

高等工业学校教学用书

# 爆炸及其作用

上册

气体动力学基础和爆轰理论

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书分上、下两册。上册为气体动力学基础和爆轰原理，下册为爆炸的作用。上册内容包括：炸药爆炸的基本特征；炸药的爆轰过程及爆轰参数的理论和工程计算方法，以及影响爆轰传播的因素；炸药的敏感度和起爆；爆炸直接作用时初始冲击波的参数等。

本书供高等工业学校有关专业教学参考，也可供从事弹药设计与研究、炸药装药与爆破器材威力设计、火工品设计，以及其他炸药应用工作者参考。


高等工业学校教学用书

### 爆炸及其作用

上 册

气体动力学基础和爆轰理论

北京工业学院八系《爆炸及其作用》编写组 编

 国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

国防工业出版社印刷厂印装 内部发行

787×1092<sup>1</sup>/16 印张22<sup>1</sup>/8 515千字

1979年7月第一版 1979年7月第一次印刷 印数：0,001—5,000册

统一书号：N15034·1805 定价：2.30元

# 前 言

在全党、全军、全国人民遵照英明领袖华主席提出的“抓纲治国”战略决策，沿着党的“十一大”的正确路线，为在本世纪内把我国建设成社会主义现代化强国而进行的伟大斗争中，我们编写了《爆炸及其作用》一书，供教学参考并愿与从事这方面工作的同志们进行交流。

爆炸是在自然界中经常发生的一种物理的或化学物理的过程。在爆炸过程中，以极高的速度释放出大量能量，通过爆炸产生的气态产物或被加热汽化的物质对周围介质做功，产生破坏作用，如破坏弹体并形成杀伤破片，爆破矿山抛掷土石，在四周介质（空气、水、固体材料等）当中形成冲击波或应力波等等。爆炸最主要的特征就是在爆炸中心周围介质中产生压力突跃，这是造成破坏效应的直接原因。

军事上应用的各种弹、雷和爆破器材都是通过炸药的爆炸作用破坏目标的。在社会主义建设中，炸药爆炸这种高功率的能源也日益广泛地获得应用，如各种工程爆破，爆炸切割、爆炸焊接和复合以及爆炸成型加工等等。因此爆炸现象的研究对于我国国防建设和社会主义经济建设都具有重要意义。

本书着重讨论炸药的爆轰过程及其对外部介质作用的规律性。全书共分十三章，主要内容包括：炸药爆炸的基本特征；炸药的爆轰过程及爆轰参数的理论和工程计算方法，影响爆轰传播因素的讨论；炸药起爆和敏感度；爆炸直接作用时初始冲击波的参数；爆炸的破片杀伤效应；爆炸的聚能效应及破甲理论；爆炸的应力波反射碎甲作用；空气以及密实介质中的爆破作用等。此外，还另立一章专门对弹丸的穿甲作用过程进行了讨论。编写中尽力引用国内科研的成果，并本着“洋为中用”原则参考和引用了国外部分书籍和文献资料的有关内容。因此，本书也可供从事弹药设计与研究、炸药装药与爆破器材威力设计、火工以及其他炸药应用工作的同志参考。

本书前六章是由张宝平同志编写的；赵衡阳同志编写了第七章；蒋浩征、李景云同志合编了第八章；恽寿榕、张守中同志合编了第九章；李景云同志编写了第十章；杨述贤同志编写了第十一章；王廷增同志编写了第十二、十三两章。在编写过程中，有关工厂，研究所和兄弟院校有关专业的同志们给了很大的支持，提供了他们多年来科学实验和理论工作的成果，并对编写内容提出了许多宝贵意见。陈玉清、关凤云同志承担了全书的描图工作。对此，我们表示衷心的感谢。

