

固体氧化物燃料电池尾气在多孔介质中的燃烧特性

张静思, 陈志光, 詹心怡, 郭双乾, 秦朝葵

(同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要: 通过配置不同组分和温度的混合气体来模拟固体氧化物燃料电池(SOFC)阴极和阳极尾气,并通过搭建双层多孔介质燃烧器实验台来研究SOFC模拟尾气的燃烧特性。结果表明:设计的多孔介质燃烧器可实现SOFC过渡和稳定阶段阳极尾气的稳定燃烧,但启动阶段的阳极尾气容易发生回火,燃烧器内烟气温度随SOFC工作阶段变化不大;阳极尾气中可燃组分的减少和惰性组分的增加都将使火焰面向燃烧器的下游移动并降低稳定燃烧温度,减小入口气流速度会使稳定燃烧温度先升后降,火焰面向燃烧器的上游移动;在无背压工况下,燃烧器的稳定燃烧极限随电堆燃料利用率的增加而减小。

关键词: 固体氧化物燃料电池(SOFC)尾气;燃烧特性;多孔介质燃烧器;燃烧温度

中图分类号: TE642;TK91;TK16 文献标志码: A

Combustion Characteristics of Exhaust Gas for Solid Oxide Fuel Cell in Porous Medium Burner

ZHANG Jingsi, CHEN Zhiguang, ZHAN Xinyi, GUO Shuangqian, QIN Chaokui

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Gas mixtures with different components and temperatures were used to simulate the exhaust gas of anode and cathode for solid oxide fuel cell (SOFC). And a double-layer porous medium burner was built to investigate the combustion characteristics of the simulated SOFC exhaust gas. The results show that the burner can realize the stable combustion of anode exhaust gas at the transition and stable stage of SOFC. However, the combustion of anode exhaust gas at the initiating stage is prone to backfire and the flue gas temperature in the burner has a little change with the SOFC working stage.

The decrease of combustible components and the increase of inert components in anode exhaust gas make the flame move downstream in the burner and reduce the stable combustion temperature. Decreasing the inlet air velocity makes the stable combustion temperature rise first but then drop and the flame move upstream in the burner. Under the condition of no back pressure, the stable combustion limit of the burner decreases with the increase of fuel utilization.

Key words: exhaust gas of solid oxide fuel cell (SOFC); combustion characteristics; porous medium burner; combustion temperature

固体氧化物燃料电池(SOFC)是继磷酸燃料电池、熔融碳酸盐燃料电池之后能量转换效率最高的第三代燃料电池。作为目前最有前景的能源装置之一,SOFC的开发和商业化对解决节能环保问题有着重要意义^[1-2]。SOFC操作温度一般在600~1000℃,其阴极、阳极尾气中含有较多余热,同时含有一部分可燃组分(H₂、CH₄、CO)^[3],若进一步燃烧SOFC尾气,充分回收尾气中的化学能和热能,则可大大提高SOFC的能源利用效率。

SOFC系统包括燃料重整器、SOFC电堆、热利用回收换热器、后燃器等。目前燃料电池工作特性研究中对SOFC电堆和燃料重整器的研究较多,而对后燃器的研究较少^[4-6]。SOFC尾气中可燃组分少,并且在不同运行阶段组分差异较大^[7-9],为保证低浓度燃气在组分波动时的稳定燃烧,选择多孔介质燃烧器进行SOFC尾气的燃烧。多孔介质本身具有较强的蓄热性,不仅能提供燃烧场所,还作为换热器实现热量交换。多孔介质燃烧技术以燃料适应性

收稿日期: 2020-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(51908414)

第一作者: 张静思(1990—),女,工学博士,主要研究方向为燃气燃烧与高效应用、燃气输运安全。

E-mail: zhang_js@tongji.edu.cn

通信作者: 陈志光(1983—),男,副教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为燃气燃烧与高效应用、燃气输运安全。E-mail: czg05_1999@126.com



