

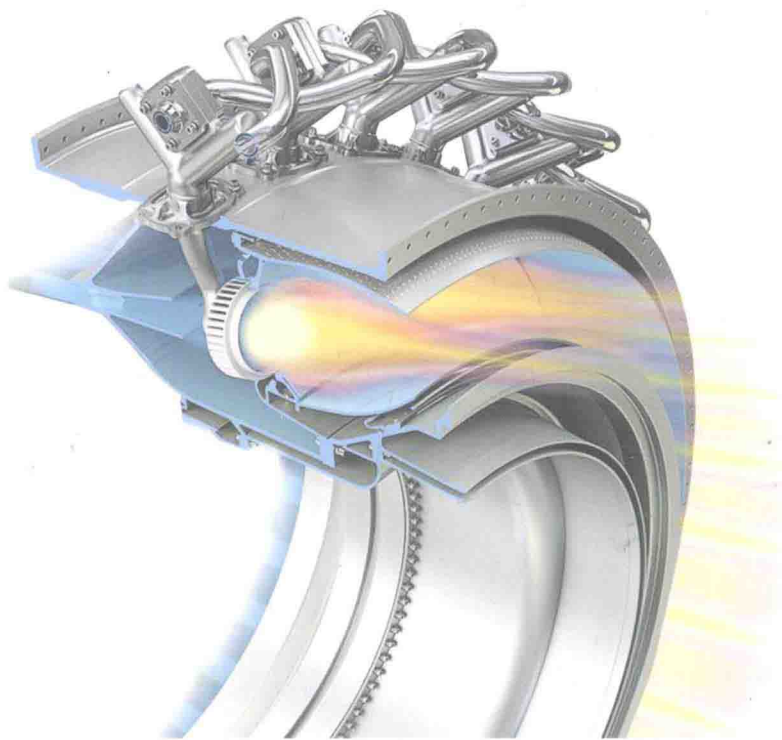
“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写



先进燃气轮机燃烧室

Advanced Gas Turbine Combustor

金如山 索建秦 著



航空工业出版社

先进燃气轮机燃烧室

金如山 索建秦 著

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书是根据作者 50 多年在燃气轮机燃烧室的科研、设计、研发和试验方面的成果和经验而撰写的一部专著,详细、全面并理论联系实际地阐述了燃烧室设计和研发各方面的技术问题,包括燃烧室气体动力学、燃油喷射雾化、燃油蒸发、液雾穿透、油气混合、燃烧效率、点火、火焰稳定、总压损失、出口温度分布、冷却、污染排放、噪声、自燃与回火,以及燃油沉积等方面的内容。本书完全针对以低污染燃烧室和高温升燃烧室为代表的新一代先进燃烧室设计研发的需要而撰写,是我国自行设计研发先进燃烧室的基础。

本书内容丰富,立足 21 世纪先进燃烧室技术,大部分是作者自己科研、设计和研发的实践总结,这是本书与其他类似出版物最大的区别。本书适合于从事燃气涡轮发动机燃烧室设计研发人员和研究生使用,也可作为相关专业科技人员和高等院校师生参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

先进燃气轮机燃烧室 / 金如山, 索建秦著. -- 北京:
航空工业出版社, 2016. 8
航空发动机出版工程
ISBN 978 - 7 - 5165 - 1086 - 5

I. ①先… II. ①金… ②索… III. ①航空发动机—
燃气轮机—燃烧室 IV. ①V235. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 208291 号

先进燃气轮机燃烧室

Xianjin Ranqilunji Ranshaoshi

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936597 010 - 84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2016 年 8 月第 1 版

