

Honeywell

未来燃料

——霍尼韦尔氢能工业与应用白皮书

FUEL OF THE FUTURE

A WHITE PAPER OF HONEYWELL TECHNOLOGIES
FOR HYDROGEN INDUSTRY AND APPLICATIONS





序言

未来燃料：如何建设一个真实的氢能经济

氢气用途广泛且储量丰富，在世界各国实现其气候目标的过程中可以大有可为。事实上，氢气在欧盟委员会 2050 年的所有八种净零排放情景中都有体现。

美国能源部于去年颁布了《两党基础设施法案》，其中包括提供 80 亿美元兴建氢能枢纽，以扩大零碳氢和低碳氢在工业、电力、住宅和运输领域的应用。在此基础上，能源部同时发布了相关计划促进对氢能经济的重大投资。如果能够以可持续的方式生产和运输氢气，低碳氢就可能转变为世界需要的日常替代能源。

的确，在政府和私营部门不断增加氢能解决方案投资的情况下，氢能有望成为使用最广泛的多用途能源之一。据研究机构预测，到 2050 年，低碳氢将满足全球最终能源需求的 7%，其总体需求将从目前的几乎为零增长到 2.11 亿吨。

氢能还可以在能源安全和经济增长方面发挥重要作用，尤其是正当世界各国在四处寻求减少对油气进口的依赖。近期区域冲突的爆发和欧洲国家的能源紧张更凸显出这一问题的严重性。

欧盟委员会公布了一项新计划，其中核心措施之一就是“可再生氢”。为实现欧盟在今年年底前将对俄罗斯天然气的依赖减少三分之二的战略，该提案谋求促进可再生能源的发展，并将 2030 年的绿氢产能目标提高到当前的四倍。

发展绿氢和蓝氢的另一个推动力是“环境、社会和公司治理（ESG）”理念的兴起，以及全球客户对环保议题的关注。从大型零售商到科技巨头，再到运输业巨头，各公司都在承诺减少供应链中的碳排放量，因此，采用清洁氢能也具有良好的经济意义。

氢能未来三步走

氢能经济还刚刚萌芽，但随着世界继续寻找应对气候变化的创新解决方案，氢能正被证明是一种可行的能源和经济增长驱动力。氢能进一步得到广泛使用需要三个前提：生产规模化、降低存储输送成本，以及激励措施加速氢能应用。

上游 - 氢气生产规模化，增加供应和生产。第一步是提高“蓝氢”和“绿氢”的供应和可用性。目前，投入使用的大多数氢气为“灰氢”，这是一种碳密集度最高的氢气。灰氢是在未采用二氧化碳减排技术的情况下以化石燃料制成的氢气，其生产过程伴随着二氧化碳的排放。

绿氢的生产采用电解工艺，该工艺不会产生对环境有害的二氧化碳，使用的电力来自太阳能发电和风电等可再生能源，因此具有可持续性。然而，要大幅增加零排放绿氢的供应并降低生产成本，仍然需要大量的研发和资金投入。

蓝氢和灰氢一样来自化石原料，但与灰氢不同的是，其生产过程排放的二氧化碳经过碳捕集处理，

因此，蓝氢的二氧化碳排放量较灰氢显著降低。绿氢是所有氢形式中最清洁的，在实现绿氢的大规模生产和供应之前，蓝氢是一项关键的过渡型技术。

中游 - 降低氢气存储输送成本，基础设施至关重要。大规模使用氢能的第二个关键因素是降低氢气存储和输送成本。当前氢气的运输主要以高压氢气罐车，液态氢罐车运输为主。罐车运输的有效运输载荷小的问题限制了氢气的运输，从规模化输送氢气的角度势必需要建立纯氢或者掺氢输送管道以便提高输送规模，降低氢气输送成本。除此之外，将氢气转换为甲醇和液氨也是大规模、较为安全高效的存储和输送氢的方式。

为了实现预期的氢能商业化及工业规模生产，相关行业现在必须优先考虑减少排放的解决方案，同时建设支持未来可再生氢能的基础设施。事实上，国际能源转型委员会最近的一份报告显示，全球工业脱碳用氢，可能需要在未来 30 年花费 15 万亿美元左右的投资。该研究还表示，其中大约 85% 的投资将用于发电，剩余 15% 将用于氢能的生产设施、运输和存储。

开发一个可自我维持的生态系统将成为决定绿氢规模化发展的关键因素。这需要各行各业的组织机构携手合作，向同一个目标迈进。参与的实体将涉及从上游生产到下游封存的价值链上的所有阶段。氢能价值链中有众多不同的利益相关方，他们将以各自的方式作出贡献，共同打造出能够自我维持的氢能经济。

下游 - 氢气利用的规模化，激励措施可加速氢能应用。氢能广泛应用需要的第三个要素，就是提供税收优惠等激励措施，以此加速氢能经济的发展，并最大程度地降低初始成本。虽然电力和天然气公用事业越来越多地考虑增加对低碳氢的投资，但当前蓝氢和绿氢生产技术与设备的价格居高不下，仍然是限制氢能发展的主要障碍。

在美国，一个积极的进展来自国会立法，将首次为零碳氢和低碳氢能源生产提供税收抵免，以刺激氢能投资。此外，美国《国内税法》的第 45Q 节也有助于持续推动低碳氢能的发展。该法案为碳捕集和碳封存提供每吨最高 50 美元的税收抵免，新提案可能会将这一数字提高到每吨 85 美元。

美国国会同时也在致力于为氢能源行业以及碳捕集、利用和封存（CCUS）行业奠定基础。美国参众两院通过了《综合拨款法案》，该法案提出了氢能产业的关键税收优惠和规定，包括为氢能和燃料电池技术办公室提供 1.5 亿美元的拨款。

未来之路

要面对和解决迫在眉睫的全球气候危机，可持续能源扮演的角色至关重要，而我们需要立即采取行动。随着越来越多的组织为更好地达成全球气候目标而实施净零战略，氢能在这些战略中的地位也在日益提升。但这只是旅程的开始，通往净零的道路复杂而又漫长。氢能和碳捕集的作用及各种应用尚未被广泛了解或接受。

积极的一面是，氢这种物质非常容易获得，它是宇宙中储量最丰富的元素。我们只需要找出经济且高效地利用氢气的方法。令人鼓舞的是，当前世界正朝着这个方向发展，市场上已经有多种新技术可以为企业的可持续发展之路提供帮助。

霍尼韦尔总裁兼首席运营官
柯伟茂 (Vimal Kapur)

氢能产业发展初期的新机遇

近年来，全球各地气候急剧变化和自然灾害频发，为实现到 21 世纪末控制全球升温在 2°C 以内的目标，世界各国正全方位努力推动能源体系向低碳化、无碳化发展。同时，在“双碳”目标的推动下，化石能源的生产和利用面临更严格的碳排放约束，能源结构转型有望加速推进。

氢能作为一种可再生清洁高效二次能源，得益于资源丰富、来源广泛、燃烧热值高、清洁无污染、利用形式多样、可作为储能介质及安全性好等优点，将助力能源、交通、石化、钢铁等多个领域实现低碳化，正逐步成为全球能源转型发展的重要载体。

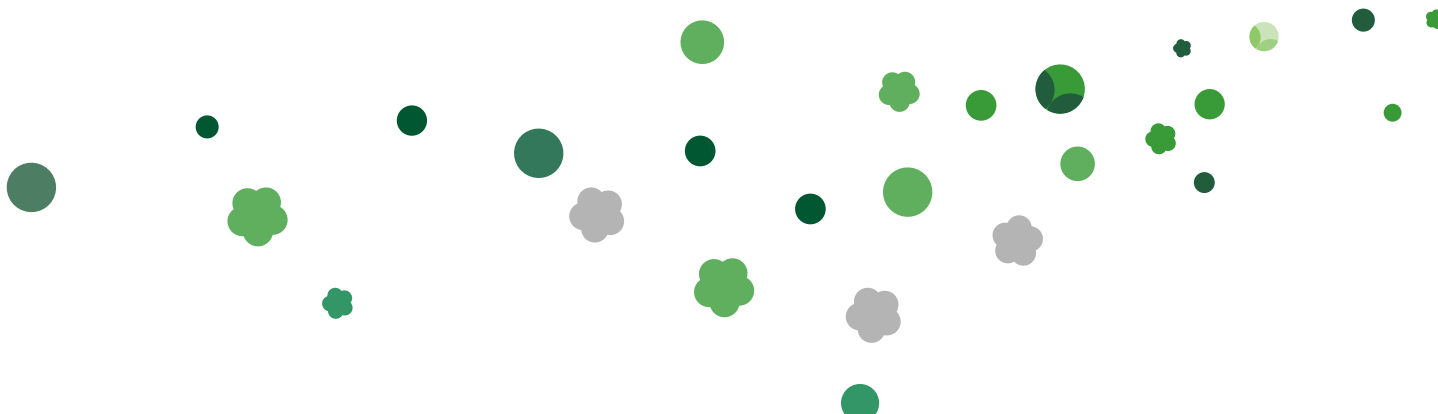
我国作为世界上最大的制氢国之一，年制氢产量约 3300 万吨（达到工业氢气质量标准的约 1200 万吨），氢能产业呈现积极发展态势。在我看来，在能源低碳转型进程中，氢能将在很多行业扮演减碳角色。具体来说，氢能产业链包括上游制氢（制备 - 存储 - 运输 - 加注），下游氢气作为能源的应用以及作为工业原料或燃料的应用三个关键领域。

从上游制氢来看，根据路线不同，可分为化石能源制氢、工业副产氢、电解水制氢以及其它新型制氢技术几种形式。我国要结合资源禀赋特点和产业布局，因地制宜选择制氢技术路线，在焦化、氯碱、丙烷脱氢等行业集聚地区优先利用工业副产氢，在风光水电资源丰富地区开展可再生能源制氢示范。从下游中的能源应用来看，在推进氢能在交通领域的示范作用外，可以积极探索氢能在工业生产中作为高品质热源的应用。

从下游中的工业原料应用来看，要逐步探索工业领域的替代应用，不断提升氢能利用经济性，拓展清洁低碳氢能在化工行业替代的应用空间。开展以氢作为还原剂的氢冶金技术应用，扩大工业领域氢能替代化石能源应用规模，积极引导合成氨、合成甲醇、炼化、煤制油气等行业由高碳工艺向低碳工艺转变，促进高能耗行业绿色低碳发展。

当前，中国氢能产业正处于快速发展初期。未来，随着顶层设计和统筹谋划的进一步明确，技术研发和产业资本的持续投入，我国氢能产业将迎来快速发展的新机遇。我们有理由相信，在中国“双碳”目标和能源转型的背景下，氢能将会像光伏、风电一样迅猛发展，为全球和中国的社会和经济注入绿色新动能，引领新浪潮。

