

# 航空发动机的发展对制造技术的需求

## Demand of Aeroengine Development for Manufacturing Technology

中航工业北京航空制造工程研究所 郭德伦 韩野 张媛



郭德伦

研究员,博士生导师,中航工业焊接技术首席专家,中航工业北京航空制造工程研究所副总工程师。主要从事焊接应力和变形控制技术的研究和设备开发,主持完成了多项新型焊接技术的研究工作,发明了“低应力无变形”焊接技术,获得了国家发明奖和省部级科技进步奖、光华基金奖等。

航空发动机按用途分为军用航空发动机和民用航空发动机。军用航空发动机是决定现代战争胜负的重要因素,并对国民经济和科技发展有着巨大的带动和促进作用,其发展水平是一个国家综合国力、工业基础和科技水平的集中体现,是国家安全

先进航空发动机的发展在很大的程度上取决于设计、材料、工艺和试验技术的发展。在新一代航空发动机性能的提高中,工艺技术与材料的贡献率为50%~70%,在发动机减重的贡献率中,工艺技术和材料的贡献率占70%~80%,充分表明先进工艺和材料技术是制约新型航空发动机发展的关键技术。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.22.068

的重要战略保障。航空发达国家始终将航空发动机技术列入国家高科技战略性领域。美国长期将推进技术列入国家五大关键技术计划,优先予以安排。美国国防部在其发展战略报告《2020联合设想》中,将喷气发动机等技术列为构成美国未来军事战略基础的九大优势技术,并将其排在第二位,放在比核武器更重要的位置。2010年5月,美国空军在指导未来10年航空武器装备发展的《技术地平线》报告中,又将“新一代高效涡轮发动机”列为重点发展的关键技术领域。

民用大飞机是知识高度密集、综合的现代化科学技术的结晶,是一个国家综合国力的集中体现。民用大飞机所采用的大涵道比涡扇发动机

更被誉为制造业的“皇冠”,被航空强国作为严密封锁的核心技术。大涵道比涡扇发动机的产品附加值远高于汽车、造船、电器等行业,不仅能产生巨大的经济利益,还成为外交手段中一个重要政治筹码,还是衡量一个国家制造能力的重要标准。美国于2006年公布了《民用航空技术未来10年发展规划:未来的基础》的报告,提出未来10年美国民用航空技术研究必须有助于达到4个高度优先的目标:即提高容量、提高安全性和可靠性、提高效率 and 性能、降低能耗和环境影响,这4个目标都与航空发动机有直接或密切的关系。

当今世界上能独立研制飞机、舰船、坦克的国家较多,能独立研制核弹、火箭的国家也不少,但能独立研

制先进航空发动机的只有美、俄、英、法和中国 5 个国家,但我国先进航空发动机研制水平较低,与我国大国地位有着明显的差距。

先进航空发动机的发展在很大程度上取决于设计、材料、工艺和试验技术的发展。在新一代航空发动机性能的提高中,工艺技术与材料的贡献率为 50% ~ 70%,在发动机减重的贡献率中,工艺技术和材料的贡献率占 70% ~ 80%,充分表明先进工艺和材料技术是制约新型航空发动机发展的关键技术。先进工艺技术贯穿在航空发动机的整个研制生产过程甚至全寿命周期,装备是工艺技术的载体,只有掌握了先进的工艺和装备技术,才能满足制造高性能、新型航空发动机的需求。先进航空发动机研制的成功与否也可作为我国是否实现了从“制造大国”向“制造强国”转型的标志之一,在我国政府发布的“中国制造 2025”中的“十大重点领域”之一的航空航天装备中占据着重要的地位。

