

整体式液体冲压发动机 分流方案燃烧室试验研究

邱新宇 宫本泉

(航空航天部31所)

摘 要: 文中介绍了一种基于现有研究成果设计的突扩燃烧室。在这种燃烧室中, 主突扩截面的气流速度降低, 但是主突扩比没有改变。在直连式试车台上对该方案进行了试验, 使用的燃料为RP-1普通煤油。初步研究结果表明, 该方案在大喷管条件下点火起动可靠, 燃烧过程比较稳定, 燃烧效率高。

主题词: 冲压发动机, 突扩燃烧室, 回流区, 燃烧稳定性

AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE COMBUSTOR WITH BYPASS FLOW IN INTEGRAL LIQUID FUEL RAMJET

Qiu Xinyu Gong Benquan

(The 31st Research Institute)

Abstract: This paper presents a dump combustor which was designed based on research accomplishment. The velocity in the main dump section is reduced in the combustor while the main dump area ratio is not changed. A series of tests were conducted on a direct connected test bench with RP-1 common kerosene. The preliminary test result shows that the combustor can be reliably ignited under the condition of large nozzle throat, the combustion process is stable and combustion efficiency is high.

Keywords: Ramjet engine, Dump combustor, Recirculation zone, Combustion stability

本文1991年7月3日收到

符 号 表

A	面积	Δp_{RMS}	脉动压力的总均方根值
d	直径	α	余气系数
f	频率	β	燃气空气比
h	比焓	η	燃烧效率
H	燃料低热值	θ	加热比
L	长度, 化学当量比的空气量	下 标	
m	密流系数	a	空气
Ma	马赫数	f	燃料
p	静压	g	燃气
p_t	总压	m	测量段
$\bar{p}$	时均压力	2	进气道
q_m	质量流量	3	燃烧室起始截面
S	脉动压力的功率谱密度	4	燃烧室出口截面
t	时间	tn	尾喷管喉道
T_t	总温		

1 引 言

曾经对两种突扩燃烧室方案(图1)进行试验研究。为叙述方便,第一种称为“原始方案”,第二种称为“加粗方案”。在原始方案中,突扩比 $A_3/A_2 = 1.63$,当尾喷管喉道面积比 $A_{tn}/A_4 = 0.55$ 时,燃烧室能够点火起动;而当 $A_{tn}/A_4 = 0.75$ 时,预燃室外通道在起动状态下临界,其下游形成局部超声流,燃烧室一直没有点着。为了减小燃烧室进口流速,在加粗方案中,进气管直径增大,突扩比减小为1.08。这样,燃烧室在 $A_{tn}/A_4 = 0.75$ 喷管条件下的进口流速与原始方案使用小喷管的相同。试验证明,加粗方案燃烧室能够点火起动。

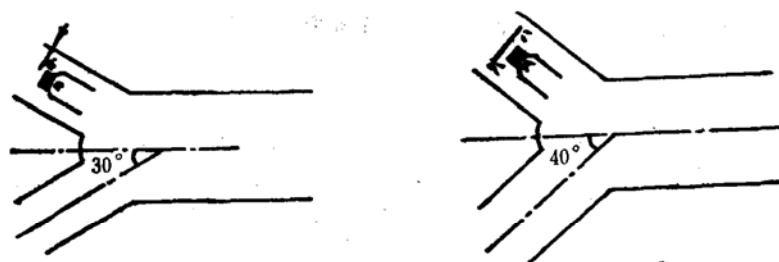


图 1 燃烧室方案

加粗方案实现了大喷管突扩燃烧室的可靠点火,但由于减小了突扩比,燃烧室中回流区的大小和强度不能满足稳定燃烧的要求,燃烧过程容易产生压力振荡。尤其在富油状态下,振荡的涡系中存在过多的燃油,周期性的燃烧放热与燃烧室固有声频一致而产生振荡燃烧,

$\Delta p_{RMS}/p$ 可以达到18%。如图2所示。

本文介绍的分流方案燃烧室与加粗方案的设计思路相同，都是设法降低点火源附近的气流速度，使燃烧室能够点火起动，但两种方案采用的方法不同。与加粗方案相比，分流方案的优点显而易见：它没有减小主突扩比，保证了燃烧室头部合适的回流区大小；通过在二次气流中喷油，比较容易控制燃烧室中的燃油分布和稳定燃烧范围；且有利于弹体布局。

