

280747

# 爆炸物理基础

(内 部)

北京工业学院一系编



## 毛 主 席 语 录

新的世界大战的危险依然存在，各国人民必须有所准备。

备战，备荒，为人民。

理论的基础是实践，又转过来为实践服务。

古为今用，洋为中用。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 前 言 .....                       | 1  |
| 第一章 绪 论 .....                   | 3  |
| § 1-1 爆炸科学发展历史简述 .....          | 3  |
| § 1-2 各种爆炸现象 .....              | 4  |
| § 1-3 炸药爆炸的特征 .....             | 5  |
| § 1-4 炸药化学变化的基本形式 .....         | 8  |
| § 1-5 炸药的分类 .....               | 9  |
| 第二章 炸药对外界作用的感度 .....            | 12 |
| § 2-1 引 言 .....                 | 12 |
| § 2-2 炸药的热感度及热爆炸机理 .....        | 13 |
| § 2-3 炸药对机械作用的感度 .....          | 20 |
| § 2-4 机械作用激发爆炸的机理——热点学说 .....   | 21 |
| § 2-5 炸药对冲击波的感度 .....           | 27 |
| § 2-6 炸药对发射惯性力作用的感度 .....       | 28 |
| § 2-7 炸药对静电和电火花的感度 .....        | 31 |
| § 2-8 影响炸药感度的因素 .....           | 36 |
| § 2-9 对感度测定工作问题及研究方向的一些看法 ..... | 40 |
| § 2-10 炸药的热分解和安定性 .....         | 41 |
| 第三章 炸药的热化学 .....                | 44 |
| 引 言 .....                       | 44 |
| § 3-1 炸药的爆热 .....               | 44 |
| § 3-2 炸药的爆温 .....               | 50 |
| § 3-3 炸药的爆炸分解反应 .....           | 55 |
| (一)确定爆炸产物组成的简化法则 .....          | 55 |
| (二)爆炸产物体积 $V_0$ 的计算 .....       | 56 |
| (三)爆炸产物组成的理论计算 .....            | 57 |
| 第四章 炸药的爆轰过程 .....               | 66 |
| § 4-1 爆速的实验测定 .....             | 67 |
| § 4-2 爆轰波的 C-J 理论 .....         | 71 |
| 引 言 .....                       | 71 |
| 爆轰波 C-J 理论 .....                | 72 |
| 气体爆轰波参数的近似计算 .....              | 82 |
| § 4-3 凝聚炸药的爆轰理论 .....           | 86 |

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| (一)凝聚炸药爆轰产物的状态方程式 .....                | 86  |
| (二)凝聚炸药爆轰参数理论计算方法 .....                | 93  |
| (三)凝聚炸药爆轰参数的近似计算 .....                 | 95  |
| § 4-4 爆轰波反应区的结构 .....                  | 100 |
| (一)爆轰波的 Z-N-D 模型 .....                 | 100 |
| (二)反应区中状态参数的分布 .....                   | 101 |
| (三)凝聚炸药的爆轰波结构 .....                    | 106 |
| (四)凝聚炸药中爆炸反应的机理 .....                  | 109 |
| § 4-5 非理想的爆轰波 .....                    | 111 |
| § 4-6 炸药由燃烧转变为爆轰 .....                 | 120 |
| (一)凝聚炸药燃烧的实验结果 .....                   | 120 |
| (二)凝聚炸药燃烧反应的两种机理 .....                 | 122 |
| (三)燃烧转变为爆轰 .....                       | 125 |
| § 4-7 爆轰波的形状及其控制 .....                 | 126 |
| (一)引言 .....                            | 126 |
| (二)爆轰波形的控制 .....                       | 129 |
| 附录 计算凝聚炸药爆轰参数的 JI-C 方法 .....           | 135 |
| <b>第五章 爆炸冲击波的初始参量及实验测量</b> .....       | 143 |
| § 5-1 爆炸冲击波初始参量的计算 .....               | 143 |
| (一)理论计算方法 .....                        | 143 |
| (二)图解方法 .....                          | 149 |
| § 5-2 冲击波参量的测量方法及其在物质动力压缩性研究上的应用 ..... | 151 |
| (一)原理概述 .....                          | 152 |
| (二)冲击波速度 $D_s$ 的实验测量方法 .....           | 152 |
| (三)质点速度 $u$ 的测量方法 .....                | 154 |
| (四)介质动力压缩性的实验结果 .....                  | 158 |
| § 5-3 爆轰波 C-J 压力的实验测定 .....            | 161 |
| <b>第六章 爆炸产物的一维飞散及爆炸推进作用</b> .....      | 172 |
| § 6-1 气体介质的一维等熵不定型流动问题 .....           | 172 |
| (一)介质一维等熵流动基本方程式 .....                 | 172 |
| (二)方程组(6-1-10)的特征及一般解——复合波流动 .....     | 174 |
| (三)方程组(6-1-10)的特殊解——简单波流动 .....        | 175 |
| § 6-2 爆轰产物的一维飞散 .....                  | 176 |
| § 6-3 接触爆炸作用于刚壁面上的压力和冲量 .....          | 187 |
| (一)爆轰波对迎面刚壁的作用 .....                   | 187 |
| (二)管侧壁某断面所受到的比冲量 .....                 | 189 |
| (三)无壳装药接触爆炸对迎面刚壁的作用 .....              | 191 |
| (四)接触爆炸时端部冲量的测定 .....                  | 193 |



