

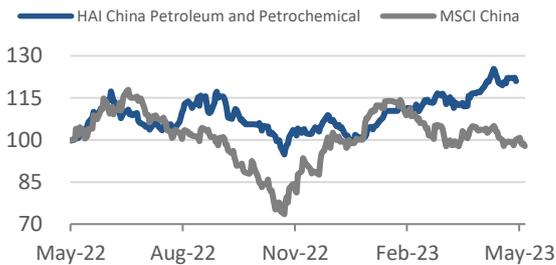
# 中国石油石化 China Petroleum and Petrochemical

## 行业专题报告：氢能系列报告之二：氢的制取

### Hydrogen Energy Report II: Hydrogen Production

观点聚焦 Investment Focus

股票名称	评级	股票名称	评级
中国石油	Outperform	华润材料	Outperform
中国石化	Outperform	东华能源	Outperform
中国海油	Outperform	九丰能源	Outperform
荣盛石化	Outperform	石大胜华	Outperform
恒力石化	Outperform	华锦股份	Outperform
东方盛虹	Outperform	维远股份	Outperform
新奥股份	Outperform	滨化股份	Outperform
广汇能源	Outperform	海优新材	Outperform
中海油服	Outperform	卓然股份	Outperform
卫星化学	Outperform	卓越新能	Outperform
桐昆股份	Outperform	同益中	Outperform
上海石化	Outperform	德美化工	Outperform
中油工程	Outperform	蒙泰高新	Outperform
齐翔腾达	Outperform	万凯新材	Outperform
纳微科技	Outperform	鹿山新材	Outperform
新凤鸣	Outperform	和顺科技	Outperform



资料来源: Factset, HTI

#### Related Reports

- 汽车涂料概述 (Overview of Automotive Coatings) (9 May 2023)
- 加强中东能源合作, 关注石化投资机会 (Enhance Energy Cooperation In The Middle East And Focus On Investment Opportunities In Petrochemicals) (23 Apr 2023)
- 坚持增储上产, 加强化石能源清洁高效利用 (Persist In Increasing Reserves and Production & Strengthen The Clean And Efficient Utilization Of Fossil Energy) (16 Apr 2023)

(Please see APPENDIX 1 for English summary)

- 核心结论。** 氢的制取主要有三种较为成熟的技术路线。一是以煤炭、天然气为代表的化石能源重整制氢；二是以焦炉煤气、氯碱尾气、丙烷脱氢为代表的工业副产气制氢；三是电解水制氢。据中国氢能联盟，氢能产业发展初期，增量侧，将以工业副产气就近供给为主；中期（2030年），将以可再生能源发电制氢、煤制氢等大规模集中稳定供氢为主；远期（2050年），将以可再生能源发电制氢为主。
- 煤气化过程中碳与水蒸气反应产生 H<sub>2</sub>，该反应为煤化工制氢关键。** 煤的气化过程是热化学过程。它是煤或焦炭为原料，以氧气、水蒸气等为气化剂，在高温条件下，通过化学反应把煤或焦炭中的可燃部分转化为气体的过程。这些反应中，碳与水蒸气反应的意义最大，它参与各种煤气化过程，此反应为强吸热过程。气化生成的混合气称为水煤气，水煤气的主要成分为 CO 和 H<sub>2</sub>。
- 天然气水蒸气转化过程中甲烷与水蒸气反应产生 H<sub>2</sub>，该反应为天然气制氢关键。** 目前工业上由天然气制合成气的技术主要有蒸汽转化法和部分氧化法。其中，蒸汽转化法为天然气制合成气的主要方法。蒸汽转化法是在催化剂存在及高温条件下，使甲烷等烃类与水蒸气反应，生成 H<sub>2</sub>、CO 等混合气，该反应为强吸热反应，需要外界供热。此法技术成熟，目前广泛应用于生产合成气、纯氢气和合成氨原料气。
- 工业副产氢主要分为：煤干馏副产氢；烃类热裂解副产氢；氯碱工业副产氢。** 煤干馏是在隔绝空气条件下加热煤，使其分解生成焦炭、煤焦油、粗苯和焦炉气（H<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub>）的过程。烃类热裂解法是将石油系烃类燃料经高温作用，使烃类分子发生碳链断裂或脱氢反应，生成相对分子质量较小的烯烃、烷烃和其他相对分子质量不同的轻质和重质烃类。氯碱副产氢气，品质高，直接适用于氢燃料电池使用。采用氯碱—氢能—绿电自用新模式，可直接节约电解用电量的 1/4 左右。
- 电解水制氢技术未来将成为主流。** 碱性水电解，质子交换膜电解和固体氧化物电解是目前电解水制氢的三种技术方法。而低温技术下，碱水制氢和 PEM 具备较高的技术成熟度，高温 SOE 技术仍处于实验室阶段。碱水制氢使用浓缩碱液作为电解质，需要将产物气体分离，以防止产物气体混合。PEM 使用润湿聚合物膜作为电解质，贵金属如铂和铱的氧化物作为电催化剂。SOE 技术是将气态水被转化为氢气和氧气，且反应温度在 700℃ 到 900℃ 之间。

Junjun Zhu  
jj.zhu@htisec.com

Xin Hu  
x.hu@htisec.com

Borong Li  
br.li@htisec.com

- **投资建议。**我们认为，传统能源企业发展“绿电制绿氢”具有可持续发展驱动力和产业、技术等方面优势。建议关注：（1）氢能全产业链企业，**中国石化；中国石油**（2）绿电制绿氢企业，**宝丰能源**；（3）制氢领域开展低成本副产氢多元耦合项目企业，**卫星化学，东华能源**。
- **风险提示：**氢能技术发展不及预期；政策支持力度不及预期。

## 1. 氢能供应体系重塑

**氢的制取主要有三种较为成熟的技术路线。**一是以煤炭、天然气为代表的化石能源重整制氢；二是以焦炉煤气、氯碱尾气、丙烷脱氢为代表的工业副产气制氢；三是电解水制氢，主要包括碱性电解水制氢、质子交换膜电解水制氢和固体氧化物电解水制氢。生物质直接制氢和太阳能光催化分解水制氢等技术路线仍处于实验和开发阶段，产收率有待进一步提升，尚未达到工业规模制氢要求。

据中国氢能联盟，氢能产业发展初期（至 2025 年），作为燃料增量有限，工业副产制氢因成本较低，且接近消费市场，将以工业副产氢就近供给为主，同时积极推动可再生能源发电制氢规模化、生物制氢等多种技术研发示范；中期（2030 年），将以可再生能源发电制氢、煤制氢配合 CCS 等大规模集中稳定供氢为主，工业副产氢为补充手段；远期（2050 年），将以可再生能源发电制氢为主，煤制氢配合 CCS 技术、生物制氢和太阳能光催化分解水制氢等技术成为有效补充。

**氢能供应体系将逐步以绿氢为基础进行重塑。**2021 年，我国氢气产能约为 4100 万吨，产量约为 3300 万吨，其中化石能源制氢和工业副产氢为主，而绿氢在氢能供应结构中占比很小（电解水制氢占比仅为 1%）。在消费侧，氢气主要作为原料用于化工（如合成甲醇、合成氨）、炼油等工业领域。着眼中长期，我们预计 2060 年我国氢气需求量 1.3 亿吨，氢能占终端能源消费的比重约为 20%。

在碳中和情景下，若基于目前以化石能源制氢为主体的氢能供应体系，氢气生产的碳排放量我们预计为 10 亿吨/年，远高于碳汇所能中和的碳排放量。因此，在推动实现碳中和目标的过程中，氢能供应体系需逐步以绿氢为基础进行重塑，辅以加装碳捕集装置的化石能源制氢方式，才能改变氢能生产侧的高碳格局。

图1 当前氢流图（万吨）

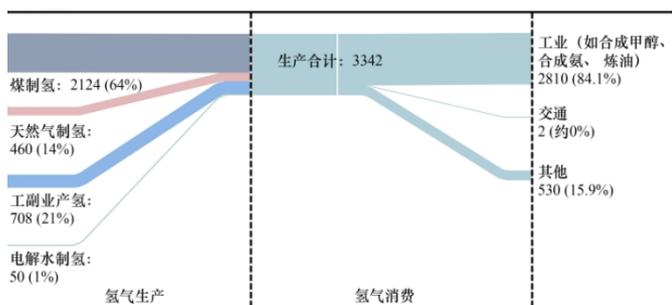
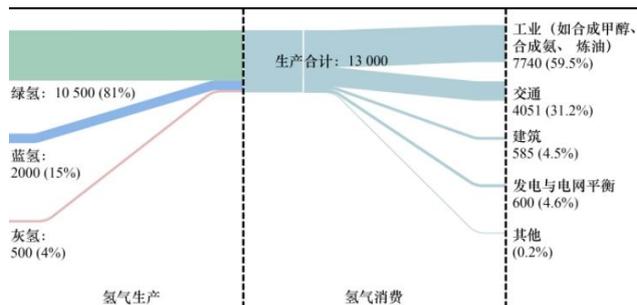


图2 碳中和愿景下氢流图（万吨）



资料来源：杜忠明《我国绿氢供应体系建设思考与建议》，HTI

资料来源：杜忠明《我国绿氢供应体系建设思考与建议》，HTI

## 2. 国内外氢能制备的历程

煤制氢历史悠久，通过气化技术将煤炭转化为合成气，再经水煤气变换分离处理以提取高纯度的氢气，是制备合成氨、甲醇、液体燃料、天然气等多种产品的原料。天然气制氢技术中，蒸汽重整制氢较为成熟，也是国外主流制氢方式。工业副产氢气主要分布在钢铁、化工等行业，提纯利用其中的氢气，既能提高资源利用效率和经济效益，又可降低大气污染，改善环境。电解水技术来自于航天科技，最早是为了生产航空燃料。

**煤化工。**煤气化制氢技术已有一百余年发展历史，可分为三代技术：第一代技术是德国在 20 世纪 20-30 年代开发的常压煤气化工艺，典型工艺包括碎煤加压气化 Lurgi 炉的固定床工艺、常压 Winkler 炉的流化床和常压 KT 炉的气流床等，这些工艺都以氧气为气化剂，实行连续操作，气化强度和冷煤气效率得到较大提高。第二代技术是 20 世纪 70 年代由德国、美国等国家在第一代技术的基础上开发的加压气化工艺。我国煤气化制氢工艺主要用于合成氨的生产，多年来开发了一批具有自主知识产权的先进煤气化技术，如多喷嘴水煤浆气化技术、航天炉技术、清华炉技术等。第三代技术主要有煤催化气化、煤等离子体气化、煤太阳能气化和煤核能余热气化等，目前仍处于实验室研究阶段。

**天然气化工。**世界上约有 50 个国家不同程度地发展了天然气化工。天然气化工比较发达的国家有美国、俄罗斯、加拿大等。美国发展天然气化工最早，产品品种和产量目前居首位。在世界合成氨产量中，约 80% 以天然气为原料。世界甲醇（甲醇生产以合成气为原料，合成气成分为  $H_2$  和  $CO$ ）生产中 70% 以天然气为原料。天然气为原料的乙烯装置生产能力约占世界乙烯生产能力的 32%。中国天然气化工始于 20 世纪 60 年代初，现已初具规模，主要分布四川、黑龙江、辽宁等地。我国天然气制氢主要用于生产氮肥，其次是生产甲醇、甲醛、乙炔等。

**电解水制氢。**碱性水电解在 20 世纪前后开始实现碱性水电解制氢技术的工业化应用，在经历了单极性到双极性、小型到大型、常压型到加压型、手动控制到全自动控制的发展历程后，碱性水电解制氢技术已逐步进入成熟的工业化应用阶段。20 世纪 70 年代起，质子交换膜（PEM）水电解制氢技术开始获得发展，并以其制氢效率高、设备集成化程度高及环境友好等特点成为水电解技术的研究重点，逐步实现从小型化到兆瓦级的发展。

**未来电解水制氢技术将成为主流。**美国、日韩和欧洲均将电解水制氢技术视为未来的主流发展方向，聚焦碱水制氢技术规模化和 PEM 制氢技术产业化，重点围绕“电解效率”、“耐久性”和“设备成本”三个关键降本性能指标推进整体技术研发，电解水制氢成本结构与关键技术分析。目前，PEM 制氢技术的瓶颈在于设备成本较高、寿命较低，且实际的电解效率还远低于理论效率（其制氢效率潜力有望超出碱水制氢技术），因此欧美发达国家正重点开展技术攻关以突破技术瓶颈，实现 PEM 制氢技术的更大发展。固体氧化物制氢技术采用水蒸气电解，高温环境下工作，理论能效最高，但该技术尚处于实验室研发阶段。

### 3. 化石能源制氢向清洁低碳转型

#### 3.1 合成气+变换反应是化石能源制氢的核心机理

**合成气（ $CO+H_2$ ）是有机原料之一，也是氢气和一氧化碳的来源。**合成气（Syngas）系指一氧化碳和氢气的混合气。合成气中  $H_2$  与  $CO$  的比值随原料和生产方法的不同而异，其  $H_2/CO$  的摩尔比为 1/2 至 3/1。合成气是有机合成原料之一，也是氢气和一氧化碳的来源，在化学工业中有着重要作用。制造合成气的原料多样，许多含碳资源如煤、天然气、石油馏分、农林废料、城市垃圾等均可用来制造合成气。

利用合成气可以转化成液体和气体燃料、大宗化学品和高附加值的精细有机合成产品，实现这种转化的重要技术是  $C_1$  化工技术（凡包含一个碳原子的化合物，如  $CH_4$ 、 $CO$ 、 $CO_2$ 、 $HCN$ 、 $CHOH$  等参与反应的化学，称为  $C_1$  化学，涉及  $C_1$  化学反应的工艺过程和技术称为  $C_1$  化工）。自从 20 世纪 70 年代后期以来， $C_1$  化工得到世界各国较大重视，以天然气和煤炭为基础的合成气转化制备化工产品的研究广泛开展。

**变换反应进一步调节合成气 (CO+H<sub>2</sub>) 中的碳氢比，是工业制氢的重要反应。**水煤气变换反应(water gas shift, 英文缩写 WGS), 是以 CO 和 H<sub>2</sub>O 为原料, 在催化剂的作用下生成 H<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的过程。该反应是工业制氢过程中的一个重要反应, 亦可用于调节合成气加工过程中的 H<sub>2</sub>/CO 比例, 在合成氨、合成甲醇等传统工业领域及燃料电池领域均有广泛应用。一氧化碳变换反应是可逆放热反应, 而且反应热随温度升高而减小。

变换过程要看对合成气具体使用目的来决定取舍。变换是 CO 和 H<sub>2</sub>O 反应生成 H<sub>2</sub> 和 CO<sub>2</sub> 的过程, 可增加 H<sub>2</sub> 量, 降低 CO 量, 当需要 CO 含量高时, 应取消变换过程, 当需要 CO 含量低时, 则要设置变换过程。如果只需要 H<sub>2</sub> 而不需要 CO 时, 需设置高温变换和低温变换以及脱除微量 CO 的过程。

表 1 由合成气合成一些有机物所需要的 H<sub>2</sub> 与 CO 摩尔比

产品	总反应式	H <sub>2</sub> /CO 摩尔比	产品	总反应式	H <sub>2</sub> /CO 摩尔比
甲醇	CO+2H <sub>2</sub> →CH <sub>3</sub> OH	2/1	甲基丙烯酸	4CO+5H <sub>2</sub> →CH <sub>2</sub> C(CH <sub>3</sub> )COOH+2H <sub>2</sub> O	5/4
乙烯	2CO+4H <sub>2</sub> →C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> +2H <sub>2</sub> O	2/1	醋酸乙烯	4CO+5H <sub>2</sub> →CH <sub>3</sub> COOCHCH <sub>2</sub> +2H <sub>2</sub> O	5/4
乙醛	2CO+3H <sub>2</sub> →CH <sub>3</sub> CHO+H <sub>2</sub> O	3/2	醋酸	2CO+2H <sub>2</sub> →CH <sub>3</sub> COOH	1/1
乙二醇	2CO+3H <sub>2</sub> →HOCH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> OH	3/2	醋酐	4CO+4H <sub>2</sub> →(CH <sub>3</sub> CO) <sub>2</sub> O+H <sub>2</sub> O	1/1
丙酸	3CO+4H <sub>2</sub> →CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> COOH+H <sub>2</sub> O	4/3	-	-	-

资料来源: 米镇涛《化学工艺学》, HTI

**合成气主要有煤制, 天然气制, 和油制三种生产方法。**合成气分为三种方法, 分别为以煤为原料的生产方法, 以天然气为原料的生产方法, 以重油或渣油为原料的生产方法。

(1) **以煤为原料的生产方法。**有间歇和连续操作两种方式。连续式生产效率高, 技术较先进, 它是在高温下以水蒸气和氧气为气化剂, 与煤反应生成 CO 和 H<sub>2</sub> 等气体, 这样的过程称为煤的气化。因为煤中氢含量相当低, 所以煤制合成气中 H<sub>2</sub>/CO 比值较低, 适于合成有机化合物。

(2) **以天然气为原料的生产方法。**主要有转化法和部分氧化法。目前工业上多采用水蒸气转化法, 该方法制得的合成气中 H<sub>2</sub>/CO 比值理论上为 3, 有利于用来制造合成氨或氢气; 用来制造其他有机化合物时 (例如甲醇、醋酸、乙烯、乙二醇等), 比值需要再加调整。

(3) **以重油或渣油为原料的生产方法。**主要采用部分氧化法, 即在反应器中通入适量的氧和水蒸气, 使氧与原料油中的部分烃类燃烧, 放出热量并产生高温, 另一部分烃类则与水蒸气发生吸热反应而生成 CO 和 H<sub>2</sub>, 调节原料中油、H<sub>2</sub>O 与 O<sub>2</sub> 的相互比例, 可达到自热平衡而不需要外供热。

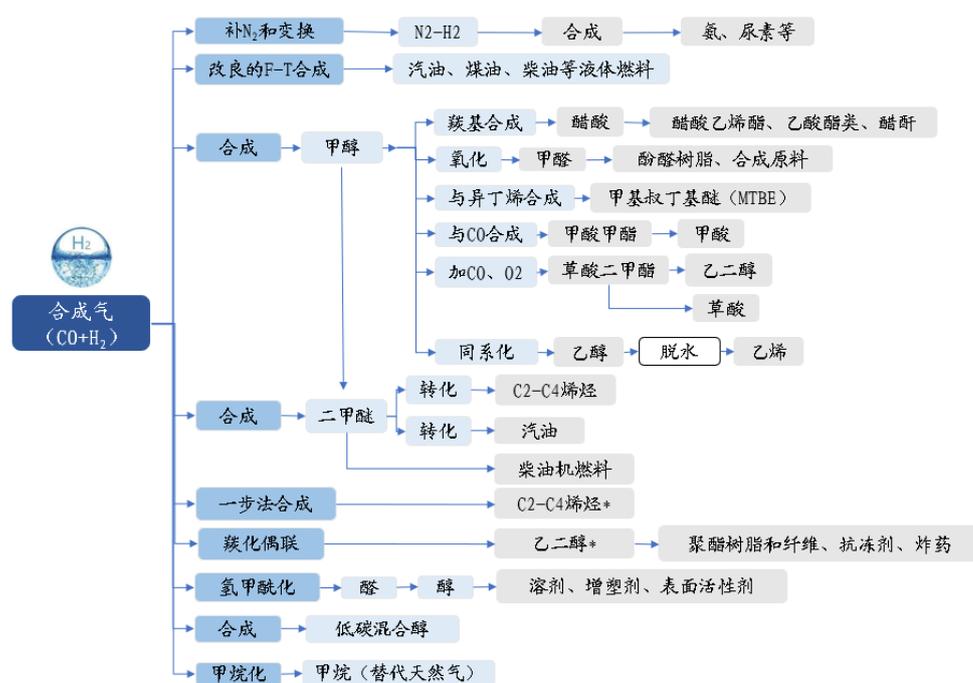
**合成气主要应用于合成氨, 合成甲醇等。**工业合成气主要应用于合成氨, 合成甲醇, 合成醋酸, 烯烃的氢甲酰化产品, 合成天然气、汽油和柴油等。其中, 合成气制甲醇, 再由甲醇制乙烯, 是煤制烯烃的主要途径。

(1) **合成氨。**合成氨工艺由含碳原料与水蒸气、空气反应制成含 H<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 的粗原料气, 再经精细地脱除各种杂质, 得到 H<sub>2</sub>:N<sub>2</sub> 体积比为 3:1 的合成原料气, 使其在 400-450°C、8-15MPa 及铁催化剂条件下进行。氨的最大用途是制氮肥, 氨还是重要的化工原料, 它是目前世界上产量最大的化工产品之一。

(2) **合成甲醇**。将合成气中  $H_2/CO$  的摩尔比调整为 2.2 左右，在 260-270°C，5-10MPa 及铜基催化剂作用下可以合成甲醇。甲醇可用于制醋酸、醋酐、甲醛、甲酸甲酯、甲基叔丁基醚 (MTBE) 等产品。

(3) **合成其他产品**。**合成醋酸**：首先将合成气制成甲醇，再将甲醇与 CO 基化合成醋酸。合成烯烃的氢甲酰化产品：烯烃与合成气或一定配比的 CO 及  $H_2$  在过渡金属配位化合物的催化作用下发生加成反应，生成比原料烯烃多一个碳原子的醛。**合成天然气**：在镍催化剂作用下，合成气进行甲烷化反应，生成甲烷，称之为合成天然气 (SNG)，热值比 CO 和  $H_2$  高。

