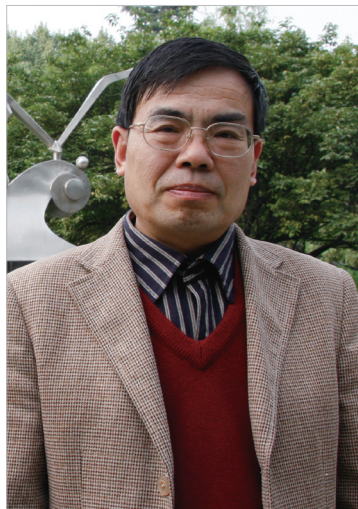


# 航空发动机整体叶盘 加工技术

## Machining Technology of Aeroengine Blisk

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 王增强



王增强

西北工业大学研究员,航空发动机 CAD/CAM 研究所副所长,现代设计与集成制造技术教育部重点实验室副主任。长期从事航空发动机整体叶盘五坐标数控加工技术、叶片无余量高效数控加工技术、涡轮叶片精铸模具 CAD/CAM 技术以及航空发动机信息化技术的研究与应用。获国家科技进步二等奖 1 项,部级科技进步一等奖 2 项、二等奖 2 项,发表学术论文 30 余篇。

整体叶盘技术是新一代航空发动机实现结构创新与技术跨越的核心技术之一。与传统结构相比,整体叶盘将叶片和轮盘设计为一体,具有减重、减级、增效和提高可靠性等优

整体叶盘制造技术的推广应用不仅可提升新型航空发动机的性能和水平,同时可带动材料工艺技术、锻件制备技术、机械制造和特种制造技术、发动机零件修复技术、表面光饰、表面完整性技术、相应检测技术和重大装备制造技术等技术水平的发展和提高。

点,美英等航空强国在 20 世纪 80 年代中期的新型发动机上开始应用整体叶盘技术,我国整体叶盘技术起步于 20 世纪 90 年代中期。由于整体叶盘结构复杂,通道窄、叶片薄、弯扭大、易变形,材料多为钛合金等难切削材料,工艺实现性差,所以国外对我国整体叶盘制造技术至今还未开放。整体叶盘制造技术的推广应用不仅可提升新型航空发动机的性能和水平,同时可带动材料工艺技术、锻件制备技术、机械制造和特种制造技术、发动机零件修复技术、表面光饰、表面完整性技术、相应检测技术和重大装备制造技术等技术水平的发展和提高。我国航空企业在整体叶盘制造中走过一些弯路,也积累了一定的经验,作者通过观察、分析和总结,现就整体叶盘的制造方法提出自己的见解,供大家共同讨论和交流。

### 整体叶盘的结构与演变

在传统的航空发动机上,压气机及风扇转子是由轮盘和叶片组装而成,其转子叶片的叶根部位设计制造成榫头,将榫头装于轮盘轮缘的榫槽中,再用锁紧装置将叶片锁定于轮盘中。20 世纪 80 年代中期,在航空发动机结构设计方面,出现了一种称之为“整体叶盘”或简称“叶盘”(Blisk)的结构,Blisk(整体叶盘)是由 blade(叶片)的前 2 个字母与 disk(轮盘)的后 3 个字母组合在一起形成的 1 个新词,它较形象地表达了这种结构的特点,即它是一种合二(叶片、轮盘)为一(叶盘)的结构。整体叶盘结构将转子叶片和轮盘制成一体,省去了连接用的榫头、榫槽,使结构大大紧凑。

追溯整体叶盘的发展,早在 20 世纪 60 年代,国外一些短寿命的小

型发动机转子设计和制造上采用了整体叶盘结构,当时不称作整体叶盘,而称作“整体转子”;随后,在涡轴发动机、民用的压缩机、离心机、膨胀机上也陆续使用了叶轮转子,称为整体叶轮,船用推进器也采用了整体叶盘结构。

