

 北京理工大学“十三五”规划教材

# 高能炸药与装药设计

Explosives and Charging Design (The Second Edition)

(第2版)

■ 崔庆忠 刘德润 徐军培 徐洋 编著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

“十三五”规划教材

# 高能炸药与装药设计

(第2版)

崔庆忠 刘德润 徐军培 徐洋 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、工艺参数优化及工装设计要素等方面,对压装药、注装药、螺旋装药等三种基本的弹药装药工艺及其参数设计方法进行了系统阐述;并就无损检测技术在装药密度和缺陷检测中的应用提出了针对性解决方案。

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/崔庆忠等编著.—2版.

—北京:国防工业出版社,2019.1

ISBN 978-7-118-11804-9

I. ①高… II. ①崔… 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(2018)第295876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

新华书店经售

\*

开本 710×1000 1/16 印张 18 $\frac{1}{4}$  字数 347千字

2019年1月第2版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 68.00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

“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。

自本书第一版出版以来，受到了读者的广泛好评，并获得了“第一届教育部兵器类专业教学指导委员会优秀教材”及“第六届兵工高校优秀教材”。但在使用过程中发现，第一版对熔注装药技术的设计及论述存在不足。另外，对装药质量的检测也未在教材中提及。为使体系更加完备，内容更为充实，第二版在保留第一版优点和特色的基础上，结合国内外的发展热点，第二版新增了熔注装药设计和装药质量无损检测技术，使本书的体系更加完备。

全书共分 18 章：第 1 章介绍了炸药及装药技术的基本概念，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、硝酸胺、硝酸酯等三类常用单体炸药，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、设计理论及设计方法，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；第 18 章从数学建模、典型工程应用等角度介绍了无损检测技术在装药密度、装药缺陷检测中的应用，使读者掌握基于工业 CT 技术的装药密度、装药缺陷检测原理及方法。

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，才避免了本书的许多不足；特别感谢为本书编著提供帮助的李瑶瑶、吴兴宇和黄玉平三位研究生，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

2019年1月6日

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
<b>第3章 脂肪族硝基化合物 .....</b>		<b>39</b>
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

<b>第4章 芳香族硝基化合物</b> .....	43
4.1 概述 .....	43
4.2 制备方法 .....	44
4.3 甲苯的硝基衍生物——三硝基甲苯 (TNT) .....	45
4.3.1 梯恩梯的物理性质 .....	45
4.3.2 梯恩梯的化学性质 .....	50
4.3.3 梯恩梯的爆炸性能 .....	52
4.3.4 梯恩梯的安全性 .....	52
4.3.5 梯恩梯的毒性 .....	53
4.4 苯的硝基衍生物 .....	53
4.4.1 二硝基苯 .....	53
4.4.2 三硝基苯 .....	54
4.4.3 三硝基间二甲苯 .....	55
4.5 苯酚的硝基衍生物 .....	55
4.5.1 二硝基苯酚 .....	55
4.5.2 三硝基苯酚 .....	55
4.5.3 苦味酸铵 .....	56
4.6 苯胺的硝基衍生物 .....	57
4.6.1 二氨基三硝基苯 .....	57
4.6.2 三氨基三硝基苯 .....	57
4.7 多环芳烃的硝基衍生物 .....	58
4.8 芳香杂环系炸药 .....	59
<b>第5章 硝胺炸药</b> .....	60
5.1 概述 .....	60
5.2 黑索今 .....	60
5.2.1 黑索今的物理性质 .....	61
5.2.2 黑索今的化学性质 .....	61
5.2.3 黑索今的爆炸性能 .....	62
5.2.4 黑索今的感度 .....	63
5.2.5 黑索今的热安定性 .....	64
5.2.6 黑索今的毒性 .....	65
5.3 奥克托今 .....	65
5.3.1 物理性质 .....	65
5.3.2 化学性质 .....	66

