



储能科学与技术

Energy Storage Science and Technology

ISSN 2095-4239, CN 10-1076/TK

《储能科学与技术》网络首发论文

题目：中国氢能发展路径及突破口：基于美国氢能战略转型与中美氢能发展差异化的启示

作者：郑新宇，徐咏，谢睿杰，邵归宁，李洋，施建峰

DOI：10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0575

收稿日期：2025-06-23

网络首发日期：2025-08-18

引用格式：郑新宇，徐咏，谢睿杰，邵归宁，李洋，施建峰. 中国氢能发展路径及突破口：基于美国氢能战略转型与中美氢能发展差异化的启示[J/OL]. 储能科学与技术. <https://doi.org/10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0575>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。



栏目名称:储能技术经济性分析

收稿日期：2025-06-23；修改稿日期：2025-07-28。

基金项目：山东省重点研发计划（重大科技创新工程）：高性能柔性非金属输氢复合管道产业化关键技术及其应用 Key R&D Program of Shandong Province（Grant No. 2024CXGC010311）。

第一作者：郑新宇（2000—），男，博士（在读），研究方向为氢电协同系统规划设计，E-mail: zhengxinyu0731@zju.edu.cn；

通信作者：施建峰，教授，研究方向为氢能储输装备安全，E-mail: shijianfeng@zju.edu.cn。

引用本文：郑新宇，徐咏，谢睿杰，等. 中国氢能发展路径及突破口：基于美国氢能战略转型与中美氢能发展差异化的启示[J]. 储能科学与技术: 1-19.

Citation: ZHENG Xinyu, XU Yong, XIE Ruijie, et al. Pathways and Breakthroughs for China's Hydrogen Development: Insights from U.S. Hydrogen Strategy Transition and China-US Divergence Analysis[J]. Energy Storage Science and Technology: 1-19.

中国氢能发展路径及突破口：基于美国氢能战略转型与中美氢能发展差异化的启示

郑新宇^{1,2}，徐咏^{1,2}，谢睿杰^{1,2}，邵归宁^{1,2}，李洋^{1,2}，施建峰^{1,2*}

（¹浙江大学能源工程学院特种装备研究所，浙江 杭州 310027；²浙江大学氢能研究院，浙江 杭州 310027）

摘要：在全球能源结构清洁化转型的背景下，地缘政治冲突加剧导致能源供应链风险显著提升，氢能因其来源多样、零碳排放等特性，不仅成为能源技术革命的重要方向，更被各国视为保障能源安全、提升供应链韧性的战略选择。中、美两国作为全球氢能发展的主要推动者，其战略布局定位和技术发展路径对全球氢能产业具有深远影响。本文通过分析美国氢能战略的转变及中、美两国氢能战略的差异，旨在为中国氢能发展提供借鉴，推动中国及全球氢能技术的协同创新与产业化应用。基于美国能源部发布的《氢能项目计划 2020》和《氢能项目计划 2024》，深入剖析了美国在氢能领域的战略转变，总结了其全球化、技术深度优化、绿氢规模化、多场景协同应用及区域示范的发展趋势。此外，结合中国《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》及一系列氢能相关政策，从战略目标、技术重点及应用场景三个维度揭示了中美近年来氢能发展的差异。基于上述对比研究，建议中国聚焦绿色氢能，依据各地区资源禀赋明确区域协同角色分工；通过氢能行业标准完善、重点技术突破、绿氢生产规模化及储运技术优化等途径，加速氢能产业化进程；关注氢能多元应用场景，推进氢能高价值应用落地。本研究不但深化了对中、美氢能战略的理解，而且为中国制定更具战略前瞻性与全球视野的氢能发展蓝图提供了科学依据，有助于推动中国以及全球氢能协同发展。

关键词：氢能；发展战略；中美对比；绿氢

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0575

中图分类号：TK 91

文献标志码：A

Pathways and Breakthroughs for China's Hydrogen Development: Insights from U.S. Hydrogen Strategy Transition and China-US Divergence Analysis

