

中国工程热物理学会

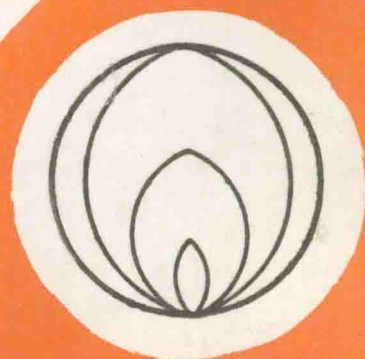
第七届年会论文集

第四分册

燃烧学与代用燃料

一九九〇

南京



目 录

I. 燃烧基本理论与流场分析

煤的热解动力学研究	蔡榕 张鹤声	1-1-1-6
回流燃烧室头部区流态及流阻特性分析	侯晓春 田百强	1-7-1-14
旋涡燃烧室气固流动特性冷态试验研究	朱皑强	1-15-1-22
烟煤型煤 SO ₂ 析出规律的试验研究 ...	许炳松 路春美 陈祖杰	1-23-1-28
旋涡燃烧室冷态气流动力场特性试验研究	朱皑强 赵长遂	1-29-1-36
燃烧电离气体若干性质的实验研究	陈熙 陈运中 黄晓彦	1-37-1-42
湍流两相流动及燃烧的统一关联矩封闭模型	周力行	1-43-1-48
四角喷燃炉膛内湍流三维气相燃烧和气固两相流动的数值模拟	洪涛 周力行	1-49-1-54
强旋流平火焰的数值研究	张者一 郭伯伟 李巍	1-55-1-60
平火焰嘴直旋同心双射流等温流场的数学模拟	张者一 郭伯伟 李巍	1-61-1-67
实扩—渐扩—渐缩燃烧室中多股斜交射流火焰的数值分析	王支苏 郭伯伟 张者一	1-68-1-73

II. 煤粉与煤浆燃烧技术

大颗粒褐煤着火分析	蔡榕 张鹤声	2-1-2-5
燃煤 MHD 燃烧器特性的试验研究与理论分析	郑文德 吴国江	2-6-2-11
高灰份碳颗粒燃烧的数学求解	马秀国 孙昭星	2-12-2-17
利用噪声信号实现球磨机监控的可行性研究	任有中 楼丽达 曹源泉 张学宏	2-18-2-23
预燃室中煤粉颗粒弥散的研究 ...	赵平 徐旭常 姚强 施学贵	2-24-2-31
管式沉降炉中煤粉颗粒的运动	张少鸿 施学贵 徐旭常	2-32-2-40
煤粉炉中石灰石脱硫剂循环利用的实验研究	石琪 施学贵 徐旭常	2-41-2-44
煤粉空气撞击射流点火研究	袁友生 蔡崧 吴小斌	2-45-2-50
多功能燃煤 MHD 燃烧室参数设计计算软件	胡志勇 魏启东 程永元等	2-51-2-56
水煤浆应用于燃气轮机燃烧室的试验研究	王应时 高丽君 沙英普 曹健 黄亚平	2-57-2-62
大型电站锅炉四角切圆炉膛中气体煤粉多相流动特性的数值试验研究	樊建人 喻平 曹克立 吴小华等	2-63-2-68

冷态炉内交叉射流的数值试验研究	樊建人 华强 曹克立 岑可法	2-69-2-74
一种燃用极低挥发份无烟煤的大速差型主燃烧器	周明德 贾臻 傅维标	2-75-2-80
压力对煤粒燃尽时间影响的研究	韩洪樵 傅维标 赵岩 周以静等	2-81-2-87
在变环境温度条件下煤粉热解通用模型的应用	傅维标 余卫舵	2-88-2-92
煤的可燃性综合指标的验证	王涤非 韩洪樵等	2-93-2-98
III. 流化床与固定床燃烧技术		
过渡床燃烧模型及热态试验研究	庞丽君 吴少华 阮根健 赵广播 秦裕琨	3-1-3-6
流化床锅炉给煤方式对挥发份析出和燃烧影响的理论计算	赵广播 陆慧林 秦裕琨	3-7-3-12
煤在流化床中破碎特性的研究	严建华 张宏焘 倪明江 岑可法	3-13-3-18
多孔燃料床非定常燃烧过程的数值分析	汪箭 范维澄	3-19-3-24
旋涡流化床冷态流动特性研究	段钰峰 赵长遂 马锦良 徐益谦	3-25-3-30
V型无烟燃烧技术	刘雪华	3-31-3-36
IV. 液体燃料燃烧技术与火灾		
沥青水浆 24 小时连续燃烧试验	马人熊 杨金生 张培元 黄兆祥	4-1-4-6
森林火灾中植物附面层风速和剪应力模型	盛淮清	4-7-4-12
室内燃烧中通风影响的实验研究	霍然 姜冯辉 向明	4-13-4-18
燃气轮机燃烧室注蒸汽技术研究	张孝谦 孙秀婵 张秀昆 赵建强 于洁	4-19-4-24
闪蒸喷嘴特性的初步研究	张青藩 黄滨	4-25-4-30
预膜式空气雾化喷嘴的内部效应	甘晓华 赵其寿	4-31-4-37
空间方位对木材燃烧火焰传播的影响	王海晖 王清安	4-38-4-43
液滴群的内燃烧过程的计算机模拟	沈赤兵 胡小平	4-44-4-49
新型节能少氧化陶瓷管型锻造加热炉的设计研制	张松寿 李茂德	4-50-4-56
固体可燃物火焰传播速度及玻璃破碎问题的值计算	邬正华 万跃鹏 范维澄	4-57-4-62
水煤浆外混式气动雾化机理研究	黄亚平 王应时 高丽君	4-63-4-68
旋转加力燃烧室预热点火器的设计及性能研究	谈浩元 黄先键 陈文平	4-69-4-74

