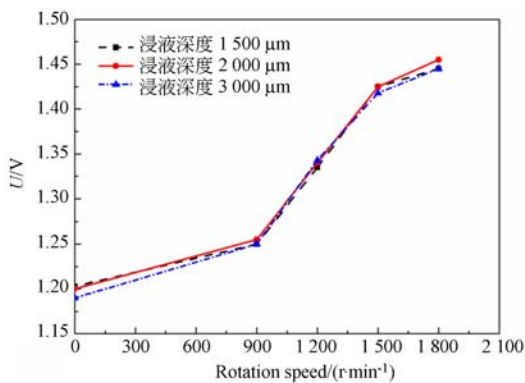


图 7 加工电压随电极转速变化规律

Fig. 7 Variation of machining voltage with rotation speed

试验结果如图 7 所示,在相同浸液深度,加工得到圆柱状电极的前提下,加工电压随电极转速的增大而增大。这是由于在电极加工过程中,电极旋转对电极表面的扩散层有减薄的趋势,电极有形成“尖锥状”的趋势,而加工电压的增大对扩散层有一个增厚的趋势,电极有形成“纺锤状”趋势<sup>[18]</sup>。在这两种趋势相互抵消下,才可以将电极加工得到均匀圆柱状。同时高转速下较大的加工电压能提高加工电流进而提高电极加工效率。常规电化学刻蚀加工圆柱状电极浸液深度越小加工电压越大<sup>[13]</sup>,由于电极的旋转对试验结果的影响较大,所以在相同转速、不同浸液深度的条件下,理想加工电压比较接近,说明在不同浸液深度的条件下,加工电压随转速的变化规律是一致的。

### 3.4 切断电流对电极直径的影响

多阶电极旋转电化学刻蚀加工过程中,较难直接测量电极的直径,所以本文通过加工电流控制电极的加工直径。在保证加工出柱状电极的前提下,对电极直径随切断电流的变化关系进行研究。试验参数:钨丝初始直径 500  $\mu\text{m}$ 、转速 1 800

r/min、浸液深度 3 000  $\mu\text{m}$ 、加工电压 1.41 V。切断电流与加工的电极直径关系如图 8 所示。

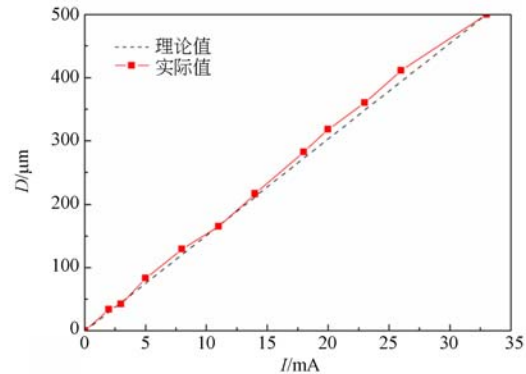


图 8 电极直径随切断电流的变化规律

Fig. 8 Variation of electrode diameter with cut-off current

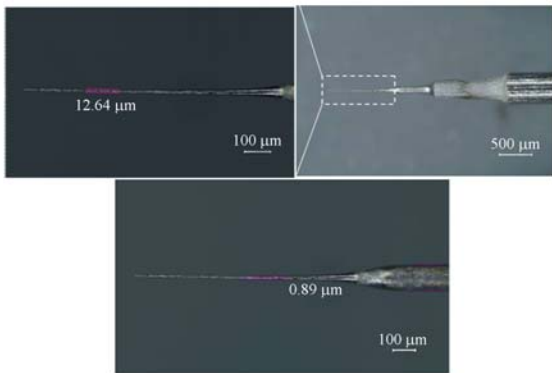
图 8 中的理论值是通过公式(9)计算得到的,试验值与理论值曲线较为吻合,验证了切断电流控制加工电极直径方法的可行性。

