

固体推进剂  
火箭发动机的  
基本问题  
(下 册)

国防工业出版社

# 固体推进剂火箭发动机的 基本问题

(下 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

国防工业出版社

基本问题

(下册)

AGARDograph 116 1969年

Williams, F. A.

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

(下册)

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<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张13<sup>3</sup>/<sub>16</sub> 335千字

1977年6月第一版 1977年6月第一次印刷 印数：0,001—3,000册

统一书号：15034·1528 定价：1.65元

# 目 录

第七章 侵蚀燃烧 .....	9
1. 引言 .....	12
2. 实验研究 .....	13
2.1 测定侵蚀函数的实验室方法 .....	15
2.2 在火箭发动机中直接测定侵蚀燃速 .....	22
2.3 在火箭发动机中间接测定侵蚀燃速 .....	27
2.4 实验结果 .....	29
2.4.1 概述 .....	29
2.4.2 各个参数的影响 .....	33
2.4.3 根据实验结果所提出的诸规律 .....	44
3. 理论研究 .....	48
3.1 半经验理论 .....	48
3.2 用气动热化学方法研究侵蚀燃烧问题 .....	58
4. 侵蚀现象对中心通道几何形状的影响 .....	63
5. 结论 .....	66
第八章 固体推进剂的点火和熄火 .....	70
1. 点火 .....	75
1.1 引言 .....	75
1.2 点火研究中的实验方法 .....	75
1.3 实验结果 .....	81
1.4 点火的理论分析 .....	96
1.4.1 引言 .....	96
1.4.2 利用滞止热气体点火 .....	97
1.4.3 利用流动热气体点火 .....	99
1.4.4 具有多相反应和辐射能交换的点火过程 .....	105
1.4.5 用凝结物质的点火 .....	118
1.4.6 对现有理论研究的评价 .....	120
1.5 发动机点火 .....	125
2. 熄火 .....	148
2.1 用降压法熄火 .....	148
2.2 用喷射阻燃剂法熄火 .....	163

3. 结论 .....	166
第九章 燃烧不稳定性的实验研究 .....	170
1. 简史; 抑振方法 .....	171
2. 不稳定性的分类 .....	172
3. 分析燃烧不稳定性的实验方法 .....	175
3.1 瞬时压力的测定 .....	175
3.2 发动机壳体的振动 .....	179
3.3 数据分析方法 .....	180
3.4 分析不稳定燃烧的光学法 .....	185
3.5 其它方法 .....	187
4. 线性声不稳定性的实验研究 (基本观点) .....	187
4.1 基本的实验室研究的基础 .....	187
4.2 用声发生器的定性实验 .....	188
4.3 激波管法 .....	189
4.4 用小端面燃烧发动机的实验 .....	189
4.5 用双发动机的实验 .....	189
4.6 用T形发动机和T形燃烧器的实验 .....	193
4.6.1 定义 .....	193
4.6.2 测定声纳的原理 .....	193
4.6.3 具体结构 .....	196
4.6.4 实验方案 .....	199
4.6.5 实验结果 .....	203
5. 发动机中声不稳定性的实验研究 .....	205
6. 关于非声和非线性燃烧不稳定性的实验研究 .....	208
6.1 引言 .....	208
6.2 激波诱发的振荡 .....	208
6.3 涡流的发展 .....	210
6.4 低压下的非声振荡不稳定性 .....	212
6.4.1 引言 .....	212
6.4.2 对发动机的观测; 实际结果 .....	212
6.4.3 用燃烧内在特征所作的解释; 对药条的观测 .....	216
6.4.4 用燃烧响应所作的解释 (停留时间的相互作用); $L^*$ 不稳定性 .....	217
6.4.5 声现象与非声现象的相互作用 .....	219
第十章 燃烧不稳定性的理论研究 .....	225
1. 引言 .....	228
2. 声振模型 .....	228

