

透平机械现代制造技术丛书

# 叶片制造技术

《透平机械现代制造技术丛书》编委会

科学出版社

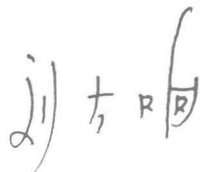
北京

## 序 言

1903年12月17日是一个值得永远纪念的日子,美国莱特兄弟在机械师查·泰勒的帮助下,自己动手制造一台12马力、重77.2公斤的活塞式汽油发动机装在“飞行者I号”飞机上,成功地进行了第一次持续的、有动力的、可操纵的载人飞行,这一划时代的创举,实现了人类飞上天空的梦想,开创了人类飞行的新纪元。此后,活塞式发动机的发展,促使飞机得到了广泛的应用;到20世纪30年代末和40年代初,英国、德国相继发明燃气涡轮发动机,使航空工业发生了一场“革命”,飞机从亚声速跨入了超声速飞行的新时代;20世纪60~70年代,涡轮风扇发动机的问世,军机飞行速度、航程和机动性出现了历史性的飞跃,民用宽体客机实现了不着陆的越洋飞行,地球变“小”了。可以毫不夸张地说,人类在航空领域中取得的每一次重大革命性进展,无不与航空动力技术的突破和进步相关。

现在,作为飞机“心脏”的航空发动机技术已成为一个国家科技水平、国防实力和综合国力的重要标志之一。而航空发动机的发展,又在很大程度上依赖于材料和制造技术的发展,因此,可以说新材料技术和现代制造技术是航空动力技术发展的重要基础,而新材料的创新和应用与其相应的制造技术又是密不可分的。很难想像没有先进的制造技术而能研制出先进的航空发动机。我国航空发动机技术,与发达国家相比存在较大差距,其中主要原因之一就是制造技术的落后。要想改变我国航空动力落后的面貌,除了在基础理论研究、应用研究、型号工程设计、新材料、试验和测试技术等方面努力之外,还必须在现代航空制造技术方面有所突破和创新。

《透平机械现代制造技术丛书》正是在这种背景下编写的。本丛书由沈阳黎明航空发动机(集团)有限责任公司技术中心组织编写,遵循“求实、求是、求新、求精”的原则,紧紧围绕生产和研制中所出现的实际问题,总结了黎明公司几十年的实践经验,针对发动机的主要关键零件逐一进行编写,还对发动机装配、试车技术做了较系统的论述,将基础理论与工程实践紧密结合起来,可以说是从实践中来,到实践中去,弥补了学校教材中工程实际应用的不足,具有较强的工程实用价值。更为难能可贵的是,本丛书的作者大多是中青年科技人员,说明我们的事业后继有人,发展有望。本书以实用性为主,主要读者是从事透平机械、航空发动机制造工程的广大技术人员、检验人员、技术工人和各级技术管理干部,对大专院校相关专业的师生也有一定的参考价值。我相信,本丛书的出版,将促进航空发动机制造技术的交流,对培养高水平的专业技术人员和高级技术工人起到重要作用,并推动我国航空发动机制造技术不断向前发展。



## 编 者 序

黎明航空发动机(集团)有限责任公司从完成第一台燃气涡轮喷气发动机至今已有40多年的历史,随着各型燃气涡轮发动机的研制与生产,在制造技术方面积累了大量经验,取得了丰硕成果。

为了促进航空发动机制造技术的交流,推动我国航空发动机制造技术的进步,2000年8月决定将黎明公司在开发透平机械和发展透平机械制造技术方面的经验、成果汇总起来,编写成《透平机械现代制造技术丛书》出版。

本套丛书由黎明公司技术中心组织各制造研究室技术人员,并约请公司广大技术人员,聘请有关教授、专家,经过两年多的努力,编写了5个分册,即《机匣制造技术》、《盘轴制造技术》、《结构件制造技术》、《叶片制造技术》、《装配试车技术》。

