

# 势银绿氢产业发展 蓝皮书（2023）



## 前言

绿氢是通过光伏发电、风电及太阳能等可再生能源电解水制氢或生物质等其他环保方式制氢，与基于碳基原料生产的灰、蓝氢相比，绿氢在制氢端实现了低碳甚至零碳排放。根据国际能源署的数据，2021 年全球氢气基本来自化石能源制氢，绿氢占比仅为 0.4%。我国是世界上最大的氢能生产和消费国，目前生产的氢气绝大多数为灰、蓝氢，绿氢仅占中国氢气总产量的不到 1%。

政策方面，自 2020 年 9 月“双碳目标”提出以来，我国国家层面氢能相关政策导向由燃料电池向能源绿色低碳转型倾斜，绿氢成为我国能源绿色低碳转型的重要载体。由于目前氢气被广泛应用于航空航天、制药、能源化工、钢铁冶金、电子电力、光伏组件、食品等领域，且在燃料电池交通、发电、储能等领域潜力巨大，使用绿氢将对实现碳中和目标起到极大的推进作用，绿氢成为未来构筑低碳社会的重要环节。

市场方面，近年来我国氢电解槽产能和装机量增长迅速，已布局绿氢项目数量飞速增加，国内绿氢的下游应用主要集中在化工等传统领域，合成氨和合成甲醇领域的绿氢需求最高。随着氢能产业的发展和政策的支持，未来我国绿氢产能和需求有望进一步提高。

制氢技术方面，国家对研发方向的指引也在不断细化，重点关注多种电解水技术的研发，并逐渐由电解水制氢技术拓展至电解水制氢技术的下游应用研究。在电解水制氢技术的研发上，项目范围从碱性电解水制氢技术逐渐向质子交换膜电解水制氢技术、高温固体氧化物电解水制氢技术、海水制氢技术等多种不同技术转移。在电解水制氢技术的应用端，项目重点针对电解水制氢技术和可再生能源的互补，并将探索电解水制氢技术在化工领域的示范。

产业链方面，国内已有近两百企业布局或规划电解水制氢业务，多集中于碱性和质子交换膜电解水制氢技术，包括在电解水制氢行业深耕多年的传统企业、近几年入局的新能源企业和装备制造企业、以及科研院校背景的氢能初创企业。

势银（TrendBank）作为国内最早从事氢能与燃料电池产业研究的咨询机构，深耕氢能产业多年，结合已有研究及产业最新动态编写本蓝皮书，重点介绍绿氢制备技术、市场及产业链情况，为业内企业、政府、投资机构等服务，让业界更多的了解和关注中国绿氢产业。

## 目录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第一章 中国绿氢产业发展概述篇.....          | 6  |
| 1.1 中国绿氢产业发展背景.....           | 6  |
| 1.2 国内绿氢产业发展现状.....           | 8  |
| 1.3 国外绿氢产业现状.....             | 10 |
| 1.3.1 美国 .....                | 10 |
| 1.3.2 欧洲 .....                | 12 |
| 1.3.3 日韩 .....                | 15 |
| 第二章 中国绿氢产业政策篇.....            | 17 |
| 2.1 国家规划政策 .....              | 17 |
| 2.2 地方规划政策 .....              | 21 |
| 2.3 其他支持政策 .....              | 23 |
| 第三章 中国绿氢产业技术篇.....            | 27 |
| 3.1 不同电解水制氢技术发展现状.....        | 27 |
| 3.1.1 碱性电电解水制氢技术.....         | 29 |
| 3.1.2 质子交换膜电解水制氢技术 .....      | 36 |
| 3.1.3 高温固体氧化物电解水制氢技术 .....    | 45 |
| 3.1.4 固体聚合物阴离子交换膜电解水制氢技术..... | 48 |
| 3.2 其他绿氢技术发展现状.....           | 50 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 第四章 中国绿氢产业市场篇.....            | 52 |
| 4.1 国内绿氢产业市场现状.....           | 52 |
| 4.2 国内绿氢产业市场规模.....           | 54 |
| 第五章 中国电解水制氢产业供应链篇.....        | 55 |
| 5.1 碱性电解槽企业分析.....            | 55 |
| 5.1.1 布局方面.....               | 55 |
| 5.1.2 产品方面.....               | 56 |
| 5.1.3 产品性能方面.....             | 58 |
| 5.1.4 产能布局.....               | 59 |
| 5.1.5 产品应用方面.....             | 60 |
| 5.2 碱性电解槽部分企业.....            | 60 |
| 5.3 碱性电解槽部材部分企业.....          | 63 |
| 5.4 质子交换膜电解槽企业分析.....         | 65 |
| 5.4.1 质子交换膜电解水制氢技术企业布局情况..... | 65 |
| 5.4.2 质子交换膜制氢设备产能情况.....      | 67 |
| 5.4.3 质子交换膜制氢装置应用.....        | 68 |
| 5.5 质子交换膜电解槽部材部分企业.....       | 69 |
| 5.5.1 质子交换膜生产企业.....          | 71 |
| 5.5.2 催化剂生产企业.....            | 73 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 5.5.3 气体扩散层生产企业.....          | 74 |
| 5.5.4 双极板.....                | 75 |
| 5.6 高温固体氧化物电解水技术部分企业 .....    | 76 |
| 5.6.1 国外 SOEC 企业 .....        | 76 |
| 5.6.2 国内 SOEC 科研院所及企业介绍 ..... | 77 |
| 5.7 固体聚合物阴离子交换膜电解设备部分企业.....  | 79 |
| 5.7.1 国外 AEM 企业.....          | 79 |
| 5.7.2 国内 AEM 企业.....          | 80 |
| 第六章 中国绿氢产业应用篇 .....           | 82 |
| 6.1 化工合成 .....                | 83 |
| 6.2 钢铁冶炼 .....                | 85 |
| 6.3 储能和发电.....                | 87 |

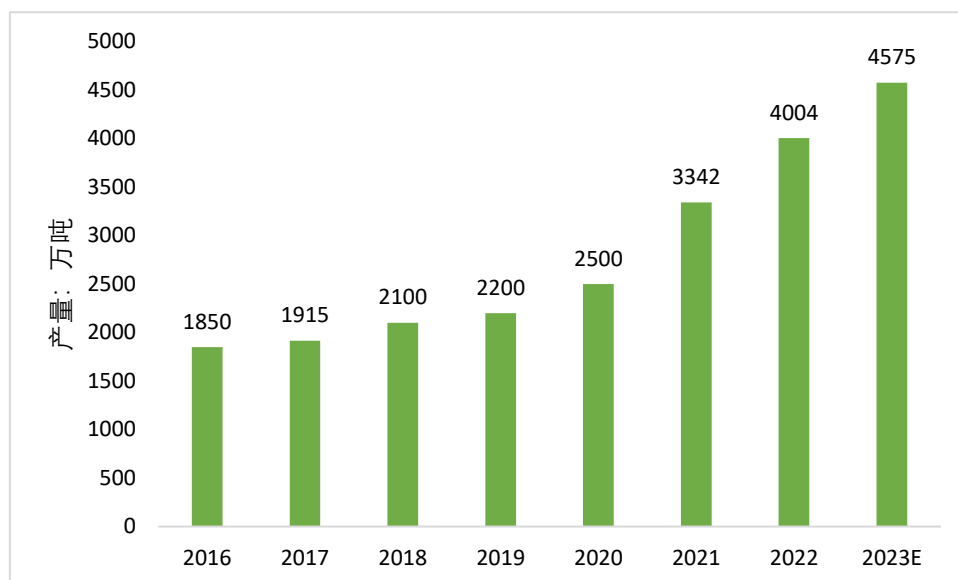
# 第一章 中国绿氢产业发展概述篇

## 1.1 中国绿氢产业发展背景

自 2020 年 9 月“双碳目标”提出以来，我国国家层面氢能相关政策导向由燃料电池向能源绿色低碳转型倾斜，绿氢成为我国能源绿色低碳转型的重要载体。

我国是世界上最大的氢能生产和消费国，2022 年各类氢气年产量约 4000 万吨，同比增长 32%。

图 1 2016-2023 年中国氢气产量统计



数据来源：中国煤炭工业协会

绿氢是通过光伏发电、风电及太阳能等可再生能源电解水制氢或生物质等其他环保方式制氢，与基于碳基原料生产的灰氢、蓝氢相比，绿氢在制氢端实现了低碳甚至零碳排放。

表 1 不同制氢方式比较

| 制氢方式  | 原料           | 优点                        | 缺点              |
|-------|--------------|---------------------------|-----------------|
| 化石能源  | 煤            | 技术成熟，成本低，来源广泛，国内大规模稳定制氢方式 | 污染严重、灰氢         |
|       | 天然气重整        | 产量大，技术成熟，国外主流制氢方式         | 能耗和温室气体排放大      |
| 工业副产氢 | 焦炉煤气、化肥、氯碱等  | 成本低，近期理想氢源                | 纯度低、提纯难         |
| 电解水   | 电、水          | 绿氢，工艺简单、无碳排放，最具发展潜力       | 耗电量大、未规模化应用、成本高 |
| 其他方式  | 热化学、生物质、光催化等 | 原料丰富                      | 技术不成熟，初期研究阶段    |

由于目前氢气被广泛应用于航空航天、制药、能源化工、钢铁冶金、电子电力、光伏组件、食品等领域，且在燃料电池交通、发电、储能等领域潜力巨大，使用绿氢将对实现碳中和目标起到极大的推进作用，绿氢成为未来构筑低碳社会的重要环节。

根据国际能源署的数据，2021 年全球氢气产量达到 9400 万吨，基本来自化石能源制氢，绿氢占比仅为 0.4%。目前我国生产的氢气绝大多数为灰氢，其中，煤制氢和天然气制氢占比约 80%，焦炉煤气、氯碱、丙烷脱氢等工业副氢占比约 19%，绿氢仅占中国氢气总产量的不到 1%。

2019-2022 年，我国氢电解槽装机量增长迅速。势银（TrendBank）预计，2025 年我国绿色可再生氢气的需求量将达到约 130 万吨以上，2023-2025 年的电解水制氢设备累计出货量预计达到 17GW 以上。随着氢能产业的发展和政策的支持，我国绿氢产能和需求有



望进一步提高。

## 1.2 国内绿氢产业发展现状

2023 年，我国绿氢发展火热程度持续高涨。

截至目前全国范围内已布局绿氢项目超 200 个，目前多数绿氢项目仍处于前期规划状态，距离投产仍需要很长时间。已建成的项目中，实际运行的项目少之又少，因为当前大量绿氢项目面临的“运行即亏损”的问题依然需要产业共同去解决。尽管绿氢项目现阶段在经济性、稳定性、寿命等各方面存在很多问题，但项目的火热程度在 2023 年并未减少，据势银（TrendBank）统计，2023 年 1-3 月确定已开标或开建的大规模绿氢项目新增 1066MW 电解槽需求，对应 1000 Nm<sup>3</sup>/h 碱性电解槽的需求量超过 200 套。

表 2 2023 年 1-3 月确定已开标或开建的大规模绿氢项目

| 时间       | 项目名称                      | 项目主体          | 电解槽招标量                           | 技术路线 |
|----------|---------------------------|---------------|----------------------------------|------|
| 1 月 6 日  | 国能宁东可再生氢碳减排示范区一期项目        | 国华投资宁夏分公司     | 5000Nm <sup>3</sup> /h<br>(25MW) | ALK  |
| 1 月 16 日 | 涑源县 300MW 光伏制氢项目          | 涑源氢阳新能源开发有限公司 | 2x600Nm <sup>3</sup> /h<br>(6MW) | ALK  |
| 1 月 28 日 | 海水制氢产业一体化示范项目             | 大连洁净能源集团有限公司  | 60MW                             |      |
| 2 月 11 日 | 平凉海螺崆峒区峡门 100 兆瓦风力发电及制氢项目 | 平凉海螺水泥有限责任公司  |                                  | ALK  |
| 2 月 16 日 | 鄂托克前旗上海庙经济                | 长江勘测规划设       | 9000Nm <sup>3</sup> /h           | ALK  |

|       |                                |                           |                                      |     |
|-------|--------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|-----|
|       | 开发区深能北方光伏制<br>氢项目              | 计研究有限责任<br>公司             | (45MW)                               |     |
| 2月16日 | 鄂尔多斯市风光融合绿<br>氢示范项目            | 中石化新星内蒙<br>古绿氢新能源有<br>限公司 | 390MW                                | ALK |
| 2月18日 | 七台河勃利县 200MW<br>风电制氢项目         | 七台河润沐新能<br>源有限公司          | 1500Nm <sup>3</sup> /h (7.<br>5MW)   | ALK |
| 2月23日 | 大安风光制绿氢合成氨<br>一体化示范项目          | 吉林电力股份有<br>限公司            | 39×1000Nm <sup>3</sup> /h<br>(195MW) | ALK |
| 2月24日 | 华能彭州水电解制氢科<br>技创新示范项目          | 华能集团                      | 2×1300Nm <sup>3</sup> /h<br>(13MW)   | ALK |
| 3月14日 | 中能建松原氢能产业园<br>(绿色氢氨一体化) 项<br>目 | 中能建氢能源有<br>限公司            | 65×1000Nm <sup>3</sup> /h<br>(325MW) | ALK |

数据来源：公开资料，势银（TrendBank）整理

据势银（TrendBank）调研分析，绿氢火热程度持续高涨的具体原因有三方面，其一是由中石化、中能建、国家电网、国电投、国家能源、三峡能源等央企国企在推动国内绿氢项目的发展；其二是众多地方政府政策将绿氢项目和风光项目指标进行绑定，鼓励企业在风光项目落地的同时配套绿氢项目；第三是对绿氢项目直接支持的政策力度也不断加大。

## 1.3 国外绿氢产业现状

### 1.3.1 美国

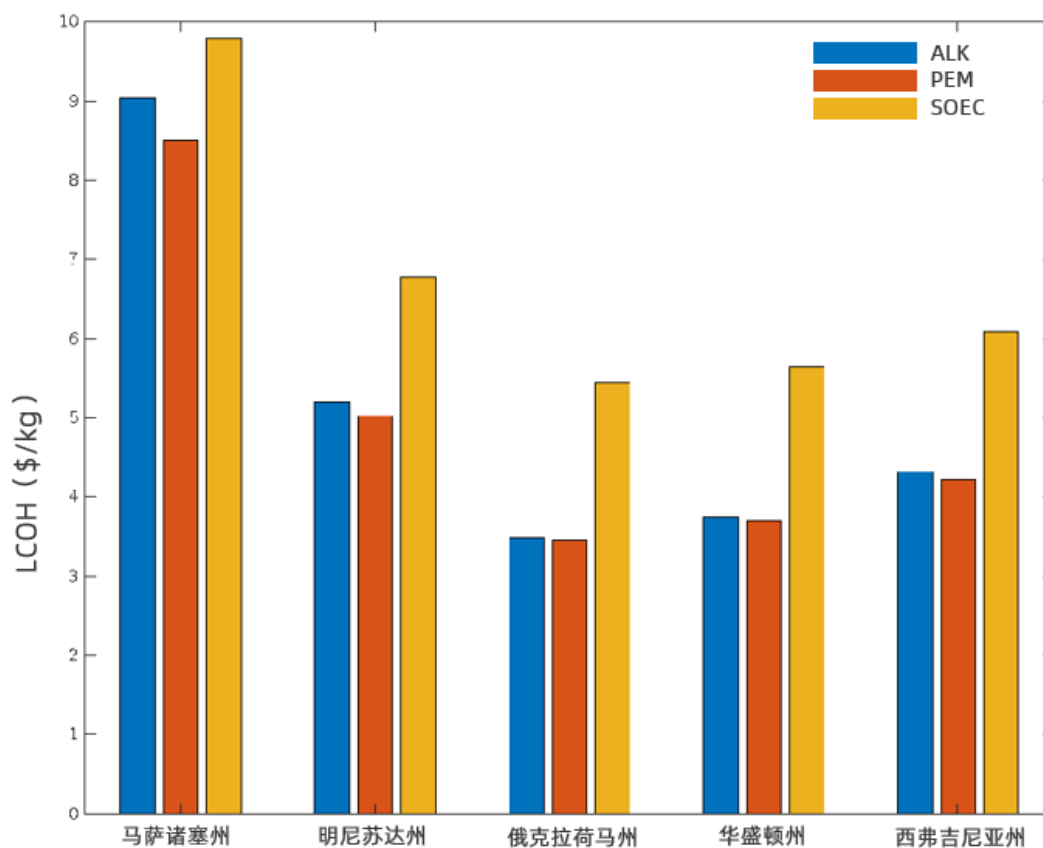
美国的绿氢项目布局较为稳健，政策导向更倾向于提高绿氢经济性。2022 年 8 月，《通胀削减法案》（IRA）为绿氢提供了开创性税收减免和可直接用于付款的条款，绿氢的经济性大幅提升。

2020 年美国推出《氢能发展规划》，提出了氢能关键技术指标，旨在从技术层面降低氢能成本。根据势银（TrendBank）对近年来美国氢能重点政策的梳理，美国不急于推动绿氢大规模应用，而将氢能的制、储、运、用过程中的成本和性能列为主要目标，以期通过技术优势实现氢能的经济性和国际竞争力。

成本方面，美国出台了一系列优惠政策刺激绿氢的发展。2021 年 6 月，美国能源部宣布拨款 5250 万美元资助 31 个项目，以推进下一代清洁氢技术并支持其氢能全球计划，预计在 10 年内将清洁氢成本降至 1 美元/kg。2021 年 11 月签署的《两党基础设施法》（BIL），计划投资 80 亿美元用于大型区域性清洁氢能中心建设，投资 10 亿美元用于清洁氢电解计划和 5 亿美元用于清洁氢制造和回收计划。2022 年 8 月《通胀削减法案》（IRA）中，对碳封存和清洁氢生产商进行税收抵免，使用 CCS 制备蓝氢和电解水制备绿氢的成本进一步降低。

2020 年，美国碱性电解水制氢的平均 LCOH 为 4.6 美元/kg，PEM 为 4.5 美元/kg，SOEC 为 6.3 美元/kg。电解水制氢最便宜的州（3.5-3.7 美元/kg）是工业电价最低的州，如俄克拉荷马州、路易斯安那州、德克萨斯州和华盛顿州；电解水制氢价格最高的州（~8-14 美元/kg）是夏威夷、阿拉斯加、罗德岛州、马萨诸塞州和加利福尼亚州。

图 2 美国五州 ALK、PEM、SOEC 电解水制氢成本

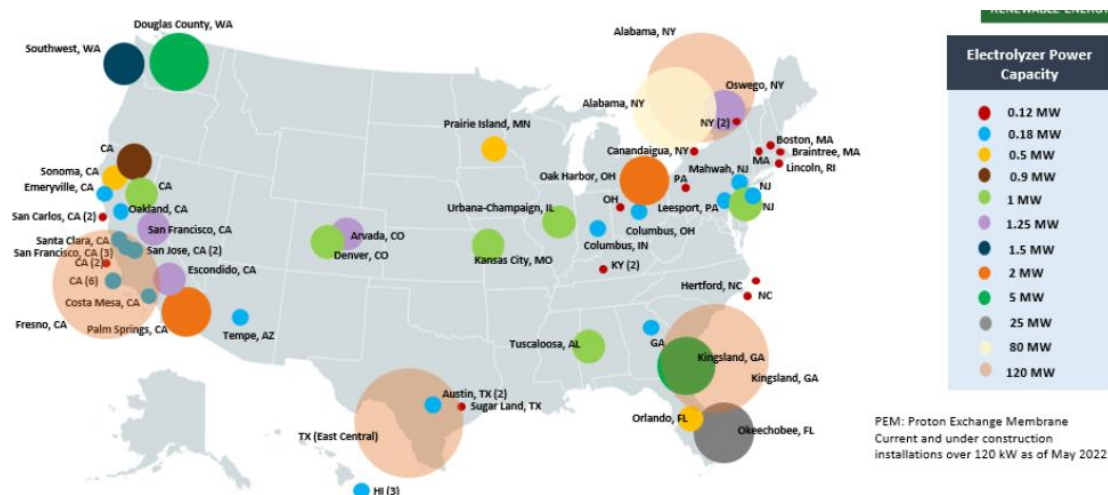


数据来源：《Analysis of Hydrogen Production Costs across the United States and over the next 30 years》

根据 IRA 法案，对于 2023 年以前开始建设的制氢项目，项目运营的前 10 年将获得 5 倍的税收抵免额度，即 0.6-3 美元/kg 氢气，绿氢可享受 3 美元/kg 补贴，且 10 年后将继续受益 0.12-0.6 美元/kg 的标准税收抵免额度。抵免将通过直接补贴的形式发放，且税收抵免额度可以转让，这使得无税收的公司亦可获得直接收益。考虑补贴后，目前在工业电价低的州，绿氢可以达到与灰氢、蓝氢平价，则绿氢在化工、钢铁、储能等领域的应用将大大增加。据美国《国家清洁氢能战略和路线图（草案）》，2050 年，清洁氢能将贡献约 10% 的碳减排量，到 2030 年清洁氢的产能将达到 1000 万吨/年以上，对应电解制氢能力约 121GW；到 2040 年增加到 2000 万公吨/年；到 2050 年增加到 5000 万吨/年。

美国绿氢项目目前多处于规划中，按计划将在 2024 年至 2026 年逐步投产。据美国能源部，截至 2022 年 5 月，美国建成和在建的 PEM 电解水制氢产能合计 621MW，相对 2021 年的 170MW 增长 265%。

图 3 2022 年美国运行和在建 PEM 电解水制氢产能



数据来源：美国能源部

### 1.3.2 欧洲

欧洲作为发达国家最多的大洲，政府和民主环保意识高，发展可再生能源的现实需求和意愿都很强烈。虽然 2022 年俄乌冲突让欧盟的气候政策无奈让步于“能源安全”，化石燃料的返场也在一定程度上影响了欧盟碳中和实现的进度，但势银（TrendBank）认为，欧盟对煤电的“妥协”是短期需求，其长期碳中和方向并未改变，能源危机实则加快了欧盟可再生能源尤其是绿氢的发展步伐。