|             |                        |            |
|-------------|------------------------|------------|
| § 6-4       | 接触爆炸对物体的一维抛射 .....     | 194        |
| § 6-5       | 以爆炸推进作用获得高速弹丸简述 .....  | 198        |
| <b>第七章</b>  | <b>聚能效应 .....</b>      | <b>204</b> |
| § 7-1       | 聚能效应的基本现象 .....        | 204        |
| § 7-2       | 药型罩的变形和金属流的形成 .....    | 207        |
| § 7-3       | 有效药量与爆轰波形 .....        | 216        |
| § 7-4       | 金属流的参数计算 .....         | 220        |
| § 7-5       | 金属流的破甲机理及破甲深度计算 .....  | 229        |
| § 7-6       | 影响破甲威力的主要因素 .....      | 246        |
| § 7-7       | 聚能效应某些参数的实验测定 .....    | 252        |
| <b>第八章</b>  | <b>应力波反射破甲作用 .....</b> | <b>259</b> |
| § 8-1       | 基本现象 .....             | 259        |
| § 8-2       | 在接触面上的破坏作用 .....       | 263        |
| § 8-3       | 应力波的基本知识 .....         | 269        |
| § 8-4       | 层裂的机理及参数计算 .....       | 283        |
| § 8-5       | 影响层裂效应的主要因素 .....      | 294        |
| § 8-6       | 斜冲击时的层裂效应 .....        | 299        |
| <b>第九章</b>  | <b>杀伤作用 .....</b>      | <b>308</b> |
| § 9-1       | 杀伤战斗部的用途及杀伤标准 .....    | 308        |
| § 9-2       | 整体式战斗部破片的形成 .....      | 309        |
| § 9-3       | 控制破片的各种方法 .....        | 324        |
| § 9-4       | 破片飞散速度及其运动方程 .....     | 328        |
| § 9-5       | 战斗部对目标的杀伤威力计算 .....    | 340        |
| § 9-6       | 战斗部对空中目标的杀伤作用 .....    | 354        |
| <b>第十章</b>  | <b>空气中爆炸 .....</b>     | <b>364</b> |
| § 10-1      | 空气中爆炸的基本现象 .....       | 364        |
| § 10-2      | 平面冲击波的基本方程 .....       | 371        |
| § 10-3      | 空气中爆炸时冲击波的初始参数 .....   | 375        |
| § 10-4      | 空气冲击波的爆炸相似律 .....      | 378        |
| § 10-5      | 装药运动时对爆炸作用的影响 .....    | 387        |
| § 10-6      | 空气冲击波的实验测定 .....       | 388        |
| § 10-7      | 空气冲击波与目标的作用 .....      | 391        |
| § 10-8      | 空气中爆炸的破坏作用和安全距离 .....  | 401        |
| <b>第十一章</b> | <b>密实介质中的爆炸 .....</b>  | <b>408</b> |
| § 11-1      | 水中爆炸的基本现象 .....        | 408        |
| § 11-2      | 水中冲击波 .....            | 411        |
| § 11-3      | 水中冲击波的传播 .....         | 417        |
| § 11-4      | 水中爆炸的气泡脉动 .....        | 423        |

|        |                  |     |
|--------|------------------|-----|
| § 11-5 | 水中爆炸的破坏作用 .....  | 424 |
| § 11-6 | 土中爆炸的基本现象 .....  | 426 |
| § 11-7 | 土中爆炸装药量的计算 ..... | 431 |

## 附 录

|        |                                                                                     |     |
|--------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 附录 I   | 常用炸药的主要示性数 .....                                                                    | 438 |
| 附录 II  | 常用炸药及爆炸产物的生成热 .....                                                                 | 441 |
| 附录 III | 各种气体及石墨( $C_{\text{固}}$ )从 $291^{\circ}\text{K}$ 到 $T^{\circ}\text{K}$ 时的内能变化 ..... | 443 |
| 附录 IV  | 爆炸产物固体组分从 $291^{\circ}\text{K}$ 至 $T^{\circ}\text{K}$ 时的内能变化 .....                  | 445 |

# 前 言

爆炸是在自然界中经常发生的一种物理过程或物理化学过程。在爆炸过程中以极高的速度释放出大量的能量，通过爆炸产生的气态产物(或被加热气化的周围介质)对周围介质做功，产生破坏作用，如破坏弹体并形成破片，爆破矿山抛掷岩石，在介质(空气、水、固体材料等)当中形成冲击波等等。爆炸最主要的特征就是在爆炸中心周围的介质中产生压力突跃，这是造成破坏作用的直接原因。

军事上应用的各种弹药和爆破器材都是靠爆炸作用来达到破坏目标的。在社会主义经济建设中炸药爆炸这种高功率的能量也日益广泛地得到应用，例如爆破矿山，开凿隧道，疏浚河流，定向爆破筑坝，利用爆炸进行金属焊接或成型加工以及用爆炸制造金刚石等等。因此，爆炸现象的研究对于我国国防建设和经济建设都具有很重要的意义。

