

爆破课程导入

一、爆破工程发展历程

爆破工程是应用数学、物理学、化学等基础科学原理，结合在科学实践及生产实践中所积累的技术经验，研究利用炸药爆炸能量对介质做功，以达到预定工程目标，减少爆破有害效应，实现安全生产的一门实用型科学技术。

早在公元 7 世纪，我国古代先民发明了黑火药；公元 13 世纪中叶，中国火药经过印度、阿拉伯国家传入欧洲；公元 17 世纪初，西欧、北美一些国家相继用黑火药进行爆破作业实验；1627 年，匈牙利第一次把黑火药用于岩石爆破作业，从而揭开了工程爆破的历史。

现代炸药的合成始于 18 世纪，1771 年英国人沃尔夫合成出苦味酸用作染料；1885 年法国将苦味酸用于装填弹药；1799 年英国人高瓦尔德制成了雷汞；1831 年出现了毕氏导火索；1863 年德国人维尔布兰德制成了梯恩梯；1867 年瑞典人诺贝尔发明了火雷管；1867 年瑞典人德里森和诺尔宾研制成功硝酸铵炸药和硝化甘油炸药；1899 年德国人亨宁合成出黑索金；1919 年出现了以太安为药芯的导爆索；1927 年制成延期电雷管；1941 年德国人和巴克曼发现了奥克托金；1946 年制成毫秒延期电雷管；1956 年美国库克发明了浆状炸药；1977 年美国生产出乳化炸药，1980 年美国研究制成了导爆管起爆系统。

现在，爆破技术在民用工程和军事上应用日趋广泛，爆破作为工程建设中的一项特殊方法，是完成人力或机械力所无法实现目标的一种非寻常手段的施工方法。

二、国内爆破技术的发展与应用

我国的爆破技术起步较晚。1970 年以后，预裂爆破、光面爆破、水下爆破和城市建筑物拆除爆破开始研究和应用；1995 年起，中深孔起爆技术及硐室爆破逐渐推广使用，特大型爆破技术日益成熟，工程控制爆破技术得到了进一步发展。

进入 21 世纪以来，我国爆破工程技术发展迅猛，成就令人瞩目。比如：在首钢孟家沟矿进行的大型硐室千吨级炸药的抛掷爆破，取得了良好的效果；青藏铁路开展了冻土爆破的研究和实践，开拓了我国工程爆破新领域；广州地铁在高大建筑群基础边缘爆破开挖大型竖井及隧道，其成功经验为我国城市地铁开挖爆破工程开辟了新途径；海南三亚铁炉港实施月产 100 万立方米的大型深孔爆破，无论在爆破的块度控制以及在开挖爆破组织管理方面，都取得了令人感叹的平整美观坡面，该技术为我国各种道路边坡开挖提供了新方法和新经验；水利水电行业在小湾、龙滩、水布垭等大型水电站的近 800 m 高边坡和跨度超过 30 m，高度 70 余米的大型地下厂房的开挖爆破中，取得丰富的经验；三峡工程二期土石围堰钢筋混凝土芯墙爆破拆除，也取得圆满成功。

目前，我国爆破器材的生产已形成较完整的体系，经过国家批准建设有 400 余个生产企业，品种达数十个，能满足国民经济各领域爆破作业的需求。

我国在工程爆破新技术方面得到发展的主要领域有：预裂爆破、光面爆破、定向抛爆破、拆除爆破、岩塞爆破等。

近年来，国外在开发油气地震勘探、油气井开发中的特种爆破技术、聚能爆破技术等方面，发展十分迅速。

三、问题与展望

爆破技术被广泛应用于公路、铁路、水利、水电、煤矿、城市地下工程、石油、冶金、农业、林业、金属加工、城市建筑物拆除、医学等民用领域和国防建设中，对加快社会主义现代化建设起到重要作用。通过爆破作业实践，人们积累了较为丰富的经验，我国爆破技术在爆破理论、爆破安全技术、新型爆破器材研发、爆破计算机辅助设计等方面取得较大的进步，收到可喜的经济效益和良好的社会效益。

随着时代的发展，人民生活水平提高和环境保护意识的增强，爆破技术存在许多亟待解决的问题，也应引起爆破作业人员的高度重视。

(1) 加强爆破技术理论研究，使爆破理论更好地指导工程实践。

在我国爆破理论研究落后于工程实践，已是一个不争的事实。由于在爆破作用机理方面无统一而精确的理论，现有的装药量计算公式与实际间存在较大差距；爆破参数等指标基本上是凭经验选择。在工程爆破过程中为确保安全，常以消极防护为主要手段，增加了大量工程投入，造成较大经济损失。

目前，我国爆破技术方面存在的问题有：

- ① 国家在爆破理论研究投入人力、物力和财力不足。
- ② 专业技术队伍力量匮乏。
- ③ 爆破技术理论研究任务艰巨、研究周期长、经济效益差。

(2) 爆破技术的发展机遇和挑战：

- ① 国家经济建设需要开挖大量土石方，爆破工程任务更加繁重，更加艰巨。
- ② 国家对爆破负面效应限制和有效率的要求将越来越严格。
- ③ 加强对低耗、高效、无害控制爆破技术的研究。

(3) 我国制定的新世纪工程爆破技术创新战略是：

① 进一步探索爆破能量控制技术的新工艺、新方法。发展炸药能量转化过程的精密控制技术，大力提高炸药能量利用率，降低爆破的有害效应。

- ② 加强爆破理论和模拟技术的研究，以指导爆破工程实践。
- ③ 发展工程爆破施工装备技术，提高施工机械化与自动化水平。
- ④ 爆破器材要向高质量、多品种、低成本和生产工艺连续化发展。
- ⑤ 爆破安全技术要进一步创新与发展。