2019 年 12 月，欧盟发布《欧洲绿色协议》，描绘了欧洲长期绿色发展战略的总体框架。2020 年 7 月，欧盟发布《欧盟氢能战略》，提出了欧洲长期发展绿氢的战略蓝图。2021

年，欧盟出台了“Fit for 55”一揽子计划来支持《欧洲绿色协议》落到实处。欧盟委员会认为，氢能是实现《欧洲绿色协议》和欧洲清洁能源转型的关键选项。

表 3 欧洲绿氢主要政策汇总

| 时间   | 政策名称                        | 相关内容  |
|------|-----------------------------|---|
| 2019 | 欧洲绿色协议                      | 欧盟实现 2050 碳中和目标的指导性协议   |
| 2020 | 欧盟氢能战略                      | <p>在第一阶段，即 2020 年至 2024 年，欧盟将安装至少 6 吉瓦的电解槽，并生产多达 100 万吨的绿氢；</p> <p>在第二阶段，即 2025 年至 2030 年，欧盟安装至少 40 吉瓦的电解槽，以及生产多达 1000 万吨的绿氢；</p> <p>在第三阶段，即 2030 年至 2050 年，绿氢技术应成熟并大规模部署，可以覆盖所有难以脱碳的领域</p> |
| 2021 | Fit for 55<br>(减碳 55%一揽子计划) | 2030 年前，工业中使用的绿氢份额要达到 50%   |
| 2022 | REPowerEU 能源计划              | <p>加码绿氢发展，预计到 2025 年建造 17.5GW 的电解槽，为欧盟工业企业提供 1000 万吨绿氢；到 2030 年，实现绿氢生产 1000 万吨，进口 1000 万吨</p>   |

|      |                  |   |
|------|------------------|---|
| 2023 | 可再生能源指令要求的两项授权法案 | 规定了三种可以被计入可再生能源的氢气：直接连接新的可再生能源发电机组所产生的氢气，在可再生能源比例超过 90%的地区采用电网供电所生产的氢气，以及在低二氧化碳排放限制的地区签订可再生能源电力购买协议后采用电网供电来生产氢气 |
|------|------------------|---|

注：“绿氢”为势银（TrendBank）译述，原文为“Renewable hydrogen”。

2022 年俄乌发生冲突后,为应对欧洲能源安全问题并尽快摆脱对俄罗斯天然气的依赖,欧盟正式通过了 REPowerEU 计划,加码支持欧盟绿氢产业的发展。

REPowerEU 从近期利用现有资源、中期开展工业碳减排改造和电解水制氢示范工程建设、长期聚焦绿氢发展等三个阶段和多种渠道,削减和抵消俄罗斯天然气进口量。该计划共投资约 3000 亿欧元,其中 1130 亿欧元用于发展绿氢上下游。此外,欧盟还积极构建绿氢市场框架,在 REPowerEU 计划中提出,要建设首个欧洲可再生氢交易中心,开展欧元-绿氢交易,以跳出美元石油框架。

2022 年 12 月,欧盟“碳税”登场,欧委会、欧洲议会及欧理事会达成临时协议,宣布将氢气纳入欧盟碳边界调整机制(CBAM /碳关税),并于 2023 年 10 月份试运行(进口商有报告义务),2026 年正式实施。届时,灰氢、蓝氢等产品均需面临高额碳关税,绿氢将更具经济性。

2023 年 2 月,欧盟通过了可再生能源指令要求的两项授权法案,提出了详细的规则来定义欧盟可再生氢的构成,为氢气生产商提供监管的确定性。可以说,欧盟绿氢产业已进入实质发展阶段。根据麦肯锡《氢能洞察 2022》,目前欧洲能源公司已开始大举布局氢能项目,截至 2030 年规划项目的合计氢气产量已超 470 万吨。

### 1.3.3 日韩

日本计划加快氢和氨的布局以加倍削减排放并在 2050 年实现碳中和。根据 2023 年 4 月 4 日日本内阁秘书处的一项提议，日本将考虑更新其基本氢能战略，将考虑在未来 15 年内拨出 15 万亿日元（1130 亿美元）的公共和私营部门资金，用于创建氢和氨供应链，详细的战略修订计划将在 5 月底前制定。

日本严重依赖能源进口，长期以来致力于掌握新兴能源市场话语权。早在 2003 年日本就提出了“氢能社会构想”，将绿氢作为该构想的最终发展阶段，同时还致力于构建国际氢能供应链。

2021 年日本更新《2050 碳中和绿色增长战略》，计划未来 10 年投入 3700 亿日元扶持氢能产业，从预算、税收、金融、监督改革、标准化、国际合作等各方面推动氢能发展，目标实现 2030 年将氢能年度供应量增加到 300 万吨，其中清洁氢供应量力争超过德国 2030 年可再生氢供应目标（约 42 万吨/年）水平，到 2050 年氢能供应量达到 2000 万吨/年。力争在发电和交通运输等领域将氢能成本降低到 30 日元/立方米（约合人民币 17 元/kg），到 2050 年降至 20 日元/立方米（约合人民币 11.6 元/kg）。

受限于自然资源稀缺、土地面积受限，日本可再生能源制氢成本较高，因此需要依赖海外进口。日本已与澳大利亚、文莱、挪威和沙特阿拉伯就氢燃料采购问题进行合作，主要依靠海上运氢，构建液化氢+甲基环己烷（MCH）运输链。

与日本类似，韩国能源依赖进口，同样在能源战略上选择从化石燃料转向氢气。

2020 年 2 月，韩国颁布全世界首部《促进氢经济和氢安全管理法》，围绕氢定价机制、氢能基础设施以及氢全产业链的安全管理提出了系统的法律框架。政府计划 2030 年构建 100 兆瓦级绿氢量产体系，2040 年建立海外制氢基地，通过进口满足绿氢需求，成本下降到 3000 韩元/kg（约合人民币 16 元/kg）以下，2050 年氢进口代替原油进口、氢能覆盖



大型工业用能的发展目标。韩国同样面临着生产绿氢成本较高的难题，需要依赖海外进口以满足国内需求。

## 第二章 中国绿氢产业政策篇

### 2.1 国家规划政策

从 2022 年我国国家层面的政策规划和重点研发项目来看，我国对绿色氢能“技术”方面的重视程度显著增加。空间布局上来看，我国鼓励山西、内蒙古、河南、四川、陕西、宁夏等省区绿氢生产，加快煤炭减量替代。

2022 年 2 月，国家发改委、国家能源局发布《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》，要求加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系。随后，2022 年 3 月发布的《氢能产业中长期发展规划（2021-2035 年）》明确了氢能在我国能源绿色低碳转型中的战略定位，同时明确提出了绿氢发展的三个阶段性目标：要求到 2025 年实现绿氢产能 10-20 万吨/年，2030 年实现绿氢的广泛应用，2035 年绿氢在终端消费中的比重明显提升。

表 4 中国绿氢主要政策汇总

| 时间      | 政策名称              | 发布单位        | 相关内容   |
|---------|-------------------|-------------|--|
| 2021.10 | 《2030 年前碳达峰行动方案》  | 国务院         | 要求加快氢能在钢铁、石化、交通运输、交通基础设施等领域的应用,加强氢能科技创新水平,加快低成本可再生能源制氢（绿氢）的技术创新和推广应用 |
| 2022.02 | 《“十四五”新型储能发展实施方案》 | 国家发改委、国家能源局 | 探索风光氢储、风光火储等源网荷储一体化和多能互补的储能发展模式。探索利用可再生能源制氢，支撑大规模新能源外送               |

|         |                              |                       |  |
|---------|------------------------------|-----------------------|--|
| 2022.02 | 《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》   | 国家发改<br>委、国家能<br>源局   | 加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系，促进能源高质量发展和经济社会发展<br><br>全面绿色转型  |
| 2022.03 | 《“十四五”现代能源体系规划》              | 国家发改<br>委、国家能<br>源局   | 积极开展风电、光伏发电制氢示范  |
| 2022.03 | 《氢能产业中长期发展规划（2021-2035年）》    | 国家发改<br>委、国家能<br>源局   | 明确了氢能在我国能源绿色低碳转型中的战略定位；研究探索可再生能源发电制氢支持性电价政策，完善可再生能源制氢市场化机制   |
| 2022.04 | 《关于“十四五”推动石化化工行业高质量发展的指导意见》  | 工信部、国<br>家发改委等<br>六部委 | 鼓励石化化工企业因地制宜、合理有序开发利用“绿氢”，推进炼化、煤化工与“绿电”、“绿氢”等产业耦合示范；适度增加轻质低碳富氢原料进口   |
| 2022.08 | 《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022-2030年）》 | 科技部                   | 研发可再生能源高效低成本制氢技术、大规模物理储氢和化学储氢技术、大规模及长距离管道输氢技术、氢能安全技术等；探索研发新型制氢和储氢技术；前沿和颠覆性低碳技术中提到新型绿色氢能技术，研究基于合成生物学、太阳能直接制氢等<br><br>绿氢制备技术 |

中国不仅在政策规划上对可再生能源制氢做出了规划,同时也积极开展电解水相关科技研发。下表是自 2018 年起, 国家科技部开展的电解水制氢相关项目申报汇总。

表 5 2018-2022 年国家重点研发项目--水电解制氢技术相关项目汇总

| 年份     | 项目                             | 牵头单位           |
|--------|--------------------------------|----------------|
| 2018 年 | MW 级固体聚合物电解质电解水制氢技术            | 中国科学院长春应用化学研究所 |
|        | 大规模风/光互补制氢关键技术研究及示范            | 国家能源投资集团有限责任公司 |
| 2020 年 | 碱性离子交换膜制备技术及应用                 | 中国科学技术大学       |
| 2021 年 | PEM 电解水制氢催化剂与界面结构的多尺度设计及集成应用研究 | 湖南大学           |
|        | 低能耗、高稳定性连续海水电解制氢关键材料和系统        | 北京化工大学         |
|        | 基于固体氧化物电解池的高温电催化研究             | 中国科学院大连化学物理研究所 |
|        | 光伏/风电等波动性电源电解制氢材料和过程基础         | 全球能源互联网研究院有限公司 |
|        | 低成本 PEM 电解水关键材料制备技术及其制氢应用示范    | 南开大学           |
|        | 高效大功率碱水电解槽关键技术开发与装备研制          | 中国科学院大连化学物理研究所 |
|        | 可再生能源电解制氢-低温低压合成氨关键技术及         | 福州大学           |

|        |                             |                  |
|--------|-----------------------------|------------------|
|        | 应用                          |                  |
|        | 十万吨级可再生能源电解水制氢合成氨示范工程       | 清华四川能源互联网研究院     |
| 2022 年 | 兆瓦级电解水制氢质子交换膜电解堆技术          | 山东赛克赛斯氢能源有限公司    |
|        | 电解水制高压氢电解堆及系统关键技术           | 中国科学院大连化学物理研究所   |
|        | 固体氧化物电解水蒸汽制氢系统与电解堆技术        | 广东电网有限责任公司       |
|        | 质子交换膜电解水制氢测试诊断技术与设备研发       | 国家能源集团氢能科技有限责任公司 |
|        | 分布式高效低温氨分解制氢技术开发与加氢灌装母站集成示范 | 湖南大学             |
|        | 高温质子导体电解制氢技术                | 中国科学技术大学         |
|        | 新型中低温固体电解质氨电化学合成与转化技术       | 清华大学             |
|        | 耦合电解水制氢的电催化选择性氧化关键技术        | 北京化工大学           |

资料来源：国家科技部、势银（TrendBank）

从国家最近 5 年的重点研发项目来看，国家对电解水制氢技术的重视程度显著提升。电解水制氢技术相关的研发项目共有 18 个，其中 2018 年至 2020 年仅有 3 个电解水制氢技术的研发项目，2021 年至 2022 年则开展了多达 16 个电解水制氢相关研发项目。

国家对电解水技术的研发方向也在不断细化，重点关注多种电解水技术的研发，并逐渐由电解水制氢技术拓展至电解水制氢技术的下游应用研究。在电解水制氢技术的研发上，项目范围从碱性电解水制氢技术逐渐向质子交换膜电解水制氢技术、高温固体氧化物电解水制

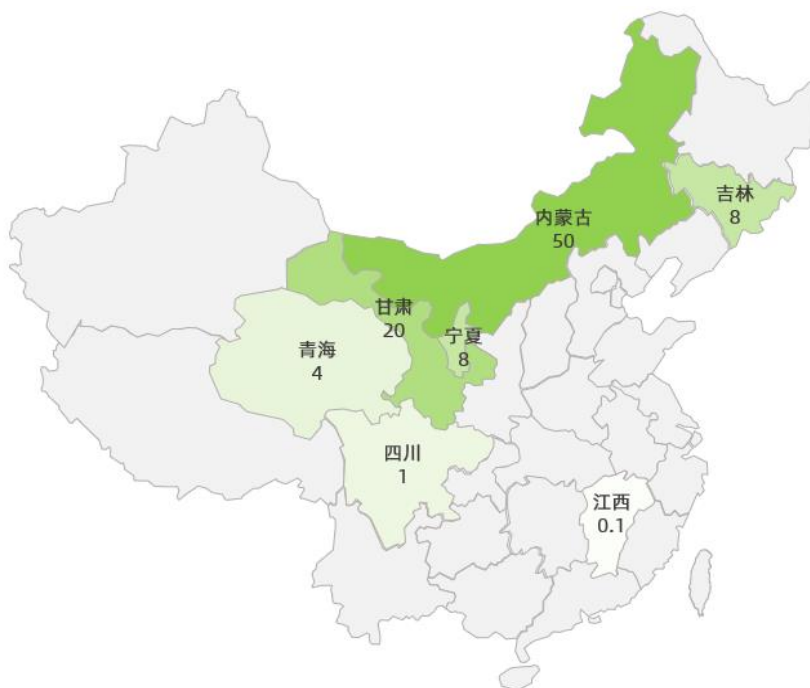
氢技术、海水制氢技术等多种不同技术转移。在电解水制氢技术的应用端，项目重点针对电解水制氢技术和可再生能源的互补，并将探索电解水制氢技术在化工领域的示范。

2022 年 12 月，工信部、国家发改委、住建部、水利部 4 部门发布《关于深入推进黄河流域工业绿色发展的指导意见》，提出鼓励氢能等替代能源在钢铁、水泥、化工等行业的应用。统筹考虑产业基础、市场空间等条件，有序推动山西、内蒙古、河南、四川、陕西、宁夏等省区绿氢生产，加快煤炭减量替代。

## 2.2 地方规划政策

国家发改委在国家氢能规划中提及的 2025 年可再生能源制氢年产量目标为 10-20 万吨，截至 2023 年 3 月 31 日，我国多个地方政府已规划的可再生能源制氢产量合计超过 90 万吨，远超国家规划总量。

图 4 2025 年中国各省可再生能源制氢规划量（万吨）



资料来源：公开资料、势银（TrendBank）

据势银（TrendBank）统计，目前内蒙古自治区、甘肃省、宁夏回族自治区、吉林省、四川省成都市、青海省和江西省都在相应的政策中明确了 2025 年可再生能源制氢产量，合计年产量为 91.1 万吨。

由于不同产业存在地域性分布的差异，各省市对可再生能源制氢的应用规划也存在显著

的差异。

东部地区，例如上海和广东等，对于可再生能源制氢在交通领域，尤其是制氢加氢一体站的应用更为关注。2022 年 8 月广东发改委发布的《广东省加快建设燃料电池汽车示范城市群行动计划（2022-2025 年）》中，提及将推动加氢站内电解水制氢，允许加氢站内开展电解水制氢，允许发电厂利用低谷时段富余发电能力，发展谷电电解制氢等。

西部地区的政策更加侧重于强调可再生能源制氢在工业领域的应用。在内蒙古、宁夏等地区，既拥有大量的可再生能源，也汇聚了大量的高碳排放企业，例如炼化企业、化工企业和钢铁企业等，电解水制氢技术的应用为这些高碳排放企业提供了低碳解决方案。

以内蒙古为例，在 2022 年 3 月内蒙古自治区发布的《内蒙古自治区“十四五”氢能发展规划》中，内蒙古政府对化工、冶金和热电联供等多个领域提出了要求，将探索绿色氢气在储能、冶炼、化工和热电联产等领域的示范应用：

- 在化工领域，政府鼓励采用传统制氢工艺（煤制氢或天然气制氢）的企业使用可再生能源制氢作为原材料进行生产活动，逐步推动煤化工产业的绿色转型。政府将重点在包头、乌海和鄂尔多斯等地区开展绿氢化工示范，建设绿氢化工示范项目；
- 在冶金领域，政府鼓励开展氢能代替焦炭作为还原剂的示范应用，改进传统工艺。政府将重点在包头、乌兰察布、乌海等地区开展绿氢冶金，探索拓展低成本的绿色氢气在钢铁、冶金等行业作为高品质原材料的应用。
- 在建筑领域（热电联供），政府将优先在鄂尔多斯、呼和浩特等园区内探索以绿氢

为纽带的多能互补模式。

## 2.3 其他支持政策

长期以来，我国将氢气作为危化品进行管理，氢气应用领域受限。为了推广氢能的大规模开发和利用，2022 年以来，我国各地非化工园区制氢相关文件的出台明显加速，支持非化工园区制氢。

据势银（TrendBank）统计，目前已有吉林省、广东省、山东省、河北省、唐山市、武汉市、上海临港等地区发布非化工园区制氢“松绑”政策。

表 6 中国绿氢产业制氢政策

| 级别 | 时间   | 地区 | 政策   | 相关内容   |
|----|------|----|--|--|
| 省级 | 2022 | 吉林 | 《支持氢能产业发展若干政策措施（试行）》                                       | 开展分布式可再生能源制氢加氢一体站在非化工园区示范建设                    |
| 省级 | 2022 | 广东 | 《广东省加快建设燃料电池汽车示范城市群行动计划（2022-2025 年）》、《广东省燃料电池汽车加氢站管理暂行办法》 | 允许站内制氢，鼓励谷电制氢，允许发电厂用低谷富余电力制氢；允许在非化工园区建设制氢加氢一体站 |
| 省级 | 2022 | 山东 | 《2022 年“稳重求进”高质量发展政策清单（第二批）的通知》                            | 探索可再生能源制氢、制氢加氢一体站试点项目不在化工园区发展                  |
| 省级 | 2022 | 河北 | 《关于调整化工建设项目备案  | 除风力发电配套制氢、海水提溴                                 |



|    |      |      |   |   |
|----|------|------|---|---|
|    |      |      | 权限的通知》  | 等不适合入园项目外,园区外不得新建、扩建化工项目                    |
| 市级 | 2022 | 唐山   | 《唐山市燃料电池汽车加氢站建设管理暂行办法》                        | 支持在非化工园区建立光伏制氢、风电制氢项目,并依托开展制氢工厂加氢站一体的制氢加氢项目 |
| 市级 | 2022 | 武汉   | 《关于支持氢能产业发展的意见》                               | 探索在非化工园区满足安全生产条件的区域开展能源型氨气制取项目。             |
| 市级 | 2021 | 上海临港 | 《中国（上海）自由贸易试验区临港新片区关于加快氢能和燃料电池产业发展及示范应用的若干措施》 | 探索在非化工园区现场制氢、制储加一体化加氢站及非固定式加氢站建设等领域改革创新。    |

除制氢制度改革类政策以外，我国出台绿氢补贴类政策的省市较去年同期也大大增加，多数政策集中发布于 2022 年下半年。

据势银（TrendBank）统计，吉林省、濮阳市等地区对绿氢直接给予生产补贴；另有湖北省、成都市等地发布针对绿氢的电价优惠和配套奖励政策。从政府出台支持政策的类型分析可以简单分为三大类，主要是制氢补贴支持类、电价优惠支持类、配套风光指标奖励类。

表 7 中国绿氢产业支持政策

|      | 时间      | 地区  | 政策                              | 相关内容  |
|------|---------|-----|---------------------------------|---|
| 制氢补贴 | 2022.12 | 吉林  | 《支持氢能产业发展若干政策措施（试行）》            | 对年产绿氢 100 吨以上（含 100 吨）的项目，以首年每公斤 15 元为标准为基础，采取逐年退坡的方式（第 2 年按基数的 80%、第 3 年按基数的 60%），连续 3 年给予补贴支持，每年最高补贴 500 万元         |
|      | 2022.07 | 濮阳  | 《濮阳市促进氢能产业发展扶持办法的通知》            | 对绿氢出厂价格不高于同纯度工业副产氢平均出厂价格,且用于本市加氢站加注的,按照年度累计供氢量给予补助。首年给予每千克 15 元补贴,此后逐年按 20%退坡,每年最高不超过 500 万元。对绿氢制备企业给予一定风电、光伏等指标配备支持。 |
| 电价优惠 | 2022.06 | 成都  | 《成都市优化能源结构促进城市绿色低碳发展行动方案》       | 加快建设“绿氢之都”，对绿电制氢项目市、区（市）县两级联动给予 0.15-0.2 元/千瓦时的电费支持   |
|      | 2022.05 | 攀枝花 | 《关于支持氢能产业高质量发展发展的若干政策措施（征求意见稿）》 | 支持制氢产业发展,其增量用电量执行单一制输配电价 0.105 元/kwh (含线损),电解氢项目建成后次年纳入全水、电交易范围。  |

|      |         |    |                                      |   |
|------|---------|----|--------------------------------------|---|
|      | 2022.08 | 广东 | 《广东省加快建设燃料电池汽车示范城市群行动计划（2022-2025年）》 | 落实燃料电池汽车专用制氢站用电价格执行蓄冷电价政策。  |
|      | 2022.07 | 深圳 | 《深圳市氢能产业创新发展行动计划 2022-2025 年》（征求意见稿） | 站内电解水制氢用电价格执行蓄冷电价政策,电解制氢设施谷期用电量超过 50%的免收基本电费。                                   |
| 配套奖励 | 2022.11 | 湖北 | 《关于支持氢能产业发展的若干措施》                    | 对在可再生能源富集地区发展风光水规模电解水制氢,按照 1000Nm <sup>3</sup> /h 制氢能力、奖励 50MW 风电或光伏开发资源并视同配置储能 |

