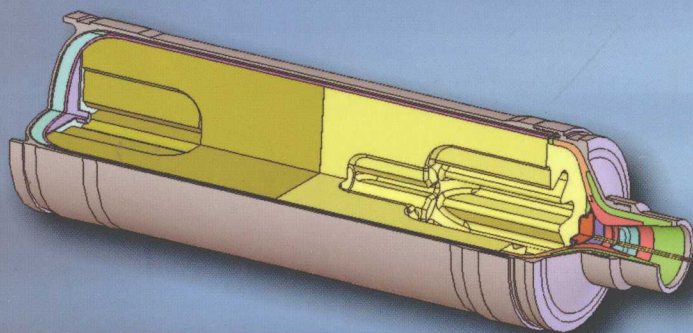




国防科技图书出版基金

# Single Chamber Multi-thrust Solid Propellant Motors

## 单室多推力 固体推进剂发动机



卜昭献 覃光明 李宏岩 著



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

013033175

V435  
39

# 单室多推力 固体推进剂发动机

Single Chamber Multi-thrust Solid Propellant Motors

卜昭献 覃光明 李宏岩 著



国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1640243

V435  
39

图书在版编目(CIP)数据

单室多推力固体推进剂发动机/卜昭献,覃光明,李宏岩  
著. —北京:国防工业出版社,2013.4  
ISBN 978-7-118-08623-2

I. ①单... II. ①卜... ②覃... ③李... III. ①固体  
推进剂火箭发动机 IV. ①V435

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 044110 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 13¼ 字数 225 千字

2013 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 80.00 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 王 峰

副主任委员 吴有生 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 (按姓氏笔画排序)

|     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|
| 才鸿年 | 马伟明 | 王小谟 | 王群书 | 甘茂治 |
| 甘晓华 | 卢秉恒 | 巩水利 | 刘泽金 | 孙秀冬 |
| 陆 军 | 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 |
| 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

## Preface

近几年,单室多推力固体推进剂发动机,作为战术导弹、水下动力推进装置和其他飞行器的动力推进系统,已陆续得到了应用。与多个单级推力发动机相组合的推进系统相比,它具有结构紧凑、质量轻和推进效能高等优点。应用实践表明,这种新型动力推进形式,能使导弹和飞行器的结构性能、飞行性能和使用性能得到显著提高,已越来越受到总体部门和使用部门的关注。

在这种类型发动机的设计和性能计算中,还没有较系统的书籍用作工程设计的参考。本书作者结合多年的工程设计实践,总结单室双推力、单室三推力产品发动机设计、研制的经验,单室四推力发动机试验研究的体验,较系统地阐述了单室多推力固体推进剂发动机的工程设计方法、所依据的理论和研制中遇到的问题。

本书共分7章。第1章,重点介绍单室多推力发动机推力方案,需控制的弹道性能参数和总体结构特点等。第2章,借助固体推进剂发动机原理教程的相关内容,列出推导单室多推力发动机理论计算与性能分析的守恒方程,导出理论计算和工程设计的计算公式。第3章,重点介绍长时间工作的单室多推力发动机,在热防护设计、结构密封设计和组合结构喷管设计及选材等方面,与单级推力发动机的不同。第4章,从发动机设计技术要求到推进剂选择与性能计算,从组合药形设计到内弹道计算,从发动机性能初步估算到弹道性能的详细计算,结合设计实例,给出单室多推力发动机的工程设计计算方法。第5章,着重叙述了组合药柱成形工艺与单级药柱成形工

艺的不同;组合药柱及装药包覆的缺陷,组合装药常见故障及质量控制。对一些缺陷引起的故障,作者根据设计和研制实践的体会进行了分析,并依据试验排查验证的结果,提出设计和工艺质量控制的要点。第6章,根据单室多推力发动机的使用特点,结合国内外使用分立式组合装药,径向分层组合装药等形式,介绍几种有应用前景的不同多推力发动机,为专业研究人员发挥奇思妙想,开拓多推力发动机设计新思路提供参考。第7章,主要对多级推力组合装药功能设计、高装填密度组合装药性能设计的可行性、发动机弹道性能参数适用范围、单室多推力发动机使用的局限性等,根据产品使用情况进行了分析,也供专业研究人员参考。

