

# 大型钛合金风扇叶片型面数控加工技术的发展应用

Development of NC Machining Technology for Large Titanium Blade

沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司 刘随建 薛 波



刘随建

研究员级高级工程师,从事航空发动机叶片生产技术工作30余年,主持和参与完成了多种型号发动机叶片的生产研制,以及多种燃气轮机、气轮机等透平机叶片的测绘设计与制造工作。

大涵道比涡扇发动机风扇叶片,在长度尺寸方面基本都达到了500mm以上,这种大型化的结构特点使其工作中承受的离心力和振动应力都非常大,因此也成为大型涡扇发动机上具有非常重要意义的零件。

多轴联动加工技术的发展应用,使大型发动机风扇叶片型面加工这一关键加工环节在精度和质量保证能力方面有了很大的提高,加工效率方面也获得了满意的效果,相信随着工艺设备技术的不断研究改进,大型风扇叶片型面加工技术会朝着机械化、自动化方向发展。

目前,很多涡扇发动机仍然采用技术比较成熟的钛合金阻尼台风扇叶片,这种叶片型面所呈现的狭长结构使其在盆背方向薄壁结构形式下的弱刚性特点更加突出。这种结构刚性较差的状况与型面总体面积较大、材料难加工的性质,为其利用传统机械加工工艺进行加工带来了不利影响,直观的体现是型面的轮廓尺寸精度、位置精度保证困难,手工抛光效率低、劳动强度大,叶型易产生烧伤、烧蚀现象。上述问题的存在构成了叶片生产的瓶颈。随着多轴联动数控加工技术的发展应用和针对该种叶片型面加工工艺的研究,使该种叶片型面加工的难点逐步得到突破,加工的质量、效率水平达到了比较理想的状态。

## 大型钛合金风扇叶片型面数控加工主要工艺路线

对于大型钛合金风扇叶片型面的加工,从传统工艺所涉及的各方面因素进行考虑,其存在的不利影响有以下几个方面。

### 1 材料的影响

(1) 钛合金弹性模量小,易造成叶片加工的装夹变形;加工中后刀面的磨损,又容易出现切削力的增大。

(2) 导热性差,手工抛光的干磨削易造成应力变形和烧伤、烧蚀现象。

### 2 叶片结构的影响

(1) 型面总体加工面积大,刀具加工全过程中因磨损所造成的精度

影响较大。

(2) 手工抛光因拿持不便,劳动强度大,加工精度难以保证。

### 3 毛料状况影响

由于材料与规格尺寸的影响,使得难以获得理想的余量分布,由此造成型面余量去除不均所形成的切削力波动,产生应力变形。

### 4 机床功能影响

(1) 叶片型面的曲面结构、刀具的固定方向切入、实际切削角度与切削参数的不同造成切削力的变化。

(2) 冷却条件差,冷却不充分与无冷却的状况造成热应力变形。

针对大型钛合金风扇叶片型面加工的难点因素,依据多轴联动数控加工技术所具有的综合加工优势,确定的主要加工工艺路线是:叶片榫头及辅助定位基准的加工→叶片型面数控粗铣加工→消除应力退火→定位基准修复→叶片型面数控精铣加工→型面光精加工。以上工艺路线所确立的总体工艺思路是:型面数控粗铣加工进行大部分余量的去除,并使精铣加工具有理想的余量分布;叶片型面数控精铣加工保证型面的几何尺寸和位置精度基本达到叶片最终的精度要求;叶片型面的光精加工保证型面的表面层质量达到要求。

### 大型钛合金风扇叶片型面数控铣加工要点

按照叶片型面总体工艺思路要求,叶片型面的铣削加工要保证型面的几何位置精度基本达到设计要求水平,并具有一定的表面粗糙度质量,同时加工中效率的提高也是型面铣削的重点工作之一。依据对大型钛合金风扇叶片型面加工特点的了解,需要综合考虑设备、刀具、加工定位等多方面因素的影响。

对于大型钛合金风扇叶片型面的铣削加工,选择五轴联动加工中心是非常必要的。选择成熟的五轴联动叶片加工中心既有高效加工方面的考虑,也有加工精度保证能力方面的考虑。对于曲率变化较大的型面加工,机床主轴的摆角功能能够很好地适应型面曲率变化所对应的切削受力一致的要求,机床高压冷却系统使切削温度大幅度降低,避免刀具快速磨损,使型面加工获得良好的加工精度和表面加工质量。

