

炸药理论

《炸药理论》编写组 编

国防工业出版社

V46
Z923

炸 药 理 论

《炸药理论》编写组 编

515570

国防工业出版社

内 容 简 介

本书主要包括：炸药的爆炸变化形式；炸药的热化学、热分解和热安定性；燃烧和爆轰理论；炸药的感度及各种起爆机理；炸药爆炸作用等基本理论和测试方法；对于近年来新发展的有关理论，研究课题及测试技术也作了介绍。适用于高等院校火药、炸药、火工品等专业，以及同类型专业的《炸药理论》课程的教材，也可供有关专业的工程技术人员和科技人员参考。

炸 药 理 论

《炸药理论》编写组 编

*

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

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092¹/₁₆ 印张 18³/₄ 431 千字

1982年1月第一版 1982年1月第一次印刷 印数：0,001—3,300册

统一书号：15034·2287 定价：1.95元

前 言

炸药是一种能够发生迅速化学反应的物质，其反应结果生成大量气体产物、放出大量热量，并对周围介质有作功和破坏的能力，故是能源之一。

炸药理论主要研究：炸药爆炸的热化学特性；炸药热分解和热安定性的特点和规律；燃烧、爆轰及由燃烧转爆轰的过程；炸药对外界作用的敏感度及起爆机理；冲击波及冲击波在介质中的传播；炸药的爆炸作用等。其目的是：了解炸药的物理化学性质与爆炸性质的关系；研究炸药在制造、使用和贮存过程中的安全性；根据不同目的，选择炸药品种和装药条件，合理地使用炸药，以最大限度发挥其效能。

炸药与其它能源相比，具有独特的优点，所以很早就被人类发现和应用。我国早在公元六世纪就发明了黑药，并且用于军事。十三世纪末，黑药传入欧洲并且得到了广泛的应用和发展。十八世纪末，由于工业技术的发展，制成了雷汞并发现了爆轰现象，从而扩大了炸药的用途，促进了猛炸药发展，开始了近代炸药的新纪元。到二十世纪四十年代，随着核武器、导弹和宇宙飞行器的出现，使炸药的研究百尺竿头，更进一步。目前，无论在军事上或民用方面都广泛地使用炸药。如在军事上，炸药被用来装填各种炮弹、火箭、鱼雷及导弹的战斗部和核武器的起爆系统，也用于许多特种军事目的；在民用方面，炸药也越来越多地使用于冶金、采矿、煤炭和铁道甚至医药卫生等部门，除在工程上广泛地采用各种爆破技术外，像爆炸成型、爆炸焊接、爆炸合成金刚石和爆炸激光新技术等也都得到了很大的发展。

炸药理论和炸药密切相关，它随着炸药的发展而发展。在这一方面，我国古代就作了探索。如《天工开物》记载：“凡火药用硝石、硫磺为主，草木灰为辅，硝性呈阴 硫性至阳”。这种以阴阳相辅的说法解释了黑药中硝酸钾和硫磺的作用，实际上就是现代氧平衡的观点。十九世纪后半叶，研究了炸药的热化学、炸药燃烧过程与混合气体的爆轰现象；二十世纪初期，对起爆药和猛炸药爆炸变化反应、热分解、凝聚炸药的爆轰理论、炸药的起爆与传爆机理又进行了深入地研究。二十世纪四十年代后，随着炸药的发展，炸药理论的研究也进入了新的阶段，由于广泛地运用了有机化学、物理化学、热力学、流体力学、理论物理等学科的基础理论和新成就，以及使用了电子计算机、电子学、光学等精密仪器，炸药理论在理论研究和实验技术方面都得到了飞跃的发展。目前，已有可能从分析的观点来阐明过去仅能定性解释的许多现象，对于炸药的合成、制造和应用起了一定的指导作用。应当指出，由于炸药理论所涉及的许多现象包含着复杂的高压、高温、高速过程，尚有许多问题没有解决，还有待于今后进一步研究。

本书是高等院校炸药及有关专业“炸药理论”课程的试用教材，亦可作为火炸药科研和工程技术人员的参考书。内容偏重于炸药理论的基本概念、基本理论和基本实验，以便给读者以必需的炸药理论基础知识。

本书是在北京工业学院、华东工程学院历次炸药理论教材的基础上，参考了近年来国

40-78/03

内外发表的有关文献和编者的教学实践及科研成果，经过加工整理而成。因此，它基本能适合于炸药理论课程的教学要求。

参加本书编写的单位有华东工程学院和北京工业学院。其中第一、五章由孙名振同志执笔；第二、三章由云主惠同志执笔；第四章由松全才同志执笔；第六章由松全才和孙名振两同志执笔；第七章由郑孟菊同志执笔；第八章由余家齐同志执笔。全书由陆庆武、肖学忠两同志审定。在编写与审校过程中，得到了有关院校、研究单位、工厂的大力支持与帮助，在此顺致谢意。

