

生物质气化气层流 MILD 燃烧火焰特性及排放研究

颜蓓蓓^{1,2}, 刘晓芸¹, 周生权^{1,2}, 陈冠益³

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津市生物质废物利用重点实验室, 天津 300350;
3. 天津商业大学机械工程学院, 天津 300134)

摘要: 生物质气化气(BGG)因其来源广泛、可再生及全生命周期碳中性等特性,被认为是天然气的重要潜在替代能源. 本文以生物质水蒸气气化燃气(BGG-S)为研究对象,构建了热同流引导的层流 MILD 燃烧实验系统,调节热同流的氧气浓度和温度,结合 OH-PLIF(平面激光诱导荧光)技术,研究火焰形态、温度分布、自由基浓度以及污染物生成特性,以解决 BGG-S 复杂组分导致的点火困难、燃烧不稳定、 NO_x 和 CO 排放控制难等问题. 结果表明,在层流 MILD 燃烧条件下,热同流能够显著提高 BGG-S 的燃烧稳定性和燃烧效率,通过预热和稀释作用优化燃烧条件,使火焰结构更加均匀,火焰长度与宽度均显著增加,出现“无焰燃烧”现象,达到理想化 MILD 燃烧状态. 热同流 O_2 体积分数为 2%~8%的层流 MILD 燃烧条件下, NO_x 排放为 $83.0 \times 10^{-6} \sim 115.3 \times 10^{-6}$,减排率为 66.7%~78.7%; CO 排放低于 100×10^{-6} ,减排率为 79.3%~85.7%. 热同流通过降低局部峰值温度及增强燃料的还原作用,显著抑制了 NO_x 生成. 此外,火焰推举与 OH 自由基分布验证了局部自点火的存在,局部自点火现象使火焰不再局限于火焰锋面,而是扩展至更大范围,呈现分布式燃烧状态,反应区宽度的增加和停留时间的延长进一步降低了 CO 排放. 研究表明,热同流条件下的 BGG-S 层流 MILD 燃烧具有良好的稳定性和超低污染排放特性,为清洁燃烧技术的发展提供了参考.

关键词: MILD 燃烧; 生物质气化气; 火焰特性; 污染物排放; OH-PLIF

中图分类号: TK6

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)01-0041-11

Flame Characteristics and Pollutant Emissions During the Laminar MILD Combustion of Biomass Gasified Gas

Yan Beibei^{1,2}, Liu Xiaoyun¹, Zhou Shengquan^{1,2}, Chen Guanyi³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Biomass/Wastes Utilization, Tianjin 300350, China;

3. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: Biomass gasified gas (BGG) is considered an important potential alternative to natural gas because of its wide availability, renewability, and carbon neutrality throughout its lifecycle. This study focused on BGG steam (BGG-S) as the research subject and constructed an experimental system for laminar moderate or intense low-oxygen dilution (MILD) combustion involving a hot coflow. By adjusting the oxygen concentration and temperature of the hot coflow and utilizing the OH planar laser-induced fluorescence (OH-PLIF) technology, this study investigated the flame morphology, temperature distribution, radical concentrations, and pollutant formation characteristics. The aim was to address issues such as ignition difficulty, combustion instability, and those encountered in controlling NO_x and CO emissions caused by the complex composition of BGG-S. The results showed that under the laminar MILD combustion conditions, the hot coflow significantly enhanced the combustion stability and efficiency of BGG-S. The optimization of the combustion conditions through preheating and dilution led to a more uniform flame struc-

收稿日期: 2025-01-03; 修回日期: 2025-02-11.

作者简介: 颜蓓蓓 (1981—), 女, 博士, 教授, yanbeibei@tju.edu.cn.

通信作者: 周生权, zhoushengquan@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52122609); 西藏自治区重点研发项目 (XZ202401ZY0063).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52122609), the Xizang Autonomous Region Key Research and Development Program (No. XZ202401ZY0063).

ture, a notable increase in flame length and width, and the occurrence of a “flameless combustion” phenomenon, achieving an ideal MILD combustion state. Under the laminar MILD combustion conditions with hot coflow O_2 volume fractions of 2%—8%, NO_x emissions ranged from 83.0×10^{-6} to 115.3×10^{-6} , showing reductions of 66.7%—78.7%, and CO emissions were lower than 100×10^{-6} , showing reductions of 79.3%—85.7%. The hot coflow effectively suppressed NO_x formation by lowering local peak temperatures and enhancing the reducing effect of the fuel. In addition, flame liftoff and the OH-radical distribution confirmed the occurrence of localized auto-ignition, which extended the reaction zone beyond the conventional flame front, promoting the state with distributed combustion. The broader reaction zone and prolonged residence time further reduced CO emissions. This study demonstrates that the laminar MILD combustion of BGG-S under hot coflow conditions offers excellent stability and ultralow pollutant emissions, providing insights into the advancement of clean combustion technologies.

Keywords: MILD combustion; biomass gasified gas; flame characteristics; pollutant emission; OH-PLIF

生物质气化气(biomass gasified gas, BGG)具有来源广泛、可再生和碳中性的优势,有望成为天然气的潜在替代和补充^[1]. 然而, BGG 热值低和组分复杂的特性使其在传统燃烧时存在诸多挑战,例如点火困难^[2]、燃烧不稳定^[3]以及污染物不易控制等^[4], 这些问题严重制约了 BGG 的应用和发展. MILD(moderate or intense low-oxygen dilution)燃烧^[5]通过形成局部自点火并降低燃烧峰值温度,可以显著提高燃烧效率并减少污染物排放^[6],其建立方式与 BGG 高度稀释的特性相契合,因此成为解决 BGG 燃烧问题的理想选择.

BGG 成分复杂,主要由 CH_4 、 CO 、 H_2 、 CO_2 、 N_2 和 C_2H_4 等小分子气体组成^[7-8]. 尽管关于 MILD 燃烧已有大量研究,但现有研究大多集中在传统燃料(如甲烷^[9-10]、煤粉等^[11-12])或简单的二元气体混合物(如富氢燃气 CH_4/H_2 ^[13-14]、沼气 CH_4/CO_2 ^[15-16]和合成气 H_2/CO 等^[13,17]),对于多组分燃气 BGG 的 MILD 燃烧鲜有涉及. 不过,近年来已有一些研究关注类 BGG 燃气的 MILD 燃烧过程. Dudyński 等^[18]和 Kwiatkowski 等^[19]研究了高含氮羽毛气化气在工业燃烧炉的 MILD 燃烧,发现不同组成气化气的 NO_x 排放量均低于 39.8×10^{-6} (15% O_2). Boussetla 等^[20]研究了沼气(CH_4/CO_2)-合成气(H_2/CO)组成变化时的 NO_x 生成机理,发现 CH_4/CO_2 和 H_2/CO 比会显著影响 NO_x 主导生成路径. Yepes 等^[21]通过 CFD 模拟了合成气(H_2/CO)添加对天然气 MILD 燃烧建立的影响,发现合成气的加入会显著增大炉内 CO_2 的烟气再循环,降低热力型 NO_x . Fordoei 等^[22]研究了 CH_4/H_2 MILD 燃烧中稀释剂 N_2 、 CO_2 的差异,得出采用高比热容的 CO_2 替换 N_2 能有效降低 MILD 燃烧的 NO_x 排放,因其能降低火焰温度. 此前,笔者也对生物质空气气化燃气(biomass air-gasified gas, BGG-A)进行了深入研究,发现比起传统燃料, BGG-A 不仅能使 MILD 燃

烧更易实现^[23],还能显著降低 NO_x 排放^[24]. 可见,目前针对类 BGG 燃气 MILD 燃烧的研究主要聚焦在组分变化对 MILD 燃烧建立、 NO_x 排放的影响上.

