



北京理工大学教育基金会 · 教授文库

固体推进剂 化学与技术

The Chemistry and Technology of
Solid Rocket Propellant

谭惠民 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



北京理工大学教育基金会 · 教授文库

固体推进剂 化学与技术

The Chemistry and Technology of
Solid Rocket Propellant

谭惠民 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书较全面地叙述了火箭固体推进剂的能量、燃烧、力学和安定性及危险性质,并主要介绍了两类推进剂——双基和复合推进剂的概况以及它们的制造工艺,同时,对推进剂应用于发动机装药时所涉及的绝热包覆技术也做了系统性的介绍,并叙述了常用的几类固体燃气发生剂的性能特点和配方设计原则。

本书可作为军工高等院校含能材料及其相关专业的教材,也可供从事固体火箭发动机、固体推进剂研究和生产的工程技术和管理人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

固体推进剂化学与技术/谭惠民编著. —北京:北京理工大学出版社, 2015.9

ISBN 978-7-5640-9714-1

I. ①固… II. ①谭… III. ①火箭-固体推进剂-高等学校-教材
IV. ①V512

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第208172号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010) 68914775(总编室)

(010) 82562903(教材售后服务热线)

(010) 68948351(其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/保定市中华美凯印刷有限公司

开 本/710毫米×1000毫米 1/16

印 张/34.75

字 数/638千字

版 次/2015年9月第1版 2015年9月第1次印刷

定 价/120.00元

责任编辑/王玲玲

文案编辑/王玲玲

责任校对/周瑞红

责任印制/王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

火箭固体推进剂是推动火箭和导弹武器的能源和工质。20世纪中期以来，固体推进剂技术取得了长足的发展，无论在理论上，还是在制造与应用的工程技术方面，都有诸多发现。我国在固体推进剂的研制、生产和应用方面也积累了丰富的经验。特别在20世纪80年代以来，我国在一些新型高性能固体推进剂及其相关的高能量密度化合物方面的研究均有重要进展。为适应我国固体推进剂事业发展的需要，总结国内外数十年来在此方面所取得的重要进展，并加强我国军工高等院校的教材建设，特编写本书。

本书共分10章。第1章概略地介绍了火箭推进的基本概念和固体推进剂的发展概况，其他各章依次叙述了固体推进剂的能量性能、燃烧性能、力学性能、安定性及危险性质，并叙述两类主要的推进剂品种——双基和改性双基推进剂及复合推进剂。第8章则全面介绍了固体推进剂的各种制造工艺。由于燃气发生剂属于固体推进剂的一个重要分支，第9章对此专门进行了论述。最后对固体推进剂的重要配套技术——绝热包覆层以及无损检测技术也做了介绍。在编写过程中，作者力求对基本原理和概念叙述准确，并特别注意化学反应原理与各种性能调控的关系，使读者对固体推进剂的性质和化学变化的本质有较全面、准确的认识，并在内容及性能水平方面尽量反映固体推进剂近年来所取得的进展。

本书为满足有国防特色的学科专业的教学需要而编写，以期为提高军工高等教育质量、推动国防科技与教育事业的发展做出一点贡献。

本书第1、2、4、7章由谭惠民编写，卢赞编写了第7章中的新型黏合剂和含能增塑剂部分，第3章由204所李上文研究员编写，第5、6、8、9、10章由罗运

军编写，航天科工集团六院 46 所王德研究员和王文丽研究员编写了第 10 章中绝热层的有关内容。在编写过程中，兵器 845 厂严金良研究员、航天科技集团四院 42 所庞爱民研究员、北京理工大学庞思平教授和周智明教授、黎明化工研究院周集义研究员以及湖南大学邓剑如教授等诸多友好同仁提供了大力协助并提供了丰富的参考资料，在此编著者对他们致以衷心的感谢，并对专门从事发动机测试的 845 厂严伍启高工所提供的宝贵的意见和参考资料表示感谢。

