

SOFC 尾气的柔和燃烧数值模拟研究

王翰林, 张路, 季巧, 梁怡琪, 袁红升
(中国航天科工集团北京机械设备研究所, 北京 100143)

摘要: 为验证柔和(MILD)燃烧在固体氧化物燃料电池(SOFC)尾气处理中的应用效果, 利用验证有效的数值方法开展 20 kW 级有机燃料 SOFC 阴阳极尾气柔和燃烧器的数值模拟研究, 以燃料利用率 86% 的 SOFC 尾气作为研究对象。结果表明, 当烟气回流比低于 0.5 时, 可以满足柔和燃烧的热力学条件 $T_{in} \geq T_{si} \geq \Delta T$ 。圆形燃烧器阴阳极尾气进口切向间隔布局有利于柔和燃烧的实现。对比空气或纯氧尾气扩散燃烧处理工艺, 柔和燃烧可以在无需脱水处理条件下保持稳定燃烧, 并且在污染物排放方面展现出较大的优势。

关键词: 柔和燃烧; 合成气燃料电池系统; 固体氧化物燃料电池; 尾气处理; 污染物排放

中图分类号: X701; TM911.4; TQ038.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8740(2026)01-0078-09

A Numerical Study of Moderate or Intense Low-Oxygen Dilution (MILD) Combustion Application on SOFC Exhaust Gas

Wang Hanlin, Zhang Lu, Ji Qiao, Liang Yiqi, Yuan Hongsheng
(Beijing Institute of Machinery and Equipment, China Aerospace Science and Industry Co. Ltd., Beijing 100143, China)

Abstract: In this work, different MILD afterburners directly burning with exhaust gas and vent air of a gross 20 kW SOFC system were numerically studied with a verified numerical method. Realization conditions and key performance of MILD combustors were discussed. If the recirculating ratio r was lower than 0.5, the MILD combustion thermodynamic condition $T_{in} \geq T_{si} \geq \Delta T$ was always met even under the system fuel utilization rate of 86%. Tangential and alternate arrangement of MILD afterburner air and fuel inlets would fulfill thermodynamics conditions and show better performance on mixing and emissions. MILD afterburner emitted fewer pollutants than non-premixed combustion regardless of exhaust gas condensation. MILD oxy-combustion had an advantage over non-premixed oxy-combustion in terms of igniting condition and pollutant emission.

Keywords: moderate or intense low-oxygen dilution combustion (MILD); integrated gasification fuel cell system; solid oxide fuel cell (SOFC); exhaust gas treatment; pollutant emissions

固体氧化物燃料电池 (solid oxide fuel cell, SOFC) 是一种将燃料化学能直接转化为电能的装置, 具有较高的能效, 在固定电站、热电联供系统中具有广泛应用前景^[1]。SOFC 燃料可适应多种燃料, 如合

成气、有机物燃料重整气、柴油、天然气等, 被视为一种解决氢能安全利用的技术手段^[2]。为了保护电堆、防止氢饥饿现象, 在实际商业化运行的 SOFC 系统中, 阳极燃料利用率会做出一定限制, 尾气中除大量

收稿日期: 2025-05-05.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0601900).

作者简介: 王翰林(1989—), 男, 博士, 高级工程师.

通信作者: 王翰林, wanghanlinke@163.com.

的 H_2O 和 CO_2 之外仍包含一定量未反应的 H_2 和 CO . 这些残余可燃组分直接排放不仅造成燃料热值的损失, 而且会带来环境污染和安全隐患. 因此, 需要尾气燃烧器等装置对尾气中的可燃组分进行处理, 使其满足排放标准, 并回收部分热值, 提高系统整体效率^[3].

SOFC 在设计燃料利用率下运行时, 阳极尾气中只包含 10% ~ 15% 的可燃组分, 含水量大, 热值为 2 ~ 3 MJ/m^3 , 难以直接点燃保持燃烧稳定^[4]. Al-Khori 等^[5]提出向尾气中添加一定量的甲烷等新鲜燃料, 补燃增加尾气热值后进行点火. 此外, Wang 等^[6]提出利用纯氧作为助燃剂直接燃烧处理 SOFC 尾气, 获得更高 CO_2 浓度的处理气后进行 CO_2 捕集. 然而, 补燃和纯氧直接燃烧方式不仅可能带来污染物排放问题, 而且会降低系统效率甚至可能引发安全事故. 这些对传统燃烧器提出了新的挑战.

多孔介质燃烧是一种保持低热值燃料燃烧稳定的有效方式^[7]. 邹远龙等^[8]将多孔燃烧器应用于 SOFC 尾气处理, 但是当系统燃料利用率高于 80% 后燃烧器熄火. Zhang 等^[9]的研究中也指出, 多孔介质燃烧器可以稳定燃烧 SOFC 尾气, 但燃料利用率提高后燃烧极限显著下降. 可见多孔介质燃烧器在尾气处理中仍存在一定的系统燃料利用率限制, 此外多孔燃烧器的流阻较大不利于 SOFC 系统稳定运行, 其点火装置在实际应用中也可能引发爆燃或回火等安全事故. 催化燃烧是另一种应用广泛的低热值可燃物燃烧方式. Wang 等^[10]的研究表明, 阳极尾气催化燃烧处理需要结合循环方式才能达到满意的处理效率. 此外, 季明彬等^[11]通过实验手段证实, SOFC 尾气中大量的水蒸气组分对催化燃烧具有明显的抑制作用, 需要脱水和多段催化预处理才能保证较为理想的转化率. 可见, 催化燃烧若在实际的 SOFC 系统中应用需要引入其他耗能工艺.

