



国防科工委“十五”规划教材·化学工程与技术

# 火炸药的安全与环保技术

肖忠良 胡双启 编著  
吴晓青 王晶禹

**北京理工大学出版社**

北京航空航天大学出版社 西北工业大学出版社  
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

## 内容简介

本书是国防科工委“十五”规划教材。全书共分七章,分别是概论、火炸药安全基本原理、火炸药生产过程中的安全性、火炸药产品安全性检测与评估方法、火炸药装药与贮存安全性、火炸药生产过程中的环境保护技术和废旧火炸药处理与再生利用,每章后附有习题和参考文献。本书从火炸药的本质特性出发,根据其分解机理与燃烧爆炸原理分析火炸药在生产、使用、贮存过程中的不安全因素,提出解决不安全性的技术途径,其中许多是最新的国内外研究成果和正在研究发展的新技术。

本书可以作为火炸药专业本科学生、研究生的教科书和参考用书,也可以作为火炸药行业技术人员的技术参考资料。

## 图书在版编目(CIP)数据

火炸药的安全与环保技术/肖忠良等编著. —北京:北京理工大学出版社,2006.1

国防科工委“十五”规划教材. 化学工程与技术

ISBN 7-5640-0490-8

I. 火… II. 肖… III. ①发射药-安全技术-高等学校-教材②炸药-安全技术-高等学校-教材③发射药-环境污染-污染防治-高等学校-教材④炸药-环境污染-污染防治-高等学校-教材 IV. ①TQ56②X789

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第150566号

## 火炸药的安全与环保技术

肖忠良 胡双启 吴晓青 王晶禹 编著

责任编辑 孙金芳

责任校对 张 宏

北京理工大学出版社出版发行

北京市海淀区中关村南大街5号(100081)

电话:010-68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

<http://www.bitpress.com.cn>

E-mail: chiefeditor@bitpress.com.cn

北京圣瑞伦印刷厂印制 各地新华书店经销

开本: 787×960 1/16

印张: 20.75 字数: 421千字

2006年1月第1版 2006年1月第1次印刷

印数: 2500册.

ISBN 7-5640-0490-8 定价: 38.00元

# 国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编委：王 祁 王文生 王泽山 田 蔚 史仪凯

乔少杰 仲顺安 张华祝 张近乐 张耀春

杨志宏 肖锦清 苏秀华 辛玖林 陈光禡

陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祯 金鸿章

贺安之 夏人伟 徐德民 聂 宏 贾宝山

郭黎利 屠森林 崔锐捷 黄文良 葛小春



# 总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当



今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、中北大学、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



# 前 言

火炸药是目前武器主要的也是基本的化学能源,经过数百年的发展与进步,已经形成(火炸药)特种能源科学技术学科与研究领域。研究领域包括有原材料合成、配方设计、产品加工,应用技术等方面。

火炸药的本质特性表明是一种危险品,也可以是危险源,所以在火炸药的生产加工、使用、贮存过程中安全性就显得特别的重要。特别是近年来,火炸药的安全技术逐渐地被人们重视,研究也不断地深入。本书从火炸药的本质特性出发,根据其分解机理与燃烧爆炸原理,分析火炸药在生产、使用、贮存过程中的不安全因素,提出解决不安全性的技术途径,其中许多是最新的国内外研究成果和正在研究发展的新技术。另外,火炸药也属于一类化工产品,在生产加工、使用、贮存过程中对环境也具有重要的影响。因此,本书从一般化工过程出发,考虑到火炸药生产的特殊性,根据环境学与环境保护的基本原理,论述了相关的环境保护技术,除通常的废水、废气处理技术外,特别介绍了废旧火炸药的再生利用技术,这对环境保护具有特殊的意义。

