

燃气涡轮发动机燃烧

(第3版)

Gas Turbine Combustion (Third Edition)

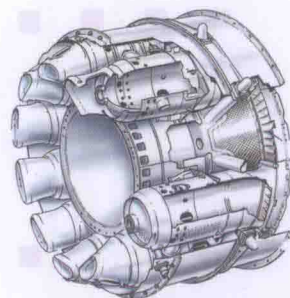
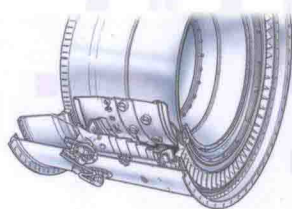
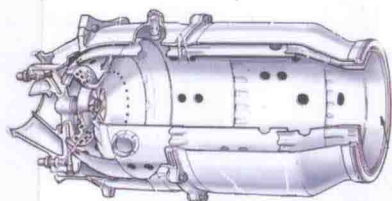
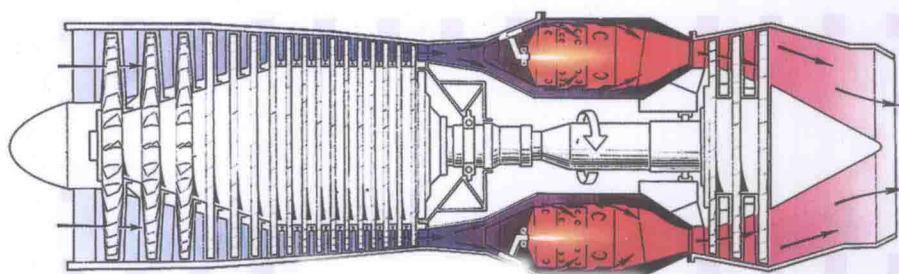
Alternative Fuels and Emissions

[英] A. H. 勒菲沃 (Arthur H. Lefebvre)

著

[英] D. R. 鲍拉尔 (Dilip R. Ballal)

刘永泉 等译



航空工业出版社

燃气涡轮发动机燃烧 (第3版)

[英] A. H. 勒菲沃 (Arthur H. Lefebvre) 著
[英] D. R. 鲍拉尔 (Dilip R. Ballal)
刘永泉 等译

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书详细介绍了燃烧基本理论,对燃气涡轮发动机燃烧室的基本设计特征、设计要求、扩压器设计、空气动力学特性、燃烧效率、燃烧稳定性和点火性能进行了全面分析,系统阐述了燃油喷射、燃烧噪声、火焰筒冷却、污染排放控制和替代燃料等内容。

本书适用于航空发动机和其他燃气轮机的设计者、制造者和使用者,也可作为燃烧专业教师、研究生及高年级本科生的教科书或设计手册。

图书在版编目(CIP)数据

燃气涡轮发动机燃烧:第3版/(英)A. H. 勒菲沃
(Arthur H. Lefebvre), (英)D. R. 鲍拉尔
(Dilip R. Ballal)著;刘永泉等译.--北京:航空
工业出版社,2016.6

书名原文:Gas Turbine Combustion Alternative
Fuels and Emissions, Third Edition

航空发动机出版工程

ISBN 978-7-5165-1023-0

I. ①燃… II. ①A… ②D… ③刘… III. ①燃气轮机
—燃烧—教材 IV. ①TK47

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第146217号

北京市版权局著作权合同登记

图字:01-2014-6586

Arthur H. Lefebvre, Dilip R. Ballal

Gas Turbine Combustion, Third Edition

ISBN 978-1-4200-8604-1

Copyright: © 2010 by Taylor and Francis Group, LLC

All Rights Reserved. Authorized translation from English language edition published by CRC
Press, an imprint of Taylor & Francis Group LLC.

