

燃 烧 理 论

——化学反应流动系统的基础理论

(美) F. A. 威 廉 斯 著

李荫亭 贾文奎 译

卞 荫 贵 校

科 学 出 版 社

1 9 7 6

内 容 简 介

本书系统地讨论了有化学反应的流动系统的基本理论。从最一般的流体力学方程组出发,对层流火焰、气体爆震、单滴燃烧、液雾燃烧以及喷管流动和边界层中的化学反应等进行了系统的理论研究。对湍流火焰、点火和熄火、固体推进剂的燃烧及燃烧不稳定性等尚无十分成熟理论模型的课题,也作了一个简要的评述。书末还有一个篇幅较长的附录,对理解燃烧理论必须掌握的有关热力学、统计力学、化学动力学、流体动力学和气体分子输运性质等方面的基础知识作了一个比较实用的概述。

本书可供燃烧理论和化学流体力学等方面的科研人员以及研制火箭发动机和设计各种燃烧装置的工程技术人员参考,也可供高等院校有关专业的师生阅读。

FORMAN A. WILLIAMS
COMBUSTION THEORY
ADDISON-WESLEY PUBLISHING CO. INC.
1 9 6 5

燃 烧 理 论

[美] F. A. 威廉斯 著
李荫亭 贾文奎 译
卞 荫 贵 校

*

科学出版社出版
北京朝阳门内大街 137 号

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
1976年12月第一次印刷 印张: 14 1/8
印数: 0001—6,010 字数: 366,000

统一书号: 13031·131
本社书号: 706·15—10
定价: 1.75 元

译 者 的 话

随着航空和火箭技术的发展,对发动机中燃烧现象的研究有了很大的进展,也出现了不少燃烧学的专著,它们从各种不同的角度归纳总结了燃烧方面的实验和理论研究的结果。

本着“洋为中用”的原则,我们翻译了本书以供读者参考。

本书从流体力学基本方程组出发,对各种燃烧现象进行了深入的理论分析。内容比较全面和系统,数学推导也较详细,但是对现象的描述和实验结果的分析,则嫌不足。为此,建议初学燃烧学的读者,首先阅读有关燃烧实验方面的著作。

由于译者水平有限,书中错误在所难免,恳切希望读者批评指正。

1973 年于北京

目 录

第一章 基础流体动力学和化学动力学概要	1
§ 1 引言	1
§ 2 多组元可反应理想气体混合物的守恒方程	2
§ 3 一维流动	5
a. 非定常情况	5
b. 定常状态	7
§ 4 Shvab-Zeldovich 公式	9
§ 5 界面上的守恒条件	13
§ 6 进一步阐述燃烧理论所采取的途径的讨论	17
第二章 Rankine-Hugoniot 关系	19
§ 1 引言	19
§ 2 一般的 Rankine-Hugoniot 方程	19
a. 方程的推导	19
b. 冷边界困难	22
c. Rankine-Hugoniot 方程的使用	23
§ 3 简化系统的分析	24
a. Rankine-Hugoniot 方程的简化	24
b. 无量纲形式	26
c. Hugoniot 曲线的性质	27
d. 爆震分支的分析	29
e. 爆燃分支的分析	30
f. Chapman-Jouguet 波的性质	31
§ 4 把结果推广到任意系统	33
a. §3 中的结果的有效范围	33
b. 冻结与平衡的声速的比较	34
c. 在 Chapman-Jouguet 点上 $v_{\infty} = a_{e,\infty}$ 的证明	35
d. Hugoniot 曲线性质小结	37
第三章 扩散火焰和单滴燃烧	38

§ 1 引言	38
§ 2 导管中管道出口处的火焰	38
a. 问题的定义	38
b. 假设	40
c. 对耦合函数 β 的组元守恒方程的解	40
d. 火焰形状和火焰高度	42
e. 火焰表面近似	43
f. 其余近似的有效性	45
g. 分析程序的说明	46
§ 3 导管壁上碳的氧化	46
a. 问题的定义	46
b. 分析	47
§ 4 燃料滴在大气中的燃烧	48
a. 问题的定义	48
b. 假设	49
c. 预言燃烧速率的分析	51
d. 燃烧速率公式的讨论	54
e. 液滴燃烧的其它特性的预言	56
f. 燃烧速率公式的修正	57
第四章 喷管流动和声波中的反应	60
§ 1 引言	60
§ 2 定常准一维流动中的化学反应	62
a. 定常准一维守恒方程	62
b. 实际应用的推动	64
c. 严格的方法	67
d. 对以微量出现的组元 A 和 B 的反应 $A \rightleftharpoons B$ 的应用	69
e. 工程上的办法	72
f. 二相喷管流动	73
§ 3 不定常三维流动中的化学反应	73
a. 控制守恒方程, 特征面	73
b. 定常二维(轴对称和平面)流动的特征线方法	78
c. 一维不定常流动的特征线方法	83
d. 对有化学反应 $A \rightleftharpoons B$ 的二组元可反应理想气体混合物中的一维不定常声波的传播	84
(I) 预备关系式	(II) 线性化

