



离网绿电电解水制氢技术的动态适配特点与应用展望

鲍正洋¹, 孟海军², 雷宪章³, 姚婷婷⁴, 赵云⁴, 肖国萍⁵, 孔凡鹏^{1*}, 邵志刚^{4*}
(¹哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150000; ²军事科学院某所, 北京 100141; ³西南石油大学, 四川 成都 610500; ⁴中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023; ⁵中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800)

摘要: 在“双碳”目标牵引下, 风电、光伏等可再生能源快速发展, 离网绿电制氢已成为提升绿电消纳和推动绿氢规模化制备的重要路径。然而, 可再生能源波动会直接传递至电解槽, 使电解过程由额定稳态转向宽功率、强瞬态和频繁切换运行, 并对气体安全、传质传热、界面稳定性和寿命提出更高要求。本文围绕波动电源与电解槽动态运行窗口匹配, 构建低负荷安全适应性、高负荷承载能力、动态爬坡能力、启停灵活性和规模化经济性五维评价框架, 比较碱性电解水 (AWE)、质子交换膜电解水 (PEMWE)、阴离子交换膜电解水 (AEMWE) 和固体氧化物电解水 (SOEC) 的运行特征、关键材料、动态适配机制及工程边界。分析表明, AWE 成本低、规模化基础好, 但受液态电解液、多孔隔膜和气液两相传输限制; PEMWE 负荷范围宽、响应快, 但贵金属和钛基组件成本较高; AEMWE 兼具低成本和柔性潜力, 仍需突破膜电极动态寿命瓶颈; SOEC 更适合稳定热源耦合下的高效制氢与共电解转化。在此基础上, 进一步从功率预测与储能缓冲、多类型电解槽协同运行以及储氢/氨醇耦合消纳等方面提出发展方向, 为离网绿电条件下电解水制氢技术优化与规模化发展提供参考。

关键词: 可再生能源发电; 离网制氢; 电解水; 绿氢; 动态适配; 发展路线

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0678

中图分类号: TK 91

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (XXXX) XX-1-22

Water Electrolysis under Variable Renewable Power: Dynamic Adaptation and Development Pathways

BAO Zhengyang¹, MENG Haijun², LEI Xianzhang³, YAO Tingting⁴, ZHAO Yun⁴,
XIAO Guoping⁵, KONG Fanpeng^{1*}, SHAO Zhigang^{4*}

(¹Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, Heilongjiang, China; ²A Certain Institute, Academy of Military Sciences, Beijing 100141, China; ³Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China; ⁴Dalian Institute of Chemical Physics, CAS, Dalian 116023, Liaoning, China; ⁵Shanghai Institute of Applied Physics, CAS, Shanghai 201800, China;)

Abstract: Driven by China's carbon peaking and carbon neutrality goals, renewable energy sources such as wind and solar power have developed rapidly. Off-grid green electricity-to-hydrogen production has become an important pathway for improving renewable electricity utilization and enabling large-scale green hydrogen production. However, in the absence of

收稿日期: 2026-08-03; 修改稿日期: 2026-08-30。

基金项目: 限域型低铂催化剂表面结构及其氧还原性能研究 (HSF20230092)。

第一作者: 鲍正洋 (2001—), 男, 博士在读, 研究方向: PEM 体系高效氧电极催化剂研究, E-mail: 1102865649@qq.com; 通信作者: 孔凡鹏, 副教授, 研究方向: 质子交换膜燃料电池及电解水制氢, E-mail: fpkong@hit.edu.cn; 邵志刚, 研究员, 研究方向: 燃料电池及电解水制氢, E-mail: zhgshao@dicp.ac.cn。

引用本文: 鲍正洋, 孟海军, 雷宪章, 等. 离网绿电电解水制氢技术的动态适配特点与应用展望[J]. 储能科学与技术, XXXX, XX(XX): 1-22.

Citation: BAO Zhengyang, MENG Haijun, LEI Xianzhang, et al. Water Electrolysis under Variable Renewable Power: Dynamic Adaptation and Development Pathways[J]. Energy Storage Science and Technology, XXXX, XX(XX): 1-22.

external power buffering, renewable power fluctuations are directly transmitted to electrolyzers, shifting electrolysis from rated steady-state operation to wide-load, highly transient, and frequently switching conditions. This imposes higher requirements on gas safety, mass and heat transfer, interfacial stability, and lifetime. This review focuses on the matching between fluctuating power input and the dynamic operating window of electrolyzers. A five-dimensional evaluation framework is established, including low-load safety adaptability, high-load tolerance, dynamic ramping capability, start-stop flexibility, and scalability/economic viability. Based on this framework, the operating characteristics, key materials, dynamic adaptation mechanisms, and engineering boundaries of alkaline water electrolysis (AWE), proton exchange membrane water electrolysis (PEMWE), anion exchange membrane water electrolysis (AEMWE), and solid oxide electrolysis cells (SOEC) are compared. The analysis shows that AWE offers low cost and strong scalability, but is limited by liquid electrolytes, porous diaphragms, and gas-liquid two-phase transport. PEMWE enables a wide load range and fast response, but is constrained by the high cost of noble metals and titanium-based components. AEMWE has the potential to combine low cost with flexible operation, but still requires breakthroughs in the dynamic lifetime of membrane electrode assemblies. SOEC is more suitable for high-efficiency hydrogen production and co-electrolysis when coupled with stable heat sources. Furthermore, an integrated off-grid green hydrogen system of "source-storage-electrolyzer-hydrogen/chemical conversion" is proposed by combining power forecasting, energy storage buffering, coordinated operation of multiple electrolyzer types, and hydrogen/ammonia/methanol utilization.

Keywords: Renewable energy; off-grid; water electrolysis; green hydrogen; dynamic adaptation; development

在“碳达峰、碳中和”目标牵引下，氢能已成为能源转型和工业深度脱碳的重要方向。“十五五”规划建议进一步提出前瞻布局氢能产业，推动可再生能源制氢规模化发展^[1]。2025年我国氢能产量突破3700万吨；截至2025年底，可再生能源制氢项目累计建成产能超过25万吨/年，较2024年底实现翻番式增长^[2]。与此同时，我国风电、光伏装机快速增长，截至2025年末两者合计装机量已超4.3亿千瓦^[3-4]。受风速、辐照度等自然条件影响，风光出力具有波动性、间歇性和不可完全预测性，易与终端负荷产生时空错配。电解水制氢可将波动绿电转化为可储运的氢能及氢基化学品，并服务于合成绿醇/氨、炼化加氢、钢铁冶金和燃料电池等场景。因此，发展可再生能源电解水制氢，既是落实氢能产业战略、扩大绿氢供给的关键路径，也是促进可再生能源高效利用的重要手段。

然而，与并网制氢可依托公共电网进行实时功率平衡不同，离网风光制氢主要依靠系统内部调

节。实际系统虽可配置电池、超级电容器等储能装置缓冲短时波动，但受应用地域和经济性限制，大规模储能通常难以完全平抑风光的多时间尺度波动，未被吸收的功率变化仍会传递至电解槽，使其长期处于宽负荷、快速爬坡和频繁启停等非稳态工况。因此，离网风光制氢并非完全“无缓冲”，其关键是在有限储能条件下提高电解槽对剩余功率波动的适应能力。基于此，本文围绕碱性电解水制氢（Alkaline water electrolysis, AWE）、质子交换膜电解水制氢（Proton exchange membranes water electrolysis, PEMWE）、阴离子交换膜电解水制氢（Anion exchange membrane water electrolysis, AEMWE）和固体氧化物电解水制氢（Solid oxide electrolysis cells, SOEC）四类路线，比较其运行特征、关键材料与组件、动态适配机制及工程应用边界。进一步从低负荷安全适应性、高负荷承载能力、动态爬坡能力、启停灵活性和规模化经济性五个维度，分析不同电解槽在离网风光制氢中的优势

与瓶颈，并总结面向波动电源耦合的电解槽改善策略，为绿氢规模化制备与可再生能源高效消纳提供参考。

1 离网发电下电解槽动态适配性评价框架

当电解槽与离网可再生能源发电耦合时，电解槽适配能力不再仅由额定工况下的电解效率衡量，而应取决于其在动态输入下维持气体安全、反应均匀、传质传热稳定和长期耐久的能力。从电解槽本体看，动态运行窗口是由“电流边界—速率边界—状态边界”共同限定的多约束运行域。首先，电流密度需满足安全稳定的上下边界：

$$I_{\min}^{\text{safe}} \leq I(t) \leq I_{\max}^{\text{stable}}$$

其中， $I_{\min}^{\text{safe}}$ 由低负荷下产气速率与气体交叉通量的竞争关系决定。低于该边界时，产物气对交叉气体的稀释能力下降，易带来氢氧混合和气体纯度风险。 $I_{\max}^{\text{stable}}$ 则受高负荷下反应物供给、产物排出、离子传导和热量移除能力共同限制；超过该边界后，电解槽可能出现局部缺水/缺液、气泡堵塞、传质极化加剧、局部电流密度升高和过热等问题。

其次，电流变化速率需低于电解槽内部状态场的重建能力：

$$|dI/dt| \leq R_{\max}$$

$R_{\max}$ 并非仅由电源或控制系统决定，而是受气泡覆盖率、局部浓度场、膜/隔膜水合状态等内部变量响应时间共同制约。尽管电流可在电气层面快速变化，但支撑该电流稳定运行的反应环境无法瞬时重建；若变化过快，电解槽可能在新稳态形成前发生传质、热管理或气体安全失衡。

基于上述认识，本文将波动电源耦合下电解槽的动态适配性归纳为五个维度：低负荷安全适应性、高负荷承载能力、动态爬坡能力、启停灵活性和规模化经济性。前四者分别对应运行窗口的下边界、上边界、变化速率边界和跨状态切换边界，第五者反映其在大规模离网制氢中的工程推广可行性。该框架可将 AWE、PEMWE、AEMWE 和 SOEC 置于统一体系下比较，揭示其在安全边界、负荷承载、响应速度、启停适应和经济性方面的差异化定位。

1.1 低负荷安全适应性

低负荷安全适应性核心是法拉第产气通量与气

体交叉通量之间的竞争。电解水过程中，氢气和氧气生成速率随电流降低而下降，但膜/隔膜中的气体渗透、溶解气迁移及压差驱动交叉通量并不一定同比例降低。此时，产物气流对交叉气体的稀释能力减弱，尤其在氧气侧，交叉氢气相对含量可能升高，带来氢氧混合和气体纯度风险。如图 1 (a) 所示，电流阶跃降低时，氧气侧氢气含量 (hydrogen crossover concentration in oxygen, HTO) 并不会随电流同步下降，而是出现滞后升高；电流恢复后，HTO 才逐渐回落^[9]。这表明低负荷风险并非源于产氢速率增加，而是产物气流量下降后，交叉气体占比上升^[9]。而且发现低电流密度下 HTO 对气体交叉参数和传质条件高度敏感，随电流降低而快速升高^[7] (见图 1 (c, d))。因此，低负荷运行的关键安全边界在于：产气通量是否足以稀释并压制气体交叉通量。

1.2 高负荷承载能力

对于 AWE、PEMWE 和 AEMWE 等低温电解槽，高负荷承载能力主要受反应物补给、气泡排出、离子传导和热量移除等过程共同限制。随着电流密度升高，水或电解液消耗及氢氧生成速率迅速增加，若液相补给和气泡排出不能同步跟上，容易造成局部缺水/缺液和气泡积聚。气泡覆盖电极表面并占据多孔层和流道后，不仅会降低有效反应面积，还会阻碍液相传输，使局部电流密度、传质极化和欧姆损失进一步升高。以 PEMWE 为例，图 2 展示了高电流密度下阳极水供给不足和膜脱水诱导欧姆损失的典型过程^[9]。大量析氧占据多孔传输层和催化层孔道后，会削弱液态水向反应界面的补给，使膜含水量下降、面积比阻抗增加，从而限制高电流密度运行。与此同时，低温电解槽在工业电流密度下通常高于热中性电压运行，活化、欧姆和传质损失所产生的热量随电流增加而上升；若气泡覆盖削弱液相换热，或局部缺水/缺液进一步增大阻抗，容易形成局部热点，并加速膜/隔膜、催化层及密封结构的退化。因此，低温电解槽的高负荷边界本质上取决于反应物供给、产物排出、离子传导和散热过程能否在高反应通量下维持动态平衡。

相比之下，SOEC 的高负荷边界更多由蒸汽供给、热平衡和高温界面稳定性决定。随着电流密度升高，蒸汽消耗速率和电化学反应通量显著增加；若蒸汽利用率过高或流量分布不均，容易产生局部

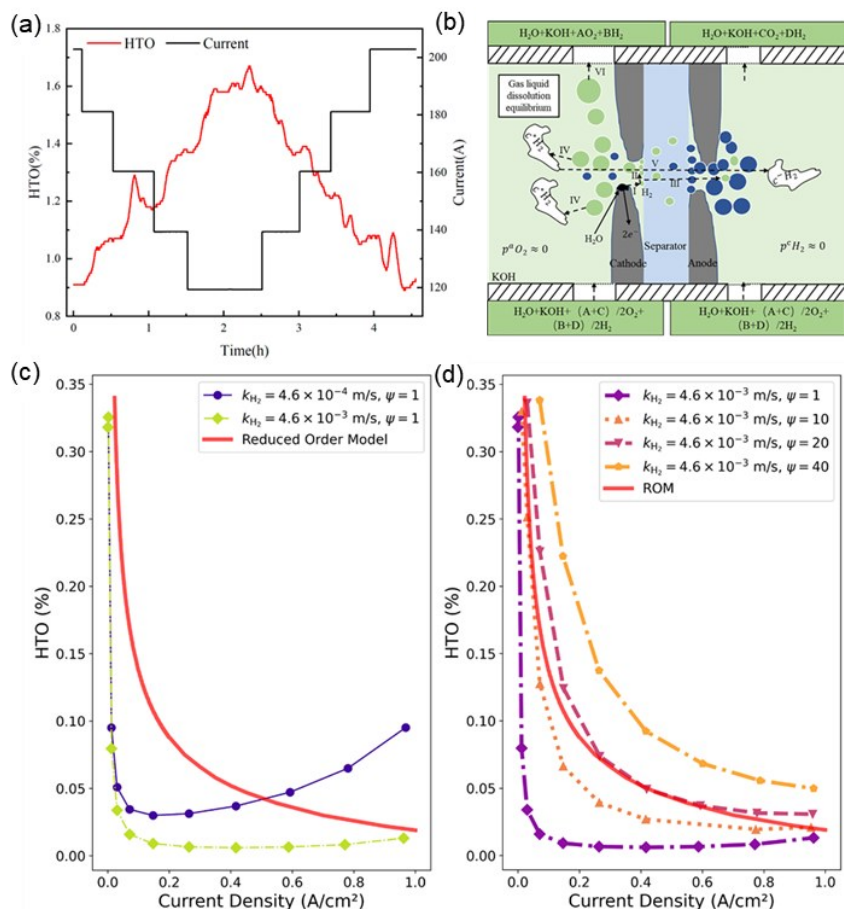


图1 低负荷工况下碱性电解槽气体交叉与氧气侧氢气含量变化机制^[5-7]。(a) 电流阶跃变化下HTO的动态响应；(b) 碱性电解槽气体交叉路径示意；(c, d) 不同交叉参数下HTO与电流密度的关系。

Fig. 1 Gas crossover and hydrogen-in-oxygen variation under low-load operation in alkaline electrolyzers^[5-7].

