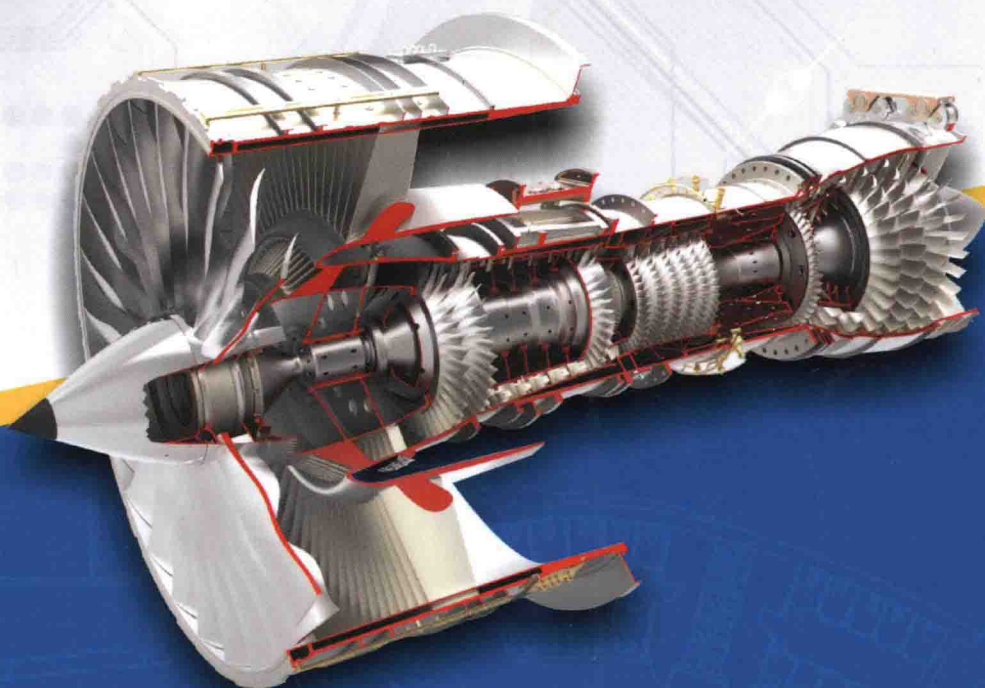


HANGKONG FADONGJI XIANJIN ZHIZAO JISHU



航空发动机先进制造技术

陈贵林 柳万珠 主编



西北工业大学出版社

航空发动机先进制造技术

主 编 陈贵林 柳万珠
编 者 陈贵林 柳万珠 梁养民 彭 颖
钱虎虢 谢国印 何 坚 刘智武

西北工业大学出版社

【内容简介】 航空发动机是飞机的“心脏”，其制造技术是衡量一个国家制造水平、国家综合实力的重要标志。全书由第五代飞机发动机先进技术、新材料、新工艺、新结构和基础技术共五个章节组成。全书详细介绍了上述制造技术的基本原理、技术优势、加工工艺、所需设备、技术发展现状以及在航空发动机上的应用等知识。本书技术新颖、内容丰富、图文并茂，是一套技术含量较高的技术文献，对从事航空发动机制造的技术人员和高等院校师生有一定的指导作用。

图书在版编目(CIP)数据

航空发动机先进制造技术/陈贵林,柳万珠主编. —西安:西北工业大学出版社,2015.2
ISBN 978-7-5612-4319-0

I. ①航… II. ①陈… ②柳… III. ①航空发动机—制造 IV. ①V263

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)040225 号

出版发行：西北工业大学出版社
通信地址：西安市友谊西路 127 号 邮编：710072
电 话：(029)88493844 88491757
网 址：www.nwpup.com
印 刷 者：北京京华虎彩印刷有限公司
开 本：787 mm×1 092 mm 1/16
印 张：13.5
字 数：239 千字
版 次：2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷
定 价：80.00 元

