

适用于紧凑 SOFC 的燃烧器耦合换热器实验

李思远¹, 白书战¹, 李国祥¹, 马孔融², 李文聪², 韩宇浩¹

(1. 山东大学 能源与动力工程学院, 济南 250061; 2. 中国重型汽车集团有限公司, 济南 250000)

摘要: 通过实验研究了紧凑固体氧化物燃料电池外围热管理系统中催化燃烧器和换热器的耦合器 (CHE) 的换热性能以及甲烷催化转化效果。测试、比较和分析了 CHE 只进行催化燃烧或热交换时的性能与正常工作时的性能。结果表明: 正常工作时 CHE 的换热效率比只进行热交换时高 10%, 而甲烷的催化转化率比只进行催化反应时降低了 4%。虽然 CHE 降低了部分催化转化性能, 但提高了燃料利用率, 因此, 使用 CHE 替代系统中的燃烧器和换热器, 可以提高换热性能, 加速系统的启动或在相同的启动时间内更节省燃料, 节约制造成本和系统空间, 并降低其余热部件的热负荷。在紧凑型 SOFC 系统中具有潜在的应用性和广阔的前景。

关键词: 换热; 催化燃烧; 耦合; 固体氧化物燃料电池; 换热效率; 热管理系统

中图分类号: TK91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)02-0434-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230462

Experimental study of a combustor-coupled heat exchanger for compact SOFC system

LI Si-yuan¹, BAI Shu-zhan¹, LI Guo-xiang¹, MA Kong-rong², LI Wen-cong², HAN Yu-hao¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. China National Heavy Duty Truck Group Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: The catalytic burner and heat exchanger in the peripheral thermal management system of a compact solid oxide fuel cell are coupled into a catalytic heat exchanger (CHE). The thermal performance of the CHE and the catalytic conversion of methane were investigated experimentally. The performance of the CHE was tested, compared and analysed when only catalytic combustion or heat exchange was taking place, compared to the performance during normal operation. The results show that the heat transfer efficiency of the CHE in normal operation is 10% higher than when only heat exchange is carried out, while the catalytic conversion of methane is 4% lower than when only catalytic reaction is carried out. Although CHE reduces some of the catalytic conversion performance, it improves fuel utilisation, so using CHE to replace the burner and heat exchanger in a system can improve heat transfer performance, speed up system start-up or be more fuel efficient for the same start-up time, save manufacturing costs and system space, and reduce the heat load on the remaining thermal components. Potential applicability and broad prospects in compact SOFC systems.

收稿日期: 2023-05-10.

基金项目: 山东省重点研发项目(2020CXGC010406); 国家重点研发项目(2022YFB4004401).

作者简介: 李思远(1991-), 男, 实验师, 硕士. 研究方向: 燃料电池系统. E-mail: lisiyuan@sdu.edu.cn

通信作者: 白书战(1979-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 内燃机, 燃料电池, 交通运输. E-mail: baishuzhan@sdu.edu.cn

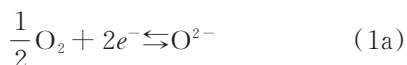
Key words: heat exchange; catalytic combustion; coupling; solid oxide fuel cell; heat exchange efficiency; thermal management system

0 引言

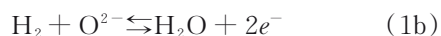
气候变化是人类面临的全球性问题。随着各国二氧化碳的排放,温室气体猛增,生命系统受到了严重的威胁。在这一背景下,世界各国正以全球协约的方式积极地减少温室气体的排放^[1],我国也提出“碳达峰、碳中和”战略目标^[2]。固体氧化物燃料电池(SOFC)可以适应多种低碳燃料^[3],还有能量转化效率高^[4]、系统简单^[5]、不需要贵金属作为催化剂等优点,具有良好的前景。目前针对SOFC的研究非常广泛,将其应用于交通运输领域也是其中一个重要的研究方向^[6-9]。车载SOFC的应用,主要有两种形式。一种是作为汽车辅助动力装置(APU)使用。许多汽车制造商已经成功地将SOFC堆栈系统作为汽车的辅助动力装置,为加热器系统、空调系统、CPU和其他电气设备提供能量。这不仅可以减轻发动机或电池的负荷,还可以在主动力设备出现故障时提供动力输出。2001年,宝马和德尔福汽车系统公司联合开发了第一辆使用SOFC作为辅助动力系统的电动汽车^[10]。其SOFC堆栈的功率为3 kW,油耗比由内燃机驱动的传统汽车系统低46%。德尔福改进并模拟了GMEV-1汽车,表明使用5 kW的SOFC(APU)可以节省57.7%的燃料^[11]。另一种是作为增程器,与混合动力系统中的电池结合使用。Bessekun等^[12]将SOFC集成到改进的日产Leaf Acenta电动车中,并使用标准化的驾驶周期进行模拟。结果表明:在不同的燃料供应下,上述组合系统的里程数可以增加1.55~4.84倍。

SOFC内部反应方程如下:

阴极反应:



阳极反应:



总反应:



从上述反应方程中可以看到,实际在SOFC内部只有 H_2 才能发生电化学反应。但当SOFC被用于交通运输领域时,通常使用碳氢化合物和

氨作为燃料,因为纯氢的获取、储存和运输还没有发展到理想的水平。虽然这些非氢燃料不能直接产生电化学反应,但可以通过阳极外部或内部的重整装置将其重整为 H_2 (和 CO)。同时,SOFC在预热阶段也需要热量。目前,一般的措施是使用燃烧器来燃烧未转化的燃料气体,如天然气,用于系统供能^[13]。因此,现在使用天然气作为SOFC的燃料是一种趋势。天然气可以被重整,容易燃烧,并且已经被研发了很长时间。而Martinez等^[14]的模拟分析也证明,使用天然气作为SOFC系统的燃料,比使用传统柴油作为燃料的性能更好。

