



## M5.2.4 涡轮

## 修订批准页:

1

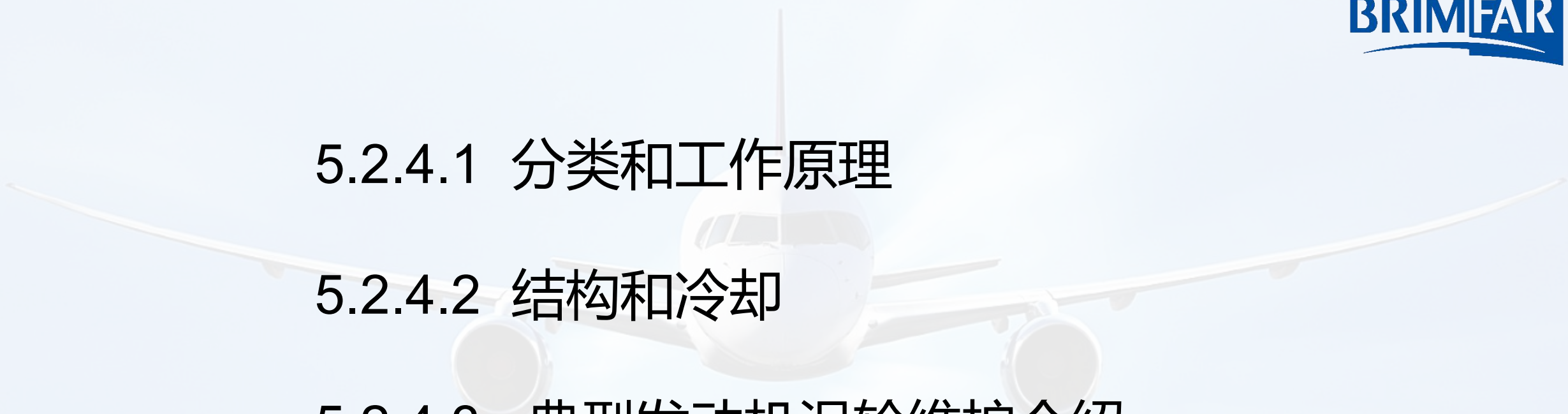
版次	修订时间	编写/改版	修订说明	审核/时间	审批/时间
R0	2020.06.14	谈海军	新编课件	谈海军 2020.08.06	张玉 2020.08.11

## 目的与要求:

<b>目的</b>	通过本次课程的学习，掌握分类和原理，结构和冷却，典型发动机涡轮维护介绍
<b>要求</b>	<ol style="list-style-type: none"><li>1. 涡轮作用和类型：轴流和向心式涡轮；轴流式涡轮类型（反力式、冲击式和反力冲击式）和工作特点</li><li>2. 轴流式涡轮工作原理：涡轮级的定义，基本工作原理；涡轮流动损失，</li><li>3. 涡轮结构：转子、机匣、叶片特点和安装；高、低压涡轮级数特点；涡扇发动机涡轮特点；涡轮材料，</li><li>4. 涡轮的检查和维护方法</li></ol>

# 课程安排:

序号	内容	等级	课时
1	分类和原理		1H
2	结构和冷却		1H
3	典型发动机涡轮维护介绍		1H

A faint, light-colored illustration of a commercial airplane is visible in the background, centered behind the text.

5.2.4.1 分类和工作原理

5.2.4.2 结构和冷却

5.2.4.3 典型发动机涡轮维护介绍

A large, faint, light-colored silhouette of a commercial airplane is centered in the background, showing the fuselage, wings, and tail.

# 5.2.4.1 分类和工作原理

# 1 涡轮概述

## 作用

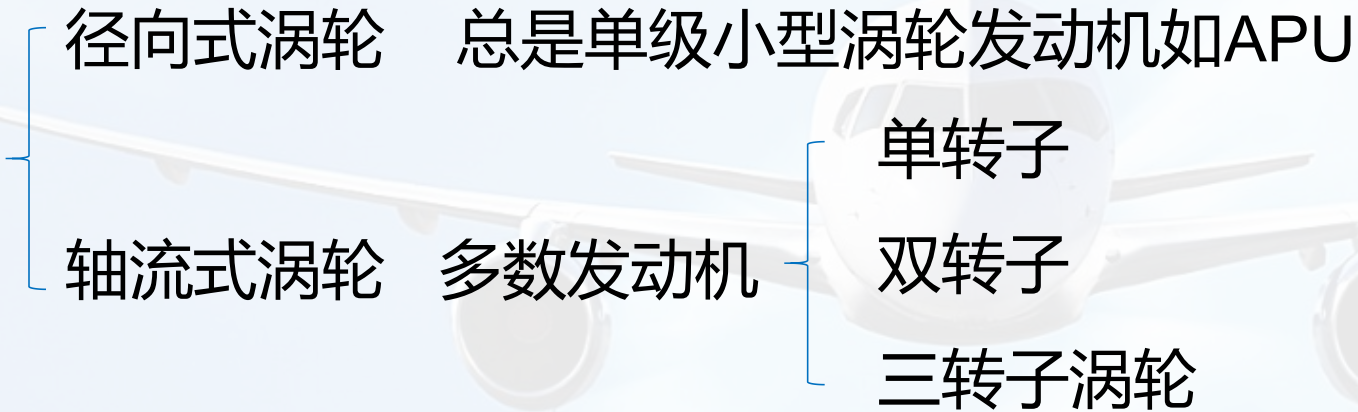
高温、高压燃气的热能和压力能变机械功，带动压气机及其它附件

在涡扇发动机中，带动风扇；

在涡桨发动机中，带动螺旋桨

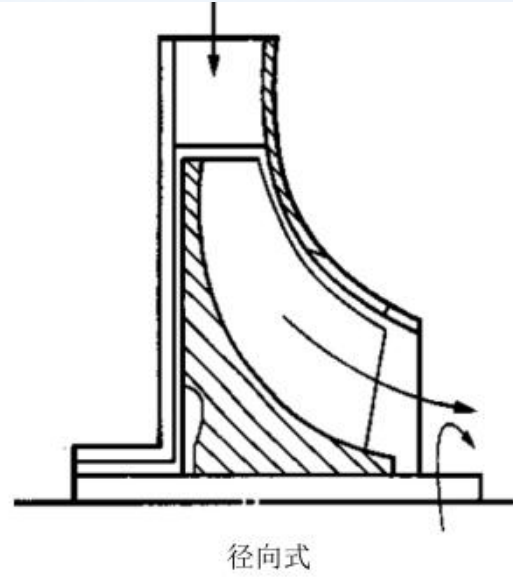
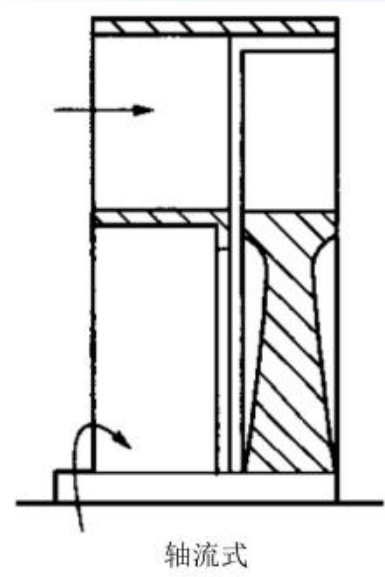
在涡轴发动机中，带动旋翼

