

ZHAYAOXUE GAILUN

炸药学概论

舒远杰 霍冀川 编著

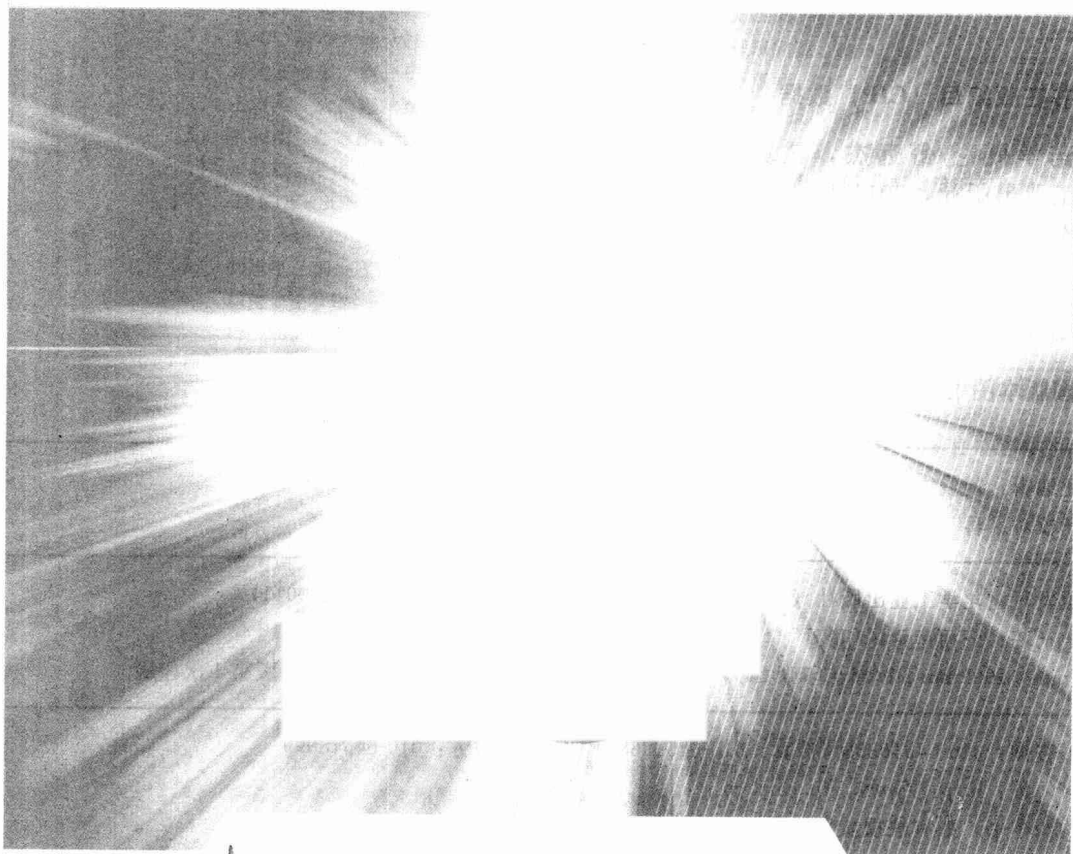


化学工业出版社

ZHAYAOXUE GAILUN

炸药学概论

舒远杰 霍冀川 编著



化学工业出版社

·北京·

全书共分为8章,前4章系统介绍了含能材料的基本知识,后4章反映了与含能材料发展相关的热点和前沿知识。第1章概述了炸药学的基本概念;第2章介绍了含能材料爆轰和安全相关的参数和性能;第3章阐述了一些主要单质高能炸药的性能和制备方法;第4章则介绍了混合炸药的性能和应用;第5章介绍了新型高能量密度材料,展望了含能材料的发展趋势;第6章介绍了硝胺类炸药热分解研究新进展,是炸药贮存和老化研究的重要内容;第7章讨论了含能材料的分子设计及性能的理论研究,提出用理论指导实验合成新型含能材料的思路;第8章介绍了含能黏结剂。内容紧密结合实际,反映了含能材料发展的新趋势,介绍了新的研究成果和技术方法。

本书可作为高等院校相关专业教材,适合大学生、研究生和教师阅读,也可供从事火炸药合成、配方设计、热性能研究及相关领域的研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

炸药学概论/舒远杰,霍冀川编著. —北京:
化学工业出版社, 2011. 8
ISBN 978-7-122-11349-8

I. 炸… II. ①舒…②霍… III. 炸药-概论
IV. TQ560.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第094827号

责任编辑:刘俊之
责任校对:蒋宇

文字编辑:徐雪华
装帧设计:张辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:三河市延风印装厂
787mm×1092mm 1/16 印张21¼ 字数567千字 2011年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究



前 言

上世纪八九十年代出版的炸药系列教材《炸药理论》、《炸药分析》、《炸药毒性与防护》、《炸药合成化学》、《炸药原材料化学与工艺学》、《炸药与装药安全技术》以及《炸药生产工艺设计》等，为我国培养国防科技人才、促进兵工科学技术的发展做出了巨大贡献。然而，近年来含能材料的理论和技术快速发展，出现了很多新的科研成果与技术，迫切需要将这些新成果编入教材中，以满足国防科技人才培养的需求。

