

燃气轮机中心分级旋流燃烧器的几何模化研究

刘占南¹, 葛冰¹, 姜海燕², 藏述升¹

(1. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240; 2. 中国船舶第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要:针对燃气轮机原尺寸燃烧试验不易开展的问题,基于特征速度、雷诺数与达姆科勒数等特征参量,对燃气轮机中心分级旋流器开展模化试验研究。本研究通过火焰自发光拍摄、气体组分分析等方法,在相同分层比下,对比等速度、等雷诺数和等达姆科勒数3种不同模化准则的试验结果在火焰结构、出口温度、污染物排放等方面的一致性,确定不同模化准则的模化特性;并在不同分层比下,研究分层比对达姆科勒准则模化效果的影响。结果表明:应用等达姆科勒数准则进行模化,模化燃烧器与原型的试验结果差异度最小;等雷诺数准则在各项特征的模化中,均与原型燃烧室存在较大差异。改变分层比,选择等达姆科勒数准则模化方法时,火焰结构的模化差异随分层比升高而减小,NO排放量在分层比取值为1时差异度最小。

关键词:中心分级;相似准则;变分层比

中图分类号:TK16 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.01.013

[引用本文格式] 刘占南, 葛冰, 姜海燕, 等. 燃气轮机中心分级旋流燃烧器的几何模化研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(1): 119-126. LIU Zhan-nan, GE Bing, JIANG Hai-yan, et al. Study on geometric modeling for gas turbine centrally-staged swirling combustor [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(1): 119-126.

Study on Geometric Modeling for Gas Turbine Centrally-staged Swirling Combustor

LIU Zhan-nan¹, GE Bing¹, JIANG Hai-yan², ZANG Shu-sheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240;
2. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: Aiming at the problem that the combustion experiment of a prototype burner of gas turbine was difficult to carry out, the modeling experimental study of gas turbine centrally-staged swirling combustor was performed in this paper based on characteristic parameters such as characteristic velocity, Reynolds number (Re) and Damköhler number (Da). By means of flame self-luminescence photography and gas component analysis, the consistency of the test results of three different simulation criteria, such as uniform velocity, equal Reynolds number and equal Damköhler number, in terms of flame structure, exhaust temperature and pollutant emission was compared under the same stratification ratio to determine the modeling characteristics of different simulation criteria; under different stratification ratios, the influence of stratification ratio on the modeling effect of Da criterion was studied. The results show that the difference of the modeling results between the model burner and the prototype is the smallest when the Da criterion is applied to the modeling; the equal Reynolds number criterion differs greatly from the prototype combustor in the modeling of various characteristics. When the stratification ratio is changed and the criterion of equal Damköhler number is selected for the modeling method, the modeling difference of the flame struc-

ture decreases with the increase of the stratification ratio, and the NO emission difference is the smallest when the stratification ratio is 1.

Key words: centrally-staged, similarity criteria, variable stratification ratio

引言

燃气轮机燃烧室的改型与性能优化离不开燃烧试验研究,在具体的试验过程中,可以通过几何模化对试验加以简化,但通用的模化试验准则并不明确,系统完善的试验方法尚未形成。

燃气轮机燃烧器的几何模化工作具有一定的研究基础。基于重型燃气轮机对燃料灵活性的要求,早期模化工作重点关注燃料特性和燃烧室几何参数对模化试验结果的影响。Sarhan 等人^[1]指出,应用不同燃料时,需采取不同的燃烧室几何参数,燃烧室长度应与不同燃料的燃烧化学反应特征时间成正比,而体积则与燃料燃烧的火焰面体积有关;当燃料相同时,燃烧室体积不应等比缩小,应保证燃烧室长度与原型一致,燃料的质量流量应与燃烧室的体积缩比一致。Brown 等人^[2]对燃烧室尺寸缩小伴随的边界效应加以分析并指出,燃烧室内表面与体积的比值也是影响燃烧器性能参数的重要因素,从化学反应停留时间、雷诺数差异、尺寸差异等角度,分析确定了发动机的热损失、摩擦损失、热应力等与模化缩放比例的复杂关联性。此外,随着多喷嘴燃烧器的广泛应用,燃烧器的数目和结构特征对模化效果的影响也被学者关注。Swami 等人^[3]分析了模化过程中喷嘴数量的影响,证实在考虑射流强度的基础上,保持相同喷嘴数目是可行的,模化过程保持与原型相同的喷嘴数目是必要的。