全书共分为七章。第一章概论。主要介绍火炸药的本质特征性与安全的重要性,同时叙述在生产使用贮存过程中与环境的关联性;同时对火炸药的安全与环境保护技术的发展趋势进行分析。第二章火炸药安全性基本原理。将其不安全性归结于能量的意外与瞬时释放。本章主要论述了火炸药能量释放的引发机理与能量释放原理极其特征性,这是火炸药安全技术的理论基础。第三章火炸药生产过程中的安全性。从火炸药生产过程特点出发,分析可能引发不安全的因素与条件;介绍目前的防范措施与技术;同时介绍有关行业的生产安全性标准。第四章火炸药产品安全检测与评估方法。介绍火炸药原材料和产品的安全性检测和评估方法。其中诸多检测方法是近年来国内外研究发展的新技术和正在研究的课题。第五章火炸药装药与贮存安全性。介绍炸药装药的安全性与火炸药贮存过程中的安全性评估方法。第六章火炸药生产过程中的环境保护技术,针对火炸药生产特点,介绍废酸、废水、废气处理技术;对于火炸药合成中硝化过程,特别介绍正在研究应用的“绿色硝化”新技术。第七章废旧火炸药处理与再生利用。

介绍火炸药在贮存、使用中对环境的影响与保护,重点介绍废旧火炸药再生利用新技术。

本书由中北大学肖忠良教授牵头组织与策划,主要由肖忠良、胡双启、吴晓青、王晶禹合作编著,其他参编人员还有曹雄和张树海。其中第一章由肖忠良教授编写;第二章由胡双启教授编写;第三章由王晶禹教授和张树海副教授编写;第四章由王晶禹教授和肖忠良教授编写;第五章由曹雄副教授和张树海副教授编写;第六章及第七章由吴晓青教授编写。

本书涉及化学工程、燃烧爆炸力学、安全学、环境学等多个学科领域,具有综合性和针对性。由于编者水平有限,错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

作 者

# 目 录

第一章 概论	1
1.1 火炸药的基本概念与特性	1
1.2 火炸药安全性概念与界定	2
1.3 火炸药与环境的关联性	4
1.4 火炸药安全与环境保护技术发展趋势	5
第二章 火炸药安全性基本原理	11
2.1 火炸药的不安全因素分析	11
2.2 火炸药的热分解、热安定性与相容性	13
2.3 火炸药的热爆炸理论	46
2.4 火炸药的热分解转燃爆与燃烧转爆轰	70
2.5 冲击波对火炸药不安全引发机理	74
思考与练习题	77
参考文献	78
第三章 火炸药生产过程中的安全性	79
3.1 原材料合成与生产过程中的安全性	79
3.2 火炸药工厂的常规安全性措施	82
3.3 典型安全防护装置	86
思考与练习题	89
参考文献	90
第四章 火炸药产品安全性检测与评估方法	91
4.1 引言	91
4.2 固体火炸药安全性检测方法及其结果	92
4.3 液体发射药的安全性	136
思考与练习题	154
参考文献	155
第五章 火炸药装药与贮存安全性	157
5.1 引言	157
5.2 炸药装药的安全性与评估方法	159
5.3 火炸药贮存中的安全性评估方法	196



思考与练习题	231
参考文献	232
第六章 火炸药生产过程中的环境保护技术	234
6.1 引言	234
6.2 废气处理方法	236
6.3 废水处理方法	260
6.4 绿色硝化技术	285
6.5 副产物的利用与处理方法	289
思考与练习题	291
参考文献	292
第七章 废旧火炸药处理与再生利用	293
7.1 引言	293
7.2 废旧火炸药的处理方法	294
7.3 过期火炸药再生利用技术	298
思考与练习题	303
参考文献	304
附录 火炸药工业污染物排放标准	305
附录 1 火炸药工业硫酸浓缩污染物排放标准	305
附录 2 雷汞工业污染物排放标准	308
附录 3 梯恩梯工业水污染物排放标准	311
附录 4 黑索今工业水污染物排放标准	313
附录 5 二硝基重氮酚工业水污染物排放标准	315
附录 6 叠氮化铅、三硝基间苯二酚铅、D·S 共晶工业水污染物排放标准	318

# 第一章 概 论

## 1.1 火炸药的基本概念与特性

### 一、火炸药的定义

关于火炸药(Propellant and Explosive),人们的认识经过几个阶段的发展,初期——药剂(Medicament);早期——危险的燃烧爆炸物质;近(二三十年)年——含能材料(物质)(Energetic Material);近(几年)期——特殊能源(Special Energy)。

