



普通高等教育“九五”国家级重点教材

# 爆轰物理学

张宝钲 张庆明 黄风雷 编著

兵器工业出版社

222  
52  
2

普通高等教育“九五”国家级重点教材

# 爆 轰 物 理 学

张宝钐 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当中“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”等本科专业的主干专业基础课程,也是原“爆炸理论及应用”博士点研究生的必修课程。本书还可作为“弹药战斗部工程”、“爆破器材与技术”、“炸药合成与制造”等各国防专业,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、爆轰学的经典理论、气相及多相爆轰,凝聚相爆轰理论,以及不稳定爆轰理论等,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。

在编写中体现如下特色:(1)鉴于本书是专业主干基础课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)鉴于本书书名中以“爆轰学”打头,与原来笔者编写的“爆炸及其作用”一书相比,爆轰理论的内容由一章改为四章,反映了该领域在近二十年来的新进展,使有关爆轰的内容更加丰富多彩和深化;(3)本书共分九章,内容更加充实,使之不但在理论内容上更加深化,并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/张宝铎等编著. —北京:兵器工业出版社,2001.8  
ISBN 7-80132-986-4

I. 爆… II. 张… III. 爆炸-物理学 IV. O38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 032092 号

出版发行:兵器工业出版社  
责任编辑:刘莹 李翠兰  
责任技编:魏丽华  
社 址:100089 北京市海淀区车道沟10号  
经 销:各地新华书店  
印 刷:天津新华印刷二厂  
版 次:2001年8月第1版第1次印刷  
印 数:1—1000

封面设计:底晓娟  
责任校对:王 锋 全 静  
责任印制:E京华  
开 本:787×1092 1/16  
印 张:29  
字 数:709.80千字  
定 价:40.00元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

## 出版说明

在 21 世纪即将来临之际,根据兵器工业科技与经济发展对于人才素质和质的要求,兵器工业总公司教育局组织兵工专业教学指导委员会制定了《兵器工业总公司“九五”教材编写与出版规划》。在制定规划的过程中,我们力求贯彻国家教委关于“抓重点,出精品”的教材建设方针,根据面向 21 世纪军工专业课程体系和教学内容改革的总体思路,本着“提高质量,保证重点”的原则,精心遴选了在学校使用两遍以上,教学效果良好的部分讲义列入教材规划,兵工专业教学指导委员会的有关专家对于这些规划教材的编写大纲都进行了严格的审定。可以预计,这批“九五”规划教材的出版将促进兵工类专业教育质量的提高、教学改革的深化和兵器科学与技术的发展。

本教材由中国工程院钱七虎院士和叶序双教授主审。

殷切地希望广大读者和有关单位对本教材编审和出版中的缺点与不足给予批评指正。

1997 年 8 月 17 日

# 前 言

爆炸是自然界中经常发生的一种物理的或化学物理的过程。在爆炸过程中,以极高的速度释放出大量的能量,借助于爆炸瞬间所产生的高压气体产物或被瞬态加热汽化的物质对周围介质做功,以及发出各种能量辐射等对目标产生破坏作用。如破坏弹体并形成破片、爆破矿山抛掷上石、在周围介质(空气、水、固体材料等)当中形成冲击波或应力波,以及高能粒子辐射引起的一系列物理、力学及化学的效应等等。爆炸最主要的特征是在周围介质中瞬间产生压力突跃,这是造成破坏效应最重要的原因之一。

爆轰物理学是一门具有广阔应用背景的新兴学科,它涉及爆轰的激发、稳定与不稳定爆轰波的传播,以及爆炸对介质和目标的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炸过程的实验研究技术和方法。因此,这门学科不但对于火工品及各种雷、弹等常规武器战斗部、而且对各种导弹和反导弹战斗部乃至核武器重要部件的设计研制具有重要的实际意义。在国民经济建设领域,诸如各种工程爆破、爆炸探矿与开采、楼房的控制爆破拆除、金属的爆炸加工、爆炸成形、复合与焊接,以及与煤气、粉尘、油气爆炸有可能发生相关的煤炭、石油、化工、棉纺、粮食加工等各类企业生产安全与防护等等,本学科的有关理论和知识也具有重要的实用价值。