编写这套丛书,坚持了求实、求是、求新、求精的原则,以航空燃气涡轮喷气、涡轮风扇发动机为重点,工艺学科为主线,在总体上强调综合性、系统性、科学性、实用性;在表达形式上以文字叙述为主,并辅以数据和必要的图、表、公式,力求这套丛书所述技术先进、概念准确、理性鲜明、论述简洁、排版合理和阅读方便,是一套为从事制造技术的广大科技人员提供有益指导和参考作用的科技丛书。

在编写这套丛书的过程中,对给予支持的单位和提供资料、参与编审的人员,表示衷心感谢。

首次组织撰写“丛书”,缺乏经验,加之参与编审人员水平有限,错误、不足之处在所难免,希望广大读者给予指正。

《透平机械现代制造技术丛书》编委会

2002年7月

为世界发展

贡献力量

林长明

《透平机械现代制造技术丛书》  
总编委会及办公室成员组成名单

总编委员会主任 庞 为

总编委会副主任 曹福泉 于培敏 崔荣繁 王 伟 石竖鲲

总编委会常务副主任 王 伟

总编委会委员(按姓氏笔画排列)

于文怀	于培敏	王 伟	王 翱	王少刚	王全星
王聪梅	王德新	牛昌安	石竖鲲	艾银生	关志成
司克鑫	阴洪生	曲 伸	刘 艳	刘一鸣	刘秋生
刘隋建	李宝歧	李谱庄	宋宝玉	杨 坚	杨振辉
杨继业	张利生	张春刚	张树江	岳 滨	周 义
庞 为	庞庆华	庞继友	邵清安	赵瑞珊	姜雪梅
倪国雄	钱韶光	高 鸽	郭 旭	郭玉芬	曹福泉
盛 明	崔树森	崔荣繁	董书惠	谢瑞福	熊 瑛
潘永瑚	魏 政	魏鉴梅			

总编委会常务委员(按姓氏笔画排列)

于文怀	王聪梅	石竖鲲	艾银生	刘 艳	刘秋生
宋宝玉	张春刚	赵瑞珊	姜雪梅	董书惠	潘永瑚
魏鉴梅					

总编委会办公室主任 石竖鲲

总编委会办公室成员(按姓氏笔画排列)

艾银生	刘秋生	宋宝玉	张春刚	郭玉兰	潘永瑚
责任编辑	宋宝玉	艾银生			
封面设计	艾银生	隋雪冰			

## 《叶片制造技术》编委会

**主 编** 刘 艳

**副 主 编** (按姓氏笔画排列)

刘秋生 吴自然 杨占尧 陈桂梅 胡元平 黄爱华

**编 委** (按姓氏笔画排列)

王少刚 王德新 石玉珂 宋宝玉 刘 艳 刘一鸣  
刘秋生 刘隋建 曲 伸 朱丽娟 何发源 吴自然  
张利生 张树江 李 波 杨占尧 汪大成 邵清安  
陈家芝 陈桂梅 国振兴 段绪海 胡元平 赵金地  
赵维勋 郭玉芬 郭殿品 崔树森 梁巧云 黄爱华  
韩 松 熊 瑛 魏朋义

**编写人员** (按姓氏笔画排列)

马济民 王 敏 王仲章 王兴雅 王向荣 王赤斌  
王柏庭 王德新 冯文刚 司连有 任富华 刘 丹  
刘洪利 朱丽娟 朴文凯 何焕章 吴卫东 吴太石  
吴自然 张 鹏 张丕德 张世东 李 波 李向东  
李辰辉 杨 青 杨晓彬 杨景金 汪大成 苏润涛  
辛公春 邵清安 陈 珍 周殿旺 国振兴 苗润田  
金文媿 姚忠东 段占峰 段绪海 洪玉清 胡元平  
赵长利 赵秀梅 赵金地 顾兴业 崔文虎 曹斌升  
梁巧云 黄爱华 程宜宣 韩 宏 鲁海洋 魏朋义  
魏姝恒

