



《中国工程物理研究院科技丛书》第030号

应用爆轰物理

孙承纬 卫玉章 周之奎 著



国防工业出版社

责任编辑 蒋怡

ISBN 7-118-02336-1



9 787118 023367 >

ISBN 7-118-02336-1/O·152

定价: 32.00 元

00140253

《中国工程物理研究院科技丛书》第 030 号

应用爆轰物理

孙承纬 卫玉章 周之奎 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

应用爆轰物理/孙承纬等著. —北京:国防工业出版社, 2000.12

(中国工程物理研究院科技丛书)

ISBN 7-118-02336-1

I. 应... II. 孙... III. 爆震-物理 IV. 0381

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 33024 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 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 21¼ 552 千字

2000 年 12 月第 1 版 2000 年 12 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

《中国工程物理研究院科技丛书》 出版说明

中国工程物理研究院建院 40 多年来,坚持理论研究、科学实验和工程设计密切结合的科研方向,完成了国家下达的各项国防科研任务。通过完成任务,在许多专业学科领域里,不论在基础理论方面,还是在实验测试技术和工程应用技术方面,都有重要发展和创新,积累了丰富的知识经验,造就了一大批优秀科技人材。

为了扩大科技交流与合作,促进我院事业的继承与发展,系统地总结我院 40 多年来在各个专业领域里集体积累起来的经验,吸收国内外最新科技成果,形成一套系列科技丛书,无疑是一件十分有意义的事情。

这套丛书将部分地反映中国工程物理研究院科技工作的成果,内容涉及本院过去开设过的 20 几个主要学科。现在和今后开设的新学科,也将编著出书,续入本丛书中。

这套丛书将在今后几年里陆续编辑出版。我院早些年零散编著出版的专业书籍,经编委会审定后,也纳入本丛书系列。

谨以这套丛书献给 40 多年来为我国国防现代化而献身的人们!

《中国工程物理研究院科技丛书》编审委员会
1999 年 6 月 4 日修改

《中国工程物理研究院科技丛书》 编审委员会名单

主 任 杜祥琬

副 主 任 彭先觉 章冠人 华欣生

委 员 (以姓氏笔划为序)

王艳秀 邓门才 水鸿寿 田常津 江金生

沈元如 李 凡 李志民 李泽仁 张方晓

张友寿 张富堂 陈银亮 杨本立 郑志坚

罗顺火 竺家亨 周德惠 俞大光 胡三国

贺云汉 黄清南 蒲仁璧

本丛书编辑部

负 责 人 吴衍斌

本册编辑 郭玉团 吴衍斌

序 言

爆轰物理是关于炸药起爆、爆轰产物性质、爆轰波传播和对介质做功规律的一门学科。由于军事需求的牵引和学科发展的推动,它的研究和应用已经成为近代常规武器与核武器设计、试验及安全保障的重要基础,同时它也推动了各种材料的爆炸加工、处理、改性技术及爆炸事故的防范、分析技术的发展。所以,一般说来,爆轰物理在国防科技和国民经济中均有重要作用。

20世纪60年代初以来,中国工程物理研究院在国内几乎空白的基础上,自力更生开拓和进行了较系统的爆轰实验、理论和数值模拟研究。我们的实验工作从测量炸药爆速和研制爆轰波形发生器开始,在完成各类爆轰装置设计和试验任务的同时,有力地推进了爆轰的学科研究。今天,有关研究已扩展到当代凝聚炸药爆轰学科的各主要方面,并探索了一些前沿性的课题。

回顾中国工程物理院早期的爆轰研究,虽然实验条件仅有北京古长城外官厅水库旁的一个小型简易爆炸场地,但是老一辈科学家带领青年同志,发挥自己的聪明才智,攻克了尖端国防科研的重大技术关键。从这里发源,辗转高原草地、山岭峡谷,今天中国工程物理院定位在科学城,已拥有完整的现代化测试设备和大型计算机数据采集、处理系统的先进设施。通过进行相当规模的数值模拟和精细实验研究,已经取得许多重要成果,并积累了丰富的技术知识和经验。本书系统地总结了多年来中国工程物理研究院流体物理研究所,尤其是作者们在固体军用炸药爆轰物理学术和应用研究方面的工作,并充分反映了本学科发展的前沿问题和最新进展。

