

A large, bright explosion with a central yellow-white core and a surrounding red-orange cloud, set against a black background with scattered red sparks.

Explosives and
Charging Design

高能炸药 与装药设计

■ 崔庆忠 刘德润 徐军培 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

高能炸药与装药设计

崔庆忠 刘德润 徐军培 编著



国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书在简述高能炸药设计理论的基础上,从工程应用的角度,阐述了脂肪族硝基化合物、芳香族硝基化合物、硝胺及硝酸酯等单体炸药的主要性能;详细阐述了军用混合炸药的分类、特性、配方设计准则、爆轰参数工程计算方法及其应用安全技术;从装药特点、工艺路线布局及工装设计要素等角度,对压装药、注装药及螺旋装药等3种基本的弹药装药技术进行了系统论述。

本书可作为高等院校含能材料、弹药工程专业本科生及研究生教材,也可供专业研究人员及其他有关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高能炸药与装药设计/崔庆忠,刘德润,徐军培编著.

—北京:国防工业出版社,2016.1

ISBN 978-7-118-10649-7

I. ①高… II. ①崔… ②刘… ③徐… III. ①炸药—研究②炸药装药—设计 IV. ①TJ5

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第314872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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本710×1000 1/16 印张17 字数315千字

2016年1月第1版第1次印刷 印数1—2000册 定价48.00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

PREFACE

“炸药及装药技术是武器装备的核心技术，基于目标力学响应的能量输出结构设计理论是炸药及装药设计的科学基础”。这是我国已故炸药理论及应用专家徐更光院士对炸药及装药技术内涵的科学诠释。

本书是在徐更光院士领导的科研团队讲授的《炸药与装药》、《弹药装药工艺学》及《炸药性质与应用》等内部讲义的基础上，结合近年来国内外的的发展热点，特别是团队近年来的科研成果编制而成的。全书共分 17 章：第 1 章介绍了炸药及装药技术的基本概念，目的是使读者初步了解本领域的基本概念和研究对象；第 2~7 章阐述了单体炸药的概念和性能，重点从工程应用的角度，对芳香族硝基化合物、硝胺、硝酸酯三类常用单体炸药，从物理化学性能、感度性能及爆轰性能等方面进行了系统介绍，使读者掌握单体炸药的特性、优缺点及使用原则等；第 8~13 章阐述了混合炸药的性能、配方设计准则及爆轰参数工程计算方法，使读者能够根据弹药的毁伤特点及工艺条件，设计混合炸药的组成结构，进行性能参数的工程计算等；第 14 章阐述了炸药应用过程的安全技术，使读者掌握炸药应用过程中的有关安全知识和要点；第 15~17 章阐述了三种主要装药方法的原理及设计理论，使读者掌握不同装药技术的工艺布局、工艺参数及工装设计要素等。

本书坚持理论联系实际的原则，立足该领域的成熟理论，通过详实、可信的数据，得到规律性结论及设计要素，使读者在牢固掌握有关知识点的基础上，达到在实际工作中灵活应用的目的。

编著者首先感谢为本书的出版提供试验条件的同仁，正是他们的付出，才使得本书的特点得到充分的发挥；其次感谢编著过程中对本书提出修改意见的学者、前辈，正是由于他们辛勤的工作，才弥补了许多不足；特别感谢为本书编著提供帮助的李瑶瑶、吴兴宇两位研究生，正是由于他们的精益求精，才使得本书能够顺利出版。

