



《中国工程物理研究院科技丛书》第 018 号

理论爆轰物理

孙锦山 朱建士 著

国防工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

理论爆轰物理/孙锦山,朱建士著. —北京:国防工业出版社,1995.12

(中国工程物理研究院科技丛书)

ISBN 7-118-01527-X

I. 理… I. ①孙… ②朱… II. 爆震-理论 N. 0381

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 15053 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 13 $\frac{3}{8}$ 361 千字

1995 年 12 月第 1 版 1995 年 12 月北京第 1 次印刷

印数:1—2000 册 定价:19.10 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

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选出版。

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		

《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 30 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,积累了丰富的知识和经验,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 30 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研工作的成果,内容涉及本院过去开设过的 20 多个主要学科。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 30 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

1989 年 1 月 25 日

《中国工程物理研究院科技丛书》
第二届编审委员会

主 任 杜祥琬

副 主 任 章冠人 华欣生

委 员 (以姓氏笔画为序)

王之康	王铁铮	水鸿寿	方乃相	刘庆兆
汤绍源	杨成龙	吴宏志	汪源浚	张仕发
张永昌	张寿齐	陈银亮	周正朝	赵维晋
胡在军	俞大光	姜学贤	姚景华	徐玉彬
徐锡申	高天祐	高国桐	董海山	赖祖武

本丛书编辑部

负 责 人 吴衍斌

本册编辑 吴衍斌 郭玉团

《中国工程物理研究院科技丛书》
已出版书目

- | | | | | |
|-----|---------------|-----------|---------|----------|
| 001 | 高能炸药及相关物性能 | 董海山 周芬芬主编 | 科学出版社 | 1989年10月 |
| 002 | 光学高速摄影测试技术 | 谭显祥编著 | 科学出版社 | 1990年2月 |
| 003 | 凝聚炸药起爆动力学 | 章冠人等编著 | 国防工业出版社 | 1991年11月 |
| 004 | 线性代数方程组的迭代解法 | 胡家贛编著 | 科学出版社 | 1991年12月 |
| 005 | 映象与混沌 | 陈式刚编著 | 国防工业出版社 | 1992年6月 |
| 006 | 再入遥测技术(上册) | 谢铭勋编著 | 国防工业出版社 | 1992年6月 |
| 007 | 再入遥测技术(下册) | 谢铭勋编著 | 国防工业出版社 | 1992年12月 |
| 008 | 高温辐射物理与量子辐射理论 | 李世昌编著 | 国防工业出版社 | 1992年10月 |
| 009 | 粘性消去法和差分格式粘性 | 郭柏灵著 | 科学出版社 | 1993年3月 |
| 010 | 无损检测技术及其应用 | 张俊哲等著 | 科学出版社 | 1993年5月 |
| 011 | 半导体材料辐射效应 | 曹建中著 | 科学出版社 | 1993年5月 |

- 012 炸药热分析
楚士晋编著 科学出版社 1994年12月
- 013 脉冲辐射场诊断技术
刘庆兆主编 科学出版社 1994年12月
- 014 放射性核素活度的测量方法和技术
古当长编著 科学出版社 1994年12月
- 015 二维非定常流与激波
王继海编著 科学出版社 1994年12月
- 016 抛物型方程差分方法
李德元 陈光南著 科学出版社 1995年6月
- 017 特种结构分析
刘新民 韦日演主编 国防工业出版社 1996年2月
- 018 理论爆轰物理
孙锦山 朱建士著 国防工业出版社 1995年12月

序

爆轰物理是一门有广泛应用背景的学科。过去人们往往将爆轰只和国防军事应用联系起来。但事实上,爆轰技术早已渗入国民经济建设的许多部门。例如用于拆迁各类建筑物的定向爆破,加工用的爆炸焊接、爆炸成形等等。对于矿井以及一些工厂生产过程中发生的粉尘爆炸一类灾害事故的防治也都涉及到爆轰物理这一学科领域。因此,近二三十年来,国内外对于爆轰物理的研究都给予充分的重视,并获得不少有理论和应用价值的成果。

爆轰是一种瞬时现象。但不论在时间尺度上这一现象如何短促,它仍有丰富的物理内涵。它有自身形成、发展和熄灭的规律。只有掌握了这些规律,人们才能将这种具有破坏力的现象用到国防建设和经济建设的一些领域,达到自己预想的目的。孙锦山、朱建士同志所著《理论爆轰物理》一书正是一本将国内外爆轰物理研究的主要成果系统地总结出来的著作。本书从基础理论讲起,详细地介绍了爆轰物理这门学科各个方面在当代的最新研究成果,特别是书中还包括了作者30多年来从事爆轰物理的研究和应用所取得的一系列研究成果。

