

文章编号 1004-924X(2018)05-1098-08

阵列微沟槽的场域离散脉冲电解加工技术

郭钟宁^{1,3}, 詹顺达^{1,2}, 罗红平^{1,2*}, 刘桂贤^{1,2}, 陈晓磊^{1,2}, 余浩^{1,2}

(1. 广东工业大学 机电工程学院, 广东 广州 510006;

2. 广州市非传统制造技术及装备重点实验室, 广东 广州 510006;

3. 佛山市铭维科技有限公司, 广东 佛山 528225)

摘要:针对难加工金属材料表面阵列非贯穿型微沟槽的高效高质量加工难题,提出一种场域离散脉冲电解加工方法,所加工沟槽具有表面质量好、尺寸微小、槽数多、沟槽前后非贯穿的特点。使用绝缘栅栏隔板作为活动掩模板对各微沟槽加工区进行离散,同时遮蔽非加工区,从而实现流场隔离和非加工区电场屏蔽等效果,有效提高沟槽的加工稳定性、精度和一致性。通过设计专用夹具,对影响加工精度的关键因素进行了单因素工艺实验研究,并利用 Comsol Multiphysics 软件对电解加工的流场和电场进行了仿真分析。仿真和试验结果显示:场域离散加工方法的流场和电场都比传统的掩膜电解加工、电解转印加工好。成功地在 1 min 内加工出 9 条宽 538.76 μm ,深 25.78 μm ,过切量为 19.38 μm 的阵列微沟槽,证实了该方法的有效性。采用短加工时间、低脉冲电压幅值、高脉冲频率、小脉冲占空比等工艺参数,有利于提高沟槽的加工精度。通过场域离散电解加工技术,可以实现对非贯穿型微沟槽的高效率、高质量、低成本加工。

关键词:电解加工;难加工金属;阵列微沟槽;场域离散;栅栏隔板

中图分类号: TG662 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20182605.1098

Pulse electrochemical machining of micro channel arrays in discrete fields and domains

GUO Zhong-ning^{1,3}, ZHAN Shun-da^{1,2}, LUO Hong-ping^{1,2*},
LIU Gui-xian^{1,2}, CHEN Xiao-lei^{1,2}, YU Hao^{1,2}

(1. School of Electromechanical Engineering,

Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Guangzhou Key Laboratory of Nontraditional Machining
and Equipment, Guangzhou 510006, China;

3. Foshan Ge Wei Technology Co. Ltd., Foshan 528225, China)

* Corresponding author, E-mail: luohongping@gdut.edu.cn

Abstract: A method of pulse electrochemical machining in discrete fields and domains was introduced to solve the problems in microchannel arrays machining on difficult-to-cut metal surface. This method has the characteristics of processing microchannels with high surface quality and a non-penetrating structure. The machining zone of each channel was separated by the specially designed fence-like

收稿日期: 2017-12-27; 修订日期: 2018-01-31.

基金项目: 国家自然科学基金-广东省联合基金资助项目 (No. U1601201); 国家自然科学基金-青年基金资助项目 (No. 51705089); 国家自然科学基金-面上基金资助项目 (No. 51575113)

template made of nonconductive material, and hence the electrolyte flow field and electric field are confined and improved, because of which a higher process stability and good machining accuracy and consistency can be achieved. Both simulation analysis and experiments verified the effectiveness of the method. The distributions of flow field and electrical field of this method are better than those of the through-mask Electrochemical Machining (ECM) method and electrochemical pattern transfer method. Nine channels with a $538.76\ \mu\text{m}$ width, $25.78\ \mu\text{m}$ depth, and an overcut of $19.38\ \mu\text{m}$ are obtained within 1 min. Single-factor experiments were conducted and the results show that good process performance can be obtained with a short machining time, low voltage amplitude, low duty cycle, and high pulse frequency. Thus, the presented method of pulse EMC in discrete fields and domains is suitable for mass production of non-penetrating microstructures with the advantages of high efficiency, high quality, and low cost.

