



国防科技图书出版基金

液体火箭发动机热防护

Liquid Rocket Engine Thermal Protection

张忠利 张蒙正 周立新 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

液体火箭发动机热防护

Liquid Rocket Engine Thermal Protection

张忠利 张蒙正 周立新 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

液体火箭发动机热防护/张忠利,张蒙正,周立新
编著. —北京:国防工业出版社,2016.2

ISBN 978-7-118-10554-4

I. ①液… II. ①张… ②张… ③周… III. ①
液体推进剂火箭发动机-防热 IV. ①V434

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第298126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 880×1230 1/32 印张 8 $\frac{1}{2}$ 字数 222 千字

2016年2月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 68.00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出出版。

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	甘茂治
(按姓氏笔画排序)	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

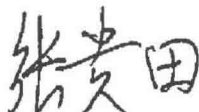
序 一

液体火箭发动机是将化学能转变成动能的热机,在研制过程中,需要组织燃烧和热防护,发动机设计师对高温燃气既爱又恨,追求高性能时燃气温度越高越好,追求可靠性和工艺可行性时燃气温度又不能太高,因此发动机设计时需要解决热防护问题。

液体火箭发动机的热防护是个复杂的综合问题,推力室是发动机产生推力的源泉,是组织推进剂喷注、雾化、燃烧的场所,最高温度和最低温度相差 4000℃ 左右,经受着冰火两重天的考验,因此发动机设计过程中首要解决的问题是推力室的热防护。自动器、电缆、导管等附属部件是保证发动机工作必不可少的部分,其热源主要是喷管和燃气辐射,并与相对位置关系有关,其温度高低由热流的大小、热源作用时间及自身的因素所决定,因此部件的热防护也是发动机热防护的重点。

《液体火箭发动机热防护》的作者解决了许多型号发动机研制过程中的棘手问题,该书系统地介绍了液体火箭发动机的热防护过程中需要确定的问题、方法、实例,实验验证措施等,是作者多年来在液体火箭发动机热防护分析过程中所形成的经验积累,有较高的学术水平和工程应用价值,对于型号研制和故障分析有较好的借鉴意义。该书对我国液体火箭发动机热防护研究有促进意义,可供从事液体火箭发动机研究的同行借鉴。

中国工程院院士



2015年7月

序 二

热防护是液体火箭发动机技术中一个重要研究领域,其中蕴含着深刻的理论问题、丰富的工程经验、处理问题的方法、操作的规范等内容,在这一领域开展深入的研究是发动机技术研究部门的重要责任之一。当前,发动机热防护技术已逐渐发展为一个独立的学科分支。国外研究机构,如DLR(德国宇航院)有专门的研究部门和研究人员在这一领域开展了长期的研究。

在以往型号的研制当中,曾经进行了大量的发动机的传热与结构热防护的分析和研究工作,积累了大量的模型、计算方法、计算程序以及丰富的试验研究经验。本书作者长期从事该领域的研究工作,积累了丰富的工程研制经验并取得了许多重要理论研究成果。本书对液体火箭发动机热防护分析过程中需要确定的问题、方法、实例以及实验验证方法等进行了系统的归纳和总结,对于型号研制和故障分析有较强的借鉴意义。目前,关于液体火箭发动机热防护国内尚无一本专门的著作,相关的理论、方法、计算分析实例往往散落在关于液体火箭发动机理论或结构设计方面的著作中(而且往往因为篇幅的限制,这些相关内容论述不够全面和深入),因此本书是在这方面进行的一次非常有益的尝试,将是今后该领域作为一个独立学科分支开展研究的重要基础文献。

本书内容全面、丰富,凝聚了作者多年来解决许多型号发动机热防护问题的经验,对于从事液体火箭发动机型号研制和相关技术研究的工程技术人员具有重要的使用价值。从事传热研究的科研人员可以从

本书当中找到绝大部分传热计算中相关问题的计算公式和工程问题的处理方法。本书也可以供从事液体火箭发动机教学和科研的高校老师和学生参考。

A handwritten signature in black ink, appearing to read '王震' (Wang Zhen), written in a cursive style.