前 言

航空发动机是飞机的“心脏”，是影响军、民用飞机安全性和经济性的主要因素，其制造技术也是衡量一个国家制造业水平的关键，是制造强国整体综合实力的体现。美、英、法等国一直按照“预研先行”的思想，通过国家长期、稳定的持续投入，实施了多项应用基础预研的中长期研究计划，为发动机研制提供了充足的基础技术储备，降低了工程研制的技术风险，缩短了研制周期，有力地推动了高推重比发动机的发展。目前，美国第四代发动机在本世纪初已装备于最先进的战斗机，并形成作战能力；推重比 15 一级的发动机将在 2015 年推出；正在研究推重比 20 和新概念、新能源发动机的关键技术，预计该系列发动机将在 2030 年左右问世。航空发动机的结构向着轻量化、整体化、复合化的方向发展，材料向着高温、高强、低密度的方向发展，由此推动了航空制造技术的快速发展，新工艺的不断涌现，保证了新材料构件及新型结构的实现，呈现出如下发展趋势：

(1) 先进制造技术不断突破，提高了发动机的性能。

涡轮叶片结构由空心简单冷却发展到复合气膜冷却、双层壁超级冷却，叶片材料工艺由高温合金等轴晶铸造发展为无余量定向柱晶-单晶-金属间化合物合金精密铸造，耐温由 850℃ 提高到 1 100℃；涡轮盘由变形高温合金普通锻造盘发展到第一、二、三代粉末高温合金盘。

(2) 新型轻量化、整体结构制造技术迅速发展和应用，使得发动机部件重量越来越轻。

风扇、压气机转子由盘/片分体发展到整体叶盘、整体叶环；风扇叶片由实心发展到空心；承力机匣也由焊接组合发展到整体精铸，或与相邻部件一体化。

(3) 复合材料构件制造技术已实现重大突破，成为新一代发动机的主流技术。

树脂基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料、C/C 复合材料及其构件制造技术是推重比 15~20 高性能发动机必备的技术，目前国外不断有新的复合材料制造方法得以应用。

(4) 特种制造技术得到了广泛应用，是新一代航空发动机的主要发展方向。

特殊材料和结构的特种焊接技术在航空发动机焊接结构件中的应用越来越广泛；快速原型制造技术为航空发动机复杂零件的设计实现实体化提供了快速方便的手段，可用于零件直接快速成形和修复，是一种很有发展前景的工艺方法。

(5) 数字化设计 / 制造 / 管理技术将成为占主导地位的重大关键制造技术，

提升航空制造业的整体水平。

从数字化设计 / 制造 / 管理软件系统的发展来看,西方国家特别是美国走在前列。随着对创新理念和新技术的不断发掘,先进国家在制造系统集成技术的应用方面有了突破性进展。目前,国外先进发动机制造企业把重点放在研究和实施虚拟制造技术,以缩短设计制造周期,降低设计制造成本,提高产品质量。

航空产品的发展,设计、材料、工艺是三位一体的关系;设计为主导,材料为基础,工艺为保障;未来先进航空发动机推重比的提高,材料和工艺技术的贡献将占到 50%~70%。因此,没有先进的航空发动机制造技术就没有先进的航空发动机。长期以来,美国、英国等航空发达国家把制造技术的发展置于重要的战略地位,并始终保持世界领先。

20 世纪 90 年代以来,我国航空发动机制造技术得到了显著提升。我国已经形成了满足第二、三代发动机试制、小批生产的技术能力;初步具备了第三代改进改型、第四代军用发动机研制的技术能力。但纵观全局,我国航空发动机制造技术仍然比较落后,总体上技术基础薄弱,技术储备不足,生产工艺落后,影响了新型号的研制和批产机种的交付。因此,从战略高度充分认识航空制造技术发展的重要性,提前安排相关工艺研究,是振兴我国航空发动机事业、解决航空装备“心脏病”的关键。为了了解和掌握国外先进航空发动机制造技术,为我国新型发动机研制提供借鉴和帮助,西安航空动力股份有限公司组织相关技术专家开展了国外先进航空发动机制造技术跟踪研究工作,对国外高推重比,特别是推重比 15 一级发动机所采用的新工艺、新材料和新结构制造技术进行了分析研究,搜集和整理了大量的中外文技术资料,并在此基础上进行了分析和研究,并结合新机科研已有科研成果,形成了 15 余万字的材料汇编成册。