四、现代工程爆破涵盖的主要内容

- (1) 钻孔机具与施工技术。
- (2) 炸药新品种、炮孔装药机械化和配套使用技术。
- (3) 满足特定要求的起爆器材和相应的使用技术。
- (4) 岩土爆破：① 隧道、井巷掘进爆破；② 台阶爆破；③ 硐室爆破；④ 控制爆破；⑤ 药壶与裸露药包爆破。
- (5) 拆除爆破：① 建（构）筑物的拆除爆破；② 水压拆除爆破；③ 水下围堰与挡水岩坎爆破。
- (6) 地震勘探爆破。
- (7) 油气井燃烧爆破。
- (8) 爆炸加工技术。
- (9) 高温爆破。
- (10) 水下爆破：① 水底炸礁爆破；② 冰凌清除爆破；③ 水下软基层爆破；④ 水下岩塞爆破；⑤ 水下钻孔爆破。
- (11) 其他特种爆破。
- (12) 医用微型爆破。
- (13) 计算机技术：① 计算机辅助技术 CAD；② 计算机数值模拟；③ 爆破信息管理系统。

第一章 爆破基础

爆破工程基础主要包括工业炸药性能分析、岩石爆破机理分析、系统起爆方法分析、基本爆破类型。

第一节 工业炸药性能分析

炸药是以氧化剂与可燃剂为主体，按照氧平衡原理构成的爆炸性混合物，在外界能量作用下，能够产生快速爆炸反应，放出高热和生成大量气体，对介质做功。炸药在铁路、公路、水利、水电、矿业、石油、林业、医用金属加工等民用领域和国防建设中得到广泛的应用。研究炸药的爆轰理论，熟悉炸药的物理、化学性质，了解炸药化学反应的基本规律，掌握炸药的爆炸性能和爆炸作用特征，对于安全、正确地使用炸药，有效地提高炸药能量利用率有着重要意义。

一、炸药和爆炸

1. 爆炸现象

爆炸是指物质发生急剧变化并放出大量气体对周围介质做机械功，同时伴随声、光、热效应的现象。爆炸时，在爆炸点周围的介质中发生急剧的压力突跃是爆炸产生破坏作用的直接原因。

根据爆炸变化过程的不同，可分为三类：一类是由物理变化引起的爆炸，如锅炉等高压容器的爆炸，称为物理爆炸；第二类是由核裂变或核聚变引起的爆炸，称为核爆炸；第三类是由化学变化引起的爆炸，称为化学爆炸，如瓦斯或煤尘的爆炸、炸药的爆炸都是化学爆炸。

2. 炸药爆炸的基本形式

由于反应方式和引起化学变化的环境条件不同，一种炸药可能有四种不同形式的化学变化：热分解、燃烧、爆炸和爆轰。

1) 热分解

热分解是一种缓慢的化学变化。其特点是化学变化在整个炸药中展开，反应速度与环境温度有关，炸药的缓慢分解速度随着温度的增加而呈指数增加。当通风散热条件不好时，分解热不易散失，很容易使炸药温度自动升高，进而促进炸药自动催化反应而导致炸药的燃烧或爆炸。

2) 燃 烧

燃烧是伴随有发光、发热的一种剧烈氧化反应。炸药可在无氧环境中正常燃烧。与缓慢分解不同，炸药的燃烧过程只是在炸药的局部区域内进行并在炸药内一层层地传播。反应区的传播速度称为燃烧速度。炸药的快速燃烧（每秒数百米）又称爆燃。

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。不稳定燃烧一般是由于燃烧过程中的热量传导或散失不平衡而形成的。不稳定燃烧可导致燃烧的熄灭或转变为爆炸。

3) 爆 炸

炸药的爆炸过程与燃烧过程类似，化学反应也只是在反应区内进行并在炸药内按一定速度一层层地自行传播。反应区的传播速度称为爆速。在炸药的爆炸过程中，若爆速保持定值，就称为稳定爆炸，否则称为不稳定爆炸。

燃烧和爆炸也是两种性质不同的化学变化过程。燃烧时通过热传导、热辐射及燃烧气体产物来传递能量和激起化学反应的，受环境条件的影响较大，而爆炸则是借助于冲击波对炸药一层的强烈冲击压缩作用来传递能量和激起化学反应的，基本上不受环境条件的影响；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；爆炸反应比燃烧反应更为激烈，放出的热量和形成的温度也更高；燃烧速度是亚音速，爆炸速度是超音速的。

4) 爆 轰

爆轰是指炸药以每秒数千米的最大稳定速度进行反应的过程。

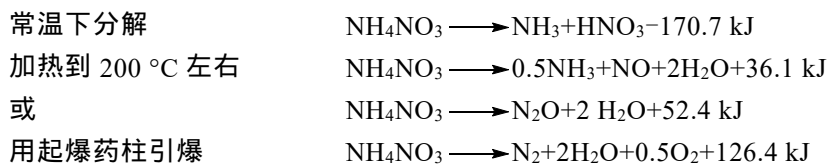
在一定条件下，炸药的上述四种变化能够互相转化的：热分解可因热量不能及时散失而发展成燃烧、爆炸；反之，爆炸也可以转化为燃烧、热分解。

