

多源低热值燃气无焰燃烧的数值模拟研究

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 300072; 2. 天津市生物质废物利用重点实验室, 天津 300072; 3. 天津商业大学 机械工程学院, 天津 300134)

摘要: 生物质、生活垃圾、低品位煤等原料通过厌氧发酵、热解气化等技术可制备燃气。这既能处理固体废弃物、清洁利用煤, 又能产生可利用的燃气, 具有能源和环保的双重效益。但制得的燃气热值低、组成复杂、不可燃组分多, 且组成受原料、工艺影响变化较大, 采用传统燃烧方式存在点火困难、燃烧不稳定、污染物不易控制等问题。无焰燃烧是一种低氧条件下的温和燃烧模式, 污染物排放量低、燃烧效率高, 有助于解决这些问题。因此, 采用详细化学反应机理 GRI Mech 3.0 和涡耗散概念 (EDC) 模型, 通过湍流与化学反应的耦合计算, 对3种低热值燃气无焰燃烧过程进行数值模拟研究。实验数据验证该方法能够准确地模拟实际燃烧器中的无焰燃烧。随后对沼气、生物质气化气、煤气化气进行无焰燃烧数值模拟研究, 包括温度场、组分场、OH自由基分布和污染物排放等, 并通过对燃烧器的改进成功实现了生物质气化气和煤气化气的无焰燃烧。结果表明, 生物质气化气、煤气化气在进行无焰燃烧时温度分布比天然气、沼气的温度分布更加均匀、反应区结构更大, 且NO_x接近“零排放”; CO₂的稀释对于无焰燃烧有促进作用; CH₄成分的存在会改变反应区及OH分布, 使温度分布更加趋于不均匀。将3种低热值燃气无焰燃烧横向对比发现, 即便输入功率一样, 燃气热值越低, 炉膛整体温度越低, 但烟气体积更大, 因此应加强烟气的余热利用, 增大系统的热效率。

关键词: 无焰燃烧; MILD 燃烧; 数值模拟; 低热值燃气; 氮氧化物排放

中图分类号: TQ536 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)S1-0362-13

Numerical simulation of flameless combustion of multi-source low calorific value gas

YAN Beibei^{1,2}, LIU Xiaoyun¹, ZHOU Shengquan^{1,2}, CHEN Guanyi³

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Key Lab of Biomass/Wastes Utilization, Tianjin 300072, China; 3. School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: Fuel can be produced from biomass, municipal solid waste, low-grade coal and other raw materials through anaerobic fermentation, pyrolysis gasification and other technologies. It can not only deal with solid waste, and make coal clean to use, but also generate utilizable gas, which has the dual benefits of energy and environmental protection. However, the produced gas has low calorific value, complex composition, more non-combustible components, and the composition changes greatly under the influence of raw materials and processes. There are some problems such as ignition difficulty, combustion instability, and difficult control of pollutants under traditional combustion. Flameless combustion

收稿日期: 2023-03-21 修回日期: 2023-07-30 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.BE23.0377

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目 (22JCQNJC00390); 天津大学自主创新基金资助项目 (2023XCG-0010)

作者简介: 颜蓓蓓 (1981—), 女, 广西柳州人, 教授, 博士。E-mail: yanbeibei@tju.edu.cn

通讯作者: 周生权 (1995—), 男, 重庆开州人, 助理研究员, 博士。E-mail: zhoushengquan@tju.edu.cn

引用格式: 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(S1): 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(S1): 362-374.



移动阅读

tion is a mild combustion mode under low oxygen condition with low pollutant emission and high combustion efficiency, which helps to solve these problems. In this study, a detailed mechanism GRI Mech 3.0 and the eddy dissipation concept (EDC) model were used to simulate the flameless combustion process of three low calorific value gas by coupling the turbulent flow with the chemical reaction. The experimental data verify that the simulation method in this study can accurately simulate the flameless combustion in the actual burner. Subsequently, the numerical simulation of flameless combustion of biogas, biomass gasified gas and coal gasified gas was carried out, including temperature field, species, OH radical distribution and pollutant emission. The flameless combustion of biomass gasified gas and coal gasified gas was successfully realized by improving the burner. The results show that the temperature distribution of biomass gasified gas and coal gasified gas in flameless combustion is more uniform than that of natural gas and biogas, the reaction zone structure is larger, and NO_x is close to "zero emission". The dilution of CO_2 can promote flameless combustion, and CH_4 will change the reaction zone and OH distribution, making the temperature distribution nonuniform. The horizontal comparison of flameless combustion of three low calorific value gas shows that even if the input power is the same, the lower the calorific value of gas, the lower the overall furnace temperature. However, the amount of flue gas is larger, so it is necessary to strengthen the heat utilization of flue gas to increase the thermal efficiency of the system.

Key words: flameless combustion; MILD combustion; numerical simulation; low calorific value gas; NO_x emission

低热值燃气包括生物质热解气、气化气、沼气、煤气化气等,这些气体既是生物质废物、生活垃圾能源化处理及煤清洁利用的产物,也是我国天然气进口依存度大的背景下潜在的替代能源,其清洁高效利用对我国能源与环境发展具有重要意义。但这类低热值燃气组分复杂多变,且含有较多不可燃成分(CO_2 、 N_2 等),采用常规的燃烧方式容易导致燃烧不稳定、燃烧效率较低、污染物排放不易控制等问题。

无焰燃烧,国际上也称作 MILD(Moderate & Intense Low Oxygen Dilution) 燃烧^[1],是低氧稀释条件下的一种温和燃烧模式,兼具高效率 and 低污染的特点,尤其是 NO_x 超低排放,被誉为 21 世纪最具潜力的燃烧技术。由于无焰燃烧的燃料灵活性,它对于低品位劣质燃料的利用展现出一定优势,能很好地解决低热值燃气传统燃烧产生的问题。但由于不同的低热值燃气具有其燃料独特性,因此无焰燃烧的建立条件和火焰特性也势必不同。HUANG 等^[2]对合成气无焰燃烧的研究发现,合成气中的 H_2 会使燃烧温度和 NO_x 排放略有增加,同时 H_2 可以促进 CO 的氧化,提高燃烧效率。DERUDI 等^[3]对沼气无焰燃烧的研究发现,由于沼气中存在的 CO_2 的稀释作用,其相较天然气无焰燃烧的温度分布更加均匀, NO_x 排放更低^[4-5]。因此,有必要对不同来源低热值燃气的无焰燃烧分别进行研究分析。

目前无焰燃烧的研究聚焦于以实验和数值模拟手段探究其建立机制、火焰稳定机制及污染物超低排放控制。从燃气种类来看,目前的研究主要集中于甲烷(天然气)、乙烷等传统高热值燃气。双组分的混合气体的无焰燃烧,如沼气(CH_4+CO_2)、合成气($\text{CO}+\text{H}_2$)

等亦有所研究^[4-7]。但对于生物质气化气、煤气化气这类多组分低热值气体进行无焰燃烧的研究较少,且这类气体含有 4~6 个组分,比例受原料、工艺的影响较大,将直接影响无焰燃烧建立及污染物排放控制。

数值计算通过对实验对象的模拟,能提供实验未测量或难以测量的信息,其结果经过实验验证之后,可获得该工况下完整的流场、温度场、自由基等信息,有助于揭示低热值燃气无焰燃烧的深层机理,并对燃烧器设计和运行参数控制提供直接指导。针对沼气的无焰燃烧数值模拟,CHEN 等^[8]通过建立对流扩散火焰模拟了富氢沼气的无焰燃烧,研究了氧化剂预热温度、氧气体积分数和燃料氢体积分数对火焰结构的影响,并揭示了稀释气体会增强沼气实现无焰燃烧的燃料适应性。VASAVAN 等^[9]采用一维燃烧模型研究了混合层中沼气无焰燃烧的点火效应,确定了氧化剂成分和温度对点火延迟的影响。HOSSEINI 等^[10]通过三维计算流体力学(CFD)的研究揭示了沼气进行无焰燃烧的天然优越性。MEHREGAN 等^[11]研究发现氧气体积分数和空气预热温度是影响沼气无焰燃烧 NO_x 排放的主要因素。这些模拟研究普遍从沼气无焰燃烧的建立入手,探讨其实现无焰的可行性与影响,几乎未从火焰稳定及火焰结构的角度解释无焰燃烧对于低热值气体的独特优势。与此同时,文献中针对生物质气化气和煤气化气的无焰燃烧模拟研究较少,仅有的研究也未能实现对不同组成低热值燃气的对比^[12-15]。