# 1.1 涡轮的分类



涡轮还可以分

- ◆ 冲击式
- ◆ 反力式、
- ◆ 冲击—反力式



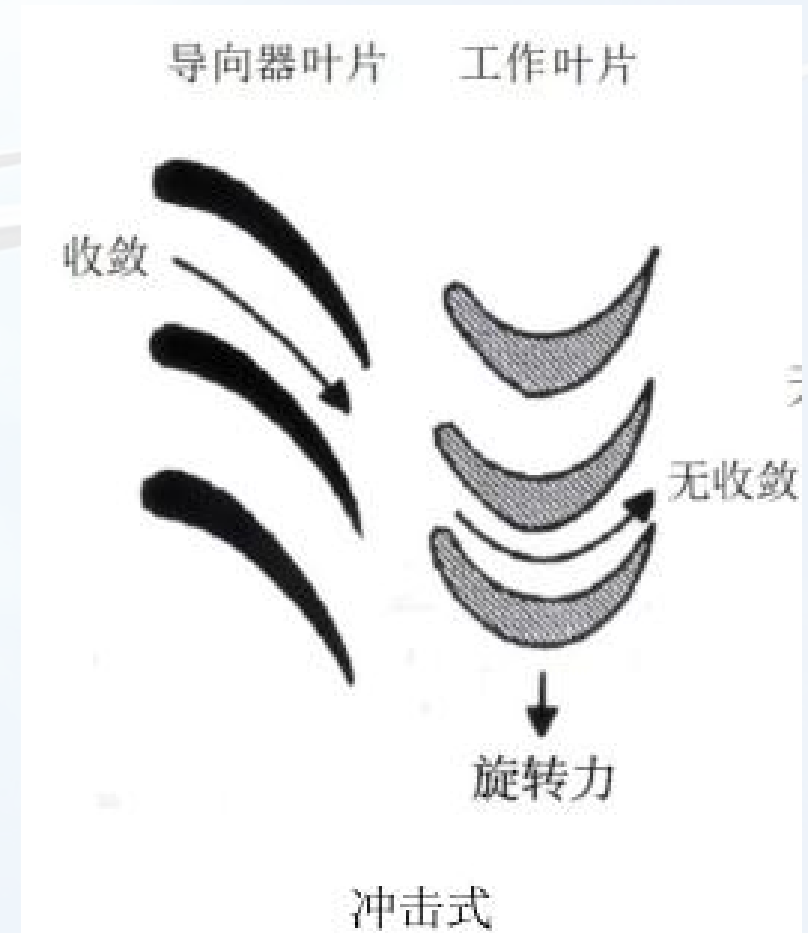
## a 冲击式涡轮

扭矩是由于气流方向的改变而产生的

导向器内通道是收敛，速度增加，压力下降

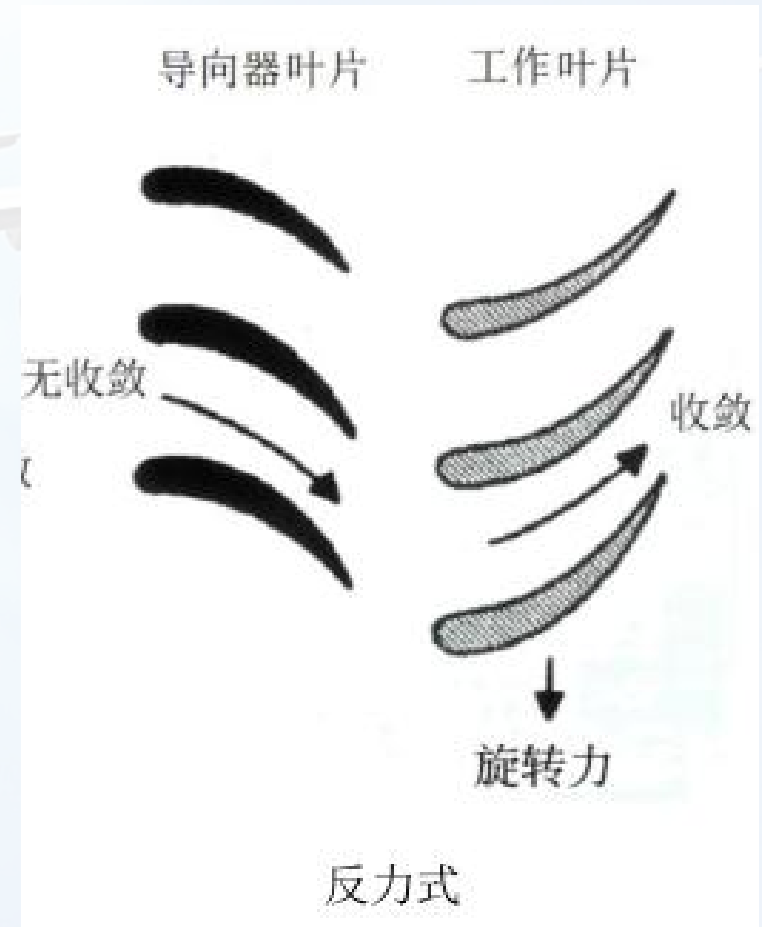
叶片通道内，相对速度不变，变气流的方向

叶片特点：前缘和后缘较薄，中间较厚



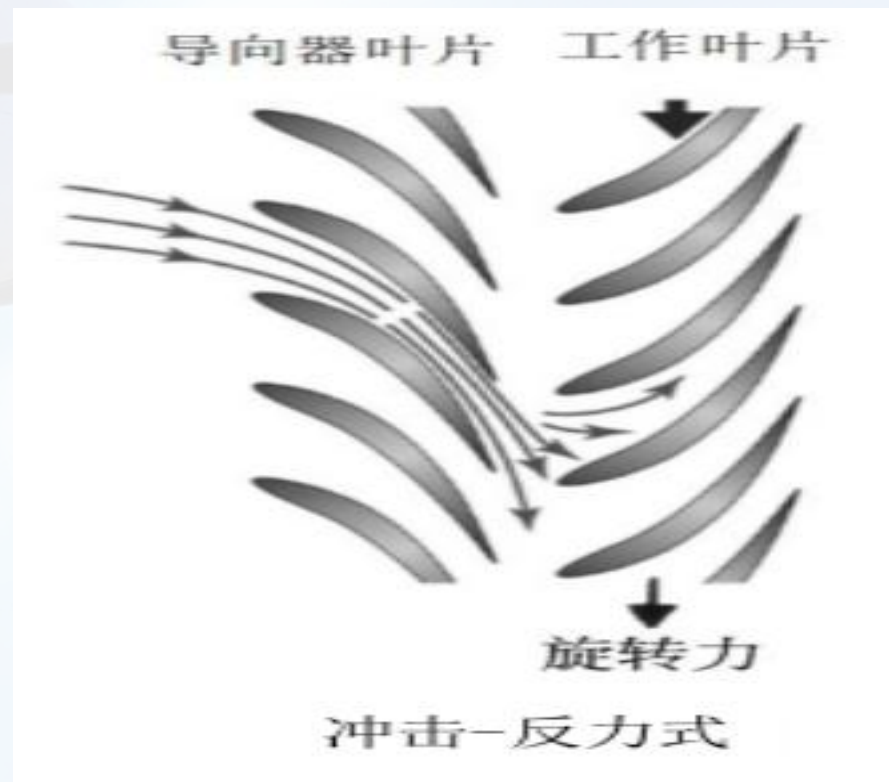
b 反力式涡轮：扭矩是气流速度大小和方向改变产生的

导向器，改变流动方向，  
叶片通道收敛，燃气膨胀和加速产生的反作用力  
叶片特点：前缘较厚，后缘较薄




### c 冲击 - 反力式涡轮

冲击式 50%，反力式 50%。



## 1.2 涡轮的工作特点

### 涡轮与压气机部件差别

- 
- a. 叶片要厚
  - b. 弯曲的程度要大。
  - c. 高温下可靠工作，
  - d. 热惯性与好的热补偿结构

### **热疲劳**

反复作用的热应力与变形可能导致部件的破坏

## a 叶片要厚

温度高，涡轮叶片受热严重，金属材料的强度随着温度的升高而降低，  
是涡轮叶片需要冷却，所以有的涡轮叶片是空心的，以便通冷却空气

b 弯曲的程度要大

单级功率大，气动力矩大。

### c 高温下可靠工作

涡轮部件的材料必须能适应高温下可靠工作的要求，要有足够的高温强度，良好的热安定性以及耐腐蚀性，**涡轮叶片材料已成为提高涡轮前燃气温度的决定因素之一**

#### d 均匀的热惯性与良好的热补偿结构

温度经常变化，内部温度的不均匀或不能自由膨胀产生热应力与热变形，过大影响发动机正常工作。短时间内热应力的剧增，可能导致部件产生裂纹

### 1.3 轴流式涡轮的工作原理

#### a 燃气在涡轮中的流动

#### a) 轴流式涡轮组成

导向器  
工作叶轮

基元级 { 导向器叶栅  
工作叶轮叶栅通道