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书封面贴有Taylor & Francis公司防伪标签,无标签者不得销售

燃气涡轮发动机燃烧(第3版)

Ranqi Wolun Fadongji Ranshao (Di - san Ban)

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话:010-84936597 010-84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2016年6月第1版

2016年6月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:27.75

字数:659千字

印数:1—2000

定价:86.00元

《航空发动机出版工程》编委会

主 任：林左鸣

常务副主任：谭瑞松

副主任：张新国 李方勇

委 员：陈元先 杨圣军 魏金钟 丁 俊 庞 为
王英杰 王之林 张 健

《航空发动机出版工程》专家委员会

主 任：刘大响

副主任：郭恩明

委 员：陈 浚 唐智明 周晓青 彭友梅 张皖南
张恩和 严成忠 杨士杰 李概奇 怀寿章
殷云浩 吴学仁 江和甫 江义军 马光辉
胡晓煜

编委会办公室

主 任：魏金钟

副主任：陈 刚 焦 鹤 刘 鑫

成 员：王晓文 向 明 潘陆原 王 伟 胡晓煜
彭友梅 姜向禹 石 英 龙明灵 刘 宁
王少雄

总 序

自1903年12月17日人类首次实现有动力飞行以来，航空事业获得了迅猛发展，极大地促进了人类社会文明的进步，对世界各国的政治、经济和军事都产生了深远的影响。航空发动机作为飞机的“心脏”，不仅是飞机飞行的动力，也是促进航空事业发展的重要推动力，人类航空史上的每一次重要变革都与航空发动机的技术进步密不可分。飞机进入喷气时代始于涡轮喷气发动机的发明，飞机突破声障、实现马赫数2和马赫数3的飞行主要是由于加力式大推力发动机的出现；飞机实现垂直起降则仰仗于可旋转喷管发动机的研制成功；巨型宽体客机的问世更少不了大涵道比、大推力的涡扇发动机；第四代战斗机的超声速巡航和超机动性主要是依靠发动机的高推重比和矢量喷管。

经过百余年的发展，航空发动机已经发展为可靠性极高的成熟产品，正在使用的航空发动机包括涡轮喷气/涡轮风扇发动机、涡轮轴/涡轮螺旋桨发动机、冲压发动机和活塞式发动机等多种类型，不仅作为各种用途的军民用飞机、无人机和巡航导弹动力，而且利用航空发动机派生发展的燃气轮机还广泛用于地面发电、船用动力、移动电站、天然气和石油管线泵站等领域。航空发动机的发展也极大地带动了机械制造、电子、控制、材料和石油化工等相关产业的发展，带来了巨大的收益。目前，全球飞机发动机及其零部件制造业的收入已占航空制造业总收入的40%左右，年收入超过1000亿美元，到2015年将达到1220亿美元，人均年收入35万美元，仅美国从事航空发动机及零件制造的公司就有1000多家，年收入超过600亿美元。

进入21世纪，航空发动机正在进一步加速发展，将为人类航空领域带来新的更大变革。目前，传统的航空发动机正在向齿轮传动发动机、变循环发动机、多电发动机、间冷回热发动机和开式转子发动机发展，非传统的脉冲爆震发动机、超燃冲压发动机、涡轮基组合发动机，以及太阳能动力和燃料电池动力等也在不断成熟，这些发动机的发展将使未来的航空器更快、更高、更远、更经济、更可靠，并能够满足更加严格的环保要求，并将使高超声速航空器、跨大气层飞行器和可重复使用的天地往返运输成为现实。

但是，航空发动机的发展绝非易事，作为人类科学技术发展的最高端产

品之一,航空发动机被誉为“工业之花”“皇冠上的明珠”,具有技术难度大、风险高、耗资多、周期长等特点,要求在相关的工程技术领域具备雄厚的基础和丰富的实践经验积累,是一个国家工业基础、综合国力和科技水平的集中体现。美国将航空发动机技术描绘为:“它是一个技术精深得使新手难以进入的领域,它需要国家充分保护并稳定利用该领域的成果,长期的专门技能和数据的积累,以及国家大量的投资。”法国将航空发动机工业描绘为:“航空发动机工业是一个与众不同的工业,是当代尖端技术的标志。进入这个竞技场的顶级‘玩家’数量非常有限,其门槛设置得比其他航空专业更高,这意味着竞争者进入的难度更大。”目前,能够独立研制航空发动机的只有美国、英国、俄罗斯、法国和中国等少数国家。

