

## SOEC 电解水制氢综述：机理、材料与可再生能源耦合

苏其响<sup>1,2,3,4</sup>, 郁青春<sup>1,2,3,4</sup>

(1. 昆明理工大学云南省有色金属真空冶金重点实验室, 昆明 650093; 2. 昆明理工大学省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 昆明 650093; 3. 昆明理工大学真空冶金国家工程研究中心, 昆明 650093; 4. 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 昆明 650093)

**摘要:**为实现 2050 年的碳中和愿景, 现在急需去发展那些既高效又成本低的绿色制氢技术, 本文对高温固体氧化物电解池(SOEC)技术进行了系统的评估, 且把其大规模应用的关键瓶颈和路径进行了梳理, 把 SOEC 跟碱性、质子交换膜电解槽的技术经济性进行了对比, 阐明了它的高温运行所带来的热力学以及动力学上的优势; 重点评述了电极材料和电解质在高温、高水汽分压环境下的衰减机制以及相应的改进策略; 分析 SOEC 跟风能、太阳能以及工业余热等波动性可再生能源的耦合方式, 还有系统集成当中面临的挑战。分析结果显示, SOEC 的制氢效率以及单位能耗都显著优于传统路线, 要实现其商业化, 核心在于把电堆寿命从现在的不足  $10^4$  h 提升到  $5 \times 10^4$  h, 凭借材料创新和系统优化, 把平准化制氢成本控制在 1.5 美元/kg 以下, SOEC 在未来绿氢供给体系当中是极具潜力的技术方案, 它的成功规模化主要依赖在材料长寿命、系统高效集成以及跟可再生能源灵活耦合这三个方面取得持续的突破。

**关键词:** 固体氧化物电解池; 电解制氢; 可再生能源; 电极材料; 系统集成

中图分类号: TQ116.21 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)04-1451-15

网络出版时间: 2026-03-13



实现碳中和目标要求能源系统进行深度脱碳, 而氢能作为零碳的二次能源载体, 在其中扮演着至关重要的角色。特别是在难以电气化的工业与重型交通领域, 对绿氢的需求尤为迫切。在现有电解水制氢技术中, 固体氧化物电解池(SOEC)因其工作温度高( $650 \sim 1000$  °C), 可大幅降低电解过程的吉布斯自由能变, 理论上具备突破 80% 电-氢转换效率的潜力, 被广泛认为是下一代低成本、高效率制氢的核心技术路线之一<sup>[1-2]</sup>。

根据国际能源署(IEA)及相关统计, 能源活动是全球温室气体排放的主要来源。因此, 推动能源结构的低碳化转型是应对气候变化的核心。在此背景下, 氢能, 特别是利用可再生能源电力驱动的“绿氢”, 已成为全球主要经济体 2050 年碳中和战略组合中的关键一环<sup>[3-4]</sup>。最新的大气化学研究算是给逸散氢彻底“正名”: 它对气候强迫的贡献微乎其微<sup>[5-7]</sup>, 基本上可以解除角色风险, 在制氢这个赛道当中,

电解水由于产物单一, 且碳足迹直接跟电源挂钩, 所以备受青睐<sup>[8]</sup>, 技术路线已经收敛为“三驾马车”: 即碱性电解水(AWE)、质子交换膜(PEM)以及固体氧化物电解池(SOEC)<sup>[9-10]</sup>, 阳极的四电子析氧反应(OER)动力学比较迟缓, 构成效率天花板<sup>[11-12]</sup>; 即便工艺已经成熟, 全球电解水产氢的占比依然只有 4%, 电耗与设备折旧这两重成本成紧箍咒<sup>[13-14]</sup>, 近期的改进案例主要集中在操作参数以及界面工程方面: Taner 等<sup>[15]</sup>降压运行质子交换膜燃料电池(PEMFC), 使热力学效率得到 1 个数量级的提升; Naqvi 等<sup>[16]</sup>用氨-醇-尿素混合液来取代纯水, 让碱性槽的产气率提高 18%; Taner 等<sup>[17]</sup>的  $6 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  原型机验证新流场设计的可扩展性; Jolaoso 等<sup>[18]</sup>借助界面改性把 SOEC 电解性能提高 80%, 效率的进阶没有显著稀释成本, 在 PEM 路线里电费依然占到 74%<sup>[19]</sup>, 规模的放大被电价给锁死, 目前研究共识转向可再生电力与电解模块的深度耦合: 依靠风光零

收稿日期: 2025-09-22。 修订日期: 2025-11-11。

基金项目: 国家自然科学基金(52364054)。

第一作者: 苏其响(1995—), 男, 博士研究生。

通信作者: 郁青春(1971—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2025-09-22. Revised date: 2025-11-11.

First author: SU Qixiang (1995-), male, Doctoral candidate.

E-mail: 874665157@qq.com

Correspondent author: YU Qingchun (1971-), male, Ph.D., Professor.

E-mail: yqcy@163.com

边际成本来稀释电费，利用高温热源或者工业余热进行补能，降低过电位与设备规格，同步提升系统级的氢产率，这一策略兼顾减碳与经济性，成为电解水技术走出示范区的唯一出口。

风能以及太阳能这两类可再生能源能够同电解水技术结合起来，构建出低碳能源系统，开展整合工作，既能改善风能和太阳能的不稳定情况，还能有效缓解电解水制氢过程中电力成本过高的问题<sup>[20]</sup>。Fan 等<sup>[21]</sup>提出一种风能–太阳能混合能源系统，证实该混合系统有助于降低成本和增加氢产量。当 SOEC 同具有波动性的可再生能源进行耦合时，其氧电极与电解质之间的界面在频繁的热循环影响下容易发生退化，这成为系统长期稳定运行所面临的严峻挑战。陈志逸等<sup>[22]</sup>采用直接组合法原位制备的固体氧化物电池电极能够有效改善电极/电解质界面相容性，抑制界面反应和性能衰减，这为开发适宜波动性电源的高稳定性 SOEC 关键材料提供了重要的见解。

风–光耦合电解水可在源侧消纳波动、在荷侧压低电力成本，为绿氢提供低碳技术路径。Fonseca 等<sup>[23]</sup>将分布式能源与电解槽协同调度，Spazzafumo 等<sup>[24]</sup>利用集中式光伏–电解系统，使年增产绿氢约 3 t，同时降低平准化成本。然而，针对地方资源禀赋的具体耦合案例仍稀缺，国内不同区域的可再生能源–电解水系统评估及未来绿氢成本曲线尚缺少系统数据。虽然已有许多关于可再生能源电解槽设备和制氢的研究，但缺乏将当地可再生能源与电解水技术结合使用的案例研究。此外，关于中国不同地区可再生能源利用的系统研究以及未来绿色氢气准备的成本分析的信息也相对较少。

全球脱碳进程下，可再生电力驱动的绿氢路线被视为削减温室气体与污染物排放的核心抓手<sup>[25]</sup>，相关工艺研发随之升温。电解水可就地消纳风光等波动电源，将水分解为氢、氧，同步摊薄制氢成本<sup>[26]</sup>；太阳能与风能资源分布广、可及性高，与电解槽匹配具备天然优势<sup>[27–28]</sup>。富余电力以氢的形式化学储存，可即时弥合能源供需时差；所得氢、氧无须二次转换，即可直接注入交通及工业环节。氢因此兼具一次能源与能源载体双重属性，在燃料电池车辆及高耗能工业中实现即产即用。

## 1 SOEC 电解制氢的工作原理及组成

### 1.1 SOEC 电解制氢的工作原理

SOEC 是一种电化学能源装置，可将电能高效

的转化为化学能，从反应过程上看与 SOFC 互为逆运行。SOEC 电解制氢的工作原理如图 1 所示。在 650~1000 °C 条件下，在电极两侧施加所需直流电压，H<sub>2</sub>O 在氢电极处得到电子被分解还原成 H<sub>2</sub> 和 O<sup>2-</sup>，O<sup>2-</sup> 通过致密的电解质层到达氧电极处失去电子产生 O<sub>2</sub>。反应式如式(1)，式(2)所示。



从热力学角度来看，SOEC 的电解过程中，水分子能被分解的关键能量取决于热能和电能，即：

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3)$$

式中： $\Delta G$  为反应的吉布斯自由能； $\Delta H$  为反应的焓变； $T$  为电解温度； $\Delta S$  为反应的熵变； $T\Delta S$  为电解过程的热能需求。

$$E_{\text{Nernst}} = -\Delta G / nF \quad (4)$$

式中： $E_{\text{Nernst}}$  为电极电势； $n$  为电子转移数； $F$  为法拉第常数，约为 96 485 C/mol； $nF$  为转移的总电荷量。

SOEC 电解水能耗与热力学关系如图 2 所示<sup>[29–30]</sup>。由图 2 可见，在 0~1000 °C 时， $\Delta H$ 、 $\Delta G$ 、 $T\Delta S$  随着温度变化的关系，随着温度的升高， $\Delta H$  基本不变， $\Delta G$  逐步下降， $T\Delta S$  逐步上升，意味着在 0.1 MPa 系统条件下，SOEC 电解反应过程中，随着温度的逐渐升高，水的理论分解电压逐渐降低且对于热能的需求超过电能，有效提高了制氢效率，降低了制氢成本。

从动力学角度来看，在电解过程中，最小电功需等于反应  $-\Delta G$  的变化。即：

$$W_m = -\Delta G \quad (5)$$

将理想电压设为  $E_r$ ，则有

$$\Delta G = -nFE_r \quad (6)$$

$$E_r = -\Delta G / nF \quad (7)$$

在平衡状态下，则有

$$E_r = -\Delta G / 2F \quad (8)$$

理想状态下与实际电解过程存在损失差异，将极化损失设为  $\eta$ ，则有

$$E = E_r + \eta_c + \eta_\Omega + \eta_e \quad (9)$$

式中： $E$  为实际电压； $\eta_c$  为气体浓度差极化损失； $\eta_\Omega$  为热焦耳极化损失； $\eta_e$  为电极的电化学极化损失。SOEC 电解池以固体氧化物作为电解质其离子电导率随着温度的升高而增强，且高温能够降低氢电极和氧电极的过电位，显著减少在电解过程中的能量损失。

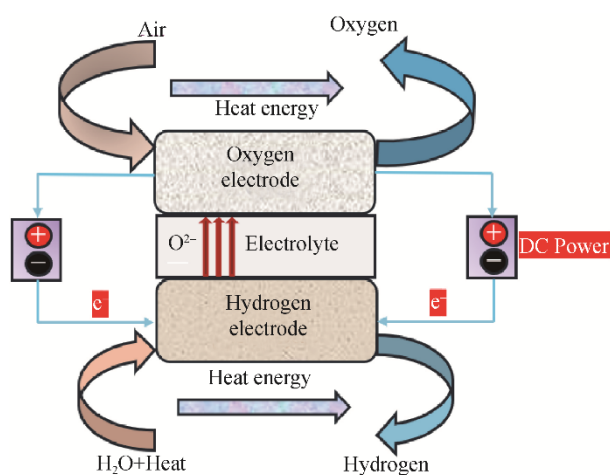


图 1 SOEC 工作原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of SOEC working principle

