



工业和信息化部“十二五”规划教材

航空燃气涡轮发动机 典型制造工艺

Hangkong Ranqi Wolun Fadongji Dianxing Zhizao Gongyi

申秀丽 张 辉 宋满祥 潘宁民 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



工业和信息化部“十二五”规划教材

航空燃气涡轮发动机 典型制造工艺

申秀丽 张 辉 宋满祥 潘宁民 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是为高等院校飞行器动力工程本科专业高年级教学需求编写的,通过了解航空燃气涡轮发动机主要零部件的制造工艺、装配和试车技术等,可以在学生的飞行器动力设计知识结构和制造工艺之间架起一座桥梁,通过对工艺知识的了解和掌握,提升工程设计的技术水平。

本书的主要内容包括与航空燃气涡轮发动机设计相关的典型制造工艺。全书共分7章,主要包括:航空发动机常用材料、典型零件金属成形工艺、叶片制造工艺、盘类零件制造工艺、轴类零件制造工艺、机匣制造工艺、航空发动机的装配工艺和试车工艺等。

本书可作为高等院校飞行器动力工程本科专业的教材,也可供相关专业的学生、教师及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空燃气涡轮发动机典型制造工艺 / 申秀丽等编著

—北京:北京航空航天大学出版社,2016.5

ISBN 978-7-5124-2137-0

I. ①航… II. ①申… III. ①航空发动机—燃气轮机—生产工艺 IV. ①V235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 117329 号

版权所有,侵权必究。

航空燃气涡轮发动机典型制造工艺

申秀丽 张 辉 宋满祥 潘宁氏 编著

责任编辑 宋淑娟

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京兴华昌盛印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:18.25 字数:467 千字

2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5124-2137-0 定价:48.00 元

前 言

本书是工业和信息化部“十二五”规划教材,可供高等院校飞行器动力工程专业本科高年级学生选用,也可供相关专业的学生、教师及工程技术人员参考。

随着航空燃气轮机推重比(功重比)和可靠性要求的不断提高,工程设计和制造工艺一体化趋势越来越明显。本教材拟通过了解航空燃气涡轮发动机主要零部件的制造工艺、装配和试车技术等,在飞行器动力工程专业学生的工程设计和制造工艺之间架起一座知识的桥梁,通过对工艺知识的了解和掌握,提升工程设计的技术水平。

航空燃气涡轮发动机的主要零件有叶片、轮盘、轴和机匣等,由于航空燃气涡轮发动机在高温、高压、高转速等环境下工作,设计上采用了许多复杂结构和新材料,这些材料加工性差,结构和型面复杂,加工精度高,对零件表面质量有特殊要求,需要特殊的切削刀具、设备以及特种加工工艺。毛坯制造主要采用精密锻压、精密铸造和粉末冶金等技术,采用这些技术可获得精确的毛坯外形,既节约贵重的金属材料,又减少切削加工工作量;用焊接方法制造的航空发动机零、部件数量显著增加,为保证焊接质量,大量采用氩弧焊、电子束焊、真空钎焊、摩擦焊和扩散焊等连接技术。特种加工在航空燃气涡轮发动机制造中是常规机械加工不可缺少的补充加工方法,是借助于电能、热能、电化学能、化学能及特殊机械能等多种能量来实现材料切除的加工方法,其残余应力、冷作硬化、热应力、热影响区及毛刺等表面缺陷均比机械切削表面小。航空燃气涡轮发动机的零件一般都要经过热处理,使零件具备必要的性能,除采用通用的热处理工艺和设备外,还采用真空热处理和在保护气体中的热处理。在化学热处理方面,除渗碳、渗氮外,渗金属和多元素共渗技术都有了很大的发展。表面涂层技术的提高也提高了零件的耐磨性、耐蚀性和热稳定性,延长了使用寿命。