全书分为第五代飞机先进技术、新材料、新工艺、新结构和基础技术等五个章节,所涉及的航空发动机新结构有宽弦空心风扇叶片、整体叶环、整体叶盘、铸冷/超冷单晶涡轮叶片、整体精铸机匣、双性能涡轮盘等;所涉及的新材料有粉末合金、金属基复合材料、树脂基复合材料、C/C 复合材料、陶瓷基复合材料、单晶合金、 γ -TiAl 合金、 Ti_3Al 合金、 Ni_3Al 合金、NiAl 合金等;涉及的新工艺有超塑成形/扩散连接、精密电解加工、精密铸造、激光束快速成形、电子束快速成形、陶瓷型芯成形、扩散连接、电液束流制孔、线性摩擦焊、惯性摩擦焊、搅拌摩擦焊等;所涉及的基础技术有高能光饰加工技术、表面完整性控制技术、模拟仿真技术、数字化制造技术等。本书详细介绍了上述制造技术的基本原理、技术优势、加工工艺、所需设备、技术发展现状以及在航空发动机上应用等知识。

本书共分 5 章,第一章由陈贵林编写,第二章由柳万珠、彭颖编写,第三章由梁养民、谢国印编写,第四章由彭颖、何坚编写,第五章由刘智武、钱虎虢编写。在

本书编写过程中,王琦、汤丽、陈娟娟、王福平、解洪超、王颖、刘明星、周峰、陈文亮、裴润森、张巧林、黄天、雷晓晶、王艳、胡建华、刘秀梅、付蓉等工程师参与了中外文技术资料的搜集、整理。夏国君、刘军为本书的出版给予了很大的帮助和支持。在编写本书时参考和引用了一些学者的著作,在此一并致以谢意。

航空发动机制造技术涉及的知识面非常广,本书只能就其中的主要技术做一些简要的介绍。由于水平有限,书中肯定会有不少缺点和错误,欢迎读者批评指正。

编 者

2014 年 10 月

目 录

第一章 国外第五代飞机发动机结构及工艺特点	1
第一节 概述	1
第二节 国外第五代飞机发动机简介	3
第三节 国外第五代飞机发动机的结构特点	6
第四节 国外第五代飞机发动机的制造技术特点	7
第二章 新材料应用	9
第一节 发动机用新型金属材料	9
第二节 树脂基复合材料制造技术	19
第三节 C/C 复合材料的制备工艺及应用	26
第四节 连续纤维增强陶瓷基复合材料成形制造技术	33
第五节 金属基复合材料的制备技术及应用	39
第六节 轻质 γ -TiAl 基合金叶片锻造技术	47
第三章 新工艺应用	58
第一节 树脂基复合材料风扇导向叶片成形制造技术	58
第二节 搅拌摩擦焊技术	63
第三节 快速制造技术	73
第四节 整体叶盘/叶环线性摩擦焊技术	79
第五节 整体叶盘修复技术	86
第六节 单晶叶片电液束制孔技术	92
第七节 整体叶盘高效精密电解加工技术	102
第四章 新结构应用	111
第一节 纤维增强钛基复合材料整体叶环成形制造技术	111
第二节 大型薄壁复杂结构机匣铸造技术	116
第三节 铸冷/超冷单晶涡轮叶片铸造技术	125
第四节 陶瓷型芯先进制造技术	131
第五节 宽弦空心风扇叶片制造技术	149

第六节 整体叶盘数控加工技术	155
第七节 涡轮盘粉末合金制造技术	165
第五章 基础技术应用	173
第一节 数字化制造技术	173
第二节 航空发动机典型零件表面完整性技术	181
第三节 高能振动光饰加工技术	188
参考文献	200

第一章 国外第五代飞机发动机结构及工艺特点

第一节 概 述

2006 年前后,美国军方和洛克希德·马丁公司特邀曾经担任美国航空航天博物馆馆长的沃尔特·博伊恩先生撰写了一篇题为“代沟”的文章。该文给出了战斗机划代的方法(见表 1-1)。按照该划分标准,美国生产的 F-22 和 F-35 战斗机为目前世界上仅有的二型第五代战斗机。

表 1-1 战斗机代次划分

划代	主要技术性能特点	代表机型
第一代 (20 世纪 30 年代末~40 年代中期)	气动布局从平直翼发展到后掠翼; 涡喷发动机从离心式过渡到轴流式; 喷气推进,其速度比之前的活塞式发动机飞机有了革命性的提升,最大飞行速度为 800 ~ 950km/h	美国:F-80; 英国:E28/39, Meteor (“流星”); 德国:Me262, He178, He280
第二代 (20 世纪 40 年代中期~50 年代初期)	后掠翼和轴流式涡喷发动机; 测距雷达; 红外空空导弹; 飞行速度为 0.95~0.98Ma,升限约 15 000m; 改进了弹射座椅,采用了增压坐舱,武器以机枪为主	美国:F-86, F9F(黑豹), F9F-8(“美洲狮”); 苏联:米格-15; 瑞典:J-29; 英国:“猎人”