2016 年 8 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 37.75

字数: 852 千字

印数: 1—1000

定价: 132.00 元

《航空发动机出版工程》编委会

主任：林左鸣

常务副主任：谭瑞松

副主任：张新国 李方勇

委员：陈元先 杨圣军 魏金钟 丁俊 庞为
王英杰 王之林 张健

《航空发动机出版工程》专家委员会

主任：刘大响

副主任：郭恩明

委员：陈浚 唐智明 周晓青 彭友梅 张皖南
张恩和 严成忠 杨士杰 李概奇 怀寿章
殷云浩 吴学仁 江和甫 江义军 马光辉
胡晓煜

编委会办公室

主任：魏金钟

副主任：陈刚 焦鹤 刘鑫

成员：王晓文 向明 潘陆原 王伟 胡晓煜
彭友梅 姜向禹 石英 龙明灵 刘宁
王少雄

总 序

自1903年12月17日人类首次实现有动力飞行以来，航空事业获得了迅猛发展，极大地促进了人类社会文明的进步，对世界各国的政治、经济和军事都产生了深远的影响。航空发动机作为飞机的“心脏”，不仅是飞机飞行的动力，也是促进航空事业发展的重要推动力，人类航空史上的每一次重要变革都与航空发动机的技术进步密不可分。飞机进入喷气时代始于涡轮喷气发动机的发明，飞机突破声障、实现马赫数2和马赫数3的飞行主要是由于加力式大推力发动机的出现；飞机实现垂直起降则仰仗于可旋转喷管发动机的研制成功；巨型宽体客机的问世更少不了大涵道比、大推力的涡扇发动机；第四代战斗机的超声速巡航和超机动性主要是依靠发动机的高推重比和矢量喷管。

经过百余年的发展，航空发动机已经发展为可靠性极高的成熟产品，正在使用的航空发动机包括涡轮喷气/涡轮风扇发动机、涡轮轴/涡轮螺旋桨发动机、冲压发动机和活塞式发动机等多种类型，不仅作为各种用途的军民用飞机、无人机和巡航导弹动力，而且利用航空发动机派生发展的燃气轮机还广泛用于地面发电、船用动力、移动电站、天然气和石油管线泵站等领域。航空发动机的发展也极大地带动了机械制造、电子、控制、材料和石油化工等相关产业的发展，带来了巨大的收益。目前，全球飞机发动机及其零部件制造业的收入已占航空制造业总收入的40%左右，年收入超过1000亿美元，到2015年将达到1220亿美元，人均年收入35万美元，仅美国从事航空发动机及零件制造的公司就有1000多家，年收入超过600亿美元。

进入21世纪，航空发动机正在进一步加速发展，将为人类航空领域带来新的更大变革。目前，传统的航空发动机正在向齿轮传动发动机、变循环发动机、多电发动机、间冷回热发动机和开式转子发动机发展，非传统的脉冲爆震发动机、超燃冲压发动机、涡轮基组合发动机，以及太阳能动力和燃料电池动力等也在不断成熟，这些发动机的发展将使未来的航空器更快、更高、更远、更经济、更可靠，并能够满足更加严格的环保要求，并将使高超声速航空器、跨大气层飞行器和可重复使用的天地往返运输成为现实。

但是，航空发动机的发展绝非易事，作为人类科学技术发展的最高端产

品之一，航空发动机被誉为“工业之花”“皇冠上的明珠”，具有技术难度大、风险高、耗资多、周期长等特点，要求在相关的工程技术领域具备雄厚的基础和丰富的实践经验积累，是一个国家工业基础、综合国力和科技水平的集中体现。美国将航空发动机技术描绘为：“它是一个技术精深得使新手难以进入的领域，它需要国家充分保护并稳定利用该领域的成果，长期的专门技能和数据的积累，以及国家大量的投资。”法国将航空发动机工业描绘为：“航空发动机工业是一个与众不同的工业，是当代尖端技术的标志。进入这个竞技场的顶级‘玩家’数量非常有限，其门槛设置得比其他航空专业更高，这意味着竞争者进入的难度更大。”目前，能够独立研制航空发动机的只有美国、英国、俄罗斯、法国和中国等少数国家。

