



国防科技图书出版基金



谢侃 等著

固体火箭发动机 流体喉部喷管技术

Fluidic Nozzle Throat in Solid Rocket Motor



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

固体火箭发动机流体 喉部喷管技术

Fluidic Nozzle Throat in Solid Rocket Motor

谢 侃 刘 宇 王一白 著
李军伟 康开华

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

固体火箭发动机流体喉部喷管技术/谢侃等著. —北京:
国防工业出版社, 2015. 1

ISBN 978 - 7 - 118 - 09773 - 3

I. ①固… II. ①谢… III. ①固体推进剂火箭发
动机—喷管喉部—研究 IV. ①V435

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 270524 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 12¼ 字数 220 千字

2015 年 1 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	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
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	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		

前 言

能够实时地进行大范围推力调节是未来固体火箭发动机的发展趋势。该技术在众多先进的国防技术中有着迫切的需求,如导弹拦截系统、固体火箭冲压发动机、弹头躲避机动、登陆舱(返回舱)的缓冲系统,导弹的多任务、大飞行剖面的能量管理技术等。过去几十年里国外对可控推力固体火箭发动机的理论和实验研究做了大量的工作,探索出了很多技术途径和设计方案,有的已经进入实际使用阶段,如美国三叉戟导弹末助推系统、苏联的凝胶推进剂发动机、美国的动能拦截弹姿轨控系统、欧洲“紫菀”地空导弹侧向力发动机等。流体喉部喷管技术是航空航天动力领域中正在发展的一项新技术。该技术既可用于固体火箭发动机的推力大小、方向的实时调节,又可作为固体燃气发生器的流量调节技术,还可作为一种长时间工作固体火箭发动机喷管喉部的主动热防护技术,技术特点新颖、应用前景广阔。

美国已针对流体喉部喷管技术在航空发动机、液体火箭发动机及固体火箭发动机上的应用开展了工程应用研究,并将固体火箭发动机流体喉部技术申请了国防专利。美国 NASA 和空军更是将该技术列为未来先进无人机和战机喷气推进系统的首选。由于该技术在国防中的重要性和敏感性,国外在这方面可直接参考的公开资料较少,国内在这方面的研究在过去更是接近空白。本书作者结合自身积累的研究基础总结成书,望能抛砖引玉,激发有志者加入到该领域的研究中来。

本书共9章,第1章由刘宇、康开华撰写,第2章~第4章由谢侃撰写,第5、6章由谢侃、王一白撰写,第7、8章由谢侃、李军伟撰写,第9章由谢侃、刘宇一起完成,全书由谢侃统稿。在书稿撰写过程中,得到了北京理工大学、北京航空航天大学、兵器工业、航天工业部门领导的支持及同行的关心和帮助,收获了很多宝贵的意见和建议。感谢中国科学院刘竹生院士百忙之中抽出宝贵时间审查了本书的初稿并给予了肯定,北京理工大学王宁飞教授、魏志军教授等在该书完成过程中都曾给予了指导,航天科技集团六院101实验站、兵器204所对本书固体火箭发动机流体喉部喷管的地面实验、发动机方案等内容提供了支持和帮助,在此表示衷心的感谢。感谢北京航空航天大学流体所闫超教授对作者在博士后工作期间的关心和帮助。同时感谢国防科技图书出版基金评审专家和编辑部编辑的工作和宝贵意见。