火炸药首先是一种物质,但在本质上它是一种能源,是一种特殊能源。该能源在一定外界和环境条件下,在特殊的封闭体系中(无需其他物质参与)以燃烧或者爆轰的物理化学方式释放能量并实现对外做功。该能源的本质是其组成元素的起始与终点物理化学状态的不同,造成元素的能级状态不同而释放能量,通常为热能。火炸药作为能源的特殊性在于:其组成元素的物理化学变化过程在封闭体系下完成,无需其他物质参与。

火炸药主要应用于武器,可作为武器的发射、推进与毁伤能源,对武器威力起着重要的基础支撑与保证作用,所以火炸药可以称为武器能源,同时还可作为其他方面的热源、气源、信号源等。

### 二、火药与炸药的相关性与本质区别

直到现在,在许多情况下火药与炸药是两个相对独立的概念。在应用形式上,用于身管武器发射和火箭推进者称为火药;用于战斗部装药毁伤者为炸药。火炸药发展到今天,从配方组成、组织结构形态,已经没有大的差别。例如火药中的晶体爆炸物成分已经达到70%以上,同时火药在适当的装填与引爆条件下,完全可以作为炸药使用,所以不能从表观形式上进行火药与炸药的区别。实际上两者之间的本质区别体现在能量释放的方式上。

在外界能量的激发下,火炸药组分发生化学反应,元素进行重排使能级改变,从而产生能量(主要是热能)。火炸药的化学反应有三种:热分解、燃烧与爆轰。热分解为(缓)慢反应,燃烧与爆轰为快速化学反应,其过程可以用化学反应动力学与反应流体动力学予以描述。在反应流体动力学体系下的压力、温度变化,与化学反应的机理、速率直接相关,这是著名的爆炸力学中C-J方程的结果。一种表观的描述为:如果化学反应在某一局部以反应波的形式稳定地进行并传播,反应阵面内的压力不发生突跃变化就是燃烧;如果化学反应在某一局部以冲击波的形式稳定地进行并传播,反应阵面内的压力发生突跃变化就是爆轰。



所以：

——以爆轰的形式释放能量者为炸药；

——以燃烧的形式释放能量者为火药。

在能量释放的时间上,火药在  $10^0 \sim 10^{-3}$  s 数量级,根据使用时燃烧压力环境的不同,可分为发射药和推进剂,前者的燃烧压力在  $10^2$  MPa 数量级,后者为  $10^0$  数量级。炸药的能量释放的时间在  $10^{-6}$  s 数量级。就做功功率而言,炸药是火药的  $10^3$  倍。

## 1.2 火炸药安全性概念与界定

### 一、安全性基本内涵

安全是人们常常提及的词句。在此,需要对“安全”与“安全性”的内涵进行研究与界定。安全,《尔雅·释诂下》:“安,定也。”《诗·小雅·常棣》:“伤乱既平,既安且宁。”《左传·襄公十一年》:“居安思危”。由此可见,安全,是指一种状态,一种按照人们的意志所希望的一种稳定的状态。

安全性是指某种事物,特别是某种物质按照人们的意志所希望的一种稳定的特性。安全性是一种性质,特点。

### 二、火炸药安全性的基本内涵

火炸药是一种能源,同时是一种物质,所以火炸药的安全性是指火炸药在制造加工、贮存、使用等过程中按照人们的意志所希望的稳定特性。

### 三、火炸药安全性的外延界定

火炸药安全性的外延,首先是指火炸药在制造、加工、贮存、使用等过程中的安全特性;第二是与安全性直接或间接关联的性质的具体内容,对于火炸药而言,包括有:热分解特性、爆炸特性、燃烧特性等;第三是在制造、加工、贮存、使用等过程中,由于外界条件作用可能引起的分解、燃烧、爆炸的可能性以及危害性分析和防护措施等。

### 四、火炸药制造、贮存与安全的相关性

火炸药生产过程的基本特征具有易燃易爆性、腐蚀性、毒害性以及生产过程的连续性。这些基本特征确定了火炸药生产过程的每个环节,必须采取特殊的、严格的安全与环保技术措施和管理制度。认识这些特征,照其规律办事,就能够保证安全生产和保护环境。

