

# EXPLOSION PHYSICS

# 爆炸物理学

(上册)

〔俄〕 Л.П.奥尔连科 (Л.П.ОРЛЕНКО) /主编  
孙承纬/译 胡海波 周之奎/校

С.Г.Андреев А.В.Бабкин Ф.А.Баум Н.А.Имховик  
И.Ф.Кобьлкин В.И.Колпаков С.В.Ладов В.А.Одинцов  
Л.П.Орленко В.Н.Охитин В.В.Селиванов В.С.Соловьев  
К.П.Станюкович В.П.Чельшев Б.И.Шехтер 著

原书第三版



科学出版社

# 爆炸物理学

原书第三版

(上册)

(俄) Л. П. 奥尔连科 (Л. П. ОРЛЕНКО) 主编

С. Г. Андреев А. В. Бабкин Ф. А. Баум Н. А. Имховик  
И. Ф. Кобылкин В. И. Колпаков С. В. Ладов В. А. Одинцов  
Л. П. Орленко В. Н. Охитин В. В. Селиванов В. С. Соловьев  
К. П. Станюкович В. П. Чельшев Б. И. Шехтер 著

孙承纬 译

胡海波 周之奎 校

科学出版社

北京

图字: 01-2011-3203

## 内 容 简 介

本书总结概括了几十年来爆炸力学的研究和应用进展, 综合应用理论、实验和数值模拟的研究途径, 全面系统地阐述炸药或爆炸物爆轰过程以及各种介质(气体、液体和固体)中爆炸作用过程涉及的基本问题, 包括爆轰和冲击动力学基本理论, 炸药爆轰性能, 炸药转变为爆轰产物的机理、条件和各种物理-力学因素的影响, 爆轰波的传播, 气体和燃气爆炸规律及参数, 凝聚介质中爆炸波的传播, 爆轰产物对物体和破片的驱动, 圆柱壳的爆炸动态断裂, 战斗部破片场的形成, 聚能(射流、射弹)战斗部设计原理, 爆炸中引起的电磁现象, 爆炸加工原理, 爆炸过程的模拟问题等. 书中具有大量公式、参数和上千张图表, 并附有很有参考价值的许多物性数据和详细的文献资料目录.

本书适宜作为爆炸力学的专业教材和深入钻研的指导资料, 可供从事与含能材料爆炸或爆轰研究、应用及安全防护有关的高等学校院系、科研部门和工矿企业的研究生、教师和科技人员参考.

Orlenko L.P. "Explosion Physics" ISBN: 5-9221-0218-4(rus.)  
"©FIZMATLIT@2004"

## 图书在版编目(CIP)数据

爆炸物理学: 原书第3版: 上册/(俄)Л.П.奥尔连科(Л. П. ОРЛЕНКО)  
主编; 孙承纬译; 胡海波, 周之奎校. —北京: 科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-031261-7

I. ①爆… II. ①奥… ②孙… ③胡… ④周… III. ① 爆炸力学-物理学  
IV. ①TQ560.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011) 第 100957 号

责任编辑: 钱 俊 刘延辉 / 责任校对: 刘亚琦  
责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计工作室

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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2011 年 6 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2011 年 6 月第一次印刷 印张: 91

印数: 1—2 000 字数: 1800 000

定价: 188.00 元(上、下册)

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



## 译者前言

本书是俄罗斯联邦以包曼命名的莫斯科国立技术大学 (МГТУ) 知名学者集体撰写的爆轰物理和爆炸力学专业领域的名著。1963 年科学出版社出版的其初版中译本 (Ф. А. 鲍姆主编), 是当时我国国防科技人员进入该领域的基本参考书之一。1975 年 К. П. 斯坦纽科维奇主编该书的第二版 (无中译本), 对大部分内容进行了改写和补充。俄罗斯物理数学文献出版社 (ФИЗМАТЛИТ) 于 2002 年出版的由 Л. П. 奥尔连科主编、十五名学者撰写的第三版, 只保留了原书的个别基础章节, 其内容和篇幅经过了全面改写、扩充和提升, 可以认为是一本全新的书。作者们精心总结了半个世纪以来俄罗斯和其他国家学者的大量科研成就, 使本书成为当前国际上最为全面、系统和深入的爆炸力学专著, 可以作为爆炸力学工作者案头常备的基本参考书。

在历史上, 苏联科学院 Я. Б. 泽尔道维奇院士首先提出了爆轰的 ZND 模型, Л. Л. 朗道院士建立了爆轰产物物态方程的研究基础。在爆炸力学对于武器技术和国民经济的重要应用中, 俄罗斯学者长期进行大量的深入细致的研究和探讨, 做出了许多原创性贡献。本书阐述的关于爆炸力学基本问题的思想及经验, 以及综合应用理论、实验和数值模拟三种研究途径的成功实践, 十分值得我们学习和研讨。

