



“十二五”国家重点出版规划项目

野战火箭装备与技术

野战火箭 发动机结构完整性评估数值方法

Numerical Method of Structural
Integrity Evaluation of Field Rocket Motor

蒙上阳 杨晓红 杨军辉 编著 I



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点出版规划项目

野战火箭装备与技术

野战火箭发动机结构 完整性评估数值方法

蒙上阳 杨晓红 杨军辉 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书主要基于黏弹性理论,采用黏弹性增量有限元数值方法,计算贴壁浇铸式和自由装填式野战火箭发动机在各种载荷历程下的响应,并据此评估发动机的结构完整性,以及采用黏弹性断裂分析有限元方法,探讨发动机药柱表面和界面脱黏裂纹的稳定性。另外,还评估了某型野战火箭发动机喷管的结构完整性。

全书在阐述理论的基础上,主要侧重于工程应用,可供从事火箭弹发动机技术研究、设计、生产和检验的科技人员使用,也可供固体火箭发动机专业学者参考。

图书在版编目(CIP)数据

野战火箭发动机结构完整性评估数值方法/蒙上阳,杨晓红,杨军辉编著. —北京:国防工业出版社,2015. 12

(野战火箭装备与技术)

ISBN 978-7-118-10648-0

I. ①野... II. ①蒙...②杨...③杨... III. ①野战—火箭发动机—工程结构—完整性—评估方法—数值方法
IV. ①V43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 284156 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印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 16¼ 字数 330 千字

2015 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 82.00 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

《野战火箭装备与技术》丛书编委会

顾 问 刘怡昕 包为民 杨绍卿

主 编 韩珺礼

副主编 汤祁忠 周长省

编 委 (按姓氏笔画排序)

马 幸 王文平 王良明 王雪松

史 博 刘生海 汤祁忠 李 鹏

李臣明 李照勇 杨 明 杨晓红

陈四春 陈志华 周长省 郝宏旭

韩 磊 韩珺礼 蒙上阳 樊水康

秘 书 杨晓红 韩 磊

炮兵是陆军火力打击骨干力量,装备发展是陆军装备发展的重点。野战火箭是炮兵的重要装备,以其突然、猛烈、高效的火力在战争中发挥了重要作用。随着现代高新技术的飞速发展及其在兵器领域的广泛应用,20世纪90年代初,国外开始应用制导技术和增程技术发展制导火箭,使火箭炮具备了远程精确点打击和精确面压制能力,推动了炮兵由覆盖式面压制火力支援向点面结合的火力突击转变。同时,随着贮运发箱模块化发射技术的应用,火箭炮摆脱了集束定向管的束缚,实现了不同弹径、射程、战斗部种类火箭弹的共架发射,具有射程远、精度高、火力猛、点面结合、毁伤高效、反应快速、机动灵活和保障便捷的特点,标志着野战火箭装备技术水平发展到了一个新的高度,夯实了野战火箭在陆军火力打击装备中的重要地位。

我国一直重视野战火箭装备技术发展,近年来更是在野战火箭武器的远程化、精确化、模块化和信息化等方面取得了长足进步,野战火箭装备技术总体水平达到了世界先进水平,部分达到领先水平。韩珺礼研究员带领的陆军火箭科研创新团队,长期从事野战火箭武器装备论证、预先研究、型号研制和作战运用研究等工作,取得了大量成果,相继推出的多型野战火箭武器系统均已成为陆军炮兵的火力骨干装备。

《野战火箭装备与技术》丛书(共14册)系统分析了未来战争形态的演进对陆军炮兵远程精确打击装备的需求,明晰了我国野战火箭武器装备的发展方向,从多角度研究了我国野战火箭武器装备的理论技术与运用问题,是对我国近年来野战火箭特别是远程火箭发展的总结与升华。该丛书在国内首次系统建立了涵盖野战火箭论证、设计、制造、试验和作战运用等多个方面的理论体系和技术体系,是近年来国内野战火箭装备技术和作战运用研究的理论结晶,为野战火箭向更远程、更精确、更大威力发展奠定了坚实理论与技术基础。《野战火箭装备与技术》丛书对于推动我国野战火箭武器深入发展具有重大意义!相信在各级机关的支持下,在广大科研人员的共同努力下,我国野战火箭武器将更加适应基于信息系统的打击需求,在未来信息化战争中将发挥更重要的作用!

