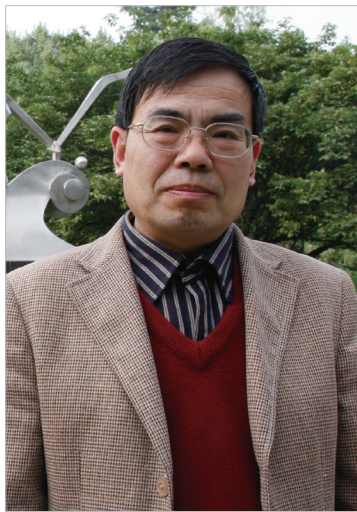


# 先进航空发动机关键制造技术

## Key Manufacturing Technology of Advanced Aeroengine

西北工业大学 王增强



王增强

研究员,西北工业大学航空发动机 CAD/CAM 研究所副所长,曾任现代设计与集成制造技术教育部重点实验室副主任。长期从事航空发动机整体叶盘五坐标数控加工技术、叶片无余量高效数控加工技术、涡轮叶片精铸模具 CAD/CAM 技术以及航空发动机信息化技术的研究与应用。获国家科技进步二等奖 1 项,部级科技进步一等奖 2 项、二等奖 2 项,发表学术论文 30 余篇。

本文从关键技术、热点技术和基础技术 3 个层面介绍航空发动机关键制造技术,制造关键技术是研制先进航空发动机必须具有的技术;制造热点技术是提高发动机制造效率和制造品质必须开展研究的技术;制造基础技术是发动机研制和批量生产应逐步积累和发展的技术,代表发动机制造技术水平和生产能力的软实力。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.22.034

推重比、功重比的高低是衡量和评价航空发动机先进性与否的最重要的技术指标。为了追求发动机推重比达到 10 以上,航空发动机在大幅度提高发动机涡轮前温度的同时,还不断使用新材料、推出新结构以降低航空发动机零部件重量。这为发动机制造提出了更高的技术要求,促进了航空发动机制造新技术源源不断地涌现和发展。为研制高性能航空发动机所开发的一系列关键制造技术将成为或已经成为先进制造技术发展的方向。本文从关键技术、热

点技术和基础技术 3 个层面介绍航空发动机关键制造技术,制造关键技术是研制先进航空发动机必须具有的技术;制造热点技术是提高发动机制造效率和制造品质必须开展研究的技术;制造基础技术是发动机研制和批量生产应逐步积累和发展的技术,代表发动机制造技术水平和生产能力的软实力。

### 航空发动机制造关键技术

#### 1 单晶涡轮叶片制造技术

现代航空发动机涡轮前温度大

大提升, F119 发动机涡轮前温度高达 1900~2050K, 传统工艺铸造的涡轮叶片根本无法承受如此高的温度, 甚至会被熔化, 无法有效地工作。单晶涡轮叶片成功解决了推重比 10 一级发动机涡轮叶片耐高温的问题, 单晶涡轮叶片优异的耐高温性能主要取决于整个叶片只有一个晶体, 从而消除了等轴晶和定向结晶叶片多晶体结构造成晶界间在高温性能方面的缺陷。

单晶涡轮叶片是目前航空发动机所有零件中制造工序最多、周期最长、合格率最低、国外封锁和垄断最为严格的发动机零件。制造单晶涡轮叶片的工序包括压芯、修芯、型芯烧结、型芯检验、型芯与外型模具的匹配、蜡模压注、蜡模 X 光检验、蜡模壁厚检测、蜡模修整、蜡模组合、引晶系统系统及浇冒口组合、涂料撒砂、壳型干燥、壳型脱蜡、壳型焙烧、叶片浇注、单晶凝固、清壳吹砂、初检、荧光检查、脱芯、打磨、弦宽测量、叶片 X 光检查、X 光底片检查、型面检查、精修叶片、叶片壁厚检测、终检等制造环节。除此之外, 还必须完成涡轮叶片精铸模具设计和制造工作。

