

文章编号 1004-924X(2009)12-3055-07

大深径比微小孔快速电火花加工系统

贾振元,任小涛,刘巍,郑新毅

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室,辽宁 大连 116024)

摘要:用电火花加工技术快速加工大深径比微小孔存在散热困难、排屑不畅、电极损耗大及加工过程不易控制等技术难点,为此,在分析电火花加工机理及加工特点的基础上,研发了一台用于快速加工大深径比微小孔的电火花机床。该设备采用立式布局,通过应用电极旋转、工件振动的旋振式机构,实现了加工过程中快速散热和排屑;通过采取工业控制计算机搭载数据采集卡和运动控制器的方式,实现了加工过程的检测控制功能一体化。针对电火花加工过程中放电信号严重畸变以及放电状态不稳定导致加工状态难检测的问题,提出了两级模糊逐级映射放电状态检测方法,同时为了实现机床的快速响应和精确控制,设计了双闭环加工控制系统。实验表明,该机床适合于深径比超过10,小孔直径为60~200 μm 的微小孔快速加工,且性能稳定、可靠性高。

关键词:电火花加工;大深径比微小孔;放电状态检测;加工过程控制

中图分类号:TG661 **文献标识码:**A

Rapid EDM systems for micro and small holes with high-aspect-ratio

JIA Zhen-yuan, REN Xiao-tao, LIU Wei, ZHENG Xin-yi

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To overcome the shortcomings in rapidly machining micro and small holes with a high-aspect-ratio by Electric Discharge Machine(EDM), such as slow cooling, poor debris flushing, high tool wear and complex manipulation, a rapid EDM machine for micro and small holes is developed based on analyzing the mechanics and characteristics of EDM. Laid up vertically, the machine applies a rotary-vibrate mechanism with tool rotating and workpiece vibrating to the rapid cooling and debris flushing, and adopts an industrial PC (IPC) with PCI card and PMAC card plugged to acquire data to implement the integratization of machining and testing. In order to solve the problem that discharge states are difficult to detect due to severely distorting sparking signals and unstable sparking states in EDM, a successive mapping detection method of discharge states based on two-stage fuzzy logic is proposed and a double-closed-loop control system is designed to achieve rapid response and precise control of the working process. Experiments show that this machine is suitable for rapidly manufacturing the micro and small holes with high-aspect-ratio (>10) and diameters from 60 μm to 200 μm and has stable per-

收稿日期:2008-11-26;修订日期:2009-02-04.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50575033);高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(No. 20090041110031)

formance and high reliability.

Key words: electrical discharge machine (EDM); micro and small hole with high-aspect-ratio; discharge state acquisition; working process control

1 引言

作为非接触式精微加工制造方法之一,微细电火花加工技术以其高精细和高精度的加工特点而受到学术界和工业界广泛关注,特别在模型模具、汽车、航空航天、医学器械方面,电火花加工有其独特的优势^[1],而大深径比微小孔加工技术是这些领域精微加工制造的一项关键技术。因此,研究微细电火花快速加工大深径比微小孔具有重要的现实意义。

微小孔是个广义的概念,直径 $<2\text{ mm}$ 的孔统称为微小孔,深度和直径之比 >10 的孔为大深径比孔^[2]。大深径比微小孔可采用激光加工或者机械加工,但是激光加工易产生应力集中和局部熔化影响孔圆柱度,而机械加工操作不便,并且两者在微米范围内加工成本高^[3]。王新荣等对深小孔电火花加工进行研究,加工出了直径为 1 mm 深度为 60 mm 的深孔^[4],马名峻等对孔径为 $2.6\sim 3\text{ mm}$ 的孔进行加工试验,指出电火花加工工艺可以高速加工深径比 >300 的深小孔^[5]。但对于直径 $<1\text{ mm}$ 大深径比微小孔的快速加工还存在散热困难、排屑不畅、电极损耗大及加工过程不易控制等技术瓶颈。

