

燃料灵活性对不同入口条件下微混组合喷嘴 燃烧特性的影响研究

陈登科, 刘伟, 邱朋华, 孙锐, 陈孟石, 赵义军, 张林瑶, 刘栗, 邢畅
(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对中/低热值合成气, 基于环形射流微混组合喷嘴, 在不同的绝热火焰温度和喷嘴出口空气流速下, 开展了热态试验研究。结果表明: 燃用中热值合成气时, 射流火焰相互独立, 随着绝热火焰温度增加, 火焰结构由 V 型转变为 M 型, 火焰释热率逐渐增加。燃用低热值合成气时, 射流火焰之间出现明显的叠加合并现象。CO 生成量会随着绝热火焰温度及流速的增加而增大, 但在试验工况下, 均不高于 15×10^{-6} ($\varphi_{O_2} = 15\%$)。NO 排放随绝热火焰温度增加快速增多, 但均不高于 13×10^{-6} ($\varphi_{O_2} = 15\%$), 流速增加有利于降低 NO 排放, 同时低热值合成气相较于中热值合成气有更低的 NO 排放能力。

关键词: 燃气轮机; 微混组合喷嘴; 合成气; 燃烧特性; NO 排放

中图分类号: TK11

文献标志码: A

文章编号: 1006-8740(2025)03-0235-10

Effect of Fuel Flexibility on Combustion Characteristics of Micro-Mixing Combined Nozzles at Different Inlet Conditions

Chen Dengke, Liu Wei, Qiu Penghua, Sun Rui, Chen Mengshi,
Zhao Yijun, Zhang Linyao, Liu Li, Xing Chang

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A thermal experimental study was conducted on medium/low heating value syngas using an annular jet micro-mixing combination nozzle at different adiabatic flame temperatures and nozzle outlet air velocities. The results show that when burning medium heating value syngas, the jet flames are independent of each other. As the adiabatic flame temperature increases, the flame structure changes from V-shaped to M-shaped, and the flame heat release rate gradually increases. When burning low heating value syngas, there is a significant overlapping and merging phenomenon between jet flames. The amount of CO generated will increase with the increase of adiabatic flame temperature and flow rate, but under experimental conditions, it is not higher than 15×10^{-6} ($\varphi_{O_2} = 15\%$). NO emissions increase rapidly with the increase of adiabatic flame temperature but they are not higher than 13×10^{-6} ($\varphi_{O_2} = 15\%$). An increase in flow rate is beneficial for reducing NO emissions, and low heating value syngas has a lower NO emission capacity compared to medium heating value syngas.

Keywords: gas turbines; micro-mixing combined nozzle; syngas; combustion characteristics; NO emission

收稿日期: 2024-06-21.

基金项目: 国家科技重大专项 (J2019-III-0018-0062).

作者简介: 陈登科 (1997—), 男, 博士研究生, 21b902035@stu.hit.edu.cn.

通信作者: 邢畅, 男, 博士, 副研究员, xingchang@hit.edu.cn.

尽管可再生能源的利用率越来越高,但随着我国用电需求的强力增长,我国电力行业仍需大量的煤炭来满足能源供应需求^[1]. 整体煤气化联合循环(integrated gasification combined cycle, IGCC)是一种将煤炭等固体燃料气化产生的合成气用于燃气-蒸汽联合循环的发电技术,是目前世界公认的污染物和CO₂超低/近零排放的高效煤基燃料发电技术之一^[2]. IGCC 燃气轮机燃烧室所使用的燃料是气化炉生产的煤制燃料气,可燃气成分以CO和H₂为主,并包含少量CH₄. 由于H₂的化学特性导致了传统的预混燃烧方式在使用H₂时容易发生回火、自点火等风险^[3],并且H₂燃烧时火焰温度高,将产生大量的NO_x,因此如何提高燃烧稳定性和降低NO_x排放是燃气轮机燃用合成气时所面临的重大挑战^[4].

目前燃气轮机燃烧室主要采用干式贫预混(dry lean premixed, DLP)燃烧技术,其利用旋流将燃料和过量空气充分混合,通过提高火焰温度时空分布的均匀性来抑制NO_x的生成,同时旋流形成的高温回流区能够确保燃烧稳定进行^[5-6]. 虽然DLP燃烧技术在CH₄燃烧中取得了很好的效果,但在传统DLP燃烧室中燃用H₂时容易发生回火、自燃或燃烧不稳定等情况,更无法稳定降低NO_x排放. 为了解决燃气轮机燃烧富氢甚至是纯氢燃料时带来的高回火风险和NO_x排放等问题,研究者主要从两方面进行了技术尝试. 第一,采用扩散燃烧,其稳定性高,适合H₂燃烧,但会导致较高的NO_x排放. 同时需要在燃烧过程中掺入稀释剂(N₂、水蒸气等)以降低火焰温度和NO_x排放^[7-8],引入的额外设备增加了系统复杂性. 第二,采用新型燃烧组织方式,其中代表性的是微混燃烧技术^[9-10].

微混燃烧技术将传统的大尺度燃烧器喷嘴(特征尺寸为100 mm量级)拆分为众多微小尺度的喷嘴(特征尺寸为10 mm量级),并简化单支喷嘴空燃混合结构,依靠燃料和空气在小尺度上的剧烈流动实现两者的快速均匀混合,在喷嘴出口处形成众多短小的高温火焰,从而缩短整体火焰长度^[11-12],减少局部高温点出现,降低NO_x排放^[13-14]. 此外,受小管径的淬灭效应影响,微混喷嘴的抗回火能力得到改善,因此能适应从天然气、合成气到纯氢气的宽广火焰传播速度变化范围,对燃料的适应性明显高于传统的旋流燃烧器.

