

## 三旋流器加装外套环对燃烧性能的影响

莫 妲, 程 明, 张成凯, 林宏军, 万 斌

(中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

**摘 要:** 对带有两种不同头部结构(基准型为方案 1, 头部加装外套环为方案 2)的三旋流单头部燃烧室进行了研究, 对有两种头部结构的燃烧室进行了流场和燃烧场的数值模拟, 在相同的进口试验条件下, 用燃气分析法和 15 点测温耙分别测量了两种头部的燃烧效率、出口冒烟数和出口温度场。结果表明: 三旋流器的燃烧效率超过了 99.7%, 加装外套环后其流场、温度场分布均较基准型有所改善, 回流区更加饱满, 油气混合和燃油雾化效果增强, 出口温度分布系数(OTDF)和出口冒烟数分别降低了 36% 和 25%。

**关 键 词:** 头部结构; 燃烧室; 三旋流器; 燃烧效率; 出口温度场; 冒烟

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

### Effect of triple swirler with an outer ring on combustion performance

MO Da, CHENG Ming, ZHANG Cheng-kai,  
LIN Hong-jun, WAN Bin

(Shenyang Engine Design and Research Institute,  
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

**Abstract:** Triple swirler combustor with two different dome structures was investigated. The reference type was case 1, and the dome for the installation of outer ring was case 2. Numerical simulation was conducted for the flow field and combustion field of the two combustors. The combustion efficiency, smoke emission and exit temperature distribution of the two designs were measured by gas analysis and thermocouple under the same experimental conditions. The results showed that the combustion efficiency of the triple swirler was more than 99.7%. The flow field and temperature field distributions of the combustor with an outer ring were improved compared with the reference type; besides, the recirculation zone was plumper, and the effects of fuel mixing with air and fuel atomization were increased, and the outlet temperature distribution factor (OTDF) and smoke emission decreased by 36% and 25% respectively.

**Key words:** dome structure; combustor; triple swirler; combustion efficiency;  
exit temperature distribution; smoke emission

为了提高发动机的热力性能和推质比, 需要持续增加高压涡轮进口总温, 涡轮前温度的增加势必要求发动机燃烧室比当前燃烧室拥有更高的温升能力<sup>[1]</sup>, 作为高温升燃烧室的燃烧组织技术

之一, 三旋流燃烧室在常规的双旋流头部基础上, 增加了第 3 股头部旋流空气。国内外的研究表明, 采用 3 级旋流器的燃烧室在保证效率的情况下, 具有燃油雾化效果好<sup>[2]</sup>、污染物排放低<sup>[3]</sup>、稳定工

作范围宽等诸多优点. 在国外, Grinstein 等<sup>[4]</sup>利用粒子图像测速仪 (particle imaging velocimetry, PIV)、相位多普勒粒子分析仪 (phase Doppler particle analyzer, PDPA)、激光多普勒速度仪 (laser Doppler velocimetry, LDV) 技术, 研究旋流器对燃烧室内冷态流场的影响, 并进行了数值研究. Mansour 等<sup>[5]</sup>对 3 级旋流器燃烧室油雾场进行了试验研究, 并用 Fluent 软件模拟其冷态流场. Li 等<sup>[6]</sup>采用 PIV 和 LDV 测量 3 级旋流器燃烧室的冷态流场. 在国内, 张晨曦<sup>[7]</sup>利用 Fluent 软件对带有 3 级旋流器且采用分级供油方式的燃烧室燃烧性能进行了研究, 袁怡祥等<sup>[8]</sup>在如何拓宽燃烧室稳定工作范围方面进行了研究, 雷雨冰等<sup>[9]</sup>在三维曲线坐标系下采用多区域耦合法对包括 3 级旋流器在内的环形燃烧室两相反应整体流场进行了数值模拟. 彭云辉等<sup>[10]</sup>对 3 种不同旋流器组合方案进行了出口温度分布的试验, 研究了旋流器旋向和头部当量比对燃烧室出口温度分布的影响.

