

文章编号: 1000-8055(2009)02-0347-06

# 头部气量分配对旋流杯结构燃烧室 贫油性能的影响

徐浩鹏, 王 方, 黄 勇, 张玉芳

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100191)

**摘 要:** 针对采用双径向旋流器的某单头部矩形燃烧室, 通过实验研究旋流器及主燃孔进气量变化对燃烧室贫油熄火特性的影响, 发现旋流器的进气量减少会使熄火油气比减小。其中, 一级旋流器进气量减小一半可拓宽熄火边界约 18 % 左右, 对熄火油气比的影响最大。而主燃孔的进气量减少一半则会使熄火油气比增大 13.1 %。不过, 主燃孔以及两级旋流器的进气量同时减少一半, 可能使燃烧室的熄火油气比进一步降低, 从而获得更大的稳定工作范围。

**关 键 词:** 航空发动机燃烧室; 旋流杯; 贫油熄火; 气量分配

**中图分类号:** V231.2

**文献标识码:** A

## Effects of flow split among swirlers and primary holes on the lean blowoff limits of a combustor with swirl cup

XU Hao-peng, WANG Fang, HUANG Yong, ZHANG Yu-fang

(National Key Laboratory on Aero-Engines, School of Jet Propulsion,  
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** An experimental research was conducted for the effect of flow split among swirlers and primary holes on the lean blowoff (LBO) limits of a single dome rectangular model combustor with dual-radial swirl cups. It's found that the decrease of air into the swirlers will improve the lean blowoff limits about 18 %, and the air flowrate of the inner swirler has the greatest impact on the blow-out limits. Besides, the decrease of air into primary holes will increase the combustor lean blowoff limits about 13.1 %. If the air flux into both the swirl cups and primary holes was cut down, the blowout fuel-air ratio would be reduced further, helping to widen the stability limits of combustors.

**Key words:** aero engine combustor; swirl cup; lean blowout; flow split

为了满足各种机动飞行以及作战状态的需要, 现代高性能军用燃气涡轮发动机普遍需要更高的燃油调节比, 这就要求发动机燃烧室能够在一个很大的调节范围内稳定工作不熄火, 一般要求贫油熄火极限油气比低于 0.005<sup>[1]</sup>。

国内外对于燃烧室贫油熄火性能的研究主要分为理论分析以及实验研究两个方面。前者主要

研究用于预测燃烧室贫油熄火极限的经验关系式, Ballal & Lefebvre<sup>[2-3]</sup> 于 1979 年提出了自己的模型, 他们认为对于均匀混气的贫油性能, 如果回流区中燃烧产生的热量小于回流区中新鲜混气点火燃烧所需要的热量, 那么火焰就会熄灭。但在模型里用到的体积量是整个主燃区的体积, 而火焰筒内接近熄火状态时的火焰体积是远远小于主

收稿日期: 2008-01-15; 修订日期: 2008-05-08

作者简介: 徐浩鹏(1983-), 男, 满族, 河北承德人, 硕士, 主要从事高性能液雾燃烧方面研究。E-mail: xuhp@caitll.cn

燃区体积的,这就给公式引入了较大的误差. GE 公司的 Mongia H C, Thomsen D D 和 Held T J<sup>[4]</sup>用实验的方法验证目前已存在的贫油熄火经验关系式,结果发现目前已存在的贫油熄火经验关系式几乎都难以用于现代燃气涡轮发动机燃烧室贫油熄火(LBO)的准确估算,至少与实验得出的数据相比还有较大的偏差.

众所周知,控制燃烧室供油量较容易,而改变燃烧室的气量分配则较困难.当燃烧室在较低工况下运行时,由于进气量仍然很大,因此极易引起吹熄,导致燃烧室熄火.从火焰筒内的燃烧现象以及相关数值计算的结果<sup>[5]</sup>不难发现,当燃烧室接近贫油熄火状态时,火焰只存在于火焰筒头部附近的一小部分空间内.因此,我们认为,影响此时熄火特性的关键因素应该是火焰筒头部的进气量大小.只要能够改变头部进气量,进而改变火焰筒的局部当量比,使火焰在局部小范围内稳定燃烧不熄灭,就能够拓宽整个燃烧室的贫油熄火油气比.

