

# 气膜冷却

葛绍岩 刘登瀛 著  
徐靖中 李 静

02

科学出版社

## 内 容 简 介

本书是燃气轮机气膜冷却研究成果的专著。它结合我国燃气轮机发展的需要,介绍了作者用不同的实验方法和数值计算对多种气膜冷却的基本规律所进行的系统和全面的研究,讨论了用五孔测头、热膜风速仪、双焦点激光测速仪、激光干涉仪、传质比拟等技术对气膜冷却流场、内外混合边界、回流区等所进行的测试,及测定了气膜冷却的有效温比和换热系数,并在这些丰富的实验结果基础上提出了供设计和生产部门使用的传热准则公式、计算曲线和计算机程序。

本书可供航空、舰船、交通运输、电站和其它工程技术领域的科技人员使用,亦可供动力机械、热能工程、工程热物理和传热学测量技术等专业师生及研究生参考。

## 气 膜 冷 却

葛绍岩 刘登瀛 著  
徐靖中 李 静  
责任编辑 陈文芳

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中 国 科 学 院 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

|               |                  |
|---------------|------------------|
| 1985年8月第一版    | 开本:850×1168 1/32 |
| 1985年8月第一次印刷  | 印张:11 1/2        |
| 印数: 精 1—1,100 | 插页: 精 2          |
| 平 1—1,000     | 字数:298,000       |

统一书号:15031·666

本社书号:4372·15—10

定 价: 布面精装 4.85 元  
平 装 3.25 元

## 前 言

目前,燃气轮机在航空、舰船、交通运输和电站中得到了广泛的应用。为了提高燃气轮机的经济性,最有效的措施是提高燃气透平的入口初温。但是由于耐高温材料的限制,燃气透平入口初温提高后必须采取更有效的冷却方法来降低高温部件的工作温度,保证发动机可靠地运行。因此,深入研究燃气轮机高温部件的冷却技术,例如气膜冷却、冲击冷却和内部冷却等是燃气轮机持续发展中最重要技术问题之一。

气膜冷却是七十年代开始在航空燃气轮机上使用的一种新颖冷却方法,目前已成了现代燃气轮机高温部件的主要冷却措施。这些气膜冷却的高温部件包括燃气轮机的透平叶片、叶轮外环、主燃烧室和加力燃烧室等。以透平叶片冷却为例,七十年代初期动叶片普遍开始采用多孔气膜冷却。这一阶段,气膜冷却叶片的结构工艺和材料性能都有较大的突破。采用气膜冷却和叶片内部强化对流冷却后,七十年代中期的透平入口初温已超过 $1,350[^\circ\text{C}]$ ,冷却温降达 $300[^\circ\text{C}]$ 以上。也就是说,透平入口初温比金属透平叶片材料可忍受的极限温度高出 $300[^\circ\text{C}]$ 以上。八十年代初期一些航空燃气轮机的透平入口初温已达到 $1,427[^\circ\text{C}]$ 。展望未来,采用全气膜冷却和层板式冲击冷却加全气膜冷却复合结构后,透平入口初温可达到 $1,450\sim 1,900[^\circ\text{C}]$ 。

在航空燃气轮机研究和发展的进程中,经过三十年的不断努力,特别是叶片气动热力学设计水平的提高和透平叶片冷却方案的多次重大改进,燃气轮机的重量减轻了4倍,耗油率降低了2.5倍,发动机寿命延长了400倍。

近十多年来,结合我国燃气轮机发展的需要,我们用不同的实验方法和数值计算对多种气膜冷却的基本规律进行了系统的研

究,并且将这些研究结果编制成设计曲线和计算机程序,提供设计和生产部门使用。部分研究结果被一些高等院校的传热学教材选用。1982~1984年这项气膜冷却研究工作又列入中美两国基础科学研究计划,成为新开辟的工程科学的第一项合作项目。我们与美国费城德克赛尔大学的邹福康教授合作,双方分别对稳态和瞬态气膜冷却的规律进行了有成效的合作研究。部分合作研究成果也纳入本书。1978年以来,我们曾将一些气膜冷却的研究成果在国内学术会议上交流,并多次应邀在国际学术会议上宣读。本书是在系统整理作者历年来的气膜冷却研究成果和搜集近几年国际上最新成果的基础上撰写而成的。

