

引文格式: 李国军, 陈晓磊, 叶志森, 等. 工件振动辅助管电极电解加工方孔仿真与试验研究[J]. 航空制造技术, 2024, 67(17): 83-92.
LI Guojun, CHEN Xiaolei, YE Zhisen, et al. Simulation and experimental research on workpiece vibration-assisted electrochemical machining of square holes with tube electrode[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2024, 67(17): 83-92.

工件振动辅助管电极电解加工方孔仿真与试验研究*

李国军^{1,2}, 陈晓磊^{1,2,3}, 叶志森^{1,2}, 张永俊^{1,2,3}, 郭钟宁^{1,2,3}

1. 广东工业大学机电与工程学院, 广州 510006;
2. 广州市非传统制造技术及装备重点实验室, 广州 510006;
3. 广东工业大学省部共建精密电子制造技术与装备国家重点实验室, 广州 510006)

[摘要] 为解决管电极电解加工方孔过程中因流场分布不均造成加工质量差等问题, 提出一种工件振动辅助管电极电解加工方孔的方法。流场仿真结果表明, 工件振动辅助电解加工能够在加工间隙内不同位置产生明显的脉动流场, 改善加工间隙内的电解液流动状态, 有效消除传统电解加工方孔中加工间隙内存在的“死水”区, 从而有利于电解产物的排出, 提升电解加工的稳定性。同时开展试验研究, 结果表明, 采用工件振动辅助管电极电解加工可以提升方孔加工的轮廓精度和表面质量, 并且采用脉冲电流可以进一步提升方孔的加工质量。最终采用振幅 0.04 mm、振频 20 Hz、脉冲占空比 80%、脉冲频率 5000 Hz、进给速度 1.5 mm/min, 加工出平均宽度 1.218 mm、宽度标准偏差 0.026 mm、侧壁表面粗糙度 0.703 μm 的方孔。

关键词: 方孔; 振动辅助; 管电极; 电解加工 (ECM); 仿真

Simulation and Experimental Research on Workpiece Vibration-Assisted Electrochemical Machining of Square Holes With Tube Electrode

LI Guojun^{1,2}, CHEN Xiaolei^{1,2,3}, YE Zhisen^{1,2}, ZHANG Yongjun^{1,2,3}, GUO Zhongning^{1,2,3}

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. State Key Laboratory of Precision Electronic Manufacturing Technology and Equipment, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

[ABSTRACT] In order to solve the problem of poor processing quality caused by uneven distribution of flow field during the process of square holes by electrochemical machining (ECM) with tube electrode, a method of workpiece vibration-assisted ECM of square holes with tube electrode is proposed. The results of flow field simulation indicate that workpiece vibration-assisted ECM can generate obvious pulsating flow fields at different positions within the machining gap, improve the electrolyte flow state within the machining gap and effectively eliminate the stagnant water area within the machining gap in the traditional ECM of square holes, thus facilitating the discharge of electrolytic products and improving the stability of ECM. The experimental researches were also conducted at the same time, and the results show that the use of workpiece vibration-assisted ECM with tube electrode can improve the contour accuracy and surface quality of square holes machining, and the use of pulse current can further improve the quality of square holes machining. Finally, a square hole with an average width of 1.218 mm, width standard deviation of 0.026 mm, side-wall surface roughness of 0.703 μm was electrochemically machined by using the amplitude of 0.04 mm, the vibration frequency of 20 Hz, the pulse duty cycle of 80%, the pulse frequency of 5000 Hz and the feed speed of 1.5 mm/min.

Keywords: Square holes; Vibration-assisted; Tube electrode; Electrochemical machining (ECM); Simulation

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2024.17.083

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52075105)。

以方孔为代表的异形孔广泛应用于航空航天、汽车制造、医疗器械等领域,并发挥着重要作用。在航空航天领域,异形孔多用于飞机进气道格栅,以增强隐形飞机的隐身效果^[1];在汽车制造领域,异形孔常用于汽车发动机的喷油嘴结构上,提高发动机入口燃油的雾化效果^[2];在医疗器械中,异形孔常用于无纺布喷丝板上,使喷丝分布得更加均匀^[3]。目前,加工上述异形孔的主要方法有机械加工、电火花加工、激光加工和电解加工。机械加工过程中,因异形孔形状复杂,加工精度难以保证,电火花加工和激光加工的表面易出现变质层和微裂纹,异形孔的表面质量无法保证。电解加工是基于电化学阳极溶解原理实现金属材料蚀除的一种加工技术,具有不受材料强度和硬度限制,无加工残余应力、重涂层及工具损耗,加工表面质量好、加工效率高等优点^[4]。其中,管电极电解加工是一种利用成形中空金属管作为阴极对工件阳极进行电化学蚀除的电解加工工艺,通过阴极的进给加工,使得工件阳极逐渐溶解并形成与金属管截面形状一致的孔型,因此在深小孔、复杂型腔、深型孔的加工中具有显著优势^[5],备受国内外学者的关注。

房晓龙^[6]研究了不同内孔形状对加工稳定性及孔表面质量的影响规律,发现内孔为圆形时流场截面最大、流场分布均匀、加工过程稳定,最终在进给速度 0.6 mm/min 下,加工出孔径 3.5 mm、孔深 1.8 mm、表面粗糙度 R_a 为 0.8 μm 的方孔。尹飞鸿等^[7]对六边形型孔加工进行了流场和电场仿真,分析了加工间隙内流场和电场的分布情况,并且开展了相应的单因素试验,最后在进给速度 1.0 mm/min 下,加工出边长 4 mm、孔深 3 mm 的六边形型孔。孟生冬等^[8]利用边长为 8 mm 的正三角形管电极,在进给速度 1.0 mm/min 等参数下,加工出单边长 8.186 mm、锥度 7.25° 的三角孔。Fan 等^[9]利用 COMSOL 软件对 3 种不同截面形状的方形管电极加工孔过程仿真,试验发现,外轮廓为弧形且内孔孔径越大的阴极,加工间隙内流场分布越均匀。Jia 等^[10]通过在方孔阴极四周及芯部镶嵌磁铁,利用磁场改善加工间隙内部的流场分布,在进给速度 0.4 mm/min 等工艺参数下加工出侧壁锥度 0.215°、宽度偏差 0.07 mm 的方孔。褚玉程等^[11]采用复合管电极振动进给和脉冲电解技术的加工方法,使得加工区域内部流体分布均匀,提高了加工精度和稳定性,最后在加工电压 15 V、振幅 0.3 mm、振频 50 Hz 等工艺参数下加工出表面粗糙度 R_a 为 0.8 μm 的斜方孔。

由以上分析可知,流场是影响管电极电解加工异形孔的关键因素^[12],上述研究均通过对阴极结构的设计达到改善管电极加工异形孔过程中流场分布不均的目的,但仍存在阴极设计复杂、进给速度低等缺陷,并且所

