



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工程爆破

王海亮 主编



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

工 程 爆 破

王海亮 主 编

王海亮 蓝成仁 田运生 李宏建 王振彪 编

王景春 主 审

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国铁道出版社

2008年·北 京

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,编写时结合《爆破安全规程》(GB 6722—2003)以及爆破器材的产品标准和试验方法标准,针对工程爆破的特点,系统地阐述了爆破工程技术人员应该掌握和了解的基本知识。主要包括炸药与爆炸的基本理论、工业炸药、起爆器材与起爆方法、岩石爆破的作用原理、隧道爆破施工技术、深孔爆破、硐室爆破、拆除爆破、爆破安全技术以及工程爆破造价。为方便教学,本书在附录部分列出了常用爆破术语汉英对照以及常见爆破器材的实物照片等资料。

本书为高等学校交通土木专业工程爆破课程的教材,可作为含能材料、火工烟火、安全工程、弹药和爆炸应用类专业本科生和研究生的选修课教材,本书也可做为相关领域工程技术人员的爆破技术培训教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程爆破/王海亮主编. —北京:中国铁道出版社,

2008.1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-113-08435-6

I. 工… II. 王… III. 爆破技术—高等学校—教材

IV. TB41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 185487 号

书 名: 工程爆破

作 者: 王海亮 主编

策划编辑: 李丽娟

责任编辑: 李丽娟 电话: 010-51873135

封面设计: 马 利

责任校对: 孙 玫

责任印制: 金洪泽

出版发行: 中国铁道出版社(北京市宣武区右安门西街8号 邮政编码: 100054)

印 刷: 中国铁道出版社印刷厂

版 次: 2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 14.75 插页: 4 字数: 356 千

书 号: ISBN 978-7-113-08435-6/TU·916

定 价: 31.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部调换。

电 话: 市电(010) 51873170 路电(021) 73170(发行部)

打击盗版举报电话: 市电(010) 63549504 路电(021) 73187

前 言

本书是根据教育部教高[2006]9号文件《教育部关于印发普通高等教育“十一五”国家级教材规划选题的通知》,为普通高等院校交通土木工程专业编写的工程爆破教材。

本书内容侧重于与爆破工程关系密切的基本概念、基本理论、基本实验以及常见的设计和施工方法,编写时注意了基本概念的正确性,严格按照国家标准对专业术语进行规范和定义。

本书内容主要包括炸药与爆炸的基本理论、工业炸药、起爆器材与起爆方法、岩石爆破作用原理、隧道爆破、深孔爆破、硐室爆破、拆除爆破、爆破安全技术和工程爆破造价等内容。各专业可根据不同情况对本书的内容适当取舍。为达到良好的教学效果,在本教材的使用过程中,教师应指导学生认真学习《爆破安全规程》(GB 6722—2003),并在实验、实习和实际工程中自觉贯彻和执行。

本教材的前身是中国铁道出版社出版的“九五”国家级重点教材《铁路工程爆破》。《铁路工程爆破》出版后,先后在北京理工大学、石家庄铁道学院、山东科技大学、解放军军械工程学院、河北工程大学、武汉理工大学、武汉化工学院、河北警察职业学院等十余所高等院校作为教材使用。用于教学的专业涉及土木工程、铁道工程、采矿工程、安全工程、工程力学、弹药工程、侦查学等20多个专业,用于教学的学生学历涵盖了专科、本科和硕士研究生等不同层次。教材使用单位对教材质量普遍反映良好,取得了较好的社会效益。《铁路工程爆破》教材于2004年获得河北省优秀教学成果三等奖。

《铁路工程爆破》教材主要是为了满足当时铁路院校的教学需要而编写的,行业特色明显。目前应用该教材的院校已大大超出铁路系统的范围。各院校对淡化该教材行业特色的呼声也较高。另外,2004年我国开始实施新的《爆破安全规程》(GB 6722—2003)。《铁路工程爆破》一书的部分内容已无法适应新规程的要求,急需修订,因此,在《铁路工程爆破》的基础上,编写了这本较为通用、能满足新规程要求、适合不同行业的工程爆破教材。

根据《爆破安全规程》(GB 6722—2003)和2001年以后发布实施的新的国家标准、行业标准及规范对本教材各章相应内容进行了全面修订,删除了“既有线及复线建设中的爆破施工”一章的内容,重新编写了“隧道爆破施工技术”和“爆破安全技术”两章的内容。

本书由山东科技大学王海亮,河北工程大学蓝成仁和石家庄铁道学院田运

生、李宏建、王振彪编写。其中第一、二、三、四章,第六章的第三、六节、第九章,附录及各章习题由王海亮撰写,第五章由田运生撰写,第六章的一、二、四、五、七节由李宏建撰写,第七、八章由蓝成仁撰写,第十章由王振彪撰写。本书由王海亮主编,负责全书的统稿和定稿,石家庄铁道学院王景春主审。

本书的编写得到了山东科技大学矿山灾害预防控制省部共建教育部重点实验室的资助。在编写过程中得到了河北卫星化工厂、抚顺矿务局十一厂、山西兴安化学材料厂、辽宁华丰化工厂、山西江阳化工厂、西安庆华电器制造厂、北京矿冶研究总院、澳瑞凯澳大利亚有限公司、安徽雷鸣科化股份有限公司的大力协助和支持,自始至终得到了山东科技大学各级领导和同事们的鼓励和支持,在此表示诚挚的谢意。

