

燃气轮机燃烧室预混喷嘴排放性能的试验和数值研究^{*}

赵玮杰^{1,2}, 于宗明¹, 贺红娟¹, 艾育华¹, 王岳^{1,2}

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了研究当量比、值班燃料量和压力对燃气轮机燃烧室预混喷嘴排放指标的影响, 在环境压力下按照等速模化原理进行了燃烧室预混喷嘴的燃烧试验, 基于化学反应网络法构建了污染物预测模型, 开展了试验和数值对比研究。结果表明: 在带值班燃料的情况下该预混喷嘴当量比 φ 在0.35~0.5时可满足国标排放要求, 但是值班燃料量增大会使 NO_x 排放升高; 在 $\varphi < 0.4$ 时, 压力对纯预混燃烧 NO_x 生成无影响, $\varphi > 0.4$ 时, NO_x 会随压力升高而增多; 带有值班燃料的预混燃烧时, NO_x 对压力变化敏感, 压力升高导致 NO_x 增多; 该预混喷嘴混合性能对空气流速不敏感、燃料兼容性强, 排放达标当量比范围宽, 经进一步设计开发后有潜力应用于燃气轮机低排放燃烧室中。该化学反应器网络模型依赖经验较少, 当值班燃料比例 ≤ 0.17 时, 对污染物预测与试验数据符合较好。

关键词: 低排放; 燃烧室; 预混燃烧; 化学反应器网络; 燃气轮机

中图分类号: V231.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2020) 02-0362-10

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190149

Experiment and Numerical Study on Emission Characteristics of Premixing Fuel Nozzle in Gas Turbine Combustor

ZHAO Wei-jie^{1,2}, YU Zong-ming¹, HE Hong-juan¹, AI Yu-hua¹, WANG Yue^{1,2}

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to study the effects of equivalence ratio, pilot fuel flowrate, and pressure on emission characteristics of premixing fuel nozzle in gas turbine combustor, combustion experiment on emission of premixing fuel nozzle were conducted at atmospheric pressure, and an emission prediction model based on chemical reactor networks was proposed. The experimental and numerical results indicated that the nozzle would meet the low NO_x emission standard at equivalence ratios from 0.35 to 0.5, but increasing pilot fuel flowrate would lead NO_x emission to increase. The increase of pressure have no effect on NO_x emission of pure premixed combustion at $\varphi < 0.4$, otherwise, NO_x would rise with the increasing pressure. NO_x emission of premixed combustion with pilot

^{*} 收稿日期: 2019-03-07; 修订日期: 2019-07-01。

基金项目: 国家自然科学基金 (51406200)。

通讯作者: 赵玮杰, 博士生, 研究领域为低排放燃烧室设计与试验。E-mail: zhaoweijie@iet.cn

引用格式: 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 Wei-jie, YU Zong-ming, HE Hong-juan, 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.)

flame was sensitive to pressure change and would increase as pressure increased. The premixing fuel nozzle, the mixing performance of which is insensitive to air velocity, which has strong fuel compatibility and a wide range of equivalence ratio to meet emission limit, has the potential to be used in low emission combustors of gas turbines after further development. The chemical reactor networks (CRN) model presented relies less on experience and the emission prediction of which is in good agreement with the experimental data when the ratio of pilot fuel to total fuel is no greater than 0.17.

Key words: Low emission; Combustor; Premixed combustion; Chemical reactor networks; Gas turbine

1 引言

环保法规对燃气轮机排放的限制日益严格,控制燃烧室污染排放是当前燃烧领域的研究热点,也是先进燃气轮机研制的重要内容。天然气是燃气轮机的主要燃料,国标 GB13223-2011 对燃用天然气的燃气轮机规定的氮氧化物排放限值为 $50\text{mg}/\text{m}^3$,国产燃气轮机目前尚无成熟机型可以满足该标准。天津地方标准 DB12/810-2018 将燃气轮机氮氧化物排放限值降低至 $30\text{mg}/\text{m}^3$,这对天然气燃气轮机低排放技术提出了更高的要求。环保法规的实施在保护环境的同时,也提高了国产燃气轮机的市场准入门槛,给国产燃气轮机的发展带来了挑战,同时也为加速燃气轮机低排放技术研发提供了动力。

为控制燃气轮机氮氧化物排放,国内外先后发展了稀释技术(注蒸汽或氮气)、贫预混燃烧、LDI (Lean direct injection)、分级燃烧、催化燃烧、RQL (Rich-quench-lean) 等技术。贫预混燃烧由于技术优势,逐渐成为当前控制燃气轮机排放的主流技术^[1]。在贫预混燃烧中影响污染物生成的因素包括:燃料与空气混合的均匀度^[2-5]、当量比(φ)或火焰温度^[6]、高温区停留时间^[7]、预混气流速度^[8-9]、湍流强度^[10]和燃料成分等,其中燃料与空气的混合均匀度对预混喷嘴的污染物排放具有重要影响。围绕贫预混燃烧降低污染物排放的原理,燃气轮机生产商开发了不同的预混喷嘴和燃烧技术。GE 公司 1980 年开发了 DLN-1^[11] 燃烧技术以满足 E 级燃气轮机污染排放要求。DLN-1 燃烧室中的燃料从旋流通道内喷出,与旋流空气和经火焰筒的射流相互掺混,以实现燃料与空气的均匀混合。为满足 F 级燃气轮机污染排放需求,GE 公司又开发了 DLN-2.XX 系列^[12-13] 预混燃烧技术,DLN-2.XX 系列预混喷嘴从旋流叶片上游以横侧射流方式喷注燃料,通过旋流和加大混合长度等方式强化掺混。西门子公司开发的 Hybrid 燃烧器^[14-15],在旋流器上游通过燃料杆喷注燃料,利用旋流器下游的回流区强化混合。三菱公司开发了带