目前,以反应流体动力学为理论基础的爆轰学科面临着向纵

深发展的新阶段。例如,与主要工程应用有关若干分支的发展比较成熟,与事故情况下炸药起爆机制有关的一些深层次问题的理解尚很不清楚。又如,美国为了维持其核武器库存的有效性,正在实行以科学为基础的核武器库存管理计划,企图通过一系列更为精密的实验室模拟实验和更为精确的大型科学计算,在不进行核试验的条件下加深对武器物理过程的理解。其中,炸药爆轰物理规律研究及其数值模拟再次受到了极大的重视,包括钝感炸药 TATB 爆轰和安全性能的研究。这种炸药爆轰反应区较宽,曲率效应明显,用 CJ 模型模拟偏差较大。除了使用特殊的手段外,很难使 TATB 炸药发生爆轰,在低温环境中它的性能明显下降甚至失效。人们对这些问题也尚未完全弄清楚。因而,以先进的科学方法深入探讨和掌握钝感炸药的爆轰规律,非但是改善核武器性能的需要,也将有助于研制安全性能更好的其他炸药和装置,其重要意义是不言自明的。

几十年来,在光学、电子学和计算机技术的推动下,爆轰的理论与实验研究、数值模拟及应用设计技术得到长足的发展,为人们更加安全、有效和精密地使用炸药或处理爆炸物质,提供了有力的认识工具。当前,量子化学、统计物理、化学反应动力学和分子动力学方法已卓有成效地应用于爆轰物理的学术研究,从微观角度更好地模拟了炸药爆轰产物性质和化学反应过程,成为计算机大型数值模拟的重要方向,也是近代凝聚态爆轰研究的前沿动向。

还应注意到,近几年来各国科学家相继发表了一系列有关爆轰物理和冲击动力学的专著,从不同的方面阐述了爆轰的物理和实验基础,标志着过去几十年研究的收获,启迪了未来发展的方向。在此承前启后的转变之时,本书系统地总结归纳以往的工作是十分有意义的。

本书作者都是中国工程物理研究院资历颇深的科技专家,从事爆轰研究已有近四十年的历史。书中关于爆轰传播、爆轰驱动、爆轰反应流体动力学计算和炸药起爆研究的许多内容,就包含了作者们的创造性成果。可以提到的是,孙承纬的一些学术论文已

被收入美国 Los Alamos 国家实验室主编的 60~90 年代炸药爆轰和燃烧的主要文献目录。作为学术带头人,他们的工作推动了中国工程物理研究院的爆轰物理应用研究,缩短了与国际先进水平的差距。在他们的培养指导下,一支高素质的青年研究队伍已成为爆轰研究的中坚力量。

与已经发表的一些爆轰专著不同,本书的特色在于理论、实验和应用的结合。作者们精湛的学术水平和广博的研究经历,正是写好这本书的重要基础。本书结构严谨,思路清晰,全书由两个方面有机结合而成,一条线索是爆轰的反应流体动力学理论基础、实验研究方法以及作为爆轰理论和数值模拟研究基石的炸药爆轰性能、产物物态方程和炸药反应速率方程的研究;另一条线索是各类爆轰技术和工程应用的基本问题研究,包括炸药起爆机理、爆轰波传播、爆轰产物飞散、爆轰驱动和近区爆炸波等。本书以许多实例说明并强调了解析理论、数值模拟与实验研究的结合,是发展爆轰学科、解决实际问题的必循途径。

