15层燃料支撑型 SOEC 电堆共电解多物理场不均匀性研究

马帅[1]，李昂[2*]

[1] 上海交通大学机械与动力工程学院　[2] 上海交通大学智慧能源创新学院　* 通讯作者：liang007@sjtu.edu.cn

研究背景与目标

SOEC 在高温下共电解 水和 二氧化碳，可直接制取氢气与一氧化碳组成的合成气。高温运行使部分反应能量由热量提供，有利于降低电能需求并耦合工业余热或可再生能源。

实际运行中，多层电堆共用进排气歧管，歧管压降和支路流阻会造成层间流量差异。反应物分压的变化进一步改变浓差极化、电流密度和局部热源，流动、传质、电化学与温度场相互耦合。

本文建立了15层燃料极支撑型电堆的全尺寸三维模型，识别 1123 K 共电解工况下的非均匀分布、传递路径及电压对于不均匀分布的作用。

模型与边界条件

模型对象是15层燃料电极支撑型 SOEC 电堆，保留燃料流道、支路及公共进排气歧管的三维结构。模型耦合流体流动、组分传输、传热、电荷守恒和电化学动力学。

共电解反应

燃料电极侧：

$$H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-} \quad ;$$

$$CO_2 + 2e^- \rightarrow CO + O^{2-} \quad 。$$

氧离子穿过电解质后在氧电极侧反应：

$$2O^{2-} \rightarrow O_2 + 4e^- \quad 。$$

运行条件设置为基准工作温度1123 K，单层SOEC工作电压为 1.3 V、1.4 V 和 1.5 V。第1层位于电堆底部，第15层位于顶部。

燃料气体由底部歧管进入、从顶部歧管排出。该布置使各层几何流程长度一致，可减小路径长度造成的流阻差异，但不能消除歧管内的压力梯度。流量决定反应物供给，局部反应速率决定组分消耗、电流密度和产物生成；欧姆热、极化热及气体携热共同形成温度场，温度又反馈影响反应动力学和离子电导率。

非均匀性传递机制

气体进入公共歧管后逐层分流，沿程静压与动压不断变化。各支路两端压差不同，因此相同几何尺寸并不能保证相同的层流量。

顶部层获得更多反应物，反应物分压较高、浓差极化较小，因而承担更高电流并生成更多产物。底部层则更容易受到反应物供给限制。

高电流区域产生更多欧姆热和不可逆极化热，气体又将上游热量带向出口。温度变化进一步影响反应动力学与电导率，使初始流量偏差向电化学和温度场传递。

工作电压升高后，总电流及反应物消耗加快，相同的流量偏差对应更大的浓度下降，因此层间非均匀性被显著放大。

参考文献

[1] Sun M. et al. J. Power Sources, 587, 233700 (2023).
[2] Fei Y. et al. Energy Convers. Manage., 300, 117911 (2024).
[3] Lu B. et al. Energy Convers. Manage., 299, 117852 (2024).
[4] Chen H. et al. Energy Convers. Manage., 341, 120088 (2025).
[5] Ni M. Int. J. Hydrogen Energy, 37, 6389–6399 (2012).
[6] Graves C. et al. Nat. Mater., 14, 239–244 (2015).
[7] Ferrero D. et al. Chem. Eng. J., 274, 143–155 (2015).

结果一：反应物层间分配

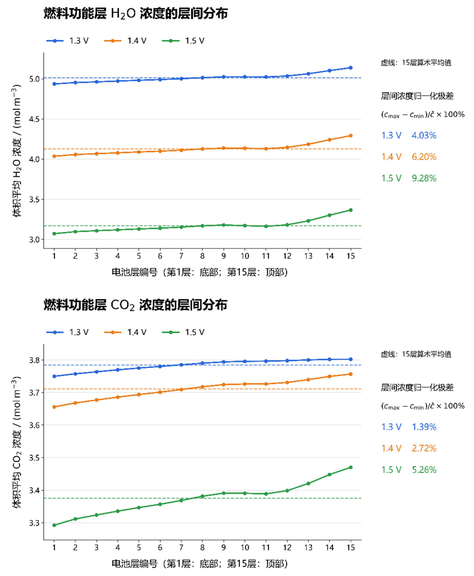


图 1 平均浓度随电池层号变化

层间水与二氧化碳的平均浓度总体由底层向顶层递增，第15层最高，说明顶部支路获得的反应物更多。其根源是公共歧管沿程压力变化导致各支路驱动力不同。

还探究了电压影响。电压由 1.3 V 升至 1.5 V 时，H_2O 不均匀度由 4.03% 增至 9.28%，CO_2 不均匀度 由 1.39% 增至 5.26%。更高电压提高反应速率和组分消耗，使初始分配偏差进一步扩大。

