

航空制造领域精密 电火花加工技术

Precision EDM Technology in Aviation Manufacturing Field

中航工业北京航空制造工程研究所 张志金 孙超 张明岐 崔海军 张海龙



张志金

工学博士,高级工程师,主要从事电解加工技术及装备、电火花加工技术研究,先后负责、参加多项预研课题。

阐述了电火花加工技术的概念、技术特点及应用范围,同时介绍了电火花加工技术在国内外航空制造领域的发展及应用情况,并着重介绍了北京航空制造工程研究所近年来在大型整体复杂结构、密集群孔、大尺寸薄壁结构以及先进碳纤维复合材料等方面取得的研究成果,并指出了未来电火花加工技术的发展方向。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.23/24.061

主要工艺特点及应用范围:

(1)适用于难切削材料的加工。可加工任何导电材料,且不受材料强度、硬度、脆性、韧性、熔点等物理性能的限制,可以突破传统切削加工中对刀具的限制,特别适用于机械加工难以成形的材料。

(2)适用于加工特殊及复杂形状的零件。由于可以将工具电极的形状复制到工件上,因此特别适合复杂型腔的加工。

(3)加工过程无切削力。加工过程中,工具电极与零件无接触,不存在集中的切削力,非常适合零件加工过程中的应力释放和薄壁件的精密成形加工。

(4)易于实现加工过程自动化。在电火花加工过程中,机床可以进行高精度轨迹运动,能够实现空间复杂

轨迹的运动和加工,且易于实现数字控制、适应控制和智能化控制。

电火花工艺的加工精度高,表面质量好,可以针对各种导电材料进行放电加工,是难切削导电材料、复杂形状构件、微细结构零件成形加工的重要工艺技术。因此,电火花加工在航空、航天等加工质量要求严苛的军用武器装备零件加工成形领域具有很大的适用范围和应用潜力。

国外从事电火花加工技术研究和电火花机床生产制造的院校、企业数目众多,其技术发展迅速,规模不断扩大,其中影响较大的如美国的GE公司、日本的沙迪克公司、英国的罗·罗公司等。通过各国相关机构、企业和科研单位的努力,电火花加工技术在航空及国防工业其他领域均得到广泛应用,并取得了显著效果。

电火花加工(Electrical Discharge Machining, EDM)技术是特种加工技术的一个分支,主要利用正、负电极之间脉冲放电时产生的电蚀现象去除工件上多余金属,从而实现放电成形加工。

电火花加工工艺主要分为电火花成形、电火花线切割、电火花制孔等几个主要方面。电火花加工技术

美国、英国、俄罗斯等国家在航空发动机及飞机整机制造方面应用较广。如发动机内关键零件和机身关键零件的制造,德国柏林工业大学的 Uhlmann 等^[1]开展了航空发动机涡轮部件高温合金材料 MAR-M247 电火花深槽加工技术研究,通过对加工电规准和机床控制参数的优化,涡轮部件的 11mm 深槽加工时间由过去的 48min 缩短为 21.9min。美国 Sermatech 国际公司通过电加工铣削来改进飞机发动机整体叶盘的制造;日本 2001 年度开始采用新型陶瓷材料制造飞机发动机,而电火花复杂成形技术是其中的关键之一;俄罗斯已经完成了首台全陶瓷发动机制造等,这些技术包括电火花成形,电火花群孔、异形孔、窄槽的加工,线切割加工和电火花表面处理以及电火花铣等新工艺方法,取得了极好的应用效果。

国内方面,除北京航空制造工程研究所、北京市电加工研究所外,其他从事电火花技术研究的单位相对较少,多为高校,其中较有影响的院校如上海交通大学、南京航空航天大学、清华大学、哈尔滨工业大学等,西北工业大学、上海交通大学等高校开展了整体涡轮盘的电火花加工技术研究^[2-9],取得了一定成果。

国内电火花机床方面,现有专业厂家近 300 家,从业人员逾 20 万,仅苏州工业园区的电火花专业厂家数目就接近 100 个。以苏州电加工所、苏州沙迪克三光、苏州中特公司、北京市电加工研究所(北京迪蒙数控技术有限公司)、上海第八机床厂、常州第二机床厂等单位为代表的国产电火花专业厂,主要进行电火花成形机床、快走丝线切割机床、高速小孔机床和其他简单专用设备制造。苏州电加工机床研究所有限公司研制的五轴联动精密数控电火花成形机床,可进行带冠整体涡轮盘扭曲叶形及其他复杂型面的加工,实现对高温合

