

高等学校教材

燃气轮机燃烧室

(修订本)

清华大学 焦树建 编著

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

前 言

本书是在1981年出版的高等学校试用教材《燃气轮机燃烧室》基础上，根据1987年11月高等学校“热力涡轮机”专业教学指导委员会制订的新教学计划和教学大纲以及审定的修改大纲修订的。

全书共十二章。在概要地阐明了燃烧理论某些基本原理的基础上，着重论述了工业用燃气轮机燃烧室的技术特性指标、工作原理、结构特点、设计计算和试验调整方法。在修订过程中，针对我国工业燃气轮机的发展现况，特别加重了对渣油和低热值煤气等劣质燃料的燃烧，以及燃烧室的模化试验技术等问题的论述。此外，对某些燃烧理论的内容也加深了讨论。

在编著过程中，作者参阅了我国有关工厂、研究所和高等学校的研究报告，综合了国内、外有关工业燃气轮机燃烧室和航空涡轮喷气发动机主燃烧室方面的设计与试验研究经验，以及作者长期从事的渣油与低热值煤气燃烧和模化试验方面的经验。在编写第十一章的近似设计方法时，着重参考了西北工业大学燃烧进修班的讲义。在此特向有关单位和给予过帮助的人们致谢。

本书可以作为高等工业学校热力涡轮机专业学生的教材，也可供从事燃烧设备的设计与试验工作的工程技术人员参考。

本书由清华大学焦树建教授编著，西安交通大学陈丹之教授主审。参加审稿工作的还有上海交通大学常弘哲副教授和武汉海军工程学院的吴会泉老师。对于他们的帮助和建议，谨致谢意。

由于作者的理论水平与实践经验有限，书中难免有许多缺点和错误，恳请读者批评指正。

作者

1988年10月

目 录

第一章 绪论.....1	§4-5 影响喷油嘴喷雾特性的各种因素.....117
§1-1 概述.....1	§4-6 燃气轮机燃烧室中常用的喷油嘴 的结构型式及其工作特性.....125
§1-2 燃烧室工作过程的特点及其要求.....1	思考、讨论题.....138
§1-3 燃烧室的技术特性指标.....5	第五章 燃烧室的结构分析.....139
思考、讨论题.....16	§5-1 概述.....139
第二章 燃烧理论简介.....17	§5-2 一次空气的配气机构.....140
§2-1 概述.....17	§5-3 燃气的混合机构.....148
§2-2 燃烧现象的本质.....17	§5-4 火焰管壁的冷却机构.....150
§2-3 化学反应速率.....18	§5-5 扩压器机构.....153
§2-4 活化分子与活化能.....21	§5-6 燃气收集器.....155
§2-5 链锁反应的概念.....22	§5-7 圆筒型燃烧室的典型结构.....155
§2-6 均相预混可燃气体的自燃.....24	§5-8 分管型燃烧室的典型结构.....158
§2-7 均相预混可燃气体的火焰传播.....29	§5-9 环管型燃烧室的典型结构.....162
§2-8 均相预混可燃气体的火焰稳定 性问题.....39	§5-10 带环腔火焰管的环管型燃烧室 的典型结构.....171
§2-9 高速气流中火焰的稳定性问题.....42	§5-11 环形燃烧室的典型结构.....173
§2-10 气体燃料的扩散燃烧.....45	§5-12 燃烧室结构型式的新发展.....175
§2-11 液体燃料的燃烧.....49	思考、讨论题.....183
思考、讨论题.....61	第六章 渣油和原油的燃烧.....184
第三章 燃烧室的工作过程.....62	§6-1 概述.....184
§3-1 概述.....62	§6-2 渣油的性质与品种的选择问题.....184
§3-2 燃烧区中气流流动过程的组织及 其对燃烧特性的影响.....62	§6-3 燃气轮机燃用渣油时产生的问题.....190
§3-3 燃烧区中燃料浓度场的组织及其 特点.....71	§6-4 燃用渣油时在燃烧技术上应采取 的措施.....195
§3-4 燃烧区中可燃混合物的形成、着 火与燃烧.....73	§6-5 防止积灰和腐蚀的措施.....201
§3-5 混合区中二次掺冷空气与高温燃 气掺混过程的组织.....76	§6-6 渣油燃烧室的调试实例.....206
§3-6 火焰管壁冷却过程的组织.....81	思考、讨论题.....212
思考、讨论题.....88	第七章 气体燃料的燃烧.....213
第四章 液体燃料的雾化与喷油嘴.....89	§7-1 概述.....213
§4-1 概述.....89	§7-2 天然气的燃烧与燃烧室.....214
§4-2 液体燃料的雾化机理.....89	§7-3 天然气燃烧室的供气系统.....218
§4-3 液体燃料雾化的质量标准.....95	§7-4 煤的气化与低热值气体燃料的燃 烧问题.....222
§4-4 单油路离心式喷油嘴的工作原理 与设计.....101	思考、讨论题.....243
	第八章 点火设备.....244
	§8-1 概述.....244

§8-2	电火花点火的基本原理与设备	245	分配规律的核算	300
§8-3	半导体点火器的基本原理与设备	249	思考、讨论题	311
§8-4	改善燃烧室的点火和传焰性能的 若干措施	251	第十一章 燃烧室的设计	312
思考、讨论题		253	§11-1 概述	312
第九章 燃烧过程的物质平衡与热 平衡计算		254	§11-2 设计燃烧室时应该集中考虑的 几个问题	312
§9-1 概述		254	§11-3 某些对燃烧室设计有参考价值 的统计数据	314
§9-2 燃料完全燃烧的理论空气量与过 量空气系数		254	§11-4 环管型燃烧室的近似设计方法	318
§9-3 燃料完全燃烧后, 燃烧产物的组成 成分		256	§11-5 燃烧室的材料	330
§9-4 燃烧过程的热平衡计算		261	思考、讨论题	334
思考、讨论题		268	第十二章 燃烧室的试验与调整	335
第十章 燃烧室的流阻损失与空气 流量分配规律的计算		269	§12-1 概述	335
§10-1 概述		269	§12-2 燃烧室试验的目的与方案	335
§10-2 扩压器的流阻损失计算		269	§12-3 燃烧室的试验设备与各项技术 特性指标的测定	337
§10-3 二次环形流道中气流参数的计算		271	§12-4 燃烧室的模化原理与模化工况 的选择	340
§10-4 旋流器的流动阻力计算		274	§12-5 燃烧室调整试验的若干措施	371
§10-5 火焰管内气流流动阻力损失的 计算		277	思考、讨论题	373
§10-6 火焰管壁上射流孔的流量系数		291	附录	
§10-7 射流串入火焰管内主气流时的 穿透深度		299	一、国际单位制(SI)及其换算关系	374
§10-8 燃烧室的流阻损失与空气流量			二、 Γ 函数表	377
			三、国内、外某些液体燃料的技术数据	378
			参考文献	381

第一章 绪 论

§1-1 概 述

燃气轮机燃烧室是一种通常用高温合金材料制作的燃烧设备。在整台燃气轮机中，它位于压气机与燃气透平之间。它有两种功能：1) 使燃料与由压气机送来的一部分压缩空气在其中进行有效的燃烧；2) 使由压气机送来的另一部分压缩空气与由燃烧后形成的温度极高的燃烧产物均匀地掺混，使之成为燃气透平能够承受的高温燃气。由于这两个功能的作用，燃烧室可以在近乎等压的条件下把燃料中的化学能释放出来，使之转化成为高温燃气的热能，为其在燃气透平中膨胀作功准备好条件。由此可见，燃烧室是燃气轮机中一个不可缺少的重要部件。