然而,SOFC需要在高温环境下发挥作用,这直接导致了其启动速度慢。未经优化的普通SOFC需要10 h^[15]才能启动,这是紧凑型SOFC应用于多场景的致命缺点。此外,在持续的高温环境中,电极会被烧结,而电池组的材料也会被慢慢分解^[16],这都会缩短SOFC的寿命,甚至使其失效。这就要求SOFC系统的低温化、小型化和集成化。SOFC的工作温度区间一般在600~1000℃。为此,需要匹配相应的热管理系统,使SOFC能够长久稳定运行,并回收利用余热以及处理未能完全燃烧的阳极废气^[17]。同时,对热管理系统中的部件进行小型化、集成化设计,对SOFC的应用也具有重要的意义^[18]。SOFC中常用的热管理系统有多种形式^[19-21],其中燃烧器和换热器都是重要部件。传统的燃烧器可燃区间较小,还需要点火器引燃,而催化燃烧的可燃区间更大,且燃烧所产生的 CO 或 NO_x 也更少^[22],因此,在紧凑型SOFC热管理系统中使用催化燃烧器更具优势,也更容易与其他部件耦合。目前,对SOFC系统中的部件进行的集成耦合研究比较少,大多数还在摸索阶段。Ghang等^[17]将蒸汽重整器和催化燃烧器组成耦合反应器,通过实验改变催化燃烧器的入口温度、催化燃烧的过量空气系数、燃料电池中的燃料利用率和蒸汽重整器中的S/C比来观察在不同条件下耦合反应器的反应特性,从而说明其对外部重整的高温燃料电池燃料处理具有一定的适用性。Park等^[23]向一种适用于氢液化装置的特别设计的板翅式换热器(PFHE)的翅片通道内填充

邻位氢转化催化剂制成一种催化换热器(CPFHE),通过实验和仿真分析证明了CPFHE的努塞尔数代表的换热效率相对于无催化剂的PFHE提高了两倍,虽然该催化换热器并不是用于燃料电池系统的,但对于燃料电池系统中部件的耦合也具有指导意义。

本研究在换热器热通道上涂覆催化剂,将催化燃烧器与换热器耦合为一个催化换热器(CHE),从而缩小热管理系统所需要的空间,并尽可能在不损失催化转化效率的情况下提高换热效率,使该催化换热器更好地应用在紧凑型SOFC系统上,在SOFC启动阶段为系统提供足够的热量,使SOFC系统更快地启动。

1 实验设置

1.1 催化换热器

换热器的形式为板翅式交叉流不混型,结构如图1所示,翅片通道高5 mm,翅片厚度0.2 mm,翅片频率0.2/mm,综合考虑速度场与压降的性能,选取导流转向角 90° ^[24]。商业Ni基催化剂涂覆在换热器热通道(图中红色部分),有效区域纵向长度600 mm,横向长度300 mm,高度300 mm。

1.2 实验系统及装置

实验系统如图2所示。其中,甲烷使用99.999%的高纯甲烷,通过质量流量控制器(ALICAT MFC)来控制进入CHE的燃料流量。热侧空气采用一台5 kW的风机和一个变频器来控制进入CHE的空气流量,用一个精度1.5、量程为200 kg/h的热式气体质量流量计来检测流量,再使用一台50 kW的空气加热装置来控制进入CHE的热空气温度。热侧空气和甲烷燃料进入多孔介质混合腔充分混合后通入CHE。冷侧安装了一个与热

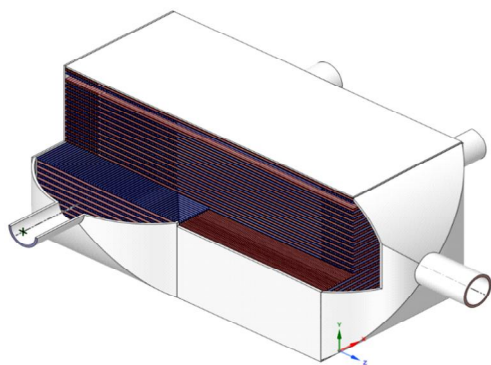


图1 换热器内部结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of internal structure of heat exchanger

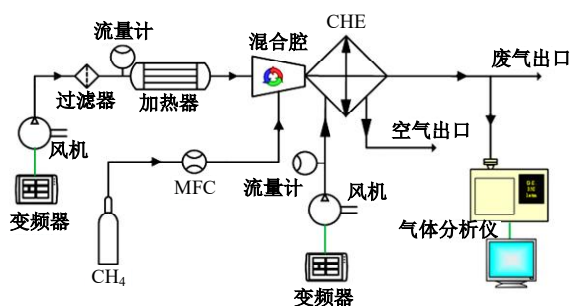


图2 实验系统

Fig. 2 Experimental system

侧相同的风机、变频器和质量流量计,以供应和控制冷侧空气流。

CHE流道如图3所示。CHE热侧入口、废气出口、冷侧入口、冷侧出口和热侧通道的内壁都通过K型热电偶进行温度测量(量程 $0\sim 1\,300\,^{\circ}\text{C}$),并使用湘仪FC2022多通道数据采集模块进行数据采集。反应后的尾气使用AVL I60气体分析仪进行检测。

