

双级轴向旋流器性能评估方法(一) ——综合旋流强度的影响

闫东博¹, 张 群¹, 汪玉明¹, 徐华胜², 邓远灏²,
钟世林², 邢 力¹, 杨省喆¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;

2. 中国航空发动机集团有限公司 四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘 要: 开展了双级轴向旋流燃烧室反应流场和燃烧性能的理论及数值研究。发展建立了一种多级旋流器性能评估方法,提出了综合旋流强度和能量利用率两个准则数来对旋流器性能进行评估,研究发现,旋流强度和流阻系数是影响旋流器能量利用率的主要因素。采用数值方法研究了双级旋流之间的相互作用机理,结果表明:双级旋流器之间,一级旋流强度对回流区宽度影响较大;综合旋流强度是影响燃烧室整体性能的直接因素;当综合旋流强度小于0.43时,为弱旋流;综合旋流强度介于0.43~0.6之间时,为中等旋流,有十分弱小的回流区;当综合旋流强度大于0.6时,呈强旋流,一定会有回流区出现;当综合旋流强度大于1.03时,为非常强的旋流;综合旋流强度一定时,双级旋流能够增加收益,能量利用较好。通过与实验及数值结果比较发现,该多级旋流器性能评估方法能够对旋流器性能进行准确评估,为未来多级旋流器的设计与性能评估提供了一种实用有效的方法。

关 键 词: 燃烧室; 多级; 旋流器; 综合旋流强度; 能量利用率

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Performance evaluation methods of two-stage axial swirler: I influence of total swirling intensity

YAN Dongbo¹, ZHANG Qun¹, WANG Yuming¹, XU Huasheng²,
DENG Yuanhao², ZHONG Shilin², XING Li¹, YANG Xingzhe¹

(1. School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Sichuan Gas Turbine Establishment,

Aero Engine (Group) Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: Theoretical and numerical studies on the reaction flow field and combustion performance of two-stage axial swirler combustors were carried out. A performance evaluation method of multi-stage swirlers was developed. In addition, the total swirl intensity and energy utilization efficiency were put forward to evaluate the swirler performance. It was found that the total swirl intensity and flow resistance coefficient were the main influential factors to the swirler energy utilization efficiency. The interaction between the two stage swirlers was investigated numerically. And the results indicate that the inner swirl intensity

收稿日期: 2015-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(51676166); 航天科技创新基金(CASC150708)

作者简介: 闫东博(1991—),男,硕士生,主要从事航空发动机燃烧与流动方向相关研究。

引用格式: 闫东博,张群,汪玉明,等. 双级轴向旋流器性能评估方法(一)——综合旋流强度的影响[J]. 航空动力学报,2017,32(7): 1592-1598. YAN Dongbo, ZHANG Qun, WANG Yuming, et al. Performance evaluation methods of two-stage axial swirler: I influence of total swirling intensity[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(7): 1592-1598.

has a greater impact on the width of central toroidal recirculation zone (CTRZ). The total swirl intensity plays a most important effect on combustor overall performance. When the total swirl intensity is less than 0.43, weak swirling flows will be produced; when the total swirl intensity is between 0.43 and 0.6, medium strength swirling flows will be produced and weak CTRZs are presented; when the total swirl intensity is more than 0.6, strong swirling flows will be produced and moderate CTRZs are presented at the same time; when the total swirl intensity is more than 1.03, very strong swirling flows will be generated. If the total swirl intensity is constant, a two-stage axial swirler will get better energy utilization efficiency than a single stage axial swirler. The results by the evaluation method are compared with the experimental and numerical results. It's found that the evaluation method for multi-stage axial swirler performance can accurately evaluate the performance of swirlers, providing a practical and effective method for the design of multi-stage swirlers in the future.

