

镍基高温合金大深径比盲孔电火花加工工艺探讨*

Research on EDM Processing of Large Depth to Diameter Ratio Blind Hole of Nickel-Based Superalloy

北京市电加工研究所 杨立光 伏金娟 任连生
沈阳鼓风机集团齿轮压缩机有限公司 沈玉琢

[摘要] 针对航空航天发动机关键零件——镍基高温合金盘轴类零件的大深径比盲孔进行了电火花加工工艺技术研究。通过低刚性深盲孔零件结构特点分析,设计专用导向套、带冲液可调电极夹具等,以满足深径比 >45 、孔径 $\phi \leq 5\text{mm}$ 的深盲孔加工要求;通过优化工艺流程,合理确定粗、中、精加工工艺方法和余量,得到可实用化的加工速度;通过系统工艺试验,确定影响镍基高温合金加工特性的电火花工艺参数,得到快速、稳定、可靠加工的有关参数与条件。结果表明:电火花加工工艺方法是解决镍基高温合金盘轴类零件大深径比盲孔加工的有效方法,所加工零件满足了图纸要求。

关键词: 电火花加工 大深径比盲孔 镍基高温合金 低刚性 盘轴类零件

[ABSTRACT] It researches EDM technology of blind hole with large depth to diameter ratio in nickel-based superalloy plate and shaft parts. Through the low rigidity of deep blind hole part structure analysis, it designs the special oriented sleeve and adjustable liquid electrodes fixture to meet requirements of deep blind hole processing with the depth to diameter ratio >45 , the aperture $\phi \leq 5\text{mm}$. By optimizing the technological process, it determines allowance, coarse, medium and finishing process reasonably, and gets practical processing speed. Through system experiment process, it determines the nickel-based superalloy processing characteristics of EDM process parameters, gets related parameters and conditions of fast, stable and reliable processing. Results show that the EDM processing method is effective to solve the large depth to diameter ratio blind hole of nickel-based superalloy, and the processing parts meet the drawing requirements.

Keywords: EDM Blind hole with large depth to diameter ratio Nickel-based superalloy Low rigidity Plate and shaft parts

* 04 国家科技重大专项(2014ZX04001-111),北京市科学技术研究院科技创新工程专项(PXM2014_178102_000006)资助。

随着航空航天发动机技术的大力发展,轻量化、大推重比的高质量发动机已成为发展趋势,这就使新型发动机的设计和制造具有下列特点:一是大量采用难加工材料,如钛合金、镍基高温合金、复合材料等,这类材料共同的特点是高强度、高粘度、高韧性、高耐磨性;二是难加工结构多,如复杂曲面构件(叶轮、叶片等)、弱刚性构件(叶轮、叶片、细长轴等)、低刚性工艺系统构件(小孔、深盲孔、窄槽等)、精密偶件(喷油嘴等)、复杂整体结构件(机匣、带冠涡轮盘等),其中弱刚性、低刚性工艺系统构件——盘轴类零件已成为发动机广泛采用的重要结构之一,其上带有大深径比的深孔、盲孔、台阶孔的结构形式也越来越多,使得机械加工难度增加,甚至无法加工,成品合格率较低。因此,对这类零件的加工工艺方法和加工能力提出了更高的要求。本文以此类零件为例,对零件上的深盲孔电火花加工工艺进行了深入的研究,且完成了用于某发动机的涡轮轴与涡轮转子叶片为一体的静动轴零件上深盲孔的加工,取得了较好的加工效果,并得到了实际应用。

1 加工零件难点分析

图1是用于某发动机的涡轮轴与涡轮转子叶片为一体的静动轴零件结构示意图。

该零件加工部位的结构特点和加工精度为:

- 细长孔,孔径为 $\phi(5 \pm 0.08)\text{mm}$,孔深为 $(235.42 \pm 0.1)\text{mm}$;

- 盲孔,孔底为平面, $R \leq 1\text{mm}$;

- 大深径比,深径比 $H/d=235.42/5 \approx 47.1$;

