

固体推进剂
火箭发动机的
基本问题

(上册)

378218

国防工业出版社

固体推进剂火箭发动机的 基本问题

(上册)

F. A. 威廉斯 N. C. 黄 M. 巴雷尔 著

京固群 译

国防工业出版社

Fundamental Aspects of Solid Propellant Rockets

F. A. Williams

N. C. Huang

M. Barrère

AGARDograph 116 1969年

固体推进剂火箭发动机的

基本问题

(上册)

京固群译

国防工业出版社出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张14 353千字

1976年6月第一版 1976年6月第一次印刷 印数：0,001—3,200册

统一书号：15034·1337 定价：1.75元

出版者的话

遵循伟大领袖毛主席关于“洋为中用”和“批判地吸收外国文化”的教导，我们翻译出版了《固体推进剂火箭发动机的基本问题》这本书，供从事这方面工作的工人、工程技术人员和革命师生参考。

《固体推进剂火箭发动机的基本问题》一书在一定程度上反映了六十年代以前固体火箭发动机发展的基本面貌。本书比较全面地论述了固体火箭发动机的内弹道学问题。书中除向我们推荐一些有价值的典型资料供参阅外，还指出了今后的发展方向。

本书叙述由浅入深。首先向读者介绍一些基本概念和基本原理，然后阐明如何由实际的物理现象（物理模型）得出相应的控制方程（数学模型），再从理论和实验两方面对现有的各种模型进行评价并提供建立新模型的参考意见。

本书的不足之处在于，有些重要问题，如推力矢量控制问题，尤其二次喷射问题谈得比较简单，而燃烧室强度问题则根本未涉及到。

本书分上、下册出版，上册（前六章）包括概论、喷管流动、推进剂性能、发动机性能和稳态燃烧，下册（后六章）包括侵蚀燃烧、固体推进剂点火与熄火、不稳定燃烧的实验问题、不稳定燃烧的理论分析、药柱的机械性能与应力分析和固体火箭发动机的发展方向。

本书系资产阶级专家学者写的，书中掺杂不少唯心主义、形而上学、技术至上等资产阶级观点，因此，希望阅读本书的读者遵照伟大领袖毛主席关于“排泄其糟粕，吸收其精华”的指示，批判地使用。

由于水平所限，错误之处在所难免，恳请读者批评指正，以利再版时订正。

目 录

| | |
|------------------------------------|----|
| 前言 | 11 |
| 第一章 固体推进剂火箭发动机介绍——概论 | 13 |
| 1. 引言 | 15 |
| 2. 固体推进剂发动机的描述和发展简史 | 17 |
| 2.1 现代固体推进剂发动机的描述 | 17 |
| 2.2 发展简史 | 21 |
| 3. 分类 | 23 |
| 3.1 第一级火箭发动机(助推器) | 24 |
| 3.2 用作末级的火箭发动机和用作空间飞行器的火箭发动机 | 26 |
| 3.3 卫星的运载火箭 | 28 |
| 3.4 探空火箭 | 29 |
| 3.5 起制导和控制作用的辅助火箭发动机 | 30 |
| 3.6 飞机助飞火箭发动机 | 32 |
| 3.7 军事上的应用 | 32 |
| 3.8 其它方面的应用 | 35 |
| 4. 固体推进的重要性 | 37 |
| 5. 本书内容简介 | 50 |
| 第二章 喷管流动和特征参数 | 58 |
| 1. 准一元流理论——等熵膨胀 | 62 |
| 1.1 引言 | 62 |
| 1.2 准一元流方程的推导 | 63 |
| 1.2.1 质量守恒 | 63 |
| 1.2.2 动量守恒 | 64 |
| 1.2.3 能量守恒 | 66 |
| 1.3 等熵流动 | 68 |
| 1.3.1 简化的守恒方程 | 68 |
| 1.3.2 一种热容量为常数的单组分理想气体 | 69 |
| 1.4 喷管流动 | 72 |
| 1.4.1 等熵流动中的壅塞 | 72 |
| 1.4.2 拉瓦尔喷管中的流动 | 74 |
| 1.4.3 激波 | 75 |