Key words: combustor; multi-stage; swirler; total swirling intensity; energy utilization efficiency

旋流器的设计参数是影响燃烧室流动燃烧特性的重要因素^[1-2]。目前先进航空发动机燃烧室火焰筒头部大多采用了双旋流组合方案,其中双级旋流器、文氏管、套筒与离心喷嘴组合的空气雾化旋流杯装置的设计由于其具有良好的雾化和综合燃烧性能,在燃烧室设计中得到了广泛应用^[3-9]。

在双旋流装置研究方面,Fu 等^[10]研究了限制域对旋流杯下游流场的影响。Ateshkadi 等^[11]和 Mongia 等^[12]采用平面激光液体诱导荧光技术研究了旋流器叶片角对喷雾场的影响及旋流杯有无文氏管的下游喷雾场。Mcdonell 等^[13],Wang 等^[14]以 CFM56 旋流杯为模型,系统测量了冷态喷雾场的时均流场。Archer 等^[15]采用 PIV (particle image velocimetry) 测量了双轴向旋流器下游冷态及燃烧三维流场。目前由于双旋流装置结构较复杂,内部流场高度各向异性,影响因素很多,归纳总结难度较大。

为了深入理解燃烧室头部三维两相流场结构,发展评估双级旋流器性能的有效方法,这里针对双轴向旋流器开展了对火焰筒流场和燃烧性能的数值研究,对于相关影响因素进行整理,总结了综合旋流强度准则数。

1 理论公式与旋流器气动参数建立

旋流数 (swirl number, 量符号记为 S_n) 是表征旋流流动的最重要参数^[2], 一般用切向动量矩和轴向动量之比来表示。目前对其简化定义为

$$S_n = \frac{2(1 - Z^3)\tan\theta}{3(1 - Z^2)} \tag{1}$$

式中 Z 是旋流器轮毂比, θ 为几何叶片角。

目前,式(1)对于旋流器单级分析较为常用,但仅求得某一级的旋流强度不足以对各不同燃烧室进行相互比较和分析。因此,这里引入燃烧室综合旋流强度 S_n^* (总旋流数)的概念。对于多级旋流器 S_n^* 采用 Beer 与 Chigier 的定义^[16]进行推导,按照切向和轴向动量来计算,再进行动量矩加权平均,即得

$$S_n^* = \frac{S_{n1}A_1V_1R_1 + \sum_{i=2}^n (-1)^k S_{ni}A_iV_iR_i}{\sum_{i=1}^n A_iV_iR_i} \tag{2}$$

式中 S_{ni} 为第 i 级旋流数, A_i 为第 i 级进气面积, V_i 为第 i 级平均速度, R_i 为第 i 级有效半径,若该级与第 1 级旋向相同, k 为 0, 否则为 1, 见图 1。

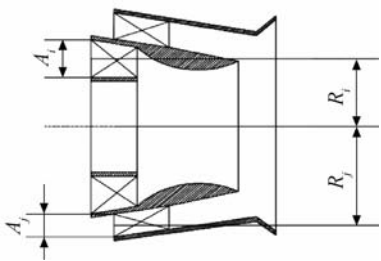


图 1 旋流器示意图
Fig. 1 Schematic diagram of swirler

此外,这里也发展了一个旋流器能量利用率参量来对旋流器性能进行评价,其定义为

$$\eta = \frac{1 + S_n^*}{\xi} \tag{3}$$

式中 ξ 为旋流器阻力系数。可以看出,在旋流器

阻力系数一定的情况下, S_n^* 数越大, 表明该旋流器组件在一定压力损失条件下形成的综合旋流强度也越大, 其能量利用效率也越高。

2 计算模型及网格划分

2.1 几何模型

图 2 为环形燃烧室单头部几何模型示意图。燃烧室模型包括扩压器、帽罩、双级轴向旋流器、头部冷却孔和挡板、火焰筒壁板、机匣等。由于考虑到主燃孔等有截断回流区的作用, 故研究中舍去了主燃孔和掺混孔等结构。

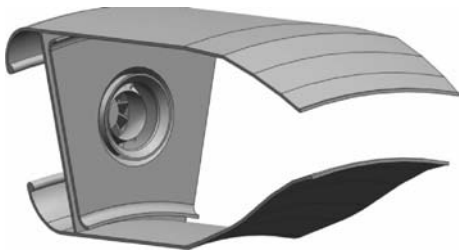


图 2 燃烧室几何结构

Fig. 2 Combustor geometry structure

2.2 网格划分和边界条件设置

燃烧室流场计算采用多面体网格, 如图 3 所示。计算中采用 realizable $k-\epsilon$ 双方程模型, 压力速度耦合采用 SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations)算法, 动量方程离散采用 2 阶格式, 其他方程离散采用 Quick 格式, 近壁面处理采用标准壁面函数。计算工况为最大工况, 进口总压为 2.88MPa, 总温为 800K, 进口质