金、钛合金等材料的高效稳定加工,目前已经在航空航天发动机企业得到应用。北京市电加工研究所(北京迪蒙数控技术有限公司)研制的 A30 精密数控电火花成形机床,解决了大扭曲整体叶轮电火花加工问题,为航空航天相关企业解决了带叶冠整体涡轮盘、发动机整体闭式叶轮等加工难题。Yang 等^[10]开发了五轴联动电火花加工机床,并加工出了闭式泵叶轮和双极叶盘,该机床加工钛合金的最大去除率为 829mm^3 ,最佳表面质量可达 $R_a0.166\mu\text{m}$ 。

北京航空制造工程研究所多年来一直从事电火花加工技术研究,在航空制造领域工作叶片气膜孔、端盖孔及深小孔加工,空心整流叶片内筋通气孔、壁面导气窄槽加工,发动机挡板异形孔、窄槽和防护隔栅斜方孔加工,火焰筒、封严环等零件的群孔、异形孔加工,机载零件相关模具加工,起落架、机载零件的电火花表面强化,燃烧室、涡轮外环、静子内环的群孔、异形孔加工,叶片榫槽、特殊零件的线切割等方面应用广泛。

近年来,在大型整体复杂结构、密集群孔、大尺寸薄壁结构以及先进碳纤维复合材料等方面取得了大量研究成果。主要包括以下几个方面:

(1) 大型复杂整体结构件的精密电火花加工技术。

随着航空发动机技术的不断发展,在先进航空发动机设计中大量采用了高温合金、钛合金等难加工材料,结构上广泛采用整体结构,给传统机械加工带来了许多难题,甚至无法加工。北京航空制造工程研究所一直从事复杂型面、型腔等三维结构电火花加工技术研究,涉及到的加工材料包括钛合金、高温合金、耐热合金、高强合金钢等多种材料,成功实现了压气机机匣、前后挡板等零件上的多种复杂形状、尺寸型面和型腔的电火花成形加工,型面加工精度达到 0.03mm ,实现了装机验证和使用(图



图1 机匣

1)。

(2) 大倾角、密集群孔电火花加工技术。

先进航空发动机在设计过程中出现了大量具有大倾角密集群孔、异型孔、干涉孔特征的结构件,这类构件采用传统机械加工基本无法实现,利用电火花加工技术的柔性进给、多工序组合可实现密集群孔的高效精密加工。北京航空制造工程研究所通过改进传统电火花加工方法,突破了组合电极设计及工艺参数选择等关键技术,采用单轴驱动发散式群孔电火花加工电极,发明了异向群孔的一次加工方法,在燃烧室火焰筒、隔热屏等零件上,实现了群孔高效精确加工,孔径加工精度达到 0.01mm ,加工效率比传统电火花加工提高 50% 以上(图 2)。针对钛合金进气道防护格栅密集排列的大倾角、高深径比异形孔结构,开展了电火花群孔加工技术研究,突破了成组电极设计、零件工装设计、加工过程控制等关键技术,解决了此类构件材料难加工且去除量大(超过 50%)、孔加工倾角大、数量多等加工难题。加工的格栅异形孔最大倾角超过 70° ,最大孔数超过 1400 个,孔尺寸精度达到 $\pm 0.03\text{mm}$,位置度小于 0.1mm ,满足了设计要求。此外,还开展了异型气膜冷却孔电火花加工技术研究,突破了电极设计以及调整技术,完成了涡轮导向叶片簇孔的制造。针对干涉孔结构,研制了专用的电极夹具和零件工装,完成了多联涡轮导向叶片



图2 火焰筒

流道内干涉性气膜孔的加工,孔径精度达到0.01mm,位置度达到0.02mm,在干涉孔加工技术方面居于国内领先地位。

(3)大尺寸薄壁结构电火花加工技术。

为了减轻结构重量,提高推重比,先进航空发动机在设计过程中大量采用薄壁结构,如薄壁弹性支座、弹性环等,这类结构加工精度要求高,加工过程易产生变形,加工难度大,机械加工基本无法实现。北京航空制造工程研究所针对环状薄壁结构开展了电火花加工技术研究,利用电火花线切割技术先后完成了鼠笼类薄壁弹性支座、弹性环等难加工零部件(图3和图4)加工。在鼠笼类薄壁弹性支座线切割加工技术的研究过程中,解决了外壁80个型槽的高位置度、高精度和高表面质量的加工难题,型槽的位置度达到0.03mm,型槽表面粗糙度达到 $0.8\mu\text{m}$,而且表面无再铸层。在涡轮轴弹性环线切割加工技术研究过程中,完成了环状型面、凸台的加工,解决了尺寸精度高、表面质量要求高、零件易变形的加工难题。

