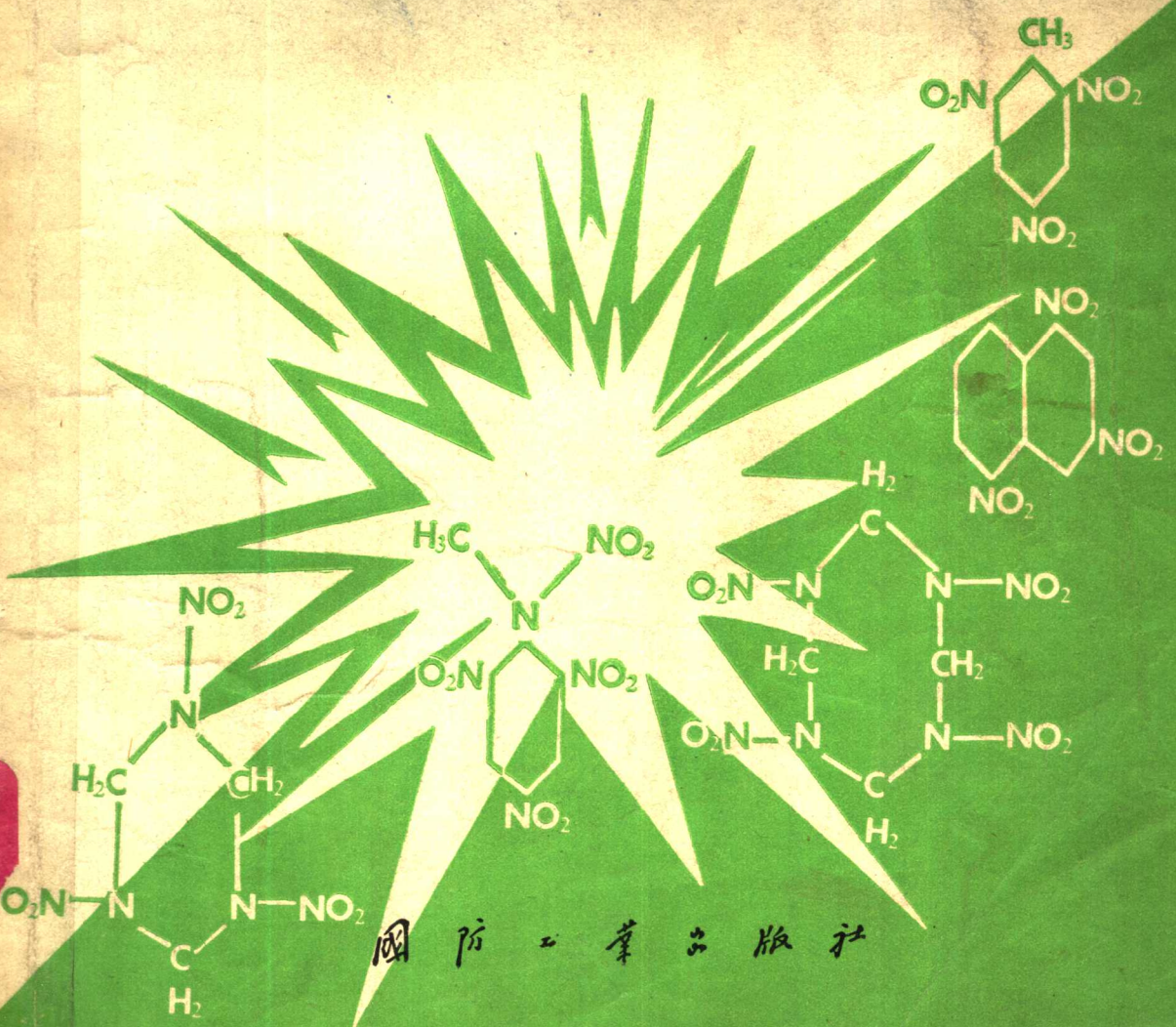


# 猛炸药的化学与工艺学

下 册

《混合炸药编写组》 编著



国防工业出版社

# 猛炸药的化学与工艺学

(下 册)

《混合炸药编写组》编著

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书叙述了军用和民用猛炸药的性质、制造原理及工艺，着重从化学上说明单体炸药及混合炸药的性质和制造工艺理论。全书分两册，上册为单体炸药，叙述了硝化剂、气相和液相硝化的理论，以及硝基化合物、硝酸胺和硝酸酯等炸药。下册为混合炸药，叙述了混合炸药的配方原则、熔铸炸药、高聚物粘结炸药、含铝炸药、燃料-空气炸药以及浆状炸药等。并附有性能表和工艺计算举例。

本书可作为高等院校炸药专业的教科书和中等学校有关专业的教学参考书。也可供有关的生产和科研人员参考。

## 猛炸药的化学与工艺学

(下 册)

《混合炸药编写组》编著

\*

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

\*

787×1092<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 17<sup>1</sup>/<sub>2</sub> 409千字

1983年11月第一版 1983年11月第一次印刷 印数：0,001—2,000册

统一书号：15034·2588 定价：1.80元

## 前 言

在国防和国民经济建设中，炸药占有一定的地位，特别是近二十年来，随着科学技术的飞跃进步，炸药在品种、性能以及制造工艺上都取得了新的发展。本书叙述了猛炸药的化学与制造工艺，从化学基本理论入手，着重讨论了几类重要单体炸药的理化性质，以及制造这些炸药的化学反应机理和方法。在掌握了单体炸药性质和炸药理论的基础上，讨论了混合炸药各组份的作用、它们之间的相容性，以及影响混合炸药性质(特别是爆炸性质)的因素。对于制造工艺方面，一般性地介绍了几种常用炸药具有代表性的工艺流程，使读者能够掌握炸药制造中的基本理论和工艺概貌。为了扩大知识领域，对有一定使用价值的其它炸药也作了一般性的介绍。

在内容上力求反映炸药工艺及其理论的近代发展，引用了近年来公开发表的文献资料，并结合教学实践编写而成。对于炸药性能和工艺的评价，应根据我国实际情况进行分析。为了便于查考，在每章末附有参考资料。

本书可作为高等学校炸药专业的教科书，也可作为中等专业学校的教学参考书，并供从事有关专业的工程技术和科研人员参考使用。

本书上册由孙荣康、任特生、高怀琳编写，下册由刘荣海、吕春绪、王文博、刘祖亮编写。全书由孙荣康主编，陆庆武审定。田宝山、王殿福、叶毓鹏、俞明熊、戴隆泽等参加了审稿。在拟订编写大纲和编写过程中，得到许多教师及有关厂、矿、研究所的大力支持，对本书提供了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。

