

文章编号 1004-924X(2015)10-2810-09

微细电解加工用中空电极的制备

孔全存^{1,2}, 刘国栋¹, 李勇^{1*}, 周凯¹

(1. 清华大学 机械工程系, 精密/超精密制造装备及控制北京市重点实验室, 北京 100084;

2. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100192)

摘要: 为了改进加工间隙内电解产物的排出条件和加速电解液的更新, 提出了一种嵌套式微细中空电极的精确可控焊接制备工艺。仿真分析了电极的过流特性, 优化了电极长度, 并进行了性能测试及加工实验。通过穿丝、黏结、嵌套尺寸及位置调整和焊接工序, 制备出加工段内径为 65 μm 、外径为 130 μm 、长 3.25 mm 左右, 后段便于装夹和连通的嵌套式中空电极。在供液压力为 1.15 MPa 时, 其出口流速可达 10 m/s 左右。利用制备的中空电极, 开展微细孔电解加工实验, 在 0.5 mm 厚不锈钢片上加工出最小入口孔径约为 157 μm , 出口孔径约为 133 μm 的微细孔, 并将其延伸应用于微结构加工中, 铣削出了长 554 μm 、宽 160 μm 、深 224 μm 的微细 T 型槽。实验结果表明: 制备的微细中空电极有效提高了加工间隙内电解液的流动特性, 且连/导通可靠、装夹方便, 适用于高深宽比微结构的电解加工。

关键词: 微细电解加工; 中空电极; 制备工艺; 流动仿真; 微细孔; 微细槽

中图分类号: TG662 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152310.2810

Preparation of hollow electrode used for micro ECM

KONG Quan-cun^{1,2}, LIU Guo-dong¹, LI Yong^{1*}, ZHOU Kai¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Beijing Key Laboratory of Precision / Ultra-precision Manufacturing Equipment and Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

* Corresponding author, E-mail: liyong@mail.tsinghua.edu.cn

Abstract: To release electrolysis products and refresh electrolyte greatly within a machining gap, a welding preparation process of Micro Nested Hollow Electrode (MNHE) for micro electrochemical machining (ECM) was researched. The flow characteristics of the MNHE were simulated and analyzed to optimize its length, then, the performance test and machining experiments for the MNHE were performed. The MNHE was prepared through threading, bonding, nested size & position adjusting and welding process. The front section of the MNHE was machined into a inner diameter of 65 μm , an outer diameter of 130 μm and a length about 3.25 mm, while its rear section was convenient for clamping and connectivity. The flow rate for outlet of the MNHE could reach up to 10 m/s under fluid supplying pressure of 1.15 MPa. Finally, experiments on micro ECM holes were carried out by

收稿日期: 2015-03-22; 修订日期: 2015-06-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51275255); 江苏省数字化电化学加工重点建设实验室 (常州工学院) 开放基金资助项目 (No. KFJJ2004005)

utilizing the prepared hollow electrode. Micro holes with the minimum inlet diameter of $157\ \mu\text{m}$ and outlet diameter of $133\ \mu\text{m}$ were achieved on $0.5\ \text{mm}$ thick stainless steel. A micro T-shaped groove with $554\ \mu\text{m}$ length, $160\ \mu\text{m}$ width, and $224\ \mu\text{m}$ depth was also milled. Experimental results indicate that the MNHE effectively improves the flow characteristics of the electrolyte within the machining gap, and it is suitable for electrochemical machining of micro structures with high aspect ratio for its easy clamp and reliable connectivity/ conductivity.

Key words: micro Electrochemical Machining (ECM); hollow electrode; preparation process; flow simulation; micro hole; micro groove

1 引言

电解加工 (Electrochemical Machining, ECM) 是利用金属/溶液界面处的电化学反应, 溶解蚀除阳极工件的成形方法, 具有不受材料强度、硬度和韧性等因素影响, 加工后工件表面质量好、无热影响层和无残余应力等优点^[1]。电解加工以离子形式蚀除金属材料, 在作用机理上达微/纳尺度加工。微细电解加工 (Micro ECM) 通过采用低加工电压、窄脉宽、低浓度电解液、小加工间隙 (数 μm 至数十 μm) 等技术手段, 提高加工定域性^[2-5], 在微小型金属零件中微细孔和微结构加工方面具有潜在优势^[6]。

在微细孔和微结构电解加工中, 常采用简单圆柱状或具有微结构的圆柱状导电体作为工具电极, 进行钻削或铣削加工^[2-5]。采用线电极放电磨削法^[7]制备的微细柱状电极, 在低浓度电解液中将加工间隙控制在 $10\ \mu\text{m}$ 左右, 并配合主轴在 $300\ \mu\text{m}$ 厚不锈钢上高速旋转, 加工出直径为 $70\ \mu\text{m}$ 的微细孔。利用电化学腐蚀法^[8]制备的柱状阵列电极, 在不锈钢片上加工出直径为 $110\ \mu\text{m}$ 、深为 $100\ \mu\text{m}$ 的 5×4 阵列孔。此类简单圆柱状微细电极由于刚度不足, 只能采用静液加工, 由于加工间隙小, 电解产物排出不畅、电解液更新缓慢, 且效率较低, 难以实现高深宽比微细孔 (直径为 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 、深 $\geq 500\ \mu\text{m}$) 的电解加工。

