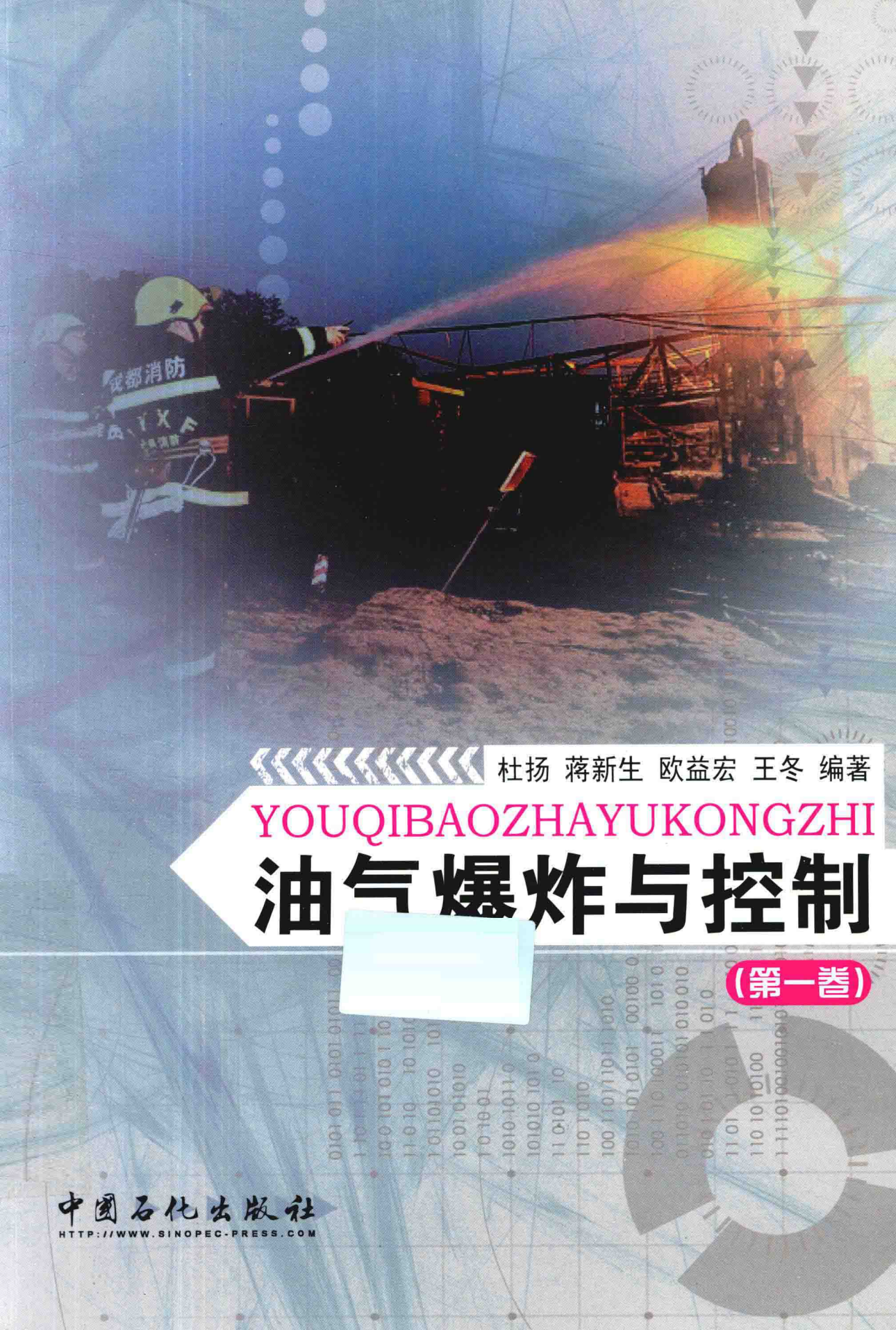




杜扬 蒋新生 欧益宏 王冬 编著

YOUQIBAOZHAYUKONGZHI

油气爆炸与控制

(第一卷)

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

油气爆炸与控制(第一卷)

杜 扬 蒋新生 欧益宏 王 冬 编著

中国石化出版社

内 容 提 要

油气爆炸与控制研究(第一卷)由上、下篇构成:上篇为油气爆炸研究理论基础,下篇为油气爆炸模拟实验与控制。上篇由绪论、气体爆炸过程的物理、化学基础、气体及油气混合物的爆炸三章组成,主要包括化学热力学、无化学反应流体的运动、热量和质量的传输、化学动力学、气体燃烧爆炸的基本模式、气体爆炸的特点以及油气混合物爆炸基础知识等;下篇由油气爆炸着火模拟实验研究、狭长受限空间油气爆炸模拟实验研究、容积式空间油气爆炸模拟实验研究、油气爆炸抑制安全技术研究、油气防爆安全技术研究五章组成,主要内容为该教学科研团队近十年的应用基础与应用技术研究部分成果。

本书作为专业性较强的专著,除了为油气安全与防护方向研究生提供一本具有参考价值的专业课教材外,也可作为相关专业研究生教学的辅助教材,还可作为该领域科研与工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

