

甲醇固体氧化物燃料电池平管型电堆与系统的变工况性能模拟

王紫寒^{1,2}, 杨 钧^{2,3}, 桑君康², 刘 墨², 官万兵², 蔡文远³, 纪育博⁴, 罗 象⁵, 吴 韬⁵

(1. 宁波大学材料科学与化学工程学院, 浙江 宁波 315211; 2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江省先进燃料电池与电解池技术重点实验室, 浙江 宁波 315201; 3. 浙江氢邦科技有限公司, 浙江 宁波 311199; 4. 宁波华润兴光燃气有限公司, 浙江 宁波 315207; 5. 宁波诺丁汉大学理工学院, 浙江 宁波 315199)

摘 要: 随着全球能源结构转型的推进, 固体氧化物燃料电池(SOFC)因其高效、清洁的能源转换特性成为研究热点。甲醇作为液态氢载体, 具有储运安全、来源广泛等优势, 其重整制氢耦合 SOFC 系统可规避氢气储运难题, 提升能源利用效率。本工作针对甲醇蒸汽重整耦合平管型 SOFC 电堆系统, 研究开发了一种基于吉布斯自由能最小化的平管型 SOFC 电堆模型, 该模型执行热量和质量平衡, 并在电压计算中考虑了欧姆、活化和浓度极化损失, 可以预测不同运行条件下甲醇 SOFC 的发电特性, 通过对比模拟计算结果与使用甲醇运行的平管型 SOFC 电堆实验数据验证了该模型的准确性。本工作还对电堆燃料利用率、电流密度和蒸汽与可燃碳(甲醇)的摩尔比等参数开展了敏感性分析, 以深入了解主要变量对系统的影响。为甲醇 SOFC 系统的优化设计与稳定运行提供了理论与实验依据, 对推动清洁能源高效利用具有重要意义。

关键词: 固体氧化物燃料电池; 甲醇; 系统模拟; 实验; 燃料利用

中图分类号: TM911.4 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2025)10-2963-10

网络出版时间: 2025-09-09



氢能已成为中国能源发展战略的重要方向。可持续的氢能体系需要高效制氢、规模化储氢和运氢, 以及便捷高效地用氢等技术来支撑^[1-2]。然而, 氢气难以在常温压缩液化, 且爆炸极限范围很宽(4%~75%), 由此导致的规模化储运难题极大地限制了氢能技术的推广应用。与纯氢相比, 甲醇拥有诸多优势: 1) 甲醇在常温呈液态, 易于存储和运输; 2) 甲醇来源广泛且价格低廉; 3) 甲醇含氢量高^[3]。因此, 甲醇燃料作为氢气的载体备选之一而备受关注。

燃料电池由于其清洁、高效及可靠性高等特点被广泛认为是未来最有应用价值的可再生能源技术之一^[4]。在各种类型的燃料电池中, 高温固体氧化物燃料电池(SOFC)因其较高的能量转换效率和燃料灵活性而显示出巨大的应用潜力^[5]。甲醇重整反应的温度范围在 220~260 °C 之间, 作为 SOFC 的燃料使用时该反应可以有效地利用 SOFC 发电余热, 从而提高系统发电效率。因此, 甲醇 SOFC 已成为 SOFC 发电技术研发的重要方向之一。

由于甲醇具有在高温易发生积碳反应的特性, 因此, 在其进入 SOFC 电堆工作之前, 通常会有燃料预处理环节。甲醇燃料的预处理方式会显著影响 SOFC 的发电性能。Tapiero 等^[6]研究了以甲醇蒸汽重整(MSR)、甲醇分解(MD) 和氨分解(AD)所产生的重整产物作为燃料对电池性能所造成的影响, 提出了“临界功率密度”用于比较不同类型的 SOFC 燃料利用率, 发现使用 MD 的产物可得到最佳发电性能。Xu 等^[7]开发了一个 2D 模型来模拟甲醇燃料 SOFC 中的甲醇分解反应、水煤气变换反应、电化学反应, 以及传热和传质过程, 模拟出甲醇蒸汽重整产物运行的固体氧化物燃料电池的热特性, 发现提高燃料入口温度对电功率提升最为显著。Zhao 等^[8]构建了基于太阳能甲醇重整的甲醇重整固体氧化物燃料电池-湿空气透平冷热电联产(SOFC-HAT-CCHP)系统, 发现该系统的总发电效率、总烟效率和热效率分别为 57.2%、63.0%和 87.1%, 与参考系统相比, 该系统每千瓦煤炭的发电量提高了

收稿日期: 2025-02-14。 修订日期: 2025-03-26。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2500402)。

第一作者: 王紫寒(1998), 男, 硕士研究生。

通信作者: 杨 钧(1982), 男, 博士, 研究员。

Received date: 2025-02-14. Revised date: 2025-03-26.

First author: WANG Zihan (1998-), male, Master candidate.

E-mail: 2544100512@qq.com

Correspondent author: YANG Jun (1982-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: yangjun@nimte.ac.cn

15.5 g 煤的发电量。Meng 等^[8]提出了一种由 SOFC 和质子交换膜燃料电池(PEMFC)组成的混合系统,用于提高甲醇发电系统的发电效率,兼容了联合燃烧系统和尾气预热系统的优点,使得系统总电功率可达 230 kW 以上,总效率可达 61%。Duong 等^[9]研究提出了一种集成 SOFC、燃气轮机(GT)、蒸汽朗肯循环和有机朗肯循环的热电联产系统,对比了直接使用氨和甲醇作为燃料的性能,结果表明:在保持等效的输出功率条件下,系统的能源效率分别显著提高了 12.64%和 10.66%,同时强调了燃料利用率和废热回收对系统热力学性能有着重要影响。以上结果为甲醇 SOFC 发电系统的构成指出了基本方向。Yao 等^[10]以一艘 25 000 吨级商用船运输为主题研究开发了一种基于 SOFC 甲醇外重整耦合燃气轮机的碳捕集混合动力发电系统,该发电系统将超临界 CO₂ 循环与有机朗肯循环相结合,以优化余热的利用,并采用化学吸收方法进行碳捕集,采用了遗传算法,通过多目标优化来优化系统的性能,优化结果表明,该系统的净输出功率达到 4 743.81 kW,碳捕获率为 81.52%,能源效率为 60.56%,发电成本为 0.087 27 dollar/(kW·h)。Taweekayujan 等^[11]提出了一种集成了甲醇的吸附增强化学回路重整、高温质子交换膜燃料电池和有机朗肯循环的发电系统,通过利用热力学和热经济学优化来提供高质量的废热以及提高经济生存能力,研究表明,通过增加催化剂提高燃料的摩尔速率,增强了发电效率,但成本提高。对于燃料电池部分,优化氧气流量比,电流密度和温度提高了性能并降低成本。Yuan 等^[12]提出了一种用于燃料的原位蒸汽重整以及 PEMFC 发电的集成系统,通过逐层利用废热和系统的整合,使燃料消耗降低,并提高了系统的发电效率,在设计工作条件下,系统的发电效率和充电效率分别为 44.59%和 39.70%。

