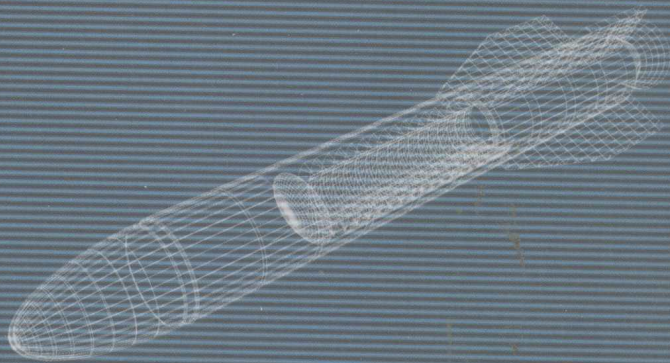


材料科学与工程



含能材料概论

王泽山 编著



哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

西北工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

国防科工委「十五」规划专著

TB34
W456.1



国防科工委“十五”规划专著·材料科学与工程

含能材料概论

王泽山 编著

哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

西北工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书涵盖了火炸药理论、发射药、推进剂、炸药、起爆药和烟火剂等含能材料的主要内容。书中较详细地介绍了含能材料理论和应用方面的基础知识,并较深入地讨论了含能材料发展的理论与新技术。本书的读者对象是从事含能材料的专业技术人员、与军事技术有关的专业技术人员和高等学校含能材料相关专业的本科生和研究生。

图书在版编目(CIP)数据

含能材料概论/王泽山编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2005.12

ISBN 7-5603-2124-0

I. 含… II. 王… III. 功能材料-概论
IV. TB34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 114676 号

含能材料概论

王泽山 编著

责任编辑 黄菊英 孙杰

哈尔滨工业大学出版社出版发行

哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号(150006)

发行部电话:0451-86416203

E-mail:press@0451.com

哈尔滨工业大学印刷厂印刷

开本:850×1168 1/32 印张:8.625 字数:222 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 7-5603-2124-0/TB·54 定价:18.00 元

国防科工委“十五”规划专著编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任:张华祝

副主任:陈一坚 屠森林

编 委:王文生 王泽山 卢伯英 乔少杰

刘建业 张华祝 张近乐 张金麟

杨志宏 杨海成 肖锦清 苏秀华

辛玖林 陈一坚 陈鹏飞 武博祎

侯深渊 凌 球 聂 武 谈和平

屠森林 崔玉祥 崔锐捷 焦清介

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。党的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,为发展国民经济做出了重要贡献。

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,传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研、高技术研究难题和生产当中,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、华北工学院、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,当人类社会跨入 21 世纪的时候,我国进入全面建设小康社会、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

含能材料的性能与武器的性能有密切的关系,它是决定武器先进性的重要因素之一。含能材料应用于武器的压力推进、反作用推进与爆炸做功,使武器的结构简单,具有机动性、突击性和摧毁性。作为武器的能源,含能材料需要进一步发展和提高,以增加武器的发射和毁伤威力,满足武器小型化,实现精确打击的需求。

在民用领域,含能材料继续扩大它的应用范围。在矿业、冶金、建筑、石油等行业,利用含能材料进行机械加工和工程施工;利用含能材料的化学能做推进功;用做气源,应用于激光、电池、宇航和救生等系统;用做热、光、烟的能源,应用于民间娱乐等活动。

我国有一批生产或应用含能材料的工厂和企业,且生产和应用规模较大,集中了一批专业科技工作者,形成了一个较为完整的生产和科学研究体系。另外,我国还有多个高等学校和研究机构设立了含能材料学科,源源不断地输送着专业人才。

近期,含能材料设计理论的研究有所进展,相关应用技术也有重要的创新。

本书就是在这种背景下编写的,旨在总结含能材料的研究成果,供相关科技人员和高校学生学习参考。



本书在绪论中讨论了火炸药与含能材料的内涵。

第一章介绍了含能材料的理论和技术的基础知识,包括爆炸过程的冲击波效应和气体膨胀效应、燃烧转爆轰、爆轰波和冲击波波型、释放能与做功能力,以及含能材料的感度试验和易损性试验。