以上工作从工业应用角度提出了燃烧器改型的部分关键点,并未从相似原理的角度给出关键物理参数,实际的模化过程应探索统一的相似准则数。对此,Xie 等人^[4]通过数值模拟方法,指出单级旋流燃烧器的模化工作中,应重视与流动和化学反应相关的三类准则,包括等速度准则、等雷诺数(Re)准则、等达姆科勒数(Da)准则,即分别保证模化燃烧试验与原型燃烧过程具有相同的流动速度和相同的 Re 及 Da 。结果表明,等 Da 准则最适用于单级旋流燃烧器的模化。Meraner 等人^[5]对氢燃料预混燃烧器的模化研究表明,模化过程保持化学反应停留时

间相同时,模化试验与原型试验所得的预混火焰表现出良好的一致性。同时,上述两项研究均表明应用等速度准则进行模化时, NO_x 生成结果偏差最大,这是由于等速度模化下高速气流使得反应物停留时间缩短,致使 OH 自由基的生成,以至于热力型 NO_x 的生成速率增大。

上述研究确定了等 Da 模化方法在单级旋流与预混燃烧器模化工作中的重要性,但该方法在中心分级旋流燃烧器中的应用效果并不明确。中心分级燃烧是现代燃气轮机降低排放、解决贫预混燃烧易诱发燃烧振荡问题的关键技术之一。该技术被多个燃气轮机制造商使用,如 GE 公司的双环预混旋流燃烧器(TAPS),先后被应用在 GENX 及 LEAP 发动机上,表现出优异的性能。RR 公司推出的贫油直接喷射(LDI)燃烧器,同样采用中心分级形式,用以提高油气掺混的均匀性,并维持火焰稳定性。

本文将对几何模化方式下中心分级燃烧器性能试验中存在的问题开展研究,探讨其模型燃烧器与原型间的参数变化规律。与单级旋流相比,中心分级燃烧器具有特殊的关键参数——分层比(Stratification Ratio, SR),其定义为值班级当量比占主燃级当量比的比例^[6],这一物理量与燃烧特征参数沿径向的分布特征存在密切联系。因此明确不同分层比对模化效果的影响,是中心分级燃烧器几何模化工作的重要内容。本研究首先开展中心分级旋流燃烧器多准则模化试验,在相同分层比下对比等速度、等 Re 与等 Da 模化试验所得的火焰结构、排放温度及污染物排放等结果。之后选择与原型燃烧器在特征参数上最相近的模化准则,进一步分析火焰特征及性能参数随分层比的变化。

1 系统介绍

1.1 试验系统

本研究采用的燃烧试验系统如图 1 所示,可分为 3 部分,即风机与空气压缩机组成的空气供应系统,天然气储存和输送的燃料供应系统,以及数据采集系统。

试验采用两组 S 型热电偶对排气出口的平均温

度场进行测量。热电偶耙的安装位置为燃烧器出口下游 $L/D = 6D$ (D 为燃烧器外径) 处, 以获取火焰筒出口温度分布。

光学采集系统, 包含 VEO 710L 高速相机和波长范围为 432 ± 10 nm 的 CH 基带通滤光片。在中心分级模化试验研究中采用的相机拍摄频率为 1 000 Hz, 原尺寸燃烧器的拍摄区域为 $260\text{ mm} \times 180\text{ mm}$; 模型燃烧器的拍摄区域为 $130\text{ mm} \times 180\text{ mm}$ 。试验

中, 采集 900 张火焰 CH 基荧光照片, 进行平均后得到时均火焰结构。

燃烧室试验段的排放特性分析采用 ULTRAMAT 23(U23) 气体分析仪, 能够对排放的 NO_x 、 CO 和 O_2 进行测量, 气体采样点位于燃烧室下游足够远处 ($LE > 40D$)。U23 气体分析仪利用红外传感器测量 NO 的体积分数, 测量范围为 $0 \sim 200 \times 10^{-6}$, 灵敏度为 $\leq 1\%$ 量程, 气体通入前进行过滤和干燥处理。