| | | |
|-------|-----------------------|-----|
| 1.4.4 | 喷管中的非一元流 | 79 |
| 1.4.5 | 喷管流动公式 | 82 |
| 1.5 | 推力及火箭的性能参数 | 83 |
| 1.5.1 | 推力公式的推导 | 83 |
| 1.5.2 | 理论推力公式; 最大推力 | 84 |
| 1.5.3 | 推力系数 | 85 |
| 1.5.4 | 特征速度 | 87 |
| 1.5.5 | 比冲 | 88 |
| 1.5.6 | 其它性能和设计参数 | 90 |
| 2. | 多组分反应气流的影响 | 91 |
| 2.1 | 引言 | 91 |
| 2.2 | 冻结或平衡等熵流动 | 91 |
| 2.2.1 | 冻结流动 | 92 |
| 2.2.2 | 平衡流动 | 95 |
| 2.2.3 | 平衡喷管流动与冻结喷管流动性能的比较 | 96 |
| 2.3 | 松弛流动 | 97 |
| 3. | 两相流动效应 | 99 |
| 3.1 | 引言 | 99 |
| 3.2 | 理论; 对性能的影响 | 100 |
| 3.2.1 | 无颗粒滞后的两相流动 | 100 |
| 3.2.2 | 有颗粒滞后的两相流动方程 | 102 |
| 3.2.3 | 无因次滞后参数 τ | 104 |
| 3.2.4 | 大滞后极限 $\tau \gg 1$ | 106 |
| 3.2.5 | 小滞后极限 $\tau \ll 1$ | 107 |
| 3.2.6 | 关于 τ 等于中间值的数值计算 | 108 |
| 3.2.7 | 本章第3.2.2节内理论中所忽略现象的影响 | 109 |
| 3.3 | 对喷管设计的影响 | 110 |
| 3.4 | 实验结果 | 111 |
| 4. | 喷管热交换 | 112 |
| 4.1 | 引言 | 112 |
| 4.2 | 无冷却喷管壁中的非稳态热传导 | 114 |
| 4.3 | 通过附面层的稳态湍流热交换 | 115 |
| 4.4 | 热交换的进一步考虑 | 118 |
| 5. | 关于其它偏离理想条件的讨论 | 120 |
| 5.1 | 非一元流对喷管性能和设计的影响 | 120 |
| 5.2 | 附面层的生成 | 122 |
| 5.3 | 喷气流分离 | 124 |
| 5.4 | 向外的排气流与周围环境的相互作用 | 125 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6. 推力矢量控制 | 127 |
| 6.1 引言 | 127 |
| 6.2 机械控制面 | 128 |
| 6.3 流体喷射 | 129 |
| 6.3.1 现象描述 | 129 |
| 6.3.2 理论分析 | 131 |
| 6.3.3 与实验结果的比较 | 132 |
| 6.3.4 喷射流体的选择 | 134 |
| 6.3.5 热气活门 | 135 |
| 6.4 机械式与流体喷射式推力矢量控制的比较 | 135 |
| 7. 固体火箭发动机与喷管设计新概念的配合问题 | 135 |
| 第三章 固体推进剂性能 | 143 |
| 1. 引言 | 146 |
| 1.1 混合比的定义 | 147 |
| 1.2 推进剂和燃烧产物的组分 | 150 |
| 1.2.1 推进剂——均质推进剂和异质推进剂 | 150 |
| 1.2.2 燃烧产物 | 157 |
| 2. 理论性能计算 | 161 |
| 2.1 平衡组分方程 | 161 |
| 2.1.1 基本组分的定义 | 161 |
| 2.1.2 控制方程——原子守恒方程和化学平衡方程 | 165 |
| 2.2 平衡组分的简化计算 | 171 |
| 2.2.1 气态燃烧产物 | 171 |
| 2.2.2 含有一种凝结物质的燃烧产物 | 176 |
| 2.3 计算平衡组分的一般方法 | 178 |
| 2.3.1 哈夫法 | 179 |
| 2.3.2 怀特法 | 183 |
| 2.3.3 布林克莱法 | 186 |
| 2.4 将布林克莱法应用于含H、Li、Be、B、C、Al、N、Cl、 O和F的推进剂的示例 | 191 |
| 2.5 推进剂性能的计算 | 196 |
| 2.5.1 平衡混合物热力学 | 197 |
| 2.5.2 性能计算——绝热火焰温度；性能计算的一般问题；冻结 喷管流动的性能；平衡喷管流动的性能；影响系数；某些 推进剂的性能 | 200 |
| 2.6 关于导致最大性能的固体推进剂组分的研究 | 212 |
| 2.6.1 关于高能燃烧剂添加剂的研究 | 212 |
| 2.6.2 关于粘结剂的研究 | 214 |

