

北京航空学院

科学报告会论文集

庆祝建校三十周年

第四分册 发动机类(上册)

1982.10

前 言

建校三十年来, 我院科研工作遵循党的方针政策, 密切结合教学, 取得不少成果, 在此基础上, 总结出了一批有一定理论价值与实践意义的学术论文。

战斗在祖国各地的校友们, 在为实现我国四个现代化这一伟大历史任务的过程中, 同样取得了可喜的成绩, 此次他们热情响应母校三十周年校庆征稿的号召, 把自己多年来从事教学、科研与工程技术实际工作中所积累起来的宝贵经验, 进行理论总结, 书写成文, 投寄我

为隆重纪念我院三十周年校庆日, 加强院内的学术交流与联系, 我处特编辑这套校庆文集。文集刊载本院与校友近期科研成果或技术总结的详细文摘。为节省篇幅, 在编辑时将作者原列参考文献删去。

论文按专题分类出版:

1. 材料科学与工程类
2. 无线电电子学类
3. 自动控制类
4. 发动机类
5. 飞行器与力学类
6. 计算机类、管理工程类、情报学类
7. 制造工程类
8. 数理类
9. 机械设计类
10. 医疗类、体育类
11. 社会科学类
12. 大学生论文集

由于编辑出版力量有限, 时间也较仓促, 难免有遗漏和不妥之处, 欢迎批评指正。

北京航空学院 科研处

1982年10月

第四分册 发动机类

目 录

1. 多股非平行流紊流掺混的冷态试验研究
.....马继华 杨载明 唐瑞成 (1)
2. 在单管燃烧室中冒烟的测量研究
.....王华芳 李黎 (9)
3. 引射喷管最佳几何参数的研究
.....吴达 李凤存 张荣 (15)
4. 对燃气涡轮燃烧室排气污染的一种简单模型的分析与发展
.....吴寿生 (23)
5. 用照相法进行直射式喷咀侧喷燃油喷雾最大浓度线的试验研究
.....李象益 王庚 (29)
6. 燃油加温对高空低压点火性能影响的试验研究
.....陈能坤 赵云惠 周雁 (42)
7. 碳氢燃油液滴蒸发的分析
.....金如山 (48)
8. 氧的浓度在低压下对流动油雾点火性能影响的试验研究
.....赵云惠 (90)
9. 二元空气雾化喷咀研究
.....赵其寿等 (96)
10. 跨流喷射燃油浓度分布计算的轨道扩散法
.....杨茂林等 (103)
11. 发动机试验动态测量与数据联机处理系统
.....郑克扬等 (117)
12. 脉冲激光显微照相技术在雾化研究中的应用
.....侯木玉等 (122)
13. 两相流掺混结构的改变对火箭冲压发动机燃烧性能影响的实验研究
.....唐瑞成等 (132)
14. 用电保温取样感头测燃油浓度分布的试验技术研究
.....顾善建等 (144)

15. 进气道畸变指标的分析 and 模拟
..... 黄熙君 等(154)
16. 涡喷—11 发动机火焰筒延寿试验
..... 俞裕民 陈明明 吴一黄(164)
17. 压气机叶栅中的二次流动
..... 陶德平 卢仁富 赵秀华(170)
18. 用积分方程求解第二类边界条件下竖壁自然对流问题
..... 王丰 魏福清(180)
19. 垂直套管腔中自由运动的数值解
..... 朱谷君 A. 弗罗恩(186)
20. 多组分液滴汽化的一个模型
..... 李汝辉 董耀德(192)
21. 管内空气紊流换热实验的数据处理
..... 杨帆 王丰 关雷洋(198)
22. 封闭空间冲击流体及换热实验研究
..... 邱绪光 等(204)
23. 相似理论应用中的若干问题
..... 邱绪光(210)
24. 使用 X—30 推进剂的固体火箭发动机的内弹道计算方法
..... 侵蚀燃烧课题组(216)
25. X—30 推进剂侵蚀燃烧特性对内弹道的影响
..... 侵蚀燃烧课题组(226)
26. X—30 推进剂侵蚀燃烧特性实验研究
..... 侵蚀燃烧课题组(233)
27. 三重迭代内弹道计算方法及程序
..... 王信 张中钦(240)
28. 固体火箭发动机快速降压过程分析
..... 王普光(246)
29. 固体火箭推进剂侵蚀比的一种半径验的计算关系式
..... 池长青 徐绍敏(253)
30. 片型装药发动机中断燃烧法
..... 李水池 李宜敏(260)
31. 固体推进剂表面裂纹中火焰传播和燃烧
..... 李桂(268)

多股非平行流紊流掺混的冷态试验研究

发动机系 马继华 杨载明 唐瑞成

前 言

两股同轴平行流之间的紊流掺混问题,已有大量的研究报导。但固体火箭——冲压组合发动机中的掺混室(即补燃室),多采用次流以一定角度进气的掺混方式,这种掺混过程是异常复杂的,有关这方面的研究工作,特别是涉及掺混机理和掺混性能计算方面的研究工作报导不多,因此可借鉴的资料较少,为此,我们在第一阶段固冲组合发动机补燃试验之后,为进一步改善补燃性能,提高比冲,进行了多股非平行流的冷态模拟试验。