21世纪初，一些新的教材相继出版。2004年，南京理工大学陆明教授编写了《炸药的分子与配方设计》，将绿色化学和原子经济引入单质炸药、耐热炸药的分子设计以及军用混合炸药、工业炸药的配方设计中，并采用建立数学模型的方法设计和评价工业炸药配方。2005年，北京理工大学周霖教授编写了《爆炸化学基础》，介绍了炸药的热力学、反应动力学、安定性和感度的理论判据等基础知识。2006年，欧育湘教授主编了《炸药学》，论述了炸药的基本理论、主要性能以及合成单质炸药的重要有机反应，较为详细地阐述了常用单质炸药的性质、生产工艺，是一本内容丰富的教材。

本书力求知识涵盖面广，具有一定的深度，与实际结合紧密。通过本书的学习，既可以系统地获得含能材料的基本理论知识，又能较全面地了解现有炸药的制备方法、配方设计，并能了解含能材料的发展趋势。因此本书重视介绍炸药的基础知识，也兼顾介绍含能材料领域内的新材料、新理论、新技术和新趋势。在系统介绍含能材料结构、性能、测试方法以及炸药的合成和配方设计、制造工艺等基础理论知识的同时，有选择性地补充了含能材料发展新趋势，比较全面地介绍了炸药各种性能研究和含能材料分子设计与理论研究，介绍了含能材料热分解研究的最新进展。

本书可作为高校相关专业本科和研究生教学用书，还可供与含能材料相关专业的科技人员阅读参考。

感谢中国工程物理研究院研究生部刘彤副主任对本书提出宝贵建议。殷明、杜军良、张浩斌、孙毅、刘勇、陈星运和边亮同志参与了本书部分章节的编写，徐金江、王东冬参与了部分资料整理，在此表示感谢！

因水平有限，书中疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

编著者
2011年5月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 炸药的发展历史	1
1.2 炸药的概念和分类	2
1.2.1 按化学组分分类	3
1.2.2 按用途分类	6
1.3 炸药的特征	7
1.3.1 高体积能量密度	7
1.3.2 强自行活化	7
1.3.3 亚稳态	8
1.3.4 自供氧	8
1.4 炸药的化学变化形式	8
1.4.1 炸药的热分解	9
1.4.2 炸药的燃烧	14
1.4.3 炸药的爆炸	18
1.4.4 炸药的爆轰	21
1.5 氧平衡及爆炸反应方程式的确定	25
1.5.1 氧平衡	25
1.5.2 爆炸反应方程式	26
1.6 炸药的应用	32
1.6.1 利用炸药的化学能做功	32
1.6.2 作为气源应用于气体发生器	33
1.6.3 利用炸药热能和声、光、烟效应	33
1.7 炸药学的研究任务	34
参考文献	34

第 2 章 炸药的能量与安全性能	35
2.1 炸药的密度	35
2.1.1 炸药晶体密度的计算	35
2.1.2 密度的测定	39
2.1.3 装药密度与爆轰性能的关系	40
2.2 炸药的生成焓	41
2.2.1 键或基团加和法	41
2.2.2 分子轨道法	47

2.2.3	原子化方案	47
2.3	炸药的爆热	48
2.3.1	炸药爆热的计算	48
2.3.2	影响爆热的因素	51
2.3.3	提高炸药爆热的途径	53
2.3.4	爆热的实验测定	54
2.4	炸药的爆温	55
2.4.1	爆温的理论计算	55
2.4.2	改变爆温的途径	56
2.5	炸药的爆速	57
2.5.1	炸药爆速的计算	57
2.5.2	炸药爆速的实验测定	66
2.5.3	影响爆速的因素	68
2.6	炸药的爆压	72
2.6.1	C-J 爆压经验公式	72
2.6.2	Kamlet 经验公式法	73
2.6.3	氮当量及修正氮当量法	73
2.6.4	佩佩金 (Пепекин) 经验公式法	73
2.7	炸药的爆容	74
2.8	炸药的做功能力和猛度	74
2.8.1	炸药的做功能力	75
2.8.2	炸药的猛度	78
2.9	炸药的安定性	79
2.9.1	热安定性的理论	79
2.9.2	影响炸药热安定性的因素	80
2.9.3	炸药安定性的评价	83
2.9.4	测定热安定性的方法	83
2.10	炸药的相容性	84
2.10.1	相容性的基本概念	85
2.10.2	相容性的实验测试方法	85
2.11	炸药的感度	86
2.11.1	感度的选择性	87
2.11.2	感度的相对性	87
2.11.3	影响炸药感度的因素	87
2.11.4	感度的理论计算	91
2.11.5	量子化学参量作为炸药感度的判据	96
2.11.6	感度的实验测试方法	100
2.12	炸药的安全使用	110
2.12.1	炸药的毒性	110
2.12.2	炸药安全使用的注意事项	113
2.12.3	过期和报废炸药的处理	113
2.12.4	炸药废水的处理	114