由于我们思想和业务水平不高，书中一定会有许多错误和不妥之处，欢迎批评指正。

# 目 录

第一章 爆炸现象及特征 .....	(1)
§ 1-1 各种爆炸现象 .....	(1)
§ 1-2 炸药爆炸的特征 .....	(2)
§ 1-3 炸药化学变化的基本形式 .....	(4)
§ 1-4 炸药的分类 .....	(5)
第二章 气体动力学基础知识 .....	(8)
§ 2-1 气体的物理性质 .....	(8)
§ 2-2 气体的状态参量和状态方程 .....	(9)
§ 2-3 热力学的一些基本概念 .....	(12)
§ 2-4 波的概念 .....	(21)
§ 2-5 气体的一维等熵流动 .....	(25)
§ 2-6 气体的一维等熵定型流动 .....	(35)
§ 2-7 平面正冲击波 .....	(41)
§ 2-8 冲击波的冲击绝热线和等熵线 .....	(49)
§ 2-9 冲击波的自由传播和反射 .....	(55)
§ 2-10 冲击波的声学理论 .....	(66)
第三章 炸药的热化学 .....	(69)
§ 3-1 炸药的爆热 .....	(69)
§ 3-2 炸药的爆温 .....	(77)
§ 3-3 炸药的爆炸分解反应 .....	(83)
第四章 炸药的爆轰过程 .....	(93)
§ 4-1 爆速的实验测定 .....	(94)
§ 4-2 爆轰波的流体力学理论 .....	(98)
§ 4-3 气体爆轰波参数的近似计算 .....	(109)
§ 4-4 凝聚炸药的爆轰理论 .....	(119)
§ 4-5 爆轰波反应区的结构 .....	(140)
§ 4-6 云雾爆轰现象及其一维理论 .....	(151)
§ 4-7 影响炸药爆轰传播的因素 .....	(165)
§ 4-8 由燃烧向爆轰的转变 .....	(175)
§ 4-9 爆轰波的形状及其控制 .....	(180)
第五章 爆轰产物的一维飞散及爆炸推进作用 .....	(189)
§ 5-1 爆轰产物的一维飞散 .....	(189)
§ 5-2 接触爆炸时作用于刚性壁面上的压力和冲量 .....	(199)
§ 5-3 接触爆炸对物体的一维抛射 .....	(209)
§ 5-4 爆炸推进作用基本原理 .....	(213)
第六章 密实介质中爆炸冲击波的初始参量 .....	(222)
§ 6-1 垂直入射时爆炸冲击波的初始参量 .....	(222)

§ 6-2	爆轰波斜入射时分界面处初始冲击波参数的确定	(240)
§ 6-3	物体高速碰撞及冲击波从一种向另一种介质传播时冲击波初始参量的确定	(254)
§ 6-4	冲击波动力学参数的实验测定及其在固体状态方程研究上的应用	(264)
§ 6-5	爆轰波 $C-J$ 压力的实验测定	(288)
<b>第七章 炸药的起爆和感度</b>		(299)
§ 7-1	炸药的热起爆理论	(299)
§ 7-2	炸药的机械起爆机理——热点学说	(304)
§ 7-3	强冲击波作用下炸药的起爆	(309)
§ 7-4	炸药感度的定义和起爆冲能	(314)
§ 7-5	炸药对热作用的感度	(315)
§ 7-6	炸药对机械作用的感度	(317)
§ 7-7	炸药对冲击波作用的感度	(321)
§ 7-8	炸药对发射作用的感度	(323)
§ 7-9	炸药对静电和电火花的感度	(325)
<b>附 录</b>		(329)
附录 I 空气冲击波阵面的参数		(329)
附录 II-1 炸药、爆炸产物的生成热		(330)
附录 II-2 部分无机盐及氧化物的生成热		(331)
附录 III 有机硝基化合物在 $298^\circ\text{K}$ 时, 定容燃烧 生成 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ (液) 及 $\text{N}_2$ 时的燃烧热		(332)
附录 IV 式 (3-1-7) 中的热修正 $\Delta_i$		(334)
附录 V-1 气体在 $293.15^\circ\text{K} \sim 4000^\circ\text{K}$ 之间的热力学性质		(336)
附录 V-2 部分爆炸产物固体组分从 $298^\circ\text{K}$ 到 $T^\circ\text{K}$ 时内能变化量 $\Delta E_i^\circ$ (大卡/克分子)		(338)
附录 VI $\lg k_p$ 随 $T$ 的变化与绝对零度时的反应热 $\Delta E_i^\circ$		(339)
附录 VII-1 密实介质的雨果尼奥参数		(340)
附录 VII-2 一些非金属材料的雨果尼奥参数		(341)
附录 VII-3 未反应炸药的冲击雨果尼奥参数		(342)
附录 VII-4 德拜函数 $D_3(x)$		(343)
附录 VIII 部分金属的雨果尼奥弹性限		(344)
<b>参考文献</b>		(345)