我希望本书的出版能为有关的技术人员提供一本较全面的专业基础性论著,并能对青年人才的培养和爆轰应用研究,产生很好的推动作用。

中国科学院院士

陈能宽

2000 年 9 月 20 日

前 言

爆炸是物体的能量(热、化学、电磁、核能或动能等)极快的释放或转化过程,并伴有强烈的力学效应和破坏作用的现象。炸药或含能材料的爆轰是化学爆炸最剧烈的形式。炸药中传播的爆轰波以超声速运动的冲击波为先导,冲击压缩波前未反应炸药,引起其化学反应并释放能量,支持先导冲击波的自持传播。凝聚炸药中的爆轰波速度约数千米每秒,波头压力约几十吉帕,瞬时功率可达 $10^{10} \sim 10^{14} \text{W}$,具有强大的做功能力。这是人们广泛地应用炸药的基本依据。

爆轰的实质是依靠冲击波传播和压缩介质、引起能量转化或释放的流体动力学现象,在等离子体和天体物理中同样存在,例如激光维持的爆轰波和热核爆轰波等,它们是化学爆轰概念的自然延伸。

20 世纪初,Chapman 和 Jouguet 提出爆轰的 CJ 模型,建立了爆轰的流体动力学理论基础。近百年来实践表明,CJ 理论至今仍是爆轰应用的主要工具,然而它不能描述炸药在反应区中转变为爆轰产物的过程,不能处理炸药起爆和爆轰建立等重要问题。20 世纪 40 年代 Зельдович, Von Neumann 和 Doring 提出的 ZND 模型,正确地解决了爆轰反应区和爆轰产物流场的耦合,奠定了爆轰的反应流体动力学理论基础。气体爆轰实验揭示了爆轰波有复杂的三维结构,但凝聚态爆轰的真实结构至今知之不多,表明真实的爆轰过程是十分复杂的。

近几十年来,由于武器研制、工程应用和安全问题需求的牵引,依靠先进的光、电实验测量技术和计算机数值模拟技术,爆轰物理研究取得了长足的进步。反应流动理论确定了典型反应系统

中定态爆轰存在的条件、结构和特性;非线性渐近分析指出了研究非定态爆轰传播、演变和稳定性问题的新途径。反应流动数值模拟和与此密切相关的炸药反应速率、爆轰产物物态方程的实验及理论研究,已成为当前炸药爆炸装置设计、安全问题评估和爆轰应用的基础。光学和脉冲 X 射线高速摄影技术、激光干涉测量技术、多种电学传感器及高性能数字示波器的应用,一系列精细的爆轰实验技术的发展,为人们了解高速高温高压环境中炸药的反应过程、爆轰波的传播、爆轰产物的流场和周围介质运动情况提供了较充分的信息。各种光谱和质谱实时测量技术的发展,为进一步了解炸药微观结构与其反应特征及爆轰性能的关系提供了手段。

研究爆轰物理的主要目的是理解炸药起爆的机理,掌握爆轰波传播和产物流场及其作用的规律,以便更加安全、有效和精密地使用炸药及爆炸性物质。爆轰物理是爆炸力学的分支学科,在国防科技和国民经济中有着重要作用,例如核与常规武器的研制及安全性保障、固体火箭与火炮推进剂的效能及安定性的提高、低感度高能量炸药的研究和使用、炸药能量转换装置研制、火工及爆炸作用器件的发展、爆破和爆炸加工技术的应用、材料爆炸合成和处理技术开发等等,都以爆轰物理为主要理论基础。工业生产和自然界的许多灾难性爆炸事故,与气相、混合相反应系统中爆炸或爆轰的形成机制及爆炸极限密切相关,这些事故的防范和分析也是爆轰物理研究的主要内容。

国际学术界关于含能材料和各种反应系统爆轰问题的研究进展,主要反映在两个系列性学术会议,即国际爆轰会议(Int. Symp. on Detonation)和国际爆炸与反应系统动力学会议(Int. Colloquium on Dynamics of Explosion and Reactive Systems)的文集中。国内外出版的一些专著和教材,分别论述了爆轰的流体动力学理论和数值模拟、实验研究、近代进展和爆炸作用。