限于编者水平，书中疏漏之处在所难免，敬请读者指正。

编者愿以此书作为对已故导师周起槐先生的追忆和怀念，以纪念他在我国推进剂事业，特别是在高能改性双基推进剂发展中所做的杰出贡献。

编著者

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 定义与基本概念	1
1.2 固体推进剂制造与应用过程中的化学问题	2
1.3 固体推进剂发展简史	5
1.4 固体推进剂的分类	7
1.5 固体推进剂的基本组成及功能	11
1.6 火箭和导弹武器对固体推进剂性能的要求	18
1.7 火箭推进的基本原理	20
1.7.1 固体火箭发动机的基本构成	20
1.7.2 火箭发动机的工作过程	22
1.7.3 火箭发动机的主要性能参数	22
参考文献	28
第 2 章 固体推进剂的能量性能	29
2.1 概述	29
2.2 爆热	31
2.3 推进剂的比容及燃气产物的相对平均分子质量	33
2.4 推进剂的比冲	34
2.4.1 定义	34
2.4.2 比冲的基本关系式	35
2.4.3 冻结比冲与平衡比冲	39
2.4.4 标准理论比冲	39
2.5 密度比冲	39

2.6	特征速度	40
2.7	推进剂比冲的计算方法	43
2.8	各类固体推进剂能量性能	49
2.8.1	双基及改性双基推进剂的能量特性	49
2.8.2	聚丁二烯推进剂的能量特性	52
2.8.3	硝酸酯增塑聚醚 (NEPE) 推进剂的能量特性	54
2.9	火箭发动机的工作效率	56
2.10	比冲效率	57
2.11	提高固体推进剂能量性能的主要途径	58
2.11.1	热力学上的依据	58
2.11.2	氧化剂	59
2.11.3	轻金属燃料	60
2.11.4	增塑剂及黏合剂	61
2.12	推进剂能量特性参数的测定	63
2.12.1	静止试验台法	64
2.12.2	弹道摆法	65
	参考文献	66
	本章习题	66
第3章	固体推进剂的燃烧性能	67
3.1	概述	67
3.2	燃烧的基本特征	68
3.3	固体推进剂的燃烧性能参数	69
3.3.1	燃烧速度 (燃速)	69
3.3.2	燃速压力指数	70
3.3.3	燃速温度系数 σ_p	73
3.3.4	压力温度系数 π_k	75
3.3.5	侵蚀燃烧与侵蚀比	76
3.4	双基推进剂的稳态燃烧理论	78
3.4.1	双基推进剂燃烧机理	78
3.4.2	双基推进剂平台燃烧机理	82
3.4.3	双基推进剂燃速和压力指数理论预估	84
3.5	复合改性双基推进剂燃烧理论	87
3.5.1	AP-CMDB 推进剂稳态燃烧模型	87
3.5.2	HMX-CMDB 推进剂稳态燃烧模型	89

3.6 复合推进剂燃烧理论	89
3.6.1 萨默菲尔德粒状扩散火焰模型 (GDF)	90
3.6.2 BDP 多层火焰燃烧模型	91
3.7 固体推进剂燃速的影响因素	93
3.7.1 氧化剂类型及含量对燃速的影响	93
3.7.2 氧化剂粒度及其分布对燃速的影响	95
3.7.3 多孔高氯酸铵对燃速影响	98
3.7.4 金属丝对燃速的影响	99
3.7.5 爆热对燃速的影响	100
3.7.6 燃烧催化剂对燃速的影响	101
3.7.7 降速剂的影响	102
3.8 固体推进剂的不正常燃烧	103
3.8.1 不完全燃烧	104
3.8.2 固体推进剂在发动机中的不稳定燃烧	104
3.8.3 固体推进剂燃烧转爆轰	108
3.8.4 推进剂燃速测试方法	110
本章习题	113
第4章 固体推进剂的力学性能	114
4.1 概述	114
4.2 固体火箭发动机对推进剂力学性能的要求	115
4.3 固体推进剂在火箭发动机中所受载荷情况的分析	116
4.3.1 自由装填式装药	116
4.3.2 壳体黏结的火箭发动机装药	117
4.4 固体推进剂力学性能的特征	120
4.4.1 双基推进剂	120
4.4.2 复合推进剂	121
4.5 高分子复合推进剂黏弹性力学行为及主曲线	122
4.5.1 高分子材料黏弹性力学行为的特征	122
4.5.2 产生黏弹性力学行为的原因	124
4.5.3 时间-温度等效原理和主曲线	124
4.6 影响固体推进剂力学性能的主要因素及调控方法	135
4.6.1 双基推进剂	135
4.6.2 影响复合推进剂力学性能的主要因素	140
参考文献	155