图 3 计算模型网格

Fig. 3 Computational model grid

量流量为 5.05kg/s, 燃油质量流量为 0.162kg/s, 采用空心锥形喷嘴。

对该几何体划分 500 万、800 万、1100 万、1300 万和 1600 万密度的网格, 在同一参数设置下进行数值计算, 所得回流区边界如图 4 所示, 图中 N 表示网格数, V_x 表示 x 方向气流进度, 由图可知 1300 万网格与 1600 万网格计算所得的回流区边界基本相似, 即当网格数大于等于 1300 万时, 计算结果已与网格数目无关, 为了节省计算成本, 本文计算均按照 1300 万网格密度来划分网格。

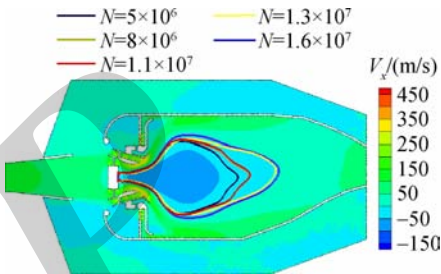


图 4 网格无关性验证(回流区边界比较)

Fig. 4 Grid independency verification (comparison of recirculation zone)

3 计算结果分析

3.1 综合旋流强度 S_n^* 不变时, 双级旋流数对燃烧室流动特性的影响

为了更清楚了解双级旋流器之间的相互作用, 这里给出了总旋流数相同, 不同的双级旋流数组合的工况, 如表 1 所示。

表 1 不同工况对比

Table 1 Comparison of different working conditions

工况	S_n^*	S_{n1}	S_{n2}
1	0.713	0.472	0.893
2	0.713	0.817	0.636

计算结果如表 2 所示。

从表 2 可见, 两种工况下燃烧室的出口总温、回流区尺度、出口 CO_2 质量分数、燃烧效率、回流

表 2 计算结果对比

Table 2 Comparison of computational results

工况	总温/K	无量纲 回流区长度	无量纲 回流区宽度	CO_2 质量分数	燃烧 效率	回流比	出口温度 分布系数
1	1838.17	2.19	1.50	0.0982	0.9977	0.199	0.132
2	1838.24	2.08	1.59	0.0982	0.9977	0.215	0.123

比、出口温度分布系数(OTDF)等性能参量都是十分近似的。由此可见,在综合旋流强度 S_n^* 一定时,不同的双级旋流数组合,对上述性能参数影响并不大,因而,综合旋流强度是影响这些性能参量的直接因素。由表 2 也可以看出,工况 2 比工况 1 获得的无量纲回流区宽度要宽,涡心截面处的回流比要大一些;但工况 1 要比工况 2 的回流区稍长。实际上,两者的总回流量差别很小,最终决定总回流强度的因素仍然是综合旋流强度。综上,当综合旋流强度一定时,双级旋流数不同组合对燃烧室整体性能影响不大,综合旋流强度是其直接影响因素。所以,对综合旋流强度开展研究是很有必要的。