图3 由合成气为原料生产的主要化工产品



资料来源：米镇涛《化学工艺学》，HTI 整理

## 3.2 煤制氢

### 3.2.1 煤化工工艺路线

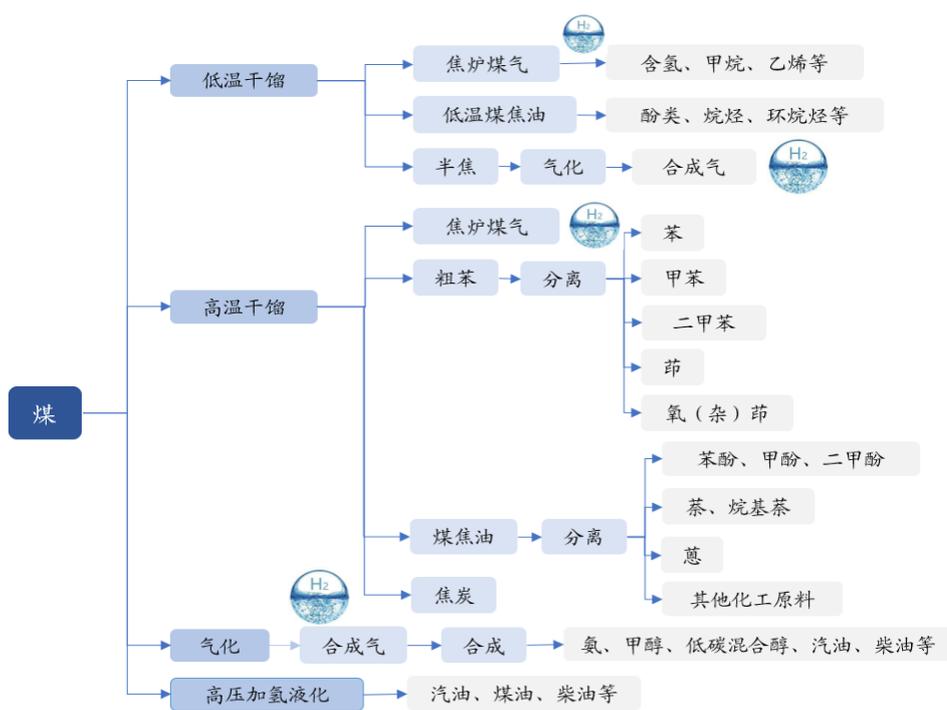
煤是由含碳、氢的多种结构的大分子有机物和少量硅、铝、铁、钙、镁的无机矿物质组成。由于成煤过程的时间不同，有泥煤、褐煤、烟煤和无烟煤之分。按质量分数计，泥煤含碳量为 60%-70%，褐煤含碳量为 70%-80%，烟煤含碳量为 80%-90%，无烟煤含碳量高达 90%-93%。煤中氢和氧元素的含量顺序是：泥煤>褐煤>烟煤>无烟煤。煤的综合利用可同时为能源、化工和冶金提供有价值的原料。煤化工加工路线主要有以下几种。

(1) **煤干馏 (coal carbonization)**。是在隔绝空气条件下加热煤，使其分解生成焦炭、煤焦油、粗苯和焦炉气的过程。煤干馏过程又分为煤的高温干馏和煤的低温干馏两类。**煤的高温干馏 (炼焦)**：在炼焦炉中隔绝空气于 900-1100°C 进行的干馏过程。产生焦炭、焦炉气、粗苯、氨和煤焦油等。**煤的低温干馏**：在较低终温 (500-600°C) 下进行的干馏过程，产生半焦、低温焦油和煤气等产物。煤干馏也是工业副产氢的来源。

(2) **煤气化 (coal gasification)**。是指在高温 (900-1300°C) 下使煤、焦炭或半焦等固体燃料与气化剂反应, 转化成主要含有 H<sub>2</sub>、CO 等气体的过程。生成的气体组成随固体燃料性质、气化剂种类、气化方法、气化条件的不同而有差别。气化剂主要是水蒸气、空气或氧气。煤干馏制取化工原料只能利用煤中一部分有机物质, 而气化则可利用煤中几乎全部含碳、氢的物质。煤气化生成的 H<sub>2</sub> 和 CO 是合成氨、合成甲醇以及 C<sub>1</sub> 化工的基本原料, 还可用来合成甲烷, 称为替代天然气 (SNG), 可作为城市煤气。煤气化是化石能源制氢的主要来源之一。

(3) **煤液化 (coal liquefaction)**。可分为直接液化和间接液化两类过程。煤的直接液化是采用加氢方法使煤转化为液态烃, 所以又称为煤的加氢液化。液化产物亦称为人造石油, 可进一步加工成各种液体燃料。加氢液化反应通常在高压高温下, 经催化剂作用而进行。氢气通常用煤与水蒸气汽化制取。煤的直接液化氢耗高、压力高, 因而能耗大, 设备投资大, 成本高。煤的间接液化是预先制成合成气, 然后通过催化剂作用将合成气转化为烃类燃料、含氧化合物燃料。

图4 煤化工工艺链上的氢气足迹



资料来源: 米镇涛《化学工艺学》, HTI 整理

### 3.2.2 煤气化制氢

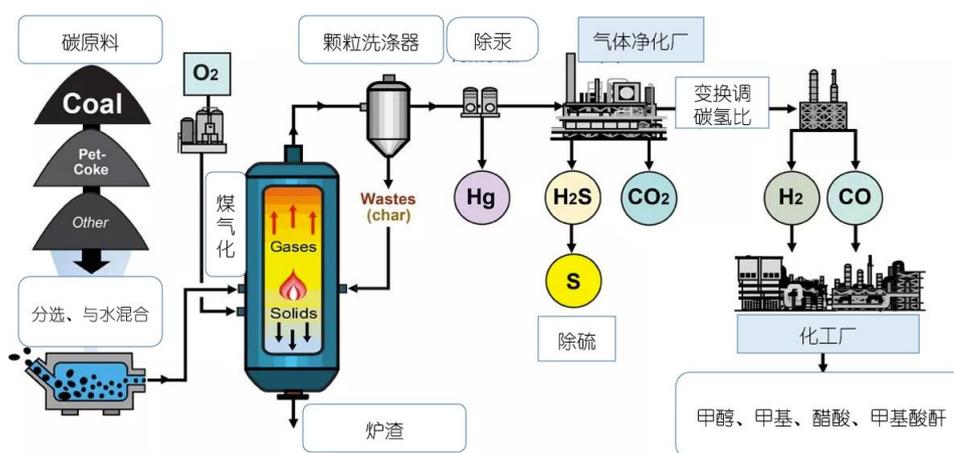
**煤气化技术是煤炭清洁转化的核心和关键技术。**中国的化石能源以煤为主, 天然气资源稀缺, 目前氢气的来源也是以煤制氢为主 (以煤气化为主)。煤制氢技术包括煤的焦化制氢和煤的气化制氢。煤的焦化是在制取焦炭过程中, 焦炉煤气作为副产品, 含氢量约 60% (体积分数)。煤焦化所得的煤气, 目前大多作为城市煤气使用。煤气化制氢在我国主要作为生产原料气用于合成氨的生产; 近些年来, 煤气化的原料气向合成甲醇、二甲醚、醋酐和醋酸等方向发展。我国每年约有 5000 万吨煤炭用于气化。在各种煤转化技术中, 特别是开发洁净煤技术中, 煤的气化是最有应用前景的技术之一。煤气化技术是煤炭清洁转化的核心和关键技术。

### 煤气化过程中碳与水蒸气反应产生 H<sub>2</sub>，该反应为煤制氢工艺的关键。

煤的气化过程是热化学过程。它是以煤或焦炭为原料，以氧气、水蒸气等为气化剂，在高温条件下，通过化学反应把煤或焦炭中的可燃部分转化为气体的过程。这些反应中，碳与水蒸气反应的意义最大，它参与各种煤气化过程，此反应为强吸热过程。碳与二氧化碳的还原反应也是重要的气化反应。气化生成的混合气称为水煤气。以上反应总过程为强吸热反应。

**煤气化的生产方法及主要设备。** 煤气化过程需要吸热和高温，工业上采用燃烧煤来实现。气化过程按操作方式来分有间歇式和连续式，前者的工艺较后者落后，现在逐渐被淘汰。目前最通用的分类方法是按反应器分类，分为固定床（移动床）、流化床、气流床和熔融床。至今熔融床还处于中试阶段，而固定床（移动床）、流化床和气流床是工业化或建立示范装置的方法。

图5 煤制氢工艺流程图



资料来源：Hydrogen as an Energy Source, DAC, HTI

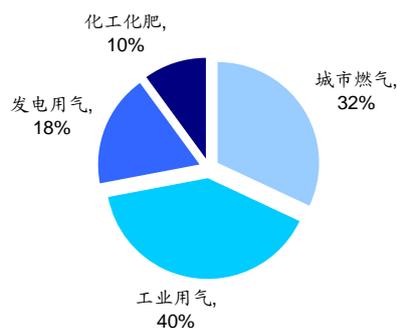
## 3.3 天然气制氢

### 3.3.1 天然气化工工艺路线

天然气的主要成分是甲烷，甲烷含量高于 90% 的天然气称为干气，C<sub>2</sub>-C<sub>4</sub> 烷烃含量在 15%-20% 或以上的天然气称为湿气，天然气与石油共生称为油田伴生气。我国已有陕甘宁、新疆地区、四川东部三个大规模气区，此外，煤矿中吸附在煤上的甲烷（煤层气）、海上油田天然气等，储量也非常客观。天然气的热值高、污染少，是一种清洁能源，在能源结构中的比例逐年提高。

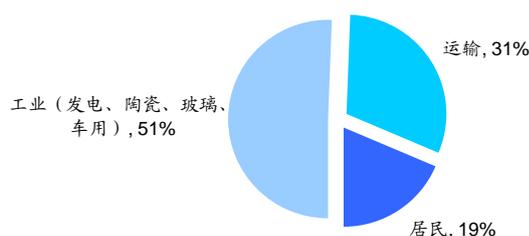
**(1) 天然气制氢气和合成氨。** 2021 年从消费结构看，工业用气占天然气消费总量的 40%；发电用气占比 18%；城市燃气占比 32%；化工化肥用气占比 10%。天然气在化工领域的用途是制造氨和氮肥，尿素是当今世界上产量最大的化工产品之一。氨也是制造硝酸及许多无机和有机化合物的原料。由天然气制氢是当前工业制氢的主要工艺之一。目前工业上由天然气制氢气的技术主要有蒸汽转化法和部分氧化法。

图6 2021年中国天然气需求结构



资料来源：自然资源部《中国自然资源报》，HTI

图7 2021年中国 LNG 需求结构



资料来源：百川盈孚，HTI

**（2）天然气经合成气路线的催化转化制燃料和化工产品。**由天然气制造合成气（ $\text{CO}+\text{H}_2$ ），再由合成气合成甲醇开创了廉价制取甲醇的生产路线。以甲醇为基本原料，可合成汽油、柴油等液体燃料和醋酸、甲醛、甲基叔丁基醚等一系列化工产品。合成气还可以经过改良费托合成制汽油、煤油、柴油等。合成气直接催化转化为低碳烯烃、乙二醇的工艺正在开发。

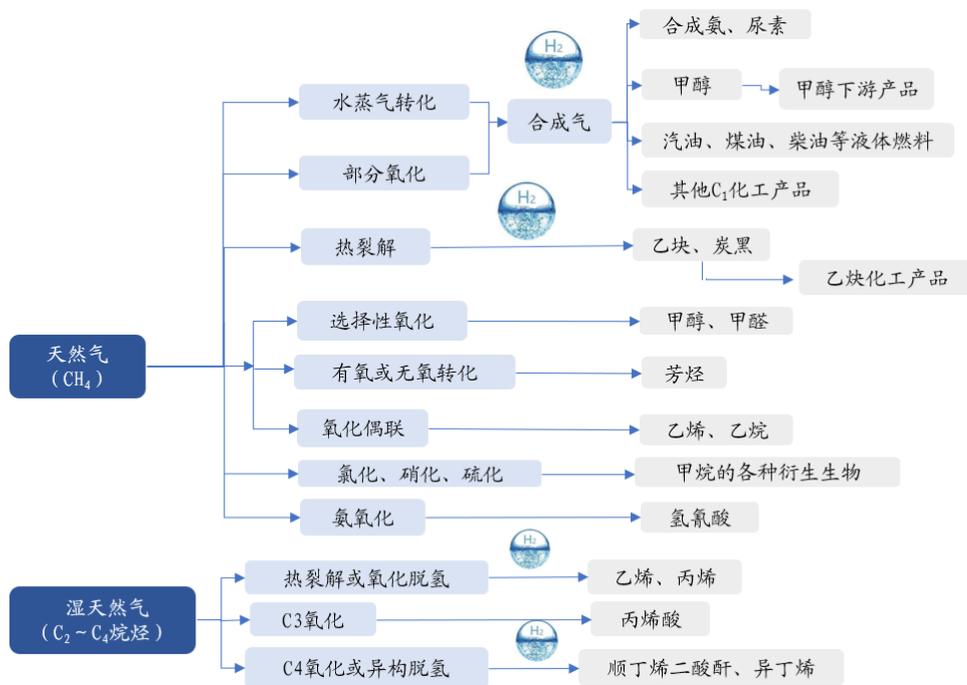
**（3）天然气直接催化转化成化工产品。**天然气中甲烷直接在催化剂作用下进行选择性氧化，生成甲醇和甲醛；在有氧或无氧条件下催化转化成芳烃，甲烷催化氧化偶联生成乙烯、乙烷等。

**（4）天然气热裂解制化工产品。**天然气在  $930\sim 1230^\circ\text{C}$  时，裂解生成乙炔和炭黑。从乙炔出发可制氯乙烯、乙醛、醋酸、氯丁二烯、1, 4-丁二醇、1, 4-丁炔二醇、甲基丁烯醇、醋酸乙烯、丙烯酸等乙炔化工产品。炭黑作橡胶的补强剂和填料，也是油墨、电极、电阻器、炸药、涂料、化妆品的原材料。

**（5）甲烷的氯化、硝化、氨氧化和硫化制化工产品。**可分别制得甲烷的各种衍生物例如氯代甲烷、硝基甲烷、氢氰酸、二硫化碳等。

**（6）湿性天然气  $\text{C}_2\text{-C}_4$  烷的利用。**湿性天然气中  $\text{C}_2\text{-C}_4$  可深冷分离出来，是优良的制取乙烯、丙烯的热裂解原料，许多国家都在提高湿性天然气在制取烯烃原料中的比例。

图8 天然气化工工艺链上的氢气足迹



资料来源：米镇涛《化学工艺学》，HTI 整理

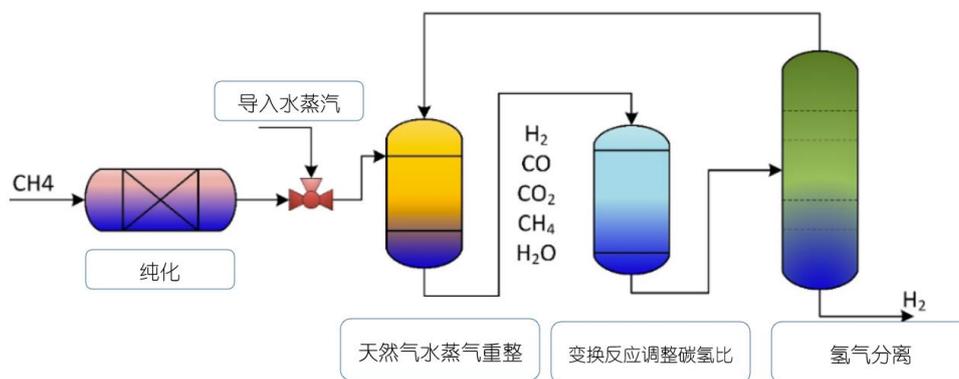
### 3.3.2 天然气水蒸气转化制氢

**天然气水蒸气转化法为天然气制合成气的技术的主要方法。**天然气中甲烷含量一般大于 90%，其余为少量的乙烷、丙烷等气态烷烃，有些还含有少量氮和硫化物。其他含甲烷等气态烃的气体，如炼厂气、焦炉气、油田气和煤层气等均可用来制造合成气。目前工业上由天然气制合成气的技术主要有蒸汽转化法和部分氧化法。其中，蒸汽转化法为天然气制合成气的技术的主要方法。

**转化过程中甲烷与水蒸气反应产生 H<sub>2</sub>，该反应为制氢工艺的关键。**蒸汽转化法是在催化剂存在及高温条件下，使甲烷等烃类与水蒸气反应，生成 H<sub>2</sub>、CO 等混合气，该反应为强吸热反应，需要外界供热。此法技术成熟，目前广泛应用于生产合成气、纯氢气和合成氨原料气。

甲烷水蒸气转化反应必须在催化剂存在下才有足够的反应速率。倘若操作条件不适当，析碳反应严重，生成的碳会覆盖在催化剂内外表面，致使催化活性降低，反应速率下降。析碳更严重时，床层堵塞，阻力增加，催化剂毛细孔内的碳遇水蒸气会剧烈汽化，致使催化剂崩裂或粉化，迫使停工，经济损失巨大。所以，对于烃类蒸汽转化过程要特别注意防止析碳。

图9 天然气水蒸气重整制氢工艺流程



资料来源：A Review of the CFD Modeling of Hydrogen Production in Catalytic Steam Reforming Reactors, Nayef Ghasem, HTI 整理

**催化剂在天然气水蒸气转化过程中具有重要作用。**天然气水蒸气转化，在无催化剂时的反应速率很慢，在1300°C以上才有较快的反应速率。然而在此高温下大量甲烷裂解，没有工业生产价值，所以必须采用催化剂。催化剂的组成和结构决定了其催化性能，而对其使用是否得当会影响其性能的发挥。

工业上一直采用镍催化剂（在贵金属中价格相对平便宜，转化效率高），并添加一些助催化剂以提高活性或改善诸如机械强度、活性组分分散、抗结碳、抗烧结、抗水合等性能。催化剂的促进剂有铝、镁、等金属氧化物。目前，工业上采用的镍催化剂有两大类，一类是以高温烧结的 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 或 $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 尖晶石为载体，用浸渍法将含有镍盐和促进剂的溶液负载到预先成型的载体上，再加热分解和煅烧，称之为负载型催化剂。另一类转化催化剂以硅铝酸钙水泥作为黏结剂，与用沉淀法制得的活性组分细晶混合均匀，成型后用水蒸气养护，使水泥固化而成，称之为黏结剂催化剂。

催化剂在使用中出现活性下降现象的原因主要有老化、中毒、积碳等。**老化**，催化剂在长期使用过程中，由于经受高温和气流作用，镍晶粒逐渐长大、聚集甚至烧结，致使表面积降低或某些促进剂流失、导致活性下降。**中毒**，许多物质，例如硫、砷等的化合物，都是催化剂的毒物；最重要、最常见的毒物是硫化物，极少量的硫化物就会使催化剂中毒，很快就完全失活。**积碳**，甲烷-水蒸气转化过程伴随有析碳副反应，同时也有水蒸气消碳反应。析出的碳是否能在催化剂上积累，要看析碳速率与消碳速率之比，当析碳速率小于消碳速率时，则不会积碳。这与温度、压力、组分浓度等条件有密切关系。

### 3.4 煤炭、天然气制氢技术经济性分析

**煤炭原料成本为 4.75 元/kg H<sub>2</sub>；仅天然气原料成本为 10.08 元/kg H<sub>2</sub>。**

我们计算得出：当前煤炭价格为 950 元/吨，生产 1 吨氢气，仅煤炭原料成本为 4750 元；生产 1kg 氢气，仅煤炭原料成本为 4.75 元；标准状态下氢气密度 0.089 kg/m<sup>3</sup>，生产 1 m<sup>3</sup>H<sub>2</sub> 仅煤炭原料成本为 0.423 元。标准状态下天然气密度 0.717 kg/m<sup>3</sup>，当前天然气价格为 3 元/m<sup>3</sup>，生产 1kgH<sub>2</sub> 仅天然气原料成本为 10.08 元；标准状态下氢气密度 0.089 kg/m<sup>3</sup>，生产 1 m<sup>3</sup>H<sub>2</sub> 仅天然气原料成本为 0.897 元。

成本假设：（1）天然气到厂价为 3 元/m<sup>3</sup>，煤炭 950 元/t。（2）氧气外购 0.5 元/m<sup>3</sup>；3.5MPa 蒸汽 100 元/t，1.0MPa 蒸汽 70 元/t；新鲜水 4 元/m<sup>3</sup>；电 0.56 元/kW·h。（3）煤制氢采用水煤浆技术，建设投资 12.4 亿元、天然气制氢建设投资 6 亿元。人员费用统一。装置 10 年折旧后残值 5%；修理费 3 %/a，财务费用按建设资金 70%贷款，年利率按 5%计。（4）比较范围为装置界区内，建设投资不含征地费以及配套储运设施。

该假设下，我们通过计算得出：煤制氢成本为 11.5 元·kg<sup>-1</sup>，天然气制氢成本为 15.6 元·kg<sup>-1</sup>。即在煤炭价格为 950 元/t，天然气价格为 3 元/m<sup>3</sup>时，煤制氢成本明显低于天然气制氢成本。

表 2 天然气制氢和煤制氢成本测算结果

项目	单位制氢成本 (元·Nm <sup>-3</sup> )	
	煤制氢	天然气制氢
原料 (天然气 / 煤炭)	0.423	0.897
氧气	0.210	
燃料及动力	0.181	0.382
直接工资	0.012	0.012
制造费用	0.135	0.065
财务及管理费	0.060	0.029
体积成本 / (元·Nm <sup>-3</sup> )	1.021	1.385
质量成本 / (元·kg <sup>-1</sup> )	11.5	15.6
折吨成本 / (元·t <sup>-1</sup> )	11500	15600