由于炸药应用研究领域的飞速发展，再加上编著者学识所限，书中定有不妥之处，恳请读者批评、指正。

编著者

2015 年 9 月 6 日

目 录

CONTENTS

第1章 绪论	1
1.1 爆炸	1
1.2 炸药	2
1.2.1 炸药的定义	2
1.2.2 炸药的化学变化	2
1.2.3 炸药的分类	3
1.2.4 对炸药的基本要求	3
1.3 炸药装药	3
1.3.1 炸药装药发展史	3
1.3.2 炸药装药方法分类	4
1.3.3 对炸药装药的基本要求	5
1.3.4 炸药装药的工艺过程	7
1.3.5 炸药装药的发展趋势	9
第2章 单体炸药概论	11
2.1 单体炸药的分类	11
2.2 炸药的爆炸热化学	12
2.2.1 氧平衡和氧系数	12
2.2.2 炸药的热分解	14
2.2.3 爆炸反应方程式	15
2.2.4 炸药的爆热	17
2.2.5 炸药的爆温	20
2.2.6 炸药的爆容	21
2.3 炸药的感度	21
2.3.1 炸药的热感度	21
2.3.2 炸药的机械感度	22
2.3.3 炸药的爆轰感度	23
2.3.4 冲击波感度	24

2.3.5	炸药的殉爆	25
2.3.6	炸药的枪击感度	26
2.3.7	炸药的静电感度	26
2.3.8	炸药对光的感度	27
2.4	炸药的安定性与相容性	27
2.4.1	炸药的安定性	27
2.4.2	炸药的相容性	27
2.4.3	炸药安定性及相容性的测试方法	28
2.5	炸药的力学性能	28
2.5.1	抗压强度	29
2.5.2	抗拉强度	29
2.5.3	抗剪强度	29
2.5.4	尺寸稳定性	29
2.5.5	影响炸药力学性能的因素	30
2.6	炸药的爆轰参数	30
2.6.1	炸药的爆速	30
2.6.2	炸药的爆压	31
2.6.3	爆轰参数与目标毁伤效应的关系	32
2.7	炸药的做功能力	33
2.8	炸药的猛度	34
2.9	炸药分子结构与性能的关系	34
2.9.1	炸药分子结构与晶体密度的关系	34
2.9.2	炸药分子结构与机械感度的关系	36
2.9.3	炸药分子结构与安定性的关系	37

第3章 脂肪族硝基化合物

3.1	概述	39
3.2	硝基烷类炸药	40
3.2.1	硝基甲烷	40
3.2.2	三硝基甲烷	40
3.2.3	四硝基甲烷	40
3.3	硝基烷合成的炸药	40
3.3.1	N, N-双- (2, 2, 2-三硝基乙基)	40
3.3.2	双- (2, 2-二硝基丙基) 缩甲醛及 双- (2, 2-二硝基丙基) 缩乙醛	41
3.3.3	硝仿炸药	41

第4章 芳香族硝基化合物 44

4.1 概述	44
4.2 制备方法	45
4.3 甲苯的硝基衍生物——三硝基甲苯 (TNT)	46
4.3.1 梯恩梯的物理性质	46
4.3.2 梯恩梯的化学性质	51
4.3.3 梯恩梯的爆炸性能	53
4.3.4 梯恩梯的安全性能	53
4.3.5 梯恩梯的毒性	54
4.4 苯的硝基衍生物	54
4.4.1 二硝基苯	54
4.4.2 三硝基苯	55
4.4.3 三硝基间二甲苯	56
4.5 苯酚的硝基衍生物	56
4.5.1 二硝基苯酚	56
4.5.2 三硝基苯酚	56
4.5.3 苦味酸铵	57
4.6 苯胺的硝基衍生物	58
4.6.1 二氨基三硝基苯	58
4.6.2 三胺基三硝基苯	58
4.7 多环芳烃的硝基衍生物	59
4.8 芳香杂环系炸药	60

第5章 硝胶炸药 61

5.1 概述	61
5.2 黑索今	61
5.2.1 黑索今的物理性质	62
5.2.2 黑索今的化学性质	62
5.2.3 黑索今的爆炸性能	63
5.2.4 黑索今的感度	64
5.2.5 黑索今的热安定性	65
5.2.6 黑索今的毒性	66
5.3 奥克托今	66
5.3.1 物理性质	66
5.3.2 化学性质	67