本书内容大致可分为三大部分。第一部分是爆轰物理基础 (第 1 章 — 第 11 章), 阐述化学炸药爆轰的物理模型、爆轰引发的化学动力学、爆轰波传播和相互作用、炸药感度和做功能力、含铝炸药的爆炸转变等。第二部分为炸药爆炸效应和爆炸装置设计原理 (第 12 章 — 第 17 章、第 21 章), 是本书的精华部分, 包括空气 (以及燃料—空气炸药)、水和岩土中的爆炸效应研究, 爆轰驱动和高速发射, 各种常规战斗部和民用爆炸加工装置工作原理和设计技术的详细论述, 许多内容是其他同类书籍中不多见的。第三部分有关固体材料冲击动力学和一些爆炸研究专门问题 (第 18 章 — 第 20 章和各附录, 以及散见于其他各章的有关内容), 提供了爆炸研究中必然涉及的连续介质动力学基础知识和数据, 具有必要的理论深度, 这也是目前有些专业书籍阐述得不够到位的地方。由于本书的性质所限, 一些当代的或者十分专门的研究结果涉及较少 (如爆轰研究的最新进展 (DSD 理论, 分子动力学计算等)、动态断裂力学、高速碰撞和深度侵彻、特种战斗部技术和结构动力响应等), 有兴趣的读者可以查阅相关专著。

本书译稿由胡海波、周之奎作了细心校对, 陶洁贞承担了繁重的打字和修图工作, 赵同虎、舒远杰、陈海坤、卢琳龙、钱晓梅和其他同志也做出了贡献。本书在出

## 第三版序言<sup>\*)</sup>

在本书第三版中我们作了重大改写和扩充,大部分章节已根据最近 25 年来积累理论和实验资料重新撰写. 本书增加了许多新的章节,专门论述破片场的形成和气态混合物的爆炸参数、爆炸中引起的电磁场、爆炸体系起爆转变的微观和宏观反应动力学、各种工业领域中爆炸能量的应用和爆炸过程的相似模拟等. 重新撰写的一些章节包括气体、液体和固体介质中的爆炸作用、聚能射流,以及爆炸过程的热力学、炸药对外界作用的感度、凝聚炸药中爆轰的传播、炸药的做功能力和抛掷能力等. 我们更换并大大增加了本书的附录,给出了所考察问题的详尽参考文献.

作者们感谢以包曼命名的莫斯科国立技术大学以下各位校友,感谢他们在本书再版时给予的经济上的支持. 他们是 А. В. Лукьянов, О. Е. Ячник, С. А. Петровский, В. В. Сапрыкин, С. В. Захаров, В. В. Николотов.

各章改写和新增章节撰写的分工是: 第 1 章 В. С. Соловьев, 第 2、3 章 Л. П. Орленко, 第 4 章 И. Ф. Кобылкин, Л. П. Орленко, 第 5 章 Н. А. Имховик, Л. П. Орленко, 第 6 章 Н. А. Имховик, 第 7 章 С. Г. Андреев, 第 8 章 С. Г. Андреев, И. Ф. Кобылкин, 第 9 章 Н. А. Имховик, И. Ф. Кобылкин, 第 10 章 Н. А. Имховик, В. С. Соловьев, 第 11 章 В. П. Чельшев, 第 12 章 Л. П. Орленко, В. Н. Охитин, 第 13、14 章 В. Н. Охитин, 第 15 章 В. А. Одинцов, Л. П. Орленко, 第 16 章 В. А. Одинцов, 第 17 章 А. В. Бабкин, В. И. Колпаков, С. В. Ладов, Л. П. Орленко, В. С. Соловьев, 第 18 章 В. В. Селиванов, 第 19 章 Л. П. Орленко, В. В. Селиванов, 第 20 章 Л. П. Орленко, 第 21 章 И. Ф. Кобылкин, 附录 А, С, D Л. П. Орленко, 附录 В Н. А. Имховик, В. С. Соловьев.

---

\*)译注: 40 多年来,本书俄文原版先后再版两次,由新老交替的不同作者集体撰写. 每一版次在内容和篇幅方面都有明显的更新和扩充(如第三版的篇幅是第二版的 2 倍以上),实际上是差别很大的不同专著.

第一版为 Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. Физиматгиз, Москва, 1959. 其中译本是 Ф. А. 鲍姆, К. П. 斯达纽柯维奇, Б. И. 谢赫捷尔著. 爆炸物理学. 众智译. 北京: 科学出版社, 1963.

第二版(无中译本)为 Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович. и др., Физика взрыва, Наука, Москва, 1975.

# 目 录

(上 册)

译者前言

第三版序言

第 1 章 炸药的一般特性 .....	1
1.1 炸药性态, 爆炸转变型式 .....	1
1.2 爆炸转变型式的性质 .....	4
1.3 对炸药及其组成物的要求 .....	10
1.4 炸药及其组成物的分类 .....	10
1.5 爆炸装置的能量 .....	16
第 2 章 气体动力学基本微分方程组 .....	17
2.1 气体动力学方程组 .....	17
2.2 运动微分方程组的积分 .....	23
2.3 物态方程 .....	26
第 3 章 气体一维等熵运动 .....	31
3.1 气体一维等熵运动方程组的特解 .....	31
3.2 气体动力学方程组的特征线 .....	33
3.3 原先静止气体的单向飞散 .....	41
3.4 产生冲击波的条件 .....	43
3.5 气体动力学方程组的通解 .....	47
第 4 章 冲击波的基本理论 .....	50
4.1 基本关系式 .....	50
4.2 平面正冲击波 .....	52
4.3 斜冲击波 .....	60
4.3.1 气体中的斜冲击波 .....	60
4.3.2 凝聚介质中的斜冲击波 .....	66
4.4 冲击波的声学理论 .....	69
4.5 发生离解和电离过程的空气中的冲击波 .....	71
第 5 章 爆轰波理论 .....	76
5.1 爆轰现象, 流体动力学理论基础 .....	76
5.2 自持爆轰波速度选择规则的根据 .....	80

