



极度燃烧

Extreme Combustion

范宝春 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

极度燃烧

Extreme Combustion

范宝春 著



国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

极度燃烧/范宝春著. —北京:国防工业出版社,
2018.9

ISBN 978-7-118-11549-9

I. ①极… II. ①范… III. ①超音速燃烧-研究②爆
燃-研究 IV. ①TQ038.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 133357 号

※

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)

天津嘉恒印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 22 字数 415 千字

2018 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 108.00 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

致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授、以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 赵伯桥

秘书长 赵伯桥

副秘书长 许西安 谢晓阳

委员 才鸿年 马伟明 王小谟 王群书

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 巩水利

刘泽金 孙秀冬 芮筱亭 李言荣

李德仁 李德毅 杨伟 肖志力

吴宏鑫 张文栋 张信威 陆军

陈良惠 房建成 赵万生 赵凤起

郭云飞 唐志共 陶西平 韩祖南

傅惠民 魏炳波

前 言

高马赫数、高雷诺数和高压高温下的燃烧称为极度燃烧(Extreme Combustion),相关系统称为爆炸燃烧系统(Explosions and Reactive Systems)。

极度燃烧导致大量能量的瞬间释放,并因此产生冲击和压缩,故具有商业和军事方面的应用价值。近几十年,瓦斯爆炸、气云和粉尘爆炸等各种火灾爆炸事故频繁发生,超燃发动机和爆轰发动机的研制,不同物态的各类新型含能材料的发现以及等离子技术(点火、助燃和支持燃烧)的应用等,皆与极度燃烧有关,这使得极度燃烧得到广泛关注。

极度燃烧由于高马赫数,故为超声速燃烧,涉及跨声速导致的壅塞、激波以及激波与燃烧的耦合等问题。由于高雷诺数,故涉及湍流燃烧和激波-涡(或边界层)-化学反应相互作用等问题。由于高温高压下燃烧(特别是凝聚态含能物质),故涉及高温高压状态方程、高压反应动力学和电磁流等问题。因此,极度燃烧是一个复杂的充满挑战的课题。

为清晰阐述有关内容,本书叙述脉络设计为:从守恒方程推导入手,介绍方程的数学特性、求解方法和计算结果。然后,借助实验和计算结果,通过物理分析,揭示流场的变化规律和动力学机制。

本书涉及的流动(无黏流、黏性流,甚至包括两相流和电磁流)、燃烧、化学爆炸、爆燃和爆轰等现象,流场介质皆由大量不停随机运动的粒子构成,因此,可依据动理学,导出其控制方程。此类方程是一组偏微分方程,其中,无黏流欧拉方程是不适定的,解的唯一性破坏时,流场会出现间断;黏性流和反应流的N-S方程也是不适定的,方程失稳会导致湍流、湍流燃烧和爆轰胞格。此外,反应流方程具有奇异性,流场可能出现壅塞。极度燃烧的某些重要特性,与方程的这种适定性和奇异性有关。

偏微分方程组大都用数值方法求解。值得注意的是,不是所有情况偏微分方程总可求解,方程有时是无法求解的。例如N-S方程,直接模拟湍流就很困难。即使方程可解,其解不一定具有物理意义。例如,在 $p-v$ 平面,用瑞利线和Hugoniot曲线讨论燃烧特性时,强解只有数学意义,没有物理价值。此外,由于计算结果仅

限于守恒方程中的未知量,故描述流场时,具有一定的局限性。例如,爆轰胞格结构、旋涡结构、流场的阴影和纹影图像等,都需对结果进行特殊处理。因此,讨论流场结构、变化规律和变化机制时,需要认真解读和正确处理计算和实验数据,寻求最佳的表现视角和阐述思路。

极度燃烧大致分为超声速燃烧 (Supersonic Combustion, 或简称超燃)、爆燃 (Deflagration) 和爆轰 (Detonation), 可以出现在气态、凝聚态、等离子态和非均相的各类可燃介质中。理论上完整描述此类燃烧,需用守恒方程、输运系数方程、状态方程和化学反应速率方程。

