

两相系统的燃烧、 爆炸和爆轰

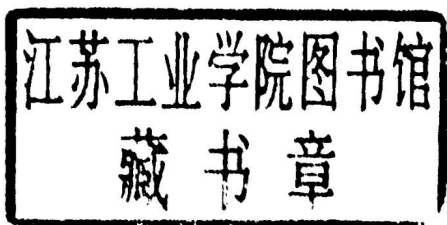
范宝春 著

国防工业出版社

TK123
F07

两相系统的燃烧、爆炸和爆轰

范宝春 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

两相系统的燃烧、爆炸和爆轰/范宝春著. —北京:国防工业出版社, 1998. 11

ISBN 7-118-01826-0

I. 两… II. 范… III. 两相系统-概论 IV. TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 20263 号

DZ19/04

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 100044)

河北三河市腾飞胶印厂

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10 $\frac{3}{4}$ 277 千字

1998 年 11 月第 1 版 1998 年 11 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1500 册 定价: 20.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

内 容 简 介

本书从理论上较全面系统地论述了两相系统的燃烧问题。基于统一的两相反应流方程,分析和讨论了湍流燃烧、爆炸和爆轰,并介绍了它们各自的存在条件和特点,以及相互联系与转换。

全书共分八章。书中融入了作者多年的研究成果,在出版前书稿曾以教材形式在教学中使用,并根据有关方面的意见进行了修改和充实。

本书可作为有关专业的科技人员和研究人员的参考书,也可作为高等院校本科师生、研究生的参考教材。

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展,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,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。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 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,对国防科技发展具有较大推动作用的专著;密切结合科技现代化和国防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,密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作,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,由国防工业出版社列出出版。

国防科技事业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。在改革开放的新形势下,国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业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 第二届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允
曾 铎

秘 书 长 刘琯德

委 员 尤子平 朱森元 朵英贤

(按姓氏笔划为序) 刘 仁 何庆芝 何国伟

何新贵 宋家树 张汝果

范学虹 胡万忱 柯有安

侯 迁 侯正明 莫梧生

崔尔杰

前 言

为讨论一个古老的课题而着手写这本书的时候,首先想着如何将一些新的内容奉献给读者,倘若真使读者感到新意,笔者将无限欣慰。

燃烧是一个与人类的联系由来已久、非常复杂的现象,虽经长达几千年的研究探索,仍有许多未解疑团。同种燃料可以缓慢燃烧,也可以加速燃烧、爆炸甚至爆轰。如果人们不能有效地控制其燃烧方式,则可能导致灾难性后果。

经济的迅猛发展引起工业和交通的诸多变化,如新型产业的出现、新技术新工艺的采用、生产规模的扩大、生产布局的紧凑化以及超大型容器的使用等,这些都伴随着火灾或爆炸灾害的潜在危险。近年来工业灾害不断发生,其规模和危害程度日趋严重,从而引起人们的关注。另一方面,民用燃料的爆炸对目标致命的摧毁也给兵器研制提供了新思路,例如燃料—空气炸药便以民用燃料为基本原料。

鉴于此,本书力图从理论上阐述两相系统的燃烧问题。基于统一的两相反应流方程,讨论湍流燃烧、爆炸和爆轰,介绍它们各自的存在条件和特点以及相互联系与转换。全书共八章:第一章概论,介绍化学反应流的基本概念和基本方程以及燃烧的基本方式;第二章湍流燃烧,介绍湍流模型、湍流燃烧的概率密度分布函数,旋涡破碎模型和统计模型;第三章两相湍流燃烧,介绍两相反应流基本方程,两相湍流燃烧的单流体、多流体和颗粒轨道模型;第四章液滴燃烧,除介绍古典模型外,还讨论古典模型的推广,如液滴瞬态非定常燃烧、多组元液滴燃烧、对流燃烧和超临界燃烧等;第五章粉尘燃烧,介绍无孔颗粒、多孔颗粒、金属颗粒和含挥发分颗

粒的燃烧;第六章两相爆炸,介绍无火焰阵面的均态热爆炸,密闭容器中低速火焰导致的爆炸以及直管或障碍物诱导的湍流加速火焰和由此生成的激波;第七章两相爆轰,主要指悬浮粉尘或液滴中的爆轰波,讨论激波与粉尘或液滴的相互作用、爆轰波的一维结构和爆速的计算;第八章薄膜爆轰,即壁面液体薄膜或沉积粉尘导致的爆轰,讨论燃烧边界层、爆轰波的二维结构和爆速的计算。

