

航空燃气轮机燃烧室

金如山 著

宇航出版社

内 容 简 介

本书是作者根据研究和教学工作的成果和经验，并总结国内外技术发展情况而写的一部专著。全书共十四章，详细阐述了燃烧室内气动、热力和传热过程，精辟分析了这些过程对于燃烧室性能的影响，对燃烧室的设计、计算和试验方法，提供了充分可供使用的数据和图表。本书特点是：（1）内容丰富、取材新颖、立足80年代；（2）理论联系实际、强调半经验半分析方法，有很强的工程实用性。

本书主要是为从事航空发动机研究、设计的工程技术人员、大学教师、学生和研究生而编写。但是对航天、船舶、机车、发电用发动机等专业人员也具有一定的参考价值。

航空燃气轮机燃烧室

金如山 著

责任编辑 宋兆武

宇航出版社出版

宏飞印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

开本：850×1168 $1/32$ 印张：16.25 字数：451千字

1988年2月第1版第1次印刷 印数：1—2000册

ISBN 7-80034-540-6/TB·013 定价：4.20元

序 言

航空发动机是飞机的“心脏”，而航空燃气轮机的燃烧室可以算是“心脏”的“心脏”。研制出一种燃烧效率高、流阻小、工作稳定、寿命长、质量轻、出口气流温度分布理想的燃烧室，乃是航空燃气轮机发展工作中的一项关键任务。几十年来，各国都在这件事上投下了大量的人力、物力，直到今天，仍然是极受重视的一项工作。金如山同志多年来致力于燃烧室与燃烧的研究工作和教学工作，曾先后在北京航空学院热动力研究所、英国克兰菲尔德理工学院以及美国普渡大学燃烧研究中心进行过这方面的科研和教学工作，取得了可喜的成就。《航空燃气轮机燃烧室》是他的最新著作。这本书详细阐述了燃烧室内的气动、热力、传热过程，精辟地分析了这些过程对于燃烧室性能的影响，提供了燃烧室设计方法、试验研究方法，以及充分的可供依据的数据。内容相当丰富，取材十分新颖，在许多方面是作者本人的科研成果（特别是在燃油的雾化蒸发过程方面）。我相信，这本书对于燃烧室设计研制工作，以及大学生、研究生的教学工作都是很有参考价值的。

曹传钧

1985年春

前 言

航空燃气轮机燃烧室的设计和技术发展既涉及到燃烧学科的研究发展，也涉及到工程技术的许多方面。过去曾有过一些关于燃烧室或燃烧的书，有的只谈燃烧理论，不研究如何应用；有的只谈具体结构，缺乏必要的理论指导。本书则力求将理论与实际结合起来，着重阐明燃烧室研究的成果如何在实际燃烧室技术发展中应用。书中避免过多的数学推导，着重于物理本质，强调在燃烧室技术发展中的半经验、半分析的特色。

本书是为从事燃烧室设计、研究、教学工作的技术人员而写的。力求在不多的篇幅内，把燃烧室发展中涉及的各项重大技术问题，概括地阐述清楚。显然，这不是一本设计手册，不能照搬来设计燃烧室。但作者相信，这本书的出版对从事燃烧室工作的工程技术人员，教学、科研人员以及研究生、大学生是很有参考价值的。

本书的取材有两点考虑：第一，要新，绝大多数是70年代后期、80年代初期的，特别是看法和观点代表了当今燃气轮机燃烧室技术的发展。坚决抛弃并纠正一些过时、陈旧的看法，尽管其中有些仍在我国燃烧室技术界流行着；第二，相当一部分是本书作者自己在燃气轮机燃烧方面的研究成果，包括两次在美国普渡大学担任机械工程系客座教授期间的工作，以及在国际学术刊物、国际学术会议上发表、宣读的很多篇论文的内容。两次在普渡大学燃气轮机燃烧短训班讲课的讲稿大都吸收在内了。

在第一章中，侧重概括环形燃烧室出现以来的技术发展；第二章中，全面讨论了燃烧室性能参数，其中很多是第一次在燃烧室的书中明确讨论的，这些参数的含义比以前的燃烧室书中讲得更清楚了；第三章专门讨论燃烧室进口流场问题，这是过去有关燃烧室的书中所没有的；第四章讨论环形扩压器，对一般书中重复讨论的