由于编者水平有限,疏漏失误之处在所难免,恳请同行和兄弟院校的师生把发现的缺点和错误通过电子信箱 a405405@263.net 及时通知编者,以便再版时加以修改或更正。

为便于教学,编者在本教材的基础上还编辑、整理了一些电教材料。如有需要者,请直接与编者联系。

编 者

2007 年 7 月

目 录

第一章 炸药与爆炸的基本理论	1
第一节 炸药和爆炸.....	1
第二节 爆炸反应的热化学.....	4
第三节 冲击波的基本知识.....	7
第四节 炸药爆轰的基本知识	11
第五节 炸药的感度	13
第六节 炸药的起爆	16
第七节 炸药的性能	18
第八节 沟槽效应	24
第九节 聚能效应	25
本章小结	27
复习题	27
第二章 工业炸药	28
第一节 工业炸药的分类	28
第二节 铵梯类炸药	29
第三节 铵油类炸药	31
第四节 浆状炸药与水胶炸药	36
第五节 乳化炸药	39
第六节 其他工业炸药	41
本章小结	43
复习题	43
第三章 起爆器材和起爆方法	45
第一节 导火索起爆法	45
第二节 电力起爆法	47
第三节 导爆索起爆法	56
第四节 塑料导爆管起爆系统	58
第五节 新型起爆器材	63
本章小结	66
复习题	66
第四章 岩石爆破作用原理	68
第一节 岩石爆破破碎原因的几种学说	68
第二节 单个药包的爆破作用	69
第三节 体积公式	72
第四节 爆破参数的意义和选择	75



第五节 影响爆破效果的因素	78
第六节 光面爆破和预裂爆破	83
本章小结	85
复习题	85
第五章 隧道爆破施工技术	87
第一节 隧道爆破施工概述	87
第二节 炮眼的种类及作用	88
第三节 掏槽眼布置	89
第四节 隧道爆破参数及炮眼布置	93
第五节 周边眼的控制爆破	96
第六节 钻爆施工	99
第七节 瓦斯隧道爆破技术	102
第八节 隧道爆破设计实例	105
本章小结	109
复习题	109
第六章 深孔爆破	111
第一节 深孔爆破基本概念	111
第二节 设计计算	113
第三节 深孔爆破施工工艺	116
第四节 毫秒延时爆破与挤压爆破	121
第五节 光面爆破和预裂爆破参数设计	124
第六节 深孔爆破工程设计实例	126
第七节 药壶法爆破	128
本章小结	130
复习题	131
第七章 硐室爆破	132
第一节 硐室爆破特点及设计要求	132
第二节 爆破类型选择与药包布置方式	133
第三节 硐室爆破参数的选择与计算	137
第四节 条形药包硐室爆破	143
第五节 硐室爆破药包布置	145
第六节 路堑硐室爆破设计实例	148
第七节 硐室爆破施工	151
本章小结	153
复习题	153
第八章 拆除爆破	155
第一节 拆除爆破原理及药量计算	155
第二节 基础拆除爆破	158
第三节 烟囱、水塔的拆除爆破	160

第四节 钢筋混凝土框架结构的拆除爆破·····	165
第五节 水压爆破·····	168
第六节 静态破碎方法·····	171
本章小结·····	173
复习题·····	173
第九章 爆破安全技术·····	175
第一节 爆破作业的基本规定·····	175
第二节 爆破安全允许距离·····	179
第三节 盲炮的预防及处理·····	186
第四节 电力起爆中早爆事故的发生与预防·····	188
第五节 爆破对环境有害影响的控制·····	190
第六节 爆破器材的安全管理·····	192
本章小结·····	197
复习题·····	197
第十章 爆破工程造价·····	199
第一节 确定爆破工程造价的依据·····	199
第二节 爆破工程造价计算·····	201
第三节 案例分析·····	205
本章小结·····	208
复习题·····	208
附录 1 常用爆破术语汉英对照·····	210
附录 2 民用爆破器材产品出厂价格·····	219
附录 3 铁路隧道围岩分级·····	224
附录 4 土壤及岩石(普氏)分类表·····	225
参考文献·····	227

第一章

炸药与爆炸的基本理论

炸药作为一种特殊的能源,在铁路、公路、水利水电、矿业、石油、农业、金属加工等民用领域和国防建设中得到广泛地应用。研究炸药的爆轰理论,熟悉炸药的物理、化学性质,了解炸药化学反应的基本规律,掌握炸药的爆炸性能和爆炸作用特征,对于安全、正确地使用炸药,有效地提高炸药能量利用率有着重要意义。

本章主要介绍炸药和爆炸的基本概念,炸药的热化学参数,冲击波与爆轰波的基本知识,炸药的感度和起爆,炸药的性能参数、沟槽效应和聚能效应等内容,为后续章节的学习奠定基础。