我国航空发动机工业起步并不晚,在中华民国时期就曾试图建立航空发动机工业;中华人民共和国成立后,我国于1951年开始建立航空发动机修理厂,经过60多年几代航空人的艰苦努力,如今我国已建成比较完整的航空发动机科研、生产体系,研制生产出了6万多台航空发动机,已进入世界少数能够独立研制航空发动机的国家行列。但是,我国航空发动机在技术水平和产品研制方面与先进国家还存在很大差距,学习国外航空发动机的先进发展经验,对我国航空发动机的发展势必起到良好的借鉴作用。

中国航空工业集团公司组织出版《航空发动机出版工程》的目的是为广大读者提供一个全面了解世界航空发动机发展历史、现状和未来的平台,使读者对航空发动机的基本概念和工作原理有更科学、系统的认识,对国外航空发动机的产品发展经验、组织管理方法和技术发展路线有更深刻的理解,对航空发动机发展对国防建设和国民经济发展的必要性有更充分的重视,以唤起广大读者对航空发动机事业的关注和热爱,并积极投身到这项光荣而伟大的事业中来。期望这套丛书能够为中国航空发动机的人才培养,航空发动机的科研、生产和使用提供参考和借鉴,为中国航空发动机事业的更大发展做出贡献!



中国航空工业集团公司董事长

2013年3月

《燃气涡轮发动机燃烧》

(第3版)

翻译审校人员

主 审：刘永泉

副主审：贾平芳 梁春华 马宏宇 赵国瑞

审 校：刘殿春 张军峰 刘红霞 程 明

校 译：马宏宇 朱 健 叶留增 杨志民 程 明

扈鹏飞 赵传亮 张成凯 张军峰

翻 译：姚 博 孟令扬 李彩玲 扈鹏飞 张成凯

朱 宇 刘 宝 刘金林 赵明龙 张军峰

李 洁 孙雨超

编 辑：刘红霞 杨芳菲

中文版序

燃气涡轮发动机主燃烧室是燃气涡轮发动机核心机的主要部件之一，将压气机压缩后的空气与燃油充分混合、燃烧，将燃料中的化学能转化为热能。燃烧室内涉及了旋流、回流、燃料/空气射流、燃料雾化、蒸发、湍流燃烧、冒烟的生成/氧化，以及对流和辐射换热等多种复杂的物理和化学过程，而这些单一过程又相互耦合和干扰。在燃烧室的设计与研制中，既要考虑气动力学和热力学等物理问题，又要考虑复杂的化学反应；既要满足点火迅速可靠、燃烧稳定安全、流体流动损失小、出口温度场品质好、排气污染小等要求，又要满足结构紧凑、质量轻、寿命长、可靠性高等要求。燃烧室设计专业面临着技术上的重大挑战，直到目前，燃烧室理论还不能对这一过程进行详尽的描述，数值模拟技术还不能支撑燃烧室技术发展，设计方法仍然要依据经验或半经验关系。尤其随着航空发动机、燃气涡轮发动机的不断发展，对燃烧室的设计要求不断提高，对燃烧室设计技术发展提出了更高的要求。

军用航空发动机主燃烧室向更高温升和更高热容燃烧方向发展。国外新一代高推重比、高性能军用航空发动机主燃烧室进口温度 T_3 高达 $900 \sim 1000\text{K}$ ，气流速度高达 $Ma0.3 \sim 0.4$ ，并且主燃烧室出口温度 T_4 可高达 $2100 \sim 2200\text{K}$ 以上。为保证主燃烧室在极宽的大小功率工作范围稳定工作，必须采用先进的气动和结构设计技术，并探索新的燃烧组织方式。具有新燃料、新技术、新工艺、新材料（如陶瓷基复合材料）的先进主燃烧室将会出现。

