

航空
燃气轮机喷气发动机
燃烧室

第一册

国防工业出版社

航空燃气轮喷气发动机 燃 烧 室

第 一 册

黄兆祥 编著



6



国防工业出版社

356148

内 容 简 介

本书是阐述航空燃气轮喷气发动机燃烧室原理的一本教学参考书，全书共分四册，将陆续出版。

第一册介绍燃烧学及燃烧室的基本原理；第二册介绍主燃烧室和加力后燃室的设计方法，对于喷嘴和气膜冷却也作了专章叙述；第三册介绍燃烧室的试验方法；第四册介绍燃烧室测量，包括气动测量、燃气分析、火花能量测量、燃油雾化测量和烟度测量。

本书可作为航空院校发动机专业的教学参考书，也可供从事航空发动机专业的科研与生产的工程技术人员参考。

航空燃气轮喷气发动机燃烧室

第一册

黄兆祥 编著

*

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

国防工业出版社印刷厂印装 内部发行

*

787×1092¹/₁₆ 印张13⁵/₈ 313千字

1979年6月第一版 1979年6月第一次印刷 印数：0,001—1,000册

统一书号：N15034·1751 定价：1.45元

序

本书是想立足于总结我国航空燃气轮机生产和研制实践经验的基础上阐述一些喷气发动机燃烧室和燃烧热物理的基本原理，力图摆脱燃烧理论和燃烧室实践脱节的现象。作者在将近三年的时间里，参加了工厂的发动机燃烧室研制和七·二一工人大学的教学工作，本书是根据当时编写的讲义补充修改而成。写法很不成熟，取材也不完整，希望读者提出宝贵意见。

本书共分四册：原理、设计、调试和测量。第一至九章为第一册，介绍燃烧学及燃烧室的基本原理，以及燃烧室设计所需要的气动热力学知识。第十至十三章为第二册，介绍燃烧室和加力后燃室设计方法，对于喷嘴和气膜冷却都作了专章叙述。第十四至十七章为第三册，介绍燃烧室在试验台和发动机上进行试验的方法，对于近代航空发动机燃烧室日渐感到重要的“高空点火”问题也有专章介绍。第四册“燃烧室测量”，包括气动测量、燃气分析、火花能量测量、燃油雾化测量和烟度测量。书中所用技术名词为了和外文名词对应并尽量使含义确切，有些与各厂、校的习惯不同，作者很愿意听到各方面的意见。

本书编写过程中得到了工厂、高等院校和力学研究所很多同志的热情帮助和鼓励，作者谨向这些同志致以谢意。

吴仲华教授同意将“燃气热力性质表”附印本书，高丽君、潘忠刚二同志帮助编写个别章节，作者在此谨致谢意。

欢迎读者对书中缺点和错误批评指正。

黄兆祥

目 录

符号	1
第一章 主燃烧室的结构及性能	5
§ 1-1 燃烧室的组成	5
§ 1-2 燃烧室的分类	16
§ 1-3 燃烧室性能八项指标	23
§ 1-4 几种燃烧室效率定义分析	31
第二章 燃烧基本原理	34
§ 2-1 燃料	34
§ 2-2 燃烧反应	36
§ 2-3 煤油燃烧的理论空气量	37
§ 2-4 燃烧反应速率——阿列尼乌斯 (Arrhenius) 公式	38
§ 2-5 火焰正常传播速度	38
§ 2-6 火焰稳定原理——余弦定律	39
第三章 燃烧室工作特性及其与发动机共同工作关系	41
§ 3-1 火焰筒主燃区空气量与 $\eta_{\text{KC}} \sim \alpha_{\text{ep}}$ 特性曲线的关系	41
§ 3-2 火焰筒主燃区进气量与贫富油吹熄极限的关系	43
§ 3-3 燃烧室和发动机的共同工作关系	44
第四章 燃烧室故障分析	46
§ 4-1 火焰筒过热	46
§ 4-2 火焰筒磨损	48
§ 4-3 喷嘴积炭	48
§ 4-4 燃烧室出口燃气温度分布不稳定	49
§ 4-5 燃烧室高空熄火	49
§ 4-6 发动机起动超温	49
第五章 燃烧室的发展方向	51
§ 5-1 航空燃气轮喷气发动机的发展趋势	51
§ 5-2 燃烧室主要技术指标的发展趋势	57
§ 5-3 燃烧室设计趋势	59
第六章 燃烧四过程分析	66
§ 6-1 燃烧理论与燃烧室设计的关系	66
§ 6-2 燃烧四过程分析	68
§ 6-3 燃烧四过程与燃烧室性能的关系	78
第七章 燃烧过程的质量守恒和能量守恒	80
§ 7-1 质量守恒	80
§ 7-2 能量守恒	83

§ 7-3 燃烧室热力计算	84
§ 7-4 例题	88
第八章 油滴在燃烧室中的运动轨迹	92
§ 8-1 油滴受力分析	92
§ 8-2 方程求解	94
§ 8-3 计算结果及分析	103
第九章 基本方程及计算公式推导	106
§ 9-1 流体动力学基本方程	106
§ 9-2 热阻	110
§ 9-3 变截面、变流量、加热一元管流的分析式	116
§ 9-4 环量	118
§ 9-5 气流的有损失一元流动等压力梯度扩压器型线方程	119
§ 9-6 环形扩压通道当量扩张角	122
§ 9-7 液流一元流动的突然扩张损失	124
§ 9-8 气流一元流动的突然扩张损失	124
§ 9-9 液流一元流动在锥形管道中的摩阻损失	126
§ 9-10 涡流器通道收缩比	127
§ 9-11 油气燃烧加热过程的能量方程	131
§ 9-12 单滴燃烧	132
附录 燃气热力性质表	143
参考文献	211