特别要感谢国家自然科学基金委员会,它使作者有机会在参加重大项目“工业爆炸灾害力学研究”的过程中查阅大量资料和从事有价值的科学研究,本书的内容大都与之有关。本书主要取材于国内外学者们的文章与著作以及作者的研究成果。书稿作为教材曾在课堂中使用,并得以修改与充实。这次有幸付印出版,恳请更多的读者批评赐教。

作 者

1997 年 4 月于南京

目 录

第一章 燃烧概论	1
1.1 基本概念和基本方程	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 基本方程	5
1.1.3 火焰	8
1.2 定常燃烧	10
1.2.1 慢燃	10
1.2.2 快燃	15
1.2.3 爆轰波	18
1.3 非定常燃烧	25
1.3.1 弱激波诱导的非定常燃烧	25
1.3.2 非定常诱导区	27
1.3.3 准定常燃烧区	28
第二章 湍流燃烧	31
2.1 湍流	31
2.1.1 涡量输运方程	31
2.1.2 湍流	36
2.2 湍流模型	41
2.2.1 Reynolds 分解	41
2.2.2 湍流模型	44
2.2.3 可压缩湍流	50
2.3 湍流燃烧	54
2.3.1 反应速率的直接封闭	55
2.3.2 概率密度分布函数(PDF)	57
2.3.3 旋涡破碎模型	65

2.3.4 统计模型	68
第三章 两相湍流燃烧	72
3.1 两相流守恒方程	72
3.1.1 体积平均值及其守恒方程	72
3.1.2 相间输运	77
3.2 颗粒悬浮流	84
3.2.1 混合物热力学	84
3.2.2 颗粒受力	89
3.2.3 两相热传导	94
3.2.4 颗粒悬浮流守恒方程	97
3.3 两相湍流燃烧	99
3.3.1 均相模型	99
3.3.2 分离流模型	105
第四章 液滴燃烧	121
4.1 扩散	121
4.1.1 摩尔流率	121
4.1.2 Fick 定律	122
4.1.3 气体中的扩散系数	125
4.2 液滴蒸发	127
4.2.1 液滴蒸发模型	127
4.2.2 d^2 定律	129
4.2.3 温度分布	130
4.2.4 Clausius—Clapeyron 方程	131
4.3 液滴燃烧	132
4.3.1 Shvab—Zeldovich 变换	132
4.3.2 瞬时反应模型	134
4.4 古典模型的修正	138
4.4.1 瞬态过程	138
4.4.2 多组元液滴	141
4.4.3 对流效应	145
4.4.4 超临界燃烧	150
第五章 粉尘燃烧	153

5.1 多孔颗粒	153
5.1.1 孔结构	153
5.1.2 孔内扩散	155
5.1.3 孔内流动	159
5.1.4 孔内反应	161
5.2 外部流场	164
5.2.1 Stefan 流	164
5.2.2 浓度和温度分布	165
5.3 无孔颗粒燃烧	167
5.3.1 缩球模型	167
5.3.2 缩核模型	172
5.4 多孔颗粒燃烧	176
5.4.1 全气化模型	176
5.4.2 非全气化模型	182
5.5 颗粒的气相燃烧	186
5.5.1 含挥发分的颗粒燃烧	186
5.5.2 金属颗粒燃烧	189
第六章 两相爆炸	198
6.1 均态热爆炸	198
6.1.1 孤立物系	199
6.1.2 封闭物系	201
6.1.3 敞开物系	203
6.1.4 两相体系	207
6.2 密闭容器中低速燃烧导致的爆炸	209
6.2.1 气相爆炸	209
6.2.2 粉尘爆炸	218
6.2.3 气云爆炸	225
6.3 火焰诱导激波	227
6.3.1 匀速火焰诱导的激波	227
6.3.2 加速火焰诱导的激波	236
6.4 湍流加速火焰	240
6.4.1 管内火焰加速	240

