

高性能航空燃气轮机 燃 烧 技 术

**Combustion Technology for High
Performance Aviation Gas Turbine**

侯晓春 季鹤鸣 刘庆国 编著
严传俊 赵坚行

国防工业出版社
·北京·

图书在版编目(CIP)数据

高性能航空燃气轮机燃烧技术/侯晓春等编著. —北京:国防工业出版社, 2002. 1

ISBN 7-118-02632-8

I. 高... II. 侯... III. 燃气轮机: 航空发动机—航空发动机燃烧—技术 IV. V 235.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 060077 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 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 20½ 526 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月北京第 1 次印刷

印数: 1—1500 册 定价: 37.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

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 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模

主任委员 黄 宁

副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎

秘 书 长 崔士义

委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成
(以姓氏笔划为序)

刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树

杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟

何新贵 张立同 张汝果 张均武

张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安

侯正明 莫梧生 崔尔杰

序 言

航空燃气涡轮发动机是资金密集、技术密集和知识密集的高新技术产品,它的研制特点是费用高、周期长、难度大、风险多。人们常把发动机对飞机的重要作用比之为飞机的“心脏”,又将它的燃烧系统(包括主燃烧室和加力燃烧室)对发动机的重要作用比之为“心脏”的“心脏”,可以想见燃烧系统对发动机的重要性。研制一种燃烧效率高,排气污染少,工作稳定,出口气流温度分布均匀,且寿命长、重量轻、可靠性高、维修性好的燃烧系统,是我们从事研制航空发动机燃烧系统的科研工作者几代人为之终生奋斗的目标。

随着世界科学技术飞速进步,航空发动机燃烧系统技术在过去 60 年的发展是相当惊人的。由于飞机作战的需要,要求航空发动机的推重比不断提高,而单位燃油消耗率又要不断降低,就促使涡轮进口平均温度持续增长,从而要求主燃烧室的温度相应提高。国际上,20 世纪 80 年代以前发动机涡轮进口温度在 1600~1700K 之间。从美国航空发动机的预研项目计划——综合高性能涡轮发动机技术(1HPTET)计划来看,1991 年规定涡轮进口温度为 2112K,这一阶段的计划指标已于 1998 年付诸实现;要求到 21 世纪初 2003 年达到 2323K;其先进概念阶段要求到 2009 年达到 2366K,要求温升高达 1250~1350K。要达到这样高的温升,除了需要有先进高温材料和相应的先进工艺外,燃烧系统技术的研究也至关重要,这给燃烧系统的研究工作者带来很大的促进和压力。

根据上述对航空发动机燃烧系统的未来高要求,从我国航空发动机发展前景考虑,我们应该做些实地调研。我国航空发动

机燃烧系统技术,过去40年来,技术水平究竟处在什么状态?与国际上有多大差距?将现实情况摸清以后,才有可能由航空科研领导部门制定出进入21世纪既切实又可行的航空发动机燃烧系统发展研究计划,这也就是本书作者编写本书的目的之一。

本书的五位作者都是具有30多年实践经验的技术专家和教授,他们从20世纪60年代起就参加航空发动机燃烧系统的设计、试验和教学工作。现在,他们即将先后退休,新的青年一代正在接班。他们要把自己多年从事燃烧系统科研和教学的劳动成果和研究工作的体会,结合参与国际合作、国外考察所收集积累的大量国内外资料,加以分析总结,写成专著传给后人。根据国内外燃烧技术发展情况,本书分为主燃烧室技术研究与应用、加力燃烧室与多功能喷管技术研究以及燃烧系统测试与试验三篇共19章。作者将本书奉献给青年一代,希望有助于他们进入21世纪在燃烧技术上进一步发展和创新,把我国的航空发动机的燃烧技术推向世界先进行列。作为一个范例,本书第二篇中介绍了我国在20世纪70年代由北京航空航天大学高歌教授自主创新的加力燃烧室沙丘驻涡火焰稳定器的成功研究和应用,给人以启迪和鼓舞。