资料来源：张彩丽《煤制氢与天然气制氢成本分析及发展建议》，HTI 测算

由上述，我们得出经验公式：

$$\text{煤制氢成本: } y=0.005x+6.72$$

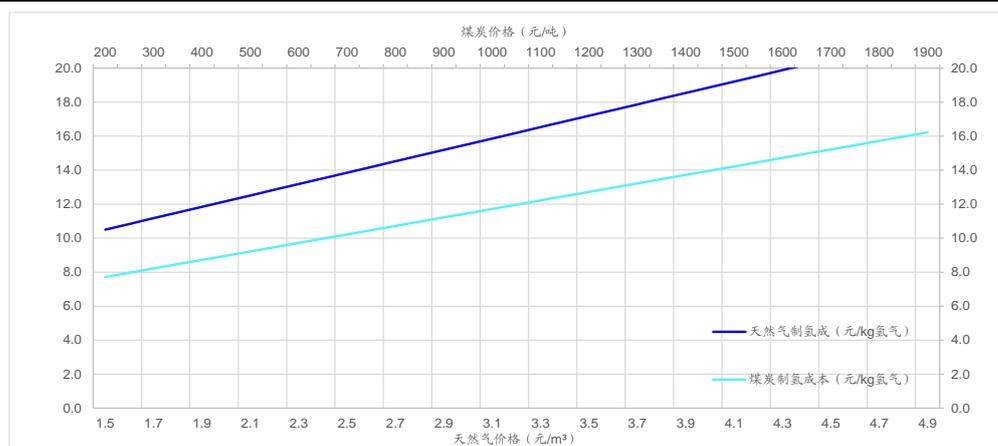
其中，y 为单位质量制氢成本 (元/kg)；x 为煤炭价格 (元/吨)；

$$\text{天然气制氢成本: } y=3.35x+5.48$$

其中，y 为单位质量制氢成本 (元/kg)；x 为天然气价格 (元/m<sup>3</sup>)

由下图看出，煤制氢成本随煤价增加而增长较慢，天然气制氢成本随气价升高而增长较快，且天然气制氢成本整体高于煤制氢成本。

图 10 煤制氢成本、天然气制氢成本随煤炭价格、天然气价格变化关系



资料来源：HTI 测算

### 3.5 煤炭清洁路线

2023年，我国将“推进煤炭清洁高效利用和技术研发，加快建设新型能源体系”列入两会政府工作报告工作重点。我国富煤贫油少气的能源资源禀赋特点决定了煤炭的主体能源地位短期内不会发生根本性变化。2022年，我国煤炭消费超40亿吨，在一次能源消费中占比仍高达56.2%，同比+0.3个百分点。煤炭利用产生的碳排放约占化石能源消费碳排放70%以上。当前形势下，加快煤炭清洁高效利用是支撑能源转型、确保国家能源安全和实现“双碳”目标的必然选择和坚强基石。

实现煤炭清洁高效利用主要分为两个维度。从源头上，需积极推动煤炭发电向清洁低碳和灵活高效转型。如现役机组的“三改联动”和新建高参数大容量机组，从而进一步提升煤电清洁高效发电能力，同时满足经济快速发展过程中对电力的需求。从治理上来说，需大力开展超低排放和减污降碳技术研发。

## 4. 工业副产氢

### 4.1 煤干馏副产氢

煤干馏 (coal carbonization) 是在隔绝空气条件下加热煤，使其分解生成焦炭、煤焦油、粗苯和焦炉气 ( $H_2$  和  $CH_4$ ) 的过程。随着我国煤炭产业的发展，煤的焦化制氢工艺已较为成熟，但其还存在投资成本大、反应过程中需用纯氧、产氢效率较低、副产物  $CO_2$  产量大等缺点。并且煤的炼焦过程以制取焦炭为主，焦化过程只是其中的一步，含有氢气的煤焦炉气 ( $H_2$  和  $CH_4$ ) 为该过程的副产物。

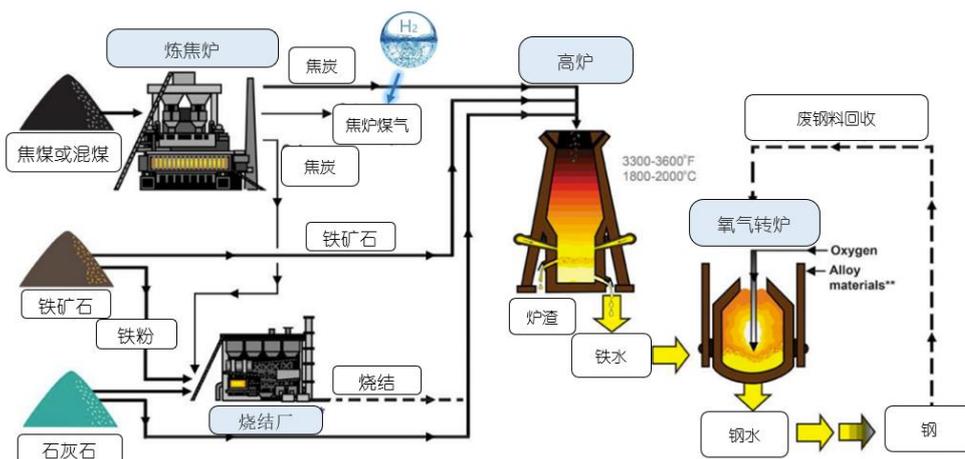
煤干馏过程主要经历如下变化。当煤料温度高于  $100^\circ C$  时，煤中的水分蒸发；温度升高到  $200^\circ C$  以上时，煤中结合水释出；高达  $350^\circ C$  以上时，粘结性煤开始软化，并进一步形成粘稠的胶质体（泥煤、褐煤等不发生此现象）；至  $400-500^\circ C$  时，大部分煤气和焦油析出，称为一次热分解产物。在  $450-550^\circ C$  时，热分解继续进行，残留物逐渐变稠并固化形成半焦，高于  $550^\circ C$  时，半焦继续分解，析出余下的挥发物（主要成分是氢气），半焦失重同时进行收缩，形成裂纹；温度高于  $800^\circ C$ ，半焦体积缩小变硬形成多孔焦炭。当干馏在室式干馏炉内进行时，一次热分解产物与赤热焦炭及高温炉壁相接触，发生二次热分解，形成二次热分解产物（焦炉煤气和其他炼焦化学产品）。因此，煤干馏过程又分为煤的高温干馏和煤的低温干馏两类。

(1) **煤的高温干馏（炼焦）**。在炼焦炉中隔绝空气于  $900-1100^\circ C$  进行的干馏过程。产生焦炭、焦炉煤气、粗苯、粗氨水和煤焦油。

1) 焦炭是最传统的煤化工产品，可以作为还原剂、能源和供炭剂用于高炉炼铁、冲天炉铸造、铁合金冶炼和有色金属冶炼，也可以应用于电石生产、气化和合成化学等领域。我国拥有完整的焦化工业体系，在规模、产量、技术和管理等方面均处于世界领先水平，为我国钢铁、化工、有色冶炼和机械制造等领域的国民经济发展做出了较大贡献；

2) 焦炉煤气主要成分是氢气（体积分数 54%-63%）和甲烷（体积分数 20%-32%）；少量乙烯和  $CO$ 。焦炉煤气可用做气体燃料及化工原料。煤化工工艺利用焦炉煤气气多碳少（氢碳比约为 2.21）、粉煤气化生产的净合成气碳多氢少（氢碳比约为 1.73）的特点，将二者进行混合，经过合成工艺生产甲醇。

图11 煤炭炼焦过程氢气足迹



资料来源: Dspmuranchi, HTI 整理

3) 粗苯中主要含苯、甲苯等单环芳烃，以及少量不饱和化合物，还有很少量的酚类和吡啶等；

4) 粗氨水可以进一步合成铵盐；

5) 煤焦油中含有多种重芳烃（沥青）、酚类等及杂环有机化合物（如萘等），是制取塑料、农药、医药等的原料。其中含量最大且应用广的是萘，目前工业萘来源仍以煤焦油为主。煤焦油中的沥青是可用于筑路和制造碳素电极。

**(2) 煤的低温干馏。** 在较低终温（500-600°C）下进行的干馏过程，产生半焦、低温焦油和煤气等产物。由于终温较低，分解产物的二次热解少，故产生的焦油中除含较多的酚类外，烷烃和环烷烃含量较多而芳烃含量很少，是人造石油的重要来源之一，早期的灯用煤油即由此制造。半焦可经气化制合成气。

表3 煤干馏过程分类

项目	条件及产物
煤的高温干馏（炼焦）	条件：在炼焦炉中隔绝空气于 900~1100°C。 产物：产生焦炭、焦炉煤气（H <sub>2</sub> 和 CH <sub>4</sub> ，中热值）、粗苯、粗氨水和煤焦油。
煤的低温干馏	条件：在较低终温（500~600°C）下进行。 产物：半焦、低温焦油和煤气（H <sub>2</sub> 和 CH <sub>4</sub> ，低热值）。

资料来源: 米镇涛《化学工艺学》，HTI

我国焦炭产地分布十分广阔，除西藏与海南外，其他省份都有产焦，年产量都在 150 万吨以上，山西、河北、陕西、山东与内蒙古等地的年产量均在 3000 万吨以上。而每生产 1 吨焦炭，可产生约 430 m<sup>3</sup> 的焦炉煤气，其中一半用于回炉助燃，另外一半可用来生产天然气等。2022 年，我国焦炭产量 47344 万吨，同比+1.3%。对应焦炉煤气产量 2036 亿 m<sup>3</sup> 焦炉煤气，按焦炉煤气含氢气照体积分数 60%，扣除助燃部分，副产氢气为 610.8 亿立方米（543.5 万吨）。2022 年，我国焦煤均价 2356 元/吨，我们按照热值折算的焦炉煤气副产氢气成本为：1m<sup>3</sup> 焦炉煤气含 60% 体积分数的氢气，30% 体积分数的甲烷）折算后氢气成本为 0.64 元/m<sup>3</sup>（7.19 元/kg）。

## 4.2 烃类热裂解（脱氢或断链）

**烷烃裂解是工业副产氢气的主要来源。** 乙烯、丙烯和丁二烯等低级烯烃分子中具有双键，化学性质活泼，能与许多物质反应，生成一系列重要的产物，是化学工业的重要原料。工业上获得低级烯烃的主要方法是将烃类热裂解。烃类热裂解法是将石油系烃类燃料（天然气、炼厂气、轻油、柴油、重油等）经高温作用，使烃类分子发生碳链断裂或脱氢反应，生成相对分子质量较小的烯烃、烷烃和其他相对分子质量不同的轻质和重质烃类。

**烃类裂解分为：烷烃裂解（正构和异构），烯烃裂解，环烷烃裂解和芳烃裂解等。** 其中，烷烃裂解分为正构烷烃裂解和异构烷烃裂解。

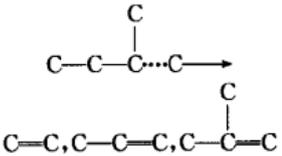
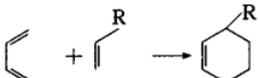
**正构烷烃。** 正构烷烃的裂解反应主要有脱氢反应和断链反应，对于 C<sub>5</sub> 以上的烷烃还可能发生环化脱氢反应（生产环烷烃和 H<sub>2</sub>）。我们计算，乙烷脱氢反应，生成 1 吨乙烯可副产 0.071 吨 H<sub>2</sub>。丙烷脱氢反应，生成 1 吨丙烯可副产 0.045 吨 H<sub>2</sub>。其中：

脱氢反应是 C-H 键断裂的反应，生成碳原子数相同的烯烃和 H<sub>2</sub>；

断链反应是 C-C 键断裂的反应，生成碳原子数少于氢原子数的烷烃和烯烃。

**异构烷烃。** 异构烷烃结构各异，其裂解反应差异较大，与正构烷烃相比有如下特点：1) C-C 键或 C-H 键的键能较正构烷的低，故容易裂解或脱氢。2) 脱氢能力与分子结构有关，难易顺序为叔碳氢>仲碳氢>伯碳氢。3) 异构烷烃裂解所得乙烯、丙烯收率远较正构烷烃裂解所得收率低，而 H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、C<sub>4</sub> 及 C<sub>4</sub> 以上烯烃收率较高。

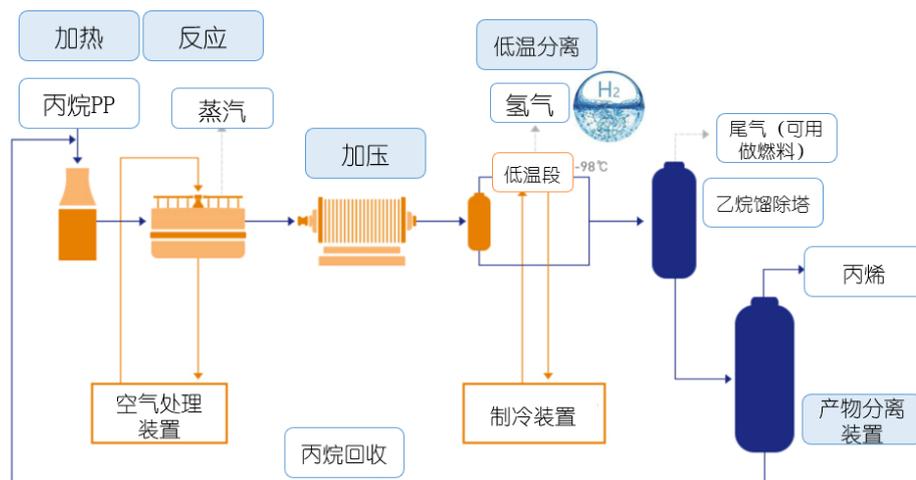
表 4 各族烃的裂解反应特性

烃类	总反应式	主要产物	特点	是否产生氢气
正烷烃	脱氢反应： $C_nH_{2n+2} \rightleftharpoons C_nH_{2n} + H_2$ 断链反应： $C_nH_{2n+2} \rightarrow C_mH_{2m} + C_kH_{2k+2}$	氢、甲烷、乙烯、丙烯等	是生产乙烯、丙烯的理想原料	是
异构烷烃	断链反应： 	乙烯、丙烯的收率比正烷烃裂解稍少，而氢、甲烷、C <sub>4</sub> 烯烃收率较多	是生产烯烃的较好原料，丙烯对乙烯的比率较正烷烃为原料时高	是
烯烃	断链反应： $C_nH_{2n} \rightarrow C_kH_{2k} + C_mH_{2m}$ 脱氢反应： $C_nH_{2n} \rightleftharpoons C_nH_{2n-2} + H_2$ 二烯合成反应： 	大分子烯烃生成乙烯、丙烯、丁二烯；乙烯、丙烯、丁二烯进而生成环烯烃	一般裂解原料中不含烯烃，烯烃是在反应过程中生成的。小分子烯烃是裂解的目的产物且不希望进一步反应	是

资料来源：米镇涛《化学工艺学》，HTI

**烃类裂解过程中，不断分解出气态烃和 H<sub>2</sub>，液态产物最终由于含氢量下降而结焦。** 在 900~1100℃ 以上主要是通过生成乙炔的中间阶段，而在 500~900℃ 主要是通过生成芳烃的中间阶段。生碳结焦反应是典型的连串反应，随着温度的提高和反应时间的延长，不断释放出氢，残物（焦油）的氢含量逐渐下降，碳氢比、相对分子质量和密度逐渐增大。随着反应时间的延长，单环或环数不多的芳烃，转变为多环芳烃，进而转变为稠环芳烃，由液体焦油转变为固体沥青质，再进一步可转变为焦炭。

图12 丙烷脱氢 ( $C_3H_8 \rightarrow C_3H_6 + H_2$ ) 氢足迹



资料来源: Sk advanced 官网, HTI 整理

2022 年我国乙烯(当量)产能 4986 万吨, 副产氢气 354 万吨; 丙烯产能 5540 万吨, 副产氢气 249 万吨。至 2025 年, 乙烯(当量)产能预计增加至 7100 万吨, 副产氢气 504 万吨; 丙烯产能预计增加至 7751 万吨, 副产氢气 349 万吨。

表 5 我国乙烯(当量)、丙烯年产能(单位: 万吨/年)

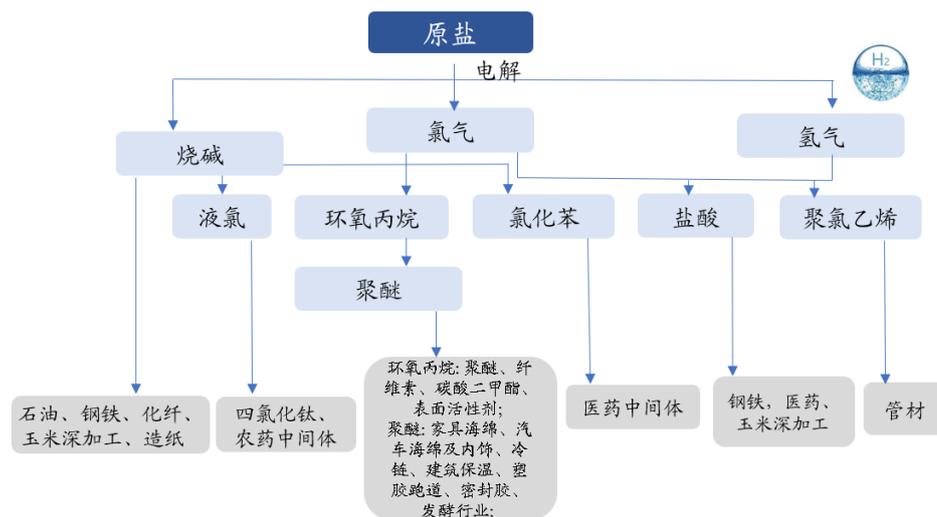
年份	乙烯	副产氢气	丙烯	副产氢气
2018	2475	176	3560	160
2019	2837	201	3927	177
2020	3431	244	4477	201
2021	4151	295	5000	225
2022	4986	354	5540	249
2023E	5391	383	6486	292
2024E	6271	445	7131	321
2025E	7100	504	7751	349

资料来源: 卓创资讯, HTI

## 4.2 氯碱尾气副产氢

氯碱行业是以盐和电为原料生产烧碱、氯气、氢气的基础原材料产业。行业氯碱产品种类多, 关联度大, 下游产品达到上千个品种, 具有较高的经济延伸价值, 广泛应用于农业、石油化工、轻工、纺织、建材、电力、冶金、国防军工等国民经济各个部门, 在我国经济发展中具有举足轻重的地位, 并与人民生活密切相关。此外, 氯碱行业为含氯消毒剂的主要生产来源, 氯碱企业所生产的各类含氯消毒用品原料和产品, 为疫情防控提供消杀物资保障。

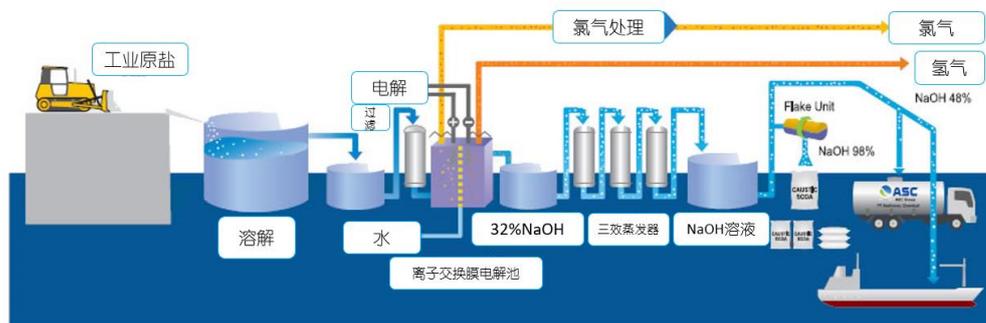
图13 氯碱产业链氢足迹



资料来源：航锦科技公司年报，2021年，HTI 整理

在氯碱生产过程中，主要工序包括整流、盐水精制、电解、氯氢处理、蒸发等几大工序，其中电解、蒸发和固碱工序是主要用能工序，合计能耗占比达到 90%以上。由于各企业烧碱产品结构不同，蒸发和固碱工序不是必配工序。加强烧碱蒸发和固碱加工先进技术研发应用对于行业整体节能降碳具有重要意义。氯碱副产氢气，品质高，直接适用于氢燃料电池使用。采用氯碱—氢能—绿电自用新模式，可直接节约电解用电量的 1/4 左右。氯碱工业的要工序是电解。工业上采用隔膜电解法、水银电解法和离子膜电解法。当前应用较多的是隔膜电解法。

图14 氯碱工业生产过程



资料来源：Chlor Alkali Process, Open PR, HTI 整理

我们计算，生产 1 吨烧碱副产 H<sub>2</sub> 为 0.025 吨，副产 Cl<sub>2</sub> 为 0.89 吨。2022 年我国烧碱产能 4610 万吨，产量 3981 万吨，副产氢气总量达 99.5 万吨。根据上海氯碱化工股份有限公司，每生成 1 吨烧碱的单位成本为 1456.6 元。

表6 烧碱产品成本分析表

项目	金额/销量
成本(万元)	102664.2
直接材料	86111.6
直接人工	642.3
动力	7812.9
制造费用	8097.4
烧碱年销售量(万吨)	70.48
单位成本(元/吨)	1456.6

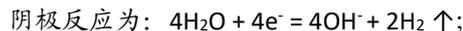
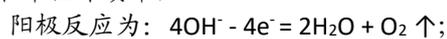
资料来源:《上海氯碱化工股份有限公司2022年年度报告》, HTI 测算

## 5. 电解水制氢

### 5.1 核心问题

**反应原理。**在电极两端施加足够大的电压时,水分子将在阳极发生氧化反应产生氧气。在阴极发生还原反应产生氢气。因此,电解水反应分为:阳极析氧反应(OER)和阴极析氢反应(HER)两个半反应。纯水作为弱电解质,电离程度低,导电能力较差,在电解水制氢过程中通常会加入一些容易电离的电解质以增加电解液的导电性。碱性电解质制氢效果强,且不会腐蚀电极和电解池等设备,通常采用浓度为20%-30%的KOH或者NaOH溶液作为电解质。

(1) 在碱性和中性介质中:



(2) 在酸性介质中:

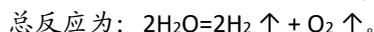
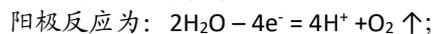


