

DOI: 10.19666/j.rlfed.202310158

基于 SOFC 尾气供热的甲烷重整制氢反应器 模拟及实验研究

李晓洁¹, 田彭杰¹, 周剑武¹, 夏天¹, 张光学²

(1. 浙江浙能技术研究院有限公司浙江省太阳能利用及节能技术重点实验室, 浙江 杭州 311121;

2. 中国计量大学能源工程研究所, 浙江 杭州 310018)

[摘要] 设计了一种千瓦级新型甲烷重整制氢反应器, 采用固态氧化物燃料电池尾气供热, 充分利用尾气中的余热和可燃成分, 构成紧凑的高效天然气发电系统。采用计算流体力学 (CFD) 对反应器内燃烧及重整反应进行了数值模拟, 结果表明: 固态氧化物燃料电池阳极和阴极尾气能够在反应器中稳定燃烧, 形成 1 486 °C 高温火焰, 为甲烷水蒸气重整反应供热; 重整管内水蒸气和甲烷体积分数沿程不断降低, 由于水蒸气过量, 出口处水蒸气体积分数为 35%, 出口氢气体积分数为 45%, 甲烷转化率达到 90% 左右; 镍催化剂具有很高的导热系数, 因此重整管内外温差小于 15 °C; 利用实验获得了反应器内温度、甲烷体积分数及甲烷转化率等数据, 对比模拟结果验证了数值模拟的准确性。

[关键词] SOFC 尾气; 甲烷重整; 制氢; 计算流体力学

[引用本文格式] 李晓洁, 田彭杰, 周剑武, 等. 基于 SOFC 尾气供热的甲烷重整制氢反应器模拟及实验研究[J]. 热力发电, 2024, 53(4): 28-35. LI Xiaojie, TIAN Pengjie, ZHOU Jianwu, et al. Simulation and experimental study on a methane steam reforming reactor heated by SOFC exhausted gas[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(4): 28-35.

Simulation and experimental study on a methane steam reforming reactor heated by SOFC exhausted gas

LI Xiaojie¹, TIAN Pengjie¹, ZHOU Jianwu¹, XIA Tian¹, ZHANG Guangxue²

(1. Key Laboratory of Solar Energy Utilization and Energy Saving Technology of Zhejiang Province, Zhejiang Energy Group R&D, Hangzhou 311121, China;
2. Institute of Energy Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: A new kilowatt-class methane reforming hydrogen production reactor is designed, using solid oxide fuel cell exhaust gas for heat supply. The system can make full use of the waste heat and combustible components in the exhaust gas to form a compact and efficient natural gas power generation system. Computational fluid dynamics was used to numerically simulate the combustion and reforming reactions in the reactor. The results show that the solid oxide fuel cell anode and cathode exhaust gases can be stably burned in the reactor to form a high-temperature flame of 1 486 °C to provide heat for the methane steam reforming reaction. In the reaction tube, the concentrations of H₂O and CH₄ continue to decrease along the way. Due to excess water vapor, the H₂O volume concentration at the outlet is 35%, the hydrogen concentration volume fraction is 45%, and the methane conversion rate reaches 90%. Nickel catalyst has a high thermal conductivity, so the temperature difference between the inside and outside of the reaction tube is less than 15 °C. At the same time, experimental research was used to obtain data such as temperature, methane concentration and methane conversion rate in the reactor. The simulation results were compared to verify the accuracy of the numerical simulation.

Key words: SOFC exhausted gas; methane steam reforming; hydrogen production; CFD

收稿日期: 2023-10-12

基金项目: 浙江省尖兵计划项目 (2023C01124); 浙能集团科技项目 (ZNKJ-2022-051)

Supported by: Zhejiang Province Top Soldier Program (2023C01124); Zhejiang Energy Group Science and Technology Project (ZNKJ-2022-051)

第一作者简介: 李晓洁 (1993), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为燃料电池系统集成、流程模拟及光伏系统经济性分析等,

lixiaojie@zhenergy.com.cn。

通信作者简介: 张光学 (1982), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为超细颗粒物排放控制、气固多相流及 CFD 数值模拟仿真等,

zhangguangxue@cjlu.edu.cn。

氢气作为清洁高效的二次能源,具有资源丰富、热值高、利用形式多样、可作为储能介质及安全性高等优点,是实现能源转型与碳中和的重要能源载体^[1-2]。随着世界面对气候变化和自然灾害加剧的压力持续增大,氢能得到了各国广泛关注^[3-4]。我国陆续制定《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》和《“十三五”交通领域科技创新专项计划》,确定了氢能在能源构成中的战略地位,并于2019年首次将氢能写入《政府工作报告》。

氢能下游应用包括燃料电池、内燃机及锅炉燃烧等。其中,固态氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)是一种电化学转换设备,能够将燃料直接转换为电能,能量转化效率高,并具有全固态、环境友好及可模块化等优点^[5]。由于SOFC工作温度高,还可组成热电联产,进一步提高能源利用效率。氢气是SOFC的理想燃料之一,发电后产物只有水,无其他污染,且不会造成催化剂失活等问题^[6-7]。