Key words: electrochemical machining; difficult-to-cut metal; micro channel arrays; discrete fields and domains; fence-like template

1 引言

随着产品逐渐向精密化、集成化和高性能化方向发展,具有微小沟槽结构特征的零部件在众多领域中得到了大量应用,包括燃料电池的电极板、流体机器上的减摩降阻装置、显示器的光栅罩等,这种结构使零部件在传热特性、流体动力学特性、机械特性、仿生特性、摩擦特性等方面表现出与光滑表面截然不同的特点,为众多学科研究注入了新的活力,具有巨大的应用潜力。

电解加工 (Electrochemical Machining, ECM) 具有与材料硬度强度无关、非接触无切削力、高材料去除率、无工具损耗等优点,可以保证加工后工件无应力变形,为难加工金属表面微沟槽结构的高质量低成本加工提供了有效途径^[1-2]。但电解加工时的电场、流场等需要合理设计,否则加工的精度和效率等难以得到有效保证。国内外学者对流场、电场的优化进行了大量研究,其中王艳萍^[3]、柳龙华^[4]、崔岩^[5]等人研究了掩膜的制备和应用问题,认为掩膜能约束电场,从而显著提高加工精度。在传统掩膜电解加工的基础上,又逐渐发展出一种模板电解加工方法。澳大利亚表面结构技术研究中心 RAFFELSTETTER^[6]等研究学者基于电场分布模型模拟了模板电解加工复杂表面织构过程的形貌变化。国内李寒松^[7-8]等人研究了掩模板电解加工方法,成功在钼合金薄板材料和 MA956 铁基薄板材料上电解加工出微阵列孔结构。王光强^[9-10]等人则应用布覆铜板作为

活动掩模板进行电解加工,同时为提高加工效率又提出了双面同步电解加工方法,并成功在钛合金薄板材料上加工出侧壁锥度小的微阵列孔结构。陈晓磊^[11-12]等人在硬质掩模板的基础上,研究了应用弹性掩模板的电解加工方法,成功在 304 不锈钢表面加工出微坑织构。钱双庆^[13-14]等人为提升加工灵活性,研究了电解转印加工方法。明平美^[15-16]等人研究 UV-LIGA 技术制造大通孔率精细镍网,随后其研究团队又提出一种泡沫金属作为阴极的电解加工方法,优化了电场和流场。这些方法在电解加工微织构,尤其是微孔织构上取得了一定效果,但同时也存在一些问题,例如传统掩膜电解加工中掩膜制备时间长、工艺繁琐,并且掩膜不能重新使用;模板电解加工中模板较厚,电解液在模板内流速较低,影响电解产物排出;电解转印加工中作用在工件表面的电场线较分散,电解加工精度较低;泡沫阴极电解加工中电解产物有可能在孔道/孔洞间隙里形成堆积等。

为解决电解加工中的排屑问题和加工精度问题,本文提出一种场域离散脉冲电解加工方法,通过仿真分析和工艺试验验证了该方法的可行性,最后成功在 1 min 内加工出表面质量好、尺寸精度高的阵列微沟槽织构。

2 方案原理

图 1 是场域离散脉冲电解加工微沟槽的原理图,加工区由上到下依次为阴极块、栅栏隔板、工件,三者层层压紧后装在弹性衬底里,弹性衬底嵌

在腔体里面。如图 2 所示,栅栏隔板内开有阵列微槽道,在电解液导通时腔体左右两边只由栅栏隔板内的槽道连通,即形成离散化流场。阴极块长度比栅栏隔板内槽道长度小,即形成入液口,出液口与入液口基本对称。供电方面,脉冲电源正极接工件形成阳极,负极接阴极块,阴极块为紫铜材料。电解液循环方面,在水泵的作用下将电解液从电解液箱中抽出,流入夹具左端的入液口,进而流入栅栏隔板内的流道,最后从夹具右端的出液口流回电解液箱,同时接通电源和水泵时开始电解加工。

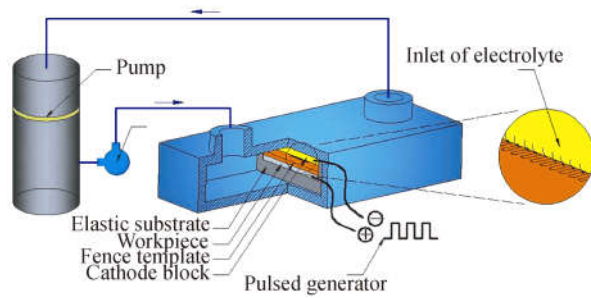


图 1 场域离散脉冲电解加工微沟槽原理图

Fig. 1 Schematic of Pulse Electrochemical Machining (PECM) of micro channel arrays in discrete fields and domains