Sang 等^[13]研究了一种高性能平管 SOFC 堆的设计,该结构兼具平板型电池与管型电池的优点。在 750 °C 测试,在燃料电池模式下峰值功率密度高达 1.222 W·cm⁻²,在电解池模式下平均电压达到 1.3 V,电流密度达到 1.283 A·cm⁻²,结论表明了平管固体氧化物电池在高效发电和电解储能应用中的潜力,同时达到了迄今为止平管固体氧化物电池堆中的最高值。Liu 等^[14]研究了平管 SOFC 电堆在氧化还原和热循环过程中的电池性能和降解机制,研究表明,以氢气为燃料该电堆可以抵抗热循环过程中的热冲击和氧化还原循环过程中 Ni 氧化引起的

体积变化。平管型 SOFC 电池的阳极支撑体包含了 10 余条中空管道,构成了微通道反应器,有利于甲醇的内重整反应,可大幅抑制甲醇积碳问题,从而提升发电特性与耐久性。Wang 等^[15]研究了使用直接内部干重整甲醇的平管型 SOFC 发电,实现了在 750 °C,CO₂ 和 CH₃OH 摩尔比为 1 和 2,电池以 200 mA·cm⁻² 的恒定电流密度稳定运行 500 h。

虽然有对甲醇 SOFC 系统的模拟计算,但鲜有针对平管型 SOFC 电堆与系统使用甲醇燃料发电特性的模拟研究。本工作通过对比甲醇重整气与氢气这 2 种不同燃料的平管型 SOFC 电堆发电特性,并基于实际数据建立模型进行模拟计算,研究了平管型 SOFC 电堆使用甲醇重整气的发电特性。

1 实验

使用浙江氢邦科技有限公司批量生产的工业尺寸阳极支撑平管型 SOFC 电堆(5 片电池)进行实验测试,电池的尺寸为 15 cm×6 cm,有效面积为 5 cm×70 cm。电池的阳极支撑层(厚度=2.8 mm)和阳极功能层(10 μm)为氧化镍-钇稳定氧化锆(NiO-YSZ),电解质(10 μm)为 YSZ,阻隔层(2 μm)为钐掺杂氧化铈(GDC),阴极(23 μm)为镧锶钴铁-钐掺杂氧化铈(LSCF-GDC)。使用的电堆测试平台、甲醇重整器和预热器均使用浙江氢邦科技有限公司产品。将电池装堆后在电堆测试平台中进行测试,阳极侧通入氢气,阴极侧通入空气,气体供应均由质量流量计[GRYLL8100, 格里机电(无锡)有限公司]进行控制。电池两侧采用导电柱,并从两侧导电柱上引出电流引线和电压引线,连接至电子负载(IT6000C, 艾德克斯)和电化学工作站(VMP3B-20, 法国 Bio-Logic 公司),测试电池的电化学性能。电堆测试实验流程图如图 1a 所示,甲醇和水由蠕动泵和流量计共同控制其流量,并经过预热器进行预热,进入重整器进行水汽重整反应。反应产物经预热器加热至 750 °C 再进入电堆阳极,与此同时空气经过鼓风机和流量计后,进入预热器加热达到 750 °C,最后进入电堆阴极。同时电堆与电化学工作站和电子负载连接采集数据,进行纯氢燃料测试时,切换甲醇水供应,纯氢从气瓶柜由流量计进入预热器加热至 750 °C 再进入阳极。开始前需将电堆还原,即启动预热程序,电加热炉以 2 °C·min⁻¹ 的升温速率将炉内温度从 20 °C 升温至 750 °C,期间通入 1 L·min⁻¹ 氢气,还原 5~8 h 后进入测试阶段,若开路电压不再发生变化,则说明电堆还原完成,可以开始进行

I - V 曲线的测试。表 1 为电堆测试参数, 并将其作为后续搭建系统的参比工况。

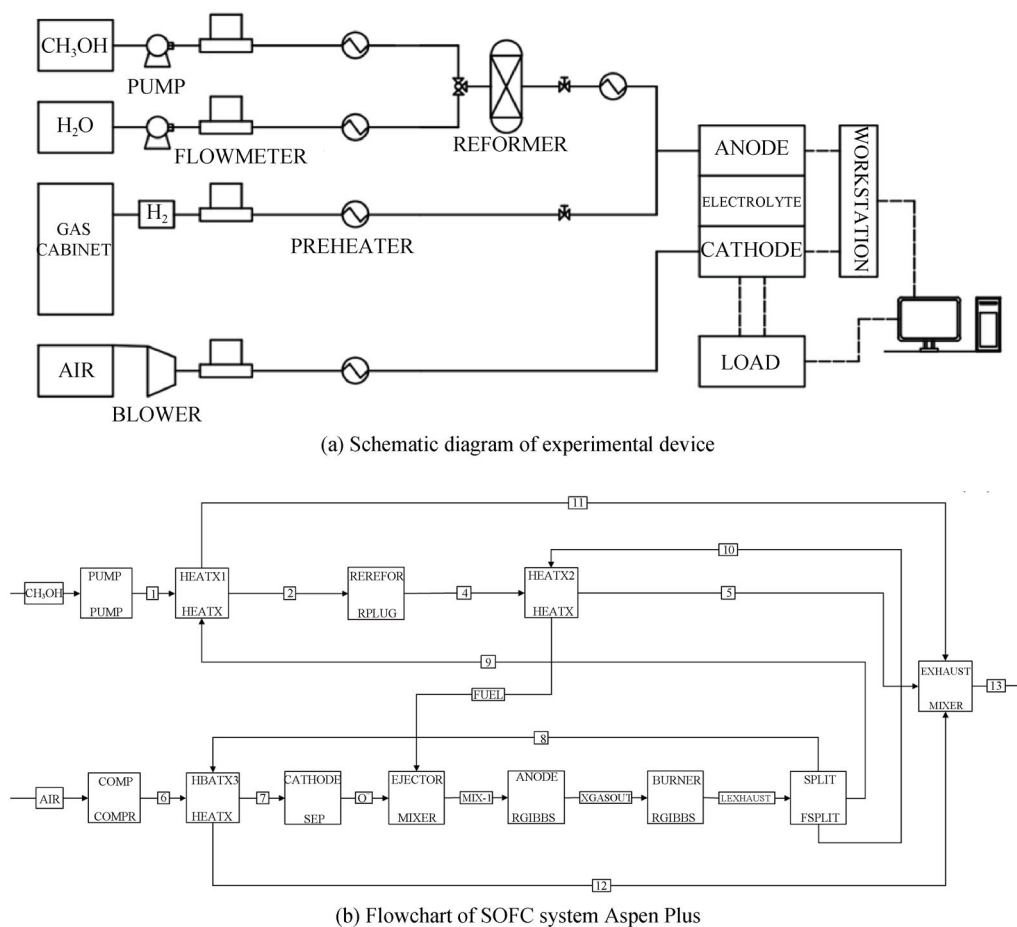


图 1 实验装置示意图和 SOFC 系统 Aspen Plus 流程图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device and flowchart of SOFC system Aspen Plus

表 1 以氢气和甲醇为燃料下运行条件数据表

Table 1 Operating conditions for hydrogen and methanol fuel

Fuel type	Temperature/°C	Pressure/bar	Component/%	H ₂ flow/(L·h ⁻¹)	Air flow/(L·min ⁻¹)
H ₂ -SOFC	750	1.013 25	100%H ₂	180.0	9
CH ₃ OH-SOFC	750	1.013 25	$x(\text{CH}_3\text{OH}):x(\text{H}_2\text{O})=2:3$	0.2	9

x —Mole fraction.