二、叉流紊流掺混的基本方程

到目前为止,人们对于紊流运动的机理还不十分清楚,因此无法用纯理论的方法进行流场的计算。通常,在平行流掺混装置中(即引射器中),广泛采用 *Fabri* 给出的计算方法,但长期实践表明:按 *Fabri* 方法计算的理论性能,往往比实际性能高许多。后来,范作民同志对 *Fabri* 公式进行了一些修正,给出了一个考虑主流在初始段中不等熵膨胀而带来损失的验证公式,使理论估算值同试验值比较符合了,但上述公式仅限于小引射系数范围 ($0.1 < N < 0.5$) 的临界状态使用,对于我们目前大引射系数 ($N \gg 1.0$) 下的叉流掺混是不适用的,因此必须针对我们试验模型的具体情况,导出新的性能计算公式。

假设条件:

- (1) 掺混室进出口气流参数各自均匀。
- (2) 忽略壁面摩擦力,忽略同外界的热交换。
- (3) 假定主喷口底部压力等于当地次流静压。
- (4) 主喷口出口速度达到临界(即主流总压力足够高)。

图(1) 为叉流掺混进出口流场简化图,取控制体“2 1 1 2 3 3 2”则有:

质量连续:

$$\frac{G_3}{G_1} = 1 + N$$

$$N = \frac{G_2}{G_1} = \frac{1}{\eta} \cdot \frac{P_{02}}{P_{01}} \cdot q(\lambda_2)$$

$$\eta = \frac{F_{hp}}{F_2}$$

动量守恒:

$$\begin{aligned} & \frac{G_1}{g} V_1 \cos \varphi_1 + P_1 F_1 / \cos \varphi_1 + \frac{G_2}{g} V_2 \cos \varphi_2 + P_2 F_2 \cos \varphi_2 \\ & + P_2 (F_3 - F_1 / \cos \varphi_1 - F_2 \cdot \cos \varphi_2) = \frac{G_3}{g} V_3 + P_3 F_3 \end{aligned}$$

经简化处理后上式变成:

$$\begin{aligned} & \omega_1 \lambda_1 \cos \varphi_1 + 1 / \lambda_1 \cos \varphi_1 + N (\omega_2 \lambda_2 \cos \varphi_2 + \omega_3 / \lambda_2 \cos \varphi_2) \\ & = (1 + N) \cdot Z(\lambda_3) \quad (\text{推导过程本文略}) \end{aligned}$$

$$\omega_1 = \frac{1}{\cos^2 \varphi_1} - \frac{2K}{K+1} \cdot \tan^2 \varphi_1$$

$$\omega_2 = \frac{C(1-K) + (1+K)}{1+K}$$

$$\omega_3 = (1+C) \cdot \cos^2 \varphi_2$$

$$C = \beta / \cos \varphi_2 - \alpha / \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 - 1$$

次流总压比:

$$\sigma_{23} = \frac{P_{03}}{P_{02}}$$

$$\sigma_{23} = \frac{(1+N) \cdot q(\lambda_2)}{N \cdot \beta \cdot q(\lambda_3)}$$

主流总压比:

$$\sigma_{13} = \frac{P_{03}}{P_{01}}$$

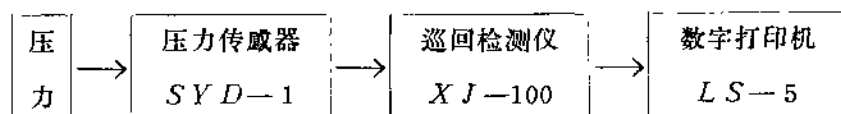
$$\sigma_{13} = (1+N) \cdot \eta / \beta \cdot q(\lambda_3)$$

$$\alpha = \frac{F_1}{F_2}, \quad \beta = \frac{F_3}{F_2}$$

采用上述推导的公式, 对三个模型进行了性能估算, 计算框图见图(2)。

三、試驗設備簡介

本試驗在固冲联管试车台上进行, 用单点总压探头测量主流和次流的总压, 用总静压复合探头测量掺混室内总静压分布, 复合探头可以转动亦可在试验过程中沿轴向移动, 用信号指示器限定测量截面的位置。试验测量框图如下:



理论计算和实验数据处理均在 $PS-80$ 微处理机上进行。图(3) 为实验数据处理框图。

四、試驗結果

(1) 試驗状态

模型	主 流			次 流		
	噴 管 型 式	φ_1	P_{01}	噴 管 型 式	φ_2	P_{02}
A	四 孔 分 流	15°	21	四 孔 汇 流	40°	2.7
B	四 孔 分 流	15°	15 20	环 形	40°	2~3
C	音 速 单 噴 口	0°	15 20	环 形	40°	2~3

(2) 試驗結果

掺混性能的试验值与理论估算值列于图(4—16)，它们之间的差别用相对偏差来衡量。

某性能参数的绝对偏差定义为：

$$\Delta X = X_{\text{计算值}} - X_{\text{试验值}}$$

则相对偏差定义为：

$$\Delta \% = |\Delta X| / X_{\text{计算值}}$$

平均相对偏差定义为：

$$\overline{\Delta \%} = \Delta \% / n$$

n = 某模型的有效试验次数，

试验结果表明：试验值同本文理论估算值之间的最大相对偏差小于5%，其中A模型的平均相对偏差小于4%，B、C两模型的平均相对偏差小于2%，图(5—8)中虚线为按Fabri法(但考虑了次流的入射角)的计算结果，它同试验点之间的相对偏差大于15%。