# 第一章 爆炸现象及特征

## § 1-1 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

蒸汽锅炉或高压气瓶的爆炸属于此类。这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。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，也是一种物理爆炸现象。这时的能源是电能。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，温度高达摄氏两百度，金属迅速化为气态而引起爆炸。物体的高速碰击（陨石落地、高速火箭碰击目标等），水的大量骤然汽化等所引起的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千米到万米之间，所形成的温度约 $3000 \sim 5000^{\circ}\text{C}$ ，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 $\text{U}^{235}$ 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。本书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。

## § 1-2 炸药爆炸的特征

从热力学意义上说，炸药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时，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，建筑物等或被破坏或受到强烈振动。

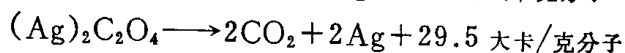
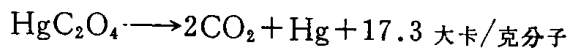
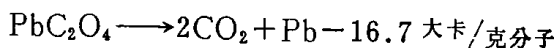
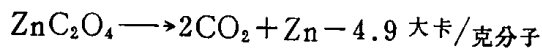
我们分析一下上述爆炸现象：一团火光表明炸药爆炸过程是放热的，因而形成高温而发光；爆炸刹那间完成说明爆炸过程的速度极高；仅用一个很小雷管即可将大包炸药引爆，说明雷管爆炸后炸药中所产生的爆炸化学反应过程是能够自动传播的；烟雾表明炸药爆炸过程中有大量气体产生，而气体的迅速膨胀则是建筑物等发生破坏或震动的原因。

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。这三个条件正是任何化学反应成为爆炸性反应必须具备的，三者互相关联、缺一不可。

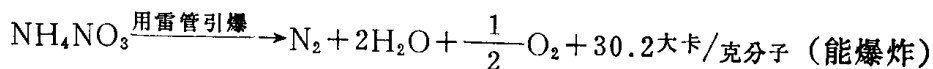
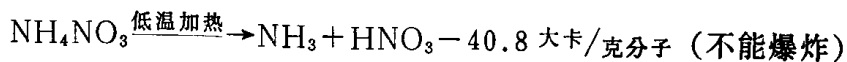
下面我们对每个条件的重要性和意义进行概略的讨论。

### （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：



$\text{ZnC}_2\text{O}_4$  和  $\text{PbC}_2\text{O}_4$  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：



上例表明，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。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），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，因而实际上可以近似地认为，爆炸反应所放出的能量全部聚集在炸药爆炸前所占据的体积内，从而造成了一般化学反应所无法达到的能量密度（参看表1-2-1）。

表1-2-1 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(大卡/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根据如下假设计算的：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 1-2-1 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高数百倍乃至数千倍。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一万千米之间。

附带说明一个问题：除了过程进行的高速度之外，反应过程的自动传播也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。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。

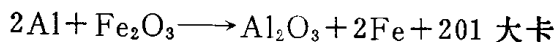


表1-2-2 炸药爆炸气体产物在常压下的体积

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	

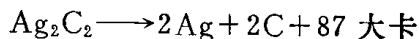
由表 1-2-2 可看到, 一升炸药在爆炸时可以产生 1000 升左右的气体产物, 在爆炸瞬间它们被强烈压缩在近于原有的体积之内, 因而造成了数十万个大气压的高压。

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。大家熟知的铝热剂反应



其热效应很强烈, 足以使产物加热到 3000°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, 此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: 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。

### § 1-3 炸药化学变化的基本形式

随着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, 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。温度升高, 反应速度加快, 服从于阿伦尼乌斯定律。例如, TNT 炸药在常温下的分解速度极小, 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 1-3-1)比较窄, 化学反应就是在此很窄的波阵面内进行并完成的。