由于著者水平所限，加上时间仓促，本书缺点和错误在所难免，恳请读者批评指正。

著 者

## 目 录

<b>第一章 概论</b> ..... 1	3-3 铵油炸药的制造 .....86
1-1 概述 ..... 1	3-3-1 铵油炸药的配方确定 .....86
1-2 混合炸药的分类 ..... 1	3-3-2 铵油炸药的配制 .....87
1-3 混合炸药的组成 ..... 3	参考文献 .....87
1-4 混合炸药的性能 ..... 7	<b>第四章 浆状炸药</b> .....88
1-4-1 密度 ..... 7	4-1 概述 .....88
1-4-2 混合炸药爆轰反应的特点 ..... 9	4-2 浆状炸药基本原理 .....93
1-4-3 感度 .....10	4-2-1 浆状炸药的组成及各组分的 性能与作用 .....93
1-4-4 作功能力 .....15	4-2-2 浆状炸药的结构特点及稳定性 .....106
1-4-5 猛度 .....18	4-2-3 浆状炸药的爆轰反应机理 .....108
1-4-6 物理化学安定性 .....20	4-3 浆状炸药的主要性能 .....109
1-5 混合炸药的制备工艺 .....21	4-3-1 抗水性 .....109
参考文献 .....23	4-3-2 安定性 .....109
<b>第二章 硝酸铵炸药</b> .....24	4-3-3 爆炸性能 .....110
2-1 概述 .....24	4-3-4 爆炸气体产物的毒性和烟 .....117
2-2 硝酸铵炸药的配方设计 .....28	4-4 浆状炸药的制造工艺 .....118
2-3 硝酸铵炸药的主要原材料 .....29	4-4-1 配方 .....118
2-3-1 硝酸铵 .....29	4-4-2 工艺举例 .....118
2-3-2 木粉 .....36	参考文献 .....123
2-3-3 食盐 .....37	<b>第五章 熔铸炸药</b> .....124
2-4 硝酸铵炸药的性能及改善性能的方法 .....39	5-1 概述 .....124
2-4-1 硝酸铵炸药的性质 .....39	5-2 梯黑炸药的组成及其与 性能的关系 .....124
2-4-2 改进硝酸铵炸药性能的方法 .....48	5-3 梯黑炸药的制造及 铸装工艺理论 .....127
2-5 硝酸铵炸药的制造 .....55	5-3-1 熔融梯黑炸药的流变性 .....128
2-5-1 原料的粉碎 .....56	5-3-2 选择固相颗粒级配, 提高固相含量 .....134
2-5-2 原料的干燥 .....59	5-3-3 熔融梯黑炸药结晶的基本原理 .....136
2-5-3 各成分的混合 .....63	5-4 梯黑炸药的制造与铸装 .....141
2-5-4 装药和包装 .....64	5-4-1 梯黑炸药的制造 .....141
2-6 硝酸铵气流干燥系统的设计计算 .....65	5-4-2 梯黑炸药的铸装 .....142
2-6-1 管道 .....66	5-5 梯黑炸药的改进与发展 .....143
2-6-2 凸轮粉碎机 .....71	5-5-1 选用能量更高的单体炸药 .....143
2-6-3 螺旋定量加料器 .....72	5-5-2 加入性能良好的添加剂 .....144
参考文献 .....73	5-5-3 选用优于梯恩梯的低熔点炸药 作为高熔点的高能炸药的载体 .....146
<b>第三章 铵油炸药</b> .....75	5-5-4 采用新的浇铸方法 .....146
3-1 概述 .....75	5-6 其它浇铸型混合炸药 .....149
3-2 铵油炸药的原料和性质 .....77	5-6-1 以苦味酸 (PA) 为基的熔铸炸药 .....149
3-2-1 铵油炸药的原料 .....77	
3-2-2 铵油炸药的性质 .....80	



5-6-2 梯恩梯和特屈儿组成的 特屈托儿 (Tetrytol).....	149	7-2-1 铝及其合金.....	212
5-6-3 喷特里特 (Pentolite) .....	149	7-2-2 其它金属与非金属.....	217
5-6-4 梯恩梯与黑喜儿的混合炸药.....	150	7-2-3 金属氢化物.....	218
5-6-5 三元混合物组成的混合炸药.....	150	7-2-4 高效氧化剂.....	219
5-6-6 熔合炸药.....	150	7-3 高威力混合炸药的爆炸性能 .....	220
5-6-7 以三硝基苯醚为基的混合炸药.....	151	7-3-1 铝粉对炸药性能的影响.....	220
参考文献 .....	151	7-3-2 含铝炸药的爆炸作用.....	226
<b>第六章 高聚物粘结炸药 .....</b>	<b>152</b>	7-3-3 含铝炸药爆轰机理.....	229
6-1 概述 .....	152	7-4 含铝炸药的配方设计与 性能估算 .....	237
6-1-1 高聚物粘结炸药的组成及特征.....	152	7-4-1 主要原料选择.....	238
6-1-2 高聚物粘结炸药的 分类及其应用.....	152	7-4-2 铝粉加入量的计算.....	239
6-1-3 高聚物粘结炸药中粘结剂的 力学状态及性质.....	153	7-4-3 爆炸性能估算.....	241
6-2 造型粉 .....	156	7-5 含铝炸药制造工艺 .....	243
6-2-1 造型粉的配方及性能.....	157	7-5-1 工艺举例.....	244
6-2-2 造型粉的配方设计.....	158	7-5-2 铝粉对炸药工艺性能的影响.....	246
6-2-3 造型粉配方组成的确定.....	170	参考文献 .....	249
6-2-4 造型粉的制造工艺及其条件的 选择.....	183	<b>第八章 燃料-空气炸药.....</b>	<b>250</b>
6-3 塑性炸药 .....	187	8-1 概述 .....	250
6-3-1 塑性炸药的产生及发展.....	187	8-2 燃料-空气炸药中的燃料 .....	252
6-3-2 塑性炸药的配方设计.....	188	8-2-1 选择燃料的基本要求.....	252
6-3-3 塑性炸药的配方及性能.....	189	8-2-2 燃料的选择.....	255
6-3-4 塑性炸药的制备工艺.....	190	8-3 云雾爆轰过程 .....	257
6-4 挠性炸药 .....	192	8-3-1 爆燃与爆轰.....	258
6-4-1 挠性炸药的组成.....	193	8-3-2 云雾爆燃与爆轰模型.....	259
6-4-2 挠性炸药的配方及性能.....	195	8-3-3 两相爆轰反应区的结构.....	259
6-4-3 挠性炸药的制备工艺.....	196	8-4 与燃料-空气炸药爆炸有关的 诸因素 .....	261
6-5 其它粘结炸药 .....	196	8-4-1 燃料的弥散与云雾的状态.....	261
6-5-1 浇铸高聚物粘结炸药.....	197	8-4-2 点火延迟期.....	263
6-5-2 泡沫炸药.....	200	8-4-3 起爆方式与强度.....	264
参考文献 .....	202	8-4-4 燃料-空气混合物的爆炸极限 .....	266
<b>第七章 高威力混合炸药 .....</b>	<b>206</b>	8-4-5 非活性气体对两相爆轰的影响.....	267
7-1 概述 .....	206	8-5 燃料-空气炸药爆轰参数的 理论计算 .....	268
7-2 高能添加剂 .....	212	参考文献 .....	275

