

高等学校教学用书

露天矿爆破工程

张萌 主编

中国矿业学院出版社

高等学校教学用书

露天矿爆破工程

张 萌 主编

中国矿业学院出版社

内 容 提 要

本书是根据教学计划要求,突出三基内容,结合国内外先进经验,贯彻少而精原则编写的。

本书共分六章,主要内容为:炸药理论、矿用炸药、爆破器材和起爆方法、爆破理论和量测技术。

本书在系统阐述炸药爆轰理论时,辅以少量的数学推导,加深物理概念,在介绍热化学参数时,考虑矿山实际,以混合炸药乳化炸药为重点,进行了全面叙述,本书还介绍了在冲击载荷作用下的岩体动载特性,邦德的岩石破碎学说、李文海顿爆破漏斗理论。同时吸取了近年来爆破技术新成果,增加了特种爆破(城市控制爆破)的内容。本书注意联系实际,在各节中都举以实例,作为从事该项工程的入门向导。

本书经煤炭部采矿工程教材编审委员会评议,同意作为煤炭高校露天开采专业的通用教材。本书也可供冶金、化工、建材、铁路、交通、水电、核工业等其它高校采矿类学生、科研设计单位以及从事爆破工程的工程技术人员参考。

责任编辑 吴秀文

高等学校教学用书

露天矿爆破工程

张 萌 主编

*

中国矿业学院出版社 出版

社 部:江苏省徐州市中国矿业学院内

编辑部:北京市学院路13号

中国矿业学院印刷厂 印刷

*

开本787×1092毫米 1/16 印张11.5

字数275千字 印数3000

1986年8月第1版 1986年8月第1次印刷

统一书号 15443·007 定价1.85元



前 言

本书作为煤炭高等院校露天开采专业《露天矿爆破工程》课程的通用教材编写的。

1982年由张霄卿、张萌、陈益蔚、张素莲共同编写《爆破工程》试用讲义，经过教学实践后，于1983年8月由煤炭部采矿工程教材编审委员会邀请了武汉建材学院刘清荣副教授、阜新矿院李德昌老师、阜新露天矿缪纯祖工程师、中国矿院杨荣新副教授、王文龙副教授等对该教材进行了评议，提出了修改意义，并将该课程名称改为《露天矿爆破工程》。

本书由张萌主编。其中第一至三章由张霄卿编写，第四、五章由张萌编写，第六章由张素莲编写。

在编写过程中，陈益蔚同志除提供大量资料外还提供了许多宝贵意见。此外，杨秀甫、周家麒、袁金相、杨永琦、艾衍祥、温瑞远等同志也提供了很多宝贵意见，在此一并表示由衷的感谢。

由于我们的业务水平不高，又缺乏编写经验，缺点和错误在所难免，欢迎批评指正。

编 者 一九八五年十二月

11200/09

目 录

第一章 炸药爆炸的理论基础	(1)
第一节 炸药爆炸的基本特征及炸药的分类	(1)
第二节 炸药的热化学	(3)
第三节 炸药的爆轰	(17)
第四节 炸药的起爆与感度	(42)
第二章 矿用炸药	(50)
第一节 常用的单体炸药	(50)
第二节 硝铵类炸药	(51)
第三节 含水炸药 (凝胶炸药)	(55)
第三章 起爆器材和起爆方法	(62)
第一节 起爆器材	(62)
第二节 电力起爆法	(70)
第三节 导爆索起爆法	(79)
第四节 导爆管非电导爆系统起爆法	(80)
第五节 导火索起爆法	(82)
第四章 爆破作用原理	(83)
第一节 爆炸应力波的基本知识	(83)
第二节 岩石的动载特性	(88)
第三节 爆破作用	(95)
第四节 爆破漏斗	(100)
第五节 岩石的坚固性和可爆性	(106)
第五章 爆破方法	(111)
第一节 浅孔爆破法	(111)
第二节 深孔爆破法	(114)
第三节 药室爆破法	(136)
第四节 特种爆破	(150)
第六章 工程爆破量测技术	(163)
第一节 高速摄影观测	(163)
第二节 爆破地震效应的量测	(170)

第一章 炸药爆炸的理论基础

炸药早已普遍用于战争和生产建设，但长期以来对其爆炸过程和在介质中的破坏作用一直了解很少，因而未能对其能量进行充分的利用和控制。自四十年代流体动力学爆轰理论兴起，五十年代创立了爆炸力学，以及近年来量测技术的发展，促使理论研究达到了一个新的水平，爆破规模和爆破技术也进入一个新的阶段。

本章主要介绍有关炸药爆炸的基本理论：炸药的起爆—爆轰—热化学过程；为学习以后各章和今后从事爆破工程奠定基础。

第一节 炸药爆炸的基本特征及炸药的分类

在日常生活中，爆炸现象是广泛存在的。例如锅炉爆炸，炸弹的爆炸，原子、核子爆炸等。爆炸是一种非常迅速的物理、化学变化过程。在这个过程中，系统的内能转变为机械能和其他形式的能，从而对周围介质做功。

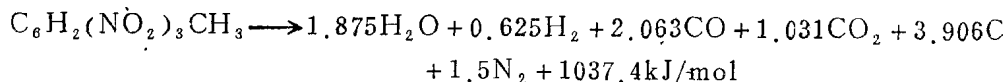
爆炸的一个最重要的特征是在爆炸点周围介质中发生急剧的压力突跃，而这种压力突跃是爆炸破坏作用的直接原因。