### 国际航空发动机的发展趋势

航空发动机的种类繁多,不同类型发动机之间的结构和性能差距巨大。航空发动机按照类型可以分为活塞发动机、涡喷/涡扇发动机、涡轴/涡桨发动机以及涡轮/冲压组合动力等。其中,先进军用战斗机使用的为小涵道比涡扇发动机,现已发展至第四代,推重比已经达到或超过 10;民用大飞机使用的为大涵道比涡扇发动机,目前最大推力已超过 50000daN;大型军用运输机采用的亦为大涵道比涡扇发动机,发动机最大推力已超过 30000daN,在安全性、可靠性使用寿命和环保特性方面也取得了巨大进步;用于直升机的涡轴发动机已经发展至第四代;高性能无人机发动机从早期的活塞发动机已经发展到涡扇发动机,如美国“全球鹰”高空长航时无人机选用

AE3007H 发动机,最高飞行高度达到 19km 以上,滞空时间达到 30 多小时,发动机的寿命达到 10000h 以上。此外,还有用于空天飞机的组合发动机、用于部分支线飞机或特种飞机的涡桨发动机、用于运动飞机的活塞发动机等多种航空发动机,也在性能上获得了大幅的提高。

总体而言,目前军用和民用航空发动机的主要特点和发展趋势包括以下 7 点。

#### 1 大推比

以尽量少的燃油使尽量轻的发动机产生更大的功率,是航空发动机一直追求的不断发展的目标,这就要求航空发动机尽量减轻重量、提高工作效率,并具有与大推力相适应的强度,因此对大型整体结构、复杂结构、轻质结构、耐高温结构、密封结构等提出了更高的要求。同时,促进了发动机结构的发展,变循环涡扇发动机就是新型军用航空发动机的代表,而三转子发动机、开式转子发动机、齿轮风扇发动机等就是为满足大推比、低油耗需求而开发的新型民用航空发动机的代表。

#### 2 大空域、极限环境适应性

现代新型的军用飞机,如高超声速飞行器、空天飞机等新型飞行器的出现,向航空发动机提出了新的要求,需要航空发动机在空气环境更为恶劣、甚至于真空的情况下工作,同时还达到更高的推力。涡扇-冲压发动机等多种组合发动机、高速涡扇发动机、亚燃/超燃冲压发动机等新型发动机便成为了新兴的热点,而适应于高温、高速环境下发动机使用的陶瓷基复合材料等新型耐高温、轻质材料和工艺技术也成为了发展的重点。

#### 3 低污染

降低发动机工作中  $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}_x$  等燃烧物的排放是现代民用航空发动机必须重视的环节,同时,还必须注意降低民用航空发动机工作过程中

的振动和噪音,这些与环保和乘坐舒适性相关的指标不仅决定着该型发动机能否通过适航性认证,还在很大程度上影响着乘客的选择性。为达到低污染的目标,需要采用提高燃烧效率和工作效率,减少未充分燃烧气体排放量,提高排放过滤,降低和减少振动源等多种措施。

#### 4 高安全性

高安全性是民用航空发动机最为关键的指标,对乘客的安全有着决定性的影响,该指标对于军用发动机同样重要。这就要求航空发动机的各零部件具有在工作环境中保持稳定工作的高可靠性,即使极个别零部件出现故障,也尽量能够保证整台发动机的安全性,避免起火、爆炸、碎裂等极端现象的出现。高性能、高强度、高稳定性的制造工艺、材料和结构的使用,对于保障航空发动机的安全性有着重要的作用。

#### 5 长寿命

长寿命是民用航空发动机降低成本、提高安全性、增加竞争力的重要特点,但随着先进军用航空发动机造价的不断提升,军用航空发动机也越来越重视长寿命的需求。在不影响航空发动机使用性能的前提下,延长各零部件的使用寿命,减少全寿命周期中的更换次数,降低维修成本等是航空发动机长寿命的具体表现,这就要求发动机中各零部件在设计、选材和制造过程中,充分遵循结构完整性制造和表面完整性制造等理念,尤其是需要将基于长寿命原理的加工、装配、维修等工艺技术置于特别关注的地位。

#### 6 低运营成本

低运营成本主要指降低航空发动机工作过程中的使用成本、维修成本和采购成本。使用成本的降低主要通过提高发动机的燃烧效率,降低燃油的单位消耗率等方法实现;维修成本的降低主要通过减少维修的时间,延长零部件的使用寿命;采