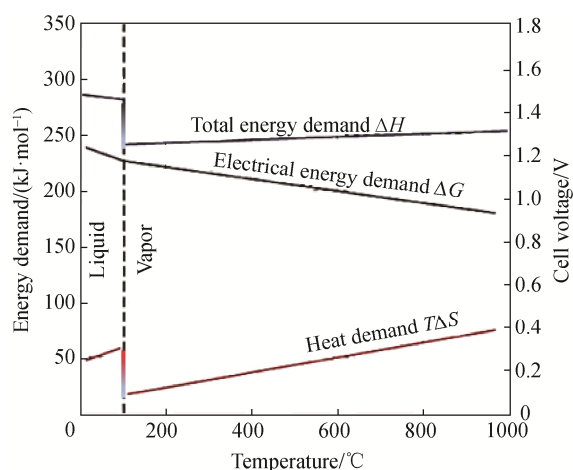


图 2 SOEC 电解水能耗与热力学关系

Fig. 2 Energy consumption and thermodynamic relationship of SOEC electrolysis of water

## 1.2 SOEC 电解制氢基本组成与分类

图 3 给出 SOEC 的基本构型与层内反应。堆芯由氢电极(阴极)、致密电解质和氧电极(阳极)三明治结构组成: 多孔电极延长三相边界, 降低气相传输阻力; 电解质致密化以实现  $O^{2-}$  导通与阴、阳极隔离; 双极连接层把单电池串并成高功率电堆。

按载流子类型, SOEC 可分为氧离子导体、质子导体及混合离子导体 3 类。当前主流为氧离子型: 650~1000 °C 下以钇稳定氧化锆(YSZ)为电解质,  $O^{2-}$  迁移完成水蒸气电解, 产氢效率已获验证<sup>[31-32]</sup>。质子型采用  $BaCeO_3$ 、 $BaZrO_3$  或其固溶体<sup>[33-35]</sup>,  $H^+$  在晶格内传递, 可在更低温区同步析出  $H_2$ 、 $O_2$ , 理论

电耗更低。混合型电解质同时提供  $O^{2-}$  与  $H^+$  通道, 兼顾两种传导机制, 为变工况和负载波动场景提供更高操作弹性与效率窗口。

依据支撑体位置, SOEC 可细分为电解质支撑、阴极支撑、阳极支撑、金属支撑及双极板支撑 5 种构型<sup>[36-39]</sup>。阴极支撑结构通常以 Ni-YSZ 金属陶瓷为氢电极, 其机械强度、电极活性与规模化制备工艺之间可实现均衡优化, 已率先完成大功率电堆的产业化验证, 成为现阶段商业化最成熟的方案。电解质支撑构型因电解质层厚度较大, 欧姆损耗偏高, 但热循环应力低、衰减率小, Bloom Energy 等企业基于此路线开发出寿命逾十年的电堆, 用于连续运行场景。阳极支撑通过匹配燃料侧热膨胀系数, 可抑制热循环界面剥离, 延长电堆寿命, 适用于间歇式高效电解制氢。金属支撑兼具金属基板的高韧性与抗热震能力, 升温速率快, 负荷跟踪性能优, 被视为可逆固体氧化物电池(reversible solid oxide cell, rSOC)及快速变载场合的理想载体<sup>[40]</sup>。双极板支撑取消独立支撑层, 将膜电极直接集成于金属双极板, 堆体厚度降至毫米级, 可实现千瓦每小时级体积功率密度。最终支撑方案的选择需综合运行温度、热循环频次、功率密度与服役寿命等指标, 按应用场景匹配最优构型。

依几何构型, SOEC 分管式与平板式两类。管式最早用于高温电解, 无须高温密封、单体串接简单, 但单位体积活性面积小、能量密度低且等静压成型成本高。在系统架构层面, 一套完整的 SOEC 装置主要包含两大功能模块: 1) 承担电化学转换核心任务的电堆, 它直接决定了系统的产氢功率与效率; 2) 是保障电堆稳定运行的平衡系统(balance of plant, BOP)。当前, 平板式电堆构型因其在单位体积内能实现更高的活性面积, 从而展现出卓越的体积功率密度与集成便利性<sup>[41]</sup>, 已成为研发与商业化实践中的主流技术路线。该构型的典型特征在于, 将薄层电解质、多孔燃料电极(氢电极)与氧电极以“三明治”结构作为重复单元, 通过精密堆叠与一体化烧结工艺构建而成。这种模块化设计理念非常适于自动化生产, 为后续的吉瓦级产能扩张奠定了坚实的工程基础。近年来在高温密封玻璃资料与铁素体不锈钢双极板等关键辅助部件上的系列突破, 成功化解了长期困扰平板式电堆的气密性保障与异质材料间热膨胀匹配两大核心难题, 最终推动其能量密度实现了近 1 个数量级的跨越式提升。

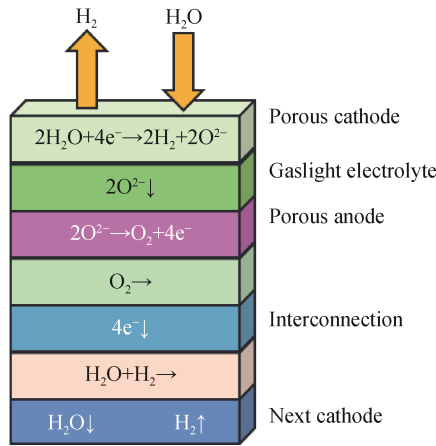


图3 SOEC 单电池结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of SOEC single cell structure

1.3 SOEC 电解技术优势

电解水制氢成本由电价与设备折旧两部分叠加，三类主流槽型(AWE、PEM、SOEC)概览见表 1。隔膜材质沿用陶瓷、橡胶或石墨多孔层<sup>[42–45]</sup>。贵金属价格推高催化剂成本，研究重心已转向硫、氧、氮、碳、磷化物等非贵金属体系<sup>[46–51]</sup>。

AWE 技术最成熟，但单槽体积大、电流密度低于 0.8 A·cm<sup>-2</sup>，扩容受限<sup>[52, 53]</sup>；PEM 以固体膜代

隔膜，实现<2 cm 的窄腔设计与 2 A·cm<sup>-2</sup> 级电流密度，运维简便，惟设备造价仍高，系统效率暂低于 65%。SOEC 走高温固态路线，运行温度 650~1000 °C，电极反应活化能垒下降，理论电解电压降低约 30%，槽效率突破 80%。高热工况可直接耦合太阳能集热、风电余热或地热，实现热–电协同，进一步提升系统能量利用率。电解质与电极均采用陶瓷或非贵金属，摆脱铂、铱依赖；同一电堆可逆运行，兼顾电解与燃料电池模式，设备利用率倍增。高温陶瓷封装赋予宽温–压操作窗口，对冷热冲击与进气波动容忍度显著优于低温膜技术，原材料供应链风险与资源约束同步下降。

SOEC 与可再生能源耦合可在 600~1000 °C 实现高效、低电耗的绿氢生产<sup>[54]</sup>。Chi 等<sup>[55]</sup>证实该电堆在直流或交流供电下均能保持稳定，并可通过风光互补构建发电–制氢一体化单元，启停时间短，调度灵活，适配风光出力波动。高温运行需持续外部热量维持反应速率，将 SOEC 直接接入聚光太阳能、风电余热或地热系统，以可再生热源替代电加热，是降低一次能耗、放大单堆产能的可行路线<sup>[56]</sup>。

表 1 3 种电解水技术的特点<sup>[57–62]</sup>

Table 1 Characteristics of three water electrolysis technologies<sup>[57–62]</sup>

Water electrolysis technology	Cathode reaction (H <sub>2</sub> production)		Anode reaction (O <sub>2</sub> production)		Current density/(A·cm <sup>-2</sup> )	Efficiency
Alkaline water electrolysis (AWE)	2H <sub>2</sub> O+2e <sup>-</sup> →H <sub>2</sub> +2OH <sup>-</sup>		4OH <sup>-</sup> →2H <sub>2</sub> O+O <sub>2</sub> +4e <sup>-</sup>		0.2–1.0	50%–78%
Proton exchange membrane water electrolysis (PEM)	2H <sup>+</sup> +2e <sup>-</sup> →H <sub>2</sub>		2H <sub>2</sub> O→O <sub>2</sub> +4H <sup>+</sup> +4e <sup>-</sup>		1.0–2.0	50%–83%
Solid oxide water electrolysis (SOEC)	H <sub>2</sub> O+2e <sup>-</sup> →H <sub>2</sub> +O <sup>2-</sup>		2O <sup>2-</sup> →O <sub>2</sub> +4e <sup>-</sup>		0.3–1.0	81%–89%
Water electrolysis technology	Operating temperature/°C	Electrolysis energy consumption/(MJ·m <sup>-3</sup> )	H <sub>2</sub> purity/%	Electrolytic cell lifespan/h	Cell pressure/MPa	Voltage range (limits)
Alkaline water electrolysis (AWE)	70–90	4.5–5.5	99.5000–99.9998	55 000–96 000	<3	1.4–3.0 V
Proton exchange membrane water electrolysis (PEM)	50–83	4.0–5.0	99.9000–99.9999	60 000–100 000	<7	1.4–2.5 V
Solid oxide water electrolysis (SOEC)	650–1000	<3.5	99.9000	16 000	<0.1	1.0–1.5 V

2 SOEC 电解制氢发展现状及面临的问题

2.1 SOEC 电解制氢发展现状

SOEC 概念始于 1960 年代 NASA 火星原位氧项目，最初目标为共电解 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 供宇航员呼吸与制

火箭推进剂。七十年代石油危机把人们的视线拉回地球，欧美相继启动地面制氢计划。进入 21 世纪，材料体系迭代使 YSZ、LSM 等廉价陶瓷取代铂族金属，单电池性能 15 年内提升 2.5 倍，主要归因于氢电极微结构优化；蒸汽发生器、换热器、压缩机等 BOP 部件同步成熟。自加热策略缩短启动时间，中

温(500~700 °C)新材料方案降低热应力与退化速率,为商业化铺路<sup>[76]</sup>。

近年研究进一步拓宽应用场景: Song 等<sup>[77]</sup>采用 CeO<sub>2</sub>浸渍、V 掺杂 LSF 阴极及 LSTN 原位析 Ni 等手段提升催化活性,并系统总结团聚、挥发、积碳、毒化、结构分解等衰减机理。Afroze 等<sup>[78]</sup>指出氧离子-质子混合导电 Hybrid-SOEC 可并行产氢产氧,效率高于单一模式。Wolf 等<sup>[79]</sup>对 600~900 °C 长期运行数据开展系统分析,确认 5 年内性能衰减可控制在 ≤20%; Topsoc 堆 2250 h 实测耗电 <36 kW·h·kg<sup>-1</sup> H<sub>2</sub>, 比 AWE 与 PEM 低 25%~30%, 验证高温路径在能效与寿命维度的双重竞争力。

综上, SOEC 可在电解态将可再生电力转为氢或合成气,亦可在燃料电池态逆向放电,完成电-化学能双向转换,兼具长时、大容量储能功能。然而,材料在循环氧化-还原环境下的耐久性与跨模式切换的控制策略仍是制约其规模商用的两大核心议题。

