

内置多孔介质 Swiss-roll 燃烧器的启动和贫燃特性

何贤钊, 谢红占, 李永玲, 马培勇, 林其钊

(中国科学技术大学热科学与能源工程系, 安徽合肥 230027)

摘要:在常规尺度 Swiss-roll 燃烧器的中心区填充多孔介质, 并对其进行实验研究. 通过监测燃烧器的温度和燃烧产物的变化, 分析了燃烧器在不同条件下的点火启动过程特性, 并得到了燃烧器的贫燃极限. 结果表明: 相比于在入口处点火, 在中心区点火启动时达到充分燃烧的时间更短, 多孔介质的温度分布更均匀; 多孔介质材料性质和预混气流量对启动特性影响很大; 在中心区温度为 950~1 200 K 时, 可处理 1.3% 的天然气/空气预混气. 说明该燃烧器能显著拓展燃料的贫燃极限, 对低热值气体具有良好的适用性.

关键词: Swiss-roll 燃烧器; 多孔介质; 启动特性; 燃烧特性

中图分类号: TK124 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.0253-2778.2010.04.008

Startup and combustible limit of porous medium built-in Swiss-roll burner

HE Xianzhao, XIE Hongzhan, LI Yongling, MA Peiyong, LIN Qizhao

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Porous medium was added to the central area of a conventional scale Swiss-roll combustor, and an experiment research was conducted. The starting process of the combustor under different conditions and its lean flammability characteristics were analyzed by monitoring the combustor's temperature development and the transformation of the combustion products. The experimental results show that, ignition at the central area takes a shorter time for complete combustion compared with that at the entering point and the temperature distribution of the porous media is more uniform; the porous media properties and that the pre-mixed gas flow rate have great influence on the startup characteristics. Furthermore, when the temperature of the combustor center is between 950 K and 1 200 K, it can burn 1.3% natural gas/air premixed gas, indicating that porous medium built-in Swiss-roll combustor can expand the fuel's lean flammability, and is well applicable to low-calorific gases.

Key words: Swiss-roll combustor; porous media; startup characteristics; combustion characteristics

0 引言

随着世界经济的不断发展, 能源与环境污染的形势日益严峻. 在此背景下, 低热值燃料的利用得到

极大关注. 低热值气体燃料主要来源于矿井通风瓦斯、工业生产过程中排放的低热值燃气等. 由于其中的可燃气体浓度很低, 难以被常规的燃烧技术所利用, 常被当作废气直接排空. 这不仅浪费了宝贵的能

收稿日期: 2009-09-28; 修回日期: 2010-01-21

基金项目: 中国高技术研究发展(863)计划(2006AA05Z210)资助.

作者简介: 何贤钊, 男, 1983年生, 博士生. 研究方向: 燃烧与环境. E-mail: xianzhao@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 林其钊, 教授. E-mail: qlin@ustc.edu.cn

源,而且直接将这些气体排入大气,造成了严重的环境污染^[1].仅对矿井通风瓦斯而言,每年世界范围内煤矿排放量就达 $29 \times 10^9 \sim 41 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[2-4].

低热值气体热值低,难以点燃和控制,燃烧存在不稳定性,容易出现回火或吹熄等现象.国内外对此开展了大量的研究和技术开发工作,如 Hanamura 等人提出的往复式多孔介质燃烧技术 (reciprocating superadiabatic combustion in porous media, RSCP)^[5-6].

本课题组基于超绝热燃烧的思想,将多孔介质和 Swiss-roll 燃烧器相结合,设计出内置多孔介质的 Swiss-roll 燃烧器.多孔介质中的预混燃烧是预混气体在一种既耐高温、导热性能又好的多孔介质材料中燃烧的过程,具有燃烧效率高、污染物排放低、负荷调节范围广、燃烧稳定等优点^[7-9].Swiss-roll 燃烧器采用逆流通道结构换热,换热效率高、热损失小、无须换向,是一种非常有潜力的低热值燃料燃烧技术.