低气耗“Y”型喷嘴设计与研究	张恩仲	4—75—4—79
高压静电改善汽油机预混合气燃烧的模拟试验研究		
..... 夏来庆 吴大元 倪光正 陈刚等		4—80—4—85
V. 火箭与火药的化学反应问题		
液氢液氧火箭发动机预燃室工作过程计算机仿真		
..... 孙纪国 庄逢辰		5—1—5—6
液氧/丙烷发动机燃烧室燃烧过程数值研究	邬小清 庄逢辰	5—7—5—11
火药热分解规律的实验研究	金志明 翁春生	5—12—5—17
VI. 代用燃料		
点燃式甲醇燃料发动机燃烧特性的研究		
..... 姜立永 刘忠长 刘金山 刘巽俊 李宇峰		6—1—6—6
甲醇柴油乳化燃料的研究	罗远荣 张纪元	6—7—6—11
稻壳干馏特性实验研究	张永廉 张翔	6—13—6—16
醇类代用燃料对地下矿井及隧道作业柴油机的适应性研究		
..... 吴凤桢 揭玉玲 张宝霞		6—17—6—21

煤的热解动力学研究

蔡榕 张鹤声
(同济大学)

摘 要

本文在分析和讨论了前人的热解动力学成果的基础上,建立了既通用又封闭的大颗粒热解模型。

该模型认为,煤粒挥发份析出的总体速率由Arrhenus公式表示,其当量动力学参数 E 、 K 与煤种无关,仅是煤粒的终温 T_{∞} ,及加热速率的函数;煤粒的挥发份最终产物 V_{∞} 与煤粒尺寸无关;在恒温加热条件下,相对挥发份最终产量 V_{∞}/V^* 满足麦克斯韦分布。

由该模型,我们只需知煤的工业分析,即可求得粒径在 $\phi 4 \sim \phi 25$ 、热解温度在 $500 \sim 1300$ K范围内的煤粒恒温热解之全过程。

同时,用失重法对三种挥发份差别很大的煤种(褐煤、烟煤和无烟煤)进行了恒温热解试验。最终,将理论分析与实验数据进行了对比,结果是另人满意的。

一、引 言

煤的热解对于炼焦、煤的气化和煤的燃烧都有着很重要的意义。由于煤的热解的复杂性,使得对它的动力学描述丰富多彩,各种经验公式、模型层出不穷。就理论模型而言,主要有双方程模型和多平行反应模型。

双方程模型认为有两类热解挥发平行地进行,其中一个反应在较低的温度下占优势,另一个在较高的温度下占优势。此模型被研究燃烧的工作者广泛采用。但它的六个参量与煤种、压力均有关,其通用性受到限制。[5]

多平行反应模型认为,热解由无穷多平行反应同时进行,其反应率系数 k_i 的变化仅是由于活化能的区别,而且反应的数目足够大以允许 E 表示为一个连续分布函数 $f(E)$ 。该模型只有四个参数,但均为煤种的函数,使其通用性仍受到限制。[2]

1987年付维标等人提出了通用热解模型。该模型认为热解时的当量化学反应动力学参数 E 、 K 不随煤种变化,仅是颗粒最终温度 T_{∞} 的函数;煤颗粒挥发物的最终产量 V_{∞} 取决于煤种、煤颗粒直径和加热条件,它由实验确定。通用热解模型的主要优点是简单和通用,它只有三个参数,且其中两个与煤种无关。其缺点主要在于 V_{∞} 的确定和 T_{∞} 的定义上。[3]

在通用热解模型中,来流温度为 T_{∞} ,炉壁温度为 T_0 。我们认为,只有当来流温度与炉壁温度均为 T_{∞} 时,煤粒热解过程中所揭示的 $E \sim T_{\infty}$ 和 $K \sim T_{\infty}$ 的关系才更有理论上的意义,也才有更进一步向其它工况推广的可能性。

对于某个煤种在某个 T_{∞} 下, V_{∞} 从本质上讲应理解为这种煤的最大挥发份析出量。它应与煤本身的某些参数建立联系。对此,我们做了一些尝试。

过去几乎所有的热解模型都是针对煤粉的,即使针对大颗粒煤,一般 $d_p < 9\text{mm}$ 。而在我们的实际需要中,例如浅层流化床。要求燃用的大颗粒煤,为此,我们在总结了前人的成果之后,建立了大颗粒煤热解模型。

二、大颗粒煤热解模型

2.1 基本假设:

1. 煤粒挥发份析出的总体速率由Arrhenus公式表示, 其当量动力参数 E 、 K 与煤种无关, 仅是煤粒终温 T 及加热速率的函数。
2. 煤粒的挥发份最终产量 V 与煤粒直径无关, 只与煤种和加热条件有关。
3. 在恒温加热条件下, 相对挥发份最终产量满足麦克斯韦分布。