数据来源：公开资料，势银（TrendBank）整理

综合制氢制度改革政策来看，绿氢产业四大类支持政策直击“非化工园区制氢受限”和“绿氢制氢成本高企”两大痛点，进一步推动国内绿氢产业落地，行业进入快速发展期。

## 第三章 中国绿氢产业技术篇

### 3.1 不同电解水制氢技术发展现状

按照制氢技术路线分类，电解水制氢技术可分为以下四种：碱性水电解技术（ALK）、质子交换膜水电解技术（PEM）、高温固体氧化物水电解技术（SOEC）和固体聚合物阴离子交换膜水电解技术（AEM）。

从 2023 年绿氢项目的招标情况来看，碱性水电解技术（ALK）仍为当前的市场主流，质子交换膜水电解技术（PEM）提升空间较大；高温固体氧化物水电解技术（SOEC）相较往年发展破冰，已处于小规模示范阶段；相比之下，固体聚合物阴离子交换膜水电解技术（AEM）仍然处于研发和测试阶段。

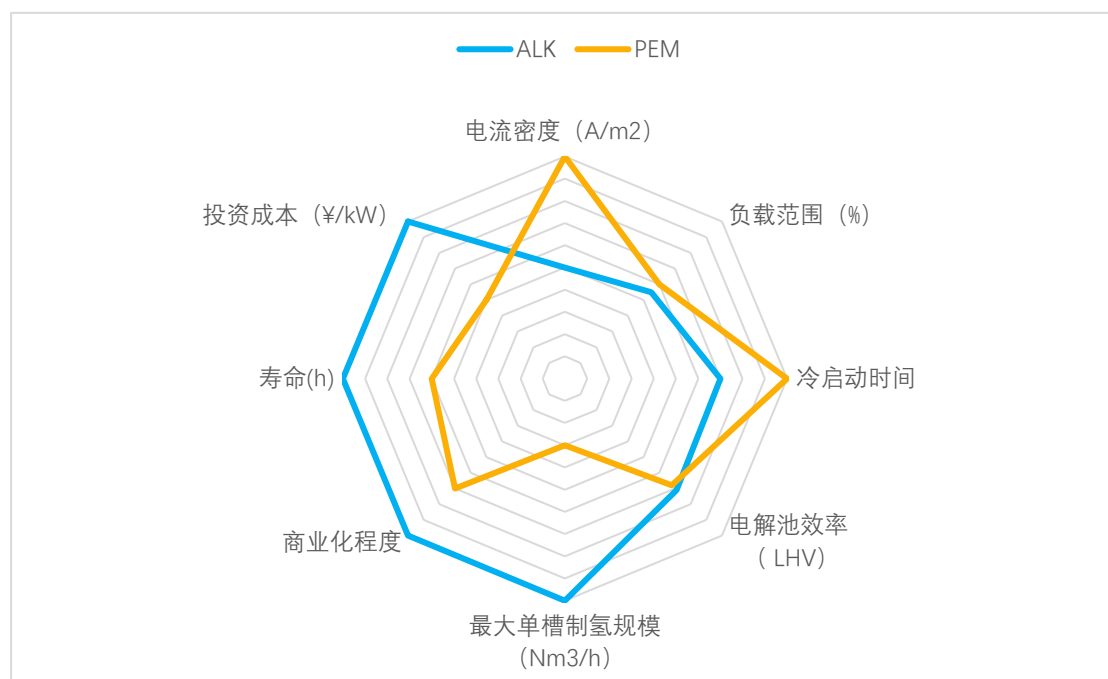
表 8 电解水技术路线对比

| 电解水<br>技术路线对比       | 发展阶段       | 效率           |           | 占地        | 维护<br>成本  | 电源<br>稳定性     |
|---------------------|------------|--------------|-----------|-----------|-----------|---------------|
|                     |            | 电解槽          | 功耗        |           |           |               |
| 质子交换膜<br>(PEM)      | 小规模商<br>业化 | 74 ~ 87%     | 3.8 ~ 5.0 | 小         | 低         | 稳定或波动<br>电源均可 |
| 碱性电解水<br>(ALK)      | 大规模商<br>业化 | 52 ~ 82%     | 4.5 ~ 5.0 | 大         | 高         | 需稳定电源         |
| 固体氧化物<br>(SOEC)     | 小规模示<br>范  | 85 ~<br>100% | 2.6 ~ 3.6 | 尚未商<br>业化 | 尚未商<br>业化 | 需稳定电源         |
| 阴离子交换膜电<br>解水 (AEM) | 实验阶段       | N/A          | N/A       | 尚未商<br>业化 | 尚未商<br>业化 | 可快速启动         |

由于碱性电解槽设备投资成本低、寿命较长，其商业化进程最快。但因其动载性能差、电流密度低，ALK 较适合大规模稳态工业化制氢；用于电网调幅时需要大幅提升动载性能。

相较之下，PEM 电解槽的电流密度较高，冷启动性能优于 ALK，但成本偏高。适用于各种制氢，包括工业制氢、便携制氢和用作电网调幅的动态负载。

图 5 ALK 和 PEM 制氢技术参数对比



数据来源：势银（TrendBank）

SOEC 是在高温下将电能和热能转化为化学能的电解设备，效率高，热机状态动载性能好，可快速双向工作，但需要高温热源。相比常温电解水，SOEC 高温电水解可以提供更高的能源转化效率，但设备投资大、寿命短，适用于核电制氢及大规模热电联供等。

AEM 水电解技术是目前较为前沿的水电解技术之一，全世界只有极少数的公司在尝试将其商业化，相关的应用和示范项目也很少。

势银（TrendBank）认为，商业化程度、技术成熟度、单槽产能、负载范围、响应速度和经济性（LCOH）等参数是影响电解水工艺选择的主要因素。

### 3.1.1 碱性电电解水制氢技术

#### 3.1.1.1 技术发展方向

据势银（TrendBank）调研，2022 年，行业对碱性电解水制氢系统的关注点主要集中于设备成本；今年以来，碱性电解槽运行的稳定性、寿命及能耗受到的关注度大大增加，综合性价比成为客户关注的主要因素。综合来看，2023 年碱性电解水制氢系统的主要技术攻关方向包括以下几点：

- 降低电耗；
- 提高电解槽寿命和运行稳定性；
- 提高单槽产气量；
- 提高响应速度；
- 优化设备结构设计。

以上技术水平的提升将对电解槽厂家的制造工艺，以及上游关键部材的性能提出更高要求，电极、隔膜、极板尤为重要。

**单槽产氢量**方面，目前大部分绿氢项目规划的年产氢量均在万吨/年以上，对电解水制氢设备也提出了“大标方”化的需求。

2023 年 3 月 17 日，伊宁市光伏绿电制氢源网荷储一体化项目开工建设。该项目总体建设范围包括 1000MW 光伏电站，配套 70 套碱性水电解制氢成套设备（单套制氢能力 1000Nm<sup>3</sup>/h），设备总制氢能力为 70000Nm<sup>3</sup>/h。提升单槽产氢量将在一定程度上降低采购成本，电解水制氢设备向单体大型化迭代升级。

目前多数碱性电解槽厂商已具备 1000 Nm<sup>3</sup>/h 制氢装备的生产能力。2022 年 10 月，明阳智能推出的碱性水电解制氢装备单体产氢量为 1500-2500Nm<sup>3</sup>/h，刷新了已发布

ALK 产品中最大单槽产氢量的记录。

据势银（TrendBank）统计，2023 年第一季度发布的碱槽新品的平均单槽产氢量为 1363 Nm<sup>3</sup>/h，高于 2022 年上半年的 667 Nm<sup>3</sup>/h 和 2022 年下半年的 1127 Nm<sup>3</sup>/h。碱槽大标方化已成为新品迭代升级的一大趋势。

**能耗方面**，降低直流电耗是目前直接降低电解水系统运营成本的有效路径之一。目前行业的普遍电耗水平为 4.5-5.0kWh/Nm<sup>3</sup>。2023 年 2 月 14 日，隆基氢能发布全新一代碱性电解水制氢设备，从经济性（LCOH）层面打造产品核心竞争力，有力推动了产业的快速发展。ALK Hi1 产品在直流电耗满载状况下可低至 4.3kWh/Nm<sup>3</sup>；同时推出的 ALK Hi1 plus 产品，直流电耗满载状况下低至 4.1kWh/Nm<sup>3</sup>，在 2500A/m<sup>2</sup> 电流密度下，更可低至 4.0kWh/Nm<sup>3</sup>。

按照电耗 4.0kWh/Nm<sup>3</sup>，电价 0.1 元/kWh 计算，则绿氢单位制氢成本可低至 14.8 元/kg，基本可与天然气制氢平价。若绿氢与风光、风电耦合，年利用小时提高至 4000 小时以上，则成本有望进一步下降至 10 元/kg 左右，基本可以实现与煤制氢平价。

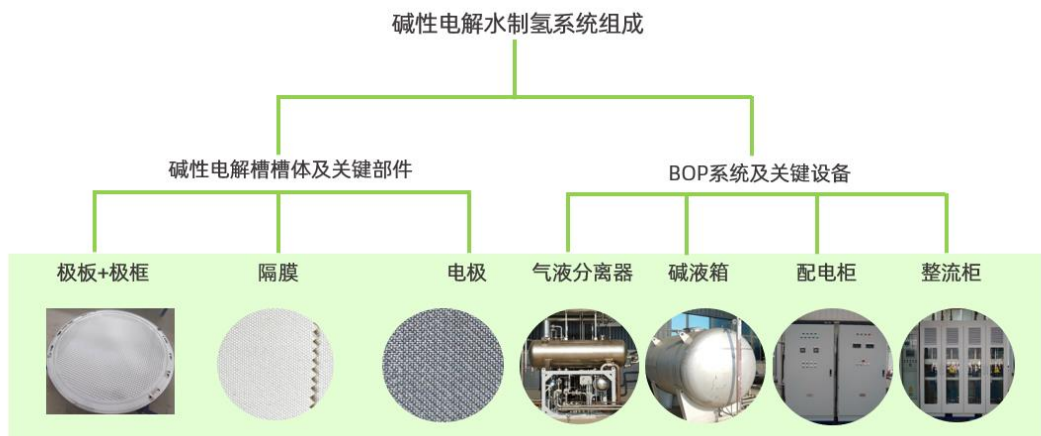
碱性电解槽的电极，是电化学反应发生的场所，也是决定电解槽制氢效率的关键。电极的主要性能指标为电流密度，目前业内相关厂家电极产品的电流密度基本可达到 3000A/m<sup>2</sup>-3500A/m<sup>2</sup> 左右。在保时来、莒纳科技、辉瑞丝网、盈锐优创、力炆电极、图灵科创等一众企业的推动下，国内碱液电极正在向“高电密”迈进。

势银（TrendBank）认为，降低电耗、提高综合性价比是电解槽走向规模化的关键，未来 5 年，绿氢降本路径清晰可见，中国绿氢产业将迎来快速发展周期，企业竞争也将加剧。

### 3.1.1.2 关键部材技术路线

碱性电解水制氢系统主要包括碱性电解槽主体和 BOP 辅助系统。

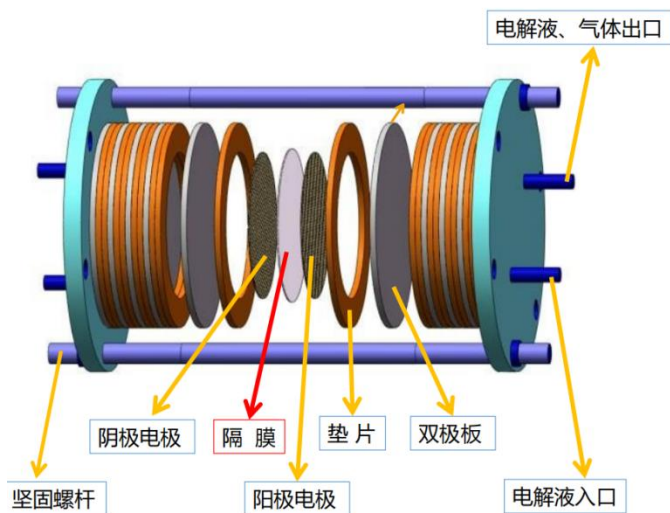
图 6 碱性电解水制氢系统组成



来源：势银（TrendBank）

碱性电解槽主体是由端压板、密封垫、极板、电极、隔膜等零部件组装而成。电解槽包括数十甚至上百个电解小室，由螺杆和端板把这些电解小室压在一起形成圆柱状或正方形，每个电解小室以相邻的 2 个极板为分界，包括正负双极板、阳极电极、隔膜、密封垫圈、阴极电极 6 个部分。

图 7 碱性电解槽结构示意图



来源：碳能科技

## ■ 极板和极框

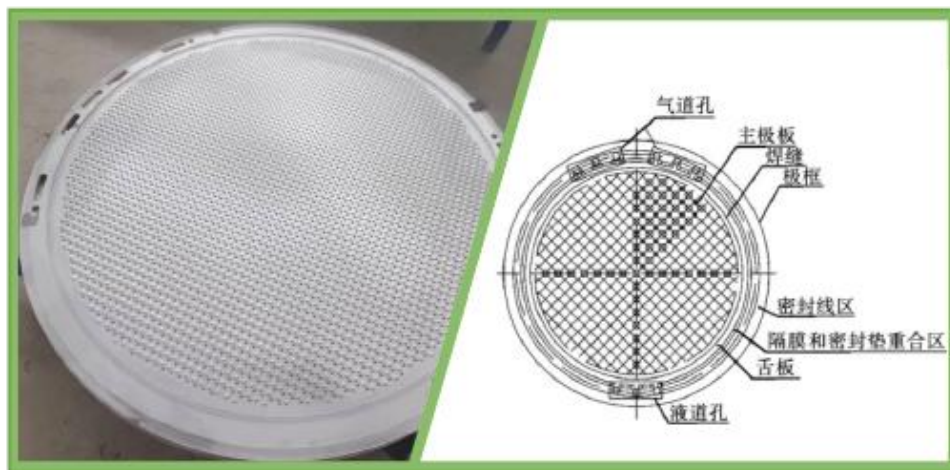


极板是碱性电解槽的支撑组件，其作用是支撑电极和隔膜以及导电。

国内极板材质一般采用铸铁金属板、镍板或不锈钢金属板，加工方式为：经机加工冲压成乳突结构，和极框焊接后镀镍而成。其中镍是非消耗性电极，在碱液里面不易被腐蚀。乳突结构有支撑电极和隔膜的作用，电解液可以在乳突与隔膜布形成的流道中流动、同时乳突还有输电的作用。

极框上分布有气道孔和液道孔，与主极板焊接的部分被称为舌板，极框最外侧为密封线区，其余为隔膜和密封垫的重合区。极框整个宽度为密封线宽度、流道区域宽度、隔膜和密封线重合区域宽度、舌板宽度。

图 8 极板实例图片及剖面图



来源：势银（TrendBank）、北京化工大学

## ■ 隔膜

碱性电解槽在电解过程中，阳极产生氧气，阴极产生氢气，隔膜的作用是防止氢气和氧气的混合。

适用于碱性电解槽的隔膜应具备以下要求：

- 保证氢气和氧气分子不能通过隔膜，但允许电解液离子通过；
- 能够耐高浓度碱液的腐蚀；

- 具有较好的机械强度，能够长时间承受电解液和生成气体的冲击，隔膜结构不被破坏；
- 为了降低电能损耗，隔膜必须要有较小的面电阻，因此隔膜孔隙率要尽可能高；
- 在电解温度和 PH 条件下隔膜能够保持化学稳定；
- 原料易得、无毒、无污染，废弃物易处理。

用于碱性电解槽的隔膜最早使用石棉隔膜，目前主流使用的是聚苯硫醚 PPS 隔膜，高性能隔膜采用的是 PPS 涂覆无机层的复合膜，另外科研院所研发的重点隔膜还有聚四氟乙烯树脂改性石棉隔膜、聚醚醚酮纤维隔膜、聚矾纤维隔膜等。

### （1）石棉隔膜

石棉是最早用于电解水制氢隔膜的材料。

石棉隔膜的优点：具有耐化学腐蚀、耐高温、高抗张强度、亲水性强等优点。

石棉隔膜的缺点：具有溶胀性，使电解能耗升高；限制电解温度，使电流效率无法提高；对人体有毒性，在石棉的开采、制作以及应用过程中，石棉细小纤维通过呼吸与肺部接触，可能引起矽肺病，许多国家都已经限制石棉材料的使用。

### （2）聚四氟乙烯树脂改性石棉隔膜

针对石棉隔膜的弊端，对石棉隔膜进行改性，其中通过共混的方法在石棉纤维中掺杂聚四氟乙烯树脂制备聚四氟乙烯改性隔膜是较为成熟石棉隔膜改性工艺。

优点：聚四氟乙烯包覆石棉纤维的隔膜结构增强了隔膜的耐腐蚀性和机械强度，也降低了石棉的溶胀性，有效地克服了石棉隔膜溶胀和易遭受碱腐蚀的缺点。

缺点：由于聚四氟乙烯树脂亲水性差，加入聚四氟乙烯的石棉隔膜亲水性大大降低，使得电流效率降低能耗升高，加入量越大隔膜亲水性也下降得越多。

### （3）聚苯硫醚隔膜

聚苯硫醚隔膜（简称 PPS），用于碱性电解槽中，其性能优点：

- 耐热性能优异：可以在 200 °C 长期使用，短期耐热性和长期连续使用的热稳定性都很优越；
- 机械性能好：刚性极强，表面硬度高，具有优异的耐蠕变形和耐疲劳性，耐磨性突出；
- 耐腐蚀性强：碱和无机盐的水溶液，即使在加热条件下，对 PPS 几乎没有腐蚀作用；
- 尺寸稳定性好：成型收缩率小，线形热膨胀系数小，因此，在高温条件下仍表现出良好的尺寸稳定性；
- 电性能优良：高温、高湿、高频率下仍具有优良的电性能。

缺点：PPS 隔膜电阻高。

由于 PPS 亲水性差，电解液不能充分进入到隔膜孔隙中，在电解过程中隔膜表面出现微小气泡聚集的现象，这些现象会增加隔膜电阻，导致能耗增加。

国内科研院所目前正在研究对 PPS 进行改性，降低与水的接触角，增加润湿度，改善亲水性的同时，维持耐高温、耐浓碱等特性基本不变。

如果能在不降低 PPS 隔膜优良的物理化学性能的前提下，改善 PPS 隔膜的亲水性能，PPS 隔膜将成为最有前景的碱性电解槽隔膜之一。

#### （4）聚砜类隔膜

聚砜类材料（简称 PSF），是应用比较早、比较广泛的一类隔膜材料，也是隔膜材料研究的热点之一。聚砜类树脂主要有双酚 A 型聚砜、聚醚砜、聚醚砜酮、聚苯硫醚砜等。

PSF 隔膜优点：具有优良的抗氧化性、热稳定性和高温熔融稳定性，同时具有优良的机械性能、耐高温、耐酸碱、耐细菌腐蚀、原料价廉易得，pH 值应用范围广等。

PSF 隔膜缺点：亲水性能差，使隔膜的水通量低，抗污染性能不理想，影响其应用范围和使用寿命。

因此，对 PSF 隔膜材料的改性工作，多集中在提高其亲水性上，主要通过向其中引入亲水性物质，来改善 PSF 隔膜材料的亲水性。

#### （5）聚醚醚酮隔膜

聚醚醚酮（简称 PEEK），是一种具有耐高温、耐化学腐蚀的高分子材料，可用作高温结构材料、电绝缘材料、增强材料等。近年来也逐渐应用于碱性水电解槽的隔膜材料。

市场上常见的 PEEK 隔膜是由 PEEK 纤维通过机织制得，隔膜的性能与隔膜的厚度和编织方式有关。

### ■ 电极

碱性电解槽的电极，是电化学反应发生的场所，也是决定电解槽制氢效率的关键。

目前国内大型碱性电解槽使用的电极，大多是镍基的，如纯镍网、泡沫镍或者以纯镍网或泡沫镍为基底喷涂高活性催化剂。

镍网一般是由 40-60 目的镍丝网经过裁圆而成，镍丝的直径大约在 200 $\mu$ m 左右。镍网产品比较成熟，价格低廉，具有良好的耐酸、耐碱、耐高温等性能。