“爆炸物理基础”讲义着重研究讨论炸药爆炸的物理或化学物理过程及爆炸对周围介质作用的规律性。它为我们研究改进炸药爆炸性能，提高爆炸能量利用率以及设计和改进各种战斗部的威力性能提供有关的基本理论。

当前世界形势的特点是天下大乱，“山雨欲来风满楼”。世界在变，变得越来越对革命有利，对反革命不利。然而，帝国主义和各国反动派并不甘心于它们的失败。当前苏修美帝两霸在世界上既勾结，又争夺，它们到处炫耀武力，搅得世界不得安宁，特别是苏修社会帝国主义，野心勃勃到处伸手。它还在我国边境陈兵百万，虎视眈眈，妄图对我国发动所谓先发制人的侵略战争，对此我们必须保持高度的警惕。

帝国主义就是战争。毛主席教导我们：“新的世界大战的危险依然存在，各国人民必须有所准备。”并且号召我们要“深挖洞，广积粮，不称霸”。对付苏修美帝发动的侵略战争，是我们学习和工作的立足点和出发点。

我们肩负着研制和设计各种性能好，威力大，使用安全的优质弹药的重任。要完成党交给我们的这一光荣使命，就必须踏实地学好有关理论，掌握炸药爆炸及其对介质作用的基本规律，为将来从事爆炸科学研究及弹药设计与威力性能改进工作打下必要的理论基础。

本讲义共分十一章，前四章阐述的是炸药爆炸的一般原理包括炸药的通性，爆炸现象，爆轰过程的激发和传播以及炸药爆轰参数计算等方面的基本理论；第五章讨论了爆炸冲击波初始参数的理论计算和实验测定的一般原理，第六章则主要是应用气体动力学的知识讨论爆炸产物进行一维飞散时的基本规律。

后五章着重讨论炸药爆炸完了后对周围介质的作用规律，包括战斗部的破片杀伤作用，聚能破甲作用，碎甲作用以及空气中和密实介质(水及岩石土壤)中炸药的爆炸作用等。

爆炸物理是一门新兴的正在发展中的学科，许多内容尚不完善，有待进一步地充实和发展。

在讲义编写过程中，有关厂，研究所，部队和兄弟院校的同志们给了我们很大的支持和帮助，大家把多年所做的实验和理论工作成果毫无保留地贡献出来，并热情地对教材提出许

多宝贵意见，对此我们表示衷心的感谢。

由于我们政治思想和业务水平较低，讲义中必有许多错误和不妥之处，欢迎大家提出批评意见。



# 第一章 绪 论

## § 1-1 爆炸科学发展历史简述

与其他科学发展一样,爆炸科学也是由劳动人民在生产斗争、阶级斗争和科学实验中建立和不断发展起来的。

当人类进入阶级社会以后人类不但需要向自然界作斗争而且由于社会划分为阶级而开始了阶级斗争,出现了阶级之间与民族之间的战争。因而使武器弹药有了发展的需要。随着防御的发展,武器弹药逐渐改良和演进,这又进一步刺激防御技术的革新,如此竞进不止,武器弹药及爆炸科学技术不断得到发展。

我们伟大的祖国对爆炸科学的发展作出了极其重要的贡献。我国是黑火药的祖国。远在公元前 200 年左右,我国劳动人民就发明了直至现在仍广泛应用的黑火药。早在周朝时廷燎就利用黑药制成了爆竹;三国时期我国已利用黑药制成了火攻武器——火球和火箭等。烟火技术到隋唐时期发展极盛。到唐朝末期(公元九世纪)黑药已广泛用在抛射弹药上了。11 世纪我国兵书“武经总要”中就有霹雳火球,用火锥烙球,声如霹雳的记载。1277 年南宋抵抗元兵用了“大火炮”,并有“爆炸后声如雷霆,烟气漫天,城壁皆塌,城内外震死二百余人”的的记载,足见当时我国应用爆炸于军事上已达到相当的规模。

然而由于数千年封建统治的桎梏,我国科学的发展受到严重阻碍。直至 1949 年中华人民共和国成立,在党和毛主席的领导下,我国兵工事业和爆炸科学才获得了重新发展的广阔天垠。

世界上爆炸科学技术的迅速发展是在十八世纪后半期。工业革命以后资本主义的发展,封建社会的崩溃,解放了社会生产力,使得各种科学技术包括爆炸科学技术迅速地发展起来。

1799 年发现了雷汞,1815 年首次用起爆药制造火帽。1846 年发现了硝化甘油和硝化棉。1865 年诺贝尔发明了雷管并用它来引爆炸药获得高速爆轰现象。这对爆炸科学技术的发展具有重要的意义。

