



氢能&燃料电池行业研究

买入 (维持评级)

行业深度研究

证券研究报告

氢能组

分析师: 姚遥 (执业 S1130512080001)

联系人: 唐雪琪

yaoy@gjzq.com.cn

tangxueqi@gjzq.com.cn

固定式应用场景突破, 海外固体氧化物电池迈入商业化

投资逻辑

固体氧化物电池 (SOC) 能源转化效率高、燃料适应性广、反应可逆, 将成为未来能源系统不可或缺的一部分。固体氧化物电池 (Solid oxide cell, SOC) 是高温全固态设备, 具有固体氧化物燃料电池 (SOFC) 以及固体氧化物电解池 (SOEC) 的双重功能, 可将氢气、天然气和其他碳氢化合物等燃料的化学能转化为电能, 也可将太阳能和风能等可再生能源储存为氢燃料。在电化学能量转换和存储技术中, SOC 是最清洁和高效的, 具有独特的平台双重功能特性。SOC 与其他能量转换技术相比具有许多优点, 例如低材料成本 (无需贵金属)、高效率 (自身发电效率近 60%, 回收热再利用能源效率最高可达 85%) 和燃料灵活性, 适用热电联产和固定式电源, 当前发展重点在可靠性、寿命和成本。从固定式应用场景突破, 应用空间广阔。基于高效率 and 多种燃料发电等优势, SOFC 成为增长最快的替代备用电源选项之一。根据 Grand View Research, 2023 年全球固体氧化物燃料电池市场规模预计为 6.2 亿美元, 预计 2024 年至 2030 年的复合年增长率为 36.8%, 规模达到 40.54 亿美元, 其中最大和增长最快的市场为美国, 其次是欧洲和中国。应用的主要场景集中于热电联供和数据中心, 2023 年 SOFC 在固定式市场应用中占比达 81.49%。并且 SOFC 技术因其高效的能源转换效率、大规模发电潜力以及持续供电的特性, 已经成为市场上数据中心备用电源的热门选择。据 Grand View Research 测算, 2023 年 SOFC 终端应用中, 51.9% 用于商业领域 (供暖供热等), 约 40% 用于数据中心电源, 对应市场规模约 2.5 亿元, 而 2023 年数据中心电源市场规模约为 229.2 亿美元, 因而 2023 年 SOFC 应用在数据中心电源总市场中的占比大约为 1.1%。随着电池进步和成本下行, 预计其在数据中心的应用渗透率也将不断提高。

商业化的关键要素在于高可靠性、长寿命和低成本。核心零部件材料的选择是决定电池性能的重点, 加工使用专用工艺、特种装备和昂贵的材料, 可在材料突破和规模化量产实现成本的快速下降, 当前电堆成本占总系统成本的 40% 左右, 预计电堆产能产量规模达 100MW 以上时, 成本将仅为当前的 20%-30%。预计随着规模化和技术进步, 当年产量达到 100MW 以上时, 成本可大幅度下降。我们认为在固体氧化物电池寿命达到 5 万小时, 系统成本降至 1 万元/kW 以下时, 将具备市场竞争力。此外, 寿命的提高与向大功率平板式金属支撑方向发展, 是 SOFC 未来商业化的发展趋势。

国外迈入商业化初期, 国内尚处工业化示范阶段。国内外在 SOFC 的技术领域存在较大差距, 美日欧等国家技术日趋成熟, 开始进入商业化应用初级阶段, 但能真正实现大规模商业化供货的企业并不多, 相关企业包括美国 Bloom Energy、Fuel Cell Energy, 英国 Ceres Power, 德国 Sunfire, 爱沙尼亚 Elcogen, 德国 Bosch, 日本三菱重工、京瓷和爱信精机, 韩国斗山集团、SK E&C 等。从年发电量来看, 能够达到兆瓦级别的全球 SOFC 企业不超过 10 家。我国受制于国外对关键技术的封锁, 整体技术水平存在一定差距, 在政策扶持有限、产业链配套发展不成熟、市场未启动的环境下, 国内 SOFC 市场应用尚未真正启动。但是近年来, 国内 SOFC 企业也开始逐步发力, 例如潮州三环具备量产能力, 是 Bloom Energy 原材料隔膜板的供应商; 潍柴动力通过兼并购 Ceres Power 展开布局等等。SOEC 方面, 其作为一种具有很好发展前景的新型水电解技术, 但是目前该技术成熟度较低, 国内仅在实验室里完成验证示范, 尚未广泛商业化。

投资建议

分布式能源应用趋势下, SOFC 凭借更高的能源转换效率、更多样的燃料选择, 在数据中心冷热电联供、船舶电源、煤气化发电等场景应用前景广阔。美国、欧洲、日本等国家基本实现了 SOFC 的商业化运行, 我国的 SOFC 产业处在工业示范向商业应用的过渡阶段, 商业化曙光开始显现, 拥有 SOFC 原材料生产、单电池生产能力或 SOFC 整体系统的设计开发技术能力的企业最具备发展潜力: 三环集团、潍柴动力等。(完整标的见正文)

风险提示

政策支持和资本投入力度不及预期、技术研发缓慢、商业化进程不及预期。



内容目录

| | |
|--|----|
| 一、可靠性、寿命和成本是固体氧化物电池实现商业化的基础..... | 6 |
| 1.1 固体氧化物电池具有平台双重功能，具备能源转化效率、燃料多样性等多重优势..... | 6 |
| 1.2 可靠性、寿命和成本是 SOC 实现商业化的关键..... | 10 |
| 二、固定式应用场景突破，中低温是固体氧化物电池商业化发展趋势..... | 12 |
| 2.1 从备用电源场景突破，技术进步+规模化驱动降本..... | 12 |
| 2.2 金属支撑平板式的中低温固体氧化物电池是未来商业化的主要路径..... | 18 |
| 三、国外迈入商业化初期，国内尚处工业化示范阶段..... | 22 |
| 3.1 美国：SOFC 装机量和发展全球第一，大中型工商业用供电为主..... | 25 |
| 3.2 日本：NEDO 牵头，发展家庭分布式热电联供系统 Ene-Farm..... | 31 |
| 3.3 欧洲：聚焦微型热电联供系统，具备一批已实现产品化的企业..... | 36 |
| 3.4 韩国：SOFC 主要应用于公用事业领域，主流技术来自国外引进..... | 40 |
| 3.5 中国：起步较晚，尚处工业示范阶段..... | 42 |
| 四、投资建议..... | 46 |
| 五、风险提示..... | 46 |

图表目录

| | |
|--|----|
| 图表 1：SOC 燃料模式（红色）和电解模式（绿色）..... | 6 |
| 图表 2：传导（a）氧离子（O-SOCs）或（b）质子（H-SOCs）的固体氧化物电池的示意图..... | 6 |
| 图表 3：SOFC 系统结构组成..... | 6 |
| 图表 4：SOFC 典型结构..... | 6 |
| 图表 5：燃料电池各类型特点对比，SOFC 转换效率高..... | 7 |
| 图表 6：SOFC 系统潜在应用场景主要为固定式应用和分布式电源..... | 8 |
| 图表 7：SOFC 可使用的燃料种类丰富..... | 8 |
| 图表 8：SOFC 内部重整利用热能..... | 8 |
| 图表 9：SOEC 系统结构组成..... | 9 |
| 图表 10：SOEC 系统原理..... | 9 |
| 图表 11：主流制氢路线对比..... | 9 |
| 图表 12：高温 SOEC 与其他低温电解槽能量消耗对比..... | 10 |
| 图表 13：SOC 对可靠性的要求..... | 10 |
| 图表 14：SOC 对寿命的要求..... | 11 |
| 图表 15：SOC 的成本问题..... | 11 |
| 图表 16：SOFC 和 SOEC 的性能要求共同点..... | 11 |



| | | |
|--------|--|----|
| 图表 17: | 2018-2030 年 SOFC 全球市场规模 (百万美元) | 12 |
| 图表 18: | SOFC 主要在固定式备用电源应用 | 12 |
| 图表 19: | 商业和数据中心是终端两大应用场景 | 12 |
| 图表 20: | 算力中心中 IT 设备能耗高达 67% | 13 |
| 图表 21: | 全球数据中心、加密货币、AI 等用电量高增 | 13 |
| 图表 22: | 算力向绿色化转型 | 14 |
| 图表 23: | END-FARM 原理图 | 14 |
| 图表 24: | 日本家用燃料电池热电联供系统 | 14 |
| 图表 25: | 集中供能和分布式热电联供一次能源消耗比较 | 15 |
| 图表 26: | Bloom Energy 分布式发电产品 | 15 |
| 图表 27: | CO ₂ 近零排放的 IGFC 系统技术路线图 | 16 |
| 图表 28: | SOFC 电堆成本随规模化量产的下降路径 (元/kW) | 16 |
| 图表 29: | 日本 SOFC 在 Ene-Farm 产量与成本变化 | 16 |
| 图表 30: | SOFC 成本随规模化量产下降 | 17 |
| 图表 31: | SOEC 成本主要在于发电系统, 其次为连接器件 | 17 |
| 图表 32: | 1.5MW 平板式 SOEC 电解系统的成本结构 | 17 |
| 图表 33: | SOEC 电解系统的成本结构 | 17 |
| 图表 34: | SOC 堆栈结构 | 18 |
| 图表 35: | 平板式和管式 SOC 性能对比 | 18 |
| 图表 36: | 平板式 SOC 结构 | 19 |
| 图表 37: | 平板式 SOC 性能要求 | 19 |
| 图表 38: | 平板式 SOC 气流形式 | 19 |
| 图表 39: | 平板式 SOC 电堆的流场设计 | 19 |
| 图表 40: | 平板式 SOC 电堆-外部气体歧管装置 | 20 |
| 图表 41: | 平板式 SOC 电堆-一体式气体歧管装置 | 20 |
| 图表 42: | 固体氧化物平板式电池结构特点 | 20 |
| 图表 43: | 平板式 SOC 支撑结构、特点及部分厂家 | 21 |
| 图表 44: | 固体氧化物燃料电池的分类和特点 | 22 |
| 图表 45: | 国外 SOFC 发展开始进入商业化初级应用阶段, 国内加快自主化开发 | 22 |
| 图表 46: | 全球 SOFC 相关企业和项目及发展情况 | 24 |
| 图表 47: | 全球 SOEC 相关企业和项目及发展情况 | 25 |
| 图表 48: | 极端天气导致电力中断加速独立备用电源推广 | 26 |
| 图表 49: | 电力灵活性需求的提升催生微电网需求 | 26 |
| 图表 50: | 美国为推广 SOFC 成立专项项目并给予资金补助, 19 年后重点发展小型 SOFC 以应对数据中心需求 | 26 |
| 图表 51: | 美国政府给予 SOFC 资金扶持每年在千万美元级别 | 27 |



| | |
|---|----|
| 图表 52: SECA 联盟对 SOFC 系统的中长期目标 | 27 |
| 图表 53: Bloom Energy Server 产品 | 28 |
| 图表 54: Bloom Electrolyzer 产品 | 28 |
| 图表 55: 公司客户涵盖多个领域龙头企业 | 29 |
| 图表 56: Bloom Energy 2024 年以来订单 | 29 |
| 图表 57: Bloom Energy 产品成本快速下行 | 30 |
| 图表 58: Fuel Cell Energy Tri-gen 平台 | 30 |
| 图表 59: Tri-gen 平台应用示意图 | 30 |
| 图表 60: ENE-FARM 在日本的商业模式 | 31 |
| 图表 61: ENE-Farm 供热原理 | 31 |
| 图表 62: NEDO 对 SOFC 分阶段目标覆盖小型至大型煤电厂发电系统 | 31 |
| 图表 63: Ene-Farm 销售量逐年高增 | 32 |
| 图表 64: 日本 SOFC ENE-FARM 系统的销售价格 (百万日元/套) | 33 |
| 图表 65: SOFC 系统补贴标准和上限价格 | 33 |
| 图表 66: FC mCHP 与其他供热系统对比 | 34 |
| 图表 67: Ene-Farm 与混合蓄电系统协作系统 | 34 |
| 图表 68: Ene-farm 作为分布式备用电网 | 34 |
| 图表 69: 日本家用 Ene-Farm 额定输出功率为 700W | 35 |
| 图表 70: 日本四口之家安装 ENE-FARM 前后电费和煤气费对比 | 35 |
| 图表 71: 京瓷家庭用 SOFC 已经发展至第三代小型化产品 | 35 |
| 图表 72: 三菱重工代表性 SOFC 产品出货案例 | 36 |
| 图表 73: 围绕 Ene-Farm 爱信精机和大阪燃气、京瓷和丰田汽车共同开发 SOFC | 36 |
| 图表 74: 欧盟规划 SOFC 发展蓝图 | 37 |
| 图表 75: PACE 项目已推动 2800 套 Micro-CHP 系统落地 | 37 |
| 图表 76: 欧盟实施两大 SOFC 项目推动行业商业化 | 37 |
| 图表 77: Enefield 项目参与企业众多 | 37 |
| 图表 78: 德国 KfW 433 计划推动燃料电池微型热电联产行业更接近大众市场 | 38 |
| 图表 79: Sunfire-HyLink SOEC | 38 |
| 图表 80: Sunfire-HyLink Alkaline | 38 |
| 图表 81: Ceres SOFC 技术应用与斗山、博世和潍柴共同开发 | 39 |
| 图表 82: 博世 SOFC 系统 | 39 |
| 图表 83: Elcogen 产品涵盖 SOFC 和 SOEC | 40 |
| 图表 84: 韩国 SOFC 公司技术主要来源于引进 | 40 |
| 图表 85: 斗山与 KHNP 构建测试平台并进行超过 2000 小时的实用型测试 | 41 |
| 图表 86: 韩国打造船舶用 SOFC | 41 |



| | |
|---|----|
| 图表 87: 斗山集团拥有 PEMFC, PAFC, SOFC 的核心技术 | 41 |
| 图表 88: SK Ecomplant 在韩国大邱的 Fuel Cell 项目 | 42 |
| 图表 89: 国内 2024 年 SOFC 示范项目 | 42 |
| 图表 90: 国家和地方出台相关政策推动 SOFC 示范 | 43 |
| 图表 91: 国内 SOFC 产业链 | 43 |
| 图表 92: 推动国内 SOFC 发展的措施 | 44 |
| 图表 93: 三环集团深圳研究院 SOFC 系统研发中心 | 45 |
| 图表 94: 潍柴发布全球首款大功率金属支撑商业化 SOFC | 45 |
| 图表 95: 潍柴 SOFC 产品累计示范运行超过 3 万小时 | 45 |

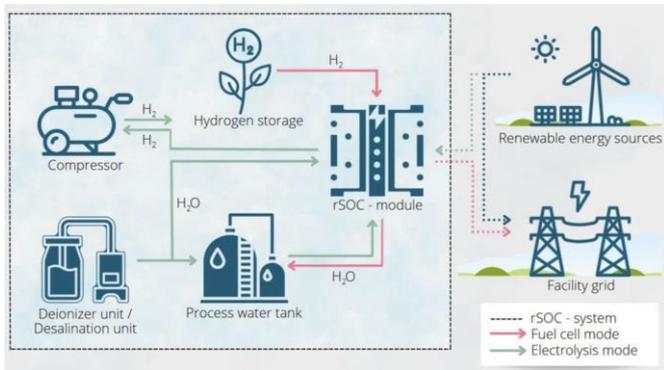


一、可靠性、寿命和成本是固体氧化物电池实现商业化的基础

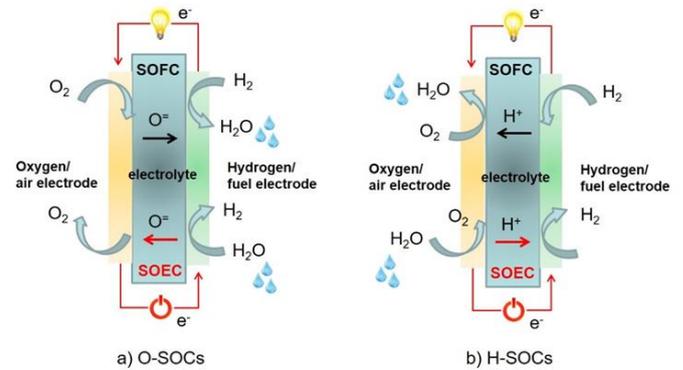
1.1 固体氧化物电池具有平台双重功能，具备能源转化效率、燃料多样性等多重优势

固体氧化物电池（SOC）能源转化效率高、反应可逆，将成为未来能源系统不可或缺的一部分。固体氧化物电池（Solid oxide cell, SOC）是高温全固态设备，具有固体氧化物燃料电池（SOFC）以及固体氧化物电解池（SOEC）的双重功能，可将氢气、天然气和其他碳氢化合物等燃料的化学能转化为电能，也可将太阳能和风能等可再生能源储存为氢燃料。在电化学能量转换和存储技术中，SOC 是最清洁和高效的，具有独特的一个平台双重功能特性。由于高工作温度（通常为 600–800℃），SOC 与其他能量转换技术相比具有许多优点，例如低材料成本（无需贵金属）、高效率（自身发电效率近 60%，回收热再利用能源效率最高可达 85%）和燃料灵活性（来源广阔）。

图表1: SOC 燃料模式（红色）和电解模式（绿色）



图表2: 传导 (a) 氧离子 (O-SOCs) 或 (b) 质子 (H-SOCs) 的固体氧化物电池的示意图

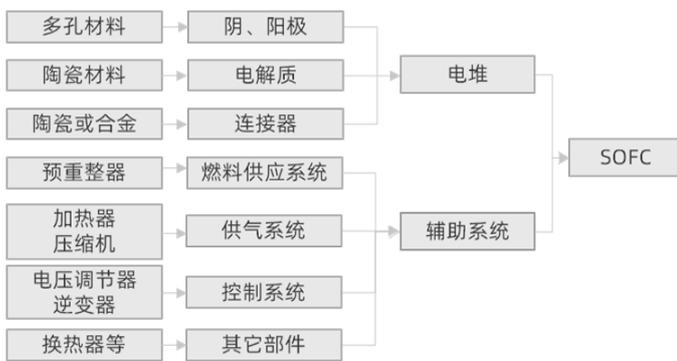


来源:《Recycling Strategies for Solid Oxide Cells》、国金证券研究所

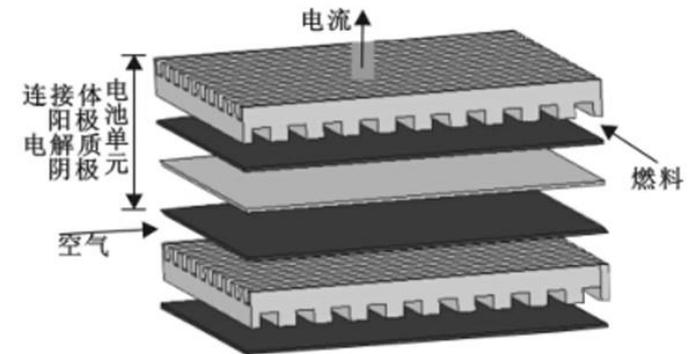
来源:《固体氧化物电池关键材料和关键问题综述》、国金证券研究所

固体氧化物燃料电池（SOFC）是 SOC 燃料电池发电模式，一种在中高温下实现从化学能到电能高效转化的发电装置。SOFC 是 SOC 的燃料电池供电模式，通过氧化燃料（氢气、碳氢化合物等）产生电能以供电。SOFC 的单电池由阳极、阴极和固体氧化物电解质组成，均使用陶瓷材料，其中阳极和阴极分别为燃料氧化和氧化剂还原的场所，两个电极的催化剂均使用陶瓷膜，SOFC 系统由单个或多个模块与热交换器、燃气重整器、涡轮机等构成。SOFC 的运行原理为阴极持续通入氧化剂即空气，具有多孔结构的阴极表面吸附氧，使 O₂ 得到电子变为 O²⁻，O²⁻ 进入电解质导体，基于浓度梯度扩散原理，最终到达固体电解质与阳极的界面，与燃料气体反应，电子由外电路传导回阴极，形成电流，实现化学能到电能的转换从而发电。

图表3: SOFC 系统结构组成



图表4: SOFC 典型结构



来源: 势银、国金证券研究所

来源:《固体氧化物燃料电池的系统结构及其研究进展》、国金证券研究所

SOFC 燃料选择范围广、发电效率高，适用热电联产和固定式电源发电。SOFC 燃料可直接采用碳氢化合物，不需要复杂且昂贵的外部燃料重整器，碳氢燃料通常可催化转化（内部重整）成氢和一氧化碳（合成气）以及部分二氧化碳，之后在电堆的阳极侧，氢和一氧化



碳再反应生成二氧化碳和水，同时产生电能和高温热能。相较其他燃料电池，SOFC的发电效率更高，余热温度高，热电联供下最高可实现近90%的效率，燃料的选择范围也更广，并且不需要使用贵金属催化剂，适合于热电联产、分布式发电、固定式电源等应用。

图表5：燃料电池各类型特点对比，SOFC转换效率高

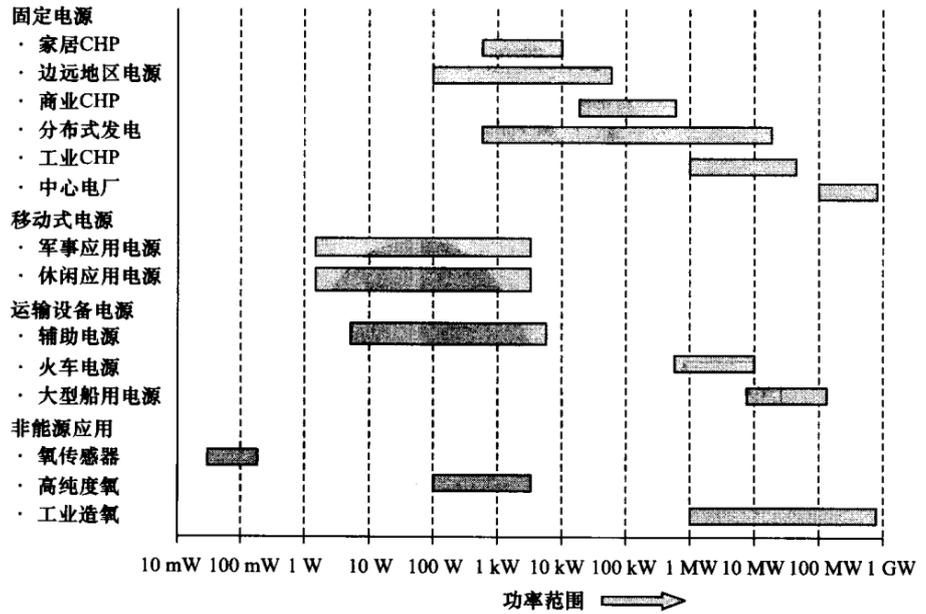
| 类型 | 碱性燃料电池 (AFC) | 磷酸燃料电池 (PAFC) | 质子交换膜燃料电池 (PEFC) | 熔融碳酸盐燃料电池 (MCFC) | 固体氧化物燃料电池 (SOFC) |
|------------|---|--|----------------------------|--|-------------------------------------|
| 工作温度 (°C) | 70~200 | 160~220 | 25~100 | 600~800 | 500~1000 |
| 阳极 | Pt/Ni | Pt/C | Pt/C | Ni/Al | Ni/YSZ |
| 阴极 | Pt/Ag | Pt/C | Pt/C | Li/NiO | LaMnO ₃ |
| 导电离子 | OH ⁻ | H ⁺ | H ⁺ | CO ₃ ²⁻ | O ²⁻ /质子 |
| 燃料 | 纯氢气 | 重整气 | 氢气 | 净化煤气、重整气 | 净化煤气、氢气、天然气、碳氢气体、沼气 |
| 氧化剂 | 纯氧 | 空气 | 空气 | 空气 | 空气 |
| 电解质 | 有腐蚀、液体 KOH | 有腐蚀、液体 H ₃ PO ₄ | 无腐蚀、质子交换膜 (PEM) | 有腐蚀、液体 Li ₂ CO ₃ , Na ₂ CO ₃ | 无腐蚀、氧化锆系陶瓷 |
| 效率 (%) | 65 | 40-45 | 40-50 | 50-55 | 50-90 |
| 比功率 (W/kg) | 35-105 | 100-220 | 300-1000 | 30-40 | 15-20 |
| 启动时间 | 几分钟 | 2-4 小时 | 几分钟 | ≥10 小时 | ≥10 小时 |
| 寿命 (h) | 3000-10000 | 30000-40000 | 10000-100000 | 10000-40000 | 8000-40000 |
| 成本 (\$/kW) | 1000 | 200-3000 | 50-2000 | 1250 | 1500 |
| 应用领域 | 航天、空间站等 | 现场集成能量系统 | 电动车、潜艇、备用电源 | 电站、区域性供电、热电联供 | 电站、联合循环发电、热电联供 |
| 优点 | 启动快、材料成本低、常温常压下工作 | 电解质廉价、对 CO ₂ 不敏感、技术成熟、可靠性高，长期运行性能好 | 功率密度最高、启动快、低温工作 | 燃料适用性广、可使用非贵金属催化剂、高品位余热，可热电联供 | 功率密度较高、燃料适用性广、采用非贵金属催化剂、高品位余热，可热电联供 |
| 缺点 | 必须使用纯氢气、氧气、周期性更换 KOH 电解质、电解质易于发生 CO ₂ 中毒 | 效率较低、启动时间长、对 CO 和 S 中毒敏感、电解质有腐蚀性、运行过程需及时去除燃料与氧化剂中的杂质 | 成本较高、需进行水管理、较差的 CO 及 S 容忍度 | 工作温度高、熔融碳酸盐电解质具有腐蚀性，造成退化/寿命问题、CO ₂ 必须再循环 | 工作温度高、部件制造成本高 |

