

引文格式: 张世贵, 张晟玮, 陈鹏飞, 等. 外涵对开机匣精密高效加工工艺研究[J]. 航空制造技术, 2023, 66(14): 100-106.

ZHANG Shigui, ZHANG Shengwei, CHEN Pengfei, et al. Research on high-effect and precise machining technology of bypass duct split casing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(14): 100-106.

外涵对开机匣精密高效加工工艺研究*

张世贵¹, 张晟玮¹, 陈鹏飞¹, 王 灿¹, 王宇航², 王国名², 孙剑飞^{2,3}

(1. 中国航发成都发动机有限公司, 成都 610503;

2. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

3. 北京航空航天大学江西研究院景德镇分院, 景德镇 333032)

[摘要] 机匣的加工质量对航空发动机制造和使用性能极为重要, 其中对开机匣由于自身的分割式结构导致其加工工序繁冗, 加工质量难以控制。本文以高精度、高效率两项优化指标为重点对对开机匣加工工艺流程展开研究, 结合材料特点及结构特点总结分析钛合金外涵对开机匣的加工难点, 针对重点加工难点设计工艺方案, 包含高精度加工设备的选择、各工序工装夹具的选择及刀具选择与工艺参数的设定等。在此基础上重点关注特征复杂的机匣外型面铣削加工过程, 对其加工区域进行划分, 完成不同工序铣削方式及数控走刀路线的确定, 最终对切削过程进行模拟仿真, 获得完备细化的加工工艺流程。经实际零件加工验证, 优化后的工艺在加工精度和加工效率方面都有所提升。本文从工艺路线及切削参数等方面进行研究, 有效减小了零件加工变形, 获得外涵对开机匣加工的精密高效加工方法, 为大型环形对开薄壁零件的加工提供一定的经验。

关键词: 钛合金; 夹具; 刀具; 外涵对开机匣; 数控加工

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2023.14.100



张世贵

高级工程师, 研究方向为航空发动机机匣制造工艺。

航空发动机机匣作为航空发动机的重要零部件之一, 是整个发动机的底座, 其内部安装有静子叶片, 外部可为各种管路、线束等提供支撑, 同时也为各种内部核心结构提供保护。因此机匣的零件质量可直接影响发动机的整体性能。由于航空发动机机匣存在因设计、材料和制造带来的形状结构复杂、材料难加工、薄壁弱刚性和高去除率等特性, 导致其生产中存在工艺流程长、加工效率低和变形误差大等加工难点^[1]。如某高压涡轮高温合金机匣的粗加工工序耗时超过 200 h; 生产某型号前整流钛合金机匣的整个周期需要 4 个月以上。其次机匣在加工过程中需要大量的工序流转和重复装夹, 工

艺参数的低适应性会降低生产效率, 同时由于残余应力和切削力等因素引起的加工变形对机匣的产品质量也有不利影响^[2-5]。

目前国内外对机匣加工变形的研究主要聚焦在加工工艺流程制定和变形控制等方面, 包括切削仿真、装夹优化和参数选择等内容, 但对钛合金对开机匣的研究较少^[6-9]。该机匣的加工工序包括零件的切割, 会对后续加工的零件质量带来极大的挑战。零件在线切割后发生显著变形, 被切割部位发生翘曲, 平面度超差直接致加工基准和配合精度不能够满足后续一系列工序的要求, 从而导致零件尺寸超差甚至直接报废。同时对开机匣的加工流程冗长、装夹手

* 基金项目: 四川省重大科技专项(2021ZDZX0001、2021ZDZX0002); 中国航空发动机集团产学研合作项目(HFZL2019CX026)。

段不足和不合理、加工路线优化和切削参数的选择缺乏也是亟待解决的问题。

针对航空发动机大型薄壁环形件切削过程中的加工变形和效率低下等问题,对航空发动机钛合金对开结构机匣加工流程和主要难点进行分析研究,结合切削工艺经验、理论分析和切削模拟等手段,建立零件关键工序的加工变形误差预测方法,开展工艺流程、切削参数和装夹方式的研究和制定,实现钛合金对开机匣的高效、高精度和低缺陷的加工。

1 零件分析

1.1 材料性能特点

外涵对开机匣是航空发动机最复杂的承力结构零件之一,国内外机型大多采用钛合金或高温合金材料。某对开机匣采用 TA15 钛合金材料,该材料属于一种近 α 型的低密度钛合金,具有中等的室温和高温强度、良好的热稳定性、抗蠕变性、耐腐蚀性及良好的焊接性能,且组织稳定、抗氧化性好,主要用于制造 500 °C 以下长时间工作的飞机、发动机零件和焊接承力零部件^[10]。但 TA15 作为一种难加工材料,也会给对开机匣的加工带来明显的困难,在其加工过程中存在热传导性能差、弹性系数低、切削力大、刀具磨损严重等问题^[11-13]。

