

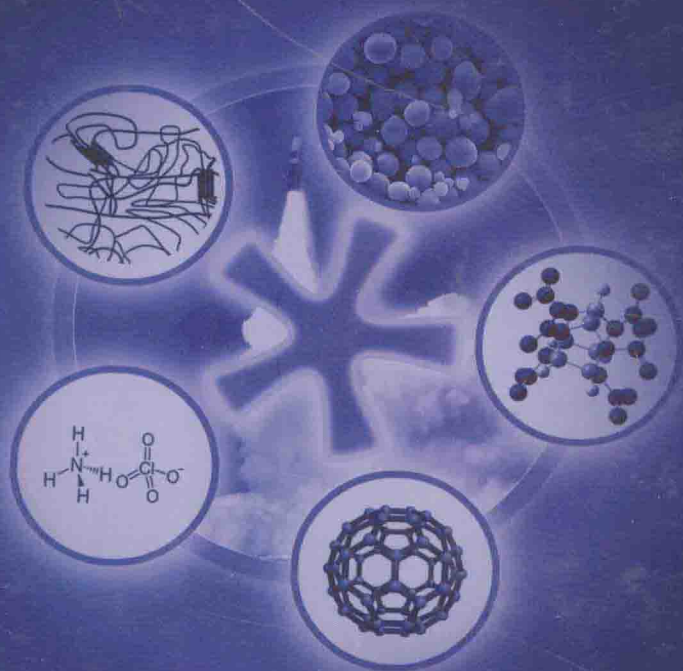


航天科技图书出版基金资助出版

固体火箭推进剂 理论与工程

庞爱民 主 编

马新刚 唐承志 副主编



中国宇航出版社

航天科技图书出版基金资助出版

固体火箭推进剂理论与工程

庞爱民 主 编

马新刚 唐承志 副主编



中国宇航出版社

版权所有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

固体火箭推进剂理论与工程 / 庞爱民主编. --北京:中国宇航出版社, 2014. 6

ISBN 978 - 7 - 5159 - 0660 - 7

I. ①固… II. ①庞… III. ①固体火箭推进剂—研究 IV. ①V512

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 075403 号

责任编辑 阎 列

责任校对 祝延萍

封面设计 文道思

出 版 中国宇航出版社
发 行

社 址 北京市阜成路 8 号
(010)68768548

邮 编 100830

网 址 www.caphbook.com

经 销 新华书店

发行部 (010)68371900

(010)88530478(传真)

(010)68768541

(010)68767294(传真)

零售店 读者服务部

北京宇航文苑

(010)68371105

(010)62529336

承 印 北京画中国画印刷有限公司

版 次 2014 年 6 月第 1 版

2014 年 6 月第 1 次印刷

规 格 880 × 1230

开 本 1/32

印 张 18.125

字 数 505 千字

书 号 ISBN 978 - 7 - 5159 - 0660 - 7

定 价 128.00 元

本书如有印装质量问题, 可与发行部联系调换

航天科技图书出版基金简介

航天科技图书出版基金是由中国航天科技集团公司于2007年设立的，旨在鼓励航天科技人员著书立说，不断积累和传承航天科技知识，为航天事业提供知识储备和技术支持，繁荣航天科技图书出版工作，促进航天事业又好又快地发展。基金资助项目由航天科技图书出版基金评审委员会审定，由中国宇航出版社出版。

申请出版基金资助的项目包括航天基础理论著作，航天工程技术著作，航天科技工具书，航天型号管理经验与管理思想集萃，世界航天各学科前沿技术发展译著以及有代表性的科研生产、经营管理译著，向社会公众普及航天知识、宣传航天文化的优秀读物等。出版基金每年评审1~2次，资助10~20项。

欢迎广大作者积极申请航天科技图书出版基金。可以登录中国宇航出版社网站，点击“出版基金”专栏查询详情并下载基金申请表；也可以通过电话、信函索取申报指南和基金申请表。

网址：<http://www.caphbook.com>

电话：(010) 68767205, 68768904

前 言

《固体火箭推进剂理论与工程》不仅包含了复合固体推进剂技术的基础知识、基本理论，而且融入了作者的研制经验，并参考国外本专业技术发展撰写而成。全书力求简明扼要，在概括介绍复合固体推进剂基本知识之际，适时引入最新的进展及前沿研究课题，使读者在掌握复合固体推进剂基本知识的同时，了解本学科最前沿的学术动态。