由于飞行器对航空燃气涡轮发动机的性能要求严格,对其空间尺寸又进行了限制,故对航空燃气涡轮发动机的装配过程有特殊的要求和严格的工艺程序。在装配过程中,其配合精度完全靠机械加工精度和钳工调整来保证。一些精密部件(如活门部件)的装配和总装配控制在清洁、防尘并有空调装置的厂房内进行,从而使装配质量大大提高。

本书由申秀丽、张辉、宋满祥和潘宁民共同编写。第1、3、4、5章主要由申秀



丽编写;第2章主要由张辉编写,申秀丽修改;第6、7章由潘宁民、宋满祥编写并修改。

本书聘请了北京航空航天大学陈光教授和中航工业黎明发动机集团有限公司高鸽副总师两位专家进行了评审,特此表示感谢!

本书在编写过程中较多参考了《透平机械现代制造技术丛书》(科学出版社,2002年),特此表示感谢!对于本书参考的其他未列出参考文献的作者在此一并表示感谢!

限于编者水平,书中缺点、错误在所难免,敬请广大读者批评指正。

作者
2016年3月

目 录

第 1 章 工艺基础知识	1
1.1 航空发动机常用材料	1
1.1.1 钛合金	1
1.1.2 高温合金	3
1.1.3 复合材料	4
1.1.4 其他新型材料	6
1.2 典型零件金属成形工艺	6
1.2.1 锻造技术	7
1.2.2 铸造技术	9
1.2.3 焊接工艺	9
1.3 无损检测	13
习 题	17
第 2 章 叶片制造工艺	18
2.1 叶片概述	18
2.1.1 叶片的结构特点	18
2.1.2 叶片的选材	24
2.1.3 叶片的工艺特点	26
2.2 叶片锻压成形	27
2.2.1 概 述	27
2.2.2 叶片锻压设备	27
2.2.3 叶片精锻成形	29
2.2.4 叶片特种锻压技术	31
2.3 叶片精密铸造	34
2.3.1 概 述	34
2.3.2 涡轮叶片精密铸造工艺流程	35
2.3.3 叶片精密铸造的结晶取向	39
2.4 叶片机械加工	41
2.4.1 概 述	41
2.4.2 叶片机械加工定位	42
2.4.3 叶身型面加工	44
2.4.4 叶片榫头加工	48
2.5 叶片的特种加工	51
2.5.1 叶片电解加工	51



2.5.2	叶片电火花加工	54
2.5.3	叶片化学铣削	56
2.5.4	叶片激光加工	57
2.5.5	空心风扇叶片的成形工艺	58
2.6	叶片表面工程技术	60
2.6.1	叶片表面改性技术	60
2.6.2	叶片表面光饰	62
2.6.3	叶片表面涂层技术	63
2.7	叶片检测	68
2.7.1	叶片金属流线检测	68
2.7.2	叶片形状与尺寸检测	68
2.7.3	叶片主要物理性能检测	70
习 题		71
第3章 盘类零件制造工艺		72
3.1	盘类零件概述	72
3.1.1	盘类零件的结构特点	72
3.1.2	盘类零件的选材	75
3.1.3	盘类零件的技术要求及工艺特点	76
3.2	盘类零件毛坯制造	79
3.2.1	钛合金轮盘成形工艺	79
3.2.2	变形高温合金轮盘成形工艺	80
3.2.3	粉末高温合金轮盘成形工艺	82
3.2.4	压气机盘和涡轮盘的毛坯	84
3.3	盘类件的典型加工工艺	87
3.3.1	盘类件的完整加工工艺	87
3.3.2	盘类件的车加工工艺	89
3.3.3	盘类件的榫槽加工工艺	92
3.3.4	盘类件端面孔的加工工艺	97
3.4	鼓筒盘组件的成形及加工工艺	99
3.4.1	鼓筒盘组件的结构特点及技术要求	99
3.4.2	典型鼓筒盘组件的真空电子束焊接	101
3.4.3	鼓筒盘组件的摩擦焊接	103
3.4.4	焊接鼓筒盘组件的车加工	105
3.5	整体叶盘制造工艺	107
3.6	盘类件热处理及表面处理工艺	109
3.6.1	热处理工艺	109
3.6.2	表面处理工艺	111
3.7	盘类件、焊接鼓筒盘组件的技术检测	113



