

特种能源技术与工程卓越工程师系列教材

# 火工品技术

## Huogongpin Jishu

叶迎华 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

014037578

TJ45  
05

特种能源技术与工程卓越工程师系列教材

# 火工品技术

## Huogongpin Jishu



叶迎华 编著

国防工业出版社



北航

C1725621

TJ 45  
05

## 内 容 简 介

本书是2007年北京理工大学出版社出版发行的普通高等教育“十一五”国家级规划教材《火工品技术》的修订本。全书共分12章,对军民用火工品结构、工艺及其应用进行了系统的介绍。第1章绪论介绍了火工品的基本知识、分类及技术要求;第2章~第11章分别介绍了用于引信点火/传火序列、起爆/传爆序列的火工品,发射弹丸用火工品,导弹用火工品,索类火工品,以及工程雷管的设计思想、基本要求和影响产品质量的主要因素;第12章介绍了火工品的最新发展及现状。

全书内容安排合理,深入浅出,注重理论联系实际,内容丰富翔实。适合作为特种能源技术与工程、兵器安全技术、武器系统运用工程等专业的本科生教材,亦可用作相关学科或专业的本科生和研究生的教材或参考书,对从事研究、生产、使用火工品的工程技术人员亦有参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

火工品技术/叶迎华编著. —北京:国防工业出版社,  
2014.3

特种能源技术与工程卓越工程师系列教材  
ISBN 978-7-118-09309-4

I. ①火… II. ①叶… III. ①火工品—高等学校—教材 IV. ①TJ45

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 037838 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 13¼ 字数 312 千字

2014年3月第1版第1次印刷 印数1—3000册 定价29.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

# 目 录

2007年,北京理工大学出版社出版发行了普通高等教育“十一五”国家级规划教材《火工品技术》,该教材五年多来一直被国内设置特种能源技术与工程专业的高校选作专业课教材,得到广大读者的认可。

目前,“卓越工程师教育培养计划”的实施,对高校人才培养模式提出了新的要求,在宽基础的同时强化培养学生的工程能力和创新能力。为了适应这一新的培养目标,创新高校与行业企业联合培养人才的机制,提升学生的工程实践能力、创新能力和国际竞争力,构建布局合理、结构优化、类型多样、主动适应经济社会发展需要的,具有中国特色的社会主义现代高等工程教育体系,加快我国向工程教育强国迈进,《火工品技术》率先修订部分内容,以适应培养模式的改变。修订的主要内容在于:丰富了火工品结构与工艺相关内容,补充了近年来国内外在火工品技术领域所取得的一些最新研究成果,使全书内容安排更合理,深入浅出,注重理论联系实际,内容丰富翔实。本教材适合作为特种能源技术与工程专业的本科生教材,亦可用作相关学科或专业研究生的教材或参考书,对从事研究、生产、使用火工品的工程技术人员亦有参考价值。

由于编著者水平有限,难免有不妥或疏漏,恳请各位读者指正。

编 著 者

2013年10月

# 目 录

言 前

第1章 绪论 .....	1
1.1 火工品的发展史 .....	1
1.2 火工品的用途 .....	2
1.2.1 军用火工品 .....	2
1.2.2 民用火工品 .....	3
1.3 火工品中药剂的化学反应形式 .....	3
1.4 常用的火工药剂 .....	4
1.5 火工品的特点、分类和技术要求 .....	7
1.5.1 火工品的特点 .....	7
1.5.2 火工品的分类和命名 .....	7
1.5.3 对火工品的技术要求 .....	9
思考题 .....	10
参考文献 .....	10
第2章 火帽 .....	11
2.1 概述 .....	11
2.2 针刺火帽 .....	11
2.2.1 针刺火帽应满足的技术要求 .....	12
2.2.2 针刺火帽结构 .....	13
2.2.3 针刺火帽的发火机理 .....	14
2.2.4 影响火帽感度的因素 .....	15
2.2.5 影响火帽点火能力的因素 .....	17
2.3 撞击火帽 .....	19
2.3.1 撞击火帽的作用和一般要求 .....	19
2.3.2 撞击火帽的结构 .....	19

