

爆 破 工 程

李成伟 等编

中国劳动出版社

内 容 提 要

本书内容包括起爆材料和炸药的基本知识,各种爆破技术的安全应用两大部分。系统地介绍了起爆材料、炸药的基本性能、分类,起爆技术,炸药的检验、运输、贮存和销毁的基本知识,以及各种爆破技术的基本原理,设计方法和施工安全技术。

《爆破工程》是为从事矿山安全监察人员函授学习的教材。也可供业余大学,职工大学的师生以及从事煤炭、冶金、铁道、建工、水利等有关爆破的工程技术人员参考。

前 言

利用爆破技术来开拓地下巷道,开采矿岩在我国已有悠久的历史。然而随着爆破器材和爆破技术的不断发展,使用爆破技术的范围越来越广泛。在露天采矿,铁道建设和水利工程中,火药量的微差爆破技术已日益成熟,一次爆破总装药量达4吨以上,爆破矿岩量达100多万吨的大爆破已非罕见;在城市建设中,控制爆破以其成本低廉、施工期短、安全可靠等特点,在拆除旧建筑物工程中表现出明显的优越性;光面爆破技术的发展,使巷道、硐室、隧道等地下工程的施工质量和施工安全取得满意的效果。因此,在煤炭、冶金、铁路建设、水利工程、建筑材料以及城市建筑物拆除等系统中,各种类型的爆破技术正在发挥着它们各自特有的作用,被广泛地运用在生产实践中。

然而绝大多数的爆破器材,本身就是一种既稳定又不稳定的物质。在制造、运输、贮存、使用操作过程中的安全,乃是首要的问题。我国各有关部门对爆破器材和爆破施工技术方面,都以法规的形式,制订了多方面的安全规程,目的就是要消除和杜绝各种不安全因素,保证安全生产。这充分说明爆破工程中的安全问题是十分重要的。

本书是为从事矿山安全监察人员函授学习而编写的。考虑到他们在各自的工作岗位上,对各种安全规程已十分熟悉,但是有些不安全因素是由爆破器材本身的性能特点,以及各种爆破技术的特点所引起的。所以有必要对基本知识和理论分析进行介绍。我们的目的是希望他们在掌握安全规程的基础上,通过本课程的学习,能对爆破器材,炸药破岩原理以及各种爆破技术的设计、施工技术安全要求,能有一个较全面的了解和掌握,从而进一步提高技术素质,科学地进行安全监察工作,以求在保障安全生产的前提下,取得更好的经济效益。

为了适应各类不同矿山安全工作者的需要,本书从安全角度着眼,不仅系统地介绍了各类爆破器材的构造和基本性能,还对贮存、运输、检验、销毁等工作的安全操作进行了介绍。除此之外,对各种爆破技术设计,施工技术安全也做了详细的介绍。

编写本书,力求做到重点突出,通俗易懂。由于时间仓促和我们的水平有限,可能有不妥之处,欢迎指正。

本书由李成伟、朱琢华、王立安和张衡编写,李成伟主编。

编者

1989年12月

目 录

第一章 爆炸和炸药的特征.....	1
第一节 爆炸和炸药的定义.....	1
第二节 炸药爆炸的基本特征.....	2
第三节 炸药的燃烧和爆炸.....	4
第四节 炸药的氧平衡.....	8
第五节 炸药爆炸能计算.....	13
第六节 炸药的爆轰.....	23
第七节 间隙效应（沟槽效应）.....	32
第二章 炸药的起爆和感度.....	35
第一节 起爆和起爆能.....	35
第二节 炸药爆炸反应的过程.....	35
第三节 炸药的感度.....	36
第四节 炸药的爆炸作用.....	43
第三章 炸药的分类.....	52
第一节 单质炸药.....	52
第二节 硝酸类炸药.....	54
第三节 浆状炸药.....	57
第四节 水胶炸药.....	59
第五节 乳化炸药.....	60
第四章 起爆器材和起爆技术.....	64
第一节 导火索起爆法.....	64
第二节 电雷管起爆法.....	67
第三节 导爆索起爆法.....	80
第四节 新型非电起爆法.....	84
第五章 爆破器材的检验与销毁.....	90
第一节 爆破器材的检验.....	90
第二节 爆破器材的销毁.....	92
第六章 爆破器材的贮存和运输.....	96
第一节 爆破器材的贮存.....	96
第二节 爆破器材的运输.....	103
第七章 爆破破岩作用原理.....	108
第一节 岩体内部爆破作用原理.....	108

第二节 爆破漏斗..... 109

第八章 采矿工程爆破技术..... 112

第一节 井巷掘进爆破技术..... 112

第二节 梯段爆破..... 124

第三节 微差爆破..... 134

第四节 光面爆破..... 139

第五节 药室大爆破..... 156

第六节 地下爆破的破坏效应..... 169

第九章 地面工程拆除爆破技术..... 177

第一节 拆除爆破的基本原理简介..... 177

第二节 设计方法..... 177

第三节 拆除爆破安全技术..... 187

第一章 爆炸和炸药的特征

第一节 爆炸和炸药的定义

在生产活动、科学试验和日常生活中，经常会遇到各种爆炸现象。爆炸时，伴随着强烈的发光、发热、声响和破坏效应。

广义地讲，爆炸是物质系统一种极迅速的物理或化学变化。在变化过程中，瞬间放出其内含的能量，并借助系统内原有气体或爆炸生成气体的膨胀，对系统周围介质做功，使之发生巨大的机械破坏效应。