- 孔加工表面粗糙度为 $R_a \leq 3.2\mu\text{m}$ 。

该零件存在如下加工难点:

(1)该零件属于弱刚性、低刚性工艺系统构件,它是将涡轮轴和涡轮转子叶片设计为一体的盘轴类零件,壁薄、结构复杂,容易产生变形,影响加工精度,尤其是轴中间带深盲孔结构,使加工变得更加困难。

在机械加工中,对于轴类零件有一个长径比:轴的长度/轴的直径,根据这个比值来判断细长轴、超细长

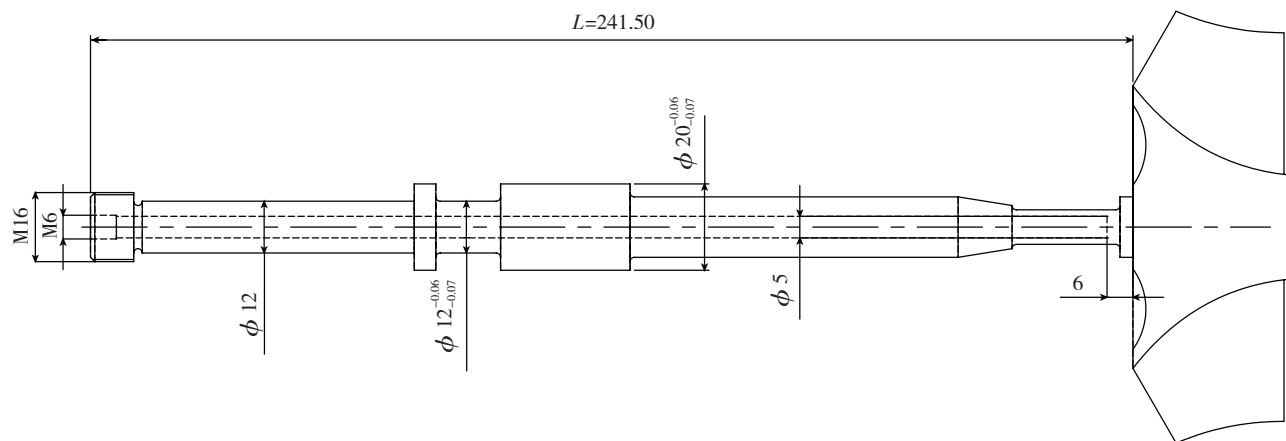


图1 静动轴零件结构

Fig.1 Structure of rest-motion shaft part

轴。对应的孔类零件有深径比: 孔的深度 H / 孔的直径 d 。这两个指标都表达了一种对轴、孔加工难度的定性判断, 一般来说, 这个比值越大, 其加工难度就越大, 特别是大深径比的深孔、盲孔、台阶孔的加工, 当深径比大到一定程度时, 由于孔的深度太长, 小直径刀具的制作长度受到限制, 使得孔只能加工到一定深度, 更深的孔甚至无法加工, 这往往成为生产的关键。

(2) 该零件所用材料为镍基高温合金 (GH4169), 这类材料具有良好的力学、抗氧化、抗高温性能和耐腐蚀性, 但导热系数低、材料塑性大、机加工容易硬化等使其加工难度很大, 而机械加工时对刀具的材质有特殊要求, 且磨损较大, 机械加工的性价较低。

相比其他加工方式, 电火花加工具有以下显著特点: (1) 以柔克刚。加工时, 电极与被加工工件材料不接触, 两极间基本没有宏观机械作用力, 因此能用“软”的工具电极加工“硬”的工件。(2) 精密微细。由于脉冲放电的能量密度可精确控制, 两极间又无宏观机械作用力, 因此可实现精密微细的加工。(3) 仿形逼真。直接利用电能、热能等物理能量加工, 便于实现加工过程的自动化、智能化; 直接利用成形电极进行加工, 并将其形状复现在工件上; 同时, 用简单的进给运动就可以加工复杂的多维曲面工件。

