

# 高性能航空发动机制造技术 及其发展趋势

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 王增强



人类在航空领域取得的每一次重大的革命性进展，无不与航空动力技术的突破和进步相关。航空发动机已成为一个国家科技水平、军事实力和综合国力的重要标志之一。随着航空科技的迅速发展，面临不断提高的国防建设要求，航空发动机必须满足超高速、高空、长航时、超远航程的新

高性能航空发动机关键制造技术目前正向轻量化、整体化结构件制造、新型结构件精密制坯、发动机制造技术新工艺、面向零件的专业化生产线以及信息技术与制造技术相结合的方向发展

一代飞机的需求，航空发动机的结构越来越复杂，精度要求越来越高。

航空工业发达国家在研制高性能航空发动机上投入了大量的资金和人力，实施了一系列技术开发和验证计划，如“先进战术战斗机发动机计划(ATFE)”、“综合高性能涡轮发动机技术”计划(IHPTET计划)及后续的VAATE计划、英法合作军用发动机技术计划(AMET)等。在这些计划的支持下，美国的F119、F414，欧洲的EJ200，法国的M88和俄罗斯的AL41F等推重比10一级发动机陆续问世。此类发动机通常具有以下特点：

- 技术先进性：单位推力大(推重比达10一级)，新技术含量高；
- 构件简单性：全机结构零件数目仅为第三代发动机的一半；
- 结构牢固性：结构抗撞击能力体现在设计始终；

▪ 系统耐久性：从零件到整机的设计都考虑可靠性和长使用寿命，全寿命费用低；

▪ 维护方便性：减少维修次数，维护工具和维护人时。

## 国外高性能发动机 制造技术发展趋势

为了提高发动机的可靠性和推力，国外高性能发动机研制采用大量新材料、新结构，对制造工艺的要求也进一步提高。为此，相继研发了一系列高性能航空发动机关键制造技术，并呈现以下发展趋势：(1)轻量化、整体化结构件制造技术；(2)新型结构件精密制坯技术；(3)航空发动机制造技术新工艺；(4)面向零件的专业化生产线；(5)信息技术与制造技术相结合。

- 1 轻量化、整体化结构件制造技术
  - (1) 整体叶盘制造技术。

整体叶盘结构是将传统结构的叶片和轮盘设计成整体结构,省去传统连接方式采用的榫头、榫槽和锁紧装置,结构重量减轻、零件数减少,避免了榫头的气流损失,使发动机整体结构大为简化,推重比和可靠性明显提高。据报道,采用整体叶盘可使发动机重量减轻20%~30%,效率提高5%~10%,零件数量减少50%以上。

目前整体叶盘的制造主要采用五坐标数控加工、电解加工、电子束焊接、锻接法和线性摩擦焊接等方法。

#### a. 五坐标数控加工。

整体叶盘五坐标数控加工是制造航空发动机风扇及压气机整体转子的主要方法之一。采用五坐标NC加工技术将锻造饼坯铣削成整体叶盘的特点是制造精度高、工艺装备简单,其关键技术为叶盘通道及型面的五坐标NC加工程序的编制、加工刀位验证、薄壁叶片加工的变形控制及误差补偿方法、表面光整处理;缺点是加工过程中要切削大量金属,对加工高温合金等难切削材料效率低、成本高。

#### b. 电子束焊接法。

EJ200采用此方法,即先将单个叶片用电子束焊接成叶片环,然后用电子束焊接技术将锻造和电解加工成形的轮盘腹板与叶片环焊接成整体叶盘结构。采用的制造技术有叶片加工技术、锻造技术、电解加工技术、电子束焊接技术、焊缝检测与评估技术。

#### c. 锻接法。

普惠公司采用锻接法制造整体涡轮转子。首先将涡轮盘轮缘部位加热至变形温度,再将单晶叶片压入涡轮盘轮缘加热部位,同时进行扩散连接,叶片固定在涡轮盘上制造成整体叶盘。锻接法的关键技术是正确地控制有效部位的加热变形参数(温度、压力、变形量),以保证叶片与轮盘高强度结合成一体。普惠公司已研究出叶片/盘的锻接工具,可准确地保证叶片正确定位。

#### d. 线性摩擦焊接法。

属固态连接技术。在线性摩擦焊接过程中,由于工件的高温是通过两个配合面间的相互高频振荡产生的,焊接处的材料并未熔化,因而不会出现一般焊接中易发生的脱焊现象,连接处也看不出“焊缝”,其强度与弹性均优于本体材料。可用线性摩擦焊接技术将2种不同材料的叶片与轮盘焊接在一起,以获得最佳的减重及性能。