微混燃烧室通常由按照一定矩阵分布规律布置的微混组合喷嘴构成,掌握微混组合喷嘴的燃烧特性和稳燃机制,对微混燃烧室的设计和应用十分重要,此外,绝热火焰温度和喷嘴出口空气流速对微混组合

喷嘴的负荷适应性具有重大影响,因此,本文针对中/低热值合成气,基于环形射流微混组合喷嘴,在不同的绝热火焰温度和喷嘴出口空气流速下,开展了微混组合喷嘴燃烧特性的试验研究. 通过对火焰结构特性、火焰温度、出口污染物排放的变化过程进行分析,从而获得不同燃料组分下更加详细的火焰结构衍变过程以及绝热火焰温度和喷嘴出口空气流速变化对此过程的影响特点,为使用微混燃烧技术燃气轮机燃烧室的设计提供参考.

1 试验系统与方法

1.1 微混组合喷嘴燃烧试验系统

试验在微混组合喷嘴燃烧试验系统上进行,如图1所示,该系统主要由微混组合喷嘴、火焰自发光拍摄系统、供气系统、预热系统、接触式测温系统、燃气组分分析系统6部分构成. 试验过程中的H₂、CO、CH₄、CO₂及N₂气源由气瓶单独供气,其纯度均为99.999%. 每路气体的流量通过质量流量计单独控制(MFC,七星华创CS系列,其精度为满量程的±0.35%),之后汇入容积为2L的混气罐参与燃烧. 空气则由空压机供气,压缩空气首先汇入储气罐储存,下游阀门打开后,气体从储气罐流入冷冻式干燥机,除水后空气经过电动调节阀、热式质量流量计调控流量后进入20 kW电加热器预热,预热到418℃后进入燃烧器,在微混合管中与合成气混合后喷出燃烧.

1.2 微混组合喷嘴结构特征

本文所用的环形射流喷嘴采用内交叉射流方式,其相较于圆形射流喷嘴,中心钝体的存在使得近场和中场内形成了回流区,这有助于提高环形射流火焰稳定性^[15-18],此外,钝体内的燃料通道,可以起到冷却作用,避免喷嘴烧蚀. 如图2所示,单支喷嘴外环直径 $D=10$ mm,燃料管外径为4.4 mm,6个燃料喷射孔的直径为0.1 mm,燃料空气混合距离为5 mm. 微混组合喷嘴则由上述的7支环形射流喷嘴组成,按正六边形布置,材料为304不锈钢,其主体由燃料分配腔,空气分配腔和燃料管3部分组成,相邻喷嘴的中心间距为20 mm. 燃料分配腔和空气分配腔填装不锈钢金丝球用于均匀分配气体. 微混组合喷嘴装配图和实物如图2所示. 燃烧器外罩尺寸为200 mm×200 mm×350 mm,四面开有观察窗,外罩上半部分为烟道,设有烟气采集点,用以将取样探针从伸入烟道中心抽取烟气.

