

文章编号:1000-8055(2012)08-1681-07

双环预混旋流与单、双环腔燃烧室性能对比

李 锋¹, 程 明^{1,2}, 尚守堂^{1,2}, 刘殿春², 张珊珊¹, 宋 博¹

(1. 北京航空航天大学 能源动力学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计所 燃烧设计室, 沈阳 110015)

摘 要: 将中心分级的双环预混旋流(TAPS)燃烧室、单环腔燃烧室(SAC)及双环腔燃烧室(DAC)采用相同的扩压器尺寸、外机匣最大直径以及燃烧室出口尺寸,采用相同的数理模型,对 TAPS 燃烧室、SAC、DAC 进行三维数值模拟。对比研究了 TAPS 燃烧室、SAC、DAC 的总压恢复系数、燃烧效率、燃烧室出口温度分布系数、污染排放等性能参数。研究表明:采用 TAPS 燃烧室,可获得比 SAC 和 DAC 更高的总压恢复系数及燃烧效率;比 SAC 和 DAC 更低的燃烧室出口温度分布系数及 NO_x 等污染的排放,尤其是设计工况下出口 NO_x 排放。从研究结果来看中心分级的 TAPS 燃烧室的技术优势十分明显,是一种很有发展前景的高温升、低污染燃烧室。

关 键 词: 双环预混旋流燃烧室; 单环腔燃烧室; 双环腔燃烧室; 中心分级燃烧室; 燃烧室设计

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Capability compare of twin annular premixing swirler with the single annular and dual annular combustor

LI Feng¹, CHENG Ming^{1,2}, SHANG Shou-tang^{1,2}, LIU Dian-chun²,
ZHANG Shan-shan¹, SONG Bo¹

(1. School of Jet Propulsion,

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

2. Combustion Design Office, Shenyang Aeroengine Design and Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: Diffuser, outer case and exit dimension kept the same with single annular combustor (SAC) and dual annular combustor (DAC), redesigned the combustor from a single annular structure into twin annular premixing swirler (TAPS) combustor in central classified. Taking the same physical models (including the turbulence, radiation, spray and emission model), three-dimensional reaction flow simulation in TAPS combustor, SAC and DAC were developed in the fluent code. The total-pressure recovery coefficient, combustion efficiency, temperature distribution of the combustor exit and NO_x/CO emission profiles were calculated. Finally, the capability of TAPS combustor, SAC and DAC were compared. The results show that, by using the TAPS combustor, the total-pressure recovery coefficient, combustion efficiency was improved compared with the SAC and DAC, the temperature distribution coefficient of the combustor exit and NO_x emission is lower than SAC and DAC. So the conclusion could be drawn that the technical advantages of TAPS

收稿日期: 2011-09-29

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120830.1200.201208.1681_001.html

基金项目: 航空重点基金(2010ZB06)

作者简介: 李锋(1966—),男,湖南资兴人,教授、博士生导师,博士后,主要从事燃烧、流动控制及隐身方面的研究。

combustor is obvious, and the TAPS combustor is a good high temperature rise and low emission combustor.

Key words: twin annular premixing swirler (TAPS); single annular combustor (SAC); dual annular combustor (DAC); central classified combustor; combustor-design

通用公司(GE)的低污染燃烧室的研究结果表明,采用中心分级的双环预混旋流(twin annular premixing swirler,简称 TAPS)燃烧室能够改善火焰筒内部流场,提高燃烧室性能和燃烧效率,降低燃烧室的污染排放^[1-2]. 相对于单环腔燃烧室(single annular combustor,简称 SAC)和双环腔燃烧室(dual annular combustor,简称 DAC),采用中心分级的双环预混旋流燃烧室,NO_x 排放相对于富油头部 SAC 和贫油头部 DAC 分别有 46%和 22%的下降,未燃碳氢排放和富油头部 SAC 相当,CO 排放低于 DAC 但是明显高于富油头部 SAC^[3-5]. 此外 Mongia H C 等提出的改进型 TAPS 燃烧室显示在 TAPS 燃烧室基准型号基础上再分别降低 NO_x 排放 50%和 75%的能力^[6-8]. 应用了 TAPS 技术的 GEnx 发动机也已经装备于波音 787 飞机,并于 2010 年 5 月 18 日完成初始启动测试. 应用改进型 TAPS-II 燃烧室的 LEAP-X 发动机已经成为我国大飞机 C919 的首选动力^[9].