刘怡昕

二〇一五年十一月

刘怡昕:中国工程院院士、南京炮兵学院教授。

自序

炮兵是陆军火力打击力量的重要组成部分,具备突然、猛烈、密集、高效的火力特点,在历次战争中发挥了重要作用,有“战争之神”的美誉。随着制导技术、电子信息技术等诸多高新技术在炮兵装备中的应用,陆军炮兵的远程精确打击能力得到大幅提升,炮兵已由过去的火力支援兵种向火力主战兵种转型,这与野战火箭武器的发展密不可分。为适应现代战争需求,野战火箭武器系统正朝着远程压制、精确打击、一装多能、高效毁伤、模块通用的方向发展。

为了提高我军炮兵作战能力,我国十分重视野战火箭武器的发展,从装备仿研、技术引进到自主研发,经过多年的积累与创新,在远程化、精确化、模块化、信息化等方面达到了较高水平。在基于信息系统的体系作战中,野战火箭主要担负战役战术纵深内对面目标精确压制和点目标精确打击任务。以贮运发箱模块化共架发射和精确化为主要特征的先进远程野战火箭武器系统,集远程综合压制、精确打击、实时侦察和效能评估于一体,为复杂战场环境下远程精确火力打击提供了重要保证,是我国陆军未来火力打击装备发展的重点。

野战火箭装备技术的发展已进入到一个新的更高阶段,立之弥高,逾之弥艰,需要有完整的基础理论加以支撑,需要有关键技术不断突破和创新,需要在基础研究上下功夫。但是,目前该领域的学术理论、技术研究成果相对分散,成系统的装备技术和理论文献很少,不利于野战火箭武器装备的优化发展。因此,迫切需要对该领域的理论与技术进行系统梳理、结集出版,以满足论证、研制、生产、作战使用等各领域参考资料缺乏的急需,为野战火箭领域人才培养和装备发展提供系统的理论与技术支撑。《野战火箭装备与技术》丛书立足野战火箭发展,填补了国内野战火箭理论与技术体系空白,被列入“十二五”国家重点图书出版规划项目,并得到了国家出版基金的资助。本丛书共有14个分册,全面系统地对我国陆军野战火箭研究成果和国内外该领域的发展趋势进行了阐述,着重对我国野战火箭基础研究和工程化研究方面取得的创新性成果进行了提炼,是我国野战火箭领域科技进步的结晶。本丛书的出版,对推动我国野战火箭装备技术不断自主创新、促进陆军武器装备发展、提升我国武器装备竞争力以及培养野战火箭领域专业人才具有重要意义。

本丛书的撰写得到了机关和广大专家的指导和帮助。感谢中国科学院院士包为民和中国工程院院士刘怡昕、中国工程院院士杨绍卿的悉心指导,感谢徐明友教授等我国野战火箭领域老一辈科研工作者奠定的基础,感谢总装备部某研究所各位领导和诸位同事的支持,感谢南京炮兵学院、南京理工大学、北京理工大学、兵器工业导航与控制技术研究所、国营 743 厂、国营 5137 厂等单位领导和科研工作者的支持,感谢国防工业出版社和陆军火箭科研创新团队为本丛书所做出的大量工作!在本丛书的撰写过程中参考了相关文献和资料,在此对相关作者一并表示感谢!

