



山东能源集团
SHANDONG ENERGY GROUP

www.shandong-energy.com

低碳技术创新及煤化工与新能源耦合发展

李智

2022-09-22

大型煤气化及煤基新材料国家工程研究中心
NATIONAL ENGINEERING RESEARCH CENTER OF COAL GASIFICATION AND COAL-BASED ADVANCED MATERIALS

新能源研发创新中心
New Energy R&D and Innovation Center



碳排放是全球性议题

57国 建议决策



16国 发表声明



38国 写入政策



17国 通过立法



应对气候变化是当前及未来数十年世界各国共同面临的重大议题，以全球变暖为主要特征的气候变化成为整个人类社会共同面临的严峻挑战。全球已有128个国家以政策宣示或立法等不同方式提出碳中和目标，其中大部分国家或区域计划在2050年实现碳中和。

国家	碳达峰	碳中和
英国	20世纪70年代初达到峰值，截至2019年排放相对峰值水平下降约40%	2050年
德国	20世纪70年代末未达到峰值，截至2019年排放相对峰值水平下降约35%	2045年
美国	2007年达到峰值，截至2019年排放相对峰值水平下降约20%	2050年
日本	2013年为历史最高排放水平，未来趋势待观察	2050年
韩国	未达峰	2050年
中国	2030年	2060年

[1] <https://ec.europa.eu/clima/nets/zero/tracker>

[2] 趋势观察：国际碳中和行动关键技术前沿热点与发展趋势 (I). 中国科学院院刊, 2021, 36(9):5.

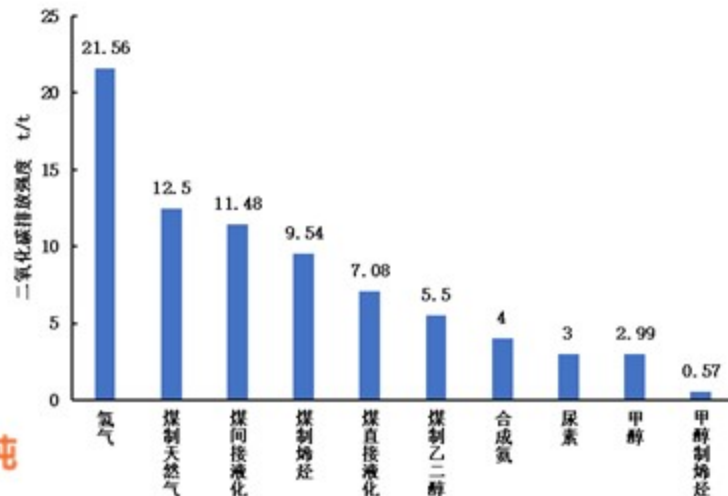
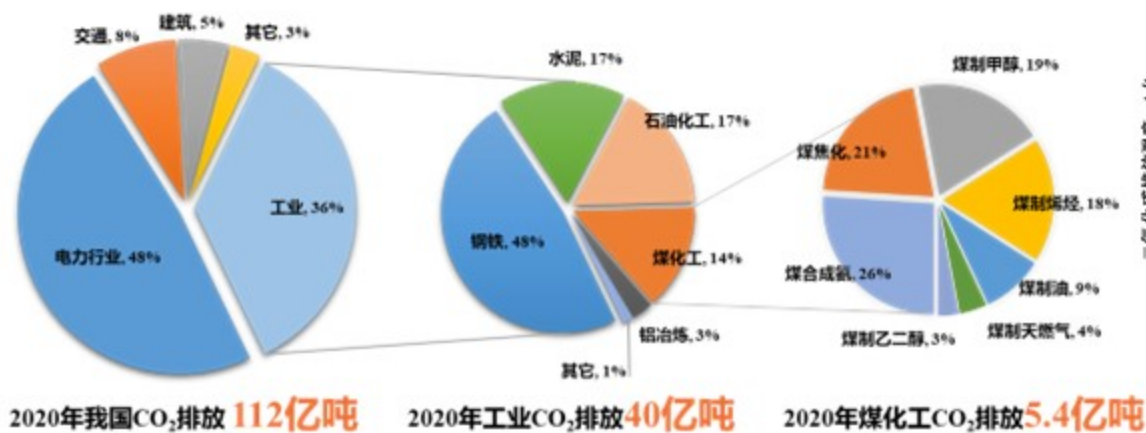
[3] 刘强, 袁钰. 碳中和产业路线图 (R). 北京: 社会科学文献出版社, 2022.1

[4] Vullo E. L., Monforti F. Fossil CO₂ and GHG emissions of all world countries[M]. 2019.

“双碳”目标下煤化工行业碳排放情况

2020年我国CO₂排放约112亿吨，主要来源是电力行业（48%）、工业（36%）、交通（8%）和建筑（5%），电力和工业是双碳攻坚的主战场。

我国煤化工行业CO₂排放量约5.4亿吨，约占我国碳排放总量的4.8%，是工业减碳的关键之一。



我国主要煤化工产品的二氧化碳排放强度

[1] 中国能源及燃料电池产业创新战略联盟. 中国能源及燃料电池产业发展报告 [R]. 北京: 人民日报出版社, 2020:20.

[2] 国际能源署. 中国能源体系碳中和路线图 [R]. 法国巴黎: 国际能源署, 2021.

[3] 中国能源统计年鉴

[4] 金玲, 郝成亮, 吴立新, 等. 中国煤化工行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2):9.

[5] 刘殿栋, 王钰. 现代煤化工行业碳达峰、碳中和方案探讨[J]. 煤炭加工与综合利用, 2021(5):6.

[6] 马守贵. 煤化工要闯过低碳技术关——访石油和化学工业规划院副院长史敬平(下)[J]. 中国石油和化工, 2010(8):3.