2.3.3	撞击火帽的发火机理 .....	20
2.3.4	撞击火帽设计中的几个问题 .....	20
2.4	火帽的装压药工艺 .....	22
2.4.1	火帽装配工艺流程 .....	22
2.4.2	重要工序介绍 .....	22
2.5	火帽的检验 .....	23
	思考题 .....	26
	参考文献 .....	26
<b>第3章</b>	<b>延期药和延期元件 .....</b>	<b>28</b>
3.1	概述 .....	28
3.2	有气体延期药——黑火药 .....	29
3.2.1	成分及主要性能 .....	29
3.2.2	黑火药的用途 .....	29
3.2.3	影响黑火药燃速的因素 .....	30
3.3	微气体延期药 .....	31
3.3.1	延期药的原材料选择 .....	31
3.3.2	延期药的组成 .....	33
3.3.3	微气体延期药燃烧机理及影响燃速的因素 .....	34
3.3.4	设计和研制延期药应该注意的问题 .....	38
3.3.5	延期药的储存安定性问题 .....	39
3.3.6	常见延期药简介 .....	40
3.4	延期元件简介 .....	43
3.4.1	保险药柱 .....	43
3.4.2	短延期药柱 .....	43
3.4.3	时间药盘 .....	44
	思考题 .....	44
	参考文献 .....	44
<b>第4章</b>	<b>炮弹雷管 .....</b>	<b>46</b>
4.1	概述 .....	46
4.2	对炮弹雷管的战术技术要求 .....	46
4.3	炮弹雷管的结构 .....	48
4.4	雷管爆炸过程和输出特性分析 .....	49
4.4.1	雷管爆炸过程分析 .....	49
4.4.2	雷管的起爆能力分析 .....	50
4.5	炮弹雷管的设计 .....	50

4.5.1	雷管装药设计和选择	51
4.5.2	雷管壳和加强帽的设计与选择	58
4.6	雷管装配工艺介绍	60
4.6.1	生产工艺流程	60
4.6.2	质量分析	62
4.7	雷管检验	62
	思考题	68
	参考文献	68
<b>第5章</b>	<b>引信用电雷管</b>	<b>70</b>
5.1	概述	70
5.2	灼热式电雷管	72
5.2.1	灼热式电雷管典型结构举例及其发火特性参数	72
5.2.2	桥丝式电雷管发火过程原理	73
5.2.3	影响桥丝式电雷管性能的因素	74
5.3	火花式电雷管	76
5.3.1	LD-1 火花式电雷管的构造	77
5.3.2	压电晶体与压电效应	78
5.3.3	火花式电雷管发火原理	79
5.3.4	影响火花式电雷管性能的主要因素	81
5.4	导电药式电雷管	83
5.4.1	典型导电药式电雷管构造的举例	83
5.4.2	设计思想依据及发火原理	84
5.4.3	影响导电药式电雷管性能的因素	85
5.5	涂膜式电雷管	85
5.5.1	典型结构简介	85
5.5.2	发火过程分析	85
5.5.3	影响涂膜式电雷管性能的因素	86
5.6	电雷管的安全问题	88
5.6.1	静电作用时的安全问题	89
5.6.2	感应电流作用时的安全问题	91
5.6.3	杂散电流作用时的安全问题	91
5.6.4	射频作用时的安全问题	91
5.7	其他形式的电雷管	95
5.7.1	金属薄膜式电雷管	95
5.7.2	爆炸桥丝电雷管	97

5.7.3 爆燃转爆轰雷管 .....	99
思考题 .....	101
参考文献 .....	101
<b>第6章 传爆药和导引传爆药 .....</b>	<b>102</b>
6.1 概述 .....	102
6.2 传爆药的战术技术要求 .....	103
6.3 导引传爆药 .....	104
6.3.1 导引传爆药的结构 .....	104
6.3.2 装药密度的确定 .....	105
6.3.3 导引传爆药的直径和长度 .....	106
6.3.4 导引传爆药的药量问题 .....	106
6.4 传爆药 .....	106
6.4.1 炸药的性质 .....	106
6.4.2 药量和形状 .....	107
6.4.3 传爆药的位置 .....	108
6.4.4 传爆药与主装药间的介质 .....	108
6.4.5 传爆管的外壳 .....	109
6.5 传爆序列设计内容与要求简介 .....	110
思考题 .....	110
参考文献 .....	111
<b>第7章 底火 .....</b>	<b>112</b>
7.1 底火的作用和一般要求 .....	112
7.2 撞击底火 .....	113
7.2.1 枪弹底火 .....	113
7.2.2 小口径炮弹底火 .....	115
7.2.3 中大口径炮弹底火 .....	118
7.2.4 迫击炮弹底火 .....	119
7.2.5 影响底火感度和点火能力的因素 .....	120
7.2.6 底火击发条件介绍 .....	120
7.3 电底火 .....	122
7.3.1 对电底火的要求 .....	122
7.3.2 灼热桥丝式电底火 .....	122
7.4 底火强度校验 .....	124
7.4.1 底火螺纹强度检验 .....	124
7.4.2 底火底部强度校验 .....	125



