



陕西出版资金精品项目

专著

ZHUANZHU

富燃料固体火箭推进剂技术

庞维强 樊学忠 胥会祥 赵凤起 著

ZHUANZHU

西北工业大学出版社



陕西出版资金精品项目

FURANLIAO GUTI HUOJIAN TUIJINJI JISHU

富燃料固体火箭推进剂技术

庞维强 樊学忠 胥会祥 赵凤起 著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书以富燃料推进剂的主要性能为主线,按照富燃料推进剂用燃烧剂的不同种类,对不同类型的富燃料推进剂的相关性能进行系统的介绍。全书共分为8章,主要介绍不同类型的富燃料推进剂的组成、主要性能以及最新研究进展,重点阐述富燃料推进剂的能量性能、工艺性能、燃烧性能和安全性能等的影响因素及规律,展望富燃料推进剂的未来发展趋势。

本书可供从事含能材料、复合固体推进剂和富燃料推进剂科研、生产的专业技术人员参考,也可供高等学校从事相关研究和教学工作的教师及研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

富燃料固体火箭推进剂技术/庞维强等著. —西安:西北工业大学出版社, 2016.8
ISBN 978-7-5612-4950-5

I. ①富… 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(2016)第 173268 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:兴平市博闻印务有限公司

开 本:787 mm×960 mm 1/16

印 张:12.75

字 数:260 千字

版 次:2016 年 8 月第 1 版 2016 年 8 月第 1 次印刷

定 价:68.00 元

序

近年来,随着科学技术的进步和新一代导弹用超声速飞行器的快速发展,固体火箭冲压发动机的研究受到了广泛的关注,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。富燃料固体火箭推进剂从燃料的能量方面分类主要包括高能含硼富燃料推进剂、中能镁铝富燃料推进剂、燃烧洁净富燃料推进剂、低特征信号富燃料推进剂等。

富燃料推进剂由于是最理想的固体火箭冲压发动机用推进能源,因而备受国内外研究者的关注。由陕西出版精品项目资金资助,西北工业大学出版社出版的《富燃料固体火箭推进剂技术》,是一本系统介绍不同类型的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。该书内容涵盖了富燃料固体火箭推进剂用不同类型燃料的基本物化特性及其在富燃料推进剂中应用的最新研究进展,还涉及了含不同燃料的富燃料推进剂的能量性能、工艺性能、燃烧性能和安全性能等调节技术,最后总结了富燃料推进剂的研究进展,并展望了富燃料推进剂在军事上的发展趋势。该著作是作者参考国内外研究和对十多年来科研团队在本领域的最新研究成果的总结,具有一定的理论研究意义和参考价值。

该书的出版将对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。

查尔斯·卡喷斯特* 教授

2016年9月15日于法国普瓦提埃大学普瓦提埃化学材料研究所

* 查尔斯·卡喷斯特,火箭推进专家。

Preface

In recent years, with the development of science and technology, solid rocket ramjet has become a widespread concern for all researchers; fuel rich solid rocket propellants used in rocket ramjet have also been the subject of rapid development, in agreement with performance calculations. Various types and performance improvements of fuel rich solid rocket propellants have been presented during the last decades. From the high-energy fuel point of view, fuel rich solid rocket propellants include: high-energy boron-based propellant, middle-energy magnesium/aluminum-based propellant, clean-combustion propellant, low signature propellant, etc.

Engine based on fuel rich solid rocket propellant, as it is the most ideal propulsion technique for solid rocket ramjet, has attracted much attention for researchers all over the world. The publication of this book entitled *Fuel Rich Solid Rocket Propellant Technology* financially supported by Shaanxi Publishing Boutique project funding, published by Northwestern Polytechnical University Press will introduce the latest research progress of fuel rich solid rocket propellants in propulsion systems. This book covers the physical & chemical properties of high-energy fuels for fuel rich propellants and the developing progress of their uses in fuel rich solid rocket propellants; it involves also the energetic properties, process performances, combustion properties and safety properties of fuel rich propellants; finally, it summarizes the current research progress and looks forward to the development trends of fuel rich solid rocket propellants for military applications. This publication is the combination of a number of cooperations, especially based on the research achievements of the author working group.