油气爆炸与控制. 第1卷 / 杜扬, 蒋新生, 欧益宏, 王冬编著. —北京: 中国石化出版社, 2013. 5
ISBN 978 - 7 - 5114 - 1921 - 7

I. ①油… II. ①杜… ②蒋… ③欧… ④王… III.
①油气 - 防爆 - 安全技术 IV. ①TE88

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 087492 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 21.75 印张 537 千字

2014 年 1 月第 1 版 2014 年 1 月第 1 次印刷

定价:58.00 元

前 言

能源、环境与安全已成为当今社会共同关心的三大重要领域。石油、成品油与天然气均为易燃易爆品，无论在开采、冶炼、储存与运输、加注与使用等各个环节中，还是在民用与军用不同工程应用背景下，其爆炸、火灾安全防护均是摆在首要地位的工作。随着现代科学技术的飞速进步以及社会发展的迫切需求，人们认识到，需要大力推进油料爆炸科学的发展作为实现油料爆炸防控有效性和经济性的科学统一的支撑。

现代科学技术的飞速进步以及社会发展的迫切需求，使不同领域爆炸科学与技术研究愈加广泛和深入，其科学与技术体系也不断形成。《油气爆炸与控制(第一卷)》作为研究油气爆炸发生、发展及防控机理与规律的专著，主要内容为由上、下两篇构成：上篇，气体及油气爆炸的基本概念及基础理论，构成了该书前三章；下篇，油气爆炸的模拟实验与控制，构成了该书的后五章。在上篇中，主要内容包括绪论、化学热力学、无化学反应流体的运动、热量和质量的传输、化学动力学、气体爆炸的基本模式及特点、油气混合物爆炸基础知识等；在下篇的油气爆炸的模拟实验与控制中，主要内容为该科研教学团队(团队成员由杜扬、蒋新生、钱海兵、王冬、欧益宏、周琳莉、周建忠、梁建军等人组成)近十年的应用基础与应用技术研究部分成果。考虑到实际需要，该部分内容主要为油气爆炸热着火模拟实验研究、狭长受限空间油气爆炸模拟实验研究、容积受限空间油气爆炸模拟实验研究、油气爆炸被动安全技术控制研究、油气爆炸主动安全控制技术控制研究。参与本书撰写和整理工作的同志有杜扬(上篇、下篇第五章)、蒋新生(下篇第二、第四章)、欧益宏(下篇第一章)、王冬(下篇第三章)。全书由杜扬整理、修改完成。

本书作为专业性较强的专著，一方面较集中地介绍作者科研团

队的部分研究成果，作者希望与该领域科研人员一起共同推进油气爆炸科学的研究进展；另一方面较系统地介绍了油气爆炸分析研究的基础理论知识，与该书专业性研究成果一起可为油气安全与防护方向研究生提供一本具有参考价值的专业课教材。另外，该书还可作为相关专业研究生教学的辅助教材，也可为该领域工程技术人员提供一定的工作参考。

需要说明的是，油气爆炸科学理论与控制涉及多学科交叉，科学问题复杂。本书只是涉及该科学理论体系与技术的一小部分；由于本书主题的限制，介绍的具体研究进展也仅是该科研教学团队近十年科研成果一部分内容(有关分析模型、数值分析等研究内容将在后续出版的《油气爆炸与控制(第二卷)》中介绍)。出版本书之意愿全在于抛砖引玉，使人们更加关注油气爆炸与控制研究的进展，支持该领域更快地发展。另外，由于作者水平有限，难免在科学观点、分析方法、阐述逻辑等方面有所偏差或有误，敬请读者批评指正。

借该书出版之际，作者衷心感谢国家自然科学基金委、总后勤部军需物资油料部、重庆市科委等部门多年来对该领域科研工作的重视和支持。对多年来在油气安全与防护方向上努力工作的科研教学团队和为本书科研成果作出贡献的已毕业和在读的博士和硕士表示最真挚的感谢！对梁建军讲师、张培理博士在该书出版过程中所作的工作表示特别感谢！

致 谢

感谢国家自然科学基金项目(批准号: 51276195、50276069、50676106)资助!

感谢军队重点科研项目、重庆市自然科学基金重点项目(CSTC, 2009BA6019)、火灾与爆炸重庆市重点实验室建设项目(CSTC, 2010CA0005)资助!