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<sup>3</sup>)，在结晶密度下黑索金的爆轰速度达 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。而爆轰过程的传播速度极快，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。

有人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。

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。

#### § 1-4 炸药的分类

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时，还是可以发生爆轰的。苦味酸和梯恩梯在没有发明雷管前，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民用爆破炸药。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，只是一种习惯上的、有条件的划分。

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。

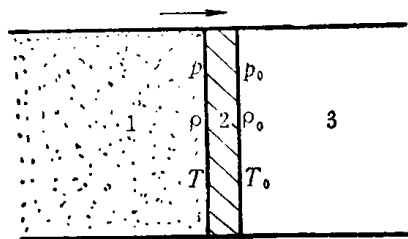


图1-3-1 化学反应波阵面沿炸药的传播

1—反应产物；2—反应波阵面；  
3—未反应炸药。

因此，为了认识它们的本质、特性以便进行研究和应用，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，多数都是内部含有氧的有机化合物。这类炸药是相对不稳定的化学系统，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  $\text{C}(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_4$  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

$$\text{HN}=\text{C}\begin{cases} \text{NH}_2 \\ \text{NH}_2\cdot\text{HNO}_3 \end{cases} \text{等；}$$

(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，三硝基甲硝胺 (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，呖喃炸药等。

其他还有氯酸盐、过氯酸盐、叠氮化物等等。

混合炸药：由两种或两种以上独立的化学成分构成的爆炸物质。通常，混合炸药的成分中一种为含氧丰富的，另一种为根本不含氧或含氧量较少的。但是，为了特种目的要加入某些附加物，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，新混合炸药种类很多。

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，由于其能量密度小，不易储存、运输，过去在爆炸技术上很少应用。但矿井中的瓦斯爆炸火箭技术中油膜及云雾爆炸，燃料-空气炸弹的出现，以及爆炸喷镀等新技术的应用，这都使得爆炸气体混合物成了重要的研究课题。

液态爆炸混合物目前应用的不多，主要是由于储存、运输、使用不方便，且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 K-1) 是由 95% 的 RDX 和 5% 的石蜡组成的；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、水雷等水中兵器中。如 TГAГ-5 (60 TNT/24 RDX/16 Al，外加 5% 的钝感剂如地蜡、石墨之类)，Torpex (41 RDX/41 TNT/18 Al)，A-32 炸药 (65 RDX/32 Al/1.5 地蜡/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、奥索金或 PETN (泰安) 为主体炸药，用粘结性较好的少量附加剂进行粘结，以便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。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。起爆药能直接在外界的作用下激起爆炸，故国际上叫做初发炸药。

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。

猛炸药：又称次发炸药，与起爆药相比它们要稳定的多，只有在相当强的外界作用下才能发生爆炸 (通常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。

常用的猛炸药有梯恩梯、黑索金、特屈儿、奥索金，以及 B 炸药等。

发射药或火药：主要用在发射枪弹或炮弹，以及用作为发射火箭的燃料，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。例如 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；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、信号剂等等。

## 第二章 气体动力学基础知识

正如本书前言中所谈到的，本书着重讨论炸药爆炸的物理或化学物理过程，以及爆炸对周围介质作用的规律性。大量实验观察表明，爆轰是爆轰波沿爆炸物一层一层地进行传播的过程。这种爆轰波是沿爆炸物传播的强冲击波。炸药爆炸对周围介质的作用，是和爆轰气体产物的高速流动及在介质中形成压力突跃的传播紧密相关的。因此，在讨论这些问题之前，对气体动力学的一些基本概念和有关基础知识作一概略介绍是必要的。

### § 2-1 气体的物理性质

气体动力学是流体力学的一个组成部分，主要研究气体在其可压缩性起显著作用时的流动规律，以及气体与所流过物体之间的相互作用。为了对气体流动规律进行研究，在气体动力学范畴内，往往把气体看成是连续的、可压缩的流体。气体具有粘性和导热性。然而，当对问题做近似处理时，一般要忽略气体的粘性和导热性。

