

燃烧理论

(第二版)

〔美〕 F. A. 威廉斯 著

科学出版社

0643
W56
(2)

燃 烧 理 论

——化学反应流动系统的基础理论

(第二版)

(美)

W. A. 威廉斯

庄

远

杨本谦译

江苏工业学院图书馆

藏书章

科 学 出 版 社

1 9 9 0

内 容 简 介

本书系统地介绍有化学反应的流动系统的基础理论,对层流火焰、扩散火焰、气体爆震、单滴燃烧、液雾燃烧以及着火、熄火和可燃极限进行了理论研究。

本书的原版为第二版。它与第一版相比,每章都进行了修改和补充,重点改写和增添了湍流火焰理论、固体推进剂燃烧、燃烧不稳定性 and 火焰蔓延等内容,还补充了燃烧问题的渐近分析理论。书末有篇幅较大的附录,概述有关热力学、统计力学、化学动力学和气体分子输运性质方面的基础知识。

本书可供燃烧理论和化学流体力学方面的科研人员和研制各种发动机与燃烧装置以及从事防火防爆安全工作的工程技术人员参考,也可供高等院校有关专业师生阅读。

Forman A. Williams

COMBUSTION THEORY

The Fundamental Theory of

Chemically Reacting Flow Systems

Second Edition

The Benjamin/Cummings Publishing Company, Inc. 1985

燃 烧 理 论

——化学反应流动系统的基础理论

(第二版)

【美】F. A. 威廉斯 著

庄逢辰 杨本濂 译

责任编辑 李雪芹 陈文芳

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1976年12月第一版 开本: 850×1168 1/32

1990年6月第二版 印张: 22 1/2

1990年6月第二次印刷 字数: 585 000

印数: 6 011—6 870

ISBN 7-03-001594-0/TK·3

定价: 27.60 元

第二版前言

在本书第一版完成后的 20 年间,燃烧理论已经取得了显著的进展。由于这一进展,在大约 5 年前,当第一版绝版时人们就十分清楚,即使重新印刷该书也不能把读者带到本学科的前沿了。这表明需要对全书进行修订。当我着手修订时,却没有想到修订需要我花出与写第一版同样多的时间。虽然在第二版准备期间,得不到本书令人感到遗憾,但尽可能地搞好修订工作总比匆忙地交付印刷要好。因此,我考虑彻底地进行修改——没有一章是不加修改就保留下来的,那些过时的章节已经完全删除了,取代的是本学科中新的重要题材。

尽管如此,本书的总体格式和表述特点仍保持不变。必要的基础知识还出现在与第一版相同的五个附录中。与本书的其余部分相比,这些附录只需要作较少的改动,少数几节原封不动地保留下来。附录中的一些特殊变化主要是:考虑了电子计算机计算能力的巨大进展而对热化学平衡计算讨论的更新,给出了化学动力学中定常概念和部分平衡近似概念方面已经得出的解释,以及根据从渐近方法思想得出的理解对链锁爆炸和热爆炸讨论的详细说明,提出了火焰中烃的氧化和氧化氮生成的化学动力学的可以利用的最新资料,并将输运过程的论述扩大到包括附加的辐射能传递方面。给出了基本数学公式的第一章和第一版一样,对信心不足的读者来说仍然不可轻视。本书仍有十二章,但由于各领域中所取得的进展,特别是以后各章介绍了对有关内容所作的修改。

前六章的标题基本上和第一版中的相同。第一版的第七章主要讨论湍流火焰的实验,在第二版中,这一章已被删掉,而用大为充实的第十章来代替,它从最基本原理出发来研究湍流火焰理论。过去 20 年间理论上的显著进展已经使得这种研究成为可能。关

于湍流燃烧的内容,以前是在第七章中提出的,现在推后到第十章,因为新的知识部分地依赖于层流火焰不稳定性研究所得的各种结果(现在包括在第九章中)以及着火和熄火的研究(包括在第八章中)。第一版第十章中的单元推进剂滴的燃烧在这些年间的燃烧问题中已被认为不那么突出了,因而现在只是按类在第三章末尾作些简短的叙述,这一章包括了对燃料液滴燃烧的详细讨论。第一版第九章论述了固体推进剂燃烧理论和燃烧不稳定性理论;现在这两方面都已经取得了实质性的进展,故有必要分列两章即关于固体推进剂的燃烧的第七章和关于燃烧不稳定性的第九章来很好地研究这些内容。第八章的标题是着火、熄火和可燃极限,这和第一版的一样。第十一章的标题为喷雾燃烧也不变。为了把重点放在特定的应用领域,虽然将第十二章的标题“边界层中的化学反应”改成了“火焰附着和火焰蔓延”,但该章总的内容仍与第一版大致相同。