锥形扩压器只字未提。从二元扩压器(可看作环形扩压器的特例)讨论到一般环形扩压器进而到短突扩环形扩压器,这是对环形扩压器的独特的概括;第五章专门讨论除扩压流动以外的燃烧室中的空气流动,对经过孔的流量系数、进气角度、透射深度以及流动的局部不均匀性的讨论形成该章的特色;在第六章专门研究主燃区的基本问题,这也是本书与过去燃烧室书的不同之点,其中不少是初次系统地归纳提出的问题;燃油雾化、蒸发、运动轨迹及燃油浓度分布是当前燃烧室研究上最重要、最活跃的方面,本书花了较多篇幅作为重点阐述,特别着重于近期的进展。而对几乎每本燃烧室的书中都提到的喷咀原理和结构等完全省略了;第七章基本上都基于作者自己的研究成果;第八、九、十章,一方面概括有关的基本问题,另一方面(亦是其特色),作为另一个重点,一步一步地阐明燃烧室出口温度分布的半经验、半分析的方法,这是把理论研究和实际技术发展相结合的一个典型问题;在第十一章中除了概括点火基本问题外,着重介绍对加氧点火的研究;第十二章提出燃烧室排气污染的问题,这是对70年代以来燃气轮机燃烧污染研究的一个全面而又精简的总结;第十三章中只讨论燃烧室的初步设计,要在本书中讨论详细设计是不可能的。目的是使学生们以及开始搞燃烧室技术工作的人有个大致概念;第十四章中并没有讨论测量技术,而着重于燃烧室试验技术中的几个重要问题,其中包含了实际经验的概括。本书作者力图把篇幅压短,只讨论了一些主要问题。读者若对某个问题有更多的兴趣,可参阅列出的参考文献。

在完成本书过程中,承蒙赵云惠讲师、侯木玉工程师、王兴甫工程师的很多帮助,无论从技术上,文字润色上,插图准备上等许多工作都是使本书能与读者见面所必不可少的。作者在此谨致以衷心感谢。最后特别感谢责任编辑宋兆武工程师对本书提出了许多宝贵意见。

作者
1985年春于
北京航空学院

目 录

第一章 航空燃气轮机燃烧室的技术发展和设计特点	(1)
1.1 燃烧室的技术发展	(1)
1.2 燃烧室设计发展的特点	(10)
参考文献	(14)
第二章 燃烧室性能参数	(15)
2.1 引言	(15)
2.2 燃烧效率	(16)
2.3 总压损失	(19)
2.4 高压熄火边界和再点火高度	(20)
2.5 燃烧室出口温度分布	(21)
2.6 火焰筒壁温及寿命	(23)
2.7 排气冒烟与燃烧室积炭	(24)
2.8 排气气态污染物	(24)
2.9 理论燃烧温度	(25)
2.10 本章主要符号	(32)
参考文献	(34)
第三章 燃烧室进口流场	(35)
3.1 进口流场对环形燃烧室工作的影响	(35)
3.2 燃烧室进口流场的测量及典型结果	(43)
3.3 燃烧室进口流场的模拟	(54)
3.4 讨论燃烧室进口流场问题的意义	(58)
3.5 本章主要符号	(60)
参考文献	(61)
第四章 环形扩压器	(63)
4.1 引言	(63)
4.2 二元扩压器	(64)
4.3 环形扩压器	(83)

4.4	短环形突扩扩压器	(101)
4.5	本章主要符号	(114)
	参考文献	(116)
第五章	燃烧室的空气流动	(119)
5.1	火焰筒空气流量分配	(119)
5.2	空气流过火焰筒进气孔的流量系数	(130)
5.3	火焰筒进气孔的进气角度	(145)
5.4	火焰筒空气射流的透入深度	(147)
5.5	环腔中的空气流动	(156)
5.6	燃烧室内空气流动的局部不规则性	(162)
5.7	燃烧室的总压损失	(169)
5.8	本章主要符号	(175)
	参考文献	(177)
第六章	主燃区的基本问题	(180)
6.1	主燃区设计中的矛盾	(180)
6.2	主燃区油气比	(181)
6.3	主燃区的流态	(186)
6.4	经过扰流器的空气流动	(190)
6.5	燃油喷射方式的选择	(198)
6.6	燃烧效率与主燃区燃烧	(199)
6.7	主燃区烟粒子浓度与主燃区辐射换热	(202)
6.8	回流式小燃烧室主燃区的特殊问题	(215)
6.9	本章主要符号	(216)
	参考文献	(218)
第七章	燃油雾化、液雾蒸发、液雾运动轨迹及燃油浓度分布	(220)
7.1	引言	(220)
7.2	燃油雾化	(222)
7.3	液滴蒸发	(254)
7.4	液雾蒸发	(281)
7.5	液雾轨迹	(291)
7.6	在气流中喷咀下游的燃油分布	(297)
7.7	本章主要符号	(306)
	参考文献	(308)