制氢方法有很多,包括化石燃料制氢、水电解制氢和工业副产制氢等^[8-9]。目前,工业中普遍使用的是甲烷水蒸气重整技术,产量达到全球氢能需求的50%^[10],相关研究较为广泛。王阳峰等^[11]开发了Ni作为活性组分的网状催化剂,具有更大比表面积,在高空速下甲烷转化率达到95%。李艳^[12]设计了质子交换膜燃料电池的部分氧化制氢系统,以Ni/Al₂O₃为催化剂,在固定床上考察了转换率和选择性。李传统^[13]通过实验发现提高温度和压力可以改善制氢反应效果,压力0.6 MPa时制氢转化率可达到78%。代磊等^[14]采用变压吸附提高制氢效果,在温度650℃、水碳比为6的条件下,甲烷转化率达到77%。王锋等^[15]对核能制氢技术进行研究,发现在高温下压力对重整性能影响不大,而较高的水碳比和重整温度能够有效提高制氢性能。萧蕙等^[10]对CaO吸附剂强化甲烷水蒸气重整制氢反应技术进行了分析,发现吸附剂性能和反应条件是决定制氢效果的重要因素。Cipiti等人^[16]开发了一种小型聚合物电解质燃料电池制氢系统,采用自热重整及Pt催化剂,产量为2~5 m³/h。Echigo等人^[17]为千瓦级聚合物电解质燃料电池系统开发了天然气制氢系统,使用新型催化剂,产物中CO体积分数可降至1×10⁻⁶。Lee等人^[18]为1 kW聚合物电解质膜燃料电池开发了天然气重整反应器,产氢速率为1 m³/h,热效率为78%,反应器体积仅14 L。上述研究中,大多采用燃料燃烧或电加热方式为制氢反

应供热,能耗较大。如果采用SOFC尾气燃烧后供热,制氢经济性将显著提高。

另外,一些研究者采用数值模拟对甲烷水蒸气重整制氢进行研究。雷晓健等^[19]建立了工业规模制氢转化炉一维数学模型,发现压力对甲烷转化率影响不大,而较高的水碳比和温度能够提高氢气体积分数。冯靓婧等^[20]采用Aspen Plus软件建立了甲烷蒸汽重整制氢模型,发现氢气产率与压力呈指数曲线关系。彭昂^[21]采用Aspen Plus软件研究了燃料电池热电联产中的天然气重整制氢系统,优化了水碳比和氧碳比等参数。黄兴等^[22]数值研究了太阳聚集辐照下甲烷水蒸气重整制氢技术,发现入口处反应很强,后续随着反应物体积分数降低反应不断减弱,优化后甲烷转化率达到96%。冶麟等^[23]模拟了以天然气蒸汽重整氢气为燃料的高温质子交换膜燃料电池系统,发现当随着电堆和重整反应温度均提高到700℃时,系统效率最高可达46.5%。贺天智等^[24]研究了甲烷蒸汽重整制氢反应路径,发现甲烷裂解制氢过程中CH₃是重要的中间产物,在反应初期浓度很高。Nguyen等人^[25]对套管式蒸汽甲烷重整反应器进行了模拟,发现套管间隙尺寸和火焰形状对产率、热效率和催化剂内部温度分布均匀性的影响很大,进而影响产氢性能。以上这些数值模拟大多只对重整管内的化学反应进行研究,鲜有包括整个进料、外部供热和重整反应等完整环节的数值模拟分析。本文设计了一种千瓦级新型甲烷重整制氢反应器,采用SOFC尾气为反应器提供燃料和热量,充分利用了尾气中的可燃成分,具有很高的经济性,并能够将制氢系统及燃料电池高度整合,构成紧凑的高效天然气发电系统。通过计算流体力学(CFD)对重整制氢反应器内的尾气燃烧及重整反应进行了耦合数值模拟,得到了内部流场、温度、组分及化学反应等分布情况,并通过实验结果对模拟进行了验证。该研究结果为甲烷重整制氢技术提供了新思路。

1 重整器结构设计及数值模拟方法

1.1 重整器结构设计

本文设计的重整制氢反应器采用SOFC电堆尾气作为热源,电堆燃料利用率为60%~70%。剩余未燃尽的CO和H₂等可燃成分随着高温阳极尾气一同排出,阴极尾气主要成分是空气,因此可以作为燃料和氧化剂进行燃烧,为甲烷水蒸气重整反应供热。

重整制氢反应器结构如图1所示。SOFC电堆高温阳极和阴极尾气均从反应器下部通入，其中阴极尾气通道布置了多孔均流板，通过提高阻力来增强流速分布均匀性。尾气在燃烧区形成高温火焰，经过多重套管折流后，对环形布置的重整管进行对流及辐射加热，促进重整反应的进行。重整气入口主要成分是甲烷和水蒸气，从反应器下部进入环形集箱，随后从下往上通入数个布置镍基催化剂的重整管，最后从上部排出。燃烧区上部布置了陶瓷，具有很低的导热系数及较高比热容，提高了反应器内部温度及燃烧稳定性。

