



装备科技译著出版基金

非稳态燃烧室物理学

Unsteady Combustor Physics

[美] Tim C. Lieuwen 著

孙明波 樊超 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

CAMBRIDGE



装备科技译著出版基金

非稳态燃烧室物理学

Unsteady Combustor Physics

[美] Tim C. Lieuwen 著

孙明波 樊超 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2014-173 号

图书在版编目(CIP)数据

非稳态燃烧室物理学 / (美)蒂姆·C. 刘雯
(Tim C. Lieuwen) 著. 孙明波, 樊超译. —北京: 国防工业出版社, 2017. 2

书名原文: Unsteady Combustor Physics

ISBN 978-7-118-10986-3

I. ①非… II. ①蒂… ②孙… ③樊… III. ①燃烧物
理学 IV. ① O551.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 012718 号

This is a Chinese edition of the following title published by Cambridge University Press:

UNSTEADY COMBUSTOR PHYSICS ISBN 978-1-107-01599-9

© Tim C. Lieuwen 2012

This Chinese edition for the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press and National Defense Industry Press 2017

This Chinese edition is authorized for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong, Macau and Taiwan) only. Unauthorised export of this Chinese edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of Cambridge University Press and National Defense Industry Press.

本书简体中文版由 Cambridge University Press 授权独家出版发行。
版权所有, 侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 27 1/4 字数 536 千字

2017 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 138.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

发行业务: (010) 88540717

非稳态燃烧室物理学

清洁、可持续的能源系统是时代发展的必然要求。大部分工程应用表明,基于燃烧的能量转换系统仍是未来能源利用的主导方式。非稳态燃烧问题是开发清洁、高效燃烧系统(如用于发电、制热或推进作用的燃烧系统)所面临的关键挑战之一。本书是目前第一部系统讨论该课题的综合性专著,重点关注发生在燃烧、流动与声学相互作用过程中的系统动力学,并将这些不同研究领域综合起来分析,系统揭示燃烧室内非稳态过程的内在物理本质。

Tim C. Lieuwen 博士是佐治亚理工学院航空航天工程学院教授。Lieuwen 博士的研究兴趣广泛,涉及能源、环境和推进领域,特别是在化学反应流体力学和声学方面造诣很深。他曾主持编撰了2部专著,撰写了7个章节,发表了200多篇论文,持有3个专利。他是AIAA 航天和航空系列的首席主编,也是《推进与动力》、《燃烧科学技术》、《燃烧研究进展》等杂志的副主编。他是美国机械工程师协会(ASME)研究员,曾获得多个奖项,包括AIAA(美国航空航天学会)劳伦斯斯佩里奖、ASME 威斯汀豪斯银奖、ASME 最佳论文奖、希格玛西青年教师奖和美国自然科学基金委杰出青年学者奖。Lieuwen 博士与他的夫人和四个女儿居住在美国亚特兰大州。

目 录

引言	1
概述	5
第1章 概论和基本方程	7
1.1 多组分完全气体热力学关系	7
1.2 连续方程	8
1.3 动量方程	8
1.4 组分守恒方程	11
1.5 能量方程	12
1.6 符号说明	15
1.6.1 拉丁字母	16
1.6.2 希腊字母	18
1.6.3 下标	19
1.6.4 上标	20
1.6.5 其他符号	20
习题	21
参考文献	22
第2章 扰动的分解与演化	23
2.1 流动微扰的数学描述	23
2.2 均匀无黏流动中小振幅扰动的传播	26
2.2.1 分解方法	26
2.2.2 关于上述分解的说明	30
2.2.3 分子输运对扰动分解的影响	32
2.3 模式耦合过程	32
2.3.1 通过边界条件耦合	33
2.3.2 通过流动非均匀性耦合	34
2.3.3 非线性耦合	35