本书是在国防工业出版社出版并由张宝钲教授主编的《爆炸及其作用》(上册)一书基础上,融汇了近20年来的学科进展,结合教学实践需求进行改编的。内容的侧重点是炸药的起爆、爆轰及其对目标的直接作用。为有利于开展教学和方便有关技术人员自学,在本书的第二章较系统地介绍了波和冲击波的理论知识。因此,本书可作为爆炸理论与技术、弹药与战斗部工程、火工品与烟火技术、以及安全工程与技术等专业的教学用书,也可作为与爆炸学科应用技术相关的其它工矿、煤炭、石油、化工类专业研究生与科技人员的参考书。

本书内容共由九章组成,其中用了五章的篇幅来讨论爆炸物起爆与爆轰的相关问题。这比《爆炸及其作用》一书的内容有了较大的扩展。在本书的第三章侧重阐述爆轰波的经典理论——爆轰的C-J理论及Z-N-D模型;第四章主要讨论均匀气相爆轰及多相(云雾或粉尘)爆轰现象;第五章侧重讨论凝聚相稳定爆轰波参数的理论确定及影响爆轰波稳定传播的因章;而第六章则主要讨论不稳定爆轰相关的问题,在该章除了介绍散心爆轰和聚心爆轰近似理论之外,用了较大的篇幅讨论了冲击转爆轰(SDT)及燃烧转爆轰(DDT)问题及其相关的理论分析。在第九章中着重讨论炸药的起爆和感度问题,介绍了相关的理论和实验测试方法。

第七章专门用来阐述爆轰波传过后或炸药柱爆轰完了时爆轰产物的流动规律及其对物体的爆炸驱动,在这里被驱动物体是作为不变形刚体处理的。然而在第八章则讨论了爆炸对可压缩介质的直接作用,包括爆炸在凝聚介质中形成的冲击波和应力波的传播问题。

在本书缩写中,除参阅了一系列国外文献之外,曾尽力引用国内一部分科研成果,并参考了近几年国内出版的一些相关书籍的内容。中国工程院钱七虎院士和叶序双教授在百忙中审阅了本书内容并提出了许多修改意见。在此,我们向两位教授及在本书编写过程中曾给予帮助

的其他同志表示诚挚感谢。

本书的第一、二、三、六、七、八章由张宝钰教授编写的,第四、九章由张庆明教授编写,黄风雷教授编写了第五章。由于思想和业务水平所限,书中一定会有错误和不妥之处,欢迎批评指正。

作者

2000年8月

# 目 录

## 第一章 绪论:爆炸现象及其特征

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)

## 第二章 冲击波导论

2.1 气体的物理性质 .....	(10)
2.2 气体的状态参量与状态方程 .....	(11)
2.3 热力学基础 .....	(14)
2.3.1 热力学第一定律 .....	(14)
2.3.2 热力学第二定律 .....	(17)
2.3.3 自由能 $F$ 和自由焓 $G$ .....	(19)
2.3.4 热力学状态函数之间的关系 .....	(21)
2.3.5 化学位 .....	(22)
2.3.6 热力学第零定律及第三定律 .....	(23)
2.4 波与声波 .....	(25)
2.4.1 波的概念 .....	(25)
2.4.2 声波 .....	(26)
2.4.3 压缩波和稀疏波 .....	(28)
2.5 流体动力学方程组 .....	(29)
2.5.1 考察流体运动的两种方法 .....	(29)
2.5.2 积分形式的流体动力学方程组的建立 .....	(31)
2.5.3 可压缩流体动力学微分方程组 .....	(34)
2.5.4 中心对称与轴对称流动方程组 .....	(36)
2.6 气体的平面一维流动 .....	(39)
2.6.1 气体的平面一维等熵流动方程组 .....	(39)
2.6.2 以 $u, c$ 为求解参量的方程组 .....	(40)
2.6.3 方程组的特征线及一般解 .....	(42)
2.6.4 方程组的特殊解—简单波流动 .....	(44)
2.6.5 稀疏波和中心稀疏波 .....	(45)

