

燃气轮机燃烧室试验技术  
专题学术会议  
论文选集

上海市机械工程学会 編

中国工业出版社

燃气轮机燃烧室试验技术专题学术会  
论文选集

上海市机械工程学会编

机械工业出版社编辑 (北京苏州胡同 141 号)

中国工业出版社出版 (北京佟麟阁路丙 10 号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 110 号

五三五工厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

开本  $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张  $7 \frac{1}{8}$ ·插页 1·字数 145,000

1965 年 6 月北京第一版·1965 年 6 月北京第一次印刷

印数 0001—2,410·定价 (科六) 0.95 元

统一书号: 15165·3503(一机-702)

## 前 言

燃气輪机燃烧室的燃烧过程是一个化学反应、热交换、空气动力等方面互相影响的复杂的热力流动过程，一二十年来陆用燃气輪机在工业中广泛采用后，很多科学技术工作者对燃烧室的試驗研究进行了大量的工作，并且总结了在不同情况下的模化准则和理論。

近几年，在燃烧室方面，虽然已开展了不少的試驗研究工作，对我国产品的发展及燃烧过程的理論研究起了一定的促进作用，但毕竟因为時間很短，到目前为止，可以说这些成果还只是局部性的，和国家的需要还不相适应。

从陆用燃气輪机燃烧室来说，它的运行条件虽然没有航空式燃烧室那样高，但是在燃烧重油、高热值或低热值气体燃料等方面出现了另外一系列新的，难以解决的问题。同时创造和寻找优良的母型燃烧室，掌握其模化规律，也是发展燃气輪机制造业的重要关键之一。

要掌握这些技术，就要对燃烧室热力动态过程进行試驗研究，也就要首先掌握一系列精密的热工测量以及一些基本理論，为此，在有关各地学会和有关单位的大力支持下，于1963年12月5日至9日在上海市科学会堂召开了我国第一次燃气輪机方面专题学术会议——以燃气輪机燃烧室試驗技术为中心的专题学术会议。

会议共收到論文报告 32 篇，其中有关燃烧室模化及整体試驗 10 篇，燃烧室测试技术 12 篇，噴油嘴研究 3 篇，燃气輪机传热 7 篇。各地参加会议的有关工厂、高等院校和研究部門共 32 个单位 115 人。会上共宣读了 14 篇具有代表性的論文，会议期間还成立了論文审評小组，对收到的 32 篇論文进行評选，最后选出 6 篇有代表性的，并具有一定价值的論文全文刊印（其中有清华大学焦树建等同志与汽輪机鍋炉研究所李念如等同志的两篇有关燃气輪机燃烧室試驗技术論文，会后都各自将自己单位同志所撰写的有关論文內容，充实到这入选的論文中）为了便于交流，我們特将这次会上收到的其它論文項目也列于其后，供讀者参考。

“燃气輪机燃烧室試驗技术学术会议論文选集”已汇编出版，其中难免有許多不当之处，望論文作者、讀者及有关方面給予指正。

上海市机械工程学会

1964年3月

## 目 次

### 前 言

1. 燃气輪机燃烧室模化試驗初步分析……………周慧仙 (1)
  2. 雾状液体燃料燃烧室的模化和效率分析問題……………清华大学 周力行 (22)
  3. 燃气輪机燃烧室試驗中的某些測量問題…清华大学 焦树建、李建业、赵 晶 (38)
  4. 1500 千瓦燃气輪机燃烧室性能試驗  
…………… 汽輪机鍋炉研究所 李念如、馮明之、王伯誠 (63)
  5. 透平轉子稳定溫度場的計算  
…………… 上海汽輪机厂 伍 能、山友欣、包济航、郭考祥 (73)
  6. 冷却式高溫半球形五孔針的校准特性  
及制造…………… 西北工业大学 林其勳、顧家賢 (91)
- 燃气輪机燃烧室試驗技术学术會議总结…………… (100)
- 會議收到的其它論文目录…………… (110)

# 燃气輪机燃烧室模化試驗初步分析

周 慧 仙

## 提 要

本文对燃气輪机燃烧室的模化問題进行了綜合介紹与分析，并且着重于探討压力对燃烧完全系数的影响。由試驗得出的結果与根据化学反应动力学理論分析的結論相比較，在一定的范围内是基本相符的。从而試图确立今后模化試驗研究的方向及主要途径。以供参考。

## 符号及其意义

$D$ ——燃烧室火焰管直径	$A$ ——燃烧室截面积
$\bar{d}$ ——燃料噴霧顆粒平均直径	$L$ ——燃烧室火焰管长度
$\eta$ ——燃烧效率	$G_r$ ——进入燃烧室一次区域的空气重量流量
$N_A, N_B$ ——每单位重量初始混合物中反应物 $A$ 与 $B$ 的分子数	$G_f$ ——燃料耗量
$P$ ——燃烧室中气流的压力	$\frac{\Delta j^*}{j^*}$ ——燃烧室全压損失系数
$P_1$ ——燃烧室进口靜压	$q_v$ ——燃烧室热容負荷
$T_1$ ——燃烧室进口绝对温度	$V$ ——燃烧室容积
$V_r$ ——参考速度；相应于燃烧室进口密度、总空气流量与燃烧室中最大截面积	$\alpha$ ——燃油的摩尔浓度
$K_2, K_3$ ——常数， $K_3$ 是与燃料特性、燃料-空气混合比及燃烧室结构有关的一个常数	$\alpha_0$ ——燃油的初始摩尔浓度
$f$ ——燃料-空气比值	$b$ ——氧气的摩尔浓度
$Re$ ——雷诺数	$b_0$ ——氧气的初始摩尔浓度
$S_L$ ——层流火焰传播速度	$M_A, M_B$ ——燃料及空气的分子量
$S_t$ ——小規模紊流火焰传播速度	$\epsilon_{O_2}$ ——氧气在空气中的相对摩尔成份
$S_T$ ——大規模紊流火焰传播速度	$\tau$ ——燃烧時間
$G_B$ ——燃烧室空气重量流量（总）	$\delta$ ——火焰传给周围火焰管壁面的相对热量
$\gamma$ ——燃烧室进口空气比重	$l$ ——火焰长度
$g$ ——重力加速度	$T_2$ ——火焰区平均温度
$\bar{u}$ ——脉动速度的均方根值	$R$ ——燃气气体常数
$H_u$ ——燃料的低热值	$E$ ——活化能
$C_p$ ——混合气体的等压比热	注脚
$\Delta T$ ——由于燃烧的理論温升	$M$ ——模型
	$H$ ——实物