第一节 炸药和爆炸

一、爆炸现象

广义地讲,爆炸(explosion)是物质能量急剧地释放过程。在此过程中,系统的势能极为迅速地转变为机械功和声、光、热等多种形式。爆炸时,在爆炸点周围介质中发生急剧的压力突跃,这种压力突跃是爆炸产生破坏作用的直接原因。

根据爆炸变化过程的不同,可将其分为三类:一类是由物理变化引起的爆炸,如锅炉等高压容器的爆炸,称为物理爆炸;另一类是由核裂变或核聚变引起的爆炸,称为核爆炸;第三类是由化学变化引起的爆炸,称为化学爆炸,如瓦斯或煤尘的爆炸、炸药的爆炸都是化学爆炸。一般将能够发生化学爆炸反应的物质统称为炸药。如不加说明,本书提到的“爆炸”均指化学爆炸。

工程爆破则是指利用炸药能量对介质作功,以达到预定工程目标的作业。

二、炸药化学变化的形式

爆炸并不是炸药唯一的化学变化形式。由于反应方式和引起化学变化的环境条件不同,一种炸药可能有三种不同形式的化学变化:缓慢分解、燃烧和爆炸。

1. 缓慢分解(slow decomposition)

缓慢分解是一种缓慢的化学变化。其特点是化学变化在整个炸药中展开,反应速度与环境温度有关,炸药的缓慢分解速度随着温度的增加而呈指数增加。当通风散热条件不好时,分解热不易散失,很容易使炸药温度自动升高,进而促成炸药自动催化反应而导致炸药的燃烧或爆炸。

2. 燃烧(combustion)

燃烧是一种伴随有发光、发热的剧烈氧化反应。与其他可燃物一样,炸药在一定的条件下也会燃烧,不同的是炸药的燃烧不需要外界提供氧,也就是说,炸药可以在无氧环境中正常燃烧。与缓慢分解不同,炸药的燃烧过程只是在炸药的局部区域(即反应区)内进行并在炸药内

一层层地传播。反应区的传播速度称为燃烧线速度,通常称为燃烧速度。炸药的快速燃烧(每秒数百米)又称爆燃(deflagration)。

炸药在燃烧过程中,若燃烧速度保持定值,不发生波动,就称为稳定燃烧,否则称为不稳定燃烧。不稳定燃烧一般是由于燃烧过程中的热量传导或散失不平衡而导致的。不稳定燃烧可导致燃烧的熄灭、震荡或转变为爆炸。

3. 爆炸

炸药的爆炸过程与燃烧过程类似,化学反应也只是在反应区内进行并在炸药内按一定速度一层层地自行传播。反应区的传播速度称为爆速。在炸药的爆炸过程中,若爆速保持定值,就称为稳定爆炸,否则称为不稳定爆炸。稳定爆炸又称为爆轰(detonation)。

燃烧和爆炸是两种性质不同的化学变化过程,其区别主要表现在以下几个方面:①燃烧是通过热传导、热辐射及燃烧气体产物来传递能量和激起化学反应的,受环境条件的影响较大,而爆炸则是借助于冲击波对炸药一层层的强烈冲击压缩作用来传递能量和激起化学反应的,基本上不受环境条件的影响。②燃烧产物的运动方向与反应区的传播方向相反,而爆炸产物的运动方向则与反应区的传播方向相同,故燃烧产生的压力较低,而爆炸则可产生很高的压力。③爆炸反应比燃烧反应更为激烈,放出的热量和达到的温度也高。④燃烧速度是亚音速的,爆炸速度则是超音速的。

在一定的条件下,炸药的上述三种变化形式都是能够相互转化的:缓慢分解可因热量不能及时散失而发展为燃烧、爆炸;反之,爆炸也可以转化为燃烧、缓慢分解。

三、炸药爆炸的三要素

炸药爆炸必须具备以下三个基本条件,即放出热量、生成气态产物和反应的高速度。这是构成爆炸的必要条件,缺一不可,故称为爆炸反应的三要素。

1. 放出热量

放出热量是爆炸得以进行的首位必要条件。下面以硝酸铵的不同化学反应为例。

常温下分解: $\text{NH}_4\text{NO}_3 \longrightarrow \text{NH}_3 + \text{HNO}_3 - 170.7 \text{ kJ}$

加热至 200℃ 左右: $\text{NH}_4\text{NO}_3 \longrightarrow 0.5\text{N}_2 + \text{NO} + 2\text{H}_2\text{O} + 36.1 \text{ kJ}$

或 $\text{NH}_4\text{NO}_3 \longrightarrow \text{N}_2\text{O} + 2\text{H}_2\text{O} + 52.4 \text{ kJ}$

用起爆药柱引爆: $\text{NH}_4\text{NO}_3 \longrightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 0.5\text{O}_2 + 126.4 \text{ kJ}$

常温下,硝酸铵的分解是一个吸热反应,不能发生爆炸;但加热到 200℃ 左右时,分解反应变为放热反应。如果放出的热量不能及时散失,炸药温度就会不断升高,促使反应速度不断加快和放出更多的热量,最终引起炸药的燃烧和爆炸。如果用起爆药柱(primer cartridge)引爆时,硝酸铵发生剧烈的放热反应,即刻爆炸。可见,只有放热反应才可能具有爆炸性。

