

气相爆轰动力学

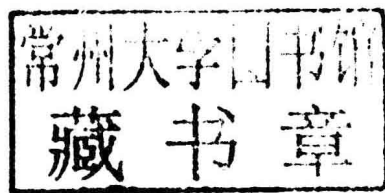
张 博 白春华◎著



科学出版社

气相爆轰动力学

张 博 白春华 著



科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书较为系统地论述了气相爆轰动力学的主要理论方法与基本成果,内容涉及气相爆轰研究基础及现象、爆轰状态与爆轰波结构和直接起爆引起爆轰等基本问题。全书共分三篇十章:第一篇概述气相爆轰理论基础、爆轰测试技术和可燃混合气体中爆轰现象;第二篇介绍爆轰接近极限时的传播机理与结构、爆轰胞格尺寸的测试技术与规律分析及爆轰临界直径;第三篇为高电压点火有效能量的测量及其特性、可燃混合气体直接起爆临界能量的规律和直接起爆临界能量的预测。本书着力阐述气相爆轰动力学实验和理论研究的新方法、新认识和新进展。

本书可供安全科学与工程、矿业工程、兵器科学与技术以及空气动力学、工程热物理等学科的研究人员、工程技术人员、高校教师阅读,也可作为有关专业本科生和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

气相爆轰动力学 / 张博, 白春华著. —北京: 科学出版社, 2012
ISBN 978-7-03-034203-4

I. ①气… II. ①张… ②白… III. ①气相-爆震-气体动力学 IV. ①0381

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第083511号

责任编辑: 张 析 刘志巧 / 责任校对: 宋玲玲
责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 东方人华

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社编务公司排版制作

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012年5月第 一 版 开本: B5 (720 × 1000)

2012年5月第一次印刷 印张: 16 1/4

字数: 312 000

定价: 65.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

爆轰学是研究爆炸发生与发展规律、爆轰状态与传播以及爆轰波结构等科学问题的一门科学，其中包含力学和化学、流体与固体、载荷和介质的耦合等诸多复杂问题。爆炸物质根据其物理属性可分为气相、液相、固相及其混合相，气相爆轰是爆轰学重要组成部分并具有其独特之处。描述气相爆轰特征的重要参数包括：爆轰胞格尺寸、临界管径、起爆临界能量以及浓度极限等，这些参数能够表现气体爆轰的本质特征。

本书以作者研究成果为主，系统地介绍了涵盖气相爆轰本质特征的气相爆轰动力学的诸多热点和难点问题，结构上分为三个部分，即气相爆轰研究基础及现象、爆轰状态与爆轰波结构、直接起爆引起爆轰，深入描述了气相爆轰形成机理、状态量化以及传播规律，这些研究将有助于推动气相爆轰学研究从宏观向微观发展，并丰富了爆轰学的内容，同时能够对工业气相爆炸事故预防与防护起到积极的指导作用。

本书在写作上也很有特色，理论与实验紧密结合，基础和应用有机结合。在内容的论述上，理论概念清楚，实验方法严谨，两者相辅相成，易于读者领会和掌握。书中内容既包含高水平的基础理论，也有创新的研究方法，凝聚了作者多年研究实践的认识、体会和成果。相信读者从书中不仅能获得有用的知识，还能得到关于科研方法的有益启示。

冯长根 教授

中国科学技术协会 副主席

2012年5月

前 言

爆轰学是一门古老而又年轻的学科。随着现代科学技术的迅速发展,爆轰学的研究领域已远远超出它的奠基者 W. Doring、G. I. Taylor、J. von Neumann、D. L. Chapman、E. Jouguet 和 Y. Zeldovich 等在 20 世纪初创立这门学科时所研究的范围。随后,爆轰学在常规武器战斗部、航天飞行器推进剂、火工品甚至核武器重要部件等设计研制中,起到了越来越大的作用,这些应用同时也推动了爆轰学的迅速发展。

气相爆轰动力学作为爆轰学的一个重要组成部分,对其进行研究与研究液相、固相及混合相的爆轰相比相对简单,并且爆轰的起爆和传播机理与非气相爆轰有相似之处,因此越来越多的科学家投入研究。气相爆轰动力学的研究分为理论研究、实验研究和数值计算三个方面。理论和实验研究的重要性是人所共知的,鉴于气相爆轰问题的复杂性,随着计算机技术的发展,数值计算日益显得重要和不可缺少,这也是爆轰研究的发展方向,因此理论和实验的研究与数值研究相互促进发展。