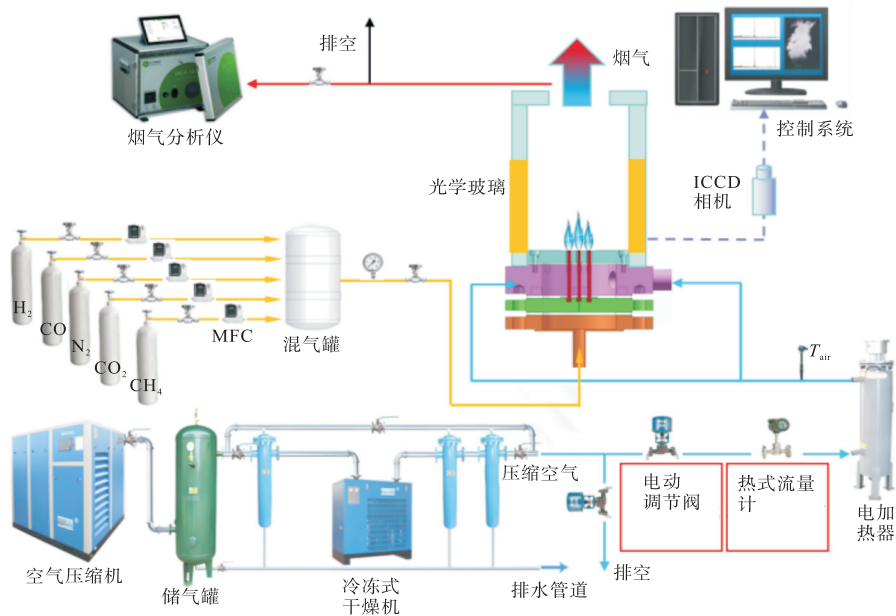


图 1 微混组合喷嘴燃烧试验系统

Fig.1 Combustion system schematic of the combined micro-mixing nozzles

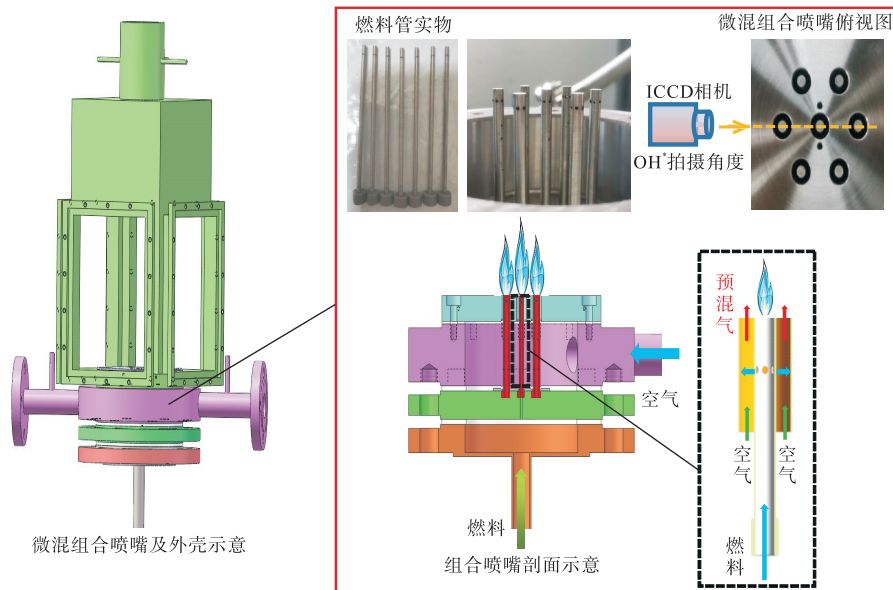


图 2 微混组合喷嘴示意

Fig.2 Schematic diagram of combined micro-mixing nozzles

1.3 试验测量及数据处理方法

如图 3 所示,本试验台应用的自发荧光系统主要由 Phantom-VEO-710L 高速相机、像增强器、带通滤光片等组成,其中像增强器模组为直径 25 mm 的双层微通道板(microchannel plate, MCP),主要用于增强弱光信号,扩展光谱探测范围以及提供纳秒级的曝光时间,OH^{*}的带通滤光片尺寸为 50 mm,波长为 310 nm,带宽为 5 nm. 相机拍摄方向见图 2. 试验中主要对烟气中的 O₂、CO、CO₂ 和 NO 进行测量分析,所用设备为图 4 所示的 OPTIMA7-MRU 烟气分析仪,测量精度为满量程的 ±2%. 温度测量所用的 K

型热电偶的量程为 0 ~ 1300 °C,测量误差为实测温度的 0.75%,本文主要针对微混组合喷嘴下游中心轴

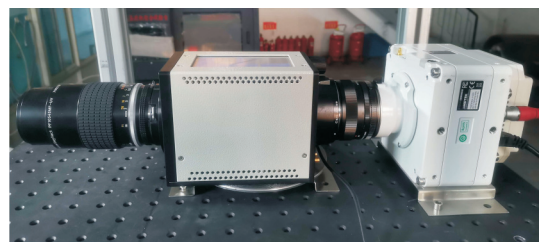


图 3 OH^{*}自发荧光系统

Fig.3 OH^{*} spontaneous fluorescence shooting system

线 300 mm 处, 以及近壁面 50 mm 和 100 mm 处的温度进行采集.



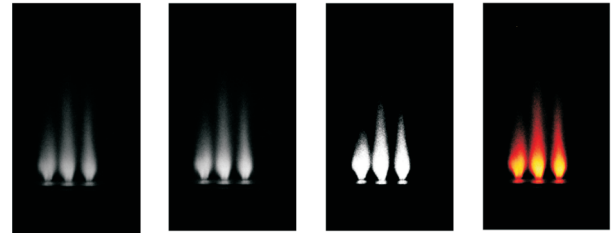
图 4 OPTIMA7-MRU 烟气分析仪
Fig.4 OPTIMA7-MRU flue gas analyzer

为了方便结果比较, 将燃烧室出口的 CO、NO 折算到 15% 氧体积分数条件下的浓度. 本文利用时均火焰图像分析火焰的宏观特性, 利用 Python 软件对多张火焰图像进行叠加求平均, 将背景噪点进行平均化, 以消除在拍摄中的各种随机干扰对火焰形态的影响, 随后对时均火焰图像进行降噪处理, 采用高斯滤波增大图像中心点的权重, 减小远离中心点的权重, 以此为基础计算邻域内各个像素值不同权重之和, 然后进行二值化识别并提取火焰边界, 绘出火焰轮廓, 根据所占像素计算出火焰的长、宽、周长和面积等信息, 最后将灰度图转化为伪彩图. 图 5 为火焰图像处理过程的示意.

1.4 燃料特性及试验运行参数

1.4.1 燃料组分特性

考虑到我国煤种的多元性和气化工艺的多样性, 进行煤制燃料气全组分条件下的研究存在难度, 因此实验中仅选用两种典型热值的合成气, 用以开展中/低热值合成气-空气微混合燃烧及 NO 生成特性研究的试验, 其中低热值合成气 (LHV syngas) 选用空气流化床煤制燃料气^[19], 其组分体积分数比分别为



(a) 时均火焰图像 (b) 高斯滤波 (c) 阈值分割 (d) 伪彩

图 5 火焰图像处理过程示意

Fig.5 Schematic diagram of flame image processing process

21% H₂、23% CO、3% CH₄、10% CO₂ 和 43% N₂, 热值 6.24 MJ/Nm³. 考虑到合成气中微量的 CH₄ 含量对整体合成气的绝热火焰温度影响较小, 且 CO₂ 及 N₂ 会增加研究问题的复杂程度, 因此中热值合成气 (MHV syngas) 选择体积分数比为 1 : 1 的 H₂-CO 合成气, 热值 11.70 MJ/Nm³.

1.4.2 试验条件

本文以 F 级燃气轮机实际燃烧的入口参数为依据, 试验过程中空气预热温度 418 °C, 燃料温度 15 °C^[13-14]. 首先维持喷嘴出口空气流速 50 m/s 不变, 改变绝热火焰温度 (adiabatic flame temperature, T_{ad}) 为 1450 ~ 1700 °C, 值得注意的是绝热火焰温度的变化是通过调控当量比来实现的, 该工况条件下的主要参数见表 1. 其次, 本文维持绝热火焰温度 1450 °C 不变, 改变喷嘴出口空气流速 30 ~ 60 m/s, 该工况条件下的主要参数见表 2.