加工异形孔尺寸均大于 3 mm,在小尺寸异形孔加工方面能力不足。本文采用边长为 1 mm 的方形管电极开展方孔加工试验研究,为改善管电极加工方孔过程流场分布,提高方孔加工效率及表面质量,提出工件低频振动辅助管电极电解加工方孔的方法,使用 Fluent 仿真软件研究低频振动对方孔加工流场的影响规律,并且研究不同电参数及进给速度对方孔加工的轮廓精度与表面质量的影响。

1 工件振动辅助管电极电解加工方孔原理及仿真

1.1 工件振动辅助管电极电解加工方孔原理

本文提出的工件振动辅助管电极电解加工方孔的方法原理如图 1 所示。采用内孔形状为圆形的方形中空管状工具电极作为阴极,电解液经管电极内孔喷射到加工间隙内,与低频振动的阳极工件形成导电回路,从而使工件发生电化学溶解,同时将加工产物、焦耳热排出加工间隙。加工过程中,端面加工间隙随着工件低频振动发生周期性变化,使加工间隙内的电解液呈脉动流动状态,从而改善电解液的流动过程,有效消除“死水”区,提升加工过程稳定性,同时脉动流场可促进加工间隙内电解产物的快速排出,减小加工产物对电解过程的影响,提升方孔加工质量。

1.2 工件振动辅助管电极电解加工方孔仿真分析

为探究工件振动辅助对电解加工方孔流场的改善作用,本文使用 Fluent 软件对加工过程的流场进行仿真分析,三维仿真模型如图 2 所示。其中边界 Γ_1 为电解液入口;边界 Γ_2 为电解液出口;边界 Γ_4 为方孔的侧壁面,采用 Deforming 变形网格设置,变形过程重构网格,减少畸变网格产生;边界 Γ_3 为方孔的底部端面,用 Fluent 软件的 User-Defined 模块编程设置动网格运动速度,模拟加工过程的振动。其余边界设置为壁面。边界 Γ_3 的运动速度 v 设置为

$$v = 2\pi Af \cos(2\pi ft) \quad (1)$$

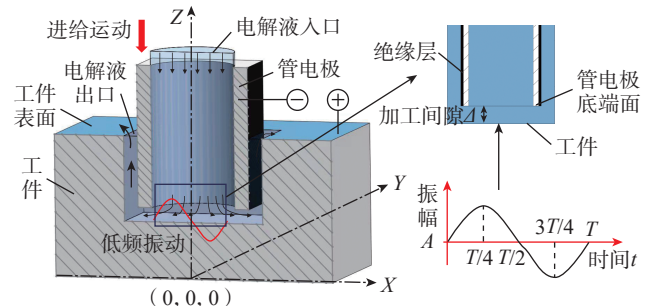


图 1 工件振动辅助管电极电解加工方孔示意图

Fig.1 Schematic diagram of workpiece vibration-assisted ECM of square holes with tube electrode

式中, A 表示振动幅度; f 表示振动频率; t 表示电解加工的时间。

为对比分析有无工件振动辅助下流体在端面加工间隙的流速变化情况, 在距离孔底部端面 0.15 mm 处, 设置一个与 XOY 平面平行的 $A-A$ 平面(图 2)。同时, 在 $A-A$ 平面上设置 $A、B、C、D$ 4 个点观察流速变化情况。

流场仿真网格模型如图 3 所示。模型网格划分采用六面体结构化网格, 并且对底部工件振动区域的网格进行尺寸细化。仿真模型设置的参数如表 1 所示。

不同电解加工方式下电解液流速云图仿真结果如图 4 所示。由图 4 (a) 可知, 在传统的方形管电极电解加工方式下, 端面加工间隙内管电极底端面 4 个直角处电解液流动阻力大, 存在“死水”区, 电解液流速低, 不利于电解产物的排出。采用工件振动辅助电解加工时(图 4 (b)), 端面加工间隙发生周期性变化, t 在 0~0.0125 s 时间段内, 加工间隙增大, 加工间隙内液流阻力降低, 电解液顺利进入加工间隙, 加工间隙内各区域电解液均以较高流速流动; t 在 0.0125~0.0375 s 时间段

内, 加工间隙逐步减小, 液流阻力增大, 电解液在加工间隙内出现低流速“死水”区, 尤其是加工间隙低至 0.16 mm 时, 低流速“死水”区面积最大。随着工件周期性往复振动, 加工间隙内的电解液将在低速-高速间周期性变化, 产生明显脉动流场, 有利于电解产物的顺利排出。

为进一步分析加工间隙内不同区域的电解液流速变化, 提取图 2 所示加工间隙内 $A、B、C、D$ 4 点的流速变化图, 如图 5 所示。可以看出, 传统管电极电解加工过程中, 各区域流速不同, 且随时间变化保持不变, $A、B、C、D$ 4 点速度分别为 15.8 m/s、3.1 m/s、27.6 m/s、19.8

表 1 仿真模型参数

Table 1 Simulation model parameters

参数	数值
振动幅度 A /mm	0.04
振动频率/Hz	20
电解液入口压强 P_1 /MPa	1.0
电解液出口压强 P_2 /MPa	0
端面加工间隙 Δ /mm	0.2
加工深度 H /mm	4
管电极外边长 L /mm	1
管电极内径 d /mm	0.8

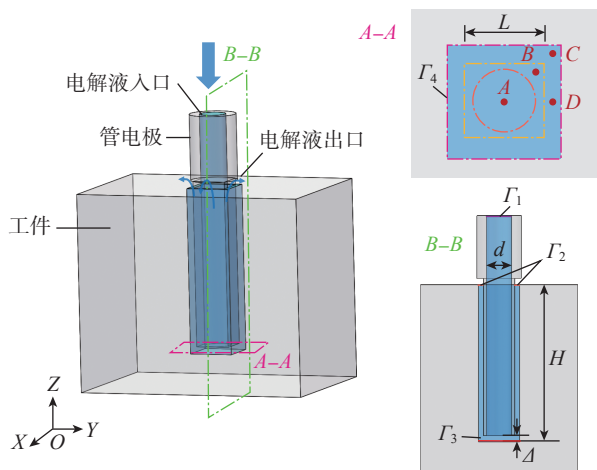


图 2 工件振动辅助管电极电解加工方孔仿真模型示意图
Fig.2 Schematic diagram of simulation model of workpiece vibration-assisted ECM of square holes with tube electrode