5.3.3	热安定性 .....	67
5.3.4	机械感度 .....	67
5.3.5	爆炸性质 .....	67
5.4	硝基胍 .....	68
5.4.1	物理性质 .....	68
5.4.2	化学性质 .....	69
5.4.3	热安定性 .....	69
5.4.4	爆炸性能 .....	69
5.5	特屈儿 .....	70
5.5.1	物理性质 .....	70
5.5.2	化学性质 .....	70
5.5.3	机械感度 .....	71
5.5.4	爆炸性质 .....	71
5.5.5	生理毒性 .....	71
5.6	其他高能硝胺炸药 .....	72
5.6.1	二乙醇-N-硝胺-二硝酸酯 .....	72
5.6.2	1-羰基-2,4,6-三-N-硝基三氮杂环己烷 .....	72

## 第6章 硝酸酯炸药 .....

6.1	概述 .....	73
6.2	泰安 .....	74
6.2.1	物理性质 .....	74
6.2.2	化学性质 .....	75
6.2.3	机械感度 .....	76
6.2.4	爆轰感度 .....	76
6.2.5	爆炸性质 .....	77
6.3	硝化甘油 .....	78
6.3.1	物理性质 .....	78
6.3.2	化学性质 .....	79
6.3.3	机械感度 .....	79
6.3.4	爆炸性能 .....	80
6.4	其他硝酸酯炸药 .....	80
6.4.1	硝化乙二醇 .....	80
6.4.2	硝化二乙二醇 .....	81
6.4.3	硝基异丁基甘油三硝酸酯 .....	82
6.4.4	硝化甘露糖醇 .....	83

<b>第7章 其他单体炸药</b> .....	84
7.1 硝酸盐 .....	84
7.1.1 硝酸铵的甲基取代物 .....	84
7.1.2 硝酸胍 .....	85
7.2 其他盐类炸药 .....	86
7.2.1 氯酸盐 .....	86
7.2.2 高氯酸盐 .....	86
7.2.3 含氟炸药 .....	87
<b>第8章 混合炸药概论</b> .....	89
8.1 概述 .....	89
8.2 混合炸药的发展 .....	89
8.3 混合炸药的组成和分类 .....	90
8.3.1 混合炸药的组成 .....	90
8.3.2 混合炸药的分类 .....	91
8.4 对混合炸药的基本要求 .....	92
<b>第9章 梯恩梯和其他高能炸药组成的混合炸药</b> .....	94
9.1 概述 .....	94
9.2 炸药的配方及性能 .....	94
9.2.1 RDX/TNT 混合炸药.....	95
9.2.2 HMX/TNT 混合炸药 .....	98
9.2.3 PETN/TNT 混合炸药 .....	98
9.2.4 CE/TNT 混合炸药 .....	99
9.2.5 其他 TNT 基熔注混合炸药 .....	99
<b>第10章 高聚物黏结炸药</b> .....	102
10.1 概述 .....	102
10.2 高聚物黏结炸药的分类与组成 .....	102
10.3 高聚物黏结炸药中的组分及作用 .....	103
10.3.1 主体炸药.....	103
10.3.2 黏结剂.....	103
10.3.3 增塑剂.....	106
10.3.4 钝感剂.....	108
10.3.5 其他添加组分.....	110