火炸药最突出的特征是:易热分解、易燃烧、易爆炸、易殉爆和易发生从热分解到爆炸的链式反应,简称易燃易爆性。



### 1. 易热分解

火炸药的成品在常温下是相对安定的化合物或混合物。实际上它们一直在进行着缓慢的热分解反应。由于其反应速度缓慢,加之安定剂及其他因素的抑制,不经检测,一般不易发现。如果环境温度过高,散热不好,阳光照射或其他条件影响,热分解反应生成的热会逐渐积聚,分解产物中的氧化氮成为加快分解的催化剂,分解速度自动加快,直至自燃自爆。1998年夏,某研究所库房中长贮的火药自燃爆炸就是典型的事例。

原材料的热分解。火炸药生产过程的主要原材料硝酸、硫酸、醋酐、甲苯、醇醚溶剂、硝化甘油、硝化棉、高氯酸铵等都是易燃、易爆的物质。如硝酸在常温下即可分解为氮的氧化物和水;硝化棉受热极易分解自燃爆炸。日本自1935年到1966年,至少发生了14次严重的硝化棉自燃爆炸事故,其中1964年7月14日东京一库区2300桶硝化棉自燃爆炸,炸死灭火的消防队员19名。

生产过程中的热分解。如硝化甘油、硝化棉、梯恩梯、硝胺炸药等制造过程中的酯化或硝化、稀释、驱酸、洗涤、中和等单元操作都是放热反应。工艺条件控制不稳,极易发生剧烈的热分解反应,如处理及时得当,则可化险为夷。处理不当,会造成燃烧爆炸和急性中毒事故。

### 2. 易燃烧

任何燃烧必须同时具备三个要素:一定量的可燃物质、与可燃物质比例相当的助燃物质和足够的激发能量。这三个要素的相互作用即可燃烧。多数火炸药成品中已含有丰富的可燃剂和助燃剂——氧元素,所以只要给予足够的激发能量,如环境温度较高、靠近热源、明火点燃以及摩擦、撞击等,即会发生燃烧事故,当其处于绝热状态、密闭容器或大量堆积时,其燃烧往往会转为爆炸。

原材料易燃烧。火炸药生产过程中极易发生燃爆事故。这是因为从原材料一直到成品的多数生产工序,有易燃、可燃物质。火炸药的原材料中,有很多是易挥发、易燃的液体,存在着极大的火灾危险性。火炸药原材料中既有氧化性物质,也有还原性物质。氧化性物质有硝酸及发烟硝酸、硫酸及发烟硫酸、氯及液氯、氧及液氧、无机过氧化物、有机过氧化物(如丁酮、环乙酮、苯甲酰的过氧化物等)、硝酸盐、氯酸盐、高氯酸盐、亚氯酸盐、重铬酸盐等。还原性物质有:硫磺、磷、碳、硫化砷、锑、金属粉(如铝、镁、铁粉等)、苯胺、胺类、醇类、醛类、油脂及其他有机化合物。

生产过程中易发生燃烧。火炸药生产过程中,几乎所有的工序都充满了可燃、易燃的原材料和成品、半成品、副产品、次品、废品、粉尘和气体,极易发生燃烧。

### 3. 易爆炸

成品易爆炸。引发火炸药爆炸主要有三种情形:一是由热分解、燃烧引发爆炸;二是由普通火灾引发燃烧爆炸;三是给予强大激发能量(如雷管、爆轰波、撞击等)后直接引起爆炸。

原材料易爆炸。火炸药生产中需要的原材料,一类是易燃液体,如乙醚、乙醇、甲苯、丙酮等,这类液体极易挥发,其蒸气与空气混合达到一定浓度时,即形成爆炸性混合气体,一遇明火



或高温可发生强烈爆炸。这类液体还极易着火,随之大量液体急剧气化,导致猛烈爆炸。另一类是性质不相容的两种或多种物质违规相混,形成爆炸性混合物,如润滑油接触高压氧气,即成为爆炸性混合物;液氨与液氯接触,可生成爆炸性极为敏感的三氯化氮;硫酸、硝酸等强酸与氯酸盐、高氯酸盐等混合,成为极强的氧化剂,如与有机物接触,即会发生爆炸。