论文
拓展
介绍

好等优点,被广泛应用于超低热值气体燃烧领域^[10-12]。

设计了SOFC高温模拟尾气配制比例并搭建了燃烧实验台,采用多孔介质燃烧技术,分析无背压工况下不同流量比、不同气流速度时SOFC模拟尾气的燃烧特性,探讨不同电堆利用率下阴极和阳极模拟尾气的稳定燃烧极限。

1 实验系统搭建与实验方法

1.1 实验装置及测试系统

基于以天然气为燃料的1 kW SOFC电堆产生的尾气量进行实验,通过配置不同组分和温度的混

合气体来模拟SOFC尾气,研究其在双层多孔介质燃烧器中的燃烧特性。SOFC尾气中阳极气体主要包括CO、CO₂、H₂和水蒸气,并且水蒸气占据绝大部分。不同电堆燃料利用率(U_f)下尾气的组分会发生变化^[13],如表1所示。阴极气体与空气组成类似。实验系统构成如图1所示。实验中阳极模拟尾气由连续自动配气装置提供,通过电脑控制流量计以调节气体流量,模拟不同电堆工况;实验中水蒸气由蒸汽发生器提供,功率为9 kW,将产生的水蒸气通入引射器引射其余组分,得到阳极模拟尾气;由容积式空压机产生的压缩空气来模拟阴极尾气。利用2套管道式加热设备分别对所配置的阴极、阳极模拟尾气加热来实现SOFC尾气的高温。

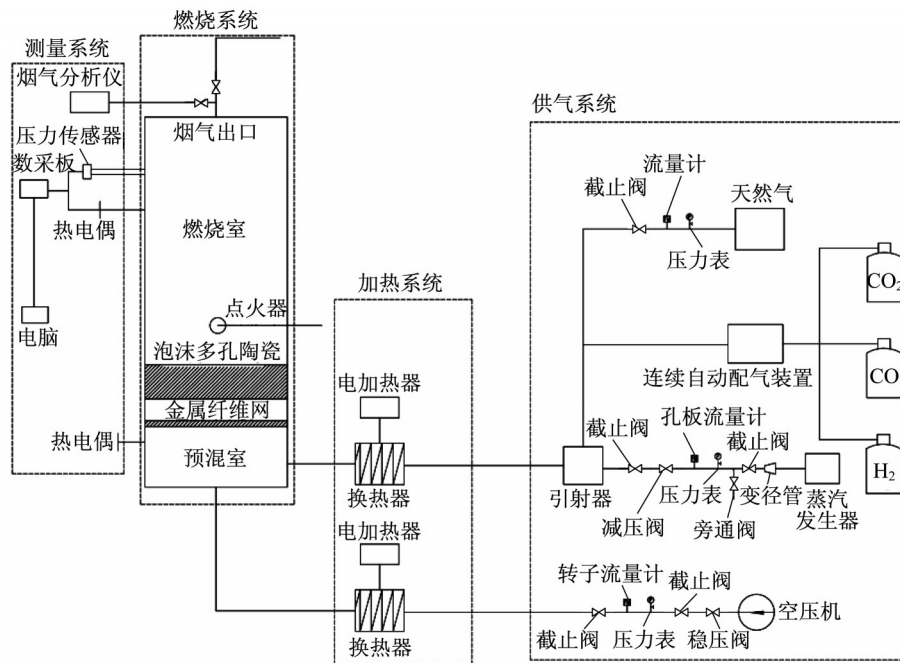


图1 实验系统

Fig.1 Experimental system

表1 1 kW SOFC阳极尾气各组分体积流量^[5,13]

Tab.1 Volume flow of components for 1 kW SOFC's anode exhaust gas^[5,13]