在全面讨论燃烧室的工作原理与设计方法之前，本章将首先研究燃烧室工作过程的特点与要求，以及某些技术特性指标的代表方法。

§1-2 燃烧室工作过程的特点及其要求

图1-1中给出了在某台机组上采用的一个分管型燃烧室的简图。

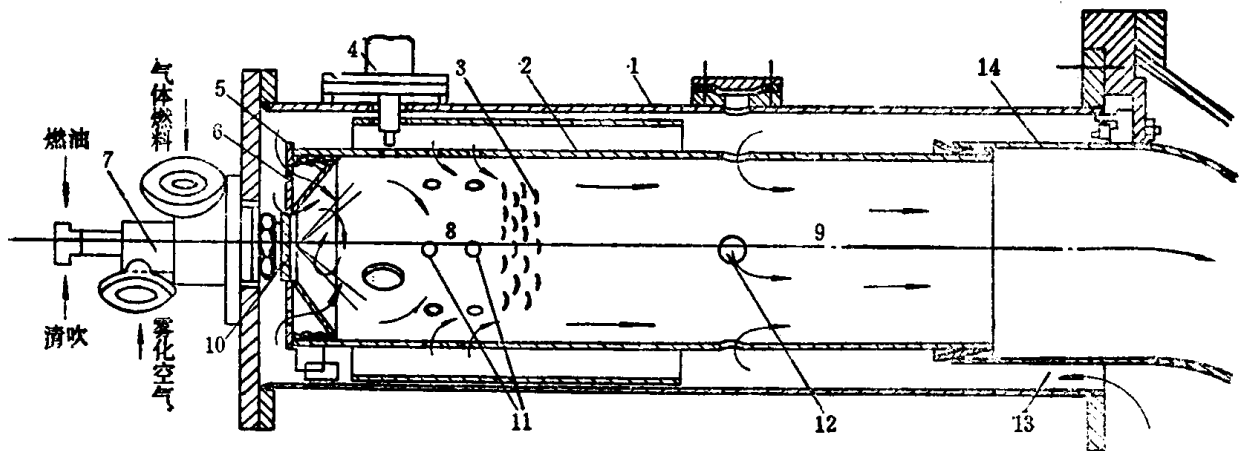


图1-1 分管型燃烧室的简图

1—外壳 2—火焰管 3—冷却鱼鳞孔 4—点火器 5—过渡锥顶 6—配气盖板 7—燃料喷嘴 8—燃烧区
9—混合区 10—旋流器 11—一次射流孔 12—混合射流孔 13—环腔 14—燃气导管

由图可知，燃烧室是由外壳1和火焰管2等零件组成的。由压气机送来的压缩空气在逆流进入外壳与火焰管之间的环腔13时，因受火焰管结构形状的制约，将分流成为几大部分。其中一部分称为“一次空气”，它分别流经旋流器10、端部配气盖板6、过渡锥顶5上的鱼鳞孔，以及开在火焰管前段的两排一次射流孔11，进到燃烧区8中去的。在那儿，它与由燃料喷嘴7喷射出来的燃料进行混合和燃烧，转变成为1800~2000℃的高温燃气。因而，所谓“一

次空气”就是指：为了保证燃料完全燃烧所必须供应到燃烧区中去的那部分燃烧用空气。另一部分空气称为“冷却空气”，它是穿过开启在火焰管壁面上的许多排冷却鱼鳞孔³，逐渐进入火焰管中，并力求沿着火焰管内壁流动的。这股空气能在火焰管内壁附近形成一个温度较低的冷却空气膜，它具有冷却高温管壁，使其免遭火焰烧坏的作用。此外，剩余下来的另一部分空气则称为“二次空气”或“混合空气”，它是由开在火焰管后段的混合射流孔¹²，射到由燃烧区流来的 $1800\sim 2000^{\circ}\text{C}$ 的高温燃气中去的，它具有掺冷高温燃气，使其温度比较均匀地降低到透平前燃气温度设计值 T_3^* 的作用。

从结构上看，燃烧室似乎比较简单。事实上，要设计一个工作可靠、经济、使用维护方便的燃烧室，却不那么容易。这是由于燃气轮机燃烧室的工作条件与一般燃烧设备不同，它需要满足一系列特殊要求，并具有某些特点的缘故。

一、对燃烧室提出的要求

(一) 工作可靠性方面的要求

- 1) 确保燃烧室在任何运行工况下都能稳定地进行燃烧，不致发生强烈的火焰脉动或熄火现象。
- 2) 燃料必须在燃烧室内燃烧完毕，力求燃烧火焰最短，严防火焰伸入透平，烧毁叶片。
- 3) 保证燃烧室出口的燃气温度场比较均匀，以防透平叶片局部过热或发生较大的热应力。
- 4) 必须使燃烧室的高温元件冷却良好，严防发生严重的积焦与积炭现象，以保证燃烧室具有足够的使用寿命。
- 5) 保证燃烧室在可能最坏的条件下，都能快速而可靠地点火起燃。
- 6) 燃烧室必须具有足够的刚度、强度和气密性，能承受振动负荷，不致变形或开裂。

(二) 工作经济性方面的要求

- 1) 使燃料在燃烧室内能最大限度地燃烧完全，即尽可能地提高燃烧效率，并力求排气完全透明。
- 2) 尽量减小气流流经燃烧室时可能产生的无谓的流阻损失。
- 3) 尽可能地提高燃烧热强度，以减小燃烧室的尺寸和重量，使结构简化，又便于制造，以适应整台燃气轮机结构紧凑性的要求。

(三) 使用维护方面的要求

- 1) 在结构上力求便于检查、检修、拆装和更换零件，使它能够及时发现隐患，以防发生严重事故。
- 2) 为了保证运行和维护的安全与方便，还应设置必要的附属设备，如泄油阀、观察窗、熄火保护装置等。

二、燃烧室的工作特点

1) 它是一个在连续的、高速气流中进行的燃烧过程。例如在某些航空类型的燃气轮机中，燃烧室进出口处的气流速度可以达到 $120\sim 170\text{m/s}$ ；燃烧区内高温燃气的平均速度可能高达 $20\sim 25\text{m/s}$ 左右。在这样高速流动的气流中，燃烧火焰很容易被吹灭，即出现所谓的燃烧火焰不易稳定的现象；同时还会由于燃料质点在燃烧室中的逗留时间较短，而容易出现燃料燃烧不够完全的现象。因而，在设计这种燃烧室时，必须采取特殊的措施，以确保燃烧过程能够既稳定而又经济地进行。

2) 它是一个在近似等压的、燃料与空气的供应关系比较稀释的条件下组织的燃烧过程。通常, 由于透平前燃气初温 t_3 的限制, 反映燃料与空气供应关系的总过量空气系数 α_2 一般为4~5左右。这就是说, 假如使燃料与流经燃烧室的全部空气流量直接混合而燃烧, 那么, 可能达到的燃烧区的平均温度是比较低的——也就是透平前的燃气初温 t_3 , 它不能为我们组织稳定而经济的燃烧过程提供条件。因而, 在设计这种燃烧室时, 必须针对 α_2 过大的特点, 采取与一般燃烧设备有所不同的特殊措施, 为有效地组织燃烧过程创造必要的条件。