续 表

划代	主要技术性能特点	代表机型
第三代 (20 世纪 50 年代末~60 年代末)	气动布局为三角翼或大后掠角机翼; 超声速; 脉冲雷达、超视距攻击; 更大功率的涡喷发动机和高效率的涡扇发动机; 最大速度达到 2.0~2.5Ma,升限接近 20 000m	美国:F-100,F-104,F-105,F-4(鬼怪); 苏联:米格-19,米格 21; 法国:“幻影”Ⅲ; 瑞典:Saab-35,Saab-37
第四代 (20 世纪 60 年代末~90 年代末)	气动布局采用边条翼; 脉冲多普勒雷达; 高推重比的涡扇发动机和电传飞行控制系统,大幅度改善了中低空和亚、跨声速机动性,采用高性能机载设备; 火控雷达具有下视下射功能,可以跟踪多个目标,探测距离达到 100km 以上,武器性能进一步提高	美国:F-14,F-15; 苏联:苏-27,米格-29; 法国:“幻影”2000
第 4 ⁺ 代	高敏捷性,传感器融和,低信号特征	欧洲:“台风”; 美国:F-16 和 F/A-18 的新改型; 苏联:苏-30; 法国:“阵风”
第 4 ⁺⁺ 代	有源相控阵雷达,信号特征更低或者采用有源(波形对消)隐身,部分具有超声速巡航能力	美国:F-15SE; 苏联:苏-35

续 表

划代	主要技术性能特点	代表机型
第五代 (21 世纪初至今)	全方位隐身； 带有精确制导武器的内埋弹仓、有源相控阵雷达(AESA)和即插即用电子设备； 高空超声速巡航,采用推力矢量技术,超高敏捷性； 部分或全部的超声速巡航能力	美国:F - 22(猛禽),F - 35(闪电) 苏联:T - 50
第六代 (未来)	高超声速； 双模发动机； 自适应外形； 超级隐身能力,在所有飞行区间(从亚声速到高马赫数)都有效； 可能具有“变形”能力,灵巧蒙皮； 高度联网,超高灵敏传感器,可选有人,定向能武器	正处在设计阶段

具备隐身、超声速巡航、非常规机动、传感器数据融合等全新性能特点的美国 F-22A 先进战术战斗机(猛禽),是由美国洛克希德·马丁、波音和通用动力公司联合设计的新一代重型隐形战斗机,它将成为 21 世纪的第五代主战機種,主要任务为取得和保持战区制空权,将是 F-15 的后继型号。历经长达 20 余年的研制和型号发展,F-22A 战斗机终于成为全球最早进入服役的第五代战斗机,于 2005 年年底形成初始作战能力。在设计侧重点上,F-22A 战斗机以夺取空中优势任务为主。F-35 战斗机是一款由美国洛克希德·马丁公司设计生产的单座、单发动机、多用途隐身战机,能够担负近空支援、目标轰炸、防空截击等多种任务,也是美国和其盟国在 21 世纪的空战主力。

第二节 国外第五代飞机发动机简介

F-22A 战斗机所用的发动机为 F119,F-35 战斗机所用的发动机为 F135,

下面就这两种类型发动机的有关情况作以介绍。

一、F119 涡扇发动机

1982 年,美国空军提出拟用于 20 世纪 90 年代中后期的下一代“先进战术战斗机(ATF)”计划,与当时的 F-15 等第三代战斗机相比,ATF 除要求有好的机动性外,还突出了良好的敏捷性、高的隐身性、超声速巡航与短距起降能力等。

1991 年 8 月 YF-22 进入“工程制造和发展(EMD)”阶段。从此,飞机被命名为 F-22,发动机被命名为 F119。F119 的第 1 种生产型发动机被命名为双转子小涵道比加力涡扇发动机 F119-PW-100,采用可上下偏转的二维矢量喷管,上下偏转角度为 20° ,推力和偏转由数字电子系统控制。