就爆炸过程的性质来看，爆炸现象大致可分为三类：

1. 物理性爆炸 爆炸时仅发生物态的急剧转化，并不伴随化学反应。蒸汽锅炉或高压氧气罐的爆炸即属此类。

2. 化学性爆炸 物态变化时能发生极迅速的放热化学反应，并生成高温高压产物的爆炸称为化学性爆炸。鞭炮及炸药的爆炸均属此类。

例如梯恩梯（三硝基甲苯）的爆炸反应：

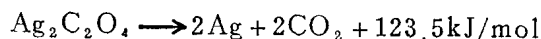
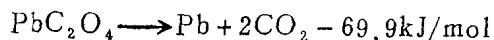


3. 核爆炸 是某些物质的原子核发生裂变或聚变引起的爆炸。核爆炸释放出巨大能量，造成高温、高压，并辐射出很强的各种射线。

在采矿工程中，应用最广的是化学性爆炸。在外界能量的激发下，能迅速引起化学反应，并且产生大量气体和热量的物质称为炸药。

炸药在爆炸过程中具有以下三个特征，即过程的放热性；过程的高速度并能自行传播；过程中生成大量气体产物。这是任何化学反应成为爆炸性反应必须同时具备的三个条件。因此，这三个条件又称为爆炸三要素。

反应过程的放热性，是产生化学性爆炸的首要条件。热是做功的能源，没有足够的热量放出，反应就不能自行延续，也就不可能出现爆炸过程的自动传播。例如，草酸盐的分解反应：



PbC_2O_4 的分解是吸热反应，不能发生爆炸；而 $\text{Ag}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 的反应能放出大量的热量，使反应得以迅速进行，这样的分解反应就具有爆炸的性质。

依靠反应时放出的热量，气体产物往往能被加热到数千摄氏度，压力可达数万兆帕。

爆炸反应过程所放出的热量称为爆热，它是炸药爆炸做功能力的标志。常用炸药的爆热约在2930~6280kJ/kg之间。

爆炸反应与一般化学反应的显著区别还在于反应过程的高速度。有一些化学反应所放出的热量比炸药爆炸时放出的热量大得多，但却未能形成爆炸，原因就在于它们的反应过程进行得缓慢。例如，煤块燃烧反应的放热量为8918kJ/kg，而1kg梯恩梯的爆炸热只有4228kJ/kg。但前者需数十分钟完成反应，而后者仅需 10^{-5} ~ 10^{-6} 秒就能反应完毕，因而使它能在瞬间释放出潜能，达到一般化学反应所无法达到的巨大功率和能量密度，从而对周围介质起强烈的破坏作用。

表1-1 某些炸药和可燃物的能量密度

炸 药、可 燃 物 名 称	能 量 密 度 kJ/L
硝 化 甘 油 (密 度 1.6 g/cm ³)	9964.6
梯 恩 梯 (密 度 1.6 g/cm ³)	6807.7
1号岩石炸药 (密 度 1 g/cm ³)	3964.9
碳 完 全 燃 烧	17.2

炸药爆炸时能够膨胀做功并对周围介质造成破坏，根本原因之一就在于炸药爆炸瞬间有大量气体产物生成。气体是爆炸做功的理想工质。由于气体具有很大的可压缩性及膨胀系数，因而能在爆炸瞬间形成巨大的压缩能，并在膨胀过程中将炸药的势能迅速转变为爆炸机械功。假如一个反应过程不能产生大量的气体，尽管有着强烈的放热反应，也不可能形成爆炸。例如铝热剂的反应：



其热效应很强烈，足以使产物加热到3000℃的高温，而且反应也极快，但由于没有气体产物生成而不具有爆炸性。

炸药就是具备上述三要素的物质，通常由碳、氢、氧、氮元素组成。它与燃烧不同，炸药自身含有可燃剂和氧化剂，在发生反应时不必由外界供给氧气而能独自进行反应。此外，炸药具有燃料所没有的高能量密度，因而是采矿工业中不可缺少的高效能源。

目前称为炸药的物质种类繁多，它们的组成、物理化学性质及爆炸性能各不相同。按其物理状态、组成、应用特性、使用条件可分类如下：

1. 按物理形态，炸药可区分为固体炸药、液体炸药、胶质炸药、浆状炸药。
2. 按炸药组成可分为单体炸药及混合炸药。

单体炸药具有单一成分的爆炸物质，多数是内部含氧的有机化合物。按其化学分子结构又可分为以下几种类型：硝基化合物——如梯恩梯、苦味酸等；硝酸酯类化合物——如硝化甘油、硝胺类——如黑索金、特屈儿等；其它还有氯酸盐、叠氮化物、雷酸盐等。

混合炸药是由两种或两种以上的爆炸组分或非爆炸组分组成的爆炸混合物。通常在组分中既有含氧丰富的，又有不含氧的物质，为了特殊的目的有时还加上某些附加物，以改善炸药的爆炸性能、安全性能、成型性能等。