1881 年首次观察到气体中爆轰波。1885 年将猛炸药苦味酸装填炮弹。1888 年发现了空心装药的聚能效应。

1899 年米海尔逊和柴普曼等各自独立地创立了爆轰波的流体动力学理论,柔盖等人在完善理论上作了有益的工作。

1900 年用 TNT 炸药装填炮弹,促进了杀伤、爆破弹威力的提高。

1906 年道特里什创立了爆速的实验测定方法。

1936 年~1939 年在西班牙战争中第一次出现了空心装药破甲弹。二次世界大战中空心装药破甲弹成为对付坦克的主要弹药。聚能破甲理论的研究有了很大的发展。

水中爆炸空气中爆炸及土中爆炸理论在第二次世界大战中都相应地得到发展。

1945 年第一次核裂变原子弹爆炸。

1952 年第一次热核弹爆炸。

战后二十多年来爆炸实验科学，应用技术，爆轰及其对介质作用的理论研究都有了长足的进展，脉冲 X 光照像技术，条式和分幅式高速摄影仪，高压示波器压电技术等爆炸研究上的应用使得高速高压爆轰现象的研究更加精密和深入。电子计算技术的应用更加便利和促进了爆轰及其对介质作用规律的理论研究，这一切都使得爆炸学科领域的内容更加丰富，日趋成熟和系统。

解放二十多年来我国爆炸科学的研究在毛主席革命路线的指引下，随着社会主义建设事业的发展也在大踏步前进。1949 年，我人民解放军渤海军区在极端艰苦的条件下就进行过空心装药的特性试验。建国后从无到有建立了自己的国防工业，兵工研究所和靶场，并进行各种制式弹药的爆炸性能试验和研究，特别是 58 年大跃进以来在党的总路线光辉的照耀下我国武器弹药已经由仿制发展到自行设计制造的新阶段。有关厂，研究所和学校逐渐建立了具有现代设备的爆炸实验室，对爆炸科学领域展开了多方面的研究，已经取得了初步成果。1964 年 10 月 16 日我国爆炸了第一颗原子弹随后又进行了热核爆炸、导弹核武器试验以及地下核爆炸实验，这标志着我国尖端武器和爆炸科学研究达到了一个新水平。

无产阶级文化大革命以来，在毛主席无产阶级革命科研路线指引下，我国进行了大吨数炸药的爆炸试验，并广泛地开展了聚能破甲、碎甲及杀伤爆破等方面的实验研究积累了丰富的资料取得了可喜的成果。

当前苏修穷凶极恶地妄图对我发动侵略战争，美帝和苏修在世界各地急烈争夺，世界还很不安宁。艰巨而光荣的任务摆在我们面前：我们必须鼓足干劲，努力做好本职工作，为使我国的爆炸科学研究和弹药研制工作达到更高的水平而努力奋斗！

## § 1-2 各种爆炸现象

广义地说，爆炸系指一种极为迅速的物理或化学的能量释放过程，在此过程中，系统的内在势能转变为机械功及光和热的辐射等等。爆炸做功的根本原因在于系统原有高压气体或爆炸瞬间形成的高温高压气体或蒸汽的骤然膨胀。

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。

爆炸可以由各种不同的物理现象或化学现象所引起。就引起爆炸过程的性质来看爆炸现象大致可分为如下几类：

### (一) 物理爆炸现象

最常见的蒸汽锅炉或高压气瓶的爆炸属于此类。它们或是由于过热水迅速转变为过热蒸汽造成高压冲破容器阻力引起的，或是由于充气压力过高超过气瓶强度发生破裂而引起的。

由地壳弹性压缩能而引起的地壳运动(地震)也是一种强烈的物理爆炸现象。最大的地震能量达  $10^{23} \sim 10^{25}$  尔格，比一百万吨 TNT 炸药的爆炸还要厉害。

再如强火花放电(闪电)或高压电流通过细金属丝所引起的爆炸现象是一种物理爆炸现象。它们的能源是电能。强放电时，能量在  $10^{-6} \sim 10^{-7}$  秒内释放出来，使放电区达到巨大的能量密度和数万度的高温，因而导致放电区的空气压力急剧升高，并在周围形成很强的冲击波。金属丝爆炸时，温度高达两万度，金属迅速化为气态而引起爆炸。

其他如物体的高速碰击(陨石降落、高速火箭碰击月球等),水的大量骤然汽化等所引起爆炸都属于物理爆炸现象。

## (二)化学爆炸现象

细煤粉悬浮于空气中的爆燃,甲烷、乙炔以一定比例与空气混合所产生的爆炸以及炸药的爆炸都属于化学爆炸现象。

炸药爆炸进行的速度高达每秒数公里~10公里之间。所形成的温度约3000~5000°C,压力高达数十万个大气压。因而能迅速膨胀并对周围介质做功。

(三)核子爆炸。核爆炸的能源是核裂变(如 $U^{235}$ 的裂变)或核聚变(如氘、氚、锂核的聚变)反应所释放出的核能。

核爆炸反应所释放出的能量比炸药爆炸放出的化学能要大的多。核爆炸时可形成数百万到数千万度的高温,在爆炸中心区造成数百万大气压的高压,同时它还有很强的光和热的辐射以及各种粒子的贯穿辐射。因此比炸药爆炸具有大得多的破坏力。核爆炸的能量约相当于数万吨到数千万吨TNT炸药爆炸的能量。

