

固体推进剂燃烧基础

(上 册)

[美] K. K. 郭 M. 萨默菲尔德 主编

宋兆武 译 金如山 校

宇航出版社

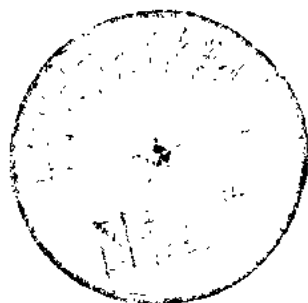
DE-4, 105
固体推进剂燃烧基础

(上册)

(美) K. K. 郭 主编
M. 萨默菲尔德

宋兆武 译

金如山 校



宇航出版社

内 容 简 介

本书是美国航空航天学会(AIAA)出版的《航天与航空进展》丛书第90卷,由在固体推进剂研制、生产、应用方面的十几位专家学者共同撰写的。本书的特点是:一、注重实际,书中用化学、流体力学、传热学、湍流、固体力学、火箭推进技术、材料科学、计算机等各种现代科学知识和技术来分析解决固体推进剂领域的理论和实际问题;二、内容新颖,本书概括了70年代中期至今近十年来国际上的最新成果。

全书共15章,分上、下两册翻译出版。上册包括第1~6章,主要介绍有关固体火箭发动机性能方面的基础知识,综述固体推进剂的燃烧特性,讨论了固体推进剂的高温分解、点火及燃烧问题,并概括介绍固体推进剂的火焰传播。下册包括第7~15章,主要内容是讨论固体推进剂稳态燃烧、过渡燃烧熄火和不稳定燃烧的基本问题,第15章专门介绍了无烟推进剂的有关问题。

本书可供从事固体火箭、固体推进剂研制、生产、使用的专家和工程技术人员阅读,也可作为高等院校有关专业师生和研究生的教学参考书。本书还可供化工和燃烧学界的专家和工程技术人员参考。

Fundamentals of Solid-Propellant Combustion

Edited by K. K. Kuo; M. Summerfield

固 体 推 进 剂 燃 烧 基 础

(上 册)

[美] K. K. 郭 主编
M. 萨默菲尔德

宋兆武 译

金如山 校

特约编辑:林国方

宇航出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经销

中国科学院印刷厂印刷

★

开本:850×1168 1/32 印张:11.5 字数:300千字

1988年7月 第1版第1次印刷 印数:1—1100册

定价:4.20元

ISBN 7-80034-082-1/V·005

译 序

美国航空航天学会(AIAA)自1960年起至1984年8月共出版《航天与航空进展》丛书九十卷(见丛书名细表)。本书是其中最新的一卷,即第90卷,由美国的K. K. 郭和M. 萨默菲尔德两位权威学者主编,并由美国、日本、法国、加拿大、意大利和印度等国的十几位著名专家共同撰写。

本书全面系统地总结了近三十年来许多国家(特别是美国)在固体推进剂燃烧方面的理论和试验研究的成果和经验,提出了今后研究的课题和方向,是一本难得的理论性和实用价值都很高的著作。本书的翻译出版将对我国从事固体火箭及固体推进剂研究、设计、制造和使用部门的专家、工程技术人员起到借鉴和促进作用。本书也可供高等院校有关专业的师生和研究生用作教学参考书。

全书共15章。每章内容自成体系,包括内容摘要、符号表、引言、理论和试验研究、结论和建议等;全书各章内容又密切相关而构成一个有机的整体。考虑到本卷篇幅较大,我们把它分为上、下两册翻译出版。

上册包括第1~6章,由宋兆武同志翻译。其内容是介绍有关固体火箭发动机性能方面的基础知识,综述固体推进剂的燃烧特性,讨论固体推进剂的高温分解、点火以及燃烧问题,概括介绍点火和火焰传播方面的内容。

下册包括第7~15章。第7、8、10章由朱荣贵同志翻译,第9章由于广经同志翻译,这几章全面讨论固体推进剂稳态燃烧各个方面的问题;第11、12章由廉茂林同志翻译,第13、14章由阮崇智同志翻译,这四章专门讨论燃烧熄火和不稳定燃烧的基本问