从整体转子、整体叶轮和整体叶盘技术的研究和应用以来,整体叶盘的结构不断发展,从最初的盘片一体发展到盘片鼓一体、盘片轴一体、盘片鼓轴一体到两级或多级叶盘固态串接的串列式整体叶盘;整体叶盘的功能结构从最初的轴流叶盘、离心叶轮发展到轴流叶盘、离心叶轮、大小叶片结构叶盘、斜流转子叶盘、带箍闭式叶盘及整流器静子叶盘等结构。在涡轴发动机和小尺寸涡喷、涡扇发动机采用精密铸造工艺也实现了涡轮转子和静子的铸造整体叶盘。叶盘毛坯的制造工艺从单纯的自由锻造饼坯,到近净成型等温锻造毛坯、线性摩擦焊接叶盘毛坯和线性摩擦焊接空心叶片整体叶盘毛坯。

## 整体叶盘的制造工艺过程

国内外,由于制造设备和条件不同,整体叶盘的加工工艺有所差异,但制造工艺过程基本上按照以下9个阶段开展加工、检查和保护工作(图1)。

### 1 毛坯锻造阶段

毛坯制造阶段完成的工作为:(1)准确理解叶盘设计图纸的技术要求、所选材料、材料标准和锻造标准;(2)确定锻造企业,充分调研锻造企业的设备条件、技术人员水平、同类锻件锻造经验情况和相关认证资质的符合性,沟通叶盘毛坯的锻造标准,在可确保能实现锻件质量的前提下,按照进度和价格优先的原则确定锻造企业;(3)签订《锻件专项技术协议》,明确毛坯复检阶段的锻件及取样方法;(4)会签叶盘锻件图。

毛坯锻造分自由锻造、模锻、等

温模锻和线性摩擦焊等方法制造锻件,小型叶盘毛坯通常使用自由锻造方法制作;大型钛合金叶盘毛坯采用等温模锻制作;空心叶盘毛坯采用线性摩擦焊方法制作。

由于叶盘运转工况的不同,铝合金、不锈钢、TC4、TC11、TC17和GH4169等均在航空发动机整体叶盘设计制造中得到使用。毛坯锻造阶段的成果为叶盘毛坯、毛坯备件、复检用坯、《专项技术协议》、锻件图和锻件合格证。

### 2 材料(锻件)复检阶段

毛坯复检阶段依据锻造设计图纸、技术要求、技术要求上规定的复检标准和《锻件专项技术协议》,选取有材料复检资质的第二家单位进行相关材料力学性能复检、锻件内部组织结构检查。按照《锻件专项技术协议》确定的取样方法加工复检用试样。锻件组织结构检测方法有超声波探伤检查、水浸探伤检查、磁粉检查等,此阶段的成果为力学性能复检证明、锻件组织结构复检合格证。

### 3 加工制造阶段

加工制造阶段是整体叶盘制造

的核心工作内容,整体叶盘设计规定的几乎全部几何尺寸须在加工制造阶段进行加工,目前整体叶盘加工的工艺方法主要有以下5项。

(1)失蜡精密铸造整体叶盘。小型航空发动机,特别是涡轴发动机的燃气涡轮、动力涡轮整体叶盘及其整体导向器均采用失蜡精密铸造工艺铸造叶盘。

(2)锻件机械加工整体叶盘。采用五座标数控加工中心,将整体叶盘转子锻坯铣削加工成整体叶盘转子零件,这是国内航空发动机整体叶盘制造研究最早,应用最广,技术较为成熟的制造方法。国外早期制造叶片数较少的小型整体叶盘如T700发动机叶盘较多采用此方法制造叶盘。现在大直径、叶片数多的整体叶盘,如罗罗公司的BR715的风扇后两级增压压气机,EJ200中的两种整体叶盘也使用了这种加工方法加工。

