

# 航空发动机叶片抛光技术现状及发展趋势

## Current Situation and Development Trend of Aircraft Engine Blade Polishing Technology

中航工业北京航空制造工程研究所航空焊接与连接技术航空科技重点实验室 崔海军 张明岐

**[摘要]** 叶片最终成形一直是航空发动机制造中的瓶颈技术,叶片自动化抛光技术研究可以解决国内叶片主要依靠手工抛光所带来的一系列问题。本文对砂轮磨削、砂带磨削的工艺特点进行了介绍,并结合国内外抛光技术现状,针对叶片抛光的技术难点,总结出了叶片抛光技术的发展趋势,给叶片抛光技术从业人员指出了一个研究方向。

**关键词:** 航空发动机 叶片抛光 砂轮磨削 砂带磨削

**[ABSTRACT]** Blade final shaping is the bottleneck technology in aircraft engine manufacturing, the research on automatic polishing technology of blade can solve the problems caused by manual polishing. In this paper, the process characteristics of grinding wheel and abrasive belt grinding are introduced. Combined with the current situation of polishing technology at home and abroad, according to the technical difficulties of blade polishing, the trend of blade polishing technology is summed up, a research direction to practitioners of blade polishing technology is put forward.

**Keywords:** Aircraft engine Blade polishing Grinding wheel Abrasive belt grinding

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.11.128

叶片是航空发动机零件中非常重要的一类零件,对发动机的性能起着关键的作用。航空发动机性能很大程度上取决于叶片质量,并且叶片的质量对发动机的安全性和可靠性也有直接影响。制造出几何精度高、表面质量好的叶片,对于提升航空发动机的性能和质量有着重要意义。压气机叶片不同部位在模拟状态下的气动情况如图 1 所示,从中可以看出叶片进排气边进行气流切割时压强的剧烈变化。

航空发动机叶片属典型的薄壁复杂自由曲面零件,所使用的材料均为难加工材料,以叶片制造使用率最大的钛合金为例,钛合金具有重量轻、强度高、高低温性能好、耐腐蚀等很多优点,但其化学性质活泼,易与刀具材



图1 压气机叶片气动性能模拟

Fig.1 Simulation of aerodynamic performance of compressor blade

料发生化学反应,导热系数和弹性模量不高,属于典型的难加工材料。从薄壁形零件的结构特点以及复杂自由曲面的加工特点考虑,影响其加工精度的因素主要有受力变形、受热变形、振动变形等因素。从以上分析可以看出,叶片的制造难度相当大,叶片最终成形一直是航空发动机制造中的瓶颈技术。

目前,国内航空发动机叶片抛光主要采用传统的手工抛光方式进行。去余量抛光分为粗抛光、半精抛光、精抛光 3 个工序,预留余量为 0.08~0.12mm。粗抛光主要进行叶型的大幅度修整,对型面的形状进行严格控制。半精抛光是消除前道工序的痕迹,降低粗糙度  $R_a$  值,修型作用较小。精抛光是半精抛光的基础上对型面进行光饰,使其达到图纸规定的表面粗糙度要求。

无余量抛光也称光抛光,一般用较细的膏剂涂在羊毛毡轮或布轮上进行,主要是去除氧化膜,去除的金属很少(有时去除量几乎为零),但表面可以达到镜面光泽。

叶片抛光工序的任务量大,占用了大量的人力资源,手工抛光时产生大量粉尘,严重影响到了操作人员的健康。由于叶片的抛光质量由操作人员的熟练程度和操作技巧所决定,从而导致叶片的型面精度、表面质量等关键指标产生了人为的误差,影响了叶片的使用效果。进行叶片自动化抛光技术的研究,保证叶片制造质量,对我国的航空工业,乃至机械制造业的许多部门都