1.2 零件结构特点

零件为航空发动机所用外涵对开机匣,其内型腔为分布简单的型面结构,机匣外型面结构复杂,零件尺寸公差与技术条件要求严格,属于对开机匣类零件中最难加工的典型薄壁型腔零件。零件包含两对半间带纵向安装边,两半之间由对称分布于纵向安装边上的精密孔及精密螺栓定位连接。零件前后端有安装边,用于连接外涵机匣前段、外涵机匣中段及外涵机匣后段。对开机匣外形尺寸为最大直径 1030 mm、最小内径 836 mm、总高 575 mm,部分尺寸精度为

± 0.015 mm,形位公差为 0.02 mm,且大部分型腔壁厚仅为 1.5 mm。纵向安装边的水平结合面要求着色检查,密接度不小于 95%,沿轴向不允许间断。机匣的零件结构如图 1 所示。

1.3 零件加工难点分析

外涵对开机匣带有纵向安装边,其外型结构比较复杂,尺寸精度和表面技术要求都非常高,在加工过程中会遇到以下 3 个主要问题:(1)部分尺寸精度和形位公差要求较高,加工过程不易保证;(2)大部分型腔壁厚仅 1.5 mm 左右,在车铣过程中,弱刚性部位容易出现让刀变形,使零件超差;(3)因具有薄壁型腔的结构特征,不合理的装夹方式容易引入装夹变形,而一般的夹具很难控制零件加工过程产生的变形。针对这些问题,进行了初步方案规划。

(1)参考以往各型号对开机匣的研制经验,制定合理的加工工艺路线。

(2)对于薄壁处车铣加工产生的变形,通过设计及制造专用工装对薄壁位置加以辅助控制,防止零件薄壁处出现严重的变形。

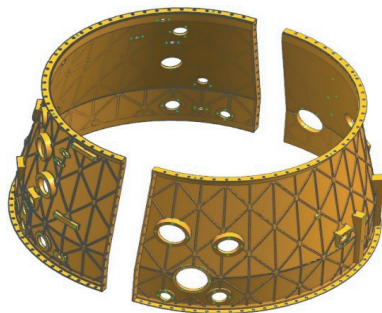


图 1 零件结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of part structure

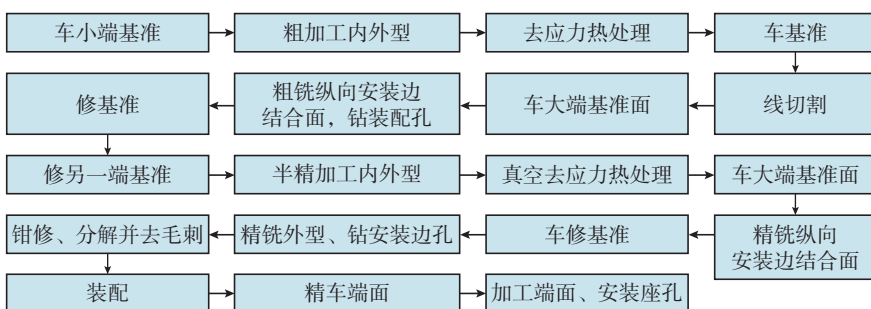


图 2 主要机加工工艺路线流程图

Fig.2 Main machining process route flow chart

(3)形位公差极小的尺寸,采用高精度机床并设计专用刀具进行加工。

(4)车铣加工产生的变形和加工效率的提高。通过合理安排刀具的选用、走刀路线及加工参数来减少变形和提高效率。

1.4 工艺方案

此零件来料为 TA15 的整体 II 类环型锻件,需要经过粗加工、半精加工、精加工等较长的工艺路线才能加工完成,其加工方法涵盖车加工、铣加工、线切割和钻镗孔加工,并且各项工艺相互独立,因此根据设计图技术条件相关要求和相关结构尺寸,并参考以往各型号对开机匣的研制经验,制定出主要加工工艺路线,如图 2 所示。