另外,本书与以往出版的燃烧技术书籍不同之处在于:书的内容实用性强,对燃烧系统的研制将会起到指导作用。国内外研制航空发动机燃烧系统的实践经验表明,燃烧系统性能的提高必须与新航空发动机的发展同步,即在研制燃烧系统时必须与发动机的研制要求取得一致;并且要特别重视燃烧部件的试验,没有大量的燃烧系统的部件试验,将会严重影响整机研制进度,增加研制风险,甚至导致整机的研制失败。经验证明,必须先做大量的部件试验,大量暴露问题,然后再上整机试车,这样研制返工次数才能少,研制成功才有可能。本书作者根据参加型号研制中得到的经验教训,在本书中加以阐述。这种研制规律性的经验很值得后人在研制工作中认真汲取。

值此世纪之交,我衷心祝愿本书的出版对提高我国航空发动机燃烧系统的研究、设计和试验水平起到积极推动作用。

吴大观

1999年10月1日

国庆50周年纪念

前 言

航空燃气轮机经历了半个多世纪的发展。世界上几个航空工业大国出于空中优势的争夺,民用大型客机和轻型燃气轮机市场的激烈争夺的需要,已将主攻目标集中在综合高性能燃气轮机上。其特点是:高增压比、高涡轮前温度、高推质比、低耗油率、低污染、高可靠性及长寿命。因此,高性能发动机主燃烧室的关键技术,是在宽广油气比工作范围内保证良好的燃烧稳定性和低的排气污染,以及在冷却、掺混气量减少的条件下具有良好的火焰筒耐热性和出口温度场品质。对军用飞机低涵道比风扇发动机的加力燃烧室来说,高性能要求有利于改善其燃烧性能,但由此则必须解决结构件的耐热性,红外隐身能力,以及为满足飞机机动性、敏捷性而发展推力矢量技术(即多功能喷管)等一些突出的技术关键问题。在研制高性能发动机上述两大部件的过程中,试验技术和方法的发展则要突出试验设备的类型和功能范围的扩展,试验自动化信息处理技术的应用,以及现代光学测试手段的采用等。针对上述要求,国外早已开始有计划、有组织地进行了全面的技术开发研究,从而使航空发动机性能水平不断提高。国内起步较晚,但在进入自行研制阶级以来,同样进行了技术跟踪和开发研究,并取得了许多成果。

近 30 年来,作为航空发动机的主要部件的燃烧室和加力燃烧室、以及与之相关的燃烧技术及测试技术,有如下一些发展和创新:(1)对于燃烧室,突出短环形燃烧室(包括短扩压器、短火焰筒、组合式供油装置、高效冷却技术)、低污染燃烧技术、具有特殊性的小型燃烧室技术、以及数值模拟设计、分析技术;(2)对于加力燃烧室,则突出风扇混合加力燃烧室中的混合器、软点火、值班火焰稳

定器、供油匹配、燃烧组织等问题,并大力研究相关的多功能喷管(含推力矢量技术和隐身技术),数值计算也得到了广泛应用;(3)在燃烧性能测量和试验技术方面,更加完善了燃烧过程模化准则和试验方法,提高了测量精度和调整水平,开发了更为先进的燃油雾化质量、燃烧室出口温度场调试、燃烧室寿命预测、燃气污染物检测技术,以及加力燃烧室的特殊试验技术等。

以上一些新的燃烧技术成果在国内早期出版的有关著作中未能加以介绍。我们几位于 20 世纪 60 年代初投身航空专业科研工作,直接参与并负责过大量型号中两大部件设计、研究及试验,取得了较多技术成果,积累了较多的实际经验;还参加过国际合作、国外考察,从而收集积累了大量国内外资料,对整个燃烧技术现状及发展有所了解。基于以上情况,在世纪之交,新老技术力量交替之际,特编著《高性能航空燃气轮机燃烧技术》,期望能发挥承前启后的作用。