有中心导向和外围多向喷嘴的燃烧技术^[16-18],其也采用旋流和延长混合时间的方式来加强混合,其特点是设置了旁通放气阀用于燃烧调整和控制。阿尔斯通公司开发的 EV 燃烧器^[19-21]采用锥形旋流结构实现燃料与空气的掺混,并使用了顺序式燃烧室技术。在航改燃气轮机方面,GE 公司生产的 LM2500+、LM6000 和 LMS100 等系列航改燃气轮机^[22-24],预混喷嘴结构均具有相似结构,均采用了反向双级旋流器实现燃料与空气混合。罗·罗公司开发的工业 RB211 和工业 Trent^[25-27],采用轴向分级的串联式燃烧室结构实现预混燃烧的目的。从低排放燃气轮机预混喷嘴的调研中可知,现有贫预混燃烧技术主要采用多点喷注、旋流和延长混合时间等方式实现燃料与空气掺混。本研究团队在借鉴吸收现有技术的基础上,从强化燃料空气混合出发,开发了一款新型燃烧室预混喷嘴,其采用受限空间的驻涡来加强燃料和空气的掺混,既能提高混合均匀性,又能有效防止挂火发生。利用该喷嘴开展的大量的理论和试验研究表明,其在提高燃料与空气混合均匀性和降低污染排放方面具有良好的表现^[28-33]。该预混喷嘴的前期工作主要集中在合成气、焦炉气等富氢燃料,对该喷嘴燃用天然气的研究较少,因此本文将从试验和模拟两个方面报告该预混喷嘴燃用天然气时的污染排放情况,以拓展其在燃气轮机主要燃料领域的应用,为天然气燃气轮机低排放燃烧技术的开发提供参考。

预混喷嘴污染物排放性能尽管最终取决于燃烧试验,然而污染物预测方法在缩短试验时间和指导设计改进方面作用明显。燃烧污染物的预测方法主要包括经验公式法^[34-35]、CFD 模拟^[36-37]和化学反应器网络法(CRN, Chemical reactor networks)^[38-40]三种。经验公式法是以试验数据为基础结合经验分析获得的对典型问题的预测,典型代表是 Lefebvre 所提出的以液体燃料燃烧产物预测为主的预测方法^[34]。详细燃烧过程模拟涉及的组分众多,对计算资源需求巨大,CFD 污染物模拟近期还难以满足工

程需求。CRN方法基于燃烧流场特点,通过构建简单的化学反应网络模型^[39],可以快速准确地计算出污染物的生成,并且方便研究压力、停留时间、当量比等因素对污染物生成的影响。CRN方法分为2类,第1类是通过对冷态或热态流场的分析,结合经验划分PSR和PFR反应区,确定各反应模型对应的参数,进而计算出最终的污染物。第2类是以Reaction Design公司的ENERGICO软件为代表的方法,其通过一定的规则,自动划分三维流场并判定其所属的反应器类型,自动计算出模型对应的计算参数。两类方法各有优劣,第1类方法在反应器参数选取上依赖经验,但其所构建的模型便于理解燃烧过程、易于研究因素影响。第2类方法,可以自动构建反应器模型,但反应器模型严重依赖于模型划分规则,同时当参数改变较大时须重新计算热态流场。本文从工程设计的角度考虑,采用CRN方法中的第1类方法,基于对燃烧物理过程的理解和经验,构建较少依赖经验参数的污染物预测模型,有助于加深对试验结果的理解和为后续试验和设计改进提供指导。

贫预混燃烧要求空气与燃料以接近可燃极限的比例混合,这需要大量空气进入预混喷嘴实现与燃料的充分混合,其余空气以冷却或掺混形式进入火焰筒并不直接参与燃烧反应,因此预混喷嘴的排放性能在低排放燃烧室中具有决定性作用。对于气体燃料来说,碳烟和UHC并不是污染物控制的重点,因此本文仅研究了 NO_x 和CO两种污染物。本文在第2节中简要介绍了试验中使用的预混喷嘴的结构和设计理念、主要试验系统、试验工况和试验方法;用CFD方法分析了试验装置的流场特点,并依此建立了化学反应器网络模型,并提供了不依赖于流场模拟的通用参数设置方法。第3节对比分析了当量比和值班燃料量的试验和模拟结果,并对CRN模型预测偏差进行了讨论;然后用CRN模型预测了压力对污染物生成的影响,为后续开展试验提供了参考。第4节给出了关于喷嘴设计与试验、污染物模型等方面的主要结论,并对后续研究工作进行展望。

2 燃烧试验与污染物模拟

2.1 试验简介

2.1.1 试验装置简介

本试验使用的预混喷嘴结构见图1。预混喷嘴主要由混合叶片、旋流叶片、中心体和喷嘴外壳组

成。混合叶片沿径向布置4排燃料喷射孔,孔径随径向位置增大,以保证燃料在径向上的均匀分布,混合叶片内的燃料通道与中心体内预混燃料通道相连。旋流叶片表面呈流线型,在弦长40%处开始周向偏转,其尾部转角为 35° ,设计旋流数为0.54。中心体直径60mm,内包含有预混燃料通道、扩散燃料通道和冷却空气通道;中心体端面沿周向均布10个直径3mm的扩散燃料喷射孔,如图1右侧图所示。喷嘴外壳长215mm,内径 $D=120\text{mm}$,其与中心体形成的环形通道成为燃料与空气混合的通道。混合叶片和旋流叶片通过螺钉与中心体相连,沿中心体周向均布且交错排列,预混喷嘴详细结构可参考文献[28-30]。