在阅读本书之前,作者认为读者已掌握了固体推进剂发动机专业的有关知识,在叙述和推导中作了很多简化,需要时还需查阅有关专业书籍的内容。

本书由王宁飞研究员、王春利教授、鲍福廷教授、李尚文研究员等专家审阅,并提出了很多宝贵意见,在此,谨向他们表示诚挚的感谢。

鉴于作者水平有限,书中一定会有错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

著作者于西安

2013年1月



## 符 号 含 义

$A$ ——喷管(燃气容积控制体)横截面积

$A_t$ ——喷管喉面积

$a$ ——声速

$A_e$ ——喷管出口面积

$A_{np}$ ——通气参量

$C_p$ ——燃气定压比热

$C_v$ ——燃气定容比热

$C_D$ ——流量系数

$C_F$ ——推力系数

$C^*$ ——特征速度

$D_p$ ——药柱外径

$D_s$ ——星形药形的顶圆直径

$D_g$ ——管槽药形的内孔直径

$D_i$ ——内外燃管形药形的内孔直径

$D_w$ ——内外燃管形药形的外圆直径

$D_e$ ——喷管出口直径

$D_t$ ——喷管喉部直径

$E(e)$ ——燃层厚度

$F$ ——发动机理论推力

$F_{cp}$ ——发动机平均推力

$h, h_0$ ——燃气的焓, 总焓

$h$ ——药形内孔深度

$i$ ——瞬时值

$I_0$ ——发动机总冲

$I_{sp}$ ——推进剂比冲

- $I$ ——穿透药柱的强度  
 $I_0$ ——激光穿透药柱前强度  
 $k$ ——比热比,余量系数  
 $K_F$ ——推力比  
 $L_p$ ——药柱长度  
 $L$ ——特征长度  
 $m$ ——质量流率  
 $M$ ——马赫数  
 $m_c$ ——点火前后发动机质量差  
 $n$ ——压强指数,星角数  
 $p_a$ ——环境压强  
 $p_b$ ——燃终压强  
 $p_c$ ——燃烧室压强  
 $p_e$ ——喷管出口压强  
 $p_0$ ——起始压强,燃气总压(滞止压强)  
 $p_{lj}$ ——推进剂临界压强  
 $R^0$ ——通用气体常数  
 $R$ ——燃烧产物气体常数  
 $r$ ——星尖半径  
 $r_1$ ——星根半径  
 $S$ ——气体的熵  
 $S_b$ ——燃烧面积  
 $T$ ——燃气温度  
 $T_0$ ——燃气流动的滞止温度  
 $T_e$ ——燃气在喷管出口处温度  
 $t_0$ ——始燃时间  
 $t_b$ ——燃终时间  
 $t_a$ ——发动机工作时间  
“ $t_{bf} - t_{0z}$ ”——发射级向增速级过渡时间  
“ $t_{bz} - t_{0x}$ ”——增速级向续航级过渡时间  
“ $t_{bx} - t_{0j}$ ”——续航级向加速级过渡时间

$t_{bj}$ —— $t_a$ ——加速级压强曲线下降时间

$t_{gz}$ 、 $t_{gx}$ 、 $t_{gj}$ ——分别为发射级向增速级、增速级向续航级、续航级向加速级过渡时间

$u_1$ ——燃速系数

$u$ ——推进剂燃速

$v$ ——排气速度

$v_e$ ——喷管出口平面流速(排气速度)

