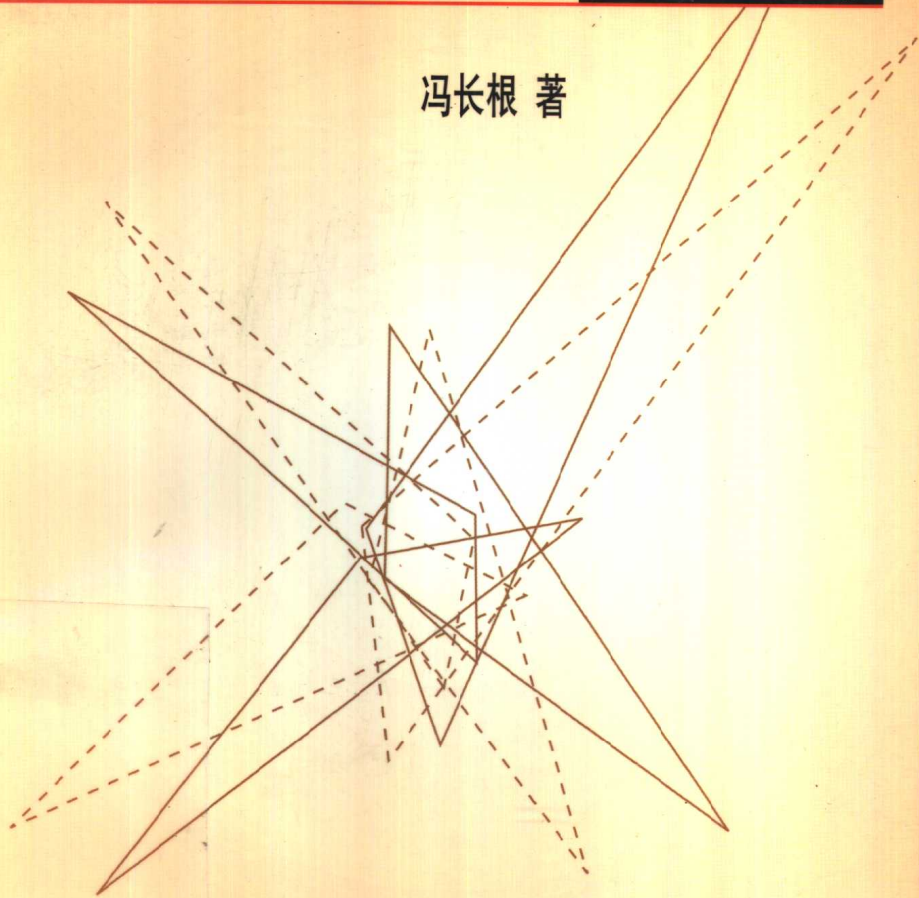


小尺寸微通道 **爆轰学**

冯长根 著



化学工业出版社

小尺寸微通道爆轰学

冯长根 著

化学工业出版社

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

小尺寸微通道爆轰学/冯长根著. —北京:化学工业出版社, 1999.7

ISBN 7-5025-2539-4

I. 小… I. 冯… II. 爆轰-理论 IV. 0381

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 10295 号

小尺寸微通道爆轰学

冯长根 著

责任编辑: 孙绥中

责任校对: 蒋 宇

封面设计: 田彦文

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京市彩桥印刷厂印刷

北京市彩桥印刷厂装订

*

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 7 $\frac{1}{8}$ 字数 194 千字

1999 年 7 月第 1 版 1999 年 7 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—1000

ISBN 7-5025-2539-4/TQ · 1134

定 价: 20.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换

序

含能材料如炸药的爆炸是极为迅速的能量释放过程,在此过程中,炸药的内能(主要是化学能)转变为机械能以及光和热的辐射等。化学反应区前沿是以超声速传播的激波,其后紧接化学反应区,激波与反应区统称爆轰波。爆轰波在直线型且截面固定的柱类含能材料(炸药)中的传播可称为爆轰波的常规传播。当装药出现拐角、弯曲或截面出现变化时,将出现一些特殊的爆轰现象,称为爆轰波的非常规传播,爆轰波的非常规传播是近年来爆轰学界较为关心的研究之一。