生产过程中易发生爆炸。火炸药生产过程中有时由于工艺条件控制不当、摩擦、撞击、打砸、设备故障等,极易发生燃烧事故或爆炸事故,硝化甘油、起爆药、黑火药等的生产最易引起燃烧或爆炸事故。

#### 4. 易殉爆

火炸药在受到周围一定距离的爆轰波或其他冲击波作用时能够发生爆炸的现象称作殉爆。表征火炸药殉爆特性的是殉爆感度,火炸药的生产工房、库房必须保持一定的安全距离,正是由这一特征决定的。引起殉爆的原因主要有:①主发炸药爆炸的冲击波作用;②主发炸药爆轰产物的直接冲击;③主发炸药爆轰时抛射物体的冲击。

#### 5. 易发生从热分解到爆炸的链式反应

火炸药的热分解、燃烧、爆炸虽然是三种不同形式的化学反应,但只要条件成熟,可以很容易地从缓慢的热分解转变为快速热分解,从快速热分解转变为猛烈燃烧,从猛烈燃烧转变为剧烈爆炸,几乎同时可引起周围一定距离的火炸药殉爆。这种链式反应,在初期尚可采取若干技术措施和管理方法扑救,一旦转化为猛烈燃烧将会不可逆转地高速变化。

### 五、火炸药使用与安全的相关性

火炸药作为能源,在使用时必须经过燃烧或者爆炸过程,未能按照预先设计的程序而进行能量释放均视为不安全。这种现象表现为膛炸。引起膛炸的原因主要有三个方面:第一,发射药或者推进剂的异常燃烧;第二,引信的误作用;第三,过载引起炸药爆炸。

## 1.3 火炸药与环境的关联性

火炸药作为一种特殊能源与环境必然发生关联,主要是在制造、加工、贮存、运输、使用过程中对环境产生直接或间接的影响。首先,火炸药作为易燃、易爆的危险品,对环境产生安全性影响;其次,火炸药作为化学化工产品,在制造加工过程中,对环境产生腐蚀、污染和危害。

#### 1. 腐蚀性

金属与环境中的介质发生化学或电化学反应而引起的破坏称为腐蚀。能产生腐蚀作用的物质称腐蚀剂或腐蚀性物质。火炸药生产过程中存在大量的腐蚀性原材料,因而建筑、设备、仪表等被严重腐蚀,直接威胁安全生产。

火炸药生产离不开腐蚀性物质,如酸、碱、胺、氧化剂等。其中生产单组分炸药和火药的主要原材料,如硝化甘油、硝化棉等的生产,更离不开强酸、强碱及其他腐蚀性较强的物质。火炸



药生产的腐蚀性,不仅加大了基本建设投资(防腐工程),影响产品质量,而且对安全生产带来严重危害,主要是:①强酸、强碱及其他腐蚀性材料与火炸药的成品、半成品、废品、粉尘等接触或残留量过高,就会促使其分解、燃烧和爆炸;②腐蚀产物混入生产过程即变为杂质,有的会成为火炸药分解的催化剂,有些硬性杂质在输送、混合、搅拌、压伸、碾压、挤压、筛选等工艺过程中,成为燃烧、爆炸的起火点。锈蚀产物堵塞管道、阀门、仪表等造成工艺波动,引发事故;③腐蚀厂房、设备、管道、仪表、自控系统等出现故障,不但降低使用寿命,增加保养维护难度、频次和费用,还易造成设备裂纹、断裂、穿孔、渗漏等,故障频繁,精度降低,动作失误,更严重的是这些问题如未被及时发现排除,则可能导致严重事故;④腐蚀性物料泄漏、喷溅、黏涂极易造成化学灼伤事故。

## 2. 排放物对环境的污染

在火炸药加工、制造、生产过程中,不可避免地向环境排放废气、废水和废弃物。在废气中含有一定量的氧化氮( $\text{NO}_x$ )是大气的主要污染源,在废水中含有一定量的硫酸、硝酸、磷酸和其他重金属盐,是土壤、水源污染源。对于废旧过期和废品火炸药的处理,如果采用焚烧的方法,会产生  $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_x$  等废气,对大气产生污染。