2. 生成气体产物

炸药爆炸放出的热量必须借助气体介质才能转化为机械功。因此,生成气体产物是炸药做功不可缺少的条件。如果物质的反应热很大,但没有气体产物形成,就不会具有爆炸性。例如铝热剂反应:



此反应的速度很快,反应的热效应可以使产物温度升到 3 000℃,使其呈熔融状态,因为没有气态产物生成,而不发生爆炸,只是高温产物逐渐地将热量传导到周围介质中去,慢慢

冷却凝固。

炸药爆炸放出的热量不可能全部转化为机械功,但生成气体数量越多,热量利用率也越高。

3. 反应的高速度

反应的高速度是爆炸过程区别于一般化学反应过程的重要标志。化学反应具备了放热性但并不一定能够发生爆炸。例如1 kg煤完全燃烧时放出的热量为8 912 kJ,但因燃烧速度太低而不可能形成爆炸;1 kg梯恩梯炸药爆炸时放出的热量虽然只有4 226 kJ,但其爆炸反应的时间只需十几到几十毫秒,因而形成爆炸反应。

由于爆炸反应的速度极高,反应结束瞬间,其能量几乎全部聚集在炸药爆炸前所占据的体积内,因而能够达到很高的能量密度。炸药发生爆炸变化所达到的能量密度比一般燃料燃烧时达到的能量密度要高数百至数千倍。正是由于这个原因,爆炸过程才具有巨大的做功能力和强烈的破坏效应。

可见,放出热量、生成气体产物和反应的高速度是形成爆炸反应的充要条件。这里可以给出炸药爆炸的定义:炸药爆炸是一种高速进行的,能自动传播的化学反应,在此反应过程中放出大量的热,并生成大量的气态产物。

四、炸药的分类

炸药的品种繁多,它们的组成、物理性质、化学性质和爆炸性能各不相同。根据炸药的一些特点,对它们进行归纳分类,对于更好地研究和使用炸药是十分必要的。常见炸药的分类方法有以下几种。

1. 按炸药组成分类

根据组成成分的不同,常把炸药分为单质炸药和混合炸药两大类。

(1)单质炸药(explosive compound)。单质炸药是指由单一化合物组成的炸药,又称单体炸药或化合炸药,如梯恩梯[三硝基甲苯(2,4,6-Trinitrotoluene),符号 TNT]、黑索今(Hexogen,符号 RDX)、太安(Pentaerythritol tetranitrate,符号 PETN)等。在民用爆破器材中,单质炸药大多用作混合炸药的组分或火工品(例如雷管、导爆索等)装药,很少单独用来进行爆破作业。

(2)混合炸药(composite explosive)。混合炸药是指由两种或两种以上的物质组成的炸药,如黑火药(black powder)、铵梯炸药(ammonite)、水胶炸药(water gel explosive)和乳化炸药(emulsion)等。混合炸药在炸药领域中占有极其重要的地位。

2. 按作用特性和用途分类

根据炸药作用特性和用途的不同,可分为起爆药、猛炸药、火药和烟火剂四大类。

(1)起爆药(primary explosive)。起爆药是指在较弱的初始冲能作用下即能发生爆炸,且爆炸速度变化大,易于由燃烧转爆轰的炸药。起爆药一般都是单质炸药,如二硝基重氮酚(di-azodinitrophenol,符号 DDNP)、D·S 共沉淀起爆药、K·D 复盐起爆药、叠氮化铅(lead azide,符号 LA)等。起爆药主要用于引发其他炸药发生爆炸反应,常用于各种雷管、火帽的初级装药,因此又称为始发炸药或第一炸药。

(2)猛炸药(high explosive)。猛炸药是指那些利用爆轰所释放的能量对介质做功的炸药。猛炸药因其对周围介质有猛烈的破坏作用而得名。这类炸药对热和冲击的感度较低,通常需要用雷管或起爆药激发起爆,因此又称为次发炸药或第二炸药。

常见的猛炸药有:梯恩梯、黑索今、太安、特屈儿(Tetryl)、奥克托今(Octogen,符号 HMX)以及各类混合炸药。无论军用还是民用,大量使用的仍是由混合炸药组成的猛炸药。不同的是民用混合炸药以廉价的硝酸铵为主要成分,而军用混合炸药则很少使用硝酸铵,只是在特定条件下将其当做一种代用品。

(3)火药(powder)。火药化学变化的主要形式是燃烧。它可以在无氧环境中稳定而有规律地燃烧,放出大量的气体和热能,对外做抛射功或推射功,因此又称为发射药或固体推进剂。其主要代表有黑火药、单基火药、双基火药、高分子复合火药等。其中民用爆破器材中大量使用的是黑火药,主要用于制作导火索。单基火药、双基火药和高分子复合火药则主要用作发射弹药的能源,如火炮的发射药、火箭发动机的推进剂等。

(4)烟火剂(pyrotechnic composition)。烟火剂是由氧化剂和可燃剂为主体制成的,在燃烧时能产生声、光、热、烟等特定效应的炸药。烟火剂包括照明剂、燃烧剂、烟幕剂、信号剂和曳光弹等,通常用于装填特种弹药或烟火材料,产生特定的烟火效应。