小尺寸微通道内装药的爆轰是当前在武器弹药中发展较快的高新技术的学术基础,某些含能装置、火工与烟火技术、爆破器材新技术和新产品的开发直接与非常规现象有关。这些技术对于国防科学技术相关领域及国民经济的有关部门具有十分重要的意义。

本书作者及其同事近年来在爆轰波非常规传播方面开展了大量工作,取得许多可喜成果。《小尺寸微通道爆轰学》正是一本将这些作者及其同事主要在北京理工大学完成的研究成果系统总结出来的著作。该书内容丰富,由浅入深,对小尺寸拐角装药和弯曲装药等条件下的爆轰波传播中出现的特殊现象,对爆轰波的直径效应、拐角效应以及会聚效应等这些爆轰波传播中的前沿课题进行了详细和全面的论述。既有实验研究得出的重要成果,又有数值模拟给出的详细描述。

我预期本书对从事爆轰波非常规传播的研究人员、工程技术人员会是一本有价值的读物。

徐更光 98.7.22.

前 言

关于小尺寸微通道的爆轰研究是近年出现的事。小尺寸装药是精密起爆控制技术经常遇到的装药情况，这种装药情况不可避免地出现装药的拐角、弯曲和交叉。围绕这种装药情况，科技工作者开展了一系列工作。目前，它已经成为 20 世纪后期出现的新技术之一。

小尺寸微通道爆轰学的研究对爆轰理论的发展有重要意义。爆轰波拐角传播过程是偏离 CJ 爆轰状态的现象，对于该现象的研究有利于加深对发散爆轰现象的认识，完善爆轰理论。小尺寸微通道爆轰学对于发展爆炸力学中的有关技术也有重要意义。爆炸逻辑网络技术是近些年发展起来的一种非常有前途的新型起爆控制技术。这一技术的理论基础正是爆轰波拐角效应。小尺寸拐角装药条件下出现的延迟爆轰以及弯曲装药条件下出现爆速亏损是爆轰波传播中的特殊现象，同时也是爆炸逻辑网络设计以及民用爆破控制中要遇到的实际问题，有关这些问题的研究对改进传爆序列以及小尺寸网络装药的优化设计有重要意义，对于大尺寸装药设计也有一定的参考价值。

爆轰理论和爆炸力学新技术中出现的课题，形成了小尺寸微通道爆轰学的研究对象。本书系统地介绍有关小尺寸微通道爆轰学的一些新成果，从实验研究、数值模拟和理论 research 三方面对这些现象及由此带来的爆轰传播的特性进行了阐述，特别是对于小尺寸装药条件下的直径效应，实际装药条件下出现的拐角效应以及小尺寸拐角装药和弯曲装药条件下出现的爆轰波非常规传播现象作了介绍。本书还专门讨论了小尺寸装药在爆炸逻辑元件和网络中的应用情况。书中介绍的研究成果，可以直接应用于实际生产，服务于国防建设等相关领域，这也是作者写此书的目的。

本书是在北京理工大学科研工作的基础上写成的。本书的主要内容反映了两个学科组的工作，即我的老师、已故著名爆炸力学专家陈

福梅教授所领导的学科组和我本人所领导的学科组。几届博士生参与了不同时期的工作。全书分五章：第一章绪论，介绍爆轰学简史和临界尺寸附近的爆轰现象；第二章介绍爆轰波拐角效应的影响因素；第三章介绍爆轰波传播的特殊现象；第四章介绍非理想爆轰的数值模拟；第五章介绍小尺寸微通道爆轰学的应用。

小尺寸微通道的爆轰研究得到国家自然科学基金、国家教委年轻教师基金、国家教委博士点基金、国家教委跨世纪人才计划基金、中国工程物理研究院基金的资助，在此表示衷心感谢。书中相当一部分材料取自陈福梅教授的博士生毛金生、刘举鹏以及我的博士生王树山、李生才的博士学位论文（以及与导师共同发表的论文），同时感谢李生才博士在本书最后成稿时，给予的大量帮助。

