



国防科技图书出版基金

# 液体火箭发动机 推力室设计

D  
esign for Thrust Chamber of  
Liquid Propellant Rocket Engines



王治军 常新龙 田干 张晓军 编著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

# 液体火箭发动机推力室设计

**Design for Thrust Chamber of Liquid  
Propellant Rocket Engines**

王治军 常新龙 田 干 张晓军 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

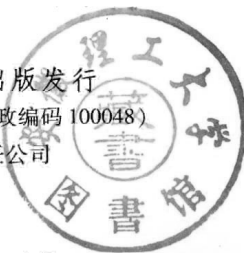
液体火箭发动机推力室设计 / 王治军, 田干等编著  
—北京: 国防工业出版社, 2014. 9  
ISBN SBN 978-7-118-09517-3

I. ①液... II. ①王... ②常... III. ①液体火箭  
—应用—作战—研究 IV. ①E83—39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 149126 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 21¼ 字数 386 千字  
2014 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 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 第六届评审委员会组成人员

主任委员	王 峰				
副主任委员	宋家树	蔡 镭	杨崇新		
秘 书 长	杨崇新				
副 秘 书 长	邢海鹰	贺 明			
委 员	于景元	才鸿年	马伟明	王小谟	甘茂治
(按姓氏笔画排序)	甘晓华	卢秉恒	邬江兴	刘世参	芮筱亭
	李言荣	李德仁	李德毅	杨 伟	肖志力
	吴有生	吴宏鑫	何新贵	张信威	陈良惠
	陈冀胜	周一宇	赵万生	赵凤起	崔尔杰
	韩祖南	傅惠民	魏炳波		

# 前 言

火箭发动机是唯一能够在大气层外工作的动力装置。运载火箭的核心部件——液体火箭发动机是当前技术发展最完善、应用最广泛的化学能火箭发动机。液体火箭发动机推力室是发动机中唯一主要产生推力的重要组件。尽管液体火箭发动机系统各种各样,但系统中所有其他组件都是围绕着能使推力室产生推力这一目的而设置的。推力室由专门从事液体火箭发动机这一行业的人来研制,其他任何机械行业都不涉及。许多研究航天技术的先驱者首先研究的就是火箭发动机,尤其是液体火箭发动机,而首要研究的就是推力室的工作原理、设计方法和生产、试验技术。推力室技术的进步,推动了整个液体火箭发动机技术的进步,从而促进了航天事业的发展。液体火箭发动机自 20 世纪 40 年代在德国导弹武器上正式应用以来,20 世纪 50 至 70 年代的 30 年间在苏联和美国经过发展突破,其技术水平取得了长足的进步,研制出了以 RD-120、RD-170 高压补燃液氧煤油发动机和 RD-0120 氢氧发动机以及 SSME 氢氧发动机为代表的高水平液体火箭发动机。50 多年来,我国为适应武器和运载火箭的需要,经过长期艰苦的努力,在液体火箭发动机研制方面做了大量工作,研制出了以“长征”系列运载火箭用大推力发动机为代表的多种型号的不同推力等级的液体火箭发动机。近些年,由于大推力高压补燃液氧煤油发动机的研制成功,又使中国液体火箭发动机技术迈上了一个新台阶。

我国航天事业方兴未艾,仍需大批后继人才,还会有不少相关专业的本科生、研究生陆续进入到这一领域工作。作为第一代航天人,将过去所做工作的点滴体会和小部分可解密资料编写出来,为广大的青年学子提供一个能够尽快入门的平台,也算了却了一个心愿。

因已有“微小型液体火箭发动机”方面的专著出版,本书略去了有关这方面的内容。把介绍中、大推力液体火箭发动机推力室设计方面的内容作为重点。编著者力图从基本概念入手,由浅入深、循序渐近地对推力室设计的基础知识作一介绍。

全书共分 11 章。第 1 章绪论,介绍了推力室的基本工作原理。第 2 章对推力室使用的液体推进剂做了简要介绍,因为有关推进剂的一些性能参数将是推力室热力参数计算的原始数据。第 3 章热力参数计算,在分析热力过程的基础上介绍了推力室性能参数和几何尺寸的计算方法。第 4、5、8、10 章对推力室各