按引起爆炸的原因不同，可将爆炸区分为：物理爆炸，核爆炸和化学爆炸三类。

1. 物理爆炸。这是由物理原因造成的爆炸，爆炸不发生化学变化。例如：锅炉爆炸、氧气瓶爆炸、轮胎放炮等都是物理爆炸。在实际生产中，除了利用内装压缩空气或二氧化碳的爆破筒落煤外，很少应用物理爆炸。

2. 核爆炸。是由核裂变或核聚变引起的爆炸。核爆炸放出能量较大，相当于数万吨至数百万吨梯恩梯（TNT），爆炸中心区温度可达数百万至数千万度，压力可达数百万大气压，并辐射出很强的各种射线。目前，在岩石工程中，核爆炸的应用范围和条件仍十分有限。

3. 化学爆炸。是由化学变化造成的爆炸。炸药爆炸，井下瓦斯或煤尘与空气混合物的爆炸，汽油与空气混合物的爆炸，以及其它混合爆炸气体的爆炸等，都是化学爆炸。在实际生活中，主要是应用炸药的化学反应。

炸药是在一定条件下，能够发生快速化学反应，放出能量，生成气体产物，显示爆炸效应的化合物或混合物。就化学组成而言，除少数起爆药外，炸药都是由两部分物质组成的，即氧化剂和燃料。在化合物炸药中，氧化剂是分子中含氧的基团，燃料则是分子中含碳氢的基团。这两种基团都是反应性很强的活性原子基团，但在分子中被活性小的中性原子基团或原子（通常为氮原子）所隔开（图1—1）。当炸药分子被外界能量活化时，分子运动速度增加，分子之间的碰撞力增大。当碰撞力增大至一定程度后，炸药分子破裂，释放出活性基团，相互发生化学反应，形成气体产物并以热能形式放出其内含有的化学能。由于爆炸过程极为迅速，过程结束时，气体产物尚不可能发生明显膨胀，故产物的温度和压力很高。其后，产物膨胀，将能量传给周围介质。

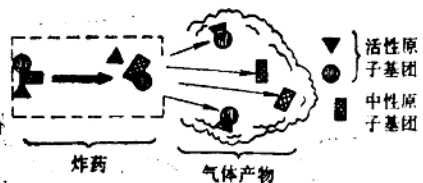


图 1—1 炸药分子爆炸时能量释放示意图

但须指出，炸药爆炸通常是从局部分子被活化、分解开始的，其反应热又使周围炸药分

子活化、分解，如此循环进行，直至全部炸药分子反应完毕。

对混合物炸药来说，氧化剂是含氧的不具有爆炸性的氧化剂分子或富有氧元素的炸药分子，燃料则是非爆炸性可燃剂分子或富有碳、

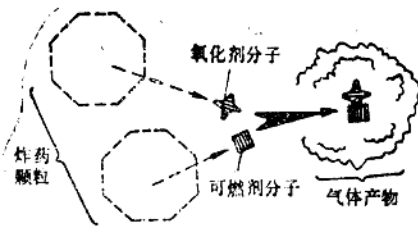


图 1—2 由氧化剂和可燃剂组成的混合炸药爆炸时能量释放示意图

氢元素的炸药分子（图 1—2）。使这类炸药爆炸，同样也需要从外界给予足够的活化能，来增加炸药内各种分子的运动速度和相互间的碰撞力，使之引起迅速的化学反应。

由此可见，炸药是既安定又不安定的物质。在平常条件下，炸药是比较安定的物质，因为除起爆药外，炸药的活化能值是相当大的（一般为 $138 \sim 230 \text{ kJ/mol}$ ），但当局部炸药分子被活化达到足够数目时，就会丧失安定性，引起炸药爆炸。因此，对待炸药既不要畏惧，但

又要慎重。

第二节 炸药爆炸的基本特征

化学爆炸是人们接触最多、应用最广泛、最有实际意义的一种爆炸现象。我们常把能发生化学爆炸的物质称之为炸药。放出热量、生成气体产物、化学反应和传播的高速度，是炸药爆炸的三个基本特征，也是构成爆炸的必要条件，缺一不可，故又称作爆炸的三要素。

一、放出热量

炸药爆炸就是将蕴藏的大量化学能（潜能）以热能形式迅速释放出来的过程。由表 1-1 可以看出，1kg 炸药的放热量与 1kg 燃料的放热量比较，燃料优于炸药，但若按每升放热

表 1-1 炸药和普通燃料放热能量比较

物质名称	每公斤放出热能量 (kJ)	每公斤燃料-空气混合物放热能量(kJ)	每升放热能量 (kJ)
汽油	41868	9629.6	17.58
无烟煤	33494	9210.9	18.0
木柴	18840	7954.9	19.6
硝化甘油	6280	—	10048
梯恩梯	4186.8	—	6489.5
黑火药	2930.7	—	2305

量计算，炸药则占绝对优势（计算每升燃料放热量时，以燃料和空气的混合物为计算基准）。因此，炸药在能量方面的特点是，微小容积中蕴蓄着大量能量，即炸药的能密度 $\rho_0 Q_v$ 很高（其中 ρ_0 ——炸药密度， Q_v ——爆热，即单位重量炸药放出热量）。

