

” 国家重点出版规划

国家出版基金项目

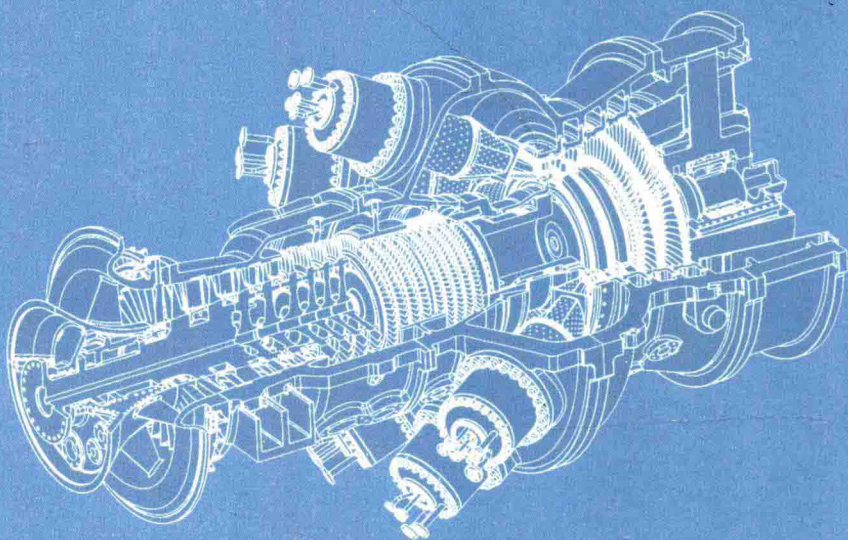
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

先进燃气轮机设计制造基础专著系列

丛书主编 王铁军

高温透平叶片的传热与冷却

朱惠人 张 丽 郭 涛 刘存良 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

“十二五”国家重点出版规划

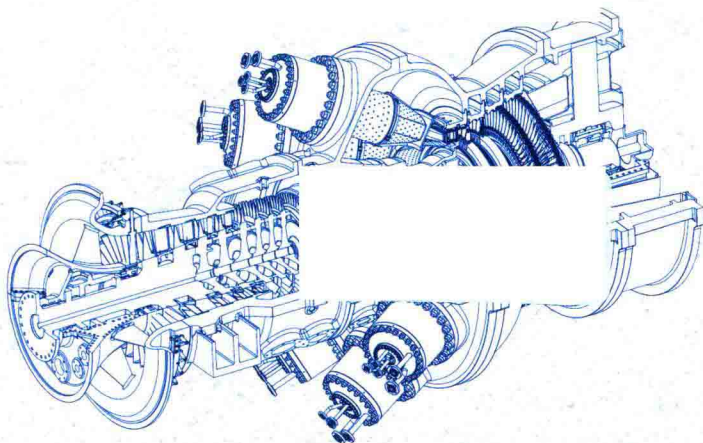


先进燃气轮机设计制造基础专著系列

丛书主编 王铁军

高温透平叶片的传热与冷却

朱惠人 张 丽 郭 涛 刘存良 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书在介绍燃气轮机中的传热基本概念及冷却基本原理的基础上,主要针对气冷叶片的热分析问题,讨论了叶片光滑表面及气膜冷却表面的传热现象及规律、叶片内部各种强化换热结构的传热现象及规律、叶片的热分析方法、传热及冷却的实验原理、传热测试方法及传热数值模拟中的一些典型问题。

本书可作为航空宇航推进理论与工程、工程热物理、热能工程等专业研究生的教学及科研参考书,也可供从事航空发动机及燃气轮机设计及相关工程工作的技术人员和研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高温透平叶片的传热与冷却/朱惠人等著. —西安:西安交通大学出版社,2017.1

(先进燃气轮机设计制造基础专著系列/王铁军主编)

ISBN 978-7-5605-9395-1

I. ①高… II. ①朱… III. ①高温透平-叶片-传热 ②高温透平-叶片-冷却 IV. ①TK14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 024599 号

书 名 高温透平叶片的传热与冷却
著 者 朱惠人 张 丽 郭 涛 刘存良
责任编辑 王 欣

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjupress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 中煤地西安地图制印有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 25.75 彩页 4 字数 553千字
版次印次 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-9395-1
定 价 490.00元

