



北京高等教育精品教材

BEIJING GAODENG JIAOYU JINGPIN JIAOCAI

爆轰物理学

张宝平 张庆明 黄风雷 编著

兵器工业出版社

北京高等教育精品教材

爆 轰 物 理 学

张宝平 张庆明 黄风雷 编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

《爆轰物理学》是国防军工院校“爆炸理论及应用”、“爆炸技术”、“火工品与烟火技术”、“安全工程与技术”等本科专业的主干基础课程,也是“爆炸理论及应用”博士点研究生的必修课程,同时还可作为“弹药战斗部工程”、“爆破器材与技术”、“炸药合成与制造”等各军工专业以及工程爆破技术、石油化工、采矿与建井、水利、电力、交通等民用部门相近专业本科生、研究生和科技人员的参考书。

本书较为系统地介绍了爆炸的广义定义和基本特征、冲击波导论、爆轰波的经典理论、气体爆轰理论、凝聚炸药爆轰理论以及凝聚炸药的不定常爆轰等,同时还对爆炸的直接作用、爆轰驱动理论、爆炸在固体中形成冲击波的传播以及与炸药应用安全性相关的问题进行了较为全面的阐述和分析。

在编写中体现了如下特色:(1)鉴于本书是专业主干基础课课本,书中着眼于讲清楚四个基本(基本概念、基本理论、基本公式推导及分析计算以及基本实验研究方法);(2)本书反映了该领域在近20多年来的新进展,使有关爆轰的内容更加丰富多彩和深化;(3)本书共分9章,内容充实,不但理论内容更加深化,而且对于工程应用更具有实际参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

爆轰物理学 / 张宝平, 张庆明, 黄风雷编著. —北京:
兵器工业出版社, 2009. 5
ISBN 978-7-80248-385-9

I. 爆… II. ①张…②张…③黄… III. 爆震 - 物理学
IV. 0381

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 137462 号

出版发行:兵器工业出版社
发行电话:010-68962596,68962591
邮 编:100089
社 址:北京市海淀区车道沟10号
经 销:各地新华书店
印 刷:北京市登峰印刷厂
版 次:2009年5月第1版第1次印刷
印 数:1—1050

责任编辑:张小洁
封面设计:李 晖
责任校对:郭 芳
责任印制:赵春云
开 本:787×1092 1/16
印 张:30
字 数:745千字
定 价:45.00元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

编者的话

爆轰物理是爆炸力学的一个重要分支,也是一门具有广阔应用前景的新兴学科。它涉及爆轰的激发、稳定及不稳定爆轰波的传播、爆炸对介质及目标直接作用等问题的化学与物理内涵、相关的理论表述以及爆轰及其作用的实验诊断技术和方法。因此,这门学科的研究与发展不仅对于火工品及各种雷、弹等常规武器战斗部,而且对于高技术导弹武器战斗部乃至核武器用重要部件的设计与研制都具有重要实际意义。在国民经济建设领域,诸如各种工程爆破,爆炸探矿与开采,各种楼房、厂房、烟囱等建筑物的控制爆破拆除,金属的爆炸加工、爆炸成型、复合与焊接以及与煤气、粉尘、油气爆炸有可能发生的相关企业(如煤炭开采、石油、化工、棉纺、粮食加工等)的生产安全与防护等,本学科的有关理论和知识也具有重要的实用价值。

回顾 20 世纪 50 年代,新中国刚刚成立,国家百业待兴,而国际环境异常恶劣,国防建设强烈需要培养一批包括爆炸科学技术在内的人才。这一任务责无旁贷地落在了经过院系调整刚刚建立的我国第一批国防工业科技院校之一——北京理工大学(原北京工业学院)的肩上。当时刚从美国留学归国不久的丁懋教授担当重任、白手起家,在北京理工大学创建了我国第一个培养火工、烟火和爆炸装药科学技术人才的专业,他首先同陈福梅教授一起翻译出版了《火工品》一书(原作者苏联学者卡尔博夫),因陋就简地建立了相关实验室,并在国内几乎空白的情况下首先在北京理工大学开设了“爆炸作用原理”及“弹药装药技术”两门课程,他亲手编写了讲义,时讲时发。我记得大约是在 1957 年下半年的事,当时能见到的相关参考书多为原版,如 Cook M. A. 著的《The Science of High Explosives》,苏联科学院院士 Эельдович Я. Б 著的《Детонации (fundamentals of detonation)》以及 Taylor J. 编的《Detonation of Condensed Explosives》,而这些书当时正处于翻译出版过程中。1960 年下半年,为便于开展系统性教学,丁懋教授把当时学校开设的“炸药理论”和“爆炸作用原理”两课合并为授课时数多达 100 学时的大课——“爆炸物理”。丁懋教授亲自授课,直到“文革”前夕。本人有幸作为他的第一任爆炸物理课助教参与了整个教学过程。

值得提及的是,在那火红的大跃进年代,丁懋教授组织并领导了包括火工与烟火技术、反装甲弹药、水下武器与防护、海岸防登陆障碍物爆破武器技术以及工

程兵用雷弹等与爆炸科技相关的一系列研究工作,成果丰硕,受到中央军委与国防科工委的高度肯定。20世纪60年代前期,丁懋教授在北京理工大学领导组织了与国家142任务(1—国防科工委,2—核工业部,4—中国科学院)相关的科研工作,他在王淦昌、郭永怀院士及原核工业部刘杰部长等领导下为我国核武器的研制发展作出了重要贡献,并因此受邀出席1978年在人民大会堂召开的国家科学大会并受奖。