## 2.2 SOEC 电解制氢面临的问题

### 2.2.1 关键材料研发

SOEC 技术能否放大,归根结底取决于材料在 650~1000 °C 水蒸气分压下的长期可靠性。与 SOFC 类似,电解质、电极与连接体必须同时满足热匹配、化学惰性、抗热震、易加工和低成本 5 项硬指标<sup>[80-81]</sup>; 但 SOFC 以“发电”为核心, SOEC 以“产氢”为目标,运行气氛更还原、氧分压更低,材料退化路径不同,因此 SOFC 的成熟配方只能作为起点。电解质层面,氧化锆基体系仍是最均衡的氧离子导体,当前主攻方向是薄膜化:把 YSZ、ScSZ 或 GDC 功能层厚度降至 5~15 μm,可在不牺牲致密性的前提下将欧姆损耗压低 30%以上,直接放大单槽电流密度并缩减电堆尺寸,可为降本提供最直接的技术抓手。

与电解质薄膜化相比,氢电极在 SOEC 工况下的退化机制更为复杂,研究权重也更高。稳态电解时,阴极腔 H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 比显著高于 SOFC, Ni-YSZ 仍可保持足够的电子通路并长期运行; 然而一旦停机或气氛波动, Ni 颗粒氧化再还原伴随体积循环,骨架开裂、三相边界缩短不可避免<sup>[82-83]</sup>。钙钛矿型 MIEC 氧化物(SrTiO<sub>3</sub>基、LaCrO<sub>3</sub>基等)因本征氧空位可调,氧化还原零膨胀,且抗硫、抗碳,被视为 Ni-YSZ 的替代候选,但电子电导率普遍低于金属 Ni, 0.5 A·cm<sup>-2</sup> 以上高电流密度下极化损耗仍偏大。权衡性能与可靠性,当前兆瓦级电堆的氢电极仍以 Ni-YSZ 为主,钙钛矿体系处于 1~5 kW 短堆

验证阶段。

SOEC 电解水制氢的核心反应只有 2 步: 阴极把水还原成 H<sub>2</sub>, 阳极把氧析出成 O<sub>2</sub>。后者过电位高,是极化损失的主要来源,因此阳极活化是国际攻关焦点。Nature、Science 近期多篇论文均指向混合离子-电子导体(MIEC), Park 等<sup>[84]</sup>证明其可把反应区从三相边界扩展到整个电极表面,加速 OER。钙钛矿、Ruddlesden-Popper 层状氧化物、双钙钛矿是 MIEC 研究最集中的体系。材料本体之外,界面 2~3 μm 微区决定性能上限。Gu 等<sup>[85]</sup>用浸渍法在 Ni-YSZ 氢电极表面锚定 Ni-SDC 纳米颗粒, 750 °C、1.3 V 下 H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> 共电解电流密度升至 2.15 A·cm<sup>-2</sup>, 为空白样的 1.8 倍; 在 20%H<sub>2</sub>-60%H<sub>2</sub>O-20%CO<sub>2</sub> 气氛中连续运行 200 h 无衰减, CO<sub>2</sub> 选择性同步提高,合成气 H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 比可通过浸渍量精准调节。图 4 为 Ni-SDC 纳米颗粒随前驱体浓度增加均匀覆盖 Ni-YSZ 晶界; 由图 5 可见, EIS 表明浸渍后极化阻抗增长速率下降一半,证实纳米包覆抑制了 Ni 粗化与导电网络断裂。Gaikwad 等<sup>[86]</sup>综述了电极/电解质界面演化规律,为 MIEC 本体-界面协同优化提供了系统依据。

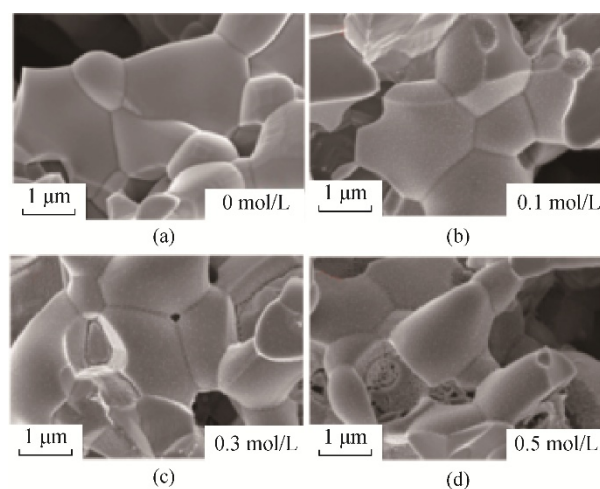


图 4 Ni-YSZ 燃料电极浸渍后的形貌与物理变化。(a~d) 0~0.5 mol/L Ni-SDC 前驱液浓度下 Ni-YSZ 支撑层的 SEM 照片<sup>[85]</sup>

Fig. 4 Morphology and physical changes of Ni-YSZ fuel electrode after immersion. SEM image of Ni-YSZ support layer at (a-d) 0~0.5 mol/L Ni-SDC precursor concentration<sup>[85]</sup>

### 2.2.2 电堆衰减问题

电堆是 SOEC 系统的功能核心,由膜电极、双极板、密封圈、互连件、支撑框架、流道及 BOP 辅机共同集成。连续运行于高温高湿环境时,材料退化与力学失效并行: YSZ 电解

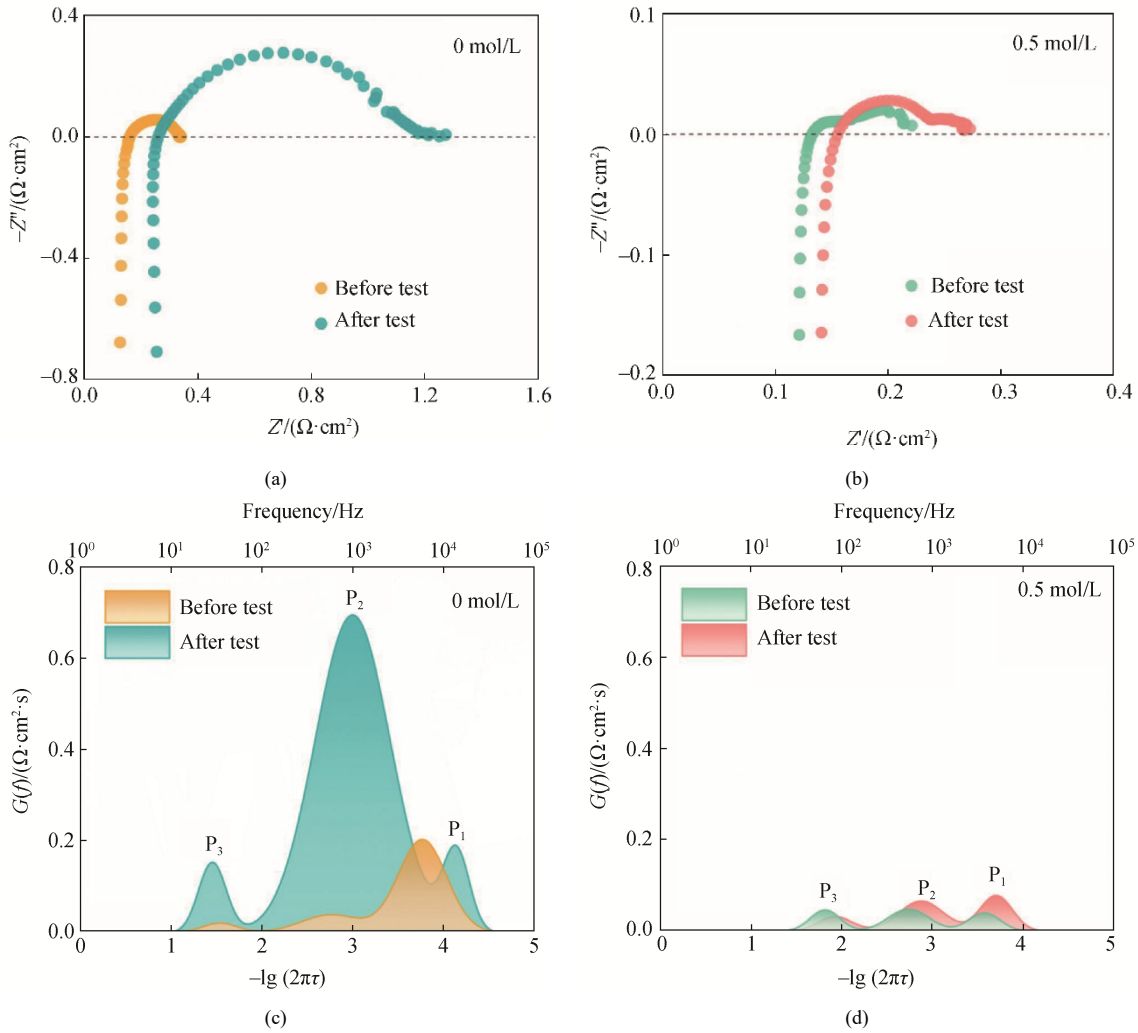


图 5 长期测试前后未浸渍电池(a, c)与 0.5 mol/L Ni-SDC 先驱液浸渍电池(b, d)的 EIS 及 DRT 分析<sup>[85]</sup>

Fig. 5 EIS and DRT analysis of non impregnated batteries (a, c) and 0.5 mol/L Ni-SDC precursor impregnated batteries (b, d) before and after long-term testing<sup>[85]</sup>

质可发生 t→m 相变并伴随晶粒长大, 离子电导率下降; 镍基氢电极被氧化或积碳后体积循环, 颗粒粗化、三相边界缩短; 玻璃基密封层失弹、裂纹扩展, 引起气体串漏, 渗透分子进一步侵蚀电解质。

在高电流密度的条件下, 焦耳热和电化学反应的速率会同步升高, 导致电极与界面之间的反应变得更加剧烈<sup>[87]</sup>; 而频繁的启停操作所带来的热循环在 20~30 °C·min<sup>-1</sup> 的温度梯度范围内会产生周期性的应力, 诱发膜板发生分层、密封沟槽出现开裂, 或者是互连焊缝产生疲劳<sup>[88]</sup>, 要是结构的完整性受到损伤, 气密性以及电接触都会同步恶化, 导致电堆的性能呈现出不可逆转的跌落, 为能够对电堆的衰减进行抑制, Liu 等<sup>[89]</sup>制备一系列 PrBaCo<sub>2-x</sub>Fe<sub>x</sub>O<sub>5+δ</sub> 钙钛矿阳极, 借助中子粉末衍射 (NPD)、同步辐射 X 射线粉末衍射 (SXRPD) 以及高角环形暗场扫描透射电子显微镜 (HAADF-STEM) 来对