- (III) 化成单一的偏微分方程
- (IV) 色散关系
- (V) 初值问题
- (VI) 有关的问题

第五章 层流火焰理论	95
§ 1 引言	95
§ 2 层流火焰的描述	96
a. 实验	96
b. 爆燃波的唯一象分析	98
§ 3 数学公式	100
a. 引言	100
b. 预备性假设和方程组	100
c. 进一步简化能量方程的近似	101
d. 对双组元混合物中单分子反应的能量方程和扩散方程的简化	103
e. 当 $Le = 1$ 时扩散方程的解	104
f. 动量方程和组元守恒方程的无量纲形式	105
g. 简化数学问题的小结	106
§ 4 对路易斯数为 1 时的单分子分解火焰	107
a. 控制方程	107
b. 冷边界困难	109
c. Von Kármán 零级近似	112
d. Zeldovich-Frank-Kamenetski 方程	112
e. Von Kármán 一级近似	113
f. 与某些其它近似方法的比较	114
g. 叠代程序	115
h. Rosen 变分方法	117
i. Spalding 的“形心定则”	118
j. 特征值上下限的 Johnson和Nachbar 方法	120
k. Johnson和Nachbar 方法同其它方法的比较	122
l. Johnson和Nachbar 的叠代程序	123
m. 进一步的说明	125
§ 5 火焰中基的分布	127
a. 问题的性质和背景的讨论	127
(I) 公式	(II) 分析的目的
(III) 文献	(IV) 燃烧速度的计算
(V) 进一步讨论的课题	
b. 推广了的定态近似	130

c. 反应中间体的控制方程	131
d. 推广定态近似应用范围的判据	132
e. 控制微分方程的级数解	133
f. 一个简化模型	134
g. 推广定态近似的有效性的小结	135
第六章 气体爆震	139
§ 1 引言	139
§ 2 爆震结构	140
a. 控制方程	140
b. 控制方程的性质	140
(I) 奇点的位置	(II) 奇点邻域的解
(III) 积分曲线的一般性质	
c. 关于爆燃的几点说明	147
d. 爆震结构的近似解	148
e. 爆震结构的讨论	149
f. ZND 爆震结构	151
§ 3 爆震传播速度	153
a. 在管道中传播的爆震	153
(I) 基本考虑	(II) 有关弱爆震的进一步说明
(III) Fay 所作的改进	(IV) 进一步的修正
b. 激波管中产生的激波后面的化学反应	159
c. 驻定的爆震波	159
§ 4 爆震波的其它方面的研究	160
a. 从爆燃向爆震的转变	160
b. 螺旋爆震	161
c. 固体和液体中的爆震	161
d. 液雾中的爆震	162
第七章 湍流火焰	168
§ 1 引言	168
§ 2 湍流火焰整体性质的测量	169
a. 火焰速度	169
(I) 定常开口火焰	(II) 定常封闭火焰
(III) 不定常球形火焰	(IV) 不定常平面火焰
b. 稳定极限	173
c. 火焰高度和燃烧效率	173

§ 3	细致湍流火焰性质的测量	174
a.	纹影和阴影观察	174
b.	高速的直接火焰照片	175
c.	烟和颗粒示踪照片	175
d.	火焰光谱学和光度学	176
e.	电测量	177
f.	火焰内湍流强度的测量	178
§ 4	湍流火焰理论	178
a.	湍流火焰的力学理论的基础	178
b.	目前的力学理论的相对优点	180
c.	皱折层流火焰的基本研究	181
d.	把皱折层流火焰的结果推广到湍流火焰	183
e.	结束语	184
第八章 点火、熄火和可燃极限		191
§ 1	引言	191
§ 2	最小点火能和熄火距离	192
§ 3	基于热损失的可燃极限	194
a.	引言	194
b.	简化模型的分析	195
c.	结果的讨论	199
	(I) 两个火焰速率的存在	(II) 可燃的浓度极限
	(III) 可燃的压力极限	(IV) 热损失常数的估算
	(V) 熄火距离	
第九章 固体推进剂的爆燃; 固体和液体推进剂火箭中的燃烧		
不稳定性		205
§ 1	引言	205
§ 2	固体推进剂的定常爆燃	205
a.	问题的描述	205
b.	气化作为速率控制过程	206
c.	由于反应物分子返回固体而引起的修正	209
d.	气相反应作为速率控制过程	211
e.	燃烧速率对压力的依赖关系	214
f.	其它速率控制过程	216
g.	浸蚀燃烧	218

