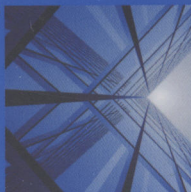
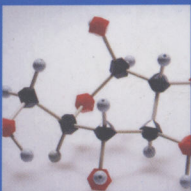




国防特色教材 · 材料科学与工程

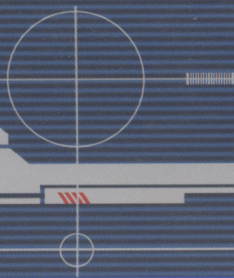
National Defense  
TEXTBOOK



# 炸药理论

ZHAYAO LILUN

金韶华 松全才 编著



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防特色教材 · 材料科学与工程

-93

# 炸药理论

金韶华 松全才 编著

TQ564

J802



西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

## 内容简介

炸药理论是研究炸药的物理化学和化学物理变化特性的一门学科,包括热分解、燃烧、燃烧向爆轰的转变、感度、爆轰等。本书着重介绍炸药的热化学、热分解、燃烧、热爆炸、燃烧向爆轰的转变、感度及其测定方法,适度地介绍爆轰过程和爆炸作用的基本知识。

本书可作为含能材料专业本科生、研究生教学用书,也适用于从事含能材料领域包括炸药化学合成、化学物理性质、配方研制、安全应用方面的技术人员和研究人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

炸药理论/金韶华,松全才编著. —西安:西北工业大学出版社,2010.1

国防特色教材·材料科学与工程

ISBN 978-7-5612-2726-8

I. ①炸… II. ①金… ②松… III. ①炸药—理论—高等学校—教材 IV. ①TQ564

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 017539 号

金韶华 松全才 编著

责任编辑 季苏平

\*

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072) 发行部电话:029-88493844 传真:029-88491147

<http://www.nwvip.com>

陕西向阳印务有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×960 1/16 印张:28.125 字数:600 千字

2010 年 1 月第 1 版 2010 年 1 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5612-2726-8 定价:55.00 元

# 前 言

最早的《炸药理论》由德国教授 H. Brunswig 编著,于 1909 年出版,至今已有 100 年。当时,该书有 12 章,266 页。1931 年,在苏联著名教授 К. Андреев 的倡议下,由工程师 К. М. Бялко 将该书的第二版译为俄文。此后,在 1940 年左右 Снитко 曾编著过另外一本《炸药理论》。1960 年出版了由 К. Андреев 和 А. Беляев 合著的《炸药理论》,这本书体现了那时的最新成就,成了经典版本。在国外至今再没有新的公开出版的版本,只是在莫斯科门捷列也夫化工大学和圣彼得堡工业大学曾出版过有关的校内教材。

早在 20 世纪 50 年代,在苏联专家的指导下,北京理工大学(原北京工业学院)出版过《炸药理论》讲义。直到 1982 年,在我国才正式出版,当时由北京理工大学和南京理工大学的孙名振、松全才、郑梦菊、俞家齐共同编著。这本书弥补、满足了当时的需求。1997 年又出现了另一版本的《炸药理论》,由松全才、杨崇惠、金韶华编著。这本书以 1960 年 К. Андреев 和 А. Беляев 的专著为范本,补充了当时的最新资料。时光荏苒,又过去了十年。在这十年间,炸药科学发展很快,在炸药理论领域、热分解、燃烧、感度等方面都有了明显的进展。将 1997 年版的《炸药理论》一书加以补充、增订实属必要,所以,笔者又付出了辛勤的劳动,才有了本书的出版。

广义的炸药理论应该包括炸药合成、制造工艺、制品加工、应用技术等有关炸药的理论,这是个庞大的、系统的课题。习惯上的“炸药理论”只涉及炸药的化学物理性质——热化学、化学动力学(如热分解、燃烧、燃烧向爆轰的转变等)——和炸药配方的研制等。涉及合成、工艺、应用的有关理论,则归到其他相关的领域,可在有关的专著中找到答案。“炸药理论”可以说是个传统的、不确切的名称,所以,现在趋向于改为“炸药的化学物理学”。

本书引用的俄文文献较多,着重于俄文最新资料的介绍。这是因为以俄文书写的有关教科书和专著较多,尤其是近年来的资料更是如此;目前,我们的教学和科研人员对于英文资料了解得较多,对俄文资料了解较少。

