

全球氢能技术发展现状及未来展望

文 / Anke Geipel-Kern

氢能源的兴起标志着能源转型开启了新篇章，而 DECHEMA 德国化学工程及生物技术协会（以下简称“DECHEMA”）正处于这一变革的核心地带，其汇聚了该领域的广泛而深入的专业知识。PROCESS 专访了 DECHEMA 的董事总经理 Andreas Förster 与能源与气候部门的负责人 Florian Ausfelder，深入探讨了氢能发展现状。

PROCESS：“氢是能源转型的香槟”是德国能源经济学家克劳迪娅·肯夫特经常引用的一句话。请问您对于这个说法有何看法？

Andreas Förster：将氢比作“能源转型的香槟”，在某些层面可能略显局限，尤其是考虑到氢在能源转型，特别在化工行业的脱碳进程中扮演的不可或缺角色。虽然香槟因其成本和独特性并非日常消费品，但是人们尚有其他酒类或非酒精饮料作为替代，而在能源领域，绿氢作为关键的清洁能源解决方案，其重要性难以被轻易替代。

PROCESS：那么氢能源在能源转型中的角色到底是什么呢，更像是泡酒还是苏打水呢？

Florian Ausfelder：要想实现脱离化石燃料的目标，我们必须把氢能尤其是绿氢价格降到普通百姓都能承受的水平，而不是仅仅停留在高端市场，这一点在化工行业体现得尤为明显。当前面临的挑战在于，氢能技术仍处于商业化早期，绿氢生产受限于较高的成本和有限的产量，导致其更像是市场上的奢侈品，而非面向大众的普及性商品。目前高价显然不利于绿氢

的大规模应用与推广，因为经济可行性是决定任何新技术能否广泛采纳的关键。随着技术进步和市场规模的扩张，绿氢成本将逐步降低，最终达到与传统能源竞争的水平。这是一个动态演变的过程，需要政府、企业和科研机构等多方力量的协同努力，以期早日实现氢能经济的大众化和去碳化目标。

PROCESS：全球氢能项目持续增加，您如何评价行业对电解装置产能的投资意愿？

Florian Ausfelder：DECHEMA 德国化学工程及生物技术协会积极促进和支持 H₂-Kompass 项目，该项目旨在监测并推动德国境内电解装置的扩展进程。在这里，我们确实看到了大

量关于电解装置产能扩展的公告和意向声明，但是在涉及投资决策时，德国企业在实际做出投资电解装置的决策时表现出更为谨慎的态度，与政府提出的雄心勃勃的政治目标形成对比。尽管政策层面明确了氢能发展的重要性及其对实现能源转型和气候目标的关键作用，但私营部门在落实大规模资金投入时面临着包括经济可行性、技术成熟度、市场不确定性在内的多重考量。

PROCESS：为什么德国企业在电解装置方面投资如此谨慎？

Florian Ausfelder：从商业角度来看，德国高昂的电力成本阻碍了投资，这已经不是什么秘密了。在德国，我们还没有成功地将可再生能源成本的



Andreas Förster 博士

Förster 博士曾在维尔茨堡学习化学，并于 1996 年在物理化学研究所获得博士学位。自 1997 年开始，他加入 DECHEMA 德国化学工程及生物技术协会，并担任研究资助部门的负责人，一直持续到 2008 年。2009 年，Förster 博士成为 ProcessNet 的执行主管，该机构是 DECHEMA 与 VDI-GVC 携手创建的重要平台。2021 年，被任命为副总经理，同年 7 月 1 日接任董事会总经理。

本文作者系《PROCESS》德文版高级编辑。

降低纳入电价。这导致了在考虑采用电力密集型或电价敏感型技术时，德国的高电价使之在与其他国家或能源方案的竞争中处于不利地位。

PROCESS : 那么，影响氢能产业落地因素除了资金还有什么？

Florian Ausfelder : 近年来，德国在氢能方面确实展现出了前所未有的投资力度，尤其是考虑到目前批准的补贴金额，这已经达到了过去难以想象的数额。然而，我认为我们缺乏一个清晰完整的氢能发展长远规划和稳定的框架条件。缺乏明确的长期愿景和全面的结构性规划，使得氢能生产项目和相关设施建设面临不确定性。企业对于是否投资氢能技术及其基础设施持谨慎态度，因为在缺少稳定法规保障和明确市场规则的情况下，任何投资都可能伴随着不可预知的风险。没有确定的框架条件，企业难以评估潜在回报，自然会担忧投资安全与资产锁死问题，从而延缓或放弃投资决策。此外，氢能源的实际应用与市场接纳程度也是决定投资可行性的关键因素。