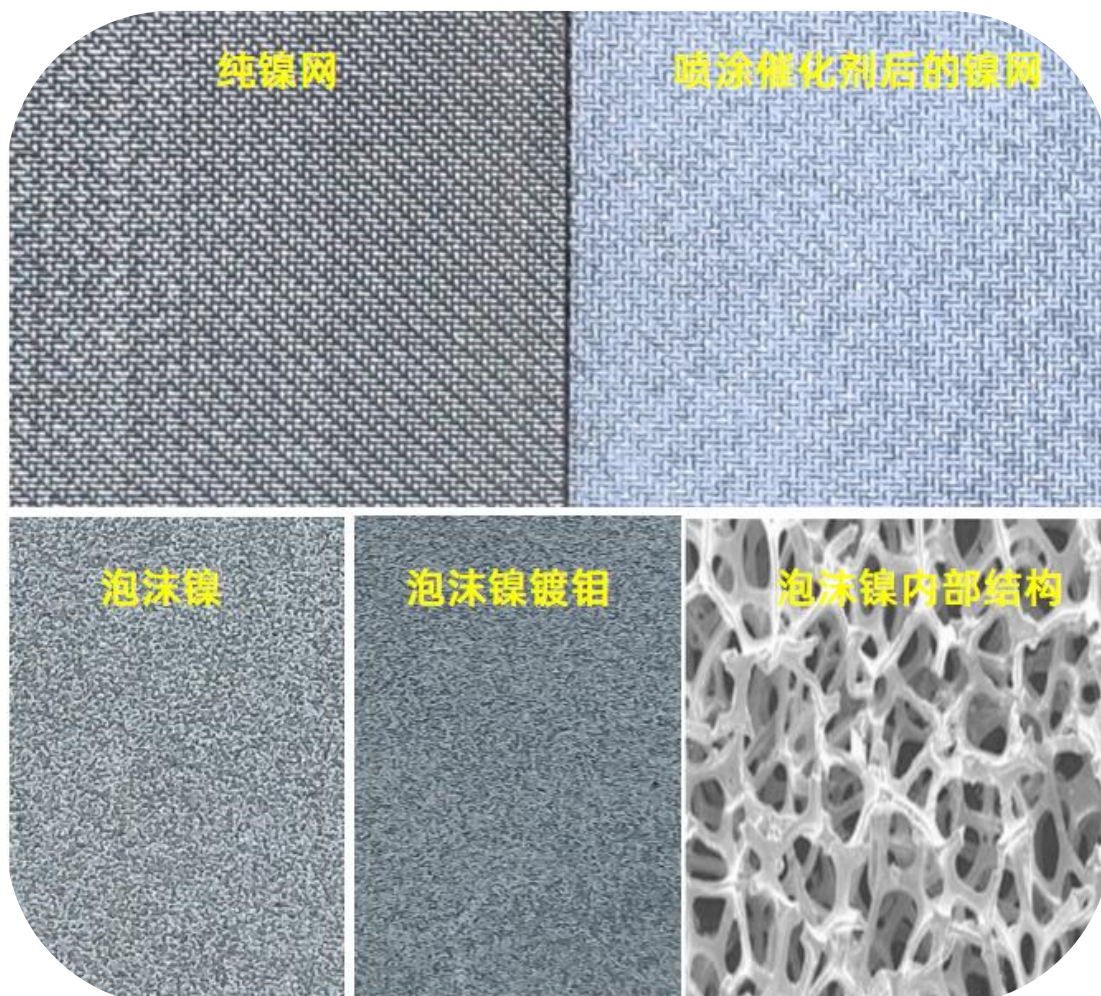
泡沫镍价格低廉、产品成熟，电极材料内部充满大量微孔，表面积非常大，溶液与电极的接触面积因此大大增大，缩短了传质距离，极大地提高电解反应效率。

涂层催化剂种类主要有两种：一种是高活性镍基催化剂，目前常见的有雷尼镍、活化处理的硫化镍、镍铝合金或者活化处理的镍铝粉等；一种是含有贵金属的催化剂（铂系催化剂，钌系催化剂，铱系催化剂等）。

涂层方式有喷涂、滚涂、化学镀等方式，不同方式性能和成本也会有差异。国内电解槽电极喷涂分三种：只喷涂阳极、只喷涂阴极和阴阳极全部喷涂。



图 9 电极图片



来源：势银（TrendBank）

### 3.1.2 质子交换膜电解水制氢技术

#### 3.1.2.1 技术发展方向

为满足下游工业领域对氢气的大规模需求，同时更好的与上游光伏、风力和水力发电等可再生电力配套，质子交换膜电解槽逐渐向大功率发展，包括提高单个模块化产品的功率和基于模块化产品组成的电解槽系统的功率。如 Cummins 的 HyLYZER-1000 系统即由 2 个 2.5MW 的电解槽组成，ITM 的 10MW 标准模块也基于 3MEP CUBE 组成的。赛克赛斯氢能也将继 1MW 电解槽后，推出其单槽规模为 5MW 的电解槽。部分企业的质子交换膜

电解槽装置指标如下表所示。

表 9 质子交换膜电解槽装置指标（部分）

| 参数指标                       | Cummings     | ITM       | 赛克赛斯 | 中船派瑞氢能  | 阳光电源    |
|----------------------------|--------------|-----------|------|---------|---------|
|                            | HyLYZER-1000 | 3MEP CUBE | NA.  | SDQ-300 | SHT200P |
| 额定功率 (MW)                  | 5            | 2         | 6    | 1.5     | 1       |
| 额定产氢量 (Nm <sup>3</sup> /h) | 1000         | 400       | 1200 | 300     | 200     |
| 最大工作压力 (MPa)               | 3            | 3         | 3    | 3.2     | 3       |
| 工作温度 (°C)                  | 65±5         | NA.       | 5-50 | 54±2    | 60±5    |
| 负荷条件范围 (%)                 | 5-125        | NA.       | NA.  | 10-100  | 5-110   |

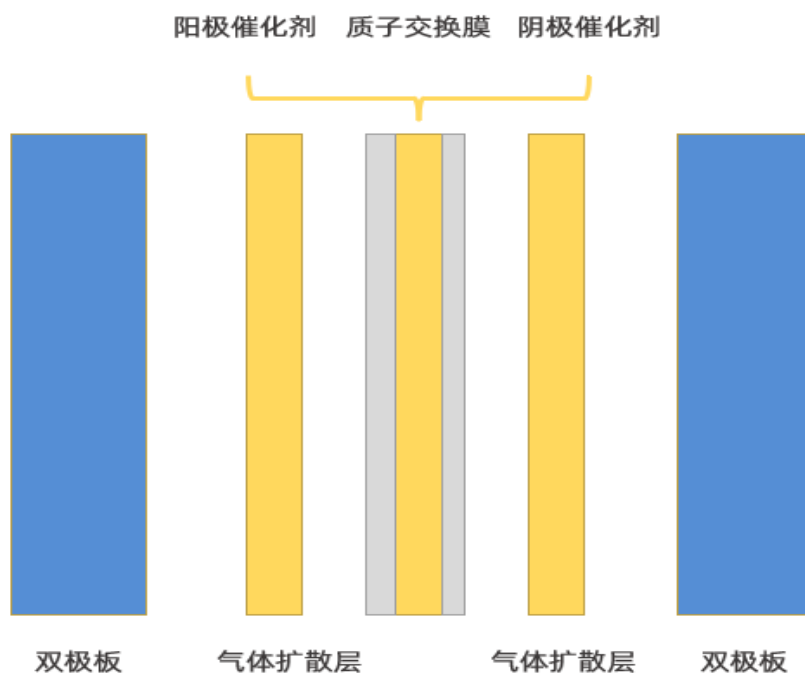
数据来源：各公司官网，势银（TrendBank）整理

随着 PEM 电解槽向大功率、高电流密度和低成本等方向不断发展，对核心部材也提出了新挑战。如开发基于膨体聚四氟乙烯或聚醚醚酮等多孔支撑材料的全氟磺酸复合膜，降低质子交换膜的厚度，提高机械强度；开发铈合金等低铈催化剂，提高催化活性，降低铈用量；优化气体扩散层的结构和表面涂层，提高气液传输效率等；优化双极板流场机构和表面涂层，提高水气扩散能力、均匀性、导电和耐腐蚀性等。

### 3.1.2.2 关键部材技术分析

PEM 电解槽是 PEM 电解水制氢装置的核心部分。电解槽的最基本组成单位是电解池。取决于功率的大小，一个 PEM 电解槽包含数十甚至上百个电解池。每个电解池由 5 部分组成，由内而外分别为质子交换膜、催化剂、气体扩散层和双极板。

图 10 PEM 电解槽内部结构示意图



来源：势银（TrendBank）

## ■ 质子交换膜

质子交换膜是 PEM 电解槽的核心零部件之一。在 PEM 电解槽中，质子交换膜即充当质子交换的通道，又作为屏障防止阴阳极产生的氢气和氧气互相接触，并为催化剂涂层提供支撑。因此，质子交换膜需要具备极高的质子传导率和气密性，极低的电子传导率。与此同时，质子交换膜还需要具备良好的化学稳定性，可以承受强酸性的工作环境；较强的亲水性也必不可少，这可以预防质子交换膜局部缺水，避免干烧。质子交换膜的性能好坏，直接影响着 PEM 电解槽的运行效率和寿命。

质子交换膜的加工上仍然存在难度，和燃料电池使用的质子交换膜（厚度 10 微米左右）相比，PEM 电解槽使用的质子交换膜更厚（150-200 微米），在加工的过程中更容易发生肿胀和变形，膜的溶胀率更高，加工难度更大。目前使用的质子交换膜大多采用全氟磺酸基聚合物作为主要材料。国内外使用最为广泛的主要为杜邦（科慕）的 Nafion™ 系列，例如 Nafion 115 和 117 系列质子交换膜，其他膜产品包括陶式的 XUS-B204 膜以及旭硝子的

Flemion®膜等。

但由于全氟磺酸树脂存在合成工艺较为复杂且存在一定的毒性,所以非氟磺酸复合膜也逐渐成为相关研究机构和企业研究方向之一,其对生物和环境的影响也逐渐引起相关机构的重视。如 2021 年,日本 NEDO 资助东丽与西门子等企业,合作开发基于东丽的烃基电解质膜的低成本 PEM 水电解系统,2023 年 3 月,欧盟的欧洲化学品管理局 (ECHA),将对拟限制 PFAS 的提案进行为期 6 个月的广泛调研和评估。

表 10 杜邦 Nafion™ 系列膜参数

| 膜型号              | Nafion N-115 | Nafion N-117 |
|------------------|--------------|--------------|
| 厚度 (微米)          | 127          | 183          |
| 基重 (克/平方米)       | 250          | 360          |
| 比重               | 1.98         |              |
| 电导率 (西门子/厘米)     | 0.083        |              |
| 离子交换容量 (毫克当量数/克) | 0.89         |              |

来源: 杜邦

国内的 PEM 电解槽生产企业对于进口质子交换膜仍然具有很高的依赖性。由于质子交换膜生产技术长期被欧美和日本国家所垄断,国内的工业级的 PEM 产品几乎全部使用杜邦的 Nafion™ 系列质子交换膜。目前,国内仅东岳未来氢能、浙江汉丞、通用氢能和科润新材料等少数企业有能力生产应用于 PEM 电解槽的质子交换膜产品。

质子交换膜主要有熔融挤出法和浇筑成膜法等几种加工方式。

如何在减少膜的厚度的同时,保持膜的机械稳定性,是膜技术开发的重点之一,如开发基于膨体聚四氟乙烯或聚醚醚酮等多孔支撑材料的全氟磺酸复合膜。膜的厚度会影响 PEM 电解槽的欧姆内阻,厚度过高会加大极化损失,增加制氢能耗。尽管如此,考虑到质子交换



膜需要在高压环境中工作，为了保持质子交换膜的机械稳定性，防止气体交叉渗透的现象发生，行业内大多仍然采用厚度超过 100 微米的膜。未来，质子交换膜的技术开发必须注重质子传导率、气体交叉渗透和高压机械稳定性三者之间的平衡。

## ■ 催化剂

阴、阳极催化剂是 PEM 电解槽的重要组成部分。由于阴、阳极催化剂是电化学反应的场所，催化剂需要具备良好的抗腐蚀性、催化活性、电子传导率和孔隙率等特点，才能确保 PEM 电解槽可以有稳定运行。

和燃料电池相比，PEM 电解槽在催化剂的使用上更加依赖贵金属材料。在 PEM 电解槽的强酸性运行环境下，非金属材料容易受到腐蚀，并可能和质子交换膜中的磺酸根离子结合，降低质子交换膜的工作性能。目前常用的阴极催化剂为以碳为载体材料的铂碳催化剂。在酸性和高腐蚀性的环境下，铂仍然可以保持较高的催化活性，确保电解效率；而碳基材料即为铂提供了载体，也充当着质子和电子的传导网络。催化剂中的铂载量约在  $0.4\text{--}0.6\text{g}/\text{cm}^2$ ，铂的质量分数约在 20%-60% 之间。

阳极的反应环境比阴极更加苛刻，对催化剂材料的要求更高。由于阳极电极材料需要承受高电位、富氧环境和酸性环境的腐蚀，燃料电池常用的碳载体材料容易被析氧侧的高电位腐蚀降解，因此一般选用耐腐蚀且析氧活性高的贵金属作为 PEM 电解槽阳极侧的催化剂。结合催化活性和材料稳定性来看，铱、钌及其对应的氧化物（氧化铱和氧化钌）是目前最适合作为 PEM 阳极侧催化剂的材料。相比氧化铱，虽然氧化钌的催化活性更强，但在酸性环境下氧化钌容易失活，稳定性比氧化铱稍差。因此，氧化铱是目前应用最广泛的阳极催化剂。催化剂中的铱载量约为  $1\text{--}2\text{g}/\text{cm}^2$ 。

据势银（TrendBank）调研，应用于析氧侧的含铱催化剂主要分下列三大类：

- 铱的氧化物：传统的氧化铱产品，在应用过程中粉末颗粒容易解析，影响使用寿命；

- 氧化铱/氧化钛：相较单纯的氧化铱而言，加入氧化钛提升了催化活性；但由于钛本身的特性，耐久仍然受到影响；
- 氧化铱/氧化铌：目前市场上少数可以兼顾催化活性和耐久性的产品。

PEM 电解槽催化剂对贵金属的依赖可能是阻碍 PEM 快速推广的因素之一。应用于 PEM 电解槽的催化剂铂、铱、钌等贵金属产量稀少、成本高昂。铱作为 PEM 电解槽阳极最重要的催化剂材料，供应上存在很大的制约。目前全球铱的产量约为 7 吨/年，远远少于其他贵金属（2021 年铂的年产量在 180 吨左右），其中 85%左右的铱产自南非。铱的价格也相当高昂，目前已经达到 1000 元/g 以上。

降低催化剂中贵金属的含量已经成为了目前催化剂技术开发的主要方向。针对阴极催化剂，开发方向集中于降低铂在催化剂中的用量。在催化剂中加入非贵金属基化合物，例如非贵金属的硫化物、氮化物、氧化物等，可以在保持催化活性的前提下，降低铂的使用量。

阳极催化剂的技术开发方向包括使用载体材料或设计新的催化剂结构：

- 使用高比表面积的材料作为铱的载体，可以将铱颗粒高度分散在载体材料上，从而提高铱的利用率和活性，借此减少铱的负载量。由于阳极的反应条件苛刻，为了确保催化剂的耐久性，阳极材料需要具备耐腐蚀性、导电性和高比表面积等特性。目前常用的载体材料有氧化钛和掺杂铌的氧化钛等；
- 设计新的催化剂结构，例如采用核壳式结构，也是可以减少铱的用量。由于催化反应集中于材料表面的活性电位，阳极催化剂可以采用核-壳式结构——在外层的壳上使用铱，在内层的核使用非贵金属材料。这样既可以减少铱的用量，也不会影响铱的催化活性。
- 国内已经有少数企业有能力生产 PEM 电解槽使用的催化剂，包括中科科创、济平新能源等。国外企业有优美科、贺利氏等。下图为质子膜电解水用催化剂实例图片。

图 11 催化剂图片



来源：中科科创

## ■ 气体扩散层

气体扩散层（国外简称 GDL 或 PTL），又称多孔传输层或集流器，是夹在阴阳极和双极板之间的多孔层。气体扩散层作为连接双极板和催化剂层的桥梁，确保了气体和液体在双极板和催化剂层之间的传输，并提供有效的电子传导。在阳极，液态水通过气体扩散层传导至催化剂层，被分解为氧气、质子和电子。生成的氧气通过气体扩散层反向汇流至双极板，质子通过质子交换膜传导至阴极，电子则通过气体扩散层传导至阳极侧双极板后进入外部电路。在阴极，电子从外部电路通过气体扩散层进入阴极催化剂层，和质子反应后产生氢气。产生的氢气通过气体扩散层汇流至双极板。因此，为了确保气/液运输效率和导电性能，气体扩散层既需要拥有合适的孔隙率，也需要拥有良好的导电性，确保电子传输效率。

PEM 电解槽的气体扩散层材料选择和燃料电池的气体扩散层选择有所不同。燃料电池通常选择碳纸作为阴极和阳极的气体扩散层材料。在 PEM 电解槽中，由于阳极的电位过高，高氧化性的运行环境足以氧化碳纸材料，通常选择耐酸耐腐蚀的钛基材料作为 PEM 电解槽阳极气体扩散层的主要材料，并制作成钛毡结构以确保气液传输效率。钛基材料在长时间的使用下容易钝化，形成高电阻的氧化层，降低电解槽的工作效率。为了防止钝化现象的发生，通常会在钛基气体扩散层上涂抹一层含有铂或者钌的涂层进行保护，确保电子传导效率。PEM 电解槽的阴极电位较阳极更低，碳纸或钛毡都可以作为气体扩散层的材料。

钛毡式气体扩散层的制作工艺较为复杂。高纯的钛材料需要经过一系列的工艺，包括钛纤维制作、清洗、烘干、铺毡、裁剪、真空烧结、裁剪、涂层等一系列的工艺，才可以入库保存。

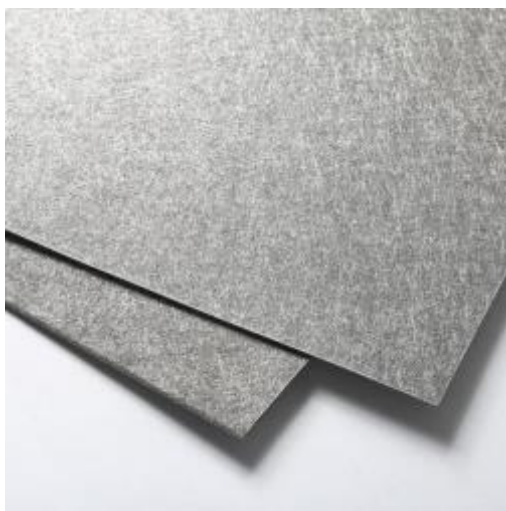
未来，气体扩散层优化的关键在于保持系统的动态平衡。随着水电解反应的持续推进，阳极生成的氧气会逐渐积聚在气体扩散层的通道内，阻塞流道，对液态水的运输产生潜在的影响。这可能会导致气液运输效率下降，对 PEM 电解槽的工作效率产生负面影响。在气液逆流的情况下，减少气液阻力，及时移除阳极产生的氧气，并将液态水及时运输至阳极催化层，将是气体扩散层优化的方向。孔隙率、孔径尺寸和厚度等指标都是未来需要研究的重点。

国内目前可以生产钛基气体扩散层的企业较少。浙江玖昱、菲尔特已经搭设了 PEM 电解槽用气体扩散层的相应产线；西安菲尔特也已拥有气体扩散层的生产技术，并展开了相应产品测试。

工业级的质子膜电解槽产品国内仍以进口品牌使用为主，国产的在民用领域取得应用，随着西部菲尔特等企业的加入，势银（TrendBank）预测气体扩散层国产化率会逐步提升。

下图为气体扩散层钛毡实例图片。

图 12 钛毡实例图片



来源：西安菲尔特

## ■ 双极板

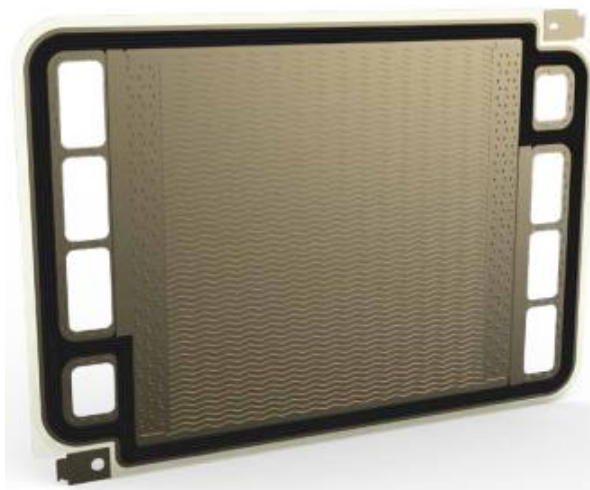
双极板不仅是支撑膜电极和气体扩散层的支撑部件，也是汇流气体（氢气和氧气）及传导电子的重要通道。阴阳极两侧的双极板分别汇流阴极产生的氢气和阳极产生的氧气，并将它们输出。因此，双极板需要具备较高的机械稳定性、化学稳定性和低氢渗透性。阳极产生的电子经由阳极双极板进入外部电路，再通过阴极双极板进入阴极催化层。因此，双极板还需要具备高导电性。

PEM 电解槽双极板和燃料电池双极板的结构和使用材料有很大的区别。在结构方面，PEM 电解槽双极板不需要加入冷却液对设备进行冷却，使用一板两场的结构就可以满足运行需求，相比于燃料电池双极板两板三场的结构更为简单。在材料方面，PEM 电解槽中阳极的电位过高，燃料电池常用的石墨板或者不锈钢制金属板容易被腐蚀降解。使用钛材料可以很好的避免金属腐蚀导致的离子浸出，预防催化剂的活化电位收到毒害。但由于钛受到腐蚀后，容易在表面形成钝化层，增大电阻，通常会在钛板上涂抹含铂的涂层来保护钛板。

钛基双极板目前有冲压工艺、蚀刻工艺等。相比之下，冲压工艺的单位加工成本更低，更适合于大规模化生产，可能会成为未来主要工艺路线。

国内目前能制造 PEM 电解槽双极板的企业数量相对较少。上海治臻和金泉益都已经搭建了 PEM 电解槽双极板的生产线，并已经开始出货。

图 13 双极板实例图片



来源：上海治臻

### 3.1.3 高温固体氧化物电解水制氢技术

SOEC (solid oxide electrolysis cell) 是高温固体氧化物电解池的简称，是在高温下将电能和热能转化为化学能的电解设备。相比常温电解水，SOEC 高温电水解可以提供更高的能源转化效率；此外，由于不需要使用贵金属催化剂，SOEC 还具备材料成本低廉的优势。

