

铂金精粹

氢入门知识-投资简介

铂金需求将持续长期增长。随着全球脱碳被提上议程，氢经济的新兴需求推动了铂金需求的增长。在本期《铂金精粹》中，我们概述了氢经济、氢技术及其对铂金的影响。这是对我们发布的与氢相关的铂金需求预测的最新补充，为铂金投资者或将铂金视为投资资产的人们了解氢市场的基本动态提供了基础。

氢是一种多功能的能源载体，能够从可再生能源中生产，并应用于各种交通运输和工业领域，以促进脱碳。尽管有这种潜力，但目前全球氢市场每年 9500 万吨的氢主要依赖化石燃料生产。铂金和其他铂族金属将通过制氢电解槽发挥关键作用，通过可再生能源催化氢和氧的生产，这是一个无排放的过程。此外，利用氢发电的含铂质子交换膜 (PEM) 燃料电池的商业开发，为氢在交通运输行业中去除化石燃料开辟了潜力，而使用绿氢也可以帮助其他行业脱碳。

目前对氢的需求主要用于化工和石化行业的原料。然而，国际能源署 (IEA) 估计，到 2030 年，由于燃料电池和能源转型相关的用途和新型工业加工，如直接还原铁 (DRI) 炼钢和燃气轮机发电站的使用，氢需求将增加到 1.5 亿吨。电解槽和碳捕获技术将用于产生 6000 万吨的新供应，从而取代基于化石燃料的氢气生产和新行业的脱碳。对现有每年 9500 万吨灰氢市场进行脱碳，将节省 4.3 亿吨二氧化碳排放，相当于每年减少 1.2 亿辆汽车上路。根据氢能委员会的数据，到 2050 年，氢与其他应用的联合使用可能带来全球 20% 的碳减排。

氢经济中的铂金需求涵盖两个关键应用：用于制氢的质子交换膜电解槽和用于氢气使用的质子交换膜燃料电池。虽然燃料电池主要应用于燃料电池汽车，但预计到 2030 年，燃料电池在船舶、铁路、越野和固定发电方面的应用将越来越广泛。2024 年标志着氢经济增长的转折点，在推进政府政策和增加财政支持的推动下，与氢相关的铂金需求预计将同比翻一番。认识到氢在实现净零排放方面的关键作用，将其融入各个行业是不可避免的。我们预计氢经济将持续增长，到 2030 年将出现近 87.5 万盎司的铂金需求，约占铂金总需求的 10%。下面，我们总结了与氢相关的需求，而我们最新的[氢展望](#)提供了全面的分析。本报告重点介绍了基本的氢技术选择及其对脱碳的贡献，帮助投资者掌握未来 5 年铂金需求的关键驱动因素。

Edward Sterck

研究总监

+44 203 696 8786

esterck@platinuminvestment.com

Wade Napier

分析师

+44 203 696 8774

wnapier@platinuminvestment.com

Jacob Hayhurst-Worthington

助理分析师

+44 203 696 8771

jworthington@platinuminvestment.com

Brendan Clifford

机构销售主管

+44 203 696 8778

bclifford@platinuminvestment.com

世界铂金投资协会

www.platinuminvestment.com

Foxglove House, 166 Piccadilly

London W1J 9EF

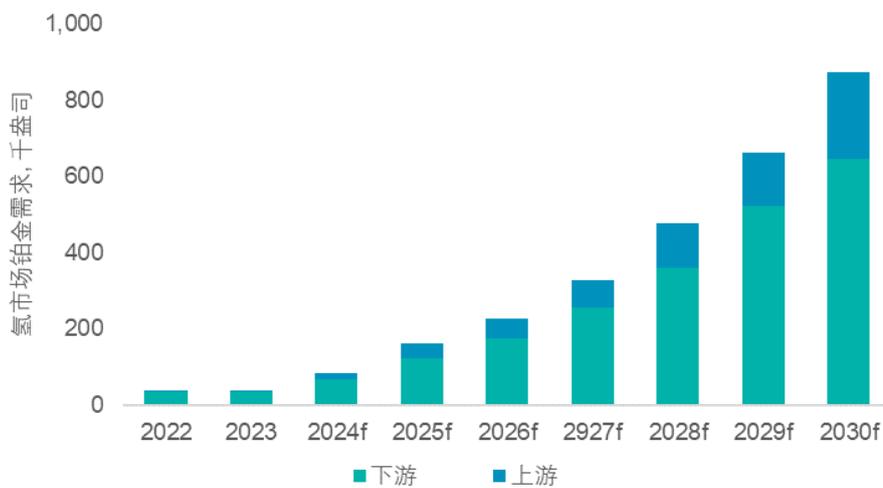
2024 年 4 月 25 日

图1 氢的铂金需求汇总表

		WPIC 氢的铂金需求预测‡								
铂金需求 (千盎司)		2022	2023	2024 预测	2025 预测	2026 预测	2027 预测	2028 预测	2029 预测	2030 预测
交通运输		19	16	44	95	143	219	312	461	564
- 氢燃料电池		19	15	42	93	138	208	293	427	505
- 铁路		0	0	0	0	1	1	1	3	5
- 航海		0	1	1	1	2	4	8	14	24
- 非道路		0	0	0	0	1	5	10	17	30
电解槽		0	4	16	39	52	71	116	141	229
固定电力		17	20	23	27	32	39	48	61	81
总需求		36	40	83	161	226	328	476	663	874

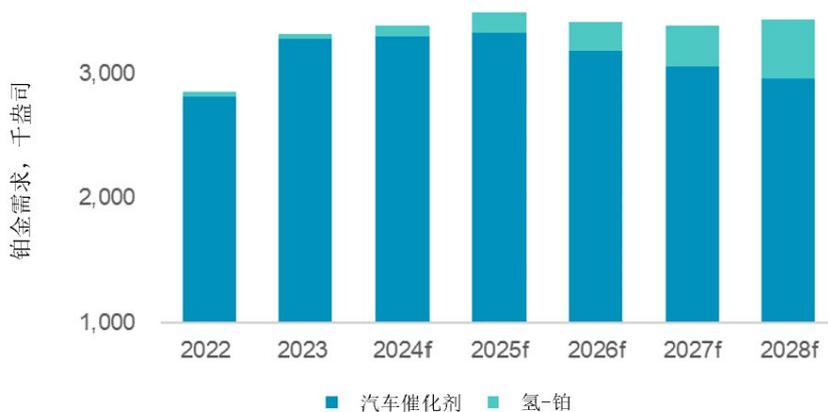
来源: WPIC 研究

图2 到2030年代末, 与氢相关的铂金需求量接近每年87.5万盎司



来源: 国际能源署、公司数据、WPIC 研究

图3 来自氢应用的新兴铂金需求抵消了内燃机汽车催化剂需求的下降



来源: 金属聚焦 (2022-2024 预测)、此后为 WPIC 研究

目录

氢是什么?	4
什么是氢经济?	5
政策制定的作用.....	8
氢是如何生产的?	9
深度解析电解法: 碱性 VS 质子交换膜	15
氢气有什么用途?	21
结论.....	33

氢是什么？

氢是元素周期表上的第一个元素，气态氢是宇宙中最丰富的元素。双原子形式的氢是一种无臭、无色、无味的气体。它的使用源于它的高热值；氢是可燃燃料单位质量中能量含量最高的元素之一。然而，氢非常轻，很难处理。为了运输或使用，它经常被压缩或冷却成液体形式。

氢通过两种方式释放其能量潜力，即通过直接燃烧或通过电化学反应，在这两种情况下都与大气中的氧气重新结合产生水。事实上，自 20 世纪中期以来，液态氢一直被用于火箭发射，而铂基燃料电池则首次被用作双子座航天飞机的机载电源。除了燃料之外，氢在当今经济中的主要用途是作为化学原料，特别是在全球农业中用于肥料的氨生产中。

图 4 双子座航天飞机中用于机载电源的燃料电池



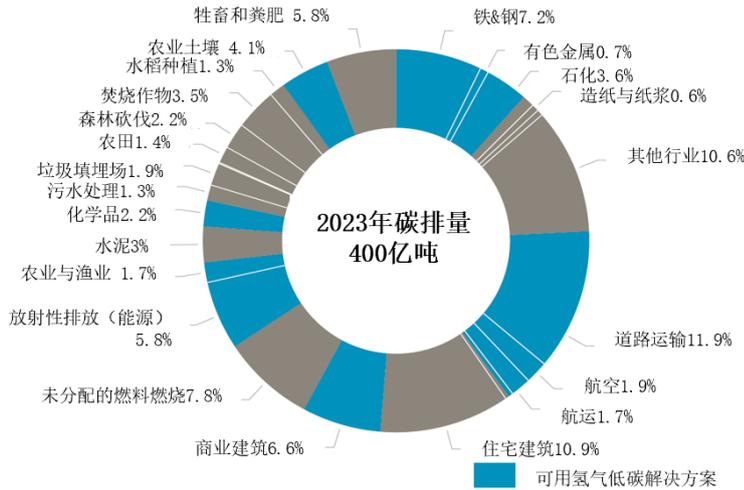
来源：国家航空航天博物馆

为什么氢对能源转型很重要？

燃烧化石燃料(煤、天然气和石油)会产生温室气体排放(GHG)，自工业革命以来，温室气体排放量一直在上升。温室气体排放与气候变化相关联，尤其是全球变暖。2015 年签署的《巴黎协定》旨在通过减少温室气体排放，到 2050 年将全球变暖限制在 1.5 摄氏度以下。实现这一目标需要从根本上改变人类的能源生产方式，从以化石燃料为基础的经济转向以金属为基础的经济，这一变化被称为能源转型。这是一项复杂的社会经济挑战，需要实施多种技术来取代化石燃料。可再生能源(风能和太阳能)和电池技术将实现减少大部分温室气体排放量的增长。然而，可再生能源和电池技术不适用于一些电池体积太大和重量太重、需要高容量利用率或根本不可能电气化的行业。像这样的行业，被描述为“难以减排”。占全球二氧化碳排放量 10%的钢铁生产就是一个例子，因为煤和天然气在化学反应中被用作氧化剂来还原铁时会释放温室气体。目前的技术还无法实现这一过程的电气化，因此可再生能源无法减少钢铁生产过程中的排放，但氢可以。氢取代煤来还原铁的过程被称为直接还原，水蒸气取代了有害的温室气体成为主要的排放物。

由于氢作为燃料、化学原料或能源载体的多功能性，越来越多人视氢为帮助难以减排的行业脱碳的关键。当通过低碳或无碳技术生产时，氢可以减少交通运输、重工业和发电中的温室气体排放。下图是工业领域的子行业对温室气体排放总量的全球贡献(图 5)。我们用颜色标记了可以应用氢技术的行业，以说明可应用的范围。根据氢能委员会的数据，到 2050 年，大约 20%的碳减排要求将通过氢的使用来满足。

图5 氢可以使世界上许多碳密集型行业脱碳。



来源：我们的数据世界，WPIC 研究

什么是氢经济？

氢作为一种化学能源载体被生产、运输和使用在各个不同的行业。促进氢使用的技术和加工的广阔生态系统被称为“氢经济”（图6）。氢经济可以分为上游、中游和下游。我们将借此机会简要介绍氢经济的每个部分，然后再对推动氢发展的关键技术进行详述。

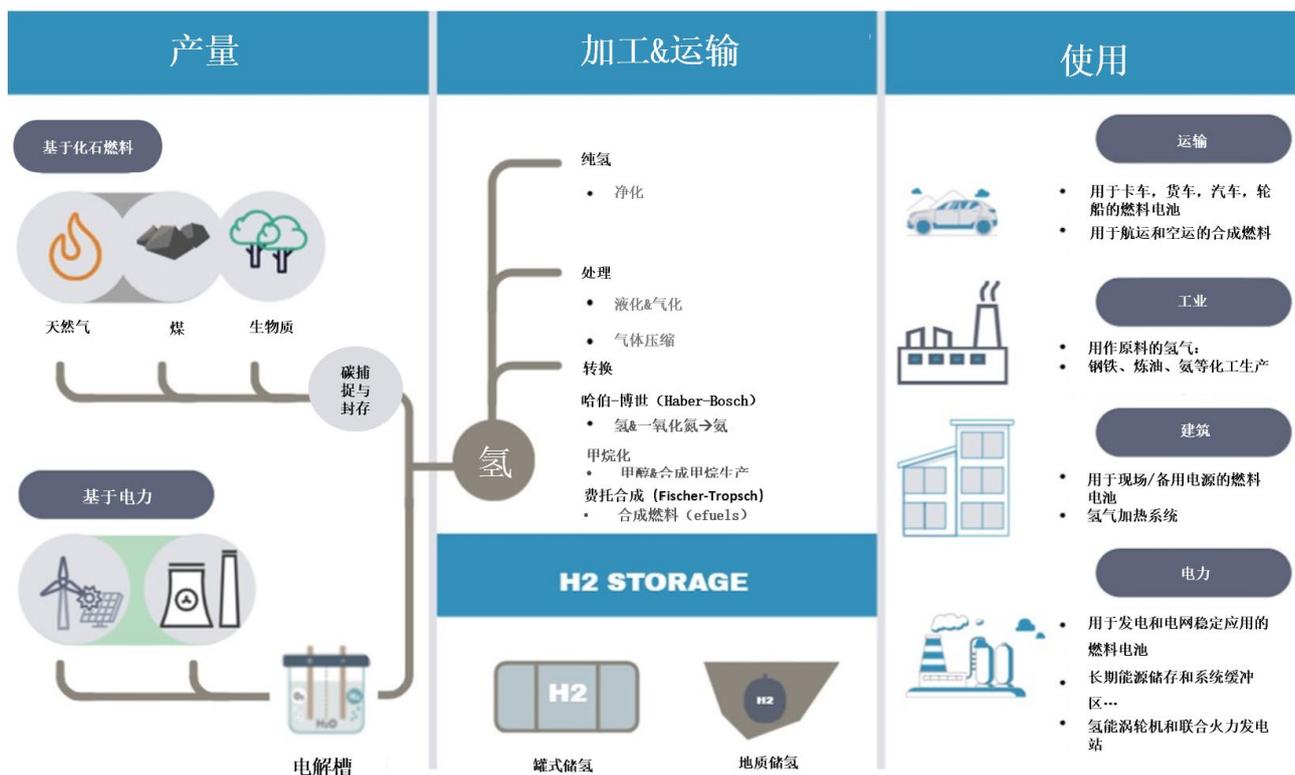
上游包括氢气生产，目前这是一个碳密集型的加工过程，通常使用天然气、石油或煤炭。这是最具成本效益的生产方法。然而，低碳和可再生生产方式发展势头正盛。预计到2030年，低碳和可再生能源将占到氢气供应的50%。利用电力将水分解成氢和氧的过程，电解槽制氢将是推动从化石燃料转变的主要技术。