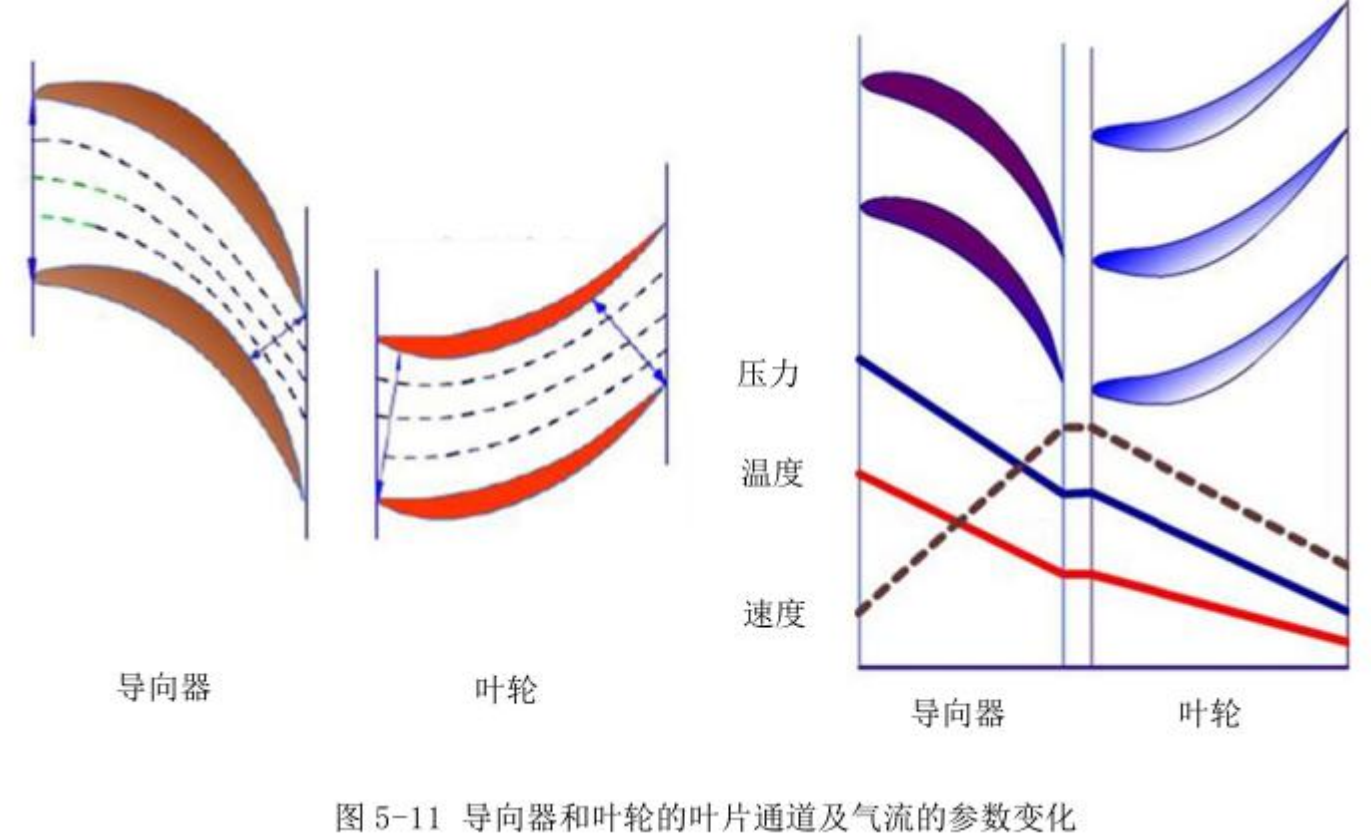


图 5-11 导向器和叶轮的叶片通道及气流的参数变化

## b) 涡轮中的流动

导向器

燃气速度增加，压力下降，改变流动方向，压力位能和热能变为动能，总压下降，总温不变。

工作叶轮

燃气相对速度增大，方向改变，压力降低，温度降低，推动工作叶轮高速旋转，向外输出功，使绝对速度减小，将热能转变为功，总压、总温都下降

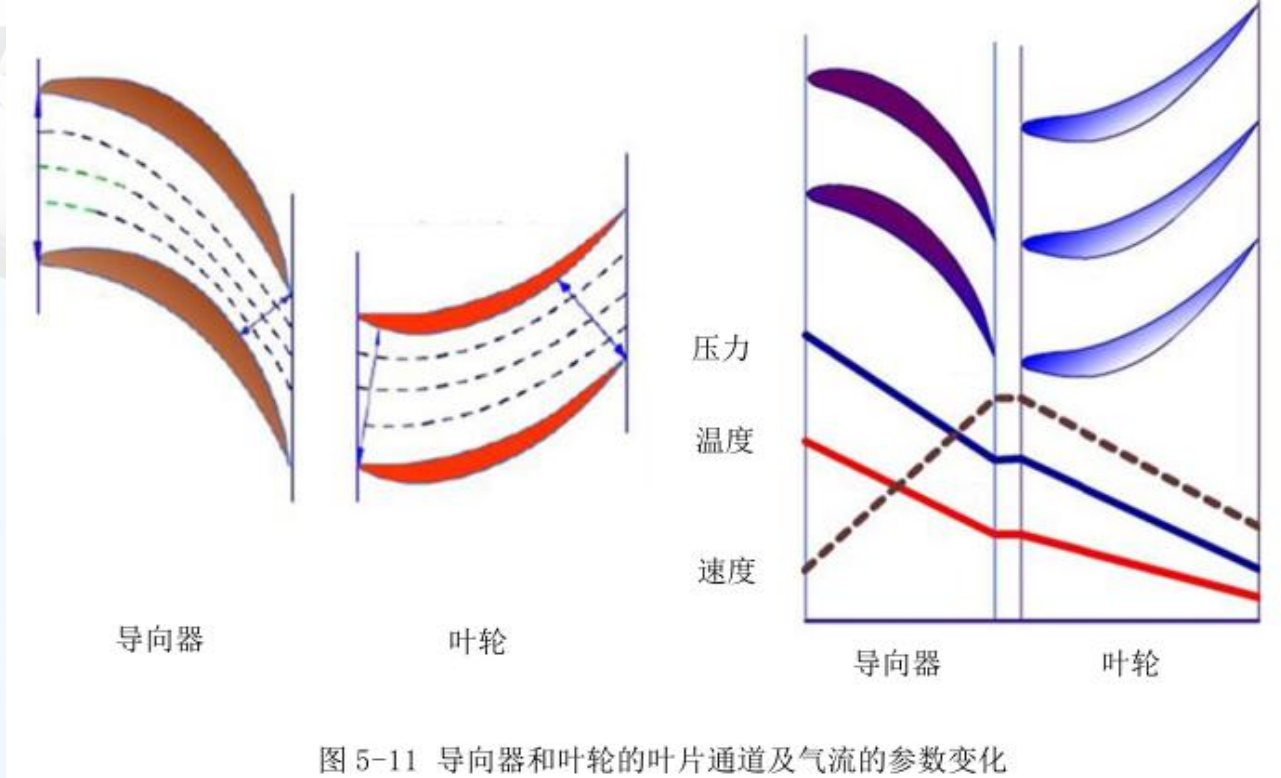


图 5-11 导向器和叶轮的叶片通道及气流的参数变化

## b 涡轮的主要参数

- a) 涡轮前燃气总温
- b) 涡轮落压比
- c) 涡轮功
- d) 涡轮效率
- e) 涡轮功率

## a) 涡轮前燃气总温

涡轮前燃气总温越高，燃气所具有的膨胀能力越强，同时涡轮叶片所承受的热负荷越大。所以，涡轮前燃气总温描述了燃气的膨胀能力，对涡轮的安全工作具有直接影响

## b) 涡轮落压比

涡轮落压比是指涡轮前燃气总压与涡轮后燃气总压之比，用  $\pi_T^*$

大小表示燃气在涡轮中的**膨胀降压能力**

## c) 涡轮功

理想涡轮功

1kg 燃气通过理想的过程（绝热、无流动损失和漏气损失情况下）从膨胀涡轮前燃气总压到涡轮后燃气总压所输出的功

实际涡轮功

1kg 燃气从涡轮前燃气总压膨胀到涡轮后燃气总压实际所输出的功

#### d) 涡轮效率

实际涡轮功与理想涡轮功之比，反映涡轮内**流动损失**

涡轮效率要比压气机高，涡轮的压降高，易漏气，漏气损失大

e) 涡轮功率  $N_T$ 

单位时间内涡轮轴实际输出的功

影响因素

涡轮前燃气总温

燃气流量

涡轮落压比

涡轮效率

总温一定，转速增，涡轮功率增大

转速一定，总温增，涡轮功率增大

A faint, light-colored silhouette of a commercial airplane is centered in the background, showing the fuselage, wings, and tail.