ZHENG Xinyu^{1,2}, XU Yong^{1,2}, XIE Ruijie^{1,2}, SHAO Guining^{1,2}, LI Yang^{1,2}, SHI Jianfeng^{1,2*}

(¹Institute of Advanced Equipment, College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China; ²Hydrogen Energy Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Against the backdrop of global energy transition toward decarbonization, escalating geopolitical conflicts have significantly heightened risks in energy supply chains, positioning hydrogen energy—with its diverse sources and zero-carbon emission characteristics—not only as a pivotal direction in energy technology revolution but also as a strategic choice for nations to enhance energy security and strengthen supply chain resilience. The United States (US) and China, as two major contributors to the development of the global hydrogen industry, profoundly influence its future trajectory through their strategic positioning and technology paths. This paper aims to provide policy references for the development of China's hydrogen

industry and to promote collaborative innovation and industrial application of hydrogen technologies in China and globally by analyzing the transformation of US hydrogen strategies and comparing the differences in hydrogen development strategies between the two countries. Based on the Hydrogen Program Plan 2020 and the Hydrogen Program Plan 2024 released by the US Department of Energy (DOE), this study investigates the transformation of US hydrogen strategies and summarizes key trends in its hydrogen development, including globalization, technology optimization, large-scale green hydrogen production, multi-scenario application, and regional demonstration. Furthermore, by comparing these trends with China's Medium and Long-term Plan for Hydrogen Industry Development (2021 - 2035) and a series of hydrogen related policies, this paper highlights distinctions between the two countries in strategic goals, technology priorities, and application scenarios. Based on the comparative analysis, this study proposes that China should prioritize green hydrogen development by establishing regional collaborative roles according to local resource endowments. The industrialization of hydrogen energy can be accelerated through multiple approaches, including: improving industry standards, achieving breakthroughs in key technologies, scaling up green hydrogen production, and optimizing storage and transportation systems. Furthermore, attention should be given to diversified application scenarios to facilitate the implementation of high-value hydrogen utilization. This research not only deepens the understanding of the US and China's hydrogen energy strategies, but also provides a scientific basis for China to formulate a more strategically forward-looking and globally oriented hydrogen development roadmaps in China. The findings contribute to facilitating synergistic advancement of hydrogen energy both domestically and worldwide.

Keywords: hydrogen; development strategy; USA-China comparison; green hydrogen

氢能是一种具有来源多样、清洁环保、可储存与转化、利用高效等特点的二次能源。在煤、石油时代向可再生能源时代转变，形成以清洁能源为主的多元能源供应体系，逐步实现对化石燃料的全面替代的发展趋势下，氢能被普遍认为是最具发展潜力的清洁能源，未来将成为社会能源供给体系中的主体能源^[1]。一方面，氢能具备大规模、长周期存储可再生能源的能力，能有效解决其间歇性和波动性问题，是构建高比例可再生能源电力系统的关键支撑；另一方面，氢能在难以电气化的重工业、重型长途运输、航空航海等领域具有不可替代的脱碳潜力，是实现这些深度脱碳领域碳中和目标的必然选择。这种以氢能为重要支柱的能源体系变革，对于引领和带动新的氢能产业及其上下游产业链的形成和发展，推动人类社会整个工业体系的变革，具有深远的战略意义和巨大的潜在价值^[2]。此外，当前国际政治经济格局进入动荡变革期，地缘政治冲突频发、能源供应链安全风险显著上升。这一背景强烈驱动全球主要经济体加速推进能源多元化和清洁化战略，以降低对单一地区化石能源的依赖，保障国家能源安全^[3]。氢能作为连接可再生能源与终端应用的核心纽带，因其资源禀赋的全球性和利用的清洁性，正被各国视为实现能源独立、保障供应链韧性的战略性能源选项，这为推动氢能发展提供了前所未有的战略机遇^[4]。