本文基于以上考虑,设计了实验件及实验方案,希望能为新型高调节比发动机燃烧室的设计提供一定的理论依据,并为今后贫油熄火经验关系式的改进指明方向.

## 1 实验件及实验方案

### 1.1 实验件及实验台

实验件采用某单头部矩形燃烧室,该设计取自某全环形燃烧室的 1/18,包含一个头部,设计承受压力 1.0 MPa,详见文献[6].其火焰筒包括

两级径向旋流器、文氏管、挡溅盘、气膜冷却孔、主燃孔和掺混孔,真实模拟了实际火焰筒的头部结构,如图 1 所示.

本研究是为了探讨火焰筒头部局部进气量变化对燃烧室贫油熄火性能的影响,据前面的分析,影响燃烧室接近贫油熄火状态时的空气量主要来自于一、二级旋流器以及主燃孔,因此主要通过改变旋流杯以及主燃孔的进气量来实现.采取在双径向旋流器的入口处缠一圈细铜片,使旋流杯的进气量减少一半,由于旋流器的气流入口处并不是整个气流通道的最小截面,因此铜片的宽度是大于入口宽度的一半的,如图 2 所示,具体设计过程详见文献[6].以两级旋流器都不堵作为基准结构,然后分别进行半堵第一级旋流器,半堵第二级旋流器,半堵两级旋流器的贫油熄火实验;通过在主燃孔外侧固定两片白铁皮以使主燃孔进气面积减少一半,从而达到改变主燃孔进气量的目的,如图 3 所示.

实验台由气路系统、油路系统、测量系统以及数据采集系统等组成,见文献[6].气路系统总长约 5 m,其中整流器安放在中间段中,是由铝质蜂窝板制成的,能够有效减少气流脉动的影响,燃烧室出口安装有控压法兰,是为了在实验过程中控制燃烧室出口压力的变化,如图 4 所示.

### 1.2 实验方案

为了验证旋流器进气量变化对燃烧室贫油熄火性能的影响,通过半堵旋流器以使进气量减少一半,可以组合出几种不同的结构形式,并与两级旋流器都不堵的结构为基准状态进行对比.为了