采用 DAC 可以获得比 SAC 更低的 NO_x 和 CO 排放^[10-11],但其慢车状态的出口温度分布不如 SAC,且结构较复杂,推广应用到高温升、大推质比发动机,实现发动机的系列化设计有一定的困难. 为此,本文将原来的单环腔燃烧室(SAC)结构重新设计为中心分级的双环预混旋流燃烧室,并与采用相同的数理模型,具有相同主燃烧室的扩压器尺寸、外机匣最大直径尺寸以及燃烧室出口尺寸的 SAC 及 DAC 性能进行对比,对比研究 TAPS 燃烧室, SAC, DAC 的性能差异^[12-14].

1 数理模的建立

1.1 物理模型的建立

TAPS 燃烧室设计为三级旋流的空气流量分配,典型 TAPS 结构如图 1 所示. 参考目前燃烧室火焰筒及涡轮冷却水平. 燃烧室流量分配方案如下:按总进气量的 13%用作涡轮冷却,20%用作火焰筒冷却,10%用作头部冷却. 余下 57%的气流为 TAPS 三级旋流流量. 燃烧室头部流量分

配方案如表 1 所示. 采用 Fluent 软件中的 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型、DDM(discrete drop model)喷雾模型、PDF(probability density function)燃烧模型、DO(discrete ordinates)辐射模型、热力模型 NO_x 排放模型进行计算,文献[11]将该模型的单环腔燃烧室数值模拟结果与实验结果进行了对比研究,验证了其计算结果的可信度. 为此,本文采用了与其相同的数理模型对不同结构的燃烧室性能进行对比,以研究在相同的数理模型下,采用何种燃烧室结构较好,为我国大飞机 C 919 的发动机燃烧室的选用提供参考意见.

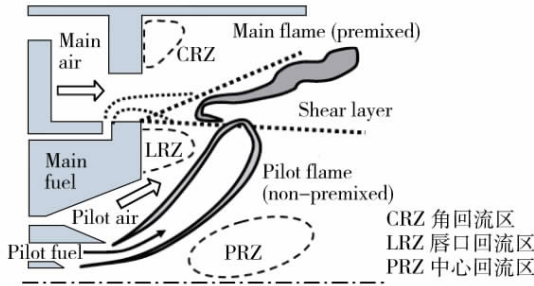


图 1 典型 TAPS 燃烧室头部结构

Fig. 1 Classical TAPS combustor structure

表 1 TAPS 燃烧室头部流量分配方案

Table 1 Flow distribution of TAPS combustor

	值班级 旋流器 1	值班级 旋流器 2	主燃级 旋流器
比例	0.042	0.058	0.47

1.2 网格划分和边界条件

1.2.1 计算域和网格划分

本文中 TAPS 燃烧室, SAC, DAC 结构及计算域如图 2~图 4 所示.