部分的结构设计原理和设计方法、设计方案做了具体介绍。第6、7章介绍了推力室内不同的工作过程,以及对结构设计的要求。第9、11章对结构设计方案从热防护和结构强度两方面进行的检验性校核计算做了较详细的介绍。

本书由王治军教授主笔,常新龙教授、田干讲师参与了编写。研究生们为本书的录入工作付出了辛勤劳动。航天科技集团公司六院葛李虎研究员、卢天寿研究员和吕奇伟主任对本书做了认真的评阅,提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。

特别感谢国防科技图书出版基金的资助和国防工业出版社程邦仁编辑的大力支持。

编著者在编写过程中也参考了不少专家和学者的著作、学术论文等,在此对他们表示最诚挚的谢意。有些论文和不少外文翻译文稿已无法找到出处,因此无法在参考文献中列出,这里也向诸位作者和译者深表歉意。

编著者水平有限,书中难免存在不妥之处和缺点错误,欢迎使用本书的师生和读者批评、指正。

A handwritten signature in black ink, reading '王治军' (Wang Zhijun), written in a cursive style.

2009年10月



# 目 录

第 1 章 绪论 .....	1
1.1 液体火箭发动机系统的组成和推力室在其中的地位 .....	1
1.1.1 系统构成 .....	1
1.1.2 推力室在系统中的地位 .....	2
1.2 推力室中的能量转换 .....	3
1.2.1 能量转换过程的理想热力循环 .....	3
1.2.2 能量转换过程中的状态参数变化 .....	4
1.2.3 能量转换过程中的热损失与效率 .....	7
1.3 理想推力室的主要简化和常用公式 .....	9
1.3.1 主要简化 .....	9
1.3.2 常用的热力和气动力方程 .....	9
1.4 推力室的参数和效率 .....	14
1.4.1 推力 .....	14
1.4.2 比冲 .....	16
1.4.3 特征速度和燃烧效率 .....	17
1.4.4 推力系数和喷管效率 .....	18
1.4.5 比冲量效率 .....	21
第 2 章 液体推进剂 .....	23
2.1 液体推进剂的类别 .....	23
2.1.1 概述 .....	23
2.1.2 按用途分类 .....	23
2.1.3 按组元数目分类 .....	23
2.1.4 按照氧化剂和燃料直接接触时的化学反应能力分类 .....	24
2.1.5 按照推进剂其组元保持液态的温度范围分类 .....	25
2.1.6 凝胶推进剂 .....	25
2.2 对液体推进剂的要求 .....	26
2.2.1 推进剂具有高的比冲 .....	26

2.2.2	推进剂组元密度大	26
2.2.3	有较好的传热性能和小的水力损失	27
2.2.4	推进剂的性能有利于在燃烧室内正常、可靠、稳定的工作	27
2.2.5	有良好的储存使用性能	27
2.3	常用的液体推进剂组元和推进剂组合	27
2.3.1	可储存的氧化剂组元	27
2.3.2	不可储存的氧化剂组元	29
2.3.3	可储存的燃料组元	30
2.3.4	不可储存的燃料组元	32
2.3.5	常用的推进剂组合	35
2.4	液体推进剂的参数计算	37
2.4.1	混合比和余氧系数	37
2.4.2	推进剂中元素的质量组成	39
2.4.3	推进剂的焓值	43
<b>第3章</b>	<b>推力室内的热力过程和热力参数计算</b>	<b>44</b>
3.1	平均余氧系数和主要过程参数的选择	44
3.1.1	平均余氧系数的选择	44
3.1.2	燃烧室压力 $p_c$ 的选择	45
3.1.3	喷管出口压力 $p_e$ 的选择	46
3.2	推力室内热力过程的特点	46
3.2.1	概述	46
3.2.2	燃气的离解与复合	47
3.2.3	燃气分子的能量分配	48
3.2.4	化学平衡和能量平衡	49
3.2.5	燃气在喷管中的平衡流动与冻结流动	50
3.2.6	燃气在喷管中的等熵流动和等熵过程指数	51
3.3	热力参数的计算	53
3.3.1	概述	53
3.3.2	燃烧过程的热力参数计算	54
3.3.3	流动过程的热力参数计算	60
3.4	推力室的实际性能参数和几何尺寸	63
3.4.1	实际比冲值的计算	64
3.4.2	流量和主要几何尺寸	64
3.5	热力参数的主要影响因素	65