为了更透彻地说明已作的修改,最好对内容逐章地作些简短的讨论。第一章中的基本公式和第二章中跨过燃烧波的跳跃条件的推导跟第一版没有太大变化。因此,以下讨论集中在剩下的几章。

第三章关于扩散火焰和液滴燃烧的内容已经大大扩展了。例如,它包括了浮力和湍流对射流火焰影响的更多的考虑,碳表面氧化动力学的讨论,金属颗粒燃烧机理的研究,以及在第一版中没有论述过的液滴燃烧真实化的许多处理方法的材料,如辐射能传递的影响,在气相和凝聚相中非定常状态的出现,动量守恒的作用,变物性和 Le 不等于 1 的影响,评估强迫对流和自然对流影响的合适参考状态的选择,以及识别出现液滴爆裂性燃烧的条件等内容。此外,在第三章中还加进了扩散火焰结构和单元推进剂滴燃烧的章节,因为这些问题属于这章标题的内容范围,而对这些问题的理解已经有了明显的新进展;至于把混合分数作为一个重要的变量引入和应用渐近分析来描述诸如火焰薄层的扩展、着火和熄火这样更高层次的内容,从教学法上讲,应该放在提出了所需要

的基础概念的第五章以后学习。

第四章中关于可忽略分子输运的流动中的有限速率化学反应的内容，已经有了超出第一版的较小程度的扩充。着火延滞期和充分搅拌反应器的讨论多少已经扩展了一些，还增加了两相喷管流动的论述，而在本章的其余地方，在写作上的修改仅限于概念的更新。

对于最初同时论述分子输运和有限速率化学的层流火焰理论一章，根据这一问题的概念在基本原则上的进展，已经作了实质性的修改。数学分析上的渐近方法，特别是通常所说的活化能渐近法，大大深化了我们对层流火焰传播细节的理解。第一版中详细叙述的大多数针对某一问题的特定方法已经删掉，而代之以活化能渐近法的系统研究。由此得到的结果被用来解释层流火焰结构和火焰速度的许多以前使人困惑的性质。此外，还根据渐近概念和电子计算机计算能力的进展这两个方面，对多步化学的火焰和火焰中基的分布也作出了新的考虑。

由于爆震理论在 60 年代的迅速发展，第一版中第六章的爆震内容，即使在该书印刷之前，在某些方面也已是陈旧了。相反，在这一课题上的许多巨大进展，从现在来看似乎已经完成，并且在各种综述文章中已经作出评价。所以，为了准备第二版，我们对这一章所作的必要的大量修改，看来能够保留较长的一段时期。主要的变化和补充是从爆震传播中的三维结构的影响的讨论开始的。对螺旋爆震的关系、不稳定性机理、三重激波的相互作用和横向间距都给予了考虑。此外，还包括了可爆震极限和爆震失效的新的分析，并给出了爆震直接激发的准则，以及爆燃转爆震的过程的讨论。

第七章的固体推进剂燃烧大部分集中在均质固体推进剂的燃烧上。对由界面的凝聚相、气相和弥散相反应控制的燃烧，现在利用渐近方法的概念给予了考虑。所提到的具体例子包括硝化纤维和过氯酸铵的燃烧，注意力则放在推进剂燃烧速率的压力敏感性和温度敏感性两个方面。对复合推进剂燃烧理论的现状也作了评

价。黑火药的燃烧是作为一个特别有争议的理论问题来论述的，这个问题涉及人类已知的最早的推进剂。此外，还给出了侵蚀燃烧的讨论，其中包括在等截面通道中有质量加入的定常、无摩擦、绝热流动的方程。

第八章中着火、熄火和可燃极限问题的提法几乎在各个方面都作了修改。对这一问题的新的探讨，强烈地依赖于活化能渐近方法，由此我们相信，这种新方法既能加深理解，又能提高结果精度。在第一版中没有提出的课题有火花塞点火的物理观点的讨论，和通过作用在其表面上的恒定能通量使一个半无限反应性固体着火的问题，介绍在更复杂的着火问题中的活化能渐近法的应用。

第九章试图对燃烧不稳定性理论的广泛领域提供一个统一的和具有个别指导意义的说明。这一章的篇幅表明了这一领域的范围十分宽广和近几年来所取得的进展。其中最后一节预混火焰的不稳定性理论是分析预混湍流火焰传播的基础，而且还与可燃极限问题有关。