目前，超过 20 个国家和地区制定了氢能发展战略计划，支持氢能重点技术开发和产业链发展。2022 年 3 月，我国国家发改委、能源局联合印发《氢能产业发展中长期规划（2021-2035 年）》，规划明确了氢的能源属性，将其纳入了未来国家能源体系，提出了氢能产业发展基本原则和阶段性目标，部署了推动氢能产业高质量发展的重要举措^[5]。日本由于化石燃料匮乏问题，成为全球最早布局氢能的国家之一。2017 年日本发布《氢能基本战略》，并于 2023 年进一步修定，计划到 2040 年投资 15 万亿日元，推动氢能发展。其氢能发展模式最显著的特点是开展国际间氢资源供应链与贸易，大量依赖于进口氢，国内通过发展氢发电、氢交通、氢工业等项目，替代石油等化石能源，保障能源安全^[6]。韩国政府于 2019 年发布《氢经济发展路线图》，涵盖了氢能制、储、输、用全产业链，重点在氢燃料电池汽车的推广、燃料电池在家庭和建筑商业中的应用、建立氢能生产-储备-分配的完整体系 3 个领域展开部署。此外，韩国于 2021 年《碳中和基本计划》将氢能列为核心能源，2023 年进一步推出《氢经济发展战略 2.0》，目标是成为全球领先的氢经济体。以韩国为代表的国家，将氢能作为打造经济增长新引擎的战略途径，鼓励氢能产业集群发展，最终推动经济增长^[7]。欧盟在 2020 年发布《欧盟氢能战略》，旨在通过降低可再生能源成本、加速发展相关技术，扩大可再生能源制氢在难以去碳化领域应用，最终实现 2050 年“气候中性”的目标。德国是欧盟氢能发展战略的重要参与者之一，将氢能视为应对能源转型中波动性、保障新能源安全稳定供应和推进关键工业部门深度脱碳的综合解决方案。2019 年，德国提出了《2030 年气候行

动计划》，计划 2050 年实现碳中和，立足于可再生能源制氢，将氢能作为能源清洁转型、深度脱碳的重要发展方向。自 1990 年以来，美国政府相继出台多项促进氢能发展的政策和行动计划，以能源部（Department of Energy, DOE）为核心开展相关研究和探索。2020 年，DOE 发布了《氢能项目计划 2020》（以下简称《计划 2020》），提出了未来十年及更长时期内氢能技术研究、开发和示范的总体战略框架。2024 年 12 月，DOE 根据美国氢能发展现状和未来需求，更新并发布了新版《氢能项目计划 2024》（以下简称《计划 2024》）。《计划 2024》明确了美国能源部氢能项目的核心战略布局，提出了以加速氢能及其相关技术的研发、示范和推广为主要目标，并针对制氢、储存、输送、转换、应用以及区域清洁氢气枢纽建设等方面制定了具体的发展目标和实施举措，旨在推动氢能技术在多领域的广泛应用和深度融合。

本文通过对美国 DOE 发布的《计划 2020》和《计划 2024》的深入分析，探讨了美国在技术进步和产业发展的背景下，其氢能发展战略全球化、技术深度优化、绿氢规模化、多场景协同及区域示范的转变趋势。此外，从战略目标、技术重点及应用场景等方面详细比较了当前中美两国在氢能发展战略上的差异化特点。在此基础上，总结出对我国未来氢能产业发展的重要启示，并从区域协同、技术创新、产业布局和高价值场景等方面提出具有指导意义的建议。