在具有微结构的圆柱状电极制备方面, 南京航空航天大学王明环等制备出具有微螺旋槽的柱状电极^[9], 首尔国立大学 JO C H 等采用电火花反拷法制备出变截面柱状电极^[4,10], 此类电极在厚度小于 $200\ \mu\text{m}$ 金属工件上采用微螺杆泵效应和/或电极旋转方式钻削加工微细孔时, 加工效率有一定程度的提高, 但加工深度受限。

为促进加工间隙中电解产物的顺利排除和电解液的快速更新, 清华大学马晓宇等提出了侧冲液配合实心柱状电极间歇回退法^[11], 林肯大学 K. P. Rajurkar 等提出低压冲液-中空电极及工件偏心轨迹运动法^[12], 南京航空航天大学王维等提出真空抽液配合中空电极^[13]等方法。柱状电极间歇回退法适用于微细孔和微结构的电解加工中, 但随着加工深度的增大, 间隙内电解液流动变缓, 加工深度受限, 且重复进给运动会降低加工精度。偏心轨迹运动法中由于工件做偏心轨迹运动, 工具电极外边缘与孔内壁间的最大间隙大于 $200\ \mu\text{m}$, 不适于直径 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 的微细孔加工。真空抽液法采用真空泵倒吸电解液, 由于最高负压为 $0.1\ \text{MPa}$, 难以实现微小加工间隙内电解液的顺畅流动, 不利于产物排出和电解液更新。

因此, 本研究采用高压供液配合中空电极的冲液方式, 将 MPa 级压力的电解液从中空电极高速冲出, 顺畅流过微小加工间隙, 促使工件在电化学作用下被蚀除, 同时产物随周围冲出的电解液被带出加工区域, 解决了产物排出不畅和电解液更新缓慢的问题。然而针对直径为 $100\sim 200\ \mu\text{m}$ 、深宽比大于 5 的微细孔电解加工用中空电极的制备工艺, 由于微细中空电极前段的径向尺寸微小, 无法实现微细中空电极与高压输液管间的密封连通, 无法将其与电源可靠导通, 也无法保证装夹后的微细中空电极与主轴轴线平行或重合以及自身的直线度和刚度。

为解决上述微细中空电极制备中存在的问题, 本文提出一种嵌套式微细中空电极的精确可控焊接制备工艺, 通过穿丝、黏结、嵌套尺寸及位置调整和焊接工序, 实现微细电解加工用中空电极与电解液的密封连通、与电源的可靠导通和与主轴轴线的平行装夹。通过对中空电极中电解液流动特性的分析, 优化微细中空电极长度, 仿真和

测试微细中空电极的性能,优化供液压力。采用制备的微细中空电极,开展了电解加工实验研究。

2 微细中空电极的制备工艺

制备的嵌套式微细中空电极结构如图 1 所示,由前段加工用的微细中空管、限位与取过流面最大剪切速度的中管、密封连通高压输液管与装夹用的后段大管等依次嵌套焊接而成。其中,前段采用直径为 $100\sim 130\ \mu\text{m}$ 的金属管,高压电解液由后段进入、经取过流面最大剪切速度的中段后,从加工用微细中空电极的前段高速冲出,流入加工间隙。

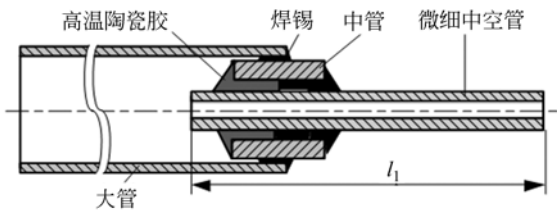
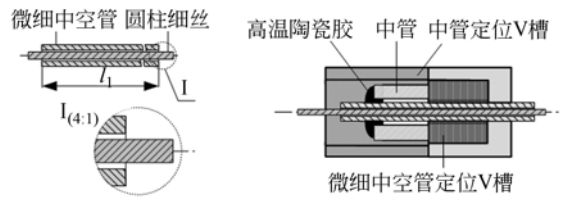


图 1 嵌套式微细中空电极结构
Fig. 1 Schematic of MNHE

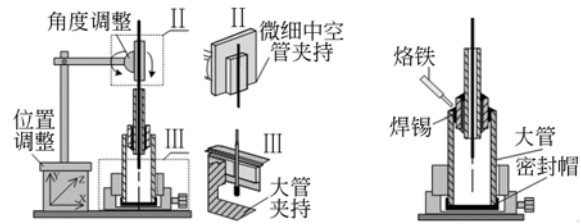
嵌套式微细中空电极的制备工艺主要由穿丝、黏结、嵌套尺寸及位置调整和焊接工序组成。穿丝工序如图 2(a)所示,将金属圆柱细丝穿入微细中空管中,圆柱细丝的直径小于微细中空管内径约 $3\sim 5\ \mu\text{m}$,且其具有较高的圆柱度,圆柱细丝可保证微细中空管的内孔在清洗、调整和焊接过程中保持畅通,在后续的嵌套尺寸及位置调整工序中便于夹持,且在微细中空管的清洗中起搅拌作用,使其清洗更彻底。