柔和燃烧具备燃烧稳定和低污染排放的特点^[12], 为 SOFC 的尾气处理提供了一种新的手段. 柔和燃烧的本质是在燃烧器内通过大量的烟气回流稀释并预热可燃混合物, 在燃烧区创造低氧环境、控制燃烧温度, 实现无焰离散燃烧的燃烧方式. 高温烟气回流不仅能降低低热值可燃混合物活化能, 也能提高掺混效果、降低能量耗散, 达到维持稳定燃烧的目的. 柔和燃烧可以在不增加 CO 排放的前提下减少 NO_x 生成^[13], 在空气预热温度较高或富氧场景下优势明显. 由于经过电化学反应, SOFC 系统阴极尾气中的 O_2 含量低于空气, 且其温度 800 ~ 1 000 $^{\circ}C$ ^[14], 这使其更适合直接作为柔和燃烧助燃剂.

依据定义, 实现柔和燃烧需要满足特定的条件. Joannon 等^[15]最先提出了柔和燃烧的热力学条件, 即烟气与燃气混合的初始温度 T_{in} 需要高于其自点火温度 T_{si} , 而点火后的最大温升 ΔT 应低于其自点火温度, 可概括为 $T_{in} \geq T_{si} \geq \Delta T_{max}$. Huang 等^[16]指出高进口温度 T_{in} 可以促进柔和燃烧实现. 可燃物即使热值超低, 一旦形成柔和燃烧便可自点火并保持稳定燃烧. 同时 Huang 等^[17-19]在研究中表明, 柔和燃烧器的混合方式、进气口布局 and 进口流速对柔和燃烧的效果有显著影响. SOFC 尾气的高显热和低热值有助于实现柔和燃烧, 若考虑 CO_2 捕集而采用纯氧作为氧化剂, 柔和燃烧也可减少污染物排放. 但由于柔和燃烧应用于燃料电池尾气处理的研究较少, SOFC 尾气应用柔和燃烧后处理的实现条件、影响因素和处理效果需要进一步讨论.

本文以典型 20 kW 级商用有机燃料 SOFC 发电模块的尾气作为典型工况, 对一组直接利用阳阴极尾气的概念柔和燃烧器开展数值模拟研究. 模拟方法首先经过文献公开的实验数据对比验证, 在掺混、火焰结构和污染物组分等方面效果良好. 利用该方法, 对不同 SOFC 系统燃料利用率条件下尾气柔和燃烧的热力学条件和点火特性进行分析. 研究进气口布置方式对概念柔和燃烧器掺混和污染物排放的影响, 优化结构设计. 对比 SOFC 系统尾气在空气扩散燃烧、纯氧燃烧以及柔和燃烧处理工艺下的火焰稳定性和污染物排放. 结果对 SOFC 系统尾气处理和系统设计有较强的指导意义.

1 数值模拟方法

1.1 尾气柔和燃烧器

典型的 SOFC 发电系统如图 1(a) 所示, 电堆阴极和阳极进口温度设为 973 K. 由于电化学反应产生热量, 阴极和阳极出口的温度为 1 073 K. 尾气柔和燃烧器布置于电堆出口处, 阳极尾气经过换热器回收部分热量后进入燃烧器与阴极尾气混合后燃烧, 充分释放剩余热值, 最终产生的烟气通过换热器预热进口空气, 实现热值回收. 本文以典型的 20 kW 级有机燃料 SOFC 系统作为研究对象, 选取系统燃料利用率 80% 和 86% 的工况进行对比, 燃烧器的进出口流量、温度和气体组分工况见表 1.

概念柔和燃烧器结构如图 1(b) 所示. 燃烧器的燃烧主体空间由一个扁平式的燃烧室构成, 其尺寸为 $\Phi 900 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 燃烧室四周对称分布两对阴极尾气和阳极尾气入口. 燃烧器出口布置于燃烧室顶

端,尽可能增加气体在燃烧器中的停留时间.已有的文献报道指出^[17],该结构形式可能大程度保证 SOFC 尾气柔和燃烧条件的达成.根据 SOFC 的运行工况,阴极尾气流量远大于阳极尾气,阴极尾气的进口和燃烧器出口管径固定设置为 90 mm.本文对比如图

1 (b) 中不同的进口布置方式、不同的阳极尾气进口直径,对尾气柔和燃烧器反应效果的影响.其中,工况 1 设置为交叉射流,工况 2 设置为切向交叉射流,工况 3 设置为切向射流.