单晶涡轮叶片, 目前世界上只有美国、俄罗斯、英国、法国、中国等少数几个国家能够制造。近年来, 国内在单晶涡轮叶片制造中也取得了较大的进步, 研制了推重比 10 一级发动机单晶涡轮叶片并批量生产了高功重比涡轴发动机单晶涡轮叶片。

## 2 整体叶盘高效高精度低成本加工技术

整体叶盘技术的应用推动了航空发动机结构设计的创新和制造工艺的跨越, 实现了发动机减重和增效的目的, 提高了发动机工作的可靠性。同时, 叶片的薄厚度、大弯扭高效率气动设计, 形成了叶片刚性差, 加工易变形难控制的问题; 叶片间窄而深的气流通道, 使叶盘加工工艺实现性差; 钛合金、高温合金等高强

材料, 难切削加工, 效率低。美英 20 世纪 80 年代的新型发动机开始应用整体叶盘技术, 我国整体叶盘技术起步于 1996 年前后。

整体叶盘技术的应用推动了发动机零件结构整体化技术的发展, 带鼓筒叶盘、带轴叶盘、盘片鼓筒轴组合叶盘、带箍闭式叶盘、整流器静子环叶盘和两级或多级叶盘组合的串列式整体叶盘结构在新型航空发动机研制中陆续得到应用; 整体叶盘的功能结构在轴流叶盘、离心叶轮的基础上, 发展了大小叶片结构叶盘、斜流转子叶盘。

自整体叶盘在高性能航空发动机上应用以来, 整体叶盘制造技术一直在发展和提升, 目前整体叶盘加工的工艺方法主要有以下 5 种: 失蜡精密铸造整体叶盘、电子束焊接整体叶盘、电化学加工整体叶盘、线性摩擦焊整体叶盘和五坐标数控机床加工整体叶盘等工艺方法。

五坐标数控机床加工整体叶盘工艺方法是国内航空发动机整体叶盘制造中技术研究开展的最早、工程应用面最宽、技术成熟度较高的叶盘制造工艺方法。其中, 插铣开槽加工工艺、对称螺旋铣削叶型精铣加工工艺、叶片前后缘加工误差补偿技术和整体叶盘叶型自适应加工工艺技术是该技术发展和应用的关键<sup>[1]</sup>。国外 T700 发动机、BR715 发动机增压级、EJ200 发动机的整体叶盘使用此加工方法加工制造, 我国 CJ1000A、

WS500 等航空发动机整体叶盘也是采用五坐标数控加工技术制造。图 1 为我国制造的商用航空发动机高压压气机第一级整体叶盘。

## 3 空心叶片制造技术

涡扇发动机的风扇远离燃烧室, 热负荷低, 但先进航空发动机对其气动效能的要求和防外物打伤的能力在不断提升。高性能航空发动机风扇均采用宽弦、无凸肩、空心风扇叶片。

罗·罗公司研制的三角形桁架结构的空心风扇叶片是对原蜂窝夹芯叶片的改进, 罗·罗公司称其为第二代空心风扇叶片, 其工艺是采用超塑成形 / 扩散连接 (SPF/DB) 组合工艺方法, 将 3 层钛合金板制成宽弦空心风扇叶片, 叶片空心部位呈三角形桁架结构, 该结构叶片已经在波音 777 和 A330 飞机的“遛达”发动机上使用。我国三角形桁架结构的空心风扇叶片制造技术也取得突破(图 2 为空心风扇叶片及内部三角形结构), 但要满足工程化应用还需开展大量的强度、振动、疲劳试验和工艺优化研究工作。

空心叶片的制造工艺流程为: 首先需准备 3 块钛合金板并按上、中、下 3 层放置, 中间一层为芯板, 上下层分别为叶盆和叶背层板, 然后按照除油酸洗 3 块钛合金板、中间层喷涂止焊剂、钛板焊接、入模加温、氩气净化、扩散连接、超塑成型、随炉冷却、表面化洗、叶根及进排气边加工、