PROCESS : 请问您所提及的框架条件具体指的是什么？

Florian Ausfelder : 尽管绿氢生产的技术和政策框架正在逐步构建，市场推广方面却面临着一个显著障碍，即缺乏统一且被广泛认可的绿氢认证体系。欧盟虽已颁布法规明确了可再生氢的标准，规定了何种条件下生产的氢气可被视为可再生能源的一部分，但实际上，市场上尚无成熟的机制来验证氢气的“绿色”属性。德国技术监督协会（TÜV）等权威机构目前无法提供绿氢认证服务，这意味着即使企业能够生产符合欧盟法规要求的绿氢，也无法获得官方背书证明其环保资质，进而无法作为可持续能源产品正式推向市场。这一认证缺失直接影



Florian Ausfelder 博士

Ausfelder 博士曾就读于卡尔斯鲁厄理工大学和爱丁堡大学，攻读化学专业，并于 2002 年在物理化学领域获得博士学位。自 2007 年起，在 DECHEMA 担任研究和项目协调方面的科研人员。2017 年，成为能源和气候部门的组长和主题发言人，自 2021 年起负责该领域的负责人。

响了绿氢的市场定位和商业价值，使其在与传统氢气（通常由化石燃料制得，成本较低）的竞争中处于不利地位。

PROCESS : 为什么绿色认证对氢如此重要？

Andreas Förster : 在构建绿氢价值链时，合作伙伴间的相互信赖及确保供应链中每一环都能获取符合标准的产品是至关重要的。外部认证机制在此过程中扮演了关键角色，特别是在验证绿氢的可持续性与碳中和属性上。缺乏这样的第三方认证，每个参与企业都将面临自行验证氢源的重担，这不仅成本高昂，还可能导致验证标准不一，效率低下。外部认证的优势在于显著增强了价值链的透明度与可靠性，它为投资者提供了一个客观的参考基准。当下，投资者愈发重视企业的环境、社会与治理（ESG）表现，仔细审视企业的碳足迹。欧盟新出台的企业可持续性报告指令，即《企业社会责任指令》，进一步强调了这一点，强制要求企业出示产品原产地证明。此外，外部认证有助于增强市场信任、促进可持续投资及对抗潜在“洗绿”指控。

PROCESS : 根据新闻报道的数据，其他国家正在投资更多的电解产能，您如何看待这一现象？

Florian Ausfelder : 许多国家频

繁公布的投资计划往往伴随着壮观的数字，但我会保持谨慎，因为宣示的投资额与实际启动的建设项目之间常常存在很大差异。以水电解领域为例，尽管该行业的未来展望被广泛看好，其当前的总体市场规模仍然有限。据统计，2023 年全球纯水电解的装机容量为 700 MW，这一数字与德国已投入运营的约 1 GW 的氯碱电解装机容量相比较，就能明白实际应用规模有多少。换言之，水电解市场正处于一个孕育希望却又待成熟的阶段，该领域技术的全面商业化与规模化应用尚未充分实现。

PROCESS : 目前水电解装置的状况如何？

Andreas Förster : 在 H₂Giga 项目推进过程中，我们面临着这些问题。尽管电解水制氢的技术本身已经相当成熟，但我们面临的任务远不止于简单扩大电解槽的物理尺寸。实现氢能的大规模工业化生产，要求我们超越传统规模扩增的思路，深入到供应链优化、成本控制、能效提升以及生产流程的创新之中。H₂Giga 团队正集中精力探索如何有效地促成这一转型，确保从实验室技术到大规模商业化生产的无缝衔接。

PROCESS : H₂Giga 项目是什么？

Florian Ausfelder : H₂Giga 是德

国政府正在进行的三个绿色氢能旗舰项目之一，目前已经从德国联邦教育与研究部（BMBF）获得了约 5 亿欧元的资助，约 130 多家企业和科研机构参与了该项目。该项目的核心目标聚焦于推动电解装置及相关组件的工业化生产体系与工艺流程的建立，提高绿色氢能生产的规模性和经济性。该项目的协调工作由 Dechema 负责，并密切关注关联项目的进展情况。在 H₂Giga 项目中，包含 9 个独立的任务单元，这些单元致力于协助如西门子、林德、曼恩舍弗勒、赢创化学、壳牌在内的 112 家主要合作伙伴，将其先进的技术方​​案快速转化为实际的大规模生产应用。此外，项目还囊括了 5 个专门针对小型制造商与供应商的子项目，以及 14 个学术研究项目，这些项目由高等院校主导，深入探究水电解技术的前沿创新。预期到 2025 年项目收官之时，H₂Giga 将发布一份综合路线图，该路线图将清晰展现所有研发路径与成果，为后续氢能产业的发展指明方向，加速全球能源转型的步伐。