The publication of this book will play an important role in the development of the theory and technology of fuel rich solid rocket propellants.

Professor Emeritus



Institute of Chemistry of Mediums and Materials of Poitiers,
UMR CNRS 7285, University of Poitiers, France

15 September 2016

前 言

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。固体冲压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,固体冲压发动机的潜在优势就越大。固体冲压发动机具有的高比冲、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。

近些年,使用富燃料推进剂的固体火箭冲压发动机研制成为热点。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。富燃料推进剂主要包括高能含硼富燃料推进剂、中能镁铝富燃料推进剂、含碳氢燃料的低特征信号富燃料推进剂、含高能硼基燃烧剂的高能富燃料推进剂等。由于富燃料推进剂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,尚未见到公开发表的系统阐述不同种类的富燃料固体火箭推进剂技术的书籍,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笔者多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。本书重点介绍不同种类的富燃料推进剂的主要组成,富燃料推进剂的能量性能、工艺性能、燃烧性能、力学性能和安全性能方面的研究结果,并展望富燃料推进剂的发展趋势,反映富燃料推进剂的最新研究发展水平,对富燃料推进剂的研制技术具有重要的指导作用。

本书共分8章,依据富燃料推进剂的主要性能为主线,分章对富燃料推进剂的不同性能进行系统阐述。第1章主要介绍富燃料推进剂的主要性能特点和最新研究进展以及研究富燃料推进剂的重要性;第2章重点介绍不同类型的富燃料推进剂的组成和选择要求;第3章介绍富燃料推进剂能量性能和表征方法及提高途径,分别研究不同燃料对富燃料推进剂能量性能的影响及规律;第4章介绍富燃料推进剂工艺性能表征方法和测试手段,分别从表观黏度和屈服值等角度研究不同种类的富燃料推进剂药浆的流变特性;第5章结合热分析手段,系统地阐述不同富燃料推进剂的燃烧性能及影响因素,重点论述不同类型的含硼富燃料推进剂的燃烧性能、含镁铝富燃料推进剂的点火特性和燃烧性能,探索含碳氢燃料和其他高能燃料富燃料推进

剂的燃烧特性;第6章理论和实际相结合,对富燃料推进剂的力学性能的代表方法和测试手段进行阐述,重点论述富燃料推进剂力学性能的影响因素和提高途径,为改善富燃料推进剂的力学性能提供借鉴和参考;第7章系统阐述富燃料推进剂安全性能的代表方法和测试手段,根据不同种类的富燃料推进剂的机械安全性能的研究结果,提出提高富燃料推进剂安全性能的技术途径;第8章论述富燃料推进剂的最新研究进展,并展望富燃料推进剂的发展趋势,为从事富燃料固体火箭推进剂的科研工作者提供研究思路和方向。

本书中的大部分内容为笔者在富燃料固体推进剂领域研究的重要成果,是笔者及其研究团队多年研究工作的结晶,同时也梳理了国内外同行们的相关研究成果。本书的撰写工作由庞维强、樊学忠、胥会祥、赵凤起合作完成。庞维强参与了全书的撰写,樊学忠参与了碳氢燃料部分的撰写,胥会祥参与了镁铝富燃料推进剂部分的撰写,赵凤起参与了高能硼基燃料推进剂部分的撰写,全书由庞维强统稿。

本书的出版得到了各方面的支持和悉心帮助。在此,笔者特别感谢西北工业大学出版社基金资助;非常感谢国际知名专家法国普瓦提埃大学化学材料研究所 Charles J. KAPPENSTEIN 教授为本书作序;感谢西北工业大学航天学院的李葆萱、胡松启等教授;中国兵器第五十九研究所的肖秀友研究员。同时感谢西安近代化学研究所的张晓宏、李上文、舒远杰、廖林泉和蔚红建等研究员;张伟、冉秀伦、李吉祯、王晗、仪建华、李冬、徐洪俊、黄海涛等博士,李宏岩、李勇宏、王国强、孟玲玲、谢五喜、石小兵、李洋、刘运飞、刘小刚、莫红军、王克勇、任晓宁、李晓宇、薛云娜、杜咏梅、张楠楠、吴雄岗等副研究员以及西安近代化学研究所的领导对本书的大力支持和悉心帮助。

在此向给予转载和引用的资料、图片、文献的所有权者表示诚挚的谢意!