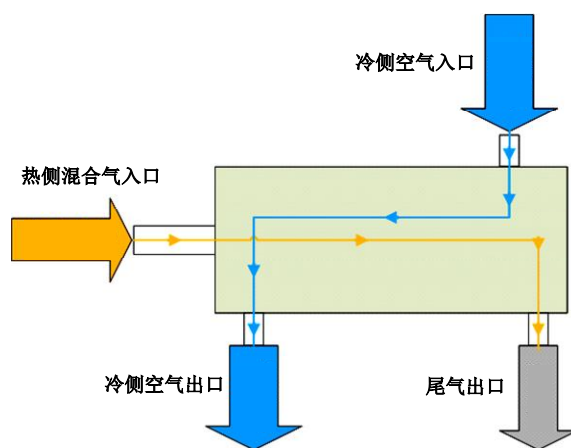


图3 CHE流道示意图

Fig. 3 CHE flow channel schematics

1.3 参数定义

燃料(甲烷)催化转化率的计算公式^[25]为:

$$X(\text{CH}_4) = \frac{C(\text{CH}_4, \text{in}) - C(\text{CH}_4, \text{out})}{C(\text{CH}_4, \text{in})} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $X(\text{CH}_4)$ 为甲烷的催化转化率; $C(\text{CH}_4, \text{in})$ 为进入CHE的甲烷的浓度,由热侧空气流量和甲烷流量计算得出; $C(\text{CH}_4, \text{out})$ 为废气中 CH_4 的浓度,由气体分析仪测量得到。

换热效率的计算公式为:

$$\varepsilon = \frac{T(c, \text{out}) - T(c, \text{in})}{T(h_i) - T(c, \text{in})} \times 100\% \quad (3)$$

式中: ε 为换热效率; $T(c, \text{out})$ 为冷侧出口空气温

度; $T(c, in)$ 为冷侧入口空气温度; $T(hi)$ 为系统内最高的温度。

Nu 数是换热能力的定量指标,由以下公式计算^[26]:

$$Nu = 0.44 \times \left(\frac{\beta}{30} \right)^{0.38} \times Re^{0.5} \times Pr^{(1/3)} \times \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (4)$$

式中: β 为板材相对于垂直方向的波纹角,45°; $Re = \frac{\rho v D}{\mu}$,等效直径 $D=0.088$ m; μ 为随温度变化的流体动力黏度,Pa·s; μ_w 为壁面上随温度变化的流体动力黏度,Pa·s。

1.4 实验设置

本研究考虑将CHE应用于一个5 kW的SOFC系统的启动预热过程。本研究为基础研究,CHE的启动考虑利用系统内的辅助燃烧器或小型电加热器进行预热,其余相关内容暂不考虑。实验主要分为3个部分,都针对同一个CHE。CHE仅作为催化燃烧器(Catalytic combustion only, CCO)时,从热侧入口通入热空气与CH₄的混合气,封闭冷侧进出口,不对CHE进行换热。CHE仅作为换热器(Heat exchange only, HEO)时,从热侧入口通入热空气,从冷侧入口通入冷空气,不进行催化反应。CHE正常工作时,从热侧入口通入热空气与CH₄的混合气,从冷侧入口通入冷空气,进行催化反应的同时也换热。

2 结果与分析

2.1 反应时间对催化转化率的影响

实验设置如表1所示,从通入CH₄开始计时,记录参数,得到反应时间与催化转化率的关系,如图4所示。从图4可明显看出,随着反应时间的延长,CH₄催化转化率会提升,在小于90%时增长速度尤其快。但本文所研究的CHE是与车载SOFC系统相匹配的,目的是使SOFC系统更快地启动,为此CHE需要更快的起燃速度。从图4中还可以观察到,当通入的热侧空气温度为770 K时,CH₄转化率需要3 min才能达到90%。然而,当热侧空气温度为870 K时,在通入燃料的瞬间,CH₄转化率就超过了90%,实现稳定运行所需的时间不到2 min。虽然催化燃烧的温度范围比较宽,但反应温度对CH₄转化率的影响也非常明显^[27]。因此,为了更好地应用于SOFC系统,

CHE需要更高的热侧空气温度。然而,过高的温度也会对换热翅片产生较大的热负荷。当热侧空气温度超过870 K时,温度对CH₄转化率的影响很小。因此,综合考虑CH₄反应转化率、快速升温的要求和CHE的使用寿命,将热侧空气温度控制在770~870 K是最佳的。

表1 反应时间对催化转化率的影响实验

Table 1 Experimental setup of the effect of reaction time on catalytic conversion

模式	热侧空气流量 /(g·min ⁻¹)	热侧空气 温度/K	CH ₄ 流量 /(g·min ⁻¹)	时间 /min
CCO	152	670	1.8	0~5
CCO	152	720	1.8	0~5
CCO	152	770	1.8	0~5
CCO	152	820	1.8	0~5
CCO	152	870	1.8	0~5
CCO	152	920	1.8	0~5