3.7.1 盘类件、焊接鼓筒盘组件的外观检测	114
3.7.2 盘类件、鼓筒盘组件的尺寸检测	114
3.7.3 形位公差检测	116
3.7.4 盘类件榫槽检测	118
习 题	119
第4章 轴类零件制造工艺	120
4.1 轴类零件概述	120
4.1.1 轴类零件的结构特点	120
4.1.2 轴类零件的选材	122
4.1.3 轴类零件的技术要求及工艺特点	122
4.2 轴类零件的毛坯制造	124
4.2.1 轴类零件的成形工艺	124
4.2.2 毛坯图及技术要求	124
4.2.3 典型轴类零件的毛坯工艺	126
4.3 轴类零件的加工工艺	126
4.3.1 轴类零件的完整加工工艺	126
4.3.2 轴类零件的深孔加工工艺	130
4.3.3 轴类零件的花键加工工艺	133
4.4 轴类零件的热处理及表面处理工艺	135
4.4.1 热处理工艺	135
4.4.2 稳定处理工艺	137
4.4.3 轴类零件的表面处理工艺	137
4.5 轴类零件的检测	138
习 题	139
第5章 机匣制造工艺	140
5.1 机匣类零件概述	140
5.1.1 机匣类零件的结构特点	140
5.1.2 机匣类零件的选材	142
5.1.3 机匣类零件的技术要求及工艺特点	143
5.2 机匣的成形工艺	144
5.2.1 环形机匣锻造毛坯	144
5.2.2 环形机匣铸造毛坯	145
5.2.3 环形机匣焊接毛坯	146
5.2.4 箱体机匣铸造毛坯	154
5.3 环形机匣机械加工	155
5.3.1 典型机匣工艺流程	155
5.3.2 环形机匣车加工	160



5.3.3	环形机匣铣削加工	161
5.3.4	对开机匣纵向安装边加工	163
5.3.5	机匣上孔的加工	164
5.4	机匣加工的热处理工艺及特种工艺	165
5.4.1	环形机匣的热处理工艺	166
5.4.2	机匣内表面的封严涂层工艺	166
5.4.3	机匣蜂窝加工工艺	167
5.5	箱体机匣的加工工艺	168
5.5.1	箱体机匣加工工艺特点	168
5.5.2	机匣壳体孔的加工	170
5.6	机匣的检测	172
5.6.1	环形机匣的检测	172
5.6.2	箱体机匣的检测	174
习 题		175
第 6 章	装配工艺	176
6.1	概 述	176
6.1.1	基本概念	176
6.1.2	装配工艺内容	176
6.1.3	装配工艺特点	177
6.1.4	装配组织形式	178
6.2	装配方法	180
6.2.1	装配尺寸链	180
6.2.2	装配精度	184
6.2.3	装配种类	184
6.3	装配方案和工艺流程	185
6.3.1	装配单元	185
6.3.2	零件分类	186
6.3.3	装配方案	187
6.3.4	装配工艺流程	189
6.4	选配、修配及试验	191
6.4.1	选配工序	191
6.4.2	修配工序	191
6.4.3	配合特性检查工序	192
6.4.4	试验工序	193
6.5	检验工序	193
6.5.1	基本概念	193
6.5.2	检验方式	194
6.5.3	检验管理制度	196