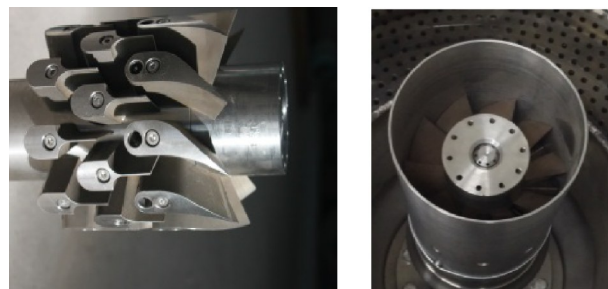


Fig. 1 Premixing fuel nozzle

图2详细显示了混合叶片流动和混合机制。从混合叶片前沿喷出的燃料与空气来流掺混,并随空气进入到混合叶片后端的驻涡混合区,在混合区内实现燃料与空气的充分混合。2排交错布置的混合叶片形成的有限空间,还可以强制气流转向、加速,限制驻涡脱落,有效防止挂火,该结构防止挂火机制参考文献[30]。

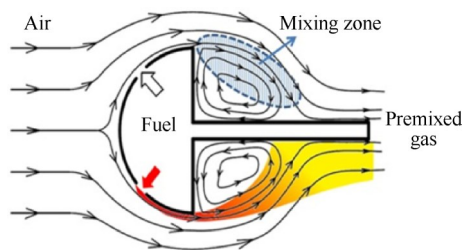


Fig. 2 Schematic diagram of trapped vortex to enhance mixing

本试验采用的试验台结构示意图见图3。带值班燃料的预混喷嘴安装在带观察窗的模拟机匣内,用石英玻璃管代替金属火焰筒,方便对火焰的观察。

空气沿石英玻璃管逆流至喷嘴处转向后进入预混喷嘴内,在预混喷嘴混合区与燃料进行充分混合形成可燃预混气,后经过旋流叶片进入石英玻璃管所构成的火焰筒内进行燃烧。在石英管出口处测量烟气成分、温度和压力等参数,从试验件机匣侧面的观察窗可以观察石英管内的火焰形态等燃烧情况。高温烟气经降温处理后排入烟囱。

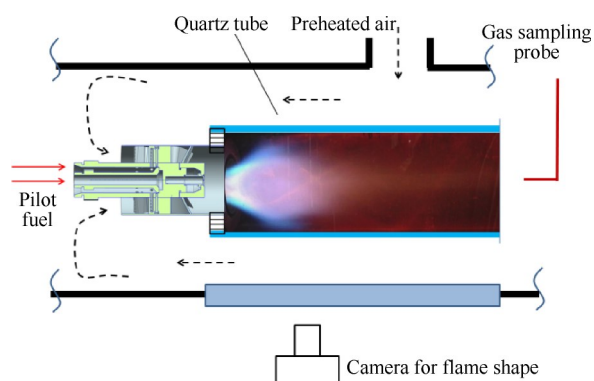


Fig. 3 Schematic diagram of experiment setup

试验中燃料和空气均使用涡街流量计测量,精度为满量程的 $\pm 1.0\%$;使用水银大气压力计和U形管水排配合测量进气和烟气稳态压力,测量精度为 $\pm 50\text{Pa}$;使用Testo350XL烟气分析仪测量烟气成分,其中 O_2 浓度精度为 $\pm 0.2\text{Vol.}\%$; NO_x 和CO测量精度为 $\pm 2\text{ppm}$ ($0\sim 39.9\text{ppm}$), 5% 测量值 ($40.0\text{ppm}\sim 300.0\text{ppm}$); 烟气温度采用B型热电偶进行测量,精度 $\pm 5^\circ\text{C}$ 。

2.1.2 试验工况与方法

试验工况是:空气预热温度 420°C ,模拟典型的F级燃气轮机燃烧室空气温度;试验压力为 0.1MPa ;试验空气流量 0.28kg/s ;燃料中甲烷含量 $>99\%$,最大燃料流量为 0.01kg/s 。

试验流程是:(1)将空气调至试验流量,并通过电加热器加热至试验温度;(2)使用预混喷嘴的扩散燃料路点火并调节至试验流量;(3)逐渐加大预混燃料流量,并记录各状态点的参数和污染物排放浓度。通过调整扩散燃料量研究不同的扩散燃料量对排放指标的影响。在预混燃烧稳定后逐渐降低扩散燃料流量直至关闭,调整预混燃料流量以研究预混条件下的排放指标。扩散燃料关闭后未在扩散管路供入清吹空气。

2.2 污染物预测模型

本文采用CFD模拟试验燃烧室内流场,根据流场特点构建CRN模型以预测污染物生成。根据预

混喷嘴几何结构建立了CFD计算模型,计算了 35m/s 、 50m/s 和 70m/s 三种空气流速,当量比为0.45时的燃料与空气掺混的流场,结果见图4~图6。在三种流速条件下的冷态流场具有相似结构,在喷嘴下游为典型的回流区结构,回流区后无掺混和冷却气进入,流动均匀符合柱塞流动特点。图5显示了沿轴向不同位置处的无量纲的轴向速度分布(三种无量纲速度重叠,为便于观察图中仅显示了 70m/s 时的速度),结果表明三种流速下的流场是相似的,与文献[8]所述结论一致,这为CRN模型中使用空气入口流速确定反应模型中的停留时间提供了依据。图5中 $x=2D$ (D 为喷嘴出口内径)时,中心线上的速度为0,该处为回流区的结束位置,在CRN模型中以此距离确定PSR反应器的体积。对三种流速条件下预混喷嘴内轴向混合均匀度(1表示完全均匀混合,0表示未混合)的统计结果见图6,结果表明流速对混合均匀度的影响较小,试验中的预混喷嘴出口混合均匀度达到0.92以上,该结果表明可以使用PSR模型来近似模拟头部回流区结构,并且混合均匀度不随流速改变,说明选择PSR模型可以适应一定的流速范围。

