航改燃机多点喷射贫预混燃烧室燃料分级实验研究 *

孙付军[1,2]，潘江华[1]，郭璐华[1]，李 洁[3]，马宏宇[3]，索建秦[1]

（1. 西北工业大学 动力与能源学院，陕西 西安 710072；
2. 中国航发湖南动力机械研究所，湖南 株洲 412002；
3. 中国航发沈阳发动机研究所，辽宁 沈阳 110015）

摘 要：为保证多点喷射贫预混燃烧室在50%~100%载荷工况范围的NO_x和CO排放量满足排放标准，本文实验研究了燃料分级数及不同工况、进口压力、进口温度下燃料分级比例对七喷嘴燃烧室NO_x和CO排放的影响规律。结果表明：主模燃料不分级方案，50%~60%载荷工况CO排放量较高而不满足排放标准；主模燃料分两级方案，50%~100%载荷工况范围内NO_x和CO排放量均满足$f_{NOx}\leqslant 25\times10^{-6}$，$f_{CO}\leqslant 50\times10^{-6}$（@ 15% O_2）的排放标准，且70%工况是打开主模第二级燃料的过渡工况点。另外随着进口压力和温度升高，能同时满足NO_x和CO排放标准的R_{pilot}（副模燃料质量流量与总燃料质量流量之比）范围逐渐缩小，且NO_x排放量与进口压力关系为$f_{NOx}\propto p_3^{0.44}$。因此采用主模燃料两级分级方案且适当调节$R_{pilot}$，本文多点喷射贫预混燃烧室$NO_x$和CO能满足目前航改地面燃机燃烧室排放要求。

关键词：航改燃机；多点喷射；贫预混燃烧；低污染；燃料分级

中图分类号：V231.2 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4055（2024）03-2208023-10

DOI：10.13675/j.cnki. tjjs. 2208023

1 引 言

作为最先进的热力装置，航空发动机优异的性能指标促进地面燃气轮机的发展，因此轻型地面燃气轮机大多依托航空发动机为母型机进行研发设计[1]。由于燃气轮机应用领域的广泛及污染排放物对人体健康和居住环境的巨大危害，世界各国环保部门均制定了燃气轮机污染物排放标准[2-3]，并在逐步提高污染物排放标准[4]。目前以天然气为燃料的地面燃气轮机普遍要求50%~100%载荷工况范围内NO_x和CO排放量均要满足$f_{NOx}\leqslant 25\times10^{-6}$，$f_{CO}\leqslant 50\times10^{-6}$[5]。依托航空发动机为母型机，世界各大燃气轮机公司和设计人员研究并开发了多种天然气燃气轮机低污染燃烧室[6]，例如罗尔斯-罗伊斯公司RB211衍生的工业燃气轮机燃烧室[7]、MT30燃气轮机燃烧室以及美国通用电气公司LM6000航改燃气轮机燃烧室[8]，其中应用最广泛的仍为贫预混燃烧技术（又被称为干式低排放燃烧技术）[9]。贫预混燃烧技术的关键是燃料与空气混合均匀[10-12]，并将燃烧区当量比控制在特定范围内以同时满足NO_x和CO排放标准[13]。

燃料/空气混合均匀性取决于贫预混喷嘴设计[14]，而燃烧区当量比的精准控制可通过燃料分级供应来实现[13]。国内外众多型号燃气轮机均采用燃料分级技术：美国通用电气公司的LM6000燃烧室燃料分为15级供应，以满足50%~100%工况的所有工况点的NO_x和CO均满足排放要求[15]；中国航发黎明公司研发的R0110燃气轮机采用燃料径向分级技术并通过调整各燃烧区燃料流量比例以满足NO_x排放标准[16]。因此燃料分级技术是燃烧室在宽工作范围内均实现NO_x和CO低排放的关键技术。目前燃料分级研究主要集中在燃料分级数和各级燃料分级比例：邢畅等[17]对不同燃料分级方案下燃烧特性进行了试验研究，结果表明不同燃料分级比例对NO_x生成量的影响趋势不同。邵卫卫等[18-19]采用试验和数值计算研究以天然气为燃料的轴向燃料分级燃烧中NO_x排放特性，发现主燃区温度及停留时间控制是采

* **收稿日期**：2022-08-09；**修订日期**：2022-11-24。
基金项目：国家科技重大专项（2017-Ⅲ-0006-0031；2017-Ⅲ-0002-0026）。
作者简介：孙付军，博士生，研究领域为贫预混低污染燃烧技术研究。
通讯作者：索建秦，硕士，教授，研究领域为航空发动机燃烧与燃烧室。E-mail：jqsuo@nwpu.edu.cn
引用格式：孙付军，潘江华，郭璐华，等. 航改燃机多点喷射贫预混燃烧室燃料分级实验研究[J]. 推进技术，2024，45(3)：2208023.（SUN F J，PAN J H，GUO L H，et al. Experimental study on fuel-staging in a lean premixed combustor with multi-points injection for aeroderivative gas turbine[J]. Journal of Propulsion Technology，2024，45(3)：2208023.）

用轴向燃料分级控制 NO_x 排放的关键。王威等[20]通过调整燃料沿径向分配比例，实现了 80%~100% 工况下 NO_x 和 CO(@ 15% O_2)排放均低于 25×10^{-6}。林宇震等[21]研究结果表明，全环燃烧室主模燃料采用燃料周向分级方式，燃烧效率和 NO_x 排放均能满足指标要求。刘爱虢等[22]研究结果表明主副两级燃料分配比例对污染排放具有较大影响。

由此可知为了同时实现低工况稳定燃烧和不同工况 NO_x 和 CO 低排放，地面燃机燃烧室常采用燃料分级供应方式。但在保证燃烧性能及低排放的前提下，多点喷射燃烧室燃料分级数应尽可能少，以减少燃料供应系统复杂性，进而提高燃机燃烧室运行可靠性[5]。因此本文基于国内某型航机改型燃气轮机气动参数和几何尺寸参数，设计了基于贫预混技术路线的多点喷射燃烧室，提出了一种新型的带收敛出口的贫预混喷嘴模[23]，并以此为单元设计了七喷射点的矩形燃烧室，实验研究不同燃料分级数及不同工况下副模燃料比例对七喷射点燃烧室 NO_x 和 CO 排放特性的影响规律，为多点喷射燃烧室后续优化研究和工程应用提供技术支撑。

2　试验方法

2.1　基元喷嘴模及七喷射点矩形燃烧室

基于国内某航机改型燃气轮机燃烧室气动参数及几何尺寸参数，以纯收敛型出口的单旋流贫预混喷嘴模为基本组成单元，设计了多点喷射燃烧室方案(如图 1 所示)：共采用 100 个喷嘴，径向由里往外分三层排布，每层分别为 20 个、40 个和 40 个。基于实验室气源条件限制，本文选取其中 7 个喷射点(喷嘴)作为研究对象，研究燃料分级方案及不同工况下副模燃料比例对 NO_x 和 CO 排放特性影响规律。

