



大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

航空发动机系列  
主编 陈懋章

# 燃气涡轮发动机的 传热和空气系统

Heat Transfer and Secondary Air System of  
Gas Turbine Engine

刘松龄 陶 智 编著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



大飞机出版工程

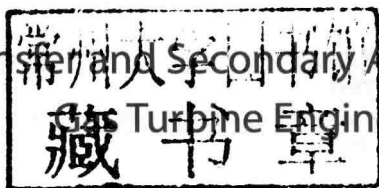
总主编 顾诵芬

航空发动机系列

主 编 陈懋章

# 燃气涡轮发动机的 传热和空气系统

Heat Transfer and Secondary Air System of  
Turbine Engine



刘松龄 陶 智 编著



上海交通大学出版社  
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



大飞机读者俱乐部

## 内容提要

随着航空发动机性能的提高,传热和冷却技术显得日益重要。本书系统总结了作者多年来的科研教学经验,分析选取其中的精华部分,同时注意吸收国内外重要的理论和方法,系统阐述了燃气涡轮发动机传热、冷却技术和空气系统的知识,反映该领域的研究现况和发展方向。本书主要面向高等院校、科研院所以及相关行业从事燃气涡轮发动机传热和冷却设计和研究的科研工作者、研究生与工程技术人员,同时也可作为相关专业的研究生教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

燃气涡轮发动机的传热和空气系统 / 刘松龄,陶智  
编著. —上海:上海交通大学出版社,2017  
ISBN 978-7-313-18194-7

I. ①燃… II. ①刘… ②陶… III. ①燃气轮机-换  
热器 ②燃气轮机-压缩空气系统 IV. ①TK47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 242719 号

## 燃气涡轮发动机的传热和空气系统

编 著:刘松龄 陶 智

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:谈 毅

印 制:苏州市越洋印刷有限公司

开 本:710 mm×1000 mm 1/16

字 数:1119 千字

版 次:2018 年 1 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-18194-7/TK

定 价:498.00 元

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:56

印 次:2018 年 1 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0512-68180638

大飞机出版工程

## 丛书编委会

### 总主编

顾诵芬(中国航空工业集团公司科技委副主任、中国科学院和中国工程院院士)

### 副总主编

金壮龙(中国商用飞机有限责任公司董事长)

马德秀(上海交通大学原党委书记、教授)

### 编委(按姓氏笔画排序)

王礼恒(中国航天科技集团公司科技委主任、中国工程院院士)

王宗光(上海交通大学原党委书记、教授)

刘洪(上海交通大学航空航天学院副院长、教授)

许金泉(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院教授)

杨育中(中国航空工业集团公司原副总经理、研究员)

吴光辉(中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、研究员)

汪海(上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员)

沈元康(中国民用航空局原副局长、研究员)

陈刚(上海交通大学原副校长、教授)

陈迎春(中国商用飞机有限责任公司常务副总设计师、研究员)

林忠钦(上海交通大学常务副校长、中国工程院院士)

金兴明(上海市人民政府副秘书长、研究员)

金德琨(中国航空工业集团公司科技委委员、研究员)

崔德刚(中国航空工业集团公司科技委委员、研究员)

敬忠良(上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授)

傅山(上海交通大学电子信息与电气工程学院研究员)

# 航空发动机系列编委会

## 主 编

陈懋章(北京航空航天大学能源与动力工程学院教授、中国工程院院士)

## 副主编(按姓氏笔画排序)

尹泽勇(中航商用飞机发动机有限责任公司总设计师、中国工程院院士)

严成忠(中航工业沈阳发动机设计研究所原总设计师、研究员)

苏 明(上海市教育委员会主任、教授)

陈大光(北京航空航天大学能源与动力工程学院教授)

## 编 委(按姓氏笔画排序)

丁水汀(北京航空航天大学动力与能源工程学院院长、教授)

王安正(上海交通大学机械与动力工程学院教授)

刘松龄(西北工业大学动力与能源学院教授)

孙健国(南京航空航天大学能源与动力学院、教授)

