

张守中 主编



爆炸 基本原理

国防工业出版社

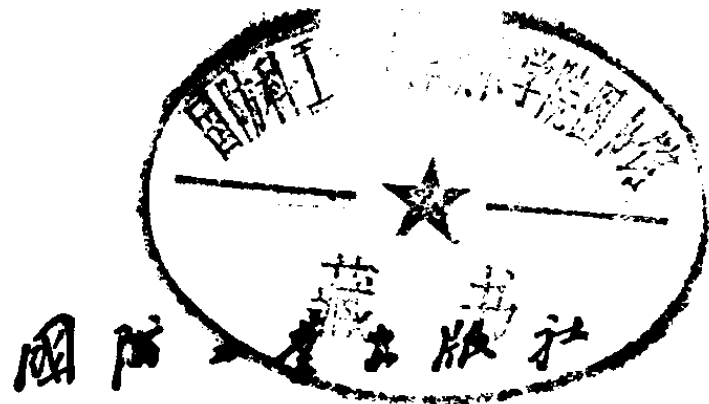
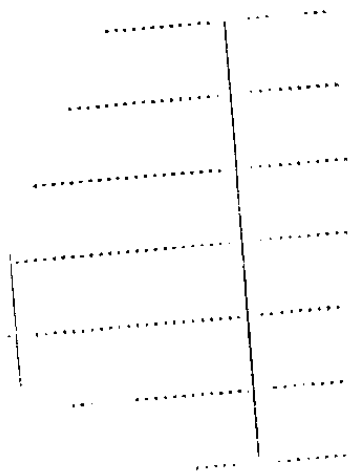
97440



科工委学院802 2 0028433 8

爆炸基本原理

张守中 主编



内 容 简 介

本书主要阐述炸药爆炸的基本原理和规律。全书共分十二章。内容包括：炸药爆炸原理，热力学知识，炸药的起爆和感度，爆炸反应，膨胀波和冲击波，爆轰波理论，炸药的猛度和威力，爆轰产物的直接作用，爆炸空气冲击波，杀伤作用，聚能效应和在岩土中爆炸等。

本书可作为从事弹药生产、民用爆破、石油射孔等方面的工程技术人员、技术管理人员学习用书，也可作为专业教育培训教材。

爆炸基本原理

张守中 主编

责任编辑 崔金泰

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京市顺义县印刷厂印装

787×1092 $1/32$ 印张 $19\frac{5}{8}$ 435千字

1988年4月第一版 1988年4月第一次印刷 印数：00,001—1,250册

ISBN-7-118-00151-1/07 定价：5.20元

SF53/02

前 言

本书由兵器工业部机动技安局组织编写，目的在于提高技安管理干部的技术安全知识和技安管理水平。本书可作为技安管理人员、生产技术人员培训教材，也可供从事弹药生产、民用爆破、石油射孔等方面工程技术人员学习使用。

爆炸是一种极其迅速的能量释放过程。在这个过程中，炸药的内在化学能转变成机械功，通过高压爆轰产物、冲击波以及杀伤破片或聚能流等对外界进行破坏。但是爆炸在国民经济中，尤其是在国防建设方面有着重要的应用。为了进行安全生产和管理，必须了解爆炸的基本现象，熟悉爆炸的基本原理，掌握爆炸的客观规律。

本书主要阐述炸药爆炸的基本原理和它对外界的作用，其内容包括：爆炸的三大特征，炸药的各种感度，炸药的爆炸过程及其参数的计算，爆炸空气冲击波的作用和设防安全距离，在岩土中爆炸的现象和地震安全距离，以及杀伤、聚能效应等。读者通过本书的学习，可以掌握爆炸的基本知识，提高分析和处理问题的能力。