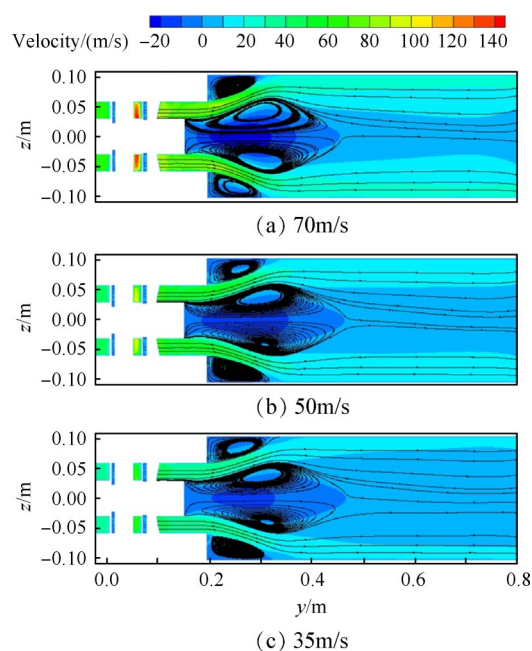


Fig. 4 Velocity contour at different air inlet velocity

按照以上流场分析结果,构建的CRN模型见图7。该模型由2个全混流反应器PSR(Perfectly stirred reactor)、1个柱塞流反应器PFR(Plug flow reactor)和1个混合器Mixer构成。PSR 1用于带值班燃料时的燃

烧模拟,PSR 2用于模拟加入值班燃料影响后的预混燃烧,Inlet1用于模拟值班燃料(按当量比0.8~1混合气供入),Inlet 2表示预混燃料气(混合气总量不变,以改变当量比的形式调整预混燃料流量),Mixer用来模拟值班燃料燃烧后与预混气的混合过程。在这个模型中值班火焰产生的高温烟气通过和预混气 Inlet 2混合,提高进入 PSR 2反应的预混气温度并改变其组分,间接影响 PSR 2中 NO_x 的生成。PSR 2模拟预混气在回流区内的燃烧,该模型未考虑设置回流比例等,目的是为了简化模型减少人为设置的经验参数。PFR用于模拟 PSR 2反应器产生的高温烟气在平直圆管中的流动和反应。

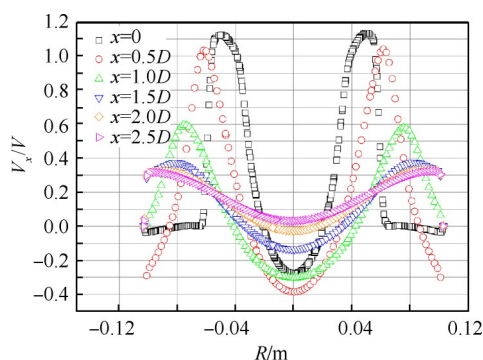


Fig. 5 Dimensionless cold flow swirling velocities at different cross sections

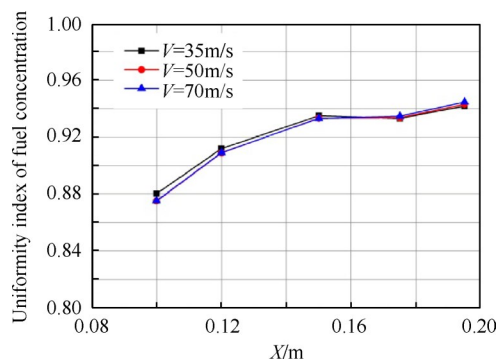


Fig. 6 Mixing uniformity index at different air velocity

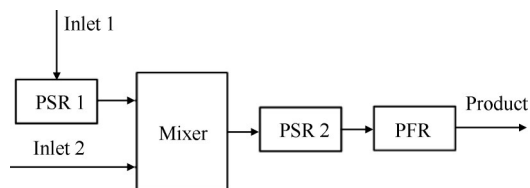


Fig. 7 Chemical reactor network for flame simulation

Inlet 1依据燃料流量按照当量比0.8确定其预混

气总流量 m_1 。文献[39]中以当量比1模拟扩散值班燃料燃烧,本文之所以选择值班燃料当量比0.8是考虑到值班燃料流量较小,值班火焰受到周边大量气流的掺混冷却等散热影响,实际火焰温度要低于当量比为1时的火焰温度。Inlet 2供入的气体流量 m_2 为试验总流量 m (空气流量和燃料流量之和)与 m_1 之差。PSR 1模拟的值班火焰与PSR 2模拟的预混火焰,均处于回流区流场内,本文假定扩散火焰与预混火焰所形成的烟气在回流区内总的停留时间 t 是不变的, t 按平均停留时间确定,即为回流区体积与来流体积流率之比,其中回流区体积为喷嘴出口至下游 $2D$ 距离所形成圆柱对应的体积。PSR 1和PSR 2反应器停留时间 t_1 和 t_2 分别按预混气流量与总预混气流量之比与总停留时间的乘积确定,即分别按式 $t_1=t \times m_1/m$ 和 $t_2=t \times m_2/m$ 计算。PFR参数按试验件实际直径和长度等参数设置,其它参数均依据试验工况条件设置。本模型中,只要确定回流区长度(本文中为 $2D$)和值班预混气Inlet 1当量比两个参数,其它参数均可按上述方法确定,其中回流区长度和Inlet 1当量比均可依经验或流场计算获得,本文中回流区长度为 $2D$,Inlet 1当量比为0.8。

本文构建的CRN模型是针对低排放燃烧室的,低排放燃烧室的主要特点是大部分空气或全部空气都从预混喷嘴进入火焰筒;预混喷嘴带有少量的值班燃料;对于包含主燃孔、冷却气膜和掺混孔结构的传统扩散燃烧室并不适合。通过增大Inlet 1预混气流量 m_1 来模拟纯扩散火焰燃烧情况也是不合适的,后文有对纯扩散情况的计算对比。本文试验和计算中 m_1/m 最大为0.17,可认为 $m_1/m \leq 0.17$ 时,该CRN模型是适用的。