由于编者水平所限，加上时间仓促，错误和缺点在所难免，希读者批评指正。

《炸药理论》编写组

一九八一年六月

目 录

第一章 绪论 1	§6 炸药的爆温41
§1 爆炸现象和炸药爆炸三要素 1	1 爆温的理论计算.....41
1 反应的放热性..... 1	2 影响爆温的因素和改变爆温的途径.....44
2 反应的快速性..... 2	第四章 炸药的热分解46
3 生成气体产物..... 3	§1 引言46
§2 炸药爆炸变化的形式 3	§2 炸药热分解的基本规律.....47
1 燃烧..... 4	1 炸药热分解的形式动力学曲线.....47
2 爆轰..... 4	2 炸药热分解的机理简介.....47
§3 炸药的分类 4	§3 研究、测定炸药热分解的方法49
1 按用途分类..... 4	1 量气法.....49
2 按组分分类..... 5	2 失重法.....51
§4 炸药的基本要求 6	3 测热法.....51
第二章 爆炸变化方程式、爆炸产物的 组分和体积 7	4 其它方法.....52
§1 炸药的氧平衡与氧系数 7	§4 硝酸酯类炸药的热分解.....52
1 炸药的氧平衡..... 7	1 硝化甘油的热分解.....52
2 炸药的氧系数..... 9	2 泰安的热分解.....55
§2 爆炸变化方程式的理论确定法10	§5 硝基胺类炸药的热分解.....57
1 第 I 类炸药.....10	1 黑索金的热分解.....57
2 第 II 类炸药.....12	2 奥克托金的热分解.....60
3 第 III 类炸药.....12	3 脂烃多硝基胺的热分解.....61
§3 爆炸变化方程式的经验确定法13	4 三硝基苯基甲基硝胺 (特屈儿) 的热 分解.....62
§4 爆炸产物体积的计算.....17	§6 硝基化合物类炸药的热分解.....62
§5 炸药爆炸时产生的有毒气体产物.....18	1 一、二、三硝基苯的热分解.....62
第三章 炸药的热化学20	2 梯恩梯 (三硝基甲苯) 的热分解.....63
§1 化学反应的热效应.....20	3 三硝基丁酸三硝基乙酯的热分解.....65
§2 炸药的爆热.....22	§7 炸药热分解机理的总论.....65
1 概述.....22	1 热分解初始反应的本质.....65
2 爆热的实验测定.....22	2 热分解的第二反应.....67
3 影响爆热的因素.....24	3 炸药热分解的活化能.....68
§3 爆热的计算.....26	§8 炸药的热安定性.....69
1 爆热的理论计算法.....26	1 概论.....69
2 爆热的经验计算法.....29	2 炸药热安定性理论.....70
§4 炸药的生成热31	3 炸药热安定性分析.....71
1 电子转移法.....31	4 指定温度下, 炸药热安定性的估计.....72
2 键能加和法.....35	§9 炸药的相容性.....74
§5 提高炸药爆热的途径.....40	1 概论.....74
	2 相容性的表现与机理.....75

3	测定炸药相容性的方法	76	爆速的影响	163	
§10	炸药的热爆炸	78	§9	炸药的高速爆轰和低速爆轰	172
1	概论	78	§10	爆轰理论的现状和发展方向	175
2	热爆炸的稳定状态理论	79	第六章 炸药的燃烧	177	
3	热爆炸的非稳定状态理论	84	§1	炸药燃烧的一般概念	177
4	实验测定热爆炸参量的方法	85	§2	可燃气体混合物的燃烧	178
第五章 冲击波与爆轰波	91	1	概述	178	
§1	冲击波基础理论	91	2	可燃气体混合物火焰正常传播的理论	178
1	音波与音速	91	3	可燃气体混合物的着火浓度极限	184
2	冲击波的形成	95	§3	凝聚炸药的燃烧	185
3	冲击波基本关系式的建立	97	1	挥发性炸药的燃烧理论	185
4	冲击波参数的计算	98	2	难挥发性炸药的燃烧	189
5	冲击波的性质	102	3	速燃炸药的燃烧	190
6	用冲击波绝热曲线讨论冲击波的性质	104	§4	实验得到的凝聚炸药稳定燃烧规律	190
7	冲击波阵面的结构	108	1	压力对燃烧速度的影响	190
8	冲击波的自由传播	109	2	影响燃速的其它因素	192
§2	爆轰过程概述	110	§5	燃烧转变为爆轰	194
1	爆轰理论的发展简介	110	1	可燃气体混合物的燃烧向爆轰的转变	194
2	爆轰的流体动力学理论的基本模型	111	2	凝聚炸药燃烧向爆轰的转变	194
§3	气相爆轰的流体动力学理论	112	§6	凝聚炸药燃烧转爆轰的条件	196
1	基本方程的建立	112	1	凝聚炸药稳定燃烧的条件	196
2	爆轰波绝热曲线	114	2	液体炸药燃烧的稳定性的	198
3	爆轰波绝热曲线各段的物理意义	115	3	粉状炸药燃烧的稳定性的	199
4	爆轰波稳定传播条件	115	4	凝聚炸药稳定燃烧的顺序	202
§4	气体炸药爆轰参数的计算和影响因素	121	第七章 炸药的感度	203	
1	气体炸药爆轰参数的计算	121	§1	炸药感度的一般概念	203
2	影响气体炸药爆速的因素	125	§2	炸药的热感度	204
§5	凝聚炸药爆轰过程	127	1	炸药热感度的表示方法和实验测定	204
1	凝聚炸药爆轰反应区的结构	127	2	炸药在热作用下发生爆炸的机理	207
2	凝聚炸药爆轰波中化学反应的机理	129	§3	炸药的机械感度	209
3	凝聚炸药的起爆与传爆	131	1	炸药撞击感度的表示方法和实验测定	209
§6	凝聚炸药爆轰参数的计算	132	2	炸药的摩擦感度及实验测定	215
1	凝聚炸药爆轰参数的理论计算	132	3	测定炸药撞击感度和摩擦感度的一些问题	217
2	凝聚炸药爆轰参数的近似计算	139	4	炸药对发射时惯性力作用的感度	219
§7	爆轰参数的测定	146	5	炸药在机械作用下的起爆机理	221
1	炸药爆速的实验测定	146	§4	炸药的爆轰感度和冲击波感度	228
2	爆轰波 C-J 压力的实验测定	151	1	猛炸药对起爆药爆轰的感度	228
3	凝聚炸药局部等熵指数 γ 的测定	158	2	炸药的冲击波感度	229
§8	影响凝聚炸药爆速的因素	159			
1	炸药化学性质的影响	159			
2	装药的物理性质对凝聚炸药				

