

压气机转子叶片类零件的 制造与修复技术

Manufacturing and Repair Technology for Compressor Rotor Blade

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 柳万珠
西安航空发动机(集团)有限公司 陈贵林 梁忠效
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 张莹



柳万珠

北京航空航天大学机械工程及自动化学院在职博士研究生、西安航空发动机(集团)有限公司高级工程师、陕西省航空学会机械制造专业委员会副主任委员。主要从事航空发动机机械制造工艺和技术管理工作,参加了多个型号发动机的研制工作,先后获得公司级科技成果多项。

压气机转子叶片类零件是航空发动机的重要零件,具有种类多、数量大、型面复杂、加工精度要求高等特点,其加工质量决定着发动机

随着发动机对推重比、结构可靠性和精度一致性要求的不断提高,整体化结构在发动机中的应用越来越多,如整体叶盘在发动机风扇、压气机等转子部件上的广泛采用。这类零件在结构简化、减重增效的同时也对制造工艺提出了更高的要求。另外,由于整体叶盘运行过程中经常受到磨损、冲击以及冷热疲劳等作用,极易产生裂纹、腐蚀和磨损等缺陷,如何对存在缺陷和损伤的叶片进行修复加工,也逐渐成为发动机设计和制造人员关注的重点。

的性能、安全与寿命。一般来说,压气机转子类叶片加工的工作量要占整台发动机叶片加工工作量的40%左右。随着发动机设计技术、材料技术以及工艺技术的日益发展,各种新型转子叶片结构不断涌现,因此如何满足新形势下的转子叶片类零件的高效精密加工成为迫切需要解决的关键问题。

目前,常见的压气机转子叶片类零件的加工方法有电解加工、精密铸造、精密锻造和数控加工等,不同的加工工艺方法都有相应的优缺点和适用的叶片类型。数控加工方法因

在叶片类零件的加工中具有叶型精度高、波纹度小、加工柔性好、生产周期较短等特点,一直是中小批量叶片类零件首选的加工方式,在试制及批产中发挥着极其重要的作用。随着发动机对推重比、结构可靠性和精度一致性要求的不断提高,整体化结构在发动机中的应用越来越多,如整体叶盘在发动机风扇、压气机等转子部件上的广泛采用。这类零件在结构简化、减重增效的同时也对制造工艺提出了更高的要求。另外,由于整体叶盘运行过程中经常受到磨损、冲击以及冷热疲劳等作用,极易产生裂

纹、腐蚀和磨损等缺陷,如何对存在缺陷和损伤的叶片进行修复加工,也逐渐成为发动机设计和制造人员关注的重点。

压气机转子叶片的加工

新一代航空发动机的推重比不断提高越来越多的依赖于高比强度、低密度、高刚度和耐高温的先进材料。目前钛合金、高温合金、树脂基及金属基复合材料和金属间化合物等均被用于制造航空发动机压气机转子叶片。与其他零件相比,叶片有其自身的形状特点和性能要求,其制造技术有别于其他类零件。叶片的主要制造工艺过程分为毛坯制造和机械加工两大阶段,毛坯制造分为铸造、锻造等;机械加工工艺过程中除了机械加工外,有的还需要焊接、涂层、电加工和热处理等。

压气机转子叶片的制造工艺主要有:

(1) 普通模锻,拉、铣削榫头,铣削叶身型面,抛光。该制造技术适用于各种材料与形状尺寸的叶片。

(2) 精密锻造,化铣,热处理,数控加工榫头(包括有阻尼台叶片的阻尼台)。该制造技术适用于钛合金、高温合金等各类叶片的制造。

单叶片的毛坯通常采用模锻件和精锻件。模锻件的突出优势是强度高,但叶身留有机加余量,在机加去余量时往往会破坏叶片叶身表面的部分流线,会影响叶片强度。与模锻件相比,精锻叶片存在强度高、机加余量小等优点,从而大幅缩短加工