7.5	底火装配工艺及检验 .....	126
7.5.1	底火装配工艺 .....	126
7.5.2	底火检验 .....	127
7.5.3	底火生产中常见质量问题分析 .....	127
	思考题 .....	128
	参考文献 .....	128
<b>第8章</b>	<b>点火具 .....</b>	<b>129</b>
8.1	概述 .....	129
8.2	电点火具 .....	129
8.2.1	电点火具的结构 .....	129
8.2.2	电点火具的作用过程 .....	130
8.2.3	关于电点火具发火头的讨论 .....	130
8.2.4	典型电点火具介绍 .....	133
8.3	惯性点火具 .....	136
8.4	辐射式延期点火具 .....	138
8.5	点火具设计中的几个问题 .....	139
8.5.1	点火药的选择 .....	139
8.5.2	关于电引火头的讨论 .....	141
	思考题 .....	142
	参考文献 .....	142
<b>第9章</b>	<b>索类火工品 .....</b>	<b>143</b>
9.1	导火索 .....	143
9.1.1	概述 .....	143
9.1.2	导火索的结构 .....	144
9.1.3	导火索的燃速 .....	144
9.1.4	导火索的制造工艺和药芯检验 .....	146
9.1.5	导火索的检验 .....	148
9.2	导爆索 .....	148
9.2.1	概述 .....	148
9.2.2	导爆索的结构和制造工艺简介 .....	149
9.2.3	影响柔性导爆索性能的主要因素 .....	149
9.3	导爆管 .....	150
9.3.1	概述 .....	150
9.3.2	导爆管的结构和制造 .....	150
9.3.3	影响质量的因素 .....	151

思考题	152
参考文献	152
<b>第10章 工程雷管</b>	<b>153</b>
10.1 概述	153
10.1.1 雷管发展史	153
10.1.2 工程雷管分类	153
10.1.3 技术要求	154
10.1.4 工程雷管的结构	154
10.2 火雷管	155
10.2.1 工程火雷管各部分的作用及其对性能的影响	155
10.2.2 火雷管的生产工艺	157
10.2.3 火雷管检验	158
10.2.4 火雷管的质量问题	158
10.3 电雷管	159
10.3.1 电雷管的分类	159
10.3.2 电雷管的电引火头	159
10.3.3 工程电雷管的装配工艺	160
10.3.4 工程爆破电雷管的质量问题	161
10.3.5 电雷管的检验	162
10.3.6 电雷管延期精度控制	163
10.3.7 电雷管的成群起爆	164
思考题	165
<b>第11章 导弹火工品</b>	<b>166</b>
11.1 导弹火工品的用途	166
11.1.1 点火系统	168
11.1.2 控制系统	168
11.1.3 级间分离系统	169
11.1.4 自毁系统	170
11.2 典型导弹火工品简介	171
11.2.1 点火火工品	171
11.2.2 起爆火工品	173
11.2.3 做功火工品	175
11.2.4 其他	177
11.3 导弹火工品的安全性问题	177
11.3.1 关于“双防”问题	177

11.3.2	关于可靠性问题	178
	思考题	180
	参考文献	180
<b>第12章</b>	<b>先进火工技术</b>	<b>181</b>
12.1	概述	181
12.2	半导体桥火工品技术	181
12.2.1	SCB火工品的作用机理	181
12.2.2	半导体桥的结构和制造工艺	182
12.2.3	SCB火工品应用举例	183
12.2.4	SCB火工品的发展趋势	185
12.3	激光点火与起爆技术	185
12.3.1	激光点火/起爆机理	185
12.3.2	药剂的激光感度	187
12.3.3	激光点火系统	188
12.3.4	激光起爆系统	190
12.4	爆炸网络技术	191
12.4.1	爆轰波拐角现象	192
12.4.2	爆炸逻辑元件和网络	192
12.5	直列式起爆技术	195
12.5.1	冲击片雷管	195
12.5.2	影响冲击片雷管性能的主要因素	198
12.6	MEMS火工技术	198
12.6.1	MEMS火工技术概念	198
12.6.2	MEMS火工技术应用实例	199
12.6.3	MEMS火工品制造工艺简介	199
	思考题	200
	参考文献	200