起爆药、猛炸药、火药和烟火剂四种药剂都具有爆炸性质,在一定条件下都能产生爆炸以至爆轰,因此统称为炸药。不过习惯上称谓的炸药主要是指猛炸药。

另外根据炸药的物理状态,可将其分为固体炸药、液体炸药、气体炸药和多相炸药。其中多相炸药是指由固体与液体、固体与气体或液体与气体所组成的炸药。如含硝化甘油和硝酸铵的胶质炸药、铵油炸药、乳化炸药、水胶炸药以及可燃粉尘与空气的混合物等,其中以固液体系最有实际意义。为了便于理论研究,通常把除气体炸药以外的液体炸药、固体炸药等统称为凝聚炸药(condensed-phase explosives)。

第二节 爆炸反应的热化学

一、炸药的氧平衡

绝大多数炸药由碳、氢、氧、氮四种元素组成,某些炸药还含有氯、硫、金属及其盐类。对于由碳、氢、氧、氮四种元素组成的炸药,可以用通式 $C_aH_bO_cN_d$ 表示。单质炸药的通式通常按 1 mol 写出,混合炸药的通式则按 1 kg 写出。大多数炸药的爆炸反应为氧化反应,其特点是反应所需的氧元素由炸药本身提供。放热量最大、生成产物最稳定的氧化反应称为理想的氧化反应。若炸药内含有足够的氧量,按理想氧化反应生成的产物应为: H_2O 、 CO_2 、其他元素的高级氧化物、氮和多余的游离氧;若氧量不足,则除生成 H_2O 、 CO_2 、 N_2 外,还生成 H_2 、 CO 、固体碳和其他氧化不完全的产物。

氧平衡(oxygen balance)是指炸药中所含的氧完全用以氧化其所含的可燃元素后,所多余或不足的氧量。氧平衡用每克炸药中剩余或不足氧量的克数或百分数来表示。氧平衡大于零时为正氧平衡,等于零时为氧平衡,小于零时为负氧平衡。

对于通式为 $C_aH_bO_cN_d$ (a 、 b 、 c 、 d 分别表示一个炸药分子中碳、氢、氧、氮的原子个数)的单质炸药,其氧平衡按下式计算:

$$OB = \frac{[c - (2a + 0.5b)] \times 16}{M} \quad (1-1)$$

对于混合炸药,其氧平衡按下式计算:

$$OB = OB_1 m_1 + OB_2 m_2 + \cdots + OB_n m_n \quad (1-2)$$

在上述两式中

OB ——炸药的氧平衡, g/g ;

16——氧的相对原子质量, g ;

M ——炸药的相对分子质量, g ;

$OB_1, OB_2, \dots, OB_n$ ——混合炸药中各组分的氧平衡值;

$m_1, m_2, \dots, m_n$ ——混合炸药中各组分所占的百分率。

常见单质炸药和混合炸药常用组分的氧平衡列于表 1-1 中。

表 1-1 单质炸药和混合炸药常用组分的氧平衡

名 称	分子式 (或实验式)	氧平衡 /($g \cdot g^{-1}$)	名 称	分子式 (或实验式)	氧平衡 /($g \cdot g^{-1}$)
梯恩梯(TNT)	$C_6H_2(NO_2)_3CH_3$	-0.740	铝 粉	Al	-0.889
黑索今(RDX)	$(CH_2N-NO_2)_3$	-0.216	木 粉	$C_{15}H_{22}O_{10}$	-1.370
特屈儿(Te)	$C_6H_2(NO_2)_4NCH_3$	-0.474	石蜡、凡士林	$C_{18}H_{38}$	-3.465
奥克托今(HMX)	$(CH_2N-NO_2)_4$	-0.216	沥 青	$C_{10}H_{18}O$	-2.909
硝化甘油(NG)	$C_3H_5(ONO_2)_3$	+0.035	氯化钠	NaCl	0.000
太安(PETN)	$C_5H_8(ONO_2)_4$	-0.101	硝酸钾	KNO_3	+0.396
硝酸铵(AN)	NH_4NO_3	+0.200	田菁胶	$(C_6H_{10}O_5)_n$	-1.185
二硝基重氮酚	$C_6H_2(NO_2)_2NON$	-0.610	硝酸钠	$NaNO_3$	+0.470
亚硝酸钠	$NaNO_2$	+0.348	轻柴油	$C_{16}H_{32}$	-3.429

例 1-1 计算硝酸铵(NH_4NO_3)的氧平衡值。

解 硝酸铵的炸药通式为 $C_0H_4O_3N_2$, $M=80$, 则

$$OB = \frac{[3 - (0 + 4/2)] \times 16}{80} = +0.2 \text{ g/g}$$

例 1-2 已知 2 号岩石铵梯炸药的配方为硝酸铵 85%, 梯恩梯 11%, 木粉 4%。计算 2 号岩石铵梯炸药的氧平衡值。

解 由表 1-1 查得, 硝酸铵、梯恩梯和木粉的氧平衡分别为 0.2、-0.74 和 -1.37。由式 (1-2) 得

$$OB = 0.2 \times 0.85 - 0.74 \times 0.11 - 1.37 \times 0.04 = 0.0338 \text{ g/g}$$

