



# 涡轮叶片疲劳

闫晓军 聂景旭 著



科学出版社

# 涡轮叶片疲劳

闫晓军 聂景旭 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书考虑了高温环境下的低周疲劳、蠕变/疲劳、复合疲劳等多种失效模式,对包括铸造、锻造、定向凝固等多种工艺的航空燃气涡轮发动机涡轮叶片(包括部分模拟件)开展了系统的疲劳寿命研究;介绍了作者课题组发展的高温疲劳寿命研究的试验技术和理论方法,并介绍了一些新的试验现象。书中针对真实涡轮叶片的研究结果与叶片在外场的使用情况(故障)基本一致;发展的试验技术和理论方法既可以用于当前航空发动机型号的排故和可靠性的提高,也可应用在新型号发动机的研制、设计改型等预先研究任务中。

本书可作为燃气涡轮发动机相关领域的科研技术人员、高校师生的参考书,也可供高温结构力学、疲劳寿命领域的相关科研人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

涡轮叶片疲劳/闫晓军,聂景旭著. —北京:科学出版社,2013  
ISBN 978-7-03-038951-0

I. ① 涡… II. ① 闫…② 聂… III. ① 航空发动机-叶片-疲劳试验  
IV. ① V232.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 251600 号

责任编辑:裴 育 / 责任校对:宣 慧  
责任印制:肖 兴 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2014 年 1 月第一次印刷 印张: 14 3/4 插页: 2

字数: 280 000

定价: 80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



## 序 一

《涡轮叶片疲劳》是一本非常有特色的疲劳试验技术方面的著作。该书针对航空工程的高可靠性要求,结合发动机高温工作环境和多种失效模式,系统、深入地介绍了开展涡轮叶片寿命研究的方法和技术。目前,尚未看到论述此方面研究的其他著作。

开展真实涡轮叶片寿命研究,不仅要设计较为复杂的加载和加温试验装置,用以模拟叶片的工作环境;同时在载荷谱换算、试验标定、数据处理等方面,也要求采用符合工程实际的理论模型和方法。作者结合实际承担的科研任务,从相对容易的低周疲劳开始,逐步发展到蠕变/疲劳、复合疲劳等较难研究,突破了一系列试验技术难点,在试验研究基础上,提出了相关的理论模型和方法,发现了新的试验现象,在涡轮叶片疲劳研究方面取得了系统、完整的研究成果。

该书不仅给出了试验和理论研究的方法,同时也给出了大量、不同类型涡轮叶片的寿命试验数据,并针对数据进行了细致分析和研究,为工程技术研究提供了宝贵的数据和技术积累。

该书可作为燃气涡轮发动机相关领域的科研技术人员、学校师生的参考书;同时,书中给出的方法也值得开展其他工程结构疲劳寿命研究借鉴。

**高镇同**

北京航空航天大学教授

中国科学院院士

2013年夏

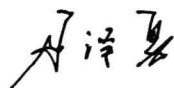
## 序 二

《涡轮叶片疲劳》一书即将出版，遵闫晓军教授之命，斗胆在这里写几句话，不敢称之为序。

航空发动机研制的重要性与艰巨性正为国人关注，作者总结二十余年研究成果撰写的专著出版，恰逢其时。相信它会对读者多有启迪，促进我国涡轮叶片疲劳研究工作更深入开展。

我痴长晓军近三十岁，但我们都是聂先生的学生。这本书是晓军与先生科研合作的见证，借祝贺此书出版之机，深深感谢先生的多年教诲，也对晓军一直随侍先生左右表示羡慕。

晓军的几位学生参加了该书的文图准备，衷心希望像他们一样的莘莘学子早有建树，大家共同振兴我国的航空发动机事业。



中国工程院院士

2013年6月

## 前 言

涡轮叶片是航空燃气涡轮发动机中的重要部件,在高温、高压的燃气环境中高速旋转,其寿命和可靠性对发动机的安全工作影响非常大。如果把航空发动机比喻为“工业之花”,那么涡轮叶片一定是这朵花中开得最鲜艳的一瓣。对涡轮叶片疲劳寿命的研究,一般是在大量试验研究的基础上,发展相关理论和模型,不断提高对叶片寿命预测的精度。