我国航空发动机工业起步并不晚，在中华民国时期就曾试图建立航空发动机工业；中华人民共和国成立后，我国于1951年开始建立航空发动机修理厂，经过60多年几代航空人的艰苦努力，如今我国已建成比较完整的航空发动机科研、生产体系，研制生产出了6万多台航空发动机，已进入世界少数能够独立研制航空发动机的国家行列。但是，我国航空发动机在技术水平和产品研制方面与先进国家还存在很大差距，学习国外航空发动机的先进发展经验，对我国航空发动机的发展势必起到良好的借鉴作用。

中国航空工业集团公司组织出版《航空发动机出版工程》的目的是为广大读者提供一个全面了解世界航空发动机发展历史、现状和未来的平台，使读者对航空发动机的基本概念和工作原理有更科学、系统的认识，对国外航空发动机的产品发展经验、组织管理方法和技术发展路线有更深刻的理解，对航空发动机发展对国防建设和国民经济发展的的重要性有更充分的重视，以唤起广大读者对航空发动机事业的关注和热爱，并积极投身到这项光荣而伟大的事业中来。期望这套丛书能够为中国航空发动机的人才培养，航空发动机的科研、生产和使用提供参考和借鉴，为中国航空发动机事业的更大发展做出贡献！

林右鸣

中国航空工业集团公司董事长

2013年3月

序 言

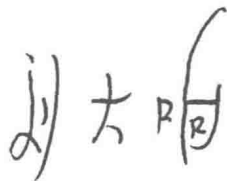
航空发动机是飞机的“心脏”，而发动机的燃烧室可以说是“心脏”的“心脏”。燃烧室的作用是将化学能（燃油加空气）转化为燃烧产物和剩余的未燃空气的热能（温度升高）。燃烧室接受压气机流出的高压空气，通过燃油燃烧产生热能，为涡轮提供均匀混合的热气。这样涡轮才能输出驱动压气机工作所需的功率，这就决定了燃烧室是发动机的“心脏”，也就是“心脏”的“心脏”。

燃烧室工况复杂，其研究内容涉及气体动力学、燃烧学、化学动力学、热力学、传热学、排放污染控制、声学等多个学科和领域；发动机对燃烧室的基本要求是燃烧效率高、压力损失小、重量轻、寿命长、污染排放低，另外燃烧室还要满足贫油熄火边界、高空点火、出口温度分布、结构、强度、寿命、维护等方面的要求。因此，在发动机的研制过程中，燃烧室的研制是发动机研发过程当中一个非常关键的工作。

作者多年来一直从事燃烧室研究、教学、试验和技术研发等方面的工作，在燃烧室技术（低污染燃烧技术、高温升燃烧技术、双燃料燃烧技术等）方面取得了公认的成就。

《先进燃气轮机燃烧室》是作者的最新著作，本书内容非常丰富，不仅涉及到燃烧室的设计要求、燃烧室内气体流动、燃烧室气体动力学、喷嘴、燃油雾化、燃油蒸发、油气混合、燃烧室冷却、低污染燃烧技术、振荡燃烧、燃烧效率、火焰稳定等基础知识和设计研发过程中的基本知识和问题，而且全面描述了包括低污染燃烧室、高温升燃烧室、工业燃气轮机、燃烧室气动热力设计和试验等燃烧室研发过程中涉及到的每一方面和环节。本书取材非常新颖，在许多方面是作者本人的研究成果。