各种爆炸现象现已成为专门的科学研究对象,并已有专门的论著。本课程只研究由炸药化学反应过程所引起的爆炸现象及其规律性。

## § 1-3 炸药爆炸的特征

炸药,从热力学意义上说来乃是一种相对地不稳定系统,它在外界作用下能够发生高速的放热反应,同时造成强烈压缩状态的高压气体。

例如一个炸药包用雷管引爆,刹那间发生爆炸。人们看到,炸药包瞬时化为一团火光,形成烟雾并产生轰隆巨响,附近形成强烈的爆炸风,建筑等物或被破坏或受到强烈振动。

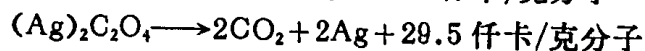
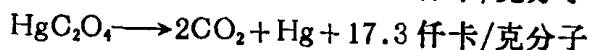
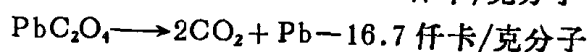
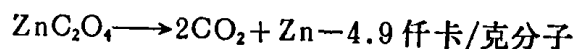
分析上述爆炸现象:一团火光表明炸药爆炸过程是放热的,因而形成高温而发光;爆炸刹那间完成说明爆炸过程的速度极高;仅用一个很小雷管即可将大包炸药引爆,说明雷管爆炸后最初在炸药中所产生的爆炸化学反应过程是能够自动传播的;烟雾表明炸药爆炸过程中有大量气体产生,而气体的迅速膨胀则是建筑等物发生破坏或震动的本质原因。

综上所述,炸药爆炸过程具有如下三个特征,即过程的放热性;过程的高速度(或瞬时性)并能自行传播;过程中生成大量气体产物。这三个条件也是任何化学反应能成为爆炸性反应必须具备的,三者互相关联、缺一不可。

下面我们对每个条件的重要性的意义进行概略的讨论。

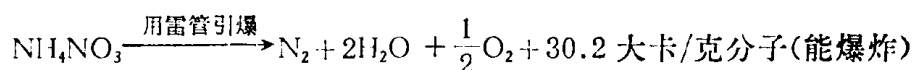
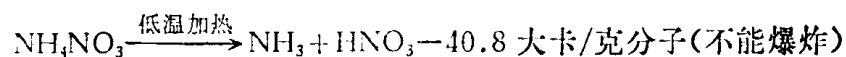
### (一)反应过程的放热性

这个条件是爆炸反应具备的第一个必要条件,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,因此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:



$ZnC_2O_4$ 和 $PbC_2O_4$ 的分解是吸热反应,不能发生爆炸,而后两个反应由于是放热反应就能够

发生爆炸。再如硝酸铵的分解：



上述例子表明，一个反应是否具有爆炸性与反应过程能否放出热量很有关系。只有放热反应才有可能具有爆炸性，而靠外界供给能量来维持其分解的物质显然是不可能发生爆炸的。

爆炸反应过程所放出的热称为爆炸热(或爆热)。它是爆炸破坏作用的根据，是炸药爆炸做功能力的标志。因此它是炸药的一个极为重要的特性数。一般常用炸药的爆炸热约在 900 ~ 1800 大卡/公斤左右。

## (二) 反应过程的高速度

爆炸反应同一般化学反应的一个最突出的不同点是爆炸过程的极高速度。一般化学反应也可以是放热的，而且有许多普通反应放出的热量比炸药爆炸时放出的热量大的多，但它们并未能形成爆炸现象，其根本原因在于它们的反应过程进行的很慢。例如煤块燃烧反应的放热量为 2130 大卡/公斤，一公斤苯燃烧的放热量为 2330 大卡/公斤，而一公斤硝化甘油的爆炸热为 1485 大卡/公斤，一公斤 TNT 的爆炸热只有 1010 大卡/公斤。而前二者反应完了所需的时间为数分钟到数十分钟，而后者仅仅需要十几到几十个微秒(即  $10^{-6}$  秒)。二者时间相差数千万倍。

由于炸药爆炸反应速度极高，一块炸药可在( $10^{-5} \sim 10^{-6}$ )秒内就反应完了，因而爆炸反应所放出的能量实际上可以近似地认为全部聚集在炸药爆炸前所占据的体积内，因而造成了一般化学反应所无法达到的能量密度。参看表 1-3-1。

表 1-3-1 某些炸药和燃料混合物的能量密度

| 炸 药 或 燃 料 混 合 物 名 称 | 每升炸药或燃料混合物的能量密度<br>(千卡/升) |
|---------------------|---------------------------|
| 硝化甘油                | 2380                      |
| 梯 恩 梯               | 1626                      |
| 碳与氧的混合物             | 4.1                       |
| 苯蒸汽与氧的混合物           | 4.4                       |
| 氢与氧的混合物             | 1.7                       |

〔注〕表中引用的燃料能量密度数据是据如下假设计算的即假定这些物质是在其原先占据的体积内完成反应的。

从表 1 所列数据可知，炸药爆炸所达到的能量密度要比一般燃料燃烧所达到的能量密度超过数百倍乃至数千倍。正是由于这个原因，炸药爆炸才具有巨大的做功功率和强烈的破坏作用。

爆炸过程进行的速度一般是指爆轰波在炸药装药中传播的直线速度，这个速度称为炸药的爆速。一般炸药的爆速大约在每秒数千米到每秒一万米之间。

附带说明一个问题，即除了过程进行的高速度之外，反应过程的自动传播 also 具有很重要的实际意义。

例如某一种物质在雷管引爆下，在与雷管相接触的很小的局部引起了爆炸反应，但是反应放出的能量不能补偿损失掉的能量，因而反应逐渐衰减最后熄灭。因此，反应过程能够进行自行传播的能力，从炸药技术应用的现实可能性观点来说具有很大的重要性。