3. 按炸药的应用特性，可以分为起爆药、猛炸药、火药（或发射药）等。

起爆药：在较弱的外界能量作用下能够发生爆炸，且爆轰成长期很短。它主要用于起

爆雷管和其它火工品内的猛炸药，因而在雷管中又称为起爆药，而把雷管中的猛炸药称为副起爆药。常用的起爆药有雷汞、叠氮化铅、二硝基重氮酚等。

猛炸药：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（通常用起爆药来激发其爆轰）。然而一旦起爆后，它们就具有更高的爆速和更大的威力（图1-1）。这类炸药包括直接用于爆破工程的单体炸药和工业混合炸药，如梯恩梯、黑索金、岩石硝铵炸药等。

发射药（火药）：在工业上主要用作点火药或延期药，如黑火药等。

4. 按使用条件可分为煤矿安全炸药、岩石炸药和露天炸药三大类。煤矿安全炸药可用于有煤尘、瓦斯爆炸危险的矿井；岩石炸药和露天炸药均为非安全炸药，前者适用于非瓦斯矿井的岩石爆破工程，后者仅适用于露天爆破工程。

一般工业炸药应具有良好的爆炸性能，适当的敏感度和安全性，以确保起爆方便可靠、爆破效果好、生产使用安全；同时其物理化学性能应较稳定，以保证在规定期限内爆炸性能的变化范围符合使用要求；还应具有原料来源广、成本低、制造工艺简单、生产操作安全等特点。

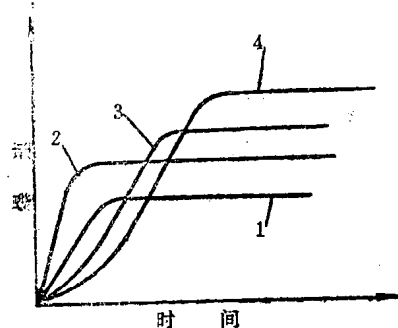


图1-1 起爆药、猛炸药爆炸速度增长曲线

1—雷汞；2—叠氮化铅；3—二硝基重氮酚；4—猛炸药

第二节 炸药的热化学

炸药爆炸做功能力的大小，取决于炸药爆炸时所放出的热量、生成气体产物的数量，以及这些热量能使气体产物达到的温度和压力。所有这些称为炸药的热化学参数，是衡量一种炸药做功能力的重要标志。这些热化学参数，可以由实验测出，也可以从理论上进行计算。

计算炸药热化学参数的基础是建立爆炸反应方程式，而爆炸反应方程式的建立又首先决定于氧平衡。

一、氧平衡

目前大量使用的炸药，从化学组成来看，主要由碳、氢、氧、氮四种元素组成，有些还含有氯、硫及某些金属元素如铝、镁等。其中碳、氢是可燃元素，氧是助燃元素，氮是载氧体。炸药爆炸的过程也就是可燃元素与助燃元素发生极其迅速和猛烈的氧化还原过程。爆炸生成物的成分受炸药中含氧量的影响很大。炸药中的碳、氢能否充分氧化，不仅直接影响炸药的能量是否充分发挥，而且关系到安全生产和矿工的健康。为使反应最有效地进行，就要恰当地供给氧，这一点，在设计混合炸药的配方时尤为重要。

理想的反应是在爆炸时放出最大的热量。根据这个原则，氢元素应氧化成水，碳元素应氧化成二氧化碳，氮游离出来；若还含有其它元素，则应氧化成相应的高级氧化物。但若炸药内含氧不足或含氧过多，就会生成 CO ， H_2 ， C ， NO 或 NO_2 等放热量较少或吸热性的产物。

氧平衡就是用来表示炸药内含氧量与氧化可燃元素所需氧量之间的关系的。通常用每

克炸药不足或多余的氧的克数来表示。对于通式为 $C_aH_bO_cN_d$ 的炸药，其氧平衡的计算式为：

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

有时也用氧平衡率来表示：

$$\text{氧平衡率} = \frac{\left[c - \left(2a + \frac{b}{2} \right) \right] \times 16}{M} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 16——氧的克原子量；

M ——炸药的摩尔质量。

由上式可以看出，随着炸药中氧的相对含量的改变，可能出现三种氧平衡情况：

1. 当 $c - \left(2a + \frac{b}{2} \right) > 0$ 时，即当炸药中的氧完全氧化可燃元素后尚有剩余时，称为正氧平衡；
2. 当 $c - \left(2a + \frac{b}{2} \right) = 0$ 时，即当炸药中的氧恰好能完全氧化可燃元素时，称为零氧平衡。
3. 当 $c - \left(2a + \frac{b}{2} \right) < 0$ 时，即当炸药中的氧不足以完全氧化可燃元素时，称为负氧平衡。

氧平衡的计算示例：

[例 1] 计算硝化甘油 $C_3H_5(ONO_2)_3$ 的氧平衡

$C_3H_5(ONO_2)_3$ 的分子量为 227

$a = 3, b = 5, c = 9, d = 3$

$$\therefore \text{硝化甘油的氧平衡值} = \frac{\left[9 - \left(2 \times 3 + \frac{5}{2} \right) \right] \times 16}{227} = +0.035 \text{ g/g}$$

或硝化甘油的氧平衡率 = +3.5%

对于混合炸药，在计算氧平衡时必须知道各组成成份的重量百分比和各组分的氧平衡。

[例 2] 计算 2 号岩石炸药的氧平衡。

已知炸药的组成和各组分的氧平衡如下表所示：

炸 药 成 分	组 成 重 量 百 分 比	各 成 分 的 氧 平 衡 g/g
硝 酸 铵	85	+0.20
梯 恩 梯	11	-0.74
木 粉	4	-1.37