3.5.1	组元混合比(或余氧系数 $\alpha_m$ )对热力参数的影响 .....	68
3.5.2	燃烧室内压力(喷管入口压力) $p_c$ 对热力参数的影响 .....	70
3.5.3	比冲 $I_s$ 的影响因素 .....	70
3.5.4	特征速度 $c^*$ 的影响因素 .....	71
<b>第4章</b>	<b>推力室轮廓尺寸的确定与型面设计 .....</b>	<b>72</b>
4.1	燃烧室轮廓尺寸的确定 .....	72
4.1.1	燃烧室形状与容积的选择 .....	72
4.1.2	燃烧室圆筒段直径和长度的选择 .....	73
4.2	喷管收敛段型面和尺寸的选择 .....	75
4.3	喷管扩散段型面的设计 .....	76
4.3.1	对喷管型面设计的要求 .....	76
4.3.2	喷管型面的种类 .....	77
4.3.3	特形喷管型面的设计方法 .....	80
4.4	喷管中的损失和流量系数 .....	94
4.4.1	摩擦损失 .....	94
4.4.2	不平行损失 .....	96
4.4.3	入口损失 .....	98
4.4.4	化学动力学损失(化学不平衡流动损失) .....	100
4.4.5	流量系数 .....	101
<b>第5章</b>	<b>喷嘴的工作原理与设计 .....</b>	<b>103</b>
5.1	概述 .....	103
5.1.1	喷嘴的种类 .....	103
5.1.2	喷嘴的主要参数 .....	107
5.1.3	研究的目的是和方法 .....	108
5.2	离心式喷嘴 .....	109
5.2.1	理想流体在喷嘴内的流动 .....	109
5.2.2	影响离心式喷嘴工作参数的因素 .....	114
5.2.3	单组元离心式喷嘴的计算步骤 .....	116
5.2.4	离心式喷嘴在实际应用中的几个问题 .....	117
5.2.5	双组元离心式喷嘴 .....	118
5.3	直流式喷嘴 .....	121
5.3.1	液体在喷嘴内的流动 .....	121
5.3.2	影响流量系数 $C_{dh}$ 值的因素 .....	122
5.3.3	直流撞击式喷嘴 .....	130

5.4	同轴式喷嘴	140
5.4.1	双组元内混合液气喷嘴	141
5.4.2	双组元内混合气液喷嘴	141
5.4.3	直流式气喷嘴的计算	142
5.5	喷嘴的典型结构	143
5.5.1	单组元离心式喷嘴	143
5.5.2	双组元离心式喷嘴	144
5.5.3	直流离心式喷嘴	144
5.5.4	直流式喷嘴	145
5.5.5	气液喷嘴	146
<b>第6章</b>	<b>燃烧室中的稳定工作过程</b>	<b>148</b>
6.1	概述	148
6.2	液体推进剂组元的雾化	150
6.2.1	雾化过程	150
6.2.2	雾化特性的几个指标	152
6.2.3	影响雾化的主要因素	156
6.3	推进剂组元间的混合	157
6.3.1	混合过程	157
6.3.2	混合的特点	158
6.3.3	混合对燃烧室参数的影响	159
6.4	推进剂组元的蒸发	160
6.5	燃烧	164
6.5.1	集中燃烧模型和分散燃烧模型	164
6.5.2	均质燃烧与异质扩散燃烧	165
6.6	燃烧室工作过程完善程度的评价	166
<b>第7章</b>	<b>推力室的不稳定工作过程</b>	<b>168</b>
7.1	概述	168
7.1.1	不稳定工作的特点	168
7.1.2	不稳定工作过程的类别	169
7.1.3	不稳定工作工程的研究	169
7.2	低频工作不稳定性	170
7.2.1	低频不稳定燃烧	170
7.2.2	发动机—弹体的低频振动	173
7.3	高频不稳定燃烧	173