从表 1 和表 2 可以看出, 低热值合成气热值远低于中热值合成气, 为了向燃烧室提供相同当量比的化学能, 需要供应更多的燃料, 且随着绝热火焰温度增加, 当量比差值增大. 为了比较两种燃料的火焰特性, 本文利用 Cantera 软件, 采用 GRI 3.0 机理计算得到层流火焰传播速度. 低热值合成气的层流火焰传播速度在 65.00 ~ 99.07 cm/s 范围内, 远低于中热值

表 1 绝热火焰温度变化实验工况的主要参数

Tab.1 Main parameters of adiabatic flame temperature variation experimental conditions

燃料组分	喷嘴出口空气流速/ (m · s ⁻¹)	T _{ad} /°C	当量比	层流火焰传播速度/ (cm · s ⁻¹)	总热功率/kW	燃料流量/ (g · s ⁻¹)	空气流量/ (g · s ⁻¹)
中热值合成气	50	1 450	0.380	94.37	16.35	0.936	11.296
		1 500	0.403	107.83	17.34	0.993	
		1 550	0.426	120.71	18.33	1.050	
		1 600	0.450	133.69	19.36	1.109	
		1 650	0.474	148.10	20.39	1.168	
		1 700	0.499	160.74	21.47	1.229	
低热值合成气	50	1 450	0.520	65.00	21.32	3.630	11.296
		1 500	0.555	71.77	22.75	3.874	
		1 550	0.595	78.99	24.43	4.160	
		1 600	0.638	85.71	26.18	4.458	
		1 650	0.682	92.85	27.96	4.761	
		1 700	0.746	99.07	30.58	5.207	

表 2 喷嘴出口空气流速变化实验工况的主要参数

Tab.2 Main parameters of experimental conditions for changes in air flow velocity at the nozzle outlet

燃料组分	喷嘴出口空气流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$T_{ad}/^{\circ}\text{C}$	当量比	层流火焰传播速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	总热功率/kW	燃料流量/ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)	空气流量/ ($\text{g} \cdot \text{s}^{-1}$)
中热值合成气	30	1 450	0.380	94.37	9.84	0.563	6.779
	40				13.08	0.749	9.038
	50				16.35	0.936	11.296
	60				19.62	1.124	13.558
低热值合成气	30	1 450	0.520	65.00	12.79	2.178	6.779
	40				17.05	2.904	9.038
	50				21.32	3.630	11.296
	60				25.58	4.356	13.558

合成气的层流火焰传播速度,两者均随绝热火焰温度的增加近似线性加大。

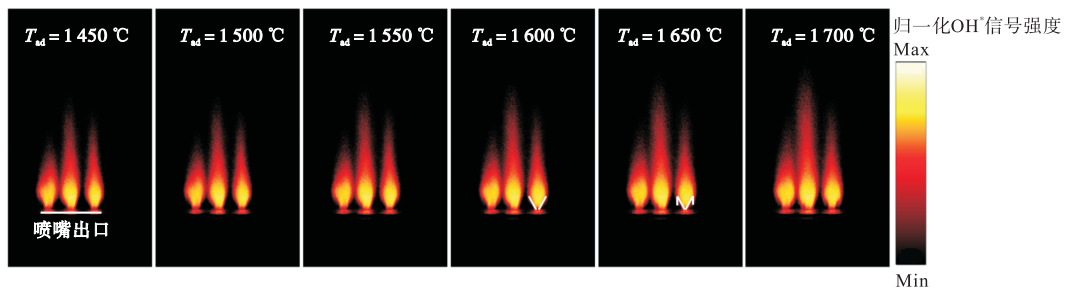
2 结果与讨论

2.1 绝热火焰温度变化的影响

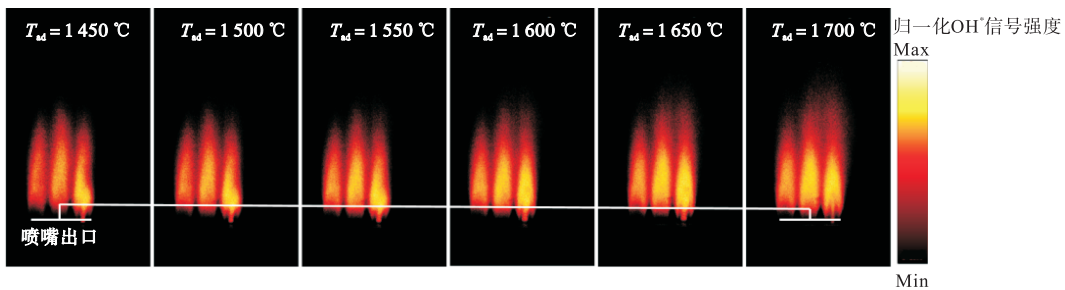
2.1.1 火焰结构特性

OH^* 信号强度可用于表征火焰热释放率的程度, OH^* 信号越强,局部热释放率越高^[20]。图 6 显示了不同绝热火焰温度下燃用中/低热值合成气的火焰 OH^* 分布。在此工况条件下无闪回或吹熄发生,火焰能够稳定保持。

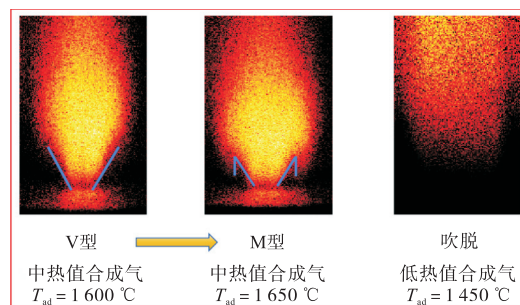
对于中热值合成气,由 OH^* 分布可以看出 3 股射流火焰相互独立,无联焰现象,在绝热火焰温度低



(a) 中热值合成气



(b) 低热值合成气



(c) 典型工况下火焰局部放大图片

图 6 T_{ad} 对中/低热值合成气 OH^* 分布的影响Fig.6 Effect of T_{ad} on OH^* distribution in medium/low heating value syngas

于 1600 °C 时,外剪切层破裂,火焰不锚定于外环喷嘴唇缘,环形射流火焰根部结构为 V 型;当绝热火焰温度为 1650 °C 时,最右侧的火焰开始锚定于环形喷嘴出口区域,火焰结构由 V 型向 M 型转变.此外,随着绝热火焰温度增加,火焰释热率逐渐增加,释热区长度拉长.