本文以三旋流单头部矩形燃烧室为研究对象, 针对其头部加装外套环后进行了冷热态流场和温度场的数值模拟, 以及出口温度分布、燃烧效率的试验研究.

## 1 研究对象

如图 1 所示, 图 1(a) 为方案 1 头部, 图 1(b) 为方案 2 头部, 均带有 1 级~3 级同心安装的轴流式旋流器. 第 1 级、第 2 级旋流器的空气流量较低, 故在中心部位形成局部富油区, 保证低功率状态下的燃烧稳定性; 第 3 级旋流器的空气流量用于强化掺混且使主燃区保持相对贫油的状态, 从而避免出现排气冒烟现象. 方案 2 头部与方案 1 头部的差别仅在于方案 2 的头部转接段上增加了

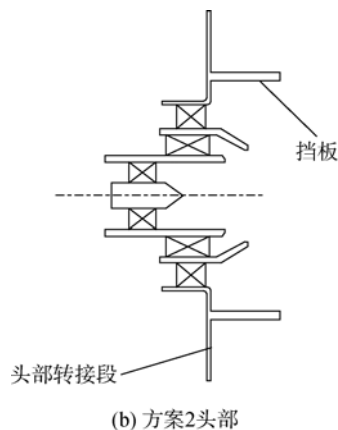


图 1 两种方案头部结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of two dome cases

一个外套环. 该外套环的作用是控制第 3 级旋流器空气的流动路线, 使其在更为合适的位置进入到核心燃烧区中, 实现高效、稳定和 low 冒烟燃烧.

## 2 数值计算

### 2.1 几何模型及网格划分

三旋流单头部矩形燃烧室的二维几何模型简图如图 2 所示, 实际的燃烧室结构存在主燃孔和掺混孔. 气流经过燃烧室进口后, 分 3 路流入火焰筒, 一股从头部的旋流器进入, 另外两股气流分别从燃烧室的内、外环腔通道的主燃孔和掺混孔流入火焰筒. 计算是三维的, 图 2 为燃烧室中心截面位置 ( $Z=0\text{ mm}$  截面) 的二维结构简图.

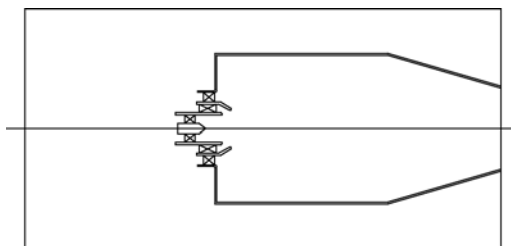
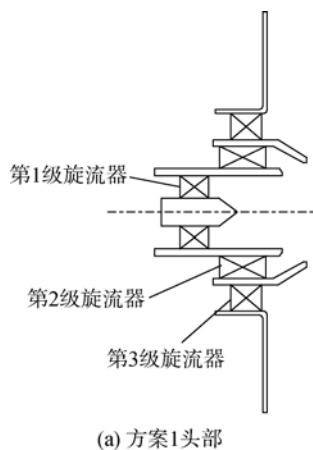


图 2 燃烧室二维结构

Fig. 2 Two-dimension combustor structure

数值计算结果的准确性对于燃烧室设计和方案的确定至关重要, 这就需要流场网格具有较高的质量, 本文采用 ANSYS ICEM CFD 软件对该燃烧室进行六面体结构网格划分, 使计算机生成网格计算量小, 计算更容易达到收敛<sup>[11]</sup>. 三旋流单头部燃烧室的网格划分情况如图 3 所示, 网格节点总数为 396 万, 网格单元数为 423 万.