在民用涡扇发动机燃烧室方面，为满足不断完善、严格的国际民航组织（ICAO）排放条例要求，通用电气公司、普拉特－惠特尼公司、罗尔斯－罗伊斯公司、国际航空发动机公司和 CFM 国际公司等国际著名发动机公司的发动机燃烧室广泛采用了燃油喷射、组织燃烧、低排放扩压器、火焰筒冷却等低排放燃烧室设计技术。其中，通用电气公司最新的双环预混旋流（TAPS）燃烧组织技术，已用于波音 787 飞机的 GEnx 发动机上，代表了目前燃烧室污染排放设计技术的最高水平。同时为了满足长寿命的要求，先进民用涡扇发动机燃烧室采用了多孔壁发散冷却、浮动壁冷却结构或多孔层板冷却等先进冷却技术，并且正在研制陶瓷基复合材料等耐温水平更高、密度

更轻的耐热材料和涂层。

在燃气涡轮发动机燃烧室方面,舰船燃气涡轮发动机基本都是由航空发动机改型而来,向着高温升、高热容燃烧方向发展。另外由于燃用柴油雾化较困难、发烟较大、火焰较长,需要控制燃烧室氮氧化物(NO_x)排放、冒烟、积炭,改善出口温度场品质、壁温、起动点火性能等。通用电气公司、罗尔斯-罗伊斯公司是舰船燃气涡轮发动机的两大生产巨头,其代表性产品为LM6000和WR-21。而工业燃气涡轮发动机通常用气体燃料、液体燃料,甚至采用固体燃料,主要围绕降低氮氧化物、一氧化碳(CO)和未燃碳氢化合物(UHC)等燃烧污染物排放等技术开展研究工作。这方面,以干低 NO_x 排放(DLN)燃烧技术的发展最为成熟、应用最为广泛,完全满足目前将 NO_x 排放量控制在25ppm(15% O_2)的排放要求。通用电气公司在其LM系列燃气涡轮发动机上取得 NO_x 和CO排放量均为25ppm的业绩之后,又在E级燃烧室达到 NO_x 和CO排放量均为9ppm、在F级燃烧室达到 NO_x 和CO排放量分别为9ppm和3ppm的高度,可以说已经触到了常规燃烧技术的极限。

本书的英文版是美国CRC出版集团出版的《燃气涡轮发动机燃烧》(第3版)教科书,由世界燃烧学界泰斗A. H. 勒菲沃(Arthur H. Lefebvre)的学生D. R. 鲍拉尔(Dilip R. Ballal)在其老师撰写的前两版的基础上撰写而成。

本书的一个明确目的,是为航空发动机和地面燃气涡轮发动机的设计者、制造者和操作者提供指导。它适合作为燃气涡轮发动机燃烧室领域研究生的教科书、设计手册,以及研究参考书。本书内容包含全部燃烧内容,还包含较前沿的物理与化学知识。

本版本共10章:

第1章介绍燃烧室的主要性能要求和基本设计特征,燃烧室的不同类型和结构,以及英国、德国和美国燃烧室发展的历史。

第2章介绍燃气涡轮发动机燃烧的基本问题,包括湍流火焰、全局反应速率和点火理论,还包括油滴蒸发和喷射蒸发的内容,强调喷射蒸发和油滴寿命时间的比值特征。

第3章介绍燃烧室扩压器的设计和性能,以及能成功预测燃烧室扩压器初步流场特征的数值模拟技术。

第4章介绍了气动设计需要了解的回流、射流和混合以及各类气孔(包括空气旋流器)的流量系数方面的知识,并且在燃烧室尺寸、压力损失和出口温度分布之间建立联系,从而为良好的气动设计提供合理的基础。

第5章介绍燃烧效率、稳定性和点火性能，将这3个问题集中到一章进行阐述，以使读者更清晰地理解燃烧性能的3个不同方面的关系。

第6章介绍燃油喷射，指出燃料的准备过程在实现低排放燃烧过程中所起的重要作用，内容包括燃油雾化、射流和油膜破碎机理、不同类型喷嘴的性能和结构特征等内容。

第7章介绍燃烧噪声，涉及到燃烧噪声的所有关键方面，包括噪声产生机理和噪声抑制方法。

第8章介绍控制火焰筒壁温的传热过程和抑制向筒壁传热的方法。

第9章介绍排放，主要包括污染排放相关问题和已制定的标准、污染物生成机理和降低传统燃气涡轮发动机污染物排放的方法、可变几何结构和分级燃烧在通过控制火焰温度降低排放方面的应用、干低氮氧化物排放和超低氮氧化物排放燃烧室设计及实现超低氮氧化物排放的方法。