第八章	燃烧室射流掺混的温度分布	(313)
8.1	引言	(313)
8.2	轴对称圆截面射流	(313)
8.3	在垂直的横向气流中的单个圆截面射流	(317)
8.4	在垂直的横向气流中多个圆截面射流	(321)
8.5	经验关系式的应用	(335)
8.6	本章主要符号	(338)
	参考文献	(339)
第九章	燃烧室冷却	(340)
9.1	引言	(340)
9.2	燃烧室内辐射换热	(343)
9.3	燃烧室内对流换热	(349)
9.4	燃烧室冷却计算	(351)
9.5	气膜冷却空气混合后的温度分布计算	(357)
9.6	本章主要符号	(371)
	参考文献	(373)
第十章	燃烧室出口温度分布	(374)
10.1	引言	(374)
10.2	燃烧室出口温度分布品质的重要性及指标	(375)
10.3	出口温度分布的试验布置	(379)
10.4	影响出口温度分布的因素	(383)
10.5	半经验半理论的方法预计出口温度径向分布	(389)
10.6	燃烧室掺混空气混合温度分布计算	(392)
10.7	燃烧室冷却空气混合温度分布计算	(402)
10.8	燃烧室出口温度径向分布的预测及与试验结果比较	(408)
10.9	燃烧室出口温度分布的统计分析及其应用	(411)
10.10	燃烧室出口温度分布随发动机状态的变化	(414)
10.11	本章主要符号	(416)
	参考文献	(417)
第十一章	点火	(420)
11.1	燃烧室点火过程	(420)
11.2	点火研究	(422)
11.3	加氧点火的研究	(428)

11.4	本章主要符号	(444)
	参考文献	(444)
第十二章	燃烧室排气污染	(446)
12.1	燃烧室排气污染问题	(446)
12.2	航空发动机排气污染标准	(447)
12.3	燃烧室排气污染问题综述	(451)
12.4	排气冒烟	(454)
12.5	其它气态污染物	(464)
12.6	低污染燃烧室的研究	(468)
	参考文献	(469)
第十三章	燃烧室初步设计	(472)
13.1	引言	(472)
13.2	原始数据	(472)
13.3	轮廓尺寸的确定	(475)
13.4	空气流量分配的确定	(479)
13.5	燃烧室进气装置的设计	(485)
13.6	本章主要符号	(491)
	参考文献	(492)
第十四章	燃烧室试验	(493)
14.1	燃烧室试验技术的含义	(493)
14.2	燃烧室试验设备	(494)
14.3	燃烧室试验类型的选择	(499)
14.4	空气加热方式选择	(500)
14.5	燃烧室试验的技术问题	(501)
14.6	本章主要符号	(508)
	参考文献	(509)

第一章 航空燃气轮机燃烧室的技术发展和设计特点

1.1 燃烧室的技术发展

本书所论述的航空燃气轮机主燃烧室的技术发展（除加力燃烧室外），包括主燃烧室总的技术发展，燃烧室模型分析计算，燃料与排气污染等。

1.1.1 主燃烧室总的技术发展

航空燃气轮机主燃烧室的技术发展，由低级到高级。不同的时期，解决问题的重点也不一样〔1〕。

一、燃烧室的型式 由单管燃烧室发展成为环管燃烧室，进而发展成环形燃烧室，最近发展为短环形燃烧室。

二、燃烧室进口压力 由低压（ $10 \times 10^5 \text{Pa}$ 以下）到中压（ $15 \times 10^5 \text{Pa}$ 左右），到较高压力（ $20 \times 10^5 \text{Pa}$ 左右），到现在的高压（ $30 \times 10^5 \text{Pa}$ ）。今后将达到 $35 \sim 40 \times 10^5 \text{Pa}$ 。相应的进气温度由 550K 提高到现在的近 800K ，今后估计可以提高到 900K 。

