



“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 发动机设计

Design of Field Rocket Motor

周长省 韩珺礼 陈雄 许进升 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

# 野战火箭发动机设计

周长省 韩珺礼 陈雄 许进升 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书是在火箭导弹武器型号研制和大量预先研究成果的基础上,将多年来火箭发动机的设计经验进行归纳总结,使其系统化、理论化、科学化和实用化,并参考大量相关文献后编写的,其特点是结合工程实际,具有较好的实用性。本书详细介绍了固体火箭发动机的基本结构设计方法、装药结构完整性分析基础和冲压发动机基本原理等,为全面学习固体火箭发动机知识及进行深入研究提供了参考。全书主要内容包括固体火箭发动机基本结构与发展,固体推进剂、绝热层、衬层,固体火箭发动机装药设计,燃烧室壳体设计,喷管设计,点火装置设计,固体火箭发动机的性能参数,固体火箭发动机内弹道参数计算,特殊固体火箭发动机,以及固体冲压发动机简介。

### 图书在版编目(CIP)数据

野战火箭发动机设计/周长省等编著. —北京:国防工业出版社,2015. 12

(野战火箭装备与技术)

ISBN 978-7-118-10371-7

I. ①野... II. ①周... III. ①野战—火箭发动机—设计 IV. ①V43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 284159 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 22 $\frac{1}{4}$  字数 470 千字

2015 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 112.00 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		

# 序

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

火箭导弹是武器的主要种类之一。由于具备射程远、威力大、精度高、火力密集、发射时后坐力小等优点,许多国家一直非常重视火箭导弹的发展。随着新原理、新技术、新材料的出现,火箭导弹的射程、威力、精度等主要战技指标在不断提高,种类不断增多,应用范围在不断扩大。火箭导弹武器推进系统的研究、设计、试验与制造,是一项庞大的系统工程,包括总体设计、分模块设计、材料选取及部件制造,以及研制阶段相应的试验与应用研究。该工程涉及大量的基础理论知识,包括固体力学、流体力学、材料力学、材料学、控制理论等。编写本书的目的是将多年来火箭发动机的设计经验进行归纳总结,使之系统化、理论化、科学化和实用化,为后继研究提供参考。期望本书的出版能够起到指导工程设计的作用,以推动火箭导弹武器的研究进展,为国防事业做出更大贡献。

本书是在火箭导弹武器型号研制和大量预先研究成果的基础上,并参考大量有关文献书籍后编写而成的,其特点是结合工程实际,具有较好的实用性。撰写本书的主要目的有两个:首先是为了教学的需要,因而本书详细介绍了固体火箭发动机的基本原理、结构完整性和最新发展的推进装置等,以求对教学对象提供较为全面的固体火箭发动机知识;其次是为了满足工程设计需要,因而本书详细介绍了固体火箭发动机的装药设计,推进剂、绝热层和衬层的材料属性等。

全书主要内容包括:绪论(喷气推进装置、固体火箭发动机基本结构与特点、固体火箭推进技术发展与应用等),固体推进剂、绝热层、衬层,固体火箭发动机装药设计,燃烧室壳体设计,喷管设计,点火装置设计,固体火箭发动机的性能参数,固体火箭发动机内弹道参数计算,特殊固体火箭发动机,以及固体冲压发动机简介。

本书可供从事固体火箭发动机设计与固体推进剂、材料等相关专业学生和



研制人员参考。薛海峰、孙朝翔、胡少青、周清春等同志在本书的绘图、排版等方面做了大量的工作,在此对他们表示衷心的感谢。由于编者水平所限,本书错误和不足之处在所难免,欢迎读者批评指正。

