

# EXPLOSION PHYSICS

# 爆炸物理学

(下册)

[俄] Л.П.奥尔连科 (Л.П.ОРЛЕНКО) /主编  
孙承伟/译 胡海波 周之奎/校

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

原书第三版



科学出版社

# 爆炸物理学

原书第三版

(下册)

(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. Челышев 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: 下册/(俄)Л. П. 奥尔连科 (Л. П. ОРЛИНКО)  
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—2000 字数: 1800000

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果, 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, 许多内容和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

版过程中得到流体物理所刘仓理、山东省科技厅国际交流合作处吕鹤和科学出版社钱俊先生的宝贵支持。译者谨向他们以及关心本译著的专业人士表示衷心的感谢。译者翻译俄文技术文献经验不足,若干专业词汇缺少规范译名,书中译述不当或者疏漏之处尚祈读者指正。

中国工程院院士 孙承纬  
中国工程物理研究院流体物理研究所  
上海激光等离子体研究所  
2009年5月

## 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 年来积累的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.

---

<sup>\*)</sup>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

## (下 册)

译者前言

第三版序言

第 15 章 爆轰产物对物体的抛射	735
15.1 爆轰波从固壁反射时爆炸冲量的确定	735
15.1.1 爆轰波阵面后爆炸产物状态参数的分布	735
15.1.2 爆轰波从固壁反射时的冲量	745
15.2 爆轰产物抛射的装药外壳速度和运动规律的确定	757
15.2.1 一维抛射时外壳最大速度的确定	757
15.2.2 爆炸产物抛射外壳的一维运动规律	761
15.3 爆轰产物对平板的一维抛射	765
15.4 密实金属颗粒的高速发射	771
15.5 爆轰产物对轴对称壳体的抛射	777
15.6 爆炸产物抛射的空间(三维)问题	793
第 16 章 爆炸装置的破片作用	797
16.1 金属外壳膨胀及破坏过程的实验观察和得到的破片分布谱	797
16.1.1 外壳运动的光学和 X 射线闪光照相研究	797
16.1.2 爆室试验和挡板试验	805
16.1.3 自然破片的基本特点	809
16.1.4 破片金相图的研究	814
16.2 壳体膨胀和断裂过程的理论模型	822
16.2.1 不可压缩刚塑性壳体的一维膨胀	822
16.2.2 可压缩弹塑性壳体的一维膨胀	826
16.2.3 壳体断裂模型	832
16.3 圆柱壳碎裂的基本关系式	840
16.3.1 断裂和破片形成中的尺度效应, 量纲分析	840
16.3.2 壳体的断裂半径	845
16.3.3 壳体碎裂特性参数的关系式, 环周分裂数	848
16.3.4 关于破片总数的关系式	853

16.3.5	破片分布的预测	855
16.4	破片的统计分布	859
16.4.1	破片的空间-质量分布	859
16.4.2	破片统计学的普遍关系式	861
16.4.3	破片分布的基本统计模型	864
16.5	标准破片圆柱壳	874
16.5.1	标准破片圆柱壳的主要类型和参数	874
16.5.2	标准破片圆柱壳静爆过程的数值模拟	881
16.5.3	标准破片圆柱壳的实验数据	885
16.5.4	利用标准破片圆柱壳研究破片形成中的尺度效应	895
16.6	破片作用	898
16.6.1	自然碎裂破片形状的模型和参数	898
16.6.2	破片弹道学	911
16.6.3	破片与靶板相互作用机制的分类	913
16.6.4	极限侵彻靶板厚度和极限侵彻速度	915
16.6.5	估计破片作用的判据	917
<b>第 17 章</b>	<b>聚能</b>	<b>922</b>
17.1	概述	922
17.1.1	聚能概念和聚能装药	922
17.1.2	发展历史简述	924
17.1.3	聚能射流形成机制, 可能的聚能状态	925
17.1.4	聚能射流对靶板的侵彻	930
17.2	聚能射流理论	934
17.2.1	不可压缩流体的射流理论	934
17.2.2	聚能射流形成的理论	936
17.2.3	射流形成的临界条件	937
17.2.4	聚能射流侵彻靶板的理论	942
17.2.5	靶板孔洞直径的确定	950
17.3	各种材料聚能射流的运动和断裂	954
17.4	聚能射流和杵杆的材料结构状态	963
17.5	聚能装药动作过程的计算	966
17.5.1	计算聚能射流参数的数值方法	967
17.5.2	带有高圆锥形药型罩的聚能装药动作参数的工程计算方法	977
17.5.3	半球形和球缺形药型罩聚能装药动作过程参数计算的特点	990