1969年珍宝岛事件发生,“深挖洞、广积粮、反侵略、保国家”是当时的主基调。打坦克、造武器,兵工厂、国防科研院所及高等学校都动员了起来。北京理工大学一方面积极投入各相关科研工作,一方面应急开办多种与爆炸科技及弹药装药生产与研发相关的培训班,随后高校实施招收工农兵学员,在这种形势下,多方呼唤编写一本有关爆炸科技与理论相关的教材。当时仍属“文革”时期,丁懋教授仍处在被“隔离审查”状态,我和我的同事们挑起了这副担子。1975年,战士出版社印刷厂铅印了我和我的同事合编的《爆炸物理基础》一书,印数2500册,业界反应热烈,纷纷来函求书,并引起国防工业出版社的关注,前来约稿。经过适当修改,由我和李景云先生为主编编写的《爆炸及其作用》一书(上、下册)于1979年由国防工业出版社正式出版(当时为避所谓名利思想之嫌,书署名为北京工业学院《爆炸及其作用》编写组)。应当说,这是由国家级出版社正式出版由国人编写的第一本爆炸科技及理论基础教学用书。由于定位为国防军工类相关专业本科生教材,同时兼顾国防科研院所、军工厂及解放军各兵种科技工程人员容易阅读,编写时着眼于“四个基本”,即讲明基本概念,阐明基本理论及其模型,演绎清楚基本理论公式的推导以及介绍清楚基本实验方法及其原理。同时在该书上册前面用一定篇幅介绍了有关热力学及气体动力学的基础知识。书最初印5000册,由于需求旺盛,包括民用化工、矿业、交通等行业的企业、高等学校及科研院所也不断来人来函索书,后又加印5000册。

改革开放以后中外学术交流不断扩大和深化,本学科相关的学术专著、科研报告,国际学术研讨会议录等相继进入国内,有的被翻译出版。20世纪90年代,《凝聚炸药起爆动力学》(章冠人等编著,1991)、《理论爆轰物理》(孙锦山、朱建士编著,1995)等一些较深层次的爆轰学著述相继出版,这给工作在爆轰学科教学第一线的我们以很大的激励。

20世纪后期,我国军工武器技术已由仿制转入自主研发的新时期,国民经济建设中涉及爆炸科技应用、生产安全与防护的领域日渐扩展,与燃烧、爆炸学科相关的本科生专业不断增多,大量非本学科专业毕业的学生转来攻读研究生学位等。上述一系列情况及广阔的社会需求都给予爆轰物理学科教材的革新、出版以强力推动。本书正是在这种情势下,以先前由国防工业出版社出版的《爆炸及其

作用》(上册)一书为基础,融汇了20多年来的学科进展,结合多年的教学实践体会进行改编的。与近年来出版的几本相关著述不同,本书明确定位为军工类相关专业本科生教学用书,在编写中贯串前述“四个基本”这条主线,遵循教学逻辑思维,概念讲清楚,新词有交代,以便于读者阅读自学。本书内容的侧重点是炸药的起爆、爆轰的传播及其对目标的直接作用。为便于开展教学和方便相关科技人员及非本学科专业学生转来攻读爆炸学科研究生学位的人员自学,在本书第2章较系统地介绍了波和冲击波的理论知识。

本书共由9章组成,其中用了5章的篇幅来讨论爆炸物的起爆与爆轰的传播等相关问题。这比《爆炸及其作用》一书的内容有了较大的扩展。其中第3章侧重阐述爆轰波的经典理论——爆轰波C—J理论及Z—N—D模型,并附带介绍了粘性爆轰及病态爆轰的概念;第4章主要讨论气体爆轰理论及多相(云雾)爆轰现象;第5章侧重讨论凝聚炸药爆轰波参数的理论确定及影响爆轰波稳定传播的因素并阐明其机理,此外,还介绍了控制波传播形状的方法和原理;而第6章则主要讨论不定常爆轰相关的问题,在该章介绍了散心爆轰和聚心爆轰的近似理论,扼要阐述了处理曲面爆轰波传播问题的爆轰冲击动力学(DSD)理论和方法,此外,用了较大的篇幅讨论了冲击转爆轰(SDT)及燃烧转爆轰(DDT)问题及相关的理论分析,并阐述了研究爆轰成长过程问题的拉氏试验分析方法;第7章专门讨论爆轰波后产物流动的规律及爆轰产物对物体的爆炸驱动,在这里被驱动物体是当作不变形刚体处理的;而第8章则侧重讨论爆炸对可压缩凝聚介质的直接作用,其中涉及爆轰波对固体的正入射和斜入射,冲击波及应力波的传播及其数值解法,此外,还介绍了固体中冲击波参数的测量方法及其应用;第9章则着重讨论炸药的感度与安定性问题,简要介绍了热爆炸理论及与冲击起爆紧密相关的热点学说,并阐述了各种感度的实验测试方法。

在本书编写中,除参阅一系列国外文献之外,曾尽力引用国内一部分科研成果,并参考引用了近年来国内出版的一些相关书籍中部分适于教学的内容。钱七虎院士及叶序双教授在本书第一次出版前曾审阅了本书内容并提出过许多宝贵意见。在近几年的教学实践中曾发现原书中存在的一些不当之处及一些印刷错误,在这次修订再版前做了调整和改正。在此,作者对两位教授和所有对本书编写给予过帮助的同志再次表示诚挚的感谢。

本书的第1,2,3,7,8章是由张宝平编写的,张庆明编写了第4,9章,黄风雷编写了第5章,并同张宝平合编了第6章。局限于作者学术与业务水平,书中难免会有错误与不妥之处,欢迎读者给予批评指正。