# 1.4 火炸药安全与环境保护技术发展趋势

火炸药本身就是一类易燃(烧)易爆(炸)物质,所以,火炸药无论是在生产、使用,还是运输、贮存过程中,安全性成为人们特别关注的问题。同时,火炸药还是一类特殊的化学物质,在生产、使用和贮存过程中,在现在和将来越来越引起人们的关注。

对于火炸药的安全问题,主要从两个方面加以研究解决,第一,组分、配方、弹药装药的安全性;第二,安全的预知与防范。对于火炸药的环境保护问题,主要是火炸药的组分作为化学化工原材料在生产过程中废水、废气的降低与无污染处理。

## 一、不敏感火炸药

自第二次世界大战后,大的战争虽然未打起来,但局部的战争却不断发生,其中尤以 1967 年和 1973 年的阿以战争、1982 年的英阿马岛之战等具有现代化战争特点,为全世界所瞩目。美国从两次阿以战争中得到的一个教训是,贮存于坦克内的弹药对交战情况下坦克的生存能力具有十分严重的威胁。这一事实更使人们认识到弹药易损性问题的重要性,因此很多国家相继开展武器在战场上的生存能力和弹药易损性问题的研究。低易损性弹药(Low Vulnerability Ammunition, LOVA)概念的出现正是这些研究工作的产物。根据美国海军地面武器中心 Max. J. Stosz 对弹药易损性的解释,弹药易损性是弹药中的火炸药由于事故(碰撞)、严酷环境(火灾)或敌方的攻击(冲击波或高速破片)而发生意外反应的敏感程度和所产生爆炸作用的剧烈程度的综合。低易损性弹药即是发生意外反应的敏感度低,一旦发生反应后



所产生爆炸作用的剧烈程度也低的弹药。在这种背景下,随着低易损性弹药概念以及人们对这种弹药的关注和需求,低易损性火炸药概念也应运而生,并逐渐得到广泛的重视。美国、英国、法国和德国等国家都不同程度地从不同的角度和途径进行着研究和探索。尤其是美国,低易损性发射药的研究和发展工作正在有计划地深入进行着。

### 1. 不敏感火炸药的研究概况

美国陆军弹道研究所(BRL)20世纪70年代初开始提出的低易损性弹药(LOVA)设计思想来源于1967年和1973年的中东战争。战争中60%的坦克损坏是因装甲穿透后弹药仓发生爆炸造成的。使用硝化棉为基的单、双、三基药的坦克炮弹药对交战情况下坦克的生存具有十分严重的威胁。于是,研制一种能将上述危害减少至最小程度的新型发射药成了当务之急。

1973年12月,弹道研究所借助小口径武器系统研究所发展无壳弹药的技术提出了低易损性弹药(LOVA)的概念。1974年,制成了一小批含75%奥克托今(HMX)和25%聚氨酯交联聚醚黏合剂的发射药,并在易损性试验中作了评价,证实了低易损性弹药概念的可行性。1975年,LOVA-X1A发射药在37mm火炮试验中获得合格的内弹道特性,并拟按比例扩大到105mm坦克炮上。

1978年,开始执行美国陆军和海军联合发展低易损性弹药的计划。同年夏天,在105mm坦克炮上成功地证明了LOVA-X1A发射药和质量分数为80%黑索今(RDX)、20%环氧固化的端羧基聚丁二烯—丙烯酸——丙烯腈共聚物黏合剂的第二批LOVA发射药的弹道特性。

1979年,美国国防部和能源部又把不敏感火炸药和低易损性发射药的研究计划结合起来,制定了不敏感火炸药的联合研制规划,对这种钝感的新一代含能材料提出了具体要求:①对高速金属破片或空心装药射流穿透导致的引燃具有较低的易损性;②一旦引燃,在低压力条件下燃速较低,从而能使发射药在药筒被穿透的开放状态下灭火。

1981年2月,在陆军研究发展局(现改名为陆军军械弹药和化学局)的赞助下开始了工程研究。此项研究包括三种低易损性发射药的大规模生产和试验等。同年9月,在弹药生存能力联合技术协作组的协调下,开始军种间、军种内LOVA发射药技术的协调和有效合作。