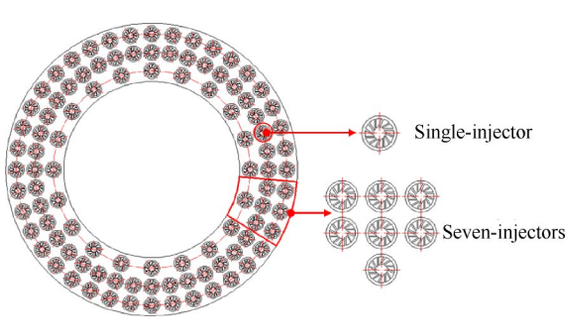


Fig. 1　Schematics of the multi-injectors combustor

基元喷嘴和七喷射点矩形燃烧室的设计如下：基元喷嘴模由轴流式旋流器、燃料流路、预混段及纯收敛型出口段组成，如图 2 所示。旋流器叶片数为 12，叶片中空且每个叶片叶盆上布置有 2 个燃料喷射孔，能最大限度地与来流空气充分混合。预混段上开有切向进气发散冷却小孔，在壁面能形成旋转贴壁气膜，加速壁面附面层空气流动，避免发生自燃和回火。全部燃烧空气由基元喷嘴模进入，在旋流器通道内与中空叶片喷射孔喷出的燃料初步混合，然后在旋流空气剪切和湍流脉动的作用下，燃料与空气在预混段中充分混合，最终混合均匀的燃料/空气混合物经过收敛型出口加速流向下游火焰筒进行燃烧。收敛型出口能提高燃料/空气混合物流出喷嘴的速度，避免发生回火。喷嘴详细结构在文献[24]中也有详细介绍。

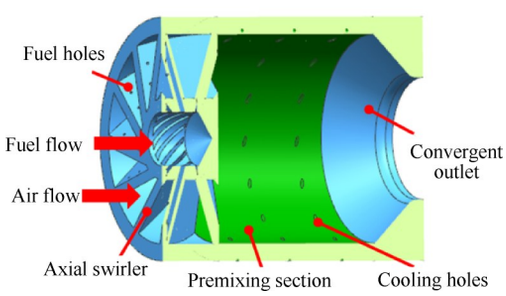
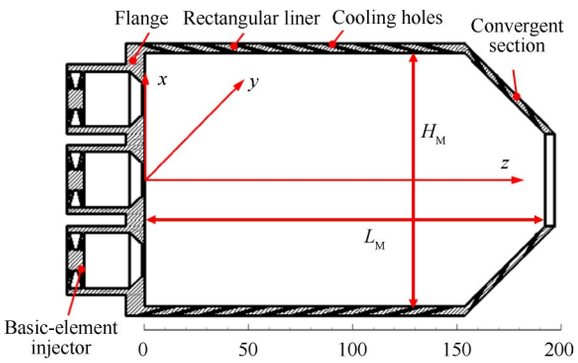


Fig. 2　Schematics of the basic-element lean-premixed injector

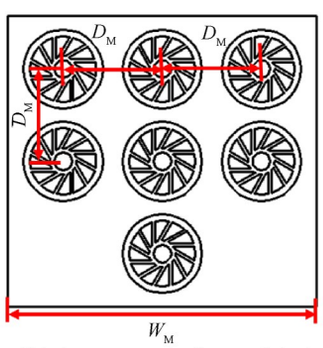
七喷射点矩形燃烧室由 7 个基元喷嘴模、法兰、矩形火焰筒及火焰筒收敛段组成，其中矩形火焰筒及火焰筒收敛段表面布置有发散冷却小孔，如图 3 所示。相邻喷嘴间间距为 D_M=45 mm，火焰筒的高度 H_M=132 mm，宽度 W_M=140 mm 和长度 L_M=200 mm，七个喷嘴出口与法兰平齐。

2.2　七喷射点矩形燃烧室排放特性试验台

本文污染物排放特性试验在西北工业大学飞行器动力实验中心燃烧实验室进行，其试验台如图 4 所示，由空气供给系统、天然气供给系统、燃气分析系统、数据采集系统、水冷系统和七喷射点矩形试验件组成。使用连续性气源和电加热器实现高温压缩空气供气，空气流量由罗斯蒙特孔板流量计进行计量。燃料采用天然气气瓶供给，其流量由热式质量流量控制器计量和控制。水冷系统用于冷却试验段左右侧壁、后测量段、燃气取样耙和尾气喷水降温。燃气分析取样和测量方法均满足国家环境保护总局制定的相关要求，其中 NO_x 分析仪测量原理为化学发光法[25]。高温燃气经过取样耙 7 个取样孔在中心样气管中混合，经样气运输管路进入预处理系统。运输管路采用电伴热的方式将样气保温在(165±15)℃，防止燃气中 UHC 和水蒸气等组分冷凝影响测量结果的准确性。燃气分析系统详细介绍可参考文献[26]。所有气动参数和



(a) Seven-injectors combustor (mm)



(b) Arrangement of seven injectors

Fig. 3　Schematics of the seven-injectors combustor

污染物排放数据均通过数据采集系统采集处理。

基于 2.1.1 节所介绍的基元贫预混喷嘴模，本文设计了一套七喷射点矩形燃烧室试验件（如图 4 所示），包括前测量段、试验段、后测量段（取样段）和后转接段（排气段）。前测量段布置有进口温度 T_3，进口压力 p_3 测点和 3 个燃料进口安装座。试验段由机匣、上下火焰筒、点火器、火焰筒壁温测点和 7 个基元喷嘴模组成，在上下火焰筒壁面各焊有 10 个温度测点，用来监测壁面温度。取样段布置有燃气取样耙测量排放。采集燃气的取样耙开有 7 个等距分布的孔径 1.0 mm 的小孔，耙体采用水冷方法降温。另外试验段左右侧壁和取样段均设计冷却水导流结构以充分冷却试验件。

2.3　七喷射点矩形燃烧室排放特性试验

针对七喷射点矩形燃烧室，本文先进行各流道空气流量分配比例检查。然后基于某型航机改型燃气轮机燃烧室工况条件及实验室试验台气源和燃料源条件，依据燃烧室试验模化方法（燃烧室进口温度、燃料/空气比及空气速度保持不变）[27]对不同工况点进行降压模拟（不同工况点试验条件如表 1 所示），验证不同工况点下不同燃料分级方案和不同副模燃料比例 R_{pilot} 对 NO_x 和 CO 排放的影响规律。最后为进一步探究七喷射点矩形燃烧室方案排放特性，在不同进口温度 T_3 和进口压力 p_3 下（试验工况如表 2 所示），研究不同副模燃料比例 R_{pilot} 对 NO_x 和 CO 的影响规律。

