

低热值气体燃料多孔介质燃烧特性研究



田峰实¹, 杨若男¹, 李本文^{1,*}, 陈元元², 许学成²

¹大连理工大学能源与动力学院, 辽宁大连 116024

²武汉科技大学材料与冶金学院, 湖北武汉 430081

摘要: 低热值气体燃料的利用不仅可以避免排入大气造成环境污染, 而且可以节约能源, 真正做到节能环保。然而, 现有传统燃烧技术很难实现低热值气体燃料稳定燃烧。由于多孔介质燃烧技术具有燃烧效率高、可燃极限宽、燃烧调节比大、污染物排放低等优点, 因此选择多孔介质燃烧技术处理并利用低热值气体燃料。利用搭建的多孔介质实验台, 选用干熄焦炉尾气作为低热值气体燃料进行实验研究。干熄焦炉尾气由 79% N₂、10% CO₂、7% CO、3% H₂ 以及 1% O₂ 组成, 热值约为 1.2 MJ/Nm³。考察了甲烷掺混比、燃烧当量比、燃烧强度等因素对火焰厚度、燃烧启动特性以及 CO 排放浓度等关键特性的影响。研究发现: 燃烧强度和甲烷掺混比相同时随着当量比的增加, 火焰区域的厚度呈现先增大后减小的趋势, 启动时间先减少, 当量比等于 1.0 时启动时间增加, 随后继续降低; 甲烷掺混比为 0 时, 无法维持燃烧; 甲烷掺混比对火焰核心区域厚度影响较低, 随着甲烷掺混比的降低启动时间显著增加, 预热会明显减少启动时间; CO 排放浓度对于当量比的变化较为敏感, 在各个工况中当量比等于 0.7 和 0.8 时 CO 排放浓度相近, 在所有当量比中 CO 排放量最低, 达到 0.9 时开始骤增; 随着甲烷掺混比的降低 CO 排放浓度降低; CO 排放浓度与燃烧强度呈负相关。本实验中 NO_x 排放浓度始终低于 10 ppm。

关键词: 低热值气体燃料; 多孔介质燃烧; 烟气排放特性; 火焰厚度; 燃烧启动特性

DOI: [10.57237/j.jest.2025.01.001](https://doi.org/10.57237/j.jest.2025.01.001)

Study on Combustion Characteristics of Porous Media of Gaseous Fuels with Low Calorific Value

Feng-Shi Tian¹, Ruo-Nan Yang¹, Ben-Wen Li^{1,*}, Yuan-Yuan Chen², Xue-Cheng Xu²

¹School of Energy and Power, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

²College of Material and Metallurgy, Wuhan Science and Technology University, Wuhan 430081, China

Abstract: The utilization of low calorific value gaseous fuels can not only avoid environmental pollution caused by emissions into the atmosphere, but also save energy and truly achieve energy conservation and environmental protection. However, it is difficult to achieve stable combustion of gaseous fuels with low calorific value with existing traditional combustion technologies. Due to the porous media combustion technology has the advantages of high combustion efficiency, wide flammability limit, large combustion regulation ratio, and low pollutant emission, the porous medium combustion technology is selected to treat and utilize low calorific value gaseous fuels. Using the porous medium test bench, the dry quenching coke oven tail gas was selected as a low calorific value gas fuel for experimental research. The

基金项目: 工业炉窑节能低氮多孔介质燃烧技术开发与应用, 辽宁省中央引导地方科技发展重点项目 (自由探索类基础研究), (基金号: 2023JH6/100100020).

*通信作者: 李本文, heatli@dlut.edu.cn

收稿日期: 2025-02-17; 接受日期: 2025-04-03; 在线出版日期: 2025-05-30

<http://www.energysci.tech.org>

dry quenching coke oven tail gas is composed of 79% N_2 , 10% CO_2 , 7% CO , 3% H_2 and 1% O_2 , with a calorific value of about 1.2 MJ/Nm^3 . The effects of methane blending ratio, combustion equivalent ratio, combustion intensity and other factors on key characteristics such as flame movement and CO emission concentration were investigated. Research has found that when the combustion intensity and methane blending ratio are the same, as the equivalence ratio increases, the thickness of the flame zone shows a trend of first increasing and then decreasing, and the starting time first decreases. When the combustion equivalent ratio is 1.0, the starting time increases and then continues to decrease; When the methane blending ratio is 0, combustion cannot be maintained; The influence of methane blending ratio on the thickness of the flame core area is relatively low. As the methane blending ratio decreases, the start-up time significantly increases, and preheating will significantly reduce the start-up time; The CO emission concentration is sensitive to the change of the equivalent ratio, and the CO emission concentration is similar when the equivalent ratio is equal to 0.7 and 0.8 in each working condition, and the CO emission is the lowest among all equivalent ratios, and begins to increase sharply when it reaches 0.9. In this experiment, the NO_x emission concentration was consistently below 10 ppm.

