

窄流道不锈钢整体叶环复合加工工艺研究

Complex Machining Process of Narrow Path Stainless Steel Bling

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 赵明 陈雷 王兴林 刘丹 孟书威



赵明
研究员级高级工程师,主要研究方向为航空发动机机匣加工工艺。

航空发动机整体叶环类零件结构复杂,材料难加工,检测也较难,单一的加工方法,难以保证整体叶环的加工质量,多种加工方法的集成是解决整体叶环加工的有效途径。采用数控加工、仿真加工、电火花成形加工、在机测量、白光测量和三坐标测量相结合的集成加工方案,在窄流道不锈钢整体叶环研制中得到验证,解决了整体叶环加工、仿真及检测等难题。

飞机发动机采用的新型零件结构形式,属于复杂整体结构的航空发动机构件,是航空发动机的重要构件,由于其叶片形状复杂、流道空间狭窄,致使机械加工工具难以达到加工表面,加工可达性差,尤其是叶片根部半径较小,清根加工难度极大,接刀、加工颤振问题严重,加工效率低,刀具费用大,叶片表面质量难以保证,采用单一的机械加工工艺方法难以解决此类零件的加工难题。

近年来,电化学腐蚀、电脉冲成形、车铣复合等复合加工技术发展较快,并在航空发动机构件加工中广泛应用,解决了许多复杂整体构件加工

难题。苏州电加研究所、北京电加工研究所等单位的五轴电火花成形加工设备也在整体叶环加工中得到应用,解决了机械加工刀具费用大等问题,但是电火花成形加工电极制造难度较大、电加工参数控制较复杂、整体叶环类零件加工干涉较突出、叶片测量较难,因此整体叶环电成形加工精度及表面质量难以保证,存在进排气端削边、积炭、表面粗糙度超差等问题。针对窄流道不锈钢类整体叶环零件结构特点,采用了数控加工、仿真加工、电火花成形加工与在机测量相结合的复合加工工艺方法,合理安排整体叶环类零件加工工艺路线;

随着航空发动机技术的发展,新一代先进飞机发动机采用了大量整体结构零件,如整体叶环、整体叶盘、盘轴一体化、机匣轴承座一体化等复杂结构零件。复杂整体结构、高强轻量化材料的采用不仅使航空发动机构件结构简化、重量减轻,而且节省了大量复杂的零组件之间的装配过程,减少了零件数量,提高了发动机整体性能,但是复杂整体结构的加工难度增加了很大。整体叶环是先进

采用仿真加工技术优化加工工具运动轨迹,避免加工干涉、过切等现象,保证加工表面光滑;采用三维建模与高速雕刻铣加工技术,设计、制造合适的电成形加工电极,通过电成形加工试验摸索出合理的电加工参数,控制合适的放电间隙,避免积炭等现象,保证加工表面粗糙度及波纹度符合设计要求;采用在机测量、自动换刀、自动刀具补偿等方法,实现加工工具磨耗的自动补偿,保证整体叶环的加工精度,使加工尺寸趋近于中差附近;采用三坐标测量、白光测量等方法,解决了叶片型面及进排气边测量等难题,保证叶身型面进排气边形状符合设计要求。

窄流道不锈钢整体叶环工艺分析

1 典型窄流道整体叶环结构

整体叶环类零件由内环、外环、叶片及流道3部分组成,属于复杂一体化结构零件,通常包含转子和静子2类构件,具有叶片数量多、流道空间狭窄、加工难度大等特点。典型的整体叶环类零件材料为马氏体不锈钢1Cr11Ni2W2MoV,外径 $\phi 390\text{mm}$ 、内径 $\phi 317\text{mm}$ 、高31mm,叶片数量为102片,内环型面钎焊蜂窝。

典型的整体叶环零件主要技术要求如下:叶身型面线轮廓度要求为0.08~0.10mm,叶身表面粗糙度 $R_a 0.8$,叶片位置度为 $\phi 0.08\sim 0.12\text{mm}$,流道面轮廓度为0.20mm。