2 数控加工工艺方案

2.1 加工设备的选择

由于对开机匣存在特殊结构的特性,其加工过程主要为车削、钻铣削及线切割,因此应选择自动化程度高、加工质量稳定的数控车床、数控加工中心及线切割设备进行数控加工,具体设备型号如表 1 所示。车削使用数控立车,其设备有较好的稳定性和刚度,加工过程中尽可能保证精加工各表面加工余量均匀、吃刀量均匀稳定,以达到提高刀具使用寿命、减小零件变形的目的。线切割使用数控线切割机,其设备具有良好的精度及稳定性,能保证安装边后续铣削精加工的余量。钻孔、铣削使用四轴和五轴加工中心,其设备具有良好的刚度与精度,同时能满足多种机匣外

型面各种复杂特征的成型加工。加工过程中应保证型面结构尺寸、纵向安装边结合面平面度和安装边定位孔的位置精度。

2.2 工装夹具的选择

为预防车铣加工薄壁处产生的变形,通过设计专用工装对薄壁位置加以辅助支撑。粗车铣加工及半精车铣加工去除大量余量后,零件内部残余应力的平衡被打破,产生了相应的应力,一部分应力随着材料的去除而逐步释放,并产生变形,而另一部分需要重新产生新的应力进而产生应力平衡,这种应力会给后续精加工造成变形,从而影响尺寸公差及形位公差的精度,造成零件不合格。因此在半精加工后增加了“工序-真空去应力热处理”工序。针对真空热处理技术条件、零件材料及结构特点,设计专用真空热处理夹具来控制热处理过程中零件应力释放产生的变形,夹具结构及零件装夹方式如图3所示。

纵向安装边的水平结合面要求着色检查,密接度不小于95%,沿轴向不允许间断。应当安排单独的工序——精铣纵向安装边结合面,对结合面进行高精度加工,同时也需要专用铣削夹具进行装夹加工。专用夹具由上下两部分组成,中间用梁连接,通过对机匣大端、小端同时沿周向约束以实现铣削过程中振动的控制,从而保证安装边结合面的表面质量和相关密接度^[14]。铣削夹具结构及零件装夹方式如图4所示。

半精加工后,外涵对开机匣的壁厚逐渐变薄,机匣基体壁厚1.5 mm,加工中极易产生变形,需设计制造专用夹具进行辅助支撑内型面来加工外型面,减少加工过程中产生的变形。在工序“精铣外型及钻安装边孔”和“钻铣径向多个安装座孔”中设计共用的铣削夹具进行装夹加工,铣削夹具结构及零件装夹方式如图5所示。

2.3 刀具的选择及工艺参数拟定

从对开机匣的机加工工艺流程图来

表1 加工设备
Table 1 Machining equipment

设备类型	设备型号	厂家	优势
数控车床	CH5116B	武汉重型机床厂	机床刚度高,运行稳定
	VTL1600ATC	台湾油机	
	VL-125C	台湾荣田精机	
数控线切割机	DK77100	南昌江南电子仪器厂	切割精度高,可切割零件尺寸大
	HCKX630C	陕西汉川机床厂	
四轴加工中心	THM63120IV	四川普什宁江机床有限公司	具有良好刚度与精度,能同时满足机匣外型面各种复杂特征的成形加工
五轴加工中心	DMU125P、DMU160P	德国 DEMAGE	
		AC28 TMY 2500	意大利 PIETROCARNAGHI

