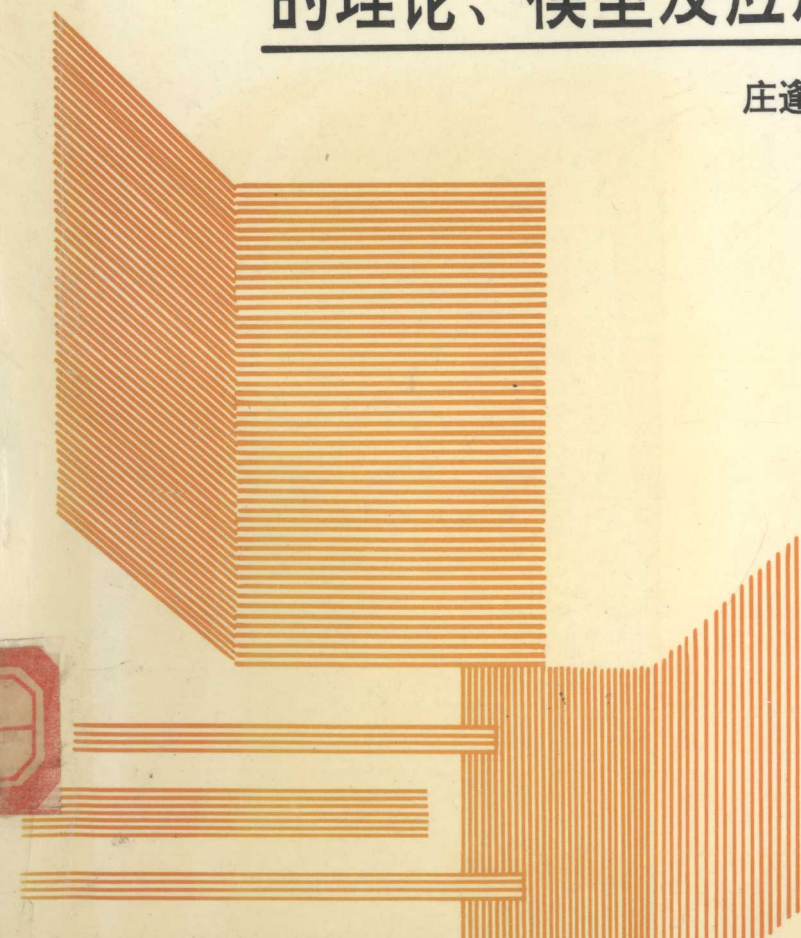


● 研究生教材 ● 研究生教材

液体火箭发动机喷雾燃烧 的理论、模型及应用

庄逢辰 编著



V434
1007

V434
1007-1

■ 研究生教材 ■



一九九七年十二月廿七日



30765999

庄逢辰 编著

液体火箭发动机 喷雾燃烧的理论、 模型及应用

国防科技大学出版社

765999

内 容 提 要

本书系统地建立和介绍了液体火箭发动机喷雾燃烧的理论、模型和性能计算方法,包括各种燃料滴和氧化剂滴的常压、高压和超临界蒸发/燃烧理论,着火和熄火理论,液滴的碎裂、碰撞和聚合理论,液滴群的蒸发/燃烧理论和液雾两相湍流燃烧理论,并给出了算例、数值解法的要点和实验验证。最后集中介绍了国内外现有的一些液体火箭发动机喷雾燃烧模型,并对各种模型的优缺点、应用现状和发展前景进行了评估。本书还特别介绍了作为喷雾燃烧初、边界条件的喷雾冷流特性实验模型和理论模型。

本书可作为航天、航空、内燃机以及一切从事和涉及液体燃料燃烧的各工程领域和专业的师生和科技人员的教材或参考用书。

液体火箭发动机喷雾燃烧的理论、模型及应用

编 著 庄逢辰

责任编辑 李 毅

责任校对 罗 青

国防科技大学出版社出版

(长沙市北区砚瓦池正街 47 号)

