

旋流杯设计参数对燃烧性能的影响

程 明¹, 林宏军¹, 李 锋²

(1. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015;

2. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 通过三维数值模拟和试验相结合的方法, 针对航空发动机主燃烧室开展了火焰筒头部旋流杯设计参数对燃烧室性能影响的研究, 其关键设计参数为副旋流器相对进气量和旋流数, 关注的燃烧性能包括出口温度场分布、NO_x 排放量等。结果表明: 数值计算获得的规律与试验的结论基本一致。随着副旋流器相对进气量的增加, 主燃烧室出口温度场逐渐恶化, 而 NO_x 排放量略有降低; 副旋流器旋流数偏离基准设计值时, 出口温度场恶化, 而 NO_x 排放量随旋流数的增加而增加。

关 键 词: 旋流杯; 相对进气量; 旋流数; CFD 分析和试验验证; 主燃烧室性能

中图分类号: V211.6; V231.1

文献标志码: A

Effect of swirl cup design parameters on combustion performance

CHENG Ming¹, LIN Hong-jun¹, LI Feng²

(1. Shenyang Engine Design and Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China;

2. School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on the three-dimensional numerical simulation and rig test, the effect of swirl cup's design parameters of head of flame tube, such as the relative flow rate and the swirl number of secondary swirler, on combustion performance of an aero-engine main combustor was researched. The researched performance includes the outlet temperature field distribution and nitrogen oxides (NO_x) emissions. It is shown that the result of numerical simulation and rig test is consistent: with the increase of the secondary swirler's relative flow rate, the outlet temperature field of the main combustor deteriorates, and the nitrogen oxides emission slightly reduces; with the deviation of swirl number of the secondary swirler from the benchmark design value, the outlet temperature field deteriorates, while nitrogen oxides emission increases with the increase of swirl number.

Key words: swirl cup; relative flow rate; swirl number;

CFD analysis and rig test verification; main combustor performance

现代高性能航空发动机的设计, 一方面通过提高主燃烧室的温升能力(高温升)来满足航空发动机推力的提升对主燃烧室出口温度的要求; 一方面通过主燃烧室内分区、分级燃烧获得航空发动机较低的污染排放量(低污染)。高温升/低污染

燃烧室成为现代先进航空发动机主燃烧室研究的主要方向^[1-2], 而主燃烧室的设计将取决于头部燃烧组织方式的选取。

对于常规的主燃烧室而言, 旋流燃烧的组织方式是一种有效的燃烧组织方式, 能够满足现役

的常规燃烧室在温升和污染排放量上的基本要求^[3],广泛地应用于军用、民用航空发动机,航机改燃机的设计中(例如 MK-202,CFM-56,GE-90 等^[4]).旋流燃烧组织设计技术的关键在于旋流器的设计和旋流流场的组织,而影响旋流器设计的主要参数则归结为旋流器的几何参数和旋流数,因此国内外研究机构针对旋流器和旋流燃烧的特性开展了大量的研究并总结了一定的经验^[5].

双级旋流器是一种典型的主燃烧室旋流燃烧组织装置,相比单一的旋流器其结构和流场的特性要更加的复杂.旋流的流场特性除与两级旋流器各自的设计参数有关外,亦受到两级旋流器的气动性能匹配的影响,相关文献[6-12]对双级旋流器的旋向匹配、流量匹配等参数对双级旋流器下游流场和回流区的影响开展了研究,但大多数研究中并未系统地研究旋流器设计参数变化引起的旋流器匹配变化,及其匹配变化对燃烧室总体性能(如熄火边界、出口温度场、NO_x 排放量等)带来的影响.

本文将常规的二级组合旋流器为研究对象,采用 FLUENT 软件^[13]进行数值模拟,重点研究双级旋流器副旋流器设计参数(相对进气量、旋流数)的变化对主燃烧室综合性能的影响,同时采用单头部燃烧室试验件对数值模拟的结果进行了初步的验证.

在数值模拟中,进行包含扩压器、二股通道、火焰筒头部和火焰筒燃烧区的全流动域计算,以避免由于燃烧区边界条件设置不合理带来的计算结果的不确定性^[14].