气相爆轰动力学同时也是一门具有广阔应用前景的学科,它涉及可燃混合气体爆轰的激发、稳定与不稳定爆轰波的传播现象、爆轰状态与爆轰波结构和直接起爆形成爆轰的机理与相关理论表述,以及爆轰过程的研究方法与技术等内容。因此,这门学科对各种易燃易爆气体爆轰特性研究及工业生产安全和国防武器装备的研制都具有重要的实际意义。在工业生产的各个领域,如化工、能源和矿业等发生的爆炸事故预防、控制和防护技术措施的基础主要是气体爆轰动力学问题。

本书首先介绍气相爆轰动力学的有关基础知识及现象,系统推导爆轰波基本方程组,利用清晰的理论概念解释爆轰学最基本的 CJ 理论与 ZND 模型,对 CJ 解的性质和雨果尼奥(Hugoniot)关系也做了详细的探讨。气相爆轰问题的研究依赖于测试设备和技术,鉴于此,本书介绍了爆轰压力信号的采集、到达时间测量及爆轰反应图像捕捉的方法和技术,这些为爆轰现象的讨论提供依据。书中也介绍了一些气相爆轰的现象,为读者了解爆轰现象提供直观的实验图像。

本书主要介绍爆轰状态与爆轰波结构和直接起爆引起爆轰等问题。爆轰状态和爆轰波结构部分内容包括:爆轰接近极限时的传播机理及结构、爆轰胞格尺寸的测量与分析和爆轰的临界直径等,这些都是研究气相爆轰机理的基础内容,书中同时介绍了利用实验研究的方法,对以上问题进行深入探讨和分析。对于直接

起爆引起爆轰问题, 由于对点火能量要求较苛刻, 在通常情况下不容易发生, 也通常被忽视而研究较少。然而, 一旦起爆源产生强烈的爆炸波, 即可通过直接起爆产生爆轰, 其在瞬间产生巨大能量, 爆轰瞬间完成, 因此通常造成严重的人员伤亡和财产损失。本书对强起爆源产生的爆炸波特征进行分析, 得出了引起直接起爆的有效能量, 在此基础上建立了可靠的实验系统, 对一系列的可燃混合气体在不同状态下的临界能量进行测量, 并分析临界能量的特征和规律, 给出了明确的结论。

总的来说, 本书较为系统地论述了气相爆轰研究基础及现象、爆轰状态与爆轰波结构、直接起爆引起爆轰等方面内容, 并且以作者本人及合作者近年来所获得的部分研究成果为主。书中还列举了大量的参考文献, 其目的在于帮助读者全面而深入地了解气相爆轰及其相关理论, 并为进一步研究提供必要的基础和线索。相对于过去在爆轰学方面的一些出版物而言, 本书着力阐述了气相爆轰动力学研究的新方法、新认识、新进展和新方向。本书力图把理论与实验紧密结合, 将基础和应用有机结合。

本书的研究工作主要依托爆炸科学与技术国家重点实验室(北京理工大学)和加拿大 McGill 大学冲击波物理实验室(Shock Wave Physics Lab)进行。爆炸科学与技术国家重点实验室(北京理工大学)提供了先进的研究条件和部分研究经费。张奇、刘庆明、王仲琦等诸位教授以及博士研究生陈健、曾一鑫等都给予了大力支持与帮助。特别感谢加拿大 McGill 大学 John H. S. Lee 教授对本研究的指导和建议, 如果没有 Lee 教授的帮助, 就不会有本书的出版。衷心感谢加拿大 Concordia 大学 Hoi Dick Ng 副教授在研究过程中进行有益的讨论。McGill 大学的研究生 A. Jesuthasan 提供了本书第 5 章部分实验数据、J-S. Grondin 和 S. Kamenskih 等曾参与部分理论和实验工作, 因此书中的内容也融入了上述人员的劳动成果, 在此一并致谢。

衷心欢迎读者对本书提出宝贵意见。

著 者

2012 年 3 月 6 日

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
参考文献	6

第一篇 气相爆轰研究基础及现象

第 2 章 气相爆轰理论基础	13
2.1 爆轰波基本方程	13
2.1.1 守恒方程	13
2.1.2 爆轰反应方程	14
2.1.3 爆轰产物状态方程	16
2.2 爆轰基本模型	17
2.2.1 CJ 理论	17
2.2.2 ZND 模型	17
2.3 爆轰波、爆燃波基本关系	18
2.3.1 瑞利线和雨果尼奥曲线	18
2.3.2 CJ 解的性质讨论	21
2.3.3 雨果尼奥关系讨论	23
2.3.4 沿着雨果尼奥曲线熵的变化规律	27
2.3.5 爆燃波的基本方程和关系	31
2.4 强点源爆炸引起爆轰问题	35
2.4.1 强点源爆炸波	35
2.4.2 强点爆炸波衰减规律讨论	37
2.4.3 爆炸波能量方程	40
2.4.4 爆轰内核尺寸及临界起爆能量	44
参考文献	45
第 3 章 爆轰测试技术	46
3.1 爆轰波压力信号采集	46
3.1.1 压阻式传感器	46