2.1	波动方程的推导 .....	228
2.2	空腔中的振模 .....	230
2.3	声场中的声能 .....	233
3.	声放大 .....	235
3.1	声纳 .....	235
3.2	空腔中单色波的声纳与能量增长率之间的关系 .....	236
3.3	各种处理方式及一般推理 .....	238
4.	声阻尼机理 .....	239
4.1	引言 .....	239
4.2	喷管阻尼 .....	239
4.2.1	端部排气燃烧室 .....	239
4.2.2	侧向排气燃烧室 .....	244
4.3	其它的边界阻尼过程 .....	246
4.3.1	壁摩擦 .....	246
4.3.2	壁的热交换 .....	250
4.3.3	复杂的壁损失现象 .....	251
4.4	均质阻尼 .....	251
4.4.1	粘性和热传导损失 .....	251
4.4.2	化学和分子松弛损失 .....	253
4.4.3	其它的均质阻尼过程 .....	255
4.5	颗粒阻尼 .....	255
4.5.1	综述和参考文献 .....	255
4.5.2	关于很小颗粒的分析 .....	257
4.5.3	关于结果的讨论 .....	259
4.5.4	精确公式 .....	260
4.5.5	实验验证 .....	261
4.6	固体中的粘弹阻尼 .....	262
4.6.1	关于固相损失的一般论述 .....	262
4.6.2	气体-固体系统的振动 .....	263
4.6.3	关于衰减的含义 .....	266
4.6.4	计算结果 .....	266
4.7	小结 .....	268
5.	声放大机理的理论 .....	268
5.1	引言 .....	268
5.2	交界面声纳的一般特性 .....	270
5.2.1	质量流率扰动与声纳之间的关系 .....	270
5.2.2	声纳的定性特性 .....	272
5.3	时间滞后理论 .....	273
5.3.1	简化的时间滞后概念 .....	273

5.3.2	改进的时间滞后理论 .....	274
5.3.3	关于时间滞后理论的结果和评价 .....	276
5.4	机械(燃烧)模型 .....	277
5.4.1	基本模型 .....	277
5.4.2	引伸 .....	280
5.5	气动热化学方法 .....	281
5.5.1	低频响应 .....	281
5.5.2	任意频率下的响应 .....	286
5.6	异质推进剂声振模型 .....	289
5.7	小振幅侵蚀效应 .....	293
5.7.1	引言 .....	293
5.7.2	有稳态侵蚀的声响应 .....	293
5.7.3	无稳态侵蚀的声侵蚀 .....	294
5.7.4	稳态和声振的综合侵蚀 .....	295
6.	非线性和非声不稳定性的理论 .....	297
6.1	引言 .....	297
6.2	平均燃速的变化 .....	297
6.3	固有不稳定性 .....	301
6.4	低频不稳定性和喘气 .....	303
6.5	非正弦曲线波 .....	306
7.	理论与实验的比较 .....	311
第十一章 固体推进剂药柱的机械性能和应力分析 .....		315
1.	引言 .....	322
1.1	综述 .....	322
1.2	粘弹性 .....	325
2.	粘弹固体的机械性能 .....	326
2.1	微分算子表示法 .....	327
2.2	积分算子表示法 .....	331
2.3	复模数和复顺性表示法 .....	336
2.4	温度效应 .....	339
2.5	用不可逆热力学为依据的表示法 .....	343
2.6	非线性应力-应变关系 .....	347
3.	固体推进剂火箭的应力分析 .....	351
3.1	线性粘弹力学中的应力分析 .....	351
3.2	镶嵌粘弹圆筒中的应力 .....	357
3.3	具有消融空腔表面的镶嵌粘弹旋转圆筒中的应力 .....	360
3.4	非等温粘弹圆筒的应力分析 .....	367
3.5	因轴向加速度所引起的药柱下沉 .....	374

3.6 用弹性金属丝加强的粘弹性圆筒 .....	377
4. 固体推进剂火箭的损坏及其准则 .....	382
4.1 引言 .....	382
4.2 裂缝的形成和扩展 .....	384
4.3 损坏准则的定义 .....	388
4.4 结论 .....	395
第十二章 固体推进剂火箭的未来 .....	401
1. 引言 .....	401
2. 推进剂的未来 .....	401
3. 关于新推进剂燃烧的基本研究 .....	406
4. 关于不稳定燃烧的新概念 .....	409
5. 技术发展——适应性和推力控制能力的改善 .....	412
6. 固体推进剂火箭的新应用 .....	416
附录 .....	418



# 固体推进剂火箭发动机的 基本问题

(下 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

(下册)

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<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张13<sup>3</sup>/<sub>16</sub> 335千字