来源：《SOFC 技术和产业发展研究报告》、国金证券研究所

- 应用主要为固定式和分布式电源/发电领域。SOFC 适用于具有高可扩展性的分布式电源和固定式应用，固体氧化物燃料电池最常见的应用领域为固定式发电，包括小型家庭热电联供系统 (CHP)，分布式发电或数据中心备用电源，以及工业用大型固定式发电站等。同时，也可作为辅助或动力电源在车辆、轮船、无人机等领域也有推广应用。



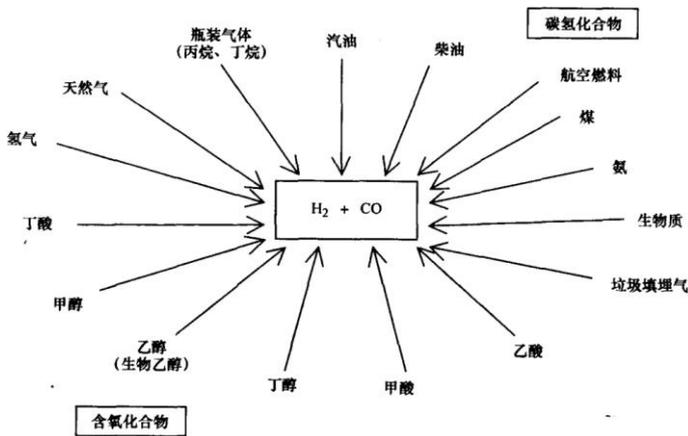
图表6: SOFC 系统潜在应用场景主要为固定式应用和分布式电源



来源:《高温固体氧化物燃料电池:原理、设计和应用》、国金证券研究所

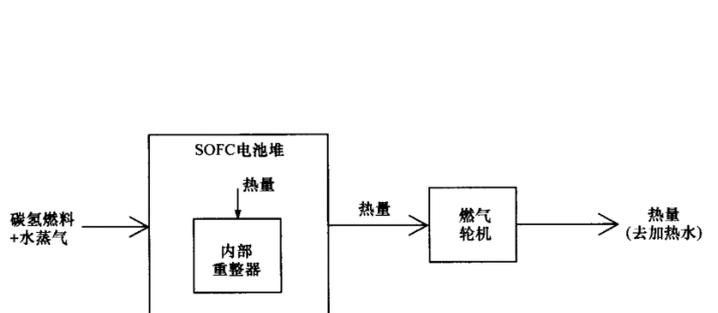
- 燃料选择更广。对比质子交换膜燃料电池 (PEMFC), SOFC 的燃料范围更广并且纯度要求更低, 其对燃料中的杂质和燃料组分波动的忍耐性高, 而 PEMFC 在少量杂质存在的情况下将会中毒。基于此情况, SOFC 燃料气可使用再生燃料资源, 例如生物质气、秸秆和垃圾填埋气等, 开拓其燃料的广泛来源以及与再生燃料配套联合。
- 热电联供使效率更高。SOFC 运行温度通常在 600-1000°C, 并且在发电的同时也产生了高温热能, 这种高温热能可以被循环利用, 例如在热电联供系统中, 可为吸热的内部燃料重整过程提供热能, 与低温燃料电池相比, SOFC 的总效率大幅提高。

图表7: SOFC 可使用的燃料种类丰富



来源:《高温固体氧化物燃料电池:原理、设计和应用》、国金证券研究所

图表8: SOFC 内部重整利用热能



来源:《高温固体氧化物燃料电池:原理、设计和应用》、国金证券研究所

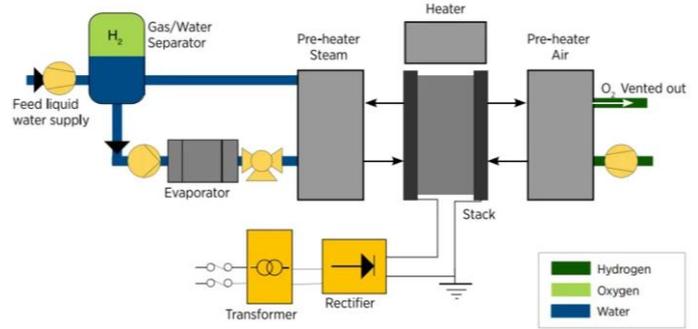
固体氧化物电解池 (SOEC) 是 SOFC 的电解模式, 一种在中高温下实现从电能到化学能高效转化的制氢装置。SOEC 是 SOFC 的制氢模式, 利用电能和热能分解水产生氢气, 必要时也可作为燃料电池的燃料。SOEC 的单电池由中间的致密固体氧化物电解质层, 通常为固体陶瓷材料, 以及两边的多孔氢电极和氧电极组成, 系统结构与 SOFC 一致。中高温 (600-1000 °C) 下在 SOEC 两侧电极上施加一定的直流电压, 水在阴极处被分解产生 O^{2-} , O^{2-} 穿过电解质层到达阳极, 并在阳极失去电子生成 O_2 , 实现电能到化学能的转换从而制氢。



图表9: SOEC 系统结构组成

| 电池类型 | 平板型 | |
|----------|--|---------|
| 构成部件 | 构成材料 | 厚度 (mm) |
| 燃烧极: 支撑体 | Ni-YSZ | 1,500 |
| 燃烧极: 功能层 | Ni-YSZ | 30 |
| 电解质 | YSZ ((ZrO ₂) _{0.92} (Y ₂ O ₃) _{0.08}) | 50 |
| 中间层 | GDC (Ce _{0.8} Gd _{0.2} O _{1.9}) | 3 |
| 空气极 | LSCF-GDC (La _{0.8} Sr _{0.4} Co _{0.2} Fe _{0.8} O ₃) | 50 |
| 隔膜 | Fe-Cr | 500×2 |

图表10: SOEC 系统原理



来源: Alpatent、国金证券研究所

来源: 艾邦氢能源技术网、国金证券研究所

SOEC 的制氢效率高、原料适应性广以及能与可再生能源耦合,是电解池的终极应用类型。SOEC 电解槽原料为水蒸气时,电解后可生成氢气,原料与其他类型的电解槽相同,然而 SOEC 在高温下运行,电解效率具备明显优势,可达到 75%以上,相同工况下还可节省约 30% 以上的用电,同时 SOEC 的原料适应性广,在水作为原料的基础上,还可添加二氧化碳,反应后可生产合成气即氢气和一氧化碳的混合物,合成气可进一步加工生成合成燃料,如柴油和航空燃油等。SOEC 主要部件材料为固体氧化物陶瓷和不锈钢,具有较强的机械稳定性和环境适应性,且材料成本更低,也不使用贵金属催化。SOEC 适合应用于大规模场景,经济性体现在制氢效率高、原料适应广、材料成本低等,相较碱式电解槽在电流密度等方面的限制以及 PEM 电解槽在寿命、贵金属催化剂成本等天花板限制下,长期来看,高温 SOEC 以高效制氢、较低成本将成为未来市场主流技术之一,或将成为电解制氢的终极应用类型。

图表11: 主流制氢路线对比

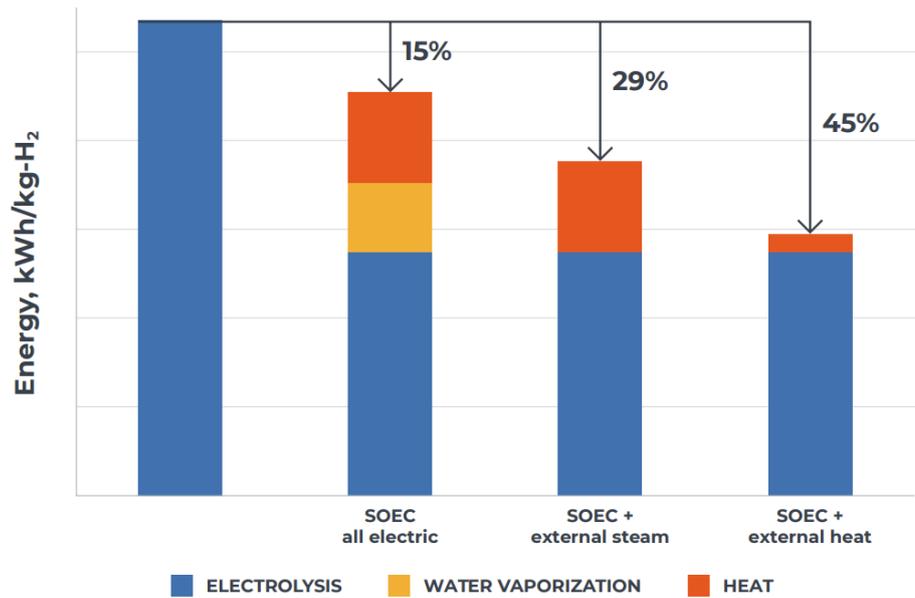
| | 碱水电解池 (ALK) | 纯水电解池 (PEM) | 固体氧化物电解池 (SOEC) |
|---------------------------------------|---------------|------------------|--|
| 电解质 | 20-30%KOH, 液体 | PEM (Nafion), 固体 | Y ₂ O ₃ /ZrO ₂ , 固体 |
| 工作温度°C | ≤90 | ≤80 | 700-1000 |
| 电流密度 A/cm ² | 0.2-0.4 | 1-2 | 1-10 |
| 能耗 kWh/Nm ³ H ₂ | 4.5-5.5 | 3.8-5.0 | 2.6-3.6 |
| 启停时间 | 快速启停 | 快速启停 | 启停不便 |
| 电堆寿命/h | 12,000 | 10,000 | 10,000 |
| 技术成熟度 | 技术成熟, 商业化 | 示范阶段 | 实验室阶段 |
| 系统维护费用 | 高 | 低 | 低 |
| 电解槽成本 (元/w) | 2,800-4,200 | 14,000 | 7,000-10,500 |

来源:《电解水制氢技术进展》、中国化信、国金证券研究所

- 制氢效率更高: 电解所需的电量取决于水温,将低水温升高,需要更多的电才能产生氢气。相反,在高水温下需要较少的电力。SOEC 在 700-850°C 的高温下运行时,可利用内部电能产生蒸汽,或者利用核电站、工业余热、太阳能集热器等外部来源产生的蒸汽,使电解槽内部所需电能量减少,进而提升效率。当电解所需的总能量完全来自电时,与传统低温电解槽相比,SOEC 所需电能减少 15%;与中温外部蒸汽源相结合时,SOEC 所需电能比低温电解槽少 29%左右;当电解槽可以与高温热源集成时,SOEC 效率将进一步提升 35-45%。



图表12: 高温 SOEC 与其他低温电解槽能量消耗对比



来源: Bloom Energy 官网、国金证券研究所

1.2 可靠性、寿命和成本是 SOEC 实现商业化的关键

SOFC 和 SOEC 商业化的主要挑战是可靠性、寿命和成本。

- 高可靠性: 商业化首要解决的是长时间运行下电堆的可靠性问题, 主要包括单电池的气密性、密封材料的可靠性和电堆的热梯度和热应力, 需要良好的单电池气密性、密封材料的高密封性及高温下的结构稳定性、合理的电堆流道设计。

图表13: SOEC 对可靠性的要求

| 指标 | 问题 | 解决方向 |
|------------|--|--|
| 单电池的气密性 | 单电池轻微的泄漏会导致电堆中燃气与空气直接接触、燃烧, 重则使系统烧毁, 轻则加速运行过程中的电堆衰减, 影响寿命。 | 单电池气密性对电解质材料要求高, 需寻求合适的材料, 耐久性、催化活性高并且合成方法简单价格低廉的材料是电极材料方面的首选。 |
| 密封材料的可靠性 | 电堆密封材料起到防止电池阴、阳极交叉泄漏及外部泄漏的作用, 因此密封材料的可靠性非常关键。 | 密封材料除了要具有高密封性外, 还需要在空气、燃气及水蒸气环境下保持结构稳定, 并能耐一定数量的热循环。 |
| 电堆的热梯度和热应力 | 电堆的热梯度主要受电堆流道设计、电堆压差及耐高温金属材料导热率等因素影响, 电堆热梯度会随着电堆使用寿命延长而增大。 | 目前商业化平板式 SOFC 电堆流道设计较常采用同流 (co-flow) 和错流 (crossflow) 的流道设计方案, 电堆热梯度的增大是系统设计中需要重点考虑的容差问题。 |

来源: 《SOFC 在分布式能源的研究进展和发展前景》、国金证券研究所

- 长寿命: 高温下运行时, 产品将发生衰减从而影响寿命, 衰减通常来源于铬中毒、硫中毒和硼中毒, 需要连接体涂层防铬挥发、燃料除硫以及使用低硼/无硼封接材料。系统的使用寿命应达到 5 万小时才能保持其在市场上的竞争力, 当前大多数寿命不到 1 万小时, 需在材料等方面进一步提升。



图表 14: SOFC 对寿命的要求

| 指标 | 问题 | 解决方向 |
|-----|---|--|
| 钼中毒 | 铬 (Cr) 是常用的连接体材料、管道、支架为耐高温金属材料, 含有大量的 Cr 元素, Cr 在空气中容易挥发, 到达电堆阴极处与阴极反应, 造成电堆衰减。 | 耐高温金属材料的连接体 Cr 挥发是毒害电堆的重要因素, 设计连接体材料防 Cr 挥发的涂层至关重要, 涂层材料除能有效防止 Cr 挥发之外, 还需跟金属基体具有较好的结合力, 而且具有良好的电导率。 |
| 硫中毒 | 燃料中因为纯度不高, 或者有意加臭引入的硫元素, 长时间运行会沉积在电池的阳极, 堵塞孔道, 降低三相界面, 对电堆造成衰减。 | 对燃料除硫处理, 确保进入电堆硫含量在非常低的水平, 是保证长寿命系统的重要要求。 |
| 硼中毒 | 在高温金属部件钎焊过程, 以及电堆的玻璃高温封接材料中, 含有大量的硼 (B) 元素, B 元素在工作过程中会挥发毒害阴极和阳极材料, 使系统性能衰减。 | 开发低 B/无 B 或者 B 挥发率低的钎焊材料和封接材料, 是提高系统寿命的方法。 |

来源:《SOFC 技术和产业发展研究报告》、国金证券研究所

- 低成本: 当前较高的成本阻碍了商业化进程, 主要原因为产业规模较小导致的系统高成本、高温工作和寿命要求高导致的材料和工艺的高成本、研发投入高导致的高折算成本。但 SOFC 的加工没有使用专用工艺、特种装备和昂贵的材料, 可在材料突破和规模化量产后实现成本的快速下降, 这将推动商业化进程加速。

图表 15: SOFC 的成本问题

| 指标 | 问题 |
|------------|--|
| 产业规模较小 | 产业处于商业初期, 规模较小, 参与的企业较少, 配套不足, 各种零部件, 包括除硫器、单电池、电堆、热交换器、燃烧器、气流分配系统、水处理系统、逆变器、电源管理器等, 都是高度定制的产品, 导致了系统价格高。 |
| 高温工作和寿命要求高 | 系统的工作温度高达 650~900°C, 工业级的 SOFC 产品要求有数万小时的寿命, 且常年不间断运行, 对各种部件、材料、涂层的耐高温老化性能要求极高, 推高了材料及工艺成本。 |
| 研发投入高 | 因为系统没有高加速老化测试条件, 任何的技术改进均需要相当长的时间进行验证。在产业初期, 研发投入折算的成本非常高。尽管面临着各种技术问题, 但是日本、欧洲的企业和研究机构, 均有运行超过 10 年的 SOFC 系统, 展示了良好的可靠性和 SOFC 技术超长的寿命。 |

来源:《SOFC 技术和产业发展研究报告》、国金证券研究所

SOFC 和 SOEC 对材料和组件的一般性要求相同, 需高温下的强稳定性。SOFC 和 SOEC 互为逆运行, 均在高温下运行, 单电池的物理结构以及单电池组堆的方式相似, 因此 SOFC 与 SOEC 对材料的一般性要求有许多相同之处, 主要体现在电池、组件、连接体和密封等材料上。

图表 16: SOFC 和 SOEC 的性能要求共同点

| 材料组件 | 性能要求 |
|-------|-------------------------------|
| 电池材料 | 高温工作下较好的热稳定性、化学稳定性和持久高效的催化活性 |
| 结构组件 | 一定的强度和抗热冲击能力, 不同组件的膨胀系数需要相互匹配 |
| 连接体材料 | 较好的导电性、气体隔离性 |
| 密封材料 | 较高的稳定性和热循环性能 |
| 其他性能 | 易于加工、成本低、寿命长等 |

来源:《高温固体氧化物电解水制氢储能技术及应用展望》、国金证券研究所

SOEC 相较 SOFC 对材料有特殊要求。由于 SOEC 与 SOFC 的电化学过程和热力学环境的差异, SOEC 对材料的性能方面有特殊的要求。SOEC 进气中水蒸气的含量远高于 SOFC, 因此,



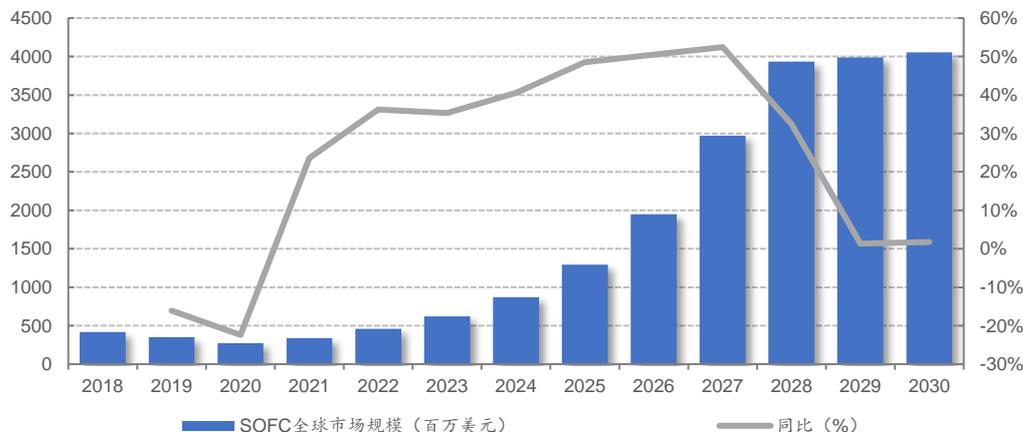
要求 SOEC 的阴极材料在高温高湿条件下仍然具有较好的稳定性，这是 SOEC 与 SOFC 对材料要求上最大的不同。此外，SOEC 还需要阴极材料对水蒸气的分解具有高效持久的催化活性。阴极材料基本采用镍-钇稳定的氧化锆 (Ni-yttria-stabilized zirconia, Ni-YSZ)。SOEC 对阳极材料的特殊要求主要是高的电子、离子电导率以及氧离子表面交换系数，具有合适的孔隙率便于 O₂ 的产生和流通。

二、固定式应用场景突破，中低温是固体氧化物电池商业化发展趋势

2.1 从备用电源场景突破，技术进步+规模化驱动降本

基于高效率 and 多种燃料发电等优势，SOFC 成为增长最快的替代备用电源选项之一。根据 Grand View Research，2023 年全球固体氧化物燃料电池市场规模预计为 6.2 亿美元，预计 2024 年至 2030 年的复合年增长率高达 36.8%，规模达到 40.54 亿美元，其中最大和增长最快的市场为美国，其次是欧洲和中国。

图表 17: 2018-2030 年 SOFC 全球市场规模 (百万美元)

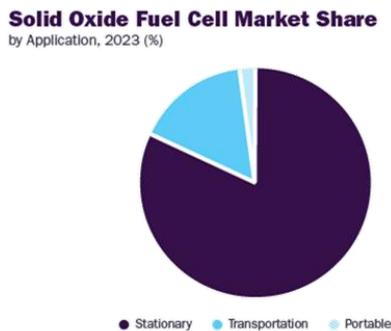


来源: Grand View Research、国金证券研究所

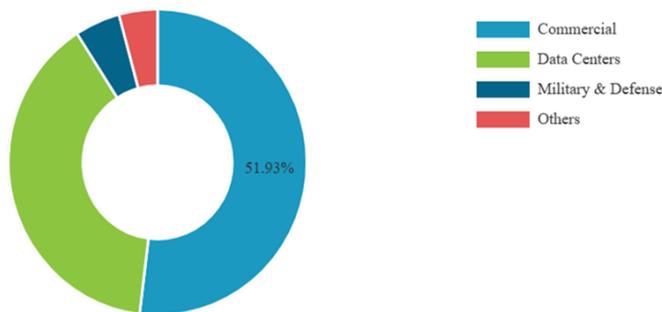
高效发电、持续供电，SOFC 发展主要场景集中于热电联供和数据中心。固定式 SOFC 系统是最清洁、最高效的热电发电技术之一，2023 年市场应用占比 81.49%。其系统性能侧重于三个参数，包括净电效率、热电联产情况下的整体效率和耐用性。此外，分具体终端应用场景看，SOFC 技术因其高效的能源转换效率、大规模发电潜力以及持续供电的特性，已经成为市场上数据中心备用电源的热门选择。目前数据中心电源是 SOFC 电池主要的市场之一，据 Grand View Research 测算，2023 年 SOFC 终端应用中，51.9% 用于商业领域（供暖供热等），约 40% 用于数据中心电源，对应市场规模约 2.5 亿元，而 2023 年数据中心电源市场规模约为 229.2 亿美元，因而 2023 年 SOFC 应用在数据中心电源总市场中的占比大约为 1.1%。随着电池进步和成本下行，预计其在数据中心的应用渗透率也将提高。

图表 18: SOFC 主要在固定式备用电源应用

图表 19: 商业和数据中心是终端两大应用场景



Global Solid Oxide Fuel Cell Market Share, By End-User, 2023



来源: Grand View Research、国金证券研究所

来源: Fortune Business Insights、国金证券研究所

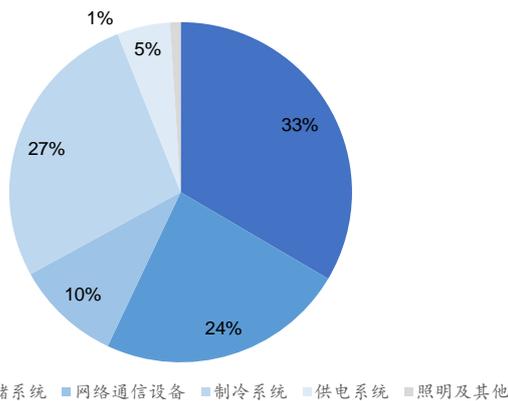
(1) 分布式发电: 数据中心是 SOFC 应用潜力最大的场景之一。电能可以远距离传输，但是热量输送范围有限。SOFC 可用作分布式发电装置，(冷)热电联供是其最优方案，美国



APPLE、GOOGLE、AT&T、EBAY 数据中心、医院、商业区和工业园区等均有成熟的应用。数据中心方面，大多现阶段仍依赖传统柴油发电机作为备用电源，高碳排放与高成本成为待解决的难题，55%的相关企业报告称在过去三年中经历过数据中心停电，其中电源和冷却系统的故障是数据中心停机的最常见原因，约占所有停机的 71%。因而数据中心电力需求的不断增长促使行业探索氢燃料电池和天然气发电等替代能源。SOFC 技术凭借高达 60% 的转换效率以及冷热电联供特性，不仅能为数据中心提供稳定的电力，还能通过回收余热来增强冷却系统的效能，实现能源的高效利用，是数据中心备用电源重要的技术发展趋势。Bloom Energy 公司开发的产品目前已在苹果、谷歌、易趣等众多公司得到应用，在美国安装超过 800MW 的 SOFC 燃料电池。