Andreas Förster：这意味着我们正在为德国打造整个氢能生态系统，并建立起配套的供应链产业。我们在本土研发这些先进技术，进而能够将其出口至全球其他地区，这是我们的核心竞争力所在。

PROCESS：在基础设施方面，储氢技术和管道输送对终端用户意味着什么？

Florian Ausfelder：目前德国拥有东西部两个服务于化工园区的私营氢气输送网络，我们正规划构建一个横贯欧洲的公共氢气主干网，旨在实现资源的广泛互联与共享。德国煤气和水协会（DVGW）指出，现有的天然气输送管网已具备兼容氢气的技术基础，但同时也设置了严谨的标准来管控天然气中氢气的掺混比例，这一举

措考量了氢气与天然气燃烧特性的差异，旨在避免对诸如玻璃制造业这类需稳定热能供给的行业造成潜在运营干扰。

就储氢能力而言，德国丰富的地下洞穴和多孔地质结构，为氢气存储提供了自然条件，尽管实现有效储存还需克服多项技术障碍。值得注意的是，相较于天然气，构建并维持氢气管网的供需平衡更为复杂，主要因为氢气较低的能量密度要求更大的储存体积，这对存储和输送效率提出了更高要求。

PROCESS：即使水电解装置规模扩大成功，德国也几乎不可能提供足够的绿氢以满足所有需求。这样的结论依据是什么？

Andreas Förster：DECHEMA 以中立的立场对德国全面满足绿氢需求进行了深入分析，特别是在考虑化工行业等高能耗部门转型的情境下，存在以下关键制约因素。

1) 资源与产能限制：德国的地理位置决定了其太阳能和风能的年产量存在自然上限。尽管技术进步不断推动能源转换效率的提升，但这并不能无限制地增加绿氢的产量以满足所有需求。

2) 成本与经济性考量：尽管生产成本正在逐渐下降，但相较于传统化石燃料制氢，绿氢的生产成本仍相对较高。化工行业作为高度竞争的市场领域，需要在成本效益与环境影响之间寻求平衡，确保大规模采用绿氢的经济可行性。

3) 基础设施与物流挑战：建立完善的绿氢生产和分配网络，包括储存和运输设施，需要巨额投资且耗时较长。尽管德国已经启动了诸如 H₂Giga、H₂Mare 和 TransHyDE 等相关项目，但这些基础设施的建设与优化仍需一定时间。

4) 替代方案与优先级评估：在某

些工业流程中，直接电气化可能是更为高效或成本更低的减排途径。因此，决策者和行业领导者需要针对具体应用场景，评估使用绿氢相较于电气化或其他减碳技术的优势与适用性，以实现最佳的环境和经济效益。

5) 国际合作的重要性：鉴于国内资源的限制，德国正积极寻求国际合作，如从澳大利亚进口绿氢的计划。然而，这种合作依赖于国际供应链的稳定性及长期合作关系的建立，并面临物流复杂性和时间延迟等挑战。

最终，关于德国绿氢发展的决策和目标制定，将取决于政策层面的综合考量与导向。

PROCESS：从整体角度来看，使用绿氢真的是最明智的能源转型解决方案吗？

Florian Ausfelder：确实，探讨绿氢生产及其在能源体系中的角色，特别是与将绿色电力直接注入电网，以取代燃气发电厂的比较，是一个复杂而多维的议题。从一个宏观视角出发，理想状态下，我们将追求最大化的环境效益和社会福祉，这意味着如果绿色电力能够有效替代化石燃料发电，直接注入电网似乎是优化能源结构的直接途径。这样不仅能减少温室气体排放，还能提升能源系统的可持续性。然而，现实情况往往更为微妙。企业的决策受到经济效益、投资回报率、技术成熟度及政策支持等多重因素的制约。对于企业而言，即便从长远看绿氢生产和使用对环境有益，但如果初期投资成本高昂、技术风险大，或是缺乏足够的市场激励和政策保障，这样的投资可能在短期内显得不那么吸引人。企业经济学关注的是项目或技术的商业可行性和盈利能力，这与宏观经济目标如促进清洁能源转型、实现碳中和，有时会产生冲突。因此，绿氢的发展挑战在于如何找到宏观经

济目标与企业经济利益之间的平衡点。

PROCESS : 再次回到供应安全这个话题,对于化工和其他能源密集型工业,比如钢铁行业,转向绿色氢意味着什么?具体来说,需要怎样的措施和策略来实现这一转变?