2.6.6	压缩波流动	(48)
2.6.7	中心对称等熵流动的特征线解	(50)
2.7	平面正冲击波	(51)
2.7.1	平面正冲击波的基本关系式	(51)
2.7.2	多方气体中平面正冲击波	(54)
2.7.3	冲击波的冲击绝热线与弱波的等熵线	(57)
2.7.4	平面冲击波在刚壁面的正反射	(67)
2.7.5	弱冲击波的声学近似理论	(69)
2.8	斜冲击波及其反射	(73)
2.8.1	斜冲击波的形成	(73)
2.8.2	斜冲击波阵面前后参数间的关系	(76)
2.8.3	密接波与脱体波	(77)
2.8.4	冲击波的极曲线	(79)
2.8.5	斜冲击波从刚壁面的反射	(85)

### 第三章 爆轰波的经典理论

3.1	定常爆轰波的 Chapman-Jouguet 理论	(89)
3.1.1	爆轰波的基本关系式	(89)
3.1.2	爆轰波稳定传播的条件	(91)
3.2	多方气体的爆轰波理论	(97)
3.3	活塞问题解的确定性	(101)
3.3.1	问题的提出	(101)
3.3.2	活塞问题解的确定性	(102)
3.4	爆轰波的 Z-N-D 模型及反应流的定常解	(104)
3.4.1	爆轰波的 Z-N-D 模型	(104)
3.4.2	爆轰波反应区流动的定常解	(105)

### 第四章 气体爆轰理论

4.1	气体爆轰现象	(111)
4.1.1	可燃性气体	(111)
4.1.2	可燃气体的燃烧与爆轰	(112)
4.2	爆炸浓度极限及其确定方法	(112)
4.2.1	爆炸浓度极限	(112)
4.2.2	爆炸浓度极限的计算	(114)
4.3	气体爆轰 C-J 参数的计算理论	(117)
4.3.1	气体爆轰波 C-J 参数的计算式	(117)
4.3.2	气体爆轰产物组成及热力学参数的计算	(118)
4.3.3	气体爆轰波参数的近似计算	(122)
4.4	爆轰波阵面内的化学反应进程和压强变化率	(124)



4.4.1	气体爆轰波阵面内的化学反应进程 .....	(124)
4.4.2	爆轰波面内的压强变化速率 .....	(127)
4.4.3	冻结声速与平衡声速 .....	(129)
4.5	爆轰波阵面内有简单反应的定常解 .....	(129)
4.6	包含输运效应的定常爆轰理论 .....	(130)
4.7	螺旋爆轰现象及胞格结构 .....	(134)
4.8	影响气体爆轰传播的简单讨论 .....	(135)
4.9	云雾爆轰现象及其一维理论 .....	(136)
4.9.1	云雾爆轰现象及其实验观察 .....	(137)
4.9.2	云雾爆轰机理的几种看法 .....	(139)
4.9.3	云雾爆轰的一维理论 .....	(140)
4.9.4	关于云雾爆轰现象及其理论的讨论 .....	(145)