下游包括氢的使用。目前，氢有三种主要用途。它被用来生产甲醇（一种基础醇）和氨（一种肥料成分，对全球农业至关重要），或因其反应性而用于石油炼制。氢在各种精炼过程中起着关键作用，有助于生产更清洁、更高质量的燃料，并满足严格的环境标准。绿氢将用于使这些至今还依赖于化石燃料的氢气的现有终端用途脱碳。然而，随着能源转型的发展，氢的下游用途将扩展到新的低碳应用，如合成燃料的生产，以及在含铂质子交换膜（PEM）燃料电池中用以在移动或固定系统中发电。

连接上游和下游的是**中游**，它包括了氢的加工、运输和储存。当今，氢气通常是在同一化学设施中生产和消耗的。然而，随着氢经济的发展，在国内和全球范围内运输氢成为必须，以便将生产设施与新兴的终端需求联系起来。氢可以作为纯气体、液体或甲醇、氨等衍生产品运输，也可以使用液态有机氢载体运输，具体取决于运输距离和终端应用。

氢气既可以储存在储罐中进行中短期储存，也可以长期储存在合适的自然地质构造中。当与可再生能源结合使用时，长期存储是保持电网稳定的关键因素。这相当于一个平衡因素，可再生能源的来源是多变的，当有过剩时，多余的部分可以用来制造可储存的氢，正如给电池充电一样，并在可再生来源不足时用作能源的来源。

图 6 氢经济背景下的氢应用关键环节



来源: WPIC 研究

铂族金属助力实现氢经济

氢经济是由化工和电气化过程所驱动的，这就需要铂族金属催化剂来促进或加速反应。铂金的物理化学属性使得它在规模化氢经济的应用尤为重要，我们估计到 2030 年，氢经济的扩张将增加 85-90 万盎司的额外铂金需求。本期入门知识将解释氢经济中使用的技术以及铂族金属和铂金的具体作用。首先是高层次概述铂族金属在氢经济中的应用情况：

上游

铂族金属催化剂在电解槽和燃料电池电化学等过程中提供必要的表面反应性，在此过程中，高效和快速的氢转化是至关重要的，铂、铱和钌是用于上游生产电解水制氢的关键催化剂。

电解水制氢也会间接产生铂金需求。铂铑合金用于生产玻璃纤维所需的漏板，其主要用途之一是作为风力涡轮机和光伏太阳能电池板的关键建筑材料。随着对可再生能源的需求增长，为制氢提供能源，与玻璃行业相关的铂金需求也将增长。

中游

铂金在氢经济中游的用途包括将氢注入到液态有机氢载体(LOHC)中，用于运输和从电解槽制氢中净化氢。氢气中的杂质会对燃料电池的性能和寿命产生负面影响，因此使用有效的催化剂至关重要。

下游

几十年来，铂、钯和铑一直用于石油精炼和化学加工中的加氢反应，占铂金工业领域需求的约 6%（2023 年）。类似在哈勃-博世反应中使用铂网来促进氨的有效生产。

下游的新铂金需求归因于交通或固定电源应用的燃料电池，可用于道路，船舶和非公路的交通领域。其他下游氢应用，如绿色钢铁和合成燃料，并不直接需要铂金，但它们通过增加电解槽制氢和低碳制氢的需求，直接增加了铂金需求。

图 7 氢经济中使用的铂族金属。

生产 (上游)	加工 & 运输 (中游)	使用 (下游)
电解槽 • 铂, 铑, 钌 玻璃纤维生产 • 铂, 铑	氢气净化 • 铂, 钯 氨气生产 • 铂, 钌, 钯 液态有机氢载体 • 铂, 钌	移动燃料电池 • 铂 固定式燃料电池 • 铂

来源: WPIC 研究

政策制定的作用

政策通过为增长、创新和可持续性提供支持性环境，在帮助处于起步阶段的行业方面发挥着至关重要的作用。绿氢经济在起步阶段面临各种挑战，包括生产成本高、技术不确定性和缺乏基础设施。

考虑到脱碳的全球目标，需要采取支持性政策行动，以确保氢经济的成功增长。截至 2023 年底，共有 61 个政府采用了氢战略，占全球能源相关二氧化碳排放量的 80% 以上。全球各国战略的成熟程度各不相同，从无约束力的氢气生产目标到创造需求和降低投资风险的政策干预。图 8 详细介绍了一些国家氢路线图，突出了一系列战略和目标。氢的主要用途已经瞄准了国家层面，从工业脱碳到合成燃料生产。

图 8 政府氢气目标精选汇总表。

国家	描述
美国	到 2030 年实现 1000 万吨“清洁”氢气生产，2040 年 2000 万吨，2050 年 5000 万吨。
欧盟	到 2030 年，国产 1000 万吨氢气，进口 1000 万吨。到 2030 年，42% 的工业用氢来自可再生，到 2035 年上升到 60%。
中国	以省为基础的生产目标，2025 年合计目标为 110 万吨。
德国	到 2030 年安装 10 吉瓦的电解槽，增加工业和交通运输氢气需求。通过建设 1800 公里的氢气管道取代对天然气的依赖。
印度	到 2030 年实现 500 万吨“绿”氢，新增可再生能源 125 吉瓦。计划扩大到 1000 万吨/年，包括发展出口。
阿联酋	到 2030 年生产 140 万吨氢，2040 年生产 750 万吨，2050 年生产 1500 万吨。结合电解槽、SMR 与碳捕捉封存制氢。
巴拿马	到 2030 年，氢衍生物燃料占海运燃料的 5%。
日本	到 2030 年生产 300 万吨氢，2040 年 1200 万吨，2050 年 2000 万吨。此外，目标是用合成甲烷取代现有管道中 1% 的天然气的供应，到 2050 年这一比例将上升到 90%。目标是在钢铁和石化行业中普及工业氢应用。
韩国	目标是到 2030 年氢和氨发电占总发电量的 2.1%，到 2036 年上升到 7.1%。

来源：政府新闻稿，WPIC 研究

战略目标大多是非强制性的，其作用是为政府的脱碳计划提供预期的方向。虽然有所帮助，但它们并没有给投资者提供需求动机或对投资的保证。近年来，由于缺乏健全的政策，大规模的氢能发展陷入了停滞。然而，围绕强制性目标设定的动力正在建立起来，并与欧盟和美国等关键司法管辖区的主要财政支持相结合。有约束力的目标向行业发出了关于未来市场的明确信号。在欧盟，到 2030 年，42% 的氢气需求来自于可再生氢气的生产，从而为低碳投资创造需求。

氢能技术在初期成本较高，需要通过研发和规模经济来降低成本，使之与传统的碳基替代品相匹配。这需要时间。政府正在引入各种金融工具来填补这一差距，并为整个价值链提供中长期稳定性。我们在下面列出了一些关键的资金支持机制，尽管应当注意的是，这一领域正在迅速发展：

- **补助金和补贴：**直接资金支持通常用于降低氢项目的资本开支，降低准入门槛。例子包括澳大利亚联邦政府的“氢先导计划”，这是一个总额为 20 亿澳元的计划，旨在支持大规模可再生氢项目。
- **税收激励：**税收抵免和回扣，例如美国的 5000 亿美元《通胀削减法案》（IRA），其中包括每公斤氢高达 3 美元的税收抵免。
- **差额协议 (CfD)：**如英国的低碳氢协议。该模式旨在为氢生产商在生产成本高时提供收入支持。它通过 15 年协议提供低碳和高碳燃料的运营成本之间的差价。

- **竞争性投标方案：**例如欧盟 8 亿欧元的氢银行试点项目。投标者根据每公斤氢的收入支付金额，通过竞标获得一定年数的收入支付，每公斤氢生产最高可达 4.5 欧元，为期 10 年。

政府对氢设定的坚定目标有助于刺激需求。当这些目标与强有力的经济支持结合时，它为投资者和项目开发者提供了构建氢经济的基础。

氢是如何生产的？

尽管氢元素非常丰富，但它很少以可用的形式单独存在。通常，氢元素与其他化学元素结合，例如在水中，它与氧结合，在有机化合物中，它与碳结合，如天然气中所含。因此，生产氢气需要物理或化学过程来将其从源分子中分离出来。

从技术角度来看，商业化的氢气生产过程基本上可以分为两条主要路径。第一种**涉及热过程**，其中一种碳氢燃料，如天然气、石油或煤炭，会发生分解（产生氢气和二氧化碳）。第二种采用**基于电力**的系统，利用电能化学分离水，这个过程称为电解。其他过程，如生物过程、热化学过程和光解过程也能生产氢气，尽管目前这些路径的制氢规模有限。

化石燃料热系统：

蒸汽甲烷重整与煤气化

当今的氢需求几乎完全（供应的 99.9%）通过使用化石燃料的生产方式来满足。当利用化石燃料生产方法，如煤气化、部分氧化和蒸汽甲烷重整（SMR）时，氢气是丰富的，并且生产成本低廉（约 1-1.5 美元/公斤氢气）。

SMR 是一个涉及在高温高压下，用轻烃，通常是甲烷（CH₄）与蒸汽（H₂O）反应，产生氢气（H₂）和一氧化碳（CO）的过程。SMR 是一种成熟的技术，因其效率高以及依赖于易于获取的天然气原料而受到青睐。这种方法成本效益高，但二氧化碳是其副产品。

煤气化是一种替代方法，利用煤炭作为氢气生产的原料。煤炭在与氧气和蒸汽的高温反应中转化为合成气（合成气体），合成气中含有氢气、一氧化碳和其他气体，然后可以将其分离成不同的产品流。

通常情况下，由于供应地的集中，SMR 将与石化过程一起使用，这使得它在大规模氢气生产中成本效益高。当煤炭资源丰富时，煤气化在生产化学原料的氢气时提供了一个选择。它提供了原料的多样性，但在某些地区可能较不受青睐，因为其产生的二氧化碳排放更多。煤气化在中国被广泛使用，而 SMR 在美国和欧盟更受青睐。

据一些估计，基于化石燃料的氢气生产占全球二氧化碳排放的高达 3.5%。考虑到全球减碳的推动，各地区将寻求逐步淘汰高碳强度的生产方式。取而代之的是，优先考虑低碳燃料基生产，最终过渡到基于可再生电力的生产。

低碳燃料基础的制氢

低碳和潜在的碳中和燃料基础制氢方法正在兴起。目前有三种技术被视为潜在的可行的氢气生产途径，即，蒸汽甲烷重整（SMR）随后进行碳捕集和储存（CCS）、甲烷裂解和生物质气化。CCS 是一种相对成熟的技术，被定位为去碳化化石燃料基氢气生产的首选途径。而甲烷裂解和生物质气化则处于更早阶段的发展中，有一些挑战需要克服。

CCS 是 SMR 或煤气化的附加技术。二氧化碳被捕获并储存或在其他工业过程中利用。这一方法减少了约 75% 的二氧化碳排放，降低了这一过程的碳强度。这种方法具有吸引力，因为它利用了现有的化石燃料基础设施，并且与可再生能源衍生的氢相比，成本较低（以当前价格计算）。然而，一个显著的缺点是它仍然依赖天然气以及其非零碳足迹，导致许多国家将其视为向绿氢生产最终目标过渡的方法。

甲烷裂解指的是一个过程，其中甲烷（CH₄），天然气的主要成分，被分解为其组成元素，主要是氢气（H₂）和固态碳。甲烷裂解被认为是一个低碳过程。过程中产生的固态碳可以被捕获并储存，防止其以二氧化碳（CO₂）的形式释放到大气中，从而减少总体碳足迹。此外，产生的固态碳具有市场价值，并在汽车轮胎、黑色墨水和石墨等产品中找到应用。

这一生产方法尚未在经济上与 SMR 或电解制氢相竞争。该技术的规模化结合支持性政策可能会在未来看到它获得关注。

生物质气化。生物质指的是来自植物或动物的有机材料，生物质气化涉及将这些材料转化为称为合成气（合成气体）的气体混合物，其中包含氢气（H₂）、一氧化碳（CO）、二氧化碳（CO₂）和其他气体。从生物质产生的合成气随后可以经过处理提取氢气。生物质气化被认为是一个潜在的碳中和过程，因为在气化过程中释放的碳最初是由植物在其生长过程中固定的。然而，整体碳平衡取决于诸如生物质来源的可持续性、运输和转换过程效率等因素。

电解法 - 基于电的制氢系统:

可再生氢气是全球脱碳挑战中的根本增值。生产可再生的“绿色”氢气的主要途径是通过一个称为电解法的过程。电解法利用一种称为电解槽的设备来生产氢气。

电解槽是一种设备，它通过断开键合将水分子（H₂O）分解为其组成的氧和氢元素。有各种相互竞争的电解槽技术，每种技术都有其优势和劣势，但基本概念保持不变：电能被用来分解水并生产可用的氢气产品，而电力的来源将影响所产氢气的分类。我们将在本报告的后面详细介绍不同的电解槽技术。

今天，电解法制氢的生产成本大约是基于化石燃料的氢气的两倍。然而，这项技术商业化仍处于初期阶段，仅占全球供应的 0.1%。这项技术可以实现规模化，预计到 2030 年，一些项目将能够取得与 SMR（蒸汽甲烷重整）和煤气化相当的价格制氢。

天然氢气蕴藏

氢气也可以通过多种方式自然形成。主要过程涉及地下水与富含铁的矿物（如橄榄石）的相互作用。这会导致水自然分解为氧气和氢气，氧气与铁结合。尽管从化学上讲这是可能的，但人们并不知道氢气是否能够聚集到足够的量级以便于经济开采。

然而，这一点偶然间被证明是错误的。1987 年，马里一个钻水井的钻孔释放出了一种无味的易燃气体，而不是水。该钻孔被封堵并被遗忘，直到 2012 年，寻找天然气的勘探者重新打通了这个钻孔，并证实了西非地下蕴藏着大量的氢气。如今，氢气为马里西部的布拉卡布古村提供动力。经济化蕴藏存在性的确认，已经启动了一波对该元素的开采热潮。天然氢看似是一种非常乐观的生产方法，但必须强调的是，勘探和开采研究还处于非常早期的阶段。

