

PRINCIPLES OF COMBUSTION
KENNETH K. KUO

燃烧原理

[美] K. K. 肯尼斯 著
郑楚光 袁建伟 米建春 译
马毓义 校

华中理工大学出版社

燃烧原理



〔美〕 K. K. 肯尼斯 著

郑楚光 袁建伟 米建春 译

马毓义 校

华中理工大学出版社

燃 烧 原 理

〔美〕 K.K. 肯尼斯 著
郑楚光 袁建伟 米建春 译
马毓义 校
责任编辑 易秋明

•

华中理工大学出版社出版发行
(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销
武汉大学出版社印刷总厂印刷

•

开本: 787×1092 1/16 印张: 31 插页: 2 字数: 704 000

1991年9月第1版 1991年9月第1次印刷

印数: 1~1 000

ISBN 7-5609-0540-4/TK·20

定价: 8.40元

序

近十年来,国内外燃烧学的研究发展迅速,成果累。然而已问世的燃烧专著中,能全面、系统而又综合地论述最新研究成果的,尚不多见,而同时又能作为近代燃烧学教材的著作,尤为难得。

《燃烧原理》一书,是美国1986年出版的最新著作,也是一本系统深入的燃烧理论专著。它在介绍相关实验技术和成果的同时,着重论述燃烧现象的物理本质和物理模型,尤其重视借助计算机求解燃烧过程的数学描述。这些内容大多体现了近年来的最新研究成果和发展方向。此外,本书还举出了运用燃烧理论去解决实际问题的例子,阐明了理论模型的应用背景,而这又恰是一般燃烧学教材所缺乏的。

从本书的取材与编排以及教学与科研的要求来看,它确是一本较好的燃烧学教材,可供有关专业的研究生和四年级本科生使用。而对于从事燃烧学教学和科研的人员以及广大的工程技术人员也是一本极有实用价值的参考书。

马毓义

一九九〇年八月

内 容 提 要

《燃烧原理》是美国1986年出版的最新著作，它是一本系统深入的燃烧理论专著。在介绍相关实验技术和成果的同时，着重论述燃烧现象的物理本质和物理模型，尤其重视借助计算机求解燃烧过程的数学描述。此外，本书还举出了运用燃烧理论去解决实际问题的例子，阐明了理论模型的应用前景。

本书介绍了用于动力、喷气和火箭推进器、火灾防护、污染控制、材料加工等方面的化学反应流动系统的基础知识，内容包括燃烧的物理化学基础；多组分有反应流体的基本守恒方程组；缓燃与爆燃；层流预混火焰；层流射流扩散火焰及其模化方法；液雾和固体燃料的两相流燃烧边界层中的燃烧反应流；着火等。

本书可作动力、航空、化工、冶金和环保等专业研究生和本科生的教材，也可作有关专业教学和科学研究工作者及工程技术人员参考。

前 言

现今的燃烧工程技术人员和科学家常常面临着一些十分复杂的现象；它们与诸如流体流动、传热传质、化学动力学、热力学及湍流等过程密切相关，深入认识这些相关过程的基本概念将给科技人员提供解决各种燃烧问题的工程背景和训练。本书介绍了广泛应用于动力生产、喷气和火箭推进气、火灾防护、污染控制、材料加工等方面的及化学反应流动系统的基础知识。

由上述的应用范围可以看出，燃烧学是一个广泛而重要的领域。虽然以往已经研究过许多理想的燃烧问题，并且能以简化的数学形式求解，但至今仍有大量的实际燃烧现象还不能精确求解。实际过程比以往所考虑的理想状况的确复杂得多，而对燃烧领域中的实际问题的研究工作，还只是刚刚开始。对相互耦合过程的数学描述和求解，在今后必将，而且应该愈加受到重视。因此对化学反应系统中的热量、质量以及动量交换的认识和了解是十分必须的。

有关燃烧的著作还为数不多，并且其中大多未能包括当今的主要发展成果；另一些书，作为通用燃烧教材则又失之太专，太深。近年来，我一直从事大学燃烧学课程的教学工作，深切感到，一部能综合描述现代燃烧学发展的书是十分需要的。为此，我搜集了大量的文献资料，作为这本教材的素材，本书正是在对这些素材不断地选裁和修定而写成的。