由于水平所限,书中难免有错误和不当之处,恳请读者不吝赐教。

韩珺礼

二〇一五年十一月

前言

火箭武器是常规炮兵的一个炮种,自 20 世纪 40 年代,苏联在第二次世界大战中研制成功“喀秋莎”BM-13 式火箭炮以来,多管火箭炮以其突然、猛烈和密集的火力而著称,是世界各国竞相发展的火力打击装备,迄今世界各国发展有百余种火箭炮。火箭炮技术的发展很大程度上取决于火箭动力系统——固体火箭发动机的发展。

固体火箭发动机是一种采用固体推进剂的化学火箭动力装置,由燃烧剂和氧化剂两者结合成一体,固化成一定的药柱形状后装入或以一定的形状直接浇铸于发动机燃烧室内构成。与液体火箭发动机系统相比,固体火箭发动机具有体积比冲高、结构紧凑、反应快、可靠性高、制造和使用成本低以及能长期处于战备状态等优点,广泛应用于军事领域、航天领域以及国民经济建设中。尤其是在军事领域中备受青睐,各种无控火箭弹、制导火箭弹、反坦克导弹、空空导弹、空地导弹,以及中近程地地、地空、舰地、舰空等导弹几乎全部采用固体火箭发动机作为一级或多级动力装置。大型远程陆基或海基发射的战略导弹,以及反导导弹,也大多采用固体火箭发动机作为动力装置。此外,固体火箭发动机几乎在所有的航天技术领域有着广泛应用,如用作航天飞行器的变轨、制动、逃逸和救生发动机以及反卫星武器的动力装置;并且,由于固体火箭发动机能够在外层空间长期存储,随时待命发射,因而在未来的太空攻击与防御体系中必将发挥举足轻重的作用。同样,固体火箭发动机在国民经济建设中也正在发挥越来越大的作用,如开采石油的压裂弹、新型快速海上救生装置、探空气象火箭、防雹降雨火箭、消防灭火火箭、架线穿缆及桥梁激振装置等都是用固体火箭发动机作为动力装置。

然而,对于适应于陆军野战高机动和恶劣环境的火箭发动机药柱,往往存在较为严重的强度问题。从已知的火箭弹故障来看,发动机故障是导致发射故障的主要原因之一。因此,确定发动机在各种载荷历程下的安全性与可靠性,是发动机设计、研制和生产部门重点关注而又一直没有很好解决的问题。由于发动机热试车和点火发射无法重现,且发动机燃烧室处于高温、高压及高应变

率的环境中,试图通过试验测量真实药柱的响应异常困难。随着数值仿真技术的发展,通过数值仿真软件辅以高性能的计算机,可模拟火箭弹发动机在各种复杂载荷工况下的响应,获取数字化虚拟试验结果,更好地观测点火发射过程中难以观测到的现象和数据,减少对物理样机的试验依赖,可大大缩短研制周期、节约研发经费。所以,通过数值仿真评估火箭弹发动机点火发射时的结构完整性,不仅具有重要的理论意义,而且具有很强的实用性。

本书在热黏弹性理论的基础上,重点建立固体药柱的黏弹性增量有限元方法及含奇异裂纹元的适用于黏弹性断裂分析的有限元方法,研究无缺陷发动机以及含药柱裂纹和界面脱黏裂纹等典型缺陷发动机的结构完整性问题。另外,评估某型野战火箭发动机喷管的结构完整性,并根据仿真结果指导结构改进设计。

