

文章编号:1000-582X(2010)12-034-06

## 阴极高速旋转对微细电化学钻孔加工精度的影响

黄绍服<sup>1,2</sup>, 曾永彬<sup>1</sup>, 朱 荻<sup>1</sup>, 王 维<sup>1</sup>, 刘 勇<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016; 2. 安徽理工大学 机械工程学院, 安徽 淮南 232001)

**摘 要:**微小孔在航空航天领域有广泛应用,而微细电化学加工是一种比较理想的微小孔方法。对工具阴极高速旋转条件下,工具阴极表面形成具有一定绝缘效果气泡层的现象进行了研究。分析了工具阴极旋转速度对微小孔电化学加工时半径过切值和杂散腐蚀的影响。结果表明,采用高旋转速度有利于减小微小孔电化学加工时半径过切值、表面粗糙度值和杂散腐蚀,对微小孔的加工精度提高起到了重要作用。

**关键词:**微细电化学加工;工具阴极;气泡层;高速旋转

**中图分类号:** TG662

**文献标志码:** A

### Influence of high speed rotating cathode on the precision of micro-electrochemical drilling hole

HUANG Shao-fu<sup>1, 2</sup>, ZENG Yong-bin<sup>1</sup>, ZHU Di<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>1</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, NUAU, Nanjing 210016, Jiangsu, P. R. China;  
2. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, P. R. China)

**Abstract:** The metal parts with small holes are widely used in the fields of aeronautics and astronautics. micro-electro chemical machining (micro-ECM) provides a viable alternative for drilling micro/small holes on metal parts with acceptable quality. This paper discusses the phenomenon of gas film formation of a certain insulation effects on the cathode, because of the cathode high speed rotating. Effects of several process factors, such as the cathode rotating speed on the radial of overcut, value of surface roughness and stray corrosion are investigated. The results show possibilities of improving the machining accuracy by utilizing cathode higher speed rotating.

**Key words:** micro-electrochemical machining; cathode; gas bubble film; high-speed rotating

微小孔在航空航天领域有广泛应用,但微小孔的加工一直是制造中的 1 个难点,研究人员围绕这一难点进行了大量研究。随着产品的日益微型化,对微小孔的加工也提出了更高的要求。微细电化学加工是以离子的形式对材料进行蚀除,具有表面质量好、与被加工材料硬度无关、加工后工件没有应力、变形和工具损耗等优点,可以实现微米级甚至更小尺度的微加工<sup>[1]</sup>。微细电化学加工在许多工业领

域中有着重要而广阔的应用前景,是当今最为活跃的研究领域之一<sup>[2]</sup>。很多研究机构对此领域进行了大量的研究探索<sup>[3-5]</sup>。在微小孔的加工中显示出其独特的优势,是一种比较理想的微小孔的加工方法。但是在微细电化学加工中也存在一个重要的问题,就是加工中工具阴极绝缘问题。使用侧壁绝缘工具阴极进行孔电解加工,能改变侧壁区域的电场分布<sup>[6]</sup>,减小侧壁的电密度,减小杂散腐蚀,从而减

收稿日期:2010-07-08

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50635040);江苏省自然科学基金资助项目(BK2008043)

作者简介:黄绍服(1974-),男,安徽理工大学副教授,主要从事特种加工方向研究,(E-mail)shfhuang@nuaa.edu.cn。

小孔的锥度。微细电化学加工间隙非常小,如果利用改变工具阴极基本尺寸的绝缘方法会导致加工间隙变得更小,造成电解液循环困难,尤其在加工深径比较大的微小孔时,加工间隙内电解液更新困难,电解产物难以从加工间隙中排出,容易发生短路,导致加工难以稳定进行<sup>[7]</sup>。另外微细电化学加工所使用工具电极基本尺寸非常小,现有绝缘方法很难具有良好绝缘效果。在试验过程中发现,微细工具阴极绝缘层容易脱落,影响加工精度。因此有必要研究一种既不改变工具阴极尺寸又具有一定绝缘效果的方法,来提高加工精度和稳定性。