三、燃烧室出口平均温度 已由 1100K 提高到目前的 $1650 \sim 1700 \text{K}$ ，将来可达到 1800K 。

四、燃烧室长度 在起飞状态下，对具有相同（或近似）空气流量的燃烧室而言，现在已缩短了约 $300 \sim 500 \text{mm}$ 。但应当说明，正如华沙尔（Wassell）〔2〕所说的，燃烧室长度对发动机总质量的影响并不特别显著。所以不应该过分强调缩短长度（除非发动机轴系的支承点的安排上要求这样做）。开始初步设计时，

有的燃烧室长度确定得过短，会给以后的发展、改型造成困难，这应引为教训。看来，在今后更多地缩短燃烧室长度没有多大必要。

五、其他要求 在燃烧室的早期发展阶段，燃烧室压力低，进气温度也低，燃烧效率成为突出的问题。因此，主要解决的问题是提高燃烧室效率，并保证高空点火的可靠性。当时，燃烧室总压恢复系数比较低（0.90~0.92）。随着发动机压比及巡航速度、进气压力、进气温度的提高，在最大起飞推力及巡航状态下的燃烧效率常在0.99以上。但是，燃烧室冷却及出口温度分布问题却变得很突出，同时也希望总压损失有所减少，熄火边界要符合要求（虽然这两点，一般说来并不难做到）。随着发动机推重比的提高，希望燃烧室长度在可能范围内再短些。自1973年美国环境保护局公布航空发动机排气污染控制条例之后，尽管后来该条例又有所放宽，尽管军用发动机可以不采用这一条例而另有规定，但排气污染的要求仍然是燃烧室发展上必须考虑的问题。在80年代，除了上述各项要求之外，又着重加上两条：其一，延长燃烧室的寿命，减少受热部件的维护费用（例如减少30%），对军用发动机还要求延长两次大修之间的时间间隔；其二，提高对各种燃料的适应性，即，可以使用几种不同的燃油，特别是替换燃料。

1.1.2 发展环形燃烧室需要解决的技术问题

一、进口流场 环形燃烧室的工作对进口流场比较敏感，所以在开始设计、发展环形燃烧室时必须知道进口流场（可能是近似估算的）。试验时，要模拟进口流场沿周向平均的径向流速分布。在计算环形燃烧室空气流量分配时，要针对某个进口径向流速分布来计算。任何空气流量分配的计算方法，如果只能适用于

均匀的进口流场，则无法体现进口流场径向流速分布对流量分配的影响，这对环形燃烧室的发展来说，没有什么实际意义。当然，我们这里指的是直流式环形燃烧室。对回流式环形燃烧室，进口流场的影响较小，在试验时可以不模拟进口流场。折流式（甩油盘雾化）环形燃烧室进口流场影响亦较小，而且很难模拟进口流场。在进行燃烧室试验时，用进口流场模拟挡板来产生沿径向的速度分布，如果要模拟压气机叶片引起的尾迹的话，不能采用在燃烧室的试验段前面加上压气机最后一级导流叶片的方法，而要单独做一批与压气机最后一级导流叶片等厚度的直叶片，加在燃烧室试验段前面来产生流经叶片的尾迹。

二、冒烟及火焰筒壁温 随着燃烧室压力的提高，燃烧室排气冒烟增大，主燃区中生成的炭粒子加多，主燃区辐射换热增大，结果使壁温增高，寿命降低。解决这个问题主要通过以下途径：

(1) 设计接近于化学恰当比的主燃区。主燃区的油气比到底是多少，很难给出一个精确的数值。但在计算主燃区空气量的原则确定后，增加主燃区的空气，减少主燃区的富油程度，一般说可以减少冒烟的程度和辐射换热；但缺点是慢车状态下燃烧效率低，一氧化碳及未燃碳氢化合物含量增大，点火困难等。现在总的趋势是采用接近于化学恰当比的主燃区，同时克服上述困难。

(2) 由压力雾化的离心式喷咀改成某种形式的部分预混合的喷射系统，例如蒸发管或空气雾化喷咀。对于这两种喷射方式，至今为止，尚不能肯定说某一种绝对地优于另一种。在压力 $25 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，出口温度 1650 K 的情况下，两种喷射方式都可以正常工作，在服役的发动机上都在使用着。

三、冷却 从事燃烧室工作的人常常自搞一套气膜冷却有效性的数据，因为由传热研究得出的数据，用到燃烧室的冷却设计上有着相当大的差距。从燃烧室壁的结构来看，简单地在室壁上开普通小孔的冷却结构，完全不适合于先进燃烧室的要求。燃烧室壁