国内外关于 Swiss-roll 燃烧器的研究多是针对 MEMS 的微小尺度研究^[10-15],尚未见到将多孔介质和 Swiss-roll 燃烧器相结合的研究报道.在常规尺度 Swiss-roll 燃烧器的中心区填充多孔介质可以增加火焰的稳定性,但多孔介质热容大,使得燃烧器的预热时间增加.而针对多孔介质启动预热过程的研究还很少^[16-17].本文以天然气/空气预混气模拟低热值气体,研究在常规尺度下,点火位置、多孔介质材料、预混气流量对点火启动特性的影响并得到了

燃烧器的贫燃极限,为该型燃烧器启动方式设计提供参考.

1 试验装置与方法

1.1 试验系统

实验在燃烧反应试验平台上进行,其系统原理如图 1 所示,由四个部分组成:燃料与氧化剂的精确供给系统、测试仪器及设备、工作参数的计算机集成显示记录系统、燃烧反应器.试验用压缩天然气成分如表 1 所示,由天然气钢瓶供给;空气由空压机供给,储气罐起缓冲作用,以得到稳定的空气压力和流量.天然气和空气的混合比例由质量流量控制器调节,预混后进入燃烧器内燃烧.各点温度由铠装热电偶测量,经数据采集仪采集处理后在计算机中显示.燃烧污染物成分由烟气分析仪检测.

质量流量控制器的准确度为 $\pm 2\% \text{ F.S.}$,线性 $\pm (0.5\% \sim 2\%) \text{ F.S.}$,重复精度 $\pm 0.2\% \text{ F.S.}$.烟气分析仪的测量范围和精度为: O_2 测量范围(体积分数,下同) $0 \sim 21.0\%$,精度 $\pm 0.2\%$; CO 测量范围 $0 \sim 10\,000 \times 10^{-6}$,精度 $\pm 20 \times 10^{-6}$; NO_x 测量范围 $0 \sim 5\,000 \times 10^{-6}$,精度 $\pm 20 \times 10^{-6}$; CO_2 测量范围 $0 \sim 20\%$,精度 $\pm 0.2\%$; CH_4 测量范围 $0 \sim 5\%$,精度 $\pm 5\%$.

1.2 内置多孔介质 Swiss-roll 燃烧器实验模型

燃烧器结构如图 2 所示,气体通道宽 20 mm ,中心区直径 200 mm ,燃烧器高 200 mm .燃烧室被两个 SiC 挡板分隔为三个区域:上游段、中间段以及下游段,以增加预混气的燃烧路径.多孔介质中心区

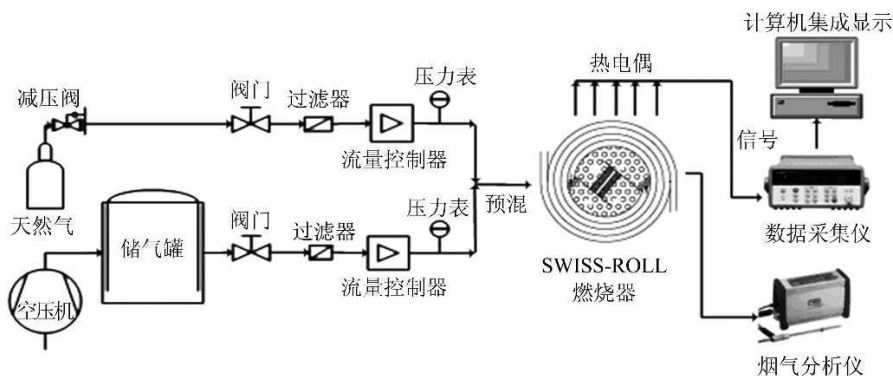


图 1 实验平台系统图

Fig.1 Experimental setup

表 1 天然气成分

Tab.1 Compositions of natural gas

	甲烷	乙烷	丙烷	异丁烷	正丁烷	异戊烷	正戊烷	氮气	二氧化碳
体积分数/%	91.845	4.336	0.906	0.151	0.170	0.046	0.033	1.965	0.484