6.6 装配工艺技术准备	196
6.6.1 工艺规程	196
6.6.2 工艺说明书	199
6.6.3 工艺装备及设备	199
6.6.4 虚拟装配	200
6.7 典型装配工艺	201
6.7.1 螺纹连接件	201
6.7.2 其他连接形式	205
6.7.3 齿轮传动	207
6.7.4 滚动轴承	209
6.7.5 粘接技术	213
6.8 组合件、部件装配	216
6.8.1 静子装配	216
6.8.2 转子装配	221
6.8.3 转子平衡	226
6.8.4 转动部件装配	229
6.8.5 燃烧部件装配	232
6.9 发动机整机装配	238
6.9.1 概 述	238
6.9.2 传动装配	239
6.9.3 转子连接	240
6.9.4 典型传动装配	242
6.9.5 总装配	243
6.10 发动机分解	248
6.10.1 概 述	248
6.10.2 工艺过程	248
6.10.3 分解特点	249
6.10.4 主要要求	249
6.10.5 故障检测	250
习 题	250
第7章 试车工艺	251
7.1 试车台简介	251
7.1.1 功 能	251
7.1.2 类 型	251
7.1.3 试车台组成	252
7.2 试车台主要设备	252
7.2.1 试车台架	252
7.2.2 进气加温装置	254



7.2.3	进气道	255
7.2.4	排气引射段	255
7.3	试车台工作系统	256
7.3.1	推力测量系统	256
7.3.2	汽油供应系统	259
7.3.3	燃油供应系统	260
7.3.4	滑油供应系统	261
7.3.5	发动机尾喷口操纵系统	261
7.4	试车台电气设备	262
7.4.1	电 源	262
7.4.2	操控台	262
7.4.3	测试和数据采集系统	262
7.5	航空发动机高空台	263
7.5.1	概 述	263
7.5.2	高空台设备	263
7.5.3	高空模拟试验	266
7.6	航空发动机试车	267
7.6.1	概 述	267
7.6.2	试车类型	268
7.6.3	试车工艺流程和工序内容	269
7.6.4	主要单元程序	270
习 题		274
参考文献		275

第 1 章 工艺基础知识

1.1 航空发动机常用材料

航空发动机常用的材料有铜、铝合金、钛合金、不锈钢、高温合金和复合材料等,随着航空发动机推重比(功重比)和涡轮前温度等性能的提高,复合材料所占的比重越来越大。图 1-1 为航空发动机常用材料用量所占比重随年代的变化图。

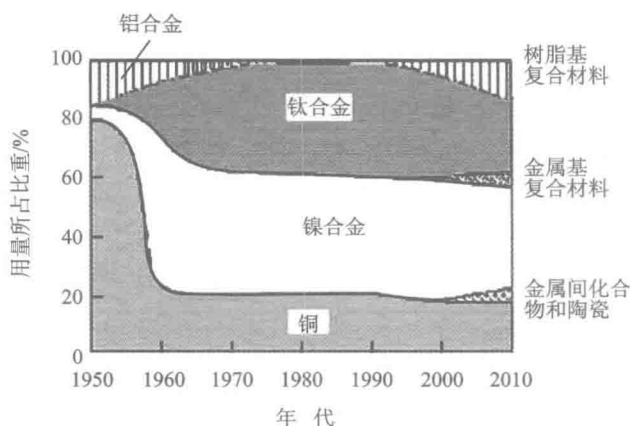


图 1-1 航空发动机常用材料的变化趋势^[1]

1.1.1 钛合金

1. 钛合金分类

钛是同素异构体,熔点为 1720°C ,在低于 882°C 时呈密排六方晶格结构,称为 α 钛;在 882°C 以上时呈体心立方晶格结构,称为 β 钛^[2]。钛合金指以钛为基体金属,并含有其他合金元素及杂质的合金。其主要包括 α 钛合金、近 α 钛合金、 $\alpha-\beta$ 钛合金和 β 钛合金,等等。

(1) 工业纯钛、 α 钛合金和近 α 钛合金^[2-4]

工业纯钛指以钛为基体,并含有少量铁、碳、氧、氮和氢等杂质的致密金属,钛含量(质量分数)可达 99%,例如 TA1、TA2 和 TA3 等。

α 钛合金指含有 α 稳定元素,在室温状态下基本为 α 相的钛合金,例如 TA4 等。 α 钛合金组织稳定,但不能进行热处理强化。

近 α 钛合金指以 α 相为基体,仅含有少量 β 相的钛合金。在室温稳定状态下 β 相含量(质量分数)一般小于 10%,例如 TA11、TA15 和 TA19 等。该类合金主要以锻件和模锻件形式供应。