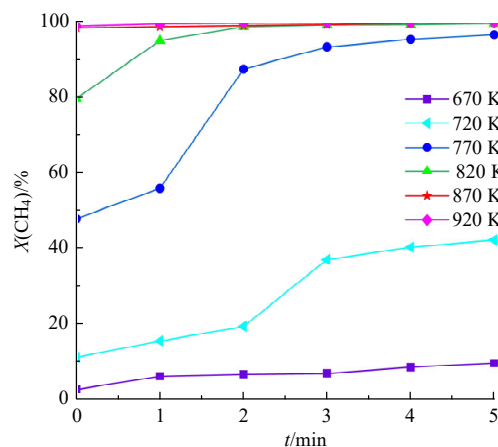


图4 反应时间对CH₄催化转化率的影响

Fig. 4 Effect of reaction time on CH₄ catalytic conversion

2.2 燃料浓度对转化率的影响

为便于与SOFC电堆进行匹配,本研究按设计工况选定CHE热侧入口空气的流量,仅通过改变通入的燃料流量探究不同燃料浓度下的CHE特性,实验设置如表2所示,充分发展并稳定后记录参数,得到CH₄浓度与催化转化率的关系,如图5所示。由图5可见,随着CH₄浓度的上升,催化转化率也随之上升,但当燃气侧空气的进气温度较高时,这种上升并不明显。当进气温度为820 K时,燃料浓度从2%提高到5%,而催化转化效率仅从99.733%提高到99.902%。可以认为,在这样的条件下,CH₄被完全燃烧。即使在较低的热侧空气温度和燃料浓度下,经过长时间(约1 h)

表 2 燃料浓度对催化转化率的影响实验
Table 2 Experimental setup of the effect of fuel concentration on catalytic conversion

模式	热侧空气流量 /(g·min ⁻¹)	热侧空气 温度/K	CH ₄ 流量 /(g·min ⁻¹)
CCO	150	720	1.7,2.6,3.5,4.4
CCO	150	770	1.7,2.6,3.5,4.4
CCO	150	820	1.7,2.6,3.5,4.4
CCO	150	870	1.7,2.6,3.5,4.4
CCO	152	920	1.7,2.6,3.5,4.4

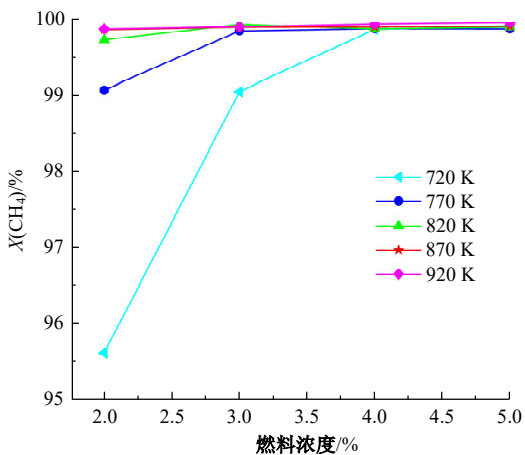


图 5 燃料浓度对催化转化率的影响
Fig. 5 Effect of fuel concentration on CH₄ catalytic conversion

的放热反应,CH₄的转化率也可以达到 95.617%。因此,在适当的浓度范围内,CH₄浓度对转化率的影响很小,增加浓度只是加速了系统的热平衡。这也验证了催化燃烧器具有在低燃料浓度下稳定燃烧的优势。

2.3 CHE 催化转化性能

车载 SOFC 系统的一些典型加热工况是将系统加热到 870 K^[28]。这个过程通常分为两个阶段:第一阶段是将堆栈加热到 720 K,第二阶段是堆栈开始进行电化学反应并使整个系统逐渐稳定^[29]。因此,在本研究中,假设 SOFC 堆栈在第一阶段被 870 K 的热空气加热。该阶段的概念图见图 6。

在系统预热阶段,CHE 的冷侧空气在换热后

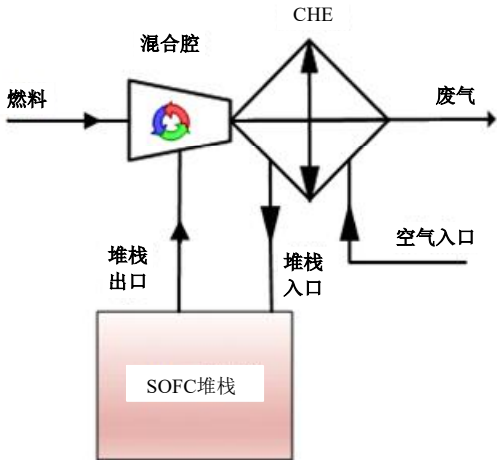


图 6 SOFC 系统概念图(第一阶段)
Fig. 6 Concept diagram of SOFC system warmup (first stage)

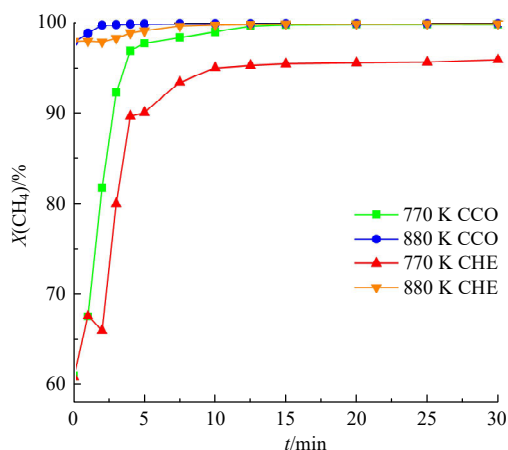
被用来加热 SOFC 堆栈,也就是说,CHE 冷侧出口的空气温度需要达到 870 K。然后,这些空气被通入混合腔并与输入的燃料混合,因此,CHE 热侧的进气温度被选为 770 K。在第二阶段,SOFC 堆栈已经开始运行,给系统增加了额外的热量,堆栈出口温度也相应提高到 880 K。此时,虽然堆栈出口不再是纯空气,而是参与了反应的阴极废气(COG)。然而,由于它仍然处于预热阶段,只有小部分氧气被消耗掉,因此,在这个阶段,可以近似地认为堆栈出口是空气。为了更好地比较 CHE 在正常运行和仅进行催化燃烧的催化转化率,实验设置见表 3。在 CHE 的实验中,冷侧空气在成功点火 2 min 后开始引入并进行热交换,以保证 CHE 稳定渡过点火阶段。