在电化学加工过程中,反应产物中含有气体,在电极表面会形成气泡层,对电极反应会产生一定影响<sup>[8]</sup>。许多研究人员对电化学加工过程中的电极表面附近析气反应进行了研究。Vogt 研究了电化学反应过程中电极表面气泡层形成的机理和运动特征<sup>[9]</sup>,Pendekanti 等人提出了基于暂态电阻气泡层电化学模型,发现电极表面和电解液界面上气泡的产生、附着和脱落直接影响电极表面电位和电流密度分布<sup>[10]</sup>。

南京航空航天大学徐惠宇等利用高速旋转工具阴极电解加工微小孔,发现孔的圆度得到提高<sup>[11]</sup>,南京航空航天大学的王明环等利用微螺旋工具阴极低速旋转,发现微细电解加工加工区域电解产物排出能力得到加强,有利于微细电解加工进行<sup>[12-13]</sup>,哈尔滨工业大学的李小海等利用工具阴极旋转也改变了电解液流体动力条件,保证了加工间隙内电解液的循环更新和电解加工的稳定进行<sup>[14]</sup>,所作工艺试验使用的工具电极旋转速度较低,没有研究工具

阴极高速旋转时,旋转速度对微细电解加工孔的精度影响。

关于微细电化学加工,目前所做研究工作主要集中在如何提高加工精度、减小加工尺度、保证加工稳定性、提高加工效率等方面。

笔者根据微小孔电化学加工的特点,采用未绝缘工具阴极,在自制的试验装置上,使用普通直流电源,通过改变工具阴极旋转速度和加工电压,对小孔加工的半径过切值和被加工孔表面杂散腐蚀进行了试验研究。

## 1 气泡层的形成

### 1.1 基本原理

微细电解加工过程中,在电解液流过加工间隙的同时,阴极析出氢气,阳极溶解而产生电解产物,故电解加工间隙中所流过的介质是气、液、固三相流。由于电解产物固相所占体积比较小,可以忽略其对微细电解加工过程的影响,故将加工间隙中气、液、固三相流动近似为气、液两相流问题处理。微细电解加工过程中析出的气体均以微小气泡形式混合在流过加工间隙的电解液中,形成气液两相流,如图 1(a)所示。工具阴极高速旋转带动加工间隙中电解液和气泡两相流一起旋转,微小气泡发生碰撞、合并,形成较大气泡,如图 1(b)所示。当工具阴极达到一定旋转速度时,加工间隙中的电解液和气泡气液两相流离心分离程度增强,更多的气泡从电解液和气泡气液两相流中分离出来,聚集在工具阴极表面附近,形成气泡层,如图 1(c)所示。

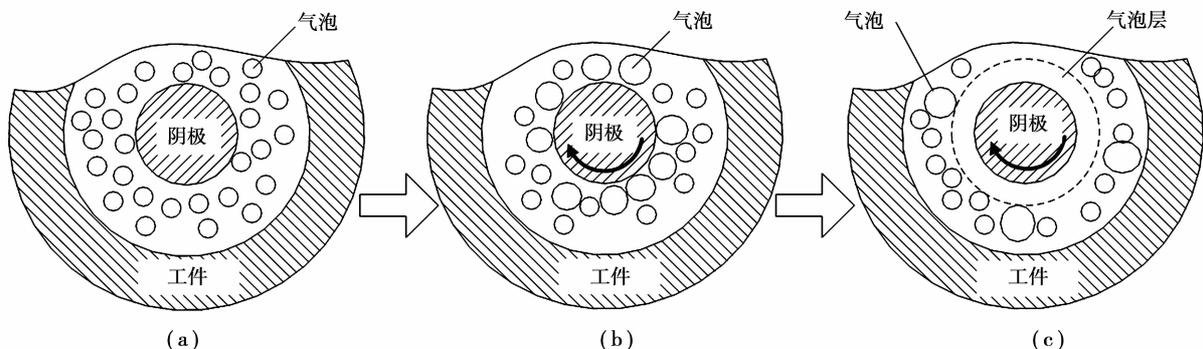


图 1 气泡层形成原理示意图

为了研究由于工具阴极旋转而产生的离心分离作用,用离心加速度与重力加速度的比值表示离心分离系数。

$$Z = \frac{\text{离心力场的加速度}}{\text{重力加速度}} = \frac{r(2\pi N/60)^2}{g} \approx \frac{rN^2}{900} \quad (1)$$