# 第1章

## 绪论

火工品是一类小型较敏感装有火炸药的爆炸元件,它能在外界不大的某种形式能量(机械、热或电能)的激发下,发生燃烧、爆炸等化学反应,并用其所释放的能量获得某种化学物理效应或机械效应,如点燃火药、起爆炸药或作为某种特定的动力能源等。

### 1.1 火工品的发展史

使用武器弹药必须解决点火与起爆的问题。古代的武器是以黑火药作装药的,并用火绳和燧石来引火。18世纪末,加瓦特研制成功雷汞,有了雷汞才有了真正意义上的火工品。1807年,苏格兰人福沙依特用氯酸钾、硫和碳制成混合击发药,随后又出现了雷汞、氯酸钾、硫化锑等混合击发药。1817年,英国人采用铜孟装击发药,这就是最初的火帽。火帽的应用使武器得到了极大的改善,从此出现了用撞针击发火帽而发火射击的武器。同年,美国引入第一个火帽式枪械,1932年成为美国军队的装备。它不仅使用方便,而且显著地提高了射击速度,促进了武器的发展。19世纪末将火帽和点火药(黑火药)组成一个元件,用作火炮中发射药的点火,这一组件即为撞击底火,更换了19世纪前半叶火炮发射药点火的摩擦式传火管,提高了火炮的发射速度。

19世纪60年代,人们又发现在雷汞的作用下,代拿买特(Dynamite)能非常猛烈地爆炸,产生爆轰现象,因而出现了用雷汞装填的雷管。19世纪末、20世纪初又相继研制成功叠氮化铅、四氮烯、三硝基间苯二酚铅等起爆药。1907年,德国人L. 维列里发明了装叠氮化铅的雷管,代替了雷汞雷管。雷管的发明和爆轰现象的发现是炸药应用史上的一个转折点。在雷管的作用下,许多猛炸药都能引起正常的爆轰,这就开拓了猛炸药在工程技术中,特别是在弹药中广泛应用的可能性,因而提高了武器的威力。

19世纪初,法国人徐洛首先发明了用电流使火药发火,制成了电火工品。1830年,美国人取得了火花式电火工品的专利,在纽约港的爆破工程中首次使用了电火工品,20世纪初开始应用于美国海军炮。电火工品的出现,大大提高了武器射击速度和引信的瞬发度,促进了武器系统和爆破技术的不断更新和发展。

1831年,英国人W.毕克福发明了导火索,它是我国古代信管的进一步发展。1908年,法国最先研制出金属导爆索,当时药芯为梯恩梯。发展到20世纪60年代,药芯装药已经有泰安、黑索金、奥克托今、特屈儿、六硝基芪等,外壳材料有棉线、纸条、塑料、化纤、合成橡胶、铅铋合金和银等。20世纪70年代,瑞典发明了塑料导爆管。

第二次世界大战期间,火箭弹、反坦克破甲弹、原子弹等新型弹药的出现和发展,促进了火工品的发展。在此期间,美、英等国研制出了硅—铅丹延期药,后又相继研制出多种微气体延期药。第二次世界大战后,随着科学技术的发展,出现了导弹及其他空间飞行器。导弹的出现使武器的打击力量产生了一个飞跃。它在现代战争中表现出极重要的作用。因为火工品具有许多独特的优点(高能量密度、高可靠性、尺寸小和瞬时释放能量大等),故在导弹武器及其他空间飞行器中得到了广泛的应用。它不仅用于点火和起爆元件,还广泛作为完成特殊作用的动力元件,这就使得火工品的应用领域更为扩大。这里的火工品包括点火器、起爆器、解除保险装置、分离装置、释放装置、弹射装置、切割装置、延期装置、爆炸开关、驱动器、燃气发生器等。美国在1969年发射的阿波罗宇宙飞船上有218个火工品,航天飞机上火工品多达500多个。

20世纪以来,科学技术的发展推动了火工品的发展,20世纪60年代出现了用激光作为能源的激光起爆器,70年代出现了半导体桥雷管、微电子雷管、动力源火工品等。70年代后期美、法、苏联等国相继研究了爆炸逻辑网络和直列式起爆技术等。