## 一、前 言

由于目前燃气輪机燃烧室的設計还没有一套比較完整的、可靠的方法，因此燃烧室試驗及其調整工作在燃气輪机产品的設計、試制及燃气輪机事业发展中起很重要的作用。然

而，近代燃气輪机正逐漸向大功率及高参数方向发展，要在一般試驗室条件下进行实物試驗或真实参数試驗是很困难的，并且也是不經濟的。所以大部份都是在模化的情况下进行試驗。因此如何把模型燃烧室或在模化試驗参数下所得到的試驗結果轉換到实物及設計参数上去是一个迫切需要解决的問題。换言之，即在燃烧室模化試驗中应遵循那些模化原則，以保証模型燃烧室与真实燃烧室內所发生的一切物理、化学过程都相似或者近似相似，那末模化試驗的結果才可以与真实情况相当。

燃烧室模化問題的解决，不仅在燃烧室試驗方面有很大的經濟意义；可以降低对空气气源参数和能量的要求，减少投資及运行費用。而且，由于模化的方法可以应用在一定的、容易实现的試驗条件下得出的試驗結果来推断其它相当的工况下的性能。这一点在利用已有的、較为成熟的母型去設計新机組时，具有很大的指导意义；可以預言該母型在新机組中运行的特性。

最近十几年来，世界上許多燃气輪机制造事业較发达的国家中亦正在探求此問題的解答，在本文下节将一一介紹。但是迄今为止，結論还不够完善，并且不統一，又不能通用。因此，我們必須亲自开展这项研究工作，在前人已取得初步成果的基础上，繼續探討燃气輪机燃烧室的模化問題，不断地发展、充实与完善它。

本文是我們第一阶段模化試驗研究工作的初步小結，只能說是对模化問題研究的一个开端。主要是針對目前一般广泛采用的模化方法；即在燃料相同的情况下，保証試驗模型燃烧室与实物几何相似、进口流速相同、进口溫度相同及总过量空气系数相等，在这种模化方法中，試驗燃烧室的空气压力是可以任意选择的。一般認為試驗压力大于 $1 \sim 1.5$  絕对大气压时，压力对燃烧性能的影响是可以不考虑的。这点結論从近代一般的理論分析及試驗結果来看是不够确切的。为了使模化試驗結果更正确地反映真实情况，以避免在模化試驗中盲目調整，必須由更多的試驗結果来进行分析，以改进此方法不足之处或者探索更适当的模化方法，为今后模化試驗指出方向。并且进一步为新产品設計提供有用的参考依据。

本文承葛永乐工程师指导与帮助，并由唐乾惕、邹积鍾、曾忠明、李荣卿和葛炳耀等共同参加試驗，謹此致謝。

## 二、現有模化研究方法綜述

从很多国外資料可以看到，对燃烧室模化的問題已进行了广泛的工业性試驗〔2〕~〔7〕及有关燃烧基础理論方面的試驗研究。由于各国研究工作者研究的对象及其应用場合不相同，因此分析問題的观点及所用理論基础各不相同，得出的結論亦不一致。这主要是由于燃气輪机燃烧室中整个过程非常复杂，目前还没有很好地了解这过程的机理，没有一个比較完善的理論可以系統描写这錯綜复杂过程中每一个物理、化学現象的特性及每个重要因素。从已有的各种理論分析看来，都是偏重于其中某一特殊过程，对于有些燃烧室或在某个运行参数范围内确实是該过程起主要作用的，則此理論分析結果与試驗結果是相符合的。反之，就不然。因此对于各种結論都要詳加具体分析，要非常注意这些結論的理論假設基础及其限制条件等，然后才能正确地、适当地应用于我們所研究的燃烧室（或者只适用于一定范围或者甚至不适用）。

下面列出几种不同的模化研究方法，都已在各国燃气轮机工业中得到广泛的应用，可以作为我们今后分析的依据与参考，由于作者水平有限，仅从目前已看到的公开发表的资料中举出几种来进行介绍与讨论。

### 1. Stewart提出的模化理论<sup>[1]</sup>

Stewart对燃气轮机燃烧室中所进行的过程作了有系统的、详细的分析，推导了要保证各过程相似的准则方程式的共同解，最后得出的结论：一般说达到燃烧过程完全相似是不可能的。而最佳模化尺寸及模化参数应该在保证真实燃烧室与几何相似的模型燃烧室燃用相同的燃料、进口温度相同、进口速度相同及相同的燃料-空气混合比的条件下，压力与定型尺寸成反比，亦即  $PD = \text{常数}$ 。而相应的喷嘴应保证实物与模型之间有相同的喷雾平均锥角、相同的喷雾压力降、喷雾液滴平均直径的比值与其燃烧室的定型尺寸比值的平方根成正比，即  $\bar{d}_H/\bar{d}_M = (D_H/D_M)^{0.5}$ 。

这结论能够使实物燃烧室与模型燃烧室之间保证下列几个过程相似，即(1)喷雾动量的影响、(2)紊流混合过程、(3)喷雾平均锥角相同、(4)点燃延迟过程、(5)化学反应动力过程和紊流火焰传播过程、(6)冷却空气的混合过程、(7)一般换热过程、(8)气流压缩性影响。但是不能保证(1)燃料同时进行蒸发和燃烧过程之相似、(2)层流传播过程之相似及(3)喷雾物射流深度之相似。根据各个过程对整个燃烧过程影响程度重要性的分析结果，认为后三个过程的影响较小。因而在保证前八个过程相似以后，基本上就能保证真实燃烧室与模型燃烧室的燃烧效率、火焰长度和颜色，燃烧室出口燃气温度场以及燃烧稳定范围都相同。

这个模化理论虽然比较完善，但是实用价值是不大的，因为它没有解决当前燃烧室试验中的主要矛盾与困难问题，从经济上来讲，根据  $PD = \text{常数}$  的原则，对于固定式及一般运输式燃气轮机燃烧室，是不能节省试验设备的投资及经常试验消耗费用的，那末模化亦没有什么意义了。