图15 电解水反应原理示意图

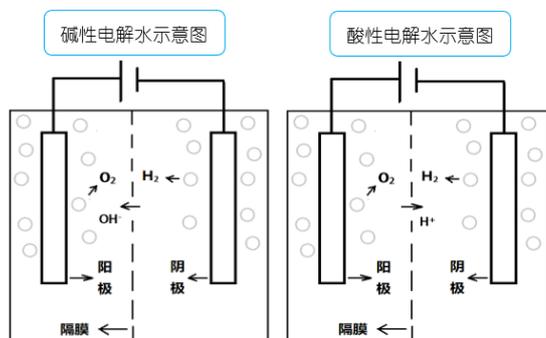
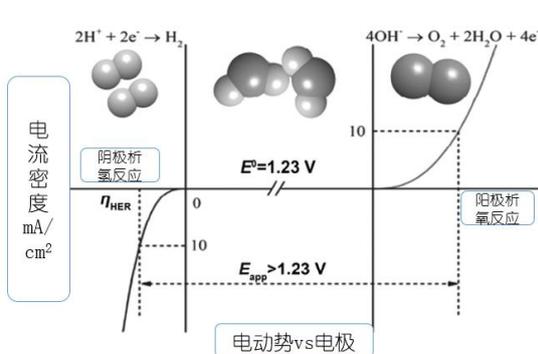


图16 电极极化对电动势产生影响



资料来源:蔡昊源《电解水制氢方式的原理及研究进展》, HTI

资料来源:贾飞宏《TMSs 催化剂用于电解水制氢技术研究进展》, HTI

**能量转化问题。**制氢过程所需要的总能量（焓变  $\Delta H$ ）可由电能（电能提供吉布斯自由能变  $\Delta G$ ）与热能（ $T\Delta S$ ）共同提供。从热力学角度，根据水分解热力学性质与温度的关系，高温操作条件（500-800°C）使电解水反应能够在热中性电压下进行。这意味着如果制氢现场有高质量的废热源，通过合理的热回收，从而降低了电能的需求，电效率大大提升。此外，从动力学上，较高的操作温度也大大降低了析氧、析氢两个半反应的过电位，使高温电解制氢具有天然的高效率优势，也避免了贵金属催化剂的使用。

$$\text{即 } \Delta H = \Delta G + T\Delta S$$

其中： $\Delta H$  为反应焓变， $\Delta S$  为反应熵变， $T$  为热力学温度。

**（1）理论分解电压。**某电解质水溶液，如果认为其欧姆电阻很小而可忽略不计，在可逆情况下使之分解所必须的最低电压，称为理论分解电压。电极的平衡电极电位是可以根据电解过程实际发生的电极反应、电解液组成和温度等条件，按能斯特公式进行计算，这就是说，某一电解质的理论分解电压是通过计算而知的。

理论状态下，电解池发生电解水反应时，只需要提供水分解的吉布斯自由能（ $\Delta G = 237.13 \text{ kJ mol}^{-1}$ ）。 $\Delta G =$  反应所需电能（由  $U_{\text{rev}}$  提供），

$$\text{即 } U_{\text{rev}} = \Delta G / nF$$

其中， $n$ ：每摩尔水分解所转移的电子摩尔数（ $n=2$ ）；

$F$ ：法拉第常数（ $96485 \text{ C mol}^{-1}$ ）；

由此得出，水在标况下分解成氢气和氧气的标准电压  $U_{\text{rev}}$  为 1.23V。

但在水分解时会产生部分熵，因此更适合采用焓变（ $\Delta H$ ）代替  $\Delta G$  进行电势计算。在标准状态下， $\Delta H$  为  $285.83 \text{ kJ/mol}$ 。此时水电解所需的最小电压为  $U = \Delta H / nF$ ， $U = 1.48 \text{ V}$ 。

**（2）实际分解电压。**当电流通过电解槽，电极反应以明显的速度进行时，电极上的反应电位已偏离平衡状态，而成为不可逆状态，这时的电极电位就不是平衡电极电位，阳极电位偏正，阴极电位偏负。这样，能使电解质溶液连续不断地发生电解反应所必须的最小电压叫作电解质的实际分解电压。显然，实际槽电压比理论分解电压大，有时甚至大很多。

实际槽电压的大小直接影响电解时所消耗的电能，因为电能是以一定电荷数量通过一定的电位降（电压）来度量的。能量损失主要是由于：（1）欧姆过电位。它与离子在通过电解质和隔膜时的电阻、气泡形成、电极和外电路中电子转移的电阻有关；（2）激活过电位。激活电压与两个电极的电化学反应动力学相关；（3）浓度过电位。通过两个电极孔隙扩散的分子传输而引起的扩散过电压。极化曲线是电极两端的电压和电流密度的曲线。极化曲线的斜率反应出电位的损失情况。

$$\text{即 } U = U_{\text{rev}} + \eta_{\text{ohm}} + \eta_{\text{act}} + \eta_{\text{diff}}$$

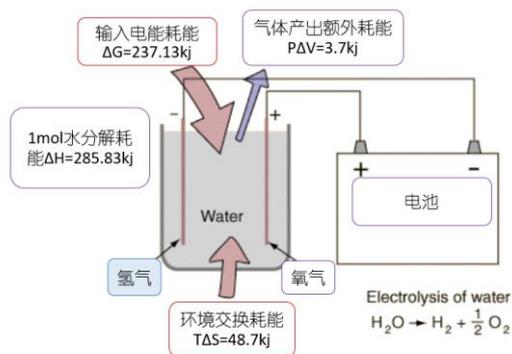
其中， $\eta_{\text{ohm}}$  为欧姆过电位

$\eta_{\text{act}}$  为激活过电位

$\eta_{\text{diff}}$  为浓度过电位

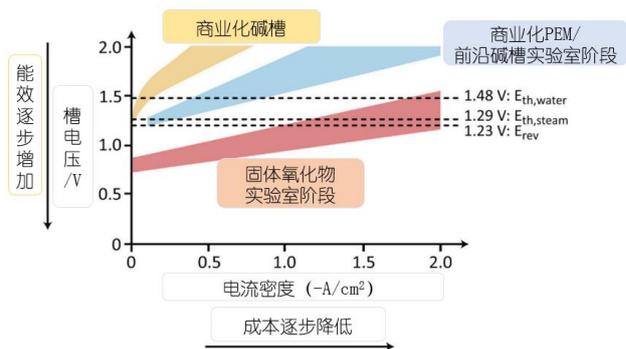
由两个电极各自的两相界面所造成的电阻要远大于：溶液电阻造成的电压降、外部导线电子转移造成的电压降。对电极反应界面的探讨也是电化学的核心。实际工业电解水时，槽电压通常为 1.8-2.0V。

图17 电解水过程中的电能需求



资料来源：Sustainable Energy Science and Engineering Center, Michal Šingliar, HTI

图18 三种电解水方法下能量效率随成本变化关系



资料来源：Renewable Routes for the Conversion of Non-Fossil Feedstocks into Gaseous Fuels and Their End Uses, Elena Rozzi, HTI

**单位耗电成本问题。**槽电压的大小直接影响电解时所消耗的电能，因为电能是以定电荷数量通过一定的电位降（电压）来度量的。由于电解水无副反应，电流效率几乎 100%。理论分解电压 1.23V，由法拉第定律知每生产 1molH<sub>2</sub>（标准状况下体积为 22.4L）需要电量 2F，我们计算得出：

(1) 每生产 1m<sup>3</sup>H<sub>2</sub> 理论耗能为 2.9kwh（2.9 度电），实际耗能 4.79kwh（4.79 度电）

若实际槽电压取 2.0V，每生产 1m<sup>3</sup>H<sub>2</sub> 则实际能量为 4.79kwh（4.79 度电），每生产 1m<sup>3</sup>H<sub>2</sub> 能量效率为 61%

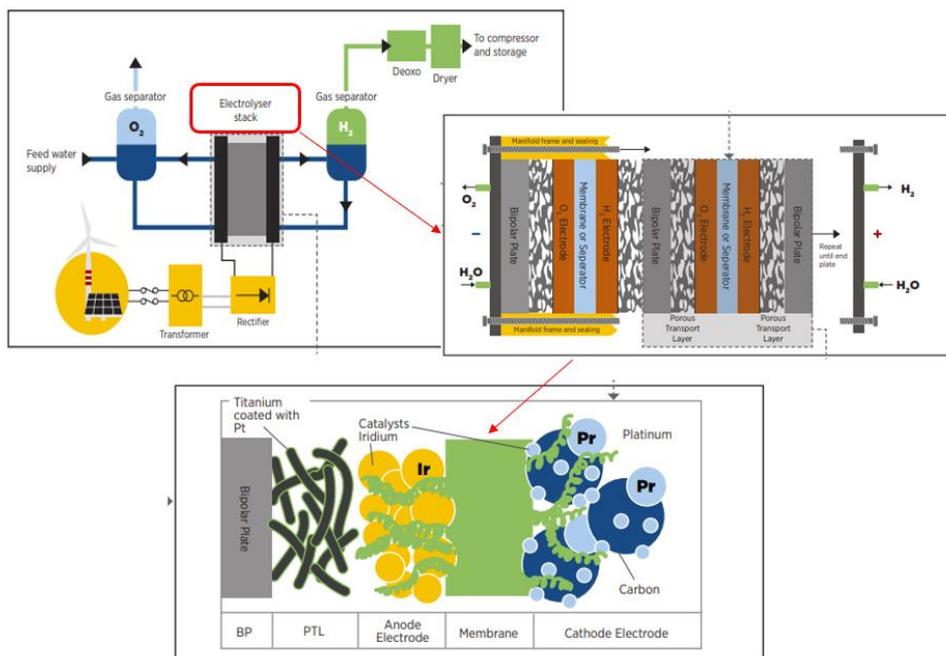
(2) 每生产 1kgH<sub>2</sub> 理论耗能为 32.58kwh（32.58 度电），实际耗能 53.9kwh（53.9 度电）

若实际槽电压取 2.0V，每生产 1kgH<sub>2</sub> 则实际能量为 53.9 度电。

**弃水、弃风和弃光。**我国目前的可再生能源发电的利用率不高，大量存在弃水、弃风和弃光。2020 年，全国弃水、弃风、弃光达 520 亿 kWh。其中弃水 301 亿 kWh，弃风 166 亿 kWh，弃光 53 亿 kWh。弃水、弃风、弃光的经济损失 213 亿元。弃水、弃风、弃光的主要原因是电力市场化改革滞后，电网建设不配套，电力系统调节能力不足，消纳不畅。若将这部分电能转化为氢能存储，可制氢总量为 96.4 万吨。

**系统内部关联及关键技术问题。**电解系统：涉及应用场景，决定了电解槽类型及设计特性；重点是电源系统及耦合控制。电解堆：涉及电解系统性能，决定了电解池关键参数设计；重点是结构、密封及集成。单个电解池：涉及电解堆性能，决定了关键部件的性能、成本和耐久性。重点是膜、催化剂、电极材料及制备。电解水制氢的核心问题是：（1）以膜、催化剂和电极为核心的材料及制备问题。（2）以气泡产生和脱出为核心的结构及控制问题。

图19 电解水制氢系统内部关联



资料来源：Green hydrogen cost 2020，Based on IRENA analysis，HTI 整理

## 5.2 电解水制氢技术分类

在技术层面，电解水制氢主要分为碱槽、PEM 水电解、固体氧化物（SOE）水电解。其中，碱槽是最早工业化的水电解技术，已有数十年的应用经验，最为成熟；PEM 电解水技术近年来产业化发展迅速，固体氧化物水电解技术处于初步示范阶段。从时间尺度上看，碱槽技术在解决近期可再生资源的消纳方面易于快速部署和应用；但从技术角度看，PEM 电解水技术的电流密度高、电解槽体积小、运行灵活、利于快速变载，与风电、光伏（发电的波动性和随机性较大）具有良好的匹配性。我们认为，随着 PEM 电解槽的推广应用，其成本有望进一步下降，而 SOE 等水电解的发展则取决于相关材料技术的突破情况。

## 5.3 碱性水电解制氢

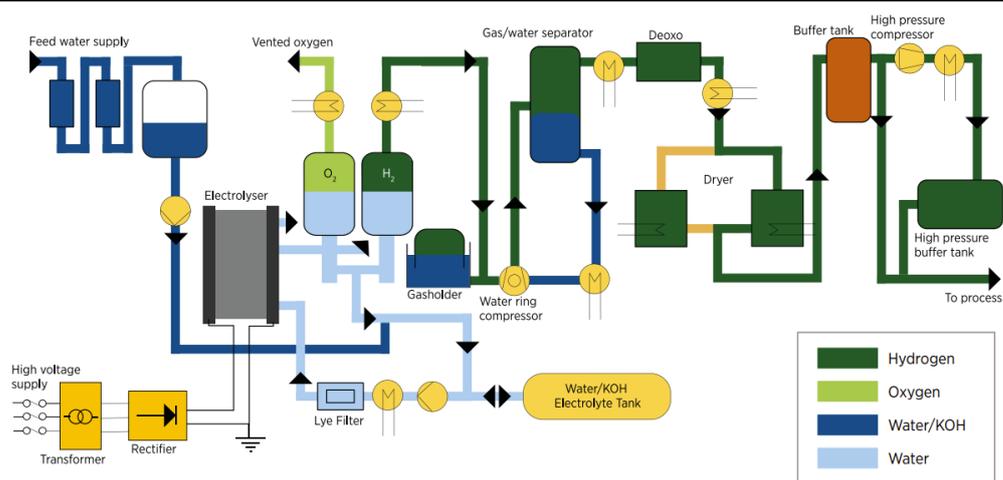
**原理。**碱性液体水电解技术是以 KOH、NaOH 水溶液为电解质，如采用石棉布等作为隔膜，在直流电的作用下，将水电解，生成氢气和氧气。产出的气体需要进行脱碱雾处理。碱性电解槽以含液态电解质和多孔隔板为结构特征。通常，碱性液体电解质电解槽的工作电流密度约为 0.25A/cm<sup>2</sup>，能源效率通常在 60%左右。碱性液体水电解于 20 世纪中期就实现了工业化。该技术较成熟，运行寿命可达 15 年。

**现状。**根据《电解水制氢技术研究进展与发展建议》俞红梅等，我国碱槽装置的安装总量为 1500-2000 套，多数用于电厂冷却用氢的制备，国产设备的最大产氢量为 1000Nm<sup>3</sup>/h。国内代表性企业有中国船舶集团有限公司第七一八研究所、苏州竞立制氢设备有限公司、天津市大陆制氢设备有限公司等，代表性的制氢工程是河北建投新能源有限公司投资的沽源风电制氢项目（4MW）。

**优点。** 碱水制氢在碱性条件下可使用非贵金属电催化剂（如 Ni、Co、Mn 等），因而电解槽中的催化剂造价较低。

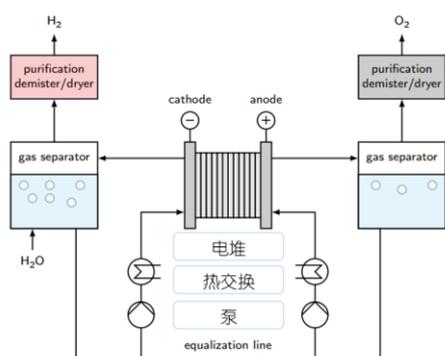
**缺点。**（1）产气中含碱液、水蒸气等，需经辅助设备除去。（2）在液体电解质体系中，所用的碱性电解液（如 KOH）会与空气中的 CO<sub>2</sub> 反应，形成在碱性条件下不溶的碳酸盐，如 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>。这些不溶性的碳酸盐会阻塞多孔的催化层，阻碍产物和反应物的传递，大大降低电解槽的性能。（3）碱性液体电解质电解槽也难以快速的关闭或者启动，制氢的速度也难以快速调节，因为必须时刻保持电解池的阳极和阴极两侧上的压力均衡，防止氢氧气体穿过多孔的石棉膜混合，进而引起爆炸。因此，碱性液体电解质电解槽就难以与具有快速波动特性的可再生能源配合。（4）碱性电解槽电流密度低，产氢压力仅为 2.5-3MPa，不利于直接储运，需要进一步纯化加压。

图20 碱水制氢系统示意图



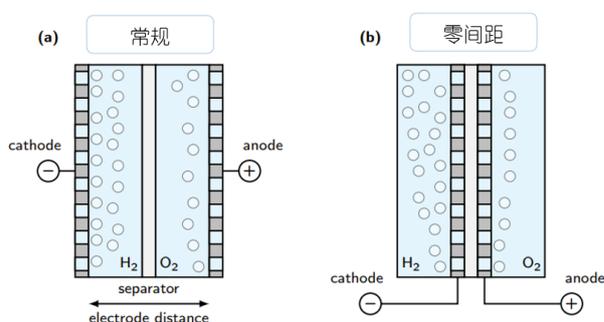
资料来源：Green hydrogen cost 2020, Based on IRENA analysis, HTI 整理

图21 碱水电解槽示意图



资料来源：Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review, mdpi, HTI

图22 碱水电解单个电解池示意图（两种设计方案）



资料来源：Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review, mdpi, HTI

**碱槽制氢的核心问题在于如何同可再生能源耦合。**《氢能产业发展中长期规划（2021-2035年）》提出，要充分发挥氢能作为可再生能源规模化高效利用的重要载体作用及其大规模、长周期储能优势，促进异质能源跨地域和跨季节优化配置，推动氢能、电能和热能系统融合，促进形成多元互补融合的现代能源供应体系。

**安全问题。**将氢能系统同新能源电网耦合是一项非常具有挑战的任务，需要确保系统的稳定性。由可再生能源供电的碱水电解槽的主要问题是由于低载负荷下引起的气体杂质（氢氧混合），当外来气体污染达到 2vol.% 时，可能会导致安全停机。因此，系统只能在可再生能源充足的时间段运行，碱性电解水制氢系统的年运行时间受到限制。有限的运行时间会导致系统的启停次数增加，这可能超过制造商预先设定的最多启停次数，因此可能会降低预期的系统寿命。

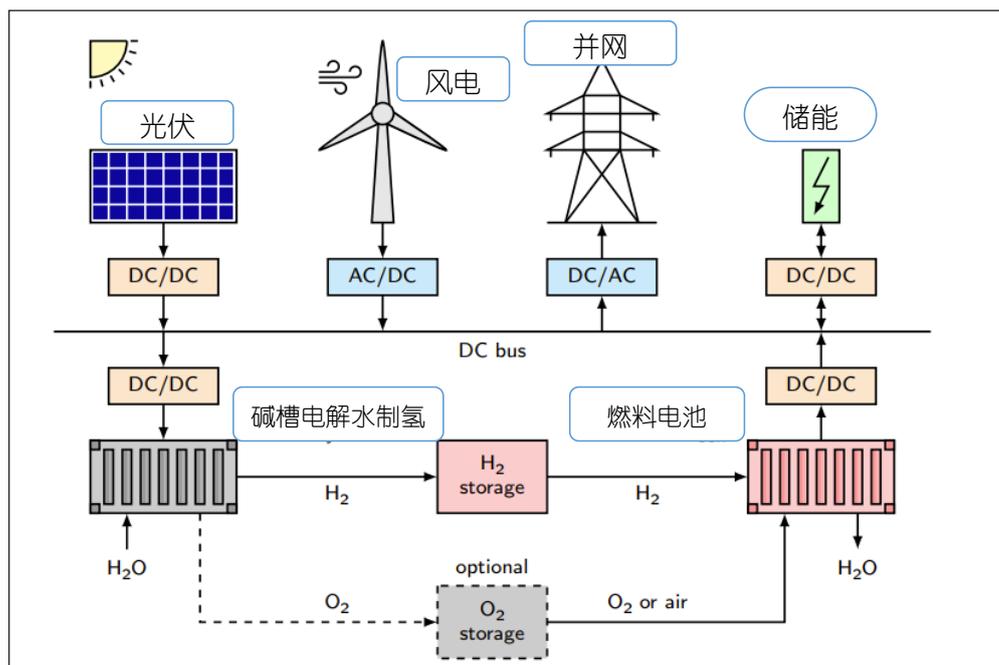
**电极失效。**更重要的是，受到重复启停的影响，电极失效加速。已知镍电极在 5000 至 10000 次启停循环后会明显失效。当制氢系统耦合光伏发电时，在 20 至 30 年内就已经达到 7000 至 11000 次循环。可再生能源的波动性加速了电极的失效。重复启停导致电极失效的问题需要通过开发稳定的电极组合物或自修复电极表面来解决。

**应对方案。**采用若干能源组合的方式，可以避免由于制氢系统耦合单项可再生能源造成的波动，从而提高整体效率。仅使用光伏发电时，法拉第效率大约为 40%；仅使用风力发电时，法拉第效率约为 80%；但两种技术的结合可将法拉第效率提高到 85% 以上。

为了防止气体杂质达到爆炸下限，大多数碱性电解槽的部分负荷范围限制在其标准负荷的 10% 至 25%。最小负载以下的波动可以通过储能装置来补充平衡；光伏电池板和风力涡轮机为碱水电解槽供电的同时，储存的氢气可以通过燃料电池转化回电力。利用额外的储能装置可以将波动降为最低，从而使得整套氢能系统可以用于电网调节。

然而，在某些情形下补充储能不够充足，当气体杂质仍处于可容忍区域时，可以允许较短时间内的无电极极化。阴极在低于约 0.25V 的电压时开始明显退化，因此，可以在达到该电压前，系统可以一直保持关闭状态。该时间段的长短取决于电极材料，目前在实验上已经可以实现大约 10 分钟的时间跨度。

图23 碱槽制氢与风光耦合



资料来源: Alkaline Water Electrolysis Powered by Renewable Energy: A Review, mdpi, HTI 整理

### 5.4 质子交换膜电解制氢 (PEM)

**原理。** 由于碱性液体电解质电解槽仍存在着诸多问题需要改进，促使固体聚合物电解质 (SPE) 水电解技术快速发展。首先实际应用的聚合物电解质为质子交换膜 (PEM)，因而也称为 PEM 电解水制氢。PEM 以质子交换膜替代石棉膜，传导质子，并隔绝电极两侧的气体，同时，PEM 电解水池采用零间隙结构，电解池体积更为紧凑精简降低了电解池的欧姆电阻，大幅提高了电解池的整体性能。

