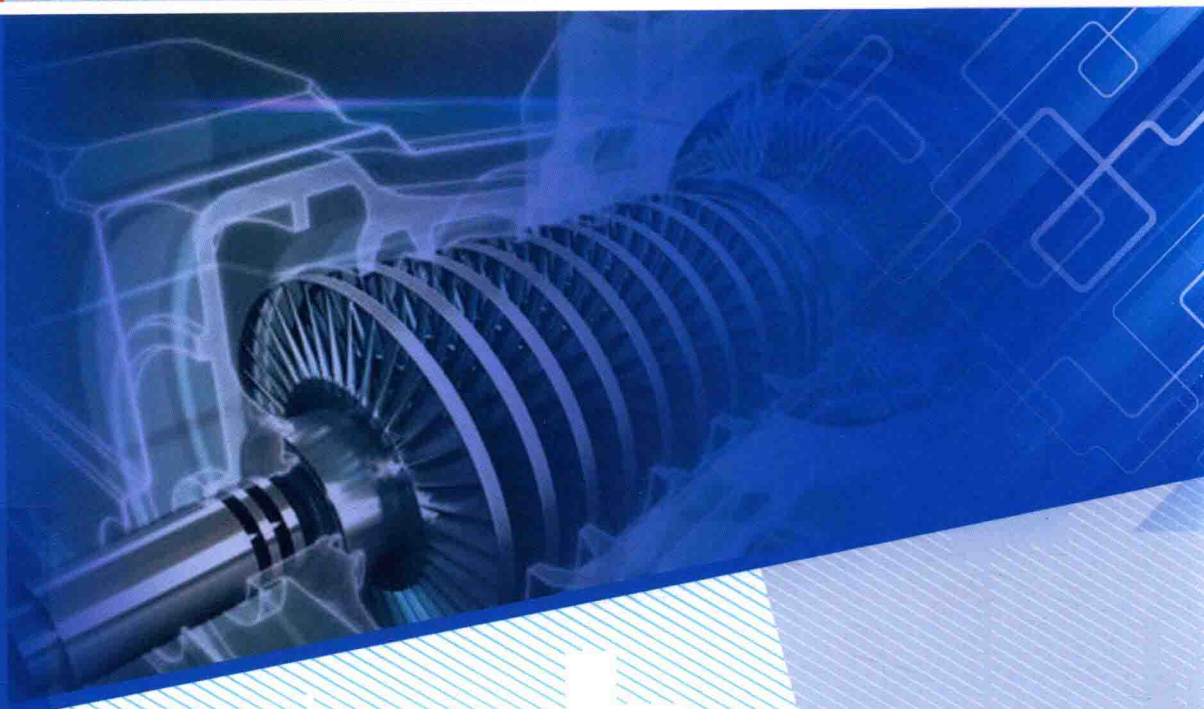


燃气轮机涡轮冷却叶片 设计及优化

李 磊 杨子龙 王佩艳 岳珠峰 等 著



科学出版社

燃气轮机涡轮冷却叶片设计及优化

李 磊 杨子龙 王佩艳 岳珠峰 等 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书围绕燃气轮机涡轮冷却叶片设计流程、涉及学科和多场耦合服役特点,系统总结了涡轮冷却叶片设计及优化方面取得的理论和应用成果。内容涵盖涡轮叶片冷却技术发展、冷却方案设计、结构设计、多场耦合分析以及多学科优化等,旨在为工程实践提供先进的设计理论、方法以及应用技术参考。

本书可供从事航空燃气轮机、船用燃气轮机、工业燃气轮机涡轮冷却叶片设计,多场耦合分析,多学科设计优化的教师和研究生使用,也可供相关专业的研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

燃气轮机涡轮冷却叶片设计及优化 / 李磊等著. —北京: 科学出版社, 2018.3
ISBN 978-7-03-055340-9

I. ①燃… II. ①李… III. ①燃气轮机-冷却叶片-机械设计-最优设计
IV. ①TK47

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 276479 号

责任编辑: 亢列梅 刘耘彤 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 陈 敬

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>

北京中石油彩色印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2018 年 3 月第一次印刷 印张: 13 1/2

字数: 272 000

定价: 95.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《燃气轮机涡轮冷却叶片设计及优化》撰写成员

