



国防科技图书出版基金

火炸药技术系列专著



含硼富燃料固体火箭推进剂技术

Boron - based Fuel Rich Solid Rocket Propellant Technology

庞维强 樊学忠 赵凤起 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

含硼富燃料固体火箭 推进剂技术

Boron - based Fuel Rich Solid Rocket
Propellant Technology

庞维强 樊学忠 赵凤起 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

含硼富燃料固体火箭推进剂技术/庞维强,樊学忠,赵凤起
著. —北京:国防工业出版社,2016.12

ISBN 978-7-118-11141-5

I. ①含… II. ①庞… ②樊… ③赵… 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(2016)第299069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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售



*

开本 710 × 1000 1/16 印张 17 字数 314 千字

2016年12月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 85.00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 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	赵伯桥	
秘书长	赵伯桥			
副秘书长	许西安	谢晓阳		
委 员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨 伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆 军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

(按姓氏笔画排序)

为适应未来新一代导弹用高超声速飞行器的快速、机动为目的的技术要求,必须发展重量轻、体积小、速度快、射程远而机动性能又好的动力装置,而固体火箭冲压发动机及其组合推进技术是解决该问题的最佳选择。近年来,随着科学技术的进步和新一代导弹用高超声速飞行器的快速发展,固体冲压发动机的研究受到了广泛的关注,用于固冲发动机中的富燃料推进剂也得到了快速发展。

硼粉由于具有较高的质量热值和体积热值而成为最具有发展潜力的富燃料推进剂用燃料,因而备受国内外研究者的关注。由国防科技图书出版基金资助出版的《含硼富燃料固体火箭推进剂技术》著作,是一本系统介绍含硼富燃料固体火箭推进剂技术方面的最新研究进展的科技著作。本书内容涵盖了无定形硼粉的表面改性、包覆、团聚造粒、表征及其在富燃料推进剂中应用的最新研究进展的科技著作,还涉及了含团聚硼富燃料推进剂的工艺、燃烧性能等调节技术,是作者参阅了近些年国内外本领域的最新研究成果,尤其是总结了作者及其科研团队的科研成果,最后又着重总结了含硼富燃料推进剂的研究进展,并展望了含硼富燃料推进剂在军事上的发展趋势,具有一定的理论研究意义和参考价值。

该书的出版将对含硼富燃料固体火箭推进剂的理论和技术发展发挥重要的作用。

路易吉·德卢卡教授^①

意大利米兰理工大学空间推进实验室

2016年9月16日

^① 路易吉·德卢卡,火箭推进专家。

Preface

Solid rocket ramjets featuring light weight, small volume, fast velocity, large operative range, and good maneuvering performance are the most suitable power devices to adapt the needed quickness and flexibility technical requirements to the highly supersonic aircrafts to be used as future new generation missiles. In this respect, the combination of different aspects of aerospace propulsion technology is the best choice. In recent years, with the development of science and technology, solid rocket ramjets have drawn a widespread attention by world – wide researchers and fuel – rich solid rocket propellants to be burned in solid rocket ramjets underwent a rapid development.

Boron powder, due to its very high gravimetric and volumetric heat of combustion, has become the most promising candidate fuels for fuel – rich solid propellants, attracting much attention from researchers all over the world. *Boron – based Fuel – Rich Solid Rocket Propellant Technology* is published with the financial support of the National Defense Science and Technology Publishing Fund, and it is a professional book systematically introducing the latest research progress in the area of boron – based fuel – rich solid propellants. This publication covers the surface modifications, coating techniques, granulation, and characterization of amorphous boron powder as well as its application to fuel – rich solid rocket propellants. Moreover, technologies to control the processing methods and combustion performance of fuel – rich propellants are also touched. At the end, the book summarizes the research progress in boron – based fuel – rich solid propellants and looks forward to the foreseeable development trends of military applications. This volume constitutes a collective scientific research achievement by the team of authors through referring to and summarizing recent domestic as well as international research findings in the relative field. Thus, it has a great value as both a theoretical research accomplishment thanks to the wide scope of its compilation and a reference document thanks to the large amount of the reported experimental data.

The publication of this book is an important contribution to the international technical literature and will certainly play an important role in the theoretical as well as technological development of boron – based fuel – rich solid rocket propellants.