# 第一章 概 论

## 1-1 概 述

混合炸药，又可以叫做爆炸混合物，这是相对于单体炸药（即爆炸化合物）而言的，它的成份至少由两种在化学上能独立存在的组分构成的。

众所周知，人类最早发现和使用的炸药就是混合炸药，即我国在大约两千年前发明的黑火药（简称黑药）。黑药由碳、硝（硝酸钾）和硫磺组成，我国唐朝后期（九世纪）的文献中首先记述了混制黑药的方法。但是直到十七世纪它一直是世界上唯一的一种炸药。随着科学技术的发展，特别是到了十八世纪，才相继地发现和发明了诸如雷酸盐、氯酸盐、硝化纤维素、硝基化合物等单体炸药以及它们的爆炸性质，这才逐渐打破了黑药的垄断地位，进而开展了多种近代炸药的研究与生产工作。

单体炸药一经出现，便展示了许多优于黑药的性能。所以第一次、第二次世界大战时，在一些重要的弹药中都装填了像苦味酸、梯恩梯一类的单体炸药，大大提高了杀伤和破坏威力。单体炸药的发展也极大地促进了混合炸药的发展，使之成了现代炸药中一个品种繁多、性能各异的庞大分支。

炸药发展的历史事实表明，混合炸药在整个炸药领域中占有重要的地位，其主要作用概括起来有以下几个方面：

### 1. 扩大原料来源，保证炸药供应

战争期间炸药的消耗量是很大的，往往出现供不应求的情况。和平时期工业炸药的消耗量也很大。例如，1978年美国消耗的工业炸药就达 176.9 万吨。如此大量的消耗，仅靠几种单体炸药是满足不了的，而且单体炸药的成本较高。制成混合炸药时可以利用诸如硝酸铵、木粉等那些来源广泛、价格便宜的原料。

### 2. 解决某些单体炸药的应用问题

单体炸药的品种较少，而且往往由于某些性质（如成型性）不能满足要求而影响其使用。把它们制成混合炸药后就能较好地满足各种要求。

### 3. 改善和调整炸药的爆炸性质

各种使用场合对炸药性能的要求不同，这就需要通过制成混合炸药的办来满足不同的要求。

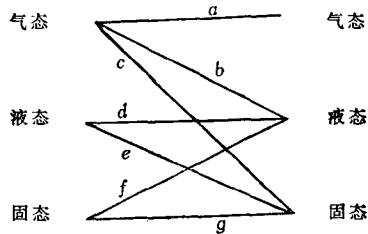
## 1-2 混合炸药的分类

从广义上说，氧化剂和可燃剂以适当的比例混合就可以制成混合炸药；以一种单体炸药为基础，再加入其它成分也是一种混合炸药。因此，混合炸药品种繁多，远远超过单体炸药。为了研究方便，常把它分类。然而到目前为止，炸药界还没有统一的分类标准，以致人们都是根据需要，突出强调某一方面，采用以下几种主要的分类法。

一、按物理状态分类 进行这种分类时，可以分别考虑原料与炸药产品两个方面。

A. 根据原料的状态分：

氧化剂(状态)+可燃剂(状态)



实例

- a*: 甲烷+空气;                      *b*: 重油雾+空气;  
*c*: 煤粉+空气;                        *d*: 四氧化二氮+苯或二硫化碳等;  
*e*: 液氧炸药;                          *f*: 铵油炸药;  
*g*: 大多数混合炸药属这种类型。

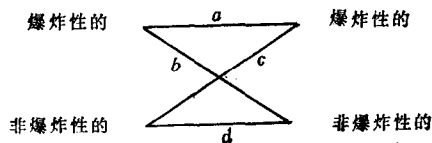
B. 根据炸药产品的状态分：

有固体炸药，液体炸药，气体炸药，塑性炸药以及其它多相体系混合炸药。

在考虑炸药的制备工艺、装填方法、爆轰反应特点、使用条件或可能发生的爆炸危险性时，常用这种分类方法。

二、按原料性能特点分类 一般分为炸药与炸药的混合物（俗称猛炸药混合物），炸药与非炸药的混合物，非炸药与非炸药的混合物三类。当把各组分在混合炸药中是起氧化剂还是可燃剂的作用联系起来时，可用下图表示：

氧化剂(特点)+可燃剂(特点)



- 实例 *a*: 喷托里特（太安+梯恩梯）;  
*b*: 四硝基甲烷+碳氢化合物;  
*c*: 四氧化二氮+硝基化合物;  
*d*: 黑药。

另外，炸药+惰性物质是又一类型，如硅藻土代拿买特（硝化甘油+硅藻土）。

这种分类法在研究混合炸药的爆轰性能、反应机理时特别有意义。

三、按特征成分分类 为了改善炸药性能和使炸药具有某种特性，往往向主体炸药中加入某种组分或添加剂，从而构成区别于其它炸药系列的又一个系列。如含高聚物的粘结炸药；加入铝粉的高威力混合炸药；含水的浆状炸药等。对于由氧化剂和可燃剂（负氧化合物）组成的混合炸药，常把氧化剂作为特征成分，分为硝铵炸药、氯酸盐炸药、高氯酸



