

高等学校教学用书

钻眼爆破简明教程

王树仁 程玉生 编



中国矿业大学出版社



前 言

本书为煤炭高等院校矿井建设专业《钻眼爆破》课程教材。讲授课时适用于50~80学时（包括实验课在内）。

本书根据教学大纲的要求，针对本专业的特点，以“三基”内容为主，力求简明扼要，突出重点，使学生能掌握钻眼爆破的基本理论和工程技术。对于某些理论部分，着重讲清概念，说明物理实质，对涉及到的基础理论公式，不再做详细推导，以削枝强干掌握主要内容。对于一些尚不成熟的理论，书中不做过多介绍。必要时，教师可指导学生阅读有关参考文献。

为适应教学中具体情况的变化和本学科新理论、新技术不断发展的情况，在教学过程中可以选取和增添部分新内容。但为保证教学大纲的执行和“三基”要求，建议新增内容以不超过30%为宜。

本书第一章至第四章由程玉生编写，第五章至第八章由王树仁编写，最后由王树仁统编。编写过程中曾参考王文龙，张萌，陶颀霖等同志和其他院校编写的教材和讲义。由于编者水平所限，书中缺点，错误之处，敬希读者批评指正。

编者

1988年12月

目 录

前言

第一篇 炸药理论基础及爆破材料..... (1)

第一章 炸药的爆炸性能及其参数..... (1)

第一节 炸药及爆炸..... (1)

第二节 炸药的爆炸反应及热化学参数..... (4)

第三节 炸药的爆轰及爆轰波参数..... (12)

第四节 炸药的爆炸作用..... (23)

第五节 炸药的起爆与感度..... (28)

第二章 矿用炸药..... (35)

第一节 铵梯炸药..... (35)

第二节 铵油炸药与铵沥蜡炸药..... (39)

第三节 煤矿许用炸药..... (42)

第四节 含水塑性炸药..... (41)

第五节 硝化甘油炸药..... (47)

第三章 起爆器材和起爆技术..... (49)

第一节 雷管..... (49)

第二节 电雷管的性能参数..... (53)

第三节 电力起爆方法..... (56)

第四节 其他起爆方法..... (64)

第二篇 爆破理论与技术..... (68)

第四章 岩石爆破作用原理..... (68)

第一节 岩石的动态特性和可爆性..... (69)

第二节 岩体中爆炸应力波..... (76)

第三节 岩石爆破破碎机理..... (80)

第四节 爆破漏斗..... (84)

第五节 岩石爆破理论..... (89)

第五章 井巷掘进爆破施工技术..... (97)

第一节 爆破参数和爆破图表..... (97)

第二节 光面爆破..... (108)

第三节 微差爆破..... (112)

第六章 矿山深孔爆破技术..... (114)

第一节 露天台阶爆破..... (114)

第二节	天井深孔爆破.....	(118)
第三节	深孔崩矿爆破.....	(120)
第三篇	钻眼工程.....	(122)
第七章	钻眼方法和钻眼机具.....	(122)
第一节	钻眼方法.....	(122)
第二节	冲击式凿岩机和钻具.....	(124)
第三节	旋转式电钻和钻具.....	(145)
第四节	潜孔式凿岩机和钻具.....	(151)
第八章	钻眼理论.....	(155)
第一节	岩石的可钻性.....	(155)
第二节	冲击凿岩理论.....	(162)
第三节	旋转切削钻眼理论.....	(171)

第一篇 炸药理论基础 及爆破材料

炸药是一种相对安定的爆炸物质。炸药的爆炸是一个瞬时完成的、高速的化学反应过程，在极短的时间内完成爆炸反应，释放出巨大能量，对周围介质产生强烈冲击而做功。研究炸药的这一爆炸过程和爆轰理论，掌握其爆炸性能和爆炸作用，对于合理使用炸药、提高炸药能量利用和研制新品种炸药有着重要意义。

本篇主要介绍有关炸药的基本理论：炸药的起爆，爆轰过程；炸药的爆炸性能和爆炸作用；现代工业炸药和起爆材料的性能等，以期合理和有效地运用炸药能量，为从事工程爆破奠定基础。

第一章 炸药的爆炸性能及其参数

第一节 炸药及爆炸

一、爆炸

爆炸是物质的一种急剧的物理或化学变化。在变化过程中，伴有物质能量的快速转变，并对周围介质做功。

由物理变化引起的爆炸称为物理爆炸。爆炸过程中，爆炸物质仅有温度、压力、体积的变化，譬如闪电、锅炉爆炸等。

由化学变化引起的爆炸称为化学爆炸。爆炸过程中，爆炸物质发生迅速化学反应，产生新的爆炸产物。例如炸药爆炸、瓦斯爆炸等。

有时也将原子的聚变、裂变单独称为原子爆炸。

爆破工程中主要研究炸药的化学变化。

二、化学爆炸的特点

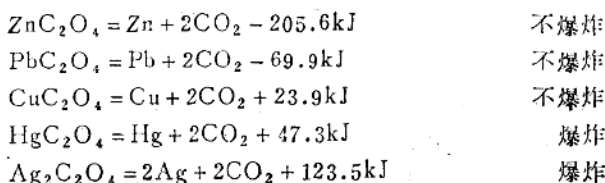
炸药是化学性爆炸物质，但并非所有化学反应的物质都有爆炸性能，化学性爆炸物质必须具备以下三个基本条件：