北京亿华通科技有限公司董事长兼总经理
张国强



目 录

序言	1
未来燃料：如何建设一个真实的氢能经济	1
氢能产业发展初期的新机遇	3
1 前言	5
1.1 氢能是实现双碳目标的重要选择	5
1.2 氢能产业链的重要环节	6
2 氢气制取过程中的关键技术	7
2.1 灰氢制造技术	8
2.2 蓝氢制造技术	10
2.3 绿氢制造技术	11
3 氢作为能源的应用技术	12
3.1 氢作为能源的行业应用	12
3.2 纯氢 / 掺氢燃烧的关键技术	13
4 氢作为原料或燃料的应用技术	15
4.1 氢气在炼化生产中的应用	16
4.2 氢气在甲醇生产中的应用	18
4.3 氢气在合成氨生产中的应用	20
4.4 氢气在钢铁冶炼中的应用	20
4.5 小结	21

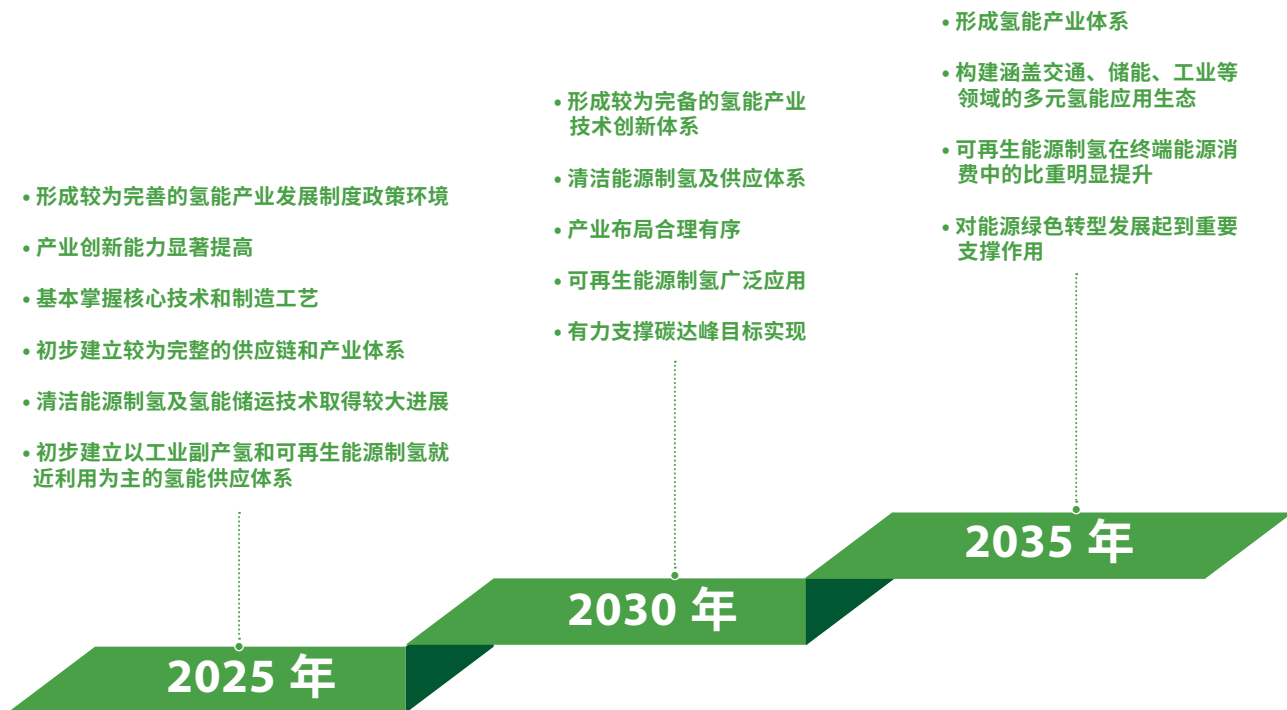
1 前言

1.1 氢能是实现双碳目标的重要选择

氢能（氢的能源生产和利用）是应对气候变化、建设脱碳社会的重要产业方向，受到世界各国的广泛关注。欧、美、日、韩等发达国家和地区纷纷制定氢能路线图，加快推进氢能产业的布局。氢能产业也是我国能源战略布局的重要部分，相关政策相继出台，就在2022年3月，国家发改委、国家能源局联合印发了《氢能产业发展中长期规划（2021-2035年）》（以下简称《规划》）。

《规划》指出，要持续推进绿色低碳氢能制取、储存、运输和应用等各环节关键核心技术研发，结合资源禀赋特点和产业布局，因地制宜选择制氢技术路线，逐步推动构建清洁化、低碳化、低成本的多元制氢体系。

《规划》明确，到2025年，要形成较为完善的氢能产业发展制度政策环境，产业创新能力显著提高，基本掌握核心技术和制造工艺，初步建立较为完整的供应链和产业体系，清洁能源制氢及氢能储运技术取得较大进展，初步建立以工业副产氢和可再生能源制氢就近利用为主的氢能供应体系；到2030年，形成较为完备的氢能产业技术创新体系、清洁能源制氢及供应体系，产业布局合理有序，可再生能源制氢广泛应用，有力支撑碳达峰目标实现；到2035年，形成氢能产业体系，构建涵盖交通、储能、工业等领域的多元氢能应用生态。可再生能源制氢在终端能源消费中的比重明显提升，对能源绿色转型发展起到重要支撑作用¹。



1 《氢能产业发展中长期规划（2021-2035年）》

1.2 氢能产业链的重要环节

根据石油和化学工业规划院的统计，当前我国氢气产能为 4000 万吨，产量为 3300 万吨，为全球最大的产氢国²。我国氢气生产利用主要在以石化化工行业为主的工业领域，从用途来看，以“原料”利用为主，用于生产甲醇、合成氨等化工产品，“燃料”利用为辅，少量作为工业燃料使用。

根据中国氢能联盟预测，在 2030 年碳达峰愿景下，我国氢气的年产量预期达 3715 万吨，在终端能源消费中占比约为 5%。在 2060 年碳中和愿景下，我国氢气的年需求量将增至 1.3 亿吨左右，在终端能源消费中占比约为 20%。其中，工业领域用氢占比仍然最大，占氢总需求量 60%²。

氢能是“双碳”目标下的必然选择，从氢能产业链上来看，包括上游制氢，中游存储、输送，下游用氢三个关键领域。

上游制氢根据路线不同，可分为化石能源制氢、工业副

产氢、电解水制氢以及其它新型制氢技术等几种形式。

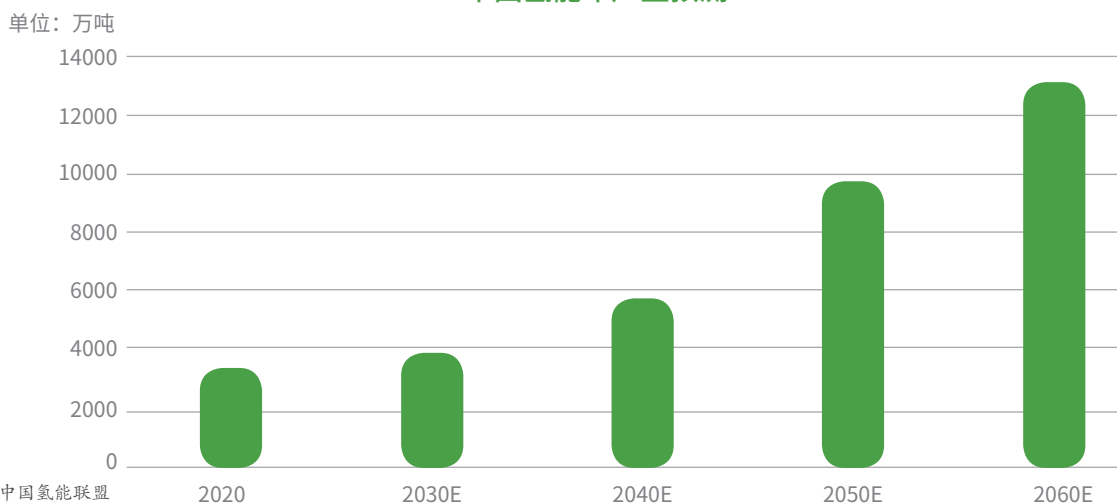
中游氢气存储和输送主要涉及高压储氢罐、高压管式运输车辆、高效氢压机、氢气或掺氢输送管线及计量仪表、掺氢后端气体分离等环节。

下游氢气的应用前景广阔。氢气作为一种高效低碳的二次能源，可应用于汽车燃料电池动力系统替代传统燃油动力，节约石油消费，也可以将氢气直接燃烧或者掺入天然气燃烧来降低燃烧过程中的碳排放。

以氢气替代一氧化碳（CO）作为还原剂的氢冶金技术可以节省焦炭的使用、减少因原料带来的二氧化碳（CO₂）排放。用“绿氢”替代“灰氢”作为化学品生产原料应用可以替代化石原料制氢，以降低化工生产环节的碳排放量，促进合成氨、合成甲醇、炼化、煤制烯烃等行业由高碳工艺向低碳工艺转变，作为清洁的工业原料，实现工业的深度脱碳。



中国氢能年产量预测



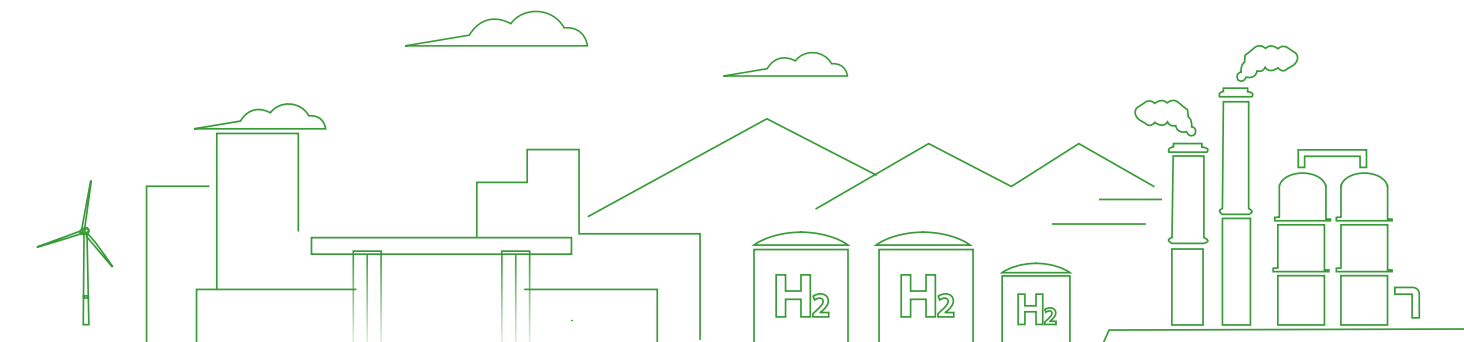
² 《2022 年中国氢能行业技术发展洞察报告》

2 氢气制取过程中的关键技术

根据氢气生产来源和生产过程中的碳排放情况，一般可将氢能分为灰氢、蓝氢、绿氢。“灰氢”是指利用化石燃料石油、天然气和煤制取氢气，制氢成本较低但碳排放量大；“蓝氢”是指使用化石燃料制氢的同时，配合碳捕捉和碳封存技术，碳排放强度相对较低但捕集成本较高；“绿氢”是利用风电、水电、太阳能、核电等可再生能源电解制氢，制氢