由于科学技术的日新月异和学识所限,书中难免存在一些错误和不足之处,敬请读者不吝赐教。

著者

2015年12月于西安近代化学研究所

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 富燃料推进剂的性能特点	1
1.3 富燃料推进剂的发展需求及进展	2
1.4 研究富燃料固体火箭推进剂的重要性	5
参考文献	6
第 2 章 富燃料推进剂的组成	9
2.1 概述	9
2.2 富燃料推进剂的组分	9
参考文献	45
第 3 章 富燃料推进剂的能量性能	50
3.1 概述	50
3.2 富燃料推进剂能量性能的特征参数与测试方法	50
3.3 提高富燃料推进剂能量性能的途径	51
3.4 含硼富燃料推进剂	54
3.5 含镁铝富燃料推进剂	57
3.6 含锆(钛)富燃料推进剂	64
3.7 含碳氢燃料富燃料推进剂	69
3.8 含高能硼基燃烧剂富燃料推进剂	70
参考文献	71
第 4 章 富燃料推进剂的工艺性能	74
4.1 概述	74

4.2	富燃料推进剂工艺性能的表征参数和测试方法	74
4.3	黏合剂 HTPB 流变特性研究	75
4.4	含硼富燃料推进剂	77
4.5	含镁铝粉富燃料推进剂	92
4.6	含锆(钛)粉富燃料推进剂	94
4.7	含碳氢燃料富燃料推进剂	96
4.8	含高能硼基燃烧剂富燃料推进剂	97
	参考文献	98
第 5 章	富燃料推进剂的燃烧性能	101
5.1	概述	101
5.2	富燃料推进剂燃烧性能的表征参数和测试方法	101
5.3	含硼富燃料推进剂	104
5.4	含镁铝富燃料推进剂	118
5.5	含锆(钛)富燃料推进剂燃烧性能	143
5.6	含碳氢燃料的富燃料推进剂	144
5.7	含高能硼基燃烧剂的富燃料推进剂	152
	参考文献	156
第 6 章	富燃料推进剂的力学性能	160
6.1	概述	160
6.2	富燃料推进剂力学性能表征参数和测试方法	160
6.3	富燃料推进剂力学性能的影响因素和提高的途径	162
6.4	含硼富燃料推进剂	165
6.5	含镁铝富燃料推进剂	166
6.6	含锆(钛)富燃料推进剂力学性能	167
6.7	含碳氢燃料富燃料推进剂	168
6.8	含高能硼基燃烧剂富燃料推进剂的表面形貌	169
6.9	固体火箭发动机对富燃料推进剂力学性能的要求	170
	参考文献	171

第 7 章 富燃料推进剂的安全性能	173
7.1 概述	173
7.2 富燃料推进剂安全性能的表征参数和测试方法	173
7.3 含硼富燃料推进剂	175
7.4 含镁铝富燃料推进剂	176
7.5 含锆(钛)富燃料推进剂	177
7.6 含碳氢燃料的富燃料推进剂	178
7.7 含高能硼基燃烧剂的富燃料推进剂	179
7.8 降低粉体感度的措施和方法	179
参考文献	181
第 8 章 富燃料推进剂的发展趋势	184
8.1 概述	184
8.2 富燃料推进剂的发展趋势	184
8.3 对发展富燃料推进剂的一些建议	189
参考文献	189