目 录

上篇 油气爆炸研究理论基础

第1章 绪论	3
1.1 爆炸与气体爆炸	3
1.2 气体爆炸科学及控制技术研究	4
1.3 油气爆炸科学及控制技术的特点	10
第2章 气体爆炸过程的物理、化学基础	12
2.1 引言	12
2.2 化学热力学	12
2.3 无化学反应流体的运动	32
2.4 热量和质量的传输	42
2.5 化学动力学	50
第3章 气体及油气混合物的爆炸	66
3.1 引言	66
3.2 气体燃烧爆炸的基本模式	66
3.3 气体爆炸的特点	68
3.4 油气混合物爆炸基础知识	72

下篇 油气爆炸模拟实验与控制

第4章 油气爆炸热着火模拟实验研究	83
4.1 引言	83
4.2 实验系统及预实验	84
4.3 热着火可视化研究	92
4.4 热着火发生规律与临界条件	99
4.5 油气热着火发生关键因素专题研究	114
4.6 地下受限空间油气二次热着火实验研究	128
第5章 狭长受限空间油气爆炸模拟实验研究	145
5.1 引言	145
5.2 狭长受限空间油气爆炸模拟实验系统	146
5.3 狭长受限空间油气爆炸特性与发展规律研究	156
5.4 大尺度狭长受限空间油气爆炸特性与发展规律实验研究	170
5.5 狭长受限空间油气爆炸专题研究	178

第 6 章 容积式空间油气爆炸模拟实验研究	184
6.1 引言	184
6.2 容积式空间油气爆炸特性与发展规律研究	185
6.3 容积式空间油气爆炸不同结构尺度影响研究	189
6.4 容积式空间油气爆炸不同初始浓度影响研究	191
6.5 容积式空间油气爆炸不同专题研究	194
第 7 章 油气爆炸抑制安全技术研究	200
7.1 引言	200
7.2 油气爆炸发展规律及其驱动机理研究	200
7.3 气体爆炸抑制技术研究	201
7.4 油气爆炸抑制新型抑爆剂研究	207
7.5 油气爆炸抑制模拟实验研究	228
第 8 章 油气防爆安全技术研究	248
8.1 引言	248
8.2 油气爆炸发生及爆炸极限研究	248
8.3 油气惰化防爆实验研究	251
8.4 油气防爆燃惰气发生技术研究	263
8.5 油料储罐燃惰气油气置换实验研究	325
8.6 油料储罐燃惰气油气置换防爆技术的工程应用	331
主要符号表	333
参考文献	335

上 篇

油气爆炸研究理论基础

第1章 绪 论

1.1 爆炸与气体爆炸

爆炸是极为迅速的物理或化学的能量释放过程，是自然界中常见的一种现象。在爆炸发生的过程中，系统内在的势能转变为机械功及光和热的辐射等。就目前一般意义上的爆炸现象有物理爆炸、化学爆炸和核爆炸现象三类。物理爆炸过程中，系统只发生物理状态的变化。例如，蒸汽锅炉或高压气瓶的爆炸。而强火花放电（如雷电）、火山爆发、地震等也是强烈的物理爆炸现象。化学爆炸过程中，既有物理状态的变化又有化学的变化。例如，甲烷、乙炔、轻质油料气体或蒸气以一定比例与空气混合所产生的爆炸，再如细煤粉悬浮于空气中的爆炸、炸药的爆炸等。核爆炸是指因原子核的裂变（如 ^{235}U 的裂变）或聚变（如氘、氚、锂的聚变）引起的爆炸。核爆炸反应释放的能量比炸药爆炸放出的化学能量要大得多。核爆炸发生中温度可达数百万到数十万，爆炸中心压力可达数百万大气压（数千吉帕），比太阳中心的压力还高，同时还有很强的光和热的辐射以及各种粒子的贯穿辐射。 $1\text{g }^{235}\text{U}$ 全部进行核裂变放出的能量就相当于20kt TNT炸药爆炸的能量， 1g 氘元素全部进行核聚变放出的能量相当于140kt TNT炸药的能量。另外，化学爆炸和核爆炸的发生时间都非常短。例如，炸药爆炸和核爆炸都是在微秒量级的时间内完成的。由于爆炸过程存在着上述特点，所以在爆炸现象的力学研究上也就存在着不同于一般连续介质力学的特点，主要表现为爆炸现象中载荷随时间变化的非定常运动、载荷对介质的局部效应以及载荷与介质的耦合作用。所谓“耦合作用”，主要指载荷的大小与介质的性质也紧紧相关，载荷与介质不能孤立处理，只有在所讨论的力学问题得到解决时才能知道载荷的大小。例如，TNT炸药爆炸时可以产生峰值为200GPa的爆炸压力，当其作用于钢板时，其峰值载荷可达280GPa，而作用于水面时，其峰值载荷却只有13GPa。很显然，介质的性质改变了载荷的大小。对气体爆炸而言，爆炸发生环境的受限条件也对爆炸载荷产生重要影响。

本书主要涉及化学爆炸中的气体爆炸，且主要是油气爆炸。如不另加说明，书中谈及的爆炸均指气体爆炸或油气爆炸。其他爆炸现象可查阅有关论著。

气体爆炸是工业生产和生活领域爆炸灾害的主要形式之一。以油气（包括石油、成品油和天然气）为例，据统计，在石油化工、天然气等行业，可燃气体爆炸在事故总数中所占的比例分别高达46%和60%，每年发生的油气爆炸事故多达数百甚至数千起，造成巨大的财产损失和人员伤亡，且单次事故所造成的人员伤亡和财产损失也大大高于其他事故。例如，震惊世界的黄岛油库特大火灾爆炸事故，直接损失大于8500万元，救火过程中19人死亡、78人受伤；而近期发生的中国石油独山子石化分公司一次双盘浮顶原油罐爆炸事故就直接造成13人死亡。仅近五年国内外就发生了几十起重大的油气爆炸事故，如伦敦邦斯菲尔德油库大爆炸事故、美国得克萨斯州“得克萨斯城”炼油厂大爆炸事故、俄罗

