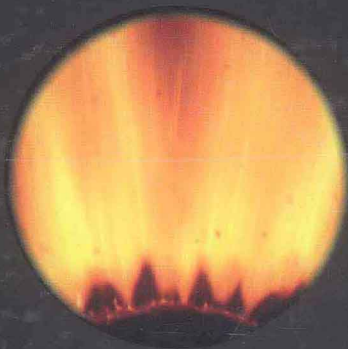




国防科技图书出版基金

火炸药技术系列专著



低特征信号 固体推进剂技术

Low Signature Solid Rocket
Propellant Technology

李上文 赵凤起 徐司雨 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

火炸药技术系列专著

低特征信号固体推进剂技术

Low Signature Solid Rocket Propellant Technology

李上文 赵凤起 徐司雨 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

低特征信号固体推进剂技术/李上文,赵凤起,徐司雨编
著. —北京:国防工业出版社,2013.7
ISBN 978-7-118-08836-6

I. ①低... II. ①李... ②赵... ③徐... III. ①固体推进剂 IV. ①V512

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 121257 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)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 18 $\frac{3}{4}$ 字数 406 千字

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 86.00 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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工

委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

序

火炸药包括枪炮发射药、推进剂和炸药,是陆、海、空、二炮武器装备实现“远程打击、高效毁伤”的动力能源、威力能源,是武器装备的重要组成部分,是大幅度提高武器装备作战效能最直接、最根本的源泉所在。武器装备的需求,有力促进了火炸药技术的发展;而火炸药的创新发展,又推动了武器装备的更新换代,甚至促使战争模式发生革命性变化。瑞典国防研究院一位专家曾说过:在现有基础上,使武器弹药的威力提高3倍以上时,武器装备的品种和战争模式将发生革命性变化,届时,战场上的毁伤与防护将出现不对称,占有技术和装备优势的一方,将完全占据战争的主动权。

我国火炸药行业经过几十年奋斗,从仿制走向自行研制,至今已形成一定规模的火炸药科研生产体系,为国防科技和武器装备发展做出了重要贡献。近十年来,在总装备部和国防科工局亲切关怀和领导下,火炸药行业技术进步取得令人瞩目的成绩,获得了大量创新性科研成果。

在国防工业出版社的大力支持下,我们开展《火炸药技术系列专著》的编著,目的是反映近十年来火炸药行业构建自主创新平台、加强与前沿技术交叉融合、努力提高自主创新能力所取得的丰硕成果。系列专著将充分展示这些成果的科学技术水平,体现火炸药及相关学科扎实的理论、新颖的学术思想和显著的技术创新。火炸药技术系列专著的出版,将为加强科学发展观的实践,为国防科技和武器装备发展,为科技人才培养做出贡献。

《火炸药技术系列专著》包括以下内容:

1. 先进火炸药设计与制备的理论和实践;
2. 火炸药装药设计与工艺理论及应用技术;
3. 火炸药用新型含能材料与功能材料技术;
4. 火炸药绿色制造与数字化工艺技术;
5. 新概念火炸药技术;
6. 火炸药燃烧爆炸基础理论与基础技术;

7. 火炸药性能测试与评估技术;
8. 废弃火炸药的处理与再利用技术。

上述内容,将充分反映著作者近年来在相关领域的最新科研成果,突出先进性和创新性;同时针对性地参考和引用国内外相关研究领域的最新科研动态,特别注重与相关化学、物理学、弹道学、材料力学、测试学、空气动力学、生物学、光学等学科的交叉融合,系统地、全面地描述当今火炸药科学与技术发展的最新研究成果,预测未来新军事变革和信息化战争对火炸药技术的需求、火炸药技术的发展趋势和应用前景。这些专著是火炸药专业人员和相关专业科技人员、管理人员的重要参考书和必备的火炸药学术著作。

