

# 控制较大尺寸机匣件加工变形的工艺措施

Technology Measures of Controlling Machining Deformation for Large Case

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 王聪梅



王聪梅

中航工业沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司机械加工技术首席专家,1984年毕业于沈阳航空工业学院机械加工工艺专业,长期从事航空发动机零部件的机械加工工艺技术研究工作。

航空发动机机匣类零件的设计结构越来越复杂、尺寸越来越大、壁越来越薄,而设计精度要求却在逐渐提高,机匣件加工后产生的变形问题越显突出。机匣件变形对发动机的装配精度、使用性能和可靠性影响较大,解决机匣件的变形问题迫在眉睫。

大型航空发动机环形机匣类零件,设计结构有整体机匣和对开机匣,多为薄壁件,尺寸较大、设计精度

高。对开机匣外表面分布有大量的岛屿、凸台、安装座、凹槽和减重花边,内表面设计有叶片安装槽,前后安装边设计有多种尺寸安装定位孔。机匣件材料多选用高温合金和钛合金,均为难加工材料。毛坯多为锻件,部分机匣的毛坯为自由锻件,目前锻件加工余量很大,且余量分布不均匀。

近几年,公司借鉴国际航空发动机零件加工工艺经验,结合国内实际情况,开展了大量控制机匣类零件加工变形的工艺试验,机匣件加工质量得到了改善。

## 合理安排加工工艺路线

机匣件内外表面的加工主要采用车削工艺和铣削工艺,多数环形机匣的内表面主要采用车削加工,整体环形机匣的外表面主要采用车削加工,有些机匣也需要部分铣削加工,对开环形机匣的外表面主要是铣削

加工,位置精度要求较高的安装边孔系需要镗加工。由于大型发动机机匣件尺寸大、壁薄、刚性弱,容易产生加工变形,因此,在安排加工工艺路线时,应注意以下两个问题。

(1)工序不应太集中,原因如下。

- 非模锻件的机匣件毛坯加工余量大,对开环形机匣外型面加工余量更大,各表面加工余量不均匀,内外表面的加工余量需要安排在多个工序交替去除。

- 锻件残余内应力较大,粗加工后应力释放,工件变形较大,需要安排后续工序逐步去除变形量。

- 超声波或腐蚀检查、热处理等工序需要安排在机匣件的加工工序间。

- 机匣件尺寸大、壁薄、刚性弱,切削过程需要有径向辅助支撑,内、外表面的加工或前、后表面的加工需要在不同工序中进行。

(2)对开环形机匣内外表面的最终加工顺序应是先铣加工外表面,后车加工内表面,原因如下。

- 设计基准安装边及内表面的尺寸公差和形位公差小,精度要求比外表面和壁厚严格。

- 铣加工切削力大,铣加工外表面后机匣有变形,将车加工安排在铣加工之后是为了保证基准精度。

- 铣加工外表面时内表面还有余量,能相对提高零件的加工刚性。

### 加工机匣件的定位装夹方法

机匣件从粗加工至最终的精加工,涉及车削、铣削和孔加工,其定位、装夹方法各有特点,正确、合适的定位和装夹方法能够减小机匣件的加工变形,并满足后期的装配要求。

(1)去除余量和去除变形量的加工工序,机匣件应在真实状态下定位和装夹,而不应使机匣件进行限制,即不应使机匣件在定位和装夹后产生弹性变形。多数环形机匣件毛坯为锻件,这些锻件除了加工余量大,圆度误差及安装边的平面度误差也很大。从粗加工工序到最终的精车工序,除了逐渐去除加工余量外,也要逐步去除变形量,使圆度误差和平面度误差符合设计图要求。因此,机匣件在定位、装夹后的状态应尽可能与其自由状态一致,即与机匣件在自由状态下的变形状态一致,然后通过加工去除变形量。加工前若通过定位、装夹使机匣件发生弹性变形,即将其归圆、压平,加工后当从夹具上卸下时,机匣件又恢复到加工前的变形状态,变形没有得到去除。因此,夹具的径向定位基准不宜采用整环定位基准,径向基准应有一定的间隙,保证机匣件的工艺基准面能够自由安装,并按照工艺规程的要求找正零件。