1. 反应的放热性

化学反应必须放出足够的热量,这是化学性爆炸的首要条件。所有炸药无一例外。

炸药爆炸时,要进行能量转变,首先转变成热能,再由热能转化为机械能对外做功。如果化学反应不放热,或者放热量很小,就不可能提供做功的能量。再者,炸药爆炸时,首先要提供能量,使炸药分子活化,产生急剧化学反应,化学反应释放热量,通过能量转换再激发下一层炸药产生化学反应。因此已爆炸炸药释放的热量是激发未爆炸炸药的能源,否则炸药爆炸过程将不能自行传播下去。

例如:

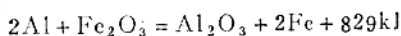


一般炸药在爆炸反应时放出的热量足以使反应生成物加热到 $2000\sim 3000^\circ\text{C}$ 以上。

2. 生成大量气体

炸药爆炸反应时,生成大量气体,在高温作用下气体迅速膨胀,对外界做功,因此气体是化学性爆炸时对外界做功的介质。物质在化学反应时不能生成大量气体亦不能产生爆炸。

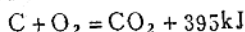
如铝热剂的化学反应,虽能放出大量热量,足以将反应产物加热到 3000°C ,但没有气体产物,不爆炸。



一般炸药在爆炸反应时,可以产生 1000L/kg 左右的气体产物。

3. 反应的快速性

化学反应的快速性,这是爆炸反应区别于普通化学反应的重要标志。



就化学反应的热效应来讲,炸药的放热量没有燃料的放热量大,每公斤无烟煤与空气混合物燃烧反应的放热量为 $9.2 \times 10^3\text{kJ}$,而每公斤梯恩梯爆炸反应的放热量为 $4 \times 10^3\text{kJ}$ 。但是煤的燃烧速度很慢,梯恩梯的爆炸反应时间大约是十万分之一秒。

因此,反应的迅速性也是爆炸反应的重要条件之一。

由于反应速度快,爆炸反应时对周围介质做功的功率就很大。例如 1kg 梯恩梯爆炸时放热 $4 \times 10^3\text{kJ}$,假设爆炸反应产物做绝热膨胀,反应时间为 10^{-5}s ,则功率为四万万 kW 。

$$A = 950 \times 10^3 \times 4.18 = 4 \times 10^6\text{J}$$

$$N = \frac{A}{t} = \frac{4 \times 10^6}{10^{-5}} = 4 \times 10^{11}\text{W}$$

当化学反应具备上述三个条件时,反应产物就能处于高温、高压、高速的状态,对周围介质有巨大的做功能力和破坏作用。

反应的放热性、产生大量气体和反应的快速性常被称为炸药爆炸三要素。

三、炸药化学反应的不同形式

“能产生化学性爆炸的物质叫做炸药”,这是炸药的定义。但爆炸并不是炸药唯一的

化学变化形式。由于环境和引起化学变化的条件不同，一种炸药可能有三种不同形式的化学变化。

1. 缓慢分解

炸药的缓慢分解一般在常温下进行，反应速度很慢，分解反应在全部炸药中同时进行，没有一定的反应区。这种分解反应的生成物往往不是爆炸反应的最终生成物。反应过程中，不产生火、光和声响，不易察觉，对外界没有破坏作用。

分解反应的速度受温度、浓度、压力等环境因素影响。随着温度升高，反应速度加快。当炸药的分解反应为放热反应，放热量稍大时，又不能及时散热，反应会自动加速，最终会引起炸药的燃烧和爆炸。

炸药的分解反应反映出炸药的化学安定性，对炸药的长期储存、加工安全都有一定的意义。

2. 炸药的燃烧

炸药的燃烧是一种激烈的氧化反应。是在一定温度以上进行的化学反应，反应速度较快，燃烧是在炸药的局部进行，并向炸药内部未燃烧部分扩展，存在有集中的燃烧反应区，燃烧的传播速度一般为 $10^{-3} \sim 10^2 \text{ m/s}$ ；炸药燃烧时有火、光产生，没有显著声响，对外界不产生强烈的破坏作用。