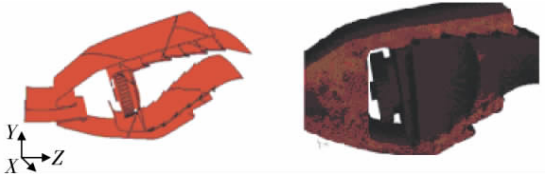


图 2 TAPS 燃烧室结构及网格

Fig. 2 TAPS combustor structure and grid

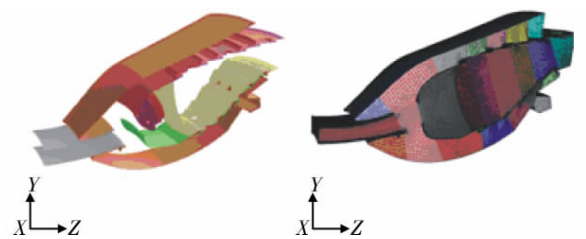


图 3 SAC 结构及网格
Fig. 3 SAC structure and grid

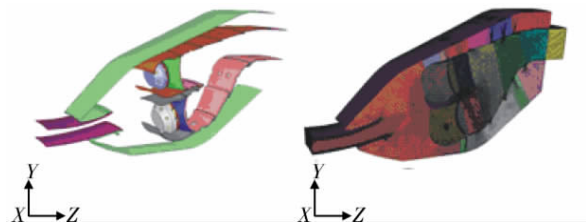


图 4 DAC 结构及网格
Fig. 4 DAC structure and grid

计算中 TAPS 燃烧室设计为 20 个头部,分成 91 个体积,总网格数目为 240 万;SAC 设计为 20 个头部,分成 64 个体积,总网格数目为 166 万;DAC 设计为 30 个头部,分成 87 个体积,总网格数目为 173 万。

1.2.2 边界条件

为了对比方便,在进行边界条件设置时,TAPS 燃烧室,SAC,DAC 采用相同的进、出口边界条件,其边界条件的设置如表 2 及表 3 所示。

表 2 进口边界条件
Table 2 Inlet boundary

	流量/ (kg/s)	温度/ K	湍流 强度/%	湍流 黏度比/%
TAPS 燃烧室	3.125	862	10	10
SAC	3.125	862	10	10
DAC	2.083	862	10	10

表 3 出口边界条件
Table 3 Outlet boundary

	外环腔/ (kg/s)	火焰筒/ (kg/s)	内环腔 1/ (kg/s)	内环腔 2/ (kg/s)
TAPS 燃烧室	0.156	2.732	0.094	0.14
SAC	0.156	2.732	0.094	0.14
DAC	0.104	1.821	0.156	

流体域的侧壁设置为旋转周期边界条件,参考压力点设置在扩压器入口。

2 3 种燃烧室的燃烧室性能对比

2.1 总压恢复系数

设计点 3 种燃烧室的总压恢复系数计算结果如表 4 及图 5 所示。

表 4 3 种燃烧室设计点总压恢复系数
Table 4 Total-pressure recovery coefficient
of design state

	外环 出口	火焰筒 出口	内环 出口 1	内环 出口 2
TAPS 燃烧室	0.984	0.956	0.983	0.983
SAC	0.985	0.928	0.982	0.983
DAC	0.979	0.949	0.982	0.982