F119 涡扇发动机主要技术指标如下:

(1)具有超声速巡航能力,飞机能在不开加力条件下以马赫数 Ma 为 1.5~1.6 持续飞行。

(2)为飞机提供短距起落和非常规机动的能力。

(3)具有隐身能力,发动机的红外和雷达反射信号特征小。

(4)加力推重比提高 20%,不加力耗油率比现役战斗机发动机下降 8%~10%。

(5)零件数量减少 40%~60%,可靠性提高 1 倍,耐久性提高 2 倍。

(6)寿命期费用降低 25%~30%。

(7)推力指标最大军用推力 118kN。

优化的发动机热力循环参数为:涵道比为 0.2~0.3,总增压比为 23~27,涡轮前温度为 $1\,647\sim 1\,757^\circ\text{C}$ 。

F119 发动机结构如图 1-1 所示,由 3 级风扇、6 级高压压气机、带气动喷嘴、浮壁式火焰筒的环形燃烧室、单级高压涡轮与高压涡轮转向相反的单级低压涡轮、加力燃烧室与二维矢量喷管等组成。整台发动机分为风扇、核心机、低压涡轮、加力燃烧室、尾喷管和附件传动机匣等 6 个单元体,另外还有附件、数字电子控制系统(FADEC)及发动机监测系统。其加力推力为 155.7kN,中间推力为 104.0kN,总压比为 35,涵道比为 0.3,涡轮前温度为 $1\,850\sim 1\,950\text{K}$,最大直径为 1.13m,长度为 4.826m,重量为 1 460kg。

F119 采用的新技术主要包括:

(1)压气机采用三维非定常黏性流计算设计,级压比提高到 1.45~1.50。采用 3 级风扇和 5~6 级高压压气机达到压比 24~25。小展弦比叶片设计提高了强

度和抗外物损伤能力。采用空心叶片和整体叶盘减轻重量,采用刷式封严,减少漏气,提高效率。

(2)燃烧室改善了气膜冷却和隔热涂层,采用了浮壁燃烧室,减少火焰筒热应力,延长其低循环疲劳寿命。

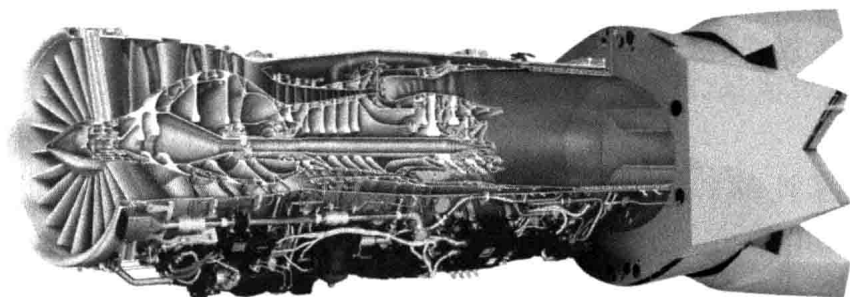


图 1-1 F119 发动机示意图

(3)涡轮采用三元跨声速气动设计,提高了涡轮的加功量,采用了单级高、低压涡轮,F119 采用了对转涡轮,取消了高、低压涡轮转子动叶之间的导叶,采用带扰流柱的先进复合冷却技术,减少冷却空气量。

(4)采用二维矢量喷管,实现了短距起落且非常规机动,减少红外和雷达信号特征。

(5)采用数字电子控制系统(FADEC),实现故障诊断和处理。

二、F135 涡扇发动机

20 世纪末,美国开展了一种综合高性能涡轮发动机计划,即 HPTET 计划。经过 HPTET 计划验证的复合材料风扇静子、超冷涡轮叶片、先进密封和先进 FADEC 等成熟技术已先后应用到 F119 发动机,在其基础上衍生出了 F135 推进系统,配装第五代战斗机 F-35。F135 发动机由美国普拉特·惠特尼公司研制,最大推力超过 176kN,作战半径超过 1 000km,但没有超声速巡航能力。F-135 发动机总压比可达 40,涵道比 <0.3 ,涡轮进口温度为 2 000~2 250K。F119 为了保证高速性能采用了较小的涵道比,而 F135 为了追求大推力增加了涵道比、放大了流量,充分释放了核心机的驱动潜能。