**统稿人员** (按姓氏笔画排列)

刘 艳 刘秋生 吴自然 杨 成 国振兴 胡元平  
梁巧云 黄爱华

**提供资料人员** (按姓氏笔画排列)

马凤春 王东林 丛 健 史凤岭 孙 革 孙永昌  
杜立奔 陈晓峰 韩立夫

# 目 录

序言  
编者序

## 第1篇 透平机械叶片及其制造技术概论

<b>第1章 现代透平机械叶片的技术特性</b> .....	1
1.1 叶片在透平机械中的功能使命 .....	1
1.1.1 叶片的工作原理 .....	1
1.1.2 叶片的工作条件 .....	3
1.2 叶片分类及其特点 .....	4
1.2.1 按使用功能划分 .....	4
1.2.2 按工作状态划分 .....	5
1.2.3 按叶片型面类型划分 .....	5
1.2.4 按叶片材料划分 .....	5
1.2.5 按有无阻尼台划分 .....	5
1.2.6 按叶片是否实体划分 .....	6
1.3 叶片与轮盘的连接榫头 .....	6
1.3.1 销钉式榫头 .....	6
1.3.2 燕尾形榫头 .....	7
1.3.3 涡轮叶片上枞树形榫头 .....	8
1.4 航空发动机叶片的特性 .....	8
1.5 叶片制造技术概述 .....	9
1.5.1 涡轮叶片的制造技术 .....	10
1.5.2 压气机叶片制造技术 .....	11
1.5.3 计算机模拟激光快速成型技术 .....	11
<b>第2章 透平机械叶片材料</b> .....	14
2.1 透平机械叶片选材 .....	14
2.1.1 叶片设计的通用安全系数含义 .....	14
2.1.2 发动机叶片选材的系统工程特性和对应的选材原则 .....	14
2.1.3 航空发动机叶片材料选择基本程序 .....	15
2.2 叶片用材料特性 .....	15
2.3 叶片的主要失效形式及预防措施 .....	16
2.3.1 叶片的主要失效形式 .....	16

2.3.2	预防失效的主要技术措施 .....	17
2.4	航空发动机叶片常用材料 .....	17
2.4.1	铝合金 .....	17
2.4.2	钛合金 .....	18
2.4.3	不锈钢 .....	22
2.4.4	高温合金 .....	23
2.4.5	定向、单晶合金特点及应用情况 .....	29
2.5	叶片材料发展展望 .....	30
2.6	典型叶片热处理工艺 .....	31
2.6.1	LY2 铝合金叶片的热处理 .....	31
2.6.2	不锈钢叶片的热处理 .....	31
2.6.3	钛合金叶片的热处理 .....	34
2.6.4	高温合金叶片的热处理 .....	36

## 第2篇 叶片锻造

<b>第3章</b>	<b>叶片锻压成形 .....</b>	<b>39</b>
3.1	概述 .....	39
3.2	叶片锻压成形的基本工艺技术 .....	39
3.2.1	叶片锻压成形工艺类型 .....	39
3.2.2	叶片锻件设计 .....	40
3.2.3	叶片锻压工艺过程设计 .....	45
3.2.4	涡轮叶片模锻工艺的典型实例 .....	46
3.3	叶片锻压模具设计 .....	49
3.3.1	叶片终锻模设计 .....	49
3.3.2	叶片预锻模设计 .....	53
3.4	叶片精锻成形 .....	55
3.4.1	叶片精锻工艺概述 .....	55
3.4.2	叶片精锻工艺的构成 .....	56
3.4.3	叶片精锻设备 .....	60
3.4.4	典型叶片精锻件成形工艺过程 .....	64
<b>第4章</b>	<b>特种锻压技术在叶片成形中的应用 .....</b>	<b>78</b>
4.1	概述 .....	78
4.1.1	特种锻压技术的定义、范围和种类 .....	78
4.1.2	叶片锻压成形应用特种锻压技术的意义 .....	78
4.1.3	选择特种锻压技术的主要原则 .....	79
4.2	高速锤成形 .....	79
4.2.1	高速锤形成的基本概念 .....	79