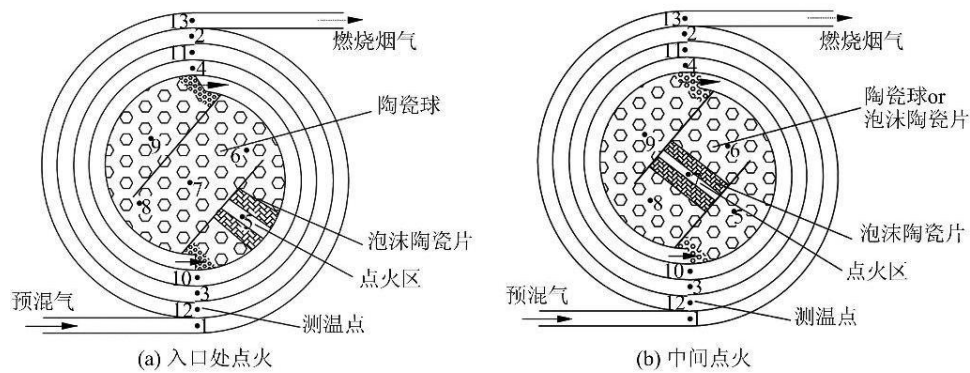


图 2 燃烧器结构示意图

Fig.2 Design of combustor

采用了不同的布置方式:图 2(a)中,在上游段留有 10 mm 左右的缝隙用来点火,缝隙两侧用孔隙率为 0.85 的 SiC 泡沫陶瓷片填充,其余部分用直径为 4 cm 的 Al_2O_3 陶瓷球填充;图 2(b)中,在中间段留有 10 mm 左右的缝隙,缝隙两侧用孔隙率为 0.85 的 SiC 泡沫陶瓷片填充,其余部分用直径为 4 cm 的 Al_2O_3 陶瓷球或孔隙率为 0.85 的 SiC 泡沫陶瓷片填充.因为陶瓷片的热容比 Al_2O_3 陶瓷球小,这有助于减小固体的壁面熄火效应,增加点火成功的概率.

在燃烧器中心区入口和出口处填充孔径很小的多孔介质,以防止火焰漂移到外围的换热通道内.中心区上端用 SiC 盖板密封,整个燃烧器的外壳均用硅酸铝纤维和珍珠岩粉末进行保温,以减小壁面热损失.在通道和中心区布置热电偶测量各点温度,共 13 根热电偶,按气流的流程布置,1~4 在进气通道中,5~9 是在中心区中,10~13 在出气通道中.通道中的热电偶布置注意不要碰到通道的壁面,以减小对气体温度测量的误差.

表 2 多孔介质物性

Tab.2 Physical properties of porous media

多孔介质 名称	发射率 (2 000 K)	导热系数(1 273 K) /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	导热系数(303 K) /($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
Al_2O_3	0.28	5	30
SiC	0.8~0.9	20	150

2 点火启动过程实验

2.1 点火位置对启动过程的影响

在处理低浓度气体之前,要将燃烧器预热.从进气通道通入高浓度天然气/空气预混气,在点火区用高能点火器点火,燃烧稳定后将点火装置移出,将燃

烧器逐渐预热至高温;然后逐渐将天然气调低至合适的浓度.

先在燃烧器中心区填充 Al_2O_3 陶瓷球,为了比较在不同点火位置时的点火启动特性,分别在上游段和中间段点火.点火时,维持天然气体积分数 5.5% 不变,30 min 内将预混气的流量从 0.88 L/s 逐渐调高至 2.55 L/s,然后维持不变.整个启动过程燃烧器的温升过程和温度分布如图 3 所示.

在实验过程中,通过测点的温度变化来确定火焰面的位置,由于布置的热电偶数目有限,这种方法具有一定的误差.如图 3(b)所示,在中心处点火时,经过 25~50 min,测点 7 的温度逐渐下降,测点 5 的温度上升,说明火焰面从初始的点火缝隙漂移到入口区域.预混气在燃烧之前被外围换热通道内的烟气和多孔介质加热,温度升高,火焰传播速度增加,大于气体流速,从而使得火焰面逐渐向上游漂移.另外,由于在中间段缝隙中点火时,火焰逐渐向上游区移动的过程中对中上游段的多孔介质有加热作用,使得多孔介质的温度分布更均匀.而在入口处点火时没有发生火焰面漂移现象.由于火焰面漂移到中心区的入口处,偏离了燃烧器的中心点,导致燃烧器偏烧,中心区入口处附近测点的温度偏高.