2 典型整体叶环加工难点

典型的整体叶环叶片流道空间狭窄,仅有8mm宽,叶片根部半径 R 为1.2mm,刀具可达性较差,机械加工的难度较大。如果采用五轴铣加工方法,只能选择小直径的加工刀具,材料去除量大,细长铣刀加工颤动严重,加工难度大,加工振纹及接刀难以消除,清根加工尤其困难。另外,整体叶环类零件叶片型面抛修、检测等都存在较大的难度。

典型整体叶环加工方案

1 总体方案

针对整体叶环类零件结构特点制定了数控加工、电火花成形加工、仿真加工、在机测量与白光测量相结合的工艺方案,运用了三维建模、虚拟仿真及在机测量等加工技术。内外环型面采用数控车削加工方法,102个叶片型面及流道采用了电火花成形加工方法。利用1Cr11Ni2W2MoV试块进行工艺试验,以确定适用的加工电流、电压以及脉宽、脉间等工艺参数。工艺方案见图1。

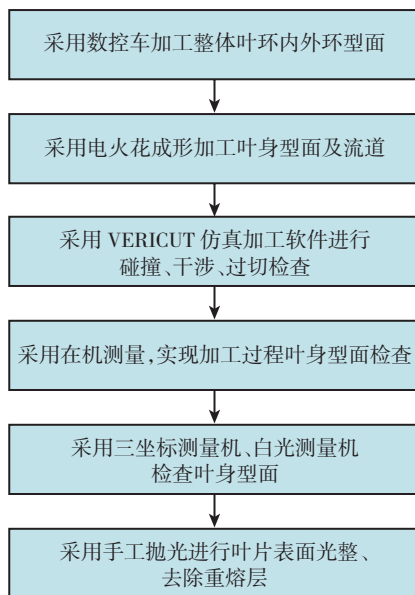


图1 整体叶环加工工艺方案

2 加工难点解决措施

整体叶环的加工难点是叶身型

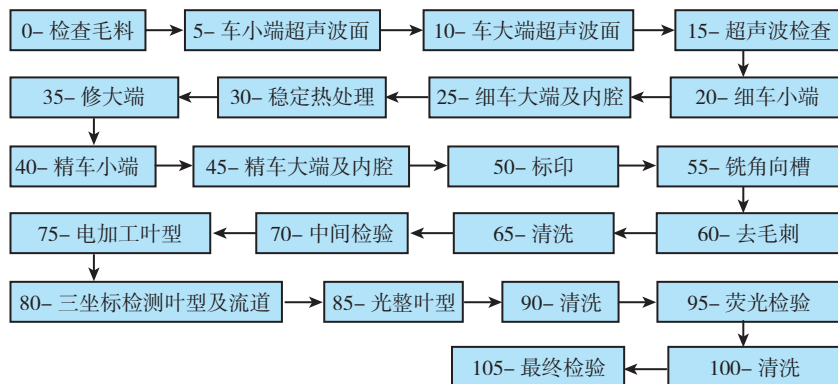


图2 典型的整体叶环加工工艺路线

面及流道的加工,采用五轴电火花成形机床加工整体叶环叶身型面及流道的难点是成形电极制造、电极运动轨迹优化、电加工参数优化及叶片型面检测。针对整体叶环加工难点,采用三维建模及高速雕刻铣技术解决成形电极设计及制造问题;采用仿真加工技术优化电极运动轨迹问题,通过在机测量补偿电极损耗、控制放电间隙;采用白光测量与三坐标测量相结合的方法,解决叶身型面检测问题,通过对电加工试验件的检测优化电加工参数。

实施过程

1 工艺路线

典型的整体叶环加工工艺路线(图2)主要包括4个阶段:(1)内外环型面数控车加工;(2)叶片及流道电火花成形加工;(3)叶身型面光整加工;(4)三坐标及白光测量检查。第一阶段完成工件的无损检测、内外环细加工及稳定处理,去除大部分加工余量,形成后续精加工基准;第二阶段完成102处叶片叶身型面及流道表面的电火花成形加工;第三阶段完成叶身型面及流道表面光整加工;第四阶段完成叶身型面的三坐标测量及白光检测。