炸药的燃烧速度受外界环境的影响，特别是压力和温度影响较大，此外也受炸药的结构、密度、外壳等因素的影响。

2. 炸药的爆炸

炸药的爆炸过程与燃烧过程相类似。化学反应区也只是在局部区域内进行并在炸药内传播。爆炸与燃烧的区别在于：燃烧靠热传导来传递能量和激起化学反应，而爆炸则是靠瞬间产生的压缩冲击波的作用来传递能量和激起化学反应；燃烧受环境条件影响较大，而爆炸基本上不受环境条件影响；爆炸反应比燃烧反应更为激烈；燃烧产物的运动方向与反应区传播方向相反，而爆炸产物的运动方向则与反应区传播方向相同，从而爆炸可产生很高压力。

反应区在炸药中的传播速度称为爆炸速度，通常将达到最大稳定爆炸速度的反应称为爆轰，对不稳定的称为爆炸。爆轰速度可达每秒数千米。

炸药的上述三种化学变化形式，在一定条件下能够相互转化，缓慢分解可发展为燃烧、爆炸，反之，爆炸亦可转化为燃烧、缓慢分解。

四、炸药的分类

炸药的分类根据各专业学科的研究重点不同，有着不同的分类方法。一般有两种分类方法，是比较统一的。

1. 按炸药的用途分类

这是指按炸药在爆炸中所起的作用不同而分类。常分成以下三种：

(1) 起爆药

这种炸药的特点是十分敏感，受到很小的外界作用就能发生爆炸反应。但炸药的威力往往不大，用来制做起爆器材，如雷管、信管等。

常用的起爆药有：叠氮化铅 $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ 、雷汞 $\text{Hg}(\text{ONC})_2$ 、斯蒂酚酸铅 $\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2\text{Pb}$ 、特屈拉辛 $\text{C}_2\text{H}_4\text{ON}_4$ 、和二硝基重氮酚 $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_2\text{ONO}_2$ 等。

(2) 猛炸药

这类炸药爆炸时,对周围介质有强烈的破坏作用,是制造工业和军事爆破器材的主要成分。一般的猛炸药不十分敏感,常需要较强的外界作用才能爆炸。

常用的猛炸药有梯恩梯 $C_6H_2(NO_2)_3CH_3$ 、特屈儿 $C_6H_2(NO_2)_4NCH_3$ 、黑索金 $[CH_2N-NO_2]_3$ 、奥克托金 $[CH_2N-NO_2]_4$ 、泰安 $C_5H_8(ONO_2)_4$ 等。

(3) 火药(发射药)

一般情况下,火药能产生快速燃烧反应。军事上用做发射药,工业上做导火索和延期雷管中的延期药。

人们熟悉的火药有黑火药和无烟火药等。

有时烟火剂也单独算一种,用来制造照明剂、燃烧剂、烟幕剂等。

2. 按组分分类

炸药按组分可分成单体炸药和混合炸药两类。

单体炸药是一种单一的爆炸化合物,在一定的外界作用下,发生迅速的爆炸反应。

单体炸药按化合物的分子结构和爆炸基团的不同,又可分为硝基化合物类炸药、硝酸酯类炸药、硝酸盐类炸药、氯酸盐和过氯酸盐类炸药等。

混合炸药是根据使用的要求不同,由两种或两种以上的单体炸药及非爆炸性的各种成分组合而成,用以调整炸药的爆炸性能。混合炸药的品种繁多,采矿工程中使用的主要有硝酸铵类炸药、硝化甘油类炸药、氯酸盐类炸药等。

除此之外,炸药的分类还由于工业用途、安全性能、物理形态、商业品名的区别使得分类名称繁多,往往各不相同。

第二节 炸药的爆炸反应及热化学参数

一、氧平衡

大量使用的炸药,主要由C、H、O、N四种元素组成。有些炸药含有Al、S、Fe以及某些金属元素。

炸药爆炸是一种氧化反应,它与其他化学氧化反应不同点是氧化剂由炸药本身提供。在炸药组成的四种元素中,C、H是可燃剂,O是氧化剂。爆炸反应的生成物可以有 CO_2 、 H_2O 、 N_2 、 O_2 、 H_2 、C、NO、 NO_2 、 CH_4 、 C_2N_2 、 NH_3 、HCN等多种成分。但是爆炸反应究竟生成什么产物(成分、数量),除受爆炸反应时压力、温度的影响外,还与炸药中氧化剂和可燃剂的含量有关。若炸药中含氧量充分,可燃剂充分氧化,生成 H_2O 和 CO_2 ,氮和多余的氧游离,反应将放出最大热量。若炸药中含氧量不足,则可燃元素不能充分氧化,除生成 H_2O 、 CO_2 以外,还将产生CO、 H_2 等氧化不完全产物。因此,炸药中氧化剂与可燃剂的含量,直接影响到爆炸反应的生成物,也与爆炸反应时释放的热量大小有关,为了反映这方面的特征,一般用氧平衡来反应炸药中氧化剂的含量。