本章习题	156
第5章 固体推进剂的安定性和危险性	157
5.1 含硝酸酯推进剂的安定性	157
5.1.1 含硝酸酯推进剂的化学安定性	158
5.1.2 含硝酸酯推进剂的物理安定性	167
5.2 复合固体推进剂的老化	170
5.2.1 复合固体推进剂的老化特征	170
5.2.2 影响复合固体推进剂老化的因素	171
5.2.3 复合固体推进剂的老化机理	173
5.3 推进剂的贮存老化试验与使用寿命预估	176
5.3.1 推进剂的贮存老化试验	176
5.3.2 快速预估固体推进剂使用寿命的方法	180
5.3.3 使用寿命预测方法评估	184
5.4 改善固体推进剂贮存性能的方法	186
5.4.1 改善含硝酸酯固体推进剂贮存性能的方法	186
5.4.2 改善复合固体推进剂贮存性能的方法	187
5.5 固体推进剂的危险性	189
5.5.1 概述	189
5.5.2 含硝酸酯固体推进剂的自动着火危险性	190
5.5.3 撞击感度	194
5.5.4 摩擦感度	196
5.5.5 固体推进剂的静电火花感度	196
5.5.6 固体推进剂的爆轰感度	198
5.5.7 推进剂生产使用过程中的安全问题	199
参考文献	200
本章习题	201
第6章 双基及改性双基推进剂	202
6.1 双基推进剂	203
6.1.1 双基推进剂的类别	203
6.1.2 双基推进剂的配方	204
6.1.3 双基推进剂的性能	207
6.1.4 双基推进剂的性能调节	212
6.2 改性双基推进剂	214
6.2.1 改性双基推进剂的性能特点	214

6.2.2	改性双基推进剂的组成	216
6.2.3	改性双基推进剂的性能	220
6.2.4	改性双基推进剂主要性能的调控规律	226
	参考文献	233
	本章习题	234
第7章	复合固体推进剂	236
7.1	概述	236
7.2	复合固体推进剂对黏合剂的要求	238
7.2.1	对黏合剂的要求	238
7.2.2	黏合剂预聚物的固化反应及其控制参数	239
7.2.3	对固化体系的要求	242
7.3	聚硫橡胶推进剂	243
7.3.1	聚硫橡胶黏合剂的合成及其性质	244
7.3.2	固化体系	245
7.3.3	典型聚硫橡胶推进剂的配方及性能	247
7.4	聚氨酯推进剂	248
7.4.1	聚氨酯的化学原理	248
7.4.2	黏合剂的合成及性质	251
7.5	聚丁二烯推进剂	256
7.5.1	端羧基聚丁二烯(CTPB)推进剂	257
7.5.2	端羟基聚丁二烯(HTPB)推进剂	263
7.6	新型固体推进剂——硝酸酯增塑聚醚(Nitrate Ester Plasticized Polyether)推进剂	281
7.6.1	概述	281
7.6.2	NEPE推进剂黏合剂系统的特点	282
7.6.3	NEPE推进剂的性能	286
7.7	固体推进剂新型黏合剂、含能增塑剂、氧化剂及含能添加剂	295
7.7.1	概述	295
7.7.2	叠氮聚醚黏合剂及其推进剂	295
7.7.3	以叠氮聚醚为黏合剂的复合固体推进剂	310
7.7.4	端羟基嵌段共聚醚(HTPE)黏合剂及其推进剂	317
7.7.5	二氟氨基聚醚黏合剂	324
7.7.6	聚醚聚三唑黏合剂及其推进剂	329
7.7.7	几种新型含能增塑剂和高能添加剂	333

