



火炸药技术系列专著



固体推进剂燃烧催化剂

Combustion Catalysts for Solid Propellant

赵凤起 仪建华 安亭 汪营磊 洪伟良 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

固体推进剂燃烧催化剂

Combustion Catalysts for Solid Propellant

赵凤起 仪建华 安 亭 汪营磊 洪伟良 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

固体推进剂燃烧催化剂/赵凤起等著. —北京:国防工业出版社, 2016. 4

ISBN 978 - 7 - 118 - 10729 - 6

I. ①固… II. ①赵… III. ①固体推进剂 - 推进剂燃烧催化剂 IV. ①V512

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 003281 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 34 字数 648 千字

2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 168.00 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	邢海鹰	谢晓阳		
委员 (按姓氏笔画排序)	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		

序

固体推进剂是战略导弹、战术导弹、空间飞行器和动能拦截弹等武器的主要动力能源,其性能优劣直接影响了武器的生存能力和作战效能。当前,空空导弹、空地导弹、高速动能弹等战术武器亟需换装新型高能、低特征信号、燃烧性能优良的固体推进剂,但这些新型推进剂面临着燃烧压力指数高且难调节、燃烧二次火焰大、不稳定燃烧严重等诸多燃烧难题。固体推进剂的燃烧特性是推进技术的核心,使用燃烧催化剂是调节固体推进剂燃烧性能的有效途径之一。

赵风起研究员及其研究团队对固体推进剂燃烧性能调节进行了数十年的研究,应用现代催化燃烧、化学热力学和动力学等新理论和新技术,从固体推进剂应用的角度,设计、制备了系列燃烧催化剂,揭示了燃烧催化剂结构与燃烧性能的关系,建立了固体推进剂燃烧性能调节方法,实现了双基系推进剂在一定压力范围内燃速可调。研究成果丰富了固体推进剂催化燃烧的理论和实践内容,为满足综合性能不断提高的固体推进剂技术的发展提供了重要的理论依据和技术手段。

编著者的这些创新性的研究成果在工程实践中得到了应用。由国防科技图书出版基金资助出版的《固体推进剂燃烧催化剂》著作,系统全面介绍了国内外尤其是编著者及其研究团队在燃烧催化剂及其对固体推进剂燃烧性能调节等方面的研究成果,具有理论意义和实践价值。该书的出版将对固体推进剂催化燃烧理论与技术的发展发挥重要作用。

南京理工大学教授
中国工程院院士



2015年11月12日

王泽山,火炸药专家。

前 言

固体推进剂作为动力源,是实现火箭导弹远程攻击、高效毁伤的前提条件,具有结构简单、加工方便、发射迅速、可靠性高、成本较低等优点,在国防军事领域的武器装备中占有支配地位。大多数战略导弹、地空导弹及炮兵战术火箭和全部的火箭炮、反坦克导弹以及火箭增程弹使用的都是固体推进剂。推进剂通过在发动机燃烧室内燃烧释放出能量,从而控制火箭导弹的飞行速度和射程。与能量性能、力学性能和安定性相比,燃烧性能是固体推进剂技术的核心,其不仅影响到推进剂能量释放的规律,还对发动机工作可靠性、火箭武器射击精度和射程起着决定性的作用。

燃烧性能调节是现代固体推进剂研究的关键技术之一,使用燃烧催化剂是调节固体推进剂燃烧性能的最佳途径。燃烧催化剂是指以化学方法改变固体推进剂燃烧性能的化合物,是固体推进剂必不可少的重要组分,其作用主要是:①改变推进剂在低压燃烧时的化学反应速度;②降低推进剂燃速受压力、温度影响的敏感程度;③改善推进剂的点火性能;④提高推进剂的燃烧稳定性;⑤调节推进剂燃速,实现发动机设计的不同推力方案。因此,系统深入研究固体推进剂燃烧催化剂,对于掌握调控固体推进剂燃烧性能的新途径,提高推进剂的综合性能具有重要的理论意义和应用价值,同时也对推动军用火箭导弹和航天航空工程火箭推进剂的发展有着重要的意义。

全书共分8章。第1章主要介绍了燃烧催化剂的概念和内涵、分类和特性、主要表征方法和未来发展趋势,并概述了开展固体推进剂燃烧催化剂研究的重要意义;第2章重点介绍了几类含单金属的新型燃烧催化剂,同时对燃烧催化剂的应用及其作用效果进行了示例介绍;第3章介绍了双金属有机化合物燃烧催化剂的合成表征、应用研究及作用效果,如金属铋基、锆基双金属配合物等,该部分内容为燃烧与爆炸技术重点实验室的重要创新成果;第4章详细介绍了当前固体推进剂领域研究较热的纳米燃烧催化剂,包括纳米金属氧化物、纳米金属复合物、纳米有机金属盐、超级铝热剂型燃烧催化剂,并对催化剂的应用效果进行了示例介绍;第5章围绕新型轻质碳材料负载型燃烧催化剂的制备、表征进行了详细介绍,包括碳纳米管负载型催化剂和石墨烯负载型催化剂,并对催化剂的应