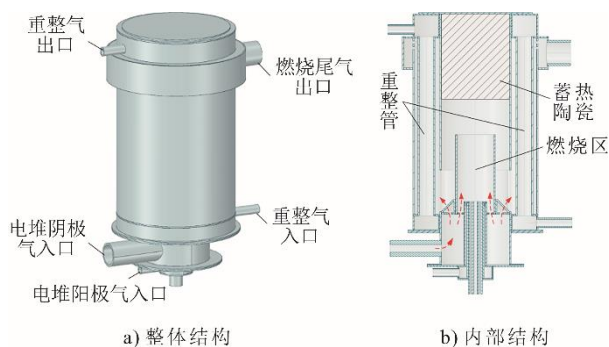


图1 重整制氢反应器结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of the reforming hydrogen production reactor

1.2 几何模型及网格

重整制氢反应器按1:1建立的几何模型如图2所示，并采用Ansys Fluent Meshing软件划分多面体网格。

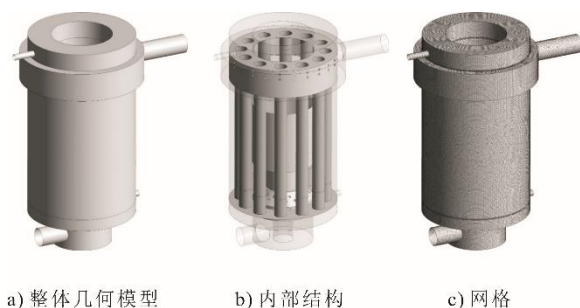


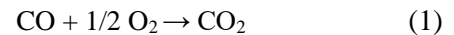
图2 几何模型及网格

Fig.2 Geometric model and mesh generation

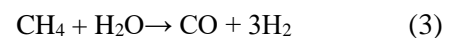
为验证网格无相关性，分别采用网格数量为123万、254万和370万进行模拟计算，发现254万网格与370万网格得到的甲烷转化率差异小于0.1%，因此后续计算均采用370万网格。

1.3 数值模型及边界条件

反应器内部包括2种截然不同的化学反应。在燃烧室内，主要反应是高温阳极和阴极尾气的放热燃烧，为重整反应供热，主要化学方程式为：



重整管内，进行的是吸热的甲烷水蒸气高温重整反应，总反应方程式为：



重整反应式(3)在常温常压下是慢速反应，工业中一般使用镍催化剂进行加速，其反应参数受催化剂化学成分组成、比表面积、制备方式及孔隙率等多重因素影响。模拟前，进行了催化剂固定床活性测试，在温度920℃、水碳比3.5、空速1800 h⁻¹时甲烷转化率为91%。对该反应进行模拟，当活化能为55 kJ/mol时甲烷转化率与实验值一致。因此，后续模拟中该催化剂活化能取55 kJ/mol。

湍流模型选用可实现k-ε模型，相比于标准k-ε模型，其耗散率是从准确涡度波动输运方程推导而来，对复杂旋流运动模拟精度更高；辐射换热选用DO模型，该模型适用于所有光学深度范围的辐射问题，并能考虑三原子气体的辐射效应及气体间的辐射换热。催化剂固定床采用多孔介质模型模拟阻力分布，并通过多孔介质平衡性传热模型计算气体在催化剂内部的换热量。催化剂孔隙率0.59，导热系数33 W/(m·℃)^[25]。

数值模拟采用Ansys Fluent 2019 R3软件平台，求解器中压力-速度耦合方式采用基于压力的SIMPLE算法，对流项采用二阶迎风离散格式，并采用亚松弛的方式加强计算稳定性，迭代至能量及辐射方程残差低于10⁻⁶，其余方程残差低于10⁻³。计算边界条件见表1。

表1 重整器边界条件

Tab.1 Boundary conditions of the reformer

入口名称	各组分流速/(L·min ⁻¹)							温度/℃	
	CH ₄	H ₂ O	CO	CO ₂	H ₂	O ₂	N ₂		
重整进气	2.90	9.10						12.00	550
电堆阳极尾气	0	12.15	1.74	1.16	2.75			17.80	444
电堆阴极尾气						27.95	118.50	146.45	691

1.4 实验验证

完成数值模拟后,按几何模型尺寸,加工了样机,并进行实验研究,实验参数与表1一致。

采用 K 型热电偶和 KeySight 34972a 数据采集仪测量重整器内温度,并利用气相色谱仪(岛津 LabSolutions)对重整反应器出口的气体进行分析。

