

Discussion on Machining Deformation and Control of Aero-engine Casing Parts

Jian Liu Lisha Liu

China Hangfa Guizhou Liyang Aviation Power Co., Ltd., Guiyang, Guizhou, 550014, China

Abstract

The engine can provide huge thrust and push the aircraft forward, which is the core power of the aircraft. As one of the key parts of the engine, the casing is used to bear the load and inertia force generated when the engine is running, and its design and processing are of great significance to improve the performance of the aero-engine. At present, the casing of aero-engine mostly adopts integral thin-walled rotating structure to meet the requirements of the engine. The casing is prone to deformation during cutting, which will directly affect its processing quality. By analyzing the causes of machining deformation of aircraft engine casing, the methods to solve these problems are summarized to ensure the quality of aircraft engine.

Keywords

aero-engine; case parts; machining deformation; control

航空发动机机匣零件加工变形与控制探讨

刘健 刘丽莎

中国航发贵州黎阳航空动力有限公司, 中国·贵州 贵阳 550014

摘要

发动机能提供巨大的推力, 推动飞行器向前飞行, 是飞行器的核心动力。机匣作为发动机的关键零件之一, 其作用是承载发动机运行时所产生的载荷和惯性力, 其设计与加工对提升航空发动机的性能具有重大意义。目前, 航空发动机的机匣大多采用整体式薄壁旋转结构, 以满足发动机的要求。机匣在切削过程中容易发生变形, 这将直接影响到其加工质量。通过对飞机发动机机匣加工变形的原因进行分析, 并归纳出了解决这些问题的方法, 以保证飞机发动机的质量。

关键词

航空发动机; 机匣零件; 加工变形; 控制

1 引言

航空发动机的机匣由多个结构各异、功能各异的零件组成, 其加工变形和焊接变形是决定其质量的重要因素。由于功能上的需求, 使得航空发动机的机匣呈薄壁结构, 尤其是随着高功率航空发动机的日益增长, 大口径航空发动机机匣已经成为主流。整体薄壁旋转结构是航空发动机机匣的主要设计形式。航空发动机机匣采用高温合金和钛合金等材料, 这些合金具有较高的硬度, 使其制造困难, 特别是在加工过程中易发生变形, 直接影响到飞机发动机机匣的加工质量。

2 航空发动机机匣

随着中国航空工业的发展, 各种发动机零部件的制造加工已经成为重要的技术课题。航空发动机的机匣, 是制造

技术的难点与关键, 采用数字控制技术, 确保其精确、科学地应用于航空发动机。机匣是航空发动机的关键零件, 是整机的基础, 也是发动机的主要承载件, 其构型十分复杂, 不同发动机、发动机的不同部分具有不同的机匣形态, 由其功能所决定, 但它们的共同特点是由圆柱形或锥形壳与支撑板构成的构件。

3 航空发动机机匣制造技术难点分析

3.1 机匣结构

航空发动机机匣形状复杂, 型腔周边存在大量特征岛屿、凸台、孔穴、沟槽、筋条等, 且壁厚较大, 制造技术难度大。对于环形机匣, 其毛坯的制造方式有锻坯、铸造坯和焊坯, 其材料切除率可达 70%, 其结构通常由内、外两个部分组成, 其中以涡轮叶片的承载部位为主, 所以对其加工品质有极高的要求, 可实现 ± 0.02 mm 的高精度加工。与机匣外侧相连的引擎配件系统, 包括油路系统、冷却系统和控制系统、管路和泵体等。由于零件形状复杂, 加工要求高, 特别是定位精度要求较高, 所以对每个零件都要采取不同的

【作者简介】刘健 (1975-), 女, 中国安徽滁州人, 本科, 高级工程师, 从事航空发动机加工技术研究。

加工方式。在发动机的前部安装侧、前槽等部位,沿其轴线方向有许多孔系,孔所在的位置壁厚、孔深小、加工时容易发生变形。前装配面作为机匣的设计参考,也是制造技术的重要参考,这就使得孔系在尺寸、定位等方面都达到了极高的要求。此外,沿其轴向与燃烧室相连的机匣尾部,不仅存在复杂的孔系,而且沿机匣加强筋处还存在大量排出孔,这类孔通常与发动机轴心呈一定夹角,此类特殊构型的异形孔制造非常困难。在制造技术方面,由于其结构较为复杂,技术难度较大,且有些机匣为双层结构,如果将其离散化和复合化,将导致二次定位,从而影响其加工一致性。