第二章主要介绍了发射药的组成、基本性能和近期的理论和技术的发展情况。包括发射药的装药和弹道的设计模型、模拟检测技术与发射药的制造方法。重点讨论了发射药基础技术和装药技术的进展,即随行装药、模块装药,利用冲压发动机、升力等增加射程的装药技术等。

第三章主要介绍了现有的液体火箭推进剂、固体火箭推进剂,推进剂的特征信号及不稳定燃烧等几项控制技术。讨论了交联改性双基、用硝酸酯增塑的聚醚聚氨酯推进剂、聚叠氮缩水甘油醚推进剂、低特征信号、不敏感和高燃速等推进剂的发展情况。

第四章所述内容是现在应用的起爆药、猛炸药、炸药装药的有关技术,即炸药的熔铸装药、猛炸药的压制装药、流体静压和等静压压药。讨论了炸药装填可能出现的装药病。本章的另一个内容是有关炸药在爆破、碎甲、聚能弹药中,在线性切割、岩石爆破等方面的应用技术。还介绍了高能量密度化合物、有机叠氮化合物等新型含能化合物的研究进展情况。

第五章是有关烟火剂技术的内容,分别论述了产生



热效应、光辐射效应、气溶胶效应等几种类型的烟火剂和它们的应用技术。

第六章讨论了含能材料的发展趋势,指出含能材料研究的主导方向是提高能量及其利用率,能量问题的实质内容是增加含能材料及其成分的焓值并对成分进行优化组合。提高能量利用率则是解决能量问题重要的和最有效的途径。

本书是从含能材料的角度编写的,因此,既包括含能材料所涵盖的主要内容(炸药理论、发射药、推进剂、炸药、起爆药、烟火剂等),也包括含能材料理论和应用的基础知识,还包括含能材料科技发展的理论与新技术。

本书的读者对象是从事与军事技术有关的专业技术人员、含能材料专业和军工领域有关专业的高等学校在校本科生和研究生。

由于作者能力有限,疏漏和不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编著者
2005年8月

目 录

第 0 章 绪论	1
0.1 火药、炸药与烟火剂的功能	1
0.2 含能材料的内涵	4
0.3 含能材料的研究与应用	5
第一章 火炸药的基础理论	8
1.1 火炸药的基本类型	8
1.2 火炸药爆炸的冲击波效应	10
1.3 火炸药爆炸的气体膨胀效应	30
1.4 火炸药的点火与起爆	35
1.5 火炸药及其装药的安全性试验	47
第二章 发射药	58
2.1 发射药的组成与军事应用	58
2.2 发射药的基本性能	67
2.3 发射药应用的技术基础	72
2.4 发射药的制造方法	76
2.5 发射药基础理论和基础技术的进展	79
2.6 发射药装药技术的进展	101
2.7 发射药污染的治理及其资源化技术	125
第三章 火箭推进剂	134
3.1 火箭推进剂概述	134
3.2 武器对固体推进剂的要求	137
3.3 固体推进剂的分类	139
3.4 固体推进剂的主要性能参数	144
3.5 推进剂的性能调节	148



3.6	推进剂的几项应用技术	159
3.7	固体推进剂的制造	172
3.8	固体推进剂的发展	177
第四章	炸药	185
4.1	现有的炸药	185
4.2	炸药的装药方法	197
4.3	炸药应用举例	205
4.4	炸药的进展	210
第五章	烟火剂	214
5.1	烟火剂的成分与功能	214
5.2	烟火剂的某些特性	216
5.3	烟火剂性质的影响因素	219
5.4	烟火剂的功能及其应用	221
第六章	含能材料的进展	243
6.1	前景预测	243
6.2	研究方向	245
6.3	促进含能材料发展的几项关键技术	250
6.4	通过武器系统的创新,提高含能材料的效能	254
	参考文献	260