本书正如书名所示侧重在爆轰物理的理论方面。对于爆轰物理研究的另一个重要手段实验,则由于研究方式、工作性质的差异而未包括在本书内。但这决非降低实验的重要性。相反我们都认为实验在爆轰物理的研究中是必不可少的手段。作者对于当代科学研究的第三种手段,即用数值模拟的手段来研究爆轰物理作了专门的介绍。由于计算科学的发展,许多爆轰现象都可以用计算机模拟出来,这就大大加深了人们对爆轰过程、内部机制的理解。大规模科学计算已经成为当代研究爆轰物理的一个强有力的工具。

我预期本书对从事爆轰物理理论研究的同志会是一本有价值的读物,对从事实验研究的同志也会是一本有用的参考书。

李德元

1994年1月于北京

内 容 简 介

理论爆轰物理以流体物理理论、反应流体力学与非平衡热力学为基础,较系统地阐述了爆轰物理的理论研究成果。本书共分八章,分别介绍了近几十年来国内、外在爆轰波结构、稳定性理论、非定常爆轰与起爆机理等方面的理论研究进展情况,同时对爆轰数值模拟的理论基础进行了简要叙述。

本书对从事爆轰物理、爆炸力学、火工与烟火等专业的工程技术和理论设计人员,是一本系统的理论参考书,可作为这些专业研究生的教科书。

目 录

绪言	1
第一章 流体物理理论基础	4
1.1 流体动力学方程组	4
1.2 方程组的一些性质	7
1.3 稀疏波和压缩波	24
1.4 冲击波	32
1.5 界面的不稳定性	37
1.6 湍流	42
参考文献	46
第二章 反应流体力学与非平衡热力学基础	47
2.1 宏观状态的描述——反应流体力学方程组	47
2.2 线性非平衡热力学	55
2.3 化学反应动力学和热力学	60
2.4 非线性热力学——非平衡态的稳定性	72
2.5 稳定性和耗散结构的几个例子	81
参考文献	87
第三章 爆轰波的 CJ 理论	88
3.1 爆轰波(爆燃波)的基本关系式	88
3.2 理想气体中的爆轰波和爆燃波	92
3.3 雨贡纽函数的性质	97
3.4 爆轰和爆燃的分类,儒格规则	103
3.5 活塞问题解的确定性	108
3.6 爆速与初始状态的关系,琼斯公式	115
3.7 凝聚态炸药爆轰产物的状态方程	121
3.8 多方指数型状态方程的爆轰波	129
参考文献	135
第四章 爆轰波的定常结构	137

4.1	包含化学反应的定常流动方程	138
4.2	ZND 模型	144
4.3	单反应爆轰波	147
4.4	多反应的爆轰问题	156
4.5	考虑粘性和热传导的爆轰波结构	161
4.6	非理想爆轰和炸药的直径效应	172
4.7	考虑化学反应过程的流管理论	178
4.8	附录:混合理想气体的热力学函数	182
	参考文献	186
第五章	爆轰波的稳定性研究	187
5.1	概况	189
5.2	微扰 CJ 爆轰波的传播	198
5.3	化学平衡流体中小扰动的传播	202
5.4	不可逆反应流体中扰动的传播	209
5.5	螺旋爆轰现象	216
5.6	冲击波在化学平衡流体中的传播	220
5.7	爆轰强度变化方程	224
5.8	稳定性的理论分析	233
5.9	爆轰稳定性分析的耗散结构理论	249
	参考文献	258
第六章	非定常爆轰波	260
6.1	爆轰波的非定常性质	260
6.2	非定常爆轰波结构	264
6.3	非定常爆轰波的定性分析	269
6.4	散心爆轰波及其结构	275
6.5	影响爆轰定常传播的因素	284
6.6	低速爆轰现象	293
6.7	气体燃烧转爆轰研究	294
6.8	凝聚态炸药的燃烧转爆轰	302
6.9	非理想爆轰及其能量利用	306
	参考文献	320
第七章	凝聚态炸药的起爆机理	322
7.1	凝聚态炸药起爆机制的实验研究现状	322