2.4	扰动场有关的能量密度和能量通量	37
2.5	扰动的线性稳定与非线性稳定	41
2.5.1	线性稳定与不稳定系统	42
2.5.2	非线性不稳定系统	44
2.5.3	强迫振荡系统和极限环系统	46
	习题	50
	参考文献	50
第3章	流动稳定性 I ——引言	53
3.1	平行流自然振荡模式:基本方程	53
3.2	时间不稳定性的一般性结论	56
3.2.1	时间不稳定的必要条件	56
3.2.2	增长速率和扰动传播速度的连界	60
3.3	对流不稳定和绝对不稳定	61
3.4	拓展示例:空间混合层	65
3.5	全局稳定性与非平行流	69
	习题	70
	参考文献	71
第4章	流动稳定性 II ——普通燃烧室流场	74
4.1	自由剪切层	76
4.1.1	流动稳定性与不稳定结构	78
4.1.2	谐振激励效应	81
4.2	尾迹流及钝体流场	84
4.2.1	平行流稳定性分析	86
4.2.2	钝体尾迹流	88
4.2.3	分离剪切层	90
4.2.4	谐振激励效应	90
4.3	射流	91
4.3.1	平行流稳定性分析	93
4.3.2	恒定密度射流动力学	94
4.3.3	谐振激励效应	97
4.3.4	横向射流	97
4.4	旋流和尾迹流	101
4.4.1	涡破碎	103
4.4.2	旋流和尾迹流动力学	106

4.4.3 谐振激励效应	109
4.5 后向台阶和凹腔	110
4.5.1 平行流稳定性分析	111
4.5.2 非稳态流动结构	112
习题	114
参考文献	114
第5章 声波传播 I ——基本概念	123
5.1 行波与驻波	123
5.2 边界条件:反射系数和阻抗	127
5.3 简单几何构型的自然模态	132
5.3.1 一维模态	133
5.3.2 多维矩形管道的模态	137
5.3.3 圆形管道的模态	138
5.3.4 集总元件及亥姆霍兹共振器	141
5.3.5 对流模态	142
5.4 受迫振荡	143
5.4.1 一维强迫及共振	143
5.4.2 管道的受迫振荡和截止模态	144
习题	148
参考文献	149
第6章 声波传播 II ——释热、复杂几何及平均流影响	151
6.1 引言	151
6.2 平均流影响	154
6.2.1 平均流对波传播的影响	154
6.2.2 平均流对边界条件的影响	156
6.3 温度变化影响	157
6.3.1 示例问题:波通过变温区的反射与透射	160
6.3.2 示例问题:变温度区域的自然频率	162
6.4 面积变化影响	163
6.4.1 基准结果	163
6.4.2 等熵喷管/扩张管及声/熵耦合	165
6.4.3 不稳定涡的产生和声学阻尼	167
6.5 声学阻尼过程	170
6.6 非稳态释热影响	171

6.6.1	热声稳定性模型问题	172
6.6.2	热声不稳定趋势的进一步讨论	176
6.7	非线性效应和极限环	179
6.7.1	模态公式和振幅方程	180
6.7.2	非线性源项	183
	习题	186
	参考文献	187
第7章	火焰与流动的相互作用	191
7.1	预混火焰的跃变关系	191
7.1.1	公式	191
7.1.2	穿过火焰的速度和压力关系	194
7.1.3	穿过火焰的涡量关系	198
7.2	物质和火焰表面的拉伸	206
7.2.1	物质表面拉伸	206
7.2.2	预混火焰拉伸	207
7.2.3	示例问题: 涡引起的物质线拉伸	207
7.3	预混火焰对迎面气流的影响	208
	习题	213
	参考文献	213
第8章	点火	216
8.1	概述	216
8.2	自点火	218
8.2.1	均匀预混反应物的点火	218
8.2.2	损失和流动不均匀性的影响	220
8.3	强迫点火	228
	习题	232
	参考文献	233
第9章	火焰内部过程	237
9.1	预混火焰概述	237
9.1.1	预混火焰结构	237
9.1.2	预混火焰相关性	240
9.2	预混火焰的拉伸和熄灭	243
9.2.1	概述	243