微小孔电火花加工具有加工放电面积小、单个脉冲放电能量微小、放电间隙微小、极难获得稳定的火花放电状态和微细工具电极制备困难等显著特点,而且随着孔深度的增加,放电状态更为复杂,加工更加困难。这些特点决定了大深径比微细电火花加工存在以下技术难点亟待解决:高精度的进给伺服系统、放电状态的实时检测、加工过程的智能控制等。在深入了解微细电火花机理及特点的基础上,本文对在电火花加工过程中,电蚀产物迅速排出、放电状态实时检测、加工过程精确控制等关键技术进行了系统研究。

2 电火花加工机床硬件系统

机床硬件系统由机械系统硬件和控制系统硬件两部分组成,设备整体结构如图 1 所示。

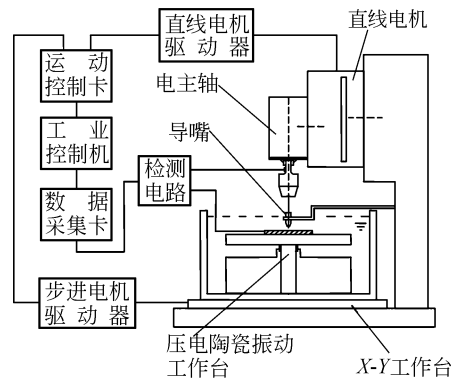


图 1 微细电火花加工装置

Fig. 1 Micro EDM processing device

2.1 机械系统结构

机械系统是确保大深径比微小孔电火花加工系统具备优良综合性能的重要前提条件之一,机械系统自身精度的高低和性能的优劣直接决定了微小孔电火花加工速度的高低及加工质量的好坏。因此,高性能机械系统是实现高效、高精度的微小孔电火花加工的关键。

电火花加工大深径比微小孔时因工具电极截面小,存在易变形,不易散热,排屑困难,电极损耗大等问题。因此通过以下几项技术实现大深径比微小孔的快速加工。

2.1.1 电极高速旋转

电极高速旋转是改善放电状态的有效措施。高速电主轴带动工具电极作高速旋转,可以破坏介质的吸附层,增加工作液的流动性,能够加速加工时的蚀除产物的排出和加工区的散热,同时可以减少间隙中短路、拉弧和二次放电的产生,确保

极间较好的火花状态,提高加工效率;同时电极高速旋转的自定心功能,可以提高孔的尺寸精度。

2.1.2 工件振动

电极和工件间的振动不仅可以迅速消电离、促进电解液的流动,快速排出蚀除物,而且可以降低由于电极旋转引起的所加工孔的喇叭状。目前研究广泛的振动形式有蠕动式进给方式进给^[2,6]和超声振动^[2,7]等。蠕动式进给是电极做频繁的进给和回退,不利于提高加工效率而且会增加进给系统的复杂程度;超声振动是将超声波加在工具电极上,使电极端面在做伺服进给的同时做超声振动,这样虽然可以改善排屑状况,但是超声振动易产生空化作用会使极间产生气泡,降低加工效率。本文选择压电陶瓷带动工件做频率 2 kHz 以下的往复运动。电极进给的同时,工件往复运动会在间隙中产出轴向的强迫振动,不仅有利于电蚀物的排出,而且能减少拉弧等非正常放电的产生,提高加工效率和加工质量。

2.1.3 工具电极的选择

电极的获得通常有两种途径:一是购买一定规格的产品;二是线电极磨削。商品电极成本高,规格不全,电极直径最小为 0.1 mm,不能满足更细的要求。目前,线电极磨削技术得到了广泛的关注和研究^[6,8-9]。但是线电极磨削需要大量的时间,机床结构复杂,磨出的电极成阶梯状,不适合大深径比微小孔的快速加工,而且随着孔深度的增加,电极的损耗越大,被磨削电极的长度、尺寸精度越大,使加工更加困难。选择线切割丝作为工具电极,直径范围广,成本低,可以不用考虑电极丝的损耗以缩短加工时间,获取高的加工效率。电极具有很高的柔性,加工时需要设置工具电极的导向机构,同时导向装置可以补偿机床的装配精度。