为了防止和减小长叶片装夹和切削加工中产生的扭转变形,要保证设备前后端装夹叶片的回转轴具有同步回转功能,其目的是改变传统叶片加工工艺使用的一端夹紧、一端顶紧的定位装夹方式,避免叶片装夹时产生的弯曲变形和叶片回转加工时一端转动、一端随动而使叶片型面在长度方向产生的扭转变形。适应于叶片定位装夹的该项要求,叶片尾端辅助定位部分,相对于前端的榫头定位基准要具有严格的位置精度要求,在型面粗加工完成后,对于因应力变形而产生的叶片前后端定位基准之间的位置精度误差,要给予修复。叶片型面加工用夹具,在安装到机床前后两端回转轴上后,在确定机床前后两端回转轴不存在同心度误差的情况下,利用专用芯轴对前后夹具的安装精度进行检测调整,保证两端夹具具有准确的位置精度关系,以免机床前后回转轴的

# P1800-PGC系列 刀具预调仪

新一代P1800-PGC刀具预调仪秉承了其经典机型P1500系列所有优点,将更好的人体工程学设计和卓越的内在品质完美结合创造了理想的刀具测量和检测解决方案,同时它在先进的刀具测基础之上全面拓展了刀具管理系统,可与MAZAK等其他机床进行络数据通讯,实现刀具数据的智能化管理,降低您的刀具库存及购成本,提高质量的同时获得更高的收益!



#### 核心优势:

- ParleVison PSC刀具测量与检测系统
- ParleVison PGC刀具管理与通讯系统
- 高分辨率的数码成像系统, 40倍光学放大
- 动态十字线自动跟踪, 系统自动识别刃形
- 双轴微调系统, 可靠的微米级重复测量精度
- 全中文操作系统, 图形化功能按键, 测量简单快捷
- 17寸液晶触摸屏, 便携式软键盘和鼠标
- 拥有多种格式的标签打印机

**帕莱克机械(南京)有限公司**

USA · Europe · 中国 · 南京 · 上海 · 广州 · 天津 · 成都

电话: 025-87113188 / 传真: 025-87113180

Email: sales@parlec.com.cn

www.parlec.com.cn



Made  
in U.S.A.

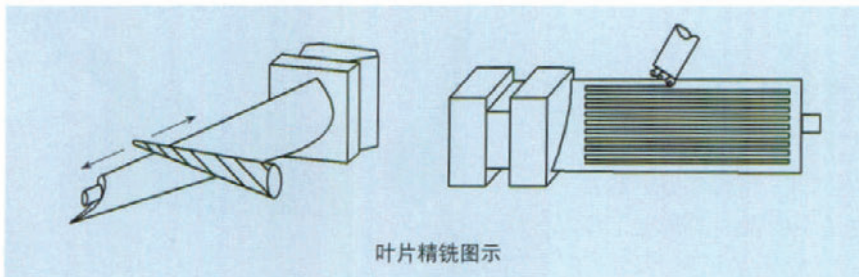


BUREAU VERITAS  
CERTIFIED

广告索引号 10-089

同步回转功能因夹具装夹精度差而产生额外扭转应力。

叶片型面的粗铣加工,是为了去除较大的余量,并为精加工留均匀的加工余量,在此前提下,该工序的加工应该保证具有高的加工效率。五轴联动叶片加工中心,具有宽行加工功能,其原理是,在铣削叶片时,刀具中心线不垂直于被铣点或面的切线,而是在走刀方向上与被铣点或面的法向成一定的角度,这种铣削采用的是圆柱型立铣刀,铣削轨迹是较宽的椭圆型弧线,与球头刀的铣削相比,对于铣削出同样的型面波峰高度或表面质量而言,生成的刀具路径的间距要大很多。因此,这种加工具有很高的加工效率。在实际加工中,采用在叶片长度上从一端向另一端移动