近 20 年来,在国家发展高性能、高可靠性航空发动机的任务需求下,我们承担了某些型号发动机的排故、定寿、延寿方面的科研任务,以此为背景开展的基础研究也得到了国家自然科学基金的资助。这些研究主要以真实涡轮叶片(包括部分模拟件)为对象,同时考虑高温环境下的低周疲劳、蠕变/疲劳、复合疲劳等多种失效模式,叶片材料也包括铸造、锻造、定向凝固等多种高温合金,寿命试验件的数量多达数百件。在开展上述研究的过程中,逐步形成了一套试验技术和研究方法,也提出了一些理论模型,发现了一些试验现象。本书内容就是对上述研究结果的整理和归纳,以期对航空发动机的发展有所裨益。

本书可作为燃气涡轮发动机相关领域的科研技术人员、高校师生的参考书。由于书中介绍的试验件都是基于国内材料和工艺体系制造的,研究结果对航空燃气涡轮发动机生产厂家也有重要参考价值。

作者的研究工作得到了国家自然科学基金(10872015、11272025),空军装备部可靠性办公室,中航工业 331 厂、贵州航空发动机设计研究所、606 所、608 所、120 厂等单位的资助和支持,在此表示感谢!

我国疲劳领域的专家高镇同院士和航空发动机领域的专家尹泽勇院士欣然为本书撰写了序言,向读者推荐此书。在此向两位院士表示诚挚的感谢!

