

文章编号: 1000-8055(2003) 02-0221-04

局部富油供油扩展燃烧室贫油点火 熄火边界研究

李继保, 刘大响

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 介绍了燃烧室主燃区设计中熄火特性与综合性能间的折衷考虑, 设计了火焰筒头部均匀供油和局部富油供油方案, 并在全环试验燃烧室上进行了两种方案对燃烧室贫油点火熄火边界影响的对比试验, 分析和总结了火焰筒头部局部富油设计方案的点火熄火规律。结果表明: 局部富油设计可显著扩展燃烧室贫油点火熄火边界。

关键词: 航空、航天推进系统; 燃烧室; 点火熄火边界; 局部富油供油

中图分类号: V 231. 2

文献标识码: A

A Study of Local Rich Fueling Design for Widening Combustor Lean Ignition and Blowout Limits

LI Ji-bao, LIU Da-xiang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A compromise between lean blowout characteristics and overall performances in the gas turbine combustor primary zone design is introduced. A uniform and a local rich fueling designs of dome have been made, and tests for comparing the influence of the two designs on combustor lean ignition and blowout limits have also been carried out in an experimental annular combustor. Ignition and blowout regulations of the local rich fueling design have been analyzed and summarized. The results show that the local rich fueling design can widen the combustor lean ignition and blowout limits apparently.

Key words: aerospace propulsion; combustor; ignition and blow out limits; local rich fueling

1 引言

对现代航空发动机燃烧室设计, 不仅要求有良好的设计点性能, 而且还要有可接受的非设计点特性。其中, 为防止发动机油门杆由大功率状态拉向慢车状态时发生贫油熄火, 燃烧室应能在油气比为 0. 005 状态下稳定工作, 是现代军用发动机关键设计要求之一^[1]。因此, 燃烧室设计必需折

衷考虑点火熄火特性和综合性能要求, 尤其对高温升燃烧室设计来说, 其油气比工作范围宽, 需发展能同时兼顾大功率状态工作冒烟值低、低功率状态工作点火熄火边界宽的主燃区设计技术。

为获得宽广的燃烧室贫油点火熄火边界, 国外已做了大量的研究, 主要方案有^[1]: 变几何、分级分区、非均匀供油(包括: 部分喷嘴供油、局部富油供油)等。这些方案在兼顾燃烧室综合性能的同

时,都不同程度地扩展了贫油点火熄火边界,其中局部富油方案在燃烧室上易于实现,但尚无公开文献详细介绍。国内某燃烧室设计中曾采用了该方案,但没有作深入的研究。

本文利用已有试验件,在某均匀供油设计的全环试验燃烧室上,通过换装点火电嘴附近的燃油喷嘴,使电嘴附近区域喷嘴的副油路供油量比平均供油量大,形成火焰筒头部局部富油供油方案,并进行了均匀供油方案和局部富油供油方案对燃烧室贫油点火熄火边界影响的对比试验研究,以分析和总结局部富油设计对扩展燃烧室贫油点火熄火边界的效果及规律。

2 局部富油设计考虑

燃烧室设计中,主燃区油气当量比选择需折衷考虑对点火熄火特性及综合性能的要求。富油主燃区设计因主燃区平均气流速度较低,具有良好的点火熄火特性,但因油气混合不易充分,要求燃烧区较长。对于现代高负荷短环形燃烧室设计,火焰筒长度较短,富油主燃区设计易导致燃烧不完全、出口温度分布质量差。此外,富油主燃区设计碳粒子浓度较高,对火焰筒壁面辐射热通量大,给壁面冷却设计带来困难;贫油主燃区设计油气混合易均匀,有利于燃烧完全,有利于获得良好的出口温度场,但因主燃区平均气流速度较高,点火熄火特性及燃烧稳定性较差。一般来说,当主燃区油气当量比大于 1.4~1.5 时,燃烧室出口易出现冒烟;当主燃区油气当量比低于 0.2~0.3 时,则易发生贫油熄火。将该原则应用于燃烧室设计,便可得到主燃区油气当量比的选择范围。仅以不同温升水平的燃烧室设计为例,其主燃区油气当量