第十章湍流火焰理论的篇幅也很长，之所以必须如此，是因为对这一课题现在已有许多不同的观点和方法可以引用。这一章包括变形对层流火焰薄层的影响的分析讨论，层流火焰薄层本身以及与湍流燃烧有关的有意义的课题，还给出了非均匀流中层流火焰的发展方程。对湍流燃烧速度概述的结果强调了具有最强有力的基础理论证明的那些方面。因为湍流火焰理论是不断发展的一个课题，可以预料，在不太远的将来，这里提出的一些结果的改进会有用的。

第十一章中液雾燃烧主题的介绍与第一版中的没有太大不同。已经给出了关于这个题目的更新的展望，并且在守恒方程中已将公式推广到与时间有关。液雾燃烧的分析已经缩写，并且根据简化的物理推理将定性的结果预估出来了。此外，还补充了对喷雾透射和云雾燃烧专题的简明讨论。

最后一章还是主要研究边界层流动中的化学反应理论，由于

加进了时间相关的轴对称边界层方程的通用公式，从而为读者开始分析反应性边界层流动多样性提供了方便。这样，燃料平板在氧化剂气流中的燃烧问题就可作为应用通用关系式的一种说明，而不作为一个独立的问题提出。混合层中预混火焰发展的分析这里精简了，我们把这一问题处理为通过固体或流体达到火焰稳定的机理的更宽广课题的一部分。最后一节从一个简化的观点叙述了通过固体和液体燃料的火焰蔓延问题，这是新的内容。

这本专著的篇幅必然比第一版的要长得多，篇幅的增加主要是由于包括的范围扩大了。数学推导的细节并没有详述，相反，在许多方面只包括了更少的中间步骤。因此，一般来讲，读者必须在每页上花更多的时间，才能获得相同的理解深度。我认为，这是燃烧理论发展的必然结果。对于要在一门课程中包含适度的内容来讲，甚至第一版中的材料也是太多的。在 Princeton 大学，本书的部分内容已经在若干研究生课程中使用。当学生学完附录，第一、二、四章和第十二章的大部分内容，并且学习了第三、五章的更为定性的内容后，他们才能在一学期内消化本书余下的绝大部分。不同的内容顺序将适用于不同构思的课程。公正地说，大多数大学的教材不会包括所有这些内容，从这个角度看，本书还可作为本学科领域内的科研工作人员的参考书。

从第一版问世以来，又出版了若干有关燃烧的书籍。本书新版引用了其中许多内容，这些书籍的不少材料有助于选择多种观点。尽管文献目录肯定不齐全，但这一领域的进展显然已使第二版的参考文献更加广泛。对于我遗忘引用的重要文献我希望编辑能理解我工作量的巨大，从而原谅我的疏忽。为了尽量做到节省版面，将三种经常引用的文献缩写为：C & F 指 Combustion and Flame，CST 指 Combustion Science and Technology，and n'th Symp. 关于两年一次的国际燃烧会议论文集全称如下：

Proceedings of the First Symposium on Combustion and the Second Symposium on Combustion. The Combustion Institute, Pittsburg (1965), reprinted from Industrial and Engineer-

ing Chemistry (1928) and from Chemical Reviews (1937),

Third Symposium on Combustion and Flame and Explosion Phenomena, Williams and Wilkins Co., Baltimore (1949),

Fourth Symposium (International) on Combustion, Williams and Wilkins Co., Baltimore (1953),

Fifth Symposium (International) on Combustion, Reinhold Publishing Corp., New York (1955),

Sixth..., Reinhold Publishing Corp., New York (1957),

Seventh ..., Butterworths Scientific Publications, London (1959),

Eighth..., Williams and Wilkins Co., Baltimore (1962),

Ninth..., Academic Press, New York (1963),

Tenth..., The Combustion Institute, Pittsburgh (1965),

Eleventh... (1967), Twelfth... (1969), Thirteenth... (1971),
Fourteenth... (1973), Fifteenth... (1975), Sixteenth... (1977),
Seventeenth... (1979), Eighteenth... (1981), Nineteenth... (1982).