符 号

F ——力 (公斤)
 F ——面积 (米²、厘米²、毫米²)
 m ——质量 (千克)
 γ ——重度 (ρg) (公斤/米³)
 ρ ——密度 (千克/米³)
 v ——比容 (米³/公斤)
 G ——重量流量 (公斤/秒)
 t ——静温 (°C)
 T ——静温 (°K)
 T^* ——总温 (°K)
 $\bar{p}$ ——无因次压力
 p ——静压 (公斤/厘米²)
 p^* ——总压 (公斤/厘米²)
 τ ——时间 (秒、时)
 W ——速度、速率 (米/秒)
 u ——相对速度 (米/秒)
 C ——浓度 (公斤分子/米³)
 c ——浓度 (克分子/厘米³)
 $\bar{c}$ ——相对浓度 (%)
 V ——容积 (米³、升、厘米³)
 Q ——热量 (千卡)
 Q ——容积流量 (米³/秒、升/秒)
 Q ——热流量 (千卡/时)
 q ——单位热流量 (千卡/时·米²)
 N ——功率 (公斤·米/秒、千瓦)
 L ——功 (公斤·米)
 η ——效率 (%)
 σ ——表面张力 (公斤/米)
 σ^* ——总压恢复系数 (%)
 ξ ——燃烧完全系数 (%)
 ζ ——系数
 n ——转速 (转/分)
 n ——扩压比
 n ——多变指数
 α ——混气余气系数
 α ——换热系数 (千卡/时·米²·°C)

α ——角度 (度、°)
 β ——燃料系数 ($1/\alpha$)
 β ——角度 (度、°)
 θ ——角度 (度、°)
 φ ——角度 (度、°)
 ψ ——角度 (度、°)
 λ ——导热系数 (千卡/时·米·°C)
 λ ——摩阻系数
 λ ——速度系数 (W/a_{rp})
 a ——音速 (米/秒)
 a ——导温系数 (米²/时)
 μ ——流量系数
 μ ——动力粘性系数 (千克/米·秒)
 ν ——运动粘性系数 (米²/秒)
 g ——重力加速度 (米/秒²)
 C_p ——定压比热 (千卡/公斤·°C)
 C_v ——定容比热 (千卡/公斤·°C)
 I ——焓 (千卡/公斤)
 S ——熵 (千卡/公斤·度)
 U ——内能 (千卡/公斤)
 k ——绝热指数
 K ——蒸发常数 (米²/秒)
 π ——压比
 R ——推力 (公斤)
 R ——半径 (米、毫米)
 R ——气体常数 (公斤·米/公斤·度)
 r ——半径 (米、毫米)
 E ——活化能 (千卡/公斤分子)
 E ——能量、广义内能 (千卡/公斤)
 H_u ——燃料热值 (千卡/公斤)
 H ——蒸发潜热、高度 (千卡/公斤、米)
 h ——高度 (米、毫米)
 h ——气流穿透深度 (毫米)
 D ——直径 (米、毫米)
 D ——破裂准则 ($\frac{\gamma u^2 d_r}{g\sigma}$)

- d ——直径(米、毫米)
 l ——长度(米、毫米)
 B ——宽度、厚度(米、毫米)
 B ——大气压力(毫米汞柱)
 A ——热的功当量1/427 (千卡/公斤·米)
 δ ——厚度(毫米)
 ω ——角速度(度/秒、转/秒)
 M ——马赫数
 M ——分子量
 M ——单位容积动量矩(千克/米·秒)
 ϕ ——扩散系数(米²/秒)
 C_R ——耗油率(公斤/公斤·时)
 p ——沾湿周界(米、毫米)
 i ——火焰筒个数
 L_0 ——一公斤燃料完全燃烧所需理论空气量(公斤/公斤)
 Re ——雷诺数($WD\rho/\mu$)
 Nu ——努塞尔数($\alpha l/\lambda$)
 Pr ——普朗特数(ν/a)
“E”——额定状态
“Z”——最大状态
“JL”——加力状态

$$\pi(\lambda) = \frac{p}{p^*} = \left[1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right]^{\frac{k}{k-1}}$$

$$\tau(\lambda) = \frac{T}{T^*} = 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2$$