题;第15章由陈佐周同志翻译,该章专门讨论无烟推进剂的有关问题。

全书由金如山教授负责审校。

鉴于译者水平所限,译文难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

译者

1985年6月于北京

附:美国《航天与航空进展》丛书 1~90 卷明细表

美国《航天与航空进展》丛书第 1 卷至第 90 卷明细表

卷 次	书 名	出版时间
1	固体火箭研究	1960
2	液体火箭和推进剂	1960
3	航天动力的能量转换	1961
4	航天动力系统	1961
5	静电推进装置	1961
6	爆燃和两相流	1962
7	高超音速流研究	1962
8	制导与控制	1962
9	电推进的发展	1963
10	月球探测技术	1963
11	空间飞行动力系统	1963
12	高温气体中的电离	1963
13	制导与控制-II	1964
14	天体力学和航天动力学	1964
15	非均相燃烧	1964
16	航天动力系统工程	1966
17	航天动力学和天体力学方法	1966
18	空间飞行器及再入飞行器的温度控制	1966
19	通信卫星系统技术	1966
20	航天飞机和行星体的热物理学: 固体性质和空间电磁辐射环境	1967
21	航天飞机和再入体的热设计原理	1969
22	同温层环流	1969
23	热物理学: 空间飞行器热设计的应用	1970
24	传热与空间飞行器热控制	1971
25	七十年代的通信卫星技术	1971
26	七十年代的通信卫星系统	1971
27	上升热气团环流	1972
28	月球的动力学特性	1972
29	空间飞行器热设计基础	1972
30	太阳活动观测和预测	1972

续表

卷 次	书 名	出版时间
31	热控制和辐射	1973
32	通信卫星系统	1974
33	通信卫星技术	1974
34	空气喷气推进的测试	1974
35	热物理学和空间飞行器热控制	1974
36	热污染分析	1975
37	航空声学: 喷气和燃烧噪音; 管道声学	1975
38	航空声学: 风扇、短距起落飞机和附面层噪音; 声爆; 航空声学测试	1975
39	热控制应用中的传热	1975
40	基础燃烧空气动力学	1976
41	通信卫星发展: 系统	1976
42	通信卫星发展: 工艺	1976
43	航空声学: 喷气噪音、燃烧和核心发动机噪音	1976
44	航空声学: 风扇噪音和控制; 管道声学; 转子噪音	1976
45	航空声学: 短距起落飞机噪音; 机身和机翼噪音	1976
46	航空声学: 声波传播; 飞机噪声预测; 航空声学测试	1976
47	由于地球磁性等离子体引起空间飞行器的带电	1976
48	空间试验室卫星的科学考察	1976
49	辐射传热和热防护控制	1976
50	外太阳系探测	1976
51	稀薄气体动力学 (I 和 II 两卷)	1977
52	空间材料科学及其空间加工生产的应用	1977
53	气相燃烧系统中的试验诊断技术	1977
54	卫星通信: 未来系统	1977
55	卫星通信: 先进工艺	1977
56	空间飞行器热力学和外行星着陆探测器	1977
57	非地球材料的空间生产基地	1977
58	湍流燃烧	1978
59	空气动力加热和热防护系统	1978
60	传热与热控制系统	1978
61	空间辐射能量转换	1978
62	替换碳氢化合物燃料: 燃烧和化学动力学	1978
63	固体燃烧试验诊断技术	1978