2.2 基本方程

热解动力学方程
$$\frac{dV}{dt} = (V_{\infty} - V) \cdot K \cdot \exp(-E/RT) \quad (2-1)$$

能量守恒方程:
$$\rho_c \frac{\partial}{\partial t} (c_p T) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (\lambda r^2 \frac{\partial T}{\partial r}) - q_v G_V - \frac{\partial}{\partial V_p} (V_p G_V c_{pV} T) \quad (2-2)$$

化简后得:
$$\rho_c \bar{c}_p \frac{\partial T}{\partial t} = \bar{\lambda} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2-3)$$

边界条件:
$$\frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (2-4)$$

$$\bar{\lambda} \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_p} = h(T_s - T_{\infty}) + \epsilon \sigma F(T_s^4 - T_{\infty}^4) \quad (2-5)$$

初始条件:
$$T(r, \tau) \Big|_{\tau=0} = T_0 \quad (2-6)$$

质量守恒方程:
$$\frac{dV}{d\tau} = - \frac{d(\rho_c / \rho_{c,0})}{d\tau} \quad (2-7)$$

联列求解式(2-1), (2-3)和(2-7), 即可求得 $V(\tau)$ 。其中的参数 V_{∞} 根据假设3应满足:

$$V_{\infty}^r / V^* = F(Z) \quad F(Z) \text{ 为麦氏分布} \quad (2-8)$$

$$Z = A(T_{\infty} - T_f + 200)$$

其中 V 根据Howard [2] 的分析取为 $(1.1 \sim 1.3) V^r$;

T 根据Dryden [1] 的结果取值;

A 取决于加热方式, 在恒温加热条件下: $A = 3/800$ 。

三、实验装置及实验方法

3.1 实验装置

图1为热解实验试验台之示意图。煤颗粒放在自制的试样支撑网中挂于失重仪下方。失重仪是在浙江大学定做的。其测量范围为 $0 \sim 30$ 克。失重仪输出接 $X-Y$ 记录仪。炉子本体是自行设计并制作的, 用两支电热丝分别加热炉内气温和炉子壁温, 温度控制均为手控。炉子本体是可以升降的, 以保正试样的放入与取出。

3.2 热解实验步骤

- (1). 将炉子升温, 并调节加热气体的电热丝及加热壁温的电热丝两端的电压, 使气温和炉壁温度相等, 并稳定在所需的温度状态。
- (2). 通入氮气, 造成炉内惰性气体气氛。
- (3). 将失重仪预热并调零后, 加上试样, 并记下失重仪的初始读数。
- (4). 将炉子本体推上去, 即将试样放入炉中。并同时记录失重仪之输出量与

时间之曲线。

由于试样选择的随机性，我们对同一类试样进行了一定数量的重复试验，取这些失重曲线的算术平均值作为最终实验结果。

四、实验结果与理论分析的比较

我们用追赶法求解了(2-3)，用变步长龙格-库塔法求解(2-1)和(2-7)详细的离散化过程及计算程序说明见文献[4]。

我们主要对三种挥发份含量差别很大的煤种进行了实验和理论计算分析。这三种煤的分析列于表1。图2~图9给出了这三种煤的热解实验结果与理论计算曲线的比较。图10~12给出了热解动力学参量 E 、 K 与 T_{∞} 和 d_p 之关系，由图中我们可以看出， E 、 K 确与煤种无关，基本假设一是成立的。图13给出了我们的结果和其他作者的结果与麦氏分布曲线的比较。图14给出了 T_{∞} 与 V_r 之关系曲线。由此我们可以看出假设三是成立的。 t_f 的物理含义详见文献[1]。假设二由图15所显示的结果支持。

五、结 论

对粒径在 $\phi 4 \sim \phi 25$ 、热解温度在500-1300 K范围内的煤粒恒温热解，大颗粒热解模型给出了另人满意的描述。对于上述条件下煤粒的热解，只需知煤的 V_r 即可由图14求得 t_f ，再由图13求出 V_{∞} ，然后根据热解条件由图10和图11求出 E 和 K ，代入方程(2-1)，(2-3)和(2-7)中，联列求解可知煤粒热解失重之全过程。

六、讨 论

大颗粒热解模型基点在于它的三条基本假定。关于第一条或许会有许多物理、化学概念上的争议，但笔者认为即使是一种经验性的公式也仍然是十分可取的，机理方面的问题可以让后人去做工作。第二条假设是根据我们自己的实验结果作出的，它与前人的结论不符。笔者以为这是由于两个方面的原因造成的：一是对煤粒的破碎造成 V_{∞} 与 d_p 有关；二是以往实验范围中粒径变化很小，且 V_{∞} 的求法也有其缺点，故难以得出正确的结论。第三条假定是基于对煤的热解过程的这样一种微观解释：煤的热解挥发是由其内部的官能团脱离煤颗粒所产生的这种官能团是一种不可辨别的粒子且满足泡利不相容原理，由固体物理学知，在温度 T 下，能量为 ϵ 的状态被官能团占据的几率服从费-狄分布，在通常情况下，费-狄分布可以简化为麦-玻分布，因此，对于服从麦-玻分布的官能团，当它们由于热解反应而离开煤颗粒时，犹如金属电子的热发射，它所产生的最终失重和 T_{∞} 的关系应该满足麦氏分布而不是其他分布。