孙晓峰(北京航空航天大学能源与动力工程学院教授)

朱俊强(中国科学院工程热物理所副所长、研究员)

何 力(牛津大学工程科学系教授)

张绍基(中航工业航空动力机械研究所原副所长、研究员)

张 健(中航发动机控股有限公司副总经理)

李应红(空军工程大学工程学院教授、中国科学院院士)

李其汉(北京航空航天大学能源与动力学院教授)

李继保(中航商用飞机发动机有限责任公司副总经理、研究员)

李锡平(中航工业航空动力机械研究所原副总设计师、研究员)

杜朝辉(上海交通大学研究生院常务副院长、教授)

邹正平(北京航空航天大学能源与动力工程学院教授)

陈 光(北京航空航天大学能源与动力工程学院教授)

周拜豪(中航工业燃气涡轮研究院原副总设计师、研究员)

金如山(美国罗罗公司原研发工程师、西北工业大学客座教授)

贺 利(中国国际航空股份有限公司原副总裁)

陶 智(北京航空航天大学副校长、教授)

高德平(南京航空航天大学能源与动力学院教授)

蒋浩康(北京航空航天大学能源与动力工程学院教授)

蔡元虎(西北工业大学动力与能源学院教授)

滕金芳(上海交通大学航空航天学院研究员)

## 总 序

国务院在 2007 年 2 月底批准了大型飞机研制重大科技专项正式立项,得到全国上下各方面的关注。“大型飞机”工程项目作为创新型国家的标志工程重新燃起我们国家和人民共同承载着“航空报国梦”的巨大热情。对于所有从事航空事业的工作者,这是历史赋予的使命和挑战。

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟制作的世界第一架有动力、可操纵、比重大于空气的载人飞行器试飞成功,标志着人类飞行的梦想变成了现实。飞机作为 20 世纪最重大的科技成果之一,是人类科技创新能力与工业化生产形式相结合的产物,也是现代科学技术的集大成者。军事和民生对飞机的需求促进了飞机迅速而不间断的发展和运用,体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索和不断创新,为诸多学科的发展和相关技术的突破提供了强劲动力。航空工业已经成为知识密集、技术密集、高附加值、低消耗的产业。

从大型飞机工程项目开始论证到确定为《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的十六个重大专项之一,直至立项通过,不仅使全国上下重视起我国自主航空事业,而且使我们的人民、政府理解了我国航空事业半个世纪发展的艰辛和成绩。大型飞机重大专项正式立项和启动使我们的民用航空进入新纪元。经过 50 多年的风雨历程,当今中国的航空工业已经步入了科学、理性的发展轨道。大型客机项目其产业链长、辐射面宽、对国家综合实力带动性强,在国民经济发展和科学技术进步中发挥着重要作用,我国的航空工业迎来了新的发展机遇。

大型飞机的研制承载着中国几代航空人的梦想,在 2016 年造出与波音 B737 和

空客 A320 改进型一样先进的“国产大飞机”已经成为每个航空人心中奋斗的目标。然而,大型飞机覆盖了机械、电子、材料、冶金、仪器仪表、化工等几乎所有工业门类,集成了数学、空气动力学、材料学、人机工程学、自动控制学等多种学科,是一个复杂的科技创新系统。为了迎接新形势下理论、技术和工程等方面的严峻挑战,迫切需要引入、借鉴国外的优秀出版物和数据资料,总结、巩固我们的经验和成果,编著一套以“大飞机”为主题的丛书,借以推动服务“大型飞机”作为推动服务整个航空科学的切入点,同时对于促进我国航空事业的发展和加快航空紧缺人才的培养,具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