续表

卷次	名 书	出版时间
64	外行星着陆加热和热防护	1979
65	热物理学与热控制	1979
66	枪炮内弹道学	1979
67	从空间对地球的遥感技术: 新式遥感器的任务	1979
68	紊流中喷射和混合	1980
69	再入受热和热防护	1980
70	传热、热控和热管	1980
71	航天装置及其同地球空间环境的相互作用	1980
72	粘性流阻的减少	1980
73	在零重试验室中的燃烧试验	1981
74	稀薄气体动力学 I 和 II (两卷)	1981
75	爆燃和爆炸气体动力学	1981
76	反应系统中的燃烧	1981
77	气动热力学和行星再入	1981
78	传热和热控	1981
79	电推进装置及其在航天飞行中的应用	1981
80	(航空)光学现象	1982
81	跨音速空气动力学	1982
82	再入大气层热物理学	1982
83	空间飞行器辐射传热和温度控制	1982
84	液态金属流和磁性流体动力学	1983
85	再入飞行器受热和热防护系统: 航天飞机; 太阳系恒星 探测器; “伽利略”木星探测器	1983
86	空间飞行器热控制、设计和使用的	1983
87	激波、爆炸、爆燃	1983
88	火焰激光器和反应系统	1984
89	轨道转换和游标发动机: 研究状况和需要	1984
90	固体推进剂燃烧基础	1984

目 录

序言	1
第一章 火箭推进剂概述及其燃烧特性	7
内容提要	7
符号表	7
1.1 引言	8
1.2 固体火箭发动机的性能	10
1.3 火箭发动机的稳定燃烧	17
1.4 燃速的温度敏感性	18
1.5 推进剂组分的热化学性质	21
1.6 推进剂燃烧产物的热化学性质	25
1.7 各类固体推进剂的燃烧过程	31
1.7.1 双基推进剂	31
1.7.2 过氯酸铵复合推进剂	33
1.7.3 改性双基推进剂	34
1.7.4 硝胺复合推进剂	37
1.8 固体推进剂燃速的控制因素	38
1.8.1 为表述固体推进剂和对燃烧波作一般描述所要求的 燃烧特性	38
1.8.2 燃烧波中的传热机理	41
1.8.3 固相中的传热	43
1.8.4 气相中的传热	44
1.8.5 气相中的反应速率	47
1.8.6 用简化的气相模型计算固体推进剂的燃速	51
第二章 过氯酸铵推进剂点火和燃烧的化学过程	56
内容提要	56
符号表	56

2.1 点火的化学过程	57
2.1.1 点火步骤	57
2.1.2 点火理论	59
2.1.3 氧化剂和粘结剂的作用	59
2.1.4 压力的影响	61
2.1.5 氧化性气氛的影响	62
2.1.6 用过氯酸 (HClO_4) 蒸气来点燃复合推进剂	63
2.1.7 预燃反应	64
2.1.8 催化剂对点火的影响	66
2.2 燃烧的化学过程	68
2.2.1 燃烧机理介绍	68
2.2.2 表面反应	70
2.2.3 表面里层反应	74
2.2.4 气相反应	89
2.2.5 催化剂对推进剂燃烧的影响	93
2.3 今后的研究方向	100
第三章 RDX (黑索金) 和 HMX (奥克托金) 的热特性	111
内容提要	111
3.1 引言	111
3.2 结晶学	113
3.3 HMX 的升华	117
3.4 固体 RDX 和 HMX 的分解	117
3.5 熔解	134
3.6 液体的分解	136
3.7 HMX 的高温分解	144
3.8 激波管试验	151
3.9 HMX 的点火	152
3.10 HMX 和 RDX 的自然	154
3.10.1 自燃速率随压力的变化	154
3.10.2 自燃速率随压力和试件初始温度的变化	158
3.10.3 自燃 HMX 的表面结构	160
3.11 结论	160