Keywords: Low Calorific Value Gaseous Fuels; Combustion of Porous Media; Flue Gas Emission Characteristics; Flame Thickness; Combustion Start-up Characteristics

1 引言

当今世界，化石能源依然是全球能源结构的主体，占比超过 80%。以中国为例，煤炭资源在能源消耗中的比例高达 55%以上。然而，煤炭燃烧过程中会产生氮氧化物、二氧化硫等有害大气污染物，导致空气污染问题日益严峻。为应对能源短缺和环境污染的双重挑战，全球正积极推动可再生能源的发展。然而，受限于资源总量、技术水平和工业基础等因素，可再生能源在短期内难以取代化石能源的主导地位，化石能源在能源消费中的核心地位仍将持续较长时间 [1]。然而在能源利用方面存在两个主要问题：一是能源利用率较低，严重浪费能源并且污染环境；二是有大量的低品位能源未被利用直接排入大气。因此低热值气体燃料的利用对于降低污染，节约能源十分重要。

气体燃料通常根据燃料的热值将其分 3 类 [2]，大于 15.07 MJ/Nm^3 为高热值气体， $6.28 \sim 15.07 \text{ MJ/Nm}^3$ 为中热值气体，小于 6.28 MJ/Nm^3 为低热值气体。在工业中会产生大量的低热值气体，如煤矿瓦斯气：可燃成份为 CH_4 ，热值范围 $0 \sim 0.3 \text{ MJ/Nm}^3$ ；VOCs：可燃成份为 C_nH_n ，热值范围 $0 \sim 0.8 \text{ MJ/Nm}^3$ ；干熄焦炉尾气：可燃成份为 CO 和 H_2 ，热值范围 $0.6 \sim 1.2 \text{ MJ/Nm}^3$ 。由于低热值气体可燃成份稀薄，使用传统燃烧方式难以点燃和稳定燃烧，而多孔介质燃烧技术便能满足以上的需求。近年来多孔介质燃烧技术不断发展，它拥有扩大燃烧极限、燃烧稳定、污染物排放低和结构简单等优点，在多个领域被广泛应用 [3-6]。利用多孔介质

燃烧器对低热值气体进行的燃烧与利用技术已经比较成熟，经过大量研究低热值气体可以在多孔介质内稳定燃烧并且降低大量的污染物排放。

多孔介质燃烧技术早在 20 世纪 70 年代初就被发现和利用，Weinberg [7] 提出向火焰区“借用”能量的假设，利用蓄热和导热能力比较强的多孔介质材料将燃烧散发的部分热量实现回流，预热未燃烧的预混气体，大幅度提高燃料的燃烧温度与火焰传播速度，并且火焰的最高温度超过预混气体绝热火焰温度，这种现象被称为“超绝热燃烧”。这也是实现低热值气体能够稳定燃烧的关键所在。Devi S [8, 9] 等对比分析了低热值气体利用多孔介质燃烧器燃烧与利用传统燃烧器燃烧的区别，发现了在多孔介质燃烧器内燃烧更加稳定并且 CO 排放降低 95%， NO_x 排放下降 85%。郑晓龙 [10, 11] 等研究结果表明，燃烧强度的改变，导致混合气体流速改变，进而影响火焰稳定性。并且研究了低热值气体在 3D 打印泡沫陶瓷中的燃烧性能，随着当量比的增加， CO 排放量呈现先降低后升高的趋势，同时面板的温度分布均匀性也会恶化。Dai [12, 13] 等人设计了一种由氧化铝固体小球与泡沫陶瓷结合的多孔介质燃烧器，研究了氧化铝固体小球直径和泡沫陶瓷孔密度对低热值气体燃烧特性的影响。除了实验条件对火焰传播和燃烧特性的影响外，颗粒的物理性质对燃烧器的性能也有很大的影响 [14]。黄冉思思 [15] 等人研究了低热值气体在双层多孔介质中的特性，指出了 CO 排放

与上游材料关系较大,上游材料的导热率不应过大,并且找到了高炉煤气、垃圾填埋气等低热值气体的稳燃上限。Liang [16] 等主要研究了多孔介质燃烧器在不同条件下的燃烧特性,包括氨火焰的燃烧特性、贫燃燃烧的火焰传播和稳定性、多孔材料在燃烧系统中的应用以及通过多层涂层提高 SiC 网状多孔陶瓷的燃烧效率。研究表明,多孔介质燃烧器在提高燃烧效率、降低污染物排放和增强火焰稳定性方面具有显著优势。钱炯杰 [17] 等人研究了 N_2 的稀释对 C_2H_4 燃烧特性的影响,CO 排放量与稀释比的关系正相关,与当量比以及气体流速负相关。

基于上述分析,目前针对工业中低热值气体的多孔介质燃烧研究相对较少。以工业中的干熄焦炉尾气为例,其热值远低于传统低热值气体的热值界限 (6.28 MJ/Nm^3),属于接近超低热值的气体燃料,极难点燃和稳定燃烧。因此,为解决这一问题,本研究搭建了多

孔介质燃烧试验台,利用 CO 、 H_2 、 N_2 、 CO_2 和 O_2 配制模拟干熄焦炉尾气作为低热值气体燃料,并通过掺混 CH_4 实现混合气体在多孔介质燃烧器中的稳定燃烧。实验重点分析了当量比、甲烷掺混比以及燃烧强度对火焰厚度、启动特性和 CO 排放浓度的影响,旨在尽可能降低甲烷掺混比的同时减少 CO 排放。基于实验结果,进一步优化燃烧器的结构参数,为实现低热值气体的高效、低排放稳定燃烧提供理论支持和技术指导。