本书内容包括炸药的热化学(炸药的爆热、爆炸化学反应、热力学的计算等),炸药的反应动力学(热分解、燃烧、燃烧向爆轰的转变、感度),爆轰现象的经典理

论,爆轰的应用等。本书叙述的重点是炸药,但从学科原理角度,也适用于火药(推进剂)、烟火剂专业的教学和科研人员参考。

本书第2,3,4,5,6,9章主要由北京理工大学金韶华编写,第1,7,8章主要由北京理工大学松全才编写,中北大学李永祥参与了第6章、第9章的编写。

孙滩洲、吴敏杰在本书成稿过程中参与了打印、排版、绘图等工作,有助于本书如期付梓,在此表示感谢。

本书可作为含能材料专业本科生、研究生的教学用书,也适用于从事含能材料领域包括炸药化学合成、化学物理性质、配方研制、安全应用方面的技术人员和研究人员参考。

由于笔者水平有限,热烈欢迎读者批评指正。

编著者

2009年4月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 爆炸 .....	1
1.2 炸药及其特点 .....	3
1.3 炸药的化学变化 .....	6
1.4 炸药的分类 .....	6
1.5 炸药发展简史和应用 .....	8
1.6 炸药理论的任务.....	18
思考与练习题 .....	19
参考文献 .....	19
<b>第 2 章 炸药的热化学及爆炸反应方程</b> .....	21
2.1 预备知识.....	21
2.2 炸药的爆热.....	24
2.3 炸药的爆温.....	37
2.4 炸药的爆容.....	42
2.5 爆炸变化方程.....	43
思考与练习题 .....	52
参考文献 .....	53
<b>第 3 章 炸药的热分解</b> .....	54
3.1 概述.....	54
3.2 研究热分解的方法.....	58
3.3 热分解的通性.....	62
3.4 硝酸酯的热分解.....	84
3.5 硝基胺的热分解.....	90
3.6 硝基化合物的热分解 .....	105
3.7 ADN(二硝酰胺铵)的热分解 .....	110
3.8 炸药的热安定性 .....	117
3.9 炸药的相容性 .....	125
思考与练习题.....	131

参考文献	132
<b>第 4 章 热爆炸</b>	<b>137</b>
4.1 炸药或非炸药体系的热爆炸	137
4.2 化学反应的非稳态发展	138
4.3 N. Semenov 的气相热爆炸理论——均温系统热爆炸理论	143
4.4 非均温系统热爆炸稳定状态理论	150
4.5 实验测定热爆炸参量的方法	157
思考与练习题	171
参考文献	172
<b>第 5 章 燃烧</b>	<b>174</b>
5.1 概述	174
5.2 引燃	180
5.3 稳定燃烧	183
5.4 化合物的燃烧	194
5.5 混合物的燃烧	208
5.6 硝基化合物燃烧的催化	214
5.7 燃烧的临界现象	217
5.8 燃烧与热分解的关系	218
思考与练习题	219
参考文献	219
<b>第 6 章 炸药的爆轰</b>	<b>221</b>
6.1 气体动力学基础知识	221
6.2 气体的爆轰理论与爆轰参量计算	237
6.3 凝聚炸药的爆轰理论与爆轰	249
6.4 炸药爆速的经验计算和实验测定	260
6.5 炸药的不稳定爆轰	278
思考与练习题	286
参考文献	286
<b>第 7 章 燃烧向爆轰的转变</b>	<b>288</b>
7.1 概述	288
7.2 不稳定燃烧	289

---

7.3 燃烧向爆轰的转变 .....	294
7.4 几种实践中常见的 DDT 过程 .....	304
思考与练习题 .....	309
参考文献 .....	310
<b>第 8 章 炸药的感受度 .....</b>	<b>311</b>
8.1 历史发展 .....	311
8.2 热点理论 .....	313
8.3 机械感度 .....	317
8.4 热感度 .....	346
8.5 冲击波感度 .....	353
8.6 爆轰波感度 .....	359
8.7 静电感度 .....	360
8.8 激光感度 .....	362
8.9 影响炸药感度的因素 .....	364
8.10 炸药的钝感 .....	370
思考与练习题 .....	386
参考文献 .....	386
<b>第 9 章 爆炸的作用 .....</b>	<b>393</b>
9.1 爆炸做功 .....	393
9.2 做功形式和爆炸时的能量平衡 .....	397
9.3 实验测定做功能力、猛度的方法及其影响因素 .....	405
9.4 聚能效应 .....	414
思考与练习题 .....	422
参考文献 .....	423
<b>附录 .....</b>	<b>424</b>
附录 1 含能材料常用数据表 .....	424
附录 2 美国 12 型落锤仪及其测定方法 .....	434
附录 3 人名俄英中对照表 .....	436
附录 4 缩略词语表 .....	438