2 SOFC 电堆建模

2.1 模型流程图

图 1b 为 SOFC 电堆的 Aspen Plus 流程图。表 2 描述了图 1b 中所示的单元操作块, 它给出了 Aspen Plus 名称(即软件开发人员为每个单元操作块指定的名称)、块-ID(即用户为每个块指定的名称), 以及简短的描述。

2.2 模型描述

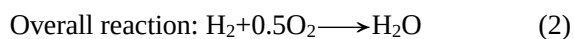
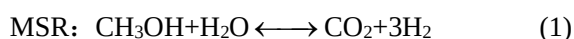
该模型基于以下主要假设条件: 1) 电堆处于等

温和稳态运行工况; 2) 零维; 3) 所有工作流体均被视为理想气体; 4) 忽略压降; 5) 预重整器绝热; 6) 重整和变换反应达到化学平衡; 7) Aspen Plus 中无法模拟离子通过电解质的交叉, 因此, 考虑了 H₂ 的整体氧化[式(3)]而不是电池半反应; 8) CH₃OH 与水蒸气发生重整反应生成 CO₂+H₂, H₂ 发生电化学反应^[16-19]。本工作的目标是获取 SOFC 系统在平衡状态下的整体性能参数(如电压、系统效率), 而非瞬态过程或局部现象。在稳态假设下, 系统内部各点的物质/能量输运达到动态平衡。燃料通道

表 2 Aspen Plus 流程图单元操作块的详细描述
Table 2 Detailed description of the Aspen Plus flowchart unit action block

Aspen Plus name	Block name	Describe
Compr	COMP	The compressor increases the pressure of the input oxidizer to a level slightly higher than atmospheric pressure
	HEATX1	Heat exchanger—simulate the preheating of methanol water by using the waste heat from the combustion of exhaust gas through a burner
HeaterX	HEATX2	Heat exchanger—simulates the preheating of reformed gas by utilizing the waste heat from the combustion of tail gas through a burner
	HEATX3	Heat exchanger—simulates the preheating of oxidant through the waste heat of exhaust gas burned by the burner
	EJECTOR	Mixer—simulates the mixing of fuel as it enters the fuel cell stack
Mixer	EXHAUST	Mixer—simulate the mixed emission of gases after heat exchange, which are produced by burning exhaust gas through a burner
Pump	PUMP	Pump—simulate the delivery of fuel into the reformer
RGibbs	ANODE	Gibbs free energy reactor—simulating the reaction occurring at the anode
	BURNER	Gibbs free energy reactor—simulating the complete combustion of residual fuel and depleted oxidizer
Rplug	REREFOR	Plug flow reactor—simulated methanol steam reforming
FSplit	SPLIT	Separator—separates the fuel exhausted by the burner into heat source for the heat exchanger
Sep	CATHODE	Separator—separates O ₂ required for electrochemical reactions

的浓度梯度被整合为基于流量与反应速率的全局燃料利用率, 这种处理方式在 SOFC 系统工程分析中已被广泛采用。同时, 采用零维模型的核心考量, 是通过权衡计算效率与工程实用性来获取系统的宏观性能参数^[18]。由图 1b 可见, 流股“CH₃OH”被送入 PUMP 块, 模拟输送甲醇水溶液。使用压力比计算排放压力: $p(\text{MeOH})/p_{\text{SOFC}}=1$, 输入甲醇水成分、温度和压力; 其摩尔流量由设计规范块设置, 取决于指定的电堆功率(或者对于可变功率, 计算器块根据指定的 i 设置摩尔流量)。甲醇水在“HEATX1”块中升至预设温度, 其出口进入“RPLUG”块进行重整反应。“REREFOR”块代表电堆重整器。假设在重整温度下达到平衡的以下反应[式(1)]在“REREFOR”块中指定:



重整燃料(流)被送入“阳极”块, 剩余的 CH₃OH 被重整, CO 被转化, H₂ 被氧化。在 Aspen Plus 中无法模拟离子转移, 因此, 模型中使用了总反应[式(2)]而不是电池半反应。虽然在 SOFC 的高工作温度下可以直接氧化 CH₃OH, 但在计算时通常假设 CH₃OH 被重整, 因此, 只有 H₂ 参与电化学反应。[式(2)]在“阳极”块中指定, 并假设它们在块温度下达到平衡($T_{\text{op}} = 1023.15 \text{ K}$)。流“AIR”被送入“COMP”块, 即空气压缩机, 其排放压力设置为略高于大气压(P_{SOFC})。输入空气流成分、温度和压力。摩尔流量通过设计规范块设置, 该块会改变空气流量, 直到空气利用率 $U_{\text{a}}=16.7\%$ ^[20]。压缩空气在“HEATX3”块

中升温至预设温度。压缩和预热的空气(气流 7)进入“CATHODE”块, 其功能是分离出电化学反应所需的 O₂[$n(\text{O}_{2,\text{consumed}})$]。“CATHODE”块 O₂ 分离分数 ($\text{O}_{2,\text{split}}$)由计算器块使用式(3)~式(6)设置计算 $n(\text{H}_{2,\text{in}})$ 。

$$n(\text{H}_{2,\text{in}}) = n(\text{H}_{2,\text{gas}}) + 3n(\text{CH}_3\text{OH}_{\text{gas}}) \quad (3)$$

$$U_{\text{f}} = \frac{n(\text{H}_{2,\text{consumed}})}{n(\text{H}_{2,\text{in}})} \quad (4)$$

$$n(\text{O}_{2,\text{consumed}}) = 0.5n(\text{H}_{2,\text{consumed}}) \quad (5)$$

$$\text{O}_{2,\text{split}} = \frac{n(\text{O}_{2,\text{consumed}})}{n(\text{O}_{2,\text{in}})} \quad (6)$$

式中: $n(\text{H}_{2,\text{gas}})$ 是“FUEL”中所含 H₂ 的摩尔流速; $3n(\text{CH}_3\text{OH}_{\text{gas}})$ 是“FUEL”中 CH₃OH 直接转化产生的 H₂ 的摩尔流速。使用[式(4)]根据已知 U_{f} (值为 0.714)确定 $n(\text{H}_{2,\text{consumed}})$, 然后使用[式(5)]得出 $n(\text{O}_{2,\text{consumed}})$, 最后使用[式(6)]计算 $\text{O}_{2,\text{split}}$ 。但 $\text{O}_{2,\text{split}}$ 等于 U_{a} , 所需的 O₂ 进入“ANODE”块, 尾气(流 XGASOUT)进入“BURNER”块, 尾气和氧化剂被送入“BURNER”, 剩余燃料在此完全燃烧, 燃烧反应产生的热量由流 LEXHAUST 表示, 它被送入“SPLIT”块, 其功能是利用燃烧器燃烧尾气分别为“HEATX1”, “HEATX2”和“HEATX3”提供热源。最后, 高温燃烧产物(流 5、11、12)混合到“EXHAUST”块中模拟燃烧器燃烧尾气经热交换器换热后气体的混合排放。