用可快速更换的零部件等方法实现;降低航空发动机的采购成本主要通过降低研制和生产成本,提高销售量等方法实现。

### 7 自监控自调节

随着多工况传感器和智能处理系统的不断发展,先进的民用航空发动机正逐步向全工况远程监控和自调节方向发展,即能通过远程数据中心实时监控发动机中主要零部件的状态和工作状况,在发现发动机异常时,能够进行远程提醒或告知,由发动机中智能调节系统对发动机工作状态进行微调,并及时将状况反馈至飞控系统,进一步降低发动机产生重大事故的可能性。这就要求微结构制造技术达到更高的水平,以满足微型传感器等微系统的制造需求。

## 各国采用的针对性技术措施简述

为了持续提高航空发动机的性能,满足各类军用、民用飞行器不断发展的需求,各航空强国采取了制定长远发展规划、实施专项计划、提高投入资金、提前开展预研、加大政府财政扶持力度、促进强强联合等一系列政策性保障措施,用以增强先进航空发动机研制能力,提高航空发动机技术水平。

### 1 开发新概念的航空发动机

为了适应军用和民用发动机广泛、复杂、特殊的需求,航空强国充分重视新型发动机的发展,大力加强新概念发动机的研发,为未来发动机的发展夯实技术基础。全电发动机、涡轮冲压发动机、智能发动机、脉冲爆震发动机、超燃冲压发动机、骨架结构发动机、波转子发动机、超微型涡轮发动机等新型航空发动机不断涌现,新燃料发动机、新能源发动机的研究也成为航空发动机未来发展的热点。其中,自适应变循环发动机被视为下一代军用航空发动机的最有潜力的方案,是GE、普惠、罗罗等各

大航空发动机厂商均在重点发展的新型航空发动机。为了进一步提高民用航空发动机的性能,降低运营成本,开式转子发动机、三转子发动机、齿轮风扇发动机等新型大涵道比涡扇发动机的发展也极为迅速,将在未来民用航空发动机市场上开展激烈的竞争。这些新型发动机的应用与发展在相当程度上依赖于制造技术的发展。

### 2 使用新型结构和新型材料

为了达到降低航空发动机的重量、提高涡轮进口温度、延长使用寿命、增强可维修性等目的,先进航空发动机越来越多地使用了整体结构、空心结构、夹层结构、轻质结构、耐高温结构等新型结构,并逐步开始采用高温钛合金、新型单晶高温合金、金属间化合物、陶瓷基复合材料等新型材料,在进一步提高发动机性能的同时,也对航空发动机的制造技术提出了更高的要求。

### 3 采用先进的新型工艺技术和制造理念

基于新理念的制造模式和工艺技术是实现工艺技术提升、保障先进航空发动机研制和生产的重要技术基础。新型的制造模式和工艺技术主要包括4方面的内容:

(1)以智能制造为代表的先进制造模式带动了新的工业革命。智能制造是指利用计算机模拟专家的分析、判断、推理、构思和决策等智能活动,并将这些智能活动与智能机器有机地融合起来,从而取代或延伸制造环境中专家的部分脑力劳动,极大地提高生产效率的先进制造模式。将智能制造模式应用于航空发动机零部件的生产和装配,将大幅提高生产效率、缩短反应时间、减少人为误差,是航空发动机下一代制造技术的发展重点。

(2)以增材制造为代表的颠覆性制造技术改变了传统工艺路线。增材制造技术是指基于数字模型将

金属、复合材料等材料堆积在特定的位置制成近净零件的技术,也称作3D打印技术,是一项新兴的前沿技术。该技术改变了传统的毛坯-加工-处理-装配的工艺路线,能够直接实现复杂结构的制造,在保证零部件性能的同时,简化了工艺流程,提高了反应速度,已在先进发动机喷嘴等零件中使用,且其应用范围日益扩大,必将成为先进发动机制造技术中的重要工艺。