感谢课题组侯贵仓高工、赵长占高工对书中试验技术发展所作的重要贡献。感谢张允华研究员、宁勇研究员、邵光迪研究员、黄维娜研究员的帮助和建议。

博士研究生孙瑞杰、邓瑛、张小勇、张锴、漆明净、陈霞参加了本书文字、图片、资料的收集工作,感谢他们的辛勤付出。

本书的研究方法和试验技术难免存在不足,敬请广大读者指正。

作 者  
2013 年夏

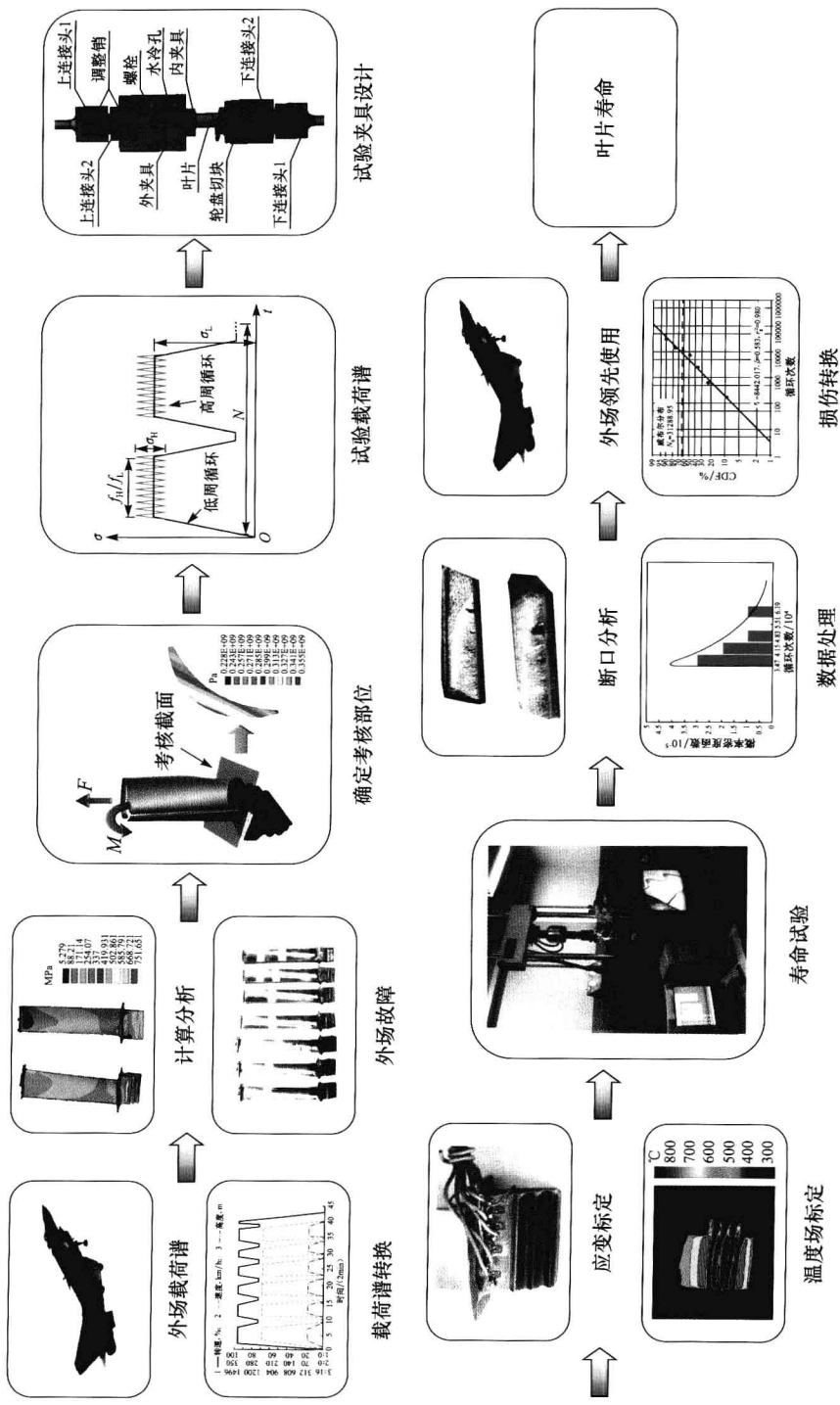


图 1.33 本书真实涡轮叶片疲劳寿命研究的方法和思路

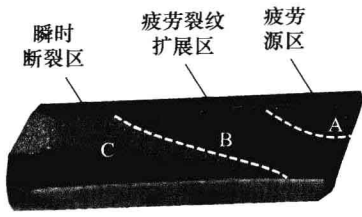


图 2.1(a) 疲劳破坏断口

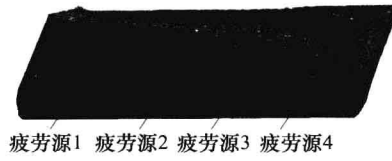


图 2.2 多源疲劳断口宏观照片

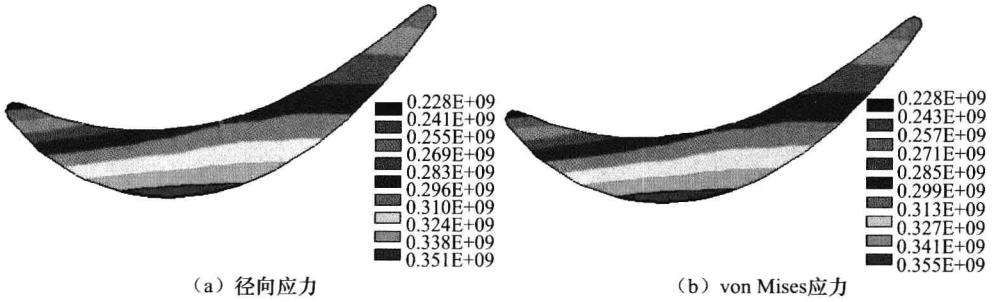


图 3.7 设计状态下叶片考核截面上的应力云图对比(单位:Pa)

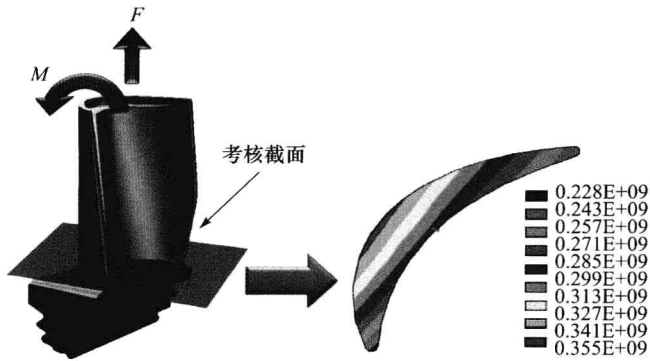


图 3.8 涡轮叶片受力及考核截面应力分布示意图(单位:Pa)