总装备部火炸药技术专业组
2010年3月

前 言

固体推进剂一直是火箭、导弹的主要能源。20 世纪 70 年代以来,具有微烟、微焰特性(统称低特征信号)的固体推进剂已逐渐发展成为固体推进剂这个大家族中的重要分支以及战术火箭、导弹现在和未来的主要能源,并已在国内外不少武器装备中广为应用。但是迄今为止,公开发表的系统阐述低特征信号推进剂技术的书籍尚未见到。仅有 K. K. Kuo 等主编的《固体推进剂燃烧基础》(1984 年美国 AIAA 出版的航天与航空进展丛书第 90 卷,1985 年宇航出版社中译文版);A. Davenas 主编的《固体火箭技术》(1989 年法文版,1993 年英文版和 1997 年宇航出版社中译文版);张端庆等编著的《固体火箭推进剂》(1991 年兵器工业出版社出版)和任务正等编著的《火炸药理论与实践》(2001 年中国北方化学工业集团公司内部版)等四部书中的某些章节曾涉及低特征信号推进剂技术的一些简况。因此,本书的目的是试图将三十余年来,作者和西安近代化学研究所同仁们在低特征信号推进剂技术领域应用基础研究中已公开发表的部分文章,进行较系统的总结和提升,奉献给从事固体推进剂研究和使用的工程技术人员,为他们提供一部有借鉴作用的技术参考书。我们也相信,本书也是对高等院校有关专业师生和研究生有所裨益的教学参考书。本书主要在燃烧与爆炸技术重点实验室完成,谨以此书纪念该实验室成立二十周年。

本书重点介绍双基(DB)、复合改性双基(CMDB)、交联改性双基(XLDB)和硝酸酯增塑的聚醚推进剂(NEPE)四类含硝酸酯增塑剂的固体推进剂在实现性能调节过程中,对“能量—燃烧—特征信号”诸性能矛盾的综合平衡与调控的技术途径。因篇幅所限,本书不涉及安全性、安定性、力学性能和制造工艺方面的技术。

本书共分 9 章。第 1 章介绍发动机羽流及特征信号的基本概念,提出推进剂按特征信号进行分类的意见。第 2 章讨论新含能化合物对低特征信号推进剂能量特性的影响。第 3 章描述低特征信号推进剂主要组分的热分解化学特性。第 4 章介绍各种燃烧催化剂的应用效果。第 5 章系统介绍了各种含硝酸酯的低特征信号推进剂燃速和压力指数的调节规律。第 6 章讲述在发动机中声不稳定燃烧的抑制方法。第 7 章阐述发动机排气羽流二次燃烧抑制(消焰)的途径和

机理。第8章简述羽流特征信号的检测方法。第9章介绍低特征信号推进剂燃速特性等参数的预估方法。

本书第1、5、6章和第7章由李上文撰写;第3章和第4章由赵凤起撰写;第2章和第9章由徐司雨撰写;第8章由王宏撰写。全书由李上文和赵凤起统稿。

作者对张晓宏、樊学忠、王江宁、王宁飞、王百成、陈广兴、潘文达诸位研究员,孟燮栓、白宜生、张蕊娥、常景湘、卢栓仓诸位高工和有关同仁在科研工作中的密切合作及帮助表示感谢;对胡荣祖、刘子如两位研究员在热分析工作中的指导深表谢意;对高红旭、宋秀铎、王晗、仪建华诸博士在新催化剂合成和应用方面的合作表示感谢。作者还要感谢裴庆、邢晓玲、安亭、肖立柏、姚二岗几位硕士在本书编辑和打印方面的协助。

由于科学技术的日新月异和作者的学识所限,本书不足之处敬请读者不吝赐教。

作者

2013年4月

于西安近代化学研究所

目 录

第 1 章 固体火箭发动机排气羽流及其特征信号	1
1.1 排气羽流	2
1.2 排气羽流的特征信号	3
1.2.1 烟	4
1.2.2 能见度	6
1.2.3 后燃引起的辐射能散发	7
1.2.4 雷达波的吸收	8
1.3 排气羽流特征信号的危害性	9
1.4 羽流特征信号抑制技术途径	10
1.5 固体推进剂按特征信号分类	11
1.5.1 固体推进剂按烟雾分类	11
1.5.2 固体推进剂按排气羽流特征信号分类的建议	12
参考文献	15
第 2 章 低特征信号推进剂的能量性能	16
2.1 几种含能化合物的理化性能及能量特性	17
2.1.1 几种含能添加剂的理化性能及能量特性	17
2.1.2 几种钝感的增塑剂和钝感含能添加剂的理化性能及 能量特性	18
2.1.3 四嗪类高氮化合物的理化性能和能量特性	20
2.2 含新型含能添加剂的低特征信号推进剂的能量特性	21
2.2.1 几种含能化合物对推进剂能量性能的影响	21
2.2.2 CL-20 对推进剂能量性能的影响	23
2.2.3 DNTF 对推进剂能量性能的影响	26
2.2.4 CL-20 与 DNTF 混合物对推进剂能量性能的影响	27
2.3 含钝感增塑剂的低特征信号推进剂的能量特性	29