2.1.4 高精度进给

大深径比微小孔电火花加工需要机床能够根据放电状态快速响应,精确进给或者回退。 z 轴作为系统的自动进给调节轴,担负着适时合理地

调整放电间隙、以保证最佳放电状态的重要任务,是机械系统最为核心的功能组件。为了满足自动进给调节轴必须具有灵敏性好、精度高、能够进行微量进给等典型特征,利用管状直线电机作为机械系统 z 轴的驱动电机。直线电机具备输出推力大、“零传动”、超高速、超精密和快速反应能力极强等诸多优点,十分适合电火花加工系统。直线电机响应快,配合开放式光栅可以实现精度为 50 nm 的微量进给。

2.2 控制系统硬件

在 Windows 2000 系统平台上建立大深径比微小孔电火花加工数控系统用户界面,采用层次化、模块化结构,通过 RS232 串口与脉冲电源控制器通讯,通过 PCI 实时采集间隙电压和放电电流,通过 PMAC 运动控制器控制直线电机的运动。各部分之间相互协作又相对独立,系统具有良好的开放性,易于实现数控系统的升级。

3 电火花加工机床软件系统

大深径比微小孔电火花加工机床软件系统是电火花加工的智能检测控制系统。对放电状态的准确检测是实现电火花加工过程精确控制的前提条件,同时也是加工工艺效果和产品最终质量的重要保障^[10]。通过精确、稳定地控制电极运动,合理调整放电间隙,可以实现更好的脉冲放电状态。

放电状态是根据检测到的间隙电压和间隙电流通过逐级映射方法得到的。电火花加工的放电状态大体上可分为空载、火花放电、过渡电弧、稳定电弧和短路等五种状态^[11]。

脉冲放电状态决定了电极的运动方向和运动速度,电极的运动是为了保持间隙中最佳的放电状态。当放电状态为空载时,直线电机驱动电极做宏观进给;当放电状态为正常放电时,直线电机驱动电极做微量进给;当放电状态为电弧时,直线电机驱动电极作微量回退;当放电状态为短路是,

直线电机驱动电极做快速回退。当电弧或短路消除后,恢复正常的加工进给伺服。

3.1 脉冲放电状态智能检测

脉冲放电状态的智能检测是以电火花加工时的电压信号和电流信号作为输入参数,利用两种信号的互补性的特点,结合模糊逻辑知识完成的。实时采集到的电压和电流信号是高速数据采集卡同步传入计算机的离散信号。对各个信号点应用基于模糊逻辑^[12-13]的多传感器数据融合技术,获得采样点放电状态;再将采样点的放电状态值矢量映射为采样点放电状态矢量;并在每个放电状态分析周期内对该矢量进行统计,以统计得到的“短路率”和“火花/电弧率”为输入,经过模糊推理^[14-15],辨识出各分析周期的脉冲放电状态。脉冲放电状态的辨识流程如图 2 所示。

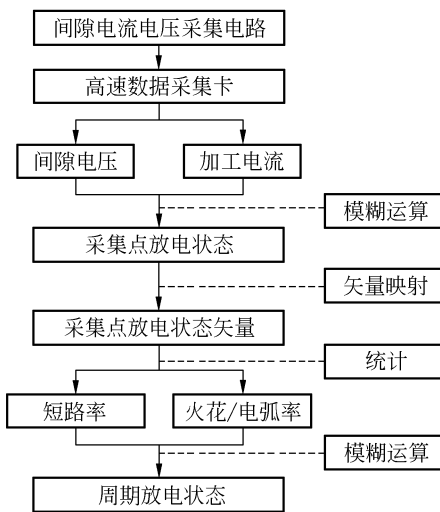


图 2 放电状态逐级映射检测方法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of spark state successive mapping detection method