本书共分十四章,分别叙述了我们在气膜冷却几个主要方面的研究结果。在绪论里,详细地论述了燃气轮机传热与叶片冷却概况,讨论了燃气轮机的发展趋势,并讨论了叶片冷却的发展速度和燃气轮机各个部件存在的传热问题。在这些燃气轮机部件中,除了经常注意到的需要加强冷却的透平叶片、主燃烧室和加力燃烧室等三大高温部件外,压气机、进气道、喷管、机匣、轴承、密封环、换热器等常温部件的传热问题也都随着燃气轮机性能的不不断提高而逐步提到研究日程上来。第一章详细讨论了气膜冷却的基本概念和气膜冷却对发动机性能的影响。第二章和第三章论述了二维气膜冷却的有效温比和换热系数。根据气膜冷却有效温比、换热系数和湍流强度的实验结果,在第四章和第五章里提出了气膜冷却壁面温度和热流量的计算方法和计算机程序。第六章和第十一章给出了二维和三维气膜冷却数值计算的结果。第七章是弯曲壁面有效温比的实验结果。第八章详细介绍了典型气膜冷却火焰筒流场的测量方法和测量结果。第九章用传质比拟的方法测量了三维气膜冷却的有效温比。第十章介绍了气膜冷却叶片有效温比的模拟实验。第十二章介绍了激波风洞瞬态气膜冷却的实验方法和测量结果。在第十三章里,详细地讨论了气膜冷却流场的观测方法和测量结果。最后,在第十四章里讨论了气膜冷却的其它应用。

在不同的气膜冷却实验里采用了五孔测头、七孔测头、热膜风速仪测定速度矢量和湍流强度，并且用先进的双焦点激光测速仪测量了凸面离散气膜孔的速度分布和湍流强度分布，用纹影仪和先进的激光干涉仪观测了气膜流场的内外边界和回流区。此外，用传质比拟、瞬态热流量计、激波风洞、激光测温等较新的实验方法研究了两股气流掺混的气膜冷却复杂传热过程。还用计算机对气膜冷却实验进行了数据实时处理。这些对流换热的先进、有效的测量技术和数据的处理方法，对其它类似的传热实验都有参考价值。

参加这些气膜冷却研究工作的还有姚永庆、顾维藻、邓素卿、王恒月、杨雅贤、黄良辅、张正芳、潘文欣、贾建国、夏彬、朱景泰、张玉明、许鸿坤、魏秋华等同志。朱小诗同志为本书设计封面。在此对他们表示衷心的感谢。

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| <b>绪论 燃气轮机传热与叶片冷却概况</b> ..... | 1  |
| 1. 燃气轮机的发展趋势 .....            | 1  |
| 2. 燃气轮机的主要传热问题 .....          | 6  |
| 3. 提高燃气轮机的透平入口温度 .....        | 7  |
| 4. 叶片冷却的发展速度 .....            | 10 |
| 5. 新一代的工业燃气轮机 .....           | 13 |
| 6. 压气机的传热问题 .....             | 16 |
| 7. 燃烧室冷却 .....                | 16 |
| 8. 透平冷却 .....                 | 18 |
| 9. 加力燃烧室和喷管的冷却 .....          | 21 |
| 10. 燃气轮机的其它传热问题 .....         | 21 |
| 11. 燃气轮机传热的基础研究 .....         | 24 |
| 12. 冷却叶片的设计和材料的选择 .....       | 30 |
| 13. 多层板全气膜冷却 .....            | 34 |
| 14. 高温叶片传热实验和水冷、蒸汽冷却叶片 .....  | 38 |
| 参考文献 .....                    | 45 |
| <b>第一章 气膜冷却的基本概念</b> .....    | 49 |
| § 1-1 气膜冷却的基本物理模型 .....       | 49 |
| § 1-2 绝热壁温 .....              | 51 |
| § 1-3 气膜冷却有效温比 .....          | 52 |
| § 1-4 叶片冷却对透平效率的影响 .....      | 57 |
| § 1-5 气膜冷却叶片的气动损失 .....       | 59 |
| § 1-6 叶片冷却效果和平均冷却效率.....      | 60 |
| § 1-7 影响气膜冷却效果的主要参数.....      | 61 |
| § 1-8 缝槽气膜冷却的有效温比公式 .....     | 64 |
| § 1-9 叶片离散孔气膜冷却 .....         | 66 |
| § 1-10 高速、高温、大温差气膜冷却 .....    | 71 |