## 5.2.4.2 结构和冷却

a 介绍

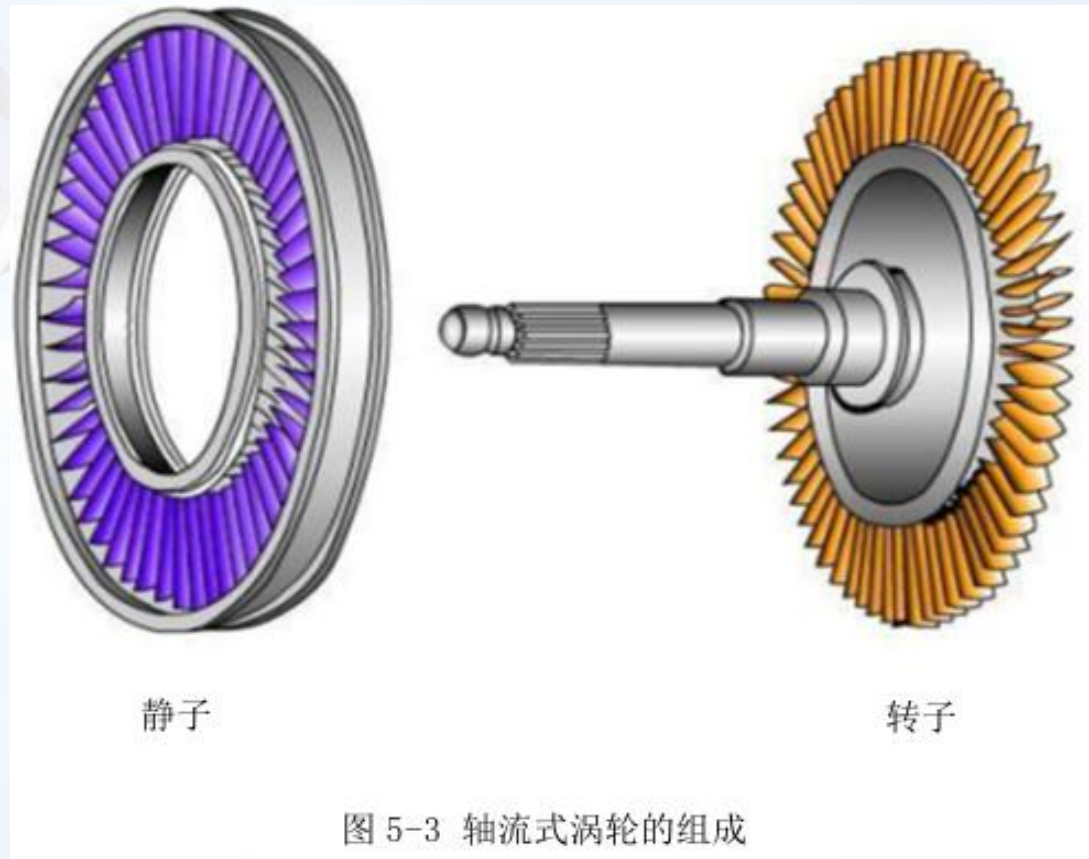
a) 组成

单级涡轮

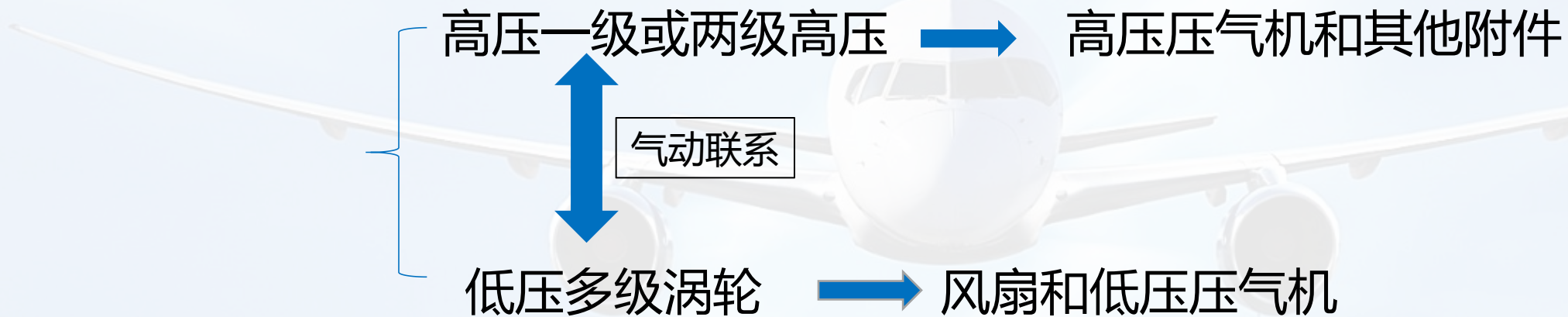
转子 工作叶轮 在后 静子 导向器或喷嘴环 在前

导向器在前原因：

- ◆ 利于燃气的膨胀加速，动能的转换，
- ◆ 便于冷却措施，



## b) 高涵道双转子发动机



压气机的级数 > 涡轮级数

一级涡轮功比一级压气机功大，一级涡轮可以带动多级压气机

## 2.1 涡轮转子

- ◆ 转子叶片
- ◆ 涡轮盘
- ◆ 涡轮轴
- ◆ 装在轴上的其它转动部件
- ◆ 多级涡轮，有盘间连接部件

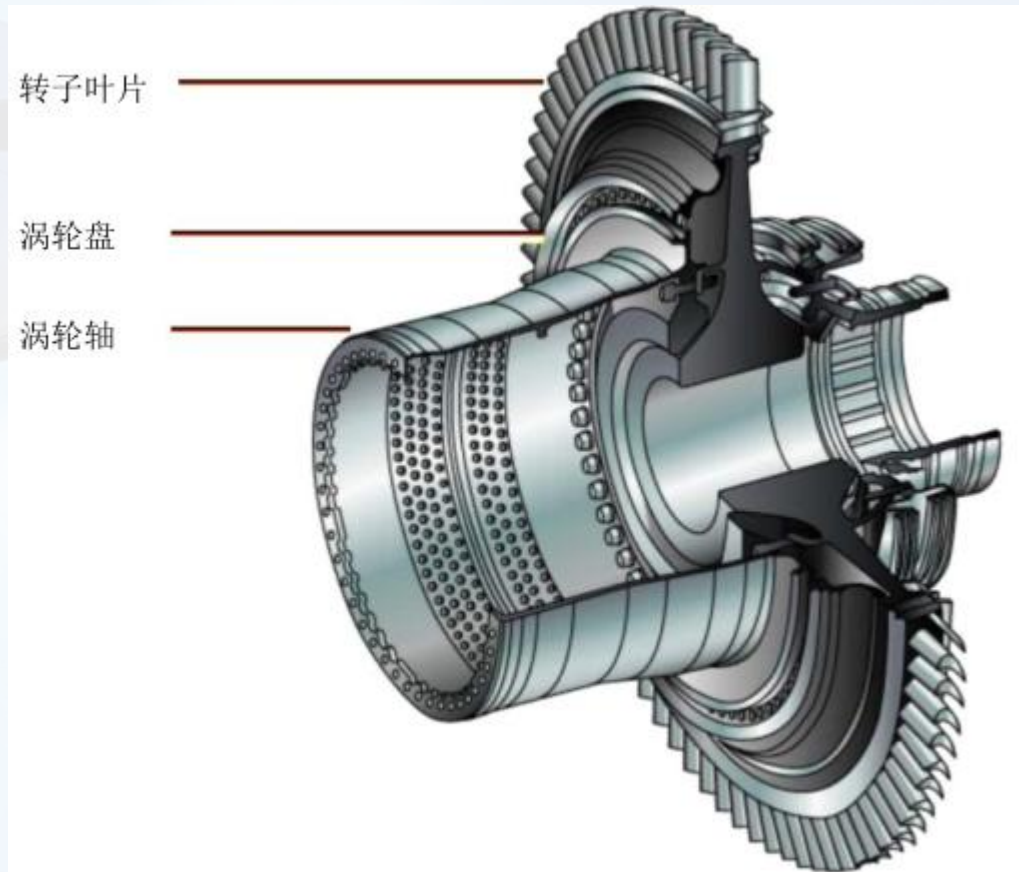


图 5-5 涡轮转子的组成

## a 涡轮转子叶片

高温，强度下降，蠕变和侵蚀

**叶片蠕变** 是热负荷和离心负荷长时间作用引起的，由于负荷的长期作用结果产生的塑性变形，与时间和温度相关

叶片合金钢

◆ 叶身

◆ 榫头

## a) 叶身

涡轮单级转换能量大，气流速度高，折转角大，从而气动力大



- a) 叶身结构原则上与压气机叶片的要求相类似
- b) 叶片的叶型剖面弯曲度大，叶身较厚，沿叶高的截面变化较明显
- c) 涡轮转子叶片设计成翼型截面，
- d) 叶片也做成空心的，由压气机引气进行冷却