阳离子的有序度进行定量分析, 有序度最高的 PrBaCo<sub>2-x</sub>Fe<sub>x</sub>O<sub>5+δ</sub> 样品在 800 °C、2.0 V 条件下的 OER 电流密度为 3.40 A·cm<sup>-2</sup>, 证实了阳离子有序度可作为阳极筛选的新型描述符, Liu 等<sup>[90]</sup>利用 Topsoe TSP-1 电堆开展长达 2104 h 的动态工况实验, 对风电的功率波动进行模拟, 且把恒定流量 (CF) 与恒定转化率 (CC) 这 2 种控制策略进行对比, 结果如图 6 所示: CC 策略所需要的外部热量更少, 而且电堆的性能波动情况与稳态运行是相当的, 没有出现额外的退化, 验证 SOEC 对于间歇性电源的适应性, Shao 等<sup>[91]</sup>选用 16 cm<sup>2</sup> Ni-YSZ 单电池, 在 2 A·cm<sup>-2</sup>、336 h 的恒电流电解过程中观察到 54.6 mV/100 h 的初始退化率, 随后降低到 11.0 mV/100 h; EIS 的解析结果表明, Ni 颗粒的粗化以及界面离子传输阻抗的增大是主要原因, 这为高电流密度下的电堆设计提供了量化的边界条件。

电堆的衰减其实是材料、工况以及系统这三者之间相互耦合导致的, 所以得从整体的视角来进行治理, 在材料这方面, 研究人员要推进电解质薄膜化以及高熵钙钛矿阳极这 2 项工作, 这样能把欧姆损耗和极化损耗降下来; 而在设计这方面, 选用金属支撑结构, 且采用梯度热膨胀密封, 把热循环应力控制在 200 MPa 以内。操作域: 电流密度 $\leq 1.5 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ 、升温速率 $\leq 3 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 、水蒸气分压 0.4~0.6 atm(标准大气压), 可将年衰减率压至 1% 以内。系统级: 在线电压巡检+80 V 上限硬截断, 避免高电位驱动相变; CA/CV/EIS 实时提取电荷转移阻抗, SEM-EDX 定量界面 Cr、Si 毒化深度, 建立衰减数字孪生模型, 提前 200 h 预警并反向优化运行参数, 实现寿命由  $1\times 10^4 \text{ h}$  级提升至  $5\times 10^4 \text{ h}$  级。

在 SOEC 严峻的阳极运行环境(高氧分压、高电位)下, 氧电极的稳定性是决定电堆寿命的关键因素之一。其衰减机理复杂, 主要包括: 1) 界面分层(delamination): 在高电流密度下, 氧离子在电极/电解质界面大量析出形成氧气, 若生成速率超过逸出速率, 会在界面处积聚形成高压氧泡, 导致电极从电解质上物理剥离, 这是最致命的失效模式。2) 元素偏析与毒化: 对于钙钛矿型氧电极(如 LSCF), 锶(Sr)元素易在表面偏析形成绝缘性的 SrO 层, 阻碍氧交换反应; 同时, 连接体合金中铬(Cr)元素的挥发物会在电极表面沉积, 形成铬酸盐, 毒化活性

位点。3) 相结构演变: 某些电极材料在长期高温氧化气氛下可能发生相变, 导致电子电导率或氧表面交换系数下降。因此, 开发兼具高催化活性、强界面结合力及抗偏析/毒化能力的新型氧电极材料是当前研究的重点。

2.2.3 系统构建问题 SOEC 热力系统必须把 650~1000  $^\circ\text{C}$  的高温工况拆成 3 条线: 材料线、热流管、寿命线。材料端, 电堆、换热器、管道须同步选用铁素体不锈钢或镍基合金, 并在 750  $^\circ\text{C}$  给出  $10^4 \text{ h}$  抗氧化极限; 热管理端, 入口蒸汽 200  $^\circ\text{C}$  左右, 出口尾气 800  $^\circ\text{C}$ , 靠回热器把高温端焓值“搬”到低温端, 但受比热容下降与夹点温差限制, 回热后蒸汽仅达 500~600  $^\circ\text{C}$ , 仍需电辅热补温至 750  $^\circ\text{C}$ , 额外电耗 30~40  $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{t}^{-1} \text{ H}_2$ , 系统总效率因此下降 3%~5%<sup>[92]</sup>。系统运行过程中会产生退化现象, 增加电阻, 释放热量, 运行演变规律如图 6 所示<sup>[90]</sup>。据 IEA 2022 年数据显示, SOEC 系统 CAPEX 19.6~39.2  $\text{kW}^{-1}/\text{元}$ , 为 PEM 的 2~4 倍、ALK 的 3~6 倍。寿命瓶颈更突出, 公开报道的堆平均寿命  $< 10^4 \text{ h}$ , 距离  $5\times 10^4 \text{ h}$  市场门槛仍有 5 倍差距<sup>[93]</sup>。缩短路径明确: 回热器夹点温差由 50  $^\circ\text{C}$  压至 20  $^\circ\text{C}$ , 电辅热负荷可再降 20%; 电极衰减率若能由现行 5~6  $\text{mV}\cdot\text{k}\cdot\text{h}^{-1}$  降至 1  $\text{mV}\cdot\text{k}\cdot\text{h}^{-1}$ , 寿命即可逼近  $5\times 10^4 \text{ h}$ , 届时 CAPEX 按年化摊销将首次与 PEM 可比。

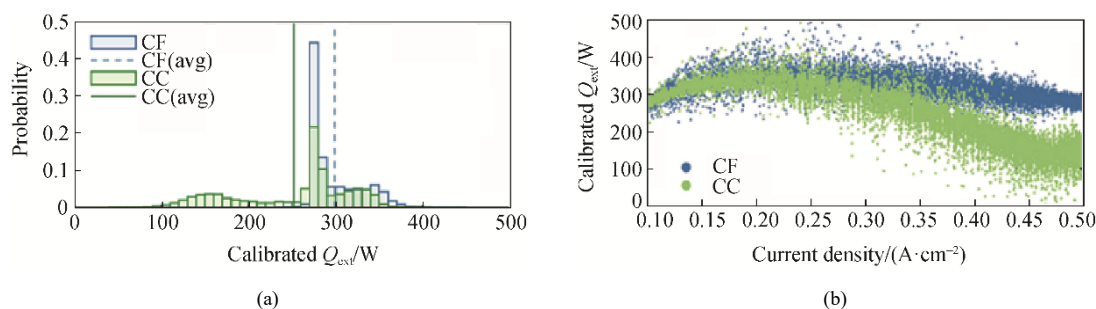


图 6 2104 小时测试期间的(a)演变及(b)概率分布<sup>[90]</sup>

Fig. 6 (a) Evolution and (b) probability distribution during the 2104 h testing period<sup>[90]</sup>

### 3 SOEC 结合可再生能源制氢

可再生能源本身清洁、可持续, 而且分布范围很广, 这能够给 SOEC 直接提供高温热源, 规避纯电路线中电价过高这个瓶颈问题。SOEC 跟那些具有波动性的可再生能源, 如风电、光伏等开展耦合, 虽然说是实现绿氢生产的一条理想路径, 不过这也给 SOEC 技术的动态响应能力以及长期

耐久性带来了比较严峻的挑战, 可再生能源功率的随机波动, 会导致 SOEC 电堆不得不经频繁的热循环以及负载循环, 剧烈的温度变化, 会因为各个组件材料的热膨胀系数不匹配而引入巨大的热应力, 诱发密封失效、电极分层或者开裂; 而电流密度的快速变化, 则会加速电极微结构, 比如 Ni 颗粒的老化, 为应对这些挑战, 得从材料、电堆以及系统这 3 个层面来开展协同优化工作:

在材料层面，去开发那些抗热震性能特别优异的金属支撑结构、热膨胀系数相匹配的电极与电解质体系，这是基础所在；在系统层面，通常会运用热管理缓冲，比如集成高温储热罐，以及功率平滑策略，与电网或者蓄电池进行协同，来把波动的能源输入转化成相对平稳的热、电负载，让 SOEC 能够尽量在准稳态工况下工作，以此来保障它的运行效率与寿命，现在的太阳能制氢以光解为主：光催化的 STH 效率只有 1%~2%，光电法的效率也不足 5%，而且电价占到氢成本的 60%~80%<sup>[94-95]</sup>，把聚光太阳能(CSP)的热量接入到 SOEC 中，能够在 650~900 °C 的热区实现“光-热-氢”的梯级利用：包括太阳能热化学循环、光热-电解水或者光热-重整耦合等方案，理论上的太阳能到氢能转化效率能够达到 35%~45%<sup>[96-98]</sup>，这比光解路线要高出 1 个数量级，同时还省去光伏-电解的双重转换损失，为绿氢提供了一条低电耗、高温、连续化的新路径。

风光富电耦合 SOEC 可把弃电转成高温热源与电解功，双重摊薄制氢成本。Houaijia<sup>[99]</sup>以 80 MW 风-塔式太阳能集成 HTSE 系统(参考 DLR 于利希塔)做稳态测算：接收器-氢高热值效率(HHV)效率 26%，全链太阳能-氢 18%，额定产氢 680 kg·h<sup>-1</sup>，但稳态仅维持 8 h，凸显储热容量对连续性的制约。Ahmadi<sup>[100]</sup>对阿富汗赫尔曼德省评估显示，Laškar Gāh 光伏电价 0.066 美元/(kW·h)每对应绿氢 2.15 美元/kg；Sangang-n 风电电价 0.057 美元/(kW·h)，氢价降至 1.45 美元/kg，成本已低于中东天然气重整氢边界。Guo 等<sup>[101]</sup>提出地热-SOEC 多联产：汽轮机 200 °C 乏汽直接进槽，产氢 6.52 g·s<sup>-1</sup> (耗电 884 kW)，后续 Sabatier 制 CH<sub>4</sub> 22.9 g·s<sup>-1</sup> (LHV 28.5 MJ·kg<sup>-1</sup>)，副产电 554 kW、冷 3.7 MW、淡水 41 kg·s<sup>-1</sup>，投资回收期 7.3 年；多目标优化后发电量提高 88%，燃料回收期缩短 18.7%，LHV 提升 35%。上述案例证实：可再生电力/热力与 SOEC 深度耦合，可在源侧把弃电、中低温余热升级为高品位化学能，大幅降低绿氢平准化成本，加速与化石能源制氢平价。

## 4 SOEC 电解制氢技术商业化进程

### 4.1 政策引导与核心技术突破阶段

SOEC 技术初期的商业化探索主要依赖于国家级能源战略的推动。美国能源部(DOE)在“氢能地球”计划中明确提出“每公斤氢/1 美元”的终极目标，并通过国家实验室体系组织关键技术攻关<sup>[102]</sup>。此阶

段的技术瓶颈主要集中在两个方面：Ni-YSZ 金属陶瓷电极在高温水蒸气环境下的微观结构演变规律，以及多节电堆在热循环过程中的界面失效机制。

美国爱达荷国家实验室(INL)的研究表明，在 750 °C、蒸汽转化率 70% 的工况下，经过 2000 h 连续运行后，传统 Ni-YSZ 电极的极化阻抗增加了约 28%，这主要源于镍颗粒的粗化现象<sup>[103]</sup>。欧盟通过“氢能联合计划”(FCH JU)支持开发的 250 kW 示范系统，在德国实现了与风电场的直接耦合运行，系统可用率达到 85% 以上，验证了 SOEC 对间歇性电源的基本适应性<sup>[104]</sup>。