|            |                                  |            |
|------------|----------------------------------|------------|
| § 1-11     | 湍流强度对气膜冷却的影响 .....               | 72         |
| § 1-12     | 全气膜冷却 .....                      | 73         |
| § 1-13     | 湍流强度和流动的不稳定性 .....               | 75         |
| § 1-14     | 叶片前缘的冲击冷却 .....                  | 76         |
| § 1-15     | 叶片中段的冲击冷却 .....                  | 78         |
| § 1-16     | 气膜冷却研究的概括 .....                  | 79         |
| § 1-17     | 气膜冷却对发动机设计和性能的影响 .....           | 83         |
|            | 参考文献 .....                       | 85         |
| <b>第二章</b> | <b>二维气膜冷却有效温比的基础实验</b> .....     | <b>91</b>  |
| § 2-1      | 二维气膜冷却概述 .....                   | 91         |
| § 2-2      | 平缝气膜冷却平板的有效温比 .....              | 93         |
| § 2-3      | 斜缝气膜冷却平板的有效温比 .....              | 105        |
|            | 参考文献 .....                       | 113        |
| <b>第三章</b> | <b>二维气膜冷却换热系数的基础实验</b> .....     | <b>115</b> |
| § 3-1      | 气膜冷却换热系数的定义及其确定方法 .....          | 115        |
| § 3-2      | 文献概述 .....                       | 116        |
| § 3-3      | 实验装置与测量结果 .....                  | 123        |
|            | 参考文献 .....                       | 129        |
| <b>第四章</b> | <b>气膜冷却火焰筒壁温的计算方法和计算曲线</b> ..... | <b>132</b> |
| § 4-1      | 火焰筒壁的冷却 .....                    | 132        |
| § 4-2      | 作图法求解火焰筒壁温 .....                 | 135        |
| § 4-3      | 计算公式和计算曲线 .....                  | 136        |
| § 4-4      | 应用实例 .....                       | 146        |
|            | 参考文献 .....                       | 152        |
| <b>第五章</b> | <b>气膜冷却火焰筒壁温和热流量计算机程序</b> .....  | <b>153</b> |
| § 5-1      | 湍流混合系数 .....                     | 153        |
| § 5-2      | 热流量的计算 .....                     | 155        |
| § 5-3      | 牛顿-拉斐尔森迭代法 .....                 | 158        |
| § 5-4      | 计算机程序 .....                      | 162        |
| § 5-5      | 计算例题的原始数据 .....                  | 163        |
| § 5-6      | 计算结果及分析 .....                    | 166        |
|            | 参考文献 .....                       | 178        |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| <b>第六章 二维气膜冷却数值计算</b> .....         | 180 |
| § 6-1 数值计算在气膜冷却研究中的作用.....          | 180 |
| § 6-2 二维气膜冷却流场的基本假设和控制方程.....       | 181 |
| § 6-3 湍流模型.....                     | 182 |
| § 6-4 三对角线矩阵算法及程序框图.....            | 186 |
| § 6-5 帕坦卡-斯波尔丁方法.....               | 189 |
| § 6-6 具有气膜冷却修正的二维边界层算法.....         | 191 |
| § 6-7 算例.....                       | 195 |
| 参考文献.....                           | 198 |
| <b>第七章 弯曲壁面的气膜冷却</b> .....          | 200 |
| § 7-1 引言.....                       | 200 |
| § 7-2 曲率对气膜冷却影响的分析.....             | 201 |
| § 7-3 气膜冷却过程和自然对流过程的比较.....         | 203 |
| § 7-4 流线曲率对湍流强度及雷诺切应力分布的影响.....     | 205 |
| § 7-5 壁面曲率对湍流热流的影响.....             | 211 |
| § 7-6 弯曲壁面气膜冷却有效温比的一般实验结果.....      | 212 |
| § 7-7 弯曲壁面喷射孔附近区域气膜冷却流场及有效温比分布..... | 215 |
| 参考文献.....                           | 223 |
| <b>第八章 气膜冷却火焰筒的流场测定</b> .....       | 225 |
| § 8-1 火焰筒流场测定的意义.....               | 225 |
| § 8-2 实验系统与测量方法.....                | 226 |
| § 8-3 实验数据的整理.....                  | 230 |
| § 8-4 测量结果及其分析.....                 | 236 |
| 参考文献.....                           | 241 |
| <b>第九章 三维气膜冷却有效温比的基础实验</b> .....    | 242 |
| § 9-1 三维气膜冷却的特点与研究方法.....           | 242 |
| § 9-2 传热传质类比的基本原理及实验装置.....         | 244 |
| § 9-3 实验结果.....                     | 246 |
| 参考文献.....                           | 259 |
| <b>第十章 气膜冷却叶片有效温比的模拟实验</b> .....    | 261 |
| § 10-1 叶片气膜冷却概述.....                | 261 |
| § 10-2 实验系统与测量方法.....               | 264 |