1 美国氢能发展战略变化

1.1 氢能战略演变：从技术储备到商业全球化

美国氢能战略在 2020 至 2024 年间实现了从技术储备向商业化及全球化的范式突破。《计划 2020》以技术研发与系统构建为核心目标，其战略重心在于突破关键领域技术瓶颈并建立氢能技术框架体系^[8-10]，明确将技术经济性提升作为首要攻关方向，通过总额 40 亿美元的研发预算系统支持制氢、储运、终端应用三大环节，并重点布局了质子交换膜电解水制氢（proton exchange membrane electrolysis, PEMEC）与固体氧化物电解水制氢（solid oxide water electrolysis, SOEC）等技术路线。《计划 2020》着力构建“技术研发-工程验证-标准制定”三位一体的推进机制，具体包括^[11]：1）开展氢能全产业链技术研发与工程验证；2）扫除氢能基础设施建设的技术壁垒；3）建立涵盖安全规范、测试方法等的技术标准框架。典型实践案例包括：在奥克兰港试点的氢燃料电池动力装载机 and 移动加氢车项目，以及通过燃料电池技术办公室与国家实验室延续合作的卷对卷（Roll to Roll, R2R）联盟——开发 R2R 工艺，以降低电解槽和燃料电池的制造成本^[12]。

2023 年，DOE 发布的《国家清洁氢能战略和路线图》（以下简称《路线图》）提出了近期（2022-2025 年）、中期（2026-2029 年）、长期（2030-2035 年）行动时间表，并制定支持清洁氢气使用和更广泛市场应用的行动。具体内容如图 1 所示^[13]。

阶段	近期（2022-2025）	中期（2026-2029）	长期（2030-2035）
最终用途和市场应用	为生产、加工、交付、储存和最终用途的大规模清洁氢部署奠定监管基础	统一氢技术相关的国际规范和标准	调整优化市场结构和加强监管，促进清洁氢出口
	跨行业（可再生能源、化石能源）开展工作以确定并缩小监管和政策差距	增加可再生能源和核电电解槽的使用能量以应对监管挑战	从大规模部署中吸取的经验教训，确定未来发展的优先部门
	制定简化大型项目许可程序，明确环境、能源和公平优先事项	通过可公开访问的平台分享安全最佳实践和早期部署的经验教训	量化氢在增强未来清洁能源系统的弹性和解决减灾问题方面的应用
	推进燃料电池及其他低、零排放终端使用技术的推广应用	制定氢混合限值的国家指南	启动至少1个区域清洁氢中心，以支持到2035年实现无碳污染电网
	建立安全可靠的数据监控和收集框架，量化氢泄漏对气候的影响	到2030年，利用清洁氢从生物质和废物中生产至少30亿加仑的可持续航空燃料	到2030年，确保超低氮氧化物涡轮和低pgm燃料电池能够运行，实现100%氢发电

图 1 2023 年 DOE 发布的氢能发展战略目标

Fig. 1 Strategic Goals for Hydrogen Development Released by the DOE in 2023

《计划 2024》在《计划 2020》的基础上，转向更为系统性的产业布局，更新了量化目标并强化全球领导力定位^[14]。《计划 2024》基于《路线图》的框架体系，通过整合各部门的职能优势形成战略实施合力，以更有效地落实《路线图》所设定的战略目标。为实现上述战略目标，美国政府创新运用立法工具构建政策支撑体系：以《基础设施投资和就业法案》（Infrastructure Investment and Jobs Act, IJJA）和《通货膨胀削减法案》（Inflation Reduction Act, IRA）为制度载体，其中 IRA 为能源部提供 95 亿美元专项资金，重点部署清洁氢生产税收抵免与区域清洁氢气枢纽建设补贴的协同激励机制^[15]。数据显示，该税收抵免机制可显著提升绿氢经济，使绿氢平准化成本（Levelized Cost of Hydrogen, LCOH）由当前 5 \$/kg 降至 1 \$/kg 以下^[16]。