(1) 连续性：在气体动力学中气体被看作是连续的介质。我们知道，气体是由大量的分子组成的。在微观上，所有的分子都在独立地作不规则的热运动，分子与分子之间不断地相互碰撞。分子在碰撞前的平均行程称为分子的平均自由程。但是，这个分子的平均自由程与气体动力学所研究的物体的尺寸相比，是微乎其微的。例如，在标准状况下，地球表面上每一立方厘米的小空间中含有  $2.7 \times 10^{19}$  个气体分子，分子的平均自由程约为  $7 \times 10^{-6}$  厘米，这个值比所研究的在气体中运动的物体尺寸小得多。再如，对于每一平方厘米的物体表面，气体分子每秒钟要碰撞大约  $10^{23} \sim 10^{24}$  次。由于碰撞极其频繁，我们无法辨别某个分子的个别碰击作用，而只能确定大量分子的集体作用。因此，气体动力学并不去研究个别分子的微观运动，而只关心大量分子组成的气团的宏观运动。这时，我们把气体看成是中间没有空隙的、可压缩的连续介质。这就是气体连续性的假设。

由于把气体看成是连续性介质，因此，我们可以把流动气体的热力学参量（如压强  $p$ 、密度  $\rho$ 、温度  $T$  等）及动力学参量（如压强  $p$ 、流动速度  $u$  等）表示为时间和空间变量（如  $t$ ， $x$ ， $y$  和  $z$ ）的连续函数。这样，我们便可以利用连续函数的数学工具来研究气体动力学问题了。

若在研究的问题中取的气体微团过小（如小于气体分子的平均自由程）或者气体很稀薄（如在 100 公里以上的高空）时，气体的连续性假设不再成立，此时气体的各个基本参量就不能再表示为连续函数了。

(2) 可压缩性：我们知道，气体是可压缩性很大的介质。可压缩性是，在压力和温度发生变化时，体积（或密度）发生改变的能力。

压力增大时，体积要缩小，气体密度要提高。压力变化越急烈，密度变化也越急烈。只有当压力的变化很微小时，介质的密度变化才可以忽略不计，此时可近似地把介质视为不可压缩的流体。但是，当气体做高速流动时，压力变化很大，气体的密度变化就不能忽

略, 此时就必须考虑气体的可压缩性。炸药爆炸后爆炸气体产物的流动以及在爆炸作用下介质的流动, 一般属于高速流动, 必须考虑气体的可压缩性。

(3) 粘性: 一切真实气体都具有粘性。流层之间存在着相对运动, 引起切向应力, 从而阻碍了流层之间的相对滑动。这种能够阻碍相对滑动的性质称为粘性。例如, 置于气流中的平板, 由于气流具有粘性, 在平板表面处的流速为零, 而随着距板表面距离的增大, 流速渐高 (如图 2-1-1 所示), 即

$$u = f(h)$$

这样, 由于流层之间速度不同而引起的切向应力  $\tau$ , 按照牛顿粘性定律表示为

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial h}$$

其中,  $\mu$  称为动力粘性系数。上式表明, 粘性切向应力  $\tau$  与流层间的速度梯度  $\frac{\partial u}{\partial h}$  成正比。粘性系数  $\mu$  即其中的比例系数, 它的数值取决于气体的性质和温度。由实验得到, 空气的  $\mu$  和温度的关系为

$$\mu = 1.745 \times 10^{-6} + 5.02 \times 10^{-9}(T - 273) \text{ 公斤秒/米}^2$$

一般说来, 气体的粘性系数  $\mu$  是很小的, 因此, 在  $\frac{\partial u}{\partial h}$  不很大时, 可以忽略气体的粘性。

(4) 导热性: 和固体介质一样, 气体也是可以传热的。但是在高速流动中, 气体导热性对流动的影响往往可以忽略不计, 而用绝热流动这一近似进行处理。

## § 2-2 气体的状态参量和状态方程

### (一) 气体的状态参量

气体的状态参量有三个, 即压强  $p$ 、密度  $\rho$ , 以及温度  $T$ 。它们之中只有两个是独立的。换言之, 三者可以用一个由实验得到的公式联系起来。如果其中的两个参量已经确定, 则第三个参量便可以用此公式推算出来。将状态参量联系起来用以描述其状态变化规律的公式称为状态方程式。下面分别介绍各状态参量的概念和常用的状态方程式。