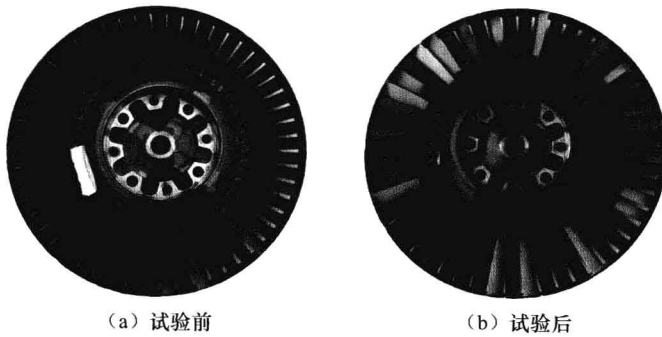


图 3.16 示温漆测量涡轮叶片温度场



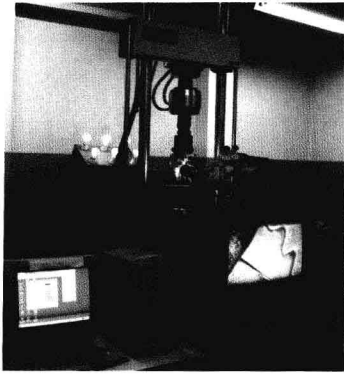


图 3.24 典型低周疲劳试验系统



图 4.6 蠕变/疲劳试验加载方案及照片

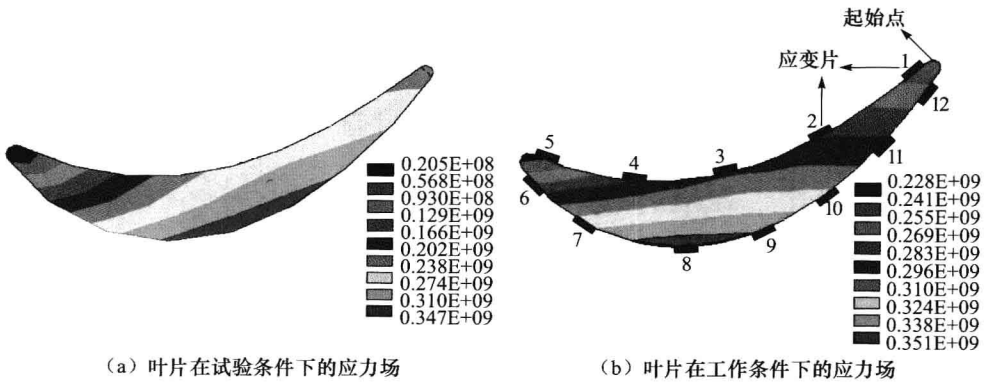


图 4.7 叶片应力场分布(单位:Pa)