## 第五章 凝聚炸药爆轰理论

5.1	凝聚炸药爆速的实验测定 .....	(147)
5.1.1	测时法 .....	(148)
5.1.2	高速摄影法 .....	(148)
5.2	凝聚炸药爆轰波结构及爆轰反应机理 .....	(150)
5.2.1	凝聚炸药爆轰波结构 .....	(151)
5.2.2	凝聚炸药爆轰反应机理 .....	(154)
5.3	凝聚炸药爆轰参数的理论计算 .....	(156)
5.3.1	爆轰方程组 .....	(156)
5.3.2	爆轰产物状态方程 .....	(157)
5.3.3	采用BKW方程计算爆轰参数 .....	(164)
5.4	凝聚炸药爆轰参数的近似计算 .....	(166)
5.5	炸药爆炸性能的工程评估 .....	(170)
5.5.1	爆速与爆压 .....	(170)
5.5.2	爆热与爆容 .....	(172)
5.5.3	爆温 .....	(176)
5.5.4	炸药作功能力的经验计算 .....	(178)
5.6	凝聚炸药爆轰传播过程的直径效应 .....	(180)
5.6.1	炸药爆轰波传播时直径效应的实验结果 .....	(181)
5.6.2	哈里顿原理与直径效应 .....	(183)
5.6.3	考虑能量耗散的直径效应理论 .....	(186)
5.7	影响凝聚炸药爆轰传播的因素 .....	(190)
5.7.1	炸药性质 .....	(190)
5.7.2	装药密度 .....	(191)
5.7.3	颗粒尺寸和装药外壳对爆速的影响 .....	(192)
5.7.4	附加物对爆速的影响 .....	(193)

5.7.5	轴向沟槽对爆速的影响 .....	(193)
5.7.6	炸药的低速爆轰 .....	(193)
5.8	爆轰波的形状及其控制 .....	(195)
5.8.1	爆轰波的自然波形 .....	(195)
5.8.2	爆轰波形的控制 .....	(197)

## 第六章 凝聚炸药的不定常爆轰

6.1	不定常爆轰波传播的实验观察 .....	(203)
6.2	不定常爆轰波的定性分析 .....	(206)
6.3	散心爆轰波的传播 .....	(210)
6.3.1	散心爆轰波的定性分析 .....	(210)
6.3.2	散心爆轰波传播的自模拟解和近似解 .....	(215)
6.4	聚心爆轰波的近似解 .....	(223)
6.5	凝聚炸药的冲击起爆 .....	(228)
6.5.1	均质炸药的冲击起爆 .....	(228)
6.5.2	非均质炸药的冲击起爆 .....	(233)
6.6	炸药冲击起爆的数值模拟计算 .....	(244)
6.6.1	基本方程 .....	(244)
6.6.2	反应速率方程及其实验确定 .....	(248)
6.7	炸药由燃烧向爆轰的转化及其数值模拟 .....	(251)
6.7.1	炸药燃烧过程的特点 .....	(252)
6.7.2	凝聚炸药燃烧反应的两种机理 .....	(254)
6.7.3	燃烧转化为爆轰的机理和条件 .....	(256)
6.7.4	燃烧转化为爆轰的数值模拟 .....	(256)
6.8	爆轰成长过程的拉氏实验分析方法 .....	(259)
6.8.1	Fowles 拉氏分析理论的基本框架 .....	(260)
6.8.2	拉氏分析方法的改进—路径线法 .....	(262)
6.8.3	材料本构方程及受冲击炸药反应速率方程的获得 .....	(264)

## 第七章 爆轰产物的流动及其推进作用

7.1	爆轰产物的一维飞散运动 .....	(265)
7.1.1	爆轰波阵面后产物的一维流动 .....	(266)
7.1.2	有限长度药柱爆轰产物的一维流动 .....	(268)
7.1.3	引爆面在装药中间时爆轰产物的一维流动 .....	(271)
7.2	爆轰产物对刚壁面的作用冲量 .....	(274)
7.2.1	爆轰波对迎面刚性壁面的作用冲量 .....	(274)
7.2.2	刚壁管侧壁上所受到的作用冲量 .....	(284)
7.2.3	无壳装药爆炸对迎面刚壁的作用 .....	(288)
7.2.4	接触爆炸时端部冲量的实验测定 .....	(290)