本书内容共分9章:第1章阐述火箭弹发动机特点、应用概况,叙述结构完整性评估研究进展情况;第2章介绍黏弹性基本理论,给出黏弹性材料的本构关系并讨论高分子材料的黏弹性力学性能;第3章分别从模型理论、Boltzmann叠加原理及Hermann变分原理出发,推导适用于不同载荷情况的黏弹性增量有限元方法,探讨获取推进剂力学性能参数的方法,奠定了火箭弹发动机结构完整性评估的基础;第4章讨论火箭弹发动机结构完整性评估的准则和相应的判据,火箭弹发动机的失效模式及相关失效判据研究是确定火箭弹发动机结构完整性与剩余寿命的基础工作;第5章以某型号火箭弹贴壁浇注式发动机为例,探讨发动机三维有限元的建模、载荷工况的确定、各种响应的分析及结构完整性的评估方法,最后探讨构成发动机材料的力学性能对结构完整性的影响,以及如何应用结构完整性评估的结果对发动机的药型进行优化;第6章发展一种适用于黏弹性断裂分析的有限元方法,并应用该奇异裂纹元计算药柱裂纹和脱黏裂纹尖端的应力强度因子,探讨发动机点火发射时药柱表面和界面脱黏裂纹的稳定性;第7章以某自由装填式火箭发动机为例,根据自由装填式火箭发动机的结构特点,评估其在各种环境温度下点火发射的结构完整性,并探讨发动机点火压力对结构完整性的影响;第8章以某型号火箭弹发动机喷管为例,分析喷管在火箭弹整个飞行期间的温度和应力场变化规律,并以此为基础提出改进设计的方法;第9章基于MSC. Nastran与MSC. Marc结构分析软件,以某型火箭弹发动机为例,演示数值仿真的实现方法及过程。

本书的第1章、第2章、第4章、第8章由蒙上阳撰写,第3章、第5章、第6章由杨晓红撰写,第7章、第9章由杨军辉撰写,全书由蒙上阳统稿。

本书的编写得到了不少专家的指导和帮助,国防科学技术大学唐国金教

授、雷勇军教授、李道奎教授,国营 743 厂李照勇所长、杜红英研究员、郭光全研究员,国营 245 厂罗永光副总经理、古勇军副所长,中国航天科工集团四院胡保朝总师,中国空空导弹研究院曹付齐高工、曹军伟主任、郭颜红主任和孙振华高工,航天科工集团二院二一〇所高凤莲高工、张洪研究员和黄献泉高工,航天科技集团四院四十一所田俊良研究员、沙保林博士、郜婕高工和姚东高工等,均对本书提出了很多宝贵意见,对此一并表示深深的谢意!

尽管编写人员尽到了最大努力,但是由于水平所限,书中难免有错误和不当之处,恳请读者不吝赐教。

作者

第1章 绪论	001
1.1 火箭发动机的结构特点	002
1.1.1 固体火箭发动机	003
1.1.2 野战火箭发动机	005
1.1.3 复合固体推进剂	009
1.2 固体火箭发动机的结构完整性评估	011
1.3 固体火箭发动机结构完整性评估进展	012
参考文献	018
第2章 黏弹性基本理论	023
2.1 黏弹性概述	023
2.2 黏弹性力学行为	024
2.2.1 蠕变	024
2.2.2 回复	025
2.2.3 应力松弛	025
2.3 线黏弹性本构关系	025
2.3.1 黏弹性模型表述	026
2.3.2 黏弹性积分型本构关系	039
2.4 高聚物的黏弹性力学性能及时温等效原理	044
2.4.1 高聚物力学性能的温度依赖性	044
2.4.2 时间—温度等效原理及 WLF 方程	045
参考文献	047
第3章 固体推进剂黏弹性增量有限元方法	048
3.1 基于 Burgers 模型的黏弹性增量有限元方法	049
3.1.1 Burgers 模型的增量型本构关系	049
3.1.2 有限元方程	054