对于非均相系统,如稀疏和密实悬浮流,利用多流体模型,通过分子动理学,可推得守恒方程。但高速流动时,湍流和颗粒绕流,使两相间的输运变得非常难以处理。颗粒的存在和颗粒间的碰撞又使两相介质的状态方程具有复杂形式 (特别是颗粒相)。此外,非均相化学反应具有特殊的反应历程 (相变、表面反应等),有些甚至迄今未搞明白。

对于凝聚态物质,激波后压力高达几百太帕,燃烧 (包括化学键的断裂、自由带电粒子的链式反应和激励状态下的产物生成) 在振动自由度激发的状态下进行。激励状态下的反应速率方程和高温高压的状态方程都非常复杂 (大多采用拟合公式)。对于非均相凝聚态 (如混合炸药或含金属粉的炸药),还需考虑固体颗粒、黏合剂和空隙对激波点火的复杂影响,处理难度更大。

对于等离子态物质 (包括某种目的加入的、激光照射产生的或高温高压反应产生的),可利用多流体模型通过分子动理学获得守恒方程,但需添加麦克斯韦方程,以描述流动伴随的电磁场变化。需考虑带电粒子碰撞产生的输运以及带电粒子的状态方程。化学反应需采用自由带电粒子参加碰撞的链式反应模型。

与上述问题相比,气相燃烧相对简单,守恒方程和输运系数方程可从分子动理学推得。可以忽略高温高压影响,采用理想气体状态方程和 Arrhenius 化学反应速率方程;忽略湍流影响,采用欧拉方程或层流 N-S 方程。因此,气相燃烧得到较为系统深入的研究,已基本形成完整的理论体系。

气相燃烧与其他物态燃烧具有相似之处,其研究思路可为其他物态研究提供参考。例如,利用 ZND 模型分析爆轰特性 (凝聚态称为非平衡 ZND 模型 (Nonequilibrium ZND theory, NEZND)), 利用三波点轨迹研究爆轰胞格 (非均相爆轰和凝聚态爆轰中均发现爆轰胞格) 等。此外,气相燃烧的研究水平是其他物态研究的追求目标。

总之,极度燃烧的讨论,绝非一本专著可以厘定。鉴于气相燃烧的特性和价值,本书仅讨论气相系统的超燃、爆燃和爆轰。

此书分为四部分,共九章。第一部分讨论无黏流,包括第1章和第2章。先介绍动理学(速度分布函数、玻耳兹曼方程和麦克斯韦传输方程)。然后介绍热力学状态函数(速度脉动的各阶统计矩)、热力学关系式和状态方程。再推导无黏流动控制方程(玻耳兹曼方程的第一近似解代入麦克斯韦传输方程),即欧拉方程。如果将状态函数或函数间的某种组合视作流场的波,欧拉方程描述了波沿特征线的传播特征。因此,无黏流动着重于流场的波系分析。方程有连续解时,流场存在等熵波(稀疏波和压缩波)。超声速情况下,若解的唯一性被破坏,流场出现间断波(激波和接触间断)。第1章讨论连续流场,第2章讨论间断。

第二部分讨论黏性流,包括第3章和第4章。玻耳兹曼方程的第二近似解代入麦克斯韦传输方程,得到黏性流动的控制方程,即N-S方程。方程中,输运项的出现使流场有旋,并存在涡量扩散和能量耗散。黏性流动着重讨论流场涡结构。高雷诺数时,流场失稳,成为随机流场,即湍流,无法直接求解。此时,可用统计学处理,包括统计矩法和概率密度分布函数(PDF)法。第3章讨论层流,第4章讨论湍流。