对于低热值合成气,火焰之间出现了明显的相互叠加合并现象.最右侧火焰根部结构为 M 型,而左侧两股火焰则无法锚定至喷嘴出口,显示出不稳定的燃烧状态,这归因于低热值合成气内含有大量的稀释气体,燃料热值较低且此时混气流速相对较高.随着绝热火焰温度增加,这两股火焰的根部与喷嘴出口的距离减小,火焰稳定性增加.

从图 7 可以看出,随着绝热火焰温度的增大,微混组合火焰面积和长度均逐渐增大,这表明火焰反应区逐渐变大,反应变得更加剧烈,此外,还可以发现,燃用低热值合成气的微混组合火焰的面积远远大于中热值合成气,这是因为燃料组分内稀释气体的增加延展了释热区,使释热变得温和,有利于形成更均匀的温度场,降低 NO_x 排放,这与 Zhang 等^[21]研究中总结的 CO₂ 稀释对 CH₄-H₂ 火焰面积的影响是一致的.绝热火焰温度增加对火焰长度的影响十分显著,尤其是中热值合成气,火焰长度从 48 mm 增加至 74 mm.

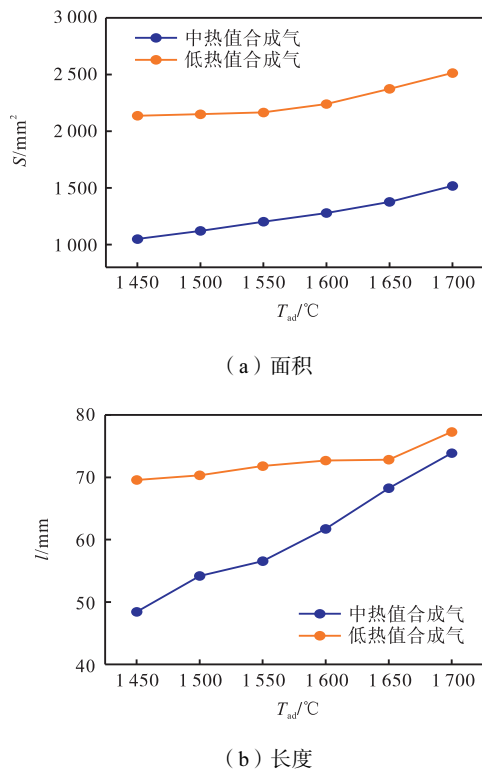


图 7 T_{ad} 对火焰面积与长度的影响
Fig.7 Effect of T_{ad} on flame area and length

2.1.2 火焰温度

对距离喷嘴出口高度 $Z = 300\text{ mm}$ 轴线中心处及 $Z = 50\text{ mm}$ 、 $Z = 100\text{ mm}$ 处壁面的温度数据进行采集,如图 8 所示,可以发现随着绝热火焰温度增大,测点温度均逐渐上升.在相同绝热火焰温度和测量位置下,燃用低热值合成气时的温度更高,这是由于其对应的热功率较大,燃料增加导致总发热量增加. $Z = 50\text{ mm}$ 处的壁面温度高于 100 mm 处是因为此处距离反应释热区较近,温度水平较高.

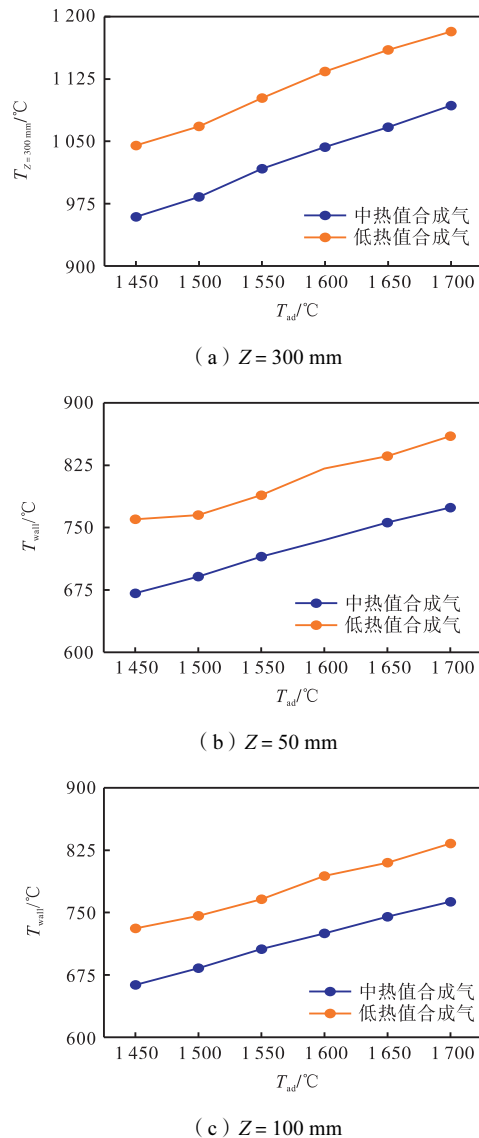


图 8 T_{ad} 对 $Z = 300\text{ mm}$ 处轴线中心温度、 $Z = 50\text{ mm}$ 处壁面温度、 $Z = 100\text{ mm}$ 处壁面温度的影响
Fig.8 Effect of T_{ad} on flame temperature axis temperature at $Z = 300\text{ mm}$, wall temperature at $Z = 50\text{ mm}$ and wall temperature at $Z = 100\text{ mm}$

2.1.3 燃气组分浓度

图 9 分别给出了不同工况条件下燃烧腔出口的 O₂、CO₂、CO 及 NO 浓度.图 9(a)中分别展示了两种燃料发生完全化学反应过程后的氧气理论计算值和

燃烧试验过程测量值,从图 9(a)中可以发现,燃用中热值合成气时出口 O_2 浓度与理论计算值误差较小,而低热值合成气出口 O_2 浓度则与理论计算值差值较大,归因于稀释剂的加入减缓了反应速度。