本书初稿曾在兵器工业部机动技安局举办的技术安全培训班上两次试用，并广泛征求了意见，这为本书正式出版打下了一定基础。

全书共分十二章。第一、二、四、五、六、七、九、十一和十二章由张守中编写，第三、八章由赵衡阳编写，第十章由孙业斌编写。张守中任主编，王一武同志进行了审校。

本书在试用和编写过程中，得到了原兵器工业部刘化民同志的热情支持和指导，对此表示衷心感谢。

由于编者水平所限，难免存在一些错误和不足之处，欢迎读者批评指正。

目 录

第一章	炸药的爆炸	1
§ 1-1	爆炸现象	1
§ 1-2	炸药爆炸的三大特征	3
§ 1-3	化学爆炸与其他形式化学反应的区别	7
§ 1-4	炸药的种类	9
§ 1-5	炸药爆炸性能的标志	15
第二章	热力学知识	19
§ 2-1	气体的分子运动	19
§ 2-2	理想气体状态方程	21
§ 2-3	状态参数	24
§ 2-4	热力学第一定律	26
§ 2-5	比热	31
§ 2-6	焓和熵	35
§ 2-7	热力学第二定律	40
§ 2-8	各种状态变化过程	43
第三章	炸药的起爆及感度	50
§ 3-1	炸药的热起爆及热感度	50
§ 3-2	炸药的机械起爆及机械感度	61
§ 3-3	炸药的冲击起爆及冲击波感度	80
§ 3-4	炸药的静电形成原理和静电感度	95
第四章	爆炸反应	106
§ 4-1	炸药的氧平衡	106
§ 4-2	爆炸反应方程式	109

V

§ 4-3	爆容	115
§ 4-4	爆热	117
§ 4-5	爆温	134
第五章	波	148
§ 5-1	三大守恒定律	148
§ 5-2	弱波	154
§ 5-3	冲击波	172
§ 5-4	波的相互作用	199
第六章	爆轰波理论	223
§ 6-1	爆轰波	223
§ 6-2	气相爆轰参数的计算	238
§ 6-3	凝聚相炸药爆轰参数近似理论计算	248
§ 6-4	瞬时爆轰	256
§ 6-5	爆速和爆压的工程计算	260
§ 6-6	混合炸药爆速和爆压计算经验公式	268
§ 6-7	爆速的实验测定	277
§ 6-8	爆压的实验测定	284
§ 6-9	爆轰反应机理	302
§ 6-10	影响爆轰传播的因素	305
§ 6-11	燃烧转变为爆轰	319
第七章	炸药的威力和猛度	334
§ 7-1	炸药的威力	334
§ 7-2	炸药的猛度	339
第八章	爆轰产物的直接作用	347
§ 8-1	爆轰产物的一维流动	347
§ 8-2	炸药爆炸对接触介质直接作用的初始值	366
第九章	爆炸空气冲击波	375
§ 9-1	空气中爆炸的基本现象	375
§ 9-2	相似理论	388

§ 9-3	爆炸空气冲击波随距离衰减时参数的计算	394
§ 9-4	空气冲击波的测定	414
§ 9-5	空气冲击波在目标上的反射	418
§ 9-6	大药量爆炸时冲击波的环流作用	429
§ 9-7	空气冲击波的破坏作用	439
§ 9-8	冲击波设防安全距离	444
§ 9-9	殉爆	458
§ 9-10	危险建筑物(A级)设防安全距离的确定	472
第十章	杀伤作用	488
§ 10-1	杀伤弹爆炸的基本现象	489
§ 10-2	杀伤破片的计算	492
§ 10-3	杀伤标准及确定原则	514
§ 10-4	影响破片杀伤作用的因素	520
§ 10-5	控制破片的方法	524
第十一章	聚能效应	531
§ 11-1	聚能现象	531
§ 11-2	射流的速度和质量	543
§ 11-3	破甲深度	551
§ 11-4	影响破甲威力的因素	557
第十二章	岩土中爆炸	579
§ 12-1	岩土中爆炸的基本现象	579
§ 12-2	爆破作用区	582
§ 12-3	地下爆炸安全距离	598
§ 12-4	岩土中爆炸的影响因素	614

第一章 炸药的爆炸

§ 1-1 爆炸现象

所谓爆炸，是大量能量在有限体积和极短时间内迅速释放或急骤转化的现象。例如：炸药化学能量的高速释放会产生爆炸；高速碰撞时，弹体动能急剧变化，也能产生爆炸；高速粒子束（如强激光束、相对论电子束、重离子束）作用于物质上，同样能形成爆炸；工业技术上的高压放电，大型铸件在水中刷冷清沙，高压容器受热，乙炔管道回火，都会产生爆炸；煤粉或面粉悬浮于空气中、天然气与空气的混合物，在一定条件下也会产生爆炸；自然界中的雷电、地震、火山爆发，也都是爆炸现象。

爆炸现象就其产生的原因来说，可以分成化学爆炸、物理爆炸和核爆炸。

过热的蒸汽锅炉爆炸是典型的物理爆炸现象。在这种爆炸中，过热的水迅速转变为蒸汽，而大量蒸汽的产生使锅炉内压力不断提高，当蒸汽压力超过锅炉能够承受的程度时，锅炉破裂，形成爆炸。

大自然中的雷电属于物理爆炸现象，其能源为电能。带有不同电荷的两块云彩，当距离比较近时，发生强烈的放电现象，电位差在 μs 数量级时间内拉平，使放电区达到极其巨大的能量密度和数万度的高温，因而导致了放电区空气压力的急剧升高，并在周围空气中形成强烈的扰动。