第 0 章 绪 论

0.1 火药、炸药与烟火剂的功能

最早的火药是黑火药,它是中国古代四大发明之一,是现代含能材料(发射药、推进剂、炸药)的始祖,是高功率化学能运用的先驱。历史上,黑火药促成武器由冷兵器发展为热兵器。

随着近代科学技术的进展,因武器的应用场所、应用过程及作用原理等方面的差别,黑火药发展成为做功形式不同和组分不同的药剂,即火药、炸药和烟火剂。火药主要用于枪炮弹丸的发射,炸药主要用于爆炸做功,烟火剂主要用于产生光、烟等效应。

1935 年火药用于军用火箭,成为在第二次世界大战末期发展起来的火箭火药。在此基础上,形成了适于推进火箭和导弹的火药——推进剂。之后,火炸药涵盖火药(发射药、推进剂)、炸药以及烟火剂的概念得以确立,并逐步形成各自的研究和应用领域。

由于火药在组成和结构上及它在火炮和在火箭中应用的差别,而有发射药和推进剂之分;炸药因其组分及用于起爆和用于摧毁的目的的差异,而有起爆药和猛炸药之分。由氧化剂和可燃物组成,反应产生热、光、烟等效应的混合物称为烟火剂。用压力发射弹丸的火药,称为发射药;用反作用力推进火箭和导弹的火药称为推进剂;用于提供冲量引发其它炸药爆轰的炸药称为起爆药;而被引爆,用于摧毁目标的炸药称为猛炸药。

火药在武器内的工作过程,是通过火药燃烧将其化学能转化为热能,再通过高温高压气体的膨胀,将热能转化为弹丸或火箭的动能。图 0.1 是发射药在身管武器中的工作原理图。

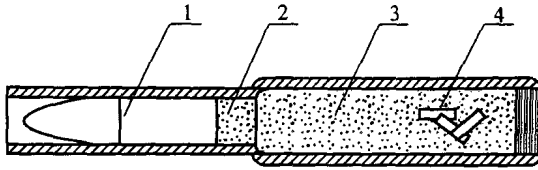


图 0.1 发射药在火炮(身管武器)中的工作原理图

1—载荷(弹丸);2—燃烧气体;3—药室;4—发射药

发射药 4 燃烧后,在燃烧气体不断产生的同时,弹丸 1 在高压气体作用下加速移动,直至弹丸飞出炮口。此过程将发射药的热能转化为弹丸的动能,通过压力完成了对载荷的发射。弹丸 1 通常称为战斗部,内装填猛炸药,到达目标后炸药被起爆,炸药的内能转变为弹片的动能、冲击波能和气体的内能,之后完成所需要的功。针对不同的武器和民用装备,炸药有多种应用形式,有专门的设计理论和应用技术,使炸药在能功转换中获得高的效率。

图 0.2 是推进剂在火箭武器中的工作原理图。推进剂燃烧后,燃烧气体在定容的燃烧室中形成高压,在燃烧气体不断产生的同时,高压气体从喷管排出,产生的气体和流出的气体处于平衡状态。一方面,保持燃烧室压力的恒定;另一方面,从喷管排出气体的反作用力,推进载荷前进。过程中推进剂的化学能转化为热能,再通过高温高压气体的排出,将热能转化为火箭的动能。

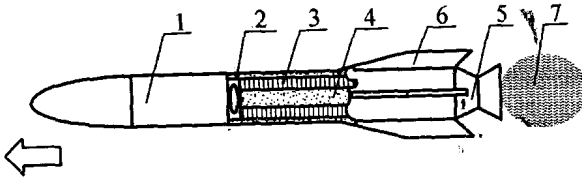


图 0.2 推进剂在现代火箭中的工作原理图

1—载荷;2—点火器;3—推进剂;4—燃烧气体;
5—喷管;6—尾翼;7—排气羽流



图 0.3 是照明弹的结构图,该弹利用了烟火剂中的延期药和有发光效应的照明剂。照明剂在燃烧反应时,将部分化学能转变为光能,并产生强烈的可见光辐射。用于摄影闪光的照明剂,在极短的时间内能产生数万至数十亿坎[德拉]的闪光。