第1章 绪 论

1.1 概 述

以速度快、质量轻、体积小、比冲高、射程远、结构简单和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之一^[1-3]。与固体火箭发动机相比,固体火箭冲压发动机用富燃料推进剂,其二次燃烧时所需的氧化剂相当一部分是取之于空气中的氧,因此明显提高了武器的射程。固体冲压发动机是富燃料推进剂主要的应用上游技术领域,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^[4-10]。富燃料推进剂也在不断发展中,推进剂配方种类也呈现多样化发展。常见的富燃料推进剂主要源于复合推进剂体系,并加入了大量的金属燃料。配方一般含有15%~20%的黏合剂、40%~50%的固体燃料(包括:固体碳氢燃料和B, Mg, Al等金属燃料)和35%~40%的氧化剂(AP等)。以所采用的主要燃料成分来分类,国外研究过的富燃料推进剂配方主要有含碳氢燃料推进剂(不含高热值固体燃料)、含金属燃料推进剂(包括镁、铝及其组合)和含硼富燃料推进剂三大类^[11-15],所采用的黏合剂主要有固态烃、端羧基聚丁二烯(CTPB)、端羟基聚丁二烯(HTPB)以及近些年开发出的各种含能聚合物黏合剂,氧化剂主要是硝酸钠、高氯酸铵(AP)、高氯酸钾(KP)和硝酸铵(AN)等。

1.2 富燃料推进剂的性能特点

与常规固体火箭推进剂相比,富燃料推进剂中氧化剂含量减少,金属含量增加。固体火箭冲压发动机燃气发生器用富燃料推进剂中氧化剂含量几乎是常规火箭推进剂的一半,金属添加剂含量则增加一倍多。富燃料推进剂的组成特点及其使用环境决定了它的燃烧特性与常规火箭推进剂不同。富燃料推进剂的主要燃烧特征为:

(1)富燃料推进剂燃烧的不稳定性。由于富燃料推进剂中氧化剂含量大大降低,因此在氧化剂颗粒的上方以及氧化剂周围,分解速度或燃烧速度都比远离氧化剂颗粒的黏合剂部分燃速高,这是造成富燃料推进剂燃烧不稳定的原因之一;另外由于金属含量增加,金属颗粒燃烧时的溅射作用也造成推进剂燃烧的不稳定。

在测定富燃料推进剂燃速时,经常发现推进剂呈现出“层状”燃烧、燃烧过程中推进剂成块

脱落等现象。Fourest 等^[16]还观察到了在低压下富燃料推进剂燃面上固体残渣周期性飞离燃面的不稳定燃烧现象。

(2)富燃料推进剂燃烧缓慢。一方面,由于富燃料推进剂中氧化剂含量少,推进剂燃烧的不完全程度增加,燃烧放热小,因此富燃料推进剂的燃速低;另一方面,由于富燃料推进剂在燃气发生器中工作压强低,尤其对于非壅塞燃气发生器的工作环境,富燃料推进剂的工作压强一般在 0.5 MPa 以下,如此低的工作压强不仅使富燃料推进剂的燃烧变得缓慢,而且对其燃烧稳定性也是一个严峻的考验。

(3)富燃料推进剂点火困难。富燃料推进剂中氧化剂含量少、燃速慢,其点火比常规火箭推进剂更难,富燃料推进剂点火须施加的能量和热量更大,而且其点火延迟时间也较长。

(4)富燃料推进剂燃烧不完全。富燃料推进剂中氧化剂含量大大减少,低压下燃烧时有浓浓的黑烟,凝相产物较多,燃烧的不完全程度增加。因为富燃料推进剂燃烧缓慢、稳定性差,燃速测试数据的散布大,用常规火箭推进剂燃速的测试方法来测定富燃料推进剂燃速有较大困难,所以富燃料推进剂的燃烧性能测试有其独特性。

1.3 富燃料推进剂的发展需求及进展

尽管富燃料推进剂存在一些不足,如点火、燃烧等问题,但是,随着科学技术的发展,高能燃料处理技术的关键技术得到突破,可应用的高能燃料生产技术也不断成熟,相应的,富燃料推进剂的一些难题也在不断解决,用于冲压发动机的富燃料推进剂将有很大的需求和应用前景。

1.3.1 固体火箭冲压发动机对富燃料推进剂的需求

鉴于富燃料推进剂固体火箭冲压发动机理论性能的优越性,多种新一代导弹武器系统都有使用这种发动机的需求^[17-24],尤其是各种用途的飞航导弹对该动力装置有很强烈的需求。