现有的燃烧著作的另一缺陷是缺乏展示理论应用的例子。本书中，尤其是介绍燃烧基础理论方面的前几章中，为了帮助读者熟悉有关燃烧的基本概念而给出了许多例子。

全书采用了公制单位。

本书既适于作本科生，也适于作研究生的燃烧学教材。讲授全部内容一般需要两个学期，建议将第一~六章安排在第一学期，第七~十章安排在第二学期。本书在介绍相关实验技术和成果的同时，注重了对燃烧理论模型的描述，尤其注重对能用计算机求解的燃烧问题的数学描述。并且注意到，燃烧学科的迅速发展已经排除了企图给出一种包罗所有理论模型的统一模型的可能性。

全书共有十章，每章都附有习题或综合练习，大部分章节都引入了新的符号表。书首所给出的有关燃烧模型的简短而明晰的绪言向读者综述了燃烧模型的要求、基本组成和应用状况。第一~三章是燃烧学的基础知识，即化学热力学、化学动力学以及多组分反应流的守恒方程组；第四章介绍了预混可燃气中的缓震波以及爆震的传递；第五章是层流预混火焰；第六章是层流射流扩散火焰和单液滴燃烧；第七章讨论湍流火焰及其模化方法；液体燃料的喷流雾燃烧及固体颗粒在流动中的燃烧过程放在第八章中；第九章介绍各种型式的边界层中化学反应流；最后一章概述了与燃烧密切相关的着火现象。

那些了解我主要是从事固体燃料推进燃烧研究的人们，见到本书涉及的内容一定会感到吃惊，我必须指出：该领域的近代发展现状已经由许多专家进行了综述，这些内容都收集在由Martin Summerfield和我编辑的题为“固体推进燃烧基础”一文中，该文于1984年12月由

AIAA出版,发表在AIAA进展丛书第90卷中。

在此,我特别感谢我的同事Gerard M. Faeth教授,他不仅热情鼓励我编写本书,而且为本书的改进提出了许多有价值的建议,他所提供的大量有关喷雾燃烧的资料是十分有用的,并成为第八章喷雾燃烧的主要组成部分,在此领域内,他和他的同事做出了许多有意义的贡献。我还应感谢美国导弹研究室(BRL)的Kevin White博士及Leland A. Watermeier先生在我休假期中为BRL组织的燃烧讲学班,通过此次讲学,使我从许多燃烧科学家及工程技术人员那里获得了有价值的营养。此外,还要感谢BRL的Joseph M. Heimerl所作的有意义的建议和评论,讲习班上的所有学员对我的教材的改进也作出了积极的贡献,正是他们的期末论文和设计,才使得我得以将许多最新理论模型和实际技术问题结合起来。对Louis K. Chang博士在绘制本书大量图表所做的辛勤努力以及Mary Jane Coleman夫人在打印和抄写上给予的帮助亦应表示衷心的感谢。最后,当然这决不意味着最次要,还要感谢我的夫人Olivia对我的理解、钟爱和耐心,感谢我的女儿Phyllis和Angela在我承担这种费时但也是愉快的写作过程中所给予我的爱戴和期望。

Kenneth K. Kuo 于Pennsylvania校园

1986年3月

目 录

导论 (郑楚光译)

第一章 化学热力学概述 (袁建伟译) (4)

符号说明	(4)
1. 热力学定律的论述	(6)
2. 状态方程	(7)
3. 质量守恒	(7)
4. 热力学第一定律; 能量守恒	(9)
5. 热力学第二定律	(11)
5.1 平衡热力学	(11)
5.2 非平衡热力学	(12)
6. 平衡准则	(18)
7. 原子类的守恒	(19)
8. 确定反应物份额的规定	(20)
9. 标准生成热	(22)
10. 热化学定律	(25)
11. 键能和生成热	(26)
12. 反应热	(28)
13. 绝热火焰温度的计算	(43)
14. 平衡常数	(47)
15. 有效压力和活性	(59)
16. 碳氢化合物燃烧时更复杂的离解	(60)
17. Clausius-Clapeyron方程; 相平衡	(61)
18. 用NASA-Lewis 程序计算复杂平衡	(65)
18.1 假设和性能	(65)
18.2 描述化学平衡的方程	(66)
18.2.1 热力学方程	(66)
18.2.2 吉布斯自由能的极小值化	(67)
参考文献	(68)
作业	(69)