5.3	气体系统爆轰波参数的计算	86
5.4	凝聚炸药爆轰波参数的计算	91
5.5	凝聚炸药爆轰产物的物态方程和等熵线	96
5.5.1	用于凝聚炸药爆轰产物组成与性质的完全热力学描述的物态方程	98
5.5.2	凝聚炸药爆轰产物的物态方程和等熵线 (不考虑爆炸产物的组成)	110
<b>第 6 章</b>	<b>爆炸与爆轰过程的热化学和热力学</b>	<b>123</b>
6.1	凝聚炸药爆炸的热效应, 爆炸产物的组分和体积	123
6.2	计算 CHNO 炸药爆轰参数的快速方法	135
6.3	凝聚炸药爆轰产物平衡态参数和组成的热力学计算	140
6.3.1	爆轰参数计算方法	140
6.3.2	爆轰产物物态方程与 CJ 面处平衡态爆轰参数的计算实例	146
6.3.3	低密度装药和燃料-空气混合物爆轰参数的计算	151
<b>第 7 章</b>	<b>冲击波中炸药分解的化学反应动力学和宏观动力学基础</b>	<b>157</b>
7.1	化学反应动力学的初步概念	157
7.2	凝聚炸药宏观均匀分解动力学的若干特点	158
7.3	弱冲击波作用下结构非均匀炸药热点式分解理论的基本原理	161
7.3.1	有效热点的浓度	162
7.3.2	热点式分解中表面燃烧的概念	167
7.3.3	燃烧理论的基本原理	170
7.3.4	获取冲击波中爆炸物分解的唯象宏观化学动力学信息和方程的方法	180
<b>第 8 章</b>	<b>炸药对于外界作用的感度</b>	<b>189</b>
8.1	初始刺激或引发性刺激	189
8.2	炸药对于热作用的感度	190
8.2.1	较弱的热作用, 热自燃 (热爆炸)	190
8.2.2	强烈的热作用, 引燃	197
8.2.3	比较炸药对热载荷感度的若干实用方法	198
8.3	炸药对于机械作用的感度	199
8.3.1	机械作用下引发爆炸的条件	199
8.3.2	评估机械作用下炸药感度的标准方法的简短介绍	207
8.4	炸药对于冲击波作用的感度	209
8.4.1	引爆冲击波转变为爆轰的条件	210
8.4.2	估算炸药对冲击波引爆感度的基本方法, 若干因素对冲击波感度的影响	222
8.5	爆轰通过不同介质的传递	227
8.5.1	爆轰通过空气的传递	227

8.5.2	爆轰通过固体介质的传递	235
8.5.3	爆轰在炮眼中的传递	239
8.6	高速小型撞击器和聚能射流作用下炸药装药的爆轰	240
8.6.1	作用上阈值特性的确定	241
8.6.2	超声速和亚声速聚能射流侵入下引发炸药中爆轰及其他型式爆炸转变的特点	248
8.6.3	高速小型撞击器作用下充填于外壳内的炸药装药中爆炸过程的引发, 加载作用下阈值参数的确定	265
8.7	爆轰波在具有拐角边界的炸药装药中的传播, 爆轰逻辑元件	271
8.7.1	“死区”形状及其尺寸的确定	272
8.7.2	爆轰波阵面加速方程	274
8.7.3	描述爆轰波阵面形状演化的微分方程的推导	277
8.7.4	爆轰逻辑元件	279
<b>第 9 章</b>	<b>爆轰的传播</b>	<b>286</b>
9.1	爆轰在气态爆炸混合物中的传播	286
9.2	爆轰在凝聚炸药中的传播	293
9.2.1	凝聚炸药装药中爆轰传播的极限	294
9.2.2	有限直径炸药装药中爆轰的传播	315
9.3	研究爆轰过程的实验方法	324
9.3.1	爆轰波速度的测量	324
9.3.2	爆轰反应区参数和剖面的测量	331
9.3.3	爆轰产物温度的测量	345
9.4	含铝混合炸药的爆轰	347
9.5	凝聚炸药的欠压缩爆轰状态	364
9.6	分子凝聚炸药中爆轰波阵面的结构	380
<b>第 10 章</b>	<b>炸药的做功能力 (爆破能力)、猛度和抛射特性</b>	<b>384</b>
10.1	评价炸药做功能力 (爆破能力) 的实验和计算方法	384
10.2	测定炸药猛度的方法	395
10.3	凝聚炸药抛射能力的估算	399
<b>第 11 章</b>	<b>介质界面上冲击波的初始参数</b>	<b>409</b>
11.1	爆轰产物出流产生的冲击波的初始参数	409
11.2	爆轰产物向某些介质中的飞散	414
11.3	空气冲击波从平面障碍物上的反射	424
11.4	固体碰撞中以及波从一个介质向另一介质渡越时产生的冲击波的初始参数	440