第三部分为反应流,包括第5章和第6章。涉及反应动力学、反应热力学和反应流体力学。火焰是流场局部燃烧区域,视为燃烧波。如果燃料和氧化剂以预先混合方式进入火焰,称为预混火焰,又可分为输运预混火焰和对流预混火焰。燃烧还可分为超燃和亚燃,燃烧过程中,两者的流场参数变化趋势不同,但马赫数皆趋于1。失稳可导致湍流燃烧,根据流动和反应的时空尺度,湍流火焰分为褶皱层流火焰(Wrinkled Laminar-Flame Model)、分布反应火焰(Distributed-Reaction Model)和涡内小火焰(Flamelets in Eddies)。不同类型的湍流火焰有不同的处理方法(湍流燃烧模型)。第5章讨论层流燃烧(超燃和亚燃),第6章讨论湍流燃烧。

第四部分为激波-火焰复合波,包括第7章、第8章和第9章。湍流加速火焰可诱导激波,形成激波-火焰复合波,称为爆燃。激波足够强时,直接使波后介质点火,再通过燃烧产物膨胀给激波以支持,称作爆轰。众多生成爆轰的方法中,弱点火形成爆轰最受关注,其形成过程包括燃烧、爆炸(诱导激波)、爆燃和爆轰等环节。第7章讨论爆燃和爆轰的特性以及爆燃和爆轰间的转换。爆轰和爆燃的一维经典模型是不稳定的,实际爆轰阵面具有三维结构,称为胞格结构,该结构揭示了爆轰自持传播的机制。第8章讨论爆轰稳定性以及CJ爆轰和临界爆轰的多维结

构和形成机制。爆轰具有不同的存在和传播方式,有些可用于发动机,如高频脉冲爆轰、驻定爆轰和旋转爆轰。其间涉及流场敛散性、边界层黏性以及波前流动等对爆轰流场、传播机制和胞格结构的影响。这些在第9章讨论。

阅读此书,如同登山,循守恒方程这一主脉,逐次攀登,遍历诸峰。既可了解极度燃烧的相关内容,也可一览流动领域的整体概貌。撰写时,作者希冀取舍精当,脉络清晰,首尾连贯,流畅无滞。但因学养和学识所限,一时恐难尽如人意。虽不能至,心向往之。书中疏漏不妥之处,恳请读者赐教指正。

范宝春

2016年10月于南京

目 录

第 1 章 无黏流	1
1.1 无黏流守恒方程	1
1.1.1 分子动理论	1
1.1.2 热力学状态函数	6
1.1.3 守恒方程动理学推导	11
1.2 等熵流动	12
1.2.1 特征线法	12
1.2.2 一维不定常流	15
1.2.3 亚声速流和超声速流	17
1.2.4 超声速二维定常流	18
1.2.5 通量矢分裂	22
1.3 小结	26
参考文献	26
第 2 章 间断	28
2.1 激波	28
2.1.1 拟线方程间断解	28
2.1.2 激波关系式	30
2.1.3 p - ν 曲线	31
2.1.4 激波特性	33
2.2 间断相互作用	38
2.2.1 p - u 曲线	38
2.2.2 初始间断分解	41
2.2.3 波的相互作用	43
2.3 界面不稳定性	56
2.3.1 泰勒不稳定	58
2.3.2 亥姆霍兹不稳定	60
2.3.3 Meshkov 不稳定	60
2.4 小结	61

参考文献	62
第3章 黏性流	63
3.1 黏性流守恒方程	63
3.1.1 守恒方程动理学推导	63
3.1.2 应变张量和应力张量	67
3.1.3 守恒方程流体力学推导	68
3.2 黏性流特性	71
3.2.1 黏性流有旋性	71
3.2.2 涡量扩散性	73
3.2.3 黏性流耗散性	75
3.2.4 黏性流稳定性	76
3.3 层流	79
3.3.1 层流解析解	79
3.3.2 层流近似解	81
3.3.3 层流数值解	84
3.4 小结	91
参考文献	92
第4章 湍流	94
4.1 湍流基础	94
4.1.1 湍流特性	94
4.1.2 湍流统计方法	95
4.1.3 湍动能串级	98
4.1.4 湍流直接模拟	99
4.2 RANS 模式	104
4.2.1 雷诺分解	104
4.2.2 涡黏模式	106
4.2.3 雷诺应力模式	109
4.3 大涡模拟	110
4.3.1 方程滤波	111
4.3.2 物理空间涡黏格式	114
4.3.3 谱空间涡黏格式	115
4.4 PDF 模式	118
4.4.1 PDF 方程	118
4.4.2 PDF 传输方程	121
4.4.3 广义朗之万模型	121