# 第1章 绪论

## 1.1 爆炸

### 1.1.1 爆炸现象

自然界有各种各样的爆炸,相应地也就有不同的“爆炸”概念<sup>[1-2]</sup>。

从广义角度来看,爆炸是指物质的物理或化学变化,在变化过程中,伴随有能量的快速转化,内能转化为机械压缩能,且使原来的物质或其变化产物、周围介质产生运动,做功。

原则上,爆炸现象包括了两个阶段:(i)这种或那种的内能转化为强烈的物质压缩能;(ii)该压缩能的膨胀——释放,潜在的压缩能转化为机械功。该机械功可使与之相接触或相邻近的介质运动并且做功。因此,迅速出现高压力的作用是爆炸的基本特征。

爆炸的能源有多种:电、运动、热、弹性压缩、原子能、化学能等。水下的强力火花放电,或者将大电流通过细的导线均可引起爆炸,这时,电能转化为加热空气、水汽的能量。

当高速运行的物体强烈撞击高强度的障碍时,运动能转化为热能,当能量足够大时,可形成强烈压缩的气体。这种类型的爆炸出现在陨石撞击地球或其他星体的场合,1994年的彗星、木星对撞就是典型的实例。

高压充气瓶也会出现爆炸。由于偶然的受热,气瓶内压力急剧升高,或是由于腐蚀或其他机械破损致使气瓶的强度下降均可使气瓶爆炸。这种爆炸是由压缩气体的内能造成的。蒸汽锅炉的爆炸也属于这种类型的爆炸。当锅炉内的水受热生成水汽,锅炉内压力超过了额定压力,超过锅炉壁的承受应力时,锅炉碎裂。锅炉碎裂后,锅炉内的过热水汽快速膨胀,做破坏功。

大部分的地震可作为由弹性压缩能引致爆炸的例子。在地壳的个别地区形成的应力(张力)可以波及广大区域,并在某些区域集聚,突然释放出大量能量。强烈地震释放的能量可相当于百万吨常见炸药爆炸所释放的能量<sup>[1]</sup>。

在小尺寸空间内也可出现类似的爆炸。例如,如果使注满水的钢瓶快速冷冻,也可出现“爆炸”。由于水在结冰过程中体积膨胀,使钢瓶内压力增加,超过了钢瓶壁所能承受的应力,导致钢瓶爆裂。这时,压缩水结冰造成的潜在弹性能就转化为破坏钢瓶的机械功。

大约在1940年,在西伯利亚某车站,存放了大量的冰,冰储藏在大箱内,总容积超过1 000 m<sup>3</sup>。由于冰块爆裂,使大箱崩裂,发出巨响,大块的冰飞出,有几十米。

上述实例都是由物理原因引致的爆炸,属于物理性爆炸。

爆炸也可由化学能引起,由于快速化学反应而使物质的化学潜能转化为压缩气体的能量。这属于化学性爆炸。

因此,从狭义角度,爆炸又可定义为伴随着大量热量释放、气体生成的快速化学变化。

出现化学爆炸与否取决于化学反应的特性,凡是同时具备放热、释放气体产物、反应速率快的化学变化必将导致爆炸,三个条件缺一不可。下面简述这三个条件的作用。

### 1. 化学反应的放热性

反应呈放热性是爆炸的首要条件。化学反应释放的热量是爆炸的能源。反应过程吸热还是放热、放热量的多少决定过程是否具有爆炸性质。例如,常见的草酸盐,当它们受热分解时,有的吸热,有的放热,因此,有的草酸盐受热分解时可能爆炸,有的则不爆炸。下面举例说明这个问题。

在表 1.1 中列出几种草酸盐分解反应的热效应和反应性质。

表 1.1 草酸盐反应热效应及性质

化合物分解反应	热效应/(kJ·mol <sup>-1</sup> )	反应性质
$(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4 \rightarrow 2\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO} + \text{CO}_2$	+263.5	分解
$\text{ZnC}_2\text{O}_4 \rightarrow \text{Zn} + 2\text{CO}_2$	+205.4	分解
$\text{PbC}_2\text{O}_4 \rightarrow \text{Pb} + 2\text{CO}_2$	+69.9	分解
$\text{Cu}_2\text{C}_2\text{O}_4 \rightarrow \text{Cu} + 2\text{CO}_2$	-23.8	爆炸,但不强烈
$\text{HgC}_2\text{O}_4 \rightarrow \text{Hg} + 2\text{CO}_2$	-47.3	爆炸
$\text{Ag}_2\text{C}_2\text{O}_4 \rightarrow 2\text{Ag} + 2\text{CO}_2$	-123.4	爆炸