参考文献	115
------------	-----

第3章 单质炸药的制备	118
--------------------	------------

3.1 炸药合成中的常见反应	118
3.1.1 硝化反应	118
3.1.2 加成反应	121
3.1.3 缩合反应	122
3.1.4 VNS胺化法	130
3.2 硝化及其注意事项	130
3.2.1 硝化剂	130
3.2.2 硝化器	132
3.2.3 硝化过程的副反应	133
3.2.4 影响硝化反应的主要因素	134
3.3 主要的单质猛炸药	134
3.3.1 硝基化合物炸药	134
3.3.2 硝胺炸药	150
3.3.3 硝酸酯类炸药	168
3.4 起爆药	175
3.4.1 起爆药的特性	175
3.4.2 起爆药的基本要求	178
3.4.3 起爆药的分类	178
参考文献	186

第4章 混合炸药	187
-----------------	------------

4.1 军用混合炸药	187
4.1.1 军用混合炸药的分类	187
4.1.2 对军用混合炸药的性能要求	191
4.1.3 军用混合炸药爆轰反应特点	192
4.1.4 混合炸药重要性能参数的计算	192
4.1.5 军用混合炸药发展趋势	197
4.2 民用混合炸药	197
4.2.1 民用混合炸药的分类	197
4.2.2 民用混合炸药的发展趋势	203
参考文献	203

第5章 新型高能量密度材料	204
----------------------	------------

5.1 无环类化合物	204
5.1.1 FOX-7	204
5.1.2 ADN	206
5.2 张力环和笼状化合物	207
5.2.1 TNAZ	207
5.2.2 CL-20	211

5.2.3	ONC	215
5.3	噁类含能材料	216
5.3.1	LLM-105	216
5.3.2	DHT	219
5.3.3	BTATz	221
5.4	唑类含能材料	223
5.4.1	咪唑类含能化合物的实验和理论研究	223
5.4.2	吡唑类含能化合物的实验和理论研究	225
5.4.3	三唑类含能化合物的实验和理论研究	225
5.4.4	四唑类含能化合物的实验和理论研究	228
5.5	呋咱和氧化呋咱	230
5.5.1	单环(氧化)呋咱类	231
5.5.2	苯并(氧化)呋咱类	231
5.5.3	多环苯并(氧化)呋咱类	232
5.6	其它高能量密度材料	233
5.6.1	全氮化合物	233
5.6.2	含高能元素的炸药	235
5.6.3	金属氢	236
5.6.4	反物质	236
5.6.5	可用作超高能量密度材料的核同质异能素	237
	参考文献	238

第6章 高能硝胺炸药的热分解

212

6.1	DMN的热分解	242
6.1.1	硝胺类炸药热分解研究的模型化合物	242
6.1.2	DMN在气相中的热分解研究	242
6.1.3	DMN在溶液中热分解研究	248
6.2	RDX的热分解	251
6.2.1	RDX气相及熔融态的热分解	251
6.2.2	RDX在溶液中分解	254
6.2.3	RDX在惰性溶剂中热分解机理	257
6.2.4	笼型效应	258
6.2.5	RDX在活性溶剂中分解机理	258
6.3	HMX的热分解	260
6.3.1	HMX气相及熔融态的热分解	261
6.3.2	HMX热分解理论研究	263
6.3.3	HMX在溶液中的热分解	265
6.3.4	HMX在固相中的热分解	268
6.4	CL-20的热分解	271
6.4.1	CL-20在凝聚态的热分解	271
6.4.2	溶液中的热分解	275
6.5	TNAZ的热分解	278

6.5.1	TNAZ 热分解的实验研究	278
6.5.2	TNAZ 热分解的理论研究	281
	参考文献	284

第 7 章 含能材料的分子设计 288

7.1	含能材料分子设计的整体思路	288
7.2	含能材料分子设计的两类重要方法	289
7.3	分子和电子结构的研究方法	290
7.3.1	密度泛函理论	290
7.3.2	自然键轨道理论	293
7.4	重要能量参数的计算方法及原理	295
7.4.1	生成焓的计算	295
7.4.2	晶体密度的求解方法	301
7.5	重要性能——热分解机理的研究方法	305
7.5.1	从头算分子动力学模拟	305
7.5.2	量子化学方法——G3MP2B3 方法	308
7.5.3	化学反应动力学	310
	参考文献	315

第 8 章 含能黏结剂 318

8.1	黏结剂概述	318
8.2	叠氮聚醚类含能黏结剂	320
8.2.1	含能黏结剂 GAP	320
8.2.2	含能黏结剂 PAMMO	321
8.2.3	含能黏结剂 PBAMO	323
8.3	硝酸酯聚醚类含能黏结剂	324
8.3.1	含能黏结剂 PNIMMO	324
8.3.2	含能黏结剂 PGN	325
8.4	聚磷氮烯类含能黏结剂	327
8.5	其它含能黏结剂	328
8.5.1	偕二硝基含能黏结剂	328
8.5.2	特殊弹性体	329