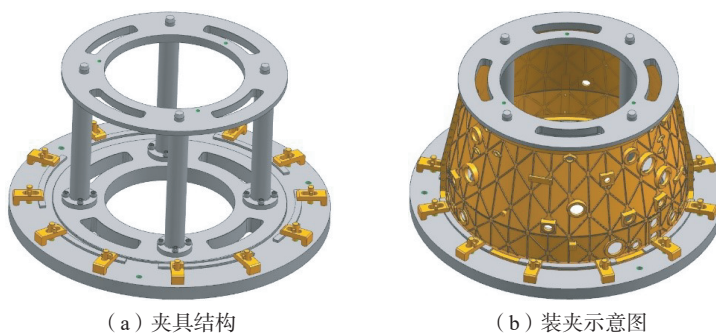


图3 真空热处理夹具结构及装夹示意图

Fig.3 Vacuum heat treatment fixture structure and clamping diagram

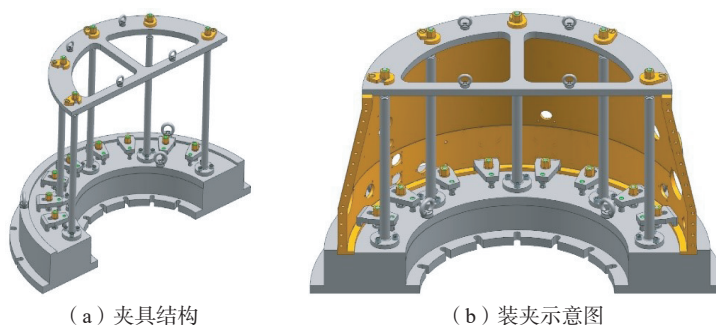


图4 结合面铣削夹具结构及装夹示意图

Fig.4 Joint surface milling fixture structure and clamping diagram

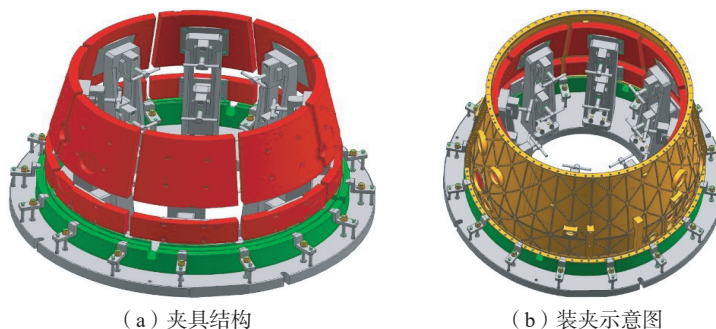


图5 外型面铣削夹具结构及装夹示意图

Fig.5 External surface milling fixture structure and clamping diagram

看,零件的加工方式有车削加工和铣削加工,不同工序的车削和铣削就需要不同的车刀和钻铣刀具来进行加工。

(1) 车削加工刀具的选择^[15]。

粗加工,为保证大切深进给,多选用 80° R0.8 mm 的机夹车刀;精加工,考虑零件结构特殊、刚性差、表面质量要求高等制约因素,优先采用 35° 的机夹车刀加工,刀具选择具体清单如表 2 所示。

(2) 钻铰铣削加工刀具的选择^[15]。

对开机匣外型面轮廓分布有安装座、减重型槽、加强筋等凸台特性,因此铣削加工中必然使用种类繁多的铣削刀具,必要时还需要直径较小的硬质合金铣刀来对型面轮廓的底部进行清根,保证零件表面圆滑转接。各个铣削加工阶段所用刀具清单如表 3 所示。

分布于纵向安装边上的精密定位孔和螺栓在连接时,采用专用测量具

“4B022/S19-003, $\Phi 8 (+0.015/0)$ 塞规”和“4B022/S18-390, $\Phi 8.5 (+0.15/0)$ 塞规”进行测量,判断合格后继续进行后续孔位的加工。专用刀具和测量具的使用,使孔的尺寸精度得以保证,从而保证两半对开机匣连接的装配精度。

综合考虑零件的材料、结构及加工精度,结合实际加工经验及所使用刀具推荐参数,面轮廓的铣削转速 1000~1500 r/min、进给率 100~200 mm/min; 钻铰孔转速 500~800 r/min、进给率为 50 mm/min。钛合金材料在车削加工和铣削加工过程中都需要合理地浇注冷却液,冷却液可以带走加工中产生的热量,防止刀具与钛合金在接触面产生硬化层,同时冷却液可以将金属屑冲走,防止积屑瘤堆积影响加工质量(切削液牌号为 CIMPERIAL[®] 和 8100 (CF))。

表 2 车削加工刀具选择
Table 2 Turning tool selection

加工阶段	刀具型号	角度 / (°)	刀尖圆角半径 R/mm	刃数
粗车	CNMG120408MS KC5510 (肯纳)	80	R0.8	4
	CNMG120408-GJ VP10RT (三菱)	80	R0.8	4
精车	CNMG120408MS KC5510 (肯纳)	80	R0.8	4
	VCMT1600408-PF4 WSM10 (瓦尔特)	35	R0.8	2
	VNMG1600408-MJ VP10RT (三菱)	35	R0.8	4

表 3 铣削加工刀具选择
Table 3 Milling tool selection

加工阶段	刀具直径 Φ /mm	刀尖圆角半径 R/mm	刀具类型	备注
粗铣	8~50	R0.5~6	立铣刀、盘铣刀	—
半精铣				—
精铣纵向安装边和结合面	50	R0.8	盘铣刀	—
	80	R6	盘铣刀	—
精铣外型轮廓	6	R3	球头铣刀	—
	8~50	R0.5~6	立铣刀、盘铣刀	—
纵向安装边定位孔、螺栓连接孔	7.7	—	合金钻头	4B101/S19-1C-001
	8	—	铰铰刀	4B121/S19-1C-001
	8.4	—	通用合金钻头	—
	8.58	—	铰铰刀	F151/S18-1C-078