(1) 压强: 单位面积上的压力称为压强, 以  $p$  表示。在工程计算上常用的压强单位有: ① 工程大气压 = 1 公斤/厘米<sup>2</sup>。标准状况下, 一大气压为 1.0336 公斤/厘米<sup>2</sup>。② 1 千巴 =  $10^9$  达因/厘米<sup>2</sup> = 986 大气压 = 1019.3 公斤/厘米<sup>2</sup>。其中达因为物理学上力的基本单位, 在地球表面上一克力等于 980 达因。

(2) 密度: 密度是流体介质的一个极为重要的概念, 它表示了质量在空间中的分布。所谓密度即单位体积中所含有的介质的质量。介质中某一点的密度可写成

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (2-2-1)$$

式中  $\Delta V$  为气体中某一微元体的体积,  $\Delta m$  为该微元体内所包含有的气体质量。 $\frac{\Delta m}{\Delta V}$  称为

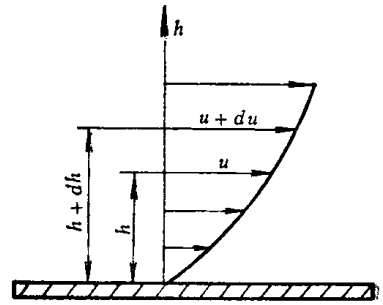


图 2-1-1

$\Delta V$  体积内的平均密度。当体积缩小到某一个点时，比值  $\frac{\Delta m}{\Delta V}$  趋于某一极限，即为某一点的密度。工程上密度的量纲为

$$\rho = \frac{\text{公斤/米/秒}^2}{\text{米}^3} = \frac{\text{公斤} \cdot \text{秒}^2}{\text{米}^4}$$

例如，空气在  $T = 288^\circ \text{K}$ （或  $15^\circ \text{C}$ ）、 $p = 1$  大气压时的密度为  $0.125 \text{ 公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4$ 。

密度的倒数称为比容，即介质单位质量所占有的体积，常以  $v$  表示之。

(3) 温度：前已述及，气体分子时刻都处于杂乱无章的热运动状态，这种分子热运动的平均动能是以温度为标志的。分子热运动愈激烈，则分子的平均动能就越大，表现出来的温度也就越高。工程上常用的温度单位有摄氏温度 ( $t^\circ \text{C}$ ) 和绝对温度 ( $T^\circ \text{K}$ )。绝对温度又称为开尔文氏温度。绝对温度  $T$  和摄氏温度  $t$  之间的换算关系为

$$T(^{\circ}\text{K}) = 273.15 + t(^{\circ}\text{C}) \quad (2-2-2)$$

工程上一般取如下近似，即

$$T(^{\circ}\text{K}) = 273 + t(^{\circ}\text{C}) \quad (2-2-3)$$

## (二) 气体的状态方程式

将压力  $p$ ，密度  $\rho$ （或比容  $v$ ）和温度  $T$  这三个基本的状态参量联系起来的方程式称为状态方程式。这种方程式概括了气体状态变化所遵循的规律。

### (1) 理想气体的状态方程式

所谓理想气体是指气体分子不占有任何体积、彼此之间不存在任何作用力（如分子之间的引力或斥力）的气体。压强不很高时的气体都可近似当做理想气体来处理。

大量的实验表明，理想气体的压强  $p$ 、密度  $\rho$  和温度  $T$  之间的关系如下：

$$pv = RT \text{ 或 } p = \rho RT \quad (2-2-4)$$

它反映理想气体状态变化时所遵循的规律，其中  $R$  称为理想气体常数。显然有

$$\frac{pv}{T} = R \quad (2-2-5)$$

对于不同的气体， $R$  值不同。只要知道气体的组成和分子量，应用上述状态方程式可以确定该气体的  $R$  值。由 (2-2-5) 式可以得到

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0} = \text{常数} \quad (2-2-6)$$

其中  $p_0$ ， $V_0$ ， $T_0$  指的是标准状态条件，即  $p_0 = 1$  大气压， $T_0 = 273^\circ \text{K}$ ， $V_0$  为标准状态下气体所占有的体积。