7.7.8	新型氧化剂	338
7.7.9	新型含能添加剂	350
	参考文献	367
	本章习题	367
第8章	固体推进剂制造工艺	369
8.1	概述	369
8.2	推进剂的制造工艺理论	370
8.2.1	硝化纤维素与溶剂间的溶解性能	370
8.2.2	双基推进剂的流变特性	372
8.2.3	双基推进剂药料的物理状态	374
8.3	螺旋压伸成型工艺	375
8.3.1	典型螺旋压伸工艺流程	375
8.3.2	吸收药的制造	375
8.3.3	塑化药料的制造	383
8.3.4	塑化药料挤压成型	385
8.3.5	切药, 整形, 探伤, 包覆	387
8.3.6	其他挤压成型工艺	387
8.4	双基、复合改性双基推进剂的浇铸成型工艺	388
8.4.1	浇铸工艺的特点	389
8.4.2	基本的工序和工艺流程	389
8.4.3	粒铸工艺	390
8.4.4	配浆浇铸工艺	395
8.4.5	固化成型	401
8.4.6	模具装配、脱模和整形	403
8.4.7	粒铸与配浆浇铸工艺的对比	404
8.5	复合推进剂的浇铸法制造工艺	405
8.5.1	概述	405
8.5.2	氧化剂准备	406
8.5.3	其他原材料准备	408
8.5.4	壳体、模芯准备	410
8.5.5	混合工艺	411
8.5.6	浇铸工艺	413
8.5.7	固化工艺	416
8.5.8	脱模与整型	418

8.5.9 端面包覆	418
8.5.10 无损检测	419
8.5.11 装药发动机的包装及存放	419
参考文献	420
本章习题	420
第 9 章 燃气发生剂	421
9.1 概述	421
9.2 双基型燃气发生剂	422
9.2.1 双基型燃气发生剂的组分及其作用	423
9.2.2 双基型燃气发生剂配方实例	425
9.3 硝酸铵型燃气发生剂	429
9.3.1 硝酸铵氧化剂	429
9.3.2 硝酸铵型燃气发生剂	433
9.3.3 硝酸铵型燃气发生剂的燃烧性能	435
9.4 高氯酸铵型燃气发生剂	436
9.4.1 降温剂	436
9.4.2 高氯酸铵型燃气发生剂配方	437
9.5 二羟基乙二醇型燃气发生剂	438
9.6 硝胺型燃气发生剂	439
9.7 烟火型燃气发生剂	440
9.7.1 烟火型燃气发生剂的组成及作用	440
9.7.2 烟火型燃气发生剂配方实例	441
9.8 燃气发生剂配方设计	443
9.8.1 降低燃烧温度	443
9.8.2 减少燃气中残渣、烟雾含量	447
9.8.3 提高燃气发生剂发气量	448
9.8.4 燃气发生剂配方设计中的有关问题	448
参考文献	450
本章习题	451
第 10 章 固体推进剂的绝热包覆层与无损检测技术	452
10.1 概述	452
10.2 对固体推进剂包覆层的基本要求	453
10.2.1 包覆层与推进剂具有良好的相容性	453
10.2.2 包覆层要有较好的力学性能	454

10.2.3	包覆层与推进剂应有良好的黏结性能	454
10.2.4	包覆材料要有良好的抗老化性能	455
10.2.5	包覆层应具有良好的工艺性能	455
10.3	包覆层材料	455
10.3.1	热塑性聚合物	455
10.3.2	热固性聚合物	457
10.3.3	聚合物弹性体	458
10.3.4	填料及其应用	459
10.4	包覆层设计的理论基础和准则	461
10.4.1	黏结机理	461
10.4.2	生烟机理和消烟技术	463
10.4.3	设计准则	464
10.5	固体推进剂的包覆工艺	467
10.5.1	自由装填式推进剂药柱的包覆	467
10.5.2	壳体黏结式发动机装药的包覆工艺	470
10.5.3	人工脱黏	473
10.6	装药包覆层中液体组分的迁移和抑制	475
10.6.1	NG 迁移的危害	475
10.6.2	迁移的原因	476
10.6.3	影响 NG 迁移的因素	477
10.6.4	NG 迁移的动力学和热力学研究	478
10.6.5	NG 迁移的抑制技术	479
10.7	装药包覆层的脱黏、开裂原因及预防措施	480
10.7.1	脱黏、开裂的原因分析	480
10.7.2	防止开裂和脱黏的措施	481
10.8	包覆层性能的检测方法	483
10.8.1	相容性试验方法	483
10.8.2	增塑剂迁移性能试验方法	485
10.8.3	黏结强度的测定与脱黏的检测	487
10.8.4	物理机械性能	488
10.8.5	贮存可靠性	489
10.8.6	探伤	489
10.9	固体推进剂的无损检测	489
10.9.1	超声波检测	490