李 磊 杨子龙 王佩艳 岳珠峰

高文静 仝福娟 杨 帆

前 言

燃气轮机广泛用于航空推进（航空发动机）、舰船推进（船用燃气轮机）、工业发电（工业燃气轮机）等领域，被誉为“工业皇冠”，是国家科技、工业和国防实力的标志。正是由于燃气轮机的重要性，世界先进国家均将燃气轮机作为优先发展的战略性产业。我国制定的《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020）》《民用航空工业中长期发展规划（2013—2020年）》《国务院关于加强培育和发展战略性新兴产业的决定》《中国制造 2025》和“两机”专项都将先进燃气轮机作为国家战略来发展。

研究表明，涡轮进口温度每提高 55°C ，燃气轮机功率和效率可提高 10%。当今世界最先进的航空燃气轮机 F119 涡扇发动机（配装 F22 战斗机）和 F135 发动机（配装 F35 战斗机）涡轮进口温度已经达到或超过 1800°C 。尽管发展了镍基单晶高温合金、陶瓷基复合材料、C/C 复合材料等耐高温材料，但是仍远远跟不上涡轮进口温度的提升。当前最先进的航空燃气轮机涡轮进口温度已超过镍基单晶高温合金材料耐受温度近 700°C ，超过陶瓷基复合材料近 400°C 。为了适应燃气轮机涡轮的高温工作环境，合理引入冷却技术来降低涡轮冷却叶片的工作温度，成为解决上述问题的关键。

一方面，涡轮进口温度的提高受制于直接暴露于高温燃气中涡轮冷却叶片材料的耐受温度，以及涡轮叶片的冷却降温效果。另一方面，旋转的涡轮工作叶片承受了上万转速所产生的离心载荷，高温、高转速的工作环境使得涡轮工作叶片成为航空发动机中工作环境最为恶劣的零部件，涡轮进口温度的提升同样受制于涡轮工作叶片的高温力学性能（强度、寿命等）。因此涡轮冷却叶片，特别是高压涡轮工作叶片，在一定程度上直接决定了燃气轮机的性能。正是由于涡轮冷却叶片的重要性，美国等发达国家都将其作为发展的重中之重。因此，开展涡轮冷却叶片关键技术的研究，对于我国高性能燃气轮机的研制具有重要意义。

本书重点围绕涡轮冷却叶片冷却技术、冷却方案设计、结构设计、多场耦合分析、多学科优化设计、可靠性设计等方面进行了系统介绍，全书共 9 章。第 1 章、第 2 章、第 3 章介绍涡轮叶片冷却技术研究现状，包括气膜冷却、射流冲击冷却、扰流柱和肋化通道强化对流换热、层板冷却、叶顶冷却等，以及冷却技术在涡轮叶片上的应用；第 4 章介绍涡轮叶片冷却方案设计方法，包括管网计算基本理论、基于管网计算的冷却方案设计等；第 5 章介绍涡轮冷却叶片参数化设计方法；第 6 章介绍涡轮冷却叶片流-热-固耦合分析、寿命预测方法；第 7 章和第 8 章分别

介绍涡轮冷却叶片多学科设计优化、基于可靠性的涡轮冷却叶片多学科设计优化方法；第9章介绍网格参数化方法在涡轮冷却叶片中的应用。本书第1章由西北工业大学李磊撰写，第2章由西北工业大学高文静、仝福娟、杨帆撰写，第3、4章由西北工业大学李磊撰写，第5章由西北工业大学王佩艳撰写，第6章由西北工业大学高文静、仝福娟、杨帆撰写，第7章由中国舰船研究院杨子龙撰写，第8章由西北工业大学李磊撰写，第9章由西北工业大学高文静、仝福娟、杨帆撰写。全书由西北工业大学岳珠峰统稿和校核。

本书成果得到国家自然科学基金(51575444)、航空动力基金、航天科学技术基金(2017-HT-XGD)、国防科工局基础科研以及型号项目的资助。本书的有关内容参考了课题组研究生李立州、虞跨海、邓丁元、周启涛、刘博、余嘉伟、万欢等的相关研究成果，得到了国家国防科技工业局、中国航空发动机集团、中国船舶重工集团公司相关人员的大力支持，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免出现不妥之处，敬请读者批评指正。