由于海军陆战队与英国皇家海军预计采用的 F-35B 必须能够垂直起降,因此 F135 也可以加上向下弯折的矢量推力喷嘴。但是这个喷嘴只在垂直起降的场合使用,可以大大缩短起飞/降落距离。它也是装备在 F-22A 战斗机上的 F119-PW-100 发动机的改进型号,其最大推力达 191.3kN,超过 F119-PW-100 的最

大推力多达 20%；F135 的最大军用推力达到 128kN，而 F119 - PW - 100 的最大军用推力仅为 104kN。因此，F135 是有史以来最为强劲的战斗机发动机。

F135 发动机是 F119 发动机的衍生型，如图 1-2 所示。F135 使用了 F119 的核心机，重新设计了风扇和低压涡轮，改进了加力燃烧室和喷管。3 级风扇转子采用超中等展弦比、前掠叶片、线性摩擦焊的整体叶盘和失谐技术，在保持原风扇的高级压比、高效率、大喘振裕度和轻质量的同时，将风扇的截面面积增加了 10%~20%。

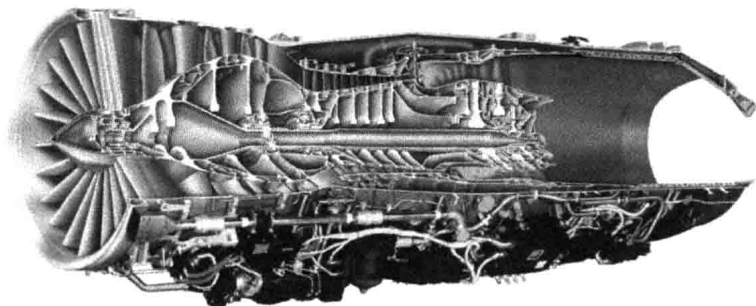


图 1-2 F135 发动机示意图

为提高推力，增加了发动机的空气流量和涵道比，提高了发动机的工作温度；为了获得短距起飞和垂直着陆能力，垂直起降型增加了新颖的升力风扇、三轴承旋转喷管、滚转控制喷管。

燃烧室在 F119 发动机三维高紊流度、高旋流结构的浮动壁燃烧室的基础上，采用了高燃油空气比燃烧室技术，在提供小的分布因子和所要求的径向剖面的同时，满足了效率目标。高、低压涡轮采用对转结构，“超冷”高压涡轮转子叶片和导流叶片采用计算流体力学(CFD)方法设计，利用高温材料 CMSX-4 单晶铸造合金铸造，已在改进的 F119 发动机上得到验证，提高耐久性的同时，能够明显提高工作温度(约为 110℃)。低压涡轮增加 1 级，变为 2 级，以适应增大的风扇带来的驱动负荷。

第三节 国外第五代飞机发动机的结构特点

军用发动机对航空发动机的一般要求是在推力满足飞机需要的前提下，推重比高、耗油率低、操纵性好、可靠性高、维修性好和环境性能满足有关条例的要求。第五代军用飞机发动机的基本技术目标是：推重比 $>12\sim15$ ；涡轮前燃气温度为 2 000~2 200K；风扇和压气机的级数比目前发动机减少约 1~2 级；采用磁浮轴承

或燃油冷却轴承而取消滑油系统;开发出“全电发动机”;具有更为完善的健康诊断系统。其主要结构特点有:

(1)风扇由3级减为1级,叶片带后掠,且为空心结构,可减重30%。已验证的这种后掠风扇叶尖速度已达475m/s,级压比为2.2。

(2)压气机由9级减为3级,第1级叶片也带后掠,转子为鼓筒式无盘结构,由钛金属基复合材料制成,与传统结构相比,可减轻重量达70%。

(3)燃烧室火焰筒材料由耐热合金改为陶瓷基复合材料,运用计算流体力学设计大大减小了出口温度分布系数,有可能实现变几何结构。

(4)高、低压涡轮均为单级,且为对转,在仍采用金属材料的条件下,整体叶盘结构可减重30%,最终涡轮前温度将高达2270~2470K,此时将采用陶瓷基复合材料或C/C复合材料。