地面燃气轮机污染物 NO_x 和 CO 排放水平按照标准状态下干燃气浓度值，并转换为排气氧浓度 15% O_2 下的体积分数值来评判[16]，如式（1）和（2）所示

$$f_{(\mathrm{NO}_x)_{15\%\mathrm{O}_2}} = f_{(\mathrm{NO}_x)_{\mathrm{meas}}} \times \frac{21-15}{21-f_{(\mathrm{O}_2)_{\mathrm{meas}}}} \tag{1}$$

$$f_{(\mathrm{CO})_{15\%\mathrm{O}_2}} = f_{(\mathrm{CO})_{\mathrm{meas}}} \times \frac{21-15}{21-f_{(\mathrm{O}_2)_{\mathrm{meas}}}} \tag{2}$$

式中 $f_{(\mathrm{NO}_x)_{15\%\mathrm{O}_2}}$ 和 $f_{(\mathrm{CO})_{15\%\mathrm{O}_2}}$ 分别为排气氧浓度 15% O_2 下 NO_x 和 CO 的体积分数值，$f_{(\mathrm{NO}_x)_{\mathrm{meas}}}$ 和 $f_{(\mathrm{CO})_{\mathrm{meas}}}$ 为分析仪测得 NO_x 和 CO 的体积分数值，$f_{(\mathrm{O}_2)_{\mathrm{meas}}}$ 为分析仪测得的 O_2 体积百分数。

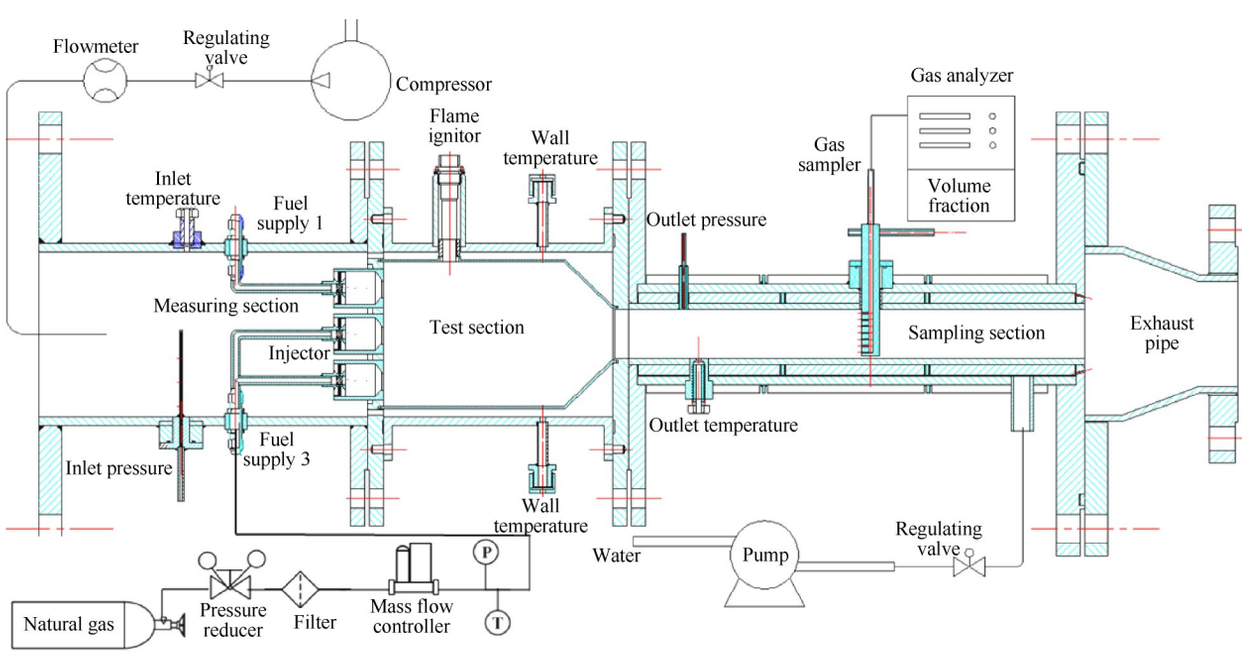


Fig. 4　Seven- injectors combustor test rig system

Table 1　Aerodynamic parameters at different loads

Load/%	T_3/K	p_3/kPa	FAR_t	R_{pilot}
50	725	221	0.018 7	0.57~0.85，5 points
60	746	232	0.019 7	0.54~0.82，5 points
70	758	240	0.020 4	0.43~0.68，6 points
80	776	245	0.021 0	0.43~0.68，6 points
90	785	250	0.021 8	0.31~0.60，7 points
100	799	253	0.022 6	0.39~0.58，5 points

Table 2　Aerodynamic parameters at different p_3 and T_3

Case	T_3/K	p_3/kPa	FAR_t	R_{pilot}
1	673	235	0.025	0.36~0.59，4 points
	723			0.35~0.60，5 points
	773			0.33~0.60，5 points
2	673	196	0.025	0.36~0.56，5 points
		235		0.36~0.56，4 points
		308		0.35~0.56，5 points
		350		0.35~0.52，5 points

Table 3　Comparison of flow distribution between design value and experimental value

Parameter	Design value	Experimental value	Relative error/%
Injector air ratio/%	72	70.03	−2.74
Cooling air ratio%	18	16.92	−6.00
Dilution air ratio%	10	12.41	24.10