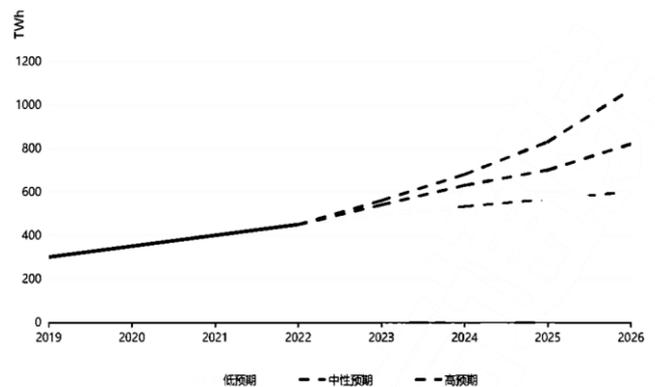
- 数据中心用电量激增，需寻求不间断的高效备用电源。据国际能源署（IEA）数据，2022 年全球数据中心消耗高达 4600 亿千瓦时电力，占全球总电量的 2%。随着人工智能工作负载、GPU 工作负载和高性能计算（HPC）的增加，配备 GPU 的具备 AI 算力的服务器需电 40-60kW/机架，而目前为 10-14kW，这大大提高了数据中心的整体功耗。预计用电量将以 160% 的速度高速增长，到 2030 年全球数据中心用电量将接近德国或瑞典一年的总电力需求。
- 数据中心运行碳排放激增，需寻求绿色能源。据斯坦福大学的《2022 年人工智能指数报告》显示，OpenAI 的 GPT-3 模型在训练期间释放了 502 公吨碳，是目前大模型中有据可查耗能最严重的，它的碳排放量是 Gopher 模型的 1.4 倍，是 BLOOM 模型的 20.1 倍，约等于 8 辆普通汽油乘用车一生的碳排放量，人均 91 年的碳排放量。此外，高盛最新分析指出，到 2030 年，数据中心电力需求的增长将使数据中心二氧化碳排放量比 2022 年增加 100% 以上（约 2.15-2.2 亿吨），增加量约占全球能源排放量的 0.6%。

图表20：算力中心中 IT 设备能耗高达 67%



来源：《中国绿色算力发展研究报告（2024 年）》、国金证券研究所，以 PUE=1.5 为例

图表21：全球数据中心、加密货币、AI 等用电量高增



来源：IEA、国金证券研究所



图表22: 算力向绿色化转型

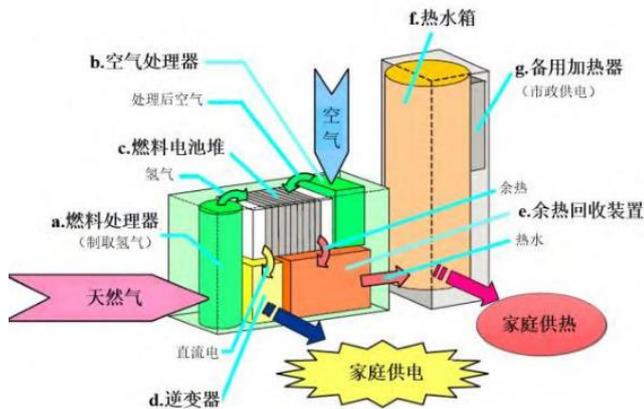


来源:《中国绿色算力发展研究报告(2024年)》、国金证券研究所

(2) 小型家庭热电联供也是 SOFC 发展的主要场景之一。SOFC 用于家庭固定式小型热电联产 (m-CHP, 1 kW~5 kW), 利用已有天然气管网, 通过 SOFC 实现热电联供, 减少电能传输损失, 提供家庭用热, 大大提高燃料直接利用效率, 综合效率达 90% 以上。日本和德国家庭用固定式小型热电联产装置已经做到初步商业化。

日本通过 Ene-Farm 项目在建筑中使用微型热电联产系统, 截至 2023 年底, 已有 503, 276 万台装置投入运行, 2020 年奥运村宿舍, 也是采用 SOFC 热电联供方式; 欧洲先后通过 Ene-field、PACE 示范项目推广燃料电池热电联产系统, 目前已经部署了大约 10000 套燃料电池微型热电联产装置。

图表23: END-FARM 原理图



图表24: 日本家用燃料电池热电联供系统

| 日本家用燃料电池热电联供系统 (ENE-FRAM) | | | | |
|---------------------------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| 制造商 | 爱信精机 | 松下 | 东芝 | |
| 产品实物图 | | | | |
| 燃料电池类型 | 固体氧化物 | 聚合物电解质 | 聚合物电解质 | |
| 输出功率 | 700W | 700W | 700W | |
| 热水存储量 | 90升, 约70° | 140升, 约60° | 200升, 约60° | |
| 效率 | 发电效率 | 46.5% (净热效率) | 39.0% (净热效率) | 39.0% (净热效率) |
| | 总效率 | 90.0% (净热效率) | 95.0% (净热效率) | 95.0% (净热效率) |
| 耐久性 | 10年 | 10年 | 10年 | |

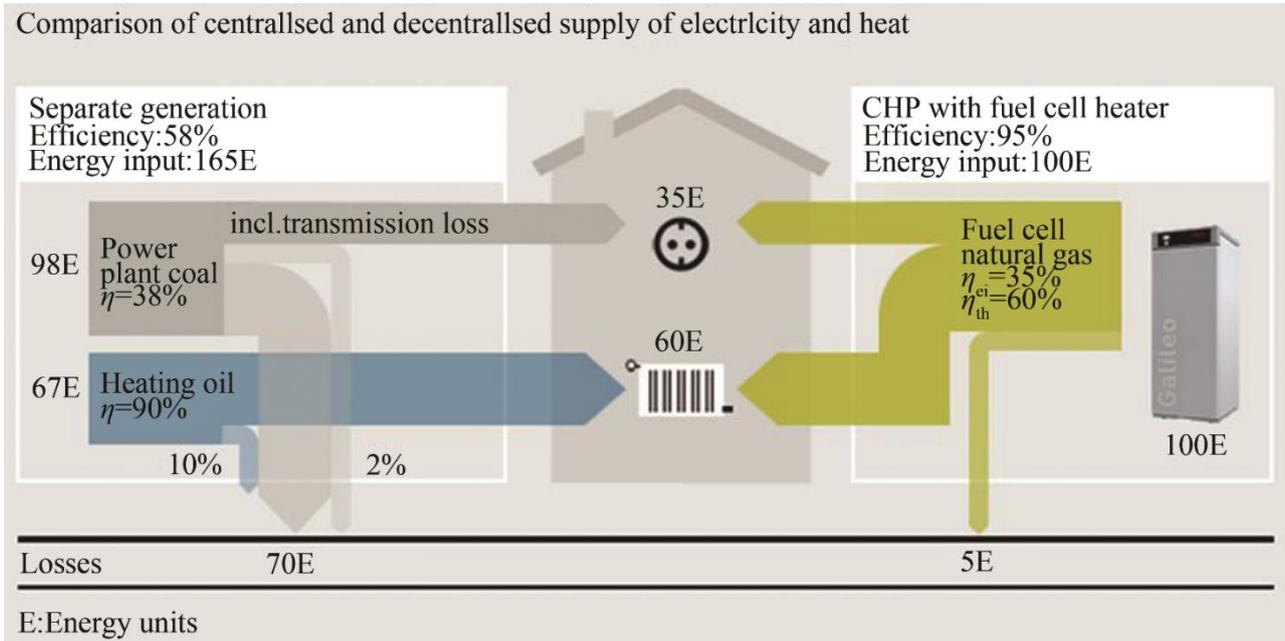
来源:《日本家用燃料电池热电联供系统在中国应用的经济性分析》、国金证券研究所

来源: 分布式能源网、国金证券研究所

究所



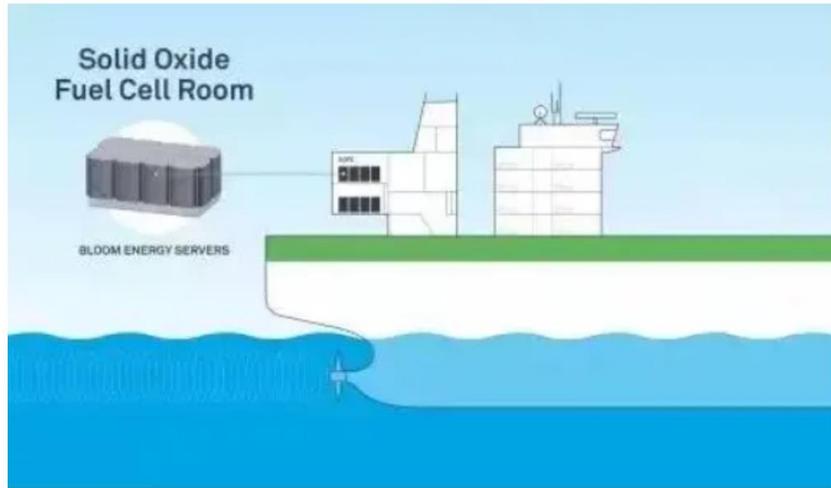
图表25：集中供能和分布式热电联供一次能源消耗比较



来源：《基于固体氧化物燃料电池的高效清洁发电系统》、国金证券研究所

(4) 交通领域：SOFC 应用主要集中在车辆、轮船和无人机等场景。SOFC 作为车辆、轮船、无人机等工具的辅助或者动力电源也得到了推广应用。2016 年日产发布了世界首辆 SOFC 作为动力源的汽车，SOFC 的燃料是生物乙醇，续航里程可超过 600km。Bloom Energy 公司与三星重工合作，计划将产品应用于船舶电源，预计到 2027 年，将有超过 100 艘邮轮需要超过 4GW 的电池订单。

图表26：Bloom Energy 分布式发电产品

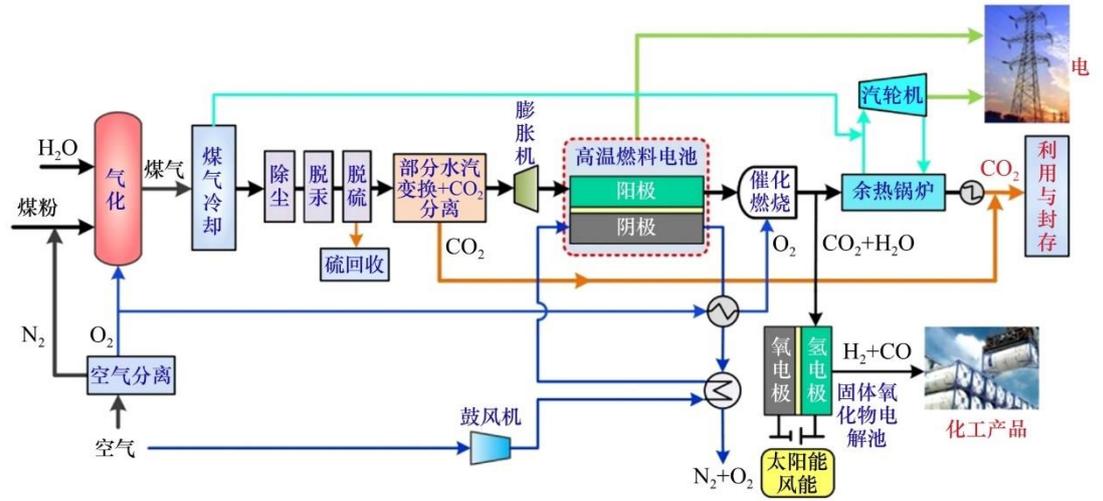


来源：搜狐、国金证券研究所

(5) 大型发电站：SOFC 也可在大型发电站替代煤炭发电。CO₂ 近零排放的大型煤气化燃料电池发电技术 (IGFC) 是将整体煤气化联合循环发电 (IGCC) 与高温固体氧化物燃料电池或 MCFC 相结合的发电系统，发电效率更高，CO₂ 捕集成本低，是煤炭发电的根本性变革技术。三菱日立电力则致力于 SOFC 联合循环大型发电系统研发，2018 年实现商用 250kW 和 1MW 规格的联合发电产品。



图表27: CO₂ 近零排放的 IGFC 系统技术路线图



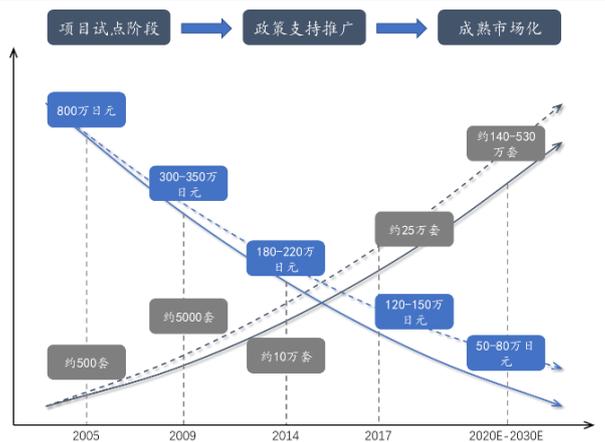
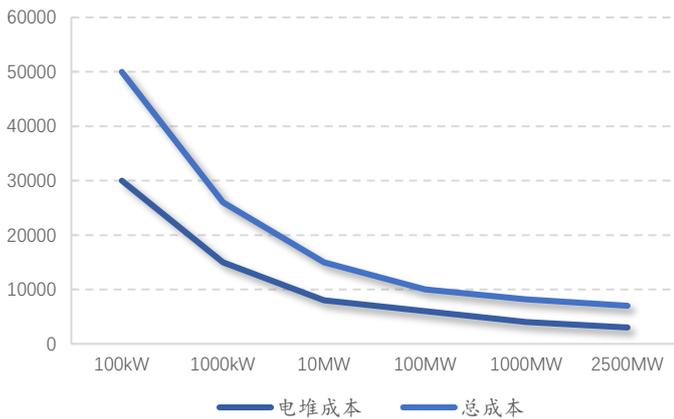
来源：中国工程科学、国金证券研究所

材料的成本和寿命是 SOFC 实现商业化的基础。根据现有示范项目运行的统计和计算表明，系统的投资成本保持在 400-1000 美元/kW (对应约 3000-7300 元/kW)，寿命达到 5 万小时以上时将具备竞争力。近年来随着规模的扩大以及市场的激烈竞争，SOFC 系统的成本快速下降，日本的 SOFC 系统从 2005 年的每套 800 万日元降至了目前的 100 万日元左右 (对应 6-7 万元/套)，若以单套 700W 计算，当前日本 SOFC 每 kW 成本为 8.6-10 万元。

未来随着规模化应用和技术进步，SOFC 成本将迎来大幅下降。根据《SOFC 技术和产业发展研究报告》测算，当年产量达到 1000MW 以上时，制造成本可大幅度下降，达到约 8400 元/kW。同时，美国能源部固态能量转换联盟 (SECA) 对 SOFC 的成本也制定了长期目标，要求 2025/2030 年 SOFC 电堆成本降低到 225 美元/kW (约 1650 元/kW) 以下，系统成本降低到 900 美元/kW (约 6600 元/kW) 以下。

图表28: SOFC 电堆成本随规模化量产的下降路径 (元/kW)

图表29: 日本 SOFC 在 Ene-Farm 产量与成本变化



来源：《SOFC 技术和产业发展研究报告》、国金证券研究所

来源：氢启未来、国金证券研究所，成本单位为日元/套

拆分来看，发电系统是设备使用成本下行的关键。具体到各环节来看，以组件为基础的 SOFC 和 SOEC 堆栈的制造成本分解中，系统的成本占比最高，在 50% 以上。规模化量产前，由于 BOP 组件需专业化定制和研发，成本占比高，在 30% 以上，大规模产业化有助于 BOP 组件的降本，系统的成本占比反而提升。但系统的成本也有大幅下降空间，当前系统成本主要包括材料、组件制备、封装集成、人力等方面，除通过规模化降低电解质粉体、耐高温金属等关键材料的价格外，改善工艺步骤、提高电池制备的成品率也是降低成本的关键。

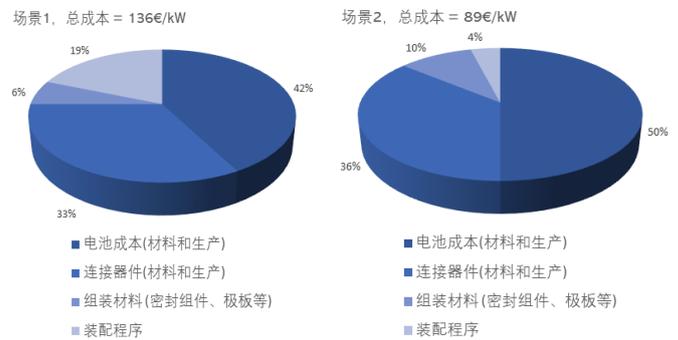


图表30: SOFC 成本随规模化量产下降

| 产量(年) | 100MW | 1000MW | 2500MW |
|----------------|-------|--------|--------|
| 系统成本(元/kW) | 11400 | 8380 | 5680 |
| 安装成本(元/kW) 10% | 1140 | 838 | 568 |
| 维护成本(元/kW) 15% | 2280 | 1676 | 1136 |
| 投资利息(元/kW) 5% | 570 | 419 | 284 |
| 设备总成本(元/kW) | 15390 | 11313 | 7668 |
| 系统寿命(h) | 43800 | 43800 | 43800 |
| 设备使用成本(元/kWh) | ¥0.35 | ¥0.26 | ¥0.18 |
| 天然气价格(元/立方) | 2.4 | 2.4 | 2.4 |
| 天然气成本(元/kWh) | 0.40 | 0.40 | 0.40 |
| 发电总成本(元/kWh) | ¥0.75 | ¥0.66 | ¥0.58 |

来源:《SOFC 技术和产业研究报告》、国金证券研究所。天然气按寿命周期平均发电效率 60%计算。

图表31: SOEC 成本主要在于发电系统, 其次为连接器件



来源:《Bottom-up cost evaluation of SOEC systems in the range of 10-100 MW》、国金证券研究所。场景 1:SOEC 单元的电力功率为 15 兆瓦。SOEC 制造商的年产量为 75 兆瓦, 并操作手动生产线。场景 2:SOEC 单元的电力功率为 75 兆瓦。SOEC 的年产量为 375 兆瓦, 并运行自动化生产线。

SOEC 适用于通过储氢进行长时储能的场景, 根据《高温水蒸气电解制氢 (SOEC) 技术及成本评估》, 使用可再生能源剩余电力水电解制氢和储氢过程的成本测算如下:

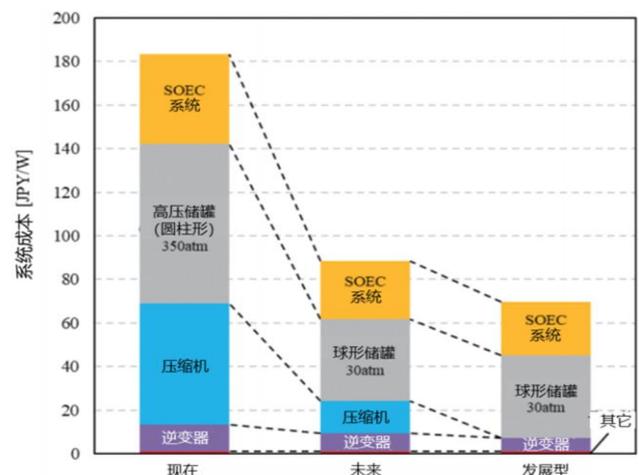
- 从储能角度出发, 对比锂离子二次电池 (LIB) 和 SOEC 成本。在假定的电价成本下, 对当前的系统成本进行比较: 在储氢时间约为 4 天以上时, 由可逆型 SOFC/SOEC 系统进行储氢相比于 LIB 充放电具有成本优势。此外, 随着未来技术的发展, 当储氢时间分别为约 2 天和约 1 天时, 可逆型 SOFC/SOEC 系统也将具有成本优势。
- 日本政府 SOEC 成本目标为制氢成本 30 日元 (约 1.76 元) /Nm³。根据测算, 当 SOEC 系统成本为 88 日元 (约 5.16 元) /W 时, 在储氢时间为 24 小时、电力成本为 5 日元 (约 0.29 元) /kWh、利用率为 60%的条件下, 制氢成本可实现 30 日元 (约 1.76 元) /Nm³。

图表32: 1.5MW 平板式 SOEC 电解系统的成本结构

| | 现在 | 未来 | 发展型 |
|-----------------------|-------|------|-------|
| 生产规模 (MW/年) | 15 | 150 | > 150 |
| 寿命 (年) | 10 | 15 | 15 |
| SOEC 模块 (日元/W) | 28.5 | 17.9 | 6.5 |
| BOS (日元/W) | 12.6 | 8.5 | 6.9 |
| SOEC 系统 (日元/W) | 41.1 | 26.4 | 13.4 |
| 压缩机 (日元/W) | 55.7 | 14.9 | — |
| 高压储罐 : 350 atm (日元/W) | 73.2 | — | — |
| 球形储罐 : 30 atm (日元/W) | — | 37.7 | 37.7 |
| 泵-鼓风机 (日元/W) | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| 热交换器 (日元/W) | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| 加热器 (日元/W) | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| 逆变器 (日元/W) | 12.0 | 8.0 | 6.0 |
| 制氢系统成本 (总体) (日元/W) | 183.3 | 88.3 | 58.4 |

注: (日元/W)的数值基于1.52MW标准SOEC计算

图表33: SOEC 电解系统的成本结构



来源:《高温水蒸气电解制氢 (SOEC) 技术及成本评估》、国金证券研究所

来源:《高温水蒸气电解制氢 (SOEC) 技术及成本评估》、国金证券研究所, 其他为泵、鼓风机、热交换器和加热器的合计成本

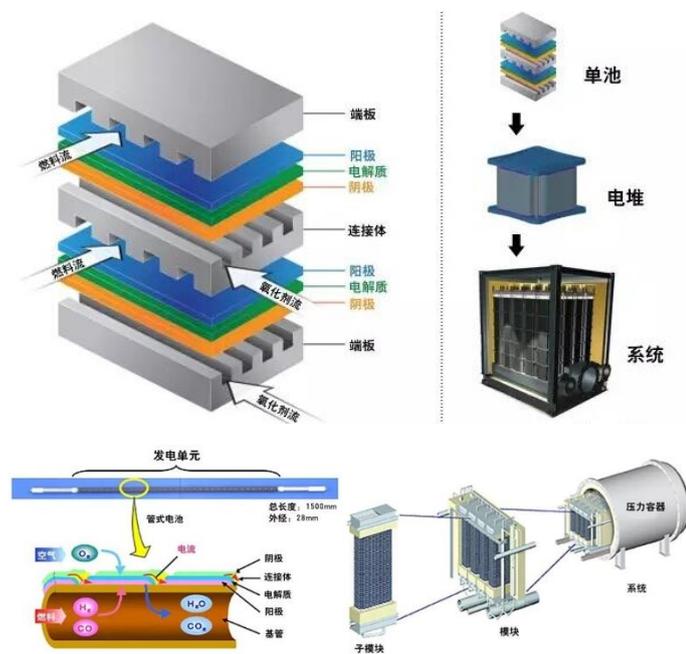


2.2 金属支撑平板式的中低温固体氧化物电池是未来商业化的主要路径

中低温运行的金属合金连接体支撑的平板式结构是固体氧化物电池实现商业化和降本过程中最具发展潜力的路径。SOC 的工作温度高达 500-1000℃，工业级的 SOC 产品寿命需要达到数万小时且不间断的运行，对材料和涂层等部件的耐高温老化性能要求非常高，从而配套使用的材料及工艺成本高。降低 SOC 的操作温度能降低部件材料的性能要求，从而材料的选择更加宽泛，能够使用更低成本的材料以降本，可使用金属合金连接体，电池的使用寿命也更长。平板式相较管式以更低成本和更高功率密度更符合商业化需求，成为当前开发的重点，管式可能更适合起停时间短的小型应用发电。

SOC 根据堆叠结构可分为平板式和管式两种类型，平板式以更低成本和更高功率密度更符合商业化需求，管式长期稳定性更高。SOC 采用全固态电池结构，SOFC/SOEC 两种模式下的电池结构完全相同，以下 SOC 结构方面的阐述均以 SOFC 为例。平板式相较管式具有高功率密度和低电阻等特性，成本相对较低，且输出功率密度和电性能较好，在大规模工业应用上具备一定优势，以更低成本和更高功率密度更符合商业化需求，是当前主流的商用化类型；管式具有长期稳定性、耐久性较好，不存在高温密封的问题，但输出功率较低且成本较高，虽然研究时间较早，但当前尚未广泛应用。