第10章介绍用于燃气涡轮发动机的传统液体与气体燃料（石油基）的物理与化学特性，评价替代燃料（合成）和传统替代混合燃料的特性，描述这些不同的燃料及其混合物对燃烧室性能、设计和排放的影响。

第1章由姚博、孟令扬翻译，马宏宇校译，刘殿春审校；第2章由李彩玲翻译，马宏宇校译，刘殿春审校；第3章由扈鹏飞翻译，朱健校译，刘殿春审校；第4章由张成凯翻译，叶留增校译，梁春华审校；第5章由朱宇翻译，杨志民校译，赵国瑞审校；第6章由刘宝翻译，程明校译，张军峰审校；第7章由刘金林、赵明龙翻译，杨志民、扈鹏飞校译，梁春华审校；第8章由张军峰翻译，赵传亮校译，刘红霞审校；第9章由李洁翻译，张成凯校译，梁春华审校；第10章由孙雨超翻译，张军峰校译，程明审校。本译著由贾平芳、梁春华、马宏宇、赵国瑞负责总审校；刘永泉对全书进行了最后审定；刘红霞、杨芳菲负责总编辑。

《燃气涡轮发动机燃烧》（第3版）的翻译出版工作中航工业沈阳发动机设计研究所完成，由所科技情报档案中心具体组织和协调。在本书的出版过程中，得到了孙彦贵、王相平、赵海、郝燕平、高家春、胡明华等领导和部分同志的大力支持，在此一并表示感谢！

因译校者水平有限，本译著中错误和曲解之处在所难免，敬请读者批评指正。

译者

2015年10月28日

原版前言

燃气涡轮发动机技术的发展要持续满足 21 世纪推力、功率、燃油效率和低污染排放的要求。自第 2 版的出版已经过去了 10 年，本书仍在世界的众多领域得到广泛的使用。A. H. 勒菲沃教授于 2003 年去世。2009 年，出版商找到我，并提议准备第 3 版的出版，我不能拒绝。首先，勒菲沃教授作为我的老师、挚友和同事已有 35 年之久；其次，第 1 版和第 2 版的撰写过程，我参与了许多研讨；最后，我从书中学到了很多。

本书有一个明确的目的，它主要为航空发动机和地面燃气涡轮发动机的设计者、制造者和操作者提供指导。它适合作为燃气涡轮发动机燃烧室领域研究生的教科书、设计手册，以及研究参考书。本书内容包含全部燃烧内容，还包含较前沿的物理与化学知识。

为满足 21 世纪燃气涡轮发动机发展需求，本意欲大量修订和更新第 2 版内容，但当我检查第 2 版的每一章节的时候，我发现其内容仍是最新的，证明了燃气涡轮发动机燃烧室的发展是逐步的。因此，在多燃料性能、回火、高空非设计点燃烧效率和减少带气膜冷却火焰筒故障研究方面的修改最少。在寻求达到更高燃油效率和更低二氧化碳（ CO_2 ）排放的过程中，过去 10 年里，压气机增压比和涡轮进口温度逐渐增长。然而气体和微粒的排放减少了 1/3 或更多，并且完全低于 2006 年 7 月制定的排放规定。因此，更新了第 9 章关于排放的内容。

最重要的更改是新加入了第 10 章“替代燃料”和本专著副标题“替代燃料与排放”。目前，石油燃料的不可再生以及费用的持续增加，促使人们进行基于煤炭、生物和其他原料的替代液体燃料的研究。全球石油燃料资源枯竭和越来越多的恐怖活动使得众多工业发达国家和发展中国家发展国内燃料源，以确保供给和能源安全。这种合乎国情生产的替代燃料，毫无疑问可以被用于燃料精炼、运输、分配和消费的基础设施。替代燃料产业在未来 10 年中的前景，主要依赖于：恰当的燃料特性和对已有的发动机与基础设施的操作特征；环境影响，包括食物、水和土地的竞争； CO_2 寿命循环分析和碳踪迹问题；投资、生产和维护的经济回报。