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{\gamma}{\gamma^*} = \left[1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right]^{\frac{1}{k-1}}$$

$$q(\lambda) = \lambda \varepsilon(\lambda) \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

$$= \lambda \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

$$\left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}$$

$$\gamma(\lambda) = \frac{q(\lambda)}{\pi(\lambda)}$$

$$z(\lambda) = \lambda + \frac{1}{\lambda}$$

下脚注

- H ——远前方、加温器、水力
 o ——环境、外侧
 1 ——压气机入口、低压压气机入口
 $1'$ ——高压压气机入口
 2 ——燃烧室入口
 $2'$ ——外函燃烧室入口
 3 ——燃气轮入口、高压燃气轮入口
 $3'$ ——低压燃气轮入口
 4 ——燃气轮出口
 5 ——尾喷管出口
 κ, c ——主燃烧室
 ϕ ——加力后燃室、尾喷管
 $\mathcal{H}$ ——火焰筒
 τ ——燃油
 T ——燃气轮
 K ——压气机
 K ——喷嘴涡流室、导热
 κ ——油滴
 C ——对流
 R ——辐射
 R ——反应、回流区
 S ——停留
 F ——实物
 M ——模型
 B ——空气
 v ——蒸气
 Γ ——燃气
 m ——混气
 f ——火焰、气膜
 W ——风车、壁面
 w ——水
 cp ——平均
 $\max$ ——最大
 $\min$ ——最小
 κp ——临界
 t ——热阻

π — 叶片
 r — 回流区、径向
 u — 切向
 z — 轴向
 a — 轴向、补燃
 3 — 涡流器、实测参数
 πp — 换算参数
 $опт$ — 最佳
 $вх$ — 进口
 $вых$ — 出口
 i — 理想、内侧
 π — 扩压器
 Π — 发动机、加力后燃室扩压器
 $э$ — 有效

$ст$ — 稳定器
 Π — 预燃室
 $тр$ — 摩阻
 ref — 参考
 $ск$ — 激波
 h — 头部
 $от$ — 孔
 th — 理论值
 $теп$ — 热力
 $ат$ — 喷油嘴
 p — 推进、加力后燃室外套、沾湿周界
 p — 燃烧产物
 I — I 股气流
 II — II 股气流

器室爐——rɔ

室爐間——ɲ

田壩——qɛ

告參——lɔɛ

新蕭——xɔ

騎夾——ɲ

丘——rɔ

謝谷里——ɲ

氏味——nɛɛ

謝南郎——m

界園謝南郎，發於室爐口氏味，張謝——ɔ

謝谷里——ɔ

謝戶里 I——ɪ

謝戶里 II——ɪ

凡和——ɲ

向谷，向高回——ɛ

向回——ɲ

向時——ɛ

盤林，向時——ɲ

盤參謝實，器謝南——ɛ

盤參謝實——qɲ

謝盤——rɲɔ

口張——xɲ

口出——xɲɲ

謝內，謝盤——ɪ

器戶里——ɲ

器戶里，發於室爐口氏味，謝盤——ɪ

盤實——ɛ

第一章 主燃烧室的结构及性能

主燃烧室、压气机、燃气轮和加力后燃室都是航空燃气轮喷气发动机重要组成部件。新鲜空气进入压气机压缩成中温高压空气，然后进入主燃烧室和喷油嘴供入已经雾化的细碎油滴掺混均匀，进行化学反应并释放热能，这时空气燃烧变为高温高压的燃气。如果在燃烧过程中把燃油完全烧尽，则燃气中只含有氮气、二氧化碳、水蒸气和未用完的氧，如果燃烧不完全，则燃气中还含有少量的一氧化碳、氢以及烷、炔、烯等烃类可燃物。从主燃烧室流出的高温高压燃气进入燃气轮膨胀作功，燃气轮又带动压气机旋转，连续地供应新鲜的中温高压空气进入主燃烧室。从燃气轮排出的燃气温度和压力都有一定下降，在尾喷管中再继续膨胀加速并产生推力，推动飞机在空中飞行。因此，燃烧室中燃油和空气燃烧的好坏就直接和发动机性能有密切的关系。