§5 炸药对静电放电的感度	233	§2 炸药的猛度	255
1 炸药摩擦带电的起因和测量方法	233	1 猛度的理论表示法	256
2 炸药静电火花感度的测量	234	2 猛度的实验测定法	260
§6 其它初始冲量对炸药的作用	235	3 影响炸药猛度的因素	262
1 光起爆炸药	235	§3 聚能效应	263
2 激光起爆炸药	236	1 聚能效应的物理实质	264
3 爆炸线起爆炸药	237	2 金属流的形成和运动	265
§7 影响炸药感度的因素	239	3 影响聚能效应的主要因素	266
1 炸药的结构和物理化学性质对感度的影响	239	§4 爆炸冲击波在介质分界面上的初始参数	269
2 炸药的物理状态及装药条件对感度的影响	241	1 分界面处压力 $P_1 < P_2$ 时的情况	270
§8 钝感	245	2 分界面处压力 $P_1 > P_2$ 时的情况	273
第八章 炸药的爆炸作用	247	§5 炸药在空气中的爆炸作用	275
§1 炸药的作功能力	247	1 空气中爆炸的基本现象	275
1 作功能力的理论表达式	247	2 空气中爆炸时冲击波参数的计算	277
2 作功能力的实验测定	249	3 空气冲击波的正反射	282
3 炸药作功能力的其它表示法	253	§6 殉爆和安全距离	285
4 提高炸药作功能力的途径	255	1 殉爆	285
		2 安全距离	287
		参考文献	290

第一章 绪 论

§ 1 爆炸现象和炸药爆炸三要素

爆炸是物质的一种非常急剧的物理、化学变化。在变化过程中，伴有物质所含能量的快速转变，即变为该物质本身、变化的产物或周围介质的压缩能或运动能。因此，它的一个重要特点是大量能量在有限的体积内突然释放或急骤转化。这种能量在极短时间和有限的体积内大量积聚，造成高温高压等非寻常状态对邻近介质形成急剧的压力突跃和随后的复杂运动，显示出不寻常的移动或机械破坏效应。爆炸的一个显著的外部特征是由于介质受振动而发生一定的音响效应。一般将爆炸现象区分为两个阶段：先是某种形式的能量以一定的方式转变为原物质或产物的压缩能；随后物质由压缩态膨胀，在膨胀过程中作机械功，进而引起附近介质的变形、破坏和移动。由物理变化引起的爆炸称为物理爆炸；由化学变化引起的爆炸称为化学爆炸。

物理爆炸在日常生活中是常见的。例如：闪电，它是一种强力的火花放电。在放电区可达到极其巨大的能量密度和极高的温度(数万度)，这就导致放电区空气压力迅速上升而发生爆炸。蒸汽锅炉或高压气瓶的爆炸以及地震等，也都属于物理爆炸的范畴。

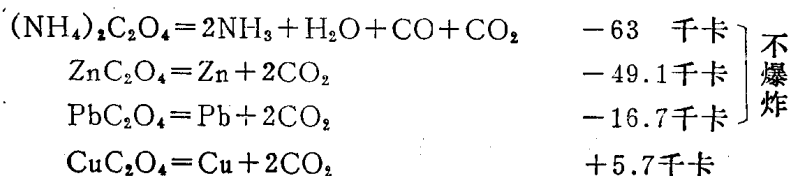
化学爆炸的例子也很多。如矿井瓦斯爆炸、煤矿粉尘爆炸以及炸药爆炸等。我们将能够进行化学爆炸的物质称为炸药。本课程重点研究炸药的爆炸变化。因此，后面所提到的“爆炸”，如不加以说明，都是指化学爆炸。

炸药发生爆炸变化的能力，决定于以下三个基本因素：反应的放热性、反应的速度性和生成气体产物。

1. 反应的放热性

反应的放热性是炸药发生爆炸变化的必要条件，对于这一点，所有的炸药都没有例外。因为要使炸药发生分解反应，必须首先供给能量，使其分子活化或破坏其原来的结构，重新组合成新的产物的分子。如果反应不具有放热性，则前一层炸药爆炸以后，不能激发下一层炸药的爆炸，这样反应便不能自动地传播下去。而要维持这种物质爆炸反应的进行，就必须不断地由外界供给能量。很显然，这样的物质不能成为炸药。反之，如果物质在爆炸时能释放热量，则其已爆炸部分所释放的热量是激发未爆炸部分的能源，这样爆炸过程就可以自行传播下去。