1 物理模型和研究方案

1.1 燃烧室模型

本文研究的对象为全环形燃烧室,该燃烧室与文献[15]中的燃烧室相同,参见图 1.其特征是采用短突扩扩压器、双旋流进气雾化装置、气膜冷

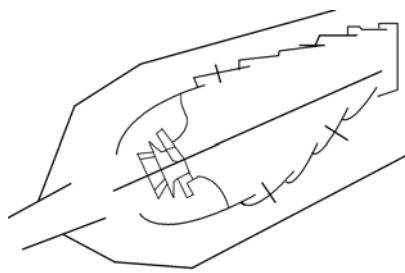


图 1 全环形燃烧室流路示意图

Fig. 1 Scheme of full annular combustor flow passage

却火焰筒.其中,空气经头部一、二级旋流器(分别为轴向和径向旋流器)进入火焰筒头部燃烧区,燃油在火焰筒头部以圆锥形喷入,并溅射在文氏管上,在双旋流进气雾化装置的作用下实现了良好的初始雾化,为高效燃烧做好了准备.

1.2 研究方案

本文研究中,在计算域、网格设置、物理化学模型的采用和边界条件设置等方面,采用了文献[15]中经过验证的“通过数值计算获得燃烧室性能”的方法,以保证计算结果的可靠性.

燃烧室的流道和机匣的结构保持不变,主要针对双级旋流器进行设计修改,在基本保持火焰筒总当量开孔面积不变的前提下,改变副旋流器流通面积和旋流数,从而研究双级旋流器匹配变化对主燃烧室性能的影响.研究的若干气动方案参见表 1.其中,方案 B-1 和方案 B-2 对副旋流器流通面积进行调整的同时,为保持当量开孔面积不变,对应地进行了火焰筒壁面气膜冷却孔开孔面积的调整.

表 1 研究方案列表

Table 1 List of research programmes

方案号	方案主要特征
A	基准方案
B-1	副旋流器流通面积增加 20%
B-2	副旋流器流通面积增加 40%
C-1	副旋流器旋流数减少 16%
C-2	副旋流器旋流数增加 25%

2 数值模拟研究

2.1 网格的划分

本次计算中选取主燃烧室对应一个头部的区域进行建模和网格划分.建模中,将离散的气膜孔简化为等面积的环带.计算域包括前置扩压器、内外二股腔道、双旋流进气装置、火焰筒,以实现整个燃烧室流动域的耦合计算.

为了有效控制网格的疏密,对计算域进行了分区处理,整个计算域内共分成 85 个体积.针对每个体积的不同特点,采用了不同的网格形式,实现了在保证计算分辨率的前提下,获得高质量的三维贴体坐标网格.为得到精度较高的计算结果,对火焰筒内计算域采用了六面体结构化网格.同时鉴于结构的复杂性,对头部(包括旋流器和文氏

管通道等)采用了非结构四面体网格,以缩短建模时间.计算域网格见图 2.

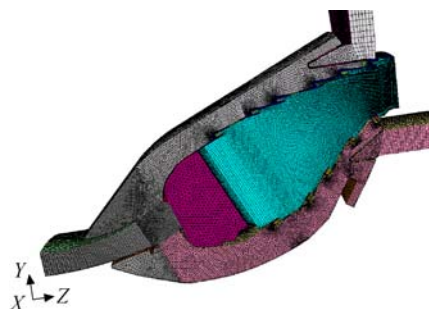


图 2 燃烧室计算网格

Fig. 2 Computational grids of combustor

2.2 边界条件

按主燃烧室地面起飞状态,即燃烧室进口空气的流量、温度和压力分别为 48 kg/s, 820 K 和 3.0 MPa,油气比为 0.023,进行了边界条件设定,采用流量进口边界条件和出流边界条件.整个流体的侧壁均设置为旋转周期边界条件.为了进

行离散相轨迹和喷雾燃烧的计算,在文氏管出口设置了中空圆锥形喷雾,设定了圆锥的初始直径、半锥角、初始温度、初始直径、初始速度、流量等.