氢气彩虹

正如讨论的那样，氢作为燃料可以来自多个可能的来源，这些来源在绿色信誉和挑战方面各不相同。为了快速区分不同来源的氢，各种氢被分配了颜色。这就是“氢气彩虹”，通常在行业中用来描述所产生的氢。

绿氢：绿氢通过使用可再生能源进行水的电解来生产，其二氧化碳足迹极小，并且杂质含量低。

黄氢：通过使用混合来源的电网电力进行点解水来生产，或者在有可再生能源时使用可再生能源，在没有时使用电网能源，以最大化产能利用。二氧化碳足迹中等，但杂质含量也低。

粉氢：通过使用核能进行水的电解来生产，其二氧化碳足迹极小，并且杂质含量低。

蓝绿氢：通过天然气或甲烷的裂解来生产，产生固态碳作为副产品。二氧化碳足迹极小，并且杂质含量低。

蓝氢：通过天然气或煤的蒸汽重整与二氧化碳捕获和封存来生产。二氧化碳足迹低至中等，含有混入的杂质。

灰氢：通过天然气的蒸汽重整生产，没有碳减排措施。碳足迹中等至高，含有混入的杂质。

棕和黑氢：通过没有碳减排措施的棕色或黑色煤的气化来生产。碳足迹高，含有混入的杂质。

白氢：指自然界产生的氢。

图9 展示了通过各种氢气生产方法转变碳强度的彩虹图



来源：WPIC 研究

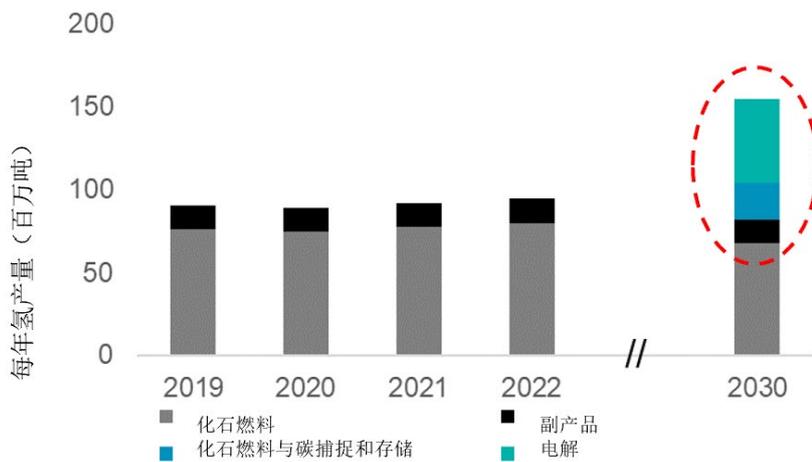
氢供应侧趋势和技术赢家

既然我们已经确定了氢能的生产方式，哪种生产技术路径将占据主导地位呢？现有的 9500 万吨氢市场几乎完全由化石燃料生产供应。然而，市场正处于变革的边缘。在未来十年里，交通、电力和工业领域的新能源转型应用将出现，这将需要专门的氢气供应。尽管氢资源丰富，供应弹性大，但新的消耗量很可能是强制的低碳氢。因此，其可行性和最终的供应轨迹受到低碳技术生产成本的制约。

国际能源署预测，到 2030 年全球氢供应将增加 50%（见图 10）。电解和碳捕集技术将成为主要的生产方法，在 2030 年后超越无法减排的化石燃料生产。这一预测将基于不断增长的需求，但需要关键推动因素来规模化这一初级产业：

- **政策、激励措施和政府设定的监管框架**对氢的生产有着重大影响。补贴、资助和支持性法规可以鼓励增加产量。
- **补贴/碳定价**：实行碳定价机制以及越来越多人关注到减少碳排放可以推动低碳和零碳制氢方法的普及。碳定价适用于产生碳排放的技术，使其及其产品更加昂贵和竞争力下降。而另一方面，补贴适用于绿色技术，以帮助降低早期发展成本，使其产品在商业上更具吸引力。二者结合起来，作为促进能源转型技术的机制。
- **国际合作**：国家之间和国际组织之间的合作可以促进全球氢贸易，影响其供应。跨境运输和贸易基础设施的协议是必不可少的。
- **技术发展**：电解装置和碳捕集与封存（CCS）的前期投资在当前低碳氢高成本中起着关键作用。随着规模经济的发挥和技术的成熟，有望在资本支出（Capex）方面取得进展，有助于增加愿意进入市场的供应商。
- **可再生能源可用性**：绿氢的最大成本组成是电力成本和可再生能源的利用限制。降低氢成本和增加供应的关键是将电解装置与成本优势地区的可再生能源设施配对。

图 10 根据国际能源署的数据，到 2030 年，电解将支撑 50% 的氢供应增长。



来源：国际能源署、WPIC 研究

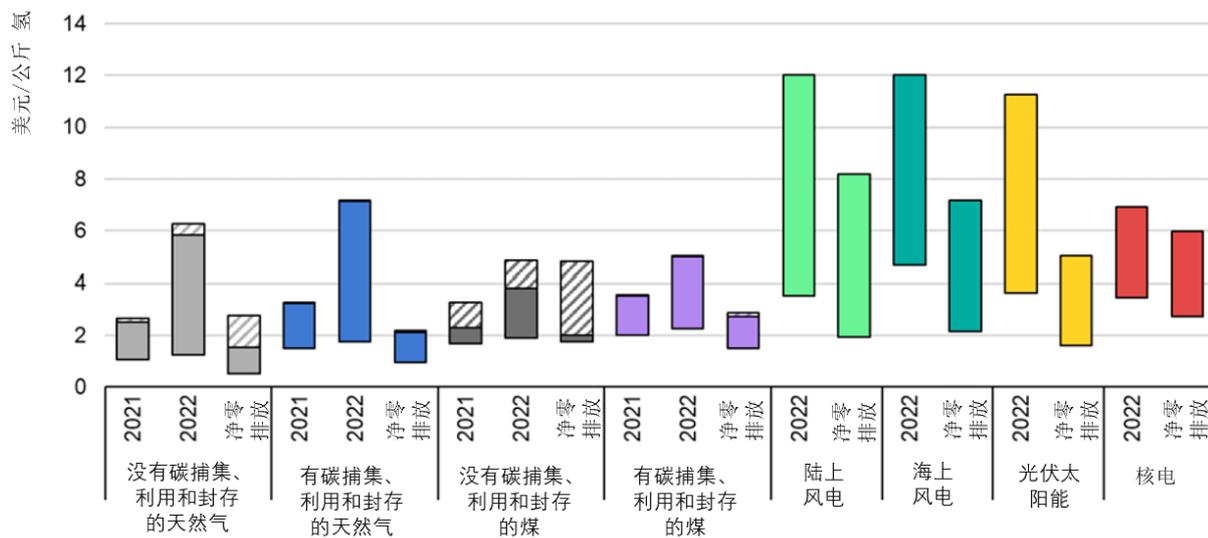
碳捕集与封存（CCS）VS 电解法

使用碳捕集技术的化石燃料生产和电解法是生产低碳氢的两条主要未来途径。根据国际能源署（IEA）的数据，到 2030 年，预计约 70% 的新供应将来自电解，其余 30% 来自碳捕集与封存（CCS）。CCS 被视为一种过渡技术，能捕获二氧化碳，但仍依赖于化石燃料的开采来生产。鉴于 COP 28 协议承诺逐步淘汰化石燃料的使用，预计 2030 年后 CCS 应用将会下降。欧盟氢能第二代表法案（2023 年）要求到 2030 年，可再生氢气比例达到 42%，到 2035 年增加到 60%，这是这一转变的早期迹象。长期目标是消除即使是带有碳捕集的非可持续燃料的燃烧。预计的一条途径是随着时间的推移，根据温室气体强度收紧低碳氢的定义标准。

目前，CCS 的优势在于成本较低，无需使用昂贵的电解槽和可再生能源成本。此外，它利用现有的煤炭和天然气基础设施，提供了更简单的供应链。在传统的石油和天然气工业区域，如美国、英国和荷兰（图 11），该技术得到了青睐。此外，作为一种低碳氢气生产方法，CCS 在美国和欧盟都得到了补贴的支持。

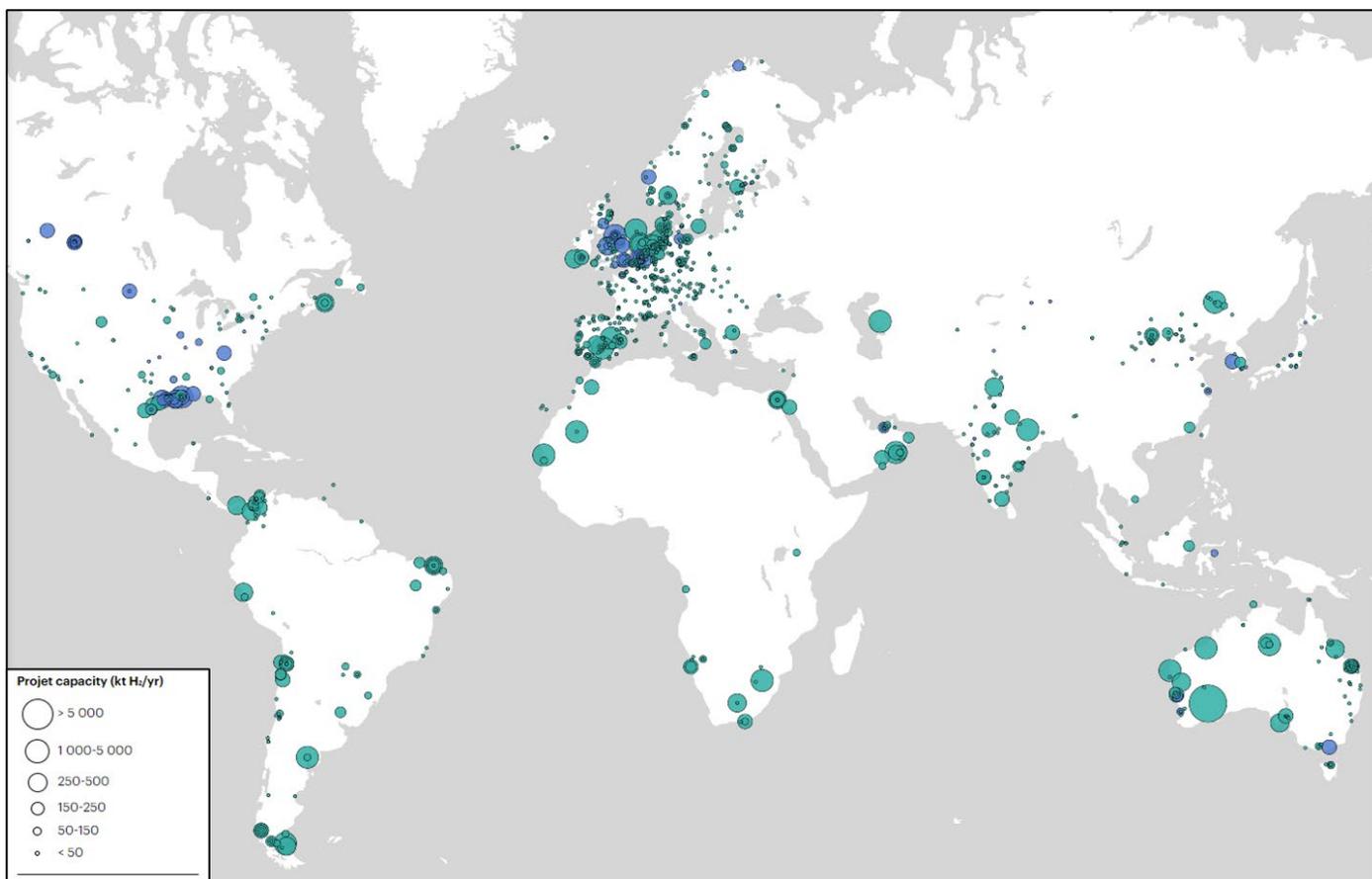
然而，人们广泛认为，随着规模经济的增长，电解槽的成本预计将会降低。当电解槽被战略性部署于具有成本优势的可再生能源区域时，它们有潜力与 CCS 达到成本平衡（图 10）。从本质上讲，蓝氢被视为一种促进产业增长的过渡技术。特别是当可再生氢的成本仍然高时，它作为一种有效的减碳基本氢应用手段。

图 11 2021 年、2022 年和 2030 年预测的制氢方法成本(EIA 2050 年净零排放场景)。



来源：国际能源署

图 12 2030 年计划投产的电解槽(绿色)和碳捕捉及存储(蓝色)项目示意图。



来源：国际能源署

电解槽类型及其对铂金的影响

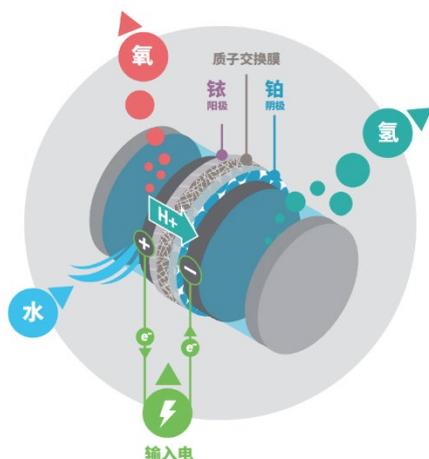
到 2030 年，电解槽将占据新增氢产量的大部分份额。目前，碱性电解槽（AEL）和含铂质子交换膜（PEM）电解槽相对成熟并已商业化。然而，阴离子交换膜（AEM）电解槽和固体氧化物电解槽（SOEC）的电解法虽然发展潜力巨大，但商业成熟度仍然较低。

下面我们将概述主要的电解槽技术选择，作为在讨论部署情景和未来趋势之前的指南：

质子交换膜（PEM）： 该技术使用气密的固体聚合物基膜作为电解质将水分解为氢气和氧气。尽管成熟度不如碱性技术，且具有更高的资本成本，但 PEM 电解槽在响应多变的电力供应方面上循环能力要强得多，这使它们更适合与间歇性可再生能源配对。随着制造规模的扩大，PEM 的成本预计将显著降低。

PEM 电解法使用铂和铱作为涂层催化剂，与碱性电解槽提供相似的效率，但占地面积小得多——最多可小 5 倍。这种紧凑的设计对于海上风电场或城市空间来说是有利的。PEM 电解槽生产的氢气纯度达到 99.99%，可以直接用于燃料电池应用，省去了额外的净化步骤。另外，与其他电解技术相比，PEM 电解槽通常在较高压力下运行，高达 200 帕。这降低了与其他技术相比的平衡厂成本，因为随后的压缩需求减少了。虽然铂和铱是 PEM 电解中使用的主要催化剂，但正在引入钌来减少给定功率输出所需铱的用量。总的来说，可以合理地假设随着时间的推移技术改进，催化剂的需求将会下降——这称为“节约用量”。