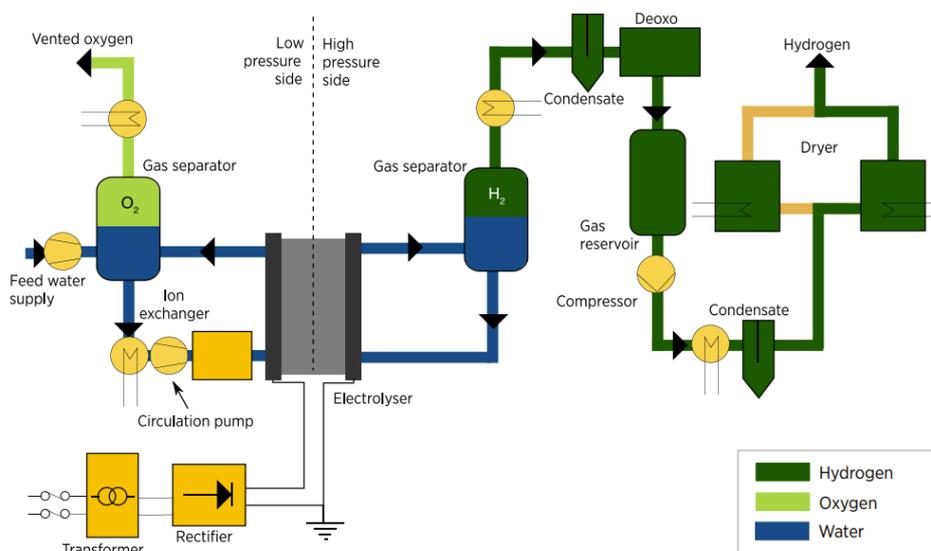
**现状。** 国际方面，由于 PEM 电解槽运行更加灵活、更适合可再生能源的波动性，许多新建项目开始转向选择 PEM 电解槽技术。过去数年，欧盟、美国、日本企业纷纷推出了 PEM 电解水制氢产品，促进了应用推广和规模化应用，ProtonOnsite、Hydrogenics、Giner、西门子股份公司等相继将 PEM 电解槽规格规模提高到兆瓦级。其中，ProtonOnsite 公司的 PEM 电解水制氢装置的部署量超过 2000 套（分布于 72 个国家和地区），拥有全球 PEM 电解水制氢 70% 的市场份额，具备集成 10MW 以上制氢系统的能力；Giner 公司单个 PEM 电解槽规格达 5MW，电流密度超过 3A/cm<sup>2</sup>，50kW 水电解池样机的高压运行累计时间超过 1.5×10<sup>5</sup>h。

我国 PEM 电解水制氢技术正在经历从实验室研发向市场化、规模化应用的阶段变化，逐步开展示范工程建设。国内的 PEM 电解水技术研究起步于 20 世纪 90 年代，针对特殊领域制氢、制氧的需求，主要研发单位有中科院大连化学物理研究所、中船重工集团 718 研究所、中国航天科技集团公司 507 所。中国科学院大连化学物理研究所从 20 世纪 90 年代开始研发 PEM 电解水制氢，在 2008 年开发出产氢气量为 8Nm<sup>3</sup>/h 的电解池堆及系统，输出压力 4.0MPa、纯度为 99.99%。2010 年大连化学物理研究所开发出的 PEM 水电解制氢机能耗指标优于国际同类产品。从单机能耗上看，国内的 PEM 制氢装置较优，但在规模上与国外产品还有距离。2022 年 7 月，由国网安徽省电力有限公司兆瓦级氢能综合利用示范站建成投产，标志着我国首次实现兆瓦级制氢-储氢-氢能发电的全链条技术贯通，该示范站采用先进的质子交换膜水电解制氢技术，年制氢可达 70 余万标立方、氢发电可达 73 万千瓦时。

**优点。**相比碱性电解槽，PEM 电解槽的电流密度更大，通常在  $10000\text{A}/\text{m}^2$  以上，远高于传统碱性电解槽的电流密度（通常在  $3000\text{-}4000\text{A}/\text{m}^2$ ）。一方面，由于 PEM 电解槽使用的质子交换膜相较碱性电解槽中使用的隔膜更薄，这提供了优秀的质子传导能力；另一方面，PEM 电解槽采用零间距结构，电解槽内部结构更为紧凑。这些优势都有助于降低 PEM 电解槽运行时的欧姆电阻，借此提高电流密度，优化工作效率。PEM 的压力调控范围大，氢气输出压力可达数兆帕，适应快速变化的可再生能源电力输入。总之，PEM 具有效率高、气体纯度高、绿色环保、能耗低、无碱液、体积小、安全可靠、可实现更高的产气压力等优点，被公认为制氢领域极具发展前景的电解制氢技术之一。

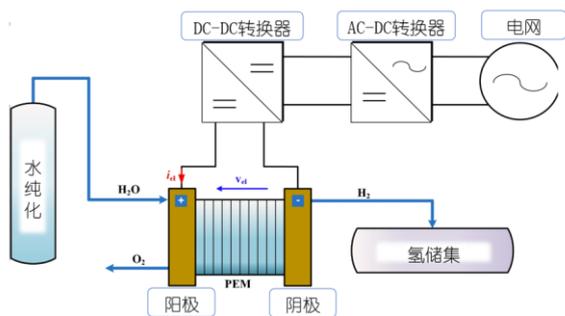
**缺点。**PEM 电解水制氢技术目前设备成本较高，PEM 电解槽的单位成本仍然远高于碱性电解槽。由于 PEM 电解槽需要在强酸性和高氧化性的工作环境下运行，因此设备对于价格昂贵的贵金属材料如铱、铂、钛等更为依赖，导致成本过高。目前中国的 PEM 电解槽发展和国外水平仍然存在一定差距。国内生产的 PEM 电解槽单槽最大制氢规模大约在  $200\text{Nm}^3/\text{h}$ ，而国外生产的 PEM 电解槽单槽最大制氢规模可以达到  $500\text{Nm}^3/\text{h}$ 。相比于国外，国内利用可再生能源合 PEM 电解水制氢的项目也相对偏少。国内大多数工业级可再生能源电解水制氢应用项目仍然以碱性水电解为主。

图24 PEM 系统流程图



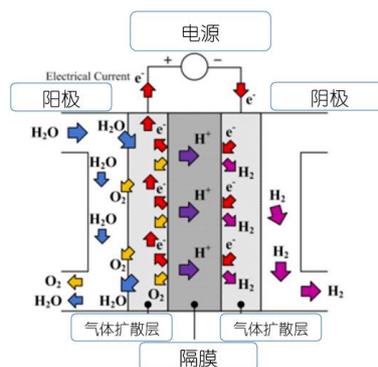
资料来源：Green hydrogen cost 2020, Based on IRENA analysis, HTI 整理

图25 PEM 单槽示意图



资料来源：Proton Exchange Membrane Electrolyzer Modeling for Power Electronics Control, HTI

图26 PEM 电解单个电解池示意图



资料来源：Proton Exchange Membrane Electrolyzer Modeling for Power Electronics Control, HTI

**PEM 电解水制氢的核心问题在于成本。** PEM 电解池单池核心部件是膜电极（MEA），由质子交换膜、阳极和阴极催化层、气体扩散层组成。膜电极组件是电化学反应发生的场所，膜电极特性与结构直接影响 PEM 电解池的性能和寿命。除了膜电极外，PEM 电解池中造价较高的部件还包括双极板。PEM 关键部件技术的研究可以分为五方面的内容：质子交换膜的材料改进及优化；电极催化剂的研究；膜电极结构优化及制备；双极板的性能提升及表面改进；电解池传热传质、流场结构及其他问题。

当前 PEM 国际先进水平为：单电池性能为  $2A \cdot cm^{-2}$ ，2V，总铂系催化剂载量为 2 至  $3mg/cm^2$ ，稳定运行时间为  $6 \times 10^4$  至  $8 \times 10^4 h$ ，制氢成本约为每千克氢气 3.7 美元。降低 PEM 电解槽成本的研究集中在以催化剂、PEM 为基础材料的膜电极，气体扩散层 GDL，双极板 BP 等核心组件。

**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 Nafion115 和 Nafion117 系列质子交换膜，其他膜产品包括陶氏 XUS-B204 膜以及旭硝子 Flemion 膜等。

**电催化剂。** 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  $0.4-0.6\text{g}/\text{cm}^2$ ，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。催化剂中的载量约为  $1-2\text{g}/\text{cm}^2$ 。

目前，应用于析氧侧的含铱催化剂主要分下列三大类的氧化物：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/氧化钌，相较单纯的氧化铱而言，加入氧化钌提升了催化活性，但由钌于本身的特性，耐久仍然受到影响；氧化铱/氧化钌，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：（1）使用高比表面积的材料作为载体，可以将颗粒高度分散在载体材料上，从而提高利用率和活性，借此减少的负载量。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。（2）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，从而在外层的壳上使用，在内层的核使用非贵金属材料。这样既可以减少的用量，也不会影响的催化活性。

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。

**气体扩散层（GDL）。**气体扩散层(国外简称 GDL 或 PTL)，又称集流器，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者的涂层进行保护，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。工业级的质子膜电解槽产品国内仍以进口品牌使用为主，国产产品已在民用领域取得应用，气体扩散层国产化率会逐步提升。

**双极板 (BP)**。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，通常会在板上涂抹含铂的涂层来保护钛板。

钛基双极板目前有三种加工工艺，分别是冲压工艺、蚀刻工艺和使用钛网加板组合制造工艺。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。

## 5.5 固体氧化物电解制氢 (SOE) 与核能制氢

SOE (solid oxide electrolysis) 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，SOE 高温电水解可以提供更高的能源转化效率。随着温度的不断上升，水电解需要的总能量增加幅度较小，但对电能和热能的需求则产生了比较大的变化。在高温下，SOE 电解水对电能的需求量逐渐减小，对热能的需求量逐渐增大。这意味着，SOE 电解设备在高温下工作

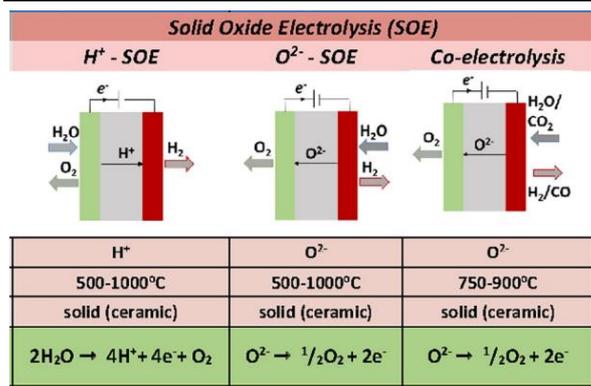
时，可以有效减少对高品质能源-电能的需求，并提升对低品质能源—废热的利用率。在未来，当可再生能源或者先进核能供应充足时，SOE 可以成为大规模制氢的技术路线之一。从技术原理上进行分类，SOE 可分为氧离子传导型 SOE 和质子传导型 SOE。

**SOE 制氢分类。**由于质子传导型 SOE 在技术层面的要求更高，尤其是材料选择上存在很多障碍，目前的发展进度远远落后于氧离子传导型 SOE。在市场上，对 SOE 的商业化尝试主要集中于氧离子传导型 SOE。氧离子传导型 SOE 在电解质中传导氧离子。和质子传导型 SOE 有所区别的是，氧离子传导型 SOE 从阴极（氢电极）处供水蒸气。水分子在得到电子后生成氢气，并电离出氧离子。氧离子经过电解质传导至阳极后，经氧化形成氧气。

**SOE 制氢原理。**水电解所需能量随温度变化而变化。SOE 电解的能量来源由电能和热能两部分构成即： $\Delta H = \Delta G + T\Delta S$  电解需要的  $\Delta G$  随着温度的升高而降低；在 100°C 时  $\Delta G$  在整个所需能量  $\Delta H$  中的比重约为 93%，而温度升高到 1000°C 时只有约 72%。随着  $\Delta G$  的降低，水的理论分解电压也随温度的升高而降低，即高温下（600-1000°C）电解水可以降低制氢过程中电能的消耗，增加热能的比例。

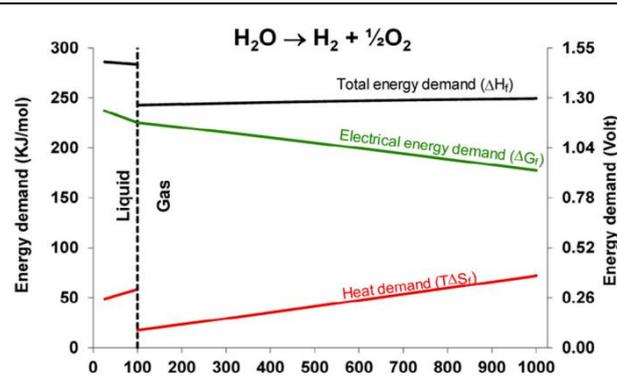
从热力学角度，高温电解相对低温电解具有更高的能量转化效率优势。目前的低温电解方式如碱性电解和聚合物电解，由于其电解质为液态和聚合物，其工作温度一般在 100°C 左右，而采用固体氧化物电解质完全可满足高温操作的要求。从动力学的角度，高操作温度可以加快电极反应速率，使阴极和阳极的过电位显著降低，有效地减少了电解过程的能量损失。SOE 采用氧离子导体材料作为电解质，其离子电导率随着温度的升高而增加，进一步降低了其欧姆损失。

图27 SOE 三种分类



资料来源：Electrocatalysts for the generation of hydrogen oxygen and Synthesis gas, Foteini M. Sapountzi, ScienceDirect, HTI

图28 电解水系统温度对所消耗电能的影响

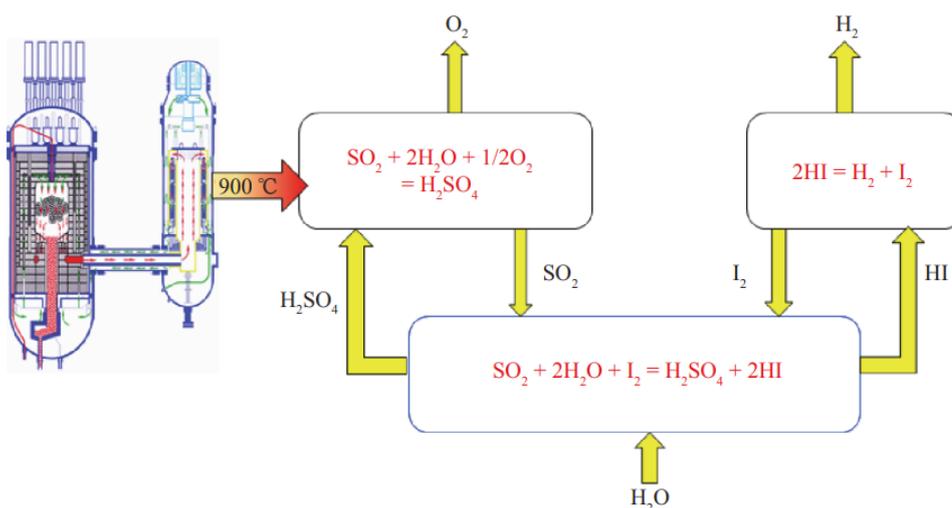


资料来源：Electrocatalysts for the generation of hydrogen oxygen and Synthesis gas, Foteini M. Sapountzi, ScienceDirect, HTI

**核能制氢对实现我国未来能源战略转变具有重大意义。**核能是清洁的一次能源，核电已经成为世界电力生产的主要方式之一。正在研发的第四代核能系统除了要使核电生产更经济和更安全之外，还要为实现核能在发电之外的领域的应用开辟途径。核能制氢就是以来源丰富的水为原料，利用核能实现氢的大规模生产。热化学循环工艺和高温蒸汽电解都是有望与核能耦合的先进制氢工艺，世界上的许多国家，如美国、日本、法国、加拿大都在大力开展核能制氢技术的研发工作。中国正在积极发展核电，在大力开展核电站的建设的同时，也非常重视核氢技术的发展。高温气冷堆能够提供高温工艺热，是最适合用于制氢的反应堆堆型。

在国家“863 计划”支持下，我国 10MWt 高温气冷试验堆已在清华大学核能与新能源技术研究院建成并实现满功率运行。在国家科技重大专项支持下，200MWe 高温气冷堆核电站示范工程的建设正在进行；核能制氢和氦气透平等前瞻性技术的研发已开展。在可用于核能制氢的反应堆堆型中，高温气冷堆因其高出口温度和固有安全性等优势，被认为是最适合用于制氢的堆型。核能制氢是高温气冷堆发电外最重要的用途，将为未来高温堆的应用拓展新的领域。核能制氢技术研发既有利于保持我国高温气冷堆技术的国际领先优势，也为未来氢气的大规模供应提供了一种有效的解决方案，同时可为高温堆工艺热应用开辟新的用途，对实现我国未来的能源战略转变具有重大意义。

图29 高温气冷堆碘硫循环制氢原理示意图

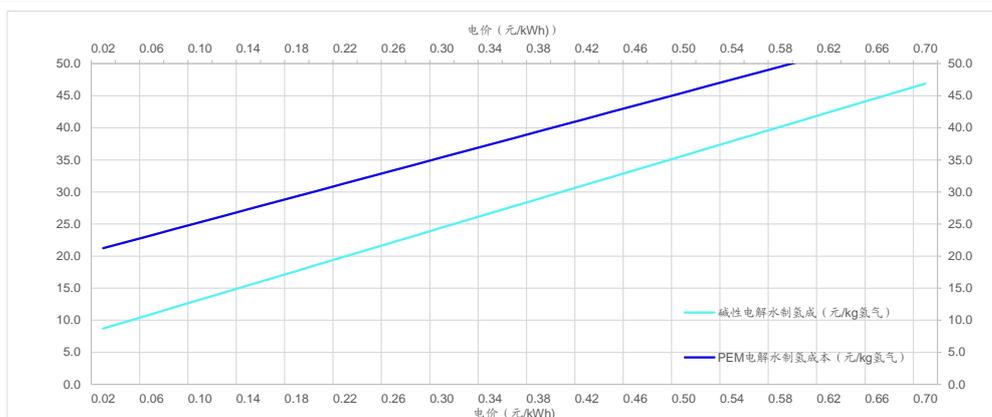


资料来源：张平等《中国高温气冷堆制氢发展战略研究》，HTI 整理

### 5.6 电解水制氢技术经济性分析

**电解水制氢成本经验公式。**一般制氢成本分为固定成本和可变成本，固定成本包括设备折旧、人工、运维等，可变成本包括制氢过程的电耗和水耗。由此得公式：制氢成本=电价×单位电耗+（每年折旧+每年运维）/每年制氢总量+单位水耗×水价。

图30 电解水制氢成本随电价变化情况（元/kg 氢气）



资料来源：HTI

注：不同设备造价下，假设两种方式年产氢量均为 200 万 Nm<sup>3</sup>

**碱性电解水制氢成本。**一般碱性电解槽的成本与其制氢能力有关，制氢能力越大，成本越高。其中 1000Nm<sup>3</sup>/h 的制氢能力是当前碱性电解槽单台设备制氢能力的上限，其价格在 700 万-1000 万元之间。

我们假设：（1）1000Nm<sup>3</sup>/h 碱性电解槽成本 850 万元，不含土地费用，土建和设备安装 150 万元；（2）每 1m<sup>3</sup> 氢气消耗原料水 0.001t，冷却水 0.001t，水费 5 元/t；（3）设备折旧期 10a，土建及安装折旧期 20a，采用直线折旧，无残值，设备每年折旧 10%，土建和安装每年折旧 5%；（4）工业用电价格 0.4 元/kWh，每 1m<sup>3</sup> 氢气耗电 5kWh；（5）每年工作 2000h，每年制氢 200 万 Nm<sup>3</sup>；（6）人工成本和维护成本每年 40 万元。

通过计算我们得出：碱性电解水制氢电耗成本占比为 74.9%，设备折旧费用占比为 15.7%，单位体积制氢成本为 2.67 元/m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>，单位质量制氢成本为 30.00 元/kgH<sub>2</sub>。降低碱性电解水制氢成本的主要途径是降低电价。

表 7 碱性电解水制氢成本测算

项目	单位体积制氢成本 (元·m <sup>-3</sup> )	项目	单位质量制氢成本 (元·kg <sup>-1</sup> )
单位体积电耗成本	2	单位质量电耗成本	22.47
单位体积折旧成本	0.42	单位质量折旧成本	4.72
单位体积人工运维成本	0.2	单位质量人工运维成本	2.25
单位体积水耗成本	0.05	单位质量水耗成本	0.56
合计	2.67	合计	30.00

资料来源：张轩《电解水制氢成本分析》，HTI 测算

根据国家发改委的《中国 2050 年光伏发展展望（2019）》的预测，至 2035 年和 2050 年光伏发电成本相比 2019 年预计约下降 50%和 70%，达到 0.2 元/kWh 和 0.13 元/kWh。我们对碱性电解水制氢成本进行敏感性分析建模，在电价为 0.2 元/kWh 时，年产氢量为 200 万 Nm<sup>3</sup> 情况下，碱槽制氢的成本为 18.8 元/kgH<sub>2</sub>；在电价为 0.13 元/kWh 时，年产氢量为 200 万 Nm<sup>3</sup> 情况下，碱槽制氢的成本为 15.4 元/kgH<sub>2</sub>。伴随设备产氢量的增加，制氢成本还会进一步降低。若两项参数进入图中蓝色部分，碱槽制氢则具备同其他制氢方式竞争能力。

图 31 碱槽单位质量制氢成本敏感性分析 (元/kg)