4.2.2	叶片高速锤挤压成形 .....	85
4.2.3	高速锤挤压模具 .....	94
4.2.4	典型工艺实例 .....	99
4.3	叶片无余量冷辊轧成形 .....	101
4.3.1	冷辊轧成形的基本概念 .....	101
4.3.2	辊轧成形工艺 .....	105
4.3.3	冷轧模设计 .....	110
4.3.4	典型工艺实例 .....	112
4.4	等温模锻成形 .....	114
4.4.1	等温成形的特点 .....	114
4.4.2	等温成形变形力的计算 .....	116
4.4.3	叶片等温锻模具材料的选择 .....	118
4.4.4	叶片等温锻模具的设计原则 .....	119
4.4.5	等温模锻对润滑防护剂的特殊要求 .....	119
4.4.6	典型件的等温模锻工艺示例 .....	120

### 第3篇 叶片的精密铸造

<b>第5章</b>	<b>叶片精密铸造成形与设计 .....</b>	<b>121</b>
5.1	概述 .....	121
5.2	精密铸造叶片成形机理 .....	121
5.2.1	等轴晶叶片凝固机理 .....	121
5.2.2	叶片定向机理 .....	122
5.2.3	单晶形成的机理 .....	123
5.2.4	叶片的热处理及微观组织控制原理 .....	123
5.2.5	热等静压技术 .....	124
5.2.6	叶片再结晶 .....	125
5.3	定向柱晶和单晶叶片的铸造特点 .....	125
5.4	精密铸造叶片的设计 .....	127
5.4.1	叶片的工艺设计 .....	127
5.4.2	叶片精铸模具设计 .....	134
<b>第6章</b>	<b>叶片精密铸造工艺 .....</b>	<b>147</b>
6.1	概述 .....	147
6.2	陶瓷型芯的制造工艺 .....	147
6.2.1	概述 .....	147
6.2.2	陶瓷型芯的性能要求 .....	148
6.2.3	陶瓷型芯的制造工艺原理 .....	151
6.2.4	制芯工艺 .....	153

6.2.5	从铸件中脱芯	156
6.3	蜡模的制造工艺	157
6.3.1	模料的性能	157
6.3.2	模料的种类与特性	157
6.3.3	模料的制备	160
6.3.4	模料回收处理	160
6.3.5	制模工艺	161
6.4	型壳制造工艺	167
6.4.1	对型壳性能的要求	167
6.4.2	制壳用原材料	169
6.4.3	型壳制造工艺	171
6.5	熔铸工艺	177
6.5.1	熔炼设备	177
6.5.2	叶片精密铸造用合金锭制备	179
6.5.3	典型叶片熔注工艺	180
6.6	精铸叶片质量检验	183

## 第4篇 叶片机械加工

<b>第7章</b>	<b>叶片机械加工工艺流程</b>	185
7.1	叶片机械加工工艺流程特点	185
7.2	叶片机械加工基准的确定	186
7.2.1	建立叶片机械加工基准坐标系的主要形式	186
7.2.2	确定叶片机械加工基准坐标系的基本要点	194
7.3	叶片机械加工工艺流程的制订	195
<b>第8章</b>	<b>叶片典型结构要素加工</b>	197
8.1	叶身型面加工	197
8.1.1	叶身型面成型铣削	197
8.1.2	叶身型面仿型切削加工	198
8.1.3	叶身型面砂带磨削	205
8.1.4	叶身型面砂带抛光	215
8.1.5	叶身型面手工抛光	218
8.2	叶片榫头榫齿(枞树型、燕尾型直齿和圆弧齿)加工	225
8.2.1	榫齿成型铣削	226
8.2.2	榫齿缓进磨削	228
8.2.3	叶片榫头拉削	235
8.3	叶片阻尼台的加工	250

8.4	叶片安装板及叶冠的加工 .....	258
8.4.1	概述 .....	258
8.4.2	叶片安装板的加工 .....	260
8.4.3	叶冠的加工 .....	275
8.5	轴颈的加工 .....	277
<b>第9章</b>	<b>叶片加工计算机辅助设计制造工程 .....</b>	<b>280</b>
9.1	概述 .....	280
9.2	叶片CAD的内容 .....	281
9.3	叶片CAM的内容 .....	281
9.4	UG软件介绍 .....	287
9.4.1	UG软件概论 .....	287
9.4.2	UG软件的应用实例 .....	287
9.5	计算机辅助工艺过程编制——CAPP .....	293
9.6	叶片柔性制造系统——FMS .....	295