当然，大颗粒热解模型是笔者对煤的热解过程进行简单而又完整的描述所作的一种尝试，由于时间和经费的限制，许多工作未能深入进行，因而错误在所难免，望各位同行不吝赐教。

七、符 号 表

C_p : 比热	q_v : 挥发份析出潜热
d : 直径	r : 半径或半径座标
E : 热解当量活化能	t : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)
F : 视角系数	T : 温度 (K)
G : 质量流量	V : 挥发份析出量
h : 对流换热系数	τ : 时间座标
K : 当量频率因子	ρ : 密度
ϵ : 煤粒表面黑度	λ : 煤粒导热系数

脚标:

c 或 p: 煤颗粒

s: 煤颗粒表面

角标:

r: 可燃基

o: 初始值

v: 挥发份

*: 特征量

f: 特征值~

∞ : 环境

八、参 考 文 献

- [1] Dryden, I.G.C., Journal of the Institute of Fuel, 1957
- [2] Howard, J.B., Chemistry of coal utilization, 1981
- [3] 付维标等, 中国工程热物理学会燃烧学学术会议, 874041, 1987
- [4] 蔡榕, 同济大学硕士学位论文, 1989
- [5] 周力行, 燃烧理论及化学反应流体力学, 1986

干燥基	工业分析				元 素 分 析				
煤种	A%	V%	C %	C%	H%	N%	S%	O%	A%
大屯	18.42	29.54	52.04	66.36	4.24	1.05	0.70	9.23	18.24
晋城	23.01	6.30	70.69	69.14	2.29	0.85	0.16	4.55	23.01
舒兰	44.39	33.18	22.43	37.54	3.28	2.17	0.56	12.06	44.39

表 1 煤的工业分析和元素分析

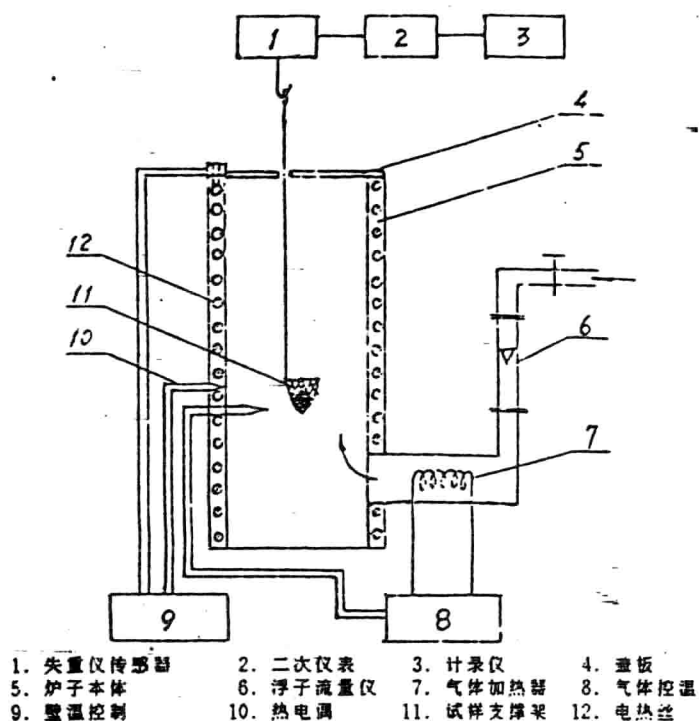
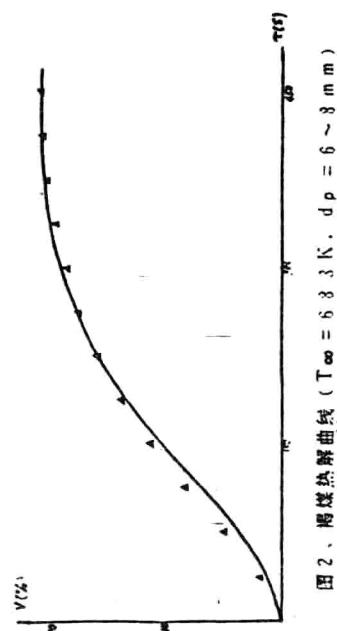


图 1、热解实验装置示意图



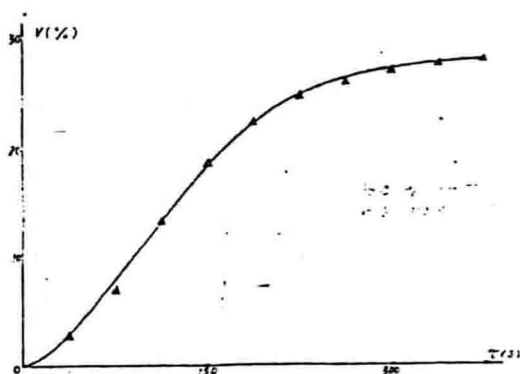


图3、褐煤热解曲线

($T_{\infty} = 800 \text{ K}$, $d_p = 10 \sim 15 \text{ mm}$)

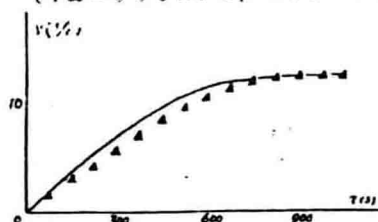


图5、大屯煤热解曲线

($T_{\infty} = 683 \text{ K}$, $d_p = 10 \sim 15 \text{ mm}$)