我国著名的火炸药及爆炸力学专家徐更光院士欣然为此书作序，在此表示衷心感谢。

冯长根

1998. 8

主要符号表

符号	含 义	首次出现	单位
Γ_s	Mie-Gruneisen 常数	式(4.1.5)	—
α	拐角角度	2.4.1.1	°
γ	物像比	2.3.2.4	—
$\bar{\kappa}$	常数	式(4.1.10)	—
λ	反应度	式(4.1.10)	—
λ_c	已反应炸药的质量分数	式(4.1.13)	—
μ	热点的质量分数	式(4.1.15)	—
θ_T	常数	式(4.1.10)	K
θ	扩散角	2.2.3	°
ρ_{m0}	材料的初始密度	1.2.4	g/cm ³
τ_d	分解过程的特征时间	式(4.1.15)	μs
τ_s	能量传递特征时间	式(4.1.15)	μs
ν_s	比容(凝聚炸药)	式(4.1.2)	cm ³ /g
ν_H	比容(冲击绝热态)	式(4.1.2)	cm ³ /g
ω_1	常数	式(4.1.13)	
ω_2	常数	式(4.1.13)	
Ψ	常数	式(4.1.14)	—
A_g	常数	式(4.1.8)	100GPa
A_s	常数	式(4.1.7)	100GPa
a	常数	式(4.1.10)	—
a_c	装药截面边长	3.1.1.1	mm
B_g	常数	式(4.1.8)	100GPa
B_s	常数	式(4.1.7)	100GPa

符号	含 义	首次出现	单位
b	常数	式(4.1.9)	—
C	储能电容	1.2.3.1	pF
C_1	质点速度	式(4.1.1)	mm/ μ s
c_{m0}	材料的初始声速	1.2.4	mm/ μ s
c_v	比热容	式(4.1.6)	J/(g·K)
D	爆轰速度(爆速)	1.2.1	mm/ μ s
D^*	弯曲装药爆速	式(3.2.2)	mm/ μ s
D_x	高频二极管	1.2.3.1	
d	装药直径	1.2.1	mm
d_c	装药临界直径	1.2.1	mm
d_l	极限直径	1.2.1	mm
E	活化能	式(4.1.10)	J
E'	炸药常数	式(4.1.11)	J
E_d	直流电源	1.2.3.1	V
E_H	内能(冲击绝热态)	式(4.1.4)	J
E_S	内能(凝聚炸药)	式(4.1.5)	J
F_S	常数	式(4.1.3)	—
f_0	常数	式(4.1.15)	—
G	表面积与体积之比	式(4.1.14)	10^6s^{-1} $(100\text{GPa})^{-2}$
G_{50}	炸药冲击感度	2.2.4.2	mm
G_S	常数	式(4.1.3)	—
H	光探板厚度	2.4.2.1	mm
H_S	常数	式(4.1.3)	—
I	常数	式(4.1.14)	10^6s^{-1}
I_1, I_2, I_3	爆轰输入	式(5.3.1)	
J_S	常数	式(4.1.3)	—
K_S	常数	式(4.1.3)	—

符号	含 义	首次出现	单位
k_i	常数	式(4.1.10)	—
L	隔板厚度	2.6.2.2	mm
L_1	探针接触宽度	式(2.2.1)	mm
L_2	探针间距	式(2.2.1)	mm
L_a	加速距离	2.2.3	mm
L_d	延迟起爆距离,延迟深度	2.2.3	mm
L_e	主发药柱宽度	2.6.2.2	mm
L_g	成长距离	2.2.4.1	mm
L_l	两狭缝在视眼空间的间距	2.3.2.3	mm
L_w	非稳态爆轰长度	3	mm
L_x	狭缝间距	2.4.2.2	mm
L_H	装药厚度	2.3.2	mm
m	常数	式(4.1.13)	—
N	狭缝序号	2.6.2.2	—
N_0	炸药常数	式(4.1.11)	—
N_1, N_2, N_3	爆炸零门	4	—
n	常数	式(4.1.13)	—
O	爆轰输出	式(5.2.1)	—
O_1, O_2, O_{12}, O_{21}	爆轰输出	式(5.2.1)	—
P	压力	2.6.2.4	GPa
P_g	压力(反应产物)	式(4.1.8)	100GPa
P_H	压力(冲击绝热态)	式(4.1.2)	100GPa
P_S	压力(凝聚炸药)	式(4.1.5)	100GPa
R	气体常数	式(4.1.9)	—
R_0	输出电阻	1.2.3.1	Ω
R_{1S}	常数	式(4.1.7)	—
R_{1g}	常数	式(4.1.8)	—
$R_{\min}$	小比爆轰半径	2.1.2.1	mm