3.2 双闭环加工过程控制

大深径比微小孔电火花加工过程控制系统本质上是一个位置控制系统,通过控制电极的运动调节放电间隙的大小,以维持优质的间隙放电状态,实现加工的进给。

根据大深径比微小孔电火花加工过程控制系统的特点将电火花加工过程控制系统设计成为双闭环控制形式,原理如图 3 所示。双闭环控制系

统的内环通过直线光栅对自动进给调节轴(z 轴)运动位置的反馈,经由 PID(比例、积分、微分)控制器,形成 z 轴放电间隙的伺服位置控制闭环;双闭环控制系统的外环,通过对间隙放电状态的实时检测形成表达间隙放电状态的反馈量,经由基于模糊逻辑的微小孔电火花加工运动控制器,形成加工系统放电状态的闭环调整。因此,放电间隙的伺服位置控制闭环通过 PID 控制器专门负责间隙大小的位置控制,以使间隙进给量达到最精;基于模糊逻辑的微小孔电火花加工运动控制器,加工系统放电状态的实时调整闭环专门负责加工系统放电状态的实时调整,从而确保放电状态时刻处于最佳水平。这样设计的双闭环加工过程控制系统既能确保间隙进给量的精确性,又在此基础上保证了放电状态的最优化,为精密、高效的微小孔电火花加工过程的实现奠定了良好的理论基础。

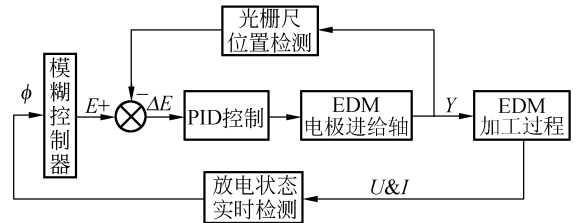
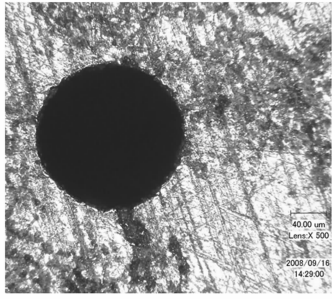


图 3 大深径比微小孔电火花加工的双闭环加工过程控制原理图

Fig. 3 Schematic diagram of double-closed-loop processing control high-aspect-ratio micro and small hole by EDM

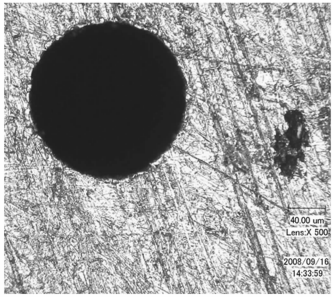
4 电火花加工实验

应用以上的研究的关键技术,开发了具有自主知识产权微小孔电火花机床,并进行了一系列加工实验。以其中的 4 组实验为例,加工参数如下:脉宽 $5 \mu\text{s}$,脉间 $25 \mu\text{s}$,加工电压 $255 \text{ V} + 94 \text{ V}$ 高低压复合,工作电流 0.88 A ,电极转速 3000 r/min ,工件做频率 1 kHz 、振幅 $2 \mu\text{m}$ 的振动,工作液为煤油。加工出的微小孔如图 4 所示,实验结果如表 1 所示。