(2) $\alpha-\beta$ 钛合金^[3,4]

$\alpha-\beta$ 钛合金指在室温状态下由 α 相及 β 相所组成的钛合金。 β 相含量(质量分数)一般为



10%~15%，例如 TC4、TC11 和 TC16 等。该合金具有良好的综合性能，能较好地进行热塑性加工，能进行淬火、时效使合金强化。

(3) β 钛合金^[2,3]

β 钛合金指含有足够多的 β 稳定元素，在适当冷却速度下能使其室温组织的绝大部分为 β 相的钛合金，例如 TB5、TB6 等。 β 钛合金在未热处理时就具有较高的强度，在淬火、时效后得到进一步强化；但其热稳定性较差，不宜在高温下使用。

2. 钛合金在航空发动机中的应用

钛合金由于具有较高的比强度、高温蠕变能力、疲劳强度、持久强度和组织稳定性，故在航空发动机风扇和压气机等中、低温部件中大量使用，主要用于制造压气机叶片、盘和机匣等零组件。

(1) 钛合金在航空发动机主体材料中的用量

从图 1-1 可以看出，在 20 世纪 50 年代，发动机用钛合金的比例较少，而到了 20 世纪 70 至 90 年代，先进航空发动机钛合金的用量达到了 35% 左右。到了 21 世纪，随着复合材料在发动机应用中的增多，钛合金用量会逐渐减少。一些西方国家的发动机钛合金用量如表 1-1 所列。我国 1988 年定型的 WP13 航空发动机的钛合金用量为 13%，2002 年定型的昆仑发动机的钛合金用量为 15%，太行发动机的钛合金用量提高到 25%^[1]。

表 1-1 一些西方国家的航空发动机钛合金用量^[1]

发动机型号	J79	JT3D	JT9D	F100	F101	CF6	V2500
推出年代	1956	1960	1969	1973	1976	1985	1989
装备的机型	F-4 F-404	B-707 B-52 F-141	B-747 B-767 F-5A	F-15 F-16	B-1	A-330 B-747 B-767	A-320 A-321
钛合金用量/%	2	15	25	25	20	27	31

(2) 航空发动机用高温钛合金

高温钛合金指可在 300~600℃ 范围内工作的钛合金。世界各国研制的航空发动机用的高温钛合金如表 1-2 所列。

表 1-2 世界各国研制的航空发动机用高温钛合金^[4]

工作温度/℃	350	400	450	500	550	600	650
中国	TC1 TC2 TC4	TC6 TC17	TA11	TC11 TA7 TA15	TA12	Ti60	TD3(Ti ₃ Al)
俄罗斯	BT6 BT12	BT3-1	BT8M	BT9 BT20	BT25	BT18y BT36	—
欧美	Ti-64	Ti-6246 IMI550 Ti-17	IMI679 Ti-811	IMI685 Ti-6242	Ti-6242S IMI829	IMI834 Ti-1100	Ti25Al10Nb3V1Mo