五、結 果 分 析

从上述结果可以看到三个模型的理论估算值同试验值能良好的相符，最大相对偏差<5%，A的计算值普遍高于试验值，A的偏差值普遍高于B、C两模型的偏差值，其原因是：我们所采用的结构因子仅仅是 α 、 β 、 φ_1 、 φ_2 的函数，它们并未概括全部结构特点——如形廓特

点, 因此只要上述四个参数相同时就会有相同的结构因子。

图(4) 中给出 σ_{13} 随 N 变化的曲线, 三模型的试验点分别成线性分布, 全部试验点落在一条公共曲线的两边, 这条线正好是 B 的理论曲线。从此图可以看到: B 状态的性能参数 σ_{13} 稍高于 A 、 C 状态的值。

六、結 論

(1) 在大引射系数下 ($N \gg 1$), 用本文的近似公式可以预示掺混性能, 最大相对偏差不超过5%。

(2) 本文给出的四孔分流喷管, 有良好的掺混特性, 在 N 相同时其 σ_{13} 值不低于音速直射单喷口的 σ_{13} 值, 因而用于火箭——冲压补燃室可望取得良好的补燃性能。

(3) 三个模型具有大体相同的 σ_{23} 值, 均在1.0附近, σ_{23} 值对主、次流总压的变化很不敏感。

(4) P_{03} 同次流总压的变化成正比, 但对主流总压的改变不敏感。

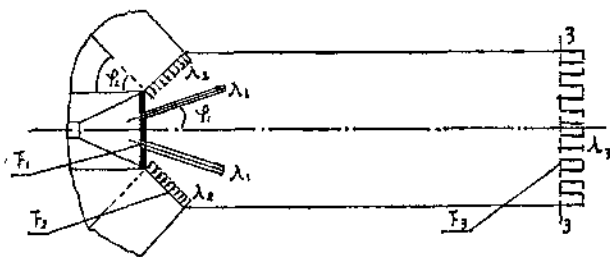


图1 双流掺混进出口截面流场简图

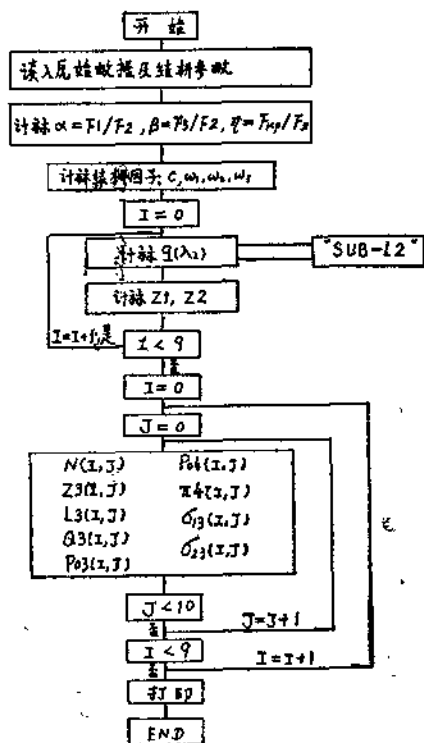


图2 理论估算框图

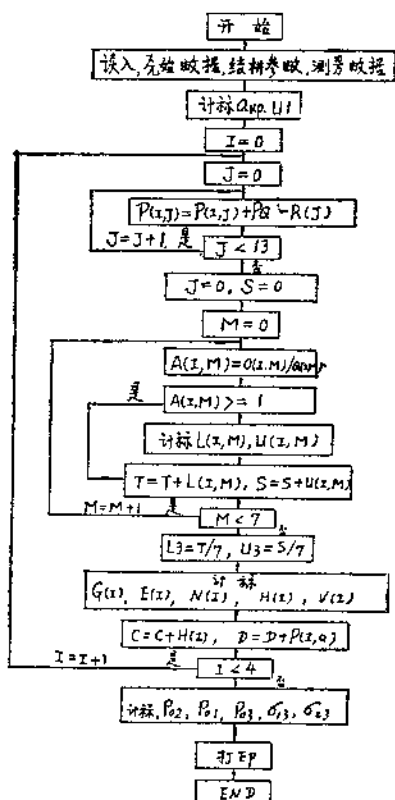


图3 实验数据处理框图

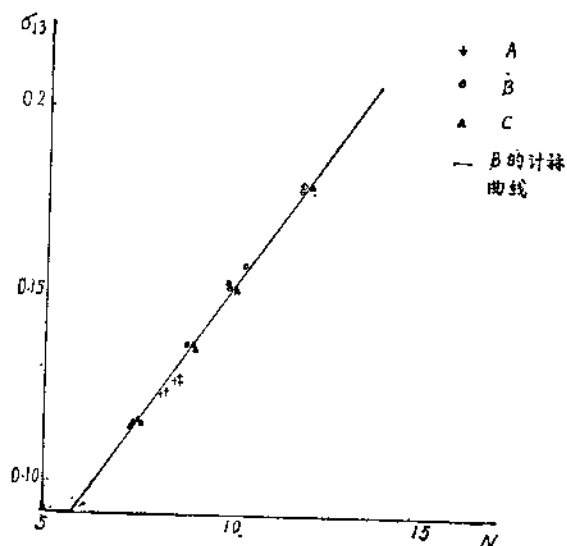


图4 σ_{13} 随 N 的变化

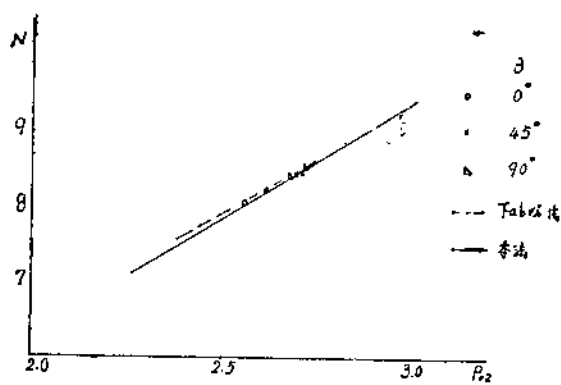


图5 N 随 P_{02} 变化 (A)