邮编: 410073 电话: (0731)4436564

新华书店总店科技发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本: 850×1168 1/32 印张: 14.5 字数: 364 千

1995 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数: 1000 册

ISBN 7-81024-337-3

V·10 定价: 15.00 元

序 言

本书是作者在国防科技大学、国防科工委指挥技术学院为液体火箭发动机专业、军事航天试验指挥专业的研究生开设的液体火箭发动机燃烧理论、燃烧科学与技术、航天运载器液体火箭发动机工作过程建模和仿真等课程的讲授内容，其中也包括作者在美国和德国的讲学内容，同时也是作者三十多年来从事液体火箭发动机燃烧科研工作的部分成果总结。这些科研工作是我我和我的同事，以及我所指导的博士生、硕士生和本科生共同完成的。在这一工作领域，我的很多研究生，如周猛、周进、王振国、吴晋湘、石少平、王中伟、刘卫东、赵文涛、陈新华、刘孝弟、原渭兰、梁考元、孙纪国、吴道宏等都作出重大贡献，我们共同发表了一百余篇学术论文，本书也反映了这些论文的主要内容。

我国航天界的老前辈任新民院士、刘传儒研究员、孙敬良总师以及各液体火箭发动机研究所的领导和同志们也对本书的内容作出了贡献。我的燃烧研究工作从一开始就得到了任新民院士的支持和指导，有些科研题目就是研究所提供并直接为型号服务的。国家高技术航天领域专家委员会也对我的科研工作给予了大力支持。在此，我要对这些同志表示深切的谢意。

液体火箭发动机的燃烧设计曾经长期处于半经验状态，这就不可避免地会导致液体火箭发动机的研制周期延长、费用增加，甚至导致研制计划失败。为了改变这种状态，各国液体火箭发动机科技工作者长期以来一直都在寻求解决的办法。现代液体火箭发动机燃烧过程计算模型，是70年代以来发展起来的一种新的设计工具，并在美国各种型号发动机，其中包括航天飞机主发动机的研制中得到了成功的应用。现在这种计算模型还在不断地完善和

发展,并可应用于发动机的不同设计阶段。在发动机的概念设计阶段,应用计算模型可以了解推力室内燃烧流场的各参数,如压力、温度、速度、浓度的分布情况,预测燃烧性能、稳定性和相容性,对各种发动机设计方案进行比较和评价,最终选择符合要求的方案;在发动机硬件设计阶段,可进行设计的验证和了解试验中发生的异常现象,以便最大限度地减少试车次数和完成改进设计,并可进行故障模拟。本书即介绍这一新设计工具的基本理论、基本模型和基本方法。

本书第一章主要介绍液体火箭发动机喷雾燃烧过程与液体火箭发动机性能、稳定性和相容性的关系,以及液体火箭发动机喷雾燃烧过程计算模型的发展历程、当前的应用和发展趋势。章末附有从1946年到1993年共76篇液体火箭发动机喷雾燃烧模型不同发展阶段中发表的有关文献,以使读者能较快地了解这一阶段的研究内容和存在的问题,继续前进。

第二章讨论作为液体火箭发动机喷雾燃烧模型初、边界条件的喷注器喷雾模型。这章的重要性丝毫不比喷雾燃烧模型本身差,甚至更为重要,难度亦更大。这一章既介绍传统应用的喷雾特性实验模型,也介绍最新发展的一些喷雾特性理论计算模型。这些理论模型正是当前迫切需要研究的内容。

第三章的目的主要是为讨论液氧、烃组元液滴的高压蒸发理论作准备,并对一般液滴蒸发/燃烧理论中常用假设的应用范围和引起的误差作了探讨,这部分内容显然亦适用于一般工业炉的燃烧。