表 1.1 的数据说明,随着反应热效应性质和大小的变化,草酸盐可由平稳分解到出现爆炸。化学反应的放热性是由分子内化学键和键能决定的,因此也就和分子的化学结构有关。

众多化学基团可使化合物具有爆炸性,在表 1.2 中列出了部分可使化合物具有爆炸性的基团。

表 1.2 可使化合物具有爆炸性的基团

基 团	化 合 物	举 例
C-NO <sub>2</sub> N-NO <sub>2</sub> O-NO <sub>2</sub>	硝基化合物, 硝胺, 硝酸酯	梯恩梯(TNT), 太安(PETN), 奥克托今(HMX)
NO <sub>3</sub> ClO <sub>3</sub> ClO <sub>4</sub>	硝酸盐, 氯酸盐, 高氯酸盐	硝酸铵, 高氯酸铵(AP)
ONC	雷酸盐	雷汞
N=N N=N≡N	偶氮, 重氮, 叠氮化合物, 多氮化合物	叠氮化铅, 重氮二硝基酚

并非所有含上述基团的化合物都具有爆炸性,一种化合物是否具有爆炸性取决于其整个分子结构,而不是某单个基团。例如,一硝基芳烃就没有爆炸性,而只有多硝基芳烃才具有爆炸性。

由实用角度看,含有硝基基团的化合物应用最广。在爆炸时,化合物分子内的碳、氢原子被硝基基团氧化,形成水和二氧化碳,释放大量热量。

## 2. 反应的高速率

虽然反应的放热性是爆炸的重要条件,但是并非所有放热反应都能表现出爆炸性。高的反应速率是形成爆炸的又一重要条件。

煤块可以平稳地燃烧,供人取暖。但是,如果将煤块粉碎成细末,使煤粉在空气中悬浮,形成一定比例的煤粉-空气混合物,点燃这种混合物就可引起爆炸。同样是煤,两种场合的区别在于反应速率不同。煤块比表面积小,氧气以扩散方式进入燃烧反应区和煤发生反应,反应速率低;而煤粉的颗粒小,比表面积大,和空气反应的速率很快,可以导致爆炸。

## 3. 生成气体产物

一个高速进行的放热反应也可能不具有爆炸性。例如,铝热剂燃烧时,按下列反应进行:



该反应释放的热可达  $840 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,是草酸银分解放热的6.8倍,但是铝热剂不易爆炸,而草酸银却很容易爆炸。原因在于草酸银反应时放出气体产物  $\text{CO}_2$ ,而铝热剂反应产物却是固体。在热作用下,气体膨胀,对外界做功。气体产物是做功的介质,将热能转化为机械能。

化学反应的放热性、高速率和生成气体产物是反应具有爆炸性的三个条件,三者缺一不可。

### 1.1.2 爆炸变化的形式

爆炸是物质发生物理、化学变化的表现,但也是一种模糊概念,人们对爆炸并没有严格的定量解释。实际上,所谈的爆炸包括了爆燃、低速爆轰、高速爆轰几种反应速率不同的变化。一般爆燃速率低于  $1000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,低速爆轰速率为  $1000 \sim 2000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,高速爆轰的速率高于  $2000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从反应传播的机理看,爆燃以热波形式传播,爆轰则以激波传播。三种反应的做功强度也不同。

## 1.2 炸药及其特点

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做炸药,又叫猛炸药。这是炸药的狭

义含义。

由于历史原因,日本用火药代表上述的广义炸药,而且有时将猛炸药也称为火药。例如日本的著名杂志——《工业火药》,实际上应叫做《工业炸药》。为了解决上述名词的混淆,现在技术界以“含能材料”一词代替广义的火药或炸药。

在技术应用中,起爆药、炸药、火药三类物质作用不同。起爆药起着引爆、引发反应的作用,曾被称为第一炸药。炸药是在起爆药作用下发生爆炸反应的,是被引发的,曾被称为第二炸药。火药或推进剂的作用是推进、抛掷,反应相当和缓,所以曾被称为低级炸药,而炸药则被称为高级炸药。