上完全采取开微小孔进行发汗冷却，其效果也并不最好。而且不能解决高压燃烧室环形火焰筒强度的加强问题。目前普遍采用机械加工冷却环带的办法冷却室壁，可以形成较均匀的冷却气膜，又对环形火焰筒的强度起到加强作用。对冷却环带已经做了许多研究工作，例如，冷却孔的流量系数，冷却缝槽中舌片的厚度和长度的选取，冷却环带空气流量的控制等等。辐射换热在燃烧室冷却计算中是最难精确确定的，为了提供比较符合实际的辐射热流数据，需要在条件相同的试验燃烧室上，或者在相同类型的燃烧室上试验测定辐射换热量。燃烧室壁冷却计算方法需要不断完善，并且要与实际壁温测量结果进行比较，也就是说，冷却计算方法必须与工程实践经验相结合。

四、出口温度分布 这是发展先进的短环形燃烧室的一个关键性的问题，因而其发展工作常常需要化费较长时间和较多的精力。首先要解决用于测量全环形燃烧室出口温度分布的移位机构。由于在高压、大流量的燃烧室上，直接由试验测量全环形燃烧室出口温度分布常常是不现实的（受到试验设备能力的限制，同时试验经费非常高），所以需要由扇形段试验燃烧室得到高压燃烧试验数据。由低压、全环形试验燃烧室的试验数据，估计出高压下大流量燃烧室在额定工作状态下燃烧室出口温度分布品质，或者用在发动机的涡轮导向叶片上安装热电偶的方法，测定较低工况下燃烧室出口温度分布，然后用回归分析推导出额定工况下燃烧室的出口温度分布。现在还不可能做到在燃烧室设计和制造之后，不经过试验就计算出出口温度分析。但现在已经有半经验半分析的方法，可以在第一次燃烧室试验之后，根据实测的出口温度分布数据，估算出当燃烧室设计（例如掺混孔）改变之后其出口温度将如何变化。这就有可能减少出口温度分布调试中的盲目性，减少试验的次数，节约经费。

五、空气流动 设计和发展环形燃烧室的另一个基本环节是设计好燃烧室的空气流动。如果能够把环形燃烧室中各截面、各点的空气压力、温度、流速（大小及方向），流量等都基本上搞

清楚，可以说燃烧室的问题就解决了一大半，余下的问题就不难解决。这就是说，如果在火焰筒内已经得到了一个比较均匀的（指周向）、上下匀称的空气流态，有了合适的空气流量分配，有了合适的沿周向较均匀的冷却空气气膜，那么再需要有一个基本良好的燃油喷雾与之相配合就行了，这个燃烧室就不会出现大的问题。当然还会有局部性的改进问题。到目前为止，在燃烧室空气流动问题上已经做了很多工作，例如，环形扩压器（包括短扩压器）、空气扰流器、主燃区空气回流流量的估算、各种孔的流量系数、掺混气流的混合，实用的空气流量分配计算方法等等。

六、燃油喷射 燃油喷射方式以发动机的类型而定。在中型以上的发动机上，现在和将来主要采用空气雾化喷咀或蒸发管，过去也采用过离心式喷咀。在小型发动机上有采用甩油盘雾化器的。过去对发动机上喷咀的要求是保证通过的燃油流量、雾化锥角、油雾的空间分布，以及希望在额定流量下雾化的平均滴径小于 $70\sim 75\mu\text{m}$ 。现在对喷咀雾化，要求其滴径小于 $50\sim 55\mu\text{m}$ ，并要求有平均滴径的公差。还进一步要求液雾的尺寸分布指数为某个适当的数值（例如，对 $R-R$ 分布， $N\approx 3$ ）。同时也要求在非设计工况，即小流量状况下（例如慢车工况），液雾的平均滴径不超过某个数值。由于火焰筒的尺寸日益减小，要特别注意避免直径很大的油滴喷射到壁面上，雾化锥角的大小在很大程度上要看与主燃区的空气流动是否相配，以便形成较均匀的油气混合。

1.1.3 燃烧室模型分析计算

一、燃烧室模型分析计算的概念 燃烧室模型分析计算，指的是设想一种模型，把实际燃烧室中的各个物理现象加以简化，使其可以用数学公式表达，进行数学分析，以便可以利用计算机进行计算，其结果有助于燃烧室的设计和发展。