5.3.3	热安定性	68
5.3.4	机械感度	68
5.3.5	爆炸性质	68
5.4	硝基胍	69
5.4.1	物理性质	69
5.4.2	化学性质	70
5.4.3	热安定性	70
5.4.4	爆炸性能	70
5.5	特屈儿	71
5.5.1	物理性质	71
5.5.2	化学性质	71
5.5.3	机械感度	72
5.5.4	爆炸性质	72
5.5.5	生理毒性	72
5.6	其他高能硝胺炸药	73
5.6.1	二乙醇-N-硝胺-二硝酸酯	73
5.6.2	1-羰基-2,4,6-三-N-硝基三氮杂环己烷	73

第6章 硝酸酯炸药 74

6.1	概述	74
6.2	泰安	75
6.2.1	物理性质	75
6.2.2	化学性质	76
6.2.3	机械感度	77
6.2.4	爆轰感度	77
6.2.5	爆炸性质	78
6.3	硝化甘油	79
6.3.1	物理性质	79
6.3.2	化学性质	80
6.3.3	机械感度	80
6.3.4	爆炸性能	81
6.4	其他硝酸酯炸药	81
6.4.1	硝化乙二醇	81
6.4.2	硝化二乙二醇	82
6.4.3	硝基异丁基甘油三硝酸酯	83
6.4.4	硝化甘露糖醇	84

第7章 其他单体炸药 85

7.1 硝酸盐 85

7.1.1 硝酸铵的甲基取代物 85

7.1.2 硝酸胍 86

7.2 其他盐类炸药 87

7.2.1 氯酸盐 87

7.2.2 高氯酸盐 87

7.2.3 含氟炸药 88

第8章 混合炸药概论 90

8.1 概述 90

8.2 混合炸药的发展 90

8.3 混合炸药的组成和分类 91

8.3.1 混合炸药的组成 91

8.3.2 混合炸药的分类 92

8.4 对混合炸药的基本要求 93

第9章 梯恩梯和其他高能炸药组成的混合炸药 95

9.1 概述 95

9.2 炸药的配方及性能 95

9.2.1 RDX/TNT 混合炸药 96

9.2.2 HMX/TNT 混合炸药 99

9.2.3 PETN/TNT 混合炸药 100

9.2.4 CE/TNT 混合炸药 100

9.2.5 其他 TNT 基熔注混合炸药 100

第10章 高聚物黏结炸药 103

10.1 概述 103

10.2 高聚物黏结炸药的分类与组成 103

10.3 高聚物黏结炸药中的组分及作用 104

10.3.1 主体炸药 104

10.3.2 黏结剂 104

10.3.3 增塑剂 107

10.3.4 钝感剂 109

10.3.5 其他添加组分 111

10.4 高聚物黏结炸药配方设计原则	113
--------------------------	-----

第11章 含铝炸药

115

11.1 概述	115
11.2 高威力含铝炸药的组成	115
11.3 含铝炸药的爆轰机理	116
11.3.1 二次反应理论	116
11.3.2 惰性热稀释理论	117
11.3.3 化学热稀释理论	118
11.4 铝粉含量、粒度及形状对含铝炸药爆轰性能的影响	118
11.4.1 爆速	118
11.4.2 爆压	120
11.4.3 爆热和爆温	120
11.4.4 爆轰产物与爆容	121
11.4.5 对金属的加速能力	122
11.4.6 爆轰反应区	122
11.4.7 威力	123
11.4.8 猛度	124
11.4.9 超压及冲量	124
11.5 其他高能添加剂	125
11.6 含铝炸药配方设计原则	126
11.6.1 主体炸药	126
11.6.2 铝粉	127
11.6.3 高效氧化剂	127
11.6.4 其他添加剂	127