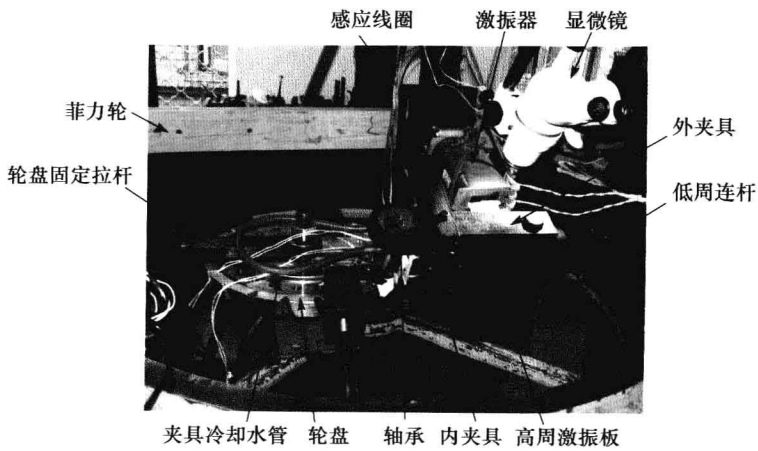


图 5.12 叶片高温复合疲劳试验系统

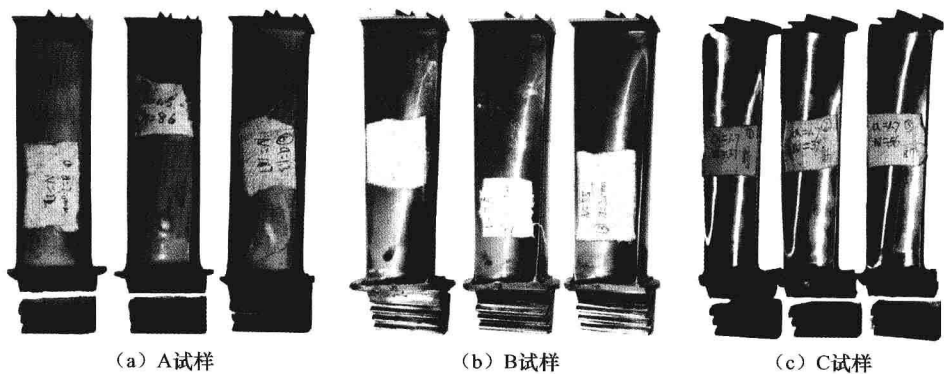


图 5.25 三类叶片典型破坏情况

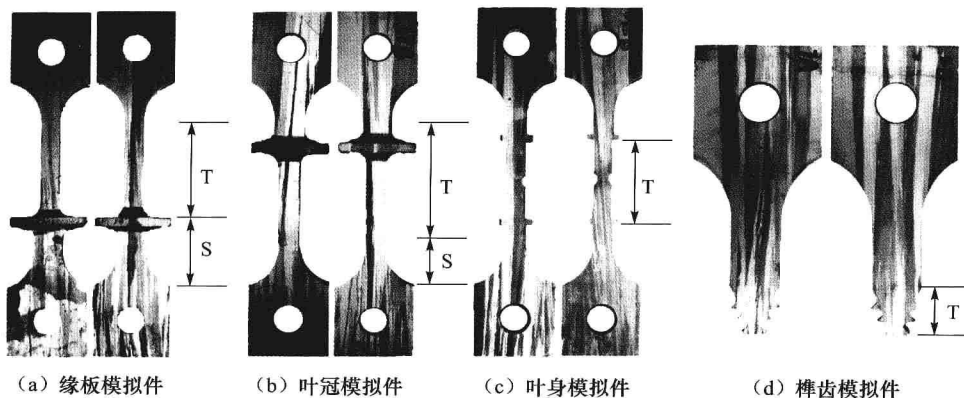


图 7.3 叶片模拟件典型显晶照片

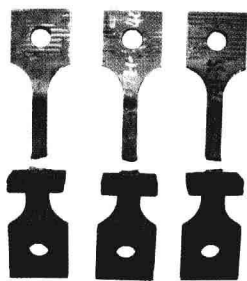


图 7.30 缘板模拟件破坏照片

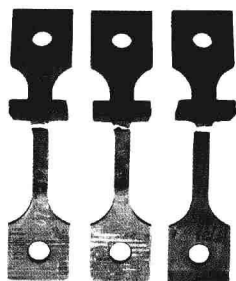


图 7.32 叶冠模拟件破坏照片

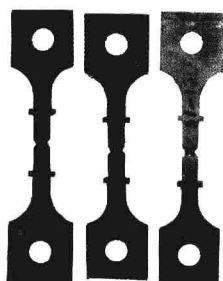


图 7.34 叶身模拟件破坏照片

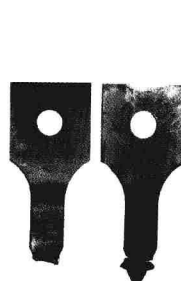


图 7.35 榫齿模拟件破坏照片

# 目 录

序一

序二

前言

第 1 章 概述	1
1.1 燃气涡轮发动机	1
1.2 涡轮叶片的结构形式	5
1.3 涡轮叶片的材料和制造工艺	7
1.4 涡轮叶片的失效模式	10
1.4.1 涡轮叶片所受载荷	10
1.4.2 涡轮叶片的主要失效模式	11
1.5 涡轮叶片疲劳寿命的研究方法	19
1.6 本书的研究方法和思路	25
1.7 本书的内容安排	27
参考文献	27
第 2 章 高温疲劳基本知识	33
2.1 概述	33
2.2 疲劳基本知识	33
2.2.1 疲劳破坏的特点	33
2.2.2 疲劳应力及相关曲线	35
2.2.3 疲劳寿命的概率统计	40
2.2.4 载荷谱	41
2.3 疲劳累积损伤理论	44
2.4 蠕变/疲劳交互作用	45
2.4.1 蠕变	45
2.4.2 蠕变/疲劳寿命预测	47
2.5 高低周复合疲劳	51
2.5.1 高低周复合疲劳的特点	51
2.5.2 复合疲劳寿命预测	52