2008年5月,中国商用飞机有限公司成立之初,上海交通大学出版社就开始酝酿“大飞机出版工程”,这是一项非常适合“大飞机”研制工作时宜的事业。新中国第一位飞机设计宗师——徐舜寿同志在领导我们研制中国第一架喷气式歼击教练机——歼教1时,亲自撰写了《飞机性能及算法》,及时编译了第一部《英汉航空工程名词字典》,翻译出版了《飞机构造学》《飞机强度学》,从理论上保证了我们飞机研制工作。我本人作为航空事业发展50年的见证人,欣然接受了上海交通大学出版社的邀请担任该丛书的主编,希望为我国的“大型飞机”研制发展出一份力。出版社同时也邀请了王礼恒院士、金德琨研究员、吴光辉总设计师、陈迎春副总设计师等航空领域专家撰写专著、精选书目,承担翻译、审校等工作,以确保这套“大飞机”丛书具有高品质和重大的社会价值,为我国的大飞机研制以及学科发展提供参考和智力支持。

编著这套丛书,一是总结整理50多年来航空科学技术的重要成果及宝贵经验;二是优化航空专业技术教材体系,为飞机设计技术人员培养提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的迫切需求;三是为大飞机研制提供有力的技术保障;四是将许多专家、教授、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,旨在从系统性、完整性和实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的“大飞机”理论与实践相结合的知识体系。

“大飞机”丛书主要涵盖了总体气动、航空发动机、结构强度、航电、制造等专业方向,知识领域覆盖我国国产大飞机的关键技术。图书类别分为译著、专著、教材、工具书等几个模块;其内容既包括领域内专家们最先进的理论方法和技术成果,也

包括来自飞机设计第一线的理论和实践成果。如：2009年出版的荷兰原福克飞机公司总师撰写的 *Aerodynamic Design of Transport Aircraft* (《运输类飞机的空气动力学设计》)，由美国堪萨斯大学2008年出版的 *Aircraft Propulsion* (《飞机推进》) 等国外最新科技的结晶；国内《民用飞机总体设计》等总体阐述之作和《涡量动力学》《民用飞机气动设计》等专业细分的著作；也有《民机设计1000问》《英汉航空双向词典》等工具类图书。

该套图书得到国家出版基金资助，体现了国家对“大型飞机项目”以及“大飞机出版工程”这套丛书的高度重视。这套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命，凝结了国内外航空领域专业人士的智慧和成果，具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性，既可作为实际工作指导用书，亦可作为相关专业人员的学习参考用书。期望这套丛书能够有益于航空领域里人才的培养，有益于航空工业的发展，有益于大飞机的成功研制。同时，希望能为大飞机工程吸引更多的读者来关心航空、支持航空和热爱航空，并投身于中国航空事业做出一点贡献。

顾诵芬

2009年12月15日



# 序 言

作为创新型国家的标志工程,大型飞机研制重大科技专项已于2007年2月由国务院正式批准立项。为了对该项重大工程提供技术支持,2008年5月,上海交通大学出版社酝酿“大飞机出版工程”,并得到了国家出版基金资助,现已正式立项。“航空发动机系列丛书”是“大飞机出版工程”的组成部分。

航空发动机为飞机提供动力,是飞机的“心脏”,是航空工业的重要支柱,其发展水平是一个国家综合国力、工业基础和科技水平的集中体现,是国家重要的基础性战略产业,被誉为现代工业“皇冠上的明珠”。新中国成立以来,发动机行业受到国家的重视,从无到有,取得了长足的进步,但与航空技术先进国家相比,我们仍有较大差距,飞机“心脏病”的问题仍很严重,这已引起国家高度重视,正采取一系列有力措施,提高科学技术水平,加快发展进程。

航空发动机经历了活塞式发动机和喷气式发动机两个发展阶段。在第二次世界大战期间,活塞式发动机技术日臻成熟,已达到很高水平,但由于其功率不能满足不断提高的对飞行速度的要求,加之螺旋桨在高速时尖部激波使效率急剧下降,也不适合高速飞行,这些技术方面的局限性所带来的问题表现得日益突出,客观上提出了对发明新式动力装置的要求。在此背景下,1937年,英国的 Frank Whittle,1939年德国的 von Ohain 在相互隔绝的情况下,先后发明了喷气式发动机,宣布了喷气航空新时代的来临。喷气发动机的问世,在很短的时间内得到了飞速发展,在很大程度上改变了人类社会的各个方面,对科学技术进步和人类生活产生了深远的影响。