图 7 所示为不同条件下 CH₄ 催化转化率随时间的变化曲线。可以看出,CHE 中的热交换影响了 CH₄ 的催化燃烧。成功点火后 2 min 通过冷空气进行热交换的行为也导致了 CH₄ 转化率的瞬间下降,但随着反应的进行,CHE 找到了新的平衡点。热侧空气温度为 770 K 时,CHE 最终的 CH₄ 转化率比 CCO 时低 4%,而且在初始发展阶段也更不稳定。热侧空气温度为 880 K 时,冷空气换

表 3 CHE 催化转化性能实验设置

Table 3 Experimental setup of CHE catalytic conversion performance

模式	热侧空气流量/(g·min ⁻¹)	热侧空气温度/K	CH ₄ 流量/(g·min ⁻¹)	冷侧空气流量/(g·min ⁻¹)	时间/min
CCO	152	770	2.6	/	0~30
CHE	152	770	2.6	150	0~30
CCO	152	880	2.6	/	0~30
CHE	152	880	2.6	150	0~30

图7 CH_4 催化转化率随时间的变化Fig. 7 Change of catalytic conversion of CH_4 with time

热对CHE的 CH_4 转化率只有0.2%的影响。可以认为,只要充分稳定后,换热对催化燃烧的实际影响并不大,换热器耦合催化燃烧是可行的。图8显示了尾气温度随时间的变化。从图8中可以看出,不同情况下尾气温度随时间变化的趋势基本相同,但在相同的热侧空气温度下,CHE的尾气温度比CCO的低。这意味着系统中的部件承受的热负荷更低,材料和加工要求降低,系统寿命可以有效延长,系统成本有望降低。

图9显示了CHE热侧通道的内壁温度随时间的变化。从图9中可以看出,当热侧空气温度为770 K时,实验30 min后CHE的内壁温度仍在上升。这意味着在较低的热侧空气温度下,仍有可能提高CHE的 CH_4 转化率。然而,当热侧空气温度为880 K时,随着反应的进行,内壁温度趋于下降。CHE内壁温度的降低可能是由于长时间的实验造成的碳沉积,这降低了CHE的催化转化

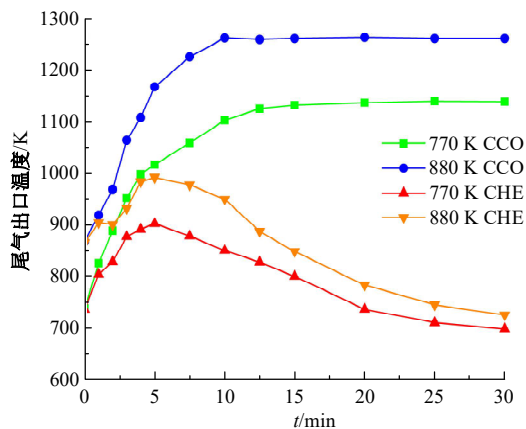


图8 尾气温度随时间的变化

Fig. 8 Change of exhaust gas temperature with time

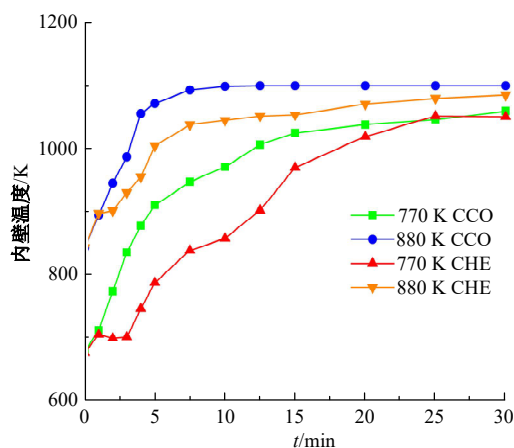


图9 CHE内壁温度随时间的变化

Fig. 9 Change of inner wall temperature of CHE with time

效率(在之前的一个实验中,长时间的贫氧燃烧导致了CHE的催化层积碳,如图10所示)。同时,冷空气带走了大量的热量。CHE本身很难维持反应所需的热量,所以它就会慢慢熄灭。因此,提高催化剂的抗积碳能力或找到适当的氧碳比和温度范围,是提高CHE的 CH_4 催化转化效率的方法^[30]。然而,应用CHE催化 CH_4 燃烧只发生在系统预热阶段,其时间不长。目前,Ceres Power^[28]已经开发了一种中温金属支撑的SOFC,只需9 min就能正常启动。在SOFC正常启动后,CHE可以通过燃烧阳极废气(AOG,(1b)反应后的富氢气体)^[13, 22]来工作。AOG更容易被催化转化且不容易积碳,使CHE在SOFC系统中长期运行时更加可靠。