碳中和的基本逻辑和技术需求

2022年8月25日，丁仲礼院士在《党委中心组学习》杂志2022年第4期发表题为《深入理解碳中和的基本逻辑和技术需求》的文章，阐述了我国二氧化碳排放来源及实现碳中和的基本逻辑。



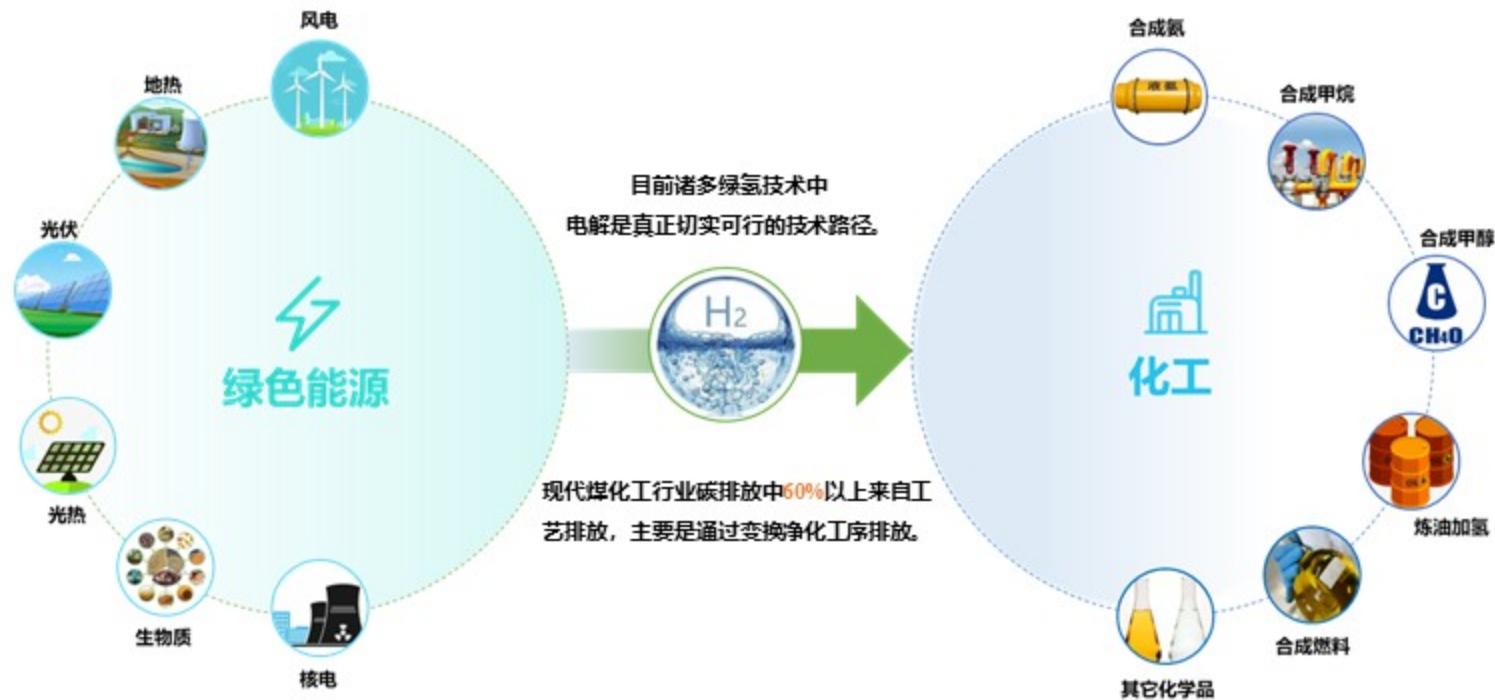
电力/热力生产过程产生的二氧化碳排放，其“账”应该记到电力消费领域头上。根据进一步研究，发现这45亿吨二氧化碳中，约29亿吨最终也应记入工业领域排放，约12.6亿吨应记入建筑物建成后的运行排放。所以我们说，**我国工业排放约占总排放量的68%**，如此之高的占比在所有主要国家中，也是绝无仅有的，这是我国作为“世界工厂”、处在城镇化快速发展阶段、经济社会出现压缩式发展等因素所决定的。

丁仲礼院士：根据我国二氧化碳的排放现状，我们就非常容易作出这样的推断：中国的碳中和需要构建一个“三端共同发力体系”：

- **第一端是电力端**，即电力/热力供应端的以煤为主应该改造发展为以风、光、水、核、地热等可再生能源和非碳能源为主。
- **第二端是能源消费端**，即建材、钢铁、化工、有色等原材料生产过程中的用能以**绿电、绿氢等替代煤、油、气**，水泥生产过程把石灰石作为原料的使用量降到最低，交通用能、建筑用能以**绿电、绿氢、地热等替代煤、油、气**。
- **第三端是固碳端**，……我们还得把“不得不排放的二氧化碳”用各种人为措施将其固定下来，其中最为重要的措施是生态建设，此外还有碳捕集之后的工业化利用，以及封存到地层和深海中。

绿电制气 (H₂、CO) 是链接新能源与化工的关键

氢同时具有能源属性和化工基础原料属性，是连接新能源与化工的重要媒介，氢既可助力可再生能源的消纳，又可作为化工原料大幅消减碳排放。绿电制气技术将和煤气化技术一样，望成为化工产业的基础技术之一。未来，掌握绿电制气技术与资源，就意味着掌握了发展权。

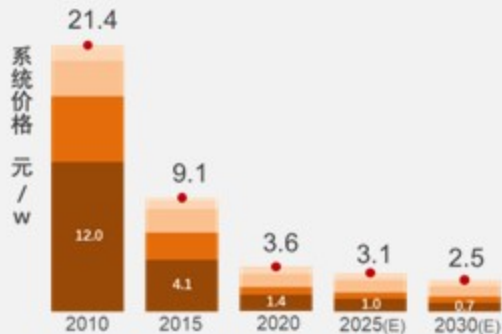


光伏成本下降为绿氢发展创造机遇

光伏

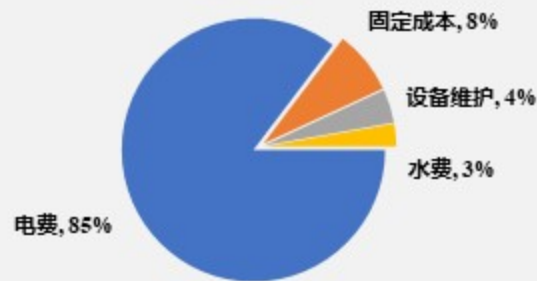


光伏电站投资成本走势 (元/W)