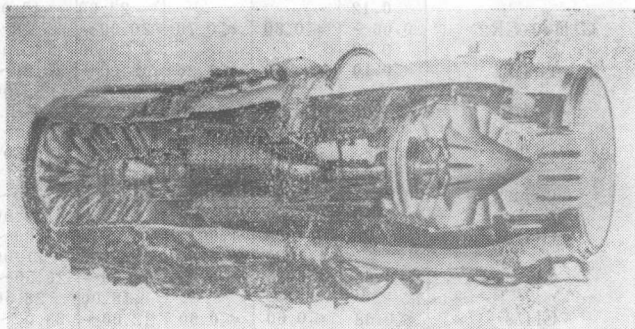


图 (0-1) 航空燃气轮喷气发动机

图 (0-1) 为典型双涵道航空燃气轮喷气发动机的剖面图，可以看出燃烧室在其中的位置。

§ 1-1 燃烧室的组成

主燃烧室的各部分大都采用含镍、钨较多的耐热合金加工而成，表 (1-1.1-1) 是国

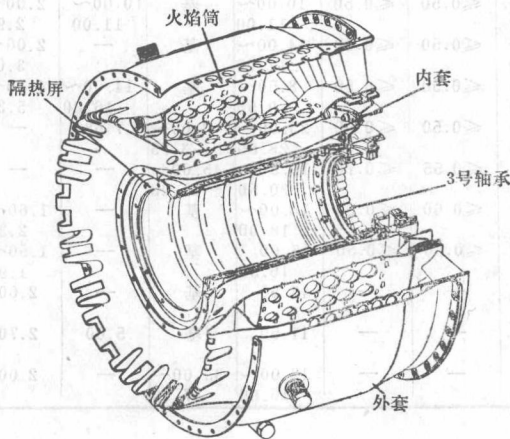


图 (1-1.1) 燃烧室部件图⁽¹⁴⁾

表 (1-1.1-1) 国产

成分 百分比 牌号	C	Si	Mn	Cr	Ni	Co	Ti	Al	W	Mo
GH30	≤0.12	≤0.80	≤0.70	19.00~ 22.00	≥7.50	—	0.15~ 0.35	≤0.15	—	—
GH39	≤0.08	≤0.80	≤0.40	19.00~ 22.00	基	—	0.35~ 0.75	0.35~ 0.75	—	1.80~ 2.30
GH44	≤0.10	≤0.80	≤0.50	23.50~ 26.50	基	—	0.30~ 0.70	≤0.50	13.00~ 16.00	—
Tn-10	0.06~ 0.12	≤0.80	≤1.50	23.00~ 26.00	24.00~ 26.00	—	1.10~ 1.70	—	—	—
GH35	0.06~ 0.12	≤0.80	≤0.70	20.00~ 23.00	35.00~ 40.00	—	0.70~ 1.20	≤0.50	2.50~ 3.50	—
GH140(GR2)	0.06~ 0.12	≤0.80	≤0.70	20.00~ 23.00	35.00~ 40.00	—	0.70~ 1.05	0.20~ 0.50	1.40~ 1.80	2.00~ 2.50
GH131	≤0.10	≤0.80	≤1.20	19.00~ 22.00	25.00~ 30.00	—	—	—	4.80~ 6.00	2.80~ 3.50
GH128	≤0.06	≤0.50	≤0.80	19.00~ 22.00	基	—	0.40~ 0.70	0.35~ 0.70	7.50~ 9.00	7.50~ 9.00
GH34	0.16~ 0.24	≤0.40	0.25~ 0.60	2.40~ 3.30	≤0.50	—	—	—	0.30~ 0.50	0.35~ 0.55
GH36	0.34~ 0.40	0.30~ 0.80	7.50~ 9.50	11.50~ 13.50	7.00~ 9.00	—	≤0.12	—	—	1.10~ 1.40
GH132	≤0.08	0.40~ 1.00	1.00~ 2.00	13.50~ 16.00	24.00~ 27.00	—	1.75~ 2.30	≤0.40	—	1.00~ 1.50
GH132A	≤0.08	≤0.75	≤0.35	13.00~ 16.00	25.50~ 28.50	—	2.70~ 3.20	0.10~ 0.35	—	—
GH78	≤0.08	≤0.60	≤0.60	12.00~ 16.00	33.00~ 37.00	—	2.40~ 3.20	0.70~ 1.70	2.00~ 4.00	—
GH38A	≤0.10	≤0.10	≤0.10	10.00~ 12.50	18.00~ 21.00	—	2.30~ 2.80	≤0.50	—	—
GH135	≤0.08	≤0.50	≤0.40	14.00~ 16.00	33.00~ 36.00	—	2.10~ 2.50	2.40~ 2.80	1.70~ 2.20	1.70~ 2.20
GH33	≤0.06	≤0.65	≤0.35	19.00~ 22.00	基	—	2.30~ 2.70	0.55~ 0.95	—	—
GH37	≤0.10	≤0.60	≤0.50	13.00~ 16.00	基	—	1.80~ 2.30	6.70~ 2.30	5.00~ 7.00	2.00~ 4.80
GH49	≤0.07	—	—	9.50~ 11.00	基	14.00~ 16.00	1.40~ 1.90	3.70~ 4.40	5.00~ 6.00	4.50~ 5.50
GH43	≤0.12	≤0.60	≤0.50	15.00~ 19.00	基	—	1.90~ 2.80	1.00~ 1.70	2.00~ 3.50	4.00~ 6.00
GH143	0.12~ 0.17	<1.00	<1.00	14.00~ 15.75	基	18.00~ 22.00	0.75~ 1.75	4.50~ 5.50	—	4.50~ 6.00
GH151	0.05~ 0.11	<1.00	<1.00	9.00~ 10.50	基	15.00~ 16.50	—	5.70~ 6.20	6.00~ 7.50	2.50~ 3.10
GH130	≤0.08	≤0.60	≤0.50	12.00~ 16.00	35.00~ 40.00	—	2.40~ 3.20	1.40~ 2.20	5.00~ 6.50	—
GH302	≤0.08	≤0.60	≤0.60	12.00~ 16.00	38.00~ 42.00	—	2.30~ 2.80	1.80~ 2.30	3.50~ 4.50	1.50~ 2.50
K5	0.10~ 0.18	≤0.50	≤0.50	10.00~ 11.00	基	10.00~ 11.00	2.00~ 2.90	5.00~ 5.80	4.50~ 5.20	3.50~ 4.20
K6	0.10~ 0.20	≤0.50	≤0.50	14.00~ 17.00	基	—	2.00~ 3.00	3.25~ 4.00	—	4.50~ 6.00
M17	0.14~ 0.20	≤0.50	≤0.50	8.50~ 9.50	基	14.00~ 16.00	4.70~ 5.30	4.80~ 5.60	—	2.50~ 3.50
K10	0.15~ 0.25	≤0.50	≤0.60	25.00~ 28.00	3.00~ 3.75	7.58	—	—	5.05	4.50~ 5.50
K11	0.10~ 0.20	≤0.55	≤0.70	19.50~ 20.50	45.00~ 47.00	—	—	—	1.50~ 8.50	—
K12	0.11~ 0.16	≤0.60	≤0.60	14.00~ 18.00	基	—	1.60~ 2.30	1.60~ 2.20	4.50~ 6.50	3.00~ 4.50
K1	<0.08	≤0.50	≤0.50	15.00~ 16.50	基	—	1.50~ 1.90	4.80~ 5.30	7.50~ 9.50	—
K2	0.15	—	—	12.50	基	—	2.60	5.00	7.00	4.70
K3	0.17	—	—	11.50	基	5.00	2.70	5.50	5.00	4.00
GH130B	<0.10	—	—	12.00~ 16.00	35.00~ 37.00	—	2.00	2.00	5.00	—