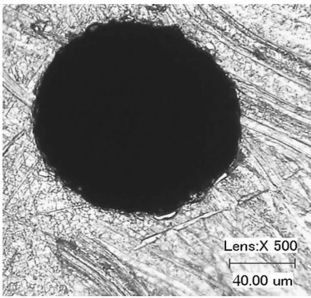
(a)钢板上 $\varphi 0.12$ mm 深 1 mm 孔

(a) $\varphi 0.12$ mm, depth 1 mm hole in steel plate



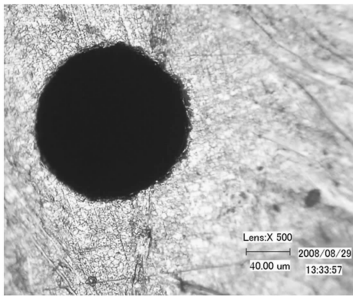
(b)钢板上 $\varphi 0.13$ mm 深 1 mm 孔

(b) $\varphi 0.13$ mm, depth 2 mm hole in steel plate



(c)铝板上 $\varphi 0.14$ mm 深 2 mm 孔

(c) $\varphi 0.14$ mm, depth 2 mm hole in aluminum plate



(d)铝板上 $\varphi 0.14$ mm 深 5 mm 孔

(d) $\varphi 0.14$ mm, depth 5 mm hole in aluminum plate

图 4 加工的微小孔的照片

Fig. 4 Photos of micro and small holes

表 1 微小孔电火花加工结果

Tab. 1 EDM results of micro and small holes

工件号	(a)	(b)	(c)	(d)
电极材料	紫铜	紫铜	黄铜	黄铜
电极直径	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm	0.1 mm
工件材料	45# 钢	45# 钢	铝	铝
工件厚度	1 mm	2 mm	2 mm	5 mm
孔入口直径	0.12 mm	0.13 mm	0.14 mm	0.14 mm
孔出口直径	0.13 mm	0.14 mm	0.14 mm	0.18 mm
加工时间	10'33"	24'12"	2'17"	25'50"
电极损耗	1.5 mm	4 mm	2 mm	20 mm

从表 1 可知,孔的深度越大,电极损耗越大。孔的出口直径要大于入口直径,这是由电极丝的旋转造成的。表 1 中(d)组实验表明该机床可以在 26 min 内加工深径比为 31 的微小孔,效率较高。

5 结 论

设计开发的电火花加工机床,很好地解决了大深径比微小孔快速加工的难题。利用高精导向机构保证了电极丝的精确定位;选用高灵敏度直线电机实现了 z 轴快速、准确控制;设计的由高速电主轴和压电陶瓷组成的旋振系统改善了极间放电状态;以线切割丝为工具电极实现了低成本加工。同时,融合电流、电压信号提出了两级模糊逐级映射放电状态检测技术,解决了大深径比微小孔加工放电状态难于辨识的难题;设计了双闭环加工过程控制系统,确保了加工的高效率和高稳定性。加工实验表明,所设计的大深径比微小孔电火花加工机床适合直径为 $60 \sim 200 \mu\text{m}$ 、深径比 > 10 的微小孔加工,且该机床运行稳定、性能良好。

参考文献:

- [1] HO K H, NEWMAN S T. State of the art electrical discharge machining (EDM)[J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, 43(13):1287-1300.
- [2] 赵万生. 先进电火花加工技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
ZHAO W SH. *Advanced Electrical Discharge Machining Technology*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [3] KAMINSKI P C, CAPUANO M N. Micro hole machining by conventional penetration electrical discharge machine [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, 43 (11): 1143-1149.
- [4] 王新荣, 张霞, 李延斌. 深小孔高速电火花加工技术的研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2002, 20(4): 30-33.
WANG X R, ZHANG X, LI Y B. Study on electric discharge machining technology in machining deep-small hole with high speed[J]. *Journal of Jiamusi University(Natural Science Edition)*, 2002, 20(4): 30-33. (in Chinese)
- [5] 马名峻, 蒋亨顺, 靳德福. 深小孔电火花高速加工工艺研究[J]. 电加工与模具, 2008(增): 66-67.
MA M J, JIANG H SH, JIN D F. Research on deep hole high-speed EDM techniques[J]. *Electromachining & Mould*, 2008(Supp.): 66-67. (in Chinese)
- [6] 李勇, 王显军, 周兆英, 等. 微细电火花加工关键技术研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(8): 45-48.
LI Y, WANG X J, ZHOU ZH Y, *et al.*. Research on the key technologies of micro electro discharge machining [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 1999, 39(8): 45-48. (in Chinese)
- [7] 吴品. 旋转电极的电火花孔加工实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
WU P. *Experimental research of holes on rotating electrode electrical discharge machining* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese)
- [8] 李文卓, 刘加光, 于云霞. 微细电火花加工机床关键技术[J]. 机械工程学报, 2007, 43(1): 170-175.
LI W ZH, LIU J G, YU Y X. Key technologies of micro EDM machine tools[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(1): 170-175. (in Chinese)
- [9] 郭锐, 赵万生, 李刚, 等. 微细电火花加工的微细电极在线检测[J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 998-1003.
GUO R, ZHAO W SH, LI G, *et al.*. Micro electrodes on-line measure in micro EDM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(6): 998-1003. (in Chinese)
- [10] 周明. 微细电火花加工放电状态辨识与预测的理论和方法[D]. 大连: 大连理工大学, 2005.
ZHOU M. *The methodology of discharging-state identification in micro electrical discharging machining(microEDM)* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005. (in Chinese)
- [11] 李文卓, 赵万生, 王振龙. 我国微小型电火花加工装置最新研究与进展[J]. 电加工与模具, 2001, 2: 5-9.
LI W ZH, ZHAO W SH, WANG ZH L. The new development of the micro EDM in China[J]. *Electromachining & Mould*, 2001, 2: 5-9. (in Chinese)
- [12] 诸静. 模糊控制理论与系统原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
ZHU J. *Fuzzy Control Theory and System Principle* [M]. Beijing: China Machine Press, 2005. (in Chinese)
- [13] 杨兆军, 李雪, 陈淑芬. 基于粗糙集模糊控制的微孔钻削在线检测[J]. 光学精密工程, 2008, 16(7): 1230-1235.
YANG ZH J, LI X, CHEN SH F. On-line monitoring micro-size drilling based on rough set fuzzy control[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(7): 1230-1235. (in Chinese)
- [14] 刘曙光, 魏俊民, 竺志超. 模糊控制技术[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2001.
LIU SH G, WEI J M, ZHU ZH CH. *Fuzzy Control Technology* [M]. Beijing: China Textile Press, 2001. (in Chinese)
- [15] PASSINO K M, YURKOVICH S. *Fuzzy Control* [M]. Menlo Park: Addison Wesley Longman Inc, 1997.

作者简介:



贾振元(1963—),男,辽宁朝阳人,博士,教授,博士生导师,主要从事机械制造、测试技术与仪器、机电控制、功能材料及其微执行器应用等领域的研究。
Email: jzyxy@dlut.edu.cn

刘巍(1979—),男,内蒙赤峰人,博士,讲师,主要从事机电控制、微执行器、微机器人、磁致伸缩材料及应用等方面的研究。
Email: lw2007@dlut.edu.cn

郑新毅(1982—),男,辽宁凌源人,博士研究生,主要从事机电一体化、电火花加工、数控技术等方面的研究。
Email: zhengxinyi9@sina.com

任小涛(1982—),男,安徽亳州人,硕士研究生,主要从事机电一体化、电火花状态辨别、电火花机床运动控制等方面的研究。
Email: ritter0302@hotmail.com

(本栏目编辑:李树军)

●下期预告

RTV 胶层建模方法在透镜结构分析中的应用

韩旭^{1,2},吴清文¹,董得义¹,陈立恒¹,吴雪峰^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春,130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

对透射镜结构中 RTV 胶层建模方法进行了研究。详细阐述了节点相连(忽略胶层材料)、各向同性材料(三层体单元和一层体单元)和各向异性材料建立胶层材料的方法,分别采用 3 种方法对透射镜组建立了有限元模型,并进行了仿真模态分析,同时搭建了模态试验装置,测试了它的模态参数。结果表明,各向异性胶层材料的建模方法得到的一阶自由模态频率与试验测试的一阶自由模态频率误差只有 0.3%,而各向同性材料的三层单元和一层单元建模方法、节点相连建模方法的误差分别达到 1.8%,1.2%和 13.9%。通过分析可以得出,胶层材料在有限元分析当中是不可忽略的,综合来看,各向同性材料一层单元的建模方法不但可以减少模型单元数量,同时还可以达到工程应用的精度要求。