### 2. Childs 与 Graves 提出的方法<sup>[2]</sup>

Childs 与 Graves 在分析 NACA 的燃烧室试验数据时，应用了两种不同的理论根据，得出了两种模化原则。

#### (一) 化学反应动力学理论

Childs 与 Graves 认为涡轮喷气发动机的燃烧过程中化学反应（亦即燃料的氧化）是最慢的一个反应，因此在整个过程中起了决定性的作用。

根据化学反应速度及气体动力学的基本关系式对于非均相反应器可以得出下列关系式：

$$\ln \frac{1 - \frac{N_A}{N_B} \eta}{1 - \eta} + K_2 = K_3 \frac{P_1 T_1}{V_r} \quad (2.1)$$

亦可以表示为：

$$\eta = f\left(\frac{P_1 T_1}{V_r}\right) \quad (2.2)$$

而对于均相反应器，当  $T_1$  变化不大时，同样亦可得出 (2.2) 式。

由此理論得出的方程式 (2.1) 与 (2.2) 在实际中应用时, 对于某些燃烧室的試驗結果是很合适的。如图 1—1 a 与 b 所示。

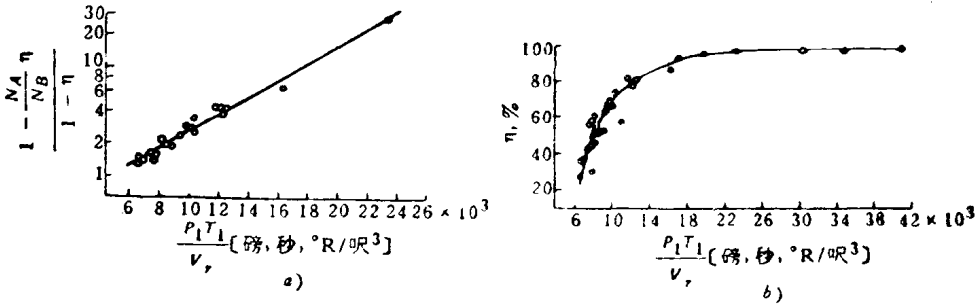


图 1—1 在不同的燃料-空气比时, 燃用汽油的燃烧室 A 的試驗数据  
a—按照式 (2.1) 作得的直綫; b—按照式 (2.2) 作得的曲綫

(二) 火焰传播理論

假定燃烧效率是由火焰传播速度所控制的, 燃烧过程可以想象为許多大小、形状都不一样的燃料与空气混合区域的燃烧, 火焰表面以一定的速度传播到附近的未燃混合物中, 該速度决定于未燃混合物的物理情况。而紊流对火焰传播速度的影响仅仅考虑为它对火焰表面面积的影响。并且假定未燃混合物的温度等于燃烧室进口的温度。对于一般燃烧室的运行条件下, 認为压力和燃烧室进口雷諾数对火焰传播速度影响是很小的。这样得到燃烧效率的近似表示式为

$$\eta = f\left(\frac{P_1^{1/3} T_1^{1.1}}{V_r}\right) \tag{2.3}$$

由此火焰传播理論得出的方程式 (2.3) 在实际中应用时, 对于燃烧室 A 的試驗数据,

虽然大部份試驗点落在一条曲綫上, 但是比較分散。如图 1—2 所示。

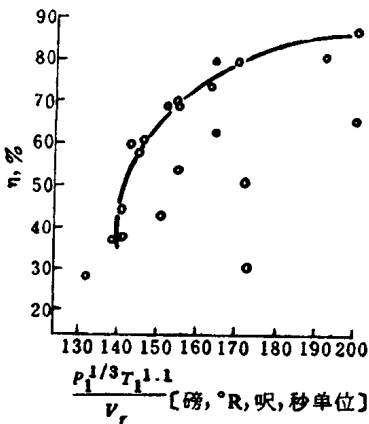


图 1—2 在不同的燃料-空气比时, 燃用汽油的燃烧室 A 的試驗数据按照 (2.3) 式作出的曲綫

由上面两种假定, 即化学反应动力学控制整个燃烧速度及火焰传播速度控制整个燃烧速度的假定, 得出燃烧效率能够分别表示为参数  $\frac{P_1 T_1}{V_r}$  或  $\frac{P_1^{1/3} T_1^{1.1}}{V_r}$  的函数,

而这两个参数又可以表成同一常数乘上参数  $\frac{P_1^2}{G_B}$  或  $\frac{P_1^{1.3} T_1^{0.1}}{G_B}$ 。因此可看到与燃烧效率有关的参数中压力与

流量的指数比值, 由化学反应动力学得到的为 2, 而由火焰传播速度理論得到的为 1.3。

对于这两个不一致的結論, 又进行了一系列的試驗研究。采用渦輪噴气发动机燃烧室 B, 燃用气体丙烷燃料, 在很广的运行范围内单独地改变压力与空气流量。得到試驗結果在燃烧室压力和流量非常低时符合于参数  $\frac{P_1 T_1}{V_r}$ , 即压力与流量的指数比值为 2, 然而在燃烧室压力和空气流



量比較高时，則符合于参数  $\frac{P_2^{\frac{1}{3}} T_1^{1.1}}{V_r}$ ，即压力与流量的指数比值为 1.3。因而作出結論如下：

当燃烧室运行范围变化很大时，很可能发生从一种速度控制过程轉变到另一个速度控制过程。在低压时，化学反应动力学参数  $\frac{P_1 T_1}{V_r}$  較为合适，而在較高压时火焰传播参数  $\frac{P_2^{\frac{1}{3}} T_1^{1.1}}{V_r}$  更好些。并預期沒有一种参数对所有的燃烧室且对整个运行范围是适合的。而对于有些燃烧室  $\frac{P_1 T_1}{V_r}$  参数很合适，这是由于在高压时火焰传播控制的燃烧速度，其效率已接近 100%。而在有些燃烧室内燃料蒸发及燃料与空气混合起了重要作用。