图 13 利用铂铱制氢的质子交换膜电解槽示意图。



来源：WPIC 研究

碱性电解槽（AEL）是最古老的电解槽类型，它们使用碱性电解液和金属电极将水分解为氢气和氧气。与 PEM 电解槽中高度腐蚀性的酸性条件不同，AEL 电解槽的碱性条件允许使用非贵金属电极，因此成本较低。这有助于降低与 PEM 相比的资本支出。制氧阳极通常是镀镍不锈钢，而制氢阴极是活化的镍合金，通常是硫化镍、镍钼或镍锡合金。另外，一个关键差异是 AEL 利用多孔膜分离氢气和氧气。这种隔膜造价更低，但当与可再生能源相结合时可能导致性能问题，因为一些气体可以穿过屏障。

尽管铂金在碱性电解槽中作为氢进化反应的催化剂优势明显，因为它的过电势更低，但出于成本与性能的权衡，通常选择镍合金。一个缺点是，当电解槽暴露于启动停止的频繁操作时，镍合金更容易加剧退化。这导致了随着时间的推移氢转换效率下降。一些制造商已经开始在**高性能碱性电解槽中加入铂金催化剂**以提高性能，包括允许更高的电流密度和使用寿命。

阴离子交换膜（AEM）是一种较新的碱性技术，其行为类似于 PEM。该系统旨在使用非多孔膜并像 PEM 一样在更高压力下操作。目的是消除导致停机和增加维护的交叉损失。与 PEM 一样，AEM 不使用电解液，消除了关于腐蚀性泄漏的环境材料处理问题。这种设计变化也减少了尺寸和重量。

电极由低成本的过渡金属（Fe、Ni、Co）制造，与 PEM 相比提供了成本优势，尽管一些制造商正在添加少量的铂金以提高性能。这项技术仍然有技术挑战需要克服才能实现商业化。首先，阴离子导电性显著低于 PEM 中使用的阳离子导电性，这影响了氢气和氧气的产量。其次，膜的耐久性较低，影响了电堆的寿命。这些问题可能会随着时间的推移而得到改善，商用数量已经出现并且正在扩大规模。

固体氧化物：固体氧化物电解技术作为一项有前途的新兴技术出现。在 500 至 850 度的高温下运行，利用热量分解水，实现约 90%的效率。相比之下，AEL 和 PEM 目前的效率为 60%至 80%。

尽管固体氧化物电解槽有潜力，但目前可用技术中资本成本最高，且由于恶劣的运行条件降低了内部组件的性能，因此维护费用也相当高。如果使用电源进行加热，则高温电解的可行性成为一大挑战。然而，当与提供废热的工业过程结合时，所需的额外输入能量显著减少，生产每千克氢的电力成本与基于化石燃料的灰氢相当。

一种特别有前途的应用包括将固体氧化物电解槽（SOEC）与核能相结合以生产粉红氢。这种将低成本、低排放的核电与废热结合的创新配对有潜力以比绿氢更低的成本产生氢气。此外，SOEC 在钢铁或氨生产等行业的整合显示出优势，在这些行业中废热是随手可得的。

图 14 电解工艺技术概述。

	碱性	质子交换膜	固体氧化物电解	阴离子交换膜
电解质	水性氢氧化钾溶液	PFSA 膜（例如 Nafion）	钇稳定氧化锆（YSZ）	阴离子交换离聚物
阴极	镍，镍-钼合金	铂，铂-钨合金	镍/YSZ	镍及镍合金，铂
阳极	镍，镍-钴合金	氧化铱，氧化钨	YSZ	镍，铁钴氧化物
工作温度	60 – 80	50-80	500-850	50-60
工作压力	30	70	1-25	1-30
堆寿命 (小时)	60-80 千	60-80 千	<10 千	
技术成熟度	成熟	商业化	演示	大型原型
资本成本	美元 500-1400/千瓦	美元 1000-1800/千瓦	美元 2800-5600/千瓦	

来源：能源金融中心，WPIC 研究

深度解析电解法：碱性 VS 质子交换膜

到 2023 年，全球部署的电解槽容量超过了 1 吉瓦，根据已宣布的项目，到 2030 年可能会超过 250 吉瓦。目前，欧洲和中国领先于这一发展。然而，美国的通胀削减法案（IRA）可能会改变这一局面，使美国在总装机容量中所占份额大于目前已宣布项目中所能看到的份额。应该注意的是，通胀削减法案在美国面临政治反对，如果特朗普在 2024 年选举中获胜，该法案可能面临被撤销的风险。

宣布项目的落地仍然高度不确定，因为预计在 2030 年前交付的所有宣布项目的容量中，只有不到 20%取得最终投资决策（FID），更不用说开始建设了。尽管许多项目离挂牌投产还有多达 6 年的时间，但这种情况并不罕见。值得欣

慰的是，50%的项目已完成可行性研究，这突显了对规划和宣布项目的资本承诺在 2022 年增加了 74%。虽然并非所有项目都会建设，但势头正在形成。随着区域政策的成熟，宣布和 FID 的数量将会增加。

碱性电解和 PEM 是全球商业上可用的电解槽，代表了到 2030 年公开容量的近 95%。理解技术分布很重要，因为尽管铂催化剂开始在碱性电解中使用，但其使用规模尚不清楚，而且当前的大多数假设是，主要或仅仅是 PEM 直接促进了铂需求。在解释我们对技术前景的看法之前，有必要提供一个关于选择电解槽的驱动因素的高层次概览。

电解法选择的驱动因素

生产者战略性地选择最大化投资回报的电解设备技术。决定最低氢成本涉及到运营费用（主要是可再生电力）的合计，以及按氢产量计算的年度资本偿还。在项目地点的能源成本相等的情况下，最小化氢生产成本存在三个变量：资本支出（Capex）、运营支出（Opex）和利用率，每种技术都提供不同的优势和劣势，这将在接下来的部分进行探讨。通常情况下，质子交换膜（PEM）的资本支出高于碱性电解水（AEL）（见图 15），但是在运行期间的技术考量，诸如较低的维护成本和更高的利用率，可以平衡这一点，降低运营支出和单位成本。

资本成本驱动因素

随着新技术的出现，初始成本往往很高。然而，有三个关键途径可以降低资本开支：规模经济、数量经济和创新。

规模经济：扩大运营规模可以带来显著的成本效益。随着工厂或项目规模的扩大，固定成本可以分摊到更大的输出上，从批量采购能力中节省成本，并在建设和工程中实现协同效应。例如，在化工行业，一个规模是原来十倍的工厂，其资本成本可能只高出五倍。随着电解槽项目变得更大，其单位产能的资本成本预期将会降低。

数量经济：“数量经济”指的是生产同一产品的更多数量导致成本降低的现象，这归因于自动化制造和供应链优化。

创新：同时，创新作为成本降低的第三个驱动力。它包括制造设计的改进，利用规模和数量经济，以及基础技术的进步以增强性能和降低制氢成本。

通过综合这些概念，持续的研发改进技术，行业扩展提升规模，以及大型项目的建设降低成本。这个迭代过程通常被称为学习曲线。

回到技术选择的讨论，碱性电解是一种更成熟的技术，相比于 PEM（质子交换膜）系统，位于学习曲线的更远端。这种成熟度转化为更多内嵌的创新和承担更大项目的能力。通常，单个碱性电堆现在可以扩展到 10 兆瓦，而 PEM 则为 5 兆瓦，而且，平均来说，建造一个碱性系统的成本大约只有 PEM 系统的一半（图 15）。

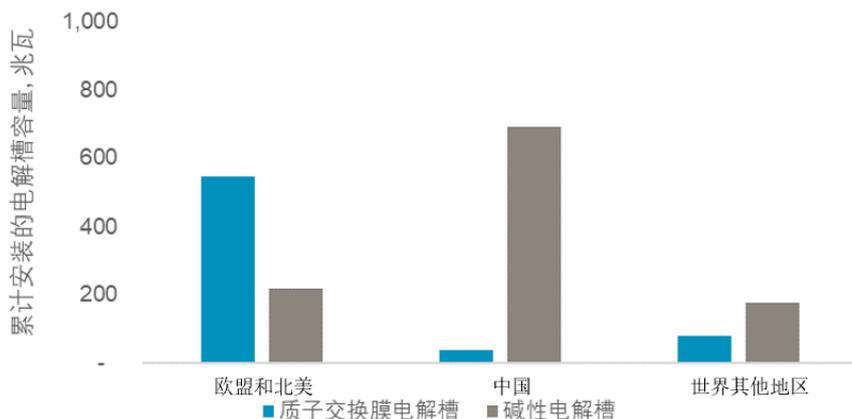
这种成本差异在地区上更为明显。在中国，碱性电解槽的制造取得了显著进步，电解槽的采购成本比全球平均水平低出惊人的 60%（尽管有传言称，可能在运行稳定性、输出和运营成本方面有所牺牲）。相反，在中国，PEM 系统的成本大约是三倍（图 15）。这种鲜明对比支撑了碱性电解（AEL）在全球早期的主导地位，截至 2023 年底，预计在全球安装容量市场份额达到 65%，相比之下 PEM 系统的市场份额较低。

图 15 电解工艺技术概述。

2022 年未安装的资本成本 (美元/千瓦)			
	全球平均	中国平均	差值
质子交换膜	1,000	630	-0.4x
碱性电解	500	210	-0.6x
差值	2.0x	3.0x	

来源：美国能源部、清洁能源示范中心 (CEDC)、WPIC 研究

图 16 碱性电解法在中国和世界其他地区是主导技术，市场份额达到 65% (2023 年)。质子交换膜电解在欧盟和北美更受欢迎。



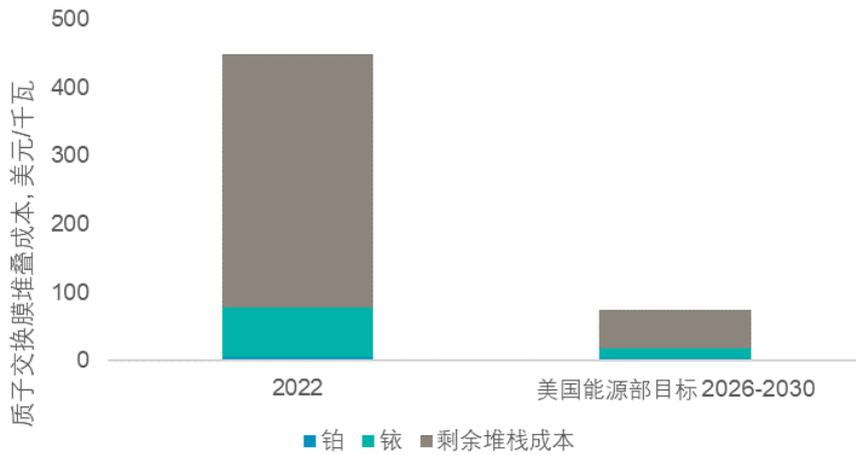
来源：国际能源署、WPIC 研究

尽管与 AEL 相比，PEM 的发展程度较低，创新程度不高，但这同时也意味着未来有更大的创新空间来降低成本。学习曲线起初陡峭，可以在短时间内积累大量的成本节省，但随着获取的进步变得越来越难，曲线会逐渐变平。太阳能装机在起步阶段是极其昂贵的，然而，在十年的时间里它们的成本降低了 90%。尽管 PEM 可能无法实现如此巨大的节省，但太阳能创新确实提供了一个并行的例子。碱性技术已经存在了 100 年，已经在成本节省的曲线上走得更远，因此尽管预计会有成本节省，但预期 PEM 的成本将会下降得更快。许多技术评论员建议，到 2030 年，PEM 的成本在中国以外的地区可能会与 AEL 相当。

一些简单的改进将推动 PEM 成本的降低，具体来说是制造自动化与催化剂的开发改进相结合，这可能会包括节省贵金属的使用。一家工程咨询公司（伍德集团）在最近的一个氢能大会上透露，目前 PEM 堆栈的制造工作程度高度依赖手工劳动。组装一个堆栈需要两名全职员工和两天时间。然而，一个自动化生产线可以在 2.5 小时内完成产品的制造，提供了明显的优势。

贵金属（铂和铱）目前大约占 PEM 电解槽堆栈设计材料成本的 15%。随着催化剂支撑设计的成熟，延长催化剂的寿命和效率，同时最小化金属含量，节省贵金属的可能性很大。预计到 2030 年，铱的节省率将达到 80%，铱最近的交易价格较高（约为铂的 4 倍），并构成了大部分贵金属成本。铂的负载量也将减少，尽管减少的幅度可能会较小。鉴于它们的成熟度已经经历了高水平的节省，预计催化剂研发的重点将放在成本较高的铱上。关键的信息是 PEM 中使用的贵金属催化剂相关的主要费用是铱，而不是铂。

图 17 铂的节约有助于降低资本成本。由于铂金的价格贴水，目前大举节约铂金的动机较低。



来源：贺利氏、美国能源部、庄信万丰、WPIC 研究

最终，创新将在提高电解水设备性能方面发挥关键作用。如图 18 所示，美国能源部预测，到 2030 年，质子交换膜（PEM）技术的进步将使其在成本和使用寿命上与碱性技术相匹配。至关重要的是，PEM 系统有望在提供更优越性能的同时实现成本平价。

PEM 电解槽旨在比碱性系统实现更高的效率和更大的电流密度。这意味着 PEM 电解设备能够使用更少的电力生产更大体积的氢气，并且占用更小的空间。这些优势在海上和城市环境中尤其有益，那里空间限制普遍存在，而且效率至关重要。

图 18 2030 年美国质子交换膜电解碱性电解的性能目标，美国能源部的目标是到 2030 年实现质子交换膜电解与碱性电解在成本和性能上的一致性。

特性	单位	碱性		质子交换膜	
		2022	2030	2022	2030
性能	A/cm ²	0.5	2	2	3
效率	千瓦时/公斤氢	51	45	51	43
寿命	操作小时	60,000	80,000	40,000	80,000
资本成本 (堆栈)	美元/千瓦	250	50	450	50
系统成本	美元/千瓦	500	150	1,000	150