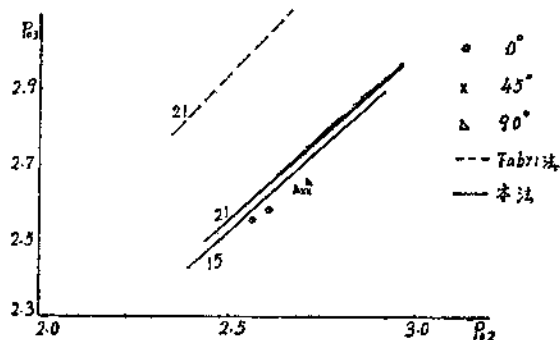


图6 P_{03} 随 P_{02} 变化 (A)

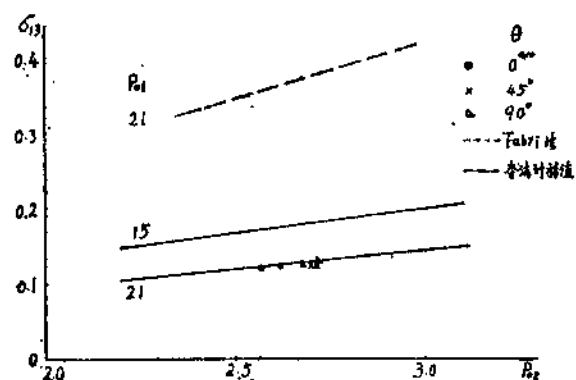


图7 σ_{13} 随 P_{02} 的变化 (A)

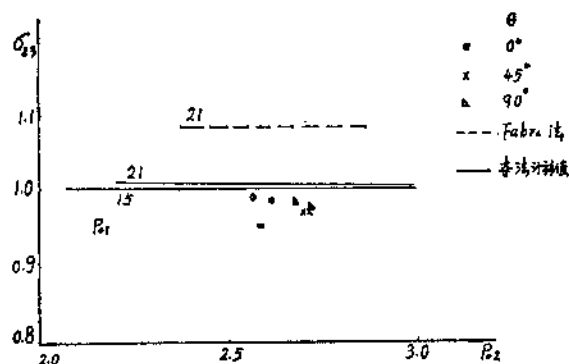


图8 σ_{23} 随 P_{02} 的变化 (A)

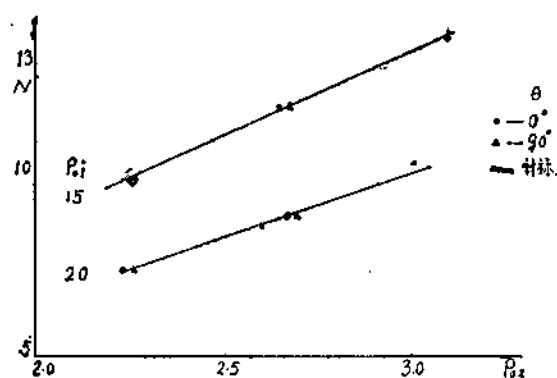


图9 N 随 P_{02} 的变化 (B)

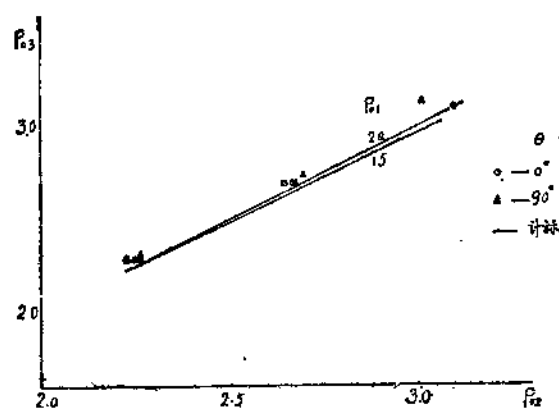


图10 P_{03} 随 P_{02} 的变化(B)

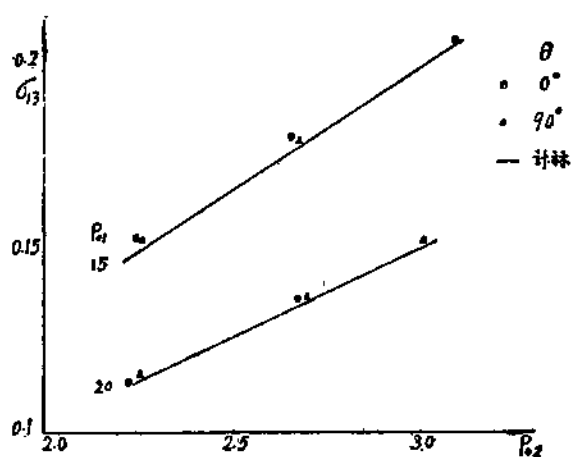


图11 σ_{13} 随 P_{02} 的变化(B)