根据中国工程物理研究院科技丛书的编写要求,本书系统阐述与我院实际工作相关的军用固体炸药爆轰物理的学科基础、应用技术和研究进展,在广泛调研了国内外重要文献资料的基础上,

充分反映了爆轰研究的前沿问题和最新成就。阅读本书的读者应具备大学本科以上的连续介质力学专业的基础,尤其是应具有关于不定常气体动力学的基础知识,并对爆轰物理的基本概念和知识有所了解。本书编排的次序是:第一至三章阐述爆轰的反应流体动力学理论、物理结构和稳定性以及基本的实验技术,是阅读和理解以后各章的基础;第四至六章讨论了炸药的爆轰性能和主要的本构性质——物态方程与反应速率,它们是进行近代爆轰实验和数值模拟研究的基本环节;第七至九章论述了爆轰的主要应用问题——起爆、传播和效应,可供工程技术应用参考。

本书写作的分工是:孙承纬(前言、一、二、七、八、九章)、卫玉章(五、六、七章)、周之奎(三、四章),全书由孙承纬负责统稿和修改。作者们感谢陈能宽院士和张寿齐教授的悉心指导,感谢朱建士院士和恽寿榕、薛鸿陆教授的认真审校,并向为本书的完成作出贡献的陶洁贞、吴国栋、刘文翰、赵峰、谭多望、文尚刚等同志致谢。作者们才疏学浅,本书肯定存在许多错误或不当之处,望读者不吝赐教。

内 容 简 介

本书是关于凝聚炸药爆轰物理及其应用的专著。全书分为九章:分别介绍了爆轰的反应流体动力学基础;爆轰波结构和稳定性;爆轰实验测量技术;炸药的爆轰参数;炸药和爆轰产物的物态方程;非均匀炸药的反应速率;炸药起爆机理;爆轰波传播和相互作用;爆轰驱动和近区效应等。可供从事军用固体炸药爆轰研究和应用的教师、科研人员、工程师和相关专业的研究生阅读或参考。

目 录

第一章 爆轰的流体动力学理论基础	1
1.1 爆轰的 CJ 模型	1
1.1.1 RH 关系和 CJ 假定	1
1.1.2 爆轰和爆燃状态的基本性质(Jouguet 规则)	6
1.1.3 活塞问题和 Taylor 波	10
1.1.4 Jones 公式和反演方法	15
1.2 爆轰的 ZND 模型	19
1.2.1 爆轰化学反应的动力学和热力学	19
1.2.2 反应介质中波的传播.....	23
1.2.3 反应流动方程组和波强度变化方程	26
1.2.4 爆轰的 ZND 模型	30
1.3 本征爆轰和非理想爆轰.....	39
1.3.1 粘性爆轰	40
1.3.2 病态爆轰	42
1.3.3 双反应道系统	44
1.3.4 发散流动系统和非理想爆轰	46
1.4 物理爆轰波.....	55
1.4.1 激光维持的爆轰波(LSD)	55
1.4.2 同质异相爆轰波	59
1.5 爆轰反应流的解析研究和数值模拟方法.....	64
1.5.1 不定常爆轰反应流的解析研究	65
1.5.2 爆轰反应流计算的特点	71
1.5.3 爆轰反应流计算编码 SSS 和 WSU	74
参考文献	79