3.1.2 压电式传感器	46
3.2 爆轰波到达时间测量	47
3.2.1 离子探针	47
3.2.2 光学探针	48
3.2.3 光纤传感器	48
3.2.4 冲击波探针	49
3.3 爆轰反应图像捕捉	50
3.3.1 烟熏技术	50
3.3.2 纹影技术	51
3.3.3 激光诱导荧光技术	52
3.3.4 高速扫描成像技术	56
参考文献	58
第4章 可燃混合气体中爆轰现象	60
4.1 爆轰波传播现象	60
4.1.1 实验观察	60
4.1.2 爆轰形成机理	63
4.1.3 边界条件对爆轰的影响	67
4.1.4 爆轰动态参数	72
4.2 直接起爆引起爆轰现象	82
4.2.1 直接起爆的方法	84
4.2.2 临界起爆能量	87
4.2.3 研究直接起爆面临的问题	91
参考文献	92

第二篇 爆轰状态与爆轰波结构

第5章 爆轰接近极限时的传播机理与结构	99
5.1 实验系统和方法	100
5.1.1 实验装置	100
5.1.2 点火系统	101
5.1.3 混合气体的选择	101
5.1.4 实验步骤	101
5.1.5 实验技术与现象判断	102
5.2 爆轰速度分析	103
5.2.1 圆管内爆轰波速度	104

5.2.2 环形管内爆轰波速度	106
5.2.3 ZND 诱导区长度分析	109
5.3 爆轰结构分析	111
5.3.1 爆轰极限内的胞格结构	111
5.3.2 接近爆轰极限时的胞格结构	113
5.3.3 接近爆轰极限时的螺旋爆轰结构	119
5.4 超压分析	121
5.4.1 爆轰极限内的爆轰波超压	121
5.4.2 接近爆轰极限时的爆轰波超压	122
5.4.3 爆轰极限之外的爆燃波超压	123
参考文献	123
第 6 章 爆轰胞格尺寸的测量与分析	125
6.1 实验系统和方法	126
6.1.1 混合气体的预混方法	126
6.1.2 测试装置	127
6.1.3 测试方法	127
6.1.4 实验条件	128
6.1.5 爆轰速度测量	128
6.1.6 爆轰胞格尺寸的测量方法	130
6.2 可燃混合气体的爆轰胞格	131
6.2.1 燃料与氧气混合气体	131
6.2.2 燃料与空气混合气体	133
6.2.3 惰性气体稀释的混合气体	135
6.3 爆轰胞格的规律分析	136
6.3.1 初始压力的影响	136
6.3.2 当量比的影响	136
6.3.3 惰性气体稀释的影响	137
6.4 胞格结构中的化学反应过程分析	138
6.4.1 稳定胞格结构	139
6.4.2 中度不稳定胞格结构	141
6.4.3 极不稳定胞格结构	142
6.5 爆轰胞格的预测	143
6.5.1 拟合曲线法	143
6.5.2 Ng 模型	144
6.5.3 特征参数法	149

参考文献	151
第7章 爆轰临界直径	153
7.1 爆轰临界管径的纹影分析	154
7.1.1 低临界和超临界管径爆轰时序图	154
7.1.2 非稳定性和稳定性混合气体中爆轰临界管径	155
7.2 实验系统和方法	159
7.2.1 实验系统	159
7.2.2 实验方法	160
7.3 可燃混合气体的爆轰临界管径分析	161
7.3.1 初始压力和临界管径	161
7.3.2 当量比与临界管径	163
7.3.3 惰性气体稀释浓度与临界管径	164
7.4 临界管径与胞格尺寸的联系	167
7.4.1 燃料与氧气和空气混合气体	167
7.4.2 氩气稀释的混合气体	169
7.5 爆轰临界管径的预测	170
7.5.1 拟合法	170
7.5.2 特征参数法	171
参考文献	172