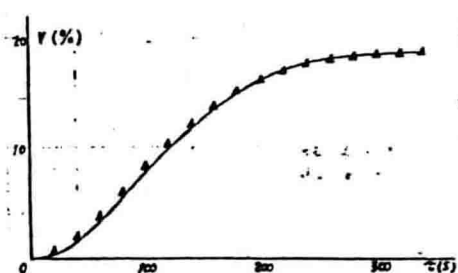


图6、大屯烟煤热解曲线

($T_{\infty} = 800 \text{ K}$, $d_p = 10 \sim 15 \text{ mm}$)

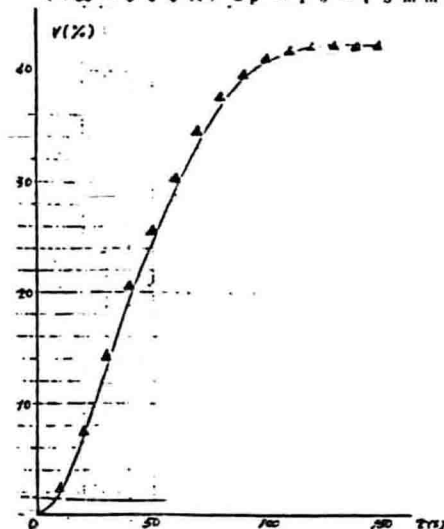


图8、大屯煤热解曲线

($T_{\infty} = 1183 \text{ K}$, $d_p = 10 \sim 15 \text{ mm}$)

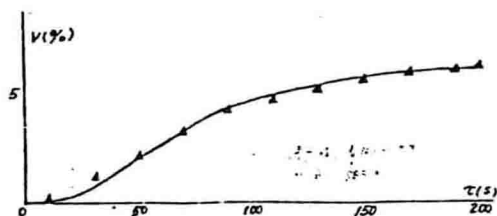


图4、晋城无烟煤热解曲线

($T_{\infty} = 983 \text{ K}$, $d_p = 10 \sim 15 \text{ mm}$)

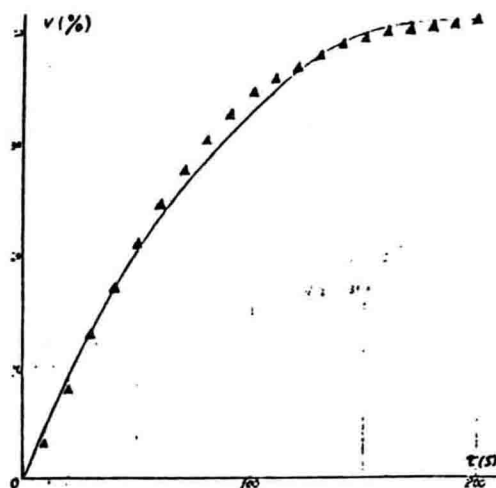


图7、褐煤的热解曲线

($T_{\infty} = 1183 \text{ K}$, $d_p = 20 \sim 25 \text{ mm}$)

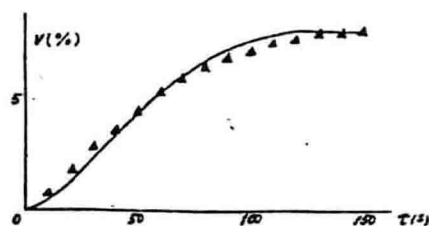


图9、晋城无烟煤热解曲线

($T_{\infty} = 1183 \text{ K}$, $d_p = 10 \sim 15 \text{ mm}$)

