

流体通道电火花加工技术 研究及应用*

任连生^{1,2,3}, 闫明芳^{1,3}, 郭建梅^{1,2}, 郭妍^{1,2}, 张世富³, 薛吉⁴, 伏金娟^{1,2}

(1. 电火花加工技术北京市重点实验室, 北京 100191;

2. 北京市电加工研究所, 北京 100191;

3. 北京迪蒙数控技术有限责任公司, 北京 100191;

4. 沈阳鼓风机集团股份有限公司, 沈阳 110142)

[摘要] 针对离心式压缩机、空分压缩机等航空装备领域及其加工制造装备中的关键零部件——大型法兰端盖内部流体通道(又称内部弯曲孔)的加工难题,提出了一种内部流体通道的电火花加工方法,研究了用于内部流体通道电火花加工的柔性传动装置的实现结构,研制了弯曲避让结构、绝缘和排屑结构及内部流体通道电火花加工工艺技术,解决了传统加工方法工序多、成本高,多开辅助孔影响零件寿命,易开裂造成毒液气泄漏、增加安全隐患的问题。加工内部流体通道直径可达15~20mm,测试样件两端孔与内部流体通道共面度 $\leq 0.8\text{mm}$,且对接处光滑过渡,表面粗糙度 $R_a \leq 3.2\mu\text{m}$,可实现多种倾斜角度的内部流体通道的加工,为各领域相似结构零部件的设计和制造提供了一种行之有效的办法。

关键词: 电火花加工; 流体通道; 柔性传动; 弯曲避让; 电加工参数

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2018.03.036



任连生

工程师,主要从事电火花加工技术研究与开发。

随着我国航空技术的发展,难加工材料、复杂型面零件的应用越来越广泛。例如,离心式压缩机、空分压缩机等动力装置是航空装备及其相关制造设备的关键组成部分,其使用工况要求(如高压、有毒、有害、有腐蚀等)、能源利用率和转换效率越来越高、环境保护以及安全要求越来越严^[1]。这类零件的材料黏性大、硬度高,空间形状异常复杂,切削加工难度大,已成为制造的“瓶颈”^[2]。电火花加工技术以其无切削力加工、无刀痕加工、以柔克刚等显著特点成为上述难加工零部件不可或缺的加工手段^[3]。大型法兰端盖是这类装置中的关键零部件,不仅起固定支撑、密封的作用,更重要的是在其上面布置了各种液路或气路,起到传输介质的

作用^[4],图1是这类零件的结构示意图。

这种零件结构特点是外形尺寸大、质量重:直径大于1m,质量大于1t;内部流体通道加工孔直径小:一般为 $\phi 15 \sim 20\text{mm}$;材料特殊:多为沉淀硬化耐腐蚀不锈钢、镍铬铁合金、高强度不锈钢等难加工材料。

传统制造方法,不论是钻孔加工还是电火花加工,一般只能先加工与外部联通的直孔,再将外联的直孔用堵柱封堵焊接,图1所示为先加工出外部2、3、5孔,然后用堵柱1和4将孔3和孔5多余的外部孔进行封堵,再焊接堵柱等工序完成的。这种方法一是增加了制造和检测工序、提高了成本,且多开的孔影响零件的强度和刚度,减少使用寿命;二是封堵部

* 基金项目: 国家科技重大专项(2015ZX04002201)。

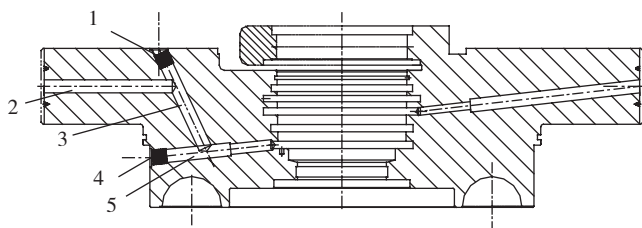


图1 大型法兰端盖结构示意图

Fig.1 Sketch of structure of large flange end cap

位易开裂、易腐蚀,造成有毒液气体的泄漏,增加了安全隐患。因此,解决该问题的有效途径是直接进行内部流体通道的加工,但由于液气孔内部结构所致,传统机械加工方法因刀具干涉无法实现加工,成为技术瓶颈。