炸药的氧平衡为：

$$\text{氧平衡} = \frac{85 \times 0.20 - 11 \times 0.74 - 4 \times 1.37}{100} = +0.0338 \text{ g/g 或 } +3.38\%$$

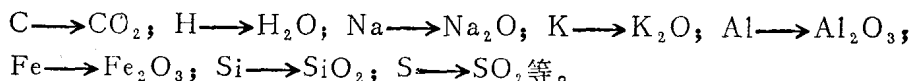
表 1-2 为某些炸药及常用物质的氧平衡。

表12

某些炸药及常用物质的氧平衡

名	称	分子式	氧平衡, g/g	名称	分子式	氧平衡, g/g
梯恩梯	梯	$C_6H_2(NO_2)_3CH_3$	-0.74	植物油	$C_{22}H_{36}O_7$	-2.214
黑索金	金	$C_3H_6O_6N_6$	-0.216	石蜡	$C_{24}H_{50}$	-3.456
奥托屈	屈	$C_4H_8O_8N_8$	-0.216	沥青	$C_{30}H_{18}O$	-0.276
特屈	安	$C_6H_2(NO_2)_4NCH_3$	-0.474	木粉	$C_{50}H_{72}O_{33}$	+1.37
泰	安	$C_3H_8(ONO_2)_4$	-0.101	木炭	C	-2.667
二硝化乙二	醇	$C_3H_4(ONO_2)_2$	0	淀粉	$(C_6H_{10}O_5)_n$	-1.93
硝化甘	油	$C_3H_5(ONO_2)_3$	+0.035	煤(含碳86%)		-2.559
苦味	酸	$C_6H_2OH(NO_2)_3$	-0.454	硫磺	S	-1.00
硝化纤维	素	$C_{24}H_{31}(ONO_2)_9O_{11}$	-0.385	铝粉	Al	-0.89
雷汞	汞	$Hg(ONC)_2$	-11.84	硅铁(Si=90%)		-1.07
二硝基重氮	酚	$C_6H_2(NO_2)_2N_2O$	-0.533	纸		-1.30
硝酸钾	钾	KNO_3	+0.396	纤维	$C_6H_{10}O_5$	-1.185
硝酸钠	钠	$NaNO_3$	+0.470	松香	$C_{20}H_{30}O_2$	-2.81
硝酸钙	钙	$Ca(NO_3)_2$	+0.488	硬脂	$C_{18}H_{36}O_2$	-2.925
硝酸铵	铵	NH_4NO_3	+0.20	硬脂酸	$C_{35}H_{70}OCa$	-2.75
抗水	铵		+0.185	亚硝酸	$NaNO_2$	+0.348
过氯酸	铵	NH_4ClO_4	+0.34	钾	$K_2Cr_2O_7$	+0.082
过氯酸	钾	$KClO_4$	+0.46	十二烷基苯磺酸钠	$C_{18}H_{20}O_3SNa$	-2.30
过氯酸	钾	$KClO_3$	+0.392	乙醇	$C_2H_4(OH)_2$	-1.29
硝酸	酸	HNO_3	+0.635	硝砂	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	0
尿素	素	$CO(NH_2)_2$	-0.80	白胶		-1.066
甲胺	酸	$CH_3NH_2HNO_3$	-0.34	槐豆	$[C_6H_7O_2(OH)_3]_n$	-1.185
矿物油	油	$C_{12}H_{26}$	-3.48	田菁	$C_{3.32}H_{5.9}O_{3.25}N_{0.084}$	-1.0144
轻柴油	油	$C_{16}H_{32}$	-3.43	聚丙烯酰胺	$(CH_2CHCONH_2)_2$	-1.69

在凝胶炸药中（浆状、水胶、乳化炸药），除了含有碳、氢、氧、氮等元素外，还含有铝、钠、钾、铁、硫等其它元素。后者虽然含量不多，但在计算时也还是需要考虑的；因而公式（1-1）、（1-2）已不能直接计算。根据氧平衡的意义，除了考虑将C氧化成 CO_2 ，H氧化成 H_2O 以外，对一些金属元素应考虑生成金属的氧化物，而S则作为可燃剂生成 SO_2 。这样，胶凝炸药各种元素的氧化最终产物大致如下：



凝胶炸药是一个混合体系，可以以一定量为基础，写出 $\text{C}_x\text{H}_y\text{O}_z\text{N}_d\text{M}_n\cdots$ 的通式来计算氧平衡，但这样计算较为复杂。若采用各组分的百分率与其氧平衡的乘积的总和来计算，则较为简便。即：

$$\text{炸药的氧平衡} = m_1 M_1 + m_2 M_2 + m_3 M_3 + \cdots m_n M_n \quad (1-3)$$

式中 $m_1, m_2, \cdots, m_n$ ——凝胶炸药各组分的氧平衡；

$M_1, M_2, \cdots, M_n$ ——凝胶炸药各组分的百分比含量。

与前述三种氧平衡相对应，所有炸药都可以分为以下三类：

1. 正氧平衡炸药。这类炸药由于含氧量过多，将会使炸药爆炸时所放出的氧元素氧化成 NO 、 NO_2 等氮的氧化物，它们在生成的过程中吸收大量的热（一克分子 NO 吸热 90.4kJ ），不利于发挥炸药的威力。氮的氧化物不仅是有毒气体，而且能对瓦斯爆炸反应起催化作用。因此，含氧量过多的炸药，不能用于有瓦斯及煤尘爆炸危险的矿井。