## 第5篇 叶片特种加工技术

<b>第10章</b>	<b>叶片的电加工技术 .....</b>	<b>299</b>
10.1	叶片的电解加工 .....	299
10.1.1	叶片的电解加工机理及其特点 .....	299
10.1.2	电解液的选择 .....	300
10.1.3	叶片型面电解成型加工 .....	303
10.1.4	整流叶片扁孔电解加工 .....	309
10.1.5	整体叶轮电解加工 .....	314
10.1.6	小孔电液束加工 .....	316
10.2	叶片的电火花加工 .....	319
10.2.1	电火花加工特点及其分类 .....	319
10.2.2	小孔电火花加工 .....	320
10.2.3	用电火花法加工叶片安装板侧面封严槽 .....	324
10.2.4	异型深孔线切割 .....	325
<b>第11章</b>	<b>叶片的焊接和激光加工 .....</b>	<b>327</b>
11.1	叶片的焊接 .....	327
11.1.1	概述 .....	327
11.1.2	压气机静子叶片组件的钎焊 .....	328
11.1.3	钛合金空心可调叶片组件的钎焊 .....	332
11.1.4	钛合金工作叶片阻尼台耐磨合金的感应钎焊 .....	334
11.1.5	涡轮工作叶片堵盖的扩散钎焊 .....	336
11.1.6	涡轮导向叶片组件的钎焊 .....	338

11.1.7	涡轮工作叶片叶冠耐磨层的焊接 .....	340
11.1.8	钛合金空心整流叶片的超塑成形与扩散连接 .....	346
11.2	叶片的激光加工 .....	348
11.2.1	激光加工机理及其特点 .....	348
11.2.2	激光加工在叶片制造中的应用 .....	349
11.2.3	激光打孔 .....	349
<b>第 12 章</b>	<b>叶片表面处理技术 .....</b>	<b>351</b>
12.1	叶片表面喷丸强化 .....	351
12.1.1	概述 .....	351
12.1.2	喷丸强化原理 .....	351
12.1.3	喷丸强化工艺对疲劳强度的影响 .....	352
12.1.4	叶片喷丸强化工艺参数及设备 .....	353
12.2	叶片表面光饰 .....	354
12.2.1	振动光饰 .....	355
12.2.2	滚动光饰 .....	359
12.3	叶片表面化学处理与涂镀层 .....	361
12.3.1	叶片宏观腐蚀检查 .....	361
12.3.2	钛合金锻造叶片表层去除和化学铣削 .....	363
12.3.3	压气机叶片叶身涂、镀层 .....	366
12.3.4	导向叶片和整流叶片特殊功能性涂层 .....	369
12.3.5	压气机转子叶片榫头电镀银和刷镀镍 .....	371
12.4	叶片高温防护涂层 .....	375
12.4.1	叶片高温防护涂层的进展历程 .....	375
12.4.2	MCrAlX 合金涂层的制备方法及比较 .....	376
12.4.3	热障涂层——最有发展前景的第四代防护涂层 .....	377
12.4.4	高温防护涂层制备方法、原理及应用实例 .....	378

## 第 6 篇 叶片检测

<b>第 13 章</b>	<b>叶片形状与尺寸的检测 .....</b>	<b>385</b>
13.1	概述 .....	385
13.2	专用测具检测 .....	387
13.2.1	叶身型面检测 .....	387
13.2.2	相关尺寸检测 .....	391
13.2.3	导向叶片喉道面积测量 .....	392
13.2.4	叶片榫头测量 .....	394
13.2.5	叶片阻尼台、锯齿冠的测量 .....	397
13.3	电感测量 .....	398