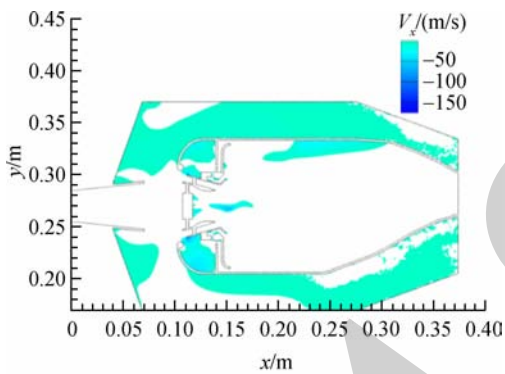
3.2 综合旋流强度 S_n^* 对回流区的影响

现着重研究不同 S_n^* 下燃烧室流场变化,探究对于双级轴向旋流器,回流区产生条件。这里给出了几种不同的 S_n^* 工况,如表 3 所示。

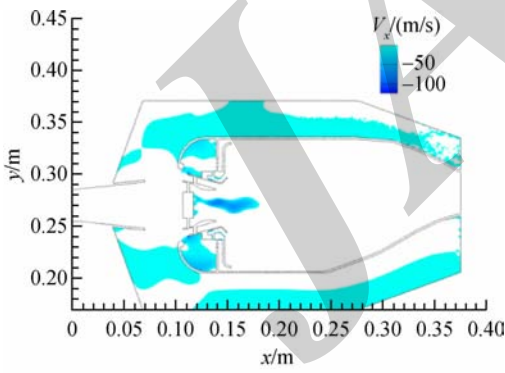
计算获得的速度分布云图如图 5 所示,图中 x,y 表示横、纵坐标。

表 3 不同工况的 S_n^*
Table 3 S_n^* for different working conditions

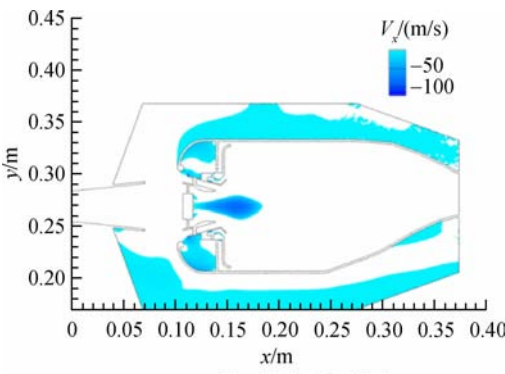
工况	S_n^*	工况	S_n^*
1	0.313	4	0.6
2	0.4	5	1.49
3	0.43		