喷气式发动机是燃气涡轮发动机的一种类型,自其问世以来,已出现了适于不

同用途的多种类型,得到了长足的发展。在 20 世纪的下半叶,它已占据航空动力装置的绝对统治地位,预计起码在 21 世纪的上半叶,这种地位不会改变。现在一般所说的航空发动机都是指航空燃气涡轮发动机。本系列丛书将只包含与这种发动机有关的内容。

现代大型客机均采用大涵道比涡轮风扇发动机,它与用于战斗机的小涵道比发动机有一定区别,特别是前者在低油耗、低噪声、低污染排放、高可靠性、长寿命等方面有更高的要求,但两者的基本工作原理、技术等有很大的共同性,所以除了必须指明外,本系列丛书不再按大小涵道比(或军民用)分类型论述。

航空发动机的特点是工作条件极端恶劣而使用要求又非常之高。航空发动机是在高温、高压、高转速特别是很快的加减速瞬变造成应力和热负荷高低周交变的条件下工作的。以高温为例,目前先进发动机涡轮前燃气温度高达  $1800\sim 2000\text{K}$ ,而现代三代单晶高温合金最高耐温为  $1376\text{K}$ ;这  $600$  多度的温度差距只能靠复杂的叶片冷却技术和隔热涂层技术解决。发动机转速高达  $10000\sim 60000\text{r/min}$ ,对应的离心加速度约为  $100000\text{g}$  的量级,承受如此高温的叶片在如此高的离心负荷下要保证安全、可靠、长寿命工作,难度无疑是非常之高的。

航空发动机是多学科交融的高科技产品,涉及气动力学、固体力学、热力学,传热学、燃烧学、机械学、自动控制、材料学、加工制造等多个学科。这些学科的科学问题,经科学家们长期的艰苦探索、研究,已取得很大成就,所建立的理论体系,可以基本反映客观自然规律,并用以指导航空发动机的工程设计研制。这是本系列丛书的基本内容。但是必须指出,由于许多科学问题,至今尚未得到根本解决,有的甚至基本未得到解决,加之多学科交叉,大大增加了问题的复杂性,人们现在还不能完全靠理论解决工程研制问题。以流动问题为例,气流流过风扇、压气机、燃烧室、涡轮等部件,几何边界条件复杂,流动性质为强三维、固有非定常、包含转换过程的复杂湍流流动,而湍流理论至今基本未得到解决,而且在近期看不见根本解决的前景。其他学科的科学问题也在不同程度上存在类似情况。

由于诸多科学问题还未得到很好解决,而客观上又对发展这种产品有迫切的需求,人们不得不绕开复杂的科学问题,通过大量试验,认识机理,发现规律,获取知

识,以基本理论为指导,理论与试验数据结合,总结经验关系,制定各种规范……并以此为基础研制发动机。在认识客观规律的过程中,试验不仅起着揭示现象、探索机理的作用,也是检验理论的最终手段。短短七八十年,航空发动机取得如此惊人的成就,其基本经验和途径就是如此。

总之,由于科学问题未得到很好解决,多学科交叉的复杂性,加之工作条件极端恶劣而使用要求又非常之高的特点,使得工程研制的技术难度很大,这些因素决定了航空发动机发展必须遵循以大量试验为支撑的技术途径。

随着计算机和计算数学的发展,计算流体力学、计算固体力学和计算传热学、计算燃烧学等取得了长足的进展,对深入认识发动机内部复杂物理机理、优化设计和加速工程研制进程、逐步减少对试验的依赖起着非常重要的作用。但是由于上述诸多科学问题尚未解决,纯理论的数值计算不能完全准确反映客观真实,因而不能完全据此进行工程研制。目前先进国家的做法,仍是依靠以试验数据为基础建立起来的经验关联关系。在数值技术高度发展的今天,人们正在做出很大的努力,利用试验数据库修正纯理论的数值程序,以期能在工程研制中发挥更大作用。