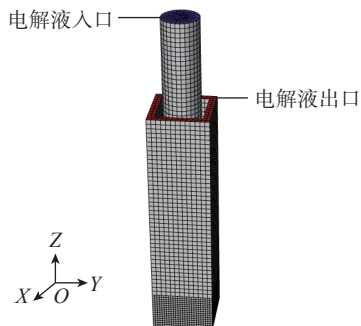
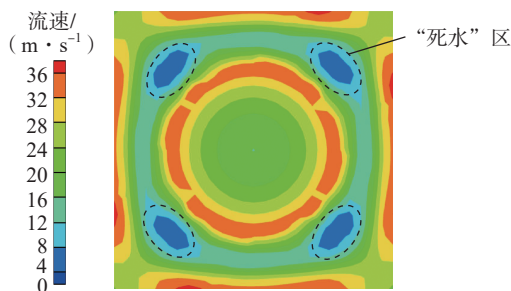
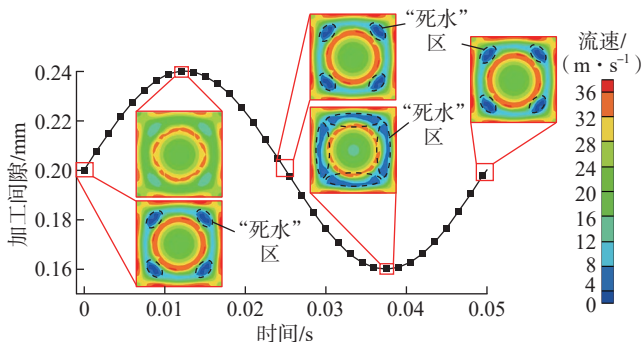


图 3 工件振动辅助管电极电解加工方孔网格模型示意图
Fig.3 Schematic diagram of mesh model of workpiece vibration-assisted ECM of square holes with tube electrode



(a) 传统管电极电解加工



(b) 工件振动辅助管电极电解加工

图 4 不同电解加工方式下电解液流速云图
Fig.4 Velocity contour diagram of electrolyte under different ECM methods

m/s,其中加工间隙内电极端面直角处(B点)电解液流速仅为 3.1 m/s,不利于此处电解产物的排出,同时降低电解加工精度和稳定性。当采用工件振动辅助电解加工时,各区域的电解液均发生周期性脉动变化,A、C、D点流速分别在 14.9~16.6 m/s、25.6~29.2 m/s、15.7~21.7 m/s 之间脉动变化,有利于改善加工间隙内电解液的流动状态。在电极端面直角处(B点),流速最高可达 10.3 m/s,较传统电解加工有显著提升,可有效消除加工间隙

内的“死水”区,促进电解产物排出,提升电解加工精度和加工过程稳定性。

2 工件振动辅助管电极电解加工方孔试验装置

试验在自主搭建的试验平台进行,如图 6 所示。该系统由机床平台、工控机、脉冲电源、电解液循环过滤系统及振动平台组成。其中,振动平台由音圈电机、高精密光栅尺、底座及承重平台组成。试验用的工件材料是

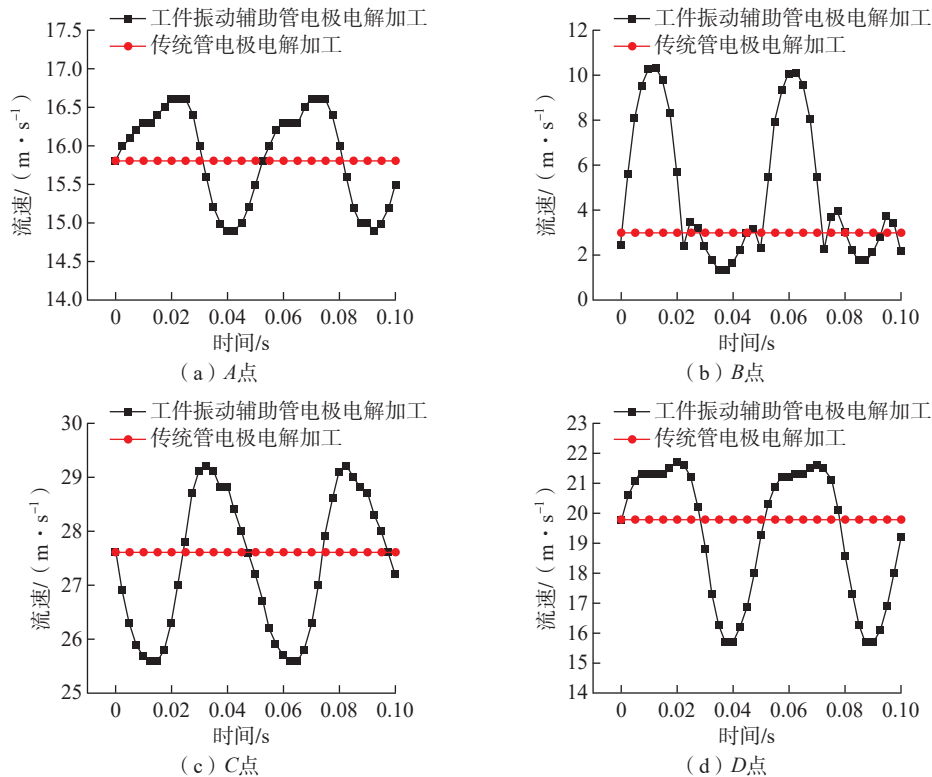


图 5 不同电解加工方式下流速变化曲线

Fig.5 Curve of velocity under different ECM methods

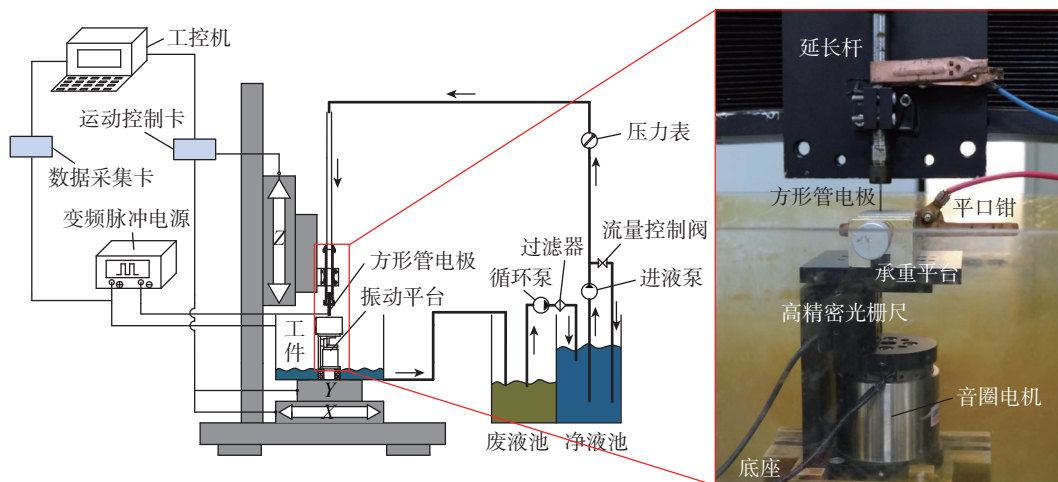


图 6 试验平台系统

Fig.6 System of test platform

304 不锈钢。试验所用方形管电极是由外径 1.5 mm、内径 0.8 mm 圆形不锈钢管通过精密电火花线切割削边制作,所加工的方形管电极边长为 1 mm。然后对方形管电极外侧壁使用环氧树脂做绝缘处理,绝缘层的厚度为 50 μm ,绝缘后的方形管电极如图 7 所示。