炸药的爆炸，石油液化气体与一定比例的空气混合物所引起的爆炸属于化学爆炸。化学爆炸是通过化学反应将物质内潜在的化学能，在极短时间内迅速释放出来，转变成热能，使爆轰产物由于达到 10^3K 以上的高温和 10^{10}Pa 以上的压力，而迅速向外膨胀，在空气中形成冲击波，并对外做功。

原子弹、氢弹的爆炸属于核爆炸。原子弹是用铀 235 或钚 239 的裂变来实现的。核裂变时，铀 235 或钚 239 的原子核在中子的作用下分裂成为较轻的原子核，放出大量的核能。氢弹是用氘、氚或锂的聚变来实现的。核聚变时，氘、氚或锂的原子核在极高温度的条件下结合成为较重的原子核，也能放出大量的核能。1g 铀 235 全部进行核裂变放出的能量相当于 $2 \times 10^7\text{kg}$ 梯恩梯的能量，1g 氘元素全部进行核聚变时放出的能量相当于 $1.4 \times 10^8\text{kg}$ 梯恩梯的能量。核爆炸时原子核反应区的温度达到 10^7K ，压力达到 10^{16}Pa 以上，在这样高的温度和压力的作用下，其能量以冲击波、光辐射和贯穿辐射等形式表现出来，对外界产生极其严重的破坏。因此，核爆炸是更加剧烈的爆炸现象。

综上所述，一般地说，爆炸是一种极其迅速的物理或化学的能量释放过程，在此过程中，系统的潜能转变为运动的机械能，然后对外做功。因而爆炸现象表现出两个阶段，在第一个阶段中，物质的能量以一定的方式转变为强烈的压缩能；在第二个阶段中，压缩能急剧地向外膨胀，在膨胀过程中对外做功，引起被作用介质的变形、移动和破坏。

爆炸的主要征象是爆炸点周围介质中压力突然急剧上升，这个突然上升的压力是破坏作用的直接因素。爆炸的对外征象是由于介质振动而产生的声响效应。

§ 1-2 炸药爆炸的三大特征

炸药是这样一种物质，在一定的外界条件作用下，能够进行高速的化学反应，放出热量，并且产生大量的气体产物。

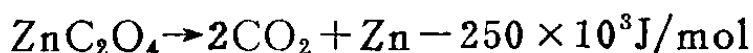
拿常见的鞭炮来说，纸卷的外壳中间装填着黑火药。黑火药就是一种炸药。当点燃引药捻，黑火药迅速燃烧，产生化学反应，并放出热量和气体产物。大量的高压气体胀破纸壳，同时发出声响和闪光，这就完成了爆炸的全过程。

从上述现象看出，炸药爆炸有三个特征，即反应的放热性、过程的高速度和反应过程中生成大量气体产物。这三个特征也是炸药爆炸时所必须具备的要素，缺一不可不能产生爆炸现象。同样也只有具备这三个要素的物质，才能称之为炸药。

一、反应的放热性

放热是炸药爆炸的能量。爆炸反应只有在炸药自身提供能量的条件下才能自动进行。没有这个条件，爆炸过程就根本不能发生；没有这个条件，反应也就不能自行延续，因而也不可能出现爆炸过程的反应传播。显然，依靠外界供给能量来维持其分解的物质，不可能具有爆炸的性质。

例如，草酸盐的分解反应可以作为典型例子：



第一种反应是吸热反应，只有在外界不断加热的条件下才能进行，因而不具有爆炸性质；第二种反应具有爆炸性，但因放出的热量不大，爆炸性不强；第三种反应具有显著的

爆炸性质。

爆炸反应所放的热量称为爆热。它是爆炸破坏作用的能源，是炸药爆炸做功能力的标志。

二、过程的高速度

过程的高速度是爆炸反应与一般化学反应的重要区别点。炸药爆炸反应大约是在 10^{-6} s 或 10^{-7} s 数量级的时间内进行的。虽然炸药的能量贮藏量并不比一般燃料大，但由于反应过程的高速度，使炸药爆炸时能够达到一般化学反应所无法比拟的高得多的能量密度。

表 1-2-1 提供了石油、煤和几种炸药的放热量和能量密度数据。

表1-2-1 炸药和一般燃料的放热量和能量密度

物质名称	单位质量物质的放热量 (J/kg × 10 ⁶)	单位体积炸药或燃料 空气混合物的能量密度 (J/L × 10 ³)
煤	32.66	3.60
汽油	41.87	3.68
黑火药	2.93	2805
梯恩梯	4.19	6700
黑索金	5.86	10467

