

230499

基本馆藏

燃气涡轮 发动机的燃烧室

H. H. 庫罗奇金著



机械工业出版社

54
0064



統一書号
15033·1587
定价 0.76 元

燃 气 渦 輪 發 动 机 的 燃 燒 室

H. H. 庫羅奇金 著

余景文、王宁园 譯



机 械 工 业 出 版 社

. 1 9 5 9

內容簡介

本書論述有关燃气渦輪發動机燃燒室的一系列問題，如：燃燒室工作的特点和条件，它的主要結構，試驗和使用数据、主要技术特性，燃油噴霧方法，离心式噴咀的計算及其結構、点火裝置和燃燒室的燃油系統。

本書的特点是作者提出了前人(截至1955年)所未提出过的，經实践考驗过的燃燒室热力計算的方法。

本書适用于高等工业学校研究燃气渦輪發動机的高年級学生，同样也适用于在該部門工作的工程師們。

苏联 Н. Н. Курочкин 著

Камеры горения газотурбинных двигателей

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ 1955 年

* * *

NO.2340

1959 年 1 月第一版 1959 年 1 月第一版第一次印刷

850×1168^{1/32} 字数 90 千字 印張 3¹⁰/₁₆ 0,001—2,100 册

机械工业出版社(北京阜成門外百万庄)出版

机械工业出版社印刷厂印刷 新华書店發行

北京市書刊出版业营业許可証出字第 003 号 定价 (11) 0.76 元

目 录

序言	5
第一章 燃气涡轮发动机燃烧室的作用	7
第二章 燃烧室的工作条件及其构件	9
§ 1. 燃烧室前的空气参数	9
§ 2. 燃烧室的工作	13
§ 3. 第一股空气的输入装置	15
§ 4. 第二股空气与燃烧产物的混合	21
第三章 燃烧室的主要技术特性	24
§ 1. 燃烧室效率	24
§ 2. 燃烧室的流体阻力	26
§ 3. 燃烧室的容热强度	30
第四章 燃烧室的热力计算	32
§ 1. 燃油的燃烧计算	33
§ 2. 空气总余气系数和火焰筒主要尺寸的确定	35
第五章 燃烧室的分类	44
§ 1. 单喷嘴的圆筒式燃烧室	44
§ 2. 多喷嘴的圆筒式燃烧室	51
§ 3. 砌砖的圆筒式燃烧室	54
§ 4. 转角式燃烧室	56
§ 5. 空气输入燃烧室。第一股空气流量的调节	61
§ 6. 隔热套	61
§ 7. 分段式燃烧室	62
§ 8. 环形燃烧室	66
第六章 重质燃油的喷雾及点燃	68
§ 1. 离心式喷嘴的作用原理	68
§ 2. 离心式喷嘴的计算	70
§ 3. 燃烧室内采用离心式喷嘴的特点	78
§ 4. 双油路离心式喷嘴	79
§ 5. 回油式可调节的离心式喷嘴	81

§ 6. 切向孔开度可改变的可调节离心式喷嘴	84
§ 7. 空气喷嘴	86
§ 8. 燃油的预先蒸发	88
§ 9. 点火装置	90
第七章 燃油系统	93
§ 1. 燃油系统简图	93
§ 2. 燃油导管的计算	98
§ 3. 燃油加温 and 过滤	100
§ 4. 燃油泵	106
§ 5. 起动燃油的供应	111
第八章 燃烧室主要构件的工作条件及材料选择	114

序 言

現在，燃气渦輪機在固定的動力工程上和在運輸上得到越來越廣泛的應用。

最近幾年來，在我国的文獻上已足夠詳細地敘述了燃气渦輪機方面的理論問題，以及壓氣機和燃气渦輪機方面的結構和工作問題，可是，有關燃气渦輪機燃燒室方面的問題則論述得極少。

本書對用重質燃油工作的燃气渦輪發動機燃燒室的結構和工作特點作了簡短說明。

本書先後地敘述了燃燒室的工作條件、特點，它的热力計算、主要結構系統圖及燃燒室試驗和使用方面的某些數據，同樣也敘述了有關燃油預燃準備、燃油混合物的點燃，與燃燒室金屬材料的工作條件等方面的問題。