张宝平 2009.5.16

目 录

第1章 绪论:爆炸现象及其特征	(1)
1.1 爆炸及其广义定义	(1)
1.2 炸药爆炸的基本特征	(2)
1.3 炸药的类型及其化学变化的形式	(4)
1.4 爆炸科学发展简述	(6)
第2章 冲击波导论	(9)
2.1 气体的物理性质	(9)
2.2 气体的状态参数与状态方程	(11)
2.3 波与声波	(14)
2.3.1 波的概念	(14)
2.3.2 声波	(16)
2.3.3 压缩波和稀疏波	(17)
2.4 流体动力学方程组	(18)
2.4.1 考察流体运动的两种方法	(18)
2.4.2 积分形式的流体动力学方程组的建立	(20)
2.4.3 可压缩流体动力学微分方程组	(23)
2.4.4 中心对称与轴对称流动方程组	(25)
2.5 气体的平面一维流动	(28)
2.5.1 气体的平面一维等熵流动方程组	(28)
2.5.2 以 u, c 为求解参数的方程组	(30)
2.5.3 方程组的特征线及一般解	(32)
2.5.4 方程组的特殊解——简单波流动	(33)
2.5.5 稀疏波和中心稀疏波	(34)
2.5.6 压缩波流动	(38)
2.5.7 中心对称等熵流动的特征线解	(40)
2.6 平面正冲击波	(41)
2.6.1 平面正冲击波的基本关系式	(41)
2.6.2 多方气体中平面正冲击波	(44)
2.6.3 冲击波的冲击绝热线与弱波的等熵线	(48)
2.6.4 平面冲击波在刚壁面的正反射	(58)

2.6.5	弱冲击波的声学近似理论	(60)
2.7	斜冲击波及其反射	(64)
2.7.1	斜冲击波的形成	(64)
2.7.2	斜冲击波阵面前后参数间的关系	(67)
2.7.3	密接波与脱体波	(69)
2.7.4	冲击波的极曲线	(70)
2.7.5	斜冲击波从刚壁面的反射	(77)
第3章	爆轰波的经典理论	(80)
3.1	定常爆轰波的C—J理论	(81)
3.1.1	爆轰波的基本关系式	(81)
3.1.2	爆轰波稳定传播的条件	(83)
3.2	多方气体的爆轰波理论	(89)
3.3	活塞问题解的确定性	(93)
3.3.1	问题的提出	(93)
3.3.2	活塞问题解的确定性	(94)
3.4	爆轰波的Z—N—D模型及反应流的定常解	(96)
3.4.1	爆轰波的Z—N—D模型	(96)
3.4.2	爆轰波反应区流动的定常解	(97)
3.5	本征爆轰、病态爆轰及其他	(109)
3.5.1	病态爆轰	(110)
3.5.2	双反应道体系的病态爆轰	(111)
第4章	气体爆轰理论	(113)
4.1	气体爆轰现象	(113)
4.1.1	可燃性气体	(113)
4.1.2	可燃气体的燃烧与爆轰	(114)
4.2	爆炸浓度极限及其确定方法	(114)
4.2.1	爆炸浓度极限	(114)
4.2.2	爆炸浓度极限的计算	(116)
4.3	气体爆轰波C—J参数的计算理论	(119)
4.3.1	气体爆轰波C—J参数的计算式	(119)
4.3.2	气体爆轰产物组成及热力学参数的计算	(120)
4.3.3	气体爆轰波参数的近似计算	(124)
4.4	螺旋爆轰现象及胞格结构	(126)
4.5	影响气体爆轰传播的简单讨论	(127)
4.6	云雾爆轰现象及其一维理论	(129)
4.6.1	云雾爆轰现象及其实验观察	(129)
4.6.2	云雾爆轰机理的几种看法	(132)

4.6.3	云雾爆轰的一维理论	(132)
4.6.4	关于云雾爆轰现象及其理论的讨论	(137)
第5章	凝聚炸药爆轰理论	(140)
5.1	凝聚炸药爆速的实验测定	(140)
5.1.1	测时法	(141)
5.1.2	高速摄影法	(141)
5.2	凝聚炸药爆轰波结构及爆轰反应机理	(143)
5.2.1	凝聚炸药爆轰波结构	(144)
5.2.2	凝聚炸药爆轰反应机理	(147)
5.3	凝聚炸药爆轰参数的理论计算	(149)
5.3.1	爆轰方程组	(149)
5.3.2	凝聚炸药爆轰产物状态方程	(150)
5.3.3	采用 BKW 方程计算爆轰参数	(158)
5.4	凝聚炸药爆轰参数的近似计算	(160)
5.5	炸药爆炸性能的工程评估	(164)
5.5.1	爆速与爆压	(164)
5.5.2	爆热与爆容	(166)
5.5.3	爆温	(170)
5.5.4	炸药作功能力的经验计算	(172)
5.6	凝聚炸药爆轰传播过程的直径效应	(174)
5.6.1	炸药爆轰波传播时直径效应的实验结果	(175)
5.6.2	哈里顿原理与直径效应	(177)
5.6.3	考虑能量耗散的直径效应理论	(180)
5.7	影响凝聚炸药爆轰传播的因素	(185)
5.7.1	炸药性质对爆速的影响	(185)
5.7.2	装药密度对爆速的影响	(185)
5.7.3	颗粒尺寸和装药外壳对爆速的影响	(186)
5.7.4	附加物对爆速的影响	(187)
5.7.5	轴向沟槽对爆速的影响	(187)
5.7.6	炸药的低速爆轰	(187)
5.8	爆轰波的形状及其控制	(189)
5.8.1	爆轰波的自然波形	(189)
5.8.2	爆轰波形的控制	(191)
第6章	凝聚炸药的不定常爆轰	(197)
6.1	不定常爆轰波传播的实验观察	(197)
6.2	不定常爆轰波的定性分析	(200)
6.3	散心爆轰波的传播	(204)