### (三) 反应过程必须形成气体产物

炸药爆炸时之所以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(参看表 1-2)。

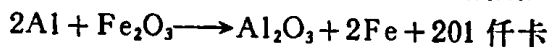
假如一个反应过程不产生大量气体，那么爆炸瞬间就不能造成高压状态，因此也就不可能产生由高压到低压的膨胀过程及爆炸破坏效应。这首先是由于气体在标准状态条件下密度比固体和液体物质要小的多，而在爆炸瞬间，炸药由固体立即定容地转化为气体，再加上反应的放热性，因此使气体处于强烈的压缩状态形成高温高压。其次气体与固体和液体物质相比具有大得多的体积膨胀系数，这使得气体成为爆炸做功的优质工质。炸药爆炸过程正是利用气体的这种特点将炸药的势能迅速地转变为爆炸机械功的。

表 1-3-2 炸药爆炸气体产物在常压下的体积

| 炸 药 名 称         | 气 体 产 物 的 体 积 (升) |         |
|-----------------|-------------------|---------|
|                 | 每 公 斤 炸 药         | 每 升 炸 药 |
| 硝化棉(13.3%N)(NC) | 765               | 995     |
| 苦味酸(PA)         | 715               | 1145    |
| 梯恩梯(TNT)        | 740               | 1180    |
| 黑索金(RDX)        | 908               |         |
| 特屈儿             | 760               |         |
| 泰安(PETN)        | 790               |         |
| 硝化甘油(NG)        | 690               | 1105    |
| 奥索金(HMX)        | 908               |         |

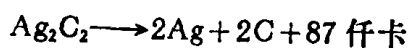
由表 1-3-2 可看到，一公升炸药在爆炸时可以产生 1000 升左右的气体产物，在爆炸瞬间它们被强烈压缩在近于原有的体积之内，因而造成了数十万个大气压的高压。

爆炸过程必须生成气态产物这个因素的重要意义，也可以通过一系列不生成气体产物的强烈放热反应不能形成爆炸的实例来说明。如大家熟知的铝热剂反应：



该反应的热效应很强烈，足以使产物加热到  $3000^\circ\text{C}$  的高温，而且反应也相当快，但终究由于不形成气态产物而不具有爆炸性。

需要指出的是，有一些物质虽然在其分解时形成正常条件下处于固态的产物但是却具有爆炸性。典型的例子是乙炔银：



表面上看该反应形成的都是固态产物，但是由于在爆炸反应温度下，银发生气化同时反应使附近的空气层迅速灼热因而导致了爆炸。

从上面的定性讨论，可以得出结论，只有具备以上三个特征的反应过程才具有爆炸特性。因此我们可以对炸药的爆炸现象下这样的定义，即炸药的爆炸现象乃是一种以高速进行的能自动传播的化学反应过程，在此过程中放出大量的热并生成大量的气体产物。

## § 1-4 炸药化学变化的基本形式

随着激起化学反应方式及反应进行的环境条件的不同，炸药化学变化过程能够以不同的形式进行，而且在性质上也具有重大的差别。

按其进行反应的速度及传播的性质，炸药的化学变化过程具有如下三种形式：即缓慢的化学变化、燃烧和爆轰。

炸药在常温常压下，在不受其他任何外界的作用时，它常常以缓慢速度进行分解反应。这种分解反应是在整个物质内展开的。同时反应的速度主要取决于当时环境的温度。温度提高，反应速度加快，服从于阿伦尼乌斯定律。如 TNT 炸药在常温下其分解速度极小。可以说很不容易觉察，然而当环境温度增高到数百度时它甚至可以立即发生爆炸。

燃烧和爆轰与一般的缓慢化学变化的主要区别就在于，燃烧和爆轰不是在全体物质内发生的，而是在物质的某一局部，而且二者都是以化学反应波的形式在炸药中按一定的速度一层一层地自动进行传播的。化学反应波的波阵面(称为化学反应区，见图 1-4-1)比较窄，化学反应就是在此很窄的波阵面内进行并完成的。

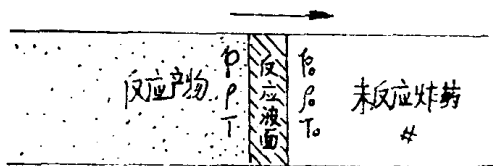


图 1-4-1 化学反应波阵面沿炸药的传播

燃烧和爆轰是性质不同的两种化学变化过程。实验与理论研究表明，它们在基本特性上有如下的区别：

首先从传播过程的机理上看，燃烧时反应区的能量是通过热传导、热辐射及燃烧气体产物的扩散作用传入未反应的原始炸药的。而爆轰的传播

则是借助于冲击波对炸药的强烈冲击压缩作用进行的。

其次，从波的传播速度上看，燃烧传播速度通常约为每秒数毫米到每秒数米，最大的也只有每秒数百米(如黑火药的最大燃烧传播速度约为 400 米/秒左右)即比原始炸药内的声速要低的多。相反，爆轰过程的传播速度总是大于原始炸药的声速，速度一般高达每秒数千米。如注装 TNT 爆轰速度约为 6900 米/秒( $\rho_0 = 1.6$  克/厘米)，黑索金在结晶密度下达到 8800 米/秒左右。