3 数控加工工艺设计与实际加工验证

在数控加工中,数控程序的编制直接影响到加工的效率和质量,因此,编制合理的加工程序非常重要。在数控程序的编制过程中,如何划分加工区域、选择走刀路线、选择合理的刀具和切削参数等会直接影响到所编程序的质量。结合对开机匣的结构特点,按不同工序的尺寸要求进行以下第 3 节中描述的相关的准备。由于对开机匣内型面车削特征相对比较简单,因此主要针对对开机匣外型面的铣削加工过程进行描述。

3.1 加工区域的划分

对开机匣外型面可以分为若干级腔槽,在每级腔槽内分布有形式各异的安装座、凸台和减重筋板槽等,因此,在实际加工中必须划分合理的加工区域,对实现零件的高效铣削及保证零件的加工质量至关重要^[16]。在粗铣加工中,此零件从整体上看属于锥体机匣,为了在粗铣中尽可能利用较大的铣削刀具,切除较大的余量,通过仔细分析零件的特点,将零件划分为 3 个加工区域(1、2、3),如图 6 所示。在精铣加工中,根据零件特点,把零件的加工细分为各级腔槽、各级腔槽内的筋板、安装座、凸台和纵向安装边 5 大区域,然后各个区域再具体细化,采取不同的对策分别进行加工。

3.2 铣削方法的制定和刀具轨迹的生成

对开机匣外型面结构复杂,在加工中需根据不同的加工部位采用多种铣削方式相结合的加工方法。粗铣加工过程中,针对零件毛料余量大、不均匀的特点,采用插铣、轴向铣削、动态铣削等方法进行铣前加工。由于对开机匣外型面安装座、加强筋、减重型槽等凸台呈罗棋布,在部分切削区域刀具运行空间较狭小,采用插铣的方法更适合,这种方法一次切深较大,每次切深 2~5 mm,单位时间内材料

的切除率较大,比较适用于狭小空间、大余量的粗加工。刀具轨迹生成采用 SURFACE 驱动,加工点扎刀的地方预先加入钻孔点,预先去除局部被加工材料,使得 SURFACE 驱动后的大部分外型轮廓可以顺利进行加工。

在精铣加工过程中,对各个腔槽的加工主要采用轴向铣削方法,这种方法在加工中零件径向受力小,可以减少零件的变形,并且可以保证零件表面的质量。在加强筋、安装座及凸台的加工中充分采用 NX/CAM 软件的功能,利用固定轴加工、变轴加工等多种方法,生成各种不同的加工路线以完成对零件的精加工。针对各种安装座、凸台采用边界驱动方式,此方式可以用制定的边界和内环来定义切削区域,能跟随复杂表面轮廓进行零件的精加工。相关工序及加工方式如表 4 所示。第 1 步对机匣外型面进行粗铣,加工方式为插铣和动态铣削相结合,沿轴向进刀,具体刀路轨迹如图 7 所示;第 2 步对安装边结合面进行铣削精加工,沿轴向进

刀,如图 8 所示;第 3 步对外型面进行铣削精加工,刀路轨迹如图 9 所示;最后对安装边安装孔进行钻铰加工,刀路轨迹如图 10 所示。

3.3 加工模拟仿真

为了保证程序的可加工性,减少实际试制时间,避免零件报废,将生成的加工程序利用仿真软件 Vericut 进行预先的模拟仿真^[17]。通过模拟仿真可对程序进行分析,在加工中发现是否有过切和撞刀现象,特别是刀具轴变化有特殊要求,旋转角度有限的程序,均可通过模拟仿真确保刀具轴变化平稳过渡,对于模拟仿真结果不理想的程序,则可返回加工模块对加工方式、参数等进行修改,直至模拟仿真结果符合加工要求。模拟仿真示意图如图 11 所示。

3.4 加工工艺验证

在对加工刀路轨迹进行仿真优化的基础上,按照第 2 节所述工艺方案及工艺流程,开展外涵道对机匣零件实际加工工艺验证。纵向结合面实际加工情况如图 12 (a)所示,可

见结合面贴合紧密,且得益于加工过程中对上下端面的同时装夹,在提升零件刚度的同时降低了加工过程中的振动,因此更大的加工参数得以使用,有效提升了加工效率。外型面实际加工情况如图 12 (b)所示,同样由于在外型面铣削过程中采用贴合内型面的内撑工装,有效抑制了薄壁