2015年7月

前 言

我国研制液体火箭发动机已经 55 年了,推力量级从 0.1N 到 1200kN,在这些发动机研制过程中均遇到热防护问题。液体火箭发动机的热防护是个复杂的综合问题,推力室是热防护的重点,它是组织推进剂喷注、雾化、燃烧的场所,热环境复杂并且非常恶劣,由于工作过程中包含许多不确定因素,如燃烧不稳定产生高频和低频的压力脉动,产生瞬时高热流燃烧现象,极易产生烧蚀,因此又是难点;推进剂供应及调节部件是发动机的重要组成部分,它们受喷管和燃气的辐射,其热环境又受相对位置关系所影响,其温度高低又受热源的大小、作用时间及自身的因素所决定,因此部件的热防护也是发动机热防护的难点之一。

本书围绕液体火箭发动机的热防护过程重点论述了燃烧室内热环境分析模型、辐射换热、液膜冷却、推力室热防护分析过程、发动机部组件热防护及传热分析、基础试验六部分内容,其中第 1 章以可燃混合气形成过程、燃烧过程中介质温度的计算方法为重点,介绍火焰面内外的介质温度分析过程;第 2 章~第 4 章详细介绍了辐射冷却、液膜冷却、推力室热防护等过程及算例;第 5 章介绍了二次启动发动机涡轮泵的热防护分析过程、姿控发动机部组件的热防护分析过程、氧蒸发器的传热与流阻分析过程、引射器的气动传热分析过程;第 6 章介绍了液体火箭发动机的热防护试验研究方法,热防护试验包括基础试验和专项试

验,基础试验包括导热试验、对流换热试验、辐射换热试验、换热器试验等,专项试验包括推进剂传热试验、部件空间热防护试验及液膜冷却试验:推进剂传热试验主要解决推进剂在一定热流、一定流速、一定结构下的换热准则关系;部件空间热防护试验主要研究在真空冷黑背景下,部件接受外界一定热流时部件壁温的变化情况;液膜冷却试验主要研究液膜长度和厚度与燃烧室的热环境关系。

航天科技集团公司科技委委员张贵田院士和西安航天动力研究所科技委主任刘站国研究员在百忙之中审阅书稿并作序,西北工业大学航天学院李进贤教授,西安航天动力研究所李斌研究员、陈炜研究员、李平研究员、李光熙研究员、吕奇伟研究员、张小平研究员、逯婉若研究员等百忙之中审阅了书稿并提出了建设性意见;西安航天动力研究所杨永红高工提供了文献资料和研究成果;编著过程中得到了旷武岳、李红、张迎莉的大力帮助;作者的同事梁克明研究员、吴玉梅研究员、杨宝娥研究员、李锋研究员、郭斌高工、仲伟聪高工、张玫高工、张锋高工等为液体火箭发动机热防护事业做出了贡献,书中的部分内容吸收了他们的劳动成果,在此深表谢意。

感谢总装备部国防科技图书出版基金对本书的资助。由于能力和认识水平所限,书中定有纰漏,诚请读者批评指正。

作者

2015年7月

目 录

符号说明	1
绪论	3
第 1 章 燃烧室内热环境分析模型	9
1.1 扩散	10
1.1.1 摩尔流率	10
1.1.2 Fick 定律	11
1.1.3 气体的扩散系数	13
1.2 液滴蒸发	14
1.2.1 液滴蒸发模型	14
1.2.2 d^2 定律	16
1.2.3 温度分布	17
1.2.4 Clausius-Clapeyron 方程	18
1.3 液滴燃烧	19
1.3.1 Shvab-Zeldovich 变换	19
1.3.2 瞬时反应模型	21
1.4 古典燃烧模型的修正	24
1.4.1 瞬态过程	24
1.4.2 多组元液滴	27
1.4.3 对流效应	30
1.4.4 超临界燃烧	34
1.5 极限情况	36
1.6 自燃推进剂燃料物性	38

参考文献	40
第 2 章 辐射换热	41
2.1 燃气辐射换热	41
2.1.1 辐射热流密度计算	42
2.1.2 分层燃气的辐射换热	46
2.2 高温部件角系数计算	47
2.2.1 角系数计算方法	48
2.2.2 基于 FEM 和 RUD 角系数计算方法	52
2.2.3 算例及分析	53
参考文献	54
第 3 章 液膜冷却	55
3.1 液膜冷却的影响因素	55
3.2 液膜冷却算法	58
3.3 液膜与燃烧室壁的耦合计算	69
3.4 液膜的组织形式	75
参考文献	79
第 4 章 推力室热防护	81
4.1 推力室再生冷却	81
4.1.1 单相对流传热	83
4.1.2 表面沸腾传热	86
4.1.3 临界热流密度计算及影响因素	88
4.2 排放冷却	92
4.3 辐射冷却	92
4.4 推力室冷却计算流程	94
4.4.1 热源分析	94
4.4.2 热平衡计算	97
4.4.3 冷却计算结果的应用	98
4.5 再生冷却推力室身部热防护分析算例	98