(一) 炸药的氧平衡

1. 炸药的氧平衡

氧平衡是炸药中含氧量与可燃元素充分氧化所需氧量之比例关系。

2. 炸药的氧平衡值

每克炸药中, 保证可燃元素充分氧化时, 多余或缺的氧量, 单位为g/g。

3. 炸药的氧平衡率

以重量百分比表示的氧平衡值。

(二) 单体炸药的氧平衡值计算

若将炸药的分子式改写为 $C_aH_bO_cN_d$, 式中a、b、c、d分别为炸药分子式中C、H、O、N元素的原子数目。则炸药的氧平衡值K为:

$$K = \frac{16 \left[c - \left(2a + \frac{b}{2} \right) \right]}{M}, \text{ g/g} \quad (1-1)$$

式中 M——炸药的摩尔质量

(三) 混合炸药的氧平衡计算

混合炸药也可将多种成分的分子式改写为一个通式 $C_aH_bO_cN_d$, 然后按式 (1-1) 计算氧平衡值。

为简便起见, 多按混合炸药中各组分的重量百分比来求。

$$K = m_1 K_1 + m_2 K_2 + \dots + m_n K_n \quad (1-2)$$

式中 $m_1, m_2, \dots, m_n$ ——混合炸药各成分重量百分比;

$K_1, K_2, \dots, K_n$ ——混合炸药各成分的氧平衡值。

(四) 炸药的氧平衡分类

炸药依氧平衡可分为正氧平衡炸药、零氧平衡炸药和负氧平衡炸药。

负氧平衡炸药的爆炸产物中含有CO、H₂等气体, 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; 且CO有毒, 很少在井下采用。

正氧平衡炸药的爆炸产物中会出现NO、NO₂等气体。虽然可燃元素能得到充分氧化, 放出最大热量; 但是生成氮的氧化物是吸热反应, 会降低爆炸反应的放热量。氮的氧化物有强烈的毒性, 并能促使煤矿瓦斯和煤尘的燃烧、爆炸, 不宜于井下使用。

零氧平衡炸药, 由于没有多余的氧, 也不缺乏氧, 可燃元素能充分氧化, 放出最大热量, 也不产生毒气。

一般工业混合炸药都设计成零氧平衡炸药。部分炸药及其成分的氧平衡值列于表1-1。

二、炸药的爆炸反应方程

爆炸反应方程反映了炸药爆炸后产物的成分及数量, 同时也是进一步确定爆炸释放能量、计算炸药爆炸的热化学参数和爆轰参数的依据。爆炸反应方程不仅对炸药爆炸性能的研究有理论上的意义, 并对了解炸药爆炸后有毒气体及含量、在井下对人体的危害、对环境的危害及安全性能有一定意义。

炸药爆炸有以下特点:

1. 反应时间极短;
2. 炸药爆炸往往存在中间反应和产物的二次反应;
3. 炸药爆炸反应及产物受多种因素的影响。如炸药成分、氧平衡、炸药粒度、密度、混合均匀情况、装药直径、装药外壳、含水量、起爆能量等多种因素都对爆炸产物及数量有影响。

由于炸药爆炸存在上述特点, 因而精确地建立炸药爆炸反应方程是十分复杂和困难的

表1-1

部分炸药及成分的氧平衡值

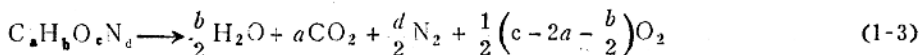
物 质 名 称	分 子 式	氧平衡(g/g炸药)
三硝基甲苯 (TNT) (梯恩梯)	$C_6H_2(NO_2)_3CH_3$	-0.74
环三次三硝胺 (RDX) (黑索金)	$(CH_2N-NO_2)_3$	-0.216
三硝酸丙三脂 (NG) (硝化甘油)	$C_3H_5(ONO_2)_3$	+0.033
二硝化乙二醇	$C_2H_4(ONO_2)_2$	0
四硝化戊四醇 (PETN) (泰安)	$C_5H_8(ONO_2)_4$	-0.101
甲胺硝酸盐	$CH_3NH_2HNO_3$	-0.340
二硝基重氮酚 (DDNP)	$C_6H_2(NO_2)_2NON$	-0.580
硝酸钾	KNO_3	+0.396
硝酸钠	$NaNO_3$	+0.470
硝酸铵	NH_4NO_3	+0.200
铝 粉	Al	-0.890
木 粉	$C_9H_{10}O_2$	-1.380
石 蜡	$C_{18}H_{38}$	-3.460
沥青	$C_{10}H_{12}O$	-2.760
轻柴油	$C_{16}H_{34}$	-3.420
矿物油	$C_{12}H_{26}$	-3.500
木 炭		-2.667
纸		-1.300
煤	含80%C	-2.559
硬脂酸钙	$C_{18}H_{36}O_4Ca$	-2.759
纤维素	$C_6H_{10}O_5$	-1.185
氯化钠	$NaCl$	0
氯化钾	KCl	0
十二烷基苯磺酸钠	$C_{18}H_{26}O_2SN_3$	-2.30
古尔胶	$C_{12}H_{16}O_{1.33}N_{0.04}$	-0.982
聚丙烯酰胺	$(CH_2CHCONH_2)_2$	-1.69
硬脂酸	$C_{18}H_{36}O_2$	-2.925
2号岩石炸药		+0.0334
2号煤矿炸药		+0.0132
松油炸药		-0.0016