2 实验设备及参数

2.1 实验系统

实验系统如图 1 所示,主要包括供气系统、数据采集系统以及燃烧系统。

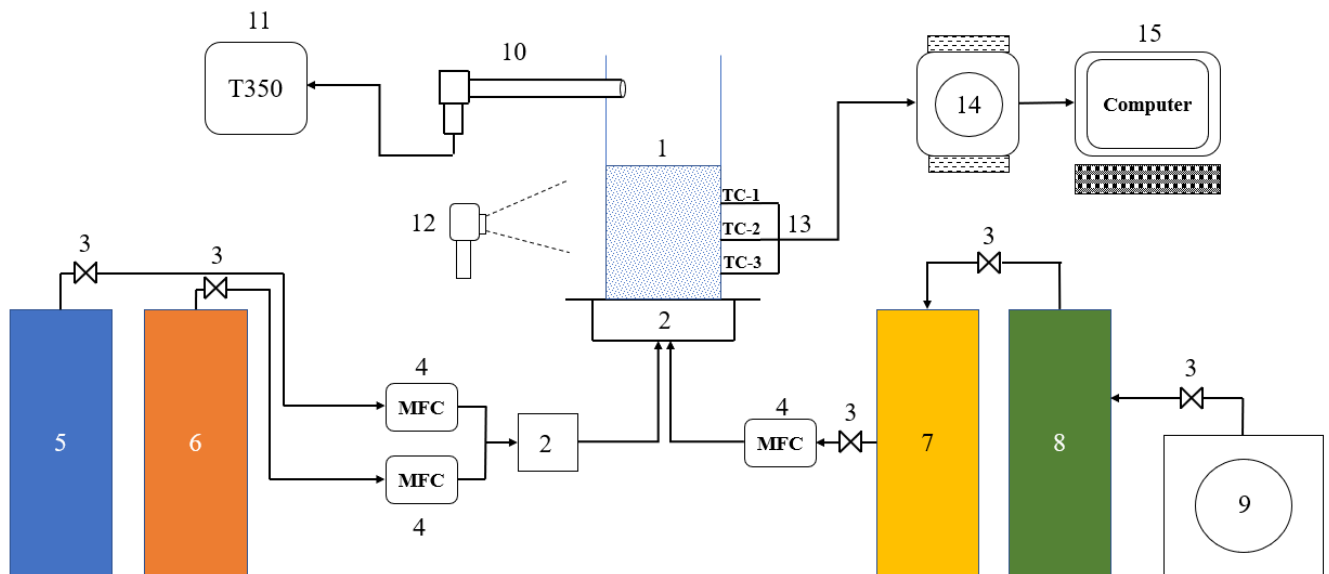


图 1 实验系统简图

1. 燃烧器 2. 预混器 3. 阀门 4. 质量流量计 5. 甲烷储气罐 6. 低热值燃料储气罐 7. 空气储气罐 8. 油水过滤器 9. 空气压缩机 10. 探针 11. Testo350 12. 摄像机 13. 热电偶 14. 数据采集模块 15. 电脑

供气系统: 空气由空气压缩机吸入,经过油水过滤器去除空气中的水分再进入空气储气罐等待使用。管路中设置了减压阀和质量流量计,气流经过减压阀压强下降至 0.4 MPa ,使三种气体出口压强相同。通过电脑控制质量流量计从而控制气体流量,空气管道使用 Sevenstar D08-1F 型号系列流量计,可控流量范围 $0 \sim 1000 \text{ L/min}$,低热值气体燃料管道使用 Sevenstar CS230 型号质量流量计,可控范围选择 $0 \sim 100 \text{ L/min}$,

甲烷管道使用 Sevenstar CS200 型号质量流量计,可控流量范围选择 $0 \sim 10 \text{ L/min}$,精度均为 $\pm 1\%$ 。

数据采集系统: 使用 K 型热电偶采集温度信息,测量范围为 $0 \sim 1300 \text{ }^{\circ}\text{C}$,精度为 $\pm 1.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。热电偶与多孔介质泡沫陶瓷板接触,测量陶瓷板的温度。使用摄像机通过火焰观测孔拍摄火焰形态。在气体出口处,打通一个放置探针的管道,使用烟气分析仪测量燃烧后气体的成份,选择 Testo350 型号分析仪,主要测量出

口气体中 CO 和 NO_x 的成份, 对于测量 CO 量程为 0~10000 ppm, 测量 NO_x 的量程为 0~4000 ppm, 精度均为 ±5%, 分辨率均为 1 ppm。

燃烧系统: 如图 2 所示, 主要由石英管、不锈钢隔热罩、纤维棉、泡沫陶瓷板、布风板和气体混合器组成。空气、低热值气体燃料以及甲烷进入下方的混合器内进行预混气体, 通过布风板进入多孔介质区域

进行燃烧, 小孔区域选择 25 mm 厚, 孔密度为 60 PPI 的 SiC, 大孔区域选择 40 mm 厚, 孔密度为 10 PPI 的 SiC, 孔隙率均为 0.85, 多孔介质泡沫陶瓷板的上下表面直径均为 100 mm。热电偶从大小孔交界面处开始布置, 向下游方向每隔 20 mm 布置一个热电偶来测量温度变化, 得到火焰移动信息。