作者認為有必要事先提醒讀者，由於對燃气渦輪發動機燃燒室用重質燃油工作的很多問題，研究得還不夠，同時，對其工作情況還缺乏足夠的資料，所以，本書中研究的問題，還遠不是需要研究的全部問題。

本書是根據作者在列寧格勒造船學院對燃燒室課程所講授的教材編寫成的。

本書適用於動力和運輸高等學校的燃气渦輪發動機專業的高年級學生，對於在燃气渦輪製造工業方面工作的工程師們，也是有幫助的。

作者對負責本書校閱工作的工程師 Е. Н. Чернян 表示謝意。

作者

第一章 燃气渦輪發動機燃燒室的作用

燃燒室是開放式循環●工作的燃气渦輪發動機的主要部件之一。

在等壓燃燒的渦輪工作循環里，燃燒室的作用，是把經壓氣機壓縮後的空氣加熱到渦輪前的燃气起始溫度。這一加熱過程是通過燃料在壓縮空氣內進行燃燒來實現的。

實質上，燃气渦輪發動機的燃燒室，是一個火室，但是，由於發動機的特點，以及對燃燒室的特殊要求，使得燃料在燃燒室內燃燒的條件，和現有的、各式各樣的、工業上用的重質燃油燃燒的實際情況有所區別。這一主要區別是，燃燒室內的燃料是在一定壓力下進行燃燒，而且其容熱強度超過普通的鍋爐和工業用火室的容熱強度幾十倍。這是由於必須儘可能縮小燃燒室的輪廓尺寸和重量，才要求燃燒室須具有較高的容熱強度。

燃燒室內液體燃料的燃燒過程，和內燃機的情況同樣有本質上的區別。首先，這區別在於燃燒室的燃燒過程，是在等壓和在速度為每秒幾十公尺的氣流里進行的。依靠火焰的熱能，使噴入燃燒室的燃料繼續不斷的燃燒。而在壓燃式內燃機內，燃燒過程是在發動機氣缸內，充滿封閉空間的壓縮空氣中周期地進行的，同時，燃料是以自燃的方式點燃的。

如上所述，燃气渦輪發動機向燃燒室提出了一系列的特殊要求。為了保證發動機的經濟性，必須使燃燒室具有很高的效率，所以，應使由於不完全燃燒而引起的熱損失減低至最小程度。在燃气渦輪發動機的一切工作狀態下，燃料應該有效地和穩定地進行燃燒，而且，燃燒過程應該在燃燒室本身範圍內完成。在燃燒室出口截面上，使燃氣流的溫度均勻分布，也是極重要的要求。

● 本書僅研究開放式循環工作的燃气渦輪發動機的燃燒室。

火焰的火舌，从燃燒室伸長到渦輪內或溫度分布显著不均匀时，将使渦輪受到严重损坏。同样，在燃燒室里，不应该有积炭現象，以及由于积炭的細小顆粒而使燃气含有杂质，这也是很重要的，因为这一現象能使渦輪叶片产生机械损伤。

高容热强度和燃燒室出口截面处的燃气溫度均匀分布，应该在最小的压力损失下获得，因为压力损失的增大，会降低燃气渦輪机的效率。

最后，应该指出，燃燒室应满足一系列結構上和維護上的要求，譬如：

1) 燃燒室的形状和尺寸对于燃气渦輪机总体配置的协调性；

2) 在燃燒室內所具有的工作溫度和压力下，燃燒室部件和連接处的机械强度和密封性；

3) 燃燒室应该便于修理和內部檢視；

4) 維護使用要安全和方便；

5) 燃燒室須具有較長的工作寿命期。

由此可見，燃燒室的設計是件很复杂的任务，目前，燃燒室的結構，是用試驗方法修正的。因此，必須进行大量的試驗工作，以便研究燃燒过程、液体燃料噴射、燃燒产物与空气混合等等問題。