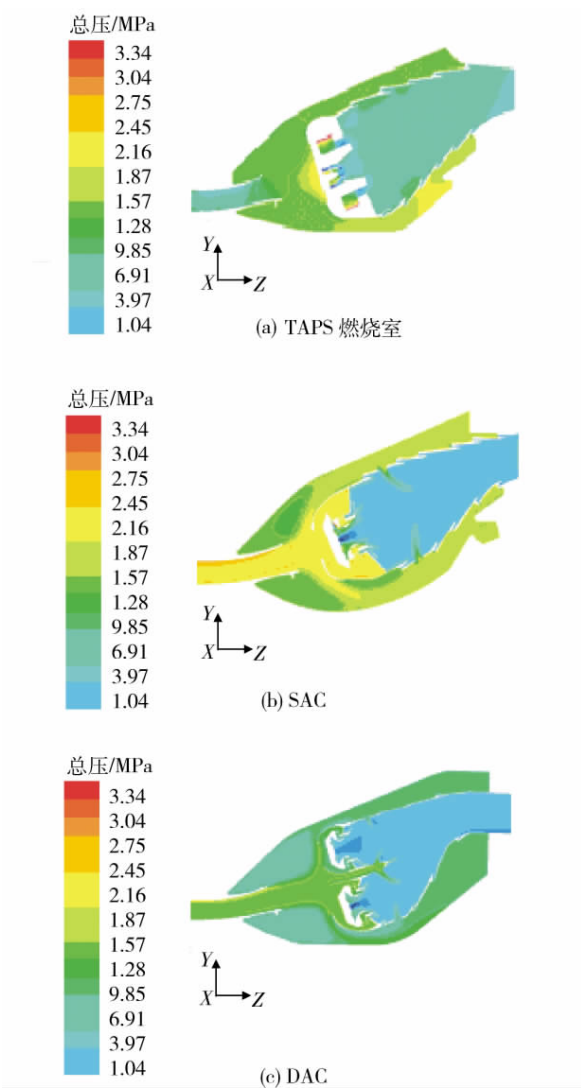


图 5 设计点 3 种燃烧室的总压分布

Fig. 5 Total pressure distribution of design state

从表 4 可以发现:在内、外两股通道出口, TAPS 燃烧室的总压恢复系数略高于 SAC 及 DAC;但火焰筒出口, TAPS 燃烧室的总压恢复系数却明显高于 SAC, DAC, 这可从图 5 的总压分布图中得到进一步的验证, 采用 TAPS 燃烧室, 其沿程的总压分布较均匀, 而 SAC 及 DAC 有明显的高低压区, 因此沿程的总压损失较大. 这表明采用 TAPS 燃烧室具有比 SAC, DAC 更低的沿程总压损失.

2.2 燃烧效率

以航空煤油为燃料, 3 种燃烧室的火焰筒内燃烧效率分布如表 5 及图 6 所示.

表 5 3 种燃烧室设计点燃烧效率

Table 5 Combustion efficiency of design state

	燃烧效率	
	设计工况	慢车工况
TAPS 燃烧室	0.986	986
SAC	0.995	
DAC	0.989	

从表 5 及图 6 中可以发现, TAPS 燃烧室在设计工况下的燃烧效率介于 SAC 和 DAC 之间, 在低工况下也保持了很高的燃烧效率水平.

2.3 沿流程截面温度分布

燃烧室沿流程截面温度分布如图 7 所示.

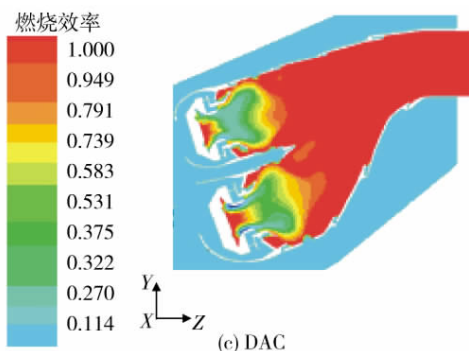
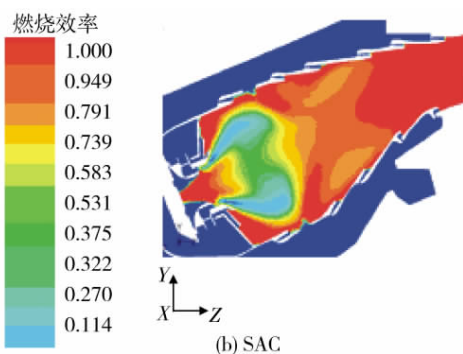
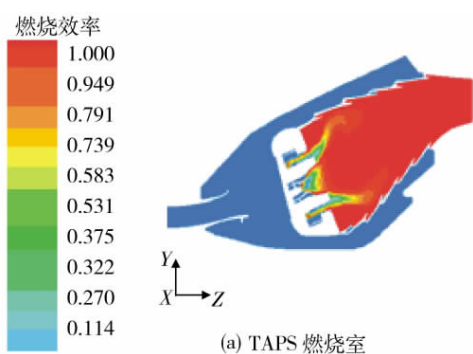