第三篇 直接起爆引起爆轰

第8章 高电压点火有效能量的测量及其特性	177
8.1 实验装置和测试方法	177
8.1.1 高电压点火系统	177
8.1.2 电火花放电能量的计算	178
8.1.3 爆炸波测量装置	180
8.2 高电压点火产生的爆炸波特性讨论	181
8.2.1 Hopkinson-Sachs 标度定律	181
8.2.2 可变能量爆炸性质	184
8.3 1/4 周期放电能量与直接起爆有效能量	188
8.3.1 问题的提出——初始 1/4 周期放电能量是否等价于引起直接起爆的有效能量	188
8.3.2 证明方法	188
8.3.3 证明结论	193

8.3.4 1/4 周期放电能量与临界能量理论值和实验值比较	194
参考文献	197
第 9 章 可燃混合气体直接起爆临界能量的规律	199
9.1 实验原理和方法	199
9.1.1 实验系统	199
9.1.2 点火能量确定	200
9.1.3 临界起爆状态判断	200
9.1.4 临界起爆能量确定	201
9.2 可燃气体与氧气混合物直接起爆临界能量	202
9.2.1 测试气体及初始条件	202
9.2.2 初始条件对临界起爆能量的影响	202
9.2.3 高浓度氩气稀释对临界能量的影响分析	205
9.3 可燃气体与氧气混合物临界能量规律分析	210
9.3.1 临界起爆能量的比例分析	211
9.3.2 爆轰敏感度分析	213
9.4 可燃气体和一氧化二氮混合物直接起爆临界能量及规律分析	214
9.4.1 $\text{H}_2\text{-N}_2\text{O/O}_2\text{-Ar}$ 直接起爆临界能量	215
9.4.2 $\text{C}_2\text{H}_2\text{-N}_2\text{O-Ar}$ 直接起爆临界能量	221
参考文献	228
第 10 章 直接起爆临界能量的预测	231
10.1 临界起爆能量的预测方法和模型	231
10.1.1 临界起爆能量拟合曲线法	233
10.1.2 表面积能量模型	233
10.1.3 活塞做功模型	234
10.2 基于爆轰胞格预测临界起爆能量	235
10.2.1 临界起爆能量与胞格尺寸的关系	235
10.2.2 胞格拟合曲线法	237
10.2.3 Ng 模型法	237
10.2.4 胞格特征参数法	238
10.3 基于临界管径预测临界起爆能量	240
10.3.1 临界起爆能量与临界管径的关系	240
10.3.2 $\text{H}_2\text{-O}_2/\text{空气}$ 混合气体	242
10.3.3 $\text{C}_2\text{H}_2\text{-N}_2\text{O-Ar}$ 混合气体	245
参考文献	247

第1章 绪 论

随着经济的不断发展，现代化程度不断提高，产业向大型化、集中化发展。物质及能量的高度集中，必然带来大量的安全问题。例如，现代工业生产过程中不可避免地涉及大量的易燃易爆气体，一旦可燃物质与空气混合并达到一定浓度范围，在一定点火能量作用下即可发生燃烧、爆炸，甚至破坏力更强的爆轰，在很大的范围内造成财产损失和人员伤亡。

爆炸，是自然界中经常发生的一种物理或化学物理的过程。在爆炸过程中，爆炸物质以极快的速度释放出巨大能量，爆炸瞬间所产生的高压气体产物或被瞬态加热汽化的物质对周围介质做功，并发出各种能量辐射等对目标产生破坏作用。爆炸最主要的特征是可在周围介质中瞬间产生压力突跃，这是造成破坏效应最重要的原因之一。

根据爆炸所释放能量速率大小和产生的爆炸波传播速度的快慢，把爆炸分为爆燃和爆轰。爆燃以每秒数米至数百米的亚音速传播，而爆轰波则以每秒千米以上的超音速在未反应介质中传播。所谓爆轰是一种前导冲击波和化学反应强耦合，并且自持传播具有强间断的现象，波前介质经冲击波压缩至较高的温度和密度，从而能够在很小尺度内迅速发生化学反应，而释放的化学能量又反过来支持前导冲击波的传播。爆燃和爆轰过程有着本质性的区别：爆燃过程是以热传导、热辐射及燃烧气体扩散的方式进行的，这个过程进行缓慢，爆燃波阵面两侧的压力、温度和密度都是连续变化的；爆轰过程则不同，它以爆轰冲击压缩的方式进行，这个过程是瞬间完成的，爆轰波两侧的压力、温度和密度都是突跃上升的。因此，对于同一种可燃混合物，爆轰状态比爆燃状态造成的破坏效应要严重得多。人们一方面希望在可控制的范围内利用它高效的能量投放能力，如爆轰发动机的应用；另一方面则希望避免它在各种不恰当场合的意外出现，以免造成严重的破坏和损失，如瓦斯爆炸、粉尘爆炸等。爆燃转爆轰一旦失控将会引起灾难性后果，碳氢燃料（尤其是氢气、瓦斯气体）的爆炸事故时有发生^[1-4]。因此，如何预防或减小爆炸事故的危害、如何有效地控制爆轰的形成，是所有研究爆燃和爆轰首先需要面对的问题^[5-13]。