对点火启动过程的燃烧产物进行了监测,结果如图 4 所示.可以看出,着火的初期,CO 浓度很高,达 $1\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$ 以上,烟气中未燃 CH_4 浓度也很高;但随着时间的延续,多孔介质和外围换热通道温度的升高,燃烧效率逐渐增加,未燃烧的 CH_4 和 CO 浓度降低;整个过程 NO_x 浓度很低,最高时小于 $20\ \text{mg}/\text{m}^3$,表明燃烧器无局部高温.相较于在入口处点火,在中心区点火启动时,未燃 CH_4 降低得更快,达到完全燃烧所需时间更少.

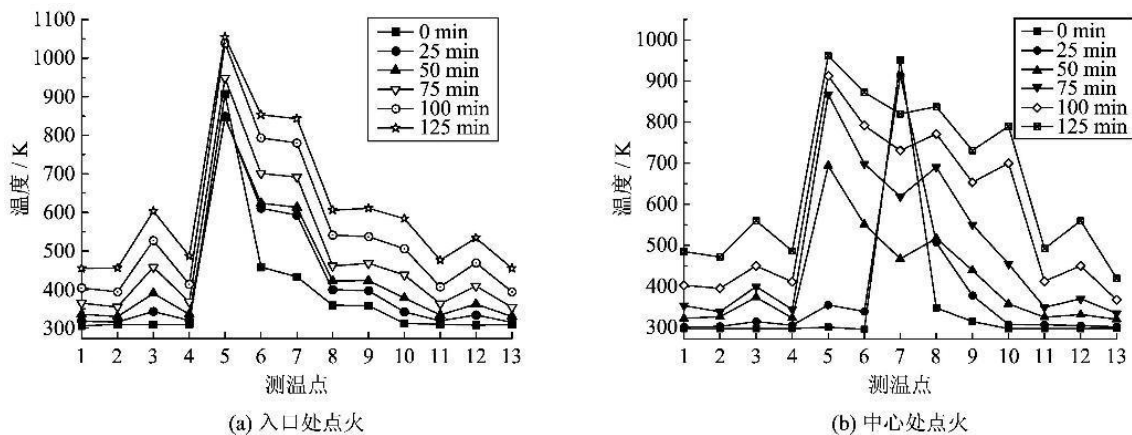


图 3 启动过程温度分布

Fig.3 Development of temperature profiles

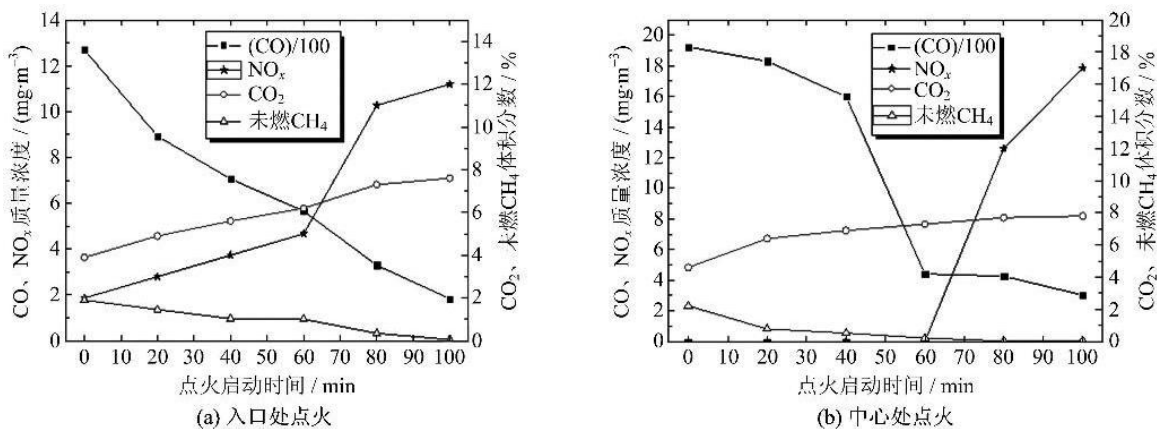


图 4 启动过程的烟气成分变化

Fig.4 Development of exhaust gas compositions

2.2 多孔介质材料对点火启动过程的影响

多孔介质材料对燃烧效果影响很大. 将 Al_2O_3 小球改成 SiC 泡沫陶瓷, 在中间段缝隙中点火, 点火时的浓度和流量仍然是: 维持天然气体积分数 5.5% 不变, 30 min 内将预混气的流量从 0.88 L/s 逐渐调高至 2.55 L/s, 然后维持不变. 考察多孔介质材料对启动特性的影响, 得到的温度分布和燃烧产物排放如图 5 所示.