#### e. 电解加工技术。

整体叶盘结构的制造还可采用电解加工技术将模锻高温合金毛坯加工成整体叶盘。

#### f. 复合材料整体叶盘制造技术。

在未来推重比15~20的高性能发动机上,如欧洲未来推重比15~20的发动机和美国的IHPTET计划中的推重比20的发动机,将采用效果更好的SiC陶瓷基复合材料或抗氧化的C/C复合材料制造整体涡轮叶盘。

#### (2) 大小叶片转子制造技术。

大小叶片转子技术是整体叶盘的特例,即在整体叶盘全弦长叶片通道后部中间增加一组分流小叶片,此分流小叶片具有大大提高轴流压气机叶片级增压比和减少气流引起的振动等特点,是使轴流压气机级增压比达到3或3以上的有发展潜力的技术。

#### (3) 整体叶环制造技术。

如果将整体叶盘中的轮盘部分去掉,就成为整体叶环,零件的重量将进一步降低。整体叶环一般采用密度较小的复合材料来制造,这种整体叶环的重量约为常规结构重量的30%。整体叶环用连续单根碳化硅(SiC)长纤维增强的钛基复合材料(TiMMC)、SCS-6SiC/IM1834和Al-Ti化合物( $Ti_3Al$ 和TiAl)作基体的复合材料制造(Al-Ti化合物基复合材料可耐温927)。英、法、德研制了TiMMC叶环,用于改进EJ200的3级风扇、高压压气机和涡轮。

#### (4) 宽弦风扇叶片制造技术。

宽弦、无凸台、空心叶片是高性能

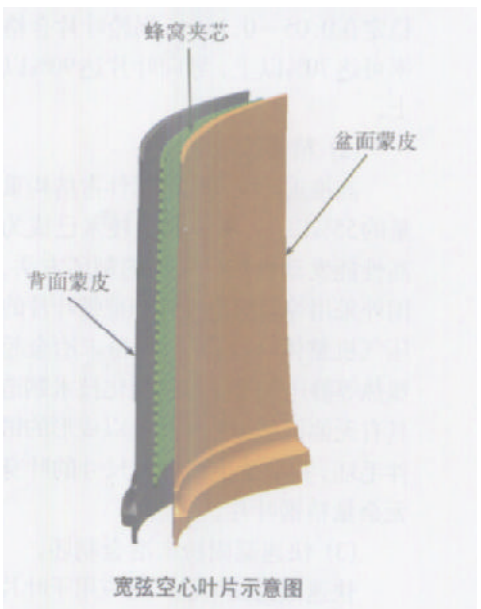
能发动机风扇和第一级压气机叶片的发展方向。推重比10一级的发动机F119,EJ200和V2500均采用宽弦风扇叶片。其制造方法是在2块钛合金薄板之间放入相同材料的蜂窝状结构,然后通过活性扩散焊接的方法将其连接成一体。这种叶片重量轻,强度高,可以抗击外来物的碰撞。

(5) 树脂基复合材料构件制造技术。

高性能发动机的进气道机匣、外涵道筒体、中介机匣等整体结构件广泛采用树脂基复合材料。树脂基复合材料构件的制造技术是集自动铺带技术、自动纤维铺放技术、激光定位、自动剪裁技术、模压成形、树脂传递模塑成形、树脂膜浸渍成形、热压罐固化成形等技术于一体的综合技术。

#### (6) 复合冷却层板结构制造技术。

多孔复合层板冷却结构是高推重



比发动机采用的先进冷却结构,多用于燃烧室和涡轮叶片。它是一种将带有复杂冷却回路的Lami Iloy多孔层板用扩散连接方法成形的冷却结构。多孔复合层板冷却结构的关键制造技术是复杂冷却回路的计算机辅助设计和绘制、“照相-腐蚀”或“照相-电解”工艺,也可用激光和电子束等特种工艺加工制造成冷却回路,扩散

连接成多层多孔层板。

## 2 精密制坯技术

高性能航空发动机采用了大量的新型结构件,由于毛坯结构的变化,其制坯方法也发生了重大变化。精铸件、精锻件、单晶和定向凝固精铸件毛坯将取代传统的大余量毛坯。传统意义的锻件将由77%降至33%,精铸件由18%增至44%以上,粉末冶金件由3%增至8%,复合材料构件由4%增至15%。

### (1) 定向凝固和单晶精铸制坯。

定向凝固和单晶精铸技术已成为推重比10以上高性能发动机关键制造技术之一。目前使用的单晶叶片是第二代空心无余量单晶叶片,即采用定向凝固经时效处理加防护涂层的对开式空心超单晶叶片。国外主要发动机公司均已建立定向凝固和单晶涡轮叶片精铸生产线,其叶片单面余量已稳定在0.05~0.1mm,涡轮叶片合格率可达70%以上,导向叶片达90%以上。