第二章 化学动力学概述 (袁建伟译) (72)

符号说明	(72)
------------	--------

1. 反应速率及其影响因素.....	(72)
1.1 总碰撞频率.....	(74)
1.2 Arrhenius方程.....	(75)
1.3 表观活化能.....	(76)
1.4 反应速率.....	(77)
2. 不同级数的单步化学反应.....	(80)
2.1 一级反应.....	(80)
2.2 二级反应.....	(81)
2.3 三级反应.....	(82)
3. 连续反应.....	(83)
4. 并列反应.....	(84)
5. 可逆反应.....	(84)
5.1 逆反应为一级的一级反应.....	(85)
5.2 逆反应为二级的一级反应.....	(86)
5.3 逆反应为二级的二级反应.....	(86)
6. 链式反应.....	(87)
6.1 自由基.....	(87)
6.2 一级反应的Lindemann理论.....	(88)
6.3 氢-溴反应.....	(89)
7. 链分支爆炸.....	(91)
8. 爆炸极限.....	(93)
8.1 H_2-O_2 系统.....	(93)
8.2 $CO-O_2$ 系统.....	(94)
9. 用无因次参量表示的等温反应的速率定律.....	(95)
9.1 平衡常数.....	(95)
9.2 化学组分生成的净速率.....	(97)
10. 求解复杂化学动力学系统的最新方法.....	(97)
10.1 求解常微分方程组 (ODES) 的数值程序.....	(97)
10.1.1 时间常数的定义.....	(98)
10.1.2 常见的误差类型.....	(98)
10.1.3 刚性的来源.....	(98)
10.1.4 隐式和显式的数值方法.....	(98)
10.1.5 常用的ODE求解程序的一些特性.....	(99)
10.2 求解PDE的程序包.....	(99)
参考文献.....	(99)
作业.....	(100)

第三章 多组分反应系统的守恒方程 (袁建伟译)..... (103)

符号说明.....	(103)
1. 浓度、速度和质量的定义.....	(104)
2. Fick扩散定律.....	(105)

3. 稀薄气体中的常态扩散理论	(106)
4. 连续性方程	(107)
5. 动量方程	(110)
5.1 用应力表示的动量方程	(110)
5.1.1 无限小质点	(110)
5.1.2 无限小控制体	(112)
5.1.3 有限控制体	(113)
5.2 应力—应变速率关系式(基本关系式)	(114)
5.2.1 应变率	(114)
5.2.2 应力	(115)
5.3 Navier-Stokes方程	(117)
6. 能量守恒	(124)
7. 多组分扩散方程的推导	(129)
8. 多组分系统中其它必须的方程	(131)
9. 多组分系统的求解	(132)
10. Shvab-Zel'dovich公式	(132)
11. 输运系数的无因次比	(135)
12. 交界面的边界条件	(136)
参考文献	(143)
作业	(143)
综合练习	(144)

第四章 预混气体燃烧中的爆燃波和缓燃波(郑楚光译).....(145)

符号说明	(145)
1. 爆燃和缓燃的根本差异	(146)
2. Hugoniot 曲线	(146)
3. Hugoniot曲线的特征	(149)
3.1 沿Hugoniot曲线的熵值分布	(151)
3.2 爆燃波后已燃气流速度与当地音速的比较	(152)
4. Chapman-Jouguet爆燃波速的确定	(157)
4.1 逐次逼近法	(157)
4.2 Newton-Raphson迭代法	(159)
4.3 爆燃波速度的计算值和实验值的比较	(161)
5. 爆燃波的结构	(163)
5.1 ZND—维爆燃波结构	(163)
5.2 多维爆燃波结构	(164)
6. 可燃混合物中缓燃—爆燃转换(DDT)机理	(166)
7. 爆燃性与化学动力学:爆燃极限	(170)
参考文献	(173)
作业	(176)

综合练习	(177)
------------	---------

第五章 预混层流火焰 (郑楚光译) (178)