Florian Ausfelder : 当前,化学和钢铁等行业正面临向更可持续生产模式转型的关键时期,氢气作为有望降低碳足迹的清洁能源,正逐渐成为转型的核心。这一转型过程不仅要求企业对现有生产工艺进行全面革新,还意味着重大的基础设施投资,以适应氢气的存储、运输和使用。企业正处在决策的十字路口,它们规划的不仅是短期内的设施升级,更是着眼未来二三十年的技术布局。对于投资者而言,前瞻性地确保氢气供应链的稳定性和经济性显得尤为重要。鉴于绿氢的规模化生产和成本效益尚需时日,如何在投资初期就预见并解决潜在的供应短缺和成本问题,成为了摆在眼前的挑战。投资者和行业领导者需要协同努力,一方面,推动技术创新和效率提升,以加速绿色氢气生产的商业化进程;另一方面,制定灵活的投资策略,考虑包括蓝氢在内的过渡方案,以满足近期的减碳需求。

PROCESS : 那么这就引出了一个问题,除了绿氢还有什么氢气能减少碳排放?

Andreas Förster : 在德国目前背景下,确保氢能源供应的安全性是实现能源转型和碳中和目标的关键考量。鉴于当前绿氢的产能和成本效率尚不能满足大规模市场需求,作为 DECHEMA,我们发现目前面临着确保能源供应链稳定性的紧迫任务。因此,为了实现真正的能源供应安全,德国可能需要采取更加务实的策略,考虑采用其他氢比如蓝氢。蓝氢虽来源于

DECHEMA 参与氢能各个流程

DECHEMA 参与了所有重要的氢能项目,并参与了许多研究的撰写。以下是德国氢能战略框架下的氢能活动概述。

- H₂Giga 计划将电解装置大规模量产,实现绿氢工业化的生产。
- H₂Mare 项目研究海上生产绿氢和其他 Power-to-X 产品。
- TransHyDE 专注于解决氢能运输和储存的技术挑战,旨在构建安全、高效且经济的氢能基础设施。
- BMWK- 项目 Tran4ReaL 旨在探讨能源转型实验室的概念。
- H₂-Kompass 项目是德国在氢经济领域的一项重要研究倡议,由 DECHEMA 德国化学工程及生物技术协会与 Acatech 德国国家工程院合作开展。该项目旨在为德国乃至欧洲的

氢经济发展提供一个全面的路线图,重点在于分析和规划氢能技术的应用前景、基础设施需求、经济影响以及相应的政策框架。

- PtX Pathways 项目由德国联邦经济和能源部 (BMWK) 在国际气候保护倡议 (IKI) 框架下运作。德国国际合作机构 (GIZ) 作为联合协调单位的角色,共同致力于推动全球范围内可持续的 Power-to-X 解决方案的发展。该项目的战略焦点在于促进摩洛哥、南非和阿根廷这 3 个国家的能源转型。
- Green-H₂-Namibia 是德国联邦教育和研究部 (BMBF) 资助的一个项目,由 DECHEMA 和 ISOE 社会生态研究所共同开展,是纳米比亚发展氢经济的一项持续倡议的一部分。

化石燃料,但通过碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术减少了碳排放,这可以作为一种过渡方案,以填补绿色氢气产量增长至足以满足大规模应用之前的空白,直至绿氢成为经济上可行且供应充足的主流能源选项。

PROCESS : 另一个选择是进口氢气,比如通过船舶运输绿氢在经济上是否可行?

Florian Ausfelder : 目前,摩洛哥、阿根廷和南非正积极展开氢能源的研究项目,同时在纳米比亚也有一处地点正处于评估阶段,这些动态引发了广泛讨论。在欧洲,关于具体从哪些国家及地区进口氢气的问题尚未形成定论。鉴于此背景,确定哪些国家将最终成为欧洲氢能源供应链上的合作伙伴仍面临较大不确定性。

不过,H₂Global 计划的出台为此提供了一个重要工具。该计划旨在从

非欧盟国家采购氢气及其衍生产品,并随后在欧洲市场通过拍卖形式进行分配。这一机制不仅促进了全球氢能源市场的互动与合作,也为欧洲提供了灵活性,能够在国际范围内寻求最合适的氢能源供应商,即便这些供应商位于欧盟之外。随着 H₂Global 的实施,未来欧洲在氢能源供应链的布局上或将迎来更多明确性和稳定性。