1. 新一代空-空导弹的需求

空-空导弹的发展方向之一是远程化,目前世界上现役的中远距离空-空导弹几乎都采用传统的固体火箭发动机,同时各国也努力在各个型号上采用各种先进的发动机技术。与中距空-空导弹相比,远距空-空导弹的难点之一在于远距离推进动力技术。经过几十年的发展,固体火箭发动机技术已相当完善,近期明显提高其性能的可能性很小,因此很多国家都积极寻求新的技术途径,而固体火箭冲压发动机就是一种被试验证明十分有效的技术途径。固体火箭冲压发动机的主要优势在于它可以提供比相同质量的固体火箭发动机大得多的能量,提供约两倍的有效动力射程,可使导弹获得更高的巡航速度和更强的末端机动能力。空-空导弹的发展将从采用双推固体火箭发动机、双脉冲固体火箭发动机,逐步过渡到使用及维护同样简单的具有射程远、速度快、体积小、结构简单等许多优点的固体火箭冲压发动机。

国外研发的新型中远程空-空导弹普遍采用了固体火箭冲压发动机作为动力装置,如目前欧洲的“流星”、南非的 R-Darter 和以色列的“德比”。表 1-1 所列内容是当今世界几种采用整体式固体火箭冲压发动机的空-空导弹及其使用的富燃料推进剂和火箭助推器。

表 1-1 几种采用固体火箭冲压发动机的中远距离空-空导弹

导弹型号	燃料类型	助推器类型	弹径/mm	弹重/kg	射程/km
Meteor	硼	无喷管火箭	180	185	>100
AIM-120 改进型	—	无喷管火箭	≈180	—	>100
R-77M	铝镁	无喷管火箭	200	225	≈160
A3M	硼	无喷管火箭	180	165	250(高空)
Rustique	硼	无喷管火箭	—	—	—
LRAAM	—	无喷管火箭	180	≈170	>100
S-225XR	—	—	203	≈200	>100

2. 未来超声速反舰导弹的需求

现代反舰作战要求导弹既能飞得快,又能飞得远,机动能力还要强,这一切都使得单独的火箭发动机力不从心。因此,只有在导弹巡航段引入推进效率更高的吸气式喷气发动机才能解决这些矛盾。未来超声速反舰导弹的动力装置,一方面大力寻求固体火箭发动机自身性能的提高和技术创新;另一方面将采用新型特种推进技术,如整体式固体火箭冲压发动机。整体式固体火箭冲压发动机兼有固体火箭发动机与冲压发动机的双重优点,理论比冲是固体火箭发动机比冲的 3~4 倍,理想的工作速度范围是 4~6 马赫,是高速导弹的理想动力装置。随着整体式固冲发动机大攻角进气道性能的提高和高能富燃料推进剂的研制成功,采用该发动机的未来反舰导弹将不仅具有速度特性好、射程远、体积小的优点,而且可实施全程主动攻击,末段机动过载大,从而大大提高导弹的抗干扰能力和突防威力。

3. 对抗高机动目标的舰空导弹的需求^[25-26]

被称为超声速飞航导弹理想推进系统的整体式火箭冲压发动机分为冲压发动机及助推火箭两级,而所谓整体火箭冲压发动机也就是设法使两级飞行器合二为一,将助推火箭内置于冲压发动机的燃体喷口内,发动机具有结构紧凑的特点。整体式固体火箭冲压发动机不仅是未来高速空射战术导弹的最佳动力方案,也很适合地射型和舰射型高速防空战术导弹。

4. 大口径炮弹增程的需求^[27-30]

对于富燃料推进剂固体火箭冲压发动机(SDR)用于炮弹增程,美国、瑞典、南非等国家从 20 世纪 80 年代进行了认真研究;固体燃料冲压发动机(SFRJ)理论上也可用于炮弹增程,此技