有重要意义。

## 1 叶片抛光技术分类

叶片抛光技术主要包括砂轮磨削和砂带磨削两类加工技术。

砂轮磨削技术从最初的普通精度、普通型面的磨削加工向高效率和高精度、复杂自由曲面的加工方向发展。超硬磨料人造金刚石和立方氮化硼砂轮的应用,使磨削加工精度及加工效率不断提高,磨削加工应用范围日益扩大。超硬磨料砂轮具有加工表面粗糙度 $R_a$ 值低、发热小、不易烧伤工件等优点,尤其适合于叶片类零件的精密、高效加工。

随着砂轮制备技术的发展,以美国 3M 为代表的砂轮制造商,开发出了不脱粒专用抛光轮。此类砂轮具有合适的弹性,因此也称弹性砂轮、软磨轮或布砂轮,能够适应工件的形状而变形以扩大接触面,加工后的表面粗糙度相比于刚性砂轮大幅度降低。

砂带磨削技术作为一种新型磨削技术,从磨削领域独立出来,成为继砂轮磨削后的另一个分支,形成相对独立又自成体系的加工技术。它的产生到现在经历了最初的手工打磨、半机械化和机械化磨削,至今已满足各类复杂自由曲面加工要求的精密或超精密加工。

在现代工业中,砂带磨削几乎能够加工所有的工程材料,在先进制造技术领域有着“万能磨削”和“冷态磨削”之称,已经成为与砂轮磨削同等重要的不可或缺的加工方法。

## 2 航空发动机叶片抛光的技术难点

目前,航空发动机叶片抛光的技术难点有以下几个主要方面:

(1) 型面加工余量不均匀。精锻钛合金压气机叶片一般采用型面定位,然后进行榫头的加工,这一加工特点使得以榫头定位进行型面抛光时,由于基准转换带来了型面加工余量不均匀。同时型面受残余应力影响存在变形,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。

(2) 叶片进排气边缘曲率半径极小。小的压气机叶片有些甚至会达到  $R0.1\text{mm}$  级别。这就使得叶片进排气边缘在进行磨削时,必须采用很小的接触力进行磨削。此外,进排气边磨削时,边缘散热条件不好,叶片进排气边容易产生烧蚀。

(3) 转接圆弧的形状复杂且半径很小。在叶片造型设计过程中,转接圆弧由流道型面和叶身型面圆滑过渡而成,其圆角为  $R2\text{mm}$  左右,曲率变化很大,给编程带来了很大困难。无论采用砂轮磨削还是采用砂带磨削

的加工方法,砂轮或砂带压紧轮均需小于  $\phi 4\text{mm}$ ,砂轮或砂带压紧轮的研制难度、使用寿命都面临很大挑战。

## 3 国外叶片抛光技术现状

随着欧美国家对砂轮磨削、砂带磨削工艺的深入研究,计算机技术、信息技术与自动化技术的发展应用,数据库、计算机以及人工智能开始用于评估、预测、模拟、优化以及控制磨削过程。通过数控、自动化以及人工智能技术改进砂轮磨削、砂带磨削工艺,使磨削工艺能够自控、稳定、环保且更适合于高效率的批量生产。

瑞士 PRECITRAME 公司的 Cyberpolish T 系列抛光机广泛应用于涡轮机及航空发动机叶片等,可以完成所有与抛光相关的专业加工,实现了多样的加工方式,如砂轮磨、砂带磨、拉丝、表面处理、抛光和镜面等,该设备可实现 6 个机械手同时工作,可对磨具和工件位置进行校准并实时修正机械手的位置。瑞士 BULA 公司在砂轮抛光、砂带磨削、去毛刺等加工领域有着 50 多年的历史,该公司生产的  $\beta$  系列六轴联动去毛刺抛光设备(如图 2 所示),采用 CNC 控制,可完成具有复杂形状的叶片类零件的抛光加工。