## 4 试验与讨论

综合上述分析,电极旋转能提高电极加工的效率 and 回转精度,在一定范围内电极转速越高,加工效率就越高。针对单阶电极不易加工较小尺寸的不足,利用电极旋转及分段加工方式加工出工作端小于 15  $\mu\text{m}$  的三阶电极,并与常规电化学刻蚀工艺加工结果进行了对比。试验参数如下:选取初始直径为 500  $\mu\text{m}$  的钨丝为试验材料,电解液为 2 mol/L 的 NaOH 溶液,设定多阶柱状电极为三阶,各阶直径分别为 250  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$ , 各阶长度分别为 1 000  $\mu\text{m}$ , 500  $\mu\text{m}$ , 1 500  $\mu\text{m}$ 。

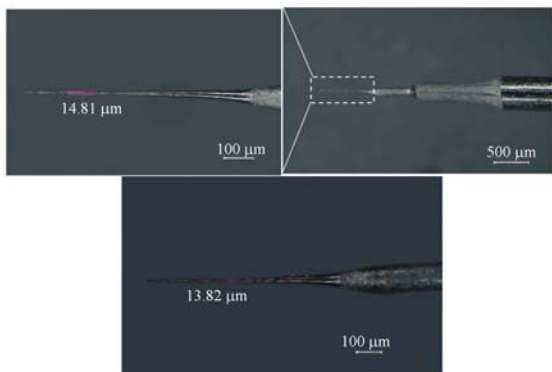
试验结果如图 9 所示,图 9(a)中电极一/二/三阶转速为 1 200/1 200/1 200 r/min,末阶电极直径 12.64  $\mu\text{m}$ ,同轴度误差为 0.89  $\mu\text{m}$ ;图 9(b)图中为常规电化学刻蚀加工,末阶电极直径 14.81  $\mu\text{m}$ ,同轴度误差为 13.82  $\mu\text{m}$ 。

上述两组试验加工时间如表 1 所示,试验一(图 9(a))各阶电极加工时间为 24 min, 12 min, 9 min,总加工时间为 45 min,试验二(图 9(b))各阶电极加工时间为 33 min, 17 min, 12 min,总加工时间为 62 min,加工效率初步提高了 27%。



(a) 电极转速 1 200 r/min 加工的三阶柱状电极

(a) Third-order cylindrical electrode fabricated by rotation speed of 1 200 r/min



(b) 电极不旋转加工的三阶柱状电极

(b) Third-order cylindrical electrode fabricated without rotation

图 9 不同转速条件下加工得到的三阶柱状电极  
Fig. 9 The third-order cylindrical electrodes fabricated with electrode rotation or not

表 1 电极转速与加工结果

Tab. 1 Rotation speed and machining results

	试验一	试验二
转速/( $r \cdot m^{-1}$ )	1 200/1 200/1 200	0/0/0
加工直径/ $\mu m$	262/103/12.64	258/104/14.81
末阶电极同轴度/ $\mu m$	0.89	13.82
加工时间 t/min	24/12/9	33/17/12

多阶柱状电极虽然具有较大的长径比,但参与加工的只有末端的部分,其形状精度和表面粗糙度对实际应用影响较大。由 2.2 节可知加工最后一阶电极时,较快转速下电极的腐蚀速率较快,不利于较小电极直径的精确控制,与常规电化学刻蚀工艺相比产生的误差较大。因此为了更高效

加工出高精度的多阶柱状电极,可采用不同转速的分段组合,即前几阶电极的加工使用较高转速,保证加工效率,最后一阶使用较低转速,保证加工精度。根据实际试验加工情况得出在 1 800/1 800/1 200 r/min 转速组合下,能较快加工出同轴度较高的三阶柱状电极。

图 10 所示,电极一/二/三阶采用 1 800/1 800/1 200 r/min 转速组合,末阶电极直径 14.81  $\mu m$ ,同轴度误差为 0.73  $\mu m$ 。