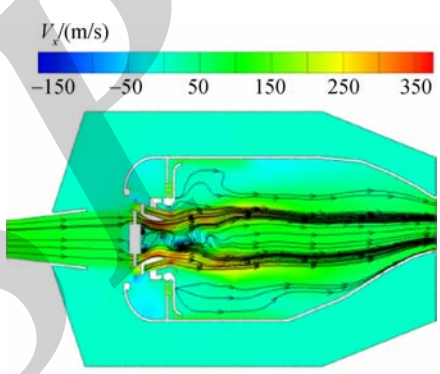
(a) 工况1,回流区显示图



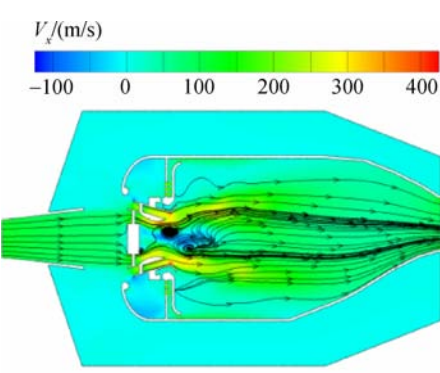
(c) 工况2,回流区显示图



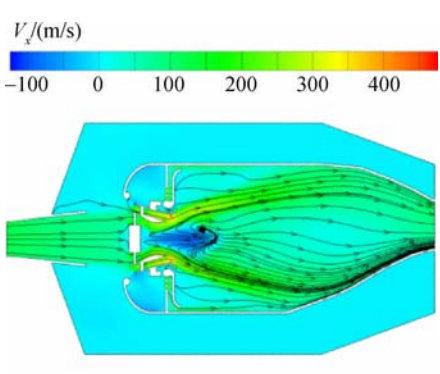
(e) 工况3,回流区显示图



(b) 工况1, z=0 m截面速度流线图



(d) 工况2, z=0 m截面速度流线图



(f) 工况3, z=0 m截面速度流线图

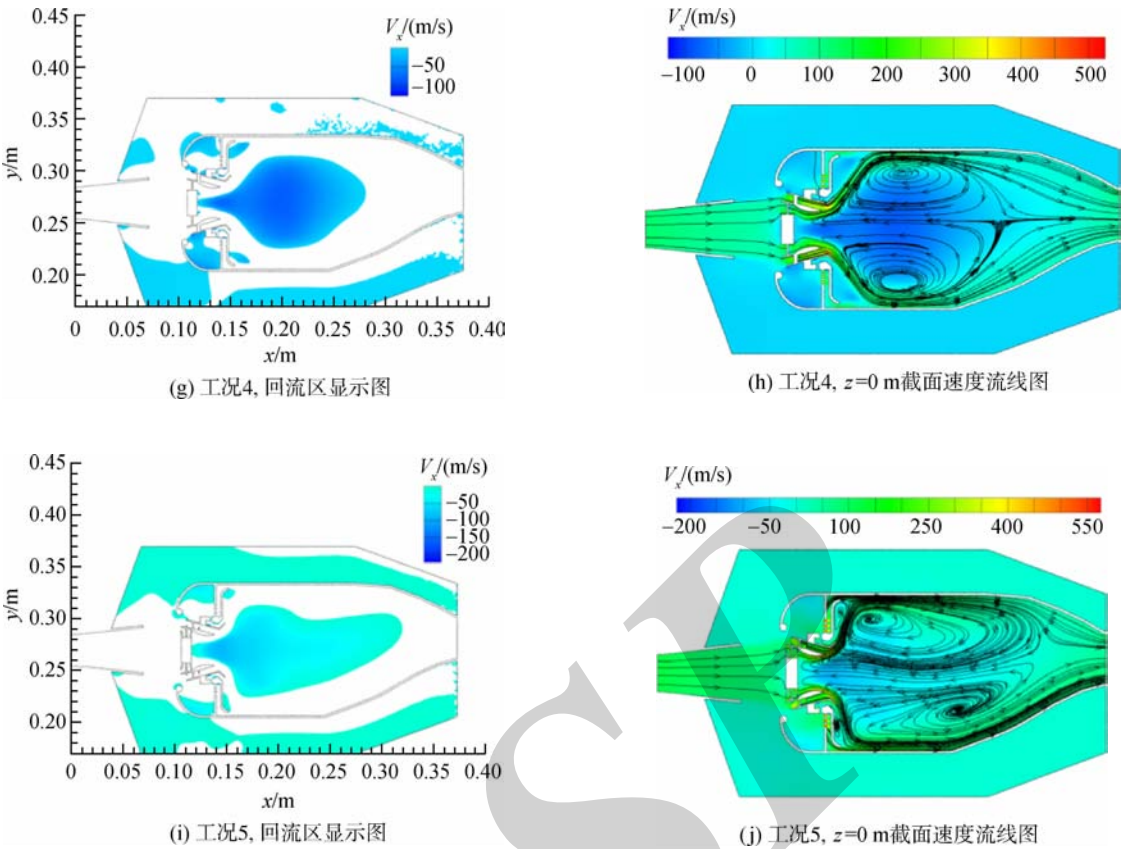


图 5 速度云图对比
Fig. 5 Comparison of velocity contours

由图 5 中的 5 组工况对比图可以看出,当总旋流数 S_n^* 为 0.313 时,回流区形态狭小,几乎可以忽略不计;直到当总旋流数达到 0.43 时,回流区形态才逐渐显现,流线逐渐扩张;当总旋流数达到 0.6 时,燃烧室流场内呈现出明显较大的,形态良好的回流区,且流线呈规则的双涡结构,火焰稳定性较好。由图 5(i)和图 5(j)可以看出,当总旋流数达到 1.49 时,由于旋流强度增大,流线扩张角变大,使回流区整体尺寸变大,但由于火焰筒高度的限制作用,使扩张的高速气流碰壁并反弹,造成对回流区的挤压,使回流区变形,形成不规则,不对称的双涡结构,这增加了流场中的湍动能,加强了油气掺混。经过大量模拟验证,当总旋流数小于 1.03 时,这种变形作用才减弱。综上所述,

当总旋流数 $S_n^* < 0.43$ 时,为弱旋流,基本不会出现回流区;当总旋流数 $0.43 < S_n^* < 0.6$ 时,为中等旋流,流线扩张,不再呈射流状,会出现十分弱小的回流区;当 $S_n^* > 0.6$ 时,呈强旋流,一定会有回流区出现;当 $S_n^* > 1.03$ 时,为非常强的旋流,形成不规则的双涡结构。

3.3 相同旋流强度下,单级与双级旋流器流场对比

对于不同级数的旋流器,为研究总旋流强度相同的情况下其流场是否存在差别,这里分别对综合旋流强度均为 0.861 的单级与双级旋流器进行数值计算,计算结果如表 4 所示。

两组工况流场计算结果对比云图如图 6 所示。

表 4 单级与双级旋流器性能比较								
Table 4 Performance comparison between single-stage and two-stage swirlers								
旋流器 类型	燃烧室出口 温度/K	无量纲 回流区长度	无量纲 回流区宽度	CO ₂ 质量分数	燃烧 效率	回流比	出口温度 分布系数	能量利 用效率
单级	1835.37	2.11	1.54	0.09332	0.9987	0.209	0.119	0.71
双级	1835.34	2.09	1.55	0.09332	0.9987	0.212	0.112	0.82