10.9.2	固体推进剂包覆层超声波脉冲反射法无损检测	493
10.9.3	X 射线检测	495
10.9.4	激光全息检测	498
10.9.5	微波检测	498
10.9.6	CT 扫描检测	500
10.10	固体火箭发动机内绝热层材料	502
10.10.1	概述	502
10.10.2	固体火箭发动机内绝热层材料的烧蚀机理	516
10.10.3	固体火箭发动机内绝热层材料设计的基本原则	524
10.10.4	固体火箭发动机内绝热层的主要原材料	526
10.10.5	固体火箭发动机内绝热层的性能及测试方法	534
	参考文献	541
	本章习题	542

第 1 章

绪论

1.1 定义与基本概念

固体推进剂是固体火箭发动机获得推力的能源和工质的固态混合物，为一种含能材料，属火药中的一类。所谓含能材料，是指自身包含了燃烧和爆炸化学反应所必需的氧化剂和还原剂的物质，这类物质在无须外界供氧的情况下，由适当的外界能量所激发，即可产生有规律的燃烧或爆炸反应，快速释放出大量的高温燃气，从而达到发射弹丸、推动火箭前进或产生爆破作用的目的。在我国，一般将用于发射枪炮弹丸的发射药和用于推进固体火箭的固体推进剂统称为火药。而用于爆炸作用的含能材料则称为炸药。固体推进剂通常贮存于固体火箭发动机内，燃烧时迅速生成大量的高温燃气，并通过喷管膨胀而产生推力，将推进剂的化学能转变为火箭飞行的动能。

火药与炸药的区别在于：火药被点燃后是以燃烧方式释放其能量的，燃烧过程沿着燃面的法线方向以逐层传播的方式由表面向内部发展，火药沿其表面法线方向消失的速度即称为燃速，无论是发射药或固体推进剂，其燃速一般为每秒数毫米至数十毫米。此时，燃烧波（即燃温在空间的分布状态）的发展方向与火药的消失方向相反，而炸药在起爆后则以爆轰的方式释放其能量，由爆炸反应所形成的爆轰波的传播速度（即爆速）一般达每秒数千米，而且爆轰波的发展方向与炸药的消失方向一致。所以，虽然火药和炸药均属于含能材料，但它们的引燃或

引爆方式、释放能量速度（燃速或爆速）以及燃烧波、爆轰波相对于含能材料本身的发展方向均有明显差别。

1.2 固体推进剂制造与应用过程中的化学问题

在现有已获得工程应用的固体推进剂中，以硝化纤维素、聚氯乙烯、热塑性聚氨酯弹性体等高相对分子质量线性大分子制备的推进剂是通过典型的加温挤压塑化成型的物理过程制备而成的，它们属于塑溶胶推进剂。而以高分子预聚物如端羟基聚丁二烯（HTPB）通过交联固化成型方法制备的推进剂则称为热固性推进剂，其成型过程是一个典型的化学过程。此外，上述两类推进剂的性能调节及它们在贮存、使用过程中，将不可避免地发生各种各样的化学反应。这些化学反应的性质及它们所能达到的程度，在很大程度上将决定推进剂的性能，因此，对固体推进剂生产制造及应用过程中有关化学反应性质的了解和掌握，将对推进剂的性能控制有十分重要的意义。