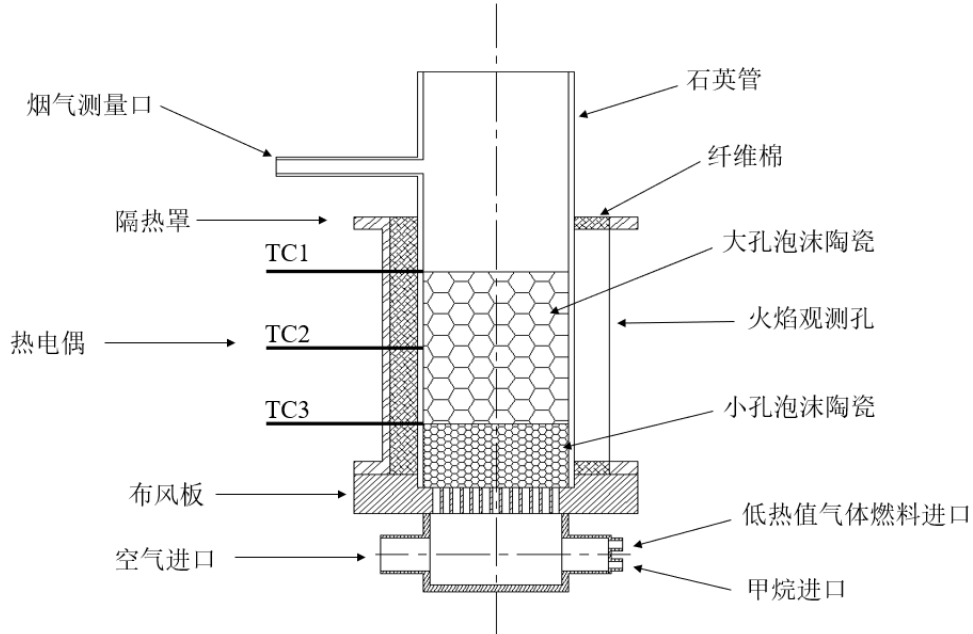


图 2 燃烧装置示意图

2.2 参数定义

低热值气体燃料掺混甲烷燃烧当量比计算式(1):

$$\varphi = \frac{((m_{\text{fuel}} + m_{\text{CH}_4}) / m_{\text{air}})_{\text{actu}}}{((m_{\text{fuel}} + m_{\text{CH}_4}) / m_{\text{air}})_{\text{stoic}}} = \frac{9.52V_{\text{CH}_4} + 0.238V_{\text{fuel}}}{V_{\text{air}} + 0.0476V_{\text{fuel}}} \quad (1)$$

式中 φ 为当量比; m_{fuel} 、 m_{air} 和 m_{CH_4} 分别表示燃料、空气和甲烷的质量流量, kg/s. V_{fuel} 、 V_{air} 和 V_{CH_4} 分别表示燃料、空气和甲烷的体积流量, m³/s。

燃烧强度是指泡沫陶瓷板单位面积内的燃烧功率, 其表达式为(2):

$$Fr = \frac{V_{\text{fuel}}Q_{\text{fuel}} + V_{\text{CH}_4}Q_{\text{CH}_4}}{A} \quad (2)$$

式中 Fr 为燃烧强度, kW/m². A 为泡沫陶瓷板横

截面积, m². Q_{fuel} 、 Q_{CH_4} 分别为低热值气体燃料和甲烷的低位热值, kJ/Nm³。

甲烷掺混比表达式为(3):

$$R = \frac{V_{\text{CH}_4}}{V_{\text{CH}_4} + V_{\text{fuel}}} \quad (3)$$

式中 R 表示甲烷掺混比。

由 CO、H₂、N₂、CO₂ 以及 O₂ 配制的干熄焦炉尾气成份如表 1 所示, 热值约为 1.2 MJ/Nm³。

表 1 低热值气体燃料成份

气体种类	N ₂	CO	CO ₂	H ₂	O ₂
体积占比%	79	7	10	3	1

2.3 实验过程

实验前先在各个管道中通入空气检测管道密闭性, 确认密闭性合格之后打开温度采集系统, 同时通过质

量流量计设置好燃料、甲烷以及空气的流量，打开气瓶的阀门，待气体进入燃烧室在石英管口用点火枪点火。观察温度变化，若温度变化幅度 $\leq 1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，则视为稳定燃烧，同时保存烟气分析仪测量 CO 的数据。测

量好数据后，先关闭燃气和甲烷的阀门，加大空气流量使燃烧室温度快速降至室温，再进行下一组实验。

表 2 给出本实验的实验工况参数。

表 2 实验工况参数

参数名称	甲烷掺混比	当量比	燃烧强度/ $\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}$
数据范围	0.2、0.1、0.05、0	0.6、0.7、0.8、0.9、1.0、1.1	300、400、500

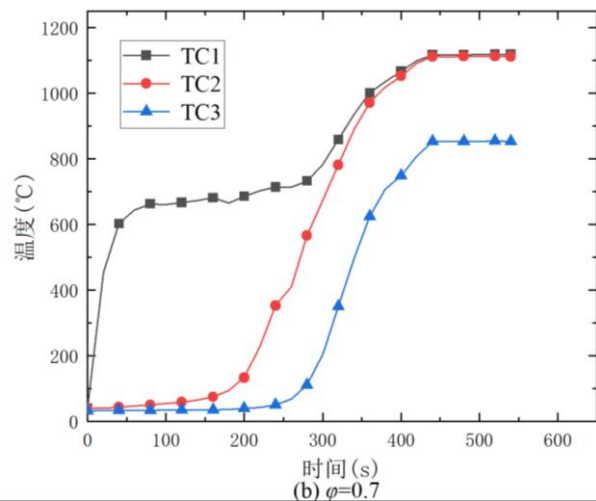
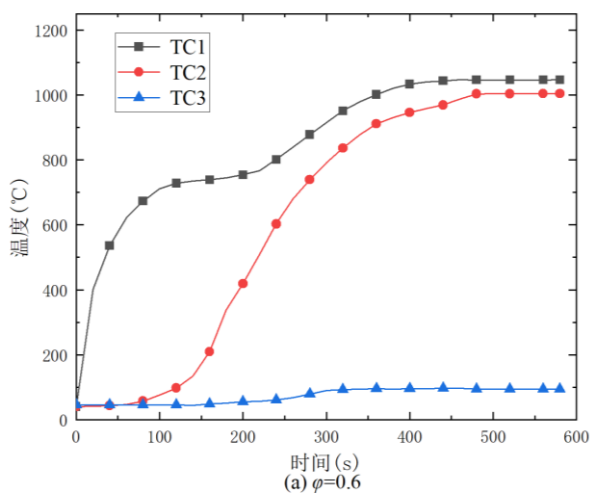
3 实验结果与讨论