1977年6月第一版 1977年6月第一次印刷 印数：0,001—3,000册

统一书号：15034·1528 定价：1.65元

# 目 录

第七章 侵蚀燃烧 .....	9
1. 引言 .....	12
2. 实验研究 .....	13
2.1 测定侵蚀函数的实验室方法 .....	15
2.2 在火箭发动机中直接测定侵蚀燃速 .....	22
2.3 在火箭发动机中间接测定侵蚀燃速 .....	27
2.4 实验结果 .....	29
2.4.1 概述 .....	29
2.4.2 各个参数的影响 .....	33
2.4.3 根据实验结果所提出的诸规律 .....	44
3. 理论研究 .....	48
3.1 半经验理论 .....	48
3.2 用气动热化学方法研究侵蚀燃烧问题 .....	58
4. 侵蚀现象对中心通道几何形状的影响 .....	63
5. 结论 .....	66
第八章 固体推进剂的点火和熄火 .....	70
1. 点火 .....	75
1.1 引言 .....	75
1.2 点火研究中的实验方法 .....	75
1.3 实验结果 .....	81
1.4 点火的理论分析 .....	96
1.4.1 引言 .....	96
1.4.2 利用滞止热气体点火 .....	97
1.4.3 利用流动热气体点火 .....	99
1.4.4 具有多相反应和辐射能交换的点火过程 .....	105
1.4.5 用凝结核物质的点火 .....	118
1.4.6 对现有理论研究的评价 .....	120
1.5 发动机点火 .....	125
2. 熄火 .....	148
2.1 用降压法熄火 .....	148
2.2 用喷射阻燃剂法熄火 .....	163

3. 结论 .....	166
第九章 燃烧不稳定性的实验研究 .....	170
1. 简史; 抑振方法 .....	171
2. 不稳定性的分类 .....	172
3. 分析燃烧不稳定性的实验方法 .....	175
3.1 瞬时压力的测定 .....	175
3.2 发动机壳体的振动 .....	179
3.3 数据分析方法 .....	180
3.4 分析不稳定燃烧的光学法 .....	185
3.5 其它方法 .....	187
4. 线性声不稳定性的实验研究 (基本观点) .....	187
4.1 基本的实验室研究的基础 .....	187
4.2 用声发生器的定性实验 .....	188
4.3 激波管法 .....	189
4.4 用小端面燃烧发动机的实验 .....	189
4.5 用双发动机的实验 .....	189
4.6 用T形发动机和T形燃烧器的实验 .....	193
4.6.1 定义 .....	193
4.6.2 测定声纳的原理 .....	193
4.6.3 具体结构 .....	196
4.6.4 实验方案 .....	199
4.6.5 实验结果 .....	203
5. 发动机中声不稳定性的实验研究 .....	205
6. 关于非声和非线性燃烧不稳定性的实验研究 .....	208
6.1 引言 .....	208
6.2 激波诱发的振荡 .....	208
6.3 涡流的发展 .....	210
6.4 低压下的非声振荡不稳定性 .....	212
6.4.1 引言 .....	212
6.4.2 对发动机的观测; 实际结果 .....	212
6.4.3 用燃烧内在特征所作的解释; 对药条的观测 .....	216
6.4.4 用燃烧响应所作的解释 (停留时间的相互作用), $L^*$ 不稳定性 .....	217
6.4.5 声现象与非声现象的相互作用 .....	219
第十章 燃烧不稳定性的理论研究 .....	225
1. 引言 .....	228
2. 声振模型 .....	228

2.1	波动方程的推导	228
2.2	空腔中的振模	230
2.3	声场中的声能	233
3.	声放大	235
3.1	声纳	235
3.2	空腔中单色波的声纳与能量增长率之间的关系	236
3.3	各种处理方式及一般推理	238
4.	声阻尼机理	239
4.1	引言	239
4.2	喷管阻尼	239
4.2.1	端部排气燃烧室	239
4.2.2	侧向排气燃烧室	244
4.3	其它的边界阻尼过程	246
4.3.1	壁摩擦	246
4.3.2	壁的热交换	250
4.3.3	复杂的壁损失现象	251
4.4	均质阻尼	251
4.4.1	粘性和热传导损失	251
4.4.2	化学和分子松弛损失	253
4.4.3	其它的均质阻尼过程	255
4.5	颗粒阻尼	255
4.5.1	综述和参考文献	255
4.5.2	关于很小颗粒的分析	257
4.5.3	关于结果的讨论	259
4.5.4	精确公式	260
4.5.5	实验验证	261
4.6	固体中的粘弹阻尼	262
4.6.1	关于固相损失的一般论述	262
4.6.2	气体-固体系统的振动	263
4.6.3	关于衰减的含义	266
4.6.4	计算结果	266
4.7	小结	268
5.	声放大机理的理论	268
5.1	引言	268
5.2	交界面声纳的一般特性	270
5.2.1	质量流率扰动与声纳之间的关系	270
5.2.2	声纳的定性特性	272
5.3	时间滞后理论	273
5.3.1	简化的时间滞后概念	273