作者  
2015年7月

# 目录

第1章 绪论 .....	001
1.1 喷气推进装置的分类 .....	001
1.1.1 吸气式发动机 .....	002
1.1.2 火箭发动机 .....	002
1.1.3 组合发动机 .....	003
1.2 固体火箭发动机的基本结构与特点 .....	005
1.2.1 固体火箭发动机的基本结构 .....	005
1.2.2 固体火箭发动机的特点 .....	008
1.3 固体火箭发动机工作过程及主要性能参数简介 .....	009
1.3.1 固体火箭发动机的工作过程 .....	009
1.3.2 主要性能参数简介 .....	010
1.4 固体火箭推进技术的发展与应用 .....	011
1.4.1 固体火箭推进技术的发展简史 .....	011
1.4.2 我国现代固体火箭推进技术的发展 .....	013
1.4.3 固体火箭推进技术的应用与发展现状 .....	015
第2章 固体推进剂、绝热层、衬层 .....	023
2.1 概述 .....	023
2.2 各类固体推进剂的性能特点 .....	024
2.2.1 双基推进剂 .....	024
2.2.2 复合推进剂 .....	025
2.2.3 改性双基推进剂 .....	026
2.2.4 微烟、少烟推进剂 .....	027
2.3 复合固体推进剂的性能预示 .....	030
2.3.1 能量特性 .....	030

2.3.2	燃速特性 .....	036
2.3.3	力学性能 .....	040
2.3.4	药浆流变性能 .....	042
2.4	复合固体推进剂配方设计 .....	044
2.4.1	黏合剂、氧化剂、金属添加剂选择 .....	045
2.4.2	主组分最佳含量 .....	049
2.4.3	固化体系 .....	050
2.4.4	固化参数 .....	053
2.4.5	键合剂 .....	054
2.4.6	增塑剂 .....	057
2.4.7	工艺助剂 .....	059
2.4.8	燃速调节剂 .....	059
2.4.9	氧化剂的粒度与级配 .....	062
2.4.10	铝粉粒度 .....	067
2.4.11	防老剂 .....	068
2.5	燃速与力学性能的控制技术 .....	070
2.5.1	燃速控制 .....	070
2.5.2	力学性能控制 .....	073
2.6	绝热层 .....	076
2.6.1	绝热层的性能要求 .....	076
2.6.2	绝热层的分类 .....	077
2.6.3	绝热层配方设计 .....	079
2.6.4	绝热层烧蚀率测试 .....	083
2.7	衬层 .....	085
2.7.1	衬层的性能要求 .....	086
2.7.2	衬层的配方组成 .....	086
2.7.3	界面黏结技术 .....	088
2.7.4	衬层/药柱界面防迁移技术 .....	090
第3章 固体火箭发动机装药设计 .....		091
3.1	推进剂型号与装药药型的选择 .....	091
3.1.1	推进剂选择 .....	091
3.1.2	装药药型的选择 .....	095

3.2	单孔管状药的装药设计 .....	096
3.2.1	装药尺寸与设计参量的关系 .....	096
3.2.2	不同约束条件下的装药设计方法 .....	101
3.3	星孔药的装药设计 .....	108
3.3.1	装药尺寸与设计参量的关系 .....	108
3.3.2	星孔装药设计方法 .....	118
3.4	轮孔药的装药设计 .....	122
3.4.1	装药尺寸与设计参量之间的关系 .....	122
3.4.2	轮孔装药设计方法 .....	128
3.5	复合药型装药设计 .....	131
3.5.1	变截面星孔装药设计 .....	131
3.5.2	双燃速推进剂装药设计 .....	135
3.6	装药的包覆 .....	139
3.6.1	包覆层的主要功能 .....	140
3.6.2	包覆材料的选择 .....	140
3.6.3	包覆的工艺方法 .....	142
3.7	装药结构完整性设计 .....	143
3.7.1	固体推进剂黏弹性力学特征 .....	144
3.7.2	描述固体推进剂力学性能的几种本构模型 .....	145
3.7.3	推进剂力学性能的温度效应 .....	149
3.7.4	固体推进剂药柱载荷分析 .....	151
3.7.5	推进剂药柱的破坏分析 .....	153

## 第4章 燃烧室壳体设计 .....

4.1	概述 .....	157
4.2	燃烧室壳体结构 .....	157
4.2.1	圆筒段结构 .....	157
4.2.2	封头结构 .....	159
4.2.3	连接结构 .....	159
4.2.4	密封结构 .....	160
4.2.5	挡药板设计 .....	161
4.3	燃烧室壳体壁厚的确定 .....	162
4.3.1	筒体壁厚的确定 .....	162