6.3.1	散心爆轰波的定性分析	(204)
6.3.2	散心爆轰波传播的自模拟解和近似解	(209)
6.4	聚心爆轰波的近似解	(218)
6.5	曲面爆轰波的非定常传播及爆轰冲击动力学方法	(223)
6.5.1	曲面爆轰波的非定常传播	(224)
6.5.2	爆轰冲击动力学理论与方法概述	(228)
6.6	凝聚炸药的冲击起爆	(233)
6.6.1	均质炸药的冲击起爆	(233)
6.6.2	非均质炸药的冲击起爆	(238)
6.7	炸药冲击起爆的数值模拟计算	(249)
6.7.1	基本方程	(249)
6.7.2	反应速率方程及其实验确定	(253)
6.8	炸药由燃烧向爆轰的转化及其数值模拟	(257)
6.8.1	炸药燃烧过程的特点	(257)
6.8.2	凝聚炸药燃烧反应的两种机理	(259)
6.8.3	燃烧转化为爆轰的机理和条件	(261)
6.8.4	燃烧转化为爆轰的数值模拟	(262)
6.9	爆轰成长过程的拉氏实验分析方法	(265)
6.9.1	Fowles 拉氏分析理论的基本框架	(266)
6.9.2	拉氏分析方法的改进——路径线法	(268)
6.9.3	材料本构方程及受冲击炸药反应速率方程的获得	(270)
第7章	爆轰产物的流动及其推进作用	(272)
7.1	爆轰产物的一维飞散运动	(272)
7.1.1	爆轰波阵面后产物的一维流动	(273)
7.1.2	有限长度药柱爆轰产物的一维流动	(275)
7.1.3	引爆面在装药中间时爆轰产物的一维流动	(278)
7.2	爆轰产物对刚壁面的作用冲量	(282)
7.2.1	爆轰波对迎面刚性壁面的作用冲量	(282)
7.2.2	刚壁管侧壁上所受到的作用冲量	(293)
7.2.3	无壳装药爆炸对迎面刚壁的作用	(297)
7.2.4	接触爆炸时端部冲量的实验测定	(299)
7.3	爆炸对物体的驱动加速理论	(300)
7.3.1	爆炸对物体的一维抛射($\kappa=3$ 时的情况)	(300)
7.3.2	爆炸对圆柱壳体的驱动加速	(312)
7.3.3	炸弹破片初速的工程估算法——哥尼公式	(325)
7.4	炸药炮理论	(329)

第8章 爆炸对可压缩凝聚介质的直接作用..... (338)

8.1	$p-u$ 平面上的瑞利线和冲击波极曲线	(338)
8.2	垂直入射时爆炸冲击波的初始参数	(345)
8.3	爆轰波在可压缩固体壁面上的斜反射	(354)
8.3.1	爆轰波在可压缩壁面上的正规斜反射	(355)
8.3.2	爆轰波在可压缩壁面上的非正规斜反射——马赫反射	(360)
8.3.3	爆轰产物在分界面处的普朗佗—迈盖尔膨胀	(364)
8.3.4	计算结果及其讨论分析	(368)
8.4	爆轰波正入射时固体界面的运动规律及作用冲量	(372)
8.4.1	分界面运动规律及爆炸比冲量的近似解	(372)
8.4.2	数值计算解	(377)
8.5	固体应力波概述	(381)
8.5.1	应力波	(381)
8.5.2	弹性应力波	(382)
8.5.3	塑性应力波	(384)
8.6	固体的高压状态方程及其确定方法	(387)
8.6.1	格留乃逊状态方程	(389)
8.6.2	格留乃逊状态方程的实验确定	(395)
8.6.3	从实测的雨果尼奥曲线确定固体的等熵线	(399)
8.6.4	雨果尼奥温度和熵的计算	(401)
8.6.5	穆尔纳汉状态方程的实验标定	(402)
8.7	固体冲击波参数的实验测量及其应用	(404)
8.7.1	固体物质冲击压缩性的实验测量	(405)
8.7.2	借助于冲击波测量研究物质的冲击相变现象	(416)
8.8	爆轰波 C—J 压力的实验测定	(420)
8.8.1	测 C—J 压力的自由表面速度方法	(420)
8.8.2	测 C—J 压力的水箱法	(424)
8.8.3	测 C—J 压力的电磁法	(426)
8.8.4	爆轰波反应区宽度 x_0 的实验测定	(428)

第9章 炸药的感度与安定性..... (430)

9.1	炸药的感度概述	(430)
9.2	炸药的热感度	(430)
9.2.1	热作用下炸药爆炸机理——热爆炸理论	(431)
9.2.2	热感度的表示方法与实验测定	(436)
9.3	炸药对机械冲击作用的感度	(438)
9.3.1	炸药在机械作用下的起爆机理	(438)
9.3.2	炸药的撞击感度	(443)