### (2) 精密锻造制坯。

高推重比发动机的锻件占结构重量的55%以上。精密锻造技术已成为高性能发动机广泛采用的制坯方法。国外采用等温锻造技术制造带叶片的压气机整体叶盘转子;用粉末冶金超塑热等静压和等温锻造精化技术制造具有无偏析超细晶粒和难以成形的锻件毛坯,并批量生产各种尺寸的叶身无余量精锻叶片。

### (3) 快速凝固粉末冶金制坯。

快速凝固技术已广泛应用于叶片制造,这种叶片使涡轮前温度可提高200,达到1730。快速凝固层板涡轮叶片采用快速凝固粉末方法先制造出叶片层板,然后用扩散连接技术将多层叶片层板固结成叶片。用此法可制成具有冲击、对流和气膜组合式冷却结构的复合层板冷却的涡轮叶片。

## 3 航空发动机制造新工艺

### (1) 热障涂层。

高推重比发动机结构中将大量采用以热障涂层技术为代表的先进涂层技术。热端部件采用热障涂层以降低金属表面的温度,提高结构强度,其中有陶瓷涂层和多层隔热层。发动机冷端部件均采用封严涂层、耐磨和防腐蚀涂层。

### (2) 激光冲击强化。

激光冲击强化是一项创新工艺,可大幅度增强金属风扇叶片的耐久性,从而降低维修成本。该工艺已用于F110、F101发动机,也将在F119、F135、F136发动机上应用。

### (3) 特种加工。

以高能束流加工为代表的特种加工技术在难切削材料加工和复杂构件的型腔、型面、型孔、微小孔、细微槽及缝的加工中具有显著特点,解决了常规加工中很难克服的困难。特种加工技术主要包括激光加工、电子束加工、离子束加工、等离子加工、电火花加工、电解加工、超声波加工、磨粒流加工和高压水射流切割等。

### (4) 结构件特种焊接。

特种焊接技术主要包括钨极惰性气体保护弧焊、活性焊剂焊接技术、自蔓延高温合成焊接法、等离子弧焊、电子束焊、激光束焊、真空钎焊、扩散焊、惯性摩擦焊、线性摩擦焊等。

### (5) 快速原型技术。

用快速原型技术可为航空发动机复杂零件的设计快速提供实体化零件,也可实现精铸复杂模具的制造,目前已发展到直接快速成形金属零件,是一种很有发展前景的工艺方法。主要方法有分层实体制造、选择性激光烧结、熔化沉积制造、三维打印和三维焊接法等。

### (6) 新型封严结构制造技术。

丝刷封严结构取代了蜂窝封严结构,成为航空发动机制造的新的工艺技术。F119和EJ200就采用了刷式封严结构。

### (7) 浮壁式火焰筒制造技术。

推重比10一级发动机的火焰筒

采用浮壁式火焰筒制造工艺。典型的F119发动机浮壁式火焰筒用玻璃陶瓷基复合材料制造,其结构用多环段连接而成。环段背向火焰的一面是对流散热的凸环,并有缝隙形成冷却隔热气膜,隔热环由浮动片构成,并用螺栓连接在外环段上。浮动片采用精密铸造,冷却隔热环部分喷涂有热障涂层,用于降低部件表面温度。

### (8) 电化学加工。

电化学加工工艺采用了电和化学的共同作用来去除金属。化学成形、电-化学钻削和电解磨削均属于电化学加工。燃气涡轮发动机部件生产中广泛采用了电-化学加工技术。

## 4 面向零件制造过程的专业化成套制造技术

GE、罗·罗和普惠公司均建成了一系列航空发动机典型零件自动化生产线,用于高性能发动机制造。

### (1) 压气机叶片精密锻造生产线。

目前航空发动机有33%的工作量来自于叶片的制造,叶片精锻生产线是解决叶片制造瓶颈的有效方法之一。生产线由叶片制坯、叶片精锻成形、叶片型面化铣、叶片热处理、叶片检测5条子生产线组成,适合于高温合金、钛合金、铝合金和不锈钢等材料精锻叶片的批量生产。

### (2) 涡轮叶片精密铸造生产线。

涡轮叶片制造质量对航空发动机的性能有很大影响。由于其结构复杂、制造技术含量高,其精铸质量和尺寸精度与叶片研制过程中的设计、制造、冶金、化学、制模、炉工等人员密切相关。国外航空发动机制造公司花费大量资金建立了发动机涡轮叶片精铸生产线。