比选择范围见表 1。

可见:在确保大功率状态正常工作的前提下,低功率状态主燃区油气比已接近贫油熄火边界。因此,扩展燃烧室贫油熄火边界是必要的(点火与熄火设计是密切相关的,具有宽广熄火边界的燃烧室,其高空点火及地面起动往往也是可以接受的),尤其对相对贫油设计的主燃区更为必要。

对于目前普遍采用的单环腔、固定几何设计的燃烧室,当主燃区平均油气当量比确定后,影响点火熄火边界的主要设计参数是主燃区平均气流速度和油气分布:选择较低的主燃区平均气流速度有利于获得较宽的贫油点火熄火边界,但较低的主燃区平均气流速度设计需较大的火焰筒头部截面积,对于给定的燃烧室进出口中径(发动机设计中,一般由压气机和涡轮部件设计确定燃烧室进出口中径),增大火焰筒头部截面积意味着增加头部高度,将导致火焰筒长度增大,这对发动机总体设计是难以接受的;火焰筒头部非均匀供油有利于扩展燃烧室贫油点火熄火边界,其机理是:当头部平均油气当量比低于熄火油气当量比、局部富油头部的油气当量比仍在可燃范围内时,贫油头部虽已熄火,但富油头部仍保持燃烧,当发动机恢复稳定工作或飞行员推油门杆后,能够由富油头部的火焰引燃整个燃烧室。在燃烧室上有两种简单方式可实现非均匀供油:一种是部分喷嘴供油、部分喷嘴不供油;另一种是所有喷嘴都供油,但点火电嘴附近燃油喷嘴副油路的平均流量比其它区域喷嘴副油路的平均流量大。文献[1]中已给出了前一种方式扩展燃烧室贫油熄火的效果,本文针对后一种方式进行试验和分析。

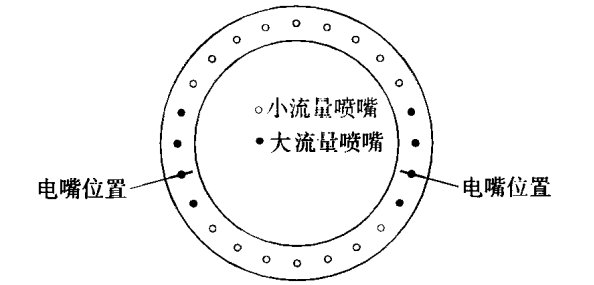


图 1 局部富油方案喷嘴分布示意图
Fig.1 Fuel nozzle arrangement for the local rich fueling design

本文在一个有 24 个相同设计的离心喷嘴和 2 个点火电嘴的全环试验燃烧室基础上,换装点火电嘴附近的 8 个燃油喷嘴,换装喷嘴副油路(大

表 1 不同温升水平燃烧室主燃区油气当量比选择范围

Table 1 Ranges of primary zone equivalence ratio for different temperature rise combustors

温升水平/K	主燃区油气当量比选择范围	
	高功率状态	低功率状态
800~850	1.0~1.5	0.20~0.30
1000~1050	1.3~1.5	0.20~0.23
1100~1150	1.5	0.20

注:低功率状态下,燃烧室的总油气当量比都取为 0.0738(油气比为 0.005)。

流量喷嘴)的流通能力比换装前喷嘴副油路(小流量喷嘴)的流通能力大 80%，从而形成局部富油供油方案(主、副油路同时工作时，通过减少主油路的供油量，使各喷嘴供油量相同，以确保燃烧室大状态工作时出口温度场均匀)。试验中大、小流量喷嘴分布如图 1 所示。

3 着火和熄火判断标准

本文中研究，燃烧室着火的判断标准为：每一试验点点火 3 次，每次至少有 16 个头部着火时为燃烧室着火，否则为不着火。熄火判断标准是根据局部富油设计特点确定的：本文局部富油供油方案中装有 8 个大流量喷嘴，贫油熄火试验中这 8 个喷嘴所在的头部最后熄火。因此，熄火判断标准为：自燃烧室稳定燃烧状态逐渐减小供油量，直至 17 个或 17 个以上头部熄火时为燃烧室熄火。