9.2.2	火焰拉伸表达式	245
9.2.3	弱拉伸效应	246
9.2.4	强拉伸效应、消耗与偏移速度以及熄火	248
9.3	预混火焰:非稳态效应	252
9.4	非预混火焰概述	256
9.5	非预混火焰的有限速率效应	258
9.6	边缘火焰和火焰传播	261
9.6.1	概述	261
9.6.2	Buckmaster 的边缘火焰模型	263
9.6.3	边缘火焰速度	266
9.6.4	火焰边缘处的条件	269
9.6.5	着火后火焰传播的含义	271
9.7	固有的火焰不稳定	271
	习题	274
	参考文献	274
第 10 章	火焰稳定,回火,火焰维持和吹脱	281
10.1	回火和火焰维持	281
10.1.1	核心流区的火焰传播	282
10.1.2	边界层回火	283
10.2	火焰稳定与吹脱	288
10.2.1	预混火焰基本影响因素:流动速度和燃烧速度的 运动学平衡	290
10.2.2	剪切层稳定火焰的拉伸率	292
10.2.3	产物回流对火焰稳定和吹脱的影响	296
10.2.4	非预混火焰的抬举和吹脱	299
	参考文献	300
第 11 章	强迫响应 I——小火焰动力学	305
11.1	长度/时间尺度概述	305
11.1.1	预混火焰与宽频带扰动场的相互作用	305
11.1.2	火焰与窄频带速度扰动场的相互作用	309
11.2	预混火焰面动力学	312
11.2.1	公式和模型问题	312
11.2.2	常值燃烧速度火焰的线性动力学	316
11.2.3	非线性火焰锋动力学	327

11.3	非预混火焰面动力学	331
11.3.1	公式和观测结果	332
11.3.2	示例一:混合层	333
11.3.3	示例二:瞬态滞止火焰	335
11.3.4	示例三:等温非预混和预混火焰的涡卷吸	336
11.3.5	示例四:受限、通风过度火焰的谐振强迫响应	338
	习题	343
	参考文献	344
第12章	强迫响应Ⅱ——释热动力学	348
12.1	强迫作用下火焰的响应机理概述	348
12.2	预混火焰——线性动力学	353
12.2.1	公式	353
12.2.2	速度耦合线性火焰响应	354
12.2.3	当量比耦合	357
12.3	谐振强迫预混火焰——非线性影响	358
12.3.1	运动恢复	359
12.3.2	稳定点的动力学	361
12.3.3	时均火焰和流场	363
12.3.4	几何形状和火焰面积空间分布	363
12.3.5	质量燃烧速率和反应热变化	364
12.4	宽带激励和湍流火焰速度	365
12.4.1	扰动对时均燃烧速率的影响	365
12.4.2	湍流引起的释热脉动	370
12.4.3	宽带燃烧噪声	373
	习题	375
	参考文献	376
	习题答案	383

引 言

本书的研究对象为非稳态燃烧流动,重点研究发生在燃烧、流体力学、声学相互作用过程的系统动力学,即燃烧室物理学。换句话说,这不是一本燃烧学专著,而是研究火焰与非稳态流动过程之间的相互作用,这种相互作用过程控制着燃烧室系统的行为。已有许多流体动力学的专著涉及“非稳态”现象(如内燃机、爆震、浮力主导的流动中的火焰颤动和热声不稳定等),本书主要关注高雷诺数、气相、亚声速流的非稳态燃烧室问题。本书设定读者已经具备流体力学和燃烧理论知识基础(并不一定需要具备声学基础),因而在体系安排上将流体力学、燃烧、声学理论交织在一起,以便于读者综合理解燃烧室中的非稳态过程本质。

非稳态燃烧室过程与现代燃烧室设计的许多重要方面密切相关。这些非稳态过程包括瞬态过程、随时间谐振、统计驻定、随机过程等。例如,点火、火焰吹脱、火焰闪回等瞬态燃烧室问题通常决定了燃烧室能够正常工作的油气比或速度范围。本书将会讨论这些瞬态过程涉及的化学动力学、质量和能量传递、高速剪切流区域内的火焰传播、流体动力稳定性、火焰膨胀与流场的相互作用等不同过程的耦合作用,这些耦合作用并不是由火焰速度与流动速度之间的简单平衡关系可以表征的。

