



# 航空钛合金叶片数控砂带磨削关键技术

## Key Technology of NC Abrasive Belt Grinding for Titanium Blade

北京胜为弘技数控装备有限公司 刘树生



刘树生

北京胜为弘技数控装备有限公司总经理,长期致力于叶片多轴加工数控装备研究,主持和参与完成多项国家 863 计划项目,其中国家 863 计划项目“大型汽轮机叶片五轴联动加工中心研制”获得中国机械工业科学技术一等奖。

本文通过对航空钛合金叶片工艺特点的分析和对不同叶片数控砂带磨削的生产实践、工艺试验、验证分析,总结提出航空钛合金叶片实现数控砂带磨削的几个必要条件和相应对策。

对于航空发动机来说,核心机一旦定型,后续发展主要通过采用新技术、新设计,加大风扇直径,增加增压压气机级数,改进高压压气机、高压涡轮叶型设计,提高高压涡轮叶片材料与涂层的耐高温性能等来提高部件效率和发动机的推力。这其中,表征循环参数的高温热部件材料的发展相对较慢,而压气机叶片、风扇叶片设计改进较为频繁,可以说,钛合金压气机叶片和风扇叶片制造是航空发动机制造的关键技术之一。

目前,国内航空发动机制造企业几乎均采用人工修磨进排气边的方

式制造钛合金压气机叶片、风扇叶片和导向叶片,叶片进排气边厚度散差较大、一致性差,型线不准确,叶片质量不高。随着汽轮机行业逐步采用数控砂带磨床加工叶片型面和进排气边,航空发动机制造企业也相继提出了采用数控砂带磨削加工进排气边的要求,迫切希望能够通过数控砂带磨解决进排气边磨削加工这一航空发动机叶片制造的难题。本文通过对航空钛合金叶片工艺特点的分析和对不同叶片数控砂带磨削的生产实践、工艺试验、验证分析,总结出航空钛合金叶片实现数控砂带磨

削的几个必要条件和相应对策。

### 进排气边磨削加工难点

航空发动机叶片和汽轮机叶片的制造工艺差别很大,前者主要采用成型法,而后者主要采用去除材料法。汽轮机叶片的材料多为不锈钢,一般是铣削出叶片径向面作为径向基准,加工肩台或榫槽与顶尖孔作为轴向基准,然后采用多轴联动机床加工叶身型线,最后经数控砂带磨抛光完成;航空叶片一般采用钛合金精密锻造、铸造方法制造压气机叶片,采用扩散连接/超塑性成型(DB/SPF)法制造钛合金宽弦风扇叶片,叶片型面是靠模具成型保证的,型面精度空间误差不超过0.15mm,成型后不再加工,直接用作型面定位夹具的基准用来加工叶根榫槽和进排气边。因此,航空钛合金叶片的加工主要是进排气边的加工,对于数控砂带磨削加工,其加工难点有以下几个主要方面。

(1) 航空叶片进排气边非常薄,大型的风扇叶片也仅有R0.3mm左右,小的压气机叶片有些甚至将达到R0.1mm级别。这就使得在进行砂带磨削时,必须采用很小的接触力进行磨削,否则难以保证型面精度,这对于砂带磨削装置的接触力控制提出了很高的要求。一般来说,大型汽轮机叶片进排气边厚度大于R0.8mm,刚性较好,磨削压力作用在工件上一般约8~10N即可,加之砂带接触宽度一般超过20mm,实际磨削抛光时接触部位压强不大。航空叶片除了进排气边厚度远小于汽轮机叶片以外,一般叶片长度也很小(压气机叶片大多数小于150mm),磨削时砂带接触宽度小于10mm,即使不考虑很薄的边缘切割砂带因素,只按照相同的压强类比测算,接触力不会超过2N,这个力值相当于我们常用的测量探头接触工件时的接触力。

(2) 磨削余量不均匀。锻造的钛合金压气机叶片和超塑成型风扇

叶片一般采用铣削或线切割进排气边锻造飞边(保证弦宽),然后进行进排气边磨削抛光加工,这一加工特点使得进排气边圆角(或局部椭圆截面)部分加工余量很不均匀,如下图所示:红色部分为毛坯外轮廓,圆弧部分为进排气边的理论曲线。砂带磨削通常采用恒压磨削原理,但是对于这样的余量不均匀,是否应该采用刚性的、理论曲线的磨削?显然,磨削时砂带磨料脱落将会使去除的材料越来越少,直到无法磨削。或许我们可以摸索出砂带厚度变化的规律,从工艺上保证通过接触轮轨迹控制最终分别去除余量,修出理想的截面轮廓和进排气边型线,但是在柔性接触轮的情况下又如何使去除量得到准确控制?