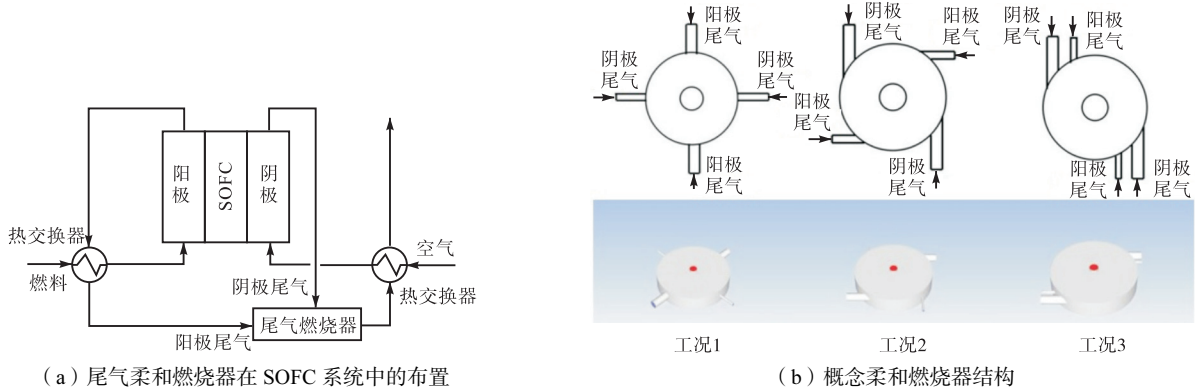


图 1 概念柔和燃烧器在 SOFC 系统中的布置及结构

Fig.1 SOFC system with MILD afterburner and configuration of MILD afterburners

表 1 典型的 20 kW 级 SOFC 系统尾气处理操作工况

Tab.1 MILD afterburner operating conditions for a typical syngas fueled SOFC system of 20 kW gross power capacity

SOFC 系统燃料 利用率/%	阴极尾气 流量/(kg/h)	阴极尾气 温度/K	阴极尾气组分 (摩尔分数)		阳极尾气 流量/(kg/h)	阳极尾气 温度/K	阳极气体组分 (摩尔分数)				
			O ₂	N ₂			CO	H ₂	H ₂ O	CO ₂	N ₂
80	188.13	1 073	0.19	0.81	13.14	614	0.035	0.105	0.625	0.226	0.009
86	201.98	1 073	0.19	0.81	13.52	621	0.025	0.074	0.657	0.237	0.008

1.2 数值方法及验证

本文采用计算流体力学 (calculating fluid dynamic, CFD) 结合化学反应器网络 (chemical reactor network, CRN) 数值方法开展尾气柔和燃烧器数值模拟研究.在 CFD 模拟求解动量和质量守恒方程时,可采用求解雷诺时均 Navier-Stokes 方程组方法.为建模求解湍流过程中的雷诺应力项,可采用经典 κ - ϵ 湍流模型理论和方法,引入物理量湍流动能 k 和湍流动能耗散率 ϵ ,并根据模型假设在方程组中加入 k 和 ϵ 方程,从而完成动量方程组的封闭求解;质量守恒方程中的组分化学反应源项 R_i 则需要利用燃烧模型求解.作者在前期的工作中基于公开的实验数据,采用修正过的 realizable κ - ϵ 湍流模型、涡扩散概念燃烧模型 (eddy-dissipate concept, EDC) 耦合详细化学反应机理,建立并优化了一套完整的 CFD 数值方法. realizable κ - ϵ 湍流模型控制方程见式 (1) 和 (2), S 表示各类源项,文献[20]中针对强旋流对关键模型参数 C_2 进行了修正和实验对比验证.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\rho_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + S_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + S_\epsilon - \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \quad (2)$$

涡扩散概念燃烧模型 (eddy-dissipate concept, EDC) 则是假设化学反应发生在微小的湍流结构中,该结构可视作全混流反应器,其时间尺度和空间尺度分别用 τ^* 和 ζ^* 进行模拟求解.模型控制方程见式 (3) 和 (4),耦合详细化学反应机理可取得良好的模拟效果.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Y_i) + \nabla(\rho v Y_i) = -\nabla J_i + R_i \quad (3)$$

$$\begin{cases} R_i = \frac{\rho(\zeta^*)^2}{\tau^* [1 - (\zeta^*)^3]} (Y_i^* - Y_i) \\ \zeta^* = C_\zeta \left(\frac{\nu \epsilon}{k^2} \right)^{1/4} \\ \tau^* = C_\tau \left(\frac{\nu}{\epsilon} \right)^{1/2} \end{cases} \quad (4)$$

文献[18]验证了上述数值方法在雷诺数 $0.32 \times 10^5 \sim 1.12 \times 10^5$ 的旋流管式燃烧器的模拟有效性,结果表明,该数值方法在过渡区和湍流充分发展区内模拟效果与实验数据吻合较好^[21-22].为进一步验证

CFD 数值方法的有效性,采用上述数值方法结合 GRI 3.0 详细反应机理对与概念柔和反应器流动形态更为相似的悉尼大学经典甲烷标准旋流扩散燃烧 SM1 实验进行模拟,取火焰中心线上的温度数据作为对比^[23]. 结果如图 2 所示,模拟结果与实验数据吻合良好,说明该数值方法对本研究同类的燃烧器有良好的模拟效果.

在概念柔和燃烧器模拟过程中壁面设为强化壁面处理条件,离散坐标(discrete ordinate, DO)模型作为辐射模型. 气体设置为理想气体,物性参数采用详细机理中的参数. 燃烧器表面设置为辐射对流混合边界. 为模拟概念柔和燃烧器在真实 SOFC 系统中的应用,假设整个燃烧器放置于燃料电池堆栈的保温箱内,其周围温度为 973 K. 将概念燃烧器燃烧区域作为计算域,使用 Hypermesh 软件进行离散化网格划分,全部使用六面体结构化网格;为方便对比,经过无关性验证后,3 种工况网格数量均控制在约 200 万. 利用商业软件 FLUENT 19.0 进行求解计算,压力解耦采用 SIMPLE 求解方法,压力迭代采用 PRESTO! 算法,离散格式为二阶迎风格式,采用可压缩求解器,动量和能量方程的收敛标准为 10^{-6} ,组分方程的收敛标准为 10^{-4} .