例如，1 kg 煤块燃烧可以放出 3.266×10^7 J 的热量，这个热量比 1 kg 梯恩梯炸药爆炸放出的热量要多几倍，可是这块煤燃烧的时间大约需要几分钟到几十分钟才能完成，在这段时间内放出的热量不断以热传导和辐射的形成传递出去，因而虽然煤的放热量很多，但是单位时间的放热量并不多，同时还要注意到煤的燃烧是与空气中的氧进行化学反应而完成的。1 kg 煤的完全反应就需要 2.67kg 的氧，这样多的氧必

须由 9m^3 的空气才能提供，因而作为燃烧原料的煤和空气的混合物，单位体积所放出的热量也只有 3600J/L ，所以能量密度很低。

爆炸反应就完全相反，炸药反应一般都是以 $(5\sim 8)\times 10^8\text{m/s}$ 的速度进行。一块 10cm 见方的炸药爆炸反应完毕也就需要 $10\mu\text{s}$ 的时间。由于反应速度极快，虽然总放热量不是太大，但在这样短暂时间内的放热量却比一般燃料燃烧时在同样时间内放出的热量高出上千万倍。同时，由于爆炸反应无须空气中的氧参加，在反应所进行的短暂时间内反应放出的热量来不及散出，以致可以认为全部热量都集聚在炸药爆炸前所占据的体积内，这样单位体积所具有的热量就达到 10^6J/L 以上，比一般燃料燃烧要高数千倍。

由于过程的高速度，使炸药内所具有的能量在极短时间内放出，达到极高能量密度，所以炸药爆炸具有巨大做功功率和强烈的破坏作用。

三、反应过程生成气体产物

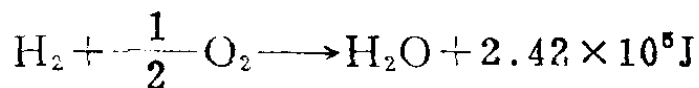
反应过程中有气体产物生成，是炸药爆炸反应的又一重要特点。爆炸瞬间炸药定容地转化为气体产物，其密度要比正常条件下气体的密度大几百倍到几千倍，也就是说正常情况下这样多体积的气体被强烈压缩在炸药爆炸前所占据的体积内，从而造成 $(10^9\sim 10^{10})\text{Pa}$ 以上的高压。同时由于反应的放热性，这样处于高温、高压下的气体产物必然急剧的膨胀，把炸药的位能变成气体运动的动能，对周围介质做功，在这个过程中，气体产物既是造成高压的原因，又是对外界介质做功的工质。表 1-2-2 提供了几种炸药爆炸生成的气体量。

表1-2-2 某些炸药爆炸气体产物在标准条件下的体积(L)

炸 药	1 kg炸药放出的气体产物	1 L炸药放出的气体产物
梯恩梯	740	1180
特屈儿	760	1290
泰安	790	1320
黑索金	908	1630
奥克托金	908	1720

由表 2 看出, 1 kg 猛炸药爆炸生成的气体换算到标准状态($1.0133 \times 10^5 \text{Pa}$, 273K)下的气体体积为 $7000 \sim 10000 \text{L}$, 这个体积为炸药爆炸前所占体积的 $1200 \sim 1700$ 倍。

当气体爆炸时, 体积一般不会增大, 例如氢、氧混合爆炸就是这样一个例子。

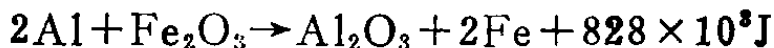


爆炸产物体积在标准状态下比爆炸前减少了三分之一。但是由于反应速度很快, 而且放出大量热量加热反应产物, 使其压力提高到 10^6Pa 以上, 然后再迅速向外膨胀做功。

爆炸过程生成气体产物的重要性, 还可以通过一系列不生成气体产物的反应来看出。例如金属硫化物的形成反应:



或铝热剂反应



尽管反应非常迅速, 且放出很多的热量, 后一个反应放出的热量足以把反应产物加热到 3000K , 但是终究由于没有气体产物生成, 没有把热能转变为机械能的媒介, 无法对外做功, 所以不具有爆炸性。

从上面的讨论可以看出，对于爆炸来说，放热性、高速度、生成气体产物是缺一不可的，只有在三个特征同时具备的条件下，化学反应过程才具有爆炸的特性。

§ 1-3 化学爆炸与其他形式化学反应的区别

炸药在不同的条件下能发生三种基本形式的化学反应过程，即热分解、燃烧和爆炸。

热分解是炸药在通常的环境温度条件下不断缓慢进行着的自身分解反应。这种反应进行的速度取决于炸药所处的环境温度，温度愈高，反应速度愈快。这种化学反应没有什么实用价值。并且，热分解严重的炸药安定性差，不易长期储存。