氢气

电解水制氢成本构成



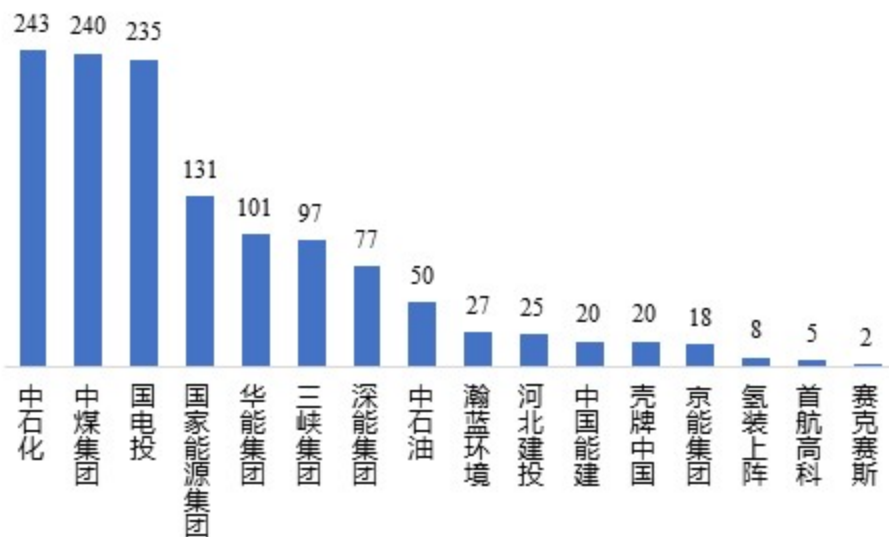
电解水制氢与煤制氢经济性对比



绿电制氢呈现爆发式增长

2022年1-7月我国绿氢项目呈井喷之势，新增项目超50个，近70个项目有最新进展，总投资近**1500亿元**。40多家企业陆续布局绿氢项目，国家能源集团、华能集团、国电投、河北建投、中石化、京能集团、三峡集团、华电集团、中国能建、中智天工与深能集团11家企业包揽了70个项目的近6成。除了上述能源化工企业以外，设备企业，煤化工企业如平煤神马也都相继入局绿氢行业。

2022年1-7月我国部分新增绿电制氢项目统计 (MW)



国内化工绿氢减碳项目典型案例

中石化--新疆库车绿氢项目



- ✓ 装机容量300MW
- ✓ 6.18亿kWh/年光伏电站,
- ✓ 9500+亩地
- ✓ 2万吨/年电解水制氢
- ✓ 21万Nm³储氢
- ✓ 2.8万Nm³/h输氢及配套设施
- ✓ 制氢成本1.6元/Nm³ (18元/kg)



宝丰能源--国家级电解水制氢项目

- ✓ 200MW光伏发电装置
- ✓ 20000Nm³/h电解水制氢装置
- ✓ 一期氢气1.34元/Nm³ (15元/kg)
- ✓ 二期氢气0.7元/Nm³ (7.84元/kg)

水电解制氢技术对比



碱性电解 (ALK)

- ✓ 堆电耗 (kWh/Nm³) : 4.2~5.0
- ✓ 工作温度 (°C) : 70~90
- ✓ 产气压力 (MPag) : ≤1.6
- ✓ 响应速度: 约120秒满载
- ✓ 特点:
 - 技术成熟TRL=9, 技术门槛较低
 - 无贵金属, 产业链完善, 投资成本低
 - 电耗高, 运维成本高



质子交换膜电解 (PEM)

- ✓ 堆电耗 (kWh/Nm³) : 3.7~4.8
- ✓ 工作温度 (°C) : 50~70
- ✓ 产气压力 (MPag) : ≤3.0
- ✓ 响应速度: ≤10秒满载
- ✓ 特点:
 - 技术成熟TRL=9, 技术门槛一般
 - 适合与可再生能源耦合, 秒级动态响应
 - 采用贵金属, 投资成本高

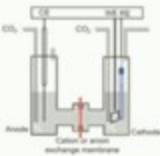
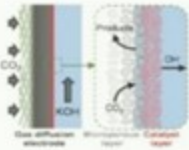
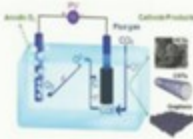
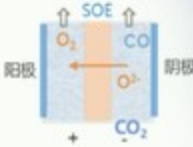


固体氧化物电解 (SOE)

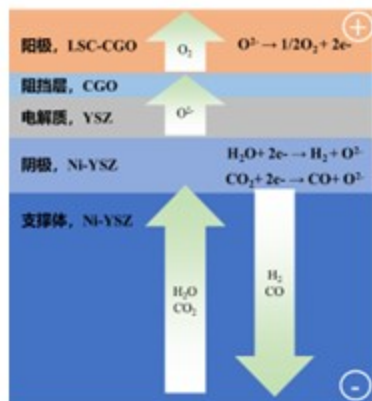
- ✓ 堆电耗 (kWh/Nm³) : 3.1~3.5
- ✓ 工作温度 (°C) : 600~900
- ✓ 产气压力 (MPag) : 常压
- ✓ 响应速度: 约600秒满载
- ✓ 特点:
 - 效率高, 电耗最低, 运营成本低
 - 适合与工业余热耦合, 效率更高
 - 无贵金属, 投资成本低
 - TRL=6, 技术门槛相对较高

[1] Schmidt O, Gambhir A, Staffell J, et al. Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(52):30470-30492.
 [2] Tucker M C. Progress in metal-supported solid oxide electrolysis cells: A review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020.
 [3] 米万良, 梁峻峰. 质子交换膜(PEM)水电解制氢技术进展及应用前景[J]. 石油炼制与化工, 2021, 52(10):10.
 [4] 简静, 王焰荣. 固体氧化物电解池水研究综述[J]. 陶瓷学报, 2014, 35(1):6.
 [5] 葛亮, 艾德生, 林旭平, 等. 固体氧化物电解池技术应用研究进展[J]. 科技导报, 2017, 35(8):10.
 [6] 邵乐, 王焰荣. 管式固体氧化物电解池制氢性能研究[J]. 陶瓷学报, 2018, 39(2):6.
 [7] 杜译学, 葛旭宏. 水电解技术发展及在绿氢生产中的应用[J]. 石油炼制与化工, 2021, 52(2):9.
 [8] Schiller G, Ansar A, Lang M, et al. High temperature water electrolysis using metal supported solid oxide electrolyser cells (SOE)[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2008, 39(2):293-301.