2.3 电压计算

电压通过能斯特方程计算得到式(7)^[21], 其中,

可逆能斯特电压(E_0)由式(8)确定, 然后减去各种极化损失, 包括欧姆极化 η_{ohm} 、活化极化 $\eta_{act,i}$ 和浓度极化 $\eta_{conc,i}$, 最后得到实际电压即[式(9)]^[22]。

$$E = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left[(p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{0.5}) / (p_{H_2O}) \right] \quad (7)$$

$$E_0 = (1.418T^2 - 3.02 \times 10^3 T + 1.82 \times 10^6) / (2F) \quad (8)$$

$$V = E - \eta_{ohm} - \eta_{act,a} - \eta_{act,c} - \eta_{conc,a} - \eta_{conc,c} \quad (9)$$

式中: $2F$ 中 2 表示每摩尔 H_2 燃料反应产生的电子数, F 为法拉第常数($96\,485\,C \cdot mol^{-1}$); T 为 SOFC 入口和出口流之间的平均温度, K; R 为理想气体常数, 取为 $8.314\,J \cdot mol^{-1} \cdot K$; p_x 为气态成分 x 的分压, bar。分压取阳极和阴极入口和出口流的平均值。

欧姆极化也叫电阻极化, 是燃料电池中由于电极和电解质对电荷的阻碍而产生的现象。当电子或离子通过电极和电解质时, 会遇到阻力, 导致部分能量以热量的形式耗散, 从而降低燃料电池的效率。式(10)给出了阳极、电解质和阴极内阻的欧姆电阻源(R_{ohm})^[23]。

$$R_{ohm} = \frac{\varphi_{anode}^1}{\sigma_{anode}} + \frac{\varphi_{electrolyte}}{\sigma_{electrolyte}} + \frac{\varphi_{cathode}^1}{\sigma_{cathode}} \quad (10)$$

式中: φ^1 为电极厚度, 假设电极-电解质界面的厚度可以忽略不计; σ 为电导率。在本工作中, 典型燃料电池材料的电导率表达式由参考文献[24-25]给出。

$$\sigma_{anode} = \frac{4.2 \times 10^7}{T} \exp\left(-\frac{1200}{T}\right) \quad (11)$$

$$\sigma_{electrolyte} = 33.4 \times 10^3 \exp\left(-\frac{10\,300}{T}\right) \quad (12)$$

$$\sigma_{cathode} = \frac{9.5 \times 10^7}{T} \exp\left(-\frac{1150}{T}\right) \quad (13)$$

欧姆电阻引起的电压损失(η_{ohm})可以通过式(14)来计算。将式(11)~式(13)和电流密度 $i(A \cdot cm^{-2})$ 代入式(14)即可。

$$\eta_{ohm} = iR_{ohm} \quad (14)$$

活化极化, 也被称为电化学极化, 是指电极表面的电化学反应速度较慢, 导致电极电位偏离其平衡电位的现象, 这种现象通常在电流密度较低时更为明显。活化极化的产生主要是因为电化学反应需要克服一定的能量障碍(即活化能), 导致反应速率受到限制。活化极化电压(η_{act})用动力学方程 Butler-Volmer 方程计算, 方程中包括了阳极和阴极的活化损失^[26-27]:

$$\eta_{act} = \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{i}{2i_{0,a}} \right) + \frac{RT}{F} \sinh^{-1} \left(\frac{i}{2i_{0,c}} \right) \quad (15)$$

式中: 阳极和阴极的交换电流密度($i_{0,a}$, $i_{0,c}$)使用半经验公式^[28]表示:

$$i_{0,a} = \gamma_a \left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{H_2O}}{P_{ref}} \right) \exp\left(-\frac{E_{act,a}}{RT}\right) \quad (16)$$

$$i_{0,c} = \gamma_c \left(\frac{P_{O_2}}{P_{ref}} \right)^{0.5} \exp\left(-\frac{E_{act,c}}{RT}\right) \quad (17)$$

式中: γ_a 和 γ_c 分别表示阳极和阴极的指前因子, $A \cdot cm^{-2}$; $E_{act,a}$ 和 $E_{act,c}$ 分别表示阳极、阴极的活化能损失, $J \cdot mol^{-1}$; P_{ref} 表示参考压力, bar。

浓差极化也叫浓度极化, 是指在电化学反应中, 反应物或者产物在扩散过程中受到阻碍, 导致电极表面附近的浓度与溶液本体之间出现差异的现象。浓差极化电压(η_{con})的计算方程主要参考阳极支撑型 SOFC^[29]。

$$\eta_{con} = -\frac{RT}{F} \ln\left(1 - \frac{i}{i_L}\right) \quad (18)$$

电流密度(i)用方程(19)表示, 输出功率、电堆效率及系统电效率由方程(20)~方程(23)计算得到。

$$i = \frac{2zF}{NA} \quad (19)$$

$$P = N \cdot V \cdot i \cdot A \quad (20)$$

$$\eta_{SOFC} = \frac{P}{(\dot{n}_{fuel,in} \cdot h_{LHV})_{anode,in}} \quad (21)$$

$$\eta_{Sys,e} = \frac{P - P_{pump} - P_{comp}}{(\dot{n}_{fuel,in} \cdot h_{LHV})_{system,in}} \quad (22)$$

式中: z 表示参与电化学反应的燃料流量, $mol \cdot s^{-1}$; N 表示电池片数; A 表示单电池活性面积, m^2 ; P 表示电堆电功率, W; V 表示单电池电压, V; $\eta_{el,SOFC}$ 表示固体氧化物燃料电池电堆发电效率; $\eta_{el,Sys}$ 表示系统发电效率; $(\dot{n}_{fuel,in} \Delta h_{LHV})_{anode,in}$ 表示输入电堆阳极的燃料低热值; $(\dot{n}_{fuel,in} \Delta h_{LHV})_{system,in}$ 表示输入系统燃料的低热值。活化极化和浓差极化所需输入的模式参数如表 3 所示。

表 3 模型输入参数^[30]

Table 3 Model input parameters^[30]

Activation polarization	Numerical value	Concentration polarization	Numerical value
Activation energy			
$E_{act,a} / (J \cdot mol^{-1})$ and	7×10^4 and 9×10^4		
$E_{act,c} / (J \cdot mol^{-1})$		Ultimate current density $i_L / (A \cdot m^{-2})$	1.6×10^4
Pre-exponential factor			
$\gamma_b / (A \cdot cm^{-2})$ and	7×10^4 and 7×10^4		
$\gamma_b / (A \cdot cm^{-2})$			

2.4 模型验证

依据实际发电参数,同时应用在流程模型当中,确保模拟和实验是在相同的条件下进行分析研究。SOFC 在稳态情况下运行参数如表 4 所示,其中,燃料使用了 40%的甲醇和 60%的水的混合液。由表 4 可知,燃料液经蒸发后送入重整器,重整后的重整气通过冷凝器冷却后再经过干燥管除水,最后经气相色谱检测后,检测结果如表 5 所示。由表 5 可知,重整气中主要成分为 CO_2 和 H_2 ,而 CO 的含量仅 0.64%,可以忽略不计(高温下, CO 可通过电化学反应贡献部分电流,但其浓度超过阈值时易引发积碳,堵塞阳极孔隙并覆盖催化活性位,显著增加极化电阻和电压衰减)。该结果证实了在甲醇重整器中甲醇可以充分转化,因此,本工作忽略 CO 对模型计算和实际测试的影响。

表 4 SOFC 运行参数^[31]
Table 4 SOFC operating parameters^[31]