爆轰的发现可追溯到15世纪，有学者发现当某些特定的化合物（如雷酸汞）受到强烈的冲击或者震动时，通常出现强烈的化学分解反应。19世纪60年代，随着当时科技的发展，捕捉高速燃烧现象和测定燃烧波速度的仪器被运用于研究

燃烧问题,发现存在一种远高于一般火焰传播速度的燃烧波,这种燃烧波的传播速度不随点火能量、管径大小而改变,只与不同种类物质相关,这种燃烧波就是爆轰波。Abel^[14]最早得到硝化棉炸药的爆轰速度,Berthelot 和 Vielle^[15, 16]对一系列的气体燃料(如 H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_2)与氧化剂(如 O_2 、 NO 、 N_2O_4)以及加入惰性气体组成的混合气体进行试验,从而确定了在气体爆炸性混合中的确存在爆轰现象。

爆轰波理论方面的研究也伴随着爆轰的发现应运而生,Chapman^[17]和 Jouguet^[18]提出定量预测可燃混合气体特性的理论。1899年,Chapman 首先提出可计算爆轰波速的理论,它将爆轰波面视为一道间断,波前气体跨越间断立即转化为高温产物。1905年,Jouguet 也独立提出了声速解理论,即爆轰波后的气流相对波面以声速运动。实际上他们描述的都是跨波阵面守恒方程的解,但 Jouguet 从理论上解释了该解的物理必然性。关于该问题的讨论以及此后逐步完善的相关理论就是 Chapman-Jouguet 理论(简称 CJ 理论)。CJ 理论能够很好地预测理想状况下爆轰波的传播现象,然而 CJ 理论完全忽视了爆轰的结构(也即爆轰波从反应物到产物的转变过程),因此它不能用于解释爆轰波的传播机理。

真实的爆轰波并非如一维稳定的 CJ 爆轰,约半个世纪前 Fickett 和 Davis^[19]已经证明在爆炸性混合气体中的爆轰波具有自持性和不稳定性,并且为三维非固定的胞状结构。20世纪40年代,由 Zeldovich^[20]、von Neumann^[21]和 Doring^[22]引入有限速率化学反应,将爆轰波面视为前导冲击波与波后反应区的组合结构,其中前导冲击波将波前气体压缩至较高的温度和密度,直接引发一定距离后的化学反应,反应释热又反过来支持前导冲击波前进。这种层流爆轰波面结构被称为 Zeldovich-Neumann-Doring 模型,简称 ZND 模型。虽然 ZND 模型仍是简单的层流结构,但是它已经包含了爆轰点火、传播、熄灭等机制,很多真实爆轰波现象在此基础之上能够得到一定的解释,如速度偏低(低于 CJ 速度)和临界爆轰直径问题。爆轰波面结构受管壁黏性和热传导作用,热量和动量发生损失,因此自点火引发的爆轰波速有所降低,管径越小则壁面损失效应越为显著,当这种损失达到某种程度,冲击波减弱和反应速度降低形成恶性循环,爆轰波面将不可避免地发生前导冲击波和反应区分离以致爆轰熄灭。

然而,经典的一维爆轰理论并没有因此失去它们的价值,不管是一维还是多维的不稳定爆轰现象,它们在平均意义上仍然具有一维理论预测的相关特性。经典 CJ 理论本质上并不否定波面的厚度,波面特征在平均意义上不随时间而改变,这可能正是 CJ 理论能够预测真实爆轰波速的原因所在。但 ZND 模型单纯反应动力学控制下的层流波面结构显然已经不能描述多维爆轰波面的平均效果(如波面厚度和反应进度等),从而也难以正确给出多维爆轰现象的一些特征参数。因此,目前爆轰研究的一个方向希望回归至一维理论并对经典 ZND 模型进行修正与完

善^[23]。

Lee 等^[24]把爆轰波的形成分为两种模式：一种是通过弱点火形成层流火焰，通过层流火焰加速到湍流状态，并最终过渡到稳定爆轰；另一种模式是借助足够强的点火源产生爆炸波而瞬间形成爆轰。前一种模式经过爆燃转爆轰过程（deflagration-to-detonation transition, DDT），是由于流动过程中各种不稳定性扰动导致低速爆燃向高速爆轰的转变。而后一种称为直接起爆，是指直接形成过驱动爆轰波并最终为 CJ 爆轰，通常借助于强烈起爆源产生的爆炸波完成，也被称为直接爆炸起爆。