周期,提高使用寿命。但由于叶片结构复杂和精密锻造技术的限制,部分叶片精锻件的阻尼台、前后缘等部位会留有部分加工余量,通常需要采用机加的方法去除。

1 叶片榫头的加工

叶片榫头的常见加工方法有铣削和拉削,另外也有成形磨削和数控车削的加工方法,各种方法具有不同特点。对于榫头结构较为简单的叶片,也可采用通用铣刀进行铣削成形。榫头铣削加工生产准备简单、周期短,适用于材料切削性能较好、生产批量小的叶片。成形磨削加工生产准备周期长、费用较高,适用于材料切削性能差的叶片。数控车削加工生产准备简单、周期短,费用较低,适用于周向圆弧齿、材料切削性能好、生产批量较大的叶片。拉削是加工叶片榫头的一种高效金属切削方式,可以用于多种结构叶片榫头表面的加工,加工精度高、质量好,生产批量大,广泛应用于叶片榫头的加工中。

2 叶片型面的加工

数控加工方法适用于各类叶片的加工。复杂结构单叶片的加工通常在多轴联动数控加工机床上进行,通过机床各轴的连续运动获得很好的加工柔性和表面加工质量。面向单叶片的加工采用专用机床可以获得较高的加工效率和加工质量。

叶片型面的数控加工多采用螺旋铣削方式。在粗加工阶段,由于叶片刚性较好,可采用单面铣削的方式去除大余量。在半精加工与精加工阶段,为保证型面加工质量,多采用螺旋铣削成型的方法。对于开敞性较好的叶片,可将叶片装卡在多坐标机床旋转轴上,沿叶片旋转轴心线用顶尖固定,在叶片作旋转运动时,刀具沿叶片表面走出的螺旋形状轨迹加工出叶片。这种工艺方法可以采用球头刀或环形刀端铣成型,其切削轨迹分布近似平行于叶片的截面线,

并且加工过程中不存在横向进刀,这样的轨迹分布能够实现一次进退刀即可完成整个叶型的加工,因此是一种高效的叶片加工方案,有着良好的工艺连续性和高效性,并且适用于叶片的高速切削。

3 叶片阻尼台的加工

叶片阻尼台的主要作用是形成环形支承,从而增加叶片刚性,阻尼台上下侧面及前后缘属于非配合面,允许偏差较大;毗邻面为配合面,加工精度要求较高,允许偏差较小。叶片阻尼台的加工也可采用螺旋走刀方式,即刀具沿绕阻尼台的螺旋轨迹进行加工,可以获得较好的表面加工质量以及阻尼台与叶身型面之间的光滑转接。

压气机整体叶盘的典型加工工艺

为满足新一代战斗机以及未来新概念高推重比发动机性能要求,新一代航空发动机对其部件的气动、结构设计,以及材料、工艺等方面提出了更高要求。作为提高发动机性能、简化结构、降低重量、减少故障率、提高耐久性与可靠性的重要措施之一,整体叶盘结构在发动机的风扇、压气机以及涡轮上被普遍采用。整体叶盘将叶片和叶盘通过先进的工艺做成一体,可以省去常规叶盘连接的榫头和榫槽,使结构大大简化。叶盘的整体结构增加了其生产制造的复杂性,对加工制造工艺提出了更高的要求。目前整体叶盘结构制造采用的方法主要有线性摩擦焊、多轴数控加工与电加工技术等。

1 线性摩擦焊

线性摩擦焊接属于固态连接技术。在线性摩擦焊接过程中,由于工件的高温是通过两配合面间的相互高频振荡产生的,焊接处的材料并未熔化,因而不会出现一般焊接中易发生的脱焊现象,连接处也看不出“焊缝”,且其强度与弹性均优于本体材