符号	含 义	首次出现	单位
R_{2g}	常数	式(4.1.8)	—
R_{2S}	常数	式(4.1.7)	—
R_{AB}	接通电阻	1.2.3.1	Ω
R_c	充电电阻	1.2.3.1	Ω
R'	保护电阻	1.2.3.1	Ω
r	装药曲率半径	3.2.1.1	mm
r_c	装药半径	4.3	mm
r_n	爆轰波阵面法向传播距离	式(1.2.2)	mm
S_l	常数	式(4.1.1)	—
S_e	装药面积	1.2.4	$(\text{mm})^2$
S_U	不爆轰区面积	2.3.4.2	$(\text{mm})^2$
S_V	爆轰衰减区面积	2.3.4.2	$(\text{mm})^2$
T	温度	式(4.1.9)	K
T_H	温度(冲击绝热态)	式(4.1.3)	K
T_s	温度(凝聚炸药)	式(4.1.6)	K
t	时间	式(1.2.2)	μs
U	不爆轰区	2.3.4.1	—
U_p	质点速度	式(4.1.1)	$\text{mm}/\mu\text{s}$
U_s	冲击波速度	式(4.1.1)	$\text{mm}/\mu\text{s}$
U_c	法向爆速	2.6.2.4	$\text{mm}/\mu\text{s}$
V	爆轰衰减区	2.3.4.1	—
v	扫描速度	2.4.2.1	$\text{cm}/\mu\text{s}$
W	爆轰增长区	2.3.4.1	—
W_S	Mie-Gruneisen 常数	式(4.1.7)	—
X_S	拐角半径	2.3.3.1	mm
X_j	初始位移	式(4.1.17)	mm
x	常数	式(4.1.14)	—
y	常数	式(4.1.14)	—

符号	含 义	首次出现	单位
Z	位移	2. 3. 3. 1	mm
Z_f	频率因子	式(4. 1. 10)	—
Z_n	熄爆距离	2. 3. 3. 1	mm
Z_s	拐角距离	2. 3. 3. 1	mm
$\bar{Z}_s$	平均拐角距离	2. 3. 4. 2	mm
z	常数	式(4. 1. 14)	—

内 容 提 要

小尺寸微通道内装药的爆轰现象具有突出的非常规传播的特征。本书主要介绍作者及其同事在该领域的研究得到的新结果。包括, 临界尺寸附近的爆轰现象, 爆轰波的拐角效应, 小尺寸拐角装药的延迟爆轰, 小尺寸弯曲装药的爆速亏损, 小尺寸装药爆轰波的会聚效应。另外, 本书还介绍了对小尺寸微通道爆轰现象进行数值模拟的结果。