第 1 章 绪论:爆炸现象及其特征

1.1 爆炸及其广义定义

爆炸是自然界中时常发生和人类生存活动中时常见到的一种现象。一些宇宙学家认为,当今宇宙是在一次大爆炸中开始形成和发展的,而且至今这一过程尚未结束。太阳黑子的剧烈活动,各星球上发生的突发性变动,近期发生的彗星对木星的撞击以及地球上发生的地震、火山爆发、雷电等都是自然界中出现的爆炸现象。节日时燃放烟火的爆炸,高压蒸汽锅炉的爆炸,矿坑内的瓦斯爆炸,面粉厂以及纺织厂的粉尘爆炸,乃至军工火炸药厂及弹药厂内发生的爆炸事故以及战争中的弹药爆炸更是人们常见的爆炸现象。显然,认识爆炸现象的本质,研究和掌握爆炸发生、扩展及其对周围介质(目标)作用的规律,对于发展国防科技,利用爆炸现象造福于人类具有重大的实际意义。

爆炸可以由各种不同的物理的或化学的过程引起。就引起爆炸过程的性质来看,爆炸现象大致可以分为如下几类:

1. 物理爆炸现象

蒸汽锅炉、高压气瓶及车辆轮胎的爆炸是常见的物理爆炸现象。这是由于过热水迅速转变为过热蒸汽造成高压冲破容器阻力引起的,或是由于充气压力过高,超过气瓶或轮胎的强度发生爆裂,使内部积存的能量迅速释放造成的。由地壳弹性压缩能释放引起的地壳的突然变动(地震)是一种强烈的物理爆炸现象。最大的地震能量比百万吨梯恩梯(TNT)炸药的爆炸还要厉害,它可引起地壳的突然破断、山体崩塌,强烈地震波的传播,并在地震中心附近引起大气的电离发光。带电云层间放电造成的雷电现象,高压电流通过细金属丝(网)所引起的电爆炸也是一种物理爆炸现象。强放电时,积存的电能可在 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ s 内释放出来,造成放电区内很高的能量密度和数万度的高温,引起放电区内空气压力急剧升高,并在周围形成很强的冲击波的传播。高功率强激光束打在金属板面上可形成数十万度乃至更高的局部高温,使受击点附近金属骤然气化造成爆炸,并可穿透金属板,同时在板内形成热冲击波的传播。其他如高速陨石冲击地壳、穿甲弹碰击和侵彻装甲板等引起的剧烈突变现象也都属于物理爆炸现象的范畴。

2. 化学爆炸现象

细煤粉、粮食粉尘以及纺织物粉尘悬浮于空气中遇明火引起的粉尘爆燃,氢气、甲烷、乙炔等以一定的比例与空气混合后的混合物的爆炸以及炸药的爆炸都属于化学爆炸现象。它们是由于急剧而快速的化学反应导致大量化学能的突然释放引起的。

炸药爆炸过程扩展的速度高达每秒数千米到万米之间,所形成的温度为 $3000 \sim 5000^\circ\text{C}$, 压力高达 $10^2 \sim 10^4$ MPa, 因而能引起爆炸气体产物的剧烈膨胀,并对周围介质做功。

3. 核子爆炸

核爆炸的能源是核裂变(如 U^{235} 的裂变)或核聚变(如氘、氚、锂核的聚变)反应所释放出

的核能。

核爆炸反应所释放出的能量要比炸药爆炸放出的化学能大得多。核爆炸时可形成数百万到数千万度的高温,在爆心区形成数百亿大气压的高压,同时还有很强的光、热的辐射以及各种高能粒子的贯穿辐射。因此,比炸药爆炸具有大得多的破坏力。核爆炸的能量约相当于数万吨到数千万吨 TNT 炸药爆炸的能量。

综上所述,我们可以看到,爆炸现象不论任何能源引起,都具有极大的能量释放速度、形成极高的能量密度,并迅速转化为对外界介质做机械功或形成能的辐射和压力突跃——冲击波的传播等特点。因此,我们可以说,爆炸乃是一种极为迅速的物理或化学的能量释放过程,在此过程中系统内部原有的势能、动能或瞬间所形成的能量转变为机械功、光和热的辐射乃至高能粒子的辐射。爆炸的一个最重要的特征是在周围介质中发生急剧的压力突跃的传播。而这种压力突跃正是爆炸破坏作用的直接原因。

当前各种爆炸现象已成为爆炸学领域各专题的研究对象,并已有专门的论著出版。本书只研讨炸药的爆炸现象及其规律性。

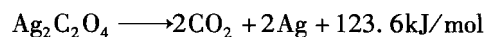
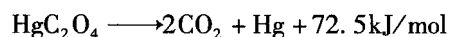
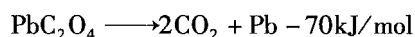
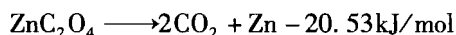
1.2 炸药爆炸的基本特征

从热力学意义上说,炸药系一种相对不稳定的体系,它在外界作用下能够发生快速的放热化学反应,同时形成强烈压缩状态的高压气体。例如一个炸药包在用雷管引爆瞬间,人们看到,炸药包瞬息化为一团火光,形成气体烟云并产生轰隆巨响,爆炸点附近形成强烈的爆炸风,建筑物或被破坏,或受到强烈冲击和震动。

分析上述炸药爆炸现象可以看出:①炸药爆炸过程是放热的,因为形成温度很高的火光。②爆炸在瞬间完成说明爆炸过程的速度极高;仅用一个小雷管即可将大包炸药引爆,说明雷管在炸药中所引起的爆炸反应过程是能够自动传播的。③一团气体烟云表明炸药爆炸过程中有大量气体产物形成,而这些气体产物的快速膨胀则是周围建筑物发生破坏或强烈震动的原因。

