

基于电火花-电解复合加工的钨材料微小孔加工研究

周义涛,沈云,奚天鹏,倪受东,陈超

(南京工业大学 机械与动力工程学院,江苏 南京 211816)

摘要:为实现钨材料微小孔高效、高质量加工,提出对钨材料采用低电导率盐溶液电火花-电解复合加工方式。通过实验分析发现,相比于纯电火花加工,在相同的加工环境下对钨材料进行电火花-电解复合加工效率提升为 $67 \mu\text{m}/\text{s}$ 。在此基础上,探究了电参数(脉冲宽度、脉冲间隙、峰值电流)、溶液浓度对电火花-电解复合加工的影响规律,并通过正交实验确定最优参数为脉冲宽度 $2 \mu\text{s}$,脉冲间隙 $2 \mu\text{s}$,峰值电流 2A ,电解液浓度 $10 \text{g}/\text{L}$ 。

关键词:钨材料;电火花加工;复合加工;参数优化

中图分类号:TH122 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)04-0041-03

Micro Hole Machining of Tungsten Materials Based on Edm-electrolysis Composite Machining

ZHOU Yitao, SHEN Yun, XI Tianpeng, NI Shoudong, CHEN Chao

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: To achieve highly efficient and high quality processing of tungsten micropores, a low conductivity salt solution EDM-ECM machining method is proposed. Through experimental analysis, it is found that the efficiency of EDM-ECM is $67 \mu\text{m}/\text{s}$ in the same machining environment in comparison with pure EDM. On this basis, the influence of electrical parameters (pulse width, pulse gap, peak current) and solution concentration on EDM-ECM is investigated, and by orthogonal experiment, pulse width $2 \mu\text{s}$, pulse gap $2 \mu\text{s}$, peak current 2A and electrolyte concentration $10 \text{g}/\text{L}$ are defined as the optimum parameters.

Keywords: tungsten; EDM; ECM; parameter optimization

0 引言

金属钨具有熔沸点高、强度大、密度大、耐化学腐蚀性好等特点,因此在实际生产中具有广泛应用,例如用于生产碳化钨硬质合金刀具、高速钢、工具钢,钨铜合金也广泛应用于军工、集成电路等领域^[1]。对于金属钨可以进行电火花加工及电解加工,陈豫红等^[2]提出对钨合金板采用高频窄脉宽的电火花脉冲电源加工技术,同时在加工过程中电极丝做高频振动,使小孔加工精度得到显著提高;北京理工大学马利政^[3]提出电火花成型加工与金属键结合的加工方法,首先在两块钨板上用线形成型电极加工凹槽,再将钨板进行金属键合,完成了大深径比钨孔加工;ZHANG C Y等^[4]在进行钨的电解加工过程中,提出采用氯化钠和低浓度碱性溶液混合的新型工作液,使得工具的进给速度达到 $24 \mu\text{m}/\text{min}$ 。以上对钨材料进行的电火花加工及电解加工研究均在一定程度上改善了材料的加工质量及加工效率。

对于钨材料的加工,本文提出一种利用低电导率盐溶液—— NaNO_3 溶液作为电解液的电火花-电解复合加工方法,开展对比实验,研究分析钨的纯电火花加工与复合加工的不同加工效果以及复合加工中参数的影响,通过实验分别探究脉冲宽度、脉冲间隙、峰值电流、溶液浓度的影响规律,进而获取最佳工艺参数组合,实现最优的加工效果。

1 电火花-电解复合加工原理

电火花-电解复合加工工具电极采用中空管电极,工作液采用低电导率中性盐溶液,同时采用高压内冲液和高压复合脉冲电源使得电火花加工和电解加工同时进行^[5-6]。电火花加工理论放电间隙约为 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ ^[7-8],当加工间隙小于理论加工间隙时能够产生持续的火花放电。加工原理微观分析如图1所示,工具电极接阴极,加工工件接阳极,管状电极通入工作液高速进入加工区域,从电极与工件之间侧隙流出,并携带出加工过程中产生的电火花与电解产物。

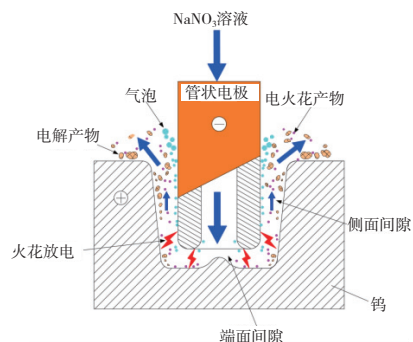


图1 电火花-电解复合加工原理图

第一作者简介:周义涛(1995—),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为电火花-电解复合高效制孔加工,405965219@qq.com。