阿佛加德罗定律指出，任何气体每一克分子量在标准状况下占有 22.4 升的体积。设气体质量为  $m$  克，分子量为  $M$ ，则

$$V_0 = \frac{mg}{M} \times 22.4 (\text{升})$$

将  $V_0$  代入 (2-2-6) 式得到

$$\frac{pV}{T} = \frac{1.0336 \times 10^4 \times 22.4 \times 9.81}{273.15} \times \frac{m}{M} = 8312.7 \frac{m}{M} = \bar{R} \cdot \frac{m}{M} \quad (2-2-7)$$

其中  $\bar{R} = 8312.7 \text{ 公斤} \cdot \text{米}^2 / \text{秒}^2 \cdot \text{度}$ ，称之为普适气体常数，由此可把 (2-2-6) 式变为

$$pV = \frac{m}{M} \bar{R}T = nRT \quad (2-2-8)$$

此即理想气体的状态方程式。

### (2) 真实气体的状态方程式

一般实际存在的气体，其分子是占有体积的。当密度比较大时，气体分子本身所占有的体积（一般称为余容）就不能忽略了。另外，随着密度的增大，气体分子之间的距离越来越小，此时分子之间的相互作用也变得明显起来，它们对气体内能和压力的影响已不能忽略。这样，理想气体的状态方程式所反映的状态变化规律已不适用于真实气体，而必须寻找更合适的状态方程式了。

为了建立描述真实气体状态变化规律的状态方程式，人们曾做了大量的理论与实验研究，提出了多种形式的状态方程。归结起来，基本的主导思想是，认为气体的内能  $E$  和压强  $p$  是由两部分组成的。一部分是分子的热运动对内能和压强的影响，称之为热内能 ( $E_T$ ) 和热压强 ( $p_T$ )，它们与气体所处的温度有关：温度高，内能大，表现出来的压强也高。同时，热内能和热压强还与气体的密度  $\rho$  或比容  $v$  有关：密度大，分子之间的距离小，分子的热运动受到限制。因此，热内能和热压强是密度（或比容）及温度的函数。另一部分是分子之间相互作用力对压力和内能的影响。这部分内能和压力只与分子之间的距离大小有关，而与温度无关，称之为冷内能 ( $E_K$ ) 和冷压强 ( $p_K$ )。显然， $E_K$  和  $p_K$  仅仅是比容  $v$  的函数。这样，真实气体的状态方程式可写成

$$E = E_K(v) + E_T(v, T) \quad (2-2-9)$$

$$p = p_K(v) + f(v) \cdot T \quad (2-2-10)$$

其中  $E$  和  $p$  分别表示气体的总内能和总压强。

对于密度不是很大的真实气体，范德瓦耳方程能够用来描述其状态变化规律，该方程的形式为

$$p + a\rho^2 = \frac{n\rho}{1 - b\rho} RT \quad (2-2-11)$$

其中  $a\rho^2$  表现了分子作用力对压力的影响，称为冷压强项。等号右边项代表热压强，该项中， $b$  为气体分子的余容，每一克分子余容等于分子体积的四倍乘以阿佛加德罗常数  $6.023 \times 10^{23}$ ； $n$  为气体的克分子数。

当气体的密度  $\rho$  更高时（例如凝聚炸药刚刚爆轰完了所形成的气体产物，其密度达到  $1 \sim 2.5$  克/厘米<sup>3</sup>），范德瓦耳方程已不能描述其状态变化规律了。此时，分子之间的作用力对压强的影响占相当大的比重。物理学的概念告诉我们，当物质的分子十分靠近时，分子之间即有引力，也有斥力。这样，(2-2-10) 式中的冷压力可被表示为

$$p_K(v) = Av^{-\gamma} - bv^{-m} \quad (2-2-12)$$

式中  $Av^{-\gamma}$  表示斥力， $bv^{-m}$  表示引力。

固体理论指出，指数  $\gamma > m$ ，而且  $m > 2$ 。因此，当比容  $v$  很大，即分子间距很大时，冷压强  $p_K(v)$  很小，甚至可以忽略不计。然而，随着  $v$  的减小，最初引力占优势（因为  $m < \gamma$ ），此时  $p_K(v) < 0$ ，即冷压强表现为引力。当比容进一步减小到某一定值时，引力和斥力相等， $p_K(v) = 0$ 。比容进一步减小，斥力迅速增大并占优势，则  $p_K(v) > 0$ 。分子之间相互作用的势能  $U$  与分子间距  $r$  的关系示意于图2-2-1。