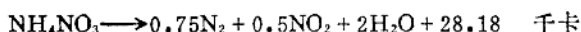
由表 1-2 中各种草酸盐的反应效应与其爆炸性的比较可以看出，放出大量热能是形成化学爆炸的必要条件，吸热反应或放热不足都不能形成爆炸。即使对同一种化合物，由于激起反应的条件和热效应不同，也会产生不同的结果。例如硝酸铵，常温到 150°C 的分解反应为吸热反应；如加热到近 200°C 时，分解反应虽为放热反应，但放热量不大，仍不能构成爆

表 1-2

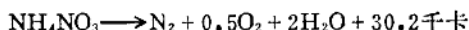
草 酸 盐 的 爆 炸 性

名 称	反 应 式	热效应 (kJ/克分子)	爆 炸 性
草 酸 锌	$\text{ZnC}_2\text{O}_4 \longrightarrow 2\text{CO}_2 + \text{Zn}$	-205.57	不 爆
草 酸 铅	$\text{PbC}_2\text{O}_4 \longrightarrow 2\text{CO}_2 + \text{Pb}$	-69.91	不 爆
草 酸 铜	$\text{CuC}_2\text{O}_4 \longrightarrow 2\text{CO}_2 + \text{Cu}$	+23.86	不 爆
草 酸 汞	$\text{HgC}_2\text{O}_4 \longrightarrow 2\text{CO}_2 + \text{Hg}$	+72.42	爆
草 酸 银	$\text{Ag}_2\text{C}_2\text{O}_4 \longrightarrow 2\text{CO}_2 + 2\text{Ag}$	+123.51	爆

炸；迅速加热到 400~500 °C 或利用传爆药柱强力起爆，由于放热量大，就会引起爆炸，其爆炸反应式为：



或



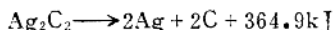
二、生成气体产物

炸药爆炸放出热量必须借助气体介质才能转化成为机械功。因此，生成气体产物是炸药作功不可缺少的条件。炸药能量转化的过程是：放出的热量先转变为气体的压缩能，后者在气体膨胀过程中转变成成为机械功。如果物质的反应热很大，但没有气体产物生成，就不会具有爆炸性。例如铝热剂反应，



按每公斤放热量计算比梯恩梯高，并能形成 3000 °C 高温，使生成产物熔化，但却不会发生爆炸。若浸湿铝热剂或在松散铝热剂中有空气，就可能发生类似爆炸的现象。

有些物质生成产物虽是固体，但很容易引起爆炸。例如乙炔银的分解反应



这是因为在反应温度条件下，银发生气化和周围空气被迅速加热并膨胀的缘故。

炸药爆炸放出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。

三、爆炸过程是高速反应

爆炸化学反应是由压缩冲击波激起的，因此，反应速度和爆炸速度都很高。在反应区内，炸药变成爆炸产物的时间只需要几十微秒，甚至不到一微秒，爆炸速度可达每秒数千米。爆炸过程的这种高速度，决定了炸药能够在很短时间内释放出大量能量，从而具有极大的威力（炸药在单位时间内的作功能力）。

爆炸过程有很高的速度，这是它区别一般化学反应的最显著的特点。它的能量在瞬间释放出来，可以达到很高的能量密度，这是其它化学反应所不能比拟的。从总能量的观点来看，和一般的可燃物比较，炸药并非高能物质（见表 1-3）。但一般可燃物燃烧过程进行得很缓慢，它的能量大都由于热的传导和辐射而损失了，故不能达到较高的能量密度。相反，炸药的爆炸反应进行极快，瞬间释放出的能量来不及散失而高度集中（见表 1-4），尽管它的总能量并不高，但由于这个缘故，仍具有极大的作功能力。

设球形装药的重量为 G ，炸药密度为 ρ_e ，则 $G = \frac{4}{3} \pi r_e^3 \rho_e$ ，其中 r_e 为装药半径。若单

位重量炸药爆炸放出热量为 Q_v ，该球形装药放出的热量应为 $\frac{4}{3} \pi r_e \rho_e Q_v$ 。假设爆炸从中心

表 1-3 某些炸药和可燃物的反应热

炸药、可燃物名称	反应热(kJ/kg)
硝化甘油	6217
黑索金	5367
梯恩梯	4186
二硝基重氮酚	3998
硝酸铵	1440
1号岩石铵炸药	3964
碳与氧完全燃烧	8960
氢与氧完全燃烧	13523

表 1-4 某些炸药和可燃物的能量密度

炸药、可燃物名称 (密度g/cm³)	能量密度 (kJ/l.)
硝化甘油 (1.6)	9965
黑索金 (1.6)	8562
梯恩梯 (1.6)	6808
二硝基重氮酚 (1)	3998
1号岩石炸药 (1)	3964
硝酸铵 (1)	1440
碳完全燃烧	17.2
氢完全燃烧	7.1

开始,以恒速 D 传播,爆炸过程所需时间应为 $\frac{r_c}{D}$ 。因此,炸药威力可近似按下式计算:

$$N = \frac{4\pi r_c^3 \rho_s Q_v D}{3} \quad (1-1)$$

例 计算梯恩梯的威力,已知: $\rho_s = 1500 \text{ kg/m}^3$, $D = 7000 \text{ m/s}$, $Q_v = 4186.8 \text{ kJ/kg}$