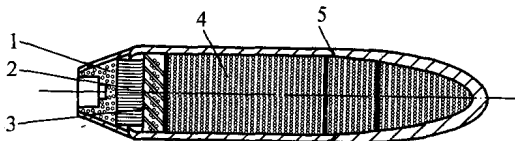


图 0.3 照明弹的结构图

1—延期药;2—点火药;3—过渡药;4—照明剂;5—弹体

上述三种情况说明火药、炸药和烟火剂的用途和作用原理有所差别。此外,它们的反应过程也有差别。炸药被激发后发生爆炸反应,反应在数微秒内完成,并以极高的功率对外做功,使周围介质受到强烈的冲击,并发生变形或破碎。发射药主要用于枪炮弹丸的发射,推进剂主要用于火箭和导弹的推进。发射药和推进剂是以燃烧的方式释放能量,燃烧波的传播速度为每秒几毫米至几十毫米。由氧化剂和可燃物组成的烟火剂有自持燃烧的能力,其燃烧速度因需要的不同而有较大的差别,一般以热、光、声、烟的形式输出能量。

因火药、炸药和烟火剂之间的差别,历史上曾将主要反应形式是爆炸的火炸药称为炸药,主要反应形式为燃烧的火炸药称为低等炸药(或火药),也曾经将炸药归属于火药,将炸药看做火药的一种类型。而具有火炸药特征的烟火剂,甚至起爆药,都另属于其它专业。

随着科学技术的发展,在 20 世纪中期,基本形成了发射药、推进剂、猛炸药、起爆药、烟火剂各自的研究领域。它们分别在武器应用和民间应用等需求下发展,目前已形成为各具特征的几大类药剂。



0.2 含能材料的内涵

火药、炸药和烟火剂也有很多共同之处,它们都是处于亚稳定状态的一类物质,其主要的化学反应是燃烧和爆炸。

可以归纳出它们所具有的几项重要特征:

① 它们是分子中有含能基团的化合物,或含有该化合物的混合物,或含有氧化剂、可燃物的混合物。这些含能基团可能是:

$\equiv\text{C}-\text{NO}_2$ 、 $=\text{N}-\text{NO}_2$ 、 $-\text{O}-\text{NO}_2$ 、 $-\text{ClO}_4$ 、 $-\text{NF}_2$ 、 $-\text{N}_3$ 、 $-\text{N}=\text{N}-$ 等。

② 它们的化学反应可以在隔绝大气的条件下进行。

③ 它们的化学反应能在瞬间输出巨大的功率。

根据这些特征逐渐认识到,无论是火药、炸药或是烟火剂,它们都是用来制造弹药和制造火工部件的材料,而且是同一类型的材料,都是含能的,即它们是含能材料。

因此,可以将含能材料表述为:一类含有爆炸性基团或含有氧化剂和可燃物,能独立地进行化学反应并输出能量的化合物或混合物。

因为“含能材料”概括了发射药、推进剂、猛炸药、起爆药、烟火剂等一类有其特征、事实上已经存在的材料系列的内涵,至20世纪70年代,这种概念逐步被世界军械领域所接受。在国际上形成了含能材料的学术领域,有例行的国际学术会议和国际性的含能材料杂志。在我国也建立了含能材料学科和含能材料专业。

能独立地进行化学反应并输出能量,这是含能材料的重要特征,也是判断某些物质是否归属为含能材料的判据。

有些物质虽具有含能材料的一些功能,但不具有含能材料的组成和结构,如石油、煤、木材等,它们能进行化学反应并释放能量,但它们的化学反应需要外界供氧;有些物质也不需要外界物质参与反应,也可以提供能量,如驱动活塞运动的水蒸气、能产生核