2. 负氧平衡炸药。这类炸药由于含氧量不足，可燃元素未被充分氧化，因而会产生 CO 和 H_2 等气体，甚至还会形成固体产物C，其中 CO 也是有毒气体。这类炸药同样不利于发挥炸药的威力。但负氧平衡炸药生成双原子气体的数量较多，能提高热能转变为机械功的效率，在一定程度上可弥补热量的损失。

3. 零氧平衡炸药。这类炸药由于其含氧量恰好等于可燃元素充分氧化时所需的氧量，因而爆炸反应时产生的热量最大，威力最高，所作的机械功也大，而且不会产生有毒气体。因此在配制新品种混合炸药时应使炸药达到零氧平衡或接近零氧平衡。

综上所述，炸药的氧平衡是确定炸药配方的重要依据。由于混合炸药的氧平衡不仅与炸药各组成成分的氧平衡有关，而且还决定于各成分的重量百分比。因此，混合炸药的氧平衡可以通过改变炸药成分或各种成分在炸药中的比例来调整，而确定这个比例的基本原则就是使总的氧平衡接近于零。

例如，计算铵油炸药零氧平衡的配方，已知氧化剂硝酸铵的氧平衡值为 $+0.20\text{g/g}$ ，可燃剂柴油的氧平衡值为 -3.42g/g ，若令硝酸铵和柴油的百分组成分别为 x 和 y ，则根据成分与零氧平衡的关系可建立下列方程组进行求解，即：

$$\begin{cases} x + y = 100 \\ (+0.20)x + (-3.42)y = 0 \end{cases}$$

$$\therefore \text{硝酸铵} \quad x = \frac{-3.42}{-0.20 - 3.42} \times 100 = 94.5$$

$$\text{柴油} \quad y = \frac{0.20}{0.20 - (-3.42)} \times 100 = 5.5$$

二、爆炸反应方程式

研究炸药爆炸的分解反应以确定炸药爆轰产物的组成——即炸药的爆炸反应方程式，才能对炸药的爆容、爆热、爆温等进行具体的计算，从而对炸药爆炸的做功能力进行评定。爆炸反应式既可以在实验室内通过对反应产物进行化学分析而建立；又可以通过理论计算来确定。但无论用那种方法建立的爆炸反应式，都难与炸药爆炸的实际情况完全相符，这是因为：

1. 目前常用的炸药在爆炸瞬间所形成的典型产物为 CO_2 , H_2O , CO , H_2 , N_2 , O_2 , NO , C , 以及少量的 CH_4 , C_2N_2 , HCN , NH_3 气体。在爆炸瞬间的高温高压下，这些产物之间可能发生一系列的二次反应。爆炸时，随着压力和温度的增大，会影响二次可逆反应化学平衡的移动，从而改变爆炸产物的组成。

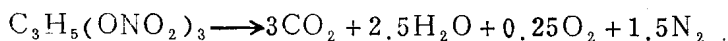
2. 爆炸反应的过程与结果，还与起爆方法、炸药本身的装填状态、初始温度及周围介质的性质有关，而这些条件往往差别很大。

3. 在实验室对产物的取样分析，只能在冷却后进行，因而测出的结果显然不同于爆炸瞬间产物的组成，且最终产物的成分与冷却速度有关。

由此可见，爆轰产物的组成或爆炸反应式的精确建立是一个复杂的、反复的运算过程。但在一般爆破工程中，毋须对爆轰产物的组成进行精确的计算。因此，近似的爆炸反应式可应用布伦克里和威尔逊提出的简化规则（简称B-W规则）进行确定。

1. 对于正氧平衡和零氧平衡的炸药 $\left[\left(c > 2a + \frac{b}{2} \right) \right]$ 由于含氧量较丰富，近似的爆炸反应式按最大放热原则来确定，即其中的碳全部被氧化成 CO_2 ，氢全部被氧化成 H_2O ，其它元素氧化成放热量最大的高级氧化物，氮和多余的氧游离。

[例1] 硝化甘油的爆炸反应式为：



单体炸药的爆炸反应式一般按1克分子炸药来写，而混合炸药的爆炸反应式一般按100g或1kg炸药来建立。

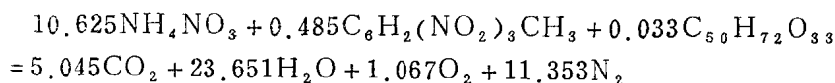
[例2] 写出2号岩石炸药的爆炸反应式

已知2号岩石炸药的重量组成为：硝酸铵85%，梯恩梯11%，木粉4%。因此1kg炸药含 NH_4NO_3 850g，相应的mol数为 $850/80 = 10.625$

1kg炸药含 $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$ 110g，相应的mol数为 $110/227 = 0.485$

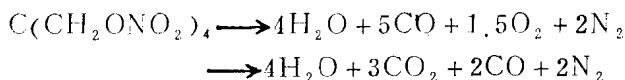
1kg炸药含 $\text{C}_{50}\text{H}_{72}\text{O}_{33}$ 40g，相应的mol数为 $40/1200 = 0.033$