在本书中,未经特别指明的炸药,都指猛炸药。

### 1.2.1 炸药——高能量密度的物质

炸药是否是某种特殊含能的物质呢?分析表明,炸药分子内并非含有什么特殊含能的因素。在表 1.3 中列出了炸药、燃料反应释放能量的对比。

表 1.3 炸药、燃料反应释放的能量值

物质 \ 释放能量	物质/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	物质-氧混合物 <sup>①</sup> /(kJ·kg <sup>-1</sup> )	物质-氧混合物/(kJ·L <sup>-1</sup> )
木柴	18 830	7 950	19.6
无烟煤	33 470	9 205	17.9
汽油	41 840	9 823	17.6
黑火药	2 930	2 930	2 803
TNT	4 180	4 180	6 480
硝化甘油(NG)	6 280	6 280	10 042

①指燃料与氧的等化学比混合物,炸药自身含氧,不须和氧混合。

由表 1.3 的数据看出,1 kg 燃料燃烧释放的热量远远大于 1 kg 炸药燃烧所释放的热量。例如,汽油的放热量是 NG 的 6.7 倍、TNT 的 10 倍、黑火药的 14.3 倍。但是,汽油燃烧时需要氧气助燃,因此在进行对比时,应该以汽油-氧的等化学比混合物为基础。对比结果表明,在质量相同时,汽油-氧混合物的放热量仍大于炸药释放的能量。但是,由于氧是气体,密度小,因此汽油-氧混合物的密度小,占有的体积大。如果 1 L 的燃料与炸药释放能量相对比,则情况明显不同。例如,1 L NG 的反应热是汽油-氧混合物的 571 倍,1 L 的 TNT 的反应热是该混合物的 370 倍,黑火药则是它的 160 倍。这说明,炸药的特点是单位体积物质反应热数值大,普通燃料-氧混合物的放热量难于与之比拟。

炸药的这个特点可用高能量密度来表示,通常用炸药密度和爆热乘积 $\rho Q_V$ 表示能量密度,在表 1.4 中列出几种常见炸药的 $\rho Q_V$ 值。

表 1.4 炸药的能量密度 $\rho Q_V$ 

炸药	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$Q_V/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$\rho Q_V/(\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$
TNT	1 530	4 573	$7.0 \times 10^6$
PETN	1 730	6 222	$10.8 \times 10^6$
RDX	1 780	6 318	$11.2 \times 10^6$
HMX	1 890	6 188	$11.6 \times 10^6$
六硝基六氮杂异伍兹烷( $\epsilon$ -HNIW)	2 040	6 230	$12.7 \times 10^6$

### 1.2.2 炸药——强自行活化的物质

条件一旦具备,炸药爆炸后,反应将快速进行,直到炸药完全反应为止。炸药爆炸时,释放大量的能量,该值与反应活化能相比大得多。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 中数据表明,1 mol 的 TNT 爆炸后所释放的能量可活化 4.6 mol TNT,1 mol PETN 爆炸释放出的能量可活化 11 ~ 12 mol PETN。依此类推,部分炸药爆炸后,可以不断地使和其接触的其余部分活化,发生反应。过程如此循环不止,直到全部炸药反应完毕。

表 1.5 炸药爆热、活化能及其比值

炸药	$Q_V^{\text{①}}/(\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	$Q_V/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$E^{\text{②}}/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	$Q_V^{\text{①}}/E$
TNT	4 570	1 039	223.8	4.6
PETN	6 222	1 944	163.2	11.9
RDX	6 318	1 404	213.4	6.6
HMX	6 188	1 832	220.5	8.3
$\epsilon$ -HNIW	6 230	2 729	237.4	11.5

① $E$ 取炸药分解的活化能值;② $Q_V$ 取 1 mol 炸药的爆热。

### 1.2.3 炸药——亚稳性物质

炸药不是一触即发的危险品。有些著作中曾认为炸药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。有实用价值的炸药必须相当安全,应能承受相当强烈的外界作用而不会爆炸。近代战争要求炸药具有低感度,高度安全

性。某些工业炸药感度很低,须借助于猛炸药引爆,例如 TNT - RDX 混合炸药,且所用药量可达百克。这说明炸药是相当安定,不易被引爆的。从热分解角度看,大部分炸药热分解速率相当低,例如低于某些化学肥料、农药的热分解速率,这也说明炸药稳定。某些具有爆炸性,但很不稳定的物质,例如  $\text{NI}_3$ ,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做炸药。