(3) 叶片变形问题。这个问题和磨削余量不均匀是同类问题,锻造钛合金叶片和超塑成型叶片均在一定温度下完成形变,受残余应力影响都存在变形,尤其是压气机叶片,变形的数量级与叶片进排气边厚度在同一量级,达到0.1mm以上,这和航空叶片一般型面空间误差0.05mm左右相比就太大了,必须予以修正。

(4) 基准问题,型面定位、叶片装夹后的一致性。精锻叶片和超塑成型叶片型面精度很好,但仍然是粗基准,这和汽轮机叶片铣削基准相比还是比较粗。如上所述,这个装夹定位误差在数量级上和叶片变形误差相当,这也是不能不考虑到的一个重要影响因素,也必须通过修正坐标系来解决。

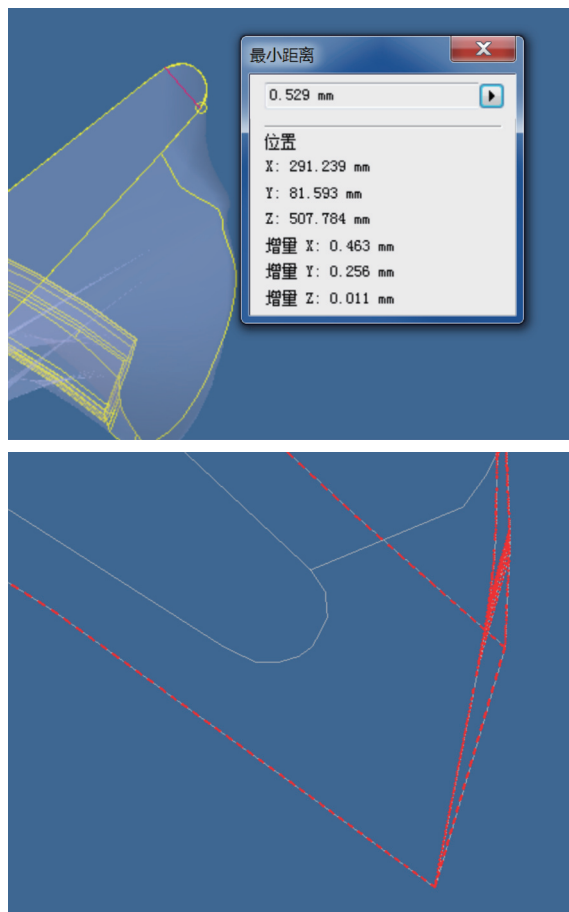
此外,进排气边磨

削时,冷却条件不好,很薄的边缘散热条件不好,叶片进排气边容易产生烧蚀,这也给叶片进排气边磨削带来一定困难;对于超塑成型风扇叶片,除了进排气边,型面也需要磨削抛光,还存在型面余量不均匀、变形误差等问题。

### 叶片数控砂带磨削关键技术

不同类型叶片数控砂带磨削的生产实践和工艺试验为航空叶片进排气边数控砂带磨削积累了经验,验证了关键技术应用于航空叶片制造的可行性。

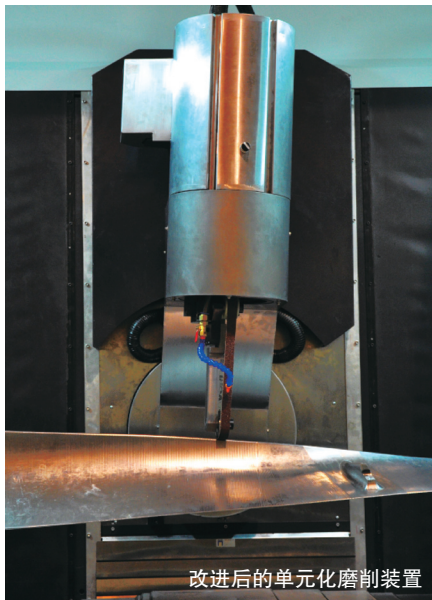
2008年4月,由北京胜为弘技数控装备有限公司、武汉华中数控股份有限公司和东方电气集团东方汽轮机有限公司联合研制的大型叶片型面加工六坐标数控砂带磨床荣获由中国机床工具工业协会授予的