叶片精铣图示

的回转加工方式,即螺旋铣削方式,从效率角度看,螺旋铣削方式相对于纵向铣削方式也具有更高的加工效率。

叶片型面的精铣加工是为了获得较高的几何与位置精度,同时使型面的粗糙度水平达到一定的要求。为了降低钛合金材料加工产生的“回弹”影响和大面积型面加工时刀具磨损对加工精度的影响,刀具必须保证锋利,并避免一把刀具的长时间加工。为此,在可能的情况下,尽量使用端铣刀进行型面的纵向铣削加工。纵向铣削加工可以分别使用几把刀具进行叶背型面、叶盆型面、进气边缘、排气边缘的铣削,避免一把刀具大面积加工造成的磨损使叶片各处型面加工精度水平产生不一致现象,有利于型面最终光精加工的进行。

在大型钛合金风扇转子叶片型

面铣削加工时,为了改善切削条件,所有避免刀具磨损的措施都是必要的。在刀具材料、规格形式的选用方面,选择整体硬质合金带涂层的圆柱球型铣刀加工叶片缘板内侧面、缘板内侧面与型面转接圆弧、靠近缘板的过渡型面、进排气边缘部位,选择圆柱镶硬质合金带涂层刀片的端铣刀加工叶片叶盆和叶背大面积的型面表面。加工钛合金刀具的涂层材料选择非常重要,要避免使用与钛合金具有亲和性的涂层材料。目前加工钛合金常用PVD涂层刀具,PVD涂层较薄而且光滑,它们附着在刀具硬质合金基体上的同时还会产生一种残余应力,这种应力有利于提高刀具的抗破坏性能,PVD能够紧密地贴于刀具上,有利于保持锋利的切削刃

外形,PVD刀具抗磨性好,化学性质稳定,不易产生积屑瘤。加工中,要使用充足的冷却液对刀具进行冷却和改善摩擦影响,选择合理的切削加工参数,改善切削力影响等。

### 大型钛合金风扇叶片型面 数控光精加工特点

叶片型面光精加工是为了保证型面粗糙度、波纹度满足设计要求、材料组织性能不产生变化,并且加工中要保证铣加工所获得的几何尺寸和位置精度基本没有大的改变。对于实际加工而言,叶片型面精加工是在去除铣加工存留刀痕的基础上,达到所要求的粗糙度、波纹度。型面每处的单面金属去除量不应大于0.05mm。

目前,利用数控砂带磨抛机床进行叶片型面光精加工的方式,是实际

加工应用较为成熟的方法,而利用数控金刚石磨轮磨削机床进行叶片型面光精加工的方式,是正在尝试应用的一种方法。这些加工方式之所以被选择应用是因为它们各具特点。

首先,对于数控砂带磨抛机床加工方法而言,其具有以下特点:(1)砂带磨削磨粒锐利,磨削效率高,已达到铣削的10倍、普通砂轮磨削的5倍;(2)砂带磨削与工件摩擦较小,磨削生热少,砂带周长较大,磨粒散热时间间隔长,容易获得空气和切削液的完全冷却,可有效减少工件变形、避免烧伤和烧蚀;(3)砂带本身的柔软性和工作轮表面的橡胶体结构,保证砂带磨削与工件柔性接触,具有较好的跑合和抛光作用;(4)砂带磨削有稳定的磨具尺寸,由于砂带依附于工作轮上进行磨削,磨具尺寸有较好的稳定性;(5)砂带磨削不能进行大余量去除的长时间加工,砂带含有的磨料总量有限,大余量去除的长时间加工会使磨料迅速消耗掉,需要中断加工进行砂带更换。

砂带磨削的上述特点使大型钛合金风扇叶片型面抛光实现程序控制条件下的机械化生产成为现实。目前,用于叶片抛光的数控砂带磨削方式,有2种方法可供选择应用:一种是使用六轴数控砂带磨抛机床进行加工,另一种是使用机器人数控砂带抛光系统进行加工。

六轴数控砂带磨抛机床的运动功能类似于铣削时的五轴数控加工中心,砂带磨削工作轮与端铣刀加工所具有的结构差异使其在型面加工适应叶片结构方面,必须具有2个方向的摆角功能。

六轴数控砂带磨抛机床具有型面磨削和抛光的双重功能,功能变换取决于动力头在刚性磨削和浮动磨削形式的变换。抛光加工时,启动恒压浮动机构,能够使磨削正向压力的变化通过压力传感器、磨削功率传感器、恒压气缸等机构进行精确控制,