关于数值模拟机理,ZHANG 等^[16]采用 GRI 2.11 机理的涡耗散概念(EDC)模型,模拟了国际火焰研究基金会(IFRF)半工业试验炉中的天然气无焰燃

烧,并探究了初始 NO_x 体积分数对 NO_x 生成的影响。KHOSHALL 等^[17]采用具有全局机理的 EDC 模型,结合 CFD 代码中内置的 NO_x 后处理模块,模拟了燃料预热温度对 NO_x 的影响。HERNANDO 等^[18]采用 CFD 模拟分析了合成气的添加对天然气再循环炉无焰燃烧的影响。因此,笔者将从数值模拟的角度,通过湍流与化学反应的耦合计算,对多种低热值燃气无焰燃烧的火焰稳定及火焰结构进行分析。

通过对沼气、生物质气化气、煤气化气 3 种低热值燃气无焰燃烧进行数值模拟研究,考察 3 者在组分和体积分数变化条件下,无焰燃烧温度场、组分场、反应区结构及 NO_x 、CO 等污染物排放的水平,以揭示低热值燃气无焰燃烧的建立机制。本研究有助于低热

值燃气利用的燃烧器设计和优化,为低热值燃气高效利用提供技术指导。

1 低热值燃气及模拟方法

1.1 低热值燃气特性

1.1.1 沼 气

沼气是一种混合气体,主要包括 45%~70% 的 CH_4 、40%~60% 的 CO_2 ,以及少量的 H_2 、 H_2S 、 NH_3 和 CO 等^[19],见表 1。由于含有大量的 CH_4 ,沼气是最接近天然气的一种中低热值气体,可以通过畜禽粪便、生活垃圾、秸秆等有机物或有机成分发酵产生^[20]。由于工艺和原料的变化,沼气组分的体积分数会发生变化,主要体现在 CH_4 和 CO_2 的相对含量。

表 1 典型低热值气体的成分和热值

Table 1 Composition and calorific values of typical low calorific value gases

典型低热值气体	主要气体体积分数/%						热值/ ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$)
	H_2	CO	CH_4	CO_2	O_2	N_2	
空气气化	9~20	10~20	1~8	10~20	1~2	40~55	4.0~5.0
生物质气化气 ^[21-22]	富氧气化	9~17	40~50	0~1.0	19~25	15~30	7.0~9.0
	水蒸气气化	35~50	25~47	14~25	9~15	2~3	12~17
沼气 ^[23]	0~0.2	0~0.2	45~70	40~60	0.1~1.0	2~5	7.5~22.4
煤气化气 ^[24]	16~67	4~65		1~20	0~0.6	0.3~1.0	2.0~15.0

1.1.2 生物质气化气

生物质/生活垃圾等在特定的气化炉(固定床、流化床等)和气化剂(空气、氧气、水蒸气等)条件下,发生干燥、热解、氧化、还原等过程,最终生成含有 CH_4 、 H_2 、CO、 CO_2 、 N_2 等组分的生物质气化气。气化气的组成受原料、气化炉、气化剂的类型和运行参数的影响,成分波动较大。典型的生物质气化气组成见表 1。对比表 1 中数据可见,以空气为气化介质的生物质气化气相较后者含有更多的稀释组分(如 N_2 、 CO_2)及更少的可燃组分,其热值也显著较低,但是由于生物质/生活垃圾本身能量密度低,空气作为气化剂更具经济性和实用场景^[25],因此这里主要考虑生物质空气气化产生的燃气。

1.1.3 煤气化气

煤相对生物质热值较高,能量密度大,气化气的品质更好,一般采用氧气或水蒸气气化。作为主要可燃成分,煤气化气的 H_2 和 CO 体积分数最高,因此一般也称作合成气,此外碎煤加压气化技术还具有 10% 左右的 CH_4 。 CO_2 是其主要惰性组分。

典型低热值气体的成分和热值总结在表 1 中,可以看出,不同来源的低热值燃气组分体积分数差别大,

因此,很有必要研究其无焰燃烧建立和污染物排放与差异。

1.2 无焰燃烧数值模型的建立

本文数值模拟采用的是文献^[26-30]中的无焰燃烧系统,相关学者在该平台上进行了大量实验,可以对模拟数据进行验证,其结构如图 1 所示。空气喷嘴直径为 10 mm,位于燃烧器出口中心,周围 30 mm 直径的圆周上环绕了 16 个直径 2 mm 的燃料喷嘴。该燃烧器通过预热空气及高速射流卷吸烟气,从而实现无焰燃烧。后文对无焰燃烧的判定将采用传统判据,即 OH 自由基分布均匀且无明显锋面、温度分布均匀、 NO_x 排放显著降低,即为实现无焰燃烧。这是无焰燃烧定义的重要部分^[1],也是很多研究的重要判据^[31-32]。

根据图 1 结构建立的几何模型如图 2(a) 所示。由于计算域对称,为减少网格数量、节约计算成本,因此选取几何模型的 1/16 进行计算,计算域如图 2(b) 所示。网格划分采用结构化网格生成方法,有助于网格质量的提升和计算的收敛。图 2(c) 展示了网格质量分布,图中所有网格质量均大于 0.9,说明网格划分质量良好。图 2(d) 为喷口附近的网格示意。对于直径为 2 mm 的高速射流喷口,采用的结构化六面体网

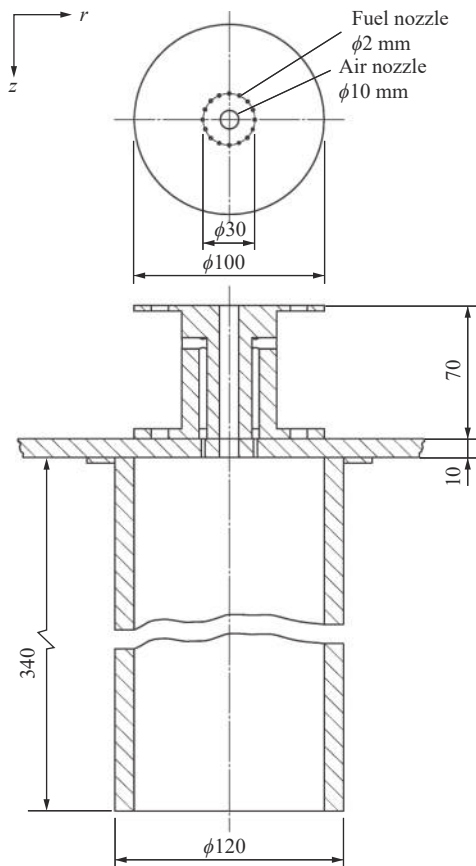


图 1 无焰燃烧系统结构

Fig.1 Structure of flameless combustion system

格尺寸为 0.03~0.06 mm, 该尺度能保证喷口附近精细化的网格划分。

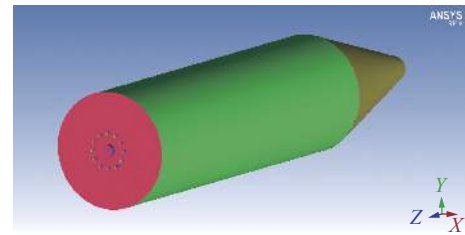
为验证网格独立性, 对网格数量不同的 3 个网格文件 (网格 1: 153 980 cells; 网格 2: 262 840 cells; 网格 3: 521 012 cells) 分别进行实验工况计算, 结果如图 3 所示。可以看出, 数量差别很大的 3 个网格计算结果几乎一致, 独立性良好, 这得益于采用结构化网格划分, 网格质量很高, 基本避免了网格划分带来的误差。

1.3 数值模型测试与验证

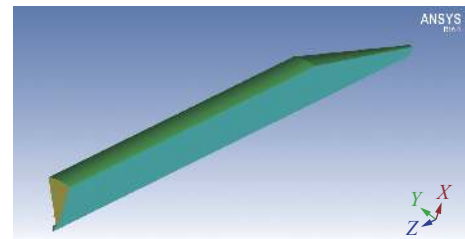
为了验证模拟的准确性, 选取了文献[22-26]中详细记录了各种实验检测数据的工况作为测试工况, 表 2 给出了该工况的详细描述。

在 Fluent 软件中激活能量方程, 辐射采用 DO 模型, 每进行 5 步的能量方程计算即更新一次辐射方程。湍流采用标准 $k-\epsilon$ 方程, 化学反应机理采用 GRI Mech 3.0 的详细化学反应机理。选择该机理是因为它经过了大量的实验验证和优化, 具有很强的预测稳定性, 能很好预测沼气^[33]、生物质气等燃气^[34-35]的反应性能。