术 20 世纪 70~80 年代就引起了美国陆军的注意。二者的难点在于冲压发动机的小型化、小发动机中燃料的高效燃烧和旋转条件下的稳定工作。

1.3.2 固液混合火箭发动机对富燃料推进剂的需求

混合推进剂的固体燃料最初采用的是炭和橡胶,但与主要液体氧化剂配合使用时发动机燃烧效率低;后来随研究工作的深入,对多种固液推进剂组合进行了研究,取得了很大的进展,所用的固体燃料主要有 PE、PU、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)、聚丁二烯丙烯酸丙烯酸(PBAN)、CTPB、HTPB 聚合物以及与金属燃料的混合物;随着许多新型含能高聚物(如聚叠氮缩水甘油醚(GAP)、叠氮甲基-3-甲基氧杂环丁烷(AMMO)、3,3-二叠氮甲基氧杂环丁烷(BAMO)、3,3-二叠氮甲基氧丁环-3-叠氮甲基-3-甲基氧丁环(BAMO/AMMO)和 3-硝基甲基-3-甲基氧丁烷(NIMMO)等)的出现,人们不仅将其用于固体推进剂黏合剂,而且还将其作为固液混合推进剂固体燃料的主要成分,使固液混合推进剂的燃速、燃烧效率、燃烧完全程度等性能得到很大的改善^[31]。固体燃料配方除了含上述高聚物组分外,还有其他新型燃料添加剂,包括二聚环戊二烯、 Li_3AlH 、GAT(偶氮四唑胍盐)等^[32]。另外,混合推进剂的点火延迟期较长,需要改善固体燃料的点火性能,通过在燃料配方中加入镁粉和小分子胍衍生物尤其是硫代酰胺可显著改善其点火性能^[33],将固体燃料配方中引入少量氧化剂^[34]得到类似富燃料推进剂的配方也可以改善点火性能。目前对混合火箭所用固体燃料配方有向添加部分氧化剂、使用含能黏合剂等高氮含能材料组分和能自持分解的富燃料推进剂发展的趋势^[35]。近些年也有人开始研究将 HTPB/AP/ Fe_2O_3 富燃料推进剂应用于固液混合火箭发动机以提高发动机的性能^[36],1999 年美国阿拉巴马大学(Huntsville)推进研究中心(PCR)和 NASA 合作进行的“混合火箭燃料消耗速率调节研究项目(Ted Rochford 执行)”采用了含 AP 氧化剂 25%~30% 的固体燃料 HTPB/AP/ Fe_2O_3 ,该燃料配方类似富燃料推进剂,但氧化剂含量较富燃料推进剂低。

从混合火箭固体燃料的发展过程来看,采用类似于富燃料推进剂、可自动分解的固体燃料为解决混合火箭发动机的燃烧问题提供了可能,成为固体燃料的发展方向。

1.3.3 固体燃料冲压发动机对富燃料推进剂的需求

固体燃料冲压发动机(Solid Fuel Ram Jet, SFRJ)最初采用的固体燃料主要是含金属的燃料和普通碳氢燃料,20 世纪 80 年代以后陆续研究了一些能量密度较高的聚立方烷碳氢燃料(1,4-二氰基立方烷和四氰基立方烷)、硼基燃料、硼基 BAMO/NMMO 富燃料推进剂等^[37]。A. M. Helmy^[38]考察了高能量密度烃类化合物作为 SFRJ 固体燃料的特点;C. Segal 等^[39]将高能量密度燃料 PCU(Polycyclic undane)烯烃二聚物与 10% 的苯乙烯/聚丁二烯共聚物黏合剂制成固体燃料固化在 SFRJ 燃烧室壁上进行了燃烧实验,在 $Ma=0.12\sim 0.25$,静压、恒温为 150~250 MPa,300 K 的空气中点火,发现放热是 HTPB 固体燃料的两倍;80 年代发展的含

能共聚物 NMMO/BAMO 成为固体燃料可自持分解黏合剂的一种有价值的选择;K. K. Kuo 等研究了在燃料中使用含能黏合剂的可能性;W. H. Hsich 等^[40]研究了最新发展的硼/BAMO/NMMO 富燃固体推进剂在 SFRJ 中的燃烧行为。对于 SFRJ 固体燃料,90 年代初主要研制了具有高体积比冲的高金属(包括硼燃料)含量固体燃料,典型配方是将 50% 的金属(硼或碳化硼)与 HTPB 聚合物混合,但是为了提高固体燃料的点火可靠性和燃烧效率,美国某些推进设备公司在固体燃料配方中加入少量氧化剂,以增强燃烧火焰的稳定性,并申请了含少量氧化剂固体燃料配方的专利^[41],在 SFRJ 中采用类似于含硼富燃料推进剂的固体燃料已成为发展的主流方向。