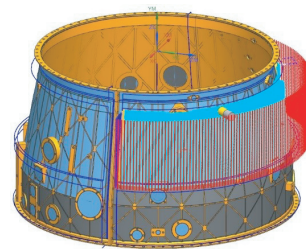


图 7 粗铣外型面刀路轨迹示意图
Fig.7 Schematic diagram of tool path of rough milling profile

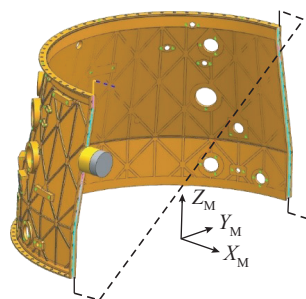


图 8 精铣纵向安装边结合面和刀具轨迹示意图
Fig.8 Finish milling longitudinal mounting edge joint surface and schematic diagram of tool path

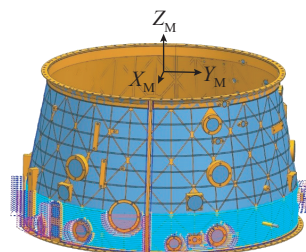


图 9 精铣外型面刀路轨迹示意图
Fig.9 Schematic diagram of tool path of finish milling profile



图 10 纵向安装边铣削、钻铰孔和刀路轨迹示意图
Fig.10 Schematic diagram of longitudinal mounting edge milling, drilling and reaming and tool path

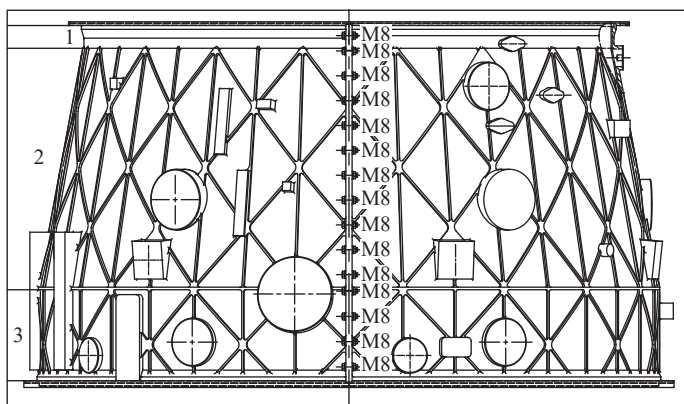


图 6 粗铣加工区域示意图
Fig.6 Schematic diagram of rough milling area

表 4 不同工序铣削方式
Table 4 Milling methods of different processes

顺序	工序	铣削方式
1	粗铣外型	插铣、轴向铣削、动态铣削
2	精铣纵向安装边结合面	轴向铣削
3	精铣外型	插铣、轴向铣削、动态铣削
4	钻安装边孔	整体钻通孔和铰通孔

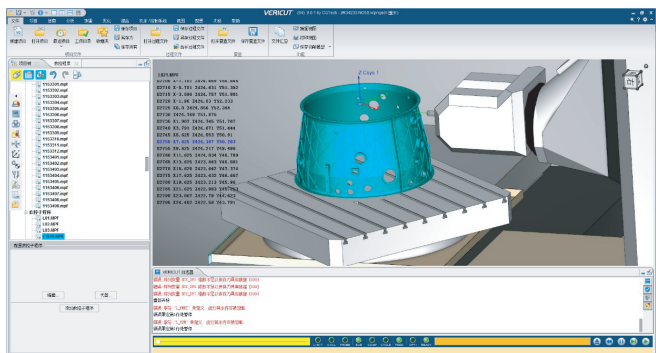
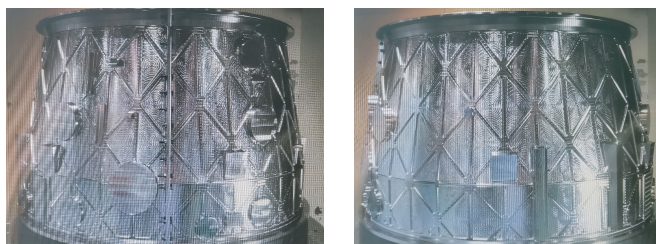


图 11 Vericut 模拟仿真

Fig.11 Vericut simulation



(a) 结合面

(b) 外型面

图 12 两种面的实际加工情况

Fig.12 Machining results of two kinds of surface

零件加工过程中的让刀变形,提升了加工精度与加工效率。经测量,工艺优化后的加工精度得到了提升,其中端面跳动控制在 0.015 mm 以内,径向跳动控制在 0.03 mm 以内,本文提出的工艺方案与工艺流程得以验证。