作 者

2017年10月

目 录

前言

第 1 章 燃气轮机涡轮叶片冷却技术概述	1
1.1 燃气轮机分类及结构组成	1
1.2 涡轮叶片的冷却需求	3
1.2.1 涡轮进口温度的发展趋势	4
1.2.2 高温材料的发展	6
1.2.3 涡轮进口温度与材料耐受温度对比	9
1.3 涡轮叶片冷却技术	10
1.3.1 简单对流换热冷却技术	13
1.3.2 肋化通道强化对流换热技术	14
1.3.3 扰流柱强化对流换热技术	15
1.3.4 射流冲击冷却技术	16
1.3.5 气膜冷却技术	16
1.3.6 组合及新型冷却技术	17
1.4 冷却技术在涡轮叶片上的应用	18
1.4.1 前缘	19
1.4.2 叶中	19
1.4.3 尾缘	21
1.4.4 叶根	22
1.4.5 叶顶	23
1.5 本章小结	24
参考文献	24
第 2 章 肋化通道、扰流柱、射流冲击冷却技术的研究现状	26
2.1 肋化通道（粗糙肋）强化对流换热技术的研究现状	26
2.1.1 肋片几何形状	26
2.1.2 肋片几何参数的影响	28
2.1.3 肋片排列方式的影响	29
2.1.4 雷诺数、转速等的影响	30

2.2 扰流柱强化对流换热技术的研究现状	31
2.2.1 扰流柱截面形状	32
2.2.2 扰流柱几何参数的影响	33
2.2.3 扰流柱排布方式的影响	34
2.2.4 转速的影响	35
2.2.5 圆形、椭圆形、水滴形扰流柱矩形通道的对流换热特性分析	35
2.2.6 间距、迎角、长短轴比等对椭圆形扰流柱矩形通道对流换热特性的 影响	39
2.2.7 扰流柱梯形通道的对流换热特性分析	42
2.3 射流冲击冷却技术研究现状	45
2.3.1 射流板与靶板间距的影响	47
2.3.2 横向流的影响	47
2.3.3 射流孔结构尺寸的影响	47
2.3.4 射流孔排布方式的影响	48
2.4 本章小结	48
参考文献	49

第3章 气膜、层板、叶顶冷却技术的研究现状

53

3.1 气膜冷却技术的研究现状	53
3.1.1 气膜孔孔型的研究现状	54
3.1.2 平板气膜冷却的研究现状	57
3.1.3 前缘气膜冷却的研究现状	59
3.1.4 叶身气膜冷却的研究现状	62
3.1.5 不同复合角下前缘气膜冷却模型的对流换热特性研究	62
3.2 层板冷却技术的研究现状	67
3.2.1 层板几何参数的研究现状	67
3.2.2 排布方式的研究现状	69
3.3 叶顶冷却技术的研究现状	71
3.3.1 叶顶防泄漏结构形式	72
3.3.2 叶顶气膜冷却	74
3.3.3 叶尖间隙的影响	76
3.3.4 转速和雷诺数的影响	77
3.4 本章小结	77
参考文献	77

第 4 章 基于管网计算的涡轮叶片冷却方案设计	81
4.1 管网计算方法	82
4.1.1 管网节流单元及基本假设	82
4.1.2 管网计算控制方程	83
4.1.3 管网计算的求解	85
4.1.4 不同冷却结构流阻和换热计算	86
4.2 管网计算方法的验证	88
4.2.1 Y 模型的对比分析验证	88
4.2.2 涡轮冷却叶片的分析验证	91
4.3 基于管网计算的涡轮冷却叶片方案设计方法	94
4.3.1 叶片冷气用量预估	94
4.3.2 叶身冷气流道设计	94
4.3.3 冷却特征设计	96
4.3.4 设计方案的验证	96
4.3.5 基于管网模型的涡轮叶片冷却方案优化设计	97
4.4 本章小结	98
参考文献	98
第 5 章 涡轮冷却叶片参数化设计	99
5.1 涡轮冷却叶片的参数化设计方法	99
5.2 涡轮冷却叶片叶型设计	103
5.2.1 基于曲率优化的 14 参数平面叶栅设计方法	103
5.2.2 叶身积叠成型	110
5.3 涡轮叶片冷却结构设计	111
5.3.1 壁厚设计	111
5.3.2 内腔型面设计	113
5.3.3 冷气通道(通道肋)设计	115
5.3.4 局部冷却特征设计	116
5.3.5 尾缘出气结构设计	117
5.4 涡轮冷却叶片榫头/缘板/伸根段设计	117
5.4.1 榫头设计	117
5.4.2 缘板设计	125
5.4.3 伸根段设计	126
5.5 涡轮冷却叶片叶顶结构设计	126