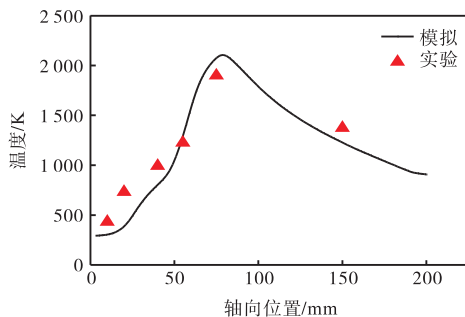


图 2 数值方法验证

Fig.2 Verification of CFD method

2 结果与讨论

2.1 热力学条件

如前文所述,柔和燃烧实现的热力学条件可以被定义为 $T_{in} \geq T_{si} \geq \Delta T$,其中初始温度 T_{in} 和自点火温度 T_{si} 在确定的当量比条件下均由烟气回流比 r 决定. 首先利用一个 CRN 模型讨论 SOFC 尾气实现柔和燃烧的热力学条件. 如图 3 所示,模型由两个全混流反应器(perfectly stirred reactor, PSR)、一个混合器(Mixer)和一个密闭均质反应器(closed homogeneous batch reactor, CHBR)构成. 假设 SOFC 的阴阳极尾气充分混合后分成两股,其中一股进入 PSR1 中进

行反应,产生的烟气与第二股在 Mixer 充分混合后,进入 PSR2 中进行反应. 将两股混气的当量比设置相同,忽略热损失,则 PSR1 和 PSR2 的出口温度相同. 根据定义 PSR2 中实现柔和燃烧, Mixer 中的温度可被视作柔和燃烧前的 T_{in} . 将 Mixer 中的组分导出,导入 CHBR 可计算出柔和燃烧的温升 ΔT ,温升的最大值即为尾气燃尽之后的温度. 能使 ΔT 达到最大值的最低 T_{in} 即为气体的自点火温度 T_{si} . PSR1 中的烟气质量 m_1 与尾气混合气总质量 m_1+m_2 之比即为烟气回流比 r ,如式(5), r 越高意味着主燃烧区内回流的燃烧烟气越多, r 为 0 时可视作扩散燃烧. 采用商用软件 Chemkin 进行求解表 1 工况中不同初始温度 T_{in} 和烟气回流比 r 条件下的气体温升 ΔT ,结果见图 4.

$$r = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad (5)$$

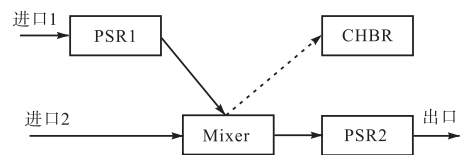


图 3 柔和燃烧 CRN 模型

Fig.3 MILD combustor CRN model

图 4(a) 和 (b) 表明,烟气回流比 r 越高, T_{si} 越高,而 ΔT 越低. 这主要是由于烟气回流比更大时燃烧区域内存在的不可燃物更多. 当 r 为 0.5 时,新鲜尾气量等于烟气回流量, T_{si} 上升至约 1000 K,而 ΔT 总是低于 80 K. 考虑到 SOFC 阴极出口温度大约为 1073 K,因此在 $r \leq 0.5$ 时,尾气均可满足柔和燃烧热力学条件. 由此可知,采用对称式进口布局的燃烧器由于进气量对称,理论上 r 为 0.5,考虑实际局部混合不均匀性,则 $r \leq 0.5$,因此满足柔和燃烧的热力学条件. 图 4(b) 表明,即使在燃料利用率高达 86%、尾气中可燃组分极少的情况下,柔和燃烧仍能保持满足热力学条件. 由此可以推断,概念柔和燃烧器理论上可无需补燃保持 SOFC 尾气的稳定燃烧,充分回收剩余化学能,简化 SOFC 尾气处理装置,提高系统效率.

当 $r=0$ 时,在 T_{in} 大约 925 K 时 ΔT 显著上升,925 K 可被看作是 SOFC 尾气扩散燃烧的点火温度. 当 $T_{in} \leq 925$ K 时, $r > 0$ 的柔和燃烧工况温升 ΔT 显著高于扩散燃烧. 这主要是由于烟气混入时,向燃烧区域内带来了一定量的链式反应活性自由基,如 OH 和 H 等,降低了气体的活化能. 这说明,当烟气混入时,尾气更容易点火. 虽然 r 提高,意味着主燃区内存在更多不可燃物,会降低 ΔT ,但是有烟气回

流的 ΔT 在低于 925 K 范围内仍明显高于扩散燃烧, 更高的 ΔT 可以更好地帮助主燃区积聚热量. 因此 SOFC 的尾气柔和燃烧具有比扩散燃烧更好的点火条件, 更易点燃且更易保持燃烧稳定. 为节约篇幅, 后文主要针对 80% SOFC 系统燃料利用率尾气工况开展进一步讨论.