对气相爆轰的系统研究始于 20 世纪 50 年代后期，Brinkley 和 Lewis^[25]基于 Karlovitz^[26]提出的湍流火焰理论而进行 DDT 的实验研究。随后 Urtiew 和 Oppenheim 等^[27, 28]通过长期的研究，并利用激波管实验观察 DDT 现象。Lewis 和 von Elbe^[29]、Kuo^[30]、Lee 等^[31-33]、Oran 和 Gamezo^[34]都很好地总结与阐述了 DDT 的机理。

一些学者对爆轰的形成和传播机理进行了研究。例如，Urtiew 和 Oppenheim^[27]在填充有氢氧混合气体的封闭长管中，利用另一端的电火花点火形成初始的层流火焰，并加速发展为湍流火焰，最终发展为爆轰。通过对现象的研究，发现 DDT 基本通过两种方式形成：一种是在湍流火焰区内部形成 DDT；另一种是在前导冲击波与火焰之间形成，即在已受热并受强烈压缩作用的物质中形成。随后的研究^[32, 33, 35, 36]进一步表明，在管道壁面上布有的障碍将导致火焰加速变快，爆轰也更容易形成。基于 Markstein^[37]的研究，Scarinci 等^[38, 39]和 Thomas 等^[40, 41]利用激波与火焰的相互作用制造更快的湍流火焰。Wagner^[42]、Knystautas 等^[43]、Boni 等^[44]发现如没有障碍物的扰动，由于缺少壁面的激波反射作用，实验中很难得到爆燃传播至自由场的 DDT 现象。Khokhlov 等^[45-48]、Oran 等^[49, 50]及 Gamezo 等^[51-53]研究了乙炔、乙烯、氢气和一氧化碳分别与空气组成的混合气体中的 DDT 现象，并分析了激波火焰相互作用和边界条件对爆燃转爆轰的影响等。

在爆轰波 DDT 过程和直接起爆过程中，热点起爆过程广泛存在，也是最基本的爆轰波形成机制。热点起爆是一个非常迅速的爆炸过程，而且热点的出现往往具有随机性，由于实验手段的限制很难对其内部的热化学反应过程进行研究。Merzhanov^[54]和 Borisov^[55]得出热点对爆轰形成过程影响极大，Zajac 和 Oppenheim^[56]提出一种流体动力学模型，在该模型中把热点作为不断扩展运动的活塞。Meyer 和 Oppenheim^[57]提出热点间隔的诱导时间必须足够小才能形成爆轰。由此 Lee 等^[58]提出了激波与能量释放的同步放大机制，也即 SWACER（shock wave amplification by coherent energy release），并认为热点周围的流场存在化学反应诱导时间（或温度）梯度，如果梯度场产生的自发反应波路径与激波/压缩波轨迹重合，就会导致激波/压缩波在传播过程中不断受到化学反应释放的能量的支持而加

速,最后达到较高的马赫数,实现激波和反应的耦合传播,即形成爆轰波。这个理论对爆轰波的热点起爆过程给出了较好的定性解释,也得到了一些实验和数值结果的支持。

除了热点之外, Lee^[59]认为爆轰易受其他因素的影响,如爆轰极限、管壁的粗糙度、管道的直径和混合气体本身的热力学状态等,基于此, Jesuthasan^[60]、Camargo 等^[61]测量了爆轰极限及爆轰接近极限时的胞格结构, Eaton 等^[62]、Barthel^[63]、Denisov 和 Troshin^[64]、Desbordes^[65]、Knystautas 等^[66]、Lee 和 Matsui^[67]、Laberge 等^[68]、Abid 等^[69]、Pedley 等^[70]、Manzhalei 等^[71]测量了各种碳氢燃料混合气体在各种初始状态下的胞格尺寸, Matsui 和 Lee^[72]、Knystautas 等^[66]、Zeldovich 等^[73]、Mitrofanov 和 Soloukhin^[74]、Edwards 等^[75]、Carnasciali 等^[76]、Zhang 等^[77, 78]、张博和白春华^[79]研究了爆轰临界管径问题。

爆轰除了通过弱点火引起的火焰加速形成之外,还可通过直接爆炸形成,也即直接起爆。爆轰的直接起爆指的是爆轰瞬间形成而没有经历火焰加速的预爆轰阶段。所谓的“瞬间”是指起爆源在极短的时间内产生强爆炸波能量,并作用于混合气体而形成爆轰,而不是一般通过火焰加速引起爆轰^[31, 59]。在可燃气体发生爆炸的事故中,绝大部分的事故都是由于可燃物质的燃烧转化为爆燃而对周围的设施和人员产生危害,由于直接起爆需要点火源在瞬间产生足以引起爆轰的起爆能量,对于起爆源点火能量要求比较苛刻,所以通常被忽略,不能引起足够的重视。