2 内外环数控加工

2.1 内外环粗加工

典型整体叶环材料为1Cr11Ni2W2MoV马氏体热强不锈钢,经调质处理后基体为回火索氏体

组织,具有很好的强度和韧性,其硬度为 $HB(d)=3.45\sim 3.1$ 。由于该材料具有较高的塑性和韧性,切削加工时,易产生黏附现象,一方面刀具前刀面形成积屑瘤,另一方面零件被加工表面会出现撕扯现象,使加工表面质量下降。因此选择合适的刀具、切削参数和走刀路线对该零件的加工影响较大。

该零件内环表面采用了阶梯结构,内表面在零件中加工到最终尺寸,用于焊接蜂窝封严环,前后端面留1mm余量,在组合件加工。内外环粗加工采用了 55° 刀尖角的菱形刀片,刀尖半径为0.8mm,刀片材料为IC908。该材料具有较好的韧性和耐磨性,抗冲击能力较强,适合不锈钢材料的车削加工,通过现场切削试验,确定切削参数如下:

- 切削深度 $a_p=1\text{mm}$;
- 进给量 $f_n=0.3\text{mm/r}$;
- 切削速度 $V_c=70\text{mm/min}$ 。

整体叶环内外环数控车加工采用了循环程序分层加工方法,在UG NX 7.5平台进行零件三维建模,选择加工区域,设置加工参数、进退刀方式及安全距离,规划走刀路线,生成刀具路径文件,并经过后置处理完成数控加工程序的编制。典型整体叶环端面槽粗加工采用了宽5mm的切槽刀片,刀尖半径为0.8mm,刀片材料为IC908。在VERICUT 7.0平台建立了整体叶环仿真加工环境,实现了基于机床运动的数控加工全过程模拟加工验证,粗车端面槽仿真加工见图3。

2.2 内外环精加工

典型整体叶环内环表面精加工采用了 35° 刀尖角的菱形刀片和5mm宽的切槽刀片,刀尖半径为0.4mm,刀片材料为IC907。该材料耐磨性好,适合不锈钢材料的精加工和半精加工,通过现场切削试验(图4),确定切削参数如下:

- (1) 切削深度 $a_p=0.2\sim 0.3\text{mm}$;

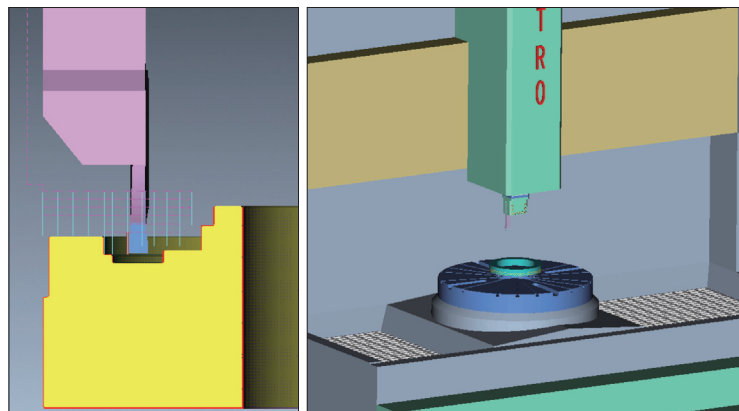


图3 第七级静子粗车加工仿真

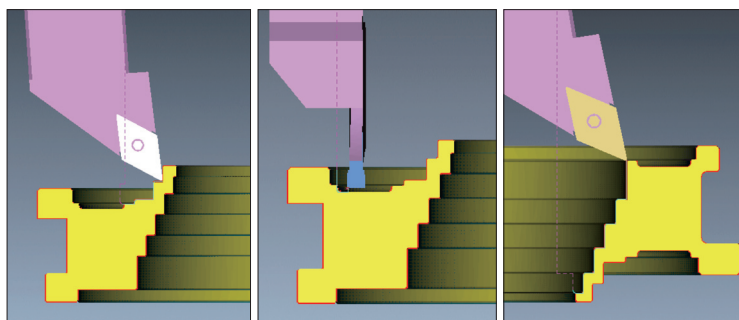


图4 典型整体叶环数控车精加工刀具路径

- (2) 进给量 $f_n=0.1\sim 0.2\text{mm/r}$;
- (3) 切削速度 $V_c=70\sim 100\text{mm/min}$ 。