### 3. Greenhough 与 Lefebvre 提出的方法<sup>[3][4]</sup>

Greenhough 与 Lefebvre 亦在两种不同的理論基础上作了探討；第一是所謂燃烧速度理論，第二是均相反应速度理論。

#### (一) 燃烧速度理論的介紹

燃烧速度理論建立在两个主要假設的基础上，首先是燃烧特性由燃烧速度与气体速度的比值所决定的。其次，無論小規模与大規模紊流都影响正常的燃烧速度。

他們認為大部份火焰传播理論是限于預先混合的气体，但是由 Burgoyne 与 Cohen 的經驗証明：含有直径为  $10\mu$  的液滴的燃料-空气雾中的火焰传播与相同比例的均质混合物中的火焰传播是一样的。因而由此得出的結論大部份可以直接应用到燃气輪机的燃烧室。

Damköhler 总结了紊流对燃烧速度的影响，小規模紊流在燃烧区域中加强了热交换过程，紊流燃烧速度公式如下：

$$S_t = S_L K_1 Re^{0.5} \quad (2.4)$$

实际上更重要的是大規模紊流对火焰传播的影响。

Karlovitz 提出在燃烧区域中大規模紊流产生小块燃气包括一小部份火焰波前，此小块以正常燃烧速度传播。而近代加以修改为此小块以小規模紊流所控制的速度传播，計算公式如下：

$$S_T = \sqrt{2 S_t u} \quad (2.5)$$

假設凡是烧着的燃料都全部烧完，而燃烧效率低是由于燃烧区内燃烧速度来不及适应通过的新鲜混气量。考虑到：

在燃烧室中供給燃烧区的热量 =  $f G_B H_u$

而实际在燃烧区中放出的热量 =  $r A_f S_T C_p \Delta T$  因此燃烧效率  $\eta$  就可表为下式：

$$\eta = \frac{r A_f S_T C_p \Delta T}{f G_B H_u} \quad (2.6)$$

但是根据定义  $f H_u = C_p \Delta T$

所以 (2.6) 式又可表为：

$$\eta = \frac{r A_f S_T}{G_B} \quad (2.7)$$

由于 
$$Re = \frac{WD\rho}{\mu} \quad (2.8)$$

其中粘度  $\mu$  随压力变化很小, 随温度的变化可以表为下式:

$$\mu = k_1^2 T^{0.75}$$

所以 (2.8) 式可表为

$$Re = \frac{G_B D}{k_1^2 AT^{0.75}} \quad (2.9)$$

根据大规模紊流中压力降  $\Delta P$  与  $\bar{u}$  可以写为下式关系:

$$\Delta P = \frac{\gamma \bar{u}^2}{2 g k_2}$$

此处  $k_2$  表示全部压力降中对增强紊流有用的百分数。

则波动速度 
$$\bar{u} = \left[ \frac{k_2 2g \Delta P}{\gamma} \right]^{0.5} \quad (2.10)$$

并引进动压头 
$$d = \frac{\gamma W^2}{2g} \quad (2.11)$$

对给定的燃料  $S_L$  取决于燃料-空气比值、进口温度及压力的影响, 其中压力的影响与反应级数  $n$  有关, 可以写成

$$S_L \propto f(\alpha) f(T_1) P^{\frac{n-2}{2}} \quad (2.12)$$

以(2.4)(2.5)(2.9)(2.10)(2.11)与(2.12)式代入(2.7)式整理后得到

$$\eta^2 \propto f(\alpha) \left[ \frac{P^n [f(T_1)] AD}{G_B} \cdot \frac{k_2 \Delta P}{d} \right]^{0.5} \quad (2.13)$$

(2.13)式说明燃烧效率与燃烧室几何尺寸、压力损失系数与运行参数压力、温度与空气流量有关。

在采用  $n=1.75$  时, 对不同方案的燃烧室在很广的压力、温度与空气流量范围内(2.13)式在实际应用中较为满意。

## (二) 反应速度理论的介绍

根据 Longwell 与 Weiss 对煤油在空气中 (或在燃烧产物中) 得到的燃烧反应速度方程式, 并求出反应级数为 1.75, 而进口温度的影响可以考虑为下列关系:

$$\frac{G_B}{V P^{1.75}} \propto \exp \frac{T_1}{b}$$

其中  $b$  仅仅与燃料-空气混合比有关。根据 Herbert 的经验公式:

$$b = 220 \left( \sqrt{2} \pm \ln \frac{\phi}{1.03} \right)$$

式中“+”对应于  $\phi < 1.03$ , 而“-”对应于  $\phi > 1.03$ 。 $\phi$  为当量燃料与空气的比值。

最后可以表成

$$\frac{G_B}{P^{1.75} \exp \frac{T_1}{b} AL} = f(\eta, \alpha) \quad (2.14)$$

如果在火焰传播理論中温度的关系  $f(T_1)$  表示为指数形式  $\exp \frac{T_1}{b}$ , 則(2.13)式即可以表成

$$\frac{G_B}{P^{1.75} \exp \frac{T_1}{b} AD \frac{\Delta P}{d}} = f(\eta, \alpha) \quad (2.15)$$

比較上述两种理論所得到的(2.14)式及(2.15)式, 可以看到此两参数形式上差不多相同的。在实际中应用时, 对一般燃烧室得到的燃烧效率可以得出很滿意的結果。如图 1-3 a 与 b 所示。

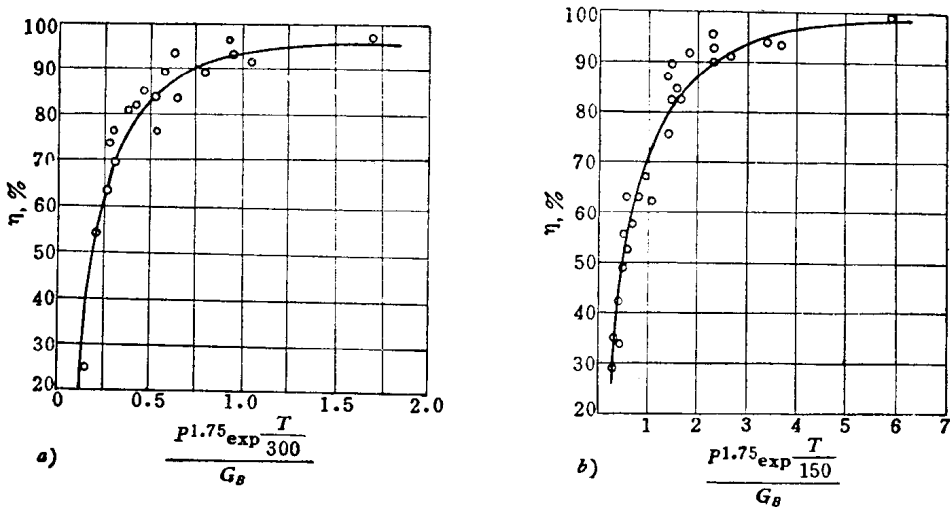


图 1-3 航空燃气輪机燃烧室的燃烧效率变化曲綫

a—空气-燃料比为 60 时( $b=300$ ); b—空气-燃料比为 100 时( $b=150$ )