由上所述,炸药爆炸过程的基本特征可归纳为:过程的放热性;过程的高速度并能自动传播;过程中生成大量气体产物。上述三个条件是哪任何化学反应能成为爆炸性反应的基本条件,三者相互关联,缺一不可。

(1)过程的放热性:这是爆炸性化学反应所必须具备的第一个条件。例如,草酸盐的分解反应



其中前两种反应为吸热反应,不具有爆炸性,而后两个反应由于是放热反应,都具有爆炸性。这就表明,只有放热化学反应才可以造成爆炸现象。大量实验事实告诉人们,靠外界供给能量来维持其分解的物质是不能成为炸药的。

炸药爆炸反应所放出的热量称为爆热。它是爆炸对外界做功和引起目标破坏的根源,是

炸药爆炸做功能力的标志。因此,它是炸药爆炸性能的重要示性数。一般炸药的爆热在 3700 ~ 7000kJ/kg。

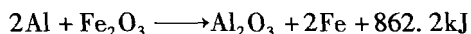
(2) 过程的高速度:爆炸反应过程与通常的化学反应过程的一个突出的不同点是它的高速度。许多普通放热反应放出的热量往往要比炸药爆炸时放出的热量大得多,但它们并未能形成爆炸现象,其根本原因在于它们的反应过程进行得很慢。例如,煤炭燃烧的放热量为 8924.7kJ/kg,苯燃烧的放热量为 9762.7kJ/kg,而 TNT 炸药的爆炸热效应约为 4190kJ/kg。但前两者反应完成所需的时间为数分钟乃至数十分钟,而后者却仅仅需要十几到几十个微秒,时间相差数千万倍。

由于炸药爆炸过程速度极高,所经历的时间极短,因此实际上可近似地认为,爆炸反应所放出的能量几乎全部聚集在炸药爆炸前所占据的体积内,从而造成了一般化学反应所无法达到的能量密度。一般来说,炸药爆炸所造成的能量密度要比普通燃料燃烧所达到的能量密度高数百倍乃至数千倍。例如硝化甘油炸药爆炸形成的能量密度高达 $9.972\text{kJ}/\text{cm}^3$,而煤炭燃烧达到的能量密度为 $0.01718\text{kJ}/\text{cm}^3$,前者比后者要高约 600 倍。正是由于这个原因,炸药爆炸产物中可形成 $10^3 \sim 10^4\text{MPa}$ (数十万个标准大气压) 的高压,从而使其具有巨大的做功功率和对目标的强烈破坏效应。

炸药爆炸过程进行的速度,系指爆轰波在炸药中传播的直线速度,这个速度称为炸药的爆速。炸药的爆速通常在每秒数千米至一万千米之间。

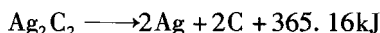
附带尚需指出,除了过程的高速度之外,爆炸过程的自动传播也具有很重要的实际意义。例如,某一物质在雷管引爆下,在与雷管相接触的很小的局部激起了爆炸反应,但是反应放出的能量不足以补偿损失掉的能量,从而可能导致反应的衰减,直至最后熄灭,这种物质就很难在实际上获得应用。

(3) 过程必须形成气体产物:炸药爆炸所放出的热能必须借助于气体介质的膨胀才能转化为机械功。因此,形成气体产物是炸药爆炸做功必不可少的条件。我们知道,气体与凝聚介质相比具有大得多的体积膨胀系数,它是爆炸做功的优质功质。炸药爆炸就是利用气体的高压缩性能,首先把瞬间放出的热量转变为气体的压缩能,而后借助于它的膨胀把爆炸所形成的巨大势能转化为机械功的。显然,如果一高速放热反应不能伴随着大量气体产物的生成,就不可能形成高的能量密度和高压状态,因此也就不能产生由高压到低压的膨胀过程及爆炸性破坏效应。例如,大家熟知的铝热剂反应



其热效应很大,可以使产物加热到 3000°C 的高温,并且反应进行得也相当快速,但终究由于没有形成气态产物而不具有爆炸性。

需要指出的是,有些物质虽然在分解时生成了正常条件下处于固态的产物,但也造成了爆炸现象。例如乙炔银的分解反应



这是由于在反应形成的高温下,银发生气化并同时使周围空气灼热而导致膨胀所致。

综合上面的讨论,我们可以得出结论:只有具有上述三个特征的反应过程才具有爆炸性。因此,可以说,炸药爆炸现象乃是一种以高速进行的能自行传播的化学变化过程,在此过程中放出大量的热,生成大量的气体产物,并对周围介质做功或形成压力突跃的传播。

1.3 炸药的类型及其化学变化的形式

通常说,能够进行爆炸及爆轰的物质称为炸药,这并不是很严格的。有一些物质在一般情况下不能爆轰,但在特定条件下却是能够爆轰的。例如发射药及火箭推进剂在通常情况下主要的化学变化形式是速燃,但是在密闭容器内或用大威力传爆药柱起爆时,往往是可以发生爆轰的。苦味酸和梯恩梯在发明雷管之前一直不被视为炸药,工业上用它们做黄色染料,但在诺贝尔发明雷管之后却成了很重要的烈性炸药。硝酸铵一直被看做是很好的化学肥料,但现在被广泛地用作为工程爆破炸药。因此,炸药与非爆炸物之间并没有十分明确的界限。

原则上说,一切能够发生放热反应的物质都可能在合适的条件下发生爆炸甚至爆轰。所以在某种意义上来说,把某些物质称为炸药,而把另一些物质称为火药或烟火剂等,只是一种习惯上、有条件的划分。