|             |                               |            |
|-------------|-------------------------------|------------|
| § 10-3      | 实验结果 .....                    | 267        |
| § 10-4      | 实验结果的分析 .....                 | 273        |
|             | 参考文献 .....                    | 275        |
| <b>第十一章</b> | <b>三维气膜冷却数值计算</b> .....       | <b>276</b> |
| § 11-1      | 三维气膜冷却的流动特征及基本假设 .....        | 276        |
| § 11-2      | 控制方程 .....                    | 278        |
| § 11-3      | 湍流模型 .....                    | 280        |
| § 11-4      | 流场分块技术 .....                  | 282        |
| § 11-5      | 弯曲壁面离散孔气膜冷却数值计算 .....         | 285        |
| § 11-6      | 气膜冷却的优化设计 .....               | 292        |
|             | 参考文献 .....                    | 296        |
| <b>第十二章</b> | <b>激波风洞气膜冷却实验研究</b> .....     | <b>298</b> |
| § 12-1      | 前言 .....                      | 298        |
| § 12-2      | Ludwig 瞬态风洞 .....             | 298        |
| § 12-3      | 压力和温度的测量结果 .....              | 300        |
| § 12-4      | 热流量的测量 .....                  | 302        |
| § 12-5      | 气膜冷却有效温比 .....                | 306        |
|             | 参考文献 .....                    | 308        |
| <b>第十三章</b> | <b>气膜冷却的观测</b> .....          | <b>309</b> |
| § 13-1      | 概述 .....                      | 309        |
| § 13-2      | 风洞压头、流速、方向侧管 .....            | 310        |
| § 13-3      | 热线测速仪 .....                   | 318        |
| § 13-4      | 纹影仪 .....                     | 325        |
| § 13-5      | 激光测量技术 .....                  | 332        |
|             | 参考文献 .....                    | 340        |
| <b>第十四章</b> | <b>气膜冷却的其它应用</b> .....        | <b>342</b> |
| § 14-1      | 高超音速气膜冷却 .....                | 342        |
| § 14-2      | 等离子体发生器阳极气膜冷却 .....           | 343        |
| § 14-3      | 飞机机翼和驾驶舱窗防冰气膜加热 .....         | 343        |
| § 14-4      | 铀等离子体的气膜冷却方案 .....            | 344        |
| § 14-5      | 枪炮弹膛内的气膜冷却 .....              | 344        |
| § 14-6      | 冲压发动机燃烧室的气膜冷却 .....           | 345        |
| § 14-7      | 火箭发动机燃烧室壁及喷管壁的气膜冷却和液膜冷却 ..... | 349        |

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| § 14-8 钛白粉生产过程中的气膜冷却 ..... | 347 |
| § 14-9 气膜冷却的其它用途 .....     | 347 |
| 参考文献 .....                 | 347 |
| 符号表 .....                  | 349 |
| 内容索引 .....                 | 353 |