∴ 1kg炸药的爆炸反应式为：



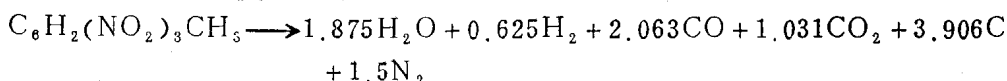
2. 对于负氧平衡炸药中含氧量足以使产物完全气化的炸药 $\left[\text{即} \left(2a + \frac{b}{2} \right) > c \geq \left(a + \frac{b}{2} \right) \right]$ ，近似的爆炸反应式可按以下原则确定：炸药中的氢首先被氧化成水，碳全部被氧化成一氧化碳，多余的氧再使一氧化碳氧化成二氧化碳。

例如泰安 $\text{C}(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_4$ 的爆炸反应式可写成：



3. 对于严重缺氧即含氧量不足以使产物全部气化, 而可能出现游离的固体碳的炸药 [即 $c < (a + \frac{b}{2})$] 可按如下原则写出近似的爆炸反应式: $\frac{3}{4}$ 的氢被氧化成 H_2O , 剩余的氧平均用于生成 CO 和 CO_2 。

例如梯恩梯的爆炸反应式为:



混合炸药一般都是按照保证释放最大的能量而配制的, 它一般接近于零氧平衡, 因而严重缺氧的情况不大可能出现。

至于在凝胶炸药中含有的水份, 原则上不参与反应, 在爆炸过程中只由液态转为气态。因此, 在确定爆炸反应方程式时, 可将水作为组分之一来计算, 而在确定产物组成时, 所含的水是以气态水的形式与由氢和氧化合所生的水相加在一起。

对含有钾、钠、钙等金属化合物的凝胶炸药, 一般先将金属完全金属氧化为氧化金属物, 剩下的碳、氢、氧、氮组分再按B-W规则处理。

炸药中若含有氯, 则首先考虑生成金属的氯化物, 剩余的氯生成氯化氢, 然后是金属的氧化物, 最后再按B-W规则处理氢和碳的反应物。

含硫或铝的凝胶炸药, 一般将硫作为可燃剂处理, 完全氧化为 SO_2 , 而铝则氧化为 Al_2O_3 。

尽管凝胶炸药的组分较复杂, 可能包含多种元素, 但均可按上述原则写出其爆炸反应式。

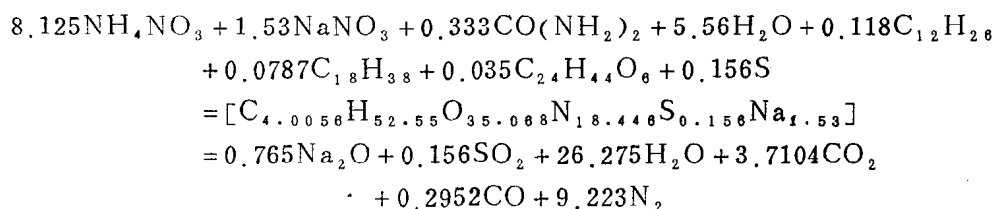
[例] 写出RYZ-2乳化炸药的爆炸反应式。

首先求出其元素组成, 列于下表

炸药组分	分子式	分子量	组分含量 (%)	1kg炸药的 mol数	1kg炸药的mol数					
					C	H	O	N	S	Na
硝酸铵	NH_4NO_3	80	65	$650/80 = 8.125$	0	32.5	24.375	16.25	0	0
硝酸钠	NaNO_3	85	13	$130/85 = 1.53$	0	0	4.59	1.53	0	1.53
尿素	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	60	2	$20/60 = 0.333$	0.333	1.332	0.333	0.666	0	0
水	H_2O	18	10	$100/18 = 5.56$	0	11.12	5.56	0	0	0
矿物油	$\text{C}_{12}\text{H}_{26}$	170	2	$20/170 = 0.118$	1.416	3.068	0	0	0	0
石蜡	$\text{C}_{18}\text{H}_{38}$	254	2	$20/254 = 0.0787$	1.4166	2.990	0	0	0	0
SPAN 80	$\text{C}_{24}\text{H}_{44}\text{O}_6$	428	1.5	$15/428 = 0.035$	0.84	1.54	0.21	0	0	0
硫磺	S	32	外加0.5	$5/32 = 0.156$	0	0	0	0	0.156	0
珍珠岩			4.5							
总计					4.0056	52.550	35.068	18.446	0.156	1.53

由此得RYZ-2乳化炸药的实验式为： $C_{4.0056}H_{52.55}O_{35.068}N_{18.446}S_{0.156}Na_{1.53}$

根据实验式各元素的量，首先考虑将Na反应生成 Na_2O ，再将S氧化成 SO_2 ，余下的按B-W规则处理，则得1kg炸药的反应式为：



三、炸药的热化学参数

(一) 炸药的爆容

炸药爆炸产物的体积，又称为爆容，以 V_0 表示。通常以1kg炸药爆炸后所形成的气态产物在标准状态下（压力为101325Pa、温度为0℃）的体积来表示，单位为L/kg。