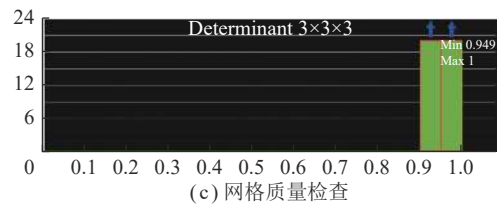
对于 NO_x 的生成, 考虑了热力型机理、快速型机理和 NNH 机理。针对低热值燃气的稀释燃烧, 由于燃料氮、 N_2O 机理、 NO 再燃机理与实验条件相差较



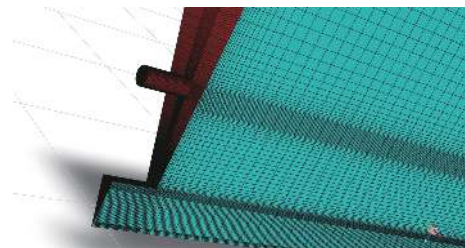
(a) 无焰燃烧器几何模型



(b) 计算域的选取(1/16)



(c) 网格质量检查



(d) 喷口附近精细化网格

图 2 无焰燃烧器几何模型、计算域及网格质量检查

Fig.2 Geometric model, calculation domain and mesh quality check of flameless burner

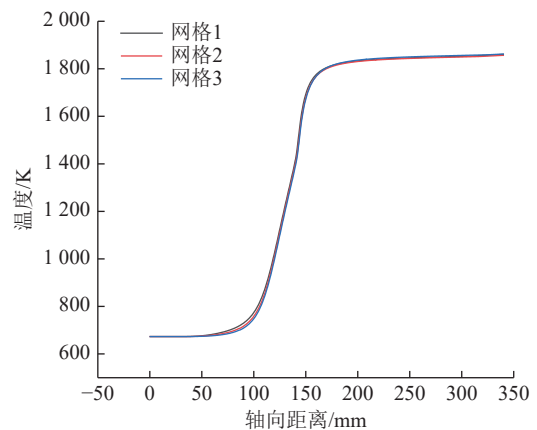


图 3 采用 3 种网格数量的计算结果

Fig.3 Calculation results of three grid quantities

大, 因此本文没有考虑。NO 的模拟结果在前人的实验工况下进行了验证, 得出基于 EDC 模拟是准确的 (表 3)。湍流与化学反应相互作用采用涡耗散概念模

表 2 测试工况

Table 2 Test conditions

燃料	过量空气系数	空气进口温度/ $^{\circ}\text{C}$	空气射流速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	燃气进口速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	壁面温度/ K
CH_4	1.3	400	113.2	6.2	1400

注：测试工况所用燃气为天然气，燃气功率为10 kW；空气过量系数=运行空燃比/化学当量空燃比。

型 (EDC), 每进行 5 步的流动即更新一次化学反应。

采用当地自适应查表法 (ISAT) 用于加快化学反应耦合计算的速度, ISAT 的容差设为 0.000 1, 保证没有因为引入 ISAT 算法而引起计算误差。

燃料和空气进口采用速度进口边界条件, 出口设为压力出口边界, 壁面为标准壁面, 壁面温度设置为 1400 K, 内部发散率设为 0.7。求解方法采用 SIMPLE 二阶迎风求解格式。计算中基于压力求解, 进行稳态计

表 3 2 种模型 NO_x 生成量与实验的对比Table 3 NO_x emissions of numerical and experimental

results		
类型	NO_x 生成量/ 10^{-6}	相对误差/%
实验数据	21.4	
EDM模型	76.2	258
EDC模型	19.8	7.50

算。在残差小于设定值之后, 计算收敛, 得到求解结果。

图 4、5 分别展示了对模拟工况计算得到的温度场、组分场、反应区结构分布。其中, 图 4 曲线不平滑是由于燃烧器内部的高湍流度和强烈卷吸; 图 4(d) 不包含 EDM 曲线是由于 EDM 采用一步反应模型, 该模型不含中间组分 CO。表 3 展示了 EDM 和 EDC 模型对 NO_x 生成量的对比。

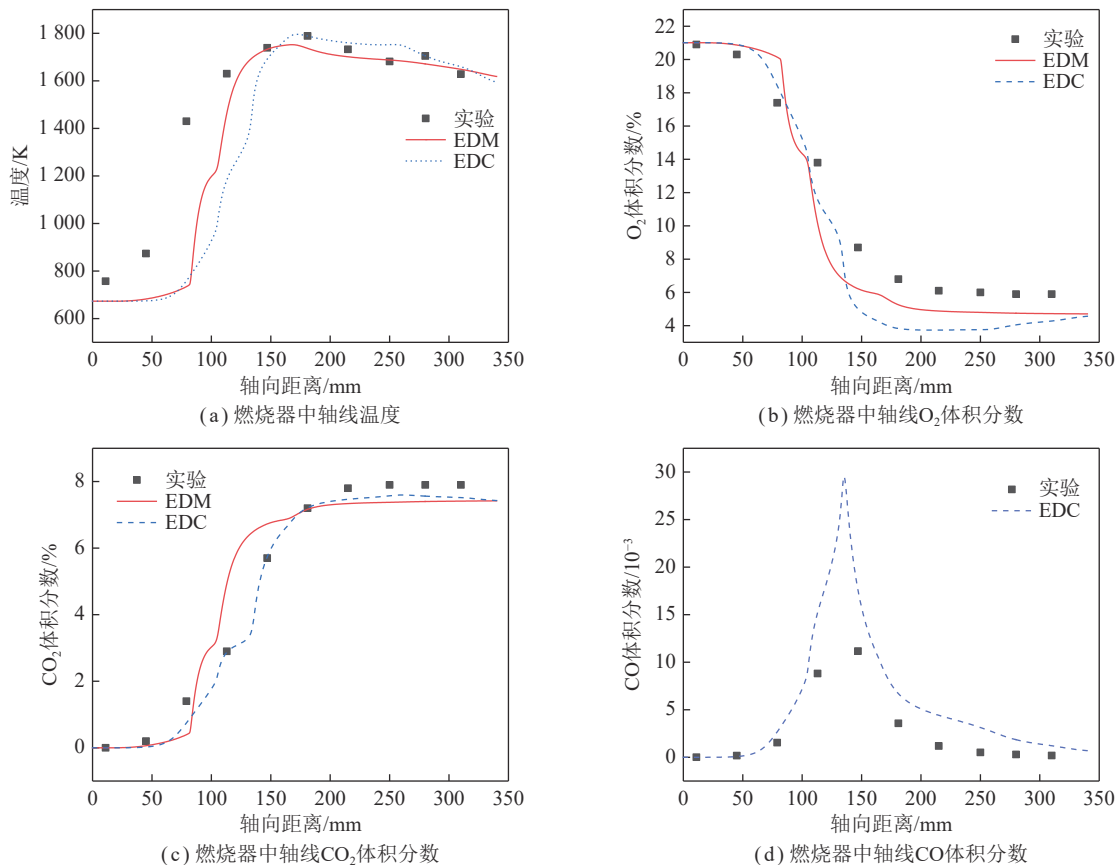


图 4 验证工况的温度、组分分布

Fig.4 Temperature and species under verification conditions

结果表明, EDM 模型由于只考虑总包反应机理, 并且认为化学反应速率很快发生, 因此只能在一定程度上给出粗略的数据, 对于燃烧区结构的模拟结果出入很大, 无法揭示无焰燃烧的反应区结构。此外, 由于反应温度场的模拟效果较差, 整体温度偏高, 同时存在局部高温区, 预测的 NO_x 生成量显著偏高。