同样地,燃烧不稳定性是一个与时间有关的谐振非稳态燃烧室问题,由非稳态释热激励燃烧室自然声学振型引起。这些不稳定性可能引起系统剧烈振荡,从而给系统的工作强加一些额外的约束条件。与这些稳定性有关的声学振荡由整个燃烧室系统控制。也就是说,它们与泵、燃料输送系统、燃烧室、涡轮传动部件等相互耦合装置的固有声振模式有关。而且,这些声学振荡还会激发流体的动力学不稳定性,从而使火焰前锋皱褶,导致热释放速率被调制。因此,燃烧不稳定性问题涉及声学、火焰动力学以及流体动力学稳定性的耦合作用。

湍流燃烧的本质就是一个非稳态问题,涉及的随机波动可能是静止的(如湍流速度脉动)和非静止的(如附着火焰内的湍流火焰刷)。对于像湍流燃烧噪声的产生之类的问题,则需要理解湍流引起的释热宽频带脉动,以及这些脉动是如何转化为声波并传播的。而且,本书以湍流燃烧作为非稳态燃烧的一个实例,其主要原因在于:如果不能理解燃烧室系统的非稳态特性,则不能很好地理解该系统的许多时间平均特性。例如,与燃料时平均消耗率有关的湍流火焰速度,可能比层流火焰速度大一两个数量级,这正是非稳态性对时平均燃速的影响所致。另外,一些直接与燃烧室基本设计(如燃烧室壁的高热流位置或者燃烧室长度要求)有关的关键

因素如火焰传播角和火焰长度等,是直接由系统的非稳态性决定的。

即使在非反应流中,许多时平均流动特性也是由内在的非稳态流体动力学控制的。例如,几十年前人们就已经知道,湍流混合层并不是简单地由宽频带湍流脉动组成,而是由准周期结构控制。对这些大尺度结构动力学的理解在认识剪切层时间平均特性(如增长速率、两流体混合速率或放热影响等)方面具有关键作用,同时也是深入理解某些内在非稳态问题(如剪切层如何响应外部激励)不可或缺的前提。

同样地,多数燃烧室流场由流体动力学不稳定性和非稳态大尺度结构控制,而后两者又受到燃烧释热的深刻影响。对于多数燃烧室结构,其瞬态和时平均火焰形状以及回流区流场通常存在某种相似性,只是瞬态流场中可观察到更多的流场结构和不对称性。强旋流是这类问题的一个很好的例子,图 0-1 比较了其时平均(图(a))和瞬态(图(b)~(d))流线图。理解诸如回流区长度和流场拓扑结构等特性,以及放热和工作条件如何影响这些流动特性,需要具备流体动力学特性的

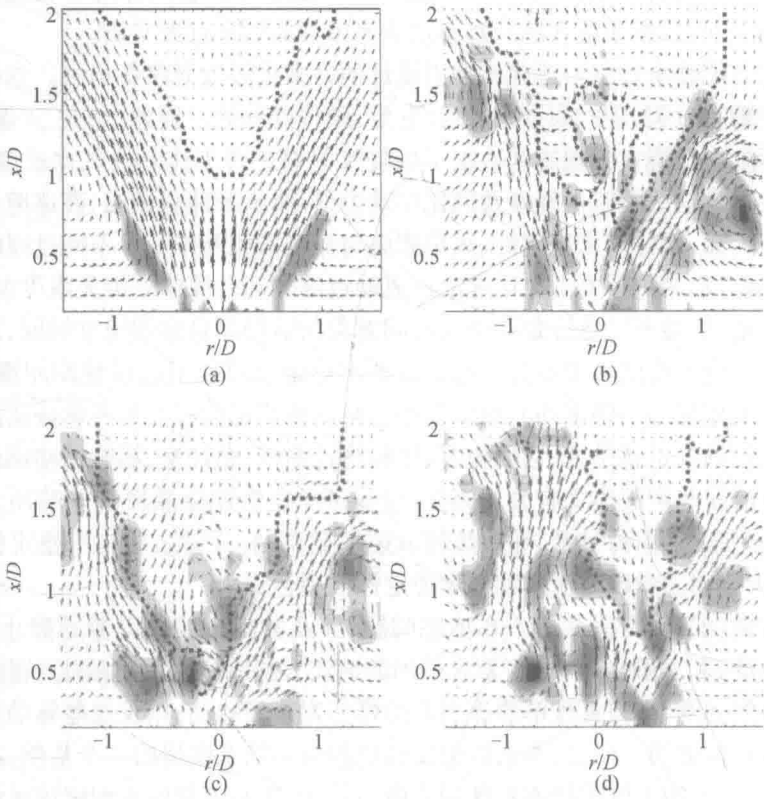


图 0-1 旋流燃烧室流场^[1]