我国高温钛合金的发展历程如图 1-2 所示。

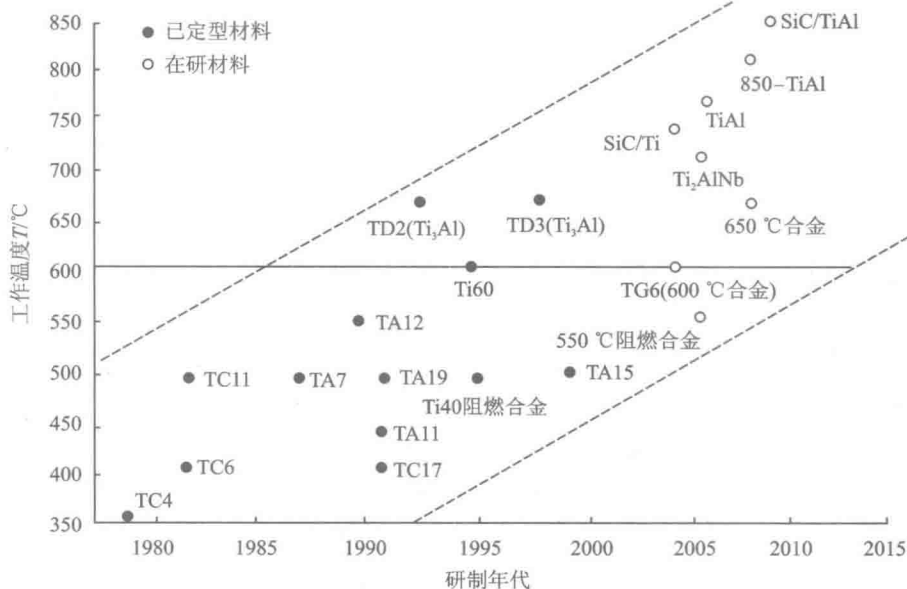


图 1-2 我国高温钛合金的发展历程^[4]

(3) 阻燃钛合金^[1,4]

钛合金具有较高的氧化生成热,同时导热性又很差,因此一旦出现转子叶片与机匣间的高能摩擦,就可能产生“钛火”。典型的“钛火”燃烧时间仅为 4~20 s,且难以灭火,因此研制出阻燃钛合金。美国的 AlloyC(Ti-35V-15Cr 或 Ti1270)阻燃钛合金已成功应用于 F119 发动机的高压压气机机匣、导向叶片和矢量尾喷管的喷口调节片,这是航空发动机使用的第一种 β 钛合金和阻燃钛合金。AlloyC 阻燃的原理主要有:首先当转子和静子相对摩擦升温时,低熔点(675 °C)的 V_2O_5 最先熔化起到吸热、熔化和降温的作用;其次 AlloyC 的导热系数远低于普通钛合金,并尽可能达到“绝热燃烧温度”低的要求。

钛合金提高阻燃能力的另一个途径是在钛合金表面渗入金属,从而形成表面阻燃合金^[1]。

(4) 钛合金的加工性能^[5]

钛合金的切削加工性能很差,表现在以下几个方面:

- ① 强度高,硬度大,摩擦系数大,导热系数低。
- ② 弹性模量小,加工时工件回弹大,加剧了刀具后刀面的磨损。
- ③ 刀具切削刃承受的应力大,刀尖或切削刃容易磨损。
- ④ 在切削加工时,工件极易与刀具表面发生黏结。

1.1.2 高温合金

1. 高温合金分类

高温合金指以铁、镍、钴为基,能在 600 °C 以上高温环境下抗氧化或耐腐蚀,并能在一定应力作用下长期工作的一类金属材料。高温合金按成形方式可分为变形高温合金、铸造高温合金(等轴晶铸造高温合金、定向凝固柱晶高温合金和单晶高温合金)和粉末高温合金^[6]。我国



各类高温合金牌号前缀的意思是:“GH”——变形高温合金,“K”——等轴晶铸造高温合金,“DZ”——定向凝固柱晶高温合金,“DD”——单晶高温合金,“FGH”——粉末高温合金。

(1) 变形高温合金和粉末高温合金编号方法^[7]

变形高温合金和粉末高温合金牌号前缀后接 4 位阿拉伯数字,例如 GH4169 和 FGH4095,其中第 2~4 位数字为合金牌号。第 1 位数字表示的意义如下:

- 1——铁或镍(镍含量小于 50%)为主要元素的固溶强化型合金类;
- 2——铁或镍(镍含量小于 50%)为主要元素的时效强化型合金类;
- 3——镍为主要元素的固溶强化型合金类;
- 4——镍为主要元素的时效强化型合金类;
- 5——钴为主要元素的固溶强化型合金类;
- 6——钴为主要元素的时效强化型合金类;
- 7——铬为主要元素的固溶强化型合金类;
- 8——铬为主要元素的时效强化型合金类。