Operation parameter	Numerical value
$x(\text{Fuel})/\%$	$x(\text{CH}_3\text{OH}):x(\text{H}_2\text{O})=2/3$
Active area / m^2	0.035
Operating pressure / bar	1.013 25
Fuel utilization rate / %	71.4
Inlet fuel temperature / $^\circ\text{C}$	750
Low calorific value of methanol / ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	640
SOFC temperature / $^\circ\text{C}$	750
Combustion chamber efficiency / %	100
SOFC change in inlet and outlet gas pressure / bar	0
Air temperature / $^\circ\text{C}$	750
Low-level calorific value of hydrogen / ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	241.8

表 5 重整气成分表
Table 5 Composition of reformed gas

Name of reforming gas component	Ratio/%
H_2	67.20
CO_2	21.28
H_2O	10.68
CO	0.64
CH_3OH	0.20

图 2 为 SOFC 的模拟值与实验值的比较。由图 2 可见,SOFC 模拟计算得出的 I - V 曲线与实验结果基本重合,证实了本工作使用的计算模型准确定较好。

3 结果与讨论

首先将以下 2 种燃料通入 SOFC 短堆进行发电,燃料组分分别是纯氢和 66.67%(摩尔比) $\text{H}_2+22.21\%$

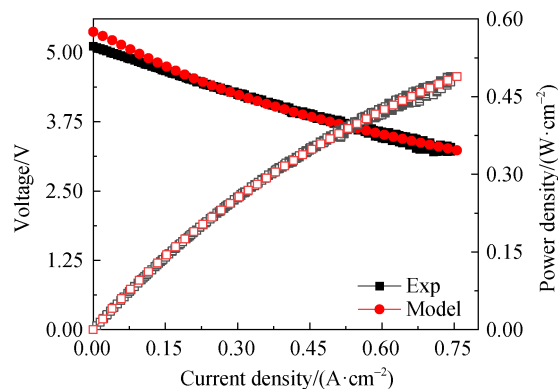


图 2 SOFC 的模拟值与实验值的比较

Fig. 2 Comparison of simulated SOFC values with experimental values

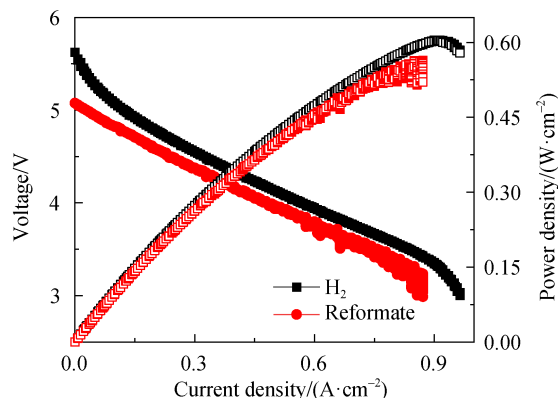


图 3 在 750 $^\circ\text{C}$ 条件下以纯氢和甲醇重整气运行 SOFC 电堆电压和功率密度与电流密度的关系曲线

Fig. 3 Relation between voltage and power density and current density of SOFC reactor running on pure hydrogen and reformat at 750 $^\circ\text{C}$

$\text{CO}_2+11.11\% \text{H}_2\text{O}$, 后者是将蒸汽与可燃碳(甲醇)的摩尔比(STCR)为 1.5 的混合甲醇水燃料通入甲醇重整器(工作温度为 246 $^\circ\text{C}$)后,实测得到的出口气体组分。使用 2 种燃料的电堆性能曲线如图 3 所示。由图 3 可见,当以纯氢作为燃料时,电堆的电压和功率密度都略高于使用甲醇重整气时的,对比 2 种燃料类型(纯氢气和甲醇重整气),当 $i=0.529 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时,使用重整气的电堆放电电压比纯氢工况时下降 0.153 V,直流功率下降 5.68 W。原因是燃料中含氢量减少同时二氧化碳和蒸汽水含量增加,导致电池开路电压下降。使用氢气和甲醇重整气时,燃料电池的性能差异最大为 $0.033 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$,这仅相当于最大功率的 5.59%,这也证实了使用甲醇燃料同样可以获得接近纯氢气的电池性能。采用以下 SOFC 工况点作为基准数据,用于后续和模拟计算的结果进行对比:
 $i=0.711 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、 $V=3.3 \text{ V}$ 、 $\eta_{\text{SOFC}}=45.25\%$ 和 $\eta_{\text{sys,e}}=39.66\%$ 。

以下对 SOFC 电堆的甲醇发电特性进行敏感性分析, 以深入了解主要变量对系统的影响, 并具体研究了蒸汽与可燃碳(甲醇)的摩尔比(STCR)、燃料利用率和电流密度^[32]对 SOFC 电堆性能的影响。在模拟计算时, 电堆运行参数如表 3 所示, 同时, 在实验过程中发现电堆在进行放电时在 150 W 的功率下能够在安全电压下稳定运行, 此时的电压为 0.7 V, 并以此作为参考条件进行模拟研究。

3.1 敏感性分析: 蒸汽与可燃碳(甲醇)的摩尔比

阳极积碳问题是导致电堆失效的关键因素, 所以, 首先研究蒸汽与可燃碳(甲醇)的摩尔比对系统发电性能的影响。图 4 为 STCR 对电压、效率和电流密度的影响。由图 4 可以看出, 在电功率保持 150 W 不变时, STCR 从 1.0 增加到 4.0(这也是实际生产过程当中经常采用的 STCR), 电压从 3.505 V 下降到 3.226 V, 系统的发电效率从 45.95% 下降到 42.35%, 这是因为 STCR 增加导致氢气含量从 72.42% 下降到 42.86%, 进入电堆时的燃料组分分压下降, 进而导

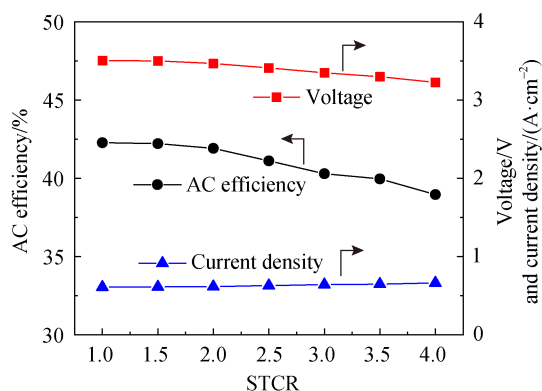


图 4 STCR 对电压、交流电效率和电流密度的影响

Fig. 4 Influence of STCR on voltage, alternating current(AC) efficiency and current density

致能斯特电压下降, 而燃料流量会相应增加并弥补燃料纯度上的不足, 最终由式(22)可知系统电效率下降。由于系统功率设定为 150 W 保持不变, 所以电流密度从 $0.61 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 上升到 $0.66 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。由上述结果可知, 在不发生积碳反应的前提下, 在低 STCR 条件下运行可得到更高的系统效率。这些结果与文献[33–34]一致。由于在 $\text{STCR}=1.0\sim 2.0$ 时, 电压和电效率下降很小, 同时处于经济和避免积碳发生考虑, 后续研究中选用 $\text{STCR}=2.0$ 。