符号说明	(178)
1. 前言	(178)
2. 热理论: Mallard-Le Chatelier 分析法	(180)
3. 综合理论: Zel'dovich, Frank-Kamenetsky 和 Semenov 模型	(181)
4. Tanford-Pease 扩散理论	(185)
5. 求解层流火焰问题的近代方法	(187)
6. 化学物理参数对火焰速度的影响	(191)
6.1 化学参数	(191)
6.1.1 混合比的影响	(191)
6.1.2 燃料分子结构的影响	(192)
6.1.3 添加剂的影响	(193)
6.2 物理参数	(193)
6.2.1 压力的影响	(193)
6.2.2 初温的影响	(193)
6.2.3 火焰温度的影响	(194)
6.2.4 热扩散系数和比热的影响	(194)
7. 火焰速度的测量方法	(195)
7.1 Bunsen 灯法	(195)
7.2 透明管法	(196)
7.3 定容球弹法	(197)
7.4 肥皂泡法 (定压法)	(197)
7.5 粒子示踪法	(198)
7.6 平面火焰燃烧器法	(198)
8. 层流流动中燃烧波的稳定原理	(199)
9. 火焰的猝熄	(200)
10. 预混层流火焰的稳定极限	(202)
10.1 用标准玻璃管确定火焰稳定极限	(202)
10.2 压力和温度对可燃极限的影响	(203)
10.3 可燃极限和火焰猝熄的 Spalding 理论	(204)
参考文献	(209)
作业	(211)

第六章 气体扩散火焰和单颗液滴的燃烧 (郑楚光译) (213)

1. Burke-Schumann 层流扩散火焰理论	(213)
1.1 基本假设和求解方法	(216)
1.2 火焰形状和火焰高度	(217)

2. 燃料射流的表观分析	(218)
3. 层流射流扩散火焰	(219)
3.1 层流射流的混合	(219)
3.2 带化学反应的层流射流	(223)
4. 静止大气中的单滴燃烧	(225)
4.1 单颗燃料液滴的蒸发	(227)
4.2 单颗燃料液滴的燃烧速率	(230)
5. 对流环境中的燃料液滴	(232)
6. 液滴在静止空间中的超临界燃烧	(233)
7. 内回流对液滴蒸发速度的影响	(237)
参考文献	(239)
作业	(240)
综合练习	(241)

第七章 湍流火焰 (米建春译) (243)

符号说明	(243)
1. 前言	(243)
2. 描述湍流火焰的唯象法	(245)
2.1 Damköhler分析法	(245)
2.2 Schelkin分析法	(246)
2.3 Karlovitz分析法	(247)
2.4 Summerfield分析法	(247)
2.5 Kovasznay的特征时间法	(248)
3. 湍流基础	(248)
3.1 传统时间平均和质量加权平均	(249)
3.2 传统时均量与质量加权平均量之间的关系	(253)
3.3 质量加权平均的守恒及输运方程	(254)
3.3.1 连续方程与动量方程	(254)
3.3.2 能量方程	(254)
3.3.3 平均动能方程	(255)
3.3.4 雷诺应力输运方程	(256)
3.3.5 湍流动能方程	(257)
3.3.6 组分守恒方程	(257)
3.4 旋涡对湍流火焰的影响	(258)
4. 湍流火焰研究中概率密度函数的应用	(259)
4.1 概率密度函数	(260)
4.1.1 测度	(261)
4.1.2 Lebesgue积分	(261)
4.1.3 分布函数	(261)
4.1.4 PDF的定义	(262)
4.2 联合分布函数和联合概率密度函数	(264)