3.1 火焰厚度与启动特性分析

如图 3 所示，在甲烷掺混比 $R=0.2$ ，燃烧强度 $Fr=400\text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 时，不同当量比情况下三支热电偶温度随时间的变化情况。在 $\varphi=0.6$ 时，3 号测温点（即大小孔交界面处）的稳定燃烧温度不足 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，而 $\varphi=1.1$ 时，2 号和 3 号测温点的温度也表现出类似的特征。显然，在这些情况下，测温点附近并未形成稳定的火焰区域。 $\varphi=0.6$ 时，由于处于贫燃料燃烧状态，空气比例较高，在其它条件相同的情况下，混合气体的流速较大。这种高流速导致火焰无法向下游传播至大小孔交界面，火焰主要集中在大孔区的上半部分。而 $\varphi=1.1$ 时，由于处于富燃料燃烧状态，空气供应不足，燃料无法完全燃烧，导致燃烧温度较低。同时，固体介质的导热和辐射换热能力也因温度较低而减弱，因此火焰仅能停留在多孔介质的表面附近，无法深入传播。除了 $\varphi=1.1$ 情况下，TC1 和 TC2 的测温点温度较为接近，表明火焰主要集中在大孔区的上半部分。从当量比的影响

来看，火焰的具体位置及其区域的厚度可以通过 TC3 的温度变化来判断。随着当量比的逐渐增加，TC3 的温度先接近后远离 TC1 和 TC2 的温度，这一现象表明火焰的下火焰面先向上游后向下游方向传播。因此，从当量比对火焰厚度的影响来看，随着当量比的增加，火焰区域的厚度呈现先增大后减小的趋势。

在这几种工况中低热值气体多孔介质燃烧的启动时间最快可以达到 300 s ($\varphi=1.1$)，最慢为 490 s ($\varphi=0.6$)。通过图 3 可知在 $\varphi=0.6\sim 0.9$ 范围内燃烧启动时间随当量比的增加而显著缩短， $\varphi=0.9$ 时仅需 386 s 。这是因为燃烧强度不变的情况下，当量比的提高使得燃料燃烧释放的热量几乎不变，而需要升温的气体总量相对减少，从而更快达到稳定燃烧状态。当 $\varphi=1.0$ 时，启动时间达到 414 s ，出现特殊情况。这是由于氧化剂与燃料按照化学当量比配比，燃烧反应速率低于贫燃料燃烧状态，因此启动时间显著延长。而当 $\varphi>1.0$ 时，由于燃烧不充分，燃烧温度较低，且总气体量较少，系统能够更快达到稳定燃烧状态。从整体范围看随着当量比的增加启动时间先减少，到达 $\varphi=1.0$ 时启动时间增加，随后继续降低。