(a) Dynamic response of HTO during step changes in current; (b) schematic illustration of gas crossover pathways in an alkaline electrolyzer; (c, d) relationship between HTO and current density under different gas crossover parameters.

蒸汽饥饿和浓差极化，并引起燃料极局部气氛及电化学势失衡，进而加速Ni迁移、微结构退化或电解质还原。同时，高负荷及负荷变化会改变电堆内部的吸放热平衡，不均匀的蒸汽流量和反应速率还会进一步放大局部温差，形成温度梯度和热应力。在高温条件下，这种热场不均匀更容易诱发电极/电解质界面分层、材料热机械疲劳及密封失效。因此，SOEC的高负荷承载能力主要取决于蒸汽供给、热场均匀性以及材料和界面的热机械稳定性能否支撑持续的高温高通量运行。

1.3 动态爬坡能力

动态爬坡能力描述电解槽在运行窗口内由一个负荷点切换至另一负荷点的速度，通常以最大功率变化速率或最大电流密度变化速率表示。其本质并非电源能否快速改变电流，而是电解槽内部状态场

能否在电流变化后及时重建新的稳定反应环境。负荷突变时，电极电位、双电层和HER/OER反应速率可快速响应，但气泡覆盖率、局部浓度场、膜/隔膜水合状态、压力场和温度场均具有不同时间常数，难以瞬时同步。除电堆内部状态外，完整制氢系统的动态响应还受到反应物供给、气液分离、压力调节和热管理等辅助环节的约束，其中AWE主要受电解液循环和气液分离影响，PEMWE/AEMWE更多受水气管理和压力控制约束，SOEC则主要受蒸汽供给和热惯性制约。因此，动态爬坡能力应同时考虑电堆响应与系统状态重建速度。

因此，动态爬坡能力反映的是多过程协同响应能力。快速升载时，界面反应速率率先增加，而反应物供给、产物排出、离子传导、热量移除和压力平衡存在滞后，易引发局部传质不足、气泡滞留、

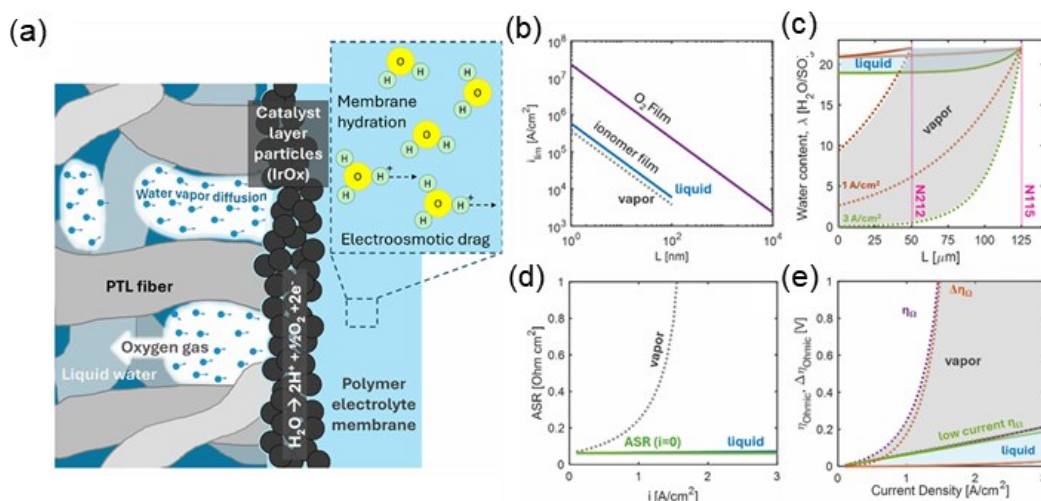


图2 高负荷下PEMWE水供给受限与膜水合衰减机制^[8]。(a) 阳极水供给受限示意图；(b) 水蒸气扩散限制电流分析图。(c) 膜含水量分布图；(d) 膜面积比阻抗变化图；(e) 欧姆过电位增加曲线图。

Fig. 2 Mechanisms of water-supply limitation and loss of membrane hydration in PEMWE under high-load conditions^[8]. (a) Schematic of limited anode water supply; (b) analysis of the vapor-diffusion-limited current; (c) membrane water-content distribution; (d) change in membrane area-specific resistance; (e) increase in ohmic overpotential.

温度升高和压差波动；快速降载时，产气速率迅速下降，但残余气体排出、跨膜气体迁移、压力平衡和电极电位恢复不能同步完成，可能导致气体纯度波动、低负荷安全风险、反向电流和混合电位问题。

图3进一步揭示了动态爬坡中“快变量”和“慢变量”响应失配的影响。负荷阶跃后，碱性电解槽产热速率随电流快速变化，而堆体、电解液、

换热器和冷却回路具有热惯性，导致堆温滞后甚至过冲^[9]（图3（a））。PEMWE在不同爬坡速率下表现出不同电流响应，更快输入变化会带来更强动态冲击；高爬坡速率和高电流密度还会加速衰减，并诱发催化剂形貌及界面结构变化（图3（b，c））。因此，动态爬坡能力不仅决定电解槽对波动电源的跟随能力，也直接影响热管理稳定性、界面可逆性和长期寿命。

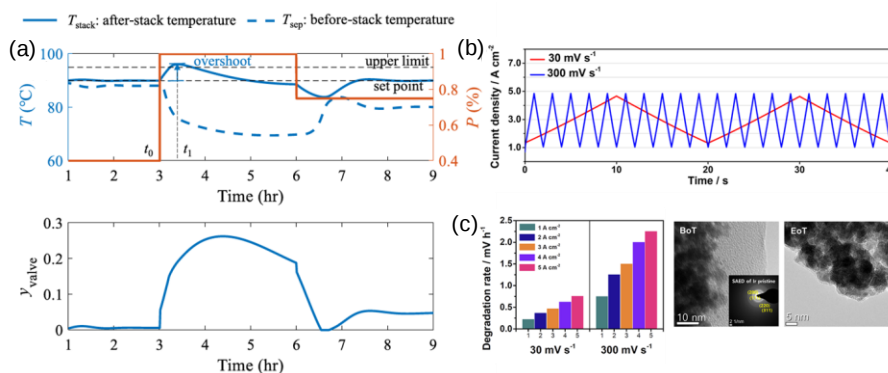


图3 动态负荷下电解槽热响应滞后与爬坡速率诱导的性能衰减^[9]。(a) 负荷阶跃变化下碱性电解槽堆温、入口温度及冷却阀开度的动态响应；(b) 不同电压爬坡速率下PEMWE电流密度的动态响应；(c) 不同爬坡速率和电流密度下PEMWE衰减速率对比及催化剂在测试前后的形貌变化。

Fig. 3 Thermal-response lag and ramp-rate-induced performance degradation in electrolyzers under dynamic loading^[9]. (a) Dynamic responses of the stack temperature, inlet temperature, and cooling-valve opening of an alkaline electrolyzer to a load step; (b) dynamic current-density responses of PEMWE at different voltage ramp rates; (c) comparison of PEMWE degradation rates at different ramp rates and current densities, together with catalyst morphology before and after testing.

1.4 启停灵活性

启停灵活性描述电解槽在停机、待机、热备和运行状态之间切换的能力。频繁启停的风险来自内部状态反复经历“建立—中断—再建立”循环。停机或待机时，残余 H_2/O_2 可能滞留于电极和流道中，若吹扫和压力平衡不充分，易增加气体混合风险。同时，电极电位由外加电场控制转向开路或混合电位状态，可能诱发反向电流、副反应和催化剂价态循环。图4显示，正常运行时电解槽由外加电源驱动 HER/OER；停机后，残余气体、双极板及不同

氧化还原态电极材料可能构成自发放电回路，使局部体系由电解池转变为原电池状态，从而诱发反向电流^[10]。反向电流会驱动非期望氧化还原反应，造成电极或催化层衰退。此外，温度反复升降会带来热应力 and 密封疲劳，膜/隔膜或离聚物的水合状态变化也会影响离子传导和机械稳定性。因此，启停灵活性的本质，是电解槽在频繁跨状态切换中能否安全、快速且可逆地重建气体、电位、温度、压力和界面状态。

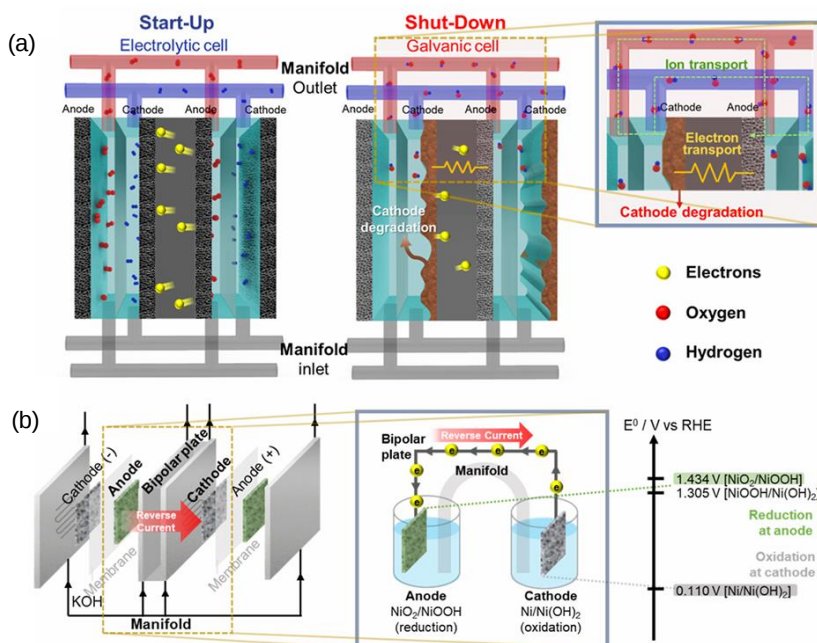


图4 碱性电解槽停机反向电流与电极退化机制^[10]。(a) 启停过程中电解池向原电池状态转变示意图；(b) 停机后反向电流驱动的电极氧化还原与阴极退化机制。

Fig. 4 Shutdown reverse current and electrode degradation mechanisms alkaline electrolyzers^[10].

(a) Schematic of the transition from electrolytic to galvanic operation during startup and shutdown; (b) reverse-current-driven electrode redox reactions and cathode degradation after shutdown.

1.5 规模化经济性

规模化经济性不仅取决于额定电解效率，还受到设备投资、运行寿命、年利用小时数及辅助系统配置等因素共同影响。对于离网制氢，可采用平准化制氢成本（levelized cost of hydrogen, LCOH）评价其全生命周期经济性。参考 Fan 等建立的制氢系统优化模型^[11]，LCOH 可简化表示为：

$$LCOH = \frac{C_{inv} + \sum_{n=1}^N \frac{C_{OM,n} + C_{elec,n} + C_{carbon,n}}{(1+r)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{H_n}{(1+r)^n}}$$

其中 C_{inv} 为可再生能源、电解槽、储能、储氢及辅助设备等初始投资， $C_{OM,n}$ 为第(n)年运行维护成本， $C_{elec,n}$ 为能源或购电成本， $C_{carbon,n}$ 为碳成本， H_n 为年产氢量，(r)为折现率，(N)为项目寿命。

动态衰减和储能配置是影响 LCOH 的两个特征性因素。动态衰减会通过效率下降、维护需求增加和有效产氢量减少等途径推高 LCOH；而储能能够削弱功率波动、减少电解槽频繁爬坡和启停，但过大的储能容量又会显著增加初始投资并带来充放电损失。因此，动态适配能力只有在其带来的利用率

和寿命收益能够抵消额外储能及设备成本时，才能真正转化为经济优势。Fan 等对中国 31 个省级地区开展的全年逐时优化显示，完全离网系统的 LCOH 约为 7.3~14.8 美元/kg H₂，系统投资成本占总成本的 52.5%~56.3%；同时，不同电解槽在动态工况下表现出明显不同的衰减特征^[11]。由此可见，离网制氢经济性的核心并非单纯追求更强的动态响应或更大的储能容量，而是在储能投入、电解槽利用率与动态寿命之间取得合理平衡。

2 四类电解槽动态适配特点与工程应用

基于前述动态适配性评价框架，不同电解水制氢路线在离网波动电源耦合场景下表现出明显差异。电解槽适用性取决于其在低负荷、高负荷、快速爬坡和频繁启停等非稳态工况下的安全性、响应能力、寿命和经济性。由于 AWE、PEMWE、AEMWE 和 SOEC 在电解质形态、离子传导、气体隔离、工作温度、关键材料及系统结构方面存在差异，其动态运行边界也不同。图 5 从低负荷安全、高负荷承载、动态爬坡、启停灵活性和规模化经济性五个维度，对四类技术路线进行比较。

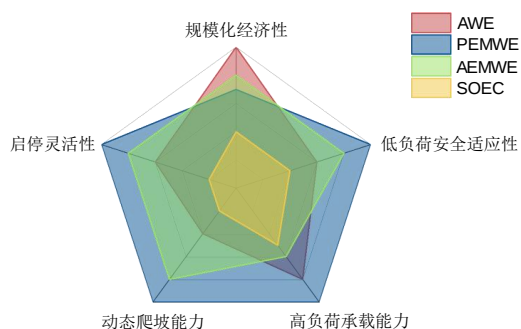


图 5 不同制氢技术路线风光波动制氢动态适配性五维雷达图

Fig. 5 Five-dimensional radar chart comparing the dynamic adaptability of different hydrogen-production pathways to fluctuating wind and solar power.

