

先进加工装备助推叶片加工技术发展

■ 沈阳黎明航空发动机（集团）有限责任公司（辽宁 110043） 刘随建 高 见 江 剑

摘要：本文介绍了先进加工设备的应用对叶片加工技术发展起到的促进作用，重点介绍了对叶片型面加工技术提高、叶片加工工艺流程简化、叶片加工快速反应能力提高、叶片生产线建立的贡献。



沈阳黎明航空发动机（集团）有限责任公司一级专家 刘随建

1. 先进加工设备提高压气机叶片型面加工精度

航空发动机叶片型面是航空发动机气动性能发挥的直接作用者，叶片型面加工精度与质量的保证，不但影响航空发动机气动性能的发挥，而且也影响航空发动机工作的安全性与可靠性。传统的压气机叶片型面加工基本都是利用模锻毛坯，通过仿型铣或电解方法去除大部分的余量，然后利用仿型磨削方式进行半精加工，最后通过手工打磨与抛光方式完成最终的加工。该种加工方式使得三维曲面形式的叶片型面轮廓、位置精度与表面质量要求得到保证，基本依赖于抛光操

作工人的技能水平，使得叶片型面加工精度很难达到比较高的要求，对于先进发动机所要求的端弯、大扭角结构的叶片型面，在形状成型方面就难以实现，即使能够实现加工的叶片型面，其质量也常常具有波动性，而且叶片型面的加工也常常成为生产的瓶颈环节。

随着五轴联动数控加工中心、六轴数控砂带磨床、脉冲电解机床等设备出现，目前压气机叶片型面加工精度水平与表面质量要求，已经逐步转化为由设备的自动化能力所保证，在采用五轴联动数控加工中心、六轴数控砂带磨床进行压气机叶片型面加工时，叶片型面的轮廓与位置精度完全由五轴联动数控加工中心的数控铣削来保证（见图1～图3），而表面质量要求则由六轴数控砂带磨床或机械光整设备给予加工保证（见图4）。由于叶片型面结构所呈现的薄壁性质，叶片型面数控铣削所选用的五轴联动数控加工中心设备，普遍具有前后轴同步回转功能（机床装夹叶片的转动轴），其使叶片薄壁性质的型面不会出现顶紧和传递

扭力时所产生的变形影响，从而使叶片的轮廓与位置精度要求可以实现百分之几毫米的水平，并且能够很好实现端弯、大扭角等复杂结构的叶片型面成形加工。

在叶片型面几何精度由数



图1 转子叶片的数控铣加工



图2 静子叶片的数控铣加工



图3 叶片五坐标数控加工中心设备



图4 叶片六轴数控砂带磨削加工

控铣削加工保证的前提下,叶片型面表面质量的保证主要是去除铣削加工存在的铣刀痕迹和降低表面粗糙度值,利用六轴数控砂带磨床具有的曲面加工能力和对表面加工时的压力控制功能,可以实现对整个型面表面均匀的微量磨削,最终实现不破坏型面几何精度前提下的表面质量提高目标。在型面铣削刀痕高度控制较好时,采用自由磨料磨削的振动光整方法,也可以稳定保证叶片型面表面质量的提高。采用脉冲电解机床进行压气机叶片型面加工时,由于电极与叶片型面间可以保证具有很小的加工间隙,从而使电解加工成为了精细化加工的方法,加工精度达到了十几微米的水平,并且其加工不存在切削力,使叶片型面的位置精度更易保证。叶片型面电解加工另外的好处是不受材料切削加工性的影响,对于高温合金类叶片的型面加工,可以很好避免数控加工刀具成本高、效率相对较低的问题,非常适合于该类叶片的批量生产。而五轴联动数控加工中心设备的加工,比较适合于批量小、新机研制的生产,其具有较好的快速反应能力。

2. 先进加工设备提高压气机叶片加工效率与快速反应能力

对于航空发动机压气机叶

片的传统生产方法,由于叶片本身结构所具有的不规则性和型面所具有的三维曲面性质,在使用普通设备进行加工时,普遍采用大量工装形式的分散工序加工方式,生产准备周期较长,叶片加工周转时间比重大,对于新机叶片生产而言,很难实现快速反应。在多轴联动数控加工中心设备引入后,叶片的生产(尤其是新机叶片生产),通过毛料结构的改变与加工工艺基准设计,可以很好地实现一次装夹多个表面集成加工的目的,使生产使用的工装量与加工的工序数量大大减少,叶片研制快速反应能力大大提高。