某型号叶片数字模型



数控砂带磨床原型机



改进后的单元化磨削装置

CCMT2008 国产数控机床“春燕奖”。在此基础上,合作三方联合无锡透平叶片有限公司于 2010 年共同承担了国家数控机床重大专项——大型叶片型面加工六坐标联动数控砂带磨床这一课题编号为 2010ZX04001,内容为 10 台数控砂带磨床组成的大型叶片磨削抛光生产线课题。现已有 3 种规格 7 台机床在东方汽轮机有限公司叶片分厂投入使用,用于核电末级和次末级叶片型面和进排气边磨削抛光。目前,已累计生产大型汽轮机叶片数千片,叶片加工质量好、一致性好,以核电汽轮机叶片为例,核电转子叶片安装后,未经动平衡时,其不平衡量就小于法国阿尔斯通技术要求。

2010 年以来,在生产实践的基础上,以机床主要制造商北京胜为弘技数控装备有限公司牵头,项目组又进行了静叶片强力磨削成型和超塑成型风扇叶片磨削试验,验证并完善了叶片数控砂带磨削各关键技术。

### 1 对砂带装置进行改进

通过汽轮机叶片生产实践完善数控砂带磨削装置单元化技术,优化控制技术和六轴联动编程技术,积累叶片数控砂带磨削工艺数据。随着生产中不断反映出的要求,对砂带装

置的改进也是持续进行的,主要的改进包括:

(1) 砂带机构低摩擦导向机构的装配结构优化,以降低导向机构静摩擦力,提高浮动砂带机构灵敏度,提高接触力控制精度;

(2) 更新低阻浮动气缸以提高接触力控制精度;

(3) 优化砂带轮系结构、改善装配工艺性以提高轮系轴线平行度,增大接触轮砂带包络角度,提高高速砂带运行稳定性;

(4) 优化 B 轴设计,采用无背隙轴承减速机 B 轴传动,提高 B 轴动态性能 10 倍以上,扩大了 B 轴摆动范围(适应风扇叶片大幅度弯曲变化);

(5) 优化 C 轴设计,采用分片齿轮消除,减少了 C 轴尺寸和结构质量,提高 C 轴精度和动态特性;

(6) 改进 C 轴和砂带机构整体防护,基本做到砂带机构免清洁、免维护;

(7) 采用横向磨削改进粗加工编程方法,提高叶片加工效率;

(8) 采用新材料接触轮,接触轮寿命由 7~10 天左右提高到 15~20 天左右。

通过优化设计,目前单元化的砂

带磨削装置体积更小,接触轮压力控制最小达到 5N 级别,整机可靠性大幅度提高,基本可以做到运行免维护,正在试验中的新型导向机构和压力控制装置将进一步提高接触压力控制精度,接触力控制精度不超过 0.5N。

### 2 静叶片强力磨削试验

试验目的是通过汽轮机静叶片强力磨削成型验证强力磨削成型工艺方法和型面精度控制方法。

通过对常见静叶片型面特征的分析,可以看到,静叶片曲面扭曲很小,甚至是桶状叶型,尤其是不带冠叶片,只有叶身型线部分(首尾两端加工后切除),叶身型线非常适合数控砂带磨削成型。对于六轴联动数控砂带磨床,选择合适的接触轮直径、硬度和砂带宽度,采用强力磨削直接成型静叶片型面是可行的;并且由于砂带磨削线速度高,拥有比铣削更高的金属去除率,采用强力磨削直接成型静叶片型面,在效率方面会优于铣削。