### 1.2.4 炸药——自供氧的物质

炸药的燃烧、爆轰是分子或组成内组分间的化学反应,不须外界供给氧。所以,曾将炸药的这种化学反应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、氢的材料,助燃性元素则包括硝基、氯酸根、硝酸酯基或含有它们材料。

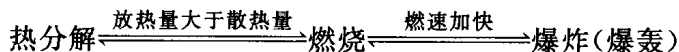
## 1.3 炸药的化学变化

炸药可以爆轰,但是只有用起爆器材引发才能实现。和普通化学品一样,炸药受热可以分解、燃烧,因此,炸药的化学变化有热分解、燃烧、爆轰三种形式。

炸药热分解性质和一般有机物质一样,常温下分解速率很慢<sup>[4]</sup>,火药、推进剂可以安全储存 20 年,炸药的储存年限还可更长。TNT 可以安全储存 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。而炸药燃烧不需外界提供氧气,但环境的温度、压力都对燃速有影响,炸药的燃速较一般有机物的燃速要大。爆轰是炸药特有的化学变化,反应速率很高,达到几千米每秒。爆轰形成的压力、温度是其他化学反应不能比拟的。

炸药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,某些工业炸药常出现这种转化,慢热分解能转化为热引燃——热爆炸,燃烧也可以转化为爆轰。炸药三种化学变化形式间转化的条件与环境、炸药的物化性质有关,可用



表示炸药三种化学变化形式间的关系。

## 1.4 炸药的分类

根据组成、用途,可将炸药(指含能材料)进行如下分类<sup>[8]</sup>。

### 1.4.1 按组成分类

按照炸药的化学组成,分为单质炸药(或单体炸药)和混合炸药两类。

单体炸药分子内同时含有氧化性基团和可燃性元素。

氧化性基团包括: $-C\equiv C$ ,存在于乙炔衍生物中,如乙炔银、乙炔铜; $=N-X$ ,存在于氮的卤化物中,如 $NCl_3$ 、 $NI_3$ 等; $-N=C$ ,存在于雷酸盐中,如雷汞、雷银等; $-N=O$ ,存在于亚硝酸酯、亚硝基化合物内,如环三亚甲基三亚硝胺; $-NO_2$ ,存在于硝基化合物中,这是应用最广的一类。根据硝基基团和碳、氮、氧的连接方式,可分为硝基化合物( $-C-NO_2$ )、硝胺( $-N-NO_2$ )、硝酸酯( $-O-NO_2$ )三种。 $-O-Cl$ ,存在于氯酸盐、高氯酸盐中,也是强氧化剂。

可燃性元素包括碳、氢、硼等元素。

混合炸药的种类繁多,通常由两种以上的成分组成。混合炸药弥补了单质炸药在品种、成型工艺、原材料来源和价格方面的不足,具有较大的选择性和适应性,扩大了炸药的应用范围,可分为军用炸药、民用炸药两大类。军用炸药包括粒状高聚物黏结炸药、液体混合炸药、燃料空气炸药、熔性炸药(浇注型)、含铝炸药、钝化炸药、挠性炸药、塑性炸药、热固性炸药等。民用混合炸药分为硝化甘油炸药、粉状铵梯炸药、铵油炸药、乳化炸药。按用途分,则有岩石、煤矿、露天、水下、光面、顶裂、石油射孔、地震勘探、爆炸焊接等类型炸药。而按性能特点,又可分为抗水和非抗水、安全和非安全、浆状、水胶、乳化、粒状黏性、难冻、耐热、当量型、被筒、离子交换炸药等<sup>[6]</sup>。

### 1.4.2 按用途分类

根据使用特性,炸药可分为起爆药、猛炸药、烟火药、火药(推进剂)四类。起爆药是最敏感的炸药,不大的外界作用可使它出现快速、强烈的化学反应,因此可用于引起其他类炸药发生反应。常用的起爆药有:叠氮化铅 $[Pb(N_3)_2]$ 、雷汞 $[Hg(ONC)_2]$ 、三硝基间苯二酚铅(TNRL) $[C_6H(NO_2)_3O_2Pb]$ 、二硝基重氮酚 $[C_6H_2(NO_2)_2ON_2]$ 、特屈拉辛(又名基特拉辛) $[C_2H_8ON_{10}]$ 。