3.2 敏感性分析: 燃料利用率

图 5 为燃料利用率对系统性能的影响, 其中, 系统功率设定为 150 W。由图 5a 可知, 当 U_f 从 55% 增加到 95% 时, 电压从 3.544 V 下降到 3.285 V, 电流密度从 $0.604 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 增加到 $0.653 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。电堆的极化电阻增加导致了其电压下降。由电流计算公式得出, 系统电流密度增加。由图 5b 可以看出, U_f 从 55% 增加到 95%, 燃料流速从 $7.176 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$ 下降到 $4.488 \text{ mol} \cdot \text{h}^{-1}$, 系统发电效率和 SOFC 电堆发电效率分别从 35.79% 增加到 57.25% 和从 33.82% 增加到 54.14%, 这表明燃料的能量更多地由电化学反应转化为电能而不是热能。阴极和电堆尾气温度取决于燃烧温度, 而燃烧温度由燃烧室中可用的燃料量决定。由图 5c 可以看出, U_f 从 55% 增加到 95%, 燃烧室温度从 1580.76 K 下降到 1077.9 K, 甲醇转化率保持不变, 这是因为在低 U_f 时, 多数燃料用于燃烧, 导致燃烧室温度较高, 而随着 U_f 的增加更多的燃料能量转化为电能而不是热能, 引起温度会下降。由上述结果可知, 建议在高燃料利用率下运行 SOFC, 但要避免浓差极化过大。综合考虑, 后续研究选用 $U_f=0.85$ 。

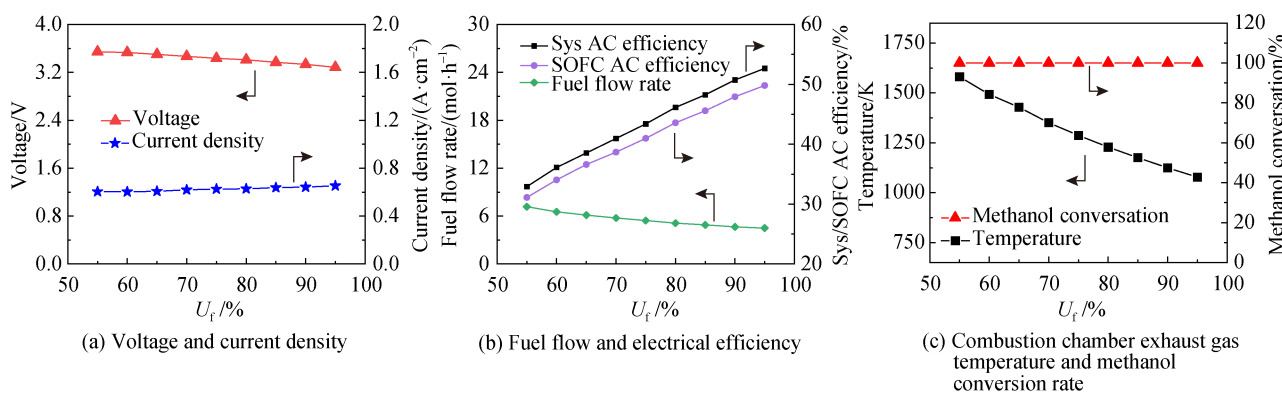


图 5 燃料利用率对系统电压、电流密度、燃料流量和电效率的影响以及燃烧室尾气温度和甲醇转化率的影响

Fig. 5 Effects of fuel utilization efficiency on system voltage, current density, fuel flow rate, and electrical efficiency, as well as effects of combustion chamber exhaust gas temperature and methanol conversion rate

3.3 敏感性分析：电流密度

在确定了系统的燃料利用率($U_f=0.85$)和 STCR(STCR=2.0)条件下,研究了电流密度对系统发电性能的影响。由图 6 可知,电流密度从 $0.558 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 增加到 $0.785 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$,电压从 3.585 V 下降到 3.161 V ,功率密度从 $0.368 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 增加到 $0.457 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$,系统电功率从 139.97 W 增加到 173.67 W ,系统电效率从 36.29% 增加到 45.02% ,SOFC 电堆的电效率从 31.56% 增加到 39.16% ,这是因为电压极化增加,导致电压下降,但由功率密度计算公式可知其是增加的。同时,系统的电功率,系统电效率和电堆电效率也是增加的。系统电功率在电流密度为 $0.785 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 时达到最大值(为 173.67 W)。而燃料电池通常在此峰值功率的左侧运行。关于安全运行,应以高电压和高效率运行 SOFC 电堆,电池的输出电压应高于 Ni 的临界氧化电动势,以此作为电池的安全运行条件,以确保电池各区域都没有发生局部氧化的风险,此时,单电池工作电压为 0.706 V [35–36];然而,就性能而言,最好以高功率运行 SOFC 电堆(本工作中使

用 5 片平管型 SOFC)。因此,必须在电压、效率和功率之间进行权衡。在系统性能趋势,安全运行和性能之间进行权衡与其他文献报告的结果相类似[31]。在本工作中设定的目标功率(P)范围($P=147.3\sim 166.9 \text{ W}$)条件下,计算得出的电流密度工作范围为 $0.602\sim 0.733 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$,对应电池电压为 $3.25\sim 3.51 \text{ V}$ 、SOFC 电堆电效率为 $33.20\%\sim 37.63\%$ 、系统电效率为 $38.18\%\sim 43.27\%$ 。

4 结论

开发了平管型 SOFC 电堆甲醇发电特性的计算模型,实现了不同操作条件下的甲醇 SOFC 电堆性能预测。该模型使用现有的 Aspen Plus 单元操作块,其优点在于对子程序链接的要求较低,从而降低了复杂性并确保了较短的计算时间。通过对比模拟计算结果与使用甲醇运行的平管型 SOFC 电堆实验数据验证了该模型的准确性。本工作还进行了敏感性分析,以深入了解主要变量对系统的影响包括燃料利用率、电流密度和 STCR。主要结论为:

1) 与纯氢气燃料相比,使用甲醇重整气发电的 SOFC 系统运行性能并未显著下降,证实了甲醇 SOFC 具备很好的实用性。

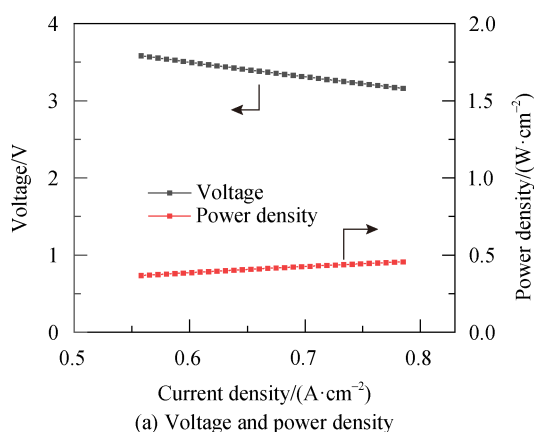
2) 提高电压带来的效率增益大于降低电压带来的效率增益;因此,应在高电压条件下调控电堆输出功率。

3) 研究得出燃料利用率、电流密度和 STCR 对甲醇 SOFC 系统性能均有显著影响。建议通过改变电流来寻求电压、效率和功率的平衡。典型的工作电流密度范围为 $0.602\sim 0.733 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$,对应电池电压为 $3.25\sim 3.51 \text{ V}$ 、SOFC 电堆的发电效率范围在 $33.20\%\sim 37.63\%$ 、系统的发电效率范围在 $38.18\%\sim 43.27\%$ 和系统的发电功率范围在 $147.3\sim 166.9 \text{ W}$ 。