图表34: SOC 堆栈结构



图表35: 平板式和管式 SOC 性能对比

| | 平板式 | 管式 |
|----------|--|------------------------------------|
| 单位面积功率密度 | 高 | 低 |
| 体积功率密度 | 高 | 低 |
| 高温密封 | 非必须 | 必须 |
| 启动速度 | 慢 | 快 |
| 连接 | 较容易 | 困难 |
| 制造成本 | 低 | 高 |
| 优势 | 电流路径较短、欧姆极化阻抗较低，电性能和输出功率密度更高，易采用低成本、批量化的制备工艺，成本较低，适用于大规模工业应用，是当前主流的商用化类型 | 稳定性和耐久性较好，能快速启停，无高温密封问题，通常用于高温下的工作 |
| 劣势 | 高温密封困难、热循环性能及长期可靠性差 | 结构原因导致电流路径较长、输出功率密度较低、成本偏高 |

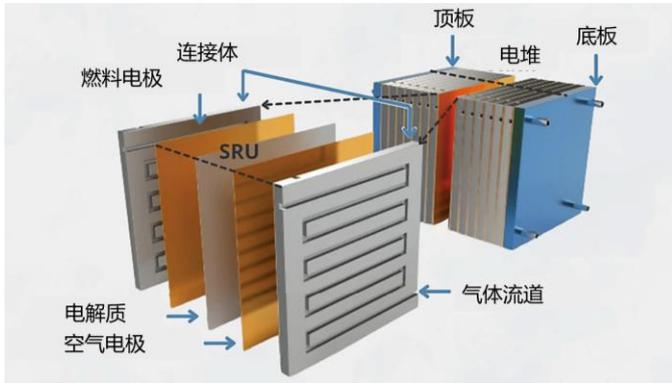
来源：《基于固体氧化物燃料电池的高效清洁发电系统》、国金证券研究所

来源：《欧洲固体氧化物燃料电池（SOFC）产业化现状》、《SOFC 技术和产业发展研究报告》、国金证券研究所

平板式 SOC 以平板型结构串联，设计要点在于气道结构和气体歧管装置的排列方式。平板式电堆结构与质子交换膜燃料电池电堆结构类似，电池组件以平板型结构串联，单个重复单元（SRU）即单电池被插入金属框架中堆叠，通过连接体连接，并在顶部和底部密封，以防止燃料和空气在 SRU 内部或在燃料室与外部之间的空隙混合从而导致反应效率下降。合理设计的燃料气和氧化气的气道可提高电堆中气流分布的均匀性和促进单电池中的传质和传热，气体歧管装置则是确保从供气端到每一片电池的正常供气以及未反应气体及生成物的排出。



图表36: 平板式 SOC 结构



图表37: 平板式 SOC 性能要求

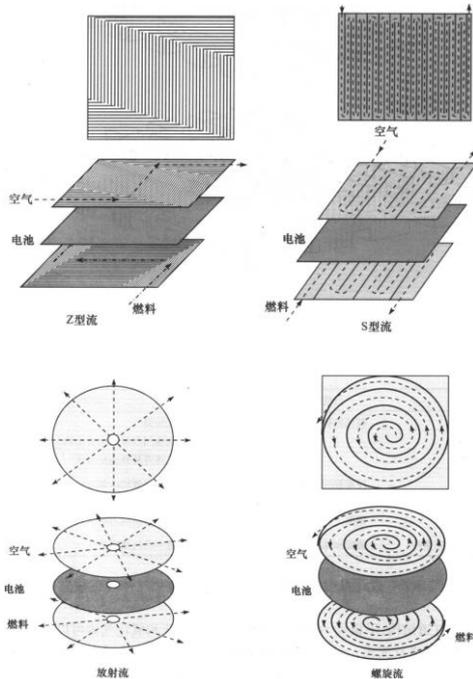
| | 性能要求 | 设计目标 |
|----------|----------------------------|--|
| 电性能 | 最小的电阻损耗 | 较短的电流路径, 良好的电接触和足够的接触面积能确保电流分布均匀、路径短的集流器 |
| 电化学性能 | 最大的开路电压、较低的极化损耗 | 电池间和单电池表面均匀的气流分布气体容易到达反应区 |
| 热管理 | 冷却和均匀的温度分布, 电堆内可能出现的最大温度梯度 | 简单有效的冷却方法, 合适的、能承受热应力的气道结构 |
| 机械/结构完整性 | 装配和操作的机械强度 | 最小的机械应力 |

来源:《Recycling Strategies for Solid Oxide Cells》、国金证券研究所

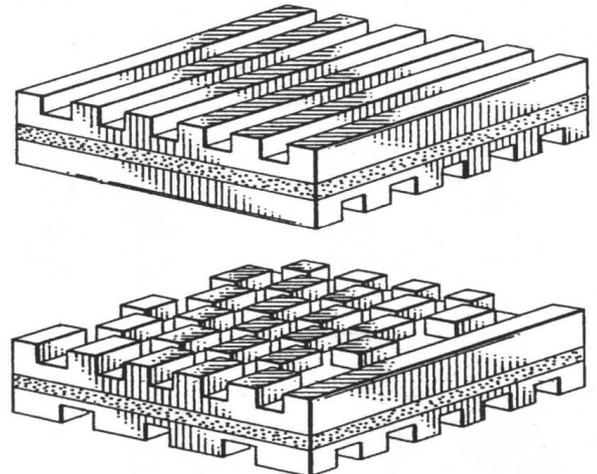
来源:《高温固体氧化物燃料电池: 原理、设计和应用》、国金证券研究所

- 气道结构决定电堆内气体和电流的分布以确保高反应效率。气道板也称连接体, 主流材料为金属合金, 气道板上的凹槽为气道, 为电极提供燃料和空气, 金属材料部分传导电流, 同时隔离相连的电池两极。气道板结构影响电池的气体分布和电流分布, 需要结构可靠、电子电导率高和抗氧化性强。平板式 SOC 电堆中, 燃料气流和氧化气流可设计为交叉式、共流式或者反流式, 气流结构的选择取决于电堆结构对电堆内温度和电流分布的影响, 不同的气道结构可实现多种气流形式, 包括 Z 型、S 型、放射型、螺旋型, 需保证每一片单电池都有足够的压差以提高电堆内单电池间气流的均匀性。此外, 由于气道还作为连接体和电极之间的电连接, 气道和电极之间的接触面积也需要考虑, 以降低接触电阻。

图表38: 平板式 SOC 气流形式



图表39: 平板式 SOC 电堆的流场设计



来源:《高温固体氧化物燃料电池: 原理、设计和应用》、国金证券研究所

来源:《高温固体氧化物燃料电池: 原理、设计和应用》、国金证券研究所

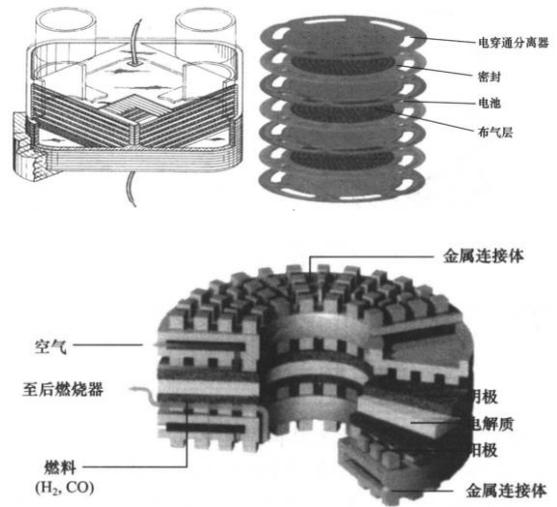
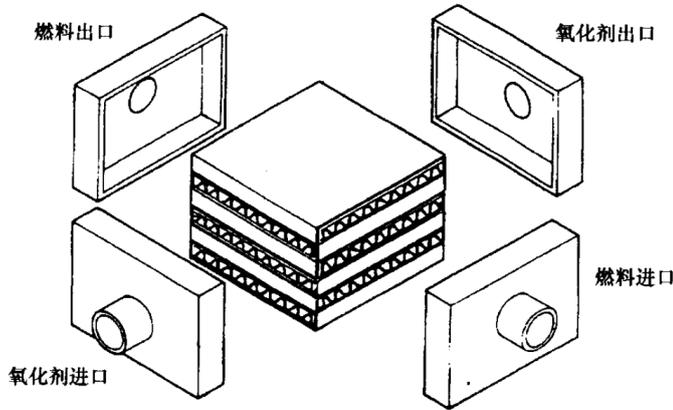
- 气体歧管装置决定电池的供气以及生成物的排出以确保电堆的高效运行。所有结构的电堆都包含气体歧管装置, 可分为外部式和一体式两种形式, 外部歧管装置独立于电堆中的单电池和连接体, 一体式歧管装置是单电池或连接体的一部分, 通常气体歧管装置需要密封以防止漏气或串气, 并且为防止单电池之间的短路, 密封装置需绝缘,



此外，相较单电池气压降，气体歧管装置应具备较低的气压降以确保电堆内气流的均匀分布。

图表40：平板式SOC电堆-外部气体歧管装置

图表41：平板式SOC电堆-一体式气体歧管装置



来源：《高温固体氧化物燃料电池：原理、设计和应用》、国金证券研究所

来源：《高温固体氧化物燃料电池：原理、设计和应用》、国金证券研究所

SOC 支撑结构分成两大类：自支撑结构和外支撑结构；平板式 SOC 主流的支撑结构包括电解质支撑、阳极支撑和金属连接体支撑。自支撑结构中，电池组元之一，通常是最厚的一层将作为电池结构的支撑体，因此单电池可分为电解质支撑、阳极支撑和和阴极支撑；外支撑结构中，薄层的单电池制备在连接体或多孔基板上，可分为连接体支撑和多孔极板支撑。平板式 SOC 主流的支撑结构包括电解质支撑、阳极支撑及金属连接体支撑。

图表42：固体氧化物平板式电池结构特点

| 电池结构 | 优点 | 缺点 |
|-------------|---|--------------------------------------|
| 自支撑 | | |
| 电解质支撑 | 致密电解质提供相对较强的结构支撑，不易受阳极氧化引起的电池损坏，机械性能高、输出性能稳定、制备工艺简单且成本低 | 电导率低引起的高电阻；为使电解质欧姆损失最小需较高的运行温度 |
| 阳极支撑 | 高电导阳极，电解质薄，电阻小输出功率高，运行温度低，可采用廉价的连接体材料，目前广泛采用的电池结构 | 阳极易发生再次氧化；厚阳极引起的传质限制，存在氧化还原气氛下易破裂的问题 |
| 阴极支撑 | 不存在氧化问题，电解质薄，运行温度低 | 电导率较低，厚阴极引起的传质限制 |
| 外部支撑 | | |
| 连接体支撑 | 低温运行下可使用薄电池组件；金属连接体提供高强度结构 | 连接体高温氧化；由于电池支撑要求，流场设计受到限制 |
| 多孔基板 | 低温运行下可使用薄电池组件；可使用非电池材料作为支撑改进电池性能 | 新材料引入增加了复杂性，不均匀表面可能导致多孔金属极板短路 |

来源：《高温固体氧化物燃料电池：原理、设计和应用》、国金证券研究所

- 第一代：电解质支撑结构简单但运行温度高（850-1000℃）。多为早期平板式电池结构，机械性能高、输出性能稳定，制备工艺简单，但由于电解质较厚（100-200μm）带来的高电阻会影响电导率，因此运行温度较高（850-1000℃），从而对材料要求高；
- 第二代：阳极支撑结构输出功率提高且运行温度降低（600-800℃）。现阶段广泛采用的结构，电解质层薄，电阻小且输出功率高，同时运行温度降低（600-800℃），对材料选择的范围更加宽泛，可采用价格较低的连接体材料，但厚的阳极可能带来传质限制，并且阳极可能发生再次氧化而破裂；
- 第三代：金属支撑结构寿命更长、成本大幅降低，运行温度进一步降低（<600℃）。



新一代可实现商业化的结构，为进一步降低工作温度、增大输出功率密度、减小传质阻力、提高热循环和抗氧化还原循环性能而研发。电池结构薄，电极厚度 50 μm ，电解质厚度 5-15 μm ，并且机械强度高，可在低温工作 (<600 $^{\circ}\text{C}$)，材料选择范围更宽，可用低成本合金材料做连接体，电池寿命更长，可靠性提高，成本将大幅降低。但金属支撑结构的制备工艺较为复杂，流畅结构受限，存在连接体的高温氧化问题，因此当前的研究重点在于开发具有高抗氧化、抗形变及不发生界面反应的合金材料。

图表43：平板式 SOC 支撑结构、特点及部分厂家

| 电池结构 | 图例 | 特征 | 厂商 |
|---------------|----|---|--|
| 第一代： 电解质支撑 | | 电解质层厚度通常大于 100~200 μm ，电极厚度约为 50 μm ，为降低电阻增大电导率，工作温度通常为 850~1000 $^{\circ}\text{C}$ | HEXIS, Bloom Energy, Sunfire |
| 第二代： 阳极支撑 | | 阳极层的厚度通常为 0.5~1 mm，电解质层厚度通常为 3~15 μm ，使用薄电解质电阻小可降低工作温度，通常为 600~ 800 $^{\circ}\text{C}$ | Fuel Cell Energy (Versa Power), Delphi, Ceramic Fuel Cells, POSCO Energy |
| 第三代： 金属支撑 | | 电极厚度通常约 50 μm ，电解质厚度 5~15 μm ，适合低温运行，通常工作温度<600 $^{\circ}\text{C}$ | Ceres Power, Plansee, Topsoe Fuel Cell |

来源：《欧洲固体氧化物燃料电池（SOFC）产业化现状》、国金证券研究所

中低温运行成为 SOC 商业化的必然路径。高温封接材料是当前平板式 SOC 的技术难点，中低温运行的金属支撑结构或将成为重点开发方向。平板式 SOC 需要连接体在电池组件边缘对高温气体进行密封以隔开氧化气和燃料气，因此开发高温封接材料成为了平板式 SOC 应用和发展的技术难点。高温下的封接问题解决需新材料的突破，这需要一定时间和技术的积累，难度较高，同时高温下材料的成本过高，不利于商业化，因此降低反应温度则成为当下的较优选择。低温运行的优点是连接体材料选择范围更广，电池的寿命更长，成本将大幅降低，可用低成本的合金材料做连接体。主要缺点是减缓了电极反应动力学(高极化)和减少反应热能，可利用涡轮机或热交换器从废气的热量中获取热能以保持高效率。

- 高温 SOC (800-1000 $^{\circ}\text{C}$)：制备技术较为成熟、关键材料性能稳定，高温带来了材料和结构等问题，制备成本较高，并且限制了电解质和制备工艺的选择，高温运行下的费用高，制约了商业化进程的发展；
- 中温 SOC (600-800 $^{\circ}\text{C}$)：运行温度降低，材料选择范围变广，阴极材料通常选择掺杂钴酸锶等钙钛矿氧化物，然而这类含有碱土金属的氧化物与空气中的二氧化碳反应会生成碳酸盐，使得运行过程中的阴极不稳定；
- 低温 SOC (<600 $^{\circ}\text{C}$)：运行温度进一步降低，材料选择范围更广，可使用廉价的密封和连接材料，另外还有可能使用非钙钛矿氧化物作为阴极，如掺杂氧化铋和 Ag 的复合物，一定程度上具有高温 SOC 的优点，启动速度相对快，运行费用较低。



图表44：固体氧化物燃料电池的分类和特点

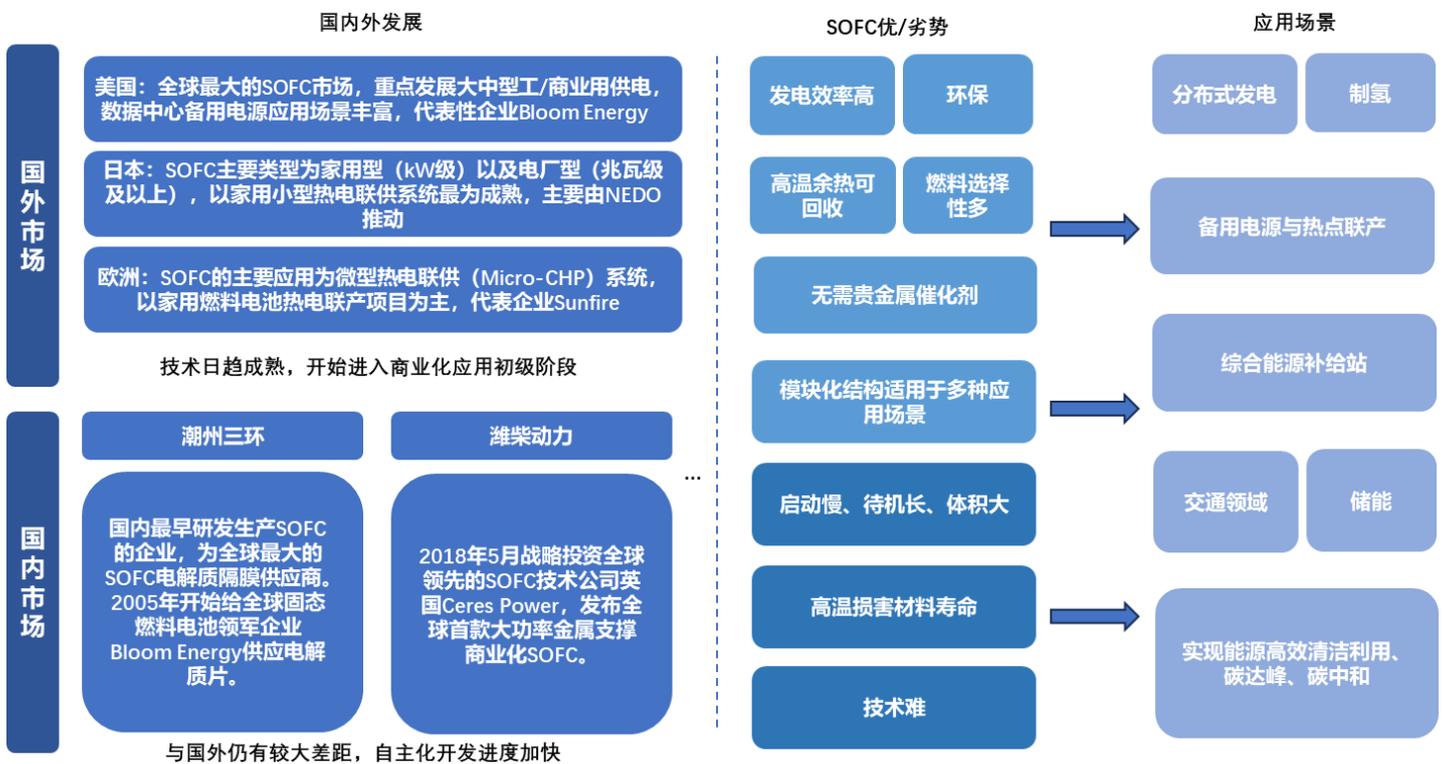
| | 高温 | 中温 | 低温 |
|--------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 工作温度 | 800°C-1000°C | 600°C-800°C | <600°C |
| 阳极 | Ni/YSZ | Ni (Cu)YSZ/SDC (氧化钐掺杂氧化锶) | Ni (Cu) CeO |
| 电解质 | YSZ (氧化锆) | YSZ/LSGM (铜镧镁氧化物) | 掺杂 CeO (氧化锶) |
| 阴极 | LSM (锰酸镧铜) | YSZ/LSGM | LSCF (铜镧钴铁氧), BSCF (铁钴酸镧铜) |
| 连接体 | LaCrO ₃ (铬酸铜) | 合金 | 合金 |
| 燃料气 | 氢气、天然气 | 乙醇、碳氢化合物、合成气、天然气 | 乙醇、碳氢化合物、合成气、天然气 |
| 电池支撑方式 | 电解质/阴极 | 阳极/金属支撑 | 阳极/金属支撑 |
| 关键问题 | 封接、连接体成本、积碳 | 阴极活性、材料匹配性、积碳 | 材料体系选择匹配性和稳定性 |

来源：《SOFC 技术和产业发展研究报告》、国金证券研究所

三、国外迈入商业化初期，国内尚处工业化示范阶段

SOFC 较 SOEC、国外相较国内距离商业化更近。国内外在 SOFC 的技术领域存在较大差距，整体而言，美日欧等国家技术日趋成熟，开始进入商业化应用的初级阶段，我国受制于国外对关键技术的封锁，整体技术水平存在一定差距。SOEC 作为一种具有很好发展前景的新型水电解技术，但是目前该技术成熟度较低，国内仅在实验室里完成验证示范，尚未广泛商业化。

图表45：国外 SOFC 发展开始进入商业化初级应用阶段，国内加快自主化开发



来源：《固体氧化物燃料电池产业发展现状及前景分析》、《固体氧化物燃料电池（SOFC）产业化现状与前景》、国金证券研究所

国际上 SOFC 应用已经较为成熟，但由于 SOFC 属于耗费人才财力巨大的项目，能真正实现大规模商业化供货的企业并不多。国际知名企业有美国 Bloom Energy、Fuel Cell Energy，



英国 Ceres Power，德国 Sunfire，爱沙尼亚 Elcogen，德国 Bosch，日本三菱重工、京瓷和爱信精机，韩国有斗山集团、SK E&C。从年发电量来看，能够达到兆瓦级别的全球 SOFC 企业不超过 10 家。在政策扶持有限、产业链配套发展不成熟、市场未启动的环境下，国内 SOFC 市场应用尚未真正启动。但是近年来，国内 SOFC 企业也开始逐步发力，潮州三环具备量产能力，是 Bloom Energy 原材料隔膜板的供应商；潍柴动力通过兼并购 Ceres Power 展开布局等等。

- 国外：美国是全球最大的 SOFC 市场，重点发展大中型工/商业用供电，特别是由于美国自然灾害频繁，缺少可靠电网，数据中心备用电源应用场景丰富；其次是日韩和欧洲，日本 SOFC 主要类型为家用型（千瓦级）以及电厂型（兆瓦级及以上），以家用小型热电联供系统最为成熟，小型热电联供系统累计出货量已达到 60MW；欧洲 SOFC 的主要应用为微型热电联供（Micro-CHP）系统，以上国家均已基本实现了 SOFC 的商业化运行。相关企业包括美国 Bloom Energy，英国 Ceres Power，欧洲 Elcogen、Convion，日本三菱重工、京瓷和爱信精机，韩国 KCERACELL、KOREA SOFC FORUM、HNPOWER 等；
- 国内：SOFC 尚处实验室向商业化过渡阶段，当前产业链配套不成熟、市场尚未大规模启动，目前国内 SOFC 的相关企业，潮州三环具备量产能力，潍柴动力通过兼并购 Ceres Power 20%的股权以及联合 Ceres Power 和博世建立合资公司布局 SOFC。