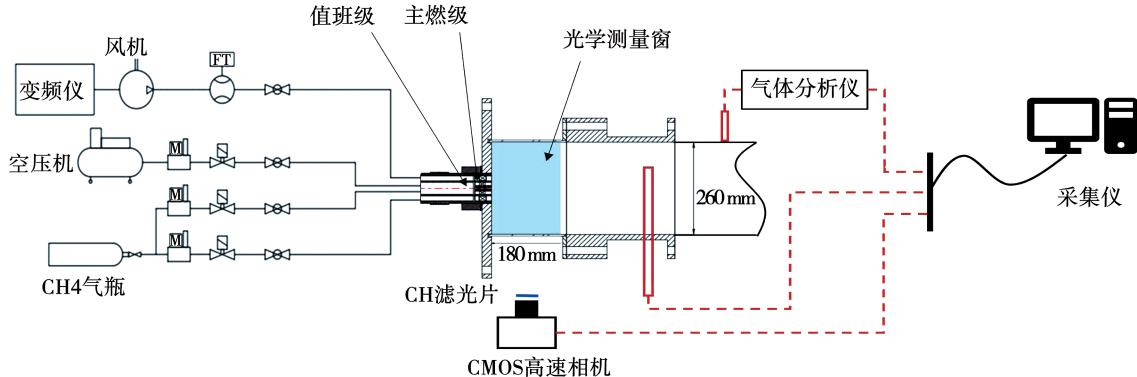


图 1 中心分级燃烧试验系统

Fig. 1 Centrally-staged combustion test system

1.2 试验燃烧器参数

所研究的燃烧器是由值班级与主燃级组成的中心分级旋流燃烧器, 如图 2 所示, 参数由表 1 给出, 叶片厚度为 1.5 mm, 旋流数在模化过程中保持不变, 模化燃烧器的几何尺寸为原型的 0.5 倍。值班级包含 8 片旋流叶片, 主燃级设置 16 片旋流叶片。

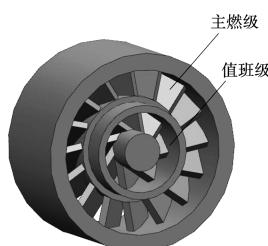


图 2 中心分级旋流器结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of centrally-staged swirling combustor

表 1 旋流器参数

Tab. 1 Parameters of swirling combustor

旋流器类型	外径/mm	旋流数
值班级	34	0.64
主燃级	70	0.70

图 3 给出燃料、空气管路的安装示意图, 值班级与主燃级的燃料和空气在图中所示的位置充分预混, 经燃烧器出口旋流作用后进入燃烧室。两级燃料来自同一气源, 空气则通过风机与空压机分别供气, 以实现变分层比的工况设计。

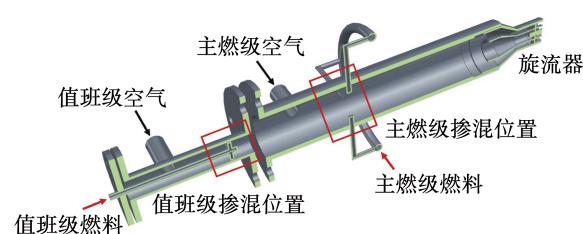


图 3 燃料及空气管路安装示意图

Fig. 3 Installation diagram of fuel and air pipelines

原尺寸燃烧器与模型燃烧器在试验台中的安装方式如图 4 所示。原尺寸燃烧器使用的管型火焰筒内径为 260 mm, 火焰筒材料为光学石英玻璃, 模型燃烧器以及所使用的火焰筒采用等比缩放, 缩放比例为 0.5, 火焰筒内径为 130 mm。

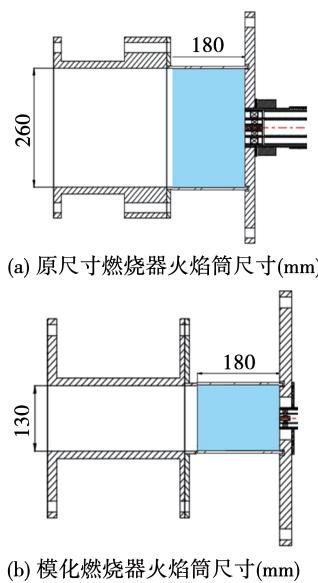


图 4 燃烧器装配与光学观测区域示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of burner assembly
and optical observation area