读者购书、书店添货,如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82669097 QQ:8377981

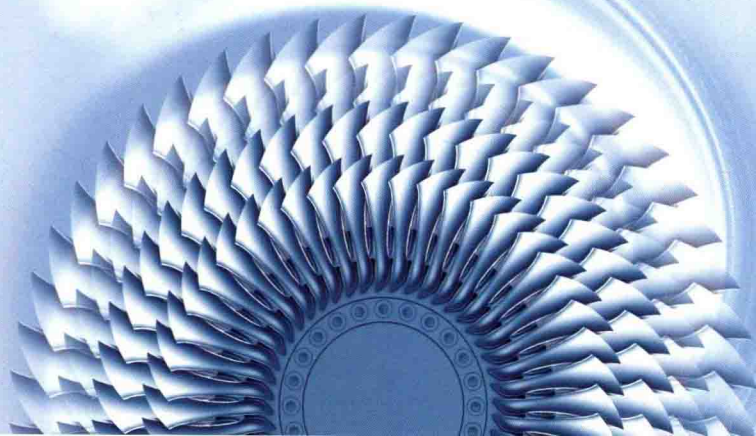
读者信箱:lg_book@163.com

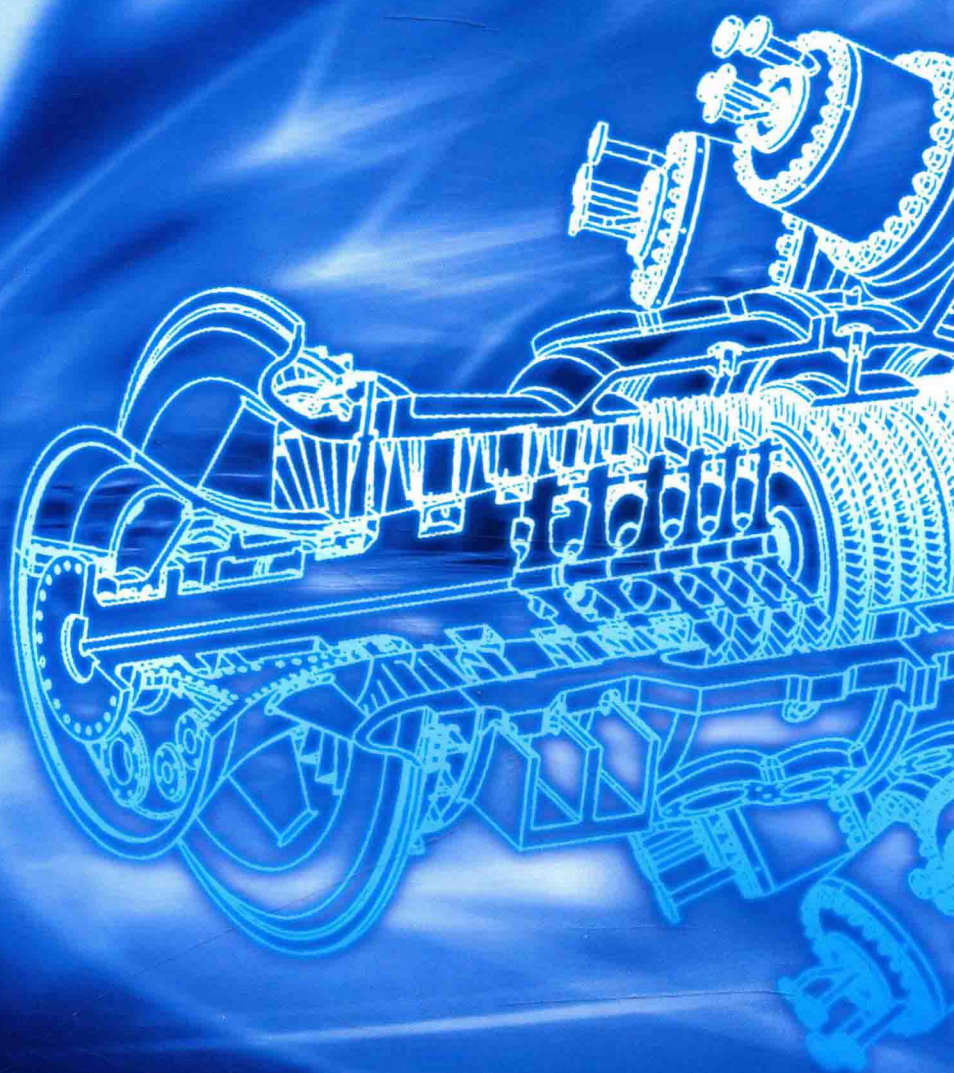
版权所有 侵权必究



“十二五”国家重点出版规划

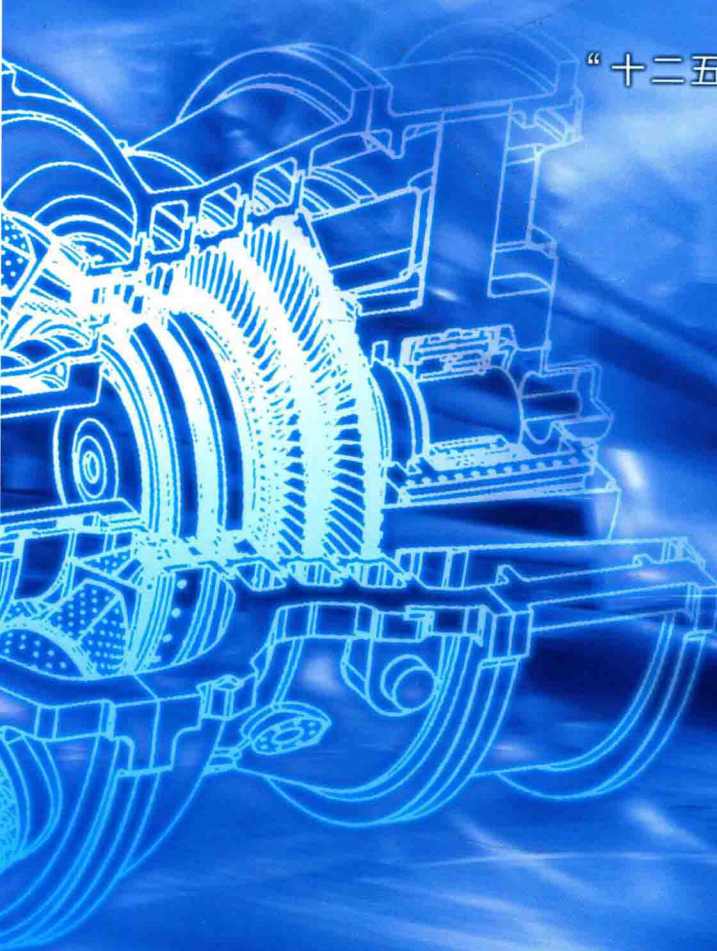
先进燃气轮机设计制造基础专著系列







“十二五”国家重点出版规划







“十二五”国家重点出版规划

先进燃气轮机设计制造基础专著系列

编 委 会

顾 问

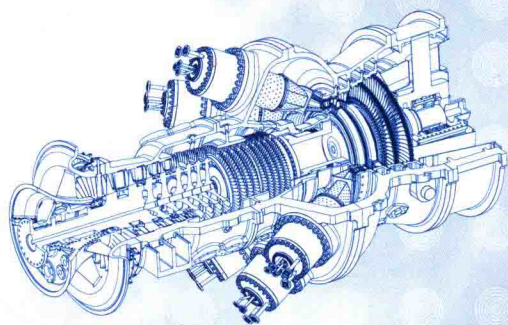
- 钟 掘 中南大学教授、中国工程院院士
程耿东 大连理工大学教授、中国科学院院士
熊有伦 华中科技大学教授、中国科学院院士
卢秉恒 西安交通大学教授、中国工程院院士
方岱宁 北京理工大学教授、中国科学院院士
雒建斌 清华大学教授、中国科学院院士
温熙森 国防科技大学教授
雷源忠 国家自然科学基金委员会研究员
姜澄宇 西北工业大学教授
虞 烈 西安交通大学教授
魏悦广 北京大学教授
王为民 东方电气集团中央研究院研究员