图1 商用航空发动机高压压气机第一级整体叶盘

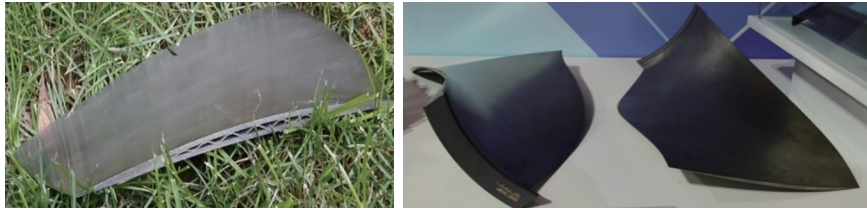


图2 空心风扇叶片及内部三角形结构

叶片检验等工序<sup>[2]</sup>超塑成形/扩散连接(SPF/DB)成风扇空心叶片。

#### 4 高端轴承制造技术

轴承是航空发动机的关键零部件之一,轴承在以每分钟上万转高速长时间运转的同时,还要承受发动机转子高速旋转所产生的巨大离心力和各种形式的挤压应力、摩擦与超高温作用。轴承的质量和性能直接影响到发动机性能、寿命、可靠性和飞行安全。高端轴承的研制和生产与接触力学、润滑理论、摩擦学等学科交叉及疲劳与破坏、热处理与材料组织等基础研究密切相关,同时还必须解决设计、材料、制造、制造装备、检测与试验、油脂及润滑等环节大量的技术难题。

目前,高端轴承的研发、制造与销售基本上被铁姆肯、NSK、SKF、FAG等西方国家的轴承制造企业垄断。我国航空发动机制造技术落后,国内轴承制造企业的生产能力和研制水平,在短期根本无法提供适合先进航空发动机使用的高端轴承。轴承已成为我国航空发动机研发中难以翻越的“珠穆朗玛峰”,极大制约了我国高性能航空发动机的发展。

#### 5 粉末涡轮盘制造技术

航空发动机涡轮盘承受着高温和高应力的叠加作用,工作条件苛刻,制备工艺复杂,技术难度大,成为我国发动机发展的难点之一。基于粉末高温合金具有优异的综合力学性能和良好的冷热工艺性能等优点,国外高性能航空发动机上广泛使用粉末涡轮盘。粉末涡轮盘的制造包括材料研制、母合金熔炼、粉末制备与处理、热等静压、等温锻造、热处

理,以及高精度检测与评价等一系列关键制造技术,它承载着先进航空发动机制造不可或缺的关键制造技术。国外粉末涡轮盘研究的趋势为在涡轮盘使用性能上从高强型涡轮盘向耐损伤型涡轮盘发展、制粉工艺向超纯净细粉方向发展,成型工艺在采用热等静压成型工艺的同时,还发展挤压成型工艺、等温锻成型工艺。国内,北京航空材料研究院已研制了多种航空发动机粉末涡轮盘,解决了先进航空发动机粉末涡轮盘的关键制造技术难题,但粉末涡轮盘工程化制造问题还未彻底解决。

#### 6 复合材料制造技术

复合材料技术已在高性能航空发动机上取得广泛的应用,为研制LEAP发动机的需要,斯耐克玛公司采用三维编制树脂转移模塑(RTM)工艺技术,加工制造了复合材料风扇机匣和复合材料风扇叶片(图3),RTM技术制造的LEAP发动机零件,不但强度高,而且质量只有相同结构钛合金部件质量的一半。在研制F119发动机过程中,普惠公司研制连续SiC纤维增强钛基复合材料宽弦风扇叶片。该类复合材料叶片具有刚度高、质量轻、耐撞击等性能,被



图3 LEAP发动机复合材料机匣和复合材料叶片

称为第三代宽弦风扇叶片。F119涡轮发动机3级风扇转子全部采用此材料制造。国内,复合材料制造技术也在航空发动机零部件制造中应用,熔体自生型TiB<sub>2</sub>颗粒增强铝基复合材料风扇叶片取得了较大的进展,但TiB<sub>2</sub>颗粒增强铝基复合材料风扇叶片高效加工、加工表面强化、抗疲劳性能和防外物打伤技术等是实现该材料风扇叶片工程应用研究的重点和难点。