Lafitte^[80, 81]最早利用直接起爆形成球形爆轰,随后, Zeldovich 等^[73]系统地对直接起爆相关机理进行研究,并发现直接起爆的本质就是起爆源在瞬间产生足够强的能量。对于给定的爆炸性混合气体,通过实验的方法来测定形成球形爆轰的最小起爆能量,是判断该混合物敏感性最直接和有效的方法^[31, 59]。

直接起爆可由多种起爆源瞬间起爆产生强爆炸波而形成。Bull 等^[82, 83]和 Alekseev^[84]利用高能炸药点火研究了碳氢燃料与空气的直接起爆问题。Knystautas、Lee 和 Matsui^[67, 85]利用 $L-R-C$ 电路产生的电火花点火,并与高能炸药点火和平面爆轰波诱导产生球形爆轰的点火能量分别进行比较。Knystautas 和 Lee^[85]、Zhang 等^[86]分别通过理论和实验发现,只有最初 1/4 周期的放电能量才真正作用于直接起爆。Matsui 和 Lee^[72, 87]对电火花点火中不同几何形状的电极及电极之间的不同间距对放电能量的影响做了研究。Berets 等^[88]对冲击波诱导爆轰做了比较系统的研究。Mooradian 和 Gordon^[89]用爆轰波替代冲击波诱导来研究直接起爆问题。Norrish 等^[90, 91]、Thrush^[92]、Klimkin 等^[93]、Kataoka 等^[94]和 Lee 等^[58]通过激光诱导的方法形成起爆。解立峰等^[95]和姚干兵等^[96]通过立式激波管对环氧丙烷(PO)、正己烷、癸烷分别与空气组成的混合气体进行了直接起爆。Zeldovich^[73]早期对爆轰波研究曾提出理想的爆轰波具有稳定一维 ZND 结构,爆轰波如果能自

持传播就必须满足：当爆炸波衰减为 CJ 状态时，爆炸波的半径必须至少约为诱导区的长度；并提出直接起爆的临界起爆能（ E_C ）与 ZND 诱导区长度（ Δ_1 ）的三次方成正比关系，即 $E_C \sim \Delta_1^3$ 。对于临界起爆能量的研究一直延续至今^[94, 95, 97-101]。

在国内，由于发展和加强国防的需要，爆轰问题在 20 世纪 50 年代就引起了部分学者的关注，并获得了一些具有重要工程应用价值的研究成果。北京理工大学八系编写的《爆炸及其作用》^[102]和张宝平等编写的《爆轰物理学》^[103]涵盖了近年爆轰（尤其是凝聚相）的研究进展。

国内关于爆轰及其相关问题的研究主要针对军事方面的应用而展开，然而主要集中于固相或者多相爆轰的研究，故在气相爆轰理论方面的系统性和深入程度还存在某些欠缺。同时，目前也没有专门介绍气相爆轰动力学最新进展的书籍。鉴于此，作者依托爆炸科学与技术国家重点实验室（北京理工大学）和加拿大 McGill 大学 John H.S. Lee 的冲击波物理实验室，对气相爆轰开展了系统的研究，并结合目前国内外在该领域研究的主要进展，整理成本书。希望本书能够概括气相爆轰动力学的主要理论方法与基本成果，使读者读完本书后对气相爆轰理论有比较系统、全面而深入的了解，并为进一步的研究提供线索。

本书较为系统地论述了气相爆轰研究基础及现象、爆轰状态与爆轰波结构和直接起爆引起爆轰等方面内容，全书分为三篇十章：

第 1 章为绪论，概述气相爆轰的研究历史和最新进展。

第一篇为气相爆轰研究基础及现象，内容包括第 2~4 章。

第 2 章介绍气相爆轰理论基础知识和概念。虽然这方面的内容在许多相关的书籍都能查阅得到，但它们是认识和理解气相爆轰规律和机理的基础，并为实验得到的爆轰现象提供理论支持。