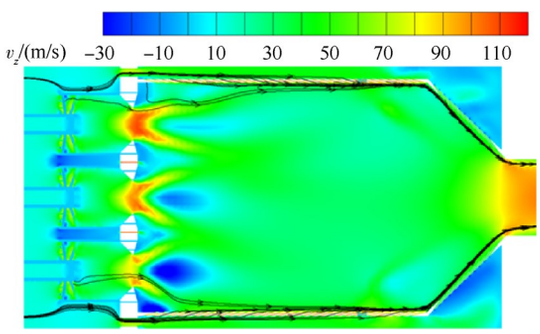


Fig. 5　Axial velocity contour and streamlines of seven-injections combustor

3　结果与讨论

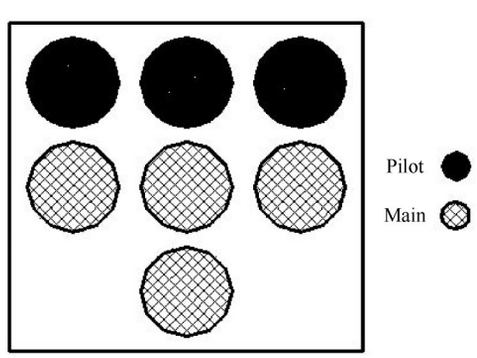
3.1　空气流量分配比例检查

各流道空气流量分配比例是燃烧室设计中的关键问题，尤其是燃烧空气（由喷嘴模进入燃烧室的空气）比例直接决定着燃烧区当量比，进而会影响燃烧室火焰稳定、燃烧效率及排放特性等各方面性能。因此本文先采用堵孔法[28]检查各流道空气比例是否与设计值一致，试验结果与设计值对比如表 3 所示。采用 3D 打印工艺加工的火焰筒壁面冷却孔内表面粗糙度较高，流量系数降低，使得冷却空气流量实验值较设计值偏小，但是火焰筒冷却孔为切向进气发散小孔，贴壁性较好（如图 5 燃烧室流线图所示），对燃烧室内部核心流动和燃烧组织基本无影响；另外减少的冷却空气量从掺混孔流入，掺混空气比例增大，由于掺混空气基数小，使得其实验值较设计值的相对误差较大，但掺混空气从燃烧室下游射入，同样对燃烧区燃烧组织几乎无影响。因此综上所述，针对本文提出的燃烧室方案，燃烧性能及 NO_x，CO 排放特性基本不受冷却空气和掺混空气量影响，而主要由燃烧空气量（喷嘴空气量）决定，而燃烧空气实验值与设计值吻合较好，相对误差仅为 2.74%，因此本文设计加工的七喷射点矩形燃烧室实验件能用来开展污染物排放特性实验研究。

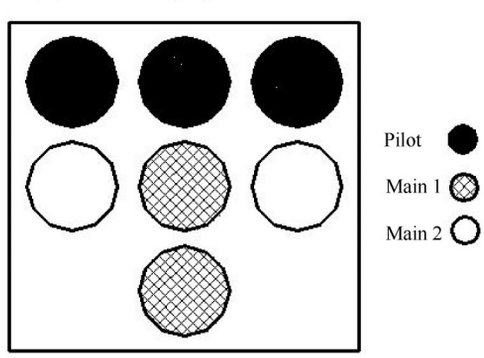
3.2　燃料分级数确定

针对七喷射点矩形燃烧室，首先给出了两种燃料分级方案：主模燃料不分级和主模燃料分两级（如图 6 所示）。在 50% 工况和 60% 工况下验证两种燃料供应方案的可行性，从而优选并确定燃料分级方案。

主模燃料不分级方案下（如图 6(a)），七喷射点燃烧室在 50% 工况和 60% 工况的污染排放特性如图 7 所示，其中下横坐标 R_{pilot} 为副模燃料比例，上横坐标是不同 R_{pilot} 相对应的副模燃烧区当量比 Φ_{pilot} 和

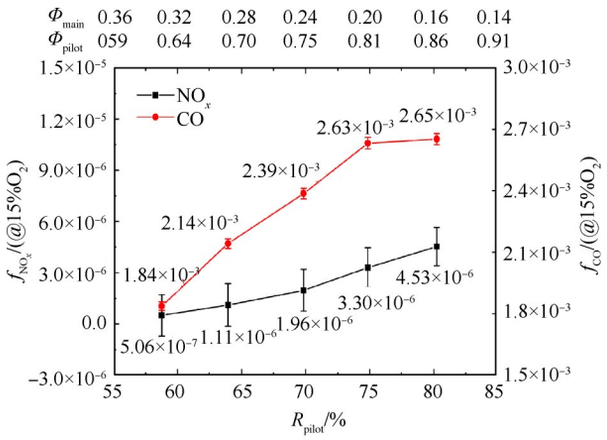


(a) No fuel-staging for main module

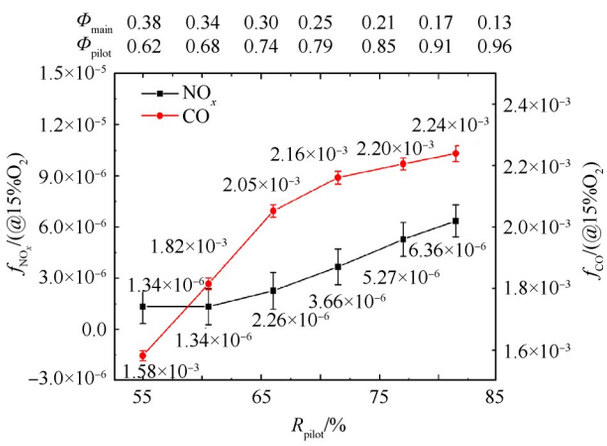


(b) Double fuel-staging for main module

Fig. 6　Fuel-staging schematics of seven-injections combustor



(a) NO_x and CO emissions at 50% load

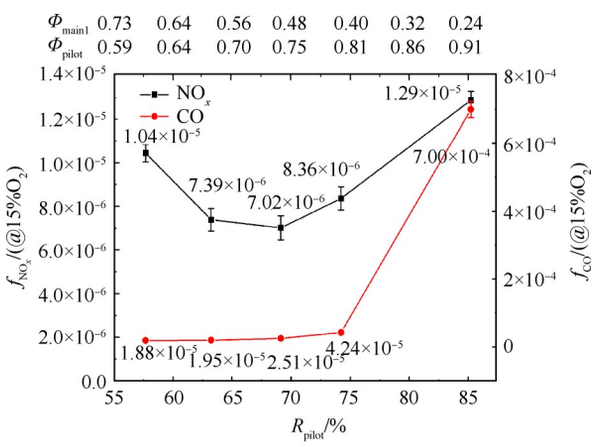


(b) NO_x and CO emissions at 60% load

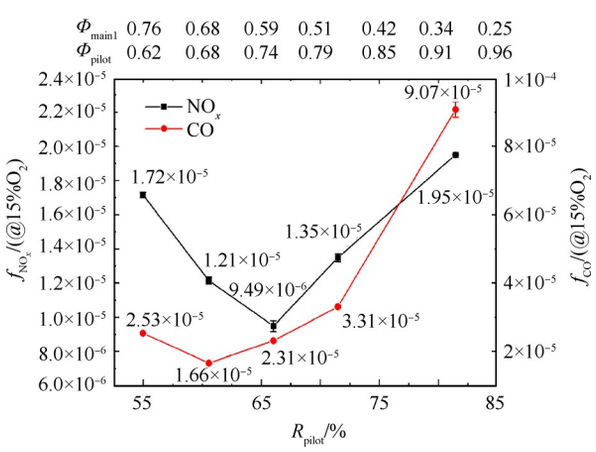
Fig. 7　NO_x and CO emissions in no fuel-staging for main module