7.3.1	高频不稳定燃烧的基本特点和类别 .....	173
7.3.2	燃烧室的声学特性 .....	174
7.3.3	高频不稳定燃烧产生的机理 .....	181
7.3.4	影响高频不稳定燃烧的因素 .....	182
7.3.5	防止高频不稳定燃烧的措施 .....	183
7.4	中频流量型振动 .....	188
7.4.1	中频流量型振动的特点 .....	188
7.4.2	中频流量型振动产生的机理 .....	189
7.4.3	中频流量型振动和低频振动与高频振荡燃烧的主要区别 .....	190
7.4.4	影响中频流量型振动的主要因素 .....	191
7.4.5	减小中频流量型振动的措施 .....	192
<b>第8章</b>	<b>喷注器与头部设计 .....</b>	<b>195</b>
8.1	概述 .....	195
8.2	混合单元的选择 .....	196
8.2.1	离心式喷嘴混合单元 .....	196
8.2.2	直流式喷嘴混合单元 .....	197
8.2.3	同轴式喷嘴混合单元 .....	200
8.2.4	直流式喷注器与离心式喷注器的比较 .....	200
8.3	提高燃烧效率的措施 .....	201
8.3.1	合适的混合比和流强分布 .....	201
8.3.2	提高射流的雾化细度 .....	201
8.3.3	二组元之间有较好的混合 .....	202
8.4	保证燃烧稳定性的措施 .....	202
8.4.1	采用合适的能量释放分布 .....	202
8.4.2	采用液相分区 .....	203
8.4.3	合理选择压降 .....	203
8.5	保证结构可靠工作的措施 .....	204
8.5.1	喷注器面的冷却 .....	204
8.5.2	燃烧室内壁的冷却 .....	205
8.5.3	隔板的保护 .....	206
8.6	典型的喷注器排列方案 .....	207
8.6.1	离心式喷注器的排列方案 .....	207
8.6.2	直流式喷注器排列方案 .....	210
8.6.3	同轴式混合单元喷注器的排列方案 .....	213

8.7	喷注器与头部结构设计	214
8.7.1	概述	214
8.7.2	离心式喷注器与头部结构	215
8.7.3	直流式喷注器与头部结构	218
8.7.4	气-液和液-气喷嘴的喷注器和头部结构	221
<b>第9章</b>	<b>推力室内壁的热防护</b>	<b>226</b>
9.1	推力室内壁的热防护方法	226
9.1.1	外冷却	226
9.1.2	内冷却	228
9.1.3	其他热防护方法	230
9.2	典型推力室的热交换过程	232
9.3	燃气向热室壁的传热	235
9.3.1	对流换热	235
9.3.2	辐射热流	241
9.4	冷室壁向冷却剂的传热	244
9.5	膜冷却	250
9.5.1	对液膜冷却效果的影响因素	251
9.5.2	液膜长度的计算	252
9.5.3	近壁燃气混合比的计算	255
9.6	影响热交换系数的因素	262
9.7	推力室身部冷却计算步骤	263
9.7.1	冷却计算的原始数据	263
9.7.2	计算步骤	263
<b>第10章</b>	<b>推力室身部结构</b>	<b>266</b>
10.1	概述	266
10.2	现代发动机推力室广泛使用的冷却通道结构	268
10.2.1	波纹板和铣槽式通道	268
10.2.2	管束式冷却通道	276
10.3	集液器和入口管的结构	277
10.3.1	入口管和集液器的安放位置与冷却液的进入	277
10.3.2	入口管和集液器的结构类型	279
10.4	液膜内冷却环带的结构	281
10.5	头部与身部的连接	283
10.6	典型的身部结构方案	286