图表46：全球 SOFC 相关企业和项目及发展情况

| 企业/项目 | 具体情况 |
|--------------|--|
| Bloom Energy | 美国的 Bloom Energy 是目前商业化最高的 SOFC 公司，已为苹果、沃尔玛、谷歌及可口可乐等提供了数千套的 SOFC 分布式发电系统。新产品 EnergyServer5 能够达到 65% 的效率，功率密度是此前型号的两倍，平均寿命超 5 年，为当前行业最高水平。 |
| ENE-FARM | 日本在新能源产业技术综合开发机构 (NEDO) 的领导下，SOFC 的规划主要包括家用型 (千瓦级) 以及电厂型 (兆瓦级及以上) 等，2005 年开始启动家用燃料电池热电联供 (ENE-FARM) 计划，对 ENE-FARM 进行示范运行及政府补助，以家用小型热电联供系统最为成熟，保有量位居全球第一。ENE-FARM 计划 2030 年实现家用燃料电池 530 万套累计装机量。 |
| 京瓷 | 从 1985 年开始开发小型 SOFC，2011 年率先推出家用千瓦级固体氧化物燃料电池热电联供系统并进入市场，整体系统效率可达 90% (LHV) 以上，其利用精密陶瓷设计、制造和测评技术，可实现产品 9×10 ⁴ h 连续工作，360 次启停，12 年的设计寿命，目前安装数量持续增加，价格逐渐降低。 |
| 三菱重工 | 三菱重工自从 1980s 开始研究 SOFC 大规模发电系统，2018 年 8 月，250 千瓦 SOFC 系统—微型燃气轮机 (MGT) 系统成功示范，并在日本推广应用，2001 年开发了 10kW 级的管式 SOFC 发电系统，2013 年成功运行 200kW 的 SOFC+MGT 复合发电系统，2014 年成立了三菱日立电力系统株式会社，研发 SOFC 联合循环大型发电系统，2018 年宣布实现商用 250kW 以及 1MW 的联合发电产品。 |
| Ceres power | 新一代、低成本金属支撑燃料电池技术的领导者，2016 年 6 月，日产汽车基于 Ceres power 的电池堆技术，发布世界首款 SOFC 原型车，采用乙醇燃料 (30L)，配备 24 千瓦时电池，续航里程 600 公里。2019 年 Ceres Power 成功开发了首个专为氢燃料设计的零排放热电联产系统，产品在住宅、商业发电和交通领域都有商业化应用。 |
| Elcogen | 成立于 2001 年，拥有最先进的陶瓷阳极支撑、低温固体氧化物燃料电池制造技术，其生产的电池片和电堆性能处于国际领先水平，目前已经商业化。 |
| Convion | 成立于 2012 年，应用于分布式发电和工业自发电的燃料电池系统，其开发的 C60 产品，可使用天然气或沼气为原料，输出功率 60 kW，发电效率达到 60%，总能量效率达到 83%。 |
| 潮州三环 | 潮州三环是国内最早研发生产 SOFC 的企业，2012 年开始批量生产 SOFC 单电池；2015 年收购澳大利亚 CFCL 公司，获得其电堆和小功率 SOFC 系统技术基础；2017 年起向国内市场推出 SOFC 电堆。潮州三环出货量最大的是电解质隔膜、单电池，同时具备电堆量产能力，系统则主要有旗下子公司 CFCL 在德国的生产基地完成，以 1.5kW 系统为主。目前潮州三环是全球最大的 SOFC 电解质隔膜供应商，欧洲市场上最大的 SOFC 单电池供应商。 |
| 潍柴动力 | 潍柴于 2018 年 5 月以 4000 余万英镑收购 Ceres Power，并与其在中国潍坊成立合资公司，在 SOFC 领域展开全面合作。合资公司使用 Ceres Power 独有的 SteelCell™ 技术，产销燃料电池系统、电堆和电池片，应用于客车、卡车和特定发电市场。潍柴 SOFC 产品已经在潍柴燃料电池产业园和潍坊市能源集团开展示范，累计运行超 3000 小时。 |
| 壹石通 | 壹石通是全球锂电池用勃姆石行业龙头，主营产品包括新能源锂电池涂覆材料、电子通信功能填充材料、低烟无卤阻燃材料等三大类。近年来，壹石通入局氢赛道，布局减碳固碳技术领域的新产品，瞄准固体氧化物电池 SOFC 二次创业。 |
| 中自科技 | 在 SOFC 领域，阳极支撑电池开发出可重复的批量制备工艺技术，开发出千瓦级的阳极支撑电堆的装堆技术并实现近百小时的短堆运行；金属支撑电池技术正在按计划开发中。 |
| 华清能源 | 苏州华清京昆能源创立于 2010 年，专注于氢能固体氧化物燃料电池的研发、生产、应用一体化科技型企业。2018 年，徐州华清京昆能源有限公司在徐州经济技术开发区成立，注册资本 2 亿元。2019 年 2 月在徐州开启产业化进程，历时四年先后实现了电池量产、电堆量产，完成了发电模组、重整器、电力电子及 BOP 控制等系统开发，实现了 1kW、5kW 和 25kW SOFC 发电系统集成。 |
| 氢邦科技 | 2019 年，由中国科学院宁波材料技术与工程研究所等多方联合创建，正式成立氢邦科技。氢邦科技主要从事固体氧化物燃料电池电堆及相关发电/电解系统的设计、研发与制造，致力于燃料电池技术、清洁能源利用技术、电力生产与存储技术的开发与应用。目前已在宁波保税西区建成平管式燃料电池电堆中试生产线一条，兼容 5kW 及以下电堆生产制造，电堆年产能可达 5MW。 |
| 宁波索福人 | 宁波索福人专门从事 SOFC 系统产业化的工作，由原中国科学院宁波材料技术与工程研究所燃料电池事业部创业而成。公司建立了 SOFC 单电池、电堆以及发电系统的生产线，对外销售 SOFC 单电池、SOFC 电堆以及 SOFC 发电系统等产品，客户涵盖国内外。 |
| 佛燃能源 | 2021 年 6 月，佛燃能源对旗下全资子公司广东佛燃科技有限公司进行增资，此次对子公司进行增资，将有助于佛燃科技投资研发固体氧化物燃料电池 (SOFC) 项目等项目。2023 年年度报告显示，公司联合国内电堆头部企业、国外知名设计公司共同研发的 50kW SOFC 热电联供系统已进入关键阶段。 |

来源：《我国固体氧化物燃料电池产业发展战略研究》、《固体氧化物燃料电池产业发展现状及前景分析》、《固体氧化物燃料电池产业化现状与前景》、国际氢能网、潍柴动力官网、中国粉体网、国金证券研究所



SOEC 对阴阳极材料要求更高，国外迈入 MW 级别、国内尚处早期。SOEC 电解水制氢技术最大的优势是电耗低，相较碱槽和 PEM 节电近 30%，适合产生高温、高压蒸汽的光热发电系统。但由于对阴阳极材料的特性要求较高，使得材料的成本大大增加，因此商业化应用受到限制。国内的 SOEC 技术还处于早期阶段，最高仅到几十 kW 级别，而国外已经迈入到 MW 级别。相比国外，我国进入 SOEC 市场较晚，与国外在功率和能耗上还存在一定技术差距。

- 国外：美国和欧洲领先，美国 SOEC 代表性公司包括 FuelCell Energy 和康明斯，美国能源部分别拨款 300 万美元和 500 万美元给两家企业用以支持 SOEC 的研发项目；欧盟启动了总预算为 975 万欧元的 SOEC 示范项目，旨在五年内将 SOEC 的技术成熟度由 TRL7 提升至 TRL8，德国的 Sunfire 是欧洲 SOEC 的代表企业，当前建成的 SOEC 总功率为 2.6MW，是世界上最大的电解水制氢设备，其于 2023 年建成 200MW 的 SOEC 电解槽产能；
- 国内：SOEC 尚处于实验室阶段，当前均为小批量订单，部分企业开始规划产能，相关企业包括质子动力、华科福赛、思伟特、宁波材料所、氢邦科技等。

图表47：全球 SOEC 相关企业和项目及发展情况

| 企业/项目 | 具体情况 |
|-----------------|---|
| FuelCell Energy | 2016-2020 间，FuelCell Energy 负责了一个美国能源部拨款为 300 万美元的 SOEC 研发项目，并完成了以下指标：电堆效率（LHV H2 to AC）>95%；系统效率（LHV H2 to AC）>90%；系统效率（LHV，以电能+热能计）>75%；单电池衰减速率 ≤1%/1000 小时；电堆衰减速率 ≤2%/1000 小时；开发了子系统，使 SOEC 能与有间歇性的可再生能源相兼容。 |
| 康明斯 | 2021 年 9 月，康明斯从美国能源部获得 500 万美元拨款，用于 SOEC 电堆自动化组装、生产的研发。该项目利用康明斯现有成熟的热喷涂工艺，自动化生产以金属为基础的固体氧化物电堆，从而减少昂贵的烧结工艺，减少所需密封件数量 50%。该项目为期三年，总预算 716 万美元，目标开发 60kW 固体氧化物电堆自动化组装的标准样板，用于建立年产能达 94MW 的 SOEC 电解槽工厂。 |
| Sunfire | 德国 Sunfire 是欧洲 SOEC 技术代表，成立于 2010 年，基于一种 Power-to-Liquid (PtL) 工艺，Sunfire 于 2020 年 10 月在荷兰建成了 2.4MW SOEC 的项目示范，每小时产氢 60 公斤用于合成燃料的生产，系统电能效率（LHV H2 to AC）目标为 85%。同时 Sunfire 是德国 H2Giga 计划的参与者，与其他参与企业共同获得 3,300 万欧元资助，用于 SOEC 电解槽系统优化、制造工艺和批量生产。Sunfire 在 2021 年 11 月获得了 1.09 亿欧元的 D 轮融资（之前其已获得超过 1 亿欧元的融资），并于 2023 年建成 200MW SOEC 产能。 |
| TOPSO | 2022 年 5 月 23 日宣布，在丹麦建造世界最大、最先进的工业规模固体氧化物电解池 (SOEC) 生产工厂，建成后年产能可达 500MW，并可扩展至 5GW。利用 SOEC 生产合成气进行绿色制氢和甲烷化是其未来主要研究的方向。 |
| Bloom Energy | 2021 年 7 月 14 日，全球 SOFC 龙头企业 Bloomenergy 正式公布 SOEC 产品，宣称是最节能的电解槽，比当今市场上任何其他产品要提高 15%至 45%以上的效率。2022 年 12 月，纽瓦克工厂启动了大规模商用电解槽的生产线，提高电解槽的生产能力到 2GW。 |
| 欧盟 SOEC 示范项目 | 2020 年 1 月，欧盟启动了总预算为 975 万欧元的 SOEC 示范项目（其中 FCH JU 出资 700 万），旨在五年内将 SOEC 的技术成熟度由 TRL7 提升至 TRL8，并制定了以下的 KPI：系统电能消耗（标准工作状况）≤ 39kW/kgH2；电堆衰减速率 ≤ 1.2%/1000 小时；可运营时间 ≥ 98 %；单位投资成本（日产 1 公斤氢气产能）≤2,400 欧元；年运行、维护成本（日产 1 公斤氢气）≤ 120 欧元。 |
| 思伟特 | 2023 年思伟特 10kW 级 SOEC 制氢系统样机正式下线，并完成了全部性能测试。该系统样机在第一代系统设计的基础上进行了全面升级，制氢效率、稳定性和安全性得到全面提升。测试结果显示，系统产氢量达到 3.23Nm3/h，耗电量 3.6kWh/Nm3，系统效率大于 82%。 |
| 质子动力 | 2019 年创立，同时布局 SOEC/SOFC 的电池片、电堆、系统全产业链的研发及产业化。团队深度掌握了 20x20cm2 单电池片技术（面积最大），2021-2022 年成功交付千瓦级 SOEC、SOFC 系统，相关性能指标国内较高水平。拥有 SOFC 863 项目经验及 SOFC/SOEC 样机打造经验。2023 年 3 月，质子动力在青岛上合示范区工厂举办了 SOEC/SOFC 青岛生产基地暨电池片和电堆一期 MW 级产线投运仪式。 |
| 华科福赛 | 华科福赛研发的 15x15cm ² 单电池固体氧化物电解池 (SOEC) 电堆稳定运行时间已超过 1040 小时。 |
| 氢邦科技 | 中科院宁波材料所孵化的浙江氢邦科技开发了基于 SOEC 使用 CO ₂ 与 H ₂ O 电解的高效率千瓦级电堆。 |

来源：IHFCA、索比氢能、国际氢能网、艾邦氢能网、金证券研究所

3.1 美国：SOFC 装机量和发展全球第一，大中型工商业用供电为主

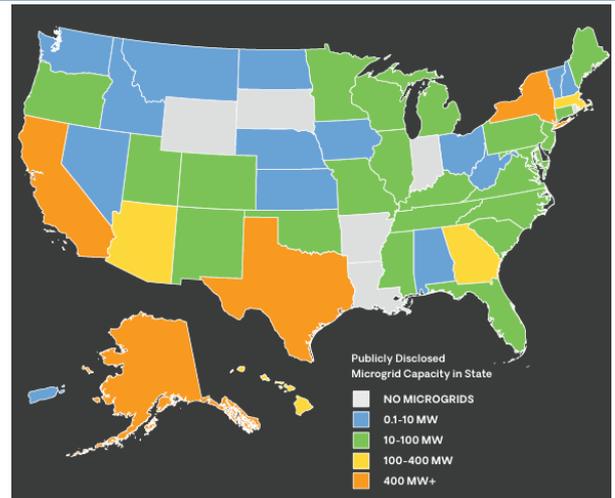
美国适合应用和推广 SOFC 产品技术，基于以下五个特性：1) 联邦政府补贴和地方财政的支持；2) 法律法规的支持；3) 美国的自然灾害比较频繁，缺少可靠的电网，备用电源应用场景比较丰富；4) 主要客户为大型的公共服务提供商；5) 国内自产自销等。



图表48: 极端天气导致电力中断加速独立备用电源推广



图表49: 电力灵活性需求的提升催生微电网需求



来源: Bloom Energy 官网、国金证券研究所

来源: Bloom Energy 官网、国金证券研究所

美国目前 SOFC 的累计装机量为全球第一，其主要的应用场景为大中型工商业用供电。Bloom Energy 公司作为主要的 SOFC 供应商，产品累计投入 1GW 以上，应用的企业包括苹果、谷歌等数据中心，以及银行、医院等其他相关机构。美国 SOFC 技术推进得益于美国联邦政府的积极引导和财政支持，同时一些地方州政府也通过补贴或税收减免等方式，推动 SOFC 投放。

图表50: 美国为推广 SOFC 成立专项项目并给予资金补助，19 年后重点发展小型 SOFC 以应对数据中心需求

| 事件 | 具体情况 |
|---|---|
| 1999-2005 年 NETL 主导成立 SECA 项目 | 1999 年，在美国能源局 (DOE) 资助下，国立能源技术实验室 (NETL) 主导成立 SECA 项目 (Solid State Energy Conversion Alliance)，与联邦政府、企业及高校和实验室一起致力于开发低成本、模块化、多燃料、应用广的 SOFC 技术。截止 2005 年，美国政府共拨款 2.5 亿美元用于管式 SOFC 的研发。 |
| 2013-2018 年 向高 kW 和 MW 级大型系统开发 | 最初 SECA 的目标是开发 3-5kW、用途广泛的小功率 SOFC 电堆，以便尽早实现量产。项目目标随后变为重点开发煤炭气化结合燃料电池发电系统 (IGFC)。SECA 项目重要参与公司 Fuel Cell Technology 于 2013 年下半年开始开发 250kW 和 MW 级，使用天然气和生物气体作为燃料，并于 2018 年测试了 200kW 的系统，未来将进一步实证 MW 级系统，远期目标是打造公用事业 100MW 级 IGFC 和 NGFC 系统。 |
| 2002-2014 年 政策补贴支持系统大型化 | 美国联邦政府向 SECA 项目提供大量支持。2002-2011 年期间达 3000~6000 万美元，2012-2014 年之间财政支持力度减半，之后一直维持在 3000 万美元左右。 |
| 2019 年-至今 FOA 资助公告发布，推动小型 SOFC 发展以应对数据中心需求 | 2019 年，美国能源部 (DOE) 化石能源办公室 (FE) 发布了一项针对 5-25kW 小型固体氧化物燃料电池系统和混合能源系统的资助公告 (Funding Opportunity Announcement, 简称“FOA”)，将向相关研究和项目提供高达 3000 万美元的联邦资助。FOA 旨在开发先进技术，利用固体氧化物水电解技术 (SOEC) 改进小型 SOFC 混合系统，使其达到氢生产和发电的商业化水平。发展小型 SOFC 是基于 DOE 预计短期内会有大量来自数据中心的需求。 |

来源: DOE、香橙会、国金证券研究所

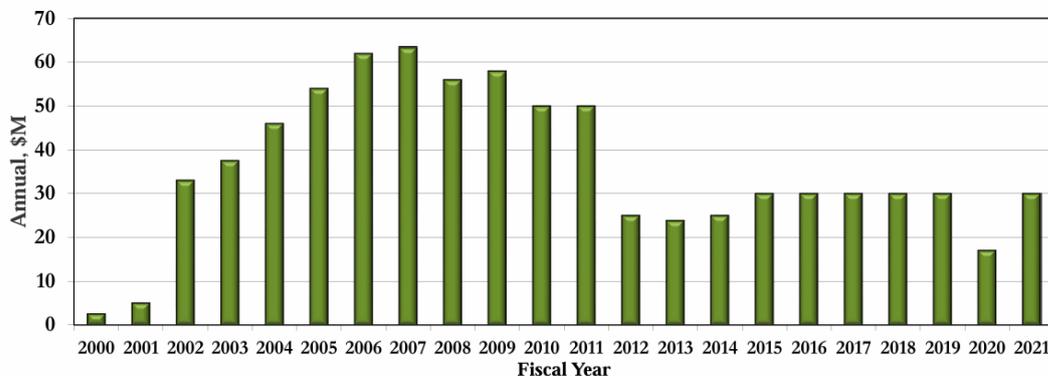
联邦政府和部分地方政府共同扶持 SOFC 发展。联邦政府层面，在美国能源局 (DOE) 资助下，国立能源技术实验室 (NETL) 成立 SECA (Solid State Energy Conversion Alliance) 项目，对 SOFC 相关项目和企业每年提供 3000~6000 万美元不等的补贴。同时，地方政府，以加利福尼亚和康涅狄格州为代表，也对 SOFC 的投放给与一定补贴或税收减免。加州的自发电激励计划项目 (Self Generation Incentive Program, 简称“SGIP”) 补贴力度较大。自 2001 年起，加州共有 450 套固定式燃料电池系统获得 SGIP 补助，并且优先支持生物质燃料的推广。目前，美国全国累计投放的 500MW 大型固定式电站，其中约有一半位于加州 (240MW)。根据 Bloom Energy 表示，其产品享受联邦和加州税收减免政策以及公用事业地方纳税人补贴后，最终系统购置成本最高可降低 80% 左右。

- 补贴逐步退坡，且向清洁能源生物质燃料倾斜。最初对使用生物质为燃料的 SOFC 给予 4,500 美元/kW 补助，对使用天然气的 SOFC 电池补贴减半，为 2,750 美元/kW。随着时间推移，补贴逐渐退坡，使用生物质为燃料的电池将给予 1,200 美元/kW 补助，



而使用天然气燃料的电池仅给予 600 美元/kW 的补贴。自 2020 年起，仅使用 100% 生物质燃料的固定式燃料电池才能收到补助。

图表51：美国政府给予 SOFC 资金扶持每年在千万美元级别



来源：NETL、国金证券研究所

SOFC 开发取得阶段性成就，离完成目标仍有 1-5 年的时间。美国在 kW 级模组开发上已经取得阶段性成就，Bloom Energy 的 Energy Server 产品发电效率目前可达到 54%、余热回收效率达到 36%，但在 MW 级 SOFC 的开发以及成本目标上距离达标仍有一定距离，尤其在中大型（100kW-1MW）SOFC 系统成本方面。虽然 SECA 在 2018 年便提出到 2020 年将系统成本降至 900 美元/kW 的目标，但截至 2020 年，系统成本仍然高居 12000 美元/kW，900 美元/kW 的系统成本目标也被推迟至 2025/2030 年完成。

- SECA 联盟长期的 SOFC 技术目标主要有以下五个方面：1) 在没有碳捕捉和碳封存的情况下，效率达到 60%；2) 寿命达到 4 万小时或以上；3) 衰减率小于 1000 小时 0.2%；4) 电堆成本降到 225 美元/kW；5) 系统成本降到 900 美元/kW 以下。
- 阶段性目标主要有以下四个方面：1) 2005 年：向特定市场供给初代产品，早期切入的应用场景包括卡车辅助动力，休闲车，军用领域等；2) 2010 年：SOFC 作为商业化产品逐渐向住宅、商业、工业的热电联供、交通领域的辅助动力等方面推广，实现 400 美元/kw 的制造成本目标；3) 2015 年：在大规模发电领域应用，推出 MW 级燃料电池组，效率显著提升（混合效率 60-70%），实现 400 美元/kw 的制造成本目标；4) 2018-2021 年：完成 MW 级燃料电池联合循环发电（IGFC）试验电厂。

图表52：SECA 联盟对 SOFC 系统的中长期目标

| 项目 | 现在 | 2025/2030 目标 |
|------------------|---------------------|--------------------------|
| 系统成本 (100kW-1MW) | >\$12,000/kW | \$900/kW |
| 系统寿命 | 1-1.5% per 1,000hrs | <0.2% per 1,000hrs |
| 示范量级 | 5kW-200kW | DG: MW 级别 量级: 10-50MW |

来源：NETL、国金证券研究所

Bloom Energy 是全球固体氧化物电池行业龙头，也是美国的代表性公司。

Bloom Energy 产品的技术基础为 SOFC，主要产品是 Bloom Energy Server (SOFC) 和 Bloom Electrolyzer (SOEC)。Bloom Energy 的业务模式为 PPA 能源采购协议，而非直接销售电池，其燃料电池系统可获得税收减免和州级补贴。2001-2015 年期间，Bloom Energy 的客户在加州累计获得 2.3 亿美元补贴。公司的技术相对成熟，运行可靠性好，其开发的 SOFC 主打产品规格为 50kW 模组，通过多模组的组合最大可以做到几十兆瓦的燃料电池系统。

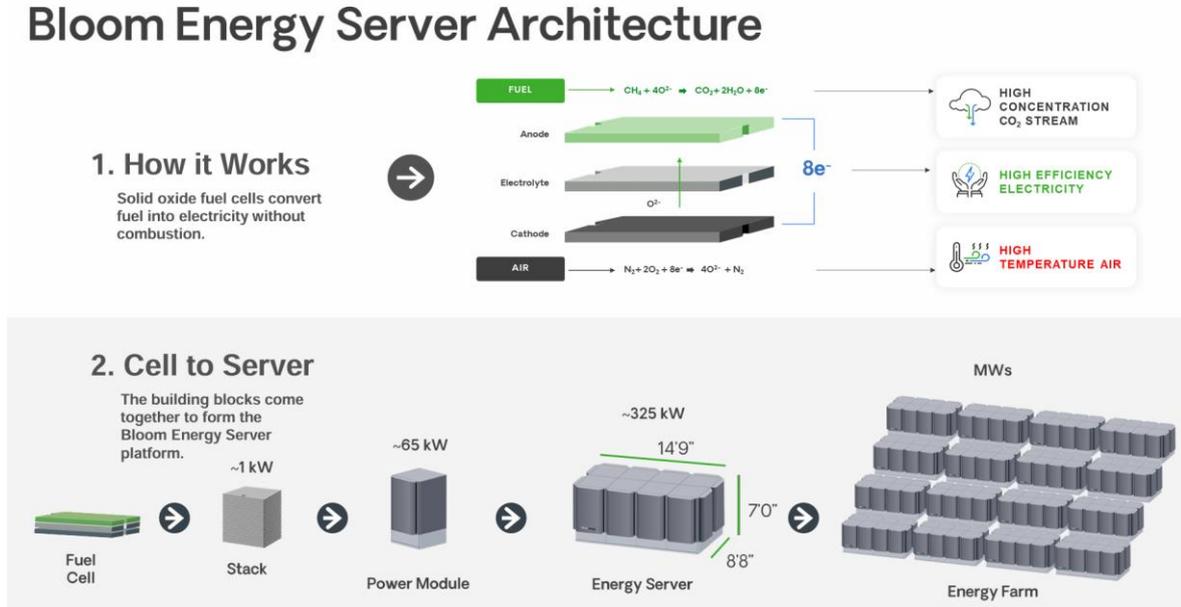
- Bloom Energy Server: 电效率高达 60%，在 SOFC 中领先，其热电联产（CHP）的设



计能实现高达 90%的综合效率，产能已经达到 1GW。

- Bloom Electrolyzer: 系统制氢效率达到 37.5kWh/kg，公司已经部署了超过 1GW 的固体氧化物技术，其电解槽可使用相同的基础平台和过去几十年的所有经验，具备强大而成熟的供应链基础。