因此,第10章首先介绍了用于燃气涡轮发动机的传统液体与气体燃料(石油基)的物理与化学特性;其次,评价了替代燃料(合成)和传统替代混合燃料的特性,描述了这些不同的燃料及其混合物对燃烧室性能、设计和排放的影响,并作为飞行器燃料的特殊需求和工业燃气涡轮发动机燃料上遇到问题的参考。

按照不背离第1版和第2版中高度成熟的原则,我将相关素材更新到2009年。我希望第3版能够很好地被燃气涡轮发动机燃烧室、燃料和排放方面的研究团体所接受。

最后,我要感谢我的妻子休伯汉姬(Shubhangi)在本书的准备阶段对我的帮助与鼓励。

D. R. 鲍拉尔
俄亥俄州
代顿大学

作者简介

A. H. 勒菲沃 (Arthur H. Lefebvre) (1923—2003), 燃气涡轮发动机燃烧领域的先驱, 普渡大学名誉教授。他拥有超过 40 年的工程与学术经验, 在雾化与燃烧原理和应用方面撰写了 150 多篇技术论文。他获得过的荣誉包括美国机械工程师学会 (ASME) 燃气涡轮发动机与 ASME 汤姆索亚 (R. Tom Sawyer) 奖、ASME 乔治西屋 (George Westinghouse) 金奖和国际燃气涡轮发动机学会 (IGTI) 学者奖。他还是美国航空航天学会 (AIAA) 推进与燃烧奖项的第一位获得者。

D. R. 鲍拉尔 (Dilip R. Ballal), 代顿大学汉斯·冯·奥海因 (Hans von Ohain) 首席教授。他在燃气涡轮发动机燃料与燃烧、发动机空气动力学、传热以及流体力学领域有 40 年的研究经验。在这期间, 他重点研究与燃气涡轮发动机燃料和燃烧相关的原理与应用上的问题。他同时是 ASME 和 AIAA 的终身会员, 并且是 ASME 的高级副会长兼《ASME 燃气涡轮发动机与动力工程学报》的编辑。他还是美国国家研究院“燃气涡轮推进器”和“航空发动机燃油效率”研究委员会委员。他的荣誉包括 ASME-IGTI 航空发动机技术奖、AIAA 吸气式推进器奖、AIAA 推进及燃烧奖, 以及 AIAA 动力系统奖。

目 录

第 1 章 基本概念	(1)
1.1 绪论	(1)
1.2 早期燃烧室的发展	(2)
1.3 基本设计特征	(6)
1.4 燃烧室设计要求	(8)
1.5 燃烧室类型	(8)
1.6 扩压器	(11)
1.7 主燃区	(12)
1.8 中间区	(13)
1.9 掺混区	(13)
1.10 燃油准备	(14)
1.11 壁面冷却	(16)
1.12 低排放燃烧室	(18)
1.13 小型发动机的燃烧室	(21)
1.14 工业燃烧室	(22)
第 2 章 燃烧原理	(28)
2.1 引言	(28)
2.2 火焰分类	(28)
2.3 物理学还是化学	(29)
2.4 可燃极限	(30)
2.5 全局反应速率理论	(30)
2.6 层流预混火焰	(32)
2.7 层流扩散火焰	(33)
2.8 湍流预混火焰	(34)
2.9 燃料液滴、燃料蒸气和空气构成的非均质混合物中的火焰传播	(35)
2.10 液滴和喷雾蒸发	(38)
2.11 点火理论	(43)
2.12 自燃	(50)
2.13 回火	(55)
2.14 化学计算	(55)
2.15 绝热火焰温度	(56)