用效果进行了示例介绍;第6章从 NTO 金属盐、吡啶类化合物、唑类化合物、硝基苯类化合物等含能燃烧催化剂的合成、表征出发,介绍了其基础特性和应用研究的进展;第7章阐述了多个有关双基系推进剂的催化燃烧机理,并论述了催化燃烧中的化学反应本质;第8章详细叙述了有关复合推进剂的催化燃烧机理,并讨论了燃烧催化剂在复合推进剂燃烧中的作用机理。

本书中的大部分内容为作者在固体推进剂及燃烧领域研究的重要成果,是作者及其研究团队多年研究工作的结晶,同时也梳理介绍了国内外同行们的相关研究成果。本书的撰写工作由赵凤起、仪建华、安亭、汪营磊和洪伟良合作完成。赵凤起参与了全书各章的撰写,仪建华负责了第4和第5章的撰写,安亭负责了第2和第8章的撰写,汪营磊负责了第3和第6章的撰写,深圳大学洪伟良教授也参与了部分章节的撰写工作。全书由赵凤起和安亭统稿。

值此书稿完稿之际,适逢燃烧与爆炸技术重点实验室成立22周年,特著此书以表纪念。实验室成立之初,即开始了与推进剂燃烧相关的实验平台建设工作,通过不断搭建完善稳态燃烧、不稳定燃烧、羽流特性、激光光谱燃烧诊断、钝感特性、点传火等实验系统,逐渐形成了用于固体推进剂燃烧研究的综合实验平台。

本书的完成得到了各方面的支持及悉心帮助。在此,作者特别感谢总装备部国防科技重点实验室基金和国家国防科工局的项目资助,感谢南京理工大学王泽山院士为本书作序。同时感谢国防科工局李红副巡视员,高绿化处长,中国兵器工业集团公司科技部黄辉处长、冯雪艳副处长,北京理工大学谭惠民、罗运军、王宁飞和张同来等教授,南京理工大学李凤生、宋洪昌、芮筱亭、廖昕、何卫东和姜炜等教授,中北大学肖忠良教授,国防科学技术大学张伟教授,深圳大学田德余教授,西北大学谢钢、马海霞和徐抗震等教授,陕西师范大学张国防、陈新兵和陈沛等教授,西安近代化学研究所李上文、胡荣祖、郝仲璋、张晓宏、樊学忠、刘子如、王江宁、高红旭、胥会祥和姬月萍等研究员,罗阳、轩春雷、宋秀铎、徐司雨、王晗、党永战、李吉祯、丁黎、张衡、郝海霞、裴庆、肖立柏、裴江峰和袁志峰等副研究员,以及西安近代化学研究所所领导对本书撰写的大力支持和悉心帮助。作者还要感谢谭艺、杨燕京和姚二岗在本书编辑和打印方面的协助。本书的出版离不开国防工业出版社肖志力编辑付出的辛勤劳动,在此表示衷心感谢。

由于本书范围广且内容多,作者能力有限,不足之处在所难免,敬请指正。

著者

2015年11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 燃烧催化剂的分类和特性	4
1.2.1 金属氧化物、金属复合氧化物和无机金属盐	5
1.2.2 金属有机化合物燃烧催化剂	5
1.2.3 含能燃烧催化剂	6
1.2.4 碳材料燃烧催化剂	7
1.2.5 纳米金属粉、纳米复合金属粉和功能化纳米金属粉	9
1.3 燃烧催化剂某些宏观参量的表征	9
1.3.1 催化剂的表面积和密度	9
1.3.2 颗粒大小及其分布	14
1.3.3 燃烧催化剂热行为分析方法	17
1.3.4 催化剂的催化作用评价	22
1.4 燃烧催化剂研究新进展	22
1.4.1 纳米燃烧催化剂	23
1.4.2 含能燃烧催化剂	27
1.4.3 双金属燃烧催化剂	31
1.4.4 发展展望	32
参考文献	33
第2章 含单金属的新型燃烧催化剂	36
2.1 含金属铅的燃烧催化剂	36
2.1.1 2,2',4,4'-四羟基二苯甲酮铅(Ⅱ)配合物(TPL)	37
2.1.2 2,2',3,4,4'-五羟基二苯甲酮铅(Ⅱ)配合物(PPL)	43
2.1.3 2,3,3',4,4',5'-六羟基二苯甲酮铅(Ⅱ)配合物(HPL)	49
2.2 含金属铋的燃烧催化剂	53
2.2.1 铋化合物燃烧催化剂研究概况	53