第 3 章介绍爆轰压力信号的采集、到达时间测量及爆轰反应图像捕捉的方法和技术，并为爆轰现象的讨论提供依据。

第 4 章描述可燃混合气体中的爆轰现象，其中分为两部分，第一部分是爆轰状态与爆轰波结构，并介绍实验中得到的爆轰现象、爆轰形成机理、边界条件对爆轰的影响以及爆轰的动态参数（即爆轰极限、胞格尺寸和临界管径）。第二部分为直接起爆引起的爆轰，详细介绍形成直接起爆采用的多种起爆源（如高能炸药、高压电火花、激波或爆轰诱导和激光诱导）以及起爆能量对直接起爆的影响。

第二篇为爆轰状态与爆轰波结构，内容包括第 5~7 章。

第 5 章首先明确了爆轰极限的基本概念，回顾了爆轰极限研究工作的发展历程。然后，通过实验测量不同初始压力下的混合气体在圆管中和环形管中的爆轰速率、爆轰结构和超压，分析各种混合气体爆轰极限的规律和胞格结构。

第 6 章介绍用于测量爆轰胞格的实验系统，基于该系统测量甲醇蒸气与氧气混合气体在各种初始状态下的爆轰胞格。引用相关文献中爆轰胞格的数据，分析

不同初始条件（如压力、当量比和惰性气体稀释）对胞格尺寸的影响。最后，提出几种预测胞格尺寸的方法，通过与实验数据的比较验证方法的正确性和可行性。

第 7 章介绍了一种测定爆轰临界管径的实验系统，通过实验对几种典型混合气体（ $\text{C}_2\text{H}_2\text{-O}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{-2.5O}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{-4O}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4\text{-O}_2$ 、 $\text{C}_3\text{H}_8\text{-O}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{-N}_2\text{O-X}\%\text{Ar}$ 和 $\text{C}_2\text{H}_2\text{-O}_2\text{-X}\%\text{Ar}$ ）在不同初始压力下的临界管径进行测量。利用相关文献中临界管径的数据，得出各种混合气体的临界管径的规律。基于实验数据，提出几种预测临界管径的模型，并与实验数据对比，验证模型的合理性。

第三篇为直接起爆引起爆轰，内容包括第 8~10 章。

第 8 章首先分别建立高电压点火系统和爆炸波测量装置，确定电火花放电能量的计算方法，测定在空气中高压电火花产生爆炸波的参数，研究爆炸波的传播规律和特性。其次，把 $1/4$ 周期放电能量与点爆炸的数值模拟结果进行对比，验证 Lee 关于 $1/4$ 周期放电能量是引起直接起爆的有效起爆能量的论断。再次，对高压电点火各能量分布进行研究，从而为使用高压电火花作为起爆源的直接起爆的研究中计算有效点火能量提供依据。最后，通过实验得到 $\text{C}_2\text{H}_2\text{-2.5O}_2$ 加入体积分数为 70% 和 0% 氩气混合气体在不同初始压力下引起球形爆轰的点火能量，进一步验证电流最初的 $1/4$ 周期放电能量是引起直接起爆的有效能量的结论。

第 9 章建立可燃混合气体直接起爆临界能量测试系统。首先，测量了碳氢燃料（如 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_3H_8 及 H_2 ）分别与氧气混合气体的直接起爆临界能量，研究不同初始条件对临界起爆能量的影响；其次，分析可燃气体与氧气混合气体临界能量规律，得出爆炸长度与胞格尺寸及诱导区长度之间的联系，并定量计算各物质爆轰敏感度；最后，开展燃料与不同氧化剂（如 N_2O 和 O_2 ）临界能量的研究，分析不同氧化剂对临界能量的影响。

第 10 章基于直接起爆临界能量的实验数据，提出几种预测临界能量的模型和方法，并分别和几种典型物质的临界能量实验数据进行对比，验证临界能量预测模型的正确性和可行性。

参 考 文 献

- [1] Eichert H, Fischer M. Combustion-related safety aspects of hydrogen in energy applications. *Int J Hydrogen Energy*, 1986, 11(2): 117-124.
- [2] Fischer M. Safety aspects of hydrogen combustion in hydrogen energy systems. *Int J Hydrogen Energy*, 1986, 11(9): 593-601.
- [3] Hord J. Is hydrogen a safe fuel? *Int J Hydrogen Energy*, 1978, 3(2): 157-176.
- [4] Reider R, Edeskuty F J. Hydrogen safety problems. *Int J Hydrogen Energy*, 1979, 4: 41-50.
- [5] Beauvais R, Mayinger F, Strube G. Turbulent flame acceleration-mechanisms and significance for safety considerations. *Int J Hydrogen Energy*, 1994, 19(8): 701-708.
- [6] Kratzel T, Pantow E, Eichert H. Modelling of hydrogen combustion: turbulent flame acceleration and detonation. *Int J Hydrogen Energy*, 1996, 21(5): 407-414.