式中: $Z$ 为离心分离系数; $r$ 为工具阴极半径(mm); $N$ 为工具阴极旋转速度(r/min)。

离心分离系数越高,分离效果越好。工业上的离心分离系数大概在100~50 000左右。将本试验所用的数据代入式(1),结果如表1。

表1 不同旋转速度下离心分离因素值

旋转速度/(r·min <sup>-1</sup> )	工具半径/mm	离心分离因素
6 000	0.2	8
24 000	0.2	128
42 000	0.2	392

## 1.2 CFD仿真

深入研究工具阴极旋转时,电解加工间隙内气液两相流动的流体动力学特征,对了解加工过程中气液两相传质、传热机理具有重要意义。

工具阴极旋转带动加工间隙内的两相流旋转,情况比较复杂,需要考虑电解液和气泡两相流体各自的运动及其相互作用。借助FLUENT软件,采用欧拉-欧拉(Euler-Euler)双流体模型处理气-液体系,利用多重参考系法(MFR)处理电解加工间隙内的旋转区域,采用标准k- $\epsilon$ 湍流模型处理液相主流域的湍动,对电解液-气泡两相流体系进行数值

模拟。

考虑到对象的复杂性,把电解加工间隙中的流体力学计算区域简化为二维情况,这样有利于观察气液两相在工具阴极旋转作用下的气泡分布情况。内子域采用旋转参考坐标系进行计算,设定相应的转速条件;微小孔内壁定义为无滑移的壁面边界条件,并采用标准壁面函数进行处理;设置初始条件假设气泡均匀的分布在电解液中,同时设置气相的体积分率为0.5。由于采用多坐标系法描述工具阴极和两相流之间的相互作用,因此按定常问题处理。

采用GAMBIT软件的Pave方法在整个计算域中生成网格,采用FLUENT6.2计算流体力学软件,方程的离散采用有限体积法,压力-速度耦合采用SIMPLE算法。动量的离散采用二阶迎风差分格式,对流项的离散采用一阶迎风差分格式。收敛判据为所有变量的残差低于 $10^{-3}$ ,计算结束。

从图2可以看出,随着工具阴极旋转速度增加,在工具阴极外表面附近含气率(电解液与气泡两相流中气泡所占容积比值)呈增加趋势,而电解液中含气率出现降低趋势。由于电解液的密度大于气泡的密度,在工具阴极高速旋转时,电解液在离心力的作用下分布在已加工孔内壁附近,气泡聚集在工具阴极外表面附近,形成气泡层。

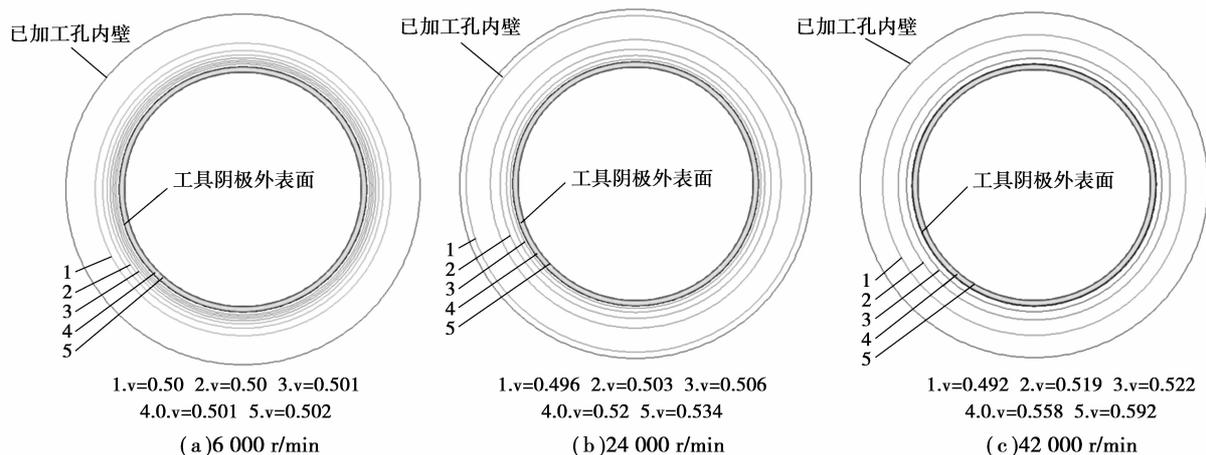


图2 旋转速度与加工间隙中含气率模拟图

## 1.3 气泡层电阻与含气率的关系

微细电化学加工过程中,析气反应不断进行,工具阴极旋转可以进一步促进气泡的合并和气泡层的形成。气泡层电阻和气泡层含气率的大小有关系<sup>[8,16]</sup>,假设气体电导率为零,利用参考文献[8]中的公式