7.2	均质炸药的起爆机理及热爆炸理论·····	325
7.3	非均质炸药热点的形成和演化·····	327
7.4	爆燃向爆轰的转变·····	341
7.5	剪切带的形成与引爆·····	354
	参考文献·····	357
第八章	爆轰数值模拟的基础·····	360
8.1	数值模拟的基本方程组·····	361
8.2	数值模拟的主要方法·····	368
8.3	二维计算的差分格式·····	379
8.4	唯象化学反应速率·····	386
8.5	人为粘性与爆轰波结构计算的匹配关系·····	395
8.6	定常爆轰波结构模拟·····	403
8.7	爆轰数值模拟的现状·····	409
8.8	两相爆轰的数值模拟·····	423
	参考文献·····	426

绪 言

爆轰物理广泛应用于国防军事和国民经济的许多领域。近几十年,国内外对爆轰物理的研究投入了很大的力量,取得了显著进展,获得了大量成果。

爆轰是一个伴有快速能量释放的化学反应传输过程。其反应区前沿为一冲击波,反应区与冲击波构成一个整体,以超声速传播,称为爆轰波。爆轰波扫过后,介质成为高温高压的爆轰产物。爆轰过程包括复杂的化学反应动力学过程和激烈的流体力学运动过程,两者互相影响,互相耦合,同时还伴随着热、光、电等物理效应。这种特点,使爆轰学成为应用物理的一个重要分支,具有丰富的理论研究课题。

本书介绍了爆轰物理的基础理论,系统总结了国内外爆轰物理的理论研究成果,其中也包括编者多年从事爆轰理论研究的工作成果。希望能为从事爆轰理论研究和应用研究的研究人员提供系统的理论基础知识和理论研究方法,促进爆轰学在我国的发展。

本书第一章为流体物理理论基础。简要介绍了研究爆轰理论所需的流体物理基础知识,包括流体力学基本方程组的不同形式、简单波和冲击波理论、各种波的相互作用理论、流体力学不稳定理论和湍流初步知识等。爆轰波的化学反应区是化学反应和流体力学的强烈耦合区。反应流体力学与非平衡热力学是深入研究反应区特性的理论基础。本书第二章叙述反应流体力学的基本理论和非平衡热力学的基础知识。本书的第一、二两章作为后几章的理论准备。

本书第三章详细介绍了爆轰波的 CJ 理论。CJ 理论将爆轰波简化为包含瞬时完成的化学反应的间断面,使复杂的反应流体力学问题变为纯流体力学问题。因而 CJ 理论得到广泛的应用。在第

三章中系统介绍了 CJ 理论的主要内容、爆轰波的特性及 CJ 理论的应用实例,为应用 CJ 理论提供了坚实的基础。

爆轰物理的深入研究表明,CJ 理论没有完全反映爆轰波内部结构的复杂多样性。本世纪 40 年代出现的 ZND 模型是第一个描述反应区特性的理论模型。此后,研究人员开展了大量对爆轰波结构的研究,取得丰富成果。本书第四章主要介绍一维定常爆轰波结构的理论,讨论考虑化学反应和流体力学耦合而形成的多种爆轰波内部结构。

早在本世纪 20 年代,C. 坎贝尔和 D. W. 伍德黑德在研究气体混合物的爆轰特性时,观察到爆轰波中有周期性扰动存在。迄今为止的大量实验研究结果都指出,爆轰波一般具有不定常、非平面的胞格结构。CJ 状态只是一个宏观热力学的平均状态。理论上也证明一维平面定常爆轰波是不稳定的,它在一定条件下将转变为另一种复杂的有序结构。本书第五章是爆轰波的稳定性研究,对这方面的研究成果作了系统的综述。

本书第六章介绍非定常爆轰波。实验发现,爆轰波具有非定常的形成和增长过程,本章论述了爆轰波的非定常性质及其定性分析,也从燃烧向爆轰的转变过程研究其非定常特性。

爆轰的起爆机理研究具有十分重要的现实意义,凝聚态炸药的起爆机理最复杂,是爆轰物理研究的重要方面。第七章讨论凝聚态炸药的起爆机理,包括热起爆、冲击引爆、热点理论及爆燃向爆轰的转变等内容。

随着计算机和计算技术的飞速发展,也由于爆轰过程的复杂性,数值模拟在爆轰理论研究和应用研究中的地位越来越重要。第八章从爆轰数值模拟的方法、差分格式、唯象反应率研究、人为粘性的研究等重要方面介绍了数值模拟的基础理论,并给出了数值模拟的实例。

编者向周光召先生表示敬意,他的许多工作,以及他早年在工作上对编者给予的指导和帮助对本书的形成起了重要作用。章冠人、恽寿榕先生审阅了本书书稿,李德元先生热情地为本书写了序