本书以国内外综合高性能发动机最新燃烧技术为着眼点,分为三篇共 19 章,系统而又突出重点地全面审视了高性能燃气轮机技术发展动向及国内差距,既有技术方案又有实用效果评述,还在概括现状的基础上展示了未来的发展。基于以上宗旨,本书避免了一般性燃烧学基本原理及教科书、设计手册中设计方法等方面内容的重复。本书由五位作者根据各自工作侧重面不同,分头撰写:侯晓春(第一篇第 1~6 章);严传俊(第一篇第 7 章);季鹤鸣(第二篇第 1~4 章及第三篇第 7 章);赵坚行(第二篇第 5 章);刘庆国(第三篇第 1~6 章)。三位主要作者交互校阅了文稿,由侯晓春对全书校审和统稿。本书可供国内航空科研管理部门参考,以便更准确地规划燃烧技术研究;也可供航空院校师生和从事燃烧室及加力燃烧室设计、试验的工程技术人员使用,以便了解国内外已有技术成果,加以推广应用,并对新的燃烧技术产生兴趣,从而有所突破和创新。

当然,燃烧技术是一门既古老而又充满活力的科学技术,还在不断地完善、发展和创新,故本书所收集的文献资料有一定局限性

和阶段性。对书中不妥或错误之处,欢迎批评与指正。但是,若能为促进新世纪我国航空燃气轮机燃烧技术的进步和发展,我们将感到无比欣慰!

本书得到了国防科技图书出版基金评审委员会的厚爱 and 资助,作者们深感荣幸,并致以诚挚的谢意。也感谢国防工业出版社责任编辑王坡麟付出的艰辛劳动和给予的支持。

最后特别感谢航空界老前辈宁槐教授、吴大观研究员、中国工程院刘大响院士、清华大学傅维标教授、北京航空航天大学杨茂林教授的热情支持和推荐。吴老对本书全稿进行了审阅,提出了宝贵意见,并为本书作序,这是对作者们的莫大鼓励。也特别感谢作者们所在单位,特别是株洲、沈阳航空动力研究所各级领导的支持和帮助。

主要符号表

拉丁字母表

A	面积,前置因子	K	常数,波数
a	热扩散系数	k	绝热指数,平衡常数,紊流动能
AR	面积比	$L(l)$	长度
B	抽气比,涵道比	L_o	理论空气量
b	宽度	L_f	火焰长度,火焰厚度
c	声速	M	分子量,吹风比(质量流量经,密流比)
C	速度,紊流模型系数	Ma	马赫数
C_d	流量系数	m	质量,质量分数
C_p	定压比热容,静压恢复系数	MMD	质量平均直径
C_v	比定容热容	N	燃油分布不均匀指数,反应数目
D	直径,扩散系数,扩散项	P, p	压力,概率,贝克列数(Pe)
d	直径	Q	热量
$E(e)$	能量	q	油气比
F	面积,推力	q_m	质量流量
f	频率,油气比,修正系数	q_v	体积流量
F_N	推力	R	半径,气体常数,压力比,推力,反射率
g	燃料消耗量	Re	雷诺数
J	雅可比行列式	R_F	火焰特征结构因子
$H(I, i)$	焓,高度	r	半径
Hu	热值	S	表面积,反应率张量,比熵,分流比
ΔH	反应热	SMD	索太尔平均直径
h	高度,焓,普朗克常量		

SN	发烟数
T	温度(K), 周期
t	温度(°C)
Tu	紊流特性

U, V, W
(u, v, w) 速度分量

V(v)	体积、容积、速度
W	分子质量、流量、重量、速率
x, y, z	坐标
Y	组合质量分数

希腊字母符号

α	吸收系数, 余气系数, 空燃比, 锥角
β	化学当量比, 角度
Γ	输运系数, 通用扩散系数
ϵ	紊流脉动动能耗散率
δ_0	出口温度场不均匀系数 (OTDF, PF)
δ_r	出口温度场径向不均匀 系数(RTDF)
η	效率, 系数
θ	加热比, 角度
λ	波长, 速度系数, 流阻系数
μ	动力粘性系数
ν	运动粘性系数
ζ	流阻系数
ζ, η, ξ	任意曲线坐标系坐标
π	压比
ρ	密度
σ	总压恢复系数, 面积比, 表面张力, 应力
τ	时间, 剪切应力