2 计算结果及分析

2.1 压力及速度场分布

图3为重整反应器内竖截面压力和速度分布情

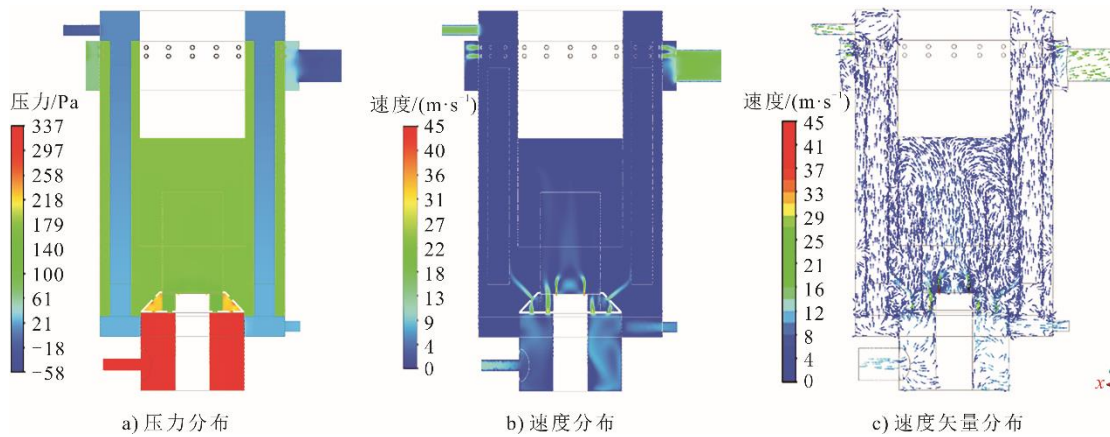


图3 重整反应器内压力及速度分布

Fig.3 Pressure and velocity distribution in the reforming reactor

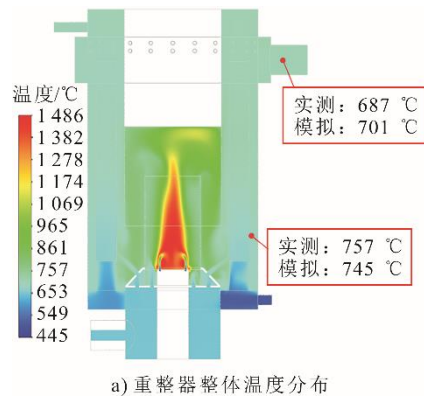
2.2 温度场分布

重整反应器内温度分布及高温火焰分布如图4所示。由图4a)可见,阳极尾气与阴极尾气在燃烧器上部发生反应,形成稳定燃烧高温区,最高燃烧温度达到1486℃。燃烧产生的高温烟气在重整反应器内通过辐射和对流对重整管进行加热,促进了甲烷水蒸气反应进行,最后温度降低至700℃左右排出。由图4b)可见,火焰形状和长度合理,但由于反应器进出口管道位置不是对称结构,因此火焰也并非完全对称,存在一定的偏斜。此外,重整管下部的温度实测为757℃,与数值模拟结果745℃吻合度较好,表明数值模拟准确性高。

图5为重整管内部竖截面的温度分布。由图5可见,重整管内部竖截面呈现初始温度低、后期温度高的特点。由于镍基催化剂具有良好的导热性能,因此重整管内外温差不大。由于重整管上部吸热的甲烷水蒸气重整反应已基本完成,烟气加热使重整管内温度升高,逐步接近烟气温度。

重整管温度沿程分布情况如图6所示。

况。从图3a)可见:在甲烷水蒸气反应区域,由于流速低,因此总压降较低,约为40 Pa,其中10 Pa产生于催化剂固定床内;在燃烧区域,由于燃烧器设计了多孔板,因此阳极尾气入口侧阻力较大,为245 Pa;同样由于存在小孔,阴极尾气入口侧阻力较大,达到325 Pa。由图3b)可见:在阳极和阴极尾气入口的小孔处均产生了高速射流,最高流速可达45 m/s;各小孔处流速差异不大,表明均流板效果良好。由图3c)可见,燃烧器出口中心处局部存在小范围的回流区,符合预期设计,这对尾气燃烧的稳定性有一定帮助。