如所周知，第一台燃气渦輪發動机是在我国制造的，早在1897年就設計完畢，以后由庫茲明斯基(П. Д. Кузьминский)工程师制成。該台發動机的燃燒室是圓筒形的，直徑为300公厘，長度約1000公厘。在这个圓筒里，装入另一件直徑为200公厘，長度800公厘的內圓筒，燃料就在这內圓筒里燃燒。在两圓筒間的环形通道里，装有蛇形管，并以50个大气压力的水經蛇形管噴出，水即变成蒸汽。內圓筒里，輸入10个大气压力的空气，燃料采用煤油。从燃燒室流向渦輪的混合气体，是含有蒸汽的灼热燃气。燃燒室的調整試驗沒有进行到底。1900年П. Д. 庫茲明

斯基逝世后，这台发动机的试制工作就停止了。

第二章 燃烧室的工作条件及其构件

§1 燃烧室前的空气参数

燃烧室前的空气温度和压力、空气流量和燃料消耗量、燃烧室后的燃气温度和其他参数，是由燃气涡轮机的热力系统决定的。在燃气涡轮发动机上，由于没有回热器，所以燃烧室前的空气温度，是由压气机的增压比决定的。

表1列出不同增压比值时的压气机后的空气温度值，此时，空气起始温度取 15°C ，压气机效率为0.83。

表 1

名 称	增 压 比				
	3	4	5	6	7
压气机后的空气温度 $^{\circ}\text{C}$	145	185	220	250	275

如装有回热器时，则燃烧室前的空气温度可达到 350°C 或更高些，这与回热程度有关。

燃烧室前空气压力，是由最合适的增压比决定的，在这增压比下，能保证燃气涡轮发动机具有最大的效率，而这最合适的增压比值，与涡轮前燃气温度、回热程度、压气机前的空气温度和压气机及涡轮的效率有关。提高涡轮前燃气温度和采用中间冷却的多级增压，会提高最合适的增压比值，而增加回热程度，相反地，会降低最合适的增压比值。

图1给出在不同的涡轮前燃气温度下，发动机效率与增压比的关系曲线。

燃气涡轮发动机的特征，是工质——空气的流量很大。如果在蒸汽涡轮内，当热降很大时，工质——蒸汽的流量比较不大的

話，則在燃气渦輪內的热降小，必要的功率基本上是依靠大的燃气流量達到的。

燃燒室內每公斤燃料燃燒時所需要的空氣量，比理論上完全燃燒時所需要的空氣量要多好几倍。1 公斤燃料所需的空氣量與 1 公斤燃料完全燃燒時理論上所需空氣量的比值，稱為空氣總余氣系數 α 。

空氣總余氣系數值可由下式定出：

$$\alpha = \frac{Q_p^n \eta_{kz} - C_{p2} t_2}{L'_0 (C_{p2} t_2 - C_{p1} t_1)}$$

式中 Q_p^n ——燃料熱值，大卡/公斤；

η_{kz} ——燃燒室效率；

L'_0 ——1 公斤燃料燃燒時，理論上所需的空氣量，公斤/公斤；

t_1 ——燃燒室前空氣溫度， $^{\circ}\text{C}$ ；

t_2 ——燃燒室後空氣溫度， $^{\circ}\text{C}$ ；

C_{p2} ——空氣比熱，大卡/公斤·度；

C_{p2} ——燃气比熱，大卡/公斤·度。

圖 2 給出空氣總余氣系數與燃燒室進口空氣溫度和出口燃气溫度的關係曲線。從曲線圖上看出，燃气渦輪發動機燃燒室內的空氣總余氣系數的數值很大。例如：如果燃燒室後，即渦輪前燃气溫度為 700°C ，空氣溫度為 200°C 時，則空氣總余氣系數 $\alpha = 5.0$ 。如果提高燃燒室前空氣溫度至 400°C ，則空氣總余氣系數增大至 $\alpha = 9.0$ 。在工質經過中間加溫的燃气渦輪發動機的中壓和低压燃燒室，空氣總余氣系數還可達到更大的數值，因為燃燒室前的空氣溫度大大地超過了 400°C 。