综上所述,火工品伴随着兵器的出现而出现,也随着火炸药、武器弹药及民用烟火技术的发展而发展。

## 1.2 火工品的用途

火工品首先在弹药中得到应用,弹丸的发射和爆炸要以火工品为先导。科学技术的进步,拓宽了火工品的应用领域。可以说,凡是以含能材料为能源的武器系统均离不开火工品。越是高新技术武器,其中火工品的种类和数量越多。火工品不仅广泛应用于军事武器系统中,而且在民用方面的应用也越来越广,以下分别从军民两方面来叙述火工品的用途。

### 1.2.1 军用火工品

火工品在军用上主要组成武器弹药的点火传火序列和引爆传爆序列。序列一般是通过一系列感度由高到低、威力由小到大的火工品组成的激发系统。它能将较小的初始冲能加以转换、放大或减弱,并控制一定的时间,最后形成一个合适的输出,适时可靠地引发弹丸装药。现以一枚57mm榴弹的发射过程为例说明。

炮弹上膛发射时,首先是撞针撞击底火,底火发火点燃发射药,发射药燃烧产生高温气体,具有很高的压力,把弹丸推出炮膛。当弹丸到达目标(飞机)时,引信中的火工品组成的引爆系统起作用,适时可靠地引爆弹丸中的猛炸药,其中引信的延期机构保证弹丸进入飞机内部一定距离爆炸。如果弹丸没有碰上目标,则要自动销毁。

由这发弹的作用过程来看,弹丸的发射要底火先起作用,弹丸中炸药的爆炸要引信先起作用,底火是火工品,引信中装有火工品,这样火工品就是最先作用的元件。现在来看看底火和引信中的火工品是怎样作用的。

### 1. 从弹丸的发射过程看底火的作用

底火是由撞击火帽和点火药构成的组合体。该组合体构成了一个点火序列,它的作用是能量转换和放大。当撞针撞击底火底部时,底火底部变形,导致火帽发火,机械能经火帽转换成火焰形式的能量,并经底火中的点火药加强放大,然后点燃发射药,推出弹丸。

### 2. 从弹丸的爆炸看引信中火工品的作用

火工品在引信中组成传爆序列,根据弹的要求不同,传爆序列的长短和内容也不同。

榴-2引信用于57mm的榴弹中。这是一种全保险型的引信,针刺雷管装在转动盘座内,平时击针和雷管不对准,只有解除保险后击针和雷管才对准。在保险解除后,弹丸碰击目标,击针刺入雷管,雷管引爆传爆药,传爆药再引爆主装药,这是主传爆序列。如果要求弹丸进入目标内部一定距离再爆炸,则在主传爆序列中还有延期元件。另有一辅传爆序列,构成自炸机构,供弹丸没有碰上目标时自动销毁用。即在发射时,由于惯性作用,侧向击针引燃小火帽,火帽点燃延期药,延期药引燃药盘雷管,再引爆传爆药和主装药。

由上述例子可以看出,火工品在弹药中主要是组成弹丸的点火、延期、传火序列和引爆、传爆序列。除此之外,在其他军事技术中,还可用于切割、分离、气体发生、瞬时热量供给、遥测和遥控开关闭合、座舱弹射等多种做功装置中。

总之,火工品在武器系统中的主要功能包括:

- (1) 组成点火、延期、传火序列,保证武器的发射、运载等系统安全可靠运行。
- (2) 组成引爆、传爆序列,保证战斗部安全可靠作用,实现对敌目标的毁伤。
- (3) 作为动力源,完成武器系统的推、拉、切割、分离、抛撒和姿态控制等。

## 1.2.2 民用火工品

火工品在民用工业上也得到了广泛的应用。首先是用于工程爆破作业中,如开山采石、水利施工、修路筑坝及建筑物拆除等,凡是用到引爆炸药的地方都离不开雷管。其次,火工品也广泛用作动力源器件,如射钉弹用于安装工程,射孔弹用于冶金炼钢,导爆索用于截断大型钢管,爆炸焊接用于修补高压电线,麻醉枪弹用于狩猎等。另外,在爆炸合成金刚石、沙漠沉杆、航空救生、汽车安全气囊等方面,火工品也起到了越来越重要的作用。总之,要求一次、快速、大威力的做功动作,采用火工品是非常简便的,其应用还将不断得到开发。