而 EDC 模型在燃烧反应温度、组分分布、污染物生成等均展示出与实验结果非常好的一致性, 这得益于 EDC 模型考虑了详细化学反应机理和湍流的相互作用。

综合对比上述结果, 基于 GRI-Mech3.0 详细机理的 EDC 模型的模拟结果和实际工况有较好的拟合性。

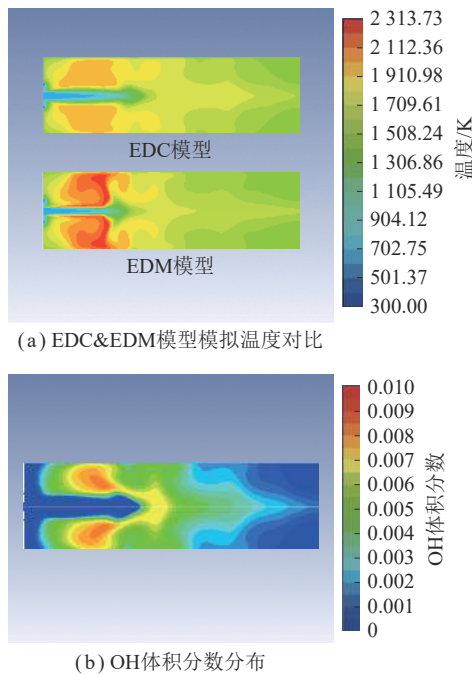


图 5 验证工况的温度对比及 OH 分布

Fig.5 OH distribution and temperature comparison under verification conditions

因此,在后续模拟中采用 EDC 计算模型和方法将得到可靠的模拟数据。

1.4 模拟工况与参数设置

1.4.1 沼气的模拟工况与参数设置

数值模拟采用的沼气成分见表 4,由于沼气组分的体积分数会随工艺和原料而变化,主要是 CH₄ 和 CO₂ 之间比例存在变化,因此本文以 CH₄ 和 CO₂ 的 3 种配比近似表示沼气在不同工艺和原料下的变化情况。为控制变量,空气温度、流速和沼气的输入功率是不变的,这样可以探究不同沼气组成(CH₄ 和 CO₂ 的体积分数)对无焰燃烧的影响。由于组成变化时沼气的热值也会变化,因此燃气的流速相应改变,以确

保输入功率保持为 10 kW。由于沼气相对生物质气化气、煤气化气热值较高,因此采用原喷嘴即可实现无焰燃烧。

1.4.2 生物质气化气的模拟工况与参数设置

本文讨论的生物质气化气来源于热值较低、品质较低的生物质废物。作为一种固废处理手段,生物质气化不强调燃气的热值和品质,仅需将产品用于自供热或其他分布式利用,宜采用空气气化进行处理。根据表 1 所述选取了 3 种典型的生物质气化气,成分见表 4。由于生物质气化气中大部分是不可燃成分,热值仅有天然气的近 1/10,因此在保证 10 kW 的燃料输入功率和空气过量系数为 1.3 不变的条件下,其燃气射流速度必然会变得非常大。

为探究其无焰燃烧的可行性,下面进行试算。通过使用 1 600 K 的局部初始化对生物质气化气进行点火,结果如图 6 所示,图中最高温还是空气的预热温度,且 O₂ 分布也说明燃烧反应没有进行,即反应区只发生了流动,无法建立无焰燃烧。

考虑到生物质燃气的低热值特性,无法实现点火的原因可能是其层流燃烧速度低、火焰温度低,在大流速下停留时间很短,火焰无法稳定,点火核完全不能发展。因此,通过改进燃烧器的方式建立无焰燃烧。通过增大燃料入口面积、减小燃气射流速度,使燃气与空气射流速度得以匹配。改进的方法为:将燃料喷嘴由 16 个直径 2 mm 的圆孔转变为外径 16 mm、内径 14 mm 的圆环,燃料的入口面积由 16π mm² 增加为 60π mm²,为原来的 3.75 倍,改进的燃烧器入口的水力直径 $D = 2 \times (16 - 14) \text{ mm} = 4 \text{ mm}$,如图 7 所示。

在新的燃烧器模型下,除了调整生物质气化气的进气速度外,为了让无焰燃烧更好的建立,考虑将炉膛的初始温度设为 1 200 K,模拟外点火过程。随后

表 4 模拟计算的 3 种低热值气体成分及特性

Table 4 Composition and characteristics of three kinds of simulated low calorific value gases

	气体体积分数/%					燃气热值/ (MJ · m ⁻³)	原燃气速度/ (m · s ⁻¹)	改进燃气速度/ (m · s ⁻¹)	空气速度/ (m · s ⁻¹)	空气温度/ K	燃料输入功率/ kW
	CH ₄	CO ₂	H ₂	CO	N ₂						
CH ₄	100	0				35.88	6.20		113.20		
沼气1	60	40				21.53	10.33		113.20		
沼气2	50	50				17.94	12.40		113.20		
沼气3	40	60				14.35	15.50		113.20		
生物质气化气1	3	20	6	10	61	2.99	74.47	20.36	94.75	673	10
生物质气化气2	3	14	11	16	56	4.28	51.92	14.19	91.97		
生物质气化气3	3	8	16	22	51	5.58	39.85	10.90	90.45		
合成气1		19	36	45		9.57		6.35	85.61		
合成气2	11	28	40	21		10.91		5.57	97.45		

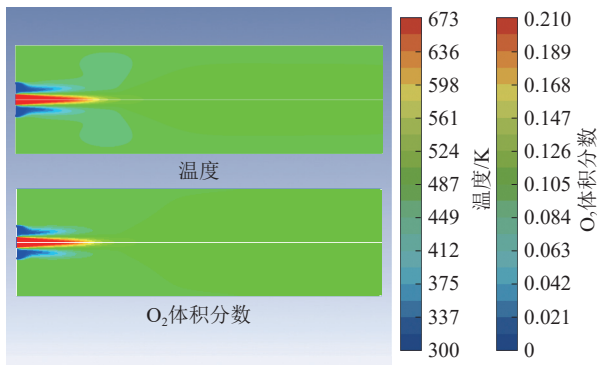


图6 生物质气化气无焰燃烧试算温度及O₂分布

Fig.6 Calculation temperature and O₂ distribution of flameless combustion of biomass gasified gas

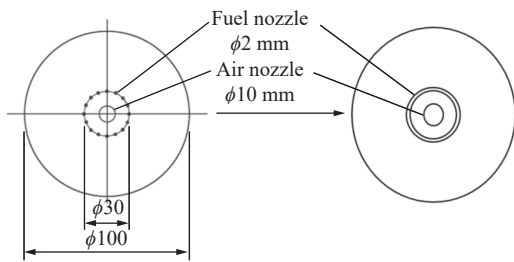


图7 燃烧器改进示意

Fig.7 Schematic diagram of burner improvement

对燃烧器模型建立周期性网格,进行迭代计算收敛后得到数值模拟的计算结果。

1.4.3 煤气化气的模拟工况与参数设置

由于煤相对于生物质来说能量密度更高,因此气化剂一般采用水蒸气或氧气,从而制取热值更高、N₂体积分数低的煤气化气(H₂和CO占比高,一般也称作合成气),具有更好的应用前景。

因此,本文选择了水煤浆气化产物(合成气1)和碎煤加压气化产物(合成气2)作为研究对象,其组成和特性见表4。应注意,本文使用的煤气化气不同于煤气(即天然气)。由于煤气化气热值相对于天然气和沼气仍较低,因此继续采用改进的燃烧器进行模拟计算,燃气及空气的进口速度由输入功率和空气过量系数分别得出。

2 结果与讨论

2.1 沼气无焰燃烧数值模拟

2.1.1 温度场

3种工况下温度分布云图如图8所示。由图8可知,沼气进行无焰燃烧整体温度分布均匀。没有明显的高温区和温度峰值点,这非常有利于炉膛内的辐射传热,可以使燃烧炉的辐射换热效率增加,增大燃料的综合利用效率。同时,整体温度较低有助于抑制热型NO_x的生成,该效果后面会详细讨论。

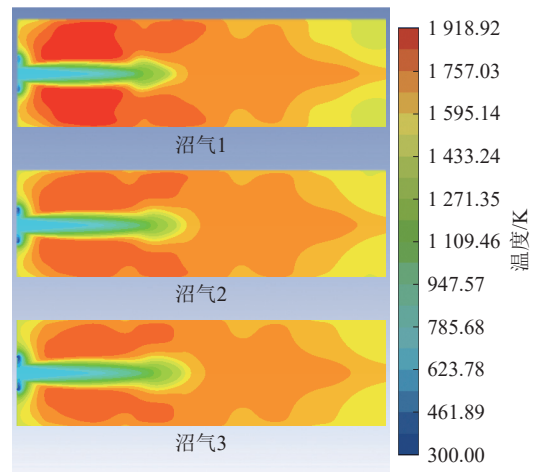


图8 沼气无焰燃烧的温度分布云图

Fig.8 Cloud map of temperature distribution in flameless combustion of biogas

观察图8可以看出,随着沼气中CO₂占比的增大,最高温度逐渐下降,并且温度分布更均匀,更符合无焰燃烧的特性。这可能是由于在提高燃气射流速度的同时带入了更多稀释气体CO₂,加强高速射流作用的烟气卷吸,降低了燃烧室内氧气的体积分数,使温度场分布更加均匀。应当注意的是,分布式反应是氧气浓度降低的结果,而不是CO₂稀释本身的结果^[36]。