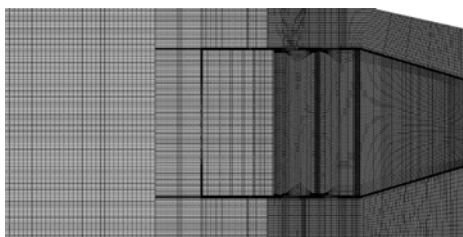


图3 燃烧室六面体结构网格

Fig. 3 Hexahedral grid of combustor

## 2.2 控制方程及边界条件

采用 FLUENT 软件对流动及燃烧进行数值模拟. 具体控制方程见参考文献[12]. 在欧拉框架下求解空气(连续相)的 Navier-Stokes 方程, 在拉格朗日框架下求解油滴(离散相)的轨迹方程, 即采用 FLUENT 软件中的离散相模型(DPM), 通过随机颗粒轨道模型来考虑两相间的相互作用, 相间采用耦合计算. 湍流对流动的影响采用 realizable  $k-\epsilon$  湍流模型<sup>[13-14]</sup>. 近壁面采用标准的壁面函数, 燃烧模型采用概率密度函数(PDF)模型模拟<sup>[15]</sup>. 边界条件是给定燃烧室进口总压和出口静压. 设定进口压力为 506.4 kPa, 燃烧室出口压力为 482.3 kPa, 燃烧室的两个侧壁认为是固壁.

## 2.3 数值模拟结果

图4为两种头部在  $Z=0$  mm 截面的零速线对比情况, 零速线能够反映回流区的大小, 可见, 加装外套环后头部的回流区径向尺度增大, 轴向尺度基本不变, 故更加饱满. 这说明第3级旋流空气的流动路线更为理想, 能在更合适的位置进入到核心燃烧区.



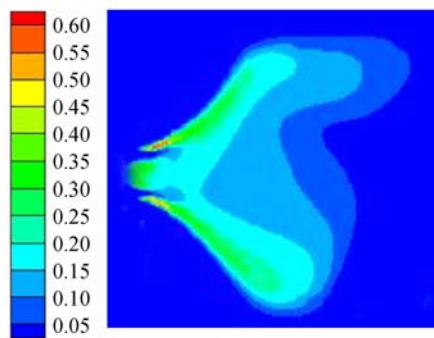
图4 两种方案头部的零速线

Fig. 4 Lines of velocity is zero for two dome cases

图5为两种头部在  $Z=0$  mm 截面的燃油质量分数分布云图, 可知, 燃油质量分数分布基本呈轴对称分布, 沿着径向方向燃油质量分数呈现不断增大的趋势, 这是因为靠近轴线的油滴跟空气的相对速度较大, 发生了二次雾化, 随着轴向距离

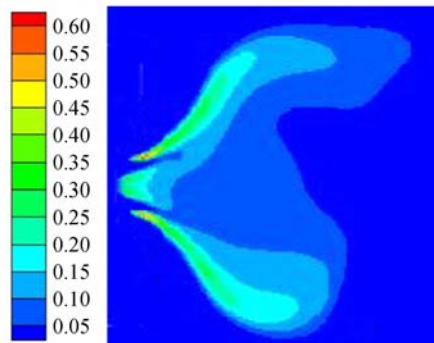
增大, 油珠逐渐蒸发与破碎, 燃油质量分数逐渐减小. 另外也可以看出, 加装外套环后主副油路分级明显, 回流区内燃油质量分数小, 说明油滴与气流混合较好, 燃油雾化蒸发快, 平均直径小, 完成燃烧所需的时间短, 有利于稳定火焰、提高燃烧效率、减小发动机的排气污染<sup>[16]</sup>.