主模燃烧区当量比 Φ_{main}。在 50% 工况和 60% 工况下，随着 R_{pilot} 增加，Φ_{main} 逐渐减小，与之相对应主模燃烧区温度降低，因此 CO 排放量逐渐升高；但是 R_{pilot} 的增加使得副模燃烧区温度逐渐升高，因此 NO_x 排放逐渐增加。从图 7 还可以得知，在所有喷嘴供燃料工作的情况下，由于 50% 工况和 60% 工况的总燃料/空气比相对较小且进口空气温度较低，所以不同副模燃料比例下 CO 排放量均很高，远远高于地面燃气 CO 排放标准。因此针对 CO 排放来说，采用两级燃料分级（副模和主模，且主模不分级）方案是不可行的。

为降低 CO 排放量，主模分成两级燃料供应 Main 1 和 Main 2（如图 6(b)所示），在 50% 工况和 60% 工况主模只有 Main 1 供燃料工作，Main 2 不工作，以提高主模局部当量比。在 50% 和 60% 工况，只有副模和主模 Main 1 供燃料工作时 CO 和 NO_x 排放量如图 8 所示。对比图 7，在相同 R_{pilot} 下，由于主模只有 Main 1 供燃料燃烧，主模局部当量比增大，CO 排放大幅度减小，与之相对应 NO_x 排放增加。如图 8 所示，随着 R_{pilot} 增加，CO 和 NO_x 均呈先减小后增加的趋势，这是由于当 R_{pilot} 较少时，副模燃烧区温度低，CO 生成量大，而此时主模局部燃烧区温度高，有利于 NO_x 生成；当 R_{pilot} 较大时，副模温度较高，而主模局部温度较低，也分别有利于 NO_x 和 CO 生成。只有当副模和主模局部当量比相接近时，CO 和 NO_x 才能同时处于较低排放水平。因此采用燃料三级供应方案（主模分两级供应），在 50% 和 60% 工况下只有副模和主模 Main 1 供燃料工作时，CO 和 NO_x 均能满足地面燃气轮机排放标准，即 $f_{NOx}\leqslant 25\times10^{-6}$，$f_{CO}\leqslant 50\times10^{-6}$（@ 15% O_2）。



(a) NO_x and CO emissions at 50% load



(b) NO_x and CO emissions at 60% load

Fig. 8　NO_x and CO emissions in double fuel-staging for main module

3.3　70%~100% 工况污染排放特性

确定主模燃料分两级供应方案后，需验证其在 70%~100% 工况下可行性。在 70%~100% 工况下，副模 Pilot、主模 Main 1 和主模 Main 2 均供燃料参与工作，且主模 Main 1 和 Main 2 的燃料所占比例相同（即

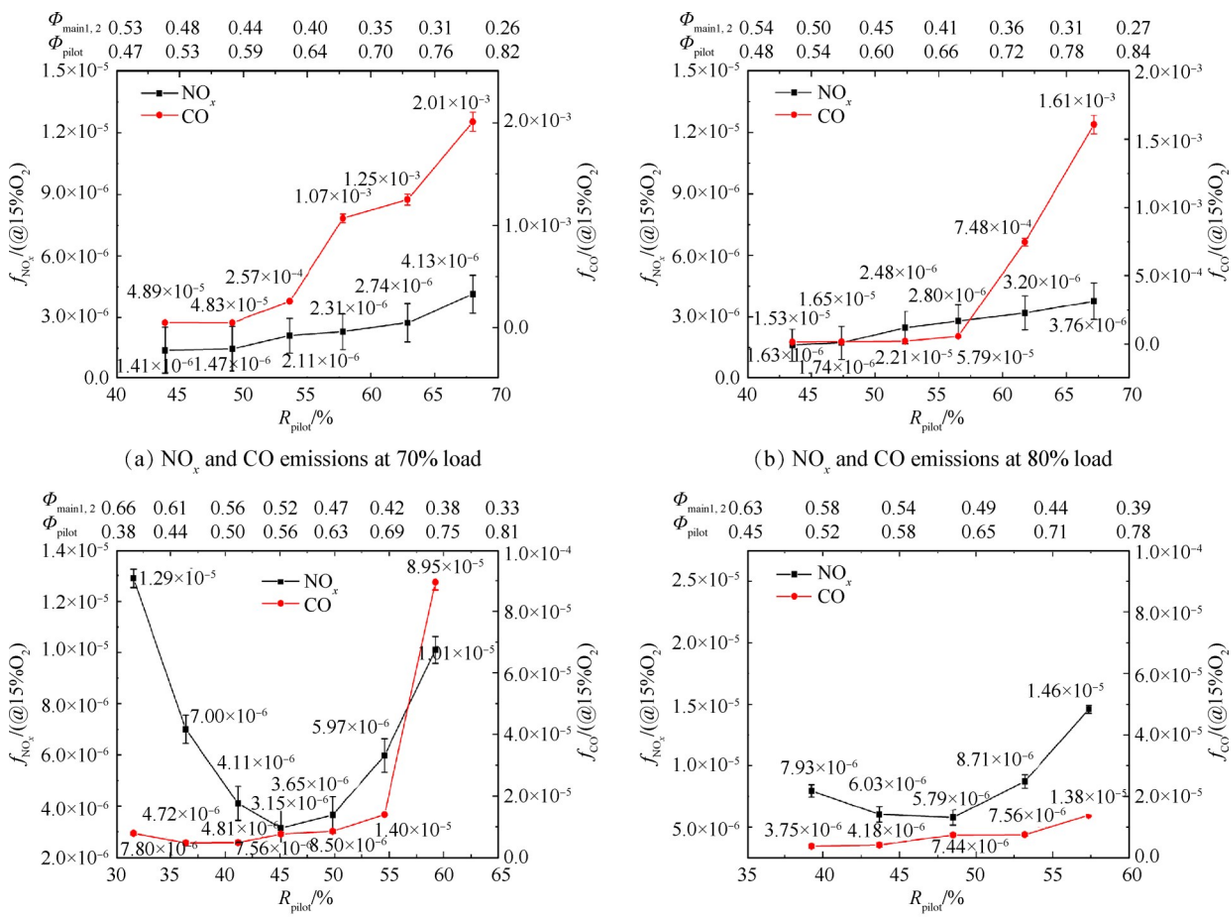
保证 Φ_{main1} 与 Φ_{main2} 相同，其燃烧区当量比统一用 $\Phi_{main1,2}$ 表示）。70%~100% 工况下，不同副模燃料比例 R_{pilot} 下 CO 和 NO_x 排放量如图 9 所示。