17.5.4	具有楔形凹槽的长条形装药形成聚能“切割刀”过程的计算方法	1004
17.5.5	聚能射流温度的估算方法	1011
17.6	聚能装药结构参数和制备工艺对穿孔作用的影响	1017
17.6.1	聚能凹槽形的药型罩	1017
17.6.2	炸药装药和外壳	1023
17.6.3	控制爆轰阵面的元件 (隔爆块)	1027
17.6.4	聚能装药的制备工艺	1030
17.6.5	聚能装药中的非理想爆轰过程	1034
17.7	运用条件对聚能装药作用的影响	1039
17.7.1	聚能装药的最佳炸高 (“焦距”)	1040
17.7.2	旋转对于聚能装药作用效果的影响	1042
17.7.3	电磁作用对于聚能射流作用效果的影响	1048
17.7.4	药型罩预加热对聚能射流作用效果的影响	1061
17.7.5	静水压力和温度对聚能射流效果的影响	1067
17.7.6	聚能射流与动力防护板 (反应装甲) 的相互作用	1074
<b>第 18 章</b>	<b>凝聚炸药爆炸中的电磁现象</b>	<b>1080</b>
18.1	炸药爆炸中电磁现象的唯象研究	1080
18.2	爆炸中电磁过程的物理数学模拟	1091
18.3	凝聚炸药爆炸热辐射的估算方法	1104
18.4	凝聚炸药爆炸中电磁和辐射气体动力学过程的实验研究	1109
<b>第 19 章</b>	<b>固体材料的爆炸力学基础</b>	<b>1116</b>
19.1	可变形弹塑性介质的绝热运动方程组	1116
19.2	液体和固体的物态方程与冲击绝热线	1127
19.2.1	凝聚物质的物态方程	1127
19.2.2	确定物质动力可压缩性的实验方法	1135
19.2.3	冲击压缩下材料的性质	1141
19.3	可压缩弹塑性介质的高速变形和断裂	1152
19.3.1	平面冲击波在弹塑性半空间中的传播	1154
19.3.2	Hugoniot 冲击绝热线上的弹性极限, 相变, 弹性波和塑性波	1161
19.3.3	高速变形的力学和形态学	1169
19.3.4	动态流动极限	1176
19.3.5	多孔介质中的冲击波	1181
19.3.6	冲击波加载下的断裂判据	1186
19.3.7	体积分脉冲加热状况下材料的动态断裂	1198