轴向压紧机匣时,若夹具上的轴向定位基准是整环平面,因夹具和机匣的基准平面都有平面度误差,两

个平面无法在每一处都接触上,局部会有空虚点,压紧前应用塞片将空虚处塞实,压紧时应用限力扳手。若夹具上设计有轴向辅助支撑,在调整轴向辅助支撑时,不应使机匣产生轴向移动,如果夹具上设计有径向辅助支撑,在调整径向辅助支撑时,使支撑点与机匣刚好接触,起到支撑作用即可,而不应使机匣产生弹性变形。

(2)在最终加工安装边孔和径向孔时,机匣定位和装夹后的状态应与在发动机装配中的状态相近,即对机匣件进行适当的约束。在加工安装边孔时,常以另一安装边为工艺定位基准,这时夹具宜采用整环定位基准,不宜采用大的定位间隙。

### 增强切削系统刚性的夹具

大型发动机机匣件为刚性较弱的大尺寸薄壁件,在精加工和半精加工过程中易产生颤振及变形,因此,加工时应采取措施增强切削系统刚性。以往加工机匣件的夹具很简单,多数以安装边径向定位,轴向用几个压板压紧安装边,这种夹具只能起一个固定机匣件的作用。开发能提高机匣件切削刚性的夹具,有利于控制机匣件的加工变形。

(1)设计制造带有径向可调辅助支撑的夹具。车削机匣件内表面时采用外部径向辅助支撑,铣削或车削机匣件外表面时采用内部径向辅助支撑,使薄壁机匣件与夹具结合在一起,提高机匣件的切削刚性。辅助支撑可以采用液压可调式,也可以采用机械可调式。使用径向可调辅助支撑夹具时,在完成机匣件找正要求及轴向压紧后,再分别调整每一个径向辅助支撑的径向距离,调整辅助支撑时,即要起到支撑机匣件的作用,又不能使机匣产生径向移动。夹具设计时有两种控制辅助支撑调整的方式可以选择,最好的方式是自动控制,即辅助支撑与机匣件接触到要求的程度时,夹具上的功能机构起作

用,限制辅助支撑继续移动;另一种控制方式相对落后,即在调整辅助支撑时,应用千分表显示并控制机匣件不在径向产生移动。

(2)增加夹具上轴向压紧的压板数量。根据机匣件尺寸的大小合理设计夹具上轴向压紧的压板数量。机匣尺寸越大,压板数量应当越多,因为有较多数量的压板,分配到每一个压板上的压紧力可以减小,能够避免压伤零件,同时机匣件的切削刚性得到提高。

图1为铣加工某机匣外表面所用的夹具,夹具设计有径向机械可调式辅助支撑。

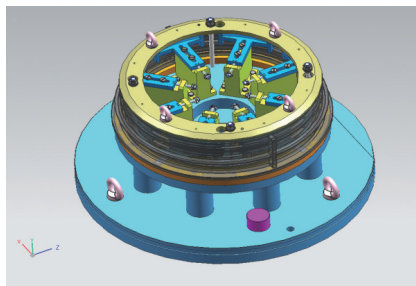


图1 带有径向可调辅助支撑的铣加工夹具

### 控制粗加工后的变形量

机匣件毛坯多为锻件,不仅锻件的形状和尺寸误差非常大,而且需要切削去除的加工余量也大,因此,机匣件的切削加工通常分成几个加工阶段进行。粗加工阶段,主要任务是去除锻件的硬化表皮和大部分加工余量,同时还要尽可能去除形状误差。粗加工选用的设备通常是普通机床,其工艺规程图表往往比较简单,只规定加工后应保证的尺寸和表面粗糙度,多数没有形位公差要求,也不指定切削刀具和切削参数,所以工人在加工时按照自己的习惯选择刀具和工艺参数。粗加工后,再经过热处理释放部分残余应力后,显露出机匣件形位误差较大。如直径为857mm的整体环形机匣,粗加工后个别机匣圆度误差达到2mm,即使后续安排了半精加工和精加工工序,

机匣的最终变形量也很难满足设计图要求。因此,控制粗加工工序的加工质量非常重要,应根据机匣件的尺寸大小、精度要求、刚性状况等具体特点,规定粗加工工序的圆度公差值和平面度公差值,以保证机匣件最终加工后的变形量在设计图规定范围内。

### 减小机匣件加工变形的切削走刀路径

金属零件切削过程中,走刀的路径不同产生切削应力的大小和状态不同,切削完成后,零件残余应力的大小和状态也不同。机匣件切削加工余量大,全部加工余量需要通过多个工序、多次走刀去除。以往工艺规程中不标注切削走刀路径,而由操作工人、数控编程员根据自己的经验和加工习惯来确定,安排的切削走刀路径只考虑是否方便加工,而没有考虑产生的切削力、切削应力对机匣加工变形的影响。