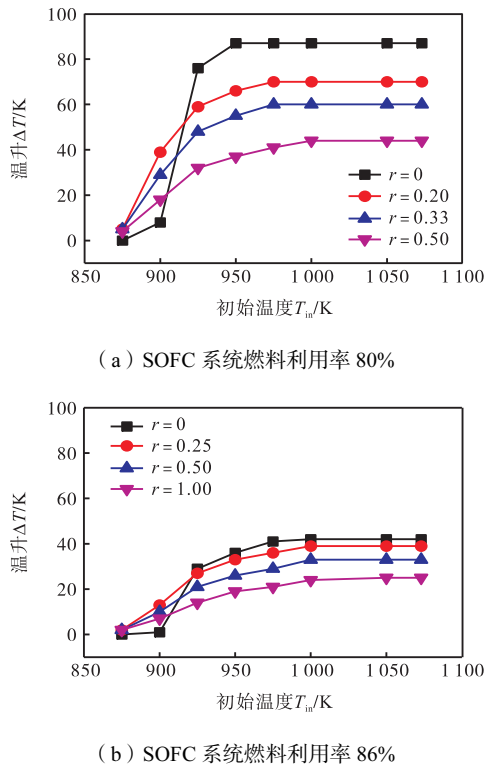


图 4 不同初始温度 T_{in} 和烟气回流比 r 条件下的温升 ΔT
 Fig.4 Temperature rise ΔT at different initial temperature T_{in} and gas recirculation ratio r

2.2 掺混方式

掺混过程不仅影响柔和燃烧实际的烟气回流比, 同时也影响新鲜 SOFC 阴极和阳极尾气在燃烧器中的混合. 掺混过程越理想, 烟气回流比越接近理论值. 燃烧器掺混方式和流场布置决定掺混效果. 掺混均匀程度可以用混合不均匀度 U 表征, 见式 (6)^[24-25], 其物理意义可以解释为在某一区域内某种组分局部实际浓度与理想混合后浓度差值与理想混合浓度在该区域内的空间加权比, U 越低混合越均匀. W_i 表示物质 i 质量分数, A 表示区域空间. 对前文提到的几种不同入口布局方式开展热态和冷态模拟, 对掺混效果进行对比.

$$U = \frac{\iint |w_i - \bar{w}_i| \cdot dA}{\bar{w}_i \cdot A}$$

$$\bar{w}_i = \frac{\iint w_i \cdot dA}{A} \quad (6)$$

首先开展 CO 和 H₂ 输运的冷态模拟, 对比概念

燃烧器不同高度切面上的 U 值, 结果见图 5. 结果表明, 工况 1 的混合不均匀度 U 明显高于工况 2 和工况 3, 工况 3 的 U 最低. 进一步开展 3 种工况的热态计算. 取概念燃烧器中分切面上的温度和流场迹线计算结果进行对比见图 6. 工况 1 中, 主燃烧区中形成 4 个涡流, 由于 SOFC 阴极尾气流量较大, 影响了燃烧烟气、阴极尾气和阳极尾气的混合. 工况 2 和工况 3 则在主燃烧区内形成了一个大的涡流, 对侧的燃烧烟气、阴极尾气有效地被输送到阳极尾气进口根部, 掺混效果更好. 工况 3 中, 一股可燃阳极尾气被阴极尾气和烟气包围, 混合效果更好, 这与 U 的冷态模拟结论一致.

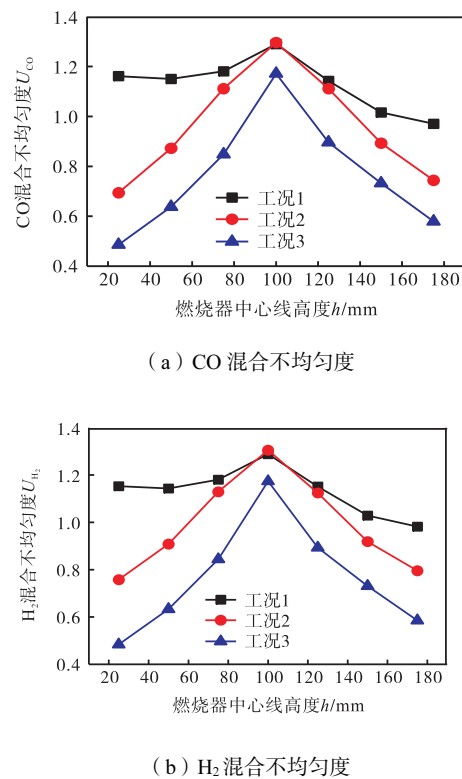


图 5 冷态条件下燃烧器不同高度横截面上的混合不均匀度
 Fig.5 Gas unmixedness on cross section at different combustor height under cold state

进一步对比概念燃烧器不同高度截面上温度峰值的热态计算结果, 结果见图 7. 结果表明, 3 种柔和燃烧器均可保持燃烧稳定, 工况 2 中的燃烧温度峰值显著低于工况 3. 这说明柔和燃烧可以不经过程补燃、直接利用 SOFC 阴阳极尾气进行后处理, 工况 2 中的实际烟气回流比 r 更高, 更接近 0.5. 而工况 3 由于掺混效果更好, 导致更多新鲜 SOFC 阴极尾气被提前混入, 因此燃烧状态更接近扩散燃烧. 根据柔和燃烧的定义可以得出结论, 工况 2 切向交叉射流进口布局方式的柔和燃烧效果更好.

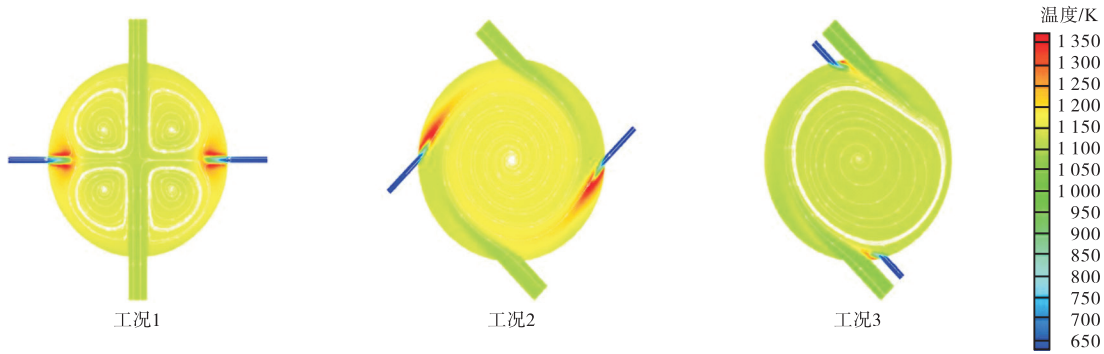


图 6 热态条件下燃烧器中心横截面上的温度分布及流场轨线

Fig.6 Temperature contour and steam trace on middle cross section of combustor under hot state