3) 它是一个在高温的用金属材料制造的尺寸有限的燃烧空间中进行的燃烧过程。这就是说, 这种燃烧室的燃烧热强度很高, 它能够在单位时间内和单位体积的燃烧空间中, 完全燃烧掉比一般燃烧设备多数十倍的燃料量。因而, 在设计这种燃烧室时, 必须采取特殊的措施, 以便提高燃烧速度、缩短燃烧火焰、加强掺冷混合, 严防燃烧火焰伸及透平, 力求燃气的出口温度场趋于均匀。同时, 还应加强高温元件的有效冷却, 以确保燃烧室具有较长的工作寿命。

4) 它是一个在工质的运行参数变化范围相当宽的条件下进行的燃烧过程。图1-2、1-3和1-4中分别给出了单轴恒速燃气轮机、单轴变速燃气轮机和航空涡轮喷气发动机燃烧室中运行参数变化情况的示例。例如对于恒速燃气轮机来说, 总的过量空气系数 α_2 可以在4.94~15.5范围内变化。在航空型燃烧室中, 空气流量的变化范围可以高达30倍以上。这些变化都会对燃烧火焰的稳定性和燃烧效率有所影响, 致使燃烧室的性能指标发生波动。因而, 在设计这种燃烧室时, 必须采取特殊措施, 以确保在可能遇到的运行条件下, 燃烧过程都能稳定而经济地进行, 而且性能指标比较平稳。

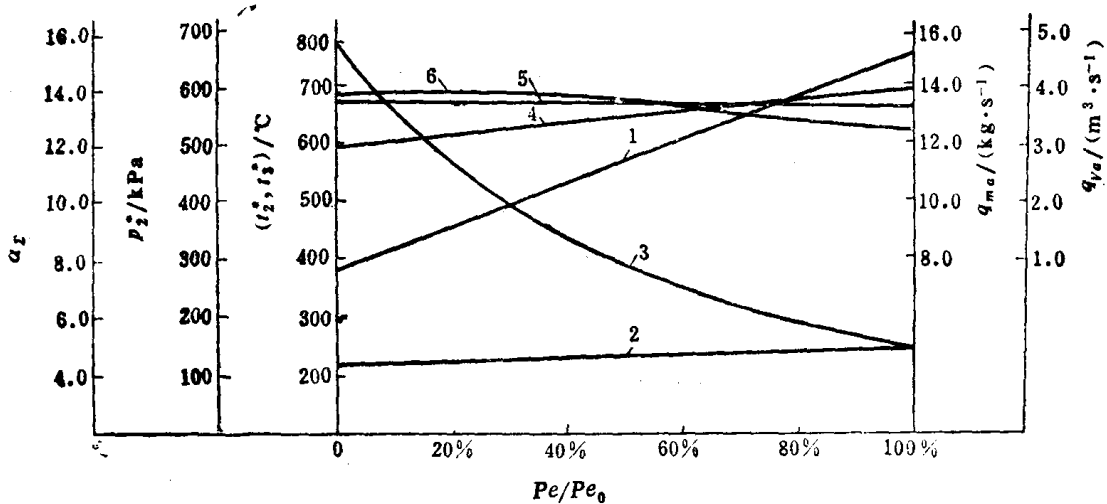


图1-2 单轴恒速燃气轮机燃烧室中运行参数的变化情况

1—透平前温 t_1 ; 2—燃烧室入口温度 t_2 ; 3—总过量空气系数 α_2 ; 4—燃烧室入口压力 P_2 ; 5—空气的质量流量 q_{ma}
6—空气的体积流量 q_{va}

5) 它是一个有时需要兼备燃用多种燃料能力的燃烧过程。在同一个燃烧室中, 希望能够兼备燃烧轻质或重质馏出油、原油或剩余油, 甚至气体燃料的要求, 是目前燃气轮机燃烧室的发展方向之一。因而, 在设计这种燃烧室时, 必须采取特殊措施, 以保证在燃烧室的结构变动不大, 燃烧性能又比较平稳的前提下, 来实现这个要求。

总之, 燃气轮机燃烧室的工作过程具有: 1) 高温, 2) 高速, 3) 高燃烧热强度, 4) 高过量空气系数, 5) 运行参数变化剧烈, 6) 要求燃用多种燃料等一系列特点。这些特点都影

响着燃烧室工作的稳定性、经济性和可靠性，同时也关系到在多大程度上能够满足对燃烧室提出的一系列要求的问题，因而，燃烧室的设计和燃烧过程的组织都必须环绕这些特点和要求来进行。

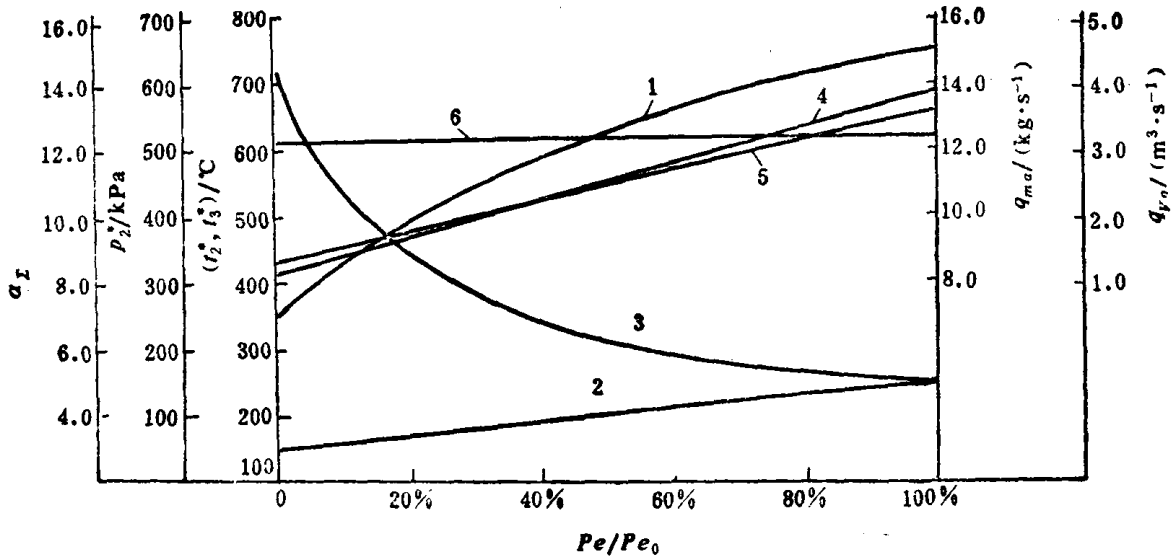


图1-3 单轴变速燃气轮机燃烧室中运行参数的变化情况

1—透平前温 t_2 ；2—燃烧室入口温度 t_3 ；3—总过量空气系数 α_L ；4—燃烧室入口压力 p_2 ；
5—空气的质量流量 q_{ma} ；6—空气的体积流量 q_{va} 。