13.3.1	电感测量原理、构成及特点	398
13.3.2	电感测量仪在叶片测量中的应用	399
13.3.3	几种多通道电感测量仪简介	401
13.4	光学投影检测	402
13.4.1	光学投影检测原理	402
13.4.2	光学投影仪在叶片检测中的应用	403
13.5	三坐标测量	404
13.5.1	三坐标测量原理、流程	404
13.5.2	三坐标测量在叶片测量中的应用	405
13.5.3	三坐标测量的误差	409
<b>第14章</b>	<b>叶片主要物理性能检测</b>	<b>410</b>
14.1	概述	410
14.2	叶片的频率测量	410
14.2.1	静频测量的意义	410
14.2.2	静频的测量方法	410
14.2.3	叶片静频测定	414
14.3	叶片静力矩测量	422
14.4	叶片表面完整性检测	423
14.4.1	检测叶片表面完整性的意义	423
14.4.2	表面完整性评价方法	424
14.4.3	表面完整性检测技术	424
<b>第15章</b>	<b>叶片的无损检测</b>	<b>429</b>
15.1	概述	429
15.2	叶片的磁粉检验	429
15.2.1	磁粉检验原理及特点	429
15.2.2	叶片磁粉检验中的常见缺陷	430
15.2.3	磁粉检验方法	430
15.2.4	叶片的磁粉检验工艺	431
15.3	叶片的射线检测	431
15.3.1	射线检测的基本原理	431
15.3.2	叶片射线检测中的常见缺陷	432
15.3.3	射线检测的基本技术	432
15.4	叶片的渗透检验	439
15.4.1	渗透检验的基本原理	439
15.4.2	叶片渗透检验中的常见缺陷	440
15.4.3	叶片的渗透检验工艺	440

15.5	叶片的超声波检验	440
15.5.1	超声波检验的原理	440
15.5.2	超声波检验在叶片上的应用	441
15.5.3	叶片超声波检验的工艺要点	442
15.6	涡流检测	444
15.6.1	涡流检测的原理及特点	444
15.6.2	涡流检测在叶片上的应用	444
15.6.3	叶片涡流检测的工艺要点	445
15.7	叶片工业CT检测技术	446
15.7.1	工业CT检测技术	446
15.7.2	CT技术的基本原理	446
15.7.3	工业CT技术在叶片检测上的应用	448
参考文献		449
后记		451

# 第1篇 透平机械叶片及其制造技术概论

## 第1章 现代透平机械叶片的技术特性

### 1.1 叶片在透平机械中的功能使命

透平系英语“turbine”的音译,意为涡轮机,透平机械主要包括蒸汽轮机、燃气轮机等,透平机械的压气机一般分为轴流式和离心式两种类型,也有轴流-离心混合式。现代航空发动机中,透平机械中多为轴流式。

航空燃气涡轮发动机基本类型有涡轮喷气、涡轮螺旋桨、涡轮轴、涡轮风扇发动机等。它们主要差别在于将高温燃气所具有的能量转换成飞机动力的原理不同。高温高压燃气使涡轮运转,靠的是涡轮叶片。高压气体的产生,靠的是压气机叶片的增压。这些安装在发动机转子和静子上具有符合气动要求和不同翼型截面的薄壁零件就是航空发动机叶片。叶片在发动机中的分布见图1.1。