3. 炸药爆炸的三要素

炸药爆炸必须具备以下三个基本条件，即放出热量、生成气态产物和反应的高速度。这是构成爆炸的必要条件，缺一不可，统称为爆炸反应的三要素。

1) 放出热量

放出热量是爆炸得以进行的必要条件，是对周围介质做机械功的物质基础。下面以硝酸铵的不同化学反应为例加以说明。



常温下，硝酸铵的分解是一个吸热反应，不能发生爆炸；但加热到 200 °C 左右时，分解反应为放热反应，如果放出的热量不能及时散失，炸药温度就会不断升高，促使反应速度不断加快和放出更多的热量，最终引起炸药爆炸；如果用起爆炸药柱引爆时，硝酸铵发生剧烈放热反应，即可爆炸。

2) 生成气体产物

爆炸放出的热量必须借助气体介质才能转化为机械功。因此，生成气体产物是炸药做功不可缺少的条件。如果物质的反应热很大，但是没有气体产物形成，就不会具有爆炸性，例如铝热剂反应：



此反应的速度很快，反应的热效应可以使产物温度升高到 3 000 °C，使其呈熔融状态，因为没有气态产物生成，而不发生爆炸。

由于气态物质具有可压缩性和很高的膨胀系数，炸药爆炸的瞬间生成大量的气体产物，在爆热作用下处于高温高压状态并使膨胀过程中将能量迅速转变为机械功，使周围介质受到破坏。

3) 反应的高速度

反应的高速度是爆炸过程区别于一般化学反应的重要标志。化学反应具备了放热性但并不一定能够发生爆炸。例如 1 kg 煤完全燃烧时放出的热量为 9 200 kJ，但因燃烧速度太低而不可能形成爆炸。1 kg 梯恩梯炸药爆炸时放出的热量虽然只有 4 222 kJ，但其爆炸反应的时间只需十几到几十毫秒，因而形成爆炸反应。

由于爆炸反应的速度极高，反应结束瞬间，其能量几乎全部聚集在炸药前所占据的体积内，因而能够达到很高的能量密度。炸药发生爆炸变化所达到的能量密度比一般燃料燃烧时达到的能量密度要高数百至数千倍。正是这个原因，爆炸过程才具有巨大的做功能力和强烈的破坏效应。

可见，放出热量、生成气体产物和反应的高速度是形成爆炸反应的三个充要条件。炸药放出热量给爆炸反应提供了充足能源，反应的高速度使爆炸能量高度集中，生成的气态物质是能量转换的工作介质。

4. 炸药的分类

炸药的品种繁多，它们的组成、物质性质、化学性质和爆炸性能各不相同。根据炸药的一些特点，对它们进行归纳分类，对于更好地研究和使用炸药是十分必要的。常见的炸药分类方法有：

1) 按炸药组成分类

根据组成的成分的不同，常把炸药分为单质炸药和混合炸药两大类。

(1) 单质炸药。单质炸药是由单一化合物组成的炸药。如梯恩梯（三硝基甲苯，符号 TNT）、黑索今（符号 RDX）、太安（符号 PETN）等。在民用爆破器材中，单质炸药大多用作混合炸药的组分或火工品（例如雷管、导爆索）装药，很少单独用来进行爆破作业。

(2) 混合炸药。混合炸药是指有两种或两种以上的物质组成的炸药。如黑火药、铵梯炸药、水胶炸药和乳化炸药等。混合炸药在炸药领域中占有极重要的地位。

2) 按作用特性和用途的不同

可分为起爆药、猛炸药、火药和烟火剂四大类。

(1) 起爆药。起爆药是指在较弱的初始冲能作用下即能发生爆炸，爆炸速度变化大，易于由燃烧转爆轰的炸药。起爆药一般都是单质炸药，如二硝基重氮酚（符号 DDNP）、D.S 共沉淀起爆药、K.D 复盐起爆药、叠氮化铅（符号 LA）等。起爆药主要用于引发其他炸药发生爆炸反应，常用于各种雷管、火帽的初级装药。

(2) 猛炸药。猛炸药是指那些利用爆轰所释放的能量对介质做功的炸药。这类炸药对热和冲击的感度较低，通常需要用雷管和起爆药激发起爆。

常见的猛炸药有：梯恩梯、黑索今、太安、特屈儿、奥克托今（符号 HMX）以及各类混合炸药。无论军用还是民用，大量使用的仍是由混合炸药组成的猛炸药。不同的是民用混合炸药以廉价的硝酸铵为主要成分，而军用混合炸药则很少使用硝酸铵，只是在特定的条件下将其当作一种代用品。

(3) 火药。火药化学变化的主要形式是燃烧。它可以在无氧环境中稳定而有规律地燃烧，放出大量的气体和热能，对外做抛射功或推射功。其主要代表有黑火药、单基火药、双基火药、高分子复合火药等。其中民用爆破器材中大量使用的是黑火药，主要用于制作导火索。单基火药、双基火药和高分子复合火药则主要用作发射弹药的能源，如火炮的发射药、火箭发动机的推进剂。

(4) 烟火剂。烟火剂是由氧化剂和可燃剂为主体制成的，在燃烧时能产生声、光、热、烟等特定效应的炸药。烟火剂包括照明剂、烟雾剂、信号剂和曳光弹等，通常用于装填特种弹药或烟火材料，产生特定的烟火效应。