盐炸药、液氧炸药等。

这种分类法是实际工作中最常用的一种，因为它既突出了特征成份，也随之突出了主要特性。

四、按性能特点分类 这种分类法突出了炸药的某一性能，以便针对使用要求进行选择。如分为高爆速(或高爆压)炸药，高威力炸药，高强度炸药，耐热炸药，以及各特种炸药。

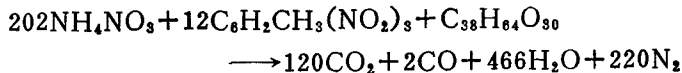
五、按装药方式分类 一般分为压装型炸药，浇铸型炸药，以及在此基础上演变为其它装药方式(如真空吸铸、压铸、振动浇铸)的各种类型的炸药。

由于混合炸药的组成及性能变异性很大，所以除上述分类法外还有其它分法，但各种分类之间都不是严格区别的，更多的则是相互渗透。本书按照习惯，兼顾组成和性能特点，对常用的混合炸药分为硝酸铵炸药、铵油炸药、浆状炸药、熔铸炸药、高聚物粘结炸药、高威力混合炸药及燃料-空气炸药等七类进行论述，并以军用炸药为主。

### 1-3 混合炸药的组成

混合炸药组成中可能涉及到的物质是很多的，这里不可能都加以介绍。但是一般混合炸药，释放能量的爆炸反应都是氧化-还原反应。在这个意义上说，它的组成中通常都有称之为氧化剂的部分与还原剂(可燃剂)的部分，即使是有机炸药的混合物，一般也都含有氧化性元素和可燃性元素。因此从能量的角度出发，可以将混合炸药的组成概括地分为氧化剂、可燃剂以及添加剂来进行讨论。

一、氧化剂 在反应中凡氧化数降低(获得电子或电子向其偏移)的部分就叫做氧化剂。例如7号阿莫尼特组成为硝酸铵/梯恩梯/松树皮粉=81/14/5，爆炸反应方程式为：

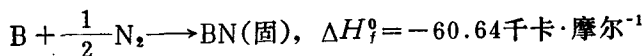
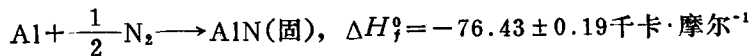
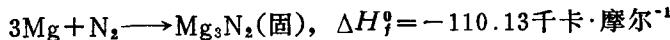


显然其中硝酸铵是氧化剂，其余是可燃剂。若进一步从元素上看，反应中氧的化合价似乎未变，但与氧相连的元素由氮变成了氢和碳，成键电子更靠近氧，因此碳、氢的氧化数升高了，故是可燃剂；氧的氧化数降低了，故是氧化剂。同时，反应中氮原子的氧化数降低，实际上也起到了氧化剂的作用。

在炸药中，氮的氧化作用由下面列举的反应可以看得更为明显：

1. 表 1-2 所示的几种硝酸盐分解反应式表明，氮的确是一种氧化剂，而且能把部分氧的氧化数由-2升高到零。

2. 某些还原性强的元素可以被氮氧化，并放出相当多的热。例如



此外，从表 1-1 的电子亲和能和电负性看，具有相当强氧化能力的元素还有氟和氯，然而单用氯作为氧化剂的效果较差，因为氯的原子量及其化合物的分子量太高，单位重量爆炸混合物的燃烧热低。

表1-1 某些元素的电子亲和能和电负性

元 素	H	Li	Be	Mg	Al	B	C	N	O	F	Cl
电子亲和能 (千卡·摩尔 <sup>-1</sup> )						(-7.6)	(-25.8)	(6.2)	-33.8	-81.0	-84.8
电 负 性	2.1	0.97	1.47	1.23	1.47	2.01	2.50	3.07	3.50	4.10	2.83

由此可见，按照氧化剂发生氧化作用所使用的元素，大致可分为三类，即含氧氧化剂、含氟氧化剂和高氮氧化剂。

#### A. 含氧氧化剂

现在混合炸药中使用的氧化剂基本上都是含氧氧化剂。它们或是单质氧，或是富氧化合物，一般应该满足下列主要要求。

a. 来源广泛，价廉易得，在贮存、运输和制备混合炸药时容易处理，最好在常温常压下为固体，熔点不低于70°C。

b. 有效氧含量尽可能高，且在反应时容易放出。

c. 在释氧反应的同时，能放出大量的热和气体产物，不生成或少生成固体产物。

d. 本身和与其它成分混合后机械感度要小，以便保证安全。

e. 物理、化学安定性好，受环境的影响小。

根据上述要求，可以对各种氧化剂进行评价，满足这些要求的程度愈高愈好。特别是有效氧含量越大，将单位重量的可燃剂完全氧化所需要的氧化剂量就减少，这就为炸药性能的调节留下了较大的余地。

能较好满足或基本满足上述要求的氧化剂为数并不很多，常用的有以下几类：

1. 硝酸盐类，如硝酸铵，硝酸钾；
2. 氯酸盐类，如氯酸钾，氯酸钠；
3. 高氯酸盐类，如高氯酸铵，高氯酸钾；
4. 硝基化合物类，如四硝基甲烷，六硝基乙烷；
5. 单质氧类，如液氧，空气。

某些氧化剂的性质见表1-2<sup>(1)</sup>。

表1-2 氧化剂的性质

氧化剂	分子量	分 解 反 应 式	生成物质量(克·克 <sup>-1</sup> )				气态生成物的体积 (克·厘米 <sup>-3</sup> )		
			氧	氮	其它 气体	固体	氧	氮	其它 气体
硝酸铵	80.04	$2\text{NH}_4\text{NO}_3=4\text{H}_2\text{O}+2\text{N}_2+\text{O}_2$	0.200	0.350	水蒸汽 0.450	0.000	140	280	水蒸汽 560
硝酸钾	101.11	$4\text{KNO}_3=2\text{K}_2\text{O}+2\text{N}_2+5\text{O}_2$	0.396	0.138		0.466	227	110	
硝酸钠	84.99	$4\text{NaNO}_3=2\text{Na}_2\text{O}+2\text{N}_2+5\text{O}_2$	0.471	0.165		0.365	330	132	
硝酸钡	261.35	$2\text{Ba}(\text{NO}_3)_2=2\text{BaO}+2\text{N}_2+5\text{O}_2$	0.306	0.107		0.587	214	86	
氯酸钾	122.55	$2\text{KClO}_3=2\text{KCl}+3\text{O}_2$	0.392			0.608	274		
氯酸钠	106.44	$2\text{NaClO}_3=2\text{NaCl}+3\text{O}_2$							
高氯酸铵	117.49	$4\text{NH}_4\text{ClO}_4=6\text{H}_2\text{O}+4\text{HCl}+2\text{N}_2+5\text{O}_2$	0.341	0.119	水蒸汽 0.230 氯化氢 0.310	0.000	239	95	水蒸汽 286 氯化氢 190
高氯酸钾	138.55	$\text{KClO}_4=\text{KCl}+2\text{O}_2$	0.463			0.537	324		
液 氧	32.00		1.000			0.000	700		