2.3 物理模型

计算中空气作为不可压理想流体处理,燃料选用材料库中给出的 JET-A 型喷气燃料(ASM 1655),该燃料与 RP-3 燃料(GB 6537-94)的性质相当接近.采用了适用于强旋流流动计算的 realizable $k-\epsilon$ 双方程湍流模型,近壁处理采用标准的壁面函数.辐射计算采用 P-1 模型.燃烧模型采用非预混 PDF(probability density function)燃烧模型.微分方程的离散采用 SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked-equations)方法,应用 2 阶迎风差分格式.

2.4 计算结果分析

2.4.1 副旋流器相对进气量的影响

图 3、图 4 和图 5 分别给出了计算得到的副旋流器相对进气量对火焰筒中心截面速度、温度和出口截面温度分布的影响.

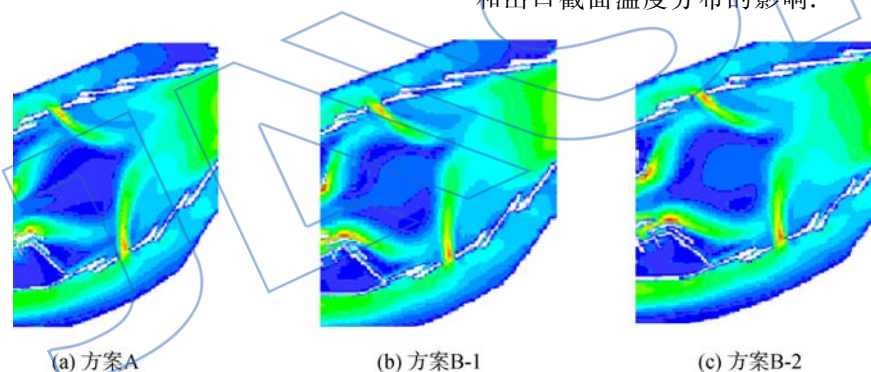


图 3 副旋流器相对进气量对火焰筒中心截面速度分布的影响

Fig. 3 Effect of secondary swirler's relative flow rate on velocity distribution of center plane of flame tube

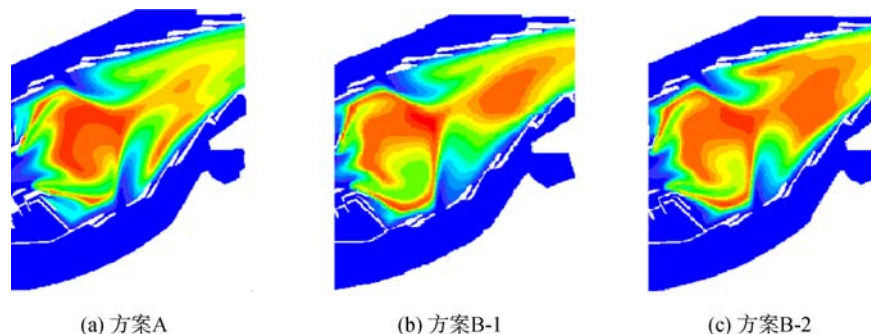


图 4 副旋流器相对进气量对火焰筒中心截面温度分布的影响

Fig. 4 Effect of secondary swirler's relative flow rate on temperature distribution of center plane of flame tube

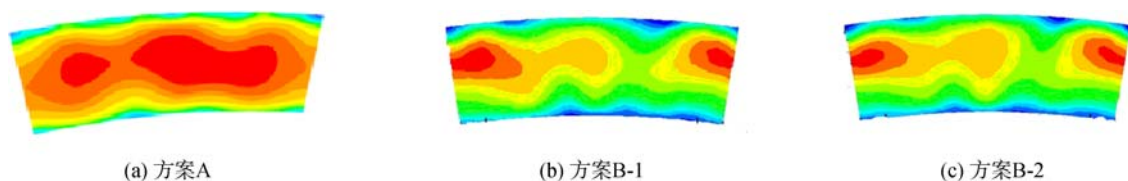


图 5 副旋流器相对进气量对火焰筒出口截面温度分布的影响

Fig. 5 Effect of secondary swirler's relative flow rate on temperature distribution of outlet plane of flame tube

1) 中心截面速度:三者流态基本一致,但旋流器相对进气量的增加使得直接进入火焰筒头部和主燃区的空气增多,旋转流动增强,旋转气流影响区域扩大.这样旋转气流的轴向延伸距离更长,一直到主燃孔位置被主燃孔气流截断;旋转气流的半径更大,更靠近火焰筒内外壁,回流区径向尺寸增大.