# 绪论 燃气轮机传热与叶片冷却概况

## 1. 燃气轮机的发展趋势

燃气轮机的热力循环原理早已被人们所认识。但是，只是近二十多年来，由于叶轮机机械气动热力学、叶片和燃烧室高温部件冷却原理、燃烧理论和高温材料等技术科学的发展，燃气轮机工业得到了迅速的发展。与其它热机如内燃机和蒸汽轮机相比，燃气轮机是一种知识密度高度集中的热机。燃气轮机工业也是一个新兴的工业体系。它的使用范围很广泛。现就航空、工业、舰船和汽车用燃气轮机的发展趋势简述如下。

### (1) 航空燃气轮机

推力大、体积小的新型涡轮喷气发动机克服了螺旋桨发动机无法突破的音障问题，开创了高速飞行的新纪元。以协和号飞机为例，喷气式民用飞机的飞行速度已超过音速的两倍。航空燃气轮机与过去的活塞式航空发动机相比，前者的主要优点是结构简单、振动小、功率或推力大、重量轻和使用寿命长，等等。

经过三十多年的努力，燃气轮机的主要指标有了很大的进展。例如：

- 燃气轮机的重量减轻了 4 倍，
- 耗油量降低了 2.5 倍，
- 发动机的寿命延长了 400 倍。

对航空燃气轮机而言，描述其总效率的方式应该是发动机热循环效率和推进效率的乘积。热效率  $\eta_{th}$  是热循环系统中输出功与输入热能之比，即

$$\eta_{th} = \frac{\text{给予喷射气流的动能}}{\text{燃料释放出的热能}} \quad (1)$$

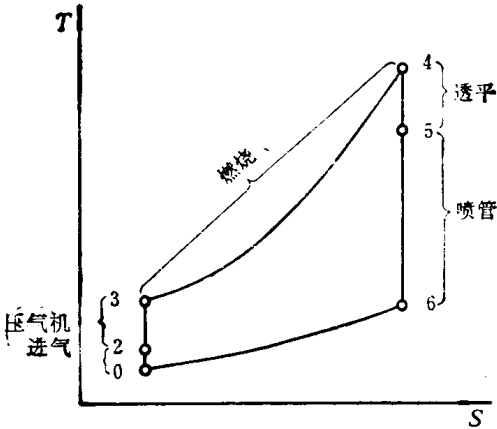


图1 涡轮喷气发动机热力循环温熵图——布雷顿循环(Brayton cycle)

如图1所示,涡轮喷气发动机热循环效率为:

$$\eta_{th,B} = 1 - T_0/T_3 \quad (2)$$

例如,压气机的压缩比是12,相应的压气机温比是2.03,依上式则得热循环效率约为0.5.为了带动压气机,透平的温降比应该与压气机的温升比基本相等.因为 $T_4 > T_3$ ,  $T_4/T_5 < T_3/T_2$ ,因而得出 $p_5 > p_2$ .这说明压气机、燃烧室和透平形成一个燃气发生器,它使气流的压力和温度同时增加.

对航空燃气轮机而言,描述其总效率的方式应该是发动机热循环效率 $\eta_{th}$ 和推进效率 $\eta_p$ 的乘积.

推进效率 $\eta_p$ 是发动机给予飞机的推力所做的功与发动机喷气的机械功之比值.取发动机单位时间里的质量流量为 $\dot{m}$ ,飞机的飞行速度为 $u_0$ ,发动机的喷气速度为 $u_c$ ,则发动机的推力是:

$$F = \dot{m}(u_c - u_0) \quad (3)$$

因而,推进效率是飞行器的推进功率 $Fu_0 = \dot{m}(u_c - u_0)u_0$ 与尾喷管排气的纯机械功率 $\dot{m}(u_c^2/2 - u_0^2/2)$ 之比:

$$\eta_p = \frac{\dot{m}(u_c - u_0)u_0}{\dot{m}\left(\frac{u_c^2}{2} - \frac{u_0^2}{2}\right)} = \frac{2u_0}{u_c + u_0} = \frac{2}{1 + \frac{u_c}{u_0}} \quad (4)$$

如图 2 所示, RB211 型发动机的  $u_c/u_0 = 1.75$ ,  $\eta_p = 0.75$ ,  $\eta_{th} = 0.45$ , 总效率约为 0.34。奥林匹斯 593 型发动机的  $\eta_p = 0.75$ ,  $\eta_{th} = 0.56$ , 则总效率约为 0.42。