斯外贝加尔斯克边疆区炼油厂大爆炸事故、辽宁省大连市大孤山新港码头输油管道爆炸事故、甘肃兰州市石化公司石油化工厂爆炸事故、辽宁沈阳市新民原油储罐爆炸事故、重庆井口天然气输气管爆炸事故、湖南兴旺加油站油罐爆炸事故、辽宁省盘锦市油井天然气爆炸事故等。这些油气重大爆炸事故不仅带来重大的人员伤亡、直接与间接的经济损失，而且带来一次次严重的生态危机。

可燃性气体重大爆炸事故(包括以上所举例子)一般都发生在受限空间中，特别是狭长与复杂组合受限空间中。自 1875 年英国发生城市煤气管道爆炸以来，人们已经开始关注可燃性气体爆炸方面的研究。特别是 20 世纪 70 年代以来，随着社会和科学的进步，为了防止或减少可燃性气体爆炸事故所带来的巨大损失，一方面对受限空间可燃性气体爆炸发生、发展规律等进行了大量的实验和理论研究，取得了丰富的研究成果；另一方面，涉及所有可燃性气体爆炸研究的目的是防止与减少可燃性气体爆炸事故损失，所以研究防止与减少可燃性气体爆炸事故损失的技术和装置、系统也成为该领域研究的重点。

1.2 气体爆炸科学及控制技术的研究

1.2.1 气体爆炸理论研究

自 1875 年英国发生城市煤气管道爆炸以来，许多学者就开始了气体爆炸的研究工作，并取得了一定的研究成果。关于气体爆炸的研究应追述到 100 年前 C-J 爆炸理论的建立，爆炸理论研究已走过了从简单到复杂、从单纯理论研究到工程实际应用研究的过程。经典气体爆炸理论的基本思想是在一定的假设前提下(如定常或准定常、无耗散或物性变化较为简单等)进行线性化和(或)解耦处理，力求通过解析的方法或简单的数值积分运算获得爆炸流场的参数分布。因此经典理论研究得到的爆炸理论模型往往又被称为爆炸解析研究模型。著名的 C-J 爆炸模型是经典理论研究的代表。该模型首次对气体爆炸过程进行了系统的概述。C-J 模型按火焰传播机制的不同爆炸波，可以分为爆燃波和爆轰波。爆燃波被描述为由无限薄的火焰面和在火焰前方的前驱压力波系构成，此时火焰的传播主要依靠热传导，为亚音速火焰；如果爆炸波进一步发展，火焰由于某种扰动加速，火焰面会逐渐追上前驱压力波系(可能发展为冲击波)，当二者合而为一时火焰传播机制就会发生根本性的变化，未燃气体中化学反应的触发完全靠冲击波完成，火焰成为超音速火焰，此时的爆炸波即为爆轰波。以此为代表，经典模型还包括 ZND 模型、Riemann 波模型、Lie 群方法、奇异摄动法、Whitham 方法、CCW 理论等。尽管各理论模型具体的处理方法和过程大相径庭，但基本都以较为简单的解析形式来描述爆炸过程中的参数变化情况和爆炸的基本规律。后来的研究表明：C-J 爆炸模型，包括后来的 ZND 模型对气体爆炸过程所作的描述是基本正确的。正是这些经典理论的建立和发展才奠定了爆炸力学的基础。关于这些理论研究工作冯·卡门和孙承纬都作了详细的总结。但是此类模型有其先天的不足，首先气体的爆炸过程是一个高度非线性、物性变化复杂、难于解耦的复杂过程，对其进行线性化求解只能是一种大体的近似；其次该类模型只能研究相当简单条件下的气体爆炸，不能合理描述边界等制约条件。因此在对气体爆炸的研究中，被局限在物性变化简单、边界条件比较理想条件下的纯理论分析范围内，工程价值较小。

经典气体爆炸理论的研究奠定了爆炸力学的基础，但是往往不能满足工程应用的要

求；对复杂爆炸流场的非线性耦合控制方程组进行数值求解又存在计算量大的实际困难。直到计算机技术的出现才使气体爆炸数值模拟研究成为可能。目前根据数值模拟所用模型的不同，主要分为场模拟和区域模拟。