2.2.2	次没食子酸铋(s-Gal-Bi)合成及表征	56
2.2.3	柠檬酸铋(Cit-Bi)合成及表征	58
2.2.4	苦味酸铋(PA-Bi)合成及表征	59
2.2.5	2,4-二羟基苯甲酸铋(β -Bi)合成及表征	60
2.2.6	2,2',4,4'-四羟基二苯甲酮铋(Ⅲ)配合物(TPB) 合成及表征	61
2.2.7	2,2',3,4,4'-五羟基二苯甲酮铋(Ⅲ)配合物(PPB) 合成及表征	63
2.2.8	2,3,3',4,4',5'-六羟基二苯甲酮铋(Ⅲ)配合物(HPB) 合成及表征	65
2.3	含金属铜的燃烧催化剂	67
2.3.1	铜化合物燃烧催化剂研究概况	68
2.3.2	2,2',4,4'-四羟基二苯甲酮铜(Ⅱ)配合物(TPC) 合成及表征	69
2.3.3	2,2',3,4,4'-五羟基二苯甲酮铜(Ⅱ)配合物(PPC) 合成及表征	72
2.3.4	2,3,3',4,4',5'-六羟基二苯甲酮铜(Ⅱ)配合物(HPC) 合成及表征	76
2.4	含金属铁的燃烧催化剂	78
2.4.1	金属铁催化剂存在的问题	78
2.4.2	二茂铁类衍生物的研究	78
2.5	过渡金属氧化物燃烧催化剂	83
2.6	稀土金属化合物燃烧催化剂	85
2.6.1	稀土的正常价态化合物	85
2.6.2	稀土非正常价化合物	87
2.6.3	稀土催化剂的设计选择	87
2.6.4	稀土催化剂的合成	88
2.7	催化剂的应用及其作用效果	90
2.7.1	二苯甲酮金属配合物对CMDB推进剂燃烧 性能的影响	90
2.7.2	铋化合物对双基系推进剂燃烧性能的影响	104
2.7.3	铜化合物对双基系推进剂燃烧性能的影响	115
2.7.4	二茂铁类燃烧催化剂对富燃料推进剂燃烧性能的影响 ..	120
2.7.5	过渡金属氧化物(TMO)燃烧催化剂对富燃料推进剂燃烧	

性能的影响	124
参考文献	127
第3章 双金属有机化合物燃烧催化剂	130
3.1 含铋双金属有机化合物燃烧催化剂	130
3.1.1 没食子酸铋铜(Gal-BiCu)金属化合物制备及表征	131
3.1.2 其他没食子酸铋基双金属化合物制备及表征	132
3.2 含锆双金属有机化合物燃烧催化剂	134
3.2.1 没食子酸锆基双金属化合物	135
3.2.2 酒石酸锆基双金属化合物	138
3.2.3 3,4-二羟基苯甲酸锆基双金属化合物	141
3.2.4 柠檬酸锆基双金属化合物	144
3.3 含铋双金属有机化合物燃烧催化剂的应用及作用效果	147
3.3.1 试样组成及制备	147
3.3.2 对双基推进剂燃烧性能的影响	149
3.3.3 对RDX-CMDB推进剂燃烧性能的影响	153
3.4 含锆双金属有机化合物燃烧催化剂的应用及作用效果	157
3.4.1 没食子酸锆基双金属化合物对双基系推进剂 燃烧性能的影响	157
3.4.2 酒石酸锆基双金属化合物对双基系推进剂 燃烧性能的影响	164
3.4.3 3,4-二羟基苯甲酸锆基双金属化合物对双基系推进剂 燃烧性能的影响	167
3.4.4 柠檬酸锆基双金属化合物对双基系推进剂 燃烧性能的影响	170
参考文献	174
第4章 纳米燃烧催化剂	177
4.1 纳米金属氧化物(一元)催化剂	177
4.1.1 制备原理	177
4.1.2 制备过程	179
4.2 纳米金属氧化物复合物(二元)催化剂	184
4.2.1 制备原理	184
4.2.2 制备过程	185
4.3 超级铝热剂型燃烧催化剂	189
4.3.1 制备原理	190