1.4 研究富燃料固体火箭推进剂的重要性

现代战争对战术武器系统提出了越来越高的要求,要求导弹具有机动、灵活、高速、隐蔽等特点。其中,速度要求最为迫切,正向超声速和高超声速发展,这说明导弹和航空航天技术已经发展到进入冲压发动机最佳工作领域的新阶段。为了适应未来新一代导弹用高超声速飞行器的技术要求,达到快速、机动的目的,就必须发展一种重量轻、体积小、速度快、射程远而机动性能又好的动力装置,冲压发动机及其组合推进技术则是它的最佳选择^[42-44]。因而,目前国内外对此特别关注。

冲压发动机不同于普通的固体火箭发动机,它的燃料中不含或含有很少的氧化剂,它大部分是直接利用大气中的氧,因而推进剂的比冲较之火箭发动机要高数倍,因此,对导弹设计具有强大的吸引力。一般而言,飞航式导弹包括空地导弹、巡航导弹等都希望采用冲压发动机。固体火箭冲压发动机中,富燃料固体火箭发动机(即燃气发生器)燃烧时产生的富燃料燃气,喷入冲压发动机燃烧室,在那里与进入燃烧室内的空气掺混,进行第二次燃烧,燃气经喷管膨胀产生推力。由此看出,要求推进剂必须含氧量少、燃烧稳定、能量高和补燃效率高。

随着科学技术的进步,固体冲压发动机是富燃料推进剂主要的应用上游技术领域,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,富燃料推进剂也处于相应的发展之中,其性能不断提高,配方种类也呈多样化发展。对于富燃料推进剂的长远发展而言,高性能的含硼推进剂配方始终是不变的选择,国外最新型的固体火箭冲压发动机大都采用了含硼推进剂配方。但从满足现实需求出发,燃烧性能更好的镁-铝推进剂配方可能更容易取得应用突破。富燃料推进剂技术不仅是飞航式导弹向超声速和高超声速($Ma > 4 \sim 8$)、中高空($H > 15 \sim 40$ km)、超低空($H < 100 \sim 300$ m)和中远程($L > 100$ km)方向发展所需吸气式发动机的关键技术,也是推力可调的固液混合火箭发动机的重要支撑技术。

在富燃料推进剂性能调节方面,燃烧性能(尤其对于含硼推进剂配方)无疑是重中之重,而且燃烧性能调节是非常复杂的系统工作,可能涉及推进剂配方组分的选择、比例、配伍、加工技术等等诸多方面的一些关键技术。一旦高能含硼富燃料推进剂的应用问题得到解决、燃烧效