解 按一公斤梯恩梯球形装药计算,装药半径为:

$$r_c = \sqrt[3]{\frac{3G}{4\pi\rho_s}} = \sqrt[3]{\frac{3 \times 1}{4 \times 3.14 \times 1500}} = 0.054 \text{ m}$$

根据 (1-1) 式,梯恩梯的威力应为:

$$N = \frac{4 \times 3.14 \times 0.054^3 \times 1500 \times 4186.8 \times 7000}{3} \\ = 536694838.8 \text{ kJ/s} = 5.37 \times 10^8 \text{ kJ/s}$$

按 (1-1) 式计算炸药威力时,没有考虑气体产物膨胀作功的时间和热能利用效率,故计算结果偏高。尽管如此,可以看出炸药威力之大是非常惊人的。

如果反应过程很慢(包括反应速度和传播速度),就不可能形成强大威力的爆炸。

第三节 炸药的燃烧和爆炸

在外界能量的激发下,炸药反应的主要形式有两种:燃烧与爆轰。此外,对于某些炸药,在特殊条件下,还会产生一种称为“爆燃”的现象。

从表 1-5、表 1-6 中,我们清楚看到,这几种过程,无论从反应速度、反应点的压力,

表 1-5 能量释放过程比较

材 料	压 力 (MPa)	速 度 (g/s)	功 率 密 度 (W/cm³)
乙 炔 焰	0.101	1	10^2
在枪膛里的发射药	202.65	10^3	10^5
爆轰的猛炸药	40530	10^6	10^{10}

还是从功率的密度或功率的输入来看,彼此的差别是非常显著的,一般都在 10^3 倍的数量

表 1-6

功率—能量比较

反应类型	反应速率 (m/s)	能量输出 (J/g)	功率输出 (W/cm ²)
油-气燃料燃烧	$\sim 10^{-6}$	$\sim 4.186 \times 10^4$	~ 10
炸药燃烧	$\sim 10^{-4}$	$\sim 4.186 \times 10^6$	$\sim 10^3$
爆轰	7×10^3	$\sim 4.186 \times 10^8$	$\sim 10^5$

级。造成这些差别的关键，是反应速度的不同。

但是，这几种变化形式在特定条件下是可以互相转化的。例如：

1. 摊得很薄的炸药，用火点燃，一般都是稳定燃烧，但如果大量堆积，由于热量的积聚和压力的递增，就很容易由燃烧转为爆轰。

2. 无烟药在大气中燃烧缓慢，但在枪、炮膛中，由于自身燃烧所造成的高压条件，使过程迅速转为爆燃，煤矿炸药在某种条件下，则会由爆轰状态衰减为爆燃。

3. 火焰雷管在火焰作用下的激发过程，在正常条件下，实际上就是由燃烧到爆轰的转化以及爆轰的传播过程，而在不正常的情况下，这种过程就会被抑制而表现为半爆或拒爆。

一、燃烧

同其它可燃物一样，炸药在热源（例如火焰）作用下，也会燃烧，区别仅在于炸药燃烧时不需要外界供氧。炸药的快速燃烧（每秒数百米）又称爆燃。

就化学变化的实质来说，燃烧是可燃元素（碳、氢等）激烈的氧化反应。但燃烧与缓慢分解或一般的氧化反应不同。其特点是：燃烧不是在全部分物质内同时展开的，而只在局部区域进行并在物质内传播。进行燃烧的区域称作燃烧区，因燃烧反应是在该区域内完成的，所以称作反应区。

图 1-3 表示炸药柱内的燃烧过程。DE 区为反应区，在该区内完成炸药的燃烧；EF 为燃烧完毕最终气体产物的区域。在反应区内放出热量，靠传导加热 BD 区，使 BD 区内炸药温度由 T_b 上升到 T_d 。 T_b 为开始燃烧反应的温度，在反应区内温度继续升高。反应结束或最终燃烧产物的温度为 T_e 。大多数炸药的燃烧主要是在气相中进行的。因此，在加热区 BD 内，虽然炸药尚未燃烧，但产生有物相的变化或分解现象。一般情况下，可将加热区再划分为两个区域：BC 区和 CD 区。对挥发性炸药来说，这两个区域的界面温度 T_c 对应于炸药的沸点，对不具有沸点或低温即开始分解的炸药来说， T_c 对应于炸药的气化温度。因炸药在 CD 区内，^[4]由凝聚相转变为气相，所以该区又称作气化区。尚未受到热作用影响的 AB 区，仍保持其原来的温度。

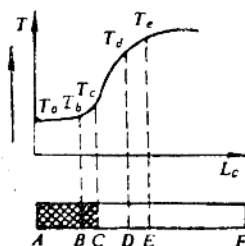


图 1-3 炸药燃烧示意图

开始发生燃烧的面称作焰面。焰面和反应区沿炸药柱一层层地传下去，其传播速度即单位时间内传播的距离称为燃烧线速度。燃烧线速度与炸药密度的乘积，即单位时间内单位截面上燃烧的炸药质量称为燃烧的质量速度。通常所说的燃烧速度系指燃烧线速度。燃烧速度与反应区内化学反应速度是两个不同的概念，不可混淆。