U_f	H ₂ /(L·min ⁻¹)	CO/(L·min ⁻¹)	H ₂ O/(L·min ⁻¹)	CO ₂ /(L·min ⁻¹)
0	16.1	4.8	4.1	1.0
0.1	14.5	4.4	4.8	1.5
0.3	11.3	3.4	6.9	2.5
0.5	8.1	2.4	9.3	3.6
0.6	6.4	1.8	12.6	3.9
0.7	4.8	1.3	14.0	4.4
0.8	3.7	0.8	15.4	4.8

SOFC尾气燃烧系统由供气、加热、燃烧和测量4个部分组成。燃烧装置包括气体预混段和燃烧器

主体段。气体预混段与燃烧器主体段之间用金属纤维网隔开,金属纤维网起防止回火的作用。燃烧器主体内放置有2层氧化锆(PSZ)的泡沫陶瓷,上游层孔隙率为40 PPI(每英寸长度上的孔洞数),下游层孔隙率为10 PPI,2层高度均为20 mm。为减少燃烧器壁面的散热损失,在燃烧器外层设置了厚度为4 mm的保温层。双层多孔介质布置如图2所示。

燃烧器沿径向布置5个k型热电偶,测点P1、P2、P3、P4和P5分别测量SOFC模拟混合尾气温、多孔介质上游温度、多孔介质中部温度、多孔介质下游温度和燃烧器出口烟气温。水蒸气由蒸汽

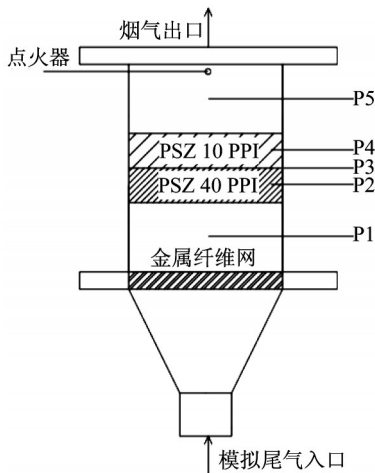


图2 燃烧器结构及双层多孔介质布置

Fig.2 Structure of the burner and layout of double-layer porous medium

发生器产生并维持在 150 °C,通过孔板流量计进行测量。氢气流量由连续自动配气装置的流量计进行测量,压缩空气流量由转子流量计测量。所有测试数据经采集模块(研华科技)采集并传输至电脑终端,采集频率为 1 Hz。

1.2 实验计量及控制参数

阴极和阳极模拟尾气的混合气体在当前压力和温度下的流速计算公式如下所示:

$$v_{\text{mix}} = \frac{q_A + q_C}{A_0 \epsilon} \quad (1)$$

式中: q_A 为阳极模拟尾气体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; q_C 为阴极模拟尾气体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; A_0 为燃烧器的截面积; ϵ 为多孔介质孔隙率。

SOFC 阴极和阳极模拟尾气的压力和温度变化较大,采用气体摩尔流量对气体的含量进行约定。气体的体积流量和摩尔流量的转换公式如下所示:

$$V_n = \frac{q_n \rho}{M} \quad (2)$$

式中: V_n 为 SOFC 阴极或阳极模拟尾气的摩尔流量, $\text{mol} \cdot \text{min}^{-1}$; M 为 SOFC 阴极或阳极模拟尾气的摩尔质量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; q_n 为 SOFC 阴极或阳极模拟尾气的体积流量, $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$; ρ 为气体在当前温度、压力下的密度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

SOFC 阴极和阳极模拟尾气的摩尔流量比

$$\lambda = \frac{V_C}{V_A} \quad (3)$$

式中: V_C 为 SOFC 阴极模拟尾气的摩尔流量, $\text{mol} \cdot \text{min}^{-1}$; V_A 为 SOFC 阳极模拟尾气的摩尔流量, $\text{mol} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

SOFC 阳极模拟尾气中水蒸气摩尔分数

$$\varphi = \frac{V_v}{V_A} \quad (4)$$

式中: V_v 为 SOFC 阳极模拟尾气中水蒸气摩尔流量, $\text{mol} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