来源：美国能源部、WPIC 研究

运营成本驱动因素与可再生能源兼容性

接下来，我们考虑这两种技术与可再生能源来源的兼容性。目前，质子交换膜（PEM）和碱性电解（AEL）都用于生产绿氢。然而，值得注意的是，它们在氢气生产和运营成本方面的表现可以根据可再生能源种类而有很大的差异。碱性电解装置设计为以恒定功率运行，而 PEM 可以承受更高水平的灵活性。这些差异根植于系统设计之中。

由于可再生能源的间歇性，例如当风不吹或云层遮挡太阳时，直连电解槽可用的功率会减少，这被称为在部分负荷下运行。碱性电解装置使用多孔膜，这限制了氢气和氧气流的混合，但并不能完全阻止。在部分负荷下运行会增加这种

混合，当气体浓度超过 4%（例如，96%的氧和 4%的氢）时，增加燃烧或爆炸的风险。为了减轻这种风险，电解装置系统会在低于 4%的安全系数下启动关闭。这通常意味着当功率下降到其额定能力的 25-30%以下时，会停止氢气生产。这引发了两个未来的挑战：

- **延长重启时间：**与 PEM（质子交换膜电解）相比，重启碱性电解装置需要更长的时间，这使得关闭时间超出了恢复到名义功率 25%所需时间（大约比 PEM 多 30 分钟）。
- **电极老化：**频繁的碱性电解槽停机/启动会加速电极老化，缩短设备寿命，并增加维护和资本成本。例如，在碱性电解装置中使用的镍电极，在经过 5,000 到 10,000 次启停循环后会显示出显著的退化。

这些因素的结合有效地减少了在一定时间范围内使用可再生能源时碱性电解槽产生的氢气量，相比于质子交换膜（PEM）电解槽来说。这反过来又增加了每公斤氢的产生总成本。

通过融入解决方案，如通过一个中间能量存储设备（例如电池）吸收功率波动，或者实施先进的电解槽栈堆系统管理，可以缓解这个问题。然而，这两种方法都带来了额外的成本和局限性。另一种策略涉及通过将电解槽与电网连接来平衡可再生电力供应，以维持稳定的负载，但这可能会影响到氢产品的定义（例如，可再生/绿色或化石/灰色），并且可能会影响到补贴的资格认定。尽管在中国等地区很受欢迎，但由于严格的政策，这种方法可能不会在西方广泛应用。

另一方面，与可再生能源的兼容性是质子交换膜（PEM）技术的一个突出特点。它可以直接与可再生能源相结合，因为它可以在较低的部分范围内运行，从 0%到 10%。这意味着系统可以在负载下降到 10%之前处理负载 - 或者根据系统设计，根本不会关闭。与其他电解系统相比，PEM 系统对负载增加和重启的响应速度更快。尽管 PEM 可能有较高的前期成本，但它通过系统优势和潜在的运营成本降低来平衡这一点。

政策驱动因素

在中国以外的地区，运营商更倾向于使用质子交换膜（PEM）电解技术，因为它在应对波动性电源，如太阳能和风能时具有灵活性和响应性。随着美国和欧盟政策的成熟，似乎电解槽将不得不直接或通过购电协议（PPA）与可再生能源项目挂钩。欧盟可再生能源指令针对利用电解产生可再生氢气在 2023 年制定了严格的附加性和时间相关性规则，美国也在起草类似的立法（45V 税收抵免规则）。生产商必须满足这些规则，才能将氢产品归类为可再生或绿色氢气。反过来，这将影响氢生产的税收、补贴，以及可能的最终市场和价格：

附加性：使用现有电网组合；或要求建造“额外”的可再生能源设施。到 2027 年，在欧盟，电力必须来源于建设时间至少早于电解槽 3 年的可再生能源项目。

时间相关性：用于制氢的电力必须在与可再生能源设施签订的购电协议（PPA）规定的同一小时内供应。

这意味着从 2027 年开始，在欧盟，为电解槽供电的电力必须通过两种方式之一来实现。第一种是通过专用的直接耦合的可再生能源。或者第二种，通过电网连接购电协议的新可再生能源来源。在利用第二种选项时，从电网中使用的电力必须仅在可再生能源运行时使用，实际上这是一个直接耦合的电解槽。因此，即使是电网连接的电解槽也会经历波动和部分负载。

时间相关性适用于能够快速响应基于可再生资源发电的灵活性电解槽，有利于铂基质子交换膜（PEM）电解槽。与碱性电解（AEL）相比，响应迅速的电解槽

能够通过紧密追踪输入电力的波动，实现更高的利用率，同时在这种运营场景下也可能减少维护的停机时间。此外，快速启动时间提供了其他电源增加运营时间的选项。这可以通过使用削减的电网电力来实现，或者使电解槽运营商能够向电网运营商提供频率控制储备服务。在控制储备协议下，电网运营商会补偿电解槽运营商，激励其在电力过剩和需求低时期运行和取电以稳定电网。增强的利用率与此类协议相结合，有助于提高项目的净现值（NPV），可能会抵消碱性电解槽项目在初始资本支出上的优势。此外，预计通过 2024 年的氢银行，每生产一公斤氢气将获得高达 4.5 欧元的补贴，进一步放大了增加利用率和制氢的优势。

在中国以外的地区，非 PEM 电解槽主要由能够稳定运行碱性电解槽的地区和项目组成。拥有高度可再生电网或低碳核能区的国家或地区可以直接从电网为电解槽供电，以生产低碳氢气。此外，某些可再生能源，如水力发电和地热能源或一系列互补的可再生能源，也适用于碱性技术，因为它们提供电力更加稳定。当稳定的电力供应且没有空间限制时，碱性技术是当前成本效益高的制氢首选技术。

将一切汇总起来 —— 东西方趋势

电解槽部署的区域趋势已经显现（图 19），在中国和非洲、南美洲、澳大利亚等地区，碱性电解槽占据主导地位，而质子交换膜（PEM）电解槽在欧洲和北美拥有更大的市场份额。我们预计这种区域偏好将持续，碱性电解槽将保持主导地位，但 PEM 电解槽将逐步增长，到 2030 年将达到全球市场份额的 38%（图 17）。

到 2030 年，我们预测全球超过三分之一的电解槽容量将安装在中国，预计碱性技术将保持 90-95% 的市场份额，得益于相对于 PEM 的资本折扣。同时，PEM 技术预计在北美和欧洲将经历增长，这得益于严格的可再生氢政策以及其相对土地使用和长期扩张的紧凑型占地优势。

图 19 2023 碱性电解和 PEM 电解的区域划分

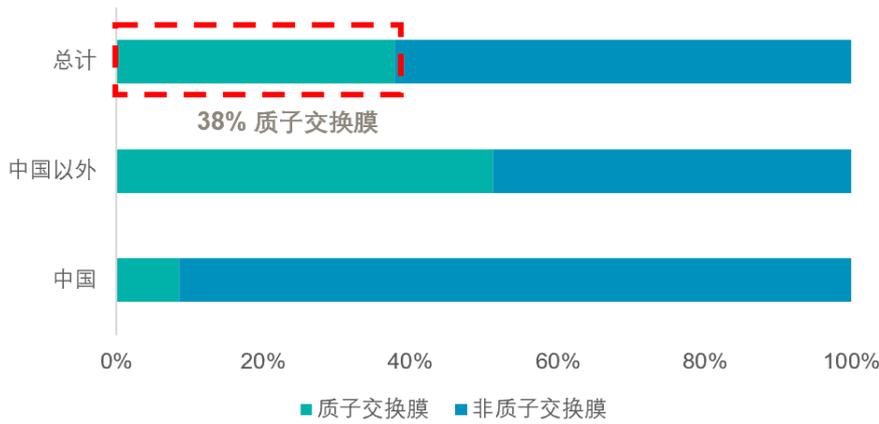
	质子交换膜	碱性
美国 & 欧盟	70%	30%
中国	5%	95%
世界其他地区	30%	70%

来源：国际能源署、WPIC 研究

虽然目前选择质子交换膜（PEM）电解技术的成本较高，但它可能增加战略价值。在考虑具有数十年项目寿命的电力设施时，PEM 的运营成本当前可能较高。然而，随着每 10 至 15 年就需要更换电解槽栈堆，下一代产品预计将提供更高性能、增加对可再生能源的利用，并且在西方地区达到与碱性技术相当的成本。在使用相同的场地体积在后续更换可以安装更大容量的项目，与碱性技术相比，产生更高的氢气产出和收入的可扩展性。

考虑到日益增长的可再生能源项目部署和可再生能源波谷时间段发电量的增加，在今天投资 PEM 技术提供了积累经验和解锁长期战略价值的机会。这种战略视角将 PEM 定位为前瞻性能源项目的有力选择，这类项目目标是实现持续增长和灵活性。话虽如此，行业发展迅速，技术选择高度依赖于创新和规模化。

图 20 由于低资本支出，碱性电解将保持主导的市场份额。PEM 将在与可再生能源直接耦合的地区获得市场份额。

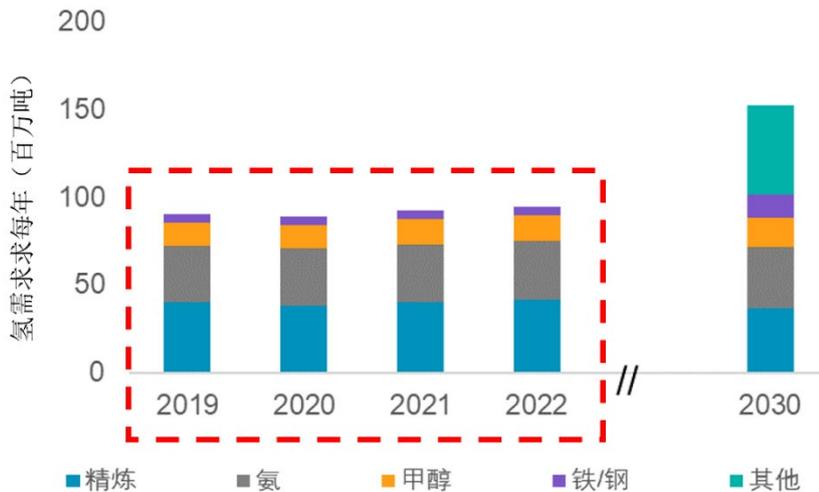


来源：国际能源署、黄橙集团、WPIC 研究

氢气有什么用途？

氢气需求可分为传统用途和未来用途。传统的氢气市场利用现场生产的氢气，这些氢气是化石燃料生产的副产品，并在现场用于生产石化或农业的衍生物。目前的需求量为 9500 万吨，主要由灰氢生产满足，这些需求大多是来自难以减排的行业需要氢气作为原料。到 2030 年，传统的氢气需求细分市场（例如氨和炼油）将保持稳定，但新的需求细分市场（例如燃料电池电动车和直接还原铁法（DRI）炼钢）将支撑新增需求增长的绝大多数，复合年增长率为 37%（图 21）。

图 21 自 2019 年以来，化工和石化生产对氢的传统需求保持平稳。



来源：国际能源署

传统氢气的用途

石油精炼：

氢在石油精炼过程中扮演着关键角色，作为反应物、催化剂和加氢反应的载体。其使用能够生产出更清洁的燃料，具有改善产品性能的特性，满足监管要求和市场对高质量精炼产品的需求。氢在石油精炼中的一些主要用途包括：

加氢裂化：氢气作为催化剂参与加氢裂化反应，帮助将长链烃转化为较小的分子，如汽油、柴油和喷气燃料。

加氢处理：加氢处理，也称为脱硫化加氢（HDS），是一种用来去除石油馏物中硫、氮和其他杂质的过程。

催化重整：催化重整是一种将低辛烷值的石脑油馏物转化为高辛烷值汽油的过程。

加氢作用：加氢反应可用于将不饱和化合物如烯烃和二烯烃转化为更稳定、更有价值的产品，如石蜡。

异构化：氢气作为反应物在异构化反应中使用，以促进分子结构的重组，提高汽油的质量。

化学品生产

氨的生产是氢气第二大传统需求领域。它是一个关键的化学基础原料，对农业肥料尤其重要。氨主要通过哈伯-博世工艺法生产，该过程涉及在高压和高温条件下，氮（N₂）和氢（H₂）的反应。

氨也显示了作为能量载体或直接作为燃料的巨大潜力。目前正在进行实验工作，以测试其作为船运氢及燃料电池和内燃机能源的适用性。

甲醇是各种行业和应用中的一种重要化学品。甲醇通常是通过在催化剂（通常是铜-锌氧化物）存在下，将一氧化碳和氢气反应而生产的。

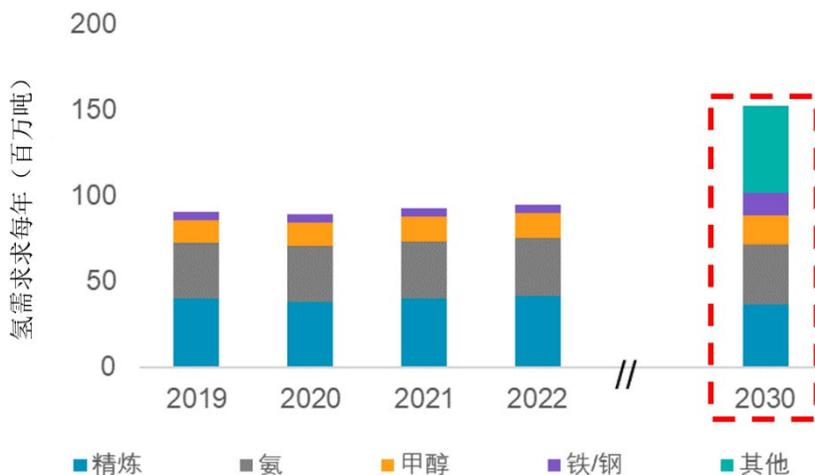
氢气的脱碳应用

氢气在脱碳中的作用是双重的。首先，要用绿氢取代传统行业中使用的灰氢。其次，新的需求将产生，其基本目的是通过应用低碳氢气作为替代能源取代目前使用的能源来实现污染行业的脱碳。

我们稍后会更全面地讨论这个问题，但作为一个简短的插曲，脱碳目前传统最终用途中使用的 9500 万吨灰氢，可以节省 4.3 亿吨碳排放，或相当于让 1.2 亿辆汽车停止上路一年。

此外，新需求必须满足两个条件才能成为可行的。首先，有必要降低应用的碳排放强度。其次，氢提供的解决方案必须在经济上具有竞争力，能够与其当前的使用以及任何其他替代品相比较，提供规模和商业化。一种在有助于定量评估氢的新应用的方法论是“氢阶梯”。