在工質進行中間加溫的燃气渦輪發動機內，高压渦輪後的燃

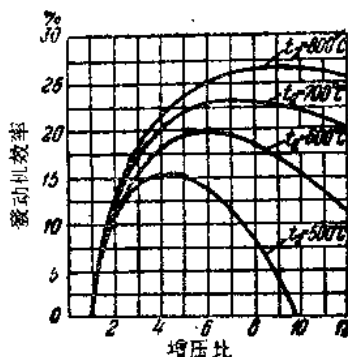


圖 1 不同溫度時，發動機效率與增压比的关系曲線。

气进入中压或低压燃烧室内，在这里，燃料再次燃烧。因为高压燃烧室后燃气中氧气的含量，比燃烧室前空气中的氧气含量少，所以，中压或低压燃烧室内，1公斤燃料燃烧时理论上所需的空气（燃气）量，自然不同于高压燃烧室内理论上所需的空气量。

圖3上指出燃气中二氧化碳 CO_2 和氧气 O_2 含量的百分比随空气余气系数的变化情况。由圖可知，当空气余气系数 $\alpha = 6.0$ 时， CO_2 含量约为2%，

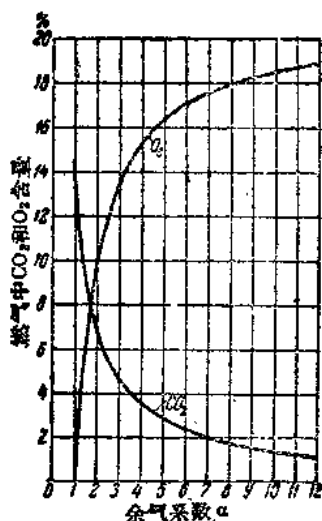


圖3 燃气中 CO_2 和 O_2 含量的变化与余气系数的关系（燃料——重油）。

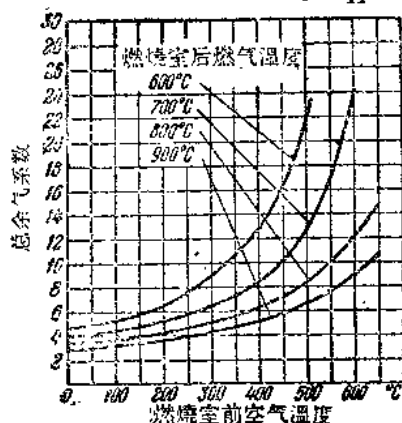


圖2 空气总余气系数与燃烧室进口空气温度和出口燃气温度的关系曲线。

氧气约至17%。当氧气含量这么高时，燃气流是完全适合于燃料在其中燃烧的一种介质。可以用工质进行中间加温的燃气涡轮发动机的试验作为实例。从这种发动机高压涡轮流入低压燃烧室的燃气，具有下列成分： $\text{CO}_2 = 2.7\%$ ， $\text{H}_2\text{O} = 2.6\%$ ， $\text{O}_2 = 16.5\%$ 和 $\text{N}_2 = 78.2\%$ 。在这样的氧气含量下，燃烧过程是稳定的，而且燃烧室在工作时具有较高的效率。

必须注意到，在同一气流里进行燃料再次燃烧时，由于氧气含量减少，而在所有顺次相继的后燃室内，燃烧1公斤燃料理论上所需要的氧气量则是相同的。遵循这一条件，也就意味着，在后燃室

(中压或低压的)内燃烧 1 公斤燃料理論上所需要的空气量, 和第一燃烧室 (高压的) 的空气量比較起来是逐漸增大的, 即:

$$L_{01} = \frac{0.21L_0}{v_{O_2}},$$

式中 v_{O_2} ——进入后燃室的燃气和空气流中氧气的体积百分比;

L_{01} ——后燃室内 1 公斤燃料完全燃烧时理論上所需要的空气量;