1) 气体爆炸场模拟研究

计算流体力学(CFD)理论的发展使数值求解复杂非线性耦合方程组成为可能。相应地，基于数值求解非线性耦合控制方程组的各种气体爆炸模型被提出，并被广泛运用到存在可燃气体环境的安全科学和爆炸力学的研究中。场模拟的基本思想是通过求解复杂的非线性流场控制方程组得到爆炸流场的详细参数，其特点是以欧拉方程或 $N-S$ 方程为基础，并耦合以化学反应方程等，对爆炸过程的流场进行数值模拟研究。这类模型是真正意义上的场仿真模型，无论对爆炸的初期发展、DDT、爆轰的研究都是有效的。场模拟常用到的主要流场控制方程是 $N-S$ 方程和时均湍流模型，燃烧释放的反应能量通过在流场能量方程中加入源项进行耦合。此类模型能完成场模拟意义上的气体爆炸流场分析，给出许多爆炸过程的细节和完整的爆燃、爆轰波结构，进而完善爆炸理论体系，提高爆炸事故的防治水平。因此，场模拟是目前应用最多，也是最有效的模型。用该类模型进行气体爆炸过程的仿真，并对结果进行分析已经成为爆炸过程理论研究的主要方法。

2) 气体爆炸区域模拟研究

区域模拟模型的特点是在区域化压力分布假设的条件下，通过积分简化的守恒方程得到气体爆炸的压力、温度等基本参数。该类模型应用最多之处在于指导工业场所的抑爆泄压设计，对爆炸空间的压力作零维或准维假设，并对火焰给出燃速公式作为补充方程，同时引入准稳态等熵压缩方程组成封闭的解耦方程组，进而利用数值积分法进行求解。此类模型与补充的经验火焰速度方程相结合能较好地预估简单几何形状爆炸场所爆炸压力上升速率、最大压力等参数，同时考虑了气体爆炸场所部分边界(主要考虑泄压口)的影响，提出了泄压口设计的工程方法并可以通过计算得出合理的泄压面积和位置。因此，该类模型经常用于简单几何形状场所爆炸灾害的防治工作和泄压效果评价等方面的研究。但是，用此类模型进行数值计算依赖于经验拟合的燃速、物性关系、湍流影响因子、有效泄放系数等参数，而且该类模型不能对复杂边界条件、前驱压力波(冲击波)、湍流强度等影响爆炸发展的重要因素作定量的描述。更为重要的是，如果爆炸场所长径比较大，或空间整体尺度较大，气体爆炸过程经过充分发展，爆炸空间的区域假设往往给出不正确的结果。所以用此类模型难于得到制约爆炸过程的因素，不能满足复杂结构油气受限空间安全与防护科学研究的要求。

目前，在气体爆炸数值模拟研究方面以下两方面工作备受研究者关注。一是由强点火源驱动的爆燃转爆轰(DDT)过程，以及爆轰波传播过程的数值模拟(由于主要研究爆轰波的行为，因此可以称之为爆轰过程模拟)；二是由弱点火爆炸引起的弱爆燃发展到强爆燃直至 DDT 整个过程的数值模拟(可以称之为爆炸发展过程模拟)。前者着重研究强冲击波和火焰的作用、爆燃和爆轰的相互转捩以及爆轰波的稳定；后者着重研究爆炸发展过程中爆炸波由弱到强的演化过程和发展机理。由于后者不仅要考虑爆炸过程中各种复杂的波行为，还要考虑湍流等流场结构对爆炸发展的影响，因此进行数值模拟的难度远远大于前者。

在国外，对直接驱动的气体爆炸 DDT 过程数值模拟结果表明：前压力波与爆炸火焰面之间存在正反馈，二者间的相互加强是促使爆炸向爆轰发展的主要因素之一。还有研究

者对前驱压力波与爆炸火焰之间的作用进行了进一步的研究。将正反馈机制归纳为加速的火焰为压力波提供更多的能量,加强压力波,压力波增加未燃气的初始温度、压力,进而又使火焰加速,最终完成爆炸的 DDT 过程。利用数值研究手段,前压力波对障碍物、反射面对气体爆炸 DDT 的影响的研究也取得了进展。文献将这种影响归结为压力波的反射、衍射和冲击波会聚的作用,但对湍流燃烧的作用没有作细致的量化工作。国内对爆炸流场的模拟也作了大量的工作,研究文献对模拟的方法进行了探讨,有些甚至研究了惰性颗粒的抑爆过程,得出了颗粒粒度、浓度与抑爆效果的关系。上述文献一般采用 N-S 方程直接耦合燃烧模型进行数值仿真,化学反应模型通常使用平均反应模型;对诸如 $\text{CH}_4 - \text{O}_2$ 、 $\text{H}_2 - \text{O}_2$ 等的简单反应体系也有使用完全基元反应方程的爆炸模型。数值算法采用冲击波捕捉能力较好的总变差减小(TVD)格式,少数用到本质无震荡(ENO)格式。此方向的模拟研究的爆炸过程集中在气体爆炸的爆轰状态附近,而且基本忽略爆炸过程中的湍流影响,因此也仅适用于充分发展的强爆炸过程的研究。