黏结工序如图 2(b)所示,将穿丝后的微细中空管穿入中管中,分别置入定位 V 槽中夹紧,使二者轴线重合或平行,然后用高温陶瓷胶黏结并均匀填满结合缝隙,控制高温陶瓷胶的流动范围,避免堵塞微细中空管。之后,采用加温方式将其完全固化,清洗后烘干,制作完成的嵌套金属管称为“组合电极”。中管限定微细中空管在大管内孔中的径向位置和轴向角度,同时将大管内过流面处最大剪切速度的电解液流入中管,有效降低了速度和压力水头损失。高温陶瓷胶的作用为:(1)将微细中空管与中管可靠黏结,防止高温焊接时脱落或易位;(2)陶瓷胶固化后硬度较高,能承受

受高压电解液冲击;(3)均匀填满结合缝隙的陶瓷胶减少管内紊流,进一步降低水头损失。



(a) 穿丝工序 (a) Threading process
(b) 黏结工序 (b) Bonding process



(c) 嵌套尺寸及位置调整工序 (c) Nested size & position adjusting process
(d) 焊接工序 (d) Welding process

图 2 嵌套式微细中空电极的制备工艺流程
Fig. 2 Preparation process of MNHE

嵌套尺寸及位置调整工序如图 2(c)所示,此工序完成微细中空管与大管轴线的同轴度及“组合电极”嵌套长度的调整。通过转动 X, Y, Z 轴的位置调整旋钮可精确调整微细中空管的轴线位置及嵌套长度,通过万向角度调整机构可精确调节二者轴线的同轴度。

焊接工序如图 2(d)所示,首先用密封帽密封大管下端面;接着调整焊接温度至 $300\ ^\circ\text{C}$ 左右,在 5 s 内用焊锡将中管和大管焊接;然后,调整焊接温度至 $270\ ^\circ\text{C}$ 左右,在 2 s 内用水溶焊锡将微细中空管和中管焊接。最后,将焊接后的嵌套式微细中空电极在 $50\sim 60\ ^\circ\text{C}$ 热水中超声清洗数分钟,抽去微细中空管内的圆柱细丝,烘干、待用。焊接时密封大管下端面是为了控制熔融焊锡流入中管与大管间隙的量,在短时高温作用下,大管内气体迅速膨胀,管内气体膨胀力和浮力与间隙内焊锡的重力很快达到平衡,使水溶焊锡均匀分布在间隙内,通过调整焊接温度和时间,控制焊锡在间隙内的流程。

嵌套式微细中空电极实物如图 3 所示,采用焊接制备工艺连接大管、限位与取过流面最大剪切速度的中管和微细中空管,以保证三者之间具

有一致的导电性和连通高压电解液的密封能力,利用“组合电极”的嵌套尺寸及位置调整工序,实现对轴线位置和嵌套尺寸的精确控制,满足微细中空管与大管同轴度较高的要求,且易于装夹。

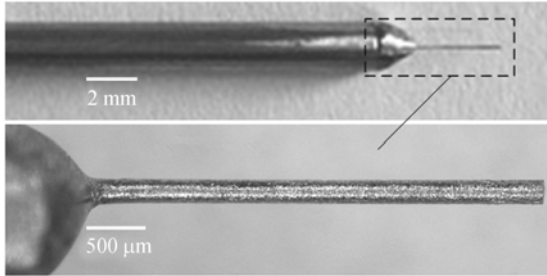


图 3 嵌套式微细中空电极实物
Fig. 3 Product picture of MNHE

3 中空电极中电解液流动仿真与性能分析

根据制备的嵌套式微细中空电极结构及尺寸,在 Gambit 中建立几何模型,通过 Fluent 软件对其中流场进行数值计算,分析微细电解加工对中空电极出口电解液流动状态的约束条件,优化微细中空电极长度,并通过仿真和测试,分析微细中空电极的流速与压力特性和导电特性。通过分析微细孔加工间隙内流速分布,优化供液压力。

3.1 微细中空电极的长度优化

微细电解加工过程中要保持电解液在加工面上各处均匀、规则地流动比较困难,而电解液流速的不均匀性和不规则性,易造成被加工表面去除量各异,在加工间隙内流速较大的稳态区域,较高的对流速度促使扩散层中的浓差极化减小,加速本区金属的溶解过程,反之亦然。若电解液流速分布的不均匀性和不规则性过大,即紊乱性过大,则在加工间隙内可能会产生空穴、局部停滞等现象,导致去除量各异性变大,致使工件的形状精度降低、表面斑点腐蚀或晶界腐蚀增大,使得精密可控微细电解加工难以顺利进行。而焊接制备的中空电极是由大管、中管和微细中空管依次嵌套而成的变截面圆管,由于嵌套结构上存在异形突变,采用中空电极高压冲液方式会引起管内紊流,若微细中空管出口处电解液为紊流状态,则易引起加工间隙内流速分布紊乱过大,导致上述不利情

况的发生。为解决流速分布紊乱性过大的问题,仿真发现适当延长微细中空管长度 l_1 和调整供液压力 p_i ,使其出口处电解液为层流状态,有利于提高微细电解加工的形状精度和表面质量。