耐热合金成分表

Nb	V	Fe	S	P	Cu	B	Zr	Ce	Ca	Pb
—	—	≤1.00	≤0.01	≤0.015	≤0.20	—	—	—	—	≤0.001
0.90~1.30	—	≤3.00	≤0.012	≤0.20	≤0.20	—	—	—	—	—
—	—	≤4.00	≤0.013	≤0.013	—	—	—	—	—	—
—	—	基	≤0.020	≤0.030	—	0.010	—	—	—	—
—	—	基	≤0.020	≤0.030	—	—	—	—	0.05	—
—	—	基	≤0.015	≤0.025	—	—	—	—	0.05	—
0.70~1.30	—	基	≤0.020	≤0.020	—	0.005	—	—	—	—
—	—	≤3.0	≤0.013	≤0.013	0.05	0.005	—	—	—	—
—	0.60~0.85	基	≤0.030	≤0.035	—	—	—	—	—	—
0.25~0.55	1.25~1.55	基	≤0.030	≤0.035	—	—	—	—	—	—
—	0.10~0.50	基	≤0.020	≤0.030	—	0.001~ 0.010	—	—	—	—
—	≤0.50	基	≤0.025	≤0.025	—	0.005~ 0.025	—	—	—	—
—	—	基	≤0.010	≤0.020	—	0.030	—	—	—	—
—	—	基	≤0.020	≤0.030	—	≤0.008	—	—	—	—
—	—	基	≤0.020	≤0.020	≤0.03	≤0.015	—	—	—	—
—	—	≤1.00	≤0.007	≤0.015	≤0.07	≤0.010	—	—	0.01	≤0.001
—	0.10~0.50	≤5.00	≤0.010	≤0.015	≤0.07	≤0.020	—	≤0.02	—	—
—	0.20~0.50	≤1.50	≤0.010	≤0.010	—	0.015~ 0.025	—	—	0.02	≤0.001
0.50~1.30	—	≤5.00	≤0.010	≤0.015	≤0.07	≤0.010	—	≤0.03	—	—
—	—	≤1.00	—	—	≤0.20	≤0.030	—	—	—	—
1.95~2.35	—	<0.70	<0.005	<0.008	<0.02	0.012~ 0.020	0.03~ 0.05	—	—	—
—	—	基	≤0.015	≤0.015	≤0.02	≤0.020	—	—	—	—
—	—	基	≤0.010	≤0.020	—	≤0.010	≤0.05	—	≤0.02	—
—	—	≤1.00	≤0.010	≤0.015	≤0.01	≤0.020	≤0.10	—	—	—
—	—	≤5.00	≤0.010	≤0.015	—	0.050~ 0.100	≤0.10	—	—	—
—	0.60~0.90	≤1.00	≤0.010	≤0.015	—	0.014~ 0.020	0.05~ 0.09	—	—	—
—	—	≤0.15	≤0.030	≤0.040	—	—	—	—	—	—
—	—	平衡	≤0.035	≤0.035	—	0.030~ 0.080	—	—	—	—
—	≤0.30	≤8.00	≤0.009	≤0.015	—	0.020	—	—	—	—
—	—	≤1.50	≤0.010	≤0.015	—	≤0.080	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	≤0.010	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	≤0.050	—	—	—	—
—	—	基	—	—	—	≤0.050	—	≤0.02	—	—

产耐热合金的组成成分, 可供参考。由图 (1-1.1) 可知, 主燃烧室由以下几部分组成。

1-1.1 火焰筒

图 (1-1.1-1) 表示火焰筒在燃烧室中所起的作用。图 (1-1.1-2) 所示火焰筒是用耐高温的镍基合金 (如 GR2 等) 钢板冲压成型滚焊而成的筒形部件, 安装在燃烧室外套之内, 工作时直接和火焰接触。压气机输入燃烧室的中温高压空气分成两路, 分别流经筒内和筒外, 最后全部进入火焰筒形成高温高压的燃气从燃气导管排入燃气轮作功。它包括以下几个零件。