2 实验结果与讨论

2.1 SOFC 不同工作阶段的模拟尾气燃烧情况

通入不同 SOFC 电堆工作状态下的阴极和阳极模拟尾气,比较不同工况下的燃烧状态、火焰面移动和燃烧温度。记录燃烧时燃烧器内各测点具体数据,通过最高温度变化判定燃烧过程火焰面的具体位置,对燃烧器燃烧状态进行分析。不同工作阶段的 SOFC 模拟尾气在双层多孔介质燃烧器内燃烧时,所测得的各测点温度变化情况如图 3 所示。

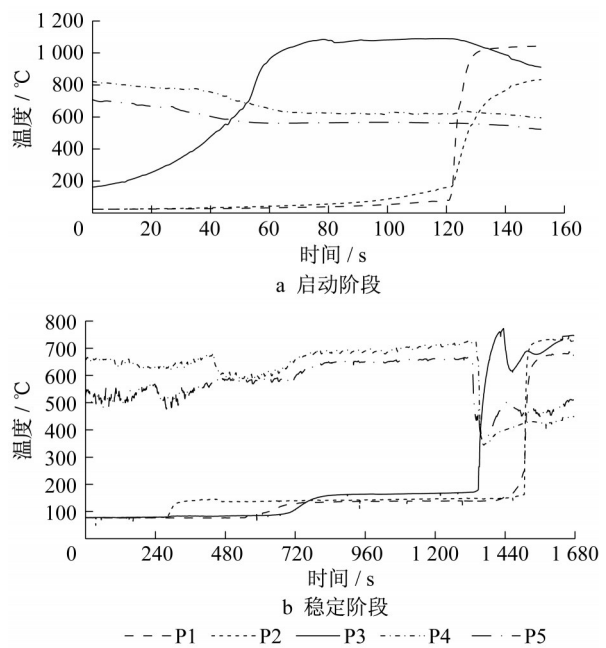


图3 SOFC 启动阶段和稳定阶段尾气燃烧温度

Fig.3 Combustion temperature of exhaust gas at SOFC's initiating stage and stable stage

燃料电池从启动到正常运行需经过启动阶段、过渡阶段和稳定阶段,尾气成分也随之变化。图 3a 为电堆启动阶段燃烧器内温度变化,此过程中燃料利用率很低。阳极模拟尾气的主要成分为天然气,实验中设置天然气体积流量为 $4.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,阴极模拟尾气体积流量为 $25.0 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$,对应的一次空气系数为 0.58。由图 3a 可知,点燃后燃烧器内最高温度从多孔介质下游逐步移动到多孔介质上游混合气区域。天然气在多孔介质燃烧器内燃烧时火焰面移

动速度快,140 s左右达到稳定燃烧,最高燃烧温度为1 084 °C,但稳定燃烧后火焰面位于燃烧器前并开始回火。

在过渡阶段,随电堆燃料利用率变化,氢气含量有所不同,尾气中可燃组分逐渐由甲烷变为氢气,天然气含量逐渐减少,氢气、水蒸气等含量逐渐增加,火焰面逐渐向下游移动且燃烧温度降低。图3b为电堆稳定阶段燃烧器内温度变化,电堆燃料利用率稳定在0.6左右,此时阳极模拟尾气主要由氢气和水蒸气组成,氢气摩尔分数在20%左右^[10]。混合气体热值低,火焰面移动速度慢,1 560 s左右才能在多孔介质燃烧器上游实现稳定燃烧,最高燃烧温度为760 °C左右。所设计的多孔介质燃烧器能使不同阶段的阳极模拟尾气稳定燃烧,不同阶段SOFC尾气在多孔介质燃烧器内燃烧时烟气温度变化不大,燃烧稳定后烟气温度维持在500~550 °C。