11.5	过压缩爆轰波的初始参数	447
<b>第 12 章</b>	<b>空中爆炸</b>	<b>456</b>
12.1	炸药装药爆炸时发生的基本物理现象	456
12.2	凝聚炸药装药的爆炸	463
12.2.1	空气冲击波的参数	463
12.2.2	炸药装药密度对空气冲击波参数的影响	467
12.3	点爆炸理论	472
12.3.1	自相似的强冲击波	472
12.3.2	考虑反压的点爆炸研究	481
12.3.3	强会聚冲击波	485
12.4	爆炸波的渐近形态	489
12.4.1	声学近似	489
12.4.2	短波理论	494
12.5	燃气爆炸	498
12.5.1	可燃气体混合物爆炸的特点	498
12.5.2	低密度装药的爆轰参数	499
12.5.3	一维爆炸	505
12.5.4	轴对称形状装药的爆炸	534
12.5.5	装药燃烧产生的爆炸波	549
12.6	爆炸波与障碍物的相互作用	572
12.6.1	爆炸波从刚性表面的一维反射	572
12.6.2	爆炸波反射参数的近似估算	582
12.6.3	空气冲击波与工程设施的相互作用	585
12.7	空气冲击波的致伤特性	590
<b>第 13 章</b>	<b>水中爆炸</b>	<b>596</b>
13.1	凝聚炸药装药的爆炸	596
13.1.1	水中爆炸问题的提法	596
13.1.2	水中爆炸的实验研究	606
13.1.3	水中爆炸冲击波运动的理论研究	611
13.1.4	水中球面爆炸波形成问题的数值解	618
13.2	燃气装药在水中的爆炸	625
13.2.1	燃气装药水中爆炸问题的物理-数学模型和算法	625
13.2.2	数值解结果与实验数据的比较	629
13.2.3	计算结果的拟合公式	633
13.3	冲击波与水域表面和底面的相互作用	636

---

13.3.1	水下爆炸时自由面对压力场的影响	636
13.3.2	冲击波从水域底部的反射	639
13.3.3	浅水中爆炸的压力场	642
13.4	水下爆炸的表面效应	644
13.4.1	空化和流体断裂的动力学强度	645
13.4.2	水冢的发展	648
13.4.3	飞溅水花及其流体动力学模型	650
<b>第 14 章</b>	<b>岩土中爆炸</b>	<b>656</b>
14.1	土壤和岩石的物理-力学性质	656
14.2	地下成洞爆炸的理论研究	658
14.2.1	塑性流体中的爆炸	658
14.2.2	塑性密实固体中的爆炸	668
14.2.3	地下成洞爆炸的综合理论	677
14.3	土壤中爆炸波的数值模拟	688
14.3.1	爆炸波在非线性弹性介质中的传播	689
14.3.2	具有体积粘性的多组分介质中的爆炸波	694
14.3.3	弹塑性物态方程在土壤中爆炸研究中的应用	702
14.4	抛掷爆炸	705
14.4.1	有界介质中的爆炸	707
14.4.2	用理想不可压缩流体模型计算弹坑	714
14.5	地下爆炸实验研究的若干结果	719
14.5.1	球面爆炸波的参数	719
14.5.2	抛掷坑	723
14.6	爆炸的地震效应	727
14.6.1	地震波的基本类型及其危险性的简要介绍	727
14.6.2	地震波的参数	729

# 第 1 章 炸药的一般特性

## 1.1 炸药性态, 爆炸转变型式

各种炸药及以其为基础的组成物是含能材料中一个特殊而又广泛的系列. 近年来, 术语“含能材料”最充分地强调指出了它们的实质, 这些性质体现于含能材料所独有的相对于各种刺激作用的应答反应特性所确定的性态. 在俄罗斯技术文献中广泛使用的术语则是——炸药 (BB) 和爆炸物 (BM). 通常条件下, 含能材料是处于某种聚集状态 (固态、液态或气态) 的化学组成物 (图 1.1).