表 1 汇总了四类电解水制氢技术路线的单槽规模、工作温度、电流密度、电解效率和制氢成本等基础参数，并进一步列出了最低负荷、启动时间、爬坡速率、使用寿命和典型应用场景等动态适配指标。由表 1 可见，AWE 具有成熟度高、单槽规模大

和成本较低等优势，是当前大规模风光制氢的重要路线；PEMWE 具备宽负荷调节、高电流密度和快速响应优势，更适合承担波动电源下的柔性调节任务；AEMWE 兼具低成本和柔性响应潜力，但仍需长周期动态运行验证；SOEC 具有高温高效和热电协同优势，但其动态适配性受热管理和材料稳定性限制。基于上述差异，以下将分别对四类电解槽的动态适配机制、关键瓶颈和工程应用进行分析。

为进一步揭示五维动态适配差异的理化基础，表 2 从低负荷安全适应性、高负荷承载能力、动态爬坡能力、启停灵活性和规模化经济性五个维度，归纳四类电解槽的主导限制机制及其对应表现。可见，AWE 的动态边界主要受多孔隔膜气体交叉及气液、热压状态重建滞后制约；PEMWE 具有较快的电流响应，但高负荷下仍受到酸性 OER 动力学、阳极水/氧两相传输和钛基组件接触稳定性的共同限制；AEMWE 兼具低成本与柔性响应潜力，其关键瓶颈在于膜、离聚物、非贵金属催化层及界面在长期动态工况下的协同稳定性；SOEC 则主要受高温热平衡、蒸汽供给和热机械匹配限制。上述差异为后文四类电解槽的技术定位和应用边界分析提供了机理依据。

2.1 碱性电解水制氢技术

碱性电解水制氢技术（AWE）是当前商业化程度最高、装备规模最大、成本最低的电解水制氢路线之一。如图 6 所示，AWE 通常采用 20% - 30% KOH 水溶液作为液态电解质，阴极发生析氢反应： $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow + 2\text{OH}^-$ ，阳极发生析氧反应： $4\text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2 \uparrow + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$ ；阴阳极由多孔隔膜分隔，以实现 OH⁻ 传导和气体分离。依托非贵金属电极、低成本隔膜和成熟装备制造体系，AWE 已成为大型风光制氢项目中最具现实基础的基荷制氢路线。据报道，双良集团单台 AWE 电解槽产氢量可达 5000 Nm³/h^[23-24]。然而，在离网波动电源耦合场景下，AWE 的动态短板也源于其体系结构：液态 KOH 循环、多孔隔膜阻气、气泡脱附/排出和热管理均具有明显时间常数，使其在低负荷安全适应性、动态爬坡能力和启停灵活性方面弱于膜电极型电解槽。

低负荷安全适应性是 AWE 耦合波动电源时的关键约束，本质上受多孔隔膜气体交叉控制。低负荷下，产氢和产氧速率随电流下降，但气体渗透、

表 1 四种制氢技术路线比较^[12-21]

Table. 1 Comparison of Four Hydrogen Production Technology Routes

类别	碱性电解水	质子交换膜电解水	阴离子交换膜电解水	固体氧化物电解水
电解质	20%-30% KOH 溶液	全氟磺酸树脂膜	阴离子交换膜	固体氧化物 (掺杂改性的氧化锆)
技术成熟度 (TRL)	商业化成熟 (TRLs 8-9)	初步商业化 (TRLs 8-9)	实验研发阶段 (TRLs 5)	示范验证阶段 (TRLs 6-8)
单槽最大规格 (Nm ³ /h)	~5000	~500	~200	~10
阴极催化剂 (HER)	雷尼镍、镍基合金	铂碳 (Pt/C)	Ni 基, Pt 基合金	Ni-YSZ
阳极催化剂 (OER)	镍基、钴基氧化物	铱基氧化物	镍基、钴基氧化物	钴基钙钛矿氧化物
工作温度 (°C)	70~90	50~80	40~80	650-850
工作电流密度 (A/cm ²)	0.25~0.9	1.0~3.0	1.0~2.0	0.3~1.0
工作电压范围 (V)	1.8~2.4	1.8~2.2	1.8~2.2	1.0~1.5
工作气压范围 (MPa)	0.1~3.0	4.0~7.0	≤3.5	0.1
产氢纯度 (%)	99.5~99.99	99.9~99.99	99.9~99.99	99.9~99.99
电解效率 (%)	60~75	78-90	65-80	≥95
直流电耗 (kWh/Nm ³)	4.0~5.5	3.7~4.5	4.3~4.8	~3.0 (有余热) ~3.6 (无余热)
制氢成本 (¥/kg H ₂)	12~19.7	21.8~35	18~30	>40
耐最低负荷强度 (%)	~30 (带压) ~10 (常压)	~0	~5	~40
启动时间	冷启: 60min 内 热启: 分钟级	冷启: 分钟级 热启: 秒级	冷启: 分钟级 热启: 秒级	冷启动: 小时级别 热启动: 20%/min
爬坡速率 (系统额定功率)	4%/秒 (加压) 10%/分钟 (常压)	10~90%/秒	10~50%/秒	NA
使用寿命 (kh)	~60	~50	NA / (~2)	<20
特点	技术成熟度最高, 单槽规模大, 综合成本最低, 但波动响应速度慢	响应速度快、电流密度高、体积紧凑、与波动性电源适配性好	结合了碱性技术的低成本与质子交换膜技术的系统灵活性, 较好适配波动电源	在高温工况下工作, 理论能量转换效率最高, 可利用热能替代部分电能制氢。
典型应用场景	大规模风光制氢	分布式风光制氢	研发示范中	研发示范中

表 2 四类电解槽多维动态适配性的主导受限机理与表现指标对比

Table 2 Comparison matrix of dominant limiting mechanisms and apparent indicators for the dynamic adaptability of four electrolyzer technologies

评价维度 (表现指标)	AWE	PEMWE	AEMWE	SOEC
低负荷安全适应性 (最低安全负荷)	多孔隔膜气体交叉 (较好)	PFSA 膜气体渗透与压差效应 (最好)	AEM 膜溶胀/降解导致阻气衰减 (好)	热平衡及蒸汽/保护气维持 (一般)
高负荷承载能力 (最高稳定电流密度)	气泡覆盖与液相更新受限 (好)	酸性 OER、水/氧传质及 Ti 界面钝化 (最好)	OH ⁻ /水传输及非贵金属催化剂重构 (较好)	蒸汽供给与热场/界面失稳 (一般)
动态爬坡能力 (最大爬坡速率与稳态恢复时间)	气液、热压状态重建滞后 (较好)	水/气/压力状态响应滞后 (最好)	膜/离聚物水合与催化状态滞后 (好)	热惯性与热膨胀失配 (一般)
启停灵活性 (冷/热启动时间与启停衰减)	残余气体与反向电流 (较好)	膜干湿循环与电位重分布 (最好)	膜/离聚物干湿循环与界面应力 (较好)	深度热循环、Ni 氧化还原与密封热疲劳 (一般)
规模化经济性 (LCOH)	材料成本低, 但辅助系统需求高 (最好)	Ir/Pt、PFSA 膜及 Ti 组件成本高 (一般)	贵金属依赖低、但寿命和放大一致性不足 (好)	经济性高度依赖热源与热管理条件 (较好)

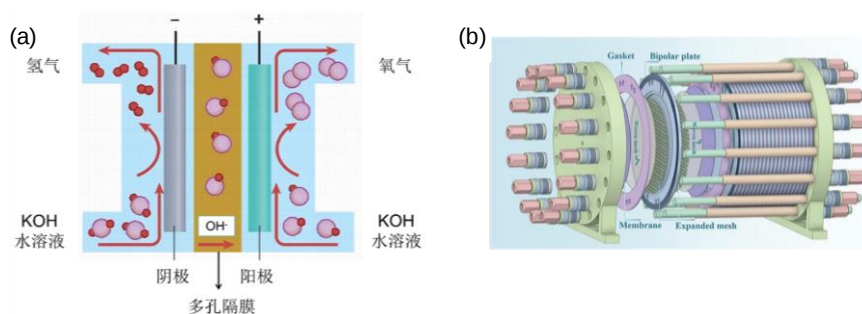


图6 (a) 碱性电解水原理示意图^[22]; (b) 碱性电解水结构示意图

Fig. 6 (a) Schematic illustration of alkaline water electrolysis^[22]; (b) schematic structure of an alkaline water electrolyzer

溶解气迁移和压差驱动交叉通量并不一定同比例降低, 导致交叉气体在产物气中的相对含量升高。隔膜孔径、氢气渗透率和泡点压力分别决定气体贯穿阻隔、溶解氢迁移和抗压差穿透能力, 共同控制低负荷氢氧交叉风险。目前常用 Zirfon UTP 500 隔膜平均孔径约为 140~150 nm, 在极低电流密度或约 30% 负荷下易出现明显交叉渗透。如图 7 (a) 所示, 通过调控相转化条件并引入纤维素纳米晶体等添加剂, 复合隔膜孔径可缩小至 45.9~55 nm, 泡点压力由约 3 bar 提升至 11.2 bar, 30 wt% KOH、30℃ 下溶解 H_2 渗透率由 20×10^{-12} 降至 $0.46 \times 10^{-12} \text{ mol cm}^{-1} \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ bar}^{-1}$, 显著提高宽负荷和带压运行安全余量^[25-28]。因此, 隔膜优化是降低 AWE 最低安全负荷、拓宽动态运行窗口的关键。

高负荷承载能力主要受气泡排出、电解液传输和局部极化限制。高电流密度下, 气体生成速率显著增加, 若气泡不能及时脱附排出, 将遮蔽活性位点、并引发局部电流密度升高、欧姆阻抗增加和过热。传统乳突状流场和镍网复合流场在高负荷下易出现气泡堵塞、流动死区和局部极化过大等问题。如图 7 (b) 所示, 通过多出入口布局、非对称截流结构和凹凸球面仿生微结构等流场设计, 可优化气泡排出路径和电流密度分布, 降低局部极化, 提升 AWE 对高负荷和波动工况的适应性^[29-31]。同时, AWE 电极也应兼顾高电流密度稳定性、抗逆电流能力和强析气界面稳定性。阳极电极决定高负荷下的能效和极化损失, 阴极电极的抗逆电流能力则关系到快速降载、断电和频繁启停过程中的电极稳定性。当前 OER 催化剂仍以 Ni、Co 基材料为主, 目标是在高电流密度和高温碱性环境中维持低过电位和结构稳定性。例如, MOF@POM 超结构可调控

过渡金属活性位点氧化还原过程, 降低碱性析氧过电位^[32] (图 7 (c))。W/Mo 双掺杂 CoP 构筑的 WMo-CoP@NM 在自组装 AWE 系统中经受 0.4 - 1.5 A cm² 反向波动电流和启停加速老化测试, 电压波动小于 50 mV, 动态稳定性优于 Raney Ni/Pt/C^[33]。因此, 面向离网波动制氢的 AWE 电极评价, 应从“低过电位优先”转向“低过电位、高负荷稳定、抗逆电流和界面耐久”并重。

动态爬坡和启停能力反映 AWE 在非稳态运行中的状态重建能力, 其限制不仅来自电堆本体, 还取决于气液分离、电解液循环、压力调节和热管理等辅助系统的协同响应。尽管电流在电气层面可快速变化, 但负荷切换后, 气液分离器液位与气相滞留量、电解液循环流量、系统温度及氢氧两侧压差均需重新建立稳定状态。气液分离器、电解液循环回路及换热/冷却系统存在明显的物料滞留和热惯性, 使压力、温度及气体纯度的响应通常滞后于电流变化。若升降载或停机过快, 可能出现压力波动、温度过冲、气液分离效率下降及气体纯度偏离等问题; 即使电堆本体仍具备负荷承载能力, 系统也可能率先触及辅助设备运行边界或安全联锁阈值^[6-7]。

目前, 提升 AWE 动态爬坡和启停能力主要依赖辅助系统控制与运行策略优化。一方面, 可通过压力、电解液流量、气液分离和换热过程的协同调节, 减小升降载过程中的压力、温度和气体纯度偏差, 拓宽安全运行范围, 并减少短时功率波动引起的不必要停机。另一方面, 热备用、多模块并联、受控爬坡和分级启停为大型离网制氢系统提供了更灵活的运行方式。热备用通过维持必要的温度、压力及辅助系统状态, 避免短时功率不足后反复经历