燃油质量分数



(a) 方案1头部

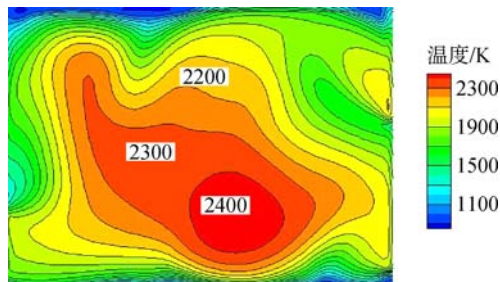
燃油质量分数



(b) 方案2头部

图5 两种头部的燃油质量分数分布  
( $Z=0$  mm 截面)Fig. 5 Fuel mass fraction distribution of two dome cases ( $Z=0$  mm section)

图6为两种头部的出口温度场分布情况, 两者的温度分布差别较大, 基准型燃烧室的出口截面高温区较为集中, 且靠近出口下侧, 而加装外套环后的出口温度分布较为均匀, 仅在左侧壁上有



(a) 方案1头部

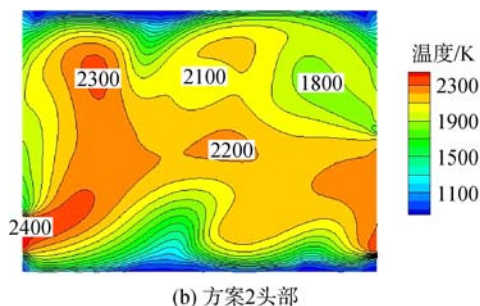


图6 两种方案头部的出口温度场

Fig. 6 Exit temperature distribution for two dome cases

一处小的热斑,这是由于单头部侧壁的影响.

### 3 出口温度场及燃烧效率试验

#### 3.1 试验设备

燃烧室出口温度分布系数<sup>[17]</sup>定义为燃烧室出口截面内的最高燃气总温与燃气平均总温之差与燃烧室温升的比值

$$F_{\text{otd}} = \frac{T_{t4,\text{max}} - T_{t4}}{T_{t4} - T_{t3}}$$

其中  $T_{t3}$  为燃烧室进口总温,  $T_{t4}$  为燃烧室出口总温,  $T_{t4,\text{max}}$  为燃烧室出口最高燃气总温.

出口温度分布试验和燃烧效率试验在单头部矩形燃烧室上进行,图7为三旋流单头部矩形燃烧室试验设备示意图.

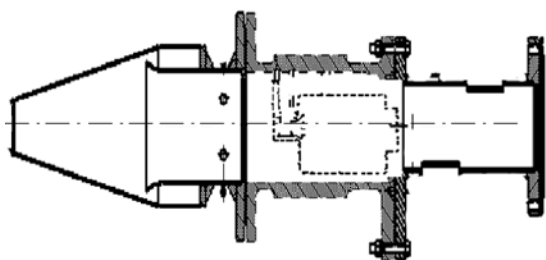


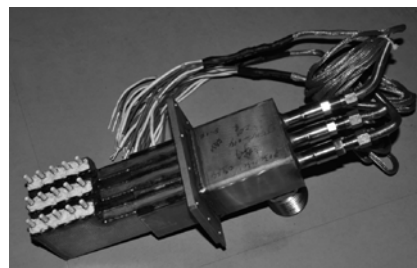
图7 单头部燃烧室试验台示意图

Fig. 7 Schematic drawing of simplex dome combustor test system

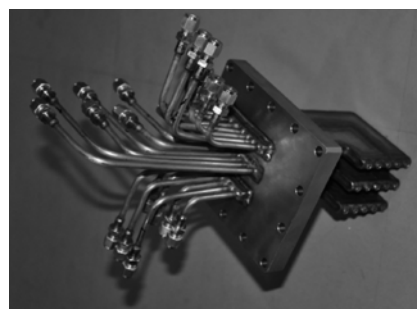
燃烧室的出口温度场和燃烧效率通过安装在出口测量段上的15点测温耙和15点燃气取样耙测得,如图8所示.

#### 3.2 试验结果及分析

图9为两种头部的燃烧效率情况,可见,两者的燃烧效率相当,且均超过了99.7%,这说明三旋流燃烧室流场组织好,燃烧较为充分.另外,通过冒烟测量设备,测得基准型的冒烟数为20,加装外套环的冒烟数为15,即冒烟数减少了25%.