固溶强化型指合金通过固溶处理,使成分均匀、晶粒度大小合适,然后制成零件使用,如 GH3044、GH3030 等。时效强化型也即沉淀强化型,指合金通过固溶处理和时效处理,使沉淀强化相 γ' 或 γ'' 等均匀弥散地析出,阻碍位错运动,从而大幅度提高高温合金的强度,如 GH2132、GH4169 等。

(2) 铸造高温合金编号方法^[7]

铸造高温合金牌号前缀后一般采用 3 位阿拉伯数字,普通等轴晶铸造高温合金允许 4 位数字。第 1 位数字表示分类号,其意义如下:

- 1——钛铝系金属间化合物高温材料;
- 2——铁或铁镍(镍含量小于 50%)为主要元素的合金;
- 4——镍为主要元素的合金和镍铝系金属间化合物高温材料;
- 8——铬为主要元素的合金。

第 2、3 位数字表示高温合金编号。

2. 高温合金在航空发动机上的应用

在现代航空发动机上,高温合金主要用于燃烧室、涡轮、加力燃烧室和尾喷管等热端部件。随着发动机性能的提高,在压气机的末级也采用高温合金。与钛合金相比,高温合金密度大,因此,在发动机上所占的比重较大。在先进航空发动机上,高温合金重量占航空发动机重量的 60% 以上^[6]。但随着复合材料应用的日趋成熟,高温合金在发动机上的应用比例会逐渐减小。

高温合金在发动机上应用技术难度较大的零部件主要有涡轮叶片、涡轮盘、薄壁机匣件和大型整体承力静子铸件等。

1.1.3 复合材料

复合材料是由两种或两种以上物理和化学性质不同的物质组合而成的一种多相固体材料^[8]。复合材料具有如下特征:

- ① 微观上是非均相材料,组分材料间有明显的界面;
- ② 组分材料性能差异很大;
- ③ 组成复合材料后性能有较大的改进;



④ 组分材料的体积分数大于 10%^[9]。

复合材料按基体材料分类可分为：

① 聚合物基复合材料，其基体主要包括热固性树脂、热塑性树脂及橡胶等，航空发动机主要用树脂基复合材料；

② 金属基复合材料，其基体主要包括铝基、钛基和铜基等，航空发动机主要用钛基复合材料；

③ 无机非金属基复合材料，其基体主要包括玻璃、水泥、碳和碳化硅等，航空发动机主要用碳化硅陶瓷基复合材料^[10]。

1. 树脂基复合材料

目前，航空发动机使用的树脂基主要包括热固性树脂中的环氧树脂和双马来酰亚胺。增强相主要是玻璃纤维和碳纤维。树脂基复合材料的工作温度一般低于 180℃，最高耐温为 300℃^[11]，因此，主要应用于发动机的冷端部件，包括反推力装置、外涵道和风扇系统等部件。

目前，国外一些大涵道比涡扇发动机冷端零部件采用了树脂基复合材料，如表 1-3 所列。

表 1-3 大涵道比发动机树脂基复合材料构件及选材^[12]

序 号	复合材料	应用零部件	应用背景	公 司
1	玻纤/双马	帽罩前锥	PW4000, PW6000	P&W
2	碳纤/环氧	风扇转子叶片	GE90, GEnx, LEAP-X1C	GE
3	碳纤/环氧	风扇出口导流叶片	PW4084, PW4168	P&W
4	碳纤/双马	发动机短舱及反推装置	Trent700, Trent800	R·R
5	碳纤/环氧		PW4168	P&W

2. 金属基复合材料

金属基复合材料是由一种或几种增强相与金属基体复合而成的多相材料，其中增强相材料一般具有很高的强度、硬度、模量、耐磨性、耐热性以及较低的塑性，而金属基体材料往往具有较好的塑性，但强度和模量等力学性能较低^[13]。