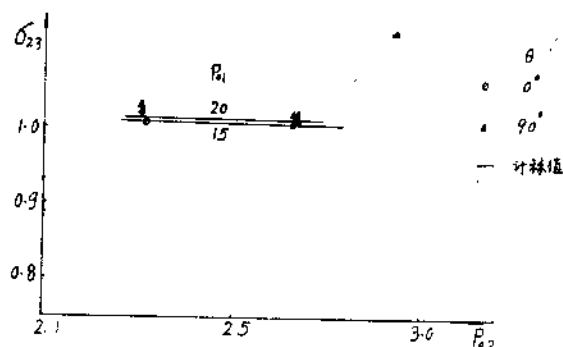


图16 σ_{23} 随 P_{02} 的变化(C)

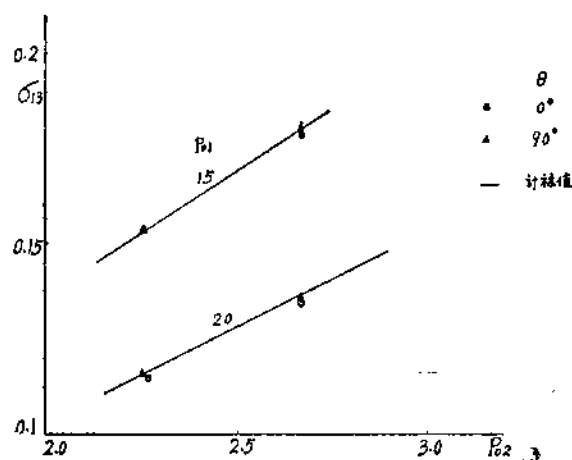


图13 N 随 P_{02} 的变化(C)

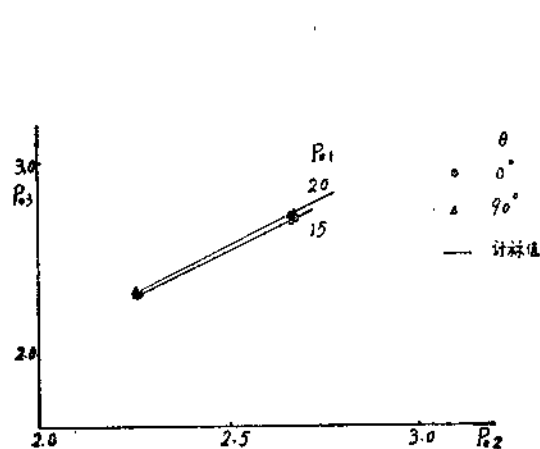


图14 P_{03} 随 P_{02} 的变化(C)

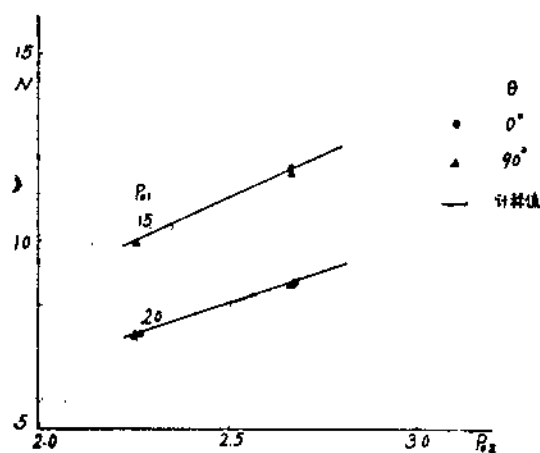


图15 σ_{18} 随 P_{02} 的变化

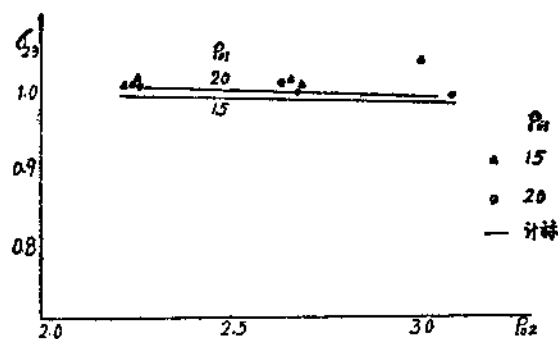


图12 σ_{23} 随 P_{02} 的变化(B)

在单管燃烧室中冒烟的测量研究

发动机系 王华芳 李 黎

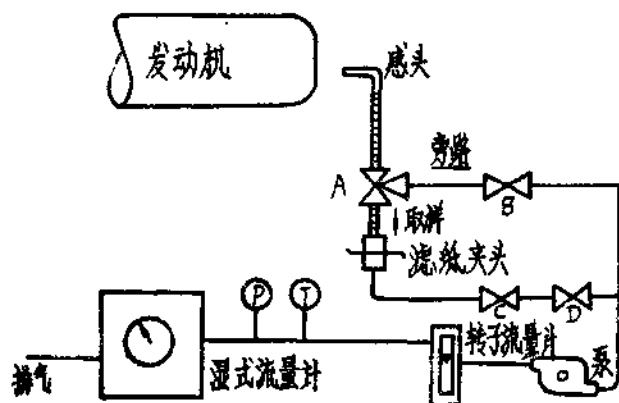
前 言

本文参考了美国测量冒烟的 *SAE ARP 1179* 文件中的标准取样系统, 然后作了改进, 设计了适合于实验室使用的冒烟取样系统。采用此系统, 测取了在实验台上作为加热器使用的一个 *AM-3* 单管燃烧室上的冒烟数据, 并作出了在余气系数 α 一定时, 冒烟数 SN 与燃烧室压力 P 的关系曲线, 及当压力一定时 SN 与 α 的关系曲线, 对此结果进行了分析。试验的条件是, 燃烧室进气压力由 $1.2 \sim 8$ 个大气压, α 范围可由 $4.5 \sim 17$ 。采用单点式保温取样感头, 取样位置距火焰筒出口 52.8cm 处。