4 结论

通过对零件材料和零件结构分析,对加工难点进行总结,围绕设备选择、夹具设计、刀具选择及工艺参数设定几方面的研究,重点关注外型面特征的铣削加工并进行刀路模拟仿真。最终有效减小了零件加工变形,获得外涵对开机匣的精密高效加工方法,为大型薄壁对开机匣零件的加工提供了一定经验。

(1) 钛合金对开机匣具有材料难加工,外型面特征复杂等特点。通过对对开机匣材料及结构特点的分析,总结出对开机匣具有特征精度要求高、薄壁弱刚性等加工难点,易造成尺寸超差、位置超差、让刀变形及装夹变形等问题。

(2) 针对关键工序“纵向安装边

结合面铣削”开发专用工装夹具,该夹具通过对机匣大端和小端的约束,抑制结合面加工过程中的振动,提升刚度,有效保证了结合面表面质量和相关密接度,同时提升加工效率。针对关键工序“机匣外型面铣削”开发专用工装夹具,该内撑工装在加工过程中同时对机匣大端和小端进行支撑,抑制加工过程中的让刀变形,同时可以减小加工振动,避免零件尺寸超差,有效提升了零件精度与加工效率。

(3) 根据对开机匣加工工艺路线流程图分析得到加工过程主要包括车削、钻削、铣削及线切割,根据各工序加工要求选择高精度、高稳定性的数控设备。根据实际生产经验及刀具推荐参数确定加工过程中的工艺参数。

(4) 重点关注机匣外型面铣削,根据外型面复杂特征实现其加工区域的划分,完成不同工序铣削方式及数控走刀路线的确定。最终对切削过程进行模拟仿真,采用仿真软件 Vericut 进行预先加工仿真,在加工中及早发现是否有过切和撞刀现象,

避免实际加工中遇到问题,造成不可挽回的损失并获得了完备细化的加工工艺流程。

(5) 开展对开机匣加工制造,对加工工艺进行验证。经测量,对开机匣整体端面跳动控制在 0.015 mm,径向跳动控制在 0.03 mm,纵向结合面贴合紧密。试验结果表明,由于纵向结合面铣削专用夹具、外型面铣削专用夹具等专用夹具的使用及工艺方案的优化,加工变形得到抑制,加工效率与加工精度得到显著提升。

参考文献

- [1] 段林升. 航空发动机机匣切削加工参数优化研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2022.
DUAN Linsheng. Research on optimization of machining parameters of aeroengine casing[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2022.
- [2] 李忠群, 党剑涛, 刘学, 等. 航空机匣工件车削加工变形预测及切削参数优化研究[J]. 制造技术与机床, 2020(2): 107-111.
LI Zhongqun, DANG Jiantao, LIU Xue, et al. Prediction of turning deformation and optimization of cutting parameters for aircraft case parts[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2020(2): 107-111.
- [3] 张韬. 低压涡轮机匣应力分析与工艺改进[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
ZHANG Tao. Stress analysis and process improvement of low pressure turbine case[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [4] 高志坤, 迟庆新, 卜嘉利. 某涡轮后机匣裂纹失效机理分析[J]. 航空发动机, 2018, 44(6): 6-10.
GAO Zhikun, CHI Qingxin, BU Jiali. Study on the crack failure mechanism of a turbine rear casing[J]. Aeroengine, 2018, 44(6): 6-10.
- [5] GUO L, YANG F, LI T, et al. Vibration suppression of aeroengine casing during milling[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 113(1): 295-307.
- [6] 王晶, 罗明, 吴宝海, 等. 航空发动机机匣摆线粗加工轨迹规划方法[J]. 航空学报, 2018, 39(6): 421814.
WANG Jing, LUO Ming, WU Baohai, et al. A trochoidal path planning method for rough machining of aeroengine casing parts[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(6): 421814.
- [7] 孙玉民, 捧跃伟, 王丽花. 某延伸

机匣铣车复合加工工艺研究[J]. 制造技术与机床, 2015(11): 153-155.

SUN Yumin, FENG Yuewei, WANG Lihua. Explortion of milling-turning composite processing on some extending casing[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2015(11): 153-155.

[8] 徐金梅, 师俊东, 王传滨, 等. 大型薄壁铝合金机匣外环加工工艺[J]. 航空制造技术, 2014, 57(4): 92-93.

XU Jinmei, SHI Jundong, WANG Chuanbin, et al. Processing technology of large thin-walled aluminum alloy casing outer ring[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2014, 57(4): 92-93.