19.3.8	材料的层裂式断裂	1201
19.3.9	炸药装药爆炸时靶板的动态断裂	1211
19.3.10	氟聚合物高速侵彻下含铝靶板的动态断裂	1215
19.4	各种介质中冲击波的耗散过程	1224
19.4.1	耗散比能量	1224
19.4.2	耗散总能量	1230
19.5	固体受冲击压缩时的电磁现象	1239
<b>第 20 章</b>	<b>爆炸过程的模拟</b>	<b>1243</b>
20.1	爆炸过程模拟的理论	1243
20.2	各类介质中爆炸过程的模拟	1245
20.3	爆炸产物引起的聚能和壳体断裂过程的模拟	1248
20.3.1	聚能过程的模拟	1248
20.3.2	复杂系统的模拟	1249
20.3.3	爆炸作用下壳体断裂的模拟	1250
<b>第 21 章</b>	<b>材料爆炸加工</b>	<b>1253</b>
21.1	爆炸强化	1253
21.2	爆炸焊接	1258
21.2.1	爆炸焊接过程的基本形式和参数	1258
21.2.2	爆炸焊接的基本规律	1264
21.2.3	爆炸焊接中接合的形成	1266
21.2.4	大板爆炸焊接的特点	1269
21.3	多孔材料的爆炸压实	1271
21.3.1	多孔材料增密模型	1272
21.3.2	平面毛坯的爆炸压实	1274
21.3.3	轴对称毛坯的爆炸压实	1277
21.4	金属板的爆炸冲压成形	1280
21.4.1	爆炸冲压成形的基本概念	1280
21.4.2	水中爆炸对坯料的作用, 坯料加载过程的 $(x, t)$ 图	1282
21.4.3	爆炸冲压成形中传递至坯料板能量的计算	1283
21.4.4	工件成形做功的计算	1285
21.4.5	炸药装药用量的计算	1287
21.4.6	水中爆炸冲压成形的特点	1290
21.5	超硬材料的冲击波合成和爆轰合成	1291
21.5.1	超硬材料的冲击波合成	1292

---

21.5.2 超硬材料的爆轰合成 .....	1293
附录 .....	1297
附录 A 空气中的冲击波 .....	1297
附录 B 炸药的性质 .....	1303
附录 C 水的物态方程 .....	1311
附录 D 物质的动力可压缩性 .....	1313
参考文献 .....	1337

## 第 15 章 爆轰产物对物体的抛射

### 15.1 爆轰波从固壁反射时爆炸冲量的确定

#### 15.1.1 爆轰波阵面后爆炸产物状态参数的分布

在爆炸产物中爆轰波后总是伴随着稀疏波, 而且在化学反应结束后立即出现稀疏波. 这是因为紧靠爆轰转变区后化学反应产物以速度  $u$  朝爆轰传播方向运动, 并因此处于高压状态.

由于任何时刻爆轰波阵面上 CJ 点处产物的熵保持常值, 波阵面后产物气体作等熵运动. 一维平面情形中, 如果爆轰产物的等熵线方程的形式为  $p = A\rho^k$  ( $k =$  常数), 则爆轰波阵面后爆轰产物的运动可以最简单地求解, 并能得到简单的解析解. 在等熵线方程为  $p = A\rho^k$  ( $k =$  常数) 的场合, 柱面和球面爆轰波情形不能得到关于爆轰产物运动问题的解析解, 需要用数值方法求解. 假如等熵线方程具有  $p = p(\rho)$  或者  $k = k(\rho)$  的任意形式, 平面、柱面和球面爆轰波阵面后爆轰产物运动的确定, 同样需要采用数值方法. 下面研究一维爆轰波阵面后爆轰产物运动的解析解和数值解.

在平面爆轰波情形并且等熵线方程为  $p = A\rho^k$  ( $k =$  常数), 爆轰波阵面后产物所有参数都只与坐标  $x$  和时间  $t$  有关. 把气体动力学基本方程组写成如下形式 (参看 3.1 节):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{2}{k-1} c \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (15.1)$$

$$\frac{2}{k-1} \frac{\partial c}{\partial t} + \frac{2}{k-1} u \frac{\partial c}{\partial x} + c \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (15.2)$$

( $dS = 0$ )

众所周知, 从上述方程组可导出 (3.7) 式:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( u \pm \frac{2}{k-1} c \right) + (u \pm c) \frac{\partial}{\partial x} \left( u \pm \frac{2}{k-1} c \right) = 0 \quad (15.3)$$

如果

$$u = \mp \frac{2c}{k-1} + \text{常数} \quad (15.4)$$

方程式 (15.3) 恒等地成立, 并且原始方程组可以改写为

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \pm c) \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (15.5)$$

此时立即可以写出如下形式的解:

$$x = (u \pm c)t + F(u) \quad (15.6)$$

应该指出, 解 (15.6) 式描述了单方向传播的波, 对爆轰波尤其具有代表性.