猛炸药爆炸时对周围介质做猛烈的破坏功,军事上用做战斗部装药和爆破装药。这类炸药可以是化合物,也可以是混合物。化合物的代表有 TNT、特屈儿(TE)、RDX、HMX 等。混合物的代表有 TNT-RDX 混合炸药,以 RDX、HMX 为主体,聚合物为黏合剂的高聚物黏结炸药(PBX)。

火药是在外界作用下能进行迅速而有规律的燃烧,同时生成大量高温燃气的物质。在军事上火药主要用做枪弹、炮弹的发射药,火箭、导弹的推进剂及其他驱动装置的能源。黑火药是历史悠久的火药。近代发射药分为单基、双基、三基、改性双基发射药几类;推进剂则分为双

基、三基和复合推进剂几类。

烟火药是在隔绝外界空气的条件下能燃烧,并产生光、热、烟、声或气体等不同烟火效应的混合物<sup>[5]</sup>,通常由氧化剂、可燃剂和黏合剂组成,有的还含有附加物,军事上用来装填特种弹药和器材,民间用于制造焰火、爆竹以及其他工业制品。烟火药按生成物产生烟幕分为遮蔽或迷盲发烟剂、有色发烟剂、干扰发烟剂;按能量分为动能、光能、热能、声能等类型。动能烟火药有气体发生剂、弹底排气剂、烟火推进剂。光能烟火药有照明剂、摄影闪光剂、曳光剂、发光信号剂、红外诱饵剂。热能烟火药有燃烧剂、点火药。声能烟火药有模拟剂、哨音剂。按反应速率分,则有延期药。

这几类炸药的燃烧稳定性区别很显著。起爆药被点燃后,燃烧很不稳定,易转变为爆轰。研究结果表明,在专用仪器内,起爆药由燃烧转变为爆轰所需的距离小;过程完成的时间很短。叠氮化铅甚至在真空下都不能稳定燃烧,只表现为爆轰。这表明起爆药燃烧稳定性最差。火药燃烧的稳定性和最好,在压力高达几十兆帕的火箭发动机内或者压力高达上百兆帕的火炮炮管内仍可以平稳地燃烧。炸药燃烧的稳定性和介于起爆药、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。

## 1.5 炸药发展简史和应用

### 1.5.1 炸药发展简史

火药的发展走过了漫长的历史进程。早在中国汉代已经具备了火药出现的化学背景。在长期的炼丹实践中,炼丹师们发现某些配方很易起火,有一定的危险性。为了安全,他们提出所谓的“伏火”措施,出现了“伏火”方法<sup>[7]</sup>。但是直到公元808年才出现确定的火药配方记载<sup>[8]</sup>。约100年后,郑藩曾利用火器攻打豫章(今江西南昌),这是火药步入应用的开始。宋代,宋朝军队大量使用以黑火药为推进动力或爆炸物组分的武器。例如,王安石曾制备了大量火箭对付西夏;虞允文在瓜州战役(公元1160年左右)中用霹雳火大败金兵。陆游的千古名句也记录了火药的功绩,“楼船夜雪瓜州渡,铁马秋风大散关”。明代,在有关兵书中已正式列出了火药的配方和相应的火器。“九龙出水”,可同时射出多支火箭,具有较强的杀伤力。名将戚继光曾编了专有的兵阵,用于使用火器。可惜,由于封建制度的约束,在我国应用火药的技术没能进一步发展,而在欧洲却迅速发展起来。公元1840年,英帝国主义以它的坚甲利兵敲开了闭关锁国的中国大门,火药成了它的有力帮凶。

尽管火药已在军事上长期得到广泛应用,但是直到19世纪上半叶仍没有脱离几百年来延续下来的古老配方:1硝、2硫、3木炭。19世纪中叶后,A. B. Nobel发明了含有雷汞的雷管,使得一系列难于爆轰的化合物可以引爆,开始了用起爆药引爆炸药的历史,炸药科学开始了另



一个新阶段。一些曾长期用做其他用途的化合物,如 RDX、苦味酸(PA),也陆续地步入了炸药的行列,出现了众多的化合物炸药。20 世纪是炸药快速发展的时代,炸药化学、工艺学、物理化学(包括炸药的燃烧、爆轰)都取得了重大进展。由于军事技术的快速发展,提出了研制高密度、高能量的新炸药,近 20 年来,已有重大的进展<sup>[9]</sup>,在表 1.6 中列举了几种具有发展前途的化合物。但是,古典的 CHON 类化合物的高能量密度的化合物已经很难再有新的飞跃,另一类化合物——聚合氮,已引起了人们的注意<sup>[9]</sup>,在表 1.7 中列举了某些拟合成的聚合氮化合物。在表 1.8 中列出炸药发展的简明编年。