目前,曲线孔加工技术受到众多学者的高度重视,纷纷开展了曲线孔电火花加工技术与应用的研究^[5-9],如利用金属丝吊挂电极加工弯曲孔、利用SMA功能材料和仿生技术研制的曲线孔电火花加工机器人采用老鼠打洞的原理进行电火花加工等。本文提出了另一种适用于加工区域较深的内部流体通道的电火花加工方法,这种方法主要由柔性传动装置、弯曲避让结构、绝缘和排屑结构及内部流体通道的电火花加工工艺技术4部分组成。

内部流体通道的加工装置与结构原理分析

1 柔性传动装置

为实现内部流体通道的电火花加工,首先要解决工具电极在零件内的转弯以及转弯精度控制问题,为此本文设计了一种利用零件上已加工出的外部竖孔(直孔或斜孔)实现与该竖孔成某一设定角度的横孔加工的柔性传动装置,其结构如图2所示^[10]。它主要由工具电极传送组件、定位轴套和定位引导装置等组成,具有三维可控的传动结构,是实现内部流体通道的电火花加工最重要的部分。

柔性传动装置工作原理:(1)首

先用机加工或电火花加工外部竖孔,然后将该装置插入孔内底部,为使插入装置时工具电极对准所需加工位置,在装置上面对应位置各铣一个平面,便于用扳手调节工具电极运动路径的方向;之后拧紧基准定位块上面的固定螺钉夹紧左侧定位轴套,最后将该装置与被加工件固定在一起。为了不破坏零件表面,又不添加特殊支架,可采用固定磁铁将基准定位夹块与被加工件吸在一起,这样就完成了装置的固定及加工孔方向的确定。(2)将工具电极传送带与电火花成形机床主轴固定,利用主轴伺服运动实现电极的前行与回退的运动;定位轴套为柱状体杆件,由左侧定位轴套和右侧定位轴套组成,形成工具电极传送带运动的轨道,让传送带按规定的路径运动;定位引导装置由引导固定轴、引导旋转轴、内孔倾斜角度调整轴组成,以引导所述传送带弯曲并传递其所确定的弯曲运动方向,与定位轴套共同作用完成了流体通道运动轨迹的

确定,实现了内部流体通道的加工。

2 弯曲避让结构

该结构由图2中的引导固定轴、引导旋转轴和内孔倾斜角度调整轴组成,其目的是解决加工过程中工具电极沿设定的转弯路径进行加工但又不伤及其他部位的双重问题。本文利用柔性材料(钢带)变形和定向横压力连接结构形成了弯曲避让结构——柔性工具电极传送组件,能够承受推力和拉力,带动与之连接的工具电极沿推力或拉力方向进行前行与回退运动,但又可以弯曲而实现弯曲流道的加工,在工具电极传送带的一端设置连接工具电极的连接结构,在其另一端设置连接推动拉回装置的连接结构;工具电极传送带的材料和厚度根据其所连接的电极的重量对其刚度和韧性的要求不同而不同,以满足能够承受推力和弯曲的要求为选择原则。

3 绝缘和排屑结构

众所周知,电火花成形加工是在一定的介质中,采用成形工具电极,通过与工件之间的火花放电,使工件材料熔化、气化而被去除,以获得要求的表面质量、尺寸精度的三维型面加工方法^[11]。电火花放电过程中工件和电极之间会产生废屑,如不能及时排出,会造成加工短路或加工效率降低,通常采用冲入液体的方式及时排出加工屑,来维持稳定加工和提高加

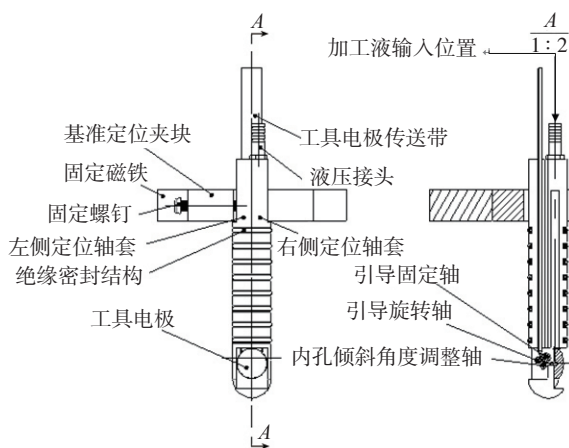


图2 柔性传动装置结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of a flexible transmission device