a) 重整器整体温度分布



b) 高温火焰分布

图4 重整反应器内温度分布

Fig.4 Temperature distribution in the reforming reactor

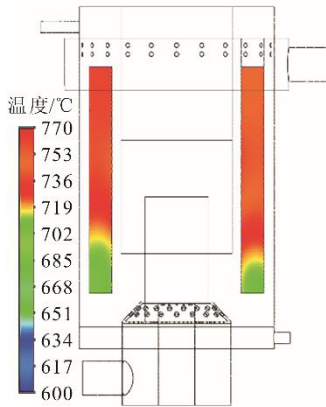


图 5 重整管内温度分布

Fig.5 Temperature distribution in the reforming tubes

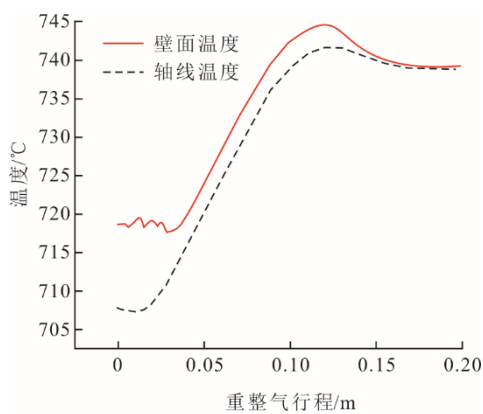


图 6 重整管内温度沿程分布横坐标为重整气在催化剂中的行程

Fig.6 Temperature distribution in the reforming tube along the course

由图 6 可见：由于重整气在进入反应区域前，已经过高温烟气预热，至催化剂区域时温度可达 700 °C 左右；随后，在催化剂的作用下，发生强烈吸热的甲烷水蒸气重整反应，因此进口初始段温度并未发生明显提升；在重整管中端，温度在高温烟气加热下迅速提高，最高达到 745 °C 左右。另外，模拟发现，重整管内的温度变化主要体现在沿程方向，而在同一个高度位置的径向温差（即壁面与中心温差）较小，不超过 15 °C。

图 7 为重整管外壁面温度分布。由图 7 可见，重整管外壁面温度为 707~760 °C，高温区主要位于重整管的中上部及向火侧，且各重整管温度分布不均匀。这是由于重整器并非严格轴向对称结构，火焰存在轻微偏斜所致。

2.3 组分及化学反应

重整器竖截面的 H_2 、 CO 、 O_2 、 CH_4 、 CO_2 和 H_2O 等组分分布情况如图 8 所示。其中， H_2 和 CO 一方面是甲烷水蒸气重整反应的产物，另一方面也

是阳极尾气的主要可燃成分。

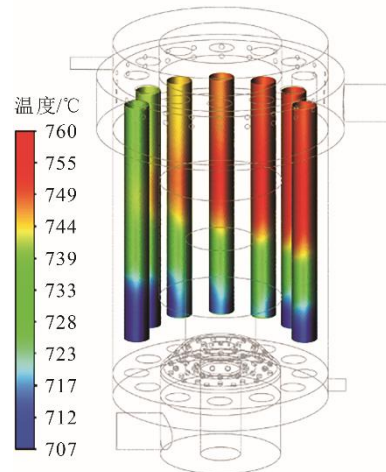


图 7 重整管外表面温度场分布

Fig.7 Temperature field distribution on the outer surface of the reforming tubes

由图 8 可见： H_2 和 CO 的体积分数在重整管内沿程逐步提高，而在燃烧器火焰区域迅速消除，表明燃烧效率很高；对应 CH_4 和 H_2O 体积分数在重整管内逐步降低，由于水蒸气过量（水碳比为 3.1），因此重整管出口仍有较高体积分数水蒸气；氧气是阴极尾气的主要组分之一，在燃烧器上部大量消耗，体积分数急剧降低，不过由于阴极尾气中的氧气过量，重整器出口氧气体积分数为 14%。与重整管内较好的气体分布对称性不同的是，燃烧器顶部左右两侧的氧气、二氧化碳及水蒸气体积分数分布不均匀。这是由于阳极气与阴极气的入口均布置在左侧，且火焰向右边偏斜引起的。

重整管内催化剂有效区域中组分沿程变化如图 9 所示。由图 9 可见，反应物 H_2O 和 CH_4 体积分数沿高度方向不断降低。这是由于水蒸气过量，甲烷首先接近耗尽，但是出口处仍会有较高体积分数的 H_2O 。相应的，反应产物 H_2 和 CO 体积分数则逐步提高，出口处氢气体积分数达到 45% 左右。这和实验测量结果 42% 比较吻合，实验过程可能存在一些副反应，因此氢气体积分数略低于模拟值。模拟得到的 CO 体积分数也与实测结果接近。

重整管内催化剂有效区域的反应速率及甲烷转化率沿程变化如图 10 所示。由图 10 可见，在经过进口段短暂调整后，甲烷与水蒸气重整反应速率迅速达到最大值 $1.6 \times 10^2 \text{ kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ 。