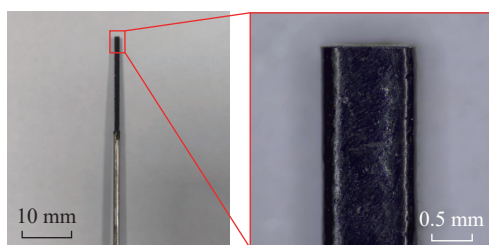
试验过程中使用数据采集卡 NI 9222 (美国国家仪器公司)采集电流信号,探究加工过程中流体流动变化对加工电流的影响。试验加工出的方孔使用电火花线切割剖开,沿深度方向等间距选择 4 个点测量方孔的宽度,同时使用台阶仪 (Kosaka, ET-150) 测量其侧壁的表面粗糙度,取样长度选择 4 mm。试验选取的具体加工参数见表 2,每组试验重复 3 次。

3 试验结果与分析

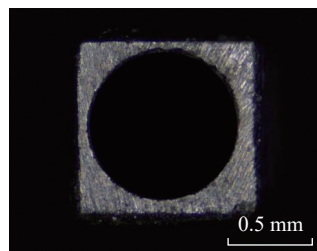
3.1 传统管电极电解加工与工件振动辅助管电极电解加工方孔对比试验

对比传统管电极电解加工与工件振动辅助管电极电解加工对方孔的轮廓精度与表面质量的影响。试验选用直流电解加工,管电极进给速度为 0.9 mm/min,其余加工参数见表 2。

图 8 是不同电解加工方式下的方孔端面及深度方向截面轮廓图。可以看出,采用传统管电极电解加工出的方孔,其端面轮廓形状较差,尤其是四角部分,轮廓精度无法保证,方孔平均宽度为 1.313 mm,并且侧壁面发黑,表面粗糙度达 4.862 μm ;而采用工件振动辅助管电极电解加工出的方孔,其截面轮廓形状和侧壁表面粗糙度都有明显改善,方孔轮廓清晰,平均宽度为 1.326 mm,侧壁表面粗糙度降至 3.728 μm 。



(a) 主视图



(b) 俯视图

图 7 外侧壁绝缘方形管电极

Fig.7 Square tube electrode with outer-wall insulation

图 9 为加工过程中采集的电流信号。可知,传统管电极电解加工的电流为 1.41 A,而工件振动辅助管电极电解加工的电流呈现周期性的脉动变化,频率与工件振动频率一致,均为 20 Hz,平均电流为 1.63 A,电流较传统管电极电解加工大 0.22 A。结合流场仿真分析可知,在传统管电极电解加工中,电极端面四角存在持续的死水区,不利于产物的排出,加工产物堆积在加工间隙内,不仅影响方孔轮廓成形精度,并且导致电导率降低,加工电流减小,加工过程稳定性下降,局部出现短路情况,影响表面质量。工件振动辅助管电极电解加工有效消除了端面加工间隙内四角处的“死水”区,加快产物排出,降低了产物对加工过程的影响,因此提高了方孔轮廓成形精度。此外,振动辅助产生的脉动流场,强化了电解液的更新速度,使电解加工在更高的电流密度下进行,从而提升了方孔侧壁表面质量。同时,根据法拉第定律,阳极溶解金属体积 V 与电流强度 I 之间的关系为

$$V = \omega It \quad (2)$$

式中, ω 为金属的体积电化学当量; t 为通电时间。

由式 (2) 可知,电流升高会增大金属材料的溶解量,在相同的阴极进给速度下,使方孔尺寸变大。

3.2 工件振动辅助管电极直流与脉冲电流电解加工方孔对比试验

在工件振动辅助管电极电解加工的基础上对比直流和脉冲电流电解加工对方孔的轮廓精度与表面质量的影响。试验选取在 0.9 mm/min 进给速度下进行加工试验,其余试验参数见表 2。

图 10 是不同加工电流下电解加工出的方孔端面及深度方向截面轮廓图。可以看出,当采用脉冲电流电解加工时 (图 10 (b)),其端面轮廓精度与侧壁表面质量

表 2 试验参数
Table 2 Test parameters

参数	数值
电解液入口压强 P_1/MPa	1.0
电解液出口压强 P_2/MPa	0
初始加工间隙 A/mm	0.4
加工电压 U/V	20
脉冲频率 f_1/Hz	5000
脉冲占空比 $\varepsilon/\%$	80
电解液 NaNO_3 质量分数 $\%$	12
进给速度 $v_f/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	0.9, 1.2, 1.5, 1.8
振动幅度 A/mm	0.04
振动频率 f_2/Hz	20

较直流电解加工均有进一步提升。为更好地分析方孔尺寸与表面质量的变化,测量了方孔宽度和侧壁表面粗糙度,如图 11 所示。直流电解加工方孔的平均宽度为 1.326 mm,由式(3)计算得出宽度标准偏差为 0.032 mm,侧壁表面粗糙度为 3.728 μm 。

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (W_i - \bar{W})^2}{n}} \quad (3)$$

式中,SD 为方孔宽度标准偏差; W_i 为第 i 个点测量方孔的宽度 ($i=1,2,3,4$); \bar{W} 为方孔平均宽度; n 为宽度数据点的个数 ($n=4$)。

当采用脉冲电流电解加工时,方孔的平均宽度为

1.261 mm,宽度标准偏差为 0.028 mm,侧壁表面粗糙度为 0.991 μm ,加工质量显著提升。

为解释产生上述变化的原因,采集加工过程中的电流信号,如图 12 所示。可知,工件振动辅助管电极直流电解加工的峰值电流为 1.83 A,工件振动辅助管电极脉冲电流电解加工的峰值电流为 2.2 A,并且峰值电流均出现周期性脉动,频率与工件振动频率相同,都为 20 Hz (图 12 (b) 中峰值电流蓝色虚线)。这说明脉冲电流进一步提升了产物的排出速度,加工间隙内电解液更新速度快,使其峰值电流大于直流电解加工的峰值电流,从而提升表面质量,并且采用脉冲电流电解加工能减弱对