此外，爆炸本身是能量急骤转化的过程。炸药爆炸是通过将炸药转化为稳定的爆炸产物，从而将化学能转变为热能，热能再转化为对周围介质所作的机械功。不放热或放热很少的反应不能提供作功的能量，因此不能具有爆炸性质。例如：





上述各反应式都是草酸盐的分解反应式，分解产物也都相似。但是，它们分解时的热效应却不相同。实验发现：凡是分解时吸热的草酸盐都不具有爆炸性；只有分解时放热的草酸汞和草酸银才具有爆炸性。草酸铜虽然分解时也放出热量，因其热量很小，有可能爆炸，但较微弱。必须指出，炸药（主要指固态和液态炸药）在爆炸时所放出的能量，并不是特别高的。如按单位重量计算，并不比一般的燃料高。那末，为什么炸药能够发生猛烈的爆炸呢？这是因为按单位容积计算，炸药的含能量比一般的燃料要大得多，从而有很高的能量密度的缘故。表 1-1 表示炸药和普通燃料的含能量。通过对比可以看出炸药含能量的特点。

表 1-1 炸药、普通燃料的含能量

物 质	燃 烧 热 或 爆 热 (千卡)		
	每 公 斤 物 质	每公斤燃料空气混合物①	每 升 燃 料 空 气 混 合 物
木柴	4500	1900	4.7
无烟煤	8000	2200	4.3
汽油	10000	2300	4.2
黑火药	700	700	670
梯恩梯	1000	1000	1550
硝化甘油	1500	1500	2400

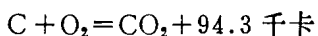
① 燃料空气混合物是指燃料完全氧化所需要的空气和燃料的混合物。

由表可见，以单位重量物质来比较，炸药爆炸时放出的能量比普通燃料燃烧放出的能量低得多，甚至只相当于其十分之几。就单位重量的燃料和空气的混合物来看，炸药的能量也只相当于燃料和空气混合物能量的一部分。但是由于空气的密度小，空气混合物占的体积相当大，因此，就单位体积的含能量来看，炸药的含能量可以达到燃料-空气混合物含能量的 130~600 倍，也就是说炸药的能量集中即能量密度大。

2. 反应的快速性

反应的快速性也是炸药发生爆炸的必要条件。它是爆炸过程区别于一般化学反应过程的最重要的标志。就以单位重量物质的放热来说，炸药往往比不上普通燃料。但是，普通燃料的燃烧一般不具有爆炸的特征，而炸药的爆炸则具有爆炸的特征，这是由其反应的快速性所决定的。例如，每公斤无烟煤与空气的混合物燃烧反应的放热量为 2200 千卡，而每公斤硝化甘油的爆热为 1500 千卡，但前者反应所需的时间为数分钟到数十分钟，而后者则可以在百分之几到百万分之几秒的时间内完成。也就是说，炸药的爆炸要比普通燃料的燃烧快千百万倍。虽然这两种反应最终都会放出大量热量，生成大量气体，但前者由于反应缓慢，气体产物可以扩散开而不致形成高压；后者则由于过程的快速性，在反应过程中，气体来不及膨胀，所放出的热量集中在炸药原来占有的容积内，而维持很高的能量密度，因此形成了高温、高压气体，使炸药爆炸具有巨大的功率和强烈的破坏作用。例如，据粗略估计，一公斤炸药仅仅释放出相当于一千瓦的电机运转一个多小时的能量，而一公斤炸药在爆炸瞬间却可以达到 5000 兆瓦的功率。

现再以煤的燃烧为例来说明反应快速性的作用。如：

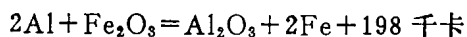


这一反应是大家所熟悉的。煤块在空气中燃烧可以放出大量的热量和气体，但煤块燃烧并不能爆炸。这是因为只有氧气扩散到煤的表面才能起反应，而反应进行又缓慢。其放出的热量和气体能逐渐扩散到周围的大气中，不会形成高温、高压，因而也不能对外界产生激烈的机械作用。若将煤块粉碎成极细的煤粉，并均匀地悬浮在空气中。则点火后就有可能产生爆炸。这是由于煤和氧气充分接触，反应十分迅速的缘故。

3. 生成气体产物

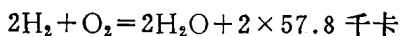
爆炸对周围介质的作功是通过高温高压的气体迅速膨胀实现的。因此在反应过程中，生成大量气体也是炸药爆炸的一个重要因素。一升普通炸药爆炸时，可以产生 1000 升左右的气体产物（标准状态），又由于反应的快速性和放热性，这样大量的气体在爆炸瞬间仍然占有炸药原来所占的容积，并被加热到高温。高温高压的气体便对外界产生猛烈的机械作用。

有一些物质，虽然在反应时放出大量的热量，反应速度也很快，但是不生成气体，没有作功的介质就不可能自身将热量转变为功。这些物质不具有爆炸性。如铝热剂的反应为：



此反应的热效应足以将反应产物加热到 3000°C，反应速度快。但是，反应产物在 3000°C 时仍然处于液态，没有气体生成，因而不爆炸。

在某些情况下，有足够的放热性和快速性，虽不生成气体，也会发生爆炸过程。例如，研细的大量铝热剂，在空气中燃烧时，由于铝热剂及周围空气受热膨胀也会发生爆炸。但这种爆炸是空气受热后产生的，并不是铝热剂本身发生的。又如气体物系在发生爆炸时，气体量有时不会增加，往往还可能减少。爆鸣气的爆炸就是这样。