过程几乎没有碳排放，但成本较高。

目前，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品制氢；三是电解水制氢。



2.1 灰氢制造技术

(1) 煤制氢

煤制氢的本质是以煤中的碳取代水中的氢，最终生成氢气和 CO_2 ，其成本低，技术成熟，运用广泛。以煤气化为例，其工艺流程是将煤炭经高温气化形成合成气，然后通过水煤气变换反应进一步将合成气中的 CO 与水反应，生成氢气与 CO_2 ，最后进行混合气体净化、分离、

氢气提纯、尾气处理等工序，最终得到高纯度氢气。由于煤中含有硫等杂质，由气化和变换反应生成的氢气需要采用脱硫和脱碳技术，后用变压吸附（PSA）纯化技术制成高纯度的氢气。脱硫和脱碳一般采用低温甲醇洗或者霍尼韦尔的 Selexol™ 工艺技术。

(2) 天然气制氢

天然气水蒸气重整制氢（SMR）目前为国内外普遍采用的天然气制氢工艺路线，和煤制氢相比，用天然气制氢产量高、加工成本较低，排放的温室气体少。在美国和

中东等地，大部分专有制氢装置采用天然气制氢，因此天然气成为国外较普遍的制氢方法，但在中国，天然气价格相对较高，因此中国大多数制氢厂通过煤气化制氢。

(3) 工业副产氢

焦炉煤气是炼焦的副产品，氢气含量超过 50%。过去焦炉煤气的处理方法是“一烧了之”，而在“碳中和”背景下，净化和回收焦炉煤气中的氢气可以在中短期提供一个碳减排的路径。

霍尼韦尔提出了一个新的焦炉煤气制造氢气的技术，

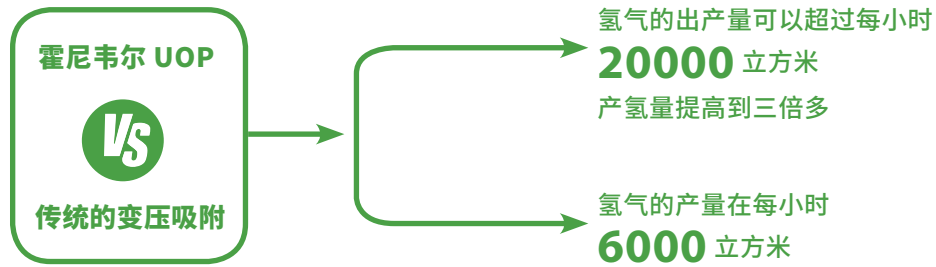
与用变压吸附从焦炉煤气中提取氢气相比，该技术的产氢量大大提高。以一个国内大型钢铁企业提供的焦炉煤气流量和成分为例，每小时 18000 立方米的焦炉煤气中含有 58% 的氢气，如果采用传统的变压吸附提取氢气，氢气的产量在每小时 6000 立方米，采用霍尼韦尔 UOP 新的焦炉煤气制氢技术，同样的焦炉煤气，





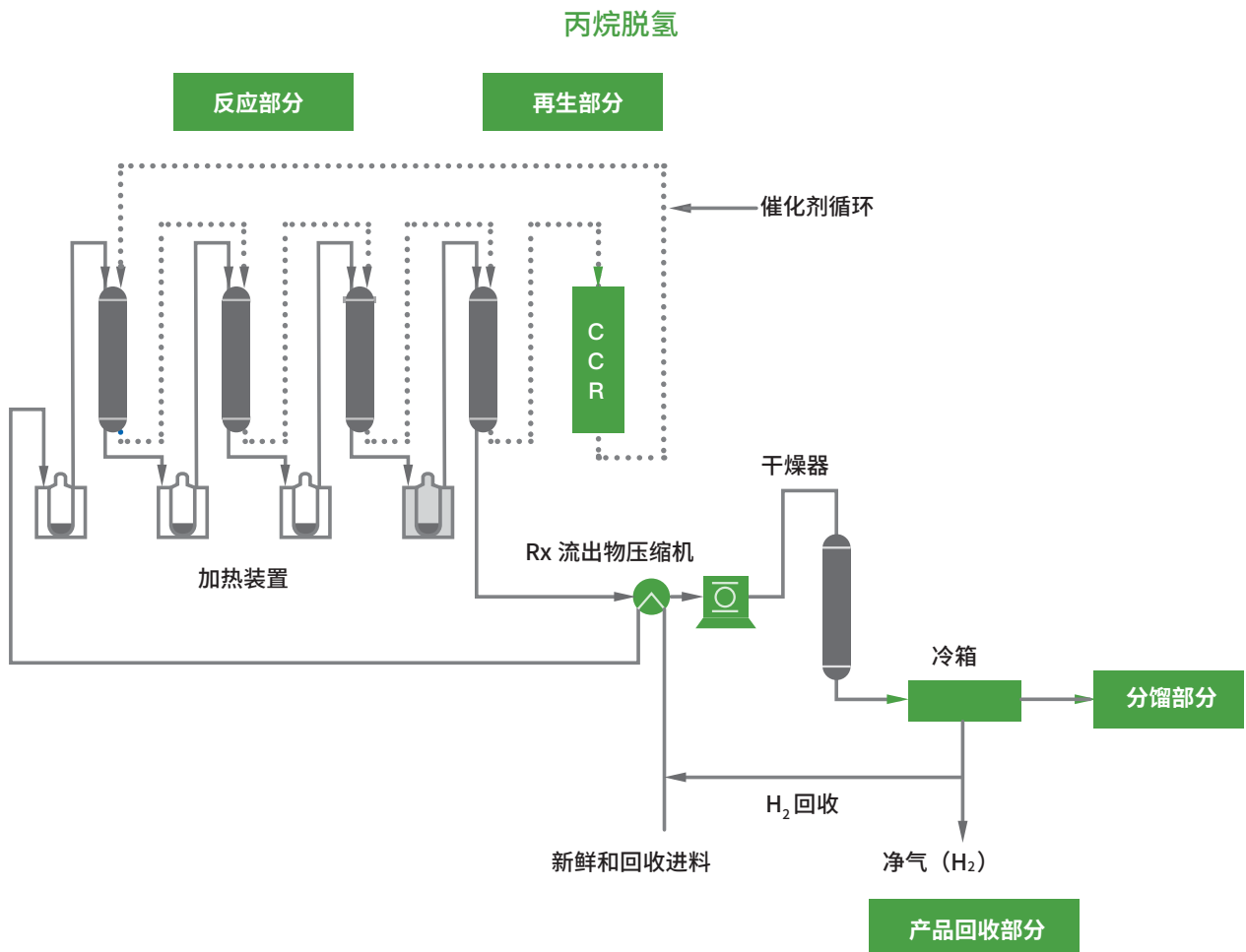
其氢气的出产量可以超过每小时 20000 立方米，产氢量提高到三倍多。同时，这个新的制氢技术也可以与

碳捕集技术相结合来实施 CO₂ 的捕集与封存，由此可以更进一步减少碳排放。



丙烷脱氢工艺是丙烷在一定范围的压力和温度条件下，通过合适的催化剂作用发生脱氢反应，从中获取丙烯和氢气。霍尼韦尔的烷烃脱氢技术就是典型代表——霍尼韦尔有丙烷脱氢制丙烯、丁烷脱氢制丁烯并进一步脱氢生产丁二烯的技术。丙烷脱氢制丙烯是目前市场上最主要的定向丙烯生产技术。其中霍尼韦尔 Oleflex™ 丙烷脱氢技术是目前行业前沿水平的丙

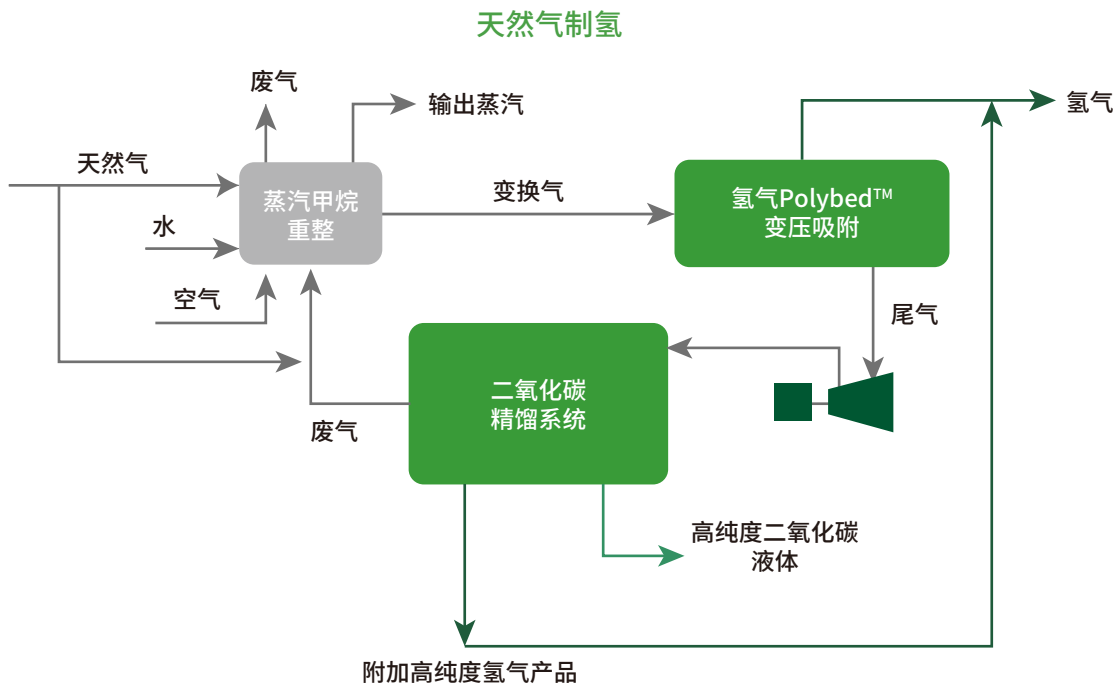
烷脱氢工艺，因为采用基于环保高效的铂系催化剂的移动床工艺，并配有催化剂连续再生系统（CCR），所以霍尼韦尔 Oleflex™ 工艺技术具有更低的丙烷单耗，更低的生焦量，也就是更低的 CO₂ 排放、更低的操作成本和更高的在线率。同时，霍尼韦尔 Oleflex™ 工艺也可以用于 C₄ 的单独脱氢，或者 C₃/C₄ 的混合脱氢。