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。炸药是否能够稳定燃烧,决定于燃烧过程进行时的热平衡。如果热量能够平衡,即反应区中放出的热量与经传导向炸药邻层和周围介质散失的热量相等,燃烧就能稳定,否则就不能稳定。不稳定燃烧可导致燃烧的熄灭、震荡或转变为爆炸。

要使燃烧过程热量达到平衡或燃烧稳定,必须具备一定的条件。该条件由下列因素所决定:炸药的物化性质和物理结构,药柱的密度、直径和外壳材料,环境温度和压力等。

炸药(包括各种物化性质、结构、密度、外壳)在一定的环境温度和压力条件下,只有当药柱直径超过某一数值时,才能稳定燃烧,而且燃烧速度和药柱直径无关。能稳定燃烧的最小直径称为临界直径。环境温度和压力越高,临界直径越小。

反之,当药柱直径固定时,药柱稳定燃烧必有其对应的最小温度和压力,称作临界温度和压力,而且燃烧速度随温度和压力的增高而增加。多数炸药的燃烧速度与环境温度和压力的关系,可用下列经验式表示:

$$U = \frac{1}{A_1 - B_1 T_0} \quad (1-2)$$

$$U = A + BP^v \quad (1-3)$$

其中常数 A_1 、 B_1 、 B 和指数 v ($v \leq 1$) 决定于炸药性质。

上述经验式只在一定的温度和压力范围内适用,低于这个范围,燃烧不可能稳定,高于这个范围,燃烧就会转变为爆炸。

管内药柱燃烧时,燃烧产物向外部空间排出,燃烧反应区则向尚未反应的炸药内部传播,两者运动方向相反(图1-4)。作用在药柱上的压力由燃烧产物生成速度和排出速度的平衡条件来确定,如图1-5所示。图中直线1表示燃烧产物生成速度与压力的关系;曲线2表

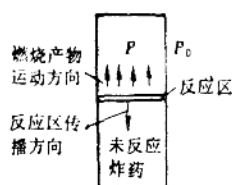


图 1-4 管内药柱燃烧时, 燃烧产物和反应区的运动方向

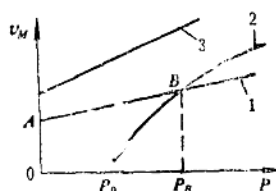


图 1-5 燃烧产物生成速度与排出速度的关系

1—燃烧产物生成速度与压力的关系

2—燃烧产物排出速度与压力的关系

示燃烧产物排出速度和压力的关系, P_0 为外部空间的压力。在压差 $P - P_0$ 作用下, 燃烧产物开始向外部空间排出。当生成速度大于排出速度时, 药柱上燃烧产物的压力将增大。反之, 当生成速度小于排出速度时, 压力将减小。因此, 作用在药柱上的压力及其对应的燃烧速度, 应由直线1和曲线2的交点B, 即生成速度与排出速度相等的条件来确定。外部空间压力 P_0 越大(曲线2右移), 药柱上的压力及其对应的燃烧速度值也越大。如果生成速度始终大于排出速度(如图中直线3所示), 燃烧不可能达到稳定, 最终将转变为爆炸。

对粉状或多孔隙的低密度炸药来说, 压力超过某一临界值时, 部分燃烧产物将向孔隙内渗入, 引燃孔隙里的炸药, 结果会出现在不同压力范围内具有不同燃烧规律的现象。低于临

界值时,随压力增大燃烧产物生成速度增加缓慢,但高过临界值后则增加很快,如图1-6所示。临界压力 P_0 决定于炸药粒度和密度。在这种情况下,存在B、D两个平衡点。当压力超过D点压力 P_d 后,燃烧产物的生成速度再次超过排出速度,压力和燃烧速度将不断增长,从而导致炸药爆炸。

根据燃烧特性,可将炸药分为三大类:起爆药、猛炸药和火药。

起爆药的特点是,一旦燃烧,化学反应极迅速,燃烧速度增长很快,即使在大气压力条件下,燃烧也是不稳定的,很容易转变成爆炸。但有些起爆药在高密度或真空条件下也能够稳定燃烧。

猛炸药一般都能稳定燃烧。燃烧转变为爆炸的压力由几个大气压到几百个大气压。破坏正常燃烧的压力愈低,炸药燃烧的稳定性愈差。易熔炸药比难熔炸药的稳定性高,高密度炸药比低密度炸药的稳定性高。

燃烧稳定性最高的是火药。稳定燃烧的压力可以从101.325kPa到1013.250kPa。若压力再高,也能转变为爆炸。

炸药燃烧主要靠热传导来传递能量。因此,稳定燃烧速度不可能很高,线速度一般为每秒几毫米到每秒几米,最高也只能达到每秒几百米,低于炸药内的声速。但燃烧速度受环境条件的影响较大。燃烧的这些特点使它不同于炸药的爆轰。

尽管在爆破工程中,炸药化学变化的主要型式是爆轰,但了解炸药的稳定性、燃烧特性及其规律,对爆炸材料的安全生产、加工、运输、保管和使用,都是很必要的。

二、爆轰

炸药爆炸的过程与燃烧过程类似。化学反应也只在局部区域(即反应区)内进行并在炸药内传播。反应区的传播速度称为爆炸速度。大多数炸药的爆炸也是氧化反应。燃烧与爆炸的主要区别在于:燃烧靠热传导来传递能量和激起化学反应,受环境条件的影响较大,而爆炸则靠压缩冲击波的作用来传递能量和激起化学反应,基本上不受环境条件的影响;爆炸反应比燃烧反应更为激烈,放出热量和形成温度也高;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;燃烧速度是亚音速的,爆炸速度则是超音速的。