改善亚音速喷气发动机推进效率的方法是采用涡轮风扇发动机。用低压透平带动发动机前部的风扇, 使空气经过外涵道喷管喷出。从而将主发动机的一部分功率移到风扇, 主发动机的喷气速度降低,  $F/\dot{m}u_0$  的有效值降低, 因此, 涡轮风扇发动机的推进效率提高。

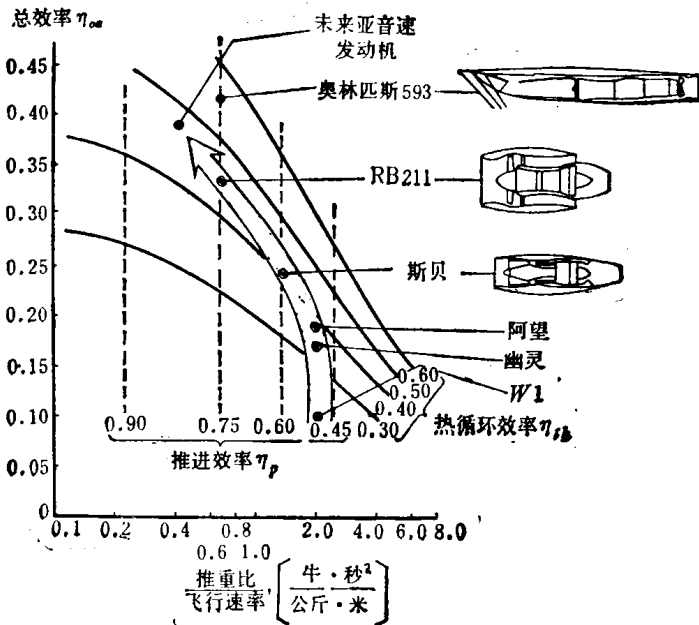


图 2 航空燃气轮机的效率

由于燃料价格的不断上涨, 高效率、节省燃料的发动机 (Energy Efficient Engine, 简称 E<sup>3</sup>) 已成为目前发动机的主要发展方向。

此外,降低发动机的排气污染程度和降低发动机的噪音极限,也是现代航空燃气轮机的重要方向。人们正考虑用多途径解决航空燃气轮机的代用燃料问题。

发展一台新的航空燃气轮机总投资可能在几十亿美元以上,研制周期可能超过6~7年。由于国际上航空发动机的销售量有限,竞争激烈,发动机新机研制的进度放慢,并且尽可能开展国际间大公司的技术合作,以期分担研制费用和共享市场。一些国家的政府投资研制军用新型航空发动机的核心机组,为新一代的发动机系列化创造条件。现在,更多的发动机工厂正努力挖掘现有有机种的潜力,提高压缩比和透平进口温度,改善叶片冷却效果,延长使用寿命和可靠性,以扩大现有有机种的销售市场。

## (2) 工业燃气轮机

五十年代初期,随着航空燃气轮机的迅速发展,工业燃气轮机也逐步得到发展。作为一种新型的动力装置,工业燃气轮机的主要优点是重量轻、体积小、运行可靠、安装容易、起动迅速,不需要冷却水,因而可以自成动力体系。这些优点是蒸汽轮机发电机组和内燃机发电机组所无法相比的。缺点是投资较大,维修费用高,目前还是以价格较高的轻柴油和天然气作为主要燃料。工业燃气轮机的发展潜力在于可以使用多种燃料,如重油、残渣油、煤的气化和液化燃料等。工业燃气轮机在发电设备、石油输送动力和天然气输送动力的应用方面有着广阔的发展前景。以煤为燃料组成的流态化床、燃气轮机蒸汽轮机联合循环将愈来愈显得重要。与内燃机相比燃气轮机需要更多的空气。吸入的空气需要经过良好的过滤系统,以防止沙粒的磨损。为了防止透平叶片的磨蚀,燃料内不宜含有过量钠、钒等杂质。大修间隔期间工业燃气轮机可持续运行二万五千小时。在燃料价格低廉的地区工业燃气轮机可以作为主发电机组使用。小型烟气透平可以作为余热回收动力装置,以提高整个系统的热效率。