其气体量减少了三分之一，但是，气体量的减少为过程的放热性和快速性所弥补。由于气体在高温下体积增加，在短暂时间内压力达到 10 大气压以上，从而具有一定的爆炸性。

由上所述，放热性、快速性和生成气体产物是决定炸药爆炸过程的重要因素。放热给爆炸变化提供了能源，而快速性则是使有限的能量集中在较小容积内产生大功率的必要条件，反应生成的气体则是能量转换的工作介质，它们都与炸药的作功能力有密切的关系。这三个因素又是互相联系的。反应的放热性将炸药加热到高温，从而使化学反应速度大大地增加，即增大了反应的快速性。此外，由于放热可以将产物加热到很高的温度，这就能使更多的产物处于气体状态。

炸药由它本身的化学结构和物理状态而决定其能够发生爆炸变化。但是，不同炸药放热量的多少、反应速度的大小以及生成气体的量在程度上是不同的。一般说来，炸药爆炸三要素是炸药发生爆炸变化的必要条件，这是炸药的共性。

§ 2 炸药爆炸变化的形式

炸药的爆炸变化有燃烧和爆轰两种典型的形式。

1. 燃烧

炸药的燃烧亦称爆燃。它和一般燃料燃烧不同的是，由于炸药本身含有氧化剂和可燃物，不需要空气中的氧气就能进行燃烧。炸药的燃烧是一种猛烈的物理化学变化。其特点是反应只在炸药柱的局部地区通常叫做反应区内进行。反应区内外的炸药温度、反应速度有明显地不同。反应区沿着炸药表面法线方向传播的速度叫做燃烧速度。通常燃烧速度在每秒几毫米到数百米之间，低于炸药中的音速。燃烧速度受外界条件，特别是受压力的影响很大。它随外界压力的升高而显著增加。燃烧过程在大气中进行得比较缓慢，并且没有显著的音响效应。而在密闭容器中，例如，在火炮的药室内，燃烧过程进行得快得多，有明显的音响效应并能作机械功。

2. 爆轰

爆轰是以爆轰波的形式沿着炸药高速地自行传播的现象。一般每秒数百米到数千米，超过炸药中的音速。爆轰传播速度受外界条件的影响很小。在爆炸点附近，发生压力的急躁升高。无论是否在密闭容器中，爆轰产物都急剧地冲击周围介质，从而导致爆炸点附近物体的碎裂和变形。

燃烧和爆轰的传播机理是不同的。燃烧是通过热的传导、扩散和辐射在炸药中传播的。而爆轰则是通过冲击波传播的，爆轰波就是伴有高速化学反应的冲击波。

爆轰过程有稳定爆轰和不稳定爆轰。传播速度稳定不变的称为稳定爆轰；传播速度变化的称为不稳定爆轰。一般情况下，所指的爆轰多系稳定爆轰，而把不稳定爆轰称为爆炸。

图 1-1 表示用雷管起爆炸药柱时，爆轰速度的变化情况。在前面一段，爆轰速度是变化的，并渐渐增大，这是不稳定爆轰阶段。爆轰经过一段不稳定加速段达到稳定的最大值，并且以此稳定速度传播下去，直至全部炸药柱反应完毕。

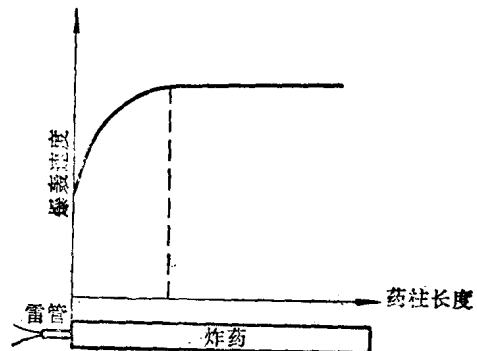


图1-1 用雷管起爆炸药柱时，爆轰速度的变化情况

炸药的这两种爆炸变化形式是互相转化的。燃烧在一定条件下，可以过渡到不稳定爆轰，进而发展为稳定爆轰。这两种爆炸变化形式将在以后有关章节中详细讨论。

§ 3 炸药的分类

1. 按用途分类

按照炸药的用途，可将炸药分为以下四类：

(1) 起爆药 起爆药是一种对外界作用十分敏感的炸药。它不但在比较小的外界作用（机械作用或热作用等）下，就能发生爆炸变化，而且变化速度可以在很短的时间内增至最大值。起爆药可用来引起其它炸药发生爆炸变化。因此，用其装填各种起爆器材和点火器材，如火帽、雷管等（用以点燃火药和起爆猛炸药）。例如，引信中的雷管就装有起爆药，用它的爆炸引起弹丸中炸药装药爆炸。

起爆药有时亦称为初级炸药、主发炸药或第一炸药。

常用的起爆药有：叠氮化铅 $[\text{Pb}(\text{N}_3)_2]$ 、雷汞 $[\text{Hg}(\text{ONC})_2]$ 、斯蒂酚酸铅 $[\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2\text{Pb}]$ 、特屈拉辛 $[\text{C}_2\text{H}_8\text{ON}_{10}]$ 和二硝基重氮酚 $[\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_2\text{ONO}_2]$ 等。