### B. 含氟氧化剂

氟是周期表中氧化能力最强的元素，它甚至可使水分解而放出氧气。但是单质氟的常态为气体（沸点 $-187.98^{\circ}\text{C}$ ），而且毒性很大，难于处理。因此欲在炸药中使用氟，必须将它和其它元素结合成一定的形式。氟和什么元素结合，结合成什么键最有利于保留单质氟的氧化能力，同时这种结合形式在通常条件下又是较易处理的致密的固体，这是氟氧化剂所面临的主要研究课题。

从键能出发，有希望的含氟氧化剂应是含 $\text{N}-\text{F}$ ， $\text{O}-\text{F}$ 和 $\text{Cl}-\text{F}$ 这样一些与氟的电负性接近的元素所组成的化合物。如 $\text{NF}_4^+\text{ClO}_4^-$ ， $\text{NF}_4^+\text{ClF}_4^-$ ， $\text{NF}_4^+\text{NO}_3^-$ ， $\text{CF}_3\text{ONF}_2$ ， $\text{ClF}_3$ ， $\text{ClF}_5$ 等。但这些都还在研究阶段，离实用还有相当距离。

### C. 高氮氧化剂

在碳氢氧氮系混合炸药中，因为爆炸后很少生成氮化物，所以氮实际上存在的氧化作用常常被忽略。但是在含有强还原性元素的系统中，氮的氧化作用就是不可忽视的，甚至是以氮为主要氧化剂。例如硼氮氢系（目前主要是作推进剂）就是以硼或硼氢化合物为可燃剂，以氮（高氮化合物）作氧化剂，反应后生成低分子量的氮化硼和氢，有利于提高作功能力。某些高氮化合物还可以起到增气剂、粘结剂等作用。

二、可燃剂 可燃剂相对于氧化剂来说是还原剂，在氧化还原反应中它将失去电子而使氧化数升高。一般第一电离能越小的元素越易失去第一个电子，因而在氧化还原反应中越活泼。如锂、硼、钠、铝作为还原剂要比碳、氢易于氧化。各种元素的第一电离能若按原子序排列，有周期性的变化（表 1-3<sup>(2)</sup>）。

表1-3 元素的原子第一电离能

原子	符号	原子序	第一电离能 (电子伏特)	原子	符号	原子序	第一电离能 (电子伏特)
氢	H	1	13.54	钠	Na	11	5.12
氦	He	2	24.5	镁	Mg	12	7.61
锂	Li	3	5.36	铝	Al	13	5.96
铍	Be	4	9.23	硅	Si	14	10.36
硼	B	5	8	磷	P	15	10.3
碳	C	6	11.2	硫	S	16	10.31
氮	N	7	12.4	氯	Cl	17	9.95
氧	O	8	13.56	氩	Ar	18	15.7
氟	F	9	20.35	钾	K	19	4.32
氖	Ne	10	21.4	钙	Ca	20	6.50

仅仅考虑反应活泼性还是不够的，最终还要看各种可以作为可燃剂的元素在同氧化剂反应时究竟能释放出多少能量。为此把各元素的燃烧热按原子序展开后有图 1-1 和图 1-2 的结果。

可见各种元素的燃烧热表现为原子序的函数，也具有一定的周期性。图 1-1 是以液氧为氧化剂的曲线。图上不仅排列了各种元素，而且可以排列化合物。化合物的燃烧热一般处于组成它们的元素燃烧热之间，如碳氢化合物处于碳元素与氢元素之间。因此，由碳至氢所组成的带，原则上概括了碳氢氧（氟）系炸药的能量水平。对于混合炸药来说，最有意义的是碳及碳氢化合物。因为它们是自然界最广泛存在而又最易得到的可燃剂。但从能

量的角度看，碳氢化合物及碳不如某些氢化物（如硼烷），而某些元素的单质（如铍、锂、硼、铝）则更为优越。这种分析可以指导人们去合理地选择可燃剂，并导致了现代含金属粉及高能氢化物混合炸药的产生。

以氟作氧化剂时（见图1-2）显示了和以氧作氧化剂时类似的规律。单位质量氢-氟混合物的燃烧热与氢-氧混合物的相接近。但在高温下氟化氢比水更难解离，因此对提高炸药的能量较为有利；氟-碳燃烧热比氧-碳的高。这都说明用氟作为氧化剂的优点。

在以高氯酸盐为组分的混合炸药中，氯也是氧化剂，但可燃剂在氯中的燃烧热比在氟或氧中的低。

当然，以上比较是在单质氧化剂条件下所得到的规律，如果是化合物形式的氧化剂，可能由于同氧、氟相连的原子或基团间相互影响而出现某些出入。

和氧化剂相比，可以作为可燃剂的物质要广泛得多。怎样进行选择，要根据需要与实际可能而定，以保证炸药产品能满足对炸药的一般要求。

三、添加剂 从炸药的定义出发，有氧化剂与可燃剂就可以组成混合炸药了，但从实际

出发，对炸药还有安全性能、混合工艺性能、成型性能、物理化学安定性能、机械性能以及其它性能的要求。而这是仅仅用氧化剂、可燃剂难以全面达到的，因此就得有添加剂。常用的添加剂按它们的功用可分为如下几类。

