

固体推进剂技术及 纳米材料的应用

Technology of Solid Propellants and
Nano - Material Applications

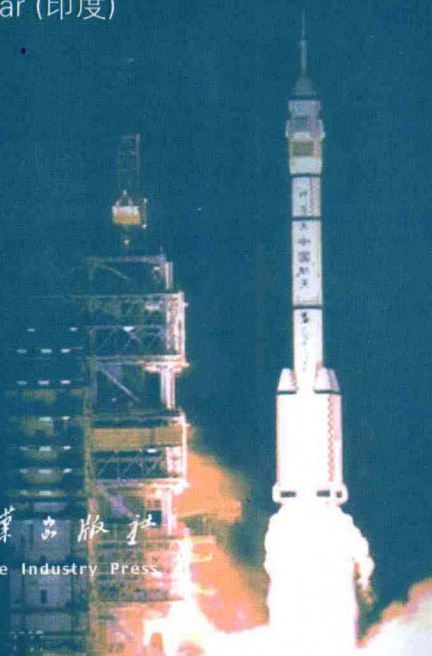
李凤生 Haridwar Singh (印度)

郭效德 Himanshu Shekhar (印度)

等 编著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



固体推进剂技术及 纳米材料的应用

**Technology of Solid Propellants and
Nano - Material Applications**

李凤生 Haridwar Singh (印度)
郭效德 Himanshu Shekhar (印度) 编著
段红珍 安崇伟 宋小兰 李苗苗

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

固体推进剂技术及纳米材料的应用/李凤生等编著. 北京:国防工业出版社,2008. 11

ISBN 978-7-118-05982-3

I. 固... II. ①李... III. ①固体推进剂—制造②纳米材料—应用—固体推进剂 IV. V512

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 150525 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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 9% 字数 231 千字

2008 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 45.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

李凤生教授

李凤生教授 博士生导师,国家有突出贡献中青年专家,先后赴澳大利亚、美国、英国、德国、俄罗斯、日本、印度及南非等国家学习、交流或合作研究。现任南京理工大学 301(火药)教研室主任,国家特种超细粉体工程技术研究中心主任,《固体火箭技术》杂志、《火炸药学报》杂志、《化学工程》杂志、《颗粒学报》杂志(英文)、《精细化工》杂志等九种杂志的编委。长期从事特种固体推进剂的设计与制造技术方面的研究以及特殊固体材料的微纳米化制造与应用技术研究和教学工作。尤其是在高燃速推进剂研究,推进剂制造新工艺技术研究和微纳米材料的制备及在固体推进剂中的应用研究等方面取得了丰硕的成果。

先后获国家及省、部、市级各类奖励 20 余项,其中国家科技进步一等奖 2 项,国家发明三等奖 2 项,省、部级特等奖 1 项,一等奖 2 项,二等奖 5 项。申请国家发明专利 37 项,已授权 29 项。在国内外出版各类著作 12 部(400 多万字),发表论文 240 余篇,被 SCI、EI 等收录 70 多篇。

李凤生教授的研究成果大多已在军民领域获得产业化应

用,产生了良好的经济与社会效益。其中,两项技术出口法国,在法国建成生产线,受到法方好评。他培养了博士后、博士、硕士 70 多名,现已分别在军民领域发挥着重要作用。

Haridwar Singh 博士

Haridwar Singh 博士 连续 14 年担任了印度高能材料研究所所长(1990 年—2004 年),在 2001 年被提升为“杰出科学家”,现在他作为“退休的科学家”(DRDO)工作于普纳大学的飞行与火箭设计室(ARDE)。2004 年—2005 年,他作为“访问学者”工作于以色列海法(Haifa)技术学院,是 M/s 爆炸指导董事会的首席专家,海得拉巴(Hyderabad)和 M/s Krishna 的抗氧化专家。

Haridwar Singh 博士曾作为德国马克斯 - 普朗克(Max-planck)学院、宾夕法尼亚(Pennsylvania)州立大学及亚利桑那州(Arizona)大学、美国陆军实验室和 Sandia 国家实验室的访问学者。他还是 OPCW 专家组的成员、印度高能材料学会(HEM-SI)的主席,以及美国航空航天局高级成员。此外,他是马哈拉施特拉邦(Maharashtra)科学院的研究员、普纳(Pune)大学评议员、《防卫科学》杂志编辑委员会成员、美国传记研究院的研究委员会成员、俄国宇航协会荣誉会员。