3 叶身型面电火花成形加工

电火花加工(Electrical Discharge Machining, EDM)是在一定的介质中,使工具电极和工件之间不断产生脉冲性的火花放电,利用火花放电在局部瞬时产生的高温把金属材料熔化逐步蚀除掉,以达到一定尺寸、形状和表面粗糙度要求的加工方法。电火花加工自1956问世以来经历50余年的发展历程,已经成为弥补传统加工方法不足的重要加工手段,由于其独特的加工能力,电火花加工已广泛应用于模具制造业、航空航天等工业领域。电火花加工这种非接触、无切削力去除材料的加工过程,当采用精规准加工时精度可控制到微米级,采用粗规准加工时也可保持较高的材料去除率,近年随着精密电源和高端数控技术在电火花机床上广泛采用,先进电加工技术已迅速在

整体叶环、叶盘加工领域展露头角。

由于整体叶环复杂结构、叶片数量多、流道空间狭窄,因此采用机械加工方式难度较大,存在刀具费用大、效率低、清根难等问题。采用五轴联动电火花成形加工机床,应用成形电极放电烧蚀的原理,通过成形设计电极,仿真轨迹优化等方法,在五轴联动电火花成形机床上,实现叶身型面及流道的粗精加工。采用电火花成形加工工艺能够节省许多加工刀具,降低刀具成本,但是成形电极的设计和制造难度较大,是电火花成形加工需要解决的关键技术之一。典型的不锈钢整体叶环电成形加工采用了紫铜电极,并通过UG NX7.5三维建模技术设计,电极分为粗加工电极和精加工电极两组,一个电极有两个加工面分别用于叶盆和叶背型面的加工,电极柄部有一个连接孔,用于安装连接杆,电极通过连接杆与电火花成形机连接。电极型面加工采用了高速雕刻铣加工技术,粗加工

电极用于去除大部分加工余量,精加工电极用于保证叶身型面及流道的尺寸、形状和位置精度,整体叶环电成形加工电极和加工过程如图5所示。

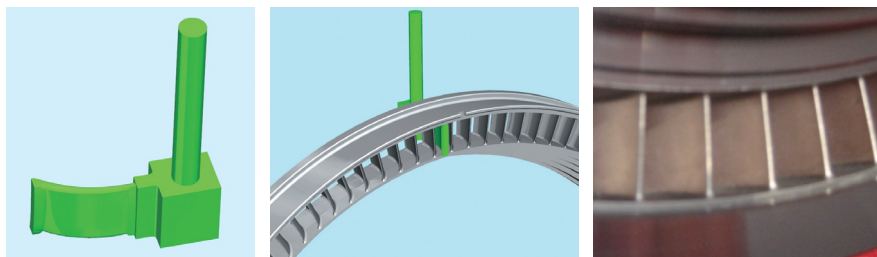


图5 整体叶环电火花成形加工示意图

4 叶身型面光整加工

整体叶环叶身型面及流道采用了电火花成形加工工艺方法,由于电加工会产生重熔层、积碳等现象,采用精规准电加工减少重熔层、积碳的产生,但是难以完全消除。叶身型面光整加工的目的在于去除叶身及流道的重熔层、积炭及接刀痕,通常采用手工抛光、磨粒流等方法。由于该不锈钢整体叶环电加工试验较充分,电加工参数控制较好,重熔层、积碳现象较轻,叶片型面、叶根等局部采用手工抛修的光整加工方法。手工抛修叶身型面分粗抛光和精抛光两步进行,叶身型面及流道转接部位光滑转接,粗抛光采用 A0-1004M、A0-1010M、AB-1010M、AB-1004M 打磨棒,精抛光采用 AD-1004M、AD-1010M 打磨棒等专用工具,并采用标准样件检测光整加工的质量,不允许划伤、划痕、和横向加工痕迹存在。