## b) 榫头

榫头负荷较大，榫头处于高温下工作，材料的机械性能降低

### 枞树形 优点

在轮缘所占的周向尺寸较小；

榫头可以有间隙地插入榫槽，允许榫头与轮缘受热后自由膨胀；

利用榫头的装配间隙，通入冷却空气，对榫头和轮缘冷却

## b. 涡轮盘

涡轮盘机械加工锻件制成

可以和轴制成整体

可以带安装边由螺栓连接涡轮轴

外缘有涡轮工作叶片安装用的榫槽

## c 涡轮轴

足够的强度

足够的刚性

涡轮轴主要是传递扭矩

轴和轴承还受到不平衡惯性力交变负荷

轴的临界转速

## 2.2 涡轮静子

- a. 涡轮机匣
- b. 涡轮导向器
- c. 涡轮框架
- d. 间隙控制装置

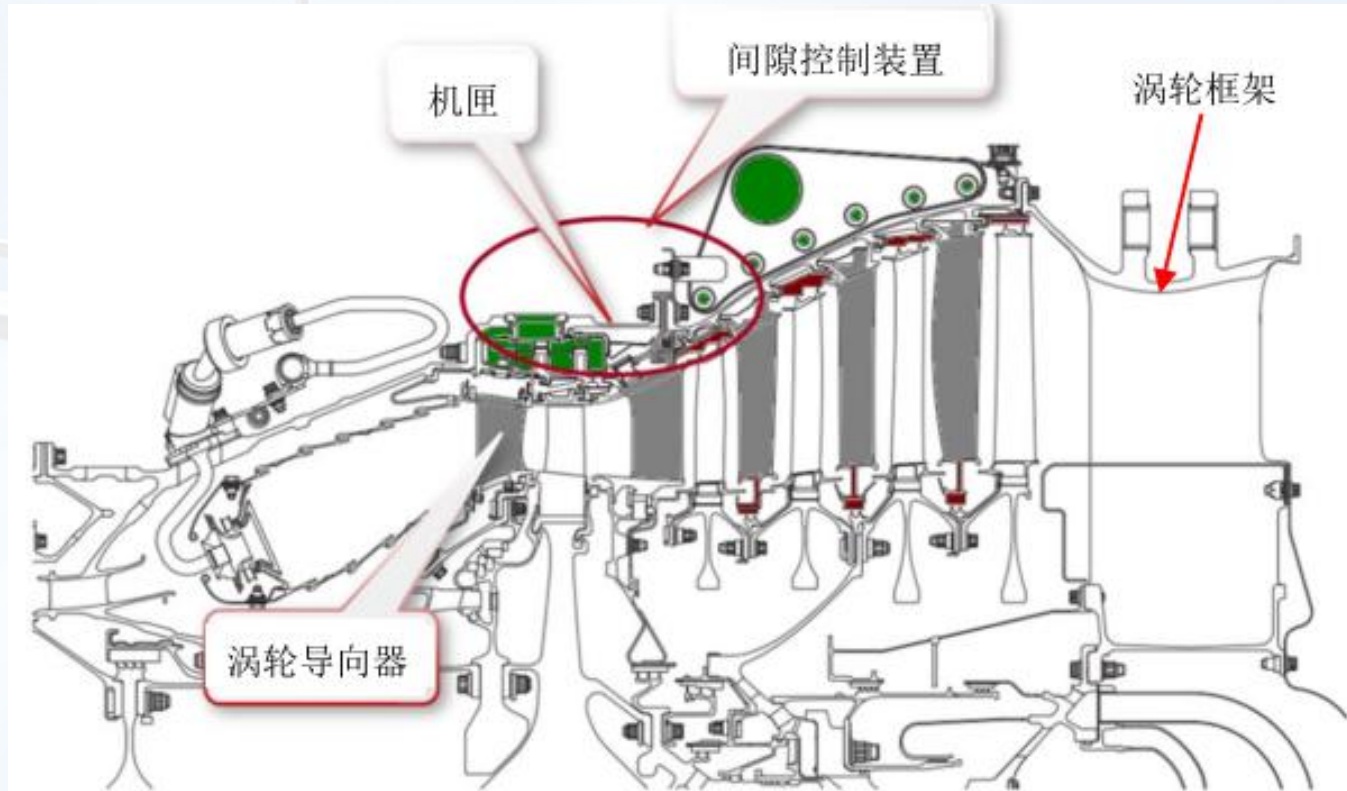


图 5-6 涡轮静子的组成

a 涡轮机匣

圆柱形或圆锥形体作用



涡轮机匣是发动机承力系统的重要构件

固定导向器

前后安装边与燃烧室及喷管，连传递负荷

## b 双层结构机匣原因

### a) 机匣与涡轮转子良好的同心度

叶片尖部附磨削材料，转子旋转，机匣内壁附着的易磨结构或涂层磨掉，以便机匣的内壁与转子同心。磨削后，叶片的附着材料也被磨掉。

## b) 双层结构机匣

机匣是传递负荷的承力构件，特别是传递不对称负荷，长期产生变形，从而不能保持均匀的叶尖间隙，使涡轮效率下降，形成发动机性能的衰退现象

双层结构机匣



改善衰退现象的措施

承力构件的外层机匣的变形

内层机匣不变形，保持了较均匀的叶尖间隙

## b 涡轮导向器

内环

外环

导向叶片环形静止叶栅

实心 铸造方便，厚薄不均，受热速度不同，热应力较大

空心 壁厚薄，均匀，通冷空气，降温，减小热应力

## c 涡轮框架

发动机主要结构件位于低压涡轮后面作用

作用

低压涡轮后端的轴承负荷传递到涡轮框架上发动机后安装节，支持发动机排气部件像喷管和排气锥

组成

框架毂

轴承支撑

外框架机匣

连接的支柱

## d 间隙控制装置

### a) 涡轮径向间隙

涡轮径向间隙：涡轮机匣与转子叶片叶尖之间距离，



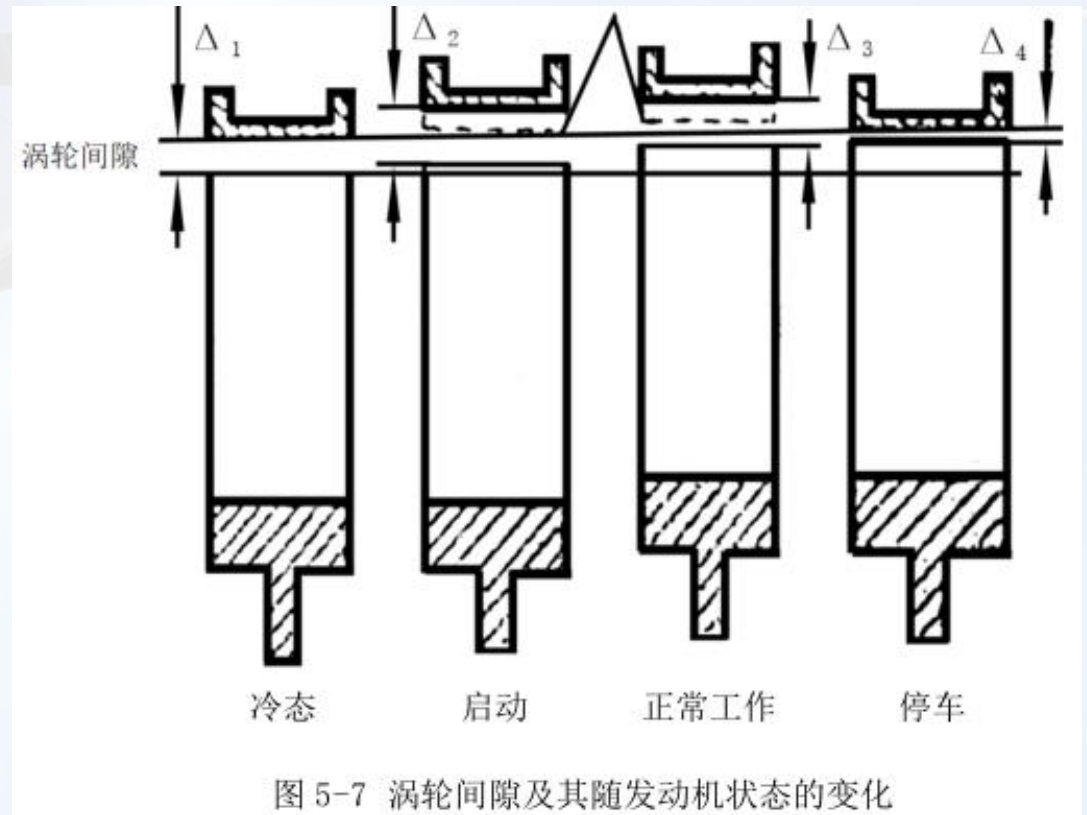
变化原因

材料、尺寸的不同，状态变化时收缩  
膨胀率的不同

材料膨胀时间取决于材料的厚度，薄的材料比厚的材料膨胀得较快

## b) 间隙及其随发动机状态的变化

- a) 冷态间隙为 $\Delta_1$ ；
- b) 启动，涡轮机匣热惯性小，温度升高比轮盘快，膨胀快，涡轮间隙增大为 $\Delta_2$ ；
- c) 转速增高，叶片和盘都加热，离心力影响，涡轮间隙减小为 $\Delta_3$ ；