§ 3	燃烧不稳定性	219
a.	固体推进剂火箭发动机中的振荡	219
b.	声导纳	223
c.	燃烧表面对声波谐振的响应	224
d.	时滞;液体火箭发动机中的振荡燃烧	227
第十章	单一推进剂液滴的燃烧	233
§ 1	引言:问题的描述	233
§ 2	基本方程;边界条件	235
§ 3	简化模型的准确结果	237
§ 4	完整模型的近似结果	240
§ 5	数值结果	242
§ 6	实验、比较和讨论	246
第十一章	液雾燃烧	251
§ 1	引言	251
§ 2	液雾统计学	251
a.	颗粒大小和形状	251
b.	分布函数	252
c.	液雾方程	253
§ 3	液体火箭发动机燃烧的简化模型	254
a.	模型	254
b.	简化的液雾方程	254
c.	\bar{R}_i 和 \bar{v}_i 对 r 的依赖关系	255
d.	液雾方程的解	256
e.	燃烧效率	256
f.	滴尺寸分布	257
g.	函数 $H(a, b, c, z)$	258
h.	某些液雾性质	260
i.	对一般化的 Rosin-Rammler 形式的初始分布的燃烧效率	261
§ 4	定常状态的守恒方程	263
a.	问题的提出	263
b.	总体连续方程	264
c.	组元守恒方程	264
d.	动量守恒方程	265
e.	能量守恒方程	266

t. 问题的解法	267
§ 5 简化守恒方程组	267
a. 假设	267
b. 总体连续方程	268
c. 组元守恒方程	269
d. 动量守恒方程	269
e. 能量守恒方程	270
§ 6 液体火箭发动机燃烧的推广了的模型	271
a. 模型	271
b. 液雾方程	272
c. 液滴蒸发速率	272
d. 滴阻力	273
e. 连续方程	274
f. 无量纲变数; 数学方面	274
g. 解	275
h. x^* 的数值	276
§ 7 复相层流火焰	277
a. 描述	277
b. 总体连续方程和液雾方程	278
c. 组元守恒方程	279
d. 动量方程	280
e. 能量方程	280
f. 状态方程	281
g. 液体温度	282
h. 数学问题和边界条件	282
i. 当路易数等于 1 时的简化	283
j. 单一弥散液雾的简化	283
k. 无量纲变量	284
l. 冷边界困难	285
m. 解	285
n. 燃烧速率的性质	287
o. 实验与比较	288
p. 结论	289
第十二章 边界层化学反应	291
§ 1 引言	291

§ 2	关于有化学反应、定常、二维层流流动边界层近似	292
a.	简化控制方程的推导	292
b.	补充简化	295
c.	推广	295
d.	不可压缩边界层方程的转换	297
e.	粘度与温度的关系	298
§ 3	Emmons 问题	299
a.	问题的定义	299
b.	边界条件	300
c.	解	302
d.	结果及讨论	304
e.	作用于平板的力	306
f.	有关研究	307
§ 4	Marble-Adamson 问题	309
a.	问题的定义	309
b.	边界条件	310
c.	局部解	310
d.	等速情况	312
e.	燃料守恒方程的解法	312
f.	结果	315
g.	渐近火焰展开区域	316
h.	火焰附着的准则	319
i.	钝体火焰稳定作用的应用	325
j.	有关的研究	326
附录 A	热力学和统计力学应用结果提要	331
§ 1	引言	331
§ 2	一般热力学结果	331
a.	热力学定律	331
b.	热力学函数	332
§ 3	统计力学的有关结果	334
a.	基础	334
b.	结果提要	335
c.	配分函数的计算	337
§ 4	化学平衡	339
a.	一般平衡条件	339