(a) 时平均流场; (b)~(d) 瞬态流场。

注:虚线表示轴向速度为 0 的等值线;阴影区表示涡量值。

相关知识。总的来说,在燃烧室的稳态过程预测方面的持续进展,得益于对燃烧室随时间变化的动力学过程的认识。

自 Markstein 的 *Nonsteady Flame Propagation* 一书出版以来,现代计算和诊断技术革新了人们对火焰时空动力学的认识。在过去 20 年里,计算能力的大规模提高和用于反映反应流空间特征的实验技术的发展,使人们对湍流火焰动力学过程的理解有了长足的进步。例如,充分搅拌反应器模型曾广泛用于描述某种类型的火焰,可以利用视线测量法来了解其内部结构,如图 0-2(a) 所示的某旋流流场的火焰图像。这些图像表明,由于涡破碎区内的强掺混作用,燃烧区基本上是一个均匀分布的反应区。充分搅拌反应器模型为后来的一些建模工作提供了重要的流动概念图,如模拟吹脱极限或污染物生成速率。然而,现代诊断技术却给出了完全不同的结果,如图 0-2(b) 所示。图中显示的是一个高度皱褶的火焰薄层,该火焰薄层并不是分布式的,而是一个非常薄的在三维空间中各个方向褶皱的结构,这导致了视线测量图给出均匀反应区的结果。

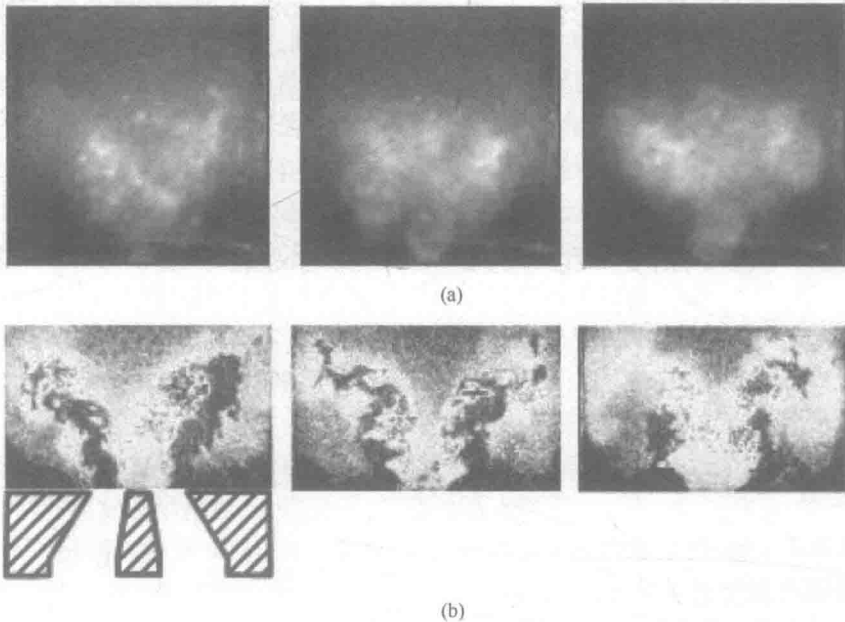


图 0-2 湍流旋流火焰的视线测量图(a)和平面 OH-PLIF 图像(b)^[2]

上述关于瞬态与时均的流场和火焰,或者视线与平面测量图片的比较表明,在燃烧领域仍有许多值得期待的进展有待发掘。通过这些实验观测能够更好地解释燃烧室的瞬态动力学,从而更有利于理解燃烧的时均和非稳态特性,这就是本书的主要出发点。本书力图解决一些人们目前所面临的并且还没有解决的最具挑战性的燃烧和燃烧室难题,希望本书可以为本领域的下一代科学家和工程师提供一些帮助。

参考文献

- [1] Markstein G.H., *Nonsteady Flame Propagation*. 1964: Pergamon.
- [2] Bellows B.D., Bobba M.K., Seitzman J.M., and Lieuwen T., Nonlinear flame transfer function characteristics in a swirl-stabilized combustor. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2007. 129(4), pp. 954–961.