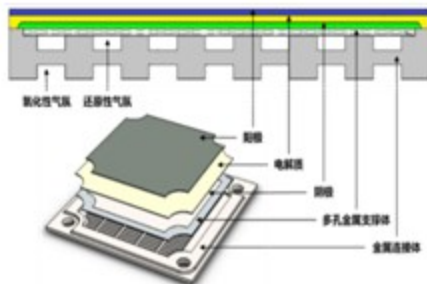
CO₂电解制CO技术对比

	H型电解	流动电解	熔盐电解	固体氧化物电解
原理				
技术特征	温度; < 100°C 电解质: 溶液 阴极: 金属 阳极: Pt	温度; < 100°C 电解质: 溶/聚合物 阴极: 金属 阳极: IrO ₂	温度; 400~800°C 电解质: 熔融盐 阴极: Fe, 合金 阳极: Ni, SnO ₂	温度; 500~1000°C 电解质: 固体氧化物 阴极: Ni, 钙钛矿 阳极: 钙钛矿
优缺点	低电流密度, 低能量转化效率, 不稳定	低能量转化效率, 不稳定	单一产物, 低能量转化效, 不稳定	高电流密度, 高法拉第效率, 高稳定性, 高能量转化效率

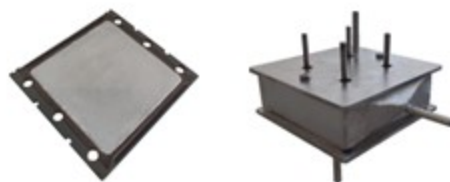
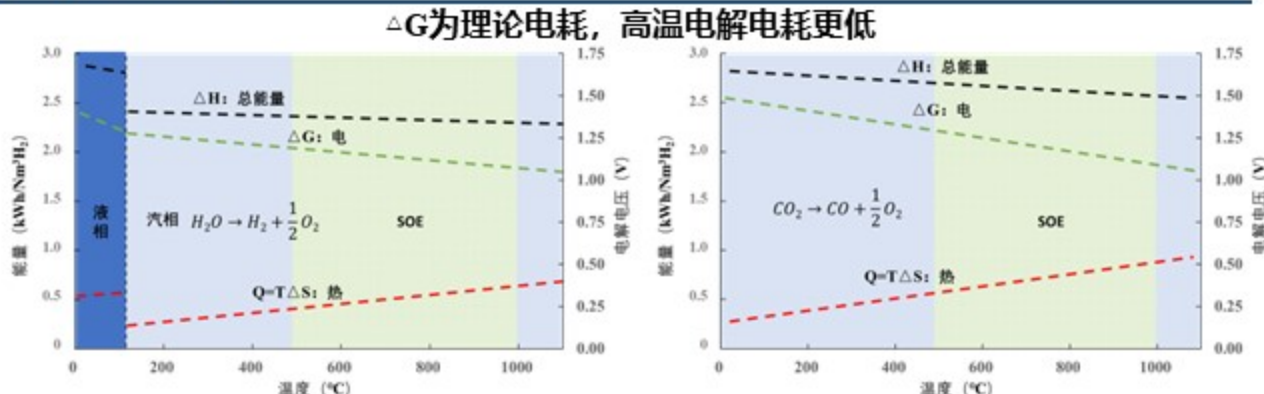
固体氧化物电解 (SOE)



SOE工作原理

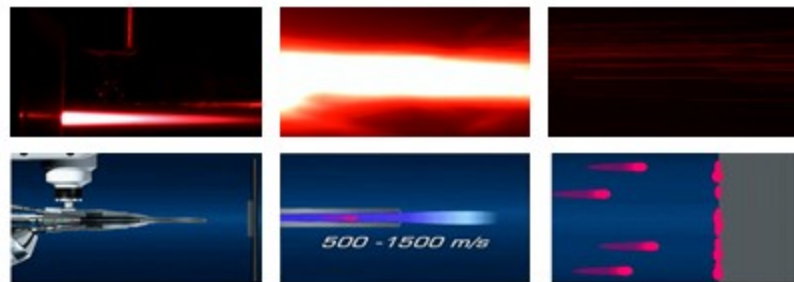


西安交通大学SOE单电池结构示意图



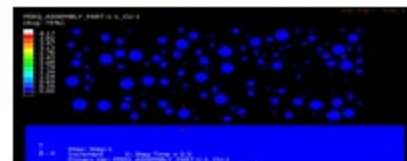
金属支撑SOC单电池及短堆

西安交通大学是国内唯一实现大面积金属支撑SOC电池制备且完成短堆集成的机构。



基于等离子喷涂制备SOE优势:

- 粒子沉积的相互独立性
- 粒子间结合界面状态的可控性
- 薄膜厚度可控性
- 极高的加工效率



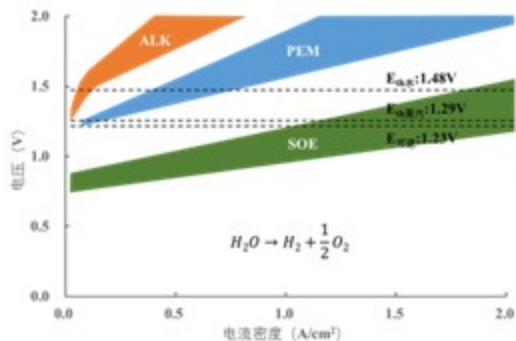
[1] Song Y., Zhang X., Xie K., et al. High-Temperature CO₂ Electrolysis in Solid Oxide Electrolysis Cells: Developments, Challenges, and Prospects[J]. Advanced Materials, 2019, 31(50):1902033.