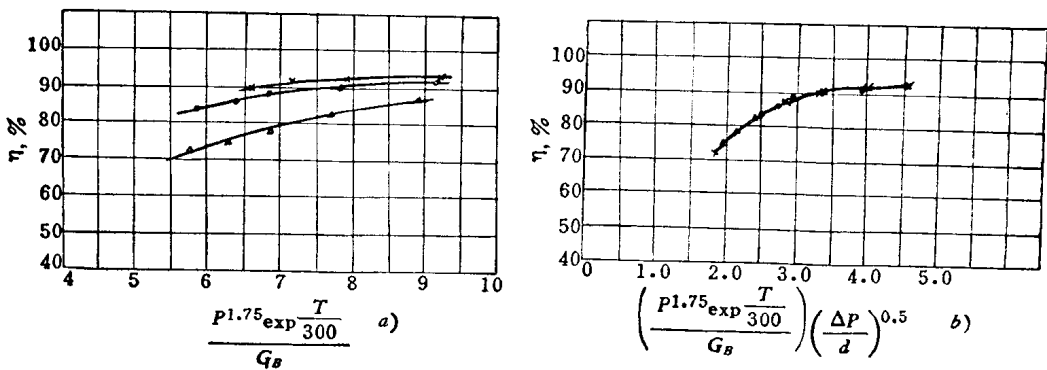


图 1-4 在三个不同压力损失系数下, 燃烧室的燃烧效率变化曲綫

a—在有关参数中不包括压力损失系数; b—在有关参数中包括压力损失系数

关于压力损失系数对燃烧室性能的影响已在 Rolls-Royce(Lefebvre 与 Murray 1957)[4]作了进一步分析研究。試驗燃烧室是特殊設計的, 可以改变其中压力损失系数, 而不至影响气流流型。在大气压力下进行試驗, 在三个不同的压力损失系数下得到的試驗数据, 对

不考虑 $\left(\frac{\Delta P}{d}\right)$ 項的参数作出的燃烧效率变化曲綫，如图 1—4a 所示。很明显是三条分开的曲綫。而对包括 $\left(\frac{\Delta P}{d}\right)^{0.5}$ 項的参数作出的曲綫，如图 1—4b 所示。使所有試驗数据都在一条共同的曲綫上。这里 $\left(\frac{\Delta P}{d}\right)$ 項的指数为 0.5，其它报告中有 0.88、1.0 及 0.65 等，一般試驗数据都在 0.5~1.0 范围内。

#### 4. Сторожук 提出的方法<sup>[5]</sup>

在苏联 ЦКТИ，为了确定结构尺寸与工况参数对燃烧效率的影响，进行了三个几何相似的多旋风器的燃烧室試驗。三个模型火焰管直径分别为 640、510 与 400 毫米，与第一个模型相比，即是按比例 1:1.25 及 1.67 几何相似縮小的。試驗模型 1 与 2 采用同一单級离心式噴嘴；噴霧錐角 $\sim 70^\circ$ ；噴霧顆粒平均直径 100 $\mu$ 。而試驗模型 3 中用相似的噴嘴，流量較小，噴霧顆粒平均直径 80 $\mu$ 。用柴油进行試驗，試驗参数范围： $\alpha_1=1.0\sim 2.0$ ； $t_1=100\sim 300^\circ\text{C}$ ； $P_1=1.25\sim 3.8$ 绝对大气压； $t_2=680\sim 700^\circ\text{C}$ 。

在比較几何相似的燃烧室試驗时，保持过量空气系数  $\alpha$ 、燃烧室进口温度  $t_1$  及燃烧室出口温度  $t_2$  不变。試驗結果表明在三个模型中的燃烧过程实际上都是一样的。

为了确定压力对燃烧性能的影响，保持燃料耗量、 $\alpha$ 、 $t_1$  及  $t_2$  不变，仅改变燃烧室中压力； $P=1.5\sim 3.0$  绝对大气压；在該压力范围内，对上述三种燃烧室进行了一系列試驗，試驗結果說明其燃烧特性是不变的。

Сторожук 认为在多个旋风器的燃烧室中，燃料与一次空气在火焰管头部进行了很好的混合，火焰波前由于很大的波动速度变得皺褶，其表面就大大地增加，燃烧过程在燃烧火焰温度很高的附近就結束了。显然，燃烧过程不取决于化学反应速度，主要是混合过程，亦即决定于气流的紊流度。根据管内流动紊流强度的测量，可以看到紊流度从壁面向中心增加，而在不同的空气流量时达到自动模化，即該燃烧室中紊流性质是带有“自由紊流”的特性。并且可以用重量流速  $Wr$  的数值来确定。

根据 Woodward<sup>[7]</sup> 提出的結論：对几何相似的燃烧室在  $\alpha_1$  与  $T_1$  不变的情况下，燃烧效率  $\eta$  与参数  $\beta$  有关， $\beta = \frac{G_I}{P^{1.25}D^3}$ 。

根据 Дорошенко 提出的結論：在  $\alpha_1$  不变时，为了整理試驗数据引进参数  $\Pi_\Phi$ ， $\Pi_\Phi = \frac{G_I}{P^{1.15}TD^3}$ 。