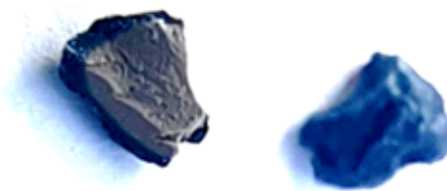


图10 催化剂表面积碳样本

Fig. 10 Carbon deposition on catalyst sample surface

2.4 CHE的换热性能

为了模拟耦合器在HEO工作模式下的换热性能,在CHE前加入一个点燃式燃烧器,通入152 g/min的770 K空气和2.6 g/min的甲烷燃气,在燃烧器中燃烧后再将高温尾气通入CHE。从CHE冷空气端通入150 g/min的空气,记录参数,得到CHE仅作为换热器时的换热效率,并与

CHE 正常工作时(表 3, CHE 的实验设置)对比, 如图 11 所示。

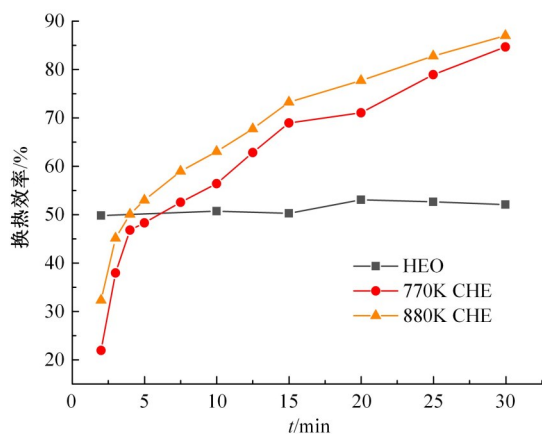


图 11 换热效率随时间的变化

Fig. 11 Change of heat exchange efficiency with time

CHE 是燃烧器和换热器耦合而成的, 因此, 认为在相同的工作条件下可以比较换热效率。从图 11 可以看出, 进行催化燃烧时的 CHE 的换热效率比其仅进行换热时的换热效率高近 10%。这表明, 热侧通道中的催化燃烧可以有效提高换热效率。因为放热反应发生在催化剂的表面^[13], 热量直接从催化剂载体, 即换热器的翅片传递到冷空气中。与一般情况下的热空气的热量到翅片再到冷空气相比, 少了一个对流换热的过程, 因此, 提高了换热效率。图 12 再次证实了这个结论。当热侧空气温度均为 770 K 时, 经过一段时间的稳定发展, CHE 的冷侧出口温度较高。虽然这两种情况都没有达到理想的 870 K, 但毫无疑问使用 CHE 是一种强化换热的策略, 并具有一定

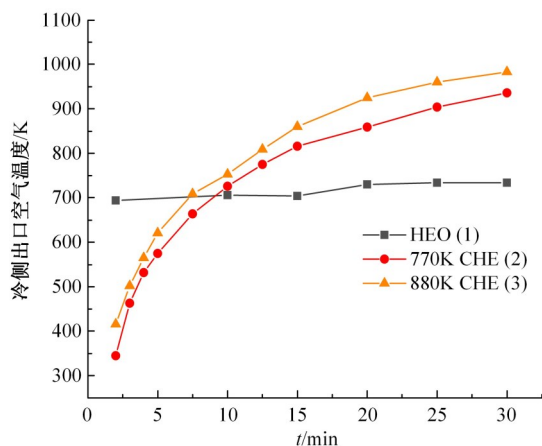


图 12 冷空气侧出口温度随时间的变化

Fig. 12 Change of cold side outlet temperature with time

的潜力。然而, 由于 CHE 使用催化燃烧, 需要一定的启动时间, 因此, 在初始发展阶段, 换热效率和冷空气出口温度比 HEO 时低。但 SOFC 系统也需要时间来慢慢升温。这与 CHE 的发展曲线相吻合^[29], 有利于 CHE 的正常使用。并且, 随着系统温度和 CHE 进口温度的上升, 图中的曲线(2)将逐渐向曲线(3)发展, 出口温度将进一步上升, 进入良性循环。因此, 在实际应用 CHE 时可以有效缩短系统的启动时间, 或在相同的启动时间内拥有更高的燃料利用率。

图 13 显示了 Park 等^[23]的 CPFHE 和本研究中 CHE 的努塞尔数与雷诺数的关系。在实验的第 30 min, CHE 热侧混合气体的特性如表 4 所示。可以通过式(4)计算得出当 Re 为 800 时, Nu (CHE) 为 13.1。在相同的 Re 下, 未优化的 CPFHE 的 Nu 为 11.8, 而带有优化翅片的 CPFHE 的 Nu 在 11~14。可以认为, CHE 的换热性能已经达到了先进水平。

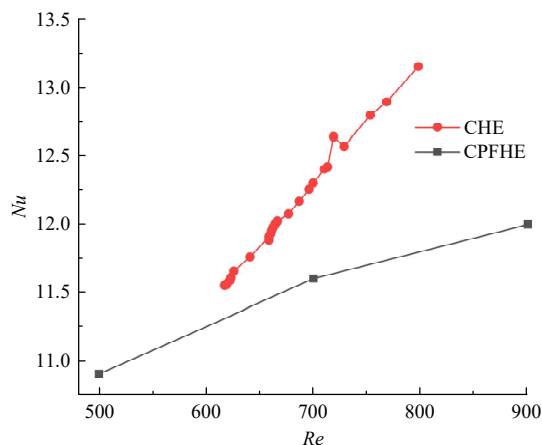


图 13 CHE 和 CPFHE 的努塞尔数与雷诺数的关系

Fig. 13 Nusselt number with respect to the Reynolds number for the CHE and CPFHE

2.5 CHE 的排放

实验按照表 3 设置, 数据只记录前 10 min 排放波动较大的情况。图 14 和图 15 显示了 CHE 正常运行和只进行催化反应时的排放比较。由于 CHE 在 SOFC 系统中一般为上游或中游部件, 难以通过具体的评价指标考量其对环境的综合影响, 因此, 仅通过定量指标探究其各项排放不同边界条件下的变化趋势。