第3章 扩压器	(65)
3.1 引言	(65)
3.2 扩压器结构	(66)
3.3 流场结构	(67)
3.4 性能指标	(68)
3.5 扩压器性能	(70)
3.6 进口流动条件的影响	(73)
3.7 设计考虑因素	(76)
3.8 数值模拟	(85)
第4章 气动设计相关问题	(93)
4.1 引言	(93)
4.2 参数	(93)
4.3 压力损失参数	(94)
4.4 尺寸和压力损失的关系	(96)
4.5 环形区内的流动	(97)
4.6 火焰筒上孔内的流动	(98)
4.7 射流轨迹	(101)
4.8 射流混合	(105)
4.9 温度分布品质	(109)
4.10 掺混区设计	(110)
4.11 温度分布系数的关系	(112)
4.12 部件温度场试验	(114)
4.13 旋流器空气动力学	(114)
4.14 轴向旋流器	(116)
4.15 径向旋流器	(119)
4.16 直叶片与曲叶片	(120)
第5章 燃烧性能	(127)
5.1 引言	(127)
5.2 燃烧效率	(127)
5.3 化学反应控制系统	(128)
5.4 混合控制系统	(132)
5.5 蒸发控制系统	(132)
5.6 化学反应和蒸发控制系统	(136)
5.7 火焰稳定性	(137)
5.8 钝体火焰稳定器	(142)

5.9	火焰稳定机理	(147)
5.10	燃烧室中的火焰稳定	(150)
5.11	点火	(154)
5.12	点火性能的评估	(154)
5.13	电火花点火	(156)
5.14	点火的其他形式	(159)
5.15	影响点火性能的因素	(162)
5.16	点火过程	(170)
5.17	改善点火性能的方法	(171)
第6章	燃油喷射	(182)
6.1	雾化的基本过程	(182)
6.2	射流和油膜破碎的经典机理	(183)
6.3	瞬发式雾化	(187)
6.4	经典式还是瞬发式	(187)
6.5	液滴尺寸分布	(187)
6.6	喷嘴要求	(195)
6.7	压力喷嘴	(195)
6.8	旋转式喷嘴	(198)
6.9	空气辅助喷嘴	(199)
6.10	空气雾化喷嘴	(200)
6.11	气泡雾化喷嘴	(205)
6.12	蒸发管	(207)
6.13	燃油喷嘴结焦	(209)
6.14	气体燃料喷射	(210)
6.15	平均液滴尺寸公式	(211)
6.16	压力喷嘴的 SMD 公式	(212)
6.17	双流体喷嘴的 SMD 公式	(215)
6.18	瞬发式雾化的 SMD 公式	(217)
6.19	内部流动特征	(218)
6.20	流量数	(218)
6.21	流量系数	(219)
6.22	喷雾锥角	(223)
6.23	燃油的径向分布	(225)
6.24	燃油的周向分布	(228)
第7章	燃烧噪声	(243)
7.1	引言	(243)

7.2	直接燃烧噪声	(243)
7.3	燃烧不稳定性	(245)
7.4	不稳定燃烧的控制	(251)
7.5	燃烧不稳定性建模	(254)
第8章	传热	(260)
8.1	引言	(260)
8.2	传热过程	(261)
8.3	内部辐射	(262)
8.4	外部辐射	(264)
8.5	内部对流	(265)
8.6	外部对流	(265)
8.7	非冷却火焰筒温度计算	(266)
8.8	气膜冷却	(269)
8.9	气膜冷却数据关联	(272)
8.10	发汗冷却的实际应用	(281)
8.11	先进壁面冷却方法	(283)
8.12	增强冷侧对流冷却技术	(285)
8.13	热障涂层冷却技术	(285)
8.14	材料	(286)
8.15	火焰筒的失效模式	(289)
第9章	排放	(295)
9.1	引言	(295)
9.2	相关问题	(295)
9.3	排放标准	(297)
9.4	污染物生成机理	(300)
9.5	常规燃烧室降低排放	(312)
9.6	控制火焰温度降低污染物排放	(319)
9.7	干低 NO_x (DLN) 燃烧室	(323)
9.8	贫油预混预蒸发燃烧室	(338)
9.9	富油燃烧 - 猝熄 - 贫油燃烧 (RQL) 燃烧室	(340)
9.10	催化燃烧	(342)
9.11	NO_x 和 CO 排放的关系与数值模拟	(348)
9.12	总结	(352)
第10章	替代燃料	(364)
10.1	引言	(364)