5.6 涡轮冷却叶片实体生成	127
5.7 本章小结	128
参考文献	129
第6章 多场耦合服役环境下涡轮冷却叶片性能分析	130
6.1 涡轮冷却叶片流-热-固耦合分析	130
6.1.1 涡轮冷却叶片流-热耦合分析	130
6.1.2 温度、气压耦合信息传递	134
6.1.3 结构强度分析	135
6.2 涡轮冷却叶片寿命分析	138
6.2.1 涡轮冷却叶片失效形式	139
6.2.2 涡轮冷却叶片寿命分析流程	140
6.2.3 涡轮冷却叶片寿命预测方法	141
6.2.4 涡轮冷却叶片寿命预测	146
6.3 本章小结	150
参考文献	151
第7章 涡轮冷却叶片多学科设计优化	152
7.1 涡轮冷却叶片多学科设计优化特点及流程	152
7.1.1 涡轮冷却叶片多学科设计优化问题的分析	152
7.1.2 涡轮冷却叶片多学科设计要求和设计准则	153
7.1.3 涡轮冷却叶片多学科设计优化流程	154
7.2 涡轮冷却叶片优化数学模型	158
7.2.1 设计变量	158
7.2.2 优化目标	159
7.2.3 约束条件	159
7.2.4 优化数学模型	159
7.3 DOE 分析	160
7.4 近似代理模型	161
7.5 优化设计结果及分析	164
7.6 本章小结	169
参考文献	170
第8章 基于可靠性的涡轮冷却叶片多学科设计优化	171
8.1 涡轮冷却叶片多学科可靠性设计优化流程	171

8.2 基于可靠性的涡轮冷却叶片多学科设计优化数学模型	173
8.2.1 设计变量	173
8.2.2 随机变量	173
8.2.3 优化目标	174
8.2.4 约束条件	174
8.2.5 优化数学模型	174
8.3 涡轮冷却叶片随机因素统计规律	175
8.3.1 壁厚、通道肋厚度分散性数据统计	175
8.3.2 材料性能分散性数据统计	176
8.3.3 转速分散性数据统计	177
8.4 服役环境下涡轮冷却叶片可靠性分析	178
8.5 基于可靠性的涡轮冷却叶片多学科设计优化及分析	180
8.6 本章小结	181
参考文献	181
 第9章 网格参数化方法在涡轮冷却叶片中的应用	 183
9.1 网格变形方法基本理论及其应用	184
9.1.1 自由网格变形的基本理论及其应用	184
9.1.2 边界网格变形方法及其应用	187
9.2 涡轮冷却叶片分析网格的参数化	192
9.2.1 三维流场分析网格的参数化	192
9.2.2 涡轮实心叶片结构分析网格的参数化	194
9.2.3 涡轮叶片流场分析网格和结构分析网格的协调变形	195
9.2.4 涡轮叶片冷却结构分析网格的参数化	196
9.3 变形后的网格光顺	197
9.4 基于网格参数化方法的涡轮冷却叶片多学科设计优化	198
9.5 本章小结	200
参考文献	200

第 1 章 燃气轮机涡轮叶片冷却技术概述

燃气轮机广泛应用于航空推进、舰船推进、工业发电等领域，被誉为“工业皇冠”，是国家科技、工业和国防实力的标志。燃气轮机的发展将带动材料、制造、机械、控制等众多相关学科和产业的发展，极大地促进国民经济和国家整体工业水平的进步。正是由于燃气轮机的重要性，世界先进国家均将燃气轮机作为优先发展的战略性新兴产业。我国制定的《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020）》《民用航空工业中长期发展规划（2013—2020 年）》《国务院关于加强培育和发展战略性新兴产业的决定》《中国制造 2025》和“两机”专项都将先进燃气轮机作为国家优先发展的方向^[1-4]。涡轮冷却叶片作为燃气轮机的核心零部件之一，在一定程度上直接决定了燃气轮机的性能。当前，先进燃气轮机国家均将涡轮冷却叶片的研发作为战略技术来发展。因此，开展涡轮冷却叶片设计关键技术的研究，对于我国高性能燃气轮机的研制具有重要意义。

1.1 燃气轮机分类及结构组成

燃气轮机是以流动气体为工质，内部连续回转燃烧，依靠高温高压燃气推动涡轮做功，将热能转换为机械能的叶轮机械。燃气轮机主要由压气机、燃烧室、涡轮等部件组成。其基本工作过程是：压气机连续从大气中吸入空气并将其压缩增压，同时空气温度也相应升高；压缩空气进入燃烧室，与喷入的燃料混合后燃烧生成高温高压燃气；高温高压燃气流入涡轮膨胀做功，推动涡轮带动压气机一起旋转，并按照功能进行功率输出。按照应用领域，燃气轮机分为航空燃气轮机（航空发动机）、船用燃气轮机、工业燃气轮机等；按照功率大小，燃气轮机分为重型燃气轮机、大中型燃气轮机、轻型燃气轮机和微型燃气轮机等。图 1-1 给出了燃气轮机的分类。