参考文献 329

第 1 章 概 述

1.1 炸药的发展历史

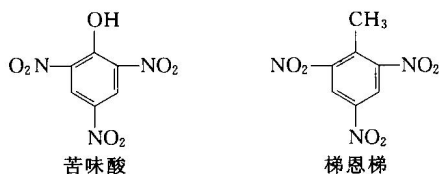
黑火药为中国古代四大发明之一，是现代炸药的始祖，它是由硝石（硝酸钾）、硫磺和木炭组成的一种混合物。约在 10 世纪初，黑火药开始步入军事应用，使武器由冷兵器逐渐转变为热兵器，这是兵器史上一个重要的里程碑，为现代武器的发展奠定了初步基础，具有划时代的意义。

13 世纪，黑火药传入欧洲。15 世纪末，西方出现了大型火炮，战争中普遍使用黑火药作为发射药。16 世纪，墨西哥建立第一个美洲黑火药工厂，开始大量生产黑火药，从那时起，黑火药配方基本固定在 KNO_3 75%、C 12.5%~15%、S 10%~12% 范围内。

19 世纪中叶之前，黑火药是唯一的猛炸药和发射药，但其威力小、引发慢，无论在开矿、修路还是军事领域，都显得力不从心，时代的发展迫使人们去发明新的炸药。

公元 1848 年，意大利人索勃赖洛（Soblero）发明了硝化甘油，后来瑞典发明家诺贝尔于 1864 年发明了雷管，之后不久，他又找到了用硅藻土吸收硝化甘油的办法，制成了运输和使用更为安全的硝化甘油炸药，命名为代拿买特（dynamite），其中含硝化甘油 75%、硅藻土 25%。代拿买特的发明对现代炸药发展有重要的贡献。1875 年诺贝尔进一步改进了硝化甘油炸药，把硝化纤维素溶解于硝化甘油，生产出了“爆胶”，它是现代胶质炸药的基础。

在代拿买特炸药出现的同时，瑞典化学家提出了用化肥硝酸铵作为硝酸粉状炸药的主要成分，并获得了矿用炸药的专利，此后还出现了两种新型炸药：苦味酸（picric acid；2,4,6-三硝基苯酚）和梯恩梯（TNT；2,4,6-三硝基甲苯）。



1887 年，诺贝尔用等量的硝化棉和硝化甘油，加入 10% 的樟脑，制成了巴力斯特火药（ballistite）。1889 年，英国火药专家艾贝尔将巴力斯特稍加改进，制成了一种新型炸药，因其被挤成绳（cord）状，因此被命名为柯达火药（cordite），或称“线状无烟火药”。

进入 20 世纪以来，炸药发展大致经历了四个阶段：以 TNT 为代表的传统炸药的广泛应用（1900s—）；以 RDX（黑索今）、HMX（奥克托今）为代表的高能炸药的出现和应用（1930s—）；以 TATB（1,3,5-三氨基-2,4,6-三硝基苯）为代表的钝感炸药的应用（1960s—）；实验与理论计算相结合寻找新型钝（低）感高能炸药的新阶段（1980s—）^[1]。

不同阶段对炸药有不同的要求，对四个阶段炸药能量和安全性能的对比充分体现了这种要求的变化（见图 1-1）：从 TNT 到 RDX、HMX 体现了对能量的追求；TATB 的应用突出了安全性能的重要性；而随着科学技术的发展，今后较长时期内含能材料的发展方向则是追

求能量和安全的平衡，在保证能量要求的情况下安全性能应得到较好保证。

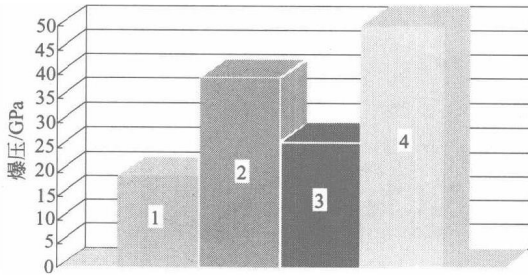


图 1-1 20 世纪以来含能材料发展的四个阶段中典型含能材料能量（爆压）对比
1—TNT；2—HMX；3—TATB；4—目标物

TNT 是在 1863 年由 Willbrand 首先合成出来的，从 20 世纪初开始使用至今，价格低廉，热安定性好，感度低，容易成型，应用非常广泛。

作为医药被合成出来的 RDX，1922 年被 Von Herz 发现是有价值的炸药，并于 20 世纪 30 年代开始使用。RDX 的性能良好，价格低廉，广泛应用于混合熔铸的熔黑梯炸药、压装炸药、含铝炸药，以及雷管和导爆索中。由于良好的性能，英国将其用 Royal Department of Explosives 的三个单词的缩写来命名。

HMX 是当前综合性能最好的高能炸药，具有高密度、高能量和热安定性好等特点，用于石油射孔弹、导弹战斗部和战略武器中，它是在第二次世界大战中（1941 年）出现的。在其出现后的几十年里，包括中国在内的世界各国致力于合成能量比它更高的炸药，得到许多新的化合物，但到目前为止实用性不强，RDX、HMX 仍是目前广泛应用的高能炸药。