由于嵌套式微细中空电极是轴对称圆柱体,仿真中以过轴线剖面的一半区域 A-HKL 作为几何模型,如图 4 所示,以微细中空管入口端面的圆心 o 为坐标原点,建立直角坐标系。根据制备工艺,大管内径为 0.70 mm ($r_{AL}=0.35$ mm),长 l_{LJ} 为 75 mm;中管外径为 0.60 mm ($r_{oG'}=0.30$ mm),内径为 0.20 mm,嵌入大管长度 l_3 为 0.5 mm;微细中空管外径为 0.13 mm ($r_{oE}=0.065$ mm),内径为 0.065 mm ($r_{oD}=0.0325$ mm),长为 l_1 ,嵌入大管长度 l_2 为 1.75 mm;黑色区域 HIJK 为焊锡。

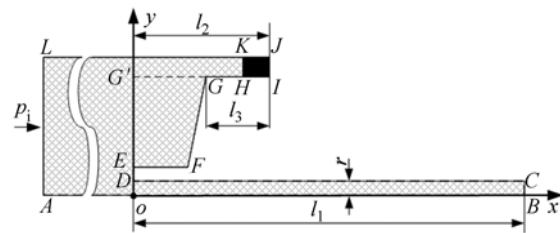


图 4 微细中空电极的几何模型、坐标系
Fig. 4 Geometry model and coordinate system of MNHE

假设电解液为不可压缩流体,定常流动,外压力只是 x 的函数,忽略重力和空气阻力,则传统的连续 N-S 方程^[14,15]为:

$$\mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = \frac{dp}{dx} + u \cdot \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right), \quad (1)$$

式中: μ 为黏度, u 为流速, p 为压力。在区域 A-HKL 内服从以下边界条件:

$$\begin{cases} u|_{\Gamma_{CD,DE,EF,FG,GH,HK,KL}} = 0 \\ y=0, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \\ p_i = 1.15, \quad p_{BC} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

初步实验表明,在直径为 100~200 μm 、深宽比大于 5 的微细孔电解加工中,其入口供液压力 p_i 为 0.25~1.15 MPa,过低压力易造成产物排出不畅与电解液更新缓慢,过高压力易引起加工间隙内流速分布的紊乱性过大,甚至发生电解液空化现象,无法实现正常加工。表 1 所示为在 300 K 温度下,出入口压力、壁面粗糙度、电解液及空气黏度等仿真参数^[16]。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

名称	数值
入口压力 p_1/MPa	1.15
出口压力 p_{BC}/MPa	0.0
壁面粗糙度 $R_a(D-HKL)/\mu\text{m}$	2.0
壁面粗糙度 $R_a(CD)/\mu\text{m}$	2.8
微细中空管长度 l_1/mm	2.0~5.0
4%NaNO ₃ 动力黏度 $\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.890×10^{-3}
空气动力黏度 $\eta/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.184×10^{-3}

在微细中空管长度 l_1 分别为 2.0、3.0、3.5、3.8、4.0 和 5.0 mm 时,仿真计算了对应微细中空电极出口端面 BC 处的流速分布,结果如图 5 中散点线所示。K. V Sharp 研究表明^[17],在水力直径为 50~247 μm 的圆形玻璃管中,雷诺数 $Re < 2\ 000$ 时,微流体实验数据符合 Poiseuille 流体理论。Poiseuille 理论表明,当过流断面上速度 u 分布与管径 r_{oy} 成二次抛物线关系时,管内的流体处于层流状态^[16]。对图 5 中的流速分布与管径 r_{oy} 进行二次曲线拟合,当微细中空管长度 $l_1 \geq 3.8\ \text{mm}$ 时,拟合相关系数 $R_i \geq 0.997\ 64\ (i \geq 2)$,表明微细中空管出口端面 BC 处为层流状态,有利于微细电解加工的稳定进行。由于微细中空管刚度的限制, l_1 应小于等于 10.0 mm,故微细中空管优选长度为 3.8~10.0 mm。根据工件厚度和侧壁绝缘工艺考虑,本研究优选微细中空管长度 l_1 为 5.0 mm。

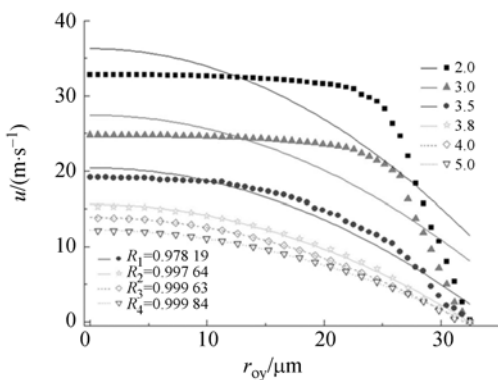


图 5 不同长度微细中空电极出口端面的流速分布
Fig. 5 Contours of velocity at outlet plane of MN-HEs with different lengths

若考虑空气阻力,采用两相流模型^[18],保持其它仿真条件不变,计算得到微细中空电极出口

端面 BC 处的最大剪切速度从不考虑空气阻力时的 11.28 m/s 降至 10.61 m/s,管内层流发展段长度从 3.8 mm 降至 3.55 mm,故仿真中有无空气阻力,对层流发展段长度的影响不大。