而 Сторожук 认为引进参数  $\beta$  与  $\Pi_\Phi$  时，沒有計算由混合过程决定的紊流特性，因此根据 ЦКТИ 的試驗，引进与紊流强度有关的、从旋风器出口的空气重量流速 ( $Wr$ )，得出：

$$\eta = f\left[\frac{G_I}{P^n T^m (Wr)^k D^3}\right]$$

式中指数  $n$ 、 $m$  及  $k$  由試驗数据来确定。

对上述三个燃烧室，当在  $P$  与  $T$  的指数  $n=m=1$  及重量流速的指数  $k=0.75$  时，他

們的燃燒效率總結得十分滿意。如圖 1—5 所示。試驗數據的分布與  $\alpha_1$  有關。

### 5. Брискин 提出的方法<sup>[6]</sup>

Брискин 在研究船用燃氣輪機圓筒型燃燒室的燃燒過程時，認為其過程是擴散型的，即其中化學反應過程的時間比擴散過程的時間要少得多。要模型燃燒室與真實燃燒室工況相似，必須保證氣動力過程、熱交換過程與燃燒發生過程等等的相似。

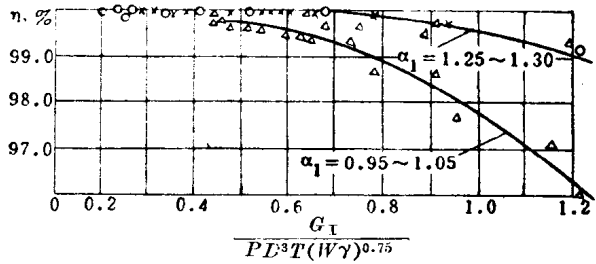


圖 1—5 燃燒效率  $\eta$  與參數  $\frac{G_T}{P D^3 T (W \gamma)^{0.75}}$  的關係

根據 Палеєв 研究馬丁爐的燃燒過程的模化理論，除了幾何相似外，還必須保證下列幾個準則：雷諾準則、阿基米德準則、 $\frac{\Delta T}{T}$  準則、表示燃料與空氣混合過程特性相似的準則、表示火焰吸收特性的準則及根據熱平衡方程導出的表示熱交換相似的準則等。

Брискин 將這些相似準則運用到燃燒室中，經過具體分析，最後歸結為，在近似模化時，模型燃燒室與實物燃燒室之間必須保證下列條件：

(1) 幾何形狀、尺寸相似。

(2) 燃料相同。

(3)  $\alpha_1 = \text{idem}$ ;  $\alpha = \text{idem}$ ;  $T_1 = \text{idem}$ ;  $rW = \text{idem}$ 。

(4) 燃料液滴直徑成比例，比例常數與模化尺寸和壓力比乘積的平方根成反比。即

$$\bar{d}_M = \bar{d}_H \frac{1}{\sqrt{(D_H/D_M)(P_H/P_M)}}。$$

為了証實上述理論，進行了一系列的試驗，試驗中模型與實物的尺寸比為 1:1.67，燃用蘇拉油與重油。試驗結果表明，如果保證了上述條件，則模型與實物的相對壓力損失、出口溫度場及混合區前的燃燒完全系數都是一樣的。

### 6. 一般常用的模化試驗方法

在工廠企業及一般實驗室里，大多數採用的方法，是在模型燃燒室與真實燃燒室之間保證下列條件：

(1) 幾何相似。

(2) 燃料相同。

(3) 進口溫度與進口流速相同。

(4) 過量空氣系數相同。

此種方法在蘇聯得到廣泛的應用。在文獻[8]與[9]中都談到過，如果當燃燒室中壓力超過 1~1.5 絕對大氣壓時，壓力對燃燒性能影響不大。

綜上所述，各國研究工作都進行了很多工作，作出初步的結論。一般都是在幾何相似、燃料相同及過量空氣系數相同的條件下，在一定的理論假設基礎上，整理出與燃燒性能有關的某一綜合數群，此數群中包含有燃燒室的幾何尺寸及運行參數等因素，例如：

$\left(\frac{P_1 T_1}{V_r}\right); \left(\frac{P_1^{\frac{1}{3}} T_1^{1.1}}{V_r}\right); \left(\left[\frac{P_1^{1.73} \exp \frac{T_1}{b}}{G_B}\right]^{0.23}\right); \left(\frac{G_I}{P_1^{1.28} D^3}\right); \left(\frac{G_I}{P_1^{1.43} T_1 D^3}\right); \left(\frac{G_I}{P T (W r)^{0.75} D^3}\right);$   
 $(PD);$  及  $(W r)$  等等。上述結論是不一致的，綜合數群中相應各參數的指數都不相同，甚至有些在形式上彼此亦不相同。這並不奇怪，鑒於燃燒過程的複雜性，各學者所研究的對象不同，因此各建立的理論基礎不同，或者，即使理論基礎相同，而採用各個燃燒物理基本試驗結果也是不相同的，所以導出的近似模化理論也就不一樣。

無論如何，在目前幾種近似模化理論中都體現了這個共同的觀點：鑒於燃燒室中這樣複雜的物理、化學過程，目前還沒有對這綜合過程的機理了解得很清楚時，只能先忽略整個過程中的次要過程，而抓住主要的基本過程進行初步理論分析。儘管對各種類型的燃燒室來講，很可能是不同的，應該分別具體對待，迄今為止，還沒有統一的結論。但是最終應由實驗來証實。因此，我們在進行燃燒室模化試驗時，不能輕而易舉地選用某一種模化理論，如果使用了对本試驗件及其運行範圍不適用的方法，則試驗結果很難說明與真實情況是否相當或者兩者之差別究竟有多大。所以我們必須在當前開展關於模化問題的研究工作，在已有的近似模化理論指導下，進行大量的試驗，結合具體情況具體分析，從更多的試驗數據中進行歸納、總結，逐漸搞清楚各類燃燒室內主要的控制過程。從而亦需要開展相應有關的燃燒物理基礎試驗，不斷發展與完善燃燒基本理論及模化理論。