2) 中心截面温度:增大旋流器相对进气量以后,由于速度场和回流区尺度的变化,在主燃孔后火焰筒中间位置出现了局部高温区,而且高温区的轴向和径向尺度均随旋流器相对进气量的增大而扩大.

3) 出口截面温度:旋流器相对进气量的增加导致了火焰筒内高温区尺度的变化,造成出口温度场逐渐恶化,其出口温度分布系数(OTDF)变化为基准方案的 1.5~2.0 倍(图 6).

此外,由于火焰筒主燃区采用了较为贫油的设计,随着头部空气量的增加,主燃区当量比进一步降低,导致 NO_x 排放量小幅减少(如图 6).

2.4.2 副旋流器旋流数的影响

图 7、图 8 和图 9 分别给出了计算得到的副旋流器旋流数对火焰筒中心截面速度、温度和出口截面温度分布的影响.

1) 副旋流器旋流数的变化对火焰筒头部的速度分布和回流区形状带来的影响并不明显,但

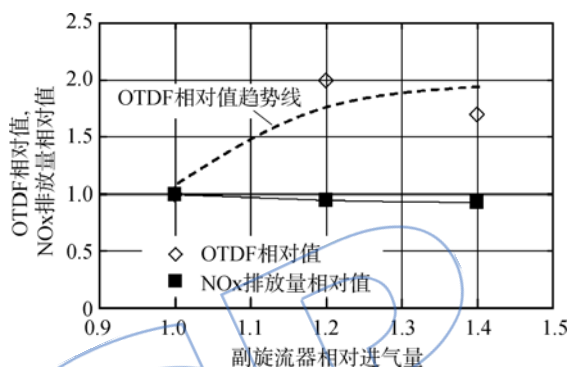


图 6 副旋流器相对进气量的变化对燃烧性能的影响

Fig. 6 Effect of secondary swirler's relative flow rate on combustion performance

是对燃烧场影响相对较大.旋流数较小时,气流旋转较弱,气流流动的轴向气流相对较强,部分燃料被气流转移到主燃孔后的区域,燃烧反应较为剧烈,高温区拖得较长.而当旋流数增大以后,气流旋转作用的增强有利于主燃区内燃烧的完成,主燃孔后的高温区域范围较少,总温分布区域较为合理.

2) 当副旋流器旋流数偏离基准方案时,出口温度场品质发生恶化,OTDF 变为基准方案的 1.5~2.0 倍(如图 10),旋流数减少对温度场均匀性的影响更为明显.同时,出口温度分布图的形状也与基准方案完全不同,高温区角向位置由基准

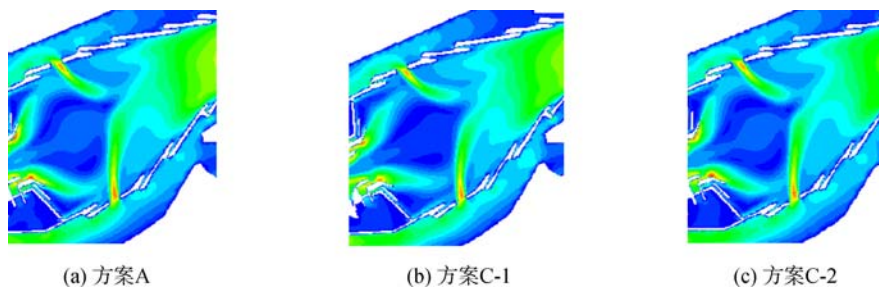


图 7 副旋流器旋流数对火焰筒中心截面速度分布的影响

Fig. 7 Effect of secondary swirler's swirl-number on velocity distribution of center plane of flame tube