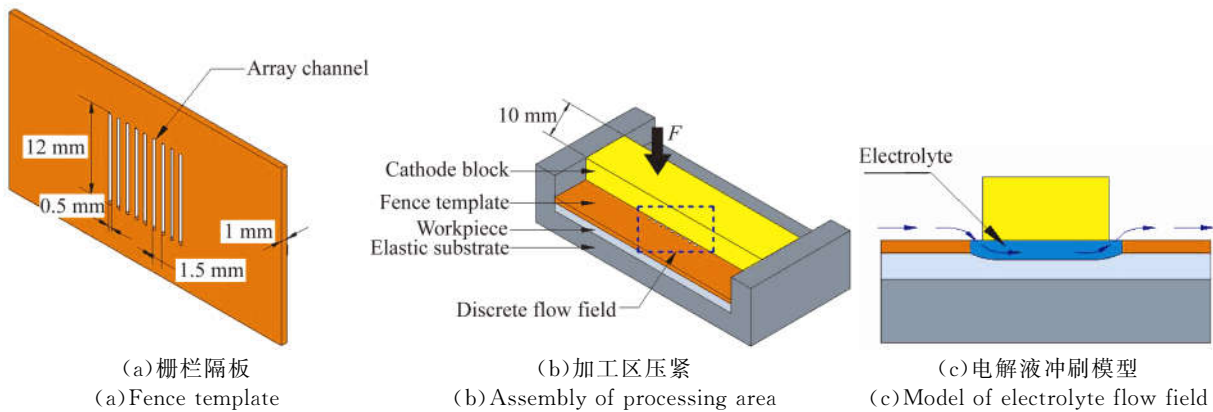


图 2 场域离散形成原理

Fig. 2 Schematic of discrete fields and domains

3 加工平台及检测装置

工件材料选用 304 不锈钢,因为不锈钢具有良好的自钝化性,是常用的燃料电池双极板、热转

换器及微反应器的加工材料,加工的微槽长度为 12 mm,一次加工 9 条。设计的夹具如图 3 所示,其中阴极块设计成“L”便于接电,详细的加工参数列于表 1。

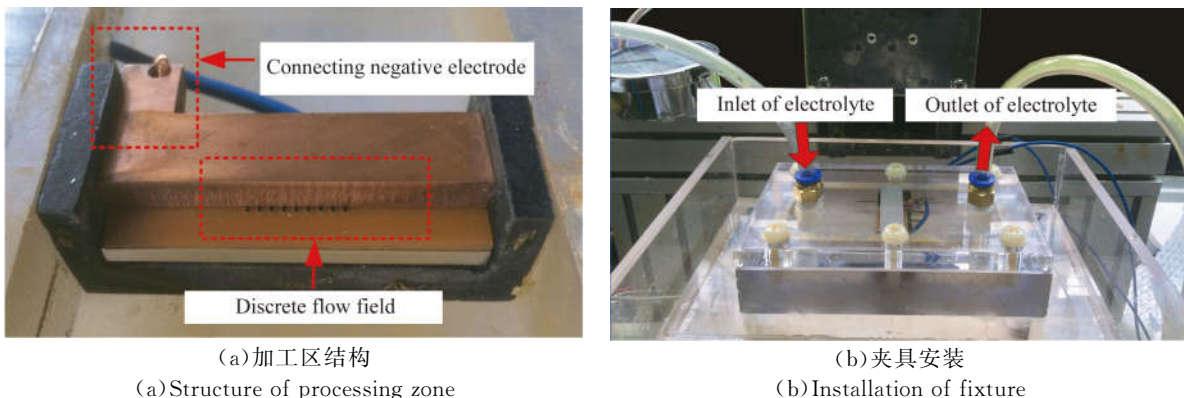


图 3 场域离散脉冲电解加工微沟槽夹具

Fig. 3 Fixture of PECM of micro channel arrays in discrete fields and domains

表1 场域离散脉冲电解加工微沟槽实验参数

Tab.1 Process parameters of PECM of micro channel arrays in discrete fields and domains

参数	单位
NaNO ₃ 电解液/(mol·L ⁻¹)	1.5
栅栏隔板开槽宽度(W)/μm	500
栅栏隔板厚度(H)/mm	1
电解液入口压力(P)/MPa	0.2
加工时间(t)/s	20,30,40,50,60
脉冲电压(U)/V	11,12,13,14,15
脉冲占空比(D)/%	30,40,50,60,70
脉冲频率(F)/kHz	0.6,0.8,1.0,1.2,1.4

通过计算平均过切量来表征阵列微沟槽的加工精度,平均过切量为:

$$\Delta s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{C-W}{2} \right], \quad (1)$$

其中: Δs 代表平均过切量, W 代表栅栏隔板的开槽宽度; C 代表加工的微沟槽宽度; n 代表槽数。

通过在电极正下方工件表面划线,每条槽提取 m 个数据点进行求和取平均值,用电解液的平均流速来评价电解产物的排出效果,平均流速为:

$$v_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m Y_{j(i)} \right], \quad (2)$$