4.3.2	封头壁厚的确定 .....	166
4.3.3	带椭球封头的壳体应力分析 .....	168
4.4	燃烧室壳体爆破压强 .....	171
4.5	壳体安全系数与可靠性概率 .....	172
4.6	燃烧室壳体低应力破坏 .....	173
4.7	纤维缠绕壳体设计 .....	175
4.7.1	纤维缠绕壳体壁厚计算的假设 .....	175
4.7.2	纤维缠绕壳体壁厚计算 .....	175
第5章 喷管设计 .....		179
5.1	概述 .....	179
5.2	喷管结构设计 .....	179
5.2.1	喷管材料选择 .....	179
5.2.2	型面设计 .....	180
5.2.3	喷管热防护设计 .....	187
5.2.4	喷管壳体设计 .....	189
5.3	喷管的特征参数与气动计算 .....	190
5.4	喷管中两相流动 .....	192
5.4.1	一维两相平衡流动 .....	192
5.4.2	一维两相常滞后流动 .....	193
5.5	长尾管设计 .....	194
5.5.1	长尾管长度限制 .....	195
5.5.2	长尾管计算 .....	195
5.5.3	长尾管热防护设计 .....	196
5.6	推力矢量控制 .....	197
5.6.1	对推力矢量控制的要求与方案比较 .....	197
5.6.2	几种推力矢量控制系统 .....	198
5.7	推力终止装置设计 .....	201
5.7.1	推力终止原理与反推力 .....	201
5.7.2	推力终止机构 .....	201
第6章 点火装置设计 .....		204
6.1	概述 .....	204

6.2	点火装置设计依据 .....	204
6.3	点火装置分类及选择 .....	205
6.4	发火管选择 .....	207
6.5	烟火剂点火器 .....	209
6.5.1	点火药的种类 .....	209
6.5.2	点火药量计算 .....	210
6.5.3	药盒设计 .....	212
6.6	点火发动机 .....	213
<b>第7章 固体火箭发动机的性能参数 .....</b>		<b>215</b>
7.1	推力、推力系数和特征速度 .....	215
7.1.1	推力的基本公式 .....	215
7.1.2	真空推力和最佳推力 .....	218
7.1.3	推力系数 .....	220
7.1.4	特征速度和等效排气速度 .....	225
7.1.5	推力的影响因素 .....	227
7.2	总冲和比冲 .....	228
7.2.1	总冲 .....	229
7.2.2	比冲 .....	229
7.2.3	比冲的影响因素 .....	231
7.3	火箭的理想飞行速度 .....	233
7.3.1	变质量系统的运动方程 .....	233
7.3.2	火箭的理想飞行速度 .....	234
7.3.3	火箭的最大理想飞行速度 .....	235
7.3.4	火箭飞行性能与多级火箭 .....	236
7.4	固体火箭发动机的效率与实际性能参数 .....	239
7.4.1	固体火箭发动机的效率 .....	239
7.4.2	固体火箭发动机性能参数的修正 .....	242
7.4.3	固体火箭发动机的实际性能参数预估 .....	251
7.4.4	预估固体火箭发动机实际比冲的统计法 .....	252
7.4.5	固体火箭发动机实际性能的测量与计算 .....	253
<b>第8章 固体火箭发动机内弹道参数计算 .....</b>		<b>255</b>
8.1	零维内弹道微分方程 .....	256

8.1.1	装药燃烧阶段内弹道方程 .....	256
8.1.2	拖尾段内弹道方程 .....	258
8.2	平衡压强 .....	258
8.2.1	平衡压强的计算公式 .....	258
8.2.2	平衡压强的影响因素 .....	260
8.3	燃烧室压强的稳定性分析 .....	262
8.3.1	燃烧室压强稳定的一般条件 .....	262
8.3.2	装填参量不变时燃烧室压强的稳定条件 .....	264
8.3.3	装填参量变化时燃烧室压强的稳定条件 .....	266
8.4	零维内弹道计算与分析 .....	268
8.4.1	压强 - 时间曲线微分方程分析 .....	268
8.4.2	四阶龙格 - 库塔法介绍 .....	269
8.4.3	计算步骤 .....	270
8.4.4	后效段计算 .....	270
8.4.5	固体火箭发动机压强 - 时间曲线的特征 .....	273
8.4.6	燃烧室头部压强计算 .....	274
8.4.7	推力和其他参数计算 .....	275
8.5	特殊装药发动机的内弹道 .....	276
8.5.1	双室双推力发动机和两次点火发动机 .....	277
8.5.2	单室双推力发动机 .....	277
8.5.3	不同推进剂串联组合装药发动机的内弹道 .....	278
8.6	一维内弹道 .....	281
8.6.1	一维内弹道方程组 .....	281
8.6.2	一阶常系数微分方程组的龙格 - 库塔解法 .....	283
8.6.3	一维内弹道方程组的求解 .....	283
8.7	内弹道性能的预示精度 .....	285
8.7.1	内弹道参数的随机偏差预估 .....	286
8.7.2	提高内弹道预示精度的途径 .....	291
<b>第9章 特殊固体火箭发动机 .....</b>		<b>296</b>
9.1	概述 .....	296
9.2	单室双推力与多推力固体火箭发动机 .....	296
9.2.1	实现单室双推力的可能途径 .....	297