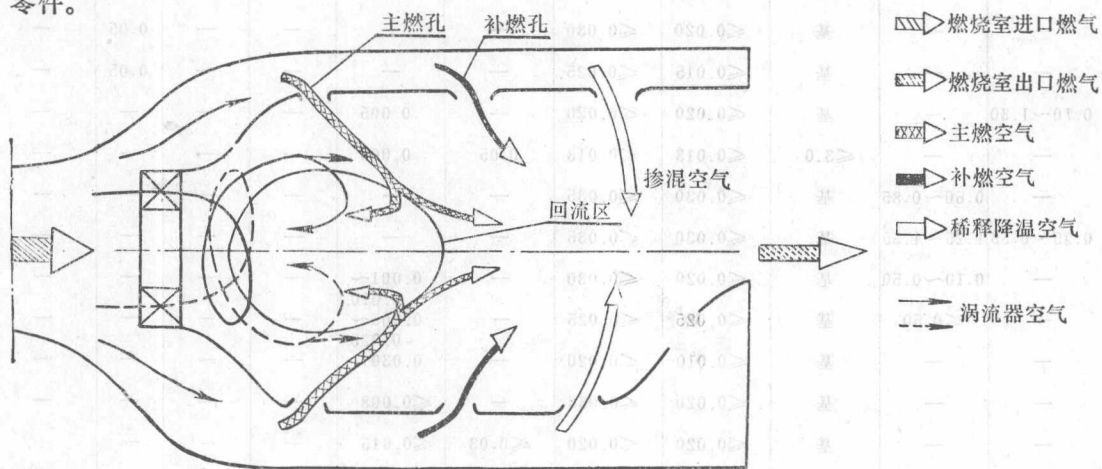


图 (1-1.1-1) 燃烧室气流流动示意图

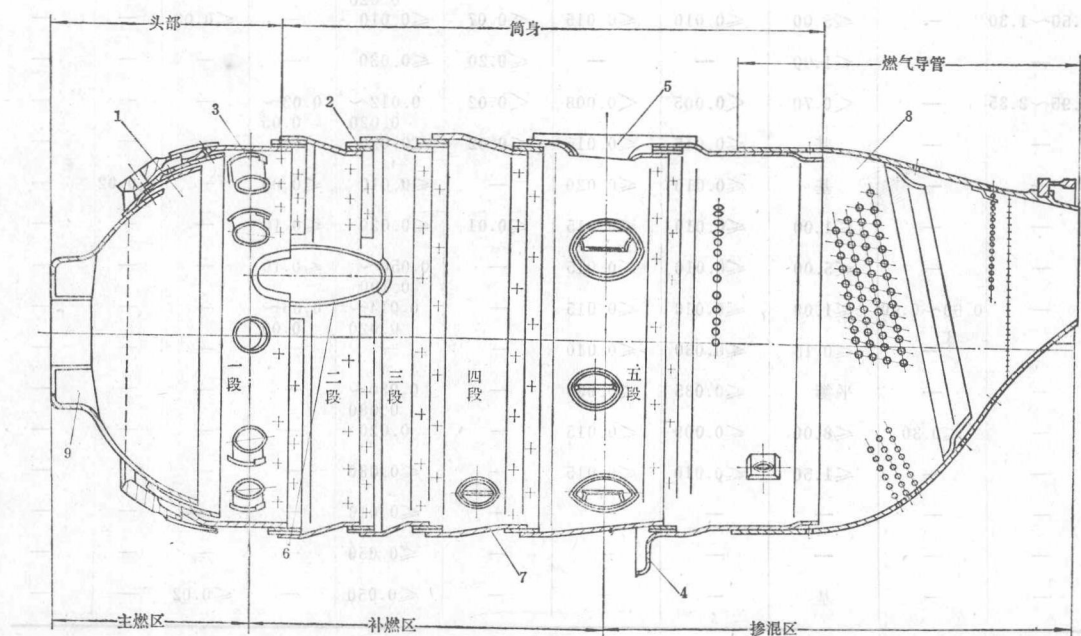
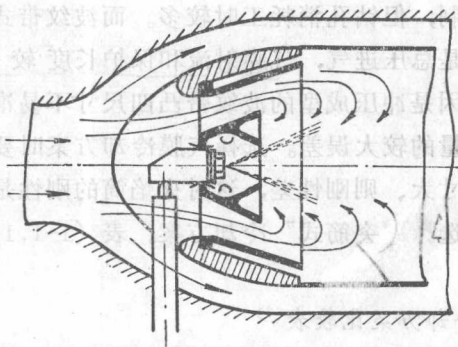


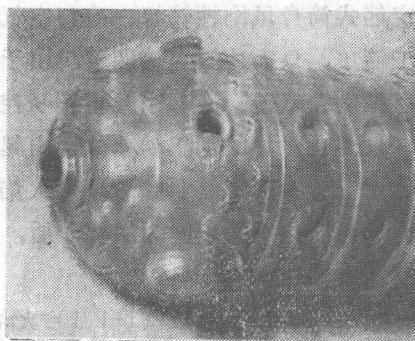
图 (1-1.1-2) 火焰筒

1—头部; 2—波纹板; 3—漏斗; 4—挡板; 5—导流板; 6—联焰管; 7—筒身; 8—燃气导管; 9—涡流器。

1-1.1-1 火焰筒头部 头部大多为球形或锥形的冲压件，上面有数排“主燃孔”和“气膜孔”。头部进气口有的装有“涡流器”，可改变气流方向为切向，并使气流加速以形成稳定火焰所必须的回流区，这叫“涡流器式火焰筒”。有些头部不带涡流器，如图(1-1.1-3)所示；有些头部开有数排进气缝隙以形成回流区，这种型的叫“擦板式火焰筒”，如图(1-1.1-4)所示。火焰筒头部所包住的空間叫“主燃区”，也有人认为主燃区应包括第一排大进气孔在内的空間，其作用是把喷油嘴供入的燃油和经主燃孔和涡流器进入火焰筒的主燃空气混合均匀，以利进行燃烧。燃烧室内燃烧反应进行的完全程度和燃烧性能的好坏主要取决于此区域内燃烧过程组织得是否良好。