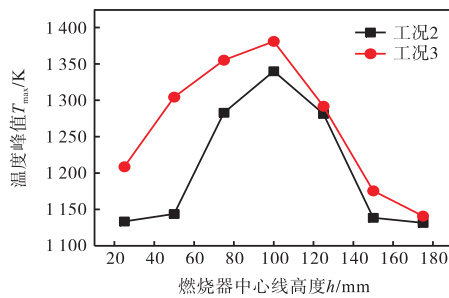


图 7 不同混合方式条件下柔和燃烧器不同高度横截面上的热态模拟温度峰值

Fig.7 Flame structure of the MILD afterburner with different mixing method under hot state

2.3 污染物排放

2.3.1 柔和燃烧与空气扩散燃烧对比

如前所述,商业运行的 SOFC 系统在尾气处理前通常会将尾气进行冷凝脱水,从而提高尾气热值后进行直接点燃处理.本节通过模拟,对比尾气柔和燃烧器与传统扩散燃烧器的污染物排放效果.其中,柔和燃烧器选取工况 2 作为结构形式,模拟不同阳极进气口直径 d 下的污染物排放.扩散燃烧器如图 8 所示,阳极尾气喷口直径 10 mm,对比典型模拟工况如表 2 所示.阳极尾气初始温度 614 K,采用冷凝脱水工艺后的温度 333 K.考虑避免散热系数 $5 W/(m^2 \cdot K)$,环境温度 973 K.模拟过程中为保证扩散燃烧能保持火焰稳定,利用 UDF 将喷嘴出口区域一定数量的网格设置为高温点火点.

NO_x 排放计算结果示于图 9(a).结果表明,如果忽略点火稳定性因素, NO_x 排放在不冷凝脱水的条件

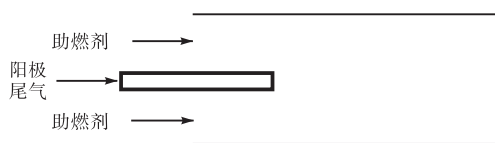


图 8 喷嘴扩散燃烧器

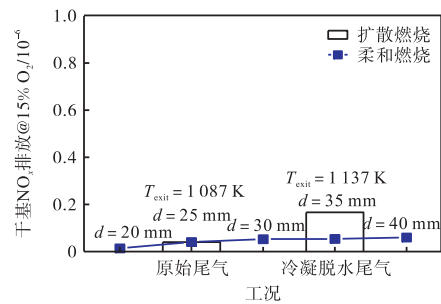
Fig.8 Nozzle jet non-premixed combustor

表 2 尾气扩散燃烧操作工况

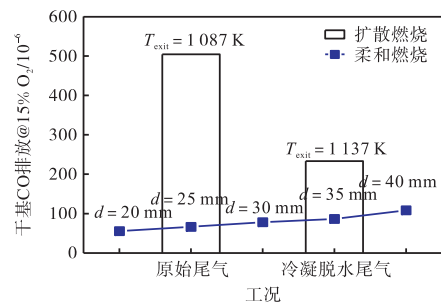
Tab.2 Operating conditions for the exhaust gas non-premixed combustor

尾气流量/ (kg/h)	尾气冷凝 温度/K	尾气组分摩尔分数				
		CO	H ₂	H ₂ O	CO ₂	N ₂
13.14	614	0.035	0.105	0.625	0.226	0.009
7.43	333	0.077	0.231	0.175	0.489	0.017

下柔和燃烧与扩散燃烧的区别不大.但如果考虑实际运行中尾气需进行脱水工艺,扩散燃烧出口温度 T_{exit} 更高, NO_x 排放显著高于柔和燃烧. CO 排放计算结果见图 9(b).结果表明,即使利用在脱水工艺获得更高的燃烧温度后,扩散燃烧的 CO 排放仍然显著高于柔和燃烧,这主要是因为柔和燃烧器通过旋流使



(a) NO_x 排放



(b) CO 排放

图 9 尾气柔和燃烧器和扩散燃烧器污染物排放

Fig.9 Comparison between pollutant emissions of MILD afterburners and jet non-premixed combustors

反应物停留时间更长. 由此可以得出结论, 采用柔和燃烧方式可以改善现有扩散燃烧尾气处理的污染物排放.

2.3.2 柔和燃烧与纯氧扩散燃烧对比

使用重整气、合成气的阳极尾气和工业纯氧中仍可能存在一定量 N_2 , 高当量比的纯氧燃烧同样会造

成 NO_x 污染物排放. 本节通过模拟研究, 对比阳极进口直径 30 mm 的工况 2 概念燃烧器和图 8 的扩散燃烧在纯氧燃烧条件下的污染物排放. 计算工况如表 3 所示, 其中 O_2 流量取 5% 过量系数, 333 K 和 315 K 两种冷凝温度后的阳极尾气组分作为对照. 结果见表 4.