假如波从左向右、朝坐标  $x$  增大的方向传播, 则解 (15.6) 式中应取正号; 对于相反方向传播的波, 则应取负号. 利用这些解, 可以确定爆轰波阵面后方产物的参数:

$$x = (u \pm c)t + F(u), \quad u = \pm \frac{2c}{k-1} + \text{常数} \quad (15.7)$$

假设  $t=0$  时爆轰波在管子封闭端处 ( $x=0$ ) 被引发, 开始从左向右传播, (15.7) 式中应选取正号. 由于  $t=0$  时刻在  $x=0$  处运动是确定的, 得出  $F(u)=0$ , 由此

$$x = (u + c)t \quad (15.8)$$

已知在强爆轰阵面上  $u_H = D/(k+1)$ ,  $c_H = kD/(k+1)$ , 从而得出 (15.4) 式中的常数为

$$\text{常数} = -\frac{D}{k-1} \quad (15.9)$$

因此, 爆轰阵面后的稀疏波应用如下公式描述:

$$\frac{x}{t} = u + c, \quad u = \frac{2c - D}{k-1} \quad (15.10)$$

由于  $x=0$  处管端是封闭的, 上式只在产物粒子速度  $u$  不为零、产物未进入静止状态的  $x$  坐标范围内成立. 从上述范围的左端点到  $x=0$  点的区间 (静止区) 中, 产物气体所有参数保持不变.

凝聚炸药 (强爆轰波) 爆轰产物的等熵指数  $k=3$ , 此时 (15.10) 式具有最简单的形式:

$$\frac{x}{t} = u + c, \quad -\frac{D}{2} = u - c \quad (15.11)$$

由此得到

$$c = \frac{x}{2t} + \frac{D}{4}, \quad u = \frac{x}{2t} - \frac{D}{4} \quad (15.12)$$

在爆轰波阵面上 (即当  $x/t = D$  时),  $u_H = D/4$ ,  $c_H = 3D/4$ . 当  $u=0$  的时刻则有

$$\frac{x}{t} = \frac{D}{2}, \quad c_{\Pi} = \frac{D}{2} \quad (15.13)$$

从 (15.12) 式得知, 在  $(D/2) \leq x/t \leq D$  的范围内粒子速度和声速按线性规律变化. 在  $0 \leq x/t \leq (D/2)$  范围内,  $u=0$ ,  $c = C_n = D/2$ . 爆轰波阵面后任意给定时刻  $u$  和  $c$  的分布如图 15.1 所示.

稀疏波终止和静止区开始的点，恰好位于爆轰波阵面和炸药起爆位置的中间。等熵指数  $k=3$  时， $p = p_H (\rho/\rho_H)^3$ ， $c = c_H \rho/\rho_H$ ，因此  $u=0$  处（静止区中）产物的参数为

$$p_{\Pi} = \frac{8}{27} p_H, \quad \rho_{\Pi} = \frac{2}{3} \rho_H = \frac{8}{9} \rho_0 \quad (15.14)$$

由此可见，爆轰阵面后方产物密度线性变化，而压力按幂函数规律变化。 $p$  和  $\rho$  的分布特性如图 15.2 所示。

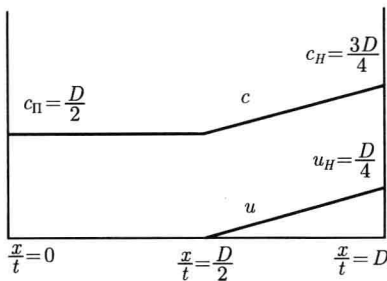


图 15.1 平面爆轰波阵面后方  $u$  和  $c$  的分布 ( $k=3$ )