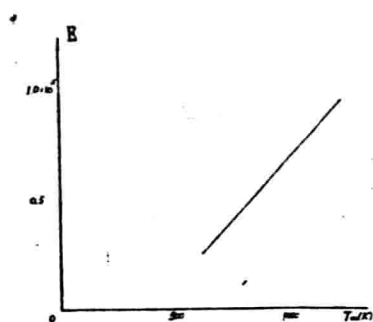


图 1.0. $E \sim T_{\infty}$ 关系曲线

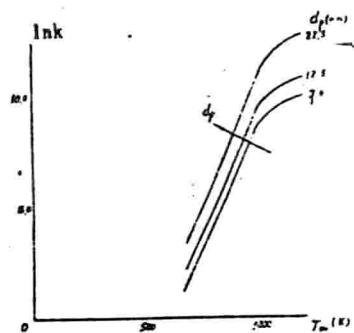


图 1.1. $K \sim T_{\infty}$ 关系曲线

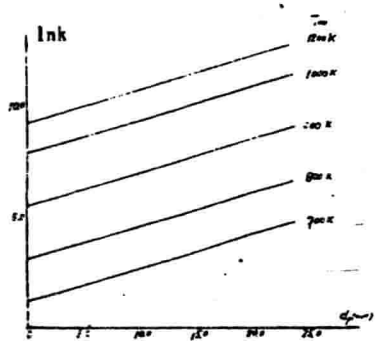


图 1.2. $K \sim d_p$ 关系曲线

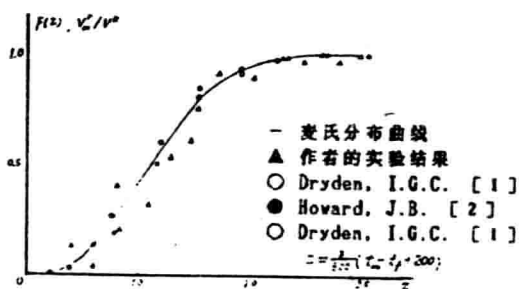


图 1.3. 麦氏分布曲线与实验结果的比较

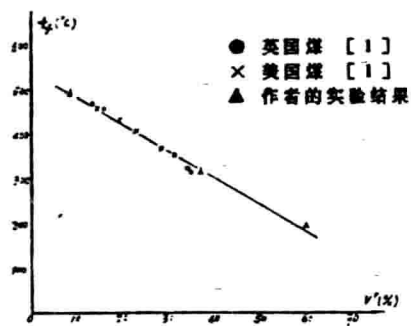


图 1.4. t_p 与 V' 的关系曲线

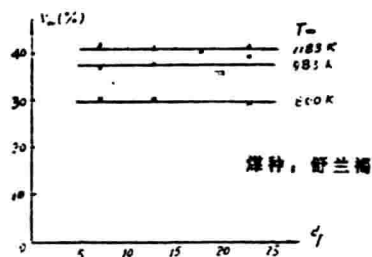


图 1.5. V_{∞} 与 d_p 的关系曲线

回流燃烧室头部区流态及流阻特性分析

航空航天部608所 侯晓春 田百强

摘 要

本文以某型号回流燃烧室水流模拟试验结果为素材, 针对不同头部结构的流态及流体损失观测结果, 进行了进一步的理论计算分析, 从而得到了一些规律性结论, 并与燃烧试验结果基本一致, 因此对深入了解回流燃烧室及研制回流燃烧室有一定价值。

1 前言

回流燃烧室在中小航空发动机上得到了广泛应用, 国内先后测绘、试验研究过几个机种的回流燃烧室, 多侧重于一般结构性能方面的研究分析, 对该种类型燃烧室有些初步了解。但是, 从指导新机设计来说是很不够的。

国外对直流燃烧室, 无论从理论上或试验方面都进行过深入的研究工作, 由于回流燃烧室自身的流路特点, 燃烧组织及火焰筒结构与直流燃烧室有不少差异, 因此国外对回流燃烧还正在分专题进行深入研究, 头部流态是其中专题之一。^[1]

本文是以某型号回流燃烧室预研中所进行的多种头部结构水流模拟试验获得的流态显影和流阻测量结果为基本素材^[2], 对不同头部的流态进行对比分析, 对不同头部的流体损失进行了计算分析, 从而获得一些规律性结论。所提供的比较全面的头部流态及流阻资料, 无疑对回流燃烧室研制工作有所裨益。另外所获结论与燃烧试验结果基本一致, 因此本文提供

的头部流谱及流阻计算分析方法是具有实用性的。

2 头部结构方案及流态

2.1 头部结构方案

回流燃烧室头部区气流结构是由火焰稳定装置(如涡流器、挡板等)、头部开孔及主燃孔等几个基本结构要素构成的。目前已有多种的头部结构在资料[3]中作过归纳,而某型号试验件采用的头部结构方案示于图1、主要结构特点见表1。

表1 试验件方案特点

方案号	涡流器	头部	喷咀	中间段	弯管
a	Wc(轴向叶片式)	H ₁ (2气膜、1小孔)	Ja(空气 雾化 喷咀)	Fa	Ta
b		H ₁ '(2气膜)			
c	Wa(斜孔式)	Ha(1气膜, 1小孔)			
d	Wd(径向式)	Hc(无孔)			
e	Wb(无孔)	Ha'(2错开气膜孔)			
f		H ₁ (2气膜)			
g	无	H ₁ (2错开气膜孔)	Jd(蒸发管)	Fc	

2.2 头部流态

图1中同时给出了各种组合方案的头部流谱图。

图1中a、b方案都采用轴向叶片式涡流器,由于头部小孔及气膜孔安排不同,所显示的流场也不相同。方案b是带轴向涡流器的典型对涡流态,而方案a由于内壁小孔强射流造成单涡流态为主。带斜孔式涡流器头部(方案

c) 流态类似于方案a。

方案d采用径向涡流器，由于径向旋转经轴向环道形成一股强烈旋流涡束，延伸长度大，并且在头部内外侧卷吸一对反向旋涡，也是典型的径向涡流器所形成的流态。

方案e、f皆采用盲端头部，也由于头部气膜带安排不同形成不同头部流态，方案e采用反向错开气膜环，形成了一个体积很大的单涡结构。PT6、JT15D发动机燃烧室类似于该种头部气流结构，是目前中小发动机燃烧室上推崇的头部方案，它对于小的火焰筒环腔高度很适宜。方案f由于对称安排了同向冷却环，所以形成了反向对涡流态。

方案g也是盲端头部，气膜结构与方案e相同，虽然配装了蒸发管喷出的射流与整个单涡气流结构是协调的，从实地观察看出该种单涡是非常完整、肥大的，无疑有利于头部燃烧。RTM322等先进发动机采用了该种方案。