叶盘和叶片榫头

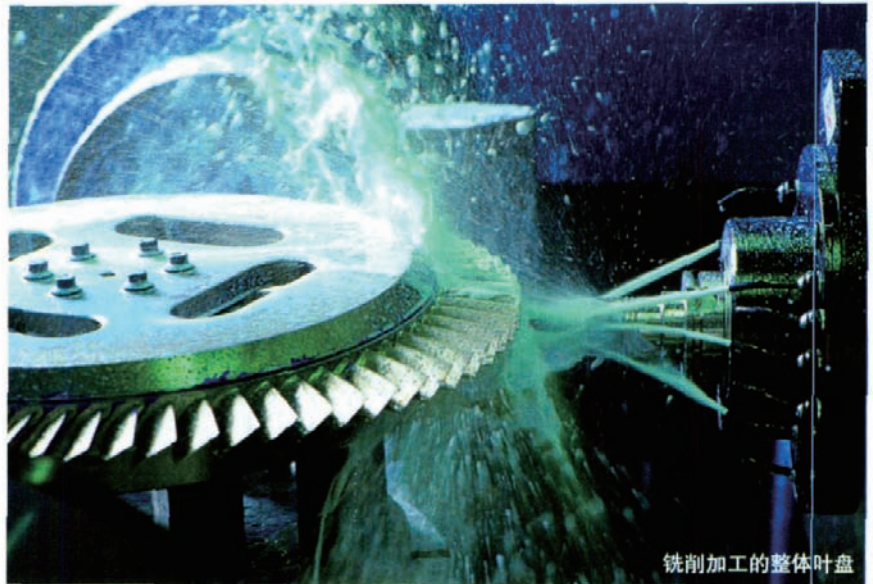
料。该技术可将两种不同材料的叶片与轮盘焊接在一起,以获得最佳的减重及性能效果。采用摩擦焊接制盘时,叶片根部和轮盘的连接处通常留有余量,焊接后采用机加方法去除。线性摩擦焊技术可使叶片和叶盘过渡区的晶粒组织变的很细,其静态、动态力学性能超过非焊接的基体材料。对于线性摩擦焊接整体叶盘,叶身型面部分通常所留余量较少,但在前后缘及叶片根部,为满足摩擦焊接工艺的要求,留有较大余量。由于线性摩擦焊接时可能造成叶片相对轮毂的位置差异,如扭转、平动等,需要先对焊接结果进行测量并与叶盘的理论模型进行配准,从而确定叶盘的余量分配、加工区域以及加工轨迹。

2 数控加工工艺

采用数控加工方法可以将整体叶盘一次加工成形。由于叶盘结构复杂,为避免加工过程中的碰撞干涉、保证叶片型面加工质量与加工过程的连续性,整体叶盘加工一般采用联动性能好、动态性能优异以及转台转动范围较大的五轴联动机床进行加工。利用五坐标数控加工方法加工整体叶盘的优点在于加工柔性好、精度高,适合快速试制的要求。

采用多轴数控加工方法加工叶盘时通常采用锻造饼坯,其加工工艺方案如下:

(1) 分多层粗加工,使加工应力



逐步释放,减少变形;为减小叶片变形和粗加工过程中的侧向力,保证粗加工的安全和高效,通常采用插铣方法;

(2) 采用球头刀进行叶片型面、轮毂面的精加工,并做清根加工。

整体叶盘上叶片加工过程中的一个典型问题是变形和振动。整体叶盘的叶片通常很薄,在加工过程中为减少叶片型面的变形和振动,可以在相邻叶片之间间断浇注石蜡、低熔点合金或填充橡皮泥等,增加叶片的刚性。此外,也可合理设计铣削方案,如采用同步半精铣-精铣等方法,降低零件的变形和加工过程中的振动。

3 电加工技术

整体叶盘的加工也可采用数控电解加工和数控电火花铣削加工技术。数控电解加工技术加工整体叶盘时工具阴极极无损耗,无宏观切削力,适合加工各种难加工材料和长、薄叶片及狭窄通道的整体叶盘,加工效率高,表面质量好。美国GE公司20世纪80年代就开始使用电解加工技术进行整体叶盘的加工。此外,电火花铣削加工技术也可以用于整体叶盘

的加工。电火花铣削采用类似于数控铣削的方法,使用铜质材料等棒状电极的连续运动去除工件材料,适合于高温合金、钛合金等难加工材料整体叶盘的加工。电火花铣削加工整体叶盘加工效率高、成本低,一般用于整体叶盘的粗加工中,以快速去除整体叶盘毛坯的大余量。

转子叶片类零件的修复加工 ——自适应加工技术

转子叶片类零件结构复杂,材料主要是钛合金、高温合金等加工难度大的贵金属,生产制造周期长,成本高。如果加工过程中出现误加工损伤或材料缺陷,就会影响零件的正常交付,甚至导致零件报废。同时,这类零件在使用过程中,由于磨损、腐蚀、高温、疲劳等因素必然出现局部损伤。为解决上述问题,近年来逐渐发展出针对叶片类零件修复的自适应加工技术。修复技术是延长和提高航空发动机关键零部件的使用寿命和运行效能、推动整体化结构应用的关键技术。