$$\rho_{\text{bub}} = \frac{\rho_{\text{ele}}}{(1-\lambda)^{3/2}} \quad (2)$$

可以进一步得到

$$\rho_{\text{bub}}/\rho_{\text{ele}} = (1-\lambda)^{-3/2} \quad (3)$$

式中: $\rho_{\text{bub}}$ —气泡层电阻; $\rho_{\text{ele}}$ —加工间隙中电解液电阻; $\lambda$ —气泡层含气率。

根据 CFD 模拟计算结果得到不同旋转速度时,工具阴极表面含气率,利用公式(3),可以得到图 3 所示曲线图。从图上能够看出随着工具阴极旋转速度提高,工具阴极附近含气率增加,所形成气泡层电阻与加工间隙中电解液电阻的比值增大。由于气泡层电阻值相对于电解液电阻值增大,可以认为覆盖在旋转工具阴极上的气泡层,具有了一定绝缘效果。

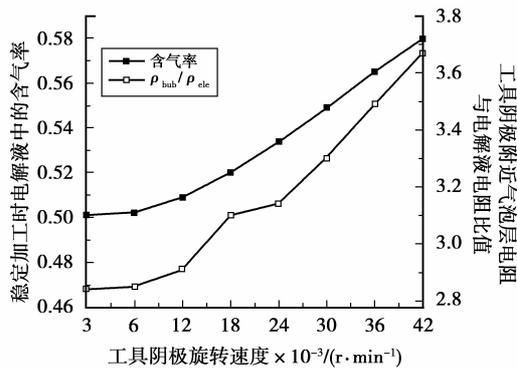


图 3 旋转速度、含气率与气泡层电阻关系图

## 2 试验与分析

试验在自行研制的微细电化学加工机床上进行,研究了旋转速度对加工电流、半径过切值和被加工孔杂散腐蚀的影响。

试验所采用的参数如下:电极直径为 0.4 mm。加工区采取外部循环更新电解液方式,温度为  $25 \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,工件为固定于加工腔内经打磨处理过的厚度为 0.3 mm 不锈钢薄片,采取工具电极在上、工件在下的电极布置方式,恒速进给加工,加工深度为 0.3 mm,电解液为质量百分数为 5% 硝酸钠溶液,有利于提高加工定域性,加工电压为直流 8 V、10 V,工具阴极旋转速度设置为 0~4 2000 rpm,加工初始间隙为 20  $\mu\text{m}$ 。

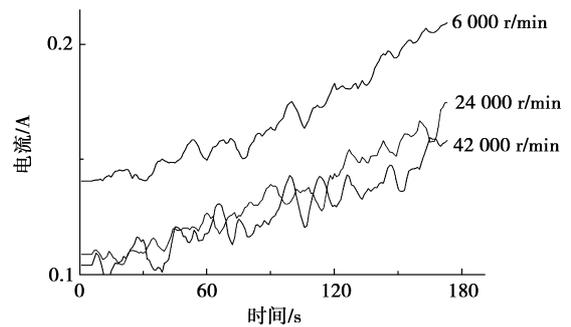
### 2.1 旋转速度对加工电流、半径过切值和杂散腐蚀的

#### 1) 旋转速度对加工电流的影响

图 4 表明了旋转速度与加工电流之间的关系,是在工具电极直径为 0.4 mm,进给速度为 2.9  $\mu\text{m/s}$ ,加工电压分别为 8 和 10 V 时,旋转速度分别为 6 000 r/min、24 000 r/min、和 42 000 r/min 情况下加工电流的比较。从图 4 中可以看出,在相同的加工工艺条件下,随着工具阴极旋转速度增大,加工过程中加工电流越小。