2.3.1	以 TEGDN 为辅助增塑剂的低特征信号 推进剂的能量特性	29
2.3.2	以 DIANP 为辅助增塑剂的钝感推进剂的能量特性	31
2.3.3	高氮类 GAP 基推进剂能量特性	32
2.4	含高氮类化合物的微烟改性双基推进剂能量特性	33
2.4.1	含几种典型高氮含能化合物的推进剂的能量特性	33
2.4.2	含 BTATz 推进剂的能量特性	35
2.4.3	含 NNHT 与 CL-20 的推进剂的能量特性	37
2.4.4	含能添加剂量对推进剂能量特性影响	39
2.4.5	混合增塑剂量对能量的影响	41
	参考文献	44
第 3 章	低特征信号推进剂的热分解行为	46
3.1	热分解行为的测试方法	46
3.1.1	仪器设备和实验条件	46
3.1.2	动力学计算方法	46
3.2	CL-20-CMDB 低特征信号推进剂的热分解行为及热 分解反应动力学	47
3.2.1	CL-20-CMDB 推进剂的热分解行为	47
3.2.2	非催化 CL-20-CMDB 推进剂的热分解反应动力学	54
3.2.3	催化 CL-20-CMDB 推进剂的热分解反应动力学	57
3.2.4	CL-20-CMDB 推进剂的气相热分解反应	69
3.3	DNTF-CMDB 推进剂的热分解行为及热分解反应动力学	80
3.3.1	DNTF-CMDB 推进剂的热分解行为	80
3.3.2	DNTF-CMDB 推进剂的热分解反应动力学	83
3.4	BTATz-CMDB 推进剂的热分解行为及热分解反应动力学	86
3.4.1	单质 BTATz 和 NNHT 的热分解特性	86
3.4.2	BTATz-CMDB 推进剂的热分解特性及动力学	88
3.4.3	NNHT-RDX-CMDB 推进剂的热分解特性及动力学	95
	参考文献	103
第 4 章	固体推进剂燃烧催化剂	105
4.1	铅催化剂	107
4.2	纳米催化剂	108

4.2.1	纳米氧化铝	108
4.2.2	纳米复合氧化物	109
4.2.3	含能纳米催化剂	114
4.2.4	纳米有机酸铅盐	117
4.3	绿色催化剂	118
4.3.1	铜盐	118
4.3.2	稀土化合物	121
4.3.3	铋的化合物	125
4.4	含能催化剂	127
4.4.1	NTO 盐	127
4.4.2	四唑类金属盐	132
4.4.3	3,5-二硝基羟基吡啶类含能盐	132
	参考文献	135
第 5 章	典型的低特征信号推进剂的燃烧性能调节	137
5.1	具有平台或麦撒效应的双基推进剂	137
5.1.1	低压麦撒螺压双基推进剂	139
5.1.2	高压平台(麦撒)螺压双基推进剂	139
5.1.3	低燃速、低燃温燃气发生剂	140
5.2	硝胺-CMDB 微烟推进剂	142
5.2.1	基础配方和催化剂	142
5.2.2	试验结果、规律和典型示例	143
5.2.3	铅-铜-炭复合催化剂的协同效应	148
5.2.4	不同形态碳物质对 RDX-CMDB 推进剂燃烧性能的影响	150
5.2.5	RDX-CMDB 推进剂的临界压力	155
5.2.6	RDX 或 HMX 含量对燃烧性能的影响	158
5.2.7	其它硝胺代替 RDX 对燃烧性能的影响	160
5.3	叠氮增塑剂的影响	163
5.3.1	直链叠氮硝胺	163
5.3.2	叠氮硝酸酯(PDADN)	165
5.4	DNTF、CL-20、FOX-12 等高能密度化合物对燃烧性能的影响	166
5.4.1	DNTF/RDX 相互取代的影响	167

5.4.2	DNTF 含量的影响	168
5.4.3	含 DNTF、CL-20、FOX-12 和 HMX 配方的对比	170
5.5	含少量铝粉(Al)的螺压 HMX-CMDB 推进剂	171
5.6	高固体含量螺压 RDX-Al-CMDB 推进剂	172
5.6.1	复合催化剂的效果	172
5.6.2	不同品种金属铝粉加入的影响	174
5.7	粒铸 EMCDB 推进剂	175
5.7.1	炭黑品种的影响	175
5.7.2	炭黑含量的影响	176
5.7.3	铅盐含量的影响	177
5.7.4	铜盐含量的影响	177
5.7.5	铝粉含量的影响	178
5.7.6	硝化棉含量的影响	179
5.7.7	PEG 含量的影响	179
5.7.8	RDX 粒度的影响	180
5.8	微烟 NEPE 推进剂	181
5.8.1	LF 的影响	181
5.8.2	LP 的影响	181
5.8.3	LF、LP 与 LC 的催化作用比较	182
	参考文献	183