1984年,美国陆军将在优选的三种低易损性发射药中保留一种,以便进行最后鉴定和批准试验,美国海军则开始在5in<sup>①</sup>、54倍口径和76mm火炮系统实施低易损性发射药的弹药发展计划。发展不敏感火炸药计划的第一项任务是加快低易损性发射药的发展,把近期发展工作的重点放在坦克炮低易损性发射药上,今后再考虑用于舰船武器,自行榴弹炮和直升机等方面。美国陆军军械研究发展局弹道研究所的易损性研究表明,装药射流碎片引燃的主要机理是一种热传导点火过程。弄清碎片点火机理对评价发射药易损性的研究是一个重大的突破。它既简化了新配方的试验程序,还可以在对影响发射药易损性的诸多参数做出评价的同时,将研究者的注意力引导到其他成分对热传导点火的影响以及对其他化学机理的理解等重

① 1 in=2.54 cm



要问题上,迄今为止的易损性试验结果已对发展一种可供野战使用的火药应持何种方针等问题提供了一些极有价值的结论。初期的 LOVA 发射药配方是 Thiokol/Watoh 公司为轻武器无壳弹计划(CAP)研制的一组聚氨酯(PU)/奥克托今发射药。继该计划之后,美国陆军弹道研究所“移花接木”,将由无壳弹弹药研制中获得的技术成功地移植到降低弹药易损性研究中,开始了低易损性弹药发射药的研究工作。

目前研究的含能氧化剂重点是奥克托今、黑索今等。现已弄清了黑索今和奥克托今作为含能氧化剂的作用,以及在某些配方中用黑索今取代奥克托今的可能性。因为黑索今虽然热安定性不及奥克托今,但成本比奥克托今的低,所以一些采用混合硝酸氧化剂的配方对降低发射药成本有很大的意义。也就是说,LOVA 发射药能用作任何一种大口徑武器系统弹药的话,就将以 100 t/a 的需求量生产,这就决定它使用的硝酸材料是黑索今,而不是奥克托今。其次,关键是理想的黏合剂可以更多地对热感度高于奥克托今的黑索今进行补偿。近期的研究已确立了选择低易损性发射药用黏合剂的主要标准,这为发展最佳黏合剂创造了条件,也为硝酸复合药的设计、试验及评价提供了极有价值的依据。通常,为获得高能量必须尽可能减少黏合剂含量,但这样做往往使发射药的加工性能和机械性能变坏。黏合剂的研究结果表明,12%~15%的黏合剂用量对内弹道性能是完全可以接受的。硝酸—惰性黏合剂系统的发射药因其较高的点火温度和较低的燃速,能有效地降低由高速破片及火焰点火引起的易损性。低易损性发射药的研究不仅是发展新型钝感发射药的动力,还为发射药传统研究方式的改进,吸收新技术的综合性研究发挥了促进作用。过去,在实验室之外从未对质量分数为 80%的固体炸药材料进行过压伸,既没有测定炮药易损性的方法和标准,又没有对现有材料为何易损性较高的机理做出过权威性论证。如果 LOVA 发射药获得成功,历来关于硝酸炸药不能用于炮药的先入之见便可以消除。易损性评价已成为低易损性发射药研究工作的重要组成部分。评价试验突破了火药传统评价试验的框框,采用模拟和受控的装置让发射药承受实战中空心装药产生的射流或碎片的撞击,以考核这些发射药在战场上的生存能力。一些从运输管理部门吸收而来的试验炮口焰、压力和燃速的再现性、燃烧和烧蚀研究的结果表明,LOVA 发射药的烧蚀较小,如果使用,不会显著影响炮口冲击波和炮口焰。LOVA 发射药的燃烧性能与历来使用的硝酸酯发射药不尽相同,但内弹道特性的评价可按照历来的方法进行。