这一阶段的技术成熟度(TRL)从 3~4 级提升至 5~6 级，为后续的工程化放大奠定了重要基础。值得注意的是，欧盟项目的技术经济评估报告指出，当时的平准化制氢成本(LCOH)仍在 6~8 美元/kg 范围内，显著高于政策目标。

### 4.2 工程验证与产业生态培育阶段

随着 YSZ 电解质薄膜制备技术的突破(厚度降至 10 μm 以下)，SOEC 技术进入了工程化验证的关键时期。欧洲企业展现出明显的先发优势，形成了完整的产业生态体系。

丹麦 Topsoe 公司建设的全球首条 500 MW 自动化生产线，采用连续流延成型工艺，将单电池生产成本降低了 40%<sup>[105]</sup>。其 350 kW 模块实现了高于 93% 的电-氢效率，直流电耗低于 36 kW·h/kg H<sub>2</sub>。德国 Sunfire 公司建设的 200 MW 产线，其 2.4 MW 系统在荷兰的工业示范中验证了卓越的动态响应能力，在应对±25%额定功率波动时，电压变化率控制在 1.5 mV/h 以内<sup>[106]</sup>。

美国 Bloom Energy 在 NASA Ames 投运的 4 MW 系统，日产氢 2.4 t，较同规模低温电解槽产氢量提高 20%~25%。Bosch 公司利用成熟热喷涂工艺建设的 94 MW 自动化产线，标志着传统制造业巨头正式进入 SOEC 领域。

中国 SOEC 产业呈现出“单堆—系统—园区”的三级跨越发展态势。2024 年 12 月，国家发改委将 SOEC 纳入首批“绿色低碳先进技术示范”清单，提供 30% 资本金和 1.5% 低息贷款支持。根据国家绿氢供给体系规划，2030 年 SOEC 装机容量目标不低于 3 GW<sup>[107]</sup>。

在产业布局方面，国家电投、中广核、三峡集团等央企设立规模达 10 亿元的 SOEC 专项基金，重点支持单堆≥50 kW、寿命≥3×10<sup>4</sup> h 的示范项目。2025 年计划开工 6 个 100 MW 级园区多能流耦合基

地, 构建“风光-储热-SOEC-绿色甲醇”一体化商业模式。

技术研发实现从“材料探索”向“工程收敛”的转变。国内产业链在关键材料与制造工艺方面取得显著突破: 电解质体系: 电解质 8%(摩尔分数) YSZ 厚度降至 8  $\mu\text{m}$  成为主流, 中国科学院山西煤化所开发的“梯度烧结”工艺, 使单电池合格率从 65% 提升至 92%<sup>[108]</sup>; 电极结构: Ni-YSZ 梯度过渡层配合 SDC 纳米包覆, 使氧化-还原循环寿命提升 3 倍; 系统集成: 金属支撑构型实现 400  $^{\circ}\text{C}$  热冲击不裂, 启停时间缩短至 45 min。

### 4.3 测试验证与标准化体系

鄂尔多斯 50 MW 风光-SOEC 联供示范项目完成 72 h 连续考核, 系统电-氢效率达 87%, 负荷 20%~100% 阶跃在 5 min 内完成跟踪, 首次验证了国产 SOEC 在“大电流密度+频繁波动”双严苛工况下的可靠性。

全国氢能标准化委员会正在制定固体氧化物电解槽性能测试方法, 拟将 750  $^{\circ}\text{C}$ 、1 A/ $\text{cm}^2$  稳态运行 1000 h 明确为型式试验的门槛, 北京低碳院建成的 100 kW 级 SOEC 公共测试平台, 给行业提供了电化学阻抗、热循环以及加压泄漏三维同步测试的能力。

### 4.4 规模效应与成本竞争力形成阶段

鉴于技术发展呈现出的态势, SOEC 产业正在迎来实现规模化发展的关键转折点, 头部企业发布激进的产能扩张路线图: Sunfire 计划到 2030 年得以实现 6 GW 的年产能, Topsoe 计划把产能扩展至 5 GW, 国家电投山东院联合 Sunfire 在潍坊动工的 1 GW 级金属支撑 SOEC 产线, 其一期 200 MW 将于 2026 年第 2 季度进行投产<sup>[109]</sup>, 成本下降的路径相当清晰明确。主要依赖 3 个方面协同推进: 实现规模化与自动化生产后, 产能每翻一番, 制造成本就会下降 18%~22%; 在材料与结构创新方面, 选用金属支撑体这类新型结构, 能够减少贵金属的使用量; 进行系统集成优化, 借助热管理的手段, 把辅助功耗从 12% 降低到 8% 以下, IEA 预测, 要是全球 SOEC 产能从百兆瓦级提升到吉瓦级, 那么系统成本就能从 2000~4000 美元/kW 降到 1000 美元/kW 以下, 欧盟依靠“H2Biga”以及 IPCEI 计划, 投入超过 3 亿欧元, 目的是在 5 年内把技术成熟度从 TRL7 提高到 TRL9, 预计到 2027 年, 电堆成本会跌破 1500 元/kW, 寿命达到  $5 \times 10^4$  h<sup>[110]</sup>, 与 PEM 电解槽实现成本平价, 临界点的到来, 会推动 SOEC 技术在钢铁、化工等难减排行业当中

的快速渗透, 支撑全球绿色氢能供给体系的建设。

## 5 SOEC 电解制氢技术应用展望

绿氢要真正实现规模落地, 其实就是“双碳”目标和能源安全的一个重要交汇点, 鉴于 SOEC 在高温以及高效方面的特性, 该技术被大家寄予成为下一代主力路线的厚望, 不过要想实现商业化, 还得打通 3 道关口:

1) 氢电极: Ni-YSZ 虽说工艺方面已经比较成熟, 但还是难以摆脱氧化与还原体积循环带来的瓶颈问题; 开发既具备 MIEC 特性, 又能抗硫以及碳毒化, 同时在热膨胀方面相匹配的钙钛矿替代体系, 借助 A/B 位共掺、表面晶格应变以及纳米异质界面设计, 把 750  $^{\circ}\text{C}$  时的极化阻抗降到 0.1  $\Omega \cdot \text{cm}^2$  以下, 且保证  $5 \times 10^4$  h 内结构不发生崩塌, 这是材料端必须要跨越的一道门槛。

2) 衰减机理: 在高温水蒸气和电场耦合的情况下, 电极团聚、界面 Cr 扩散以及玻璃密封失效等多种因素交织在一起, 必须建立起“工况-电化学信号-微结构”之间的一一对应关系; 借助 CA/CV/EIS 在线捕获电荷转移阻抗的演变, 结合 SEM-EDX、TOF-SIMS 与同步辐射 XRD 实现 3D 化学成像, 构建寿命预测数字孪生, 提前 500 h 给出干预阈值, 为运维提供可操作的“预防窗口”。

3) 可再生耦合: 风光出力波动与 SOEC 热惯性匹配需借助“热能缓冲”以及“功率缓冲”这两个通道来解决: 把聚光太阳能或者风电余热先送入 800  $^{\circ}\text{C}$  的熔盐或者陶瓷球储热罐, 以此来平抑 30 min 级别的波动; 电解槽选用金属支撑加上薄电解质架构, 允许 20% 的功率阶跃在 5 min 内完成, 实现热-电双源随动, 系统年利用小时数 > 7500 h, 绿氢成本  $\leq 1.5$  美元/kg, 为吉瓦级部署提供可复制的工程范式。

## 6 总结与展望

随着风光发电成本的持续下降与化工、冶金等领域对绿氢需求的增长, SOEC 技术有望在“风光-氢-氨-醇”一体化项目、分布式供能系统及绿色炼化等场景中实现规模化应用, 成为支撑我国“双碳”目标实现的核心技术之一。

在全球能源体系向着低碳化方向进行转型的宏观背景之下, 氢能作为拥有零碳排放特性的二次能源载体, 其所具备的战略价值正日益凸显出来, 在众多的制氢技术路线当中, SOEC 技术凭借其独特

的高温运行特性，表现出显著的材料成本以及系统能效方面的优势，跟低温电解技术，如 ALK 以及 PEM 这些技术相比，SOEC 选用非贵金属陶瓷材料体系，在 650~1000 °C 的工作温度环境下，电化学反应动力学得以显著加速，理论电解效率能够达到 80% 以上，这对降低绿氢平准化成本(LCOH)提供了一条重要的路径。

国内的 SOEC 技术目前还停留在十千瓦到百千瓦级别的示范阶段，想要真正走向规模化的商业应用，还得解决一系列的技术瓶颈，这主要体现在“三高一低”的挑战上：也就是在提高单堆功率密度、长期运行的耐久性以及系统集成度的基础上要能够有效地去控制投资和运营成本，为能够突破上面提到的这些瓶颈。我们需要从材料创新、系统耦合以及产业生态这 3 个维度来协同推进：

1) 在材料与结构集成创新方面：发展电极、电解质以及密封玻璃的一体化设计方法，借助微观结构调控以及界面应力优化，得以实现  $2\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$  高电流密度下，性能衰减速率低于  $1\text{ mV/kh}$ ，极大程度提升电堆运行寿命。

2) 多能耦合系统的优化工作：推进 SOEC 与工业余热以及可再生能源的协同集成，借助 200~300 °C 的中低温废热，能够对系统的热需求进行有效补偿，降低大约 30% 的外源电耗，让能量利用效率得到全面提升。

3) 推进产业链的自主化建设工作：打造从粉体材料、单电池制备、电堆组装一直到系统集成的完整国产供应链，主要目标是能够把电堆成本控制在  $\leq 2500\text{ 元/kW}$ ，设计寿命达到  $\geq 5\times 10^4\text{ h}$ ，以此来为大规模部署奠定基础。

SOEC 在能效方面的优势相当明显，不过它的大规模推广还是面临着 3 个主要的制约因素：氧电极这类关键材料在高温且水汽分压较高的环境里会发生持续的退化，功率出现波动的情况会对电堆的机械完整性和电化学完整性产生影响，以及产生比较高的初始投资成本，未来的研发工作需要把重点放在以下几个方面：去开发那些稳定性更高的新型电极材料、建立起能够适应波动性电源的热、电以及质量管理策略，还有推动全产业链的标准化工作进行成本控制。

鉴于风光发电的成本在不断下降，再加上化工和冶金等行业对绿氢的需求一直在增长，SOEC 技术有望在“风光-氢-氨-醇”一体化项目、分布式供能系统以及绿色炼化等场景当中实现规模化应用，会成为