2.2 不同尾气组分对燃烧的影响

2.2.1 阴极、阳极模拟尾气的摩尔流量比

保持燃料电堆利用率为0.6时的阳极模拟尾气成分,改变阴极、阳极模拟尾气的摩尔流量比 λ 进行燃烧实验。图4为多孔介质燃烧室温度受 λ 的影响结果。当 $\lambda=0.7$ 或更小时,多孔介质内无法观测到火焰,火焰浮于燃烧器出口处,并有向外蔓延的趋势。这是由于多孔介质内部一次空气量太小,导致SOFC阳极气体燃烧不完全,火焰向外延伸。随着阴极模拟尾气流量不断上升, $\lambda=1.9$ 时燃烧器内的峰值温度约为700 °C,此时燃烧状态最佳。当阴极模拟气体摩尔流量继续增大时,多孔介质燃烧器内火焰面逐渐向出口方向移动。当 $\lambda=2.3$ 时,多孔介质表面已经出现明显的火焰,说明发生了脱火情况。

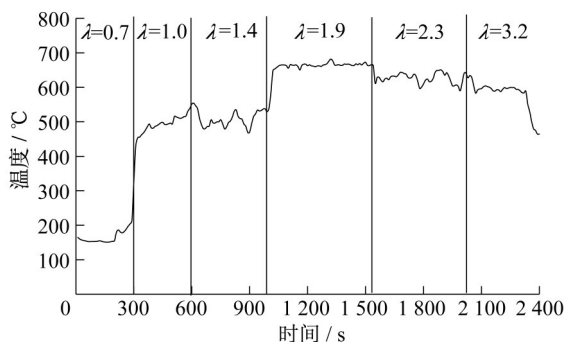


图4 λ 对燃烧室温度的影响

Fig.4 Effect of λ on combustion chamber temperature

2.2.2 氢气含量

不同燃料电堆利用率下,尾气中可燃组分含量

会有较大变化。由于氢气为尾气中含量最高的可燃性气体,因此研究了阴极气体量不变时氢气含量变化对燃烧情况的影响。保持阴极气体摩尔流量为4.00 mol·min⁻¹,阳极模拟尾气中水蒸气摩尔流量为1.32 mol·min⁻¹,氢气的摩尔分数依次为8.3%、12.1%、20.5%、28.8%(分别对应SOFC电堆燃料利用率0.6、0.7、0.8、0.9的工况)。混合尾气中氢气的摩尔分数与尾气稳定燃烧时火焰温度的关系如图5所示。当混合尾气中氢气摩尔分数减少时,火焰温度呈下降趋势、火焰面向下游移动,这是混合尾气中可燃组分减少而导致的结果。当氢气摩尔分数降至8.3%时,燃烧室内火焰熄灭、燃烧停止,温度急剧下降。

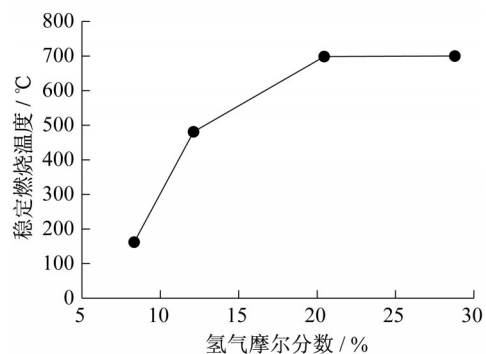


图5 不同氢气摩尔分数下燃烧器稳定燃烧时温度变化

Fig.5 Variation of burner's stable combustion temperature with different mole fractions of hydrogen

2.2.3 水蒸气含量

SOFC阳极模拟尾气中存在大量的水蒸气,极大地影响了混合尾气中可燃组分的爆炸极限,因此探究阳极模拟尾气中水蒸气摩尔分数 φ 对燃烧情况的影响。保持阴极模拟尾气的体积流量为2 m³·h⁻¹,选取 $\lambda=2$, φ 从75%升高至85%时,燃烧器内温度变化如图6所示。