### (3) 压气机转子叶片电-化学自动化加工生产线。

该技术集拉削加工技术、高精度测量技术、电化学技术、电火花加工技术、机器人技术以及无损检测技术等众多技术于一体,其关键技术为360°电-化学加工技术。首先采用组

合的垂直拉床将预切长度的棒材拉削加工出叶片的榫齿,然后利用根部来定位,从叶盆和叶背两面进行电-化学加工,一次完成叶身型面加工。

#### 5 信息技术与制造技术相结合

航空发动机先进制造技术必须将专业的制造技术与信息技术、管理技术有机地结合在一起,将计算机技术综合应用于发动机的设计、制造、检测、管理、销售、使用、服务等发动机研制全过程。国外航空发动机研制经历了和正在进行着从传统的大批量生产向精益生产模式的转变。GE公司发动机部GEAE在1998年制订实施了航空发动机异地协同设计和制造的增量式发展规划,取得了显著的效益。普惠公司采用集成产品开发团队的形式来管理发动机全生命周期内的计划、流程、技术、信息等经济技术活动。罗·罗公司建立了发动机典型零件的自动化生产线和协同的计算机工作环境,实施了并行工程,从整体上增强航空发动机的研制能力。

### 我国航空发动机

#### 先进制造技术发展状况

为了满足高性能发动机研制的需要,解决航空动力落后的问题,结合航空发动机研制,我国在先进航空发动机某些关键制造技术上取得了进展,主要表现在以下几方面:

(1) 异地协同设计制造平台建设已经起步,并行工程的思想被行业普遍接受,先进制造技术被设计部门采用,加快了新机研制的进度。右上图所示为采用新技术设计、制造的WS500发动机。

(2) 按照零件特点建立了航空发动机盘环零件生产线、叶片精锻生产线和大型钛合金机匣一体化制造生产线。

(3) 重要件关键工艺研究取得了重大突破。

(4) 整体叶盘五坐标NC加工工艺技术在新机研制中得到了广泛应

用,成功地应用于两级风扇整体叶盘。这是目前国内整体叶盘制造最有效的技术。

(5) 整体叶盘电解加工技术成功地应用于以高温合金为代表的难切削材料的整体结构件制造。

(6) 整体叶盘线性摩擦焊接技术进入了实质性的研究阶段。

(7) 空心叶片制造的关键工艺技术已经突破,并进入应用阶段。

(8) 涡轮叶片定向凝固和单晶精铸的关键工艺已经突破,并在新机研制中得到应用和验证。

(9) 涡轮盘、涡轮导向器、大型机匣整体精铸关键技术已经在新机研制中得到应用。

(10) 快速成形技术、热障涂层技术、电子束焊接、激光束焊接、混合搅拌焊接等新工艺方法已在新机研制中应用。

#### 几点建议

(1) 加强航空发动机制造规范研究。

标准的制造工艺规范是制造航空发动机合格零件的保证。制造规范的制定和修改必须针对具体企业环境,经过大量的试验和试用来完成。制造规范是在特定企业的环境下执行,其综合运行成本最低、加工质量最好、有最稳定的制造指令文件。

(2) 加强专业化零件生产线建设。

专业化零件生产线包括系统制造规范的设备刚性和柔性的组合,主要适合于结构相对复杂、制造周期长、生产批量大、制造质量要求高的零件,如机匣、叶盘、叶片、轴、喷嘴、涡轮叶片等,以解决航空发动机制造瓶颈问题。

(3) 加强发动机工艺数据库建设。



建立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,在切削加工中,推动刀具制造技术研究,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。

(4) 加强工艺仿真技术研究。

在建立工艺数据库和制造规范的基础上,加强工艺仿真技术研究,提高航空发动机的快速响应生产能力。

(5) 加快航空发动机信息化平台建设。

加快航空发动机行业信息化平台建设,实现航空发动机异地协同设计、制造和管理。

#### 结束语

先进制造技术是高性能航空发动机技术发展的基础,发动机技术的发展越来越依赖于材料和工艺的进步。同时,高性能航空发动机的需求和发展又促使制造技术迈向更高的水平。我们必须下大力气开展高性能航空发动机制造技术研究,在消化吸收国际先进制造技术的基础上,结合航空发动机行业的实际需要,开展自主工艺创新,以科学的工艺管理理念为指导,以先进的工艺装备为支撑,不断提高我国航空发动机制造工艺技术水平,逐步形成独具特色,既满足行业需求,又能带动国民经济发展的工艺体系。 (责编 咏智)