1.3 试验工况

本研究通过结合 3 种模化准则的定义与试验过程的热量输入,完成试验工况设计。特定工况下试验的热量输入可表示为:

$$Q = K \rho_0 U_0 D^2 \quad (1)$$

式中: K —与燃料种类和当量比相关的比例系数,由于研究所涉及的燃料种类和当量比 0.65 不变, K 可认为是常数; ρ_0 —入口处燃料与空气混合物的密度, kg/m^3 ; U_0 —混合气体流速, m/s ; D —燃烧器外径, mm 。

应用等速度准则进行模化时,需保持燃烧器特征速度 U_0 不变,通过上式可以得到几何模化下的输入热量的比值与几何缩放的关系:

$$\frac{Q_v^*}{Q_0} \propto \left(\frac{D_v^*}{D_0} \right)^3 \quad (2)$$

式中: Q_0 —实际燃烧室运行过程中的热输入值, kg/s ; D_0 —原尺寸燃烧器出口直径, mm ; Q_v^* —等速度模化条件下的热输入值, kg/s ; D_v^* —等速度模化下燃烧器出口直径, mm 。

等雷诺数(Re)准则进行模化时,保持流动的雷诺数不变,即保持 $U_0 D_0$ 不变,当模化采用的燃料种类不变时,入口流体的密度与粘度不变,相应的热输入比值与几何缩放因子的关系为:

$$\frac{Q_{Re}^*}{Q_0} \propto \frac{D_{Re}^*}{D_0} \quad (3)$$

等 Da 模化是指控制反应物在燃烧室内的停留时间恒定,即 D_0/U_0 为恒定,可得对应的热输入比值与几何缩放因子的关系为:

$$\frac{Q_{Da}^*}{Q_0} \propto \left(\frac{D_{Da}^*}{D_0} \right)^3 \quad (4)$$

式(3)与式(4)中, Q_{Re}^* 、 Q_{Da}^* —等 Re 与等 Da 模化条件下的热输入值, kg/s ; D_{Re}^* 、 D_{Da}^* —等 Re 与等 Da 模化下燃烧器出口直径, mm 。

根据能量的转化与守恒定律,试验涉及的热量输入可用燃料流量表征,即燃料流量之比与热量输入之比相等,因此在保证燃烧当量比不变的同时改变燃料流量和空气流量,可以实现不同模化准则对应的中心分级燃烧试验。

本研究所涉及分层比(SR)的定义式为:

$$SR = \frac{\varphi_{\text{pilot}}}{\varphi_{\text{main}}} \quad (5)$$

式中: φ_{pilot} 、 φ_{main} —值班级与主燃级当量比。

基于上述分析,本研究设计的中心分级模化热态性能与火焰成像试验工况见表 2。

表 2 试验工况设计

Tab. 2 Design of test conditions

燃烧器	工况 编号	主燃级燃料质量 流量/ $\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$	值班级 当量比	分层比
原型燃烧器	B1	1.42	1.45	2.64
	B2	1.55	1.05	1.75
	B3	1.68	0.65	1.00
	B4	1.76	0.68	0.60
模化燃烧器	B1-Re	0.72	1.45	2.64
	B1-v	0.36	1.45	2.64
	B1-Da	0.18	1.45	2.64
	B2-Da	0.19	1.05	1.75
	B3-Da	0.21	0.65	1.00
	B4-Da	0.22	0.68	0.60

工况编号方式为“分层比 - 模化准则”,如 B1 - Da 是指分层比为 B1, 模化准则选取等 Da 模化时的试验条件。原型燃烧器试验中,总空气流量为 50 g/s , 总燃料流量为 1.9 g/s , 模化燃烧器试验的空气与燃料流量依据式(2) ~ 式(4)等比变化。

2 试验结果及分析

2.1 不同准则模化试验结果对比

本节分析并对比不同模化准则试验结果在火焰结构、出口平均温度、污染物排放等方面差异,以确定与原型燃烧器所得试验结果最为相近的模化方法。

2.1.1 火焰结构对比分析

图5为Abel逆变换^[7]处理后的时均CH基自发光结果,由图可见,火焰结构存在明显差异。

如图5所示,依据等Da模化的火焰与原尺寸燃烧器火焰在根部具有相似的M状干涉形态,该现象是由等Da模化与原尺寸燃烧试验具有相同反应停留时间所决定,随着气流流速加快,主燃级火焰所受的抬升现象变得明显,以至于破坏两级火焰在根部的干涉结构,产生等速度与等Re模化在根部的V型结构。此外,化学反应停留时间也会影响燃烧反应中CH基的分布情况。在原型试验与等Da模化下,CH基主要分布在火焰根部和两级的干涉位置,而在停留时间最短的等Re模化方式下,CH基趋于均匀地分布在整个燃烧室内。