其中: v_s 代表电解液的平均流速; m 代表在 X 轴方向总共选取的样本点数; $Y_{j(i)}$ 代表电解液在第 i 条槽第 j 个点的流速。

用方程(3)来求流速平均变化量,用于判断流道间流速的一致性:

$$v_u = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left[\max(Y_{j(1)}, Y_{j(2)}, \dots, Y_{j(n)}) - \min(Y_{j(1)}, Y_{j(2)}, \dots, Y_{j(n)}) \right], \quad (3)$$

其中 v_u 代表流速平均变化量。 v_u 值越小流道间流速一致性越好,越容易加工出尺寸一致性更好的微沟槽。

测量微沟槽时所用的设备为超景深三维显微镜(VHX-600E, KEYENCE Corporation, Japan)和激光共聚焦三维显微镜(OLS4000, OLYMPUS Corporation, Japan)。

4 仿真分析

4.1 流场仿真分析

栅栏隔板内的阵列流道将整体流场分割为离散的几个流场,用 Comsol Multiphysics 软件对流场域进行仿真。网格划分方法为自由划分四面体网格,尺寸经过特别细化,图 4(a)为划分网格后的模型。流场域的几个关键尺寸为:栅栏隔板厚度 1 mm,开槽宽度 500 μm,开槽长度 12 mm,开槽数 9,阵列偏距 1.5 mm。边界条件定义为:入口由压力控制,设置为 0.2 MPa,出口为大气压。为简化计算,对流场模型做两种假设:(1)电解液为连续不可压缩流体;(2)忽略电解加工中气泡对流场的影响。

选用标准 $k-\epsilon$ 模型对三维稳态流场进行仿真,计算结果满足动量守恒方程和质量守恒方程。仿真结果如图 4(b)和 4(c)所示,结果表明,电解液平均流速达到 10.92 m/s,不同流道的速度变化量只有 0.82 m/s。电解液在加工区速度高,有利于电解产物的及时排出,能够提高电解加工稳定性;而不同流道速度变化量小,则有利于在不同加工区营造相同的加工环境,得到尺寸均一稳定的槽道。

4.2 电场仿真分析

图 5 对比了几种常用电解加工方法的电场模型。如图 5(a)所示,掩膜电解加工虽然能保证加工精度,但掩膜制备工艺繁琐且无法重复使用;如图 5(b)所示,电解转印加工中虽然掩膜可以重复使用,但电场线分散,加工精度低;图 5(c)为场域离散脉冲电解加工微沟槽的电场模型,加工间隙即为隔板厚度,且电场线垂直作用于工件表面,电流密度均匀,在这种加工环境下工件表面腐蚀速度相同,有利于降低侧向腐蚀,提升加工精度。