一、冒烟的取样系统

国外从六十年代开始就对冒烟测量方法进行了研究, 各研究单位都有自己测量冒烟的方法, 有采用光学方法的, 也有采用过滤方法的, 而且烟度的单位也各不相同。1968年 *SAE* 成立了一个专门委员会 (*E-31* 飞机排气污染测量委员会), 确定一种推荐的冒烟表示单位 (*SAE* 冒烟数) 及测量系统装置, 成为排气冒烟的标准性技术文件, 其取样系统的原理图如图 (1) 所示。

SAE 推荐的是过滤的方法, 图 (1) 中阀门 *A* 为一个三通阀, 使样气过滤纸夹头或者由旁路抽至大气。阀门 *B* 和阀门 *C* 是节流阀门, 用来控制经过过滤器或旁路的流量。阀门 *D* 是截止阀, 用来截止从过滤器通往真空泵的, 泵为薄膜真空泵, 用来抽取样品。转子流量计用来监测样气的流率。湿式流量计, 用来测量所通过的样气总容积流量。温度和压力测量用于校正容积流量。取样后, 过滤纸上的烟痕



图(1) 标准取样系统原理图

通过反射率计来测量冒烟数, *SAE* 定义的冒烟数为 SN , 即当一定量的样气 (单位过滤纸面积上通过 0.023 磅的气样, 即 0.023 磅/时²) 通过过滤纸后, 用反射率计测量出带烟痕的过

滤纸的反射率, SN 用如下公式计算:

$$SN = 100 \left(1 - \frac{R_s}{R_w} \right)$$

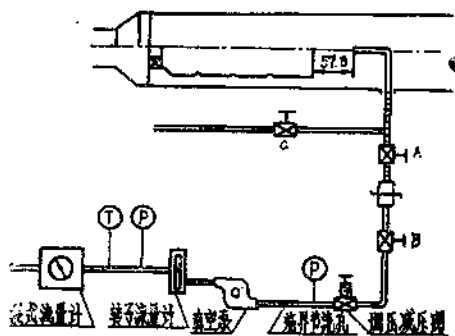
R_s ——有烟痕过滤纸的反射率

R_w ——清洁过滤纸的反射率

根据上式, 只需测出 R_s 及 R_w 则 SN 即可求得。以上这个标准系统, 用于发动机排气口处取样测量。

我们是在试验台上测冒烟, 因此对冒烟取样系统, 参照美国标准作了某些修改, 其方案见图(2)。

样气由保温取样感头抽取, 当取样时, 关闭 C 阀, 打开 A 阀, 使样气经过滤纸夹头, B 阀为节流阀作为调节流量用, 然后经自动调压减压阀, 其作用为不论上游压力如何变化, 而阀后压力能维持一定值, 再经过一个直径 $d = 1mm$ 的临界节流小孔, 其作用为保持小孔流速在临界状态来控制流量, 一台薄膜式真空泵作为抽气用, 用转子流量计监控流量, 用湿式流量计测总的流过样气的容积流量, 流量计前的压力、温度的测量作为修正流量的标准状态用。



图(2) 取样系统方案图

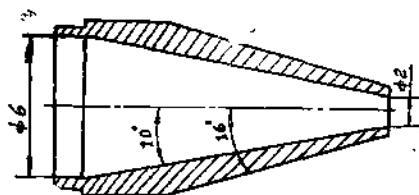
与美国标准取样系统所不同的有以下几点:

1. 活门 A 不是三通, 而是两通阀。
2. 旁通路没有联到真空泵上, 因为在试验台上燃烧室中压力比较高, 为了在正式取样前使感头中保持流动状态, 避免烟粒子积累, 只需将阀门 C 打开, 样气即能由感头流出, 这样有两个优点, 一是操作简便, 二是带烟的样气不必经过真空泵及流量计, 以免污染管路及仪表。而在发动机排气口测取样品时, 因为气流压力低, 所以旁路必须接在真空泵上。
3. 为了简化操作, 在泵前加了一个临界节流小孔, 当小孔前压力一定时, 则流量就保持不变, 当取样需要某一额定流量时, 只需校准小孔前压力就行, 而自动调压减压阀, 就是保证不论上游压力如何变化, 经过调压阀都能保证下游压力不变。在取样过程中, 不论燃烧室内工作状况如何变化, 取样管路上只要调压阀出口压力一定, 就能保证取样流量不变, 可以避免在每个不同状态时调节阀门来控制流量, 这样既耽误时间也影响精度, 此处转子流量计作为监控用, 湿式流量计测出总的容积流量。但如用转子流量计, 使用秒表也能测出总流量。

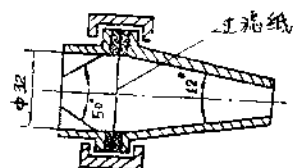
其中感头尺寸参考 $SAE \quad ARP \quad 1179$ 标准设计, 如图(3)所示。