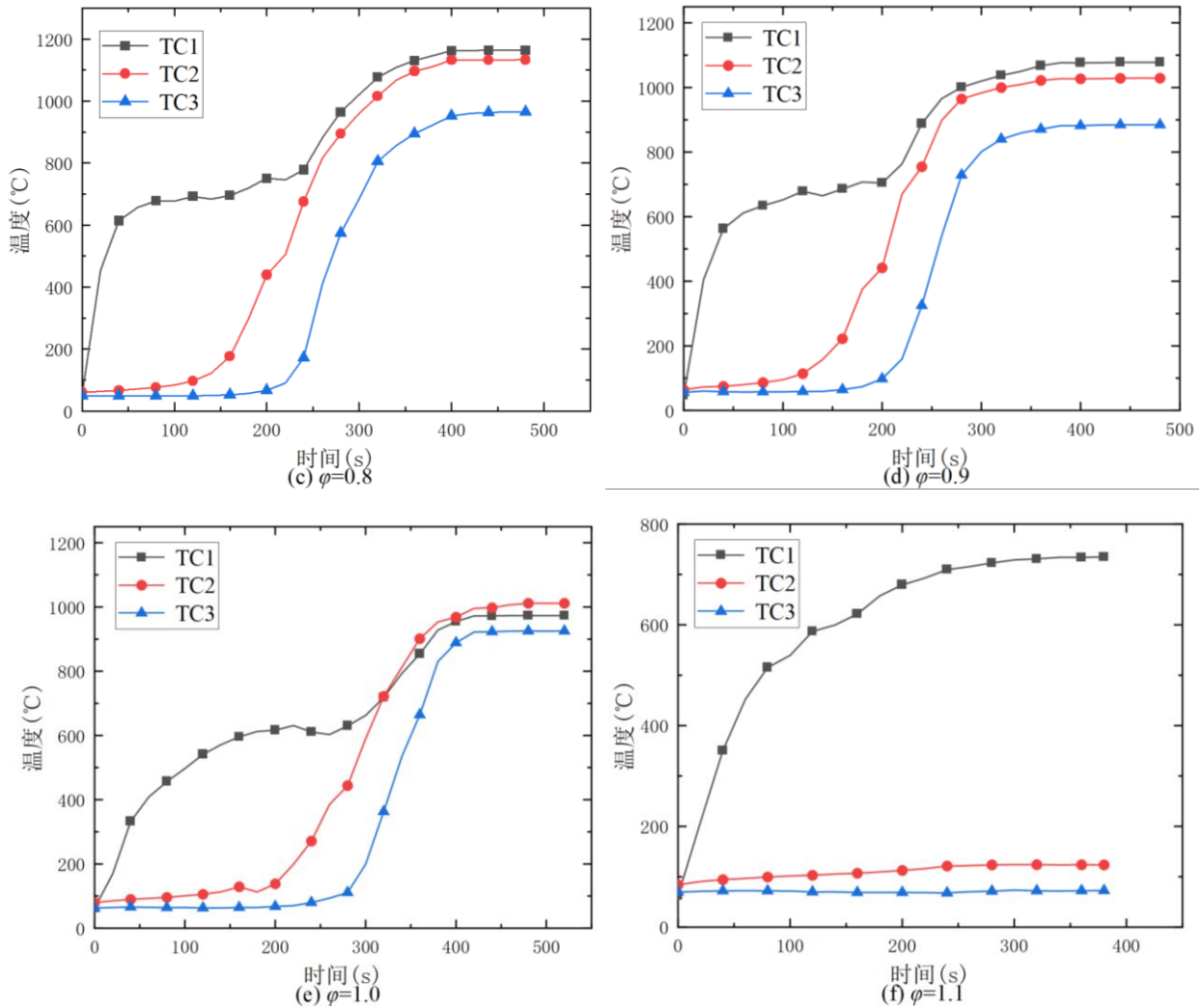


图3 不同当量比下温度随时间变化图

图4为 $\phi=0.8$, $Fr=400 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 时不同甲烷掺混比 R 下的三支热电偶温度随时间变化图。在实验中当 $R\leq 0.1$ 时经过多次尝试无法将气体点燃, 因此本实验使用甲烷燃烧将多孔介质泡沫板预热, 甲烷燃烧初期上游温度增加的更快, 由于实际操作的限制性, 无法确保每个工况从同一预热温度开始实验, 所以设定 $TC3\approx 900^\circ\text{C}$ 时开始按照原定的工况参数通入燃料、甲烷以及空气, 此时 $TC1$ 和 $TC3$ 的温度大约为 650°C , 超过燃料中可燃成分的燃点。当 $R=0$ 时, 在图中可以看到各点温度均低于 600°C , 已经低于燃料中可燃成分的燃点, 火焰逐渐熄灭, 因此本实验若想稳定燃烧必须掺混甲烷。

通过图4可知 $R=0.1$ 与 0.05 时测量点2的温度最

高, 说明火焰主要集中在大孔区的中间部位, $TC1$ 和 $TC3$ 的稳燃温度相近并且温度都低与 950°C , 与火焰核心区域温度温差较大, 说明火焰核心区域厚度相对于图3(c)中的 $R=0.2$ 时较小, $R=0.1$ 与 0.05 工况火焰核心区域厚度相近。

在 $R=0.1$ 工况下, 启动时间为 118 s , 显著低于 $R=0.05$ 工况的 257 s 。这是由于甲烷的燃烧速度远高于 CO , 甲烷含量的减少会显著延长燃烧的启动时间。此外, 在实验气体按比例通入前, 多孔介质泡沫板经过预热处理, 这使得 $R=0.1$ 与 0.05 工况的启动时间均低于 $R=0.2$ 工况。由此可见, 预热处理对于快速达到稳定燃烧状态具有显著效果。