4.3 用于湍流火焰中的几种形式的概率密度函数	(266)
4.3.1 混合份额随时间的矩形波变化	(266)
4.3.2 截断高斯分布	(266)
4.3.3 截断高斯分布型PDF的替代形式	(267)
4.3.4 β -概率密度函数	(267)
4.3.5 混合份额和反应程度变量的联合PDF	(267)
4.3.6 学生t-分布	(267)
5. 湍流模型	(268)
5.1 应力张量各分量方程的直接封闭	(268)
5.2 双方程模型	(269)
6. 间歇率和粘附结构	(270)
6.1 间歇率	(270)
6.2 粘附结构	(271)
7. 具有非预混反应物的湍流反应流(湍流扩散火焰)	(272)
7.1 守恒标量法	(272)
7.1.1 守恒标量、混合份额以及快速反应假设	(273)
7.1.2 守恒标量的概率密度函数	(276)
7.1.3 反应速率和反应区结构	(277)
7.1.4 扩散火焰中污染物的形成	(279)
7.2 双变量法	(279)
7.2.1 Janicka和Kollmann模型	(279)
7.2.2 用第二变量对化学生成项封闭	(280)
7.2.3 Bilger的扰动分析法	(281)
7.3 直接封闭法	(283)
7.3.1 矩封闭法	(283)
7.3.2 PDF封闭法	(284)
7.4 Lundgren, Monin和Novikov的概率统计法	(285)
7.4.1 Lundgren建立的PDF方程	(285)
7.4.2 湍流PDF的封闭	(287)
7.4.3 Favre平均的单元联合PDF输运方程	(287)
7.5 Spalding的ESCIMO理论	(288)
8. 预混反应物的湍流反应流动	(289)
8.1 Spalding旋涡破碎模型	(289)
8.1.1 气体团的形成和粘附	(290)
8.1.2 小尺度火焰的传播	(290)
8.1.3 R^* 的不变性	(290)
8.1.4 ζ 的不变性	(291)
8.1.5 生存谱	(291)
8.1.6 反应速率关系的分析	(291)
8.1.7 反应速率关系的讨论	(292)
8.2 Bray和Moss的统计模型	(293)
8.3 Chorin, Ghoniem和Oppenheim的随机涡方法	(298)
9. 湍流预混火焰扭曲面的特征尺度	(301)
9.1 纹影照相	(302)

9.2 扭曲层流火焰结构的观察	(302)
9.3 未燃和已燃气体团尺度的测量	(303)
9.4 扭曲面的长度尺度	(304)
参考文献	(305)
作业	(311)
综合练习	(311)

第八章 两相流系统中的燃烧(郑楚光译) (314)

符号说明	(314)
1. 喷雾燃烧概述	(315)
2. 喷雾燃烧系统	(315)
3. 燃料的雾化	(317)
3.1 喷嘴型式	(317)
3.2 雾化特性	(318)
4. 喷雾静力学	(318)
4.1 颗粒的特征描述	(318)
4.2 分布函数	(318)
4.2.1 对数概率分布函数	(320)
4.2.2 Rosin-Rammler分布函数	(320)
4.2.3 Nukiyama-Tanasawa分布函数	(320)
4.2.4 Mugele-Evans上限分布函数	(321)
4.3 分布函数的输运方程	(322)
4.4 液体燃料火箭发动机喷雾燃烧的简化模型	(322)
5. 液雾燃烧的特征	(324)
6. 喷雾燃烧过程模型分类	(328)
6.1 关系式	(328)
6.2 液滴弹导模型	(328)
6.3 一维模型	(329)
6.4 搅拌反应器模型	(329)
6.5 局部均相流模型(LHF)	(330)
6.6 分离流(两相流)模型	(330)
7. 局部均相流模型	(331)
7.1 LHF模型的分类	(331)
7.2 LHF模型的数学表达式	(333)
7.2.1 基本假设	(333)
7.2.2 状态方程	(333)
7.2.3 守恒方程	(336)
7.2.4 湍流输运方程	(339)
7.2.5 边界条件	(340)
7.2.6 求解过程	(340)
7.2.7 LHF模型预测值与试验值的比较	(342)

8. 分离流(两相流)模型.....	(348)
8.1 单元内颗粒源模型(离散液滴模型)	(348)
8.1.1 确定型分离流模型(DSF)	(349)
8.1.2 随机分离流模型(SSF)	(351)
8.2 SSF和DSF模型计算结果讨论	(353)
9. 分组燃烧模型.....	(355)
9.1 分组燃烧准则	(356)
9.2 喷雾火焰中分组燃烧模式	(357)
10. 多相系统的连续介质力学方法.....	(358)
11. 流化床中固体粒子的燃烧.....	(362)
11.1 引言	(362)
11.2 两相流体动力学模型	(363)
11.2.1 气相质量方程	(363)
11.2.2 固相质量方程	(364)
11.2.3 气相动量方程	(364)
11.2.4 固相动量方程	(365)
11.2.5 气相能量方程	(367)
11.2.6 固相导热方程	(368)
11.2.7 状态方程	(369)
11.2.8 颗粒燃料动态床中燃烧过程的边界条件	(369)
11.3 虚拟平均方法	(369)
11.3.1 定义	(370)
11.3.2 连续性方程	(371)
11.3.3 动量方程	(372)
参考文献	(373)
作业	(381)