$w_{BF}$ ——装药包覆质量

$w_p$ ——药柱质量

$\rho$ ——燃气密度

$Y_p$ ——推进剂比重

$\alpha_p$ ——压强对温度的敏感系数

$\theta(Q)$ ——星边夹角

$\varepsilon(E^*)$ ——星角系数

$\mu_{\text{水}}$ ——水对激光吸收系数

$\mu_{\text{空气}}$ ——空气对激光吸收系数

“F,Z,x,j”——注脚,分别表示发射级、增速级、续航级和加速级参数。

# 目录

## Contents

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 概述 .....                     | 1  |
| 第 1 章 发动机总体设计 .....          | 3  |
| 1.1 推力方案 .....               | 4  |
| 1.2 总体结构 .....               | 7  |
| 1.3 总体特性术语 .....             | 8  |
| 第 2 章 发动机性能计算 .....          | 11 |
| 2.1 性能计算的理论依据 .....          | 12 |
| 2.1.1 推力的形成及原理公式 .....       | 12 |
| 2.1.2 准一元流理论及假设 .....        | 13 |
| 2.1.3 准一元等熵流守恒方程及热力学函数 ..... | 14 |
| 2.1.4 发动机理论计算公式 .....        | 15 |
| 2.1.5 推力和压强的工程计算公式 .....     | 17 |
| 2.1.6 发动机性能参数试验处理公式 .....    | 18 |
| 2.2 单室多推力发动机主要弹道性能 .....     | 19 |
| 2.2.1 各级推力比 .....            | 19 |
| 2.2.2 内弹道曲线及特征点 .....        | 20 |
| 2.2.3 发动机推力冲量 .....          | 22 |
| 2.2.4 发动机比冲和比推力及实际比冲 .....   | 22 |
| 2.2.5 发动机推力 .....            | 23 |
| 2.2.6 燃烧室压强 .....            | 23 |
| 2.2.7 发动机特征速度 .....          | 24 |

|            |                      |           |
|------------|----------------------|-----------|
| 2.3        | 多推力组合装药性能参数 .....    | 25        |
| 2.3.1      | 推进剂实际比冲 .....        | 25        |
| 2.3.2      | 装药实际比冲 .....         | 25        |
| 2.3.3      | 推进剂燃速 .....          | 26        |
| 2.3.4      | 压强指数 .....           | 28        |
| 2.3.5      | 压强温度系数 .....         | 29        |
| <b>第3章</b> | <b>发动机结构设计 .....</b> | <b>31</b> |
| 3.1        | 热防护设计 .....          | 32        |
| 3.1.1      | 燃烧室壳体隔热层设计 .....     | 32        |
| 3.1.2      | 后盖内表面隔热垫设计 .....     | 37        |
| 3.2        | 密封设计 .....           | 39        |
| 3.2.1      | 连接密封结构 .....         | 39        |
| 3.2.2      | 喷管密封结构 .....         | 40        |
| 3.2.3      | 装药外腔密封结构 .....       | 41        |
| 3.3        | 装填设计 .....           | 41        |
| 3.3.1      | 装填结构 .....           | 41        |
| 3.3.2      | 装填性能 .....           | 43        |
| 3.4        | 喷管结构设计 .....         | 44        |
| 3.4.1      | 喷管材料选择 .....         | 44        |
| 3.4.2      | 复合结构喷管 .....         | 45        |
| 3.4.3      | 喷管安装结构 .....         | 46        |
| 3.5        | 几种典型的单室多推力发动机 .....  | 46        |
| 3.5.1      | 双推力发动机 .....         | 46        |
| 3.5.2      | 三推力发动机 .....         | 49        |
| 3.5.3      | 四推力发动机 .....         | 50        |
| <b>第4章</b> | <b>组合装药设计 .....</b>  | <b>53</b> |
| 4.1        | 组合装药设计技术要求 .....     | 54        |
| 4.1.1      | 推进剂一般性能要求 .....      | 54        |
| 4.1.2      | 燃烧性能的特殊要求 .....      | 55        |
| 4.2        | 组合装药结构特征 .....       | 55        |
| 4.3        | 组合装药性能特点 .....       | 56        |
| 4.3.1      | 组合装药综合性能 .....       | 56        |