[2] Hauch A., R Klingas, Blennow P., et al. Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis[J]. Science, 2020, 370(6513).

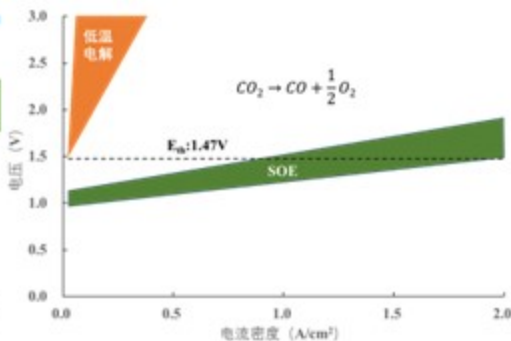
SOE是最有潜力的电解技术之一

SOE电解制氢技术特点：

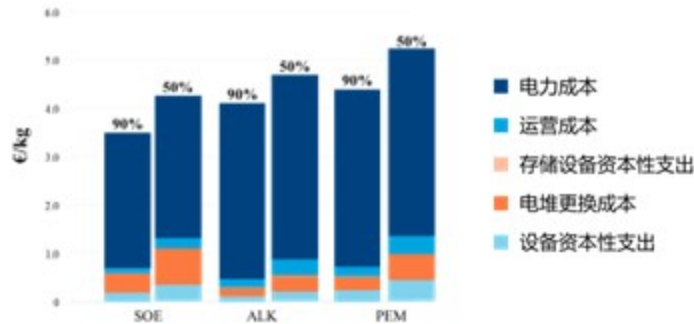
- ✓**能耗低。**工作温度500~1000°C，电解效率可达90~100%，耗电量为3.1-3.6kWh/Nm³，可适用于可再生能源电力；
- ✓**材料低廉。**以镍、铁及稀土金属氧化物为材料，不使用贵金属催化剂，不受资源储量限制，主要材料在我国储量丰富；
- ✓**可利用工业余热。**在工艺上可与化工、冶金、核电等深度耦合，利用其副产余热提高系统效率，进一步降低绿氢成本；
- ✓**可直接电还原CO₂生产合成气。**绿电还原CO₂或CO₂+水蒸气生产CO或合成气。



(a). 3种电解水制氢技术对比电压电密对比



(b). CO₂电解电压电密对比



电解水制氢技术成本结构比较 (2025)

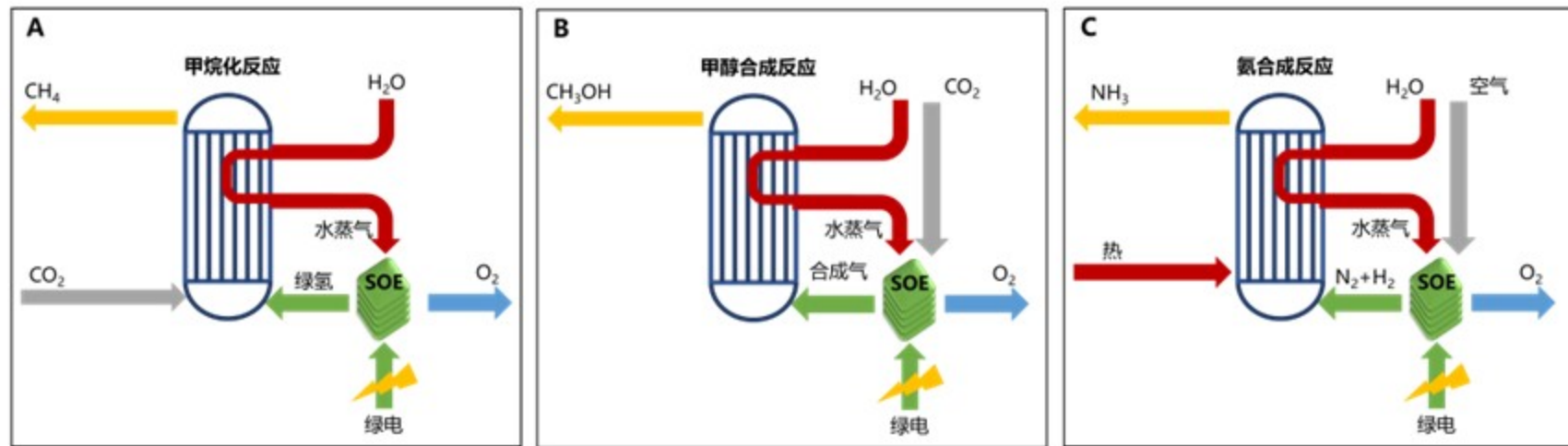
电价60 €/MWh (约0.4326元/kWh)
 内部收益率 (IRR) 8% @20年寿命
 90%负荷 ≈ 7880h
 50%负荷 ≈ 4380h

电解电压与电流密度关系图

SOE本质决定了其具有更高的效率和更低的成本^[1]

[1] 王焰荣, 2021氢能及固体氧化物电池产业技术论坛报告
 [2] Christian Walker, H2FC Supergen Hydrogen Research Conference 2020 Report

SOE技术更适合与工业过程耦合



SOE与煤制甲醇、合成氨等化工过程的耦合在提高整体能效的同时还可降低碳排放。丹麦托普索公司对生物质气化合成甲醇进行测算，其效率约为59%，当生物质气化与SOE耦合后，效率提升至70%以上，而传统的煤制甲醇工艺，系统能量转化效率约53%。SOE与合成氨工艺融合，可以充分利用合成氨过程的余热蒸汽生产合成氨所需的H₂以及煤气化过程所需的O₂，与传统工艺相比，可减少75%的CO₂排放。

[1] Hauch A, R Küngas, Blennow P, et al. Recent advances in solid oxide cell technology for electrolysis[J]. Science, 2020, 370(6513).