据此,设定实验目标为分 3~5 次磨削成型,余量 2.5~3mm 左右的铸造毛坯静叶片,磨削叶片达到技术要求,验证强力磨削对叶片型线的修正作用及工艺方法。针对选取的铸造静叶片的毛坯状况和数学模型,制定试加工工艺流程如下:

- 铸造静叶片毛坯检查,确定出气边余量;

- 毛面定位,打 3 个中心孔;

- 装夹叶片,参照数学模型,对比找正叶片(批量生产可采用测头自动测量),确定最大磨削余量,确定磨削余量分配;

- 按照最大余量处参数设定起刀和进给量,采用有浮动的磨削,使高点见光;

- 强力磨削(粗加工)方式加工,根据余量,内背弧横向磨削进给,进出气边纵向进给加工,每次切深 0.8mm 左右;

·每次磨削后测量实际去除量与指令进给作比较,修正切深

·重复上面两个过程,直至余量0.05mm左右;

·采用浮动抛光,纵向磨削抛光,完成叶身型面加工;

·切除叶片两头余量;

·型线检查。

除去项目在试验过程中,由于铸造叶片余量不均匀(余量高低差5mm左右),粗磨超过10次,耗时超过3h;粗磨指令切深0.8mm,实际切深约0.5mm,分析认为是接触轮硬度因素造成的;加工完成后的叶片经厂家检验,型线满足要求,表面粗糙度小于 $R_a0.3$ 。

根据试验结果,证明在加工过程中,需要注意以下问题:

(1)磨削线速度对磨削效率影响最大,粗磨应尽可能高于30m/s;

(2)粗磨砂带粒度不高于60#,能够有效去除黑皮;

(3)强力磨削过程中砂带受力较大,有时可能出现丢转现象,砂带轮系应多采用挂胶轮以增大轮系摩擦力;

(4)机床强力磨削发热量较多,宜采用高压冷却甚至低温介质冷却;

(5)精加工磨削,为保证尺寸精度稳定性和进给量准确,应采用硬度较高的接触轮;

(6)强力磨削应对叶片毛坯有余量分配、分布不均匀程度提出要求,为提高效率,可考虑机床粗加工出气边加厚部分和余量不均匀的型面后再进行强力磨削;

(7)增大安全防护力度,采用全封闭机床罩壳,预防人身意外伤害。

试验结果证明:对于静叶片加工,强力磨削代替铣削是可行的,但是毛坯状况需要改善,余量分布须均匀;强力磨削对叶片型线具有一定的修正作用,但是砂带磨损造成的砂带厚度变化使修正作用效果减弱;磨削前和磨削过程中应引入在位测

量,及时动态分配加工余量,提高加工效率,提高叶片加工精度。

### 3 超塑成型风扇叶片试验

本试验目的是通过超塑成型风扇叶片磨削试验积累航空钛合金叶片磨削工艺数据(试验中)。钛合金超塑成型空心叶片毛坯叶身单边余量约0.5mm,进排气边为线切割割出,余量最大约3mm,装夹基准为叶根部位的矩形肩台(线切割割出,误差不超过0.1mm),要求采用数控砂带磨削加工出进排气边角(椭圆截型)并修磨叶身曲面至尺寸。

针对选取的空心叶片的毛坯状况和数学模型,制定试加工工艺流程如下:

·叶片毛坯检查,确定进排气边余量;

·装夹叶片,参照数学模型,拉表找正叶片,确定最大磨削余量,确定磨削余量分配;

·按照最大余量处参数设定起刀和进给量,采用理论型线轨迹强力磨削方式加工,根据余量,内背弧横向磨削进给,进出气边纵向进给加工,每次切深0.3mm左右,砂带线速度8~12m/s;

·每次磨削后测量实际去除量与指令进给作比较,修正切深;

·重复上面两个过程,直至余量0.05mm左右;

·采用浮动抛光,纵向磨削抛光,完成叶身和进排气边型面加工;