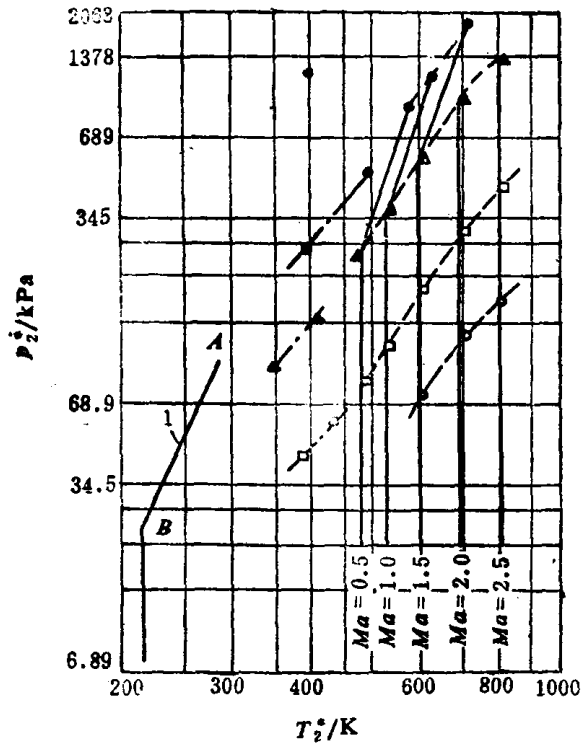


图1-4 某台航空涡轮喷气发动机中燃烧室入口的温度 T_2 和压力 p_2 与各种飞行情况的变化关系

1—外界空气温度和压力与飞行高度的关系
A—零m时的外界空气状态 B—10973m时的外界空气状态

至今，人们对燃烧理论的掌握还远远落后于燃烧技术发展的需要，它基本上还是一门以试验为主体的实验科学。目前，燃气轮机燃烧室主要是通过大量试验调整而最后定型的，它还不能较多地依靠理论计算方法进行设计。这个现实正需要我们进一步加强对燃烧室工作过程的研究。

§1-3 燃烧室的技术特性指标

前一节中，我们已经全面地综述了对燃烧室提出的一系列要求。通常，可以把这些要求概括为几个参数（即所谓的“燃烧室技术特性指标”）来作为衡量各种燃烧室工作性能好坏的技术标准，它们是：熄火极限、燃烧效率、燃烧热强度、流阻损失参数、燃气出口温度场指标、壁面温度指标、点火特性、排气污染特性指标和使用寿命等。现就这些指标分述如下：

一、熄火极限

熄火极限是一个表示燃烧室燃烧稳定性范围的安全指标。

所谓“燃烧稳定性范围”就是指：当燃烧室在这个运行参数范围内工作时，将不会发生强烈的火焰脉动或熄火现象。

通常，在燃气轮机的运行过程中，燃烧室的工作条件是经常变化的。例如：供入燃烧室的空气压力、温度和速度，特别是空气流量 q_{ma} 与燃料流量 q_{mf} 的比例关系，都会随着负荷工况的改变而变化。一般，人们习惯于用总过量空气系数 $\alpha_z = q_{ma}/(q_{mf}L_0)$ 或燃料-空气比 $f = q_{mf}/q_{ma}$ ，来表示空气流量与燃料流量的比例关系。其中 L_0 是单位质量的燃料在完全燃烧时所需要消耗的理论燃烧空气量。显然， $\alpha_z f L_0 = 1$ 。由此可见，当燃烧室在稀态工况下工作时， α_z 大而 f 值小。反之，当 α_z 小而 f 大时，燃烧室就处于浓态工况下工作。假如一个燃烧室能够在燃料与空气的混合比，也就是 α_z 或 f 的变化范围相当宽的情况下，维持稳定燃烧而不发生强烈的火焰脉动或熄火，那么，我们称此燃烧室的燃烧稳定性好；反之，则称为燃烧稳定性差。

试验表明，通常可能发生两种熄火情况：一种是当 α_z 小到一定程度（也即 f 大到一定程度）后发生的熄火现象。那时，燃料过浓，空气供应不足，燃气出口温度显高。这种熄火现象称为“浓态熄火”。当时所对应的过量空气系数或燃料-空气比，称为“浓态熄火极限” α_{min} 或 f_{max} 。另一种是当 α_z 大到（也即 f 小到）一定程度后发生的熄火现象。那时，燃料过稀，空气供应过多，而燃气出口温度显低。这种熄火现象称为“稀态熄火”。它所对应的过量空气系数或燃料-空气比，称为“稀态熄火极限” α_{max} 或 f_{min} 。显然，浓态熄火极限与稀态熄火极限之间的差值越大，燃烧室的燃烧稳定性也就越好。

目前，有两种常用的表示燃烧稳定性的方法：

1) 直接以燃气轮机运行过程中可能发生熄火现象的最危险工况下的参数为基准，实测燃烧室的“稀态熄火极限” α_{max} 和“浓态熄火极限” α_{min} 来表示燃烧稳定性。例如：分轴燃气轮机在全转速满负荷工况下发生突抛负荷时，由于燃料流量突然减少，空气流量相应地有所增加，而最有可能发生稀态熄火；相应地，在怠速空负荷工况下，假如突然把满负荷工况下的燃料量喷入，则最有可能发生浓态熄火。因而，在试验中可以以这两个工况的参数为基础，在适当增大或减小一些空气流量后，实测燃烧室可能达到的 α_{max} 和 α_{min} ，作为标志燃烧稳定性的指标。一般希望 $\alpha_{max} \geq 30$ ； $\alpha_{min} = 2 \sim 2.5$ ，才有可能保证燃气轮机正常运行的需要。

2) 以燃烧室在某一恒定的进气压力 p_2 和温度 t_2 情况下, 熄火极限 α_{max} 和 α_{min} (或 f_{min} 和 f_{max}) 与燃烧室入口处的气流速度 v_2 之间的关系曲线 (如图1-5所示) 来表示燃烧稳定性。显然, 在同一个流速 v_2 情况下, α_{max} 与 α_{min} 之间的差值越大, 燃烧稳定性就越好。

除了空气的压力、温度和流速对燃烧稳定性有所影响外, 燃烧室的结构型式将是一个关键性的影响因素。这个问题将在以后的讨论中看到。

试验表明: 降低 v_2 或提高 t_2 , 对于改善燃烧稳定性都有利。当 $p_2 > 98.1 \text{ kPa}$ 时, 随着压力的增高, 熄火极限略有改善, 但其影响程度并不十分明显。可是, 当 $p_2 < 98.1 \text{ kPa}$ 后, 压力的降低将严重地恶化燃烧的稳定性。

在涡轮喷气发动机的燃烧室中, 假如我们能够测定出一系列不同压力和温度下图1-5那样的熄火极限曲线, 就能进一步绘制出发动机的飞行高度与飞行马赫数之间的稳定运行关系曲线。当飞机在这个运行范围内飞行时, 燃烧室就不会发生熄火或强烈的火焰脉动故障。

二、燃烧效率 η ,

燃烧效率是一个表示燃料在燃烧室中燃烧时, 化学能释放程度和热能利用程度的经济性指标。

燃料在燃烧室中燃烧时可能发生的能量损失, 主要是由燃料的化学未完全燃烧损失 Q_c 、物理未完全燃烧损失 Q_m , 以及燃烧室对外界的散热损失 Q_s 这三部分组成的, 即

$$\Sigma Q = Q_c + Q_m + Q_s \quad (1-1)$$

这些能量损失的总效果将表现为燃料的发热量 Q_u 未能完全被利用来加热燃气, 也就是说, 当时, 在燃烧室出口处燃气的实际温度 (或总焓值), 总要比燃料完全燃烧而且没有对外散热损失时的温度值来得低。因而, 燃烧效率可以用单位质量的燃料中发热量的有效利用程度来表示, 即

$$\eta_r = \frac{Q_u - \Sigma Q}{Q_u} = 1 - \frac{\Sigma Q}{Q_u} \quad (1-2)$$

燃料的化学未完全燃烧损失 Q_c 是指: 在燃烧室的排气中残存有一部分尚未燃烧的 CO 、 H_2 、 CH_4 等可燃气体, 从而带走了一部分未能释放出来的化学能所致的能量损失。通常, 化学未完全燃烧损失是在燃料与空气配合不当、燃烧区内空气供应过多或不足、燃烧温度过低或过高时发生的。在设计工况下, 这种损失有可能控制在 $(0.5 \sim 2)\%$ 左右。