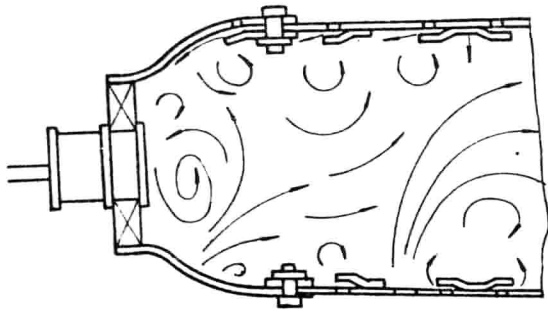
图1中也给出了早期回流燃烧室头部流谱图⁽⁴⁾，即方案h，它是T53-L-1B的带蒸发管型的燃烧室，头部采用挡板与蒸发管相间安排，在头部内外侧排列大量小孔。因此它的头部结构属于小尺度类型。

从以上列举的各种头部结构及流态对比分析，可以得到如下结论，

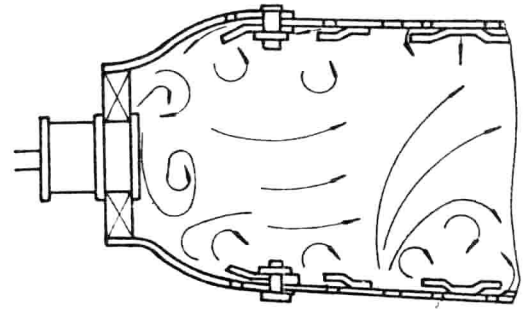
(1) 头部气流结构取决多种结构要素，头部小孔、冷却环安排及涡流器类型是主要影响因素，彼此相互影响。

(2) 哪种头部气流结构最佳，实在难于定论，各国各公司都有各自传统经验，另外与各种系列发动机采用的燃油供给方案匹配有关。

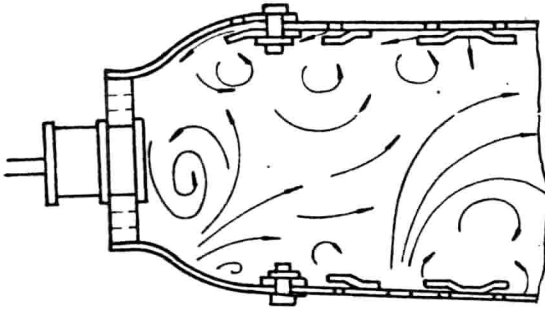
(3) 相应于b、d方案的燃烧试验结果表明，采用径向涡流器头部方案的燃烧效率高于采用轴向涡流器的。两种涡流器配相同供油方案，在设计工况下，分别为0.9874、0.9636。该结果可从前述流谱对比分析获得解释，



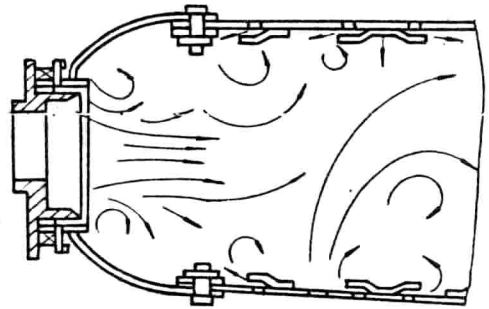
(a)



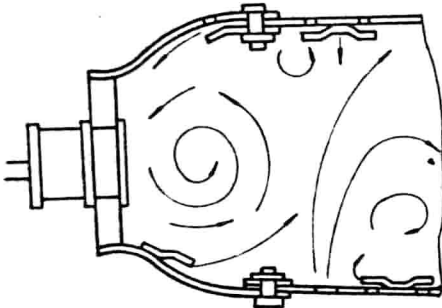
(b)



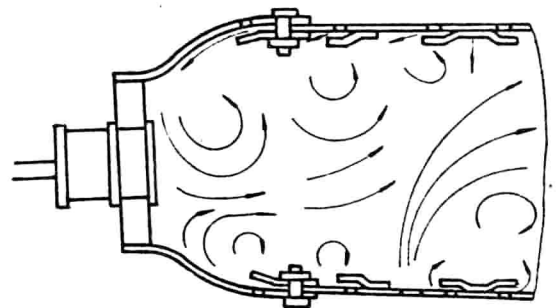
(c)



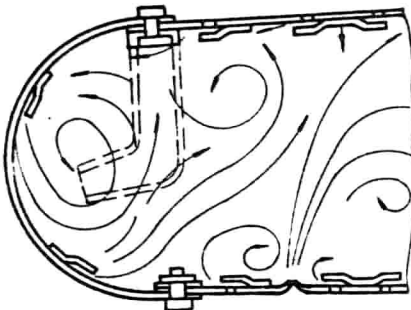
(d)



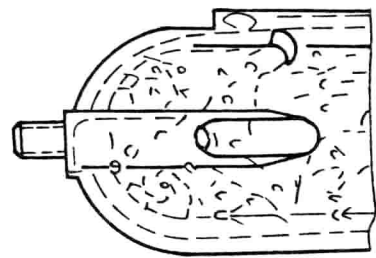
(e)



(f)



(g)



(h)

图1 不同头部方案的流谱图

d方案头部区涡束强大, 有利于头部区油气紊流混合和充分燃烧, 而b方案的对涡区短小, 其后又无强涡区。另外根据涡流器基本尺寸计算涡强数, S_{v0} 为1.42, S_{v0} 为1.57, 也可得到说明。