# 帕莱克热缩仪



## ■ 高频热感应系统

3-5 秒即可实现均匀加热

## ■ 独有的核心水冷技术

全自动热缩冷却流程，加热、装载、冷却一系列动作可在 30 秒内完成

## ■ 操作简便、安全、高效

使用创新解决方案，将感应热缩技术和水冷技术结合在一起，在一个位置上完成加热和冷却循环，整个过程无须接触加热刀柄，保障用户安全

帕莱克是全球刀具系统和刀具预调仪解决方案的领航者，一直致力于为客户提供全方位的加工解决方案，以其先进的技术、高质量的产品、本土化的服务，帮助您在生产经营中降低成本，创造更高效益！

## 帕莱克机械（南京）有限公司

USA·Europe·中国·南京·上海·广州·天津·成都·西安

电话: 025-87113188 传真: 025-87113180

http://www.cnki.net  
E-mail: sales@parlec.com.cn



Made in U.S.A.

www.parlec.com.cn

ISO 9001

BUREAU VERITAS

Certification



广告索引号 10-089

适应每件叶片型面尺寸一定范围的差异,实现不破坏型面精度条件下的抛磨加工。在进行型面磨削加工时,锁住接触轮浮动机构,可以进行型面的刚性磨削加工。型面的刚性磨削加工,可以在型面的精铣加工精度能力差的情况下,起到补充或代替的作用,其使用的砂带粒度应根据余量情况进行变换,这种加工会改变原有的尺寸位置精度,并且相对于铣削加工,其过大的余量去除会产生较大的应力变形。因此,在铣加工具有精度保证能力的前提下,不推荐使用磨削功能。

机器人数控砂带抛光方法,是由机器人拿持叶片在程序控制下作复合运动,在固定的砂带机上进行抛光加工。其加工利用了逆向工程技术,加工前,机器人拿持叶片榫头部位进行叶片型面轮廓尺寸的扫描检测,然后数据处理机构生成加工控制程序,最终在程序控制下实现叶片的抛光加工。目前,机器人砂带磨削方法,因受到运动精度限制,一般只作为型面抛光加工的手段。

数控金刚石磨轮磨削方法属于典型的硬刚性磨削,其使用的机床运动机构基本与五轴联动叶片铣削加工中心相同,而使用的切削工具是将立式铣刀改变为表面喷涂上金钢石粉的圆柱磨轮。磨削加工时,利用了宽行加工技术。该种加工方式是硬刚性磨削,由于金钢石磨轮本身透气性差,不能通过容留、交换冷却液介质达到散热的效果,因此不适合对零件表面进行较大余量去除的磨削,而且即使是去除小余量的加工,对于钛合金材料叶片型面的磨削也易产生烧伤现象,因此在利用该方法进行钛合金叶片型面加工时,必须摸索选择非常适合的切削参数,机床冷却方式必须非常有效。另外,金刚石磨轮对型面加工时的硬刚性磨削性质,也存在一定的接刀“棱线”,尽管可以通过程序与磨轮规格的匹配性调整对其进行改善,但不能达到完全去除,对于叶片疲劳性能的影响是不利的,因此必须采取辅助措施进行消除表面“棱线”的补充加工,还可能需要使用数控砂带磨抛机床进行相应程序控制下的补充加工。另外,使用自由磨料性质的湿吹砂方法进行补充加工也应该是可行的方法。由于数控金刚石磨轮磨削方法的上述特点,其加工应用还在摸索阶段。

目前,数控砂带磨抛机床方法因其多方面的优势特点,正在成为大型叶片型面抛光加工最为适宜的方法,其综合性的优势特点还在于既可以进行干磨削也可以进行湿磨削,还可以进行 CO<sub>2</sub> 冷却方式下的超低温磨削,这对于避免大型钛合金材料叶片型面抛光产生烧伤、烧蚀非常有利。数控磨抛机床的应用,改变了大型叶片型面手工抛光劳动强度大的状况,对于大型叶片生产效率提高发挥了重要作用。

## 结束语

多轴联动加工技术的发展应用,使大型发动机风扇叶片型面加工这一关键加工环节在精度和质量保证能力方面有了很大的提高,加工效率方面也获得了满意的效果,相信随着工艺设备技术的不断研究改进,大型风扇叶片型面加工技术会朝着机械化、自动化方向发展。(责编 小颖)