燃料的物理未完全燃烧损失 Q_m 也是指: 有一部分燃料在燃烧室中因未能完全燃烧释出能量所造成的能量损失。但是, 这些未燃物质却是以液滴、碳粒或积焦的形态出现, 而被燃气带走、或是积存在燃烧室的管壁上。这种损失一般是在机组负荷降低时, 由于燃烧区温度过低、燃料的雾化质量又严重恶化时发生的。假如在燃烧室的局部地区空气严重供应不足, 则可能发生排气冒黑烟现象。目前, 在设计良好的燃烧室中, 有可能使怠速工况下的这种损失不超过 $(0.5 \sim 1)\%$; 在满负荷工况下则趋近于零。

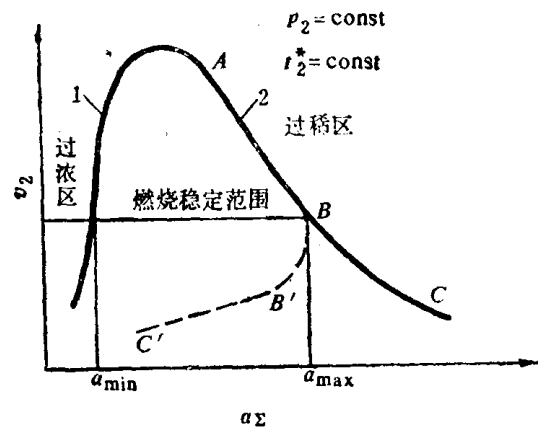


图1-5 熄火极限曲线

1—液态熄火极限曲线 2—稀态熄火极限曲线
(ABC—蒸发式供油 AB'C'—喷雾式供油)

燃烧室的散热损失 Q ,则是由于燃烧室外壳壁温比外界环境温度高,致使对外界有对流和辐射热损失存在而造成的。一般敷设有绝热材料的燃烧室,其外壁温度不会超过 60°C ,因而,这种热损失有可能控制在 0.5% 左右。

根据燃烧过程的能量守恒原理,燃烧效率还能表示为:

$$\eta_r = \frac{(q_{ma} + q_{mf})i_g^{T_3} - q_{ma}i_a^{T_2} - q_{mf}i_f^{T_j}}{q_f Q_u^{T_1}} \quad (1-3)$$

$$= \frac{q_{mf}(1 + L_0)i_{pg}^{T_3} + (q_{ma} - q_{mf}L_0)i_a^{T_3} - q_{ma}i_a^{T_2} - q_{mf}i_f^{T_j}}{q_{mf}Q_u^{T_1}} \quad (1-3)$$

式中 $Q_u^{T_1}$ ——在温度为 T_1 时测定的燃料的低发热量, $[Q_u^{T_1}]$ 为 J/kg ;

L_0 —— 1kg 质量的燃料所需消耗的理论燃烧空气量, $[L_0]$ 为 $\text{kg}\cdot\text{空气}/(\text{kg}\cdot\text{燃料})$;

q_{ma} ——单位时间内流进燃烧室的空气质量, $[q_{ma}]$ 为 kg/s ;

q_{mf} ——单位时间内供给燃烧室的燃料质量, $[q_{mf}]$ 为 kg/s ;

$i_g^{T_3}$ —— 1kg 燃气在燃烧室出口平均总温为 T_3 时的热焓值, $[i_g^{T_3}]$ 为 J/kg ;

$i_{pg}^{T_3}$ —— 1kg 纯燃气在温度为 T_3 时的热焓值, $[i_{pg}^{T_3}]$ 为 J/kg ;

$i_a^{T_2}$ —— 1kg 空气在燃烧室进口平均总温为 T_2 时的热焓值, $[i_a^{T_2}]$ 为 J/kg ;

$i_a^{T_3}$ —— 1kg 空气在温度为 T_3 时的热焓值, $[i_a^{T_3}]$ 为 J/kg ;

$i_f^{T_j}$ —— 1kg 燃料在温度为 T_j 时的物理焓, $[i_f^{T_j}]$ 为 J/kg ;

第九章中给出了计算燃烧效率的、更为准确的关系式(9-57),可供使用。

现有燃气轮机燃烧室的 $\eta_r = (90 \sim 99)\%$,它与燃烧室和喷燃设备的结构型式、燃料种类,以及负荷的变化范围等因素有密切关系。

三、燃烧热强度

燃烧热强度的涵义是:在单位时间内、在单位体积的燃烧空间中(或在单位面积的燃烧截面上),能够释放出来的热量(或燃烧完的燃料量)。以单位体积计算的燃烧热强度简称为“体积热强度” Q_v [其单位为 W/m^3 或 $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{s})$];以单位面积计算的燃烧热强度则称为“面积热强度” Q_f [其单位为 W/m^2 或 $\text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]。即

$$Q_v = \frac{q_{mf}Q_u^{T_1}\eta_r}{V_{f,t}} \quad (1-4)$$

$$Q_f = \frac{q_{mf}Q_u^{T_1}\eta_r}{A_{f,t}} \quad (1-5)$$

式中 $V_{f,t}$ ——火焰管的体积, $[V_{f,t}]$ 为 m^3 ;

$A_{f,t}$ ——火焰管的横断面积, $[A_{f,t}]$ 为 m^2 。

显然,燃烧热强度是一个反映燃烧室结构紧凑性的特性指标。因为这个指标越高,正意味着燃烧同样数量的燃料所需要的燃烧空间的体积或横断面积就越小,也就是说,燃烧室的尺寸和重量都比较小。

试验表明：燃烧热强度 Q_v 和 Q_f 大体上与燃烧室的工作压力 p_2 成正比。因而，严格地讲， Q_v 和 Q_f 这两个参数并不能确切地反映燃烧室结构设计的紧凑程度。因为，一个结构尺寸较大的燃烧室，假如在工作压力较高的情况下工作，其 Q_v 和 Q_f 值就有可能比一个结构较紧凑的，但处于低压工况下工作的燃烧室者为高。因此，人们认为采用考虑了工作压力 p_2 影响的所谓“比体积热强度” \dot{q}_v （其单位为 $W \cdot m^{-3} \cdot N^{-1}$ ）和“比面积热强度” \dot{q}_f （其单位是 $W \cdot N^{-1}$ ），来作为衡量燃烧室结构紧凑性的特性指标是比较合适的。它们的定义是：

$$\dot{q}_v = Q_v / p_2 \quad (1-6)$$

$$\dot{q}_f = Q_f / p_2 \quad (1-7)$$

燃烧热强度的大小主要与燃烧室的结构型式、寿命要求和燃料种类等因素有关。环型、环管型和分管型燃烧室的燃烧过程比圆筒型燃烧室者容易组织，因而 \dot{q}_v 和 \dot{q}_f 值一般较高。燃料性能好（如天然气和煤油）、透平前的燃气初温 t_3 高、使用寿命要求低的燃烧室， \dot{q}_v 和 \dot{q}_f 值也较高。空气体积流量大、燃料消耗量又多的燃烧室，其 \dot{q}_v 和 \dot{q}_f 值就不大容易获得很高。