对于转子叶片和静子叶片,其加工方式(见图5、图6)是:利用五轴联动数控加工中心设备,装夹叶片两端的工艺基准,对叶片榫头(或缘板)四周及型面部分,一次装夹,全部加工完成;型面部分利用六轴数控砂带

磨床或机械光整设备加工后,切割掉工艺基准,然后再采用榫头(或缘板)作为定位,完成叶片两端加工,大大提高了加工效率,缩短了生产准备周期。

3. 先进加工设备提高涡轮叶片加工效率与快速反应能力

对于传统的航空发动机涡轮叶片生产,由于其使用的材料为铸造高温合金,合金中难加工金属元素多,形成的化合物硬度较高、导热性差,切削加工使用的刀具磨损非常严重,因此,涡轮叶片的生产基本采用磨削加工方式完成。传统的航空发动机涡轮叶片生产,主要使用普通平面磨床、平面缓进磨床、大直径内圆与外圆磨床,工装使用量大、工序多,加工效率低。对于空心涡轮叶片,由于工作时表面的降温要求,还需要型面加工众多的小孔,用于叶片内部冷却气体流出而在叶片外表面形成气膜。型面孔的传统加工方式是采用普通电

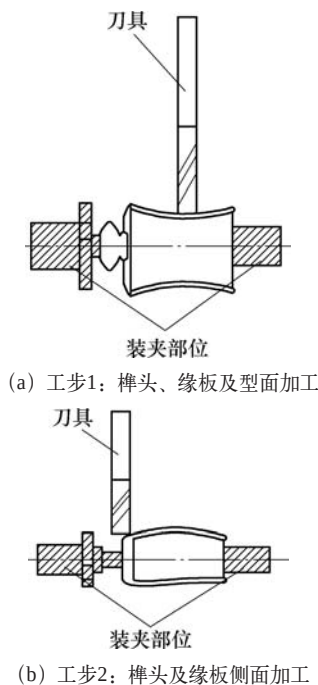


图5 压气机转子叶片一体化加工示意图

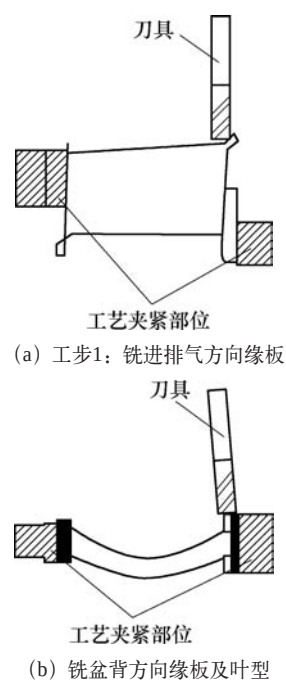


图6 压气机静子叶片一体化加工示意图

火花成型机,使用多台不同角度的夹具,加工不同角度的孔,加工效率低、成本大。

随着多轴联动数控磨削加工中心设备的出现,涡轮叶片的加工方式有了根本性的改变。首先,对于导向器叶片缘板所具有的大直径短圆弧结构,通过两个直线轴与一个回转轴的联动功能就能很好地实现其成形加工,传统的大直径内圆与外圆磨床逐步退出了叶片生产专业,相应的工装结构也变得小型化;其次,通过对叶片加工基准的合理规划设计,利用先进设备的多轴联动数控功能,可以很好地实现一次装夹多部位加工的集成生产方式,从而使涡轮叶片传统分散性质的加工工艺路线大幅度地向集中性质的工艺路线发展,叶片加工所使用的工装数量获得成倍的降低,如图7所示。在三坐标等先进测量设备应用的前提下,甚至可以对