贯穿在固体推进剂制造与应用过程中的化学问题主要涉及以下几个方面。

1. 黏合剂的分子结构与化学性质

黏合剂的分子结构是指黏合剂的化学组成、分子链中的结构单元和它们的连接方式、官能团的性质和含量以及分子链的聚集形态。一般来说，聚集态结构如晶态结构、取向结构、织态结构或无规聚集等属于物理形态结构，与所制成推进剂的物理性质有密切关系。复合固体推进剂从聚硫橡胶（PS）发展到聚丁二烯丙烯酸（PBAA）、聚丁二烯丙烯腈丙烯酸（PBAN）、端羧基聚丁二烯（CTPB）及端羟基聚丁二烯（HTPB）等推进剂的过程，除了从化学热力学因素出发以能量水平的高低为淘汰的标准外，黏合剂的化学性质与所制备推进剂的工艺性能、力学性能及贮存老化性能的关系也是这些推进剂发展中的重要因素。例如 PBAA、PBAN 预聚物中固化官能团（—COOH）沿主链呈无规分布，固化后，推进剂力学性能的重现性与预聚物相对分子质量和官能团分布状态的准确控制紧密相关，同时，它们与固化剂（一般含环氧或氮丙啶基团）的固化反应存在后固化现象，使推进剂在长贮中会变硬、变脆，影响了它们的使用性能。虽然遥爪型的 CTPB 较前两者有了重要改进，其固化官能团—COOH 主要分布于链端，但上述固化反应的缺点及易于老化的化学性质，加上羧基的存在引起药浆黏度偏大，制约了 CTPB 推进剂的发展。对于目前应用广泛的 HTPB 推进剂来说，固化官能团由羧基到羟基的改变，不但使推进剂药浆的黏度明显降低，固体填料的含量可以增高到 88% 或更高，同时，通过与异氰酸酯类的固化交联反应，也使推进剂获得更理想的网络结

构和抗老化性能。此发展过程充分说明，黏合剂化学结构的选择及其化学性质与推进剂性能关系的认识，是复合推进剂发展中十分重要的因素。

2. 力学性能调节中的化学问题

在以热固性黏合剂制备的固体推进剂中，其力学性能主要受两方面因素的影响：一是黏合剂大分子基体本身的化学结构及反应特性，二是黏合剂基体与氧化剂填料之间的相界面的结合状态。例如，在 HTPB 推进剂中，HTPB 预聚物分子链上含有反式和顺式的单元结构，以及由 1,2-加成反应所形成的产物，同时，所含的羟基也包括烯丙基伯羟基、乙烯基伯羟基以及仲羟基等结构不同的羟基。由于结构上的差异，这些羟基与同一种异氰酸酯进行固化反应的活性有所区别。因此，在固化时，需控制这些羟基与异氰酸酯基团之间的活性匹配，以便尽可能获得结构完整的网络。同时，不同的异氰酸酯固化剂，如甲苯二异氰酸酯（TDI）、异佛尔酮二异氰酸酯（IPDI）、六次甲基二异氰酸酯（HDI），以及脲基多异氰酸酯（美国商品代号 N-100），在与—OH 发生聚氨酯反应时的活性各有区别，即使是在同一种异氰酸酯，如 2,4-TDI 或 2,6-TDI，由于—NCO 基团在甲苯母体上位置的不同，反应活性也有差别。对位上的—NCO 的反应活性明显高于邻位的—NCO 基团。对 HTPB 预聚物链上羟基及固化剂异氰酸酯基反应特性的了解，有助于对 HTPB 推进剂力学性能进行控制。

在解决黏合剂基体与固体填料之间的相界面黏结力时，键合剂（Bonding Agent）的分子设计也是在充分了解和掌握填料（高氯酸铵 AP 或硝胺 RDX 和 HMX）与黏合剂之间可能产生的物理化学作用的基础上进行的。众所周知的三氟化硼三乙醇胺键合剂，就是依靠三乙醇胺中氨基与 AP 之间的反应以及羟基与异氰酸酯的作用而使其进入黏合剂基体的网络，并在这些填料表面形成一层黏附力强的高模量层而显著改善推进剂的力学性能。因此，在黏合剂高分子选定之后，针对它们的化学结构特点及反应性质来选择固化体系和键合剂，是固体推进剂力学性能调控中的关键因素。

3. 燃烧性能调节中的化学问题

固体推进剂的燃烧是一个复杂的化学流体力学过程，该过程涉及气相、液相、固相及各相界面间的化学反应及反应物质之间的扩散、传热和动力传递等物理过程。推进剂体系不同，燃烧过程中涉及的化学反应也各不相同。例如，在双基推进剂中，行之有效的催化剂是通过催化 NO 与 H_2 、CO、 CH_4 等分解产物之间的反应，使燃烧区中的暗区变薄，加速了向嘶嘶区和燃烧表面的传热，从而达到提高推进剂的燃速和改变其燃速压力指数的目的。

含高氯酸铵（AP）的复合推进剂的催化燃烧机理较为复杂，很多研究表明，一些过渡金属氧化物（ CrO_3 、 Fe_2O_3 、CuO 等）的催化作用部位分别或同时发生在