工效率。由于所设计的柔性传动装置需要插在零件孔中,且孔较深(可达400~500mm),一般绝缘材料如树脂、有机玻璃等机械强度不高,所以主体材料要使用金属,因此还需解决装置与零件之间的绝缘问题,但绝缘结构又不能阻碍加工蚀除物的顺利排出。

为解决这一问题,设计了带多个O型密封圈的绝缘密封结构,选取优质尼龙材料作为本体,提高了绝缘性能。同时,为了能够顺利冲液排屑,在装置中部设计了进油槽和出油槽,并在进油槽上加增接头,方便在冲油加工时连接冲油管,使加工液可沿进油槽冲刷到加工区域,不断更新加工区域的液体,并使使用过的加工液携带加工屑从出油槽被挤出,实现顺利排屑,保证加工效果。

流体通道的试验方法及结果分析

图3是本文用于试验加工的一种结构形式的内部流体通道形状的剖视图,下面介绍试验方法及结果分析。

1 试验方法

(1) 试验装置采用内部流体通道加工装置和北京市电加工研究所与北京迪蒙数控技术有限公司生产A2190多轴联动电火花成形机床(如图4所示)。机床主机采用滑枕结构,工作台固定不动,主轴头通过滑枕实现X、Y方向移动,工作台承重较大,工件安装稳定性好,可满足试验要求,表1是A2190机床主要技术参数。

(2) 工具电极材料为紫铜;工件材料为沉淀硬化耐腐蚀不锈钢。内部流体通道特征尺寸:如图5所示,外端为 $\phi 25$ 深约400mm、倾斜 75° 的斜孔,内端为 $\phi 15$ 深约110mm、倾斜 105° 的斜孔,已由机加工完成。

电火花成形加工选用参数:在电火花加工中,脉冲电源的极性、脉冲宽度、脉冲间隔、峰值电流、电极放电面积、加工深度、电极单边缩量等

参数与加工速度、表面粗糙度、加工精度、电极损耗率等加工效果有着密切的联系,是重要的工艺参数^[7]。此

加工工况条件恶劣,加工位置深、工具电极放电面积较小且不规律变化、排屑条件差,为保证稳定加工选用一

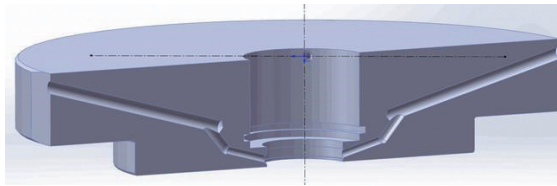


图3 内部流体通道形状剖视图

Fig.3 Section views of the shape of the internal fluid channel



图4 工件机加工照片

Fig.4 Processing equipment

表1 A2190机床主要技术参数

项目	技术数据
工作台尺寸(长×宽)/mm	2500×1200
X、Y、Z轴行程/mm	2100×900×600
工作液槽内腔尺寸(长×宽×高)/mm	3110×1700×900
最大电极重量/kg	100
最大工件重量/kg	7000
主轴端面到台面的最小/最大距离/mm	700~1300

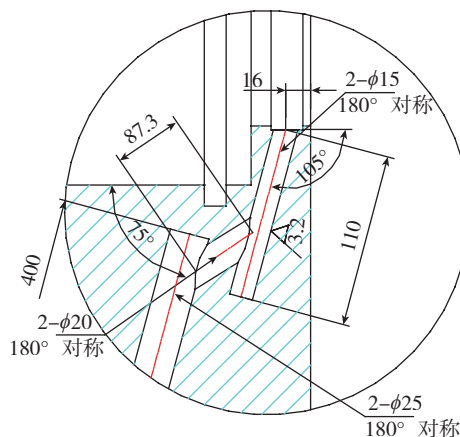


图5 内部流体通道特征

Fig.5 Internal fluid channel characteristics

档中精工艺参数进行加工,此参数需同时满足表面粗糙度的要求,选用电火花成形加工参数见表2,另外,抬刀高度和抬刀周期两个参数也非常重要,可根据加工稳定性进行适当调节。工作液选用DIC-302型专用电火花加工液。该工作液挥发率低、气味小,闪点高($> 110^{\circ}\text{C}$)、安全性好,黏度低、流动性好,有利于排屑加工。