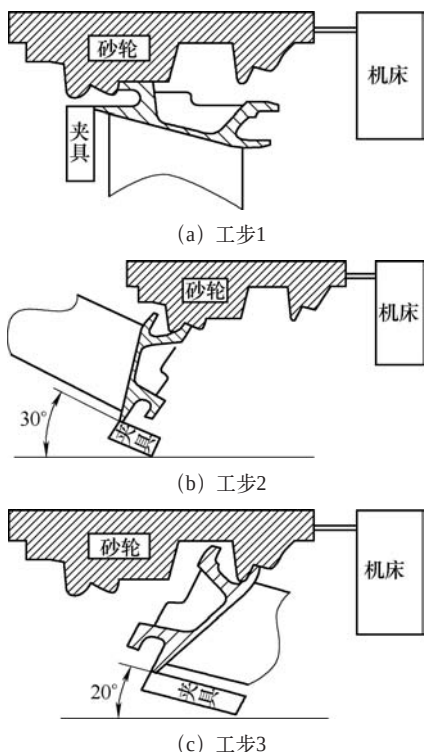


图7 涡轮导向器叶片一体化加工示意图

一种叶片的加工只使用几台工艺装备,生产成本、加工周期获得极大的降低,对于小批量、多品质的叶片加工而言,快速反应和切换加工能力获得极大提高。

涡轮叶片叶身型面小孔的加工,在早期使用普通电火花成型机加工时,其位置精度基本靠工装进行保证,加工工装经常需要几台,加工所用电极磨耗大,甚至一件叶片的加工也需要多次更换电极进行加工。在数控电火花小孔机出现以后,一件叶片叶身型面上的多种角度小孔加工,基本只需要1台夹具就可以完成加工,小孔的位置可通过机床的程序设定获得良好保证,而小孔机空心旋转方式的电极使加工时的磨耗变得均匀,基本省去了修理的必要,空心电极内部高压切削液对加工区电蚀产物的及时冲出,使加工获得了持续平稳的加工状态,加工质量稳定,效率提高了好几倍。目前,国内外涡轮叶片冷却气膜孔的加工已经普遍采用数控电火花小孔机设备。

4. 先进加工设备促进实现高效叶片加工流水线生产方式

在航空发动机生产中,叶片的生产一直是生产的紧张环节,主要的原因是生产数量大、形状复杂、材料难加工、加工的专业化性质强,在先进的加工装备出现以前,专业化的流水线建立经常存在设备专用性强、工装差异大及切换生产困难的情况。在多轴联动的数字化加工设备出现后,生产工艺的灵活性、敏捷性大大提高,对于不同结构的叶片,通过工装结构通用性的考虑,逐步可以实现在一条生产线

上的快速切换。随着快换工装、机械手、灵活测量功能的三坐标测量机等配套技术的发展,叶片的生产加工正在逐步走向高效的流水线加工方式。

目前,叶片流水线加工方式呈现的特点是由各个封闭式的加工单元组成生产线,每个封闭单元自动地完成加工、毛刺清理及测量等完整的加工,然后利用自动的记录系统完成相应的信息传输,一个单元内的不同加工内容由机械手完成,零件的上下料也通过机械手与可以灵活装夹的工装结构实现,如图8所示。不同单元之间的零件传送可以通过履带式或信号引导的专用车进行,最终使叶片生产实现从毛料到最终成型的加工,质量与效率获得良好保证,从而也使发动机生产进入良好循环,为叶片加工实现高效生产提供了有力支持。

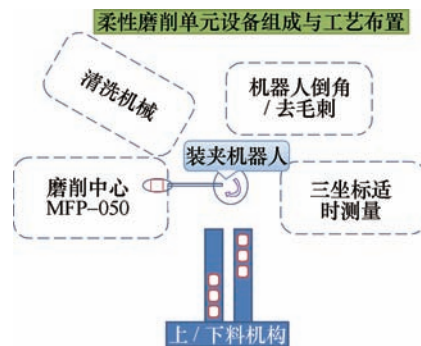


图8 叶片流水线单元加工示意图

参考文献:

- [1] 孙凤池. 机械加工工艺手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [2] 朱凯旋, 陈延君, 黄云, 等. 叶片型面砂带磨削技术的现状和发展趋势[J]. 航空制造技术, 2007 (2): 102-104.

MW (收稿日期: 20160816)