主 编

- 王铁军 西安交通大学教授

编 委

- 虞 烈 西安交通大学教授
朱惠人 西北工业大学教授
李涤尘 西安交通大学教授
王建录 东方电气集团东方汽轮机有限公司高级工程师
徐自力 西安交通大学教授
李 军 西安交通大学教授



总序

20 世纪中叶以来,燃气轮机为现代航空动力奠定了基础。随后,燃气轮机也被世界发达国家广泛用于舰船、坦克等运载工具的先进动力装置。燃气轮机在石油、化工、冶金等领域也得到了重要应用,并逐步进入发电领域,现已成为清洁高效火电能源系统的核心动力装备之一。

发电用燃气轮机占世界燃气轮机市场的绝大部分。燃气轮机电站的特点是,供电效率远远超过传统燃煤电站,清洁、占地少、用水少,启动迅速,比投资小,建设周期短,是未来火电系统的重要发展方向之一,是国家电力系统安全的重要保证。对远海油气开发、分布式供电等,燃气轮机发电可大有作为。

燃气轮机是需要多学科推动的国家战略高技术,是国家重大装备制造水平的标志,被誉为制造业王冠上的明珠。长期以来,世界发达国家均投巨资,在国家层面设立各类计划,研究燃气轮机基础理论,发展燃气轮机新技术,不断提高燃气轮机的性能和效率。目前,世界重型燃气轮机技术已发展到很高水平,其先进性主要体现在以下三个方面:一是单机功率达到 30 万千瓦至 45 万千瓦,二是透平前燃气温度达到 $1600\sim 1700\text{ }^{\circ}\text{C}$,三是联合循环效率超过 60%。

从燃气轮机的发展历程来看,透平前燃气温度代表了燃气轮机的技术水平,人们一直在不断追求燃气温度的提高,这对高温透平叶片的强度、设计和制造提出了严峻挑战。目前,有以下几个途径:一是开发更高承温能力的高温合金叶片材料,但成本高、周期长;二是发展先

进热障涂层技术,相比较而言,成本低,效果好;三是制备单晶或定向晶叶片,但难度大,成品率低;四是发展先进冷却技术,这会增加叶片结构的复杂性,从而大大提高制造成本。

整体而言,重型燃气轮机研发需要着重解决以下几个核心技术问题:先进冷却技术、先进热障涂层技术、定(单)向晶高温叶片精密制造技术、高温高负荷高效透平技术、高温低 NO_x 排放燃烧室技术、高压高效先进压气机技术。前四个核心技术属于高温透平部分,占了先进重型燃气轮机设计制造核心技术的三分之二,其中高温叶片的高效冷却与热障是先进重型燃气轮机研发所必须解决的瓶颈问题,大型复杂高温叶片的精确成型制造属于世界难题,这三个核心技术是先进重型燃气轮机自主研发的基础。高温燃烧室技术主要包括燃烧室冷却与设计、低 NO_x 排放与高效燃烧理论、燃烧室自激热声振荡及控制等。高压高效先进压气机技术的突破点在于大流量、高压比、宽工况运行条件的压气机设计。重型燃气轮机制造之所以被誉为制造业皇冠上的明珠,不仅仅由于其高新技术密集,而且在于其每一项技术的突破与创新都必须经历“基础理论→单元技术→零部件试验→系统集成→样机综合验证→产品应用”全过程,可见试验验证能力也是重型燃气轮机自主能力的重要标志。

我国燃气轮机研发始于 20 世纪 50 年代,与国际先进水平相比尚有较大差距。改革开放以来,我国重型燃气轮机研发有了长足发展,逐步走上了自主创新之路。“十五”期间,通过国家高技术研究发展计划,支持了 E 级燃气轮机重大专项,并形成了 F 级重型燃气轮机制造能力。“十一五”以来,国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年),将重型燃气轮机等清洁高效能源装备的研发列入优先主题,并通过国家重点基础研究发展计划,支持了重型燃气轮机制造基础和热功转换研究。