2023 年，国内市场已多次释放出 SOEC 制氢设备采购订单，越来越多的企业与高校开始布局 SOEC 赛道，国内 SOEC 技术的发展从“实验研发阶段”进入“小规模示范阶段”。不过，目前国内 SOEC 企业的技术水平相较国外发展水平仍有较大差距。主要体现在以下几点：

- 关键材料性能提升：高温运行条件下保持良好的热稳定性和化学稳定性，同时保证材料易于加工、控制成本；
- 建立完备的供应链：目前 SOEC 原材料体系均由厂家独自设计制造，每家设计的 SOEC 产品支撑结构、配套的原材料都不一样，不利于 SOEC 的整体开发；

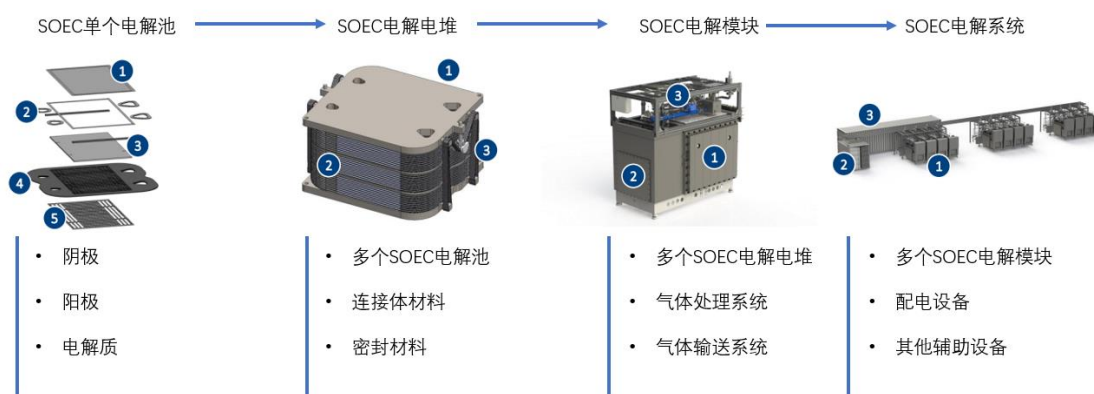


- BOP 国产化供应：目前国内尚未形成成熟的 BOP 供应链，产品仍处于定制化阶段，导致 BOP 的成本居高不下。

2022 年，固体氧化物电解水蒸汽制氢系统与电解堆技术（共性关键技术类）被列入科技部“氢能技术”重点专项 2022 年度项目申报。项目主要研究内容包括：针对固体氧化物电解水蒸汽制氢（SOEC）技术实用化问题，研究大功率固体氧化物电解制氢电解堆与系统集成技术。具体包括：大面积、高强度的超薄电解质设计与制备技术；高活性、长寿命电极设计与制备技术；电解池电连接、串接密封及其成堆技术；电解堆模组流场和热控设计与集成技术；水热等运行条件对电解堆性能影响规律、优化运行策略及 SOEC 系统集成技术。

以上技术指标与 SOEC 电解系统关键材料息息相关，其构成如下图所示：

图 14 SOEC 电解水系统构成图



来源：Sunfire、势银（Trendbank）

SOEC 电解系统的最基本组成单元是 SOEC 电解池，多个电解池组装在一起成为 SOEC 电堆。多个电堆和气体处理系统、气体输送系统一起可以组合成 SOEC 电解模块。最终多个模块可以组合成一个完整的 SOEC 系统。由于各个 SOEC 设备制造公司的技术和工艺存在差异性，组成 SOEC 电解电堆的电解池数量、组成 SOEC 电解模块的电堆数量和组成 SOEC 电解系统的模块数量也会存在不同。

电解质、阴极和阳极是 SOEC 电解池的核心组成部分，直接影响着 SOEC 设备的工作

性能和工作效率。

## ■ 电解质

电解质的性质决定了 SOEC 的技术路线和阴、阳极材料的选择（高温下热膨胀系数需保持一致）。电解质的主要作用是将在阴极产生的氧离子传导至阳极，阻隔电子电导，并防止阴阳极产生的氢气和氧气相互接触。因此，电解质层需要有极高的离子传导率和极低的电子传导率。为了防止阴极的氢气渗透进入阳极，电解质层的气密性必须高。此外，为了减少电解池的欧姆损失，电解质层的厚度要尽可能减小。

电解质材料通常选用导电陶瓷材料。在 800-1000℃ 的高温运行环境下，常用的电解质材料有钇稳定的氧化锆（YSZ）和钪稳定的氧化锆（ScSZ）。由于 YSZ 即可以提供优良的氧离子电导率，相比 ScSZ 又具备一定的成本优势，已经成为了最常用的电解质材料。在 600-800℃ 的中温运行环境下，镧锶镓镁（LSGM）、钆掺杂的氧化钪（SDC）和钆掺杂的氧化钪（GDC）也是较为常用的电解质材料。

## ■ 阴极

阴极是原料水分解的场所，并提供电子传导通道。这要求阴极材料具有良好的电子导电率、氧离子导电率和催化活性，以确保反应的顺利进行。与此同时，由于阴极需要和高温水蒸气直接接触，阴极材料需要在高温高湿下具备化学稳定性。材料还必须具备合适的孔隙度，保证电解所需水蒸气的供应和氢气产物的输出。由于在高温下，热膨胀系数不匹配会导致过高的机械应力，最终使材料破碎。因此，阴极材料必须和电解质材料具有类似的热膨胀属性。

阴极材料通常选用金属陶瓷复合材料。镍（Ni）、钴（Co）、铂（Pt）、钯（Pd）都满足 SOEC 对阴极材料的要求。镍的成本较低，对水的分解反应具有良好的催化活性，用 Ni 和 YSZ 制造的金属陶瓷复合材料成为了最常用的阴极材料。使用 YSZ 和 Ni 作为阴极材料，可以使阴极的热膨胀系数接近以 YSZ 为主要材料的电解质，保持 SOEC 的机械稳定性。



YSZ 还可以提高界面的电化学反应活性，确保 SOEC 的工作效率。

## ■ 阳极

阳极是产生氧气的场所。阳极材料必须要在高温氧化的环境下保持稳定。与此同时，为了确保氧气的顺利生成，阳极材料必须具备优良的电子导电率、氧离子导电率和催化活性；材料必须采用多孔结构，便于氧气的流通。最后，为了保持高温下的机械稳定，阳极材料的热膨胀系数也必须和电解质相匹配。

使用钙钛矿氧化物制备的导电陶瓷材料是目前最常用的阳极材料。其中，掺杂锶的锰酸镧（LSM）的化学催化活性高，和 YSZ 电解质的热膨胀系数接近，是其中最具代表性的材料之一。

### 3.1.4 固体聚合物阴离子交换膜电解水制氢技术

虽然固体聚合物阴离子交换膜电解水制氢技术（AEM）可以同时兼具 PEM 和 ALK 的技术优势，但由于处于发展初级阶段，相关产品在寿命、产氢规模等方面是否能够满足商业化运行仍然存疑。

目前我国 AEM 制氢技术的开发难点主要集中于：

- 提高设备寿命：AEM 在工作过程中，阴离子交换膜表面会形成的局部强碱性环境，使得 AEM 在  $\text{OH}^-$  的作用下发生降解带来的穿孔会引发电堆短路，影响使用寿命；
- 开发合适高效的聚合物阴离子交换膜：在保持工作效率的同时兼顾使用寿命；
- 产品大标方化：目前我国 AEM 电解槽单槽产品还停留在  $0.5\text{-}5\text{Nm}^3/\text{h}$  之间，很难满足我国西北、西南等地区大型可再生能源电解水制氢综合示范项目的采购标准。

阴极材料、阳极材料和阴离子交换膜是 AEM 电解池的核心构成，直接影响着 AEM 电解池的工作效率和设备寿命等。

## ■ 阴离子交换膜

阴离子交换膜是 AEM 电解池中最重要的一部分，直接决定着 AEM 电解设备的工作效率和运行寿命。阴离子交换膜的作用是将氢氧根离子从阴极转导至阳极。因此，构成阴离子交换膜的材料需要具备较高的阴离子传导性和极低的电子传导性。由于在 AEM 电解设备中，局部区域会出现高碱性，理想条件下，阴离子交换膜需要具备优秀的化学和机械稳定性。与此同时，为了隔绝阴极和阳极，防止氢气和氧气相互接触产生爆炸，阴离子交换膜必须具备极低的气体渗透性。

目前的阴离子交换膜通常选用聚合物作为其主要材料。由于 AEM 水电解技术还处于研发阶段，现阶段仍未找到最合适的材料，在研发中使用较多的有芳香族聚合物。目前材料的选择仍然存在许多问题：1、芳香族聚合物在碱性环境中长期运行时，尤其是在加入了稀 KOH 溶液作为辅助电解质的情况下，会慢慢被降解，影响 AEM 水电解设备的稳定性和系统寿命；2、由于氢氧根离子在阴离子交换膜中的传导性比质子在质子交换膜中的传导性低的多，为了保持 AEM 电解池的工作效率，研发机构倾向于制作更薄的阴离子交换膜，以减少氢氧根离子传导时收到的阻力，但这也会降低阴离子交换膜的机械稳定性，使它容易出现孔洞。

## ■ 阴极材料和阳极材料

阴极材料和阳极材料的主要作用是催化水的分解反应，并将产生的氢气与氧气及时输出。因此，阴极和阳极材料必须具备较强的催化活性，和多孔性。为了电极反应的顺利进行，阴极和阳极材料必须具备较高的阴离子传导性和电子传导性。

现阶段使用最多的阴极材料主要是镍，阳极材料主要是镍铁合金。铁和镍不但对水的分解有较强的催化活性，而且来源广、成本低。由于 AEM 不需要在高腐蚀性的环境下运行，因此阴阳极材料中不需要加入钌元素等贵金属催化剂和钛，大大降低了 AEM 设备的制造成本。

目前开发的阴离子交换膜仍然无法兼顾工作效率和设备寿命。因此，有关 AEM 的研究主要聚焦于开发合适高效的聚合物阴离子交换膜。其次，在实验室研发阶段，电极材料中仍然会加入少量的贵金属。因此，开发低成本的高效非贵金属催化剂也是 AEM 研究的重点之一。

## 3.2 其他绿氢技术发展现状

### ■ 生物质制氢技术发展现状

生物质制氢技术可分为生物质热转化制氢、微生物发酵制氢两种。对于含有较多纸板和塑料等物质的城市垃圾，可以使用热解气化技术制氢；对于含水率较高的生物质或者垃圾，如厨余垃圾等，可以使用生物发酵技术制氢。按不同的菌种分类，生物发酵技术又可分为两种技术路线，甲烷菌和产氢菌。

目前甲烷菌应用于沼气制氢技术比较成熟，已经开始商业化推广，国内已有数十套小型的撬装式沼气制氢装置运行，国内大型的沼气制氢装置也可达到 50000 标方每小时。

产氢菌的应用此前一直处于实验室研发阶段，距离商业化应用尚有一段距离。2023 年 2 月，生物制氢产氢菌在国内有了重要突破，国内首个生物制氢及发电一体化项目在哈尔滨市平房污水处理厂完成入场安装、联调，启动试运行。项目包括制氢、提纯、加压、发电、交通场景应用、发酵液综合利用等六大系统。制氢采用生物质-垃圾发酵制氢技术，以农业废弃秸秆、园林绿化废弃物、餐厨垃圾、高浓有机废水等为发酵底物，以高效厌氧产氢菌种作为氢气生产者。

热解气化制氢技术方面，由于气体处理过程复杂，生物质-垃圾热解气化制氢目前国内暂时没有商业化运行项目。国内企业如东方锅炉、大唐集团等正在布局热解气化制氢领域。2022 年 10 月，国内首台套生物质气化——化学链制氢多联产应用研究中试项目在中国大

唐集团有限公司安徽马鞍山当涂发电公司“点火”成功。

总体来说，生物质制氢现阶段的商业化推广比较少，未来是否有发展潜力取决于四项关键点：

- 是否能提高产氢效率；
- 是否能实现连续流产氢，进而实现工业化生产；
- 装备能否规模化；
- 是否能获取廉价原料。

政策方面，2023 年 2 月，欧盟重新定义可再生氢，生物质被排除在外。欧盟可再生能源指令要求的两项授权法案，规定了三种可以被计入可再生能源的氢气：直接连接新的可再生能源发电机组所产生的氢气，在可再生能源比例超过 90%的地区采用电网供电所生产的氢气，以及在低二氧化碳排放限制的地区签订可再生能源电力购买协议后采用电网供电来生产氢气。

#### ■ 太阳能制氢技术发展现状

太阳能制氢可分为光电解水制氢、光催化分解水制氢和太阳能热化学循环制氢，目前均处于研发阶段，国内相关指标如“太阳能到氢能转化效率”尚未达到可规模化示范的指标，较国际上还有一定差距。太阳能制氢未来研发的关键是产氢材料的效率及稳定性。

## 第四章 中国绿氢产业市场篇

### 4.1 国内绿氢产业市场现状

据势银（TrendBank）统计，截至 2023 年 3 月底，全国已有超 200 个运行、在建和规划的绿氢项目，其中 177 项为电解水制氢项目，基本实现覆盖全国。

图 15 中国电解水项目分布



数据来源：势银（TrendBank）数据库

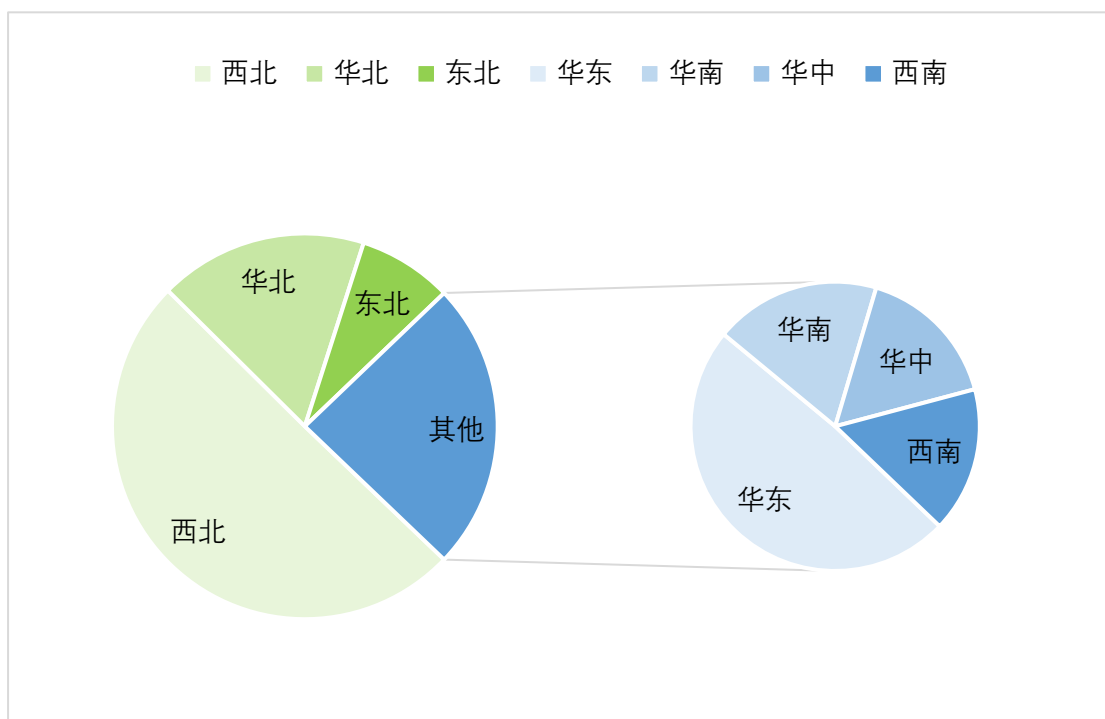
目前多数绿氢项目仍处于前期规划状态，距离投产仍需要很长时间。已建成的项目中，实际运行的项目少之又少，究其原因，当前大量绿氢项目面临的“运行即亏损”的问题依然需要产业共同去解决。尽管绿氢项目现阶段在经济性、稳定性、寿命等各方面存在很多问题，项目的火热程度在 2023 年并未减少。据势银（TrendBank）统计，2023 年 1-3 月确定已开标或开建的大规模绿氢项目新增 1066MW 电解槽需求，对应 1000 Nm<sup>3</sup>/h 碱性电解槽

的需求量超过 200 套。

2023 年 4 月，位于吉林大安的“风光制氢合成氨一体化项目”公开中标候选人。项目共计招标 39 套 1000Nm<sup>3</sup>/h 的碱性电解水制氢系统，招标分为 4 个标段，中标候选人包括隆基氢能、阳光电源、三一氢能、派瑞氢能。

从地域分布上看，2023 年第一季度，我国绿氢项目增量主要集中于“西北、东北、华北”地区。截至 2023 年 3 月底，“三北”地区项目数量合计占比 75%，较 2022 年 11 月的 70%进一步提升。

图 16 中国电解水项目地区分布



数据来源：势银（TrendBank）数据库

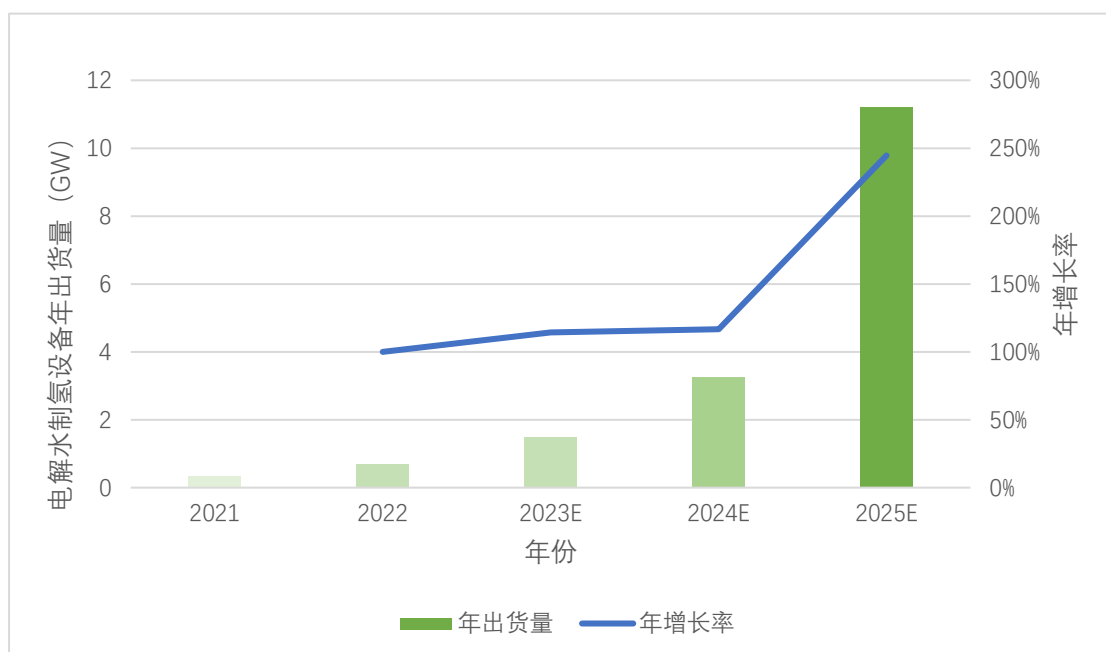
相较于中国其他地区，“三北”地区在可再生能源制氢上具备独特的优势。第一，“三北”地区拥有丰富且廉价的可再生电力资源以及大量的风光指标；第二，“三北”地区拥有大量的化工企业（合成氨/合成甲醇）和炼化企业可以作为绿氢的终端应用场景，实现短距离运输应用或就地消纳。势银（TrendBank）预计，“三北”地区将在未来三年内成为中国

的绿氢生产中心。

## 4.2 国内绿氢产业市场规模

据势银（TrendBank）统计，2023 年 1-3 月确定已开标或开建的大规模绿氢项目新增 1066MW 电解槽需求，预计 2025 年绿色可再生氢气的需求量将达到约 130 万吨以上，2023-2025 年的电解水制氢设备累计出货量预计达到 17GW 以上。

图 17 2021-2025 年电解水制氢设备年出货量预测



来源：势银（TrendBank）

目前我国绿氢项目年规划产量都在万吨以上，其中最大的项目年绿氢规划产量达到了 25 万吨（搭配 632 台 1000Nm<sup>3</sup>/h 的碱性电解槽）。这些项目大多用于大规模绿色合成氨，预计将于 2025 年逐步开始投产。根据势银（TrendBank）的预测，未来电解水制氢设备的出货量可能在 2025 年迎来井喷式增长。2023-2025 年中国电解水制氢设备预计累计出货 17GW，其中 2025 年中国电解水制氢设备的年出货量预计将超过 11GW，占比达到 65%，远远高于 2023-2024 年的年出货量。

## 第五章 中国电解水制氢产业供应链篇

### 5.1 碱性电解槽企业分析

#### 5.1.1 布局方面

据势银（TrendBank）统计，国内已有一百五十多家企业布局或规划碱性电解槽的研发或生产，包括在碱性电解水制氢行业深耕多年的传统企业、近几年入局的新能源企业和装备制造企业、以及科研院校背景的氢能初创企业。

150 多家企业中，有 20 家左右为 2023 年 1 月份至 4 月份新入局的企业。势银（TrendBank）估计大部分企业已于 2022 年“跑步入场”，2023 年仍有一定新增但增速将放缓。下表为部分企业列表，非公开的未列入。