第12章 其他混合炸药

128

12.1 液体混合炸药	128
12.1.1 液体混合炸药的组成	128
12.1.2 液体混合炸药的典型配方	130
12.2 军用代用混合炸药	132
12.2.1 含硝酸铵的代用炸药	132
12.2.2 含硝酸脲的代用炸药	134
12.3 燃料空气炸药	135
12.3.1 燃料	135
12.3.2 其他添加剂	137

12.3.3 关键技术	137
第13章 混合炸药性能参数的计算	139
13.1 原子组成的计算	139
13.2 氧平衡的计算	140
13.2.1 $C_aH_bN_cO_d$ 组成的炸药	140
13.2.2 $C_aH_bN_cO_dF_fAl_g$ 组成的炸药	140
13.3 生成热的计算	141
13.4 密度的计算	141
13.4.1 理论密度	141
13.4.2 相对密度	141
13.4.3 松装密度	142
13.5 爆速的计算	142
13.6 爆压的计算	144
13.6.1 Kamlet 公式	144
13.6.2 C-J 理论简化公式	145
13.6.3 经验计算式	145
13.7 爆热与爆容的计算	145
13.7.1 爆热	145
13.7.2 爆容	146
13.8 爆炸反应方程式	146
13.9 格尼常数	147
13.10 冲量	148
第14章 炸药应用的安全技术	149
14.1 炸药的筛选与混合	149
14.2 炸药的融化与注装	150
14.3 炸药的机械成型	150
14.4 炸药的机械加工	152
14.5 炸药的销毁	153
14.5.1 烧毁法	153
14.5.2 爆炸法	153
第15章 注装法	155
15.1 概述	155
15.1.1 注装法装药对炸药的要求	155

15.1.2	注装法装药技术的分类	156
15.1.3	注装过程介质的变化	156
15.2	熔态炸药的结晶机理	156
15.2.1	自发晶核的形成	157
15.2.2	非自发晶核	162
15.2.3	影响晶核形成的其他因素	164
15.2.4	晶体的生长	165
15.2.5	晶体的生长速度	165
15.2.6	过冷度与晶核、晶体生长速度的关系及对晶体结构的 影响	168
15.3	熔态炸药在弹体中的结晶与凝固	170
15.3.1	熔态炸药结晶过程中粗结晶的形成与预防	170
15.3.2	熔态炸药在凝固过程中缩孔的形成与预防	171
15.3.3	熔态炸药在凝固过程中气孔的产生及预防	174
15.3.4	熔态炸药在凝固过程中底隙的产生及预防	176
15.3.5	注装药柱裂纹的产生和预防	176
15.3.6	熔态炸药冷却凝固时的传热方程	186
15.4	悬浮液混合炸药的注装	191
15.4.1	梯黑悬浮炸药的性质	191
15.4.2	梯黑悬浮炸药注装中的质量控制	197
15.4.3	块注法装药	199
15.5	注装工艺	199
15.5.1	纯熔态梯恩梯的注装工艺	199
15.5.2	悬浮液炸药的注装工艺	200
15.5.3	块注法装药工艺	200
15.5.4	塑态炸药的浇注工艺	200
15.5.5	挤注炸药的装药工艺	201
15.6	提高注装药柱质量的装药方法	201
15.6.1	离心浇注	201
15.6.2	真空装药	201
15.6.3	振动装药	202
15.6.4	压滤法装药	202
15.6.5	静态压力浇注	202
15.6.6	压力浇注法	202
15.6.7	热探针法	202
15.6.8	逐层凝固法	202

15.6.9 低比压顺序凝固装药	203
15.6.10 制型装填法	203
15.7 注装的安全技术	203

第16章 压装法

16.1 概述	204
16.2 炸药的压制过程	205
16.2.1 散粒体的性质	205
16.2.2 散粒体炸药的压紧过程	207
16.2.3 药柱强度	208
16.3 压力与装药密度的关系	210
16.4 温度与装药密度的关系	213
16.5 炸药颗粒分布及粒径对成型密度的影响	213
16.6 药柱密度的分布	213
16.6.1 单向压药时药柱的密度分布	214
16.6.2 双向压药时药柱的密度分布	215
16.7 压药应力的分布	215
16.8 压药模具设计	218
16.8.1 压药过程中模套的径向位移及应力分析	218
16.8.2 退模力的近似计算	220
16.8.3 模套的锥度对退模力的影响	222
16.8.4 模具设计	223
16.9 压装工艺	231
16.9.1 压装工艺过程	231
16.9.2 压药方法	231
16.9.3 压药过程中的保压问题	232
16.10 压装法的安全技术	233