表 3 尾气纯氧燃烧操作工况

Tab.3 Operating conditions of exhaust gas for oxy-combustion

工业纯氧流量/(kg/h)	工业纯氧进气温度/K	工业纯氧组分摩尔分数		阳极尾气流量/(kg/h)	尾气冷凝温度/K	阳极尾气组分摩尔分数				
		O_2	N_2			CO	H_2	H_2O	CO_2	N_2
1.37	298	0.95	0.05	13.14	614	0.035	0.105	0.625	0.226	0.009
1.37	298	0.95	0.05	7.43	333	0.077	0.231	0.175	0.489	0.017
1.37	298	0.95	0.05	6.90	315	0.069	0.197	0.061	0.653	0.020

结果表明, 阳极尾气若采用扩散燃烧方式, 需在温度 333 K 以下的条件进行冷凝脱水提高热值后才能在纯氧环境下点燃并保持稳定燃烧. 但是冷凝后的尾气纯氧燃烧温度很高, 过程中诞生了大量的 NO_x 污染物. 而纯氧柔和燃烧无需经过脱水工艺即可稳定燃烧, 出口温度得到有效控制, 其 NO_x 生成显著降低, 同时安全性更高. 此外, 由于停留时间更长, 即使在更低的燃烧环境下, 柔和燃烧的 CO 的转化率相较于扩散燃烧明显更低. 此外, 柔和燃烧由于可以不经脱水稳定燃烧, 高含量水蒸气产生的 H 和 OH 自由基可以抑制 NO_x 生成并促进 CO 氧化^[26]. 由此得出结论, 纯氧柔和燃烧相较于传统处理方式无需冷凝设备、污染物排放更低, 对于需要进行 CO_2 捕集 SOFC 系统是一种更清洁、更稳定、更经济的尾气处理手段.

表 4 纯氧条件下柔和燃烧和扩散燃烧模拟结果对比

Tab.4 Comparison between MILD and non-premixed oxy-combustor

燃烧方式	尾气冷凝温度/K	燃烧出口温度/K	干基 CO 排放 @1% $O_2/10^{-6}$	干基 NO_x 排放 @1% $O_2/10^{-6}$
柔和燃烧	614	1 210	130	24
扩散燃烧	614	火焰熄灭	—	—
扩散燃烧	333	1 739	3 004	533
扩散燃烧	315	1 835	2 700	601

3 结 论

为了优化 SOFC 尾气处理手段, 本文利用验证可靠的数值模拟方法, 对一种直接利用 20 kW 级有机燃料 SOFC 系统阴阳极尾气的概念柔和燃烧器开展了数值研究. 结果显示柔和燃烧器具备更好的点火条件, 当烟气回流比 r 小于 0.5 时, 尾气始终满足柔和燃烧的热力学条件 $T_{in} \geq T_{si} \geq \Delta T$, 能够在系统燃料利用率 86% 的尾气条件下仍保持燃烧稳定. 因此, 柔

和燃烧器进口对称布置可满足自点火和烟气回流比条件. 对比 3 种不同的燃烧器进口布局混合方式, 结果显示切向交叉射流布局主燃区旋流区最大, 烟气回流比最接近 0.5 的理论值, 燃烧最为稳定. 对比需经过冷凝脱水工艺的传统扩散燃烧尾气后处理方式, 柔和燃烧无论利用阴极尾气或者纯氧作为助燃剂, 都可在不经脱水的条件下点燃并保持燃烧稳定, 其燃烧温度、排放的 CO 和 NO_x 污染物显著低于扩散燃烧. 柔和燃烧可以被认为是一种更稳定、更高效、更清洁、更安全的 SOFC 系统尾气处理方式, 未来仍需开展进一步研究.

参考文献

[1] Hao Q, Zhu L, Wang Y, et al. Achieving near-zero emission and high-effecient combined cooling, heating and power based on biomass gasification coupled with SOFC hybrid system[J]. *Fuel*, 2024, 357: 129751.

[2] 蔡伟强, 袁金良, 郑青榕, 等. 碳氢燃料固体氧化物燃料电池的多场耦合模型与热应力分析[J]. *燃烧科学与技术*, 2023, 29(2): 243-252.

Cai Weiqiang, Yuan Jinliang, Zheng Qingrong, et al. Multi-field coupling model and thermal stress analysis of solid oxide fuel cell with hydrocarbon as fuel[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(2): 243-252 (in Chinese).

[3] Li C, Wang Z, Liu H, et al. Exergetic and exergoeconomic evaluation of an SOFC-Engine-ORC hybrid power generation system with methanol for ship application[J]. *Fuel*, 2024, 357: 129994.

[4] Wang H, Lei Q, Li P, et al. Key CO_2 capture technology of pure oxygen exhaust gas combustion for syngas-