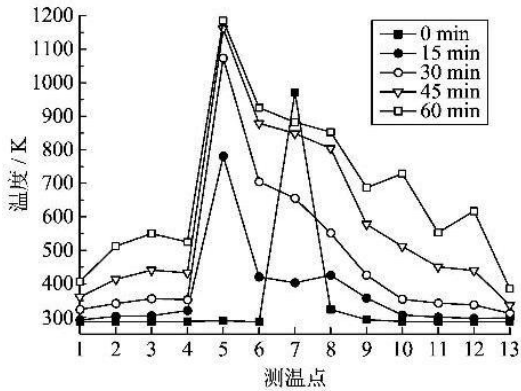
由温度分布图可以看出, 采用 SiC 泡沫陶瓷片构建中心区时, 与图 3(b) 相比, 温度升高很快, 60 min 即可以达到采用 Al_2O_3 陶瓷球 125 min 时达到的温度分布. 这主要是由于 SiC 的热容小于 Al_2O_3 , 而且本文中 SiC 堆积的多孔介质中心区的孔隙率 (85%) 大于 Al_2O_3 构成的中心区 (60%). 因此, 若工程中需要缩短预热启动过程, 可采用 SiC 作为多孔介质材料, 但实验发现, SiC 泡沫陶瓷片在高温下长时间工作时容易变脆断裂. 与图 4(b) 相比较, 燃

烧生成物变化情况和排放量与采用 Al_2O_3 时相似, 说明多孔介质类型对污染物的生成影响不大.

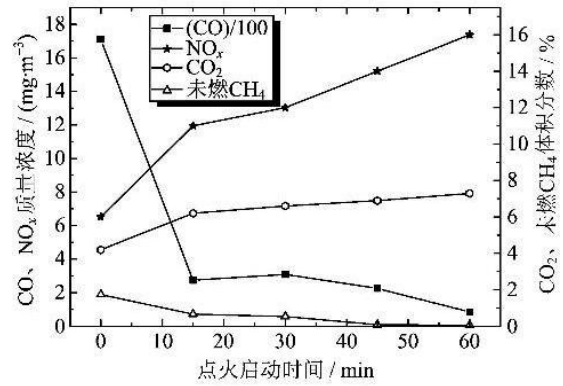
2.3 预混气流量对点火启动特性的影响

中心区仍然用 SiC 多孔介质填充, 中间段点火, 保持天然气体积分数 5.5% 不变, 30 min 内将预混气的流量从 0.88 L/s 逐渐调高至 3.49 L/s, 然后维持不变, 考察预混气流量对启动预热过程的影响. 0~60 min 内的温度和污染物成分变化如图 6 所示.

当将流量提高到 3.49 L/s 时, 与图 5(a) 相比, 60 min 时中心区的整体温度比 2.55 L/s 时高 200 K 左右, 外围换热通道温度增加不明显. 仍然存在火焰面漂移问题, 最高温度点从中心区的测点 7 漂移至上游区的测点 5. 相比于图 5(b), 燃烧产物随预热时间的变化规律与 2.55 L/s 时相同, CO 和未燃 CH_4 随着预热时间的增加而减小, NO_x 逐渐增加, 其中 NO 占绝大部分, NO_2 很少. 根据甲烷的化学反应机理, CH_4 不完全燃烧时会有 H_2 产生, 本实验