2.2 蓝氢制造技术

煤制氢和天然气制氢是目前最经济、也是最为广泛应用的制氢技术。煤制氢一般包括煤气化、净化、CO 变换以及氢气提纯等环节。煤制氢在煤气化及 CO 变换过程中会释放大量的 CO₂。未集成 CCUS（碳捕集、利用与封存）技术的煤制氢的碳强度约为 19 kg CO₂/kg H₂。天然气制氢一般包括原料气处理、蒸汽转化、CO

变换和氢气提纯等环节。天然气制氢在蒸汽转化及 CO 变换环节会释放大量的 CO₂，未集成 CCUS 技术的天然气制氢的碳强度约为 9.5 kg CO₂/kg H₂。因此，在“双碳”的背景之下，煤制氢和天然气制氢因其较高的碳强度，并不符合低碳的发展方向。



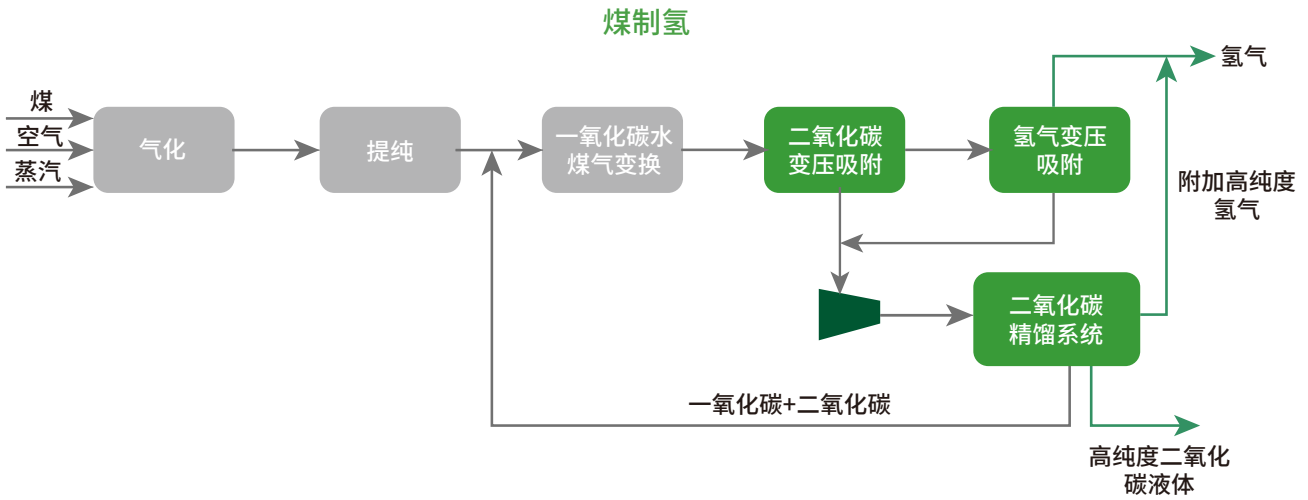
“蓝氢”是在灰氢的基础上结合 CCUS 技术获取的氢气。蓝氢的制取通过 CCUS 技术捕获化石能源制氢过程中排放的 CO₂ 从而在理论上减少碳排放水平，是氢气制取由灰氢向绿氢发展的过渡环节。集成 CCUS 技术的煤制氢的碳强度可低至 3 kg CO₂/kg H₂，集成 CCUS 技术的天然气制氢的碳强度则可低至 1 kg CO₂/kg H₂。煤炭是我国的战略资源，作为原料使用的煤炭不直接计算碳排放。因此，伴随 CCUS 技术的逐步成熟以及成本的下降，煤制氢在中国将具有相对的优势和持续发展的潜力。

霍尼韦尔发明了一项煤制氢以及天然气制氢的蓝氢生产工艺，这个新工艺结合 PSA 和液体 CO₂ 分离技术将现有的工艺进行优化。它有两点特点：其一，增加氢气的总回收率；其二，降低 CO₂ 增压的运行成本。由于新工艺产生的 CO₂ 是液体 CO₂，因此当需要高压



CO₂（一般封存和利用 CO₂ 都需要高压）时，可以通过泵输送，而不是压缩机，这样可以节省大量的压缩能耗。在目前绿氢成本高企的情况下，煤制氢以及天然气制氢的蓝氢是一个相对低成本的 CO₂ 减排工艺技术。霍尼韦尔发明的这项天然气制氢的蓝氢工艺将在美国的印第安纳州进行产业化，每年可捕集和封存 165 万吨 CO₂，是截至目前已知世界上最大的单体装置之一³。

3 2021 年 6 月 16 日霍尼韦尔官方新闻稿《美国的最大碳捕集和封存项目之一采用霍尼韦尔技术》
https://www.honeywell.com.cn/cn/zh/news-events/newsroom/news/2021/06/news20210616_2



2.3 绿氢制造技术

未来，绿氢将逐步对灰氢和蓝氢进行替代。“绿氢”技术是通过光伏、风电等可再生能源发电后产生电流去电解水，生产氢气。该技术在无排放 CO₂ 的同时产生大量的氢气和氧气。根据中国氢能联盟对未来中国氢气供给结构的预测，中短期来看，中国氢气来源仍以化石能源制氢为主，以工业副产氢作为补充，可再生能源制氢的占比将逐年升高。预计到 2050 年，约 70% 左右的氢气由可再生能源电解水制取，其余 20% 由化石能源制取，10% 由生物制氢等其它技术供给⁴。

可再生能源制氢的关键核心技术是高效的电解水制氢技术。电解水制氢就是在直流电的作用下，通过电化学过程将水分子解离为氢气与氧气，分别在阴、阳两极析出。电解水方法根据使用电解质的不同，分为碱性水电解（ALK）、质子交换膜电解（PEM）、固体

氧化物电解（SOEC）、碱性阴离子交换膜电解（AEM）四种。四者的基本原理是一致的，即在氧化还原反应过程中，阻止电子的自由交换，而将电荷转移过程分解为外电路的电子传递和内电路的离子传递，从而实现氢气的产生和利用。

在电解水制氢技术上，霍尼韦尔利用其膜制造和催化剂生产领域的优势，正在开发高效的质子膜、阴离子膜、催化剂和膜电极等。霍尼韦尔新技术专注于质子交换膜电解（PEM）和碱性阴离子交换膜电解（AEM）的催化剂涂层膜（CCMs）。霍尼韦尔最新的 CCMs 已在实验室测试中显示，通过突破性的专有高离子通量膜和高活性催化剂，可实现更高的电解槽效率和更高的电流密度，预计这将使电解槽成本降低 25%。



4 《2022-2028 年中国氢能行业市场发展调研及未来前景规划报告》

3 氢作为能源的应用技术

氢能作为一种清洁、高效、安全、可持续的二次能源，其热值可达 142 KJ/g，重量能量密度约是天然气的 2.5

倍、石油的 3 倍、煤炭的 4.5 倍，意味着消耗相同质量的天然气、石油、煤炭和氢气，氢气所提供的能量最大。

3.1 氢作为能源的行业应用

在交通运输领域，氢燃料电池是氢能高效利用的重要途径。氢燃料电池原理是氢与氧结合生成水的同时将化学能转化为电能和热能，具有很高的理论经济性。目前来看，随着国家氢能产业的推进和技术的成熟，交通领域应用的商业化进程正在加速，且交通运输领域成长性很强。根据中汽协发布的数据，

2021 年我国燃料电池汽车产销量分别为 1777 辆和 1586 辆，同比分别增长 48% 和 35%⁵。据 2021 年初发布的《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》预计，2025 年我国氢燃料电池汽车保有量将达到 10 万辆左右，将成为新能源汽车的重要组成部分。

2021 年我国燃料电池汽车产销量分别为

1777 辆
1586 辆



同比分别增长

48%
35% ↑

2025 年我国氢燃料电池汽车保有量将达到

10 万辆左右



氢可作为能源应用于交通行业，也广泛应用于工业燃烧降低碳排放。在工业领域，热能的主要来源是电加热和燃料燃烧加热两种形式，虽然电能的使用在不断上升，但是在需要高强度供热的工业应用领域，利用燃烧获得热能的方式在今后相当长的时间内仍无可替代，而且相当一部分的电能也需通过燃烧产生。目前燃烧所用的燃料主要是以碳氢化合物为主体的化石燃料，这也是碳排放的主要来源之一。燃烧过程中使用氢替代部分

化石燃料是有效降低碳排放的手段。

在发电领域，我国已有天然气掺氢的商用项目落地。今年初，国家电投集团宣布，其首个燃气轮机掺氢燃烧示范项目正式投运，这是全球范围内首个在天然气商业机组中进行掺氢燃烧的联合循环、热电联供示范项目，改造后的机组具备了纯天然气和天然气掺氢两种运行模式的兼容能力⁶。

⁵ <https://www.163.com/dy/article/GTHISSTM0519EFR3.html>

⁶ http://www.cnenenergynews.cn/zhiku/2022/05/19/detail_20220519123924.html



氢气燃烧没有碳排放，只有水蒸气，是可再生的能源，但是这个转变需要时间，是一个逐步的过程。在找到经济有效的大规模制氢技术之前，我们可以采取逐步取代的方式，即在现有的燃气中掺混部分氢气。氢与