3.2 材料特性

由于材质的问题,机匣的制造难度主要表现在:不锈钢机匣在加工时,其切削力通常高于45钢25%,且切削温度较高,在加工时极易发生粘着,且在刀具的前刀面上易生成积屑瘤,因材料的塑性与韧性,被加工的表面存在撕裂。采用钛合金的箱体,在切削过程中其切削变形系数约为1,导致其前刀面产生强烈的滑动摩擦,导致刀具磨损加剧,且切削温度较45钢高2倍。因其具有较强的化学活性和较强的亲和力,极易发生表面硬化、粘刀等现象。另外,由于钛合金的弹性模量较低,工件的回弹也会增加后刀面的磨损。由于使用了高温合金材料,其切削力是普通钢材的2~3倍,在使用过程中刀具容易产生扩散、氧化等磨损,且加工硬化问题突出。由于材料热导率较小,切割热量主要集中在刀口处,产生较高的温度。因其高韧性,使其极易成卷屑,且不容易去除。使用镁合金制造的机匣,加工性能比较好,由于切削时产生的碎屑很小,易自燃,并且在加工中产生了严重的氧化。从以上分析可知,由于机匣材质的原因,切削力大、刀具粘刀严重、刀具磨损大、切削温度高,以及受力导致的大变形。

4 机匣变形产生的原因

4.1 装夹力

航空发动机机匣是一类典型的薄壁型结构零件,由于其壁厚,有些机匣厚度仅为数毫米,甚至小于1mm,造成了其刚度偏低,从而使其在切削力、夹紧力、残余应力等因素的作用下易产生变形。航空发动机机匣在装配和安装过程中由于受力不均,会对其产生额外的附加力,从而导致其在加工后产生变形。航空发动机机匣在载荷作用下产生的变形主要集中在薄壁和端面。

4.2 切削力

航空发动机机匣在切削力的作用下,会产生切削力,从而使其发生变形。航空发动机机匣的切削变形多发生在薄壁部位,会造成诸如圆跳量、圆柱度、位置等测量结果的超差。

4.3 残余应力

残余应力是造成航空发动机机匣变形的主要因素之一,在航空发动机的制造过程中切削产生的应力会在机匣中持

续积累,并逐步作用于机匣,造成其变形。

5 机匣变形的防治方法

航空发动机机匣是一种以机加工为主的复杂零件,为了降低其加工变形,需要对其成因进行有效调控,以提高其加工质量。由于航空发动机机匣的加工变形是多因素综合影响的,因此需要通过各种方法对技术及夹具进行优化。例如,某型航空发动机风扇壳外环采用TC4材质,采用整体旋转结构,直径1000mm左右,而环壁厚度仅2mm,这一结构特性导致其在切削时容易受到多个力的作用,从而导致其在切削时产生变形,从而导致加工质量下降。

通过测试与分析,得出了航空发动机风扇机匣在精加工过程中产生的应力松弛,从而引起加工变形的主要原因,经分析认为,经过精整后,由于叶片的约束被解除,重新获得了自由状态,其径向圆跳动的实测值会产生超差,从而造成了直径的超差。

5.1 优选夹持模式

针对航空发动机扇壳的结构特征,一般都是将其两个端面作为加工基准,进行径向和轴向的夹紧,而在对其进行精密加工时,则以其底面为基准,由于其平面度误差的存在,使得其在轴向压缩过程中受到的压力不均匀而产生变形。对航空发动机风扇机匣在夹紧过程中的变形进行了仿真分析,结果表明,由于夹紧不合理,导致了大约0.05mm的变形,这对以后的航空发动机风扇机匣的制造造成了很大的影响,导致了这些误差的叠加。若以航空发动机风扇机壳面为基准,则应尽可能采用径向夹紧法。在航空发动机风扇机匣其他部位的加工过程中必须尽可能采用轴向压缩的方法,以减小因夹紧引起的薄壁变形,从而提升航空发动机风扇机匣的制造精度。

5.2 技术参数的优化

合理地设计和制造技术参数,对于提高航空发动机风扇壳的制造质量具有重要意义。在航空发动机风扇壳的加工中车削方法是目前常用的一种方法。由于粗加工、半精加工等阶段的加工余量较大,加工切削力对风扇机匣的影响相对较小,采用适当的热处理技术,可有效地消除粗、半精加工时的切削应力。在精整阶段,需要对精整期的机械结构进行仿真,在航空发动机风扇机匣的精整过程中增加切削量和进给,并采用低进给和高转速的方法来控制在车削时的车削力,减小车削力对机加工风扇机匣的影响。同时,在切削时应注意冷却,以减少切削热量对机加工风扇壳的影响。

5.3 路线校正

在编制车削技术时,应注重选取合适的技术路线,并根据材料特性对刀具、进给量、车削速度等技术参数进行U型安泽处理,并尽量去除因残余应力而引起的加工变形。至于残余应力,大多集中在被加工面0.3mm以下的部位,在离开被加工表面0.3mm的地方,基本不会有任何的切割应