10.6.1	波纹板身部结构 .....	286
10.6.2	波纹板与肋条铣槽组合式身部结构 .....	287
10.6.3	肋条铣槽式身部结构 .....	288
10.6.4	管束式身部结构 .....	289
10.6.5	SSME(航天飞机主发动机)发动机身部 .....	290
<b>第 11 章</b>	<b>推力室的结构强度 .....</b>	<b>292</b>
11.1	推力室的受力情况和强度计算特点 .....	292
11.1.1	工作状态与受力情况 .....	292
11.1.2	强度计算特点 .....	294
11.2	推力室身部壳体的总承载能力 .....	294
11.2.1	极限分析计算方法 .....	295
11.2.2	维·依·费奥多西耶夫计算方法 .....	297
11.3	推力室身部的连接强度和局部强度 .....	302
11.3.1	连接强度 .....	302
11.3.2	局部强度 .....	304
11.3.3	管束式推力室身部结构的局部强度 .....	305
11.4	离心式喷注器的强度 .....	305
11.4.1	计算假设 .....	305
11.4.2	薄板理论计算方法 .....	306
11.4.3	极限分析计算方法 .....	310
11.5	头部外底强度 .....	312
<b>参考文献</b>	.....	<b>316</b>

# Contents

<b>Chapter 1 Introduction</b> .....	1
1.1 Organization of liquid propellant rocket engine and the status of thrust chamber .....	1
1.1.1 Organization of the system .....	1
1.1.2 The status of thrust chamber in the syetem .....	2
1.2 Energy conversion in thrust chamber .....	3
1.2.1 Ideal thermodynamic cycle in energy conversion .....	3
1.2.2 Status parameter changes in energy conversion .....	4
1.2.3 Heat loss and efficiency in energy conversion .....	7
1.3 Major simplified and common – used formula for an ideal thrust chamber .....	9
1.3.1 Major simplified .....	9
1.3.2 Common – used Thermodynamic and aerodynamic equations .....	9
1.4 Parameters and efficiency of thrust chamber .....	14
1.4.1 Thrust .....	14
1.4.2 Specific impulse .....	16
1.4.3 Characteristic velocity and combustion efficiency .....	17
1.4.4 Thrust coefficient and nozzle efficiency .....	18
1.4.5 Specific impulse efficiency .....	21
<b>Chapter 2 Liquid propellant</b> .....	23
2.1 Classification of propellants .....	23
2.1.1 Summary .....	23
2.1.2 Classification by application .....	23
2.1.3 Classification by number of component .....	23
2.1.4 Classification by chemical reactivity of the oxidant and the	



	fuel into direct contact .....	24
2.1.5	Classification by temperature range of propellant component remaining liquid .....	25
2.1.6	Gel propellant .....	25
2.2	Requirements on liquid propellant .....	26
2.2.1	Propellant with high specific impulse .....	26
2.2.2	Propellant component with high density .....	26
2.2.3	Propellant with Better heat transfer performance and small hydraulic loss .....	27
2.2.4	Propellant conducive to normal reliable and stable work in combustion chamber .....	27
2.2.5	Propellant with good storage and service performance .....	27
2.3	Common – used liquid propellant components and combination .....	27
2.3.1	Oxidant component that can be stored .....	27
2.3.2	Oxidant component that cannot be stored .....	29
2.3.3	Fuel component that can be stored .....	30
2.3.4	Fuel component that cannot be stored .....	32
2.3.5	Common – used propellant combination .....	35
2.4	Calculation of liquid propellant parameters .....	37
2.4.1	Mixing ratio and excess oxygen coefficient .....	37
2.4.2	Mass composition of propellant elements .....	39
2.4.3	Propellant enthalpy .....	43

### **Chapter 3 Thermodynamic process and parameters in thrust**

	<b>chamber</b> .....	44
3.1	Selection of average coefficients of residual oxygen and major process parameters .....	44
3.1.1	Selection of average excess oxygen coefficient .....	44
3.1.2	Selection of combustion chamber pressure $P_c$ .....	45
3.1.3	Selection of nozzle outlet pressure $P_e$ .....	46
3.2	Features of thermodynamic process .....	46
3.2.1	Summary .....	46
3.2.2	Gas dissociation and gas Compound .....	47
3.2.3	Energy distribution of gas molecules .....	48