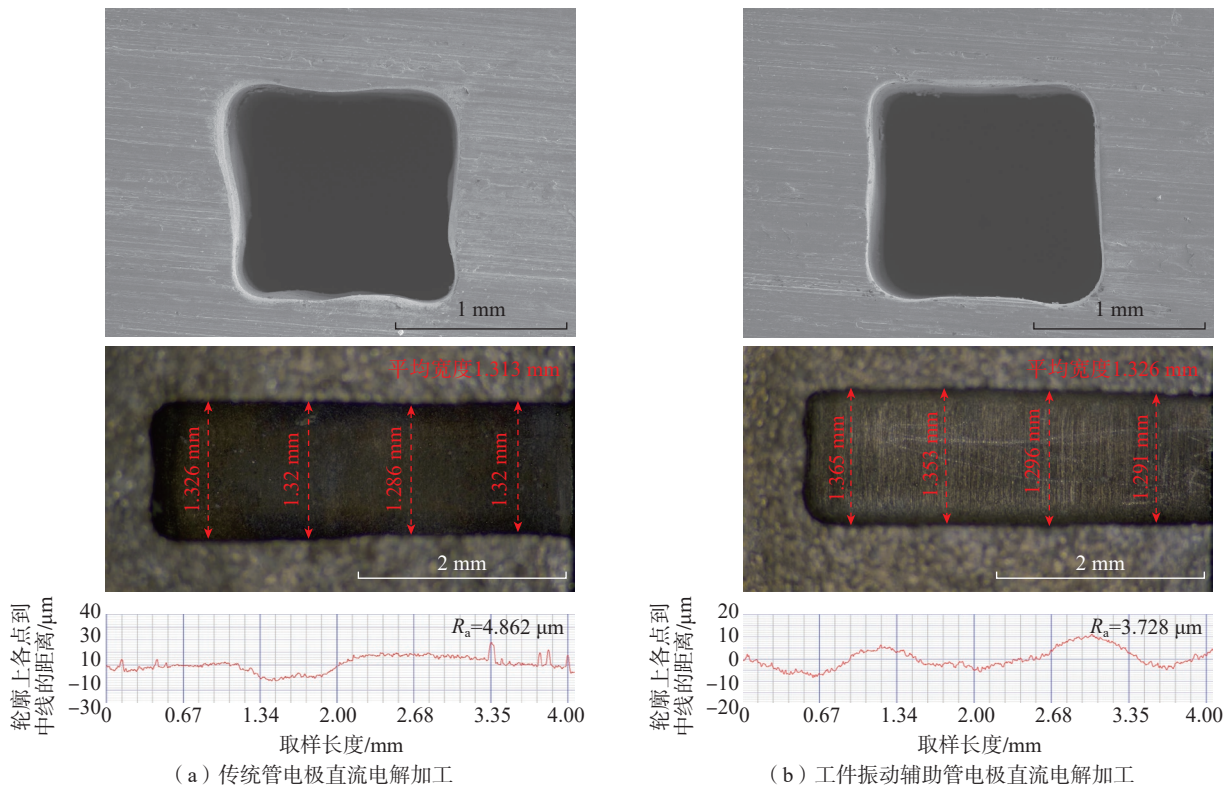


图 8 不同电解加工方式下的方孔截面图

Fig.8 Cross-sectional photographs of square holes under different ECM methods

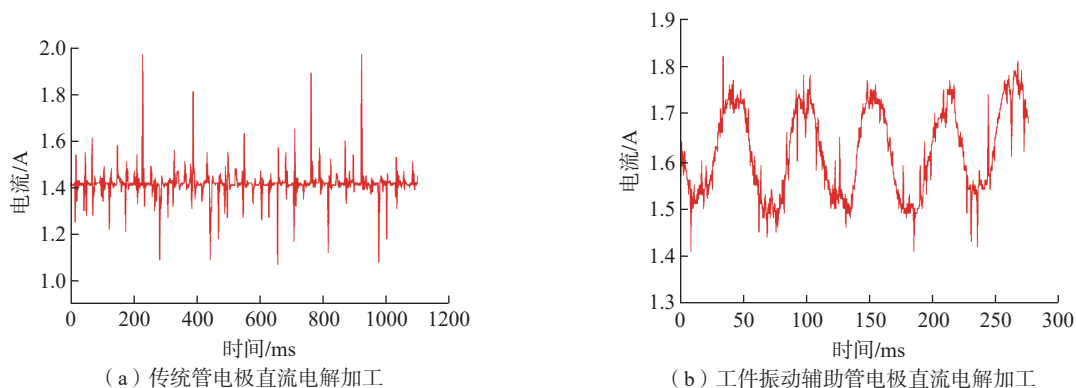
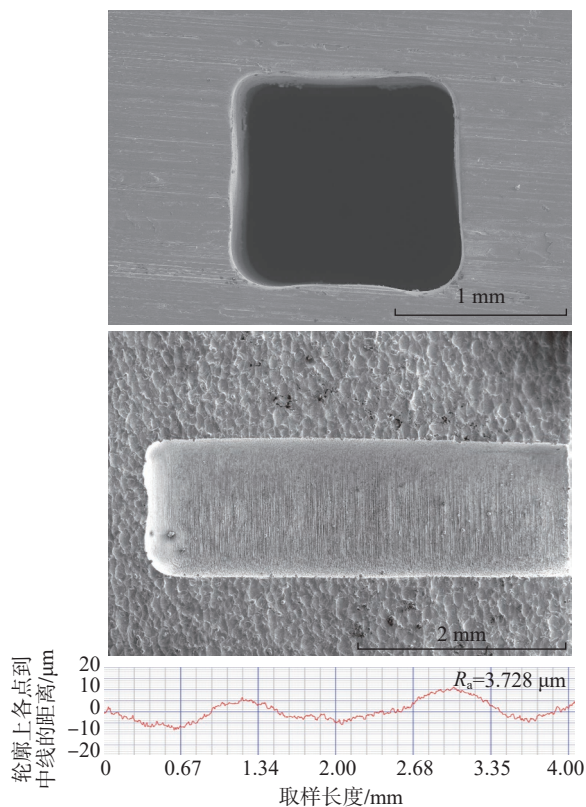
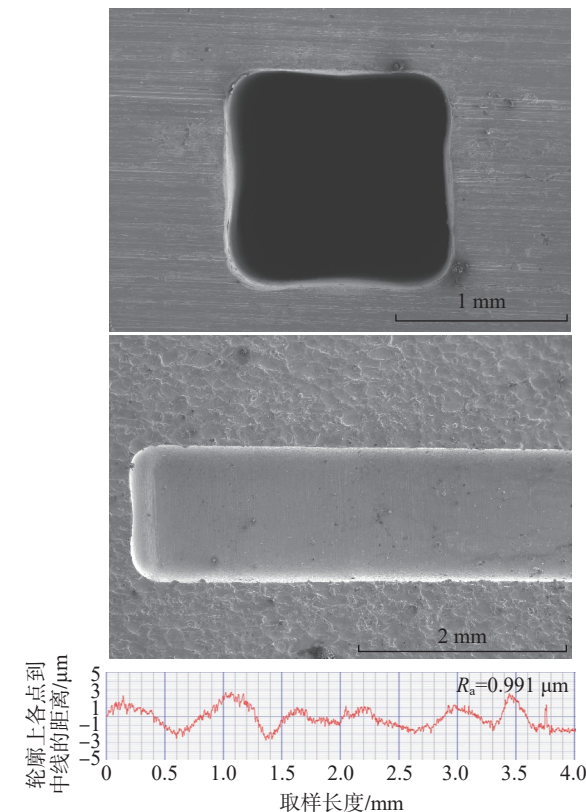