L_0 ——第一燃烧室内 1 公斤燃料完全燃烧时理論上所需要的空气量。

§2 燃燒室的工作

燃燒室內, 虽然每公斤燃料所需要的空气量很大, 但不可能在空气的整个体积內都組成燃料燃燒。所以, 在燃燒室內从总空气量中, 分出一部分必需的空气供給燃料燃燒的一种燃燒室的結構, 已得到广泛的采用。

圖 4 画出了这种燃燒室的簡圖。噴咀 1 在压力作用下将燃料噴入火焰筒 3 的燃燒空間。經過輸气装置 4, 向噴咀附近形成的火焰根部輸入燃料燃燒时所必需的第一股空气。輸气装置就是渦流器, 它使第一股空气的气流产生旋轉运动。通过火焰筒圓孔 5 向燃燒空間輸入燃料燃燒时所必需的部分第二股空气, 而第二股空气的主要部分沿着火焰筒和外套 2 所形成的环形通道流动, 这

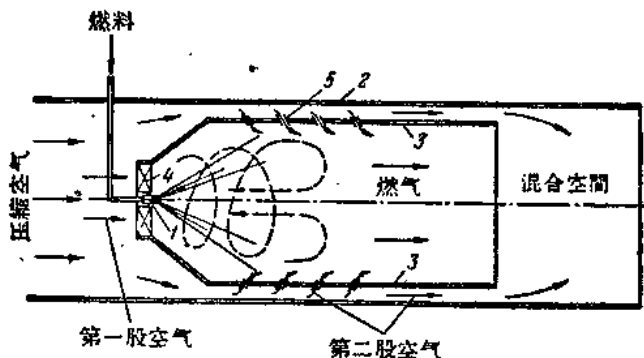


圖 4 燃燒室原理圖。

部分空气在燃燒室后部与燃料的燃燒产物混合。第二股空气的高速流动，保証火焰筒壁必要的冷却。

以后，我們將通过輸气装置的空气，称为第一股空气，而总空气量的其余部分，称为第二股空气。第一股空气从燃燒室头部到后部（通过輸气装置和火焰筒）所流經的路綫，称为第一股空气的流程。第二股空气从燃燒室头部到后部所流經的路綫，称为第二股空气的流程。

因此，在燃燒室內存在二个性質不同的过程：1) 燃料的燃燒和 2) 第二股空气和燃燒产物的混合，它一般地位于燃燒区域之后，而在燃燒室的后部。

为了使燃燒室內燃料有效地燃燒，应该遵循下列条件：

- 1) 燃料和空气应有正确的数量比，它們的混合应完善；
- 2) 燃料雾化顆粒小，并是均質的；
- 3) 霧状燃料的点燃应稳定。

在高速流动的燃气和空气流里进行燃料燃燒，是燃燒室內燃料燃燒过程的特点。用重質燃油工作的燃燒室，在火焰区域内軸向分速度的平均值約为 $20 \sim 30$ 公尺/秒，而在航空发动机的燃燒室里，則为 $70 \sim 90$ 公尺/秒。在高速流动介質中燃燒，将使它的延續時間大大縮短。所以，在这种条件下，为了获得燃料的有效燃燒，首先要求燃料微粒和空气混合良好；第二，創造保証火焰前稳定的条件，就是不断点燃进入燃燒室的燃料。

对装有渦流器（作为輸气装置）的燃燒室的研究，証实了在火焰筒內燃气和空气流形成旋轉运动。在火焰筒橫截面上，軸向分速度分布的特点是具有很大的不均匀性。由于大的速度梯度，便保証了气流具有很大的紊度，因而也保証了良好的混合条件。在火焰筒中心部分，沿燃燒室縱軸，产生朝向噴咀的燃气逆流，如圖 4 所示。