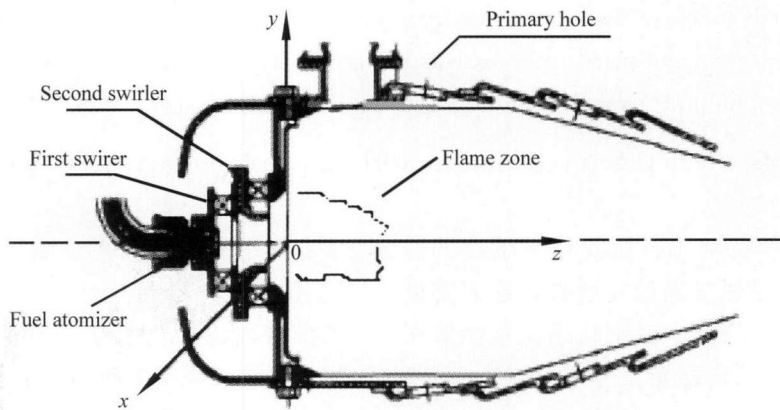


图 1 单头部矩形燃烧实验件火焰筒结构图

Fig.1 Structure of single dome rectangular model combustor

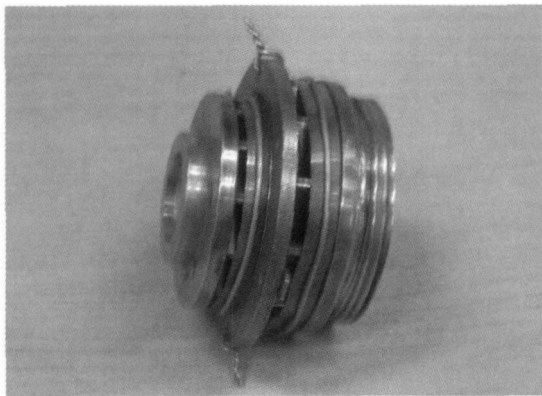


图 2 减少旋流杯进气量示意图

Fig.2 Sketch of the decrease of air into the swirlers

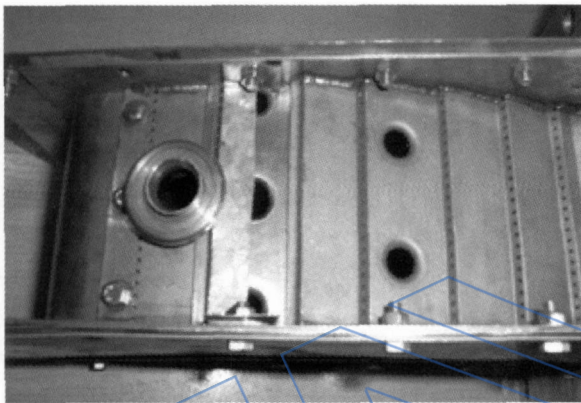


图 3 减少主燃孔进气量示意图

Fig.3 Sketch of the decrease of air into primary holes  
验证旋流器和主燃孔进气量同时变化对燃烧室贫油熄火性能的影响,采用半堵旋流器以及主燃孔

进气口的方法来使各自的进气量减少一半.实验选定的工况见表 1,具体实验方案见表 2.

表 1 实验工况参数

Table 1 Experimental parameters

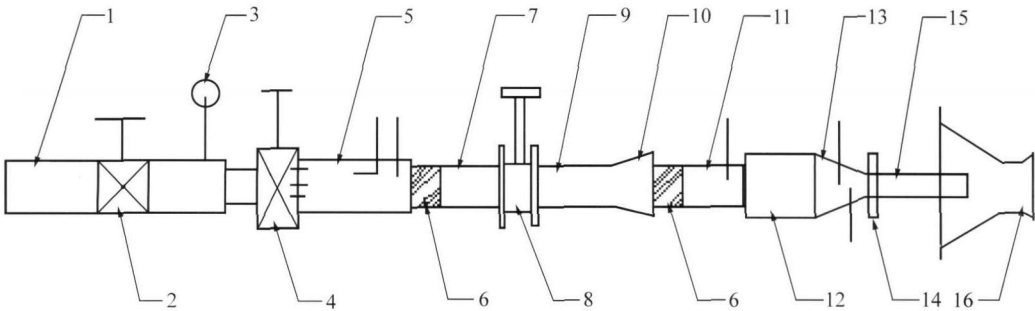
| 参 数           | 数值      |
|---------------|---------|
| 实验段来流压力/ MPa  | 0.271 5 |
| 实验段来流温度/ K    | 288     |
| 空气流量/ (kg/ s) | 0.55    |
| 燃烧室出口压力/ kPa  | 220     |

值得一提的是,对于不同的头部进气情况,对应熄火点的燃烧室出口压力和总流量可能不一样,为了尽可能的消除这种影响,实验过程中保证燃烧室出口压力不变,但是总的气流量却不一定相等,最终计算出不同状态的熄火油气比要经过基准压力和基准流量的修正.

表 2 实验方案

Table 2 Experimental Scheme

| 方案 | 一级旋流器 | 二级旋流器 | 主燃孔 |
|----|-------|-------|-----|
| 1  | 半堵    | 半堵    | 半堵  |
| 2  | 不堵    | 半堵    |     |
| 3  | 半堵    | 不堵    |     |
| 4  | 不堵    | 不堵    |     |
| 5  | 不堵    | 不堵    | 不堵  |
| 6  | 半堵    | 不堵    |     |
| 7  | 半堵    | 半堵    |     |



1 进气段; 2 手动阀门; 3 压力表; 4 气动薄膜调节阀; 5 中间段; 6 整流器; 7 软管; 8 涡街流量计;  
9 中间段; 10 扩张段; 11 整流段; 12 实验件; 13 收缩段; 14 控压法兰; 15 出气段; 16 消声段

图 4 气路系统示意图

Fig.4 Sketch of air pipeline

2 结果与分析

为了验证每次实验的可重复性和准确性,每种工况均做了 2 次或 3 次实验,这里只给出最终实验结果,详细实验数据见文献[6].