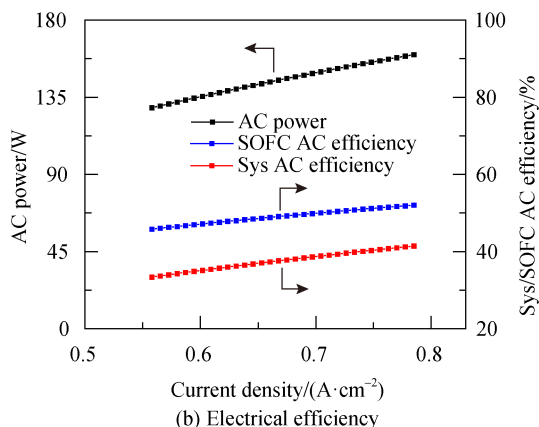
4) 计算得出了在甲醇 SOFC 系统输出功率为 150 W 时的设计操作条件:蒸汽与可燃碳(甲醇)的摩尔比为 2.0、系统燃料利用率为 0.85、电流密度为 $0.704 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、工作电压为 3.3 V 、SOFC 电堆发电效率为 50.34% 和系统发电效率为 39.38% 。

参考文献:

- [1] ATILHAN S, PARK S, EL-HALWAGI M M, et al. Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry[J]. Curr Opin Chem Eng, 2021, 31: 100668.
- [2] YADAV M, XU Q. Liquid-phase chemical hydrogen storage materials[J]. Energy Environ Sci, 2012, 5(12): 9698–9725.
- [3] GONG C Y, XU Y H, CAI S S, et al. Comparative study on thermodynamic analysis of solid oxide fuel cells supplied with



(a) Voltage and power density



(b) Electrical efficiency

图 6 电流密度对电压和功率密度的影响以及对电效率的影响

Fig. 6 Effect of current density on voltage and power density and electrical efficiency

- methanol or ammonia[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2024, 50: 1293–1301.
- [4] BUONOMANO A, CALISE F, D'ACCADIA M D, et al. Hybrid solid oxide fuel cells–gas turbine systems for combined heat and power: A review[J]. *Appl Energy*, 2015, 156: 32–85.
 - [5] ZHAO H B, HOU Q L. Thermodynamic performance study of the MR SOFC–HAT–CCHP system[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2019, 44(8): 4332–4349.
 - [6] TAPIERO D, TZABAR N, TARTAKOVSKY L. Performance of solid-oxide fuel cells operating with different sustainable fuel reformates[J]. *J Power Sources*, 2024, 611: 234761.
 - [7] XU Q D, XIA L C, HE Q J, et al. Thermo–electrochemical modelling of high temperature methanol-fuelled solid oxide fuel cells[J]. *Appl Energy*, 2021, 291: 116832.
 - [8] MENG T, CUI D A, JI Y L, et al. Optimization and efficiency analysis of methanol SOFC–PEMFC hybrid system[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2022, 47(64): 27690–27702.
 - [9] RESEARCH Prof Phan Anh Duong Ph D, BO RIM RYU P D, TRAN THE NAM P D, et al. Comparative study of thermodynamic performances: Ammonia vs. methanol SOFC for marine vessels[J]. *Chem Eng Technol*, 2024, 47(9): e202400118.
 - [10] YAO S G, YAN X, XIA M J, et al. Thermodynamic and economic analysis, optimization of SOFC/GT/SCO₂/ORC hybrid power systems for methanol reforming-powered ships with carbon capture[J]. *Case Stud Therm Eng*, 2025, 67: 105840.
 - [11] TAWEEKAYUJAN S, PRASERTCHAROENSUK P, CHEN Y S, et al. Enhancing methanol-to-power: A comprehensive evaluation of an integrated methanol-reforming, high-temperature proton exchange membrane fuel cell, and organic Rankine cycle system[J]. *Energy*, 2025, 321: 135301.
 - [12] YUAN S K, LI P J, JIAO F, et al. An efficient integrated system for methanol steam reforming to produce hydrogen coupled with PEMFC power generation[J]. *J Therm Sci*, 2025, 34(2): 374–388.
 - [13] SANG J K, LIU S, YANG J, et al. Power generation from flat-tube solid oxide fuel cells by direct internal dry reforming of methanol: A route for simultaneous utilization of CO₂ and biofuels[J]. *Chem Eng J*, 2023, 457: 141189.
 - [14] LIU Z, WANG C T, HAN B B, et al. Flat-tube solid oxide stack with high performance for power generation and hydrogen production[J]. *Appl Energy*, 2024, 362: 122999.
 - [15] WANG J P, ZHAO Y M, YANG J, et al. Understanding thermal and redox cycling behaviors of flat-tube solid oxide fuel cells[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2023, 48(57): 21886–21897.
 - [16] COSTAMAGNA P, MAGISTRI L, MASSARDO A F. Design and part-load performance of a hybrid system based on a solid oxide fuel cell reactor and a micro gas turbine[J]. *J Power Sources*, 2001, 96(2): 352–368.
 - [17] HOFMANN P, PANOPOULOS K D, FRYDA L E, et al. Comparison between two methane reforming models applied to a quasi-two-dimensional planar solid oxide fuel cell model[J]. *Energy*, 2009, 34(12): 2151–2157.
 - [18] PANOPOULOS K D, FRYDA L E, KARL J, et al. High temperature solid oxide fuel cell integrated with novel allothermal biomass gasification Part I: Modelling and feasibility study[J]. *J Power Sources*, 2006, 159(1): 570–585.
 - [19] ZHANG W, CROISET E, DOUGLAS P L, et al. Simulation of a tubular solid oxide fuel cell stack using AspenPlus™ unit operation models[J]. *Energy Convers Manag*, 2005, 46(2): 181–196.
 - [20] SUWANWARANGKUL R, CROISET E, PRITZKER M D, et al. Modelling of a cathode-supported tubular solid oxide fuel cell operating with biomass-derived synthesis gas[J]. *J Power Sources*, 2007, 166(2): 386–399.
 - [21] CAMPANARI S, IORA P. Definition and sensitivity analysis of a finite volume SOFC model for a tubular cell geometry[J]. *J Power Sources*, 2004, 132(1/2): 113–126.
 - [22] HUSSAIN J, ALI R, AKHTAR M N, et al. Modeling and simulation of planar SOFC to study the electrochemical properties[J]. *Curr Appl Phys*, 2020, 20(5): 660–672.
 - [23] TAPIERO D, DISKIN D, TZABAR N, et al. Performance of solid-oxide fuel cells fed with pure hydrogen and methanol steam reforming products–experimental study[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2024, 50: 1427–1440.
 - [24] AGUIAR P, ADJIMAN C S, BRANDON N P. Anode-supported intermediate temperature direct internal reforming solid oxide fuel cell. I: Model-based steady-state performance[J]. *J Power Sources*, 2004, 138(1/2): 120–136.
 - [25] BRAUN R J. Optimal design and operation of solid oxide fuel cell systems for small-scale stationary applications[D]. Madison, WI, USA: The University of Wisconsin-Madison, 2002.
 - [26] SEZER S, KARTAL F, UĞUR Ö. Artificial intelligence approach in gasification integrated solid oxide fuel cell cycle[J]. *Fuel*, 2022, 311: 122591.
 - [27] BAE Y, LEE S, YOON K J, et al. Three-dimensional dynamic modeling and transport analysis of solid oxide fuel cells under electrical load change[J]. *Energy Convers Manag*, 2018, 165: 405–418.
 - [28] LISBONA P, CORRADETTI A, BOVE R, et al. Analysis of a solid oxide fuel cell system for combined heat and power applications under non-nominal conditions[J]. *Electrochim Acta*, 2007, 53(4): 1920–1930.
 - [29] LEE T S, CHUNG J N, CHEN Y C. Design and optimization of a combined fuel reforming and solid oxide fuel cell system with anode off-gas recycling[J]. *Energy Convers Manag*, 2011, 52(10): 3214–3226.
 - [30] TANIM T, BAYLESS D J, TREMBLY J P. Modeling a 5 kW_e planar solid oxide fuel cell based system operating on JP-8 fuel and a comparison with tubular cell based system for auxiliary and mobile power applications[J]. *J Power Sources*, 2014, 245: 986–997.
 - [31] DOHERTY W, REYNOLDS A, KENNEDY D. Computer simulation of a biomass gasification-solid oxide fuel cell power system using Aspen Plus[J]. *Energy*, 2010, 35(12): 4545–4555.
 - [32] SANTIN M, TRAVERSO A, MAGISTRI L, et al. Thermoeconomic analysis of SOFC–GT hybrid systems fed by liquid fuels[J]. *Energy*, 2010, 35(2): 1077–1083.
 - [33] CALISE F, DENTICE D'ACCADIA M, PALOMBO A, et al. Simulation and exergy analysis of a hybrid solid oxide fuel cell (SOFC)–gas turbine system[J]. *Energy*, 2006, 31(15): 3278–3299.
 - [34] WANG Y G, LI H Y, LYU Z W, et al. Study of operating conditions for high efficiency and anode safety of industrial-size solid oxide fuel cell[J]. *Acta Chim Sin*, 2022, 80(8): 1091.
 - [35] AMERI M, MOHAMMADI R. Simulation of an atmospheric SOFC and gas turbine hybrid system using Aspen Plus software[J]. *Int J Energy Res*, 2013, 37(5): 412–425.
 - [36] COCCO D, TOLA V. Externally reformed solid oxide fuel cell–micro-gas turbine (SOFC–MGT) hybrid systems fueled by methanol and di-methyl-ether (DME)[J]. *Energy*, 2009, 34(12): 2124–2130.