在追求能量的同时，武器在使用中的安全问题非常突出。19 世纪 60 年代，美国使用钝感炸药来提高武器的安全性能，将 TATB 炸药用于核武器炸药部件。目前美国唯一承认的钝感炸药就是 TATB，其机械感度和热感度非常低，耐热性能好，被称为“木头”炸药。钝感炸药的使用带来显著的好处，对制造、加工、使用、运输、贮存以及作战等具有非常重要的意义。表 1-1 列出了美国持久核力量弹头中使用钝感炸药前后安全等级的比较。

表 1-1 美国持久核力量弹头安全等级

型 号	运载工具	交付时间	HE/IHE ^①	安全等级
W61	轰炸机	1969 年	IHE	B
W62	民兵 III	1970 年	HE	D
W76	三叉戟 I	1978 年	HE	C
W78	民兵 III	1979 年	HE	C
W80	BMG-109A, AGM-86B	1983 年	IHE	B
W83	轰炸机	1983 年	IHE	A
W84	BMG-109A	1983 年	IHE	B
W87	MX 和平卫士 ICBM	1986 年	IHE	A
W88	三叉戟 II	1988 年	HE	C

① HE，敏感炸药；IHE，钝感炸药。

钝感炸药使用后，安全性能得到明显改善，但其能量总体偏低。为解决上述问题，1980 年以来，寻找高能低感炸药是炸药研究的主要方向。这一阶段的主要特点是对含能材料理论的认识更加深入，计算机技术飞速发展，化学家、物理学家（包括理论学家和实验研究者）合作更为紧密，使得人们在一定程度上可以实现将烧瓶中进行的化学合成在计算机上进行实验的梦想了。

1.2 炸药的概念和分类

炸药是一种相对不稳定的物质，在外界能量作用下，能够自行发生急剧的化学变化，在

极短的时间内突然释放出大量能量，产生的爆炸产物快速向周围膨胀，产生强冲击波，造成对周围介质的破坏。

广义上，炸药指能发生化学爆炸的物质，包括化合物和混合物。火药、烟火剂、起爆药都属于炸药的范畴。但是技术上只将用于爆破目的的物质叫作炸药，又叫猛炸药。这是炸药的狭义概念。

炸药因其组成、物理性能、化学性能和爆炸性能的不同可分为很多种。通常有两种分类方法，一是按炸药的化学组分分类；一是按炸药的用途分类。

1.2.1 按化学组分分类

按其化学组分可将炸药分为单质炸药和混合炸药两大类，前者为单一化合物（它与化学中从元素组成把物质分为“单质”与“化合物”有所不同，有的学者也将“单质炸药”称为“单体炸药”），后者则由多种组分构成，但无论是单质炸药还是混合炸药，大多由氧化剂（氧元素）和可燃剂（可燃元素）组成。

1.2.1.1 单质炸药

单质炸药是只含有一种化合物的炸药，在它们的分子内含有爆炸性基团，其中最重要的是硝基（ $-\text{NO}_2$ ）。根据硝基基团的连接方式可分为由 $\text{C}-\text{NO}_2$ 、 $\text{N}-\text{NO}_2$ 和 $\text{O}-\text{NO}_2$ ，分别形成硝基化合物、硝胺和硝酸酯三类最重要的单质炸药。

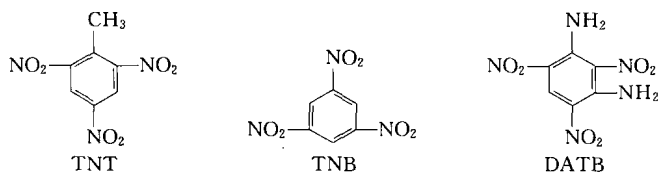
(1) 硝基化合物炸药 目前用作炸药的硝基化合物主要是芳香族多硝基化合物。最常用的是以梯恩梯（TNT）为代表的单碳环多硝基化合物。此类炸药的感度和能量大多数低于硝胺和硝酸酯类炸药，但其制造工艺成熟，原料廉价易得，因而被广泛应用。可用作炸药的脂肪族多硝基化合物主要有硝仿系化合物，虽然其机械感度较高，但它们氧平衡较好，爆速和爆压较高，有的已获得实际应用。

常用的硝基化合物炸药如下。

① 梯恩梯（2,4,6-三硝基甲苯；TNT；分子式： $\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$ ）

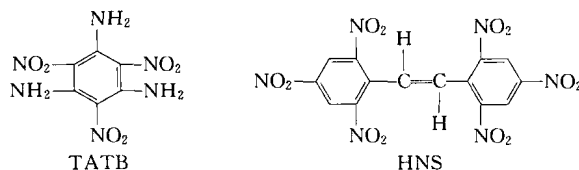
② 1,3,5-三硝基苯（TNB；分子式： $\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_6$ ）

③ 1,3-二氨基-2,4,6-三硝基苯（DATB；分子式： $\text{C}_6\text{H}_5\text{N}_5\text{O}_6$ ）



④ 1,3,5-三氨基-2,4,6-三硝基苯（TATB；分子式： $\text{C}_6\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$ ）


⑤ 六硝基芪（2,2',4,4',6,6'-六硝基均二苯基乙烯；HNS；分子式： $\text{C}_{14}\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_{12}$ ）