6.4.2 障碍物导致的火焰加速	245
第七章 两相爆轰	255
7.1 两相爆轰波一般特性	256
7.1.1 颗粒悬浮流中的正激波	256
7.1.2 两相爆轰波	261
7.2 气云爆轰	265
7.2.1 激波作用下液滴的变形和雾化	265
7.2.2 激波作用下液滴的点火与局部爆炸	274
7.2.3 一维 ZND 模型	280
7.3 粉尘爆轰	284
7.3.1 一维 ZND 模型	284
7.3.2 双阵面粉尘爆轰	292
第八章 薄膜爆轰	296
8.1 反应边界层	296
8.1.1 边界层方程	296
8.1.2 自模拟解	298
8.1.3 壁面条件	301
8.1.4 积分关系式	303
8.2 液体薄膜爆轰	304
8.2.1 燃烧边界层	304
8.2.2 壁面条件	307
8.2.3 Chapman-Jouguet 条件	308
8.3 粉尘薄膜爆轰	312
8.3.1 燃烧边界层	312
8.3.2 Chapman-Jouguet 条件	321
参考文献	323

第一章 燃烧概论

燃烧是一种复杂的物理化学现象,相同组分的可燃混合物在不同条件下可以具有迥异的燃烧方式,其燃烧速度可在每秒几米至几千米的范围内变化。

燃烧是带化学反应的流动,因此可用一组反应流守恒方程来描述,燃烧方式的差异与此类方程的固有属性有关。方程具有强烈的非线性,通常不易求解。为便于讨论,本章在不失问题本质的前提下,根据不同情况,对方程进行简化并据此讨论各种燃烧方式所具有的特点。

本章内容包括:化学反应流的基本概念和基本方程;定常燃烧,包括慢燃、快燃和激波诱导的燃烧,即爆轰波;非定常燃烧,讨论激波与火焰之间的相互影响。

1.1 基本概念和基本方程

1.1.1 基本概念

一、平衡体系

用边界将一定量的物质从环境中分离出来便构成一个热力学体系。这里的边界可以是容器一类的实际物理边界,也可以是虚构的任意封闭表面。体系可以通过边界与环境相互作用,根据这种作用可将体系分为三类:

(1)孤立体系 体系与环境之间既无能量交换,也无质量交换;

(2) 封闭体系 体系与环境之间仅有能量交换, 而无质量交换;

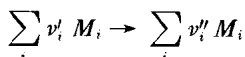
(3) 敞开体系 体系与环境之间既有能量交换, 也有质量交换。

在不受外界影响时, 如果体系的宏观上可测量的性质如压力、温度、体积等皆不随时间而变化, 称体系处于热力学平衡态, 可用状态函数来描述。状态函数分为两类: 强度性质和容量性质, 前者不具有可加性, 如压力、温度和密度等, 后者则具有可加性, 整体的值等于各部分值的和, 如内能、焓和熵等。两个容量性质相除便得到强度性质, 例如单位质量的内能称为比内能为强度性质, 类似的还有比焓、比熵和比容等等。

流动体系不能严格地满足热力学平衡的要求, 为描述此类体系的状态, 须对平衡概念作某些推广。流体的连续介质模型将流体质点视作数学上的点, 但微观上则认为该点内部包含不可计数的分子以构成热力学体系。当这类体系处于平衡态时, 则称此类平衡为当地平衡。质点在流动过程中不断改变其状态, 如果这种变化是一系列的平衡过程, 该质点每一瞬间皆处于平衡态, 称此为瞬时平衡。这样, 便可用具有时空分布的状态函数来描述流动系统。

二、反应度

化学反应计量方程的通式为



其中 M_i 表示单位摩尔的 i 组分, ν_i' 和 ν_i'' 分别为反应物和生成物的化学反应计量系数。该式说明消耗 $\nu_i' - \nu_i''$ 摩尔的 i 组分可生成 $\nu_i'' - \nu_i'$ 摩尔的 j 组分。因此

$$\frac{\Delta N_1}{a_1} = \frac{\Delta N_2}{a_2} = \dots = \frac{\Delta N_i}{a_i}$$

其中 ΔN_i 为反应导致的组分 i 的摩尔数的变化, $a_i = \nu_i'' - \nu_i'$ 为计量系数, $a_i < 0$ 为反应物, 反之为产物。上式可写成

$$\frac{dn_i}{a_i} = d\varepsilon$$

其中 n_i 为组分 i 的摩尔浓度, ε 称为基于摩尔的反应度。

若用 i 组分摩尔浓度的变化速率 $\dot{W} = \frac{dn_i}{dt}$ 来表示化学反应速率, 有

$$\frac{\dot{W}_i}{a_i} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \dot{W}$$