第 6 章 声不稳定燃烧的抑制

6.1	不稳定燃烧的现象、后果及分类	185
6.1.1	不稳定燃烧现象	185
6.1.2	不稳定燃烧的不良后果	186
6.1.3	不稳定燃烧的分类	186
6.2	声燃烧不稳定性简介	186
6.2.1	发动机中声不稳定性的判据	186
6.2.2	燃烧响应函数的测定	189
6.3	声不稳定燃烧的抑制方法	191
6.3.1	采用某种抑制振荡燃烧的机械装置	191
6.3.2	改变推进剂装药设计参数和几何形状	193
6.3.3	调整推进剂配方	193
6.4	发动机稳定性分析	215

参考文献	216
第 7 章 固体火箭发动机排气二次燃烧火焰的抑制	218
7.1 排气羽流二次燃烧(后燃)产生的机理	218
7.1.1 羽流二次燃烧(后燃)的引发原因和机理	218
7.1.2 二次燃烧的抑制办法和化学抑制机理	219
7.2 新型消焰剂的筛选	220
7.2.1 钾盐对 NC/TMETN 钝感双基推进剂燃烧性能的影响	221
7.2.2 消焰剂对 RDX - CMDB 推进剂燃烧性能的影响	224
7.3 新消焰剂发动机验证结果	227
7.3.1 发动机羽流结构及电磁波衰减测试	227
7.3.2 发动机试验结果	227
7.3.3 附加药片法发动机试验结果	231
7.4 影响消焰剂加入量的因素	232
7.4.1 喷管设计	233
7.4.2 发动机推力大小	233
7.4.3 推进剂的能量	234
7.4.4 发动机的飞行速度	234
参考文献	234
第 8 章 排气羽流特征信号的检测技术	236
8.1 概述	236
8.1.1 烟雾	236
8.1.2 热辐射	237
8.1.3 能见度	237
8.1.4 雷达波衰减	238
8.1.5 测试对象排气羽流的特点	238
8.2 烟雾的检测技术	239
8.2.1 烟雾衰减的“朗伯—比尔定律”	239
8.2.2 烟雾测量的主要方法	241
8.2.3 国内外用于发动机排气羽流烟雾测试的主要方法	244
8.2.4 发动机排气羽流烟雾测试的过程及典型数据	245
8.3 火焰辐射的检测技术	247
8.3.1 火焰辐射的机理	249

8.3.2	火焰辐射测试原理	249
8.3.3	发动机排气羽流火焰辐射测试的过程及典型数据	252
8.4	羽流对微波的衰减作用	253
8.5	羽流特征信号检测技术的发展趋势	256
	参考文献	257
第9章	低特征信号推进剂的燃烧性能预估	259
9.1	燃烧预估理论模型	260
9.1.1	Kubota 双基稳态燃烧模型	260
9.1.2	神经网络模型	260
9.1.3	一维气相反应流理论模型	262
9.1.4	双基推进剂半经验预估模型	264
9.2	一维气相反应流理论应用	265
9.2.1	非催化推进剂燃速预估方法	265
9.2.2	催化燃烧机理	266
9.2.3	双基和 RDX - CMDB 低特征信号推进剂燃速计算公式	268
9.2.4	燃烧性能的预估分析	270
	参考文献	276

Contents

Chapter 1 Exhaust plume and signature of solid rocket motor	1
1.1 Exhaust plume	2
1.2 Exhaust plume signature	3
1.2.1 Smoke	4
1.2.2 Visibility	6
1.2.3 Afterburning leading to radiation emission	7
1.2.4 Radar absorption	8
1.3 Peril of exhaust plume signature	9
1.4 Inhibition technique of plume signature	10
1.5 Classification of solid rocket propellant based on signature	11
1.5.1 Classification of solid rocket propellant based on smoke	11
1.5.2 Classification suggestion of solid rocket propellant based on plume signature	12
References	15
Chapter 2 Energy property of low signature propellant	16
2.1 Physicochemical properties and energy characteristics of some energetic compounds	17
2.1.1 Physicochemical properties and energy characteristics of several energetic additives	17
2.1.2 Physicochemical properties and energy characteristics of some insensitive plasticizers and energetic additives	18
2.1.3 Physicochemical properties and energy characteristics of some high - nitrogen energetic compounds derived from tetrazines	20
2.2 Energy characteristics of low signature propellant containing some new type energetic additives	21
2.2.1 Effect of some energetic compounds on the propellant	