我感谢许多人对我准备第二版所给予的帮助。在技术资料方面和我进行有意义的讨论的同事和科学家的名字不胜枚举，如果我试图对他们都感谢的话，肯定会由于我疏忽而从名单中遗漏掉他或她的名字，从而造成对某些人的不尊重。然而，我不能不在这里说明一下，在加深我对燃烧理论的理解上，Amable Liñán 比其他任何人做出的贡献更多。甚至对于修改本书提出了特别有帮助的意见的人，我也不敢列举每个人名一一表示谢意。尽管如此，我还是想说，当我写完这本书时，一些日本燃烧科学家翻译了我的打字手稿，他们提出的意见被证明在促进我澄清英语的表达方面是很有用的。几乎所有的原始手稿都是由 Peggy Berger 打字的，我非常感谢她在五年多的时间里对我的耐心帮助。最后，我要对 Elizabeth 表示衷心的感谢，是她鼓励我专心致志地完成本书。

F. A. 威廉斯

1984年6月于新泽西州普林斯顿

第一版前言

本书介绍了流体流动中化学反应理论的系统发展结果。它既可作为高年级学生的教科书,也可供燃烧领域的科技工作者参考。作者力图使本书覆盖整个燃烧领域,而不仅包括作者曾经作过研究的那些部分。但是,本书必须着重强调燃烧的理论方面,只是在很必要的地方才讨论实验。由于在燃烧实验方面有许多优秀的专著,诸如 B. Lewis 和 G. von Elbe 的经典著作“Combustion, Flames and Explosions of Gases” (Academic Press, New York, 1st ed., 1951, 2nd ed., 1961), A. G. Gaydon 和 H. G. Wolfhard 合著的“Flames, Their Structure, Radiation and Temperature” (Chapman and Hall, Ltd., London, 1960) 和 W. Jost 的“Explosion and Combustion Processes” (McGraw-Hill, New York, 1946), 之所以如此处理看来是有道理的。熟悉这些专著中的材料将为开始学习燃烧理论的读者提供一个全面的观点。有关的实验工作也可在燃烧学会主办的每两年一次的国际燃烧会议的巨大的文集和“燃烧与火焰”杂志中找到。

本书的安排和开始写作的方法需要作一些解释。为了尽可能直接地进行主要课题的讨论,从一开始我就认为读者已具有理解燃烧理论所必须具备的科学基础知识。因此,预先假定读者具有数学(主要是对常微分方程和偏微分方程的透彻了解)、热力学、统计力学、化学动力学和分子输运理论的知识。为了帮助那些没有完全达到所有这些要求的读者学习,同时为便于查找本书所使用的有关基础知识,本书还提供了包含热力学和统计力学、化学动力学、流体动力学基本方程以及输运性质方面的详细附录。对于缺乏这些课程基础知识的学生来说,在开始学习本书之前,最好先学习有关附录,但是,气体动力学和热力学的某些基础知识以及应

用数学的全面知识,在任何情况下都是需要的,所以本书没有给出有关数学的附录,其它如热机循环分析,Reynolds 数(Re)和 Mach 数(M)的含义以及湍流概念等也被省略了。

虽然教学法的考虑涉及到本书材料的编排,但是主题内容本身决定了本书是更多地讲已经做了什么工作的书,而不是谈怎样去做的书。我希望通过解决某些问题和通过指出已经解决的和还没有解决的有关问题,将能为读者指明富有成效的研究方向和提出一些解决问题的有用方法。

本书虽然没有明确地给出家庭作业,但是诸如“可以表明”和“读者可以证明”等经常出现在教科书中的这类陈述,学生可以把它作为习题看待。

我的表述风格通常是扼要的推导,而不是无层次的归纳。也许,通过去掉对非常勉强的要点的描述和通常与教学法考虑有关的附加内容,我可为某些读者澄清一些可能混淆之处。

本书的写作是在 S. S. Penner 博士的鼓励下进行的。实际上,本书是在我作为哈佛大学助理教授并享有喷雾基础研究国家科学基金期间完成的。在此期间,我作为国家科学基金博士后成员在伦敦大学帝国学院度过了六个月,在那里,我的大部分时间用来写作本书。

我向和我讨论过这本书的同事们表示感谢。特别值得提出的是 William Nachbar 博士和 Howard W. Emmons 教授的提供资料的谈话。D. B. Spalding 提出了许多有益的建议,并在仔细地阅读了第一稿以后作了许多重要的改动。而在这里,我要特别感谢我的老师 S. S. Penner 博士,他写了一些章节的初稿,并且给予我经常的鼓励和帮助。