从图 9(c)也可以看出,燃用中热值合成气时最

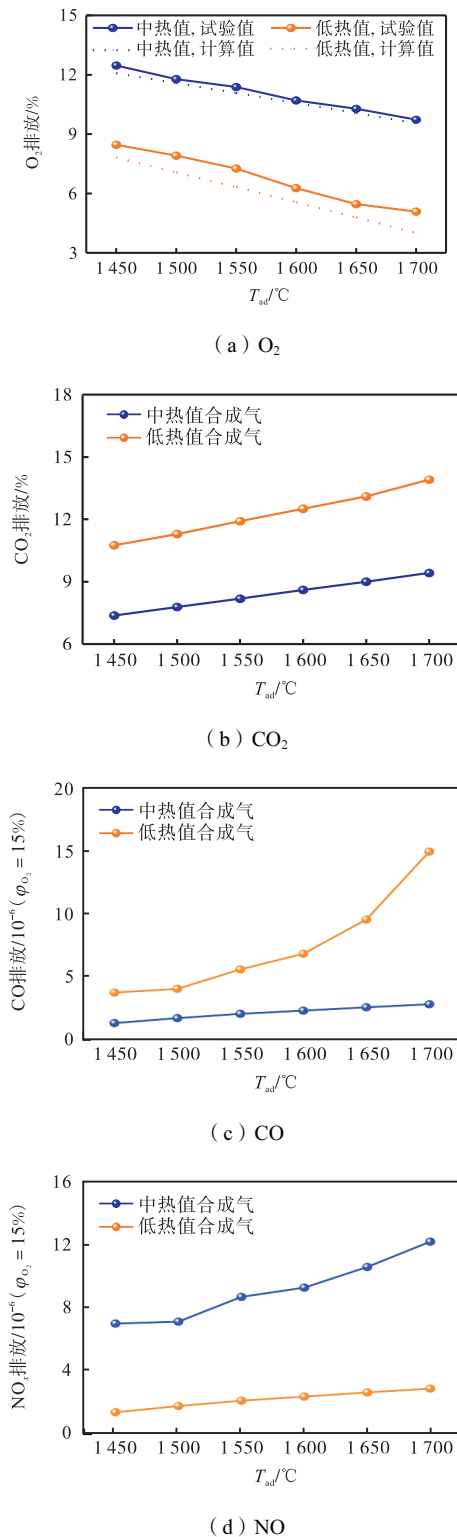


图 9 T_{ad} 对燃烧室出口烟气的影

Fig.9 Effect of T_{ad} on composition of exhaust gas at combustion chamber outlet

大 CO 生成量仅为 3×10^{-6} ($\varphi_{O_2} = 15\%$),且基本不随绝热火焰温度的变化而增大,燃烧效率较高.低热值合成气的 CO 排放在高绝热火焰温度下较高,是因为此时燃料-空气预混气中的燃料占比增加,导致在这种火焰尺寸或者停留时间下无法完全反应.尽管 CO 生成量会随着绝热火焰温度的增加和燃料热值的减小而增大,但在试验工况下,均不高于 15×10^{-6} ($\varphi_{O_2} = 15\%$).

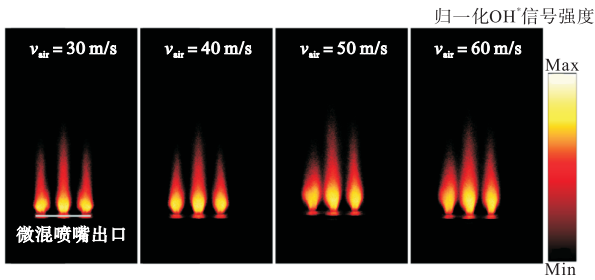
从 9(d)可以看出,燃用中热值合成气时,NO 排放随绝热火焰温度的增加快速增多,这符合热力型 NO 的生成特点,但在试验工况下,均不高于 13×10^{-6} ($\varphi_{O_2} = 15\%$).燃用低热值合成气时的出口 NO 浓度较低,最大不超过 3×10^{-6} ($\varphi_{O_2} = 15\%$),远低于中热值合成气的出口 NO 排放,这是因为该燃料气内的 N_2 和 CO_2 能够有效降低合成气的氧化反应速率,增加恒定热量输入情况下空燃混合气体整体热容,此外,由之前的分析可知,低热值合成气的释热区面积更大,释热更加温和,温度场分布更加均匀,这有利于降低 NO 排放,同时,低热值合成气-空气混气流速更高,致使停留时间缩短,这也能够有效抑制此处的 NO 生成。

2.2 喷嘴出口空气流速变化的影响

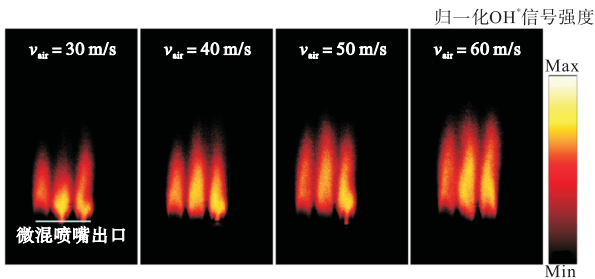
2.2.1 火焰结构特性

图 10 显示了不同喷嘴出口空气流速下中/低热值合成气的 OH^* 分布,在此工况条件下无回火或吹熄发生,火焰能够稳定保持.从图中可以看出,随着流速增加,热释放区域被拉伸,但 OH^* 的亮度没有显著变化.对于中热值合成气,3 股射流火焰相互独立,无联焰现象,低流速下锚定于中心钝体上的区域较大,这容易导致回火,流速的增加,致使火焰根部 V 型结构更为明显.对于低热值合成气,火焰之间出现了明显的相互叠加合并现象,低流速下右侧两股火焰能够锚定于中心钝体上,而最左侧的火焰则远离喷嘴出口,显示出不稳定的燃烧状态,随着流速增加,中心火焰亦被吹托,火焰稳定性变差,直至空气流速达到 60 m/s 时,3 股火焰均未锚定于喷嘴出口,燃烧稳定性变差。