过滤纸夹头设计尺寸, 如图(4)所示。

因为冒烟测量中烟粒子颗粒极小, 一般为 $<0.1\mu$, 因此不必采用等动力取样。为了防止烟粒子在管路中堆积或静电吸附, 路管材料用不锈钢, 感头的端部采用铜的, 过滤纸夹头的材料采用铜的。为了使样气温度保持在露点以上, 感头与夹头处都采用电阻丝加热保温, 用



图(3) 探头设计图



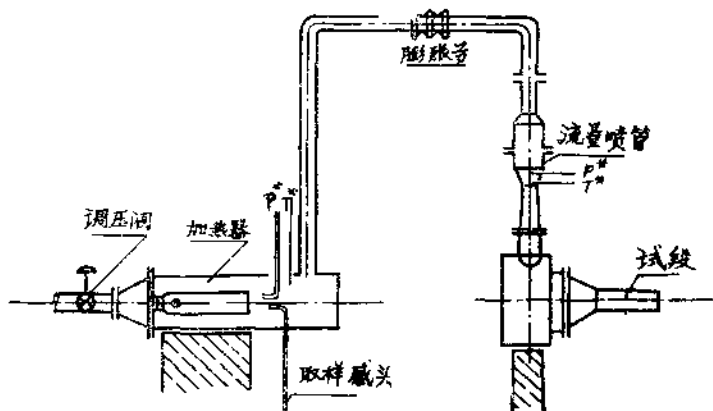
图(4) 过滤纸夹头设计尺寸

<36伏的电压，每次试验前，提前加热使温度达80℃以上。

这套系统在实际操作中简便快速，但当自动调压减压阀的上游压力很低时，不易保持稳定。

二、试验设备及数据测量

本试验在某联管试验台上的加热器中测取冒烟，设备简图见图(5)。

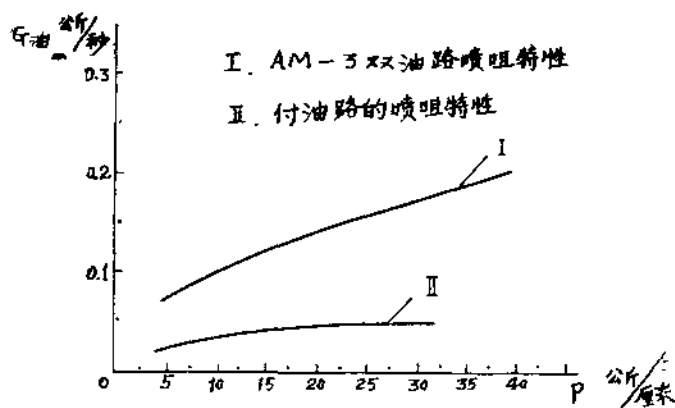


图(5) 实验设备简图

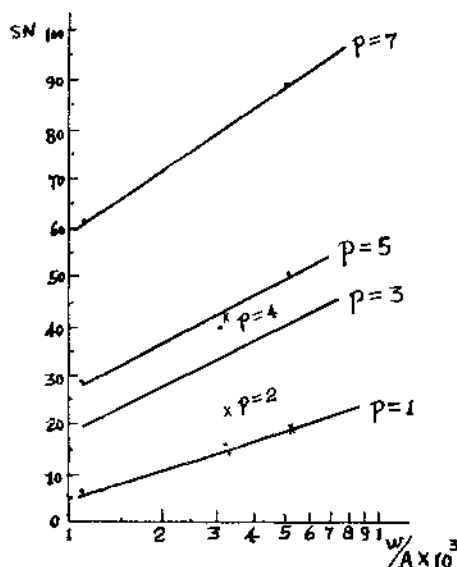
试验台的工作范围，其供气压力可由1.2~8个大气压，供油范围 α 可由4.5~20。试验的燃烧室为AM—3发动机的主燃烧室，它安装在一个 $\phi 245\text{mm}$ 直径的管道内，有一双油路的燃油喷嘴，采用半导体高能点火系统。喷嘴的供油特性见图(6)，供油量少时只用付油路供油。

实验的目的除了检验取样系统以外，并测量压力对冒烟的影响及余气系数 α 对冒烟的影响。因此除了测出燃烧室出口的总温 $T^*_{\text{燃}}$ 及总压 $P^*_{\text{燃}}$ 外，还需测出流量喷管处的总温 $T^*_{\text{流量}}$ 及总压 $P^*_{\text{流量}}$ ，流量喷管喉道直径 $D=80\text{mm}$ ， $F=50.25\text{cm}^2$

$$\text{喷管处流量 } G_{\text{喷}} = \frac{m P^*_{\text{流量}} F q(\lambda)}{\sqrt{T^*_{\text{流量}}}} = 18.56 \frac{P^*_{\text{流量}}}{\sqrt{T^*_{\text{流量}}}}$$