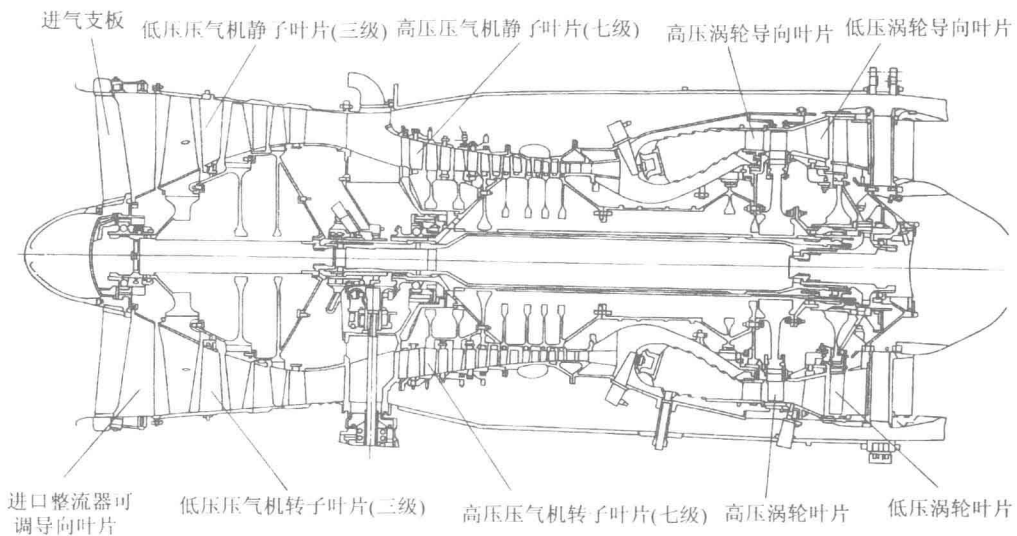


图1.1 叶片在发动机中分布简图

#### 1.1.1 叶片的工作原理

叶片的主要作用在于与发动机腔体配合形成空气或燃气截面及方向的不断变化,与主轴或涡轮盘等配合实现燃气发生器高温压缩易燃气流,同时能保证燃气的高速流动并转换成所需要的飞机运动动力。

叶片的叶身沿流线的剖面为翼型剖面是建立在叶栅空气动力学和大量叶栅吹风试验的基础上,涡轮叶片与压气机叶片有着完全不同的工作原理。

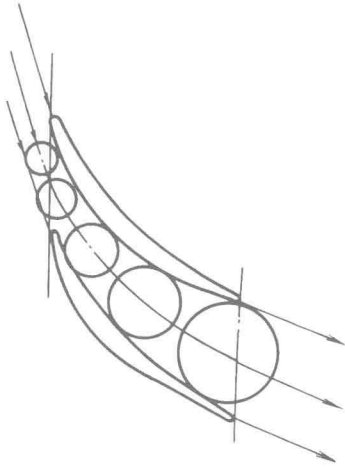


图1.2 亚音速压气机叶栅增压原理示意图

### (1) 压气机叶片的工作原理。

压气机是利用输入的机械功对空气进行压缩,提高空气的压力,供后面的燃烧室燃烧用。

压气机叶片对气流增压的原理,又有亚音速增压和超音速增压之分。

亚音速压气机叶栅增压原理示意图见图1.2。由图1.2可见,对气流增压基于叶栅通道的扩张型叶栅进口内切圆小,出口内切圆大,同时气流方向由斜变正。从立体角度看,叶栅进口面积小,出口面积大。这样,在亚音速情况下气流流过渐扩流管就会减速扩压。增压能力的高低是压气机的主要性能指标之一。在压气机的亚音级中,动叶和静叶都是按照这种扩张型的通道设计的,因此都能起到减速增压的作用。动叶在旋转的同时,还对气体做功,增加了气体的动能,是使气体从前面的低压区流到后面高压区的动力。压气机的增压作用就是动叶对气体做功和气流在动、静叶叶栅中减速扩压的共同结果。

超音速压气机叶栅增压原理与亚音速有所不同,主要表现在动叶上。其增压原理示意图见图1.3。

由图1.3可见,超音速叶栅不是扩张通道,气流在超音速动叶通道中基本不拐弯。它是靠冲击波突跃将超音速气流突降为亚音速气流,从而达到提高气体压力的目的。这种靠冲击波减速扩压的能力往往比亚音级要大。超音速动叶对气流做功也是靠冲击波来实现的。由图1.3可见,气流对动叶的作用力方向仍然是由叶盆指向叶背,动叶旋转就要克服叶片承受的气动力而对气流做功。

对于静叶来讲,在超音叶栅和在亚音叶栅中并没有什么原则上的区别。因为在两种情况下,静叶进口的绝对速度都是小于当地的音速。静叶的作用是使气流方向由斜变正,由斜变正的叶栅总是相当于渐扩形流路,因而使气流减速增压。但在超音级中,静叶叶栅通道扭转会更大,对气流的增压作用也更大。