b. 相平衡	341
c. 理想气体的反应	342
d. 非理想气体的反应	343
e. 在凝聚相中的反应	344
f. 非均相反应	345
g. 平衡组成的计算	346
§ 5 反应热	347
a. 反应热定义	347
b. 微分反应热	348
c. 生成热等	349
d. Kirchhoff 和 Van't Hoff 方程	351
e. 绝热火焰温度	353
§ 6 凝聚相	353
a. 相律	353
b. 二元混合物的蒸气压	355
c. 二元混合物的沸点	357
d. 二元混合物的蒸气压与温度关系	358
e. 溶液的综合特性	360
附录 B 化学动力学综述	363
§ 1 引言	363
§ 2 质量作用定律	363
a. 定律的陈述	363
b. 复合反应, 平衡常数	364
c. 反应级和分子度	366
§ 3 反应机理	367
a. 一般方法	367
b. 一级反应和单分子反应	367
c. 高级反应	369
d. 逆反应	370
e. 链式反应及有关过程	371
(I) 反应的各种类型	(II) 近似速率表达式
(III) 反应中间体的定常状态近似	
f. 催化	377
§ 4 比反应速率常数的确定	378
a. Arrhenius 定律	378

b. 活化能	379
c. 碰撞反应速率理论	380
d. 绝对反应速率理论	382
e. 绝对速率理论与碰撞理论的比较	384
f. 绝对反应速率理论的其他应用	386
g. 反应速率理论的近代发展	386
§ 5 复相过程的速率	387
a. 对所考虑的复相过程的描述	387
b. 级(A)或(E)速率控制	387
c. 级(B)或(D)速率控制	388
d. 级(C)速率控制	390
附录 C 连续介质守恒方程的推导	395
§ 1 引言	395
§ 2 定义和基本数学关系式	396
§ 3 连续性方程	398
§ 4 动量方程	399
§ 5 能量方程	402
§ 6 在关于独立共存连续介质推导的守恒定律和关于多组元气体 混合物的运动论结果之间的比较	404
a. 运动论的定义	404
b. 守恒方程的比较	406
§ 7 方程(6)的证明	407
附录 D 守恒方程的分子运动论推导	410
§ 1 引言	410
§ 2 速度分布函数和玻尔兹曼方程	410
§ 3 流体动力学变量的定义	411
§ 4 变化方程	416
§ 5 叠加的不变量	416
§ 6 宏观守恒方程	417
a. 总连续性方程	417
b. 动量守恒方程	417
c. 能量守恒方程	418
d. 组元守恒方程	419
e. 提要	419

附录 E 输运特性	421
§ 1 引言	421
§ 2 碰撞积分	422
§ 3 扩散	423
a. 多组元扩散方程的物理推导	423
b. 简化扩散方程	426
c. 二元扩散系数	427
d. 多组元扩散系数	428
e. 热扩散系数	428
§ 4 输运过程的基本处理	429
§ 5 粘度	431
a. 粘性系数	431
b. 压力张量	432
§ 6 热流	432
a. 热传导系数	432
b. 热流矢量	434
§ 7 输运系数的无量纲比值	435

第一章 基础流体动力学和 化学动力学概要

§ 1. 引 言

由于大多数燃烧问题都涉及到有化学反应和有扩散的气体的流动,学习燃烧理论的学生除了基础热力学外,还必须理解流体动力学守恒方程,包括输运性质和化学动力学. 所有这些基础课题的简练的但却相当完整的处理放在附录中. 希望不熟悉这些课题的读者,在开始学习第一章之前先读附录.

本章对进行反应的理想气体混合物的最终的守恒方程,做了一个概述(第二节). 从宏观角度(附录 C),控制方程(除状态方程和状态的热方程外)是不局限于理想气体的. 本书中考虑的绝大多数的课题,都是对特殊流动求解这些方程. 在第三节,对一维流动(定常和非定常)在任意正交曲线坐标系中,推出了这些方程所采取的形式. 这一节还推出了能用于许多燃烧问题的具体形式. 在第四节,讨论了由 Shvab 和 Zeldovich 推出的守恒方程的简化形式. 在本章中,讨论的那些控制许多燃烧问题中的流动的特殊形式的方程,均已满意地得到了解决.