对于我的家属的耐心,我也理应表示感谢。

F. A. 威廉斯

1964 年 6 月于加利福尼亚州 拉霍亚

目 录

第二版前言

第一版前言

第一章 流体动力学和化学动力学的有关方面的概述	1
1.1 多组元有反应理想气体混合物的守恒方程	2
1.2 一维流动	5
1.2.1 非定常流动	5
1.2.2 定常流动	8
1.3 耦合函数	10
1.4 界面上的守恒条件	15
1.5 燃烧理论进一步发展所采取途径的讨论	20
第二章 Rankine-Hugoniot 关系	21
2.1 一般的 Rankine-Hugoniot 方程	21
2.1.1 方程的推导	21
2.1.2 冷边界困难	24
2.1.3 Rankine-Hugoniot 方程的使用	25
2.2 简化系统的分析	26
2.2.1 Rankine-Hugoniot 方程的简化	26
2.2.2 无量纲形式	28
2.2.3 Hugoniot 曲线的性质	29
2.2.4 对爆震分支的分析	30
2.2.5 对爆燃分支的分析	30
2.2.6 Chapman-Jouguet 波的性质	33
2.3 结果向任意系统的推广	36
2.3.1 2.2 节中的结果的有效范围	36
2.3.2 冻结音速与平衡音速的比较	36
2.3.3 在 Chapman-Jouguet 点上 $v_{\infty} = a_{e,\infty}$ 的证明	38
2.3.4 Hugoniot 曲线性质的小结	40

第三章 扩散火焰和液滴燃烧	41
3.1 导管管道出口处的火焰	42
3.1.1 问题的定义	42
3.1.2 假设	42
3.1.3 耦合函数 β 的组元守恒方程的解	43
3.1.4 火焰形状和火焰高度	45
3.1.5 火焰表面近似	47
3.1.6 其余近似的有效性	48
3.1.7 关于公式和分析的说明	49
3.2 导管壁上碳的氧化	51
3.2.1 问题的定义	51
3.2.2 碳燃烧的特性	52
3.2.3 分析	54
3.3 燃料颗粒在氧化性介质中的燃烧	56
3.3.1 问题的基本情况和定义	56
3.3.2 假设	58
3.3.3 预言燃烧速率的分析	60
3.3.4 燃烧速率公式的讨论	63
3.3.5 液滴燃烧的其他特性预估	65
3.3.6 液滴燃烧的进一步真实化	67
3.4 火焰薄层的结构	74
3.4.1 结构问题的研究	74
3.4.2 混合分数变量	78
3.4.3 活化能渐近法	82
3.4.4 着火和熄火	87
3.5 单元推进剂滴的燃烧	92
第四章 可忽略分子输运的流动中的反应	94
4.1 着火延滞和充分搅拌的反应器	94
4.2 定常准一维流动中的反应	98
4.2.1 定常准一维守恒方程	98
4.2.2 火箭发动机的比冲	101
4.2.3 近平衡和近冻结流动	103
4.2.4 对组元 A 和 B 仅以微量出现的 $A \rightleftharpoons B$ 反应中的应用	105

4.2.5	反应的冻结	108
4.2.6	喷管两相流动	109
4.3	非定常三维流动中的反应	112
4.3.1	守恒方程;特征面	112
4.3.2	定常二维(轴对称和平面)流动的特征线方法	117
4.3.3	一维非定常流动的特征线方法	123
4.3.4	对有化学反应 $A \rightleftharpoons B$ 的二元化学反应理想气体 混合物中的一维非定常声传播	124
4.3.4.1	预备关系式	124
4.3.4.2	线性化	125
4.3.4.3	简化成单一的偏微分方程	126
4.3.4.4	色散关系	128
4.3.4.5	初值问题	129
4.3.4.6	有关的问题	132
第二章 层流火焰理论		133
5.1	层流火焰的描述	134
5.1.1	实验	134
5.1.2	爆燃波的唯象分析	137
5.2	数学公式	139
5.2.1	引言	139
5.2.2	预先的假设和方程组	139
5.2.3	对能量方程进一步简化的近似	141
5.2.4	二元混合物中单分子反应的能量方程和扩散方程 的化简	142
5.2.5	$Le = 1$ 时扩散方程的解	144
5.2.6	动量方程和组元守恒方程的无量纲形式	144
5.2.7	简化数学问题的小结	146
5.3	Le 为 1 的单分子分解火焰	146
5.3.1	控制方程	146
5.3.2	冷边界困难	148
5.3.3	燃烧速率本征值的范围	153
5.3.4	迭代过程和变分方法	155
5.3.5	Zel'dovich, Frank-Kamenetskii 和 Von Kármán 的	