第四章到第六章主要介绍液氧/烃、液氧/液氢发动机中组元液滴的高压蒸发理论、超临界燃烧理论和亚临界—超临界蒸发/燃烧理论。这些理论即使在最近出版的燃烧专著中亦还没有涉及。这些内容亦适用于分析内燃机、航空发动机和燃气轮机中的燃烧过程。

第七章和第八章介绍单元推进剂和自燃推进剂组元液滴的高压和常压蒸发理论,主要适用于自燃推进剂火箭发动机及应用单元推进剂的一些武器,如鱼雷和液体炮等。

第九章介绍的液雾两相湍流反应控制方程和基本模型,主要针对液体火箭发动机和超燃冲压发动机中的一些具体应用,其中包括一些最新的模型,如湍流/化学反应的相互作用模型等。

第十章液滴碎裂和聚合模型、第十一章液滴着火/熄火理论和第十二章液滴群燃烧理论都还只属于初步发展中的理论,它们的成熟程度远远不及前面几章中介绍的一些理论,但在比较完善的喷雾燃烧过程计算中又是必须予以考虑的,而这些理论和模型在一般文献中又介绍得很少,故本书还是专门列了三章予以介绍,以供读者在进一步研究喷雾燃烧过程计算模型时参考。

第十三章到第十八章都是介绍具体应用的液体火箭发动机喷雾燃烧过程计算模型,其中自燃推进剂火箭发动机燃烧过程计算模型和 CAFILRE 燃烧和流动过程分析模型是我们自己研制的。前者适用于自燃推进剂火箭发动机,后者适用于液氢液氧发动机,由于 CAFILRE 所发展的程序具有良好的可读性,模型改进、程序修正都只发生在相应子模块中,实现起来很方便,而且便于调试,根据不同的要求对程序进行相应的组合,可以完成不同的任务,故亦可扩大到适用于液氧/烃和自燃推进剂火箭发动机以及一般燃烧室和工业炉的模拟。第十四章到第十七章主要是把国外现有的一些代表性的液体火箭发动机喷雾燃烧模型介绍给大家。这些模型都各有优缺点和自己的适用范围,其中 ARICC 分析模型是美国目前最先进的液体火箭发动机燃烧过程计算模型,并在航天飞机主发动机的研制过程中得到了应用,但目前亦只适用于液氢液氧发动机。

第十九章介绍液体火箭发动机喷雾燃烧性能的实验解析计算方法。这种方法在日本的 H-Ⅱ 火箭研制中起到了促进作用。

第二十章是结束语，主要是结合本书已经简述的内容，提出了一些需要进一步研究的方向性问题。

由于液体火箭发动机中的燃烧过程也许是所有燃烧与流动现象中最为复杂的过程，它涉及的问题很广泛，所以本书或许不单对液体火箭发动机专业的研究生、本科生和研究人员或设计人员有用，而且对一切从事涉及燃烧过程的各种工程领域的人员都会有参考价值。

本书序言、第一章到第十一章、第十三章至第十七章、第十九章和第二十章为庄逢辰所写，第十二章是周进和庄逢辰合写，第十八章是王振国和庄逢辰合写。我们热烈欢迎使用本书的教师、学生和各方面的研究及设计人员对本书提出宝贵的批评意见，以便今后不断加以充实和改进。

最后，作者要特别感谢陈新华同志，他为本书的清稿和定稿付出了辛勤的劳动，才使本书得以及时出版。

庄逢辰

1994年8月于北京

本书主要符号表*

A	面积, 喷嘴几何特性
a	声速, 导热系数, 吸收系数
B	传热数, 传质数
b	无量纲温度或浓度
C	摩尔浓度
C_0	阻力系数
C_p	气体定压比热
C_p	定压比热
C_v	蒸汽定压比热, 定容比热
C^*	特征速度
D	扩散系数, 喷嘴直径
d	液滴直径
E	活化能; 黑体的辐射能
E_m	混合均匀性参数
e	内能
F	网格中气体所占的体积与气体和液体所占的体积之比
f	混合物分数
G	群燃烧数
g	重力加速度, f 脉动均方值
h	焓, 传热系数, 液膜厚度
h^0	生成焓
I	内能, 单位矩阵