图 9 不同电解加工方式下方孔的电流变化

Fig.9 Current variation of square holes under different ECM methods



(a) 工件振动辅助管电极直流电解加工



(b) 工件振动辅助管电极脉冲电流电解加工

图 10 不同加工电流下电解加工的方孔截面图

Fig.10 Cross-sectional photographs of square holes by ECM at different machining currents

已加工侧壁的二次腐蚀作用,提高其加工精度^[13]。

3.3 进给速度对加工结果的影响

下文重点探究脉冲电流下,进给速度对工件振动辅助管电极电解加工方孔的影响规律,进给速度分别设置为 0.9 mm/min、1.2 mm/min、1.5 mm/min 和 1.8 mm/min,其余试验参数见表 2。

图 13 是不同进给速度下电解加工出的方孔端面及深度方向截面轮廓图。可以看出,随着进给速度的增加,方孔的轮廓精度与表面质量都有所提高,具体数值如图 14 所示。当进给速度从 0.9 mm/min 增加到 1.8 mm/min 时,方孔平均宽度从 1.261 mm 降低到 1.205 mm,宽度标准偏差从 0.028 mm 降低到 0.025 mm,方孔宽度随着加工速度的增加持续减小,且尺寸均匀性持续提升。进给速度从 0.9 mm/min 增加到 1.5 mm/min 时,侧壁表面粗

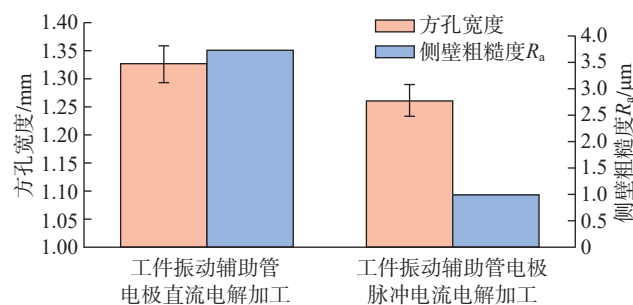
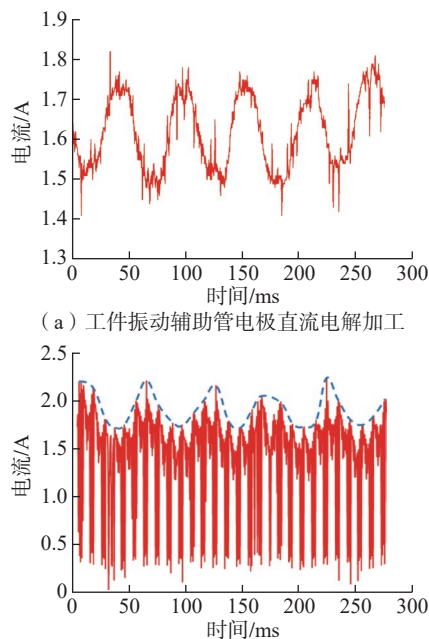


图 11 不同加工电流下电解加工方孔宽度与侧壁粗糙度

Fig.11 Width and side-wall roughness of square holes by ECM at different machining currents



(a) 工件振动辅助管电极直流电解加工

(b) 工件振动辅助管电极脉冲电流电解加工

图 12 不同加工电流下电解加工方孔的电流变化

Fig.12 Current variation of square holes by ECM at different machining currents

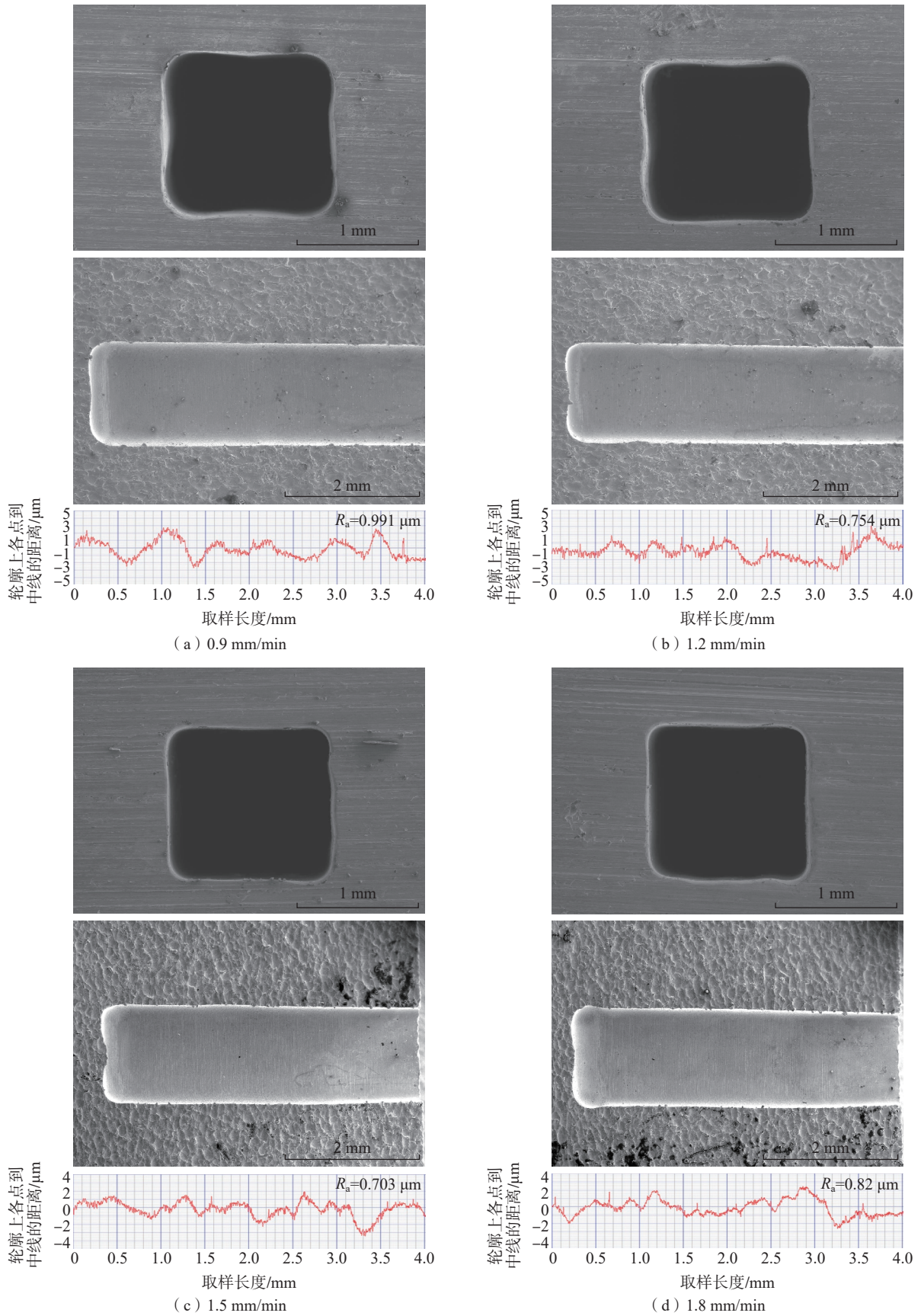


图 13 不同进给速度下电解加工的方孔截面图

Fig.13 Cross-sectional photographs of square holes by ECM at different feed speeds