## 1.3 火工品中药剂的化学反应形式

火工品在引信、弹药中广泛作为传火序列与传爆序列的点火传火元件、引爆传爆元件和延期元件。毫无疑问,火工品完成各种作用的能源,来自其所装填药剂在爆炸变化时所释放出的能量。此外,火工品作用的可靠性、使用的安全性等与其中药剂所发生的爆炸变化的特性有着密切的关系。因此,要了解火工品就必须对炸药爆炸变化的化学物理过程以及各类炸药的特性有一个基本的认识。

药剂的爆炸变化按其传播速度和特性的不同分为热分解、燃烧和爆轰。药剂整体加热时发生分解反应,若环境温度较低,热分解反应进行得比较缓慢,其热分解只消耗微量的反应物,良好的热传递条件使热分解产生的热量全部传递到周围环境,热量不能积累,热分解反应能稳定缓慢地进行下去,不会自行加快;随着环境温度上升,热分解的热量不能全部传递到环境,使系

统得热大于失热,出现热量的积累,温度上升,放热反应的速率随温度升高呈指数增加,释放更多的热量,系统内积累更多的热量,温度进一步上升,如此循环,直至热自燃或热爆炸。药剂的燃烧或爆炸往往在某一局部的物质先吸收能量而形成活化中心(或反应中心),活化分子具有比普通分子平均动能更多的活化能,在一般条件下是不稳定的,容易与其他物质分子进行反应而生成新的活化中心,形成一系列连锁反应,使燃烧得以持续进行。由于燃烧速度受外界条件的影响,特别是受环境压力的影响较大,当传播速度大于物质的声速时,燃烧就转为爆轰。所以,药剂化学变化的三种形式在性质上虽然存在质的差别,但它们之间却有着紧密的内在联系,缓慢的化学分解在一定条件下可以转为燃烧,燃烧在一定条件下又可转变为爆轰。一般而言,对于起爆药及猛炸药,其化学反应速度极快,爆轰成长期短,其表现形式主要是由不稳定爆轰转为稳定爆轰。各类火工器件利用了炸药的燃烧和爆轰这两种形式的爆炸变化来完成特定任务。

把火工品中所装填的药剂统称为炸药。炸药的燃烧(有时亦称爆燃)不同于一般燃料的燃烧,炸药本身含有氧与可燃成分,因此,其燃烧不需借助空气中的氧气便可进行。炸药的燃烧是一种激烈的物理化学变化过程,这种变化沿炸药表面法线方向上传播的速度通称为燃烧速度或燃速。通常燃速为  $1\text{mm} \cdot \text{s}^{-1} \sim 10\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,最大能达  $9 \times 10^2 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这种燃速受外界的影响,特别是压力的影响很大,随外界压力的升高而显著地增加。燃烧反应在大气中进行得比较缓慢,没有声响效应,而在有限制的容器中进行就快得多,压力上升迅速,并且伴随声响效应,通常利用这种反应来做抛射功。

爆轰是一种比燃烧更为剧烈的物理化学变化,它是一种以爆轰波的形式沿炸药装药高速自行传播的现象。爆轰波简单而言就是炸药进行爆炸变化时的带有高速化学反应区的冲击波。爆轰过程的传播速度(即爆速)通常从数千米每秒至  $10\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其传播速度受外界的影响极小。爆轰还有稳定爆轰和非稳定爆轰之分。一般情况下所指的爆轰多为稳定爆轰,炸药达到稳定爆轰时,其传播速度是不变的,而非稳定爆轰的传播速度是变化的,有时把非稳定爆轰称为爆炸。炸药的非稳定爆轰在传播过程中可能增强转为稳定爆轰,也可能被减弱转为燃烧甚至熄灭。

燃烧和爆轰是两种性质不同的爆炸变化过程,这两种形式不同的爆炸变化在一定条件之下又是可以转化的。归纳起来它们之间的主要区别在于:

(1) 过程传播的机理不同。燃烧时传递能量的形式是通过热的传导、辐射及燃烧产物扩散作用来进行的,而爆轰则是通过爆轰波来传递的。

(2) 过程传播的速度不同。燃烧速度一般为  $10^2 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下,而爆轰过程的速度一般为  $2 \sim 8\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(3) 受外界的影响程度不同。燃烧过程受外界特别是压力的影响较大,而爆轰过程不受外界的影响。稳定的爆速是炸药的特征示性数。

(4) 产物质点运动的方向不同。燃烧时其产物质点运动的方向与燃烧面运动的方向相反,因此燃烧面内的压力较低,而爆轰时其产物质点运动的方向与爆轰波传播的方向相同,爆轰波内反应区的压力可达  $10\text{GPa}$ 。