从图 14 中可以看出, 由于反应温度偏低, CHE 的氮氧化物排放几乎为零。然而, CHE 燃烧并不充分, 产生了更多的 CO, 有可能是换热导

表 4 CHE 充分发展后的热侧混合物特性
Table 4 Properties of hot-side mixture after CHE
full development

参数	数值
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	0.319
$\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	4.516×10^{-5}
$\mu_w/\text{Pa}\cdot\text{s}$	4.115×10^{-5}
β	45°
Pr	0.714

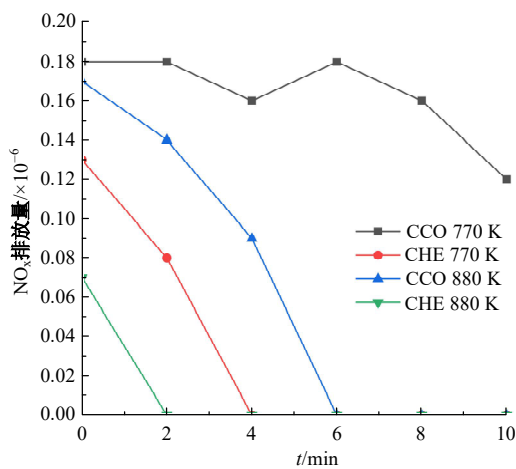


图 14 NO_x排放随时间的关系

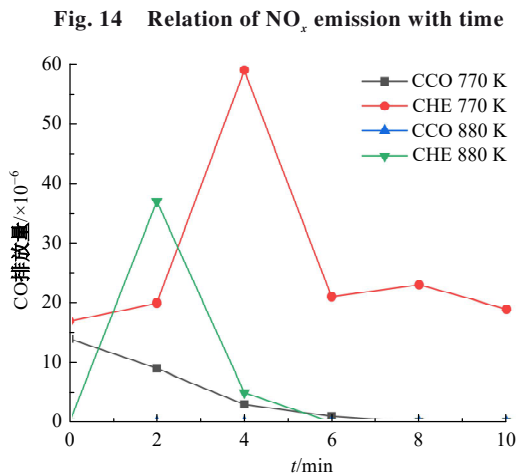


图 15 CO 排放随时间的关系

Fig. 15 Relation of CO emission with time

致温度不均匀,形成了部分低温区,从而产生了较多的CO。但催化剂对CO的氧化反应也有催化作用,随着CHE热侧空气温度随系统温度的升高,催化作用增强,可以有效改善CO的排放。总体而言,CHE的各种排放都比较低。如果CHE能长期稳定地燃烧,也有可能达到NO_x和CO非常低的工作条件。因此,寻找一种稳定可靠的催化剂或能使各项排放都比较低的条件范围,也是今后改进CHE的关键。

3 结 论

(1)CHE 比仅进行换热时的换热效率提高了 10%,并且冷空气侧出口温度比相同换热器的更高,也更接近预热 SOFC 系统的温度要求,因此,在实际应用中 CHE 可以有效缩短系统的启动时间,或在相同的启动时间下拥有更高的燃料利用率。

(2)CHE 的 CH₄ 催化转化率比仅进行催化反应时降低了 4%。提高进气温度、提高催化剂的抗积碳能力或找到可以避免积碳的氧碳比和条件区间是提高 CHE 的 CH₄ 催化转化率的途径,也能再次提高 CHE 的换热效率和稳定运行能力。

(3)在 770 K 的热侧温度下,CHE 达到最高催化转化效率的时间不到 5 min,满足系统启动的需求。CHE 的废气温度远低于传统点火燃烧器的废气温度,可以大大降低其余部件的热负荷,有望降低对其他热力部件的要求和成本。

(4)CHE 的燃料浓度适应区间很广,NO_x、CO 排放量也比较低,并且有望找到两者综合排放都很低的工况。将 CHE 应用于 SOFC 系统的一般热循环中,利用其催化燃烧更易反应的 AOG 气体可能更具潜力。

参考文献:

[1] Kuyper J, Schroeder H, Linnér B. The evolution of the UNFCCC[J]. Annual Review of Environment and Resources, 2018, 43(1): 343-368.

[2] 王灿,张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 2020, 12(6): 58-64.

Wang Can, Zhang Ya-xin. The path to carbon neutral vision and policy system[J]. China Environmental Management, 2020, 12(6): 58-64.

[3] Choudhury A, Chandra H, Arora A. Application of solid oxide fuel cell technology for power generation—a review[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 20: 430-442.

[4] O’Hayre R P, Cha S W, Colella W, et al. Fuel Cell Fundamentals[M]. 3rd Edition. Hoboken: Wiley, 2016.

[5] Zeng Z Z, Qian Y P, Zhang Y J, et al. A review of heat exchange and thermal management methods for temperature gradient reduction in solid oxide fuel cell (SOFC) stacks[J]. Applied Energy, 2020, 280: No.