Professor *Luigi De Luca*

SPLab, Space Propulsion Laboratory, Politecnico di Milano, Italy

16 September 2016

以速度快、质量轻、体积小、比冲高、射程远、结构简单可靠等为特点的固体火箭冲压发动机推进系统,在战争中有很强的突防力和打击力,将是现代空空导弹、反舰导弹等的最佳推进方案。固体火箭冲压发动机是利用空气中的氧气作为氧化剂,它比固体火箭发动机的能量高得多,同样体积和重量的发动机,冲压发动机可提供至少两倍于固体火箭发动机的射程。固冲发动机的卓越性能是以富燃料推进剂的高能量特性为基础的,富燃料推进剂的能量越高,则固冲发动机的潜在优势就越大。固体冲压发动机具有高比冲、可实现全程动力飞行、小体积、长工作时间、较好的机动性等优点,可满足空空、空地、反舰和反辐射导弹的要求,也是炮弹增程中值得研究的动力装置。

近年来,使用富燃料推进剂的固体火箭冲压发动机研制再次成为热点。富燃料推进剂作为固体冲压发动机的主要应用技术领域,经过几十年的发展,呈现出性能不断提高和品种日益细分的发展趋势。含硼富燃料固体推进剂作为固体冲压发动机的重要动力源,是目前能量最高的富燃料推进剂之一,也是最理想的固冲发动机用推进能源,因而受到广泛关注。但是迄今为止,公开发表的系统阐述含硼富燃料推进剂技术的书籍尚未见到,仅有部分书中的某些章节曾涉及富燃料推进剂技术的一些概况。因此,本书的目的是试图将30余年来在本领域应用基础研究中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实用的工程技术人员,为他们提供一部有借鉴作用的技术参考书。本书重点介绍了硼粉的表面改性和团聚、含硼富燃料推进剂的能量性能、工艺性能和燃烧性能方面的研究结果,反映了含硼富燃料推进剂的研究发展水平,对含硼富燃料推进剂的研制技术具有重要的指导作用。

本书共分7章,依据含硼富燃料推进剂研制的自身性能和满足使用要求为主线,分章对含硼富燃料固体推进剂的不同性能进行系统阐述。第一章主要介绍含硼富燃料推进剂的主要组成、主要性能和最新研究进展,并概述了含硼富燃料推进剂的性能特点和高能武器系统对含硼富燃料推进剂的需求,以及需要解决的问题。第二章重点介绍了用于含硼富燃料推进剂的无定形硼粉的表面改性和团聚工艺,并与改性前进行了对比,介绍了晶体硼粉、硼镁复合粉等的特性。

第三章介绍了含硼富燃料推进剂的表-界面特性,研究了硼粉改性前后与推进剂主要组分间的表-界面特性,重点从接触角、表面自由能和黏附功等角度出发,获得了团聚硼颗粒与黏合剂的表-界面机理。第四章介绍了含硼富燃料推进剂药浆的流变特性,分别从黏合剂体系、改性前后硼粉与黏合剂悬浮液和含硼富燃料推进剂药浆等方面进行了详细分析和阐述,并对高含硼量富燃料推进剂的制备工艺进行了探索研究。第五章从理论和实际相结合,对含硼富燃料推进剂的能量性能及影响因素进行了分析和研究。第六章系统研究了含硼富燃料推进剂的燃烧性能,围绕硼粉的点火,建立了硼粉点火模型,重点介绍了不同类型和粒度的硼粉对富燃料推进剂燃烧性能的影响,从推进剂的燃烧残渣角度分析了不同因素对含硼富燃料推进剂的燃烧效率的影响。第七章介绍了含硼富燃料推进剂的需求和发展趋势以及对发展富燃料推进剂的一些建议。

庞维强博士参与了本书中硼粉的表面改性及团聚处理、含硼富燃料推进剂的工艺性能和燃烧性能的撰写,樊学忠研究员参与了本书中硼粉改性、团聚前后的表-界面特性和含硼富燃料推进剂能量性能的撰写,赵凤起研究员参与了本书中含硼富燃料推进剂的研究进展和发展趋势及燃烧机理的撰写,本书由庞维强博士整理、统稿。

本书的完成也来自于各方面的支持和悉心帮助。在此,作者特别感谢国防科技图书出版基金、原总装备部燃烧与爆炸技术国防重点实验室基金和国家国防科工局的项目资助。作者特别感谢固体推进剂研究方面的国际知名专家意大利米兰理工大学空间推进实验室路易吉·德卢卡(Luigi T. DeLuca)教授为本书作序,特别感谢西北工业大学李葆萱、胡松启、王英红和张教强等教授对作者在科研实验中给予的指导和帮助,特别感谢南京理工大学化工学院的周伟良教授和陕西师范大学材料科学与工程学院的刘宗怀教授对本著作提出的宝贵建议,同时感谢西安近代化学研究所的张晓宏、李上文、刘子如、胡荣祖、蔚红建、胥会祥、廖林泉和张伟等研究员;冉秀伦、李吉祯、王晗、仪建华、黄海涛、严启龙、李冬、徐洪俊等博士;李宏岩、孟玲玲、莫红军、李勇宏、王国强、刘芳莉、谢五喜、石小兵、李洋、闫宁、孙志华、王克勇、李晓宇、任晓宁、刘庆等副研究员,以及西安近代化学研究所的各级领导对本著作的大力支持和悉心帮助。