图表53: Bloom Energy Server 产品



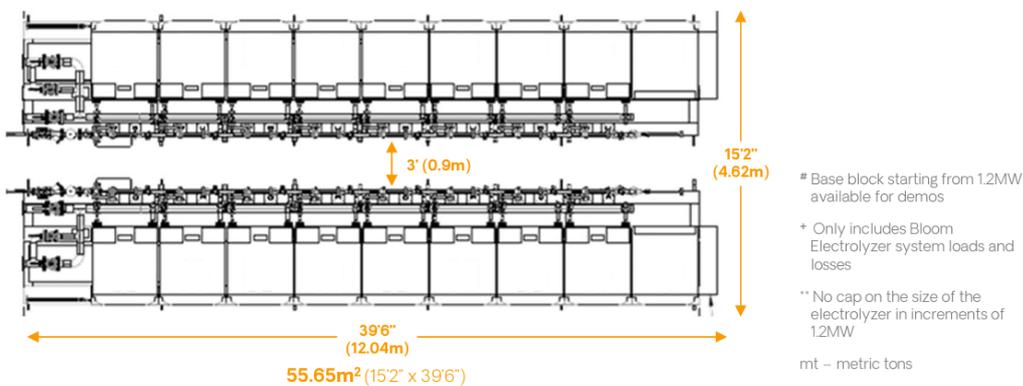
来源: Bloom Energy 官网、国金证券研究所

图表54: Bloom Electrolyzer 产品

MODULAR BLOOM ELECTROLYZER KEY DATA

| Power (MW) | Hydrogen Output | | | |
|--------------------|-----------------|--------|---------|---------------------|
| | kg/hr | mt/day | mt/year | Nm ³ /hr |
| 1.2 [#] | 32 | 0.77 | 280 | 356 |
| 2.4 | 64 | 1.5 | 560 | 712 |
| 50 | 1,344 | 32 | 11,772 | 14,957 |
| 1000 ^{**} | 26,685 | 640 | 233,759 | 297,002 |

2.4MW ELECTROLYZER BLOCK



来源: Bloom Energy 官网、国金证券研究所

公司产品出货量超 1.2GW，与多个领域龙头合作，订单不断攀升。公司位于加州，贡献了该州 60%的固定式燃料电池系统，并且产品目前已应用在苹果、谷歌等多家公司，在全球 8 个国家销售安装了 1.2GW 的 SOFC 产品。此外，Bloom Energy 也与三星重工合作，进军



船舶领域；2023年 Bloom Energy 宣布与 SK Ecoplant 延续 2021 年签署的首选经销商协议 (PDA) 条款，预计 2024-2027 年至少增加 500MW 的能源服务器购买量，订单金额高达 45 亿美金。该交易预计将为 Bloom Energy 在 20 年内带来约 15 亿美元的产品收入和 30 亿美元的服务收入。

图表55：公司客户涵盖多个领域龙头企业

Market Segments Served



Diverse customer ecosystem with Fortune 500 customers

来源：Bloom Energy 官网、国金证券研究所

- 2024年11月7日，BE 宣布了史上最大订单，与 SK Eternix 合作开发的 80 兆瓦项目将为韩国忠清北道的两个生态公园供电，仅一周之后，11月14日，Bloom Energy 宣布与 AEP（美国电力公司）签订千兆瓦燃料电池采购协议，为人工智能数据中心供电，这项供应协议供应高达 1 吉瓦 (GW) 的产品，成为迄今为止世界上最大的燃料电池商业采购。作为该协议的一部分，AEP 已订购 100 兆瓦 (MW) 的燃料电池，预计 2025 年将有进一步的扩建订单。

图表56：Bloom Energy 2024 年以来订单

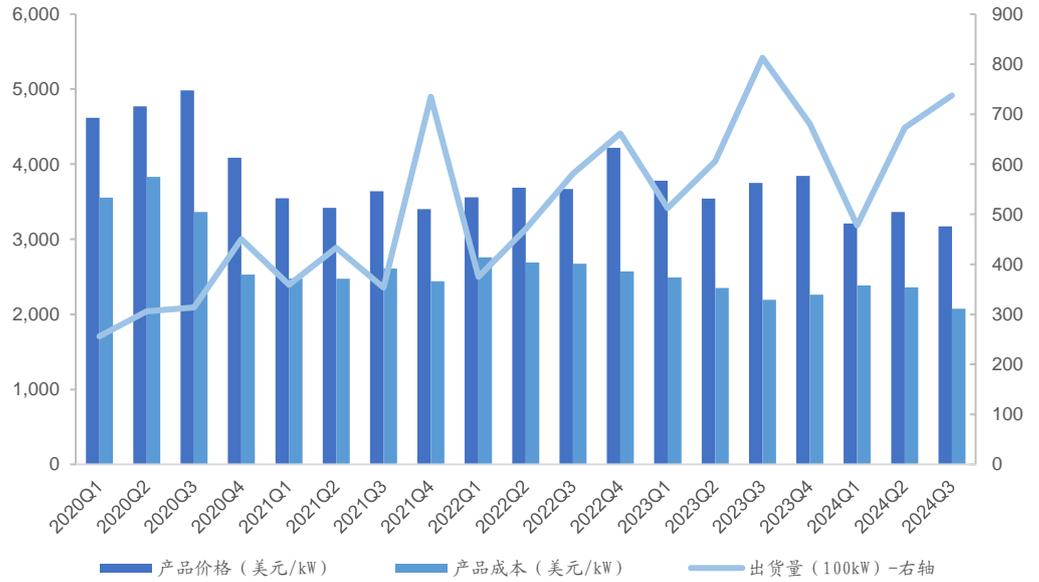
| 时间 | 订单内容 | 合作方 |
|-------------|---|--|
| 2024年12月11日 | HPS 和 IDF 将购买 19 MW 的 Bloom Energy Server，包括现场微电网解决方案。根据 PPA 结构签订合同，共约 1.25 亿美元资金将支持 Bloom 设备安装 | HPS Investment Partners 和 Industrial Development Funding |
| 2024年11月14日 | 1GW，用于为 AI 数据中心供电，一期供货 100MW，2025 年后增加后续订单 | 美国电力公司 (AEP) |
| 2024年11月7日 | 80MW，2025 年供货，韩国两个公园供电 | SK Eternix |
| 2024年11月7日 | 对现有协议扩展，新协议将广达现有 Bloom SOFC 装置电力容量增加 150% 以上 | Quanta Computer Inc. 广达电子 |
| 2024年11月7日 | 20MW，在洛杉矶的两个战略地点提供 Bloom SOFC | FPM Development |
| 2024年9月20日 | 500MW，在 2024 年 1 月 1 日至 2027 年 12 月 31 日期间购买 Bloom SOFC | SK ecoplant Co |
| 2024年5月9日 | 在加利福尼亚州的现有高性能计算数据中心安装额外兆瓦级的 Bloom Energy 基于燃料电池的能源服务器 | 英特尔 |

来源：Bloom Energy 官网、国金证券研究所

技术迭代+不断放量，产品成本快速下行。近年来，公司的产品价格不断下行，2024Q3 产品平均销售价格约为 3170 美元/kW，成本在 2075 美元/kW，相较 2020Q3，售价和成本分别减少了 57% 和 62%，每年约以 10%—15% 的速度下降。产品 52% 在美国本土使用，48% 销往海外，例如韩国、日本。2023/2024Q1-3 收入达到 13.34 亿美元/9.01 亿美元。预计 2024 年，全年收入达到 14-16 亿美元，毛利率 28%。



图表57: Bloom Energy 产品成本快速下行



来源: Bloom Energy 官网、国金证券研究所

Fuel Cell Energy 总部位于美国，主要从事固定式燃料电池的研究，主要产品是可用于现场发电、热电联产及分布式发电的 MCFC。

产品主要服务于电力实业、商业和企业、政府机构等。目前公司产品 DFC 发电厂已在全球超过 50 个地点产生超洁净、高效和可靠的电力。公司已经生产超过 15 亿千瓦时的超清洁电力，且拥有超过 300 兆瓦的发电装机容量。作为美国最大的上市燃料电池制造商之一，公司在全球 50 多个地点提供清洁能源，主要在美国、韩国、英国、德国和瑞士开展业务。

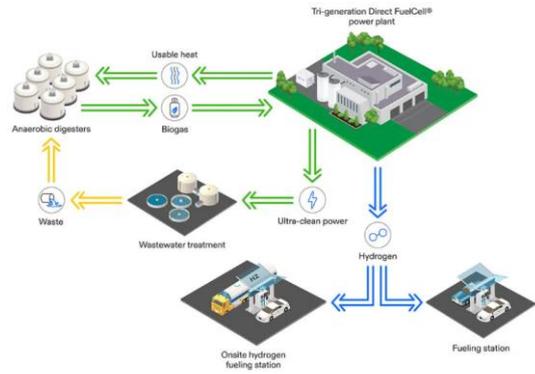
- 在 韩国， 公司经营世界上最大的燃料电池园区——京畿绿色能源燃料电池园区 (Gyeonggi Green Energy Fuel Cell Park)，该园区由 21 座发电厂组成，为韩国客户提供 59 兆瓦的电力和区域供热。
- 在 北美， 公司经营康涅狄格州布里奇波特的 5 个 2.8MW 发电厂和一个兰金循环涡轮底循环，该涡轮机将来自燃料电池的热量转化为额外的电力，然后出售给康涅狄格州的 Light & Power。此外，公司也与丰田达成协议，在加利福尼亚长滩开发设施，Tri-Gen 系统每天将加州农业废物转化为 2.35 兆瓦电力和 1.2 吨氢气。
- 2023 年 2 月，FuelCell Energy 和马来西亚海洋与重型工程控股有限公司 (MHB) 的全资子公司马来西亚海洋与重型工程公司 (MMHE) 已签署谅解备忘录 (MoU)，合作开发大规模亚洲、新西兰和澳大利亚的电解槽设施。

图表58: Fuel Cell Energy Tri-gen 平台



来源: Fuel Cell Energy 官网、国金证券研究所

图表59: Tri-gen 平台应用示意图



来源: Fuel Cell Energy 官网、国金证券研究所



3.2 日本：NEDO 牵头，发展家庭分布式热电联供系统 Ene-Farm

日本 SOFC 发展主要由 NEDO 牵头推动。日本 SOFC 的主要在新能源产业技术综合开发机构 (NEDO) 的领导下发展，针对 SOFC 规划主要包括家用型 (千瓦级) 以及电厂型 (兆瓦级及以上) 等。日本从 2005 年开始启动家用燃料电池热电联供 (ENE-FARM) 计划，对 ENE-FARM 进行示范运行及政府补助，2011 年，NEDO 推出全球首个商业化的 SOFC 热电联供系统 (ENE-FARM type S) 即标志着 ENE-FARM SOFC 路线的成功，因此以家用小型热电联供系统最为成熟，保有量位居全球第一。除此之外，日本也致力于开发固定式电站 250kW 级兆瓦级的 SOFC 和燃气轮机燃料电池联合发电 (GTFC)，以及推进综合煤气化，即 SOFC 燃气轮机和中汽轮机联合循环系统 (IGFC)。2017 年，工业用的 SOFC 燃料电池也开始进入商用化阶段。

图表60: ENE-FARM 在日本的商业模式



图表61: ENE-Farm 供热原理



来源: PV JAPAN BRIDGE、国金证券研究所

来源: ofweek、国金证券研究所

日本政府出台 SOFC 专项路线图，覆盖小型至大型煤电厂发电系统的效率、寿命和成本。NEDO 对 SOFC 的未来规划覆盖家用型 (kw 级)、商用型 (数十到百 kw 级)、工业型 (MW 级) 以及电厂型 (数十与数百 MW 级)。根据最新发布的《固定式燃料电池路线图》，2025 年工商用型机组成本目标为 50、100 万日元/kw (高、低压运行)；2030 年家用型机组为 50 万日元/kw，工商用型机组 30、50 万日元/kw (高、低压运行)，中等容量 (数百千瓦至数兆瓦级) 联合发电系统价格低于 30 万日元/kw；2040 年固体氧化物燃料电池系统价格不超过 30、50 万日元/kw (高、低压运行)。

图表62: NEDO 对 SOFC 分阶段目标覆盖小型至大型煤电厂发电系统

| 类型 | 目标 | 2025 年 | 2030 年 | 2040 年 |
|------------|---|--|--|--|
| 家用燃料电池 | 2025 年以前，推广普及家用燃料电池，到 2030 年应用规模达到 300 万台，2030 年以后推进下一代燃料电池的商业化，包括金属支撑固体氧化物燃料电池、质子陶瓷燃料电池。 | 燃料电池发电效率 (低热值) 达到 40%~55%，寿命超过 10 年。 | 燃料电池发电效率 (低热值) 达到 40%~60%，寿命达到 15 年，系统价格低于 50 万日元。 | 燃料电池发电效率 (低热值) 达到 45%~65%，质子陶瓷燃料电池、废气再循环型固体氧化物燃料电池等发电效率达到 70%，寿命超过 15 年。 |
| 商用、工业用燃料电池 | 2025 年前推进在家庭的有效利用；2030 年以前作为分布式电源进行推广普及，发展多样化燃料，发挥对可再生能源的调节能力；2040 年前推广普及使用绿氢的分布式能源系统，实现高效长寿命运行，可逆固体氧化物电池 | 固体氧化物燃料电池效率超过 55%，寿命超过 10 年，系统价格不超过 100 万日元/千瓦 (低压运行)、50 万日元/千瓦 (高压运行)。燃气轮机燃料电池联合发电 (GTFC) 和整体煤气化燃料电池联合发电 (IGFC) 进入初期导入，GTFC 寿命 10 年，IGFC 寿命 | 纯氢聚合物电解质燃料电池量产，发电效率达到 60%，寿命 15 年。固体氧化物燃料电池效率超过 60%，寿命 15 年，系统价格不超过 50 万日元/千瓦 (低压运行)、30 万日元/千瓦 (高压运行)。中等容量 (数百千瓦至数兆瓦级) 联合发电系统开始推广普及，效率超过 60%，寿 | 纯氢聚合物电解质燃料电池推广普及，发电效率 65%，寿命 15 年。固体氧化物燃料电池效率超过 70%，寿命超过 15 年，系统价格不超过 50 万日元/千瓦 (低压运行)、30 万日元/千瓦 (高压运行)。中等容量联合 |

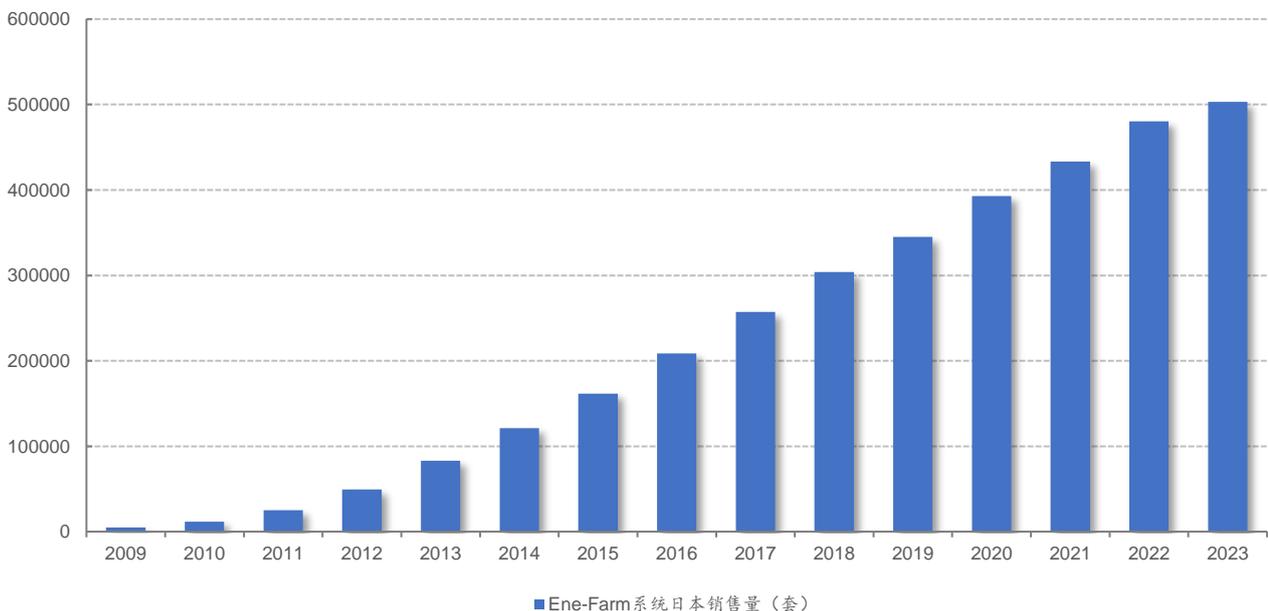


| | | | |
|-----------------------|------------------------------------|--|--------------------------------|
| 实现应用，开发 CO2 分离回收型燃料电池 | 5 年（2026 年），数十兆瓦规模大容量系统价格数百万日元/千瓦。 | 命达到 15 年，系统价格低于 30 万日元/千瓦。GTFC 效率 63%（2031 年），寿命达到 15 年。IGFC 效率 55%（2032 年），寿命 15 年。 | 发电系统效率超过 75%。GTFC 和 IGFC 推广普及。 |
|-----------------------|------------------------------------|--|--------------------------------|

来源：NEDO、国金证券研究所

政府牵头给予资金资助，Ene-Farm 系统保有量全球第一。日本从 2005 年开始启动家用燃料电池热电联供（ENE-FARM）计划，对 ENE-FARM 进行示范运行及政府补助。NEDO 在 2009-2020 年期间推出“面向燃料电池应用扩大的 ENE-FARM 支持事业费补助金”总额达 76.5 亿日元。根据规划，ENE-FARM 计划 2020 年、2030 年分别实现家用燃料电池累计装机量达 140 万套和 630 万套，对应成本有望进一步下降到 50 万日元/套（约 3 万元人民币/台套）左右。目前 PEMFC+SOFC 的系统已经突破了将近 50 万台，SOFC 占比将近一半，代表企业有京瓷、大坂燃气、三菱日立、爱信精机等。

图表 63: Ene-Farm 销售量逐年高增

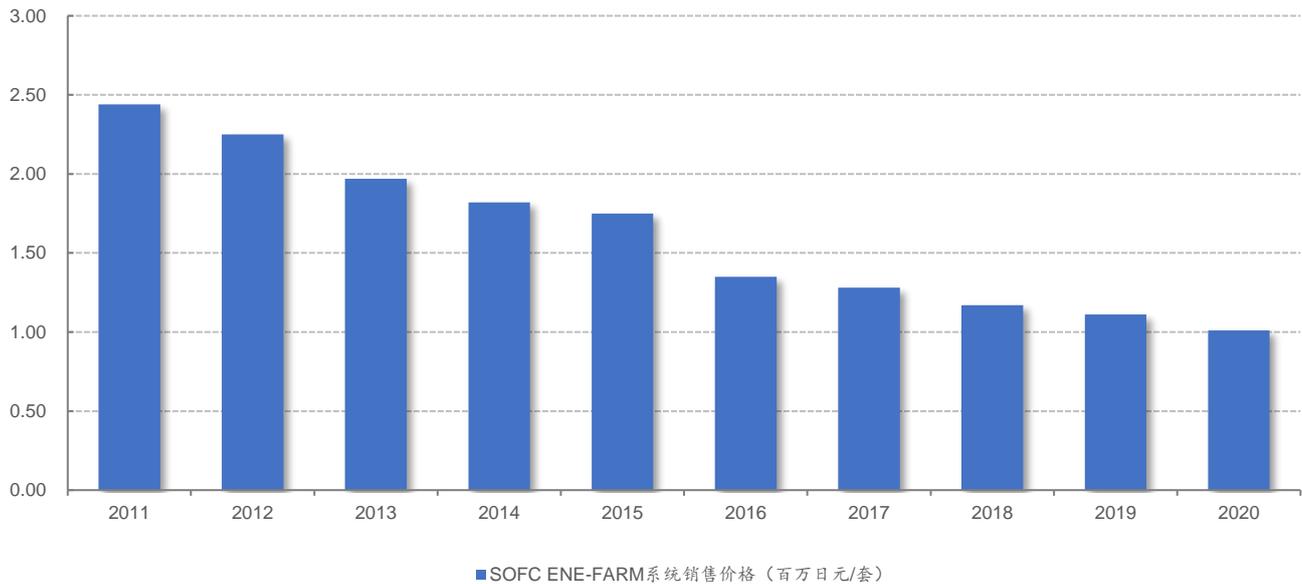


来源：Daigas Group、国金证券研究所

ENE-FARM 系统逐步开启商业化应用，现行成本仅为推广初期成本的 40% 以下。2009 年后，在日本政府持续补贴和松下、爱信精机等厂商的大力推广下，家用燃料电池系统系统逐步开启商业化应用。随着规模效应显现，2020 年 ENE-FARM 成本迅速降至 100 万日元/套（约 4.75 万元人民币/套），较 2011 年成本下降 142%，逐步减少补贴依赖。在此期间日本政府补贴也逐步退坡，从 2010 年开始对于安装燃料电池系统的家庭提供 140 万日元或制造成本一半的补贴，到 2015 年政府补贴额度逐步降低至 50-60 万日元。



图表64：日本 SOFC ENE-FARM 系统的销售价格（百万日元/套）

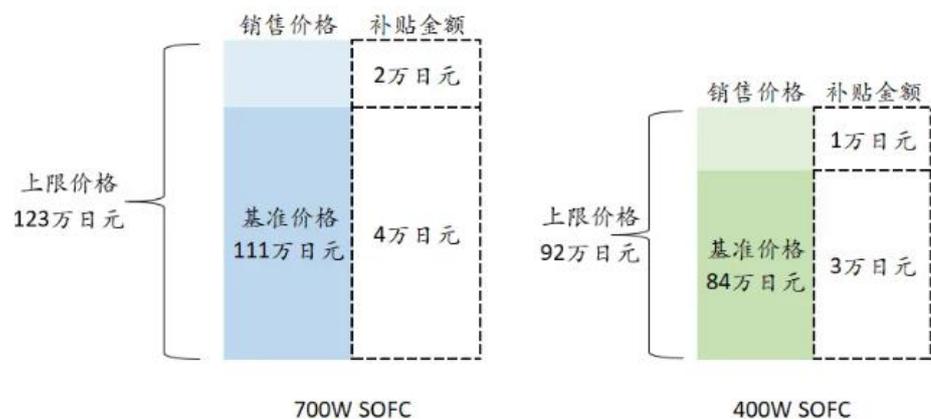


来源：Statista、国金证券研究所

现阶段大范围推广 ENE-FARM，国家和地方政府的补助仍然必不可少。2019 年 3 月 11 日，日本产业经济省发布关于“《支持 ENE-FARM 等燃料电池扩大利用运营费补助金》财年预算提案》，对 ENE-FARM 项目中的 SOFC 和 PEFC（聚合物电解质燃料电池）燃料电池设备和安装费用进行补贴。补贴针对燃料电池设备和安装费用的总价：

- 总价 < 123 万日元，（约合人民币 7.38 万元），给予 SOFC 补助 8 万日元（约合人民币 4800 元）；
- 2) 123 万日元 < 总价 < 134 万日元（约合人民币 8.04 万元），给予 SOFC 补助 4 万日元（约合人民币 2400 元）；
- 超过最高价格，不予补贴；
- PEFC（聚合物电解质燃料电池）没有统一补助标准；
- 对可支持液化石油气的设备、可应用在寒冷地区、可用在公寓等环境中的 FEMFC 和 SOFC 进行额外补贴。

图表65：SOFC 系统补贴标准和上限价格



来源：METI、国金证券研究所

Ene-farm 相较其他供暖方式可节省电费燃气费用，并且更为灵活。FC mCHP 一般输出功率 ≤ 5kW，应用场景涵盖独立住宅、排屋、小型集中住宅、便利店、独立商户等。虽然与效



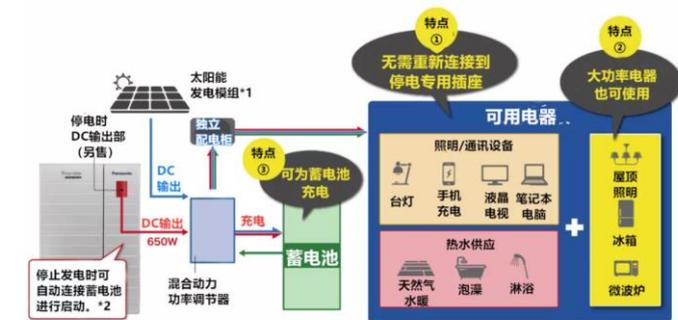
率较高的供热锅炉相比，整体能源利用率相差不多，但是 FC mCHP 在满足房屋热水及空间供暖的需求的同时，可以承担部分或主要电力供应，同时可以与屋顶光伏系统互补，在晨间和夜间用电高峰时段补足电力，又能在日间用电低谷时段售电上网盈利。因此，产生的电力无论自用或销售，都可以抵消部分购置费用。城市大规模铺设 FC mCHP 可以增加电网弹性，提高能源利用效率，应对紧急情况下的电力供应问题。另一方面，该系统依托于现有城市燃气网络布置，在氢能基础设施缺乏的初期，是一个能够切入和快速展开的燃料电池应用场景。