从图 11 可以看出,随着喷嘴出口空气流速的增大,微混组合火焰面积逐渐增大,这表明火焰反应区逐渐变大,反应变得更加剧烈.低热值合成气的火焰面积均大于中热值合成气,这与之前的结论一致.流速增加对于微混组合火焰长度的影响十分显著,两种热值的合成气火焰高度增幅基本都在 10 mm 左右。

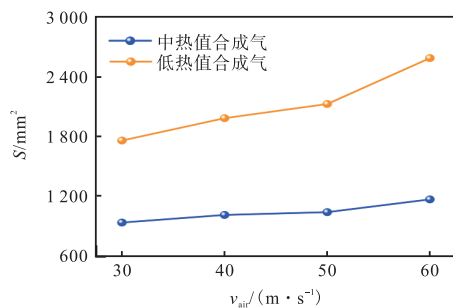


(a) 中热值合成气

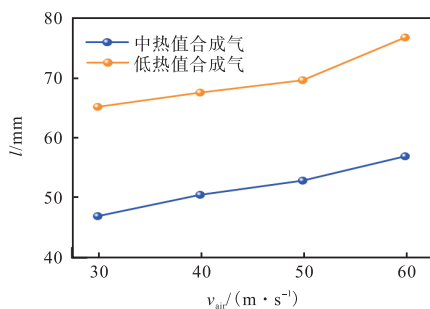


(b) 低热值合成气

图 10 空气流速对 中/低热值合成气 OH* 分布的影响
Fig.10 Effect of v_{air} on OH* distribution in medium/low heating value syngas



(a) 面积



(b) 长度

图 11 空气流速对火焰面积与长度的影响
Fig.11 Effect of v_{air} on flame area and length

2.2.2 火焰温度

图 12 给出了不同流速下距离喷嘴出口高度 $Z = 300\text{ mm}$ 轴线中心处的火焰温度. 可以发现, 随着流速增加, 测点温度均逐渐上升. 在相同流速和测量位置下, 燃用低热值合成气时的温度更高, 这与之前的结论一致.

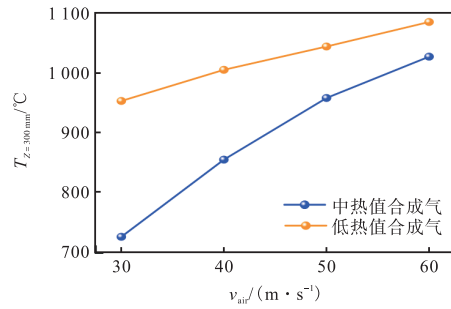
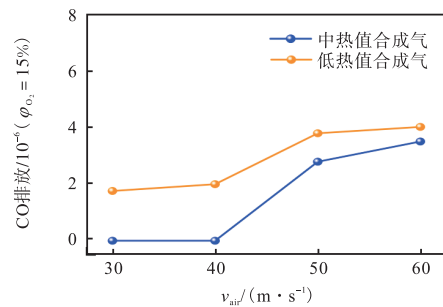


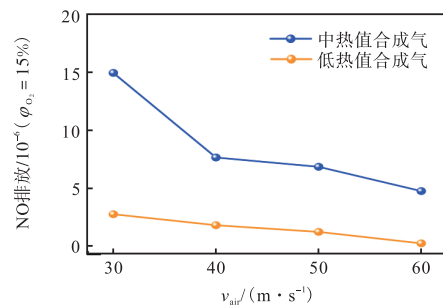
图 12 空气流速对 $Z = 300\text{ mm}$ 处轴线中心温度的影响
Fig.12 Effect of v_{air} on the axis temperature at $Z = 300\text{ mm}$

2.2.3 燃气组分浓度

图 13 分别给出了不同工况条件下燃烧腔出口的 CO 浓度及 NO 浓度. 可以发现, CO 排放量随着喷嘴出口空气流速的增加而增大, 但增幅相对较小, 所有工况下的 CO 生成不超过为 4×10^{-6} ($\phi_{O_2} = 15\%$), 说明该入口条件下的燃烧效率较高, 反应充分. 低热值合成气的 CO 排放较中热值合成气更高, 这与预期结论相符.



(a) CO



(b) NO

图 13 空气流速对燃烧室出口烟气的成分影响
Fig.13 Effect of v_{air} on composition of exhaust gas at combustion chamber outlet

从图 13(b)可以看出, 流速增加有利于降低 NO 排放, 归因于燃气停留时间的缩短. 结合 2.1.3 节结论可以认为中热值合成气对于当量比和出口流速的敏感性更高, 在实际燃气轮机运行时, 低当量比下提高喷嘴出口混气流速有利于降低 NO_x 排放. 低热值合成气由于其内含有大量的 N_2 和 CO_2 , 在实际燃烧

过程中燃烧温度较低,且流场分布更加均匀,出口 NO 排放对当量比和流速敏感性较低,反而在一定程度上需要较高的当量比和低流速来提升火焰吹熄极限,提高燃烧稳定性,避免出现火焰振荡等现象。

3 结 论

本文利用微混组合喷嘴结构,开展了绝热火焰温度和喷嘴出口空气流速变化对中/低热值合成气-空气微混合燃烧及 NO 生成特性研究的试验。主要得出以下结论:

(1) 对于中热值合成气,射流火焰相互独立,随着绝热火焰温度增加,火焰结构由 V 型向 M 型转变,火焰释热率逐渐增加,释热区长度拉长。对于低热值合成气,左侧两股火焰无法锚定至喷嘴出口,显示出不稳定的燃烧状态。

(2) 随着喷嘴出口空气流速增加,热释放区域被拉伸,中热值合成气的火焰 V 型结构更为明显,而低热值合成气的火焰稳定性随之变差,甚至于在流速 60 m/s 时射流火焰均不能锚定于喷嘴出口。