2.5.3 双频比法应用实例 .....	53
参考文献 .....	62
<b>第3章 低周疲劳</b> .....	<b>65</b>
3.1 概述 .....	65
3.2 低周疲劳试验技术 .....	66
3.2.1 载荷谱及转换 .....	66
3.2.2 应力场及模拟 .....	71
3.2.3 温度场及模拟 .....	77
3.2.4 试验系统 .....	79
3.2.5 数据处理 .....	81
3.3 铸造叶片的低周疲劳 .....	83
3.3.1 改进工艺对寿命的影响 .....	83
3.3.2 改进检测方法对寿命的影响 .....	87
3.3.3 微裂纹对寿命的影响 .....	90
3.4 锻造叶片的低周疲劳 .....	91
3.5 小结 .....	97
参考文献 .....	98
<b>第4章 蠕变/疲劳</b> .....	<b>100</b>
4.1 概述 .....	100
4.2 叶身部位蠕变/疲劳寿命 .....	100
4.2.1 确定考核部位 .....	101
4.2.2 载荷谱换算及寿命预测 .....	104
4.2.3 蠕变/疲劳试验 .....	107
4.2.4 试验结果及数据分析 .....	110
4.2.5 蠕变伸长量 .....	121
4.2.6 断口分析 .....	125
4.3 榫齿根部蠕变/疲劳寿命 .....	126
4.3.1 蠕变/疲劳试验 .....	127
4.3.2 试验条件考核部位应力场及变化 .....	129
4.3.3 工作条件考核部位应力场及变化 .....	132
4.3.4 断口分析 .....	133
4.4 小结 .....	135
参考文献 .....	136

---

<b>第 5 章 复合疲劳</b> .....	138
5.1 概述 .....	138
5.2 复合疲劳试验技术 .....	140
5.2.1 考核部位及工作应力场 .....	140
5.2.2 载荷谱 .....	141
5.2.3 加载方式及夹具设计 .....	142
5.2.4 应力场标定与振动应力监测 .....	143
5.2.5 叶片加温 .....	145
5.2.6 复合疲劳试验系统 .....	145
5.3 寿命预测理论与方法 .....	146
5.3.1 反推法 .....	146
5.3.2 对比法 .....	161
5.4 小结 .....	168
参考文献 .....	169
<b>第 6 章 定向凝固叶片的疲劳特点</b> .....	170
6.1 概述 .....	170
6.2 低周疲劳 .....	172
6.2.1 试验方案 .....	172
6.2.2 试验结果 .....	173
6.2.3 试验条件下叶片的应力场 .....	176
6.2.4 低周疲劳特点 .....	178
6.3 高低周复合疲劳 .....	178
6.3.1 试验方案 .....	178
6.3.2 试验结果 .....	179
6.3.3 与普通铸造叶片对比 .....	182
6.3.4 复合疲劳特点 .....	183
6.4 小结 .....	184
参考文献 .....	184
<b>第 7 章 定向凝固叶片模拟件的疲劳蠕变试验研究</b> .....	185
7.1 概述 .....	185
7.2 模拟件设计 .....	185
7.2.1 几何特征 .....	186
7.2.2 显微组织 .....	188

---

7.2.3 应力分布 .....	190
7.3 模拟件显微组织的数值仿真 .....	192
7.3.1 数值模型 .....	192
7.3.2 宏观物理场 .....	193
7.3.3 显微组织 .....	197
7.3.4 与腐蚀显晶结果对比 .....	199
7.4 叶片显微组织的数值模拟 .....	200
7.4.1 数值模型 .....	200
7.4.2 宏观物理场 .....	201
7.4.3 显微组织 .....	203
7.5 低周疲劳试验 .....	205
7.5.1 试验方案 .....	205
7.5.2 试验结果 .....	206
7.5.3 数据分析 .....	208
7.6 蠕变试验 .....	211
7.6.1 试验方案 .....	211
7.6.2 试验结果 .....	212
7.6.3 数据分析 .....	213
7.7 小结 .....	217
参考文献 .....	218
<b>第8章 总结</b> .....	<b>219</b>

# 第 1 章 概 述

## 1.1 燃气涡轮发动机

1903 年,美国的莱特兄弟采用活塞发动机作为飞机动力,实现了人类历史上首次有动力飞行,同时也开启了航空科学与技术发展的新篇章。100 多年以来,信息技术的不断革新,使得人类可以在瞬间传递大量信息;而航空科学技术的飞速进步,则可以使身处异地、异国的人们,在数小时内就能见面,地球真正变成了“地球村”。