Andreas Förster : 对于纳米比亚的氢能源项目而言,关键因素包括选址的适宜性、与地方政府的紧密沟通以及确保当地社区的接受度。具体而言,需要详细考察潜在电解设施的地点,评估水资源的可用性和可持续性,因为这些都是项目可行性的基础。面对这些问题,我们正深入参与项目各阶段的工作,确保所有相关考量都得到妥善处理。

尽管我们在积极推进,但对于未
(下转第 31 页)

的深厚积淀，正全力推进覆盖氢气价值链的每一个环节。林德不仅掌握着顶尖的技术和专业知 识，还支持各类规模的氢气项目，从生产、运输到加工和应用，无所不包。而且林德拥有全球最大的液态氢生产能力及分销体系，并运维着约 1 000 km 长的管道网络，确保氢气供应的广泛覆盖和高效传输。至今，林德在全球范围内已成功安装超过 80 座氢气电解设备和 200 个加氢站，除此之外，全球超过一半的液氢装置均出自林德的规划与建设。林德还通过与戴姆勒卡车合作，共同研发了过冷液氢（sLH₂）系统，这一技术革新不仅实用且便于推广，可支持使用氢气进行货物零排放运输，从而推动重型运输的脱碳化。

林德正在同时进行多个电解项目，总功率达到数百兆瓦。此外，林德还在德克萨斯州投资约 18 亿美元，建设



一个生产蓝氢的工厂。该工厂将使用林德 CCS 技术分离和储存 170 万 t 二

氧化碳。林德不仅帮助客户实现能源转型，还通过林德的“35by35”倡议，致力于在 2035 年前将自身的 Scope1 和 Scope2 排放量减少 35%，并确保到 2050 年所有业务部门实现气候中立。

林德正积极推进多个电解项目，这些项目的总装机容量已达到数百兆瓦级别，彰显了其在扩大清洁能源解决方案方面的决心。与此同时，林德还在德克萨斯州投资约 18 亿美元，建设一个生产蓝氢的工厂，该工厂利用林德先进的碳捕集与储存（CCS）技术，每年能从生产过程中分离并安全封存多达 170 万 t 的二氧化碳，为工业级减碳树立了新标杆。林德在助力客户向低碳能源模式转变的同时，也身体力行，通过实施“35×35”计划，即到 2035 年将其绝对温室气体（GHG）排放量在 2021 年的基础上减少 35%，并于 2050 年实现气候中和。

（上接第 29 页）

来氢气及其衍生物出口方向的决策，欧洲市场已展现出更明确的趋向。欧洲南部利用丰富的太阳能资源，而北部则依赖风能，各自发展可再生能源制氢。同时，阿拉伯半岛国家凭借其在化石能源生产和可再生能源领域的双重优势，以及优越的地理位置，也是氢能源生产与出口的有力竞争者。

氢能源的运输方式，不论是通过氨或甲烷形态，经由管道、船舶或其他创新手段，都是经济与社会经济分析的关键组成部分。为了实现能源进口的多元化策略，我们必须全面审视各种物流解决方案的可行性与成本效益。在全球能源转型的背景下，确保氢能源供应链的稳定性和多样性，对促进可持续发展

PROCESS：氢能还有很长的路要走，有些人认为氢能时代离我们太远了。你们是如何看到这一观点？

Andreas Förster：确实，氢能的广泛应用和氢能时代的完全到来还面临着不少挑战，诸如高昂的制氢成本、存储和运输的复杂性，以及相关基础设施的建设需求，这些都让一些人觉得氢能经济的愿景似乎较为遥远。然而，尽管前路漫漫，多数专家和决策者仍然视氢能为实现全球碳中和目标不可或缺的一环。为了不让繁荣、舒适和生活质量因气候变化而受损，加速推进氢技术和相关解决方案的发展变得尤为迫切。这不仅仅是为了避免风险，更是为了开拓一条通往可持续未来的可靠道路。

Florian Ausfelder：氢能之所以被视为减碳路径上的关键基石，是因为它在多个难以脱碳的行业中扮演着无可替代的角色，尤其是化学工业和钢铁制造业。在这些领域，传统的高碳排放工艺难以仅凭现有技术彻底改变，而氢作为清洁的能源载体，提供了深度脱碳的可能性。通过氢气作为还原剂或能源，可以显著降低这些行业的碳足迹。虽然氢能普及的道路可能比预期更为漫长，但它对于保障地球的长远繁荣与生态平衡至关重要。通过国际合作、持续投资以及政策引导，我们有望逐步克服现有挑战，推动氢能成为现实中的清洁能源支柱，引领我们迈向一个更加绿色、低碳的未来。