如图 6 所示,当微细中空电极内径在 0.045~0.075 mm ($r_{oD}=0.022\ 5\sim 0.037\ 5\ \text{mm}$) 变化时,其微细中空管优化长度 l_1 约为 3.6~6.2 mm。

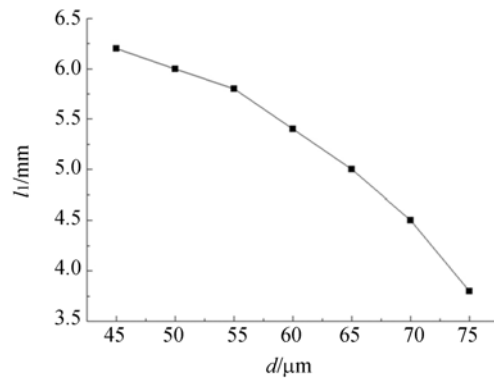


图 6 微细中空电极优化长度与内径的关系
Fig. 6 Relationship between optimum length and inner diameter of MNHE

3.2 微细中空电极的过流性能分析

以内径为 0.065 mm 微细中空电极为例,对不同长度微细中空电极出口的流速与压力特性进行仿真和测试,如图 7 所示。结果表明,随着供液压力从 0.25 MPa 增大至 1.15 MPa,通过微细中空电极的电解液流速平稳增加,出口最大流速高达 10 m/s 以上,其流速特性完全满足微细深小孔加工时,间隙内产物排出与电解液更新的要求。当微细中空管长度 l_1 分别为 5.0、6.5 和 8.0 mm 时,在相同压力下,流速相差约 30%~50%,随着长度 l_1 的增大,流经微细中空电极出口的电解液流速逐步减小,长度 l_1 相同的微细中空电极流速与压力特性一致性较好。

图 7 中由实心方、圆和三角形构成的实心点线图,分别表示实测的微细中空管长度 l_1 为 5.0、6.5 和 8.0 mm 电极的流速与压力特性;由空心方、圆和三角形构成的空心点线图分别表示仿真的与之对应电极的流速与压力特性。测试与仿真结果的最大误差点在微细中空管长度 l_1 为 8.0 mm、供液压力 p_1 为 1.15 MPa 处,其最大相对误

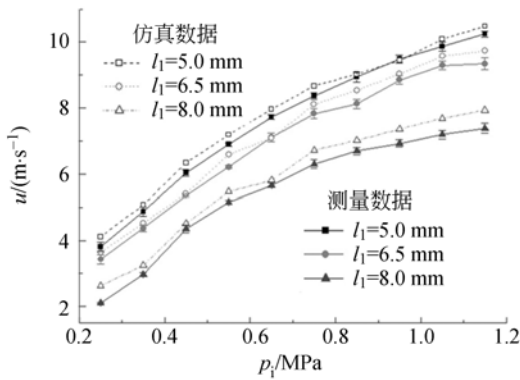


图 7 不同长度微细中空电极出口流速与压力关系的测试与仿真比较

Fig. 7 Comparisons of simulation and measurement of relationship between outlet flow rates and pressures for MNHEs with different lengths

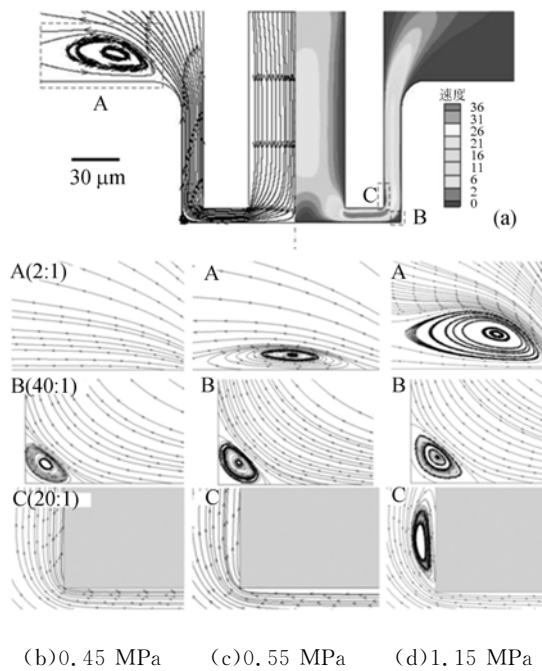
差值 $<6\%$ 。通常在管径微小时表面张力、界面滑移引起的静电力等,对微流体的运动有重要影响^[19],但由于加工时供液压力 p_i 远远大于这些力,故对仿真结果影响不大,测试与仿真结果验证了在本研究中这些力可忽略不计。对制备的中空电极体电阻进行测量,其值约为 0.03Ω 。结果表明焊接制备的嵌套式微细中空电极,能够满足微细电解加工对电极水、电特性的要求。