全书共分7章：第1章为绪论，第2章为复合固体推进剂性能与表征，第3章为复合固体推进剂品种及性能，第4章为固体火箭发动机内绝热层与衬层材料，第5章为固体火箭发动机装药制造工艺，第6章为固体火箭发动机装药安全与寿命评估，第7章为复合固体推进剂技术发展趋势。本书不仅可作为固体推进剂专业硕士研究生教材，也可作为固体火箭发动机和固体推进剂专业科研人员、工程技术人员的专业参考书和培训教材。

本书编写过程中得到了中国航天科技集团公司第四研究院四十二研究所有关领导及人力资源处的大力支持，得到了航天科技图书出版基金的资助。在编写和定稿过程中，曾先后聘请中国航天科技集团公司第四研究院叶定友研究员、北京理工大学谭惠民教授、西安近代化学研究所赵凤起研究员、南京理工大学周伟良教授审阅，他们提出了许多宝贵意见。

参加本书编写的有庞爱民、唐承志、肖金武、汪越、赵孝彬、唐根、潘新洲、彭松、吴京汉、刘学、尹华丽、凌玲等，全书由庞爱民、马新刚统稿。限于编者水平，虽几经易稿和修改，书中错误和疏漏之处在所难免，敬请读者提出宝贵意见。

编 者

2014年5月

缩 略 语

A

ADN	二硝酰胺铵
AFRPL	美国空军火箭推进实验室
AGARD	北约航天研究与发展顾问组
AMMO	3-叠氮甲基-3-甲基氧丁环
AMRAAM	先进中程空空导弹
AN	硝酸铵
AP	高氯酸铵
APP	聚磷酸铵
ARCO	大西洋富田公司
ARDEC	美国陆军军备研究开发和工程中心
ASRM	先进固体火箭发动机
ATBC	乙酰柠檬酸三丁酯

B

BAG-22	一种中性聚合物键合剂
BAG-100	一种中性聚合物键合剂
BAMO	3,3-双叠氮甲基氧丁烷
BDNPA/F	2,2-二硝基丙基缩甲醛/缩乙醛的混合物
BG	硝化甘油与1,2,4-丁三醇三硝酸酯的混合物
BHT	2,6-二特丁基-4-对甲酚
BR	聚丁二烯橡胶

BSF	标准试验发动机
BTTN	1,2,4-丁三醇三硝酸酯
Buna-N	丁钠橡胶
Bu-NENA	丁基硝氧乙基硝胺
Butocene	一种二茂铁类燃速催化剂,俗称皮特辛

C

CARS	激光相干反斯托克斯拉曼光谱
Catocene	一种双核二茂铁燃速催化剂,俗称卡托辛
CB	炭黑
C. C	一种燃速催化剂(氧化铜、氧化铬、亚铬酸铜等混合物)
CDB	复合双基
CMDB	复合改性双基
CR	氯丁橡胶
CSP	低温固体推进剂
CTPB	端羧基聚丁二烯
CTPIB	端羧基聚异丁烯

D

DBTDL	二月桂酸二丁基锡
DCPD	双环戊二烯
DDI	二聚脂肪酸二异氰酸酯
DDS	二氨基二苯砒
DEGDN	二缩二乙二醇二硝酸酯
DLTP	硫代二丙酸二月桂酯
DMA	动态热机械分析
DMP	邻苯二甲酸二甲酯
DMP-30	2,4,6-三[(二甲胺基)甲基]苯酚

DOA	己二酸二辛酯
DOD	美国国防部
DOS	癸二酸二异辛酯
DOT	美国运输部
DOW	美国道化学公司
DR	管道火箭发动机(整体式火箭冲压组合发动机)
DSC	差示扫描量热
DTA	差热分析

E

EB	弹性粘合剂基体
EDB	压伸双基
ENB	乙叉降冰片烯
EMCDB	弹性体改性浇注双基
EPDM	三元乙丙橡胶
E618	双酚 A 型环氧树脂

F

FEFO	双-(氟二硝基乙基)缩甲醛
FF(焰)	扩散火焰
FOX-12	N-脒基脲二硝酰胺盐
FTIR	傅里叶变换红外光谱

G

GAP	缩水甘油叠氮聚醚
GAPA	端叠氮基聚叠氮缩水甘油醚
GPC	凝胶渗透色谱

H

HAN	硝酸羟铵
-----	------

HASAM	高速反辐射导弹
HD	1,4-己二烯
HDI	六次甲基二异氰酸酯
HEDM	高能量密度材料
HMX	环四次亚甲基四硝胺,俗称奥克托今
HN	硝胺/NEPE 粘合剂
HNF	硝仿肼
HNIW(CL-20)	六硝基六氮杂异伍兹烷
HPLC	高效液相色谱
HTBN	端羟基聚丁二烯丙烯腈
HTCE	端羟基聚酯
HTPB	端羟基聚丁二烯
HTPE	端羟基聚醚
HX-752	间苯二甲酰(2-甲基氮丙啶)
HX-868	1,3,5-苯三甲酰(2-乙基氮丙啶)
HX874	2,4,6-三[1(2-乙基氮丙啶基)]三嗪
HVM	超高速导弹