图 22 氢燃料电池汽车和合成燃料生产等新需求将推动氢年需求增长约 50%。



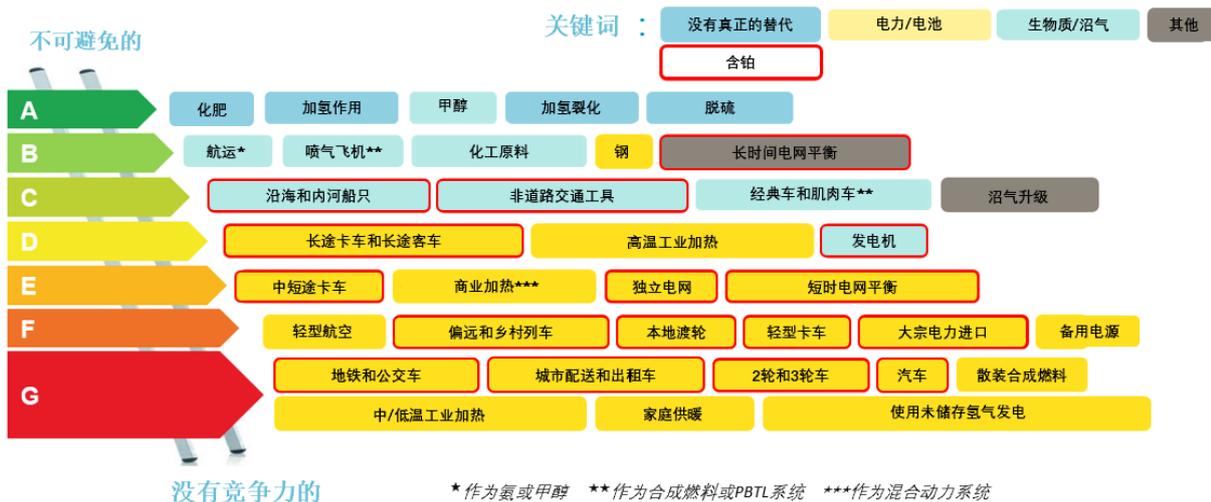
来源: 国际能源署

氢梯度法

氢梯度法确定了在尝试脱碳的可能技术上采用氢的应用场景。梯度法根据技术采纳的驱动因素以及替代脱碳技术，对应用场景按照到 2035 年成为氢重要市场用途的可能性进行排名。

应用场景从顶部的“不可避免”排到底部的“无竞争力”。所谓“不可避免”实质上意味着要么必须将氢用作生产原料，要么目前没有技术替代氢。在“无竞争力”的梯度端，虽然可以使用氢，但当前氢被替代技术所超越。值得注意的是，“不可避免”使用氢并不必然意味着需求在增加，而是指氢在该应用中至关重要，必须在预测氢需求情景时予以考虑。

图 23 氢燃料电池和合成燃料生产等新需求将推动需求增量增长约 50%。



来源: Michael Liebreich/Liebreich Associates

顶部行 (A) 由当前氢的主要用途组成，这些功能无法替代（例如氨的生产）。目前对氢的需求几乎完全通过化石燃料生产，并且大约占全球温室气体排放的 2%。这些行业将首先实现脱碳。铂将通过从灰氢向绿氢的强制性转变而受益，这需要使用含铂的电解槽。

往下看，梯形图突出了目前不使用氢气但可能采用氢气来实现脱碳的市场（从 B 到 G）。这些是新的需求领域。范围从“合成燃料”（将绿氢和捕获的碳结合用于航空）到由燃料电池驱动的“汽车”。

在解析这些新应用之前，我们将花一点时间考虑这些新应用对铂金的影响。

小众应用产生巨大的铂金需求：

图 23 中镶红方框直接通过使用燃料电池和电解槽对铂金需求产生贡献。大多数含铂应用集中在 C 至 G 组中，代表“一定市场份额”到“某些地区的小众应用”。理解这一点很重要。氢经济与其他技术并肩存在，以支持全面的脱碳尝试，如图 23 中所强调的，电池/电动替代品是可用的（黄色）。

必须承认，由于氢技术与电池电动车（BEV）技术相比能效较低，它将主要保留用于大容量、高利用率周期的应用。在电池过大且充电时间不切实际的情况下，氢就成为了可行的电池替代品。

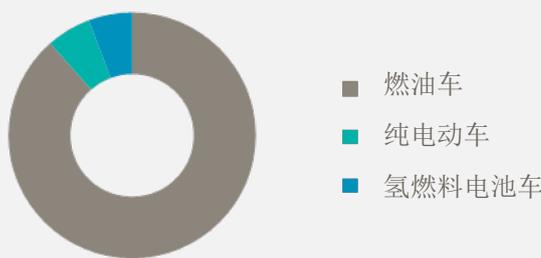
图 24 新的氢需求领域，如氢燃料电池车和合成燃料生产，将推动铂金需求增加约 50%。

应用	用例	2030 市场份额%	2030 千盎司铂金
氢燃料电池汽车	高端 SUV/先行者国家	0.3%	91
氢燃料电池卡车/货车	增程器/冷库	1%	42
氢燃料电池重型车	高利用周期	6%	372

来源：国际汽车制造商协会、WPIC 研究

电解槽和燃料电池中相对较高的铂金含量意味着这些领域的微小增长率就可以对铂金总需求产生巨大影响。例如，我们预测到 2030 年，轻型、轻型商用和重型燃料电池电动车（FCEVs）的市场份额分别将达到 0.003%、1%和 6%。尽管这些市场份额有限，但这意味着到 2030 年，FCEVs 对铂金的预计需求将超过 500 千盎司，相比之下，2023 年内燃机（ICE）对铂金的总需求约为 3000 千盎司。预计此后的增长将持续，到 2040 年，中型和重型燃料电池卡车的市场份额将达到十中位数的水平。

图 25 到 2030 年，重型燃料电池汽车的市场渗透率将超过 6%



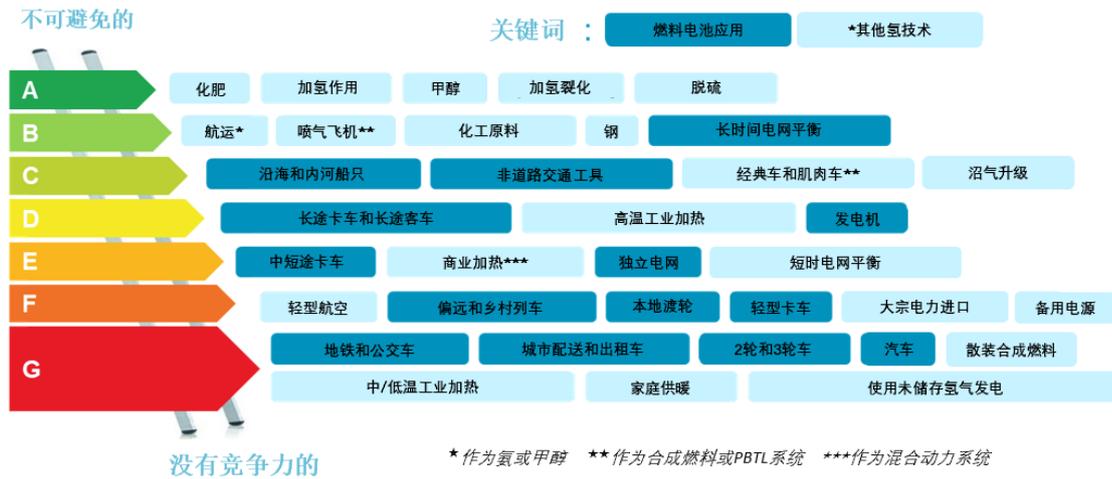
来源：WPIC 研究

氢燃料电池

氢燃料电池随着全球碳减排放上了议程，燃料电池可以在多种应用中取代排放碳的燃烧过程，例如替代用于备用电源或海上辅助动力的柴油发电机，以及普通交通和货运应用（图 26 中深蓝色部分所示）。

燃料电池是通过氢和氧结合的电化学反应产生电力的设备，其唯一的副产品是热和水。燃料电池技术已经成熟，有超过 100 年的历史将氢转化为电力和水。

图 26 氢阶梯中存在许多技术上可行的燃料电池应用(深蓝色)。



来源: Michael Liebreich/Liebreich Associates

燃料电池具有多样化的应用（图 27），涵盖便携式、移动式 and 固定式等不同类别，每个类别都适应不同的功率范围和燃料电池类型（如下所示）。铂金在移动燃料电池应用中作为催化剂脱颖而出，促进氢和氧之间的最佳反应。其稳定性能够抵御挑战性的化学环境和高电流密度，确保长期效率。

在移动领域，有前景的行业包括汽车燃料电池车辆，以及铁路、海运和移动重型机械等离路应用。这些行业展现了显著的发展潜力，推动燃料电池技术在难以实现电气化的应用中，与电池技术并驾齐驱的采用。

图 27 燃料电池的种类很多。通常，质子交换膜燃料电池用于移动应用，而其他燃料电池用于固定发电。

名称	缩写	常见用途	行业	工作温度 °C	电效率 (%)	含铂?
质子交换膜燃料电池	PEMFC	便携式、移动式	道路运输、消费品	<120	~55%	是
磷酸燃料电池	PAFC	固定式	固定电力	120-150	~40%	是
碱性染料电池	AFC	固定式、移动式	固定电力	<100	~65%	部分
熔融碳酸盐燃料电池	MCFC	固定式	固定电力	600-700	~55%	否
固体氧化物燃料电池	SOFC	固定式	固定电力	500-100	~60%	否

来源: WPIC 研究

汽车氢燃料电池应用

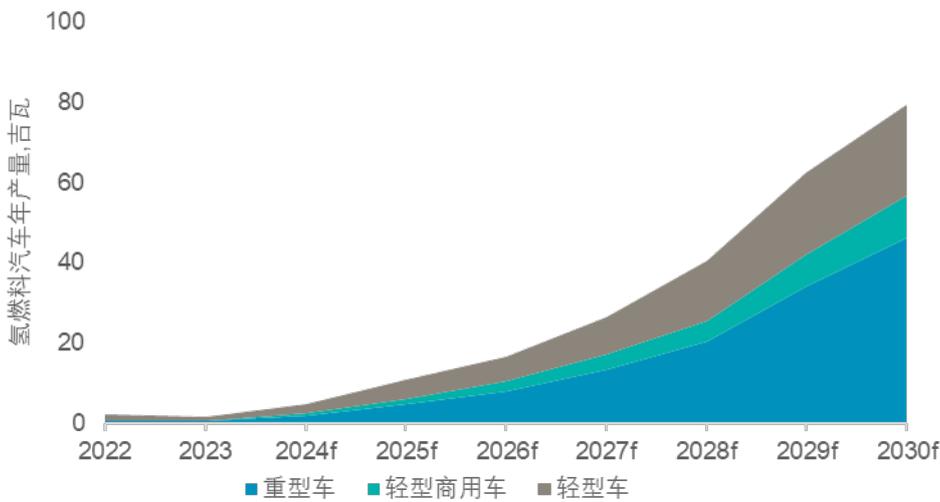
燃料电池电动汽车（FCEV）与电池电动汽车（BEV）和微混合动力电动汽车（MHEV）都有相似之处。与 BEV 一样，FCEV 的驱动力由一个或多个电动机提供，能源来源是燃料电池，而不是大型重型电池组。燃料电池由一个“堆栈”或膜电极组件（MEA）组成，每个膜夹在阴极和阳极之间，两者都添加了铂，膜作为固态电解质。氢气被引导到阳极，在那里它与铂催化剂反应，导致每个氢原子分离成一个电子和一个质子。电子以电流的形式流向阴极，提供推进力。而质子穿过膜与进入阴极的空气中的氧气和电流结合，生成纯净水作为车辆的排放物。

除了燃料电池外，FCEV 通常与 BEV 共享约 80%的组件和系统。与 MHEV 一样，FCEV 也有一个相对较小的电池，用于储存再生制动能量，并在大加速时将其提供给电机，尽管主要驱动力来自电动机而不是内燃机（ICE）。重要的是，FCEV 是“离网”的，它们不需要插电就能充电，这在内城地区是一个显著的优势，因为消费者可能无法获得非街道停车场和家用充电点。此外，FCEV 提供更快的加氢时间，与燃油车（3 至 5 分钟）相当，更长的行驶里程，以及显著更轻的整体系统重量。

迄今为止，车企在乘用车、轻型商用车和重型运输开发了 FCEV 车型。到 2022 年底，全球 FCEV 约有 72,000 辆，其中 80%为乘用车，1%为轻型商用车，19%为卡车和公交车。尽管 FCEV 车队目前规模不大，但预计将迅速扩张，因为像现代、丰田和博世这样的大型跨国公司正在投资制造业。我们在[氢能展望](#)中概述的自下而上的分析表明，到 2030 年，基于生产商的产能扩张，各种类型 FCEV 的保有量可能有超过 2,000,000 辆。

FCEV 的未来需求增长将主要来自重型车辆领域，特别是在近期（图 28）。在欧盟，重型车辆占道路运输温室气体（GHG）排放的约 25%，与全世界大致相似。重型运输行业需要变革，其商业本质使得注重环保的组织能够在人群中集中的参与者中做出流线型的变化，这与影响乘用车细分市场中消费者选择的复杂格局不同。

图 28 汽车燃料电池需求将受到重型车应用的推动。



来源: WPIC 研究

商用车应用通常需要高容量利用率、长距离能力和高装载能力。考虑到燃料电池电动车（FCEV）和电池电动车（BEV）的不同特点，根据运输应用的不同，减碳技术的选择也各不相同，具体如下所述。

重型车辆（HD）： 重型车辆中的燃料电池系统比同等功率输出所需的电池明显轻。据清洁空气特遣队（Clean Air Task Force）称，一个 8 类美国电池电动货运卡车（BEV）与柴油卡车相比，其载重能力可能会减少 10%到 20%，而燃料电池电动车（FCEV）的载重损失不到 5%。这减少了 BEV 用于运输目的所需的大型重型电池所带来的容量和有效载荷损失。此外，FCEV 通常可以行驶更长的距离，范围从 500 公里到 1000 公里，并且可以快速和离网加注燃料，为偏远地区的长途运输提供了显著优势，并且最小化了电池充电所需的停机时间。