(3)以基于结构完整性制造为代表的新型制造理念深刻影响了传统工艺方法。发动机的结构完整性是指关系到安全使用、使用费用和功能的结构强度、刚度、振动、损伤容限及安全寿命等发动机所要求的结构特性的总称。结构完整性概念贯穿于发动机结构设计、制造、使用和维护的全过程,制造技术对保证发动机结构完整性有着极为重要的作用。以结构完整性研究为手段和方法,能够加强制造技术与测试验证技术的紧密结合,研究和建立发动机制造过程与结构完整性之间的关系,促进制造技术的改进,达到加速提升制造技术的技术成熟度的目标。

(4)以微纳制造为代表的制造技术新发展拓宽了制造技术的应用范围。微纳制造技术一般指微米、纳米级(0.1~100nm)的材料、设计、制造、测量、控制和产品的研究、加工、制造以及应用技术,可以认为包含加工尺度和加工精度(可归于精密加工或超精密加工的范畴)两个方向的内容。目前主要用于MEMS系统(微机电系统)、碳纳米管材料、仿生结构、传感器等的制造。微纳制造能够实现多种微精零部件、元器件、功能结构的制造,对于未来发动机性能的进一步提高有着重要的作用。

## 先进航空发动机对制造技术和装备的需求

制造工艺和装备是航空发动机

技术的核心,与航空武器装备的研制和生产密切相关,决定着先进的航空发动机设计能否变为成功的产品,还关系着航空武器装备的研制与生产周期、质量和成本等,是构建航空强国的重要基础。

### 1 数控加工技术

数控加工是切削加工与数控设备结合后形成的机械切削工艺,在航空发动机制造过程中工作量最大,广泛用于航空发动机金属、非金属和复合材料的加工中。针对航空发动机高效率、高质量、低成本的数控加工需求,重点发展难加工材料和复杂形状零件的高效精密数控加工、自适应加工、难加工金属材料数控加工参数优化及表面完整性研究、大型薄壁结构数控加工变形控制等工艺技术研究;提高数控加工的效率、质量和适用范围,逐步实现加工过程的数字化、智能化。

### 2 先进金属成形技术

先进金属成形技术是指以超塑成形/扩散连接技术、多能源增材加工技术、旋压技术等为代表的应用于或将应用于先进航空发动机金属、金属间化合物、金属基复合材料等结构件成形的工艺技术,主要应用于航空发动机具有标志性的钛合金空心风扇叶片以及高温合金机匣、金属管路等结构的成形。需重点开展超塑成形/扩散连接、喷丸成形、强力旋压、热成形、拉伸成形、管材成形等工艺技术研究,不断提升成型的精度和成形件的性能,并实现更多复杂结构的制备。

### 3 涂层制备技术

功能性涂层是航空发动机中部分重要零件保持良好运行状态的重要表面防护措施之一。航空发动机采用了大量的防护涂层,解决耐磨、隔热、高温抗氧化、封严及钛合金阻燃等问题,以提高零件性能和寿命,涂层的设计和制造就成为了关键。功能性涂层包括热障涂层、可磨耗涂

层、抗氧化涂层和耐蚀涂层等类型。目前需开展离子注入与离子渗复合技术、复合热源喷涂技术、高能束流微纳加工技术、物理/化学气相沉积技术、新型耐高温长寿命热障涂层及新结构热障涂层制备技术、新型元素掺杂及结构复合防护涂层技术、纳米复合涂层技术等工艺技术的研究和相关设备的开发。

### 4 焊接技术

焊接技术作为一种永久性的连接手段,覆盖了钢铁材料,铝、铜、钛等金属材料和复合材料;焊接方法从传统的电弧焊、钎焊,发展到先进的激光、电子束等高能束流焊和摩擦焊等固相焊。焊接技术已成为集材料、机械、电子、力学、光学、信息、管理学等为一体,形成一种多学科交叉、技术密集的技术体系。航空发动机焊接结构件的应用越来越多,已成为其发展所必须的、关键工艺技术。目前需重点发展航空发动机轻量化、整体化结构制造工艺,包括整体叶盘、整体叶环、空心叶片、薄壁机匣、刷式封严等方面所需的电子束焊、激光焊、线性摩擦焊、TLP扩散焊、钎焊等焊接工艺技术的研究和设备的开发,同时加强金属基和陶瓷基复合材料焊接、高性能金属及非金属等异种材料间的焊接、焊接结构使用寿命评定等关键工艺技术研究 and 所需工艺设备开发。