近似.....	157
5.3.6 强温度相关速率的渐近分析	159
5.3.7 其他火焰的推广	165
5.4 多步化学反应的火焰	170
5.4.1 问题的基本情况和性质的讨论	170
5.4.1.1 公式	170
5.4.1.2 分析的目的	172
5.4.1.3 文献	173
5.4.1.4 燃烧速度计算	176
5.4.2 推广的定常近似	178
5.4.3 反应中间物的守恒方程	179
5.4.4 推广的定常近似的可用性判据	180
5.4.5 检验定常近似的分析方法	181
5.4.6 各种火焰结构理论的评述	183
第六章 爆震现象	185
6.1 平面爆震结构	186
6.1.1 控制方程	186
6.1.2 控制方程的性质	186
6.1.2.1 奇点的位置	187
6.1.2.2 奇点邻域的解	190
6.1.2.3 积分曲线的一般性质	192
6.1.3 关于爆燃的几点说明	193
6.1.4 爆震结构的近似解	195
6.1.5 关于爆震波结构的讨论	196
6.1.6 ZND 爆震结构	199
6.2 在管道中移动着的爆震波的传播速度	202
6.2.1 对平面波的基本考虑	202
6.2.2 有关弱爆震的进一步说明	203
6.2.3 管壁的影响	204
6.2.4 与冻结音速和平衡音速有联系的混淆	206
6.2.5 三维结构的影响	208
6.2.6 激波管中激波后的化学反应	208
6.3 爆震波的横向结构	209

6.3.1	螺旋爆震和稳定性考虑	209
6.3.2	横向结构理论	213
6.3.3	驻定爆震波	217
6.3.4	可爆震极限和冷熄厚度	218
6.3.5	从爆燃向爆震的转变	222
6.4	固体、液体和液雾中的爆震	225
第七章	固体推进剂的燃烧	228
7.1	均质固体的稳态燃烧描述	229
7.2	过渡态理论的应用	231
7.3	界面上的平衡方法	234
7.4	由凝聚相反应速率控制的燃烧	237
7.5	由气相反应速率控制的燃烧	242
7.6	弥散现象及其它影响	248
7.7	异质推进剂的燃烧	250
7.8	侵蚀燃烧	257
第八章	着火、熄火及可燃极限	261
8.1	最小点火能和冷熄距离	263
8.2	有热损失的预混火焰	267
8.2.1	分析方法	267
8.2.2	两个火焰速度的存在	273
8.2.3	可燃浓度极限	274
8.2.4	可燃压力极限	275
8.2.5	热损失估算	276
8.3	着火理论中的活化能渐近法	281
第九章	燃烧不稳定性	289
9.1	固体推进剂火箭发动机中的声学不稳定性	290
9.1.1	振荡方式	290
9.1.2	声能的守恒	293
9.1.3	声导纳	297
9.1.4	阻尼机理	300
9.1.4.1	相对重要性	300
9.1.4.2	喷管阻尼	301
9.1.4.3	壁阻尼	303

9.1.4.4 均质阻尼	305
9.1.4.5 固体振动	305
9.1.4.6 张弛阻尼	308
9.1.4.7 颗粒阻尼	309
9.1.5 放大机理	311
9.1.5.1 相对重要性	311
9.1.5.2 放大准则	312
9.1.5.3 时滞理论	315
9.1.5.4 燃烧响应	316
9.1.5.5 异质性效应	320
9.1.6 非线性效应	321
9.2 燃烧固体的固有振荡	326
9.3 液体推进剂火箭发动机中的振荡燃烧	335
9.4 燃烧装置中的系统不稳定性	338
9.5 预混火焰中水力学的和扩散的不稳定性	341
9.5.1 由渐近方法得出的公式	341
9.5.2 网眼状火焰	351
9.5.2.1 体积力不稳定性	351
9.5.2.2 水力学的的不稳定性	354
9.5.2.3 扩散-热不稳定性	359
第十章 湍流火焰理论	369
10.1 概率描述	371
10.1.1 概率密度泛函	371
10.1.2 平均	373
10.1.3 概率密度函数的性质	377
10.1.4 Fourier 分解	382
10.1.5 湍流尺度	385
10.2 湍流扩散火焰	390
10.2.1 分析对象	390
10.2.2 耦合函数的应用	392
10.2.3 微量组元的产生	401
10.2.4 平均热释放率	404
10.2.5 变形对火焰薄层的影响	408