- fueled high-temperature fuel cells[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2021, 8(3): 383-393.
- [5] Al-Khori K, Bicer Y, Boulfrad S, et al. Techno-economic and environmental assesment of integrating SOFC with a conventional steam and power system in a natrual gas processing plant[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44: 29604-29617.
- [6] Wang H, Lei Q, Li P, et al. Key CO₂ capture technology of pure oxygen exhaust gas combustion for syngas-fueled high-temperature fuel cells[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2021, 8(3): 383-393.
- [7] 曹运齐, 杨 丽, 贾志轩, 等. 煤矿低浓度瓦斯多孔介质催化燃烧稳定性研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2024, 30(5): 481-488.
- Cao Yunqi, Yang Li, Jia Zhixuan, et al. Stability of coal mine low concentration methane catalytic combustion in porous media[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2024, 30(5): 481-488 (in Chinese).
- [8] 邹远龙, 周月桂, 李澜波, 等. CO₂ 和 H₂O 气氛下甲烷 MILD 富氧燃烧 NO 和 CO 生成机理[J]. *燃烧科学与技术*, 2022, 28(3): 239-246.
- Zou Yuanlong, Zhou Yuegui, Li Lanbo, et al. NO and CO formation mechanisms for methane MILD-oxyfuel combustion under CO₂ and H₂O atmospheres[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2022, 28(3): 239-246 (in Chinese).
- [9] Zhang J, Chen Z, Zhan X, et al. Combustion characteristics of exhasust gas for solid oxide fuel cell in porous medium burner[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2021, 49(7): 1047-1052.
- [10] Wang X, Lü X, Weng Y, Performance analysis of a biogas-fueled SOFC/GT hybrid system integrated with anode-combustor exhaust gas recirculation loops[J]. *Energy*, 2020, 197: 117213.
- [11] 季明彬, 李大钧, 龚思琦, 等. SOFC 尾气催化燃烧特性[J]. *燃烧科学与技术*, 2021, 27(2): 201-207.
- Ji Mingbin, Li Dajun, Gong Siqi, et al. Catalytic combustion characteristics of SOFC tail gas [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2021, 27(2): 201-207 (in Chinese).
- [12] 王志超, 谭厚章, 李宇航, 等. 氨气/甲烷无焰燃烧污染物生成特性的实验研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2024, 30(3): 277-286.
- Wang Zhichao, Tan Houzhang, Li Yuhang, et al. Pollutant formation characteristics of ammonia/methane MILD combustion[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2024, 30(3): 277-286 (in Chinese).
- [13] Xie M, Dai F, Tu Y. A numercial study of accelerated moderate or intense low-oxygen dilution(MILD) combustion stability of methane in a lab-scale furnace by off-stoichiometric combustion technology[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2021, 32: 108-118.
- [14] 张中刚, 蔡伟强, 郑青榕, 等. 以合成气为燃料的 SOFC 多物理场传递过程数值分析[J]. *燃烧科学与技术*, 2022, 28(2): 141-148.
- Zhang Zhonggang, Cai Weiqiang, Zheng Qingrong, et al. Numerical analysis of multi-physics transport processes of solid oxide fuel cell fueled by syngas [J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2022, 28(2): 141-148 (in Chinese).
- [15] Joannon M D, Sabia P, Sorrentio G, et al. Numerical study of mild combustion in hot diluted diffusion ignition(HDDI) regime[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2009, 32: 3147-3154.
- [16] Huang M, Zhang Z, Shao W, et al. Effect of air preheat temperature on the MILD combustion of syngas[J]. *Energy Conversion Management*, 2014, 86: 356-364.
- [17] 黄明明, 邵卫卫, 张哲巛, 等. 基于交叉射流和切线旋流的 CH₄ 柔和燃烧特性对比[J]. *航空动力学报*, 2014, 29: 31-40.
- Huang Mingming, Shao Weiwei, Zhang Zhedian, et al. Comparison of CH₄ moderate or intense low-oxygen dilution combustion characteristics based on cross-flow jet mixing and swirl mixing[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2014, 29: 31-40 (in Chinese).
- [18] Huang M, Xiao Y, Zhang Z, et al. Effect of air/fuel nozzle arrangement on the MILD combustion of syngas[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 87: 200-208.

- [19] Huang M, Shao W, Xiong Y, et al. Effect of fuel injection velocity on MILD combustion of syngas in axially-staged combustor[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2014, 66: 485-492.
- [20] 王翰林, 雷福林, 邵卫卫, 等. 合成气燃气轮机燃烧室 CFD 模拟的模型选择及优化[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35: 1429-1435.
- Wang Hanlin, Lei Fulin, Shao Weiwei, et al. Screening and modification of CFD models for syngas turbine combustor [J]. *Proceedings of CSEE*, 2015, 35: 1429-1435 (in Chinese).
- [21] Wang H, Shao W, Lei F, et al. Experimental and numerical studies of pressure effects on syngas combustor liner temperature[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 82: 30-38.
- [22] Wang H, Lei F, Shao W, et al. Experimental and numerical studies of pressure effects on syngas combustor emissions[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 102: 318-328.
- [23] Kalt P, Al-Abdeli Y, Masri A, et al. Swirling turbulent non-premixed flames of methane: Flow field and compositional structure[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2002, 29(1): 1913-1919.
- [24] 黄明明, 邵卫卫, 张哲巅, 等. 合成气柔和燃烧实现条件数值研究[J]. *燃气轮机技术*, 2014, 27(1): 16-21.
- Huang Mingming, Shao Weiwei, Zhang Zhedian, et al. Numerical study on realization condition of syngas MILD combustion[J]. *Gas Turbine Technology*, 2014, 27(1): 16-21 (in Chinese).
- [25] Biagioli F, Guthe F. Effect of pressure and fuel-air unmixedness on NO_x emissions form industrial gas turbine burners[J]. *Combustion and Flame*, 2007, 151: 274-288.
- [26] 颜衍梯, 王 勇, 刘芃芃, 等. 非预混氢/天然气烟气内循环燃烧特性研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2025, 31(2): 212-220.
- Yan Kanti, Wang Yong, Liu Pengpeng, et al. Combustion characteristics of non-premixed hydrogen/natural gas flue gas based on flue gas internal recirculation[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2025, 31(2): 212-220 (in Chinese).