此外，《计划 2024》还通过布局地缘供应链、主导标准体系及技术输出强化全球竞争力，将 2030 年确立为氢能出口战略节点，构建覆盖北美自由贸易区的氢能供应链网络，还与欧盟联合制定氢能认证互认体系，推动形成国际统一的绿色氢能标准框架。并将创新融入环境社会治理机制，计划建立七个区域清洁氢气枢纽，配套部署碳封存验证装置，实现全生命周期减排。可以看出，《计划 2024》聚焦于明确成本目标、强化全球竞争力和推动可持续发展，这一转变表明美国从早期的技术积累阶段过渡到了以商业化和国际化为导向的快速发展阶段。

1.2 氢能技术转型：从多样化探索到绿氢聚焦

在氢能技术方面，《计划 2020》主要集中于氢气的多样化生产、储存、输送和转化路径，评估多路径技术可行性。以氢气生产为例，《计划 2020》重点布局了化石能源耦合碳捕集（蓝氢）、生物质/废弃物资源转化（灰氢）及电解水（绿氢）三条技术路径，其中电解水制氢因其零碳属性被定位为长期战略方向。《计划 2020》通过开发碱性制氢电解槽（Alkaline water electrolysis, ALK）的新型隔膜材料和高活性、高利用率的非贵金属催化剂，探索新的电解池和电堆设计，以提高电流密度(长期目标 1A/cm²)并降低欧姆电阻，为大规模制氢奠定基础^[17]。而在氢气输送方面，规模化输氢路径主要包括气态长管拖车、液体罐车、管道（气氢）和化学氢载体运输^[18-20]；氢气储存采用物理储氢和基于材料化学储氢两种方法^[21-22]；氢气的转化则通过质子交换膜燃料电池（proton exchange membrane fuel cell, PEMFC）或固体氧化物燃料电池（solid oxide fuel cell, SOFC）发电实现^[23-24]。《计划 2020》的技术研发以探索性为主，着重于建立多样化的技术路径。相较之下，《计划 2024》则转向了技术的深度优化和规模化降本，特别是在降低绿氢生产成本和开发创新储运方式方面展现出更强的紧迫感和目标性。二者的总体技术目标的数据对比如表 1 所示。

表 1 美国《计划 2020》与《计划 2024》的总体技术目标对比

Table 1 Comparison of overall technical goals between the Hydrogen Program Plans 2020 and the Hydrogen Program Plans 2024

技术环节		《计划 2020》	《计划 2024》
氢气生产	绿氢成本	2 \$/kg	<2 \$/kg（2026 年） <1 \$/kg（2031 年）
	电解槽成本	300 \$/kW	250 \$/kW
氢气输送	终端成本	早期直接应用市场：<5 \$/kg 高价值产品市场：<2 \$/kg	早期直接应用市场：<7 \$/kg 高价值产品市场：<4 \$/kg
氢气储存	碳纤维成本	13 \$/kg	14 \$/kg
氢能应用	SOFC 系统	成本：900 \$/kW 寿命：40000h	成本：1000 \$/kW 寿命：80000h

对比发现，《计划 2020》虽提出灰氢、蓝氢和绿氢多路径并行，但《计划 2024》及配套政策（如 IRA）已明确将绿氢作为核心攻坚方向，将绿氢技术指标进一步深化，以完成降低电解水制氢成本至 1 \$/kg 这一核心目标。其技术深度优化体现在材料革新、系统效率突破及工艺集成创新三方面：材料革新——铈钴合金催化剂使 PEMEC 铂族金属负载量从 0.8 g/kW 降至 0.1 g/kW，超薄质子交换膜提升质子传导率；系统效率突破——低温 ALK 效率从 58%提升至 65%，SOEC 效率提升至 76%；工艺与集成创新——Hydrogen Shot 计划联合国家实验室与产业界，催化了多个标志性工程，例如 Plug Power 在纽约州建成的北美最大 PEMEC 工厂，使用 R2R 电极工艺降低膜电极成本 45%，动态响应缩短 PEMEC 启停时间，适配风光发电波动性。