4.5 小结	123
参考文献	124
第5章 燃烧	126
5.1 反应流	126
5.1.1 反应动力学	126
5.1.2 反应热力学	130
5.1.3 反应流守恒方程	135
5.1.4 预混火焰	138
5.2 对流预混火焰	141
5.2.1 对流预混火焰特性	141
5.2.2 声波耗散和频散	147
5.3 输运预混火焰	150
5.3.1 敞开体系燃烧	150
5.3.2 密闭容器燃烧	155
5.3.3 超声速燃烧	159
5.4 小结	162
参考文献	163
第6章 湍流燃烧	165
6.1 可压湍流	165
6.1.1 Favre 平均	165
6.1.2 涡黏模式	166
6.1.3 大涡模拟	168
6.2 湍流燃烧基础	170
6.2.1 反应流守恒方程	170
6.2.2 湍流火焰分类	170
6.3 湍流燃烧模型	172
6.3.1 湍涡破碎模型	172
6.3.2 BML 模型	173
6.3.3 火焰面模型	176
6.3.4 PDF 模型	186
6.3.5 线性涡模型	189
6.4 小结	192
参考文献	193

第 7 章 激波-火焰复合波	194
7.1 爆燃	194
7.1.1 加速火焰	194
7.1.2 爆燃现象	196
7.1.3 CJ 爆燃	198
7.2 爆轰	200
7.2.1 爆轰现象	200
7.2.2 理想气体爆轰	203
7.2.3 爆轰自模拟解	207
7.2.4 激波强度方程	208
7.2.5 弱爆轰	210
7.2.6 爆燃与爆轰	219
7.3 燃烧转爆轰	221
7.3.1 典型过程	222
7.3.2 燃烧转爆燃	223
7.3.3 爆燃转爆轰 (DDT)	225
7.3.4 数值研究	229
7.4 小结	233
参考文献	235
第 8 章 爆轰结构	237
8.1 一维爆轰稳定性	237
8.1.1 爆轰稳定性	237
8.1.2 方波爆轰	238
8.1.3 数值研究	242
8.2 爆轰精细结构	248
8.2.1 二维胞格	248
8.2.2 三维胞格	257
8.3 临界爆轰	267
8.3.1 单头爆轰	267
8.3.2 间歇爆轰	273
8.4 小结	276
参考文献	277
第 9 章 爆轰推进	279
9.1 驻定爆轰	279

9.1.1	驻定爆轰现象	279
9.1.2	理论分析	281
9.1.3	数值研究	284
9.1.4	脱体驻定爆轰	290
9.2	脉冲爆轰	292
9.2.1	脉冲爆轰现象	292
9.2.2	单次脉冲	293
9.2.3	多次脉冲	301
9.3	爆轰衍射	307
9.3.1	静止系统	308
9.3.2	流动系统	311
9.4	旋转爆轰	316
9.4.1	旋转爆轰现象	316
9.4.2	持续旋转爆轰	321
9.5	小结	325
	参考文献	327