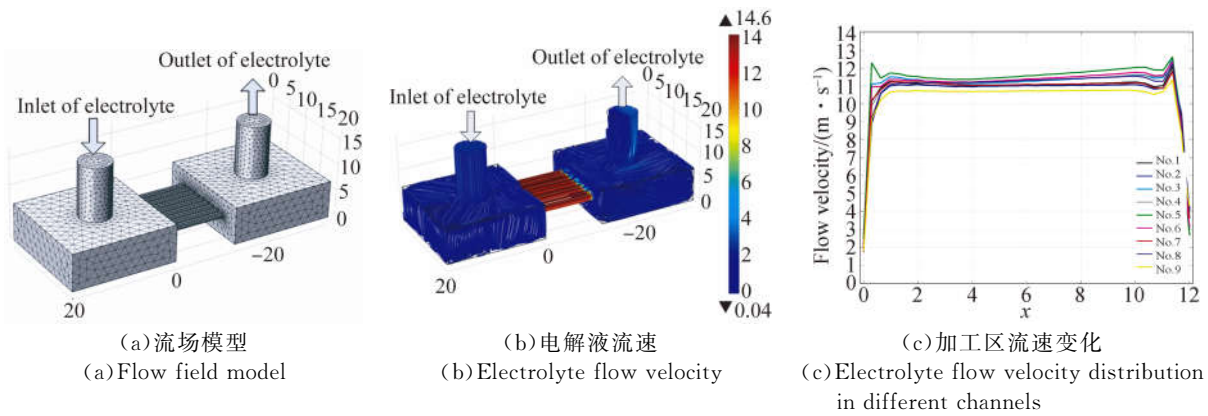


图 4 流场仿真结果

Fig. 4 Simulation results of flow field of electrolyte

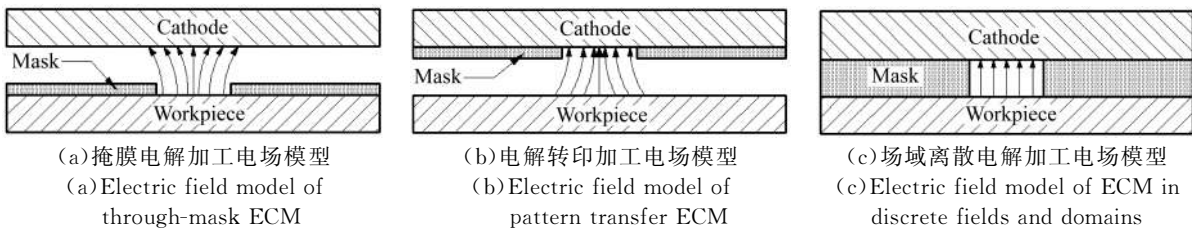


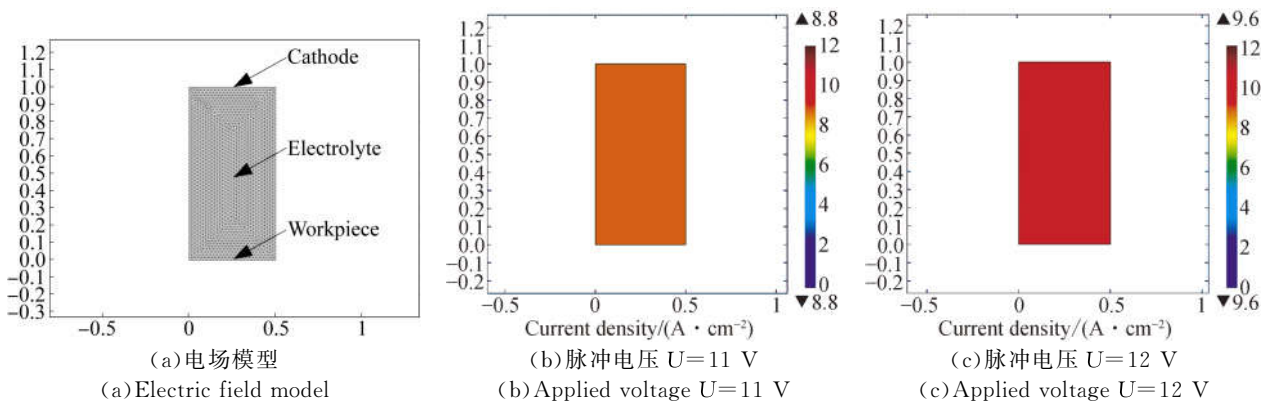
图 5 不同方法的电场仿真模型

Fig. 5 Electric field models for different methods

图 6(a)为电场模型,由于整条流道的物理模型特征明显,属于拉伸型,故将三维模型简化为二维。电场模型的几个关键尺寸为:栅栏隔板厚度 1 mm,开槽宽度 $500 \mu\text{m}$ 。边界条件为:工件阳极电势 11,12,13,14,15 V,工具阴极电势 0 V,电解液电导率 8 s/m 。为简化计算,对电场模型做两