(2) 猛炸药 猛炸药爆炸时，对周围介质有强烈的机械作用，能粉碎附近的固体介质，故作为爆炸装药装填各种弹丸及爆破器材。猛炸药需要较大的外界作用或一定量的起爆药作用才能诱起爆炸变化，故有时亦称为次发炸药、高级炸药或第二炸药。

常用的猛炸药有梯恩梯 $[\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3]$ 、特屈儿 $[\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_4\text{NCH}_3]$ 、黑索金 $[\text{CH}_2\text{N}-\text{NO}_2]_3$ 、奥克托金 $[\text{CH}_2\text{N}-\text{NO}_2]_4$ 、泰安 $[\text{C}_5\text{H}_8(\text{ONO}_2)_4]$ 等。

(3) 火药 火药能在没有外界助燃剂（如氧气）参加下，进行有规律的快速燃烧，而燃烧产生的高温高压气体对弹丸作抛射功。因此，火药装在炮弹的药筒、迫击炮弹的尾部以及火箭发动机内作为发射药和推进剂。主要代表有：有烟火药或黑火药；无烟火药或溶塑火药，主要有硝化棉火药和硝化甘油火药。

(4) 烟火剂 烟火剂包括照明剂（如组分为 $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 66%、 Mg 24%、酚醛树脂10%）、信号剂（ KClO_3 60%、 SCrO_4 24%、酚醛树脂12%、石蜡3%）、曳光剂（ $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ 55%、 Mg 35%、树脂10%）、燃烧剂（如铝热剂等）及烟幕剂（ KClO_3 20%、 C 10%、 NH_4Cl 50%、 萘 20%），用以装填特种弹药，产生特定的烟火效应。

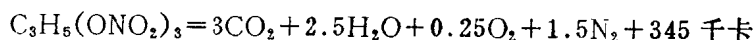
上述四种药剂中，猛炸药的基本爆炸变化形式是爆轰；起爆药是燃烧和爆轰；火药与烟火剂则是燃烧。不过它们都具有爆炸性质，在一定条件下，都能产生爆炸以至爆轰。在考虑安全问题时，应该注意这一点。

2. 按组分分类

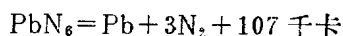
炸药按组分分类的方法很多。这里仅介绍一种比较简单的方法，即将炸药分为单体炸药和混合炸药两大类。

(1) 单体炸药 又称爆炸化合物。它本身是一种化合物，即一种均一的相对稳定的化学系统。单体炸药在外界一定的作用下，能导致分子内键的断裂，发生迅速的爆炸变化，生成热力学稳定的化合物。

这类炸药多数是含氧的有机化合物，能进行分子内燃烧。例如，硝化甘油的爆炸分解反应式是：



还有一部分是不含氧的吸热化合物，它们在外界的作用下，迅速分解为其组成的元素，并放出其生成热。例如叠氮化铅，其爆炸反应式是：

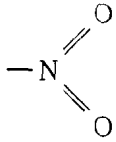


单体炸药的不稳定性与分子内具有特殊爆炸性质的基团有关。具有这种性质的基团有：

- $\text{C}\equiv\text{C}$ 基 存在于乙炔衍生物中。如乙炔银 $[\text{Ag}_2\text{C}_2]$ 、乙炔铜 $[\text{CuC}_2]$ 等；
- $=\text{N}-\text{X}$ 基 存在于氮的卤化物中。如氯化氮 $[\text{NCl}_3]$ 、二碘化氢氮 $[\text{NHI}_2]$ 等；
- $-\text{N}=\text{N}$ 基 存在于叠氮化合物和偶氮化合物中。如叠氮化铅 $[\text{Pb}(\text{N}_3)_2]$ 、叠氮化银 $[\text{AgN}_3]$ 等；
- $-\text{N}=\text{C}$ 基 存在于雷酸盐中。如雷汞 $[\text{Hg}(-\text{ON}=\text{C})_2]$ 、雷银 $[\text{Ag}-\text{O}-\text{N}=\text{C}]$ 。

等;

—N=O基 存在于亚硝酸酯及亚硝基化合物中;



存在于硝酸酯及硝基化合物中。如梯恩梯 $[\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{CH}_3]$ 、泰安 $[\text{C}(\text{CH}_2\text{ONO}_2)_4]$ 等;

—O—Cl基 存在于氯酸盐及过氯酸盐中。如氯酸钾 $[\text{KClO}_3]$ 、过氯酸钾 $[\text{KClO}_4]$ 等。

(2) 混合炸药 又称爆炸混合物。它本身是一种混合物,是由两种以上化学性质不同的组分组成的系统。有气态、液态或固态。这里主要讨论固态的爆炸混合物。

混合炸药的种类繁多,而且其组成可以根据不同的使用要求加以变化和调整。它们可以由炸药与炸药、炸药与非炸药、或都是非炸药组成。

目前,我国使用的混合炸药很多。常用的有以下几种:

普通混合炸药 如钝化黑索金、梯黑 40/60 (梯恩梯 40%、黑索金 60%);

含铝混合炸药 如钝黑铝炸药、梯黑铝炸药等;

有机高分子粘结炸药 如 3021、8321 炸药等;

特种混合炸药 如塑性炸药、弹性炸药、液体炸药等;

