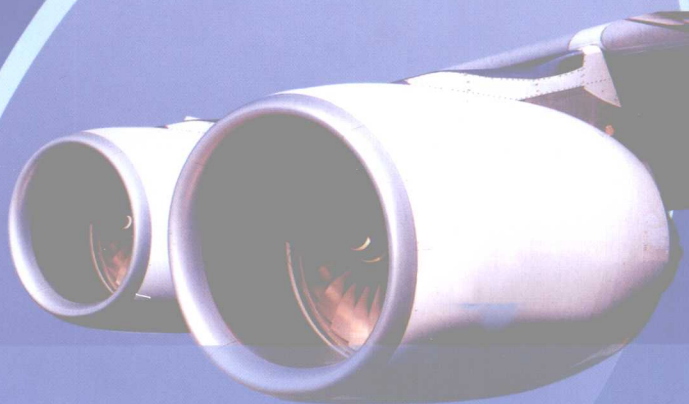




中国航空学会  
《航空科学技术丛书》

# 燃气轮机燃烧室



## Gas Turbine Combustor

林宇震 许金宏 刘高恩 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

中国航空学会  
《航空科学技术丛书》

# 燃气轮机燃烧室

Gas Turbine Combustor

林宇震 许全宏 刘高恩 著

北京航空航天大学  
航空发动机气动热力重点实验室

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

燃气轮机燃烧室 / 林宇震, 许全宏, 刘高恩著. —北京:  
国防工业出版社, 2008. 5  
(航空科学技术丛书)  
ISBN 978 - 7 - 118 - 05543 - 6

I. 燃... II. ①林...②许...③刘... III. 燃气轮机-燃烧  
室 IV. TK473. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 206075 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)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 850 × 1168 1/32 印张 9 $\frac{3}{4}$  字数 242 千字

2008 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 35.00 元

---

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

## 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 第五届评审委员会组成人员

- 主任委员 刘成海
- 副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬
- 秘 书 长 程洪彬
- 副 秘 书 长 彭华良 蔡 镭
- 委 员 于景元 王小谟 甘茂治 刘世参  
(按姓氏笔画排序)
- 李德毅 杨星豪 吴有生 何新贵
- 佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元
- 陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明
- 常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民
- 舒长胜
- 本书主审委员 傅惠民

# 《航空科学技术丛书》

## 编审委员会

主任 刘高倬

副主任 (按姓氏笔画排序)

马恒儒 王欣 丛日刚 刘国华 杨国庆 杨育中  
姜澄宇 胡海岩 魏钢

编委会顾问 (按姓氏笔画排序)

王中 刘大响 李明 宋文骢 张福泽 陈一坚  
陈懋章 贲德 钟群鹏 徐建中 曹春晓 管德

编委会委员 (按姓氏笔画排序)

王立新 甘晓华 伍贻兆 刘行伟 孙先仿 孙健国  
朱自强 严传俊 吴学仁 张靖周 张聚恩 李玉龙  
李志强 杨伟 沈士团 沙长安 苏恩泽 周德云  
孟光 武哲 胡子建 荣毅超 费斌军 夏品奇  
徐肖豪 桂幸民 高正 高正红 高德远 梁德旺  
崔德刚 康锐 梅文华 程洪彬

编委会编辑部

吴松 王晓舟 郝刚 唐应恒

编委会办公室

曲岩 赵霜红 邢剑飞

## 总 序

航空器的诞生和发展,不仅极大地改变了人类的生活方式,促进了社会经济繁荣,而且成为决定现代战争胜负的重要因素和国家综合实力的集中体现。建国以来,我国航空工业经历了维修、仿制、自主研发、试验、生产、装备使用等过程,取得了丰硕成果。尤其是近 20 年来,航空技术研究有不少突破性科技成果,涌现出一大批有突出贡献和学术成就斐然的技术专家、学科带头人,他们的科技成就和丰富经验,是我国航空事业的宝贵财富。以图书为载体,记录这些成就,传播这些经验,可以扩大航空领域科学技术的交流,促进航空科技事业的继承与发展,加快航空科技人才的培养和提高。