经理论计算，当 R_{pilot} 为 43% 时，副模燃烧区当量比 Φ_{pilot}、主模燃烧区当量比 $\Phi_{main1,2}$ 相等。如图 9 所示，在 70%~100% 工况，当 R_{pilot} 高于 45%，CO 和 NO_x 排放量均随 R_{pilot} 的增大而增加，究其原因，R_{pilot} 增加使得 Φ_{pilot} 不断增大，导致副模燃烧区温度升高而增加热力型 NO_x 排放量；同时当副模燃烧区温度高于 1 850 K（燃烧区当量比高于 0.7），CO_2 高温裂解产生的 CO 量增多；再者，R_{pilot} 增加使得 $\Phi_{main1,2}$ 不断减小，主模燃烧区温度不断下降，CO 氧化速率变慢，当 $\Phi_{main1,2}$ 低于 0.4 时，CO 排放量急速增加。如前所述，只有当 Φ_{pilot} 和 $\Phi_{main1,2}$ 值相接近时，整个燃烧室内既无局部高温区，也无局部低温区，NO_x 和 CO 排放量均较低。当 R_{pilot} 位于 43% 附近，NO_x 排放随工况增大而增大，CO 排放随工况增大而减小。

从图 9(a) 可以看到，由于进口温度 T_3 和燃料/空气比相对较低，即使通过调节 R_{pilot}，CO 排放量始终比较高，仅当 R_{pilot} 处于 43% 附近，即 Φ_{pilot} 和 $\Phi_{main1,2}$ 相接近时，CO 排放量才低于地面燃机排放标准 50×10^{-6}。因此 70% 工况是打开主模 Main 2 的过渡工况点。随着燃烧室工况增大（进口温度和燃料/空气比均增大），相同 R_{pilot} 下 Φ_{pilot} 和 $\Phi_{main1,2}$ 均增大，CO 排放量快速减少，使得能满足 CO 排放标准的 R_{pilot} 上限逐渐增大，在 100% 工况下能满足 CO 排放标准的 R_{pilot} 高达 60%（如图 9(b)~(d) 所示）。因此采用三级燃料供应方案（主模分两级），70%~100% 工况 CO 和 NO_x 均能满足 $f_{NOx}\leqslant25\times10^{-6}$，$f_{CO}\leqslant50\times10^{-6}$（@15% O_2）的排放标准。

3.4　不同压力下污染排放特性

为了进一步探究本燃烧室方案排放特性，在 Case 1 和 Case 2 工况开展不同进口温度和压力下，副模燃料比例 R_{pilot} 对 NO_x 和 CO 排放特性的影响规律。同样当 R_{pilot} 为 43% 时，副模燃烧区当量比 Φ_{pilot} 和主模燃烧区当量比 $\Phi_{main1,2}$ 趋于相同。图 10 为表 2 中 Case 2 工况，不同进口压力和 R_{pilot} 下 NO_x 排放规律：在相同进口压力状态下 NO_x 排放量均随 R_{pilot} 增大而呈现先减小后增大的趋势，NO_x 排放量最低点对应的 R_{pilot} 位于 43% 附近，其原因在 3.2 节和 3.3 节已有叙述。另



(a) NO_x and CO emissions at 70% load　　(b) NO_x and CO emissions at 80% load

(c) NO_x and CO emissions at 90% load　　(d) NO_x and CO emissions at 100% load

Fig. 9　NO_x and CO emissions at 70%~100% load in double fuel-staging for main module

外在相同 R_{pilot} 下，NO_x 排放量随进口压力的升高而增大，且当 R_{pilot} 越偏离 43%，NO_x 排放量随着压力的升高而增加显著。这是因为当位于 43% 附近时，燃烧区温度低于 1 800 K，NO_x 生成量主要来自于 N_2O 中间体和瞬发 NO 生成机理，其与压力无关[29]；而随着 R_{pilot} 偏离 43%，副模燃烧区或主模燃烧区当量比逐渐增加（其相应燃烧区温度升高），热力型 NO_x 生成量逐渐占据主导地位，而热力型 NO_x 与压力呈指数关系。

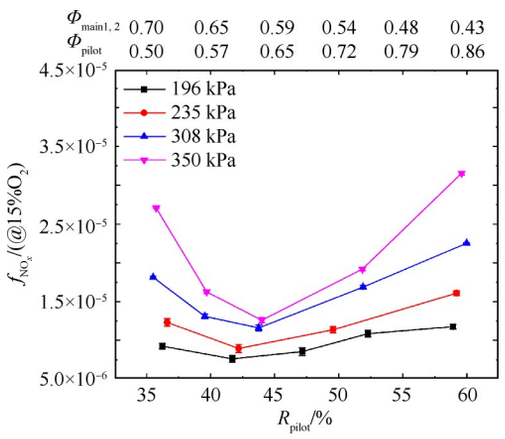


Fig. 10　NO_x emissions at different inlet pressure

查阅文献[6,30]，NO_x 排放量正比于 p_3^n。在 R_{pilot} 为 43% 时，将不同进口压力下 NO_x 排放值通过上述关系类比获得的拟合曲线和关系式如图 11 所示：$f_{NOx} \propto p_3^{0.44}$，指数低于常规燃烧室的 0.5~0.8[6]。这既说明了本文燃烧室燃料/空气混合良好，也从侧面证明了前面所说的，在 R_{pilot} 为 43% 时，NO_x 生成量主要来自于 N_2O 中间体和瞬发 NO 生成机理，而热力型 NO_x 生成量较少。

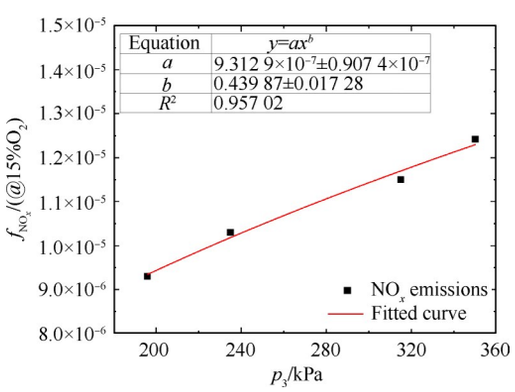


Fig. 11　NO_x fitted curve at R_{pilot}=43%

图 12 为不同进口压力下 CO 排放随 R_{pilot} 的变化规律：在相同进口压力下，CO 排放量随着 R_{pilot} 增加也呈现先减小后增大的变化趋势，同样在 R_{pilot} 为 43% 附近 CO 排放量较低，其原因在 3.2 节和 3.3 节也已有叙述。在相同 R_{pilot} 下，CO 排放量随进口压力的升高而减小，这是因为压力升高会增大燃烧室预混火焰的湍流传播速度[31]，加快 CO 等未完全燃烧产物氧化速率。此外压力升高会抑制 CO_2 的高温分解作用[32]，也会降低 CO 生成量，这也可以解释当 Φ_{pilot} 高于 0.7 时，CO 生成量随压力升高而急速减小。另外从图 10 可以看出，由于进口压力对 NO_x 排放量呈正相关作用，随着进口压力升高，能同时满足 NO_x 和 CO 排放标准的 R_{pilot} 范围逐渐缩小。只有当 Φ_{pilot} 和 $\Phi_{mian1,2}$ 同时位于 0.55~0.70，NO_x 和 CO 才能同时满足 $f_{NOx} \leqslant 25\times10^{-6}$，$f_{CO} \leqslant 50\times10^{-6}$（@15% O_2）的排放标准。