水蒸气气化成本虽高于空气气化,但其气化效率高、灰分产量低^[25]、产物热值较高(约为 $12 \sim 14 \text{ MJ/m}^3$)^[26],具有更广泛的应用场景. 然而 BGG 的组成比例受原料和气化工艺的影响显著,相比起 BGG-A,生物质水蒸气气化燃气(BGG steam, BGG-S)的 H_2 和 CO 的含量均较高,并含有少量 C_2 产物(C_2H_4 和 C_2H_6),这将显著影响火焰结构、污染物排放及 MILD 燃烧建立^[6],其燃烧特性^[27]和污染物排放特性与 BGG-A 有很大差异^[28-29]. 此外,尽管现有研究多在湍流条件下探讨 MILD 燃烧,但研究表明,在层流条件下同样可以实现 MILD 燃烧^[30-33]. 因此,本文以 BGG-S 为原料,探究其在层流状态下 MILD 燃烧的火焰特性和污染物排放规律.

MILD 燃烧通常可用热同流射流(jet in hot coflow, JHC)燃烧器建立^[31, 34-35],包含中心喷嘴和环形热同流. 热同流一般通过多个扩散平面小火焰形成,调节燃料和氧化剂的组分和流量可以形成不同温度和氧气浓度的热同流氛围. 热同流可以使燃料流在高温低氧条件下发生慢速化学反应和局部自点火,从而建立 MILD 燃烧^[36-38]. 因此,探究不同氧气浓度和温度下热同流对 BGG-S MILD 燃烧特性的影响格外重要.

本文通过实验研究的方法,探究热同流对 BGG-S MILD 燃烧特性的影响. 首先,分析 BGG-S 在冷空气和热同流条件下的火焰形态与结构,探索不同氧气浓度和温度条件下,热同流对燃烧区温度、火焰结构以及自由基浓度的影响. 其次,通过实验测量污染物排放,定量分析 CO 和 NO_x 在不同燃烧条件下的生成特性,揭示 MILD 燃烧对污染物减排的作用机制. 最后,结合 OH-PLIF 技术,研究 BGG-S 在传统

燃烧和 MILD 燃烧条件下的火焰结构和自点火特性, 进一步阐明 BGG-S 在层流条件下实现 MILD 燃烧的机制. 该研究将为 BGG-S 的高效清洁燃烧提供理论依据和数据支撑.

1 生物质气化气 MILD 燃烧建立

1.1 MILD 燃烧系统及检测装置

图 1 展示了本研究使用的 MILD 燃烧系统^[24]. 燃烧系统由 JHC 燃烧器、烟气收集及测量装置、热电偶测量装置、光学诊断装置组成. 主燃料由燃烧器中心直径 5 mm 的管道通入, 调节燃料流速可形成不同雷诺数 (Re) 的射流火焰. 热同流由外径 62 mm、内径 7 mm 的环形扩散平面火焰产生, 其中 CH_4 的流速为 2.6 L/min, 调节空气流速可获得不同当量比的 CH_4 -空气火焰产生的热同流. 如果同时供给 BGG-S 和 CH_4 -空气, 则可以形成热同流中的 BGG-S 射流火焰 (MILD 燃烧).

为确保热同流的良好均匀性, 采用了“Hencken”燃烧器^[39-40], CH_4 通过下部两个水平入口进入, 经过多孔板整流后进入缓冲区, 与空气隔绝. 缓冲区通过毛细管连接燃烧器出口平面, 空气则通过上部入口均匀通过细孔. 燃烧器出口平面上毛细管与细孔交错分布, 如图 1 所示.

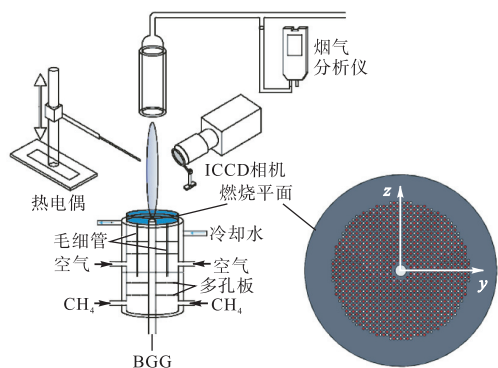


图 1 MILD 燃烧系统示意

Fig.1 Schematic of the MILD combustion system

1.1.1 温度分布测量

采用 R 型热电偶 (直径 76 μ m 铂/铑合金丝) 测量 CH_4 -空气平面火焰不同位置的温度, 以验证平面火焰特性, 测量范围为 0 ~ 1400 $^{\circ}$ C. 温度在 0 ~ 600 $^{\circ}$ C 时, 热电偶的最大误差为 ± 1.5 $^{\circ}$ C; 600 ~ 1400 $^{\circ}$ C 时热电偶的最大误差为 $\pm 0.0025t$ (t 为温度, $^{\circ}$ C). 通过移动热电偶支架和滑轨, 可以获得不同位置的温度. 测量高度为 $x = 15$ mm, 方向为图 1 中的 $\pm y$ 和 $\pm z$, 测

量不确定度小于 5%. 为了消除偶然误差带来的影响, 每个位置的测量采用 3 次独立测量的平均值. 热电偶的电势差信号传入安捷伦的数据采集仪 (Agilent, 34972A), 并通过电脑端控制输出结果.

1.1.2 NO_x 和 CO 排放测量

采用烟气分析仪 (Testo 350) 检测烟气罩收集的烟气污染物和氧气浓度, 以分析 MILD 燃烧的污染物排放特性. 表 1 总结了 Testo 350 对不同气体的测量范围、分辨率和精度.

表 1 Testo 350 烟气分析仪测量范围及精度

Tab.1 Measurement range and accuracy of the Testo 350 flue gas analyzer

气体	范围 (体积分数)	分辨率	精度
CO	0 ~ 40 $\times 10^{-6}$	0.1 $\times 10^{-6}$	$\pm 2 \times 10^{-6}$
	40 $\times 10^{-6}$ ~ 500 $\times 10^{-6}$		$\pm 5\%$
NO	0 ~ 40 $\times 10^{-6}$	0.1 $\times 10^{-6}$	$\pm 2 \times 10^{-6}$
	40 $\times 10^{-6}$ ~ 300 $\times 10^{-6}$		$\pm 5\%$
NO ₂	0 ~ 100 $\times 10^{-6}$	0.1 $\times 10^{-6}$	$\pm 5 \times 10^{-6}$
	100 $\times 10^{-6}$ ~ 500 $\times 10^{-6}$		$\pm 5\%$
O ₂	0 ~ 25%	0.01%	$\pm 0.2\%$

在 JHC 燃烧器的开放空间下, 环境空气卷吸会使得烟气分析仪测量的污染物浓度数据偏低, 这里提出了修正方法^[41]. 该方法基于氧元素守恒, 采用氧气浓度测量数据对污染物进行换算, 以求得 3 种燃烧模式下燃料化学当量燃烧 (即基准氧浓度为 0% O₂) 的污染物数据, 能有效消除空气稀释的影响, 详细计算方法参见文献^[41].