I

ICC	美国州际商务委员会
ICT	德国法恩霍夫化学技术研究所
IDP	壬酸异癸酯
IHPRPT	综合高性能火箭推进技术计划(美国)
IPDI	异佛尔酮二异氰酸酯
IR	聚异戊二烯橡胶
Isonol-100	N,N'-双-(2-羟丙基)-苯胺

J

JDRADM	联合双任务空中压制导弹
--------	-------------

K

KP 高氯酸钾

L

LAB 醇胺类键合剂

LIF 激光诱导荧光光谱

M

MAPO 三(2-甲基)氮丙啶氧化膦

MDI 4,4'-二苯基甲烷二异氰酸酯

MICOM 美国陆军导弹司令部

MT-4 一种氮丙啶类键合剂

N

NASA 美国国家航空航天局

NASP 美国空军固体推进计划

NBF 正丁基二茂铁

NBR 丁腈橡胶

NC 硝化棉

NENA 硝氧乙基硝胺

NEPE 硝酸酯增塑的聚醚

NF 硝仿

NG 硝化甘油

NHC 正己基碳硼烷

NPBA 中性聚合物键合剂

NTO 3-硝基-1,2,4-三唑-5-酮

N-100 多官能团脂肪族异氰酸酯

P

PAO	四官能度环氧乙烷-四氢呋喃共聚醚
PAZ	一种氮丙啶类键合剂
PBAA	聚丁二烯丙烯酸
PBAN	聚丁二烯丙烯腈
PBX	塑料粘接炸药
PCU	多环十一烷
PDMS	聚二甲基硅氧烷
PE	聚酯
PE-co-T	环氧乙烷-四氢呋喃共聚醚
PEG	聚乙二醇
PEP	推进与含能材料专家小组
PET	环氧乙烷-四氢呋喃共聚醚
PETN	季四戊醇四硝酸酯, 俗称太安
PGA	聚己二酸己二醇酯
PGN	聚缩水甘油硝酸酯
PLN	聚硝基甲基氧杂环丁烷
PMA	聚甲基丙烯酸酯
PNIMMO	聚(3-硝酸酯亚甲基-3-甲基氧杂丁环)
PPG	聚丙二醇
PS	聚硫
PSAN	相稳定硝酸铵
PU	聚氨酯
PVC	聚氯乙烯

R

RDX	环三次甲基三硝酸酯, 俗称黑索今
-----	------------------

S

SBR	丁苯橡胶
SEM	扫描电子显微镜
SFIRR	整体式固体燃料冲压发动机
SNPE	法国火炸药公司
SRAM	近程攻击导弹
SRB	航天飞机助推器
SSST	超声速掠海靶弹(美国)
STAR	美国聚硫公司宇航固体发动机“星”系列代号

T

TAGN	三氨基胍硝基盐
TBF	叔丁基二茂铁
TDI	甲苯二异氰酸酯
TEA	三乙醇胺
TEGDN	三缩三乙二醇二硝酸酯
TG	热重
THF	四氢呋喃
TLC	薄层色谱
TMETN	三羟甲基乙烷三硝酸酯
TMO	过渡金属氧化物
TMP	三羟甲基丙烷
TNAZ	三硝基氮杂环丁烷
TNT	三硝基甲苯,俗称梯恩梯
TOP	磷酸三(2-乙基己酯)
TPB	三苯基铋
T27	一种二茂铁类燃速催化剂

V

VFDR 流量可调冲压发动机

X

XLDB 交联双基

防-H N,N'-二苯基对苯二胺

甲叉 4426-S 双-(4-羟基-3,5-二特丁基苄基)-硫化物

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 复合固体推进剂技术的发展历程	1
1.3 复合固体推进剂的组成和组分	2
1.3.1 氧化剂	3
1.3.2 粘合剂	4
1.3.3 金属燃料或其他高能添加剂	6
1.3.4 固化剂和交联剂	6
1.3.5 增塑剂	7
1.4 固体火箭发动机对复合固体推进剂技术的要求	8
参考文献	10
第 2 章 复合固体推进剂性能与表征	11
2.1 概述	11
2.2 复合固体推进剂的能量性能	14
2.2.1 复合固体推进剂能量性能的代表参数	14
2.2.2 复合固体推进剂的能量水平	19
2.2.3 能量性能设计的基本方法	20
2.2.4 能量性能的测试方法	24
2.3 复合固体推进剂的燃烧性能	25
2.3.1 稳态燃烧性能参数及影响因素	27
2.3.2 复合固体推进剂稳态燃烧性能的设计/调节方法	40
2.3.3 稳态燃烧性能的代表方法	44