航空燃气轮机，主要作用是为航空器提供动力。按照提供动力的方式，航空燃气轮机可以分为涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、涡轮螺桨发动机、涡轮轴发动机。船用燃气轮机因具有体积小、功率大等优点，已被广泛应用于驱逐舰、护卫舰、登陆艇、导弹艇等。工业燃气轮机主要用于天然气发电、天然气管路输送、交通等领域。根据涡轮进口温度以及与之对应的循环效率、冷却方式的不同，重型燃气轮机被划分为 B 级、E 级、F 级、G 级与 H 级等。用途不同，航空燃气轮机、船用燃气轮机、工业燃气轮机结构和工作原理不尽相同，图 1-2~图 1-4 给出了典型燃气轮机的工作原理图。

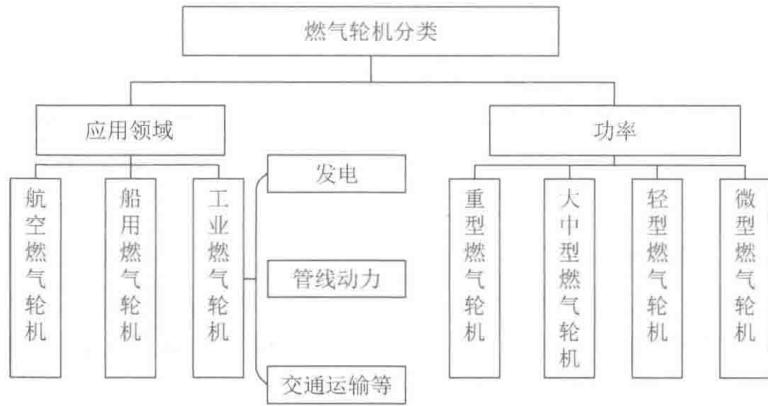


图 1-1 燃气轮机的分类

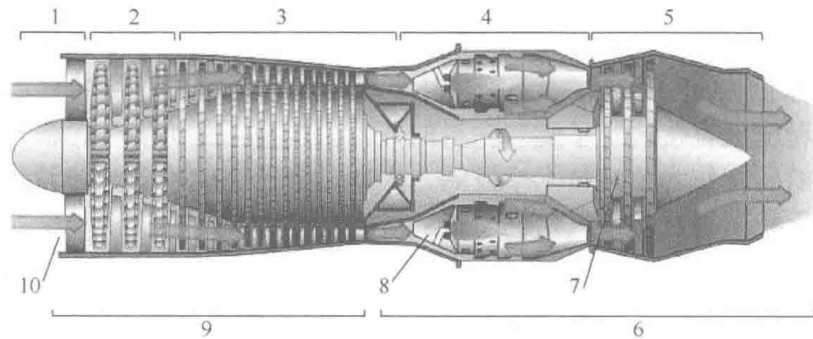


图 1-2 涡轮喷气发动机工作原理图

1-进气道进气；2-低压压气机压缩；3-高压压气机压缩；4-燃烧；