1.1.3 火焰化学发光和 PLIF 图像拍摄

采用数码相机 (佳能 6D) 进行火焰图像拍摄, 以确定推举高度、火焰形貌、火焰发光强度等火焰基本特性. 所有工况中, 数码相机与火焰的相对位置不变, ISO 设置为 800, 曝光时间设置为 1/10 s 和 1/200 s, 以获取不同曝光时间下的火焰形貌.

平面激光诱导荧光 (planar laser induced fluorescence, PLIF) 技术可用于燃烧过程中火焰重要特征自由基的诊断及火焰瞬时结构标示. 如 CH_2O 为火焰预热区的标示物, CH 为火焰反应区的标示物, OH 为火焰产物区的标示物. 在 MILD 燃烧中, OH 的浓度和分布可以表征火焰的局部自点火特性^[42-43]. 采用 ICCD (intensified charge-coupled detector) 相机检测激光诱导 OH 自由基产生的荧光信号, 以获得 OH 空间分布, 从而分析火焰结构和 MILD 燃烧形成机理.

图 2 为 OH -PLIF 测量的实验装置示意. 采用 Nd: YAG 激光器 (PL8010) 和 OPO 激光器, 通过变频得到波长为 314.2 nm 的激光用于激发 OH 自由基. 激光能量为 4.5 mJ, 通过镜片组合得到的激光检

测高度为 7 cm. 使用 ICCD 相机(PI Max 3)拍摄激光诱发的 OH 荧光信号,ICCD 相机配备用于 OH 的紫外镜头($f=100\text{ mm}$,最大光圈值 $f/2$).所有 PLIF 图像均采用背景减法和平面场校正处理.

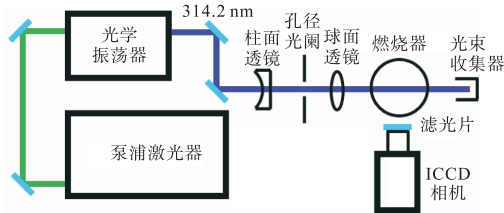


图 2 OH-PLIF 测量的实验装置示意

Fig.2 Schematic of the experimental setup used for OH-PLIF measurement

1.2 MILD 燃烧工况设置

本文研究的实验工况如表 2 所示,其中 q_v 代表主燃料和热同流的气体体积流量.系统可建立 3 种燃烧模式,即 BGG-S 传统射流扩散火焰、 CH_4 -空气平面火焰和热同流中 BGG-S 射流火焰(MILD 燃烧).BGG-S 的雷诺数(Re)设置为 500、1 000、1 500 和 2 000,燃料组成和性质如表 3 所示.热同流 CH_4 -空气燃烧产物的当量比(φ)为 0.6、0.7、0.8 和 0.9 时,对应氧气体积分数为 8%、6%、4% 和 2%,实验测得的热同流平均温度分别为 948 K、1 061 K、1 173 K 和 1 250 K.不同位置的热同流火焰温度差异不超过 20 K,均匀性良好,有利于 BGG-S 形成稳定 MILD

表 2 BGG-S 层流 MILD 燃烧的实验工况

Tab.2 Experimental conditions of the laminar MILD combustion of BGG-S

燃烧模式	主燃料		热同流		
	$Q_{V,\text{BGG-S}} / (\text{L/min})$	Re	$q_{V,\text{CH}_4} / (\text{L/min})$	$q_{V,\text{air}} / (\text{L/min})$	φ
BGG-S 扩散燃烧	1.3	500	2.6	27.5	0.9
	2.6	1 000			
	3.9	1 500			
	5.2	2 000			
CH_4 -空气平面火焰			2.6	31.0	0.8
				35.4	0.7
				41.3	0.6
				41.3	0.6
BGG-S MILD 燃烧	1.3	500	2.6	27.5	0.9
	2.6	1 000		31.0	0.8
	3.9	1 500		35.4	0.7
	5.2	2 000		41.3	0.6

表 3 BGG-S 的组成和热力学性质

Tab.3 Composition and thermodynamic properties of BGG-S

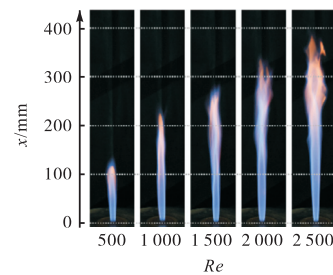
体积分数/%						低位热值/ (MJ/m^3)	等效 化学式	化学当量 空燃比
CH_4	H_2	CO	CO_2	C_2H_4	C_2H_6			
11.1	22.7	28.1	29.8	6.9	1.4	14.98	$\text{CH}_{1.06}\text{O}_{0.74}$	3.49

燃烧.此外,由于部分文献会采用绝热燃烧温度代表热同流温度^[36, 44-45],本文提供了 4 种热同流的理论绝热燃烧温度 1 665 K、1 839 K、1 997 K 和 2 132 K,以便于与文献^[36, 44-45]对比.

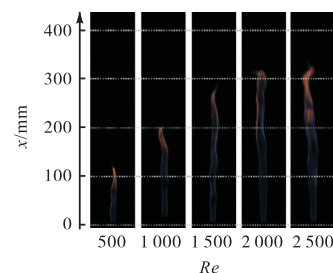
2 火焰图像

2.1 空气中 BGG-S 层流扩散火焰图像

首先研究了 BGG-S 在冷空气中的扩散火焰.图 3 显示了冷空气中不同 Re 的层流火焰在不同曝光时间下的火焰图像, $Re=2\ 500$ 湍流工况的图像用于对比.可以看出,层流条件($Re=500\sim 2\ 000$)下,BGG-S 火焰高度(x)随 Re 增大而增大,由 $Re=500$ 时的 120 mm 增大到 $Re=2\ 000$ 时的 320 mm;而当 Re 进一步增大至 2 500 时,火焰高度不再明显增大.观察 1/200 s 的图像显示,尽管火焰亮度较低,冷空气中的 BGG-S 扩散火焰整体均存在明显的火焰锋面.



(a) 曝光时间 1/10 s



(b) 曝光时间 1/200 s

图 3 冷空气中 BGG-S 层流扩散火焰图像

Fig.3 Images of the laminar diffusion flames of BGG-S in cold air

火焰的化学发光能够反映其所处的状态.蓝色发光表明火焰存在 CH 自由基辐射;蓝绿色发光则代表 C_2 自由基辐射,通常发生在局部燃料较多的区域;黄色发光代表碳烟的黑体辐射.图 3 中 BGG-S 的层流火焰在中下部基本为蓝色,在火焰顶部呈现部分黄色,这展示了 BGG-S 射流燃烧的火焰结构,也表明燃烧过程中生成了可见的碳烟,这可能与 BGG-S 原料中的 C_2 组分有关.当前研究普遍认为,碳烟在约

1 300 ~ 1 600 K 的温度范围内的扩散火焰中形成。C₂H₄ 能在散射光强度高的区域产生明显碳烟^[46], 且发烟比 C₃H₈ 更容易^[47]。在 BGG-S 燃烧过程中, 如果时间充足, 碳烟就会在反应区的燃料侧(局部当量比 > 1)生成, 并且在流向氧化区的过程中不断被氧化消耗。本文仅展示火焰图像, 对碳烟的生成不做进一步研究。