应该把燃烧的模式分析计算和作为设计发展工具的燃烧室的

模型分析计算加以区别。鲁勃特 (Roberts) [7] 明确指出：“必须区别用于设计目的模型分析计算和更为纯属研究上的模型分析计算，后者希望把燃烧模型分析计算引导到基础学科的方向上去。而对于一个成功的设计系统来说，必须要得出设计预估，而且这个设计预估必须把燃烧室的硬件设计和要预估的性能联系起来。”所谓燃烧室的硬件设计指的是：火焰筒几何形状、空气进气孔的尺寸及分布、扰流器的涡强、燃油喷咀的参数等。常把这样的燃烧室模型分析计算编成一套程序，其输入是：火焰筒几何尺寸、燃烧室进口压力和进口温度、空气流量分配、燃油性质、燃油喷咀参数等；其输出为：燃气的温度、压力、速度、已燃烧掉的燃料百分数、燃烧产物的化学组成等等。

二、燃烧室模型分析计算的进展 70年代初，开始出现大型的、理论分析的、三元的流动模型。随着计算机容量的增大、运算速度的提高，计算模型越来越大，越来越复杂。到70年代中期，搞大模型的呼声最高。但很快许多大发动机公司认识到，要运用这些大模型于实际燃烧室的发展工作上，所需的人力，特别是对人员的技术水平和经验的要求，以及所需的计算机容量、机时数等都远远超过原来所想像的程度，为了得到一些在工程上实际有用的东西，所花费的代价太大。在70年代末期，对这些大模型进行了严格的、客观的鉴别，决定哪些有用，哪些没有用。结果现今仍在燃烧室实际设计与发展工作上应用的程序简化多了，变量数也大大减少了。这样就出现了许多燃烧室模型分析计算方法。现在的实际情况是这样的：尽管燃烧室模型分析计算包括了从简单的经验关系式到复杂的、三元的、两相的(或三相的)、可反应的气流流场分析，但在燃烧室设计和发展上最常用的、占主要地位的、真正起作用的是经验关系式和一些简单的模型。几乎每个发动机公司都应用某种形式的燃烧室二元的空气流动模型，只有个别的发动机公司“冒险”地采用三元的空气流动模型。从实用观点看，只要其结果具有工程上可用的准确度，对实际燃烧室的设计发展有利，采用简单的模型分析是无可非议的。简单的

模型分析对操作人员要求的技术水平低，判读结果简便迅速，所需经费少。这对从事燃烧室发展工作的工程师来讲，无疑是非常重要的。

现在实际应用的燃烧室模型分析计算方法都是半经验、半分析性的。理论分析一般只作到适可而止的地步（即较简单的模型），余下的用经验关系式解决。只有这样，才能在燃烧室设计发展过程中起作用。为此，需要简单叙述一下燃烧室设计过程。

三、燃烧室设计过程 现在的燃烧室设计过程，是交错运用经验关系式和分析计算方法。当然，整个设计方法的基础是靠试验数据及经验关系式。目前，燃烧室设计系统仍与二十年前美国北方研究公司出版的“燃烧室设计和性能分析”一书中所说的系统基本相同。当前，提高先进燃烧室的设计能力的主要途径有三个方面：

- (1) 试验数据的不断扩大和完善；
- (2) 对已有的经验关系式的扩展；
- (3) 引入一些半经验半理论的分析结果。

燃烧室的设计与发展大体上也有三个阶段：

- (1) 初步设计阶段。这时，无例外的要应用经验关系式；
- (2) 详细设计阶段。这时结合一些试验，应用分析模型，使设计达到预期的性能指标。例如流动模型、冷却计算模型、强度计算模型、污染模型等；

(3) 发展与改进（或调试）阶段。这时总还有一些性能达不到要求，大多采用专门的半经验半分析模型来指导发展工作。对先进的环形燃烧室最常遇到的是冷却问题和出口温度分布问题。不管在哪个阶段，都要先尽可能的算一算，然后与试验数据对比，以逐渐积累经验。计算机程序在很大程度上用来回答设计或修改设计的方向是否正确，并大致确定各参数的量级。但最后结果还是由试验来决定。

对经验关系式和半经验、半理论的分析这两种方法，不能轻易地用一个去否定另一个。由试验数据归纳得出的经验关系式，