目前，我们还没有办法根据燃烧室的结构型式和工作参数，从理论上估算可能达到的燃烧热强度。因此，在设计新燃烧室时，一般只能参考现成的、性能比较好的燃烧室的试验数据，来合理地选择 \dot{q}_v 和 \dot{q}_f 值，作为计算新设计的燃烧室火焰管体积和直径的依据。

表1-1中给出了某些燃气轮机燃烧室的燃烧热强度的试验数据，可供设计时参考。

表1-1 某些燃气轮机燃烧室的燃烧热强度

燃 烧 室 型 式	燃料种类	机组功率 kW	$Q_v/(W \cdot m^{-3})$	$\dot{q}_v/(W \cdot m^{-3} \cdot N^{-1})$	$\dot{q}_f/(W \cdot N^{-1})$
固定式圆筒型燃烧室	柴油或渣油			35.6~118.6	35.6~118.6
BBC公司发电用圆筒型燃烧室	柴油或渣油	6200	12.8×10^6	26.1	
机车用圆筒型燃烧室	柴油或渣油	3000	44.9×10^6	75.3	73.9
小型燃气轮机上采用的单管燃烧室	柴 油	200~1000		142~356	94.9~356
一般分管型燃烧室或环管型燃烧室	柴油或渣油			94.9~178	118.6~142
PG5301分管型燃烧室	柴油或渣油	23000	186×10^6	189.8	
机车用分管型燃烧室	柴油或渣油	2300	83.7×10^6	142.3	
一般航空型燃烧室	煤 油	6000~20000		178~593	
斯贝发动机的环管型燃烧室	煤 油		465×10^6	233.6	
JT-3D-3B带环腔火焰管的环管型燃烧室	煤 油		122×10^6	89	
一般舰用燃气轮机燃烧室	柴 油	6000~10000		178~296.5	

四、流阻损失参数

流阻损失参数是一种表示空气工质在流经燃烧室时，压力势能损失程度的经济性指标，也就是说，它是一个从气流流动的角度来反映燃烧室设计质量的参数。根据燃气轮机的热力循环计算得知：燃烧室的压力损失每增加1%，将使燃气轮机的热效率下降2%左右。因而，流阻损失参数也是一个必须重视的经济指标。

通常，在燃烧室中发生的流阻损失是由以下四种原因造成的：

- 1) 为了稳定和强化燃烧过程，就需要强烈地扰动气流，因而，必须消耗一部分压力势能；
- 2) 为了保证燃烧室出口处燃气温度的均匀性或合理分布，就需要强化二次混合空气与高温燃气之间的相互掺混作用，由此必须消耗一部分压力势能；
- 3) 工质在加热时，由于气流动量的变化所引起的热阻损失；

4) 工质流经燃烧室时, 由于摩擦、扩压、分流等现象所造成的压力损失。

显然, 流阻损失的存在将会使燃烧室出口处燃气的总压 p_3^* 低于燃烧室入口处空气的总压 p_2^* 。其降低程度则与燃烧室的结构型式、火焰管内气流的流动情况、气流的速度, 以及燃气的加热程度等因素, 有密切关系。在设计燃烧室时, 除了为稳定和强化燃烧过程以及为保证燃气的均匀掺混和火焰管壁的冷却, 而必须采取高速气流外, 应尽可能地降低燃烧室其它部位的气流速度, 并消除不必要的局部流阻损失。

目前, 表示燃烧室流阻损失的参数有:

(一) 流阻损失系数 Φ

$$\Phi = \frac{p_2^* - p_3^*}{\frac{\rho_2 v_2^2}{2}} \quad (1-8)$$

式中 p_2^* ——燃烧室入口处空气的总压, [p_2^*]为kPa;

p_3^* ——燃烧室出口处燃气的总压, [p_3^*]为kPa;

v_2 ——燃烧室入口处空气的平均流速, [v_2]为m/s;

ρ_2 ——燃烧室入口处空气的密度, [ρ_2]为kg/m³。

有时, 也有用燃烧室火焰管最大截面 A_{f1} 上的平均动压值 $\frac{\rho_2 v_{f1}^2}{2}$, 来计算流阻损失系数的, 即

$$\Phi_{f1} = \frac{p_2^* - p_3^*}{\frac{\rho_2 v_{f1}^2}{2}} \quad (1-9)$$

显然, 由于计算平均动压值的特征截面选得不同, 那么, 流阻损失系数的绝对数值就有差异。但是它们之间一定可以用如下关系进行互相转换, 即

$$\frac{\Phi}{\Phi_{f1}} = \left(\frac{v_{f1}}{v_2} \right)^2 = \left(\frac{\frac{q_{ma}}{\rho_2 A_{f1}}}{\frac{q_{ma}}{\rho_2 A_2}} \right)^2 = \left(\frac{A_2}{A_{f1}} \right)^2 \quad (1-10)$$

式中 A_2 、 A_{f1} ——分别为燃烧室的入口断面积和火焰管的最大断面积。

试验表明: 当气流流过不喷油燃烧的燃烧室时(这种试验称为“冷吹风试验”), 只要雷诺数 Re 足够大, 致使气流的流动特性进入了通常所谓的“自模化流动状态”后, 那么, Φ 值将是一个常数, 它不再会随气流速度的继续增大而有所改变。目前, 常用的燃烧室都具有这个特性。因而, 在冷吹风工况下, 由试验求得的燃烧室的 Φ , 将总是一个常数。可是当燃烧室进入燃烧工况后, 由于热阻的影响, Φ 值将开始随着燃气加热程度 $\frac{T_3^*}{T_2^*}$ 的增高而逐渐加大。式中的 T_3^* 和 T_2^* 分别表示燃烧室出

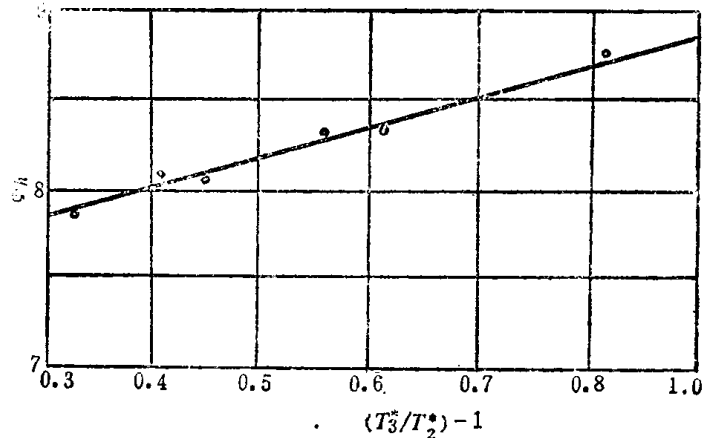


图1-6 流阻损失系数 Φ 随 $\frac{T_3^*}{T_2^*}$ 的变化关系

口处燃气的绝对总温和燃烧室入口处空气的绝对总温。

试验表明：在燃烧工况下，燃烧室的流阻损失系数 Φ_h ，可以表示为如下函数关系，即

$$\Phi_h = f\left(\Phi, \frac{T_3^*}{T_2^*}\right) = \Phi + K\left(\frac{T_3^*}{T_2^*} - 1\right) \quad (1-11)$$