基于上述难点分析和电火花加工特点, 本文提出采用电火花加工技术实现弱刚性、低刚性工艺系统构件大深径比盲孔的加工方案, 并在北京迪蒙数控技术有限责任公司生产的 B35 精密数控电火花成形机床上进行了加工试验。

2 镍基高温合金大深径比盲孔的电火花加工工艺探讨

2.1 电火花加工工艺方案的确定

在电火花加工领域, 当孔的深径比 $H/d \geq 10$ 时, 称为深孔。深孔按形状分为盲孔和通孔, 常用加工方法有高速小孔机床加工、电火花成形机床加工等。对孔径为 $\phi(5 \pm 0.08)$ mm、孔深 (235.42 ± 0.1) mm、孔底 $R \leq 1$ mm、深径比 47.1 的大深径比盲孔, 采用的工艺路线如下:

(1) 粗加工。

采用高速小孔电火花加工机床, 目的是解决加工效率问题。方法是: 采用 $\phi 2.5$ mm 黄铜多孔柱电极对孔进行预加工, 此工序完成的孔直径 $\phi \leq 4.5$ mm。采用多孔电极的目的是加工后底面为平面, 不留下凸起的柱, 为后续精加工做好准备。

(2) 中加工。

采用电火花成形机床, 目的是解决加工效率和加工精度问题。方法是: 采用 $\phi 4.0$ mm 紫铜管状电极, 通过编制圆周轨迹程序进行加工, 同时配以上冲液, 使排屑顺畅, 减少二次放电, 达到扩孔 (修正孔侧壁) 和底面的目的; 再者, 因是整个侧面同时进行加工, 使电极的损耗均匀一致, 减少了孔锥度的产生。此工序完成的孔直径约为 $\phi 4.8$ mm。

(3) 精加工。

采用电火花成形机床, 目的是解决加工精度问题, 并达到图纸要求。方法是: 采用 $\phi 4.8$ mm 紫铜柱电极进行加工, 同时配以专用导向器。此时的加工余量很小, 导向器的作用是减少抖动, 排屑排气, 保证稳定加工和尺寸精度。

实际加工中, 影响尺寸精度的主要因素有电极的制作和导向、电极的装夹和调整、机床重复定位精度、电火花放电间隙的大小及其一致性, 以及电参数的选择等; 影响加工效率的主要因素有各工序余量的分配、冲液方式和冲液压力等。另外, 应合理选择电参数, 解决电极损耗与加工速度的矛盾, 并在兼顾加工速度的前提下尽

量减少电极损耗。

2.2 试验条件的建立、实施与分析

2.2.1 加工机床选择

为解决机床规格、精度和工艺参数选择等技术问题,中精加工机床采用北京迪蒙数控技术有限公司生产的 B35 精密数控电火花成形机床,该机床主要技术参数和功能如下。

- (1) X、Y、Z 行程: 350mm × 250mm × 272mm;
- (2) 定位精度: 0.005mm;
- (3) 重复定位精度: 0.002mm;
- (4) 电极损耗: ≤ 0.5%;
- (5) 具有专家加工工艺数据库: 包括铜 / 钢、石墨 / 钢、石墨 2 / 钢、铜 / 铝合金、石墨 1 / 铝合金、石墨 2 / 铝合金、银钨 / 钢、铜钨 / 钢、银钨 / 硬质合金、铜钨 / 硬质合金、铜 / 锌合金、石墨 / 锌合金、铜 / 铜合金等电极和工件材料的组合电参数工艺数据库。