Simulation of Variable Operating Condition Performance of Methanol Solid Oxide Fuel Cell Planar Tubular Stack and System

WANG Zihan^{1,2}, YANG Jun^{2,3}, SANG Junkang², LIU Zhao², GUAN Wanbing², CAI Wenyuan³, JI Yubo⁴, LUO Xiang⁵, WU Tao⁵

(1. College of Materials Science and Chemical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Advanced Fuel Cell and Electrolytic Cell Technology, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, Zhejiang, China; 3. Zhejiang Hydrogen Power Technology Co., Ltd., Ningbo 311199, Zhejiang, China; 4. Ningbo Huarun Xingguang Gas Co., Ltd., Ningbo 315207, Zhejiang, China; 5. College of Science and Engineering, University of Nottingham Ningbo China, Ningbo 315199, Zhejiang, China)

Extended Abstract

Introduction With the advancement of global energy transition, the development of efficient and clean energy conversion technologies becomes crucial to addressing energy shortages and environmental pollution. Solid oxide fuel cells (SOFCs) have attracted much attention due to their high energy conversion efficiency and fuel flexibility, while methanol as a liquid hydrogen carrier offers advantages such as safe storage/transportation and wide availability. However, a systematic research on the off-design performance and optimal design of methanol-SOFC systems remains insufficient, particularly for planar-tubular SOFC stacks through modeling and experimental validation. This study was to establish an accurate mathematical model combined with experimental verification to elucidate the power generation characteristics of methanol-SOFC systems under variable operating conditions, providing theoretical foundations and technical support for efficient and stable system operation.

Methods This study proposed an equilibrium-based SOFC stack model based on the principle of minimizing Gibbs free energy, integrating heat and mass balance calculations, while comprehensively considering the effects of ohmic polarization, activation polarization, and concentration polarization on the voltage. An industrial-sized flat-tube SOFC stack (5 cells) was used to compare the power generation performance of pure hydrogen and methanol reforming gas at 750 °C. The composition of the reforming gas was analyzed by gas chromatography, and the *I*-*V* curve was tested. A system flow model was constructed using a software named Aspen Plus, and the *I*-*V* curves obtained from the SOFC system model simulation aligned closely with the experimental results, confirming the accuracy of the computational model used in this study. The sensitivity analysis was then performed to evaluate the effects of key parameters (*i.e.*, the steam-to-carbon molar ratio (STCR), fuel utilization rate (*U*_f), and current density) on the system performance.

Results and discussion In the comparison of the performance of the SOFC system under pure hydrogen and methanol reforming gas power generation conditions, the maximum power density difference was only 5.59%, confirming the practicality of methanol fuel. Furthermore, the sensitivity analysis indicates that a) since anode carbon deposition is a key factor leading to stack failure, the impact of the steam-to-carbon molar ratio (STCR) on the system power generation performance is studied. The operating voltage decreases from 3.505 V to 3.226 V, and the system efficiency reduces from 45.95% to 42.35% when the STCR increases from 1 to 4 (a commonly used STCR in industrial processes). A low STCR (=2) can balance both the efficiency and carbon deposition suppression; b) the impact of fuel utilization rate on the system power generation performance is investigated. The system efficiency increases from 35.79% to 57.25% when the fuel utilization rate increases from 55% to 95%. However, the excessive concentration polarization can be avoided, and a fuel utilization rate of 85% is recommended; and c) after determining the system's fuel utilization rate and STCR, the impact of current density on the system power generation performance is studied. The calculated current density range is 0.602–0.733 A·cm⁻², with the operating voltage range of 3.25–3.50 V under the target power range conditions (*i.e.*, *P* = 147.3–166.9 W). The system efficiency ranges from 38.18% to 43.27% at the optimal current density of 0.704 A·cm⁻².

Conclusions This study proposed a computational model for the methanol power generation characteristics of flat-tube SOFC stacks, enabling the performance prediction of the methanol-SOFC stack under different operating conditions. The accuracy of this model was validated through modeling and experimental results. The study further clarified the performance behavior of the methanol-SOFC system under varying conditions and proposed optimization ranges for key parameters. The results indicated that methanol fuel could effectively replace pure hydrogen, and the stack output power could be controlled under high voltage conditions. The efficient and stable operation could be achieved *via* adjusting the steam-to-carbon molar ratio, fuel utilization rate and current density. At an output power of 150 W, the optimal operating parameters were a steam-to-carbon molar ratio of 2, a fuel utilization rate of 85%, and a current density of 0.704 A·cm⁻². Under the optimum conditions, the stack efficiency was 36.71%, and the system efficiency was 42.21%. The research findings could provide an important reference for the engineering application of methanol-SOFC systems and have significant implications for advancing clean energy technologies.

Keywords solid oxide fuel cell; methanol; system simulation; experiment; fuel utilization