A. 钝感剂。用以降低炸药的感度（主要是机械感度），使之适合安全性能要求。如钝化黑索今中的蜡类，某些混合炸药中的石墨。

B. 敏化剂。用以提高炸药的起爆感度并使爆轰传播稳定，如岩-2炸药、浆状炸

药中的梯恩梯、细片状铝粉等。

C. 粘结剂。用以粘结各组分，使之均匀分散而不产生离析，制成一定的药粒便于装药，赋予装药一定的物理、机械性能以及其它性能等，如黑药中的硫磺，PBX型炸药中的高聚物，塑性炸药C-4中的聚异丁烯。

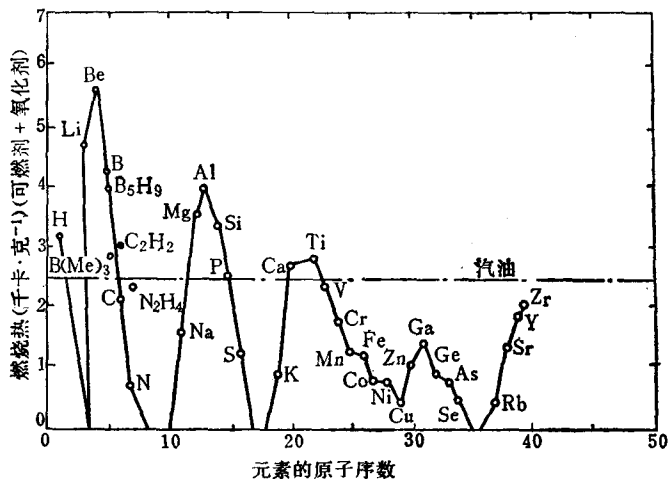


图1-1 以氧为氧化剂时，元素的燃烧热和原子序的关系

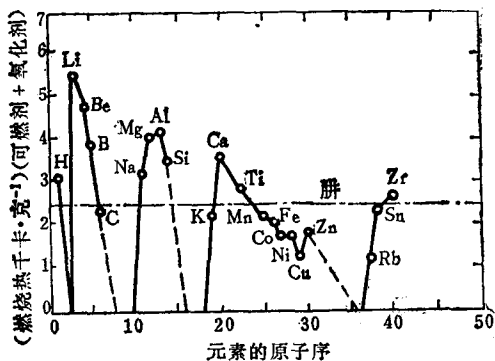


图1-2 以氟为氧化剂时，元素的燃烧热和原子序的关系

D. 增塑剂。用以降低粘结剂的玻璃化温度，增加混合炸药的塑性和柔软性，降低它的脆性和刚性。如C-4中的癸二酸二辛酯、马达油；某些高聚物粘结炸药中的卵磷脂。

E. 其它添加剂。为了改善炸药的某种性能而加入。如对浇铸型混合炸药，为了改善流动性可加表面活性剂（如卵磷脂）；为了防止固相过快的沉降而加入稠化剂硝化棉；对于含铝炸药，为了防止水份侵蚀铝粉而加入吸水剂氯化钙。

如果添加剂本身具有爆炸性或含有硝基，就称为活性添加剂，如活性粘结剂、活性增塑剂、活性钝感剂等。

四、混合炸药的氧平衡 工业混合炸药，特别是在井下和巷道内使用的混合炸药，在配方设计时应考虑其氧平衡。一般以接近零氧平衡为好，以充分发挥各组分的作用和减少有毒气体生成量。而军用混合炸药、特别是含铝炸药，一般就不必如此考虑氧平衡。

## 1-4 混合炸药的性能

混合炸药的性能，一是决定于它的组成，二是决定于它的混制加工工艺，三是决定于能否使它充分发挥作用的使用条件。本书将只着重于前两个问题的讨论，对使用方面在必要时也作一些介绍，而本章只根据使用要求，概述其密度、感度、威力、猛度和安定性。

### 1-4-1 密度

密度是混合炸药一个很重要的性质，因为它和机械、爆炸等其它性能有密切的关系。

一、理论密度<sup>(8)</sup> 理论密度只取决于组成该混合炸药的各原料的密度，其值等于各组分体积百分数乘以各自密度的加权平均值，即

$$\rho_{\text{TMD}}^{\bullet} = \frac{\sum m_i}{\sum (m_i/\rho_i)} = \frac{\sum (V_i \rho_i)}{\sum V_i} \quad (1-1)$$

与之有关的辅助参数表达式有：

$$v_i = \frac{100V_i}{\sum V_i} = \frac{100m_i/\rho_i}{\sum (m_i/\rho_i)}$$

$$w_i = \frac{100V_i \rho_i}{\sum (V_i \rho_i)} = \frac{100m_i}{\sum m_i}$$

$$v_{\text{空}} = [1 - (\rho_0/\rho_{\text{TMD}})] \times 100\%$$

式中  $\rho_{\text{TMD}}$ ——理论密度(克·厘米<sup>-3</sup>)；

$m$ ——质量(克)；

$V$ ——体积(厘米<sup>3</sup>)；

$v$ ——体积百分数(%)；

$w$ ——质量百分数(%)；

$V_{\text{空}}$ ——空隙率(%)；

$\rho$ ——密度(克·厘米<sup>-3</sup>)；

$\rho_0$ ——混合炸药实际密度(克·厘米<sup>-3</sup>)；

脚注  $i$ ——组分。

● 为Theoretical Maximum Density的缩写。

例如已知某混合炸药的

$$\rho_{TMD} = 1.83 (\text{克} \cdot \text{厘米}^{-3})$$

$$\rho_0 = 1.61 \sim 1.69 (\text{克} \cdot \text{厘米}^{-3})$$

$$\text{则 } V_{\text{空}} = \left[ 1 - \frac{\rho_0}{\rho_{TMD}} \right] \times 100\% = 12.2 \sim 7.8\%$$

混合炸药的理论密度是理论上可能达到的最大装药密度。实际上所能得到的装药密度，不论是铸装还是压装，都小于理论密度。

二、实际密度 炸药的实际密度及密度分布，除决定于各组分的理论密度外，还和加工条件有关。这主要有固体组分的粒度及粒度分布，颗粒形状，表面情况，装药压力，装药温度，附加物的作用以及其它措施。

例如对铸装型炸药，熔融组分在冷却凝固过程中，晶核形成和晶体长大的速度应有适当的控制。细而均匀的结晶时可获较大密度；若为粗大结晶时只能达到较小的密度。固体组分的颗粒近于球形、表面光滑、粒度及其级配合理，加入表面活性剂，以至采用真空浇注，加压或振动凝固措施，都有利于提高密度。象组成为黑索今/梯恩梯=65/35的混合炸药，用普通法浇铸时密度为 1.658 克·厘米<sup>-3</sup>，用振动浇铸时密度为 1.689 克·厘米<sup>-3</sup>，而用真空振动浇铸法时密度可达 1.730 克·厘米<sup>-3</sup>。