图中的曲线为斥力势能与引力势能的合成曲线。

由此曲线可看出，当  $r$  很大时， $U \rightarrow 0$ ，随着  $r$  的减小， $U$  为负值，即引力势能占优势。当  $r$  进一步减小，斥力势能迅速增加，并逐渐占优势，使  $U$  值变为正值。

凝聚炸药的爆轰产物的密度很大，分子间距很小，故其引力项  $Bv^{-m}$  可以忽略。故 (2-2-10) 式可写为

$$p = Av^{-\gamma} + f(v)T$$

令  $f(v) = \frac{B}{v}$ ，上式变为

$$p = Av^{-\gamma} + \frac{B}{v} T \quad (2-2-13)$$

式中  $A$ 、 $\gamma$  和  $B$  与炸药性质有关的常数，可以通过实验及理论计算予以确定。

作为一种近似：认为炸药刚爆轰完了时，气体产物密度很大，气体分子热运动对压强的影响（即热压强项）可以忽略，则爆轰产物的状态变化规律可近似地描述为

$$p = Av^{-\gamma} = Ap^{\gamma} \quad (2-2-14)$$

此即为经常采用的凝聚炸药爆轰产物近似的状态方程。该方程已在凝聚炸药爆轰参数的近似计算中获得了广泛的应用。

### § 2-3 热力学的一些基本概念

热力学像其他科学一样，是在生产和科学实验实践中形成和发展起来的。它研究能量由一种形式转变成另一种形式时所遵循的法则，研究随着种种物理的或化学的过程而发生的能量转化，以及过程进行的条件对能量转化的影响等。

热力学是在热力学第一和第二定律的基础上建立起来的。热力学的理论在研究蒸汽机、冷冻机、压缩机、内燃机、喷气发动机、涡轮机等的热功转换，以及电解过程、化学反应过程与平衡、大气现象等问题上获得了广泛的应用。同时，它还是研究流体力学、炸药的燃烧与爆轰过程以及爆炸对介质作用等的基础。有鉴于此，我们在本节中简要地介绍一些基本的热力学概念。

#### (一) 热力学第一定律

热力学第一定律实际上就是能量守恒定律。它是全人类实践经验的总和，它阐述了这样一个事实，即热能和机械功是等价的，并且可以互相转换。实验确定，热量转变为机械功时，

1 千卡的热量与 427 公斤·米的功相当。这个当量以  $J$  表示，称为热功当量。热功当量的倒数称为功热当量。热力学第一定律描述了任一过程的能量转换关系。此定律表明：在任何过程中，某一系统的内能变化量  $\Delta E$  等于系统所得的热量  $Q$  与

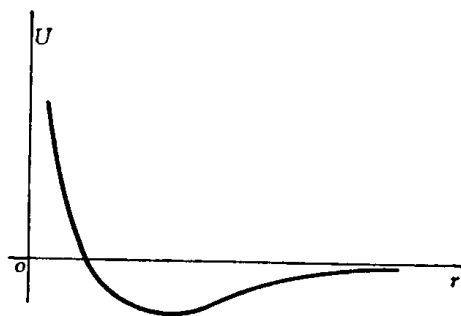


图2-2-1 分子间作用势能  $U$  与分子间距  $r$  的关系

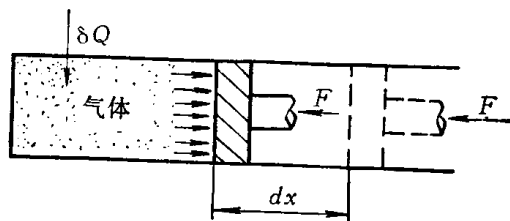


图 2-3-1