3.3 供液压力的仿真优化

微细孔电解加工中,为避免电解液流速分布紊乱性过大,防止间隙内产生空穴、局部停滞等现象,在不降低工件形状精度和表面质量的前提下,供液压力的确定是顺利开展精密可控微细电解加工实验的必要条件之一。如图 8 所示,以微细中空电极和被加工工件表面所约束的电解液区域为几何模型,以外界大气压和供液压力 p_i 分别为出入口边界条件,在底部间隙为 $10 \mu\text{m}$ 、侧壁间隙为 $15 \mu\text{m}$,加工深度为 100 和 $500 \mu\text{m}$ 处,仿真计算了不同供液压力下间隙内流速分布。图 8(a)轴线左边部分是供液压力 p_i 为 1.15 MPa 、加工深度为 $100 \mu\text{m}$ 处,间隙内的流线分布图;图 8(a)轴线右边部分是其速度分布云图。图中 A 区域为侧壁间隙出口紊流区, B 区域为工件被加工表面底部拐角紊流区, C 区域为电极下端出口侧壁紊流区。

从实验发现,紊流区 A 内旋涡面积的大小对电解加工的影响最大,因为区域 A 内旋涡面积增大,不利于侧壁间隙出口处产物的排除。图 8

(b)、(c)、(d)分别是供液压力 p_i 为 0.45 、 0.55 和 1.15 MPa ,加工深度为 $100 \mu\text{m}$ 处,区域 A、B、C 内的流线分布图。从仿真结果可知,供液压力从 0.45 MPa 升高至 1.15 MPa 时, A 区内旋涡面积从零增至 $60 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 左右, B 区内旋涡面积基本不变, C 区内旋涡面积从零增至数 μm^2 , C 区内旋涡面积的增大也不利于侧壁间隙内产物的排除。在加工深度为 $500 \mu\text{m}$ 处,供液压力为 0.55 MPa 时,区域 A、B、C 内的流线分布与图 8(b)相似;供液压力为 0.65 MPa 时,区域 A、B、C 内的流线分布与图 8(c)相似。



(b) 0.45 MPa (c) 0.55 MPa (d) 1.15 MPa

图 8 不同供液压力下间隙内流速分布比较

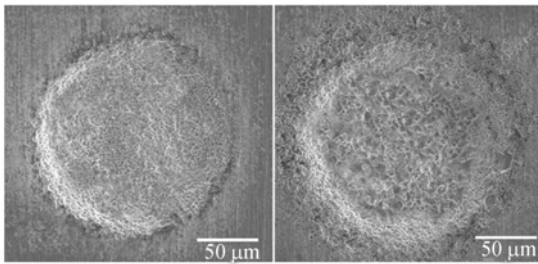
Fig. 8 Comparison of velocity distribution in machining gap under different fluid supplying pressures

通过调整供液压力 p_i 的大小,可在保证适当侧壁间隙出口流速前提下,保证产物排出和电解液更新,并控制各区域内旋涡面积至最小,从而减小间隙内电解液流速分布的紊乱性,确保微细电解加工的顺利进行。根据上述原则,针对直径 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 、深为 $500 \mu\text{m}$ 左右微细孔电解加工,优选入口供液压力 p_i 为 $0.45 \sim 0.55 \text{ MPa}$,此压力下侧壁间隙出口处最大流速可达 $4 \sim 6 \text{ m/s}$,满足微小间隙内加工产物顺利排出与电解液快速更新的要求。

4 微细电解加工实验

4.1 浅坑加工

采用长度优化的微细中空电极进行初步实验,在不锈钢平片上,保持初始间隙为 $10\ \mu\text{m}$,分别以微细中空电极出口处电解液为不同流动状态,进行 $10\ \text{s}$ 的浅坑电解加工,其它参数相同。图 9(a)是出口液流为层流状态时的加工结果,边缘轮廓清晰,波纹度误差较小,底面较平整,其表面粗糙度 R_a 约为 $0.5\ \mu\text{m}$;图 9(b)是出口液流为紊流状态时的加工结果,边缘轮廓模糊、波纹度误差较大,底面相对粗糙,其 R_a 约为 $1.6\sim 2.0\ \mu\text{m}$ 。结果表明,微细中空电极出口处电解液为层流状态时,会有效降低加工间隙内流速分布的紊乱性,有利于提高微细电解加工的形状精度和表面质量。



(a)层流状态 (b)紊流状态

(a) Laminar flow state (b) Turbulent flow state

图 9 微细中空电极出口处不同流动状态加工结果对比
Fig. 9 Comparison of machining results with different flow states at the outlet end-plane of MNHE

4.2 微细孔及微细槽加工

采用制备的微细中空电极(内径为 $65\ \mu\text{m}$ 、外径为 $130\ \mu\text{m}$ 、微细中空管伸出长度为 $3.25\ \text{mm}$)和高压中空冲液方式,开展微细孔加工实验。将电极进给速度在 $6\sim 10\ \mu\text{m/s}$ 内每次提高 $2\ \mu\text{m/s}$,在 $0.5\ \text{mm}$ 厚的 304 不锈钢片上,加工出 3×3 微细阵列孔,如图 10 所示。加工参数如下:电解液为 $0.5\ \text{mol/L}$ 的 NaNO_3 水基溶液,供液压力为 $0.55\ \text{MPa}$,加工电压为 $8\ \text{V}$,脉宽为 $5\ \mu\text{s}$,脉间为 $5\ \mu\text{s}$ 。结果显示,随着进给速度从 $6\ \mu\text{m/s}$ 增大至 $10\ \mu\text{m/s}$,微细孔的入口直径从 $215\ \mu\text{m}$ 减小至 $157\ \mu\text{m}$,出口直径从 $175\ \mu\text{m}$ 减小至 $133\ \mu\text{m}$,加工时间从 $83\ \text{s}$ 缩短至 $50\ \text{s}$ 。体积蚀除速率从实心柱状电极的 $3.21\times 10^{-4}\ \text{mm}^3/\text{s}$ ^[11] 提高至