对于大多数工程场所而言,弱点火引起的爆炸由弱到强地发展,进而发生 DDT 是气体爆炸灾害的主要形式,同时爆炸发展初始阶段也是抑制爆炸的有利阶段,因此对爆炸发展过程的研究越来越引起人们的重视。由于众多的研究表明:湍流在爆炸过程,尤其是弱点火气体在爆炸发展过程中往往起到不可忽略的重要作用,湍流的影响必须加以考虑,但湍流爆炸流场模拟的难度较大,国内外对爆炸发展过程的数值模拟研究工作仍然处于起步与发展阶段。国内外不少学者应用湍流模型研究了障碍物对爆炸火焰的加速过程,但所用的燃烧模型部分为直接的 Arrhenius-EBU 模型。由于模型为一般燃烧模型,所以对化学动力学机制几乎没有考虑,同时,数值计算中采用的 SIMPLE 算法根本不能准确捕捉到冲击波。有些研究工作考虑了流场的可压缩性修正,但同样没有解决燃烧模型和冲击波的计算问题,从其与实验的对比更明显地反映了算法的缺陷。目前大多数研究文献对爆炸发展过程的研究以 Spalding 的有限反应速率的湍流燃烧 Arrhenius-EBU 模型为爆炸燃烧模型,并采用传统的 SIMPLE 算法,因此对爆炸发展机理的数值模拟研究往往不全面。

此外,这些理论研究在爆炸过程的模拟中过于将注意力集中在障碍物引起的湍流影响燃烧的研究中,没有将爆炸过程中压力波、湍流以及火焰的行为进行综合的考虑,因此对爆炸过程中火焰、压力波的发展规律以及影响因素缺乏整体的认识。这也使爆炸理论中爆炸发展动力、驱动机理以及湍流加速火焰、压力波和火焰的耦合机制等问题都未得到圆满的解决。在本书作者和合作研究者共同完成的相关研究工作中,探索了基于火焰和压力波的耦合作用机制下爆炸发展的分析模型。在场模拟研究中,直接爆燃转爆轰(DDT)的数值模拟研究相对成熟,目前与工程爆炸事故最为接近的爆炸发展过程的数值模拟中对湍流爆炸燃烧过程的描述以及捕捉湍流流场中冲击波的有效数值算法的建立仍然是需要深入研究的问题。

1.2.2 气体及油气爆炸实验与控制技术研究

气体爆炸研究的最终目的是控制爆炸的发生与发展,以求最大限度地减少爆炸事故带来的损失。气体爆炸是涉及流体流动、传热传质和化学反应及其相互作用的复杂燃烧过程,由于其本身是一个极为复杂的物理化学过程,其中包含了高温、高压、高速等极端条件下(如极端的传热条件、极端的紊流流动条件等)的复杂流体力学现象,为提出科学的爆炸防治技术、完善爆炸理论,研究工作往往需要采用实验、数值模拟以及理论分析的综合

方法。

爆炸抑制包含传播火焰的抑制，也包含对爆炸波的抑制和衰减，同时还涉及火焰和爆炸波之间的相互耦合过程。另外，这些现象都会影响到整个抑爆流场的变化。所以实验研究的内容较复杂。气体爆炸发生与发展规律、抑爆机理等都是爆炸抑制的基础。与灭火机理的研究相比，抑爆机理研究的起步比较晚。

与爆炸控制的需求相适应，各国相继建设了不同规模的实验室。特别是针对煤矿瓦斯爆炸以及瓦斯煤尘爆炸灾害的防治需要，前苏联、波兰、美国、英国、日本以及原联邦德国等主要工业国家都相继建成了具有实际规模的大型实验管道或坑道，如波兰巴尔巴拉爆炸实验巷道长 400m、断面 7.5m^2 。我国也于 20 世纪 80 年代初针对瓦斯爆炸建成了大型瓦斯煤尘爆炸实验巷道，全长 896m、断面 7.2m^2 。作者所带领的科研团队也在近年建成直径达 2m 的室内油气爆炸及控制研究实验装置。在这些大型实验设施中，针对各种爆炸灾害过程及其防治技术都进行了大量的实验模拟和研究。

抑爆阻爆是阻止和减少爆炸危害和损失的重要手段，长期以来，人们一直非常重视这方面的研究。已有的研究表明，油气在受限空间中一旦形成稳定爆轰时火焰面和冲击波将紧密结合在一起，此时要加以抑爆、阻爆和扑灭已是非常困难。尤其是狭长受限空间中传播的爆炸压力波破坏力大、衰减慢，常规泄压门几乎起不到泄压抑爆的作用，造成的破坏往往是严重的、大范围的。因此，必须采用有效的主动安全防护技术进行削弱和扑灭。研究还表明在受限空间油气爆炸初期以及 DDT 的演化过程中存在可控的条件，但这需要更进一步深入、细致和系统的研究。近年来诸如煤矿开采、大型坑道气体爆炸控制一直是国内外煤矿生产、油气储运及安全科学与技术领域关注的焦点、研究的重点。特别是近 10 年来，我国对复杂受限空间中气体爆炸与控制技术及理论的研究都取得了很大进展，在瓦斯爆炸与控制实验研究、瓦斯防治理论研究、瓦斯爆炸与控制过程理论与数值模拟等方面涌现一批学术与科技水平高、应用前景好的研究成果。