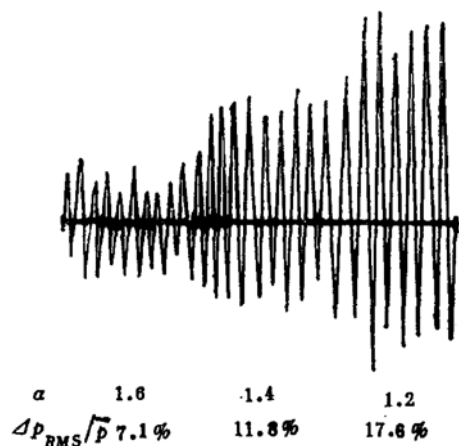


图2 加粗方案压力振荡曲线

2 试验设备和试验方法

2.1 试验设备

高压空气经电动闸门、调压阀、加热器、稳定段和测量段进入直连式试验发动机，通过调压阀将气流调整到试验的模拟压力。调压后的空气进入由四个单管燃烧室组成的加热器，直接将气流加热到模拟温度。加热后的空气在稳定段中均温均压后进入发动机。试车台对发动机进行地面供油，并按试验要求进行各种测量。

2.2 燃烧室结构

分流方案燃烧室如图3所示。从原始方案的转弯段处向后方引出两方形管道，以此做为分流进气管，从侧边进入燃烧室。

在燃烧室进口前的主进气管中安装喷油杆和预燃室。喷油杆小孔垂直于气流喷射燃油，

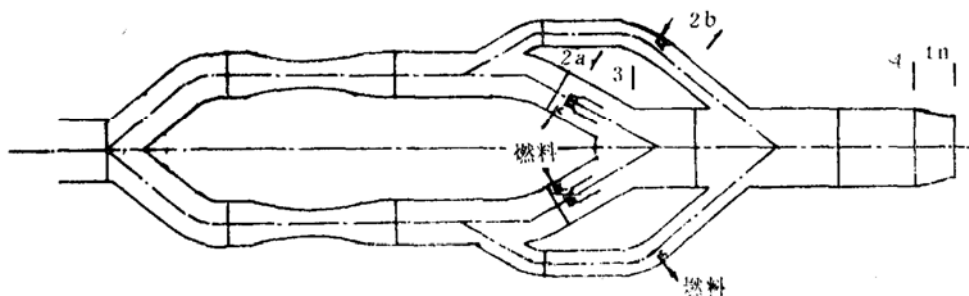


图3 分流方案燃烧室

利用高速气流对燃油进行雾化,雾化后的燃油与空气掺混后进入燃烧室。

发动机工作时,烟火棒发火首先点燃预燃室,然后传焰至燃烧室回流区,回流区着火后即成为自动点火源并使火焰稳定。点火和稳定燃烧主要靠燃烧室头部的稳定涡系来实现。地面试验中用循环水冷却燃烧室。

二次流中如果不喷油,它则提供新鲜空气促使主流中未完全燃烧的燃油进一步氧化燃烧。二次流中也可以喷油,这时,总的燃料在燃烧室分布得更均匀。通过调整二次流中的供油量,比较容易控制燃烧室的工作范围。

燃烧室的结构特征参数如下:

$$A_{2a}/A_3 = 0.61 \quad A_{2b}/A_3 = 0.24$$

$$A_{1a}/A_3 = 0.75 \quad L/d_3 = 4$$

2.3 试验方法和数据处理

用测量段总压 p_{tm} 和总温 T_{tm} 控制试验的模拟参数,保证试验在预定的状态下进行。

试验的模拟压力 $p_{tm} = 0.75\text{MPa}$,在该压力下尾喷管封闭。试验的模拟温度 $T_{tm} = 373\text{K}$ 、 473K 。