糙度从 $0.991 \mu\text{m}$ 降低到 $0.703 \mu\text{m}$, 而当进给速度从 1.5 mm/min 进一步增加到 1.8 mm/min 时, 侧壁表面粗糙度从 $0.703 \mu\text{m}$ 增加到 $0.82 \mu\text{m}$, 侧壁表面粗糙度呈现先下降后上升的趋势, 在进给速度为 1.5 mm/min 时最小。

为进一步分析加工结果, 采集加工过程的电流信号如图 15 所示。可知, 当进给速度从 0.9 mm/min 增加到 1.8 mm/min 时, 峰值电流从 2.2 A 增加到 3.5 A 。电解加工平

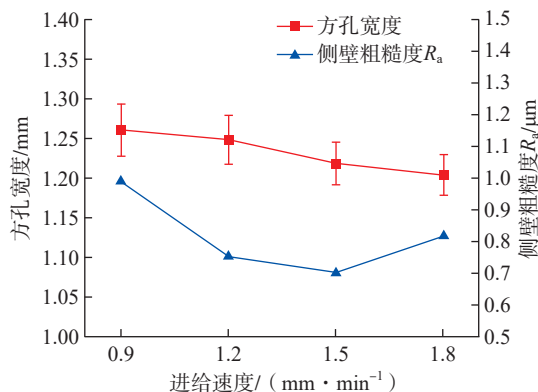


图 14 不同进给速度下方孔宽度与侧壁粗糙度

Fig.14 Width and side-wall roughness of square holes at different feed speeds

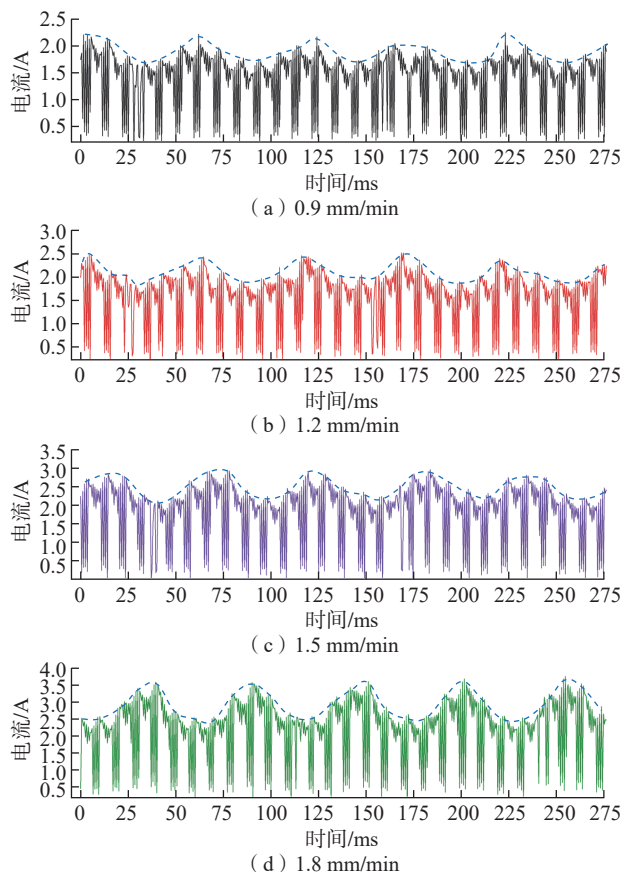


图 15 不同进给速度下电解加工方孔的电流变化

Fig.15 Current variation of square holes by ECM at different feed speeds

衡间隙 Δ_b 与管电极进给速度 v_c 之间的关系为

$$\Delta_b = \frac{\eta\omega\sigma(U - \delta_E)}{v_c} \quad (4)$$

式中, η 为电流效率; σ 为电解液的电导率; U 为加工电压; δ_E 为阴阳极电极电位值总和。

由式 (4) 可知, 在其他加工参数不变的情况下, 随着管电极进给速度的增加, 加工间隙减小, 加工电流增大, 从而使材料在高电流密度下溶解, 同时配合工件振动, 电解产物能够顺利排出加工区域, 因此进给速度从 0.9 mm/min 增加到 1.5 mm/min 时, 孔侧壁表面粗糙度降低。而当进给速度提升至 1.8 mm/min 时, 加工间隙进一步减小, 增大了电解液流动阻力, 削弱了工件振动在改善流场分布和提高产物排出效率中的作用, 从而导致产物无法完全排出加工区, 影响材料溶解, 因此侧壁表面粗糙度有所增大。此外, 随着管电极进给速度的提升, 管电极端面电场对已加工侧壁的二次电解加工时间减少, 使得方孔宽度减小。

4 结论

本文提出工件振动辅助管电极电解加工方孔的方法, 提升方孔加工质量。建立了工件振动辅助管电极电解加工方孔的三维流场模型, 仿真分析了工件振动对加工间隙内流场的影响, 并进行相关试验, 得出如下结论。

(1) 工件低频振动使端面加工间隙大小发生周期性变化, 促进电解液流速产生脉动变化, 有助于强化加工间隙内部传质能力并有效消除端面加工间隙内部的“死水”区, 提升加工过程的稳定性。

(2) 工件振动辅助管电极电解加工能够提升方孔的端面轮廓精度和侧壁表面质量, 与传统管电极直流电解加工方孔对比, 方孔轮廓清晰且侧壁表面粗糙度从 $4.862 \mu\text{m}$ 减小到 $3.728 \mu\text{m}$ 。

(3) 脉冲电流能够进一步提升方孔加工质量, 与直流电解加工相比, 方孔宽度由 $1.326 \text{ mm} \pm 0.032 \text{ mm}$ 降至 $1.261 \text{ mm} \pm 0.028 \text{ mm}$, 侧壁表面粗糙度由 $3.728 \mu\text{m}$ 降至 $0.991 \mu\text{m}$, 表面质量显著提升。

(4) 在振幅 0.04 mm 、振频 20 Hz 、电压 20 V 、脉冲占空比 80% 、脉冲频率 5000 Hz 、入口压强 1 MPa 的试验参数下, 方孔宽度随着进给速度的增加逐渐减小且尺寸均匀性持续提升, 在进给速度为 1.8 mm/min 时, 方孔宽度为 $1.205 \text{ mm} \pm 0.025 \text{ mm}$; 而侧壁表面粗糙度随着进给速度的提升, 呈现先减小后增大的趋势, 在进给速度为 1.5 mm/min 时达到最小, 为 $R_a 0.703 \mu\text{m}$ 。

参考文献

- [1] 张乐, 周洲, 许晓平. 飞翼无人机保形进气道耦合进口格栅

气动与隐身综合特性[J]. 航空动力学报, 2018, 33(7): 1612-1621.