4.3.2	制备过程	191
4.4	纳米有机金属盐(配合物)催化剂	215
4.4.1	制备原理	215
4.4.2	制备过程	216
4.5	纳米燃烧催化剂的应用及其作用效果	257
4.5.1	纳米金属氧化物(一元)催化剂	257
4.5.2	纳米金属氧化物复合物(二元)催化剂	259
4.5.3	超级铝热剂型燃烧催化剂	263
4.5.4	纳米有机金属盐(配合物)催化剂	274
	参考文献	295
第5章	轻质碳材料负载型燃烧催化剂	299
5.1	碳纳米管负载型催化剂	299
5.1.1	制备原理	300
5.1.2	制备过程	300
5.2	石墨烯负载型催化剂	332
5.2.1	制备原理	333
5.2.2	制备过程	334
5.3	轻质碳材料负载型燃烧催化剂的应用及其作用效果	361
5.3.1	碳纳米管负载型催化剂	361
5.3.2	石墨烯负载型催化剂	363
	参考文献	366
第6章	含能燃烧催化剂	369
6.1	3-硝基-1,2,4-三唑酮类催化剂	369
6.1.1	3-硝基-1,2,4-三唑酮碱金属化合物	369
6.1.2	3-硝基-1,2,4-三唑酮过渡金属化合物制备	370
6.1.3	NTO 金属化合物的晶体结构	371
6.2	吡啶类含能催化剂	372
6.2.1	2-羟基-3,5-二硝基吡啶(2DNP)金属化合物	372
6.2.2	4-羟基-3,5-二硝基吡啶(4DNP)金属化合物	382
6.2.3	4-羟基-3,5-二硝基吡啶氮氧化物(4HDNPO) 金属化合物	392
6.3	二唑或三唑类含能催化剂	403
6.3.1	4-氨基-3,5-二硝基吡啶(LLM-116) 金属化合物	403

6.3.2	2,4-二硝基咪唑金属化合物	411
6.3.3	4-氨基-1,2,4-三唑铜配合物(4ATZCu)	
	合成及表征	421
6.4	四唑类含能催化剂	423
6.4.1	5-苯基四唑金属化合物	423
6.4.2	5-亚甲基二四唑金属化合物	424
6.5	硝基苯类含能催化剂	425
6.5.1	4,6-二硝基苯并氧化呋喃金属化合物	425
6.5.2	5-(2,4-二硝基苯胺基)-水杨酸铅化合物	426
6.5.3	2,4,6-三硝基苯胺基对苯甲酸(TABA)金属化合物	427
6.5.4	N-二乙酸基-2,4-二硝基苯金属化合物	429
6.6	蒽醌类含能燃烧催化剂	431
6.7	含能燃烧催化剂的应用及作用效果	434
6.7.1	试样组成及制备	434
6.7.2	含能金属化合物催化剂对双基推进剂燃烧性能的影响	435
6.7.3	含能金属化合物催化剂对RDX-CMDB推进剂燃烧性能的影响	438
	参考文献	442
第7章	有关双基系推进剂的催化燃烧机理	445
7.1	引言	445
7.2	凝聚相主导催化机理	445
7.2.1	光化学反应机理	445
7.2.2	含碳物质-热亮球作用机理	446
7.2.3	螯合物形成机理	447
7.2.4	催化燃烧的碳骨架产生和消失机理	448
7.3	气相主导催化机理	449
7.3.1	Pb-PbO循环催化机理	449
7.3.2	铅-碳催化作用机理	450
7.3.3	π 键络合机理	451
7.3.4	亚硝酸盐形成机理	452
7.3.5	铜盐活性组分的气相催化机理	453
7.4	凝聚相-气相协同催化机理	455
7.4.1	自由基输运机理	455
7.4.2	氧化铅活性组分与碳载体催化作用机理	455

7.4.3	化学当量转移机理	457
7.4.4	铅-铜-炭复合催化剂协同作用机理	457
7.4.5	铅-铜-炭自由基催化机理	460
	参考文献	464
第 8 章	有关复合推进剂的催化燃烧机理	466
8.1	概述	466
8.2	高氯酸铵的催化热分解机理	467
8.2.1	过渡金属氧化物催化剂	468
8.2.2	其他金属氧化物催化剂	470
8.2.3	离子催化剂	471
8.2.4	高氯酸铵分解的抑制剂	473
8.3	催化剂对 AP 复合推进剂的催化作用	475
8.3.1	对 AP 的热分解特性的催化作用	475
8.3.2	催化的 AP 复合推进剂	482
8.3.3	催化的 AP-GAP 推进剂	487
8.3.4	催化的 AP-AMMO 推进剂	490
8.4	催化剂对硝酸铵(AN)复合推进剂的催化作用	495
8.4.1	推进剂配方设计及制备	496
8.4.2	硝酸铵的热分解	497
8.4.3	金属氧化物(MO)催化硝酸铵分解的作用机理	498
8.4.4	催化的 AN-GAP 推进剂燃烧特性	500
8.5	燃烧催化剂在复合推进剂燃烧中的作用机理	503
8.5.1	气相催化理论	506
8.5.2	界面非均相催化理论	507
8.5.3	多气道多相催化燃烧理论	510
	参考文献	517