H_2O 的层间差异及其增幅均高于 CO_2，表明水蒸气供给对高负荷运行更敏感，是改善层间一致性时需要优先关注的反应物。

结果二：产物浓度分布

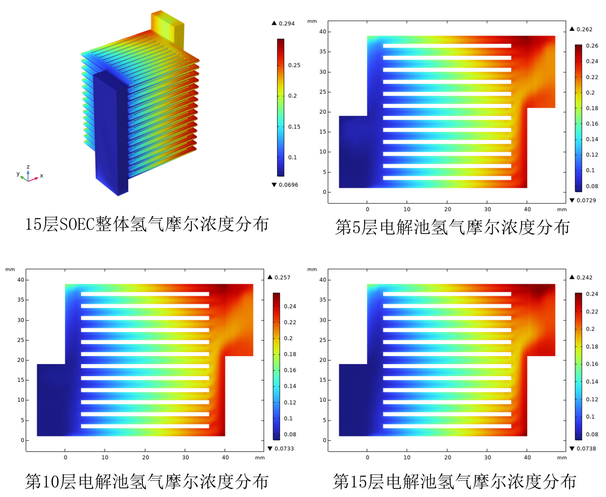


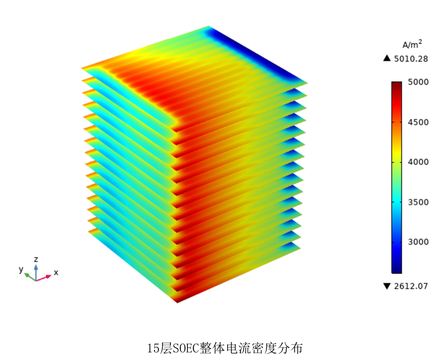
图 2　电堆整体与典型层内氢气摩尔浓度云图

结果显示，各层H2浓度沿燃料气体流动方向持续升高。入口区域反应物充足，随着H2O 不断发生电化学还原，H2在下游逐步积累，出口侧形成高浓度区。

层间差异表现显著。第15层的整体产物浓度高于第10层和第5层，与反应物层间分配趋势一致。顶部层获得更多H2O和 CO2，能够维持更高反应速率，因此产气量更大。

产物浓度差异说明歧管造成的流量偏差已经传递到实际电化学转化。长期运行时，各层燃料利用率和产气量不一致，可能造成部分层利用不足，而高负荷层承受更快的性能衰减。

结果三：电流密度分布



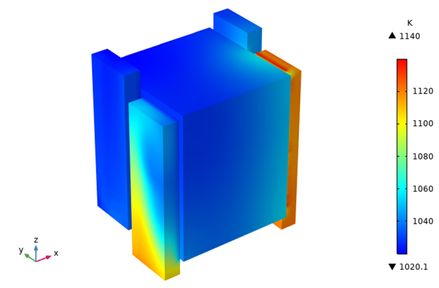
15层SOEC整体电流密度分布

图 3　15层 SOEC 整体电流密度，2612.07–5010.28 A/m²

电流密度由底层向顶层递增，并与反应物浓度分布高度一致。顶部层反应物分压较高，浓差极化较小，因此能够承担更高的局部电流。

高电流意味着更快的反应物消耗和更大的电化学负荷，长期运行可能加速电极微结构粗化、界面退化和局部性能衰减。

结果四：温度场分布



15层SOEC整体温度场分布

图 4　15层 SOEC 整体温度场，1020.1–1140 K

温度场由反应吸放热、欧姆热、活化与浓差损失、固体导热及气体对流换热共同决定。高电流区域产生更多不可逆热量。

高温区集中在反应较强及流体出口侧。气体沿流道携带并积累上游热量，使出口区域更容易形成温升。局部高温又会改变反应动力学和电导率，强化电化学不均匀性。

结论与工程启示

1、结构效应。下进上出使各层几何流程长度一致，但歧管压力梯度仍会造成层间流量偏差。

2、耦合传递。反应物供给差异依次传递到 H_2 生成、电流密度和温度场，形成相互反馈的多物理场不均匀性。

3、电压影响。提高工作电压会加快反应物消耗，并显著放大层间传质与电化学差异。

4、优化方向。应优先优化进排气歧管截面和支路流阻，并协调工作电压与燃料利用率，加强热管理，避免局部高电流和高温。