问题。

确定炸药爆炸反应方程有理论确定法和经验确定法两种。前者是根据化学平衡和质量守恒原理进行计算,结果比较精确;后者是根据经验,以某种热效应或能量原则来确定产物成分,方法往往比较简便。不论是哪种方法,都是将炸药依氧平衡的不同分成三类,分别计算或求取。即正氧平衡和零氧平衡类炸药;能使产物完全气化的负氧平衡类炸药和不能使产物完全气化的负氧平衡类炸药。

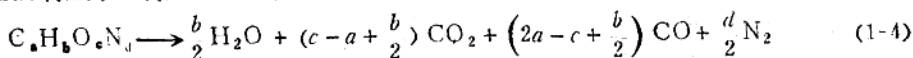
经验确定法目前多用吕-查德里方法和布伦克里-威尔逊方法。简介如下:

(一)对第Ⅰ类炸药,即零氧平衡和正氧平衡炸药,根据吕-查德里的最大放热量原则,产物组分为:氢完全氧化为水,碳氧化为二氧化碳,氮以分子 N_2 存在,剩余的氧也以分子 O_2 出现。这样,爆炸反应方程为:



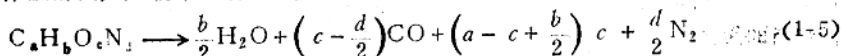
(二)对第Ⅱ类炸药,即负氧平衡炸药,并符合 $2a + \frac{b}{2} \geq c \geq a + \frac{b}{2}$ 条件,含氧量虽不足以使所有可燃元素完全氧化,但能使可燃元素完全气化,产物中不含游离的固体碳。

根据布伦克里-威尔逊方法是先将氢氧化为水,碳氧化为一氧化碳,剩余的氧再将一氧化碳氧化为二氧化碳。其方程式为:

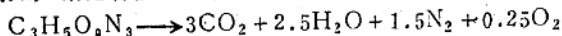


(三)对第Ⅲ类炸药,即负氧平衡炸药,符合 $a + \frac{b}{2} > c$ 。此类炸药缺氧量多,不能使产物完全气化,产物中有固体碳出现。

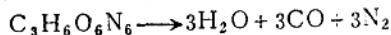
按布伦克里-威尔逊方法是先将氢氧化为水,剩余的氧使碳氧化为一氧化碳,剩余的碳以固体碳游离,产物中没有二氧化碳。反应方程式为:



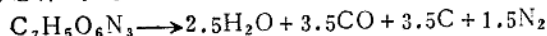
例如,硝化甘油 $C_3H_5(ONO_2)_3$ 的爆炸反应产物为:(第Ⅰ类炸药)



黑索金 $(CH_2N-NO_2)_3$ 的爆炸反应产物为(第Ⅱ类炸药):



梯恩梯 $C_7H_5(NO_2)_3CH_3$ 的爆炸反应产物为(第Ⅲ类炸药):



对于凝胶炸药,常含有其他元素,在确定爆炸产物组分时可按以下原则处理:

1. 水不参与反应,只由液态变汽态;
2. 钾、钠、钙、镁、铝等金属元素,在反应时将首先被完全氧化;
3. 硫被氧化为二氧化硫;
4. 氯首先与金属作用,再与氢生成氯化氢。

在考虑了上述原则之后,再依前述方法确定爆炸反应方程。

三、炸药的爆容

炸药爆炸产物的体积称为爆容。一般以每公斤炸药爆炸生成的气体产物在标准状态

下 (压力为101325Pa、温度为0℃) 的体积表示, 常用单位为L/kg。

爆容可根据炸药的爆炸反应方程式用阿佛加德罗定律求得。

若爆炸反应方程式是一个摩尔炸药的反应方程式 (单质炸药多用), 则爆容为

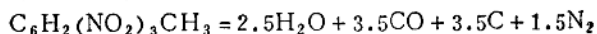
$$V_0 = \frac{22.4n}{M} \times 10^3 \quad (1-6)$$

式中 V_0 ——爆容, L/kg;

n ——每个摩尔炸药爆炸生成气体产物的摩尔数;

M ——炸药的摩尔质量, g/mol。

例: 梯恩梯炸药的爆炸反应方程式为:



爆容为:

$$V_0 = \frac{22.4 \times 7.5}{227} \times 10^3 = 740 \text{ L/kg}$$

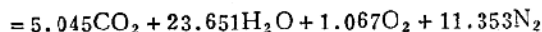
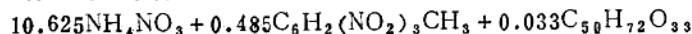
若炸药的爆炸反应方程式是按1kg炸药写的化学平衡方程式, (混合炸药多用此种) 则爆容为

$$V_0 = 22.4n \quad (1-7)$$

式中 V_0 ——爆容, L/kg;

n ——每公斤炸药爆炸生成气体产物的摩尔数。

例: 1kg二号岩石铵梯炸药的反应方程式为:



爆容为

$$V_0 = 22.4 \times 41.116 = 921 \text{ L/kg}$$

爆容是评价炸药做功能力的一个参数。部分炸药的爆容见表1-2。

四、炸药的爆热

1kg或者一个摩尔炸药爆炸时所放出的热量, 称为爆热。一般是指等容过程的热效应。

爆热是炸药爆炸对外界做功的能源, 是决定炸药爆炸性能的重要参数之一。

爆热可通过理论计算和实验测定求得。理论计算常用盖斯定律求取。

$$Q_{2-3} = Q_{1-3} - Q_{1-2} \quad (1-8)$$

式中 Q_{1-2} ——炸药的生成热;

Q_{1-3} ——爆炸产物的生成热;

Q_{2-3} ——炸药的爆热。

物质的生成热一般通过燃烧热求得, 因此多为等压条件下的热效应, 可通过下式换算为等容过程热效应: ($t = 25^\circ\text{C}$ 、 $p = 0.1\text{MPa}$ 时)

$$Q_v = Q_p + 2.48\Delta n \quad (1-9)$$

Q_v ——等容过程反应热效应, kJ/mol;

Q_p ——等压过程反应热效应, kJ/mol;

Δn ——反应产物中气体摩尔数与反应物中气体摩尔数之差 ($n_2 - n_1$)。

有的较复杂的物质的生成热可采用电子转移法或键能加和法进行估算。

表1-2

部分炸药的爆容值

炸 药 名 称	密度, g/Cm ³	爆容, L/kg
梯 恩 梯	1.5	740
黑 索 金	1.5	890
硝 化 甘 油	1.6	690
硝 酸 铵		980
铵梯炸药(80:20)	1.3	890
黑 火 药		280

表1-3

部分炸药和物质的生成热

物 质 名 称	摩尔质量	分 子 式	生成热(kJ/mol)	
			定 压	定 容
硝酸铵	80	NH ₄ NO ₃	366	355
硝酸钾	101	KNO ₃	494	490
硝酸钠	85	NaNO ₃	493	463
过氯酸钾	138.5	KClO ₄	438	431
氯酸钾	122.6	KClO ₃	390	398
硝化甘油	227	C ₃ H ₅ N ₃ O ₉	371	350
硝化乙二醇	152	C ₂ H ₄ N ₂ O ₆	248	233
乙二醇	62	C ₂ H ₄ (OH) ₂		445
黑索金	222	C ₆ H ₆ N ₆ O ₆	-65.5	-87.3
梯恩梯	227	C ₇ H ₅ N ₃ O ₆	74.1	56.5
硝化棉	1000	C _{22.5} H _{15.8} O _{16.1} N _{8.7}		2720
叠氮化铅	291	PbN ₆	-484	-448
雷 汞	284	Hg(CNO) ₂	-268	-273
斯蒂芬酸铅	468	C ₆ H ₅ N ₃ O ₉ Pb	855	
二硝基重氮酚	210	C ₆ H ₂ O ₅ N ₄	-116	-199
石 蜡	254	C ₁₈ H ₃₈	479	559
硬脂酸	284	C ₁₈ H ₃₆ O ₂		891
硬脂酸钙	607	C ₃₆ H ₇₀ O ₄ Ca	2772	2684
木 粉	986	C ₃₉ H ₇₀ O ₂₈		5694
轻柴油	224	C ₁₆ H ₃₂		662
纤维素		(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n		946
沥 青	394	C ₃₀ H ₁₈ O		595
水(液)	18	H ₂ O	286	283
三氧化二铝	102	Al ₂ O ₃	1671	1667
三氧化二铁	159.5	Fe ₂ O ₃	831	827
碳酸钠	106	Na ₂ CO ₃	1130	1126
氯化铵	53.5	NH ₄ Cl	314	306
氯化钾	58.5	NaCl	412	410
氯化钙	110	CaCl ₂		793
淀 粉		(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n		948
古尔胶				6900, kJ/kg
甲酸硝酸盐	94	CH ₃ N ₂ O ₃		340
矿物油	172	C ₁₂ H ₂₂		343