由于科学技术的日新月异和作者的学识所限,书中难免存在不足之处,敬请读者不吝赐教。

著 者

2016年8月

于西安近代化学研究所

第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 含硼富燃料推进剂的主要组成	2
1.2.1 黏合剂	2
1.2.2 金属燃料	2
1.2.3 氧化剂和高能填料	7
1.2.4 燃烧催化剂和燃烧稳定剂	8
1.2.5 键合剂	9
1.2.6 防老剂	12
1.3 富燃料推进剂的主要性能及特点	13
1.3.1 能量性能	13
1.3.2 工艺性能(流变性能和表-界面性能)	14
1.3.3 燃烧性能	17
1.3.4 含硼富燃料推进剂的性能特点	19
1.4 含硼富燃料推进剂目前存在的问题	20
1.5 含硼富燃料推进剂的最新进展	22
1.5.1 硼粉的表面改性进展	22
1.5.2 含硼富燃料推进剂研究现状	23
1.6 含硼富燃料推进剂的重要性	27
参考文献	28
第二章 硼粉的表面改性及其表征	30
2.1 概述	30
2.2 硼粉对推进剂制备工艺的恶化及机理研究	30
2.2.1 XPS 分析	31
2.2.2 黏度分析	31

2.2.3	红外分析	33
2.2.4	含硼 HTPB 富燃料推进剂工艺恶化的机理分析	34
2.3	团聚硼颗粒的制备工艺流程	35
2.3.1	无定形硼粉的预处理	36
2.3.2	无定形硼粉的包覆	37
2.3.3	无定形硼粉的团聚造粒	41
2.4	团聚硼颗粒的粒度分布分形表征	48
2.4.1	分形理论概述	49
2.4.2	粒度分布的分形模型	50
2.4.3	颗粒粒度分布分形的测试原理	50
2.4.4	固体推进剂中固体填料的粒度分形维数	51
2.4.5	分形维数表征固体颗粒粒度级配特点	56
2.4.6	团聚硼颗粒表面粗糙度和粒径分布对富燃料推进剂 药浆流变性能的影响	56
2.5	团聚硼颗粒堆积密度研究	60
2.5.1	团聚硼颗粒堆积密度测试	61
2.5.2	团聚硼颗粒的两种堆积密度比较	61
2.5.3	团聚硼颗粒的流散特性研究	64
2.5.4	振动次数对团聚硼颗粒振实堆积密度的影响	64
2.6	团聚硼颗粒的强度研究	66
2.6.1	团聚硼颗粒强度测试	66
2.6.2	强度(抗压)的测试原理	67
2.6.3	团聚硼颗粒的基本物理参数	67
2.6.4	不同因素对团聚硼颗粒强度的影响	68
2.7	硼粉团聚前和团聚后的表面特性	71
2.7.1	团聚硼颗粒表观形貌研究	71
2.7.2	团聚硼颗粒的酸度分析	73
2.7.3	团聚硼颗粒的 X 荧光分析	74
2.7.4	团聚硼颗粒的包覆度研究	75
2.8	团聚硼颗粒的团聚造粒机理	76
2.8.1	团聚颗粒的核化和长大理论	76
2.8.2	团聚硼颗粒生长过程分析	80
2.8.3	团聚硼颗粒的造粒机理分析	81
2.9	晶体硼粉研究	83