### 航空发动机制造热点技术

#### 1 再结晶抑制技术

单晶高温合金的优异性能主要来源于单晶叶片消除了晶界,而再结晶的出现会显著降低原单晶合金的耐高温性能。单晶叶片铸造成型后还必须进行气膜孔加工、榫齿磨削、缘板侧面铣削、叶尖铸造工艺孔焊接、热处理、装配等后续加工工作,发动机运转过程中,叶片在高速旋转中承受着热冷气流冲击和高温、巨大载荷、剧烈震动等情况,均有可能产生再结晶,并已发生了多起涡轮叶片失效故障。因此,近年来国内外研究采用预回复热处理、渗碳、涂层以及去除表面变形层等与此相关的抑制再结晶方法和加入强化元素对再结晶的修复工作。

#### 2 3D打印技术

3D打印也称增材制造,集成了CAD、CAM、粉末冶金、激光加工等多项技术。利用3D打印技术,我们可以把“大脑”的思维变成三维实体,把电脑上的零件图像打印成“真实”零件。3D打印技术使制造技术和加工理念发生了“革命性”的变化。澳大利亚莫纳什大学,成功制造出世界上首个3D打印喷气发动机。同时,还与波音公司、空客集团和赛峰集团合作,为波音等提供3D打印的发动机原型机,用于飞行测试。采用3D打印技术,发动机零部件的制造时间可以从3个月缩短至6天。

国内利用3D打印技术,对涡扇发动机高压压气机转子叶片叶尖磨损件进行了修复和再使用。利用3D打印技术制造了发动机上非承力件、静子件零件,但零件使用的力学性能正在积极地评估,同时,使用3D打印技术制造发动机转子零件、承力件等也开展了广泛的研究工作。

### 3 叶片进排气边(前后缘)加工技术

航空发动机叶片进排气边的加工质量是影响航空发动机气动性能的关键因素之一。进排气边也是叶片缺陷易发部位和钛合金缺陷敏感区,大量的发动机失效事件都是叶片进排气边加工缺陷造成的。由于叶片进排气边是叶片最薄的部位,又是叶片的边沿部位,其刚性差、加工变形量大,加工的叶片进排气边常常出现方头、尖头等。发动机叶片批量生产中,高效高质量叶片进排气边加工的关键工艺问题仍未彻底解决。

### 4 自适应加工技术

自适应加工技术分为3种形式,即刀位轨迹的自适应规划、数控系统的自适应控制与数字化检测相结合的自适应加工<sup>[3]</sup>。国内自适应加工技术在航空发动机精锻/辊轧叶片加工、损伤叶片修复和线性摩擦焊接整体叶盘加工中等到成功应用,虽然自适应加工技术在理论和实践上都取得了突破和发展,但是自适应加工技术的工程化应用仍是航空发动机制造研究的热点技术。

### 5 抗疲劳制造技术

零件材料疲劳和表面加工缺陷已成航空发动机零件失效的主要根源,且失效故障成增速发展之势,所以“抗疲劳制造”成为航空发动机制造的热点技术。抗疲劳制造技术是指在不改变零部件材料和截面尺寸的前提下,通过在零件制造过程中改变材料的组织及应力分布状态来提高零部件疲劳寿命的制造工艺。疲劳寿命主要受热处理、环境腐蚀、表面质量、应力集中、表层应力等因素

影响。抗疲劳制造的主要方法是减少应力集中和提高零件表面强度。减少应力集中就是保证加工表面的完整性,提高零件表面强度最好的方法就是喷丸。航空发动机抗疲劳制造中,在传统喷丸工艺中,研制了多种新的喷丸介质,同时激光喷丸、超声波喷丸和高压水喷丸新工艺也取得了广泛的应用。

### 6 防鸟撞技术

鸟撞事件频发,由此造成危害巨大成为航空发动机研制不可避免的问题,国内外均开展了广泛的研究。2015年7月美国FAA发布了《运输类飞机鸟撞要求》的通告,此要求的发布不仅对未来航空发动机的防鸟撞、防外物打伤提出了具体的要求和规定,同时又为发动机新材料新结构制造技术的开展指明了又一新的研究方向。