本书具有很强的针对性和实用性,可作为从事相关领域的专业工程技术、

设计人员、管理人员以及高等院校、科研院所相关专业的技术参考资料和研究生教材。同时由于作者水平有限,书中必有不妥之处,殷切恳请读者、同行批评指正。

作 者
2014. 10

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 流体喉部喷管应用背景	1
1.2 固体火箭发动机流体喉部推力调节原理与特点	6
1.2.1 推力调节原理	6
1.2.2 固体火箭发动机流体喉部工作方式与特点	7
1.3 国内外发展状况	8
1.3.1 概况	8
1.3.2 基于流体喉部喷管的二次喷射矢量控制研究	11
1.4 流体喉部喷管固体火箭发动机的设计	12
参考文献	14
第 2 章 气-气流体喉部的稳态特性	18
2.1 流体喉部的有效面积	18
2.2 稳态特性分析方法	19
2.2.1 冷流试验方法与装置	19
2.2.2 计算流体方法	26
2.3 流动特征	28
2.3.1 环缝式流体喉部	28
2.3.2 圆孔喷嘴式流体喉部	31
2.3.3 无量纲喷嘴位置与流体喉部特征的关系	32
2.4 二次流流量比与总压比的关系	34
2.5 二次流参数与有效喉部面积	35
2.5.1 二次流总温与等效性	35
2.5.2 二次流/主流流量比	36
2.5.3 环缝喷嘴与圆孔喷嘴的比较	37
2.5.4 二次流喷嘴个数	37
2.5.5 二次流喷嘴面积比	38
2.5.6 二次流喷射角度	38
2.5.7 二次流喷嘴扩张比的影响	39
2.6 主喷管参数的影响	40

2.6.1	主喷管收敛段	40
2.6.2	反压比	41
2.7	流体喉部的二次流方案比较	41
2.7.1	二次流喷嘴的布局方案	41
2.7.2	无源与有源方案	42
2.7.3	多喷嘴组合方案	42
	参考文献	44
第3章	特征函数与喷管效率	45
3.1	固发流体喉部性能表征与计算方法	45
3.1.1	特征函数	45
3.1.2	流体喉部喷管推力效率	46
3.2	流体喉部的特征函数曲线	47
3.3	流体喉部喷管的推力效率	50
3.3.1	推力效率与修正流量比的关系	50
3.3.2	推力效率与压比 NPR 的关系	51
3.3.3	推力效率与喷嘴面积比的关系	53
3.3.4	推力效率与喷射角度的关系	54
3.3.5	推力效率与喷嘴个数的关系	55
	参考文献	56
第4章	气-粒两相流条件下的流体喉部	57
4.1	颗粒相对流体喉部的扰动	57
4.2	两相流动理论基础与 FLNT-V1.1 分析代码	58
4.2.1	气-粒两相流模型	58
4.2.2	两相流控制方程	58
4.2.3	喷管损失与校核算例	60
4.3	颗粒尺寸的影响	64
4.3.1	环缝喷嘴算例	64
4.3.2	圆孔喷嘴算例	67
4.4	颗粒质量分数的影响	68
4.4.1	环缝喷嘴算例	68
4.4.2	圆孔喷嘴算例	69
4.5	颗粒尺寸分布的影响	70
4.5.1	扼流性能	70
4.5.2	两相流场与颗粒轨迹	71
4.5.3	两相流条件下喷嘴位置的选择	73
4.6	两相流条件下流体喉部喷管的效率	73

4.7 两相流旋流流体喉部特性	75
4.7.1 两相流条件下一维理想旋流模型	75
4.7.2 旋流流体喉部性能及颗粒相的影响	80
参考文献	84
第5章 流体喉部喷管的二次流喷射 TVC	86
5.1 工作模式与 TVC 机制	86
5.2 推力矢量的稳态表征方法	87
5.3 二次流 TVC 的六分力测量	88
5.3.1 六分力测量原理与推力架构成	89
5.3.2 六分力测量力学模型	90
5.3.3 测量误差和标定	93
5.4 喷嘴位置与 TVC 特征	98
5.5 喉部喷流对 SVC 性能的影响	102
5.5.1 二元流体喉部喷管的不对称喷射	102
5.5.2 实际侧向力调节	104
5.6 推力矢量的影响因素	106
5.6.1 反压 NPR 的影响	106
5.6.2 喷射角度的影响	107
5.6.3 喷嘴面积比的影响	108
5.7 圆孔喷嘴组合模式	109
参考文献	118
第6章 气-液流体喉部	120
6.1 气-液流体喉部的流动特征	120
6.2 二次流气液工质对比	122
6.2.1 喷射方案1—— 	123
6.2.2 喷射方案2—— 	124
6.2.3 喷射方案3—— 	124
6.2.4 喷射方案4—— 	125
6.2.5 喷射方案5—— 	126
6.2.6 喷射方案6—— 	126
6.2.7 综合比较	128