支撑中国“双碳”目标得以实现的核心技术之一。

#### 参考文献:

- [1] 李德胜, 郭虎, 胡莹珍, 等. 固体氧化物电解池关键材料及其海水电解研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(10): 2712–2726.  
LI Desheng, GUO Hu, HU Yingzhen, et al. J Chin Ceram Soc, 2023, 51(10): 2712–2726.
- [2] JIANG J H, XIE K, LIU Y H, et al. Hydrogen production technology promotes the analysis and prospect of the hydrogen fuel cell vehicles development under the background of carbon peak and carbon neutrality in China[J]. ACS Omega, 2022, 7(45): 40625–40637.
- [3] CHEN Z J, WEI W, NI B J. Cost-effective catalysts for renewable hydrogen production via electrochemical water splitting: Recent advances[J]. Curr Opin Green Sustain Chem, 2021, 27: 100398.
- [4] 国家统计局人口和就业统计司. 中国统计年鉴—2021(总第 40 期), No.40[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- [5] NAJJAR Y S H. Hydrogen safety: The road toward green technology[J]. Int J Hydrog Energy, 2013, 38(25): 10716–10728.
- [6] VOGEL B, FECK T, GROOß J U, et al. Impact of a possible future global hydrogen economy on Arctic stratospheric ozone loss[J]. Energy Environ Sci, 2012, 5(4): 6445–6452.
- [7] JACOBSON M Z. Effects of wind-powered hydrogen fuel cell vehicles on stratospheric ozone and global climate[J]. Geophys Res Lett, 2008, 35(19): 2008GL035102.
- [8] KAZIM A, VEZIROGLU T N. Utilization of solar-hydrogen energy in the UAE to maintain its share in the world energy market for the 21st century[J]. Renew Energy, 2001, 24(2): 259–274.
- [9] 刘明义, 于波, 徐景明. 固体氧化物电解水制氢系统效率[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(6): 868–871.  
LIU Mingyi, YU Bo, XU Jingming. J Tsinghua Univ Sci Technol, 2009, 49(6): 868–871.
- [10] NAGASAWA K, ISHIDA T, KASHIWAGI H, et al. Design and characterization of compact proton exchange membrane water electrolyzer for component evaluation test[J]. Int J Hydrog Energy, 2021, 46(74): 36619–36628.
- [11] CASTEEL M, WESTOVER T L, SHIGREKAR A, et al. Ultra-high efficiency hydrogen production using a large-scale solid oxide electrolysis cell system[J]. Int J Hydrog Energy, 2025, 157: 150283.
- [12] BERG F, SHVIRO M, CARMO M, et al. Evaluation of simplified test rig for high throughput screening of proton exchange membrane water electrolysis components[J]. Int J Hydrog Energy, 2025, 120: 385–392.
- [13] 谢镇阳, 郑建能, 任兰军, 等. 电解水绿氢制取装备与规模化应用路径[J]. 大型铸锻件. 2026(1): 1–7.  
XIE Zhenyang, ZHENG Jianneng, REN Lanjun, et al. Heavy Casting and Forging. 2026(1): 1–7.
- [14] 王彦哲, 周胜, 周湘文, 等. 中国不同制氢方式的成本分析[J]. 中国能源, 2021, 43(5): 29–37.  
WANG Yanzhe, ZHOU Sheng, ZHOU Xiangwen, et al. Energy China, 2021, 43(5): 29–37.
- [15] TANER T. The novel and innovative design with using H<sub>2</sub> fuel of PEM fuel cell: Efficiency of thermodynamic analyze[J]. Fuel, 2021, 302: 121109.
- [16] NAQVI S A H, TANER T, OZKAYMAK M, et al. Hydrogen production through alkaline electrolyzers: A techno-economic and enviro-economic analysis[J]. Chem Eng & Technol, 2023, 46(3): 474–481.

- [17] TANER T, NAQVI S A H, OZKAYMAK M. Techno-economic analysis of a more efficient hydrogen generation system prototype: A case study of PEM electrolyzer with Cr-C coated SS304 bipolar plates[J]. *Fuel Cells*, 2019, 19(1): 19–26.
- [18] JOLAOSO L A, BELLO I T, OJELADE O A, et al. Operational and scaling-up barriers of SOEC and mitigation strategies to boost H<sub>2</sub> production- a comprehensive review[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2023, 48(85): 33017–33041.
- [19] 刘玮, 万燕鸣, 熊亚林, 等. 碳中和目标下电解水制氢关键技术及价格平准化分析[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(11): 2888–2896.  
LIU Wei, WAN Yanming, XIONG Yalin, et al. *Trans China Electrotech Soc*, 2022, 37(11): 2888–2896.
- [20] SINGH S, JAIN S, PS V, et al. Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2015, 51: 623–633.
- [21] FAN X C, WANG W Q, SHI R J, et al. Hybrid pluripotent coupling system with wind and photovoltaic-hydrogen energy storage and the coal chemical industry in Hami, Xinjiang[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2017, 72: 950–960.
- [22] 陈志逸, 乐忠威, 艾娜, 等. 直接组装机原位制备固体氧化物电池的电极研究进展[J]. *陶瓷学报*, 2022, 43(5): 825–838.  
CHEN Zhiyi, YUE Zhongwei, AI Na, et al. *J Ceram*, 2022, 43(5): 825–838.
- [23] FONSECA J D, CAMARGO M, COMMENGE J M, et al. Trends in design of distributed energy systems using hydrogen as energy vector: A systematic literature review[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2019, 44(19): 9486–9504.
- [24] SPAZZAFUMO G, RAIMONDI G. Economic assessment of hydrogen production in a Renewable Energy Community in Italy[J]. *E Prime Adv Electr Eng Electron Energy*, 2023, 4: 100131.
- [25] YUE M L, LAMBERT H, PAHON E, et al. Hydrogen energy systems: A critical review of technologies, applications, trends and challenges[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2021, 146: 111180.
- [26] BURTON N A, PADILLA R V, ROSE A, et al. Increasing the efficiency of hydrogen production from solar powered water electrolysis[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2021, 135: 110255.
- [27] WANG M Y, WANG Z, GONG X Z, et al. The intensification technologies to water electrolysis for hydrogen production—A review[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2014, 29: 573–588.
- [28] BRAUNS J, TUREK T. Alkaline water electrolysis powered by renewable energy: A review[J]. *Processes*, 2020, 8(2): 248.
- [29] MOHAMMADI A, MEHRPOOYA M. Techno-economic analysis of hydrogen production by solid oxide electrolyzer coupled with dish collector[J]. *Energy Convers Manag*, 2018, 173: 167–178.
- [30] ZHANG Q Q, CHANG Z S, FU M K, et al. Thermal performance analysis of an integrated solar reactor using solid oxide electrolysis cells (SOEC) for hydrogen production[J]. *Energy Convers Manag*, 2022, 264: 115762.
- [31] SU C X, LÜ Z, WANG C Q, et al. Effects of a YSZ porous layer between electrolyte and oxygen electrode in solid oxide electrolysis cells on the electrochemical performance and stability[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2019, 44(29): 14493–14499.
- [32] YU B, ZHANG W Q, XU J M, et al. Preparation and electrochemical behavior of dense YSZ film for SOEC[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2012, 37(17): 12074–12080.
- [33] RAJENDRAN S, THANGAVEL N K, DING H P, et al. Tri-doped BaCeO(3)-BaZrO(3) as a chemically stable electrolyte with high proton-conductivity for intermediate temperature solid oxide electrolysis cells (SOECs)[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12(34): 38275–38284.
- [34] EXNER J, NAZARENUS T, KITA J, et al. Dense Y-doped ion conducting perovskite films of BaZrO<sub>3</sub>, BaSnO<sub>3</sub>, and BaCeO<sub>3</sub> for SOFC applications produced by powder aerosol deposition at room temperature[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2020, 45(16): 10000–10016.
- [35] BI L, TRAVERSA E. Steam electrolysis by proton-conducting solid oxide electrolysis cells (SOECs) with chemically stable BaZrO<sub>3</sub>-based electrolytes[J]. *ECS Trans*, 2015, 68(1): 3387–3393.
- [36] KOJ M, GIMPEL T, SCHADE W, et al. Laser structured nickel-iron electrodes for oxygen evolution in alkaline water electrolysis[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2019, 44(25): 12671–12684.
- [37] YANG H, LIU Y F, LIU X L, et al. Large-scale synthesis of N-doped carbon capsules supporting atomically dispersed iron for efficient oxygen reduction reaction electrocatalysis[J]. *eScience*, 2022, 2(2): 227–234.
- [38] WANG T Z, CAO X J, QIN H Y, et al. Integrating energy-saving hydrogen production with methanol electrooxidation over Mo modified Co<sub>4</sub>N nanoarrays[J]. *J Mater Chem A*, 2021, 9(37): 21094–21100.
- [39] ZHANG B, WANG J S, LIU J, et al. Dual-descriptor tailoring: The hydroxyl adsorption energy-dependent hydrogen evolution kinetics of high-valence state doped Ni<sub>3</sub>N in alkaline media[J]. *ACS Catal*, 2019, 9(10): 9332–9338.
- [40] ZHONG W W, TU W G, WANG Z P, et al. Ultralow-temperature assisted synthesis of single platinum atoms anchored on carbon nanotubes for efficiently electrocatalytic acidic hydrogen evolution[J]. *J Energy Chem*, 2020, 51: 280–284.
- [41] 彭美兰, 李智姗, 张肖鑫, 等. 原位析出制备固体氧化物电解池的“氧化铷-金属-钙钛矿”复合阴极材料[J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(4): 1015–1024.  
PENG Meilan, LI Zhishan, ZHANG Xiaoxin, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2023, 51(4): 1015–1024.
- [42] 马刚. 金属杂质离子对电解水制氢的影响研究[J]. *科技展望*, 2015, 25(13): 75.  
MA Gang. *Sci Technol*, 2015, 25(13): 75.
- [43] DU H T, KONG R M, QU F L, et al. Enhanced electrocatalysis for alkaline hydrogen evolution by Mn doping in a Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> nanosheet array[J]. *Chem Commun*, 2018, 54(72): 10100–10103.
- [44] LIU S H, LI B Y, MOHITE S V, et al. Ultrathin MoS<sub>2</sub> nanosheets *in situ* grown on rich defective Ni<sub>0.96</sub>S as heterojunction bifunctional electrocatalysts for alkaline water electrolysis[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2020, 45(55): 29929–29937.
- [45] ZHOU G Y, CHEN Y, DONG H, et al. Ultrafine monodisperse NiS/NiS<sub>2</sub> heteronanoparticles *in situ* grown on N-doped graphene nanosheets with enhanced electrocatalytic activity for hydrogen evolution reaction[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2019, 44(48): 26338–26346.
- [46] KONG W S, LUAN X Q, DU H T, et al. Enhanced electrocatalytic activity of water oxidation in an alkaline medium *via* Fe doping in CoS<sub>2</sub> nanosheets[J]. *Chem Commun*, 2019, 55(17): 2469–2472.
- [47] ZHANG J, WANG T, POHL D, et al. Interface engineering of MoS<sub>2</sub>/Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> heterostructures for highly enhanced electrochemical overall-water-splitting activity[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2016, 55(23): 6702–6707.
- [48] GUO K L, WANG Y T, HUANG J F, et al. *In situ* activated Co<sub>3-x</sub>Ni<sub>3</sub>O<sub>4</sub> as a highly active and ultrastable electrocatalyst for hydrogen generation[J]. *ACS Catal*, 2021, 11(13): 8174–8182.
- [49] JIN H Y, WANG X S, TANG C, et al. Stable and highly efficient hydrogen evolution from seawater enabled by an unsaturated nickel