种假设:(1)加工区电解液充足且电导率在截面任何地方都相同;(2)忽略因温度变化而导致的电导率变化。

如图 6(b)~6(f)所示,电场仿真结果表明,在同一加工电压下,加工区电流密度均一稳定,随着电压增大,电流密度增大。



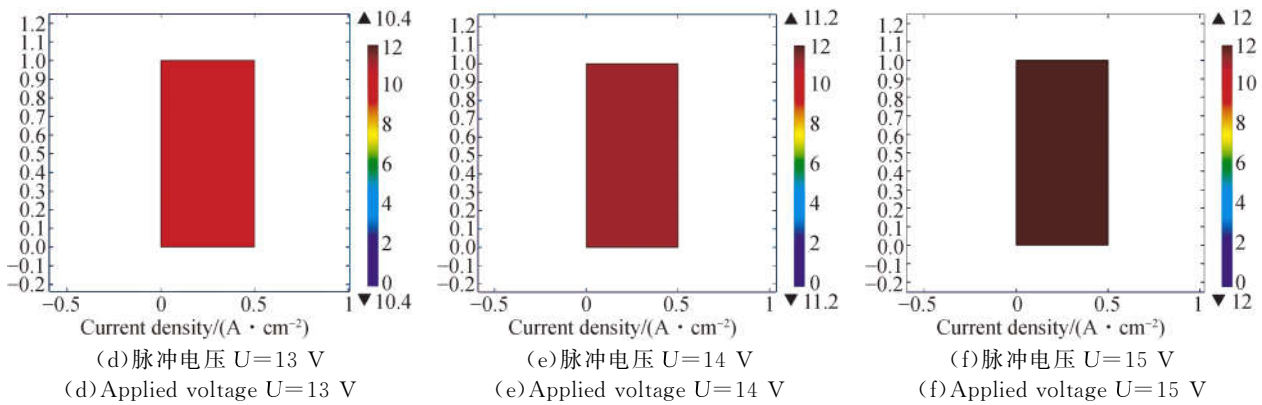


图 6 电场仿真结果

Fig. 6 Simulation results of electrical field

5 实验结果与讨论

实验条件如下:1.5 mol/L NaNO_3 电解液,脉冲电压为 13 V,脉冲频率为 1 kHz,脉冲占空比为 30%,加工时间为 40 s,栅栏隔板内槽道宽度为 500 μm ,厚度为 1 mm,实验加工结果如图 7 所示。

不锈钢板上电解加工出的阵列微沟槽宽度为 538.76 μm ,深度为 25.78 μm ,过切量只有 19.38 μm 。

对影响实验结果的关键参数进行单因素实验,研究因素包括加工时间、脉冲电压、脉冲占空比以及脉冲频率,具体加工参数见表 2。由于结构本身较浅,而过切量可通过加工槽宽换算得到,因此这里只测量槽宽,实验结果见图 8。

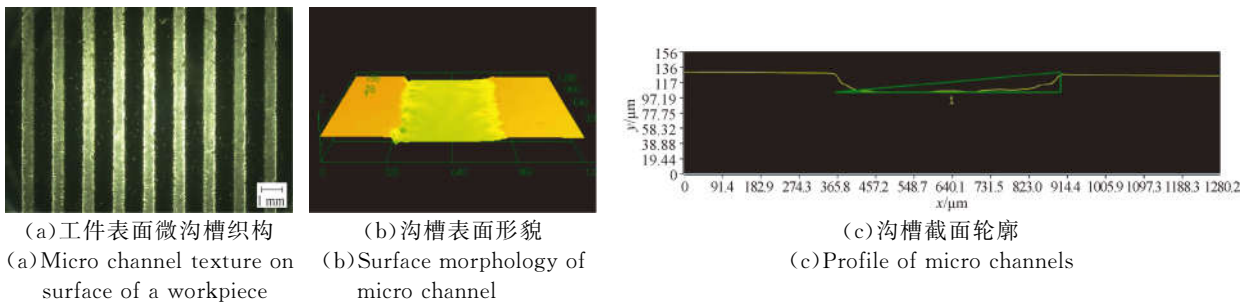


图 7 实验加工结果

Fig. 7 Experimental machining results

表 2 单因素实验具体参数

Tab. 2 Process parameters of single factor experiment

变量	数值	其他实验条件
加工时间(t)/s	20,30,40,50,60	1.5mol/L NaNO_3 , $U=13\text{ V}$, $D=50\%$, $F=1.0\text{ kHz}$, $W=500\ \mu\text{m}$, $H=1\text{ mm}$, $P=0.2\text{ MPa}$
脉冲电压(U)/V	11,12,13,14,15	1.5mol/L NaNO_3 , $t=40\text{ s}$, $D=50\%$, $F=1.0\text{ kHz}$, $W=500\ \mu\text{m}$, $H=1\text{ mm}$, $P=0.2\text{ MPa}$
脉冲占空比(D)/%	30,40,50,60,70	1.5mol/L NaNO_3 , $t=40\text{ s}$, $U=13\text{ V}$, $F=1.0\text{ kHz}$, $W=500\ \mu\text{m}$, $H=1\text{ mm}$, $P=0.2\text{ MPa}$
脉冲频率(F)/kHz	0.6,0.8,1.0,1.2,1.4	1.5mol/L NaNO_3 , $t=40\text{ s}$, $U=13\text{ V}$, $D=50\%$, $W=500\ \mu\text{m}$, $H=1\text{ mm}$, $P=0.2\text{ MPa}$

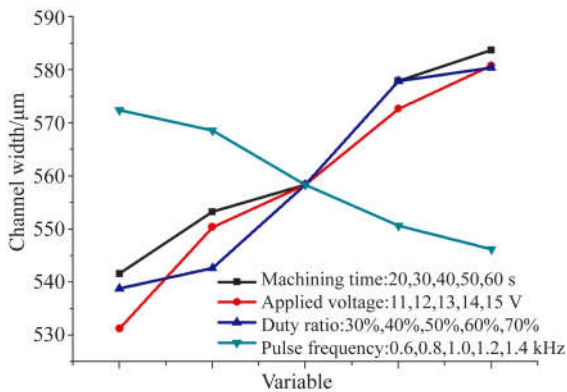


图 8 关键加工参数对沟槽宽度的影响

Fig. 8 Influence of process parameters on channel width

在加工时间为 20, 30, 40, 50 和 60 s 时, 所对应的切槽宽度分别为 541.59, 553.29, 558.35, 577.91, 和 583.71 μm 。加工时间长即电解反应时间长, 材料去除量增大, 侧向腐蚀更大, 但加工时间过短会使电解加工效果不明显。