4.6	辐射冷却推力室热防护分析算例	110
4.7	发汗冷却	118
	参考文献	121
第5章	发动机典型部组件热防护	123
5.1	涡轮泵壳体热防护	123
5.1.1	启动过程问题简介	124
5.1.2	氧化剂泵温度计算	125
5.1.3	地面模拟试验	133
5.1.4	排放冷却方案考验	136
5.2	姿态控制发动机热防护	139
5.2.1	姿态控制发动机所处的热环境分析	139
5.2.2	受热危险部位壁温分析	143
5.2.3	热防护方案传热分析及验证	145
5.3	姿态控制发动机附件热防护	149
5.4	氧蒸发器传热与流阻计算	158
5.4.1	计算依据	158
5.4.2	计算流程	159
5.4.3	氧蒸发器传热与流阻计算过程	161
5.4.4	氧蒸发器壁温校核计算过程	168
5.4.5	氧蒸发器设计算例	169
5.5	引射器气动传热结构设计	171
5.5.1	超声速二次喉道引射器气动参数计算	171
5.5.2	引射器型面结构设计及流场分析	176
5.5.3	引射器引射能力测试	183
5.5.4	引射器传热分析	185
	参考文献	197
第6章	热防护试验	198
6.1	基础试验	198
6.1.1	导热试验	198

6.1.2	对流换热试验	201
6.1.3	辐射试验	208
6.2	专项试验	211
6.2.1	推进剂电传热试验	211
6.2.2	部件空间试验	219
6.2.3	液膜冷却试验简介	224
	参考文献	226
附录	液体火箭发动机常用介质和材料物性参数	227

Contents

Symbol description	1
Generalization	3
Chapter 1 Thermal Surroundings Analysis Model in Combustion	
Chamber	9
1. 1 Diffusion	10
1. 1. 1 Mole Flux	10
1. 1. 2 Fick Law	11
1. 1. 3 Gas Diffusivity	13
1. 2 Droplet Evaporation	14
1. 2. 1 Droplet Evaporation Model	14
1. 2. 2 d^2 Law	16
1. 2. 3 Temperature Distribution	17
1. 2. 4 Clausius-Clapeyron Equation	18
1. 3 Droplet Combustion	19
1. 3. 1 Shvab-Zeldovich Transform	19
1. 3. 2 Instantaneous Reaction Model	21
1. 4 Transform Model of Classiciality Combustion	24
1. 4. 1 Instantaneous Course	24
1. 4. 2 Many Group Droplet	27
1. 4. 3 Convective Effect	30
1. 4. 4 Supercritical Combustion	34
1. 5 Limited Instance	36
1. 6 Spontaneous Propellant Physical Parameters	38
References	40

Chapter 2 Radiation Heat Transfer	41
2.1 Gas Radiation Heat Transfer	41
2.1.1 Radiation Heat Flux Density Calculation	42
2.1.2 Delaminated Gas Radiation Heat Transfer	46
2.2 High Temperature Assembly Geometry Factor Calculation	47
2.2.1 Geometry Factor Calculation Means	48
2.2.2 Geometry Factor Calculation Means By FEM and RUD	52
2.2.3 Example and Analysis	53
References	54
 Chapter 3 Liquid Film Cooling	 55
3.1 Influence Factor of Liquid Film Cooling	55
3.2 Calculation Means of Liquid Film Cooling	58
3.3 Liquid Film and Combustion Chamber Wall Coupling Calculation	69
3.4 Liquid Film Achieve Manner	75
References	79
 Chapter 4 Thruster Chamber Thermal Protection	 81
4.1 Regenerative Cooling in Thruster Chamber	81
4.1.1 Single-phase Convective Heat Transfer	83
4.1.2 Surface Boiling Heat Transfer	86
4.1.3 Critical Heat Flux Density Calculation and Influence Factor	88
4.2 Put Liquid out Cooling	92
4.3 Radiation Heat Transfer	92
4.4 The Scheme of Cooling Calculation in Thruster Chamber	94
4.4.1 Heat Source Analysis	94