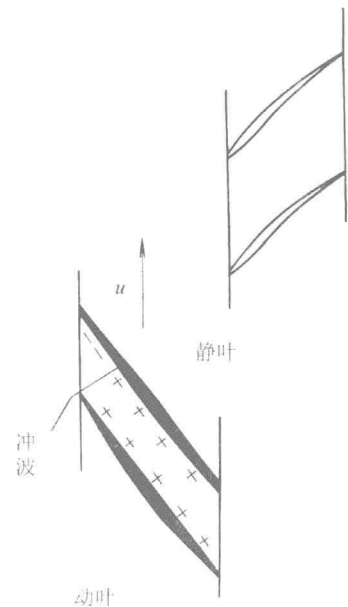


图1.3 超音速压气机叶栅增压原理示意图

### (2) 涡轮叶片的工作原理。

涡轮的作用是将燃烧室后高温高压燃气的一部分能量转换为转子高速旋转的机械能,以带动压气机及有关附件。



涡轮叶片也有动叶和静叶,与压气机不同的是涡轮的静叶在前,动叶在后。涡轮的静叶又叫导向叶片。导向叶片和动叶叶栅的通道与压气机叶片相反,是收敛型通道,其示意图如图1.4所示。

燃烧室出口的高温高压燃气流过导向器叶栅时,气流在由正变斜的收敛通道中会膨胀加速,温度虽然有所下降,但仍然很高。因此,其变为高温、高压、高速气流,从导向器叶片尾部喷出。所以,通常又把导向器称作喷嘴环。从导向器喷出的高温、高压、高速气流,冲击涡轮转子叶片,带动转子旋转,将燃气的热能、压力能和动能的一部分或大部分转变成机械能。燃气在动叶中一般也是膨胀加速的,即涡轮动叶叶栅的通道一般也是收敛形通道。燃气中剩余的能量用来产生推力或用作其他用途。

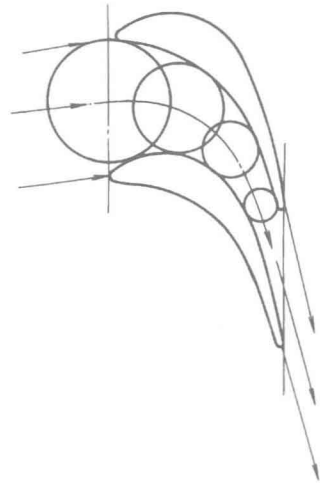


图1.4 涡轮叶栅的收敛型通道

### 1.1.2 叶片的工作条件

发动机工作时,叶片上受到如下几种负荷:

(1) 叶片本身质量所产生的离心力。

叶片在旋转离心力场作用下,由本身质量而产生的力为质量离心力。此种力使叶片产生拉伸应力、弯曲应力和扭转应力。一般离心拉伸应力占叶片总应力水平的60%~70%,并作为叶片强度造型的基础计算值。随着叶片的增大,在大型发动机的叶片上作用着巨大的离心力,如在RB211 涡扇发动机上,每片风扇叶片的离心力高达540kN。

(2) 空气与燃气的气动力。

由气流流动对叶片所作用的力为气动力,此种力使叶片产生弯曲应力和扭转应力。气动力值通常由气动力特性计算提供,它是流量的函数,一般沿叶高是非线性变化。

(3) 热应力。

叶片受热不均匀所产生的应力为热应力。涡轮叶片受热温度变化较大,热应力也较大,特别是发动机起动和停车瞬间更为严重。

(4) 交变力。

由叶片振动所产生的力为交变力或称振动力。此种力使叶片产生较大的弯曲应力、扭转应力和具有复合振型的复杂应力。

(5) 随机载荷。

近代研究叶片疲劳和疲劳寿命时,还要计入叶片所受的随机载荷。随机载荷主要来自于发动机工作时的随机振动,通常此力为一种无规律的形式,随不同的工作状况而不同。

在以上几种载荷中,离心力又叫做静载荷,振动等交变载荷又称为动载荷。由交变载荷所引起的叶片破坏属于疲劳破坏,一般为高周疲劳破坏。叶片颤振破坏是另一种形式的疲劳破坏,属于低周大应变疲劳损伤现象。热负荷也是一种循环载荷,也要引起疲劳,即热疲劳。所谓热疲劳是指由温度的循环变化而引起材料的膨胀和收缩受到限制,其内部因变形受阻而产生热应力。热疲劳也是一种低周应变疲劳。