当 $\varphi=75%$ 时,多孔介质中部温度最高并在一段时间内保持825 °C左右不变,说明此时燃烧反应区位于多孔介质中部。升至 $\varphi=85%$ 后,观测到多孔介质中部温度大幅度下降,多孔介质下游温度、燃烧器出口烟气温度相继上升,最后燃烧器出口处烟气温度为5个测点中最高的温度,并稳定在523.1 °C左右。这说明水蒸气含量上升后,火焰面向下游移动且温度下降。

2.3 入口尾气流速对燃烧的影响

当SOFC阴极、阳极模拟尾气的组分和比例不

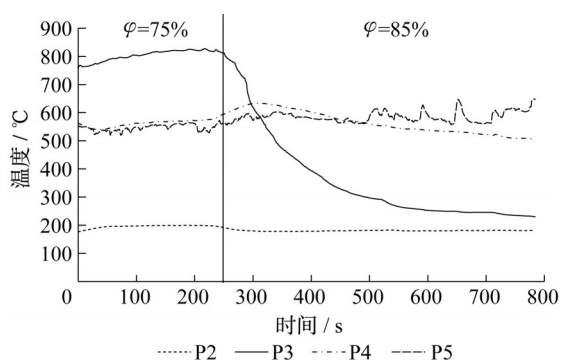


图6 不同水蒸气摩尔分数下燃烧器稳定燃烧温度变化
Fig.6 Variation of burner's stable combustion temperature with different mole fractions of vapor

变时,混合尾气的气流速度也会对燃烧情况造成影响,因此探究燃烧器入口尾气流速对燃烧的影响。阳极模拟尾气保持1 kW的SOFC电堆在 $U_f=0.6$ 时的成分配比,选取 $\lambda=2$ 。不同入口尾气流速 v_{mix} 下燃烧器内温度变化如图7所示。

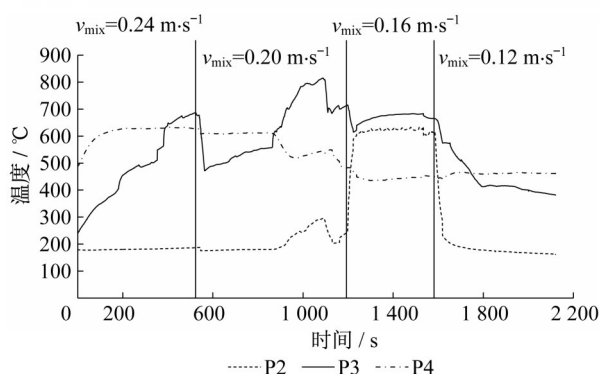


图7 入口尾气流速对燃烧器内温度影响
Fig.7 Effect of inlet exhaust gas velocity on temperature in the burner

混合尾气的入口流速为 $0.24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,在多孔介质下游处用时120 s尾气达到稳定燃烧,火焰温度保持在 630°C 左右;随燃烧进行火焰面开始向中部移动,燃烧器中部温度一直在升高,在360 s左右时中部温度超过下游温度,但中下游温度相差较小,燃烧反应区位于多孔介质中下游,稳定燃烧时火焰温度可达 680°C 。

入口流速至 $0.20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,中部温度先下降后上升,上下游温度受影响较小,在840 s后上游温度略上升,下游温度略下降,火焰面朝着上游方向移动,在多孔介质中部实现稳定燃烧,最高温度达到 800°C 。受火孔热强度和蓄热预热作用的综合影响,相较于 $0.24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 工况,多孔介质基体蓄积热量增

多,流速的降低增加气体与固体的接触时间,起到预热增强效果,燃烧器中部最高温度较高。

继续降低入口流速至 $0.16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,多孔介质上游温度急剧上升至 620°C 左右,仅次于中部温度的 680°C ,火焰面移动至多孔介质中上游。此时火焰温度有所降低,与 $0.24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时的最高燃烧温度相近,火焰温度的影响因素中火孔热强度占主要地位。