金属基复合材料主要应用于发动机的中、低温部件。常用的金属基复合材料包含纤维增强铝合金基、钛合金基等复合材料。其应用如表 1-4 所列。

表 1-4 金属基复合材料在航空发动机上的应用^[14]

序 号	复合材料	零部件	应用背景	公 司
1	碳化硅纤维增强的钛基复合材料	风扇叶片	—	GE
		低压轴	F110	
2	硼纤维增强的铝基复合材料	风扇叶片	—	P&W
3	高强度纤维增强的斜方晶钛铝基复合材料	压气机后转子	IHPTET 计划	—
4	碳化硅纤维增强的钛基复合材料	高压压气机第 3、4 级 整体叶环	IHPTET 计划 XTC-16 核心机	—

3. 陶瓷基复合材料

陶瓷基复合材料具有耐高温、抗氧化、耐磨耗、耐腐蚀等优点。航空发动机常用的陶瓷基



复合材料包括碳纤维增韧碳化硅陶瓷基(C_f/SiC)复合材料和碳化硅纤维增韧碳化硅陶瓷基复合材料(SiC_f/SiC)。 C_f/SiC 耐温可达 $1650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ， SiC_f/SiC 耐温可达 $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于 SiC_f/SiC 具有更好的抗氧化性能，因此，得到了更广泛的应用。 SiC_f/SiC 的密度为镍基高温合金的 $1/3\sim 1/4$ ^[15]。其应用如表 1-5 所列。

表 1-5 陶瓷基复合材料在航空发动机上的应用^[15,16]

序 号	复合材料	零部件	应用背景	公 司
1	CMCs	低压涡轮导向叶片	LEAP-1	GE
2	SiC_f/SiC	喷管内调节片	M53-2, M88-2	SNECMA
3	SiC_f/SiC	火焰筒(使用温度 $1480\text{ }^{\circ}\text{C}$)	XTE65/2	美 IHPTET 计划

1.1.4 其他新型材料

1. 形状记忆合金

形状记忆合金(Shape Memory Alloy, SMA)是一种新型智能材料，具有独特的形状记忆效应(Shape Memory Effect, SME)和超弹性效应(Super Elastic Effect, SEE)。

所谓形状记忆效应，即在外力作用下发生较大的塑性变形，但升温后，塑性变形会回复到外力作用前的状态。所谓超弹性效应，即形状记忆合金在较高温度状态下，在加载过程中产生较大的应变，卸载后可恢复到原来的形状^[17]。

形状记忆合金在发动机上的应用以 NiTi 合金为主。

2. 金属间化合物

金属间化合物是由两种或多种金属以整数化(化学计量比)组成的化合物。金属间化合物具有复杂的点阵结构，通常是由两种或多种亚点阵嵌套形成的有序超点阵结构，各种组元原子各自占据点阵的固定阵点，最大限度地形成异类原子之间的结合，因此又称为有序金属间化合物^[6]。

在航空发动机领域应用的金属间化合物主要有 TiAl 系金属间化合物和 Ni_3Al 基金属间化合物。

TiAl 合金应用的最佳部位是高压压气机叶片和低压涡轮叶片。GE 公司研制的 GEnx 发动机低压涡轮第 6 级和第 7 级叶片采用了铸造 TiAl 合金叶片。该材料也在压气机机匣和扩压器等零件上尝试使用。 Ti_3Al 基及 Ti_2AlNb 基金属适用于制造在 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时使用的航空发动机机匣、结合环等结构件^[4]。

由于 Ni_3Al 基金属间化合物的高熔点和低密度，使其在高温下具有高的强度及优良的抗蠕变性能，因此可在 $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上高温和恶劣环境下工作。在航空发动机上主要用于高、低压涡轮导向叶片。IC10 合金的铸造性能优良，可进行大缘板复杂导向叶片的整体定向凝固成形^[6]。

1.2 典型零件金属成形工艺

金属成形工艺分为凝固成形、塑性成形和焊接成形。锻造技术属于塑性成形工艺，铸造技