这是由于该反应主要受反应物浓度和温度的影响，而进口区域的反应物浓度最大。随后，虽然重整管温度升高，但反应物浓度降低，因此反应速

率仍逐步降低。从甲烷转化率来看亦是如此，进口区域甲烷转化率增加较快，后期增加减缓。数值模

拟表明，甲烷转化率可达 90%，与实验值 87% 差异不大。

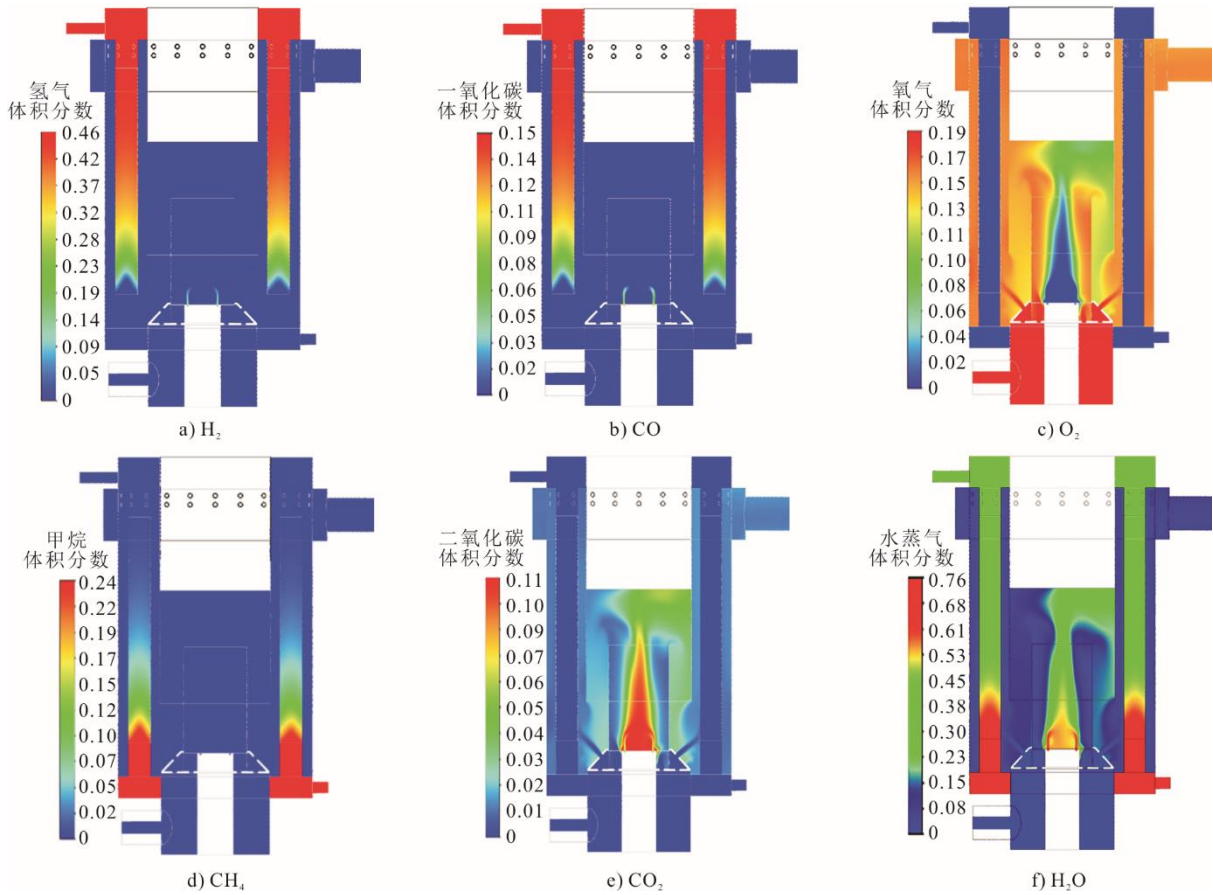


图 8 重整器内组分分布

Fig.8 Distribution of components in the reforming reactor

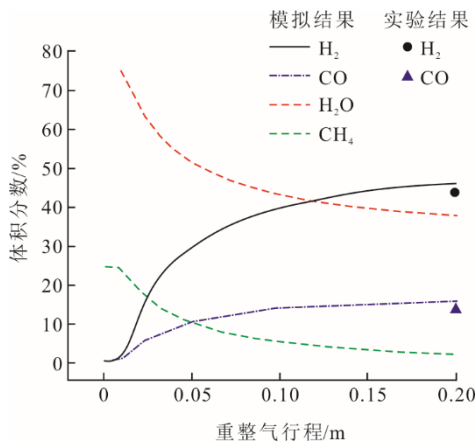


图 9 重整管内部气体组分沿程分布

Fig.9 The inside gas components along the reforming tubes

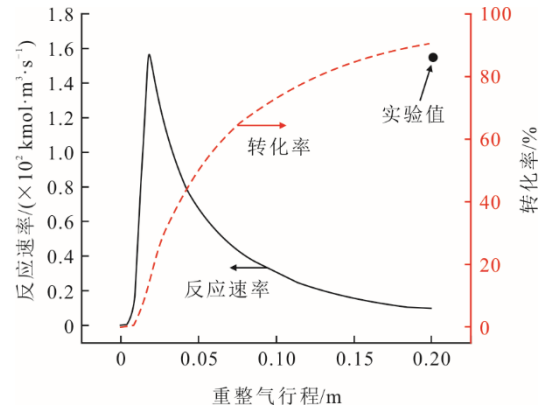


图 10 重整管内反应速率和甲烷转化率

Fig.10 Reaction rate and methane conversion in the reforming tubes

图 11 为甲烷水蒸气重整反应速率及吸热率分布。

由图 11a)可见，重整管进口附近区域反应速率最高，沿程逐步降低，同时得益于镍催化剂的高导

热特性，催化剂内部的反应速率分布较为均匀，中心与边缘差异非常小。由图 11b)可见，吸热最显著的区域出现在重整反应最剧烈的位置，并且管中心的吸热率大于四周。

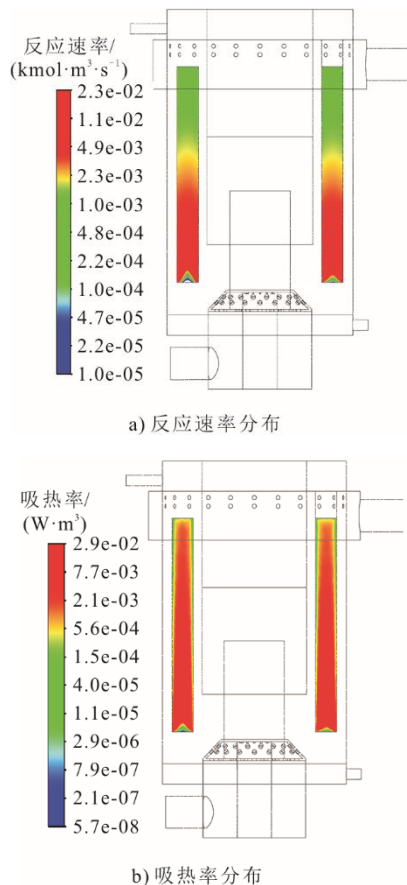


图 11 甲烷水蒸气重整反应速率及吸热率分布
Fig.11 Distribution of methane water vapor reforming reverse rate and heat absorption rate

3 结 论

本文设计了一种采用 SOFC 尾气供热的千瓦级新型甲烷重整制氢反应器,采用 CFD 对燃烧及重整反应进行数值模拟得到以下结论。

1) SOFC 的阳极和阴极尾气在反应器的燃烧器区域上部形成了稳定火焰区,最高温度为 1 486 °C。模拟发现火焰存在轻微偏斜,因此结构设计上应增加对称性,以减轻偏斜。由于镍催化剂具有很高的导热系数,重整管内外温度差小于 15 °C,有助于提高能量利用率。

2) 在重整管内, H₂O 和 CH₄ 体积分数沿程不断降低,由于水蒸气过量,出口处仍有约 35% 体积分数的 H₂O。重整器出口氢气体积分数达到 45%,与实验结果 42% 比较吻合。模拟得到的 CO 体积分数也与实测结果比较接近。出口处甲烷转化率达到 90%。SOFC 尾气供热制氢工艺具有很好的可行性。

【参 考 文 献】

[1] 邱玥,周苏洋,顾伟,等。“碳达峰、碳中和”目标下混氢天然气技术应用前景分析[J].中国电机工程学报,

2022, 42(4): 1301-1321.

QIU Yue, ZHOU Suyang, GU Wei, et al. Application prospect analysis of hydrogen enriched compressed natural gas technologies under the target of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1301-1321.

- [2] YUE M, LAMBERT H, PAHON E, et al. Hydrogen energy systems: a critical review of technologies, applications, trends and challenges[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2021, 146: 111180.
- [3] 邹才能, 李建明, 张茜, 等. 氢能工业现状、技术进展、挑战及前景[J]. 天然气工业, 2022, 42(4): 1-20.
- ZOU Caineng, LI Jianming, ZHANG Qian, et al. Industrial status, technological progress, challenges and prospects of hydrogen energy[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(4): 1-20.