3.2	基于 Boltzmann 原理的黏弹性增量有限元方法	055
3.2.1	Boltzmann 叠加原理和积分型本构方程	055
3.2.2	有限元方程	057
3.3	不可压缩或近似不可压缩黏弹性增量有限元方法	060
3.3.1	不可压缩或近似不可压缩黏弹性材料的本构方程	060
3.3.2	有限元方程	063
3.4	固体推进剂力学性能测试	065
3.4.1	固体推进剂应力松弛模量的试验测量	065
3.4.2	应力松弛模量的 Prony 级数拟合	066
3.4.3	Burgers 模型参数的获取	067
	参考文献	069
第4章 野战火箭发动机结构完整性评估判据		071
4.1	固体推进剂药柱破坏分析	071
4.1.1	推进剂药柱破坏性能	071
4.1.2	固体推进剂破坏准则	073
4.2	火箭弹发动机失效模式及失效判据	074
4.2.1	无缺陷火箭弹发动机结构完整性破坏的主要 模式及判据	074
4.2.2	含缺陷火箭弹发动机结构完整性破坏的主要 模式及判据	076
	参考文献	077
第5章 无缺陷火箭弹发动机结构完整性评估		078
5.1	火箭弹发动机三维有限元模型的建立	079
5.1.1	火箭弹发动机的几何构型	079
5.1.2	建立发动机药柱三维有限元模型的方法	079
5.1.3	计算基本假设	082
5.2	火箭弹发动机结构完整性分析的载荷及边界条件	082
5.2.1	温度载荷	082
5.2.2	点火发射时的燃气内压载荷	082
5.2.3	轴向加速度载荷	083
5.2.4	复合载荷	084
5.2.5	边界条件处理	084
5.3	复合载荷作用下火箭弹发动机结构完整性评估	084

5.3.1	高温、常温和低温点火发射时发动机位移场	085
5.3.2	高温、常温和低温点火发射时发动机应力场	090
5.3.3	高温、常温和低温点火发射时发动机应变场	092
5.4	材料特性对火箭弹发动机结构完整性的影响	095
5.4.1	温度载荷作用下材料性能参数对结构完整性的影响	095
5.4.2	内压载荷作用下材料性能参数对结构完整性的影响	098
5.5	基于结构完整性的药型改进与设计	101
5.5.1	温度载荷下人工脱黏层最佳深度的获取方法	102
5.5.2	低温环境下火箭弹发动机药柱伞盘结构设计	105
	参考文献	109

第6章 含典型缺陷的火箭弹发动机结构完整性评估 110

6.1	含裂纹体的有限元方法	111
6.1.1	内嵌裂纹尖端的裂纹元	111
6.1.2	含裂纹黏弹性体的有限元方法	115
6.1.3	裂纹 J 积分的有限元计算方法	119
6.2	发动机药柱表面裂纹对结构完整性的影响	119
6.2.1	发动机药柱前翼槽表面裂纹	120
6.2.2	发动机药柱伞盘顶端表面裂纹	124
6.2.3	发动机药柱圆柱段中部表面裂纹	126
6.2.4	发动机药柱后翼槽表面裂纹	126
6.3	药柱界面脱黏裂纹对结构完整性的影响	128
6.3.1	发动机药柱含界面脱黏裂纹的有限元计算模型	129
6.3.2	发动机前包覆层与推进剂界面脱黏裂纹 扩展趋势分析	130
6.3.3	发动机后包覆层与推进剂界面脱黏裂纹稳定性分析	134
6.4	其他典型缺陷对药柱结构完整性的影响	136
6.4.1	药柱表面划伤对结构完整性的影响	136
6.4.2	药柱含内聚空洞对结构完整性的影响	142
6.5	发动机药柱裂纹 J 积分计算及稳定性评估	149
6.5.1	发动机药柱前翼槽底部裂纹的稳定性评估	150
6.5.2	发动机药柱伞盘裂纹的稳定性评估	154
6.5.3	发动机药柱圆柱段中部裂纹的稳定性评估	156
6.5.4	发动机药柱前人工脱黏层裂纹的稳定性评估	159