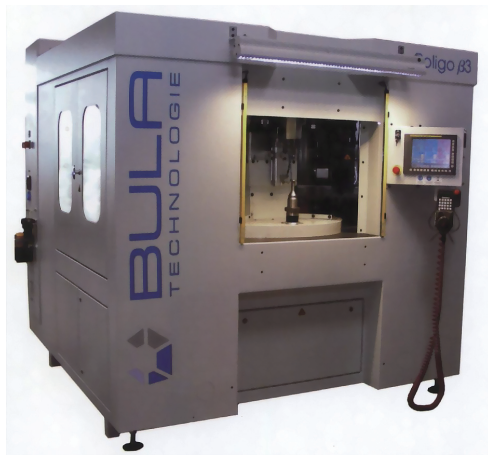


图2 Poligo  $\beta$ 3抛光机

Fig.2 Poligo  $\beta$ 3 polishing machine

德国 IBS 公司的 MTS1000-6CNC 六轴砂带磨床有仿形磨削、恒压力磨削和 CNC 磨削 3 种加工方式,能够对叶片等复杂自由曲面进行精整加工。叶片模型的数据信息通过一个多坐标测量头测得,并根据测得的信息自动编制加工程序,生产效率比手工磨削高,加工精度和加工效率都较高。

英国 Cyril-Adams 和 Rolls-Royce 公司生产的涡轮叶片砂带磨床在世界上均颇有声誉,前者产品属窄砂带型面磨床,后者属于宽砂带的型面磨床。美国 EXCELLO 公司为美国 GE 公司设计开发了六坐标 CNC 燃气轮机叶片砂带抛光机床和大型叶片砂带抛光机床,

能对难加工的钛合金叶片进行抛光,提高其表面质量。

#### 4 国内叶片抛光技术现状

近些年我国砂轮磨削、砂带磨削技术发展很快,一大批学者、工程技术人员在磨削机理、设备开发等方面作出了突出贡献,推动了我国叶片抛光技术的发展。

北京航空航天大学陈五一、陈志同等联合秦川机床开展了五轴联动砂轮磨削航空发动机叶片的相关研究,对采用鼓形砂轮周磨复杂自由曲面的刀位计算进行了研究。相对于圆柱砂轮,鼓形砂轮由于可以有效避免自由曲面周磨过程中的干涉而得到了广泛应用。利用以上的研究成果,秦川机床开发出了 QMK50A 叶片磨床(局部图如图 3 所示),主要用于复杂自由曲面,特别是叶片的精密磨削及抛光加工。机床既可采用立方氮化硼砂轮磨削,也可采用普通砂轮磨削,并可安装在线测量装置,对工件的定位误差、待加工余量和加工精度进行测量。

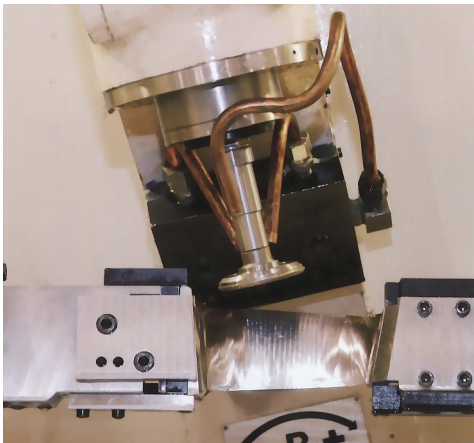


图3 QMK50A叶片磨床局部  
Fig.3 Local QMK50A blade grinding machine

重庆大学刘瑞杰、黄云针对钛合金磨削加工磨削率低、砂带使用寿命短以及表面质量差等问题,通过提高砂带线速度,选用合理的磨削压力、砂带磨料、磨削液和采用高粒度号的砂带等,可有效防止磨削烧伤和裂纹的产生,改善金属材料砂带磨削的表面加工质量。重庆三磨海达磨床有限公司联合重庆大学、重庆理工大学在 2008 年研制出了 2MY55200-6NC 型六轴联动数控砂带磨床,该机床可自动对工件表面进行粗磨、精磨和抛光加工,实现由不锈钢、镍基高温合金或钛合金等难加工材料组成的复杂型面叶片高效率加工。2010 年,该公司又成功研制了 2MGY5540A-7NC 七轴高精度数控砂带磨床,在航空发动机精锻叶身无余量叶片进排气边缘的数控磨削加工中取得了新进展。