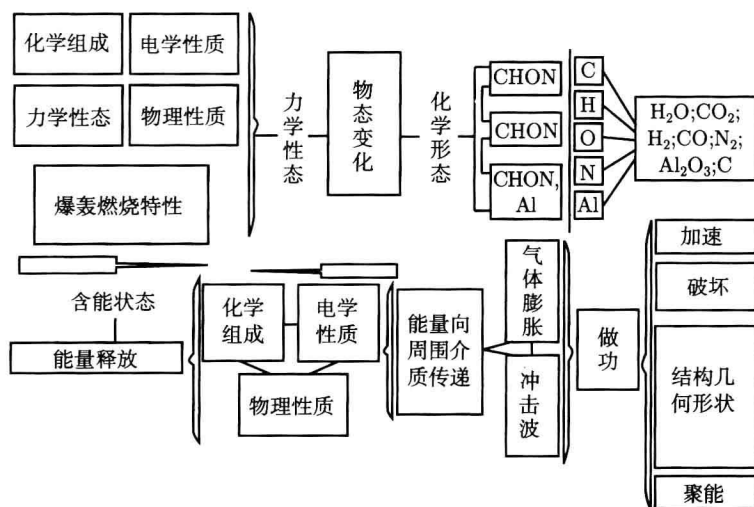


图 1.1 含能材料的性态

在上述性质以及物理、热物理、力学和电学性质总合的意义上, 含能材料定性上与其他惰性材料没有差别, 许多情况下可以担当结构材料的功能, 尤其在“力学性态”方面. 然而, 术语“含能材料”还有其特别的含意: 含能材料具有潜在的化学能, 在一定条件下这些能量才可能释放出来. 这些条件实质上是对含能材料设定的可标度的作用, 以保证达到所需要的能量释放状态. 对于含能材料来说, 能量释放型式确定了系统的能量性态, 并伴随着必定的力学行为, 以及首先是系统聚集状态的变化. 爆炸系统物态变化的特点是, 固态、液态或气态物质总是转变成气态. 很多情况下, 也可能存在凝结相、蒸汽甚至固态组分. 根据能量释放型式和相变动力

学, 上述转变所形成的气态物质分别被称为燃烧产物 (ПГ)、爆轰产物 (ПД) 或爆炸产物 (ПВ), 并不取决于爆炸转变 (ВП) 状况的基本特征. 最一般情况下, 含能量较高的含能材料的爆炸产物, 能量释放密度也较高 (可达到  $17 \times 10^3 \text{ kJ/m}^3$ ), 许多情形中还可得到空前巨大的释能功率 (每平方米波阵面上  $10^4 \text{ W}$ ). 通常从含能材料具有的内能转化为动能, 随后在很多情形以及释能过程中消耗于做功. 从初始状态到最终状态的转变是一个很复杂的、并且与系统经历的亚稳定状态有联系的多阶段过程. 从已知的初始状态向最终状态的上述转变, 就是爆炸转变型式的实质. 引起潜能释放的外部作用称为引发. 如果不去考虑爆炸转变型式, 那么最终的爆炸产物呈现出任何物质都固有的力学性态. 爆炸产物的力学性态与其原始含能材料的差别, 表征在聚集状态和考虑到释能的含能量方面. 系统的物理性态, 即只有在爆炸转变的“型式转换”中才能达到的物理、电学和光学特性, 通常是其独有的特性. 实际上, 现在很大程度上利用的正是含能材料的含能特性, 即其爆炸型式特性和产物特性, 而较少利用各种爆炸转变型式所伴生的作用, 如力学、光学、电磁学和热学特性以及与之有关的在周围介质中的效应.

爆炸转变型式 (PВП) 是比爆炸转变形态 (BВП) 更加完全的概念, 它意味着设想可在含能材料中发生的许多相互联系的物理上有条件的内禀过程的总合. 无论研究哪种爆炸转变型式, 都不能脱离引发条件以及引发时所受的空间约束. 能量释放和相变是凝聚态系统所有爆炸转变型式共有的特征, 但是在转变机理、决定因素和气体动力学流动的时空图像方面会存在实质性的差别. 我们把爆炸转变型式分为下面几类:

正常的层流燃烧 (НГ)——以恒定速度传播、温度和浓度剖面不变的燃烧.

对流燃烧 (КГ)——具有气体动力学孔隙度的固体含能材料燃烧的各种类型, 是燃尽物质的射流所支配的过程. 当正常燃烧达到中断压力  $p_{cr}$  时, 产生对流燃烧.

低速爆轰 (НСД)——这是爆轰转变之前波动过程的个别情况, 紧接着压缩波阵面后出现分解度很低的波动过程.

正常爆轰 (НД)——由冲击波及其后方的化学反应区组成的超声速定常组合体 (图 1.2).

不同爆炸转变型式的差别表现在沿传播方向的能量传递和波阵面上化学反应过程的引发机理上. 它们在实际中的重要性很大程度上只在于过程物理实质处于两个极端的方面: 层流燃烧 (正常燃烧) 和正常爆轰 (定常爆轰). 与具有较高参数的过程相比, 任一过程都可称为低阶的; 反之, 与具有较低参数的过程相比又可称为高阶的. 大多数自然发生的过程是正常层流燃烧和正常爆轰的定常状态, 而对流燃烧与低速爆轰则必须在范围相对较窄的特殊条件下才能实现. 上述过程又有向着更高阶型式过渡或向着衰减的但还能自持的对流燃烧或低速爆轰型式转变的趋势, 要把后面这两种型式维持在定常的程度上, 则需要特别的条件. 人们有时把参

数高低处于正常层流燃烧和正常爆轰之间的所有可能型式的集合, 称为似爆轰的爆炸 (偶尔也称之为不完全爆炸). 可以看出这样的称呼是有道理的, 因为这类型式具有爆炸的性质: 较高的参数、自持传播、释放能量和较多工质的输出. 如上所述, 按照参数高低来说, 似爆轰的爆炸处于与表征燃烧和爆轰的参数范围部分相交的中间位置.