Haridwar Singh 博士的主要研究成果有:①针对印度的气候条件,建立了针对双基推进剂、高能硝铵基推进剂、复合改性

双基推进剂和大尺寸壳体粘结火箭发动机的先进浇铸技术；
②提出了进口导弹的推进系统的寿命延长方法，节省了巨额的外汇；③发展了易损性较低的高能枪炮药、高性能和热稳定炸药、爆炸反应装甲(ERA)。

前 言

人类进入了一个航天和导弹的时代,火箭技术已成为现代科学技术的一个重要分支。为满足导弹和运载火箭对推进剂提出的高效和大推力要求,新型和环境友好型推进剂(无烟、振动、摩擦和碰撞钝感)成为研究和发展方向。

本书目的是描述和讨论固体火箭推进剂技术相关专题。真心希望本书中介绍的一些重要和先进的专题,如推进剂与壳体寿命预测、先进固体推进剂、质量控制和可靠性、加工和操作过程中的安全性,以及当今先进的纳米材料在固体推进剂中的应用和金属/水推进剂等,成为本书的特色。这些专题对于从事固体火箭推进剂技术研究和开发的单位、生产企业、质量控制机构和学术界的科学家/工程师,以及该领域的博士和硕士研究生具有重要参考价值。

本书共分为 13 章,主要是关于固体火箭推进剂制造技术,绝热层、衬层和阻燃层体系,点火系统,燃烧机理及纳米材料的应用和金属/水推进剂等方面的详细描述。本书还对其他一些专题进行了详细介绍,如推进剂的结构完整性、火箭发动机壳体材料、催化和平台推进剂等。

本书由南京理工大学国家特种超细粉体工程技术研究中心主任李凤生教授领导的研究小组和印度武器研究与发展研究院高能物质研究所前所长 Haridwar Singh 博士以及 Himanshu Shekhar 等联合编著。其中第 1 章至第 11 章由 Haridwar Singh 博士和 Himanshu Shekhar 以英文编写,李凤生教授修改、补充及删减,并由他领导的研究小组译成中文;第 12 章由李凤生教授和段红珍博士及安崇伟博士执笔;第 13 章由李凤生教授和刘冠鹏博士执笔。

第1章和第2章由刘冠鹏博士和郭效德博士翻译；第3章由刘冠鹏博士和段红珍博士翻译；第4章和第7章由郭效德博士和段红珍博士翻译；第5章由李苗苗博士和安崇伟博士翻译；第6章由安崇伟和刘冠鹏博士翻译；第8章由安崇伟博士和宋小兰博士翻译；第9章由宋小兰博士和刘冠鹏博士翻译；第10章由宋小兰博士和李苗苗博士翻译；第11章由段红珍博士、安崇伟博士和李苗苗博士翻译，王毅博士参与了书稿校对。全书由李凤生教授译文校对并统稿。

印度在推进剂方面受到美国、欧洲及俄罗斯的援助和支持，有许多先进之处值得中国学习和借鉴，印度高能物质研究所实际上是印度高能炸药和高能推进剂研究所，Haridwar Singh 博士任该所所长长达14年之久，在高能推进剂技术方面积累了丰富的知识和经验，对西方国家及俄罗斯在高能推进剂技术方面的现状和发展趋势十分了解。李凤生教授从事固体推进剂的设计与制造和微纳米材料的制备与性能及应用研究有40年之久。他与 Haridwar Singh 博士是多年的合作伙伴与朋友。合作编著并以中文出版此书的目的在于向中国的读者介绍印度及其他国家在高能固体推进剂方面的现状及发展趋势，以及当今纳米材料在固体推进剂中的应用和金属/水推进剂的研究进展，为中国推进剂技术的发展作出一点微薄贡献。