2.1 旋流器进气量变化对油气比的影响

旋流器进气量变化(封堵旋流器进气面积)对贫油熄火油/气比的影响结果见表 3. 从表 3 可以看出,半堵旋流器后的熄火油气比普遍小于基准结构时的熄火油气比,即旋流器进气量减少后,燃烧室的熄火边界变宽,稳定工作范围变大,而且半堵第一级旋流器后的熄火油气比小于半堵两级旋流器以及基准结构不封堵旋流器时的熄火油气比,可见,一级旋流器的进气量对熄火油气比的影响最大,且二级旋流器进气量对熄火油气比影响不大. 半堵第一级旋流器后的熄火油气比较基准结构时的油气比降低了约 18.4%,半堵两级旋流器的油气比在基准结构和半堵第一级旋流器之间,较基准结构降低了约 7.4%.

究其原因,燃烧室接近熄火状态时,火焰体积会很小,不能完全充满整个主燃区,而此时供油量必定很小,参与燃油雾化以及燃烧的空气将主要来自与喷嘴距离最近的一级旋流器<sup>[7]</sup>,因此,一级旋流器进气量变化对整个燃烧室的贫油熄火油气比影响最大. 另外,减少二级旋流器的进气量也就意味着相应的增加了一级旋流器的进气量<sup>[8]</sup>,虽然二级气量减小有利于熄火边界的拓宽,但它所带来了一级气量的增大对拓宽熄火边界是不利

的,这也就是二级旋流器进气量变化对燃烧室的熄火油气比的影响不大的原因.

表 3 旋流器进气量变化对熄火油气比的影响  
Table 3 Effect of flow split among swirlers on the LBO limits

| 编号 | 旋流器状态 | 熄火油气比     |
|----|-------|-----------|
| 1  | 基准状态  | 0.004 499 |
| 2  | 基准状态  | 0.004 484 |
| 3  | 半堵第一级 | 0.003 999 |
| 4  | 半堵第一级 | 0.004 004 |
| 5  | 半堵第一级 | 0.004 165 |
| 6  | 半堵两级  | 0.004 209 |
| 7  | 半堵两级  | 0.004 046 |

2.2 主燃孔进气量变化对油气比的影响

主燃孔进气量变化(封堵主燃孔进气面积)对贫油熄火油/气比的影响结果见表 4. 从表 4 可以看出,旋流杯为基准状态并半堵主燃孔后,燃烧室的熄火油气比显著增大,增幅约为 13.1%,证明减少主燃孔进气量使燃烧室工作恶化,不利于燃烧稳定. 半堵主燃孔,再半堵旋流器后,熄火油气比就有所减小,但始终大于相同旋流杯结构,不封堵主燃孔时的状态. 在半堵主燃孔的条件下,半堵第一级旋流器的熄火油气比小于半堵第二级旋流器的熄火油气比,这进一步证明了第一级旋流器进气量对熄火油气比的影响大于第二级旋流器.

表 4 主燃孔进气量变化对熄火油气比的影响  
Table 4 Effect of flow split into primary holes on the LBO limits

| 编号 | 旋流器状态 | 主燃孔状态 | 熄火温度/℃ | 熄火油气比     |
|----|-------|-------|--------|-----------|
| 1  | 基准状态  | 基准状态  | 172.46 | 0.004 499 |
| 2  | 基准状态  | 基准状态  | 171.8  | 0.004 484 |
| 8  | 基准状态  | 半堵状态  | 163.63 | 0.005 284 |
| 9  | 基准状态  | 半堵状态  | 160.53 | 0.005 38  |
| 10 | 基准状态  | 半堵状态  | 161.3  | 0.005 377 |
| 11 | 半堵第一级 | 半堵状态  | 149.4  | 0.005 015 |
| 12 | 半堵第一级 | 半堵状态  | 158    | 0.004 81  |
| 13 | 半堵第二级 | 半堵状态  | 130    | 0.005 137 |
| 14 | 半堵第二级 | 半堵状态  | 153.84 | 0.005 306 |
| 15 | 半堵两级  | 半堵状态  | 75.6   | 0.003 849 |
| 16 | 半堵两级  | 半堵状态  | 96.4   | 0.004 1   |