第17章 螺旋装药法

17.1 概述	236
17.2 螺杆	237
17.2.1 螺杆的结构	237
17.2.2 螺杆在工作时炸药的受力分析	238
17.3 螺旋装药法形成的药柱	243
17.3.1 药柱的行形成过程	243
17.3.2 药柱的结构	244

17.3.3 减小药柱径向密度差的途径	246
17.3.4 螺旋装药中易发生的疵病	248
17.3.5 螺杆的设计	252
17.4 螺旋装药工艺	254
17.5 螺旋装药的安全技术	254
参考文献	256

第1章

绪 论

炸药和装药在国民经济建设和国防建设中都有着不可替代的重要地位。从10世纪到19世纪,黑火药一直是各国唯一使用的火炸药,它对世界的科学进步和社会发展起到了巨大的推动作用。

随着科学技术的进步,18世纪后期相继发现了一些新的单体炸药:1771年苦味酸被合成出来,于1885年直接用于炮弹装药;1863年制出了梯恩梯,于1902年用于装填炮弹;1899年合成黑索今,并在第二次世界大战期间发展了一系列以黑索今为基的高能混合炸药;1941年发现了黑索今的同系物奥克托今,使炸药的性能得到进一步的提高。另外,较著名的单体炸药还有特屈儿和泰安等,特别是近年来发展的CL-20炸药,其密度高达 $2.19\text{g}/\text{cm}^3$,爆速比黑索今提高10%,爆压提高约14%。

由于单体炸药的性能不能满足战争的需要,因此在第一次世界大战期间开始广泛使用混合炸药,从而使炸药的种类急剧上升;第二次世界大战以后,炸药工业飞速发展,新型炸药层出不穷;核武器、导弹和其他宇宙飞行器的出现,使炸药的应用领域进一步拓展,品种更加繁多,并且各种性能也大幅度提高,特别是炸药的威力已比黑火药装填炮弹时提高了13倍。

1.1 爆 炸

爆炸是指物质在物理或化学变化中含有的能量,快速地转变为压缩能或动能,并显示出机械破坏的效果。爆炸又分为以下两种。

(1) 物理爆炸:由物理原因引起的爆炸称为物理爆炸,如电、高速的机械运动、热、弹性压缩引起的爆炸均属物理爆炸。

(2) 化学爆炸:由化学变化引起的爆炸,如核反应、化学反应引起的爆炸称为化学爆炸。

爆炸过程分为两个阶段。

(1) 某种形式的内能转化为强烈的物质压缩能。

(2) 物质由压缩态膨胀,释放压缩能,转化为机械功,进而引起邻近的周围介质变形、位移、破坏。

1.2 炸 药

1.2.1 炸药的定义

炸药是一种在一定外界条件下,可以发生高速化学反应同时放出大量热量和生成大量气体的物质。

能够构成化学爆炸的体系很多,如煤粉和空气的混合物,但不是所有的体系都能作为炸药,能够作为炸药的化学体系必须满足以下 3 个条件。

- (1) 反应的放热性,即爆炸时发生的反应必须是放热的。
- (2) 生成大量的气体产物。
- (3) 反应的高速度。

只有同时具备以上 3 个条件的物质才能称为炸药。

炸药的化学组成是氧化剂和可燃剂,在爆炸时,这两种组分在高温、高压下快速燃烧,释放出大量的热量,使反应继续进行,并通过气体产物对外作功。

1.2.2 炸药的化学变化

炸药的能量密度大,其爆炸时所放出的能量是燃料燃烧时放出能量的 130~600 倍。另外炸药做功的功率大,即单位时间放出的热量大,因此具有较强的破坏能力。在外界作用下,炸药可发生 3 种基本的物理化学变化。