参考文献	162
第7章 自由装填式火箭弹发动机结构完整性评估	164
7.1 计算模型	165
7.2 载荷工况	167
7.3 复合载荷作用下自由装填式火箭发动机的结构完整性评估	169
7.3.1 发动机点火发射时药柱位移场	169
7.3.2 发动机点火发射时药柱 von Mises 应力场	176
7.3.3 发动机点火发射时药柱 von Mises 应变场	179
7.3.4 点火压力对发动机结构完整性的影响	182
参考文献	190
第8章 野战火箭发动机喷管结构完整性评估	191
8.1 喷管温度和传热分析	192
8.1.1 燃气的温度和压强分布	192
8.1.2 燃气和喷管内壁的传热	192
8.1.3 计算分析单位制	193
8.2 计算模型	194
8.2.1 计算基本假设	194
8.2.2 有限元计算模型	194
8.2.3 载荷工况	196
8.2.4 材料力学性能参数	197
8.2.5 喷管热分析和结构分析评估准则	197
8.3 喷管温度场计算与分析	198
8.3.1 发动机点火工作 10s 时喷管的温度场	198
8.3.2 发动机点火工作 20s 时喷管的温度场	201
8.3.3 发动机点火工作 240s 时喷管的温度场	204
8.4 喷管在温度和燃气压力作用结构完整性评估	207
8.4.1 发动机点火工作 10s 时喷管的变形和应力	207
8.4.2 发动机点火工作 20s 时喷管的变形和应力	213
8.4.3 发动机点火工作 240s 时喷管的变形和应力	217
参考文献	221
第9章 火箭弹发动机数值仿真实现	222
9.1 MSC. Nastran 在黏弹性分析中的应用	222

9.1.1	创建几何模型	223
9.1.2	划分有限元网格	224
9.1.3	赋予边界条件及载荷工况	225
9.1.4	定义材料属性	225
9.1.5	定义单元特性	226
9.1.6	定义分析类型提交 MSC. Nastran 求解	227
9.1.7	查看分析结果及数据采集	229
9.2	MSC. Marc 在黏弹性分析中的应用	233
9.2.1	创建几何模型及有限元计算模型	233
9.2.2	赋予边界条件及载荷工况	233
9.2.3	定义材料属性	236
9.2.4	设置求解载荷工况	237
9.2.5	定义单元特性	237
9.2.6	提交 MSC. Marc 求解	237
9.2.7	查看分析结果及数据采集	239
9.3	MSC. Nastran 与 MSC. Marc 结合求解裂纹 J 积分	240
	参考文献	244

第1章

绪论

火箭炮不仅能够极短的时间内连续发射大量火箭弹,瞬间形成大面积弹幕,造成严重的人员伤亡和装备破坏,而且具有机动性能高、操作简单及维修方便等一系列优点,已成为近年来无论是发达国家还是发展中国家都竞相采用和研制的炮兵武器。以“信息先导,火力主战”为特征的现代战争,陆战场上的纵深作战要求陆军炮兵先敌开火、远战歼敌,因此增大武器的射程是增强炮兵火力的主要目标之一。研制射程更远的身管火炮花费大、研制周期长,而研制射程远的火箭炮则要容易得多,通过发展大口径或高性能的野战固体火箭发动机即可大幅度提高火箭射程。增加射程有多种方法,常用的有:增加火箭弹发动机口径和装药量,即通过加大肉厚增大总冲;采用多种药型组合增加推力;改变推进剂配方增加能量;等等。特别是箱式火箭炮的出现,使得增加火箭弹发动机的口径变得容易。然而对于适应于陆军野战高机动和恶劣环境的火箭发动机,其性能要求远比传统保温发射的固体火箭发动机严格得多。为增加射程而进行的这些改进都将可能导致发动机在点火发射时工作环境更为恶劣,特别是对于药型复杂的贴壁浇铸式火箭弹发动机,点火发射时发动机药柱通常存在较为严重的强度问题。从已知的火箭弹的故障来看,发动机是导致灾难性故障的主要原因之一。因此,准确得到发动机在点火发射增压过程中的安全性与可靠性数据,可指导发动机设计、研制和生产。然而,火箭弹发动机热试车和点火发射时,几十至几百毫秒时间内发动机燃烧室压力由工作环境的大气压迅速增至几十乃至上百标准大气压($1 \text{ 标准大气压} = (1.013 \times 10^5 \text{ Pa})$)。此时,发动机药柱处于高温、高压及高应变率的环境下,且其点火发射过程不可重现,试图通过试验测量真实药柱的响应异常困难。因此,获取发动机点火发射时药柱的响应问题仍然困扰着发动机生产设计部门。随着数值仿真技术的发展,通过数值仿真软件辅以高性能的计算机模拟火箭弹发动机在各种复杂载荷工况下的响应,可大大减少对物理样机的试验,节约研发经费。因此,通过数值仿真对整个火