由图9(a)可知,在中心轴线处,轴向距离 $z = 60 \sim 170$ mm段都在发生燃烧反应,温度不断上升;在 $z > 270$ mm阶段,几乎不发生燃烧反应,炉膛温度略微下降,这是炉膛内的高温烟气与出口壁面换热的结果。对比3种沼气,可以看出3者的温度分布基本一致,这主要是由于燃料的输入功率是一样的,同时CO₂的影响也与图8一致。

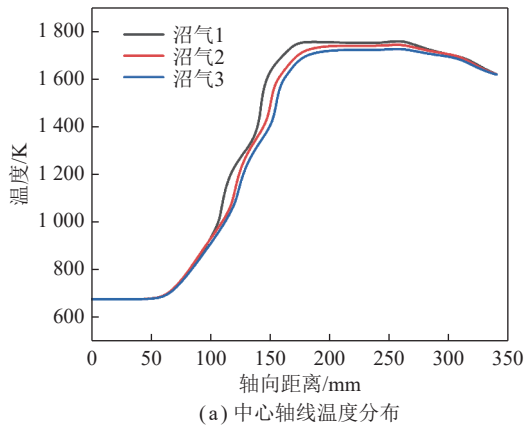
2.1.2 组分场

(1) CO₂分布

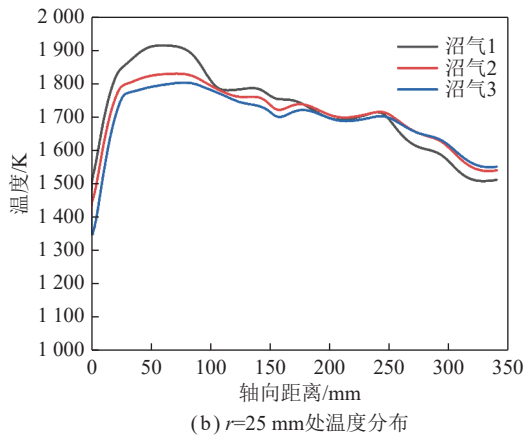
在上述温度场的结果中,体现了CO₂对于沼气无焰燃烧的重要作用。图10(a)显示了3种沼气无焰燃烧时在炉膛中心轴线上的CO₂体积分数的分布。在 $z < 25$ mm区段,由于空气流速较大,CO₂难以卷吸,因此几乎没有CO₂;在 $z > 25$ mm区域,中心轴线上开始出现CO₂并逐渐增多,说明CO₂很快被卷吸进入燃烧区,稀释了空气和燃料。

图10(b)展示了炉膛 $r = 25$ mm轴线处CO₂的分布情况。由图可知,由于烟气卷吸,近燃烧区的CO₂一直保持在较高水平,而不是如传统燃烧集中在燃烧区下游,这进一步揭示了沼气发生无焰燃烧的特性。

图11更加直接地展示了炉膛内部CO₂的分布情况,可以看出CO₂在进入燃料进口后通过强湍流作用,很快扩散到炉膛内的各个部位,同时通过加强炉膛内



(a) 中心轴线温度分布



(b) $r=25\text{ mm}$ 处温度分布

图 9 沼气无焰燃烧轴向温度分布

Fig.9 Axial temperature distribution of flameless combustion of biogas

的烟气卷吸, 增强低氧效应, 更好地实现无焰燃烧。

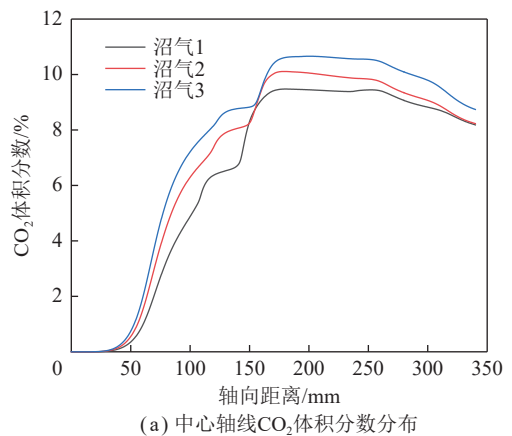
(2) OH 分布

OH 自由基是燃烧反应最重要的中间产物之一, 其分布可以表征火焰结构。对于沼气无焰燃烧过程, 由图 12 可知 OH 均分布在较广的空间范围内, 尤其是空气射流末端和烟气卷吸发生比较强烈的近燃烧区域, 这一点对于沼气 1 的 OH 分布尤其明显。沼气 2 和沼气 3 的 OH 分布更加均匀, 说明沼气的无焰燃烧发生在整个炉膛, 没有明显的火焰锋面, 这区别于传统燃烧中 OH 分布在一个很薄的区域内 (即火焰锋面)。

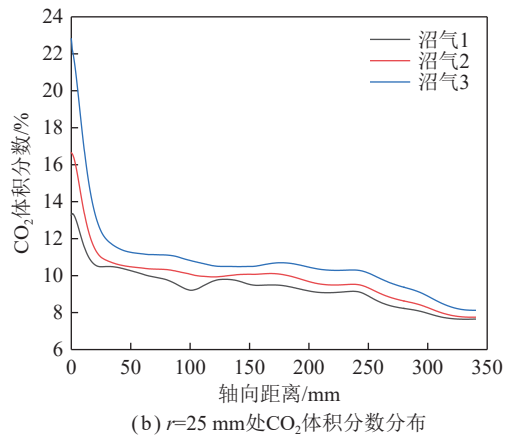
对比 3 种沼气的 OH 分布可以发现, 随着燃料中 CO_2 体积分数和燃料射流速度的增加, OH 分布更加均匀, 这进一步体现了在沼气无焰燃烧中 CO_2 稀释的优势, 即能够加强湍流稀释效应, 使炉膛内的燃烧反应分布式发生。

2.1.3 NO_x 排放

表 5 展示了沼气无焰燃烧时污染物的排放水平。对于沼气无焰燃烧, NO_x 排放量均低于 5×10^{-6} , 甚至接近为 0, 这一结果与其他文献很好地吻合^[5, 37-38]。这主要得益于 2 个因素: ① 无焰燃烧整体温度分布均匀,



(a) 中心轴线 CO_2 体积分数分布



(b) $r=25\text{ mm}$ 处 CO_2 体积分数分布

图 10 沼气无焰燃烧轴向 CO_2 体积分数分布

Fig.10 Axial distribution of CO_2 molar fraction in flameless combustion of biogas

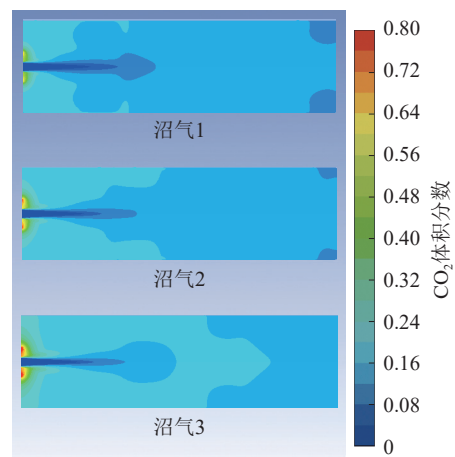


图 11 沼气无焰燃烧的 CO_2 分布云图

Fig.11 Cloud map of CO_2 distribution in flameless combustion of biogas

峰值温度低, 没有火焰锋面, 热力型 NO_x 的生成受到了抑制; ② 空气的射流动量大, 燃料射流速度较小, 燃料在近燃烧区很快被空气和卷吸烟气等混合物卷吸、混合、发生反应, 呈分布式燃烧的特点, 在这种燃烧模式下, 污染物的生成反应会很慢。