## 1.4 常用的火工药剂

火工药剂的品种很多,根据其组成、物理化学性质和爆炸性质的不同,可以有不同的分类方

法,但人们最关心的是按用途来分类。按用途的不同,可以分为起爆药、猛炸药、火药、延期药、点火药、针刺药、击发药等。

### 1. 起爆药

起爆药是最敏感的一种,受外界较小能量的作用就能发生爆炸变化,而且在很短的时间内其变化速度可增至最大(即爆轰成长期短),但是它的威力较小,在许多情况下不能单独使用,只是用来作为火帽、雷管装药的一个组分,以引燃火药或引爆猛炸药。

常用的起爆药有雷汞( $\text{Hg}(\text{ONC})_2$ ) (已被淘汰)、叠氮化铅( $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ )、三硝基间苯二酚铅( $\text{C}_6\text{H}(\text{NO}_2)_3\text{O}_2\text{Pb}$ )、四氮烯( $\text{C}_2\text{H}_8\text{ON}_{10}$ )、二硝基重氮酚( $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_2\text{N}_2\text{O}$ ),以及这些药为主所组成的共沉淀药剂、硝酸胥镍、GTG等。

叠氮化铅因工艺条件不同,有两种白色晶型:短柱状的 $\alpha$ 型结晶和长针状的 $\beta$ 型结晶。 $\beta$ 型结晶很敏感,不稳定,制造时应避免生成这种针状结晶。 $\alpha$ 型叠氮化铅的密度为 $4.71\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,假密度为 $0.8\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,耐压性好,无“压死”现象。它不吸湿,也不溶于水。能与稀硝酸或溶有少量亚硝酸钠的稀醋酸作用,可以利用这一特性来洗涤粘有叠氮化铅的器皿,以避免发生危险。叠氮化铅与镍、铝不起作用,但能与铜作用,尤其在含有水分及二氧化碳存在的情况下,反应生成机械感度更大的碱式叠氮化铜,容易发生危险。叠氮化铅的化学安定性好,即使在 $50^\circ\text{C}$ 下长期加热也不会改变性质。它的针刺感度和火焰感度均较小,而起爆能力较大,被广泛用于雷管及火帽中。

三硝基间苯二酚铅又称为斯蒂芬酸铅,真密度为 $3.8\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,假密度为 $0.99\sim 1.0\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,呈深黄色。因流散性不好,常用沥青造粒后使用。为了克服它静电感度大的缺点,常用石墨斯蒂芬酸铅来减小静电积累。斯蒂芬酸铅的吸湿性很小,不溶于水和酒精等一般有机溶剂,可被稀硫酸或硝酸分解,利用这一性质可以销毁少量废药。它与金属不起作用,化学安定性好,加热至 $100^\circ\text{C}$ 时失去结晶水但不分解,可长期储存。它的冲击感度比较低,和其他起爆药相比,它摩擦积累静电的能力强,并且火花感度和火焰感度均较大,但是起爆能力弱,因此不能单独作为雷管中的起爆药使用。

四氮烯又称特屈拉辛,它是淡黄色粉末结晶,真密度为 $1.65\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,假密度为 $0.45\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,在受压 $49.5\text{MPa}$ 时容易“压死”。四氮烯不吸湿,不溶于水及一般有机溶剂,不与金属作用,在一般储存条件下安定,加热到 $50^\circ\text{C}$ 时开始分解,在 $60^\circ\text{C}$ 以上的水中则强烈分解。可利用这一性质来销毁少量的废药。它的摩擦感度与火焰感度均较小,而针刺感度和冲击感度较大,因此在针刺雷管中用作针刺药组分的敏感剂,它的起爆能力弱,不能单独作起爆药用。

二硝基重氮酚又称为DDNP,主要在工程雷管中应用得较多。

硝酸胥镍和GTG是新研发的起爆药,显著优点是环保。

### 2. 猛炸药

猛炸药典型的爆炸变化形式是爆轰,常用作各种弹药的主装药、传爆药及雷管和导爆索的装药。猛炸药感度较低,它需要较大的外界能量作用才能激起爆炸变化,一般用起爆药来起爆。

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[ $\text{CH}_2\text{N}-\text{NO}_2$ ]、泰安( $\text{C}_5\text{H}_8(\text{ONO}_2)_4$ )、奥克托今( $\text{CH}_2\text{N}-\text{NO}_2$ )等单质炸药及以黑索金和奥克托今为主体的混合炸药。