与常规的数控加工工艺不同,面向修复的数控加工技术存在的难点主要表现在以下几个方面:首先,服役过程中实际叶片类零件的形状会发生变化,基于理论模型的数控加工

轨迹无法直接用于修复加工。此外,零件破损部分的实际模型无法通过检测手段获得,需要通过破损部分的边界提取和零件理论模型构造修复区域的实际模型。同时,当整体叶盘中需要更换几个叶片时,更换后的叶片由于焊接精度及变形的影响可能造成修复加工余量严重不均匀的情况。因此,解决上述问题的关键在于必须根据叶盘修复毛坯的实际检测结果对叶片的定位基准、加工余量以及加工轨迹分布等进行综合优化。可见,面向修复的多轴数控加工技术是数字化测量-计算机辅助设计-计算机辅助制造技术的一体化集成应用,是一种自适应加工技术。

在对缺陷件进行焊接修复处理之后,需要进一步采用自适应加工技术对焊接修复件进行加工。

1 数字化检测技术

快速高精度的数字化检测技术是实现叶片类零件修复加工的基础。为实现快速高精度检测,必须根据转子叶片类零件的结构特点,确定待测区域、无干涉的测量路径以及需要测量的最小点集。在得到测量结果的基础上,与转子叶片理论模型进行匹配,快速确定叶片的实际型面形状。

2 快速寻位与余量优化

修复加工过程中的快速寻位与余量优化是实现零件高效、精密修复的关键环节。由于待修复零件的原有基准可能发生磨损或变形,无法满足修复精度的要求。根据测量数据与叶片理论模型的匹配结果,通过叶片特征点位的匹配,实现叶片类零件的快速定位。同时,结合叶片的实际形状,通过对焊接部分模型的调整实现焊接后的余量优化分布,以获得更好的修复效果。

3 工艺几何自适应建模

待修复的零件大多经历了长时间的服役工作过程或是加工过程中出现了缺陷,无论是零件的裂纹、破损还是工作过程中所产生的局部变

形都可能对修复加工精度产生重要影响。因此,可以根据待修复零件当前的实际形状,基于叶片的理论模型,根据测量数据、寻位及余量优化结果,自动提取破损区域边界并进行待修复区域模型的重构,用于后续的代码转换。

4 加工代码自动转换

在重构待修复区域的模型之后,建立重构模型与叶片理论模型之间的映射关系,并根据该关系将理论模型的加工代码进行自动变换,以用于重构模型的加工。这种自动变换不



修复过程中的叶片

需要对重构模型进行重新加工编程,这样便于联机实现实时的代码转换,特别适用于整体叶盘上不同叶片具有不同缺陷情况的处理。

结束语

压气机转子叶片类零件是航空发动机中的关键重要零件。随着航空发动机性能的不断发展和,对这类零件的加工工艺与质量要求越来越高。为满足新一代航空发动机对高推重比、长航时要求的提高,迫切需要结合航空发动机制造行业的实际需求,开展以下几方面的研究:

(1)加大对先进工艺装备投入的同时要注重充分发挥现有装备的制造能力。利用现有的设备,通过工艺方法的改进提高压气机转子叶片类零件的制造工艺水平,是提高我国航空发动机行业整体制造能力的关键。

(2)坚持不懈地推进加工技术与工艺方法的创新。实践证明,加工工艺的创新和改进是提高产品制造能力的核心要素。通过采用特种加工以及对传统工艺方法的改进能够获得加工效率及精度方面的提升。

(3)开展整体化结构修复技术的预先研究。整体叶盘等整体化构件是新一代航空发动机的核心零部件,先进的修复技术是延长这类产品服役寿命及修复后运行效能的关键技术。必须提前开展整体化构件修复技术的研究,以满足新一代战斗机及大型运输机的需求。

(4)强化产、学、研、用合作的程度和渠道。充分发挥科研院所、航空制造厂家以及用户单位的产学研优势,不断提高我国航空发动机的整体制造工艺技术水平。

(责编 侧卫)