Contents

Chapter 1 Inviscid Flow	1
1.1 Conservation Equations of Inviscid Flow	1
1.1.1 Kinetic Theory	1
1.1.2 Thermal State Function	6
1.1.3 Derivation of Conservation Equations Based on Kinetic Theory	11
1.2 Isentropic Flow	12
1.2.1 Characteristics Method	12
1.2.2 Unsteady One Dimensional Flow	15
1.2.3 Subsonic Flow and Supersonic Flow	17
1.2.4 Steady Two Dimensional Supersonic Flow	18
1.2.5 Flux-Vector Splitting	22
1.3 Closed Remarks	26
References	26
Chapter 2 Discontinuity	28
2.1 Shock Wave	28
2.1.1 Discontinuity of Quasi-Linear Equation	28
2.1.2 Shock Relation	30
2.1.3 $p-v$ Curves	31
2.1.4 Features of Shock Wave	33
2.2 Discontinuity Interaction	38
2.2.1 $p-u$ Curves	38
2.2.2 Classical Riemann Problem	41
2.2.3 Wave Interaction	43
2.3 Surface Instability	56
2.3.1 Taylor Instability	58
2.3.2 Helmholtz Instability	60
2.3.3 Meshkov Instability	60
2.4 Closed Remarks	61

References	62
Chapter 3 Viscous Flow	63
3.1 Conservation Equations of Viscous Flow	63
3.1.1 Derivation of Conservation Equations Based on Kinetic Theory	63
3.1.2 Strain Tensor and Stress Tensor	67
3.1.3 Derivation of Conservation Equations Based on Fluid Dynamics	68
3.2 Viscous Flow Properties	71
3.2.1 Vorticity of Viscous Flow	71
3.2.2 Vortical Diffusivity	73
3.2.3 Viscous Dissipation	75
3.2.4 Stability of Viscous Flow	76
3.3 Laminar Flow	79
3.3.1 Analytic Solution	79
3.3.2 Approximate Solution	81
3.3.3 Numerical Solution	84
3.4 Closed Remarks	91
References	92
Chapter 4 Turbulent Flow	94
4.1 Fundamentals of Turbulence	94
4.1.1 Nature of Turbulence	94
4.1.2 Statistical Description of Turbulence	95
4.1.3 Energy Cascade	98
4.1.4 Direct Numerical Simulation	99
4.2 RANS Model	104
4.2.1 Reynolds Decomposition	104
4.2.2 Viscosity Model	106
4.2.3 Reynolds–Stress Model	109
4.3 Large Eddy Simulation	110
4.3.1 Filtering	111
4.3.2 Smagorinsk Model	114
4.3.3 LES in Wavenumber Space	115
4.4 PDF Method	118
4.4.1 PDF Equation	118
4.4.2 PDF Transport Equation	121
4.4.3 GLM Model	121

4.5	Closed Remarks	123
	References	124
Chapter 5	Reacting Flow	126
5.1	Reacting Flow	126
5.1.1	Kinetics of Reactions	126
5.1.2	Chemical Thermodynamics	130
5.1.3	Conservation Equations of Reacting Flow	135
5.1.4	Premixed Flame	138
5.2	Convective Premixed Flame	141
5.2.1	Features of Convective Premixed Flame	141
5.2.2	Dispersion and Attenuation of Sound	147
5.3	Transport Premixed Flame	150
5.3.1	Combustion in Open System	150
5.3.2	Combustion in Closed System	155
5.3.3	Supersonic Combustion	159
5.4	Closed Remarks	162
	References	163
Chapter 6	Turbulent Combustion	165
6.1	Compressible Turbulence	165
6.1.1	Favre Average	165
6.1.2	Viscosity Model	166
6.1.3	Large Eddy Simulation	168
6.2	Fundamentals of Turbulent Combustion	170
6.2.1	Conservation Equations of Reacting Flow	170
6.2.2	Classification of Turbulent Flame	170
6.3	Turbulent Combustion Models	172
6.3.1	Eddy-Break-up Model	172
6.3.2	BML Model	173
6.3.3	Level Set Approach	176
6.3.4	PDF Model	186
6.3.5	Linear-Eddy Model	189
6.4	Closed Remarks	192
	References	193