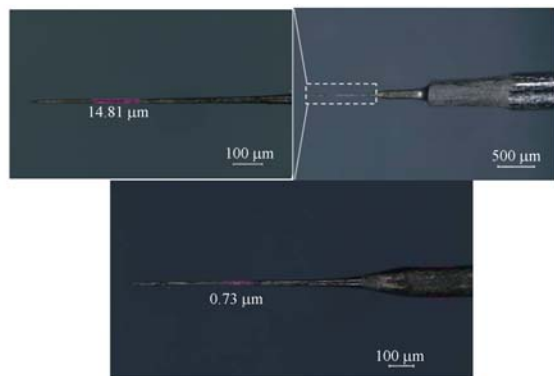


图 10 采用不同电极转速组合加工的三阶柱状电极  
Fig. 10 The third-order cylindrical electrode fabricated by different rotation speed combinations

本组采用优化电极转速后的加工时间如表 2 所示,试验三各阶电极的加工时间为 15 min,13 min,9 min,总加工时间为 37 min,加工效率相对于常规电化学刻蚀工艺提高了约 39%。

表 2 优化电极转速组合与加工结果

Tab. 2 Optimized rotation speed and machining results

试验三	
转速/( $r \cdot m^{-1}$ )	1 800/1 800/1 200
加工直径/ $\mu m$	290/110/14.81
末阶电极同轴度/ $\mu m$	0.73
加工时间 t/min	15/13/9

由上述试验结果可知,旋转电化学刻蚀加工得到的柱状微电极与常规电化学刻蚀加工的相比,回转精度较高,加工时间大大缩短,充分验证了旋转可以提高电化学刻蚀加工的效率及回转精度;并克服单阶电极不易加工较小直径的不足,通过分段和变速组合加工出末端直径 15  $\mu m$  左右的三阶柱状电极,并保证多阶柱状电极工作端有

较高的形状精度与同轴度。

## 5 结 论

本文针对十数微米级多阶柱状电极旋转电化学刻蚀工艺进行了原理分析和试验研究,并通过试验验证转速对加工电流、加工电压及加工效率的影响。试验结果表明:浸液深度相同,一定范围

内电极转速越高,加工圆柱状微电极所需的加工电压越大。电极的旋转促进了电化学反应传质过程,相同加工条件下,在一定范围内电极转速越高,加工电流越大、加工效率越高。通过合理的组合各阶电极的加工转速,可高效稳定加工出末端直径小于  $15\ \mu\text{m}$ 、同轴度误差  $1\ \mu\text{m}$  以内的多阶柱状微电极。本文的研究对微小尺寸柱状电极的高效制备提供有效的参考。