天然气混合，或作为纯氢可在燃气轮机、加热器、锅炉或发电等其它能源应用中燃烧，但也不是简单的“拿来即用”，仍需要解决氢燃烧设备及附件的兼容性问题

和燃烧过程中的附带污染物排放问题。

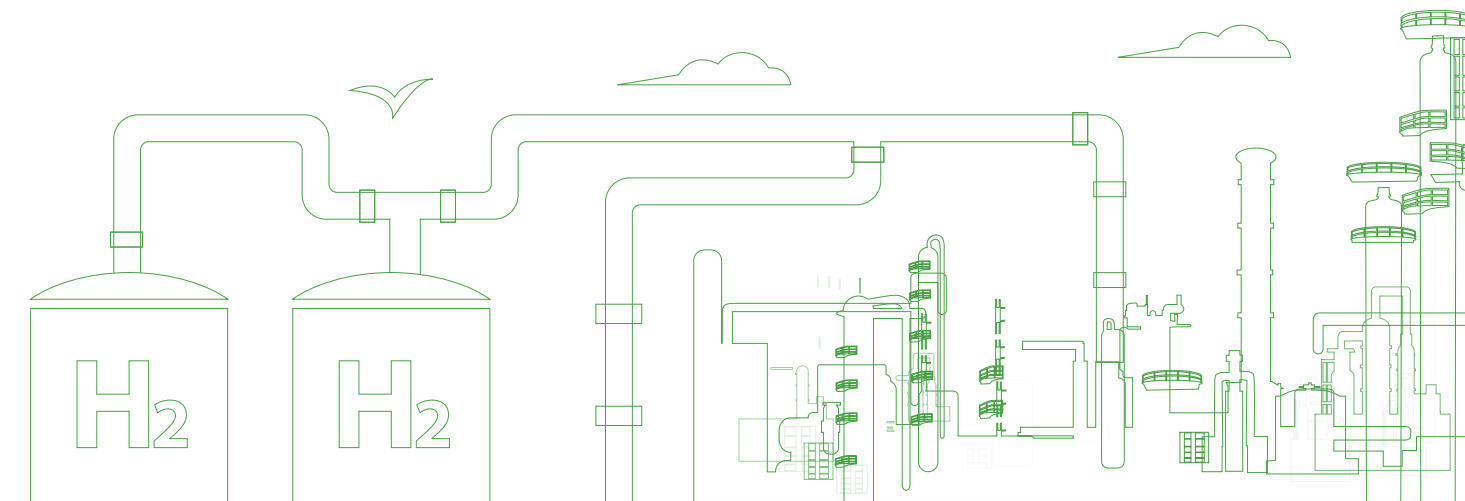
3.2 纯氢 / 掺氢燃烧的关键技术

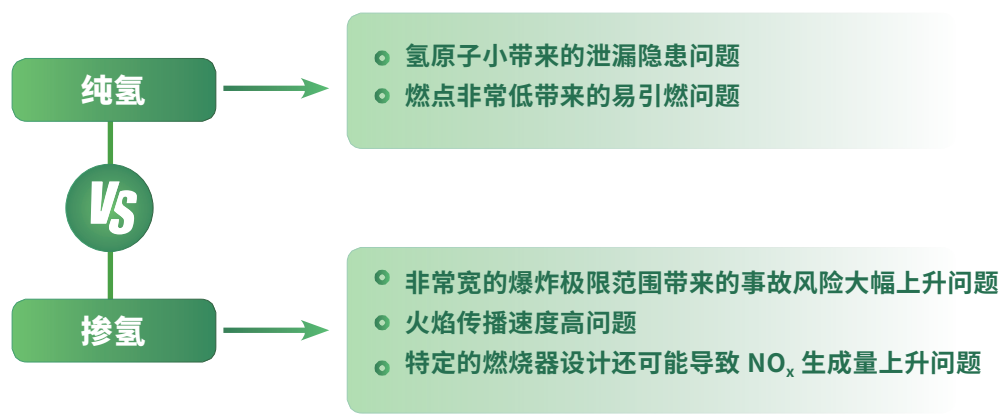
相较于天然气，氢气具有更低的华白数（Wobbe），因此天然气 - 氢气混合物的热值会随着掺入氢气比例的增加而显著下降，这就意味着在相同的工况下需要提高燃气流量才能获得相同的热容量。由于氢气的密度较低，华白（Wobbe）指数的下降幅度反而要小得多，取决于掺混比例，混合燃气的压力需提高 10%~50% 才能获得相同的热容量。氢气的层流火焰传播速度明显高于天然气，然而天然气掺氢后，很多燃烧器上的可见火焰长度变化并不大。但是高火焰传播速度可能会引起共振并产生啸叫。

随着掺氢量的增加，绝热燃烧温度（亦称“火焰温度”）会随之升高，从而会加剧产生氮氧化物（NO_x），尤其

是当掺氢量 ≥ 50% 的时候，NO_x 会大幅上升。因此，让使用氢燃料的燃烧器实现超低 NO_x 排放是一个重要的课题。

鉴于氢气的特性，燃烧应用的控制设备及燃烧器需要与之匹配。如，氢原子很小，会带来泄漏隐患；氢的燃点非常低，很小的静电火花就可能引起火灾；氢具有非常宽的爆炸极限范围（LEL-UEL，4%~77%），事故风险因此大幅上升；其火焰传播速度高（可达 3.46m/s），可能导致火焰上移，造成燃烧器局部高温、回火；此外，特定的燃烧器设计还可能导致 NO_x 生成量上升。这些都对控制设备及燃烧系统的设计、制造，及现场的施工和调试有更高的要求，以确保设备的安全稳定运行。

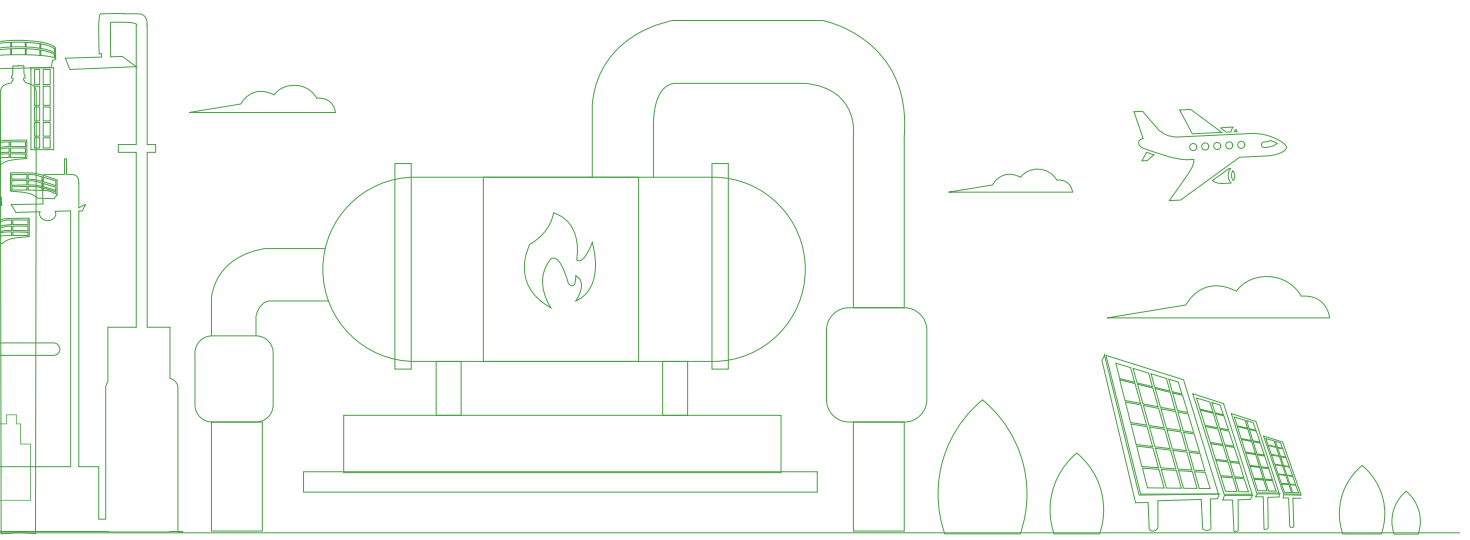




设计一个可以实现掺混比例可调并且可以精确控制空燃比的燃烧控制系统，需要对系统主要组成部件的特性有深入了解，并且有深厚的设计和应用的实战经验积累。通常来说，若在天然气中掺入 10%~20% 的氢气，通常只需调整燃烧器，尤其对于能精确调节空燃比的低 NO_x 的解决方案，调整会更简单。若掺氢量不断变化，则须额外添加空燃比控制部件。若掺氢量较高，则必须选择适用的燃烧器类型。

霍尼韦尔热能解决方案和 UOP 凯勒特作为全球领先的燃烧解决方案提供者、工业加热燃烧设备制造和

供应商，一直都在积极应对氢燃料的到来。霍尼韦尔研发并测试了大量支持氢燃料的工业燃烧器产品组合，可提供完整的燃烧系统，从燃气进口的手动阀门到最终的燃烧器，包括其中的调压器、流量计、自动切断阀、压力开关、流量调节阀和燃烧器。对于天然气燃烧设备，如进行掺氢燃烧，其燃料处理系统、阀门和管道以及燃烧室硬件需要进行更改，以满足其安全性。霍尼韦尔对系统中的每个组成部分，结合技术分析，实验室试验和 CFD 计算分析，进行了氢燃料适用性评估，可有效保障氢气燃烧设备的安全启停和控制。



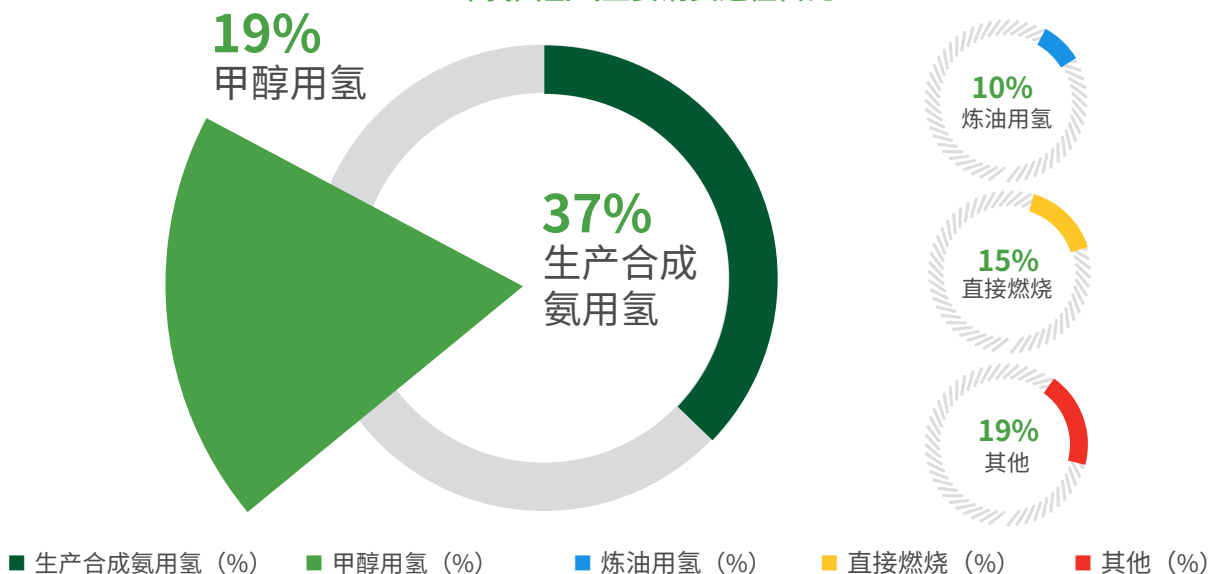
4 氢作为原料或燃料的应用技术

氢气不仅是一种清洁能源，也是一种十分重要的工业原料。公开的数据显示，目前的氢能在工业领域的消费占比为，生产合成氨用氢占比为 37%，甲醇用氢占比为 19%、炼油用氢占比为 10%，直接燃烧占比为 15%，其它领域占比为 19%⁷。

在化学工业中，氢气是合成氨、甲醇等的主要原料之一。在炼油工业中，氢气被广泛用于对石脑油、粗柴油、燃料油和重油的脱硫、石油炼制、催化裂化，以及不

饱和烃等的加氢精制，以提高油品的质量；尼龙塑料、农药、油脂化学和精细化学品加工中都需要加入氢气来生产相应产品；在冶金工业中，有色金属如：镍、钛、钨、钼等的生产和加工中，氢气被用于作为还原剂和保护气；在硅钢片、磁性材料生产中，也需要高纯氢气作保护气，以提高磁性和稳定性；在精密合金退火和粉末冶金生产中，薄板和带钢轧制中常用氢-氮做保护气。