[9] 任军学, 龚仔华, 田荣鑫, 等. 航空发动机机匣五轴插铣加工[J]. 航空制造技术, 2013, 56(9): 58-61.

REN Junxue, GONG Zihua, TIAN Rongxin, et al. 5-axis plunge milling of aeroengine case[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 56(9): 58-61.

[10] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册: 第4卷, 钛合金、铜合金[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.

Editorial Committee of China Aviation Materials Manual. China aviation materials

manual: Volume 4, titanium alloy and copper alloy[M]. Beijing: Standards Press of China, 2001.

[11] 赵树萍, 吕双坤, 郝文杰. 钛合金及其表面处理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.

ZHAO Shuping, LÜ Shuangkun, HAO Wenjie. Titanium alloy and its surface treatment[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2003.

[12] 隋楠, 曹京霞, 黄旭, 等. 合金成分对TA15钛合金组织及力学性能的影响[J]. 航空材料学报, 2019, 39(1): 48-54.

SUI Nan, CAO Jingxia, HUANG Xu, et al. Effect of composition on microstructure and mechanical properties of TA15 titanium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(1): 48-54.

[13] 吴广东. TA15钛合金结构件高效铣削解决方案研究[J]. 工具技术, 2015, 49(1): 58-60.

WU Guangdong. Research on efficient milling solution of TA15 titanium alloy structural parts[J]. Tool Engineering, 2015, 49(1): 58-60.

[14] 陈亚莉, 韩永武, 吴铁石, 等. 对开机匣结合面加工方案研究[J]. 中国新技术新产品, 2018(22): 70-71.

CHEN Yali, HAN Yongwu, WU Tieshi, et

al. Research on machining scheme of connecting surface of starter box[J]. New Technology & New Products of China, 2018(22): 70-71.

[15] 范忠仁, 陈世忠. 刀具工程师手册[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 1985.

FAN Zhongren, CHEN Shizhong. Tool engineer's manual[M]. Harbin: Heilongjiang Science and Technology Press, 1985.

[16] 胡晓群, 叶红雨, 冯湛. 航空发动机对开机匣高效数控铣加工技术应用研究[C]// 第三届沈阳科学学术年会论文集. 沈阳: 沈阳市科学技术协会, 2006: 300-304.

HU Xiaoqun, YE Hongyu, FENG Zhan. Research on the application of High Efficiency NC milling technology for aero-engine pair box[C]// Proceedings of the 3rd Shenyang Annual Conference on Science. Shenyang: Shenyang Association for Science and Technology, 2006: 300-304.

[17] 黄雪梅. VERICUT 数控仿真实例教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.

HUANG Xuemei. VERICUT numerical control simulation example course[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.

通讯作者: 孙剑飞, 副教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为加工变形控制、难加工材料切削加工等。

Research on High-Effect and Precise Machining Technology of Bypass Duct Split Casing

ZHANG Shigui¹, ZHANG Shengwei¹, CHEN Pengfei¹, WANG Can¹, WANG Yuhang², WANG Guoming², SUN Jianfei^{2,3}

(1. AECC Chengdu Engine Co., Ltd., Chengdu 610503, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, BUAA, Beijing 100191, China;

3. Jingdezhen Research Institute of Beihang University, Jingdezhen 333032, China)

[ABSTRACT] The machining quality of the casing is very important to the manufacturing and performance of the aero-engine. Due to the split structure, the machining process of the split casing is complicated and the machining quality is difficult to control. In this work, the two optimization indexes of high-precision and high-efficiency are taken as the focus to study the processing flow of the bypass duct split casing. Combined with the material characteristics and structural characteristics, the processing difficulties of the titanium alloy split casing are summarized and analyzed. The process scheme is designed for the key processing difficulties, including the selection of high-precision processing equipment, the selection of tooling fixtures in each process, the selection of tools and the setting of process parameters. On this basis, the milling process of the casing outer surface with complex features is focused on, and the processing area is divided to complete the determination of different milling methods and CNC tool paths. Finally, the cutting process was simulated and a complete and detailed machining process was obtained. Through the actual parts processing verification, the optimized process has improved the processing accuracy and processing efficiency. In this work, the research is carried out from the aspects of process route and cutting parameters, which effectively reduces the machining deformation of the parts, obtains the precise and efficient machining method of the bypass duct split casing processing, and provides some experience for the processing of large annular thin-walled parts.

Keywords: Titanium alloy; Fixture; Tool; Bypass duct split casing; NC machining

(责编 晓月)