在本书的编写过程中，中国、印度及国外的许多著名科学家提供了他们的宝贵意见，在此对他们表示衷心的感谢。

A. P. J. Abdulkalam 博士——印度 Hon' ble 的行政长官和印度导弹之父，在本书稿的编写过程中，给予了巨大的支持。在此，我们向他表示深深的谢意和敬意。

由于作者水平有限，本书在编著与翻译中难免有错误和不当之处，恳请读者批评指正。

编著者
2008年8月

目 录

第 1 章 火箭的组成及其发展史	1
1.1 火箭的发展史	1
1.2 航天器与火箭	5
1.3 火箭/导弹系统的组成	9
1.3.1 火箭发动机壳体	9
1.3.2 推进剂	9
1.3.3 点火系统	10
1.3.4 阻燃层、绝热层和衬层	11
1.3.5 喷管	11
1.4 其他推进系统	12
1.4.1 核能推进	13
1.4.2 电推进	14
1.5 印度火箭、导弹及运载火箭的发展 历程	15
第 2 章 火箭推进剂的种类及制造技术分类	17
2.1 简介	17
2.2 固体推进剂	18
2.3 液体推进剂	20
2.4 混合推进剂	21
2.5 凝胶推进剂	22
2.6 推进剂的制造技术分类	23

第3章	推进剂的组成及各组分的性能	25
3.1	固体推进剂的组成	25
3.1.1	双基推进剂的组成	26
3.1.2	复合推进剂的组分	28
3.1.3	贫氧推进剂的组成	33
3.2	液体推进剂的组分	33
3.3	混合推进剂的组分	36
第4章	固体火箭推进剂的制造工艺	39
4.1	引言	39
4.2	双基推进剂的制造工艺	39
4.2.1	挤压双基推进剂	40
4.2.2	浇铸双基推进剂	41
4.3	复合推进剂的制造	45
4.3.1	发动机准备	46
4.3.2	绝热材料的放置	46
4.3.3	打磨与衬层包覆	46
4.3.4	推进剂的混合	47
4.3.5	推进剂的浇铸	48
4.3.6	推进剂的固化	49
4.3.7	推进剂整形	49
4.3.8	应力消除	50
4.3.9	阻燃	50
4.4	复合改性双基推进剂的制造	51
4.4.1	药浆浇铸技术	51
4.4.2	新型粒铸工艺	52
4.5	挤出复合推进剂的制造	52
4.6	用于冲压式喷气发动机/超声速冲压喷射装置的 贫氧推进剂的制造	53

4.6.1	挤压工艺	54
4.6.2	浇铸工艺	54
第5章	绝热层、衬层和阻燃层	55
5.1	引言	55
5.2	绝热层	56
5.3	衬层	58
5.4	阻燃层	60
第6章	固体火箭的推进原理	63
6.1	概述	63
6.2	热化学理论分析与计算	65
6.3	喷管理论	70
6.4	内弹道学	76
6.5	火箭的特性	79
6.6	实例研究	81
6.7	结论	83
第7章	质量控制、安全性和可靠性	84
7.1	引言	84
7.2	质量控制的设备	84
7.2.1	粒度分析	84
7.2.2	水分测定	85
7.2.3	挥发分测量	86
7.2.4	黏度测定	86
7.2.5	密度测量	87
7.2.6	爆热测定	87
7.2.7	燃速测定	87
7.2.8	感度测试	88
7.2.9	热分析测试	89

7.2.10	力学性能测试	90
7.2.11	X 射线照相技术	91
7.3	仪器分析	92
7.3.1	色谱法	92
7.3.2	分光光度法	92
7.3.3	电滴定	93
7.3.4	设备校准	93
7.4	弹道性能评估	94
7.5	复合推进剂加工制造的质量控制	96
第 8 章	生产过程中的安全技术	99
8.1	概述	99
8.2	危险等级分类	102
8.3	主要事故	104
8.4	推进剂制造过程中的安全技术	108
8.5	日常准则	110
第 9 章	点火系统	113
9.1	引言	113
9.2	点火理论	116
9.3	点火装置设计	117
9.4	点火药性能	119
第 10 章	固体火箭推进剂的燃烧机理	121
10.1	概述	121
10.2	复合推进剂的燃烧机理	122
10.3	双基推进剂的燃烧机理	125
10.4	硝胺推进剂的燃烧机理	126
10.5	含 HMX 与 GAP 固体推进剂的燃焰结构	129
10.6	新型推进剂的燃烧特性	129