起爆药、猛炸药、火药和烟火剂都具有爆炸性质，在一定条件下都能产生爆炸以致爆轰，因此统称为炸药。

3) 根据炸药的物理状态

可分为固体炸药、液体炸药、气体炸药和多相炸药。其中多相炸药是指由固体与液体、固体与气体或液体与气体组成的炸药。如含硝化甘油和硝酸铵的胶质炸药、铵油炸药、乳化炸药、水胶炸药以及可燃粉尘与空气的混合物等，其中以固液体系最有实际意义。

4) 按使用条件分类

炸药可分为煤矿许用炸药、岩石炸药、露天炸药。

二、爆炸化学反应

1. 炸药的氧平衡

绝大多数炸药由碳、氢、氧、氮四个元素组成，某些炸药还含氯、硫、金属及其盐类。对于由碳、氢、氧、氮四种元素组成的炸药，可以用通式 $C_aH_bO_cN_d$ 表示。单质炸药的通式通常按 1 mol 写出，混合炸药的通式则按 1 kg 写出。大多数炸药的爆炸反应为氧化反应，其特点是反应所需的氧元素由炸药本身提供。放热量最大、生成产物最稳定的氧化反应称为理想的氧化反应。若炸药内含有足够的氧量，按理想氧化反应生成的产物就为： H_2O 、 CO_2 、其他元素的高级氧化物、氮和多余的游离氧；若氧不足，则除生成 H_2O 、 CO_2 、 N_2 外，还生成 H_2 、

CO、固体碳和其他氧化不完全的产物。

氧平衡是指炸药中所含的氧用以完全氧化其所含的可燃元素后，所多余或不足的氧量。氧平衡用每克炸药中剩余或不足氧量的克数来表示。氧平衡大于零时为正氧平衡，等于零时为零氧平衡，小于零时为负氧平衡。

(1) 正氧平衡：炸药中所含的氧量多于可燃物质完全氧化所需量的氧平衡。

(2) 零氧平衡：某种炸药中所含的氧量，恰好足够使其所含一切可燃物质完全氧化的氧平衡。

(3) 负氧平衡：炸药中所含的氧量少于可燃物质完全氧化所需量的氧平衡。

对于通式 $C_aH_bO_cN_d$ (a 、 b 、 c 、 d 分别表示一个炸药分子中碳、氢、氧、氮的原子个数) 的单质炸药，其氧平衡按下式计算：

$$OB = \frac{[c - (2a + 0.5b)] \times 16}{M} \quad (1.1)$$

对于混合炸药，其氧平衡按下式计算：

$$OB = OB_1m_1 + OB_2m_2 + \dots + OB_n m_n \quad (1.2)$$

在上述两式中 OB ——炸药的氧平衡 (g/g)；

16——氧的相对原子质量 (g)；

M ——炸药的相对分子质量 (g)；

OB_1, OB_2, \dots, OB_n ——混合炸药中各组分的氧平衡值；

m_1, m_2, \dots, m_n ——混合炸药中各组分所占的百分率。

常见单质炸药和混合炸药常用组分的氧平衡列于表 1.1 中。

表 1.1 常见单质炸药和混合炸药常用组分的氧平衡

名称	分子式	氧平衡/(g·g ⁻¹)	名称	分子式	氧平衡/(g·g ⁻¹)
梯恩梯 (TNT)	C ₆ H ₂ (NO ₂) ₃ CH ₃	-0.74	铝粉	Al	-0.89
黑索今 (RDX)	(CH ₂ N-NO ₂) ₃	-0.216	木粉	C ₁₅ H ₂₂ O ₁₀	-1.38
特屈儿 (Te)	C ₆ H ₂ H(NO ₂) ₄ NCH ₄	-0.464	石蜡	C ₁₈ H ₃₈	-3.46
奥克托今 (HMX)	(CH ₂ N-NO ₂) ₄	-0.216	沥青	C ₁₀ H ₁₈ O	-2.76
硝化甘油 (NG)	C ₃ H ₅ (ONO ₂) ₃	+0.035	凡士林	C ₁₈ H ₃₈	-3.46
太安 (PETN)	C ₃ H ₈ (ONO ₂) ₄	-0.101	硝酸钾	KNO ₃	+0.396
硝酸铵 (AN)	NH ₄ NO ₃	+0.2	田菁胶	C _{3.32} H _{5.9} O _{3.25} N _{0.084}	-1.014
二硝基重氮酚	C ₆ H ₂ (NO ₂) ₂ NON	-0.58	硝酸钠	NaNO ₃	+0.47
亚硝酸钠	NaNO ₂	+0.348	轻柴油	C ₁₆ H ₃₂	-3.42

例 1.1 计算硝酸铵 (NH₄NO₃) 的氧平衡值。

解 硝酸铵的炸药通式为 C₀H₄O₃N₂， $M=80$ ，则由式 (1.1) 得：

$$OB = \frac{[3 - (0 + 4/2)] \times 16}{80} = +0.2 \text{ g/g}$$

例 1.2 已知 2 号岩石铵梯炸药的配方为硝酸铵 85%、梯恩梯 11%、木粉 4%。计算 2 号岩石铵梯炸药的氧平衡值。

解 由表 1.1 查得，硝酸铵、梯恩梯和木粉的氧平衡分别为 0.2、0.74、-1.38，由式 (1.2) 得：

$$OB=OB_1m_1+OB_2m_2+\dots+OB_nm_n$$

$$OB=0.2\times 0.85-0.74\times 0.11-1.38\times 0.04=+0.0334 \text{ (g/g)}$$

根据氧平衡的值，可将炸药分为正氧平衡炸药、负氧平衡炸药和零氧平衡炸药。

负氧平衡炸药因氧量欠缺，不能充分利用可燃元素，爆炸产物中含有 H_2 和有剧毒的 CO 气体，甚至出现固体碳。由于可燃元素不能充分氧化，不能放出最大热量。但是，负氧平衡炸药的生成产物中含双原子气体较多，能够增加生成气体的数量。