图表66: FC mCHP 与其他供热系统对比

| | Ene-Farm | Ecowill(天然气发动机) | 节能高效热水器 | 冷媒热泵热水器 | 高效煤油热水器 | 传统型热水器 |
|-----------|--------------|-----------------|-------------|------------|-----------|-----------|
| 销售价格(推测) | 120 万日元左右 | 60-90 万日元 | 25-40 万日元 | 45-80 万日元 | 25-30 万日元 | 23-28 万日元 |
| 每年节约电费燃气费 | 约 5~8 万日元 | 约 5~6 万日元 | 约 1~1.5 万日元 | 约 7~12 万日元 | 约 0.7 万日元 | - |
| 回收年数 | 12-19 年 | 6-13 年 | 1-2 年 | 3-4 年 | 3-7 年 | - |
| 发电效率(LHV) | 39-46.5% | 23-27% | - | - | - | - |
| 热效率(LHV) | 43.5-56% | 63-65.7% | 95% | 3-3.5 | 95% | 80% |
| CO2 减排 | 约 1.3~1.9t/年 | 约 0.4~0.8t/年 | 约 0.2t/年 | 约 1.2t/年 | 约 0.2t/年 | - |

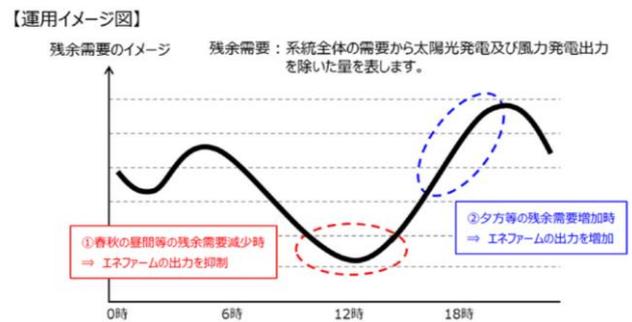
来源: ofweek、国金证券研究所。#每年节约电费燃气费、CO2 减排量,是根据各公司估算的(没有相同条件下的比较值)豪②回收年数=(销售价格(推测)-传统型热水器(23 万日元))/每年节约的电费燃气费;3)冷媒热泵热水器的热效率值是根据 APF (=每年能源消费效率(每年的供给热量/每年的消费电力)计算的。

图表67: Ene-Farm 与混合蓄电系统协作系统



来源: dempa-digital、国金证券研究所

图表68: Ene-farm 作为分布式备用电网



来源: Daigas、国金证券研究所

根据日本家庭的生活习惯对热水的需求，Ene-farm 装置设计了 700W 的额定输出功率。根据实测数据，一年间 ENE-FARM 为日本四口之家节约了近 7 万日元的电费和煤气费。虽然在煤气费的节约上 ENE-FARM 的表现并不突出，但在节约电费上效果十分明显。



图表69：日本家用 Ene-Farm 额定输出功率为 700W

图表70：日本四口之家安装 ENE-FARM 前后电费和煤气费对比



| 单位：日元 | | | 总计 |
|----------------------|-----|----------|----------|
| ENE-FARM 安装 前 1 年 | 煤气费 | 149, 150 | 292, 320 |
| | 电费 | 143, 170 | |
| ENE-FARM 安装 后 1 年 | 煤气费 | 148, 660 | 221, 870 |
| | 电费 | 76, 210 | |

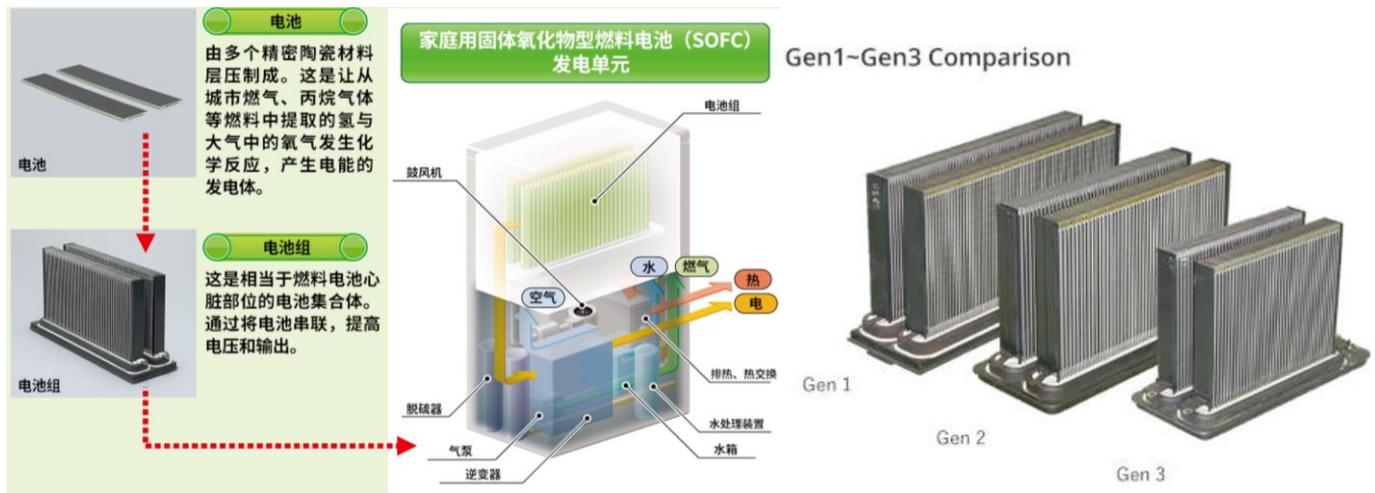
来源：Daigas、国金证券研究所

来源：PV JAPAN BRIDGE、国金证券研究所

日本京瓷

日本京瓷株式会社 (Kyocera) 从 1985 年开始深耕小型固体氧化物燃料电池的技术开发，2011 年率先推出的家用千瓦级固体氧化物燃料电池热电联供系统进入市场，整体系统效率可达 90% (LHV) 以上。现在已经实现第三代更小型化的产品，产品发电功率达 700W，实现了 9 万小时连续工作、360 次启停、12 年设计寿命。京瓷的 SOFC 已广泛应用于家庭和小型企业，如便利店和餐馆，未来预计将作为备用电源安装在通信基站、交通信号灯和管道监控中。

图表71：京瓷家庭用 SOFC 已经发展至第三代小型化产品



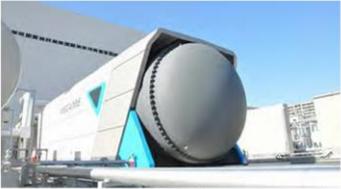
来源：京瓷官网、国金证券研究所

三菱重工

日本三菱重工 (MHI) 从 20 世纪 90 年代开始针对煤炭高效利用，进行大规模固体氧化物燃料电池发电系统研究。2001 年开发出 10kW 级的管式 SOFC 发电系统，2013 年成功运行 200kW 的 SOFC+MGT 复合发电系统，2014 年成立了三菱日立电力系统株式会社，致力于 SOFC 联合循环大型发电系统研发，2018 年宣布实现商用 250kW 以及 1MW 的联合发电产品。目前，日本三菱与日立集团合资成立的电力公司已成功研发出 250 kW 固体氧化物燃料电池 - 微型燃气轮机 (MGT) 系统，并在日本推广应用。



图表72：三菱重工代表性 SOFC 产品出货案例

| Kyushu University | Mitsubishi Estate Company, Limited Marunouchi Building | Hazama Ando Corporation Technical Research Institute |
|--|--|---|
|  |  |  |
| Specifications Outdoor Installation • Operational from March 2015 • Cumulative Power Generation Time >22,000 Hours | Specifications Steam Recovery, Indoor Installation (basement 4th floor) | Specifications Hot Water Recovery, Outdoor Installation Hydrogen Mix Power Generation (under construction) |

来源：三菱重工官网、国金证券研究所

爱信精机

2011年，日本新能源产业技术综合开发机构（NEDO）开发出全球首个商业化的 SOFC 热电联供系统（ENE-FARM type S），由大阪燃气、爱信、京瓷、长府制作所、丰田汽车等 5 家企业共同研发完成。其中，大阪燃气主要担任热电联供系统的设计与施工以及维护技术、京瓷担任燃料电池堆的设计与制造技术、爱信与丰田汽车担任发电机组的设计与制造技术、长府制作所担任排热利用热水供应机组的设计与制造技术，最终产品由爱信负责生产。

图表73：围绕 Ene-Farm 爱信精机和大阪燃气、京瓷和丰田汽车共同开发 SOFC



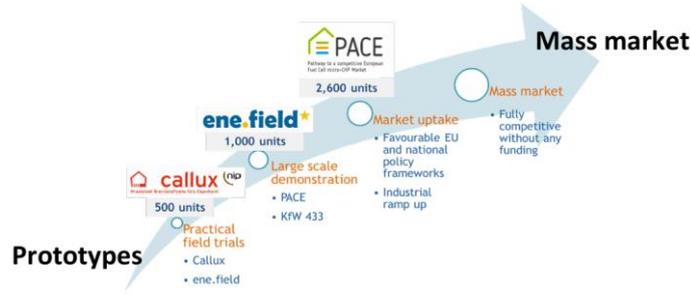
来源：中国新能源网、国金证券研究所

3.3 欧洲：聚焦微型热电联供系统，具备一批已实现产品化的企业

欧洲主要推广微型热电联供系统。与美国的 SOFC 市场偏向大中型工/商业用供电系统不同，欧洲市场的主要推广方向是微型热电联供（Micro-CHP）系统。并且欧洲具有一批成功实现产品化的公司，包括英国 Ceres Power、德国 Sunfire、意大利 Solidpower、爱沙尼亚 Elcogen、丹麦 Topose、德国 Bosch Thermotechnology 等，近年来由于可再生能源的快速发展，Sunfire、Topose 正在转向固体氧化物燃料电池的逆过程即固体氧化物电解池技术研究。

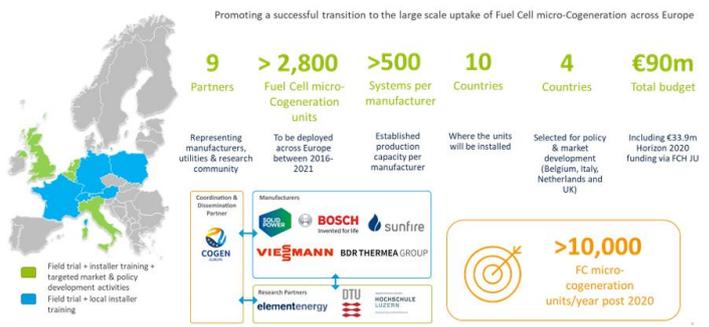


图表74: 欧盟规划 SOFC 发展蓝图



来源: Ene-field 官网、国金证券研究所

图表75: PACE 项目已推动 2800 套 Micro-CHP 系统落地



来源: PACE 官网、国金证券研究所

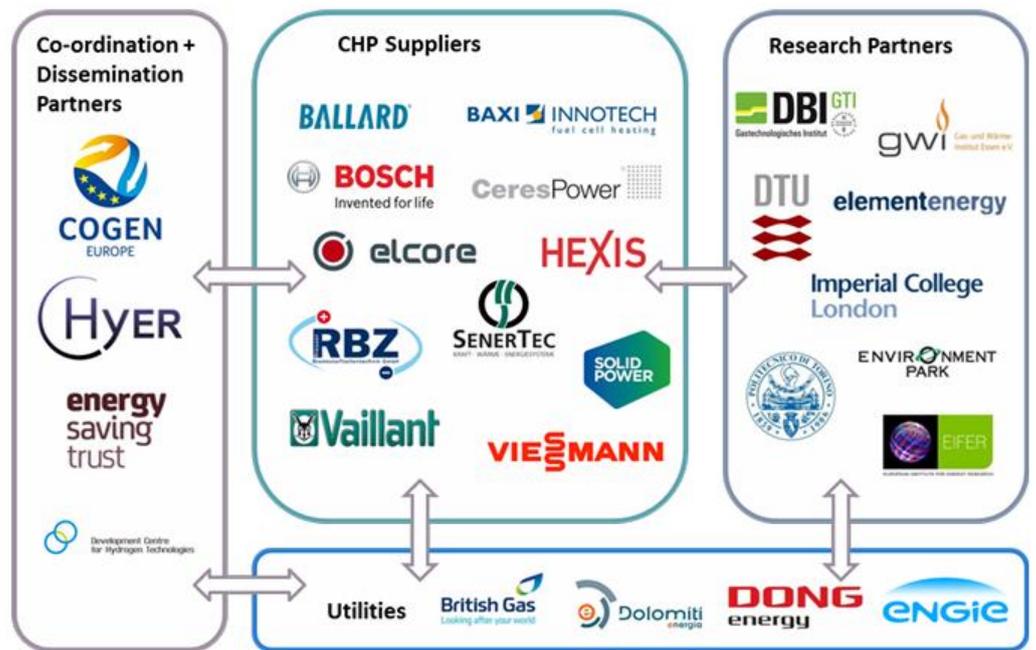
欧盟实施 Ene-field 和 PACE 两大 SOFC 项目推动行业商业化。欧盟支持了众多 SOFC 和 SOEC 项目，例如 Ene-field 和 PACE 项目，分别开发了 1046 套和 2800 余套的微型固体氧化物燃料电池系统，进而推动行业商业化。

图表76: 欧盟实施两大 SOFC 项目推动行业商业化

| 事件 | 具体情况 |
|----------------------------------|--|
| 2012-2017 年 欧盟实施 Ene-field 项目 | 2012 年，欧盟实施 Ene-field 项目，项目包含欧盟 12 个成员国、9 家燃料电池系统制造商，项目投资 5300 万欧元，研发了数十款 SOFC 及 PEMFC 热-电联供系统。该项目已在 10 个欧盟成员国部署了 1000 多个微型热电联产机组，这是欧洲燃料电池微型热电联产部署量的一个变化，也是将该技术推向商业化的重要一步。 |
| 2016-2023 年 PACE 项目 | PACE 是一个为期 7 年的项目，自 2016 年以来，已在 9 个欧洲国家部署了 2800 多台高效燃料电池微型热电联产机组。项目耗资 9000 万欧元，以 Ene-field 的成功为基础，该项目汇集了 5 家领先的欧洲供应商（BDR Thermea, Bosch, SolydEra, Sunfire 和 Viessmann）。 |

来源: Enefield 官网、PACE 官网、国金证券研究所

图表77: Enefield 项目参与企业众多

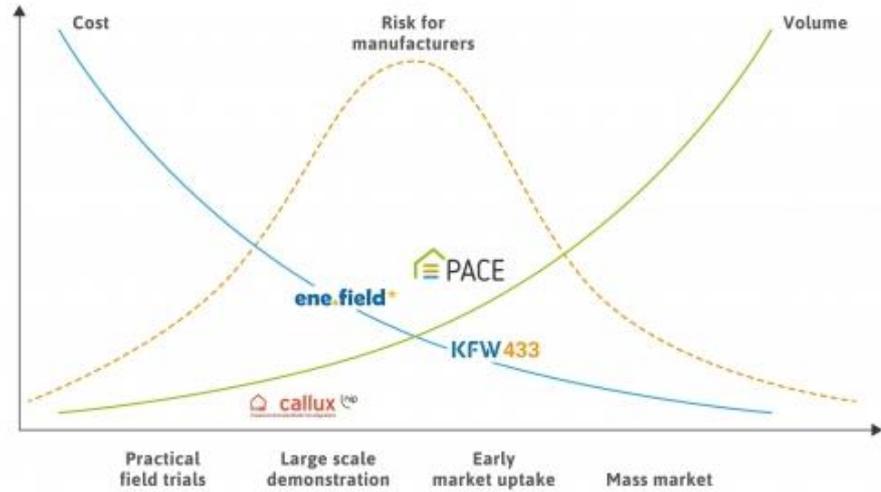


来源: Enefield 官网、国金证券研究所



欧洲市场中德国发展最为迅速。德国联邦政府于 2016 年发起了 Micro-CHP 市场激活计划—KfW 433，根据输出功率的大小为装置安装提供 7050-28200 欧元的补助金。该项目在 2017 年的计划支持 1500 套 250W-1.5kW 的装置，长期目标是每年为 7.5 万套装置提供补助。目前，德国已累计投放 5 万多套 Micro-CHP，是欧洲 Micro-CHP 投放最多的国家。除德国以外，荷兰、丹麦、瑞典、比利时等国在该领域也有布局。

图表78：德国 KfW 433 计划推动燃料电池微型热电联产行业更接近大众市场



来源：PACE 官网、国金证券研究所

德国 Sunfire

公司是基于碱性以及固体氧化物技术生产工业电解槽的全球领导者。近期聚焦于 SOEC 系统，2021 年试运营了目前世界上最大的 250kW 的 SOEC 电解制氢示范系统，每 1h 可生产 5.7kg 的氢气。近年 Sunfire 正在迅速扩大其生产能力，并筹集了更多资金，为当今业内资金最充足的电解槽生产商之一，目标到 2030 年在整个欧洲安装数 GW 的电解产能。目前已出货 100+MW SOEC，效率达到 88%_{LHV, AC}。

- 2022 年获得 2.15 亿美元 D 轮融资，并签署高达 640MW 的电解槽协议。
- 2023 年 8 月，Sunfire 通过欧洲共同利益重要项目 (IPCEI) 从德国联邦政府获得 1.69 亿欧元，在 2022 年获得 6000 万欧元，用于建设固体氧化物和加压碱性电解槽的自动化生产，此项目为欧盟 H2Giga 项目的一部分。
- 2024 年 3 月，Sunfire 获 5 亿欧元的股权、贷款和政府补助，包括股权融资 2.15 亿欧元 (合 2.33 亿美元)，从欧洲投资银行 (EIB) 获得 1 亿欧元贷款，以及此前宣布但尚未动用的 2 亿欧元支持资金。

图表79：Sunfire-HyLink SOEC

图表80：Sunfire-HyLink Alkaline



来源：Sunfire 官网、国金证券研究所

来源：Sunfire 官网、国金证券研究所

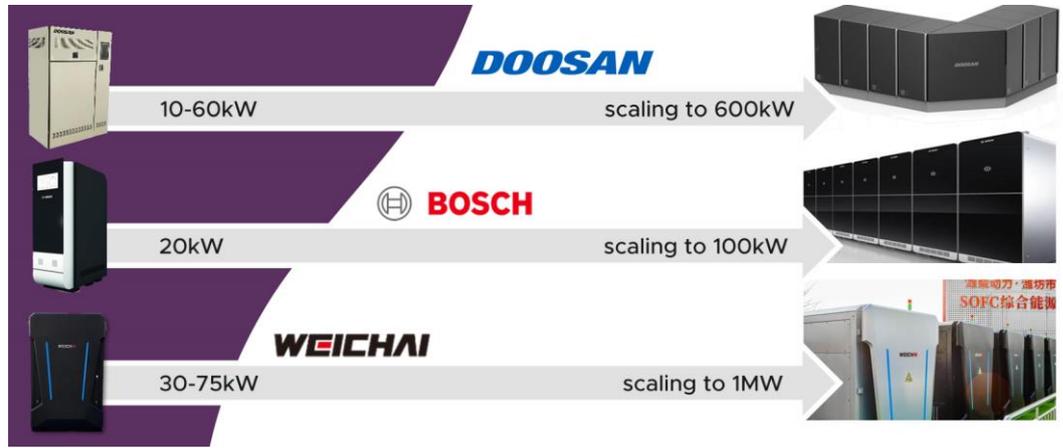
英国 Geres Power

公司是新一代、低成本金属支撑燃料电池技术的领导者。其 Steel Cell 技术，源自英国



帝国理工学院，已持续研究开发近 16 年。2019 年 Ceres Power 宣布成功开发了首个专为氢燃料设计的零排放热电联产系统，产品在住宅、商业发电和交通领域都有商业化应用。近年来 CeresPower 也在积极推固定式发电和 SOEC 的市场。2018 年，CeresPower 被潍柴动力收购了 20% 的股份，已经跟潍柴动力、博世、康明斯共同开发出 30kW 的商用车增程器。

图表81: Ceres SOFC 技术应用与斗山、博世和潍柴共同开发



来源: Ceres Power 官网、国金证券研究所

德国 Bosch

博世积极布局 SOFC 产业链，2018 和 2019 年两次投资英国电堆生产商 Ceres Power，引进电堆生产线，并且开发出 10kW 的 SOFC 热电联供系统，发电效率达到 60%，其主要的应用市场是小型的工商业和数据中心。

图表82: 博世 SOFC 系统



来源: 博世官网、国金证券研究所

爱沙尼亚 Elcogen

Elcogen 的产品是 SOFC 单片电池和电堆，SOFC 在将燃料转化为电能的效率达到 74%。从 2021 年开始，公司计划每年生产约 50MW 的电池，在 SOFC 系统方面则是与 Magnex 公司合作。Magnex 是日本 SOFC 系统开发商，正在开发 250W 的 SOFC 便携式系统和 1~5kW 的 SOFC 沼气/乙醇热电联产系统。



图表83: Elcogen 产品涵盖 SOFC 和 SOEC



来源: Elcogen 官网、国金证券研究所

3.4 韩国: SOFC 主要应用于公用事业领域, 主流技术来自国外引进

韩国 SOFC 主要应用于公用事业领域, 市面上的主流技术来自国外的 Ceres Power 和 Bloom Energy 两家公司, 由斗山和 SK E&C 分别引进推广。2019、2020、2021 年分别布署达 370.7MW、464MW、605MW。2024 年, 韩国造船与海洋工程公司 (HD KSOE) 也将投资 8000 万美元收购燃料电池专门企业 Convion, 进入 SOFC 和 SOEC 市场。斗山也完成了世界首个船舶用 SOFC 产品挪威船级社环境测试, 300KW 级 SOFC 开始量产验证。

图表84: 韩国 SOFC 公司技术主要来源自引进

| 公司 | 产品类型 | 功率 | 技术来源 | 应用领域 |
|--------------|-------|-------------------|--------------------|-------|
| POSCO Energy | MCFC | 300kW、2.5MW | FuelCell Energy | 公用事业 |
| 韩国斗山 | PEMFC | 600W、1kW、5kW、10kW | FuelCell Energy | 住宅/商业 |
| | PAFC | 400kW | Clearedge Power | 公用事业 |
| | SOFC | 5~20kW | Ceres Power | 商业 |
| S-FuelCell | PEMFC | 1~10kW | CETI, GS Fuel Cell | 商业 |
| | PAFC | 100kW | S-FuelCell | 公用事业 |
| SK E&C | SOFC | 300kW | Bloom Energy | 公用事业 |
| HD KSOE | SOFC | 60kW、250kW | Convion | 商业 |

来源: Intralink Research、World energy、国金证券研究所

在引进技术的同时, 韩国政府也支持本土企业和机构对 SOFC 的研发制造。韩国政府曾扶持三星及 POSCO Power 进行家用型 SOFC 系统开发, 并提出 2030 年发电效率 40%, 热效率 50%, 持续时间 9 万小时, 成本 5000 美元等目标。韩国也拥有本土 SOFC 上下游的专门企业: KCERACELL 是 SOFC 部件原材料公司、提供正负极、电解质和连接板材料; HNPPOWER 是一家氢能和氢燃料电池设备公司, 具有 SOFC 电堆技术。

在韩国, 1000 平方米以上的楼层需要保证至 30% 的能耗来自可再生能源。若住宅和商业用户使用太阳能发电、太阳能供暖、燃料电池、地热和风能的任意一种, 韩国产业通商资源部 (MOTIE) 将为其提供补贴。其中, 补贴燃料电池 80% 的安装费, 最多不超过 9900 韩元/kW, 住宅用燃料电池补贴不超过 10000 韩元/kW。韩国政府还为住宅、商业和公用事业燃料电池提供特价天然气, 大约比正常价格低 6.5%。



图表85: 斗山与 KHNP 构建测试平台并进行超过 2000 小时的实用型测试



来源: 电动汽车网、国金证券研究所

图表86: 韩国打造船舶用 SOFC



来源: YNA、国金证券研究所

斗山集团

斗山集团 (Doosan Group) 从 2014 年收购美国 Clear Energy Power (前 UTC) 开始进军氢燃料电池发电市场, 截至 2024 年已经拥有 PEMFC, PAFC, SOFC 的核心技术, 累计装机超过 700MW。今年 50MW 工厂竣工后, 斗山计划从 2025 年开始正式进军 SOFC 市场, 并且也在投入基于 SOFC 技术的船用燃料电池技术的开发, 计划在年内完成整个 SOFC 系统的测试和认证, 并交付船用 SOFC。