(2) 硝胺炸药 硝胺炸药是分子中含有 $\text{N}-\text{NO}_2$ 或 $\text{N}-\text{NO}$ 的炸药，是第二次世界大战后迅速发展起来的一类炸药。可分为芳香族硝胺、链状硝胺和氮杂环硝胺三种；又可分为伯硝胺、仲硝胺和叔硝胺三种。硝胺类炸药的机械感度和化学安定性介于硝基化合物炸药和硝酸酯类炸药之间，能量较高。其中黑索今已得到广泛应用；奥克托今是目前已使用的炸药中能量最高、综合性能最好的炸药。它们除用作炸药外，还可用于发射药和固体推进剂的组

在爆炸产物中，氧这个电负性较大的元素（常称为氧化元素）与碳、氢这些电负性较小的元素（常称为可燃元素）是直接相连的。这样两个电负性相差较大的原子之间的化学键具有较大的键能。有关键能值见表 1-2。

表 1-2 炸药分子及爆炸产物中主要化学键键能

化学键	C—H	C—C	C=C		O—H	CO	N≡N
键能/kJ·mol ⁻¹	405.4	262.9	423.7	1004.8	480.5	880.9	712.6



在梯恩梯分子中，氧化元素氧与可燃元素碳、氢之间不是直接相连，而是通过一个氮（以一NO₂的形式）相连接的，而氮的电负性介于氧和碳、氢之间，它与碳、氢、氧之间组成的化学键键能相对较小，因而梯恩梯分子中化学键键能的总和较小。这样，爆炸产物中各化学键键能之和就远大于梯恩梯分子中化学键键能之和，而使上述爆炸反应能够放出大量热量。在梯恩梯分子中氮似乎起着隔离氧化元素与可燃元素的作用，故通常称为隔离元素。

所有的单质炸药都具有上述情况。因而可以说单质炸药的分子是由氧化元素与可燃元素通过隔离元素连接起来处于相对平衡状态的统一体，在外界能量作用下，分子迅速解体，氧化元素与可燃元素直接化合而生成气态产物并放出大量的热。

由此可见，一个碳、氢、氧、氮系的硝基衍生物，其分子中含有适当数量的硝基都具有爆炸性能；如果它又能最低限度地满足对猛炸药提出的基本要求，那么它就可作为单质炸药的一个品种在实际中得到应用。

对于隔离元素氮，除具有适宜的电负性而起到隔离作用外，还有不少优点。如分解后得到爆容较大的氮气，同时放出大量的能量（N≡N叁键的键能为 916kJ·mol⁻¹，比 N—N 单键的键能 169kJ·mol⁻¹ 的三倍还要大很多），确实是比较理想的隔离元素。

所以炸药的结构特征为：它们通常是由氧化元素、可燃元素和隔离元素组成，其中隔离元素氮和氧化元素氧以硝基的形式出现。

虽然单质炸药基本是 C、H、O、N 系的硝基化合物，但是 C、H、O、N 四种元素的比例不同，硝基的连接方式不同 [如—C(NO₂)₃、、以及—O—NO₂等]，或带有不同的基团（—NH₂、—OH 等），其化合物的结构也就不同，从而化合物的性能参数也就有很大差别。通过研究单质炸药的分子结构特征、分子结构与爆炸性能参数的关系，设计新的炸药分子，可为合成具有更好爆炸性能的新型炸药提供依据。

1.2.1.2 混合炸药

混合炸药的种类繁多，其含有两种或两种以上的成分，通常由单质炸药和添加剂，或由氧化剂、可燃剂和添加剂混合而成。常用的氧化剂有硝酸盐、氯酸盐、高氯酸盐等，可燃剂有木粉、金属粉、炭、碳氢化合物等，添加剂有黏结剂、增塑剂、敏化剂、钝感剂、乳化剂、防潮剂、交联剂、表面活性剂等。研制开发混合炸药可弥补单质炸药在性能、成型工艺、原材料来源和成本方面的不足，具有较大的选择性和适应性，扩大了炸药的应用范围。混合炸药可分为军用混合炸药和民用混合炸药两大类。

(1) 军用混合炸药 军用混合炸药用于装填各种武器弹药，能量水平高，安全性和相容性好，感度适中，生产、运输、贮存过程较为安全，且装药性能良好。此外，低易损性也是 20 世纪 70 年代以来对军用炸药提出的普遍要求。军用混合炸药分为铵梯炸药、熔铸炸药、高聚物黏结炸药、含金属粉炸药、燃料-空气炸药、低易损性炸药、分子间炸药等几大类。

(2) 民用混合炸药 民用混合炸药也称工业炸药，是以氧化剂和可燃剂为主体构成的混

合爆炸物，可用于矿山开采、地质勘探、油田钻探、爆炸加工等众多领域，其成本低廉、制造简单、使用方便。

更详细的内容见本书第4章。

1.2.2 按用途分类

按其用途可将炸药分为起爆药、猛炸药、烟火剂、火药四类。

(1) 起爆药 起爆药是最敏感的炸药，在较微弱的外界作用下，即可发生快速、强烈的化学反应。这类炸药感度高，对初始冲能敏感，燃烧转爆轰容易、迅速，爆轰输出的能量可以起爆猛炸药。起爆药按照组成可分为单质起爆药、混合起爆药和复盐起爆药三类；按外界作用的方式可分为击发药、针刺药、摩擦药和导电药等。