对于一个反应, $\dot{W}_i$ 的值通常是不同的, 与组分的选择有关, 但 $\dot{W}$ 的值并不因此而变化, 故称为通用反应速率。

由于反应过程中质量守恒, 故

$$\sum_i \nu_i' W_i = \sum_i \nu_i'' W_i = W$$

其中 W_i 为 i 组分的分子量。于是

$$\sum_i \tilde{\nu}_i' \{M_i\} = \sum_i \tilde{\nu}_i'' \{M_i\}$$

其中 $\{M_i\}$ 表示单位质量的 i 组分, $\tilde{\nu}_i = \frac{\nu_i W_i}{W}$, 进而有

$$\frac{dY_i}{b_i} = d\lambda$$

或

$$\frac{\dot{\psi}_i}{b_i} = \frac{d\lambda}{dt} = \dot{\psi}$$

其中 Y_i 为 i 组分的质量分数, $b_i = \tilde{\nu}_i'' - \tilde{\nu}_i'$, λ 为基于质量反应度,

若令 $\lambda = \frac{Y_i - Y_{i,u}}{Y_{i,b} - Y_{i,u}}$, 脚标 u 和 b 表示反应前和完全反应后, 则反应过程中 λ 从 0 变到 1。 $\dot{\psi}$ 为基于质量的通用反应速率。

三、反应热

处于热力学平衡状态的体系称为简单热力学体系, 其状态可用两个选作独立变量的状态函数来确定, 其余的状态函数与独立变量之间满足一定的方程, 称为状态方程。例如选压力 p 和温度 T 为独立变量时, 比焓 h 应满足状态方程 $h = h(T, p)$ 。对于带化学反应的体系, 由于建立化学平衡所需时间较建立热动平衡长, 故可认为体系处于热力学的平衡态和化学反应的冻结态, 因此, 体系的状态还与各组分的浓度有关。但浓度的变化是由化学反应方程制约的, 从而可用反应度来替代, 于是 $h = h(p, T, \lambda)$, 其中 λ 的分量 λ_i

表示第 j 个独立反应的反应度。微分该式

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_{p, \lambda} dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_{T, \lambda} dp + \left(\frac{\partial h}{\partial \lambda} \right)_{T, p} \cdot d\lambda$$

由于 $h = \sum Y_i h_i$, 其中 $h_i = h_{0i} + \int_{T_0}^T c_{p,i} dT$, 脚标“0”表示标准状态, h_{0i} 为标准状态下 i 组分的生成焓, $c_{p,i}$ 为组分 i 的定压比热, 故

$$\left(\frac{\partial h}{\partial \lambda_i} \right)_{T, p, \lambda_k (k \neq i)} = \sum b_i h_{0i} = Q$$

其中 Q 为第 j 个反应的反应热, $Q < 0$ 为放热反应, 反之则为吸热反应。当 $c_p = \text{常数}$ 时

$$Q = \sum b_i h_{0i} \quad (1-1)$$

显然, $Q_i = \frac{Q}{b_i} = \frac{\sum h_{0i} b_i}{b_i}$, 其中 Q_i 表示组分 i 的反应热。故

$$\sum \dot{\psi}_i h_{0i} = \dot{\psi} \sum b_i h_{0i} = \dot{\psi} Q_i = \dot{\psi} Q \quad (1-2)$$

对于完全气体, $\left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_{T, \lambda} = 0$, 故

$$dh = c_p dT + Q \cdot d\lambda \quad (1-3)$$

其中 $c_p = \sum Y_i c_{p,i}$, 积分该式

$$h = h_{th} + h_{ch} \quad (1-4)$$

其中 $h_{th} = c_p T$ 称为热焓, $h_{ch} = Q \cdot \lambda$ 称为化学焓。

四、热性系数和热性

引进物理量 σ , 其定义式为

$$\sigma = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial \lambda} \right)_{p, h}$$

用来描述化学反应导致的流团体积的变化, 其中 ρ 为密度, v 为比容。

考虑单反应情形, 对于状态方程 $v = v(\lambda, p, T(\lambda, \rho, h))$ 有

$$\left(\frac{\partial v}{\partial \lambda} \right)_{p, h} = \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_{p, \lambda} \left(\frac{\partial T}{\partial \lambda} \right)_{h, p} + \left(\frac{\partial v}{\partial \lambda} \right)_{p, T}$$

令 $\alpha_f = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_{p, \lambda}$ 称为膨胀系数, 可以证明 $\alpha_f > 0$ [1]。