第三，燃烧过程的传播容易受外界条件的影响，特别是受环境压力条件的影响。如在大气中燃烧进行的很慢，但若将炸药放在密闭或半密闭容器中燃烧过程的速度急剧加快，压力高达数千个大气压。此时燃烧所形成的气体产物能够做抛射功，火炮发射弹丸正是对炸药燃烧的这一特性的利用。而爆轰过程由于其传播速度极快，几乎不受外界条件的影响，对于一定的炸药来说，爆轰速度在一定条件下是一个固定的常数。

第四，燃烧过程中燃烧反应区内产物质点运动方向与燃烧波面方向相反。因此燃烧波面内的压力较低。而爆轰时，爆轰反应区内产物质点运动方向是与爆轰波传播方向相同，爆轰波区的压力高达数十万个大气压。

爆炸物理书中将爆炸过程分为燃烧、爆炸和爆轰三类，这未必恰当。因为所谓的“爆炸”和爆轰在基本特性上并没有本质差别，只不过传播速度一个是可变的(称之为“爆炸”)，一个是恒定的(称之为爆轰)。我们认为“爆炸”也是爆轰的一种现象，称为不稳定爆轰，恒速爆轰称为稳定爆轰。这从科学意义上来说更为恰当。



需要强调指出,炸药化学变化过程的三种形式(缓慢化学反应、燃烧和爆轰)在性质上虽各不相同但它们之间却有着紧密的内在联系。炸药的缓慢化学分解在一定的条件下可以转变为炸药的燃烧;而炸药的燃烧在一定的条件下又能转变为炸药的爆轰。

通常说,能够进行爆轰的物质称为炸药,这并不是很严格的。有一些物质在一般情况下不能爆轰,但在特定条件下却是能进行爆轰的。例如发射药在一般情况下主要的化学变化形式是速燃,但是在密闭容器内或用大威力的传爆药柱进行起爆还是可以发生爆轰的。苦味酸、梯恩梯在没有发明雷管前它一直不被视为炸药。但应用雷管起爆方法后它们却成了很重要的炸药。硝酸铵一直被看作是化学肥料,但现在广泛地被当作矿用爆破炸药。因此炸药与非爆炸物的界限并不是十分明确的。原则上说一切能够发生放热反应的物质都可能在合适的条件下爆轰。所以从某种意义上说来,把某些物质称为炸药,而把另一些物质称为火药或烟火剂等等,只是一种习惯的有条件的划分。

## § 1-5 炸药的分类

目前称之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质各不相同。因此,为了认识它们的本质、特性以便进行研究和使用的,将它们进行适当的分类是必要的。

分类方法有两种。一种是按炸药的组成成分及分子结构的特点分类,这种分类方法对于炸药的研制工作者很有益处,便于他们掌握炸药在组成上的特点和规律以进行新型炸药的研究和合成。另一种是按炸药的应用进行分类,这种分类方法对于应用炸药的工程技术人员如战斗部设计工作者以及工程爆破技术人员选用炸药较为方便。下面分别做简单地介绍。

### (一)按炸药组成分类

一般分为两大类,即单质炸药和混合炸药。

单质炸药:为一种成分的爆炸物质,它们多数都是内部含有氧的有机化合物。这类炸药是相对的不稳定的化学系统,在外界作用下能发生迅速的分解反应,放出大量的热,内部键断裂,所形成的自由原子(或离子)重新组合成新的热力学上稳定的产物。

单质炸药按它们的化学分子结构又可分为许多类型,主要的有:

- ① 乙炔及其衍生物:如乙炔银  $\text{Ag}_2\text{C}_2$ , 乙炔汞  $\text{Hg}_2\text{C}_2$  等;
- ② 雷酸及其盐类:如雷汞  $\text{Hg}(\text{ONC})_2$ , 雷酸银  $\text{Ag}(\text{ONC})$  等;
- ③ 硝酸酯类:如硝化乙二醇  $\text{C}_2\text{H}_4(\text{ONO}_2)_2$ , 硝化甘油  $\text{C}_3\text{H}_5(\text{ONO}_2)_3$ , 泰安或喷特儿  $\text{C}(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_4$  以及硝化棉等。

④ 硝酸盐类:如硝酸铵  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 硝酸尿  $\text{NH}_2\text{-CO-NH}_2\cdot\text{HNO}_3$  硝酸胍  $\text{HN}=\text{C}\begin{matrix} \text{NH}_2 \\ \text{NH}_2 \end{matrix}$   $\cdot\text{HNO}_3$  等;

⑤ 硝基化合物,包括芳香族及非芳香族硝基化合物两类。前者如大家熟悉的三硝基甲苯(TNT),三硝基苯酚(苦味酸),二硝基甲苯(DNT),二硝基萘,三硝基甲胺(特屈儿)以及三硝基间苯二酚(斯蒂夫酸)及其盐类等;后者如硝基甲烷(NM),硝基胍,硝基尿素,环三次甲基三硝胺(黑索金 RDX),重( $\beta, \beta, \beta$ -三硝基乙基-N-硝基)乙二胺以及增塑性较好的重(2,2,2-三硝基乙醇)缩甲醛等,奥索金(HMX),基纳(DINA),EDNA,黑喜儿(HND),六硝基苯,咪唑炸药等皆属于硝基化合物炸药。