2.2.2 电极和工件夹具设计

图 2 是设计的电极和工件夹具及各部件在 B35 机床上的布局示意图。

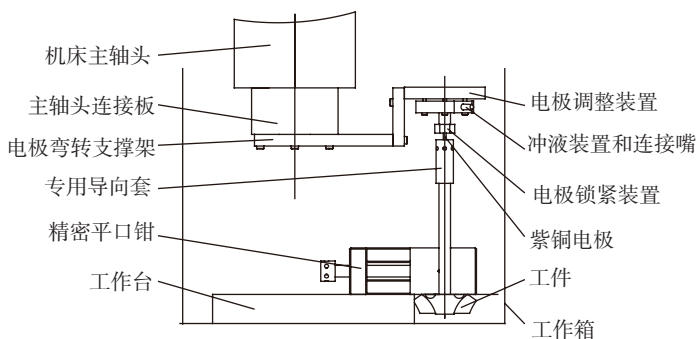


图2 电极和工件夹具及在机床上的布局示意图

Fig.2 Layout schematic diagram of electrode and workpiece clamp in the machine

为解决前述技术问题,本文提出了在 B35 机床上实现电火花大深径比盲孔的加工方法,主要考虑因素如下:

(1) 电极夹具。主要由电极弯转支撑架、电极调整装置、冲液装置和连接嘴、电极锁紧装置组成。电极弯转支撑架的设计应满足加工所需要的行程,与电极调整装置的安装和与工件相对位置的确定。因机床 Z 轴行程为 272mm,连接板到工作台面的最小距离为 200mm,故将其设计为弯转形式;电极调整装置用于调整电极两方向与工作台的垂直度,设计时主要考虑因电极较长,所能够调整的角度应满足要求;冲液装置和电极锁紧装置既要保证能够夹紧电极,又要保证能够进行良好冲液,这里采用了密封圈涨紧的方法进行密封。

(2) 工件夹具选用精密平口钳,将平口钳直接固定在工作台上,依靠工作台、平口钳及工件自身的精度和简单调整来保证工件轴心线的两个方向与主轴轴心线运动的两个方向平行。

2.2.3 电极制作和导向

(1) 电极制作。粗加工电极为黄铜材料,尺寸为 $\phi 2.5\text{mm}$ 、长 400mm 的多孔柱电极,端面形状如图 3 所示。中加工电极为紫铜材料,尺寸为 $\phi 4.0\text{mm}$ 、长 300mm、壁厚 1mm 的管状柱电极,端面形状如图 4 所示,其尺寸精度为 $\pm 0.05\text{mm}$,圆度公差 $\leq 0.01\text{mm}$,直线度公差 $\leq 0.08\text{mm}$ 。精加工电极为紫铜材料,尺寸为 $\phi 4.8\text{mm}$ 长 300mm 的实心柱电极,端面形状如图 5 所示,其尺寸精度为 ± 0.05 ,圆度公差 $\leq 0.01\text{mm}$,直线度公差 $\leq 0.05\text{mm}$ 。

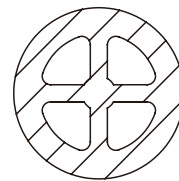


图3 多孔柱电极

Fig.3 Porous column electrode

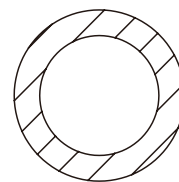


图4 管状柱电极

Fig.4 Tubular column electrode

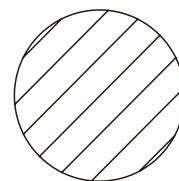


图5 实心柱电极

Fig.5 Solid column electrode

(2) 电极导向。由于是深孔加工,电极很长,为保证电极在加工过程中不抖动,设计了专用导向套,其结构形式如图 6 所示,导向套与工件安装见图 7。

由图 6 可知,该导向套为中空圆柱体,由导向部位、排屑排气空间、6 个均布排屑排气孔、工件定位部分组成。其中,导向部位的尺寸 D 与所用电极动配合, $D = \text{电极直径} + 0.02\text{mm}$; 工件定位部分的尺寸 D_2 与工件定位面为过渡配合, $D_2 = \text{工件直径} + 0.005\text{mm}$,以满足