(3) CO 生成量会随着绝热火焰温度及流速的增加而增大,但在试验工况下,均不高于 15×10^{-6} ($\varphi_{O_2} = 15\%$),满足排放设计要求,中热值合成气的燃烧效率更高。

(4) NO 排放随绝热火焰温度的增加快速增多,但在试验工况下,均不高于 13×10^{-6} ($\varphi_{O_2} = 15\%$)。流速增加有利于降低 NO 排放,同时低热值合成气相较于中热值合成气有更低的 NO 排放能力。试验所用微混组合喷嘴在设计工况下具有很大的燃料灵活性。

参考文献:

- [1] 唐 婷, 朱 民, 张 旭, 等. 基于运行数据的 IGCC 电站燃气轮机性能分析[J]. 热能动力工程, 2016, 31(2): 32-38, 136.
Tang Ting, Zhu Min, Zhang Xu, et al. Analysis of IGCC gas turbine performance based on field data[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2016, 31(2): 32-38, 136(in Chinese).
- [2] 仇晓龙, 李 博, 张 扬, 等. 合成气/空气贫燃火焰熄灭极限的测量与数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(5): 977-980.
Qiu Xiaolong, Li Bo, Zhang Yang, et al. Experimental and numerical study on extinction limits of lean syn-
- gas/air mixtures[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(5): 977-980(in Chinese).
- [3] Sandeep K C, Bhattacharyya R, Warghat C, et al. Experimental investigation on the kinetics of catalytic recombination of hydrogen with oxygen in air[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(31): 17906-17912.
- [4] Takagi Y, Oikawa M, Sato R, et al. Near-zero emissions with high thermal efficiency realized by optimizing jet plume location relative to combustion chamber wall, jet geometry and injection timing in a direct-injection hydrogen engine[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(18): 9456-9465.
- [5] Vandervort C L. 9 ppm NO_x/CO combustion system for F-Class industrial gas turbines[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 2000, 123(2): 317-321.
- [6] Venkataraman K, Lewis S E, Natarajan J, et al. F-Class DLN technology advancements: DLN2. 6+. [C]//*Proceedings of the ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition*. Columbia, Canada, 2011: 587-594.
- [7] Taamallah S, Vogiatzaki K, Alzahrani F M, et al. Fuel flexibility, stability and emissions in premixed hydrogen-rich gas turbine combustion: Technology, fundamentals, and numerical simulations[J]. *Applied Energy*, 2015, 154: 1020-1047.
- [8] Lam K K, Geipel P, Larfeldt J. Hydrogen enriched combustion testing of siemens industrial Sgt-400 at atmospheric conditions[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2015, 137(2): 021502.
- [9] Funke H H W, Beckmann N, Keinz J, et al. 30 Years of dry-low-NO_x micromix combustor research for hydrogen-rich fuels: An overview of past and present activities[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2021, 143(7): 071002.
- [10] Asai T, Dodo S, Karishuku M, et al. Performance of multiple-injection dry low-NO_x combustors on hydrogen-rich syngas fuel in an IGCC pilot plant[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2015, 137(9): 091504.

- [11] Lyu Y J, Xing C, Liu L, et al. Study of turbulent flame characteristics of water vapor diluted hydrogen-air micro-mixing combustion[J]. *Renewable Energy*, 2022, 189: 1194-1205.
- [12] Cao Z, Lyu Y J, Peng J B, et al. Experimental study of flame evolution, frequency and oscillation characteristics of steam diluted micro-mixing hydrogen flame[J]. *Fuel*, 2021, 301: 121078.
- [13] Xing C, Liu L, Qiu P H, et al. Research on combustion performance of a micro-mixing combustor for methane-fueled gas turbine[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2022, 103: 72-83.
- [14] Xing C, Chen X Y, Qiu P H, et al. Effect of fuel flexibility on combustion performance of a micro-mixing gas turbine combustor at different fuel temperatures[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2022, 102: 100-117.
- [15] Zhang W, Wang J, Lin W, et al. Measurements on flame structure of bluff body and swirl stabilized premixed flames close to blow-off[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 104: 15-25.
- [16] Mao R, Wang J H, Zhang W J, et al. Effect of high hydrogen enrichment on the outer shear-layer flame of confined lean premixed CH₄/H₂/air swirl flames[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46: 17969-17981.
- [17] 王欣尧, 韩 啸, 林宇震, 等. 中心分级旋流火焰中热声不稳定分岔现象研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2021, 27(4): 382-387.
- Wang Xinyao, Han Xiao, Lin Yuzhen, et al. Bifurcations of thermoacoustic instability in centrally-staged swirl flames [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2021, 27(4): 382-387 (in Chinese).
- [18] 吉龙娟, 李德立, 胡光亚, 等. 预混火焰中热声振荡非线性特征的实验研究[J]. 燃烧科学与技术, 2024, 30(2): 119-127.
- Ji Longjuan, Li Deli, Hu Guangya, et al. Nonlinear characteristics of thermoacoustic oscillation in premixed flame[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2024, 30(2): 119-127 (in Chinese).
- [19] 程晓磊, 张 鑫. 现代煤气化技术现状及发展趋势综述[J]. 煤质技术, 2021, 36(1): 1-9.
- Cheng Xiaolei, Zhang Xin. Summary of present situation and development trend of modern coal gasification technology[J]. *Coal Quality Technology*, 2021, 36(1): 1-9 (in Chinese).
- [20] Liu X, Shao W, Tian Y, et al. Investigation of H₂/CH₄-air flame characteristics of a micromix model burner at atmosphere pressure condition[C]// *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. Oslo: ASME, 2018: 15-24.
- [21] Zhang M, Wang J, Huang Z. Turbulent flame structure characteristics of hydrogen enriched natural gas with CO₂ dilution[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(39): 20426-20435.