正氧平衡炸药不能充分利用其中的氧量，而且多余的氧和游离氮化合时，产生吸热反应，生成具有强烈毒性并对瓦斯与煤尘爆炸起催化作用的氮氧化合物。

零氧平衡炸药，因氧和可燃元素都得到了充分利用，在理想反应条件下，能放出最大热量，而且不会生成有毒气体，故爆炸效果最好。

混合炸药的氧平衡可由其组成和配比来调节。对于工业炸药，一般应使其氧平衡接近于零氧平衡。

2. 爆 热

单位质量炸药爆炸时放出的热量称为炸药的爆热（单位： kJ/kg ）。

炸药的爆热是在实验室使用一种专门的装置——爆热弹进行测定，并经实验和计算得到的。表 1.2 列出了几种常见炸药的爆热实验值。

表 1.2 几种常见炸药的爆热实验值

炸药名称	装药密度/($g \cdot cm^{-3}$)	爆热/($kJ \cdot kg^{-1}$)	炸药名称	装药密度/($g \cdot cm^{-3}$)	爆热/($kJ \cdot kg^{-1}$)
梯恩梯	0.85	3 389.0	特屈儿	1.0	3 849.3
梯恩梯	1.50	4 225.8	特屈儿	1.55	4 560.6
黑索今	0.95	5 313.7	硝酸铵/梯恩梯 (80/20)	0.9	4 100.3
黑索今	1.50	5 397.4	硝酸铵/梯恩梯 (80/20)	1.30	4 142.2
太 安	0.85	5 690.2	硝酸铵/梯恩梯 (40/60)	1.55	4 184.0
太 安	1.65	5 690.2	硝化甘油	1.60	6 192.3

提高炸药的爆热对于提高炸药的做功能力具有重要的意义。通常用来提高炸药爆热的途径主要有以下两个方面。

1) 改善炸药的氧平衡

为使炸药内可燃元素或可燃剂完全氧化放出最大热量，应使炸药尽量接近于零氧平衡。不过同属于零氧平衡的炸药放出的能量也不相同，一般含氢量高的炸药能量较大，这是由于氢完全氧化为水所放出的热量较高的缘故。零氧平衡炸药放出的热量与炸药化学反应的完全程度有关，并取决于炸药粒度、混合药质量、装药条件和爆炸条件等因素。

2) 加入高能元素或高能量的可燃剂

在单质炸药中引入铍、铝等高能元素可以适量提高其爆热。例如，在黑索今中加入适量

的镁粉，爆热可提高 50%。在混合炸药中加入铝粉、镁粉等是获得高爆热炸药常用的方法。这是因为这些金属粉末不仅能与氧元素进行氧化反应放出大量的热，而且还可以和炸药爆炸产生的 CO₂、H₂O 产生二次反应，而这些反应都是剧烈的放热反应，从而可以增大爆热。

3. 爆 温

炸药爆炸时放出的热量使爆炸产物定容加热所达到的最高温度称为爆温。爆温取决于爆热和爆炸产物的组成。单质炸药的爆温一般为 3 000 ~ 5 000 °C。工业炸药一般为 2 000 ~ 2 500 °C。

爆温是炸药的重要参数之一，它对爆炸的研究不仅有理论意义，而且有实际意义。在具有瓦斯与煤尘爆炸危险的环境中实施爆破作业时，为防止炸药爆温过高而引爆瓦斯和煤尘，必须按规定使用爆温较低的煤矿许用炸药。为了达到一定的军事目的，则需要研制和使用爆温较高的军用炸药。

为了达到降低爆温的目的，一般采用在炸药中加入附加物的方法，煤矿许用炸药中加入的附加物主要是氯化钠。相反为了提高炸药的爆温，则常在炸药中加铝粉和镁粉等高热剂。

4. 比 容

比容是单位质量炸药爆炸时生成的气体产物在标准状态下所占的体积，常用的单位是 L/kg。爆炸产物中的水在炸药爆炸时为气态，而在常温下为液态。在不考虑液态水占有的体积时，其余气体产物在标准状况下的体积称为干比容。如果假设标准状况下水仍为气态，则爆炸气体产物的体积之和称为全比容。

部分炸药在标准状态下的比容见表 1.3。

表 1.3 部分炸药在标准状态下的比容

炸药名称	比容/ (L · kg ⁻¹)	炸药名称	比容/ (L · kg ⁻¹)
硝化甘油	716	二硝基重氮酚	875
黑索今	908	2 号岩石硝酸炸药	924
梯恩梯	750	硝酸铵	870

气态产物是炸药爆炸做功的工作介质。气态产物越多，爆炸反应热变为机械功的效率越高，因此它与炸药做功能力有密切关系。比容通常按爆炸反应方程式计算，即

$$V_0 = \frac{22.4n}{M} \quad (1.3)$$

式中 v_0 ——炸药的比容 (L/kg)；

n ——爆炸反应方程式中各气态产物物质的量之总和 (mol)；

M ——爆炸反应方程式中炸药的质量 (kg)。

例 1.3 已知梯恩梯的爆炸反应方程式为 $C_7H_5O_6N_3 \longrightarrow 2.5H_2O + 3.5CO + 1.5N_2 + 3.5C$ ，求梯恩梯的比容。