在脉冲电压为 11, 12, 13, 14 和 15 V 时, 所对应的切槽宽度分别为 531.27, 550.38, 558.35, 572.64 和 580.81 μm 。加工电压增大会增大加工区电流密度, 从而使工件表面材料去除率增大, 造成更大的侧向腐蚀。因此, 为获得更高的加工精度, 加工电压应尽量小, 但过小的加工电压会使电解加工量变小, 影响加工效率。

在脉冲占空比为 30%, 40%, 50%, 60% 和 70% 时, 所对应的槽宽分别为 538.76, 542.69, 558.35, 577.87 和 580.38 μm , 占空比越大即一个脉冲周期内电解反应时间越长, 工件蚀除量变大, 微沟槽尺寸越大。因此为减小过切量, 占空比应相对选小, 延长电解产物的排出时间, 以获得更好的加工精度。

在脉冲频率为 0.6, 0.8, 1.0, 1.2 和 1.4 kHz 时, 所对应的槽宽分别为 572.39, 568.61, 558.35, 550.69 和 546.16 μm 。占空比一定时, 频率越高, 脉冲周期内脉宽长度会相应减小, 工件腐蚀量变小, 微沟槽尺寸越小。因此为减少过切量, 脉冲频率应相对选大, 以获得更好的加工精度。

参考文献:

[1] RAJURKAR K P, ZHU D, MCGEOUGH J A, et al.. New developments in electro-chemical machining [J]. *CIRP Annals*, 1999, 48(2):567-579.

6 结 论

本文提出一种场域离散脉冲电解加工非贯穿型阵列微沟槽方法, 并设计了专用夹具, 重点应用带有阵列流道的栅栏隔板作为活动掩模板, 实现了流场隔离和非加工区电场屏蔽的效果。通过 Comsol Multiphysics 仿真分析, 得到电解液在栅栏隔板流道内的平均流速达到 10.92 m/s, 不同流道速度变化量只有 0.82 m/s, 高电解液流速有利于排出电解产物, 提高电解加工稳定性, 而流速变化量低则有利于加工出尺寸一致性较高的微沟槽。场域离散脉冲电解加工中的电解加工间隙即为隔板厚度, 能高精度加工出阵列微沟槽。

在 1.5 mol/L NaNO_3 电解液, 脉冲电压为 13 V, 脉冲频率为 1 kHz, 脉冲占空比为 30%, 加工时间为 40 s, 栅栏隔板内槽道宽度为 500 μm , 厚度为 1 mm 的条件下进行工艺实验, 成功加工出 9 根宽 538.76 μm , 深 25.78 μm , 过切量只有 19.38 μm 的阵列微沟槽结构, 证实了场域离散脉冲电解加工微沟槽结构的可行性。

对影响微沟槽加工精度的关键参数进行了单因素实验, 结果表明: 采用短加工时间、低脉冲电压、低脉冲占空比、高脉冲频率有利于提高沟槽的加工精度。但是短加工时间和低电压使沟槽的总去除量减小, 沟槽深度达不到要求; 低的脉冲占空比可以延长单位周期内电解产物的排出时间, 起到强化传质的效果, 但同时降低了效率; 高脉冲频率可以使整个加工过程的能量分布更均匀稳定, 有利于提高加工稳定性和定域性, 所以应该综合考虑各参数之间的匹配。从槽形垂直度的角度出发, 考虑目前已开展的工艺试验结果, 所选参数组合在加工时间为 40 s、脉冲电压为 13 V、脉冲占空比为 30%、脉冲频率为 1.4 kHz 时效果最佳。接下来将进一步通过正交实验设计等方法, 优选工艺参数组合。本文的研究结果可为场域离散脉冲电解加工微沟槽的工业应用提供一定的参考。

[2] RAJURKAR K P, SUNDARAM M M, MALSHE A P. Review of electrochemical and electrodischarge machining [J]. *Procedia CIRP*, 2013, 6:13-26.

[3] 王艳萍, 徐文骥. 微沟槽电解加工试验研究 [J]. *电加工与模具*, 2015(1):21-24.