- 115899.
- [6] Crosbie G M, Murray E P, Bauer D R, et al. Solid oxide fuel cells for direct oxidation of liquid hydrocarbon fuels in automotive auxiliary power units: sulfur tolerance and operation on gasoline[J]. SAE International, 2002, 111(3): 832-839.
- [7] Rechberger J, Kaupert A, Hagerskans J, et al. Demonstration of the first European SOFC APU on a heavy duty truck[J]. Transportation Research Proceedings, 2016, 14: 3676-3685.
- [8] Nissan Motor Company. Nissan SOFC powered vehicle system runs on bioethanol[J]. Fuel Cells Bulletin, 2016, 2016(7): 2-3.
- [9] Bessekon Y, Zielke P, Hagen A, et al. Simulation of a SOFC/Battery powered vehicle[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(3): 1905-1919.
- [10] Crosbie G M, Murray E P, Bauer D R, et al. Solid oxide fuel cells for direct oxidation of liquid hydrocarbon fuels in automotive auxiliary power units: Sulfur tolerance and operation on gasoline[C]//SAE Technical Paper, 2002-0410.
- [11] Botti J J, Grieve M J, MacBain J A. Electric vehicle range extension using an SOFC APU[C]//SAE Technical Paper, 2005-1172.
- [12] Bessekon Y, Zielke P, Hagen A, et al. Simulation of a SOFC/battery powered vehicle[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(3): 1905-1919.
- [13] 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): 1454-1462.
- [14] Martinez A S, Brouwer J, Samuelsen G S. Comparative analysis of SOFC-GT freight locomotive fueled by natural gas and diesel with onboard reformation[J]. Applied Energy, 2015, 148: 421-438.
- [15] Barzi Y M, Ghassemi M, Hamed M H. Numerical analysis of start-up operation of a tubular solid oxide fuel cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(4): 2015-2025.
- [16] 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(增刊 1): 234-238.
- Dai An-na, Xu Lin-feng, Shui An-ze. Research and progress of solid oxide fuel cells[J]. Guisuanyan Tongbao, 2015, 34(Sup. 1): 234-238.
- [17] 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): 3234-3241.
- [18] Shekhawat D, Berry D A, Gardner T H, et al. Effects of fuel cell anode recycle on catalytic fuel reforming[J]. Journal of Power Sources, 2007, 168(2): 477-483.
- [19] 杨博然, 陈志光, 秦朝葵. 固体氧化物燃料电池(SOFC)外围热管理系统研究进展[J]. 城市燃气, 2019, 2019(3): 4-10.
- Yang Bo-ran, Chen Zhi-guang, Qin Zhao-kui. Research progress on the peripheral thermal management system of solid oxide fuel cell (SOFC)[J]. City Gas, 2019, 2019(3): 4-10.
- [20] Baek S, Kim Y, Bae J. Effect of anode-off gas recirculation at solid oxide fuel cell system[C]// ASME 2008 6th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology, Denver, USA, 2008: 645-651.
- [21] Dietrich R U, Oelze J, Lindermeir A, et al. Efficiency gain of solid oxide fuel cell systems by using anode off-gas recycle-results for a small scale propane driven unit[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(17): 7152-7160.
- [22] Yu S, Hong D J, Lee Y D, et al. Development of a catalytic combustor for a stationary fuel cell power generation system[J]. Renewable Energy, 2010, 35(5): 1083-1090.
- [23] Park J, Lim H, Rhee G H, et al. Catalyst filled heat exchanger for hydrogen liquefaction[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2021, 170: No. 121007.
- [24] 韦小雄, 张淑文, 唐萍, 等. 铝制板翅式换热器导流结构优化设计[J]. 化工设备与管道, 2011, 48(1): 13-16.
- Wei Xiao-xiong, Zhang Shu-wen, Tang Ping, et al. Optimal design of inflow structure of aluminum plate-fin heat exchanger[J]. Chemical Equipment and Piping, 2011, 48(1): 13-16.
- [25] Kim J, Myung C, Lee K. Exhaust emissions and conversion efficiency of catalytic converter for an ethanol-

- fueled spark ignition engine[J]. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*, 2019, 13(5): 1211-1223.
- [26] Venkataraman V, Pacek A W, Steinberger W R. Thermal integration of SOFC and plate heat exchanger desorber[J]. *ECS Transactions*, 2015, 68(1): No. 068010221.
- [27] 骆潮明, 李艳霞, 刘中良, 等. 低浓度甲烷在微小燃烧器中的催化燃烧实验[J]. *化工学报*, 2015, 66(增刊 1): 216-221.
- Luo Chao-ming, Li Yan-xia, Liu Zhong-liang, et al. Experimental catalytic combustion of low concentration methane in a tiny burner[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering, China*, 2015, 66 (Sup. 1): 216-221.
- [28] Leah R T, Bone A, Hammer E, et al. Development progress on the ceres power steel cell technology platform: further progress towards commercialization[J]. *ECS Transactions*, 2017, 78(1): 87-95.
- [29] Leah R T, Bone A, Lankin M, et al. Ceres power steel cell technology: rapid progress towards a truly commercially viable SOFC[J]. *ECS Transactions*, 2015, 68(1): No. 068010095.
- [30] He J, Yang Z Q, Ding C L, et al. Methane dehydrogenation and oxidation process over Ni-based bimetallic catalysts[J]. *Fuel*, 2018, 226: 400-409.