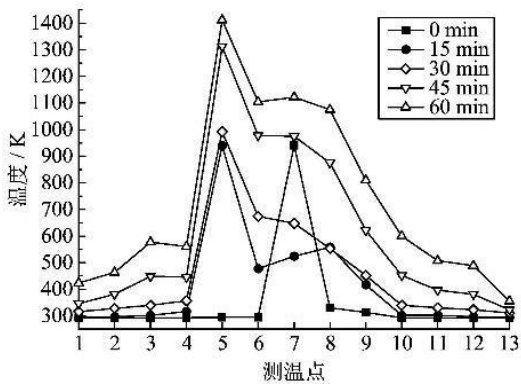
(a) 温度分布变化



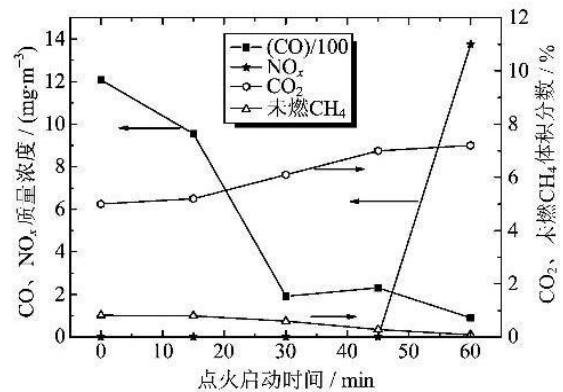
(b) 烟气成分变化

图 5 点火启动过程(多孔介质为 SiC 时)

Fig. 5 Starting process (SiC porous media used)



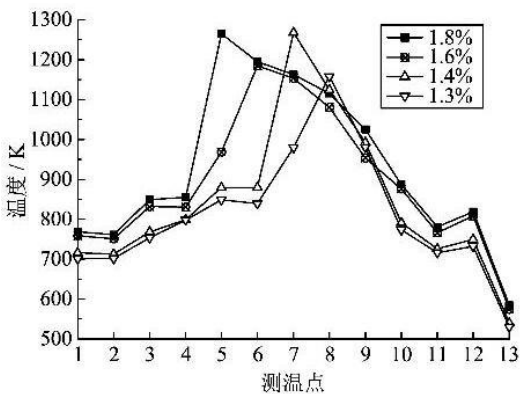
(a) 启动过程温度分布变化



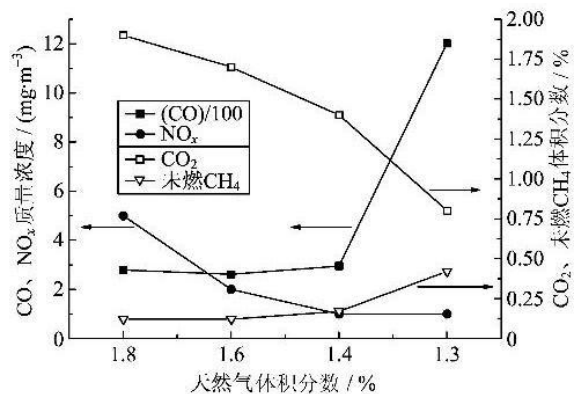
(b) 启动过程烟气成分变化

图 6 3.49 L/s 时启动过程

Fig. 6 Starting process (flow rate: 3.49 L/s)



(a) 各浓度下的温度分布



(b) 各浓度下的燃烧产物

图 7 贫燃特性

Fig. 7 Leann flammability characteristics

由于条件限制,未能检测出 H_2 含量.

3 内置多孔介质 Swiss-roll 燃烧器的燃烧特性

瓷片填充,预混气流量 3.49 L/s,天然气体积分数 5.5%时,维持空气流量不变,逐渐将天然气浓度调低,进行贫燃实验.各浓度时的温度分布和生成物成分如图 7 所示.

在 2.3 的实验工况下,即中心区用 SiC 泡沫陶.由温度分布可知,随着天然气浓度的降低,放热

量减少, 换热通道的温度开始缓慢下降. 火焰面逐渐后移, 从上游区的测点 5 逐渐向中心区漂移. 这与火焰传播速度与气流速度的匹配相关, 火焰传播速度会随着天然气浓度的降低而下降, 使得火焰面逐渐往中下游区漂移. 另外由于布置的热电偶数量有限, 热电偶之间的间距较大, 在天然气体积分数为 1.6% 时, 未能准确检测到火焰面位置, 从而使得测点 6 的温度偏低.