图 6 3 种燃烧室设计状态火焰筒内燃烧效率分布

Fig. 6 Combustion efficiency of design state

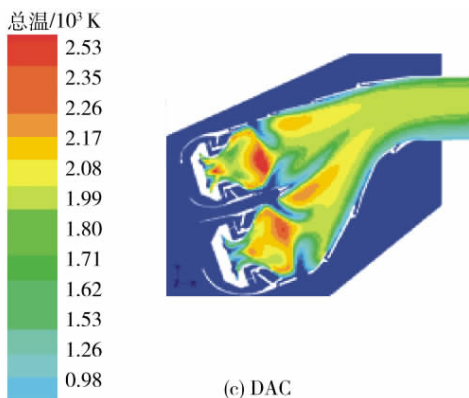
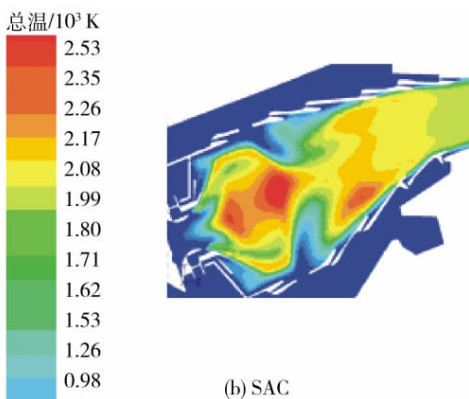
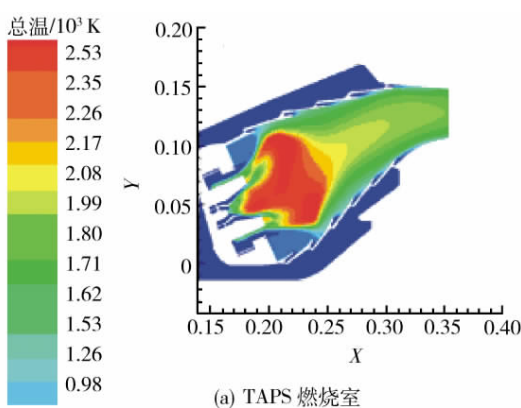


图 7 3 种燃烧室沿流程截面总温分布

Fig. 7 Total temperature distribution

从图 7 中的 3 种燃烧室喷嘴截面的总温分布云图中可以发现:在喷嘴截面上,TAPS 燃烧室的高温区的范围较 SAC 和 DAC 都大,但是沿流程截面来看,TAPS 燃烧室主燃区中的高温区的缩小很快,这说明 TAPS 燃烧室在设计工况下的火焰长度很短,同时 TAPS 燃烧室的峰值温度略低于 SAC 和 DAC,故 TAPS 燃烧室 NO_x 排放应比 SAC 和 DAC 的低。

2.4 燃烧室出口温度分布

2.4.1 燃烧室出口温度分布系数(OTDF)

TAPS 燃烧室出口温度分布如图 8 所示,3 种燃烧室的出口温度分布系数 OTDF(out temperature distribution function)对比如表 6 所示。

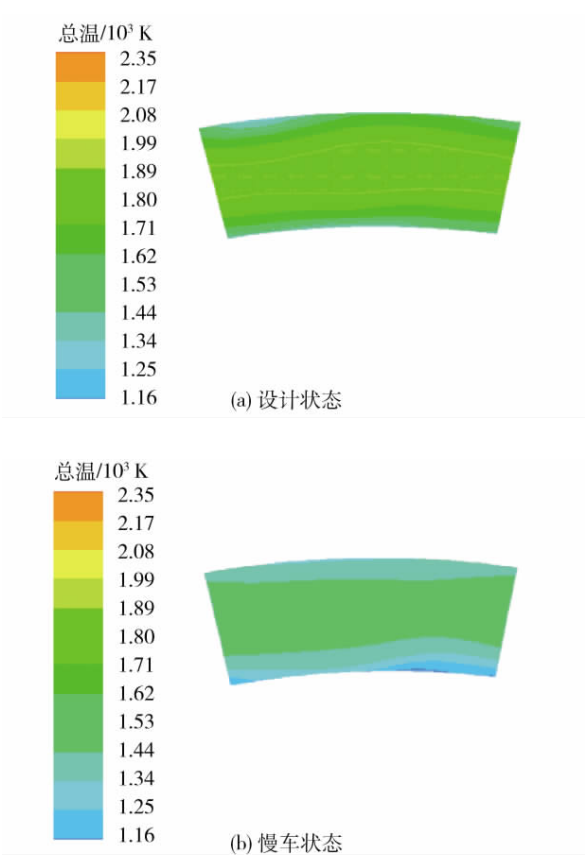


图 8 TAPS 燃烧室出口温度分布
Fig. 8 Temperature distribution of TAPS combustor

表 6 3 种燃烧室出口温度分布系数 Table 6 OTDF of three combustors		
	设计状态	慢车状态
TAPS 燃烧室	0.134	0.133
SAC	0.262	
DAC	0.157	0.251