解 因为 $n=2.5+3.5+1.5/7.5$ ， $M=227$ ，所以由式 (1.3) 得：

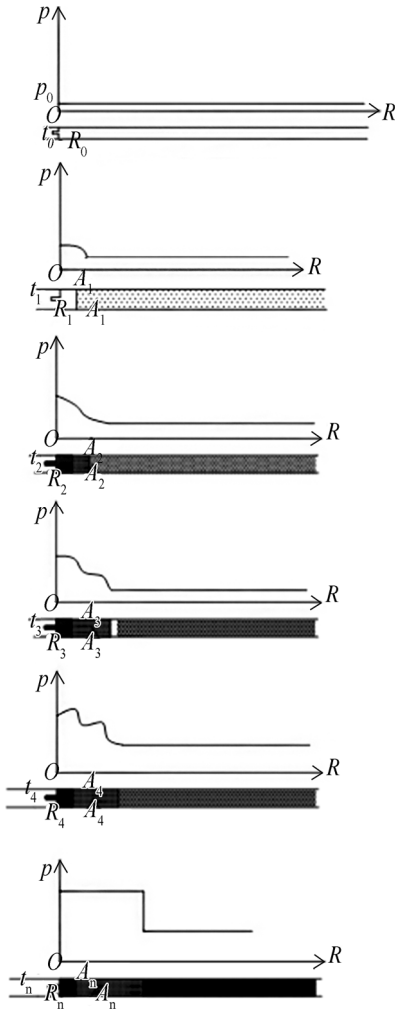
$$V_0 = \frac{22.4 \times 7.5}{0.227} = 740 \text{ (L/kg)}$$

5. 爆 压

爆压是指爆轰产物在爆炸完成的瞬间所具有的压力，单位为 MPa。爆炸过程中爆炸产物内的压力是不断变化的，爆压是指爆轰结束时，爆轰产物在炸药初始体积内达到热平衡时的流体静压值。爆压反映炸药爆炸瞬间的猛烈破坏程度。爆压可用阿贝尔状态方程进行计算。

$$\rho = \frac{nRT}{V-a} = \frac{np}{1-ap} RT \quad (1.4)$$

式中 a ——气体分子的余容，为炸药密度的函数；
 r ——炸药密度；
 T ——爆温。



R—活塞与气体的界面；A—各个瞬时的波阵面；P—管中空气压力。

图 1.1 冲击波形成原理示意图

t_4 瞬间：产生第四个压缩波，其波速 c_3 大于 c_2 。

如此追逐的结果，必有一个瞬时如 t_n ，后面的压缩波都赶上了第一个压缩波，彼此叠加成一个与以前的压缩波有质的差别的强压缩波，波阵面在 A_n-A_n ，面上各个介质参数都是突然

6. 冲击波的形成

冲击波是一种介质中以超声波传播的并具有压力突然跃升然后慢慢下降特征的一种高强度压力波。

飞机和弹丸在空气中的超音速飞行，炸药爆炸产物在空气中的膨胀，都是产生冲击波的典型例子。下面仍借助活塞在气缸中的运动来说明冲击波的形成原理，在图 1.1 中把冲击的形成过程分解成若干阶段。

t_0 瞬时：假设活塞静止 R_0 处，缸内气体未受扰动，压力平均为 p_0 。

t_1 瞬时：活塞从 R_0 加速运动至 R_1 ，占据了 R_0-R_1 区间，原来该区间的空气被压缩到 R_1-A_1 区间而形成第一个压缩波，波阵面等于原来未被扰动时空气的音速 c_0 。

假设活塞从 R_1 处开始向右保持匀速运动。

t_2 瞬时：活塞运动速度不变并到达 R_2 ，使活塞前端的气体继续受到压缩，原来 R_1-R_2 区间的空气被压缩到 R_2-A_2 区间而形成第二个压缩波，波阵面在 A_2-A_2 。由于第二个压缩波是在第一次压缩所造成的密度增大的空气中传播的，它的波速就等于密度加大的空气的音速 c_1 ，其波速 c_1 大于 c_0 。

t_3 瞬时：产生第三个压缩波，其波速 c_2 大于 c_1 。

跃升的，这就是冲击波。

从冲击波的形成过程可以看出：冲击波的波面是一个突跃面，在这个突跃上介质的状态参数发生不连续的突跃变化，且变化梯度非常大。

冲击波的基本特性：

(1) 冲击波的波速对未扰动介质而言是超音速的。

(2) 冲击波的波速与波的强度有关。由于稀疏波的侵蚀和不可逆能量损耗，其强度和对应的波束将随传播距离增加而衰减。传播一定距离后，冲击波就会退变为压缩波，最终衰减为音波。

(3) 冲击波波阵面上的介质状态参数（速度、压力、密度、温度）的变化是突跃的，波阵面可以看作介质中状态参数不连续的间断面。冲击波后面通常跟有稀疏波。

(4) 冲击波通过时，静止介质将获得流速，其方向与波传播方向相同，但流速小于波速。

(5) 冲击波对于介质的压缩不同于等熵压缩。冲击波形成时，介质的熵将增加。

(6) 冲击波以脉冲形式传播，不具有周期性。

(7) 当很强的入射冲击波在刚性障碍物表面发生正反射时，其反射冲击波波阵面上的压力是入射冲击波波阵面上压力的 8 倍。由于反射冲击波对目标的破坏性更大，因此在进行火工品车间、仓库等有关设计时应尽量避免可能造成的冲击波反射。