第四章 硝酸酯和硝酸复合推进剂的化学性质	170
内容提要	170
4.1 引言	170
4.2 硝化纤维的分解	174
4.2.1 硝化纤维分解动力学	174
4.2.2 硝化纤维分解的产物和机理	177
4.2.3 硝化纤维分解中的增塑剂和稳定剂	183
4.3 硝酸酯推进剂的催化反应	184
4.4 硝胺的分解	196
4.4.1 HMX 和 RDX 分解动力学	197
4.4.2 HMX 和 RDX 高温分解的产物和机理	201
4.4.3 硝胺推进剂的催化反应	210
4.5 火焰区化学	214
第五章 固体推进剂点火理论和试验	231
内容提要	231
符号表	231
5.1 引言	232
5.1.1 辐射能点火源	237
5.1.2 激波管和其他点火试验	251
5.2 固体推进剂点火理论模型及有关的理论	259
5.2.1 各种解法评述	272
5.2.2 固相反应机理理论	277
5.2.3 有外部氧化剂参与的非均相反应的点火理论	280
5.3 固体推进剂点火的气相理论	284
5.3.1 气相理论——激波管的情况	285
5.3.2 气相理论——辐射热输入情况	288
5.4 结论	292
第六章 火焰传播和总的点燃过渡过程	303
内容提要	303
符号表	304
6.1 引言	305
6.2 固体火箭发动机的点火和推力过渡过程	306

6.2.1 点火装置或点火器	306
6.2.2 点火过渡阶段的物理过程	309
6.2.3 点火瞬态模型和试验	312
6.3 沿着固体推进剂和燃料的火焰传播	325
6.3.1 火焰传播机理	325
6.3.2 火焰传播理论和试验	327
6.4 向固体推进剂裂纹和缺陷中的火焰传播	336
6.4.1 引言	336
6.4.2 有缺陷的推进剂中火焰传播和燃烧的物理过程	336
6.4.3 推进剂裂纹中的火焰传播理论和试验	337
6.5 结论	346

序 言

在各式各样的推进系统和燃气发生器系统中，固体推进剂有着广泛的用途。但是，从事这些系统研究工作的工程师和科学家们不断地遇到涉及复杂气动热化学过程的各种问题。要解决这些问题就需要对科学与工程的许多分支有很好的了解。这些分支包括化学、流体力学、传热学、湍流、热力学、固体力学、火箭推进理论、材料科学、数学以及偏微分方程和常微分方程的数值解法等。

在美国航空航天学会出版的《航天与航空进展》丛书中，这一卷新书的编写目的是：1) 介绍固体推进剂燃烧研究工作各个方面的历史发展和当前的发展水平；2) 既可作为初学者学习固体推进剂燃烧过程的基础知识的指导性材料，又可作为一本系统的教科书；3) 分析固体推进剂燃烧各个领域技术上的差距，指出今后研究的课题和方向；4) 促进固体推进系统的进一步发展，指导设计并研制先进的固体推进系统，使之具有更高的效率、更好的重现性和最大的安全性。

在固体推进剂燃烧及火箭推进方面已经出版过几本很杰出的著作。这些著作包括：美国航空航天学会的《航天与航空进展》丛书第一卷，即《固体火箭研究》(1960年出版，M·萨默菲尔德编)；《固体火箭》(1960年普林斯顿大学出版社出版，C·哈格特等著)；《火箭推进》(1960年埃尔塞维厄出版公司出版，M·巴勒尔等著)；《固体火箭的基本问题》(1969年北大西洋公约组织出版，F·A·威廉姆斯等著)。还有G·萨顿写成的《火箭发动机》一书的几个版本，从1949年到1976年的四个版本是由J·威利父子出版社出版的。上述这些书都是很有用的，特别是在其刚出版的时

候。然而由于最近三十年来固体推进剂燃烧领域取得了巨大的进展,所以迫切需要出版一本新书来包容这方面的最新知识。

另有几本书讨论了特殊应用方面(特别是枪炮)的固体推进剂燃烧的课题。关于枪炮内弹道学的最早的名著是《枪炮内弹道学理论》(1950年J·威利父子出版社出版,J·康纳厄著)。该领域的其他著作包括:《内弹道学》(1951年伦敦皇家出版社出版,F·R·W·亨特著);《高速火炮理论》(1965年在巴黎由北大西洋公约组织出版,A·E·西查尔著);《管式武器及固体火箭的内弹道学》(1942年至1962年的版本由苏联国家科学技术出版社在莫斯科出版,M·E·塞雷耶科夫著)。该领域一本最新的书是H·克里厄与M·萨默菲尔德合著的《枪炮内弹道学》,该书于1979年出版,即美国航空航天学会《航天与航空进展》丛书的第66卷。尽管这些书都包含有固体推进剂燃烧方面的内容,但它们只着重讨论火炮系统的内弹道性能,而不着重于固体推进剂燃烧的基本问题。