表 11 部分碱性电解槽企业列表

| 序号 | 企业名称               | 序号 | 企业名称             |
|----|--------------------|----|------------------|
| 1  | 中船（邯郸）派瑞氢能科技有限公司   | 16 | 中集氢能科技有限公司       |
| 2  | 考克利尔竞立（苏州）氢能科技有限公司 | 17 | 海卓动力（青岛）能源科技有限公司 |
| 3  | 天津市大陆制氢设备有限公司      | 18 | 扬州吉道能源有限公司       |
| 4  | 西安隆基氢能科技有限公司       | 19 | 湖南氢氢松松科技发展有限公司   |
| 5  | 阳光氢能科技有限公司         | 20 | 无锡华光环保能源集团股份有限公司 |
| 6  | 山东奥扬新能源科技股份有限公司    | 21 | 苏州苏氢制氢设备有限公司     |
| 7  | 深圳市凯豪达氢能源有限公司      | 22 | 中国华电集团有限公司       |



|    |                  |    |                |
|----|------------------|----|----------------|
| 8  | 江苏国富氢能技术装备股份有限公司 | 23 | 中国华能集团         |
| 9  | 明阳智慧能源集团股份公司     | 24 | 亿利洁能股份有限公司     |
| 10 | 苏州希倍优氢能科技有限公司    | 25 | 广东盛氢制氢设备有限公司   |
| 11 | 江苏双良新能源装备有限公司    | 26 | 温州高企氢能科技有限公司   |
| 12 | 深圳市瑞麟科技有限公司      | 27 | 扬州中电制氢设备有限公司   |
| 13 | 三一重工股份有限公司       | 28 | 北京汉氢科技有限公司     |
| 14 | 江苏天合元氢科技有限公司     | 29 | 上海氢器时代科技有限公司   |
| 15 | 北京中电丰业技术开发有限公司   | 30 | 海德氢能科技（江苏）有限公司 |

## 5.1.2 产品方面

2022 年全年，共有 14 家企业发布了碱性电解槽新品；2023 年第一季度，发布碱性电解槽新品的企业数量已达 8 家，超过去年全年的一半。2023 年企业在新品发布方面的火热程度较 2022 年更胜一筹。

2022 年上半年和 2022 年下半年，发布的新的平均单槽最大产氢量分别为 667 Nm<sup>3</sup>/h、1127 Nm<sup>3</sup>/h，2023 年第一季度进一步增至 1363 Nm<sup>3</sup>/h，“大标方”成为各家争抢的制高点。截至目前，已发布产品中最大单槽产氢量已达到 2500Nm<sup>3</sup>/h。碱性电解槽的单体大型化迭代升级，正在加速发展。

表 12 新发布的碱性电解槽产品汇总

| 省份 | 企业            | 成立时间    | 分类     | 产品发布时间  | 单槽最大产氢量<br>(Nm <sup>3</sup> /h) |
|----|---------------|---------|--------|---------|---------------------------------|
| 湖南 | 湖南氢氢松科技发展有限公司 | 2019.12 | 氢能初创企业 | 2022.02 | 500                             |

|    |                  |         |           |         |      |
|----|------------------|---------|-----------|---------|------|
| 江苏 | 江苏国富氢能技术装备股份有限公司 | 2016.06 | 氢能产业链企业   | 2022.04 | 1000 |
| 广东 | 深圳市瑞麟科技有限公司      | 2008.06 | 氢能传统企业    | 2022.06 | 500  |
| 北京 | 华电重工股份有限公司       | 2008.12 | 工程、装备制造企业 | 2022.07 | 1200 |
| 江苏 | 苏州希倍优氢能科技有限公司    | 2021.07 | 装备制造企业    | 2022.08 | 1400 |
| 山东 | 山东奥扬新能源科技股份有限公司  | 2022.02 | 氢能产业链企业   | 2022.08 | 1200 |
| 广东 | 广东盛氢制氢设备有限公司     | 2022.05 | 氢能产业链企业   | 2022.08 | 100  |
| 江苏 | 江苏双良新能源装备有限公司    | 2007.11 | 光伏及产业链企业  | 2022.09 | 1000 |
| 北京 | 内蒙古亿利氢田时代技术有限公司  | 2022.08 | 光伏及产业链企业  | 2022.09 | 1000 |
| 广东 | 明阳智慧能源集团股份公司     | 2006.06 | 风电及产业链企业  | 2022.10 | 2500 |
| 上海 | 上海舜华新能源系统有限公司    | 2004.08 | 氢能产业链企业   | 2022.11 | 500  |
| 湖南 | 湖南盈德气体有限公司       | 2001.11 | 工业气体企业    | 2022.12 | 500  |
| 河北 | 中船（邯郸）派瑞氢能科技有限公司 | 2008.03 | 氢能传统企业    | 2022.12 | 2000 |
| 江苏 | 江苏天合元氢科技有限公司     | 2021.11 | 光伏及产业链企业  | 2022.12 | 1000 |
| 广东 | 广东盛氢制氢设备有限公司     | 2022.05 | 氢能产业链企业   | 2023.01 | 1000 |
| 深圳 | 中集集电（广东）科技发展有限公司 | 2022.10 | 风电及产业链企业  | 2023.01 | 1200 |
| 江苏 | 苏州苏氢制氢设备有限公司     | 2014.09 | 氢能传统企业    | 2023.01 | 2000 |
| 北京 | 中集氢能科技（北京）有限公司   | 2005.12 | 设备制造企业    | 2023.01 | 1200 |
| 北京 | 北京中电丰业技术开发有限公司   | 2007.07 | 氢能传统企业    | 2023.01 | 2000 |
| 上海 | 上海氢器时代科技有限公司     | 2022.11 | 设备制造企业    | 2023.01 | 1500 |

|    |              |         |          |         |      |
|----|--------------|---------|----------|---------|------|
| 陕西 | 西安隆基氢能科技有限公司 | 2021.03 | 光伏及产业链企业 | 2023.02 | 1500 |
| 江苏 | 苏州绿萌氢能科技有限公司 | 2014.09 | 氢能传统企业   | 2023.03 | 500  |

### 5.1.3 产品性能方面

国内主流的碱性电解槽企业,均具备单体大型化电解槽的生产能力,负载可调节范围广,产品成熟度高,新品研发重点在于实现“大规模、低能耗、高稳定性”三者的统一。

表 13 代表企业电解槽产品参数对比

|                              | 中船（邯郸）<br>派瑞氢能科技<br>有限公司 | 考克利尔竞立<br>（苏州）氢能科<br>技有限公司 | 西安隆基氢能<br>科技有限公司 | 天津市大陆<br>制氢设备有<br>限公司 | 山东奥扬新能<br>源科技股份有<br>限公司 |
|------------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------|-----------------------|-------------------------|
| 产品型号                         | CDQ 系列                   | DQ 系列                      | LHy-A 系列         | FDQ 系列                | AQ 系列                   |
| 氢气产量<br>(Nm <sup>3</sup> /h) | 2000                     | 1500                       | 1500             | 1000                  | 1200                    |
| 运行温度<br>(°C)                 | 95±5                     | 90±5                       | 90±5             | 90±5                  | 90±5                    |
| 氢气纯度                         | ≥ 99.8%                  | ≥ 99.8%                    | ≥ 99.9%          | ≥ 99.9%               | ≥ 99.9%                 |
| 氧气纯度                         | ≥99.2%                   | ≥ 98.5%                    | ≥ 98.5%          | ≥99.5%                | ≥ 98.5%                 |
| 工作压力<br>(MPa)                | 1.5-2.5                  | 1.6                        | 1.6-3.0          | 3.0                   | 1.6                     |
| 运行负荷                         | 50%-100%                 | 20%-115%                   | 25-115%          | 40-100%               | 20-110%                 |

|                              |      |      |         |      |      |
|------------------------------|------|------|---------|------|------|
| 能耗<br>(kWh/Nm <sup>3</sup> ) | ≤4.3 | ≤4.4 | 3.9-4.4 | ≤4.4 | ≤4.4 |
|------------------------------|------|------|---------|------|------|

## 5.1.4 产能布局

据势银 (TrendBank) 统计, 截至目前, 国内碱性电解槽企业已披露产能超过 11GW。

表 14 已披露的碱性电解槽产能

| 省份  | 电解水装备企业              | 2022 年产能        |
|-----|----------------------|-----------------|
| 河北  | 中船 (邯郸) 派瑞氢能科技有限公司   | 1.5GW (ALK+PEM) |
| 陕西  | 西安隆基氢能科技有限公司         | 1.5GW           |
| 安徽  | 阳光氢能科技有限公司           | 1.1GW (ALK+PEM) |
| 江苏  | 考克利尔竞立 (苏州) 氢能科技有限公司 | 1GW             |
| 天津  | 天津市大陆制氢设备有限公司        | 1GW             |
| 山东  | 山东奥扬新能源科技股份有限公司      | 1GW             |
| 江苏  | 江苏国富氢能技术装备股份有限公司     | 0.5GW           |
| 北京  | 北京中电丰业技术开发有限公司       | 0.5GW           |
| 北京  | 航天思卓氢能科技有限公司         | 0.5GW           |
| 北京  | 北京华易氢元科技有限公司         | 0.35GW          |
| 广东  | 深圳市瑞麟科技有限公司          | 0.3GW           |
| 广东  | 深圳市凯豪达氢能源有限公司        | 0.3GW           |
| 内蒙古 | 内蒙古亿利氢田时代技术有限公司      | 0.25GW          |

## 5.1.5 产品应用方面

就产品应用情况而言，碱性电解槽四家主流企业均涉足电力、冶金、化工等应用领域。从客户分布来看，各家的碱性电解槽除了中国市场，在海外市场也有广阔的空间，国内碱性电解槽产品在国际上也具备较强的竞争力。

表 15 碱性电解槽主流企业的产品应用情况

| 企业                 | 应用领域                                   | 客户分布  |
|--------------------|--|---|
| 中船（邯郸）派瑞氢能科技有限公司   | 电力、石化、医药、冶金、多晶硅、气象、航天等领域及各大气体公司        | 中国、美国、德国、挪威、瑞典、瑞士、西班牙等三十余个国家  |
| 考克利尔竞立（苏州）氢能科技有限公司 | 电力、电子、冶金、建材、化工、气象、航天及新能源               | 中国、俄罗斯、白俄罗斯、菲律宾、印尼、印度、孟加拉、土耳其、南非等三十余个国家                                     |
| 天津市大陆制氢设备有限公司      | 电力、电子、半导体材料、光纤、冶金、建材、原子、化工、宇航、气象、医药等行业 | 中国、美国、丹麦、冰岛、挪威、希腊、俄罗斯、保加利亚、韩国、埃及、科威特、阿联酋、沙特、印度尼西亚、印度、菲律宾、阿尔及利亚、巴基斯坦、坦桑尼亚等国家 |
| 隆基氢能科技有限公司         | 煤化工、石油化工、钢铁冶金、交通运输、能源电力及其他工业等领域        | 中国、英国、法国、德国、荷兰、中东、北美等国家和地区  |

## 5.2 碱性电解槽部分企业

### ■ 考克利尔竞立（苏州）氢能科技有限公司

考克利尔竞立（苏州）氢能科技有限公司（Cockerill Jingli Hydrogen，简称 CJH）是苏州竞立制氢设备有限公司和 John Cockerill 集团于 2018 年合资成立的公司。John

Cockerill 集团在承接了苏州竞立制氢设备有限公司的专业技术和生产经验的基础上，增加研发力量、更新生产设备、扩大产能、提升质量标准，打造全新“考克利尔竞立”品牌，专注于各类行业制氢设备的设计、研发、制造和销售等。

考克利尔竞立是一家专业研发、生产水电解制氢设备及气体后处理设备的高科技企业，是目前国内技术最先进的制氢企业之一，能提供  $2\text{Nm}^3/\text{h}$ - $1500\text{Nm}^3/\text{h}$  的碱性电解水制氢设备。自从 2017 年研制出全球首台套产氢量  $1000\text{Nm}^3/\text{h}$  的制氢设备以来，该型号产品已成为目前行业主流产品，被广泛应用于光伏材料、钢铁、玻璃等行业，以及国内首个液态太阳燃料合成示范项目中。2021 年，考克利尔竞立分别下线国际首台套  $1200\text{Nm}^3/\text{h}$  和  $1300\text{Nm}^3/\text{h}$  的电解水制氢设备，是我国“绿氢”制备向大规模迈进的重要标志。2022 年，考克利尔竞立加速碱性电解槽工艺升级，推动二对一、四对一模块化系统在实际项目中应用。

2022 年以来，考克利尔竞立中标多个项目。2022 年 5 月，以排名第一的成绩入围中石化新疆库车绿氢项目，并中标总订单量的 50%；10 月，考克利尔竞立成功入围氢能领跑者行动白名单，成为首批入围的五家企业之一；2023 年一季度接连签下 7 个国内外制氢系统订单，签订型号包含 10、50、80、200 和  $600\text{Nm}^3/\text{h}$ ，一系列产品将应用于新能源、气体、玻璃等多个行业，推动全球能源转型发展。

考克利尔竞立已具备生产超大型电解水制氢设备的技术和能力，其生产的碱性电解水制氢设备已成功在国内外几十家企业投运，产品除覆盖国内，还远销俄罗斯、白俄罗斯、菲律宾、朝鲜、印尼、伊朗、印度、孟加拉、土耳其、南非及“一带一路”沿线等三十多个国家和地区。为全球客户节约了能源消耗，减少了废气及温室气体排放，在保护自然环境的同时降低了企业的生产成本。

#### ■ 阳光氢能科技有限公司

阳光氢能科技有限公司是阳光电源全资子公司，专注于可再生能源电解水制氢技术的研

究。阳光氢能主要产品为 IGBT 制氢电源、碱性水电解槽、PEM 电解槽、气液分离与纯化设备、智慧氢能管理系统，致力于提供“高效、智慧、安全”的绿电制氢系统及解决方案。

产品技术方面，阳光氢能坚持“双线制氢”并叠加科技赋能。其目前已拥有碱性水电解制氢和 PEM 电解制氢两种技术路线，同步开发的离网、并网、微网多模式下制氢系统可提供一站式的绿电制氢系统及解决方案，契合可再生能源快速波动特性，综合实现能源电力、石油化工、交通、冶金等场景下的多元应用。针对制氢重要设备电解槽，阳光氢能特设材料研究实验室，配备电化学工作站、X 射线荧光光谱仪、体视显微镜、隔膜电阻率测试仪等设备，用以对电解槽核心材料进行性能研究、分析评价及先进技术跟踪。通过材料和设计创新，阳光电源在电解槽性能难题的研究上逐个突破，实现了核心性能指标的提升。

科研与人才方面，阳光氢能自成立始，坚持研发投入和技术创新双驱动战略，打造了一支自主创新能力强、经验丰富的专业研发队伍，主导和参与制定多个行业标准、申请专利 200 多项，建成国内领先的电解水制氢系统综合测试平台。同时，阳光氢能始终保持与国内高等院校的密切交流，先后与上海交通大学、中国科学技术大学、中国科学院等院校科研单位开展系列研究合作。

项目应用方面，阳光氢能的产品在各大风电、光伏制氢项目中得到应用。2022 年以来，阳光氢能陆续为国网六安、内蒙古综合能源站、宁夏、长江电力等项目提供电解水制氢设备，逐步推动“技术优势”变为“市场优势”。

## ■ 四川亚联氢能股份有限公司

四川亚联氢能股份有限公司成立于 2000 年 9 月 18 日，22 年一直坚持并专注于以新能源解决方案和先进的制氢技术为研发主导方向，并延伸至氢能领域的产品开发。公司 ALKEL 系列水电解制氢技术，由亚联氢能与北京化工大学团队合作研发，有效降低电解电压，减少电解过程的整体能耗，提升电解效率。水电解槽及系统结构由亚联氢能自主设计。

该产品技术特点如下：

- 密封垫片采用新型高分子材料保证了电解槽的密封性。
- 采用无石棉隔膜布的电解槽可降低能耗、绿色环保、不含致癌物，不用清洗过滤器等优势。
- 完善的联锁报警功能。
- 采用独立的 PLC 控制，故障自恢复功能。
- 占地小，设备布置紧凑。
- 运行稳定,可全年连续运行不停车。
- 自动化水平高，可实现装置现场无人管理。
- 在 30%-100%流量下，负荷调节自如、安全稳定运行。
- 设备使用寿命长，可靠性高。

公司开发德全套制氢系统为 PLC 程序控制全自动运行。具有自动停机、自动检测、报警、联锁等控制功能，做到一键开机的自动化水平。当 PLC 发生故障时，系统能手动操作，确保系统连续用氯。

## 5.3 碱性电解槽部材部分企业

### ■ 碱性电解槽隔膜的代表性企业

国内碱性电解槽企业使用 PPS 隔膜居多，PPS 隔膜绝大部分又依赖进口品牌供应，部分企业开始使用复合膜，隔膜生产制造企业主要有东丽(中国)投资有限公司、Agfa-Gevaert Group 及碳能科技（北京）有限公司。

碳能科技的新型无机—有机复合隔膜（简称复合隔膜），是由陶瓷粉体和支撑体组成，对标欧洲某公司的复合隔膜。复合隔膜表面纳米多孔，内部为微米孔道结构，阻断氢气穿越



能力强，同时透过电解液离子，具有永久亲水性，与进口隔膜性能相当，具有较好的电解性能和使用寿命。目前复合隔膜最大宽幅可达 2 米，可以满足大型电解槽尺寸需求。

#### ■ 碱性电解槽镍网的代表性企业

安平县辉瑞丝网制造厂（简称：辉瑞丝网），辉瑞丝网生产的镍网，主要编织工艺为平纹编织和斜纹编织，抗压能力强；采用高纯镍丝编织，镍网的抗腐蚀能力强。

碱性电解槽用镍网目前全部国产化，企业分布在河北较多。

#### ■ 碱性电解槽电极喷涂的代表性企业

保时来从事碱性电解槽镍网催化剂喷涂已有二十余年，主要采用离子熔射工艺，喷涂材料目前推出第二代技术：阴极专用的镍铂钠涂层，此种技术的优点是高电密、低电压、低成本、高寿命。目前保时来正在推进其  $8000\text{A}/\text{m}^2$ - $10000\text{A}/\text{m}^2$  第四代电极网的研发。

莒纳科技是新一代的绿氢电极材料与解决方案供应商。2023 年 1 月，莒纳科技首款碱液电极 JA 系列产品、首条碱液电极中试产线正式发布与启用，电流密度最高可达  $11900\text{A}/\text{m}^2$ ，有望助力碱性电解槽单槽产氢量  $3000\text{Nm}^3/\text{h}$  以上。莒纳科技的技术人员提出了下一代电解槽的性能目标：

- 性能达到  $11900\text{A}/\text{m}^2@2.0\text{V}@85^\circ\text{C}$ ；
- 电流密度调节范围达到  $1000$ - $11900\text{A}/\text{m}^2$ ；
- 电密在  $3000\text{A}/\text{m}^2$  情况下，直流电耗降低至  $4.0\text{kWh}/\text{Nm}^3\cdot\text{H}_2$  以下。

北京盈锐优创氢能科技有限公司是盈锐源创科技有限公司旗下专业研发、生产和销售氢能催化电极的高新技术企业，从热喷涂材料的研发生产到电极涂层设计，再到热喷涂加工和活化全流程工艺，为电解槽设备企业提供催化电极成品和整套解决方案。公司催化电极已经电解槽厂商、科研机构、高校等多方测试，并应用于制氢头部企业 1000 标方电解槽。

## 5.4 质子交换膜电解槽企业分析

### 5.4.1 质子交换膜电解水制氢技术企业布局情况

布局质子交换膜电解槽的企业主要分布在中国、美国、德国和挪威等国家，除传统专注于电解槽开发的企业外，还包括能源化工、工业气体、电力相关、传统汽车、内燃机、燃料电池、研究机构技术孵化等等类型企业，通过自主研发、参股或收购等手段来实现布局，加速企业转型，且多集中在近几年完成布局。

相关企业如 Cummins（康明斯）、GTT（法吉泰）、Linde（林德）、MAN Energy Solutions（曼恩能源方案）、Nel、Plug Power（普拉格能源）、Rolls-Royce（劳斯莱斯）、Schaeffler（舍弗勒）、Siemens（西门子）、Toyota（丰田）、中国石化、赛克赛斯、中船派瑞氢能、中科院大连化物所、阳光电源、国家电投、上海氢器时代、氢晨科技、清能股份、金宏气体等，具体如下表所示（排名不分先后）。

表 16 质子交换膜电解槽企业（部分）

| 序号 | 公司名称                   | 国家  | 序号 | 公司名称    | 国家 |
|----|------------------------|-----|----|---------|----|
| 1  | Cummins                | 美国  | 26 | 中电丰业    | 中国 |
| 2  | Elogen                 | 法国  | 27 | 国富氢能    | 中国 |
| 5  | H2B2                   | 西班牙 | 28 | 广东卡沃罗   | 中国 |
| 4  | Hitachi Zosen          | 日本  | 29 | 威孚高科    | 中国 |
| 5  | Hoeller Electrolyzer   | 德国  | 30 | 氢晨科技    | 中国 |
| 6  | H-TEC SYSTEMS          | 德国  | 31 | 清能股份    | 中国 |
| 7  | Hystar                 | 挪威  | 32 | 氢器时代    | 中国 |
| 8  | iGas Energy            | 德国  | 33 | 青岛创启信德  | 中国 |
| 9  | ITM Power              | 英国  | 34 | 鹭岛氢能    | 中国 |
| 10 | ITM Linde Electrolysis | 德国  | 35 | 淳华氢能    | 中国 |
| 11 | Nel Hydrogen           | 挪威  | 36 | 索拉尔绿色能源 | 中国 |
| 12 | Siemens Energy         | 德国  | 37 | 融科氢能    | 中国 |

|    |              |    |    |         |    |
|----|--------------|----|----|---------|----|
| 13 | Thyssenkrupp | 德国 | 38 | 瑞麟科技    | 中国 |
| 14 | Tokyo Gas    | 日本 | 39 | 绿航星际研究院 | 中国 |
| 15 | Toyota       | 日本 | 40 | 上海彭蓝新能源 | 中国 |
| 16 | Ohmium       | 美国 | 41 | 率氢技术    | 中国 |
| 17 | Plug Power   | 美国 | 42 | 江苏兴燃科技  | 中国 |
| 18 | 中石化石科院&燕山石化  | 中国 | 43 | 时代氢源科技  | 中国 |
| 19 | 中石化石油机械      | 中国 | 44 | 暗流科技    | 中国 |
| 20 | 康明斯恩泽        | 中国 | 45 | 安徽清技氢能  | 中国 |
| 21 | 赛克赛斯         | 中国 |    |         |    |
| 22 | 中船派瑞氢能       | 中国 |    |         |    |
| 23 | 中科院大连化物所     | 中国 |    |         |    |
| 24 | 阳光电源         | 中国 |    |         |    |
| 25 | 长春绿动         | 中国 |    |         |    |