完整冷启动,但同时会带来额外寄生能耗。已有研究在系统建模中通常将AWE热备用功耗取为额定功率的1%~5%,其中针对5 MW级AWE的模型常采用约2%的额定功率作为热备用功耗^[34]。多模块运行则为波动功率的分级消纳提供了工程路径。福岛氢能研究基地(FH2R)采用20 MW光伏与10 MW级AWE系统耦合,产氢量可在300~2000 Nm³/h范围内调节,系统最大升降载速率达500 kW/s,并可在20 s内完成最小与最大输出之间的切换,累计运行时间已超过13000 h。旭化成川崎试验平台进一步采用4个0.75 MW AWE模块并联,各模块既可独立运行,也可根据系统效率进行协调切换,用于验证波动功率条件下的多模块控制与长期耐久性^[35]。通过模块间的负荷分配与逐级投切,可将连续随机功率变化分解为各模块可承受的负荷变化,减少单槽及其辅助系统反复经历大幅流量、压力和温度变化所带来的动态冲击。

工程应用方面,AWE已形成较成熟的装备制造和工程放大体系,是当前全球绿氢产业化的核心路线之一。中国在AWE装备制造中占据重要份额,中石化新疆库车项目等百兆瓦级工程推动了大规模绿氢示范^[36]。如图7(d)所示,在离网可再生能源耦合方面,2020年全球首套千吨级太阳燃料合成示范项目实现了10 MW离网光伏耦合AWE制绿氢^[37];2023年我国首个万吨级光伏+碱性电解水制氢项目成功产氢,标志着绿电制氢向规模化商业化迈进^[38]。从动态适配角度看,AWE更适合作为稳定基荷制氢单元,而不宜单独承担高频、大幅度功率波动。2025年投产的国电投大安风光制绿氢合成氨一体化示范项目采用36000 Nm³/h AWE与9600 Nm³/h PEMWE组合,使系统负荷范围拓宽至5%~110%^[39]。近期公开的工程运行结果显示,制氢集群可实现8%~110%的连续功率调节;在分钟级剧烈风光波动下,PEMWE承担主要高频功率分量,AWE以约1.5%/s的速率跟随,集群整体响应时间小于10 s;群控策略使电氢转换效率提升约3.5%,电解槽日均启停次数降低约34%。同时,在无电化学储能条件下,系统风光实际消纳率达到96.8%^[40]。这些结果说明,通过不同电解槽之间的动态分工,可降低大型AWE直接承受高频功率变化的压力,并提高制氢集群的运行柔性。

总体而言,AWE的竞争力量来自低成本、大规

模和成熟供应链,但其动态适配性受液态KOH、多孔隔膜和气液两相传输过程限制。因此,AWE在离网风光制氢中更适合作为稳定基荷制氢单元,而非快速调节单元。未来AWE的技术升级应围绕“更宽安全运行窗口”和“更强系统协同能力”展开,使其在大规模离网制氢中发挥稳定主体作用。

2.2 质子交换膜电解水制氢技术

质子交换膜电解水制氢技术(PEMWE)以超纯水为原料,以膜电机组件(membrane electrode assembly, MEA)为核心,其中MEA由质子交换膜及其两侧紧密贴附的阳极、阴极催化层构成,形成零间距电极结构(见图8)。电解过程中,阳极水分子发生析氧反应: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 \uparrow + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$;生成的H⁺经质子交换膜迁移至阴极,并与电子结合生成氢气: $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2 \uparrow$ 。质子交换膜同时承担质子传导和气体隔离功能,使PEMWE不依赖液态电解液和多孔隔膜。由此,PEMWE具有离子传输路径短、欧姆阻抗低、浓度弛豫小等特点,因而更容易实现高电流密度、宽负荷运行和快速动态响应。

在低负荷与气体安全方面,质子交换膜是决定PEMWE气体隔离能力和运行窗口的关键。全氟磺酸膜(Perfluorosulfonic acid membrane, PFSA)在湿润、高温条件下具有较高质子电导率和较好机械稳定性。但在高压差、薄膜化和宽负荷运行条件下,膜的气体渗透、化学稳定性和机械耐久性仍会影响低负荷安全边界。当前PFSA膜的改良主要围绕三方面展开(见图9(a)):一是采用多孔PTFE等增强骨架提升结构稳定性和抗机械疲劳能力^[41];二是引入自由基捕获剂、功能化侧链基团或部分氟化/去氟化结构,以减缓自由基攻击和膜化学降解^[42-44];三是推进国产质子交换膜产业化,降低关键膜材料供应风险。以苏州科润新材料产品为例,其膜厚度范围为50~220 μm,质子电导率、酸离子交换容量、机械性能和吸水率等关键参数已接近商业化Nafion系列产品水平^[45-46]。

在高负荷承载方面,PEMWE主要受OER动力学速率、MEA内水/氧两相传输和钛基组件界面接触稳定性共同限制。酸性OER是动力学缓慢的四电子过程,IrO₂及其衍生物仍是目前最可靠的阳极催化剂体系。因此,低Ir载量、高本征活性和高电流密度稳定性是阳极设计的核心目标。如图9

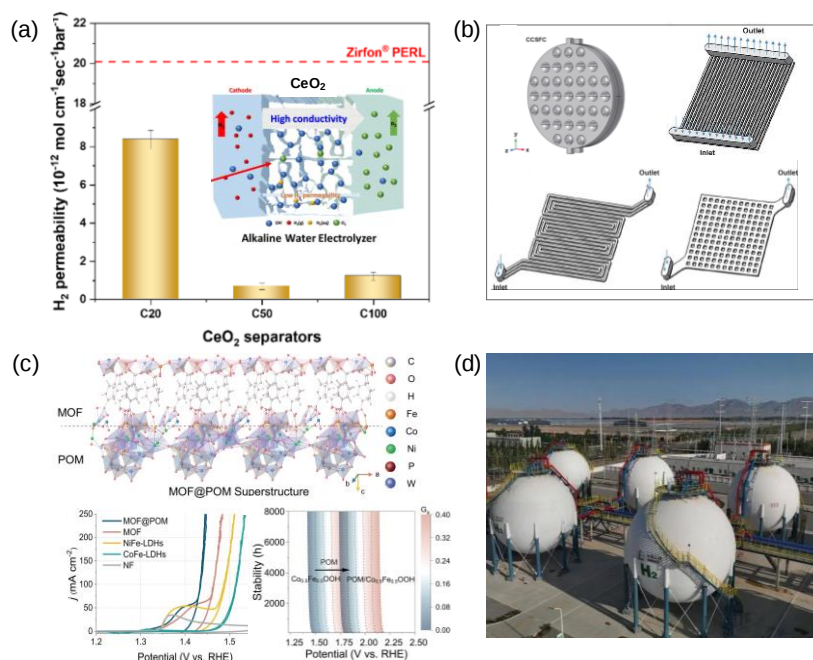


图7 (a) AWE隔膜改性降低低负荷氢气渗透率^[28]; (b) 不同流道板示意图^[31]; (c) 碱性电解水高活性催化剂开发示意图^[32]; (d) 我国AWE离网制氢工程新闻报道^[37]

Fig. 7 (a) Modification of the AWE separator to reduce hydrogen permeation at low loads^[28]; (b) schematics of different flow-field plates^[31]; (c) examples of developing high-activity catalysts for alkaline water electrolysis^[32]; (d) news report on an off-grid AWE hydrogen-production project in China^[37]

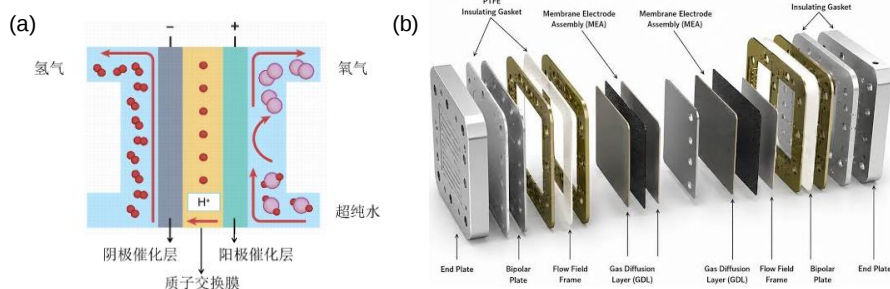


图8 (a) 质子交换膜电解水原理示意图^[22]; (b) 质子交换膜电解水结构示意图

Fig. 8 (a) Schematic illustration of proton exchange membrane water electrolysis^[22]; (b) schematic structure of a proton exchange membrane water electrolyzer

(b) 所示, 动态模板重构介孔氧化铈催化剂通过三维有序介孔结构优化高电流密度下的物质传输, 在 5 A cm^{-2} 下实现超过 2700 h 稳定运行, 说明构建高通量、低传质阻力和高稳定性的阳极结构是提升 PEMWE 高负荷承载能力的重要方向^[47]。除催化剂外, 气体扩散层、多孔传输层和双极板也直接影响高负荷运行。阳极侧处于强酸、高电位和富氧环境, 通常采用钛基组件; 但钛易形成低导电 TiO_2 钝化膜, 增加接触电阻, 因此常需 Au、Pt 等耐腐蚀导电涂层。以国际可再生能源署 (IRENA) 对 1

MW PEMWE 系统的典型成本分解为例, 电堆约占完整系统成本的 45%; 在电堆内部, 双极板和 PTL 分别约占 53% 和 17%, 合计约占电堆成本的 70%, 折算约占完整系统成本的 31.5%^[48]。相比之下, CCM 中的 Ir、Pt 等催化贵金属占完整系统成本低于 10%, 但 Ir 资源稀缺仍可能制约 PEMWE 的大规模部署。需要指出的是, 双极板和 PTL 的高成本不仅来自钛材料本身, 还包括成形加工及贵金属耐腐蚀涂层等制造环节。上述比例会随制造规模、组件设计和材料用量变化, 但表明降低钛基结构组件成

本与减少关键贵金属用量,是 PEMWE 规模化降本的两个不同但同等重要的方向。为降低成本并提升稳定性,当前研究集中于钛钢复合基材、导电聚合物复合材料以及低贵金属或非贵金属耐腐蚀涂层^[49]。这些组件优化不仅影响设备成本,也决定高电流密度下的电压效率、界面接触稳定性和长期衰减速率。

在动态爬坡和波动耐受方面, PEMWE 中质子可在膜内快速迁移,电极界面无需明显液相离子浓度弛豫,因此具有更快电流响应和更宽负荷调节范围。然而,快速升降载会使阳极催化层反复经历高电位氧化、局部水/气传输变化和界面应力波动,要求催化剂不仅具备稳态高活性,还能承受阶跃电流冲击。如图 9(c) 所示,复旦大学张波团队通过超声辅助“熟化诱导嵌入”策略,将 Ir 纳米颗粒锚定并嵌入 CeOx 载体晶格,构筑 RIE-Ir/CeOx 低铱催化剂。在阳极 Ir 载量仅 0.3 mg cm^{-2} 时,该体系在 3 A cm^{-2} 下实现 1.72 V 电解电压,并在 PEMWE 电堆中完成 6000 h 加速老化测试;经 $1 - 8 \text{ A cm}^{-2}$ 宽幅阶跃电流冲击后,回到 2 A cm^{-2} 时性能仍保持稳定^[50]。这表明,面向波动电源耦合的 PEMWE 阳极设计,应由稳态低过电位拓展至阶跃电流下的结构稳定性和界面可逆性。除 MEA 材料外,运行策略同样影响 PEMWE 动态效率。刘元等针对 50 kW 级 PEM 制氢系统建立压强-功率关联模型,并提出以最大制氢效率为目标的动态压强优化策略。如图 9(d) 所示,在额定电流 $20\% - 120\%$ 的波动输入下,相比恒压模式,动态调压可使平均单位制氢能耗由 4.72 降至 4.61 kWh/Nm^3 ,节能率达 2.33% ,系统效率提升约 2% ^[51]。因此, PEMWE 的动态爬坡能力不仅取决于 MEA 的快速电流响应,还需通过压力控制、水管理和功率管理降低波动运行能耗。

启停灵活性是 PEMWE 的另一重要优势。 PEMWE 不依赖大体积液态碱液循环,膜电极结构紧凑、液体库存小,因此冷启动、热启动和待机恢复速度较快,适合承担波动电源下的快速调节任务。但频繁启停仍会带来膜水合状态循环、局部干湿变化、残余气体滞留、压力波动和电极电位重分布等问题,进而加速膜化学降解、催化剂溶解或界面接触衰退。因此,提升 PEMWE 启停适应性不仅需要高稳定膜电极,还需要合理的水管理、气体吹

扫、压力平衡和受控启停策略。

工程应用方面, PEMWE 在我国仍处于商业化初期,但凭借快速响应、宽负荷调节和高纯氢输出优势,已逐步应用于可再生能源制氢示范场景。当前国内单槽规模最大的 PEM 电解槽制氢量可达到 $500 \text{ Nm}^3/\text{h}$,国氢科技、中国华电科工和中车株洲所等单位均实现了该规模产品的自主研发^[52]。在兆瓦级示范方面,2024 年国家电力投资集团有限公司在吉林长春中韩示范区部署的“可再生能源+PEM 制氢”系统,单槽额定制氢量为 $200 \text{ Nm}^3/\text{h}$,活性面积为 2500 cm^2 ,直流电耗为 4.6 kWh/Nm^3 ,达到国际先进水平^[53];华电德令哈项目完成商业化氢气交付,实现了青海省 3 MW 级高海拔光电 PEM 制氢成功示范^[54];上海氢晨新能源科技有限公司自主研发的海上单槽 $1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ PEM 制氢电解槽已开展全功率测试,其动态响应时间约 5 s ,直流电耗低于 4.3 kWh/Nm^3 ,为海上风电耦合制氢提供了新的工程路径^[55]。