气流速度降低至 $0.12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,多孔介质中部、上部温度均开始下降,尤以上部温度下降明显,说明火焰已经脱离了多孔介质下部,进入了预混室,燃烧器发生回火。此时,燃烧器火孔热强度为 $83.3 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$,即为该多孔介质燃烧器能正常运行的最小火孔热强度。

2.4 SOFC尾气稳定燃烧范围

SOFC尾气由多种组分构成,在不同在反应工况下,组分会发生较大变化。由于每种组分的热值、密度、理论空气量、火焰传播速度和稳定性等存在差异,因此燃料电池尾气燃烧器应具有适应不同组分波动而保持稳定燃烧的能力。通入不同电堆燃料利用率下的阳极模拟尾气,并调整阴极气体的流量,观察多孔介质燃烧器内温度及火焰面的变化,判定多孔介质燃烧器在不同 λ 下的稳定燃烧范围。

调整阴极和阳极混合气体比例,使燃烧器在多孔介质内部稳定燃烧,此时保持阳极气体不变,即保持一定的燃料利用率。逐步减小阴极气体的流量,当多孔介质下部温度高于多孔介质内部温度时,即火焰面移动到多孔介质下方混合气体空间进行燃烧则判定发生回火,定义此时的阴极和阳极气体比例为该燃料利用率下的回火极限。从初始稳定燃烧状态,逐步增加阴极气体流量,当多孔介质上部温度高于多孔介质内部温度时,即火焰面移动到多孔介质上部空间进行燃烧则判定为脱火,定义此时阴极和阳极气体比例为该燃料利用率下的脱火极限。依次改变可燃气体流量,获得不同燃料利用率下SOFC模拟尾气的稳定燃烧上下限,以此来确定其稳定燃烧范围。实验结果如图8所示。

由图8可知,稳定燃烧的上下限均随燃料利用率的提高而下降,稳定燃烧范围变窄。当 $U_f=0.6$ 时,多孔介质脱火极限的 λ 为2.8,回火极限的 λ 为1.2。随着电堆燃料利用率的增大,阳极模拟尾气 H_2 含量逐渐减少,理论空气量相应减小,脱火极限和回火极限的 λ 均减小。当 U_f 大于0.75时,回火现象不再发生,火焰在空气量减少到一定程度时熄灭。当 $U_f=0.85$ 时,脱火极限的 λ 为0.5。燃料利用率提

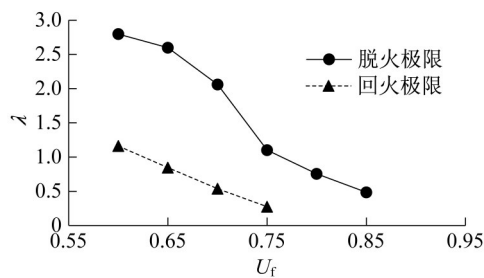


图8 不同燃料利用率下SOFC尾气稳定燃烧范围

Fig. 8 Stable combustion range of SOFC exhaust gas at different fuel efficiencies

高,阳极模拟尾气的热值降低,则燃烧反应放热量随之下降,火焰自维持的动力源减弱,再加上大量的水蒸气存在抑制了燃烧反应的进行,因此火焰倾向于发生吹熄。

3 结论

(1)所设计的多孔介质燃烧器可满足不同阶段SOFC模拟尾气的燃烧,启动阶段的阳极模拟尾气容易发生回火,不同阶段SOFC尾气在多孔介质内燃烧时烟气温度的变化不大,燃烧稳定后烟气的温度维持在500~550℃。

(2)SOFC阳极模拟尾气成分变化对燃烧状态产生影响,阳极模拟尾气中可燃组分的减少和惰性组分的增加都将使火焰面向下游移动,并且稳定燃烧温度降低,当混合气体可燃组分摩尔分数低于8.3%时燃烧中断。