本书的出版，对于目前我国飞机动力装置的研发工作将会起到有力的推进作用。



2016年1月8日

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 燃气轮机燃烧室的基本组成部分	(1)
1.2 发动机循环参数及工况	(2)
1.3 燃烧室的工作参数	(3)
1.4 性能参数及工作评定参数	(4)
1.5 航空燃气轮机主燃烧室的发展	(6)
1.6 燃烧室气动热力设计	(7)
第 2 章 燃烧室空气流动	(8)
2.1 燃烧室总的空气流路	(8)
2.2 燃烧室空气分配	(9)
2.3 火焰筒有效流通面积 AC_d	(10)
2.4 火焰筒进气孔 C_d	(14)
2.5 带旋流器的预混模的 AC_d	(16)
第 3 章 燃烧室空气动力学	(21)
3.1 扩压流动与扩压器	(21)
3.2 流线型扩压器	(21)
3.3 短突扩扩压器	(23)
3.4 前置扩压器设计	(27)
3.5 先进燃气轮机燃烧室环形扩压器设计和头部空气动力学的发展	(30)
3.6 实用燃烧室旋流空气动力学及旋流器	(34)
3.7 旋流空气动力学对燃烧的影响	(47)
3.8 燃烧区旋流的相互作用	(54)
3.9 掺混射流的空气动力学	(57)
第 4 章 燃油喷射与雾化	(58)
4.1 喷嘴类型	(58)
4.2 喷嘴的流量方程、流量系数和流量数	(59)
4.3 液雾的液滴尺寸分布	(61)
4.4 单油路离心式喷嘴	(69)
4.5 空气助雾化简单离心式喷嘴	(74)

4.6	关于压力雾化、空气助雾化、空气雾化的概念讨论	(82)
4.7	高液体压力降的成膜式空气雾化喷嘴	(86)
4.8	直喷跨流空气雾化喷嘴	(90)
4.9	同轴顺流直喷空气雾化	(99)
4.10	内混空气雾化喷嘴	(112)
4.11	外混合二次雾化空气助雾化离心式喷嘴	(119)
4.12	本章总结	(119)
第 5 章	燃油蒸发	(120)
5.1	引言	(120)
5.2	单个静止液滴蒸发的试验测量	(121)
5.3	单组分液滴静止蒸发的物理基础	(122)
5.4	单组分静止液滴稳态蒸发的计算	(125)
5.5	单组分单个液滴非稳态 (加热段) 蒸发计算	(128)
5.6	强迫对流蒸发	(130)
5.7	等效蒸发常数	(131)
5.8	液滴蒸发与液雾特性的相互关系	(131)
5.9	多组分燃油液滴蒸发概论	(133)
5.10	将多组分燃油当作单组分燃油来处理的液滴蒸发计算	(134)
5.11	多组分燃油饱和蒸气压方程及蒸气分子量方程	(139)
5.12	燃油液雾蒸发问题的复杂性	(143)
5.13	液相计算中需要考虑的几个方面	(146)
5.14	单组分简化处理的多组分蒸发计算与多组分燃油蒸发计算的比较	(153)
5.15	用 $\rho_g D_{gAB}$ 和 $(\lambda/c_p)_g$ 的比较	(164)
5.16	实用蒸发模型	(166)
第 6 章	燃油液雾穿透分布及油气混合	(167)
6.1	概论	(167)
6.2	液滴运动阻力系数	(168)
6.3	液雾中的液滴运动阻力系数	(174)
6.4	离心式压力雾化喷嘴液雾穿透	(178)
6.5	在横向直匀流中简单直射喷雾的穿透	(182)
6.6	在直匀横向气流中简单直射喷嘴下游固体壁面上燃油捕获率的分析 及试验验证	(186)
6.7	低污染燃烧研发中控制燃油碰壁的措施	(188)
6.8	在旋流空气中直射喷嘴的穿透碰壁	(192)
6.9	同轴顺流直喷空气雾化在横向气流中的穿透	(193)
6.10	燃油散布及油气混合的重要性	(197)