3006	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50
50	29.8	30.9	32.0	33.1	34.3	35.4	36.5	37.6	38.8	39.9	41.0	42.1	43.3	44.4	45.5	46.6	47.8	48.9	50.0	51.1	52.2	53.4	54.5	55.6	56.7
100	15.7	16.9	18.0	19.1	20.2	21.3	22.5	23.6	24.7	25.8	27.0	28.1	29.2	30.3	31.5	32.6	33.7	34.8	36.0	37.1	38.2	39.3	40.4	41.6	42.7
150	11.0	12.2	13.3	14.4	15.5	16.7	17.8	18.9	20.0	21.2	22.3	23.4	24.5	25.7	26.8	27.9	29.0	30.1	31.3	32.4	33.5	34.6	35.8	36.9	38.0
200	8.7	9.8	11.0	12.1	13.2	14.3	15.4	16.6	17.7	18.8	19.9	21.1	22.2	23.3	24.4	25.6	26.7	27.8	28.9	30.1	31.2	32.3	33.4	34.6	35.7
250	7.3	8.4	9.6	10.7	11.8	12.9	14.0	15.2	16.3	17.4	18.5	19.7	20.8	21.9	23.0	24.2	25.3	26.4	27.5	28.7	29.8	30.9	32.0	33.1	34.3
300	6.4	7.5	8.6	9.7	10.9	12.0	13.1	14.2	15.4	16.5	17.6	18.7	19.9	21.0	22.1	23.2	24.3	25.5	26.6	27.7	28.8	30.0	31.1	32.2	33.3
350	5.7	6.8	7.9	9.1	10.2	11.3	12.4	13.6	14.7	15.8	16.9	18.1	19.2	20.3	21.4	22.6	23.7	24.8	25.9	27.0	28.2	29.3	30.4	31.5	32.7
400	5.2	6.3	7.4	8.6	9.7	10.8	11.9	13.1	14.2	15.3	16.4	17.6	18.7	19.8	20.9	22.1	23.2	24.3	25.4	26.5	27.7	28.8	29.9	31.0	32.2
450	4.8	5.9	7.1	8.2	9.3	10.4	11.5	12.7	13.8	14.9	16.0	17.2	18.3	19.4	20.5	21.7	22.8	23.9	25.0	26.2	27.3	28.4	29.5	30.6	31.8
500	4.5	5.6	6.7	7.9	9.0	10.1	11.2	12.4	13.5	14.6	15.7	16.9	18.0	19.1	20.2	21.3	22.5	23.6	24.7	25.8	27.0	28.1	29.2	30.3	31.5
550	4.2	5.4	6.5	7.6	8.7	9.9	11.0	12.1	13.2	14.4	15.5	16.6	17.7	18.8	20.0	21.1	22.2	23.3	24.5	25.6	26.7	27.8	29.0	30.1	31.2
600	4.0	5.1	6.3	7.4	8.5	9.6	10.8	11.9	13.0	14.1	15.3	16.4	17.5	18.6	19.8	20.9	22.0	23.1	24.3	25.4	26.5	27.6	28.7	29.9	31.0
650	3.8	5.0	6.1	7.2	8.3	9.5	10.6	11.7	12.8	14.0	15.1	16.2	17.3	18.5	19.6	20.7	21.8	22.9	24.1	25.2	26.3	27.4	28.6	29.7	30.8
700	3.7	4.8	5.9	7.1	8.2	9.3	10.4	11.6	12.7	13.8	14.9	16.1	17.2	18.3	19.4	20.5	21.7	22.8	23.9	25.0	26.2	27.3	28.4	29.5	30.7
750	3.6	4.7	5.8	6.9	8.1	9.2	10.3	11.4	12.5	13.7	14.8	15.9	17.0	18.2	19.3	20.4	21.5	22.7	23.8	24.9	26.0	27.2	28.3	29.4	30.5
800	3.4	4.6	5.7	6.8	7.9	9.1	10.2	11.3	12.4	13.6	14.7	15.8	16.9	18.0	19.2	20.3	21.4	22.5	23.7	24.8	25.9	27.0	28.2	29.3	30.4
850	3.3	4.5	5.6	6.7	7.8	9.0	10.1	11.2	12.3	13.5	14.6	15.7	16.8	17.9	19.1	20.2	21.3	22.4	23.6	24.7	25.8	26.9	28.1	29.2	30.3
900	3.2	4.4	5.5	6.6	7.7	8.9	10.0	11.1	12.2	13.4	14.5	15.6	16.7	17.9	19.0	20.1	21.2	22.3	23.5	24.6	25.7	26.8	28.0	29.1	30.2
950	3.2	4.3	5.4	6.5	7.7	8.8	9.9	11.0	12.2	13.3	14.4	15.5	16.6	17.8	18.9	20.0	21.1	22.3	23.4	24.5	25.6	26.8	27.9	29.0	30.1

资料来源：HTI

注：横轴为电价：元/kWh，纵轴为年产氢量：万 Nm<sup>3</sup>

**PEM 电解水制氢成本。**我们假设：（1）500Nm<sup>3</sup>/h 的 PEM 电解槽成本 3000 万元，不含土地费用，土建和设备安装 200 万元；（2）每 1m<sup>3</sup> 氢气消耗原料水 0.001t，冷却水 0.001t，水费 5 元/t；（3）设备折旧期 10a，土建及安装折旧期 20a，采用直线折旧，无残值，设备每年折旧 10%，土建和安装每年折旧 5%；（4）工业用电价格 0.4 元/kWh，每 1m<sup>3</sup> 氢气耗电 4.5kWh；（5）每年工作 2000h，每年制氢 100 万 Nm<sup>3</sup>；（6）人工成本和维护成本每年 40 万元。

通过计算我们得出：PEM 电解水制氢电耗成本占比为 50%，设备折旧费用占比为 43%，单位体积制氢成本为 5.25 元/m<sup>3</sup>H<sub>2</sub>，单位质量制氢成本为 58.99 元/kgH<sub>2</sub>。设备折旧成本占比电解水制氢成本较大，除降低电价外，降低设备成本也是降低 PEM 电解水制氢成本的主要途径。

表 8 PEM 电解水制氢成本测算

项目	单位体积制氢成本 (元·m <sup>-3</sup> )	项目	单质量制氢成本 (元·kg <sup>-1</sup> )
单位体积电耗成本	1.80	单位质量电耗成本	20.22
单位体积折旧成本	3.00	单位质量折旧成本	33.71
单位体积人工运维成本	0.40	单位质量人工运维成本	4.49
单位体积水耗成本	0.05	单位质量水耗成本	0.56
合计	5.25	合计	58.99

资料来源：张轩《电解水制氢成本分析》，HTI 测算

我们对 PEM 电解水制氢成本进行敏感性分析建模，在电价为 0.2 元/kWh 时，年产氢量为 100 万 Nm<sup>3</sup> 情况下，碱槽制氢的成本为 48.9 元/kgH<sub>2</sub>；在电价为 0.13 元/kWh 时，年产氢量为 100 万 Nm<sup>3</sup> 情况下，碱槽制氢的成本为 45.8 元/kgH<sub>2</sub>。若两项参数进入图中蓝色部分，PEM 电解水制氢则具备同其他制氢方式竞争能力。

图 32 PEM 单位质量制氢成本敏感性分析 (元/kg)

58.99	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.44	0.46	0.48	0.50
50	78.0	79.0	80.0	81.0	82.0	83.0	84.0	85.1	86.1	87.1	88.1	89.1	90.1	91.1	92.1	93.1	94.2	95.2	96.2	97.2	98.2	99.2	100.2	101.2	102.2
100	39.8	40.8	41.8	42.8	43.8	44.8	45.8	46.9	47.9	48.9	49.9	50.9	51.9	52.9	53.9	54.9	56.0	57.0	58.0	59.0	60.0	61.0	62.0	63.0	64.0
150	27.0	28.1	29.1	30.1	31.1	32.1	33.1	34.1	35.1	36.1	37.2	38.2	39.2	40.2	41.2	42.2	43.2	44.2	45.2	46.3	47.3	48.3	49.3	50.3	51.3
200	20.7	21.7	22.7	23.7	24.7	25.7	26.7	27.8	28.8	29.8	30.8	31.8	32.8	33.8	34.8	35.8	36.9	37.9	38.9	39.9	40.9	41.9	42.9	43.9	44.9
250	16.9	17.9	18.9	19.9	20.9	21.9	22.9	23.9	24.9	26.0	27.0	28.0	29.0	30.0	31.0	32.0	33.0	34.0	35.1	36.1	37.1	38.1	39.1	40.1	41.1
300	14.3	15.3	16.3	17.3	18.4	19.4	20.4	21.4	22.4	23.4	24.4	25.4	26.4	27.5	28.5	29.5	30.5	31.5	32.5	33.5	34.5	35.5	36.6	37.6	38.6
350	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.6	19.6	20.6	21.6	22.6	23.6	24.6	25.6	26.6	27.7	28.7	29.7	30.7	31.7	32.7	33.7	34.7	35.7	36.8
400	11.1	12.1	13.1	14.2	15.2	16.2	17.2	18.2	19.2	20.2	21.2	22.2	23.3	24.3	25.3	26.3	27.3	28.3	29.3	30.3	31.3	32.4	33.4	34.4	35.4
450	10.1	11.1	12.1	13.1	14.1	15.1	16.1	17.1	18.2	19.2	20.2	21.2	22.2	23.2	24.2	25.2	26.2	27.3	28.3	29.3	30.3	31.3	32.3	33.3	34.3
500	9.2	10.2	11.2	12.2	13.3	14.3	15.3	16.3	17.3	18.3	19.3	20.3	21.3	22.4	23.4	24.4	25.4	26.4	27.4	28.4	29.4	30.4	31.5	32.5	33.5
550	8.5	9.5	10.5	11.6	12.6	13.6	14.6	15.6	16.6	17.6	18.6	19.6	20.7	21.7	22.7	23.7	24.7	25.7	26.7	27.7	28.7	29.8	30.8	31.8	32.8
600	7.9	9.0	10.0	11.0	12.0	13.0	14.0	15.0	16.0	17.0	18.1	19.1	20.1	21.1	22.1	23.1	24.1	25.1	26.1	27.2	28.2	29.2	30.2	31.2	32.2
650	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.6	17.6	18.6	19.6	20.6	21.6	22.6	23.6	24.6	25.7	26.7	27.7	28.7	29.7	30.7	31.7
700	7.0	8.0	9.1	10.1	11.1	12.1	13.1	14.1	15.1	16.1	17.1	18.2	19.2	20.2	21.2	22.2	23.2	24.2	25.2	26.2	27.3	28.3	29.3	30.3	31.3
750	6.7	7.7	8.7	9.7	10.7	11.7	12.7	13.7	14.8	15.8	16.8	17.8	18.8	19.8	20.8	21.8	22.8	23.9	24.9	25.9	26.9	27.9	28.9	29.9	30.9
800	6.3	7.4	8.4	9.4	10.4	11.4	12.4	13.4	14.4	15.4	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5	21.5	22.5	23.5	24.6	25.6	26.6	27.6	28.6	29.6	30.6
850	6.1	7.1	8.1	9.1	10.1	11.1	12.1	13.1	14.2	15.2	16.2	17.2	18.2	19.2	20.2	21.2	22.2	23.3	24.3	25.3	26.3	27.3	28.3	29.3	30.3
900	5.8	6.8	7.8	8.9	9.9	10.9	11.9	12.9	13.9	14.9	15.9	16.9	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0	25.0	26.0	27.1	28.1	29.1	30.1
950	5.6	6.6	7.6	8.6	9.6	10.7	11.7	12.7	13.7	14.7	15.7	16.7	17.7	18.7	19.8	20.8	21.8	22.8	23.8	24.8	25.8	26.8	27.8	28.9	29.9

资料来源：HTI

注：横轴为电价：元/kWh，纵轴为年产氢量：万 Nm<sup>3</sup>

## 6. 投资建议

**关注传统能源企业动力转型“绿电制绿氢”带来的投资机会。**2023 年，我国将“推进煤炭清洁高效利用和技术研发加快建设新型能源体系”列入两会政府工作报告工作重点。我国富煤贫油少气的能源资源禀赋特点决定了煤炭的主体能源地位短期内不会发生根本性变化。传统能源企业实现“清洁高效”需要大力发展“绿电制绿氢”，调整氢原料获取途径，同时减少 CO<sub>2</sub> 排放，长期有助于企业降本提效，ESG 可持续发展。

当前，全球氢能产业仍处于全产业链关键技术研发初期和商业模式探索阶段。我们认为，从原料端氢替换和能源端需求换两个路径看，传统能源企业发展“绿电制绿氢”具有可持续发展驱动力；传统能源企业融资能力强，可以长远布局产业未来，在技术研发、资源整合等方面都有丰富经验，具备产业、技术等方面优势。建议关注：（1）氢能全产业链企业，**中国石化；中国石油**（2）绿电制绿氢企业，**宝丰能源**；（3）制氢领域开展低成本副产氢多元耦合项目企业，**卫星化学，东华能源**。

## 6.1 中国石化

中国石化是国内最大的氢气生产企业，氢气年产能超 390 万吨，约占全国氢气产量的 11%。中国石化加快构建“一基两翼三新”产业格局，抢抓氢能发展的重大战略机遇，落好关乎发展大局的关键一子，把氢能作为公司新能源业务的主要发展方向，逐步培育并壮大中国石化氢能产供销一体化产业链，推进打造中国第一氢能公司。

2022 年 12 月，中国石化华南最大氢燃料电池供氢中心——茂名石化氢燃料电池供氢中心产出合格的 99.999% 高纯氢。该项目日产氢能力达 6400 公斤，每年可向社会供应高纯氢 2100 吨。至此，中国石化建成燕山石化、天津石化、齐鲁石化、青岛炼化、高桥石化、上海石化、广州石化、海南炼化、茂名石化等 9 个氢燃料电池供氢中心，引领我国氢能产业链高质量发展。

风险提示：（1）氢能项目进展不及预期；（2）氢能产业上中下游技术进步低于预期；（3）国家补贴等鼓励政策不及预期。

## 6.2 中国石油

2022 年，公司新能源业务全面实施碳达峰行动方案，持续优化海上风电、CCS/CCUS、气电等发展规划，加快推进新能源基地建设，全力参与“沙戈荒”大基地和深远海风电大基地项目建设，加强绿电、地热、氢能等项目布局实施。坚持绿色低碳转型，推进油气和新能源融合发展，着力打造“油气热电氢”综合能源公司。

2023 年，公司预计油气和新能源分部的资本性支出为人民币 1955 亿元，主要是继续加强国内松辽、鄂尔多斯、准噶尔等重点盆地的规模效益勘探开发，加大页岩气、页岩油等非常规资源开发力度，推进清洁电力、CCUS、氢能示范等新能源工程。2023 年，公司预计销售分部的资本性支出为人民币 70 亿元，主要用于国内油气氢电非综合能源站建设，优化终端网络布局，以及海外油气储运和销售设施建设等。

风险提示：（1）氢能项目进展不及预期；（2）氢能产业上中下游技术进步低于预期；（3）国家补贴等鼓励政策不及预期。

## 6.3 宝丰能源

2022 年宝丰能源实施节能降碳项目 28 项，截止 2022 年已完成 15 项，累计实现二氧化碳减排 7.4 万吨/年。同时，宝丰能源通过太阳能生产绿色电能，利用绿电制取绿氢、绿氧，首创将“绿氢”“绿氧”直供化工系统，用绿氢替代原料煤、绿氧替代燃料煤生产高端化工产品，实现新能源与现代煤化工融合协同发展，降低现代煤化工装置综合能耗，提高碳资源转化率，开创了一条新能源替代化石能源的“碳中和”科学路径，从源头破解了化工企业的碳减排难题。

公司本部位于中国能源化工“金三角”之一的宁东国家级能源化工基地，新投资建设的内蒙古宝丰煤基新材料有限公司一期 260 万吨/年煤制烯烃和配套 40 万吨/年植入绿氢耦合制烯烃项目位于“金三角”的另一核心区内蒙古鄂尔多斯，“金三角”地区煤炭资源非常丰富，产业链原料供给充足、便利，原料成本更低；内蒙子公司更加靠近华北、华东等主要产品销售区域，物流运输发达便利，运输成本更低。

风险提示：（1）氢能项目进展不及预期；（2）氢能产业上中下游技术进步低于预期；（3）国家补贴等鼓励政策不及预期。

## 6.4 卫星化学

公司拥有美国乙烷三个出口设施其中之一的股权并具有优先使用权。在乙烯生产工艺中，乙烷裂解工艺的乙烯收率高达 83%左右；综合能耗不到 300kg 标油，远低于石脑油 580-640kg 标油，运行成本低。同时大量副产氢气，连云港年产 250 万吨乙烷裂解装置氢气副产量约 14 万吨。此外，公司年产 90 万吨 PDH 装置的氢气副产量约 7.2 万吨。氢气纯度高，可直接作为氢能源使用。目前合计年产氢气 21.2 万吨。

公司将充分利用轻质化原料生产过程中副产的绿色氢能，一是规划园区内氢能利用示范项目。二是打造园区的循环经济和可再生能源利用。三是谋划以氢为原料的化学品发展：1）**电子级双氧水**。公司现有年产 22 万吨双氧水装置，能达到 G1G2 标准，是华东地区主要的光伏硅片清洗液供应商。年产 25 万吨双氧水装置正在建设中，计划做到 G3G4 级，将作为电子级化学品销售；2）**合成氨**。利用环氧乙烷生产中的氮气反应为丙烯腈提供合成氨；3）**合成甲醇**。利用环氧乙烷生产中的二氧化碳制甲醇为 DMC 提供原料等。

风险提示：（1）氢能项目进展不及预期；（2）氢能产业上中下游技术进步低于预期；（3）国家补贴等鼓励政策不及预期。

## 6.5 东华能源

2022 年 9 月，公司发布“东华能源股份有限公司关于与中国核工业集团有限公司签署《战略合作协议》的公告”，全方位合作助力公司转型升级。2022 年 10 月，公司拟与中国核能电力股份有限公司共同出资设立茂名绿能，打造高温气冷堆与石化产业耦合的新发展理念样板工程项目——茂名绿能项目的建设运营主体，其中公司拟出资 24500 万元，持有茂名绿能 49%的股权。其中，双方共同推进高温气冷堆项目，未来五年内预计投资超千亿元。

表 9 东华能源与中核集团战略合作内容

项目	内容
高温气冷堆项目	高温蒸汽供能
热化学制氢及氢气固态储存材料研发	双方联合成立氢能联盟，设立研究院、中试装置，主攻绿氢制备环节中热化学制氢技术路线，并研发氢气的固态储存材料和装备。
“央企+民企”混合所有制改革典范	积极推动中核集团成为东华能源的战略投资者（占股比例 5%-15%）
助力东华能源降低动力成本	中核按照“保量优价优先”原则，向东华能源（宁波、张家港）提供经济、零碳电力供应。

资料来源：东华能源股份有限公司关于与中国核工业集团有限公司签署《战略合作协议》的公告，HTI

风险提示：（1）氢能项目进展不及预期；（2）氢能产业上中下游技术进步低于预期；（3）国家补贴等鼓励政策不及预期；（4）制氢产业降本提效不及预期。

## 7. 风险提示

氢能需求低于预期；氢能技术发展不及预期；政策支持力度不及预期。

## APPENDIX 1

## Summary

- **Conclusions:** There are three main mature technological pathways for hydrogen production. The first involves the use of fossil fuels such as coal and natural gas for steam reforming to produce hydrogen. The second pathway involves the production of hydrogen from industrial by-product gases such as coke oven gas, chlor-alkali tail gas, and propane dehydrogenation. The third pathway is the production of hydrogen through the electrolysis of water. According to the China Hydrogen Energy and Fuel Cell Industry Alliance, during the initial stage of hydrogen energy industry development, the focus will be on supplying hydrogen through industrial by-product gases. In the medium term (by 2030), the emphasis will shift towards large-scale, centralized, and stable hydrogen supply through renewable energy power generation, coal-based hydrogen production, and other means. In the long term (by 2050), the primary focus will be on hydrogen production through renewable energy power generation.
- **During the coal gasification process, the reaction of carbon and steam to produce H<sub>2</sub> is a key step in coal chemical hydrogen production.** The coal gasification process is a thermochemical process that uses coal or coke as a raw material and oxygen, steam, or other gasification agents to convert the combustible portion of the coal or coke into gas under high temperature and chemical reaction. Among these reactions, the reaction of carbon with steam is the most significant as it participates in various coal gasification processes and is a strongly endothermic reaction. The gas mixture generated from gasification is called "water gas", and the main components of water gas are CO and H<sub>2</sub>.
- **In the process of natural gas steam reforming, the reaction between methane and steam to produce H<sub>2</sub> is a key step in natural gas hydrogen production.** Currently, the main technologies for producing synthesis gas from natural gas in industry are steam reforming and partial oxidation. Among them, steam reforming is the primary method for producing synthesis gas from natural gas. Steam reforming involves the reaction of hydrocarbons such as methane with steam in the presence of a catalyst and at high temperatures to produce a gas mixture containing H<sub>2</sub> and CO. This is a strongly endothermic reaction and requires external heating. Steam reforming is a mature technology and is widely used in the production of synthesis gas, pure hydrogen gas, and raw gas for synthesizing ammonia.
- **Investment Advice.** We believe that the development of "green electricity for green hydrogen" by traditional energy companies has sustainable development drivers and advantages in terms of industry, technology, and other aspects. We suggest to pay attention to: (1) hydrogen energy industry chain enterprises such as **SINOPEC** and **PETROCHINA**; (2) companies specializing in green electricity for green hydrogen, such as **NINGXIA BAOFENG ENERGY**; (3) companies engaged in low-cost byproduct hydrogen coupling projects in the hydrogen production field, such as **SATELLITE CHEMICAL** and **ORIENTAL ENERGY**.
- **Risks warning.** The development of hydrogen energy technology is not as expected, and the level of policy support is also not as expected.