根据氧平衡的值, 可将炸药分为正氧平衡炸药、负氧平衡炸药和零氧平衡炸药。

负氧平衡炸药因氧量欠缺, 不能充分氧化可燃元素, 爆炸产物中含有 H_2 和有毒的 CO 气体, 甚至出现固体碳。由于可燃元素不能充分氧化, 不能放出最大热量。但是, 负氧平衡炸药的生成产物中含双原子气体较多, 能够增加生成气体的数量。

正氧平衡炸药不能充分消耗其中的氧量, 而且多余的氧和游离氮化合时, 产生吸热反应, 生成具有强烈毒性、并对瓦斯与煤尘爆炸起催化作用的氮氧化合物。

零氧平衡炸药, 因氧和可燃元素都得到了充分反应, 故在理想反应条件下, 能放出最大热量, 而且不会生成有毒气体。

由此可见, 氧平衡对炸药爆炸时放出的热量, 生成气体的组成和体积, 有毒气体含量, 二次火焰 (例如 CO 和 H_2 , 在有外界氧供给时, 可以再次燃烧形成二次火焰) 等有着多方面的影响。

混合炸药的氧平衡可由其组成和配比来调节。对于工业炸药, 一般应使其氧平衡接近于零氧平衡。

二、爆 热

在规定条件下,单位质量炸药爆炸时放出的热量称为炸药的爆热(heat of explosion)。通常以1 mol或1 kg炸药爆炸所释放的热量表示(kJ/mol 或 kJ/kg)。炸药的爆炸变化极为迅速,可以看作是在定容条件下进行的,而且定容热效应可以更直接地表示炸药的能量性质,因此炸药的爆热均指定容爆热。

炸药的爆热是在实验室使用一种专门的装置——爆热弹进行测定,并经实验和计算得到的。表1-2列出了几种常见炸药的爆热实验值。

表 1-2 几种常见炸药的爆热实验值

炸 药 名 称	装药密度 /(g·cm ⁻³)	爆 热 /(kJ·kg ⁻¹)	炸 药 名 称	装药密度 /(g·cm ⁻³)	爆 热 /(kJ·kg ⁻¹)
梯恩梯	0.85	3 389.0	特屈儿	1.0	3 849.3
梯恩梯	1.50	4 225.8	特屈儿	1.55	4 560.6
黑索今	0.95	5 313.7	硝酸铵/梯恩梯 (80/20)	0.9	4 100.3
黑索今	1.50	5 397.4	硝酸铵/梯恩梯 (80/20)	1.30	4 142.2
太 安	0.85	5 690.2	硝酸铵/梯恩梯 (40/60)	1.55	4 184.0
太 安	1.65	5 690.2	硝化甘油	1.60	6 192.3

提高炸药的爆热对于提高炸药的作功能力具有重要的意义。通常用来提高炸药爆热的途径主要有以下两个方面。

1. 改善炸药的氧平衡

为使炸药内可燃元素或可燃剂完全氧化放出最大热量,应使炸药尽量接近于零氧平衡。不过同属于零氧平衡的炸药所放出的能量也不相同,一般含氢量高的炸药能量较大,这是由于氢完全氧化为水所放出的热量较高的缘故。此外,零氧平衡炸药放出的热量还与炸药化学反应的完全程度有关,而后者又决定于炸药粒度、混药质量、装药条件和爆炸条件等许多因素。

2. 加入高能元素或高能量的可燃剂

在单质炸药中引入铍、铝等高能元素可以适量提高其爆热。例如,在黑索今中加入适量的镁粉,爆热可提高50%。在混合炸药中加入铝粉、镁粉等是获得高爆热炸药常用的方法。这是因为这些金属粉末不仅能与氧元素进行氧化反应放出大量的热,而且还可以和炸药爆炸产物中的CO₂、H₂O产生二次反应,而这些反应都是剧烈的放热反应,从而可以增大爆热。

三、爆 温

炸药爆炸时放出的热量使爆炸产物定容加热所达到的最高温度称为爆温(explosion temperature)。爆温取决于爆热和爆炸产物的组成。单质炸药的爆温一般在3 000~5 000℃之间,工业炸药一般为2 000~2 500℃。

爆温是炸药的重要参数之一。它对炸药的研究不仅有理论意义,而且有实际意义。例如在具有瓦斯与煤尘爆炸危险的环境中实施爆破作业时,为防止炸药爆温过高而引爆瓦斯或煤尘,必须按规定使用爆温较低的煤矿许用炸药。另一方面,为了达到一定的军事目的,则需要研制和使用爆温较高的军用炸药。

为了达到降低爆温的目的,一般采用在炸药中加入附加物的办法,煤矿许用炸药中加入的附加物主要是氯化钠。相反为了提高炸药的爆温,则常在炸药中加入铝粉和镁粉等高热剂,在许多弹药中,如鱼雷、水雷和对空导弹中装填的就是含铝炸药。

由于爆炸过程具有高温、高压、高速的特点,加上爆炸的破坏性,给爆温的测定造成困难。迄今为止,用实验的方法精确测定爆温的问题尚未完全解决。为了得到炸药爆温的具体数值,一般采用理论方法计算,有关的计算方法详见参考文献 1。