6.11	大范围内分布的不均匀性及小范围内分布的均匀性	(200)
6.12	离心压力雾化喷嘴与副空气模的直混	(202)
6.13	单个简单直射喷嘴 90°喷射在亚声速、室温和横向空气流中下游的燃油散布	(203)
6.14	在均匀加热横向空气流中单个直射喷嘴下游液相及燃油蒸气的浓度分布	(209)
6.15	在不均匀的室温横向气流中单个直射喷嘴下游液体燃油油气比分布	(211)
6.16	旋流横向气流中直喷油雾的散布	(213)
6.17	旋流对油气散布与混合的影响	(215)
6.18	同轴顺流直喷空气雾化在旋流横向气流中的油气分布	(217)
6.19	结束语	(218)
第7章	先进燃烧室的燃烧组织	(220)
7.1	燃烧组织的定义及其重要性	(220)
7.2	先进燃烧组织与常规燃烧组织的不同	(220)
7.3	常规燃烧区燃烧组织的基本特点	(221)
7.4	常规的燃烧组织不适合于先进燃烧室的原因	(222)
7.5	贫燃低污染燃烧区组织的一些特点	(223)
7.6	先进燃烧组织的空气供应和燃油供应	(224)
7.7	先进低污染燃烧组织和燃烧室研发的关系	(225)
第8章	燃烧效率	(227)
8.1	定义	(227)
8.2	什么情况下有燃烧效率的问题	(230)
8.3	对 θ , η 的讨论	(230)
8.4	一些典型的慢车状态燃烧效率试验数据	(232)
8.5	慢车状态下影响燃烧效率的诸因素	(233)
8.6	进近工况下燃烧效率试验数据	(234)
8.7	巡航状态及过渡工况下的燃烧效率	(238)
8.8	其他情况下的燃烧效率问题	(240)
8.9	单模燃烧室试验、扇形段燃烧室试验、全环形燃烧室试验燃烧效率的比较	(242)
8.10	影响燃烧效率各因素的综合讨论	(242)
第9章	地面点火与高空再点火	(245)
9.1	点火与发动机起动过程	(245)
9.2	点火起动过程可能出现的问题	(247)
9.3	点火起动中的燃油供应	(250)

9.4	影响地面点火的主要因素	(252)
9.5	改善地面点火的措施	(257)
9.6	高空点火起动	(259)
9.7	影响高空点火的各因素	(262)
9.8	改善高空点火的可能措施	(268)
9.9	点火试验	(271)
第 10 章	火焰稳定与熄火	(272)
10.1	基本概念	(272)
10.2	在燃气轮机燃烧室中可能有熄火危险的情况	(275)
10.3	慢车贫油熄火	(275)
10.4	进近状态雷雨熄火	(286)
10.5	主模熄火	(289)
10.6	改进主模熄火的措施	(292)
10.7	预混主模熄火的主动控制	(295)
10.8	军用发动机燃烧室的熄火	(296)
10.9	先进燃烧室火焰稳定的气动基础	(296)
第 11 章	燃烧室出口分布	(299)
11.1	主燃烧室与冲压燃烧室、加力燃烧室的不同点	(299)
11.2	燃烧室出口温度分布质量要求与定义	(299)
11.3	高油气比燃烧室出口分布的特殊要求	(301)
11.4	燃烧室出口热点指标	(302)
11.5	影响燃烧室出口径向温度分布的因素	(304)
11.6	环形燃烧室出口径向温度分布的半经验半理论的预估方法	(306)
11.7	燃烧室出口径向温度分布的调试	(306)
11.8	涡轮级间燃烧室 (ITB) 出口温度分布的特殊问题	(309)
第 12 章	燃烧室传热与冷却	(311)
12.1	燃烧室冷却的要求	(311)
12.2	冷却方式	(313)
12.3	气膜冷却	(313)
12.4	冲击冷却	(317)
12.5	冲击与发散小孔冷却组合的研究	(322)
12.6	发散小孔冷却的研究	(324)
12.7	作者研发的冷却方式	(331)
12.8	辅助性的加强冷却措施	(339)
12.9	燃烧室传热过程	(343)