5-膨胀做功；6-热端；7-涡轮；8-燃烧室；9-冷端；10-进气口

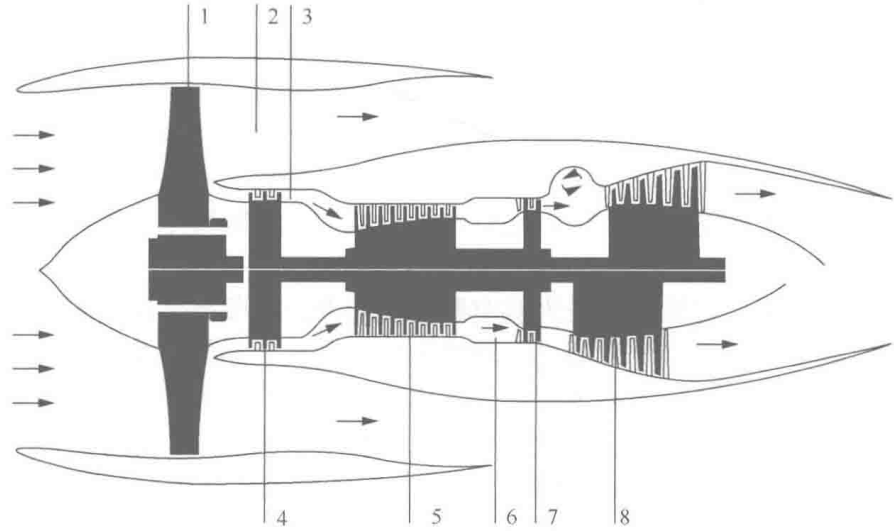


图 1-3 涡轮风扇发动机工作原理图

1-风扇；2-外涵道；3-内涵道；4-低压压气机；5-高压压气机；6-燃烧室；7-高压涡轮；8-低压涡轮

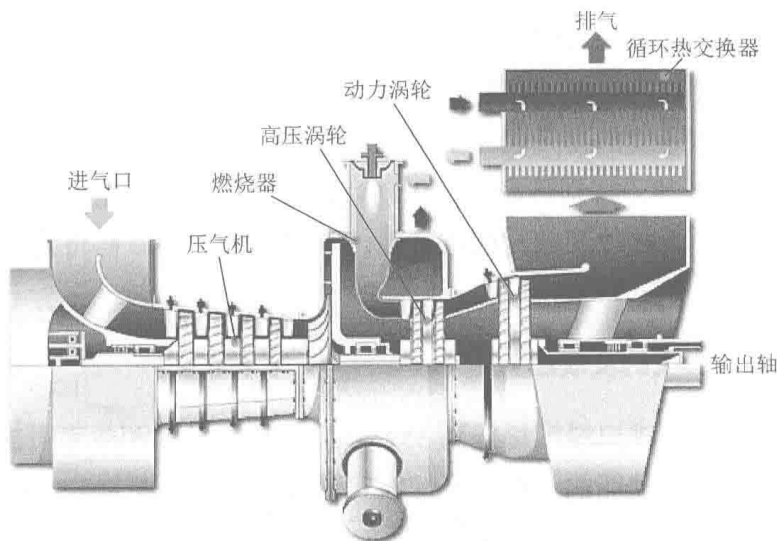


图 1-4 船用、工业燃气轮机工作原理图

1.2 涡轮叶片的冷却需求

工作过程中，燃气轮机涡轮进口处高压涡轮叶片（静叶和动叶）直接暴露在高温燃气中，如图 1-5 所示。一方面，涡轮进口温度（turbine inlet temperature, TIT）的提高受制于直接暴露于高温燃气中涡轮叶片材料的耐受温度，以及涡轮叶

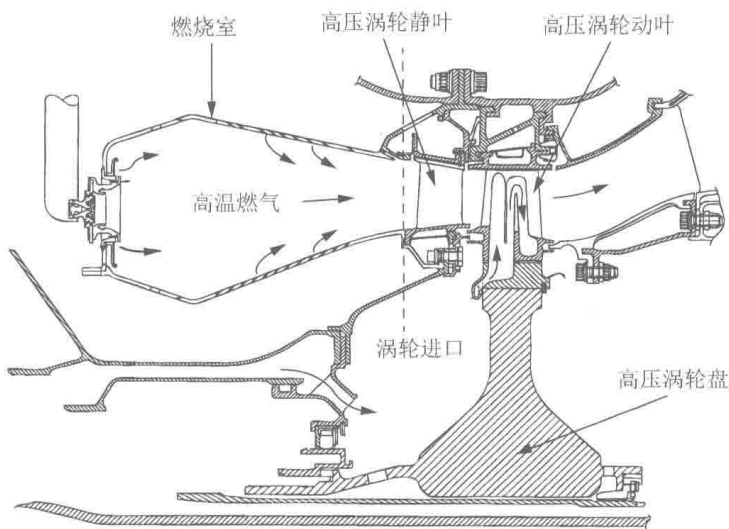
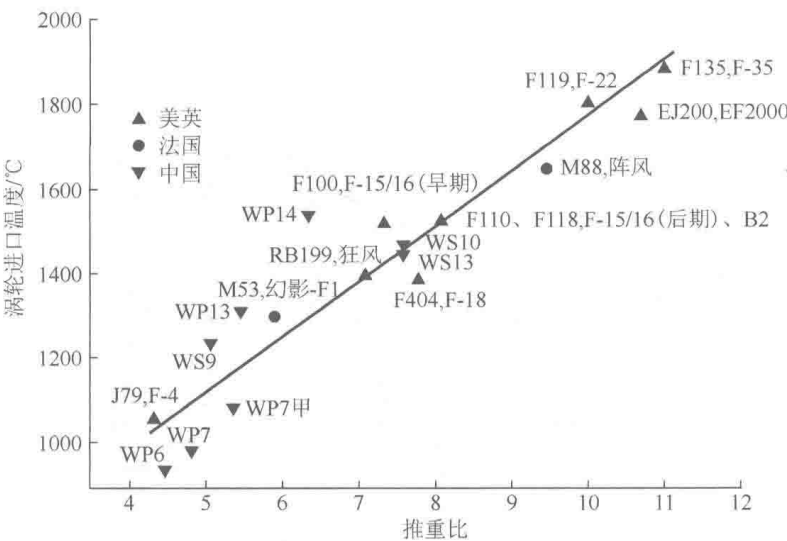