对于压装型炸药，密度和装药条件有关。首先是压应力（或比压），在一定的压应力作用下，炸药的可塑性、流动性就起决定性作用，而这是受炸药的温度、药粒情况、附加剂等控制的。如 A-Ⅸ-I 和 A-Ⅸ-I● 炸药密度随压力的变化情况见表 1-4。

表 1-4 炸药密度和压力的关系(室温)

压应力 (千克·厘米 <sup>-2</sup> )	500	900	1300	1700	2000	2300
A-Ⅸ-I 密度 (克·厘米 <sup>-3</sup> )	1.5967	1.6432	1.6656	1.6776	1.6811	1.6828
A-Ⅸ-I● 密度 (克·厘米 <sup>-3</sup> )	1.6206	1.6650	1.7372	1.7594	(压力1900) 1.7723	1.7816

可见密度随压应力增大而增加，最后分别趋近于它们的理论密度 1.7224 和 1.8500 克·厘米<sup>-3</sup>。

组成为黑索今/三硝基乙基-N-硝基甲胺/氟橡胶=77/22/1 的混合炸药，在 800 和 1500 千克·厘米<sup>-2</sup> 的压应力作用下，密度随温度的变化情况如表 1-5 所示<sup>[4]</sup>。

表 1-5 压药密度和温度的关系

密度(克·厘米 <sup>-3</sup> ) 压应力(千克·厘米 <sup>-2</sup> )	温度(℃)				
	70	75	77	79	80
800	1.7702	1.7786	1.7845	1.7860	1.7868
1500	1.7825	1.7848	1.7864	1.7871	1.7873

● A-Ⅸ-I 的组成为黑索今/混合蜡=95/5；A-Ⅸ-I 的组成为 A-Ⅸ-I/铝粉=80/20。



对于某些工业炸药（如浆状炸药）或特种炸药（如泡沫炸药），常可以通过向炸药内引入气体的办法来降低密度。

一种混合炸药装药，在知道它的理论密度和实际密度后，既可以判断装药的质量，也可以对此炸药的成型性能进行评价，例如人们常用  $\rho_0/\rho_{TMD}$  比值来标志压装型炸药的可压性。

### 1-4-2 混合炸药爆轰反应的特点

凝聚炸药的爆轰反应依炸药的化学组成和物理结构不同而可能是整体反应机理、表面反应机理或混合反应机理。因为现在实际应用的绝大多数混合炸药，或者是氧化剂与可燃剂、富氧成分与缺氧成分的混合物；或者是猛炸药混合物、主体炸药与少量添加剂的混合物，都是非均质的。所以它们的爆轰反应属于表面反应机理、混合反应机理或这两种机理共同作用的结果。

对于表面反应机理的炸药，热点形成后高速化学反应首先沿颗粒表面进行，而后向深部迅速扩展，反应的引发和进行速度要受药粒表面积的控制。

对于混合反应机理的炸药，由于某些组分难于以固态直接进行化学反应，故一般都需通过易分解成分首先分解，生成气体，然后渗透或扩散到尚未开始反应的组分颗粒表面引起相互间反应；或者各组分以各自不同的速度单独进行分解，然后分解产物之间通过扩散而相互接触，继续反应至完全。显然这样的反应过程要受各组分粒度、混合均匀度和药体密度等多种因素影响。组分粒度大、混合不均匀时，不利于各组分及其分解产物之间的接触；药体密度大、各组分之间空隙小时，也不利于扩散混合。它们都会导致爆轰反应速度降低，甚至中途熄灭。

爆轰反应作为一种特殊的化学反应，其速度除受上述机理所规定的传质因素影响外，同样也受到动力学因素（如温度、压力等）的影响。总的反应速度究竟是受传质因素控制还是受动力学因素控制依不同的炸药而定。就一般的凝聚炸药而言，于爆轰的高温高压条件下，化学反应大约在  $10^{-8} \sim 10^{-8}$  秒内可以完成。但单体炸药反应较快，制成混合炸药后反应就要变慢。芬格（Finger）<sup>[6]</sup> 等研究了各种类型混合炸药的反应时间，给出的几种典型混合炸药爆轰模型如图 1-3 所示。

可见单一的奥克托今在 0.1 微秒内就可以完全反应，而奥克托今 + 维通反应时间就要多于 0.1 微秒，再加入高氯酸盐和铝粉后需要 100 多微秒才能完全反应，硝酸铵-铝-水系统的浆状炸药，反应时间竟长达 100 毫秒。

反应时间延长，意味着爆轰反应区长度加大。反应区愈长的爆轰波，在传播过程中愈易受到径向

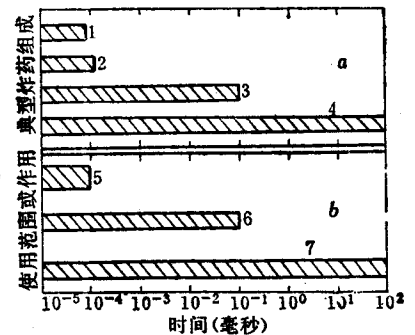


图1-3 典型炸药反应时间的近似变化情况

a—进行化学反应的近似时间；b—可以应用的最长化学反应时间；1—炸药组成为奥克托今（HMX）；2—炸药组成为LX-04（即HMX/维通●=85/15）；3—炸药组成为HMX + ClO<sub>4</sub><sup>-</sup> + Al + 维通；4—炸药组成为NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> + Al + H<sub>2</sub>O + O<sub>2</sub>；5—对爆速可以作出贡献的反应时间；6—可起到金属加速作用的反应时间；7—对形成水下冲量、测热能量、空气冲击波和形成炸坑有效的反应时间。

● 即Viton，为一种氟橡胶。

膨胀波的干扰, 能量损失增加, 使支持爆轰波传播的能量减少, 爆速降低, 甚至中途熄灭。只有当装药直径很大, 或装药有不传热、不变形的刚性外壳时才可以避免径向膨胀波的干扰。因此许多混合炸药, 特别是所谓氧化-还原型的属于非理想爆轰的混合炸药, 爆速受装药直径和约束条件的强烈影响, 装药的临界直径与极限直径都较大。当装药密度一定, 直径大于临界直径而小于极限直径时有如下关系<sup>(6)</sup>:

$$D = D_{\max} \left( 1 - \frac{a}{d} \right)$$

式中  $D$ ——实际爆速;