- d) 停车，热惯性小的机匣冷却转子快，涡轮间隙减小，涡轮间隙为 $\Delta_4$  最小



## c) 减小间隙原因

减小径向间隙，提高发动机的效率

间隙太大，大量燃气通过间隙流走没有做功

间隙太小，转子叶片同涡轮机匣的摩擦，涡轮材料磨损或涡轮损坏

间隙控制可以减小间隙，实质上是指停车时不允许出现机匣与叶片相碰的条件下， $\Delta$  4 最小，在其它状态下，尽量减小间隙，

换上的新发，第一遍试车后，第二次启动会卡住

排故 1 第一次试车大油门时间长磨掉防磨层

2 充分冷却，时间长

## 2.3 涡轮的材料

### a 涡轮的常见故障

采用先进的材料  
和制造工艺原因

高的离心力  
功率循环引起的材料疲劳  
硫化物引起的腐蚀

涡轮常见故障裂纹，原因是热应力。

受热最严重的部件是第一级涡轮导向器。

超温可能导致叶片出现裂纹，裂纹在或横穿过叶片的前缘与后缘，方向与叶片的长度相“垂直”

用强光源和放大镜对涡轮叶片，孔探检查

## b 涡轮导向叶片

涡轮导向叶片环境

较大的气动力

不稳定的脉动负荷外

温度高

冷热变化大温度不均匀严重。

耐热是最主要的性能要求，采用冷却技术，还采用耐高温的镍合金和加强热阻特性的热障涂层

## c 涡轮盘

旋转应力，影响涡轮盘使用寿命的限制因素**抗疲劳裂纹**的能力

涡轮盘用镍基合金制造，增加镍的含量增大抗疲劳特性，延长寿命。

另一采用粉末冶金盘，可提高强度，允许更高的转速

## d 涡轮工作叶片

**定向凝固**：将晶粒沿叶片长度方向排成柱状  
用铸造镍基合金，好的抗蠕变和疲劳特性。

“定向凝固”比普通铸造的等轴晶体改善使用寿命。

燃气涡轮发动机用单晶体叶片

高温强度  
良好的抗氧化  
抗热腐蚀性能，  
好疲劳性能  
断裂韧性

## 2. 4 涡轮的冷却

对高压涡轮导向叶片和工作叶片，用发动机高压压气机的空气冷却

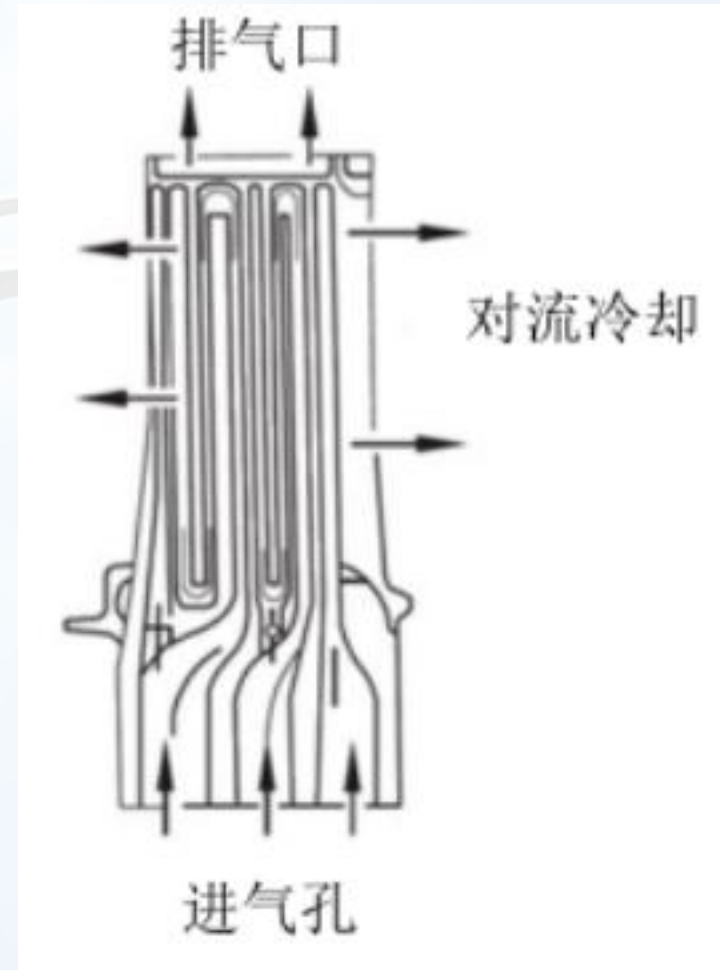
- a. 对流冷却
- b. 冲击冷却
- c. 气膜冷却

现代燃气涡轮发动机采用对流、冲击及气膜冷却三种组合冷却方法

## a 对流冷却

对流冷却最简单的冷却方法

底部和顶部的孔进入，流叶片内部通路，与壁面热交换，从叶片前后缘流出，同热的燃气流汇合



## b 冲击冷却

对于**涡轮导向叶片和转子叶片**是较好的冷却方法

冷却空气流入叶型内空心的导流片，导流片小孔或缝隙作为喷嘴，冷却空气通过喷嘴冲击叶型的内壁。这样强化了局部的换热能力，增强了冷却效果。随后冷却空气顺着叶片内壁面进行对流冷却，从叶片后缘流出同热燃气流汇合。