7.3	爆炸对物体的驱动加速理论 .....	(291)
7.3.1	爆炸对物体的一维抛射( $\gamma=3$ 时情况) .....	(291)
7.3.2	爆炸对圆柱壳体的驱动加速 .....	(305)
7.3.3	炸弹破片初速的工程估算法——Gurney 公式 .....	(317)
7.4	炸药炮理论 .....	(321)

## 第八章 爆炸对可压缩凝聚介质的直接作用

8.1	$p-u$ 平面上的瑞利线和冲击波极曲线 .....	(330)
8.2	垂直入射时爆炸冲击波的初始参量 .....	(336)
8.3	爆轰波在可压缩固体壁面上的斜反射 .....	(345)
8.3.1	爆轰波在可压缩壁面上的正规斜反射 .....	(347)
8.3.2	爆轰波在可压缩壁面上的非正规马赫反射 .....	(351)
8.3.3	爆轰产物在分界面处的普朗佉—迈盖尔膨胀 .....	(355)
8.3.4	计算结果及其讨论分析 .....	(358)
8.4	爆轰波正入射时固体界面的运动规律及作用冲量 .....	(361)
8.4.1	分界面运动规律及爆炸比冲量的近似解 .....	(362)
8.4.2	数值计算解 .....	(366)
8.5	固体应力波概述 .....	(369)
8.5.1	应力波 .....	(369)
8.5.2	弹性应力波 .....	(370)
8.5.3	塑性应力波 .....	(373)
8.6	固体的高压状态方程及其确定方法 .....	(375)
8.6.1	Mie-Grüneisen 状态方程 .....	(377)
8.6.2	Mie-Grüneisen 状态方程的实验确定 .....	(383)
8.6.3	从实测的 Hugoniot 曲线确定固体的等熵线 .....	(387)
8.6.4	Hugoniot 温度和焓的计算 .....	(388)
8.6.5	穆尔纳汉(Murnaghan)状态方程的实验标定 .....	(389)
8.7	固体冲击波参数的实验测量及其应用 .....	(391)
8.7.1	固体物质冲击压缩性的实验测量 .....	(391)
8.7.2	借助于冲击波测量研究物质的冲击相变现象 .....	(402)
8.8	爆轰波 C-J 压力的实验测定 .....	(406)
8.8.1	测 C-J 压力的自由表面速度方法 .....	(406)
8.8.2	测 C-J 压力的水箱法 .....	(410)
8.8.3	测 C-J 压力的电磁法 .....	(412)
8.8.4	爆轰波反应区宽度 $x_0$ 的实验测定 .....	(414)

## 第九章 炸药的感度与安定性

9.1	炸药感度概述 .....	(416)
9.2	炸药的热感度 .....	(416)

9.2.1	热作用下炸药爆炸机理 — 热爆炸理论 .....	(417)
9.2.2	热感度的表示方法与实验测定 .....	(421)
9.3	炸药对机械冲击作用的感度 .....	(423)
9.3.1	炸药在机械作用下的起爆机理 .....	(424)
9.3.2	炸药撞击感度 .....	(428)
9.3.3	炸药的摩擦感度 .....	(430)
9.3.4	炸药对枪击的感度 .....	(431)
9.3.5	苏珊试验 .....	(432)
9.4	炸药的发射感度 .....	(433)
9.5	炸药的静电感度 .....	(435)
9.5.1	炸药的摩擦生电 .....	(435)
9.5.2	炸药对电火花的感度 .....	(436)
9.6	炸药的热安定性及其评估 .....	(436)
9.6.1	炸药热安定性 .....	(437)
9.6.2	炸药热安定性分析 .....	(438)
9.6.3	炸药热安定性评估 .....	(438)
附录 A	空气冲击波阵面的参数 .....	(440)
附录 B	气体在 293.15~4000K 之间的热力学性质 .....	(442)
附录 C	未反应炸药的冲击雨果尼奥参数 .....	(443)
附录 D-1	密实介质的雨果尼奥参数 .....	(444)
附录 D-2	一些非金属材料的雨果尼奥参数 .....	(445)
附录 E	部分金属的雨果尼奥弹性限 .....	(446)
参考文献	.....	(447)