冲击波不仅能在流体（气体、液体）中传播，也能在固体中传播。

三、炸药爆轰基本知识

1. 爆轰波

炸药被激发起爆后，首先在炸药的某一局部发生爆炸化学反应产生大量高温、高压和高流速的气体产物流，并释放出大量的热能。这一高速气流的作用强烈冲击和压缩邻近层的炸药，使在邻近炸药层中产生冲击波，并引起该层炸药的应力、温度和密度产生突跃式升高而迅速发生化学反应，生成爆炸产物并释放出大量的热能。局部炸药爆轰所释放的热能，一方面可以阻止稀疏波对冲击波的侵蚀，另一反面又可以补充到冲击波中，以维持冲击波以稳定的速度向前传播。这样，冲击波继续压缩下一层炸药又引起下一层炸药的化学反应，新释放的热能又补充到冲击波中去，以维持它的定速传播。如此一层一层地传播，就完成了炸药的爆轰过程。

这种伴随有快速反应区的冲击波称为爆轰波，爆轰波沿炸药传播的速度称为爆速。

2. 爆轰波的结构

在冲击波的高压作用下，相邻与冲击波的炸药层出现一个压缩区 0—1（图 1.2），其厚度约 10^{-5} cm。在这里，压力、密度、温度都呈突跃升高状态。

随着冲击波的传播，新压缩区的产生，原压缩区成为化学反应区，反应在 1—1 面开始发生，在 2—2 面结束。再随着冲击波的前进，新的化学反应区的形成，原化学反应区又成为反应产物膨胀区。化学反应放出的能量，不断维持着波阵面上参数的稳定，其余在膨胀区消耗掉，因而达到能量平衡，冲击波即以稳定速度向前传播，这就是爆轰过程的实质。由此可见：

(1) 爆轰波只存在于炸药的爆轰过程中。爆轰波的传播随着炸药爆轰结束而中止。

(2) 爆轰波总带着一个化学反应区，它是爆轰波得以稳定传播的基本保证。习惯上把 0—2 区间称为爆轰波波阵面的宽度，其数值一般为 0.1 ~ 1.0 cm，视炸药的种类而异。

(3) 爆轰波具有稳定性，即波阵面上的参数及其宽度不随时间而变化，直至爆轰终了。

2—2 面为爆轰化学反应区的末端面。在进行理论研究时，常把满足一定假设条件的理想爆轰波波阵面简称为 C—J 面。C—J 面上的状态参数称作爆轰波参数或爆轰参数。爆轰波 C—J 面上的压力称作爆轰压力。爆轰波 C—J 面上的温度称作爆轰温度。

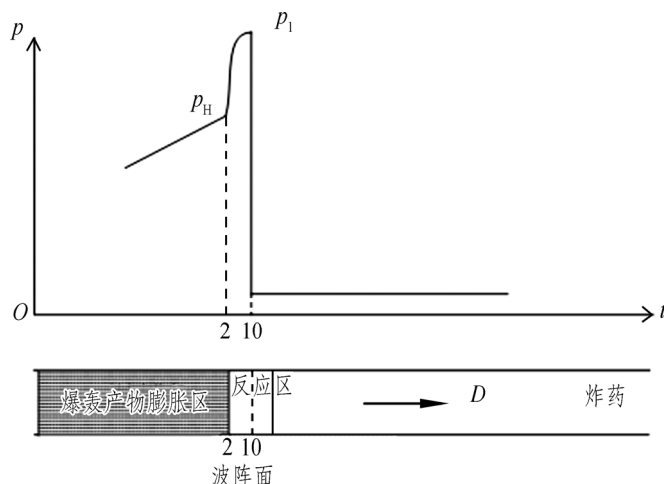


图 1.2 爆轰波结构示意图

3. 爆轰波的参数

对于强冲击波，其基本方程可表示为：

$$\text{C—J 面上爆轰产物的移动速度 } u_H = \frac{1}{K+1} \quad (1.5)$$

$$\text{爆轰压力 } p_H = \frac{1}{K+1} p_0 D^2 \quad (1.6)$$

$$\text{C—J 面上爆轰产物的比容 } v_H = \frac{1}{K+1} V_0 \quad (1.7)$$

$$\text{C—J 面上爆轰产物的密度 } \rho_H = \frac{1}{K+1} \rho_0 \quad (1.8)$$

$$\text{C—J 面上稀疏波相对爆轰波产物的速度 } c_H = \frac{1}{K+1} D \quad (1.9)$$

$$\text{爆速 } D = \sqrt{2(K^2 - 1)Q_V} \quad (1.10)$$

$$\text{爆轰温度 } T_H = \frac{2K}{K+1} T_b \quad (1.11)$$

式中： T_b 表示爆温， Q_V 表示爆热。对于凝聚炸药，一般取 $K = 3$ 。从这些公式可以知道：

(1) 爆轰产物质点移动速度比爆速小，但随爆速的增大而增大。

- (2) 爆轰压力取决于装药的爆速和密度。
- (3) 爆轰刚结束时，爆轰产物的密度大于炸药的初始密度。
- (4) 爆轰温度大于爆温。

4. 炸药的爆轰反应机理

根据炸药的化学组成以及装药的物理状态不同，可以把炸药的爆轰反应机理分为均匀灼烧机理、不均匀灼烧机理和混合反应机理。

1) 均匀灼烧机理

均匀灼烧机理是指炸药在强冲击波作用下，爆轰波波阵面的炸药受到强烈的绝热压缩，使受压缩炸药的温度均匀地升高，如同气体绝热压缩一样，化学反应是在反应区的整个体积内进行的。这种机理多发生在结构均匀的固体炸药（如单质炸药）以及无气泡和无杂质的均匀液体炸药，即所谓的均相炸药中。这种炸药反应速度非常快，能在 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ s 内完成。