燃烧是一种激烈的化学反应形式。这种化学反应以波的形式在炸药中进行，此波称为燃烧波。燃烧波的传播速度，就是燃烧速度。燃烧速度一般为几毫米每秒至几百米每秒。

爆炸是最激烈的一种化学反应形式，这种化学反应以爆炸波的形式进行。一般炸药的爆炸速度为 $5000\sim 8000\text{m/s}$ 。

爆炸与热分解的主要区别在于：

1. 热分解是在整个炸药中展开的，没有集中的反应区域；而爆炸是在炸药局部发生的，并以波的形式在炸药中传播。

2. 热分解在不受外界任何特殊条件作用时，一直不断地自动进行；而爆炸在外界特殊条件作用下才能发生。

3. 热分解与环境温度关系很大，其规律符合阿累尼乌斯定律，化学反应速度常数与温度成指数关系，即随着温度的升高，热分解速度将按指数规律迅速增加；而爆炸与环境温度无关。

爆炸与燃烧的主要区别在于：

1. 燃烧与爆炸虽然都是以波的形式传播，但传播速度绝然不同，燃烧的速度为几毫米每秒到几米每秒，最大也只有几百米每秒，也就是说燃烧的速度大大低于原始炸药中的声速；而爆轰的速度通常是几千米每秒，也就是说爆炸的速度一定大于原始炸药中的声速。

2. 从传播连续进行的机理来看，燃烧时化学反应区放出的能量是通过热传导、辐射和气体产物的扩散传入下一层炸药，激起未反应的炸药进行化学反应，使燃烧连续进行；而在爆轰时，化学反应区放出的能量以压缩波的形式提供给前沿冲击波，维持前沿冲击波的强度，然后借助于前沿冲击波的冲击压缩作用激起下一层炸药进行化学反应，使爆轰连续进行。

3. 从反应产物的压力来看，燃烧产物的压力通常很低，对外界显示不出力的作用；而爆炸时产物压力可以达到 10^{10} Pa 以上，爆炸向四周传出冲击波，有强烈的力效应。

4. 从反应产物质点运动方向来看，燃烧产物质点运动方向与燃烧传播的方向相反；而爆炸产物质点运动方向与爆轰传播的方向相同。

5. 从炸药本身条件来看，随着装药密度的增加，炸药颗粒间的孔隙度减小，燃烧速度下降；而对于爆轰来说，随着装药密度的增加，单位体积物质化学反应时放出的能量增加，使之对于下一层炸药的冲压加强，因而爆轰速度增加。

6. 从外界条件影响来看，燃烧易受外界压力和初温的影响，其中压力的影响更为严重。当外界压力低时，燃烧速度很慢，随着外界压力的提高，燃烧速度加快，当外界压力过高时，燃烧变得不稳定，以致转变成爆轰；爆轰基本上不受外界条件的影响。

本书对于炸药爆炸习惯上采用了两个名词：爆炸和爆轰。

一般来说，具有爆炸三个特征（放热性、高速度、生成气体产物）的化学反应，皆称为爆炸，其爆炸传递的速度可能是变化的；爆轰除了具备爆炸的三个特征之外，还要求传播的速度是恒定的。因而，爆炸一般笼统定义具有三大特征的化学反应，而爆轰专门定义传播稳定的爆炸过程。

§ 1-4 炸药的种类

前面讲了爆炸的三大特征，以及爆炸与其它化学反应的区别。下面大致介绍有关炸药的一些知识。

什么是炸药呢？广义地说，能够进行化学爆炸的物质称之为炸药。然而，这种说法与实际应用中存在有很大的差别。一些物质虽然在一般条件下不作为炸药使用，但是在特定条件下却能进行爆炸反应。炸药的缓慢分解反应、燃烧和爆轰虽然各有不同，但是也有着紧密地内在联系，在一定条件下缓慢的化学反应能够转变为燃烧，燃烧在一定条件下又能转变为爆轰。

炸药的种类，可以按照应用特性划分，也可以按照化学结构划分。由于本书主要内容是爆炸作用原理，而不是炸药性质，因而对炸药只是按照应用的范围进行分类，并且介绍一下常用猛炸药的种类。

一、炸药分类

按照应用范围，炸药可以划分成四大类：起爆药，猛炸药，火药和烟火药。

1. 起爆药

主要用途是作为爆炸过程的引爆剂，用来激发猛炸药进行爆轰。