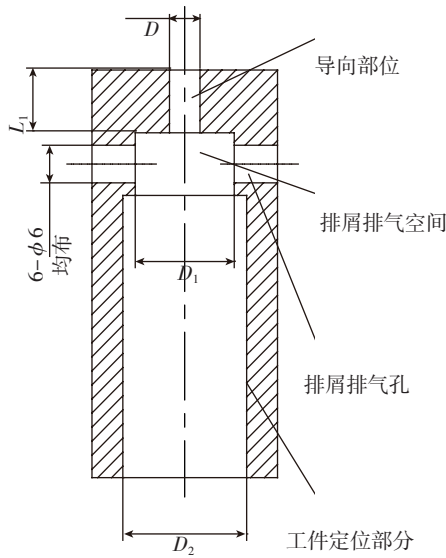


图6 专用导向套

Fig.6 Special oriented sleeve

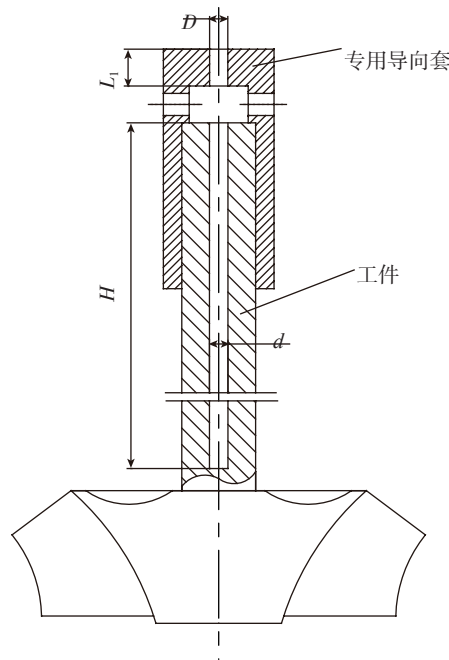


图7 专用导向套与工件安装示意图

Fig.7 Installation diagram of a special oriented sleeve and workpiece

定位精度和接触的稳定性要求,且保障加工过程中导向套不脱落。在深盲孔加工过程中,会不断地产生加工

蚀除物和气体,因此,还设计了排屑排气空间和6个均布的 $\phi 6\text{mm}$ 排屑排气孔。 D_1 尺寸取决于定位面尺寸和排屑排气空间的大小,一般 $D_1=D_2-2\times 1\text{mm}$ 且 $D_1 > d+2\times 1\text{mm}$,以将加工蚀除物和气体及时排出。再者,由于被加工工件通常为难加工材料,所以导向套需采用不导电的耐高温、耐磨绝缘材料,以满足长时间电火花加工难加工材料的要求。

2.2.4 电参数选择和加工程序

要达到大深径比盲孔的电火花加工尺寸精度和表面粗糙度要求,必须正确选择电参数。表1是经过试验后确定的中、精加工电参数。

经过优化的加工程序 SHENKONG 如下:

(ON OFF MA IP SV UP DN LN STEP PL V HP PP C S L);

C790 = 012 012 00 0050 05 05 04 000 0000 + 01 000 10 00 05 03;

C710 = 107 007 00 0025 04 05 04 000 0000 + 01 000 10 00 06 03;

H000 = 00000000 H001 = 00000000 H002 = 00000000;

H003 = 00000000 H004 = 00000000 H005 = 00000000;

(中加工);

H100=235.42; (加工深度);

H200=0.30; (轨迹半径);

G90;

G24;

T84;

C790;

G01 Z - H100;

G01XH200;

G02XH200Y0I-H200J0;

G03XH200Y0I-H200J0;

G01X0Y0;

M05G00Z1.0;

G83 T001;

T85; (关泵);

M02; (加工结束);

;

表1 中、精加工电参数

加工条件	脉冲宽度 ON/ μs	脉冲间隔 OFF/ μs	峰值电流 IP/A	伺服基准电压 SV/V	加工极性 PL	电源电压 U/V	伺服速度 / 档
中加工电参数	80	20	5	60	+	90	005
精加工电参数	30	10	2.5	45	+	90	006

(精加工);
 H100=235.42; (加工深度);
 H200=0.00; (轨迹半径);
 G90;
 G24;
 T84;
 C790;
 G01 Z - H100M04;
 G83 T002;
 T85; (关泵);
 M02; (加工结束);