本书可供从事爆轰学、弹药工程、火工与烟火技术、爆破器材、工程爆破等有关科技领域的研究、教学、设计人员及大专院校师生、研究生学习参考。

目 录

主要符号表

1 绪论	1
1.1 爆轰理论发展简史	2
1.2 临界尺寸附近的爆轰现象	5
参考文献	16
2 爆轰波拐角效应	19
2.1 研究爆轰波拐角效应的意义和简史	19
2.2 爆轰波拐角绕射过程中的爆速	25
2.3 爆轰波拐角效应影响因素的研究(Ⅰ)	36
2.4 爆轰波拐角效应影响因素的研究(Ⅱ)	61
2.5 爆轰波拐角效应影响因素的研究(Ⅲ)	74
2.6 形成爆轰波拐角效应的机理	82
参考文献	99
3 爆轰波传播的特殊现象	104
3.1 小尺寸拐角装药的延迟爆轰	104
3.2 小尺寸弯曲装药的爆速亏损	119
3.3 小尺寸装药中爆轰波的相互作用	128
参考文献	138
4 非理想爆轰的数值模拟	140
4.1 爆轰数值模拟和基本方程组	140
4.2 非线性动力学有限元法的基本原理	146
4.3 小尺寸装药的爆轰传播	156
4.4 爆轰波的拐角效应(Ⅰ)	162
4.5 爆轰波的拐角效应(Ⅱ)	167
4.6 弯曲装药的爆轰波传播	175
4.7 爆轰波的拐角效应(Ⅲ)	178
4.8 双爆轰波作用过程	191

参考文献	198
5 爆炸逻辑元件和网络	202
5.1 爆炸逻辑零门	202
5.2 爆炸逻辑异步与门	204
5.3 爆炸三输入一输出网络	207
5.4 爆炸二输入四输出网络	209
5.5 结论	213
参考文献	213

1 绪 论

本书研究爆轰现象，重点是小尺寸微通道的爆轰波传播，即爆轰波的非常规传播现象。

炸药的爆炸是极为迅速的能量释放过程，在此过程中，炸药的内能（主要是化学能）转变为机械能以及光和热的辐射等^[1]。化学反应阵面沿炸药超声速传播的过程，称为爆轰^[2]。这种在炸药中超声速自持传播的带有化学反应区的强冲击波称为爆轰波。爆轰波的传播是爆轰学的基本问题之一。

解释爆轰现象的经典理论有一维 CJ 理论^[3~5]、ZND 模型^[6~8]，准一维的 W-K 理论^[9]、Bdzil 稳态二维爆轰模型^[10]等。这些模型适用于直线型且截面固定的柱类装药爆轰波的传播，即常规的传播。

炸药爆炸现象的特点，使得对它的应用主要集中在利用它的做功效应。本世纪六七十年代以来，人们逐渐观察和认识到一些爆轰波非常规的传播现象，如爆轰波由大药柱向小药柱传播所出现的接触效应^[11]，由小药柱向大药柱传播所出现的拐角效应^[12]，以及爆轰波相互作用^[13]等，可以作为某些特殊爆炸元件的内在机制加以利用^[14~19]。从而开始了使炸药由单一的做功材料向其它应用方面发展的进程，其中包括在某些快速反应控制方面的应用。最典型的，是近些年来发展起来的、利用小尺寸装药爆轰波非常规传播特性的爆炸逻辑网络新技术，这是一种非常有前途的新型起爆控制技术。有关爆炸逻辑网络技术的研究发展了爆炸应用技术，在发展兵器、航天等科学技术方面具有重要意义。爆炸逻辑网络技术利用了爆轰波的拐角效应和相互作用等现象，其装药的特点：一是装药尺寸比较小，二是装药形状存在拐角和弯曲、三是出现交叉装药等。本书介绍了对这些现象的系统研究。

1.1 爆轰理论发展简史

1881 年和 1882 年, Berthelot 和 Vieille^[20,21], 以及 Mallard 和 Le chatelier^[22]各自独立地在研究火焰传播的过程中发现了爆轰现象。他们的研究揭示出, 火焰在充满可燃气体管道内传播时, 由于温度、压力等条件的不同, 可以有两种完全不同的速度。一种是每秒几百米, 另一种是每秒几千米。习惯上, 前者被称为爆燃, 后者被称为爆轰。据此, 爆轰也被定义为迅速而激烈的燃烧形式^[23]。