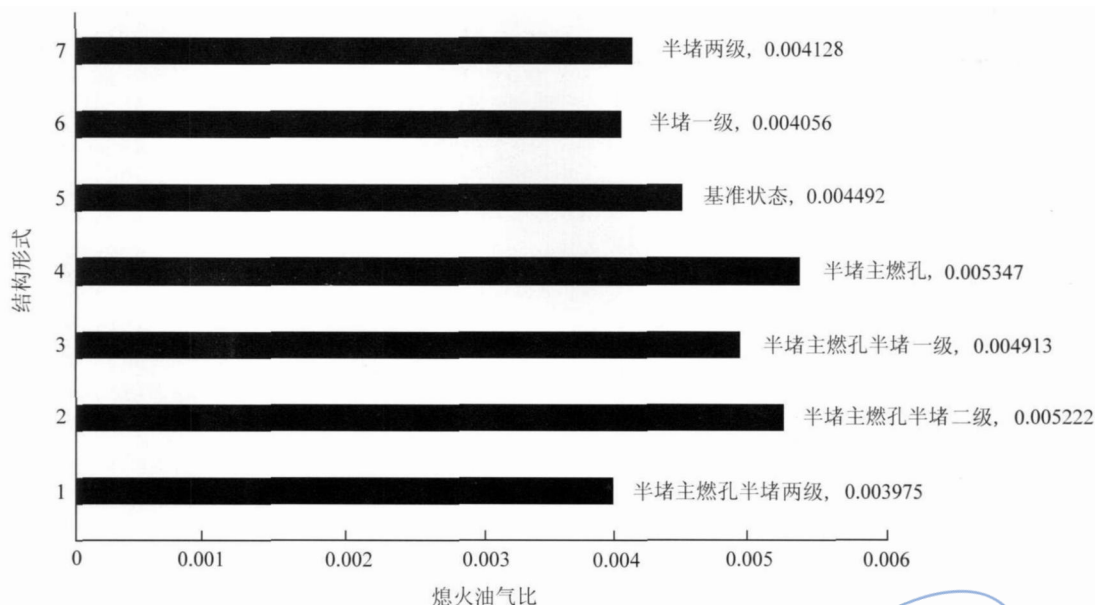


图5 各工况下油气比定量关系图

Fig. 5 Relationship of blowoff fuel air ratio with different structures

在半堵主燃孔以及两级旋流器的情况下,燃烧室的熄火油气比反而较小,与半堵两级旋流器而不封堵主燃孔时的状态相当。

主燃孔进气面积减小后,主燃孔进气量必然减小,导致旋流杯进气量变大,从而使熄火油气比显著增大。但当主燃孔以及两级旋流器均为半堵状态时,由于主燃孔进气量减小后,头部进气量等比例减小,从而使燃烧室头部获得了更好的油气匹配,使燃烧室能够在较小的油气比条件下稳定工作不熄火。

各种结构形式下熄火油气比的平均值与基准结构熄火油气比的对比关系如图5所示。

从图5中可以清晰的看出,单纯减少旋流器进气量后,燃烧室的熄火油气比均有所减小,有利于拓宽燃烧室的稳定工作范围;半堵主燃孔以后,熄火油气比均显著增加,说明减少主燃孔进气量不利于拓宽燃烧室的贫油熄火边界;半堵主燃孔和两级旋流器情况下的熄火油气比与半堵一级旋流器或两级旋流器而不堵主燃孔时的熄火油气比相当。