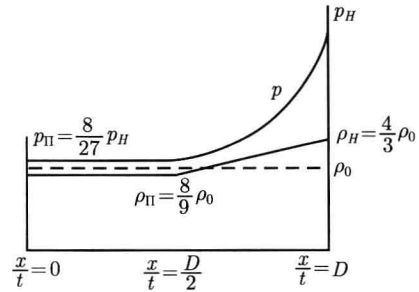


图 15.2 平面爆轰波阵面后方  $p$  和  $\rho$  的分布 ( $k=3$ )

由于产物的所有状态参数只依赖于  $x/t$ ，因此波将随时间流逝而逐渐延展，但其形状不变，也就是说爆轰产物作自相似运动。上述解是Грибун<sup>[15.1]</sup>得到的。表 15.1 列出了不同等熵指数  $k$  值下，比值  $p_{\Pi}/p_H$  和  $\rho_{\Pi}/\rho_H$  的计算结果。从表 15.1 可以看出，甚至在  $k$  值变化很大时，比值  $p_{\Pi}/p_H$  的变化仍比较小。

表 15.1 不同  $k$  值下静止区中爆轰产物的压力和密度

$k$	$p_{\Pi}/p_H$	$\rho_{\Pi}/\rho_H$	$k$	$p_{\Pi}/p_H$	$\rho_{\Pi}/\rho_H$
3.0	0.3	0.67	1.20	0.35	0.42
1.66	0.33	0.51	1.0	0.369 = 1/e	0.369
1.40	0.34	0.46			

假如爆轰在封闭容器中进行，则爆轰结束后不久爆轰产物内处处建立起相同的压力  $p_c$ ，而且密度等于  $\rho_0$ 。这个压力容易由爆轰产物物态方程  $E = pv/(k-1)$  或  $(p_c v_0)/(k-1) = Q_v$  确定，于是有

$$p_c = (k-1) \rho_0 Q_v \quad (15.15)$$

产物为完全气体时爆轰波阵面处的压力为（见第 5 章）

$$p_H = 2(k-1) \rho_0 Q_v, \quad p_c = \frac{p_H}{2} \quad (15.16)$$

这种情况下, 爆轰波阵面压力为爆炸产物平均压力的二倍. 波阵面上较高的压力被位于稀疏波后面其余部分气体中的低压力所抵偿:  $p_{\Pi} = 0.6p_c$ .

假如化学反应在整个炸药体积中瞬时完成, 则爆轰产物的最大压力等于  $p_c$ . 因此, 瞬时爆轰时紧靠装药的近区内爆炸的局部效应明显地小于正常爆轰的情形, 但是这时炸药势能所决定的爆炸产物作用的总和没有变化.

采用电磁方法对不同长度的 TNT/RDX(50/50) 装药中、平面爆轰波阵面后爆炸产物的运动进行了实验研究, 结果表明: 如果能在质点速度随时间变化的实验曲线中区分出  $0.1\mu\text{s}$  的一个定常范围, 则后面的运动就可看作是自相似的<sup>[15.2]</sup>. 此时已设爆轰产物的等熵线具有任意形式  $p = p(\rho)$ , 爆轰产物的自相似运动可以用下述方程描述 (见 3.2 节):

$$\eta = \frac{x}{Dt} = \frac{u}{D} + \frac{c}{D}, \quad du = -\sqrt{-dpdv} \quad (15.17)$$

或者因等熵流动中  $du/d\ln\rho = c$ 、 $dp = \rho c du$ , 把这两个式子从 CJ 点开始积分, 得到

$$\rho(\eta) = \rho_H \exp \left\{ \int_{u_H}^{u(\eta)} \frac{du}{c} \right\}, \quad p(\eta) = p_H + \int_{u_H}^{u(\eta)} c \rho du \quad (15.18)$$

TNT/RDX(50/50) 炸药 ( $\rho_0 = 1.68\text{g/cm}^3$ ) 的实验值  $u = u(\eta)$  如图 15.3(曲线 1) 所示. 利用 (15.17) 式第一个方程可以参数形式确定  $c = c(u)$ , 从而由 (15.18) 式的数值积分可得出  $\rho(\eta)$  和  $p(\eta)$ .