最初的研究曾发现含硝酸的发射药其燃速-压力特性曲线会出现斜率突变现象。近期的实验研究了硝酸颗粒的大小、粒度分布及生产工艺对 LOVA 发射药斜率突变特性的影响。结果表明,采用 2  $\mu\text{m}$  和 10  $\mu\text{m}$  双级配(63:1)硝酸氧化剂和惰性黏合剂(如聚氨酯系统)组成的 LOVA 发射药不存在这种突变。由于双级配硝酸氧化剂的混合效应,使这类发射药具有线性燃烧特性,为制备性能良好的硝酸-惰性黏合剂发射药开拓了一条有效途径。相对硝酸酯系发射药来说,LOVA 发射药具有低燃速系数和高燃速指数。燃速系数低,说明 LOVA 发射药在低压下燃烧极慢,低压下点火也极慢,有减小压力波的可能性;燃烧指数高,说明可借助适当的药形设计和燃烧层厚度来改善发射药燃烧的渐增性。最近,Law 测定了传导点火后发射药燃



烧的持续时间,发现最能抗传导点火的发射药燃烧也最慢,今后将进一步测定 LOVA 发射药的低压燃烧特性。因为迄今为止的研究都集中在防止破片冲击的点火上,评价 LOVA 发射药二次点火响应和确定影响的参数将是今后的研究课题。近几年的研究表明 LOVA 发射药的特性适合应用于坦克炮弹药。为了调查 LOVA 发射药对带弹壳的弹药具有吸引力的性质是否也适用新的自行榴弹炮等火炮装药,美国陆军弹道研究所已开始 LOVA 火炮发射装药的两相流研究。

迄今为止的研究重点都集中在发射药对付空心装药产生的射流和破片的威胁上,已开始着手研究动能穿甲弹的威胁。目前,正在对按加速发射药研究计划发展的 LOVA 发射药进行工艺合格试验,完善其性能的工作也仍在继续进行。这些工作包括配方的局部变动、点火系统的改变等。如获成功,LOVA 发射药将满足易损性显著下降、能量性能与现用发射药相当的要求。在强调提高命中率和终点弹道性能的同时,必须重视使用不牺牲生存能力且能量更高的发射药。为满足这一需要,高能型 LOVA 发射药正在研制之中,它将有可能获得跟目前坦克炮弹药中任何一种发射药同样高的能量。一些新的技术和材料正在用于 LOVA 发射药的研究,这将给 LOVA 发射药的发展工作带来意外的效果。激光作为一种红外热源正在用于 LOVA 发射药的点火研究,目前正在确立一套利用激光点火试验进行发射药易损性分类的标准。新型的点火药将适用于比较难燃的复合硝酸胺发射药,它将有利的解决低温下出现相对较低的膛压和燃速这一难题。

低易损性发射药是在惰性黏合剂中分散细颗粒的奥克托今或黑索今而成的复合材料。LOVA 计划的主要技术目标之一就是证明硝酸胺材料(奥克托今或黑索今)的选择和黏合剂类型如何影响发射药的性能、易损性和成本。在固体含量水平相近的发射药中,选用不同的黏合剂可以使火药力水平发生 10% 的变化。已经发现,黏合剂在抵抗热金属粒子产生的传导点火中起着关键的作用。使用吸热分解的黏结剂发射药的抗传导点火能力极好。

## 2. 不敏感弹药的研究与发展

近年来,随着火炸药能量的增加,其敏感性也相应地提高。敏感的弹药在运输、贮存和使用中都是很危险的。据统计数据,美国 1966—1990 年内,在海运过程中,由于弹药着火、爆炸引起的人员伤亡和经济损失是巨大的。在阿英战争中,阿根廷用一枚飞鱼 AM-39 空对舰导弹击沉了英国现代化驱逐舰谢菲尔德号;后阿又用飞鱼导弹击沉了英国大型运输舰大西洋运送号。导弹本身的威力有这么大吗?不完全是,因为运载弹药的舰艇实际上是一个弹药库,所以是导弹威力和火炸药殉爆炸沉了军舰。因此,美国海军强调新含能材料发展中降低敏感性是关键问题,开发不敏感弹药是该领域的先进技术。

1978 年美国海军首先声明要发展敏感性小的武器系统,要求在海军舰艇上携带的所有弹药必须是敏感性较低的。之后,美国三军都参与不敏感弹药的研究,设立不敏感弹药先进发展项目,作为近几年含能材料领域内的先进技术。美国国防部制定了不敏感弹药的标准(MIL-STD-2105A)。海军的基本方针是:改进现装备的弹药,到 1995 年选择 15 种弹药使之成为