ψ	压力损失系数
ϕ	当量油气比, 直径
ω	角速度, 化学反应速率

下角标

ab	加力燃烧室
a	空气, 标量, 组分, 反应级数
abs	绝对
b	燃烧室
c	压气机, 冷却
cm	混合的
d	扩压器, 突扩区
e	有效的
ev	蒸发
f	燃料, 火焰
i	局部的, 点火
in	内部的
g	燃气, 气相, 高的
kp	临界的
l	层流
m	混合的, 质量
max	最大的
min	最小的
nz	喷管的
opt	恰当的
p	燃烧产物, 液相
pr	燃气
q(qc)	猝熄
r	径向的, 参考的(rep)
s	表面, 化学当量比, 静参数
t	总的, 紊流
v	体积
w	壁面的

- 3 燃烧室进口截面
 4 燃烧室出口截面
 5 最末级涡轮出口截面
 6 混合器或加力燃烧室
 进口截面
 7 发动机尾喷管进口截面
 8 发动机尾喷管喉道截面
 9 发动机尾喷管出口截面

上角标

- ， 同类参数区分号

侧记号

- Σ 总和
 Δ 绝对增量,变化

顶记号

- 相对值,平均值,时间平均值
 ~ 质量平均值

目 录

第一篇 主燃烧室技术

第一章 主燃烧室技术研究与发展概况	1
参考文献	9
第二章 短扩压器和短火焰筒	11
1.2.1 环形燃烧室扩压器的演变与研究概况	11
1.2.2 短突扩扩压器	18
1.2.3 抽气式扩压器	37
1.2.4 短火焰筒	52
参考文献	60
第三章 燃油供给技术	62
1.3.1 燃油供给技术的发展及应用概况	62
1.3.2 空气雾化喷嘴及组合式空气雾化装置	67
1.3.3 蒸发管供油方式及蒸发式燃烧室	83
1.3.4 耐高温的燃油喷嘴	88
参考文献	95
第四章 火焰筒冷却技术	98
1.4.1 火焰筒冷却技术的重要性及发展概况	98
1.4.2 气膜冷却结构的改进	103
1.4.3 多孔壁发散冷却技术	111
1.4.4 复合气膜冷却	118
1.4.5 多孔层板发散冷却	124
1.4.6 分块式火焰筒	132
1.4.7 高温材料及结构的发展和应用	136
参考文献	147

第五章 低污染燃烧技术	150
1.5.1 低污染燃烧技术研究概况	150
1.5.2 常规燃烧室的低污染燃烧技术	152
1.5.3 以控制 NO_x 为中心的 low 污染燃烧技术	163
参考文献	184
第六章 小型发动机燃烧室特殊技术问题	187
1.6.1 小型发动机燃烧室主要技术问题及其发展动向	187
1.6.2 燃油供给技术	191
1.6.3 主燃区燃烧组织	198
1.6.4 火焰筒冷却技术	204
1.6.5 掺混段结构性能研究	210
参考文献	224
第七章 燃烧室数值计算的发展与应用	226
1.7.1 燃烧室数值计算的现状	226
1.7.2 多维两相燃烧流场数值分析的新发展	230
1.7.3 计算燃烧学的应用	246
参考文献	252

第二篇 加力燃烧室与多功能喷管

第一章 加力燃烧室概述	254
2.1.1 发展概述	254
2.1.2 战术技术要求	259
2.1.3 加力技术现状	261
2.1.4 主要组成零件介绍	268
2.1.5 加力燃烧室(含喷管)的联接与安装	279
2.1.6 加力燃烧室配套附件	282
2.1.7 展望	283
参考文献	288
第二章 涡喷加力燃烧室	289
2.2.1 基本特点和设计要求	289