## 航空发动机制造基础技术

### 1 精密制坯技术

精密制坯技术包括精密锻造制坯、精密铸造制坯和3D打印技术制坯,它是为现代航空发动机制造提供“粮食”的技术。传统发动机零件制造的毛坯“黑大粗”,毛坯中的大多数材料在后续加工中被去除和消耗。近30年来在航空发动机风扇压气机的叶片、叶盘、机匣制坯中发展了叶片精锻生产线、叶盘零件毛坯制造的等温锻造工艺和机匣毛坯模锻制造工艺;在涡轮叶片、整体涡轮盘、整体涡轮导向器制坯中采用失蜡精密铸造方法;附件机匣及复杂壳体制坯中的整体精密铸造制坯技术。

随着3D打印技术不断发展和成熟,越来越多的航空发动机研制中结构复杂、数量少、供货急的复杂航空发动结构件采用3D打印技术制造加工毛坯,图4为3D打印的整体叶盘毛坯试验件。

### 2 高效高质量焊接技术

构件整体化是新型航空发动机



图4 3D打印的整体叶盘毛坯试验件

零件结构发展变化的趋势,高效焊接技术是实现构件整体化的最有效方法之一。扩散连接焊、线性摩擦焊、电子束焊等焊接工艺是实现航空发动机构件整体化制造的3大关键技术。

扩散连接焊也称作SPF/DB技术,该技术是成型与焊接的组合工艺技术,即在超塑性成型过程中进行扩散焊接,在扩散焊接中实现超塑性成型。宽弦空心风扇叶片就是采用SPF/DB技术制造的,随着宽弦空心风扇叶片技术的发展,使宽弦空心风扇叶片成型的工艺难度和成型时间大幅度增加,空心风扇叶片的合格率、力学性能、成型效率和成本也显著提高,并且合格宽弦空心风扇叶片的判定准则也在不断发展。

线性摩擦焊是在惯性摩擦焊技术上发展起来的。它利用两个接触工件间的相互运动产生热量,接触面附近区域发生塑性变形,当摩擦加热区的温度达到一定要求时停止振动和相对摩擦运动,两工件就固态连接在一起。线性摩擦焊技术将空心叶片与轮盘焊接在一起,这就制成了航空发动机空心叶片整体叶盘。

电子束焊是利用高功率密度电子束的能量实现各种材料零件的焊接,焊接过程采用计算机控制,保证了焊接厚度和焊接精度的可控范围<sup>[4]</sup>。电子束焊将航空发动机两级或多级整体叶盘组合焊接成串列式整体叶盘,不仅替代螺栓连接减轻了构件重

量,还提高转子组件的刚性与强度。罗·罗公司使用电子束焊实现了中压压气机、高压压气机转子组件焊接;普惠公司使用电子束焊实现了PW400的增压级鼓筒、高压压气机2~8级转子组件、9~11级转子组件的焊接、低压涡轮2级、4级涡轮盘与篦齿环的焊接。国内,在先进航空发动机制造中,使用电子束焊实现了高压压气机5~7级高温合金叶盘组件的焊接。

### 3 刀具、机床、构件一体化技术

航空发动机上几乎所有的零件都需要机械加工,机械加工离不开刀具和机床。现代航空发动机制造技术,使刀具技术和机床功能等得到了高速发展。近年来,为实现航空发动机零件的高效低成本制造,国内外开展将工件、刀具和机床作为一个整体系统从运动学、振动学和力学的角度开展制造技术研究,即刀具-机床-构件一体化综合制造技术,取得了较大进步。

刀具作为切削加工的最直接、最主要的工具,在切削航空发动机钛合金、高温合金和不锈钢等加工材料中发挥了至关重要的作用。但传统的刀具已不能满足现代航空发动机高效加工的要求,刀具向着“高精度、高效率、高可靠性和专用化”等方向发展并不断提升。同时,复合材料加工专用刀具、安装有刀具寿命预测的智能刀具也开始得到应用。