由爆燃到爆炸的转变这个特定领域内,苏联科学院于1973年出版了A·F·贝利耶夫等著的《在凝固相中由爆燃到爆炸的转变》一书。该书专门讨论过渡过程,并且在这个领域内是有用的。然而,该书没有提供固体推进剂燃烧方面一般的基础知识。从现有著作的状况和各有所侧重的目的性来看,显然我们现在出版这本新书是必要的,而且就其可作为固体推进装置进一步发展的参考文献而言,就更具有重大的意义。

由于涉及领域的多科性和广泛性,本书由许多杰出的研究人员合作撰写,他们各自撰写自己专门研究的固体推进剂燃烧问题的某个方面。全书共15章,其中每一章都综述了在该方面已经做过的工作;详细描述了重要的理论推导过程及试验方法;给出了有关的试验及理论研究成果;指出了技术上存在的差距和今后的研究方向。

N·库伯塔撰写的第一章,精辟地介绍了有关固体火箭发动

机性能方面的基础知识,综述了固体推进剂的燃烧特性。随后的三章讨论了固体推进剂的高温热分解、点火及燃烧各方面的问题。K·基肖和V·盖伊思里合撰的第二章,讨论过氯酸胺推进剂点火和燃烧方面的基本化学问题,也讨论了氧化剂、粘结剂、催化剂以及环境条件对点火和燃烧过程的影响。T·L·博格斯撰写的第三章包括了黑索金(RDX)和奥克托金(HMX)热特性方面的资料,并清楚地叙述了这些硝胺推进剂的升华、热解、点火及自己爆燃过程。关于NC(硝化棉)HMX和RDX分解的细致动力学过程、硝胺推进剂的催化过程以及火焰区化学的详细讨论将在第四章中进行,该章的作者是R·A·法伊弗。

第五章和第六章概括了固体推进剂点火和火焰传播方面的内容。由C·E·赫门斯撰写的第五章详细描述了各种点火试验方法与点火理论,包括固相、非均相及气相的点火理论,对各种点火现象和点火准则也作了透彻的解释。第六章介绍了固体火箭发动机点火及推力过渡过程,还详细讨论了火焰在推进剂表面上的传播以及火焰向推进剂内部缺陷中扩展的情况。

本书用四章的篇幅全面讨论固体推进剂稳态燃烧过程的各个方面。在第七章中,G·伦格雷、A·比泽特、J·杜特克以及J·F·特鲁勃特提供了均质推进剂的火焰结构和其燃烧机理的重要资料。这一章也对高速燃烧机理及平台效应(或称麦瑟效应)进行了有价值的讨论。在第八章中,K·N·R·拉莫哈利详细分析了非均质推进剂的各种燃烧模型,包括圭劳-威廉斯的过氯酸胺(AP)燃烧模型、萨默菲尔德的粒状扩散火焰模型、赫门斯模型、贝克施泰特-德尔-普赖斯模型、奥斯本及其同事们的微小集合模型等。在第九章,E·W·普赖斯广泛叙述和解释了含金属推进剂的燃烧现象,详细讨论了金属及其氧化物的性质和金属添加剂对燃烧速率的影响,并附有相应的图片加以说明。在第十章中,M·K·拉兹登和K·K·郭讨论了固体推进剂侵蚀燃烧的研究情况。基于研究方法及处理问题的途径不同,他们把各式各样的