表 1.6 现代高能含能材料

新氧化剂和高能材料 (New oxidizers and high-energy materials)	含能黏合剂 (Energetic binders)
$\begin{array}{c} \text{O}_2\text{N} \diagdown \\ \text{N}^+\text{NH}_4^+ \\ \text{O}_2\text{N} \diagup \\ \text{ADN} \end{array} \quad \left[ \begin{array}{c} \text{H} \\   \\ \text{H}-\text{N}-\text{H} \\   \\ \text{H} \end{array} \right]^+ \quad \left[ \begin{array}{c} \text{NO}_2 \\   \\ \text{HC}-\text{NO}_2 \\   \\ \text{NO}_2 \end{array} \right]^-$ <p style="text-align: center;">HNF</p>	$\text{HO} \left[ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H}_2 \\   \quad   \\ \text{C}-\text{C}-\text{O} \\   \\ \text{CH}_2\text{N}_3 \end{array} \right]_n \text{H} \quad \text{H} \left[ \begin{array}{c} \text{CH}_2\text{N}_3 \\   \\ \text{C}-\text{C}-\text{C} \\   \quad   \\ \text{H}_2 \quad \text{H}_2 \\ \text{CH}_2\text{N}_3 \end{array} \right]_n \text{OH}$ <p style="text-align: center;">GAP                      PolyBAMO</p>
<p style="text-align: center;">HNIW                      DNAF</p>	$\text{H} \left[ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{H}_2-\text{C}-\text{C}-\text{H}_2 \\   \\ \text{CH}_2\text{N}_3 \end{array} \right]_n \text{OH} \quad \text{H} \left[ \begin{array}{c} \text{CH}_2\text{N}_3 \\   \\ \text{H}_2-\text{C}-\text{C}-\text{C} \\   \quad   \\ \text{H}_2 \quad \text{H}_2 \\ \text{CH}_2\text{N}_3 \end{array} \right]_n \text{O} \left[ (\text{CH}_2)_4 \right]_m \text{OH}$ <p style="text-align: center;">PolyAMMO                      BAMO-THF</p>
$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{OCH}_2\text{C}(\text{NO}_2)_2\text{CH}_3 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{H} \quad \text{OCH}_2\text{C}(\text{NO}_2)_2\text{CH}_3 \\ \diagup \quad \diagdown \\ \text{H} \quad \text{OCH}_2\text{C}(\text{NO}_2)_2\text{CH}_3 \\ \diagdown \quad \diagup \\ \text{H}_3\text{C} \quad \text{OCH}_2\text{C}(\text{NO}_2)_2\text{CH}_3 \\ \text{BDNPF/A} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{CH}_2\text{ONO}_2 \\   \\ \text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{H} \\   \\ \text{CHONO}_2 \\ \text{TMETN} \end{array}$	$\text{H} \left[ \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\   \\ \text{H}_2-\text{C}-\text{C}-\text{H}_2 \\   \\ \text{CH}_2\text{ONO}_2 \end{array} \right]_n \text{OH} \quad \text{HO} \left[ \begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H}_2 \\   \quad   \\ \text{C}-\text{C}-\text{O} \\   \\ \text{CH}_2\text{ONO}_2 \end{array} \right]_n \text{H}$ <p style="text-align: center;">PolyNMMO                      PGN</p>
	$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N}-\text{N}=\text{N}-\text{N}=\text{N}-\text{N}=\text{N}-\text{NH}_2 \\   \quad   \quad   \quad   \\ \text{N}=\text{N} \quad \text{N}=\text{N} \quad \text{N}=\text{N} \quad \text{N}=\text{N} \\ \text{DAAT} \end{array} \quad \begin{array}{c} \text{H}_2\text{NHN}-\text{N}=\text{N}-\text{N}=\text{N}-\text{NHNH}_2 \\   \quad   \quad   \\ \text{N}=\text{N} \quad \text{N}=\text{N} \quad \text{N}=\text{N} \\ \text{DHTz} \end{array}$ <p style="text-align: center;">四唑化合物</p> <p style="text-align: center;"><math>\text{R}^+ : \text{Na}^+, \text{NH}_4^+, \text{胍盐}, \text{三氨基胍盐}, \text{胍}</math></p>