### 三、試驗方法簡述及試驗結果

目前，我們先研究燃燒室運行參數對燃燒性能的影響。這些運行參數主要是燃燒室中壓力、進口溫度及進口流速。從一般的試驗條件來講，要保持燃燒室進口溫度與真實情況相同是比較容易達到的。而壓力與流量往往是受到氣源條件的限制。如上節第六種方法，參照[8]與[9]中指出當試驗壓力超過1~1.5絕對大氣壓時，壓力對燃燒性能影響可以不考慮。因此就可以任意選定一個試驗壓力，在這壓力下需要一定的流量以保證進口流速達到與真實情況相同。由於這種模化方法比較容易實現，目前已被廣泛採用。然而這種方法是不夠嚴密的；一方面雖然壓力的影響，在超過某一壓力值後不予考慮是有可能的，因為從[1]~[7]中都可以看到壓力的影響；不論對化學反應過程及火焰傳播過程及其它各過程等都有一定的影響，而歸結到壓力對燃燒效率的影響時，一般分析結果及試驗曲綫都可以看出類似指數形式，也就意味著有可能在其它參數一定時，壓力達到某一數值後，對燃燒效率的影響很小了。但是這個壓力的“特定值”却是值得注意的問題，因為它與各種結構的燃燒室及其運行參數範圍及過量空氣系數等都有關係的。另一方面，由於此模化方法中壓力是可以任選的，所引起的其它問題也沒有給予適當的限制與注意。例如：對噴油嘴的模化等問題。為此，我們第一階段的工作是保持其它參數都在一般範圍內不變的條件下，探索壓力對燃燒性能的影響。本文首先討論壓力對燃燒效率的影響。為今後全面地開展關於氣流參數對燃燒性能影響的模化研究積累一部份經驗。

#### 1. 試驗裝置及試驗方法簡述

試驗裝置要滿足上述的保證條件，在空氣系統部份有一分支管，支管中設有輔助燃燒室，以供加熱部份或全部空氣用。為了建立燃燒室中一定的壓力及保證其進口某一定流速

所需要的空气流量，必須在总的进气管上設有向空放气閥門及燃烧室后面的出口节流閥門。这样，調节向空放气閥門、出口节流閥門及輔助燃烧室的噴油量，就可以达到一定的燃烧室进口压力、流速及溫度。測量系統采用一般热工測量方法及其常用的仪表，以測定燃烧室进出口靜压差、进口靜压、进出口溫度、空气流量及燃料耗量（包括輔助燃烧室中未烧完的燃料）。

試驗燃烧室采用一般輕結構型的分管燃烧室，燃料为輕柴油，所有試驗中都用同一个双油路离心式噴油嘴。

由于当前条件所限，試驗压力仅选在 1.3~2.2 绝对大气压范围内变化。为了評定不同的过量空气系数下压力对燃烧效率的不同影响，在每个試驗压力下，其它参数也都保持不变的条件下，仅仅改变試驗燃烧室的噴油量，以作出燃烧效率随过量空气系数的变化曲綫。

## 2. 試驗結果

試驗燃烧室进口溫度选在  $\approx 550^\circ\text{K}$ ；进口流速选在  $\approx 100$  米/秒以及进口压力  $P_1=1.3$ 、1.5、1.7、1.9 及 2.2 绝对大气压的气流参数范围内，測得了在一次过量空气系数  $\alpha_1=1.3$ ~2.9 的范围内燃烧室主要特性：燃烧效率；压降損失系数；火焰管壁面溫度；热容負荷及出口溫度場等。分別作成曲綫，如图 1—6~1—14 所示。

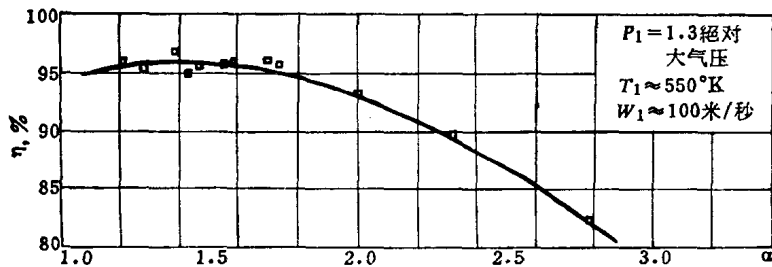


图 1—6 在  $P_1=1.3$  绝对大气压； $W_1 \approx 100$  米/秒及  $T_1 \approx 550^\circ\text{K}$  的情况下  $\eta = f(\alpha_1)$  特性曲綫

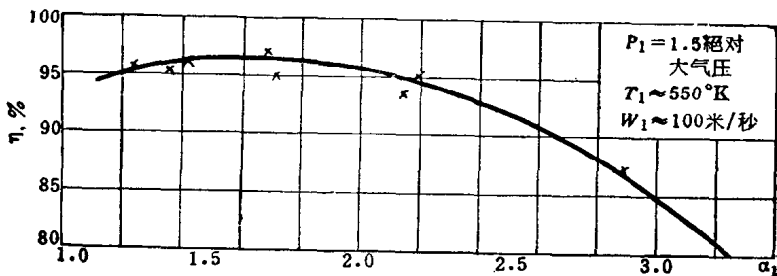


图 1—7 在  $P_1=1.5$  绝对大气压； $W_1 \approx 100$  米/秒及  $T_1 \approx 550^\circ\text{K}$  的情况下  $\eta = f(\alpha_1)$  特性曲綫

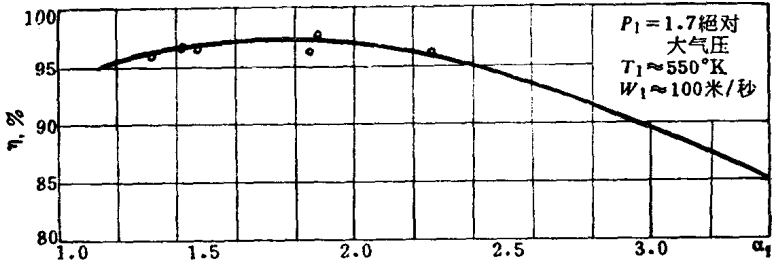


图 1-8 在  $P_1 = 1.7$  绝对大气压;  $W_1 \approx 100$  米/秒及  $T_1 \approx 550^\circ\text{K}$  的情况下  $\eta = f(\alpha_1)$  特性曲线

