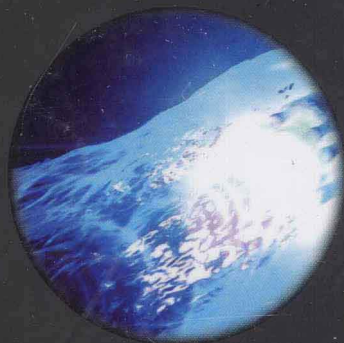




火炸药技术系列专著

国防科技图书出版基金



镁基水反应 金属燃料

Magnesium-based Hydro-reactive Metal Fuel

张 炜 张为华 等著



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

镁基水反应金属燃料

Magnesium-based Hydro-reactive Metal Fuel

张 炜 张为华 周 星 著
李是良 鲍 桐 姚汝亮

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

镁基水反应金属燃料/张炜等著. —北京:国防工业出版社, 2013. 8

ISBN 978-7-118-08841-0

I. ①镁... II. ①张... III. ①固体推进剂—研究
IV. ①V512

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 177149 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 15 字数 236 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 69.00 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	王 峰				
副主任委员	吴有生	蔡 镭	杨崇新		
秘 书 长	杨崇新				
副 秘 书 长	邢海鹰	贺 明			
委 员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书	
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利	
	刘泽金	孙秀冬	陆 军	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	
	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			

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等取得的丰硕成果。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

用于超高速水下航行器的水冲压发动机以水为主氧化剂,以水反应金属燃料为燃料。水反应金属燃料是由金属粉、氧化剂和黏合剂等组成的高金属含量固体富燃料推进剂,其金属含量是常规复合固体火箭推进剂中金属含量的3倍以上。该燃料是水冲压发动机的能源,具有与水快速反应、高能量密度等特点,已成为当前特种推进剂领域的研究热点之一。

水反应金属燃料在超高速水下动力装置中有重要的应用价值,其研究已引起各国含能材料研究者的高度重视。20世纪40年代就提出了将水反应金属燃料用作超高速水下航行器推进系统的概念。俄罗斯已经将基于水反应金属燃料的水冲压发动机成功应用于“暴风雪”超高速鱼雷的动力装置。

全书的撰写思路是:首先,采用热力计算和直连式水冲压发动机试验,分析提高水反应金属燃料能量的技术途径;之后,采用实验与数值分析相结合的方法,依据水反应金属燃料在水冲压发动机中的反应顺序,依次论述镁基水反应金属燃料的热分解特性、自持燃烧性能及其与水反应的特性。

全书共分八章。第一章在介绍水冲压发动机工作原理及其应用的基础上,阐述水反应金属燃料的组成、功能、性能及其调节技术,分析了水反应金属燃料的发展趋势。第二章在简要介绍水冲压发动机能量性能热力计算原理的基础上,采用热力计算和直连式水冲压发动机试验的方法,分析燃料配方、工作参数与水冲压发动机能量性能之间的关系。第三章从镁基水反应金属燃料主要组分的热分解性能研究入手,考察燃料的热分解特性及其影响因素,进而探索镁基水反应金属燃料的热分解反应机理。第四章基于燃料配方,系统考察镁基水反应金属燃料自持燃烧速度、自持燃烧温度和自持燃烧喷射效率特性,并分析它们的主要影响因素。第五章通过镁基水反应金属燃料自持燃烧过程的反应热力学分析、反应区域温度分布和自持燃烧过程的反应产物研究,探索镁基水反应金属燃料的自持燃烧机理。第六章依据前三章的研究成果,结合镁基水反应金属燃料

配方及反应特点,建立镁基水反应金属燃料的自持燃烧模型;据此分析镁基水反应金属燃料自持燃烧速度的影响因素。第七章在分析镁/水反应特性及其反应动力学的基础上,分析镁基水反应金属燃料与水的反应特性,探讨燃料配方及压强对镁基水反应金属燃料/水反应的影响规律。第八章在分析镁基水反应金属燃料/水体系反应热力学基础上,分别建立基于动力学和扩散分段控制的镁/水反应模型、碳/水反应模型,进而构建镁基水反应金属燃料/水反应模型,基于数值计算结果探讨镁基水反应金属燃料/水反应的影响因素。