### 5 特种加工技术

特种加工技术用于先进航空发动机中主要包括高能束流加工,电加工,以及特种能源加工。其中高能束流加工和电加工应用最为广泛。如涡轮工作叶片等热端部件上气膜孔结构的加工质量影响着热端部件的工作温度、使用寿命,尤其是随着航空发动机性能的不不断提升,需采用耐热涂层才能保证涡轮叶片正常工作,气膜冷却孔加工的难度和重要性也随之提升。为解决涡轮工作叶片气膜冷却孔优质加工等难题,需开展

短脉冲激光制孔、高效优质自动化电液束加工、高品质电火花制孔等工艺技术的研究,并进行相应的工艺设备开发。

对于广泛应用于难切削复杂结构成形的电加工技术,则需根据其加工应力小、质量好等特点,针对航空发动机中整体叶盘、机匣、火焰筒等不同构件的不同需求,开展精密振动电解加工、照相电解加工、精密电火花加工、电液束加工和复合电加工等工艺技术和装备的研究。

### 6 复合材料结构制造技术

为减轻重量和提高耐热性,航空发动机大量采用了复合材料构件,包括树脂基、金属基和超高温复合材料3类。

树脂基复合材料是指以环氧树脂、双马来酰亚胺树脂等为基体的复合材料,工作温度400℃以下,构件制造时采用热压罐、缠绕成型、RTM等工艺技术。树脂基复合材料是帽锥、包容环、外涵道等大型结构件制备时选用的高强度轻质材料,解决复杂形状的大尺寸树脂基复合材料构件制备的工艺问题,是目前航空发动机的迫切需求。

金属基复合材料工作温度在700℃以下,应用于压气机叶片、整体叶环等结构,减重效果明显(压气机叶环结构可减重70%),是先进航空发动机选用材料的重要方向,需重点开展碳化硅纤维增强体制备、钛基或钛铝基与SiC增强体的复合、金属基复材构件热等静压等制造技术研究和相应的工艺设备研发。

超高温复合材料目前包括增韧陶瓷基复合材料和抗氧化碳碳复合材料两种。增韧陶瓷基复合材料应用于推比15一级航空发动机燃烧室、火焰稳定器、导向叶片、矢量喷管调节片等热端静止件,使用该材料时减重效果明显、耐高温性好(1650℃)、无需冷却,需开展SiC纤维预制件设计与制造、SiC基体致密

化(化学气相渗透法 CVI)、SiC 纤维与基体界面防护、复合材料表面抗氧化涂层制备等关键技术研究。抗氧化碳/碳复合材料应用于大推比航空发动机燃烧室喷嘴、涡轮外环、加力燃烧室喷管等热端部件,可承受 1800℃~2000℃ 高温。需开展碳纤维预制件设计与制造、C/C 复材表面抗氧化涂层制备等关键技术和装备研制等。

### 7 增材制造技术

以增材制造技术为代表的颠覆性制造技术,在概念验证阶段就引起了全球的广泛关注。增材制造技术被认为是制造技术领域的一次重大突破。该技术具有缩短研制时间、实现开放式产品设计等特点,欧美航空发达国家已开展增材制造技术在航空发动机结构上的应用研究。增材制造技术在航空发动机未来潜在用途非常广泛,冷热端部件均可应用,以激光、电子束和电弧为代表的增材制造技术将促使航空发动机制造的模式、流程、供应链等方面发生巨大变化。针对由钛合金、高温合金、超高强度钢等航空发动机用高性能材料制成的复杂结构,需开展增材制造粉末和丝材的制备、构件性能和精度控制、增材制造效率提升、电弧增材制造等关键技术研究,重点在控形控性、轨迹优化、过程监测和智能化工艺装备的研发。