2020 年我国氢气主要消费途径占比



数据来源：中国煤炭加工利用协会

从氢气在工业领域的消费来看，中国绝大部分的氢气都由工业过程消耗掉了，其中尤以炼化和化工行业（即合成氨和甲醇工业）的氢气消耗最多，占比达到 66%。随着人们生活水平的不断提高，化工与材料的需求量还会增加，因此化工行业的规模还有进一步扩大的可能，其用氢量也会相应增加，但是增加量比较有限。然而，氢气作为能源的需求会大大增加。虽然

炼化与化工行业的用氢量增加有限，但目前这些行业所用氢气绝大部分是灰氢，制氢过程产生大量 CO₂ 排放，而在“双碳”目标下，灰氢的应用会逐步降低，因此清洁氢气，如绿氢和蓝氢的生产与应用，在炼化与化工领域将有很广阔的前景。此外，在“双碳”目标的要求下，氢气在钢铁、冶金领域的需求也会大大增加。

7 平安证券 - 制氢篇：副产氢已占先机，绿氢有望开新局

4.1 氢气在炼化生产中的应用

炼油厂的主要任务就是从原油中提炼出汽柴油、航煤等燃料油。现代炼油厂增加了石化产品的生产，逐渐将炼油厂转化为炼化一体化工厂。氢气是炼油厂的宝贵资源，炼厂需要大量氢气来降低汽油柴油中的硫和氮含量，同时在加氢裂化中加大对渣油、重油的转化，以生产更多的汽柴油。随着对炼油产品的含硫量要求越来越严苛，炼油厂对氢的需求将会不断增加。

目前中国炼油厂的氢气主要有两个来源，炼油厂副产氢气和专门的制氢装置生产的氢气。炼油厂的副产氢气主要来自催化重整装置生产高辛烷值汽油的工艺，以及催化裂化工艺。重整装置生产的氢气浓度高，约占原油总量的 0.5%~1%⁸，容易回收，因此几乎每一个炼油厂都将重整装置的氢气回收并加以利用。催化裂化装置出来的氢气，其浓度比较低，并且含氢气中含有一些难以脱除的杂质，因此不是所有

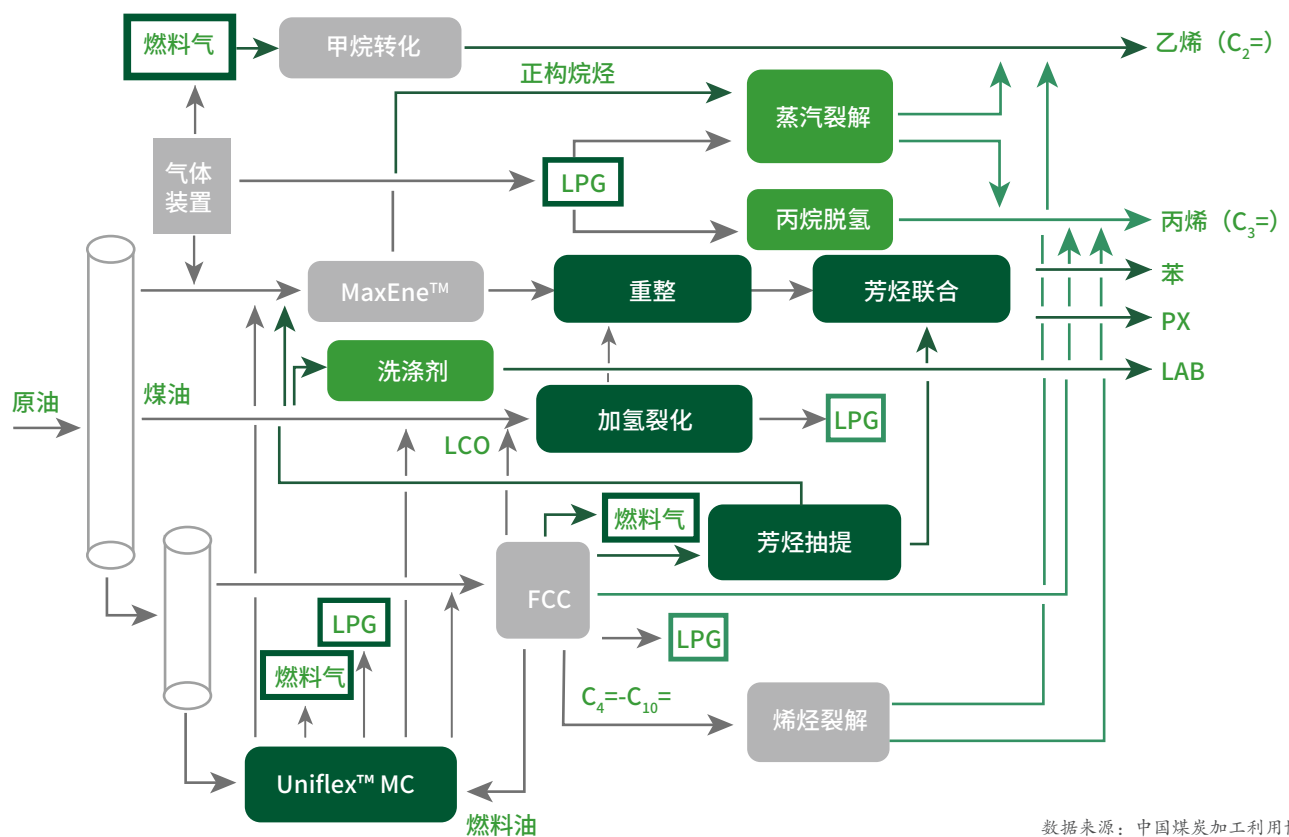
炼油厂主要环节对氢气的需求

过程	耗氢量 (对原料) %
直馏石脑油加氢精制	0.1
直馏煤油加氢精制	0.3
催化裂化汽油加氢脱硫	0.2-0.5
直馏柴油加氢精制	0.5-0.7
焦化汽柴油加氢精制	1.0-1.5
催化裂化柴油加氢精制	0.7-1.0
柴油深度加氢脱硫、脱芳烃	2.0-3.2
减压蜡油加氢精制	2.0-3.0
常压渣油加氢脱硫	1.2-1.5
减压渣油加氢脱硫	1.5-2.0

*《炼油厂总工艺流程设计》

的催化裂化装置生产的氢气都得到回收，还有的被当成燃料气燃烧生热。

未来炼厂流程工艺



数据来源：中国煤炭加工利用协会

8 《煤制氢与天然气制氢成本比较分析及建议》，《石油炼制与化工》2018年1月第49卷第1期

重整装置是各炼厂最重要的生产高辛烷值汽油的生产装置之一，它在生产高辛烷值汽油的同时，生产了大量的副产氢气，重整副产氢气约占原油总量的0.5%~1%，是大炼化中的主要氢气来源。除了炼厂回收副产氢以制氢外，国内炼油企业一般都设有专有制氢装置。制氢的原料主要有两种，即天然气和煤。天然气通过蒸汽重整制氢，而煤通过煤气化来制氢。正如前面章节所说，需要在灰氢制取的过程中增加CCUS技术的应用，才能减少碳排放。

许多国家已宣布未来将禁止生产化石燃油汽车，成品油需求在碳达峰后将逐步减少。这些年，我国汽油产量增速明显放缓，根据国家统计局发布的数据，柴油产量自2017年后开始下降。与此同时，世界各国经济不断发展，人民生活水平的不断提高促进了石化产品和有机材料需求的不断增长。因此，炼厂迫切需要转型，由以生产汽油为主转型为以生产石化产品为主，甚至完全生产石化产品。

石化产品原料的轻质化

美国页岩气革命的成功为世界带来了大量的轻烃原料，从而催生了新的工艺技术与路线。以丙烯为例，在页岩气革命之前，丙烯几乎都通过石脑油裂解来生产，它是乙烯生产的副产物。页岩气革命带来相对廉价的丙烷，因此丙烷脱氢制丙烯呈爆发式增长。根据目前世界上丙烷脱氢装置的产能分布，可以看到中国处于世界领先地位⁹。此外，大量乙烷也被应用到蒸汽裂解制乙烯的工艺过程中。相比于石脑油制乙烯，乙烷制乙烯的产率高、成本低，具有很强竞争力。轻质化趋势将改变炼化企业氢气来源，当烷烃的分子量越小时，

它的氢/碳原子比越高，因此脱氢生产烯烃可以产生大量高浓度、易于回收的氢气。轻烃化的一个重要影响就是帮助炼化企业降低对外部氢气的依赖，以及减少专用制氢装置的需求。除乙烷和丙烷外，世界上天然气的储量按能量当量比原油要高，因此也可以从天然气来制取石化产品。比如，天然气制乙烯的工艺就是目前正在开发的工艺技术¹⁰，相比于乙烯的氢/碳原子比为2，甲烷的氢/碳原子比是4，由甲烷来生产乙烯可以释出大量氢气。

丙烷脱氢装置产能分布



炼油到石化生产的转化

未来炼化企业的一个重要转型就是由生产汽柴油转向生产石化产品，最终到完全生产石化产品。炼厂主要负责三烯和三苯的生产，如果一个炼厂完全只生产石化产品，就可能产生大量副产氢气。从化学原理出发，原油中的氢/碳原子比例为2左右，而烯烃的氢/碳原子比也是2，芳烃的氢/碳原子比则是1（苯）、8/7（甲苯）

和5/4（二甲苯），所以如果将原油完全用于生产烯烃，碳、氢能够平衡；如果生产芳烃，则原油中的氢有富余。由于原油脱硫、脱氮需要氢气，裂解也需要氢气，未来的炼厂根据烯烃和芳烃的产品比例就可以在氢气上做到平衡，而如果多用轻质原料来生产烯烃，则炼厂还有可能由于氢气富余而实现氢气出口。

⁹ 数据来源《中万宏源 - 烯烃行业展望深度报告》

¹⁰ Anjar Ray, Amar Anumakonda, 《第26章——从生物质燃料中生产绿色液体碳氢燃料》，学术出版社，587-608, 2011

低浓度氢气的回收

对于高浓度的氢气——如从催化重整和烷烃脱氢（丙烷脱氢产丙烯）工艺出来的副产氢，炼厂一般已经做到回收，但是对于低浓度的副产氢气，如催化裂化、

延迟焦化和蒸汽裂解的副产氢气，今后也可以采用变压吸附（PSA）、膜分离、深冷等工艺或者工艺结合起来提取，从而回收。

总之，炼化企业由于脱硫、脱氮、裂解等工艺需要大量的氢气，目前氢气的来源为炼厂副产氢和由天然气或者煤制取的氢气。随着炼厂转型生产更多的石化产品，对氢气需求的影响也会趋向复杂。首先，重油的裂解和利用需要更多的氢气，但炼厂原料的轻质化，