北京胜为弘技数控装备有限公司刘树生与华中科技大学杨建中突破了高性能机床主机结构设计、六轴联动双矢量控制等关键技术研究,开发出了 TX6-CNC 六轴联动数控砂带磨床。该机床 Y 轴、Z 轴、A 轴采用双驱动结构,提高了各轴的动态响应,机床各功能部件进行了结构优化设计,可以满足机床高速运行下的动刚度要求。机床控制采用法矢量和砂带接触线双矢量控制技术,通过控制接触线的矢量方向获得了准确的型面。2013 年,该公司针对航空发动机叶片进排气边磨削加工开发了 TX6-1000HV 六轴联动数控砂带磨床(局部图如图 4 所示),可用于航空发动机钛合金精锻叶片进排气边和叶身型面的抛光。

中航工业北京航空制造工程研究所自主开发了 SFP-300 叶片双面仿形抛光机床(如图 5 所示),该机床基于靠模仿形原理,可同时进行叶盆、叶背型面的磨削及抛光。机床加工原理是,靠模轮以恒定压力接触叶片靠模,当回转盘旋转时,带动靠模轮和砂轮绕回转盘

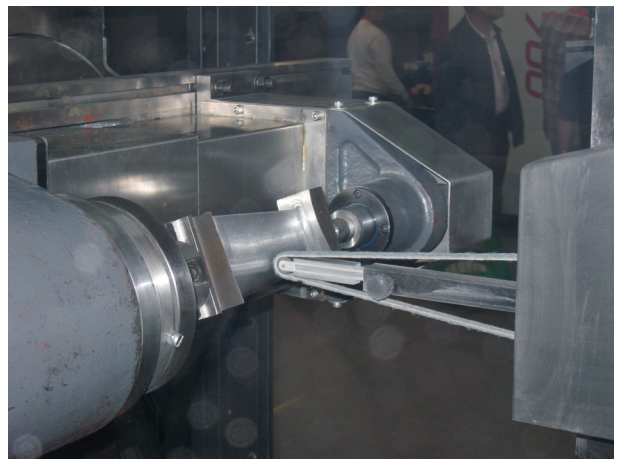


图4 TX6-1000HV砂带磨床局部  
Fig.4 Local TX6-1000HV abrasive belt grinding machine



图5 SFP-300叶片双面抛光机床  
Fig.5 SFP-300 blade double-sided polishing machine

中心摆动,靠模轮在靠模型面上的随形运动通过叶盆仿形机构和叶背仿形机构中的刚性结构传递到砂轮,砂轮在叶片毛坯上进行型面的磨削。项目组人员突破了双面抛光机床结构设计、砂轮定制、砂轮损耗及补偿等关键技术研究,通过金刚石砂轮和弹性砂轮磨削过程的组合使用,使加工完成的样件达到了叶型精度和表面粗糙度要求。该机床主要用于叶型扭转较小、叶身高100~300mm的静子叶片的抛光,叶片抛光的重复性好,节省了抛光过程中的离线检测时间,因此抛光效率高,且机床成本较低,利于在航空发动机叶片的批生产中应用。

## 5 叶片抛光技术的发展趋势

针对叶片抛光的技术难点,结合国内外抛光技术现状,可以总结出叶片抛光技术的发展趋势具有以下特点。

(1)叶片型面越来越复杂,出现了宽弦叶片、掠形叶片、弓形叶片等新型结构,专一形式的抛光方法已不能解决叶片全部位的抛光。针对不同结构、不同材料的叶片,需要采用不同的抛光方法,从进给方式、工艺模式、磨具的特殊要求等方面综合考虑,加工工艺越来越复杂。同时,各部位抛光需要机床的运动形式、规格参数差异很大,在同一个机床上完成叶片不同部位的抛光较难实现。因此,多工位、多种加工方式并行的工艺策略更适用于叶片全部位的抛光。砂轮磨削、砂带磨削两种技术需要各自发挥优势、适宜的分工、有机的整合。这对工程技术人员提出了更高的要求,需首先进行充分的工艺试验,积累大量的工艺数据,然后再进行整套抛光设备的开发。