本书是作者及其团队近年来在镁基水反应金属燃料及其水冲压发动机研究成果基础上撰写的,是课题组多年研究成果的积累,同时也引用了国内外许多同仁的研究成果、论文与著作。第一章由周星和张炜主笔,第二章由周星、鲍桐和姚汝亮合作完成,第三至第六章由李是良主笔,第七章和第八章由周星主笔。全书由张炜统稿,经张为华审定。

本书的研究工作得到了夏智勋教授、郝拥军主任、周俊虎教授和伊寅高工的指导和帮助。胡建新副教授、胡凡副研究员、杨卫娟副教授和黄利亚讲师也提供了许多帮助。周宥辰在本书的编排和校对方面做了大量的工作。在此对他们表示衷心的感谢。

本书涉及含能材料、高分子材料、燃烧学、化学和数值分析等多学科内容。在本书的撰写过程中注重理论、实验研究成果与实际应用的结合,以便读者有所收获。本书可供从事特种推进剂行业的科研、生产以及教学的科技人员参考。

由于作者水平有限,书中一些内容还在研究与发展之中,难免有疏漏和不当之处,恳请读者批评指正。

著者
2013年3月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 超高速水下航行体	2
1.3 水冲压发动机及其工作原理	3
1.4 水反应金属燃料的组成及性能	6
1.4.1 水反应金属燃料的组成	6
1.4.2 水反应金属燃料的燃烧性能	8
1.4.3 水反应金属燃料的工艺性能	9
1.4.4 金属与水的反应	10
1.5 水反应金属燃料的发展趋势	11
参考文献	13
第二章 水反应金属燃料的能量特性	16
2.1 水冲压发动机能量性能的热力计算原理	16
2.1.1 水反应金属燃料平衡燃烧产物计算	17
2.1.2 水冲压发动机的性能计算	20
2.2 水反应金属燃料配方与能量性能的关系	22
2.2.1 提高水反应金属燃料能量性能的技术途径	22
2.2.2 提高镁基水反应金属燃料能量性能的技术途径	26
2.3 水冲压发动机工作参数与能量性能的关系	31
2.3.1 压强对水冲压发动机能量性能的影响	32
2.3.2 水燃比对水冲压发动机能量性能的影响	33
2.4 水冲压发动机中镁基水反应金属燃料的能量特性	34

2.4.1	镁含量对水冲压发动机能量性能的影响	34
2.4.2	水燃比对水冲压发动机能量性能的影响	35
	参考文献	35
第三章	镁基水反应金属燃料的凝聚相反应性能	37
3.1	镁基水反应金属燃料组分的热分解性能	39
3.1.1	AP 的热分解性能	39
3.1.2	HTPB 黏合剂的热分解性能	42
3.1.3	Mg 的热氧化性能	44
3.1.4	AP/HTPB 混合物的热分解性能	46
3.1.5	Mg/HTPB 混合物的热分解性能	47
3.1.6	AP/Mg 混合物的热分解性能	48
3.2	镁基水反应金属燃料的热分解性能	49
3.2.1	镁基水反应金属燃料热分解反应的基本特征	49
3.2.2	氧黏比对镁基水反应金属燃料热分解性能的影响	51
3.2.3	氧化剂粒度对镁基水反应金属燃料热分解性能的影响	52
3.2.4	镁粉对镁基水反应金属燃料热分解性能的影响	53
3.2.5	催化剂对镁基水反应金属燃料热分解性能的影响	55
3.2.6	压强对镁基水反应金属燃料热分解性能的影响	61
3.3	镁基水反应金属燃料的热分解反应机理	62
3.3.1	镁基水反应金属燃料凝聚相热分解产物的形貌	62
3.3.2	镁基水反应金属燃料的凝聚相热分解产物	66
3.3.3	镁基水反应金属燃料的气相热分解产物	71
3.3.4	镁基水反应金属燃料热分解反应的热力学分析	73
3.3.5	镁基水反应金属燃料的热分解机理	75
	参考文献	77
第四章	镁基水反应金属燃料的自持燃烧性能	78
4.1	燃料配方对镁基水反应金属燃料自持燃烧速度的影响	79
4.1.1	氧黏比对镁基水反应金属燃料自持燃烧速度的影响	79