(a) 测温耙



(b) 燃气取样耙

图8 燃烧室出口测量设备

Fig. 8 Combustor exit test rig

图10为两种头部的出口温度分布系数,可见,加装外套环后出口温度分布系数减小了

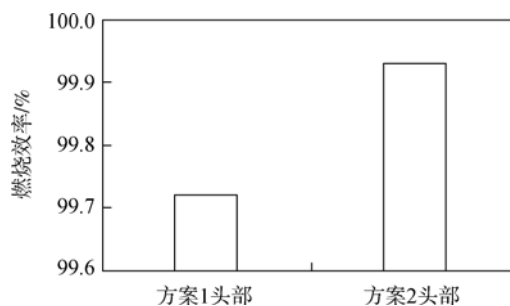


图9 两种方案头部的燃烧效率比较

Fig. 9 Comparison of combustion efficiency for two dome cases

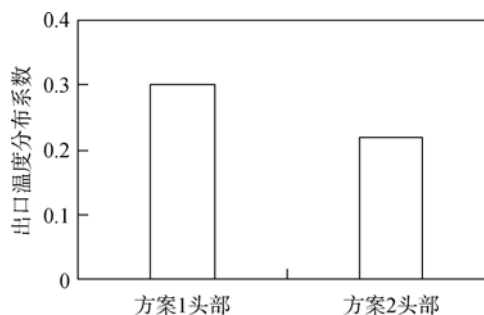


图10 两种方案头部的出口温度分布系数比较

Fig. 10 Comparison of outlet temperature distribution factor combustor for two dome cases

36%,这是由于第3级旋流空气提前进入主燃区,由图4也可以说明这一点.另外,油滴受到的气动力大,燃油能雾化成更小的液滴,燃油与空气的掺混时间缩短,燃烧提前,减小了火焰,使出口最高温度降低,燃烧室出口的出口温度分布系数就小.

### 3.3 数值计算与试验结果对比

图11为试验和计算得到的基准型燃烧室的出口温度场,可见试验与计算得到的出口平面的温度分布相似,特别是热点的位置都靠近右下侧.这也说明了数值计算设置和结果合理,具有一定的可信度,同时也说明对于设计方案的筛选以及燃烧室设计具有指导性.

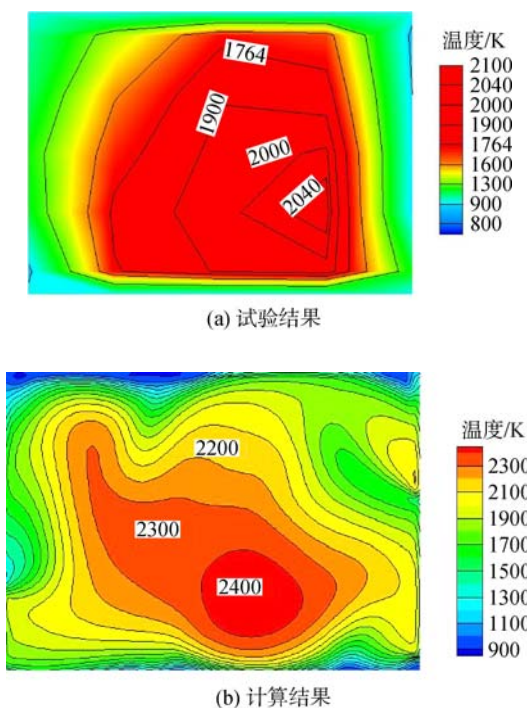


图11 方案1头部的出口温度场

Fig. 11 Exit temperature distribution for dome case 1

## 4 结 论

本文利用三旋流单头部矩形燃烧室,研究了头部加装的外套环对燃烧性能的影响.计算和试验的结果表明:

1) 三旋流燃烧室的数值分析设置与结果合理,具有一定的可信度.