图(1-1.1-3) 不带涡流器的燃烧室头部

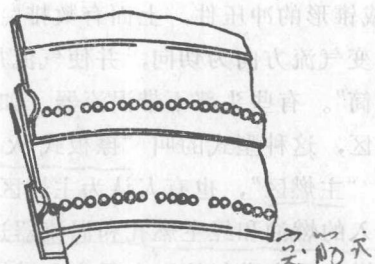
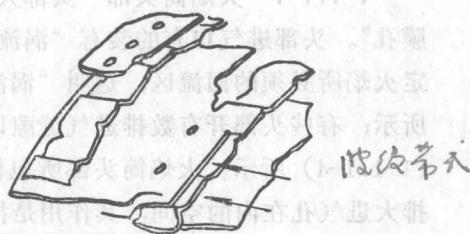


图(1-1.1-4) 擦板式火焰筒头部

若燃油和空气按化学当量比混合燃烧，则燃气中没有多余的燃油或氧气，这时燃气温度最高，反应速率快，燃烧反应也最完全，这当然是我们所希望的结果。但是高达 2200°C 的燃气温度，燃气轮是经受不了的。如果为了使燃烧室出口燃气降温到 1000°C 左右而减少供油量，则油气混合比太贫，不仅燃烧不够完全，而且反应速率慢，火焰拉得长，容易熄火。有时火焰直接接触燃气轮叶片，这对于发动机安全可靠运转是很不利的。当然，加长燃烧室是可以缓和这个矛盾的，但发动机尺寸加长，重量也就大了，这对于航空发动机来说是不允许的。这就出现了燃气温度不能太高，而又要求燃烧反应快而烧得完全的矛盾。为了解决这一矛盾，就要求火焰筒头部只进入少量空气，大致上是比化学当量比稍少的空气，可在主燃区和燃油混合均匀燃烧。经补燃区继续烧完的高温燃气再和剩余的新鲜空气混合降温，这时进入燃气轮膨胀作功的燃气温度就不太高了。

有些火焰筒头部装有导流罩，其作用是控制进口气流流场和流量，有时它对燃烧反应完全度和出口温度分布是有明显影响的。

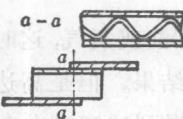
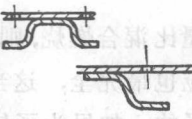
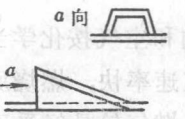
1-1.1-2 筒身 头部之后为等截面或变截面的圆筒，由数段耐热合金钢板冲压成型滚焊连接而成。各段之间有一交接重合段，沿圆周方向各钻有一排气膜孔，参看图(1-1.1-5)。筒外温度较低的Ⅱ股空气经气膜孔进入筒身内部形成“保护气膜”，把火焰和筒壁隔开，以保护筒身不致烧坏。图(1-1.1-6)为“波纹带”冷却方案。筒身各段之间增加一段“波纹带”，冷却空气即可由波纹缝隙进入筒身内部，这就能达到冷却筒身内壁的目的。筒身分段多，则冷却效果好；缺点是筒身上进气孔不好安排，加工复杂，同时消耗冷却空气量也较多，有时会和参加燃烧和掺混降温所需的空气产生矛盾，因而也并不是

图(1-1.1-5) 气膜孔冷却^[14]图(1-1.1-6) 波纹带冷却^[14]

分段越多越好。设计燃烧室的任务之一就是选择最佳的分段段数。

突筋式筒身虽刚性较好、冷却空气量易于控制，但钻孔消耗工时较多。而波纹带式筒身加工简单，只需冲压焊接即可，由于冷却空气是总压进气，气膜射流和保护长度较长；但缺点是刚性略差、冷却空气量不易控制，其原因是冲压成型的波纹带凸凹尺寸不易准确控制，只要有微小的加工误差就会引起冷却空气量的较大误差。选择气膜冷却方案时要根据具体情况分析而定，例如，若环形火焰筒本身尺寸大、则刚性差，这时火焰筒的刚性是主要矛盾，而简化工艺则降为次要矛盾，这时可以选择“突筋式”冷却方案。表(1-1.1)为各种冷却方案的比较。

表(1-1.1) 火焰筒各种冷却方案比较表^[7]