2) 不均匀灼烧机理

不均匀灼烧机理是指自身结构不均匀的炸药，在冲击波的作用下受到冲击波强烈压缩时，整个压缩层炸药温度并不是均匀地升高并发生灼烧，而是个别点的温度升得很高，形成“起爆中心”或“热点”并先发生化学反应，然后再传到整个炸药层。

在不均匀灼烧机理中“起爆中心”形成的途径主要有以下 3 种，它们均已被实验所证实：

- (1) 炸药中含有微小气泡（气体或蒸汽）在受到冲击波压缩作用时的绝热压缩。
- (2) 由于冲击波经过时炸药的质点间或薄层间的运动速度不同而发生摩擦或变形。
- (3) 爆炸气体产物渗透到炸药颗粒间的空隙中而使炸药颗粒表面加热。

3) 混合反应机理

混合反应机理是混合炸药，尤其是固体混合炸药所特有的一种爆炸反应机理。其特点是，反应不是在炸药的化学反应区整个体积内进行的，而是在一些分界面上进行的。对于由几种单质炸药组成的混合炸药，它们在发生爆轰时首先是各组分的炸药自身进行反应，放出大量的热，然后是各反应产物相互混合并进一步反应生成最终产物。但是，对于有反应能力相差很悬殊的一些组分的混合炸药，如由氧化剂和可燃剂或者是炸药与非炸药成分组成的是混合炸药，它们在爆轰时，首先是氧化剂或炸药分解，分解产物的气体产物渗透或扩散到其他组分质点的表面并与之反应，或者是几种不同组分的分解产物之间的相互反应。

四、炸药感度

1. 炸药感度及其类型

在外界能量的作用下，炸药发生爆炸的难易程度称为感度。能够激发炸药发生爆炸变化的能量有热能、电能、光能、机械能、冲击波能或辐射能等多种形式。通常根据外界作用于炸药能量的形式将炸药的感度分热感度、火焰感度、摩擦感度、撞击感度、起爆感度、冲击波感度、静电感度等若干类型。

炸药对不同形式的外界能量作用所表现的感度是不一样的，不能简单地以炸药对某种起爆能的感度等效地衡量它对另一种起爆能的感度。

在工程实践中，人们希望炸药在使用的时候具有高感度，以保证起爆和传爆的可靠性；而在生产、储存运输等非使用场合，炸药又具有低感度，以确保安全。根据需要，人们把炸药的感度又分为“使用感度”和“危险感度”。所谓使用感度是指炸药在预定起爆方式所施加的起爆能的作用下发生爆炸反应的难易程度。对于爆破作业人员来说，一般都希望炸药在使用时具有较高的使用感度，以减小炸药拒爆的概率，有效地防止盲炮事故。所谓危险感度则是指炸药在外界施加的各种非正常起爆能的作用下发生爆炸的难易程度。无论是炸药的生产者还是使用者，都希望炸药具有较低的危险感度，以保证炸药在生产、运输和储存等非使用环节的安全，避免发生意外事故。

2. 炸药的热感度

炸药的热感度是指在热的作用下，炸药发生爆炸的难易程度。热作用的方式主要有两种：均匀加热和火焰点火，习惯上把均匀加热时炸药的感度称为热感度，把火焰点火时的炸药感度称为火焰感度。

炸药的热感度通常用爆发点来表示。爆发点是炸药在一定的受热条件下，经过一定的延滞期发生爆炸时加热介质的最低温度。很显然，爆发点越高，则说明该炸药的热感度越低。

在工业生产中，用爆发点测定仪来测定炸药的爆发点，做爆发点量测实验时延滞期一般取 5 min 为标准。表 1.4 列出了几种炸药的爆发点。

表 1.4 几种炸药的爆发点

炸药名称	爆发点/°C	炸药名称	爆发点/°C
EL 系列乳化炸药	330	硝酸铵	300
2 号岩石铵梯炸药	186 ~ 230	黑火药	290 ~ 310
3 号露天铵梯炸药	171 ~ 179	黑索今	230
2 号煤矿铵梯炸药	180 ~ 188	特屈儿	195 ~ 200
3 号锰矿铵梯炸药	184 ~ 189	梯恩梯	190 ~ 295
硝化甘油炸药	300	二硝基重氮酚	150 ~ 151

雷管的起爆药均具有较高的火焰程度。在敞开环境下，一般工业炸药用火焰点燃时通常只发生不同程度的燃烧。

火焰感度用上限距离和下限距离表示。用导火索点燃装入加强帽中的 0.05 g 炸药，上限距离是 100%发火的最大距离，下限距离则是 100%不发火的最小距离。

3. 炸药的机械感度

炸药的机械感度是指炸药在机械作用下发生爆炸的难易程度。机械作用的形式有撞击摩擦、针刺等，其中撞击和摩擦是最为常见的两种形式。

1) 撞击感度

在机械撞击的作用下，炸药发生爆炸的难易程度称为炸药的撞击感度。