12.10	燃烧室冷却计算举例	(372)
12.11	结束语	(383)
第 13 章	燃烧室总压损失	(384)
13.1	总压损失系数	(384)
13.2	无用总压损失与有用总压损失	(384)
13.3	火焰筒总压损失系数与火焰筒 AC_d 的确定	(385)
13.4	影响燃烧室总压损失的各因素	(386)
13.5	火焰筒加热总压损失	(387)
13.6	火焰筒冷态总压损失的组成	(388)
13.7	讨论	(389)
第 14 章	燃烧室噪声排放	(392)
14.1	燃烧室两种噪声排放	(392)
14.2	直接噪声与间接噪声	(393)
14.3	不同结构形式的影响	(393)
14.4	燃烧噪声的特性	(394)
14.5	燃烧噪声流	(398)
14.6	燃气轮机燃烧噪声的预估以及与试验的对比	(398)
14.7	燃烧噪声研究近期的进展	(405)
14.8	本章小结	(406)
第 15 章	燃烧室排气冒烟及微粒子排放	(407)
15.1	冒烟及微粒子排放	(407)
15.2	新的冒烟问题	(408)
15.3	排气冒烟一些基本概念	(410)
15.4	烟粒子生成机理	(414)
15.5	烟粒子的氧化	(418)
15.6	烟粒子与火焰辐射的关系	(421)
15.7	发动机排气冒烟的可见性	(423)
15.8	排气冒烟测量与燃烧室研发	(425)
15.9	燃料对燃烧室冒烟的影响	(431)
15.10	燃烧室工作参数对冒烟的影响	(435)
15.11	燃烧室设计对冒烟的影响	(435)
15.12	先进燃烧室减少冒烟的设计措施: 高油气比燃烧室	(439)
15.13	RQL 低污染燃烧室中的冒烟问题	(440)
15.14	燃气轮机燃烧室冒烟的 CFD 计算	(441)
15.15	微粒子排放概述	(442)

15.16	定义与术语	(443)
15.17	考虑航空发动机的微粒子排放的原因	(443)
15.18	对环境中微粒子浓度的政府规定要求	(445)
15.19	航空发动机非挥发性微粒子排放测量文件	(446)
15.20	带粒子的样气取样管	(448)
15.21	挥发性微粒子与发动机设计与工况的关系	(448)
第16章	预混燃烧中的回火	(451)
16.1	引言	(451)
16.2	回火常与自燃同时出现	(451)
16.3	回火的几种机理概述	(453)
16.4	设计措施	(460)
第17章	预混燃烧中的自燃	(463)
17.1	引言	(463)
17.2	重要概念	(464)
17.3	液体航空燃油自燃延迟时间测定和关系式	(465)
17.4	DF-2 液体燃油自燃延迟时间的试验数据	(469)
17.5	甲烷(或天然气)的自燃延迟时间	(472)
17.6	航空液体燃油自燃延迟时间的分析	(474)
17.7	为防止 LPP 预混模自燃采取的设计措施	(477)
17.8	JP-10 自燃延迟时间	(478)
第18章	低污染燃烧中的振荡燃烧	(479)
18.1	引言	(479)
18.2	振荡燃烧在常规燃烧室中不严重而在低污染燃烧室中严重的原因	(480)
18.3	问题的严重性	(480)
18.4	克服振荡燃烧问题的难点	(481)
18.5	瑞利(Rayleigh)准则, 振荡燃烧机理	(482)
18.6	控制措施概述	(489)
18.7	由燃烧区组织来控制振荡燃烧	(491)
18.8	减振阻尼措施	(491)
18.9	低污染振荡燃烧控制实例	(494)
第19章	燃油沉积	(504)
19.1	自氧化与热解	(504)
19.2	燃油自氧化机理生成燃油沉积的基本过程	(505)
19.3	鉴别沉积的方法	(507)