2 电火花加工与电火花-电解复合加工对比实验分析

2.1 电火花-电解复合加工机床

钨的电火花-电解复合加工试验平台选用高速穿孔机,可以实现微小孔的高速、稳定加工。如图2所示,机床硬件部分由位移平台、电极旋转主轴、内冲液系统、导向装置等组成。机床软件部分由电源和伺服控制系统组成。其中伺服控制系统包括放电状态检测和主轴运动控制等,机床界面由操作按钮部分、放电电压显示部分和坐标显示部分等组成。



图2 高速穿孔机

2.2 实验设计

首先进行钨的电火花加工与电火花-电解复合加工对比实验,其次进行电火花-电解复合加工的参数优化实验。在实验时分别采用不同的脉冲宽度、脉冲间隙、峰值电流及溶液浓度,实验参数如表1、表2所示。实验过程中记录加工时间、加工前后电极质量变化,结束后对比分析两类实验的加工效率及电极损耗等。

表1 对比实验基本参数

加工参数	电火花-电解复合加工	电火花加工
脉冲宽度/ μs	2	2
脉冲间隙/ μs	1	1
峰值电流/A	2	2
工件厚度/mm	3	3
电极(内/外)直径/mm	0.18/0.50	0.18/0.50
进给深度/mm	30	30
工作液类型	5 g/L NaNO_3 溶液	去离子水

表2 参数优化实验基本参数

加工参数	电火花-电解复合加工
脉冲宽度/ μs	1、2、3、4
脉冲间隙/ μs	1、2、3、4
峰值电流/A	1、2、3、4
工件厚度/mm	3
电极(内/外)直径/mm	0.18/0.5
进给深度/mm	30
工作液(NaNO_3)浓度/(g/L)	5、10、15、20

2.3 电火花加工与电火花-电解复合加工效果对比

对比工件表面加工形貌,如图3所示。在电火花加工孔口处可以观察到熔融后产物堆积,存在明显的重铸层,孔口较为粗糙并且孔径较小;而复合加工可以观察到电化学溶解作用去除工件材料痕迹,并且小孔孔口边缘比较光滑,存在一定的倒圆,电化学溶解具有一定的扩孔效应,使得复合加工孔径比电火花加工孔径稍大。综上所述,电火花-电解复合加工孔的表面质量优于纯电火花加工。

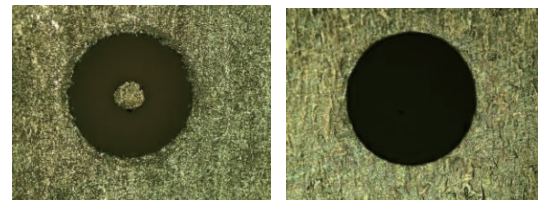


图3 不同加工方式工件表面形貌

在钨的纯电火花加工过程中,由于铜电极的比热容、热导率、热膨胀系数均明显高于工件钨^[9],造成电火花放电过程中产生的热量吸收差异较大,同时铜电极熔沸点低于工件钨,从而导致工件损耗极小,而铜电极却有很大的损耗(相对长度损耗在10以上)。调整加工电参数在短时间内始终无法对钨进行深孔加工,如图3(a)所示,工件表面仅产生一个凹槽,管电极产生的“中心柱”并未消失,加工效率非常低,在实际生产过程中很难应用。

对于电火花-电解复合加工,实验过程中可以快速实现3 mm钨板的穿透加工,加工速度达到了 $67 \mu\text{m/s}$,效率远远高于纯电火花加工,是钨材料加工的一种较优方案。电火花加工与电火花-电解复合加工的加工时间、电极损耗量及电极损耗率如图4所示。

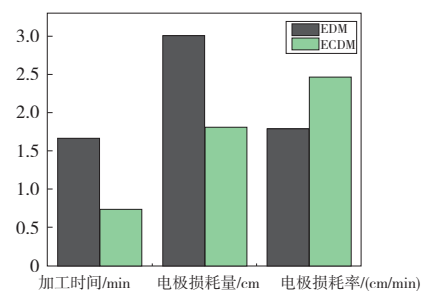


图4 不同加工方式加工时间和电极损耗

3 电火花-电解复合加工参数优化

在复合加工过程中电源电容、伺服速度、伺服参考电压、电流、占空比、溶液浓度等参数对加工效果均会产生一定影响^[10]。在上述实验条件和参数下,对钨进行电火花-电解复合加工实验研究,探究电参数、溶液浓度对加工效果的影响规律,进一步优化对于钨材料微小孔复合加工较适宜的加工参数。

3.1 脉冲宽度对钨的电火花-电解复合小孔加工影响规律

在保证脉冲间隙、峰值电流不变时,脉冲宽度对于加工时间和电极损耗的影响曲线如图5所示。从图中可以看出,随着脉冲宽度的增加,加工时间逐渐减少,电极损耗率逐渐增加。产生这种情况的原因是随着脉冲宽度的增加,单个脉冲放电能量随之增大,加工速度得到大幅度提升,相应的电极损耗率也随之逐渐提高。