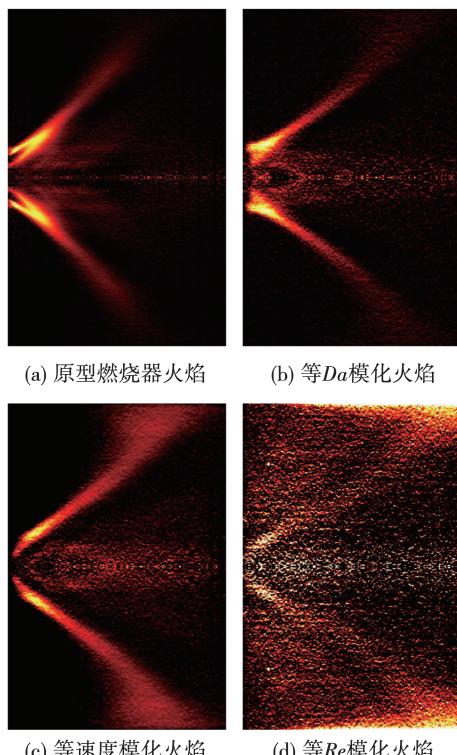


图5 模化试验火焰成像结果

Fig. 5 Flame imaging results of modeling test

为实现量化火焰结构特征的目的,本研究定义了火焰张角、火焰穿透长度等燃烧特性参数,如图6所示。图6中的图像为二值化处理的CH基时均分布图,可以提取图中火焰形态的内包络线。包络线的切线与图像中心轴线的夹角为火焰张角 α ,包络线沿轴向的最远距离 h 为火焰穿透长度。

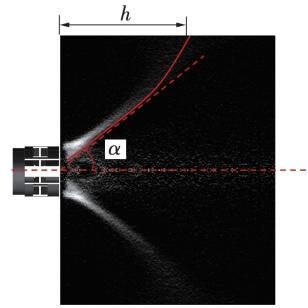


图6 火焰结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of flame structure

图7为B1分层比工况下原型与各准则模化试验对应的火焰张角与穿透长度对比。为有效对比原型燃烧器与模化试验的火焰穿透长度,在结果处理中利用喷嘴出口直径对火焰穿透长度进行归一化处理,即图7所示的穿透长度(L)为实际穿透长度(h)与喷嘴出口直径(D)的比值。3种模化准则结果对比发现,等Re模化对应的火焰具有最大穿透长度,等Da模化对应的归一化穿透长度最小为1.9。

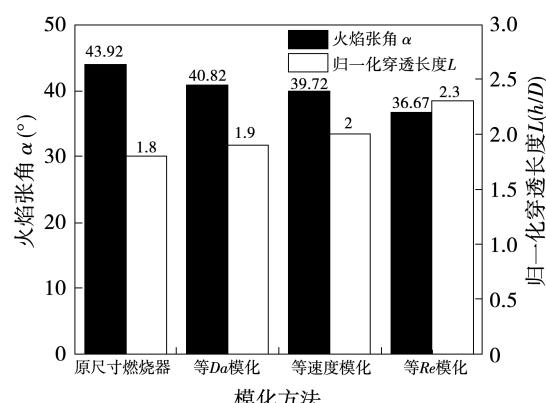


图7 原型与不同模化方法下火焰张角与穿透长度对比

Fig. 7 Comparison of flame angles and penetration lengths between prototype and different simulation methods

火焰穿透长度主要与气体的轴向流速有关,较高的气流速度下,未燃的燃料与空气在燃烧室内传播的距离更远,继而使得反应区被推移,CH基的生

成区域随之向下游移动。因此,气流轴向流速最大的等 Re 模化工况,对应的火焰穿透长度最大。

采用不同模化准则时,火焰张角与火焰穿透长度存在相反变化趋势。火焰张角主要与主回流区的形态有关,高速气流携带燃烧产物离开反应区域,使得主回流区径向产生一定收缩,而轴向被拉长,因此火焰张角会随流速的提高而减小。