* 其余符号或意义变更时以各章中给定的为准

J	焦耳常数
K	湍流动能, 导热系数
K_0	指数前因子
K_e	平衡常数
L	蒸发潜热, 长度
l	湍流尺度
Le	Lewis 数
M	分子量
MF	质量分数
MR	混合比
m	质量
$\dot{m}$	质量变化率
$\dot{m}''$	质量流强
$\dot{m}_v$	蒸发速度
N	液滴数
n	均匀度指数
Nu	Nusselt 数
ON	Obedience 数
On	Ohnesorge 数
P	压力
$P(\phi)$	变量 ϕ 的概率密度分布函数
Pr	Prandtl 数
Pe	Peclet 数
q	热流, 传给液滴的热量
Re	Reynolds 数
R_u	通用气体常数
r	半径, 氧化剂和燃料的化学计算质量比
s	流线距离, 散射系数
Sc	Schmidt 数
T	温度, 无量纲时间
t	时间

u, v, w 速度分量

V 体积, 比容

$\dot{W}$ 流量

We Weber 数

x, y, z 坐标方向

x 相对摩尔浓度

X_s 无量纲蒸发速度

y 相对体积浓度

Y 相对质量浓度

Z 压缩因子

希 腊 字 母

α 撞击半角, 增长速率

β Schvab—Zeldovich 耦合参数, 综合参数

Γ 输运系数

γ 比热比, 混合比, 活度系数, 化学反应级数

δ Frand—Kamenetski 参数, Kronecker delta

Δ Damkohler 数

ε 湍流动能耗散率, 喷嘴有效截面系数

ΔH_c 反应热

ΔH_s 相变热

η 无量纲坐标, 效率

θ 无量纲温度, 撞击半角, 孔隙比

λ 蒸发常数, 波长, 容积粘性系数

μ 动力粘性系数

ρ 密度

ν 运动粘度, 化学计量系数

σ 表面张力, 应力张量, Boltzman 常数

τ 剪切应力, 时间

ϕ 通用因变量, 方位角, 速度系数, 蒸发百分数

ω	偏心因子, 角系数
$\dot{\omega}$	化学反应速度

下 角 标

a	雾化
B	液滴或射流的碎裂
C	临界值, 燃烧值
ch	反应
d	液滴
E	熄火点
e	惰性介质
eff	有效值
f	燃料, 火焰面
g	气相
I	喷注器, 着火点
i	某液滴尺寸组, 某气体组元, 某流管号
j	某推进剂组元, 射流
i, j, k	坐标方向
l	液体, 层流
m	质量中间
mix	混合
n	喷嘴
o	初始值
ox	氧化剂
$p(或 Pr)$	燃烧产物
r	相对值
s	表面
t	湍流
th	理论

v	蒸发
w	壁面
∞	无穷远处, 来流

上标及上角标

—	Reynolds 平均
$\sim$	<i>Favre</i> 平均
$\rightarrow$	向量
,	Reynolds 脉动量
,,	<i>Favre</i> 脉动量
*	特征值
•	时间变化率
c	燃烧
g	气体
l	液体
lf	横向流
v	蒸发

目 录

序 言

第一章 液体火箭发动机喷雾燃烧设计的历史发展、现状和趋势

1.1 液体火箭发动机喷雾燃烧过程的唯象描述	(1)
1.2 液体火箭发动机工作特性要求和燃烧过程	(5)
1.3 液体火箭发动机喷雾燃烧过程计算模型的发展过程	(9)
1.3.1 液体火箭发动机喷雾燃烧设计的历史状态	(9)
1.3.2 液体火箭发动机喷雾燃烧过程计算模型的提出和建模方法	(10)
1.3.3 液体火箭发动机燃烧速率控制过程的研究	(12)
1.3.4 液体火箭发动机喷雾燃烧过程蒸发模型的发展	(14)
1.4 80年代以来液体火箭发动机喷雾燃烧过程计算模型的应用和发展趋势	(19)
参考文献	(26)