2006 年以来,我们承担了“大型动力装备制造基础研究”,这是我国重型燃气轮机制造基础研究的第一个国家重点基础研究发展计划

项目,本人有幸担任了项目首席科学家。以 F 级重型燃气轮机制造为背景,重点研究高温透平叶片的气膜冷却机理、热障涂层技术、定向晶叶片成型技术、叶片冷却孔及榫头的精密加工技术、大型盘式拉杆转子系统动力学与实验系统等问题,2011 年项目结题优秀。2012 年,“先进重型燃气轮机制造基础研究”项目得到了国家重点基础研究发展计划的持续支持,以国际先进的 J 级重型燃气轮机制造为背景,研究面向更严酷服役环境的大型高温叶片设计制造基础和实验系统、大型拉杆组合转子的设计与性能退化规律。

这两个国家重点基础研究发展计划项目实施十年来,得到了二十多位国家重点基础研究发展计划顾问专家组专家、领域咨询专家组专家和项目专家组专家的大力支持、指导和无私帮助。项目组共同努力,校企协同创新,将基础理论研究融入企业实践,在重型燃气轮机高温透平叶片的冷却机理与冷却结构设计、热障涂层制备与强度理论、大型复杂高温叶片精确成型与精密加工、透平密封技术、大型盘式拉杆转子系统动力学、重型燃气轮机实验系统建设等方面取得了可喜进展。我们拟通过本套专著来总结十余年来的研究成果。

第 1 卷:高温透平叶片的传热与冷却。主要内容包括:高温透平叶片的传热及冷却原理,内部冷却结构与流动传热,表面流动传热与气膜冷却,叶片冷却结构与热分析,相关的计算方法与实验技术等。

第 2 卷:热障涂层强度理论与检测技术。主要内容包括:热障涂层中的热应力和生长应力,表面与界面裂纹及其竞争,层级热障涂层系统中的裂纹,外来物和陶瓷层烧结诱发的热障涂层失效,涂层强度评价与无损检测方法。

第 3 卷:高温透平叶片增材制造技术。重点介绍高温透平叶片制造的 3D 打印方法,主要内容包括:基于光固化原型的空心叶片内外结构一体化铸型制造方法和激光直接成型方法。

第 4 卷:高温透平叶片精密加工与检测技术。主要内容包括:空

心透平叶片多工序精密加工的精确定位原理及夹具设计,冷却孔激光复合加工方法,切削液与加工质量,叶片型面与装配精度检测方法等。

第5卷:热力透平密封技术。主要内容包括:热力透平非接触式迷宫密封和蜂窝/孔形/袋形阻尼密封技术,接触式刷式密封技术相关的流动,传热和转子动力特性理论分析,数值模拟和实验方法。

第6卷:轴承转子系统动力学(上、下册)。上册为基础篇,主要内容包括经典转子动力学及一些新进展。下册为应用篇,主要内容包括大型发电机组轴系动力学,重型燃气轮机组转子中的接触界面,预紧饱和状态下的基本解系和动力学分析方法,结构强度与设计准则等。

第7卷:叶片结构强度与振动。主要内容包括:重型燃气轮机压气机叶片和高温透平叶片的强度与振动分析方法及实例,减振技术,静动频测量方法及试验模态分析。

希望本套专著能为我国燃气轮机的发展提供借鉴,能为重型燃气轮机和航空发动机领域的技术人员、专家学者等提供参考。本套专著也可供相关专业人员及高等院校研究生参考。

本套专著得到了国家出版基金和国家重点基础研究发展计划的支持,在撰写、编辑及出版过程中,得到许多专家学者的无私帮助,在此表示感谢。特别感谢西安交通大学出版社给予的重视和支持,以及相关人员付出的辛勤劳动。