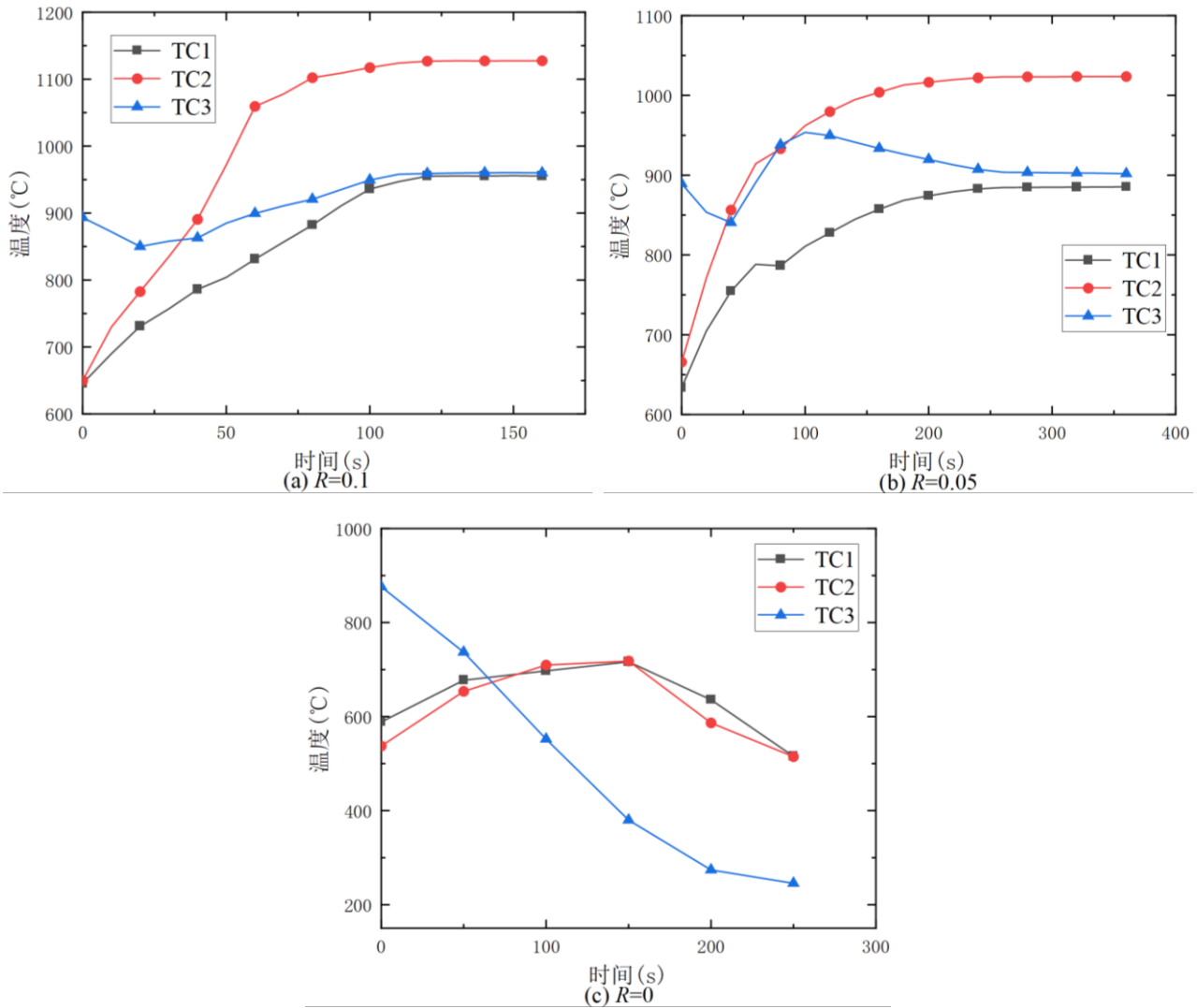


图 4 不同甲烷掺混比下温度随时间的变化图

3.2 排放特性

图 5 为(a)在 $Fr=400 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, 不同甲烷掺混比和当量比工况下 CO 排放浓度对比图; (b)在 $R=0.05$, 不同燃烧强度和当量比工况下 CO 排放浓度对比图。两图中 $\phi=1.0$ 时 CO 浓度均达到 10000 ppm, 不代表这是它们真正的浓度而是因为仪器的量程是 0~10000 ppm。CO 排放浓度受到当量比的影响明显要比甲烷掺混比以及燃烧强度更加敏感, $\phi=0.9$ 时 CO 排放浓度开始骤增, 主要原因是 CO 燃烧速度比甲烷慢很多, 氧气迅速与甲烷反应, 导致低热值气体燃料中 CO 未得到充分反应。而 $\phi=0.7$ 和 0.8 时氧气充足火焰温度较高, CO 排放浓度相近并远低于其他当量比, 最低可分别达到 27 ppm

(30.9 mg/Nm^3)和 22 ppm (25.2 mg/Nm^3)。

燃烧强度 Fr 增加导致燃烧温度提高, CO 反应速率增加, 所以其他参数相同时, Fr 越大 CO 排放浓度越低。甲烷掺混比 R 的改变对 CO 排放的整体趋势是 R 越小浓度越低, 当 $R=0.05$, $\phi=0.8$, $Fr=500 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 时 CO 浓度达到最低为 22 ppm (25.2 mg/Nm^3)。这是由于甲烷混合低热值气体燃烧温度低于甲烷燃烧温度, 甲烷无法充分燃烧, 也会产生一些 CO 但不是很多, $R=0.2$, $\phi=0.8$, $Fr=400 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 时 CO 排放浓度为 445 ppm (600 mg/Nm^3)。

本实验中 NO_x 排放浓度始终低于 10 ppm, 这是由于低热值气体燃烧温度较低, 避免了局部高温的产生, 而且可燃成份中不含有 N 元素。

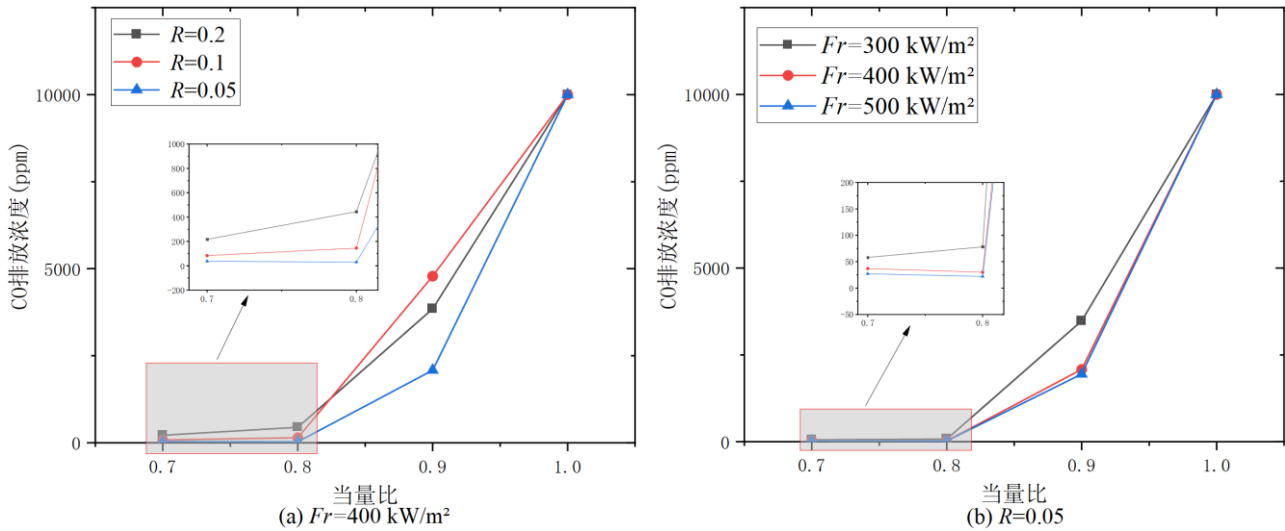


图5 不同工况下 CO 排放浓度对比图

4 结论

对低热值气体燃料掺混甲烷在多孔介质内燃烧的火焰厚度、启动特性以及 CO 排放特性进行了研究, 得出以下结论:

- 1) 在燃烧强度以及甲烷掺混比固定的情况下, 随着当量比的增加, 火焰区域的厚度呈现先增大后减小的趋势。在 $\varphi=0.6$ 时大小孔交界面温度几乎没有上升, $\varphi=1.1$ 时火焰只在大孔区上表面一层。低热值气体掺混甲烷多孔介质燃烧的启动时间最快可以达到 300 s ($\varphi=1.1$), 最慢为 490 s ($\varphi=0.6$), 燃烧启动时间随着当量比的增加先减少, 到达 $\varphi=1.0$ 时启动时间反而增加到 414 s, 随后继续降低。
- 2) 当没有甲烷掺混时低热值气体无法维持燃烧, 即使在预热的情况下也会逐渐熄灭。在预热的情况下, $R=0.1$ 与 0.05 工况可以维持稳定燃烧。在燃烧强度以及当量比固定的情况下, $R=0.1$ 与 0.05 工况火焰核心区域厚度相近, 相对于 $R=0.2$ 时较小。在 $R=0.1$ 工况下, 启动时间为 118 s, 显著低于 $R=0.05$ 工况的 257 s。预热会显著降低启动时间。
- 3) 当量比是影响 CO 排放浓度的关键因素, $\varphi=0.7$ 和 0.8 时各种工况下 CO 排放浓度最低可以达到 27 ppm (30.9 mg/Nm^3) 和 22 ppm (25.2 mg/Nm^3), $\varphi=0.9$ 时 CO 排放量开始剧增。同

一燃烧强度和当量比下, CO 排放浓度随甲烷掺混比降低而减少, 同一甲烷掺混比和当量比下, CO 排放浓度随燃烧强度的增加而减少。

- 4) 低热值气体多孔介质燃烧中要注意当量比的控制, 以达到稳定燃烧, 低 CO 排放浓度的目的。

参考文献

- [1] 秦朝葵, 郑璐. 多孔介质燃烧技术现状 [J]. 城市燃气, 2015(07): 7-11.
- [2] 娄马宝. 低热值气体燃料(包括高炉煤气)的利用 [J]. 燃气轮机技术, 2000(03): 16-18.
<https://doi.org/10.16120/j.cnki.issn1009-2889.2000.03.004>
- [3] Mujeebu M A, Abdullah M Z, Bakar M Z A, et al. Applications of porous media combustion technology – A review [J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1365-1375.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.01.017>
- [4] Ayat G, Kasra G, Majid S, et al. Applications of porous materials in combustion systems: A comprehensive and state-of-the-art review [J]. Fuel, 2021, 304.
<https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2021.121411>
- [5] Mujeebu M A, Abdullah M Z, Bakar M Z A, et al. Combustion in porous media and its applications – A comprehensive survey [J]. Journal of Environmental Management, 2008, 90(8): 2287-2312.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.10.009>
- [6] 许学成. 泡沫陶瓷多孔介质燃烧特性与技术应用研究 [D]. 武汉科技大学, 2024.
<https://doi.org/10.27380/d.cnki.gwkju.2024.000030>

- [7] Weinberg F. Combustion temperatures: the future? [J]. *Nature*, 1971, 233(5317): 239-241.
<https://doi.org/10.1038/233239a0>
- [8] Devi S, Sahoo N and Muthukumar P. Experimental studies on biogas combustion in a novel double layer inert Porous Radiant Burner [J]. *Renewable Energy*, 2020, 149: 1040-1052.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.092>
- [9] Sangjukta D, Niranjana S and P M. Comparative performance evaluation of a porous radiant burner with a conventional burner: Biogas combustion [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 218.
<https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2022.119338>
- [10] 郑晓龙, 胡惊雷, 柯致远, 等. 3D 打印泡沫陶瓷板内低热值气体的燃烧特性 [J]. *工业炉*, 2023, 45(03): 7-12.
- [11] 郑晓龙. 富氧预混氨气在多孔介质内燃烧行为的研究 [D]. 武汉科技大学, 2024.
<https://doi.org/10.27380/d.cnki.gwkju.2024.000633>
- [12] Dai H, Dai H, Zhu H, et al. Combustion characteristics of a low calorific gas burner with ceramic foam enclosed by alumina pellets [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2022, 58(2): 221-231.
<https://doi.org/10.1007/S00231-021-03107-9>
- [13] Huaming D and Hongchao D. Efficient lean combustion in a novel porous medium burner with the integrated of pellets and ceramic foam: Experimental study of flame propagation and stability [J]. *Combustion and Flame*, 2022, 244.
<https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2022.112244>
- [14] V. F R, A. Y I, S. O E, et al. Pore-scale flame dynamics in a one-layer porous burner [J]. *Combustion and Flame*, 2022, 235.
<https://doi.org/10.1016/J.COMBUSTFLAME.2021.111711>
- [15] 黄冉思思, 程乐鸣, 邱坤赞, 等. 中、低热值预混气体在双层多孔介质中的贫燃特性 [J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2015, 49(09): 1783-1789.
- [16] Xiong L, Fanghao W, Yawei L, et al. The enhanced thermal shock resistance and combustion efficiency of SiC reticulated porous ceramics via the construction of multi-layer coating [J]. *Ceramics International*, 2023, 49(6): 9097-9103.
<https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2022.11.068>
- [17] 钱炯杰, 曾宪阳, 凌忠钱, 等. 低热值 C_2H_4 -AIR- N_2 预混气体在多孔介质内的燃烧特性研究 [J]. *热能动力工程*, 2021, 36(08): 78-84+91.
<https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.08.012>