- surface nitride[J]. *Adv Mater*, 2021, 33(13): e2007508.
- [50] CUI W, CHENG N Y, LIU Q, et al. Mo<sub>2</sub>C nanoparticles decorated graphitic carbon sheets: Biopolymer-derived solid-state synthesis and application as an efficient electrocatalyst for hydrogen generation[J]. *ACS Catal*, 2014, 4(8): 2658–2661.
- [51] YU X, XU S R, WANG Z, et al. An Mn-doped NiCoP flower-like structure as a highly efficient electrocatalyst for hydrogen evolution reaction in acidic and alkaline solutions with long duration[J]. *Nanoscale*, 2021, 13(25): 11069–11076.
- [52] GUO Z T, LIU L, WANG J Q, et al. Recent progress in CoP-based materials for electrochemical water splitting[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2021, 46(69): 34194–34215.
- [53] MOHITE S V, XING R M, LI B Y, et al. Spatial compartmentalization of cobalt phosphide in P-doped dual carbon shells for efficient alkaline overall water splitting[J]. *Inorg Chem*, 2020, 59(3): 1996–2004.
- [54] WENDEL C H, BRAUN R J. Design and techno-economic analysis of high efficiency reversible solid oxide cell systems for distributed energy storage[J]. *Appl Energy*, 2016, 172: 118–131.
- [55] CHI J, YU H M. Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production[J]. *Chin J Catal*, 2018, 39(3): 390–394.
- [56] WANG F, WANG L, OU Y L, et al. Thermodynamic analysis of solid oxide electrolyzer integration with engine waste heat recovery for hydrogen production[J]. *Case Stud Therm Eng*, 2021, 27: 101240.
- [57] JUNAID A, ABDULLAH M, BANO N, et al. Facile synthesis of strontium selenide supported copper sulfide hybrid nanosheets as an efficient electrode for high-performance OER[J]. *J Korean Ceram Soc*, 2024, 61(3): 469–481.
- [58] IMMERZ C, PAIDAR M, PAKONSTANTINOU G, et al. Effect of the MEA design on the performance of PEMWE single cells with different sizes[J]. *J Appl Electrochem*, 2018, 48(6): 701–711.
- [59] KHALILI M, KARIMIAN BAHNAMIRI F, MEHRPOOYA M. An integrated process configuration of solid oxide fuel/electrolyzer cells (SOFC-SOEC) and solar organic Rankine cycle (ORC) for cogeneration applications[J]. *Int J Energy Res*, 2021, 45(7): 11018–11040.
- [60] SCHMIDT O, GAMBHIR A, STAFFELL I, et al. Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2017, 42(52): 30470–30492.
- [61] HU K W, FANG J K, AI X M, et al. Comparative study of alkaline water electrolysis, proton exchange membrane water electrolysis and solid oxide electrolysis through multiphysics modeling[J]. *Appl Energy*, 2022, 312: 118788.
- [62] 赵雪莹, 李根蒂, 孙晓彤, 等. “双碳”目标下电解制氢关键技术及其应用进展[J]. *全球能源互联网*, 2021, 4(5): 436–446.  
ZHAO Xueying, LI Gendi, SUN Xiaotong, et al. *J Glob Energy Interconnect*, 2021, 4(5): 436–446.
- [63] SU H Y, WU D L, LI C X, et al. Research advances on electrode materials for solid oxide electrolysis cells[J]. *Prog Nat Sci Mater Int*, 2023, 33(3): 309–319.
- [64] LAHRICHI A, EL ISSMAELI Y, KALANUR S S, et al. Advancements, strategies, and prospects of solid oxide electrolysis cells (SOECs): Towards enhanced performance and large-scale sustainable hydrogen production[J]. *J Energy Chem*, 2024, 94: 688–715.
- [65] BONANNO M, MÜLLER K, BENSMANN B, et al. Review and prospects of PEM water electrolysis at elevated temperature operation[J]. *Adv Mater Technol*, 2024, 9(2): 2300281.
- [66] KUMAR S S, HIMABINDU V. Hydrogen production by PEM water electrolysis—A review[J]. *Mater Sci Energy Technol*, 2019, 2(3): 442–454.
- [67] MAHAPATRA M K, LU K. Glass-based seals for solid oxide fuel and electrolyzer cells—A review[J]. *Mater Sci Eng R Rep*, 2010, 67(5–6): 65–85.
- [68] ARUNACHALAM M, HAN D S. Efficient solar-powered PEM electrolysis for sustainable hydrogen production: An integrated approach[J]. *Emergent Mater*, 2024, 7(4): 1401–1415.
- [69] IKUEROWO T, BADE S O, AKINMOLADUN A, et al. The integration of wind and solar power to water electrolyzer for green hydrogen production[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2024, 76: 75–96.
- [70] BUTTLER A, SPLIETHOFF H. Current status of water electrolysis for energy storage, grid balancing and sector coupling *via* power-to-gas and power-to-liquids: A review[J]. *Renew Sustain Energy Rev*, 2018, 82: 2440–2454.
- [71] FELGENHAUER M, HAMACHER T. State-of-the-art of commercial electrolyzers and on-site hydrogen generation for logistic vehicles in South Carolina[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2015, 40(5): 2084–2090.
- [72] 陈婷, 刘魁, 郑国柱, 等. 可逆固体氧化物电池氧电极材料氧表面交换系数测定及研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2023, 51(10): 2727–2738.  
CHEN Ting, LIU Kui, ZHENG Guozhu, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2023, 51(10): 2727–2738.
- [73] RABALLO S, LLERA J, PEREZ A, BOLCICH J C. Clean hydrogen production in Patagonia Argentina[C]//*Proceedings of the 18th World Hydrogen Energy Conference*. Essen, Germany, 2010: 11.
- [74] EL-SHAFIE M. Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review[J]. *Results Eng*, 2023, 20: 101426.
- [75] WANG T Z, CAO X J, JIAO L F. PEM water electrolysis for hydrogen production: Fundamentals, advances, and prospects[J]. *Carbon Neutrality*, 2022, 1(1): 21.
- [76] 新型电解水制氢技术路线(一): SOEC 独辟蹊径, 静待花开[EB/OL]. (2023-09-28)[2025-09-19].  
<https://mp.weixin.qq.com/s/mGT77WECu7EbxuD42DrB3Q>.
- [77] SONG Y F, ZHANG X M, XIE K, et al. High-temperature CO<sub>2</sub> electrolysis in solid oxide electrolysis cells: Developments, challenges, and prospects[J]. *Adv Mater*, 2019, 31(50): e1902033.
- [78] AFROZE S, SOFRI A N S B, REZA M S, et al. Solar-powered water electrolysis using hybrid solid oxide electrolyzer cell (SOEC) for green hydrogen: A review[J]. *Energies*, 2023, 16(23): 7794.
- [79] WOLF S E, WINTERHALDER F E, VIBHU V, et al. Solid oxide electrolysis cells—current material development and industrial application[J]. *J Mater Chem A*, 2023, 11(34): 17977–18028.
- [80] LESSING P A. A review of sealing technologies applicable to solid oxide electrolysis cells[J]. *J Mater Sci*, 2007, 42(10): 3465–3476.
- [81] 胡轶坤, 曹军文, 张文强, 等. 高温固体氧化物电解池应用研究进展[J]. *发电技术*, 2023, 44(3): 361–372.  
HU Yikun, CAO Junwen, ZHANG Wenqiang, et al. *Power Gener Technol*, 2023, 44(3): 361–372.
- [82] 邵晴, 罗凌虹, 关成志, 等. 固体氧化物电池 Ni-YSZ 燃料电极长期稳定性研究进展[J]. *陶瓷学报*, 2022, 43(5): 759–779.  
SHAO Qing, LUO Linghong, GUAN Chengzhi, et al. *J Ceram*, 2022, 43(5): 759–779.
- [83] 华博. 高性能中温固体氧化物燃料电池 Ni-YSZ 阳极的研究和优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.  
HUA B. Research and optimization of Ni-YSZ anode for high performance intermediate-temperature solid oxide fuel cells[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [84] PARK K Y, LEE T, WANG W H, et al. High-performance Ruddlesden-Popper perovskite oxide with *in situ* exsolved