| | | |
|------------------------------|-----------------------------|------------------|
| 2.6.3 | 关于氧化剂的研究 | 215 |
| 2.6.4 | 关于液体喷射的研究 | 217 |
| 2.6.5 | 备注 | 217 |
| 3. | 性能的实验测定 | 218 |
| 3.1 | 实验室方法 | 218 ⁸ |
| 3.1.1 | 以压力测量为依据的方法 | 218 |
| 3.1.2 | 以速度测量为依据的方法 | 219 |
| 3.2 | 火箭发动机实验 | 222 |
| 3.2.1 | 普通的实验台 | 222 |
| 3.2.2 | 发动机中气体流速的测量 | 225 |
| 4. | 理论与实验的比较 | 227 |
| 第四章 发动机工作 | | 230 |
| 1. | 引言 | 233 |
| 2. | 各种燃速规律 | 234 |
| 2.1 | 曾经提出过的燃速规律(某些参数的影响) | 235 |
| 2.2 | 测定燃速的方法 | 239 |
| 3. | 发动机工作特性(压力和药厚随时间的变化) | 242 |
| 3.1 | 端面燃烧药柱 | 242 |
| 3.2 | 中心开孔的药柱 | 246 |
| 3.3 | 推进剂药柱的几何形状 | 254 |
| 3.4 | 球形药柱 | 268 |
| 3.5 | 双燃速固体推进剂药柱 | 271 |
| 3.6 | 关于发动机工作期间所得压力-时间曲线的备注 | 281 |
| 4. | 在特定情况下发动机几何形状的最佳化 | 283 |
| 5. | 固体升华发动机 | 289 |
| 6. | 结束语 | 292 |
| 第五章 稳态燃烧现象的实验研究 | | 296 |
| 1. | 引言 | 297 |
| 2. | 双基均质推进剂的燃烧 | 300 |
| 2.1 | 研究均质固体推进剂的实验方法 | 301 |
| 2.2 | 实验结果 | 305 |
| 3. | 异质推进剂组分物理化学特性的确定 | 307 |
| 3.1 | 线性热分解率 | 308 |
| 3.1.1 | 测量装置 | 308 |
| 3.1.2 | 实验结果 | 315 |
| 3.1.2.1 | 燃烧剂 | 315 |

| | |
|----------------------------------|------------|
| 3.1.2.2 氧化剂 | 315 |
| 3.1.3 热分解测量的重要性 | 318 |
| 3.2 某些氧化剂的燃速 | 318 |
| 4. 为分析异质固体推进剂燃烧机理而提出的模型实验 | 323 |
| 4.1 氧化剂小球在气态燃烧剂气流中的燃烧 | 324 |
| 4.2 多孔芯燃烧器 | 330 |
| 4.3 气相中的化学反应动力学 | 334 |
| 4.4 压制的固体推进剂试件 | 335 |
| 4.5 金属的燃烧 | 342 |
| 5. 关于异质推进剂燃烧机理的研究 | 344 |
| 5.1 直接方法 | 344 |
| 5.2 间接方法 | 355 |
| 5.2.1 低压区间 | 355 |
| 5.2.2 中等压力(5~50大气压)区间 | 357 |
| 5.2.3 平台区间 | 361 |
| 5.2.4 高压($p > 100$ 大气压)区间 | 364 |
| 5.3 关于燃烧区的总结 | 365 |
| 第六章 固体推进剂稳态燃烧理论 | 371 |
| 1. 气动热化学基本方程 | 374 |
| 1.1 引言 | 374 |
| 1.2 方程的由来 | 375 |
| 1.3 控制方程组的积分式 | 375 |
| 1.4 控制方程组的微分式 | 377 |
| 1.5 传递现象; 反应率 | 379 |
| 1.6 热力学关系; 变量数目的计算 | 382 |
| 1.7 交界面处的守恒条件 | 383 |
| 2. 均质固体推进剂燃烧理论 | 385 |
| 2.1 绝热理论 | 385 |
| 2.1.1 简史 | 385 |
| 2.1.2 赖斯-金内尔及帕尔-克劳福德理论 | 387 |
| 2.1.3 约翰逊-纳赫巴和斯波尔丁理论 | 390 |
| 2.1.3.1 关于约翰逊-纳赫巴模型的定义 | 390 |
| 2.1.3.2 控制气相问题的基本方程组 | 391 |
| 2.1.3.3 气相问题的边界条件 | 392 |
| 2.1.3.4 气相问题的无因次数学表达式 | 393 |
| 2.1.3.5 气相问题解的上下界 | 395 |
| 2.1.3.6 气相问题的迭代解 | 397 |
| 2.1.3.7 表面气化过程 | 399 |