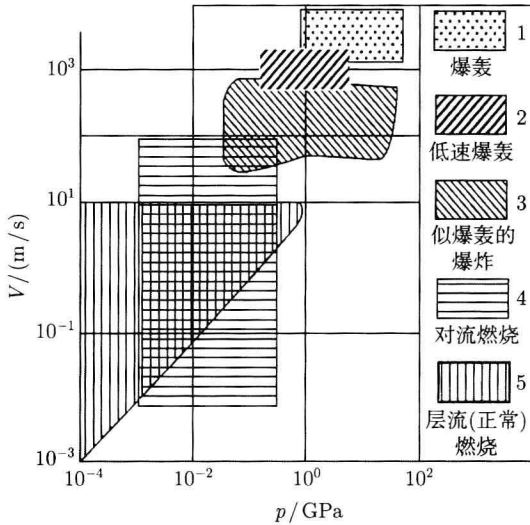


图 1.2 各种爆炸型式存在范围的图示,  $p$ — 压力,  $V$ — 阵面速度

换言之, 按参数和功率增高的次序, 各种爆炸型式可按如下顺序排列: 正常层流燃烧-对流燃烧-低速爆轰-正常爆轰. 这个顺序是爆炸型式本身的自然渐进序列, 正常层流燃烧和正常爆轰是此序列中两个极端的过程, 对流燃烧和低速爆轰则是处于中间的过程. 上述序列具有如下特点:

—— 在一定条件下, 沿着低参数过程向高参数过程发展的方向, 一种型式可以转变为另一种型式.

—— 任何一种上述的型式都可能被激发, 并能够转变为下一种型式.

—— 与“正常层流燃烧-对流燃烧-低速爆轰-正常爆轰”次序相反的转变是不可能的.

—— 过程的阶次越高, 爆炸转变过程的参数 (压力、速度) 越高, 经过的时间越短.

实际上能够实现的, 多半是与引发时一定的能量引入机制相对应的定常型式. 必须指出如下原则: 如果没有特别的目的, 可以直接在含能材料中引发所需要的爆炸转变型式, 而不必经过较低阶的型式发展为所需的型式. 下面列出确定上述爆炸

型式定常传播形式的一些物理因素:

**正常燃烧** —— 能量传递和传播的机理取决于分子热传导的过程, 波动影响完全不必考虑, 外部条件可用来可靠地控制反应过程。

**对流燃烧** —— 高热燃烧产物从燃烧区向未反应物质深处渗透所主导的过程, 波动过程的作用只存在于燃烧区内, 外部条件对控制参数的作用是有限的。

**低速爆轰** —— 由局部区域 (热点) 反应所引起、并由弱压缩波激发和维持的过程, 装药的物理-力学结构是决定性的因素, 装药外壳的存在通常有助于确立过程传播的可能性。

**正常爆轰** —— 依靠强冲击波阵面后方均匀的局部预热, 导致能量协同释放的过程。

还有若干物理因素确定了究竟是哪一种爆炸型式可能传播, 并确定了一种型式向另一种型式的转变。正常燃烧时,  $p_{\text{HГ}}$  是周围空间中的压力, 当此压力升高到层流燃烧中断压力以上时, 层流燃烧就会中断, 过程可能转变为程度更低的后继型式。对流燃烧时压力  $p_{\text{КГ}}$  是点火阵面的压力, 低速爆轰时压力  $p_{\text{HСД}}$  是压缩波阵面的压力, 正常爆轰时压力  $p_{\text{HД}}$  则是冲击波阵面的压力。以上所述可参见图 1.3 的说明。