2.2 热同流中 BGG-S 层流扩散火焰图像

为了对比不同 Re 下的变化趋势, 图 4 展示了热同流中 BGG-S 的层流火焰图像。加入热同流之后, BGG-S 的射流卷吸作用会使 CH₄-空气火焰向 BGG-S 射流中心逐渐靠近, 呈现近似的圆锥形, 这促进了热同流与 BGG-S 的充分混合。对比图 3 的冷空气氛围, 一方面, 热同流的加入使火焰高度显著增大, 如 $Re = 2\ 000$ 时火焰高度由 320 mm 增大到 450 mm; 另一方面, 热同流的加入使 BGG-S 火焰宽度明显增大, 即热同流会使燃烧呈现分布式反应, 从而降低局部的燃烧峰值温度。同时可以发现火焰辐射在 0 ~ 100 mm 范围内几乎不可见, 这与 MILD 燃烧的特性一致。

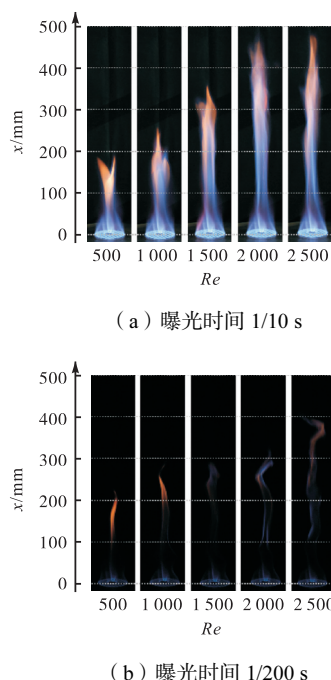


图 4 热同流中 BGG-S 层流火焰图像 ($\phi = 0.9$)

Fig.4 Images of the laminar flames of BGG-S under hot coflow conditions ($\phi = 0.9$)

分析图 4 热同流条件下 BGG-S 的层流火焰结构可以发现, 火焰整体呈现三段式结构, 具体如下。

第 1 段为火焰上游的热同流影响区。国际上的研究^[48-49]认为其接近理想化的 MILD 燃烧, 因为此处几乎不受环境空气的影响, 是 BGG-S 在预热、稀释

条件下的低氧燃烧反应, 符合 MILD 燃烧的 PSR 描述。该区段的范围一般在 0 ~ 100 mm 高度, 火焰结构稳定。在本研究中, MILD 燃烧的判定主要基于火焰不可见、OH 自由基(火焰结构)分布均匀、NO_x 排放显著降低^[5, 50]。图 5 中 1/200 s 曝光时间的图像用来表征火焰的瞬时图像, 可以观察到 JHC 火焰呈现了明显的火焰不可见现象, 另外火焰区显著加大, 呈现了分布式的反应。

第 2 段为火焰中部的过渡区。该段内 BGG-S 射流火焰同时受到热同流和环境空气影响, 且该区段的长度显著受到 BGG-S 雷诺数的影响。随着 Re 增大, 该区段显著变长。但是增大到湍流条件 ($Re = 2\ 500$) 时, 该长度几乎不再变化。该区域接近于实际的 MILD 燃烧。

第 3 段为火焰顶部的不稳定区。在该区段内, 火焰呈现较大的不稳定性, 火焰的化学发光也呈现橙色或黄色, 在该区段火焰主要受环境空气的影响, 基本处于传统扩散燃烧状态。

为了分析热同流当量比对 BGG-S 射流火焰的影响, 图 5 展示了 BGG-S 在不同当量比热同流下的火焰图像。随着热同流当量比减小, 热同流火焰的圆锥形逐渐消失。这是因为在 CH₄-空气火焰中, 空气流量和流速增大使得 BGG-S 射流的卷吸作用对该区域的影响减弱, 从而导致平面火焰在燃烧器出口附近更加稳定。尽管如此, BGG-S 射流的卷吸仍能促进热同流与 BGG-S 混合。另一方面, 热同流当量比减小会使

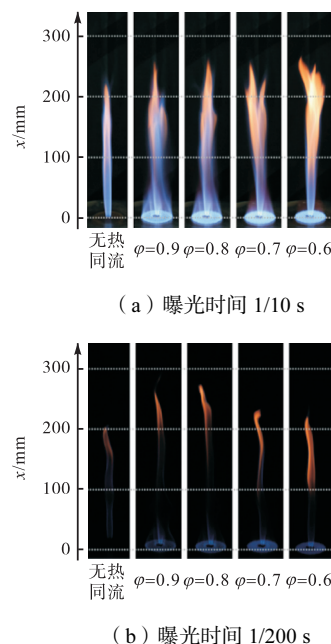


图 5 热同流中 BGG-S 层流火焰图像 ($Re = 1\ 000$)

Fig.5 Images of the laminar flames of BGG-S under hot coflow conditions ($Re = 1\ 000$)

BGG-S 火焰黄色化学发光长度增加,从约 50 mm 增大到 120 mm. 然而,在第 1 区段(0~100 mm)内未见碳烟生成,表明该区域仍具有良好的 MILD 燃烧特性.

3 污染物排放

3.1 热同流污染物排放

图 6 展示了热同流在不同当量比下的污染物排放. 整体而言, NO_x 排放低于 110×10^{-6} , CO 排放低于 120×10^{-6} , 且两者的排放量均随当量比减小而减小, 尤其是 NO_x 的减小较为显著. 对于 NO_x 排放, 当量比降低时, 火焰温度随之降低, 从而减少了 NO_x 生成速率, 导致 NO_x 排放显著下降.

而对于 CO 排放, 更高的火焰温度和氧气浓度有利于其氧化. 随着当量比降低, 空气比例增大, 虽然氧气浓度增加, 但由于更多 N_2 的引入, 火焰温度却有所下降, 因此 CO 的排放只是略微下降. 可以看出, 平面火焰污染物排放较低, 具有清洁燃烧的特点, 因此, 采用热同流来实现 MILD 燃烧具有重要的现实意义.

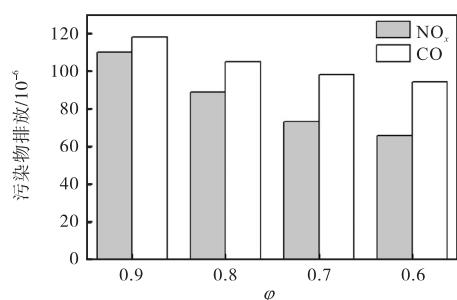


图 6 不同当量比下热同流的污染物排放 (CH_4 体积流量为 2.6 L/min)

Fig.6 Pollutant emissions at different hot coflow equivalence ratios (volume flow rate of CH_4 is 2.6 L/min)

3.2 空气中 BGG-S 层流扩散火焰污染物排放

图 7 展示了 BGG-S 喷射到空气中形成扩散火焰的污染物排放. 可以看出, 单独的 BGG-S 层流扩散火焰的 NO_x 浓度并没有随着 Re 改变而显著变化, 维持在 $234 \times 10^{-6} \sim 287 \times 10^{-6}$ 的较低浓度水平. 这是因为 NO_x 的排放主要与温度相关, 其主要受到燃料和氧化剂初始温度和局部当量比的影响^[51]. 此工况下初始温度相同, 局部当量比和火焰峰值温度也接近, 因此 NO_x 的排放浓度并没有显著变化.

CO 排放量非常高, 范围在 $459.4 \times 10^{-6} \sim 668.4 \times 10^{-6}$. 这反映了 BGG-S 传统燃烧的一大问题, 即 CO 的不完全氧化, 以及随之造成的燃烧效率降低和燃料

浪费, 因此研究其清洁高效燃烧显得更加重要. CO 排放随 Re 增大而增加可能归因于停留时间变短. 由于燃烧器喷口直径固定, Re 增大会造成出口速度增大 (1.1、2.2、3.3、4.4 m/s). 图 3 中火焰高度分别为 115、220、270、315 mm, 根据平均速度粗略估计其停留时间约为 0.21、0.20、0.16、0.14 s. 停留时间降低会抑制 CO 的氧化过程, 因此 CO 排放显著升高.