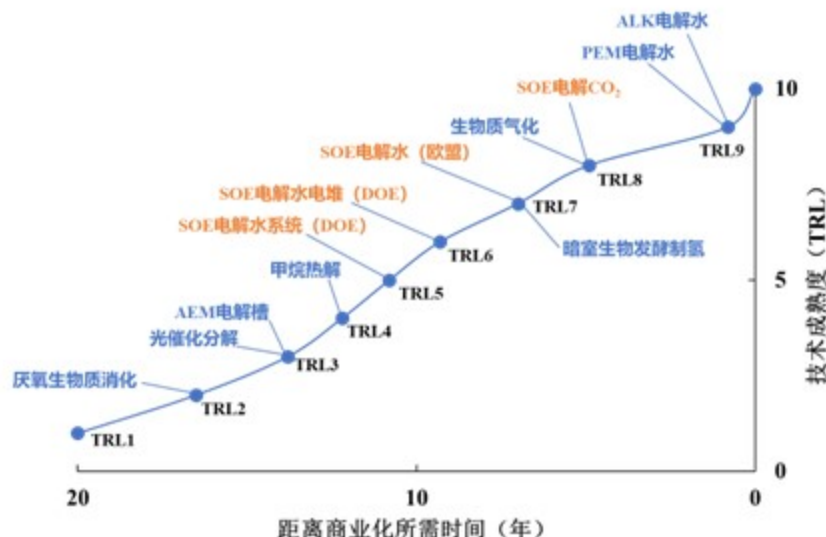
[2] 张子昂. 分级给氧膜式煤气化炉煤基联产系统能耗分析[J]. 2013.

[3] John Bogild Hansen. The Methanol Synthesis past and future[R]. International Methanol Conference, Taastup, 2017.

[4] Christian Walter. Status of SOEC and SOFC activities at SUNFIRE[R]. H2FC Supergen Hydrogen Research Conference 2020 Report.

[5] Chen X, Guan C, Xiao G, et al. Syngas production by high temperature steam/CO₂ coelectrolysis using solid oxide electrolysis cells[J]. Faraday Discussions, 2015, 182.

多种制氢技术成熟度



技术成熟度分项表

等级	研发内容	所处阶段
1-1	基本概念和基本原理	实验室阶段
1-2	基本组分和结构、基本性能和使用寿命	
1-3	关键材料制备的基本原理	
2-1	关键材料制备的驱动条件	
2-2	完成材料制备原理的验证	
2-3	明确了材料的关键技术指标和主要使用寿命	
3-1	确定了材料制备的实施方案	
3-2	实现了实验室工艺贯通, 制备出了样品	
3-3	完成了结构和主要性能的实验测试	
3-4	样品测试结果满足关键技术指标要求	工程化阶段
4-1	样品制备工艺流程贯通, 获得试制品	
4-2	试制品的结构性能通过实验验证	
5-1	完成了试制品的验证件的制备	
5-2	制定了完整的试验验证和测试方法	
5-3	试制品验证件通过了模拟环境测试	
6-1	完成了试制工艺流程优化	
6-2	完成了试制品小批量工程化制备及性能评价	
6-3	完成了试制品的验证件在使用环境中的测试, 并通过应用评价	
7-1	完成了产品验证件在使用环境中的全面测试和稳定	产业化阶段
7-2	完成了规模生产装备的调试, 生产线完整	
7-3	生产线通过环境、安全、职业卫生等相关评审	
7-4	完成产业化生产文件编制	
7-5	掌握了产业化制备工艺技术	
8-1	产品经过验证满足使用需求	
8-2	产品满足质量一致性要求	
8-3	具备稳定生产的能力	
8-4	制定了产品成本优化方案	
9-1	产品性能全部满足使用需求	
9-2	产品生产要素得到优化, 满足市场需求	
9-3	产品具备稳定的产能和利润, 成为热销产品	

SOE在电解技术受到学术界及产业界的高度关注, 政府及企业纷纷加大技术研发投入, 使得SOE技术取得突破性进展。2020美国能源部 (DOE) 对其SOE电解水制氢技术成熟度 (Technology Readiness Level, TRL) 评估为TRL5~TRL6, 欧盟2020年对其SOE技术成熟度评估为TRL7, 处于工程化阶段。SOE电解CO₂制CO技术成熟度达到TRL8, 处于产业化阶段。

[1] Ned Stetson. H2 Technologies Overview[R]. 2021 Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting

[2] R.Kingas. Review - Electrochemical CO₂ Reduction for CO Production: Comparison of Low- And High-Temperature Electrolysis Technologies[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2020, 167(4):044508.

全球SOE示范项目不完全统计

序号	项目名称	国家	运行时间	SOE用途	装机MW
1	Green Natural Gas	丹麦	2011	CH ₄	0.04
2	Sunfire PtL demo "Fuel1"	德国	2012	合成燃料	0.038
3	DEMETER	法国	2012	多用途	-
4	Haldor Topsoe - El-Opgraderet Biogas I	丹麦	2013	CH ₄	0.038
5	CHOCHCO	法国	2014	CH ₄	-
6	Dresden	德国	2015	H ₂	0.01
7	BOEING (rSOC Demonstrator)	美国	2015	H ₂	0.038
8	SYNFUEL	丹麦	2015	合成燃料	-
9	HELMETH (R&D)	德国	2016	CH ₄	0.015
10	Naval Facilities Engineering Command, Engineering and Expeditionary Warfare Center	美国	2016	H ₂	0.05
11	Haldor Topsoe - El-Opgraderet Biogas II	丹麦	2017	CH ₄	0.038
12	GrInHy	德国	2017	H ₂	0.15
13	CoSin: Synthetic Natural Gas from Sewage, Barcelona	西班牙	2018	CH ₄	0.03344
14	REFLEX	意大利	2018	H ₂	0.038
15	Minerve, Nantes	法国	2018	CH ₄	0.12
16	Balance project	芬兰	2019	多用途	0.006
17	Hypos - Sunfire	德国	2019	H ₂	0.18
18	GrInHy2.0	德国	2020	H ₂	0.72
19	Kopernikus	德国	2021	合成燃料	0.01
20	Kopernikus 2.0	德国	2021	合成燃料	0.25
21	E-CO ₂ MET Raffinerie Mitteldeutschland	德国	2021	甲醇	1
22	Prairie Island	美国	2021	H ₂	1
23	Hydrogen Lab Leuna (phase 1)	德国	2021	甲醇	1
24	Multiphly	缅甸	2022	H ₂	2.6
25	Changwon Industrial complex	韩国	2022	H ₂	
26	Norsk e-Fuel Phase 1	挪威	2023	合成燃料	22
27	Nordic Blue Crude	挪威	2024	合成燃料	20
28	Norsk e-Fuel Phase 2	挪威	2026	合成燃料	220
29	First Ammonia	德国	2025	合成氨	5000 (500)