表1-4

炸药部分爆炸产物的生成热

物质名称	摩尔质量	分子式	生成热, kJ/mol	
			定压	定容
二氧化碳	44	CO ₂	396	396
一氧化碳	28	CO	113	114
水(汽)	18	H ₂ O	242	241
二氧化氮	46	NO ₂	-33	-17
一氧化氮	30	NO	-90	-90
一氧化二氮	44	N ₂ O	-82	-74
二氧化硫		SO ₂		297
氯化氢(气)	36.5	HCl	92	92
硫化氢		H ₂ S		20
甲烷	16	CH ₄	77	74
氨	17	NH ₃	46	44

表1-5

部分炸药爆热的实测值

炸药名称	密度, g/cm ³	爆热Q _o , KJ/kg
梯恩梯	1.5	4229
黑索金	1.5	5401
特屈尔	1.55	4564
泰安	1.65	5694
硝化甘油	1.6	6196
铵梯炸药(80:20)	1.3	4145
铵梯炸药(40:60)	1.55	4187
雷汞	1.25	1591

常用的炸药成分的生成热和爆炸产物生成热列于表1-3和表1-4。部分炸药爆热值列于表1-5。

炸药的爆热受以下因素影响：

(1) 炸药氧平衡值的影响：工业用混合炸药应尽量配成零氧平衡炸药，其爆热最高。

(2) 装药密度的影响：随着炸药密度增大，爆轰压力会增大，使爆炸瞬间的二次可逆反应向着减小体积和增大放热的方向进行，这对负氧平衡炸药影响较为明显。

(3) 附加物的影响：炸药中加入铝粉、镁粉等金属粉末，可生成金属氧化物和金属氯化物，这都是放热量大的反应，可增大爆热。炸药中加入硼或氟的化合物等高能物质，反应后生成氧化硼和氟化氢，能放出大量热，提高爆热。添加油类、石蜡等物质，有类似作用。加入水后，有一部分热量将消耗于水的蒸发。

(4) 装药外壳的影响：装药外壳可阻止爆炸产物的二次可逆反应体积扩散，使可逆反应向着利于减小体积和增大爆热的方向进行，同时也阻止爆炸时未反应物质的侧向飞散，防止热损失。

五、炸药的爆温

炸药爆炸时放出的热量将爆炸产物加热到的最高温度称为爆温。在爆炸反应时，爆炸产物的温度是不均匀的、变化的。

一般讲，炸药的爆温高，则膨胀做功的能力大。不同用途的炸药，对爆温有不同的要求，井下矿用炸药，为防止引燃瓦斯和煤尘，对爆温应有一定限制；而军事上的燃烧剂则要求爆温越高越好。

炸药爆温取决于炸药的爆热和爆炸产物的热容。在矿用安全炸药中，常用消焰剂降低爆温，如加氯化钠等物质。

爆炸过程极快，实测爆温较困难。目前采用测色温确定爆温。表1-6为几种炸药的爆温实测值。

表1-6 炸药的实测爆温

炸药名称	硝化甘油	黑紫金	泰安	特屈尔	梯恩梯
密度, g/cm ³	1.60	1.70	1.77	—	—
爆温, K	4000	3700	4200	3700	3010

若假设爆炸反应过程为定容、绝热过程，可根据爆热计算出爆温值。

六、炸药的爆压及炸药力

假定炸药爆炸反应为绝热、等容过程，则炸药爆炸产物的压力称为爆压。

爆压是炸药反应为同体积爆炸产物时的状态函数，因而可由气体状态方程求得。按理想气体状态方程有

$$pV = nRT \quad (1-10)$$

$$p = nRT \cdot \frac{1}{V} = f \cdot \rho \quad (1-11)$$

式中 p ——爆压；

V ——炸药的比容；

n ——爆炸产物中气体的摩尔数；

R ——摩尔气体常数；

T ——爆温；

ρ ——炸药密度；

f ——炸药力。

$$f = nRT \quad (1-12)$$

炸药力 f 又称为比能，经变换可有

$$f = \frac{p_0 V T}{273} \quad (1-13)$$

由式 (1-13) 可看出，炸药力可理解为一公斤炸药的爆炸气体产物在标准大气压力下，温度由零0[K]升到 T [K] 时膨胀所做的功。反映了炸药的膨胀做功能力。

由式 (1-11) 计算出的爆压偏低，因为炸药的爆炸产物处高温高压状态，理想气体的状态方程已不适用。对爆压计算，常用阿贝尔状态方程：

$$p(V - a) = f \quad (1-14)$$

式中 a ——气体分子的余容，L/kg。

$$p = \frac{f\rho}{1 - a\rho} \quad (1-15)$$

余容 α 由实验确定, α 与密度 ρ 有图1-1的关系。

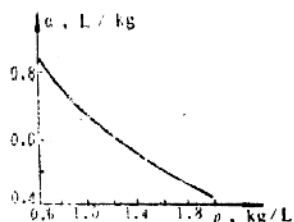


图1-1 余容 α 与炸药密度 ρ 的关系

弹压也可通过测压弹实验测定。

第三节 炸药的爆轰及爆轰波参数

爆轰是炸药爆炸的一种最充分的形式, 从19世纪末期以来, 对爆轰过程进行了深入的研究, 并建立了以流体动力学为基础的爆轰理论。爆轰理论阐明了爆轰传播的规律和实质, 正确地解释爆轰过程的特点, 如爆轰机理、稳定条件等, 导出了爆轰传播的基本理论公式, 计算出各种爆轰参数, 如爆速、爆轰压力等, 得到比较满意的结果。