| | | |
|----------|------------------------------|-----|
| 2.1.3.8 | 无反向表面气化率定律的推导 | 399 |
| 2.1.3.9 | 表面平衡边界条件 | 401 |
| 2.1.3.10 | 中间表面边界条件 | 402 |
| 2.1.3.11 | 无反向表面气化过程的燃速与压力的依赖关系 | 404 |
| 2.1.3.12 | 约翰逊-纳赫巴关于过氯酸铵绝热燃速的研究结果 | 406 |
| 2.1.3.13 | 表面平衡的燃速随压力而变的关系 | 407 |
| 2.1.3.14 | 气相反应区的结构 | 410 |
| 2.2 | 非绝热理论 | 411 |
| 2.2.1 | 热损失的作用 | 411 |
| 2.2.2 | 热损失的类型 | 411 |
| 2.2.3 | 包括热损失的能量守恒方程 | 412 |
| 2.2.4 | 热损失对燃速影响的原因 | 413 |
| 2.2.5 | 热损失与表面温度的关系 | 414 |
| 2.2.6 | 在燃速分析中非绝热性所引起的修正 | 414 |
| 2.2.7 | 具有无反向表面率过程的非绝热分析 | 415 |
| 2.2.8 | 关于双特征值解的解释 | 417 |
| 2.2.9 | 约翰逊-纳赫巴非绝热理论与实验结果的比较 | 417 |
| 2.2.10 | 具有表面平衡的非绝热性分析 | 419 |
| 3. | 复合推进剂某些组分的分解理论 | 420 |
| 3.1 | 引言 | 420 |
| 3.2 | 热板热分解理论 | 421 |
| 3.2.1 | 多孔板 | 422 |
| 3.2.2 | 不可穿透板 | 425 |
| 3.3 | 推进剂组分的热分解 | 425 |
| 3.3.1 | 燃烧剂组分 | 425 |
| 3.3.2 | 硝酸铵 | 426 |
| 3.3.3 | 过氯酸铵 | 428 |
| 4. | 异质固体推进剂燃烧理论 | 428 |
| 4.1 | 引言 | 428 |
| 4.2 | 两温概念 | 429 |
| 4.3 | 有关扩散火焰与预混火焰相互作用的概念 | 430 |
| 4.4 | 夹层燃烧模型 | 432 |
| 5. | 金属颗粒的燃烧理论 | 434 |
| 5.1 | 引言 | 434 |
| 5.2 | 各种燃烧金属性态的描述和分类 | 435 |
| 5.3 | 含有不挥发-不可溶氧化物的金属小球的燃烧理论 | 438 |
| 5.3.1 | 稀异质扩散火焰 | 438 |
| 5.3.2 | 金属小球的燃烧 | 440 |
| 5.3.3 | 关于铝球燃烧改进的理论分析所应采用的假设 | 442 |

固体推进剂火箭发动机的 基本问题

(上册)

F. A. 威廉斯 N. C. 黄 M. 巴雷尔 著

京固群 译

国防工业出版社

Fundamental Aspects of Solid Propellant Rockets

F. A. Williams

N. C. Huang

M. Barrère

AGARDograph 116 1969年

*
*
固体推进剂火箭发动机的

基本问题

(上册)