轻型商用燃料电池应用也在兴起。目前有两个主要用例正在出现。首先是在冷藏车辆中，所需电池的尺寸将过大，无法满足功率要求。其次，使用小型燃料电池在厢式货车和轻型卡车中，作为电动车的续航增程器。其思路是确保商用应用中的高利用率，并最小化损失。此外，有关商用电动车在更高有效载荷下拖拉和续航能力不足的报告支持了燃料电池系统的使用。Stellantis、Faurecia 和 Michelin 的合资企业 Symbio 计划到 2030 年每年生产 20 万辆轻型商用 FCEV。

乘用车：目前市场上有两款商用乘用车，即现代 Nexo 和丰田 Mirai。动力电池技术是燃料电池在乘用车中的替代品。自 2020 年以来，由于技术进步、充电设施改善、政府补贴和新车型推出，电动车市场份额已增长四倍，到 2023 年达到 12%。尽管有些消费者反对，但电动车似乎已经成为减碳乘用车的现行途径。在短期内，我们预计全球燃料电池车市场渗透率的增长将是适度的。

图 29 宝马 wix5 氢动力 SUV 与现代 Nexo



来源：宝马汽车、现代汽车

从长远来看，随着商业应用加氢设施的发展，可以想象会出现小众乘用车燃料电池电动车（FCEV）细分市场。回顾 2016 年可以看出市场是如何快速演变或缩小的。柴油车曾一度占欧盟轻型车市场份额的 50%。然而，在 2023 年——八年后——随着“柴油门”丑闻和消费者情绪的下降，这一份额已降至约 15%。相反，在同一时期，欧洲的轻型纯电动车（BEV）的生产份额从 1% 激增到约 25%。我们的观点是，尽管目前乘用车 FCEV 的数量依然很低，消费者情绪可能会发生重大转变。鉴于建立了加氢网络，乘用车 FCEV 可能具有上行潜力。然而，这种潜力很可能局限于高端的大型乘用车或在有着庞大国内汽车工业的燃料电池先锋国家：

- **首发国家：**在燃料电池制造关键玩家的总部所在地区，尤其是韩国和日本，预计乘用车燃料电池电动车（FCEV）的采纳将保持持续的轨迹。这一点通过像现代 Nexo 和丰田 Mirai 等车型的生产，在这些先行国家得到了体现。这背后的动力在于展示燃料电池技术可行性的战略必要性，以及政府的支持。尽管有这些努力，目前成本优势较大且充电基础设施更为完善的电池电动车（BEV）的普及，很可能使轻型 FCEV 的市场渗透保持在边缘地位。
- **高端/SUV：**一些高端汽车制造商，如宝马和捷豹路虎，已经公布了为大型高端运动型多功能车（SUV）开发原型或生产线的计划。与燃料电池电动车（FCEV）相比，电池电动车（BEV）对能源过渡金属的依赖明显更高，前者与传统内燃机汽车（ICE）的一致性更接近。鉴于近期供应链挑战，包括来自芯片短缺引发的营收减少和延长的交货时间，汽车制造商正在热切地专注于减少潜在的未来生产风险。进一步的例子是，如果**锂供应出现短缺**，可能会对电池电动车生产线造成的潜在中断。因此，可以明显看到向探索集成生产线的转变，使得 BEV 和 FCEV 车型选项能够同时可用。

图 30 氢燃料电池车的优点和缺点总结

应用领域	优点	缺点
氢燃料电池汽车	<ul style="list-style-type: none"> - 型号选择广泛 - 非常适合重负载 - 高载重量 - 行驶里程长 - 加氢时间短 - 零排放 	<ul style="list-style-type: none"> - 当前资本开支最高 - 氢气当前成本高 - 加氢基础设施有限
纯电动汽车	<ul style="list-style-type: none"> - 零尾气排放 - 最高能效 - 运行成本低 - 主流技术 - 型号选择广泛 	<ul style="list-style-type: none"> - 资本开支高于内燃机汽车 - 高折旧率 - 依赖充电基础设施 - 电池生产和处理的环境影响
内燃机汽车	<ul style="list-style-type: none"> - 加油站分布广泛 - 技术成熟 - 行驶里程长 - 加油时间短 - 高功率和性能 	<ul style="list-style-type: none"> - 温室气体排放和空气污染 - 相较电动车运行成本高

来源：WPIC 研究

什么决定了燃料电池中铂金的使用？

与内燃机（ICE）一样，车辆类型对燃料电池电动车（FCEV）中铂的需求有重要影响。燃料电池车辆中的铂含量与三个基本因素有关，这些因素分别影响轻型车辆（LV）、轻型商用车（LCV）和重型车辆（HDV）的载铂量。通常而言，重型车的铂含量可能是乘用车的 4 到 8 倍，而轻型商用车的铂含量则取决于其应用场景。

1. **额定功率：**为了产生更多的电势来驱动更大的车辆或质量，燃料电池通常会拥有更大的膜电极组件（MEA）表面积用以传导 H⁺ 离子。较大的 MEA 需要涂覆更多的铂。因此，180 千瓦的燃料电池将比 90 千瓦的燃料电池使用更多的铂。
2. **额定寿命：**质子交换膜（PEM）燃料电池是腐蚀性和酸性环境；随着时间的推移，催化剂会降解，导致燃料电池性能下降。更具挑战性的重型应用，需要每千瓦更高的载铂量来补偿催化剂的衰减，以便它能够更长时间地保持其额定功率并持续使用。
3. **车辆的应用和驱动系统：**尽管本质上是额定功率的延伸，但有必要澄清 - 较大的车辆通常需要更高的额定功率，因此需要更多的铂金，尽管并非总是如此。应用和驱动系统影响使用的燃料电池大小，特别适用于轻型商用车。一些氢燃料面包车和巴士，虽然比乘用车大，但使用电池电动车（BEV）驱动系统，然后一个小型燃料电池作为续航扩展器。其他的车型，可能有一个与其大小不成比例的大型燃料电池，例如在冷藏车辆应用中，电力需求很大。

到 2030 年，燃料电池电动车（FCEV）应该占氢相关铂需求的 55%（505 千盎司）。与乘用车和轻型商用车的产量相比，重型燃料电池车（HD-FCEV）具有最高的载铂量，其保有量的增加对增加铂需求有相对较大的影响。我们估计重型燃料电池车将占燃料电池车需求的 75%。

非道路燃料电池交通应用（铁路、海运及重型机械）

与推动重型运输转向燃料电池电动车（FCEV）的理由一致，电池电动车（BEV）在管理高负载和承受极端工作周期方面面临的挑战在工业应用中变得明显。众多工业应用操作在这样苛刻的条件下，使得 FCEV 成为一个有前景的解决方案。因此，我们预计在铁路、海运和非道路作业等领域将出现 FCEV 的应用。巴拉德公司（Ballard）作为燃料电池制造的重要参与者，已经在这些部门部署了多个兆瓦级系统，这支撑了 FCEV 在恶劣工作环境下日益增长的吸引力。

图 31 燃料电池汽车可按比例扩展，以提供适用于货运和土方工程等应用的高功率输出。



来源：加拿大太平洋公司、英美资源集团

铁路：氢动力铁路提供了一种可持续的替代方案，能显著降低柴油机车产生的温室气体排放和当地空气污染物。与电池动力火车相比，氢动力火车提供了更长的行驶范围，非常适合无电化的客运铁路线，或者在那些电气化可能具有挑战性或成本高昂的区域，例如长途货运。它们还提供了类似传统柴油火车的快速加注时间。特别适用的领域包括加拿大和澳大利亚等地的偏远商品运输。世界铂金投资协会预计，到 2030 年，氢动力铁路将支持铂金需求增加 5 千盎司。

海运：氢气作为海运船只的替代燃料具有重要潜力，特别是在提供辅助动力或作为主推进系统方面。作为辅助动力，氢燃料电池可以支持各种船上操作，包括照明、加热和驱动辅助机械，减少对传统柴油发电机的依赖，从而降低在港口和空闲时间的排放。此外，氢气可以用于基于燃料电池的船舶推进系统，无论是作为主要能源还是与电池等其他能源结合使用，提供零排放运行。世界铂金投资协会预计，到 2030 年，氢动力海运将支持铂金需求增加 2.4 万盎司。

非道路：燃料电池可以在非道路环境中得到充分的扩展应用，如建筑、采矿和农业机械。氢燃料电池的扭矩和功率输出适合非道路机械的苛刻要求，为重型起重、挖掘或农业任务提供充足的动力，同时减少温室气体排放，增强这些关键领域的可持续性。英美资源集团和福蒂斯克已经开始尝试使用一队氢动力运矿卡车（见图 31），因为采矿行业寻求脱碳。世界铂金投资协会预测，到 2030 年，氢动力非道路应用将支持铂金需求增加 3 万盎司。

固定式燃料电池应用

固定式燃料电池为分部式发电提供了一种可扩展的、低排放的解决方案，同时降低了对化石燃料的依赖（详细如下）：

微电网和备用电源：在并网或离网情况下提供可靠的电力，确保关键基础设施中电力供应的不间断。

住宅和商业用途：为家庭、办公室和商业建筑供电，可以作为独立电力系统，或者在联合供热和动力（CHP）设置中与电网电力相结合。

偏远和离网地区：在中央电网接入受限的地区，满足电力需求是一个重大挑战。“氢岛”的概念作为一种集成的解决方案应运而生，提供可持续性和可靠

性。这一框架包括在非高峰时段通过电解槽从可再生能源产生氢气，随后储存它以备将来使用或作为备用电源。通过为偏远地区提供一个可靠和可持续的能源储备，氢岛有助于增强能源韧性和自主性。

工业应用：为各种工业操作提供过程所需的热和动力，有助于提高制造过程的效率和减少排放。

直接还原铁（DRI） - “绿钢”

钢铁生产是二氧化碳排放的主要来源之一，许多评论人士认为全球约 10% 的碳排放量与该行业有关。传统上，铁矿石与焦炭一起在高炉中加热。铁矿石是一种氧化铁，主要是赤铁矿（Fe₂O₃）和磁铁矿（Fe₃O₄），为了制造钢铁需要还原为元素铁（Fe）。煤炭中的碳作为还原剂来制取元素铁，但同时与氧气结合，产生并排放二氧化碳。

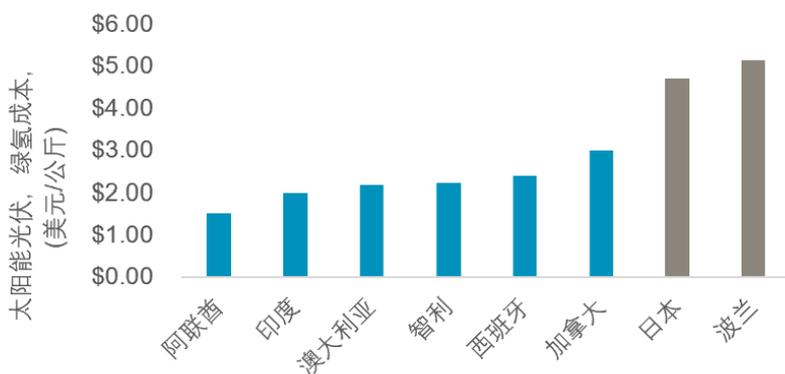
直接还原铁（DRI）是一种利用电气化和绿氢作为还原剂的工艺，该工艺不在高炉内熔化铁矿石而是去除矿石中的氧气。在立式炉中，使用低碳氢气对矿石进行还原，仅产生元素铁和水。然后在电弧炉中（可由可再生能源供电）处理铁，生产出与传统方法相比碳足迹更小的钢铁。

通过整合可再生能源为工厂供电，并通过电解槽生产绿氢，钢铁制造商实际上可以成为碳中和企业。瑞典最大的钢铁生产商 LKAB 已经规定到 2050 年将实现碳中和。

绿钢的成本竞争力

目前，绿钢的成本竞争力低于高炉钢材。然而，一系列的碳税措施和氢气价格降低将改变这一现状。根据麦肯锡公司的分析，在一系列情景下，绿钢将变得经济可行。在每吨碳排放的价格为 60 欧元的情况下，氢气的成本需要降到每公斤 1.2 欧元；相反，在更高的碳价，即每吨 90 欧元的情况下，氢气价格可以高达每公斤 2.0 欧元，以保持成本竞争力（目前欧洲的碳交易价格为每吨 61 欧元，历史最高价为每吨 82 欧元）。目前，在成本竞争力强的地区，“出厂价”的氢气生产成本可以低于每公斤 2.0 美元（约合 1.85 欧元）（见图 32）。尽管这忽略了中游成本（压缩、液化和运输）以及资本提供方的投资回报要求。世界铂金投资协会（WPIC）估计 2022 年国内中游成本约为每公斤 3.00 美元。到 2030 年，通过补贴和更低的氢气成本，绿钢将会问世。瑞典的 HYBRIT 绿钢厂计划到 2026 年为市场生产商业化的无化石燃料钢材。

图 32 选定国家通过太阳能光伏发电生产氢气的成本



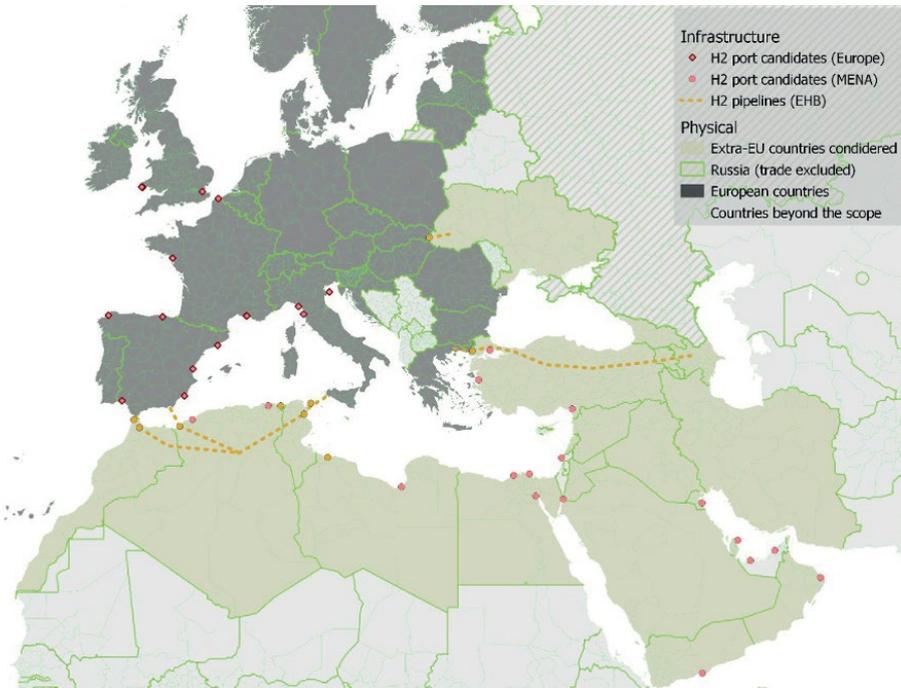
来源：国际可再生能源机构、WPIC 研究

氢的运输和支持基础设施

今天，大多数氢都不会离开它所产生的化工厂。相反，它是在化工和石化工艺中产生并使用的。然而，将氢气作为一种能源载体使用需要跨越氢经济的不同部分进行运输。目前，氢的运输量较小，距离也较短。这是通过冷却或压缩氢气装入卡车来完成的。然而，随着产业的扩大，将需要更有效的运输方法。