第二章 液体火箭发动机喷雾燃烧模型的初、边界条件——喷注器喷雾模型

2.1 液体火箭发动机喷注器的作用和构型	(32)
2.2 液体火箭发动机喷注器喷雾尺寸分布的实验性模型	(36)
2.2.1 喷雾尺寸分布的数学表达式	(36)
2.2.2 液滴平均直径的表达式	(38)
2.2.3 典型喷注单元的液滴平均直径	(39)
2.2.4 喷雾燃烧模型中常用的液滴尺寸分组方法	(43)
2.3 液体火箭发动机喷注器喷雾流强分布的实验性模型	(44)
2.4 液体火箭发动机喷注器喷雾混合比分布的实验性模型	(47)
2.4.1 混合均匀性参数	(47)
2.4.2 混合特征速度效率	(52)
2.5 液体火箭发动机喷注器喷雾冷流试验和模拟方法	(52)
2.6 液体火箭发动机喷注器雾化特性理论计算模型	(57)

2.6.1	二股直流自击式喷嘴的喷雾尺寸分布理论计算模型	··· (57)
2.6.2	直流—直流式气/液同轴喷嘴的喷雾尺寸分布理论 计算模型	····· (61)
2.6.3	直流—离心式气/液同轴喷嘴雾化特性的理论计算 模型	····· (65)
	参考文献	····· (74)
第三章 液氧、烃组元液滴的常压准定常蒸发/燃烧理论		
3.1	基本假设	····· (78)
3.2	静止介质中液滴无燃烧时的准定常蒸发理论	····· (80)
3.2.1	模型	····· (80)
3.2.2	方程	····· (81)
3.2.3	求解	····· (83)
3.2.4	分析讨论	····· (83)
3.3	对流介质中液滴无燃烧时的准定常蒸发理论	····· (86)
3.3.1	模型	····· (86)
3.3.2	理论	····· (87)
3.4	静止介质中液滴有燃烧时的准定常蒸发理论——液滴准 定常扩散燃烧理论	····· (88)
3.4.1	模型	····· (88)
3.4.2	方程	····· (88)
3.4.3	求解	····· (91)
3.5	对流介质中液滴燃烧时的准定常蒸发理论	····· (92)
	参考文献	····· (94)
第四章 液氧、烃组元液滴的高压蒸发理论		
4.1	引言	····· (95)
4.2	ZKS 液滴高压蒸发理论	····· (96)
4.2.1	计算方程和计算公式	····· (96)
4.2.2	计算结果和分析讨论	····· (102)
4.3	Matlosz 液滴高压蒸发理论	····· (106)
4.3.1	基本方程和求解方法	····· (106)
4.3.2	计算结果和分析讨论	····· (111)

4.4 K. C. Hsieh 和杨威迦理论	(111)
4.4.1 控制方程	(111)
4.4.2 匹配条件	(114)
4.4.3 热力学性质和输运性质的选取	(116)
4.4.4 计算结果讨论	(116)
4.5 应用液相活度系数计算高压气液平衡的方法	(120)
4.5.1 理论模型	(120)
4.5.2 计算结果及分析	(123)
参考文献	(124)
第五章 液氧/烃、液氧/液氢发动机中组元液滴的超临界燃烧理论	
5.1 引言	(128)
5.2 液滴超临界燃烧的点源理论	(128)
5.2.1 基本假设	(128)
5.2.2 基本方程	(129)
5.2.3 方程的解和结果讨论	(131)
5.3 液滴超临界燃烧的分布源理论	(135)
5.3.1 点源理论的优缺点和分布源理论的提出	(135)
5.3.2 分布源理论的求解和结果讨论	(135)
5.4 液滴超临界燃烧的变物性理论	(138)
5.4.1 基本假设	(138)
5.4.2 基本方程	(138)
5.4.3 方程的解	(140)
5.4.4 计算结果和讨论	(142)
5.5 液滴超临界燃烧的动力学理论	(143)
5.5.1 基本假设	(143)
5.5.2 基本方程和初边界条件	(144)
5.5.3 数值计算和结果讨论	(145)
参考文献	(149)
第六章 液氧/烃、液氧/液氢发动机中组元液滴的亚临界—超临界蒸发/燃烧理论	
6.1 引言	(150)