钱学森先生曾提出技术科学的概念,它是搭建科学与工程之间的桥梁。航空发动机是典型的技术科学,而以试验为支撑的理论、经验关系、设计准则和规范等则是构建此桥梁的水泥砖石。

对于航空发动机的科学、技术与工程之间的关系及其现状的上述认识将反映在本系列丛中,并希望得到读者的认同和注意。

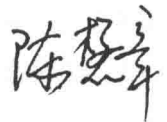
“发动机系列丛书”涵盖总体性能、叶轮机机械、燃烧、传热、结构、固体力学、自动控制、机械传动、试验测试、适航等专业方向,力求达到学科基本理论的系统性,内容的相对完整性,并适当结合工程应用。丛书反映了学科的近期和未来的可能发展,注意包含相对成熟的先进内容。

本系列丛书的编委会由来自高等学校、科研院所和工业部门的教师和科技工作者组成,他们都有很高的学术造诣,丰富的实际经验,掌握全局,了解需求,对于形成系列丛书的指导思想,确定丛书涵盖的范围和内容,审定编写大纲,保证整个丛书质量,发挥了不可替代的重要作用。我对他们接受编委会的工作,并做出了重要贡献

表示衷心感谢。

本系列丛书的编著者均有很高的学术造诣,理论功底深厚,实际经验丰富,熟悉本领域国内外情况,在业内得到了高度认可,享有很高的声望。我很感谢他们接受邀请,用他们的学识和辛勤劳动完成本系列丛书。在编著中他们融入了自己长期教学科研生涯中获得的经验、发现和创新,形成了本系列丛书的特色,这是难能可贵的。

本系列丛书以从事航空发动机专业工作的科技人员、教师和与此专业相关的研究生为主要对象,也可作为本科生的参考书,但不是本科教材。希望本丛书的出版能够有益于航空发动机专业人才的培养,有益于提高行业科学技术水平,有益于航空工业的发展,为中国航空事业做出贡献。



2013年10月

# 前 言

提高燃烧室出口温度是提高燃气涡轮动力装置性能的主要技术途径之一,目前先进的航空燃气涡轮发动机燃烧室出口的燃气平均温度已超过 2 000 K,并以平均每年约 10 K 的速率继续增长,用于涡轮冷却的空气量已占进气量的 20%左右,这些冷却空气都是从压气机增压后的气流中提取,不可避免地带来发动机总体性能损失。严酷的工作环境使发动机热端部件成为故障多发部位,为在保证总体性能前提下满足不断增长的冷却要求,发动机的冷却结构,特别是涡轮叶片的冷却结构日益复杂化,对制造技术、材料性能以及产品成本构成严峻挑战。如何保证零部件在高温、高压、高负荷条件下正常工作并有较长的寿命成为燃气涡轮发动机发展的技术难题。对于追求高性能、重量轻、尺寸小的航空发动机而言上述问题显得更为突出。

传热学是上述技术方向所涉及的主要学科之一,据统计在提高燃气温度的技术贡献中,70%左右来自传热和冷却技术的进步,在此背景下传热学科成为动力类学科中最活跃的领域之一,国内外许多著名高校都有从事燃气涡轮传热研究队伍,燃气涡轮发动机设计单位的传热和空气系统部门的规模因任务繁重而日益扩大。有关燃气涡轮的学术刊物上发表的论文中属传热学科的日益增多,重要的国际学术会议如美国机械工程师协会(ASME)每年举行的学术年会上发表的传热学科论文数往往占最大的比例,据不完全统计,从 2000 年至 2010 年的十年中该协会学术会议每年发表的与传热相关论文数从 100 篇左右增加到 200 篇左右。航空燃气涡轮中的传热研究成果不仅推动了本行业技术的发展,而且将传热学科推向更高的水平,产生一些新的理论和技术,如新型气膜冷却、高速旋转物体周围的流动与传热、新型强化传热技术、高湍流度气流的换热、小尺度通道的换热、复杂传热过程的数值模拟等。上述成果可推广用于其他类型的动力装置、节能技术等领域,推动国民经济的发展。