3.5　不同温度下污染排放特性

图 13 为表 2 中 Case 1 工况，不同进口温度下 NO_x 和 CO 随 R_{pilot} 的变化规律。如图 13(a)所示，不同进口温度下 NO_x 随 R_{pilot} 变化规律与前面类似，且在 R_{pilot} 为 43% 附近，NO_x 生成量最少。在相同 R_{pilot} 下，NO_x 排放量随进口温度升高而增加，且当 R_{pilot} 越偏离 43%，NO_x 排放量随着进口温度的升高而增加显著，其原因是，在相同燃烧区当量比下，进口温度越高使得燃烧区火焰更高，而热力型 NO_x 生成量与火焰温度呈指数关系。图 13(b)为不同进口温度下 CO 随 R_{pilot} 变化规律：在不同进口温度下，CO 排放量随着 R_{pilot} 增加均呈现先减小后增大的变化趋势，其原因在前文已有叙述。在相同 R_{pilot} 下，CO 排放量随进口温度升高而减小，其原因仍可由燃烧区火焰温度来解释。尤其是局部当量比小于 0.5 时，进口温度对 CO 排放影响较大。另外从图 13 可以看出，由于进口温度对 NO_x 排放量也呈正相关作用，随着进口温度升高，能同时满足 NO_x 和 CO 排放标准的 R_{pilot} 范围也在逐渐缩小。

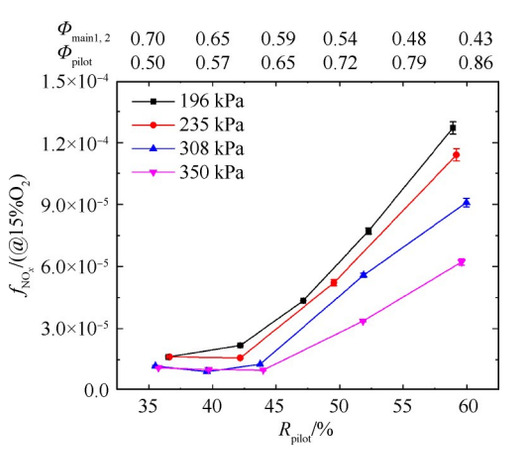
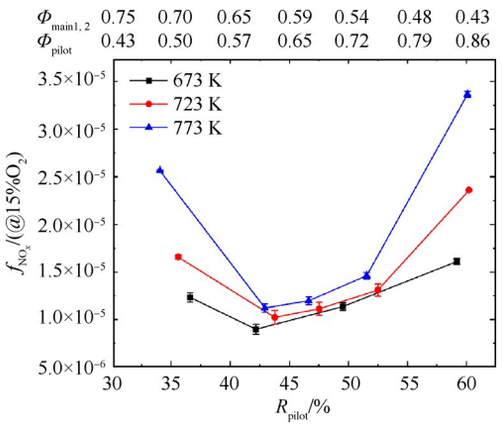
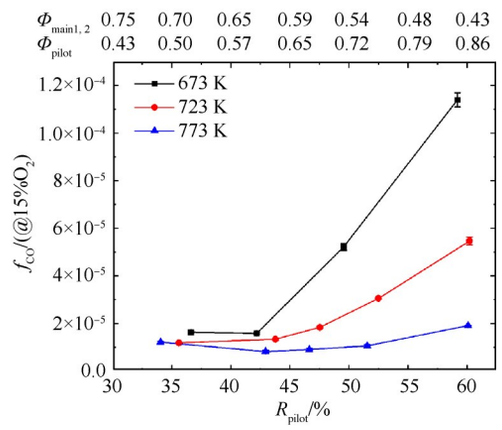


Fig. 12　CO emissions at different inlet pressure



(a) NO_x emissions characteristic



(b) CO emissions characteristic

Fig. 13　NO_x and CO emissions at different inlet temperature

4　结　论

通过本文研究，得到如下结论：

（1）在 50% 工况和 60% 工况下，主模燃料不分级方案下 CO 排放远远超标，而采用主模燃料分两级供应方案 CO 和 NO_x 排放均能满足排放要求（此时副模、主模 1 供燃料工作）。因此七喷射点矩形燃烧室需采用三级燃料供应方案，即副模、主模 1 和主模 2。

（2）70% 工况是打开主模第二级燃料的过渡工况点。70%~100% 工况下，副模、主模 1 和主模 2 全部工作且当其燃烧区当量比基本一致时（副模燃料比例 R_{pilot} 在 43% 附近），CO 和 NO_x 排放量均较低，且均能满足要求。

（3）当 R_{pilot} 在 43% 附近，CO 和 NO_x 排放量均较低。且当 R_{pilot} 在 43% 附近，NO_x 随进口压力和进口温度升高，增加幅度最小，这可由不同火焰温度下 NO_x 生成机理不同来解释。

（4）采用主模燃料分两级供应方案，本文提出的七喷射点矩形燃烧室在 50%~100% 工况之间任一工况点，NO_x 和 CO 均能满足 $f_{NOx}\leqslant 25\times10^{-6}$，$f_{CO}\leqslant 50\times10^{-6}$（@15% O_2）的排放标准，能大大减少其应用在全环燃烧室上的分级数。

致　谢：感谢国家科技重大专项的资助。

参考文献

[1] 李孝堂. 航机改型燃气轮机设计及试验技术[M]. 北京：航空工业出版社，2017.

[2] U.S.EPA. U.S.EPA clean energy environment guide to action，section 5.3：output-based environment regulations to support clean energy supply[Z]. Washington：U.S. Office，2006.

[3] GB13223-2003，火电厂大气污染物排放标准[S].

[4] GB13223-2011，火电厂大气污染物排放标准[S].

[5] 尉曙明. 先进燃气轮机燃烧室设计研发[M]. 上海：上海交通大学出版社，2014.

[6] LEFEBVRE A H，BALLAL D R. Gas turbine combustion：alternative fuels and emissions[M]. New York：CRC Press，2010.

[7] WILLIS J D，TOON I J，SCHWEIGER T，et al. Industrial RB211 dry low emission combustion[R]. ASME 93-GT-391.

[8] JOSHI N D，EPSTEIN M J，DURLAK S，et al. Development of a fuel air premixer for aero-derivative dry low emissions combustors[R]. ASME 94-GT-253.

[9] MCDONELL V. Chapter 5-lean combustion in gas turbines[M]. London：Academic Press，2008.