这些都进一步说明无焰燃烧是一种很清洁的燃

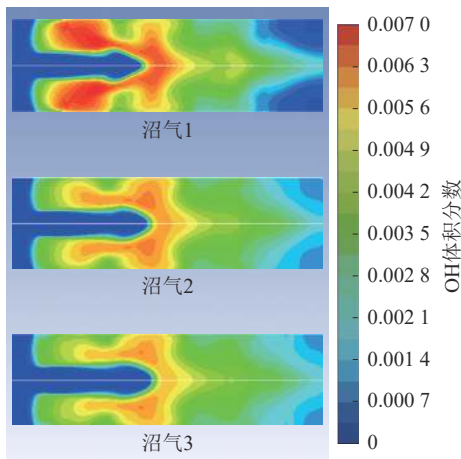


图 12 沼气无焰燃烧的 OH 分布

Fig.12 OH distribution in flameless combustion of biogas

表 5 3 种沼气无焰燃烧 NO_x 生成量的对比

Table 5 Comparison of NO_x produced by flameless combustion of three biogas

类型	NO _x 生成量/10 ⁻⁶	实验数据验证
沼气1	2.47	2×10 ⁻⁶ [3]
沼气2	0.83	
沼气3	0.51	

烧方式,并且对于热值较低的沼气,采用无焰燃烧方式比天然气的无焰燃烧更具优势。

2.2 生物质气化气无焰燃烧数值模拟

2.2.1 温度场

3 种生物质气化气无焰燃烧的温度场如图 13 所示,可知采用改进的燃烧器和预热炉膛的方法能够实现低热值的生物质气化气的无焰燃烧,且其燃烧更加符合无焰燃烧的特点,这是由于拥有更多的不可燃成分(CO₂、N₂)对燃料进行稀释,加强炉膛内高温烟气的卷吸,这一点类似沼气进行无焰燃烧时 CO₂ 的作用机制。

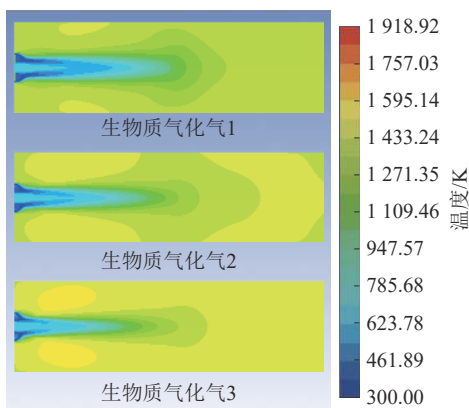
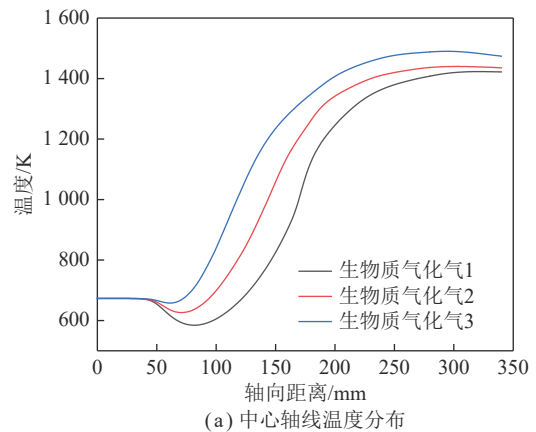


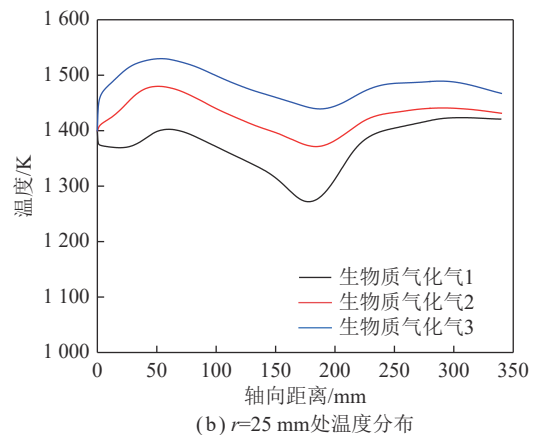
图 13 生物质气化气无焰燃烧温度分布云图

Fig.13 Cloud map of temperature distribution in flameless combustion of biomass gasified gas

分析图 14 中心轴线和 $r = 25 \text{ mm}$ 处沿轴线的温度分布可得,生物质气化气的热值对于燃烧炉内整体平均温度有正向影响,但总体差别较小,这得益于烟气回热利用的影响。较高热值的生物质气化气不可燃成分(CO₂、N₂)较少,整体温度升高更多;而在燃料输入功率不变的情况下,较低热值的生物质气化气产生的高温烟气的量更多,如果将高温烟气进行回热利用,总燃烧热不变,则热值低并不会影响到燃料的利用效率。



(a) 中心轴线温度分布



(b) $r=25 \text{ mm}$ 处温度分布

图 14 生物质气化气无焰燃烧轴向温度分布

Fig.14 Axial temperature distribution of flameless combustion of biomass gasified gas

2.2.2 OH 分布

对于生物质气化气的无焰燃烧过程,OH 体积分数分布如图 15 所示。由图 15 可知,生物质气化气无焰燃烧相较于天然气和沼气无焰燃烧的 OH 体积分数更低、分布更均匀、范围更广,几乎没有高浓区域,沿中心区域后周围呈明显层状递减,直至反应消失。

2.2.3 NO_x 排放

3 种生物质气化气 NO_x 生成的模拟结果显示,NO_x 均低于 10⁻⁸,已经达到“零排放”水平。这一巨大优势,说明生物质通过气化可以减少污染物的生成,且产生的生物质气化气无焰燃烧后产生的 NO_x 已接

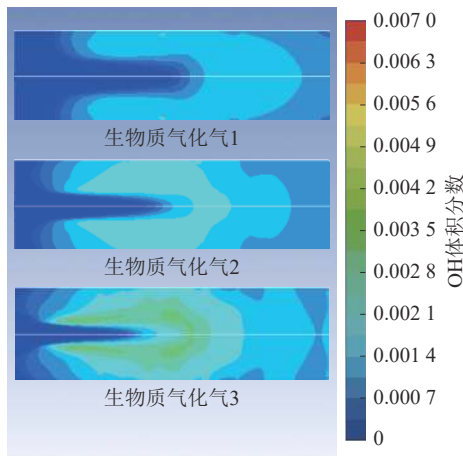


图 15 生物质气化气无焰燃烧 OH 分布

Fig.15 OH distribution in flameless combustion of biomass gasified gas

近“零排放”,体现了生物质气化及应用全流程的环境友好性。

2.3 煤气化气无焰燃烧数值模拟

2.3.1 温度场

2 种煤气化气的热值相近,合成气 2 多了组分 CH_4 ,为衡量其热效应,图 16 展示了 2 种煤气化气进行无焰燃烧的温度分布。由图 16 可知,煤气化气在进行无焰燃烧时温度分布比天然气、沼气的温度分布更加均匀,这类似于生物质气化气的特性。但由于它相较生物质气化气稀释组分 (CO_2 、 N_2 等) 较少,燃料热值较高,因此温度的分布性相较生物质气化气较差。

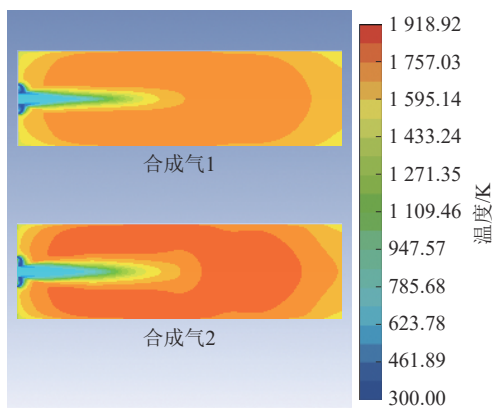
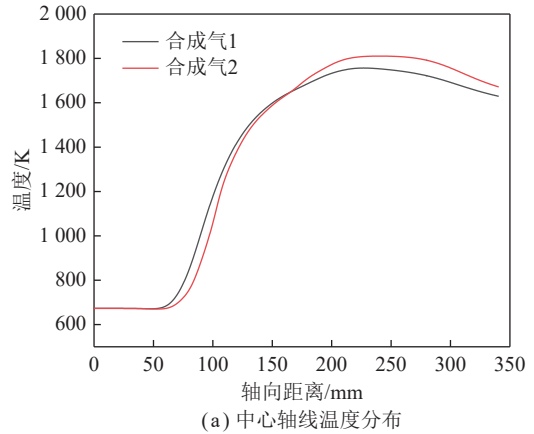


图 16 煤气化气无焰燃烧的温度分布云图

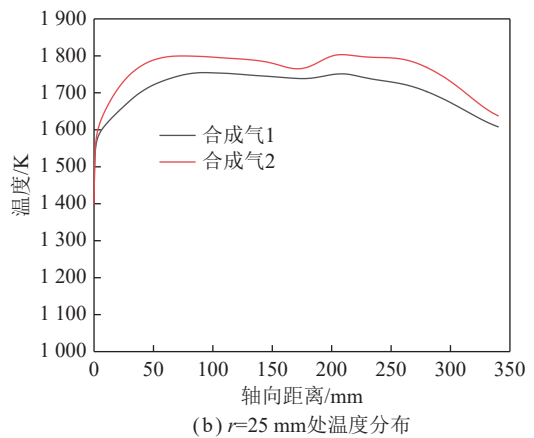
Fig.16 Cloud map of Temperature distribution in flameless combustion of coal gasified gas