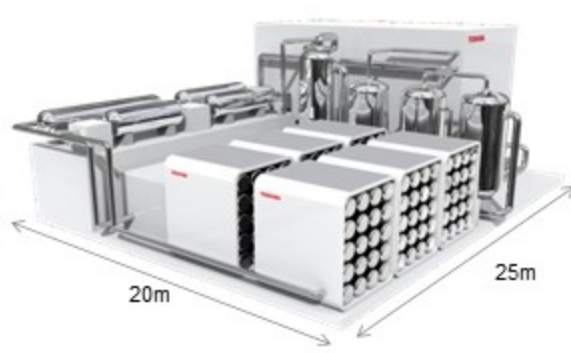
部分SOE应用案例



Sunfire位于德国萨尔茨基特示范装置



Topsoe位于美国得克萨斯州休斯顿eCOs™装置



日本Toshiba基于SOEC开发的H₂ Omega™装置



Topsoe位于美国俄亥俄州哥伦布市商业化装置



Topsoe公司位于丹麦富勒姆SOE+甲烷化耦合装置



Sunfire公司向德国政府部门提供的共电解系统

[1] www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database

[2] Casper, H ads bjerg, Chetan, et al. Small-Scale CO from CO₂ using Electrolysis[J]. Chemical Engineering World, 2017, 52(3):44-46.

[3] Posdziech O., Schwarze K., Brabant J. Efficient hydrogen production for industry and electricity storage via high-temperature electrolysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(35):19089-19101.

国外SOE产业正在迅速发展



Topsoe电堆和系统



Bloom Energy电堆和系统



Cummins单电池和电堆



Sunfire电堆和系统



Elcogen单电池和电堆



重要事件



2021年03月

丹麦**Topsoe**披露计划投资一个新的制造设施，以生产高效SOEC，每年500MW的产能，并可选择扩大至5GW，在Herring的新工厂将成为世界上最大的SOEC制造工厂。



2021年07月

美国**Bloom Energy**(BE)正式公布电解槽(SOEC)产品，并利用其现有SOFC产线开始大批量生产SOE电解槽。



2021年09月

美国**Cummins**从美国能源部获得500万美元拨款，总预算716万美元，目标是开发60kW固体氧化物电堆自动化组装的标准样板，建立年产能为94MW的SOE电解槽工厂。



2021年11月

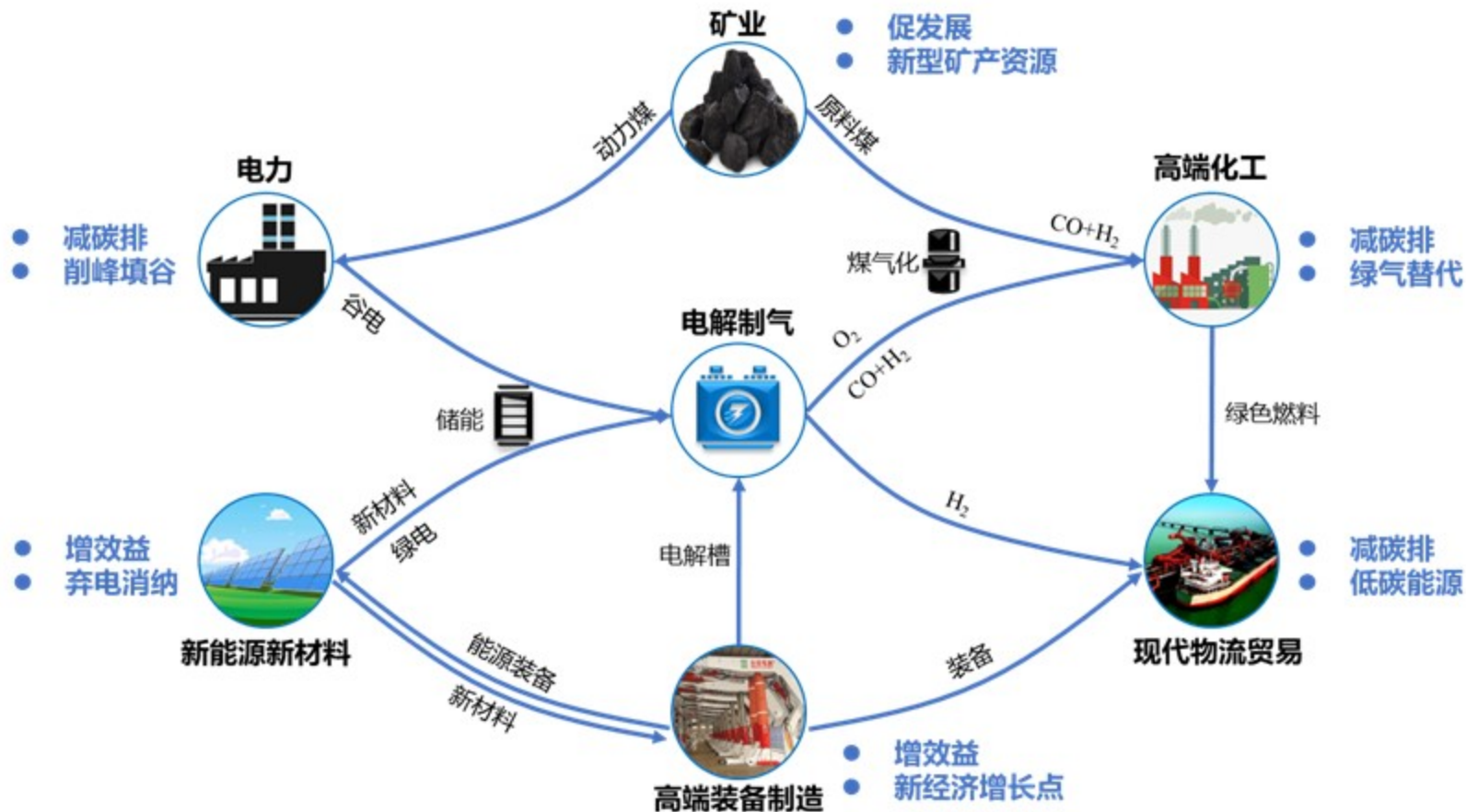
德国**Sunfire**获得了1.09亿欧元的D轮融资（之前其已获得超过1亿欧元的融资），并计划于2023年建成200MW的SOE电解槽产能。