3 结论

(1) 本文对大深径比盲孔的电火花加工工艺进行了深入研究,提出的工艺方法能够较好地解决镍基高温合金的低刚性工艺系统构件上的深盲孔加工要求,所加工零件满足了图纸尺寸和表面质量要求,对这类零件的电火花加工有很好的借鉴作用。

(2) 提出的电火花深盲孔专用导向器对大深径比(深径比 > 45 、孔径为 $\phi 5\text{mm}$)的深盲孔电火花加工是可行的,简化了加工难度,提高了产品质量。

(3) 对镍基高温合金材料电火花加工特性进行了试验,确定了合理的工艺参数;通过优化工艺流程,确定粗、中、精加工工艺方法和余量,得到可实用化的加工速度。

(4) 此工艺方法不仅能够完成圆柱形状的深盲孔电火花加工,而且可以推广到异型孔的加工,如方形、花瓣形、三角形等盲孔的电火花加工。

(责编 谷雨)

(上接第 37 页)

此每加工完一排孔后,将加工深度增加 0.02mm。

采用上述加工方法,完成了正式件的加工,群孔的加工精度、表面质量、位置度等技术指标均符合图纸要求,发散壁等其他非加工部位无烧伤和碰伤。图 6 为加工后火焰筒的局部图,该零件已经顺利交付给用户。

4 结论

采用成组电极进行火焰筒群孔加工,具有以下 2 个方面的特点:(1) 采用数控电火花成形机床进行群孔的加工,成组电极由群孔的分布规律、孔径和空间角度所决定;(2) 需要进行充分的工艺参数试验,在加工效率优先的前提下,保证火焰筒群孔的加工精度和表面质量,并实现较低的电极损耗。

经过加工试验验证,在现有的数控电火花成形机床

上采用群孔成组电极电火花加工技术,可以实现航空发动机火焰筒群孔的优质加工,解决了具有干涉结构火焰筒群孔的加工难题,获得了较高的加工效率和较好的表面质量。

(责编 谷雨)

(上接第 41 页)

完全一致,这样才能成功加工出想要的零件,要做到这点,只需要控制图形中加工线条的个数就可以了。利用这个系统就可以完成很多复杂零件程序的编制,只是需要人为设计走刀路线比较复杂。

例如,在设备预验收时试加工的零件的编程图形如图 7 所示。

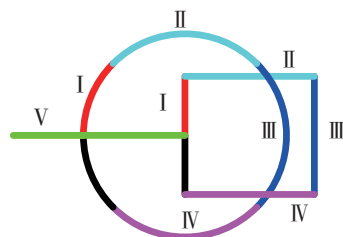


图7 试加工零件的编程图形

Fig.7 Programming graphics of testing parts

其中,相同线条为上下对应的程序段,正方形为上表面图形,圆形为下表面图形,2个图形的进退刀点为同一点,这样加工出的零件就是一个上表面为方形,下表面为圆形的零件,输入零件高度是为让系统自动计算上导轮在 U 轴和 V 轴上的运行距离。

机床除去自动编程外也支持手动编程,编程代码与数控铣床代码基本一致,具体代码可以查机床说明书,机床可以实现圆弧插补、直线插补等命令。

采用本方案的机床在工厂运行了近 8 个月的时间,加工了批产型号、科研型号在内的十几批次的 20 余种上千个零件,合格率达到了百分之百,节省了做夹具的费用,缩短了零件的加工周期。

3 结束语

电火花加工这种特种加工技术不仅仅是一种用来切断或者粗加工的手段,它相较于传统机加工方式有很多的优势,简单点说就是只要零件能导电,就能进行加工,当机床的主轴精度、加工参数、电脉冲补偿准确到一定程度时,它其实与一台机加设备在加工零件精度方面几乎没有区别,而且电加工所产生的应力几乎可以忽略,所以一台具备多轴联动功能的线切割机床是可以完成更多复杂工况零件的加工的。

(责编 杰一)