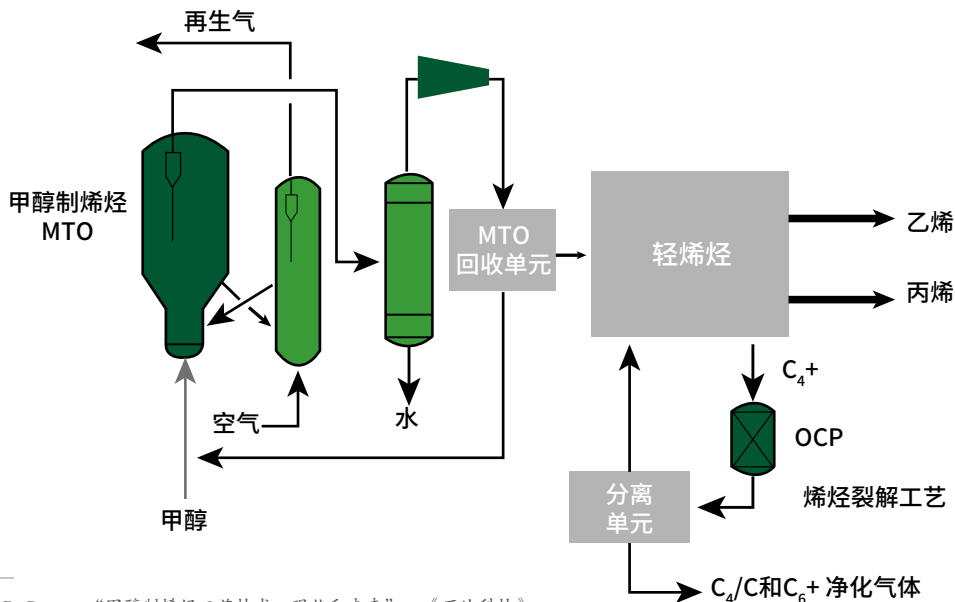
以及炼厂三烯、三苯产量的增加也会生产更多的副产氢，从而降低外部对氢气需求的依赖。从长远看，炼化如果转型成完全生产石化产品，并带入轻质烷烃如乙烷和丙烷等，则可实现氢气自给自足，甚至能够对外销售富余的氢气。

4.2 氢气在甲醇生产中的应用

霍尼韦尔于上个世纪 80 年代发明了甲醇制烯烃的技术（MTO）¹¹，打开了由甲醇生产化学品的路径，甲醇变成了一个非常重要的有机化工的基本原料。后来霍尼韦尔又在 MTO 的基础上，与法国的道达尔一起发明

了烯烃裂解技术（OCP）¹²，MTO 结合 OCP 技术可以提高由甲醇制烯烃的产率和经济性，因此，甲醇的应用得到更进一步的推广。

霍尼韦尔甲醇制烯烃与烯烃裂解联合流程工艺

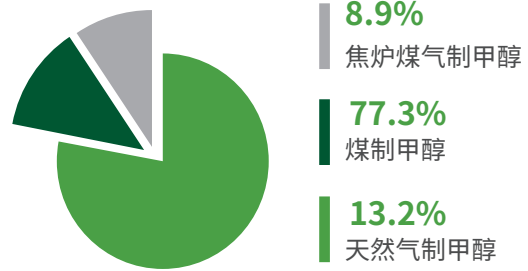


11 Makarand R.Gogate, “甲醇制烯烃工艺技术：现状和未来”，《石油科技》，37（5），559-565,2019
 12 “霍尼韦尔 UOP 和道达尔化工成功展示 MTO 生产塑料”，绿色汽车大会，www.greencarcongress.com/2010/07/mto-20100706.html

国际上甲醇大部分通过天然气蒸汽重整，变换反应和甲醇合成来生产。众所周知，我国能源国情为“富煤、贫油、少气”，因此煤制甲醇成为我国甲醇生产最主要的生产方式，煤制甲醇产能占全国总产能的 77.3%¹³，此外，我国还有少量天然气和焦炉煤气制甲醇。

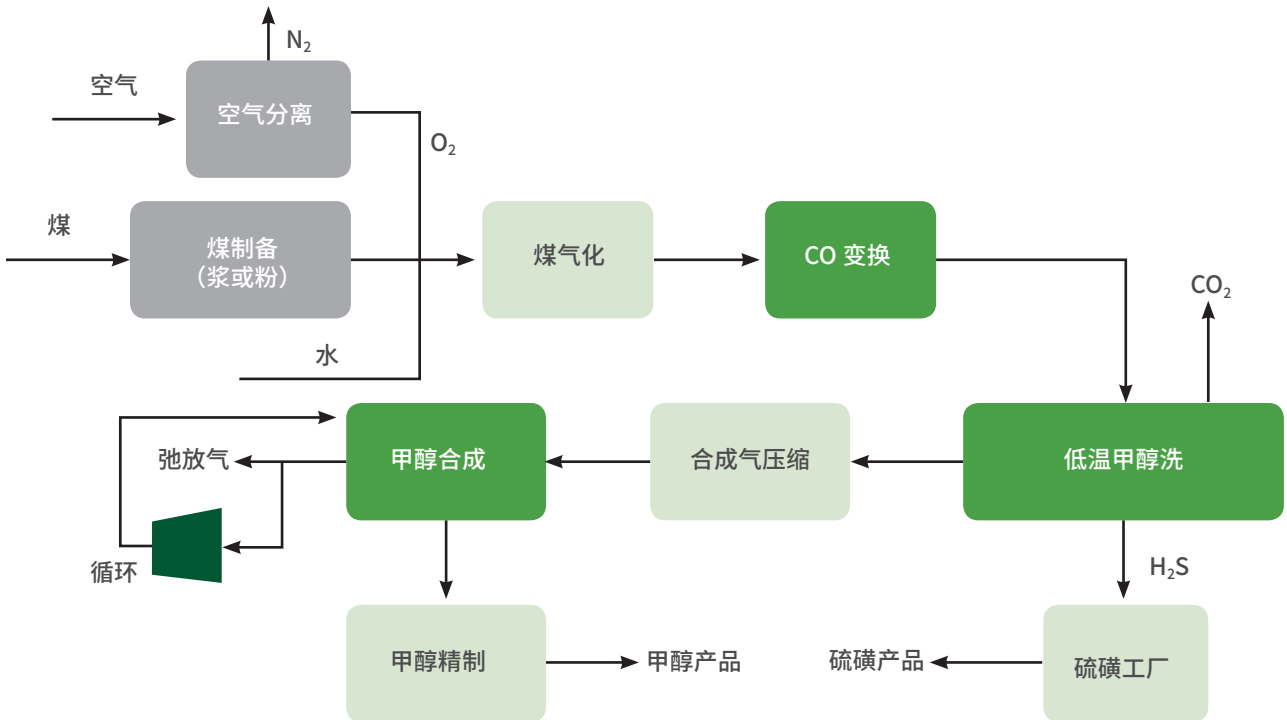
煤制甲醇工艺由煤气化和变换反应组成，在气化过程中，煤中含有的少量硫都转化为 H₂S 和少量的 COS，同时在气化和变换反应中，有大量 CO₂ 产生，煤制甲醇工艺一般采用低温甲醇洗将硫和 CO₂ 分步脱除，

中国甲醇主要来源



当然，也可以选用其它物理溶剂如霍尼韦尔 UOP 的 Selexol™ 工艺脱除硫和碳。

煤制甲醇工艺流程图



煤制甲醇工艺中 CO₂ 主要是在 CO 变换反应中产生的，而之所以要进行 CO 变换是因为煤气化得到的合成气的氢气含量太低，达不到甲醇合成需要的氢 / 碳比例。在碳中和的年代，我们需要避免 CO₂ 的产生，因此可以将绿氢导入煤气化的合成气中来调节氢 / 碳比例，大大减少煤制甲醇工艺过程中的 CO₂ 排放。将电解水制绿氢的工艺引入煤制甲醇是个行之有效的办法，因为电解水产生的氧气可以送入气化炉来代替高能耗和高成本的空气分离所产生的氧气。除了变换反应产生 CO₂ 外，煤气化也生成一定的 CO₂，但是我们可以通

过导入更多的绿氢来将煤气化生成的 CO₂ 在甲醇合成反应器中直接合成甲醇，这样甲醇合成反应器中将同时有如下两个主反应：

- CO 甲醇合成： $\text{CO} + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH}$
- CO₂ 甲醇合成： $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$

绿氢在煤制甲醇中的应用可以降低甚至完全消除工艺过程的 CO₂ 排放，这为中国发展绿色煤化工提供了一条可行的技术路径。

13 “氮肥甲醇行业生产技术创新发展成绩显著”，中国化工报，2021 年 7 月 22 日

4.3 氢气在合成氨生产中的应用

在国民经济中，氨占有很高的地位，它是我国无机工业的重要产品之一。液氨不仅可以直接作为肥料使用，而且以氨作为原料可以合成工业上的氮肥，如尿素、硝酸铵、磷酸铵、氯化铵以及各种含氮复合肥，同时氨也是合成燃料以及碳纤维生产的基本有机原料。合成氨（ $N_2+3H_2 \rightarrow 2NH_3$ ）是指氮气和氢气在高温高压和催化剂的作用下经过化学反应直接生产氨，其原料中的氮气可以通过空气分离而来，而氢气可以由前一章讨论的制氢技术来生产。煤制合成氨（先制氢）是中国目前广泛采用的工艺路线。但是双碳目标下，合成氨需要寻找一条更为低碳的合成技术路线。用绿氢来代替煤制氢气就可以达到这一目标，因此合成氨将是绿氢的另一个较大的应用领域。有报道称¹⁴，合成氨可以作为一种运输氢的介质，通过绿氢产生合成氨

后，液氨可以做跨洋运输，这样像日本、韩国等缺乏可再生能源资源的国家也可以用到绿氢。

除了炼化、甲醇合成、合成氨等大量用氢的化工工业外，其它一些较小规模的化工工业也需要用到氢气，包括植物油和油脂制高碳醇、醛类加氢制醇、亚硝酸盐加氢制胺、苯加氢制环己烷、过氧化氢合成、硝基化合物加氢制胺、羧酸和马来酸加氢制醇、HCl 生产、非饱和油和油脂加氢饱和等。

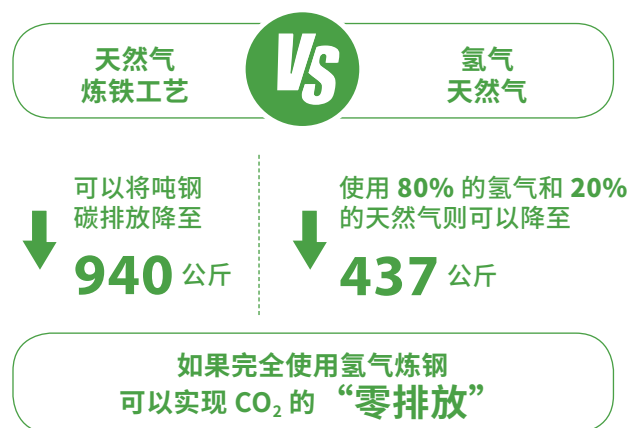
氢气作为还原剂被广泛应用到化工工艺中，这些工艺过程用氢量较少，但产品的价值相对比较高，因此它们很有可能是电解水制绿氢的一个合适运用场景。