图 1-5 燃气轮机涡轮叶片及工作环境

片的冷却降温效果；另一方面，旋转的涡轮动叶承受了上万转速所产生的离心载荷，高温、高转速的工作环境使得涡轮动叶成为燃气轮机中工作环境最为恶劣的零部件，涡轮进口温度的提升同样受制于涡轮动叶的高温力学性能（强度、寿命等）。因此，涡轮叶片，特别是高压涡轮动叶，在一定程度上直接决定了燃气轮机的性能。正是由于涡轮冷却叶片的重要性，美国等发达国家都将其作为重中之重发展。

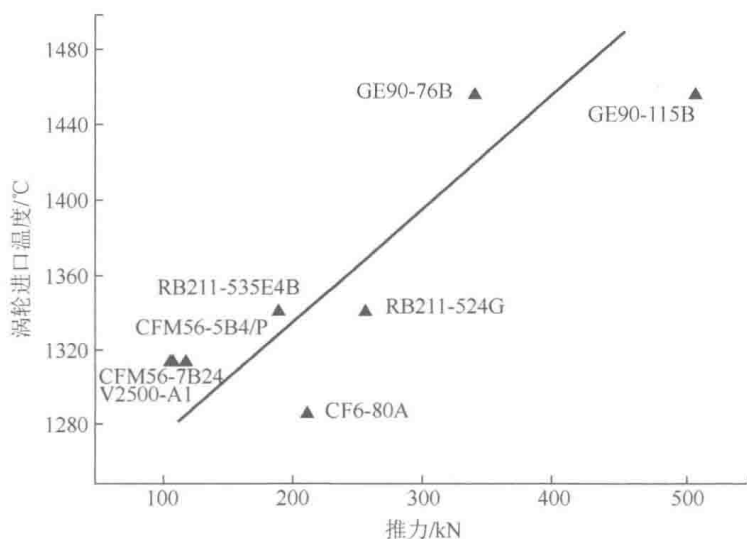
1.2.1 涡轮进口温度的发展趋势

研究表明，涡轮进口温度每提高 55℃，燃气轮机功率和效率可提高 10%^[5]。因此伴随着燃气轮机性能的不不断提升，涡轮进口温度也不断提升。航空燃气轮机追求较高的推重比或功重比，要求性能较为突出，因此涡轮进口温度较高。图 1-6 给出了国内外主要航空燃气轮机涡轮进口温度的发展情况。当今世界最先进的航空燃气轮机——F119 涡扇发动机（配装 F-22 战斗机）和 F-135 发动机（配装 F-35 战斗机）涡轮进口温度已经达到或超过 1800℃，新一代大功率涡轴发动机涡轮进口温度将达到 1500℃左右。作为航空燃气轮机燃料，碳氢化合物理论燃烧温度可达 2200℃，因此航空燃气轮机涡轮进口温度具有进一步提高的可能。