2) 三旋流燃烧室的燃烧效率较高,超过了99.7%.

3) 加装外套环后燃烧室头部的回流区尺度增大,有利于组织燃烧和稳定火焰,同时油滴所受的气动力增大,燃油雾化变细,完成燃烧所需的时

间缩短,有效的减少了排气冒烟,另外出口温度分布系数相对值也有所降低.

## 参考文献:

- [1] Bahr D W. Technology for the design of high temperature rise combustors[R]. AIAA 85-1292, 1985.
- [2] 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):332-336.  
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): 332-336. (in Chinese)
- [3] Li G, Gutmark E J. Combustion characteristics of a multiple swirl spray combustor[R]. AIAA-2003-0489, 2003.
- [4] Grinstein F F, Yong T R, Mongia H C. Computational and experimental analysis of the flow dynamics in a multi-swirl combustor[R]. AIAA-2002-1006, 2002.
- [5] Mansour A, Benjamiin M. A new hybrid air blast nozzle for advanced gas turbine combustor[R]. ASME Paper 2000-GT-0117, 2000.
- [6] Li G, Angier S, Lambolez O, et al. Experimental study of velocity flow field for a multiple swirl spray combustor[R]. AIAA-2002-0618, 2002.
- [7] 张晨曦.三旋流燃烧室头部方案设计与燃烧流场数值模拟[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.  
ZHANG Chenxi. Dome design and numerical simulation of combustion flow field for a triple swirler combustor[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese)
- [8] 袁怡祥,林宇震,刘高恩.三旋流器头部燃烧室拓宽燃烧稳定工作范围的研究[J].航空动力学报,2004,19(1):142-147.  
YUAN Yixiang, LIN Yuzhen, LIU Gaoen. Combustor dome design with three swirlers for widening the operation stability range[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(1): 142-147. (in Chinese)
- [9] 雷雨冰,赵坚行.三级旋流器环形燃烧室化学反应流场的数值研究[J].推进技术,2005,26(3):215-218.  
LEI Yubing, ZHAO Jianxing. Numerical study of reacting flow field in the annular combustor with the triple swirler[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(3): 215-218. (in Chinese)
- [10] 彭云辉,林宇震,刘高恩.三旋流器燃烧室出口温度分布的初步试验研究[J].航空动力学报,2007,22(4):554-558.  
PENG Yunhui, LIN Yuzhen, LIU Gaoen. A preliminary experimental study of pattern factor for a triple swirler combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(4): 554-558. (in Chinese)
- [11] 纪兵兵,陈金瓶. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解[M].北京:中国水利水电出版社,2012.
- [12] FLUENT Inc. FLUENT 6.3 user's guide [M]. New Hampshire: Fluent Inc, 2006.
- [13] 金戈,张志学,顾铭企. QD128 航改燃气轮机燃烧室数值模

- 拟[J]. 航空发动机, 2008, 34(2): 30-35.
- JIN Ge, ZHANG Zhixue, GU Mingqi. Numerical simulation of QD128 aero-derivative gas turbine combustor[J]. Aeroengine, 2008, 34(2): 30-35. (in Chinese)
- [14] 蒲宁. 航空发动机燃烧室数值仿真中湍流模型的比较研究[D]. 沈阳: 沈阳航空工业学院, 2009.
- PU Ning. Comparison of turbulent models for aero-engine combustor numerical simulation[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2009. (in Chinese)
- [15] 吴超. 湍流燃烧模型在燃烧室数值计算中的应用研究[D]. 沈阳: 沈阳航空工业学院, 2009.
- WU Chao. Study on applicability of turbulent combustion model in the numerical calculation of combustor[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2009. (in Chinese)
- [16] 金如山. 航空燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 宇航出版社, 1988.
- [17] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册: 第九册 主燃烧室[M]. 北京: 航空工业出版社, 2000.

(编辑: 叶 青)