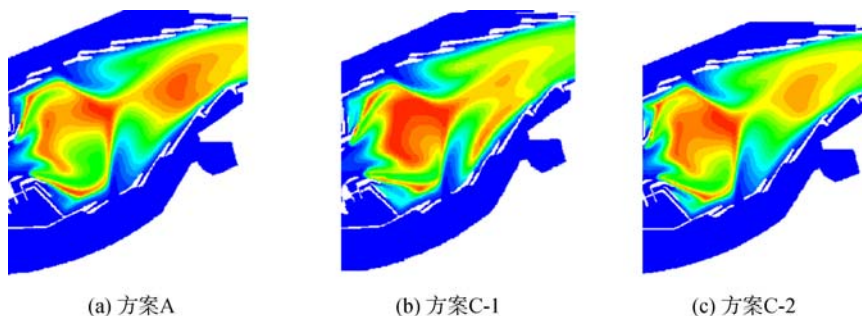


图 8 副旋流器旋流数对火焰筒中心截面温度分布的影响

Fig. 8 Effect of secondary swirler's swirl-number on temperature distribution of center plane of flame tube

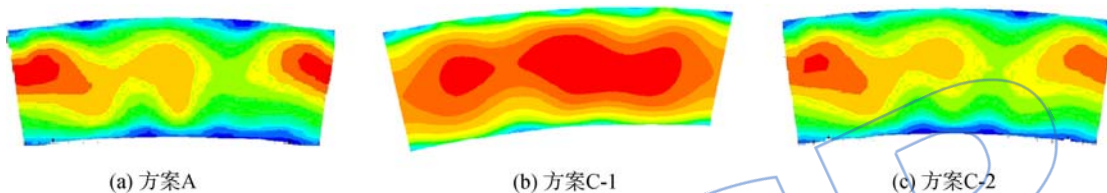


图 9 副旋流器旋流数对火焰筒出口截面温度分布的影响

Fig. 9 Effect of secondary swirler's swirl-number on temperature distribution of outlet plane of flame tube

的喷嘴截面转移到了周期截面处。

3) 由于旋流数较低时的主燃区温度偏低,故 NO_x 排放量相对略低,而随着旋流数的增加,主燃区温度增加,造成 NO_x 排放量的增加(如图 10)。

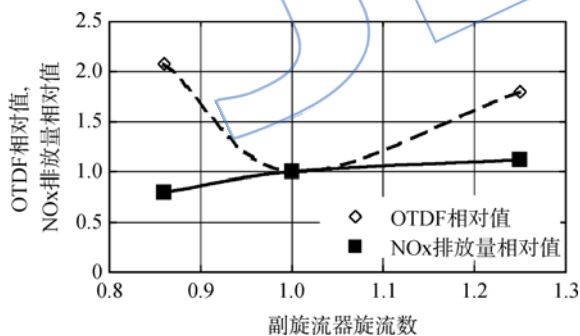


图 10 副旋流器旋流数的变化对燃烧性能的影响

Fig. 10 Effect of secondary swirler's swirl-number on combustion performance

3 单头部燃烧室模型试验

3.1 试验研究

为了进一步研究双级旋流器中副旋流器的相对进气量和旋流数的变化对燃烧性能的影响,并验证数值模拟的结果,针对表 1 中不同设计方案,开展了模型燃烧室设计状态燃烧性能试验,考核

了不同方案的排气污染和出口温度分布性能。

本次研究中采用的高压燃烧试验系统主要由试验台主体、供气系统、供油系统、测量监视系统、燃气取样系统以及数据采集系统等组成。试验件为单头部矩形燃烧室。在火焰筒出口,采用 12 点 B 型铂铑 30-铂铑 6 热电偶,进行温度分布测量。采用 Testo360 燃气分析仪测量燃烧室 NO_x 排放量。