率大幅度提高,以富燃料推进剂为燃料的冲压发动机在与其他发动机的竞争中具有显著优势。

参 考 文 献

- [1] 庞维强,张教强,国际英,等. 21世纪国外固体推进剂的研究与发展趋势[J]. 化学推进剂与高分子材料,2005,3(3):16-20.
- [2] 李上文,赵凤起. 国外固体推进剂研究与开发的趋势[J]. 固体火箭技术,2002,25(2):36-42.
- [3] 赵凤起,覃光明,蔡炳源. 纳米材料在火炸药中的应用研究现状及发展方向[J]. 火炸药学报,2001,24(4):61-65.
- [4] 庞维强. 高含硼量富燃料推进剂研究[D]. 西安:西安近代化学研究所,2011.
- [5] 胥会祥,樊学忠,刘关利. 纳米材料在推进剂应用中的研究进展[J]. 含能材料,2003,11(2):95-98.
- [6] 洪伟良,刘剑洪,田德余,等. 纳米催化剂的特性及其在固体推进剂中的应用[J]. 飞航导弹,2000,12(4):43-45.
- [7] 庞维强. 硼团聚技术及其在富燃料推进剂中的应用研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.
- [8] 张克勤. 冲压推进技术评论[J]. 推进技术,1990(3):1-5.
- [9] 盛祖芳. 粉体表面改性新进展[J]. 塑料加工,2001,37(6):11-15.
- [10] Pang Weiqiang, Fan Xuezhong, Zhao Fengqi, et al. Effects of different metal fuels on the characteristics of HTPB-based fuel rich solid propellants [J]. Propellants, Explosive, Pyrotechnics, 2013,38(6):482-486.
- [11] 刘兴洲,等. 飞航导弹动力装置[M]. 北京:宇航出版社,1992.
- [12] 方丁酉,张为华,杨涛. 固体火箭发动机内弹道学[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1997.
- [13] 庞维强,张教强,朱峰. 新型纳米材料在固体推进剂中的应用[J]. 纤维复合材料,2005,1:12-16.
- [14] 张爱科. 纳米材料在固体推进剂中的应用[J]. 宇航材料工艺,2003,2:17-20.
- [15] 张汝冰,张宏英,李凤生. 含能催化复合纳米材料的制备研究[J]. 火炸药学报,2000,23(3):9-12.
- [16] Fourest B, Masson C. Rescherch of the development de propergols aerobics a fort exopasant de pression[C]. Proc. of the 21st Int. Annu. Conf of ICT,1993,39/1-14.
- [17] Liu T K. Effect of fluorinated graphite on combustion of boron and boron based fuel rich fropellants [J]. J. of Propulsion and Power, 1996,12(1):26-33.

- [18] Liu T K. Effect of boron particle surface coating on combustion of solid propellants for ducted rockets [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1991, 16: 156.
- [19] Limage C R. Combined ducted rocket and solid fuel ramjet cycle [J], AIAA - 1997 - 3397.
- [20] Vigot C, Cocket A, Guin C. Combustion behavior of boron-based Solid Propellants in a ducted roket [J]. *Intenational Journal of Enegetic Materials and chemical propulsion*, 1991, 2(1 - 6): 386 - 401.
- [21] 庞维强, 张教强, 朱峰. 新型纳米材料在固体推进剂中的应用研究 [J]. *纤维复合材料*, 2005, 22(1): 12 - 15.
- [22] Biass E H, Richardson D. Ramjet the air-breathing engine with no serviceable parts inside [J]. *ARMADA International*, 1996, 4: 34.
- [23] 庞维强, 樊学忠. 纳米金属氧化物催化剂在固体推进剂中的应用进展 [J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2008, 6(2): 16 - 19.
- [24] Besser H L. Solid propellant ramrockets [C]// *Ramjet and Ramrocket Propulsion Systems for Missles*, Monterey, London, 1984.
- [25] Mackenzie K. *Advanced Ramjet Systems for the Propulsion of Guided Weapons*. N92 - 23169/5.
- [26] Mcclendon, S. E. Miller, W. H. Herty, et al, Fuel selection criteria for ducted rocket application [J], AIAA, 1980: 1120.
- [27] Pang Weiqiang, Fan Xuezhong, Xue Yunna, et al. Study on the compatibility of tetraethylammonium dodecahydrododecaborates (BHN) with some energetic components and inert materials [J]. *Propellants, Explosive, Pyrotechnics*, 2013, 38 (2): 278 - 285.
- [28] 崔洪涛. 颗粒表面包覆的研究 [D]. 长春: 中国科学院长春应用化学研究所, 2002.
- [29] Pang Weiqiang, Zhao Fengqi, Xue Yunna, et al. Synthesis, characterization of high energetic combustion agent (BHN) and its effects on the combustion properties of fuel rich solid propellant [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2015, 12(3): 537 - 552.
- [30] 庞维强, 张教强, 国际英, 等. 21 世纪国外固体推进剂的研究与趋势 [J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2005, 3(3): 16 - 20.
- [31] Zarlingo F. Air-breathing propulsion concerts for high speed tactical missiles [R]. AIAA - 88 - 3070, 1988.
- [32] 庞维强, 张教强. 21 世纪纳米技术在固体推进剂中的应用研究 [J]. *纳米科技*, 2005, 2 (2): 9 - 13.
- [33] 庞维强, 樊学忠, 吕康. 硼粉在富燃料固体推进剂中的应用 [A]// *中国航空学会动力分*