(3) 试验需要完成中间内部流体通道约 $\phi 20$ 长87.3mm的加工,实现与内外端两斜孔的连通。测试样件两端孔与内部流体通道共面度 $\leq 0.8\text{mm}$,且对接处光滑过渡,表面粗糙度 $R_a \leq 3.2\mu\text{m}$ 。

2 试验结果与分析

加工后采用高速走丝电火花线切割机床对电火花加工的内部流体通道部位进行剖切,然后用加工断面与设计流体通道三维模型断面形状进行比对,检验加工尺寸和形状;用表面粗糙度标准样板与加工表面质量进行比对,检验加工后流体通道的表面质量。图6是从工件上取下试块后的整体照片,图7是取下试块的剖面照片,可清晰观看加工后连接孔的形状。图8是用表面粗糙度标准样板与加工部位表面质量比对照片。

由图6~8可知:实现了中间内部流体通道与内外端两斜孔的连通,且对接处光滑过渡;加工后流道与图3设计的流体通道基本吻合,断面为长圆孔形状,用数字游标卡尺检测流体通道宽度为19.2~19.5mm,测试样件两端孔与内部流体通道共面度 $\leq 0.8\text{mm}$,表面粗糙度明显优于机加工表面,与表面粗糙度标准样板比对, R_y 为8.8~9.5 μm , R_a 为1.5~1.6 μm ,加工结果符合设计要求。

结论

通过对试验方法的验证和结果分析,可以得到初步结论如下:

(1) 本文提出的用于内部流体通道的电火花加工柔性传动装置及

研制的弯曲避让结构、绝缘和排屑结构及内部流体通道电火花加工工艺技术,是实现这类零件内部流道加工的一种有效方法。

(2) 此装置通过实际加工验证是可行的,可完成大于、等于、小于 90° 角的内部流体通道的电火花加工,加工内部孔直径为15~20mm;测试样件两端孔与内部流体通道共面度 $\leq 0.8\text{mm}$,且对接处光滑过渡;表面粗糙度 $R_a \leq 3.2\mu\text{m}$ 。

(3) 由前述可知,所述内部流体通道是机械加工方法所不能实现的。利用电火花加工技术的特点来解决机械铣削、钻削由于刀具硬度、不可达或干涉而无法进行加工的问题是解决这种类似结构加工的有效途径。

参考文献

[1] 郁永章,姜培正,孙嗣莹.压缩机工程手册[M].北京:中国石化出版社,2012.

YU Yongzhang, JANG Peizheng, SUN Siying. Compressor engineering handbook[M].

表2 电火花成形加工参数

条件号	脉冲宽度/ μs	脉冲间隔/ μs	脉冲间隔倍率/MA	峰值电流/ I_p/A	伺服基准电压/ S_V/V	加工极性/PL	空载电压/ U/V	伺服速度/ $S/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$
C120	120	20	01	3.0	45	+	90	20



图6 从工件上取下试块后整体照片

Fig. 6 Whole picture of workpiece after taking down the test block



图7 取下试块剖面照片

Fig.7 A section photograph of the test block



图8 加工部位表面质量比对照片

Fig.8 Comparison of surface quality of machined parts

Beijing: China Petrochemical Press, 2012.

[2] 伏金娟,任连生. 解决制造难题的有效手段:电火花成形加工利器[J].金属加工,2016(14):8-9.

FU Jinjuan, REN Liansheng. The effective means to solve the manufacturing problem: electrical discharge machining tool[J]. Metal Working, 2016(14): 8-9.

[3] 翟力军,伏金娟,刘建勇,等.电火花成形加工技术的现状与挑战[J].金属加工,2016(21):1-6.

ZHAI Lijun, FU Jinjuan, LIU Jianyong, et al. Current situation and challenge of electric spark forming machining technology[J]. Metal Working, 2016(21): 1-6.