从表 6 及图 8 中可以发现,TAPS 燃烧室无论是在设计工况或是在慢车工况,燃烧室出口温度分布系数均小于其他方案。

2.4.2 燃烧室出口径向温度分布系数(RTDF)

TAPS 燃烧室出口径向温度分布系数 RTDF(radial temperature distribution function)如图 9 所示,3 种燃烧室的出口径向温度分布系数比较如表 7 所示。

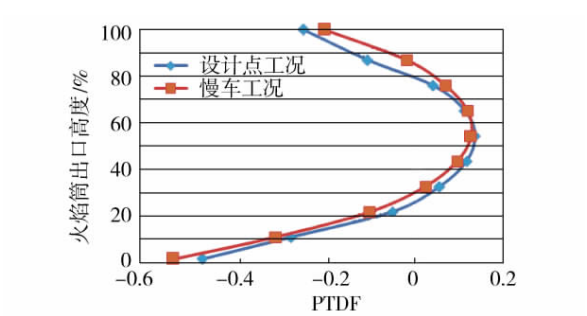


图 9 TAPS 燃烧室出口径向温度分布系数 RTDF
Fig. 9 RTDF distribution of TAPS combustor

表 7 3 种燃烧室出口径向温度分布系数 Table 7 RTDF of three combustors		
	设计点状态	慢车状态
TAPS 燃烧室	0.116	0.112
SAC	0.156	
DAC	0.118	0.154

从表 7 及图 9 中数据中可以发现:TAPS 燃烧室出口径向温度分布系数比 SAC,DAC 低,出口温度分布更均匀,TAPS 燃烧室具有更佳的出口温度分布品质。

2.5 污染排放

2.5.1 CO 排放

慢车状态时 TAPS 燃烧室,SAC,DAC 出口 CO 排放如表 8 及图 10 所示。

表 8 3 种燃烧室慢车出口 CO 排放 Table 8 CO emission of slow train state	
	CO/(g/kg)
TAPS 燃烧室	34.03
SAC	22.77
DAC	8.49

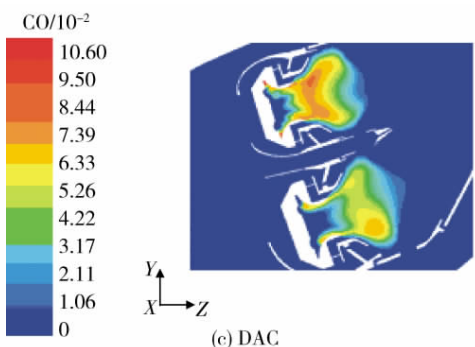
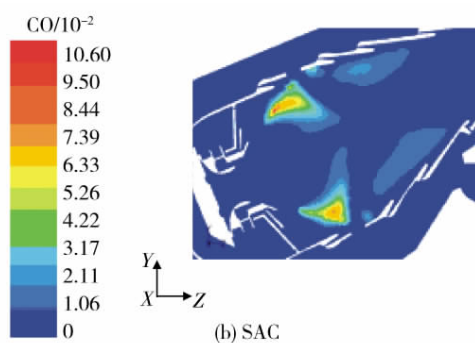
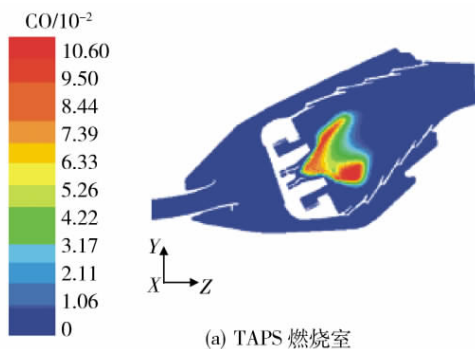