鉴于作者水平有限,缺点和错误在所难免。敬请广大读者不吝赐教。

《先进燃气轮机设计制造基础》专著系列主编
机械结构强度与振动国家重点实验室主任

王铁军

2016年9月6日于西安交通大学

前言

燃气轮机是一种动力强劲的热动力装置,在航空器推进、舰船推进及热力发电等领域有重要应用。其高温部件如燃烧室、透平等的工作环境温度一般都远高于其自身材料的耐热极限,研究其中的传热问题并形成有效的冷却方案(技术),对保证燃气轮机长期有效地工作具有非常重要的意义。透平叶片的冷却结构最为复杂、流动传热形式具有多样性,是燃气轮机高温部件冷却技术研究中最具代表性的部件,因此本书重点以透平叶片为对象讨论燃气轮机中的传热现象的机理、规律及高温部件的冷却技术等相关问题,其中的共性规律不仅存在于燃气轮机中的其他高温部件或热端部件中,也存在于有类似现象的其他各类动力装置或设备中。

现代高压透平叶片在工作时包含有两种基本的传热现象,即叶片内部复杂结构的传热和叶片表面无气膜或有气膜的传热,透平叶片的冷却技术就是基于对这两种传热现象的深入认识,并在应用中将它们有机地结合而形成的。因此,讨论叶片内、外传热特性或规律及整体叶片冷却结构的热分析或设计方法是本书的主要内容。在这之前,本书将介绍一些涉及叶片传热现象的基本概念及冷却基本原理,最后本书会介绍一些基本的传热测量技术,讨论实验及数值模拟中的一些问题。

影响透平叶片传热特性的因素有很多,对这些因素的研究可以粗略地划分为三个不同的层次,由此导致研究透平叶片传热及冷却技术的内容也分为三个不同的层次:第一层次,主要研究叶片各个部位的各种冷却结构基本单元的流动传热规律,这一层次的研究不关心叶片的完整结构,重点是揭示叶片各种结构中的流动传热机理和规律,此处所讲的规律,包括流动参数的变化及结构尺寸的变化等对传热的影响;第二个层次,主要是研究叶片中结构单元之间的相互影响规律,或结构与结构之间的连接形式对流动传热规律的影响,包括叶片内外结构之间的影响等,研究对象是接近完整的叶片内部结构,或完整的外部结构,甚至是整体叶片结构,这一层次的研究可以理解为是

对第一层次研究成果的修正;第三个层次,主要研究由于叶片在燃气轮机中位置的不同,致使其所处环境的不同,引起的对叶片传热特性的影响。如透平上游燃烧室工作状态对叶片表面传热的影响、透平中上游叶片扰动对下游叶片表面传热的影响,等等。上述第一、第二层次的研究主要侧重于叶片本身造型及其冷却结构的变化引起的传热规律的不同,第三层次的研究则主要侧重于叶片的工作环境的变化引起的传热规律的不同。这三个层次的研究,无论简单或复杂,研究难度有多大,都是为建立叶片热分析及设计体系服务的,都属于所谓叶片的基础传热研究的范畴。本书在传热部分主要介绍上述的第一层次的研究内容,其中,除了在个别章节介绍了其他研究者的工作以外,本书的大部分内容主要介绍的是西北工业大学传热实验室在过去一段时期内进行的部分研究工作。

本书由四部分组成。

第一部分主要介绍基本概念:

第1章主要介绍叶片中的传热和冷却的基本概念及原理,其中较为详细地讨论了对流传热(包括气膜冷却)现象中的换热系数及换热温度的概念。

第二部分主要介绍叶片传热特性及冷却结构的设计和热分析:

第2章至第4章主要介绍叶片表面的传热现象及规律;其中包括:光滑叶片表面传热特性、各种孔形气膜冷却传热机理及特性、叶片典型部位气膜冷却传热特性等。

第5章至第7章主要介绍叶片内部的传热现象及规律,其中包括:扰流肋、冲击及扰流柱等强化传热结构的流动传热特性等。

第8章主要介绍如何结合叶片表面传热及内部传热对叶片进行热分析计算,包括基于二维边界层理论的叶片外传热(含气膜冷却传热)计算、基于一维网络的叶片内传热计算,以及叶片壁温的耦合迭代热分析计算,并以叶片的简单冷却结构、复合冷却结构及壁冷结构为例,介绍了叶片的热分析计算方法。