(1) 热分解:在外界热和辐射的作用下,会发生缓慢的热分解,在一般环境中,能自动进行。

(2) 燃烧:炸药在热源作用下,会发生燃烧。

(3) 爆轰:炸药爆炸时,反应快速进行,形成高温、高压区,这是炸药化学变化的最高形式。

以上 3 种形式是相互转化的,即在一定条件下,炸药的缓慢分解可以转为燃烧,而燃烧也会在一定条件下转为爆轰,反之也会由爆轰转燃烧,燃烧转变为热分解。

从物质结构上,炸药是相当安定的(如苦味酸长期作为燃料使用;黑索今作为灭鼠药曾获过专利;硝化甘油是治疗冠心病的常用药;有的工业炸药甚至用雷管也起爆不了),但起爆后反应速度很快。这是由于炸药的活化能相当大,因此不易引爆,但炸药分解放热能量也很大,所以只要一个炸药分子活化分解后,其反应热可使周围炸药的 3~5 个分子活化分解,如此循环下去,就会使全部炸药分子反应快速完成。

1.2.3 炸药的分类

按用途不同分类,炸药主要有以下4种。

- (1) 起爆药:易被引发,常用作引爆其他高能炸药。
- (2) 猛炸药:具有较高的做功能量,一般用做爆破器材及常规武器的装药。
- (3) 火药和推进剂:利用燃烧产生的气体做抛掷功,用于运载炮弹及火箭等,易被点燃但不易转为爆轰。
- (4) 烟火剂:用于各种特殊用途,如信号弹、照明弹、烟幕弹的装药等。

按化学结构与组成分类,炸药分为单体炸药和混合炸药。其中,单体炸药主要包括:硝基化合物($-\text{C}-\text{NO}_2$)炸药、硝酸酯($-\text{O}-\text{NO}_2$)炸药、硝胺($-\text{N}-\text{NO}_2$)炸药、氯酸盐及过氯酸盐的衍生物、叠氮化合物炸药($-\text{N}=\text{N}=\text{N}$)、多氮化合物($-\text{N}=\text{N}-$)炸药等。混合炸药包括:含爆炸性组分的混合炸药和不含爆炸性组分的混合炸药等。

1.2.4 对炸药的基本要求

一般来说,炸药应满足如下要求。

- (1) 热安定性好:要求炸药在生产、加工、使用和储存过程的条件下,不改变其物理化学性质。
- (2) 机械感度尽可能低:炸药在生产、加工、运输、使用中受到撞击、摩擦、碾压、挤压等机械作用时尽可能不爆或少爆。
- (3) 爆炸性能好:炸药的爆速、爆压和爆热等符合技术要求。
- (4) 原材料来源丰富,且价格便宜。

1.3 炸药装药

炸药装药技术是研究炸药成型工艺及理论、装药设备、控制产品质量和生产安全的一门科学,炸药装药是生产弹药必不可少的部分,世界各国一般都采用注装、压装和螺旋装药这3种基本装药方法,随着科学技术的发展,炸药装药在工艺、机械化程度和安全操作上都有了很大的进步,使装药质量和生产效率得到显著改善,从而为弹药威力的提高奠定了基础。

1.3.1 炸药装药发展史

公元10世纪时,在中国宋朝时期,黑火药首先被用于军事目的,用它制成火箭、火球和铁火炮,而欧洲直到16世纪下半叶才开始出现装填黑火药的球形火器,比中国晚三百多年。直到18世纪80年代,黑火药一直是唯一的军用炸药和点火药,装药方法采用捣装法,即现在所说的压装法,也是最早出现的装药方法。