10.4	高聚物黏结炸药配方设计原则 .....	112
<b>第11章</b>	<b>含铝炸药</b> .....	<b>114</b>
11.1	概述 .....	114
11.2	高威力含铝炸药的组成 .....	114
11.3	含铝炸药的爆轰机理 .....	115
11.3.1	二次反应理论 .....	115
11.3.2	惰性热稀释理论 .....	116
11.3.3	化学热稀释理论 .....	117
11.4	铝粉含量、粒度及形状对含铝炸药爆轰性能的影响 .....	117
11.4.1	爆速 .....	117
11.4.2	爆压 .....	119
11.4.3	爆热和爆温 .....	119
11.4.4	爆轰产物与爆容 .....	120
11.4.5	对金属的加速能力 .....	121
11.4.6	爆轰反应区 .....	121
11.4.7	威力 .....	122
11.4.8	猛度 .....	123
11.4.9	超压及冲量 .....	123
11.5	其他高能添加剂 .....	124
11.6	含铝炸药配方设计原则 .....	125
11.6.1	主体炸药 .....	125
11.6.2	铝粉 .....	126
11.6.3	高效氧化剂 .....	126
11.6.4	其他添加剂 .....	126
<b>第12章</b>	<b>其他混合炸药</b> .....	<b>127</b>
12.1	液体混合炸药 .....	127
12.1.1	液体混合炸药的组成 .....	127
12.1.2	液体混合炸药的典型配方 .....	129
12.2	军用代用混合炸药 .....	131
12.2.1	含硝酸铵的代用炸药 .....	131
12.2.2	含硝酸脲的代用炸药 .....	133
12.3	燃料空气炸药 .....	134
12.3.1	燃料 .....	134
12.3.2	其他添加剂 .....	136

12.3.3	关键技术	136
<b>第13章</b>	<b>混合炸药性能参数的计算</b>	<b>138</b>
13.1	原子组成的计算	138
13.2	氧平衡的计算	139
13.2.1	$C_aH_bN_cO_d$ 组成的炸药	139
13.2.2	$C_aH_bN_cO_dF_fAl_g$ 组成的炸药	139
13.3	生成热的计算	140
13.4	密度的计算	140
13.4.1	理论密度	140
13.4.2	相对密度	140
13.4.3	松装密度	141
13.5	爆速的计算	141
13.6	爆压的计算	143
13.6.1	Kamlet公式	143
13.6.2	C-J理论简化公式	144
13.6.3	经验计算式	144
13.7	爆热与爆容的计算	144
13.7.1	爆热	144
13.7.2	爆容	145
13.8	爆炸反应方程式	145
13.9	格尼常数	146
13.10	冲量	147
<b>第14章</b>	<b>炸药应用的安全技术</b>	<b>148</b>
14.1	炸药的筛选与混合	148
14.2	炸药的融化与注装	149
14.3	炸药的机械成型	149
14.4	炸药的机械加工	151
14.5	炸药的销毁	152
14.5.1	烧毁法	152
14.5.2	爆炸法	152
<b>第15章</b>	<b>注装法</b>	<b>154</b>
15.1	概述	154
15.1.1	注装法装药对炸药的要求	154

15.1.2	注装法装药技术的分类	155
15.1.3	注装过程介质的变化	155
15.2	熔态炸药的结晶机理	155
15.2.1	自发晶核的形成	156
15.2.2	非自发晶核	161
15.2.3	影响晶核形成的其他因素	163
15.2.4	晶体的生长	164
15.2.5	晶体的生长速度	164
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	167
15.3	熔态炸药在弹体中的结晶与凝固	169
15.3.1	熔态炸药结晶过程中粗结晶的形成与预防	169
15.3.2	熔态炸药在凝固过程中缩孔的形成与预防	170
15.3.3	熔态炸药在凝固过程中气孔的产生及预防	173
15.3.4	熔态炸药在凝固过程中底隙的产生及预防	175
15.3.5	注装药柱裂纹的产生和预防	175
15.3.6	熔态炸药冷却凝固时的传热方程	185
15.4	悬浮液混合炸药的注装	190
15.4.1	梯黑悬浮体炸药的性质	190
15.4.2	梯黑悬浮炸药注装中的质量控制	196
15.4.3	块注法装药	198
15.5	注装工艺	198
15.5.1	纯熔态梯恩梯的注装工艺	198
15.5.2	悬浮液炸药的注装工艺	199
15.5.3	块注法装药工艺	199
15.5.4	塑态炸药的浇注工艺	199
15.5.5	挤压炸药的装药工艺	200
15.6	提高注装药柱质量的装药方法	200
15.6.1	离心浇注	200
15.6.2	真空装药	200
15.6.3	振动装药	201
15.6.4	压滤法装药	201
15.6.5	静态压力浇注	201
15.6.6	压力浇注法	201
15.6.7	热探针法	201
15.6.8	逐层凝固法	201