总体而言, PEMWE 的竞争力不在于最低设备成本和最大单槽规模,而在于高电流密度、宽负荷范围、快速启停和强动态响应能力。因此,在离网风光制氢系统中, PEMWE 更适合作为柔性调节单元,用于吸收高频功率波动、提高可再生能源消纳比例,并与 AWE 等低成本基荷制氢路线形成互补。未来 PEMWE 的发展重点应围绕低贵金属高稳定膜电极、国产质子交换膜、低成本耐腐蚀双极板/传输层和系统动态控制协同推进,从而在降低成本的同时保持其动态适配优势。

2.3 阴离子交换膜电解水制氢技术

阴离子交换膜电解水制氢技术(AEMWE)通常以低浓度 KOH 溶液(如 1 mol L^{-1})为原料,反应主要发生在由阴离子交换膜(AEM)与阴、阳极催化层构成的膜电极结构中(图 10)。阴极侧发生析氢反应: $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow + 2\text{OH}^-$;生成的 OH^- 经 AEM 迁移至阳极,并发生析氧反应: $4\text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2 \uparrow + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$ 。与 AWE 相比, AEMWE 采用固态阴离子交换膜替代多孔隔膜,可同时实现 OH^- 传导和气体隔离,并构建零间隙膜电极结构,从而降低欧姆阻抗、提升动态响应;与 PEMWE 相比, AEMWE 可使用 Ni、Fe、Co 等非贵金属催化剂,降低贵金属依赖和系统成本^[56]。因此, AEMWE 的技术价值在于以较低材料成本实现接近 PEMWE 的柔性运行

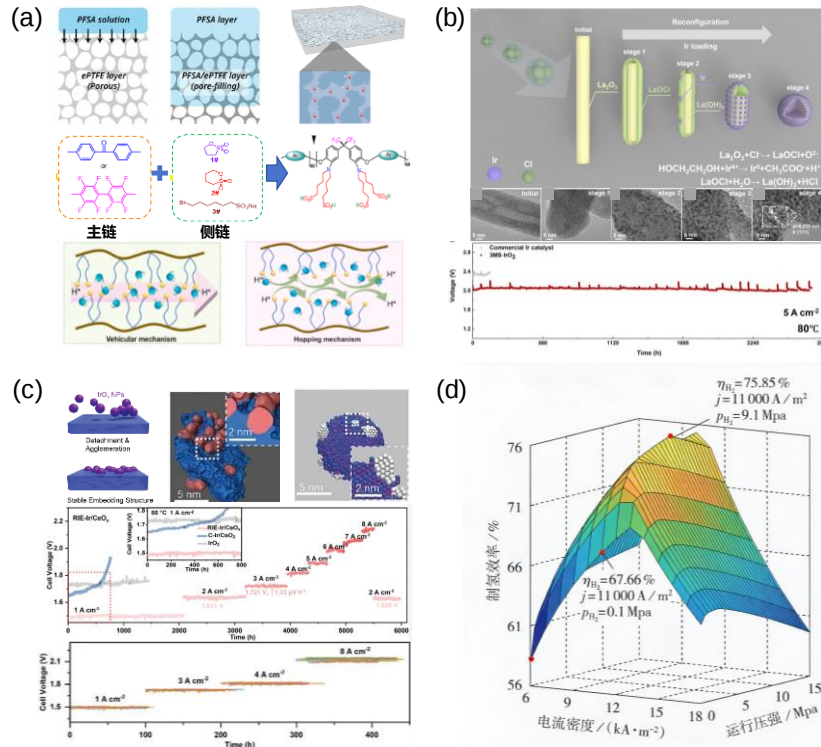


图9 (a) 质子交换膜改性策略^[41-42]; (b) 高负荷大电流承载体系的开发^[47]; (c) 耐波动PEM组件的开发^[50]; (d) PEM系统运行策略调控动态爬坡效率^[51]

Fig. 9 (a) Proton exchange membrane modification strategies^[41-42]; (b) development of high-load, high-current-capacity systems^[47]; (c) development of fluctuation-tolerant PEM components^[50]; (d) regulation of dynamic ramping efficiency through PEM system operating strategies^[51]

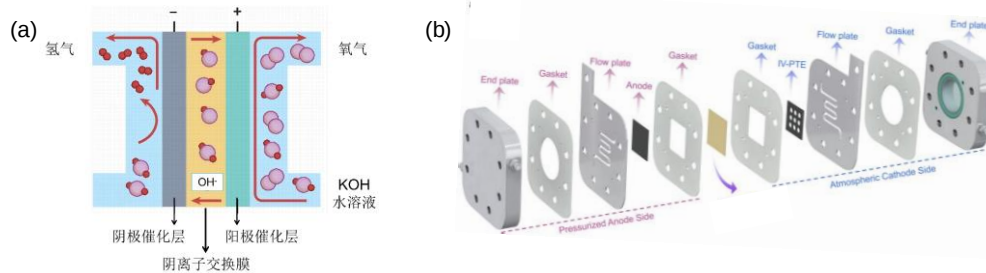


图10 (a) 阴离子交换膜电解水原理示意图^[22]; (b) 阴离子电解水结构示意图

Fig. 10 (a) Schematic illustration of anion exchange membrane water electrolysis^[22]; (b) schematic structure of an anion exchange membrane water electrolyzer

能力，是离网波动制氢中值得关注的低成本动态路线。

从低负荷安全适应性看，AEMWE有望缓解传统AWE多孔隔膜下的气体交叉问题，但这一优势取决于AEM的化学稳定性、尺寸稳定性、阻气能力和界面完整性。AEM中常见的季铵盐等阳离子基团在高pH和长期运行条件下易受OH⁻亲核攻击而降解，导致离子电导率下降；波动工况下的压差变化、含水梯度和干湿循环也可能引起膜溶胀、机

械疲劳和界面剥离^[57]。此外，碱性体系中的CO₂/碳酸盐污染会改变局部离子传导环境，提高欧姆阻抗并削弱低负荷稳定性^[58-59]（图11（a））。因此，AEMWE的低负荷安全潜力不仅取决于膜的初始阻气性能，更取决于膜和离聚物在长期动态工况下能否维持稳定的OH⁻传导和气体隔离能力。

从高负荷承载能力看，AEMWE的核心挑战在于膜电极内部的OH⁻传导、水管理、非贵金属催化剂稳定性和界面传质能否支撑高电流密度运行。虽

然AEMWE的零间隙结构有利于降低欧姆阻抗,但高负荷下水/OH⁻传输、气泡排出和催化层离聚物分布不均会导致局部传质受限、界面阻抗增加和电压快速升高。AEMWE主要采用Ni、Fe、Co等非贵金属催化体系,成本优势明显,但这些催化剂在高电位、强碱和剧烈析气条件下容易发生金属溶解、价态重构和催化层脱落。尤其在波动工况下,高低负荷反复切换会放大催化剂活性相的结构演变,使早期“低过电位”评价难以反映真实工程可靠性。因此,AEMWE高负荷承载能力的提升,应从单一膜电导率或单一催化剂活性,转向膜—离聚物—催化剂—多孔传输层—电堆结构的协同优化。

从动态爬坡能力看,AEMWE具备接近PEMWE的结构潜力。其固态电解质膜和零间隙膜电极结构可缩短离子传导路径,避免传统AWE中大体积电解液循环和液相浓度场弛豫对响应速度的限制。但这种潜力能否转化为工程优势,取决于膜电极组件在高频电流波动下的结构鲁棒性。快速阶跃电流会引起催化剂价态循环、局部OH⁻浓度变化、膜/离聚物水合波动和气泡冲击,导致催化层-膜界面接触衰退^[60-61](图11(b))。针对非贵金属催化剂在动态工况下易溶解和结构坍塌的问题,徐路团队提出“瞬态促进剂”策略,构筑Ni₃Fe_{1.2}Cr_{0.8}O_x催化体系(图11(c))。其中Cr牺牲溶出以保护Ni/Fe活性中心,并原位诱导形成高孔隙率NiFeOOH架构,改善变载下的电解液渗透和析气传质。在AEMWE单池中,该体系在1.0 A cm²下电压仅1.68 V,并在0.5–1.0 A cm²高频交变电流下稳定运行超过30天,电压衰减率仅0.33 mV h⁻¹;在2.5 kW级AEMWE实堆中经模拟光伏波动协议测试后,仍表现出良好电压稳定和恢复能力^[62]。

从启停灵活性看,AEMWE同样具有较好潜力,但其风险主要集中在膜和界面的动态稳定性。但频繁启停会带来膜含水状态变化、离聚物局部干湿循环、碳酸盐积累/再分布、催化剂价态循环和界面机械应力。近期杨正金团队开发的刚性微孔奎宁环基阴离子交换膜,利用刚性三蝶烯节点限制链段堆积。在10 M NaOH、80 °C条件下老化3100 h后,OH⁻电导率保留率高达99.95%,并达到168.8 mS cm⁻¹。针对波动工况,该膜在包含高频启停中断的0.5 A cm²电流密度下运行1200 h,电压衰减率仅为65 μV h⁻¹;在0.5与1.0 A cm²电流阶跃及

30–80 °C温度交变的综合波动模拟工况下,连续运行1400 h后仍保持良好尺寸和运行稳定性^[63]。提高膜的尺寸稳定性和耐碱稳定性,是提升AEMWE启停适应性和长期动态运行可靠性的关键。

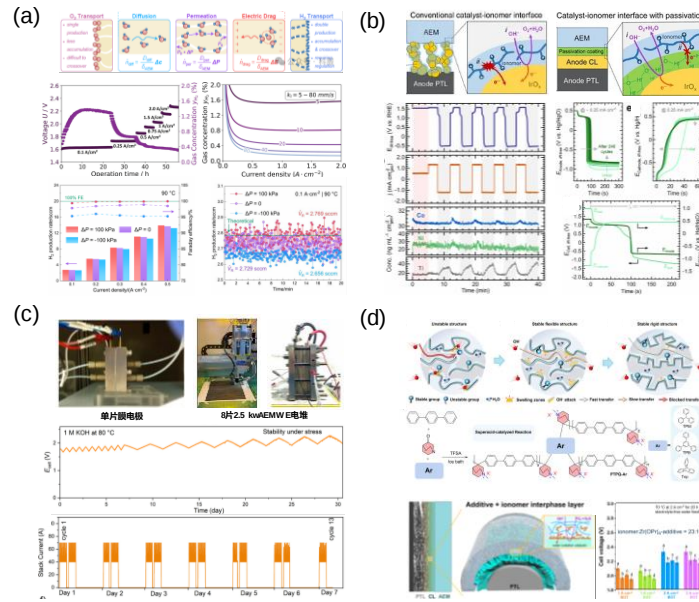
从规模化经济性看,AEMWE的吸引力在于低贵金属依赖和潜在低成本MEA体系,但其经济优势目前更多体现为发展潜力,而非完全成熟的工程现实^[64](图11(d))。AEM膜、离聚物和非贵金属催化剂在长寿命动态工况下的验证仍不足,碳酸盐污染、界面水管理、电堆放大一致性和系统寿命也有待进一步确认。目前初步实现商业化的膜材料正加速发展,例如,Versogen的PiperION®系列膜采用无醚聚芳基哌啶结构,80 °C下离子电导率高于150 mS cm⁻¹,离子交换容量约2.35 meq g⁻¹,在1 M KOH、80 °C下寿命可达2000 h^[65]。国产AWEymer® W-75T阴离子交换膜在80 °C下离子电导率大于160 mS cm⁻¹,阳离子基团在1 M NaOH、80 °C、10000 h条件下降解小于5%^[66]。总体而言,AEMWE仍需从材料性能验证走向长周期电堆和系统级可靠性验证,才能真正体现其LCOH竞争力。

工程应用方面,AEMWE正处于由实验室千瓦级验证向工业化兆瓦级示范过渡的关键阶段。2024年,由中国能源建设集团广东省电力设计研究院牵头的国内首个“兆瓦级固态阴离子交换膜制氢示范工程”采用国产自主研发AEM电解堆,系统额定产氢量达250 Nm³/h^[67]。这些工程进展表明,AEMWE正在由材料、单池和小型电堆研究逐步向规模化系统集成拓展,但与AWE和PEMWE相比,其长期动态运行数据仍较有限,膜电极寿命、系统可靠性及全生命周期性能仍需进一步工程验证。

总体而言,AEMWE的技术价值在于尝试连接AWE的低成本优势与PEMWE的柔性响应优势。其低负荷安全、动态爬坡和启停灵活性具有较大潜力,高负荷承载能力和规模化经济性则取决于膜、离聚物、非贵金属催化剂和界面结构能否在长期波动工况下保持协同稳定。因此,AEMWE目前更适合被定位为未来低成本柔性制氢路线,而非已经完全成熟的大规模基荷路线。未来其突破重点应从单一材料性能提升,转向膜电极组件、电堆放大和真实波动工况下的系统可靠性验证。

2.4 固体氧化物电解水制氢技术

固体氧化物电解水(SOEC)主要包括氧离子



注：(c) 膜电极及电堆长时波动性测试^[62]；(d) 阴离子交换膜对启停适应性和纯水电解工况的影响^[63-64]。
图 11 (a) 阴离子交换膜的改性及开发^[57-59]；(b) 快速阶跃电流带来的界面及衰退问题^[60-61]；

Fig. 11 (a) Modification and development of anion exchange membranes^[57-59]; (b) interfacial and degradation issues caused by rapid current steps^[60-61]; (c) long-term fluctuation testing of membrane electrode assemblies and stacks^[62]; (d) effects of anion exchange membranes on start-stop adaptability and operation under pure-water electrolysis conditions^[63-64]