- [4] 赵永志, 蒙波, 陈霖新, 等. 氢能源的利用现状分析[J]. 化工进展, 2015, 34(9): 3248-3255.
- ZHAO Yongzhi, MENG Bo, CHEN Linxin, et al. Utilization status of hydrogen energy[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2015, 34(9): 3248-3255.
- [5] SHARMA M, RAKESH N, DASAPPA S. Solid oxide fuel cell operating with biomass derived producer gas: Status and challenges[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 450-463.
- [6] 吕秀清, 孙海珍, 安静, 等. 直接甲烷固体氧化物燃料电池 Ni-BZCYYb 阳极抗积炭性能研究[J]. 燃料化学学报, 2023, 51(4): 519-527.
- LYU Xiuqing, SUN Haizhen, AN Jing, et al. Improved coking resistance of direct methane solid oxide fuel cell with Ni-BZCYYb anode[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2023, 51(4): 519-527.
- [7] 韩婷婷, 吴玉玺, 解子恒, 等. 固体氧化物燃料电池镍基阳极积碳机理及性能提升策略研究进展[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(6): 1931-1942.
- HAN Tingting, WU Yuxi, XIE Ziheng, et al. Recent advances in carbon deposition mechanism and performance improvement of Ni-based anode for solid oxide fuel cells[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(6): 1931-1942.
- [8] 孙晖, 孟祥海, 魏景海, 等. 绿电制氢生产氨的新场景与实践[J]. 化工进展, 2023, 42(2): 1098-1102.
- SUN Hui, MENG Xianghai, WEI Jinghai, et al. New scene for ammonia synthesis by green hydrogen[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(2): 1098-1102.
- [9] 孙德强, 张俊武, 吴小梅, 等. 我国氢能产业发展现状、挑战及对策[J]. 中国能源, 2022, 44(9): 27-35.
- SUN Deqiang, ZHANG Junwu, WU Xiaomei, et al. Development status, challenges and countermeasures of hydrogen energy industry in China[J]. Energy of China, 2022, 44(9): 27-35.
- [10] 萧蕙, 吴素芳. 反应吸附强化甲烷水蒸气重整制氢反应技术概述[J]. 化学反应工程与工艺, 2021, 37(1): 89-96.
- XIAO Hui, WU Sufang. An overview on H₂ production technology from reaction sorption enhanced steam methane reforming[J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2021, 37(1): 89-96.
- [11] 王阳峰, 丁强, 陈锋, 等. Ni/γ-Al₂O₃/FeCrAl 丝网催化剂的制备及其甲烷水蒸气重整制氢催化性能[J]. 石油炼制与化工, 2020, 51(8): 30-36.