(3)电子束焊接整体叶盘。叶片与轮盘分别加工好后,将一个个叶片用电子束焊接法焊到轮盘的轮缘上。普惠公司PT6三级轴流转子叶盘均用电子束焊接加工成型。

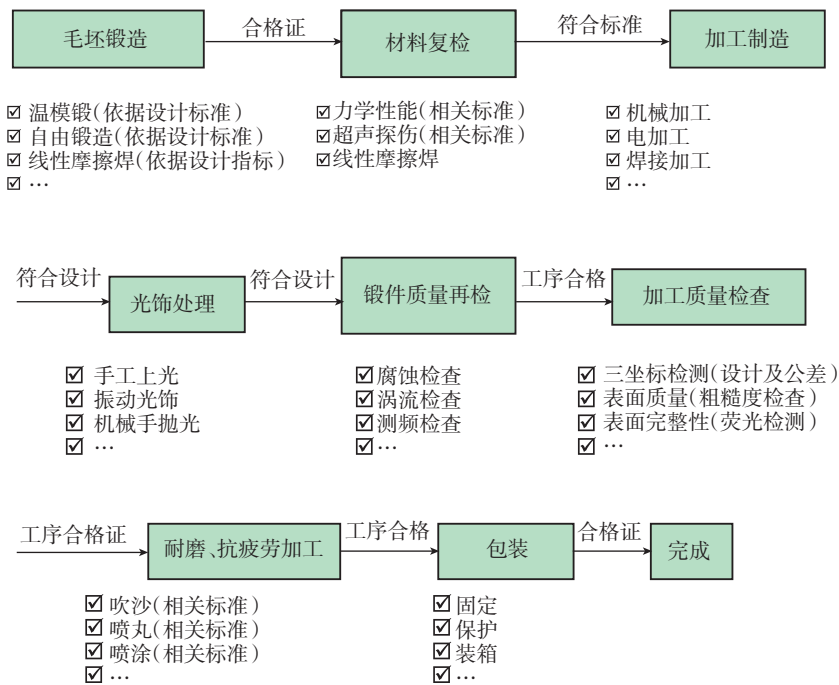


图1 整体叶盘加工工艺过程

(4) 电化学加工整体叶盘。电化学加工实质上是一种反电镀过程,将浸泡在电解液槽中的叶盘锻件毛坯与电源的正极连接,类似电镀时的阳极,将先期加工的叶型形状的工具与电源负极连接,类似电镀时的阴极,电源接通后,工件表面的材料逐渐被溶解形成所要求的型面(型面由处于阴极的工具型面来保证),从工件上被溶解掉的材料,被电解槽中高速流动的电解液带走。用电化学加工方法加工整体叶盘比用五坐标数控铣床加工叶盘,加工时间大大缩短、特别对于大风扇整体叶盘,由于要从工件上去除掉大量材料,使用此方法效果更好;同时也避免叶片在铣削加工中由于大量切削材料产生的残余应力。GE 公司自 1985 年开发了这种加工方法,并先后用于 T700、F414、F110-GE-129R 等发动机整体叶盘加工。

(5) 线性摩擦焊整体叶盘。这是一种新的固态连接技术,它类似于扩散连接,即将两个清洁的轮盘和叶片结合表面处于高压与高温下,这样在两件材料的结合面间形成了原子的相互转移,最终使轮盘和叶片紧密连接成一体。在扩散连接中连接的工件在高温炉中使整个工件加热到高温,而在线性摩擦焊过程中,工件的高温是通过两结合面间的高速互动摩擦产生的。F119 第一级空心风扇叶片采用这种焊接方法焊到轮盘上。

在加工制造阶段,值得密切关注的问题是必须采取真空热稳定化处理方法消除加工阶段产生的残余应力及其叶片的加工变形,真空热处理的温度及其加温和冷却的时间与处理叶盘的材料和规格有关。

#### 4 光饰处理阶段

光饰处理是为满足整体叶盘粗糙度设计而开展的加工任务,主要是对叶盘叶型表面进行上光处理,消除加工刀痕或走刀轨迹的反光现象,同

时也可提高叶片型面的压应力。目前采用的主要方法有手工上光,手工预上光,振动光饰,机械手抛光等方法。图 2 为五坐标机械手抛光机抛光叶盘零件。



图2 五坐标机械手抛光机抛光叶盘零件

#### 5 锻件质量再检查阶段

锻件质量再检查是在叶片型面还未达到精加工状态时,采用腐蚀检查、涡流检查等方法检查锻件的内部(整体叶盘叶片表面和次表面)质量。这一阶段将给出相应的过程检测报告。

#### 6 加工质量检查阶段

加工质量检查的主要工作为:(1)用三坐标测量机(目前使用最广泛)检查叶盘的加工几何尺寸是否满足设计要求,其依据为叶盘设计图纸、公差和叶盘零件模型,出具叶片型面检测报告、相关几何尺寸报告和装配尺寸实测值报告;(2)用荧光检查方法检查零件表面是否存在缺陷,并出具检查报告;(3)对叶片的固有振动频率进行检测,出具规定叶片固有振动频率的实测报告;(4)用粗糙度检查设备检查叶片型面是否满足设计图纸规定的粗糙度要求;(6)加工表面残余应力检测,一般认为:叶片表面的残余应力越小加工质量越好,压应力比拉应力好。