4.4 氢气在钢铁冶炼中的应用

炼钢主要分为采矿（铁矿石和煤）、选矿、备料与炼焦、炼铁、炼钢等几个关键步骤。传统的高炉炼铁选用焦炭作为原料之一，通过焦炭燃烧提供还原反应所需要的热量并产生还原剂 CO，在高温下利用 CO 将铁矿石中的氧夺取出来，将铁矿石还原得到铁，并产生大量 CO₂。目前的炼钢企业大都采用该技术，因此钢铁行业碳排放量大，污染严重。

在“双碳”目标下，钢铁工业急需改进工艺，减少生产过程中的碳排放。未来，氢气的应用将在炼铁（钢）过程减少碳排放起到关键作用，氢气可代替 CO 成为氧化铁的还原剂，氢气炼铁（钢）将大大减少钢铁工业的碳排放。根据远东资信报道，截至 2020 年，我国钢铁企业平均吨钢碳排放量为 1765 公斤。采用基于天然气的炼铁工艺，可以将吨钢碳排放降至 940 公斤；

而使用 80% 的氢气和 20% 的天然气则可以降至 437 公斤；如果完全使用氢气炼钢，则可以实现 CO₂ 的“零排放”¹⁵。



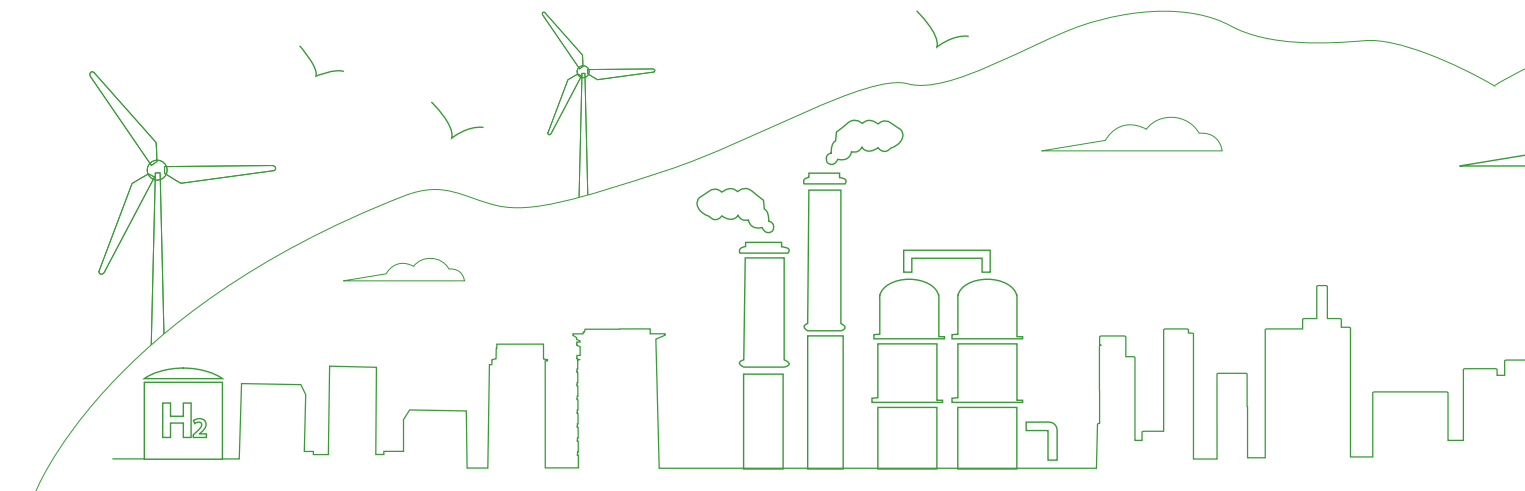
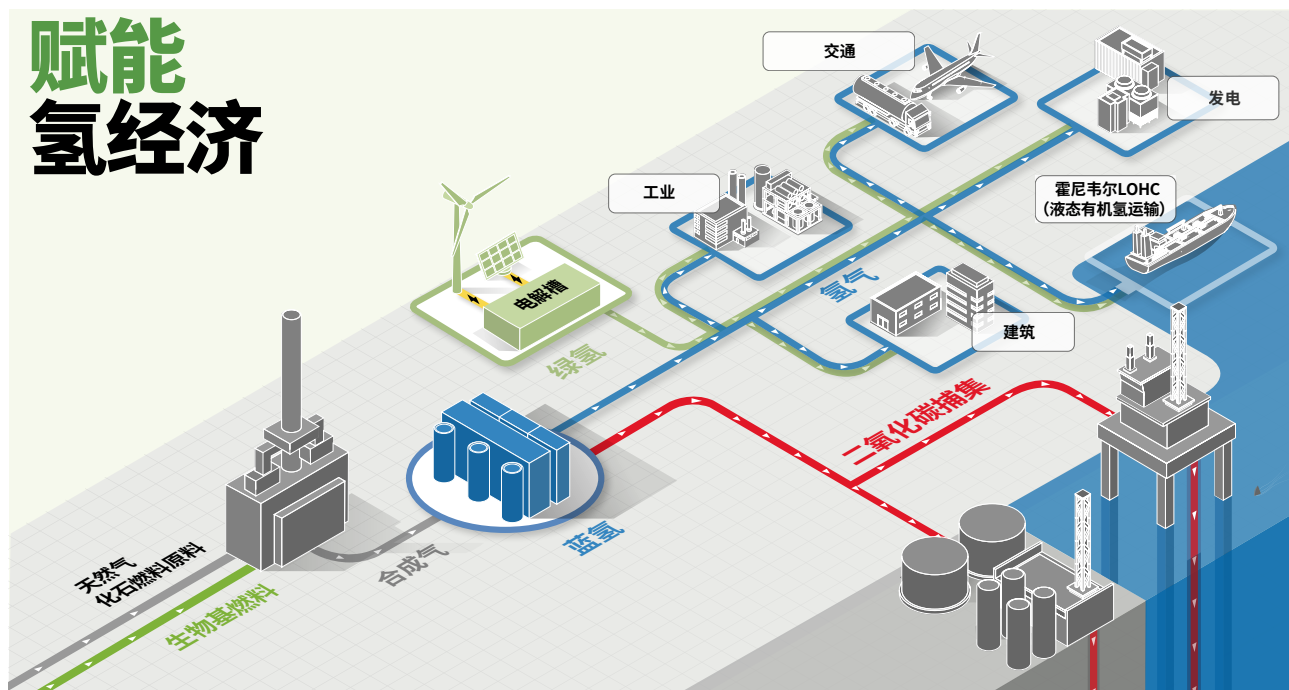
¹⁴ Wan Zhijian, Youkun Tao, Jing Shao, Yinghui Zhang, Hengzhi You, “氢作为固态氧化物燃料电池的一种有效氢能载体和清洁能源”, 《能源转型管理》, 228 (15), 2021

¹⁵ 远东资信, “国内钢铁行业碳中和路径”

4.5 小结

氢气已被广泛应用到炼化和化工工业中。在炼化工业，目前炼厂的副产氢气一般不能满足全厂氢气的需求，因此需要煤制氢和天然气制氢，这些制氢方法产生大量 CO₂ 排放，对实现“双碳”目标是一个挑战。在需要较大成本下降的情况下，蓝氢和绿氢的应用可以帮助炼化行业减碳。从中短期来看，炼厂一方面还需要满足汽柴油的需求，另一方面要提高资源的利用效率，也就是增加重油的裂解，这些改造会提高炼厂对氢气的需求。从长远来看，碳中和时代的炼厂将生产很少，甚至完全不生产汽柴油，而是由原油生产烯烃和低碳

芳烃；同时，炼厂也会走原料轻质化的道路，比如使用乙烷、丙烷等石化原料生产烯烃，这两方面的变化都会产生更多的副产氢气。因此，碳中和时代的炼化企业完全有可能做到氢平衡，也就是除副产氢气外，不需要额外的氢气，如果原料和产品结构好（多用轻质原料和多产芳烃），则炼化企业还可以输出副产氢气。在钢铁、冶金和煤化工（煤制甲醇）和合成氨工业，由于“双碳”目标的要求，氢气的应用还有非常大的需求空间，绿氢和蓝氢在这些工业中的需求增长将是巨大的。



关于我们

霍尼韦尔（中国）有限公司可持续发展研究院隶属于霍尼韦尔特性材料和技术集团，前身为 2018 年成立的霍尼韦尔（中国）有限公司环境保护研究院。升级后的研究院融合了该业务集团的创新力量和专家，涵盖了研发、技术、市场、产品等各个领域。可持续发展研究院低碳中心（以下简称“低碳中心”）成立于 2021 年 8 月，专注于研究低碳技术发展和市场需求，以霍尼韦尔创新的产品和技术为引擎，推动低碳解决方案在中国市场的开拓和实施，助力客户可持续发展以及中国“碳达峰”和“碳中和”目标的实现。低碳中心继发布第一本《炼化行业低碳发展》白皮书后，在成立一周年之际，又发布了《以绿色技术促进可持续发展——霍尼韦尔 2022 低碳发展》绿皮书，此次《氢能工业与应用发展》白皮书是低碳中心发布的第一本氢能行业应用的白皮书，后续还将有更多的研究洞见与大众见面。

霍尼韦尔特性材料和技术业务集团是全球领先的特性材料、工艺技术和自动化方案供应商。该集团下属霍尼韦尔 UOP 拥有超过 4900 个专利和应用，并且全球广泛使用的 36 种炼油工艺中的 31 种是霍尼韦尔 UOP 的发明。此外，UOP 技术助力全球 60% 汽油、40% 液化天然气和 70% 聚酯纤维的生产。集团下属过程控制部是分布式控制系统（DCS）的发明者，引领工业自动化行业长达半个世纪之久，其技术应用于全球超过 15000 家生产基地，覆盖超过 125 个国家和地区。集团下属高性能材料部专业生产多样的高性能产品，包括环境友好型制冷剂、发泡剂和气雾剂。

编辑委员会

感谢参与撰写《未来燃料——霍尼韦尔氢能工业与应用发展》白皮书的各位编者：

周麓波 张奎山 杨悦 顾昕 李策己 路振龙 汪明月 邓晶尹 吴翀

感谢他们基于对行业发展和相关技术应用的洞察和提出的独到见解和前瞻看法。



Honeywell

霍尼韦尔(中国)有限公司
可持续发展研究院

地址:上海环科路555弄1号楼
邮编:201203
电话:400-842-8487
网址:www.honeywell.com.cn



联系我们