式中 Φ ——燃烧室冷吹风试验时的流阻损失系数；

K ——一个反映燃烧室结构差异的常数。

图1-6中给出了某种燃烧室流阻损失系数的变化趋势，可供参考。

在一般燃烧室中，相对于火焰管最大断面上的平均动压值而言的 Φ_h 值约为8~12，这就是说，当压缩空气流经燃烧室并进行燃烧加热时，必须损失掉8~12倍的按火焰管最大断面计算的动压值。

当然，流阻损失系数也可以按燃烧室外壳的最大断面积 $A_{c,r}$ 上的平均动压值计算。那时， $\Phi_{c,r} \approx 25 \sim 30$ 。

(二) 总压保持系数 σ^* 或总压损失系数 δ^*

通常定义：

$$\begin{aligned} \sigma^* &= p_3^*/p_2^* = \frac{p_2^* - (p_2^* - p_3^*)}{p_2^*} \\ &= 1 - \frac{\Delta p_{2,3}^*}{p_2^*} \end{aligned} \quad (1-12)$$

而

$$\begin{aligned} \delta^* &= \frac{p_2^* - p_3^*}{p^*} = \frac{\Delta p_{2,3}^*}{p_2^*} \\ &= 1 - \sigma^* \end{aligned} \quad (1-13)$$

用 σ^* 或 δ^* 来表示燃烧室流阻损失的优点在于：当得知压力 p_2^* 后，很容易估算出燃烧室总压降的数值。但是，这两个参数却与燃烧室入口处气流的马赫数 Ma_2 有密切关系，因为

$$\begin{aligned} \Phi_h &= \frac{p_2^* - p_3^*}{\frac{\rho_2 v_2^2}{2}} = \frac{p_2^* (1 - p_3^*/p_2^*)}{\frac{\rho_2 v_2^2}{2}} \\ &= \frac{p_2^* (1 - \sigma^*)}{\frac{\rho_2 v_2^2}{2}} \end{aligned}$$

而

$$\begin{aligned} \frac{\rho_2 v_2^2}{2} &= \frac{p_2}{RT_2} \frac{v_2^2}{2} = \frac{p_2}{\gamma RT_2} \frac{\gamma v_2^2}{2} \\ &= \frac{\gamma}{2} \frac{v_2^2}{a^2} p_2 = \frac{\gamma}{2} Ma_2^2 p_2 \end{aligned}$$

式中 R ——气体常数。

鉴于

$$p_2^* = p_2 + \frac{\rho_2 v_2^2}{2} = p_2 \left(1 + \frac{\gamma}{2} Ma_2^2 \right)$$

所以

$$\begin{aligned} \sigma^* &= 1 - \Phi_h \frac{1}{p_2^*} \frac{\rho_2 v_2^2}{2} \\ &= 1 - \Phi_h \frac{\gamma}{2} Ma_2^2 \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{2} Ma_2^2} \end{aligned}$$

由于

$$\frac{\gamma}{2} Ma_2^2 \ll 1$$

因而上式可以简化为:

$$\begin{aligned} \sigma^* &= 1 - \Phi_b \frac{\gamma}{2} Ma_2^2 \\ &\approx 1 - 0.7 \Phi_b Ma_2^2 \end{aligned} \quad (1-14)$$

当然

$$\delta^* = 1 - \sigma^* \approx 0.7 \Phi_b Ma_2^2 \quad (1-15)$$

由此可见, σ^* 和 δ^* 值将随燃烧室工况的改变而不断地变化。现有燃烧室中 $\sigma^* \approx (91 \sim 98)\%$ 。

图1-7中给出了某台燃烧室在 $a_\Sigma = \infty$ 的冷吹风工况下, σ^* 和 Φ 随 Ma_2 的变化关系, 可供参考。

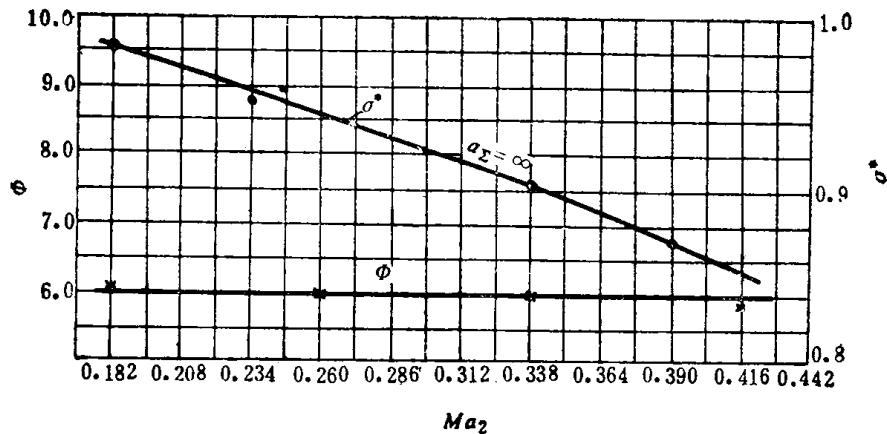


图1-7 某台燃烧室在冷吹风工况下, σ^* 和 Φ 随 Ma_2 的变化关系

不难证明: 总压损失系数 δ^* 与燃烧室的比面积热强度 \dot{q}_r 之间有如下关系, 即

$$\delta^* \approx C \left(\frac{\dot{q}_r a_\Sigma}{Q_r^{T_1} \eta_r} \right)^2 T_2 \left[\Phi + K \left(\frac{T_3^*}{T_2^*} - 1 \right) \right] \quad (1-16)$$

式中 $C = \frac{L_0^2 \bar{R}}{2} \left(\frac{A_{r1}}{A_2} \right)^2$ 是一个表征火焰管最大断面 A_{r1} 与燃烧室入口断面 A_2 之间的比例关系的系数。其中 $\bar{R} = 287.05 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 是空气的气体常数; L_0 是理论燃烧空气量; \dot{q}_r 的单位取 W/N , $Q_r^{T_1}$ 的单位应取 J/kg 。

由此可见, 燃烧室的流阻损失与比面积热强度的平方成正比。因而, 减小燃烧热强度是减小流阻损失的一个重要手段。反之, 为了获得燃烧热强度很高的燃烧室, 就必须付出提高流阻损失系数的代价。

五、燃气出口温度场指标

燃烧室出口处燃气温度场的均匀程度对于燃气透平第一级导叶和工作叶片的工作安全性将有密切影响。图1-8中给出了某台机组中燃烧室出口温度场的试验结果, 可供参考。

通常, 可以用各种方法来表示燃烧室出口温度场的不均匀程度。图1-8中采用了三种表示方法, 即

$$\text{最大不均匀度 } \theta_t = \frac{\text{最高温度} - \text{出口平均温度}}{\text{出口平均温度} - \text{进口平均温度}} \quad (1-17)$$

$$\text{径向不均匀度 } \theta_r = \frac{\text{半径方向最高平均温度} - \text{出口平均温度}}{\text{出口平均温度} - \text{进口平均温度}} \quad (1-18)$$

$$\text{不均匀系数 } A_r = \frac{\text{最高温度} - \text{出口平均温度}}{\text{出口平均温度}} \quad (1-19)$$

一般要求： $\theta_r < (30 \sim 35)\%$ ； $\theta_r < 10\%$ ； $A_r \leq 10\%$ 。

此外，为了最合理地发挥透平叶片材料的潜力，在设计燃烧室时，可以预先给出燃烧室出口断面上径向平均总温沿叶高方向的理想分布关系，如图 1-9 所示，力求燃烧室的试验结果能够满足这个规范要求。