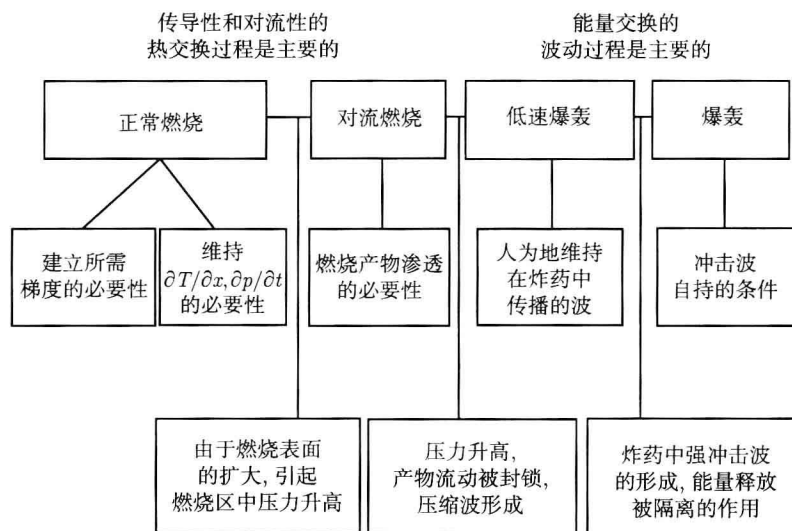


图 1.3 爆炸型式变化示意图

## 1.2 爆炸转变型式的性质

爆轰是速度为 10km/s 左右的某种“屏障”, 是否存在着某种处于爆轰和原子核内部过程之间的参数范围? 基于现有的经验, 从逻辑上就可否定这种范围存在的可

能性。

这个判断以众所周知的如下物理事实作为基础：如果把运动的物质系统用于能量传递，那么当能量传递速度接近某种临界值时，这个过程就存在相应的“能量壁垒”。当介质速度超过  $O_2$  和  $N_2$  分子的平动速度时，在空气中就达到“声障”；当介质速度超过  $O_2$  和  $N_2$  分子的振动速度时，就达到“热障”；当该速度超过炸药中原子键 (C—H、O—H、N—H) 之间的振动能级时，就达到“爆轰屏障”。根据“爆轰屏障”的存在可导出如下论点：以速度  $8\sim 9\text{km/s}$  运动的爆轰阵面在  $10^{-13}\text{s}$  之内就可通过原子间的距离，因此，炸药分解的速率常数也是  $10^{-13}\text{s}$  量级。由于除了原子的振动运动以外没有其他的能量传递系统，所以爆轰不可能使得炸药以大于  $10^7\text{kg/sm}^2$  的速率分解。在论证猛炸药爆轰速度极限时，所引用的途径不是唯一的。C-H-O-N 化合物可以达到能量极限，但目前对于 C-H-O-N 系统我们尚未“达到”其极限可能性的 1%(甚至对于不含氢的系统也是如此)。因此，选择合理途径加入高能金属添加物，以改变爆轰波阵面处的流动结构，即在非等熵卸载波中可以释放出一定比例的能量，导致系统做功能力的提高，并使爆轰阵面处的压力反而降低。这种途径在实际应用中并不总是有利的，因为炸药抛射和加载能力在很大程度上取决于能量从爆轰产物中向外传出的条件。

在讨论爆炸转变型式的性质之前，我们指出对爆炸转变型式作抽象的、与实际问题无关的研究并不一定恰当。目前，还不能充分说明对于选定的含能材料来说，实现这种或那种爆炸型式的切合实际的界限是什么。

实际应用中，应当更多地了解和分析爆炸型式的性质，不仅根据定常形式中有规律性的参数高低，而且还应考虑到与周围介质能量交换的特性、爆炸型式引发的可能性、受控程度、外部条件对所考虑型式传播的影响。事实上人们感兴趣的或许是该型式在能量方面的极限可能性，也许是该型式仍有可能实现的极端条件。表 1.1 中汇集了具有实际意义的爆炸转变型式的若干基本性质。

关于炸药理论的现有文献中惯用的方法，是把爆炸转变的各种型式概括为一个统一的爆炸概念，并给出可用来识别各种爆炸转变型式的要素。下列要素属于决定性的因素：过程的放热性、过程的高速度、强烈气化、自持传播的能力。上述要素可以看作是理解爆炸过程物理基础的初步近似。

**型式参数** 下列型式参数通常是有意义的：线速度、能量释放的波阵面参数和潜能。

这些参数的知识对于广泛范围内的实际应用已经足够。可以应用型式参数估算炸药的潜在能力，主要是估算其加载和抛射的能力。型式参数决定并且限制了爆炸的实际应用。但是，当涉及具体反应程式中所发生爆炸型式的极限可能性时，已列举的要素就不够了。因此，必须按阶段地研究从型式引发条件到向周围介质传递能量的整个过程。

表 1.1 爆炸转变型式特性的比较

状态特性		正常燃烧 (HГ)	对流燃烧 (KГ)	低速爆轰 (HСД)	正常爆轰 (HД)
波阵面的 状态参数	速度/(m/s)	$10^{-3} \sim 10$	$10^{-3} \sim 10$	$10^{-1} \sim 10^2$	$(2 \sim 9) \times 10^{-3}$
	压力/Pa	$10^5 \sim 10^9$	$10^5 \sim 10^8$	$10^8 \sim 10^9$	$(1 \sim 30) \times 10^9$
	功率/(kW/m <sup>2</sup> )	$10^3 \sim 10^5$	$10^5 \sim 10^8$	$(1 \sim 3) \times 10^9$	$10^9 \sim 10^{11}$
向高阶型式 转变的趋势		有	有	有	—
转变的 可能性	控制因素	$P, P'$	$P, P', S, \rho_0$	$S$ , 外壳	外壳
	中止因素	$P, P', \phi$	$P, P', \rho_0$	外壳	—
影响	外部条件	有	有	有	无
	几何边界条件	有	有	有	无, 当 $d_3 < d_{cr}$
阵面过程中 能量释放分数		$\approx 1$	$\approx 1$	0.1~0.2	$\approx 1$ , 在 CJ 面之前
反应过程中 系统聚集状态 的变化		$K_\phi \rightarrow$ 气体 ( $K_\phi$ ) $K_\phi \rightarrow$ ( $K_\phi$ ) (气体 $\rightarrow$ 气体)	$K_\phi \rightarrow$ ( $K_\phi$ )	$K_\phi \rightarrow$ ( $K_\phi$ )	$K_\phi \rightarrow$ 气体 ( $K_\phi$ ) (气体 $\rightarrow$ 气体)
抛射中传递能量 的份额/% $Q_v$	敞开方式	0	5 以下	10 以下	35 以下
	封闭方式	20	20	30	70 以下
利用外部能源的可能性		有	有	无	无
形成射流、破片等 几何结构的能力		无	无	有/无	有
对周围介质的加载性质		等熵加载	波动加载	冲击波加载	冲击波加载