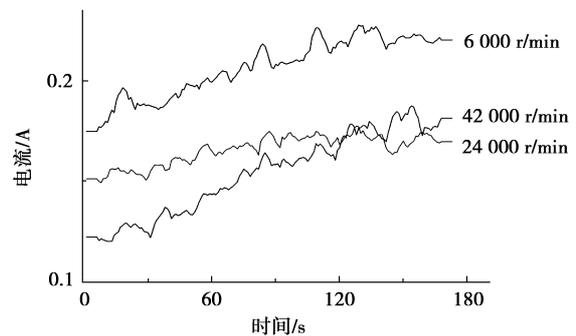
#### 2) 旋转速度对半径过切值和杂散腐蚀的影响

在电解加工孔时,如果工具阴极侧壁不绝缘,孔侧壁始终处于被电解加工状态,受到杂散腐蚀影响,



电解液浓度: 5% 硝酸钠溶液; 工具阴极进给速度: 2.9  $\mu\text{m/s}$ ; 工具阴极直径: 0.4 mm

(a) 加工电压 8 V

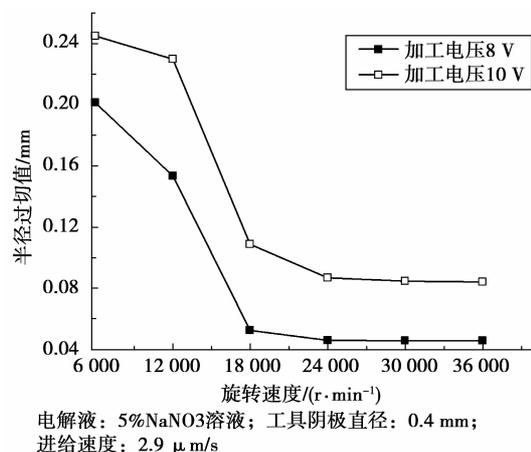


电解液浓度: 5% 硝酸钠溶液; 工具阴极进给速度: 2.9  $\mu\text{m/s}$ ; 工具阴极直径: 0.4 mm

(b) 加工电压 10 V

图 4 旋转速度对加工电流的影响

降低了加工的定域性和加工精度。从图 5 可以看出,未绝缘的工具阴极,随着旋转速度的增加,电化学加工孔时,被加工孔的半径过切值会减小。工具阴极旋转速度增加到 24 000 r/min 以上时,被加工孔半径过切值有明显变化,当旋转速度达到 42 000 r/min 时,半径过切值变得更小。从图 6 和图 7 可以看出来,随着工具阴极旋转速度增大,受到杂散腐