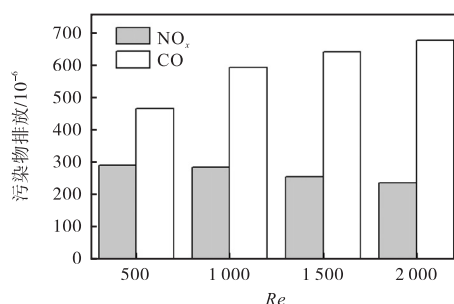


图 7 不同 Re 的 BGG-S 层流扩散火焰污染物排放

Fig.7 Pollutant emissions from the laminar diffusion flames of BGG-S at different Re values

3.3 BGG-S 层流 MILD 燃烧污染物排放

3.3.1 NO_x 排放

图 8 展示了不同热同流当量比下 BGG-S 层流 MILD 燃烧的 NO_x 排放. 为了控制变量, 将 BGG-S 的 Re 固定为 1000, 作为层流的典型代表. 根据 JHC 燃烧器的特点, MILD 燃烧由热同流和 BGG-S 射流火焰耦合形成. 因此探究其污染物排放时, 可以将单独的热同流和 BGG-S 射流火焰的污染物排放叠加, 然后与 MILD 燃烧对比, 从而分析出 MILD 燃烧的污染物减排特性.

图 8 显示, BGG-S 层流 MILD 燃烧时, NO_x 排放仅为 $83.0 \times 10^{-6} \sim 115.3 \times 10^{-6}$. 相比于两种单独火焰的叠加 (传统燃烧), BGG-S MILD 燃烧的 NO_x 减排率达到 66.7% ~ 78.7%, 随热同流当量比增大而增大. 原因可能在于, 在传统燃烧中, 随着热同流当量比增大, 热同流空气流量下降, 用于稀释的 N_2 流量下降, 热同流温度逐渐升高 (由 948 K 增加到 1250 K), 传统燃烧下热同流 NO_x 排放随温度上升而增加. 而在 MILD 燃烧模式下, 随着热同流当量比增大, 热同流氧气浓度降低, 低氧稀释的热同流条件促使火焰温度分布更加均匀, 降低了整体 NO_x 生成速率, 因此 NO_x 减排率增大. 进一步分析发现, 热同流当量比为 0.9 时, MILD 燃烧的 NO_x 排放甚至低于单独的热同流 NO_x 排放. 这意味着热同流当量比较低 (氧气浓度较低) 时, 热同流中的 CH_i 组分加强了 NO 再燃路径的反应速率, 使热同流自身的 NO_x 被还

原. 这一现象揭示了 BGG-S 有望成为 CH_4 或天然气清洁燃烧的辅助燃料.

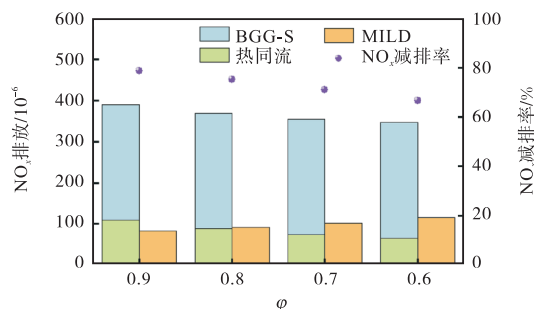


图 8 不同热同流当量比下 BGG-S 层流 MILD 燃烧的 NO_x 排放 ($Re = 1000$)

Fig.8 NO_x emissions from the laminar MILD combustion of BGG-S at different hot coflow equivalence ratios ($Re = 1000$)

为了进一步探究 BGG-S 对热同流 NO_x 排放抑制的机理, 图 9 比较了不同 Re 下 MILD 燃烧的 NO_x 排放. 可以看出, 随着 BGG-S 的 Re 增大, MILD 燃烧和单独 BGG-S 扩散燃烧的 NO_x 排放均有减小, 而 MILD 燃烧的 NO_x 减排率则由 69.4% 增大至 72.6%, 这说明 Re 增大对 MILD 燃烧中 NO_x 排放的抑制作用更为显著. 随着 Re 增大, BGG-S 射流速度增加, 环境空气卷吸加强, 使燃烧区温度均匀分布. MILD 燃烧增强了火焰传播和自点火的协同作用, 进一步强化了反应区温度场的均匀分布, 因此 NO_x 减排率升高.

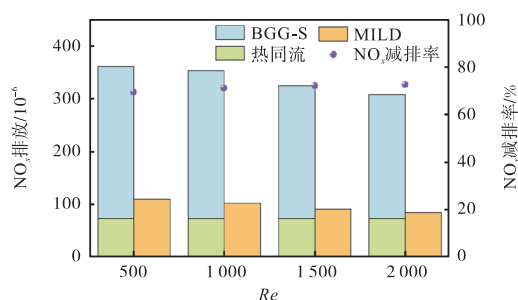


图 9 不同 Re 的 BGG-S 层流 MILD 燃烧的 NO_x 排放 ($\phi = 0.7$)

Fig.9 NO_x emissions from the laminar MILD combustion of BGG-S at different Re values ($\phi = 0.7$)

3.3.2 CO 排放

图 10 展示了不同热同流当量比下的 BGG-S 层流 MILD 燃烧 CO 排放, 减排效果显著. 热同流当量比为 0.9 ~ 0.6 时, CO 减排率为 79.3% ~ 85.7%, 随热同流当量比减小而增大. 当量比降低时, 热同流的氧气浓度增大, 促进 CO 氧化, 因此, MILD 燃烧的 CO 排放有所减小. 此外, BGG-S 本身含有约 30% 的

CO, 传统燃烧 CO 排放较高, 而 MILD 燃烧中热同流对 BGG-S 的预热可以提高整体反应温度, 促进 CO 的氧化, 因此 CO 排放显著降低.

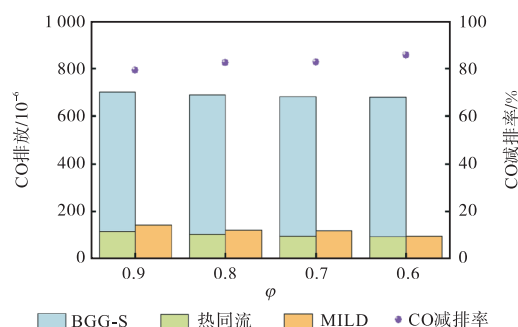


图 10 不同热同流当量比下的 BGG-S 层流 MILD 燃烧 CO 排放 ($Re = 1000$)

Fig.10 CO emissions from the laminar MILD combustion of BGG-S at different hot coflow equivalence ratios ($Re = 1000$)

图 11 展示了不同雷诺数 BGG-S 层流 MILD 燃烧的 CO 排放特性. 可见, 随着 Re 增大, 单独 BGG-S 扩散燃烧和 MILD 燃烧的 CO 排放均增加, 而减排率随之降低. 这预示着, 热同流降低 BGG-S 的 CO 排放的效果是有限的, 需要合理地设置热同流和 BGG-S 的输入功率, 这对于分级燃烧的功率匹配提供了参考.