1) 副旋流器相对进气量的影响

图 11 和图 12 分别展示了试验获得和 CFD 计算得到的设计状态出口温度分布系数和 NO_x 排放量随副旋流器相对进气量变化的趋势(相对于基准方案)。随着副旋流器相对进气量的增加,试验件出口温度场明显变差,而 NO_x 排放量有所降低。

2) 副旋流器旋流数的影响

图 12 展示了副旋流器旋流数变化对设计状态 NO_x 排放量以及出口温度分布系数的影响。

当副旋流器旋流数偏离基准方案(增加或者减少)时,试验件出口温度场变差。分析认为副旋流器旋流强度的降低和增强,与主旋流器的流量和速度匹配变差,致使燃烧区域延长,燃烧室出口温度场出现局部高温区。

当副旋流器旋流数偏离基准方案时, NO_x 排

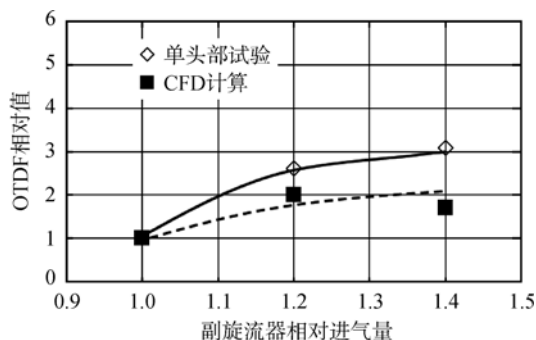


图 11 副旋流器相对进气量对出口温度分布系数的影响(CFD 计算和试验的比较)

Fig. 11 Effect of secondary swirler's relative flow rate on outlet temperature distribution coefficient (CFD vs. rig test)

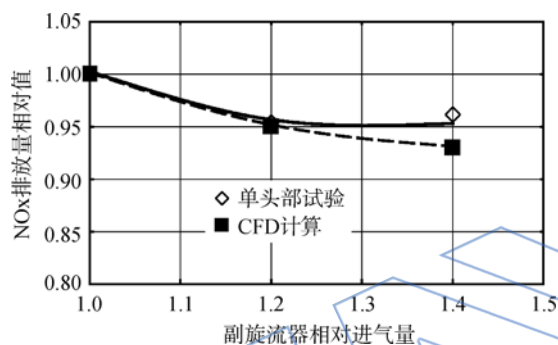


图 12 副旋流器相对进气量对 NOx 排放量的影响 (CFD 计算和试验的比较)

Fig. 12 Effect of secondary swirler's relative flow rate on NOx emission (CFD vs. rig test)

放量相对降低。

3.2 数值模拟结果与试验结果的对比

为了评估数值模拟的方法,将数值模拟的结果与试验的结果进行了对比,图 11~图 12 和图 13~图 14 分别给出了副旋流器相对进气量和副

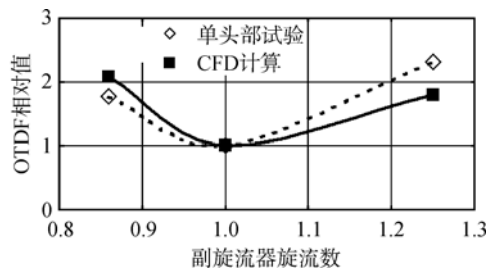


图 13 副旋流器旋流数对出口温度分布系数的影响 (CFD 计算和试验的比较)

Fig. 13 Effect of secondary swirler's swirl number on outlet temperature distribution factor (CFD vs. rig test)

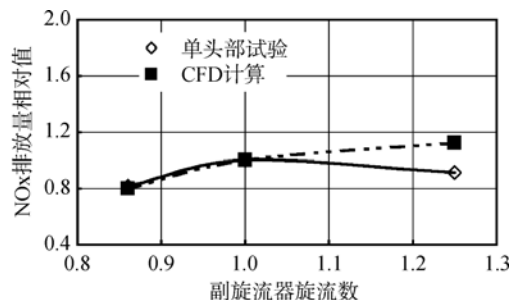


图 14 副旋流器旋流数对 NOx 排放量的影响 (CFD 计算和试验的比较)