2022年~

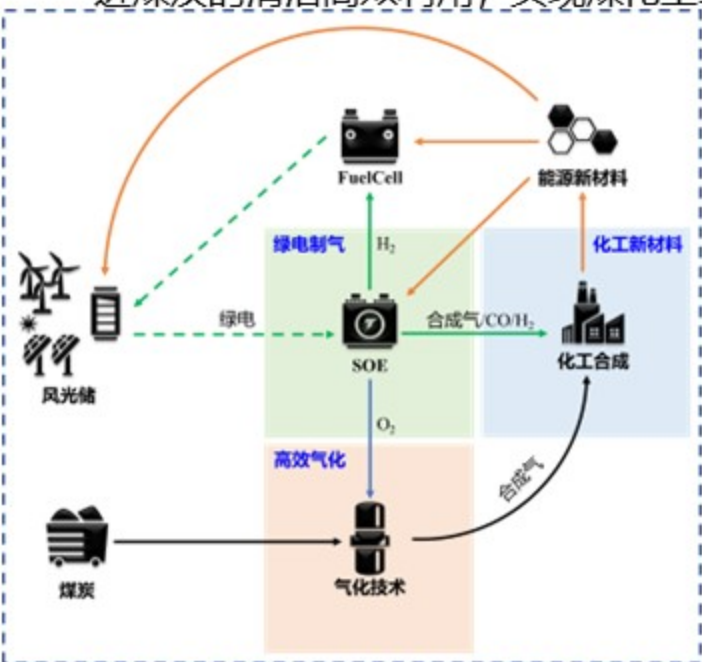
芬兰**Elcogen**新建10000平方米工厂，现有工厂占地的7倍，到2023年，产能将扩展到50 MW。

电解制气技术可以融合集团六大产业协同发展

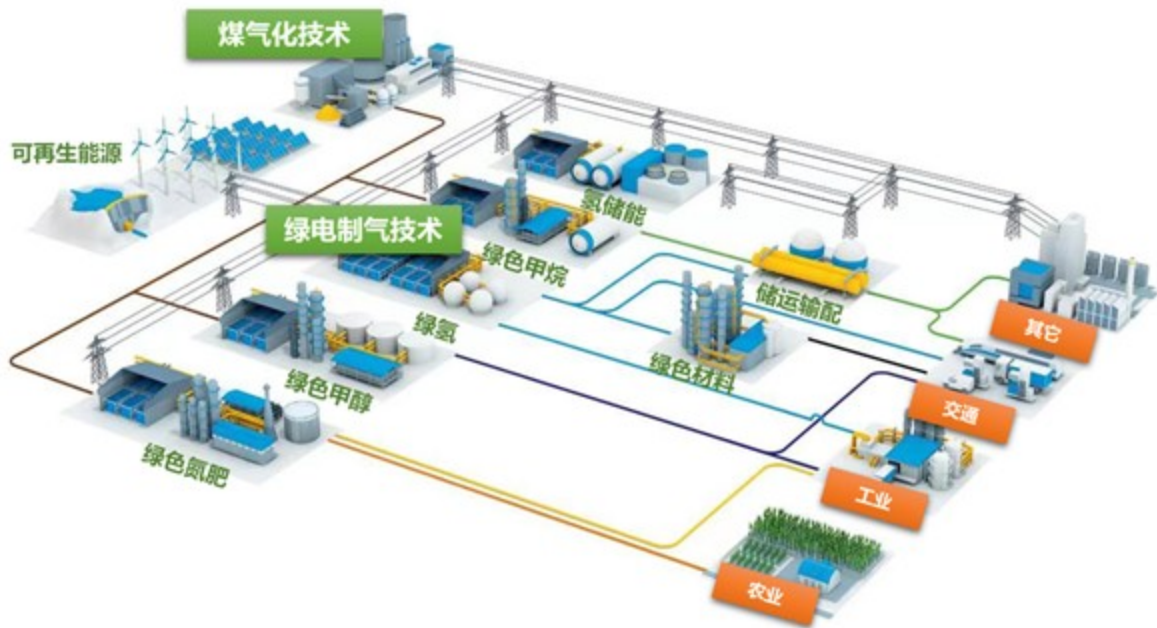


打造可持续生态系统，推动低碳社会愿景的实现

绿电制气是“新时代的气化技术”，双碳背景下**高效煤气化技术**和**先进绿电制气技术**将是煤化工企业源头技术的制高点。以两种气化技术为纽带，可有效推进传统能源与可再生能源的融合发展，促进煤炭的清洁高效利用，实现煤化工绿色低碳跨越式发展。



煤化工三大技术方向：高效气化、绿电制气、化工新材料



绿色低碳化工源头技术制高点：高效煤气化技术、先进绿电制气技术



山东能源集团
SHANDONG ENERGY GROUP

www.shandong-energy.com

谢谢!



高圆,李智,李甲鸿,等.金属支撑固体氧化物燃料电池技术进展[J].综合智慧能源,2022,44(8):1-24.

李智,刘涛,张志伟,等.煤化工低碳技术及其与新能源耦合发展的研究进展[J].中国煤炭,2022,48(8):66-81.