5 叶身型面检测

整体叶环叶身型面及流道的开敞性较差,叶片进排气边 R 较小,三坐标测量机检测的难度较大。针对整体叶环结构特点,分别制定了整体叶环在加工过程和零件交付过程的检测方案。整体叶环加工过程检测应用了电火花加工设备不放电对刀的功能,检测叶身型面坐标点与叶身型面理论数据进行对比,实现加工过

程的在机测量。

整体叶环叶身型面表面质量控制是通过调整电加工参数实现的,通过对多组试验件剖切后进行理化测试,检测试验件的表面粗糙度和重融

层厚度,采用白光测量机检测叶身型面轮廓度,确定合理的电火花成形加工工艺参数,叶身型面粗糙度为 $R_a 0.74$,重熔层厚度仅为 0.005mm ,叶身型面轮廓度为 0.08mm 。

结果分析

叶身型面及流道表面的加工是整体叶环类零件加工的难点,采用电火花成形加工方法是解决机械加工刀具可达性差、清根难、刀具成本高和表面质量差等难题的有效途径之一。电火花加工的表面和机械加工的表面不同,它是由无方向性的无数小坑和硬凸边所组成。与机械加工一样,电火花加工表面粗糙度通常用微观轮廓平面度的平均算术偏差 R_a 表示。电火花加工的表面质量主要包括表面粗糙度、表面变质层和表面力学性能等。表面粗糙度控制方法如下:

$$R_{\max} = k \times T_i \times I_e$$

其中, R_{\max} 为实测的表面粗糙度, k 为常数,铜加工钢时常取 2.3 ; T_i 为单个脉冲放电时间; I_e 为脉冲峰值电流。

由上面的公式,可以看出影响电火花加工表面粗糙度的因素主要是单个脉冲的能量的大小,另外,工件材料的电加工性能,熔点高的材料较熔点低材料容易获得好的表面粗糙度;在精加工时,工具电极的表面

粗糙度将会影响到加工表面的粗糙度,石墨电极加工不易获得光滑的表面,而铜电极可以获得高的表面粗糙度,因此用铜电极可以获得较好的表面粗糙度。

通过多次试验件加工试验,调整电加工参数,采用白光测量技术检测型面数据,进行理化性能检测,摸索出该零件电成形合理的加工工艺参数,保证叶身型面及流道的加工质量。采用电火花成形加工整体叶环叶身型面粗糙度为 $R_a 0.74$,重熔层厚度仅为 0.005mm ,满足了设计提出的 $R_a 0.8$ 和轮廓度 0.08 的要求。电火花加工参数为:峰值电流 0.5A ;脉冲宽度 $10\mu\text{S}$;脉冲间隔 $50\mu\text{S}$;加工电压 150V ;伺服电压 70V 。

结论

航空发动机整体叶环类零件结构复杂、材料难加工,检测也较难,单一的加工方法,难以保证整体叶环的加工质量,多种加工方法的集成是解决整体叶环加工的有效途径。采用数控加工、仿真加工、电火花成形加工、在机测量、白光测量和三坐标测量相结合的集成加工方案,在窄流道不锈钢整体叶环研制中得到验证,解决了整体叶环加工、仿真及检测等难题。具有如下优点:(1)整体叶环内外型面采用了在机测量、自动换刀、自动刀具补偿和循环程序加工方法,使所有数控加工尺寸趋于中差附近;(2)整体叶环叶身型面及流道采用了电火花成形加工工艺,通过合格电极、在机测量和合理的电加工参数,保证叶身型面及流道轮廓度及表面粗糙度的符合性;(3)构建了整体叶身仿真加工环境,通过仿真加工技术优化了加工工具运动轨迹,避免了碰撞、干涉和过切等现象;(4)通过白光测量与三坐标测量相结合的方法,解决了整体叶环叶身型面进排气边检测难题。

(责编 良辰)