电解液: 5% NaNO<sub>3</sub> 溶液; 工具阴极直径: 0.4 mm; 进给速度: 2.9  $\mu\text{m/s}$

图 5 旋转速度对过切量的影响

蚀影响的区域逐渐减小。当工具阴极旋转速度达到 42 000 r/min 时,杂散腐蚀区域被局限在孔口附近很小的范围内。

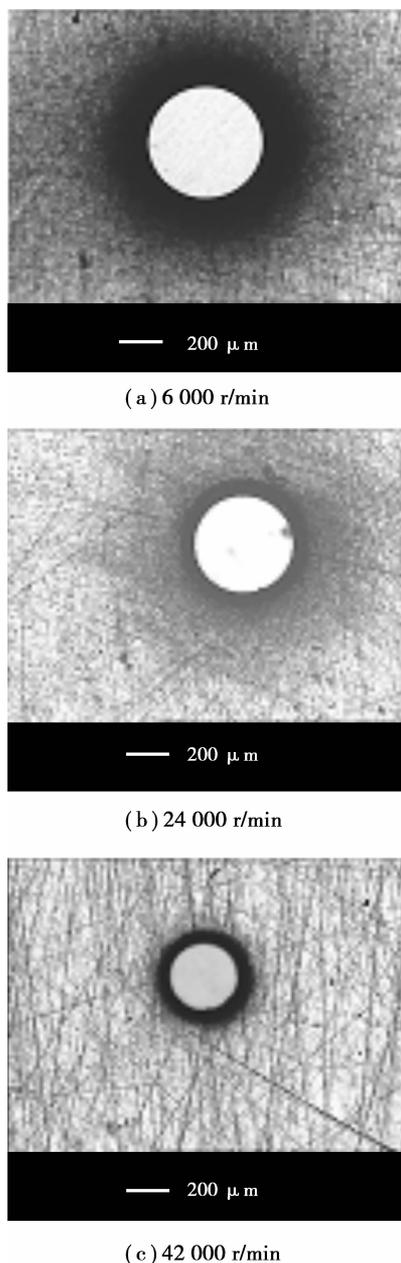


图 6 加工电压 8 V 时旋转速度对杂散腐蚀的影响

## 2.2 旋转速度对表面粗糙度及孔口轮廓的影响

由于被加工材料元素分布不均匀,则对应各处电解加工的化学当量及阳极电位也不相同,因此电解去除速度不同,从而形成加工表面有微观几何凹凸。电解液流场速度对表面粗糙度有重要影响。流速不够,则表面粗糙度变差,必须保证适当的流速且保证流场参数均匀分布。当工具阴极旋转速度增加时,孔表面的流速增加。用表面形貌仪对微小

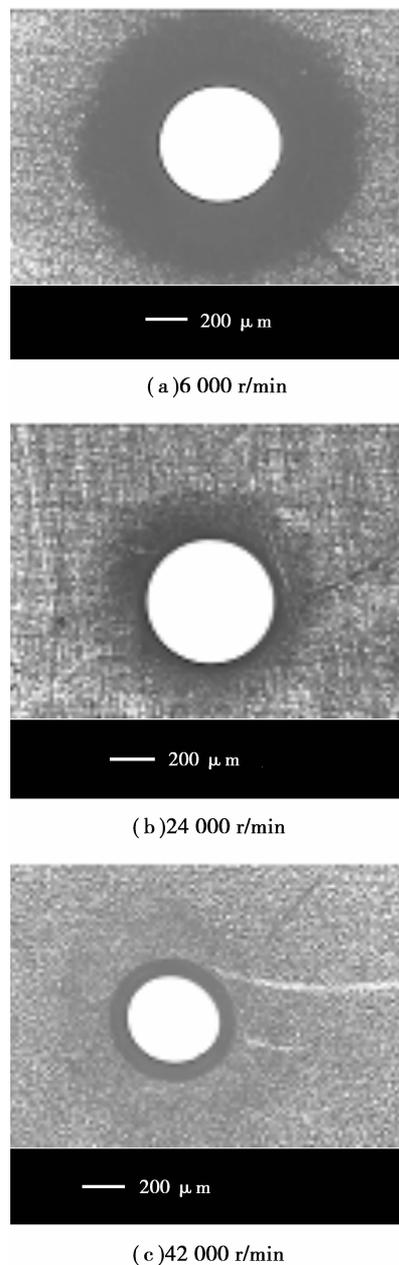


图 7 加工电压 10 V 时旋转速度对杂散腐蚀的影响

孔表面进行测量,得到图 8 所示测量结果,从图中可以看出,随着旋转速度的增加,表面粗糙度值变小,孔口轮廓变得光滑。

## 2.3 讨论

工具阴极旋转时,离心力作用在电解加工间隙中电解液上,由于离心分离作用,加工间隙中电解液和气泡要分离,气泡被聚集在工具阴极附近,形成含气率较高的气泡层,对工具阴极起到部分绝缘作用,加工过程中可以减小加工完的区域和被加工孔表面的二次电解,从而减小了被加工孔半径过切值和杂散腐蚀,较大的改善了孔的加工精度和定域性。随