能源是可再生氢生产成本中最大的组成部分。具有丰富和高强度可再生能源的地区通常电力更便宜。上游的氢气将需要通过陆地和海洋运输到下游市场。可能的选择包括管道、航运或两者的组合。由Hydrogen4EU提供的图33举例说明了这个系统如何形成一个氢主干网络。所谓的氢“主干”网络是一个提议中的港口和管道网络，可以建设起来以促进氢的国际贸易。其目的是利用北非和中东地区廉价的可再生能源生产氢气，以供出口到欧洲的终端市场。

图33 氢气“主干线”是一个拟议中的港口和管道网络，旨在建设方便于氢的国际贸易。其目的是利用北非和中东地区廉价的可再生能源来生产氢出口到欧洲。



来源：欧洲氢能研究项目 Hydrogen4EU

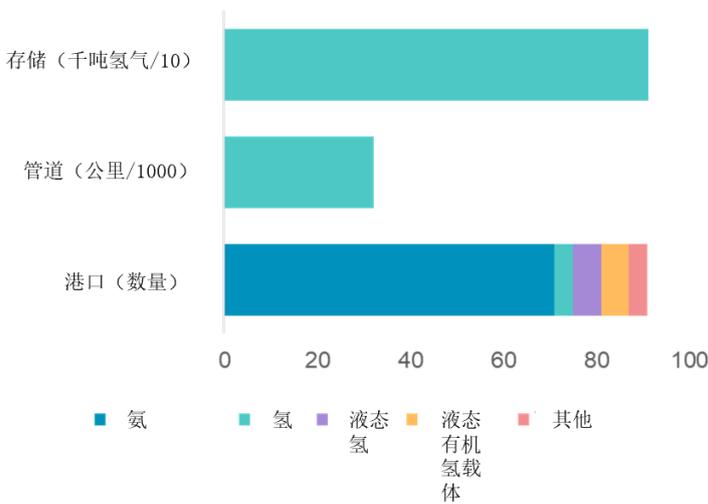
氢气是通过电解产生的气体。虽然它的质量能量非常高，但它的密度却极低。这意味着它的体积能量非常低。由于船舶受到体积限制，这不可避免地意味着需要更多的航行次数和更高的成本。幸运的是，可以将氢气转换并结合成不同的形态或化合物，以改善运输的经济性。

氢气管道：将氢气保持在气态形式并利用管道运输是最经济的运输方式。目前官宣建造的氢气管道近 30,000 公里（图 34）。由于运输气体的管道需要大量的资本投入，氢气管道的发展将主要集中在利用现有的天然气基础设施，并辅以新的连接。预计运输路线将主要是区域性的，跨洲际运输（例如，非洲到欧洲）由于较远距离管道的成本直觉上让人难以承受，将受到限制。

氢气船运：通过连接现有的海港，氢气运输克服了管道的限制。鉴于氢气的低密度，它需要转换成另一种形式以便高效运输。选项包括压缩、液化或转化为衍生产品。氨、液体有机氢载体、甲醇和合成燃料等脱颖而出，相比于元素氢，它们提供了更优越的技术和经济优势。这些衍生物由于单位体积的能量密度更高，它们通过集中能量有效提高了运输效率。此外，它们在市场上的长期存在意味着已经有相当多的技术知识和基础设施用于安全处理和运输。国际能源署指出，到 2030 年，氨将是最常见的海上运输的氢形式，而液态氢的运输只会占很小的份额（图 34）。

氨可以在常温和适度压力下以液态形式储存和运输，而氢通常需要低温或高压储存才能保持在液态。与氢相比，这使得氨的储存和处理更加实用和节能。最后，如氨这样的衍生产品已经有了用于生产、储存和分发的成熟基础设施，特别是在农业和化学工业中。这些现有的基础设施可能被重新利用或用于其他应用，例如能量存储或运输，而不需要显著的额外投资。

图 34 支持计划中的基础设施表明，管道运输和氨船运将是首选的运输方式。



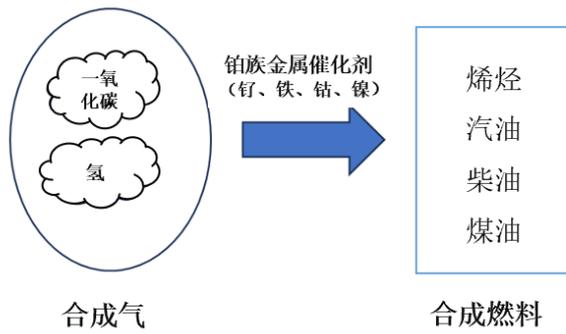
来源：国际能源署

合成燃料是一种低碳或碳中和的燃料，通过结合可持续的二氧化碳和电解产生的氢来生产。利用费托合成过程（Fischer-Tropsch process）在含有铂族金属催化剂（PGM catalyst）的情况下结合碳和氢，以生产合成燃料。

这些合成碳氢化合物，如合成煤油（syn-kerosene）和合成柴油（syn-diesel），可以在汽车和航空领域现有的内燃机中使用。由于电池和燃料电池的重量问题，合成燃料被视为与可持续航空燃料（SAF）并驾齐驱，用来实现航空业脱碳的主要方法。可持续航空燃料与合成燃料的不同之处在于，它是通过生物质、废油或农业残余物生产的。

根据国际清洁交通委员会（ICCT）的数据，合成煤油的生产成本约为欧盟喷气机燃料成本的大约 3 倍。然而，这一数字到 2050 年将降至大约 1.5 倍。引入碳税到使用高碳燃料的航空运营中，很可能实现成本平价。

图 35 铂族金属催化剂用于在制造合成燃料的过程。



来源: WPIC 研究

结论

世界去碳化的需求十分迫切，意味着所有减排选项都将被需要，并且在大部分情况下，这些选项是相辅相成的，而不是相互竞争的。

目前全球对氢项目的补贴已超过 3000 亿美元，现在的问题不是氢经济是否会起飞，而是它增长的速度以及由氢应用所带来的铂金需求增长的间接影响。

目前已有多种现有技术能够实现今天的氢经济，但为了降低成本，仍需要创新、新技术和规模经济。无论是独立降低成本还是与碳税协调，竞争性成本降低都将是快速普及氢所必需的，对于铂基电解槽和燃料电池也是如此。

我们定期发布的氢相关铂金需求的报告将根据行业演变来提出我们的预测，但按照目前的情况，我们预计电解槽和重型燃料电池电动车将是早期需求的主要驱动力，而更广泛的燃料电池应用将在本十年末和 2030 年代成为铂金需求的最大驱动力。

WPIC 旨在提高铂金投资

世界铂金投资协会（WPIC）是由领先的南非铂族金属矿业公司于 2014 年成立的，旨在通过可行性见解和目标性拓展来增加铂金投资。我们通过提供《[铂金季刊](#)》、《[铂金远景](#)》（月刊）和《[铂金精粹](#)》（现为月刊），帮助投资者做出明智决策。我们还通过投资者、产品、渠道和地理位置对铂金投资价值链进行分析，并与机构合作，以提高市场效率并增加高性价比的产品种类，满足各类型投资者的需求。

WPIC 不受监管，不能提供投资建议：请参阅[声明和免责声明](#)。

术语表

电池电动汽车 (BEV) - 一种插电式汽车，配备了大型电池，可以插入电源充电。

碱性电解 (AEL) - 一种使用碱性电解液分解水产生氢气和氧气的电解设备。

氨 - 一种由氮和氢组成的化合物，常用作肥料和在各种工业过程中使用。

氨 - 一种由氮和氢组成的化合物，常用作肥料和在各种工业过程中使用。

碳捕获与封存 (CCS) - 一种技术，可以捕获工业过程中的二氧化碳排放，并将其储存于地下，以减缓气候变化。

差价合约 (CfD) - 一种金融工具，用于管理可再生能源项目中电价波动的风险。

直接还原铁 (DRI) - 一种使用天然气或氢气作为还原剂，从铁矿石中生产铁的过程。

电解 - 一种化学过程，利用电力将化合物分解为其组成元素。

氢燃料电池电动汽车 (FCEV) - 一种电动汽车，利用燃料电池产生电力（通过在铂催化剂上导入氢气和氧气）。因此，它们驱动电动机/消耗氢燃料。

温室气体 (GHG) - 一种气体（如二氧化碳），能够在地球大气层中捕获热量，导致温室效应和气候变化。

混合动力电动汽车 (HEV) - 一种配备了小型电池并与小型内燃机结合的车辆。该车辆的纯电动续航能力可以忽略不计，因为发动机会定期启动和关闭。电池由发动机充电。

平准化度电成本 (LCOE) - 评估和比较不同能源生产方法成本的方法论。

氢气平准化成本 (LCOH) - 标准化的方法论，可以计算生产氢气的运营和资本成本，使不同生产路径之间具有可比性。

液态有机氢载体 (LOHC) - 一种用于以液态形式储存和运输氢气的物质。

净现值 (NPV) - 未来现金流的现值总和。该计算允许将未来现金流反映为今天的实际价值，从而使不同投资机会具有可比性。

铂族金属 (PGMs) - 一组通常与铂金一起出现在含铂矿石中的金属。可以指铂、钯、铑、铱、钌和钇中的一些或全部。

插电式混合动力电动汽车 (PHEV) - 一种结合了内燃机和中等大小电池的车辆，可以插电充电，以纯电动模式运行有限距离，也可以单独使用汽油或柴油运行。

质子交换膜水电解 (PEM) - 一种电解设备，通过断裂键合，将水分子 (H₂O) 分解为其组成的氧气和氢气元素。PEM技术使用气密的固态聚合物基膜作为电解质。PEM采用涂有铂和铱的催化剂作为膜的一部分。

电力购买协议 (PPA) - 电力发电商和购买者之间的合同，规定了特定时期内电力销售的条款。

蒸汽甲烷重整 (SMR) - 一种使用天然气与蒸汽反应来生产氢气的过程。

合成燃料 (Synfuel) - 由可再生资源生产或通过费托合成等过程生产的燃料，常用作化石燃料的替代品。

总拥有成本 (TCO) - 计算资产生命周期成本的计算方式，包括购买价格和运营成本。用于比较不同资产的回报预测。

重要公告和免责声明：本发行材料仅限于教育目的。发行方(世界铂金投资协会 World Platinum Investment Council)由世界领先的铂金生产商成立，旨在开发铂金投资需求的市场，其使命在于通过具有执行力的行业见解和目标明确的发展规划，激励现货铂金的投资需求，为投资者提供铂金相关的支持知情决策的信息，并携手金融机构和市场参与者共同开发投资者需要的产品和渠道。

本发行材料绝不是、也绝不应该被曲解为关于任何证券的售卖意向书或购买意向的鼓吹性材料。发行方发行本材料，绝不企图传达任何指令，绝不安排、建议或企图促成任何涉及证券或商品的交易，或为其相关事宜充当代理方，不管材料中是否提及。本发行材料绝不企图提供任何税务、法律或投资建议，材料中的任何内容绝不应该被曲解为购买、销售或持有任何投资或证券、或涉及任何投资策略或交易活动的建议。发行方绝不是、也绝不意图成为证券经纪人、或注册投资顾问，或在美利坚合众国或大不列颠联合王国的法律下注册，包括《2000年金融服务和市场法》(英国)(Financial Services and Markets Act 2000)或《高级管理人员和认证制度》(Senior Managers and Certifications Regime)，或由金融行为监督局(英国)(Financial Conduct Authority)注册。

本发行材料绝不是、也绝不应该被曲解为直接针对于或适合于任何特定投资者的个性化投资建议。任何投资决策的形成仅限于咨询专业投资顾问后。基于您自身的投资目标、财务状况以及风险承受能力，您在决定任何投资、投资策略、证券或相关交易是否适合您方面全权负责。根据您的商业、法律、税务现状或状况，您应该咨询您的商业、法律、税务或会计顾问。

本发行材料所采纳的任何信息都认为是可靠的。但是本材料发行方无法确保这些信息的准确性和完备性。本发行材料包括前瞻性声明，包括关于本行业预期的持续增长声明。本材料发行方声明：本材料所提及的任何前瞻性陈述(即不含历史信息的所有陈述)都有可能影响未来实际结果的风险性和不确定性。**世界铂金投资协会 World Platinum Investment Council**的所有标志、服务标记、商标都属于其独家所有。本发行材料中提及的所有其它商标都属于各商标持有方的财产。本材料发行方并不隶属于、联合于或关联于上述商标持有方，或受其赞助、批准或原创，特别声明除外。本材料发行方所做的所有声明都不是针对任何第三方商标的任何权利。

WPIC 研究的 MiFID II 状态

世界铂金投资协会(WPIC)已经根据 MiFID II (欧洲金融工具市场指令修订版)对其内容和服务进行了内外部审查。因此 WPIC 就其研究服务对其客户以及客户的合规/法律部门强调以下内容：WPIC 的研究内容明显属于**次要非货币利益类别**，可以继续免费提供给所有资产管理人，可以免费分享给各个投资组织。

1. WPIC 不从事任何金融工具的具体执行业务。WPIC 不从事任何造市、销售交易、贸易或股票交易活动。(也不存在任何可能性刺激诱因)。
2. WPIC 研究内容可以通过多种渠道广泛传播至所有利益相关方，因此根据 MiFID II (ESMA/FCA/AMF)标准，其内容属于“次要非货币利益类别”。WPIC 研究可以通过其官网免费获取，其研究信息聚合平台没有任何权限许可要求
3. WPIC 没有、也不会对其研究服务的使用者收取任何费用，WPIC 清晰告知机构投资者不会对其就免费内容收取任何费用。

更多细节信息请查看 WPIC 网站：

<http://www.platinuminvestment.com/investment-research/mifid-ii>