四、爆 容

爆容(specific volume)又称比容,是单位质量炸药爆炸时生成的气体产物在标准状况(0℃、1个大气压)下所占的体积,常用的单位是 L/kg。爆炸产物中的水在炸药爆炸时为气态,而在常温下为液态。在不考虑液态水占有的体积时,其余气体产物在标准状况下的体积称为干比容。如果假设标准状况下水仍为气态,则爆炸气体产物的体积之和称为全比容,即爆容。

气态产物是炸药爆炸做功的工质。气态产物越多,爆炸反应热变为机械功的效率越高,因此它与炸药做功能力有密切关系。爆容通常按爆炸反应方程式计算,即

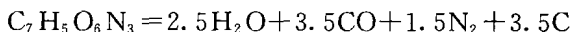
$$V_0 = \frac{22.4n}{M} \quad (1-3)$$

式中 V_0 ——炸药的爆容, L/kg;

n ——爆炸反应方程式中各气态产物物质的量之总和, mol;

M ——爆炸反应方程式中炸药的质量, kg。

例 1-3 已知梯恩梯的爆炸反应方程式为



求梯恩梯的爆容。

解 因为 $n = 2.5 + 3.5 + 1.5 = 7.5$, $M = 227$, 所以

$$V_0 = \frac{22.4 \times 7.5}{0.227} = 740 \text{ L/kg}$$

五、爆炸压力

炸药爆炸时生成的热气体所产生的压力称为爆炸压力(explosion pressure)。应当注意的是爆炸压力与以后要讲到的爆轰压力(detonation pressure)不同,不应混淆。

第三节 冲击波的基本知识

一、波

空气、水、岩体、炸药等物质的状态可以用压力、密度、温度、移动速度等参数表征。物质在外界的作用下状态参数会发生一定的变化,物质局部状态的变化称为扰动。如果外界作用只引起物质状态参数发生微小的变化,这种扰动称为弱扰动。如果外界作用引起物质状态参数发生显著的变化,这种扰动称为强扰动。

扰动在介质中的传播称为波。在波的传播过程中,介质原始状态与扰动状态的交界面称为

波阵面(或波头)。波阵面的移动方向就是波的传播方向,波的传播方向与介质质点震动方向平行的波称为纵波,波的传播方向与介质质点震动方向垂直的波称为横波。波阵面在其法线方向上的位移速度称为波速。按波阵面形状不同,波可分为平面波、柱面波、球面波等。

所谓音波即介质中传播的弱扰动纵波,音速则是弱扰动在介质中的传播速度。在这里,不能把音波只理解为听觉范围内的波动。

二、压缩波和稀疏波

受扰动后波阵面上介质的压力、密度均增加的波称为压缩波(pressure wave);受扰动后波阵面上介质的压力、密度均减小的波称为稀疏波(expansion wave)或膨胀波。压缩波和稀疏波的产生和传播过程可以形象地用活塞在气缸中的运动过程加以说明,如图 1-1 和图 1-2 所示。在图 1-1 和图 1-2 中, R 表示气缸内某一点距活塞的距离, P 表示气缸内气体的压力, t 表示活塞运动的时间。在瞬时 t_0 ,活塞处于初始位置 R_0 ,缸内压力均为 P_0 。

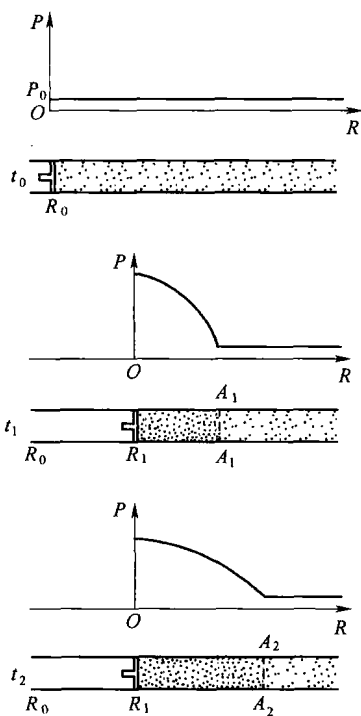


图 1-1 压缩波形成示意图

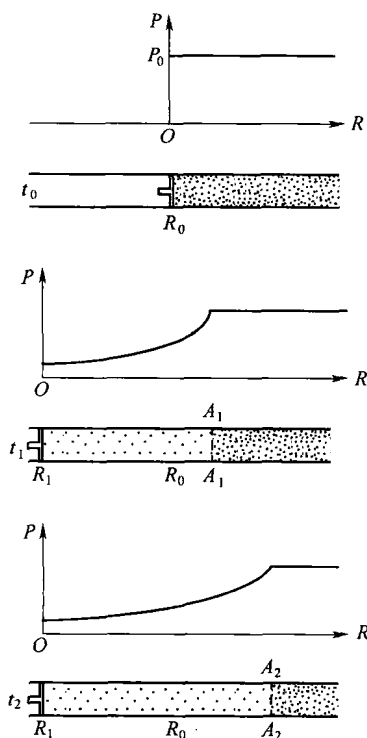


图 1-2 稀疏波形成示意图

现假设活塞向右加速运动,在瞬时 t_1 ,活塞移至 R_1 (图 1-1),活塞右边的气体被压缩,使区间 R_1-A_1 内的气体压力和密度都升高, A_1 点右边气体仍保持初始状态,因此,在该瞬时,波阵面在 A_1-A_1 处。假定活塞停在 R_1 处,则至瞬时 t_2 ,由于压力差的存在,造成气体继续由高压区向低压区运动,波阵面由 A_1-A_1 移至 A_2-A_2 。随着时间的推移,波阵面在气缸中逐层向右传播,就形成压缩波。