1899 年和 1905、1917 年, Chapman^[3]和 Jouguet^[4,5]各自独立地提出了一个简单然而令人信服的假定, 认为爆轰过程的化学反应在一个无限薄的间断面上瞬时完成, 原始炸药转化为爆轰产物。这样一来, 在建立爆轰数学模型的时候, 就不必考虑化学反应的详细过程。化学反应的作用如同一个外加的能源, 反映到流体力学方程中来, 流体力学的质量、动量和能量守恒方程可以跨过爆轰间断(爆轰波阵面)建立起来。这样就诞生了最早的建立在流体力学和热力学基础上的较为严格的理论—CJ 理论。CJ 理论的关键不仅在于上述 CJ 假定, 还在于提出了爆轰波能够定常传播的约束条件—CJ 条件。所谓 CJ 条件, 是指爆轰波阵面后方的状态用冲击 Hugoniot 线和 Rayleigh 线的切点来描述, 或直观地表述为波阵面后方的流动速度等于声速。由 CJ 条件可得到 CJ 方程, 结合流体力学的三个守恒方程, 再加上爆轰产物的状态方程, 就构成了描述爆轰的封闭方程组, 用于进一步的研究。CJ 理论是定常爆轰的非常理想化的理论, 但它无疑是成功的。在当时, 应用 CJ 理论可使对于气体爆轰的爆速计算值与实测值相差只有 1%~2%^[23]。CJ 理论第一次给出了爆轰的物理模型和数学模型, 反映了爆轰是化学反应冲击波传播过程这一本质, 从而奠定了爆轰研究的基础, 具有划时代意义。

从某种意义上说, CJ 理论是爆轰的流体力学理论, 它对爆轰过程的化学反应细节没有描述, 只注意到了热力学过程而忽略了化学动力学过程。由于化学反应速率不可能无限大, 所以化学反应不可能在一个间断面上瞬时完成, 也就是说, 化学反应应该以有限的反应速率进

行, 化学反应区具有一定的厚度。爆轰过程的化学反应细节的研究, 至今仍然是爆轰研究的难点之一。但对爆轰的化学反应区结构的研究, 包括反应区内部流动过程和化学反应动力学过程的研究, 无疑是爆轰理论研究的首要问题, 也是认识爆轰现象的关键之一。

1940 年, Zeldovich^[6]在前苏联, 1942 年 Von Neumann^[7]在美国, Doering^[8]在德国分别独立地提出了相同的描述爆轰波基本结构的模型, 称为 ZND 模型。ZND 模型认为未反应的物质首先经历了一个预压冲击波过程, 压到高温高密度, 再经过一个化学反应区达到终态。它将前导冲击波看成一个无化学反应的一维间断平面, 在化学反应区内假设流动是一维的; 化学反应以有限的速率进行, 该反应是单一的向前进行的反应过程; 在每一个断面上, 都达到化学反应平衡状态, 一直到反应完成。在这样的假设下, 反应区内任一点的状态与前方未反应的物质由守恒定律相联系; 其状态方程用该点的反应度来估计, 这样在与冲击波相连接的坐标系内, Euler 流体力学方程在整个反应区内有一个定常解, 反应区终端的状态仍然符合 CJ 理论的 CJ 状态。ZND 模型第一次正确地揭示了爆轰波的基本结构, 即它由前导冲击波和紧跟其后的化学反应区构成。即使在实验技术大大发展的今天, 用亚纳秒精度的 F-P 干涉仪进行的实验仍表明该模型基本正确^[24]。ZND 模型还首次阐明了爆轰化学反应的触发机制, 并考虑了化学反应的动力学过程。因而, ZND 模型是 CJ 模型的重要发展, 由于这个模型更接近于实际, 因此成为爆轰理论发展的又一里程碑。

CJ 理论和 ZND 模型统称为爆轰的简单理论, 也是理想爆轰的理论。可用 CJ 理论和 ZND 模型描述的爆轰过程称为理想爆轰过程。稳态爆轰只是理想爆轰的必要条件, 有限尺寸装药情况下所出现的宏观上的稳态爆轰并不是严格意义上的理想爆轰。事实上, 只有当装药尺寸趋于无限大时, 爆轰波阵面才可能是一个无限大平面, 反应区内的流动才可能是一维的。另外, 爆轰的化学反应是很复杂的, 不可能仅仅沿单一方向进行, 并可能出现化学反应驰豫现象^[25]。因而, 实际的爆轰过程都属于非理想爆轰的范畴, 如本书研究的小尺寸装药爆轰波的非常规传播就是一种典型的非理想爆轰。