$D_{\max}$ ——该密度下的最大爆速;

$d$ ——装药直径;

$a$ ——常数。

此式表明了一定密度的装药爆速随直径增大而提高。

关于常数  $a$ , 它和炸药的性质及装药密度有关, 可以反映径向膨胀波造成的能量损失对爆速的影响。伊瑞因 (Eyring) 等人<sup>(6)</sup>曾用不同的流体动力学模型试图把  $a$  同反应区长度联系起来, 并得出了  $a$  等于反应区长度的近似结论。但反应区长度问题又是相当复杂的, 现在在理论计算与实验测定上都还没有一个公认的标准, 以致不同的作者往往得出相差一倍至十倍的结果<sup>(7)</sup>。

由图 1-3 知道, 不同组成和结构的混合炸药, 有不同的反应机理、反应时间与反应区长度, 因而有不同的爆炸作用效果, 适应于不同的用途。这是在研制和使用混合炸药时予以注意的。

### 1-4-3 感度

感度不仅关系到炸药处理、使用时的安全性, 而且关系到作用的确实可靠性, 在一定程度上决定了一个炸药的应用范围。现有的单体炸药中, 大量的由于感度较高不能直接使用、或只能在很窄的范围内使用, 特别现已成为憾事的现象是能量愈高者感度也愈高。与之相反, 适于大量生产和使用, 价廉易得的工业炸药感度又太低。因此调整感度, 使之符合使用要求, 是混合炸药的重要任务之一。

一、感度的分类 体现炸药感度的使用安全性和起爆作用的确实性往往是有矛盾的, 一般起爆作用确实性好的炸药处理时安全性较小, 而处理十分安全的炸药起爆又不易确实可靠。但是也有以下两种与之不同的情况。例如疋田强<sup>(8)</sup>指出, 近年来美国和加拿大都认为研制 2 号雷管能够直接起爆的浆状炸药是可能的, 然而这种浆状炸药对于摩擦、撞击、火焰的感度和用 8 号雷管也不能起爆的浆状炸药是差不多的。相反<sup>(9)</sup>, 在干燥的纯硝酸铵中混入约 3% 极细的二氧化硅所组成的混合物, 用 10 公斤落锤 90 厘米落高, 爆炸百分数为 48% (同样条件下梯恩梯为 8~12%), 对撞击如此敏感的炸药, 在普通条件下用雷管都不能起爆, 即低于梯恩梯的作用确实性。与之类似, 梯恩梯油/木质素=66/34 的混合炸药在标准落锤仪上试验, 爆炸百分数为 80%, 即与黑索今相当, 但它在敞开的条件下用 8 号雷管也不能起爆。这种情况说明, 仅仅用一种感度的概念和一种测定、表示感度的方法是不全面的, 甚至易造成误解。

为了合理解决炸药的感度问题, 从炸药本身的性能上能把使用安全性和作用确实性最

终统一起来, 库克 (Cook)<sup>[10]</sup> 提出把感度区分为实用感度和危险感度两类。前者表示炸药使用时爆轰的难易, 后者则表示在制造、运输、贮存和使用中的危险程度。这是炸药感度的两个不同的概念, 因而测试与表示方法也就不同。一般说来检验实用感度可通过包括超音速的刺激因素, 如起爆感度试验, 冲击波或殉爆感度试验等; 检验危险感度可通过包括亚音速的刺激因素, 如机械撞击、摩擦、火焰感度试验以及热安定性试验等。

和库克的意见相似, 疋田强提出了安定度、第一种感度和第二种感度的概念。安定度是指炸药抵抗缓慢分解、进而是否引起自燃的能力; 第一种感度是指炸药因热、摩擦和撞击而引起燃烧、爆炸的性能; 第二种感度则是指炸药因类似雷管那样强烈的冲击而直接引起爆轰的性能。他用这种方法比较了某些混合炸药的感度特点, 结果见表 1-6。

表1-6 某些工业炸药的各种感度比较

炸药种类	比较结果			感度		
	安定度	第一种感度	第二种感度			
代那买特类	差	大	大			
硝酸铵炸药类	好	中	中			
铵油炸药类	好	中或小	小			
浆状炸药类	中等或好	小	中或大			

研制混合炸药时, 应设法降低其危险感度, 保持和提高实用感度, 使实用感度/危险感度的比值最大。这不仅需要的, 而且也是可能的, 其途径就是要了解感度原理, 把握影响因素, 合理加以应用。

二、炸药的钝感 对炸药进行钝感处理, 使之能满足安全性能的要求, 这是研制混合炸药时经常遇到的课题。不言而喻, 这里所论的感度是指危险感度或第一种感度, 因此必须用与之相适应的测试方法和评定标准。

#### A. 钝感机理

根据鲍登 (Bowden) 的热点理论, 引起炸药的爆炸要经历一个热点的形成与热点的传播过程, 假若能阻止这个过程的一个环节或全部环节的进行, 爆炸就不会发生, 即炸药被钝感了。现代对炸药进行钝感处理的研究, 大多是基于这种理论展开的。

鲍埃司 (Bowers)<sup>[11]</sup> 等人通过对黑索今进行钝感处理的系统研究, 提出了吸热-填充钝感理论。他们认为, 钝感剂降低炸药感度的实质在于从热点吸收足够的热量, 从而阻止了自加速反应, 同时液态的钝感剂可以填充于固体炸药的空隙之间, 因此减少了作为热点主要热源的气泡数目。这样, 钝感剂的物理状态及其它性质必将显著影响钝感效力。

作者们是以炸药的撞击感度作为检测感度变化的标准。撞击感度试验仪落锤重 2.5 公斤, 对黑索今进行试验的结果是爆炸百分数为 50% 的落高 (特性落高) 为 25 厘米。而当黑索今含 10% 不同性质的固体钝感剂时所对应的落高如表 1-7 所示。

实验数据表明, 钝感剂的钝感作用与其比热容有相同的变化趋势。Superia 蜡具有最大的比热容, 因而钝感效果最好。石墨可以减小黑索今颗粒之间的摩擦, 但并不能降低感度。石墨、硫磺粉和 Mylar 不能钝感黑索今的原因, 可能是由于它们的比热容小于黑索