5.3.2	改进的时间滞后理论 .....	274
5.3.3	关于时间滞后理论的结果和评价 .....	276
5.4	机械(燃烧)模型 .....	277
5.4.1	基本模型 .....	277
5.4.2	引伸 .....	280
5.5	气动热化学方法 .....	281
5.5.1	低频响应 .....	281
5.5.2	任意频率下的响应 .....	280
5.6	异质推进剂声振模型 .....	289
5.7	小振幅侵蚀效应 .....	293
5.7.1	引言 .....	293
5.7.2	有稳态侵蚀的声响应 .....	293
5.7.3	无稳态侵蚀的声侵蚀 .....	294
5.7.4	稳态和声振的综合侵蚀 .....	295
6.	非线性和非声不稳定性的理论 .....	297
6.1	引言 .....	297
6.2	平均燃速的变化 .....	297
6.3	固有不稳定性 .....	301
6.4	低频不稳定性和喘气 .....	303
6.5	非正弦曲线波 .....	306
7.	理论与实验的比较 .....	311
第十一章 固体推进剂药柱的机械性能和应力分析 .....		315
1.	引言 .....	322
1.1	综述 .....	322
1.2	粘弹性 .....	325
2.	粘弹固体的机械性能 .....	326
2.1	微分算子表示法 .....	327
2.2	积分算子表示法 .....	331
2.3	复模数和复顺性表示法 .....	336
2.4	温度效应 .....	339
2.5	用不可逆热力学为依据的表示法 .....	343
2.6	非线性应力-应变关系 .....	347
3.	固体推进剂火箭的应力分析 .....	351
3.1	线性粘弹力学中的应力分析 .....	351
3.2	镶嵌粘弹圆筒中的应力 .....	357
3.3	具有消融空腔表面的镶嵌粘弹旋转圆筒中的应力 .....	360
3.4	非等温粘弹圆筒的应力分析 .....	367
3.5	因轴向加速度所引起的药柱下沉 .....	374

3.6 用弹性金属丝加强的粘弹性圆筒 .....	377
4. 固体推进剂火箭的损坏及其准则 .....	382
4.1 引言 .....	382
4.2 裂缝的形成和扩展 .....	384
4.3 损坏准则的定义 .....	388
4.4 结论 .....	395
第十二章 固体推进剂火箭的未来 .....	401
1. 引言 .....	401
2. 推进剂的未来 .....	401
3. 关于新推进剂燃烧的基本研究 .....	406
4. 关于不稳定燃烧的新概念 .....	409
5. 技术发展——适应性和推力控制能力的改善 .....	412
6. 固体推进剂火箭的新应用 .....	416
附录 .....	418





## 第七章 侵蚀燃烧

### 符号说明

$\alpha$	式 (7-12) 所定义的燃速常数; 中心通道中的平均声速
$A_b$	燃烧面积
$A_c$	$P^2/4\pi$
$A_p$	管形药柱末端的通道面积
$A_t$	喷管喉部面积
$a_0, a_1, \dots, a_5$	式 (7-13) 所定义的侵蚀常数
$B$	质量传递的驱动力; 固相气化的频率因子
$b$	式 (7-12) 所定义的燃速参数
$c^*$	特征速度
$C_F$	摩擦系数
$C_{F0}$	无质量喷射时的摩擦系数
$C_H$	斯坦顿 (Stanton) 数
$C_{H0}$	无质量喷射时的斯坦顿数
$c_p$	燃气定压比热
$c_s$	推进剂比热
$D$	通道直径
$d$	晶粒直径
$E$	固相气化的活化能
$G$	轴向质量流量
$g$	光学放大因子
$h$	热交换系数; 单位质量的焓; 二元燃烧室的宽度