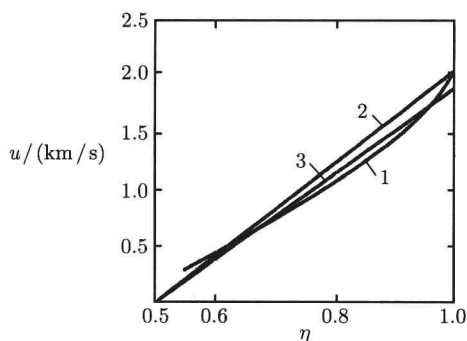


图 15.3 TNT/RDX(50/50) 炸药中爆轰波阵面后方粒子速度  $u$  的变化

1—实验曲线 (据Зубарев的数据), 计算曲线: 2— $k=2.7$ ; 3— $k=3$

这时利用下面方程求出等熵指数为

$$k = \frac{d \ln p}{d \ln \rho} = \frac{\rho}{p} \frac{dp}{d\rho} = \frac{\rho c^2}{p}$$

根据实验曲线  $u = u(\eta)$  得到的这些计算结果列于表 15.2. 表 15.2 列出的  $p = p(\rho)$  关系, 是根据实验关系  $u = u(\eta)$  (图 15.3) 得到的 TNT/RDX(50/50) 炸药爆轰产物

的等熵线, 在这个图中还给出了当爆轰产物等熵线方程为  $p = A\rho^3$  和  $p = B\rho^{2.7}$  时、计算得到的 TNT/RDX(50/50) 炸药的  $u = u(\eta)$  曲线。

表 15.2 TNT/RDX(50/50) 炸药爆轰产物的实验等熵线参数

$\eta$	$u/D$	$c/D$	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	$p/\text{GPa}$	$k$
1	0.271	0.729	2.30	26.5	2.70
0.968	0.24	0.728	2.21	23.6	2.90
0.933	0.21	0.723	2.12	20.9	3.10
0.880	0.18	0.700	2.03	18.3	3.18
0.815	0.15	0.665	1.95	15.9	3.17
0.747	0.12	0.627	1.86	13.8	3.10
0.679	0.09	0.589	1.77	11.8	3.04
0.611	0.06	0.551	1.68	10.1	2.96
0.543	0.03	0.513	1.58	8.6	2.83
0.475	0	0.475	1.49	7.2	2.73

对自相似爆轰波而言, 有  $d(x/t) = du + dc$ , 或者  $d(x/t) = du(1 + dc/du)$ . 由于  $du = cd \ln \rho$ , 则  $d(x/t) = du(1 + d \ln c/d \ln \rho)$ , 或者

$$\frac{du}{d\eta} = \frac{D}{1 + d \ln c/d \ln \rho} = \frac{2D}{1 + k(1 + (\rho/k^2)dk/d\rho)} \quad (15.19)$$

上式右部最后的表达式是对公式  $k = c^2\rho/p$  取对数、然后对  $\ln \rho$  求导数而得到的。假如  $k = \text{常数}$ , 则由 (15.19) 式得出

$$\frac{du}{d\eta} = \frac{2D}{1 + k} = \text{常数} \quad (15.20)$$

与  $k = k(\rho_H) = \text{常数}$  比较, (15.19) 式得到的  $u = u(\eta)$  曲线更为倾斜 (参看图 15.3), 既相应于更负的导数  $dk/d\rho$ , 表明随着  $\rho$  值的减小、 $k$  值增大。