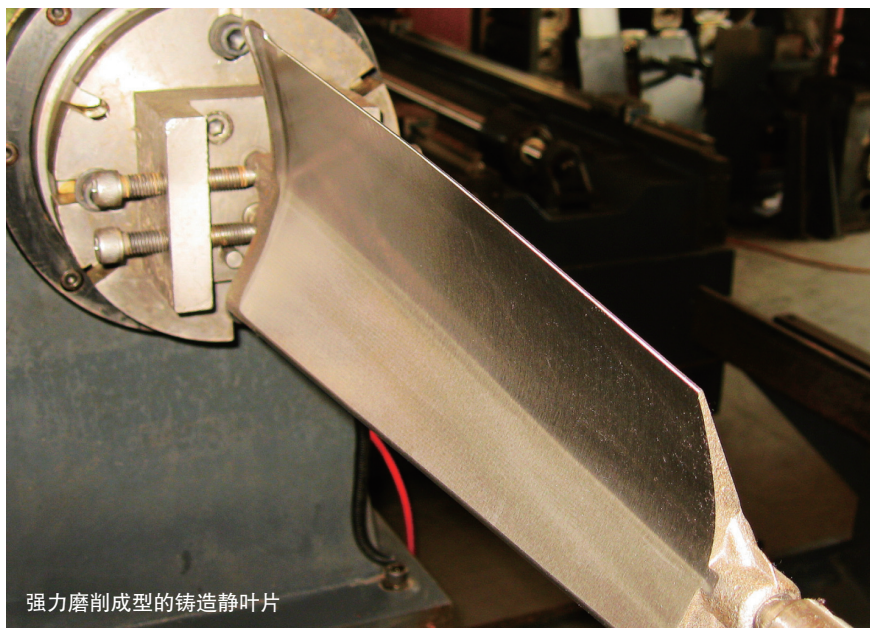
·型线检查。

试验效果:

(1)进排气边形态基本正常,与叶身型面过渡平滑,现场无测量手段,需待测量后才能与数学模型进行比较;

(2)叶身大部分区域磨削去除金属比较均匀,叶根与叶冠部位去除较多,偏差较大。分析原因是叶根部分为新更换的砂带,磨料锐度较强,叶身部分砂带磨料脱落较为稳定,故大部分区域磨削去除金属变化不大,叶冠部分去除余量较多与叶片变形有关;

(3)砂带磨削指令进给和实际金属去除偏差较大,指令切深0.3mm,实际金属去除不均匀,个别部位甚至没有去除金属。分析认为影响因素有两点:其一是叶片单端装夹,加工到叶冠部位时有弹性变形,造成让刀;其二是砂带在磨削过程中由于磨料的脱落造成接触轮中心与待加工面距离变化较大,新砂带由于有高点存在与用过的砂带差别超过0.3mm;



强力磨削成型的铸造静叶片

(4) 线速度 16m/s 以上的磨削, 经常有火花, 担心烧蚀, 降低砂带速度至 8m/s 左右, 基本没有火花, 但金属去除率明显降低;

(5) 粗加工方式的横向磨削砂带磨削能力低于精加工方式的纵向磨削, 纵向磨削切宽小, 因此切深保持性好, 砂带磨料脱落少;

(6) 叶片表面质量良好, 粗糙度小于  $R_a0.4$ 。

根据试验结果, 证明在加工过程中, 需要注意以下问题。

(1) 钛合金叶片磨削速度不宜过高, 8~12m/s 效果较好;

(2) 钛合金叶片进排气边厚度较小, 按照数字模型型线强力磨削成型时对砂带磨料的切割作用不明显, 但是采用浮动抛光时非常明显。对于进排气边小于  $R0.3\text{mm}$  的叶片, 5N 级别的接触力磨削去除金属超过 0.1mm, 对于航空叶片空间精度 0.05mm 的要求难以保证, 必须设法提高接触力控制精度, 降低磨削接触力;

(3) 按照数字模型型线强力磨削成型对加工出准确的型线总体有效, 但砂带磨料脱落增加了不确定因素, 由此造成的曲面误差量级大于叶片技术要求的允差, 因此采用强力磨削成型需在磨削前准确测量接触轮中心至砂带外缘尺寸, 并且对于砂带磨料脱落规律要有所掌控才可以实现。除此以外, 磨削过程中, 必须增加对叶片型面和进排气边的检测, 重新分配余量, 修正程序坐标, 否则, 加上柔性的接触轮在内多个不确定因素的存在将无法保证加工出准确的叶片型线;