① 单质起爆药 单质起爆药是成分单一的起爆药，分子内含有敏感的爆炸性基团，如重氮、叠氮和多氮化物（如叠氮化铅、硝基重氮苯、硝基四唑等）、硝基酚重金属盐（如三硝基间苯二酚铅）、雷酸、氰胺基金属盐（如雷汞、硝基氰胺盐）、乙炔的金属衍生物（如乙炔银）等都属于单质起爆药。

② 混合起爆药 混合起爆药是由两种及两种以上的单质起爆药，或起爆药与氧化剂、可燃剂、添加剂等组成的混合物。混合起爆药有利于提高起爆药的安全性，满足某些单质起爆药不能达到的使用要求。混合起爆药在使用中需着重考虑组分之间的相容性、混合的均匀性、药剂的成形性和安全性等性质。

③ 复盐起爆药 复盐起爆药是由单质起爆药通过共沉淀或络合的方法制成的一种起爆药。其使用安全、高能量和低感度等特征可满足不同要求。

(2) 猛炸药 猛炸药爆炸时对周围介质做猛烈的破坏，在军事上被用作战斗部装药和爆破装药。这类炸药使用时需借助于起爆药的作用才能发生爆轰，可以是单质化合物，也可以是混合物。

常用的单质猛炸药有梯恩梯、特屈儿、黑索今、奥克托今等。混合猛炸药的有梯恩梯-黑索今混合炸药和以黑索今、奥克托今为主体、聚合物为黏结剂的高聚物黏结炸药（PBX）。

(3) 烟火剂 烟火药是燃烧能产生光、热、烟、声或气体等不同烟火效应的混合物。通常由氧化剂、可燃剂及少量黏结剂组成。军事上用来装填特种弹药和器材；民间用于制造烟火、爆竹以及其它工业制品。按能量分为动能、光能、热能、声能等类型的烟火剂；其中动能的有气体发生剂、弹底排气剂、烟火推进剂；光能的有照明剂、摄影闪光剂、曳光剂、发光信号剂、红外诱饵剂；热能的有燃烧剂、点火药；声能的有模拟剂、消音剂。

(4) 火药 火药又称发射药，能够在外界助燃剂（如氧）的作用下进行迅速而有规律的燃烧，同时放出大量气体和热量，在军事上主要用作枪弹、炮弹的发射药，火箭、导弹的推进剂及其它驱动装置的能源。火药分为黑火药、单基火药、双基火药、三基火药、高分子复合火药等几类。

单基火药又称单基发射药、硝化纤维素火药，简称单基药，是以硝化纤维素为主要能量组分，并加入适量其它添加剂的火药。单基火药在制造时需添加溶剂使硝化纤维素具有塑性，压制成型后又要排除醇醚溶剂，使火药的燃烧层厚度受到限制。单基火药能量较低，烧蚀小，主要品种有我国的单芳发射药、法国的B发射药、美国的FNH发射药等，广泛应用于各种枪械和大口径低装药量的火炮。

双基火药简称双基药，是以硝化纤维素和二元醇或多元醇的硝酸酯为主要能量组分组成的火药。根据化学成分有硝化甘油火药、硝化木糖醇发射药等品种。双基火药用于制造各种形状的较大尺寸的药柱，可通过压伸、烧铸等工艺成型；其能量范围大于单基火药，烧蚀也

较大。用于大口径火炮和迫击炮发射药装药时，称双基发射药；用于固体火箭发动机的双基火药称为双基火箭推进剂。

三基火药又称三基发射药，简称三基药，是由硝化纤维素、硝化甘油（或其它硝酸酯）和另一种固体含能材料为主要能量组分组成的火药。通常根据所加入另一种固体含能材料的类别来命名。主要品种有硝基胍发射药、太安发射药、硝胺发射药等。三基火药属于非均质火药，组分中添加的固体含能材料如硝基胍等爆热小、比容大。在能量相同时，三基火药一般比单基火药和双基火药爆温低、烧蚀小、火焰小，适用于弹丸初速高、烧蚀小的大口径高膛压火炮装药。

起爆药、猛炸药、烟火剂和火药都具有爆炸性能，在一定条件都能产生爆轰。通常情况下，起爆药点燃后，燃烧很不稳定，易转变为爆轰。猛炸药的稳定性介于起爆药、火药之间，随所处的环境而改变，在一定条件下可以稳定燃烧，而在另一些条件下，燃烧变得不稳定，可转变为爆轰。火药和烟火剂燃烧时的稳定性都很好，主要是爆燃。