图(6) 喷嘴特性曲线



图(7) SN 对 W/A 曲线

注：图上 P 即为文中的 $P^*_{燃}$

由喷嘴前压力，通过查喷嘴特性曲线可求得供油量。

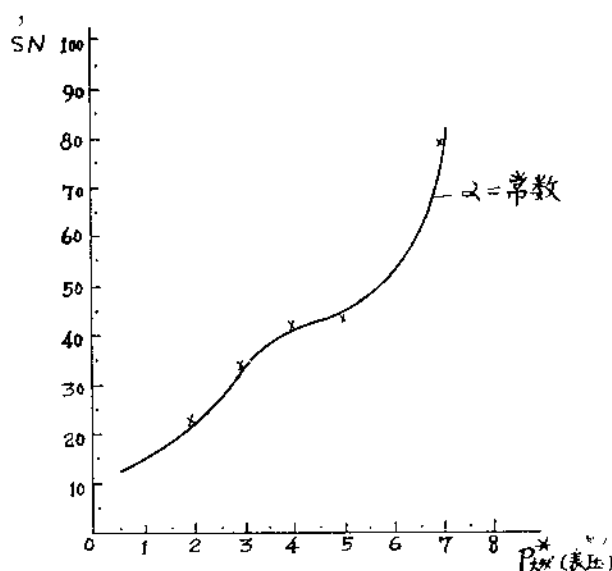
三、试验结果分析

1. α 一定时，燃烧室内压力变化对冒烟的影响即 $SN-P$ 曲线

由于设备操作及测量精度的限制， α 不能保持绝对不变，其变化约在 6.3~6.9 范围内，但作为定性分析还是可以的。按 $SAE ARP 1179$ 文件中规定，为了使取样流量比较精确，要求对各个燃烧室压力都取四个不同流量的冒烟样品，然后作出在某一个压力下的 SN 对 W/A 的曲线， W/A 取对数坐标，并将结果用直线联结。我们参考了 $SAE ARP 1179$ 文件采取了三个流量的烟样，其流量为 5.1 升，14.7 升和 23.3 升，作出曲线如图(7)。

根据参考资料中所说，取四个流量作 SN 对 W/A 的曲线时误差为最小。我们因为是作定性的分析，因此简化了步骤。有了 SN 对 W/A 的曲线后，再在某一个样气流量下作出 SN 对 $P^*_{燃}$ 的关系曲线。根据参考资料中规定，取样时间不少于 1 分钟，取样流量应保持在 14 升/分，使烟样有代表性，因此我们就确定取样时间为 63 秒，样气总流量为 14.7 升，作为对比流量画出了 SN 对 $P^*_{燃}$ 的关系曲线，见图(8)。

由于设备的限制，压力只能做到 8 个大气压。根据曲线可以看到，随着 $P^*_{燃}$ 的增加则冒烟数 SN 是增加的，这是因为当燃烧室内压力增高时，主要影响喷嘴特性，当 α 不变时，由于燃烧室压力增加，单个油珠运动的阻力增加，影响燃油喷射的穿透深度，所以压力增加则冒烟增加，当压力超过 10 个大气压时冒烟激烈上升。由于设备能力的限制，我们没能做更高的压力，只做到 8 个大气压。但从图(8)曲线上可见，当压力增加时 SN 是增加的。可是这里还有一个喷嘴油压的影响，当油压不同时，喷雾锥角、粒度不同，总的 ΔP_T 小，雾化就差些，锥角也小些，这样就会影响冒烟数，总的来讲， SN 应正比于 $P^{2.3-3}$ 。但从图(8)上



图(8) SN 对 $P^*_{燃}$ 的曲线

可以看到,当压力在3~5个大气压这一段中, SN 数增加缓慢些,分析原因是燃油喷雾质量的影响,实验时为保持余气系数 α 基本不变,增加燃烧室的压力也就是增加了空气流量,因此相应增加燃油流量,在仅用付油路时必然是增大供油压力,其结果改善了雾化,从而可减少冒烟即抵消一部分由于压力增加而恶化冒烟的影响,故 $P^*_{燃} = 3 \sim 5$ 时曲线平缓,而当 $P^*_{燃} = 7$ 时,此时主付油路同时供油, $\Delta P_{油}$ 低,雾化质量差,再加上压力的影响冒烟必然大大增加。

$P^*_{燃} = 7$	$\Delta P_{T油} = 3.5$ (主付油路)	$SN = 80$
$P^*_{燃} = 5$	$\Delta P_{T油} = 26$ (付油路)	$SN = 45$
$P^*_{燃} = 4$	$\Delta P_{T油} = 19$ (付油路)	$SN = 43$
$P^*_{燃} = 3$	$\Delta P_{T油} = 11.9$ (付油路)	$SN = 35.5$
$P^*_{燃} = 2$	$\Delta P_{T油} = 3.7$ (付油路)	$SN = 23$
$P^*_{燃} = 1$	$\Delta P_{T油} = 2.5$ (付油路)	$SN = 14.2$

由此可见,当高压燃烧时冒烟是一个很大的问题。

2. 压力一定时,不同的 α 对冒烟的影响即 $SN \sim \alpha$ 曲线

图(9)中的 $SN \sim \alpha$ 曲线,其 $P^*_{燃} = 3$ 时,可见当 α 由6~14时,随着 α 的增加冒烟数 SN 是下降的。这是因为 α 增加,使主燃区中富油程度下降,使烟粒形成减少,所以 SN 就下降了。但根据我们的试验条件,当 $\alpha > 14$ 以后, SN 又增加了,这是因为油量太小使喷咀的油压差小,喷咀的雾化质量太差,喷出的液滴直径增加,在燃烧过程中不易蒸发,所以形成的烟粒子又增加了。当 $\alpha = 16.6$ 时,喷咀油压差为2.2,因此 SN 必定要增加。

曲线另一端,当 $\alpha < 6$ 时, SN 也是下降的,这是因为 α 下降时,虽然燃烧室中富油应