注:  $P$ — 压力,  $P' = dP/dt$ — 压力随时间的变化率,  $S$ — 燃烧表面积,  $K_\phi$ — 凝聚相,  $\phi$ — 表面积

**转变趋势** 通常, 从一个爆炸转变型式到另一种型式的自发转变是未曾预料的也是不能许可的现象: 火药、固体火箭燃料、烟火剂组成物等应该稳定地燃烧, 而炸药则应该发生爆轰。不同的含能材料具有不同的转变趋势。确定转变可能性的基本要素是含能材料的装药质量、装药结构和外部约束条件。根据某些要素 (部分或全体) 可以确定定常反应过程中断并向更高阶型式转变, 或者逐渐熄灭。

尤其是很多实际情况中必须研究个别场合下控制各种爆炸型式并使之中断的可能性, 越慢的过程越容易得到控制, 可利用的控制因素越多。燃烧型式的控制比较简单, 改变外部条件 (温度、压力) 或者改变装药的结构特性 (孔隙度)、几何约束条件等, 就能够中止燃烧。以波动方式为主导、并且是超音速的爆炸型式的控制实质上非常复杂。与之相关的爆炸型式动力学由很窄的释能区内的过程参数所确定, 实际上与外部条件无关。对于凝聚态系统来说, 爆炸过程的巨大威力及其定向作用 (波阵面后方介质的流动沿着阵面传播的方向) 都不可能利用外部因素来控制, 这种情况还同在高流动参数场合下, 无法建立起在强度上相当于爆炸阵面参数的、因



而能够控制爆炸甚至能够中断波动过程的外部条件有关。以冲击波为主导的型式必定是超音速的,依据这个观点,热量的传入与排出实际上是不可能的。每个流动的马赫数对应着能够传输给这个流动的一定的热量。对于气态的和非均匀的低密度系统而言,存在这种可能性,因为这些系统的流动参数水平相对较低,释能区域相对较宽。对于凝聚态的高密度系统而言,气体动力学卸载(稀疏)是控制这种系统爆炸过程的唯一方法,因为产物飞散可以耗费掉用于维持、传播爆炸型式所必需的能量,使之发生不足,但这种方法只在装药线性尺度不大的场合下见效。原则上由于流体动力学卸载可使得化学反应中止,在具有不光滑爆炸阵面的极度稀释的液态系统中,爆炸型式可能中断。

从正常爆轰到层流燃烧的转变显然是不可能的,与之相关的是:爆轰过程的典型速度比燃烧过程高出几个量级,而其空间特征尺度则比燃烧过程低几个量级。在燃烧的温度和压力梯度( $dT/dx$ 和 $dp/dt$ )典型值的条件下,流体动力学途径要比大幅度地降低流场参数的方法更容易使得爆轰过程中断。

显然,过程的阶次越高就越难加以控制。对于正常层流燃烧来说,确实存在着很多可以控制其过程的因素:装药结构特性、外部条件、几何形状等;对于爆轰来说,实际上只能利用其几何形状来控制,而且是在很窄的尺度范围内。

阵面处释放的能量分数是过程的本质性特征。通常,阵面释能分数越低,整个能量释放就越延缓。这种情况下,应当在比冲击波阵面更广的意义下研究过程的前沿阵面,它可以由几个特征区域所组成,其中任何一个区域都是以某一种过程为主导的(加热区、气化区、火焰渗透区、燃尽区等)。例如,燃烧阵面是加热区、气化区、释能区的总和,爆轰阵面则是一个随即释放能量的冲击波阵面。一般情况下,阵面后方的过程存在某个规则的层面,把原始介质与上述同释能相关的几个接续状态区分开来。通常,能量释放区越接近于这个层面,过程的参数就越高。许多实际情况中,需要在保持能量释放总量水平不变的同时,降低波阵面的参数(压力、质点速度、温度等)。为此可给出这些型式传播所需的条件,使得包括引发阶段和能量释放阶段在内的这种综合物理过程在时间上得到展延。先导波的扰动首先使得含能材料中少量潜能被释放出来,这些能量从声阻抗高的外壳上发生反射之后(这种情况中通常一定具有外壳),决定了过程存在的可能性和速度。剩下的能量释放得比较晚,有时其机理也与第一阶段有所不同。这种阶段中可能实现的有波动和燃尽两种现象,其中波动现象是过程独特的一种钝化器。为了促使爆炸现象在空间和时间上发生中断,必须创造一些条件使得第二阶段中释放的能量不能供给于第一阶段,介质的燃尽应发生在非等熵的卸载波中。此时作为消极因素的流体动力学卸载作用增强,这样的流动实际上很难实现,“流体动力学体系”中任何不完善性都将导致过程的中止。上面所述情形大多属于低速爆轰,但在对流燃烧中也可以找出实际能使能量释放延缓的共同特征。对流燃烧时燃烧型式得到激励,低速爆轰时波动过程的