燃烧效率定义为焓增燃烧效率,其计算公式如下:

$$\eta = \frac{(1 + \alpha L)(h_g - h_a)}{H_f}$$

式中 h_g 由燃烧室出口总温查焓温表求得。为了消除尾喷管实际喉道尺寸与名义尺寸偏差的影响,燃烧室出口总温用下式导出:

$$T_{t4} = \left(\frac{m_g p_{tm冷} p_{t4热}}{\beta m_a p_{tm热} p_{t4冷}} \right)^2 T_{tm热}$$

动态压力传感器(XTE-190-100)安装在主进管壁面,测量系统的采样频率为2000Hz。在试验过程中,动态压力测量系统将采集到的脉动压力值存入磁盘,并用PS-85计算机对磁盘里的数据进行分析处理,然后绘出脉动压力的变化曲线,打印出脉动压力的总均方根值和功率谱密度。

3 试验结果和讨论

3.1 燃烧室点火起动

分流方案燃烧室点火起动的试验结果证明,该方案设计思路正确,结构参数选择基本合理。共进行了五次点火试验,均为一次点火成功。各次试验的结果见表1。

表1中,主流和二次流的空气流量比是通过测量二次气流的总静压,继而分别求出二次流和主流的空气流量后得出的。试验数据如表2所示。

试验中均为预燃室、燃烧室同时着火,而且只要一个预燃室着火,燃烧室就着火。这显示燃烧室着火边界可能由预燃室着火边界决定。另外,从表1中的数据来看,着火油压 p_f 非常接近,但主流 α 相差很大。因此,燃烧室着火边界的确由预燃室着火油压决定。

在尾喷管封闭的条件下,若主流流量占总流量的73% (0.55/0.75),则主流流量就与原始方案使用 $\epsilon_c = 0.55$ 喷管时相同。但实际上点火状态的主流流量占总流量的86.7%,即相当于原始方案在 $A_{1a}/A_4 = 0.65$ 喷管条件下的空气流量($0.867 \times 0.75 = 0.65$)。由此可以推断,

表1 燃烧室点火起动的试验结果

试验编号	p_{tm} (MPa)	T_{tm} (K)	$q_{ms主}/q_{ms总}$	$q_{mt主}/q_{mt总}$	$p_{t着}$ (MPa)	$\alpha_{主}$	$\alpha_{总}$
19	0.76	474.7	86.7%	/	1.80	1.52	1.75
25	0.75	467.5	86.7%	68.2%	1.78	1.87	1.47
26	0.75	377.2	86.7%	/	1.93	2.00	2.31
27	0.74	475.5	86.7%	/	1.78	1.85	2.13
28	0.75	474.2	86.7%	/	1.63	1.95	2.25

表2 空气流量测量数据

记录点	$p_{t二次}$ (MPa)	$p_{二次}$ (MPa)	$p_{二次}/p_{t二次}$	$Ma_{二次}$	$q_{ms二次}/q_{ms}$
冷态	0.161	0.152	0.9418	0.29	13.3%
热1 ($\alpha_{总}=1.242$)	0.436	0.409	0.9376	0.30	36.7%
热2 ($\alpha_{总}=1.760$)	0.355	0.326	0.9183	0.35	34.0%

当 $A_{in}/A_4 = 0.65$ 时, 原始方案也能点火起动。

3.2 燃烧稳定性

分流方案实现了大喷管突扩燃烧室的可靠点火, 它还是抑制燃烧振荡的较好方案。表3中列出了动态压力测量结果(二次流中喷油)。数据表明, 当 $\alpha_{总} = 1.25 \sim 1.1$ 、 $\alpha_{主} = 1.17 \sim 1.04$ 时, $\Delta p_{RMS}/\bar{p} \leq 4.35\%$ 。最富油时, $\alpha_{总} = 1.11$ 、 $\alpha_{主} = 1.04$, $\Delta p_{RMS}/\bar{p} = 4.35\%$ 。当 $t > 14s$ 以后, 没有动态测量数据, 但压力示波显示, 在降油压直到贫油熄火时 $\alpha_{总} = 2.20$ 的过程中, 燃烧都很平稳。主要脉动压力谐波分量的频率 $f = 193Hz$, 该频率对应于燃烧室一阶纵向压力振荡。