爆炸同样存在稳定爆炸和不稳定爆炸两种情况。爆炸速度保持定值的称为稳压爆炸,否则为不稳定爆炸。稳定爆炸又称为爆轰。爆轰是炸药化学变化的最高形式。爆轰速度可达每秒2000~9000m;产生压力可达数万至数十万大气压。人们靠炸药作功,主要就是利用它的爆轰特性。有关炸药爆轰的问题,以后还要详细讨论。

炸药的上述化学变化形式,在一定条件下,都是能够相互转化的:缓慢分解可发展为燃烧、爆炸;反之爆炸也可以转化为燃烧、缓慢分解。

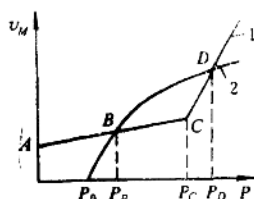


图 1-6 炸药燃烧速度发生变化时产物生成速度与排出速度的关系

1—燃烧产物生成速度与压力的关系
2—燃烧产物排出速度与压力的关系

第四节 炸药的氧平衡

一、氧平衡的基本概念

炸药一般由碳、氢、氧、氮四种元素组成。其中碳、氢是可燃元素，氧是助燃元素。炸药的爆炸过程，实质上是氧同碳、氢生成 CO_2 、 CO 、 H_2O 等新产物的氧化还原过程（对碳、氢而言是氧化过程，对氧而言是还原过程）。氧平衡的概念，就是衡量炸药中所含的氧将可燃元素完全氧化是多余还是不足的情况。根据所含氧的多少，可将炸药的氧平衡分为三种：

1. 炸药中的氧含量足够将可燃元素完全氧化，并有剩余，称为正氧平衡；
2. 炸药中的氧含量正好将可燃元素完全氧化，称为零氧平衡；
3. 炸药中的氧含量不足以将可燃元素完全氧化，称为负氧平衡。

实践证明，只有当炸药中的碳和氢都被氧化成 CO_2 和 H_2O 时，其放热量才最大。零氧平衡一般接近这种情况。负氧平衡的炸药，爆炸产物中就会有 CO 、 H_2 ，甚至出现固体 C ；而正氧平衡炸药的爆炸产物，则会出现 NO 、 NO_2 等气体。这两种情况，不利于发挥炸药的最大威力，把它们用在矿井下，生成的 CO 、 NO 、 NO_2 等不仅都是有毒气体，而且能对瓦斯爆炸反应起催化作用，因而这样的炸药都不允许用于有瓦斯及矿尘爆炸危险的矿井。

由此可见，氧平衡不仅是研究炸药反应的基本概念，而且是设计混合炸药配方、确定某种炸药的使用范围和条件的重要依据。

二、氧平衡的计算式

一般单质炸药或混合炸药，其实验式可用下面通式表示：



式中 a 、 b 、 c 、 d 分别代表在一个炸药分子中碳、氢、氧、氮的原子个数；或是一克分子的炸药中，碳、氢、氧、氮的克原子数。

发生爆炸反应时，可燃元素碳、氢的完全氧化是按下式进行的：



也就是说， a 克原子的碳变成二氧化碳，需要消耗 $2a$ 克原子氧； b 克原子的氢变成水，需要消耗 $\frac{1}{2}b$ 克原子的氧。而炸药本身所具有的氧的克原子数是 c ，因此， c 与 $(2a + \frac{1}{2}b)$ 的差值，有下列三种情况：

1. $c - (2a + \frac{1}{2}b) > 0$ 的炸药为正氧平衡炸药；
2. $c - (2a + \frac{1}{2}b) = 0$ 的炸药为零氧平衡炸药；
3. $c - (2a + \frac{1}{2}b) < 0$ 的炸药为负氧平衡炸药。

这个差值，就可以表示炸药的氧平衡，它指出每克分子炸药中多余或不足的氧的克原子

数。在实际运算中，氧平衡往往用每克炸药内多余或不足的氧的克数来表示，这时，CaHh-OcNd炸药的氧平衡可按下式计算：

$$\text{氧平衡} = \frac{\left[c - \left(2a + \frac{1}{2}b \right) \right] \times 16}{M} \text{克/克} \quad (1-7)$$

式中 16——氧的克原子量；

M——炸药的克分子量。

也可以用百分数来表示，指的是每 100 克炸药所含的多余或不足的氧的克数。习惯上，在正氧平衡数值前作“+”号，在负氧平衡数值前作“-”号。

三、氧平衡计算举例

1. 单一物质的氧平衡

1) 硝酸铵 (NH_4NO_3)

硝酸铵写成炸药通式应为 $\text{C}_0\text{H}_4\text{O}_3\text{N}_2$ ， $M=80\text{g}$ ，代入氧平衡计算式得：

$$\text{NH}_4\text{NO}_3 \text{ 氧平衡} = \frac{\left(3 - \frac{1}{2} \times 4 \right) \times 16}{80} = +0.2\text{g/g}$$

2) 梯恩梯 (TNT)