## 附录 APPENDIX

### 重要信息披露

本研究报告由海通国际分销，海通国际是由海通国际研究有限公司(HTIRL)，Haitong Securities India Private Limited (HSIPL)，Haitong International Japan K.K. (HTIJKK)和海通国际证券有限公司(HTISCL)的证券研究团队所组成的全球品牌，海通国际证券集团(HTISG)各成员分别在其许可的司法管辖区内从事证券活动。

### IMPORTANT DISCLOSURES

This research report is distributed by Haitong International, a global brand name for the equity research teams of Haitong International Research Limited ("HTIRL"), Haitong Securities India Private Limited ("HSIPL"), Haitong International Japan K.K. ("HTIJKK"), Haitong International Securities Company Limited ("HTISCL"), and any other members within the Haitong International Securities Group of Companies ("HTISG"), each authorized to engage in securities activities in its respective jurisdiction.

### HTIRL 分析师认证 Analyst Certification:

我，Junjun Zhu，在此保证(i)本研究报告中的意见准确反映了我们对本研究中提及的任何或所有目标公司或上市公司的个人观点，并且(ii)我的报酬中没有任何部分与本研究报告中表达的具体建议或观点直接或间接相关；及就此报告中所讨论目标公司的证券，我们(包括我们的家属)在其中均不持有任何财务利益。我和我的家属(我已经告知他们)将不会在本研究报告发布后的3个工作日内交易此研究报告所讨论目标公司的证券。I, Junjun Zhu, certify that (i) the views expressed in this research report accurately reflect my personal views about any or all of the subject companies or issuers referred to in this research and (ii) no part of my compensation was, is or will be directly or indirectly related to the specific recommendations or views expressed in this research report; and that I (including members of my household) have no financial interest in the security or securities of the subject companies discussed. I and my household, whom I have already notified of this, will not deal in or trade any securities in respect of the issuer that I review within 3 business days after the research report is published.

我，Xin Hu，在此保证(i)本研究报告中的意见准确反映了我们对本研究中提及的任何或所有目标公司或上市公司的个人观点，并且(ii)我的报酬中没有任何部分与本研究报告中表达的具体建议或观点直接或间接相关；及就此报告中所讨论目标公司的证券，我们(包括我们的家属)在其中均不持有任何财务利益。我和我的家属(我已经告知他们)将不会在本研究报告发布后的3个工作日内交易此研究报告所讨论目标公司的证券。I, Xin Hu, certify that (i) the views expressed in this research report accurately reflect my personal views about any or all of the subject companies or issuers referred to in this research and (ii) no part of my compensation was, is or will be directly or indirectly related to the specific recommendations or views expressed in this research report; and that I (including members of my household) have no financial interest in the security or securities of the subject companies discussed. I and my household, whom I have already notified of this, will not deal in or trade any securities in respect of the issuer that I review within 3 business days after the research report is published.

我，Borong Li，在此保证(i)本研究报告中的意见准确反映了我们对本研究中提及的任何或所有目标公司或上市公司的个人观点，并且(ii)我的报酬中没有任何部分与本研究报告中表达的具体建议或观点直接或间接相关；及就此报告中所讨论目标公司的证券，我们(包括我们的家属)在其中均不持有任何财务利益。我和我的家属(我已经告知他们)将不会在本研究报告发布后的3个工作日内交易此研究报告所讨论目标公司的证券。I, Borong Li, certify that (i) the views expressed in this research report accurately reflect my personal views about any or all of the subject companies or issuers referred to in this research and (ii) no part of my compensation was, is or will be directly or indirectly related to the specific recommendations or views expressed in this research report; and that I (including members of my household) have no financial interest in the security or securities of the subject companies discussed. I and my household, whom I have already notified of this, will not deal in or trade any securities in respect of the issuer that I review within 3 business days after the research report is published.

### 利益冲突披露 Conflict of Interest Disclosures

海通国际及其某些关联公司可从事投资银行业务和/或对本研究中的特定股票或公司进行做市或持有自营头寸。就本研究报告而言，以下是有关该等关系的披露事项(以下披露不能保证及时无遗漏，如需了解及时全面信息，请发邮件至 ERD-Disclosure@htisec.com)

HTI and some of its affiliates may engage in investment banking and / or serve as a market maker or hold proprietary trading positions of certain stocks or companies in this research report. As far as this research report is concerned, the following are the disclosure matters related to such relationship (As the following disclosure does not ensure timeliness and completeness, please send an email to ERD-Disclosure@htisec.com if timely and comprehensive information is needed).

海通证券股份有限公司和/或其子公司(统称“海通”)在过去12个月内参与了600938.CH and 601857.CH的投资银行项目。投资银行项目包括：1、海通担任上市前辅导机构、保荐人或主承销商的首次公开发行项目；2、海通作为保荐人、主承销商或财务顾问的股权或债务再融资项目；3、海通作为主经纪商的新三板上市、目标配售和并购项目。

Haitong Securities Co., Ltd. and/or its subsidiaries (collectively, the "Haitong") have a role in investment banking projects of 600938.CH and 601857.CH within the past 12 months. The investment banking projects include 1. IPO projects in which Haitong acted as pre-listing tutor, sponsor, or lead-underwriter; 2. equity or debt refinancing projects of 600938.CH and 601857.CH for which Haitong acted as sponsor, lead-underwriter or financial advisor; 3. listing by introduction in the new three board, target placement, M&A projects in which Haitong acted as lead-brokerage firm.

601857.CH 目前或过去12个月内是海通的投资银行业务客户。

601857.CH is/was an investment bank clients of Haitong currently or within the past 12 months.

中国石化集团齐鲁石油化工公司，601857.CH，香港华润(集团)有限公司上海代表处及化学工业第三设计院有限公司目前或过去12个月内是海通的客户。海通向客户提供非投资银行业务的证券相关业务服务。

中国石化集团齐鲁石油化工公司，601857.CH，香港华润(集团)有限公司上海代表处 and 化学工业第三设计院有限公司 are/were a client of Haitong currently or within the past 12 months. The client has been provided for non-investment-banking securities-related services.

海通在过去的12个月中从601857.CH获得除投资银行服务以外之产品或服务的报酬。

Haitong has received compensation in the past 12 months for products or services other than investment banking from 601857.CH.

**评级定义 (从 2020 年 7 月 1 日开始执行):**

海通国际 (以下简称“HTI”) 采用相对评级系统来为投资者推荐我们覆盖的公司: 优于大市、中性或弱于大市。投资者应仔细阅读 HTI 的评级定义。并且 HTI 发布分析师观点的完整信息, 投资者应仔细阅读全文而非仅看评级。在任何情况下, 分析师的评级和研究都不能作为投资建议。投资者的买卖股票的决策应基于各自情况 (比如投资者的现有持仓) 以及其他因素。

**分析师股票评级**

**优于大市**, 未来 12-18 个月内预期相对基准指数涨幅在 10%以上, 基准定义如下

**中性**, 未来 12-18 个月内预期相对基准指数变化不大, 基准定义如下。根据 FINRA/NYSE 的评级分布规则, 我们会将中性评级划入持有这一类别。

**弱于大市**, 未来 12-18 个月内预期相对基准指数跌幅在 10%以上, 基准定义如下

各地股票基准指数: 日本 – TOPIX, 韩国 – KOSPI, 台湾 – TAIEX, 印度 – Nifty100, 美国 – SP500; 其他所有中国概念股 – MSCI China.

**Ratings Definitions (from 1 Jul 2020):**

Haitong International uses a relative rating system using Outperform, Neutral, or Underperform for recommending the stocks we cover to investors. Investors should carefully read the definitions of all ratings used in Haitong International Research. In addition, since Haitong International Research contains more complete information concerning the analyst's views, investors should carefully read Haitong International Research, in its entirety, and not infer the contents from the rating alone. In any case, ratings (or research) should not be used or relied upon as investment advice. An investor's decision to buy or sell a stock should depend on individual circumstances (such as the investor's existing holdings) and other considerations.

**Analyst Stock Ratings**

**Outperform:** The stock's total return over the next 12-18 months is expected to exceed the return of its relevant broad market benchmark, as indicated below.

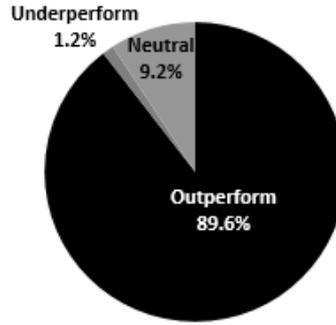
**Neutral:** The stock's total return over the next 12-18 months is expected to be in line with the return of its relevant broad market benchmark, as indicated below. For purposes only of FINRA/NYSE ratings distribution rules, our Neutral rating falls into a hold rating category.

**Underperform:** The stock's total return over the next 12-18 months is expected to be below the return of its relevant broad market benchmark, as indicated below.

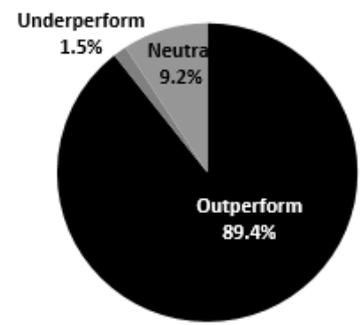
**Benchmarks for each stock's listed region are as follows: Japan – TOPIX, Korea – KOSPI, Taiwan – TAIEX, India – Nifty100, US – SP500; for all other China-concept stocks – MSCI China.**

**评级分布 Rating Distribution**

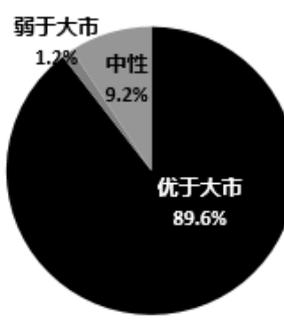
**Most Recent Full Quarter**



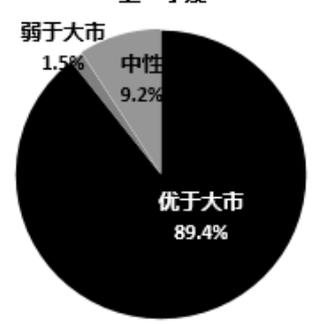
**Prior Full Quarter**



**最新季度**



**上一季度**



**截至 2023 年 3 月 31 日海通国际股票研究评级分布**

	优于大市	中性 (持有)	弱于大市
海通国际股票研究覆盖率	89.6%	9.2%	1.2%
投资银行客户*	5.2%	6.4%	9.5%

\*在每个评级类别里投资银行客户所占的百分比。

上述分布中的买入, 中性和卖出分别对应我们当前优于大市, 中性和落后大市评级。

只有根据 FINRA/NYSE 的评级分布规则, 我们才将中性评级划入持有这一类别。请注意在上表中不包含非评级的股票。

**此前的评级系统定义 (直至 2020 年 6 月 30 日):**

**买入**, 未来 12-18 个月内预期相对基准指数涨幅在 10%以上, 基准定义如下

**中性**, 未来 12-18 个月内预期相对基准指数变化不大, 基准定义如下。根据 FINRA/NYSE 的评级分布规则, 我们会将中性评级划入持有这一类别。

**卖出**, 未来 12-18 个月内预期相对基准指数跌幅在 10%以上, 基准定义如下

各地股票基准指数：日本 – TOPIX, 韩国 – KOSPI, 台湾 – TAIEX, 印度 – Nifty100; 其他所有中国概念股 – MSCI China.

#### Haitong International Equity Research Ratings Distribution, as of Mar 31, 2023

	Outperform	Neutral (hold)	Underperform
HTI Equity Research Coverage	89.6%	9.2%	1.2%
IB clients*	5.2%	6.4%	9.5%

\*Percentage of investment banking clients in each rating category.

BUY, Neutral, and SELL in the above distribution correspond to our current ratings of Outperform, Neutral, and Underperform.

For purposes only of FINRA/NYSE ratings distribution rules, our Neutral rating falls into a hold rating category. Please note that stocks with an NR designation are not included in the table above.

#### Previous rating system definitions (until 30 Jun 2020):

**BUY:** The stock's total return over the next 12-18 months is expected to exceed the return of its relevant broad market benchmark, as indicated below.

**NEUTRAL:** The stock's total return over the next 12-18 months is expected to be in line with the return of its relevant broad market benchmark, as indicated below. For purposes only of FINRA/NYSE ratings distribution rules, our Neutral rating falls into a hold rating category.

**SELL:** The stock's total return over the next 12-18 months is expected to be below the return of its relevant broad market benchmark, as indicated below.

**Benchmarks for each stock's listed region are as follows: Japan – TOPIX, Korea – KOSPI, Taiwan – TAIEX, India – Nifty100; for all other China-concept stocks – MSCI China.**

**海通国际非评级研究:** 海通国际发布计量、筛选或短篇报告，并在报告中根据估值和其他指标对股票进行排名，或者基于可能的估值倍数提出建议价格。这种排名或建议价格并非为了进行股票评级、提出目标价格或进行基本面估值，而仅供参考使用。

**Haitong International Non-Rated Research:** Haitong International publishes quantitative, screening or short reports which may rank stocks according to valuation and other metrics or may suggest prices based on possible valuation multiples. Such rankings or suggested prices do not purport to be stock ratings or target prices or fundamental values and are for information only.

**海通国际 A 股覆盖:** 海通国际可能会就沪港通及深港通的中国 A 股进行覆盖及评级。海通证券 (600837.CH)，海通国际于上海的母公司，也会于中国发布中国 A 股的研究报告。但是，海通国际使用与海通证券不同的评级系统，所以海通国际与海通证券的中国 A 股评级可能有所不同。

**Haitong International Coverage of A-Shares:** Haitong International may cover and rate A-Shares that are subject to the Hong Kong Stock Connect scheme with Shanghai and Shenzhen. Haitong Securities (HS; 600837 CH), the ultimate parent company of HTISG based in Shanghai, covers and publishes research on these same A-Shares for distribution in mainland China. However, the rating system employed by HS differs from that used by HTI and as a result there may be a difference in the HTI and HS ratings for the same A-share stocks.

**海通国际优质 100 A 股 (Q100) 指数:** 海通国际 Q100 指数是一个包括 100 支由海通证券覆盖的优质中国 A 股的计量产品。这些股票是通过基于质量的筛选过程，并结合对海通证券 A 股团队自下而上的研究。海通国际每季对 Q100 指数成分作出复审。

**Haitong International Quality 100 A-share (Q100) Index:** HTI's Q100 Index is a quant product that consists of 100 of the highest-quality A-shares under coverage at HS in Shanghai. These stocks are carefully selected through a quality-based screening process in combination with a review of the HS A-share team's bottom-up research. The Q100 constituent companies are reviewed quarterly.

**MSCI ESG 评级免责声明条款:** 尽管海通国际的信息供货商 (包括但不限于 MSCI ESG Research LLC 及其附属公司 (「ESG 方」)) 从其认为可靠的来源获取信息 (「信息」), ESG 方均不承担或保证此处任何数据的原创性、准确性和/或完整性, 并明确表示不作出任何明示或默示的担保, 包括可商售性和针对特定目的的适用性。该信息只能供阁下内部使用, 不得以任何形式复制或重新传播, 并不得用作任何金融工具、产品或指数的基础或组成部分。此外, 信息本质上不能用于判断购买或出售何种证券, 或何时购买或出售该证券。即使已被告知可能造成的损害, ESG 方均不承担与此处任何资料有关的任何错误或遗漏所引起的任何责任, 也不对任何直接、间接、特殊、惩罚性、附带性或任何其他损害赔偿 (包括利润损失) 承担任何责任。

**MSCI ESG Disclaimer:** Although Haitong International's information providers, including without limitation, MSCI ESG Research LLC and its affiliates (the "ESG Parties"), obtain information (the "Information") from sources they consider reliable, none of the ESG Parties warrants or guarantees the originality, accuracy and/or completeness, of any data herein and expressly disclaim all express or implied warranties, including those of merchantability and fitness for a particular purpose. The Information may only be used for your internal use, may not be reproduced or disseminated in any form and may not be used as a basis for, or a component of, any financial instruments or products or indices. Further, none of the Information can in and of itself be used to determine which securities to buy or sell or when to buy or sell them. None of the ESG Parties shall have any liability for any errors or omissions in connection with any data herein, or any liability for any direct, indirect, special, punitive, consequential or any other damages (including lost profits) even if notified of the possibility of such damages.

**盟浪义利 (FIN-ESG) 数据通免责声明条款:** 在使用盟浪义利 (FIN-ESG) 数据之前, 请务必仔细阅读本条款并同意本声明:

第一条 义利 (FIN-ESG) 数据系由盟浪可持续数字科技有限责任公司 (以下简称“本公司”) 基于合法取得的公开信息评估而成, 本公司对信息的准确性及完整性不作任何保证。对公司的评估结果仅供参考, 并不构成对任何个人或机构投资建议, 也不能作为任何个人或机构购买、出售或持有相关金融产品的依据。本公司不对任何个人或机构投资者因使用本数据表述的评估结果造成的任何直接或间接损失负责。

第二条 盟浪并不因此收到此评估数据而将收件人视为客户, 收件人使用此数据时应根据自身实际情况作出自我独立判断。本数据所载内容反映的是盟浪在最初发布本数据日期当日的判断, 盟浪有权在不发出通知的情况下更新、修订与发出其他与本数据所载内容不一致或有不同结论的数据。除非另行说明, 本数据 (如财务业绩数据等) 仅代表过往表现, 过往的业绩表现不作为日后回报的预测。

第三条

改、复制、编译、汇编、再次编辑、改编、删减、缩写、节选、发行、出租、展览、表演、放映、广播、信息网络传播、摄制、增加图标及说明等, 否则因此给盟浪或其他第三方造

成损失的，由用户承担相应的赔偿责任，盟浪不承担责任。

第四条 如本免责声明未约定，而盟浪网站平台载明的其他协议内容（如《盟浪网站用户注册协议》《盟浪网用户服务（含认证）协议》《盟浪网隐私政策》等）有约定的，则按其他协议的约定执行；若本免责声明与其他协议约定存在冲突或不一致的，则以本免责声明约定为准。

**SusallWave FIN-ESG Data Service Disclaimer:** Please read these terms and conditions below carefully and confirm your agreement and acceptance with these terms before using SusallWave FIN-ESG Data Service.

1. FIN-ESG Data is produced by SusallWave Digital Technology Co., Ltd. (In short, SusallWave)'s assessment based on legal publicly accessible information. SusallWave shall not be responsible for any accuracy and completeness of the information. The assessment result is for reference only. It is not for any investment advice for any individual or institution and not for basis of purchasing, selling or holding any relative financial products. We will not be liable for any direct or indirect loss of any individual or institution as a result of using SusallWave FIN-ESG Data.
2. SusallWave do not consider recipients as customers for receiving these data. When using the data, recipients shall make your own independent judgment according to your practical individual status. The contents of the data reflect the judgment of us only on the release day. We have right to update and amend the data and release other data that contains inconsistent contents or different conclusions without notification. Unless expressly stated, the data (e.g., financial performance data) represents past performance only and the past performance cannot be viewed as the prediction of future return.
3. The copyright of this data belongs to SusallWave, and we reserve all rights in accordance with the law. Without the prior written permission of our company, none of individual or institution can use these data for any profitable purpose. Besides, none of individual or institution can take actions such as amendment, replication, translation, compilation, re-editing, adaption, deletion, abbreviation, excerpts, issuance, rent, exhibition, performance, projection, broadcast, information network transmission, shooting, adding icons and instructions. If any loss of SusallWave or any third-party is caused by those actions, users shall bear the corresponding compensation liability. SusallWave shall not be responsible for any loss.
4. If any term is not contained in this disclaimer but written in other agreements on our website (e.g. *User Registration Protocol of SusallWave Website, User Service (including authentication) Agreement of SusallWave Website, Privacy Policy of Susallwave Website*), it should be executed according to other agreements. If there is any difference between this disclaimer and other agreements, this disclaimer shall be applied.

#### 重要免责声明:

**非印度证券的研究报告:** 本报告由海通国际证券集团有限公司（“HTISGL”）的全资附属公司海通国际研究有限公司（“HTIRL”）发行，该公司是根据香港证券及期货条例（第 571 章）持有第 4 类受规管活动（就证券提供意见）的持牌法团。该研究报告在 HTISGL 的全资附属公司 Haitong International (Japan) K.K.（“HTIJKK”）的协助下发行，HTIJKK 是由日本关东财务局监管为投资顾问。

**印度证券的研究报告:** 本报告由从事证券交易、投资银行及证券分析及受 Securities and Exchange Board of India（“SEBI”）监管的 Haitong Securities India Private Limited（“HSIPL”）所发行，包括制作及发布涵盖 BSE Limited（“BSE”）和 National Stock Exchange of India Limited（“NSE”）上市公司（统称为「印度交易所」）的研究报告。HSIPL 于 2016 年 12 月 22 日被收购并成为海通国际证券集团有限公司（“HTISG”）的一部分。

所有研究报告均以海通国际为名作为全球品牌，经许可由海通国际证券股份有限公司及/或海通国际证券集团的其他成员在其司法管辖区发布。

本文件所载信息和观点已被编译或源自可靠来源，但 HTIRL、HTISGL 或任何其他属于海通国际证券集团有限公司（“HTISG”）的成员对其准确性、完整性和正确性不做任何明示或暗示的声明或保证。本文件中所有观点均截至本报告日期，如有更改，恕不另行通知。本文件仅供参考使用。文件中提及的任何公司或其股票的说明并非意图展示完整的内容，本文件并非/不应被解释为对证券买卖的明示或暗示地出价或征价。在某些司法管辖区，本文件中提及的证券可能无法进行买卖。如果投资产品以投资者本国货币以外的币种进行计价，则汇率变化可能会对投资产生不利影响。过去的表现并不一定代表将来的结果。某些特定交易，包括设计金融衍生工具的，有产生重大风险的可能性，因此并不适合所有的投资者。您还应认识到本文件中的建议并非为您量身定制。分析师并未考虑到您自身的财务情况，如您的财务状况和风险偏好。因此您必须自行分析并在适用的情况下咨询自己的法律、税收、会计、金融和其他方面的专业顾问，以期在投资之前评估该项建议是否适合于您。若由于使用本文件所载的材料而产生任何直接或间接的损失，HTISG 及其董事、雇员或代理人对此均不承担任何责任。

除对本文内容承担责任的分析师除外，HTISG 及我们的关联公司、高级管理人员、董事和雇员，均可不时作为主事人就本文件所述的任何证券或衍生品持有长仓或短仓以及进行买卖。HTISG 的销售员、交易员和其他专业人士均可向 HTISG 的相关客户和公司提供与本文件所述意见相反的口头或书面市场评论意见或交易策略。HTISG 可做出与本文件所述建议或意见不一致的投资决策。但 HTIRL 没有义务来确保本文件的收件人了解到该等交易决定、思路或建议。

请访问海通国际网站 [www.equities.htisec.com](http://www.equities.htisec.com)，查阅更多有关海通国际为预防和避免利益冲突设立的组织 and 行政安排的内容信息。

**非美国分析师披露信息:** 本项研究首页上列明的海通国际分析师并未在 FINRA 进行注册或者取得相应的资格，并且不受美国 FINRA 有关与本项研究目标公司进行沟通、公开露面和自营证券交易的第 2241 条规则之限制。

#### IMPORTANT DISCLAIMER

**For research reports on non-Indian securities:** The research report is issued by Haitong International Research Limited (“HTIRL”), a wholly owned subsidiary of Haitong International Securities Group Limited (“HTISGL”) and a licensed corporation to carry on Type 4 regulated activity (advising on securities) for the purpose of the Securities and Futures Ordinance (Cap. 571) of Hong Kong, with the assistance of Haitong International (Japan) K.K. (“HTIJKK”), a wholly owned subsidiary of HTISGL and which is regulated as an Investment Adviser by the Kanto Finance Bureau of Japan.