3 结果与讨论

3.1 当量比对污染物排放的影响

为保持预混火焰在一定的当量比范围内稳定燃烧,采用值班燃料是燃气轮机贫预混燃烧室常用配置。本试验过程中也设置了值班燃料,为便于试验分析,当量比对污染物影响的试验均在值班燃料量为固定流量的情况下进行,因此试验中值班燃料与预混燃料的比例是随着总当量比的增大而下降的。图8显示了值班燃料流量为 1g/s 时,随总当量比增大火焰形态的变化,图9~图10所示试验结果均是在此值班燃料流量下获得的。图8(a)显示的是仅有值班燃料时所形成的扩散火焰,从照片可以发现此时火

焰较短,分布在中心钝体下游呈倒锥形结构。随着当量比增大(预混燃料逐渐增多),火焰形态先是保持不变(图8(b)),而后逐渐增大并且充满整个回流区(图8(c)~(f))。图8(b)中火焰形态保持不变,是因为此时预混燃料流量较低,预混气混合均匀,没有局部的高浓度区域,此时预混气处于可燃极限外,除与扩散火焰掺混的燃料参与燃烧外,部分燃料未发生反应直接随旋流空气贴石英管壁面流出,实测的氧含量比理论完全燃烧氧含量高的结果(见图10)也说明低当量比时部分燃料未参与燃烧。当量比增大后,在值班火焰的点燃下,预混气逐渐参与燃烧,并成为主流预混火焰。从火焰照片上看,值班燃料产生的扩散火焰所形成的高温区影响有限,CRN模型中按 m_1/m 设置PSR 1停留时间正是基于对此燃烧现象的观察。

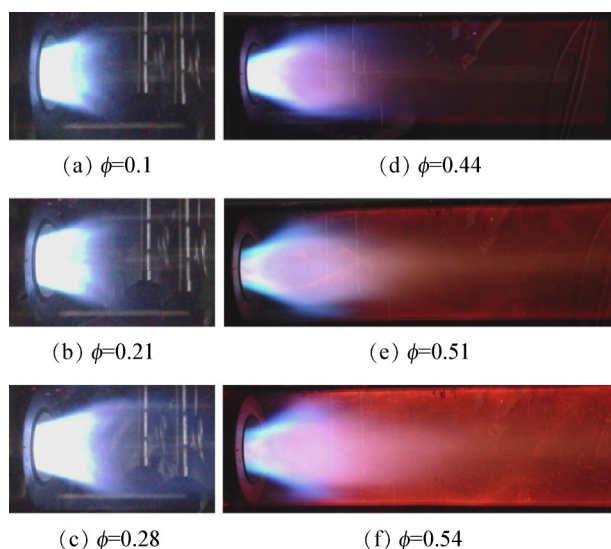


Fig. 8 Direct photos of flame under different equivalence ratios

图9显示了预混喷嘴 NO_x 和CO排放指标的实测值和CRN模型预测结果, NO_x 和CO浓度值均按国标折算到15%氧浓度,后文与此处理相同,不再赘述。从整体结果来看,本文构建的CRN模型预测结果与试验值总体趋势相同,但在具体数值上还有偏差。图9(a)中当量比为0.1~0.2时, NO_x 随当量比增大呈下降趋势,是因为此阶段 NO_x 主要由扩散火焰形成,而燃料流量增大对扩散火焰产生的 NO_x 进行了稀释。对应在CRN模型中,就是此阶段内预混气在PSR 2反应器内未发生反应,PFR出口烟气温度未变化。图9(a)中,当量比为0.2~0.25时,

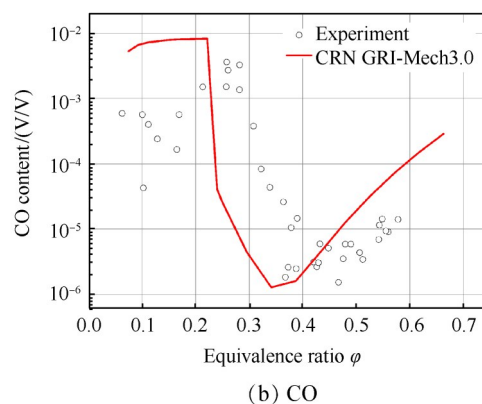
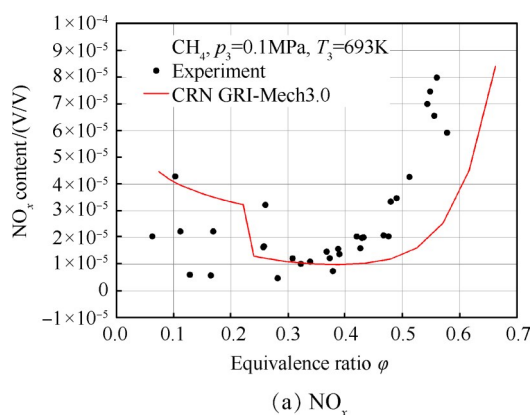


Fig. 9 Equivalence ratio influence on emission

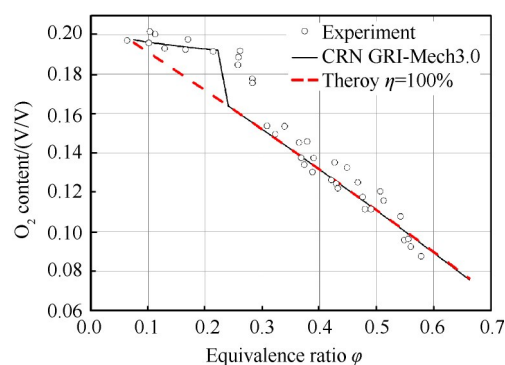


Fig. 10 Experimental data of O_2 content compared to theory

NO_x 的陡然降低是由于预混气在PSR 2反应器中开始发生反应,燃烧状态发生了改变。在当量比 >0.25 以后, NO_x 随当量比增大试验值和计算值均呈现增大趋势。试验值总体上比计算值偏大 $1 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5} (\text{V/V})$,主要原因是:(1)试验中预混气在喷嘴出口平面混合均匀度计算结果虽然可达到0.92,具体见图6,但是和PSR模型中完全均匀混合还是有差距的。本文构建的模型无法模拟混合不均造成的影响。(2)实际燃烧中值班燃料形成的扩散火焰与预混火焰之间存在相互作用,当量比增大后预