|            |                        |            |
|------------|------------------------|------------|
| 4.3.2      | 对组合装药性能的需求 .....       | 57         |
| 4.4        | 推进剂的选择 .....           | 59         |
| 4.4.1      | 推进剂的能量特性 .....         | 60         |
| 4.4.2      | 推进剂的燃烧性能 .....         | 60         |
| 4.4.3      | 推进剂燃烧稳定性 .....         | 61         |
| 4.5        | 组合装药设计 .....           | 61         |
| 4.5.1      | 设计内容 .....             | 61         |
| 4.5.2      | 设计依据 .....             | 62         |
| 4.5.3      | 设计方法 .....             | 62         |
| 4.5.4      | 设计实例 .....             | 63         |
| 4.6        | 远程高速导弹多推力组合装药设计 .....  | 112        |
| 4.6.1      | 设计思路 .....             | 112        |
| 4.6.2      | 理论依据 .....             | 113        |
| 4.6.3      | 技术基础 .....             | 113        |
| 4.6.4      | 设计实例 .....             | 114        |
| <b>第5章</b> | <b>成形工艺及质量控制 .....</b> | <b>123</b> |
| 5.1        | 组合药柱成形工艺 .....         | 124        |
| 5.1.1      | 两次浇铸工艺 .....           | 124        |
| 5.1.2      | 二次固化工艺 .....           | 125        |
| 5.2        | 装药包覆成形工艺 .....         | 125        |
| 5.2.1      | 三元乙丙包覆套包成形工艺 .....     | 125        |
| 5.2.2      | 硅橡胶包覆灌挤成形工艺 .....      | 126        |
| 5.3        | 组合装药常见故障 .....         | 126        |
| 5.3.1      | 组合药柱内部缺陷 .....         | 127        |
| 5.3.2      | 包覆层缺陷 .....            | 131        |
| 5.3.3      | 装药非正常燃烧 .....          | 132        |
| 5.4        | 组合装药质量控制 .....         | 139        |
| 5.4.1      | 药柱成形质量控制 .....         | 139        |
| 5.4.2      | 包覆成形质量控制 .....         | 140        |
| 5.4.3      | 包覆层强度检验 .....          | 142        |
| 5.4.4      | 装药内部缺陷的无损检验 .....      | 143        |
| <b>第6章</b> | <b>组合装药的多种形式 .....</b> | <b>147</b> |

|             |                           |            |
|-------------|---------------------------|------------|
| 6.1         | 分层侧面燃烧组合装药 .....          | 148        |
| 6.2         | 分立式药柱组合装药 .....           | 149        |
| 6.3         | 相同药形不同燃速的组合装药 .....       | 150        |
| 6.4         | 独立装药分立组合结构发动机 .....       | 151        |
| 6.4.1       | 同口径分立结构发动机 .....          | 151        |
| 6.4.2       | 次口径分立结构发动机 .....          | 155        |
| <b>第7章</b>  | <b>单室多推力发动机设计要点 .....</b> | <b>159</b> |
| 7.1         | 组合装药设计要点 .....            | 160        |
| 7.1.1       | 多级推力组合装药功能设计 .....        | 160        |
| 7.1.2       | 高装填密度组合装药性能设计 .....       | 160        |
| 7.1.3       | 组合装药设计的局限性 .....          | 164        |
| 7.2         | 发动机弹道性能参数适用范围 .....       | 165        |
| 7.2.1       | 续航级性能参数范围 .....           | 165        |
| 7.2.2       | 发射级的最大推力冲量 .....          | 165        |
| 7.2.3       | 各级弹道参数的可调范围 .....         | 165        |
| 7.3         | 单室多推力发动机的缺点 .....         | 166        |
| 7.3.1       | 燃烧室壳体设计强度不能充分发挥 .....     | 166        |
| 7.3.2       | 续航级低压下喷管效率低 .....         | 166        |
| 7.3.3       | 续航级低压下结束工作时的后燃时间长 .....   | 167        |
| 7.3.4       | 斜置斜切喷管排气羽流的偏斜 .....       | 167        |
| 7.4         | 多推力组合装药与单推力组合装药的差异 .....  | 168        |
| 7.4.1       | 单推力组合装药 .....             | 168        |
| 7.4.2       | 组合装药的应用 .....             | 175        |
| <b>附录</b>   | <b>.....</b>              | <b>177</b> |
| 附录1         | 单室多推力固体推进剂发动机结构 .....     | 177        |
| 附录2         | 多推力组合装药药形参数三维图 .....      | 187        |
| <b>参考文献</b> | <b>.....</b>              | <b>191</b> |