WANG Y P, XU W J. Experimental study on electro-

- chemical machining of microgrooves [J]. *Electromachining & Mould*, 2015(1):21-24. (in Chinese)
- [4] 柳龙华, 刘刚, 熊琰, 等. 大高宽比、高线密度 X 射线透射光栅的制作 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(1):72-77.
LIU L H, LIU G, XIONG Y, *et al.*. Fabrication of high-aspect-ratio and high-density X-ray transmission grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(1):72-77. (in Chinese)
- [5] 崔岩, 石二磊, 夏劲松, 等. 掩模偏转方向对硅尖形状的影响 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8):1865-1869.
CUI Y, SHI E L, XIA J S, *et al.*. Effect of changing mask direction on tip shape [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8):1865-1869. (in Chinese)
- [6] RAFFELSTETTER P, MOLLAY B. On the modeling of shape evolution in through-mask electrochemical micromachining of complex patterned substrates [J]. *Electrochimica Acta*, 2010, 55(6):2149-2157.
- [7] 李寒松, 李龙文, 高传平, 等. 钼栅网活动模板电解加工技术研究 [J]. *电加工与模具*, 2015(1):37-41.
LI H S, LI L W, GAO CH P, *et al.*. Study on molybdenum aperture plate by electrochemical machining with movable cathode mask [J]. *Electromachining & Mould*, 2015(1):37-41. (in Chinese)
- [8] 杨敏, 李寒松, 王国乾, 等. MA956 高温合金活动模板电解加工小孔技术研究 [J]. *电加工与模具*, 2016(5):42-46.
YANG M, LI H S, WANG G Q, *et al.*. Study on small hole machining of MA956 superalloys by electrochemical machining with movable cathode mask [J]. *Electromachining & Mould*, 2016(5):42-46. (in Chinese)
- [9] 王光强, 朱荻, 曲宁松. 蜂窝状微坑结构的电学加工研究 [J]. *电加工与模具*, 2007(2):32-34, 46.
WANG G Q, ZHU D, QU N S. Research of machining array micro-dimples in electrochemical machining [J]. *Electromachining & Mould*, 2007(2):32-34, 46. (in Chinese)
- [10] WANG G Q, LI H S, QU N S, *et al.*. Investigation of the hole-formation process during double-sided through-mask electrochemical machining [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 234:95-101.
- [11] CHEN X L, QU N S, LI H S, *et al.*. Electrochemical micromachining of micro-dimple arrays using a polydimethylsiloxane (PDMS) mask [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 229:102-110.
- [12] CHEN X L, QU N S, LI H S, *et al.*. Removal of islands from micro-dimple arrays prepared by through-mask electrochemical micromachining [J]. *Precision Engineering*, 2015, 39:204-211.
- [13] 钱双庆, 张华, 鲍凯, 等. 电解液非线性特性对电解转印加工表面织构域性影响分析 [J]. *机械设计与制造*, 2015(10):139-141, 145.
QIAN SH Q, ZHANG H, BAO K, *et al.*. Influence of non-linear electrolyte on the localization of surface texturing with electrochemical pattern transfer [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2015(10):139-141, 145. (in Chinese)
- [14] 王哲, 钱双庆, 曹红蓓, 等. 基于电场的电解转印加工流道过程模拟与分析 [J]. *现代制造工程*, 2017(6):14-19.
WANG ZH, QIAN SH Q, CAO H B, *et al.*. Simulation based on electric field about processing of channels by electrochemical pattern transfer machining [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2017(6):14-19. (in Chinese)
- [15] 明平美, 朱荻, 周锋, 等. 用 UV-LIGA 技术制造大通孔率精细镍网 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(6):1267-1273.
MING P M, ZHU D, ZHOU F, *et al.*. Fabrication of metal micro-precision sieves with high open areas using UV-LIGA process [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6):1267-1273. (in Chinese)
- [16] 明平美, 周维海, 赵晨昊, 等. 极间柔性多孔物充填型活动掩膜电解加工微坑技术 [J]. *中国科学: 技术科学*, 2016, 46(10):1005-1015.
MING P M, ZHOU W H, ZHAO CH H, *et al.*. Active through-mask electrochemical machining with its interelectrode gap filled with flexible porous material [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2016, 46(10):1005-1015. (in Chinese)

作者简介:



郭钟宁(1957—),男,江苏南京人,教授,博士生导师,1997年于香港理工大学获得博士学位,中国机械工程学会特种加工分会常务理事,主要从事特种加工技术、微纳加工技术及加工过程检测与控制的研究。E-mail: znguo@gdut.edu.cn

通讯作者:



罗红平(1978—),男,江西南昌人,博士,讲师,2009年于湖南大学获得博士学位,主要从事特种加工技术及装备、微加工技术的研究。E-mail: luohongping@gdut.edu.cn