传导型和质子传导型，其中氧离子传导型技术成熟度更高、应用更广。该体系通常在 650 °C 以上运行，以水蒸气为原料制氢：阴极侧水蒸气被还原生成 H_2 和 O^{2-} ($2H_2O(g) + 4e^- \rightarrow 2H_2 \uparrow + 2O^{2-}$)， O^{2-} 经电解质传导至阳极并氧化生成 O_2 ($2O^{2-} \rightarrow O_2 + 4e^-$) (见图 12)。SOEC 的核心优势在于高温热力学和热电协同。高温可降低电解过程的吉布斯自由能需求，从而减少电耗；同时，SOEC 可耦合工业余热、核热或光热，用热能替代部分电能，在特定场景下实现较高系统效率。此外，SOEC 具备 H_2O/CO_2 共电解能力，可制备合成气，并与甲醇、氨和液体燃料等 Power-to-X 过程耦合^[68-69]。因此，SOEC 并非面向快速调节的低温电解路线，而更适合作为热电协同和高效率转化平台。

从低负荷安全适应性看，SOEC 在高温下运行，其低负荷边界主要受热平衡、蒸汽供给和电极氧化还原状态控制，从其波动工况下的工作流程示意图看出，电流降低或短时中断时，电化学反应速率下降，但电堆仍处于高温环境；若水蒸气、氢气保护气和热输入比例失衡，燃料极可能发生局部氧化，在氧化还原循环中易产生体积变化和机械应

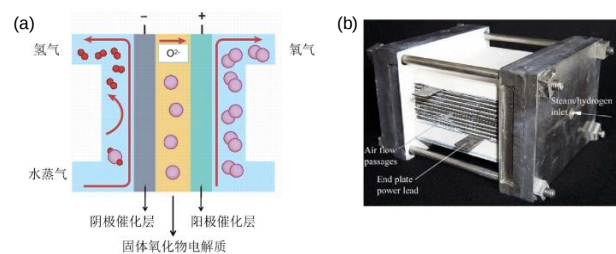


图 12 (a) 固体氧化物电解水原理示意图^[22]；(b) 固体氧化物电解水结构示意图

Fig. 12 (a) Schematic illustration of solid oxide water electrolysis^[22]; (b) schematic structure of a solid oxide water electrolyzer

力。因此，SOEC 的低负荷运行关键是能否维持高温气氛、蒸汽利用率和电极还原状态。

从高负荷承载能力看，SOEC 的限制主要来自蒸汽供给、浓差极化、热平衡和电极/电解质界面稳定性。高电流密度下，水蒸气消耗速率迅速增加，若蒸汽补给不足，会出现局部蒸汽饥饿，导致浓差极化升高、燃料极局部气氛变化以及电极氧化还原状态失衡。同时，高负荷会改变 SOEC 的热平衡状态。SOEC 的热效应与工作电压、热中性电压和蒸汽转化率密切相关，局部电流密度不均或蒸汽分布不均会造成温度梯度，从而诱发热机械应力、

界面分层和密封疲劳。因此, SOEC的高负荷承载能力不仅取决于电极催化活性和电解质离子电导率, 还取决于蒸汽流场、热管理和材料热膨胀匹配能否支撑高温高通量运行。

在材料与组件层面, SOEC的核心挑战是高温长期稳定性。燃料极通常采用Ni-YSZ复合材料, 具有良好电子导电性和水蒸气还原活性, 但在氧化还原循环中易发生Ni颗粒粗化、体积膨胀和孔结构演变。氧电极常采用LSM等钙钛矿材料^[71-72](图13(b)), 但传统LSM以电子导电为主, 反应集中于三相界面, 限制高电流密度下的有效反应面积; 同时, 高氧分压Sr偏析、界面反应和电极/电解质分层会加速衰减^[73]。因此, 当前研究主要围绕混合离子-电子导体氧电极、体相掺杂、纳米催化剂浸渍、原位溶出和界面修饰等策略展开, 以提高反应活性、降低面阻抗并改善热膨胀匹配^[74]。电解质方面, YSZ仍是商业化电堆的重要选择, 后续改良重点在于提升中低温区氧离子电导率、构筑超薄电解质和优化电极/电解质界面, 从而降低欧姆极化和界面阻抗^[75-76]。

从动态爬坡能力看, SOEC的限制主要来自温度场和热应力重建。高温下电流快速变化会改变电堆吸热/放热平衡、蒸汽利用率、空气流量需求和温度梯度。若直接承受风光高频波动, 电堆可能尚未完成热平衡重建便进入新的电流区间, 导致热应力积累、密封疲劳和界面衰退。因此, SOEC的动态爬坡能力应理解为高温电堆在热安全边界内完成负荷变化的能力。Jack Brouwer等提出热待机和冷启动控制策略, 通过反馈与前馈控制调节电加热器功率和空气流量。热待机下, 系统可在维持操作温度的同时将电流降至 0 A cm^{-2} , 并以 $0.073\text{ A cm}^{-2}\text{ min}^{-1}$ 恢复负荷; 稳态切换至热待机约需6 min。冷启动时, 在 $0.036\text{ A cm}^{-2}\text{ min}^{-1}$ 爬坡率和 $1.0 - 2.0\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ 升温速率下, 系统可在6 - 11 h内升至额定高温^[76]。这说明SOEC可动态运行, 但必须依赖受控热管理和热待机策略。除主动热管理外, 在电堆或系统层面引入热储能也可作为SOEC的动态运行提供热缓冲。其中, 相变材料可利用潜热吸收和释放负荷变化引起的瞬态热量, 而陶瓷填充床等固态显热储能可缓冲蒸汽发生及进气预热过程中的热负荷波动, 从而降低电堆温度变化速率和温度梯度, 减小热应力, 并有利于热待机后的热状态恢

复^[77]。但其工程应用仍需综合考虑储热温区匹配、传热速率、循环稳定性、系统体积及成本, 避免储热环节自身成为新的动态响应瓶颈。

从启停灵活性看, SOEC在四类电解槽中受限最明显。低温电解槽启停主要涉及吹扫、润湿、电位保护和压力平衡, 而SOEC还需数百摄氏度升降温。冷启动或停机会引发热膨胀失配、密封疲劳和界面分层; 还原气氛不足时, Ni基燃料极会因氧化还原循环产生微结构损伤。Tucker团队验证了SOEC在蒸汽、模式、热和氧化还原循环下的鲁棒性(图13(c))^[78]。电池在3% - 75%蒸汽浓度循环下稳定300 h, 经500次SOEC/SOFC切换和150次600 - 800 $^{\circ}\text{C}$ 热循环后保持性能; 但全氧化还原循环会造成Ni膨胀应力。将无氢蒸汽暴露限制为每次30 min, 可维持300次部分氧化还原循环。因此, SOEC启停优化通过热待机、保护气和受控升降温, 避免深度热循环与燃料极深度氧化。

从规模化经济性看, SOEC的优势高度依赖应用场景。若与工业余热、核热或高温化工过程耦合, SOEC可利用外部热源降低电耗, 并通过 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 共电解进一步进入合成气、甲醇、氨等Power-to-X路径, 从而形成区别于低温电解槽的系统经济性。因此, SOEC的LCOH竞争力不能脱离热源条件和下游产品场景孤立评价。在没有稳定热源或热储能支撑的离网风光系统中, SOEC难以直接承担高频快速调节; 而在具备稳定热源、连续蒸汽供应和氢基燃料合成需求的工业园区中, 其高效率优势更容易转化为经济优势。

工程应用方面, SOEC目前仍处于从千瓦级向百千瓦级和更高规模过渡的研发示范阶段。中国科学院上海应用物理研究所研发的200 kW级固体氧化物电解水制氢系统, 额定产氢量达 $64\text{ Nm}^3/\text{h}$, 直流电耗低至 3.0 kWh/Nm^3 , 代表了国内SOEC装备+研发的重要进展^[79]。2024年, 石油化工研究院自主研发的SOEC电解水制氢侧线装置在中原油田示范运行, 总制氢功率105 kW, 标志我国首个百千瓦级SOEC项目落地^[80]。此外, 依托甘肃武威液态燃料钍基熔盐实验堆开展的“核热-电-氢”综合利用平台验证正在推进, 为核热耦合高效电解制氢提供了重要参考^[81]; 中国科学院上海应用物理研究所与南方电网联合研制的百千瓦级固体氧化物电氢双向转换装置, 在SOEC模式下制氢功率达100

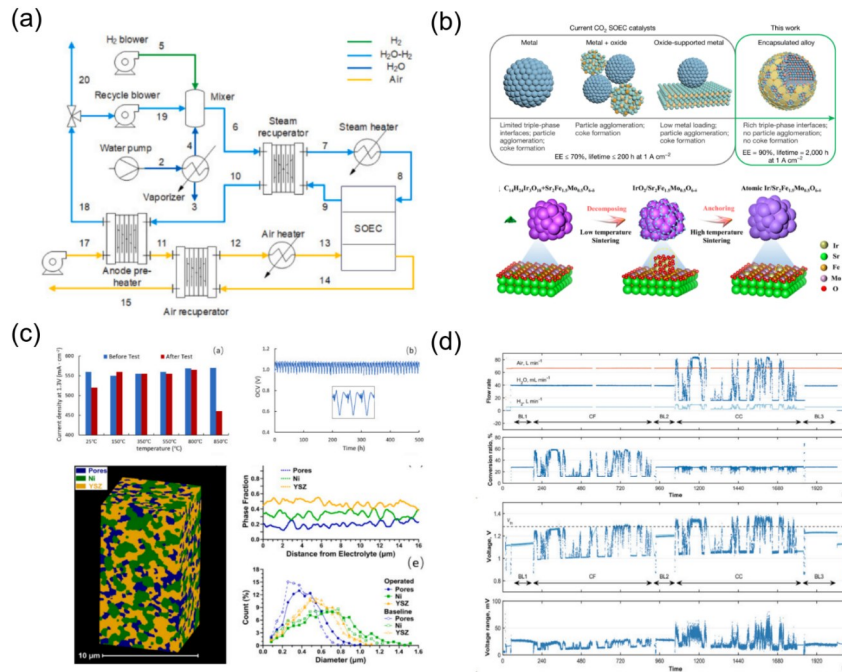


图 13 (a) SOEC 波动工况工作流程示意图^[70]; (b) SOEC 固态电极材料的开发^[71-72]; (c) 波动工况下 SOEC 电极的实时监测^[78]; (d) SOEC 波动工况下电压及产氢效率的实时监测^[83]

Fig. 13 (a) Workflow of SOEC under fluctuating operating conditions^[77]; (b) development of solid-state electrode materials for SOEC^[84,85]; (c) real-time monitoring of SOEC electrodes under fluctuating conditions^[79]; (d) real-time monitoring of voltage and hydrogen-production efficiency during fluctuating SOEC operation^[86]

kW，在发电模式下功率达 35 kW，体现出 SOEC/SOFC 可逆运行和长周期储能的潜力^[82]。这些示范表明，SOEC 的工程应用更适合从油田、核热、工业余热和电氢双向转换等热电协同场景切入，而非直接作为裸接风光波动的快速调节负荷。

总体而言，SOEC 的技术价值在于高温高效、热电协同和 Power-to-X 拓展能力。其短板不在于电化学反应本身无法快速进行，而在于高温电堆对热循环、蒸汽波动、密封疲劳、界面稳定和氧化还原气氛高度敏感。因此，SOEC 在离网风光制氢中的合理定位不是直接快速跟随波动电源，而是通过热储能、蒸汽缓冲、热待机和稳定热源耦合，实现高效率、长周期和场景化制氢。未来 SOEC 的突破重点应从单体性能提升，进一步转向高温电堆寿命、动态热管理、可逆运行可靠性和热电氢/化工系统集成优化。

3 发展展望

随着“十五五”时期风电、光伏等可再生能源装机规模持续扩大，离网制氢系统将从单一示范工程逐步走向规模化、系统化运行，其面临的核心矛

盾将由传统的制氢效率与成本优化问题，转向源端功率随机性、电解槽动态运行安全窗口以及下游用氢连续稳定性之间的多尺度耦合问题。

在供电侧，应构建面向电解槽动态运行窗口的多时间尺度功率整形体系。风电和光伏输出具有秒级扰动、分钟级波动以及日内和季节性变化叠加的特征，原始功率不宜直接输入电解槽。可通过功率预测、短时电储能和能量管理系统，对输入功率进行分层调节。在经济性条件下，短时电储能主要平抑秒级至分钟级波动，降低快速爬坡、低负荷运行和频繁启停对电解槽的冲击；功率预测和能量管理则用于提前识别功率变化趋势，优化储能充放电和电解槽负荷分配，使输入功率最大限度保持在电解槽动态运行窗口内。但储能容量并非越大越优，过度配置会显著增加初始投资，因此应结合电解槽动态适配能力和年利用小时数，以 LCOH 最小化为目标确定合理的储能规模。

在电解转换侧，不同电解槽技术路线各有特点，应因地制宜发展多类型电解槽协同方案。AWE 成本低、规模化基础好，适合作为基荷制氢单元，但受液态电解液循环、多孔隔膜气体交叉和

低负荷安全边界限制,不宜长期承受高频波动;PEMWE 依托致密质子交换膜和零间隙膜电极结构,具备宽负荷、快速爬坡和灵活启停优势,是当前最具现实性的快速调节单元;AEMWE 有望兼具低成本和柔性响应潜力,但其膜电极寿命和工程可靠性仍需验证;SOEC 则更适合稳定热源支撑下的高效制氢和共电解转化,而非直接跟随高频功率波动。从经济性角度看,多类型电解槽协同还需兼顾不同技术路线的成本、寿命与动态性能,通过优化容量配比和运行分工,在动态适配能力与 LCOH 之间取得平衡。因此,未来离网制氢系统不宜局限于单一电解槽路线,而应综合功率波动特征、技术适配边界及经济性,合理配置不同类型电解槽。