概 述

本节介绍本书的结构和内容,并针对不同背景的读者提出如何最有效地利用本书的建议。第1章主要介绍本书中将要用到的一些基本控制方程。其余各章可以分成三个部分:第2~6章为第一部分,第7~9章为第二部分,第10~12章为第三部分。第一部分讨论燃烧室中的流动扰动,其中第2章详细讨论不同类型的扰动是如何在非均匀、存在化学反应的燃烧室环境中产生和传播的。第2章通过引入流动扰动的分解,即将流动扰动分解为声、涡和熵扰动,为第3~6章更详细地讨论非均匀环境中的扰动动力学打下了基础。第3章和第4章侧重讨论燃烧室环境中涡扰动的演化过程。其中:第3章对流体动力学稳定性的一般理论进行了概述,并详细讨论了流动不稳定的控制条件的一些普遍特性;第4章详细讨论与燃烧室环境密切相关的一些典型流动结构,如剪切层、尾迹流和旋转射流等,该章还讨论了流动非均匀性和声学强迫作用对流动不稳定性的影响。

第5章和第6章讨论燃烧室环境中的声波传播过程。其中:第5章对声波传播、边界条件和固有声学模式进行一般性介绍;第6章则讨论热释放、平均流和复杂几何结构对声波的影响,本章还延伸讨论了热声不稳定性。

本书的第二部分,即第7~9章,讨论反应流现象和化学反应动力学。其中:第7章详细讨论了火焰如何影响整个流场,但没有明确介绍火焰内部过程,而是侧重讨论火焰对于压力、熵、涡量,以及速度场的影响;第8章讨论自点火和强迫点火现象;第9章讨论火焰,首先回顾了预混燃烧和非预混燃烧的基础理论,然后讨论更复杂的课题,如火焰拉伸、火焰熄灭,以及边缘火焰等。

本书的第三部分,即第10~12章,讨论燃烧室中的瞬态过程(除了第8章讨论的点火过程)和谐振现象。其中:第10章着重讨论瞬态、非定常燃烧室环境下的火焰吹脱、回火以及火焰稳定的一般现象;第11章和第12章侧重于强迫火焰动力学,讨论火焰动力学与(外加的)窄频带和宽频带的声和涡的相互作用。

本书的主体内容主要面向已具备流体力学入门级课程水平的研究生和具备燃烧理论基础的本科生。在各个章节的“附注内容”中有与本章内容相关的延伸讨论。建议读者按照本书的组织结构顺序通读全文,至于那些将本书作为参考书的读者也可在某些独立章节找到各自有用的内容。对于燃烧室流动的流体动力稳定性或大尺度结构特别感兴趣的读者可以从第2章开始阅读,首先大致理解扰动传播模式的更一般性的内容,之后可直接过渡到第3章和第4章。同样地,对声扰动

感兴趣的读者可以先看第2章,然后直接跳到第5章和第6章。对热声相互作用感兴趣的读者可能需要阅读第11章和第12章。最后,对火焰稳定、吹脱、回火现象感兴趣的读者可以进一步阅读第7章、第9章和第10章。此外,如果读者对本书之外的一些延伸主题特别感兴趣,如超声速或者燃烧室两相流物理过程,也可以在本书中找到相关内容的介绍,如流体动力稳定性、热声耦合或者火焰稳定性等一些控制其他流体动力过程的基础性问题。

许多人对本书的完成做出了贡献。首先,我要深深地感谢我的爱妻 Rinda 和女儿 Liske、Anneke、Carolina 和 Janna Lieuwen,感谢她们对我的爱、鼓励和支持。