如果要使守恒方程得到成功的应用,必须知道边界条件和界面条件. 由于这些条件与所研究的特殊系统的模型关系极大,因此,难于给出得到这些条件的一般规则. 例如:它们可能要求考虑表面平衡(在附录 A 中讨论的)或者表面速率过程(附录 B 中讨论的). 然而,在界面上的简单的质量、动量、能量平衡常常是很重要的. 由于这个原因,在第五节中由一般守恒方程推出了界面条件. 第六节讨论了本书其余各章的安排.

§ 2. 多组元可反应理想气体混合物的守恒方程

在附录 C 和 D 中, 推导了将反复使用的一般的守恒方程, 现将其摘抄如下:

总体连续方程(方程 D-33):

$$\rho \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

动量方程(方程 D-35):

$$\rho \mathbf{v} / \partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -(\nabla \cdot \mathbf{p}) / \rho + \sum_{i=1}^N Y_i \mathbf{f}_i \quad (2)$$

能量方程(方程 D-37):

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \mathbf{v} \cdot \nabla u = -\nabla \cdot \mathbf{q} - \mathbf{p} : (\nabla \mathbf{v}) + \rho \sum_{i=1}^N Y_i \mathbf{f}_i \cdot \mathbf{V}_i \quad (3)$$

组分连续方程(方程 D-40):

$$\partial Y_i / \partial t + \mathbf{v} \cdot \nabla Y_i = \omega_i / \rho - [\nabla \cdot (\rho Y_i \mathbf{v}_i)] / \rho, \quad i = 1, \dots, N \quad (4)$$

在方程(2)中, \mathbf{p} 通过 (E-37) 方程由 (E-35) 给出:

$$\mathbf{p} = \left[p + \left(\frac{2}{3} \mu - \epsilon \right) (\nabla \cdot \mathbf{v}) \right] \mathbf{U} - \mu [(\nabla \mathbf{v}) + (\nabla \mathbf{v})^T] \quad (5)$$

在方程(3)中, 当忽略辐射热传导时, \mathbf{q} 由 (E-43) 给出:

$$\mathbf{q} = -\lambda \nabla T + \rho \sum_{i=1}^N h_i Y_i \mathbf{V}_i + R^0 T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\frac{X_j D_{T,i}}{W_i D_{ij}} \right) (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_j) \quad (6)$$

在方程(3)和(4)中 \mathbf{V}_i 由 (E-18) 确定:

$$\begin{aligned} \nabla X_i = & \sum_{j=1}^N \left(\frac{X_i X_j}{D_{ij}} \right) (\mathbf{V}_j - \mathbf{V}_i) + (Y_i - X_i) \left(\frac{\nabla p}{p} \right) \\ & + \left(\frac{\rho}{p} \right) \sum_{j=1}^N Y_j Y_j (\mathbf{f}_i - \mathbf{f}_j) \\ & + \sum_{j=1}^N \left[\left(\frac{X_i X_j}{\rho D_{ij}} \right) \left(\frac{D_{T,i}}{Y_j} - \frac{D_{T,i}}{Y_i} \right) \right] \left(\frac{\nabla T}{T} \right) \\ & i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (7)$$

方程(5)至(7)中出现的输运系数,列在附录E中。外力 \mathbf{f}_i 是给定的(不是推出的),方程(4)中的 w_i 是由唯象的化学动力学表达式确定的。

$$\begin{aligned} w_i = W_i \sum_{k=1}^M (v''_{i,k} - v'_{i,k}) B_k T^{\alpha_k} e^{-(E_k/R^0 T)} \prod_{j=1}^N \left(\frac{X_j \rho}{R^0 T} \right)^{\nu'_{j,k}} \\ i = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (8)$$

这是方程(B-6)到(B-8), (B-41), (B-42)一个组合。

在方程(1)–(4)中, $N + 5$ 个独立变数可以取为 Y_i, ρ, T 和 \mathbf{v} , 在这种情况下, 其余变数可以通过理想气体状态方程联系起来:

$$p = \rho R^0 T \sum_{i=1}^N (Y_i / W_i) \quad (9)$$

热力学恒等式:

$$u = \sum_{i=1}^N h_i Y_i - p / \rho \quad (10)$$

状态的热方程:

$$h_i = h_i^0 + \int_{T^0}^T c_{p,i} dT \quad i = 1, \dots, N \quad (11)$$

以及恒等式:

$$x_i = \frac{(Y_i / W_i)}{\sum_{j=1}^N (Y_j / W_j)} \quad i = 1, \dots, N \quad (12)$$

在方程(1)–(7)中使用了向量符号, ∇ 是梯度算符, \mathbf{U} 是单位张