在应用侧,离网制氢宜由单一制氢装置向“可再生能源制氢—储运—氢基化工/多能供给”一体化模式拓展,其核心是根据绿电波动特征、用氢连续性、储运半径及下游产品需求,统筹电解槽类型、储能与储氢规模以及氢、氨、甲醇等转化路径。通过将间歇性绿电转化为可储存、可运输和可调度的氢能及氢基产品,可提高可再生能源就地消纳能力,缓解产氢与用氢之间的时序错配,降低远距离输电或纯氢长距离储运压力,并拓展绿氢在工业原料、燃料和多能供给等领域的应用价值(见图 14)。

在测试评价侧,应面向离网风光波动工况建立标准化加速应力测试(accelerated stress test, AST)和动态负荷验证协议。针对当前不同研究测试条件和失效判据不一致的问题,未来应重点建立具有代表性的动态负荷谱,并统一关键边界条件和寿命评价方法。同时,应结合测试前后材料与界面表征,明确性能衰减对应的失效机制。尤其对于 AEMWE,应加强从单池到电堆的长期动态验证,为材料筛选和工程化评价提供统一依据。

综上,离网绿氢系统的未来竞争力,将取决于“源—储—电解槽—氢/化”全链条协同优化能力。供电侧需要通过预测和短时储能将随机功率转化为电解槽可承受的动态输入;电解转换侧需要以 AWE、PEMWE、AEMWE 和 SOEC 的功能互补构建阵列化运行体系;应用侧则需通过储氢、氨醇转化和多能耦合,提高波动产氢的消纳能力和价值。随着高耐久膜电极、低成本关键材料、智能能量管理和大型系统集成技术的发展,离网可再生能源制

氢有望从单点示范走向规模化、连续化和场景化应用,成为绿氢供给的重要支撑。



图 14 可再生能源制氢关键技术发展架构图
Fig. 14 Development framework for key technologies in renewable energy-based hydrogen production

参考文献

- [1] 央视网. “十五五”规划建议[EB/OL]. [2025-12-29]. <https://energy.cctv.cn/2025/12/01/ARTI2OBCCf9U3q6geLqjiJA5251201.shtml>. CCTV.com. Recommendations for the 15th five-year plan[EB/OL]. [2026-5-10]. <https://energy.cctv.cn/2025/12/01/ARTI2OBCCf9U3q6geLqjiJA5251201.shtml>.
- [2] 国家能源局. 中国氢能发展报告 2025[EB/OL]. [2026-5-10]. https://www.nea.gov.cn/20250430/96022785b3a747248288ad1c57d3a025/2025043096022785b3a747248288ad1c57d3a025_35aeee443346424eb4a3da029cb007003c.pdf. National Energy Administration. China hydrogen energy development report 2025[EB/OL]. [2026-5-10]. https://www.nea.gov.cn/20250430/96022785b3a747248288ad1c57d3a025/2025043096022785b3a747248288ad1c57d3a025_35aeee443346424eb4a3da029cb007003c.pdf.
- [3] 国务院关于印发《2024—2025 年节能降碳行动方案》的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2024, (17): 11-16. Notice of the State Council on Issuing the “2024 - 2025 Energy Conservation and Carbon Reduction Action Plan”[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2024, (17): 11-16.
- [4] 国家能源局. 2025 年可再生能源并网运行情况[EB/OL]. [2026-5-10]. <https://www.nea.gov.cn/20260212/742b8c6a078347b0b39de676c05c5d58/c.html>. National Energy Administration. Grid-connected operation status of renewable energy in 2025[EB/OL]. [2026-5-10]. <https://www.nea.gov.cn/20260212/742b8c6a078347b0b39de676c05c5d58/c.html>.

- [5] WANG S Y, CHEN H B, HU S, et al. Characterization of hydrogen-in-oxygen changes in alkaline electrolysis hydrogen production system and analysis of influencing factors [J]. Processes, 2025, 13(8).
- [6] LI Y Y, ZHANG T, DENG X T, et al. Active pressure and flow rate control of alkaline water electrolyzer based on wind power prediction and 100% energy utilization in off-grid wind-hydrogen coupling system [J]. Applied Energy, 2022, 328.
- [7] MARTINHO D L, BERNING T. A conceptual approach to reduce the product gas crossover in alkaline electrolyzers [J]. Membranes, 2025, 15(7).
- [8] EBBERT M A, LITSTER S. Experimental assessment and analysis of mass transport limiting current density in water vapor-fed polymer electrolyte membrane electrolyzers [J]. Scientific Reports, 2024, 14(1).
- [9] QI R M, LI J R, LIN J, et al. Thermal modeling and controller design of an alkaline electrolysis system under dynamic operating conditions [J]. Applied Energy, 2023, 332.
- [10] KIM Y, JUNG S M, KIM K S, et al. Cathodic protection system against a reverse-current after shut-down in zero-gap alkaline water electrolysis [J]. JACS AU, 2022, 2(11): 2491-500.
- [11] FAN G, ZHANG H, SUN B, et al. Economic and environmental competitiveness of multiple hydrogen production pathways in China [J]. Nature Communications, 2025, 16(1): 4284.
- [12] World Bank Group. Electrolyzers for hydrogen production technical and economic characteristics[EB/OL]. [2026-5-9]. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099022326123011297/pdf/P506220-b45b0865-8706-4862-8792-d8cc71f84569.pdf>
- [13] 雷蕾,贾冰峰,张成伟,等. 我国可再生能源制氢发展趋势及路径分析[J]. 电力勘测设计, 2025, (03): 1-7+89.
LEI L, JIA B F, ZHANG C W, et al. Development trend and path analysis of renewable energy hydrogen production in china[J]. Electric Power Survey & Design, 2025, (03): 1-7+89.
- [14] 周雨轩, 张志宇, 刘洪涛, 等. 可再生能源大规模制氢技术现状及发展趋势[J]. 低温与特气, 2025, 43(01): 15-8+33.
ZHOU Y X, ZHANG Z Y, LIU H T, et al. Current situation and development trend of large-scale hydrogen production technology from renewable energy[J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2025, 43(01): 15-8+33.
- [15] 杨晓, 姚明宇, 韩伟, 等. 大规模可再生能源电解制氢技术现状及发展研究[J]. 热力发电, 2025, 54(05): 33-43.
YANG X, YAO M Y, HAN W, et al. Review on current status and development of large-scale renewable energy electrolysis hydrogen production technology[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(05): 33-43.
- [16] 张正, 宋凌琪. 电解水制氢技术: 进展、挑战与未来展望[J]. 工程科学学报, 2025, 47 (02): 282-295.
ZHANG Z, SONG L J. Hydrogen production by water electrolysis: advances, challenges and future prospects[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(02): 282-295.
- [17] NIBLETT D, DELPISHEH M, RAMAKRISHNAN S, et al. Review of next generation hydrogen production from offshore wind using water electrolysis[J]. Journal of Power Sources, 2024, 592.
- [18] SHIVA KUMAR S, LIM H. An overview of water electrolysis technologies for green hydrogen production[J]. Energy Reports, 2022, 8: 13793-813.
- [19] EL-SHAFIE M. Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review[J]. Results in Engineering, 2023, 20.
- [20] WANG X, YANG X, WANG X, et al. Roadmap toward the production, storage, transportation, and applications of green hydrogen[J]. Carbon and Hydrogen, 2025, 27(3): 241-67.
- [21] HAM K, BAE S, LEE J. Classification and technical target of water electrolysis for hydrogen production[J]. Journal of Energy Chemistry, 2024, 95: 554-76.
- [22] YU L, NING M, WANG Y, et al. Direct seawater electrolysis for hydrogen production[J]. Nature Reviews Materials, 2025, 10(11): 857-73.
- [23] 唐燕飞, 崔培龙, 刘金龙, 等. 碱性电解水制氢研究现状与发展前景[J]. 机械制造, 2025, 63(07): 1-4.
TANG Y F, CUI P L, LIU J L, et al. Research status and development prospect of alkaline electrolysis of water for hydrogen production[J]. Machinery, 2025, 63(07): 1-4.
- [24] 双良节能系统股份有限公司. 世界最大 5000Nm³/h 电解槽[EB/OL]. [2026-5-10]. <https://www.shuangliang.com/cn/news/company-news/938.html>.
Shuangliang Energy Conservation Systems Co., Ltd. The world's largest 5,000 nm³/h water electrolyzer[EB/OL]. [2026-5-10]. <https://www.shuangliang.com/cn/news/company-news/938.html>.
- [25] 俞江南, 王雨依, 付俊杰, 等. 电解水制氢技术及隔膜材料研究进展[J]. 当代化工研究, 2023, (20): 5-7.
YU J N, WANG Y N, FU J J, et al. Research progress of electrolytic water to hydrogen technology and diaphragm materials[J]. Modern Chemical Research, 2023, (20): 5-7.
- [26] 查松妍, 张颖, 闫东阳, 等. 碱性电解水制氢隔膜技术现状及发展趋势[J]. 冶金信息导刊, 2025, 62(04): 61-66.
ZHA S Y, ZHANG Y, YAN D Y, et al. Present situation and development trend of membrane technology for hydrogen production by alkaline water electrolysis[J]. Metallurgical Information Review, 2025, 62(04): 61-66.
- [27] HENKENSMEIER D, CHO W C, JANNASCH P, et al. Separators and membranes for advanced alkaline water electrolysis[J]. Chem Rev, 2024, 124(10): 6393-443.
- [28] LEE J W, LEE C, LEE J H, et al. Cerium oxide-polysulfone composite separator for an advanced alkaline Electrolyzer [J]. Polymers, 2020, 12(12).
- [29] 高玲玉, 杨琳, 王晨辉, 等. 碱性电解槽三维两相 CFD 模拟研究[J]. 电化学(中英文), 2023, 29(9): 22-37.
GAO Y L, YANG L, WANG C H, et al. Three-dimensional two-phase CFD simulation of alkaline electrolyzers[J]. Journal of Electrochemistry, 2023, 29(9): 22-37.
- [30] ZHANG Q, HAO Y, CHEN H, et al. Toward energy-efficient alkaline water electrolysis: Advances in mass transport optimization and electrolyzer design[J]. Advanced Energy Materials, 2026, 16(1): e04039

- [31] ZHANG Q, HAO Y W, CHEN H J, et al. Toward energy-efficient alkaline water electrolysis: advances in mass transport optimization and electrolyzer design [J]. *Advanced Energy Materials*, 2026, 16(1).
- [32] Yue K, Lu R, Gao M, et al. Polyoxometalated metal-organic framework superstructure for stable water oxidation[J]. *Science*, 2025, 388(6745): 430-436.
- [33] XU G, XING M, QIAO Z, et al. Constructing ultra-stable electrocatalysts to achieve adaptability of industrial-level alkaline water electrolyzers for fluctuating renewable energies[J]. *Advanced Energy Materials*, 2025, 15(31): 2500926.
- [34] CHENG L, JI X. Optimal Scheduling of Weak-Grid Green Ammonia Systems Based on ALK-PEM Electrolyzer Coordination [J]. *Energies*, 2026, 19(12): 2807.
- [35] FUJITA Y, UCHINO Y, OHNO J, et al. Development and Demonstration of Large-scale Alkaline Water Electrolysis System "Aqualyzer" [J]. *Electrochemistry*, 2025, 93(11): 117007.
- [36] 潘会平,王玉虎,胡振宇. 碱性电解水制氢技术应用现状及前景展望 [J]. *山西化工*, 2025, 45(09): 45-47.
- PAN H P, WANG Y H, HU Z Y. Application status and prospects of alkaline electrolysis hydrogen production technology[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2025, 45(09): 45-47.
- [37] 中国科学院大连化学物理研究所. 全球首套规模化太阳燃料合成示范项目试车成功 [EB/OL]. [2026-5-10]. https://dicp.cas.cn/xwdt/zhxws/202001/t20200116_5488587.html.
- Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences. The world's first pilot project for large-scale solar fuel synthesis has successfully commenced trial operations[EB/OL]. [2026-5-10]. https://dicp.cas.cn/xwdt/zhxws/202001/t20200116_5488587.html.
- [38] 清华大学电机工程与应用电子技术系. 清华四川能源互联网研究院助力我国首个万吨级新能源制氢项目成功制氢[EB/OL]. [2026-5-10]. <https://www.eea.tsinghua.edu.cn/info/1038/5650.htm>.
- Department of Electrical Engineering, Tsinghua University. The Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute has assisted in the successful hydrogen production of China's first 10, 000-tonne-level new energy hydrogen production project[EB/OL]. [2026-5-10]. <https://www.eea.tsinghua.edu.cn/info/1038/5650.htm>.
- [39] 大安市人民政府. 绿能启航!全球最大单体绿氨项目投产 大安吉电绿氢合成氨一体化示范项目创四项全球之最[EB/OL]. [2026-5-10]. http://www.daan.gov.cn/daxw/zxbd/202507/t20250728_1018229.html.
- Daan municipal people's government. Green energy sets sail! The world's largest single green ammonia project commences operation - daan jidian green hydrogen-to-ammonia integration demonstration project sets four global records[EB/OL]. [2026-5-10]. http://www.daan.gov.cn/daxw/zxbd/202507/t20250728_1018229.html.
- [40] 贺革,吉旭,苏鹏,等. 规模化绿电驱动下绿氨多稳态柔性调控技术与工程实践 [J/OL]. *化工进展*, 1-23[2026-08-20]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2026-1055>.
- HE G, JI X, SU P, et al. Multi steady state flexible regulation technology and engineering practice for green ammonia driven by large scale renewable power [J/OL]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 1-23[2026-08-20]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2026-1055>.
- [41] HAN D-H, HEO W, OH S-J, et al. Enhancing proton exchange membrane fuel cell performance and durability: Role of expanded polytetrafluoroethylene layer thickness in reinforced composite membranes[J]. *Journal of Power Sources*, 2025, 649: 237425.
- [42] BAN T, GUO M, WANG Y, et al. High-performance aromatic proton exchange membranes bearing multiple flexible pendant sulfonate groups: Exploring side chain length and main chain polarity [J]. *Journal of Membrane Science*, 2023, 668: 121255.
- [43] XU K, PEI S, ZHANG W, et al. Chemical stability of proton exchange membranes synergistically promoted by organic antioxidant and inorganic radical scavengers[J]. *Journal of Membrane Science*, 2022, 655: 120594.
- [44] BAN T, GUO M, WANG Y, et al. High-performance aromatic proton exchange membranes bearing multiple flexible pendant sulfonate groups: Exploring side chain length and main chain polarity[J]. *Journal of Membrane Science*, 2023, 668: 121255.
- [45] 苏州科润新材料股份有限公司官网. 产品中心规格参数[EB/OL]. [2026-5-10]. <http://thinkre.cn/product/19.html>.
- Official Website of Suzhou Kerun Advanced Materials Co., Ltd. Product center specifications and parameters[EB/OL]. [2026-5-10]. <http://thinkre.cn/product/19.html>.
- [46] 江苏先丰纳米材料科技有限公司. Nafion膜规格参数[EB/OL]. [2026-5-10]. <https://www.xfnano.com/m/category/detail?goodId=1417>.
- Jiangsu Xianfeng Nano Materials Technology Co., Ltd. Nafion membrane specifications and parameters[EB/OL]. [2026-5-10]. <https://www.xfnano.com/m/category/detail?goodId=1417>.
- [47] WEI C, LIU C, ZHANG Z, et al. Dynamic template reconstruction induced mesoporous iridium catalysts for high-current-density PEMWE[J]. *Joule*, 2025, 9(9).
- [48] IRENA. Green Hydrogen Cost Reduction[EB/OL]. [2026-8-20]. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/202020/Dec/IRENA_Green_hydrogen_cost_2020.pdf
- [49] 丁显, 冯涛, 何广利, 等. 风电光伏波动性电源对电解水制氢电解槽影响的研究进展[J]. *储能科学与技术*, 2022, 11(10): 3275-3284.
- DING X, FENG T, HE G L, et al. Research progress of the influence of wind power and photovoltaic of power fluctuation on water electrolyzer for hydrogen production[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(10): 3275-3284.
- [50] SHI W, SHEN T, XING C, et al. Ultrastable supported oxygen evolution electrocatalyst formed by ripening-induced embedding [J]. *Science*, 2025, 387(6735): 791-796.
- [51] 刘元, 肖碧涛, 卢昂, 等. 面向波动可再生能源的质子交换膜电制氢系统最优压强运行[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(8).
- LIU Y, XIAO B T, LU A, et al. Optimal pressure operation of proton exchange membrane water electrolysis system for fluctuating renewable energy[J]. *Electric Power Automation Equipment/Dianli Zidonghua Shebei*, 2024, 44(8).