(4) 在考虑砂带磨料脱落影响的同时, 考虑实时变压力磨削控制, 也就是在不便于控制砂带厚度变化(相当于刀长的变化)的时候, 通过压力控制去除金属的量来控制叶片型面修正。

由于该试验还在进行中, 下结论

为时尚早, 但可以看出, 对于航空钛合金叶片, 通过砂带磨削修形, 磨削出进排气边圆弧(或椭圆)截型是必需的; 保证准确型线的关键是磨削接触力, 提高接触力控制精度, 降低磨削接触力是实现航空钛合金叶片进排气边准确加工的关键。

根据前文所述航空钛合金叶片的特点和几种代表性的叶片砂带磨削的试验研究, 我们可以总结出现行工艺条件下航空钛合金叶片型面和进排气边数控砂带磨削的几个必要条件和已有对策。

(1) 现行工艺条件下, 航空钛合金叶片毛坯型面和进排气边制造误差均大于允差, 要求数控砂带磨具备修正、磨削成型和抛光功能, 因此数控砂带磨削必须建立在对叶片装夹状态的准确测量基础上, 也就是机床设备必须具有在位测量功能(机内测量), 并且检测方式尽可能采用非接触式, 以免在压气机小叶片测量时造成不必要的变形。可能采取的方式为基于多目视觉原理的 CCD 测量或线激光扫描, 考虑到毛坯反光的因素, 目前线激光扫描似乎比 CCD 测量略占优势。

(2) 基于实测、反求的快速模型重构技术, 测量的目的是加工, 必须通过模型重构迅速生成在现实毛坯误差或装夹差异状态下的模型, 并且判断出是否能够加工出合格的产品并生成或修正加工程序, 进行加工。在修正叶片型线的应用方面, 更是离不开模型重构和模型比对的支持, 否则根本不知道该加工哪里。考虑到叶片加工效率, 这一过程基本可以控制在 5min 左右完成。

(3) 砂带磨局部修正功能。较大的偏差可以通过强磨修整, 多走几遍理论轨迹来修正, 但是对于小于 0.1mm 的偏差修正, 实时压力控制的变压力磨削会更有效。目前, 关于变压力磨削编程控制已经做了试验, 实现已经不是技术难题。

(4) 低摩擦导向和小接触力控制是实现航空钛合金叶片进排气边准确加工的关键, 对于  $R0.1\text{mm}$  级的进排气边磨削成型和抛光, 接触力可能会小于 2N, 考虑到磨削质量, 接触力的分辨率不会高于 0.5N, 最好能控制在 0.1N 级别。这将对砂带机构导向装置提出挑战, 目前在试验的导向装置和浮动执行机构基本可以做到零摩擦, 剩下的就是降低砂带浮动机构质量提高运动灵敏度了。

(5) 适应航空钛合金叶片结构特点的机床结构。对于压气机叶片中的锻弯叶片和掠型的风扇叶片, 加工时 B 轴摆动角度会要求更大, 机床设计应充分考虑; 大型风扇叶片扭曲接近  $90^\circ$ , 加工时 C 轴摆角变化相应地也会非常大, 也是机床设计布置中考虑的重点。

## 结束语

以上是最近 3 年来我们对于叶片砂带磨削所做工作的一些心得体会和小结, 很多方面还有待进一步研究、总结、验证直至提炼成为专业的核心技术。近年来许多领域已经不能按照通常引进技术、装备、工艺的方法来满足国内制造的需求了, 这是因为国内需求已经达到国际水平, 例如三代核电、新型发动机技术、高铁技术等。

国家重大专项的实施无疑给制造业急需的技术研究提供了有力的支持, 但专项的实施毕竟是阶段性、时效性的, 对于制造业核心技术的掌握和发展, 今后需求牵引的产、学、研、用的紧密结合必须成为一种常态。这种需求的牵引不仅会改变装备制造企业的产品开发模式, 甚至可能会影响到工科院校的人才培养模式, 我们期待这种改变。随着需求牵引的研究工作的开展, 解决航空钛合金叶片进排气边磨削加工这一航空发动机叶片制造的难题应该为时不远了。

(责编 泰山)