3. 不同头部的流阻特性

3.1 试验结果

对表1中列举的诸方案录测了整个燃烧室流阻系数, 相应各方案的流阻系数见表2。由于与它们匹配的火焰筒中间段、掺混段(弯管)及喷咀是相同的(除g方案采用蒸发管外, 其它皆采用简单空气雾化喷咀)。由于单独录取头部流阻较困难, 但是表2给出的 ξ_c 可以作为比较不同头部流体阻力特性。

3.2 计算分析

下面的计算主要考虑不同方案所采用的涡流器、头部小孔、气膜环及喷咀的尺寸差异, 分别计算其阻力系数(都相对火焰筒头部出口截面)。

从两方面进行了不同涡流器流阻计算: 一是纯理论计算; 二是按涡流器试验数据计算。

轴向(叶片及斜孔式)涡流器阻系数理论计算公式:

$$\phi_{s(f)} = 1.3 \left[\left(\frac{A_f}{A_s} \right)^2 / \cos^2 \alpha - 1 \right] \quad (1)$$

径向涡流器系数理论计算公式^[3]:

$$\phi_{s(f)} = \left(\frac{A_f}{A_s} \right)^2 \left\{ \left(\frac{r_b}{r_z} \right)^{2n_s} \cdot \frac{1}{n_s} - \left(\frac{1}{n_s} - 1 \right) + \left(\frac{A_s}{A_f} \right)^2 \left[1 - \frac{A_t}{A_s} \right] \right\} \quad (2)$$

式中 A_f 、 A_s 、 A_t ——火焰筒、涡流器喉道及出口面积;

α ——叶片或钻孔进气角;

n_s ——旋流的衰减数, 一般取0.8;

r_z ——旋流器的出口断面与气流的平均旋风半径;

r_b ——旋流叶片出口处喉道的平均旋风半径。

各种涡流器试验测得的数据⁽¹⁾按下列公式计算流量系数 C_d 及流阻系

数 ϕ' ...

$$C_{ds} = \frac{V}{A_s} \sqrt{\frac{r}{2g\Delta P}} \quad (3)$$

$$\phi'_{s(f)} = \frac{1}{C_{ds}^2} \left(\frac{A_f}{A_s} \right)^2 \quad (4)$$

式中 V ——试验测得的通过涡流器流量, m^3/s ;

r ——气流重度, kg/m^3 ;

ΔP ——试验时压差, $9.81Pa$ 。

经过喷嘴、头部小孔及气膜孔的流阻系数, 均按几何尺寸由下式进行计算(忽略流量系数),

$$\phi_{o(f)} \text{ (或 } \phi_{j(f)} \text{)} = \left(\frac{A_f}{EA_o} \right)^2 \quad (5)$$

然后求出头部总流阻系数 $\phi_{\text{总}}$

$$\phi_{k(f)} = 1 / \left(\sum_{i=1}^j \frac{1}{\sqrt{\phi_i}} \right)^2 \quad (6)$$

经换算求出相对于进口截面的头部流阻系数 $\phi_{\text{总}}$, 以上各项计算结

果汇总于表2。

表2 不同头部方案流阻系数计算值

方案号	ξ	$\phi_{\text{总}}$	$\phi'_{\text{总}}$	$\phi_{\text{总}}$	$\phi_{\text{总}}$	$\phi_{\text{总}}$	$\phi_{\text{总}}$
a	1.032~1.030	478.7	1247	1125.4	6187.8	175.4	0.247
b	1.040~1.047			1832.9		291.9	0.318
c	1.052~1.054	394.0	3046	2387.5		380.0	0.363
d	1.056~1.059	945.9	1536	/		684.0	0.487
e	1.185~1.199	/	/	2387.5		909.4	0.562
f	1.128~1.145	/	/	1832.5	4587.4	808.0	0.530
g	1.10~1.129	/	/	2387.5		805.0	0.529

(注：为了区分试验值与计算值，采用不同符号表示流阻系数。)

从表2所绘出结果可以获得如下结论：

(1) 计算所得不同头部方案的流阻系数 $\phi_{\text{算}}$ （或 $\phi_{\text{算}}$ ）值大小规律与试验测得的燃烧室总的流阻系数 ξ_c 值基本一致。试验数据的微量差异表明水流模拟试验录测流阻特性是准确的。头部流阻系数占总阻力系数比例接近一般规律，表明前面给出的估算方法具有实用价值。

(2) $\phi_{\text{算}}$ 与 $\phi_{\text{算}}$ 变化规律一致，而数值上有些差异，由于计算中简化及加工误差造成。计算结果中轴向叶片式的流阻最小，径向式的大，与现有资料报导的规律相同。

3. 2.3 涡流器的流阻大小不能代表整个头部流阻大小，整个头部流阻大小是多项结构因素的综合值。方案a~b的流阻小，f~g方案的大，该结论在方案b、d、f的燃烧室试验中录测的 σ_c 分别为0.988、0.980、0.974。与本文获得的结果一致。

4. 结论

(1) 本文提供的流谱，录测的流阻及流阻计算结果对燃烧效率、流阻特性分析提供了比较满意的解释。

(2) 头部流场好坏及流阻大小受头部多种结构因素影响。

(3) 从已有型号头部方案及燃烧试验结果来看，采用径向涡流器及盲端头部（即方案d~g）的燃烧室综合性能较为理想，适合于中小发动机回流燃烧室。