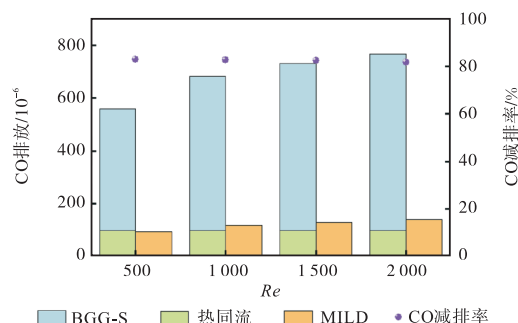


图 11 不同 Re 的 BGG-S 层流 MILD 燃烧 CO 排放 ($\phi = 0.7$)

Fig.11 CO emissions from the laminar MILD combustion of BGG-S at different Re values ($\phi = 0.7$)

4 火焰结构及 MILD 燃烧形成机理

4.1 空气中 BGG-S 层流扩散火焰结构

第 2.2 节的火焰图像进一步表明, 在 80 mm 高度以下的区域, 主要是 MILD 燃烧为主导, 同时为了避免喷嘴出口位置燃烧器对激光的影响, 本研究的激光探测火焰的高度为 10 ~ 80 mm 区段, 长度为 7 cm.

BGG-S 通过喷嘴射入大气中, 会形成传统的扩散火焰. 图 12 展示了层流 BGG-S 在冷空气中扩散火

焰的 OH-PLIF 图像. 其中右侧的色度卡代表了 OH 的荧光强度, 由于激光能量是保持不变的, 因此荧光强度代表了 OH 的相对浓度.

在径向上, OH 分布在 BGG-S 射流与空气的界面, 这表明了燃烧反应主要发生在此处. 扩散火焰一般将局部当量比为 1 的界面认为是火焰面^[52], OH-PLIF 图像进一步验证了这种火焰描述的正确性. 在扩散燃烧中, BGG-S 和空气通过传热传质, 不断传递热量、输送燃料和氧化剂到该界面, 形成持续稳定的火焰.

在轴向上, 可以看出 OH 在火焰上游浓度很高, 且高浓度区域分布于火焰上游很短的距离之内. 说明燃烧反应主要发生在火焰上游, 且上游燃料与氧化剂反应的火焰面更薄, OH 浓度更大. 在火焰下游, 由于燃料浓度衰减与空气混合加剧, OH 浓度逐渐降低. 这是空气中射流扩散火焰的典型特征. 随着 Re 增大, 燃料总输入功率增大, 每一处燃料质量分数都增大, OH 浓度也随之增大.

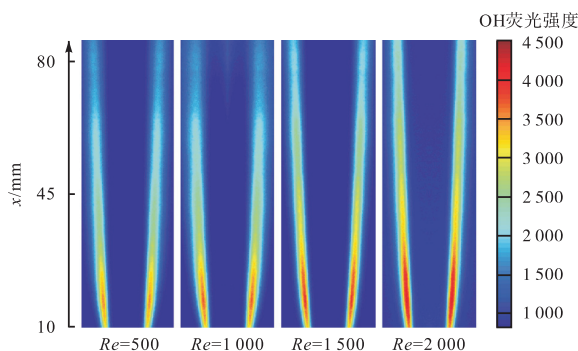


图 12 层流 BGG-S 在冷空气中射流扩散燃烧的 OH-PLIF 图像

Fig.12 OH-PLIF image of the laminar BGG-S jet diffusion combustion in cold air

4.2 BGG-S 层流 MILD 燃烧形成机理

为了分析 BGG-S 发生层流 MILD 燃烧时的火焰结构和形成机理, 图 13 展示了 MILD 燃烧下 BGG-S 火焰的 OH-PLIF 图像. 从 OH 轴向分布可以看出, BGG-S 的层流 MILD 燃烧比 BGG-S 的传统燃烧的 OH 分布范围更大, 浓度也更高, 燃烧也更加集中地发生在火焰上游. 结合图 4 瞬时图像也可以发现, 火焰发光只在火焰上游 10 ~ 30 mm 区域出现, 30 ~ 100 mm 区域火焰已呈现不可见状态, 形成了“无焰燃烧”.

这种 OH 分布和火焰的集中并没有使火焰面变窄. 如图 13 所示, 即使在不同 Re 条件下, OH 在 10 ~ 45 mm 范围内都保持了较高的浓度, 且分布较为均匀. 这进一步说明, 此时火焰的稳定模式并不是单

纯的火焰传播, 而是发生了局部自点火现象. 如果只有火焰传播, OH 的浓度会呈现类似图 12 先增大后减小的分布. 图 13 展现的 OH 分布是从火焰最上游逐渐衰减, 说明反应由火焰最上游自发点火产生.

可以确定, 热同流的高温条件造成了该区域的自点火现象. 自点火的发生使火焰不再局限于火焰面, 而是更大的范围, 这有利于降低局部峰值温度和 NO_x 大幅减排. 同时热同流的稀释条件使反应区变宽, 燃烧呈现分布式, 甚至出现局部火焰不可见的“无焰燃烧”状态. 局部更大的反应区可以提供更长的停留时间, 热同流会使反应的平均温度更高, 因此 CO 得到充分的氧化, CO 的排放也得到大幅降低.

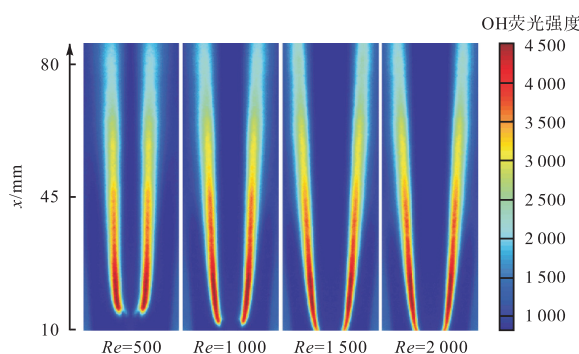


图 13 BGG-S 层流 MILD 燃烧的 OH-PLIF 图像 ($\phi = 0.7$)

Fig.13 OH-PLIF image of the BGG-S laminar MILD combustion ($\phi = 0.7$)

对比图 12、图 13 可以发现, 热同流的加入会使 BGG-S 的射流扩张角减小, 使得火焰长度增大. 在 OH 的径向分布上, 可以看出 OH 的扩张角随 Re 的增大而增大. 这是因为在热同流条件不变时, 随着 BGG-S 的 Re 增大, 热同流对 BGG-S 射流的径向分布影响变小, 扩张角增大.

值得一提的是, 当 BGG-S 的 Re 较小时, 可以明显地观察到火焰的推举现象. 国际上有专门针对推举高度进行的研究和预测^[53]. 并且通过数值模拟研究可知, 在热同流的 MILD 燃烧条件下, 推举现象伴随着自点火现象的发生^[54]. Oldenhof 等^[37]通过高速相机拍摄到火焰在推举高度之后形成点火核和发展出火焰袋, 火焰袋进一步促进了下游火焰的传播和发展. 因此这进一步证实了层流的 BGG-S 在热同流条件下发生了 MILD 燃烧. 随着 Re 增大, 火焰的推举距离变小, 这是 BGG-S 自身质量流量增大使热同流的影响弱化的结果.