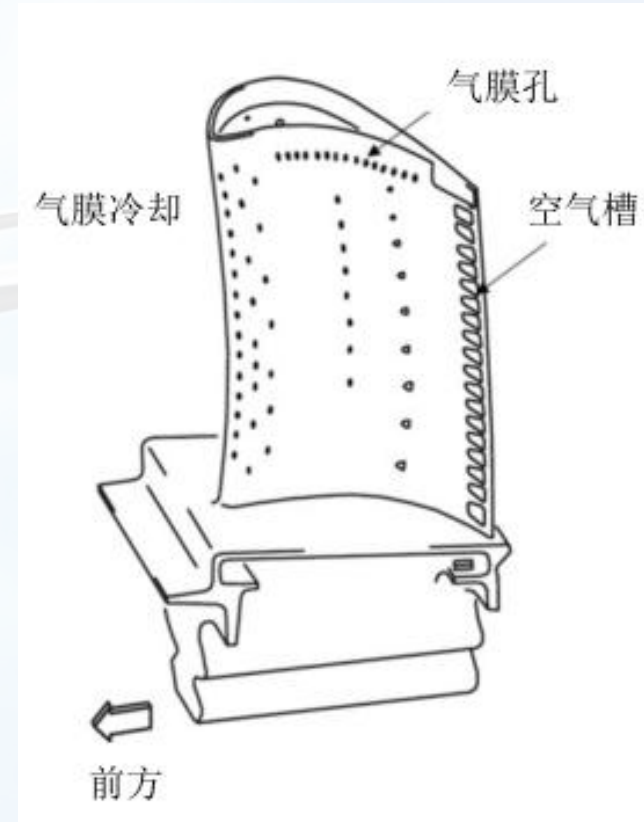
## c 气膜冷却

**气膜冷却** 叶片端部进气，壁面上开的大量小孔流出，在叶片表面形成一层气膜

制造复杂，强度有影响

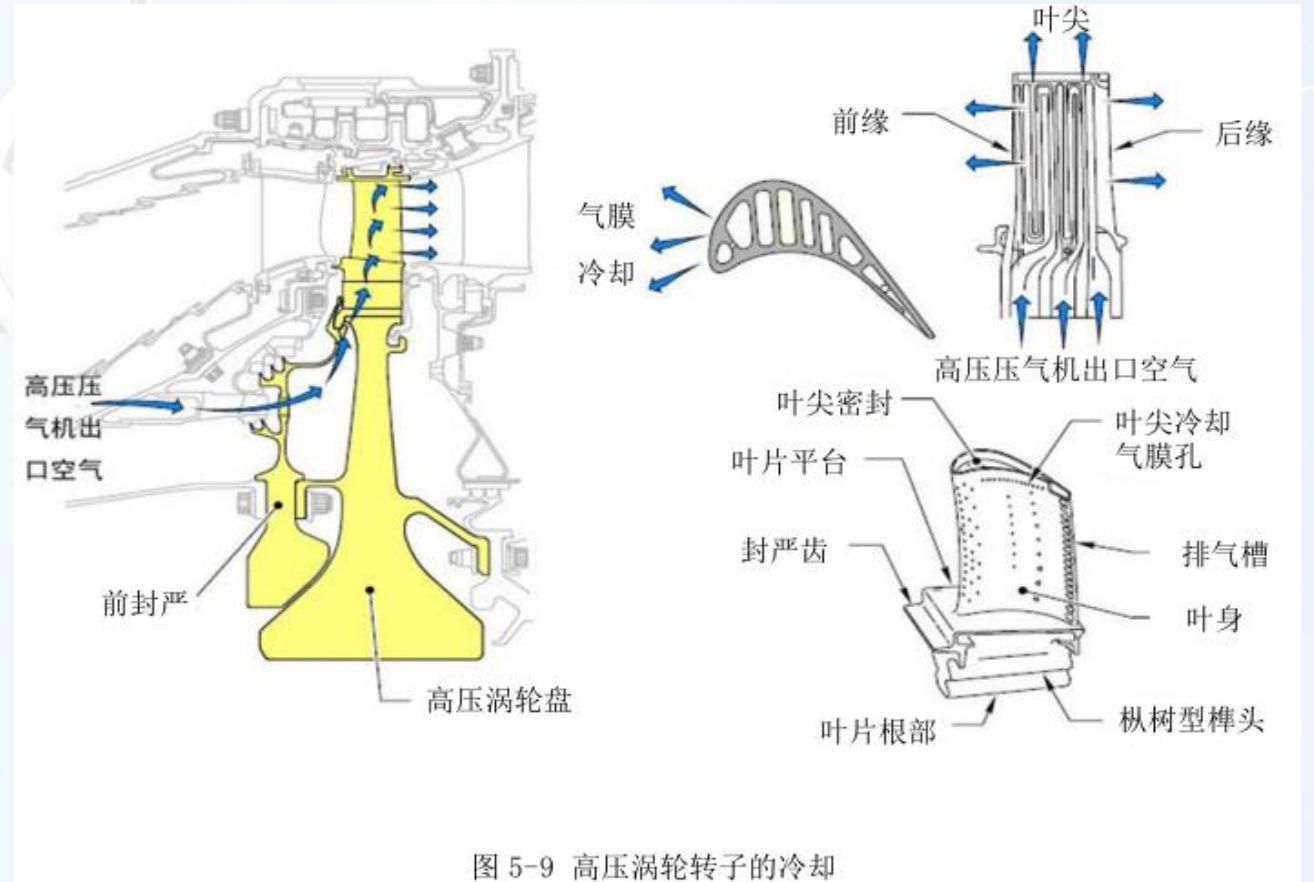
需考虑叶片冷却效果，颗粒物堵塞冷却

通道和内部腐蚀



## d 涡轮叶片的根部冷却

冷却涡轮盘的空气进入涡轮盘内部的空腔，并向外流过轮盘表面，沿级间封严与轮盘之间的通道进入涡轮叶片的叶根冷却之后，到主燃气流中



e 涡轮叶片冷却的环境条件

悬浮颗粒或其他化学污染物多




内部冷却通道的堵塞或内部腐蚀



涡轮叶片的寿命大大缩短



考虑叶片冷却效果与预防颗粒物堵塞冷却通道和内部腐蚀

A faint, light-colored silhouette of a commercial airplane is centered in the background of the slide.

## 5.2.4.3 典型发动机涡轮维护介绍

## 4.1 部件识别

涡轮转子

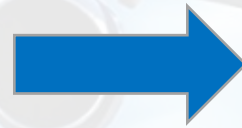


图 5-12 高压涡轮转子

# 涡轮转子叶片

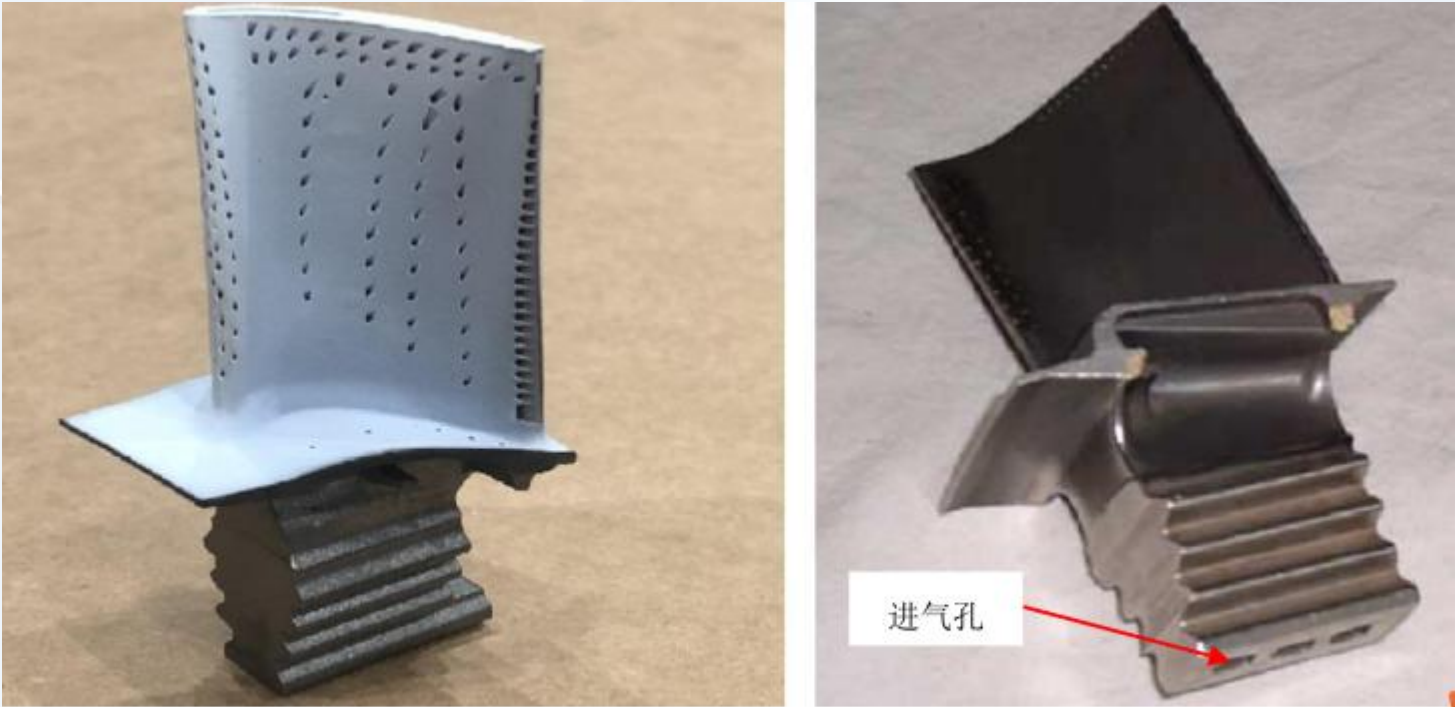
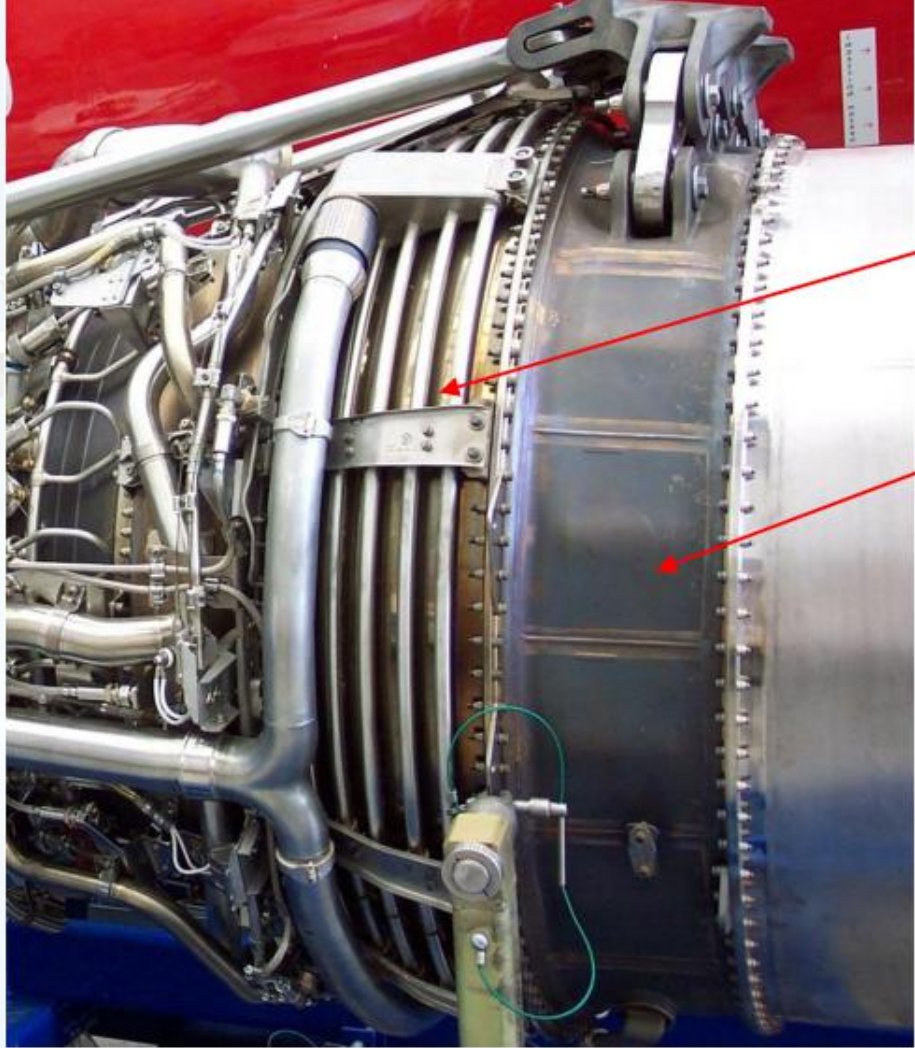
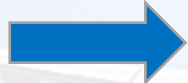