(5)由于涡轮进口温度很高,即使以下限2270K计算,发动机单位推力也比F100高70%~80%,因而新发动机很可能不采用加力燃烧室。

(6)采用全方位矢量喷管。

第四节 国外第五代飞机发动机的制造技术特点

航空发动机性能对制造技术提出了越来越高的要求,发动机部件结构呈现轻量化、整体化、复合化的特点和发展趋势;材料不断向着耐高温、高比强度、复合化方向发展;制造技术也不断向高效、低成本、高精度、精益化方向发展。主要表现在:

(1)材料耐温能力、强度水平的不断提高,推动先进制造技术不断进步。如涡轮叶片结构由实心发展到空心;冷却形式由简单冷却发展到复合气膜冷却及双层壁超级冷却;叶片工艺由高温合金等轴晶铸造发展为单晶精密铸造;压气机盘发展为阻燃钛合金盘等。

(2)新型整体结构、高可靠性轻量化结构使制造技术朝着精密、高效、低成本方向发展,如发展了空心风扇叶片超塑成形/扩散连接技术、风扇/压气机整体叶盘和整体叶环、五轴数控加工技术、复杂结构激光快速成形技术等。

(3)复合材料将是第五代发动机及未来先进发动机的主流技术,如树脂基、钛基、碳-碳基、陶瓷基复合材料等结构件制造技术。

(4)新型热障涂层等防护涂层制备技术和特种制造技术得到了广泛应用,成为未来先进发动机的主要发展方向,如整体叶盘线性摩擦焊技术等。

(5)数字化制造技术将成为占主导地位的重大关键制造技术,提升了航空制造业的整体水平。

航空发动机是飞机的“心脏”，未来航空发动机性能的提升，制造技术的贡献将占到 50%~70%，没有先进的航空发动机制造技术，就没有先进的航空发动机。长期以来，美欧等航空发达国家始终把航空制造技术的发展置于重要的战略地位。因此，国内应按照航空发动机技术的发展规律，加大对航空制造技术的投入力度，提前开展相关制造技术的研究，形成“货架”技术，助推航空发动机整体水平的提升。

第二章 新材料应用

第一节 发动机用新型金属材料

高性能飞机发动机的发展,有赖于航空发动机材料的发展。为了提高发动机的推重比,降低发动机耗油率,满足发动机部件高温、高强、抗蠕变、抗疲劳、抗氧化等性能,新型单晶材料、粉末高温合金材料及轻型高温材料的研究应用成为必然。

据预测,在未来航空发动机性能的提高中,新材料的贡献率将为 50%~70%,而材料和制造技术对发动机减重的贡献率将为 70%~80%。21 世纪,复合材料在高性能燃气涡轮发动机重要结构件上的用量比例明显增加。而钛合金、高强度高韧性高温合金、粉末合金、定向柱晶和单晶合金仍然是高推重比、高性能发动机的主要结构材料。例如压气机叶片采用 γ -钛铝合金;涡轮盘采用金属间化合物和双合金材料;涡轮叶片采用先进的单晶合金材料。

一、单晶高温合金

高温合金是指以铁、镍、钴为基,能在 600℃ 以上高温抗氧化或抗腐蚀,并在一定应力作用下长期工作的一类金属材料,因其合金化程度很高,在英国、美国称之为超合金,它可通过定向凝固工艺和选晶技术制成只有单个晶粒或多个柱晶的铸件。相对于普通铸造合金,由于其尽量消除晶界强化元素及采用特殊的成形方法,单晶高温合金的综合性能得到进一步增强,即延伸率明显改善;蠕变持久性能在中温和高温下均成倍提高;高温疲劳寿命大幅度延长,达到普通铸造合金的十倍左右。

1. 单晶高温合金的特点

单晶高温合金是在定向高温合金基础上发展而来的,以完全消除高温断裂特征的晶界,从而达到很高的蠕变及持久强度。经过几十年的发展,国外已经开发出了四、五代单晶合金,每一代单晶合金的承温能力都比前一代提高约 30℃。

第一代单晶合金(国外牌号:PWA1480,CMSX-2 等;国内牌号:DD3,DD8)的特点:①去除晶界强化元素 C,B,Zr,Hf,以获得高的初熔温度;②添加难熔元素钽代替部分钨,以获得较好的单晶铸造性能,高的 γ' 相体积分数和高的 γ' 相沉淀强度,稳定的显微组织和良好的抗氧化性、涂层稳定性;③保留难熔元素钴,以提