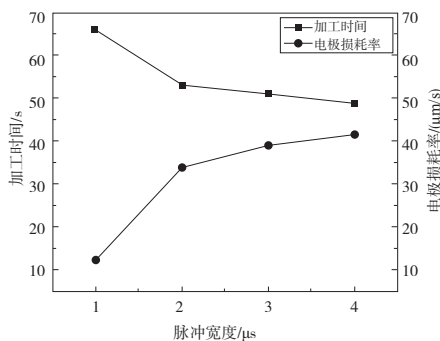


图5 脉冲宽度对电火花-电解复合加工影响

3.2 脉冲间隙对钨的电火花-电解复合小孔加工影响规律

在保证脉冲宽度、峰值电流不变时,脉冲间隙对于加工时间和电极损耗的影响曲线如图6所示。从图中可以看出,随着脉冲间隙的增加,加工时间逐渐增加,电极损耗率逐渐降低。产生这种现象的原因是随着脉冲间隙增加,单位时间内脉冲个数随之减少,虽然脉冲能量较大,但是单位时间放电次数减少使得单位时间内脉冲能量较小,相应的电极损耗较小。

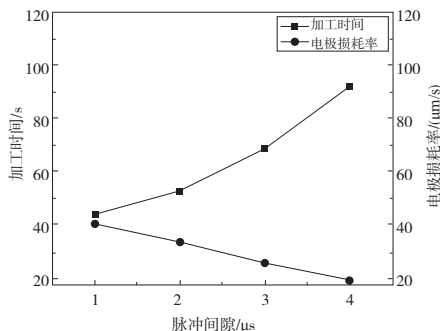


图6 脉冲间隙对电火花-电解复合加工影响

3.3 峰值电流对钨的电火花-电解复合小孔加工影响规律

在保证脉冲宽度、脉冲间隙不变时,峰值电流对于加工时间和电极损耗的影响曲线如图7所示。从图中可以看出,随着峰值电流的增加,加工时间在依次减少,电极损耗率在逐渐提高。产生这种现象的原因是单个脉冲能量的强弱会受到峰值电流强弱的影响,脉冲能量随着峰值电流增大而增大,导致更多电子向工具电极高速运动,轰击

电极表面产生大量电蚀凹坑,宏观表现为电极损耗率增大。

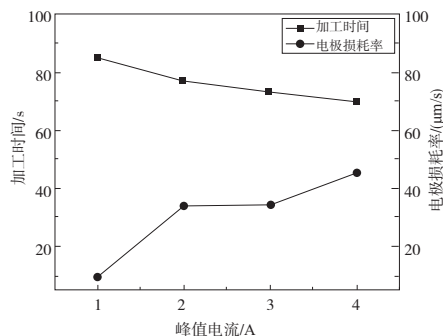


图7 峰值电流对电火花-电解复合加工影响

3.4 电解液浓度对钨的电火花-电解复合小孔加工影响规律

图8为硝酸钠溶液浓度对加工时间和电极损耗率的影响曲线图。从图中可以看出,溶液浓度越高,钨的电火花-电解复合加工效率越高,同时电极损耗率也呈现递减的趋势。产生这种现象的原因是加工过程中产生的氢气会包裹电极形成气泡膜,气泡膜作为非导电相在电极和工件之间造成电位差满足了放电条件,在此过程中工作液浓度越高,产生气泡的速率越高可以更快满足加工条件,从而使得加工效率更高。

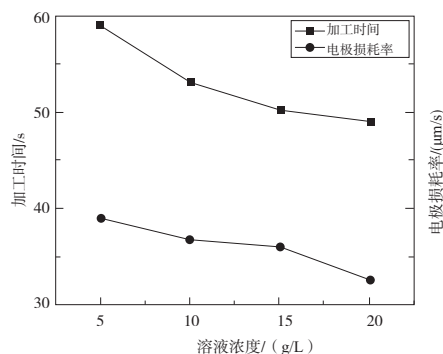


图8 硝酸钠溶液浓度对电火花-电解复合加工影响

4 结语

1) 在进行钨的纯电火花加工时,因为电极材料和工件物理属性存在差异,铜电极在加工过程中吸收更多热量,导致电极损耗量较大,在短时间内无法实现深孔加工。

2) 采用低导电率的硝酸钠溶液进行电火花-电解复合加工,可以结合电火花高效率加工及电解高质量加工两者优势,提升钨的加工效率,孔的加工速度可达 $67 \mu\text{m/s}$ 。