1.3 炸药的特征

炸药具有四个基本特征^[2]：高体积能量密度、强自行活化、亚稳态和自供氧。

1.3.1 高体积能量密度

如以单位质量来计，1kg 燃料燃烧放出的热量远远大于同质量炸药燃烧所释放的能量。如表 1-3 中列出数据所示，汽油的放热量是硝化甘油的 6.7 倍、梯恩梯的 10 倍、黑火药的 14.3 倍。即使以汽油-氧的等化学比混合物反应热作为对比基础，汽油-氧混合物的放热量仍大于炸药释放的能量。但如果以单位体积计，情况则大不一样。这时，1L 硝化甘油的反应热是汽油-氧混合物的 571 倍，梯恩梯是该混合物的 370 倍，黑火药则是它的 160 倍。因此，可用高体积能量密度一词表示炸药的这个特点，通常用炸药密度和爆热乘积的 ρQ_V 表示炸药的体积能量密度，表 1-4 中列出了几种常见炸药的 ρQ_V 值。

表 1-3 几种常见炸药、燃料反应释放的能量值

物 质	Q_c/kJ		
	1kg 物质	1kg 物质-氧混合物 ^①	1L 物质-氧混合物
木材	18830	7950	20
无烟煤	33470	9205	18
汽油	41840	9823	18
黑火药	2930	2930	2803
梯恩梯	4180	4180	6480
硝化甘油	6280	6280	10042

① 指燃料与氧的等化学比混合物，含能材料自身含氧，不需和氧混合。

表 1-4 几种常见炸药的体积能量密度 ρQ_V

含 能 材 料	$\rho/kg \cdot m^{-3}$	$Q_V/kJ \cdot kg^{-1}$	$\rho Q_V/10^6 kJ \cdot m^{-3}$
梯恩梯	1530	4573	6.9
太安	1730	6222	10.8
黑索今	1780	6318	11.2
奥克托今	1890	6188	11.6

1.3.2 强自行活化

炸药在外界能量作用下发生爆炸后，在不需外界补充任何条件和没有外来物质的参与

下，爆炸反应即能以极快速度进行，直至完全反应。这是因为炸药本身含有爆炸变化所需要的氧化组分和可燃组分，且爆炸时放出的爆热足以提供爆炸反应所需的活化能，可以不断地使其接触的其余部分活化。表 1-5 中列出了几种炸药的爆热 (Q_V)、活化能 (E) 以及二者的比值。

表 1-5 几种常见炸药爆热、活化能及其比值

炸 药	$Q_V/\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$Q_V/\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	$E^\ominus/\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$	Q_V^\ominus/E
梯恩梯	4572	1039	223.8	4.6
太安	6222	1944	163.2	11.9
黑索今	6318	1404	213.4	6.6
奥克托今	6188	1832	220.5	8.3

① E 取炸药热分解的活化能值。

② Q_V 取 1mol 炸药的爆热。

1.3.3 亚稳态

炸药不是一触即发的危险品。有些著作中曾认为含能材料像一个倒立着的瓶子，稍受外力就会倾倒。对于起爆药来说，这种比喻或许成立，但猛炸药则不然。有实用意义的含能材料必须相当安全，能承受一定强度的外界作用而不会爆炸。近代战争要求含能材料具有低感度、高安全性。某些工业炸药感度很低甚至不能被雷管引爆，且所用药量达百克，例如梯恩梯-黑索今混合炸药。这说明含能材料是相当稳定、不易被引爆的。从热分解角度看，大部分含能材料热分解速率相当低，甚至低于某些化学肥料、农药的热分解速率，也说明含能材料稳定。某些具有爆炸性、但很不稳定的物质，例如 NI_3 ，没有应用价值，这些物质只能被称为爆炸物，并非所有能爆炸的物质都能用作含能材料。

1.3.4 自供氧

炸药分子或组分内，既含有可燃剂，又含有氧化剂。炸药的燃烧、爆轰是炸药分子内或内组分间的化学反应，不需外界供给氧。炸药的这种化学反应曾被称为分子的内燃烧反应。炸药分子或组分内的可燃性物质包括碳、氢原子或含有碳、氢的物质，助燃性物质则包括硝基、高氯酸、硝酸或含有它们的物质。

1.4 炸药的化学变化形式

和普通化学品一样，含能材料受热可以分解、燃烧。含能材料可以发生爆轰，但是只有用起爆器材引发才能实现。含能材料的化学变化有热分解、燃烧和爆轰三种形式。

含能材料热分解性质和一般有机物质一样，常温下分解速率很慢，火药、推进剂可以安全贮存 20 年甚至更长，梯恩梯可以安全贮存 40 年以上。

燃烧是有机物质的一种反应，但一般物质在燃烧时，需要外界供氧，氧进入反应区，维持燃烧反应进行；而含能材料燃烧不需外界提供氧气，含能材料的燃速较一般有机物的要大，且环境温度和压力都对燃速有影响。

爆轰是含能材料特有的化学变化，反应速率很高，达到几千米每秒。爆轰形成的压力、温度是其它化学反应不能比拟的。

含能材料的三种化学变化形式可以互相转化。在某些条件下，爆轰可衰减为燃烧；反之，缓慢地热分解也能转化为热引燃甚至热爆炸。燃烧也可以转化为爆轰。这种转化发生的条件与环境与含能材料的物化性质等有关。可用下式表示三种化学变化形式的转化：