图 14 展示了不同热同流当量比 (ϕ) 下 BGG-S 层流 MILD 燃烧的 OH-PLIF 图像. 可以发现, 加入热同流之后, 火焰下游 OH 浓度增大、分布范围也增大,

并且形成了火焰推举,这进一步验证了 BGG-S 局部自点火的发生和 MILD 燃烧的形成. 随着热同流当量比减小, BGG-S 的射流扩张角变小,这是因为更多的空气进入使烟气流量和流速增大,热同流影响增强. 这种效应也影响了 BGG-S 层流 MILD 燃烧的推举高度,即热同流当量比减小时,推举高度逐渐增大. 值得注意的是,热同流当量比为 0.6 时,推举高度反而减小. 这主要来源于环境空气的影响. 热同流当量比较小时,热同流流量增大,环境空气卷吸作用减弱,热同流所受挤压减小,此时推举高度不会显著提升. 因此,推举高度受到热同流和环境空气的双重影响.

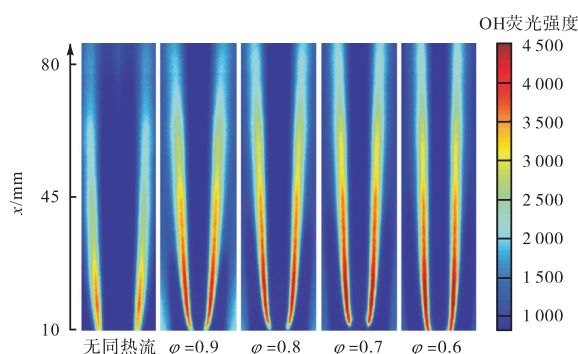


图 14 不同热同流当量比下 BGG-S 层流 MILD 燃烧的 OH-PLIF 图像 ($Re = 1\,000$)

Fig.14 OH-PLIF image of the BGG-S laminar MILD combustion at different hot coflow equivalence ratios ($Re = 1\,000$)

5 结 论

本文研究了层流条件下生物质水蒸气气化燃气在热同流射流燃烧器中的 MILD 燃烧特性,尤其关注火焰图像、火焰结构、 NO_x 和 CO 排放的情况,主要结论如下.

(1) 在 MILD 燃烧条件下, BGG-S 的火焰长度和宽度均增大,呈现分布式反应特征. 在 $0 \sim 100\text{ mm}$ 区段, BGG-S 受热同流影响燃烧稳定,其预热和稀释作用使该区域接近理想化 MILD 状态,火焰锋面消失,出现“无焰燃烧”现象.

(2) $Re = 1\,000$ 时, BGG-S 层流 MILD 燃烧的 NO_x 排放为 $83.0 \times 10^{-6} \sim 115.3 \times 10^{-6}$,减排率 $66.7\% \sim 78.7\%$. 热同流创造低氧稀释环境显著抑制 NO_x 生成, BGG-S 燃料还原作用进一步降低 NO_x 排放. 而 CO 排放则均控制在约 100×10^{-6} ,减排率 $79.3\% \sim 85.7\%$. 热同流高温利于促进 CO 氧化,降低当量比时氧气浓度增加将进一步促进 CO 完全氧化.

(3) BGG-S 传统燃烧时, OH 浓度在轴向上呈先增大后减小的趋势. MILD 燃烧时, OH 浓度在 $10 \sim 45\text{ mm}$ 的高度范围内保持较高水平且分布更广,同时火焰上游发生局部自点火.

(4) 自点火现象使火焰在更大范围扩展,降低局部峰值温度,显著减少 NO_x 排放. 热同流的稀释作用使反应区变宽,呈分布式燃烧状态,甚至出现局部火焰不可见的“无焰燃烧”现象. 更大的反应区使停留时间更长,热同流的高温提高平均反应温度促进 CO 完全氧化,进一步降低 CO 排放.

参考文献:

- [1] Huber G W, Iborra S, Corma A. Synthesis of transportation fuels from biomass: Chemistry, catalysts, and engineering[J]. Chemical Reviews, 2006, 106(9): 4044-4098.
- [2] Liu C P, Song H P, Zhang P, et al. A rapid compression machine study of autoignition, spark-ignition and flame propagation characteristics of $H_2/CH_4/CO$ /air mixtures[J]. Combustion and Flame, 2018, 188: 150-161.
- [3] Allison P M, Driscoll J F, Ihme M. Acoustic characterization of a partially-premixed gas turbine model combustor: Syngas and hydrocarbon fuel comparisons[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 3145-3153.
- [4] Lee I B, Woo I S, Lee M C. Effects of nitrogen dilution on the NO_x and CO emission of $H_2/CO/CH_4$ syngases in a partially-premixed gas turbine model combustor[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(35): 15841-15851.
- [5] Cavaliere A, de Joannon M. Mild combustion[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(4): 329-366.
- [6] Zhou S Q, Yan B B, Mansour M, et al. MILD combustion of low calorific value gases[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2024, 104: 101163.
- [7] Molino A, Chianese S, Musmarra D. Biomass gasification technology: The state of the art overview[J]. Journal of Energy Chemistry, 2016, 25(1): 10-25.
- [8] Heidenreich S, Foscolo P U. New concepts in biomass gasification[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2015, 46: 72-95.
- [9] Fordoei E E, Mazaheri K, Mohammadpour A. Numerical study on the heat transfer characteristics, flame structure, and pollutants emission in the MILD methane-air, oxygen-enriched and oxy-methane combustion[J]. Energy, 2021, 218: 119524.
- [10] Chen S, Liu H, Zheng C G. Methane combustion in