燃气逆流的形成是由于在火焰筒中心部分造成低压区的緣故。

一部分灼热燃气向喷嘴回流，保证雾状燃料可靠的点燃，这样不仅加速了点燃过程和燃烧过程，同时，在燃烧室工作状态改变时，也形成了必需的火焰稳定条件。

现在，我们来研究一下，装有锥形输气装置的燃烧室火焰筒内的不同截面上的速度分布（圖 5）。从圖上可以看到，速度分布的特点是具有很大的不均匀性。第一股空气的主要部分流过锥体，并靠近火焰筒壁流动。在气流的中心部分，靠近锥体处形成低速和回流区，以保证火焰焰前的稳定。从我們研究过的实例中看出，燃烧室的工作效率是由空气动力因素所决定的。空气动力条件本身，即沿燃烧室截面的速度分布等等，主要是取决于输气装置的构造。

根据第一股空气流量和燃料消耗量，确定第一股空气的余气系数平均值，此值与燃料燃烧时的局部空气余气系数值有很大的区别。如前所述，沿火焰筒截面上，空气分布是不均匀的。同样，燃油分布也是不均匀的（見圖 42）。既然在火焰任意点上的空气余气系数值，取决于该点的氧气和燃料的浓度，所以，可以得出这样结论：沿火焰截面上的空气余气系数 α_1 分布是不均匀的，而与空气和燃料的分布有关。例如圖 5 所示，燃烧室内火焰截面的中心部分， α_1 具有最小值，而由中心向边缘增大。随着 α_1 的改变而相适应的是，火焰中心部分的温度具有最大值，而由中心向边缘降低。燃烧室内燃料的完全燃烧，可以在第一股空气余气系数的某一定范围内获得。但应该指出，燃烧室及其输气装置的每一结构，相应地具有它自己最合适的第一股空气的余气系数值。

最合适的第一股空气的余气系数值，应理解为：在这一数值时，燃料能够完全燃烧，而且火焰最短，不超过规定的火焰区范围。如第一股空气的余气系数，比其最合适的数值降低时，仍然可以保持完全燃烧，但是，火焰一般地会伸长，同时，火焰温度增高，因而火焰筒的温度也增高。如第一股空气的余气系数，比其最合适的数值显著增大时，会降低燃烧温度。其结果会使化学性的

燃燒不足的現象、和部分燃料以氣態和液態從燃燒室逸出的現象增長。這種情況可以由外部的顏色表現出來，這時，燃氣渦輪發動機排出的燃氣是呈白色的。

不同燃燒室和輸氣裝置的構造，其最合適的第一股空氣余氣系數值約為：

$$\alpha_1 = 1.5 \sim 3.0$$

在航空發動機燃燒室內，燃油（煤油）燃燒時的第一股空氣余氣系數從 $\alpha_1 = 1.0$ 至 $1.25 \sim 1.3$ 。

同時，很大部分的第二股空氣也供給燃料燃燒用，它經過火焰筒前部的許多圓孔輸向燃燒區域。

燃油霧化的質量，是決定燃燒室內燃料燃燒效率的主要因素之一。燃料油滴的燃燒速度，主要由氣化速度決定。所以，重要的是使油滴表面與其體積的比值尽可能地大。由於這一比值與油滴半徑成反比，因此，應該力求燃料的霧化達到最好的程度。

燃燒室前的空氣是高溫時，在很大程度上，能促進燃料的有效燃燒。首先是由於高溫空氣能增加氣化速度，因而也增大了燃料微粒的燃燒速度。增高燃燒室前的空氣溫度，同樣也可以增大第一股空氣的余氣系數，從而能夠改善燃料與空氣的混合條件。

§3 第一股空氣的輸入裝置

如上所述，在現有的大多數燃燒室的構造中，燃燒室進口處的空氣流分為二股：第一股氣流及第二股氣流。

適當選擇第一股及第二股空氣的通道截面，就可以從進入燃燒室的總氣流中分出所需數量的第一股空氣。此時的出發點，是使第一股及第二股空氣流程的總阻力彼此相等。

無論就質的或量的方面來說，都應當對第一股空氣的輸入正確地加以組織。如果說對第一股空氣的輸入組織得良好，那就是指空氣和霧狀燃油能很好的混合。



圖5 裝有錐形輸氣裝置的燃燒室火焰筒內不同截面上的速度分布。