15.6.9	低比压顺序凝固装药	202
15.6.10	制型装填法	202
15.7	装装的安全技术	202
15.8	注装炸药凝固过程仿真计算	203
15.8.1	熔态炸药基本传热类型	203
15.8.2	热传导控制的微分方程	204
15.8.3	定解条件	205
15.8.4	热传导有限元数值计算方法	206
15.8.5	基本假设	206
15.8.6	缩孔、缩松预测判据	207
15.8.7	模型验证	208
15.8.8	凝固过程优化设计	210
<b>第16章</b>	<b>压装法</b>	<b>213</b>
16.1	概述	213
16.2	炸药的压制过程	214
16.2.1	散粒体的性质	214
16.2.2	散粒体炸药的压紧过程	216
16.2.3	药柱强度	217
16.3	压力与装药密度的关系	219
16.4	温度与装药密度的关系	222
16.5	炸药颗粒分布及粒径对成型密度的影响	222
16.6	药柱密度的分布	222
16.6.1	单向压药时药柱的密度分布	223
16.6.2	双向压药时药柱的密度分布	224
16.7	压药应力的分布	224
16.8	压药模具设计	227
16.8.1	压药过程中模套的径向位移及应力分析	227
16.8.2	退模力的近似计算	229
16.8.3	模套的锥度对退模力的影响	231
16.8.4	模具设计	232
16.9	压装工艺	240
16.9.1	压装工艺过程	240
16.9.2	压药方法	240
16.9.3	压药过程中的保压问题	241
16.10	压装法的安全技术	242

<b>第 17 章 螺旋装药法</b> .....	245
17.1 概述 .....	245
17.2 螺杆 .....	246
17.2.1 螺杆的结构.....	246
17.2.2 螺杆在工作时炸药的受力分析.....	247
17.3 螺旋装药法形成的药柱 .....	252
17.3.1 药柱的形成过程.....	252
17.3.2 药柱的结构.....	253
17.3.3 减小药柱径向密度差的途径.....	255
17.3.4 螺旋装药中易发生的疵病.....	257
17.3.5 螺杆的设计 .....	261
17.4 螺旋装药工艺 .....	263
17.5 螺旋装药的安全技术 .....	263
<b>第 18 章 装药质量无损检测技术</b> .....	265
18.1 工业 CT (ICT) 检测系统 .....	265
18.1.1 射线源系统.....	265
18.1.2 探测器系统.....	266
18.1.3 数据采集系统.....	266
18.1.4 机械扫描系统.....	267
18.1.5 计算机系统.....	267
18.2 性能参数 .....	267
18.2.1 空间分辨率.....	268
18.2.2 密度分辨率.....	269
18.2.3 伪影.....	269
18.3 装药质量检测系统设计 .....	270
18.3.1 射线源选择.....	270
18.3.2 扫描方式选择.....	270
18.3.3 几何尺寸确定.....	271
18.4 装药密度检测 .....	273
18.4.1 模型建立.....	273
18.4.2 模型修正.....	274
18.4.3 试验验证.....	277
18.5 装药底隙检测 .....	278
18.5.1 模型建立.....	278

18.5.2	试验验证	280
18.6	装药孔隙检测	281
18.6.1	模型建立	281
18.6.2	试验验证	282
	<b>参考文献</b>	<b>283</b>

# 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,1885年直接用于炮弹装药;1863年制出了梯恩梯(TNT),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运动能,并显示出机械破坏的效果。爆炸又分为两种:

(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。