参考文献	131
第7章 固发流体喉部的推力调节过程	132
7.1 固发内弹道计算方法	132
7.1.1 加质源项实现方法	132
7.1.2 N-S 方程离散方法	132
7.2 定流量的调节过程	133
7.3 环缝式流体喉部非定常过程	134
7.3.1 典型非定常工作过程	134
7.3.2 燃烧室空腔容积的影响	136
7.3.3 二次流喷射角度的影响	137
7.4 有源孔式流体喉部的推力调节特性	137
7.4.1 流量调节特性	137
7.4.2 推力调节特性	138
7.4.3 填充过程	140
参考文献	141
第8章 固发流体喉部的烧蚀特性	142
8.1 喉衬材料	142
8.2 固发喉衬烧蚀的计算方法	142
8.2.1 气固界面边界条件	143
8.2.2 燃气组分	144
8.2.3 化学反应体系	144
8.2.4 燃气的物性参数计算方法	145
8.3 传统固发喷管的喉部烧蚀——Borie 喷管模型	146
8.4 流体喉部的烧蚀特性	147
8.5 基于流体喉部的主动热防护技术	149
参考文献	151
第9章 系统应用模式与主要结构	153
9.1 系统分类	153
9.1.1 姿轨控系统	153
9.1.2 主推进系统	156
9.1.3 按工质分类	158
9.2 典型结构	160
9.3 喷嘴结构	162
9.4 二次流燃气发生器	162
9.4.1 燃气发生器可靠点火	164
9.4.2 燃气过滤	165

9.4.3 燃气降温	167
9.4.4 燃气稳压	169
9.5 推力调节模式与效能	170
9.5.1 调节模式	170
9.5.2 效能与推力变化范围指标	173
参考文献.....	175
主要符号表	176

Contents

Chapter 1	Generalization	1
1.1	Application Background of Fluidic – Throat Nozzle	1
1.2	Theory and Characteristics of Fluidic Throat for Solid Rocket Motors	6
1.2.1	Thrust Modification Theory	6
1.2.2	Work Modes and Characteristics of Fluidic Throat for Solid Rocket Motors	7
1.3	General Study Conditions in China and Abroad	8
1.3.1	General Introduction	8
1.3.2	Study of Secondary Flow TVC for Fluidic – Throat Nozzles	11
1.4	Design Procedure of Solid Rocket Motors with Fluidic Nozzle Throat	12
	References	14
Chapter 2	Steady Characteristics of Gas – Gas Aerodynamic Throat	18
2.1	The Effective Throat Area of Fluidic Throat	18
2.2	The Analytical Methods for Steady Aerodynamic Characteristics	19
2.2.1	Experimental Methods and Apparatus of Cold Flow	19
2.2.2	Computational Fluidic Dynamics	26
2.3	Flow Characteristics	28
2.3.1	Axial Gap Type of Fluidic Nozzle Throats	28
2.3.2	Round Holes Type of Fluidic Nozzle Throats	31
2.3.3	Dimensionless Relationship for Injector Positions and Characteristics of Fluidic Nozzle Throat	32
2.4	The Relation between Mass Flow Ratio and Total Pressure Ratio of the Secondary Flow	34
2.5	The Effective Throat Area and Secondary Flow Parameters	35
2.5.1	Total Temperature of Secondary Flow and Equivalence	35

2. 5. 2	Mass Flow Ratio for Secondary and Main Flow	36
2. 5. 3	Comparison for Axial Gap and Round Holes Injectors	37
2. 5. 4	Injector Numbers	37
2. 5. 5	Area Ratio of Secondary Flow Injectors	38
2. 5. 6	Injection Angles	38
2. 5. 7	Influence of Expansion Ratio of Secondary Flow Injectors	39
2. 6	The Influences of Geometry Parameters of the Main Nozzle	40
2. 6. 1	Convergent Section of Main Nozzle	40
2. 6. 2	Back Pressure Ratio	41
2. 7	Comparison for Vary Secondary Flow Concepts	41
2. 7. 1	Secondary Flow Injectors Arrangement	41
2. 7. 2	Concepts with and without Secondary Flow Sources	42
2. 7. 3	Combination Concepts of Multi Injectors	42
	References	44
Chapter 3	The Characteristic Function and Nozzle Efficiency	45
3. 1	The Performance Characterization and Calculation Method for the Fluidic Throat in Solid Rocket Motors	45
3. 1. 1	The Characteristic Function	45
3. 1. 2	Thrust Efficiency of Fluidic Nozzle Throats	46
3. 2	The Performance Characterization Curves	47
3. 3	The Thrust Efficiency of the Fluidic – throat Nozzle	50
3. 3. 1	Modified Mass Flow Ratio vs. Thrust Efficiency	50
3. 3. 2	Back Pressure Ratio NPR vs. Thrust Efficiency	51
3. 3. 3	Injector Area Ratio vs. Thrust Efficiency	53
3. 3. 4	Injection Angles vs. Thrust Efficiency	54
3. 3. 5	Injector Numbers vs. Thrust Efficiency	55
	References	56
Chapter 4	The Fluidic Throat in Gas – particle Two Phase – flow Conditions	57
4. 1	The Turbulence of the Particle Phase on the Fluidic Throat	57
4. 2	Two – phase Flow Theory and the FLNT – V1. 1 Analytical Codes	58
4. 2. 1	Particle – gas Two Phase Flow Models	58
4. 2. 2	Control Functions of Two Phase Flow	58