按照炸药在应用上的特点,通常将其划分为起爆药、猛炸药、发射药或火药以及烟火剂四种类型。

(1)起爆药:主要用作为激发猛炸药爆轰的引爆剂,所以国外又称其为初级炸药(Primary Explosives)。它们具有敏感度高(很弱的外界作用,如加热、针刺、摩擦、撞击等作用下很容易引发爆炸)、爆炸成长到最大爆速所需的时间短等特点。因此,可用来制造各种起爆器材,如雷管、火帽、点火装置等。

常用的起爆药有雷汞 $[\text{Hg}(\text{OCN})_2]$ 、叠氮化铅 $[\text{Pb}(\text{N}_3)_2]$ 、斯蒂芬酸铅 $[\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2\text{Pb} \cdot \text{H}_2\text{O}]$ 、二硝基重氮酚 $[\text{C}_3\text{H}_2\text{N}_2\text{O}(\text{NO}_2)_2]$,代号为DDNP以及特屈拉辛 $[\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_{10}\text{O}]$ 等。

(2)猛炸药:又称次发炸药(Secondary Explosives),与起爆药相比它们要稳定得多,只有在相当强的外界作用下才能发生爆炸(通常要用起爆药的爆炸作用来激发其爆轰)。然而,一旦起爆后,它们就具有更高的爆轰速度和更强的破坏威力。因此,军事上常用这类炸药装填炮弹和军工爆破器材等。

常用的单质炸药有梯恩梯(TNT)、黑索今(RDX)、特屈儿(Tetryl)、奥克托今(HMX)、苦味酸(PA)、硝基甲烷(NM)等。近30多年来,鉴于军事安全技术的需要,人们发展了诸如DATB、TATB、硝基胍之类的低易损性高猛炸药。常用的高猛混合炸药有熔铸混合炸药(如B炸药(64RDX/36TNT)、奥克托儿(TNT/HMX 40/60, 30/70, 20/80)),梯—黑—铝高爆热炸药(如Torpex:41RDX/41TNT/18Al,黑萨尔 Hexelpw30,以及THLD-5等)以及以黑索今或奥克托今为主体的塑料粘结混合炸药(如PBX9404, 8701, 7066)等。此外,近30多年来,还研制发展了具有特殊性能的混合炸药,如塑性炸药、弹性炸药、橡胶炸药、耐热炸药等。

(3)发射药或火药:主要指用来发射枪弹或炮弹,用来发射火箭的推进剂以及用来作点火药和延期药的黑火药等。常用的火药,除了黑火药之外,用得最多的乃是以硝化棉、硝化甘油为主要成分,外加部分添加剂胶化成的无烟火药。例如98%硝化棉以及少部分醚溶剂、二苯胺等胶化成的单基无烟火药;由45%硝化棉溶于40%硝化甘油及15%的其他成分胶化成的巴里斯泰型发射药;60%硝化甘油和1.5%的其他成分用硝化棉胶化成的柯达型发射药等。

(4)烟火剂:通常是由氧化剂、有机可燃物或金属粉及少量粘合剂混合而成。军事上主要利用其速燃效应,如照明弹中的照明剂,烟幕弹中的烟幕剂,燃烧弹中的燃烧剂以及曳光剂、信号剂等。

我们知道炸药在热力学上是一种相对的不稳定体系。在通常温度条件下炸药内部总是存在着缓慢的化学分解反应。但是在不同的环境条件下炸药能够以不同的形式进行化学反应，而且其性质与形式都可能具有重大差别。按照反应的速度及传播的性质，炸药的化学变化过程具有如下三种形式：即缓慢的化学变化、燃烧和爆轰。

炸药在常温常压下，在不受其他任何外界的作用时，常常以缓慢速度进行分解反应。这种分解反应是在整个物质内展开的。同时反应的速度主要取决于当时环境的温度。温度升高，反应速度加快，服从于阿伦尼乌斯定律。例如，TNT 炸药在常温下的分解速度极小，很不容易觉察，然而当环境温度增高到数百度时，它甚至可以立即发生爆炸。

燃烧和爆轰与一般的缓慢化学变化的主要区别就在于燃烧和爆轰不是在全体物质内发生的，而是在物质的某一局部，而且两者都是以化学反应波的形式在炸药中按一定的速度一层一层地自动进行传播的。化学反应波的波阵面（如图 1-3-1 所示）比较窄，化学反应正是在此很窄的波阵面内进行并完成的。

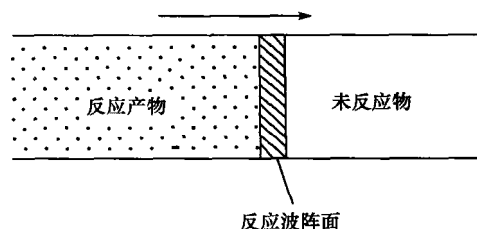


图 1-3-1 反应波阵面的传播

燃烧和爆轰是性质不同的变化过程。实验与理论研究表明，它们在基本特性上有如下的区别：

第一，从传播过程的机理上看，燃烧时反应区的能量是通过热传导、热辐射及燃烧气体产物的扩散作用传入未反应的原始炸药的。而爆轰的传播则是借助于冲击波对炸药的强烈冲击压缩作用进行的。