(3)燃烧器进口气流速度对燃烧功率、燃烧温度和燃烧稳定的影响明显,混合气组分一定($U_f=0.6$, $\lambda=2$),入口气流速度为0.16~0.24 m·s⁻¹时,燃烧器可以稳定燃烧。受火孔热强度和多孔介质蓄热作用的影响,气流速度逐渐减小时稳定燃烧温度先升后降,入口气流速度为0.20 m·s⁻¹时,火焰面稳定在多孔介质中部,其稳定燃烧温度可达800℃。

(4)SOFC尾气的稳定燃烧范围受燃料利用率影响,在无背压工况下,燃烧器的稳定燃烧极限随电堆燃料利用率的增加而减小。

作者贡献说明:

张静思:实验设计,数据分析,论文撰写与修改。

陈志光:实验设计,实验指导,论文修改。

詹心怡:实验操作,数据分析,论文撰写与修改。

郭双乾:实验操作。

秦朝葵:实验设计,实验指导。

参考文献:

- [1] 代安娜,许林峰,税安泽. 固体氧化物燃料电池的研究与进展[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(Z1):234.
DAI Anna, XU Linfeng, SHUI Anze. Research progress of solid oxide fuel cell[J]. Chinese Journal of Ceramics, 2015, 34(Z1):234.
- [2] STAMBOULI A B, TRAVERSA E. Solid oxide fuel cells (SOFCs): a review of an environmentally clean and efficient source of energy [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2002, 6(5):433.
- [3] XUE X, TANG J, SAMMES N, *et al.* Dynamic modeling of single tubular SOFC combining heat mass transfer and electrochemical reaction effects [J]. Journal of Power Sources, 2005, 142(1/2):211.
- [4] MENON V, BANERJEE A, DAILLY J, *et al.* Numerical analysis of mass and heat transport in proton-conducting SOFCs with direct internal reforming [J]. Applied Energy, 2015, 149(7):161.
- [5] YEN T-H, HONG W-T, HUANG W-P, *et al.* Experimental investigation of 1 kW solid oxide fuel cell system with a natural gas reformer and an exhaust gas burner [J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(5):1454.
- [6] PAULINA P-O, ZDZISLAW J. Numerical investigation of a novel burner to combust anode exhaust gases of SOFC stacks [J]. Polish Journal of Chemical Technology, 2017, 19(3):20.
- [7] 刘振. 甲烷不完全氧化SOFC热电气联产的模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
LIU Zhen. Simulation of incomplete oxidation of methane by SOFC for thermoelectric co-generation [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [8] 由宏新,高红杰,陈刚,等. SOFC中干甲烷浓度对Ni-YSZ阳极上反应的影响[J]. 燃料化学学报, 2013, 41(3):374.
YOU Hongxin, GAO Hongjie, CHEN Gang, *et al.* Effects of dry methane concentration on the methane reactions at Ni-YSZ anode in solid oxide fuel cell [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2013, 41(3):374.
- [9] RIENSCH E, MEUSINGER J, STIMMING U, *et al.* Optimization of a 200 kW SOFC cogeneration power plant, Part II: variation of the flowsheet [J]. Journal of Power Sources, 1998, 71(1/2):306.
- [10] BARRA A J, ELLZEY J L. Heat recirculation and heat transfer in porous burners [J]. Combustion and Flame, 2004, 137(1):230.
- [11] AL-ATTAB K A, CHUNGHU J, ZAINAL Z A. Experimental investigation of submerged flame in packed bed porous media burner fueled by low heating value producer gas [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 62(4):1.
- [12] 张俊春. 多孔介质燃烧处理低热值气体及燃烧不稳定性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
ZHANG Junchun. Study on combustion of low calorific value gas with porous media and combustion instability [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [13] GHANG T G, LEE S M, AHN K Y, *et al.* An experimental study on the reaction characteristics of a coupled reactor with a catalytic combustor and a steam reformer for SOFC systems [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(4): 3234.