#### 7 耐磨、抗疲劳加工阶段

此阶段工作的主要任务是增加叶盘在工作状态下相关部位的耐磨能力和叶片的抗疲劳性能。主要方法为喷涂、喷丸湿吹砂和激光强化等。

#### 8 包装阶段

包装阶段是叶盘制造中非常重要但常常被忽视的工作内容,其主要包括叶盘零件在叶盘包装箱中固定、保护和封装等工作内容,根据叶盘的尺寸和重量制作叶盘的包装箱。

#### 9 完成叶盘制造交付

本阶段依据设计图纸、各个阶段的质量文件、过程检查记录,开具零件合格证,按照要求归档全部质量文件、过程记录和流水卡等。

### 整体叶盘 NC 加工关键技术

整体叶盘虽然加工方法较多,但国内研究成果最多、应用最广泛、技术成熟度最高的加工方法还是锻件机械加工整体叶盘的方法,也就是五坐标 NC 加工方法。为了实现整体叶盘的高效低成本、高设计符合性制造,必须制定科学的叶盘加工工艺规范和合理的 NC 加工程序。图 3 为整体叶盘 NC 加工常采用的加工工艺路线。叶盘加工的关键点较多,下面就部分重要的关键工艺技术给以介绍。

#### 1 插铣开槽加工工艺

整体叶盘零件开槽加工的基本特点是加工的材料为难切削材料而切削量大,叶盘毛坯的绝大多数材料需在开槽阶段去除。传统上叶盘开槽加工中一般采用立铣刀分层侧铣的加工方式进行开槽加工,由于叶盘开槽侧铣加工切削量较大,刀具承受切削力和扭矩很大,常常导致刀具折断。随着刀具悬伸量的增加,加工过程会出现刀具和叶片激烈的振动现象,零件加工的表面质量差、误差大,开槽加工效率低、加工周期长。开槽工作是影响叶盘制造效率和成本的瓶颈问题。

插铣加工也称为 Z 轴(刀轴)切削法加工,是近年来在深腔槽或陡峭壁类结构零件加工中常采用的一种

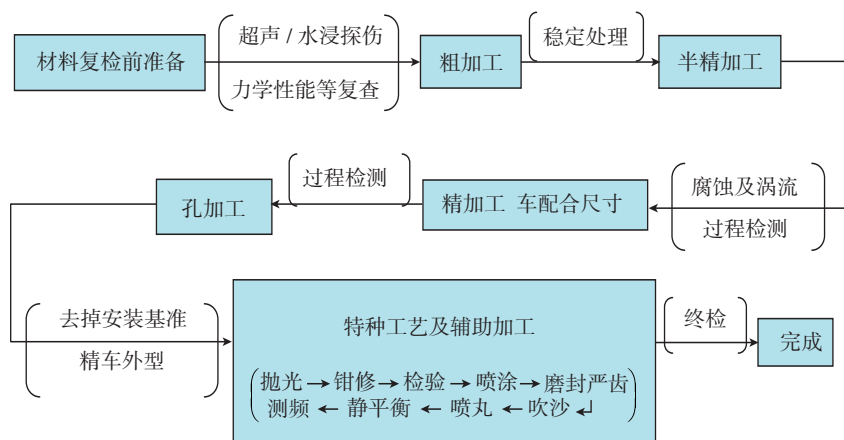


图3 整体叶盘NC加工常采用的加工工艺路线

高效加工方法。插铣加工时刀具沿机床主轴方向作进给运动,利用底部的切削刃进行钻、铣组合切削。插铣工艺切削力小,减小了刀具和工件的变形;插铣切削过程中切削力无突变,从而有效避免了机床-刀具系统的振动,使切削过程平稳。经大量叶盘加工开槽加工验证,在增大侧向步距和悬伸量的情况下,插铣切削仍能保持平稳状态;插铣时刀具和零件的接触面温度低,刀具转速和进给量可大幅度提高。因此,在钛合金、高温合金和不锈钢等难切削材料粗加工中,插铣工艺开槽加工可大幅度提高刀具耐用度、减少开槽时间、降低加工成本。