硝酸炸药 如阿马托 (铵梯炸药)、2*岩石炸药等。

燃料空气炸药是炸药中的一种。又称“浮质炸药”。其燃料是易挥发的碳氢化合物,如环氧乙烷、环氧丙烷、含有少量丁烷的丙炔-丙二烷-丙烷混合物,或爆炸性粉尘,如铝粉、煤粉等。这些燃料和空气中氧较均匀地混合后,引爆可以产生爆轰。虽然,对与燃料空气炸药有密切关系的爆炸性气体混合物爆轰的研究已有相当的历史,但燃料空气炸药用于军事则是近一二十年的事。燃料空气炸药与凝聚炸药比较,有其独特的优点,因而引起各国的重视,近年来发展很快。

§ 4 炸药的基本要求

上面列举的许多爆炸物系中,在民用和军用方面实际使用的并不多,这是因为它们不能满足使用上的基本要求。这些基本要求有下列几点:

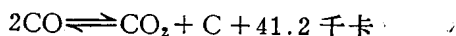
- (1) 有足够的能量和威力,足以保证一定的抛射作用或破坏效应;
- (2) 对外界作用要有一定的感度,一方面能保证使用安全,另一方面能容易诱起爆炸;
- (3) 能长期保持其物理化学安定性及爆炸性质;
- (4) 原料易于取得,制造简便、安全、经济。

第二章 爆炸变化方程式、爆炸产物的组分和体积

确定炸药爆炸时的产物组分和气态产物的量，即确定炸药的爆炸变化方程式，在理论上和实际工作中都具有很大的意义。一方面这是对炸药某些性能参数，如爆热、爆温、爆压以及爆轰速度等进行计算的主要依据。另一方面也是在地下矿井中和在有可燃气体和矿尘的矿山爆破时，确定对人体有毒害的一氧化碳和氮的氧化物以及可以引起二次火焰的成分的重要资料，这是关系到工人身体健康和生命安全以及保护国家财富的重要问题，必须引起重视。只有了解爆炸产物的具体组成，才能更好地通过炸药组分的调整、改进爆破作业的方法来提高炸药的爆炸性能，减少有毒气体的产量和防止二次火焰。

确定炸药爆炸变化方程式是比较困难和复杂的问题。这除炸药的化学组成外，许多外部因素都对其产生影响。通常我们用化学分析的方法得到的是冷却后爆炸产物的组分，但由于在冷却过程中，温度和压力发生变化，产物之间相互反应的化学平衡也移动了，因此得到的结果和爆炸结束瞬间不完全一致。

其次，同一种炸药爆炸变化的形式（如热分解、燃烧、爆轰等）不同，其产物也不同。一般有机炸药的缓慢热分解过程可生成大量氮的氧化物和许多液体或固体的有机化合物残渣。而在炸药快速燃烧时，在较高的压力下，物质分解的程度较高，分解产物主要是 CO_2 、 CO 、 C 、 H_2O 、 H_2 、 N_2 、 O_2 、 H 、 O 、 N 、 NO 等。爆轰产物组分与燃烧时的组分又显著不同。按照吕-查德里（Le-Chatetier）的原则，压力增大使反应产物之间的平衡向着系统体积减小的方向移动，如当爆轰时，下列反应向生成游离碳的方向移动：



随着装药密度的增加，爆轰压力增加，上述过程将会更为加强地发展，因而爆轰产物中 CO_2 和 C 的含量增多，相应地 CO 量减少。至于某些离解产物如 H 、 OH 、 N 、 O 等在激烈的爆轰反应区域内，是很少有可能生成的，而在冷却以后的爆轰产物组分中，数量也很少，它们只可能在爆轰产物膨胀过程的一定阶段内存在，这已由实验数据所证明。

此外，冷却时间、装药外壳的材料、爆破介质的性质、膨胀时作功的大小以及混合炸药的均匀程度等都对产物的组分有一定的影响。因此，要精确地确定爆炸产物的组分还有一定的困难。

但是，爆炸变化反应的方向是服从于化学热力学定律的。一般应导致形成热力学最稳定的化合物，并伴随放出最大的热量。根据理论分析和实验所得数据，可以写出接近真实情况的爆炸变化方程式。

§1 炸药的氧平衡与氧系数

1. 炸药的氧平衡

目前，大量使用的炸药，其元素组成主要为 C 、 H 、 O 、 N 四种元素，有的还含有 Cl 、 F 、 S 以及某些金属元素如 Al 等。由 C 、 H 、 O 、 N 四种元素所组成的炸药可写为

$C_aH_bO_cN_d$ 的形式。其中 C、H 是可燃剂，O 是氧化剂。在爆炸过程中，炸药分子破裂，进行氧化还原反应，这几种元素重新组合形成新的稳定产物，并放出大量的热。这些产物主要有 CO_2 、 H_2O 、 CO 、 N_2 以及 O_2 、 H_2 、C、 NO 、 NO_2 、 CH_4 、 C_2N_2 、 NH_3 、 HCN 等。爆炸产物的种类和数量除受爆炸时压力与温度的影响外，还和炸药中的可燃剂和氧化剂的量有关。一般用氧平衡和氧系数来表示炸药中氧及可燃元素的相对含量。

氧平衡是将炸药中的氧用来完全氧化炸药本身所含的碳和氢为 CO_2 和 H_2O 以后多余或不足的氧量。若炸药中含有其它可燃元素，如铝等，同样也应以铝完全氧化为 Al_2O_3 来进行计算。