从上述结果可以看出,贫油熄火油/气比显然与熄火时燃油喷射局部区域的空气流量有关,无论是堵塞头部旋流器,还是主燃孔的进气面积,都会造成燃油喷射附近区域空气量的变化,从而影响整体的燃烧室贫油熄火边界。这就意味着,如果未来要对Lefebvre所提出的预测贫油熄火油/气

比的经验关系式<sup>[3]</sup>进行改进,必须考虑局部空气量,或者说局部燃烧室体积。

### 2.3 误差分析

由于熄火油气比是指熄火点时的油流量与空气流量之比,所以油气比的误差来源应该由两部分

的误差累积组成,即  $\frac{\Delta f}{f} = \frac{\Delta m_f}{m_f} + \frac{\Delta m_a}{m_a}$ 。

而在实验过程中,油流量和空气流量都是通过控制压力来调节的,有手动控制误差的存在;读数分别由压力估算和流量计读数得到,有表的误差存在;还有油量标定过程中的读数误差,反应时间差等组成。前面提到由压力变化引起的流量变化是流量与压差的平方根呈正比,因此,这些误差相加就是最终得出的熄火油气比的误差范围。经分析,本次实验测得的熄火油气比的误差精度在 $\pm 2\%$ 以内。

## 3 结 论

结合前面的实验结果分析,可以得出以下一些重要结论:

1) 半堵旋流器后的熄火油气比小于基准结构时的熄火油气比,即减少任何一级旋流器进气量,都可使燃烧室的稳定工作范围变宽。

2) 半堵第一级旋流器后的熄火油气比小于半堵两级旋流器和基准结构不封堵旋流器时的熄火油气比,可见第一级旋流器的进气量对熄火油

气比的影响最大. 此时燃烧室的贫熄边界可拓宽约 18.4 %.

3) 只半堵主燃孔时, 燃烧室的熄火油气比显著增大, 使贫熄边界缩小约 13.1 %.

4) 半堵主燃孔、且半堵任何一级旋流器时, 与基准结构相比, 熄火油气比有所增大, 但始终小于只半堵主燃孔时的结果, 进一步说明半堵主燃孔气流不利于贫油熄火.

## 参考文献

- [1] 袁怡祥, 林宇震, 刘高恩. 旋流杯燃烧室头部流场与喷雾对贫油熄火的影响[J]. 航空动力学报, 2004, 19(3): 332-337.
- YUAN Yixiang, LIN Yuzhen, LIU Gaoen. The effect of flow field and fuel spray of combustor with swirl cup on lean blowout limit at idle condition[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3): 332-337. (in Chinese)
- [2] Ballal D R, Lefebvre A H. Weak extinction limits of turbine flowing mixtures[J]. Journal of Engineering for Power, 1979, 101: 343-348.
- [3] Lefebvre A H. Fuel effects on air turbine combustion—ignition, stability, and combustion efficiency[J]. Journal of Engineering for Air Turbine and Power, 1985, 107: 24-37.
- [4] Mongia H C, Vermeersch M, Thomsen D D, et al. A simple reactor-based approach for correlating lean blowout of turbo-propulsion engine combustors [R]. AIAA Paper A01-34174, 2001.
- [5] 邓甜. 多点喷射燃烧室数值模拟研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.
- DENG Tian. Numerical simulation of multi-injection combustors[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [6] 徐浩鹏. 旋流杯结构燃烧室下游流场特性及贫油熄火特性研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.
- XU Haopeng. A research of the downstream flowfields and lean blow-out limits of combustors with swirl cups [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [7] 郎洪俭, 郭志辉, 黄勇. 主燃孔对旋流杯下游流场的影响[J]. 推进技术, 2006, 27(2): 110-113.
- LANG Hongjian, GUO Zhihui, HUANG Yong. Effect of primary holes on the velocity profiles downstream of a swirl cup[J]. Journal of Propulsion Technology, 2006, 27(2): 110-113. (in Chinese)
- [8] 张玉芳. 燃烧室贫油熄火性能研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.
- ZHANG Yufang. A research of the lean blow-out limits of combustors[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)