混气开始燃烧,对扩散火焰所形成的高温区的冷却作用减弱,使得高 NO_x 生成率的高温区域逐渐变大,从而导致 NO_x 升高。本文构建的CRN模型无法模拟这样的过程。基于以上两点原因,CRN模型在预测的准确性方面还有待进一步改进,但作为一种快速预测方法,从与试验结果的对比发现,本模型基本可以满足对参数影响因素定性研究和对试验现象分析的需要。当量比对 NO_x 影响研究的现实作用是确定预混喷嘴可以满足排放法规要求的当量比运行范围,为燃机燃烧控制策略制定提供依据。按照 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 的国标要求,从 NO_x 排放角度要求当量比不超过0.5,从CO排放的角度要求当量比不低于0.35,因此从常压试验结果可以确定,预混喷嘴可以满足国标排放要求的运行范围是 $0.35 < \varphi < 0.5$,实际中还应考虑压力对污染物生成和燃烧动态性等影响因素,满足排放标准的运行范围会更窄。

图9(b)显示了CRN模型对CO的预测值与试验值的对比,该模型基本预测了CO随当量比的变化趋势,具体数值上偏差的原因与对 NO_x 预测偏差原因分析相同。图10显示的实测烟气氧含量与燃料完全燃烧氧含量对比,表明在当量比较低的情况下没有实现完全燃烧,这与对燃烧火焰形态变化的观察相符,应在后续设计改进中引起重视。

3.2 值班燃料量对污染物排放的影响

在低排放燃烧室的设计中,合理确定值班燃料比例是非常重要的,过高的值班燃料比例会造成 NO_x 排放超标,过低的值班燃料比例会导致熄火等问题。在本试验中,研究了值班燃料流量为 $1\text{g}/\text{s}$ 和 $2\text{g}/\text{s}$ 两种固定流量下的排放情况,结果显示在图11中,并且在图中给出了CRN模型预测结果,其中为便于观察,值班燃料流量为 $1\text{g}/\text{s}$ 的试验数据未显示(试验数据与图9中试验结果相同)。结果表明值班燃料的增加会导致 NO_x 排放的增大,这与低排放燃烧室值班燃料比例的研究结论相一致。值班燃料量对CO的影响主要体现在低当量比阶段,此时由于火焰温度的升高,CO排放量大为降低,高当量比时值班燃料的增加对CO排放基本无影响。CRN模型预测结果与试验数据符合较好,表明本文确定的CRN模型及参数设置方法是可以正确反映燃烧物理过程的,可以用于与本试验设置相似的燃烧室污染物的预测。

对于纯扩散燃烧情况下的污染物的排放情况,图11中也给出了试验结果和CRN预测结果。对比

分析表明,CRN模型对于扩散燃烧模型下的污染物预测结果与试验值总趋势相同,但是具体数值偏差较大。扩散燃烧与带值班燃料的预混燃烧,在火焰形态、流场结构和污染物生成路径等方面已经有较大不同。在纯扩散模式下,仍然按照参与扩散燃烧的空气流量线性设置反应器停留时间等参数,已经和实际燃烧过程不相符,导致预测结果出现较大偏差。对于纯扩散火焰的模拟,可按照文献[38-40]给出的方法,从流场结构中确定反应模型划分和参数设置。

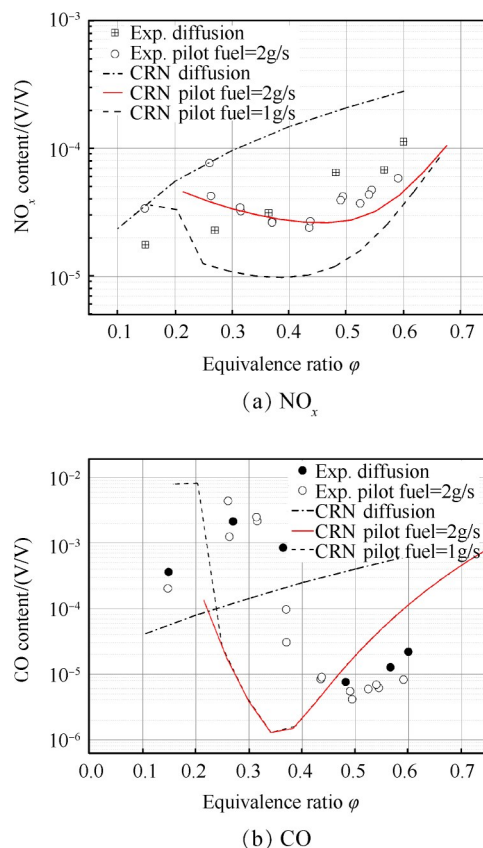


Fig. 11 Pilot fuel flowrate influence on emission

3.3 压力对 NO_x 排放的影响

高压燃烧试验是燃烧室研制中花费最大的部分,研究压力对污染物排放的影响规律,可减少高压试验时间和投入。图12显示了利用前文构建的CRN模型,得到的压力对污染物影响的计算结果。计算选取三种型号燃气轮机燃烧室压力:(1)WP6G, 0.7MPa ; (2)9FA, 1.6MPa ; (3)UGT25000, 2.2MPa 。图12(a)显示了纯预混燃烧模式下,三种压力下, NO_x 排放随当量比的变化趋势,为便于低当量比下的比较,图中给出了局部放大图。结果表明对于纯预混燃烧,当量比 <0.4 时,压力对 NO_x 排放结果几乎无影响,