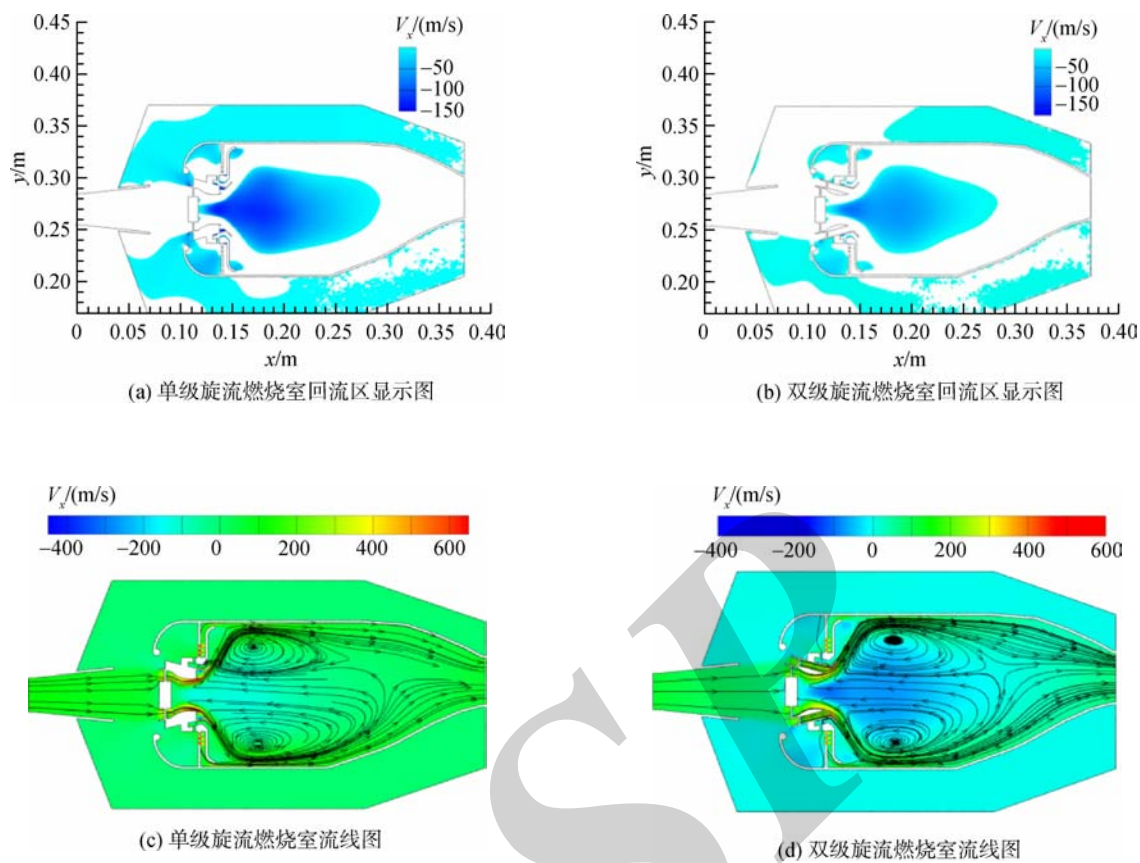


图 6 计算结果对比图

Fig. 6 Comparison diagram of computational results

由表 4 可以看出,在综合旋流强度相同的情况下,单级与双级旋流燃烧室的相关性能参数除了能量利用效率外,均差别不大,这说明综合旋流强度是影响燃烧室出口 CO_2 排放,温度分布,燃烧效率以及回流区总体尺寸和回流比等性能参数的主要因素。而单级的能量利用效率明显小于双级的能量利用效率,这是由于在旋流数相同的情况下,双级的进气面积要大于单级旋流器进气面积,在相同的进口质量流量下,在不考虑可压缩性时,单级旋流器出口的速度增加量要大于双级旋流器的,根据开口系一般瞬态能量方程,这个速度增就体现在了压力降上,所以就显现出了单级旋流器的压力损失要大于双级旋流器的,也即其能量利用效率低。同时,从图 6(a)和图 6(b)可以看出,虽然两者产生的回流区总体尺度差别不大,但双级旋流器产生的流场下游明显要窄一些,这是由于第 2 级旋流在起作用,由于第 2 级产生的旋流距离出口的火焰筒壁面较近,即其相对于单级旋流器的相对限制域高度要低一些,气流在火焰筒壁面产生强烈的碰壁效应,碰壁后的气流对回流区下游的气流进行挤压,出现了图 6(a)的现象,根据图 6(c)和图 6(d)的流线图,可以更清晰