(a) 军用航空燃气轮机

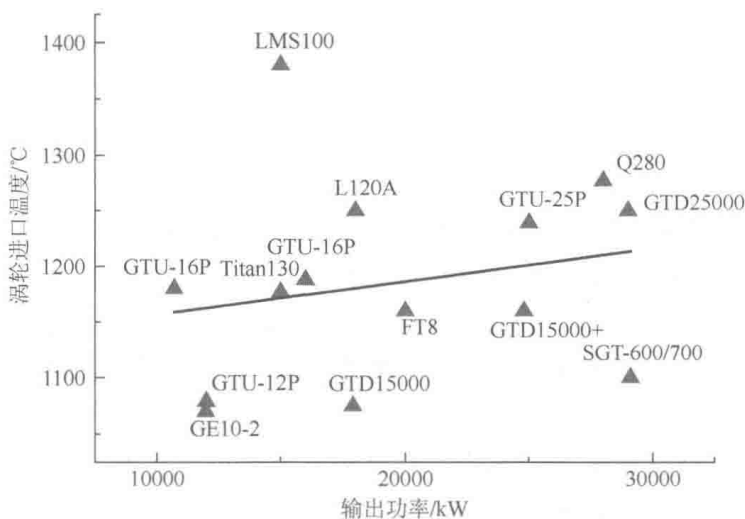
图 1-6 国内外主要航空燃气轮机涡轮进口温度的发展情况



(b) 民用航空燃气轮机

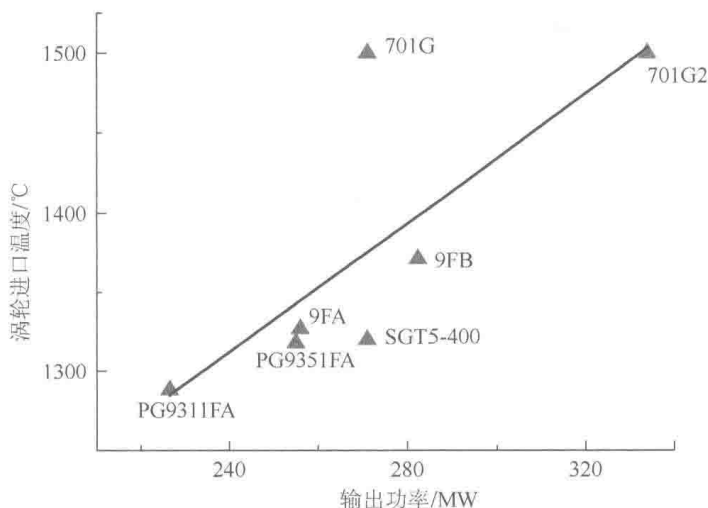
图 1-6 国内外主要航空燃气轮机涡轮进口温度的发展情况 (续)

船用燃气轮机和工业燃气轮机, 由于受到 NO_x 排放的限制, 涡轮进口温度维持在 $1050\sim 1500^\circ\text{C}$, 典型船用和工业燃气轮机涡轮进口温度如图 1-7 所示。其中, F 级重型燃气轮机涡轮初温在 1300°C 附近, G 级重型燃气轮机涡轮初温约为 1500°C 。



(a) 船用燃气轮机

图 1-7 典型船用和工业燃气轮机涡轮进口温度



(b) 工业燃气轮机

图 1-7 典型船用和工业燃气轮机涡轮进口温度 (续)

1.2.2 高温材料的发展

燃气轮机涡轮叶片工作在高温环境中, 高压涡轮动叶需要承受离心力、气动力、热应力以及高温燃气激励下的振动载荷, 此外还需要承受高温燃气冲刷、氧化、热腐蚀等, 因此对涡轮叶片高温材料的要求十分苛刻。高温材料需要具有较高的高温屈服强度、抗拉强度、抗疲劳强度、持久和蠕变强度, 以及优良的抗氧化和热腐蚀的性能。目前发展的耐高温材料包括变形高温合金、铸造高温合金(等轴晶铸造高温合金、定向凝固高温合金、单晶高温合金)、粉末冶金高温合金、陶瓷基复合材料(CMC)、C/C 复合材料等^[6]。图 1-8 给出了典型高温合金的发展历程。

变形高温合金是指能够通过热加工变形成型的高温合金。在微观结构上, 变形高温合金由多个晶粒组成, 呈现出各向同性宏观力学性能, 最高工作温度在 800℃ 左右。按照合金元素, 变形高温合金分为铁基、镍基和钴基变形高温合金; 按照性能、成形特点及用途, 变形高温合金分为热稳定变形高温合金和热强变形高温合金。热稳定变形高温合金的特点是热稳定性很高, 通常在固溶状态下使用, 塑性很好, 主要用于受力不大而工作温度很高的零件, 如燃烧室火焰筒及加力燃烧室等。热强变形高温合金的特点是热强度较高, 通常在淬火、时效状态下使用, 主要用于高温下承受大载荷及复杂应力的零件, 如涡轮叶片、涡轮盘等。典型的变形高温合金包括美国的 Inconel 系列、我国的 GH 系列等。目前变形高温合金主要应用于燃气轮机燃烧室、机匣、涡轮盘、低压涡轮叶片等。