箭弹发动机点火发射时的位移、应力和应变场响应进行分析,以评估其安全性与可靠性,不仅具有重要的理论意义,而且具有很强的实用性。

1.1 火箭发动机的结构特点

依靠高速喷射气流产生的直接反作用力推动物体运动的装置称为喷气发动机。喷气发动机广泛用作火箭弹、飞机、宇宙飞船及航天飞机等各种飞行器的动力装置。喷气发动机又分为空气喷气发动机和火箭发动机两大类。利用周围大气作为氧化剂而自身只携带燃烧剂(燃油)的喷气发动机称为空气喷气发动机,如涡轮喷气发动机和冲压喷气发动机等。自身既携带燃烧剂又携带氧化剂而不需要周围大气作氧化剂的喷气发动机称为火箭发动机。火箭发动机的种类很多,通常根据其能源种类的不同分成化学能火箭发动机、核能火箭发动机、电能火箭发动机和太阳能火箭发动机^[1,2]。

依靠推进剂的化学能作为能源的火箭发动机称为化学能火箭发动机。它是目前技术最为成熟、使用最为广泛的一种火箭发动机。推进剂在高压燃烧室内进行化学反应释放能量,将工质加热到很高的温度(2500~4000K),然后在喷管中膨胀加速到2000~4700m/s喷出。根据推进剂物理性态的不同,化学能火箭发动机分为液体火箭发动机、固体火箭发动机和固液混合型火箭发动机。目前大量使用的是液体火箭发动机和固体火箭发动机。

液体火箭发动机所用燃料的氧化剂和燃烧剂均呈液态,在发动机中分别存于不同的贮液箱(氧化剂贮箱和燃烧剂贮箱)内。工作时由液体输送系统,即分别将氧化剂和燃烧剂注入燃烧室,点火发射燃烧产生高压燃气由喷管喷出,推动弹体前进。因此,液体火箭发动机的主要组成有推进剂贮箱、管路输送系统(包括调节系统)、燃烧室和喷管等。图1-1为挤压式输送系统液体火箭发动机工作原理。

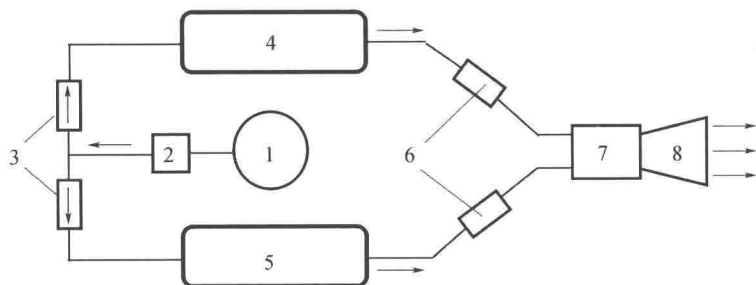


图 1-1 挤压式输送系统液体火箭发动机工作原理

- 1—高压气瓶;2—减压器;3—单向阀;4—氧化剂贮箱;
5—燃烧剂贮箱;6—自控阀;7—燃烧室;8—喷管。