目前我国有关传热学科的书籍多数是本科生用教材,内容以传热基础知识为主,较少涉及燃气涡轮中的传热、冷却技术和空气系统方面的知识。国内现

有的少量燃气涡轮传热书籍因出版较早难以满足读者的需要,与传热学科快速发展的形势以及燃气涡轮技术发展现况不相适应。空气系统是燃气涡轮发动机必不可少的部分,空气系统特性与发动机总体性能和高温部件冷却密切相关,但国内现有燃气涡轮发动机书籍中有关空气系统的内容很少,以致从事该领域工作的技术人员很难找到一本内容充实的参考书。撰写本书的目的是为从事燃气涡轮发动机设计和试验,特别是传热分析、冷却设计和空气系统设计的技术人员提供一本参考书,帮助新手能更快掌握相关的专业知识,了解国内外本学科技术发展现状和动向,也可为在校学生特别是研究生提供较为系统的教材或参考书。

本书的主要特色是:针对燃气涡轮发动机传热、冷却和空气系统,详细阐述本学科的基础理论、实验数据、工程计算方法和最新研究成果。第1章内容是以边界层理论为基础的对流换热理论,书中给出一些经典换热问题的分析解,包括静止物体和转动盘换热分析解。边界层转换过程常常是决定涡轮叶片传热计算成败的关键,其转换形态与传统的转换有很大区别,为此在基础理论中加入了涡轮叶片常见转换过程的理论和相关知识。涡轮叶片是高温零件中热负荷和机械负荷最大的部分,书中第2、第3和第4章内容是围绕涡轮叶片的传热分析和冷却设计需要安排的。叶片与燃气间的换热是传热分析中不确定度最高的部分,原因是燃气参数受多种复杂因素影响,且叶片各部位的流动和换热规律差异很大。第2章对叶身、端壁、前缘、动叶叶尖四个部位的流动与换热分别做了叙述,特色内容有:燃气温度畸变时的叶片换热、湍流强度和湍流尺度对叶片换热的影响、非轴对称端壁换热以及叶片型面换热计算等。气膜冷却是涡轮叶片和燃烧室主要冷却方式之一,第3章全面阐述了气膜冷却的基本原理、冷却特性的影响因素、重要的实验结果和计算方法,介绍了不同气膜孔型的特性,给出一些气膜冷却特性工程计算用的关联式。第4章结合涡轮叶片各部位结构和气流特点,叙述了相应的气膜冷却规律,对叶片前缘喷淋冷却、端壁几何参数对气膜冷却特性的影响、叶尖间隙气流结构和气膜孔的合理布局以及尾缘强化传热结构对气膜冷却特性影响等问题做了详细分析。涡轮叶片内部冷却也是避免叶片过热的有效途径,第5章介绍了先进的内部强化传热结构、强化传热的机理以及转动叶片内部冷却通道中哥氏力的影响,给出工程实用的肋壁流阻和换热计算方法。旋转盘(包括涡轮盘和压气机盘)的热状况是整个发动机热状况分析中最重要部分,本书第6章详细叙述了旋转盘腔内的基本流型、转盘表面流动和换热的边界层理论、旋转盘面摩阻和换热计算方法,介绍了自然对流驱动的旋转盘腔流动与换热的非定常特征。第7章阐述了高性能燃烧室先进冷却结构,包括多斜孔冷却和浮动瓦冷却结构的工作原理和研究的新进展,对低污染燃烧室冷却的特点做了介绍。本书第8章详细叙述了燃气涡轮

发动机空气系统网络的理论及求解方法,给出重要的阻力元件(各类节流孔和篦齿封严等)的流阻和换热特性,对空气系统中较复杂的预旋系统、减涡系统、轮缘封严系统的工作原理和特性进行了详细的讨论。第8章和第6章一起组成发动机空气系统的全面知识。第9章介绍了新型高效冷却结构,包括:层板冷却、涡轮叶片的铸冷和壁冷、双层壁冷却等。对叶片冷却结构发展趋势——小尺寸通道的冷却特性和发展潜力进行了分析。给出了新型槽孔的几何参数和气膜冷却特性与常规的圆柱孔、扩张孔的对比。对轮缘封严双孔模型的理论 and 实验结果做了介绍。