第二，从波的传播速度上看，燃烧传播速度通常约为每秒数毫米到每秒数米，最大的也只有每秒数百米（如黑火药的最大燃烧传播速度约为 400m/s ），即比原始炸药内的声速要低得多。相反，爆轰过程的传播速度总是大于原始炸药的声速，速度一般高达每秒数千米，如注装 TNT 爆轰速度约为 6900m/s ($\rho_0 = 1.60\text{g/cm}^3$)，在结晶密度下黑索今的爆轰速度达 8800m/s 左右。

第三，燃烧过程的传播容易受外界条件的影响，特别是受环境压力条件的影响。如在大气中燃烧进行得很慢，但若将炸药放在密闭或半密闭容器中，燃烧过程的速度急剧加快，压力升高至数个乃至数十个兆帕。此时燃烧所形成的气体产物能够做抛射功，火炮发射弹丸正是对炸药燃烧的这一特性的利用。而爆轰过程的传播速度极快，几乎不受外界条件的影响，对于一定的炸药来说，爆轰速度在一定条件下是一个固定的常数。

第四，燃烧过程中燃烧反应区内产物质点运动方向与燃烧波面传播方向相反。因此燃烧波面内的压力较低。而爆轰时，爆轰反应区内产物质点运动方向与爆轰波传播方向相同，爆轰波区的压力高达数十个吉帕。

有人将爆炸过程分为燃烧、爆炸和爆轰三类，这未必恰当。因为所谓的“爆炸”和爆轰在基本特性上并没有本质差别，只不过传播速度一个是可变的（称为“爆炸”），一个是恒定的（称为“爆轰”）。我们认为“爆炸”也是爆轰的一种现象，称为不稳定爆轰，而恒速爆轰称为稳定爆轰。需要强调指出，炸药化学变化过程的三种形式（缓慢化学反应、燃烧和爆轰）在性质上虽各不相同，但它们之间却有着紧密的内在联系。炸药的缓慢分解在一定的条件下可以转变为炸药的燃烧，而炸药的燃烧在一定的条件下又能转变为炸药的爆轰。

1.4 爆炸科学发展简述

爆炸是宇宙中及我们星球的自然界中早已存在的现象。关于宇宙形成问题的一个学派认为宇宙空间是大爆炸的产物,并且宇宙目前仍处于爆炸的扩张过程之中。太阳里的黑子活动,流星对地面的撞击,火山爆发,地震以及雷电都属于爆炸现象。

然而人类在认识爆炸现象,发明爆炸物,制造爆炸现象并利用它们却是最近一两千年的事。我们的祖先对爆炸科学的发展有着不可磨灭的伟大贡献。我国是黑火药的祖国,它的发明与古中医学的炼丹术有着紧密的关系。有的资料说,黑火药出现于周朝,而一硝二黄三木炭的黑火药配方则可能要晚一些。唐朝末期已被用于火攻作战,到了11世纪中期宋朝曾公亮所撰《武经总要》一书中关于黑火药在军事上应用已有生动的记载。13世纪后期,南宋对元兵作战已用了“大火炮”武器,破坏威力已相当可观。

中国的黑火药这一伟大发明,与罗盘、造纸及印刷术,并称为中国对世界文明发展具有重大影响的四大发明。主要是由于封建主义统治的桎梏,重诗文轻科学技术的儒家思想的束缚,在近几百年来我国的科学技术日益落后,以致在工业革命后强盛起来的欧洲人面前处于被动挨打的软弱地位。直到1949年中华人民共和国成立之后,经过10多年的奋斗,这种状况才开始改观,但仍不容太乐观,因为我们在许多领域与世界先进国家的科技水平的差距似仍在扩大,至少尚未明显地缩小。

欧洲人是通过丝绸之路向中国学到了东方文明,包括黑火药。工业革命后的欧洲,朝气蓬勃,科学技术迅猛发展,1799年发现了雷汞。1815年发明了用起爆药制造的火帽(一种点火具)。1846年发明了硝化甘油与硝化棉火药。1865年著名的瑞典科学家诺贝尔发明了雷管,用它可以引发高速爆轰现象,并使得原先不被认为是炸药的物质(如黄色染料——苦味酸等)变成了炸药,促进了弹药的改进和威力的大幅度提高。1881年首次观察到气体中爆轰波传播现象,1888年发现了空心聚能装药效应。

1899年柴普曼(Chapman)独立地创立了爆轰波的流体力学理论,1905年和1917年柔格(Jouguet)也独立地完成了相类似的理论工作。自此,以他们二人命名的C—J爆轰理论建立了起来,并沿用至今。

1900年TNT炸药被用于装填炮弹,使弹药威力大幅度提高。1906年道特里什创立了测量爆轰波传播速度的实验方法。1936~1939年的西班牙战争中出现了反装甲车辆的聚能装药破甲弹。

第二次世界大战中爆炸科学与武器弹药技术交互作用中获得迅猛发展。聚能装药理论与技术发展推动着反坦克破甲弹威力的提高;爆轰波Z—N—D模型的提出,是爆轰理论的重大发展;凝聚装药爆轰产物状态方程及爆轰参数计算,爆炸驱动加速等方面的进展,促进了原子武器的研制;其他在水下爆炸、空气中爆炸及土中爆炸领域的研究也取得了很大进展。

1945年第一次核裂变原子炸弹投入使用。1952年第一个热核武器炸弹爆炸。

战后60多年来,像其他科学一样爆炸科学与技术无论在爆炸实验科学、爆炸理论与数值计算分析,还是应用技术方面都有了长足的进展。它们主要表现在:

1. 爆炸现象观察技术与爆炸动力学参数检测技术

炸药爆速的电测技术的发展可使爆速测量精确到爆速值的0.5%。当前的测试仪器(包