地看到双级旋流器出口气流转角更大,碰壁效应明显。这也造成了双级旋流器产生的回流区上游的宽度略宽于单级旋流器的。分析可知,如果考虑主燃孔等因素,回流区下游并不是研究者重点关注的,而双级旋流器产生的气流挤压作用有助于主燃孔气流截断回流区,从能量利用上来说,这是在增加收益焓。

4 结 论

通过对于双级轴向旋流器开展火焰筒流场和燃烧性能的理论及数值研究,获得了以下研究结论:

- 1) 理论推导和总结了新的多级旋流器设计准则数,即综合旋流强度,获得了评估双级旋流器性能的有效方法,并证明了其准确性和实用性。
- 2) 综合旋流强度一定时,双级旋流数不同组合对燃烧室整体性能影响不大,综合旋流强度 S_n^* 是其直接影响因素。当 $S_n^* < 0.43$ 时,为弱旋流,基本不会出现回流区;当 $0.43 < S_n^* < 0.6$ 时,为中等旋流,会出现十分弱小的回流区;当 $S_n^* > 0.6$ 时,为强旋流,一定会有回流区出现;当 $S_n^* > 1.03$ 时,为非常强的旋流,形成不规则的双涡结构。

3) 综合旋流强度相同时,单级与双级旋流燃烧室的燃烧室出口 CO_2 排放,温度分布,燃烧效率以及回流区总体尺寸和回流比等性能参数差别不大,但单级旋流器的能量利用率低于双级旋流器。

参考文献:

[1] 严传俊,范玮. 燃烧学[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2008.

[2] 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.

[3] MEHTA J M. Mean velocity and turbulent flow-field characteristics inside an advanced combustor swirl cup[R]. AIAA 89-0215,1989.

[4] MONGIA H C,AL-ROUB M,DANIS A. Swirl cup modeling;Part I [R]. AIAA-2001-3576,2001.

[5] GIRIDHARAN M C,MONGIA H C,JENG S M. Swirl cup modeling;Part VIII spray combustion in CFM-56 single cup flame tube[R]. AIAA-2003-0319,2003.

[6] JENG S M,FLOHRE N M. Air temperature effects on non-reacting spray characteristics issued from a counter-rotating swirler[R]. AIAA-2005-355,2005.

[7] EL-KADY A M,JENG S M,MONGIA H C. The influence of primary air jets on flow and pollutant emissions characteristics within a model gas turbine combustor[R]. AIAA-2006-544,2006.

[8] LIU Y,HAYASHI S. Experimental and numerical investigations on flow characteristics in a double-swirler combustor[R]. AIAA 97-0708,1997.

[9] LINCK M,GUPTA A K. Effect of swirl and combustion on flow dynamics in luminous kerosene sprayflames[R]. AIAA-2003-1345,2003.

[10] FU Y,CAI J,JENG S M,et al. Confinement effects on the swirling flow of a counter-rotating swirl cup[R]. ASME Paper GT2005-469,2005.

[11] ATESHKADI A,MCDONELL V G,SAMUELSEN G S. Effect of mixer geometry on fuel spray distribution,emission and stability[R]. Reno,NV:The 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings,1998.

[12] MONGIA H C,GORE J P,GRINSTEIN F F,et al. Combustion research needs for helping development of next generation advanced combustors[R]. Salt Lake City,US: The 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Joint Propulsion Conferences,2001.

[13] MCDONELL V G,SAMUELSEN G. Assessing the physics of spray behavior in complex combustion systems[R]. Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics,1996.

[14] WANG H,MCDONELL V G,SOWS W A,et al. Experimental study of a model gas turbine combustor swirl cup: Part II droplet dynamics[J]. Journal of Propulsion and Power,1994,10(4):446-452.

[15] ARCHER S,GUPTA A K. The role of confinement on flow dynamics under fuel lean combustion conditions[R]. AIAA-2004-5617,2004.

[16] BEER J M,CHIGIER N A. Combustion aerodynamics [M]. London:Applied Science Publishers Limited,1972.

(编辑:王碧琚)