## 2 对称螺旋铣削叶片精加工工艺

对称螺旋铣削加工工艺采用螺旋铣削刀具轨迹在叶片两侧一个螺旋周期内对被加工叶片“对称”地加工,使叶片两侧被切除的材料量值基本相等,从而可减小传统单边加工时残余应力引起的变形,有效地控制了粗加工、半精加工后叶片内应力非对称释放和加工残余应力引起的加工变形。同时,还可采用高速铣削技术,直接减小铣削力以及工艺系统的被迫振动。因此,这种工艺方法在实现加工薄壁叶片时,其单面铣削工艺无法保证的加工精度。

叶片对称螺旋铣削精加工分为

两步:第一步,对称地切除半精加工时留下的非均匀余量,并为第二步加工留下均匀的切削余量;第二步,对称地切除第一步留下的余量和残余应力层,并完成对“让刀”误差的补偿。

## 3 叶盘叶片前后缘加工误差补偿技术

叶片前后缘加工质量的优劣直接影响发动机叶盘工作时的气动性能,决定着发动机的工作效率的高低。为了满足新型航空发动机的高效气动性能的要求,叶片设计的越来越薄,其前后缘圆弧半径甚至小于0.1mm,有的还采用了椭圆形前后缘结构,所以叶片前后缘切削加工过程中必然会产生较大的加工误差,许多叶盘、叶片报废的原因就是前后缘加工超差所致。究其原因,叶片加工过程中,在切削力作用下,叶片及刀具均发生变形,刀具触点处实际切削量小于数控加工程序给定的切削量,这就是通常称为“让刀”的现象,使一部分预期切削的材料仍然残留在被加工叶片上,残留下来的余量和叶片加工过程的变形量基本相等,造成叶片零件的尺寸、形状和位置超差。

叶盘叶片前后缘加工误差补偿技术就是为了满足叶片前后缘加工符合设计公差要求的工艺方法,该方法是建立在工艺试验和反复试切的

基础上一种工程应用方法。在叶盘叶片加工前,首先选定叶盘上部分叶片作为工艺试验叶片按照理论模型进行加工,采用三坐标测量机对加工完成的叶片进行测量,通过分析测量数据得出叶片的变形误差规律,再根据叶片的变形情况对原理论模型进行修改,即对加工的叶片模型进行反变形建模。然后以反变形设计模型为基准重新进行NC编写和加工,经过2~3次迭代试验,加工的叶片前后缘就可满足设计要求。不同的结构、不同的材料、不同规格的叶片补偿的量不同,有的差距还非常大。经验和补偿数据的积累决定着叶片前后缘加工的效率和质量。

## 4 空心叶片线性摩擦焊整体叶盘叶型自适应加工工艺

国外高性能航空发动机风扇叶盘大量采用了空心叶片整体叶盘结构。空心叶片整体叶盘的制造方法为:首先采用扩散连接-超塑性成形方法成形出叶片;其次采用线性摩擦焊工艺将叶片和轮盘焊接成一体;最后使用自适应加工方法对叶片的叶身和叶根进行加工。

由于种种原因,扩散连接-超塑性成形方法成形的叶片不能完全达到设计规定的指标要求,加之线性摩擦焊工艺焊接的叶盘,叶片在叶盘上的位置和扭角也不尽一致,所以为了满足叶盘装机后的工作性能,必须针对空心叶片整体叶盘结构的叶片进行适应性NC加工。自适应加工的工艺过程为:(1)对待加工的空心叶片整体叶盘的全部叶片进行计量和造型;(2)检测每一个叶片特征位置的叶片壁厚,建立叶片壁厚分布数据库;(3)将计量造型结果及厚度分布状况与设计理论模型进行比较,综合分析叶片位置及其厚度的分布状况信息;(4)在综合测量结果与设计模型的异同状况,确定自适应加工的方案;(5)进行编程和加工。

(责编 三丰)