当量比 >0.4 以后,压力增大导致 NO_x 随之增多,但是增多趋势在减弱,呈现非线性增多。该计算结果与文献[41]所给试验数据趋势相一致。

图12(b)展示的结果是在值班燃料流量为 1g/s 时计算获得的。与图12(a)显示的纯预混燃烧时 NO_x 排放结果不同, $0.35<\varphi<0.5$ 时,压力增大均导致 NO_x 排放增多,这符合压力对扩散燃烧 NO_x 排放的影响,从CRN模型中也可看到,低当量比时 NO_x 随压力增大的增量主要来自模拟扩散燃烧的PSR1反应器。该结果表明,要使高压试验与常压试验中 NO_x 排放指标相当,应尽可能降低值班燃料比例或者采用纯预混燃烧。

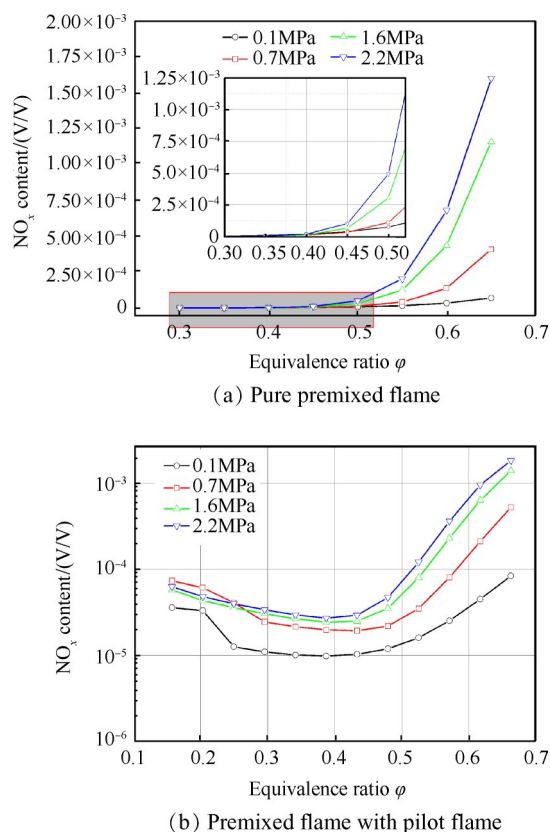


Fig. 12 Effect of pressure on premixed flame NO_x emission with pilot flame based on CRN model

4 结论

本文通过试验和模拟两种方法对预混燃烧污染物生成规律进行了研究,着重研究了当量比、值班燃料量和压力对污染物生成的影响。可以得到以下结论:

(1)本预混喷嘴在值班燃料为 1g/s ,总当量比 $0.35\sim 0.5$ 时,常压试验中的污染排放指标可以满足国

标要求;值班燃料量增多会导致污染物生成明显升高;压力对贫预混燃烧 NO_x 排放无影响,对含值班燃料的预混燃烧 NO_x 影响明显,因此低排放燃烧室设计中应尽量减少值班燃料量或采用全预混燃烧。

(2)本文提出的CRN模型及参数设置方法,可以在较宽的值班燃料范围内预测污染物生成情况,预测结果与试验值较为吻合,能够用于低排放燃烧室设计。但是本文的CRN模型尚未考虑火焰辐射等热损失、扩散火焰与预混火焰相互作用、掺混不均等方面的影响因素,后续还需结合试验工作逐步完善。

致谢:感谢国家自然科学基金的资助。

参考文献

- [1] Mcdonell V, Dunn-rankin D, Therkelsen P. Lean Combustion Technology and Control [M]. USA: Academic Press, 2016: 147-201.
- [2] Thomas F. FRIC. Effects of Fuel-Air Unmixedness on $\text{NO}(\text{x})$ Emissions[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1993, 9(5): 708-713.
- [3] 郑韞哲, 朱民, 姜羲. 合成气旋流预混燃烧的大涡模拟[J]. 推进技术, 2013, 34(5): 664-671. (ZHENG Yun-zhe, ZHU Min, JIANG Xi. Large Eddy Simulation of Premixed Swirling Combustion with Synthesis Gases [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(5): 664-671.)
- [4] 郑韞哲, 朱民, 姜羲. 旋流预混燃烧室流动混合的大涡模拟[J]. 航空动力学报, 2012, 27(1): 33-40.
- [5] Elkady A M, Herbon J, Kalitan D M, et al. Gas Turbine Emission Characteristics in Perfectly Premixed Combustion [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2012, 134(6): 501-508.
- [6] Kang K, Song J, Son J, et al. Emission Characteristics of Induced Premixed Flames with Various Pressure and Flow Conditions [C]. Gyeongju: *Proceedings of the 9th Asia-Pacific Conference on Combustion*, 2013.
- [7] Rutar T, Malte P C, Kramlich J C. Investigation of NO_x and CO Formation in Lean-Premixed, Methane/Air, High-Intensity, Confined Flames at Elevated Pressures [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, 28(2): 2435-2441.
- [8] Carlsson H, Nordstrom E, Bohlin A, et al. Numerical and Experimental Study of Flame Propagation and Quenching of Lean Premixed Turbulent Low Swirl Flames at Different Reynolds Numbers [J]. *Combustion and*