- nanoparticles for direct CO<sub>2</sub> electrolysis[J]. *J Mater Chem A*, 2023, 11(39): 21354–21364.
- [85] GU S D, HU S M, YANG C C, et al. Ni-SDC nanoparticles decorated Ni-YSZ fuel electrode for SOEC: A comprehensive strategy to optimize performance, syngas composition and stability for H<sub>2</sub>O-CO<sub>2</sub> co-electrolysis[J]. *Fuel*, 2025, 389: 134600.
- [86] GAIKWAD P S, MONDAL K, SHIN Y K, et al. Enhancing the Faradaic efficiency of solid oxide electrolysis cells: Progress and perspective[J]. *npj Comput Mater*, 2023, 9: 149.
- [87] SATOH T, WAKASUGI M, USUI M. Influence of surface metal and current direction on degradation behavior of sintered silver joint under high-density current[J]. *J Electron Mater*, 2024, 53(1): 217–227.
- [88] YAO R, SUN K A, ZHANG K Y, et al. Stable hydrogen evolution reaction at high current densities *via* designing the Ni single atoms and Ru nanoparticles linked by carbon bridges[J]. *Nat Commun*, 2024, 15(1): 2218.
- [89] LIU Q X, SHEN F R, SONG G H, et al. Tailoring ion ordering in perovskite oxide for high-temperature oxygen evolution reaction[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2023, 62(32): e202307057.
- [90] LIU H, HØGH J, BLENNOW P, et al. Assessing fluctuating wind to hydrogen production *via* long-term testing of solid oxide electrolysis stacks[J]. *Appl Energy*, 2024, 361: 122938.
- [91] SHAO Q, JIN D, LU Y, et al. Performance evolution analysis of solid oxide electrolysis cells operating at high current densities[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2024, 57: 709–716.
- [92] FALLAH VOSTAKOLA M, OZCAN H, EL-EMAM R S, et al. Recent advances in high-temperature steam electrolysis with solid oxide electrolyzers for green hydrogen production[J]. *Energies*, 2023, 16(8): 3327.
- [93] 氢能之家. SOEC 电解槽制氢原理、结构及成本、应用场景及国内企业 [EB/OL]. (2024-01-05)[2025-09-19]. <https://ner.jgvoel.cn/c1360333.shtml>.
- [94] HAUCH A, KÜNGAS R, BLENNOW P, et al. Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis[J]. *Science*, 2020, 370(6513): eaba6118.
- [95] FAN J L, YU P W, LI K, et al. A levelized cost of hydrogen (LCOH) comparison of coal-to-hydrogen with CCS and water electrolysis powered by renewable energy in China[J]. *Energy*, 2022, 242: 123003.
- [96] ESSAHILI O, LAKBITA O, OUAFI M, et al. Overview of advanced research in luminescent solar concentrators for green hydrogen production[J]. *Sol Energy*, 2023, 262: 111859.
- [97] PENG S Q, ZHONG W L, ZHAO H L, et al. Solar-driven multifunctional Au/TiO<sub>2</sub>@PCM towards bio-glycerol photothermal reforming hydrogen production and thermal storage[J]. *Int J Hydrog Energy*, 2022, 47(98): 41573–41586.
- [98] ONIGBAJUMO A, SWARNKAR P, WILL G, et al. Techno-economic evaluation of solar-driven ceria thermochemical water-splitting for hydrogen production in a fluidized bed reactor[J]. *J Clean Prod*, 2022, 371: 133303.
- [99] HOUAIJIA A, ROEB M, MONNERIE N, et al. Solar power tower as heat and electricity source for a solid oxide electrolyzer: A case study[J]. *Int J Energy Res*, 2015, 39(8): 1120–1130.
- [100] AHMADI M H, HOSSEINI DEHSHIRI S S, HOSSEINI DEHSHIRI S J, et al. A thorough economic evaluation by implementing solar/wind energies for hydrogen production: A case study[J]. *Sustainability*, 2022, 14(3): 1177.
- [101] GUO P X, KUMAR N B, ELMASRY Y, et al. CO<sub>2</sub> hydrogenation for geothermal energy storage through synthetic natural gas production and byproduct of refrigeration and freshwater using solid oxide electrolyzer cell (SOEC) and methanation reactor; Techno-economic evaluation and multi-objective optimization[J]. *J CO<sub>2</sub> Util*, 2023, 69: 102395.
- [102] U.S. Department of Energy. Hydrogen Shot[EB/OL]. (2021-06)[2025-09-19]. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/hydrogen-shot-introduction>.
- [103] RESHETENKO T, LAUE V, KREWER U, et al. Study of degradation and spatial performance of low Pt-loaded proton exchange membrane fuel cells under exposure to sulfur dioxide in an oxidant stream[J]. *J Power Sources*, 2020, 458: 228032.
- [104] Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking. Strategic Research and Innovation Agenda 2021–2027[R/OL]. Brussels: European Commission, 2022. [https://www.clean-hydrogen.europa.eu/about-us/key-documents/strategic-research-and-innovation-agenda\\_en](https://www.clean-hydrogen.europa.eu/about-us/key-documents/strategic-research-and-innovation-agenda_en).
- [105] Topsoe. From vision to reality — five pivotal years in the history of Topsoe's SOEC[EB/OL]. (2025-10-14)[2025-09-19]. <https://www.topsoe.com/blog/from-vision-to-reality-five-pivotal-years-in-the-history-of-topsoes-soec>.
- [106] BIS Research. Global Solid Oxide Electrolyzer Cell (SOEC) Market Report[R/OL]. 2024. <https://bisresearch.com/industry-report/solid-oxide-electrolyzer-cell-market.html>.
- [107] 国家发展改革委办公厅. 绿色低碳先进技术示范项目清单(第二批)[EB/OL]. (2025-04-16)[2025-09-19]. <https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202504/P020250428526909716531.pdf>.
- [108] 张旻, 朱良柱, 官万兵, 等. Mn 基 A 位双钙钛矿材料在固体氧化物电池中的研究进展[J]. *陶瓷学报*, 2022, 43(5): 816–824.
- Zhang Y, Zhu L Z, Guan W B, et al. Research progress of Mn-based A-site double perovskite materials in solid oxide cells[J]. *Journal of Ceramics*, 2022, 43(5): 816–824.
- [109] 国家能源局. 中国氢能发展报告(2025)[R/OL]. 北京: 国家能源局, 2025. [https://www.nea.gov.cn/20250430/96022785b3a747248288ad1c57d3a025/2025043096022785b3a747248288ad1c57d3a025\\_35aeee443346424eb4a3da029cb007003c.pdf](https://www.nea.gov.cn/20250430/96022785b3a747248288ad1c57d3a025/2025043096022785b3a747248288ad1c57d3a025_35aeee443346424eb4a3da029cb007003c.pdf).
- [110] International Energy Agency. Global Hydrogen Review 2023[R/OL]. Paris: IEA, 2023. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2023>.

#### 作者贡献声明:

**苏其响:** 提出研究方向, 设计论文框架, 绘制图表, 参与数据分析与撰写论文;

**郁青春:** 实验测试, 参与数据分析, 完善论文框架, 修订论文。

## A Review of Hydrogen Production by SOEC Water Electrolysis: Mechanism, Materials, and Renewable Energy Coupling

SU Qixiang<sup>1,2,3,4</sup>, YU Qingchun<sup>1,2,3,4</sup>

(1. Yunnan Provincial Key Laboratory of Nonferrous Metals Vacuum Metallurgy, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 3. National Engineering Research Center of Vacuum Metallurgy, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 4. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

### Extended Abstract

To achieve the 2050 carbon neutrality vision, it is necessary to promote research and development of efficient and economically beneficial green hydrogen production technologies. In the process of global transition to a low-carbon energy system, hydrogen as a key zero carbon energy carrier continues to attract much attention. This review provides a comprehensive evaluation of high-temperature solid oxide electrolysis cell technology, focusing on analyzing some related challenges and potential pathways for large-scale application.

Compared to low-temperature alternatives such as alkaline and proton exchange membrane electrolysis, SOEC has unique advantages due to its high-temperature operation. It uses ceramic materials without precious alloys and can operate at 650–1000 °C, and it can improve the electrochemical performance, resulting in an energy conversion efficiency of > 80%. These characteristics make SOEC a promising solution for low-cost production of green hydrogen gas. The existing domestic technology is still in demonstration stage with project scales typically ranging from tens to hundreds of kilowatts. Commercial deployment needs to overcome challenges of "three highs and one low". A key is to improve power density of battery stack, increase its service life, improve system integration, and reduce costs. To solve this problem, collaborative progress is needed in fields of material innovation, structural design, and system integration.

Collaborative design approach involving electrodes, electrolytes, and sealing components is crucial in development of materials and structures. For precise microstructure control and interface optimization, battery pack can operate stably at a high current density of 2 A/cm<sup>2</sup>, while controlling attenuation rate of < 1 mV/h, and significantly extending actual service life.

Optimizing multi energy data collaboration system is equally crucial, and SOEC can leverage industrial waste heat and renewable energy resources to utilize medium to low temperature thermal energy (*i.e.*, 200–300 °C), thereby reducing external power consumption by approximately 30% and improving overall energy utilization efficiency. It is also necessary to build a regional supply chain that covers entire process from raw material and battery preparation to integrated assembly and system integration. The integration cost should be controlled within RMB 2500 kilowatt hours, and the design life should reach 50 000 h. A key is to lay a foundation for widespread application.

The widespread promotion of SOEC still faces several constraints, *i.e.*, loss of electrode materials under high temperature and high humidity conditions, stability challenges caused due to power input fluctuations, and relatively high initial costs. Future research should focus on developing more durable electrode materials, establishing intelligent management systems that adapt to changes in renewable energy, and promoting standardization and cost control throughout entire industry chain to achieve technological popularization.

The combination of wind and solar energy with water electrolysis can build a more adaptable clean energy resource system. Integration helps alleviate grid stability issues related to intermittent renewable energy resources and significantly reduces electricity cost of hydrogen production. Hybrid wind and solar energy system can increase hydrogen production, while reducing costs. A key is that when SOEC is matched with fluctuating power sources, oxygen electrode/electrolyte interface will degrade under frequent thermal cycles, which is an important factor affecting long-term stability of system. In global, green hydrogen production driven by renewable resources is gradually known as a key approach of reducing greenhouse gas emissions. Electrolytic hydrogen can utilize local wind and solar energy to decompose water into hydrogen and oxygen, reducing production costs. Moreover, solar and wind energy are widely distributed and naturally compatible with electrolysis equipment. Excess electricity can be chemically stored as hydrogen, efficiently regulating spatial and temporal imbalance of energy supply and demand. Therefore, generated hydrogen and oxygen can be directly applied in transportation and industrial fields without conversion, making hydrogen both a primary energy source and a data carrier.

Compared with conventional methods, the SOEC technology has a better hydrogen production efficiency and a lower unit energy consumption, and its commercialization key lies in increasing lifespan of fuel cell stack from less than 10<sup>4</sup> h to 5 × 10<sup>4</sup> h, reducing cost of hydrogen to below \$1.5/kg. The current costs of photovoltaics and wind power continue to decline. In combination with growing demand for green hydrogen in industries such as chemical metallurgy, the SOEC is expected to achieve large-scale applications in "electricity hydrogen ammonia/methanol" integrated system, distributed energy network, and sustainable financing

model. Its core position lies in serving as a fundamental supporting technology for carbon neutrality goals.

**Summary and Prospects** In transition towards a decarbonized energy system globally, hydrogen plays a crucial role as a zero carbon energy carrier. In this context, solid oxide electrolysis cell (SOEC) technology with its advantages in high-temperature operation significantly reduces material costs and improves overall system energy efficiency, compared to low-temperature solutions such as alkaline and proton exchange membrane electrolysis. SOEC system adopts a non-precious metal ceramic structure. When operating at 650–1000 °C, electrochemical kinetics acceleration mechanism achieves a conversion efficiency of > 80%, providing a feasible approach to reduce cost of green hydrogen leveling. The existing domestic demonstration projects are limited to a scale of tens to hundreds of kilowatts, and the commercial implementation needs to break through bottleneck of "three highs and one low", thus increasing power density of fuel cell stack, extending its service life, and optimizing system integration, while reducing assets and operation and maintenance costs. Solving these obstacles requires collaborative efforts in three major fields, and innovation in materials and structures must break through conventional design framework of electrodes, electrolytes, and sealing glass.

With precise microstructure design and interface stress control, system can maintain a high current density of  $2 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ , while controlling degradation rate at 1 mV per thousand hours, significantly extending lifespan of battery pack. Multi-energy coupling optimization is crucial, which requires integrating the SOEC with industrial waste heat and renewable resources, thus utilizing low-grade thermal energy (*i.e.*, 200–300 °C), efficiently offsetting internal heating demand, reducing external electricity consumption by approximately 30%, and comprehensively improving energy utilization efficiency. For those localized supply chains, establishing a complete domestic production capacity from precursor powder to single cell manufacturing, stacking and assembly to system integration is particularly crucial. The goal is to control stacking cost at RMB 2500 per kW and achieve an operating life of  $5\times 10^4$  h, laying a foundation for large-scale applications. At present, although the SOEC has significant energy efficiency advantages, its promotion and application still face multiple constraints, *i.e.*, gradual decay of oxygen electrodes under high temperature and high vapor partial pressure, mechanical and electrochemical damage caused by power fluctuations, and daunting initial capital investment.

Subsequent exploration should focus on preparing new electrode materials with a higher stability, establishing flexible thermoelectric synergistic regulation mechanisms to adapt to fluctuating renewable energy, and promoting standardization and cost reduction and efficiency improvement throughout entire industry chain. The cost of photovoltaic and wind power continues to decrease, coupled with increasing demand for green hydrogen in chemical and metallurgical fields. Solid oxide electrolysis cell technology is expected to be widely applied in "electricity hydrogen ammonia/methanol" integrated system, distributed energy system, and sustainable refining scenarios. This technology will undoubtedly become a key pillar technology supporting the dual carbon goals in China.

**Keywords** solid oxide electrolysis cell; hydrogen production; renewable energy; electrode materials; system integration