第三部分主要介绍叶片传热及冷却研究中的测试方法、实验原理及数值模拟中的一些典型问题:

第9章介绍了相似分析及因次分析方法,讨论了进行传热实验及叶片综合冷却效率实验时应遵循的相似原则,包括考虑辐射影响时上述两类实验应遵循的相似原则。

第10章介绍进行叶片传热实验时常用的测试技术,包括热电偶、热电阻、热色液晶及红外测温技术,以及单参数传热及双参数传热的测量技术等。

第 11 章介绍进行叶片传热数值模拟时,特别是进行气膜冷却的数值模拟时,湍流热扩散问题的重要性及部分研究工作。

第四部分对进一步研究工作提出了一些建议。

第 12 章对后续展开叶片传热及冷却研究工作提出了一些建议。

本书是在许多同事共同努力下完成的,他们在相应章节的研究工作或撰写工作中做出了重要贡献:朱惠人(第 1 章,第 2 章,第 3 章,第 4 章,第 9 章,第 10 章,第 11 章,第 12 章),张丽(第 1 章,第 7 章,第 8 章),刘存良(第 3 章,第 4 章,第 11 章),郭涛(第 5 章,第 6 章,第 10 章),许卫疆(第 9 章),郭文(第 9 章),许都纯(第 10 章),王鸣(第 10 章)。本书由朱惠人负责统稿、修改完善、定稿。

朱惠人的部分博士生对本书所展示的研究工作的完成、或者在本书的撰写中做了许多有益的工作,在此一并表示感谢,他们是:原和朋、孔满招、刘存良、李红才、白江涛、张宗卫、李春林、张效伟、周雷声、赵署、郑杰、骆剑霞、刘聪、梁卫颖、魏建生、孟通、徐扬、付仲仪等。

本书许多研究内容反映了国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目“超限高温服役环境调控机理与双工质冷却新原理”(项目编号 2007CB707701)的研究成果,在此谨对科技部在经费上的支持表示由衷的感谢。

作者愿借此机会对西安交通大学王铁军教授、虞烈教授表示感谢,有幸与他们合作,受益匪浅,本书的出版也是在他们支持下完成的。

透平叶片中的传热现象非常复杂,仅仅依靠数值模拟手段,难以获得较为准确的定量数据,就目前现状而言,通过实验测量获得可靠的、定量的传热数据在叶片热分析及冷却结构设计中仍占有主导作用,因此本书介绍的内容主要以实验为主,同时辅以数值模拟,以期能够详细地了解流场结构,揭示其中的传热机理。但由于作者水平有限,对许多实验及数值模拟结果难以做出准确而合理的分析解释,在此希望读者谅解,并给予指正。

目前正值国家批准启动航空发动机及燃气轮机重大项目立项之际,希望本书能对读者有一定的参考价值,并起到抛砖引玉的作用。

朱惠人

2016 年 10 月 30 日

目 录

第 1 章 透平叶片传热及冷却原理/1

1.1 概述/1

1.2 透平叶片冷却/5

1.2.1 基本原理/5

1.2.2 内部冷却/7

1.2.3 外部冷却/8

1.2.4 综合冷却技术/10

1.3 透平叶片传热/11

1.3.1 叶片外部传热/12

1.3.2 叶片内部结构传热/27

1.4 透平叶片冷却技术研究方法/46

1.4.1 透平叶片冷却技术研究路线/46

1.4.2 透平叶片冷却技术研究方法/52

参考文献/55

第 2 章 光滑叶片表面传热/56

2.1 中高截面换热系数分布/56

2.1.1 光滑导叶表面传热/57

2.1.2 光滑动叶表面传热/61

2.2 全表面换热系数分布/64

2.2.1 光滑导叶表面传热/66

2.2.2 光滑动叶表面传热/67

2.3 结束语/70

参考文献/70