在抑爆领域，人们最早进行的是密闭容器中的爆炸研究（指无激波生成的容器爆炸），已取得了大量的研究成果。例如，Bartknech 对封闭容器内的可燃气体爆燃进行了大量的实验研究，探讨了容器体积对可燃气体爆燃强度的影响，提出了立方根定律，该定律已被国际标准 ISO 6184 Explosion Protection System 采用。国外对固气液态灭火抑爆剂控制气体爆炸进行了大量的实验研究工作。这些实验研究工作不仅确定了这些灭火剂抑制爆炸的性能，还研究了影响抑爆性能的主要因素。如已有实验研究表明，颗粒直径的减少或密度的增加可以抑制可燃气的爆炸过程。对一些抑爆效果差的抑爆剂，当颗粒粒径小于一个极限值时会成为好的抑爆剂。同时，随着可燃气体的配比变化，爆轰速度也随之变化，所需的抑爆剂的量也随之变化，在压力波传播速度最大处并不一定需要最多的抑爆剂。再如，对阻燃粉尘作为抑爆剂的实验研究表明，某些阻燃剂不但不能抑制爆炸，相反具有助爆作用。另外，对水剂抑爆剂的实验研究也取得了一定的进展。但是，由于气体爆炸实验研究需要解决的问题太多，对于满足气体爆炸控制技术与安全工程发展的需求而言，对实现安全防治技术研发的科学性、有效性、经济性相统一的目标而言，实验研究还有很长的路要走。

在国内外，不同研究者在和抑爆有关的应用基础研究以及不同抑爆剂抑制爆炸性能等方面进行了大量的实验研究工作。如在应用基础研究方面，火焰与爆炸波的加速现象、火焰诱导激波现象、不同水雾条件下的气体火焰传播现象等。这些研究中还对抑爆剂抑制机

理进行了研究,如对不同水雾条件下的气体火焰传播现象的实验研究表明:水雾对气体爆炸火焰传播的抑制是由于水雾作用于火焰阵面反应区,降低了反应区内火焰温度和气体燃烧速度,减缓了火焰阵面传热与传质的进行,从而使传播火焰得以抑制;而水雾对气体爆炸火焰传播的抑制效果与水雾通量、雾区浓度、水雾区长度以及火焰到达水雾区的火焰传播速度有关。再如,不同抑爆剂抑制爆炸性能等方面,被动式粉尘云和水幕对爆炸波的抑制作用研究,不同抑爆剂种类、浓度、粒度等抑爆剂参数下对甲烷空气混合物爆炸的抑爆效果,固态抑爆剂对液化石油气和甲醇裂解气(主要成分为CO)爆炸的抑爆效果以及干粉剂用量、干粉分散均匀度和抑爆系统干粉喷散作动时间对抑爆效果的影响的实验研究,等等。这些研究涉及具体结构等参数,从中也得到了一些基于实验的半经验公式,当然也不可避免地对抑爆机理进行探索或讨论。如,多层丝网结构对管内气体爆炸抑制的实验,研究了多层丝网结构和平行狭缝结构对管内传播的爆燃火焰的淬熄能力,提出了临界淬熄量的重要概念,得到了临界淬熄速度、临界淬熄压差、临界淬熄量(临界淬熄速度与临界淬熄压差之积)与丝网层数、丝网目数、金属丝径等几何参数之间关系的经验公式,同时也得出了多层丝网结构对压力波的抑制效果。值得一提的是本书作者及研究团队从1996年起对油气爆炸开展了较广泛的实验研究,基于实际应用需求为牵引,对涉及油气爆炸控制机理、技术等进行了大量的实验研究工作,为油气爆炸及其抑制科学与技术的进一步研究和发展奠定了良好的基础。

基于前述实验研究表明:抑爆过程十分复杂,对影响其效果的各种因素极为敏感,包括压力波与火焰之间的相互耦合作用、抑爆流场、几何边界条件、抑爆剂种类、粒子直径和空间分布状态、抑爆装置的工作方式,甚至抑爆场的空间约束状态等都会影响到抑爆效果。一般而言,实验研究成果的局限性较大,特别是和不同实际工程背景相结合的抑爆技术及实验研究仍然还有大量的研究工作需要进行。

近年来,人们还研究了火焰与爆炸波的加速现象、火焰诱导激波现象,在大型激波管内基于碳酸钙和水型抑爆剂被动式粉尘云和水幕对爆炸波的抑制作用等。还在直径0.7m、长25m大型爆炸实验管中充入浓度8%~10%的甲烷空气混合物,采用电雷管起爆5gTNT起爆方式,对粉尘抑爆现象进行了实验再现,并对不同抑爆剂种类、浓度、粒度等抑爆剂参数下产生的抑爆效果进行了实验研究。另外,还采用复合爆炸抑制系统,对液化石油气和甲醇裂解气(主要成分为CO)进行了抑爆效果实验,研究了干粉剂用量、干粉分散均匀度和抑爆系统干粉喷散作动时间对抑爆效果的影响。尽管这些工作比较全面地考虑了抑爆过程中不同因素的影响效果,但是由于其研究的可燃气体种类比较单一,不同抑爆剂有着不同的缺陷,缺少性能更加优异、应用前景更好的抑爆工质,没有以实际工程场所的结构形式为参照,与实际抑爆流场之间存在较大差异等原因,很难直接应用于实际。人们还在全程透明的火焰加速管系统和细水雾实验系统中,对不同水雾条件下的气体火焰传播现象进行了实验研究,得到了一些有价值的实验研究成果。由于其研究采用的是全程透明的有机玻璃管,其流场比较理想和规范,几何边界条件简单,受外界扰动较小,与实际中的地下坑道各种分支及壁面粗糙度等情况相差较远,研究结果实用性欠缺。一些研究者还针对管道内的预混可燃气体爆炸,进行了多层丝网结构对管内气体爆炸的抑制研究,也得到了一些具有参考价值的结论。但已有研究比较适合于小直径气体输运管道的爆炸抑制,难适用于具有特殊结构及用途的大型坑道中来,其应用具有一定的局限性。