- [52] 国务院国有资产监督管理委员会. 兆瓦级 PEM 电解制氢装备用氧化铱催化剂 [EB/OL]. [2026-5-10]. <http://www.sasac.gov.cn/n4470048/n32559362/n35167919/n35167924/n35167959/c35257759/content.html>.
State-owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council. MW-scale PEM electrolytic hydrogen production equipment with iridium oxide catalyst[EB/OL]. [2026-5-10]. <http://www.sasac.gov.cn/n4470048/n32559362/n35167919/n35167924/n35167959/c35257759/content.html>.
- [53] 国务院国有资产监督管理委员会. 兆瓦级 PEM 制氢系统[EB/OL]. [2026-5-10]. <http://www.sasac.gov.cn/n4470048/n29955503/n30143035/n30143047/n30143148/c30160168/content.html>.
State-owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council. Megawatt-class pem hydrogen production system[EB/OL]. [2026-5-10]. <http://www.sasac.gov.cn/n4470048/n29955503/n30143035/n30143047/n30143148/c30160168/content.html>.
- [54] 青海省人民政府. 青海省首个绿电制氢项目实现商业化交付[EB/OL]. [2026-5-10]. <http://www.qinghai.gov.cn/zwgk/system/2025/04/28/030071099.shtml>.
Qinghai Provincial People's Government. Qinghai province's first green-power-to-hydrogen project achieves commercial delivery [EB/OL]. [2026-5-10]. <http://www.qinghai.gov.cn/zwgk/system/2025/04/28/030071099.shtml>.
- [55] 上海市国有资产监督管理委员会. 申能集团投资企业氢晨科技发布全球首个海上千万方 PEM 槽及制氢系统[EB/OL]. [2026-5-10]. https://www.gzw.sh.gov.cn/shgzw_zxzx_gqdt/20251024/774a4fe2a82a4f2284dac898f4bbda71.html.
Shanghai State-owned Assets Supervision and Administration Commission. Sheneng Group's investment enterprise, Hynern Technology, launches the world's first offshore PEM cell and hydrogen production system capable of handling thousands of cubic meters.[EB/OL]. [2026-5-10]. https://www.gzw.sh.gov.cn/shgzw_zxzx_gqdt/20251024/774a4fe2a82a4f2284dac898f4bbda71.html.
- [56] 钱圣涛, 何勇, 翁武斌, 等. 阴离子交换膜电解水制氢技术的研究进展[J]. 新能源进展, 2024, 12(01): 1-14.
QIAN S T, HE Y, WONG W B, et al. Research progress of anion exchange membrane water electrolysis technology for hydrogen production[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2024, 12(01): 1-14.
- [57] 邢学奇, 宋鹏翔, 申爱景, 等. 电解水制氢用阴离子交换膜研究进展[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(11): 3856-3870.
XING X Q, SONG P X, SHEN A J, et al. Recent progress of anion exchange membrane for hydrogen production via water electrolysis[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(11): 3856-3870.
- [58] ZHANG W, WANG T, ZHUO Y, et al. Anode-pressurized water electrolysis with modulated anion exchange membrane architecture [J]. Nature Communications, 2026.
- [59] KLINGER A, STROBL O, MICHAELS H, et al. Transport of hydrogen through anion exchange membranes in water electrolysis [J]. Advanced Materials Interfaces, 2025, 12(5).
- [60] MARQUEZ R A, BENDER J T, ALEMAN A M, et al. Insights into catalyst degradation during alkaline water electrolysis under variable operation [J]. Energy & Environmental Science, 2025, 18(14): 7170-87.
- [61] KWAK M, OJHA K, SHEN M K, et al. Electrically insulated catalyst-ionomer anode interfaces toward durable alkaline membrane electrolyzers [J]. Acs Energy Letters, 2024, 9(3): 1025-34.
- [62] MALEK A, WU L, LI Y, et al. Transient-promoter-stabilized NiFe oxyhydroxide enables durable kW - scale water splitting under fluctuating power[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2026, 138(1): e20825.
- [63] ZOU W, TANG G, PENG K, et al. Quinuclidinium-based microporous anion exchange membranes for water electrolysis [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2025, 137(45): e202514264.
- [64] ZHU Y. Layered protection for pure-water electrolysis [J]. Nature Chemical Engineering, 2025, 2(11): 667-.
- [65] STORE F C. PiperION® Anion Exchange Membrane, 60 microns, Self-Supporting[EB/OL]. [2026-5-10]. <https://www.fuelcellstore.com/versogen-piperion-aem-self-supporting-60um-73800019?search=piper>.
- [66] 惠州亿纬氢能有限公司. 产品中心-阴离子交换膜[EB/OL]. [2026-5-10]. https://www.evehydrogen.com/content/details_371_124.html.
EVE Hydrogen Energy Co., Ltd. (Huizhou). Product center - anion exchange membrane[EB/OL]. [2026-5-10]. https://www.evehydrogen.com/content/details_371_124.html.
- [67] 中国能源建设股份有限公司. 中国能建联合体中标全国首个兆瓦级阴离子交换膜制氢示范项目[EB/OL]. [2026-5-10]. https://www.ceec.net.cn/art/2024/10/25/art_11019_2533287.html.
China Energy Engineering Corporation Limited. China Energy Engineering Group Consortium wins bid for the country's first megawatt-scale anion exchange membrane hydrogen production demonstration project[EB/OL]. [2026-5-10]. https://www.ceec.net.cn/art/2024/10/25/art_11019_2533287.html.
- [68] 纪钦洪, 于广欣, 黄海龙, 等. 固体氧化物电解池技术研究及应用进展[J]. 现代化工, 2025, 45(06): 79-83.
JI Q H, YU G X, HUANG H L, et al. Research and application progress on solid oxide electrolytic cell technologies [J]. Modern Chemical Industry, 2025, 45(06): 79-83.
- [69] 柴潇, 袁世通. 固体氧化物电解池电还原 CO₂ 研究进展[J]. 电源技术, 2025, 49(06): 1118-1125.
CHAI X, YUAN S T. Research progress of electroreduction of CO₂ in solid oxide electrolysis cell[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2025, 49(06): 1118-1125.
- [70] Kim J Y, Mastropasqua L, Saeedmanesh A, et al. Development of thermal control strategies for solid oxide electrolysis cell systems under dynamic operating conditions-Hot-standby and cold-start scenarios[J]. Energy, 2025, 317: 134679.
- [71] HU F, HE B, CHEN K, et al. Single-atom anchored on perovskite with strong metal-oxide interaction for efficient high temperature

- CO₂ electrolysis [J]. *Advanced Materials*, 2025.
- [72] MA W, MORALES-VIDAL J, TIAN J, et al. Encapsulated Co – Ni alloy boosts high-temperature CO₂ electroreduction [J]. *Nature*, 2025.
- [73] 姚昊天,董珊芝,郝杨,等. 固体氧化物电解池材料和结构优化的研究进展 [J/OL]. *储能科学与技术*, 1-27[2026-5-10]. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0680>.
- YAO H T,DONG S Z,HAO Y, et al. Research progress on material and structural optimization of solid oxide electrolyzer cells[J/OL]. *Energy Storage Science and Technology*,1-27 [2026-5-10].<https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0680>.
- [74] 邹庚, 冯炜程, 宋月峰,等. 固体氧化物电解池阳极材料研究进展(英文)[J]. *电化学*, 2023, 29(02): 20-34.
- ZOU G,FENG Y C,SONG Y F, et al. Recent advances in anode materials of solid oxide electrolysis cells[J]. *Journal of Electrochemistry*, 2023, 29(02): 20-34.
- [75] WOLF S E, WINTERHALDER F E, VIBHU V, et al. Solid oxide electrolysis cells – current material development and industrial application[J]. *Journal of materials chemistry A*, 2023, 11(34): 17977-8028.
- [76] HAN F, LANG M, SZABO P, et al. Performance and degradation of electrolyte supported SOECs with advanced thin-film gadolinium doped ceria barrier layers in long-term stack test[J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2024, 171(5): 054515.
- [77] 李昭,李宝让,陈豪志,等. 相变储热技术研究进展[J]. *化工进展*,2020, 39(12):5066-5085.DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2020-0376.
- LI Z,LI B R,CHEN H Z, et al. State of the art review on phase change thermal energy storage technology[J].*Chemical Industry and Engineering Progress*,2020,39(12):5066-5085.DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2020-0376.
- [78] Zhu Z, Dzara M J, Slomski H, et al. Robust dynamic operation of high temperature electrolysis solid oxide cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2026, 674: 239770.
- [79] 中国科学院上海应用物理研究所. 上海应用物理所 200kW 高温制氢装置一次开车成功并顺利通过项目验收[EB/OL]. [2026-5-10]. http://www.sinap.cas.cn/xwzx/kydt/202303/t20230322_6705904.html. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences. The 200 kw high-temperature hydrogen production device developed by shanghai institute of applied physics achieved a successful first startup and passed the project acceptance smoothly[EB/OL]. [2026-5-10]. http://www.sinap.cas.cn/xwzx/kydt/202303/t20230322_6705904.html.
- [80] 杨雁,孙宝翔,杨岭敏. 我国首个百千瓦 SOEC 电解水制氢侧线装置示范运行[N]. *中国石化报*. 2024-11-25(1).
- YANG Y,SUN B X,YANG L M. China's first 100 kw soec water electrolysis hydrogen production pilot plant operates successfully in demonstration[N]. *China Petrochemical News* 2024-11-25(1).
- [81] 徐洪杰,戴志敏,蔡翔舟,等. 钍基熔盐堆和核能综合利用[J]. *现代物理知识*, 2018, 30 (04): 25-34.
- XU H J, DAI Z M, CAI X Z. et al. Thorium-based molten salt reactors and comprehensive utilisation of nuclear energy[J]. *Modern Physics*, 2018, 30 (04): 25-34.
- [82] 中国科学院. 上海应物所成功研制百千瓦级固体氧化物电池电氢双向转换装置 [EB/OL]. [2026-5-10]. https://www.cas.cn/cg/zh/202407/t20240710_5024878.shtml. Chinese Academy of Sciences. Shanghai Institute of Applied Physics has successfully developed a hundred-kilowatt-level solid oxide fuel cell hydrogen-bidirectional conversion device[EB/OL]. [2026-5-10]. https://www.cas.cn/cg/zh/202407/t20240710_5024878.shtml.
- [83] LIU H, HøGH J, BLENNOW P, et al. Assessing fluctuating wind to hydrogen production via long-term testing of solid oxide electrolysis stacks [J]. *Applied Energy*, 2024.