21 世纪是科技迅猛发展的时代,国民经济的发展必须依靠高科技;武器装备和军事技术的发展更要依靠高科技。航空科技图书出版工作是航空科技和军队航空武器建设事业的一个组成部分,优秀的航空科技图书既是航空科技工作的一种成果,也是科技水平的重要标志,是国家的重要财富。出版《航空科学技术丛书》,不仅是从总体上对我国航空科技发展的总结,而且是为今后航空科技加强自主创新、实现持续快速发展奠定了良好的技术基础。

这套丛书将按照飞机、发动机、材料工艺、综合航电、机载设备和武器等领域来分类和组成,在每一类中可进一步细分为设计、气动、强度、原理、燃烧、控制、实验与测试技术、工艺、材料、信息技术等学科。其中部分著作是由航空领域的院士、著名专家等牵头组织编撰或修订的学术专著;部分著作是目前处于科研生产一线的学科带头人结合科研课题和科研成果的有较高学术价值的专著;另有一些是偏重工程应用的、有推广价值的技术著作。具体分列



如下:

(1) 在航空科学技术领域中,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著作;学术思想新颖,内容具体、实用,对航空科技发展有较大推动作用的专著。

(2) 航空工程技术理论方面有突破的应用科学专著、应用技术著作。

(3) 密切结合军用、民用航空装备现代化需要的高新技术内容的专著。

(4) 有重大发展前景和重大开拓使用价值,密切结合军用、民用航空装备现代化需要的新思想、新概念、新工艺、新材料内容的专著。

(5) 填补目前我国航空科技领域空白并具有应用价值的前沿学科和边缘学科的科技图书。

这套丛书从组织策划到付诸实施,得到了业界的热烈响应,得到了各领导机关的重视与支持,得到中国人民解放军总装备部、空军装备部和国防科工委、中航一集团、中航二集团、北京航空航天大学、南京航空航天大学、西北工业大学、中国民航学院以及一些航空科研院所、国防工业出版社等单位有关领导和专家的大力支持与协助,得到国防工业出版社的鼎力资助。在此,特向上述单位的领导和专家们致以热忱的谢意。

相信这套丛书的出版将对我国航空事业的发展起到承前启后、继往开来的重要作用,将是一件具有里程碑意义的工作。期望这套丛书能够有益于高技术领域人才的培养,有益于国防科研事业的发展,有益于航空科学技术的进步。

中国航空学会

《航空科学技术丛书》编审委员会

2005年12月

# 《航空科学技术丛书》 已出版书目

- 001 航空燃气轮机燃油喷嘴技术  
甘晓华 著 2006 年
- 002 飞行器结构优化设计  
李为吉 宋笔锋 孙侠生 张勇 编著 2006 年
- 003 航空用引射混合器  
李立国 张靖周 著 2006 年
- 004 燃气轮机燃烧室  
林宇震 许全宏 刘高思 著 2008 年

## 序 言

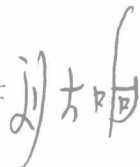
燃气轮机燃烧室是燃气轮机核心部件之一。目前,军用航空燃气轮机为了大幅度提高推重比及功重比,燃烧室朝着高温升方向发展。民用航空燃气轮机和工业燃气轮机燃烧方面,低污染燃烧是主要发展方向,这两方面的发展趋势给燃烧室的研究和发展带来了巨大的技术挑战。

本书作者长期从事燃气轮机燃烧室研究,特别是近十年来,在高温升燃烧室、低污染燃烧室及火焰筒先进冷却方式方面取得了可喜的研究成果。本书正是作者根据其多年的研究成果并系统总结了国内外燃烧室的最新发展写成的。

这本书重点分析和讨论了军用航空燃气轮机高温升燃烧室、民用航空燃气轮机和工业燃气轮机低污染燃烧室所涉及到的关键技术和难题,及与此相关的基础理论发展,并探讨了高温升燃烧室和低污染燃烧室关键技术的解决方案,颇具独到之处,是一本有价值的专著。特别是对低污染燃烧室污染排放生成原理及其影响因素、污染排放的控制、低污染燃烧室研究中的困难等重要问题的讨论,对我国大飞机动力低污染燃烧室研发是很有参考价值的。