(4)先进碳纤维复合材料精密电火花加工技术。

近年来碳纤维复合材料在整个飞行器关键部件中的占比越来越高,对碳纤维复合材料的高品质加工技术需求也愈加迫切。碳纤维复合材料硬度高、脆性大,采用传统机械加工刀具损耗大、加工效率低,而



图3 鼠笼

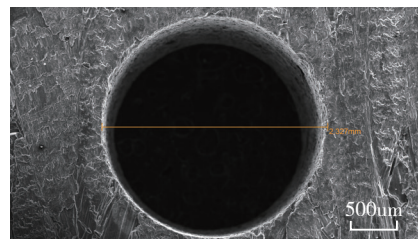


图4 弹性环

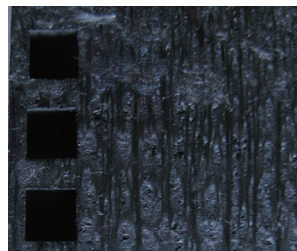
且容易产生崩裂等现象。北京航空制造工程研究所针对C/C、C/SiC复合材料典型特征结构开展了高效精密电火花加工技术研究,掌握了C/C、C/SiC复合材料的电火花加工基本规律和关键技术,实现了型孔、型腔、型槽等多种典型特征结构和样件的工艺试验和试制(图5),加工表面平整、无裂纹等缺陷,表面粗糙度达到 $0.6\mu\text{m}$,型面加工精度达到 $\pm 0.03\text{mm}$,型孔加工精度达到 $\pm 0.02\text{mm}$,为该技术的工程化应用奠定了技术基础,也为其他复合材料的加工成型提供了有益参考和借鉴。

结束语

随着航空领域设计技术的不断发展,各种难加工材料、复杂结构件不断出现,电火花加工技术以其独特的加工特点与技术优势,在先进航空发动机、飞机制造中必将发挥越来越重要的作用。未来,开展数字化柔性电加工系统研究、发展专用装备和工艺技术、形成专机性质的数字化柔性电加工中心、针对高温合金、钛合金等难加工材料、复杂结构件开展精密电火花加工技术的研究将成为电火花加工技术的一个重要发展方向。



(a)电火花加工小孔



(b)电火花加工型腔

图5 C/C (C/SiC)复合材料电火花加工小孔、型腔

参考文献

- [1] UHLMANN E, DOMINGOS D C. Development and optimization of the die-sinking EDM-technology for machining the nickel-based alloy MAR-M247 for turbine components. *Procedia CIRP*, 2013, 6: 180-185.
- [2] ZHAN H, ZHAO W. EDMing turbopump blisks. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 2002, 74(1):19-22.
- [3] 王刚,赵万生,于达仁,等.整体涡轮盘通道电火花加工方法的研究. *计算机辅助设计与制造*, 2001(3):35-37.
- [4] 赵建设,刘辰,吴锐,等.闭式整体构件组合电加工关键技术研究. *机械工程学报*, 2011, 47(1):169-176.
- [5] 李刚,王阵龙,赵万生,等.带冠整体涡轮盘电火花加工 CAD/CAM 技术. *南京航空航天大学学报*, 2007, 39(2): 253-257.
- [6] 刘晓,康小明,赵万生.闭式整体涡轮叶盘多轴联动电火花加工电极运动路径规划. *电加工与模具*, 2012(1):11-14.
- [7] 詹涵普.带冠扭叶片涡轮叶盘 CAD/CAM 与加工仿真 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2001.
- [8] 廖平强.带冠整体涡轮电火花加工技术研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [9] 谢林军.带叶冠变截面扭曲叶片涡轮盘计算机辅助电火花整体加工 [D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- [10] YANG D D, CAO F G, LIU J Y, et al. Overview on five-axis precision EDM techniques. *Procedia CIRP*, 2013, 6:192-198.

(责编 古京)