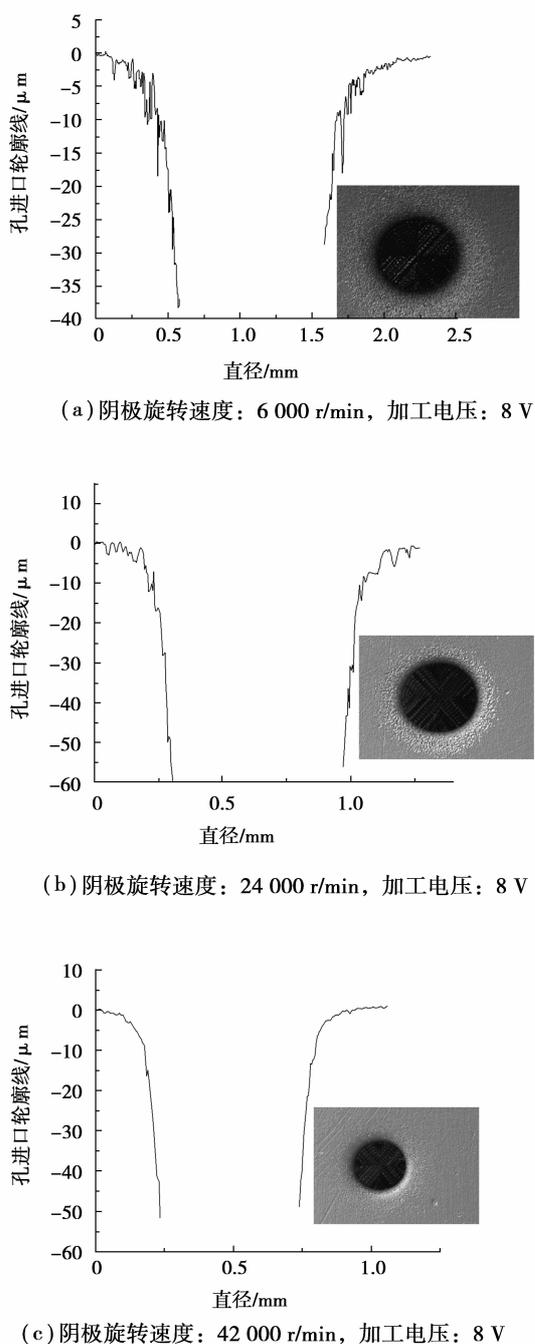


图 8 阴极旋转速度对表面粗糙度及孔口轮廓的影响

随着工具阴极旋转速度增加,电解液和气泡气液两相流受到的离心力增大,离心分离作用增强,工具阴极表面含气率越来越高,覆盖在工具阴极的气泡层电阻值增加,绝缘效果变得越来越好。当工具阴极旋转速度达到 42 000 r/min 时,在稳定加工的前提下,能获得较小的半径过切值和较小范围内的杂散腐蚀区域。另外工具阴极旋转速度增加,被加工孔表面电解液流场流速增加,表面粗糙度变好,并且得到比较光滑的孔口轮廓。

### 3 结 论

笔者采用工具阴极高速旋转进行了电化学加工孔的试验研究,针对小孔加工特点,研究了工具阴极旋转速度,对孔半径过切值、杂散腐蚀及表面粗糙度及孔口轮廓的影响。试验结果表明采用较高的旋转速度,能在工具阴极表面形成有一定绝缘效果的气泡层,在不改变工具阴极基本尺寸的情况下,减小了微小孔的半径过切量,表面粗糙度值,同时减小杂散腐蚀区域。因此工具阴极采用较大旋转速度有利于提高微小孔加工精度。

#### 参考文献:

- [1] 李小海,王振龙,赵万生. 微细电化学加工研究新进展[J]. 电加工与模具, 2004 (2): 1-5.  
LI XIAO-HAI, WANG ZHEN-LONG, ZHAO WAN-SHENG. Recent advancement of electrochemical micromachining technology [J]. Electromachining & Mould, 2004 (2): 1-5.
- [2] 朱荻,王明环,明平美,等. 微细电化学加工技术[J]. 纳米技术与精密工程, 2005, 3(2):151-155.  
ZHU DI, WANG MING-HUAN, MING PING-MEI, et al. Micro electrochemical fabrication [J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2005, 3(2):151-155.
- [3] RICCIARDI G, CANTELLO M, MARIOTTI P, et al. Micromachining with excimer laser[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1998, 47(1): 145-148.
- [4] MASUZAWA T, TÖNSHOFF H K. Three dimensional micro machining by machine tool[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1997, 46 (2): 621-628.
- [5] DARIO P, CARROZZA M C, CROCE N, et al. Non-traditional technologies for Micro-Fabrication [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 1995, 5(2): 64-71.
- [6] PARK B J, KIM B H, CHU C N. The effects of tool electrode size on characteristics of micro electrochemical machining[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2006, 55(1):197-200.
- [7] YANG I, PARK M S, CHU C N. Micro ECM with ultrasonic vibrations using a semi-cylindrical tool [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2009, 10(2): 5-10.
- [8] EIGELDINGER J, VOGT H. The bubble coverage of gas-evolving electrodes in a flowing electrolyte [J]. Electrochimica Acta, 2000, 45(27):4449-4456.