早期飞机采用的航空活塞发动机,其工作原理和现在的汽车活塞发动机原理相同,如图 1.1 所示。首先,进入气缸的气体和雾化后的燃油混合,经电火花点火,燃油燃烧后将其化学能转换为气体内能,促使气体的压力和温度迅速升高;然后,高温高压的燃气推动活塞做往复直线运动;继而,在曲柄连杆机构作用下,活塞的往复运动转换为轴的连续旋转运动,从而带动螺旋桨或旋翼高速旋转,产生推力或升力。

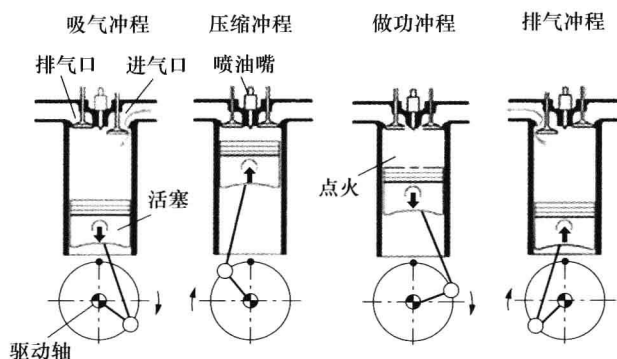


图 1.1 活塞发动机工作原理

在第二次世界大战结束前后,活塞发动机的功重比(功率/重量)已达到 1492W/kg,飞机的飞行高度可达 15km,飞行速度从 16km/h 提高到 800km/h,接近了螺旋桨飞机的速度极限<sup>[1]</sup>。受活塞发动机推进原理的限制,飞行速度不可能达到或者接近声速,因此采用活塞发动机的飞机无法再进一步提高飞行速度,这就促使了燃气涡轮发动机的出现和发展,航空推进技术进入了涡轮发动机时代。

燃气涡轮发动机是一种喷气发动机,其功重比或推重比(推力/重量)可达到普通汽车活塞发动机的 10 倍以上。这种高功重比特性,为飞机飞行速度的提高奠定了基础。目前民用飞机中的大中型客机、各国主力战机(包括固定翼和旋翼飞机)基本都采用燃气涡轮发动机作为推进装置(图 1.2)。

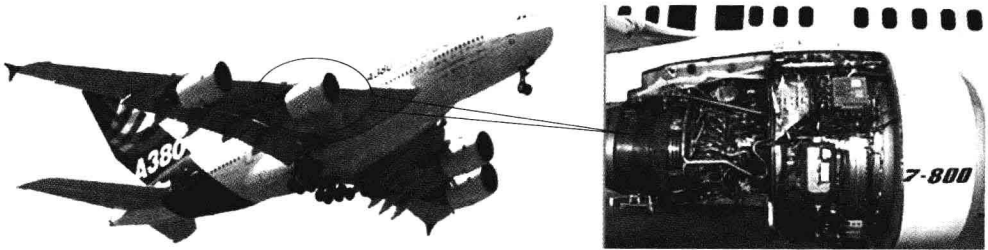


图 1.2 燃气涡轮发动机及其在飞机上的安装

燃气涡轮发动机主要由压气机、燃烧室、涡轮、尾喷管等部件组成,包括涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、涡轮螺桨发动机和涡轮轴发动机等种类。以涡轮喷气发动机为例(图 1.3),高速气流进入发动机进气道后,首先经压气机压缩而增压,之后流入燃烧室进行喷油燃烧,形成高温、高压燃气,接着进入涡轮中膨胀做功,推动涡轮高速旋转,涡轮和压气机则通过涡轮轴相连接,从而带动压气机及其他动力部件工作,最后燃气流经由尾喷管高速喷出,产生推力。