图 5-13 涡轮转子叶片

## 2. 涡轮静子

涡轮机匣



低压涡轮机匣

涡轮框架

图 5-14 涡轮机匣

涡轮导向器

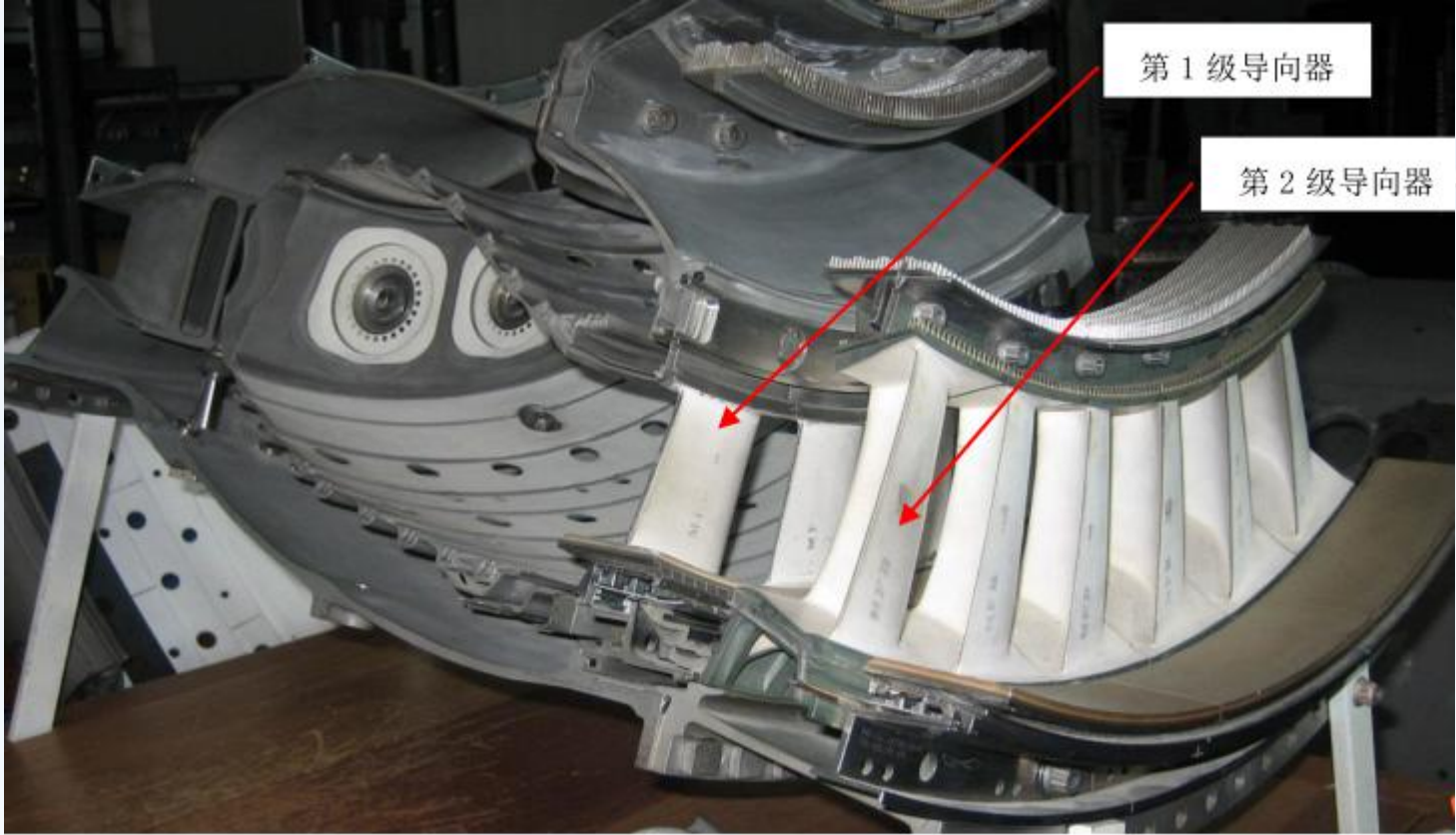
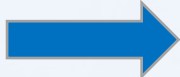


图 5-15 涡轮导向器

## 4.2 典型发动机涡轮的常见维护及安全注意事项

### 维护特点

防止发动机超温、超转、超时

易堵塞，转静子叶片易烧蚀，断裂

高压涡轮进口导向叶片烧蚀，裂纹，材料缺损

高压涡轮转子叶尖有磨损指示槽，判断叶片和环罩的磨损



(a)



(b)

图 5-16 高压涡轮导向叶片的检查

(a) 1 级高压涡轮导向叶片，腐蚀，涂层丢失

(b) 1 级高压涡轮罩环，刮磨痕迹，剥落；2 级高压涡轮导向叶片腐蚀，涂层丢失和烧蚀痕迹



(a)



(b)

图 5-17 高压涡轮转子叶片的检查

(a) 1 级高压涡轮叶片，腐蚀，涂层丢失和烧蚀痕迹

(b) 2 级高压涡轮叶片，腐蚀，涂层丢失

# 小结:

A faint, light-colored image of a commercial airplane is visible in the background, centered behind the table.

序号	思考题
1	涡轮原理
2	结构和冷却
3	涡轮维护



**感谢聆听，欢迎指正**