对 $C_aH_bC_cN_d$ 类的炸药，氧平衡的公式为：

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

式中 16——氧的原子量；

M ——炸药的分子量。

由式 (2-1) 可以看出，随着炸药中氧含量的改变，可以出现三种氧平衡的情况：

当 $c - \left(2a + \frac{b}{2} \right) > 0$ 时，炸药中的氧完全氧化可燃元素后还有富裕。这种情况称为正氧平衡。这类炸药就称为正氧平衡的炸药。

当 $c - \left(2a + \frac{b}{2} \right) = 0$ 时，炸药中的氧正好能完全氧化可燃元素。此种情况称零氧平衡。这类炸药就称为零氧平衡的炸药。

当 $c - \left(2a + \frac{b}{2} \right) < 0$ 时，炸药中的氧不足以完全氧化可燃元素。此种情况称负氧平衡。这类炸药就称为负氧平衡的炸药。

如：硝化甘油 [$C_3H_5(ONO_2)_3$ 或 $C_3H_5O_9N_3$] 的氧平衡为：

$$\text{氧平衡} = \frac{9 - \left(2 \times 3 + \frac{5}{2} \right) \times 16}{227} = +3.5\% \text{ 或 } +0.035 \text{ 克/克炸药}$$

泰安 [$C(CH_2ONO_2)_4$ 或 $C_5H_8O_{12}N_4$] 的氧平衡为：

$$\text{氧平衡} = \frac{12 - \left(2 \times 5 + \frac{8}{2} \right) \times 16}{316} = -10.1\% \text{ 或 } -0.101 \text{ 克/克炸药}$$

式中 227 和 316——分别为硝化甘油和泰安的分子量。

对于混合炸药可将各组分的氧平衡数值乘以该组分的重量百分数，求各乘积的代数和即为其氧平衡。

如 2* 岩石炸药，其成分为 NH_4NO_3 85%、梯恩梯 11%、木粉 4%，而这三种组分的氧平衡分别为 +0.2 克/克、-0.74 克/克和 -1.38 克/克，则 2* 岩石炸药的氧平衡为：

$$\text{氧平衡} = \frac{+0.2 \times 85 + (-0.74) \times 11 + (-1.38) \times 4}{100} = 0.0334 \text{ 克/克}$$

表 2-1 列出某些炸药和有关物质的氧平衡数值。

表2-1 某些炸药和有关物质的氧平衡值

名 称	分 子 式	氧 平 衡 (克/克炸药)
梯恩梯(TNT)	$C_6H_2(NO_2)_3CH_3$	- 0.74
黑索金(RDX)	$(CH_2N-NO_2)_3$	- 0.216
奥克托金(HMX)	$(CH_2N-NO_2)_4$	- 0.216
特屈儿(Te)	$C_8H_2(NO_2)_4NCH_3$	- 0.474
硝化甘油(NG)	$C_3H_5(ONO_2)_3$	+ 0.035
硝化乙二醇	$C_2H_4(ONO_2)_2$	0.000
泰安(PETN)	$C_5H_8(ONO_2)_4$	- 0.101
二硝基甲苯(DNT)	$C_6H_3(NO_2)_2CH_3$	- 1.144
四硝基甲烷(TNM)	$C(NO_2)_4$	+ 0.490
硝基胍(NQ)	$CN_4H_4O_2$	- 0.308
硝化纤维素(11.96N%)	$C_{24}H_{31}N_8O_{38}$	- 0.387
硝化纤维素(13.47N%)	$C_{24}H_{26}N_{11}O_{42}$	- 0.286
雷汞	$Hg(CNO)_2$	- 0.113
硝酸铅	$Pb(NO_3)_2$	+ 0.242
硝酸钾	KNO_3	+ 0.396
硝酸钠	$NaNO_3$	+ 0.470
硝酸铵	NH_4NO_3	+ 0.200
铝粉	Al	- 0.890
木粉	$C_{39}H_{70}O_{28}$	- 1.380
石蜡	$C_{18}H_{38}$	- 3.460
沥青	$C_{30}H_{16}O$	- 2.760
轻柴油	$C_{16}H_{32}$	- 3.420
木炭		- 2.667
纸		- 1.300
煤	含80% C	- 2.559
2°岩石炸药	NH_4NO_3 :TNT:木粉 85 : 11 : 4	+ 0.0334
2°煤矿炸药	NH_4NO_3 :TNT:木粉:食盐 71 : 10 : 4 : 15	+ 0.0132
铵油炸药	NH_4NO_3 :柴油:木粉 92 : 4 : 4	- 0.0016

2. 炸药的氧系数

氧系数，即炸药分子被氧所饱和的程度。对于 $C_aH_bO_cN_d$ 类的炸药，氧系数的公式为：

$$A = \frac{c}{\left(2a + \frac{b}{2}\right)} \times 100\% \quad (2-2)$$

或

$$A = \frac{2c}{(4a + b)} \times 100\% \quad (2-3)$$

这就是说氧系数是炸药中所含的氧量与完全氧化炸药中所含的碳与氢所需氧量的百分比数。它和氧平衡的概念一样，都是用来衡量炸药中氧含量与可燃元素含量的相对关系。同样，它与炸药的爆轰产物有关。

氧系数的计算举例如下：

(1) 硝化甘油 ($C_3H_5O_9N_3$) 的氧系数为：