4.1.2	氧化剂粒度对镁基水反应金属燃料自持燃烧速度的影响	79
4.1.3	镁粉粒度粗/细比对镁基水反应金属燃料自持燃烧速度的影响	80
4.1.4	镁粉含量对镁基水反应金属燃料自持燃烧速度的影响	80
4.1.5	催化剂对镁基水反应金属燃料自持燃烧速度的影响	81
4.2	燃料配方对镁基水反应金属燃料自持燃烧温度的影响	82
4.2.1	氧黏比对镁基水反应金属燃料自持燃烧温度的影响	82
4.2.2	氧化剂粒度对镁基水反应金属燃料自持燃烧温度的影响	83
4.2.3	镁粉粒度粗/细比对镁基水反应金属燃料自持燃烧温度的影响	84
4.2.4	镁粉含量对镁基水反应金属燃料自持燃烧温度的影响	85
4.2.5	催化剂对镁基水反应金属燃料自持燃烧温度的影响	86
4.2.6	压强对镁基水反应金属燃料自持燃烧温度的影响	87
4.3	燃料配方对镁基水反应金属燃料自持燃烧喷射效率的影响	88
4.3.1	氧黏比对镁基水反应金属燃料自持燃烧喷射效率的影响	88
4.3.2	氧化剂粒度对镁基水反应金属燃料自持燃烧喷射效率的影响	90
4.3.3	镁粉粒度粗/细比对镁基水反应金属燃料自持燃烧喷射效率的影响	90
4.3.4	镁粉含量对镁基水反应金属燃料自持燃烧喷射效率的影响	91
4.3.5	催化剂对镁基水反应金属燃料自持燃烧喷射效率的影响	91
4.3.6	镁基水反应金属燃料自持喷射效率与压强的相关性	92
4.4	镁基水反应金属燃料自持燃烧速度与温度的相关性	93
4.5	镁基水反应金属燃料自持燃烧速度与喷射效率的相关性	95
4.6	镁基水反应金属燃料的自持燃烧速度与热分解性能的相关性	96
	参考文献	98

第五章 镁基水反应金属燃料的自持燃烧机理

5.1	镁基水反应金属燃料自持燃烧反应分析	99
5.1.1	碳、氢、镁元素氧化反应的竞争关系	99
5.1.2	燃料自持燃烧平衡产物的数值分析	101

5.1.3	氧黏比对燃料自持燃烧过程热力学性质的影响	102
5.1.4	镁含量对燃料自持燃烧过程热力学性质的影响	103
5.2	镁基水反应金属燃料自持燃烧的燃烧波结构	104
5.2.1	镁基水反应金属燃料燃面附近的温度分布	104
5.2.2	压强对镁基水反应金属燃料燃烧波温度的影响	106
5.2.3	镁基水反应金属燃料的自持燃烧火焰结构	107
5.3	镁基水反应金属燃料自持燃烧过程的反应产物	109
5.3.1	镁基水反应金属燃料自持燃烧的凝聚相产物	109
5.3.2	镁基水反应金属燃料自持燃烧的气相产物	112
5.4	镁基水反应金属燃料的自持燃烧机理	114
5.4.1	镁基水反应金属燃料自持燃烧反应的热力学分析	114
5.4.2	镁基水反应金属燃料自持燃烧机理	118
	参考文献	120
第六章	镁基水反应金属燃料的自持燃烧模型及数值分析	121
6.1	镁基水反应金属燃料自持燃烧过程的物理模型	122
6.2	镁基水反应金属燃料自持燃烧过程的数学模型	124
6.2.1	镁基水反应金属燃料自持燃烧的质量燃速	124
6.2.2	镁基水反应金属燃料假想推进剂的燃面几何学	125
6.2.3	镁基水反应金属燃料自持燃烧燃面的能量守恒方程	129
6.2.4	镁基水反应金属燃料自持燃烧过程气相三个火焰 的反应热	130
6.2.5	镁基水反应金属燃料自持燃烧的无因次火焰距离	130
6.2.6	AP 氧化性分解产物进入初始火焰的分数	133
6.2.7	镁颗粒燃烧的热效应	134
6.3	镁基水反应金属燃料自持燃烧模型的验证	139
6.3.1	含 50% 镁粉镁基水反应金属燃料的自持燃速特性	140
6.3.2	不同镁含量镁基水反应金属燃料的自持燃速特性	141
6.4	镁基水反应金属燃料自持燃烧速度的数值分析	142
6.4.1	氧化剂粒度对镁基水反应金属燃料自持燃烧速度的影响	143
6.4.2	镁粉粒度对镁基水反应金属燃料自持燃烧速度的影响	144
6.4.3	镁粉含量对镁基水反应金属燃料自持燃烧速度的影响	145