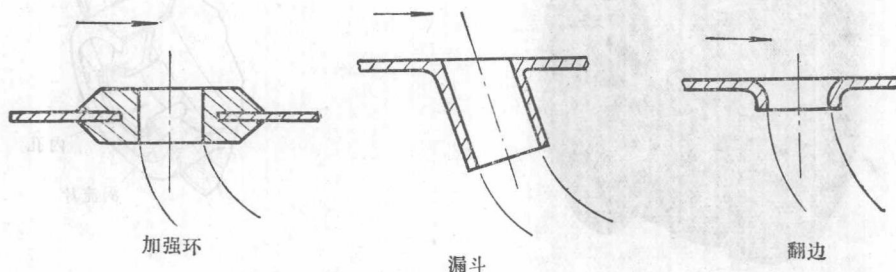
型式	波纹带	突筋式	冷却环	鱼鳞式	发散壁
筒图					
项目					
特点	总压进气，结构简单	部分总压进气，结构较复杂	静压进气，结构较复杂	总压进气，结构简单	静压进气，结构简单
冷却均匀性	冷却均匀，保护段长	冷却均匀，保护段较长	冷却均匀，保护段较短	冷却不均匀	冷却最均匀
热补偿性	最好	较差	较差	好	比较好
刚性	较好	最好	最好	差	最差
工艺性	好	较差	差	最好	差
重量	较重	较重	重	轻	最轻
适用范围	分管，环管，小环形火焰筒	分管，环管，环形火焰筒	打补钉	分管，环管火焰筒	分管，环管火焰筒，打补钉奥林巴斯
采用机种	斯贝	J57、P型、J型	斯贝、达特	J-79	斯贝 593

由于筒身各段具有大小不等的进气孔，使燃烧室外套之内，火焰筒外的Ⅱ股空气不断穿入火焰筒内并插入到一定深度，以及由头部流来尚未烧完全的燃气掺混得以继续燃烧。筒身内的空间包括“补燃区”或“过渡区”和“掺混区”。“补燃区”的作用把前面未烧完的燃油再补充一些空气继续燃烧，以使放热量达到最大可能值。这些进气孔的尺寸和排列位置可以预先设计计算，作一个初步安排，最后定型仍要依靠大量的试验工作。

筒身上最后一排进气孔叫“掺混孔”，一般孔径较大，孔数较少。由“掺混孔”至燃烧室出口叫“掺混段”，煤油和氧气在“补燃区”已接近烧完，形成温度较高的燃气，经掺

混孔进入筒身的大股新鲜空气射流穿入高温燃气，混合均匀成为温度较低的稀释燃气。

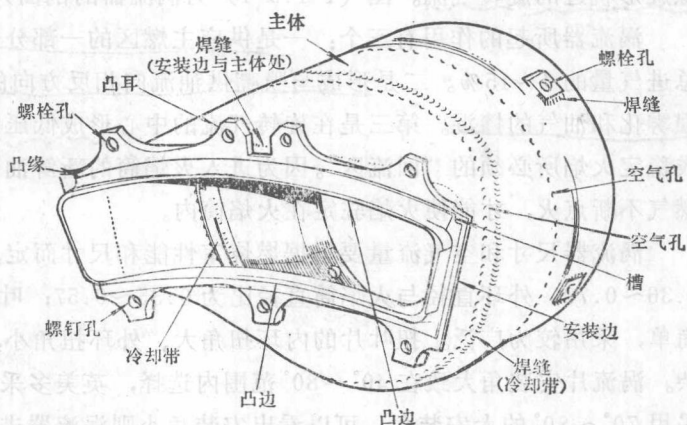
有些进气孔具有翻边、加强环和漏斗，如图(1-1.1-7)所示。其作用是增加射流穿透深度，而孔径和进气量则基本上保持不变，这时火焰筒中心也能获得充足的空气进行燃烧和掺混。翻边和加强环还能防止进气孔附近产生裂纹。翻边工艺最简单，可以在筒身上直接冲出，但深度只能在2毫米以下。需要较深的射流穿透深度时，多半采用焊在筒身上的漏斗。



图(1-1.1-7) 加强环、漏斗和翻边示意图

1-1.1-3 燃气导管 火焰筒出口最后一段是燃气导管，其进口与筒身焊接，出口断面和燃气轮导向器进口扇面形状相同，用耐热合金钢板冲压成不规则的过渡段，如图(1-1.1-8)所示。其作用是把掺混孔引入的新鲜空气和高温燃气混合均匀并导入燃气轮导向器。当燃烧不完全，火焰拉的较长时，燃气导管很容易烧坏，所以有时导管壁面上也钻一些冷却小孔，对局部过热区进行冷却。

燃气导管受发动机尺寸限制不能太长，由于其横断面形状有较大变化，因而，设计导管通道型面时要注意不使气流方向改变太快，以免造成气流脱离，形成较大的总压损失。导管出口气流不均匀，或气流方向不是轴向流动，都会导致燃气轮效率和功率的下降。



图(1-1.1-8) 燃气导管

1-1.2 燃烧室外套

燃烧室外套用低合金耐热钢板(如 1Cr 18 Ni9 T)冲压焊接而成，组合后与火焰筒形成Ⅱ股气流通道，它由以下两部分组成。

1-1.2-1 扩压段 燃烧室外套内通道在进入火焰筒之前，其通道截面是逐渐扩大的，使气流在进入火焰筒之前先扩压减低速度以减少流阻损失。设计扩压段时要注意气流的扩压度及其扩压规律，以尽量提高总压恢复系数。

1-1.2-2 燃烧室外套 外套尺寸由发动机外形尺寸决定，火焰筒和外套形成Ⅱ股气流外通道，又和隔热屏形成Ⅱ股气流的内通道。通道截面尺寸决定各截面处的局部速度和静