2.9.1	晶体硼粉的制备	83
2.9.2	晶体硼粉的物化特性	84
2.10	硼/镁(铝)复合粉研究	88
2.10.1	硼镁(铝)复合粉的表面形貌和粒度分布研究	90
2.10.2	硼镁(铝)复合粉的密度研究	91
2.10.3	硼镁(铝)复合粉 X 射线荧光分析	92
2.10.4	硼镁(铝)复合粉表面酸度分析	93
	参考文献	94
第三章	团聚硼颗粒与黏合剂体系的表-界面性能研究	97
3.1	概述	97
3.2	测试原理和测试方法	97
3.2.1	表-界面化学原理	97
3.2.2	接触角测试原理	99
3.2.3	黏附功与铺展系数的计算原理	99
3.2.4	测试方法	100
3.3	团聚硼颗粒与黏合剂体系的表-界面性能	101
3.3.1	团聚硼颗粒的表面特性研究	101
3.3.2	接触角和表面自由能的计算	107
3.3.3	黏附功和铺展系数的计算	108
3.3.4	团聚硼颗粒的表面改性机理研究	110
3.4	含团聚硼富燃料推进剂的表-界面(多界面)特性研究	114
3.5	团聚硼颗粒对含硼富燃料推进剂微观形貌的影响	116
	参考文献	117
第四章	流变性能和制备工艺	119
4.1	概述	119
4.2	推进剂流变特性的表征和测试	119
4.2.1	流变特性的表征	119
4.2.2	测试的仪器装置	120
4.2.3	样品的制备	121
4.2.4	测试方法	121
4.3	不同因素对富燃料推进剂流变性能的影响	122
4.3.1	HTPB 黏合剂的流变特性	122

4.3.2	团聚硼/HTPB 悬浮液流变特性研究	123
4.3.3	不同组分对含硼富燃料推进剂药浆流变特性的影响	126
4.4	含硼富燃料推进剂的制备工艺	134
4.4.1	含硼富燃料推进剂的设计原则	135
4.4.2	富燃料推进剂制造工艺流程	135
4.4.3	含团聚硼富燃料推进剂配方	136
4.4.4	推进剂样品的制备	136
4.4.5	含团聚硼富燃料推进剂的制备工艺性能	137
	参考文献	137
第五章 能量性能		140
5.1	概述	140
5.2	评价富燃料推进剂的能量性能的指标——热值和密度	140
5.2.1	富燃料推进剂能量特性计算原理和方法	141
5.2.2	燃烧热值的理论计算与测试方法	145
5.3	推进剂能量提高的技术途径	146
5.3.1	添加金属燃料	146
5.3.2	有效添加剂	146
5.4	含硼富燃料推进剂能量性能的影响因素	148
5.4.1	黏合剂	148
5.4.2	硼粉燃料	150
5.4.3	氧化剂和固体填料	154
	参考文献	160
第六章 燃烧性能		162
6.1	概述	162
6.2	含硼富燃料推进剂燃烧性能的代表参数和测试方法	163
6.2.1	表征参数	163
6.2.2	测试方法	164
6.3	改善含硼富燃料推进剂燃烧的技术途径	165
6.3.1	加入添加剂	165
6.3.2	硼颗粒表面包覆	169
6.4	硼颗粒的点火与燃烧	171
6.4.1	硼粉的点火模型	172

6.4.2	团聚硼颗粒的点火模型	172
6.4.3	不同气氛中硼粉的点火特性	174
6.4.4	不同气氛下硼粉燃烧发射光谱和火焰形态	177
6.5	硼对富燃料推进剂燃烧性能的影响	183
6.5.1	含硼富燃料推进剂的燃烧性能研究	183
6.5.2	表面改性硼粉的热分解特性	185
6.5.3	含晶体硼粉富燃料推进剂的燃烧性能	187
6.5.4	含晶体硼粉富燃料推进剂的热分解特性	188
6.5.5	含硼镁复合粉的富燃料推进剂的燃烧特性	190
6.5.6	含团聚硼富燃料推进剂 $\Phi 64$ 标准发动机试验	191
6.6	富燃料推进剂燃烧机理研究	195
6.6.1	燃烧火焰结构	195
6.6.2	燃烧波温度	198
6.6.3	熄火表面	209
6.6.4	燃烧残渣分析	211
6.7	含硼富燃料推进剂一次燃烧喷射效率影响因素分析	223
6.7.1	推进剂配方和实验方案	223
6.7.2	推进剂组分对一次喷射效率的影响	225
6.7.3	喷射装置对一次喷射效率的影响	226
6.8	含硼富燃料推进剂的一次燃烧模型	226
6.8.1	一次燃烧物理模型的建立	227
6.8.2	一次燃烧数学模型的建立	229
	参考文献	233
第七章 含硼富燃料推进剂的应用前景和发展趋势		238
7.1	概述	238
7.2	含硼富燃料推进剂的应用前景	238
7.2.1	新一代空空导弹	238
7.2.2	未来超声速反舰导弹	239
7.2.3	对抗高机动目标的地空导弹	240
7.2.4	大口径增程炮弹	240
7.3	富燃料推进剂的发展趋势	240
7.3.1	低特征信号	240
7.3.2	钝感特性	240

7.3.3 高燃速压力指数	241
7.3.4 使用纳米燃料的富燃料推进剂	241
7.4 对发展富燃料推进剂的一些建议	242
参考文献	243