19.4	燃油沉积试验	(508)
19.5	燃油沉积试验结果	(511)
19.6	燃油沉积的机理 (自氧化机理)	(517)
19.7	燃油沉积的计算分析	(520)
19.8	纯化学动力学的燃油沉积模型分析	(520)
19.9	工程性的燃油沉积计算分析	(522)
19.10	工程性的燃油沉积速率计算方程	(527)
19.11	工程性燃油沉积模型计算与试验数据的比较	(527)
19.12	工程上控制燃油沉积的措施 (自氧化机理)	(535)
19.13	高温热解下燃油结焦	(536)
第 20 章	液体燃油	(541)
20.1	引言	(541)
20.2	航空燃油的发展	(541)
20.3	燃油规范	(544)
20.4	航空煤油附加剂	(549)
20.5	JP-8+100	(551)
20.6	试验方法	(553)
20.7	航空煤油组成	(554)
20.8	航空煤油的物理性质	(557)
20.9	航空煤油的燃烧性质	(567)
20.10	航空煤油使用中的问题	(570)
20.11	替换喷气燃油的发展	(572)
参考文献	(576)

第1章 绪 论

1.1 燃气轮机燃烧室的基本组成部分

常规的航空燃气轮机燃烧室简图如图 1-1 所示。

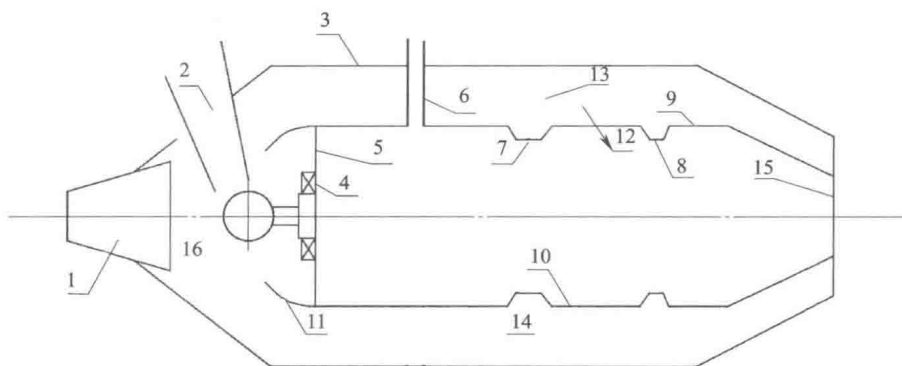


图 1-1 常规燃气轮机燃烧室简图

1—前置扩压器；2—燃油喷嘴；3—燃烧室机匣；4—头部旋流器；5—火焰筒头部；6—点火器；
7—主燃孔；8—掺混孔；9—外火焰筒；10—内火焰筒；11—头部导流板；12—冷却孔；
13—外环形流路；14—内环形流路；15—燃烧室出口；16—突扩区

图 1-1 仅为燃烧室示意图，通常情况下燃烧室进口的平均直径要比燃烧室出口的平均直径小。

随着先进燃烧室的发展，一个低污染燃烧室或一个高油气比燃烧室，可以与图 1-1 有相当大的不同，不同之处为：

(1) 前置扩压器改变，可采用分叉形多流路扩压器和与压气机出口导向叶片 (OGV) 相组合的扩压器，或采用扩压-空气分配器方案；

(2) 可不再需要头部导流板；

(3) 不再有主燃孔；

(4) 对低污染燃烧室可没有掺混孔；

(5) 燃油喷嘴可以不再是成膜式空气雾化喷嘴，副油喷嘴采用压力雾化离心式喷嘴，主油喷嘴采用直射跨流空气雾化或顺流空气雾化直射喷嘴。

但不论如何变化，燃烧室不能缺少以下部分：

(1) 扩压器——进口空气扩压及分配空气流动的装置；

(2) 燃油喷嘴；

(3) 火焰筒——提供燃烧所需的容积；

- (4) 点火器；
- (5) 冷却——为火焰筒提供冷却空气；
- (6) 环形流路——为火焰筒提供空气流路；
- (7) 燃烧室头部——使火焰筒形成封闭空间；
- (8) 燃烧室出口到涡轮的通路。

1.2 发动机循环参数及工况

发动机循环参数及工况是燃烧室设计研发最重要的依据，通常由总体性能部门给定。发动机循环主要规定了最大起飞推力、压比、涡轮进口温度及其对应的工况。

燃烧室按照发动机的工况设计、依照发动机工况试验，并依照发动机的工况工作。发动机循环工况给定了各工况下燃烧室的重要参数，如燃烧室及火焰筒进口总压、进口总温，燃烧室出口总压、空气流量和燃油流量等。