第 11 章	火箭技术的相关问题	132
11.1	推进剂结构的完整性	132
11.2	现代火箭发动机的壳体材料	136
11.3	推进剂及火箭发动机的寿命预测和延寿	141
11.3.1	失效模式	143
11.3.2	寿命延长	144
11.3.3	推进系统的寿命延长	146
11.4	催化/平台双基推进剂	147
11.5	新型固体推进剂	150
11.5.1	含能氧化剂	152
11.5.2	含能胶黏剂与增塑剂	153
11.6	未来火箭推进剂和推进系统	156
第 12 章	纳米材料在固体火箭推进剂中的应用	158
12.1	纳米材料的基本概念与特性	158
12.1.1	纳米材料的基本概念	158
12.1.2	纳米材料的主要特性	158
12.2	用于固体推进剂的纳米材料的主要制备方法	160
12.2.1	气相法	160
12.2.2	液相法	161
12.2.3	固相法	162
12.3	用于固体推进剂的微/纳米复合材料的 制备方法	162
12.3.1	制备微/纳米复合材料的目的及意义	162
12.3.2	微/纳米复合材料的制备方法	164
12.4	纳米金属材料在固体推进剂中的应用	166
12.4.1	纳米金属材料的特殊性能	166
12.4.2	纳米金属粉对固体推进剂中氧化剂 AP 热分解性能的影响	170

12.4.3	纳米金属粉对 AP/HTPB 固体推进剂 热分解及能量的影响	198
12.5	纳米氧化物在固体推进剂中的应用	209
12.5.1	纳米氧化物及纳米稀土氧化物对固体 推进剂中氧化剂 AP 热分解性能的影响 ...	209
12.5.2	纳米氧化物及纳米稀土氧化物对固体 推进剂热分解及能量的影响	217
12.6	碳纳米管在推进剂中的应用	220
12.6.1	碳纳米管基复合催化剂对 AP 热分解 性能的影响	221
12.6.2	碳纳米管基复合催化剂对 AP/HTPB 推进剂热分解性能的影响	222
12.7	纳米贮氢材料在固体推进剂中的应用	222
12.7.1	纳米镁镍贮氢材料对 AP 及 AP/HTPB 推进剂热分解性能的影响	224
12.7.2	纳米 MgH_2 对 AP 及 AP/HTPB 推进剂 热分解性能的影响	229
12.7.3	纳米 LiH 对 AP 及 AP/HTPB 推进剂 热分解性能的影响	231
12.7.4	纳米 Mg_2CuH_3 对 AP 及 AP/HTPB 推进剂 热分解性能的影响	235
12.8	纳米粉体对 AP 及 AP/HTPB 的热分解催化 性能评述	237
12.9	纳米炸药	238
12.9.1	纳米高氯酸铵	239
12.9.2	纳米黑索今	240
12.9.3	纳米奥克托金	243
12.9.4	纳米六硝基六氮杂异伍兹烷	244

第 13 章	金属/水反应推进剂	246
13.1	金属/水反应推进剂的基本概念及原理	246
13.2	研究金属/水反应推进剂的目的及意义	249
13.3	金属/水反应推进剂的性能	250
13.3.1	金属/水反应推进剂的基本组成	250
13.3.2	金属/水反应推进剂的能量性能	251
13.3.3	Al(Mg)/H ₂ O 反应固体推进剂的 热分解	253
13.3.4	Mg/H ₂ O 反应固体推进剂能量性能	254
13.3.5	Al/H ₂ O 反应固体推进剂的能量性能	259
13.4	Al(Mg)/H ₂ O 反应推进剂的燃烧机理分析	261
参考文献		265

CONTENTS

Chapter 1 History of Rocketry and Systems Involved	1
1.1 History of Rocketry	1
1.2 Spacecrafts and Rockets	5
1.3 Systems Involved in Rockets/Missiles	9
1.3.1 Rocket Motor Casing	9
1.3.2 Propellant	9
1.3.3 Ignition Systems	10
1.3.4 Inhibition Insulation and Liners	11
1.3.5 Nozzles	11
1.4 Other Propulsion Systems	12
1.4.1 Nuclear Propulsion	13
1.4.2 Electric Propulsion	14
1.5 Milestones for the Development of Rockets/Missiles and Space Vehicles in India	15

Chapter 2 Rocket Propellants: Classification and

Manufacture	17
2.1 Introduction	17
2.2 Solid Propellants	18
2.3 Liquid Propellants	20
2.4 Hybrid Propellants	21
2.5 Gelled Propellants	22
2.6 Manufacture of Propellants	23