[4] 王书敏,何可禹.离心式压缩机技术问答[M].北京:中国石化总公司情报研究所,2006.

WANG Shumin, HE Keyu. Centrifugal compressor technology questions and answers[M]. Beijing: Intelligence Research Institute, China Petrochemical Corporation, 2006.

[5] 刘永红,杨毅.曲线孔仿生电火

花加工工艺规律的研究[J].新技术新工艺,2001(2):19-21.

LIU Yonghong, YANG Yi. Study on the technological law of bionics EDM of curved hole[J]. New Technology & New Process, 2001(2):19-21.

[6] 王克锡.国外最新电火花技术在模具加工中的应用[J].金属加工(冷加工),2015(9):16-19.

WANG Kexi. The application of the latest EDM technology in the mould processing[J]. Metal Working (Metal Cutting), 2015(9): 16-19.

[7] 刘永红,杨毅,孟庆国.曲线孔电火花加工机器人的转弯导向机理[J].电加工与模具,2001(6):13-15.

LIU Yonghong, YANG Yi, MENG Qingguo. The turning and guiding mechanism of curved hole electric spark machining robot [J]. Electromachining & Mould, 2001(6): 13-15.

[8] 何寅.曲线孔加工方法概述[J].科教导刊,2016(14):47-48.

HE Yin. An outline of methods in machining curved hole[J]. The Guide of Science & Education, 2016(14): 47-48.

[9] 徐盛林,杨俊杰,余五新,等.弯曲孔电加工工艺的实验研究[J].制造技术与机床,2005(6):71-74.

XU Shenglin, YANG Junjie, YU Wuxin, et al. Research on the technology of hole with bending axis on EDM machine[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2005(6): 71-74.

[10] 任连生,闫明芳,伏金娟,等.一种用于内部弯曲孔电火花加工的柔性传动装置:201510558018.8[R].2017-08-11.

REN Liansheng, YAN Mingfang, FU Jinjuan, et al. A flexible transmission device for internal bending hole EDM: 201510558018.8[R]. 2017-08-11.

[11] 曹凤国,翟力军,桂小波,等.电火花加工技术[M].北京:化学工业出版社,2014.

CAO Fengguo, ZHAI Lijun, GUI Xiaobo, et al. EDM technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.

通讯作者:伏金娟,教授级高级工程师,研究方向为电火花加工技术及标准, E-mail: fujinjuan@126.com。

Research and Application of Electrical Discharge Machining (EDM) Technology for Flow Channel Machining

REN Liansheng^{1,2,3}, YAN Mingfang^{1,3}, GUO Jianmei^{1,2}, GUO Yan^{1,2}, ZHANG Shifu³,
XUE Ji⁴, FU Jinjuan^{1,2}

(1. Beijing Key Laboratory of Electrical Discharge Machining Technology, Beijing 100191, China;

2. Beijing Institute of Electro-Machining, Beijing 100191, China;

3. Beijing Dimeng CNC Technology Co., Ltd., Beijing 100191, China;

4. Shenyang Blower Works Group Corporation, Shenyang 110142, China)

[ABSTRACT] The large flange cover is one of the key components of centrifugal compressor and air separation compressor that is utilized in the aviation equipment, and the machining of the flow channel inside flange cover is a difficult problem. An electrical discharge machining method for machining an internally curved flow channel is proposed. The structure of a flexible transmission device used for EDM internal flow channel machining is studied. The bending avoidance technology, insulation & chip removal technology and EDM processing technics are prepared. Using this new method could solve the traditional mechanical processing problems, such as shorten parts service lives by drilling auxiliary holes, solve the high security risks that are caused by toxic liquid and gas leakage for easy cracking of the welding position, complex procedures and high costs. The method can achieve the high efficiency and high precision machining of the flow channel with various inclination angles. The experimental results show that this method can be used to process internal curved holes with diameter ranged from 15mm to 20mm, bending joint smooth transition and two hole docking at the accuracy of not less than 0.8 mm, surface roughness less than $R_a 3.2\mu\text{m}$. This method of EDM provides an effective method for the manufacture of components with internally curved flow channel.

Keywords: Electrical discharge machining (EDM); Flow channel; Flexible transmission; Bending avoidance; Parameter of EDM
(责编 大漠)