# 第一章 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。节日时施放烟火的爆炸,高压蒸汽锅炉等的爆炸,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,以及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  $10^{-6} \sim 10^{-7}$ 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,所形成的温度约为  $3000 \sim 5000^\circ\text{C}$ ,压力高达  $10^2 \sim 10^4 \text{MPa}$ ,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  $\text{U}^{235}$  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的多。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十万吨 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。

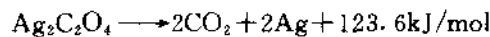
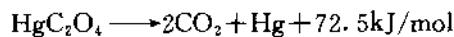
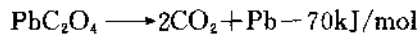
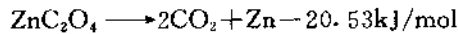
## 1.2 炸药爆炸的基本特征

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,或受到强烈冲击和振动。

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。上述三个条件是一切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。它是爆炸对外界作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。一般炸药的爆热约在 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的很慢。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 $\mu\text{s}$ ( $10^{-6}\text{s}$ ),时间相差数百万倍。

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。一般说来,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余米之间。

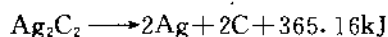
附带尚需指出,除了过程的高速度之外,爆炸过程的自动传播也具有很重要的实际意义。例如,某一物质在雷管引爆下,在与雷管相接触的很小的局部激起了爆炸反应,但是反应放出的能量不足以补偿损失掉的能量,从而可能导致反应的衰减,直至最后熄灭,这种物质就很难在实际上获得应用。

(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,那么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 $3000^\circ\text{C}$ 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,我们可以说,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。硝酸铵一直被看作是很好的化学肥料,但现在被广泛地用作工程爆破炸药。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、火药或推进剂以及烟火剂四种类型。

起爆药:主要用作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 $[\text{Pb}(\text{N}_3)_2]$ 、斯蒂夫酸铅 $[\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2\text{Pb} \cdot \text{H}_2\text{O}]$ 、二硝基重氮酚 $[\text{C}_7\text{H}_2\text{N}_2\text{O}(\text{NO}_2)_2]$ ,代号为DDNP],以及特屈拉辛 $[\text{C}_2\text{H}_6\text{N}_{10}\text{O}]$ 等。

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)、奥索今(HMX)、苦味酸(PA)、硝基甲烷(NM)等等。近20多年来,由于军事安全技术考虑,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)以及以黑索今或奥索今为主体的塑料粘结混合炸药,如PBX9404, 8701, 7066等。此外,近20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,耐热炸药等等。

发射药或火药:主要指用来发射枪弹或炮弹、及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,用的最多的乃是由硝化棉、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%的其他成分胶制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等。

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,而且二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。

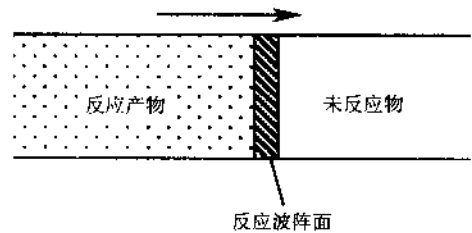


图 1-3-1 反应波阵面的传播

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:

首先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。

其次,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 左右),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的很慢,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,压力高达数千个 Pa。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面定的常数。

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而传播方向相反。因此燃烧波而内的压力较低。而爆轰时,爆轰反应区内产物质点运动方向是与爆轰波传播方向相同,爆轰波区的压力高达数 10 个 GPa。

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(称之为“爆炸”),一个是恒定的(称之为爆轰)。我们认为“爆炸”也是爆轰的一种现象,称为不稳定爆轰,面恒速爆轰称之为稳定爆轰。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。