如果没有 Joseph Citenko 提供的基金以及我的同事 Vigor Yang 的支持,本书也不可能面世。在此诚挚地对他们的支持表示感谢,是他们的支持使此书得以启动。

感谢乔治亚理工学院我所在课题组的同事们,没有他们的鼎力相助本书也不可能完成。他们在整理文献、执行计算、评述论点、完善推导、查错以及宣传等方面都做出了非常大的贡献。在此要特别感谢 Vishal Acharya、Michael Aguilar、Alberto Amato、Ianko Cheterev、Jack Crawford、Ben Emerson、Christopher Foley、Julia Lundrigan、Nick Magina、Michael Malanoski、Andrew Marshall、Jacqueline O'Connor、Dong-Hyuk Shin、Shreekrishna、Ryan Sullivan、Prabhakar Venkateswaran 和 Ben Wilde,能够与如此杰出的团队一起工作我深感荣幸,非常感谢他们的帮助。

特别感谢 Ben Bellows、Enrique Portillo Bilbao、Baki Cetegen、Jeff Cohen、Joel Daou、Catalin Fotache、Fei Han、Santosh Hemchandra、Hong Im、Matthew Juniper、Vince McDonnell、Randal McKinney、Venkat Narra、Bobby Noble、Preetham、Rajesh Rajaram、Mike Renfro、Paul Ronney、Thomas Sattelmayer、Dom Santavicca、David Scarborough、Thierry Schuller、Santosh Shanbhogue、Shiva Srinivasan、R. I. Sujith、Sai Kumar Thumuru 和 Qingguo Zhang,感谢他们对本书目录和内容提出的反馈意见和建议。另外,Glenda Duncan、Siva Harikumar、Faisal Ahmed 和 Jordan Blimbaum 为本书的编辑提供了大力支持。

最后,诚挚地感谢我的同事和导师,他们是 Ben Zinn、Robert Loewy、Lakshmi Sankar、Jeff Jagoda、Jerry Seitzman、Suresh Menon 和 Vigor Yang,感谢他们对我的帮助和支持。

第1章 概论和基本方程

1.1 多组分完全气体热力学关系

本章介绍本书中将要用到的多组分、化学反应完全气体关键方程^[1-5]。这些方程描述了完全气体状态变量的热力学关系,如压力、密度以及熵之间的相互关系,同时也描述了相关的物理定律,如与密度和速度有关的质量守恒定律、与速度和压力有关的动量方程以及与内能、动能、做功和传热有关的能量方程。

本章的主要目的是将全书中将要用到的关键方程汇总到一起,并假定读者事先已经对它们有所了解。本章后面给读者提供了大量的参考文献以进一步了解这些方程的细节及其推导过程。尽管这些推导过程对于理解后续章节并不是必要的,但对每个方程物理含义的理解本身是非常重要的。因此,本章也包含了对这些方程式中各项物理意义的讨论。

我们将使用下面的理想气体状态方程:

$$p = \frac{\rho \mathcal{R}_u T}{MW} \quad (1.1)$$

和

$$de = Td\mathcal{A} + p \frac{d\rho}{\rho^2} + \sum_{i=1}^N \frac{\mu_i}{MW_i} dY_i \quad (1.2)$$

式中: $e = \sum_{i=1}^N Y_i e_i$; $\mathcal{A} = \sum_{i=1}^N Y_i \mathcal{A}_i$; $\mu_i = \left. \frac{\partial E}{\partial n_i} \right|_{\mathcal{A}, \rho, n_j \neq i}$ 为组分 i 的化学势。所有变量的定义可见 1.6 节的符号说明。混合物平均相对分子量由下式给出:

$$\overline{MW} = \sum_{i=1}^N X_i \cdot MW_i \quad (1.3)$$

摩尔分数 X_i 与质量分数 Y_i 的关系如下:

$$X_i = \frac{Y_i \overline{MW}}{MW_i} \quad (1.4)$$

焓可以写为

$$h = \sum_{i=1}^N Y_i h_i = \sum_{i=1}^N Y_i \int_{T_{\text{ref}}}^T c_{p,i}(T^*) dT^* + \sum_{i=1}^N h_{f,i}^0 Y_i$$