力,在进行航空发动机风扇机匣的精整过程中应该尽可能地将其切割深度提高到 0.3mm,而在末次切割时,则要降低进给速度,从而确保在精整后的机匣上,残余应力的分布都是均匀的。

6 航空发动机机匣数字控制制造技术研究

为了确保航空发动机机匣的制造质量,必须在许多方面进行控制和改进,以下将对此进行详细的说明。

6.1 建立机匣的 CNC 技术参数模型

在对其进行参数化建模前,首先要对其进行分析,掌握其结构特性,并根据其特点将其划分为不同的零件,从而将具有类似特性的零件归入同一个零件中。其次,在此基础上根据各基础要素间的相关关系或约束,构建各要素间的相关关系,构建各要素间的关联表达及特性分叉。最后,通过对每一要素所对应的基准关系和约束关系进行分析,进而对其进行数字化约束,生成机匣本体特征,并在本体特征上生成额外特征。

6.2 对机匣的数控加工技术方案进行了优选

针对在数控加工中容易产生机匣变形的问题,提出了通过对技术路线和技术参数的优化来实现的方法。第一,对夹具的安装进行控制,通常在毛坯数控加工时,都要留出一定的空间用来做夹具的安装。第二是粗料,这一步的主要目的是清除坯件上的绝大多数残余物,只需根据机匣的轮廓来切割即可,不需要太高的加工精度。第三,对剩余零件进行半精加工,消除因热处理而引起的变形,并对每一块曲面进行最终加工,为最终的精加工打下基础。第四,所有的表面最后处理都要做好,并且要确保所有的零件,尤其是主零件的零件。技术设计应综合考虑技术的精度和效率,并对技术余量进行合理配置。第五,提出了均匀对称的加工余量分配与内部外形对称切割方法,也就是按照工件的余量和走刀次数来调节加工次序,使得内外表面在相同的技术过程中可以实现内外表面的交互加工,直到最后的尺寸。

6.3 机匣加工过程中刀具路径的优化

在设计刀具路径时,要在保证后续铣削加工的余量的情况下,尽量在粗加工过程中消除较多的余量,以达到缩短

加工时间、提高加工效率的目的。比如,对于燃烧室机匣这样的多岛形结构,可以将其插入铣削组合起来。其一,利用凸台周边的等高线切削方法,解决了插铣过程中由于插铣深度差异而导致的刀具磨损加剧的问题,从而实现了高效、低成本的高效切削。以内岛屿为中心,以凸台法向量为刀轴,围绕凸台进行铣削加工。其二,建立高速铣削轨迹引入的机匣特征建模方法,以机匣为检测表面,在不干扰的条件下,产生最大的余量去除和最大效率的高速铣削切削方案,实现对凸台处的根部清理。在机匣外轮廓精铣时,已经铣掉了机匣上凸起周边的精铣和清理根部的外圆周表面,仅留下了 2mm 的凸起侧面余量,并采用了与凸起定面法线相同的定刀方法,实现了两次环切。为了确保插切过程的平滑性,各凸台的精铣加工都采用了圆弧进、退两种方法。利用轮廓—凸台组合铣削的方法,将凸台周边的外圆与型面铣削集成为型面铣削,在生成刀具路径的同时,降低了加工次数,提高了加工效率。对不依赖凸台的肋条和相邻轮缘面片间的过渡圆角,一般都是用四坐标铣削加工。在存在干涉的情况下,利用机匣曲面上的刀位偏差面,对刀具路径进行剪裁,在保持无干扰的前提下,形成了一种旋转面铣削加工程序。

7 结语

航空发动机机匣是具有高精度和特殊材质的薄壁件,其制造技术要求高,制造困难,品质不稳定。航空发动机机匣的制造是一个系统而又复杂的工作,为了进一步提高其制造质量,有必要研究航空发动机机匣的数控制造技术,以确保其质量。由于航空发动机机匣属于薄壁结构,在加工过程中容易受外部因素的影响,必须根据变形的成因,采取有针对性的控制方法,从而实现对其变形量的控制,从而提升机匣加工质量。

参考文献

- [1] 张志革,王敏丰.航空发动机机匣机械加工过程中变形因素分析及变形控制[J].中国设备工程,2020(15).
- [2] 毕超,张超,徐昌语.机匣类零件几何变形测量方法的研究与探索[J].航空精密制造技术,2022(1).
- [3] 谭毅,杨书仪,左建华,等.面向包容性的航空发动机机匣研究综述[J].航空工程进展,2022(6).