理论模型分成几类,详细描述了侵蚀燃烧的试验测量方法及其观测结果,以及侵蚀燃烧的机理。

本书中有四章是讨论过渡燃烧及燃烧不稳定性问题的。第十一章的作者是 K·K·郭、J·P·戈尔和 M·萨默菲尔德。这一章讨论了固体推进剂的过渡燃烧过程及其基本机理、理论模型、试验观测以及物理-化学参量和使用环境条件对过渡燃烧速率的影响。在第十二章, L·D·卢卡专门讨论熄火理论及其试验方法,详细叙述了快速降压动态熄火、隔绝辐射熄火以及其他各种熄火技术;对非线性燃烧稳定性机理及理论也作了充分的阐述。第十三章的作者是 E·W·普赖斯,该章讨论了火箭发动机中的燃烧不稳定性的试验观测方法,包括燃烧响应函数的测量技术、不稳定燃烧的各种模型,以及推进剂特性对燃烧不稳定性的影响。J·S·钱撰写的第十四章讨论不稳定燃烧的理论分析问题,包括波运动的线性分析、声放大及声阻尼作用、非声振的不稳定性、非线性分析以及对各种理论分析方法的预估性能。

在第十五章, E·米勒讨论了无烟推进剂,他详细论述了生成烟的化学机理、二次烟生成及其模型、烟的均相及非均相核、以及减少推进剂燃烧产物冒烟的各种方法。

虽然在过去三十年中固体推进剂领域的技术有了巨大进展,但是还有许多悬而未决的难题和新的应用问题有待研究。基于我们在该领域长期工作的经验,作为我们个人的看法,认为今后至少有四个方面的研究应将会得到人们更多的注意:第一个方面,是把先进的无干扰快速响应诊断技术应用于固体推进剂燃烧流场性质的测定和火焰结构的测定。这种技术将为从事固体推进剂燃烧研究的科学家们提供一种对燃气速度、组分浓度、温度和密度的测量手段。该测量手段具有很高的空间分辨率和时间分辨率。这些技术包括激光多普勒热线风速仪、相干反-斯托克斯-拉曼质谱仪、激光火花质谱仪、快速波长跟踪米克森干涉仪、激光诱导荧光技术、高速流动显示、大功率 X 射线动态摄影技术等。这些技术大多

可用于研究固体推进剂的点火、过渡燃烧现象、两相反作用流、燃烧不稳定性以及各种推进装置,可以预期,随着这些试验研究技术的突破,我们对固体推进剂燃烧问题的认识将会有个质的飞跃。

可以预见,随着人们认识的深化,今后将会开展第二个方面的研究工作,即研究许多曾限制(约束)人们对固体推进剂燃烧的深入认识和进行数学分析的那些问题(当前的认识和分析基本上属于热物理学的范畴)。这些限制是由于人们对起决定性作用的化学过程缺乏认识造成的。于是,就忽略了在固体火箭发动机中的气相化学反应和有限速率的气相化学反应动力学的影响,所以现有的不稳定燃烧理论就过于简化、过于偏重纯热物理学了,因而也就缺乏真实性。缺乏真实性的另一个例子,是用常规燃速理论不能解释固体推进剂燃烧时形成平台的特殊化学效应。化学效应是多方面的,值得进行试验研究和理论探讨。上一段所提到的新发展起来的试验技术肯定将有助于阐明这些基本问题。

可以预期,未来研究的第三个方面是高压燃烧领域。作为本书撰写基础的许多试验结果都是在常规压力(100atm)下得到的,可供借鉴学习。但是,火箭发动机的设计者们正在研制更高压力下工作的固体火箭,至于枪炮当然早已在比常规固体火箭至少高十倍的压力下使用了。这就迫使燃烧学专家们必须对现有的理论作进一步的研讨和扩展,以适应高压条件下的点火和燃烧现象的研究。

进一步研究的第四个方面是把富燃固体推进剂应用于空气喷气推进系统。固体-冲压发动机具有比冲高、航程远的优点。在这种固体-冲压发动机中,由于含氧的冲压空气的流入,燃烧区发生显著变化;进面又会大大地影响富燃固体推进剂的燃速、点火过程、熄火现象以及燃烧情况的许多方面。从燃烧研究的广阔领域里可以学到很多东西,但在固体-冲压发动机的燃烧方面却有大量的新课题有待研究解决。

除了向本书的作者表示感谢之外,编者还向为本书作出贡献