自 2022 年下半年到 2023 年初，入局质子交换膜电解水的企业越来越多，将加速质子交换膜电解水技术的商业化进程，部分企业动态如下。

表 17 质子交换膜电解水企业动态（部分）

| 时间          | 相关企业                             | 动态内容  |
|-------------|----------------------------------|---|
| 2022 年 6 月  | Rolls-Royce、Hoeller Electrolyzer | Rolls-Royce 收购了 PEM 电解槽企业 Hoeller Electrolyzer 54%的股权，后者的创新技术将成为 Rolls-Royce 动力系统部门新 mtu 电解槽系列产品的基础，其电解槽预计于 2023 年在腓特烈港的验证中心投入运行  |
| 2022 年 11 月 | 赛克赛斯                             | 赛克赛斯的 6MW 的 PEM 纯水电解制氢设备发往内蒙古金麒麟新能源股份有限公司在内蒙古打造的风电制氢就地消纳项目。该项目由风力发电结合 PEM 纯水制氢技术生产氢气，通过高压气态运输方式供给当地化工企业进行消纳。实现了氢能源制、储、运、用氢体系的商业化。 |

|             |              |   |
|-------------|--------------|---|
| 2022 年 11 月 | 国富氢能与卡沃罗     | 国富氢能与卡沃罗联合开发的 100Nm <sup>3</sup> /h (0.5MW) PEM 电解槽正式下线，并将集成为 1MW 制氢系统。该台 PEM 电解槽为广东省首台 PEM 电解槽，其设计依据现行国家标准和 ISO 国际标准，拥有自主知识产权，且性能对标国内领先和国际先进水平。                |
| 2023 年 1 月  | 金宏气体、索拉尔绿色能源 | 金宏气体在 2023 年初成立索拉尔绿色能源（苏州）有限公司，聚焦 ALK 碱性，PEM 质子交换膜和 AEM 阴离子交换膜电解水制氢装备的研发、制造、销售和技术服务等  |
| 2023 年 3 月  | 嘉庚创新实验室、鹭岛氢能 | 嘉庚创新实验室的“高性能百千瓦级 PEM 制氢电解槽及其核心材料”项目已通过厦门市促进科技成果转化中心组织专家评价。基于该科技成果孵化形成的公司，鹭岛氢能已推出高性能百千瓦级 PEM 制氢电解槽产品，并在窑炉、离网制氢系统等多种场景开展应用测试，在此基础上开发的兆瓦级 PEM 制氢系统产品也正在筹备开展应用测试工作。 |
| 2023 年 3 月  | Toyota       | Toyota 开发了使用燃料电池电堆和 Mirai 的其他技术从电解水中产生氢气的新型电解设备。该设备将于今年 3 月在电装福岛公司的工厂投入使用，该工厂将作为技术实施场所，以促进其未来的广泛使用。   |

## 5.4.2 质子交换膜制氢设备产能情况

目前质子交换膜电解槽仍处于商业化推广的前期阶段，但从相关企业的产能设计方面可以看出，各企业均较为看好未来几年 PEM 电解槽的大规模应用，到 2025 年附近的产能规划大部分多为 500MW 或 GW 级别。

表 18 质子交换膜制氢设备产能（部分）

| 公司      | 产能情况  |
|---------|---|
| Cummins | 在美国新设工厂的 PEM 电解槽产能为 500MW，未来可扩展到 1GW，比利时工厂的 PEM 电解槽产能扩大至 1GW，并为其位于加拿大密西沙加的工厂增加了空间，还在西班牙和中国建设两家新的电解槽工厂，每家工厂的产能为 500MW，可扩展至 1GW |

|        |                                       |
|--------|---------------------------------------|
| ITM    | 在英国谢菲尔德 PEM 电解槽产能为 1GW                |
| Nel    | 到 2025 年，在美国康涅狄格州的 PEM 电解槽产能扩大为 500MW |
| 赛克赛斯氢能 | 现有年产能达 50MW，在建的年生产能力达 GW 级            |
| 长春绿动氢能 | 建设年产百千套 PEM 制氢设备生产线（GW 级）             |
| 中船派瑞氢能 | 年产 120 套 PEM 制氢设备                     |
| 氢器时代   | 预期 2025 年 PEM 电解制氢装备达到百 MW 级产能        |
| 卡沃罗    | 一期规划建设 PEM 电解槽 1GW 的智能化生产线            |

数据来源：公开资料，势银（TrendBank）整理

### 5.4.3 质子交换膜制氢装置应用

根据质子交换膜制氢装置规模的不同，其应用领域也不一样。其中百千瓦级的质子交换膜制氢装置多用于电子加工、半导体、电力、金属粉末加工和高校实验室等领域，MW 级以上的质子交换膜制氢装置可用于加氢站、氢电耦合、合成绿氨、e-fuel 及其他领域。其中欧盟拟允许在 2035 年后销售使用 e-fuel 的内燃机乘用车及轻型商用车，利于质子交换膜制氢装置的应用。

国内外相关项目大多数仍为技术验证的示范项目，由各国政府推动或支持，虽多处于建设阶段，但近期披露出的相关项目数量较多且装机规模较大，质子交换膜电解水项目从 MW 级向百 MW 级规模的发展趋势较为明显。

2023 年 1 月 30 日，ITM Power 与 Linde 签署两份合同，每份合同都将向 Linde 出售一套由 100MW 的 PEM 电解槽组成的制氢工厂，也是 ITM Power 将首次部署基于其 3MEP CUBE 组成的 10 MW 标准模块。这两座制氢工厂将安装在莱茵集团在德国林根的燃气发电厂。第一座工厂预计将于 2024 年投产，第二座工厂计划在 2025 年开始运营。

2023 年 3 月 20 日，吉电股份发布关于公司全资子公司与长春绿动氢能科技有限公司签订大安风光制绿氢合成氨一体化示范项目 PEM 制氢设备供货合同暨关联交易的公告，合同价格为 29000 万元，共涉及 10000Nm<sup>3</sup>/h 的 PEM 电解水制氢系统，将分三批交付。

同日，Cummins 宣布，将为加拿大魁北克碳回收项目提供共计 90MW 的 PEM 电解槽，该项目由 4 个 HyLYZER®-5000 组成，也将是 HyLYZER®-5000 首次安装，其制氢能力是现有 PEM 电解水制氢设备的五倍。工厂目前正在建设中，计划于 2025 年投入运营。其他质子交换膜电解水制氢项目如下表所示。

表 19 质子交换膜电解水制氢项目（部分）

| 项目名称                  | 项目状态 | 项目地点    | 装机规模/MW | 类型     |
|-----------------------|------|---------|---------|--------|
| 六安兆瓦级氢能综合利用示范站        | 运行投产 | 中国安徽    | 1       | 氢电耦合   |
| 长江电力绿电绿氢示范项目          | 运行投产 | 中国湖北    | 1       | 加氢     |
| 金麒麟新能源公司 PEM 纯水电解制氢项目 | 建设中  | 中国内蒙古   | 6       | 化工原料   |
| 大安风光制绿氢合成氨一体化示范项目     | 建设中  | 中国吉林    | 50      | 绿氢     |
| 加拿大碳回收项目              | 建设中  | 加拿大魁北克  | 90      | e-fuel |
| 旗舰一号甲醇项目              | 建设中  | 瑞典西诺尔兰省 | 70      | e-fuel |
| GET H2 Nucleus 项目     | 建设中  | 德国林根    | 100     | 化工原料   |

## 5.5 质子交换膜电解槽部材部分企业

目前质子交换膜电解槽用膜电极以 CCM 制备工艺为主，包括热压转印、喷涂，刮涂工

艺等，直涂工艺仍在开发过程中。质子交换膜电解槽企业多自制膜电极，同时第三方膜电极企业也有批量出货。部分相关企业如下表所示。

表 20 膜电极相关企业（部分）

| 外资企业                               | 本土企业   |
|------------------------------------|--|
| Johnson Matthey（庄信万丰）、De Nora（迪诺拉） | 赛克赛斯氢能、中船派瑞氢能、中科院大连化物所、长春绿动、鸿基创能、擎动科技、唐锋能源、亿氢科技、武汉理工氢电、枞水新能源、中科科创、氢辉能源、青岛创启信德新能源 |

庄信万丰持续专注于开发下一代技术，包括膜电极组件(MEA)，催化剂涂层膜(CCM)，燃料电池/电解水催化剂和质子膜技术，驱动燃料电池和 PEM 电解水核心材料性能的提升。在过去的两年中，JM 一直在建设绿氢业务。通过收购牛津的 Oxis Energy 工厂扩大产能，并宣布与行业领先企业如：Plug Power、Hoeller Electrolyzer 和 HyStar 建立合作伙伴关系，继续发展技术产品和相关业务，JM 将继续在绿氢领域进行深耕。

中科科创依托于中科院上海高等研究院人才队伍和技术优势，致力于自主知识产权的燃料电池电催化剂及膜电极研发、规模化生产及应用。在 PEM 电解水膜电极方面，通过采用自动化程序控制喷涂的工艺制备 PEM 膜电极，可实现单片面积为 60cm×60cm 的膜电极制备，相应产品已实现批量出货，并在百千瓦的电堆上实现应用，目前正在筹划新工艺和产线建设，将持续在 PEM 制氢方面发力。

枞水新能源主要产品涵盖 PEM 电解制氢催化剂、膜电极与氢燃料电池催化剂等，在膜电极方面已实现大尺寸 PEM 电解水制氢膜电极规模量产，最大可加工尺寸活性面积 ≥5000cm<sup>2</sup>，年产能 > 500m<sup>2</sup>，且正在规划 500MW 级的膜电极产线建设。

武汉理工氢电除燃料电池外，自主研发面向制氢领域的 PEM 电解水膜电极，相应产品除向国内多家 PEM 电解水制氢设备企业供货外，还出口至欧洲市场，用于当地可再生能源

制氢工程。

氢辉能源已经完成产能为 10 万平米/年的 PEM 膜电极连续涂布生产线建设，其膜电极产已在国内外多家电解水公司的进行性能及寿命验证，目前正小批量的给相关 PEM 电解槽公司供货。

鸿基创能在 2022 年 6 月，建设了国内首条电解水制氢 CCM 卷对卷生产线，年产能规模达到 30 万平米。

### 5.5.1 质子交换膜生产企业

目前质子交换膜电解槽使用的膜多为全氟磺酸均质膜，国内外使用最为广泛的为科慕的 Nafion 115 和 Nafion117 系列质子交换膜，厚度均在 100μm 以上。其他如 Fumatech（富马）、Solvay（索尔维）、AGC（艾杰旭）、东岳未来氢能、汉丞科技、科润新材料、通用氢能、国润储能等企业同样有相应产品布局。部分企业如下表所示。

表 21 质子交换膜企业（部分）

| 外资企业   | 本土企业                             |
|--|----------------------------------|
| Chemours（科慕）、Fumatech（富马）、Solvay（索尔维）、AGC（艾杰旭） | 东岳未来氢能、汉丞科技、科润新材料、通用氢能、武汉绿动、国润储能 |

东岳未来氢能主营业务包括全氟磺酸树脂，燃料电池、水电解和液流电池三大应用领域用质子交换膜及 ePTFE 基膜等，其水电解用质子交换膜已通过国内下游龙头企业的技术验证，已开启小规模批量化采购并应用于商业化项目，正在规划设计连续化大规模电解制氢质子交换膜生产线。

汉丞科技以海归科学家为核心，以高科技为先导，主要致力于研发、生产、销售氢能



含氟新材料、增强型纳米微孔膜等产品，在 PEM 制氢方面，针对小型和大型电解槽分别推出了不同牌号的全氟磺酸复合膜。

通用氢能的主要业务包括气体扩散层、质子交换膜等氢能关键材料的研发与批量化制造。其质子交换膜和气体扩散层（碳基）已在相应客户处进行测试验证。

科润新材料在氢健康领域和工业制氢方面均有相应产品，其中在工业制氢上，科润新材料已有的成熟产品主要有 NEPEM-115、117 系列膜。

为提高质子交换膜电解槽效率，通过降低质子交换膜厚度来降低内部的欧姆电阻损耗是未来的开发方向之一，如开发基于膨体聚四氟乙烯或聚醚醚酮等多孔支撑材料的全氟磺酸复合膜，Fumatech、东岳未来氢能、汉丞科技、通用氢能、科润新材料等企业同样有相关布局。但开发全氟磺酸复合膜的同时仍需保持质子交换膜的机械稳定性和氢气渗透率，以保证电解槽的安全及寿命。部分产品指标如下表所示。

表 22 质子交换膜产品指标（部分）

| 指标     | 单位               | Chemours     | Chemours     | Fumatech  | Fumatech  |
|--------|------------------|--------------|--------------|-----------|-----------|
|        |                  | Nafion N-115 | Nafion N-117 | FS-960-RF | FS-990-PK |
| 厚度     | μm               | 127          | 183          | 54-66     | 90-105    |
| 基重     | g/m <sup>2</sup> | 250          | 360          | 136-142   | 140-180   |
| 质子电导率  | mS/cm            | 83           | 83           | > 40      | > 60      |
| 离子交换容量 | meg/g            | 0.89         | 0.89         | 1.15      | 1.11-1.22 |
| 有无增强   | \                | 无            | 无            | 微孔        | PEEK 织物   |

## 5.5.2 催化剂生产企业

催化剂是 PEM 电解槽的核心部材，其性能对 PEM 电解槽的性能影响较大，且速率控制步骤主要由在阳极发生的析氧反应（OER）决定。PEM 电解槽的阳极催化剂通常为 Ir 基催化剂，如 Ir 黑、IrO<sub>2</sub> 等，负载量在 1-1.5mg/cm<sup>2</sup>，阴极催化剂通常为 Pt/C 催化剂。PEM 电解槽催化剂可从 Heraeus（贺利氏）、Umicore（优美科）、BASF（巴斯夫）等企业购买，国内中科科创、济平新能源、擎动科技、柘水新能源、氢电中科、中自科技等企业正积极推动相应产品开发和客户验证，并实现小规模出货。催化剂相关企业如下表。

表 23 催化剂相关企业（部分）

| 外资企业   | 本土企业   |
|--|--|
| Heraeus（贺利氏）、<br>Umicore（优美科）、BASF<br>（巴斯夫）、TKK（田中贵金<br>属） | 中科科创、济平新能源、氢电中科、擎动科技、武汉理工氢<br>电、柘水新能源、中自科技、龙蟠氢能源、青岛创启信德新<br>能源、中石大新能源、合肥动量守恒 |

中科科创在质子交换膜水电解制氢催化剂方面，先后推出了氧化铱、铱黑和铱钨黑等相关催化剂产品，并且已经具备了单批次公斤级的生产能力，且与多家质子交换膜制氢设备生产企业达成了合作和产品交付。

济平新能源生产的催化剂在燃料电池和水电解制氢上都有相关应用。在水电解制氢领域，济平新能源目前主要推广的产品有 PEM 电解槽阴阳极催化剂和碱性电极材料，其中 PEM 催化剂满产年产能可以达到 1000 千克。在 2022 年 12 月，济平新能源向清能股份交付了公斤级 PEM 电解催化剂。

氢电中科主营产品有燃料电池催化剂和电解水催化剂，其中电解水催化剂主要包含有析

氢的铂和铂碳系列催化剂和析氧的铱基系列催化剂，相关产品已经在电解水领域商业化销售。

### 5.5.3 气体扩散层生产企业

气体扩散层起到传输水、氢气、氧气、传递电子和为催化剂层提供机械支撑等作用。PEM 电解槽的阴极气体扩散层可为碳纸、碳毡或钛毡，而由于阳极过电位较高，阳极气体扩散层多为钛毡，且为防止在长期运行中钛被氧化，导致电导率降低，其表面还需涂覆贵金属涂层。

目前 Bekaert（贝卡尔特）、西安菲尔特、浙江菲尔特、惠同新材、安泰环境等企业可提供相应产品。相关企业如下表所示。

表 24 气体扩散层相关企业（部分）

| 外资企业   | 本土企业   |
|--|--|
| Bekaert（贝卡尔特）、MeliCon GmbH（梅利夫）、GKN Sinter Metals（吉凯恩） | 浙江菲尔特、西安菲尔特、惠同新材、通用氢能（碳基）、中钛国创、安泰环境、金通科技、合肥动量守恒、玖昱科技 |

西安菲尔特金属过滤材料股份有限公司是另一家有能力生产质子交换膜电解槽气体扩散层的企业。目前西安菲尔特的产品处于试验阶段且已经和多家 PEM 电解槽头部企业开展合作，对相关产品进行测试。

浙江菲尔特过滤科技股份有限公司在电解水方面可提供，金属双极板、气体扩散层（PEM 用钛毡、ALK 泡沫镍毡）、表面导电防腐涂层等相关产品。浙江菲尔特通过采用直径为微米级的钛合金纤维生产钛毡。目前已建有 500 平方米/月的气体扩散层产线。未来随着质子交换膜制氢设备的应用推广，浙江菲尔特会将相应产线扩建至 1 万平方米/月。

## 5.5.4 双极板

双极板与气体扩散层作用类似，同样起到传输水、氢气、氧气、传递电子和为催化剂层提供机械支撑等作用。PEM 电解槽的双极板通常为钛基双极板，表面镀有 Pt 或 Au 等贵金属涂层或进行其他表面处理。目前治臻新能源、金泉益、浙江菲尔特、西安泰金等企业可提供相应双极板产品。涂层企业包括 Nanofilm（纳锋科技）、Impact Coatings（毅湃）、常州翊迈等。相关企业如下表所示。

表 25 双极板相关企业（部分）

| 外资企业   | 本土企业   |
|--|--|
| DANA（德纳）、Grabener（格雷伯）、<br>Feintool（法因图尔）、<br><br>涂层：Nanofilm（纳锋科技）、Impact<br>Coatings（毅湃） | 治臻新能源、金泉益、浙江菲尔特、西安泰<br>金、博远新能源、三佳机械、中钛国创、安<br>泰环境、<br><br>涂层：常州翊迈、北京实力源、上海福宜、<br>中科迈格、汇成真空 |

治臻股份目前在苏州常熟的生产基地拥有 350 万片/年的双极板产能，为燃料电池用双极板和电解水制氢用双极板的混合产线，将根据公司的业务方向调整不同产品的产量。上海治臻生产的双极板采用工业级钛合金作为主要材料，通过冲压工艺制备双极板，可使用 0.4mm 以下薄板，降低原材料成本，同时还开发有非贵金属涂层技术，减少对贵金属的依赖。

深圳金泉益科技有限公司依托公司在金属蚀刻方面的技术积累，专注于燃料电池金属双极板和 PEM 电解槽钛极板的布局和生产，是国内少数可以提供 PEM 电解槽钛板解决方案的企业之一。目前，金泉益已经具备 150 万片/年的燃料电池双极板产能和 7 万片/年的 PEM 电解槽双极板产能，未来将继续在氢能领域发力。

西安泰金是西北有色金属研究院控股子公司,致力于成为全球绿色智能电解成套整体解决方案和服务方案的领跑者。在 PEM 水电解方面,已产业化的产品可满足双极板设计、流道刻蚀、激光焊接、镀层处理全工艺流程,镀层厚度 0.2~5 $\mu$ m,镀层均匀不脱落。

## 5.6 高温固体氧化物电解水技术部分企业

目前 SOEC 电解设备的总体产业化程度不高,推出的商业化产品较少,仍处于研发阶段。相比国内,国外推出的产品数量相对较多。

### 5.6.1 国外 SOEC 企业

目前国外可以生产 SOEC 电解水制氢设备的企业主要有德国 Sunfire 公司、美国 Bloom Energy 公司和丹麦 Topsoe 等。

表 26 部分国外 SOEC 企业产品介绍

| 企业名称         | 产品制氢规模<br>(Nm <sup>3</sup> /h) | 氢气纯度   | 制氢电耗<br>(kWh/Nm <sup>3</sup> ) | 应用领域          |
|--------------|--------------------------------|--------|--------------------------------|---------------|
| Sunfire      | 45 (电解模块)                      | 99.99% | 3.3                            | 钢铁冶炼、<br>油品冶炼 |
| Bloom Energy | 87 (电解模块)                      | 99.99% | 3.5                            | 核能制氢          |

来源: 势银 (TrendBank)

目前国外 SOEC 企业在成本控制和生产能力方面优于我国。BLOOM ENERGY (BE) 的 1kW 电堆的成本可做到万元人民币以下,远低于我国的 3-5 万元; 丹麦 Topsoe 正在丹麦海宁建设世界上最大的 SOEC 电解槽工厂,年产能为 500 兆瓦,将于 2024 年投入运营。

## 5.6.2 国内 SOEC 科研院所及企业介绍

国内 SOEC 行业的发展已从“实验研发阶段”进入“小规模示范阶段”。越来越多的企业与高校开始布局 SOEC 赛道，部分已经推出示范项目，落地产线。下表列出国内 SOEC 相关企业及企业进展。