参考文献	146
第七章 镁基水反应金属燃料与水的反应特性	147
7.1 镁/水反应特性及反应动力学	147
7.1.1 实验数据处理方法	147
7.1.2 镁粉/水体系的低温反应特性	150
7.1.3 镁粉/水体系的高温反应特性	157
7.2 镁基水反应金属燃料/水的反应特性	167
7.2.1 镁基水反应金属燃料/水反应过程	167
7.2.2 水蒸气环境中镁基水反应金属燃料的燃烧实验及数据 处理方法	170
7.2.3 压强对镁基水反应金属燃料/水反应特性的影响	172
7.2.4 燃料配方对镁基水反应金属燃料/水反应特性的影响	176
参考文献	182
第八章 镁基水反应金属燃料/水反应模型及数值分析	184
8.1 水燃比对镁基水反应金属燃料/水体系反应的影响	184
8.1.1 计量水燃比对燃料/水体系燃烧产物的影响	184
8.1.2 最佳水燃比对燃料/水体系燃烧产物的影响	186
8.2 基于动力学和扩散分段控制的镁/水反应模型	187
8.2.1 镁/水扩散控制燃烧模型	188
8.2.2 镁/水化学反应动力学模型	197
8.2.3 基于动力学和扩散分段控制的镁/水反应组合模型	201
8.2.4 镁/水反应影响因素的数值研究	202
8.3 碳/水反应动力学	205
8.4 镁基水反应金属燃料/水反应模型的数值分析	206
8.4.1 镁基水反应金属燃料/水反应模型	206
8.4.2 镁基水反应金属燃料/水反应影响因素的数值分析	208
参考文献	215

Contents

Chapter 1	Introduction	1
1.1	Preface	1
1.2	Ultra-high-speed underwater vehicle	2
1.3	Water ramjet and its working principle	3
1.4	Composition and properties of hydro-reactive metal fuel	6
1.4.1	Composition of hydro-reactive metal fuel	6
1.4.2	Combustion properties of hydro-reactive metal fuel	8
1.4.3	Processblity of hydro-reactive metal fuel	9
1.4.4	The reactions between metals and water	10
1.5	Development trends of hydro-reactive metal fuel	11
	References	13
Chapter 2	Performance of hydro-reactive metal fuel	16
2.1	Fundamentals of thermodynamic calculation for water ramjet	16
2.1.1	Equilibrium combustion products calculation of hydro-reactive metal fuel	17
2.1.2	Performance calculation of water ramjet	20
2.2	Correlations between performance and the hydro-reactive metal fuel formulation	22
2.2.1	Technological approaches to enhance the perormance of the hydro-reactive metal fuel	22
2.2.2	Technological approaches to enhance the perormance of the	

magnesium -based hydro-reactive metal fuel	26
2.3 Correlations between performance of water ramjet and its working parameters	31
2.3.1 Influence of pressure on the performances of water ramjet	32
2.3.2 Influence of the mass ration of water and the fuel on the performances of water ramjet	33
2.4 Performance of magnesium-based hydro-reactive metal fuel in the water ramjet	34
2.4.1 Effect of the magnesium content on the performances of water ramjet	34
2.4.2 Effect of the mass ratio of water and the fuel on the performances of water ramjet	35
References	35

Chapter 3 Condensed phase reaction characteristics of magnesium-based hydro-reactive metal fuel

3.1 Thermal decomposition characteristics of the ingredients of magnesium-based hydro-reactive metal fuel	39
3.1.1 Thermal decomposition characteristics of AP	39
3.1.2 Thermal decomposition characteristics of HTPB binder	42
3.1.3 Thermal oxidation characteristics of magnesium powder	44
3.1.4 Thermal decomposition characteristics of AP and HTPB mixture	46
3.1.5 Thermal decomposition characteristics of magnesium powder and HTPB mixture	47
3.1.6 Thermal decomposition characteristics of AP and magnesium mixture	48
3.2 Thermal decomposition characteristics of magnesium-based hydro-reactive metal fuel	49
3.2.1 Thermal decomposition characteristics of magnesium-based hydro-reactive metal fuel	49
3.2.2 Effect of mass ratio of oxidizer and binder on the thermal	