图 17 显示,尽管合成气 2 的不可燃成分更高,但由于热值影响,合成气 1 的总体温度比合成气 2 的要低、温度分布也更均匀。这初步体现出 CH_4 对温度分布均匀性的影响:由于 CH_4 的热值较高,是 CO 和 H_2 的 3 倍左右,而合成气 1 中 H_2 和 CO 的体积分数较

高,因此热值较低,炉膛总体温度分布更加均匀。



(a) 中心轴线温度分布



(b) $r=25\text{ mm}$ 处温度分布

图 17 煤气化气无焰燃烧轴向温度分布

Fig.17 Axial temperature distribution of flameless combustion of coal gasified gas

2.3.2 OH 分布

图 18 中对于煤气化气的无焰燃烧,OH 体积分数与沼气的无焰燃烧状况相当,高于生物质气化气,总体分布较为均匀,反应在整个炉膛内发生,没有明显的火焰锋面,但 OH 分布更趋近于炉膛中部区域。另

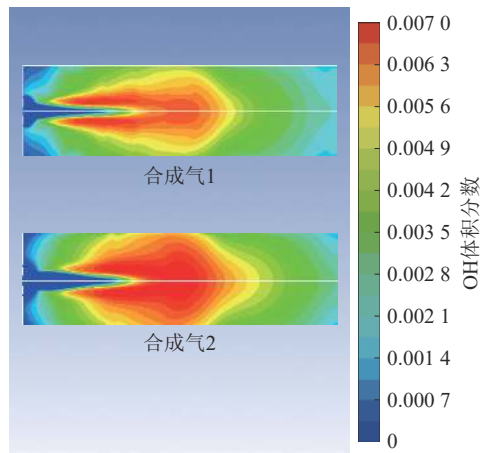


图 18 煤气化气无焰燃烧过程中 OH 分布云图

Fig.18 Cloud map of OH distribution in flameless combustion of coal gasified gas

外,CH₄的存在使合成气1的OH体积分数整体低于合成气2。

2.3.3 NO_x 排放

2种煤气化气无焰燃烧的NO_x生成的模拟结果显示,NO_x生成量分别为 0.335×10^{-6} 和 0.826×10^{-6} ,已经达到近“零排放”水平。数值比生物质气化气的排放量略高,这是由OH体积分数较高导致的,因此揭示了OH体积分数对于NO_x生成的直接影响。

2.4 3种低热值燃气无焰燃烧对比

2.4.1 温度场分布的对比

为量化温度场的对比,选取沼气2、合成气2、合成气1、生物质气化气2四种低热值燃气的无焰燃烧在 $r=25$ mm处轴向温度分布。结果如图19所示,4种低热值燃气的热值分别为:17.94、10.91、9.57、4.28 MJ/m³。其中,最大温差是指沿 $r=25$ mm的轴线上的温度最大值和最小值之差。之所以选择 $r=25$ mm,是因为实验验证的数据是 $r=25$ mm处,同时在该轴线上温差最大。

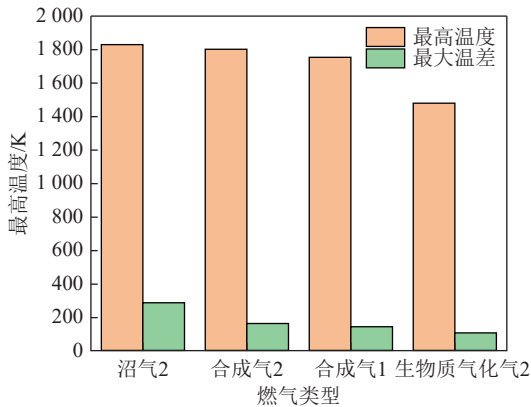


图19 4种低热值气体无焰燃烧最高温度和最大温差对比

Fig.19 Comparison of maximum temperature and maximum temperature difference in flameless combustion of four low calorific value gases

对比生物质气化气2与另外3种燃气可以发现,即使燃料的输入功率相同,燃气热值越高,最高温度便越高。主要原因在于生物质气化气2中N₂和CO₂组分的体积分数太高,对无焰燃烧进行了深度稀释,降低了整个炉膛的最高温度。这体现了低热值燃气中不可燃组分N₂和CO₂的作用机制:稀释燃料与氧化剂的混合物,降低炉膛升温,增加烟气量,加强炉膛烟气卷吸。

对比沼气2和其他3种气体的最大温差可以发现,即使最高温度相差不大的情况下,沼气的温差相差较大,合成气2由于含有少量CH₄,因此温差也较大。这体现了CH₄在无焰燃烧中的作用机制:CH₄的热值比CO和H₂高2倍,存在于混合燃气中必然会

增加局部峰值温度,使最大温差增大。

2.4.2 OH分布的对比

图20展示了OH体积分数分布对比情况,可以发现,合成气2的OH体积分数更大,且温度分布更集中,其成分相较于沼气多了H₂和CO,相较于生物质气化气多了CH₄和H₂。故可以分析出高比例的H₂和CH₄能够产生分布较为集中的OH,OH体积分数升高,促进热力型机理和快速型机理中NO_x的生成。

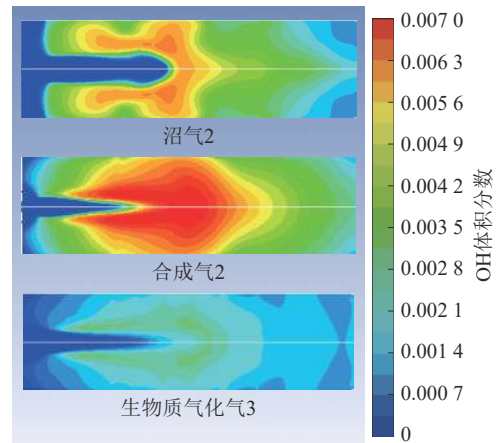


图20 沼气和生物质气化气无焰燃烧的OH分布云图

Fig.20 Cloud map of OH distribution in flameless combustion of biogas and biomass gasified gas

2.4.3 燃烧污染物的对比

由图21可知,NO_x排放总体均低于 3×10^{-6} ,达到了超低排放水平。对于生物质气化气和煤气化气,基本达到了近零排放。但值得注意的是,合成气2的热值比沼气2低,但是污染物排放却比沼气2高,主要是由于合成气2中含有高比例的H₂,在反应中造成局部OH体积分数升高,促进热力型机理和快速型机理

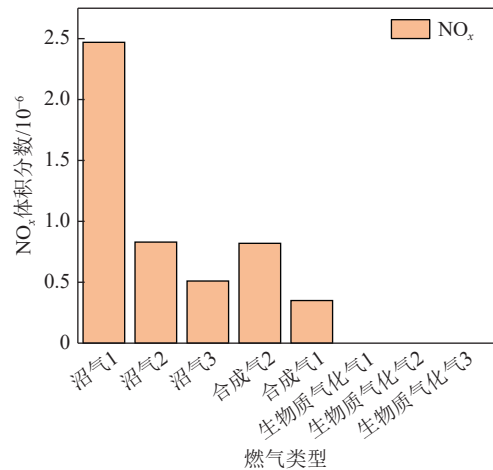


图21 不同低热值气体无焰燃烧污染物排放对比

Fig.21 Comparison of pollutant emissions from flameless combustion of different low calorific value gases

中 NO_x 的生成。

但无焰燃烧对于中低热值燃气, 不论其成分和热值如何变化, NO_x 污染物的排放都超低, 且未加任何后处理装置即可达到近零排放。这是无焰燃烧技术最初被发现的优势所在, 可以有效推进低热值燃气的利用。

2.4.4 热利用效率的对比

综合分析 3 种低热值燃气, 虽然热值有所变化, 但是增大燃气进口流量可以使燃料输入功率维持不变。不过增大燃气进口流量的同时, 烟气量也会增加, 燃烧产生的热将会更多地传递给低热值气体中的不可燃成分, 炉膛整体的温度略有下降, 传热功率变小。因此, 对于低热值燃气无焰燃烧的热利用, 宜加强高温烟气的余热利用, 补偿损失的热量。在空气过量系数不变的条件下, 热值更低的燃气产生的烟气更多, 利用好这部分余热能够对炉膛的传热进行一定补偿, 使低热值燃气燃烧时温度更加均匀, 这也有利于炉膛内部的辐射换热。