在对火焰特征加以量化后,得出表 3 所示的模化火焰与原型的差异对比结果,等 Da 模化在火焰长度与火焰张角等火焰特征方面,与原型火焰的差异均最小,分别为 4% 与 7%,而等速度及等 Re 模化的差异均超过 10%。因此,在对中心分级旋流燃烧器的模化研究中,采用等 Da 模化准则可以获得与原型较相似的火焰结构。

表 3 火焰特征模化差异对比

Tab. 3 Comparison of differences in flame

feature modeling

火焰特征	等 Da 模化/%	等速度模化/%	等 Re 模化/%
火焰长度	4	19	29
火焰张角	7	10	19

2.1.2 出口温度、污染物排放对比分析

选择 B1 工况,保证分层比相同,原型与模化燃烧器在出口处的温度分布情况在图 8 中给出。为有效对比原型与模化燃烧室的出口温度特性,对实际径向坐标(X)采取无量纲处理。

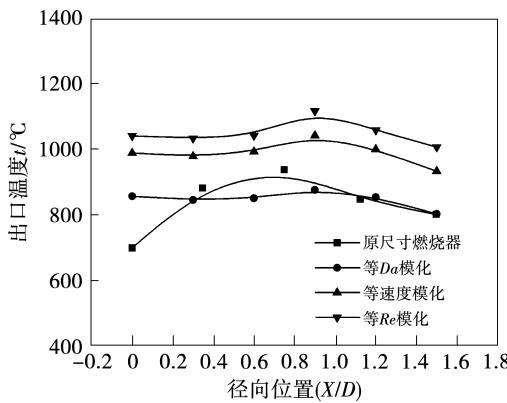


图 8 B1 工况出口温度分布情况对比

Fig. 8 Comparison of discharge temperature distributions under B1 condition

结果显示,不同模化准则对应的燃烧室出口温度分布趋势相似。约在 X/D 为 1 处,各试验工况对

应的温度均达到最大值,偏离此位置对应的温度均有所下降。

同时,在该分层比条件下,与原型燃烧室相比,等 Da 模化具有最小差异,等速度与等 Re 模化试验的结果均高于原尺寸试验,且等 Re 模化与原型的排放温度结果差异最大。该现象的产生与气流流速有关,由于等速度和等 Re 模化与等 Da 模化相比,反应后的高温气体流速更高,燃烧反应后的高温区沿轴向扩展,以至于出口位置的径向温度相应提高。

与排放温度分布情况相比,出口平均温度能够反映总热量的散失情况,并能削弱因中心与壁面间存在较大温差所带来的影响。图 9 为分层比为 2.64 的 B1 工况对应各试验的出口平均温度,结果表明,等 Da 模化与原型燃烧器的相似程度最高,两者的差异仅为 1.2%,等速度和等 Re 模化与原型的差异均超过 15%。

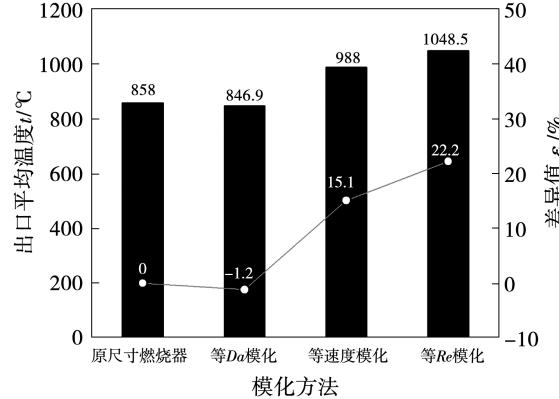


图 9 B1 工况出口平均温度对比

Fig. 9 Comparison of average outlet temperatures under B1 condition

图 10 给出原型燃烧室与定分层比工况下 NO 排放量对比情况,纵坐标单位为 NO 污染物的体积分数(折合 15% O_2 的条件下,表示为 @ 15% O_2)。结果表明,等 Da 、等速度、等 Re 模化对应的排放量逐渐降低,其中等 Da 与等速度模化数值接近,等 Re 模化相差最大。三种模化方法中,等 Da 模化方法最优,但与原型所得结果仍存在差异。NO 的排放与化学反应停留时间以及 CH 基的分布有关,等 Da 模化方法与原型具有一致的化学反应停留时间,对应的 NO 生成量也最为相近。

在试验涉及的贫燃条件下,主导 NO 生成的主要机理为快速型机理。该机理中控制反应速率的关

键步骤为:



可见高 CH 基浓度将促使 NO 生成^[8]。由图 5 火焰成像结果可见,由于等 Re 模化方法下高速气流导致的强烈掺混,反应域内 CH 基分布更加均匀,反而抑制了快速型(费尼莫尔机理)NO 的生成,使得 NO 排放的测量值与其他模化方法相比最小。

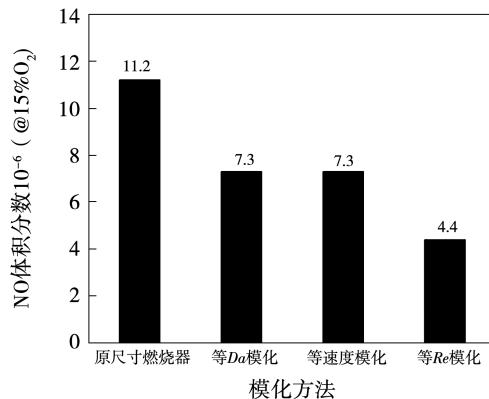


图 10 B1 工况 NO 排放对比

Fig. 10 Comparison of NO emissions under B1 condition

2.2 分层比对火焰结构及污染物排放特性的影响

本研究在对比各项模化准则的模化效果后,进一步探究等 Da 模化方法下分层比变化对燃烧特征的影响。图 11 为分层比为 2.64 与 1.75 时原型试验与等 Da 模化试验所得的 CH 基自发光时均图像。

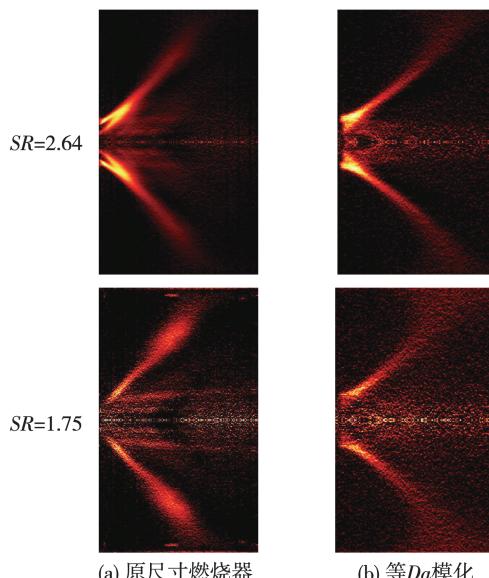


图 11 变分层比火焰结构对比

Fig. 11 Comparison of flame structures with variable stratification ratio

如图 11 所示,分层比减小后原型燃烧器与模化燃烧器火焰根部的干涉现象被削弱,同时分层比 1.75 对应的 CH 基浓度更低,这是由于分层比接近 1 时,两级当量比趋于一致,两级火焰的差异性减小从而抑制火焰的干涉,CH 基的分布也趋于均匀。

火焰张角与火焰穿透长度对比情况由表 4 给出,分层比改变时原型与模化燃烧器的火焰张角与穿透长度具有相同的变化趋势,即分层比降低时火焰张角有所减小,而火焰穿透长度增加,两者相反的变化趋势与 2.1.1 节给出的结果相同。

表 4 变分层比火焰特征对比

Tab. 4 Comparison of flame characteristics with variable stratification ratio

分层比 SR	燃烧器	火焰张角/ (°)	火焰归一化 穿透长度
2.64	原型	43.92	1.8
	模化	40.82	1.9
1.75	原型	43.65	2.0
	模化	39.79	2.2

模化燃烧器与原型燃烧器的火焰特征参数差异如表 5 所示,随着分层比下降,模化燃烧器的火焰张角和穿透长度与原型燃烧器的差异增大,因此对中心分级燃烧器而言,不同分层比下等 Da 模化与原型燃烧实验结果存在差异。

表 5 变分层比原型与模化燃烧器火焰差异

Tab. 5 Differences in flame between prototype and modeling burners with variable stratification ratio

分层比	火焰张角差异/%	穿透长度差异/%
2.64	7.06	5.56
1.75	8.84	10.00

图 12 为不同分层比下,两种燃烧器对应的 NO 排放量的对比情况。对原型燃烧器而言,分层比为 1 附近时,对应的 NO 排放量最小,该结果表明两级当量比匹配时,流场的均匀性有利于抑制 NO 的产生。同时,分层比大于 1 时模化燃烧器与原型的 NO 排放具有相同变化趋势,在分层比为 1 时,两者的 NO 排放量最相近。