科学、合理地安排机匣件的切削走刀路径,能够减小机匣件加工后的变形量,因此,在规划零件的切削加工过程时,应根据金属切削原理,针对零件的设计结构、精度要求和毛坯加工余量的大小,科学安排零件各个表面的加工次数和全部加工表面的先后加工顺序,科学安排每一次切削的刀具进给方向,并在工艺规程工序图表中以图示的形式,用顺序号标注各表面的加工次数和加工顺序,用箭头线标注刀具切削方向和刀具进给方向,如图2所示。

### 机匣加工后的检测状态

机匣件加工完成后,要按照设计图检查其各项尺寸和形位公差。由于机匣件是弱刚性零件,其检测状态不同时,形状和位置误差的检测结果会不同,部分尺寸的检测结果也会有区别。

(1) 机匣件在自由状态下检测。  
这种状态是机匣件加工后的原

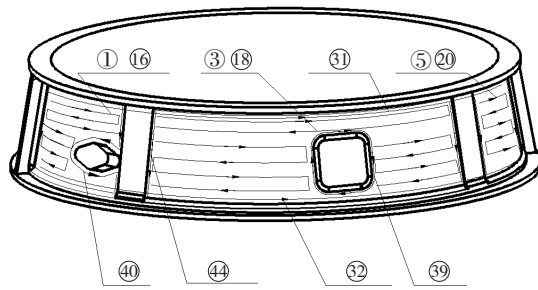


图2 某机匣外型面铣削加工走刀路径示意图

始状态,检测时不对机匣件做任何约束,检测结果代表了机匣件的真实情况,但是与机匣件装配在发动机上的状态不一致。由于机匣件在加工后有所变形,在这种情况下的检测结果,通常圆度误差和平面度误差比较

的检测,这种检测状态下的检测结果体现了零件在装配状态下的误差值,也满足了机匣件的加工工艺性要求。

### 机匣件采取工艺措施后的加工效果

选取某对开环形机匣和某整体环形机匣开展控制加工变形的工艺攻关,采取上述工艺措施后,机匣件的加工变形减小。表1为某整体环形机匣采取工艺措施前后基准 $\phi 846\text{mm}$ 的最终圆度误差值比较,该机匣材料为GH4169,毛坯为锻件。

表1 整体环形机匣设计基准 $\phi 846\text{mm}$ 的圆度误差

采取工艺措施前		采取工艺措施后	
批次号	跳动值(自由状态)/mm	批次号	跳动值(自由状态)/mm
09-4-1-5	0.45	11-08-1-1	0.075
09-5-2-6	0.3	11-08-1-2	0.105
09-4-2-1	0.3	11-08-1-3	0.09
09-4-2-2	0.4	11-08-1-4	0.09
09-4-1-13	0.25	11-08-1-5	0.1
09-4-1-14	0.46	11-08-1-6	0.19
		11-08-1-7	0.09
		11-08-1-8	0.09

大,相应的部分径向尺寸和轴向尺寸误差也较大。

(2) 机匣件在约束状态下检测。

参照机匣件装配在发动机上的状态,在此状态下,设计图通常对机匣件定位支口的形状和位置公差有两个规定,一是在自由状态下定位支口的圆度和平面度公差值;二是将定位支口约束到规定的公差值内。在定位支口被约束状态下,再检查其他所有尺寸、形状和位置误差应在设计图规定的公差范围内。如将机匣安装在一个约束夹具上,机匣的定位支口与约束夹具上的约束表面配合,将机匣的圆度和平面度约束到设计图要求的值内,然后再检查其他所有的形状、位置和尺寸。对弱刚性零件

### 结束语

解决机匣件的加工变形是一项复杂的系统工程,影响机匣件加工变形的因素很多,如毛坯质量、工艺路线、加工余量分配、各工序加工后质量、零件装夹定位方式、定位间隙和压紧力、切削走刀路径、切削刀具和切削参数、冷却液、机床刚性和精度等,上述工艺措施只是减小机匣加工变形的部分措施,仅有上述措施还远不能彻底解决机匣件变形问题,还应开展如下研究:(1) 毛坯残余应力与均匀化研究;(2) 机匣件切削走刀路径优化的深入研究;(3) 基于机匣件实际装配状态的限位检测研究。

(责编 深蓝)