流体动力学爆轰理论的基本观点是:

1. 炸药的爆轰是冲击波在炸药中传播而引起的;
2. 炸药在冲击波作用下的快速化学反应所释放出的能量又支持了冲击波的传播, 使其波速保持恒定而不衰减;
3. 爆轰参数是以流体动力学为基础计算的。

爆轰理论对炸药爆炸作用和炸药新品种的研究都有着重要作用。也是近代炸药理论和爆破理论的基础。

一、冲击波

冲击波是在介质中以密度、压力、质点运动速度突然升高的形式向前传播的一种压缩波。在波阵面前后形成不连续的突变, 尽管如此, 实际上在波阵面上仍然存在着连续变化的过渡区, 但这个过渡区是很小的, 其长度与分子自由程的距离差不多, 在空气中约为 10^{-6} cm。冲击波的传播速度很快, 一般达到每秒千米以上, 见图1-2。

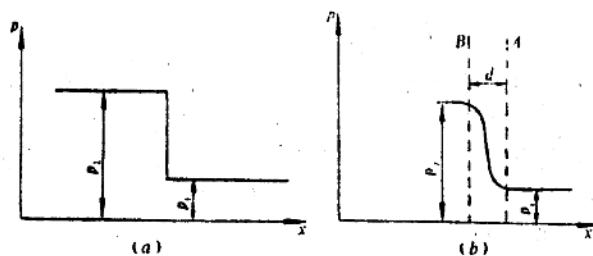


图1-2 冲击波的压力跳跃

a—理想冲击波; b—实际冲击波

冲击波的基本关系式可根据基本守恒定律导出。对于平面正冲击波可导出以下关系式。

假设冲击波波阵面前后介质状态是突变的，而且传播过程中与外界没有热交换，为绝热过程。冲击波波阵面前后的介质状态参数如图1-3所示。

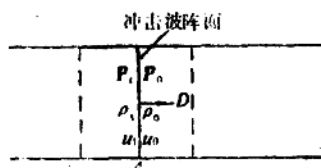


图1-3 冲击波的状态参数

其中 E_0 、 E_1 ——波阵面前后的介质的内能，

p_0 、 p_1 ——波阵面前后的介质压强，

ρ_0 、 ρ_1 ——波阵面前后的介质密度，

u_0 、 u_1 ——波阵面前后的质点运动速度，

D ——冲击波传播速度。

根据质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律和介质的状态方程，可以导出下列方程：

$$\rho_0(D - u_0) = \rho_1(D - u_1) \quad (1-16)$$

$$p_1 - p_0 = \rho_0(D - u_0)(u_1 - u_0) \quad (1-17)$$

$$p_0 u_1 - p_0 u_0 = \rho_0(D - u_0) \left[(E_1 - E_0) + \frac{1}{2}(u_1^2 - u_0^2) \right] \quad (1-18)$$

$$p_1 = p(\rho_1, E_1) \quad (1-19)$$

经变换有：

$$u_1 - u_0 = \sqrt{(p_1 - p_0)(V_0 - V_1)} \quad (1-20)$$

$$D - u_0 = V_0 \sqrt{\frac{p_1 - p_0}{V_0 - V_1}} \quad (1-21)$$

$$E_1 - E_0 = \frac{1}{2}(p_1 + p_0)(V_0 - V_1) \quad (1-22)$$

$$p_1 = p(V_1, E_1) \quad (1-23)$$

式中 V_0 、 V_1 ——冲击波波阵面前后介质的比容。

其中式(1-19)和式(1-23)是介质的状态方程，对于不同的介质应有不同的状态方程式。

以上参数中，介质的初始状态参数 E_0 、 p_0 、 ρ_0 、 u_0 是可以确定的，应为已知量。剩下五个冲击波波阵面前后的状态参数，只要通过实验测定一个参数，其他参数便可由以上四个方程式求出。

若是平面正冲击波在气体中传播，我们假定空气为理想气体，其状态方程 (1-19) 或 (1-23) 则为：

$$pV = RT \quad (1-24)$$

$$E = C_v T \quad (1-25)$$

$$C_p = C_v + R \quad (1-26)$$

$$K = \frac{C_p}{C_v} \quad (1-27)$$

引入