4. 2. 3	Nozzle Loss and Standard Calculation Cases	60
4. 3	The Influences of Particle Sizes	64
4. 3. 1	Axial Gap Type Cases	64
4. 3. 2	Round Holes Type Cases	67
4. 4	The Influences of Mass Fraction of Particle Phase	68
4. 4. 1	Axial Gap Type Cases	68
4. 4. 2	Round Holes Type Cases	69
4. 5	The Influences of Particle – Size Distribution Profiles	70
4. 5. 1	Mass Flow Control Performance	70
4. 5. 2	Two Phase Flow Fields and Particle Tracks	71
4. 5. 3	Choose Injector Positions in Two Phase Flow Conditions	73
4. 6	The Fluidic – throat Nozzle Efficiency in Two – phase Flow Conditions	73
4. 7	The Characteristics of Two – phase Swirl – flow Throat in Laval Nozzles	75
4. 7. 1	One – dimensional Swirl Nozzle Flow Model in Two Phase Flow Conditions	75
4. 7. 2	Performance of Swirl Nozzle Throat and Influence of Particle Phase	80
	References	84

Chapter 5 Secondary Flow TVC for Fluidic – throat Nozzles 86

5. 1	Work Modes and TVC Manners	86
5. 2	The Performance Characterization of Thrust Vector Control	87
5. 3	Six – component Forces Tests of Secondary Flow TVC	88
5. 3. 1	Six – component Forces Test Methods and Thrust Stand	89
5. 3. 2	Mechanical Models of Six – component Forces Test	90
5. 3. 3	Measurement Error and Calibration	93
5. 4	Injector Positions and TVC Characters	98
5. 5	The Influences of Fluidic Throat Flow on SVC	102
5. 5. 1	Asymmetric Injection in 2D Fluidic Nozzle Throats	102
5. 5. 2	Actual Lateral Forces Modification	104
5. 6	The Influences of Thrust Vector Control	106
5. 6. 1	Influence of Back Pressure NPR	106
5. 6. 2	Influence of Injection Angle	107
5. 6. 3	Influence of Injector Area Ratio	108

5.7	The Arrangement Concepts of Round Hole Injectors	109
	References	118
Chapter 6	Gas – liquid Fluidic Throat	120
6.1	The Flow Characters of Gas – liquid Throat	120
6.2	Comparison between Gas and Liquid Secondary Flow	122
6.2.1	Injection Concept 1—— 	123
6.2.2	Injection Concept 2—— 	124
6.2.3	Injection Concept 3—— 	124
6.2.4	Injection Concept 4—— 	125
6.2.5	Injection Concept 5—— 	126
6.2.6	Injection Concept 6—— 	126
6.2.7	General Comparison	128
	References	131
Chapter 7	Thrust Modulation Process of Fluidic Throat for Solid Rocket Motors	132
7.1	The Calculation Method of the Internal Ballistics	132
7.1.1	Mass Sources Description	132
7.1.2	Discrete method for N – S Functions	132
7.2	The Modulation Process at Fixed Mass Flow Rates	133
7.3	The Unsteady Process for the Axial – lap Fluidic Throat	134
7.3.1	Typical Unsteady Work Process	134
7.3.2	Influence of Chamber Volume	136
7.3.3	Influence of Injection Angle	137
7.4	Thrust Modulation for the Active Fluidic Hole – type Throat	137
7.4.1	Mass Flow Modification Characteristic	137
7.4.2	Thrust Modification Characteristic	138
7.4.3	Filling Process	140
	References	141