显然，实际的试验结果总是与理想分布曲线有差距。通常，可以用以下两个参数来描述这种偏差的大小，即用 $D_{R_{max}}$ 来表示实测的平均径向总温分布曲线 2 与所要求的理想分布曲线 1 之间的偏差；而用 $D_{m_{max}}$ 来表示同叶高处实测的最高局部径向温度 3 与所要求的理想分布曲线 1 之间的最大偏差。它们的表达式是：

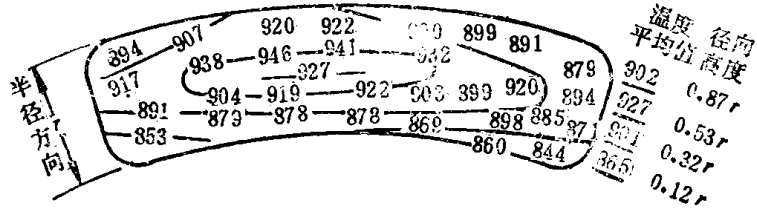


图 1-8 燃烧室出口温度场示例

$$\text{平均温度 } t_3^* = 899^\circ\text{C} \quad \theta_r = \frac{946 - 899}{899 - 274} = 7.5\%$$

$$\theta_r = \frac{927 - 899}{899 - 274} = 4.5\% \quad A_r = \frac{946 - 899}{899} = 5.23\%$$

$$D_{R_{max}} = \frac{R_{max}}{t_3^* - t_2^*} \quad (1-20)$$

$$D_{m_{max}} = \frac{m_{max}}{t_3^* - t_2^*} \quad (1-21)$$

式中 t_3^* ——燃烧室出口处的燃气平均温度；

t_2^* ——燃烧室入口处的空气平均温度；

R_{max} ——实测的平均径向总温分布曲线与理想分布曲线之间的最大温度偏差；

m_{max} ——某叶高上实测的最高局部径向温度与理想分布曲线之间的最大温度偏差。

为了明确地反映温度场的分布特点，最好还能标出与 $D_{R_{max}}$ 和 $D_{m_{max}}$ 相对应的叶高的百分数和圆周方向的位置。

通常，希望能把 $D_{R_{max}}$ 和 $D_{m_{max}}$ 控制在 10% 以内。

此外，在装有许多个燃烧室的机组中，还应力争每个燃烧室之间燃气出口温度场的平均值不能互相偏差 $15 \sim 20^\circ\text{C}$ 左右为好。

严格地讲，为了评定装有许多个燃烧室的机组中燃气温度场的均匀性程度，我们还应该设法测量出透平进口处环形流道中燃气温度场的分布特性。必须力争环形流道中同一个直径断面上，燃气的最大不均匀度保持为 $\pm 5\%$ 左右，将是满意的。

图 1-10 中给出了装有许多个分管型燃烧室的机

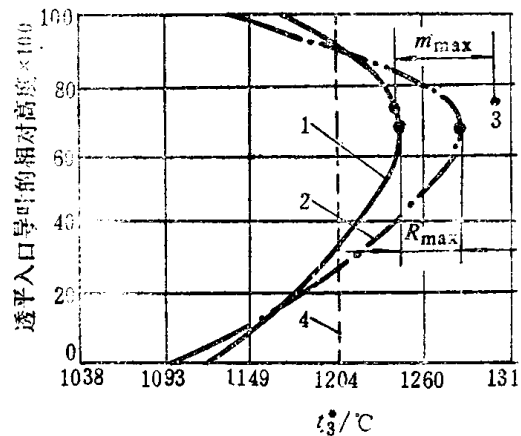


图 1-9 燃烧室出口断面上径向平均总温沿叶高方向分布图

1—理想的平均径向总温分布曲线 2—实测的平均径向总温分布曲线 3—某叶高上的最高局部温度值 4—燃烧室出口断面上的燃气平均温度线，即 t_3^* = 常数线

组中，透平进口处环形流道内燃气温度场测点的布置情况。表1-2中给出了在100% Pe_0 负荷工况下，实际测得的透平进口温度场的试验数据及其不均匀度，可资分析和参考。其中 Pe_0 为机组的额定功率。

显然，燃烧火焰的长度、二次混合空气的来流均匀性、掺混速度与紊流度以及燃气混合器的结构型式等因素，都对燃烧室出口处燃气温度场的指标有密切影响。

六、火焰管壁面温度的指标

火焰管壁面温度的高低及其均匀程度对于燃烧室的工作寿命将有决定性影响。

一般规定：火焰管的壁面温度不应超过金属材料长期工作所能承受的温度水平。对于工作寿命要求较长的燃烧室来说，希望能把火焰管的最高壁温控制在650~750℃左右。但在工作寿命较短的燃烧室中，其最高壁温则有可能超过800~850℃，甚至在局部地区有可能达到900℃左右。

表1-2 100% Pe_0 负荷工况下，透平进口温度场的试验数据

温度测点号	直径 断面 编号			温度测点号	直径 断面 编号		
	d_1	d_2	d_3		d_1	d_2	d_3
1	699	738	712	10	703	728	687
2	743	783	740	11	742	751	690
3	745	764	748	12	698	721	685
4	700	721	683	平均温度	722	746	709
5	751	770	733	不均匀度	$\frac{751-722}{722}$	$\frac{783-746}{746}$	$\frac{748-709}{709}$
6	723	752	713	上限	=+4.02%	=+4.96%	=+5.50%
7	750	765	706	不均匀度	$\frac{698-722}{722}$	$\frac{721-746}{746}$	$\frac{683-709}{709}$
8	704	731	693	下限	=-3.32%	=-3.53%	=-3.67%
9	701	739	720				

火焰管上壁面温度的分布均匀程度也是一个很重要的安全性指标。显然，减小它们之间的温度偏差，对于防止火焰管发生翘曲变形或开裂是有好处的。但是，目前对此指标尚无明确的规定。

七、点火特性

燃烧室应能确保机组在启动时，在所规定的空气参数 t_2 、 p_2 和 q_{m0} 的条件下，能够快速而又可靠地点燃主燃料炬，并且在机组的整个升速过程中，不致发生熄火、超温和火焰过长等

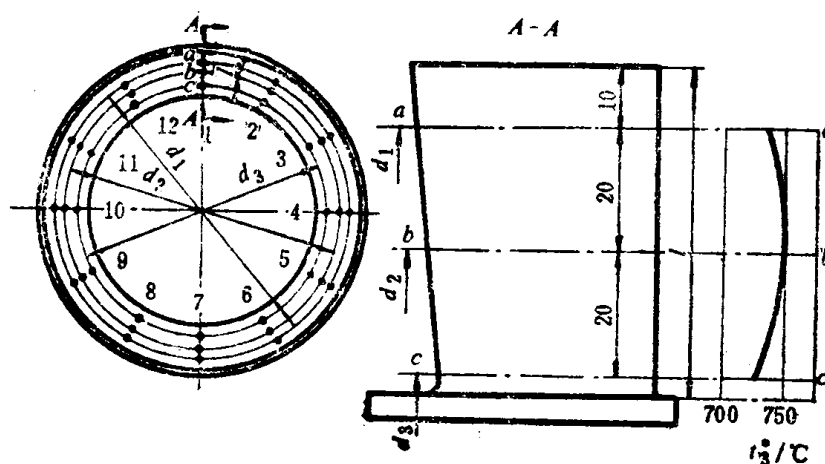


图1-10 透平进口处环形流道内燃气温度场测点的布置情况