图 10 3 种燃烧室慢车状态时的 CO 质量分数分布

Fig. 10 CO distribution of slow train state

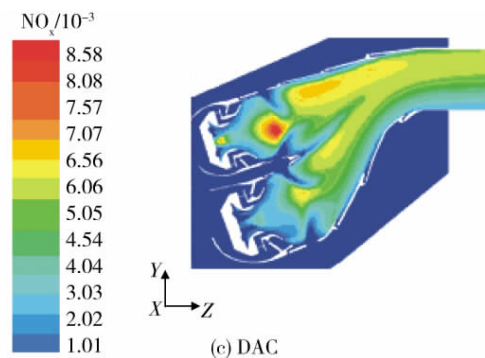
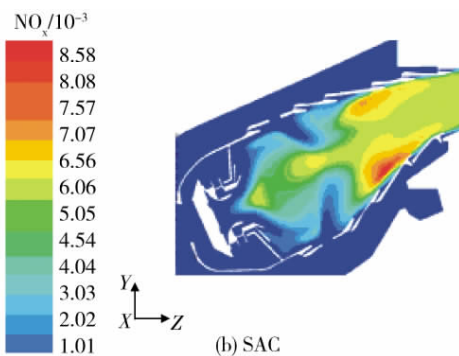
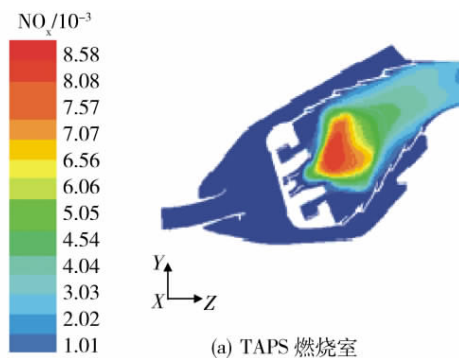
从表 8 中可以发现, TAPS 燃烧室在慢车工况下的 CO 排放比 SAC 和 DAC 都上升了不少, 原因在于 TAPS 燃烧室在低工况下值班级为富油当量比设计, 没有充分燃烧的燃油从套筒出口出来之后受到主燃级新鲜气流的淬熄作用, 导致 TAPS 燃烧室 CO 排放比传统 SAC 偏高, 这一现象与国外的有关报道一致. 这可从图 10 的 CO 排放及图 7 的温度分布图中得到进一步的验证, 采用 TAPS 燃烧室, 其 CO 排放主要集中在头部, 此时比较富油; 而 SAC 和 DAC 沿程温度较高, 因此总的 CO 排放较低.

2.5.2 NO_x 排放

设计状态时, TAPS 燃烧室, SAC, DAC 出口 NO_x 排放如表 9 及图 11 所示.

表 9 3 种燃烧室设计状态出口 NO_x 排放Table 9 NO_x emission of design state

	NO _x /(g/kg)
TAPS 燃烧室	51.45
SAC	91.06
DAC	85.72

图 11 3 种燃烧室设计状态 NO_x 质量分数分布Fig. 11 NO_x distribution of design state

从表 9 中可以发现: 在设计状态, TAPS 燃烧室的 NO_x 排放比 SAC 降低了 43.5%, 比 DAC 降低了 40%. 产生这一现象的原因可初步解释为: NO_x 排放与燃烧室内的温度有着强烈的相关性. TAPS 燃烧室的 NO_x 主要在主燃区中产生, 随着燃油的快速耗尽, 燃烧室内的温度也急剧下

降, NO_x 的生成也急剧减小. 而 SAC 和 DAC 由于主燃孔和掺混孔的作用, 导致在整个燃烧室的沿程范围内 NO_x 的生成量都比较大. 这可从图 11 的 NO_x 排放及图 7 的温度分布图中得到进一步的验证, 采用 TAPS 燃烧室, 其 NO_x 排放主要集中在头部高温区, 此时比较富油, 因此总的排放较少; 而 SAC 沿程温度较高, 因此总的 NO_x 排放较大.

与国外文献报道对比, TAPS 燃烧室的 NO_x 排放的下降水平较为合理, 这一现象与国外的有关报道一致, 表明所设计的双环预混旋流燃烧室, 其 NO_x 排放可望达到美国最先进的 TAPS 燃烧室同期水平, 满足 CAEP/6 的排放标准.