在爆炸反应式确定以后，爆炸产物体积 V_0 可由阿佛加德罗定律求得：

$$V_0 = \frac{22.4n}{M} \times 1000, \text{ L/kg} \quad (1-4)$$

式中 n ——1mol 炸药爆炸生成气体产物的总mol数；

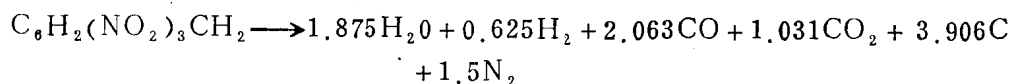
M ——1mol炸药的质量，g。

或写成 $V_0 = 22.4n', \text{ L/kg}$ (1-5)

式中 n' ——1kg炸药爆炸生成气体产物的总mol数。

[例] 计算梯恩梯的爆容 V_0 。

已知1mol梯恩梯的爆炸反应式为：



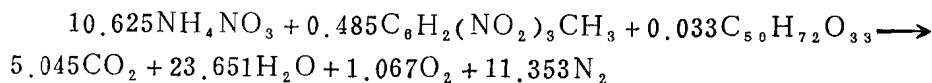
$$n = 1.875 + 0.625 + 2.063 + 1.031 + 1.5 = 7.094$$

$$M = 227g$$

$$V_0 = \frac{22.4 \times 7.094}{227} \times 1000 = 700 \text{ L/kg}$$

[例2] 计算2号岩石炸药的爆容 V_0 。

已知1kg 2号岩石炸药的爆炸反应式为：



$$n' = 5.045 + 23.651 + 1.067 + 11.353 = 41.116$$

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

由于爆炸气体产物是炸药爆炸做功的介质，爆炸时所放出的热能要通过它转化机械功，所以爆容是评定炸药爆炸做功能力的一个重要参数。

(二) 爆热

爆热是指1kg或1mol炸药在一定条件下爆炸瞬间所放出的热量。在定容条件下用 Q_v 表示，单位是kJ/kg或kJ/mol。

爆热是炸药产生巨大的破坏功和抛掷功的能源。它不仅是评价炸药威力的直接标志

量,而且还决定炸药的其它参数和爆炸性能。爆热无论在炸药的实际上还是理论研究中,都具有重要的意义。

1. 盖斯定律。

炸药爆热的理论计算基础是热化学的盖斯定律。盖斯定律认为:化学反应的热效应与反应进行的途径无关,而只取决于反应的初态和终态。现用图1-2的盖斯三角形予以说明。

图中状态1、2、3分别代表标准状态下的元素、炸药和爆炸反应产物。按照盖斯定律,由元素1形成反应产物3过程中的热效应 Q_{1-3} ,与由元素1生成炸药2,然后再由炸药2爆炸形成反应产物3,这两个过程的热效应之和($Q_{1-2} + Q_{2-3}$)

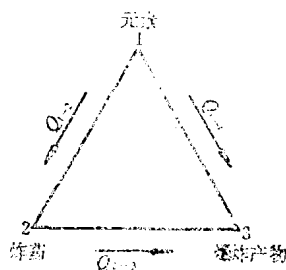


图1-2 盖斯三角形

在数值上是相等的,即:

$$Q_{1-3} = Q_{1-2} + Q_{2-3} \quad (1-6)$$

所以炸药的爆热为

$$Q_{2-3} = Q_{1-3} - Q_{1-2} \quad (1-7)$$

式中 Q_{1-2} ——炸药的生成热;
 Q_{1-3} ——爆炸产物生成热;
 Q_{2-3} ——爆热。

运用盖斯定律时,反应过程的条件必须是固定的,或者都是定压过程,或者都是定容过程;而炸药的爆炸过程非常接近于定容过程。所以,爆热一般是指定容爆热 Q_V 。由于热化学参数大都是定压条件下测得的,所以需要将定压爆热 Q_p 换算成定容爆热 Q_V 。由热力学第一定律可得它们的关系为:

$$Q_V = Q_p + p \cdot \Delta V \quad (1-8)$$

若反应前和反应后的物质为理想气体,且反应前后的压力和温度保持不变,则:

$$\text{反应前有} \quad pV = n_1 RT$$

$$\text{反应后有} \quad pV = n_2 RT$$

$$\text{由此得} \quad Q_V = Q_p + \Delta n RT \quad (1-9)$$

式中 R ——通用气体常数, $8.319 \text{ J}/(\text{mol} \cdot ^\circ\text{C})$

T ——计算热效应时的温度, K;

Δn ——($n_2 - n_1$), 即产物中气体mol数 n_2 与反应物中气体mol数 n_1 之差, 对于凝聚炸药 $n_1 = 0$, $\therefore \Delta n = n_2$

由于化学反应的热效应与温度、压力有关,因此,在热化学中,所有热效应系指同一条件下的数值。一般将 $t = 25^\circ\text{C}$ (或 298K), $P = 0.1\text{MPa}$ 条件下的热效应值称为标准热效应。在此情况下,式(1-9)可写为:

$$Q_V = Q_p + 2.48 \cdot \Delta n \quad (1-10)$$

由式(1-7)可以看出,若要计算炸药的爆热,必须确定炸药的爆炸反应式(即爆炸产物的具体组成)及炸药的生成热。

某些炸药的生成热和某些反应产物的生成热列于表1-3和1-4。

2. 生成热和燃烧热

在炸药的爆热计算中,要涉及到炸药的生成热。所以炸药的爆热不仅决定于炸药的元

表1-3

炸药成分的生成热

名 称	分 子 式	分 子 量	生 成 热, kJ/mol	
			定 压 Q_p	定 容 Q_v
硝 酸 铵	NH_4NO_3	80	365.75	354.83
硝 酸 钾	KNO_3	101	494.42	489.56
硝 酸 钠	NaNO_3	85	467.75	463.02
硝 酸 钙	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	164	938.01	928.21
氯 酸 钾	KClO_3	122.6	390.2	397.75
高 氯 酸 铵	NH_4ClO_4	117.5		284.37
梯 恩 梯	$\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$	227	73.27	56.52
黑 索 金	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_6\text{N}_6$	222	-65.48	-87.34
特 屈 儿	$\text{C}_7\text{H}_5\text{O}_8\text{N}_5$	237	-19.67	-41.49
泰 安	$\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_{12}\text{N}_4$	316	541.65	512.51
硝 化 甘 油	$\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_9\text{N}_3$	227	369.98	350.48
二 硝 化 乙 二 醇	$\text{C}^*\text{H}_4\text{O}_6\text{N}_2$	152	248.07	233.41
雷 汞	$\text{Hg}(\text{OCN})_2$	284	-268.37	-273.82
氮 化 铅	$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	291	-481.9	-447.98
二 硝 基 重 氮 酚	$\text{C}_6\text{H}_2\text{O}_4\text{N}_5$	210	-321.12	
奥 克 托 金	$\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_8\text{N}_8$	296	-74.94	
木 粉	$\text{C}_{39.5}\text{H}_{70.8}\text{O}_{28.6}$	1000		5694.05
纤 维 素	$(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$			946.09
石 蜡	$\text{C}_{18}\text{H}_{38}$	254	604.99	558.93
矿 物 油	$\text{C}_{12}\text{H}_{26}$	170		342.69
轻 柴 油	$\text{C}_{16}\text{H}_{32}$	224		661.51
沥 青	$\text{C}_{30}\text{H}_{18}\text{O}$	394		594.52
硬 脂 酸 钙	$\text{C}_{36}\text{H}_{70}\text{O}_4\text{Ca}$	607	2774.17	2684.15
尿 素	$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	60		324.56
硬 脂 酸	$\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$	284		891.03
亚 硝 酸 钠	NaNO_2	69		364.42
甲 胺 硝 酸 盐	$\text{CH}_3\text{NH}_2\text{HNO}_3$	94		339.59
乙 二 醇	$\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$	62		444.93
淀 粉	$(\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5)_n$			910.18

表1-4

爆炸产物的生成热

名 称	分 子 式	分 子 量	生 成 热 kJ/mol	
			定 压 Q_p	定 容 Q_v
水 (气 态)	H ₂ O	18	241.91	240.7
水 (液 态)	H ₂ O	18	286.25	282.6
一 氧 化 碳	CO	28	112.54	113.76
二 氧 化 碳	CO ₂	44	395.69	395.69
一 氧 化 氮	NO	30	-90.43	-90.43
二 氧 化 氮	NO ₂	46	-33.33	-17.17
一 氧 化 二 氮	N ₂ O	44	-82.27	-74.11
氨	NH ₃	17	46.05	43.54
甲 烷	CH ₄	16	76.62	74.11
三 氧 化 二 铝	Al ₂ O ₃	102	1670.53	1666.77
三 氧 化 二 铁	Fe ₂ O ₃	159.7	831.08	827.31
氢 化 氢	HCl	35.5		92.36
硫 化 氢	H ₂ S	34		20.16
氯 化 钠	NaCl	58.5	411.68	410.47
氯 化 钾	KCl	74.6	436.93	435.72
氯 化 铵	NH ₄ Cl	53.5	313.8	306.47
氯 化 钙	CaCl ₂	110.98		793.02
氧 化 钠	Na ₂ O	61.98		415.25
氧 化 钾	K ₂ O	94.2		362.33
二 氧 化 硫	SO ₂	64.06		297.1
二 氧 化 硅	SiO ₂	60.09		854.98
氧 化 钙	CaO	56.08		633.50

素组分，同时也与炸药的生成热（或可认为与炸药的分子结构）有关。

在标准条件下，由单质生成 1 mol 化合物的热效应称为该化合物的标准生成热，单位是 kJ/mol。

大部分有机化合物都很容易被氧化，生成一些稳定的氧化物，这一类反应即为燃烧反应。燃烧热是指 1 mol 的物质燃烧时的热效应，单位是 kJ/mol。在 25℃、1 大气压下（10132 Pa）的燃烧热，称为标准燃烧热。只要测出炸药的燃烧热，以及燃烧产物的生成热，应用盖斯定律就能计算出炸药的生成热。

由盖斯定律可知 $Q'_{1-3} = Q_{1-2} + Q'_{2-3}$

式中 Q'_{1-3} ——由单质直接形成燃烧产物的生成热；

Q'_{2-3} ——炸药的燃烧热；

Q_{1-2} ——炸药的生成热。

因此，炸药的生成热 $Q_{1-2} = Q'_{1-3} - Q'_{2-3}$ (11-1)

〔例〕 试验测定出黑索金的燃烧热 $Q'_{2-3} = 2122.7 \text{ kJ/mol}$ ，计算黑索金的生成热。

黑索金的燃烧方程为： $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_6\text{N}_6 + \frac{3}{2}\text{O}_2 = 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{N}_2 + 2122.7 \text{ kJ/mol}$