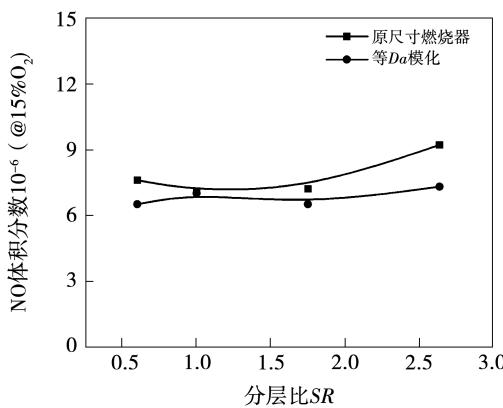
图 12 等 Da 模化下 NO 排放随分层比变化情况

Fig. 12 Variation of NO emission with stratification ratio under equal Damkohler number modeling

3 结 论

本文通过开展燃烧性能试验,探究燃气轮机中心分级旋流燃烧器的模化方法。首先,在相同分层比下分析不同模化准则的模化效果,结果表明,不同模化方法的模化效果由于流速差异会造成火焰结构、排放温度与排放方面的差异。然后,进一步分析了不同分层比下等 Da 模化准则的火焰特征。具体结论包括:

(1) 保持原型与模化燃烧器达姆科勒数一致时,流动特征时间与化学反应特征时间相同,对应试验所得的火焰张角与穿透长度差异度均在 10% 以内,同时平均温度的差异也仅有 1.2%。

(2) 保持原型与缩比燃烧器雷诺数一致时,气流流速与缩放比成反比,高流速导致模化过程中火焰张角与穿透长度的差异度为 19% 与 29%,平均温度的差异高达 22%。

(3) 在中心分级旋流燃烧器的模化工作中,火焰张角与穿透长度等特征参数随分层比的减小,模化试验与原型试验的差异性增大。

(4) 在分层比取为 1 时,中心分级燃烧器两级当量比相等,此时反应区的组分浓度相对均匀,原型

燃烧器 NO 排放取得最小值,且与模化燃烧器的 NO 排放结果差异度仅为 2%。

参 考 文 献:

- [1] SARHAN A M. Similarity principles for the design of liquid propellant combustion chamber [C]//International Conference on Aerospace Sciences and Aviation Technology. Cairo, Egypt: The Military Technical College, 1997, 7:431 - 440.
- [2] BROWN S, MENON S, HAGEN C. Investigation of scaling laws for combustion engine performance [J]. Bend, OR: Oregon State University - Cascades, 2016.
- [3] SWAMI R D, GANY A. Parametric investigation on similarity and scale effects in hybrid motors [J]. International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion, 2002, 5(1/6):161 - 169.
- [4] XIE W, SHI T, GE B, et al. Effects of scaling laws on flow and combustion characteristics of lean premixed swirl burners [J]. Journal of the Global Power and Propulsion Society, 2022, 6: 343 - 353.
- [5] MERANER C, LI T, DITARANTO M, et al. Effects of scaling laws on the combustion and NO_x characteristics of hydrogen burners [J]. Combustion and Flame, 2020, 214:407 - 418.
- [6] 王思睿, 刘训臣, 李磊, 等. 分层比对分层旋流火焰稳定模式及流动结构的影响 [J]. 空气动力学学报, 2020, 38 (3): 619 - 628.
WANG Si-rui, LIU Xun-chen, LI Lei, et al. Effects of stratification ratio on flame stabilization and flow structure in stratified swirling flame [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2020, 38 (3):619 - 628.
- [7] 伍文霞, 傅钰雯, 舒文, 等. 基于 Abel 逆变换的颜色法测量火焰当量比的研究 [J]. 智能计算机与应用, 2022, 12 (10): 123 - 129.
WU Wen-xia, FU Yu-wen, SHU Wen, et al. Study on measurement of flame equivalence ratio by color method based on Abel inverse transform [J]. Intelligent Computer and Applications, 2022, 12 (10):123 - 129.
- [8] LIU F, MU Y, LIU C, et al. Effect of fuel staged proportion on NO_x emission performance of centrally staged combustor [C]//ASME Turbo Expo 2013 : Turbine Technical Conference and Exposition, San Antonio, Texas, USA, June 3 - 7, 2013.

(湛 鑫 编辑)