第二章 爆轰波的结构和稳定性	83
2.1 爆轰的纵向结构	83
2.1.1 爆轰反应区的结构	83
2.1.2 振荡爆轰	88
2.2 爆轰的横向结构	90
2.2.1 气体爆轰的胞格结构	90
2.2.2 凝聚态爆轰的横向结构	98
2.3 冲击波的稳定性	107
2.3.1 超声速/亚声速条件	108
2.3.2 波纹不稳定性界限	111
2.3.3 二维分裂不稳定性界限和后边界扰动方法	112
2.3.4 冲击波稳定性的区域分划和实验研究	116
2.4 爆轰波的稳定性	119
2.4.1 方波爆轰模型	120
2.4.2 爆轰波稳定性的线性分析	124
2.4.3 爆轰模拟系统的稳定性	126
2.5 冲击波和强爆轰波传播的不稳定性和渐近衰减 规律	130
2.5.1 聚心冲击波和强爆轰波传播的不稳定性	130
2.5.2 波强度变化方程和 RH 关系的一般形式	134
2.5.3 冲击波和强爆轰波衰减的渐近规律	138
参考文献	148
第三章 爆轰实验测量技术	153
3.1 高速摄影技术	154
3.1.1 高速相机的工作原理	154
3.1.2 高速摄影技术用于快过程的实验测量	156
3.1.3 高速摄影技术用于速度测量	159
3.2 激光干涉测量技术	165
3.2.1 任意反射表面速度干涉仪(VISAR)	165
3.2.2 法布里—珀罗速度干涉仪(FPI)	167

3.2.3 激光干涉测量技术的应用	171
3.3 闪光 X 射线摄影技术	172
3.3.1 闪光 X 射线摄影原理	173
3.3.2 闪光 X 射线的分幅摄影	174
3.4 电子学测量技术	177
3.4.1 电探针测量速度的方法	177
3.4.2 电容传感器测量自由表面速度的技术	180
3.5 压电传感器	184
3.5.1 石英压电传感器	185
3.5.2 PVDF 压电传感器	187
3.6 压阻传感器	194
3.6.1 锰铜压力传感器的结构	195
3.6.2 压阻传感器的定标	197
3.6.3 压阻传感器的电源	200
3.7 电磁粒子速度传感器	202
3.7.1 电磁粒子速度计和电磁应力计的原理	202
3.7.2 电磁粒子速度计及磁场装置的设计	205
参考文献	212
第四章 炸药爆轰参数的测量和研究	216
4.1 爆轰波速度的测量和研究	216
4.1.1 爆速的实验测量	216
4.1.2 爆速与装药密度的关系	219
4.1.3 爆速与装药直径的关系	222
4.1.4 爆速直径效应的理论	224
4.2 炸药装药的临界直径	228
4.2.1 临界直径的实验测量	228
4.2.2 影响临界直径的因素	230
4.2.3 临界直径的理论	233
4.3 爆轰压力的测量和计算	239
4.3.1 自由表面速度法	240

4.3.2	关于自由表面速度法的讨论	242
4.3.3	阻抗匹配法和等熵法	244
4.4	爆压增长及相关问题	249
4.4.1	爆压增长问题及增长模型	249
4.4.2	两步反应模型	250
4.4.3	支持 ZND 模型的观点和实验	251
4.5	介质冲击温度和爆轰产物温度的测量	255
4.5.1	色温法	256
4.5.2	拉曼散射法	261
4.5.3	热电偶技术	267
	参考文献	269
	第五章 凝聚态炸药及爆轰产物的物态方程	272
5.1	爆轰产物的经验物态方程—— γ 律方程	273
5.1.1	等 γ 物态方程	273
5.1.2	等 β 物态方程	278
5.1.3	组合 γ 物态方程	280
5.1.4	等熵指数 γ 的实验测量	281
5.2	爆轰产物的经验物态方程——JWL 方程	283
5.2.1	Wilkins 物态方程	283
5.2.2	标准 JWL 物态方程	286
5.2.3	其他形式的 JWL 方程	296
5.2.4	Davis 物态方程	301
5.2.5	爆轰产物经验物态方程的应用	305
5.3	涉及化学反应的爆轰产物物态方程	310
5.3.1	BKW 和 HOM 物态方程	311
5.3.2	LJD 物态方程	319
5.3.3	JCZ 物态方程	322
5.4	未反应炸药的物态方程和数值计算的有关问题	325
5.4.1	未反应炸药的冲击绝热线	326
5.4.2	未反应炸药的物态方程	329