我很高兴向从事燃气轮机燃烧及相关领域的科研和设计人员、高校师生推荐本书。

中国工程院院士



2007年11月

## 前 言

燃气轮机燃烧的特点是涉及面宽、相互交叉、互相影响,在基础和应用两方面都具有自身显著的特色。国际上在应用方面,军用航空燃气轮机为了大幅度提高推重比,其燃烧是朝着高温升燃烧方向发展;另外,为了在更宽广空域飞行,需要保证各种极端条件下的燃烧性能,如高高空等。民用航空燃气轮机和工业燃气轮机燃烧方面,出于环境保护,朝着低污染燃烧的方向发展。基础研究方面,多组分液体燃料的蒸发、强非线性湍流流动的两相燃烧基本规律及化学动力学、污染物生成规律、高热流密度的火焰筒传热等,这些基础研究成果为应用打下了深厚的基础。在设计方面,国际上大多数研究机构及各大燃气轮机公司都具有自己的工程数据、设计体系(以PW和GE为代表)以及重要的经验关系准则。

经过50年的发展,国内燃气轮机燃烧已有相当进步,但是,至今燃烧室自主设计和研发水平还相对落后,设计体系尚未完整建立。落后的主要原因之一是对燃气轮机燃烧的基础理论和技术发展趋势关键问题认识不够。并且,国内燃气轮机燃烧学科的书籍已陈旧,特别是不能反映现在(21世纪)燃气轮机燃烧在基础、应用方面的发展,已很不适应国防工业发展的要求,在燃烧室的设计方面也很缺乏理论基础方面的指导。国外的书籍基础性较强,但对关键技术及前沿问题涉及较少。

本书指明了燃气轮机燃烧关键技术前沿问题、解决趋势和相关的基础理论研究,并且总结了工程实用的经验关系准则,具有先进性、基础性和实用性。

本书主要包括航空燃气涡轮发动机及民用工业燃气轮机的燃烧过程以及其相应燃烧室的设计。书中内容重点包括两个方面:

一是军用高温升燃烧室的设计;二是民用低污染燃烧室的设计。全书核心内容包括了现代高性能燃烧室设计的核心技术关键问题,从而导引了重要的研究方向及相关前沿问题,其中部分内容取材于作者多年来在燃气轮机燃烧方面的科研成果及学术论文。

燃烧学科的特点是复杂而涉及面广,它包含湍流流动、化学反应动力学、两相流雾化蒸发混合等物理过程、传热/辐射。特别是湍流与化学反应以及与喷雾之间的交互作用复杂。因此燃烧学科,特别是燃气轮机燃烧室的设计和非常需要既能理论结合实际,又能解决工程设计需要的书籍以满足工程技术人员以及高校研究生的需求。

感谢北京航空航天大学航空发动机气动热力重点实验室对本研究领域的支持。感谢原北京航空航天大学金如山教授在本书成稿过程中的大力协助。感谢中国燃气涡轮研究院,中国航空动力机械研究所,中国航空工业沈阳发动机设计研究所燃烧专业提供的研究课题。感谢本课题组的硕士研究生和博士研究生的研究工作,他们的工作丰富了本书的内容。感谢国防工业出版社,为本书的面世所进行的大量辛勤劳动。

囿于作者的学识和水平,本书缺点和错误在所难免,希望广大读者指正。

# 目 录

第1章 绪论	1
1.1 燃烧室的功用和要求	1
1.2 燃气轮机燃烧室的分类	3
1.2.1 按燃烧室用途分类	3
1.2.2 按其他方式分类	4
1.3 燃烧室基本组成部分	6
1.4 燃气轮机燃烧室的基本参数	9
1.5 燃烧室工况	16
1.6 燃气轮机燃烧室的发展	16
参考文献	18
第2章 燃烧室空气流动及空气动力学	20
2.1 空气流量分配	21
2.1.1 燃烧空气流量分配	22
2.1.2 冷却气流量分配	26
2.1.3 掺混空气量分配	27
2.1.4 流量分配的调整	28
2.2 有效流动面积	29
2.3 燃烧室进口流场与扩压流动	31
2.4 旋涡流动及旋流器	40
2.4.1 旋流器形式	40
2.4.2 旋流器几何参数	42
2.4.3 旋流数	46
2.4.4 旋流器设计与下游空气动力学	51
2.4.5 强旋流下的 PVC 与振荡燃烧	58