**For research reports on Indian securities:** The research report is issued by Haitong Securities India Private Limited (“HSIPL”), an Indian company and a Securities and Exchange Board of India (“SEBI”) registered Stock Broker, Merchant Banker and Research Analyst that, inter alia, produces and distributes research reports covering listed entities on the BSE Limited (“BSE”) and the National Stock Exchange of India Limited (“NSE”) (collectively referred to as “Indian Exchanges”). HSIPL was acquired and became part of the Haitong International Securities Group of Companies (“HTISG”) on 22 December 2016.

All the research reports are globally branded under the name Haitong International and approved for distribution by Haitong International Securities Company Limited (“HTISCL”) and/or any other

members within HTISG in their respective jurisdictions.

The information and opinions contained in this research report have been compiled or arrived at from sources believed to be reliable and in good faith but no representation or warranty, express or implied, is made by HTIRL, HTISCL, HSIPL, HTIJKK or any other members within HTISG from which this research report may be received, as to their accuracy, completeness or correctness. All opinions expressed herein are as of the date of this research report and are subject to change without notice. This research report is for information purpose only. Descriptions of any companies or their securities mentioned herein are not intended to be complete and this research report is not, and should not be construed expressly or impliedly as, an offer to buy or sell securities. The securities referred to in this research report may not be eligible for purchase or sale in some jurisdictions. If an investment product is denominated in a currency other than an investor's home currency, a change in exchange rates may adversely affect the investment. Past performance is not necessarily indicative of future results. Certain transactions, including those involving derivatives, give rise to substantial risk and are not suitable for all investors. You should also bear in mind that recommendations in this research report are not tailor-made for you. The analyst has not taken into account your unique financial circumstances, such as your financial situation and risk appetite. You must, therefore, analyze and should, where applicable, consult your own legal, tax, accounting, financial and other professional advisers to evaluate whether the recommendations suits you before investment. Neither HTISG nor any of its directors, employees or agents accepts any liability whatsoever for any direct or consequential loss arising from any use of the materials contained in this research report.

HTISG and our affiliates, officers, directors, and employees, excluding the analysts responsible for the content of this document, will from time to time have long or short positions in, act as principal in, and buy or sell, the securities or derivatives, if any, referred to in this research report. Sales, traders, and other professionals of HTISG may provide oral or written market commentary or trading strategies to the relevant clients and the companies within HTISG that reflect opinions that are contrary to the opinions expressed in this research report. HTISG may make investment decisions that are inconsistent with the recommendations or views expressed in this research report. HTI is under no obligation to ensure that such other trading decisions, ideas or recommendations are brought to the attention of any recipient of this research report.

Please refer to HTI's website [www.equities.htisec.com](http://www.equities.htisec.com) for further information on HTI's organizational and administrative arrangements set up for the prevention and avoidance of conflicts of interest with respect to Research.

**Non U.S. Analyst Disclosure:** The HTI analyst(s) listed on the cover of this Research is (are) not registered or qualified as a research analyst with FINRA and are not subject to U.S. FINRA Rule 2241 restrictions on communications with companies that are the subject of the Research; public appearances; and trading securities by a research analyst.

#### 分发和地区通知:

除非下文另有规定, 否则任何希望讨论本报告或者就本项研究中讨论的任何证券进行任何交易的收件人均应联系其所在国家或地区的海通国际销售人员。

**香港投资者的通知事项:** 海通国际证券股份有限公司("HTISCL")负责分发该研究报告, HTISCL 是在香港有权实施第 1 类受规管活动(从事证券交易)的持牌公司。该研究报告并不构成《证券及期货条例》(香港法例第 571 章)(以下简称"SFO")所界定的要约邀请, 证券要约或公众要约。本研究报告仅提供给 SFO 所界定的"专业投资者"。本研究报告未经过证券及期货事务监察委员会的审查。您不应仅根据本研究报告中所载的信息做出投资决定。本研究报告的收件人就研究报告中产生或与之相关的任何事宜请联系 HTISCL 销售人员。

**美国投资者的通知事项:** 本研究报告由 HTIRL, HSIPL 或 HTIJKK 编写。HTIRL, HSIPL, HTIJKK 以及任何非 HTISG 美国联营公司, 均未在美国注册, 因此不受美国关于研究报告编制和研究分析人员独立性规定的约束。本研究报告提供给依照 1934 年"美国证券交易法"第 15a-6 条规定的豁免注册的「美国主要机构投资者」("Major U.S. Institutional Investor")和「机构投资者」("U.S. Institutional Investors")。在向美国机构投资者分发研究报告时, Haitong International Securities (USA) Inc. ("HTI USA") 将对报告的内容负责。任何收到本研究报告的美国投资者, 希望根据本研究报告提供的信息进行任何证券或相关金融工具买卖的交易, 只能通过 HTI USA。HTI USA 位于 340 Madison Avenue, 12th Floor, New York, NY 10173, 电话 (212) 351-6050。HTI USA 是在美国于 U.S. Securities and Exchange Commission ("SEC") 注册的经纪商, 也是 Financial Industry Regulatory Authority, Inc. ("FINRA") 的成员。HTIUSA 不负责编写本研究报告, 也不负责其中包含的分析。在任何情况下, 收到本研究报告的任何美国投资者, 不得直接与分析师直接联系, 也不得通过 HSIPL, HTIRL 或 HTIJKK 直接进行买卖证券或相关金融工具的交易。本研究报告中出现的 HSIPL, HTIRL 或 HTIJKK 分析师没有注册或具备 FINRA 的研究分析师资格, 因此可能不受 FINRA 第 2241 条规定的与目标公司的交流, 公开露面和分析师账户持有的交易证券等限制。投资本研究报告中讨论的任何非美国证券或相关金融工具(包括 ADR)可能存在一定风险。非美国发行的证券可能没有注册, 或不受美国法规的约束。有关非美国证券或相关金融工具的信息可能有限制。外国公司可能不受审计和汇报的标准以及与美国境内生效相符的监管要求。本研究报告中以美元以外的其他货币计价的任何证券或相关金融工具的投资或收益的价值受汇率波动的影响, 可能对该等证券或相关金融工具的价值或收入产生正面或负面影响。美国收件人的所有问询请联系:

Haitong International Securities (USA) Inc.  
340 Madison Avenue, 12th Floor  
New York, NY 10173  
联系人电话: (212) 351 6050

#### DISTRIBUTION AND REGIONAL NOTICES

Except as otherwise indicated below, any Recipient wishing to discuss this research report or effect any transaction in any security discussed in HTI's research should contact the Haitong International salesperson in their own country or region.

**Notice to Hong Kong investors:** The research report is distributed by Haitong International Securities Company Limited ("HTISCL"), which is a licensed corporation to carry on Type 1 regulated activity (dealing in securities) in Hong Kong. This research report does not constitute a solicitation or an offer of securities or an invitation to the public within the meaning of the SFO. This research report is only to be circulated to "Professional Investors" as defined in the SFO. This research report has not been reviewed by the Securities and Futures Commission. You should not make investment decisions solely on the basis of the information contained in this research report. Recipients of this research report are to contact HTISCL salespersons in respect of any matters arising from, or in connection with, the research report.

**Notice to U.S. investors:** As described above, this research report was prepared by HTIRL, HSIPL or HTIJKK. Neither HTIRL, HSIPL, HTIJKK, nor any of the non U.S. HTISG affiliates is registered in the United States and, therefore, is not subject to U.S. rules regarding the preparation of research reports and the independence of research analysts. This research report is provided for distribution to "major U.S. institutional investors" and "U.S. institutional investors" in reliance on the exemption from registration provided by Rule 15a-6 of the U.S. Securities Exchange Act of 1934, as amended. When distributing research reports to "U.S. institutional investors," HTI USA will accept the responsibilities for the content of the reports. Any U.S. recipient of this research report wishing to effect any transaction to buy or sell securities or related financial instruments based on the information provided in this research report should do so only through Haitong International Securities (USA)

Inc. ("HTI USA"), located at 340 Madison Avenue, 12th Floor, New York, NY 10173, USA; telephone (212) 351 6050. HTI USA is a broker-dealer registered in the U.S. with the U.S. Securities and Exchange Commission (the "SEC") and a member of the Financial Industry Regulatory Authority, Inc. ("FINRA"). HTI USA is not responsible for the preparation of this research report nor for the analysis contained therein. Under no circumstances should any U.S. recipient of this research report contact the analyst directly or effect any transaction to buy or sell securities or related financial instruments directly through HSIPL, HTIRL or HTIJKK. The HSIPL, HTIRL or HTIJKK analyst(s) whose name appears in this research report is not registered or qualified as a research analyst with FINRA and, therefore, may not be subject to FINRA Rule 2241 restrictions on communications with a subject company, public appearances and trading securities held by a research analyst account. Investing in any non-U.S. securities or related financial instruments (including ADRs) discussed in this research report may present certain risks. The securities of non-U.S. issuers may not be registered with, or be subject to U.S. regulations. Information on such non-U.S. securities or related financial instruments may be limited. Foreign companies may not be subject to audit and reporting standards and regulatory requirements comparable to those in effect within the U.S. The value of any investment or income from any securities or related financial instruments discussed in this research report denominated in a currency other than U.S. dollars is subject to exchange rate fluctuations that may have a positive or adverse effect on the value of or income from such securities or related financial instruments. All inquiries by U.S. recipients should be directed to:

Haitong International Securities (USA) Inc.  
340 Madison Avenue, 12<sup>th</sup> Floor  
New York, NY 10173  
Attn: Sales Desk at (212) 351 6050

**中华人民共和国的通知事项:** 在中华人民共和国(下称“中国”,就本报告目的而言,不包括香港特别行政区、澳门特别行政区和台湾)只有根据适用的中国法律法规而收到该材料的人员方可使用该材料。并且根据相关法律法规,该材料中的信息并不构成“在中国从事生产、经营活动”。本文件在中国并不构成相关证券的公共发售或认购。无论根据法律规定或其他任何规定,在取得中国政府所有的批准或许可之前,任何法人或自然人均不得直接或间接地购买本材料中的任何证券或任何权益权益。接收本文件的人员须遵守上述限制性规定。

**加拿大投资者的通知事项:** 在任何情况下该等材料均不得被解释为在任何加拿大的司法管辖区内出售证券的要约或认购证券的要约邀请。本材料中所述证券在加拿大的任何要约或出售行为均只能在豁免向有关加拿大证券监管机构提交招股说明书的前提下由 Haitong International Securities (USA) Inc. (“HTI USA”) 予以实施,该公司是一家根据 National Instrument 31-103 Registration Requirements, Exemptions and Ongoing Registrant Obligations (“NI 31-103”)的规定得到「国际交易商豁免」(“International Dealer Exemption”)的交易商,位于艾伯塔省、不列颠哥伦比亚省、安大略省和魁北克省。在加拿大,该等材料在任何情况下均不得被解释为任何证券的招股说明书、发行备忘录、广告或公开发行。加拿大的任何证券委员会或类似的监管机构均未审查或以任何方式批准该等材料,其中所载的信息或所述证券的优点,任何与此相反的声明即属违法。在收到该等材料时,每个加拿大的收件人均将被视为属于 National Instrument 45-106 Prospectus Exemptions 第 1.1 节或者 Securities Act (Ontario)第 73.3(1)节所规定的「认可投资者」(“Accredited Investor”),或者在适用情况下 National Instrument 31-103 第 1.1 节所规定的「许可投资者」(“Permitted Investor”)。

**新加坡投资者的通知事项:** 本研究报告由 Haitong International Securities (Singapore) Pte Ltd (“HTISSPL”) [公司注册编号 201311400G] 于新加坡提供。HTISSPL 是符合《财务顾问法》(第 110 章) (“FAA”) 定义的豁免财务顾问,可 (a) 提供关于证券,集体投资计划的部分,交易所衍生品合约和场外衍生品合约的建议 (b) 发行或公布有关证券、交易所衍生品合约和场外衍生品合约的研究分析或研究报告。本研究报告仅提供给符合《证券及期货法》(第 289 章) 第 4A 条项下规定的机构投资者。对于因本研究报告而产生的或与之相关的任何问题,本研究报告的收件人应通过以下信息与 HTISSPL 联系:

Haitong International Securities (Singapore) Pte. Ltd  
50 Raffles Place, #33-03 Singapore Land Tower, Singapore 048623  
电话: (65) 6536 1920

**日本投资者的通知事项:** 本研究报告由海通国际证券有限公司所发布,旨在分发给从事投资管理的金融服务提供商或注册金融机构(根据日本金融机构和交易法(“FIEL”))第 61 (1) 条,第 17-11 (1) 条的执行及相关条款)。

**英国及欧盟投资者的通知事项:** 本报告由从事投资顾问的 Haitong International Securities Company Limited 所发布,本报告只面向有投资相关经验的专业客户发布。任何投资或与本报告相关的投资行为只面对此类专业客户。没有投资经验或相关投资经验的客户不得依赖本报告。Haitong International Securities Company Limited 的分支机构的净长期或短期金融权益可能超过本研究报告中提及的实体已发行股本总额的 0.5%。特别提醒有些英文报告有可能此前已经通过中文或其它语言完成发布。

**澳大利亚投资者的通知事项:** Haitong International Securities (Singapore) Pte Ltd, Haitong International Securities Company Limited 和 Haitong International Securities (UK) Limited 分别根据澳大利亚证券和投资委员会(以下简称“ASIC”)公司(废除及过度性)文书第 2016/396 号规章在澳大利亚分发本项研究,该等规章免除了根据 2001 年《公司法》在澳大利亚为批发客户提供金融服务时海通国际需持有澳大利亚金融服务许可的要求。ASIC 的规章副本可在以下网站获取: [www.legislation.gov.au](http://www.legislation.gov.au)。海通国际提供的金融服务受外国法律法规规定的管制,该等法律与在澳大利亚所适用的法律存在差异。

**印度投资者的通知事项:** 本报告由从事证券交易、投资银行及证券分析及受 Securities and Exchange Board of India (“SEBI”) 监管的 Haitong Securities India Private Limited (“HTSIPL”) 所发布,包括制作及发布涵盖 BSE Limited (“BSE”) 和 National Stock Exchange of India Limited (“NSE”) (统称为「印度交易所」) 研究报告。

研究机构名称: Haitong Securities India Private Limited

SEBI 研究分析师注册号: INH000002590

地址: 1203A, Floor 12A, Tower 2A, One World Center

841 Senapati Bapat Marg, Elphinstone Road, Mumbai 400 013, India

CIN U74140MH2011FTC224070

电话: +91 22 43156800 传真: +91 22 24216327

合规和申诉办公室联系人: Prasanna Chandwaskar; 电话: +91 22 43156803; 电子邮箱: [prasanna.chandwaskar@htisec.com](mailto:prasanna.chandwaskar@htisec.com)

“请注意，SEBI 授予的注册和 NISM 的认证并不保证中介的表现或为投资者提供任何回报保证”。

版权所有：海通国际证券集团有限公司 2019 年。保留所有权利。

**People’s Republic of China (PRC):** In the PRC, the research report is directed for the sole use of those who receive the research report in accordance with the applicable PRC laws and regulations. Further, the information on the research report does not constitute “production and business activities in the PRC” under relevant PRC laws. This research report does not constitute a public offer of the security, whether by sale or subscription, in the PRC. Further, no legal or natural persons of the PRC may directly or indirectly purchase any of the security or any beneficial interest therein without obtaining all prior PRC government approvals or licenses that are required, whether statutorily or otherwise. Persons who come into possession of this research are required to observe these restrictions.

**Notice to Canadian Investors:** Under no circumstances is this research report to be construed as an offer to sell securities or as a solicitation of an offer to buy securities in any jurisdiction of Canada. Any offer or sale of the securities described herein in Canada will be made only under an exemption from the requirements to file a prospectus with the relevant Canadian securities regulators and only by Haitong International Securities (USA) Inc., a dealer relying on the “international dealer exemption” under National Instrument 31-103 Registration Requirements, Exemptions and Ongoing Registrant Obligations (“NI 31-103”) in Alberta, British Columbia, Ontario and Quebec. This research report is not, and under no circumstances should be construed as, a prospectus, an offering memorandum, an advertisement or a public offering of any securities in Canada. No securities commission or similar regulatory authority in Canada has reviewed or in any way passed upon this research report, the information contained herein or the merits of the securities described herein and any representation to the contrary is an offence. Upon receipt of this research report, each Canadian recipient will be deemed to have represented that the investor is an “accredited investor” as such term is defined in section 1.1 of National Instrument 45-106 Prospectus Exemptions or, in Ontario, in section 73.3(1) of the Securities Act (Ontario), as applicable, and a “permitted client” as such term is defined in section 1.1 of NI 31-103, respectively.

**Notice to Singapore investors:** This research report is provided in Singapore by or through Haitong International Securities (Singapore) Pte Ltd (“HTISSPL”) [Co Reg No 201311400G. HTISSPL is an Exempt Financial Adviser under the Financial Advisers Act (Cap. 110) (“FAA”) to (a) advise on securities, units in a collective investment scheme, exchange-traded derivatives contracts and over-the-counter derivatives contracts and (b) issue or promulgate research analyses or research reports on securities, exchange-traded derivatives contracts and over-the-counter derivatives contracts. This research report is only provided to institutional investors, within the meaning of Section 4A of the Securities and Futures Act (Cap. 289). Recipients of this research report are to contact HTISSPL via the details below in respect of any matters arising from, or in connection with, the research report:

Haitong International Securities (Singapore) Pte. Ltd.

10 Collyer Quay, #19-01 - #19-05 Ocean Financial Centre, Singapore 049315

Telephone: (65) 6536 1920

**Notice to Japanese investors:** This research report is distributed by Haitong International Securities Company Limited and intended to be distributed to Financial Services Providers or Registered Financial Institutions engaged in investment management (as defined in the Japan Financial Instruments and Exchange Act (“FIEL”) Art. 61(1), Order for Enforcement of FIEL Art. 17-11(1), and related articles).

**Notice to UK and European Union investors:** This research report is distributed by Haitong International Securities Company Limited. This research is directed at persons having professional experience in matters relating to investments. Any investment or investment activity to which this research relates is available only to such persons or will be engaged in only with such persons. Persons who do not have professional experience in matters relating to investments should not rely on this research. Haitong International Securities Company Limited’s affiliates may have a net long or short financial interest in excess of 0.5% of the total issued share capital of the entities mentioned in this research report. Please be aware that any report in English may have been published previously in Chinese or another language.

**Notice to Australian investors:** The research report is distributed in Australia by Haitong International Securities (Singapore) Pte Ltd, Haitong International Securities Company Limited, and Haitong International Securities (UK) Limited in reliance on ASIC Corporations (Repeal and Transitional) Instrument 2016/396, which exempts those HTISG entities from the requirement to hold an Australian financial services license under the Corporations Act 2001 in respect of the financial services it provides to wholesale clients in Australia. A copy of the ASIC Class Orders may be obtained at the following website, [www.legislation.gov.au](http://www.legislation.gov.au). Financial services provided by Haitong International Securities (Singapore) Pte Ltd, Haitong International Securities Company Limited, and Haitong International Securities (UK) Limited are regulated under foreign laws and regulatory requirements, which are different from the laws applying in Australia.

**Notice to Indian investors:** The research report is distributed by Haitong Securities India Private Limited (“HSIPL”), an Indian company and a Securities and Exchange Board of India (“SEBI”) registered Stock Broker, Merchant Banker and Research Analyst that, inter alia, produces and distributes research reports covering listed entities on the BSE Limited (“BSE”) and the National Stock Exchange of India Limited (“NSE”) (collectively referred to as “Indian Exchanges”).

Name of the entity: Haitong Securities India Private Limited

SEBI Research Analyst Registration Number: INH000002590

Address : 1203A, Floor 12A, Tower 2A, One World Center

841 Senapati Bapat Marg, Elphinstone Road, Mumbai 400 013, India

CIN U74140MH2011FTC224070

Ph: +91 22 43156800 Fax:+91 22 24216327

Details of the Compliance Officer and Grievance Officer : Prasanna Chandwaskar : Ph: +91 22 43156803; Email id: [prasanna.chandwaskar@htisec.com](mailto:prasanna.chandwaskar@htisec.com)

“Please note that Registration granted by SEBI and Certification from NISM in no way guarantee performance of the intermediary or provide any assurance of returns to investors”.

---

This research report is intended for the recipients only and may not be reproduced or redistributed without the written consent of an authorized signatory of HTISG.

Copyright: Haitong International Securities Group Limited 2019. All rights reserved.

<http://equities.htisec.com/x/legal.html>

---