为判断某一头部是否着火或熄火，试验中在燃烧室出口截面、对应每一头部位置都安装了热电耦测量耙，并记录相应的温度值，同时进行了摄像。

4 试验结果和分析

采用所述试验件，在燃烧室进口温度为常温、压力为 80 kPa 状态下，进行了火焰筒头部局部富油供油与均匀供油对贫油点火熄火边界影响的对比试验(一般应选择发动机工作包线范围内容积流量最大的工作点为燃烧室熄火的试验状态，本文仅对两种方案作比较，为节省试验经费，将熄火试验状态与点火试验状态选为同一状态)，主要试验结果示于图 2 和图 3 中。与前述的非均匀供油

扩展燃烧室点火熄火边界的机理分析相一致：相对于均匀供油方案，局部富油供油设计使燃烧室点火边界余气系数增大了 0.5~1.0、熄火边界余气系数增大了 0.3~0.8。

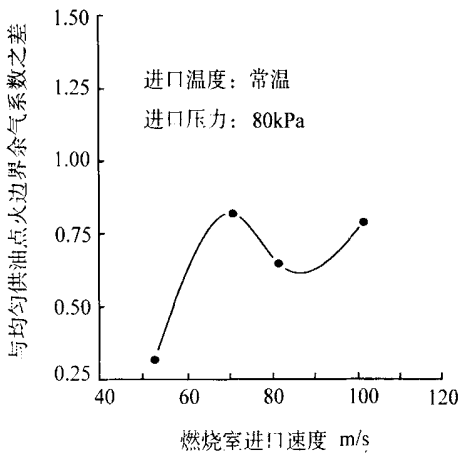


图 3 局部富油扩展的熄火边界
Fig. 3 Widen lean blow out limits

试验中发现以下规律：局部富油设计可同时扩展燃烧室贫油点火和熄火边界，但对扩展点火边界更为显著。燃烧室贫油点火边界总是比熄火边界窄，在燃烧室进口温度、压力和空气流量相同情况下，熄火边界点的供油量小于点火边界点的供油量，因此熄火边界点的供油压降也小于点火边界点的供油压降。对于局部富油供油方案，由于喷嘴总的喷口面积增大(换装了大流量喷嘴所致)及熄火边界余气系数更大，喷嘴供油压降比均匀供油时的压降更小。供油压降减小，燃油雾化质量变差，甚至难以形成雾锥，从而严重影响燃烧。本文试验中，均匀供油方案与局部富油供油方案点火熄火边界点的供油压降及比较示于表 2 中。

表 2 均匀供油与局部富油供油方案点火熄火边界点的供油压降比较

Table 2 Comparison of fuel supply pressure drop at ignition and blowout boundaries between the uniform fueling and local rich fueling design