图表87: 斗山集团拥有 PEMFC, PAFC, SOFC 的核心技术

| 事件 | 具体情况 |
|------------------|---|
| 2020 年 7 月 | 由斗山集团投资建设的大山燃料电池发电厂正式投入运营。该发电厂装配了 114 台斗山 M400 型号 PAFC 燃料电池, 产品功率为 400kW。发电厂氢气来源为工业副产氢, 燃料电池总装机量达到 50MW, 是为目前全球最大燃料电池发电项目, 发电量可达 40 万 MWh, 约可为附近 16 万户家庭提供 24 小时电力。 |
| 2020 年 10 月 19 日 | 已经保有 PAFC 技术的斗山集团与英国 Ceres Power 签订战略合作协议, 布局 SOFC。该协议主要包含两个部分内容: (1) 非排他性技术授权; (2) 2023 年底之前投资 724 亿韩元 (约合 4.2 亿人民币) 建成产能 50MW SOFC 产线, 2024 年实现量产。 |
| 2021 年 3 月 | Doosan Fuel Cell 与 Korea Offshore & Shipbuilding 签署谅解协议, 共同开发 SOFC, 目标是实现电池和电堆的本土化生产, 并从 2024 年起在韩国大规模生产 SOFC 系统。 |
| 2023 年起 | 斗山与韩国 Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd. (KHNP) 共同构建测试平台并进行超过 2000 小时 (约 3 个月) 的实用型测试, 验证中低温型 SOFC 的基本性能及安全性, 并确保正式推进事业的运行数据。 |
| 2024 年 | 斗山燃料电池公司在韩国群山投产的 50MW 的 SOFC 工厂也于 2024 年竣工, 包含 SOFC 的核心部件 Cell Stack 的量产、SOFC 系统的制作及商业化运营管理。 |
| 2024 年 3 月 | 船用 SOFC 的核心部件单元电堆通过了世界三大船级社之一的挪威船级社* (DNV, Det Norske Veritas) 的环境测试标准。斗山燃料电池计划在年内完成整个 SOFC 系统的测试和认证, 并交付船用 SOFC。 |

来源: DFCC、香橙会、国金证券研究所

SK E&C

SK Ecoplant 是 SK 集团和 Bloom Energy 共同成立的合资公司, 一直致力于实现 SOFC 在韩国的本地化。2020 年 1 月, SK 集团与 Bloom Energy 成立合资企业, 实现了 SOFC 零部件的国产化, 并在庆尚北道龟尾市完成了 Bloom SK 燃料电池制造工厂的建设, 开始实现 SOFC 的本土化。2023 年 12 月, SK Ecoplant 与 Bloom Energy 和两家韩国中小型公司 (Amosense、T&E Korea) 签署了建立固体氧化物燃料电池 (SOFC) 供应链并加速 SOFC 国产化的协议。具体看, Amosense 将促进 SOFC 电解质载体 (衬底) 的国产化, T&E Korea 将促进 SOFC 供氧装置 (鼓风机) 的国产化和生产。Bloom Energy 为 SOFC 组件的韩国开发提供技术支持, 并努力在韩国本土和国际上分销。

SOEC 方面, 2021 年 SK Ecoplant 与美国 Bloom Energy 的合资公司生产基于 SOEC 技术的绿氢, 2022 年建立了一个 130kW 的 SOEC 设施。并且在未来三年内, 两家公司将扩大现有



业务，2022年至2025年期间至少增加500MW的电力合同，对应约45亿美元合同额。此外，SK集团将向Bloom Energy投资约5亿美元收购股权。

图表88: SK Ecoplant 在韩国大邱的 Fuel Cell 项目



来源: SK 官网、国金证券研究所

3.5 中国: 起步较晚, 尚处工业示范阶段

国外固体氧化物燃料电池的研发方向主要聚焦于降低成本和提高稳定性方面, 中国则起步较晚, 尚处于初步探索阶段。目前美国、日本的 SOFC 技术和产品都对国内禁止出售和转让, 国内需要发展自己的 SOFC 技术。中国的 SOFC 研究开发工作主要在科研院所和高校, 资金来源主要是国家或地方科技项目支持。经过几十年的积累, 已经初步掌握了从原材料生产、大面积单电池批量生产制备、电堆组装到整个 SOFC 系统的设计开发技术。但是同欧美日的先进水平及商业化应用相比, 我国的 SOFC 产业处在工业示范向商业应用的过渡阶段, 示范案例包括晋煤集团 15kW SOFC、华清京昆 1 kW SOFC、国家能源 20 kW SOFC、索福人 25 kW SOFC、潍柴 30 kW SOFC、京瓷 700W SOFC。目前国内 SOFC 发电系统功率范围为 1-35kW, MW 级产线超 10 条。

图表89: 国内 2024 年 SOFC 示范项目

| 时间 | 项目示范应用案例 |
|-------------|---|
| 2024 年 12 月 | 12 月 16 日, 由中广核研究院和中海石油气电集团有限责任公司联合研发的 100kW 固体氧化物燃料电池 (以下简称 SOFC) 发电系统完成满功率出厂测试并包装发货, 标志着国内首套最大单机功率百千瓦级高温燃料电池发电系统研制成功。 |
| 2024 年 12 月 | 潍柴动力开发的固体氧化物燃料电池 (SOFC) 热电联供示范项目在西安港务区顺利建成投运。该项目位于燃气集团新能源公司所属新港公司园区内, 是在公司已有的“地热+光伏+储能+氢能”智慧综合新能源示范工程基础上, 引入潍柴全球首款大功率固体氧化物燃料电池。进一步推动分布式新能源、微电网和大电网的有机融合与协同发展。 |
| 2024 年 9 月 | 中广核 6MW 副产氢 SOFC 项目公示。项目采用先进固体氧化物燃料电池技术, 利用工业副产氢进行高效发电, 打造绿色循环经济和氢能高效利用应用场景。主要建设 6MW 固体氧化物燃料电池发电机组及配套设施, 发电机组由数十套百千瓦级以上发电系统组成, 并由能量管理系统灵活调度。项目建成后年发电量可达千瓦时, 每年可减少碳排放 4 吨, 也可以用于分布式调峰。 |
| 2024 年 6 月 | 清能股份旗下豫氢动力交付的全国首个 2MW 级氢燃料电池热电联供示范项目试运行成功。该项目是开元化工利用烧碱副产品氢气, 建设集氢燃料提纯和氢能发电功能为一体的 2MW 级氢燃料电池热电联供示范项目。预计将年消耗开元化工氢气 1600 万标方, 年可发电约 1513 万度, 年节省电费约为 934 万元; 节省标煤 0.18 万吨, 减排二氧化碳 0.79 万吨, 节省蒸汽费 355 万元。 |
| 2024 年 5 月 | 由国家能源集团牵头、北京低碳清洁能源研究院承担的“CO2 近零排放的煤气化燃料电池发电系统开发”项目成果通过中国煤炭工业协会鉴定, 项目研究成果达到了“国际领先水平”, 并建议开展更大规模的煤气化燃料电池 (IGFC) 发电系统工程验证与示范。该项目创建了 CO2 近零排放的 IGFC 发电技术体系, 突破了 IGFC 系统关键技术, 建成了首个兆瓦级 IGFC 试验基地, 研制了首套 CO2 近零排放的百千瓦级 IGFC 示范系统。项目列入了国家“十四五”能源领域科技创新规划, 还可以进行分布式热电联供或者耦合逆向电解 (SOEC) 实现氢储能。 |

来源: 氢云链、国金证券研究所

美国通过 SECA 计划、日本通过 Ene-Farm 计划、欧盟通过 Ene.Field 等计划, 都已经在



SFOC 领域取得了显著的成果。我国在 SOFC 关键技术和系统集成方面与发达国家有较大差距，但在 SOFC 电堆最核心材料方面具有优势技术和产业化企业。《中国战略性新兴产业发展报告》、《能源技术革命创新行动计划（2016—2030 年）》、《能源技术创新“十三五”规划》等战略规划文件均将 SOFC 发展列为关键能源创新技术，借助国家政策优势和对高效清洁发电技术的的市场需求，加大对 SOFC 核心技术攻关和关键设备研发。

图表 90：国家和地方出台相关政策推动 SOFC 示范

| 政策 | 具体内容 |
|------------------------------|--|
| 《氢能产业发展中长期规划（2021-2035 年）》 | 推进固体氧化物电解池制氢、光解水制氢、海水制氢、核能、高温制氢等技术研发。 |
| 《能源技术革命创新行动计划（2016-2030 年）》 | 支持固体氧化物燃料电池（SOFC）发电技术的攻关。 |
| 《中国制造 2025—能源装备实施方案》 | 百千万至兆瓦级固体氧化物燃料电池（SOFC）发电分布式能源系统：突破 SOFC 电催化材料、膜电极、高温双极连接体关键技术，掌握长寿命（>40000h）的管型和板型 SOFC 及其关键部件的批量制备与生产技术、系统集成技术。 |
| 《广东省能源发展“十四五”规划》 | 基于 SOFC 电解质隔膜片等核心零部件制造方面全球领先的优势，发展 SOFC 及其分布式发电成套装备，推广高温燃料电池冷热电三联供应用示范。 |
| 《北京市氢能产业发展实施方案（2021-2025 年）》 | 推广质子交换膜燃料电池、固体氧化物燃料电池在热电联供、固定式发电、备用电源以及微电网等领域的应用，开展移动式燃料电池充电装置试点。以新建数据中心和通信基站等为应用场景，推动质子交换膜燃料电池、固体氧化物燃料电池、甲醇重整制氢、高安全性固态储供氢等技术与产品的试点应用。 |

来源：政府官网、国金证券研究所

SOFC 产业链主要包括单电池及上游材料、电堆及其辅助设备（BOP）、系统集成和应用部分。电池层面，国内数家单位已经掌握了大面积单电池量产技术，耐久性可达到上万小时，潮州三环尤为突出。在电堆方面，国内企业在电池结构设计、单电池组装方面仍然比较粗放，电池密封和连接体结合强度在电池长期运行中还存在不稳定等问题，这很大程度上影响着 SOFC 系统的使用寿命。比如，目前国内的水平大概在数千小时到 1 万小时左右，但 SOFC 商业化系统的期望是 10 年以上。在电堆辅助系统（BOP）上，包括预重整器、加热器、压缩机、电压调节器、逆变器、换热器等，目前国内还没有专业生产公司，主要原因是 SOFC 市场还未起量、涉足企业的积极性不高，参与 SOFC 的开发和产业化的企业不多；缺乏相应的配套政策，补贴力度与欧美等国家相比较少。除了配套部件（BOP）产业链问题，还有系统效率优化问题、大功率系统的构建问题、电池寿命问题等。

图表 91：国内 SOFC 产业链



来源：势银、国金证券研究所



我国应该加快研发固体氧化物燃料电池系列关键技术，实现固体氧化物燃料电池系统的规模性示范，面向 2035 年进行兆瓦级固体氧化物燃料电池规模化的示范与试运行。目前我国固体氧化物燃料电池产业化发展仍存在很多亟待解决的问题，例如：1) 应用基础研究薄弱，关键技术缺失；2) 固体氧化物燃料电池产业链长、国内技术无法共享；3) 缺少足够的资金投入，产业化成本较高等等。针对此，一方面应该加强突破关键性技术，同时立足国情，坚持多元应用与示范先行，因地制宜开展固体氧化物燃料电池技术的商业应用示范。

图表 92：推动国内 SOFC 发展的措施

| 项目 | 建议 | 具体内容 |
|---------|---|--|
| 关键性技术 | 1. 开发低成本高性能单电池批量化制备技术 | 加强低成本、高性能关键元件产业化技术研发和批量生产，重点解决产品一致性、稳定性和长寿命等。 |
| | 2. 突破高一一致性可靠性电堆设计、集成及产业化技术 | 对于高温运行的电堆单元工程化集成技术及批量化装配技术，重点解决一致性和稳定性。 |
| | 3. 掌握高效系统集成、控制管理及示范技术 | 采用大功率的电堆，虽然开发困难，但系统相对简单，传热宽容度好。 |
| | 4. 拓展固体氧化物燃料电池产业化应用场景 | 国家需要在船舶领域对固体氧化物燃料电池技术进行引导，实现固体氧化物燃料电池电力系统在船舶上应用。 |
| 保障措施与政策 | 1. 加快制度体系建设，加强固体氧化物燃料电池技术及产业发展的顶层设计 | 与欧美等发达国家和地区相比，我国固体氧化物燃料电池补贴力度还不够大，产业链不够完善，要从政策上鼓励既具有核心技术又有长远发展规划和发展潜力的企业加大投入。 |
| | 2. 强化财税金融支持，充分发挥市场在资源配置中的决定性作用，突出企业主体地位 | 发挥好财政性资金作用，支持开展固体氧化物燃料电池重大技术装备的试点示范和前沿关键技术研发应用。 |
| | 3. 坚持创新驱动发展 | 注重发展核心技术，尤其要重视关键材料与部件的国产化。 |
| | 4. 完善标准规范体系，形成具有自主知识产权的技术标准 | 尽快推动完善固体氧化物燃料电池产业技术标准体系，支持开展团体标准、行业标准研究，加快构建国家标准、行业标准和团体标准相结合的标准化协同创新机制，超前部署固体氧化物燃料电池创新领域标准。 |

来源：《我国固体氧化物燃料电池产业发展战略研究》、国金证券研究所

不少能源巨头公司已经开始了 SOFC 技术的储备。比如，潍柴动力在 2018 年就斥资 4000 万英镑收购了英国公司 Ceres 的 20% 股份；中广核集团、晋煤集团等已经开展了相应的 SOFC 破冰，推进相关示范项目落地。国家能源集团、中石油、中石化、广东能源集团、南方电网等央企也在积极布局 SOFC 产业，基于企业自身有燃料、有市场、偏向于实际应用。另外，自 2022 年以来，壹石通、中自科技、佛燃能源、新奥股份、中环环保等企业纷纷布局 SOFC 领域。

三环集团

三环集团已成为全球 SOFC 电解质隔膜、SOFC 单电池的主要供应商，是国家重点研发计划 SOFC 电堆工程化开发的牵头单位，具有一流的技术基础和技术团队。潮州三环（集团）股份有限公司是国内最早研发生产 SOFC 的公司，出货量最大的是电解质隔膜、单电池，同时具备电堆量产能力，系统则主要有旗下子公司 CFCL 在德国的生产基地完成，以 1.5kW 系统为主。目前潮州三环为全球最大的 SOFC 电解质隔膜供应商（供货 Bloom Energy），欧洲市场上最大的 SOFC 单电池供应商。

公司于 2004 年开始开展 SOFC 电解质隔膜开发和生产业务；2012 年开始批量生产 SOFC 单电池；2015 年收购澳大利亚 CFCL 公司，获得其电堆和小功率 SOFC 系统技术基础；2016 年将 SOFC 专利授权 SOLIDpower 公司使用，并且为其供应单电池；2017 年开始向国内市场推出 SOFC 电堆。2022 年成功运行了由 3 个 35KW 模组组成的 100KW 示范系统。2023 年 1 月同广东省能源集团有限公司合作开展的“210kW 高温燃料电池发电系统研发与应用示范项目”，在广东惠州天然气发电有限公司顺利通过验收。



图表93: 三环集团深圳研究院 SOFC 系统研发中心



来源: 三环集团官网、国金证券研究所

潍柴动力

潍柴动力 2018 年 5 月战略投资全球领先的 SOFC 技术公司英国 Ceres Power, 成为其最大股东, 并与其携手在中国潍坊成立合资公司, 在固态氧化物燃料电池领域展开全面合作。合资公司将使用 Ceres Power 独有的 SteelCell 技术, 产销燃料电池系统、电堆和电池片, 应用于客车、卡车和特定发电市场。目前潍柴动力已经实现了 SOFC 技术的工程化突破, 掌握新一代 SOFC 关键核心技术, 其 2023 年 2 月发布的 120KW 产品是全球首款大功率金属支撑 SOFC, 净发电效率超过 60%, 热电联产效率达到 92.55%, 在大型 SOFC 系统中全球最高。

图表94: 潍柴发布全球首款大功率金属支撑商业化 SOFC

图表95: 潍柴 SOFC 产品累计示范运行超过 3 万小时



来源: 潍柴动力官网、国金证券研究所



来源: 潍柴动力官网、国金证券研究所

壹石通

壹石通是全球锂电池用勃姆石行业龙头, 主营产品包括新能源锂电池涂覆材料、电子通信功能填充材料、低烟无卤阻燃材料等三大类。近年来, 壹石通入局氢赛道, 布局减碳固碳技术领域的新产品, 瞄准固体氧化物电池 SOFC 二次创业。

2022 年 10 月, 壹石通发布公告拟由全资子公司安徽壹石通材料科学研究院有限公司作为实施主体, 投资建设壹石通运营中心项目, 预计总投资近 4 亿元; 2023 年 2 月, 与中国科学技术大学先进技术研究院发起共建“固体氧化物燃料电池联合实验室”, 致力于实现零碳循环和二氧化碳的资源化利用; 2023 年 12 月, 公司在合肥南岗的固体氧化物能源系统建设项目开工, 总投资约 12.1 亿元, 建设周期为 3 年, 将形成年产 1GW 固体氧化物能源系统的生产规模 (含 SOFC 和 SOEC)。

中自环保

中自环保科技股份有限公司是一家专注于新材料、新能源的研发、生产和销售的高新技术



企业，是我国移动污染源尾气处理催化剂领域的少数主要国产厂商之一。在 SOFC 领域，阳极支撑电池开发出可重复的批量制备工艺技术，开发出千瓦级的阳极支撑电堆的装堆技术并实现近百小时的短堆运行；金属支撑电池技术正在按计划开发中。

中国石油

2023 年 8 月，中国石油首套千瓦级固体氧化物燃料电池（SOFC）热电联供系统开车成功并稳定运行超千小时。石化院 SOFC 团队立足中国石油绿色转型重大需求，高质量完成系统设计集成、安装调试、优化运行等任务，千瓦级 SOFC 热电联供系统试车成功，实现了发电效率 $\geq 40\%$ 、蒸汽效率 $\geq 25\%$ 、热电综合效率 $\geq 80\%$ 。

中国船舶

中国船舶 712 所长期聚焦于燃料电池领域的应用。2023 年 10 月 24 日，中国船舶 712 所获得中国船级社（CCS）颁发的“船用固体氧化物燃料电池发电系统原理认可证书”。这是国内首次船用 SOFC 发电系统原理认可，起到了行业示范引领作用。

新奥股份

新奥天然气股份有限公司业务覆盖平台气交易、天然气分销、产业智能平台建设与运营、基础设施运营、综合能源、工程建设及安装业务在内的天然气全场景。此外也积极在氢能、生物质等新能源领域 储备技术并拓展业务。

在 SOFC 项目方面，公司牵头负责国家科技部重点研发计划《固体氧化物燃料（SOFC）电池热电联供关键技术研究》课题，实现将天然气、焦炉煤气、生物沼气等多种复杂燃料的化学能高效转化为电能和热能，报告期内已完成 30 kW SOFC 工程样机的技术开发、建造，和以焦炉煤气为燃料的热电联供工业应用示范。整体系统的净发电功率平均达 35.6 kW（最大达到 47 kW），发电效率达 60.72%，热电联供效率超过 95%，连续平稳运行时间达 3000 小时，并于 2023 年 11 月完成了科技部专家组现场见证工作。

四. 投资建议

分布式能源应用趋势下，SOFC 凭借更高的能源转换效率、更多样的燃料选择，在数据中心冷热电联供、船舶电源、煤气化发电等场景应用前景广阔。美国、欧洲、日本等国家基本实现了 SOFC 的商业化运行，我国的 SOFC 产业处在工业示范向商业应用的过渡阶段，商业化曙光开始显现，拥有 SOFC 原材料生产、单电池生产能力或 SOFC 整体系统的设计开发技术能力的企业最具备发展潜力：三环集团（SOFC 系统，也是全球 SOFC 隔隔板主要供应商之一）、潍柴动力（SOFC 系统，收购 Ceres Power）、佛燃能源（SOFC 系统）、壹石通（SOFC 系统）、新奥股份（SOFC 系统）。

五. 风险提示

政策支持和资本投入力度不及预期：行业尚处商业化初期，商业化初期仍需国家政策的支持和财政补贴，以及资本的大力投入，以促进相关配套产业链不断完善，形成良性循环，若支持和投入力度不足，产业发展速度将受到影响；

技术研发缓慢：我国的 SOFC 系统还处在工业示范阶段，相关技术发展及商业化应用面临诸多难题，例如长寿命、高可靠性电堆的设计和生制备技术，高效、长周期稳定运行的大功率系统等，若技术开发突破进程缓慢，产业规模化应用时间将被拉长；

商业化进程不及预期：我国距离欧美日的先进水平及商业化应用相比仍有差距，需要进一步发展，若技术发展和示范应用效果不及预期，则固体氧化物燃料电池行业商业化进程受到影响。



行业投资评级的说明：

买入：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 15%以上；

增持：预期未来 3—6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 5%—15%；

中性：预期未来 3—6 个月内该行业变动幅度相对大盘在 -5%—5%；

减持：预期未来 3—6 个月内该行业下跌幅度超过大盘在 5%以上。



特别声明：

国金证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。

形式的复制、转发、转载、引用、修改、仿制、刊发，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。经过书面授权的引用、刊发，需注明出处为“国金证券股份有限公司”，且不得对本报告进行任何有悖原意的删节和修改。

本报告的产生基于国金证券及其研究人员认为可信的公开资料或实地调研资料，但国金证券及其研究人员对这些信息的准确性和完整性不作任何保证。本报告反映撰写研究人员的不同设想、见解及分析方法，故本报告所载观点可能与其他类似研究报告的观点及市场实际情况不一致，国金证券不对使用本报告所包含的材料产生的任何直接或间接损失或与此有关的其他任何损失承担任何责任。且本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次公开发布时的判断，在不作事先通知的情况下，可能会随时调整，亦可因使用不同假设和标准、采用不同观点和分析方法而与国金证券其它业务部门、单位或附属机构在制作类似的其他材料时所给出的意见不同或者相反。

本报告仅为参考之用，在任何地区均不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告提及的任何证券或金融工具均可能含有重大的风险，可能不易变卖以及不适合所有投资者。本报告所提及的证券或金融工具的价格、价值及收益可能会受汇率影响而波动。过往的业绩并不能代表未来的表现。

客户应当考虑到国金证券存在可能影响本报告客观性的利益冲突，而不应视本报告为作出投资决策的唯一因素。证券研究报告是用于服务具备专业知识的投资者和投资顾问的专业产品，使用时必须经专业人士进行解读。国金证券建议获取报告人员应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况，以及（若有必要）咨询独立投资顾问。报告本身、报告中的信息或所表达意见也不构成投资、法律、会计或税务的最终操作建议，国金证券不就报告中的内容对最终操作建议做出任何担保，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。

在法律允许的情况下，国金证券的关联机构可能会持有报告中涉及的公司所发行的证券并进行交易，并可能为这些公司正在提供或争取提供多种金融服务。

本报告并非意图发送、发布给在当地法律或监管规则下不允许向其发送、发布该研究报告的人员。国金证券并不因收件人收到本报告而视其为国金证券的客户。本报告对于收件人而言属高度机密，只有符合条件的收件人才能使用。根据《证券期货投资者适当性管理办法》，本报告仅供国金证券股份有限公司客户中风险评级高于C3级(含C3级)的投资者使用；本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要，不应被视为对特定客户关于特定证券或金融工具的建议或策略。对于本报告中提及的任何证券或金融工具，本报告的收件人须保持自身的独立判断。使用国金证券研究报告进行投资，遭受任何损失，国金证券不承担相关法律责任。

若国金证券以外的任何机构或个人发送本报告，则由该机构或个人为此发送行为承担全部责任。本报告不构成国金证券向发送本报告机构或个人的收件人提供投资建议，国金证券不为此承担任何责任。

此报告仅限于中国境内使用。国金证券版权所有，保留一切权利。

| 上海 | 北京 | 深圳 |
|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 电话：021-80234211 | 电话：010-85950438 | 电话：0755-86695353 |
| 邮箱：researchsh@gjzq.com.cn | 邮箱：researchbj@gjzq.com.cn | 邮箱：researchsz@gjzq.com.cn |
| 邮编：201204 | 邮编：100005 | 邮编：518000 |
| 地址：上海浦东新区芳甸路1088号 紫竹国际大厦5楼 | 地址：北京市东城区建国内大街26号 新闻大厦8层南侧 | 地址：深圳市福田区金田路2028号皇岗商务中心 18楼1806 |



【小程序】
国金证券研究服务



【公众号】
国金证券研究