3) 通过研究电火花-电解复合加工参数的影响,得到脉冲宽度、脉冲间隙、峰值电流及电解液浓度的作用规律,在本文所述实验方案下,进一步探究得到最优实验参数组合为脉冲宽度 $2 \mu\text{s}$,脉冲间隙 $2 \mu\text{s}$,峰值电流 2A ,电解液浓度 10g/L 。

(下转第72页)

步骤5):用实车进行装调实验,在门和车身上测量面差和间隙,实际测量的结果与虚拟环境中对测量数据的计算结果相比,偏差在 ± 0.25 mm以内,能够满足工程应用。

表1 左后门匹配约束数值 单位:mm

名称	理论值	优化前		优化后	
		测量值	偏差	测量值	偏差
间隙1	3.5	2.726	-0.774	3.551	0.051
间隙2	3.6	3.226	-0.374	3.572	-0.028
间隙3	3.7	3.486	-0.214	3.869	0.169
间隙4	3.7	3.221	-0.479	3.604	-0.096
面差1	0	-0.704	-0.704	-0.021	-0.021
面差2	0	-0.286	-0.286	0.583	0.583
面差3	0	-0.921	-0.921	0.023	0.023
面差4	0	-0.393	-0.393	0.435	0.435

4 结语

本文针对汽车车门和铰链的装调繁琐问题,用扫描的点云数据建立虚拟模型,用优化算法计算车门和铰链调整量,在铰链工装阶段直接按照调整量在夹具上对铰链进行调整。本文提出了车门和铰链的调整算法,对车门建立在公差约束下的优化方程,有效避免“倒高”问题,保证车门与车身有良好的外形匹配效果;对铰链同轴问题提出在可调整方向上调整的方法,保证铰链同轴度合格。左后门和左前门的调整实例说明本方法可以有效地加快汽车车门的装调准确性和生产效率。

参考文献:

- [1] MOREY B. New metrology culture improving chrysler quality[J]. Manufacturing Engineering, 2013, 151(3):69-71.
- [2] 许铭,刘胜兰,张韬,等. 基于点云测量数据的汽车车身外形匹配质量分析[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(3):73-76, 111.
- [3] 朱文峰,王皓,李艳萍. 线段豪斯多夫距离度量下的车身覆盖件匹配方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2009, 37(12):1648-1652.
- [4] WANG H, YU J Y. The non-closed parts optimal fitting method based on curvature Hausdorff distance using 3D non-contact measurement points[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2013, 227(2):201-212.
- [5] 许川,吴昊,王华,等. 基于高斯映射的多误差源复杂结构匹配分析与优化[J]. 上海交通大学学报, 2013, 47(5):840-845.
- [6] BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2):239-256.
- [7] 冯国卫,张一丁,孔飞,等. 基于激光测量的汽车零件间隙面差计算方法[J]. 激光与红外, 2014, 44(4):370-373.
- [8] 刘治. 基于测量数据的汽车外形匹配评价技术[D]. 南京:南京航空航天大学, 2020.
- [9] LOW, KOK L. Linear least-squares optimization for point-to-plane ICP surface registration[J]. Chapel Hill, University of North Carolina, 2004, 10(4):1-3.
- [10] LIU D C, NOCEDAL J. On the limited memory BFGS method for large scale optimization[J]. Mathematical Programming, 1989, 45(1/2/3):503-528.

收稿日期:2022-03-02

(上接第43页)

参考文献:

- [1] 徐凯. 钨铜复合材料的现状与发展[J]. 中国钨业, 2010, 25(3):30-34.
- [2] 陈豫红,周尚荣,张鹏程. 钨合金板群孔特种加工技术研究[J]. 机械设计与制造, 2012(11):114-116.
- [3] 马利政. 大深径比钨孔电火花加工研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015.
- [4] ZHANG C Y, ZHANG Y J, CHEN X L, et al. Investigation of the electrochemical dissolution behavior of tungsten during electrochemical machining[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 97(9/10/11/12):3575-3582.
- [5] 徐正扬,张辰翔. 基于电火花-电解复合加工方法的微小孔制造[J]. 航空制造技术, 2018, 61(3):16-22.
- [6] 张彦. 微小孔电火花-电解复合加工基础研究[D]. 南京:南

京航空航天大学, 2016.

- [7] MOHD ABBAS N, SOLOMON D G, FUAD BAHARI M. A review on current research trends in electrical discharge machining (EDM)[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(7/8):1214-1228.
- [8] LAUWERS B, KLOCKE F, KLINK A, et al. Hybrid processes in manufacturing[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2014, 63(2):561-583.
- [9] 时东波. 高钨合金微小孔电火花加工工艺及穿透检测技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- [10] 唐健,张彦, MD Rashedul Islam, 等. 电火花-电解复合加工的低电极损耗机理研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(6):18-21.

收稿日期:2022-02-15