### 8 数字化制造技术

现代航空发动机制造必须建立在数字化制造技术基础上。数字化制造技术是传统制造技术与信息、管理技术的有机结合,通过计算机、网络和数据库管理技术,综合应用于发动机设计、制造、使用和服务的全寿命过程,并凭借企业资源计划管理和质量/可靠性管理等先进管理工具,实现航空发动机成本、质量、同期和效益的最大化。需重点开展制造与设计协同、制造数据集成管理、制造过程重组与流程管理、数字化工艺与

工装设计、车间数字化制造执行控制、生产组织与供应链管理、发动机总装与维修管理技术和制造系统集成等关键技术研究。

数字化制造的发展方向是智能制造。为与国外先进水平并驾齐驱,需要大力推动智能制造技术的发展,形成针对特点工序组合或发动机产品的具有快速响应和精确制造能力的智能制造生产线,实现对制造过程的高层次管理和精细化控制,自主研发发动机结构智能化设计支持工具,初步具备研制以数字化、智能化控制为特征的关键工艺设备及系统的能力,并应用于新型航空发动机的研制过程。

### 9 发动机装配和调试技术

航空发动机装配和调试是根据尺寸协调原则,采用装配工具、工装和设备等将发动机零件或组件按照技术要求进行组合、连接形成更高级的装配件或发动机整机,并对装配后的装配件进行相关性能调试的过程。发动机的装配和调试技术是保证发动机各装配件和整机使用性能的关键性技术。需重点开展零组件的动态测试与优化、装配精度控制及状态监测与装备、装配系统规划与集成等涉及到面向装配的产品设计、装备研制、工艺、检测与试验、管理等贯穿了发动机的整个设计/制造过程的、工艺技术研究,并进行相应的设备、软件等开发。

### 10 航空发动机修复技术

随着信息、网络和控制等技术的发展,工艺技术正从面向产品研制向面向产品全寿命服务延伸。修复技术是航空发动机中重要的工艺技术,是融合了焊接、增材制造等多种工艺技术的综合性工艺,根据需修复零部件所处的工作环境、损伤程度等,选定不同的修复方法。修复技术决定着发动机关键零部件的使用寿命;修复后使用性能,以及航空发动机全寿命周期使用成本等。根据航空发

动机的迫切需求,需重点开展针对不同结构的基于增材制造和基于焊接的修复技术研究,并开展焊后形貌修整和性能测试与评估方面的研究。

## 展望

作为各类飞行器发展的前导与基础,航空发动机的性能不断提高,这对航空制造技术的需求也越来越高。同时,航空制造技术的进步与变革也有力地推动了航空发动机的发展。根据目前国际航空制造技术的发展状况,可以预见到以下先进制造模式和制造技术将在航空发动机中发挥重大作用。

(1) 智能制造模式将成为航空发动机制造的新里程碑。智能制造将大幅降低人为因素造成的不利影响,加快发动机的生产、装配、检测和测试的进程,对先进航空发动机的研制和生产均有重要意义;

(2) 颠覆性制造技术的应用将引发航空发动机制造技术的重大变革。以增材制造、仿生制造为代表的颠覆性技术将为更多新结构在航空发动机中的应用开辟更为通畅的途径,逐步实现结构功能一体化制造,并能进一步缩短反应时间;

(3) 前沿制造技术将在航空发动机中广泛应用。以极限制造(含微纳制造、超大尺寸制造等)、多能源多工艺复合制造为代表的前沿制造技术将在航空发动机中推广应用,解决航空发动机目前面临的一些制造瓶颈,为新型航空发动机的发展奠定技术基础;

(4) 基于结构完整性等新理念的制造技术将进一步提高航空发动机的性能。将结构完整性等新型理念融入传统工艺中,推动工艺技术开展针对性的改进,将有助于提高产品的使用寿命和性能,将促进航空发动机进一步提高安全性、可靠性、长寿命等性能。

(责编 春早)