- WANG Yangfeng, DING Qiang, CHEN Feng, et al. Preparation of Ni/ γ -Al₂O₃/FeCrAl mesh-type catalyst and its catalytic performance for methane steam reforming to produce hydrogen[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2020, 51(8): 30-36.
- [12] 李艳. 城市天然气制取 PEMFC 用氢系统的设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005: 1.
- LI Yan. Design of the hydrogen production system from city natural gas for PEMFC[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005: 1.
- [13] 李传统. 甲烷制备高纯度氢气的实验研究[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2004(4): 28-31.
- LI Chuantong. Studies on producing hydrogen with high concentration from methane[J]. Journal of Nanjing Normal University (Engineering Technology Edition), 2004(4): 28-31.
- [14] 代磊, 李明, 胡鸣若. 用于 PEMFC 的天然气水蒸气制氢系统[J]. 化工学报, 2009, 60(增刊 1): 90-94.
- DAI Lei, LI Ming, HU Mingruo. Hydrogen production system for PEMFC using natural gas steam reforming [J]. CIESC Journal, 2009, 60(Suppl.1): 90-94.
- [15] 王锋, 周菁, 李隆键. 高温氢气加热甲烷蒸汽重整制氢热力学分析[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(8): 1581-1585.
- WANG Feng, ZHOU Jing, LI Longjian. Thermodynamic analysis of methane steam reforming heated by high temperature helium for hydrogen production[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2014, 35(8): 1581-1585.
- [16] CIPITÌ F, RECUPERO V, PINO L, et al. Experimental analysis of a 2 kWe LPG-based fuel processor for polymer electrolyte fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2006, 157(2): 914-920.
- [17] ECHIGO M, SHINKE N, TAKAMI S, et al. Performance of a natural gas fuel processor for residential PEFC system using a novel CO preferential oxidation catalyst[J]. Journal of Power Sources, 2004, 132(1): 29-35.
- [18] LEE D, LEE H C, LEE K H, et al. A compact and highly efficient natural gas fuel processor for 1 kW residential polymer electrolyte mem-brane fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 2006, 165(1): 337-341.
- [19] 雷晓健, 王元华, 张英, 等. 甲烷蒸汽重整制氢反应器的模拟与分析[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2017, 42(5): 76-83.
- LEI Xiaojian, WANG Yuanhua, ZHANG Ying, et al. Simulation and analysis of reactor for methane steam reforming[J]. Natural Gas Chemical Industry (C1 Chemistry and Chemical Industry), 2017, 42(5): 76-83.
- [20] 冯靓婧, 曹长青. 甲烷蒸汽重整制氢过程的数值模拟[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2015, 36(1): 57-61.
- FENG Liangjing, CAO Changqing. Numerical simulation of methane steam reforming for hydrogen production[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 36(1): 57-61.
- [21] 彭昂. kW 级燃料电池热电联产系统中天然气重整制氢体系的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 1.
- PENG Ang. Hydrogen production from natural gas for fuel cell based micro-CHP system[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011: 1.
- [22] 黄兴, 赵博宇, 张昊, 等. 聚集辐照下甲烷水蒸气重整制氢过程参数研究[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(4): 58-65.
- HUANG Xing, ZHAO Boyu, ZHANG Hao, et al. Parameters research for hydrogen production of methane steam reforming under concentrated radiation[J]. Oil & Gas Chemical Industry, 2021, 50(4): 58-65.
- [23] 冶麟, 贾滨, 尹燕. 基于重整氢气的高温 PEMFC 系统的模拟分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 48(4): 341-346.
- YE Lin, JIA Bin, YIN Yan. Modeling and analysis of ht-pemfc system based on reformed hydrogen[J]. Journal of Tianjin University (Natural Science and Engineering Technology Edition), 2015, 48(4): 341-346.
- [24] 贺天智, 蔡磊, 管延文, 等. 甲烷蒸汽重整制氢反应路径研究[J]. 煤气与热力, 2020, 40(3): 34-44.
- HE Tianzhi, CAI Lei, GUAN Yanwen, et al. Study on reaction pathways of steam methane reforming for hydrogen production[J]. Gas & Heat, 2020, 40(3): 34-44.
- [25] NGUYEN D D, NGO S I, LIM Y I, et al. Optimal design of a sleeve-type steam methane reforming reactor for hydrogen production from natural gas[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(3): 1973-1987.

(责任编辑 杨嘉蕾)