下面研究任意形式的等熵线方程下, 平面、柱面和球面爆轰波阵面后方爆炸产物状态参数的分布。一维爆轰波情况下, 波阵面后所有的参数只与坐标  $r$  和时间  $t$  有关。由于任意时刻爆轰波阵面上熵是常值, 波阵面后方产物气体开始等熵膨胀, 因此利用关系式  $c^2 = (dp/d\rho)_s$ , 可以把气体动力学方程组的头两式 (2.19) 简化为下列形式:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{c^2}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial r} &= 0 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{N\rho u}{r} &= 0 \end{aligned} \quad (15.21)$$

到目前为止, 我们的研究局限于炸药装药内部均匀介质中的爆轰传播过程, 无论方程组还是边界条件中的变量都未指定长度和时间的尺度。因此从自相似运动理



论可知, 随时间变化的未知解即密度、压力和其他变量的场能够保持与变量  $r$  和  $t$  无关, 而只取决于具有速度量纲的组合  $r/t$ .

引进变量变换  $\beta = r/t$ , 并利用基本关系式

$$\frac{\partial}{\partial r} = \frac{1}{t} \frac{d}{d\beta}, \quad \frac{\partial}{\partial t} = -\frac{r}{t^2} \frac{d}{d\beta} = -\frac{\beta}{t} \frac{d}{d\beta}$$

把方程组 (15.21) 简化为以全导数表示的两个微分方程组成的方程组:

$$\begin{aligned} \frac{du}{d\beta} &= -\frac{Nc^2u}{\beta(c^2 - (u - \beta)^2)} \\ \frac{d\rho}{d\beta} &= -\frac{\rho(u - \beta)}{c^2} \frac{du}{d\beta} \end{aligned} \quad (15.22)$$

声速的平方  $c^2$  是密度的函数, 借助于关系式  $c^2 = (\partial p / \partial \rho)_S$ , 可由爆轰产物的物态方程求出. 如前所述在平面波情况下 ( $N = 0$ ), 除了不符合真实爆轰情形的平凡解  $u = \text{常数}$ 、 $\rho = \text{常数}$  外, 从方程组 (15.22) 还可得到

$$c^2 - (u - \beta)^2 = 0 \quad (15.23)$$

利用 (15.23) 式, 把描述沿  $\beta$  轴方向传播的平面爆轰波的方程组 (15.22) 变为

$$c = \beta - u \quad (15.24)$$

$$\frac{d\rho}{du} = \frac{\rho}{c} = \rho(\beta - u) \quad (15.25)$$

变量  $\beta$  的范围从装药中心处的  $\beta = 0$ 、变化到爆轰波阵面处  $\beta = u_H + c_H = D$ . 考虑到对称性, 在装药中心处应满足下面条件:

$$u = 0 \quad (15.26)$$

当  $\beta = D$  时, 爆轰波阵面上满足下列条件 (参看 5.4 节):

$$\frac{\rho_H}{\rho_0} = \frac{k+1}{k}, \quad u_H = \frac{D}{k+1}, \quad c_H = \frac{kD}{k+1}, \quad p_H = \frac{\rho_0 D^2}{k+1}, \quad k = \frac{\rho}{p} \left( \frac{dp}{d\rho} \right)_S \quad (15.27)$$

关系式 (15.26) 和 (15.27) 就是积分微分方程组 (15.22) 的边界条件. 当  $k = \text{常数}$ , 即当爆轰产物等熵膨胀线的形式为

$$p = A\rho^k \quad (15.28)$$

对于平面爆轰波, 由方程组 (15.24) 和 (15.25) 不难得到解析解 (15.10) 式. 把下述表达式代替 (15.25) 式中的声速:

$$c = \sqrt{Ak\rho^{(k-1)/2}} \quad (15.29)$$