- MILD oxyfuel regime: Influences of dilution atmosphere in coflow configuration[J]. *Energy*, 2017, 121: 159-175.
- [11] Zeng Z K, Zhang T Y, Zheng S K, et al. Ignition and combustion characteristics of coal particles under high-temperature and low-oxygen environments mimicking MILD oxy-coal combustion conditions[J]. *Fuel*, 2019, 253: 1104-1113.
- [12] 黄文仕, 吴玉新, 张 海, 等. 高速射流煤粉 MILD 燃烧的研究进展[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(8): 3240-3251.
- Huang Wenshi, Wu Yuxin, Zhang Hai, et al. Research progress of moderate or intense low-oxygen dilution(MILD) combustion of pulverized coal in high-speed jet[J]. *Journal of China Coal Society*, 2023, 48(8): 3240-3251 (in Chinese).
- [13] Mardani A, Mahalegi H K M. Hydrogen enrichment of methane and syngas for MILD combustion[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(18): 9423-9437.
- [14] Xu S T, Tian Z Y, Tian S J, et al. Sustainability of hydrogen-enriched methane MILD combustion over a wide range of hydrogen-blending ratios in a strongly heat-extracted well-stirred reactor[J]. *Fuel*, 2024, 357: 130035.
- [15] Mameri A, Tabet F, Hadeif A. MILD combustion of hydrogenated biogas under several operating conditions in an opposed jet configuration[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(6): 3566-3576.
- [16] Vasavan A, de Goey P, van Oijen J. Numerical study on the autoignition of biogas in moderate or intense low oxygen dilution nonpremixed combustion systems[J]. *Energy and Fuels*, 2018, 32(8): 8768-8780.
- [17] Huang M M, Deng H X, Liu Y, et al. Effect of fuel type on the MILD combustion of syngas[J]. *Fuel*, 2020, 281: 118509.
- [18] Dudyński M, Kwiatkowski K, Bajer K. From feathers to syngas—Technologies and devices[J]. *Waste Management*, 2012, 32(4): 685-691.
- [19] Kwiatkowski K, Krzysztoforski J, Bajer K, et al. Bio-energy from feathers gasification—Efficiency and performance analysis[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2013, 59: 402-411.
- [20] Boussetla S, Mameri A, Hadeif A. NO emission from non-premixed MILD combustion of biogas-syngas mixtures in opposed jet configuration[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(75): 37641-37655.
- [21] Yepes H A, Obando J E, Amell A A. The effect of syngas addition on flameless natural gas combustion in a regenerative furnace[J]. *Energy*, 2022, 252: 124008.
- [22] Fordoei E E, Boyaghchi F A. NO emission characteristics for the HTC and MILD combustion regimes with N_2 , N_2/CO_2 and CO_2 diluents: Effect of H_2 addition to CH_4 [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(92): 36185-36210.
- [23] 颜蓓蓓, 刘晓芸, 周生权, 等. 多源低热值燃气无焰燃烧的数值模拟研究[J]. *煤炭学报*, 2024, 49(增1): 362-374.
- Yan Beibei, Liu Xiaoyun, Zhou Shengquan, et al. Numerical simulation of flameless combustion of multi-source low calorific value gas[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(Suppl 1): 362-374 (in Chinese).
- [24] Zhou S Q, Zhu X C, Yan B B, et al. Role of a hot coflow on establishment of MILD combustion of biomass gasified gas[J]. *Fuel*, 2022, 314: 123142.
- [25] Cao L C, Yu I K M, Xiong X N, et al. Biorenewable hydrogen production through biomass gasification: A review and future prospects[J]. *Environmental Research*, 2020, 186: 109547.
- [26] Gil J, Corella J, Aznar M A P, et al. Biomass gasification in atmospheric and bubbling fluidized bed: Effect of the type of gasifying agent on the product distribution [J]. *Biomass and Bioenergy*, 1999, 17(5): 389-403.
- [27] Zhou S Q, Zhu X C, Wu Z T, et al. Effect of composition of biomass steam-gasified gas on laminar burning velocity and overall activation energy[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2024, 181: 107048.
- [28] Boujjat H, Rodat S, Chuayboon S, et al. Experimental and numerical study of a directly irradiated hybrid solar/combustion spouted bed reactor for continuous steam gasification of biomass[J]. *Energy*, 2019, 189: 116118.
- [29] Huynh C V, Kong S C. Combustion and NO_x emissions of biomass-derived syngas under various gasification conditions utilizing oxygen-enriched-air and steam[J]. *Fuel*, 2013, 107: 455-464.
- [30] Abtahizadeh E, Sepman A, Hernández-Pérez F, et al. Numerical and experimental investigations on the influence of preheating and dilution on transition of laminar coflow diffusion flames to MILD combustion regime[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(11): 2359-2374.
- [31] Sepman A, Abtahizadeh E, Mokhov A, et al. Experimental and numerical studies of the effects of hydrogen addition on the structure of a laminar methane-nitrogen jet in hot coflow under MILD conditions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(31): 13802-13811.
- [32] Sepman A V, Abtahizadeh S E, Mokhov A V, et al. Numerical and experimental studies of the NO formation

- in laminar coflow diffusion flames on their transition to MILD combustion regime[J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(8): 1364-1372.
- [33] Sepman A V, Mokhov A V, Levinsky H B. Spatial structure and NO formation of a laminar methane-nitrogen jet in hot coflow under MILD conditions: A spontaneous Raman and LIF study[J]. *Fuel*, 2013, 103: 705-710.
- [34] Medwell P R, Kalt P A M, Dally B B. Imaging of diluted turbulent ethylene flames stabilized on a jet in hot coflow(JHC) burner[J]. *Combustion and Flame*, 2008, 152(1): 100-113.
- [35] Li Z S, Li B, Sun Z W, et al. Turbulence and combustion interaction: High resolution local flame front structure visualization using simultaneous single-shot PLIF imaging of CH, OH, and CH₂O in a piloted premixed jet flame[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(6): 1087-1096.
- [36] Oldenhof E, Tummers M J, van Veen E H, et al. Role of entrainment in the stabilisation of jet-in-hot-coflow flames[J]. *Combustion and Flame*, 2011, 158(8): 1553-1563.
- [37] Oldenhof E, Tummers M J, van Veen E H, et al. Ignition kernel formation and lift-off behaviour of jet-in-hot-coflow flames[J]. *Combustion and Flame*, 2010, 157(6): 1167-1178.
- [38] Oldenhof E, Tummers M J, van Veen E H, et al. Conditional flow field statistics of jet-in-hot-coflow flames [J]. *Combustion and Flame*, 2013, 160(8): 1428-1440.
- [39] Yuan Y, Li S Q, Li G D, et al. The transition of heterogeneous-homogeneous ignitions of dispersed coal particle streams[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(9): 2458-2468.
- [40] Gao Q, Li S Q, Zhao Y Q, et al. Mechanism on the contribution of coal/char fragmentation to fly ash formation during pulverized coal combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(3): 2831-2839.
- [41] 周生权, 刘晓芸, 颜蓓蓓, 等. 一种基于开放空间燃烧装置的烟气污染物测定及修正方法: CN 117110515B[P]. 2024-10-12.
Zhou Shengquan, Liu Xiaoyun, Yan Beibei, et al. Method for Determination and Correction of Flue Gas Pollutants Based on Open-Space Combustion Device: CN 117110515B[P]. 2024-10-12 (in Chinese).
- [42] Doan N A K, Bansode S, Osawa K, et al. Identification of combustion mode under MILD conditions using chemical explosive mode analysis[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(4): 5415-5422.
- [43] Sidey J, Mastorakos E. Visualization of MILD combustion from jets in cross-flow[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35(3): 3537-3545.
- [44] Proud D B, Evans M J, Chan Q N, et al. Dilute spray flames of ethanol and n-heptane in the transition to mild combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 238: 111918.
- [45] Proud D B, Evans M J, Medwell P R, et al. Experimental investigation of the flame structure of dilute sprays issuing into a hot and low-oxygen coflow[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 230: 111439.
- [46] Santoro R J, Yeh T T, Horvath J J, et al. The transport and growth of soot particles in laminar diffusion flames[J]. *Combustion Science and Technology*, 1987, 53(2/3): 89-115.
- [47] Kent J H. A quantitative relationship between soot yield and smoke point measurements[J]. *Combustion and Flame*, 1986, 63(3): 349-358.
- [48] Cabra R, Myhrvold T, Chen J Y, et al. Simultaneous laser Raman-Rayleigh-LIF measurements and numerical modeling results of a lifted turbulent H₂/N₂ jet flame in a vitiated coflow[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29: 1881-1888.
- [49] Cabra R, Chen J, Dibble R, et al. Lifted methane-air jet flames in a vitiated coflow[J]. *Combustion and Flame*, 2005, 143(4): 491-506.
- [50] Perpignan A A V, Rao A G, Roekaerts D J E M. Flameless combustion and its potential towards gas turbines[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, 69: 28-62.
- [51] Fordoei E E, Mazaheri K. Effects of preheating temperature and dilution level of oxidizer, fuel composition and strain rate on NO emission characteristics in the syngas moderate or intense low oxygen dilution (MILD) combustion[J]. *Fuel*, 2021, 285: 119118.
- [52] Stephen R. *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications*[M]. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [53] Jung K S, Jung B R, Kang S H, et al. A numerical study of the pyrolysis effect on autoignited laminar lifted dimethyl ether jet flames in heated coflow air[J]. *Combustion and Flame*, 2019, 209: 225-238.
- [54] Evans M J, Medwell P R, Wu H, et al. Classification and lift-off height prediction of non-premixed MILD and autoignitive flames[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 4297-4304.

(责任编辑: 田 军)