表 27 国内 SOEC 企业产品信息（部分）

| 企业名称            | 产品信息   |
|-----------------|--|
| 上海应用物理研究所       | SOEC 制氢设备，电解功率可达 7.2kW，性能衰减率仅为 0.5%/kh;<br>完成 200kW-SOEC 装置，制氢功率达到 202kW，制氢速率 64Nm <sup>3</sup> /h，直流电耗为 3.16kWh/Nm <sup>3</sup> ·H <sub>2</sub> |
| 清华大学核能与新能源技术研究院 | 研究利用核能高温气冷堆的余热结合 SOEC 制氢。研发的 SOEC 实现了 105 小时的稳定运行，产氢速率达到 105l/h  |
| 北京思伟特新能源科技有限公司  | 拥有千瓦级的 SOEC 制氢系统样机：每小时产氢量接近 1Nm <sup>3</sup>   |
| 武汉华科福赛新能源有限公司   | SOEC 电堆，稳定运行时间超过 1040 小时；在 800℃工作温度下，最大电解功率达到 831W，最大电解效率高于 97%，产氢电耗在 2.86-3.35°C/Nm <sup>3</sup> 之间，稳定运行电解功率高于 600W                             |
| 浙江氢邦科技有限公司      | 多种高温电解技术（电解纯 CO <sub>2</sub> /电解海水/共电解水和 CO <sub>2</sub> ）   |
| 北京质子动力发电技术有限公司  | 阳极支撑平板型 SOEC   |

|              |                              |
|--------------|------------------------------|
| 上海翌晶能源技术有限公司 | 电堆可逆运行，产品规格：1000W/3000W/12KW |
|--------------|------------------------------|

来源：势银（TrendBank）

表 28 国内 SOEC 企业相关进展

| 企业名称            | 产线及相关项目   |
|-----------------|---|
| 上海应用物理研究所       | 研制的 20kW 级高温电解制氢与加氢一体化系统，结合 100kW 光伏系统，开展微能源网技术验证；<br>2021 年下半年，中标南方电网广州供电有限公司 SOEC 制氢研发系统；<br>2023 年 2 月，200kW 级 SOEC 制氢验证装置一次开车成功，并顺利完成连续 72 小时性能考核 |
| 清华大学核能与新能源技术研究院 | 在 SOEC 电解效率、电极极化和阴极优化等方面进行了探索   |
| 北京思伟特新能源科技有限公司  | 已开发出 3kW 的 SOEC 系统，10kW SOEC 系统完成组装；正在北京、张家口、内蒙古等城市筹建 SOEC 制氢相关项目   |
| 浙江氢邦科技有限公司      | 已经建成 MW 级单电池制备的试验线；<br>成功研发了 5kW 级电解堆，在央企开展了若干示范，实现了出口销售；正在开发 20kW 级 SOEC 电解水制氢系统   |
| 北京质子动力发电技术有限公司  | 2021 年，质子动力与中广核集团签约 2kW SOEC 制氢系统，将首次应用于核电制氢示范项目，投运地点为广东大亚湾核电站；   |

|  |  |
|--|--|
|  | 2022 年，质子动力为国家电网提供 5kW SOEC 制氢系统，用于国家电网谷电制氢示范项目，是该公司首套 SOEC 制氢系统示范运营项目；<br><br>目前有 5 套以上 SOEC 制氢系统示范项目投运；在青岛落地了 SOEC 电池片及单电堆生产线，一期设计产能 1MW/年，二期设计产能 10MW/年 |
|--|--|

来源：势银（TrendBank）

## 5.7 固体聚合物阴离子交换膜电解设备部分企业

### 5.7.1 国外 AEM 企业

AEM 电解设备的总体产业化程度较低，仍处于前期研发阶段，全球仅有少数几家企业在尝试将 AEM 技术商业化。

意大利 Enapter 公司是少数成功生产出商业化 AEM 制氢设备的企业。Enapter 公司于 2018 年德国汉诺威工业博览会上首次公布了 AEM 电解水模块，制氢规模达到 0.5Nm<sup>3</sup>/h。2021 年，Enapter 公司推出了 AEM 电解水制氢系统，系统由 420 个制氢模块组成，制氢规模达到 0.5Nm<sup>3</sup>/h。

表 29 Enapter 公司 AEM 产品参数

|      |                        |
|------|------------------------|
| 生产速率 | 0.5Nm <sup>3</sup> /h  |
| 氢气压力 | 可达 35Bar               |
| 氢气纯度 | 99.999%（有干燥器）          |
| 制氢能耗 | 4.8kWh/Nm <sup>3</sup> |



|          |                        |
|----------|------------------------|
| 运行功耗     | 2400W                  |
| 待机功耗     | 15W                    |
| 运行环境（温度） | 5-45℃                  |
| 运行环境（湿度） | 最高 95%                 |
| 耗水量      | 0.4l/h                 |
| 重量       | 55kg                   |
| 尺寸       | 长 0.48m，宽 0.63m，高 0.3m |

来源：Enapter

Enapter 公司于 2021 年开始 AEM 产线的建设。工厂每月可以生产 10000 台 AEM 水电解标准化模块。2023 年 4 月，Enapter 首批水冷 AEM 电解槽 EL 4.0 交付给欧洲客户 Umstro GmbH 和 ja – gasttechnology。Enapter 公司的 AEM 电解槽下游应用领域包括加氢站项目、储能领域、住宅，以及氢发动机的测试和研究等。

## 5.7.2 国内 AEM 企业

中国在 AEM 制氢领域布局的企业相对较少。当前，清华大学、吉林大学、山东东岳集团、山东天维膜技术有限公司进行了阴离子交换膜研制相关工作，中科院大连化物所重点开展了催化剂的研发工作，中船 718 所开展了 AEM 电解槽的集成与基础研发工作。北京未来氢能、深圳稳石氢能则在大力推进 AEM 的产业化。2023 年入局 AEM 制氢领域的企业有所增加，例如卧龙集团与德国 Enapter 公司签署合作备忘录，将在中国共同开展氢电解槽及相关业务。

表 30 中国 AEM 相关企业动态

| 企业名称           | 相关动态  |
|----------------|---|
| 北京未来氢能科技       | 于 2022 年 8 月开始建设 AEM 制氢设备中试基地，包含阴离子交换膜、金属双极板和催化剂等关键部材产线   |
| 稳石氢能           | 2023 年 2 月，推出国内首款 2.5kW AEM 电解槽新品和集成系统。公司介绍新品直流功耗为 4.3kWh/Nm <sup>3</sup> ，输出压力为 3MPa，最大产氢量达 600L/h；热启动时可在 60 秒内达到 0-100%，冷启动时间不超过 5 分钟；电解槽工作寿命 > 30000h；系统寿命可达 10 年；<br><br>计划将在 2024 年开建首个超级工厂于 2025 年正式投产；并在 2026 年开建第二个超级工厂，同时拟开启 IPO |
| 卧龙集团           | 2023 年 3 月，与德国 Enapter 公司签署合作备忘录，将在中国共同开展氢电解槽及相关业务  |
| 承德新新钒钛储能科技有限公司 | 2023 年 4 月，携 AE 制氢机亮相 2023 储能国际峰会   |

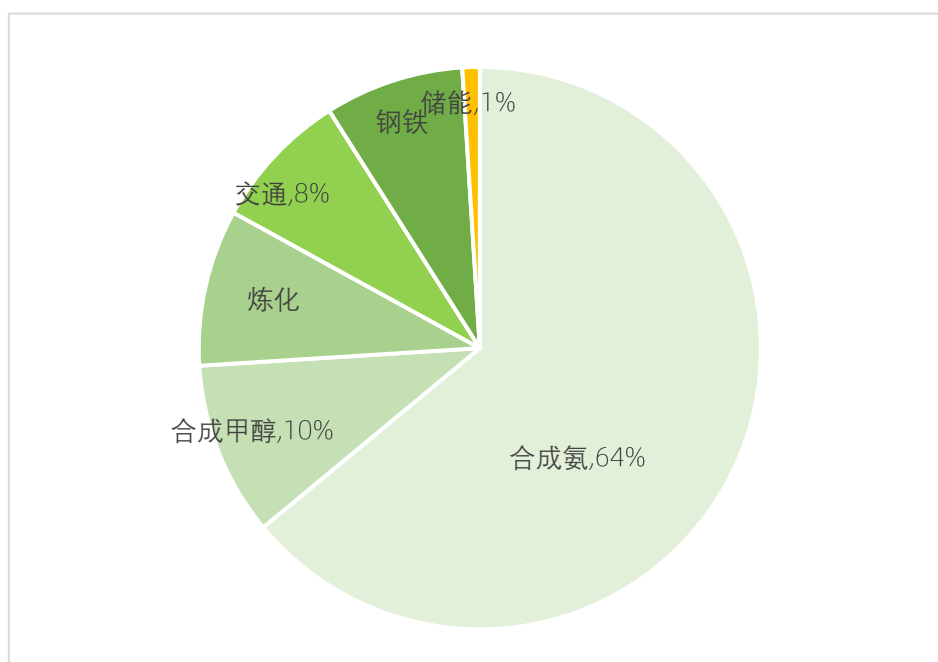
来源：势银（TrendBank）

## 第六章 中国绿氢产业应用篇

根据国际能源署（IEA）《全球氢能评论 2022》，近两年，全球氢能需求增量大部分仍来自于炼化和工业等传统应用领域。从 2021 年消费数据看，得益于技术进步，氢能在冶金、交通、电力等新应用领域的需求量虽然只有约 4 万吨，但同比 2020 年大增 60%。到 2030 年，预计这一需求将增长至约 200 万吨。

国内绿氢的下游应用也主要集中在化工等传统领域。根据势银（TrendBank）的统计，从已知绿氢项目的下游应用领域来看，化工领域对绿氢的需求量最高，主要集中于合成氨和合成甲醇领域。

图 18 中国绿色氢气应用领域分布



来源：势银（TrendBank）

本篇将主要介绍绿氢在化工、钢铁、储能及发电领域的应用情况。

## 6.1 化工合成

国际上主要使用天然气作为甲醇和合成氨的主要生产原料。由于中国“富煤少气”的能源结构，国内主要使用煤炭为生产原料。根据势银（TrendBank）的统计，从已知项目的下游应用领域来看，化工领域对绿氢的需求量最高，主要集中于合成氨和合成甲醇领域。

### ■ 合成甲醇

我国煤制甲醇的产能占到了甲醇总产能的 75% 以上。2020 年中国甲醇总产量约 6500 万吨。假设 75% 的甲醇来源于煤化工产业，则 2020 年煤制甲醇的碳排放约为 1.9 亿吨。

直接使用低碳氢与传统工艺耦合可减少煤炭资源的消耗，并降低碳排放，截至 2023 年 1 月，我国绿氢制甲醇项目已达 6 项。宁夏宝丰能源项目是中国首个绿色甲醇生产项目，该项目位于宁夏宁东能源基地，利用光伏发电（200MW）制取绿氢替代煤制氢。生产的绿色氢气将运输至宝丰能源的甲醇合成装置中，作为甲醇合成的原料气之一。项目制氢总规模 150MW，目前正在运行中。

### ■ 合成氨

我国 2020 年合成氨产量为 5117 万吨，大约 3900 万吨产自煤炭，估计直接和间接二氧化碳排放接近 2.2 亿吨。

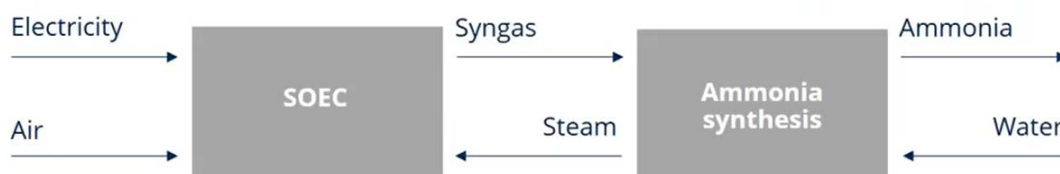
使用低碳氢气替代高碳排放氢气是降低合成氨行业碳排放的途径之一，截至 2023 年 1 月，我国绿色氢气制合成氨项目已达 22 项。内蒙古包头市达茂旗风光制氢与绿色灵活化工一体化绿氢制合成氨（绿氨）项目于 2022 年 8 月开工建设，预计投产时间为 2023 年 12 月。项目预计每年生产氢气 1.78 万吨，合成氨年产量预计 10 万吨；风光工厂预计每年可节约标煤 37.78 万吨，节水 162.35 万吨，减碳 104.96 万吨，减少灰渣 14.92 万吨；绿色化工预计减碳 50 万吨。

国外项目方面，Haldor Topsoe 合成氨示范项目是 Haldor Topsoe 主导的示范项目。

目前传统合成氨工艺的氢气来源主要是煤和天然气，在国外以天然气为主要原料，在中国以煤炭主要原料。在使用煤和天然气制取氢气的过程中，二氧化碳作为副产物之一将大量生成并排放到大气中。

在碳中和的大背景下，Haldor Topsoe 使用德国和丹麦海岸附近丰富的风电资源，配合 SOEC 水电解制取绿色氢气替代传统的天然气重整制氢。值得一提的是，SOEC 设备运行时所需要的热能由合成氨反应时释放的反应热提供。由于氨的合成是放热反应，通过利用氨合成塔的余热加热原料水可以达到提高能源效率的目的。SOEC 电解设备由 Haldor Topsoe 自行研发和生产。

图 19 Haldor Topsoe 合成氨工艺示意图



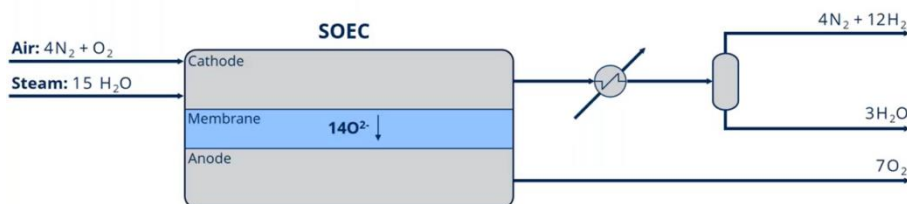
来源：Haldor Topsoe

SOEC 不仅可以生产氢气，还能起到分离空气中氧气和氮气的作用。氧气在 SOEC 的阴极得到电子后转化成氧离子，并通过氧离子电解质移动至阳极。最终，氮气会和水电解生成的氢气一起组成合成气进入到下一工序，而空气中分离出的氧气则会和水电解产生的氧气一起在阳极作为副产品收集起来。因此，Haldor Topsoe 公司在绿氢合成氨工艺中取消了空气分离装置。

图 20 合成氨工艺中 SOEC 运行示意图

### Ammonia syngas by SOEC

Approximate mass balances with Steam conversion 80 %



来源：Haldor Topsoe

按照 Haldor Topso 的工艺路线，使用 SOEC 生产绿色氢气，慢慢代替传统制氢方式，即可以减少碳排放，又可以省去空气分离设备的投资，将成为未来合成氨工艺的方向之一。

## 6.2 钢铁冶炼

传统的钢铁冶炼技术使用焦炭作为铁矿石的还原剂。因此，在钢铁冶炼过程中，二氧化碳作为生产过程的主要产物之一被大量排放至外界环境中。钢铁行业要实现大幅碳减排，需要对传统冶炼工艺进行创新性变革，氢能在冶金领域的创新与应用，将推动传统“碳冶金”向新型“氢冶金”转变，国内企业如宝武、河钢、鞍钢正在推进相关研究与示范。

受制于氢存储和经济性问题，国内氢冶金多以研发示范为主，尚未有正式运营的商业化项目，相关项目进展较慢。

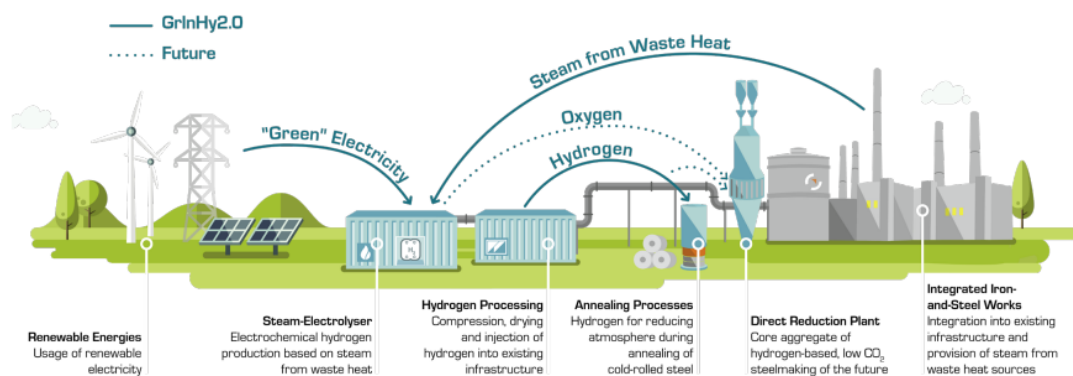
国内项目方面，位于内蒙古的国际氢能冶金化工产业示范区项目已签约，将建设 5GW 的风力发电，1.5GW 的光伏发电和年产 30 万吨的水电解制氢项目。在冶金方面，项目以绿氢为还原剂，建设 2\*55 万吨直接还原铁项目和 80 万吨的铁素体不锈钢项目；在化工方面，项目以绿氢为原料，建设年产 120 万吨的绿色氨项目。

国外项目方面，GrInHy2.0 项目是德国第二大钢铁生产公司萨尔茨吉特 (Salzgitter AG) 和德国 SOEC 设备制造企业 Sunfire 公司联合参与的绿色钢铁生产示范项目。通过使用萨

尔茨吉特发明的绿色低碳钢铁冶炼工艺（SALCOS），铁矿石将被氢气直接还原成海绵铁，并用于后续的钢铁生产。生产过程中将不再产生二氧化碳，作为副产物的水在经过净化提纯后也可以重复利用，对环境的影响更低。在氢气产量较低时，工艺中也会使用一定数量的天然气进行替代。

在 GrInHy2.0 项目中，用于还原铁矿石的氢气由 SOEC 电解装置生产。由于 SOEC 的工作温度在 800°C 左右，原料水需要提前加热。钢铁厂在冶炼过程中会产生很多的余热蒸汽，使用废热生产 SOEC 所需的水蒸气，可以有效提高能源利用效率，减少总能源投入，是因地制宜的典型案列。SOEC 电解设备由德国 Sufire 公司提供，电解槽总功率达到 720 千瓦。

图 21 GrInHy2.0 项目流程示意



来源：萨尔茨吉特

GrInHy2.0 项目的 SOEC 设备已于 2020 年 12 月正式投产。目标是到 2022 年底 SOEC 能至少运行 13000 小时，以每小时 18 千克的生产速率，生产 100 吨左右的高纯氢气，并将 SOEC 的氢气生产能耗保持在 40 度电（交流电）每千克氢气以下，生产成本保持在 7 欧元每千克氢气以下。

目前，据萨尔茨吉特公司估测，公司的每年二氧化碳排放量在 800 万吨以上。如果未

来公司所有产线全部使用绿色低碳钢铁冶炼工艺，公司的二氧化碳排放量预计能减少 95%，可以为减排做出巨大贡献。

## 6.3 储能和发电

受制于经济性和大规模应用的技术限制，目前绿氢用于储能和发电的项目较少。氢储能发电主要分为发电侧、电网侧、用户侧的应用，各领域示范应用进展如下：

### ■ 发电侧

氢储能发电在发电侧的应用价值主要体现在减少弃电、平抑波动和跟踪出力等方面。

位于内蒙古的“三峡乌兰察布新一代电网友好绿色电站示范项目”是国内首个“源网荷储”示范项目。2022 年 8 月，项目包含的 6 台发电设备已交付。

### ■ 电网侧

氢储发电在电网侧的应用价值主要体现在为电网运行提供调峰容量和缓解输变线路阻塞等方面。

位于安徽六安的兆瓦级固体聚合物电解水制氢及燃料电池发电示范工程，由国家电网安徽综合能源服务有限公司投资建设，于 2021 年 9 月 10 日正式满负荷运行调试成功，首次实现了我国兆瓦级氢储能发电在电网领域的应用。

位于河北张家口的 200MW/800MWh 氢储能发电工程是独立核算的发电项目，已列入 2022 年河北省电网侧独立储能示范项目清单。分为两期建设，其中一期建设总装机容量 100MW/400MWh，二期总装机容量 100MW/400MWh；项目建设期为 2 年，是目前全球最大的氢储能发电项目。

### ■ 用户侧

氢储能发电在用户侧的应用价值主要体现在参与电力需求响应、实现电价差额套利以及



作为应急备用电源等方面。

位于广东佛山的“中日韩智慧能源产业基地项目”为全国首座氢能进万家智慧能源示范社区项目，按照规划，该社区一期工程依托现有城市气网，将从天然气管网向混氢天然气管网最终向氢气管网演变。而二期项目将采用光伏制氢，不再使用城市的燃气和电网，小区里面的住户也不用再缴纳电费和燃气费，推动小区最终实现碳达峰、碳中和。

当前，氢能在我国发电侧的应用以“电-氢”单向转换为主，受制于经济性和大规模应用的技术限制，氢发电在发电侧的应用较少；在电网侧，氢能的应用通常需考虑“电-氢-电”双向转换，氢发电平准化度电成本相当高昂，同样限制了氢发电在电网侧的示范应用；在用户侧，由于我国居民电价和工商业电价较低，氢发电在住宅和商业用户端将在很长时间内难以具备经济性优势；相反，利用化工副产氢通过燃料电池发电和供热，在一定条件下已初步具备经济性。未来，预计工业领域的应用将成为我国氢发电产业的主要增量市场。

## 联系我们

电话：0574-87818480

邮箱：[service@trendbank.com](mailto:service@trendbank.com)

## 宁波总部

地址：浙江省宁波市宁穿路1811金融硅谷11号楼38层