### 参考文献:

- [1] 刘勇,曾永彬. 用高转速微电极电解钻削深小孔[J]. 光学精密工程, 2014, 22(3): 608-615.  
LIU Y, ZENG Y B. Electrochemical drilling of deep and small holes with high speed micro electrode[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 608-615. (in Chinese)
- [2] LI Y, ZHENG Y F, YANG G, *et al.*. Localized electrochemical micromachining with gap control[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, 108(1-3): 144-148.
- [3] 徐斌,王振龙,伍晓宇,等. 三维队列微电极在微细电火花加工的应用[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1304-1313.  
XU B, WANG ZH L, WU X Y, *et al.*. Application of 3D queue micro-electrode to micro-EDM[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1304-1313. (in Chinese)
- [4] WAIDA T, OKANO K. Micro-grinding of micro-machine component[J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1995, 61(10): 1365-1368.
- [5] YAMAGATA Y, HIGUCHI T. Three-dimensional micro fabrication by precision cutting technique[J]. *Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, 1995, 61(10): 1361-1364.
- [6] MASUZAWA T, FUJINO M, KOBAYASHI K, *et al.*. Wire electro-discharge grinding for micro-machining[J]. *CIRP Annals*, 1985, 34(1): 431-434.
- [7] MASUZAWA T, TSUKAMOTO J, FUJINO M. Drilling of deep microholes by EDM[J]. *CIRP Annals*, 1989, 38(1): 195-198.
- [8] BRYANT P J, KIM H S, ZHENG Y C, *et al.*. Technique for shaping scanning tunneling microscope tips[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1987, 58(6): 1115.
- [9] FOTINO M. Nanotips by reverse electrochemical etching[J]. *Applied Physics Letters*, 1992, 60(23): 2935-2937.
- [10] LIM Y M, KIM S H. An electrochemical fabrication method for extremely thin cylindrical micropin[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2001, 41(15): 2287-2296.
- [11] 黄燕华,董申,袁光辉,等. 微细电极精密车削技术[J]. 电加工与模具, 2003(4): 14-16.  
HUANG Y H, DONG SH, YUAN G H, *et al.*. The precision turning technology to machine micro electrodes[J]. *Electromachining & Mould*, 2003(4): 14-16. (in Chinese)
- [12] 曹国辉,王振龙,迟关心,等. 基于单脉冲放电的钨微细电极快速成形方法及其应用研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(7): 43-47.  
CAO G H, WANG ZH L, CHI G X, *et al.*. Rapid fabrication of tungsten microelectrode based on a single discharge and its application[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(7): 43-47. (in Chinese)
- [13] 王明环,朱荻,张朝阳. 电化学腐蚀法加工微圆柱体[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6): 128-132.  
WANG M H, ZHU D, ZHANG ZH Y. Fabrication of micro-pin based on electrochemical etching[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(6): 128-132. (in Chinese)
- [14] 王明环,朱荻,徐惠宇. 电化学腐蚀法制备针尖的试验研究[J]. 传感器技术, 2005, 24(3): 24-26.  
WANG M H, ZHU D, XU H Y. Experimental research on tips preparation using electrochemical etching[J]. *Journal of Transducer Technology*, 2005, 24(3): 24-26. (in Chinese)
- [15] 刘勇,曾永彬,朱荻,等. 三维微细电解铣削加工的实时控制与检测[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1309-1318.  
LIU Y, ZENG Y B, ZHU D, *et al.*. Real-time

control and data acquisition system for 3D micro electrochemical milling[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6): 1309-1318. (in Chinese)

- [16] 刘勇,曾永彬,余宏兵,等. 多阶柱状微电极加工模型及试验研究[J]. *机械工程学报*, 2011, 47(17): 164-171.

LIU Y, ZENG Y B, YU H B, *et al.*. Theoretical and experimental research on fabrication of multiple stepped cylindrical micro electrode[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(17): 164-171. (in Chinese)

- [17] 刘勇,朱菽,曾永彬,等. 微细电解铣削加工模型及实验研究[J]. *航空学报*, 2010, 31(9): 1864-1871.

LIU Y, ZHU D, ZENG Y B, *et al.*. Theoretical and experimental research on micro electrochemical milling[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(9): 1864-1871. (in Chinese)

- [18] 李名鸿,刘勇,郭春生,等. 高回转精度微柱状电极电化学加工模型及试验[J]. *航空学报*, 2016, 37(12): 3864-3872.

LI M H, LIU Y, GUO CH SH, *et al.*. Model and experimental on fabrication of cylindrical micro electrode with high rotation accuracy by electrochemical machining[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(12): 3864-3872. (in Chinese)

#### 作者简介:



刘勇(1982-),男,山东日照人,博士,副教授,硕士生导师,2011年于南京航空航天大学获得博士学位,主要从事精密、微细特种加工方面的研究。E-mail: rzliuyong@163.com



邓世辉(1993-),男,安徽亳州人,硕士研究生,2016年于安徽理工大学获得学士学位,主要研究方向为精密、微细电解加工技术。E-mail: 971331437@qq.com