以上实验研究表明:抑爆过程十分复杂,对影响其效果的各种因素极为敏感,包括压

力波与火焰之间的相互耦合作用、抑爆流场、几何边界条件、抑爆剂种类、粒子直径和空间分布状态、抑爆装置的工作方式,甚至抑爆场的空间约束状态等都会影响到抑爆效果,且由于各种原因,鲜有能直接运用于油库特别是地下、半地下油罐油气爆炸抑制的研究成果。

前已述及受限空间结构构成 DDT 过程发展的条件,导致油气爆炸恶性发展,作为油料集聚地的各种油料储运场所(如油库、输油管线、加油站、油码头等)的安全与防护越来越受到各国的关注和重视,相应的基础与应用基础研究在全世界范围内蓬勃开展。近年来,针对工业气体和粉尘在受限空间中的爆炸演化及发展规律的研究也越来越得到人们的重视。许多已成为相关领域安全科学与技术研究的重要内容之一,涌现出一批学术与科技水平高、应用前景好的研究成果。但这些研究 80% 以上是针对瓦斯、煤粉和常见工业可燃气体的,而对一些特殊环境下(各类受限空间)油气爆炸及其控制技术的研究却相对较少。对受限空间特别是地下狭长受限空间油气爆炸的研究,除在基础实验与理论研究方面取得了一定的进展外几乎未见其他报道。还有众多的领域是空白,许多基础与应用基础研究迫在眉睫,其中包括受限空间油气爆炸及其抑制的应用基础研究。

为了有效控制爆炸传播,抑爆剂成为关键因素和目前研究热点之一,研究成果不断问世。惰性粉尘、惰性颗粒、水雾、惰性气体等对工业气体爆炸抑制的研究表明,这些抑爆工质在不同条件下对扑灭火焰和吸收爆炸波能量都有不同程度的效果,涉及实际抑爆工程设计需要的实验与分析研究工作也取得进展。但是这些研究也表明:就抑爆工质本身而言,不同工质存在各自的缺陷。有些抑爆机理单一或有限;有些浓度值要求高、悬浮效果欠佳;有些对抑爆工作对象和环境要求高;有些系统技术要求高、结构复杂、造价高,等等。因此研究性能更加优异、应用前景更好的抑爆工质仍然是非常重要的研究工作。

同时,对抑爆工质、抑爆机理、抑爆影响因素、有效计算公式甚至相似关系等基本应用基础问题还缺乏系统、深入的实验和理论研究。冷气溶胶是近几年迅速发展起来的高性能灭火剂,已有的研究表明,由于其粒径小于 $5\mu\text{m}$,对火焰有强抑制和强窒息作用以及对热辐射的遮隔和冷却作用使其灭火效能急剧上升,灭火时间和效率均优于水雾、惰性气体和惰性微粒,是常规灭火剂的几十倍,而用量仅为其百分之几。以 $\text{NaHCO}_3/\text{SiO}_2$ 复合粒子冷气溶胶为例,在 60m^3 封闭空间里,从启动到灭火,灭火时间小于 60s ,最低用量为 $80\text{g}/\text{m}^3$,灭火方式为全淹没式灭火,灭火效能与 EBM(热气溶胶, $90\sim 100\text{g}/\text{m}^3$) 相当,是普通 BC 类干粉灭火剂的 $6\sim 10$ 倍。同时冷气溶胶无毒害、无污染、不破坏大气臭氧层、不附带二次危害、不产生高温,是绿色环保型灭火剂,是哈龙的优良替代品。目前,国内外的研究都是将冷气溶胶用于灭火领域,而用于受限空间油气爆炸抑制尚未见报道,所以,开展针对油气混合物抑爆阻爆实验、机理及技术的研究,有效提高油库爆炸安全防护技术水平具有重大的社会、经济价值。

1.2.3 油气爆炸科学技术中的术语和概念

气体爆炸科学是爆炸防控有效性、合理性与经济性相统一的科学基础。它主要包括基础研究和应用研究两部分。油气爆炸科学是气体爆炸科学中的一部分。

各学科在发展过程中都规定和使用一定的专业术语,这里,将重要、基本术语和概念在以下给出。

(1) 油气爆炸科学: 油气爆炸科学是研究油气爆炸发生、发展及其防控的机理和规律