	点火	熄火
均匀供油压降/ kPa	150~360	65~170
局部富油供油压降/ kPa	63~93	33~52

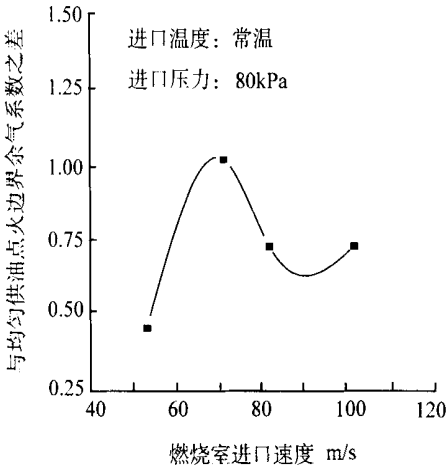


图 2 局部富油扩展的点火边界
Fig. 2 Widen lean ignition limits

可见：局部富油方案中，点火边界点供油压降尚能维持喷嘴正常工作，但熄火边界点供油压降太低，燃油雾化质量将很差，难以进一步扩展贫油

熄火边界,因而表现为局部富油对扩展点火边界更有效。

均匀供油方案中燃烧室熄火几乎是突发的,而局部富油供油方案中燃烧室熄火是渐进的。对于火焰筒头部均匀供油设计,每个头部油气分布基本一致,若燃烧室在某试验点熄火,则所有头部都熄火,仅由于燃油重力作用及试验件加工误差,在熄火边界附近很窄的余气系数变化范围内可能出现部分头部熄火、部分头部不熄火现象;对于局部富油供油设计,火焰筒头部油气分布是不一致的,当小流量喷嘴所在头部的油气比低于熄火油气比而出现熄火时,大流量喷嘴所在头部的油气比仍在可燃范围内,仍保持燃烧,并引燃其邻近的小流量喷嘴头部。随燃烧室余气系数继续增大,小流量喷嘴头部逐渐熄火,直至所有头部都熄火。本文试验中,均匀供油与局部富油供油贫油熄火典型过程比较见表3。

表3 均匀供油与局部富油供油方案的贫油熄火过程比较

Table 3 Comparison of lean blowout process between the uniform fueling and local rich fueling design

均匀供油		局部富油供油	
燃烧室余气系数	熄火头部数	燃烧室余气系数	熄火头部数
4.12	0	6.0	0
4.81	0	6.49	0
5.50	0	6.66	1
5.78	0	6.76	6
6.00	0	6.94	7
6.39	0	7.05	9
6.61	0	7.23	12
6.87	5	7.52	13
7.12	24	7.82	24

注:燃烧室上共有24个头部。

局部富油供油方案中,首个小流量喷嘴头部出现熄火时,小流量喷嘴头部的平均余气系数大于均匀供油方案燃烧室的熄火余气系数;大流量喷嘴头部熄火时,大流量喷嘴头部的平均余气系数小于均匀供油燃烧室的熄火余气系数(计算某个头部平均余气系数时,认为各头部间的空气流量是平均分配的,燃油流量按各喷嘴的供油量计

算)。当小流量喷嘴头部的平均余气系数与均匀供油燃烧室熄火余气系数相同时,供油压降虽有所下降,但由于大流量喷嘴头部(相对富油区)良好的燃烧,不断向小流量喷嘴头部(相对贫油区)传热和传质,支持着小流量喷嘴头部可在更贫油状态下继续燃烧;当燃烧室余气系数增大至小流量喷嘴头部全部熄火后,因喷嘴供油压降太低及已熄火区的吸热,导致大流量喷嘴头部在其平均余气系数仍小于均匀供油时燃烧室的熄火余气系数就全部熄火。对应表3试验结果,整理得到的大、小流量喷嘴头部熄火余气系数与均匀供油方案燃烧室熄火余气系数的比较示于表4中。

表4 熄火余气系数比较

Table 4 Comparison of lean blowout air excess coefficient between the uniform fueling and local rich fueling design

均匀供油	局部富油供油	
燃烧室熄火余气系数	首个小流量喷嘴熄火时该头部平均余气系数	大流量喷嘴头部熄火时该头部平均余气系数
6.87	8.19	5.44

5 结 论

- 在本文试验参数范围内,可得如下结论:
- (1) 火焰筒头部局部富油供油可同时扩展燃烧室贫油点火熄火边界,但对扩展点火边界更为显著。
 - (2) 均匀供油方案中燃烧室熄火过程几乎是突发的,而局部富油供油方案中燃烧室熄火过程是渐进的。
 - (3) 局部富油供油方案中,首个小流量喷嘴头部出现熄火时,该头部的平均余气系数大于均匀供油方案燃烧室的熄火余气系数;大流量喷嘴头部熄火时,该头部的平均余气系数小于均匀供油方案燃烧室的熄火余气系数。
 - (4) 喷嘴供油压降是影响局部富油供油方案扩展贫油熄火边界的主要因素。

参考文献:

[1] Bahr D W. Technology for the Design of High Temperature Rise Combustors[R]. AIAA- 85- 1292, July 8- 10, 1985.