京固群译

*
国防工业出版社 出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*
850×1168 $\frac{1}{32}$ 印张14 353千字

1976年6月第一版 1976年6月第一次印刷 印数：0,001—3,200册

统一书号：15034·1337 定价：1.75元

出版者的话

遵循伟大领袖毛主席关于“洋为中用”和“批判地吸收外国文化”的教导，我们翻译出版了《固体推进剂火箭发动机的基本问题》这本书，供从事这方面工作的工人、工程技术人员和革命师生参考。

《固体推进剂火箭发动机的基本问题》一书在一定程度上反映了六十年代以前固体火箭发动机发展的基本面貌。本书比较全面地论述了固体火箭发动机的内弹道学问题。书中除向我们推荐一些有价值的典型资料供参阅外，还指出了今后的发展方向。

本书叙述由浅入深。首先向读者介绍一些基本概念和基本原理，然后阐明如何由实际的物理现象（物理模型）得出相应的控制方程（数学模型），再从理论和实验两方面对现有的各种模型进行评价并提供建立新模型的参考意见。

本书的不足之处在于，有些重要问题，如推力矢量控制问题，尤其二次喷射问题谈得比较简单，而燃烧室强度问题则根本未涉及到。

本书分上、下册出版，上册（前六章）包括概论、喷管流动、推进剂性能、发动机性能和稳态燃烧，下册（后六章）包括侵蚀燃烧、固体推进剂点火与熄火、不稳定燃烧的实验问题、不稳定燃烧的理论分析、药柱的机械性能与应力分析和固体火箭发动机的发展方向。

本书系资产阶级专家学者写的，书中掺杂不少唯心主义、形而上学、技术至上等资产阶级观点，因此，希望阅读本书的读者遵照伟大领袖毛主席关于“排泄其糟粕，吸收其精华”的指示，批判地使用。

由于水平所限，错误之处在所难免，恳请读者批评指正，以利再版时订正。



目 录

| | |
|------------------------------------|----|
| 前言 | 11 |
| 第一章 固体推进剂火箭发动机介绍——概论 | 13 |
| 1. 引言 | 15 |
| 2. 固体推进剂发动机的描述和发展简史 | 17 |
| 2.1 现代固体推进剂发动机的描述 | 17 |
| 2.2 发展简史 | 21 |
| 3. 分类 | 23 |
| 3.1 第一级火箭发动机(助推器) | 24 |
| 3.2 用作末级的火箭发动机和用作空间飞行器的火箭发动机 | 26 |
| 3.3 卫星的运载火箭 | 28 |
| 3.4 探空火箭 | 29 |
| 3.5 起制导和控制作用的辅助火箭发动机 | 30 |
| 3.6 飞机助飞火箭发动机 | 32 |
| 3.7 军事上的应用 | 32 |
| 3.8 其它方面的应用 | 35 |
| 4. 固体推进的重要性 | 37 |
| 5. 本书内容简介 | 50 |
| 第二章 喷管流动和特征参数 | 58 |
| 1. 准一元流理论——等熵膨胀 | 62 |
| 1.1 引言 | 62 |
| 1.2 准一元流方程的推导 | 63 |
| 1.2.1 质量守恒 | 63 |
| 1.2.2 动量守恒 | 64 |
| 1.2.3 能量守恒 | 66 |
| 1.3 等熵流动 | 68 |
| 1.3.1 简化的守恒方程 | 68 |
| 1.3.2 一种热容量为常数的单组分理想气体 | 69 |
| 1.4 喷管流动 | 72 |
| 1.4.1 等熵流动中的壅塞 | 72 |
| 1.4.2 拉瓦尔喷管中的流动 | 74 |
| 1.4.3 激波 | 75 |