# Contents

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Introduction</b> .....                                                                    | 1  |
| <b>Chapter 1 General design of solid propellant motor</b> .....                              | 3  |
| 1.1 Thrust project .....                                                                     | 4  |
| 1.2 General structure .....                                                                  | 7  |
| 1.3 Technical term of general characteristic .....                                           | 8  |
| <b>Chapter 2 Motor performance calculation</b> .....                                         | 11 |
| 2.1 The theoretical principle of calculation .....                                           | 12 |
| 2.1.1 Thrust formation and principle formula .....                                           | 12 |
| 2.1.2 Quasi-monistic flows theory and assumption .....                                       | 13 |
| 2.1.3 The quasi-monistic flow equation and thermodynamics<br>property .....                  | 14 |
| 2.1.4 The motor theory computes formula .....                                                | 15 |
| 2.1.5 Thrust and pressure engineering computation formula .....                              | 17 |
| 2.1.6 The motor property parameter experimental treatment formula .....                      | 18 |
| 2.2 The main ballistic property of single chamber multi-thrust motors .....                  | 19 |
| 2.2.1 The thrust ratio of various stage .....                                                | 19 |
| 2.2.2 Internal ballistic curve and the characteristic point .....                            | 20 |
| 2.2.3 The motor thrust impulse .....                                                         | 22 |
| 2.2.4 The motor specific impulse, comparative thrust and realistic<br>specific impulse ..... | 22 |
| 2.2.5 The motor thrust .....                                                                 | 23 |
| 2.2.6 The pressure of chamber .....                                                          | 23 |

|                  |                                                                 |           |
|------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.7            | The characteristic velocity of rocket motor .....               | 24        |
| 2.3              | Multi-thrust propellant grain property parameter .....          | 25        |
| 2.3.1            | The actual specific impulse of propellant .....                 | 25        |
| 2.3.2            | The actual specific impulse of grain .....                      | 25        |
| 2.3.3            | The burning rate of propellant .....                            | 26        |
| 2.3.4            | Press exponent of burning rate .....                            | 28        |
| 2.3.5            | Press temperature coefficient .....                             | 29        |
| <b>Chapter 3</b> | <b>Motor structure designs .....</b>                            | <b>31</b> |
| 3.1              | The heat protection designs .....                               | 32        |
| 3.1.1            | The chamber heat insulation layer designs .....                 | 32        |
| 3.1.2            | Cover to insulate heat inside the surface behind design .....   | 37        |
| 3.2              | Seal design .....                                               | 39        |
| 3.2.1            | The conjunction seals structure .....                           | 39        |
| 3.2.2            | The nozzle seals structure .....                                | 40        |
| 3.2.3            | The chamber outside seals structure .....                       | 41        |
| 3.3              | Packing design .....                                            | 41        |
| 3.3.1            | Packing structure .....                                         | 41        |
| 3.3.2            | Packing property .....                                          | 43        |
| 3.4              | Nozzle structure design .....                                   | 44        |
| 3.4.1            | Nozzle material choice .....                                    | 44        |
| 3.4.2            | Compound nozzle structure .....                                 | 45        |
| 3.4.3            | Nozzle gearing structure .....                                  | 46        |
| 3.5              | The typical single chamber multi-thrust motors .....            | 46        |
| 3.5.1            | The double thrust motor .....                                   | 46        |
| 3.5.2            | Three thrust motor .....                                        | 49        |
| 3.5.3            | Four thrust motor .....                                         | 50        |
| <b>Chapter 4</b> | <b>Combination propellant grain design .....</b>                | <b>53</b> |
| 4.1              | The combination propellant grain design technique request ..... | 54        |
| 4.1.1            | General property request .....                                  | 54        |
| 4.1.2            | The special request on combustion property .....                | 55        |
| 4.2              | The combination propellant grain structure characteristic ..... | 55        |
| 4.3              | The combination propellant grain characteristics .....          | 56        |