2.4.6	燃烧对旋流流动的影响	58
2.5	流量系数	60
2.5.1	径向旋流器流量系数	61
2.5.2	轴向叶片式旋流器流量系数	64
2.5.3	先进火焰筒壁面冷却方式流量系数	65
2.6	主燃区空气动力学	68
	参考文献	70
<b>第3章</b>	<b>燃油喷射和雾化</b>	<b>74</b>
3.1	复合式燃油喷射	74
3.2	横向流动中的燃油喷射与混合	79
3.2.1	燃油直接喷射入横向流动气流中的特性	80
3.2.2	液雾喷射入横向流动气流中的特性	84
3.3	超临界环境中燃油蒸发	88
3.3.1	超临界态碳氢燃料的基本特性	90
3.3.2	燃油液滴在超临界环境下汽化和燃烧的物理过程	93
3.3.3	燃油液滴在静止超临界环境中的汽化	95
3.3.4	燃油液滴在强迫对流超临界环境中的汽化	98
3.3.5	燃油液滴在超临界环境中的燃烧	100
	参考文献	104
<b>第4章</b>	<b>燃烧室点火</b>	<b>107</b>
4.1	燃烧室点火过程	108
4.1.1	高能电嘴燃烧室点火过程	108
4.1.2	火炬点火燃烧室点火过程	111
4.2	燃烧室点火性能	112
4.2.1	地面起动点火性能	112
4.2.2	空中再起动机件	114
4.3	液雾点火的基础理论和实验结果	114
4.3.1	点火模型	115
4.3.2	点火实验结果	117

4.4	燃烧室点火设计的基本考虑	122
4.5	点火经验关系	126
4.6	其他在研点火方式	128
	参考文献	131
<b>第5章</b>	<b>燃气轮机燃烧室火焰稳定</b>	<b>133</b>
5.1	燃烧室稳定工作范围	133
5.2	慢车贫油熄火	135
5.2.1	发动机慢车贫油熄火的重要性	135
5.2.2	贫油熄火物理本质	137
5.2.3	贫油熄火基础理论研究	138
5.2.4	贫油熄火半经验模型	139
5.2.5	贫油熄火研究新进展	144
5.3	返场雷雨熄火	149
	参考文献	154
<b>第6章</b>	<b>燃烧室火焰筒冷却及室壁结构</b>	<b>156</b>
6.1	火焰筒传热过程分析	156
6.2	先进冷却方式基本原理分析	159
6.3	先进冷却方式及室壁主要特点	162
6.3.1	发汗冷却	162
6.3.2	多斜孔冷却方式	163
6.3.3	冲击/多斜孔复合冷却方式	164
6.3.4	层板	165
6.3.5	冲击/气膜冷却	167
6.3.6	气膜/发散冷却方式	168
6.3.7	逆向平行流翅壁	168
6.3.8	瓦块结构	169
6.4	先进冷却方式的讨论	170
6.5	多斜孔冷却方式	171
6.5.1	流量系数	172
6.5.2	绝热温比	172



6.5.3	多斜孔内对流换热系数	174
6.5.4	多斜孔壁换热系数	176
6.6	冲击/多斜孔复合冷却方式	177
6.6.1	冲击/多斜孔复合冷却方式流量系数	178
6.6.2	冲击/多斜孔复合冷却中的冲击换热	178
6.6.3	冲击/多斜孔复合冷却方式绝热温比和热侧换热系数	180
6.6.4	复合冷却方式多斜孔内对流换热系数	181
6.6.5	冲击/多斜孔复合冷却方式内部换热优化	181
	参考文献	183
<b>第7章 燃烧室排气污染</b>		<b>189</b>
7.1	燃气轮机排气污染物	189
7.2	工业及船用燃气轮机燃烧排放要求	191
7.3	民用航空燃气轮机燃烧排放标准	193
7.4	某些国际机场的附加规定	199
7.5	污染物生成机理	201
7.5.1	氮氧化物生成机理及影响因素	201
7.5.2	冒烟生成机理及影响因素	211
7.5.3	一氧化碳生成机理及影响因素	218
7.5.4	未燃碳氢的形成机理及影响因素	222
7.6	污染排放控制及低污染燃烧室	223
7.6.1	燃气轮机燃烧室 $\text{NO}_x$ 排放控制	225
7.6.2	CO 和 UHC 控制的措施	234
7.6.3	工业燃气轮机排放控制	236
7.7	民用航空及工业低污染燃烧室	238
7.7.1	民用低污染燃烧室	238
7.7.2	工业燃气轮机低污染燃烧室	242
7.8	低污染燃烧室研发上的困难	246
7.8.1	自燃	246
7.8.2	回火	247