| | | |
|-------|-----------------------|-----|
| 1.4.4 | 喷管中的非一元流 | 79 |
| 1.4.5 | 喷管流动公式 | 82 |
| 1.5 | 推力及火箭的性能参数 | 83 |
| 1.5.1 | 推力公式的推导 | 83 |
| 1.5.2 | 理论推力公式; 最大推力 | 84 |
| 1.5.3 | 推力系数 | 85 |
| 1.5.4 | 特征速度 | 87 |
| 1.5.5 | 比冲 | 88 |
| 1.5.6 | 其它性能和设计参数 | 90 |
| 2. | 多组分反应气流的影响 | 91 |
| 2.1 | 引言 | 91 |
| 2.2 | 冻结或平衡等熵流动 | 91 |
| 2.2.1 | 冻结流动 | 92 |
| 2.2.2 | 平衡流动 | 95 |
| 2.2.3 | 平衡喷管流动与冻结喷管流动性能的比较 | 96 |
| 2.3 | 松弛流动 | 97 |
| 3. | 两相流动效应 | 99 |
| 3.1 | 引言 | 99 |
| 3.2 | 理论; 对性能的影响 | 100 |
| 3.2.1 | 无颗粒滞后的两相流动 | 100 |
| 3.2.2 | 有颗粒滞后的两相流动方程 | 102 |
| 3.2.3 | 无因次滞后参数 τ | 104 |
| 3.2.4 | 大滞后极限 $\tau \gg 1$ | 106 |
| 3.2.5 | 小滞后极限 $\tau \ll 1$ | 107 |
| 3.2.6 | 关于 τ 等于中间值的数值计算 | 108 |
| 3.2.7 | 本章第3.2.2节内理论中所忽略现象的影响 | 109 |
| 3.3 | 对喷管设计的影响 | 110 |
| 3.4 | 实验结果 | 111 |
| 4. | 喷管热交换 | 112 |
| 4.1 | 引言 | 112 |
| 4.2 | 无冷却喷管壁中的非稳态热传导 | 114 |
| 4.3 | 通过附面层的稳态湍流热交换 | 115 |
| 4.4 | 热交换的进一步考虑 | 118 |
| 5. | 关于其它偏离理想条件的讨论 | 120 |
| 5.1 | 非一元流对喷管性能和设计的影响 | 120 |
| 5.2 | 附面层的生成 | 122 |
| 5.3 | 喷气流分离 | 124 |
| 5.4 | 向外的排气流与周围环境的相互作用 | 125 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6. 推力矢量控制 | 127 |
| 6.1 引言 | 127 |
| 6.2 机械控制面 | 128 |
| 6.3 流体喷射 | 129 |
| 6.3.1 现象描述 | 129 |
| 6.3.2 理论分析 | 131 |
| 6.3.3 与实验结果的比较 | 132 |
| 6.3.4 喷射流体的选择 | 134 |
| 6.3.5 热气活门 | 135 |
| 6.4 机械式与流体喷射式推力矢量控制的比较 | 135 |
| 7. 固体火箭发动机与喷管设计新概念的配合问题 | 135 |
| 第三章 固体推进剂性能 | 143 |
| 1. 引言 | 146 |
| 1.1 混合比的定义 | 147 |
| 1.2 推进剂和燃烧产物的组分 | 150 |
| 1.2.1 推进剂——均质推进剂和异质推进剂 | 150 |
| 1.2.2 燃烧产物 | 157 |
| 2. 理论性能计算 | 161 |
| 2.1 平衡组分方程 | 161 |
| 2.1.1 基本组分的定义 | 161 |
| 2.1.2 控制方程——原子守恒方程和化学平衡方程 | 165 |
| 2.2 平衡组分的简化计算 | 171 |
| 2.2.1 气态燃烧产物 | 171 |
| 2.2.2 含有一种凝结物质的燃烧产物 | 176 |
| 2.3 计算平衡组分的一般方法 | 178 |
| 2.3.1 哈夫法 | 179 |
| 2.3.2 怀特法 | 183 |
| 2.3.3 布林克莱法 | 186 |
| 2.4 将布林克莱法应用于含H、Li、Be、B、C、Al、N、Cl、 O和F的推进剂的示例 | 191 |
| 2.5 推进剂性能的计算 | 196 |
| 2.5.1 平衡混合物热力学 | 197 |
| 2.5.2 性能计算——绝热火焰温度；性能计算的一般问题；冻结 喷管流动的性能；平衡喷管流动的性能；影响系数；某些 推进剂的性能 | 200 |
| 2.6 关于导致最大性能的固体推进剂组分的研究 | 212 |
| 2.6.1 关于高能燃烧剂添加剂的研究 | 212 |
| 2.6.2 关于粘结剂的研究 | 214 |