ZHANG Le, ZHOU Zhou, XU Xiaoping. Aerodynamic and stealthy integrated performance of conformal inlet coupling entrance grille of flying wing unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(7): 1612-1621.

[2] 祁璐. 喷油嘴锥孔复合进给精密电解加工技术基础研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

QI Lu. Basic research on precision electrochemical machining technology of nozzle cone hole with compound feed[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.

[3] ZHAO X Y, YI X S, XU Z B, et al. Effects of spinneret structure on poly-ether-ether-ketone fibers by screw extrusion[J]. Journal of Central South University of Technology, 2005, 12(3): 272-275.

[4] 刘志东. 特种加工[M]. 2版. 北京: 北京大学出版社, 2017: 162-163.

LIU Zhidong. Special processing[M]. 2nd ed. Beijing: Peking University Press, 2017: 162-163.

[5] 房晓龙. 管电极电解加工关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

FANG Xiaolong. Research on key technology of electrochemical machining of tube electrode[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[6] 房晓龙, 曲宁松, 李寒松, 等. 电极内孔结构对钛合金方孔电解加工的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(9): 137-142.

FANG Xiaolong, QU Ningsong, LI Hansong, et al. Effects of hollow hole structure of electrode on electrochemical machining of square holes in titanium alloys[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(9): 137-142.

[7] 尹飞鸿, 蒋丽伟, 肖华星, 等. 六边形形孔电解加工试验及工艺优化[J]. 制造业自动化, 2018, 40(2): 60-64.

YIN Feihong, JIANG Liwei, XIAO Huaxing, et al. Experiment and process optimization of electrolytic machining of hexagonal hole[J]. Manufacturing Automation, 2018, 40(2): 60-64.

[8] 孟生冬, 干为民, 陈阳, 等. 管电极电解加工三角孔实验研究[J]. 电加工与模具, 2018(2): 35-38.

MENG Shengdong, GAN Weimin, CHEN Yang, et al. Experimental study on electrochemical drilling of triangle hole[J]. Electromachining & Mould, 2018(2): 35-38.

[9] FAN Q M, LIU G, FAN Z J, et al. Flow field numerical simulation of the ECM machining gap on square holes based on COMSOL[C]//2011 Third Pacific-Asia Conference on Circuits, Communications and System (PACCS). Wuhan, Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 1-4.

[10] JIA J L. Study on superposed magnetic field ECM of square hole[J]. Advanced Materials Research, 2012, 443-444: 899-904.

[11] 褚玉程, 张明岐, 刘萌, 等. 管电极精密振动电解加工斜方孔实验研究[J]. 电加工与模具, 2018(5): 33-37.

CHU Yucheng, ZHANG Mingqi, LIU Meng, et al. Experiment study of shaped tube precision-vibrating electrochemical drilling inclined square hole[J]. Electromachining & Mould, 2018(5): 33-37.

[12] 薛润荣, 赵建社, 姚学磊, 等. 异形深孔电解加工过程的流场优化[J]. 电加工与模具, 2020(3): 32-37, 63.

XUE Runrong, ZHAO Jianshe, YAO Xuelei, et al. Flow field optimization in electrochemical machining process of special-shaped deep holes[J]. Electromachining & Mould, 2020(3): 32-37, 63.

[13] PAN Y, XU L Z. Vibration analysis and experiments on electrochemical micro-machining using cathode vibration feed system[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2015, 16(1): 143-149.

通讯作者: 陈晓磊, 副教授, 博士, 研究方向为电化学制造技术。

(责编 七七)

(上接第 82 页)

MA Teng, JIA Xiaoliang, SUN Bingyang. Aircraft assembly shop-floor resources tracing and visualization[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(6): 64-72.

[2] 龙安林, 何凤涛, 蒋超, 等. 飞机大部件装配能力测算方法研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(3): 83-86, 102.

LONG Anlin, HE Fengtao, JIANG Chao, et al. Research on evaluating method of assembly capacity of large aircraft component[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(3): 83-86, 102.

[3] 王伟, 王旭东, 孟飙. 飞机生产中的批次架次管理技术[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2015, 32(6): 87-92.

WANG Wei, WANG Xudong, MENG Biao. Shipset management technology in aircraft production[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2015, 32(6): 87-92.

[4] 郑守国, 张勇德, 谢文添, 等. 基于数字孪生的飞机总装生产线建模[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(5): 843-854.

ZHENG Shouguo, ZHANG Yongde, XIE Wentian, et al. Aircraft final assembly line modeling based on digital twin[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(5): 843-854.

[5] DOS SANTOS C H, MONTEVECHI J A B, DE QUEIROZ J A, et al. Decision support in productive processes through DES and ABS in the digital twin era: A systematic literature review[J]. International Journal of Production Research, 2022, 60(8): 2662-2681.

[6] 屈琦, 贾晓亮, 郑植元, 等. 飞机部件装配生产线仿真研究[J]. 航空制造技术, 2017, 60(4): 54-59.

QU Qi, JIA Xiaoliang, ZHENG Zhiyuan, et al. Simulation of aircraft components assembly line[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017, 60(4): 54-59.

[7] JIA Y, TIAN H, CHEN C, et al. Predicting the availability of production lines by combining simulation and surrogate model[J]. Advances in Production Engineering & Management, 2017, 12(3): 285-295.

[8] AZADEH A, NEGAHBAN A, MOGHADDAM M. A hybrid computer simulation-artificial neural network algorithm for optimisation of dispatching rule selection in stochastic job shop scheduling problems[J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(2): 551-566.

[9] 陈聪, 候磊, 李乐乐, 等. 基于GRU改进RNN神经网络的飞机燃油流量预测[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(27): 11663-11673.

CHEN Cong, HOU Lei, LI Lele, et al. Prediction of aircraft fuel flow based on recurrent neural network[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(27): 11663-11673.

[10] ZHANG Y Z, XIONG R, HE H W, et al. Long short-term memory recurrent neural network for remaining useful life prediction of lithium-ion batteries[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(7): 5695-5705.

[11] 孙翊文, 王宇璐, 傅昆, 等. 交互门控循环单元及其在到达时间估计中的应用[J]. 中国科学(信息科学), 2021, 51(5): 822-833.

SUN Yiwen, WANG Yulu, FU Kun, et al. Interactive gated recurrent unit and its application for estimated time of arrival[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2021, 51(5): 822-833.

通讯作者: 张琦, 工程师, 研究方向为生产制造技术、生产线规划、项目管理。

(责编 七七)