9.2.2	单室双推力固体火箭发动机设计 .....	301
9.2.3	单室多推力固体火箭发动机 .....	305
9.3	无喷管固体火箭发动机 .....	307
9.3.1	无喷管固体火箭发动机的意义 .....	307
9.3.2	无喷管固体火箭发动机设计 .....	308
9.4	多次点火脉冲固体火箭发动机 .....	316
9.4.1	脉冲固体火箭发动机的特点 .....	316
9.4.2	应用脉冲固体火箭发动机的意义 .....	316
9.4.3	脉冲固体火箭发动机设计 .....	318
9.4.4	脉冲固体火箭发动机的关键技术 .....	320
第10章 固体冲压发动机简介 .....		322
10.1	火箭冲压发动机 .....	322
10.1.1	基本组成及作用 .....	323
10.1.2	火箭冲压发动机分类 .....	323
10.2	火箭冲压发动机的主要性能参数 .....	324
10.2.1	有效推力 $F_{ef}$ .....	325
10.2.2	推力系数 .....	327
10.3	整体式火箭冲压发动机 .....	328
10.3.1	整体式冲压发动机 .....	328
10.3.2	整体式固体火箭冲压发动机 .....	329
10.3.3	整体式固体火箭冲压发动机典型结构方案举例 .....	331
10.4	贫氧固体推进剂 .....	334
10.4.1	贫氧固体推进剂的特点 .....	334
10.4.2	贫氧固体推进剂组分的选择 .....	334
10.5	火箭冲压发动机的发展与展望 .....	336
参考文献 .....		338



# 第1章

## 绪论

火箭发动机(Rocket engine, Rocket motor)是火箭、导弹等航空航天飞行器的动力装置,属于喷气推进(Jet propulsion)范畴。喷气推进装置通过喷射某种物质(工作物质,简称工质)所引起的反作用力作为推动飞行器运动的推力,反作用力正比于工质的喷出速度和喷射工质的质量流率。

喷气推进系统产生的推力是一种直接反作用力,不同于需要借助外界物体才能产生的间接反作用力(例如,在水中划船时,推动船运动的力需要借助船外的水)。为了产生持续一定时间的反作用力,喷气推进系统喷射的工质和转变为工质射流动能的能量(能源)必须具有一定的储量。

### 1.1 喷气推进装置的分类

根据推进原理的不同,可以将喷气推进装置分为吸气式发动机(Air-breathing engine)、火箭发动机和组合发动机(Combination of rocket and air-breathing engines)三种类型,如图1-1所示。

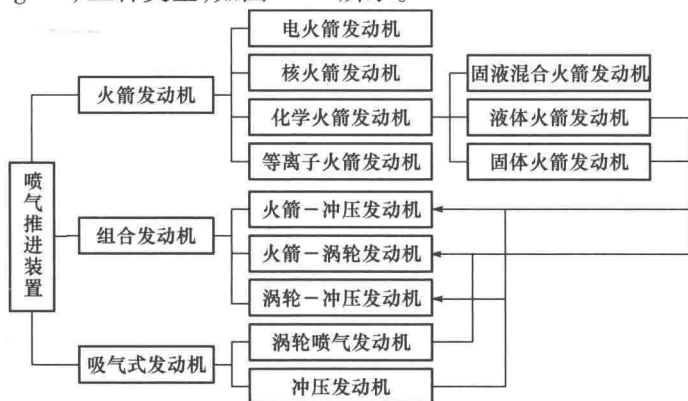


图1-1 喷气推进装置分类