梯恩梯 [$\text{C}_6\text{H}_7(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3$] 写成通式应为 $\text{C}_7\text{H}_5\text{O}_6\text{N}_3$ ， $M=227\text{g}$ ，代入氧平衡计算式得：

$$\text{TNT 氧平衡} = \frac{\left[6 - \left(2 \times 7 + \frac{1}{2} \times 5 \right) \right] \times 16}{227} = -0.74\text{g/g}$$

2. 混合炸药的氧平衡

有两种计算方法。一种是分别查出或算出混合炸药中各成分的氧平衡，然后乘以该成分在炸药中的百分数，求其代数和。另一种则是将混合炸药作为一个整体，先求出某一定数量（例如 100g）混合炸药中 C、H、O、N 等元素的克原子数，然后再算出氧平衡。两法算出结果相同。方法本身也有内在联系，但前者比较简单，后者较繁。现以 2 号煤矿炸药为例，分别计算如下：

1) 按炸药各成分的氧平衡计算

2 号煤矿炸药的组成及各成分的氧平衡

（查表或单独算出）列于表 1-7。

按第一种算法：

$$\begin{aligned} \text{2 号煤矿炸药氧平衡} &= (0.20) \times \frac{71}{100} + (-0.74) \times \frac{10}{100} \\ &\quad + (-1.38) \times \frac{4}{100} + 0 \times \frac{15}{100} \\ &= +0.0128\text{g/g} \end{aligned}$$

表 1-7 2 号煤矿炸药的组成及各成分氧平衡

炸药成分	组成 (%)	氧平衡 (g/g)
硝酸铵	71	+0.20
梯恩梯	10	-0.74
木粉	4	-1.38
食盐	15	0

$$= +1.28\%$$

2) 按整体计算

以 100 克炸药为计算基础, 因组成已知, 故可求出 100g 炸药中各种元素的 mol 数, 见表 1-8。

表 1-8 2 号煤矿炸药的元素组成

炸 药 成 分	分子式或实验式	分子量	100g 炸 药内所 占克数	100g 炸药内所 占 mol 数	100g 炸药内各种元素的 mol 数				
					C	H	O	N	NaCl
硝 酸 铵	NH_4NO_3	80.048	71	$71/80=0.8875$	—	3.548	2.661	1.774	—
梯 恩 梯	$\text{C}_7\text{H}_5\text{O}_6\text{N}_3$	227	10	$10/227=0.04405$	0.308	0.2263	0.2643	0.132	—
木 粉	$\text{C}_{12.7}\text{H}_{19.4}\text{O}_{21.6}$ (1000)	(1000)	4	$4/1000=0.004$	0.1768	0.2852	0.1144	—	—
食 盐	NaCl	58.5	15	$15/58.5=0.256$	—	—	—	—	0.256
100克炸药中各元 素的克原子数合计					0.4668	4.0515	3.0397	1.91	0.256

根据此表, 2 号煤矿炸药的可燃元素完全氧化后所多余的氧(即其氧平衡)等于 $3.0397 - (2 \times 0.4668 + \frac{1}{2} \times 4.0515) = 0.08 \text{ mol}$ 。以每克或每 100g 炸药所剩氧的克数表示, 则为 $+ \frac{0.08 \times 16}{100} = 0.0128 \text{ g/g}$, 或 $+1.28\%$ 。

四、氧平衡在设计炸药配方中的应用

单质炸药和其它物质的氧平衡是由它的分子组成决定了的, 不能人为地改变它。但是, 人们可以将几种物质按某种比例混合在一起, 调整总的氧平衡, 以便充分发挥炸药的能量和避免产生有毒气体。确定这个比例或比例范围的基本原则就是总的氧平衡接近零, 具体的计算, 则因混合炸药的组成成分不同而异, 现分别讨论于下:

1. 两种成分计算法

设混合炸药只由氧化剂和可燃剂两成分组成, 已知其氧平衡分别为 a 、 $b(\text{g/g})$, 要得到零氧平衡的混合炸药, 分别求其百分组成 X 和 Y 。

根据成分和零氧平衡的关系得:

$$X + Y = 100$$

$$aX + bY = 0$$

解此方程组得:

$$X = -\frac{b}{a-b} \times 100 \quad (1-8)$$

$$Y = \frac{a}{a-b} \times 100 \quad (1-9)$$

例如, 计算铵油炸药零平衡的配方, 已知: 氧化剂硝酸铵的氧平衡 $a = +0.20(\text{g/g})$; 可燃剂柴油的氧平衡 $b = -3.42(\text{g/g})$ 。代入上式得:

$$\text{硝酸铵: } X = \frac{-(-3.42)}{0.20 - (-3.42)} \times 100 = 94.475(\%)$$

$$\text{柴 油: } Y = \frac{0.20}{0.20 - (-3.42)} \times 100 = 5.525(\%)$$

$$\begin{aligned} \text{氧平衡: } & 0.20 \times 94.475 + (-3.42) \times 5.525 \\ & = 18.895 - 18.895 = 0 \end{aligned}$$