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 General Description	1
1.2 Characteristics and Classification of Combustion Catalysts	4
1.2.1 Metal Oxides, Metal Oxide Composites and Inorganic Metal Salts	5
1.2.2 Metal – organic Combustion Catalysts	5
1.2.3 Energetic Combustion Catalysts	6
1.2.4 Carbon – based Combustion Catalysts	7
1.2.5 Nano – metal, Nano – metal – composite and Functional Nano – metal Powders	9
1.3 Characterization of Macro Parameters of Combustion Catalysts	9
1.3.1 Surface Area and Density of Combustion Catalysts	9
1.3.2 Particle Size and Distribution	14
1.3.3 Thermal – behavior Analysis of Combustion Catalysts	17
1.3.4 Evaluation of Catalytic Effects of Combustion Catalysts	22
1.4 New Advances in the Development of Combustion Catalysts	22
1.4.1 Nano Combustion Catalysts	23
1.4.2 Energetic Combustion Catalysts	27
1.4.3 Bi – metallic Combustion Catalysts	31
1.4.4 Development Prospects	32
References	33
Chapter 2 Mono – metallic Combustion Catalysts	36
2.1 Lead – based Combustion Catalysts	36
2.1.1 Lead 2,2',4,4' – Tetrahydroxybenzophenone (TPL)	37
2.1.2 Lead 2,2',3,4,4' – Pentahydroxybenzophenone (PPL)	43
2.1.3 Lead 2,3,3',4,4',5' – Hexahydroxybenzophenone (HPL)	49
2.2 Bismuth – based Combustion Catalysts	53
2.2.1 A Review of the Bismuth – based Combustion Catalysts	53

2.2.2	Synthesis and Characterization of Bismuth Subgallate(s – Gal – Bi)	56
2.2.3	Synthesis and Characterization of Bismuth Citrate(Cit – Bi)	58
2.2.4	Synthesis and Characterization of Bismuth Picrate(PA – Bi)	59
2.2.5	Synthesis and Characterization of Bismuth 2,4 – Resorcylic(β – Bi)	60
2.2.6	Synthesis and Characterization of Bismuth 2,2',4,4' – Tetrahydroxybenzophenone(TPB)	61
2.2.7	Synthesis and Characterization of Bismuth 2,2',3,4,4' – Pentahydroxybenzophenone(PPB)	63
2.2.8	Synthesis and Characterization of Bismuth 2,3,3',4,4',5' – Hexahydroxybenzophenone(HPB)	65
2.3	Copper – based Combustion Catalysts	67
2.3.1	A Review of the Copper – based Combustion Catalysts	68
2.3.2	Synthesis and Characterization of Copper 2,2',4,4' – Tetrahydroxybenzophenone(TPC)	69
2.3.3	Synthesis and Characterization of Copper 2,2',3,4,4' – Pentahydroxybenzophenone(PPC)	72
2.3.4	Synthesis and Characterization of Copper 2,3,3',4,4',5' – Hexahydroxybenzophenone(HPC)	76
2.4	Iron – based Combustion Catalysts	78
2.4.1	Drawbacks of the Existing Iron – based Combustion Catalysts	78
2.4.2	Investigations on Ferrocene Derivatives as Combustion Catalysts	78
2.5	Transition Metal Oxides as Combustion Catalysts	83
2.6	Rare – earth Metal Compounds as Combustion Catalysts	85
2.6.1	Compounds with Normal Valence	85
2.6.2	Compounds with Abnormal Valence	87
2.6.3	Design of Rare – earth Metal – based Combustion Catalysts	87
2.6.4	Syntheses of Rare – earth Metal – based Combustion Catalysts	88
2.7	Applications and Catalytic Effects of Combustion Catalysts	90
2.7.1	Effects of Droxybenzophenone Metal Complexes on the Combustion Performances of CMDB Propellants	90
2.7.2	Effects of Bismuth Compounds on the Combustion Performances of Double – base System Propellants	104
2.7.3	Effects of Copper Compounds on the Combustion Performances of Double – base System Propellant	115
2.7.4	Effects of Ferrocene Compounds on the Combustion Performances of	