[10] FRIC T F. Effects of fuel-air unmixedness on NO_x emissions[J]. AIAA Journal of Propulsion and Power，1993，9(5)：708-713.

[11] BIAGIOLI F，GUETHE F. Effect of pressure and fuel-air unmixedness on NOx emissions from industrial gas turbine burners[J]. Combustion and Flame，2007，151(1-2)：274-288.

[12] 赵玮杰，于宗明，贺红娟，等. 燃气轮机燃烧室预混喷嘴排放性能的试验和数值研究[J]. 推进技术，2020，41(2)：362-371.（ZHAO W J，YU Z M，HE H J，et al. Experiment and numerical study on emission characteristics of premixing fuel nozzle in gas turbine combustor[J]. Journal of Propulsion Technology，2020，41(2)：362-371.）

[13] 尉曙明，索建秦. 航空衍生工业燃气轮机双燃料贫燃预混低污染燃烧技术[J]. 航空动力学报，2015，30(9)：2049-2057.

[14] SUN F J，SUO J Q，LIU Z. Investigation on flowfield and fuel/air premixing uniformities of low swirl injector for lean premixed gas turbines[R]. ASME GT 2021-59934.

[15] LEONARD G，STEGMAIER J. Development of an aeroderivative gas turbine dry low emissions combustion

system[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1994, 116(3): 542-546.

[16] 包文飞, 李 明, 牟 影, 等. R0110重型燃气轮机分级燃烧室NOx排放试验研究[J]. 航空发动机, 2013, 39(6): 59-62.

[17] 邢 畅, 邱朋华, 刘 栗, 等. 燃料预混特性对燃烧室燃烧特性的影响[J]. 推进技术, 2016, 37(11): 2114-2119. (XING C, QIU P H, LIU L, et al. Effects of fuel premixed characteristics on combustion characteristics of combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2016, 37(11): 2114-2119.)

[18] 王子叶, 刘志坦, 邵卫卫, 等. 天然气燃料轴向分级预混燃烧特性研究[J]. 燃气轮机技术, 2018, 31(4): 32-39.

[19] 周昊航, 张哲巅, 邵卫卫, 等. 天然气燃料分级燃烧中NO_x排放特性分析[J]. 推进技术, 2018, 39(5): 1024-1032. (ZHOU H H, ZHANG Z D, SHAO W W, et al. Analysis on NO_x emission characteristics of natural gas fuel-staged combustion[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39(5): 1024-1032.)

[20] 王 威, 李雅军, 程 旭, 等. 三级燃料径向分级燃烧对燃烧室性能的影响[J]. 热能动力工程, 2020, 35(5): 34-42.

[21] 付镇柏, 林宇震, 张 弛, 等. 中心分级燃烧室进场工况燃油分级方式试验研究[J]. 推进技术, 2014, 35(1): 77-86. (FU Z B, LIN Y Z, ZHANG C, et al. Experimental investigation on fuel-staging mode of internally-staged combustor under approach condition[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(1): 77-86.)

[22] 刘爱虢, 陈炫任, 杨宇东, 等. 燃料分级比例对双燃料燃烧室燃烧性能的影响[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(7): 756.

[23] 孙付军, 索建秦, 梁红侠, 等. 一种燃料从叶片喷射的贫预混模喷嘴及全环燃烧室[P]. CN108800206A, 2018-06-06.

[24] 孙付军, 高非凡, 李 洁, 等. 多点喷射贫预混喷嘴流场及排放特性研究[J]. 推进技术, 2022, 43(7): 210330. (SUN F J, GAO F F, LI J, et al. Flowfield and emission characteristics of lean premixed injector with multi-point injection[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(7): 210330.)

[25] 国家环境保护总局. 空气和废气监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.

[26] 李 乐, 索建秦, 于 涵, 等. 燃气分析系统优化设计及应用研究[J]. 西北工业大学学报, 2020, 38(1): 104-113.

[27] 侯晓春, 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.

[28] 常 峰, 程 明, 林宏军, 等. 改进堵孔法在主燃烧室上的试验研究[J]. 推进技术, 2020, 41(4): 161-166. (CHANG F, CHENG M, LIN H J, et al. Experimental study on improved hole plugging method of combustor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(4): 161-166.)

[29] NICOL D G, MALTE P C, Philip C. Simplified models for NO_x production rates in lean premixed combustion[R]. ASME 94-GT-432.

[30] MAUGHAN J R, LUTS A, BAUTISTA P J. A dry low NO_x combustor for the MS3002 regenerative gas turbine[R]. ASME 94-GT-252.

[31] 张 群, 黄希桥. 航空发动机燃烧学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2019.

[32] Stephen R Turns. 燃烧学导论: 概念与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.

(编辑: 白 鹭)

Experimental study on fuel-staging in a lean premixed combustor with multi-points injection for aeroderivative gas turbine

SUN Fujun[1,2], PAN Jianghua[1], GUO Luhua[1], LI Jie[3], MA Hongyu[3], SUO Jianqin[1]

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, China;
3. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: To ensure that the NO_x and CO emissions of the multi-points injection lean premixed combustor in the range of 50%~100% loads all meet the emission demands, the effects of fuel-staging number, fuel-staging ratios under different loads, inlet pressure and inlet temperature on NO_x and CO emissions for seven-injectors combustor were studied experimentally. The experimental results indicate that when adopting no fuel-staging scheme for main fuel, the CO emissions under 50%~60% loads are both high and do not meet the standard. With the double fuel-staging scheme for main fuel , the emissions of NO_x and CO within the range of 50%~100% loads all meet the demands of $f_{NOx} \leqslant 25\times10^{-6}$, $f_{CO} \leqslant 50\times10^{-6}$ (@15% O_2), and 70% load is the transition load point for opening the second-stage main fuel. As the inlet pressure and temperature increasing, the range of R_{pilot} (R_{pilot} is the ratio of pilot fuel mass flow to total fuel mass flow), at which the NO_x and CO could both satisfy the emissions demands, gradually decreased. In addition, the f_{NOx} relation with p_3 is shown as $f_{NOx} \propto p_3^{0.44}$. Therefore, with the double fuel-staging scheme for main fuel and appropriate adjustment of R_{pilot}, the NO_x and CO emissions of the multi-points injection lean premixed combustor in this paper can meet demands for aeroderivative and land-based gas turbine combustor at present.

Key words: Aeroderivative gas turbine; Multi-point injection; Lean premixed combustion; Low emission; Fuel-staging

Received: 2022-08-09; **Revised**: 2022-11-24.

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2208023

Foundation items: National Science and Technology Major Project of China (2017-Ⅲ-0006-0031; 2017-Ⅲ-0002-0026).

Corresponding author: SUO Jianqin, E-mail: jqsuo@nwpu.edu.cn