3 结 论

(1) 在维持输入功率不变的情况下, 热值低、可燃组分多的生物质气化气可以通过增大燃气进口面积、减小进口速度实现稳定无焰燃烧。

(2) 低热值气体中的 CO_2 和 N_2 对于无焰燃烧的建立有天然的优化作用, CO_2 的体积分数越高, 温度分布越均匀, 平均温度越低; 同时 OH 分布也更加均匀, 燃烧反应发生在更大范围内, 对燃料、氧气燃料混合物的稀释效果越强, 污染物排放量越低, 甚至接近零排放。

(3) CH_4 成分的存在会使温度分布更加趋于不均匀, 这主要是由于甲烷燃料的热值较高; 还会使燃烧区更趋近于燃烧器中游。 H_2 和 CH_4 会使 OH 体积分数升高, 促进热力型机理和快速型机理中 NO_x 的生成。

(4) 保持燃料的输入功率相同, 燃气热值越高, 最高温度便越高; 低热值燃气无焰燃烧的烟气量更大, 但温度更低, 因此应该加强烟气的余热利用, 以增大系统的热效率。

参考文献(References):

- [1] CAVALIERE A, JOANNON M D. mild combustion[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2004, 30(4): 329–366.
- [2] HUANG M M, ZHANG Z D, SHAO W W, et al. Effect of air pre-heat temperature on the MILD combustion of syngas[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 86: 356–364.
- [3] DERUDI M, VILLANI A, ROTA R. Sustainability of mild combustion of hydrogen-containing hybrid fuels[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2007, 31(2): 3393–3400.
- [4] MAMERI A, TABEL F, HADEF 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.
- [5] HOSSEINI S E, WAHID M A. Biogas utilization: Experimental investigation on biogas flameless combustion in lab-scale furnace[J]. *Energy Conversion and Management*, 2013, 74: 426–432.
- [6] SABIA P, SORRENTINO G, BOZZA P, et al. Fuel and thermal load flexibility of a MILD burner[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(4): 4547–4554.
- [7] CHINNICI A, NATHAN G J, DALLY B B. Experimental and numerical study of the influence of syngas composition on the performance and stability of a laboratory-scale MILD combustor[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2020, 115: 110083.
- [8] CHEN S, ZHENG C G. Counterflow diffusion flame of hydrogen-enriched biogas under MILD oxy-fuel condition[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(23): 15403–15413.
- [9] 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 Fuels*, 2018, 32(8): 8768–8780.
- [10] HOSSEINI S E, BAGHERI G, WAHID M A. Numerical investigation of biogas flameless combustion[J]. *Energy Conversion and Management*, 2014, 81: 41–50.
- [11] MEHREGAN M, MOGHIMAN M. A numerical investigation of preheated diluted oxidizer influence on NO_x emission of biogas flameless combustion using Taguchi approach[J]. *Fuel*, 2018, 227: 1–5.
- [12] 周生权, 李远博, 陈冠益, 等. 生物质气化燃气无焰燃烧的实验研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2020, 26(3): 226–230.
- [12] ZHOU Shengquan, LI Yuanbo, CHEN Guanyi, et al. Experimental study on flameless combustion of biomass gasification-derived gas[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2020, 26(3): 226–230.
- [13] 苏红. 生物质气化燃气无焰燃烧自燃特性数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2023.
- [13] SU Hong. Numerical study on self-ignition characteristics of mild combustion of biomass Gasification-derived syngas[D]. Tianjin: Tianjin University, 2023.
- [14] DANON B, DE JONG W, ROEKAERTS D J E M. Experimental and numerical investigation of a FLOX combustor firing low calorific value gases[J]. *Combustion Science and Technology*, 2010, 182(9): 1261–1278.
- [15] KWIAKOWSKI K, MASTORAKOS E. Regimes of nonpremixed combustion of hot low-calorific-value gases derived from biomass gasification[J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(6): 4386–4397.
- [16] ZHANG T Y, ZHOU Y G, ZHOU B F. The effects of the initial NO volume fractions on the NO_x generation and reduction routes under natural gas MILD combustion conditions[J]. *Fuel*, 2022, 328: 125175.
- [17] KHOSHALL A, RAHIMI M, ALSAIRAFI A A. CFD study on in-

- fluence of fuel temperature on NO_x emission in a HiTAC furnace[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2011, 38(10): 1421–1427.
- [18] 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.
- [19] 李金平, 柏建华, 李珍. 不同恒温条件厌氧发酵的沼气成分研究[J]. *中国沼气*, 2010, 28(6): 20–23, 55.
LI Jinping, BAI Jianhua, LI Zhen. Influence of temperature on biogas composition of thermostatic anaerobic fermentation[J]. *China Biogas*, 2010, 28(6): 20–23, 55.
- [20] 张全国. 沼气技术及其应用[M]. 3版. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [21] PUIG-ARNAVAT M, BRUNO J C, CORONAS A. Review and analysis of biomass gasification models[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(9): 2841–2851.
- [22] SUTTON D, KELLEHER B, ROSS J R H. Review of literature on catalysts for biomass gasification[J]. *Fuel Processing Technology*, 2001, 73(3): 155–173.
- [23] WEILAND P. Biogas production: current state and perspectives[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 85(4): 849–860.
- [24] MINCHENER A J. Coal gasification for advanced power generation[J]. *Fuel*, 2005, 84(17): 2222–2235.
- [25] 陈冠益, 陈欣, 颜蓓蓓, 等. 面向低碳环保的生活垃圾能源化技术进展与应用[J]. *能源环境保护*, 2023, 37(1): 74–82.
CHEN Guanyi, CHEN Xin, YAN Beibei, et al. Low-carbon and environmental-friendly municipal solid waste treatment technologies for energy utilization: a review[J]. *Energy Environmental Protection*, 2023, 37(1): 74–82.
- [26] VERÍSSIMO A S, ROCHA A M A, COSTA M. Experimental study on the influence of the thermal input on the reaction zone under flameless oxidation conditions[J]. *Fuel Processing Technology*, 2013, 106: 423–428.
- [27] VERÍSSIMO A S, ROCHA A M A, COELHO P J, et al. Experimental and numerical investigation of the influence of the air pre-heating temperature on the performance of a small-scale mild combustor[J]. *Combustion Science and Technology*, 2015, 187(11): 1724–1741.
- [28] ZHOU B, COSTA M, LI Z S, et al. Characterization of the reaction zone structures in a laboratory combustor using optical diagnostics: from flame to flameless combustion[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, 36(3): 4305–4312.
- [29] VERÍSSIMO A S, ROCHA A M A, COSTA M. Importance of the inlet air velocity on the establishment of flameless combustion in a laboratory combustor[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2013, 44: 75–81.
- [30] VERÍSSIMO A S, ROCHA A M A, COSTA M. Operational, combustion, and emission characteristics of a small-scale combustor[J]. *Energy & Fuels*, 2011, 25(6): 2469–2480.
- [31] ARIEMMA G B, SORRENTINO G, DE JOANNON M, et al. Optical sensing for MILD Combustion monitoring[J]. *Fuel*, 2023, 339: 127479.
- [32] MINAMOTO Y, SWAMINATHAN N, CANT S R, et al. Morphological and statistical features of reaction zones in MILD and premixed combustion[J]. *Combustion and Flame*, 2014, 161(11): 2801–2814.
- [33] FORTUNATO V, GIRALDO A, ROUABAH M, et al. Experimental and numerical investigation of a MILD combustion chamber for micro gas turbine applications[J]. *Energies*, 2018, 11(12): 3363.
- [34] FISCHER M, JIANG X. An investigation of the chemical kinetics of biogas combustion[J]. *Fuel*, 2015, 150: 711–720.
- [35] KWIATKOWSKI K, DUDYŃSKI M, BAJER K. Combustion of low-calorific waste biomass syngas[J]. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2013, 91(4): 749–772.
- [36] KHALIL A E E, GUPTA A K. Thermal field investigation under distributed combustion conditions[J]. *Applied Energy*, 2015, 160: 477–488.
- [37] COLORADO A F, HERRERA B A, AMELL A A. Performance of a Flameless combustion furnace using biogas and natural gas[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(7): 2443–2449.
- [38] HOSSEINI S E, WAHID M A, ALI ABUELNUOR A A. Biogas flameless combustion: A review[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 388: 273–279.