梯恩梯为淡黄色的结晶物,工业生产的是鳞片状产品。阳光照射下会逐渐变成褐色,这是由于紫外线的作用,发生光学异构化的缘故。梯恩梯的密度为 $1.66\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,假密度为



$0.9\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,熔点为 $80.9^{\circ}\text{C}$ ,在熔化时不分解,热安定性良好,在 $150^{\circ}\text{C}$ 时开始缓慢分解,因此可用熔铸法来装填弹药。它吸湿性小,一般为 $0.05\%$ 。它不与金属起作用,但与碱类反应生成比它更为敏感的物质。梯恩梯主要作为战斗部的主装药使用。

特屈儿为淡黄色结晶物,密度为 $1.78\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,假密度为 $0.9\sim 1.0\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,它的威力比梯恩梯稍大,容易被起爆。但是因为毒性大,价格较高,基本不再使用。

黑索金为白色结晶物,密度为 $1.8\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,假密度为 $0.8\sim 0.9\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,纯黑索金的熔点为 $203^{\circ}\text{C}$ ,熔化时分解。黑索金不吸湿,不溶于水和一般有机溶剂,只有丙酮和浓硝酸对它的溶解情况较好,因此,它们可以作为黑索金重结晶的溶剂。稀硫酸或稀氢氧化钠与黑索金一起较长时间煮沸时可使之水解。可根据这一特性来处理少量废药和清洗生产设备。它与金属不起作用。黑索金具有威力大、起爆感度大、原料广和安定性好等优点,因此它的使用范围较广。单质黑索金可以用作导爆索芯药,钝化黑索金可用作传爆药、雷管中的装药以及各种弹药的爆炸装药,亦可用作传爆药。

泰安是白色结晶,密度为 $1.77\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,假密度为 $1.2\sim 1.3\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,纯泰安的熔点为 $142^{\circ}\text{C}$ ,熔化时开始分解,故不能铸装。但是它能溶解于梯恩梯中,故可将它们做成熔合物使用。泰安不吸湿,也不溶于水、酒精,易溶于丙酮,它不与金属起作用,安定性好。加热到 $170^{\circ}\text{C}$ 时冒黄烟分解。它的机械感度在常用猛炸药中较为敏感,广泛用于导爆索的药芯装药,钝化泰安可用于雷管装药和传爆药。

奥克托今为无色结晶,随着晶型不同密度不同。 $\alpha$ 型结晶的密度为 $1.846\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , $\beta$ 型结晶的密度为 $1.902\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。它不吸湿,能溶于丙酮、浓硝酸等。熔点为 $278^{\circ}\text{C}$ ,在室温下不挥发,热安定性好。它的机械感度在常用猛炸药中最敏感,具有较大的威力。由于它具有爆速高、密度大和高温热安定性好等优点,因此可以用于高威力导弹及火箭弹战斗部、复合推进剂的组分及深井爆破用装药,改性后也可作为传爆药使用。

### 3. 火药

火药典型的爆炸变化形式是燃烧。火药可以在没有外界助燃剂(如氧)的参与下,在相当宽的压力范围内保持有规律的燃烧,放出大量的气体和热能,对外做抛射功和推送功,因此,火药常用作发射武器的能源,如常用作枪、炮弹的发射药、火箭发动机的推进剂,亦广泛应用于火工品中。常用的火药有黑火药、单基药(以硝化棉为主体的火药)以及双基药(以硝化甘油和硝化棉为主体的火药)。

### 4. 点火药、延期药

点火药、延期药通常是以氧化剂和可燃物为主体的混合药剂。点火药的特点是热感度较高,点火能力较强。主要用作点火、传火类火工品的装药。常用的点火药有CP、BNCP、锆/过氯酸钾、硼/硝酸钾等。延期药一般由火焰点燃后,经过稳定的燃烧来控制作用的时间,以引燃或引爆序列中的下一个火工元件。用于各种延期体包括延期雷管中。为了易于压制成型,常加入少量的黏合剂,有时调整燃速还加入其他附加物。延期药分为有气体延期药(黑火药)和微气体延期药,常用的微延期药有钨系、硼系、锆系等。

### 5. 针刺药、击发药

针刺药、击发药主要由起爆药、氧化剂和可燃剂等混合而成。起爆药作为感度调节剂。用于针刺火帽和针刺雷管中。