6.2 准定常—瞬变理论	(151)
6.2.1 基本假设	(151)
6.2.2 准定常燃烧模型	(151)
6.2.3 瞬变燃烧模型	(156)
6.2.4 计算结果和讨论	(157)
6.2.5 结论	(160)
6.3 全瞬变理论	(161)
6.3.1 守恒方程	(161)
6.3.2 输运性质和热力学性质	(162)
6.3.3 状态方程	(163)
6.3.4 气相燃烧模型	(164)
6.3.5 界面边界条件	(164)
6.3.6 数值计算方法	(165)
6.3.7 计算结果和讨论	(167)
6.4 液氧滴的亚临界—超临界蒸发理论	(172)
6.4.1 模型和守恒方程	(172)
6.4.2 输运性质和热力学性质	(173)
6.4.3 状态方程	(173)
6.4.4 界面边界条件	(174)
6.4.5 计算结果和讨论	(175)
参考文献	(182)

第七章 单元推进剂液滴的蒸发/燃烧理论

7.1 引言	(184)
7.2 绝热条件下单元推进剂液滴的常压蒸发/分解燃烧理论	(184)
7.2.1 基本假设和理论模型	(184)
7.2.2 基本方程及其求解	(185)
7.2.3 公式的应用和分析	(188)
7.3 单元推进剂液滴的常压蒸发/氧化燃烧理论	(189)
7.3.1 理论模型——双火焰峰模型	(189)
7.3.2 基本方程	(191)
7.3.3 方程求解	(193)

7.4 单元推进剂液滴的高压非定常分解燃烧理论	(195)
7.4.1 模型的提出	(195)
7.4.2 计算方程和求解方法	(195)
7.4.3 计算结果讨论	(198)
参考文献	(203)

第八章 自然推进剂发动机中组元液滴的高压蒸发理论

8.1 引言	(204)
8.2 基本假设和物理模型	(204)
8.3 计算方程	(207)
8.4 算例和分析	(211)
参考文献	(218)

第九章 液雾两相湍流反应流的控制方程和基本模型

9.1 描述湍流反应流的 Navier—Stokes 方程	(220)
9.2 两种统计平均方法—— Reynolds 平均和 Favre 平均	(223)
9.3 Favre 平均的气相控制方程组	(223)
9.4 湍流模型	(224)
9.5 化学反应模型	(226)
9.5.1 简单化学反应系统	(226)
9.5.2 Schvab —— Zeldovich 耦合参数和混合分数守恒方程	(227)
9.5.3 化学计算比关系	(228)
9.5.4 控散控制快速化学反应的 $\bar{k}-\bar{e}-\bar{f}$ 火焰面模型法	(229)
9.5.5 控散控制快速化学反应的 $\bar{k}-\bar{e}-\bar{f}-\bar{g}$ 简化 pdf 模型	(229)
9.5.6 预混反应流的 EBU 模型	(232)
9.5.7 湍流/化学反应相互作用的简化 pdf 模型	(233)
9.6 气相控制方程的统一形式和边界条件	(237)
9.6.1 气相控制方程的统一形式	(237)
9.6.2 气相控制方程的边界条件	(237)
9.7 液相控制方程组及其初边界条件	(242)
9.7.1 基本假设	(243)
9.7.2 液滴数方程	(244)
9.7.3 液滴动量方程	(244)