从燃烧的烟气成分可以看出, 整个贫燃过程 NO_x 的排放都很低, 在天然气体积分数为 1.8% 时仅为 5 mg/m^3 , 这主要是由于多孔介质的蓄热和良好的导热性, 使得燃烧器整体温度较低, 没有局部高温区. 在天然气浓度降到 1.3% 时, CO 大量生成, 达 1000 mg/m^3 , 未燃 CH_4 浓度增加很快, 燃烧效率从 95% 降低至 70% 左右. 贫燃极限主要是由中心区的温度, 燃烧热与散热量之间的平衡所决定, 若增加换热圈数, 改善保温效果减少散热, 应该可以进一步强化能量的积累效应, 拓展燃料的贫燃极限.

4 结论

(I) 点火启动时, 随着多孔介质温度的升高, 燃烧效率增加, 未燃 CH_4 和 CO 浓度逐渐下降, 整个过程 NO_x 排放都很低. 相较于上游区点火, 在中游区点火时由于火焰在向上游区漂移过程中对多孔介质有预热作用, 使得多孔介质的温度分布更均匀. 另外, 多孔介质材料性质和预混气流量对启动特性影响很大.

(II) 当预混气流量为 3.49 L/s , 天然气体积分数降到 1.3% 时, 未燃 CH_4 增加, CO 排放达 1000 mg/m^3 以上, 燃烧效率下降至 70%.

(III) 内置多孔介质 Swiss-roll 燃烧器能够实现烟气和进气的逆流换热, 中心区的多孔介质又进一步加热预混气, 提高预混气在燃烧前的焓值, 显著拓展燃料的贫燃极限, 对低热值气体具有良好的适用性.

参考文献 (References)

[1] 赵黛青, 夏亮, 何立波. 低热值燃料稳定燃烧的研究现状与进展[J]. 世界科技研究与发展, 2005, 27(5): 33-39.

[2] Bibler C J, Marshall J S, Pilcher R C. Status of worldwide coal mine methane emissions and use[J]. International Journal of Coal Geology, 1998, 35:

283-310.

[3] Su S, Beath A, Guo H, et al. An assessment of mine methane mitigation and utilization technologies [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2005, 31: 123-170.

[4] Schultz H L, Carothers P, Watts R, et al. Assessment of the Worldwide Market Potential for Oxidizing Coal Mine Ventilation Air Methane[R]. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2003.

[5] Weinberg F. Heat-recirculating burners: Principles and some recent developments[J]. Combustion science and technology, 1996, 121: 3-22.

[6] Hoffmann J G, Echigo R, Yoshida H, et al. Experimental study on combustion in porous media with a reciprocating flow system[J]. Combustion and Flame, 1997, 111: 32-40.

[7] 吴学成, 程乐鸣, 王恩宇, 等. 多孔介质中的预混燃烧发展现状[J]. 电站系统工程, 2003, 19(1): 37-40.

[8] Khanna V, Goel R, Ellzey J L. Measurements of emissions and radiation for methane combustion within a porous medium burner [J]. Combustion science and technology, 1994, 99: 133-142.

[9] Howell J R, Hall M J, Ellzey J L. Combustion of hydrocarbon fuels within porous inert media [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1996, 122: 121-145.

[10] Weinberg F J. Combustion Temperatures: The Future? [J]. Nature, 1971, 233: 239-241.

[11] Lloyd S A, Weinberg F J. A burner for mixtures of very low heat content[J]. Nature, 1974, 251: 47-49.

[12] Lloyd S A, Weinberg F J. Limits to energy release and utilization from chemical fuels[J]. Nature, 1975, 257: 367-370.

[13] Lloyd S A. Combustion in Double Spiral Burners[J]. Ind Eng Chem Res, 1994, 33, 1 809-1 816.

[14] 李军伟, 钟北京, 王建华. 甲烷/空气在微小型 Swiss-roll 燃烧器内燃烧的实验研究[J]. 热能动力工程, 2008, 23(2): 195-200.

[15] 李军伟, 钟北京, 王建华. 甲烷/空气在微型 Swiss-roll 燃烧器内的燃烧实验[J]. 清华大学学报, 2008, 48(5): 888-891.

[16] 王恩宇, 程乐鸣, 骆仲洪, 等. 天然气在渐变型多孔介质中的预混燃烧启动特性[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(5): 393-397.

[17] Huang Y, Chao C Y H, Cheng P. Effects of preheating and operation conditions on combustion in porous medium[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(21): 4 315-4 324.