3 结 论

通过对比 TAPS 燃烧室, SAC, DAC 3 种燃烧室的计算结果可以发现: TAPS 燃烧室出口的总压恢复系数、燃烧效率比 SAC, DAC 高; 出口温度分布系数明显比 SAC, DAC 低; 慢车状态下, CO 排放水平比 SAC, DAC 略高; 设计状态下, NO_x 排放水平比 SAC, DAC 低. 双环预混旋流燃烧室与单环腔燃烧室(SAC)、双环腔燃烧室(DAC)性能对比表明, 中心分级的 TAPS 燃烧室的技术优势十分明显, 是一种很有发展前景的高温升、低污染燃烧室. 双环预混旋流燃烧室, 其 NO_x 排放可望达到美国最先进的 TAPS 燃烧室同期水平, 满足 CAEP/6 的排放标准, 将改进型 TAPS 燃烧室作为我国大飞机首选动力的燃烧室是可行的.

参考文献:

- [1] Turner M G, Ryder R, Norris A, et al. High fidelity 3D turbofan engine simulation with emphasis on turbo-machinery combustor coupling [R]. AIAA-2002-3769, 2002.
- [2] Zelina J, Cardena M, Tomondi C, et al. Low-emissions gas turbine combustor development using sector and full annular rigs[R]. AIAA-1998-3528, 1998.
- [3] Fuller E J, Smith C E. CFD analysis of a research gas turbine combustor primary zone[R]. AIAA-1994-2768, 1994.
- [4] Cline M C, Deur J M, Micklow G J, et al. Computation of the flow field in an annular gas turbine combustor[R]. AIAA-1993-2074, 1993.
- [5] 赵坚行. 民用发动机污染排放及低污染燃烧技术发展趋势[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6): 986-995.
- ZHAO Jianxing. Pollutant emission and development of low-emission combustion technology for civil aero engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(6): 986-995. (in Chinese)
- [6] Hukam C, Mogia H C. Aero-hermal design and analysis of gas turbine combustion systems: current status and future direction[R]. AIAA-1998-3982, 1998.
- [7] Rizk N K, Mongia H C. Three-dimensional emission modeling for diffusion flame, rich/lean, and lean gas turbine combustors[R]. AIAA-1993-2338, 1993.
- [8] 李杰. TAPS 燃烧室燃油喷嘴结构设计特点分析及思考[J]. 航空科学技术, 2010(1): 8-10.
- LI Jie. Analysis of fuel nozzle configuration characteristic of TAPS combustor [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(1): 8-10. (in Chinese)
- [9] 梁春华, 尚守堂. 大飞机发动机先进低排放燃烧室技术[J]. 航空制造技术, 2010(14): 40-43.
- LIANG Chunhua, SHANG Shoutang. Advanced low emission combustor technologies for large commercial aircraft engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010, (14): 40-43. (in Chinese)
- [10] 李锋, 孙佰刚, 彭浪青, 等. 大发动机双环腔燃烧室设计及性能分析[J]. 航空科学技术, 2008(2): 17-21.
- LI Feng, SUN Baigang, PENG Langqing, et al. Design and capability analysis of dual annular combustor[J]. Aeronautical Science and Technology, 2008(2): 17-21. (in Chinese)
- [11] 李锋, 尚守堂, 程明, 等. 双环腔燃烧室置换单环腔燃烧室可行性研究[J]. 航空动力学报, 2008, 23(1): 145-149.
- LI Feng, SHANG Shoutang, CHENG Ming, et al. Research on the feasibility of displacing the single annular combustor with a dual annular combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(1): 145-149.
- [12] 宋博. 发动机燃烧室的参数化建模和数值模拟[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2009.
- SONG Bo. Parametric modeling and numerical analysis of aero-engine combustor[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2009. (in Chinese)
- [13] 刘殿春, 董玉玺, 尚守堂, 等. 单环腔中心分级燃烧室流畅数值模拟[J]. 航空动力学报, 2010, 25(6): 1251-1257.
- LIU Dianchun, DONG Yuxi, SHANG Shoutang, et al. Numerical simulation of the flow field in a single annular concentric staged combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(6): 1251-1257. (in Chinese)
- [14] 张珊珊. 双环预混旋流燃烧室优化设计[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2010.
- ZHANG Shanshan. Optimization design of twin annular premixing swirler combustor[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)