2. 三种成分计算法

设混合炸药由氧化剂、可燃剂、敏化剂三成分组成，已知其氧平衡分别为 a, b, c (g/g)，要得到零氧平衡的混合炸药，分别求其百分组成 X, Y, Z 。

根据成分和零氧平衡的关系得：

$$X + Y + Z = 100 \quad (1-10)$$

$$aX + bY + cZ = 0 \quad (1-11)$$

此二方程不足以解三个未知数，而只能推出 Z 对 X 和 Y 的关系式：

$$X = \frac{-100b + Z(b - c)}{a - b} \quad (1-12)$$

$$Y = \frac{100a - Z(a - c)}{a - b} \quad (1-13)$$

求解时，先假定其中任一数，其它两个未知数即可求出。

例如，计算由硝酸铵、木粉、梯恩梯组成的炸药的零氧平衡配方。设其百分组成分别为 X, Y, Z ，已知其氧平衡 a, b, c 顺次为 $+0.20, -1.38, -0.74$ (g/g)，可按下述方程确定百分组成：

设 $Z=0$ ，此时，式(1-12)、(1-13) 实际上变成式(1-8)、(1-9)，可用两种成分计算法求出在此条件下的 X 和 Y 值：

$$X = 81.34(\%)$$

$$Y = 12.66(\%)$$

即配方中无梯恩梯时，木粉等于 12.66%，若有梯恩梯，则小于 12.66%

再设 $Y=0$ ，同理算出硝酸铵和梯恩梯的配比为：

$$X = 78.72(\%)$$

$$Z = 21.28(\%)$$

亦即梯恩梯在配比中不能超过 21.28%。

这样，我们事实上得到三个组分的变动范围，在这个范围内，由算式(1-12)、(1-13) 计算出的任何一个配方，都应该是零氧平衡的。显然，配方会有多组，应分别通过实验和生产实践，根据我们对其爆炸性能、技术经济指标、使用条件等综合要求来确定其中最优配方。

因此，对于三组分的情况，我们无法单独按零氧平衡的要求，简单地算出它的配方，而只能定出某一个范围，再根据要求去确定它。

对于含有食盐的四组成混合炸药，实际上也是按三组分方法来计算配方的。因为食盐的氧平衡等于零，所以，只要大致定出食盐的配比，余下三个组分则按上述方法定出比例范围。当然，合理的配方，也只能在综合的实验之后作出。

3. 四种以上成分计算法

随着组分的增多，变数相应增加，计算将更复杂。这时，可根据实验经验，先定出某些

较有把握的组分的比例，使配比未定的组分减少为两、三个，然后再根据上述方法计算。

五、有毒气体

在炸药爆炸生成的气体产物中，CO 和氮氧化物（NO，NO₂，N₂O₃，N₂O₄）都是有毒气体（或称有害气体）。炸药内含硫或硫化物时，还能生成硫化氢和亚硫酸酐等有毒气体。上述有毒气体的毒性，用空气中的危险浓度来表示，见表 1-9。

表 1-9 有毒气体在空气中的危险浓度

有毒气体	各种危险浓度 (mg/L)			
	吸入数小时将引起轻微中毒	吸入 1 小时后将引起严重中毒	吸入 0.5~1 小时就会有致命危险	吸入数分钟就会死亡
一氧化碳	0.1~0.2	1.5~0.6	1.6~2.3	—
氧化氮	0.07~0.2	0.2~0.4	0.2~1.0	0.5
硫化氢	0.01~0.2	0.25~1.4	0.5~1.0	1.2
亚硫酸酐	0.025	0.06~0.26	1.0~1.05	—

分析表 1-9 中的数据可以看出，氧化氮的毒性比 CO 高得多。若按毒性折算，每升氧化氮相当于 6 升 CO，即折算系数为 6。

有毒气体不仅对人体有害，而且某些有毒气体对煤矿井下瓦斯能起催化作用（例如氧化氮）或引起二次火焰（例如 CO、H₂）。因此，对井下使用炸药产生的有毒气体量应有严格的限制。若将各种有毒气体按毒性折算成 CO，每千克炸药生成的有毒气体量不应超过 80 升。

但须指出，气体产物在膨胀过程中，随着温度和压力的下降，组分将不断发生变化，有毒气体则应根据冷却后的气体产物组分来判断。

因有毒气体的形成受许多因素影响，很难从理论上给以精确计算，一般通过试验或在现场抽样，对样品进行化学分析予以测定。

形成有毒气体的主要原因有：

1. 炸药的氧平衡。有毒气体量与氧平衡的关系如表 1-10 和表 1-11 所示。

表 1-10 有毒气体量与氧平衡的关系(实验室测定资料)

炸药组成(%)		氧平衡 (%)	干燥后的产物组分 (%)						
硝酸铵	梯恩梯		CO ₂	CO	NO	H ₂	CH ₄	N ₂	O ₂
95	5	+18	16.6	4.55	—	0.55	1.2	76.1	1
88	12	+8.7	27.95	4.9	3.25	0.5	1.55	61.85	—
83	17	+4	32.05	5.35	2.35	1.7	1.6	56.95	—
79	21	+0.3	32.3	5.65	2.75	1.85	1.65	55.6	—
70	30	-8.2	26.6	13.85	0.7	2.3	2.15	54.4	—

分析表中数据可以看出，随正氧平衡炸药内剩余氧量增加，氮氧化物增多，而 CO 减少；随负氧平衡炸药内不足氧量增加，氮氧化物减少，而 CO 增多，零氧平衡炸药形成有毒气体量最少。因此，井下使用炸药应尽可能使之接近于零氧平衡。