- Flame*, 2015, 162(6): 2582–2591.
- [9] 段冬霞. 低旋流喷嘴预混燃烧特性的数值和实验研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2017.
- [10] Aladawy A S, Lee J G, Abdelnabi B. Effect of Turbulence on NO_x Emission in a Lean Perfectly-Premixed Combustor[J]. *Fuel*, 2017, 208: 160–167.
- [11] Thomas L L, Simons D W, Popovic P, et al. E-Class DLN Technology Advancements, DLN1+[R]. *ASME GT* 2011–45944.
- [12] Venkataraman K, Lewis S E, Natarajan J, et al. F-Class DLN Technology Advancements: DLN2.6+ [R]. *ASME GT* 2011–45373.
- [13] Pavri R, Moore G D. Gas Turbine Emissions and Control [R]. *New York: General Electric Laboratory, Report No. GER-4211*, 2001.
- [14] Liu K, Sanderson V. The Influence of Changes in Fuel Calorific Value to Combustion Performance for Siemens SGT-300 Dry Low Emission Combustion System[J]. *Fuel*, 2013, 103: 239–246.
- [15] Maghon H. Hybrid Burner for a Pre-Mixing Operation with Gas and/or Oil, in Particular for Gas Turbine Systems[P]. *US:5062792*, 1991–11–05.
- [16] Ai T, Masada J, Ito E. Development of the High Efficiency and Flexible Gas Turbine M701F5 by Applying “J” Class Gas Turbine Technologies[J]. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 2014, 51(1): 1–9.
- [17] Tsukuda Y, Akita E, Arimura H, et al. The Operating Experience of the Next Generation M501G/M701G Gas Turbine[R]. *ASME* 2001–GT-0546.
- [18] Aoki S, Tsukuda Y, Akita E, et al. Development of the Next Generation 1500°C Class Advanced Gas Turbine for 50Hz Utilities[R]. *ASME* 96–GT-314.
- [19] Zajadatz M, Pennell D, Bernero S, et al. Development and Implementation of the Advanced Environmental Burner for the Alstom GT13E2[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2013, 135(6).
- [20] Zajadatz M, Lachner R, Bernero S, et al. Development and Design of Alstom’s Staged Fuel Gas Injection EV Burner for NO_x Reduction[R]. *ASME GT* 2007–27730.
- [21] Alkatie H, Mcmillan R, Noden R, et al. Dual Fuel Dry Low Emissions (DLE) Combustion System for the ABB Alstom Power 13.4 MW Cyclone Gas Turbine[R]. *ASME* 2000–GT-0111.
- [22] Neilson C E, Shafer D G, Carpentieri E. LM2500 Gas Turbine Fuel Nozzle Design and Combustion Test Evaluation and Emission Results with Simulated Gasified Wood Product Fuels[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1999, 121(4): 600–606.
- [23] Reid R E, Hartranft J J. GE LM2500 Marine Gas Turbine Experience Update[R]. *ASME* 91–GT-023.
- [24] Blouch J, Li H, Mueller M, et al. Fuel Flexibility in LM2500 and LM6000 Dry Low Emission Engines [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2012, 134(5): 51503.
- [25] Willis J D, Moran A J. Industrial RB211 DLE Gas Turbine Combustion Update[R]. *ASME* 2000–GT-0109.
- [26] Summerfield A H, Pritchard D, Tuson D W, et al. Mechanical Design and Development of the RB211 Dry Low Emissions Engine[R]. *ASME* 93–GT-245.
- [27] Soinne P, Stephens R. Industrial RB211: 15 Years of History and Development[R]. *ASME* 90–GT-145.
- [28] 于宗明, 吴鑫楠, 邱朋华, 等. 燃气轮机富氢燃料预混燃烧实验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(5): 1426–1433.
- [29] 于宗明, 贺红娟, 王 岳, 等. 阵列驻涡预混器内流抗挂火机理研究[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(12): 3231–3241.
- [30] 于宗明. 可燃气体阵列驻涡强化混合模型及其应用[D]. 北京:中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2016.
- [31] 邹文杰, 王 岳, 孔文俊. 轴向旋流器单通道甲烷/空气回火特征大涡模拟研究[J]. *推进技术*, 2017, 38(7): 1548–1555. (ZOU Wen-jie, WANG Yue, KONG Wen-jun. LES Study on Flashback of Single Channel of an Axial Swirler for Premixed CH_4/Air Mixture[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(7): 1548–1555.)
- [32] 邹文杰, 王 岳, 孔文俊. 强旋流环形通道甲烷/空气回火特征大涡模拟研究[J]. *热能动力工程*, 2017, 32(5): 44–49.
- [33] 邹文杰. 甲烷-空气预混气在轴向叶片式旋流器中回火特征大涡模拟研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2016.
- [34] Lefebvre A H. Gas Turbine Combustion[M]. *USA: Taylor and Francis*, 1998: 373–376.
- [35] Rizk N, Mongia H C. A Semi-Analytical Emission Model for Diffusion Flame, Rich/Lean and Premixed Lean Combustors[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1995, 117(2): 290–301.

- [36] Andreini A, Cerutti M, Facchini B, et al. CFD Analysis of NO_x Emissions of a Natural Gas Lean Premixed Burner for Heavy Duty Gas Turbine [J]. *Energy Procedia*, 2015, 81(12): 967-976.
- [37] Jaravel T, Riber E, Cuenot B, et al. Large Eddy Simulation of an Industrial Gas Turbine Combustor Using Reduced Chemistry with Accurate Pollutant Prediction [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 3817-3825.
- [38] 吴鑫楠, 于宗明, 冯永志, 等. 合成气注氮燃烧室的数值模拟与实验研究[J]. 推进技术, 2016, 37(7): 1287-1294. (WU Xin-nan, YU Zong-ming, FENG Yong-zhi, et al. Experimental and Numerical Study of a Syngas Combustor with N_2 Injection[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2016, 37(7): 1287-1294.)
- [39] 杨小龙, 崔玉峰, 徐 纲, 等. 燃气轮机燃烧室化学反应器网络模型研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(9): 1585-1588.
- [40] 杨小龙. 燃气轮机燃烧室化学反应器网络模型研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2009.
- [41] Bhargava A, Kendrick D W, Casleton K H, et al. Pressure Effect on NO_x and CO Emissions in Industrial Gas Turbines[R]. ASME 2000-GT-0097.

(编辑:梅 瑛)