数控机床研制起源于解决航空零件的加工问题,航空发动机上几乎所有的零部件都是通过数控机床制造的。高精、高速、复合、智能和环保是未来机床发展的必然方向。

### 4 基础数据库的开发和应用技术

国外航空发动机设计、试验和制造大量采用仿真技术进行模拟相关零件、构件或发动机整机的特性,模拟锻件的变形、铸件的凝固、焊接件的连接、零件加工中材料的切削过程等。为了研制高性能航空发动机,发

动机科研院所、高等院校从国外引进了大量的仿真软件,但与之相配套的工艺数据库不对我国销售,个别的数据即使销售但售价很高,有的售价超过了仿真软件价格的数倍。

我国发动机设计、制造基本靠经验。由于发动机制造人才短缺,研制的航空发动机性能无法与美英的发动机相比,制造的价额居高不下。所以开发与发动机制造息息相关的航空发动机常用和特用材料切削、焊接、铸造、锻造工艺数据库,特别在切削加工中,推动刀具制造技术与材料切削技术研究相结合、通用刀具研制与特种刀具研制相结合等制造基础技术研究势在必行。

### 5 航标、国标、国军标工程化应用技术

近年来,在配合新机研制中,虽然广大航空制造专家、材料专家研制并开发了大量的航标、国标、国军标,为新型航空发动机研制做出了重要贡献,但是由于受当时的条件所限,相关标准相互不够协调,有的在工程应用中发现了不够完善的问题。比如相同牌号材料(属仿制材料)按照目前标准锻造的零件毛坯加工变形大、制造效率低,而按美标锻造的零件毛坯在后续加工中几乎不出现加工变形问题;某些不锈钢热处理的硬度指标范围很宽甚至超过了机械切削的上限。而且,这些并非个别现象。所以,必须尽快开展与航空发动机制造密切相关的标准工程化研究。

### 6 加工废料回收和再利用技术

高性能航空发动机需要使用高强度、耐高温材料,靠近燃烧室的压气机和涡轮部件大量使用镍基和钴基超耐热合金,风扇和压气机叶片、机匣、盘大量采用钛合金、高温合金材料。这些材料均为贵金属,一方面这些金属的本身价值很贵;另一方面国家储备和矿藏有限。随着时间的推移,航空发动机制造中钛合金、超耐热合金需求和存量的尖锐矛盾将越来越凸显出来。

发动机零部件制造过程中,铸件的浇冒口、锻件毛坯的“肥头大耳”、叶盘及整体构件加工切除掉几乎60%~90%的切屑等等,其回收率很低,再用率更低,造成的浪费极其严重。国外从国家层面进行了加工去除料的回收和再使用,而国内这些去除料大多被送到废品回收站。据统计和分析,航空发动机零部件成本的50%来自于其材料本身。

如何系统回收。如何剔除回收料中的H、O及其他杂质元素是解决回收料再利用的难点技术和热点问题。

## 结论

近年来,为适应国家安全和国民经济发展的需要,各种型号的预警机、歼击机、直升机、大客大运等新型飞机不断飞上蓝天,但他们绝大多数依然缺乏一颗强劲的“中国心”。中国制造的ARJ21客机,安装着美国的CF34-10A发动机,中国制造的C919大型客机,将配装美、法研制的LEAP-X1C发动机,我们必须尽快翻过这一页。

可以相信,随着中国制造2025的全面布局,航空发动机重大工程的开展,通过航空发动机人的不懈努力,逐步解决航空发动机制造的关键技术、基础技术和热点技术,中国的飞机安装上健康强劲的“中国心”的目标即将实现。

## 参考文献

- [1] 王增强.航空发动机整体叶盘加工技术.航空制造技术,2013(9):58-61.
- [2] 刘业胜,曹玮,郭福水,等.钛合金空心风扇叶片加工误差对其性能影响的初步分析.航空制造技术,2013(16):58-64.
- [3] 李海宁,赵赞,史耀耀,等.航空发动机风扇/压气机叶片制造关键技术.航空制造技术,2013(16):34-37.
- [4] 佩恩.喷气发动机(The JET ENGINE).英国:罗尔斯·罗伊斯国际有限公司(中国),1992.

(责编 叶枫)