$6.62\times 10^{-4}\ \text{mm}^3/\text{s}$,实验验证了制备的嵌套式微细中空电极,促进了加工间隙内产物的顺利排出与电解液快速更新,且有效提高了加工效率。

图 10(a)所示为其它加工参数相同,电极进给速度分别是 $6, 8$ 和 $10\ \mu\text{m/s}$ 所对应的微细孔入口图(从左至右);图 10(b)为与之对应的出口图(从右至左),图 10(c)为典型通孔的脱模测量图。在相同加工参数下,孔的出、入口尺寸与形状一致性较好。

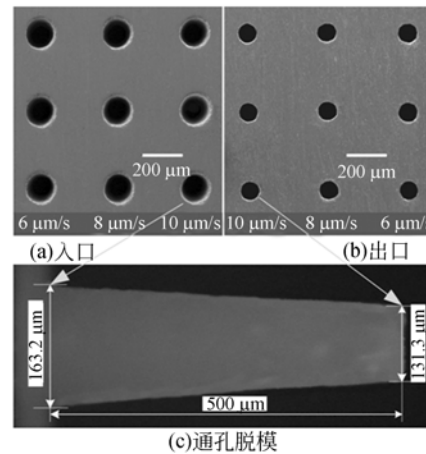


图 10 微细阵列孔出入口及典型通孔脱模测量图
Fig. 10 Inlet/outlet of micro array holes and measurement drawing of typical through-hole stripping

微细孔电解加工中间隙内换液情况相对恶劣,而铣削加工中冲液边界相对开放。因此,制备的嵌套式中空电极,可延伸应用于微结构的电解铣削加工中。利用侧壁绝缘中空电极(外径增至 $150\ \mu\text{m}$ 左右)下端进行电解铣削微细槽的加工

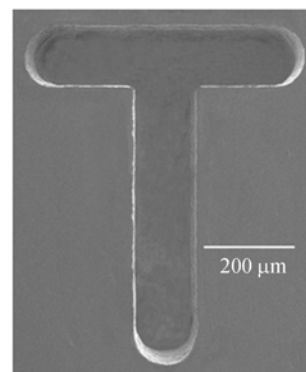


图 11 细 T 型槽
Fig. 11 Micro T-shaped groove

实验,加工参数同上。在304不锈钢上,铣削出长554 μm 、宽160 μm 、深224 μm 的微细“T”型槽,如图11所示。微细槽边缘轮廓清晰、侧壁陡峭、底面光整,形状精度和表面质量较好。

5 结 论

为促进加工间隙内电解产物的顺利排出与电解液的快速更新,提出了一种嵌套式微细中空电极的精确可控焊接制备工艺。通过穿丝、黏结、嵌套尺寸及位置调整和焊接工序,制备出前段加工用内径65 μm 、外径130 μm 、长3.25 mm、后段装夹和连通的嵌套式中空电极,实现了微细中空电极与电解液的密封连通、与电源的可靠导通和

与主轴轴线的平行装夹。

通过中空电极过流特性的分析表明:当微细中空电极内径为0.045~0.075 mm时,微细中空管优化长度约为3.6~6.2 mm。在供液压力为1.15 MPa时,出口流速可达10 m/s左右。

对孔径为100~200 μm 、深宽比大于5的微细孔电解加工,优化供液压力为0.45~0.55 MPa。在0.5 mm厚的不锈钢上,加工出最小入口孔径约157 μm 、出口孔径约为133 μm 的微细孔;进一步延伸至微结构加工,铣削出长554 μm 、宽160 μm 、深224 μm 的微细T型槽。加工实验验证了制备的中空电极应用于高深宽比微结构电解加工中的可行性。

参考文献:

- [1] FANG X L, QU N S, ZHANG Y D, *et al.*. Effects of pulsating electrolyte flow in electrochemical machining [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(1): 36-43.
- [2] ROLF S, VIOLA K, PHILIPPE A, *et al.*. Electrochemical micromachining [J]. *Science*, 2000, 289: 98-101.
- [3] 孔全存,李勇,刘国栋,等. 三电极微细电解加工脉冲电源 [J]. 清华大学学报(自然科学版),2015,55(3):266-272.
KONG Q C, LI Y, LIU G D, *et al.*. Three-electrode pulse power supply for micro ECM [J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2015,55(3):266-272. (in Chinese)
- [4] CHOI S H, KIM B H, SHIN H S, *et al.*. Analysis of the electrochemical behaviors of WC-CO alloy for micro ECM [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2013, 213(4):621-630.
- [5] MATTHIAS K, VIOLA K, ROLF S. Electrochemical micromachining with ultrashort voltage pulses - a versatile method with lithographical precision [J]. *Electrochimica Acta*, 2003, 48:3213 - 3219.
- [6] 张朝阳,李中洋,王耀民,等. 激光冲击效应下的力学电化学微细刻蚀加工[J]. 光学精密工程,2012,20(6): 1310-1315.
ZHANG CH Y, LI ZH Y, WANG Y M, *et al.*. Mechanical-electrochemical micro-etching under laser shock effect [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1310-1315. (in chinese)
- [7] 李小海,王振龙,赵万生. 高频窄脉冲电流微细电解加工研究[J]. 机械工程学报,2006,42(1): 162-167.
LI X H, WANG ZH L, ZHAO W SH. Electrolytic micromachining with high frequency short pulse current [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(1):162-167. (in chinese)
- [8] 王明环,朱荻,王磊,等. 微细电解加工中工具电极的制备及应用[J]. 微细加工技术,2007,5: 52-60.
WANG M H, ZHU D, WANG L, *et al.*. Preparation and application of electrodes used for the tool of micro-electrochemical machining [J]. *Microfabrication Technology*, 2007,5: 52-60. (in chinese)
- [9] 王明环,朱荻,徐惠宇. 微螺旋槽电极在改善微细电解加工中性能的应用[J]. 机械科学与技术,2006,3(25): 348-351.
WANG M H, ZHU D, XU H Y. Use of micro-helix electrodes in improving performance of micro-ECM [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2006,3(25): 348-351. (in Chinese)
- [10] JO C H, KIM B H, CHU C N. Micro electrochemical machining for complex internal micro features [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2009, 58(1): 181-184.
- [11] 马晓宇. 阵列孔微细电解加工基础技术研究[D]. 北京:清华大学,2010.
MA X Y. *Research on fundamental techniques of Micro ECM for array hole fabrication* [D]. Beijing: TsingHua University. 2010. (in chinese)

- [12] RAJURKAR K P, ZHU D. Improvement of electrochemical machining accuracy by using orbital electrode movement [J]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1999, 48(1): 139-142.
- [13] WANG W, ZHU D, QU N S, *et al.*. Electrochemical drilling with vacuum extraction of electrolyte [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, 210(2): 238-244.
- [14] 许晓威, 陈立国, 贺文元, 等. 数字微流控芯片半月形驱动电极的设计[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(3): 633-640.
XU X W, CHEN L G, HE W Y, *et al.*. Design of crescent driving electrode for digital electrowetting-on-dielectric devices [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(3): 633-640. (in chinese)
- [15] 孔全存, 李勇, 朱效谷, 等. 基于双电层电容的微细电解加工间隙的在线检测 [J]. *纳米技术与精密工程*, 2013, 11(6): 527-535.
KONG Q C, LI Y, ZHU X G, *et al.*. Online detection method for inter-electrode gap in micro ECM based on capacitance of electric double layers [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2013, 11(6): 527-535. (in Chinese)
- [16] 杨国清, 廖彦剑, 杨军, 等. 一种多通道微流控芯片压力检测方法研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(11): 2546-2551.
YANG G Q, LIAO Y J, YANG J, *et al.*. Study on a multi-channel micro fluid chip pressure measurement method based on laminar flow distribution [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(11): 2546-2551. (in chinese)
- [17] SHARP K V, ADRIAN R J. Transition from laminar to turbulent flow in liquid filled microtubes [J]. *Experiments in Fluids*, 2004, 36(5): 741-747.
- [18] ZHU X G, HUANG W F, LI Y. Role of step-shape structures and critical failure bubble volume in micro bubble constraint [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(22): 2941-2946.
- [19] 李勇, 江小宁, 周兆英, 等. 微管道流体的流动特性 [J]. *中国机械工程*, 1994, 5(3): 24-26.
LI Y, JIANG X N, ZHOU ZH Y, *et al.*. Flow characteristics of fluid in micro-pipeline [J]. *China Mechanical Engineering*, 1994, 5(3): 24-26. (in Chinese)

作者简介:



孔全存(1976—),男,甘肃永靖人,博士,实验师,1998年于陕西师范大学获得学士学位,2007年于北京航空航天大学获得硕士学位,主要从事微细电解加工及精密测试技术等方面的研究。E-mail: kongquancun@163.com



刘国栋(1990—),男,吉林长春人,博士研究生,2013年于吉林大学获得学士学位,主要从事微细电解加工实验及仿真方面的研究。E-mail: liugd13@mails.tsinghua.edu.cn



周凯(1989—),男,陕西渭南人,博士研究生,2011年于西安交通大学获得学士学位,现为清华大学机械工程系博士研究生,主要从事微纳制造方面的研究。E-mail: zhou-kai@vip.163.com

导师简介:



李勇(1962—),男,河南方城人,博士,研究员,博士生导师,1982年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1987年、1991年于日本新潟大学分别获得硕士、博士学位,主要从事微细电加工工艺与装备、单点金刚石刀具超精密切削加工、以及微流控柔性 MEMS 蒙皮等技术研究。E-mail: liyong@mail.tsinghua.edu.cn