表3 动态压力测量结果

	$p_{tm} = 0.75MPa$				$T_{tm} = 467.5K$		
$t(s)①$	0.5~1.8	1.8~3.2	3.2~4.6	4.6~5.9	5.9~7.3	7.3~8.7	12.8~14.1
$\alpha_{总}$	1.25~1.15	1.15~1.13	1.13~1.11	1.11	1.11~1.14	1.14~1.15	1.24
$\alpha_{主}$	1.17~1.08	1.08~1.06	1.06~1.04	1.04	1.04~1.07	1.07~1.08	1.17
$\Delta p_{RMS}/\bar{p}$	2.98%	3.20%	3.20%	4.35%	3.01%	3.19%	2.79%
$f(Hz)$				193.36			193.36
$S(\omega)$				38.34			31.44

①——以着火点做为计时起点。

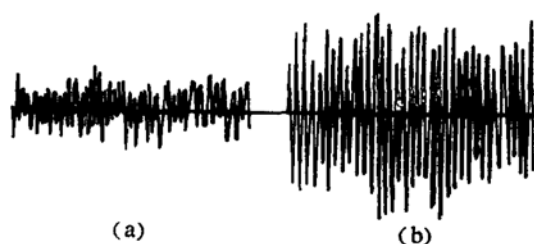
分流方案还进行了二次流中不喷油的试验。试验观察和示波记录均表明, 燃烧过程比较平稳, 但与二次流中喷油的情况相比, 燃烧的稳定性要差一些。例如, 当 $\alpha_{总} = 1.66$ 、 $\alpha_{主} = 1.06$ 时, $\Delta p_{RMS}/\bar{p}$ 在 10% 左右。因此, 二次流中喷油在保持主流同样的余气系数下直接加宽了燃烧室富油稳定边界。而且, 二次流中喷油使燃烧室进口流速降低, 燃烧室头部回流区的

稳定性也会得到改善。

低温状态试验时,二次流中也没有喷油。动态压力测量的结果列于表4中。表中数据表明,低温下燃烧不稳定。当 $\alpha_{\text{总}}=2.40\sim 2.16$ 、 $\alpha_{\text{主}}=1.54\sim 1.38$ 时, $\Delta p_{\text{RMS}}/\bar{p}=12.6\sim 14.0\%$ 。主要脉动压力谐波分量的频率根据 α 的不同略有差别。例如,当 $\alpha_{\text{总}}=2.40$ 时, $f=177\text{Hz}$;当 $\alpha_{\text{总}}=2.16$ 时, $f=182\text{Hz}$ 。上述频率均相应于燃烧室一阶纵向压力振荡。与高温状态相比,低温下的振荡频率略低。因为温度低时,压力波的传播速度减慢, α 大时振荡频率略低的原因也与此相同。图4将低温状态与高温状态燃烧过程的脉动压力曲线进行了比较。

表4 低温状态的动态压力测量结果

	$p_{\text{tm}}=0.75\text{MPa}$		$T_{\text{tm}}=377.2\text{K}$		
$t(\text{s})$	1.8~2.7	4.0~5.4	8.1~9.5	13.6~14.9	19.1~20.4
$\alpha_{\text{总}}$	2.19	2.16	2.17	2.31~2.36	2.40
$\alpha_{\text{主}}$	1.40	1.38	1.39	1.48~1.51	1.54
$\Delta p_{\text{RMS}}/\bar{p}$	13.6%	14.0%	14.0%	13.1%	12.6%
$f(\text{Hz})$		181.64			176.76
$S(\omega)$		2224.01			1905.03



(a) 高温状态, $\alpha_{\text{总}}=1.12$, $\alpha_{\text{主}}=1.05$,
 $\Delta p_{\text{RMS}}/\bar{p}=3.2\%$
 (b) 低温状态, $\alpha_{\text{总}}=2.40$, $\alpha_{\text{主}}=1.54$,
 $\Delta p_{\text{RMS}}/\bar{p}=12.6\%$

图4 高温状态与低温状态的脉动
 压力曲线比较

造成低温下燃烧不稳定的主要原因在于:燃油的蒸发过程在低温下变得恶化,回流区中存在大量未蒸发的燃油,致使燃烧放热很不均匀,更容易产生振荡燃烧。

分流方案改善了燃烧的稳定性,其原因可能有以下几个方面:

(1) 燃烧室具有较大的主突扩比,头部回流区比较稳定。

(2) 二次流具有阻尼减振作用,它吸收了部分振荡能量,降低了燃烧振荡的振幅。

(3) 二次流作为声波反射面,改变了燃烧室的声学特性。

(4) 进入燃烧室的二次流截断了部分主流的运动,使燃烧室头部回流区发生了变形。

3.3 燃烧性能

表5中列出了部分燃烧性能数据。无论二次流中是否喷油,燃烧效率 η 都能保持在0.9以上,加热比 θ 随着 α 的减小明显增加。当二次流中喷油时,喷油量占总供油量的31.8%,燃烧效率并未降低,即使在 $\alpha_{\text{总}}=1.242$ 的富油状态, η 仍为0.95,这说明分流方案不仅燃烧稳定,燃烧效率也很高。

另外,当二次流中喷油时, $\alpha_{\text{总}}=1.242$ 、 $\alpha_{\text{主}}=1.166$, $\eta=0.950$;当二次流中不喷油时, $\alpha_{\text{总}}=1.841$ 、 $\alpha_{\text{主}}=1.178$, $\eta=0.948$ 。两者主流 α 接近,燃烧效率相同。显然,二次流中的燃油进入燃烧室后在较短的距离内仍能够充分燃烧,这可能与二次流下游的回流区有关(二次

表5 燃烧性能数据

参 数	二次流中喷油		二 次 流 中 不 喷 油		
$p_{tm}(\text{MPa})$	0.73	0.75	0.74	0.74	0.73
$T_{tm}(\text{K})$	479.0	482.0	475.7	475.8	473.0
$\alpha_{\text{总}}$	1.455	1.242	2.034	1.841	1.655
$\alpha_{\text{主}}$	1.365	1.166	1.302	1.178	1.059
η	0.932	0.950	0.907	0.948	0.942
θ	3.959	4.372	3.207	3.502	3.734

流进入燃烧室时具有一定的穿透深度,其下游也会形成回流区)。此外,二次流中较大的掺混距离也有利于增加燃烧完全度。

3.4 熄火特性

如表6所示,分流方案燃烧室具有较宽的熄火边界, $\alpha_{\text{贫}} \alpha_{\text{总}}$ 从2.20到3.24。表6中还列出了几次试验所经历的最富油的状态,燃烧室都没有熄火。由此可进一步猜测,第25次试验(二次流中喷油)的富油熄火边界比 $\alpha_{\text{总}} = 0.77$ 相应于 $\alpha_{\text{主}} = 0.72$ 还要宽。结合贫油熄火边界,燃烧室的着火 α 范围为2.20~0.72。

表6 燃烧室熄火数据

试 验 编 号	25①		26	27		28	
$p_{tm}(\text{MP})$	0.75		0.75	0.74		0.75	
$T_{tm}(\text{K})$	465.7		377.2	475.5		474.2	
$\alpha_{\text{主}}$	2.20	1.11	2.87	3.20	1.66	3.24	1.13
$\alpha_{\text{总}}$	2.06	1.04	1.84	2.05	1.06	2.07	0.72

① 二次流中喷油,其余几次皆不喷油

4 结 论

1. 点火状态下预燃室空气流量较大,其着火油压较高。但只要预燃室着火,燃烧室也同时着火。若加大预燃室喷嘴流量或减小预燃室空气量,着火油压就可降低,燃烧室贫油着火边界会随之变宽。

2. 温度较高时,燃烧过程比较稳定。尤其是二次流中喷油时,富油稳定边界宽,振动强度低。

3. 低温下燃烧不稳定,应通过改善燃油的雾化、蒸发和油气分布来抑制低温不稳定燃烧。

4. 分布方案具有较高的燃烧效率,即使二次流中喷油,燃烧效率并不降低。

5. 分流方案还具有较宽的贫富油熄火边界。若减少或增加二次流中的喷油量,着火范围就可以向贫油或富油方向移动,有利于调整燃烧室工作范围。