其他还有氯酸盐、过氯酸盐、叠氮化物等等。

混合炸药：它们是至少有两种独立的化学成分构成的。通常混合炸药的成分一种为含氧丰富的成分，另一种为根本不含氧或含氧量较少的成分。但是为了特种目的加入某些附加物用以改善炸药的爆炸性能、安全性能、机械力学性能、成型性能以及抗高低温性能等等。从而使混合炸药在军事应用上日益扩大，地位越来越重要。当前国内外混合炸药的研究进展很快，种类很多。

混合炸药可分为爆炸的气体混合物，液态混合物及固体混合物三类。

爆炸气体混合物如  $\text{CH}_4 + \text{O}_2$ ， $\text{H}_2 + \text{O}_2$  等，由于它们爆炸能量密度小，不易储存，运输，在爆炸技术上很少应用。但在研究爆炸的传播过程和爆炸反应动力学理论以及研究矿井中瓦斯爆炸的危险性等方面具有重要的意义。

液态爆炸混合物目前应用的不多，主要是由于其储存、运输、使用不方便，多数感度又比较高的缘故。但是液态混合炸药的应用问题已开始引起爆炸科学工作者们的注意。

目前应用最广的是固体混合炸药。固体混合炸药又可分为：

(1) 普通混合炸药：如军事上常用的钝化黑索金(A IX-1)是由 95% 的 RDX 和 5% 的腊组成的；再如 TNT/RDX 40/60、50/50，钝化 TNT/RDX 50/50 等各类 B 炸药以及工程爆破上常用的硝铵炸药都属于此类。

(2) 含铝混合炸药：加入铝粉的主要目的在于增加爆炸反应的热效应以提高炸药的爆炸威力。这类炸药多用于海空军弹药以及鱼雷、水雷等水下武器中。如 TTAI-5(60TNT/24RDX/16Al)，外加 5% 的钝感剂如地腊、石墨之类) Torpex(41RDX/41TNT/18Al)，A-32 炸药(65RDX/32Al/1.5 地腊/1.5 石墨)等等。

(3) 有机高分子粘结炸药：这类炸药主要以黑索金、奥索金及 PETN(泰安)为主体炸药，用粘结性较好的少量附加剂进行粘结，以在保证尽量好的爆炸性能下，改善炸药的力学性能、成型性能、安全使用性能等，如 8321、1871、聚苯乙烯粘结黑索金等等皆属此类。

(4) 特种混合炸药：这类炸药主要是为满足军事应用上的特殊要求研制的如各种塑态炸药、弹性炸药、橡皮炸药等。

## (二)按炸药应用分类

按炸药的应用特性可将其分为起爆药、猛炸药、火药(或发射药)以及烟火剂四大类。

起爆药：主要用作为激发高猛炸药爆轰的引爆剂。因为它们具有感度高(在很弱的外界作用如热作用或针刺、摩擦等机械作用影响下很容易发生爆炸)爆炸成长到最大爆速所需的时间短的特点，因此可用来制造各种起爆器材如雷管、火帽等。

常用的起爆药有雷汞[ $\text{Hg}(\text{OCN})_2$ ]、迭氮化铅[ $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ ]、斯蒂夫酸铅[ $\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2\text{Pb} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ]、二硝基重氮酚[ $\text{C}_6\text{H}_2\text{N}_2\text{O}(\text{NO}_2)_2$ ，代号 DDNP]、以及特屈拉辛[ $\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_{10}\text{O}$ ]等。

起爆药因为能直接在外界的作用下激起爆炸，故国际上叫做初发炸药。

猛炸药：又称次发炸药，与起爆药相比它们要稳定的多。只有在相当大的外界作用下才能发生爆炸，通常技术上用起爆药的爆炸作用来激发其爆轰。然而，一旦起爆后，它们就具有更高的爆速和更强烈的破坏威力，因此军事上用这类炸药装填炮弹和爆破器材等。

常用的猛炸药(包括单质和混合炸药)详见附录 I。

发射药或火药：主要用在发射枪弹或炮弹，以及用做为发射火箭的燃料，也有用来作点火药和延期药的如黑火药。常用的发射药或火药，除了黑药之外，用的最多的乃是由硝化棉、

硝化甘油为主要成分，外加部分添加剂胶化成的无烟火药。如 98% 硝化棉，以及少部分醚溶剂、二苯胺等胶化成的单基无烟药；由 45% 硝化棉溶于 40% 硝化甘油及 15% 的其他成分胶制成的巴里斯泰型发射药以及 60% 硝化甘油和 1.5% 的其他成分用硝化棉胶化成的柯达型发射药等等。

烟火剂：通常是由氧化剂、有机可燃物或金属粉及少量粘合剂混合而成。军事上主要利用其速燃效应如照明弹中的照明剂，烟幕弹中的烟幕剂、燃烧弹中的燃烧剂以及曳光剂、凝固汽油剂、信号剂等等。