2.4 复合固体推进剂的力学性能	56
2.4.1 概述	56
2.4.2 复合固体推进剂力学性能的特征及其描述	58
2.4.3 复合固体推进剂力学性能的影响因素	60
2.4.4 复合固体推进剂力学性能调控手段	71
2.4.5 基体/填料界面特性表征方法	71
2.4.6 复合固体推进剂力学性能测试方法	77
2.4.7 复合固体推进剂细观力学行为及破坏失效机理	81
2.4.8 复合固体推进剂力学模型和理论	85
2.5 复合固体推进剂的工艺性能	93
2.5.1 概述	93
2.5.2 复合固体推进剂药浆的流变特性	94
2.5.3 复合固体推进剂工艺性能的影响因素	109
2.5.4 复合固体推进剂工艺性能的判定	126
2.6 复合固体推进剂的老化性能	129
2.6.1 概述	129
2.6.2 推进剂老化的一般规律及其影响因素	129
2.6.3 推进剂的老化与防老化技术	137
2.6.4 推进剂老化性能评估方法	139
2.6.5 恒定高温加速老化稳定性评估准则	141
2.6.6 贮存寿命评估方法	144
2.7 复合固体推进剂的安全性能	160
2.7.1 概述	160
2.7.2 固体推进剂的感度	161
2.7.3 固体推进剂的破坏效应	166
2.7.4 固体推进剂的燃烧、爆炸与爆轰危险性	167
2.8 固体推进剂的羽流特性	170
2.8.1 概述	170
2.8.2 羽流特征信号分类	174
2.8.3 固体火箭推进剂排气羽流特征信号的影响因素	177

2.8.4 降低固体火箭羽流特征信号的途径和措施	183
2.8.5 羽流特征信号的表征参数和测试评估方法	187
参考文献	192
第3章 复合固体推进剂品种及性能	202
3.1 概述	202
3.2 HTPB 复合固体推进剂	205
3.2.1 HTPB 推进剂应用与发展	205
3.2.2 HTPB 推进剂组分与作用	208
3.2.3 HTPB 推进剂基本化学原理	225
3.2.4 HTPB 推进剂配方设计与计算	242
3.2.5 HTPB 推进剂性能调节与控制	246
3.2.6 含硝胺炸药的 HTPB 推进剂	257
3.3 NEPE 高能固体推进剂	268
3.3.1 概述	268
3.3.2 高能固体推进剂的发展历程	269
3.3.3 NEPE 高能固体推进剂的组分与作用	271
3.3.4 NEPE 推进剂的性能与设计	280
3.4 低特征信号固体推进剂	319
3.4.1 概述	319
3.4.2 降低固体推进剂羽流特征信号的技术途径	322
3.4.3 低特征信号固体推进剂的配方设计方法	324
3.4.4 低特征信号复合固体推进剂品种及特性	328
3.5 固体富燃料推进剂	341
3.5.1 概述	341
3.5.2 固体富燃料推进剂的配方设计	346
3.5.3 含硼富燃料推进剂	362
3.6 洁净固体推进剂	372
3.6.1 概述	372
3.6.2 实现推进剂洁净化的技术途径	374

3.7 低易损性固体推进剂	383
3.7.1 概述	383
3.7.2 低易损性推进剂特点	384
3.7.3 实现推进剂低易损性的技术途径	385
参考文献	392
第4章 固体火箭发动机内绝热层与衬层材料	398
4.1 概述	398
4.2 固体火箭发动机内绝热层	400
4.2.1 内绝热层的发展概况	400
4.2.2 绝热层的组成与组分	404
4.2.3 绝热层的基本性能及表征方法	416
4.2.4 绝热层性能调节技术	424
4.3 固体火箭发动机衬层	425
4.3.1 衬层的发展概况	425
4.3.2 衬层技术基础	428
4.3.3 衬层的性能与要求	431
4.3.4 衬层的主要组分与功能	436
4.3.5 衬层主要性能的表征方法	439
4.3.6 衬层主要性能的设计技术	442
参考文献	450
第5章 固体火箭发动机装药制造工艺	459
5.1 概述	459
5.2 原材料准备	462
5.2.1 氧化剂准备	462
5.2.2 推进剂其他组分的准备	472
5.2.3 非推进剂组分的准备	472
5.3 壳体绝热与包覆工艺	472
5.3.1 壳体绝热工艺	472
5.3.2 衬层包覆工艺	477