从压缩波的形成过程可以看到:在压缩波中,波阵面到达之处,介质的压力和密度等参数均增加,介质运动的方向与波传播的方向是一致的。需要注意的是,这二者既有联系又有区

别。这里介质的移动是指物质的分子或质点发生位移,而波的传播则是指上一层介质状态的改变引起下一层介质状态的改变。可见,波的传播总要超前于介质的位移。换句话说,波的传播速度总是大于介质的位移速度。

如果在瞬时 t_0 , 活塞处于 R_0 , 缸内压力为 P_0 (图 1-2), 活塞不是向右移动, 而是向左移动, 则缸内气体发生膨胀。在瞬时 t_1 , 活塞从 R_0 左移至 R_1 , 原来在 R_0 附近的气体移动到 R_0-R_1 区间, 使邻近 R_0 右边气体的压力和密度都下降, 该瞬间的波阵面在 A_1-A_1 。假定活塞停在 R_1 处, 则至瞬时 t_2 , 由于气缸内存在压力差, 所以 A_1-A_1 右边的高压气体要继续向 R_1 方向移动, 使邻近 A_1-A_1 面气体的压力和密度下降, 波阵面由 A_1-A_1 移至 A_2-A_2 。这种压力和密度持续衰减的传播就形成了稀疏波。

从稀疏波的形成过程也能看到: 稀疏波是由于介质的压力和密度的下降而引起的, 波阵面所到之处, 介质的压力和密度等参数是下降的。稀疏波的传播方向与波阵面的传播方向相同, 与介质的运动方向相反。需要注意的是: 通常压缩波和稀疏波是伴生的, 即压缩波的后面一般都跟随有稀疏波, 而稀疏波产生的同时也会伴有压缩波的产生。

三、冲击波的形成

冲击波(shock wave)是一种在介质中以超声速传播的并具有压力突然跃升然后慢慢下降特征的高强度压力波。

飞机和弹丸在空气中的超音速飞行, 炸药爆炸产物在空气中的膨胀, 都是产生冲击波的典型例子。下面仍借助活塞在气缸中的运动来说明冲击波的形成原理, 在图 1-3 中把冲击波的形成过程分解成若干阶段。

t_0 瞬时: 假设活塞静止于 R_0 处, 缸内气体未受扰动, 压力均为 P_0 。

t_1 瞬时: 活塞从 R_0 加速运动至 R_1 , 占据了 R_0-R_1 区间, 原来该区间的空气被压缩到 R_1-A_1 区间而形成一压缩波, 波阵面在 A_1-A_1 , 波速等于原来未被扰动时空气的音速 c_0 。

假定活塞从 R_1 处起向右保持匀速运动。

t_2 瞬时: 活塞运动速度不变并到达 R_2 , 使活塞前端的气体继续受到压缩, 原来 R_1-R_2 区间的空气被压缩

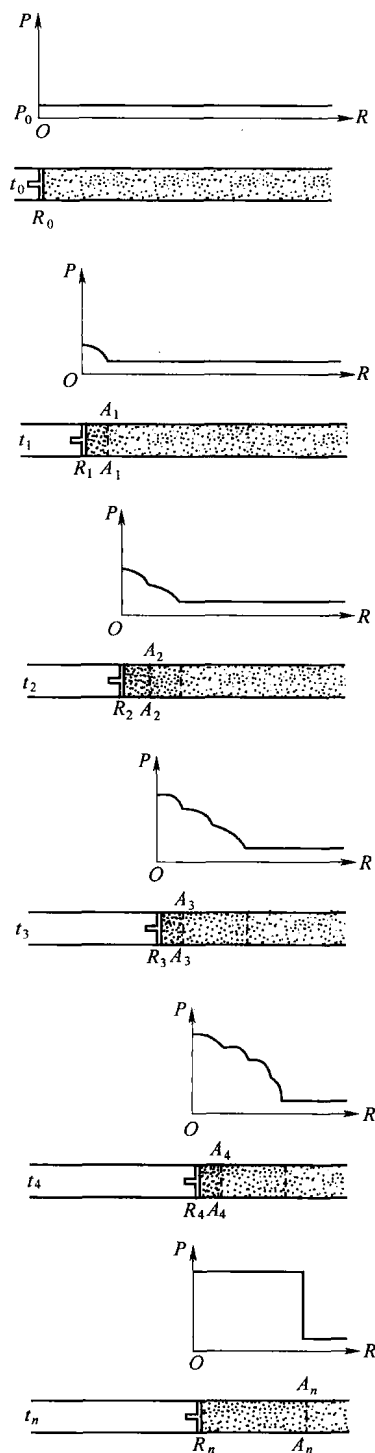


图 1-3 冲击波形成原理示意图
R—活塞与气体的界面; A—各个瞬时的波阵面; P—管中空气压力