对民用航空（简称民航）发动机燃烧室，国际民航组织（ICAO）规定了以下4个工况：

- (1) 慢车状态——以最大起飞推力的7%定义；
- (2) 30%状态——以最大起飞推力的30%定义；
- (3) 85%状态——以最大起飞推力的85%定义；
- (4) 最大状态——以最大起飞推力的100%定义。

30%状态有时也称为进近工况（approaching），85%状态有时也称为爬升工况（climb）。

民航发动机必须有巡航状态，可以在不同高度和不同马赫数（ Ma ）时巡航，最重要的是最大巡航状态。例如，规定在高度37000ft^①和 Ma 0.8的最大巡航状态与高度42000ft和 Ma 0.85的最大巡航状态就有所不同。

此外，还有高温天气最大起飞推力状态（环境温度120°F^②）等。为满足过渡态设计需要，循环给定每隔2%或3%为一工况。

对军用航空发动机燃烧室，有100%工况、地面慢车工况、空中慢车工况、空中格斗工况、低空突防工况（low altitude penetration），还有不同高度和不同 Ma 的巡航工况，但没有民航发动机常用的最大巡航状态。

工业燃气轮机燃烧室工况与民用、军用航空发动机都不同，通常以最大功率的百分数描述。

① 1ft≈0.305m。

② 1°F=32+9/5℃。

1.3 燃烧室的工作参数

燃烧室的工作参数只代表描述其工作状况的参数,并不代表其工作的好坏,更不代表其性能的好坏。

燃烧室的工作参数包括以下参数(由循环参数规定)。

(1) 压力

p_{13} ——扩压器进口平均总压。确定了 p_{13} , 就确定了发动机的压比。

$p_{13.1}$ ——火焰筒进口总压, 即 p_{13} 减去扩压器总压损失。

p_{14} ——燃烧室出口平均总压, 即 $p_{13.1}$ 减去火焰筒的总压损失。

$\frac{p_{13} - p_{14}}{p_{13}}$ ——燃烧室总压损失系数。

$\frac{p_{13.1} - p_{14}}{p_{13.1}}$ ——火焰筒总压损失系数。

以上参数在燃烧室试验时都要进行测量。

(2) 空气流量

q_{ma3} ——扩压器进口空气流量。

$q_{ma3.1}$ ——火焰筒进口空气流量, 一般与 q_{ma3} 不相等。

以上参数在燃烧室试验时都要进行测量。

(3) 温度

T_{13} ——燃烧室进口总温。

$T_{13.1}$ ——火焰筒进口总温, 通常 $T_{13.1} = T_{13}$ 。

T_{14} ——燃烧室出口总温。

$T_{14} - T_{13}$ ——燃烧室温升。

以上参数除 T_{14} 外, 在燃烧室试验时都要进行测量。

(4) 燃油流量 q_{mf}

Δp ——喷嘴压力降。

$FAR = q_{mf}/q_{ma3}$ ——燃烧室总油气比 (fuel - air ratio, FAR)。

$FAR_L = q_{mf}/q_{ma3.1}$ ——火焰筒油气比。

以上参数在燃烧室试验时都要进行测量。

(5) 火焰筒有效流通面积 AC_d

有效流通面积 AC_d 是几何面积 A 与空气流量系数 C_d 两项的乘积。 AC_d 是一个非常有用的参数, 当把整个火焰筒当成一个空气流动的器件, 其定义为

$$q_{ma3.1} = AC_d \sqrt{2\Delta p_L \rho_a} \quad (1-1)$$

式中: Δp_L ——火焰筒的压力降, 为火焰筒进口总压 $p_{13.1}$ 减去火焰筒出口静压;

ρ_a ——空气密度。

由于发动机循环中并未规定火焰筒出口静压, 同时火焰筒出口总、静压之差相对于