Fig. 14 Effect of secondary swirler's swirl-number on NOx emission (CFD vs. rig test)

旋流器旋流数变化时出口温度分布系数和 NOx 排放量的 CFD 计算结果与试验数据的对比(均相对于基准方案),由图可以看出,其燃烧性能变化趋势与试验数据具有较好的一致性,本文所采用的数值模拟方法可以初步应用于航空发动机燃烧室性能计算及方案评估的工作中。

同时,也应该看到,燃烧室部件涉及到气体流动和掺混、燃料和空气射流、燃料雾化/蒸发、湍流燃烧、冒烟的生成/氧化以及对流和辐射换热等复杂的物理化学过程,实际上对其中任何一个环节的准确模拟都是一个难题.这样,后续需进一步增大 CFD 技术在燃烧室部件应用的深度和广度,增强该方法的工程可用性。

4 结 论

为掌握双级旋流器副旋流器的相对进气量和旋流数对燃烧室性能的影响,开展了数值模拟研究和单头部试验,评估了副旋流器关键参数变化对污染排放以及出口温度分布等性能参数的影响规律,并进行相关的分析,通过研究得到以下结论:

1) 副旋流器的相对进气量增加而旋流数不变时,随着副旋流器相对进气量的增加,主燃烧室出口温度场逐渐恶化,NOx 排放量略有降低。

2) 副旋流器旋流数改变而旋流器相对进气量不变时,副旋流器的旋流数偏离基准设计值时,出口温度场恶化,而 NOx 排放量随旋流数的增加而单调增加。

参考文献:

- [1] 林宇震,许全宏,刘高恩. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [2] 金如山. 航空燃气轮机燃烧室[M]. 北京:宇航出版社,1988.

- [3] 候晓春,季鹤鸣,刘庆国,等. 高性能航空燃气轮机燃烧技术[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [4] 方昌德. 世界航空发动机手册[M]. 北京:航空工业出版社,1996.
- [5] Gupta A K, Lilley D G, Syred N. Swirl flows[M]. Kent: Abaus Press,1984.
- [6] 林宇震,刘高恩,王华芳. 反向与同向双旋流器流场的试验研究[J]. 航空动力学报,1995,10(4):108-110.
LIN Yuzhen, LIU Gaoen, WANG Huafang. An investigation of air flow field produced by a double-swirler airblast atomizer[J]. Journal of Aerospace Power, 1995, 10(4): 108-110. (in Chinese)
- [7] Wang H Y, McDonell V G, Samuelsen G S. Influence of hardware design on the flow field structures and the patterns of droplet dispersion; Part I mean quantities[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1995, 117(2):282-289.
- [8] Ateshkadi A, McDonell V G, Samuelsen G S. Effect of mixer geometry on fuel spray distribution, emission and stability[R]. AIAA 98-0247, 1998.
- [9] Wang H Y, McDonell V G, Sowa W A, et al. Scaling of the two phase flow downstream of a gas turbine combustor swirl cup; Part I mean quantities[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993, 115(2):453-460.
- [10] Wang H Y, McDonell V G, Samuelsen G S. Correlation on droplet behavior with gas 2 phase structures in a gas turbine combustor[R]. AIAA 93-1767, 1993.
- [11] Woo S S, Yeoung M H, Dae S L. Flow and spray characteristics of a lean fuel injection module with radial swirlers[R]. ASME Paper 2000-GT2118, 2000.
- [12] Woodmansee M A, Ball I C, Barlow K W. Experimental flow field characterization of a combustor swirl cup[R]. AIAA-2002-2864, 2002.
- [13] Fluent Inc. FLUENT 6. 1 User's Guide[M]. New York: Fluent Inc, 2003.
- [14] Nickolaus D, Smith C E. CFD modeling of a gas turbine combustor from compressor exit to inlet[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 121(1): 89-95.
- [15] 程明,尚守堂,李锋. 主燃烧室全流动域三维数值计算和性能分析[R]. 沈阳:中国航空学会动力分会燃烧与传热传质学术会议, 2007.