全书共9章,由刘松龄和陶智合作编写,第1、2、3、4、7、8、9章由刘松龄负责编写,第5、6章由陶智负责编写。

多年来国内的院校、研究所和生产企业的科技人员在燃气涡轮发动机传热、冷却和空气系统领域做了许多工作,取得不少研究成果。由于条件限制,作者难以将这些成果反映在书中,内容有欠全面在所难免。因作者的学术水平和编写能力所限,书中可能有错,欢迎读者批评指正。

上海交通大学出版社对提高本书版面质量和文字编辑方面做了许多努力,作者对此深表谢意。

刘松龄 陶智

2016年9月

# 目 录

## 第 1 章 对流换热的理论基础 1

- 1.1 边界层的概念 1
- 1.2 边界层微分方程组 3
- 1.3 换热与流阻的类似——雷诺类似(Reynolds analogy) 10
- 1.4 层流边界层流动和换热的相似解 11
- 1.5 层流边界层换热的积分方程解 16
- 1.6 边界层的转捩(transition) 20
- 1.7 湍流边界层微分方程、湍流应力、湍流热流密度 31
- 1.8 混合长度(mixing length)理论 33
- 1.9 湍流边界层的速度和温度分布 34
- 1.10 湍流边界层的动量积分方程解 37
- 1.11 湍流边界层的换热 38
- 1.12 管内湍流流动和换热 40
- 1.13 粗糙表面的湍流流阻和换热 43
- 1.14 高速流的换热 46
- 1.15 变物性对换热的影响 50
- 1.16 旋转盘表面的摩阻 51
- 1.17 转盘换热与摩阻的类似,雷诺类似 55
- 1.18 旋转盘的换热 58
- 1.19 湍流模型简述 61
- 参考文献 66

## 第 2 章 涡轮叶片与燃气的换热 71

- 2.1 燃烧室出口燃气温度分布和湍流度 71
- 2.2 叶片型面与燃气的换热 75
- 2.3 涡轮叶片端面的换热 114



- 2.4 叶片前缘的换热 139
- 2.5 工作叶片尖部的换热 145
- 参考文献 172

### 第3章 气膜冷却原理 182

- 3.1 概述 182
- 3.2 气膜冷却的基本概念 183
- 3.3 二维缝气膜冷却特性 187
- 3.4 圆柱形孔气膜冷却特性 190
- 3.5 扩张孔的气膜冷却特性 226
- 参考文献 254

### 第4章 涡轮叶片的气膜冷却 259

- 4.1 涡轮叶片型面的气膜冷却 259
- 4.2 涡轮叶片前缘的气膜冷却 265
- 4.3 叶片尾缘区的气膜冷却 290
- 4.4 涡轮导叶端壁区的气膜冷却 306
- 4.5 涡轮动叶端壁的气膜冷却 336
- 4.6 动叶尖部的气膜冷却 353
- 参考文献 385

### 第5章 涡轮叶片内部冷却通道的强化换热 392

- 5.1 涡轮叶片内部冷却通道的强化换热理论基础 392
- 5.2 带肋通道的流动与换热 407
- 5.3 冲击冷却 434
- 5.4 扰流柱强化换热 463
- 参考文献 492

### 第6章 旋转盘腔内的流动与换热 499

- 6.1 涡轮盘腔结构和压气机盘腔结构 499
- 6.2 旋转盘腔内流动和传热的边界层理论及其应用 505
- 6.3 有径向供气的向外流动旋转盘腔流场基本结构 516
- 6.4 径向向内流动的旋转盘腔 536
- 6.5 自然对流占主导地位的旋转盘腔的流动和换热 547
- 6.6 旋转盘腔内流动和换热的一维流理论及其应用 563
- 参考文献 568