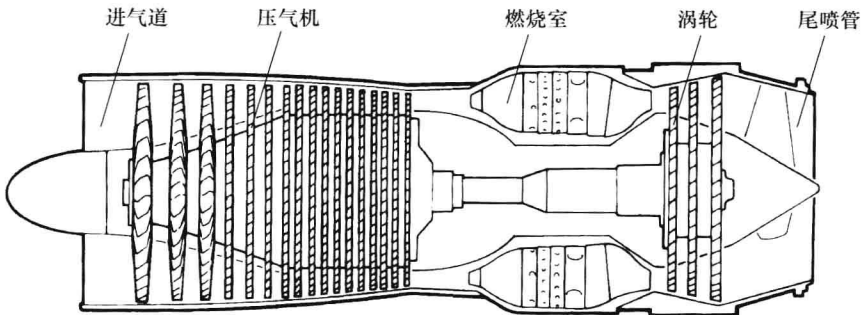


图 1.3 典型燃气涡轮发动机的结构图

目前大量使用的涡轮风扇发动机的基本工作原理和上述涡轮喷气发动机相同,但一般采用双转子(两个发动机轴)结构(图 1.4),压气机和涡轮都分别由低压、高压两部分组成,前面的低压压气机也称作风扇。涡轮风扇发动机气流通道分为内、外涵道(图 1.5),内涵道燃气的循环和上述涡轮喷气相同,但外涵道的气流不经过燃烧,其总体耗油率比涡轮喷气发动机要优越。目前,先进的第三代、第四代军用战斗机、商用客机大多都采用涡轮风扇发动机作为动力。



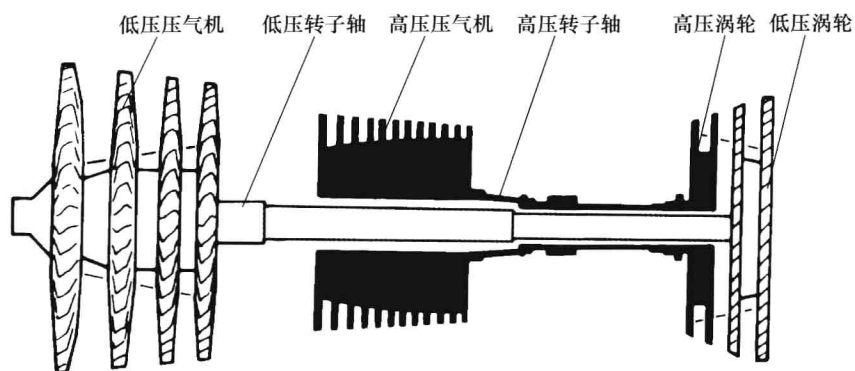


图 1.4 双转子的结构示意图

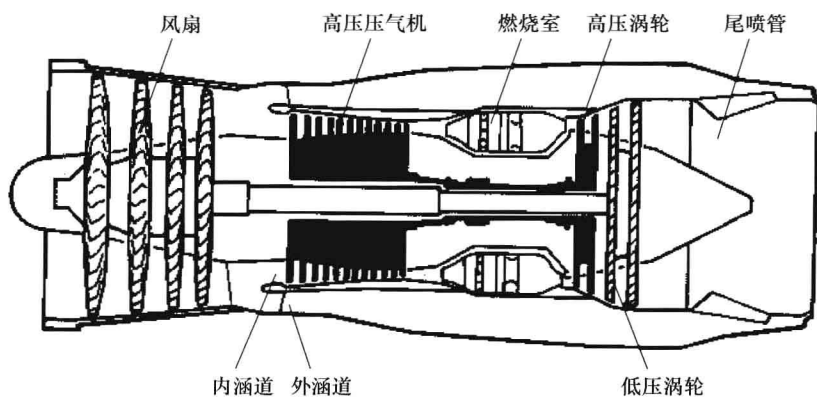


图 1.5 涡轮风扇发动机结构示意图

对比活塞发动机和燃气涡轮发动机的工作原理可以看出:在活塞发动机中,活塞是将化学能转变机械能的部件,而在燃气涡轮发动机中,涡轮叶片起到了类似的作用。两种发动机不同之处在于:活塞输出的功率是间歇性的,而涡轮叶片由于呈环状并均匀安装在圆形轮盘的轮缘上,可以连续旋转做功,这正是燃气涡轮发动机的输出功率远大于活塞发动机的重要原因。

一般情况下,涡轮部件由不动的静子和转动的转子组成。静子包括涡轮导向器(由沿周向分布的多个导向器叶片组成)和固定它的机匣。转子包括转子叶片(又称“涡轮动叶”或“涡轮工作叶片”)、涡轮盘和涡轮轴等。涡轮部件的工作原理如图 1.6 所示:从燃烧室出来的高压、高温、高速燃气,经过一排固定在机匣上的静子叶片(又称导向器叶片),对气流方向和速度进行调整,使其以更有利的攻角和更高的速度流向转子叶片,从而带动涡轮盘和涡轮轴转动,输出机械功。