第九章 带化学反应的边界层流动(米建春译) (382)

符号说明	(382)
1. 前言	(382)
1.1 反应边界层流动的应用	(383)
1.2 研究中应用的高温试验装置	(383)
1.3 理论方法和边界层分类	(383)
1.4 历史回顾	(383)
2. 二维反应边界层流动的控制方程.....	(386)
3. 边界条件.....	(389)
4. 化学动力学.....	(391)
4.1 均相化学反应	(391)
4.2 多相化学反应	(393)
5. 具有表面反应的层流边界层流动.....	(394)
5.1 控制方程和边界条件	(394)
5.2 转换到 (ξ, η) 的坐标系	(395)

5.3 控制方程和自相似解的分离条件	(397)
5.4 表面反应的Damköhler数	(397)
5.5 滞止区附近石墨的表面燃烧	(398)
6. 气相反应的层流边界层流动	(401)
6.1 控制方程和坐标转换	(401)
6.2 气相反应的Damköhler数	(402)
6.3 向轴对称情况的推广	(403)
7. 有化学反应的湍流边界层流动	(403)
7.1 引言	(403)
7.2 Evans的边界层积分矩阵法	(404)
7.2.1 通用守恒方程	(404)
7.2.2 分子输运特性	(406)
7.2.3 湍流输运特性	(408)
7.2.4 状态方程	(412)
7.2.5 积分矩阵求解方法	(412)
7.2.6 BLIMP分析的限制条件	(412)
7.3 Patankar和Spalding的向前积分法	(413)
7.3.1 物理模型的描述	(413)
7.3.2 粘性流动区的守恒方程	(413)
7.3.3 气相化学反应的模拟	(414)
7.3.4 非粘性区域的控制方程	(414)
7.3.5 边界条件	(415)
7.3.6 κ 和 ϵ 的近壁处理	(415)
7.3.7 湍流模拟中使用的常数	(416)
7.3.8 坐标变换及Patankar和Spalding求解方式	(416)
7.3.9 理论结果与试验数据的比较	(418)
7.4 炽热活性气体对金属的侵蚀	(421)
7.5 火箭发动机上石墨喷嘴的空气热化学侵蚀	(425)
7.6 湍流壁面火焰	(431)
7.6.1 Ahmad和Faeth使用的试验方法	(433)
7.6.2 Ahmad-Faeth研究成果的进一步发展	(434)
7.6.3 壁面火焰的研究结果	(436)
参考文献	(439)
作业	(446)

第十章 着火(袁建伟译)

(447)

1. 前言	(447)
2. 着火的激发及装置	(448)
3. 自燃	(448)
3.1 热自燃	(448)
3.2 各种参数对自燃温度的影响	(451)
4. 固体推进剂的着火	(452)

5. 液体燃料雾在流动空气流中的着火	(457)
5.1 Subba, Rao和Lefebvre的试验装置和最小点火能的概念	(457)
5.2 流动空气系统中煤油雾的着火	(458)
5.3 液体燃料雾中淬熄距离和最小点火能的Lefebvre蒸发模型	(460)
6. 碳粒子的着火	(463)
7. 炽热的氧化性气流中固体燃料上的着火和火焰传播	(471)
7.1 实验研究	(471)
7.2 理论描述	(473)
7.2.1 基本假设	(473)
7.2.2 控制方程	(474)
7.2.3 边界条件和初始条件	(474)
7.2.4 转换为相似坐标	(475)
7.2.5 求解方法	(476)
7.3 着火和火焰传播的结果	(477)
参考文献	(478)
综合练习	(480)

附录 燃烧问题中常用的常数和转换因子