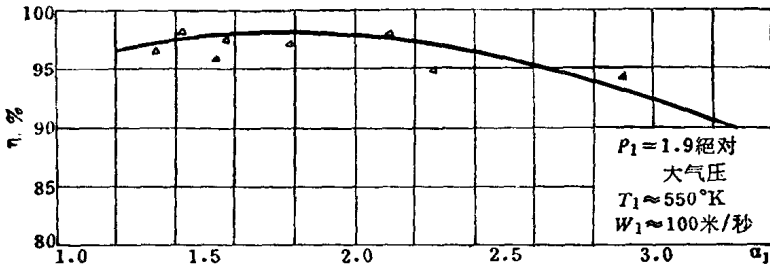


图 1-9 在  $P_1 = 1.9$  绝对大气压;  $W_1 \approx 100$  米/秒及  $T_1 \approx 550^\circ\text{K}$  的情况下  $\eta = f(\alpha_1)$  特性曲线

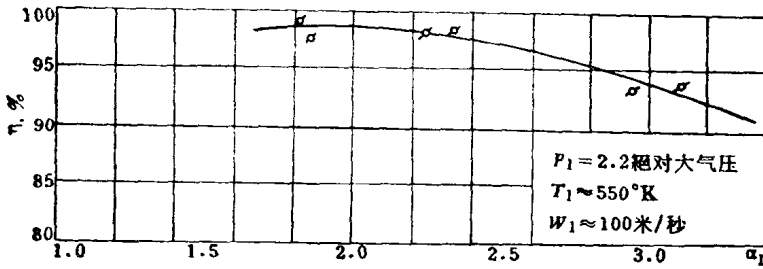


图 1-10 在  $P_1 = 2.2$  绝对大气压;  $W_1 \approx 100$  米/秒及  $T_1 \approx 550^\circ\text{K}$  的情况下  $\eta = f(\alpha_1)$  特性曲线

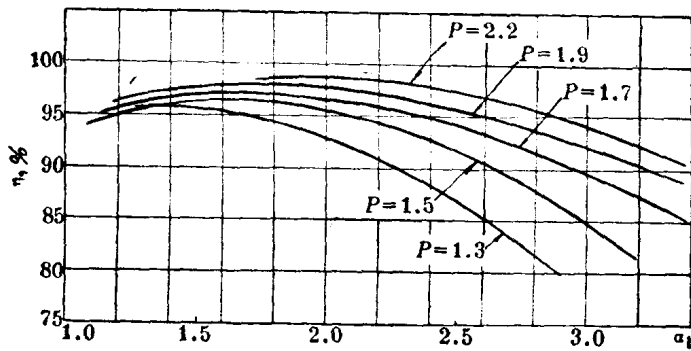


图 1-11 在  $T_1 \approx 550^\circ\text{K}$ ;  $W_1 \approx 100$  米/秒及不同压力下  $\eta = f(\alpha_1)$  曲线变化规律



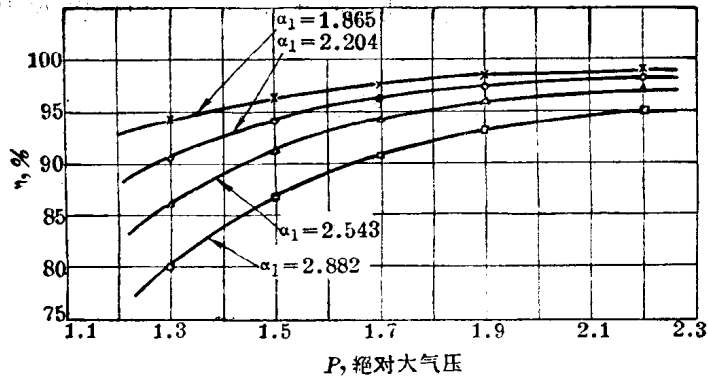


图 1-12 在  $T_1 \approx 550^\circ\text{K}$ ;  $W_1 \approx 100$  米/秒及不同  $\alpha_1$  下  
燃烧效率随压力变化曲线

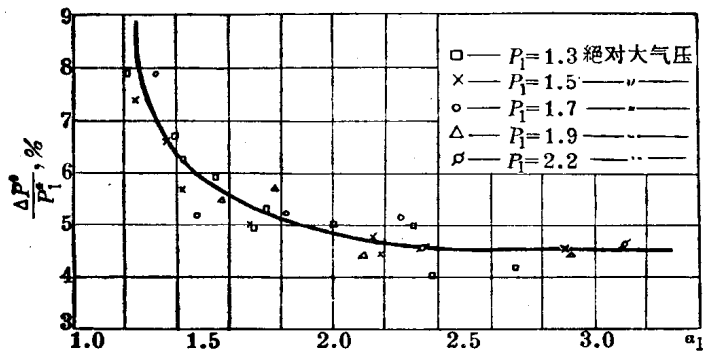


图 1-13 在  $T_1 \approx 550^\circ\text{K}$ ;  $W_1 \approx 100$  米/秒及不同压力下

$$\frac{\Delta P^*}{P^*} = f(\alpha_1) \text{ 特性曲线}$$

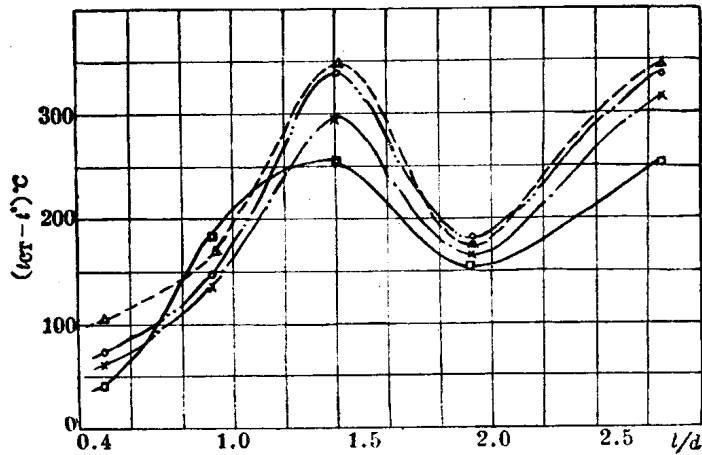


图 1-14 在  $T_1 \approx 550^\circ\text{K}$ ;  $W_1 \approx 100$  米/秒及不同压力下火焰管  
某一截面方向上沿轴向长度壁面温度分布曲线

□— $P_1=1.3$  绝对大气压; ×— $P_1=1.5$  绝对大气压; ○— $P_1=1.7$  绝对大气压;  
△— $P_1=1.9$  绝对大气压;  $t^*$  特定点的温度