### (3) 舰船用燃气轮机

与工业燃气轮机相似，舰船用燃气轮机有着许多的优点。目前，军舰上更多地开始采用燃气轮机作为动力装置。商用船只是否能推广使用燃气轮机，主要取决于低品位燃料的燃烧技术和叶片使用寿命能否获得较大的进展。自从1947年英国海军开始在军舰上第一次采用燃气轮机作为动力以来，很长一段时间海军舰只采用燃气轮机和蒸汽轮机两类机组在驱逐舰和护航舰上同时使用。1967年英国海军决定，一切新建的水上军舰一律采用燃气轮机作为动力装置。其它许多国家的海军舰队，也多开始采用燃气轮机机组。

舰用燃气轮机的主要优点是：设备小、操作人员少、启动快，并且整台燃气轮机拆修和更换也比较方便。

从发展的角度来看，舰用燃气轮机和航空燃气轮机一样，应不断提高压缩比和燃气进口温度，以提高热效率。英国罗·罗公司的舰用斯贝，美国通用电气公司的LM 2500型和普赖特-惠特尼(Pratt and Whitney)公司的FT9型都是舰用燃气轮机。新型涡轮风扇发动机的核心燃气轮机的功率在1万到3万千瓦之间，也适合舰只使用。舰船用燃气轮机使用再生式换热器后还可以进一步提高热效率。

### (4) 汽车用燃气轮机

汽车用燃气轮机的功率比较小，发展这类小功率燃气轮机目前在技术上和经济上还有一定的困难。汽车燃气轮机采用薄陶瓷片紧凑式换热器，以便提高热效率。并且这类换热器还有抗高温、耐腐蚀、抗热膨胀、耐磨损和容易密封等优点。此外，蘑菇状薄片结构回热器可以增加单位体积的换热面积，也适宜于在汽车燃气轮机上使用。一些用陶瓷冶金方法做成的小型燃气轮机转子和叶片，可以承受高温燃气的冲击，简化了叶片冷却技术。一些坦克上用的具有再生式换热器的燃气轮机已研制成功，并已正式投产。

## **(5) 原子能燃气轮机**

气冷原子能反应堆和高温燃气轮机组合，可形成一种新的动力装置。氦气是这类动力装置的理想载热工质之一。氦气的音速较高，因而可以避免跨音速叶片设计带来的困难，叶片的转速也可以适当地提高。氦气的比热较空气高，如果每级叶片的焓降保持不变，则氦气透平级数需相应增加。为了获得氦气透平反应堆的设计经验，西德在奥伯豪森（Oberhausen）建成了一座5万[千瓦]的氦气闭式气轮机，氦气的工作压力与空气冷却反应堆的工作压力相接近。

## **2. 燃气轮机的主要传热问题**

燃气轮机各组成部件的主要传热问题可简要列举如下：

### **(1) 入口段、风扇和压气机**

- 入口段的防冰
- 轮盘温度分布
- 机壳温度分布
- 实际缝隙的控制

### **(2) 燃烧室**

- 火焰筒冷却——气膜冷却和外环对流冷却
- 燃油喷咀热性能
- 火焰热辐射

### **(3) 透平**

- 叶片内部冷却
- 叶片气膜冷却
- 叶片发散冷却



- 叶片冲击冷却
- 叶片水冷
- 叶片蒸汽冷却
- 叶片陶瓷涂层防护性冷却
- 叶片尾缘内部扰流柱强化冷却
- 叶片侧壁气膜冷却
- 叶根和榫头冷却
- 叶片外环和机壳温度分布
- 轮盘温度分布
- 温度变化和叶片与机匣间实际缝隙的控制
- 全气膜叶片冷却

#### **(4) 加力燃烧室和尾喷管**

- 加力燃烧室内壁的冷却——气膜冷却
- 火焰稳定器的冷却
- 火焰热辐射

#### **(5) 轴承和润滑系统**

#### **(6) 换热器**

- 再生式紧凑换热器
- 陶瓷薄片蘑菇结构换热器
- 冷却润滑油用换热器

#### **(7) 转子迷宫式密封系统**

#### **(8) 红外线热辐射的遮盖**

### **3. 提高燃气轮机的透平入口温度**

燃气轮机进展的重要标志是透平入口温度的提高和压气机压比的增加。