(2)叶片抛光工艺已不是简单的去余量和上光,完全演变为一种最终成形的加工方法,是保证叶片最终加工质量的最后一个环节。由于叶片加工精度、表面质量要求高,需进行加工过程的在线实时检测,使机床能根据磨具状态变化进行实时补偿。经过长时间的抛光过程,磨具的直径会随着不断磨损而逐渐变小,由于机床加工路径不变,导致磨具与工件会逐渐分离,无法完成抛光过程。磨具实时检测、实时补偿功能可以解决这个问题。每次运动前均要检测磨具大小,根据检测结果调整磨具中心位置,从而保证磨具的切深恒定。

(3)在叶片大批量生产中,抛光的加工效率显得尤为重要。解决方案之一是减少离线检测时间和重复装夹时间,叶片抛光需要在一次装夹中完成;解决方案之二是减少机床空走刀时间,同时对可能报废的叶片采取拯救措施,因此机床须具备自适应加工功能。航空发动机叶片毛坯型面和进排气边误差均大于允差,为提高抛

光效率,加工前需进行毛坯余量分布状况的测量。根据测量结果,通过模型重构技术生成现实毛坯状态下的模型,判断是否能够加工出合格的产品,并在叶型扭转误差和轴线弯曲误差允许范围内制定个性化的加工程序。此加工程序应基于分层去除的工艺策略,减少机床空走刀,逐步修正叶片的局部误差。

## 6 结论

随着航空发动机性能的不不断提高,新材料、新结构的叶片不断出现,叶型曲线也越来越复杂,给叶片抛光技术带来了更大的挑战。经过众多学者、工程技术人员多年来的不断努力,我国在叶片抛光工艺和装备技术上取得了较大的进步,但与国外相比较,国内研究还不够系统和深入。针对叶片抛光加工精度、加工质量、加工效率等要求,争取在机床结构设计、在线检测、实时补偿、自适应加工等关键技术取得突破。只有这样才能快捷有效地提高叶片加工质量,提高我国航空发动机制造水平。

(责编 一帆)

(上接第123页)

构钢基体与厚度为1.5mm的自润滑衬板的焊接连接。

(2)自润滑衬板加工出三角倒角形式,顶角为45°,端边厚度为0.4mm;滑轨基体加工出三角倒角形式,顶角为60°,厚度为0.5mm,可满足滑轨组件焊接工艺尺寸要求。

(3)实施电子束焊接,焊接束流:4.5mA;焊接速度:400mm/s;聚焦电流:383.3mA;加速电压:60kV。

(4)通过设计焊接工装、抗变形措施以及精确的焊接工艺参数控制,可实现焊缝成形良好,防止自润滑涂层受热失效的目标。

## 参考文献

- [1] 刘春飞,张益坤.电子束焊接技术发展历史,现状及展望(I).航空制造技术,2003(1):33-36.
- [2] 康文军,梁养民.电子束焊接在航空发动机制造中的应用.航空制造技术,2008(21):54-56.
- [3] 毛智勇.电子束焊接技术在大飞机中的应用分析.航空制造技术,2009(2):92-94.
- [4] 张益坤,成志富.电子束焊接技术在航天产品中的应用.航空航天焊接技术,2008(21):52-53.
- [5] 陈国庆,张秉刚,冯吉才.电子束焊接在航空航天工业中的应用.航空航天焊接技术,2011(11):42-45.
- [6] 冯吉才,王廷,张秉刚,等.异种材料真空电子束焊接研究现状分析.焊接学报,2009(10):108-112,118.
- [7] 唐家鹏,关世玺.真空电子束焊接工艺研究.新技术新工艺,2009(1):55-57.

(责编 谷雨)