值得注意的是，《计划 2024》中的部分关键性能指标，如碳纤维成本、SOFC 系统成本等，其设定的目标值较《计划 2020》中的规划目标有所提高。这一调整源于 DOE 在《计划 2020》的实践推进过程中积累了经验，经过对市场实际状况、技术成熟度、规模化生产面临的挑战以及更全面的经济性考量等复杂因素的综合评估后，对相关指标进行了更符合当前发展阶段现实约束的修订，从而确立了更具落地可行性的基准目标。

1.3 氢能多领域应用：环境效益与产业经济的双重增值

《计划 2024》中，DOE 主要聚焦氢能十一个计划领域：氢气生产、氢气输送、储氢、燃料电池、应用/技术验证、氢能安全、氢能规范和标准、氢能教育、氢能基础研究、系统分析、系统集成；并以十年为阶段制定技术攻关计划和应用目标，重点拓展具有战略影响力的终端应用场景。以工业和交通应用为例，美国在其终端领域应用日程及技术路线规划如图 2 所示^[25]。

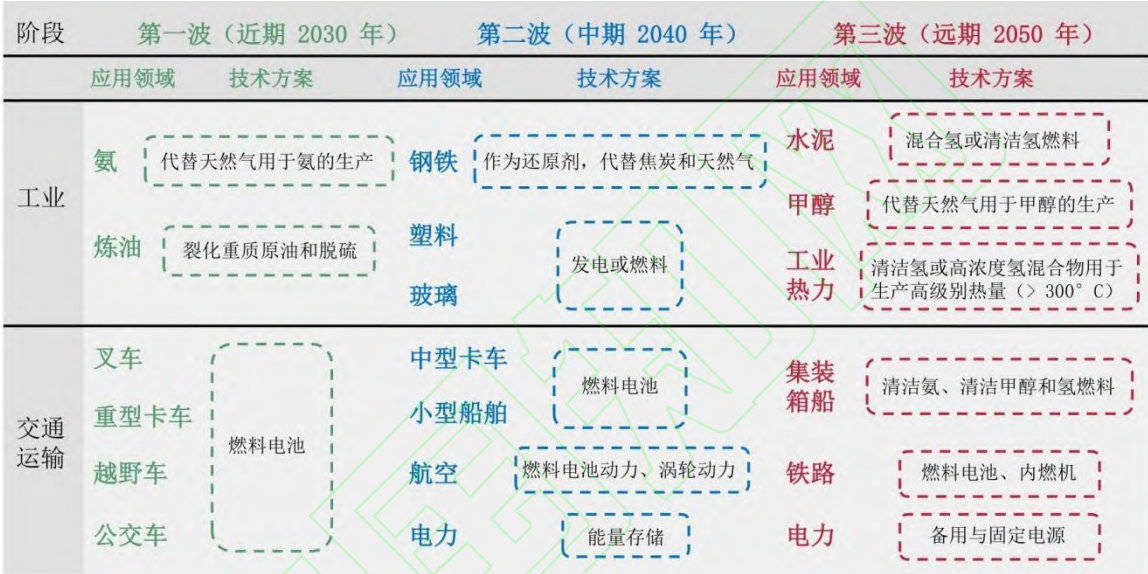


图 2 美国清洁氢在终端领域应用日程及技术路线

Fig. 2 Timeline and technical roadmap for clean hydrogen applications in end-use sectors in the USA

在交通运输方面，《计划 2024》强调该领域占美国 CO₂ 排放量的 1/3，且是局部空气污染主要来源。氢燃料电池技术可加速交通脱碳进程，尤其适用于需长续航里程、快速补能及重负荷的中型/重型长途车辆。《计划 2020》及《计划 2024》对比显示：中重型车辆占比从 4% 升至 5%，但排放占比从 25% 降至 21%，此矛盾性改善主要归因于氢能重卡在港口物流、州际货运等场景的规模化替代，例如 2024 年氢能叉车占比达 16%，较 2020 年提升 11%。随着燃料电池系统成本下降与应用规模扩大，氢能交通正向铁路、船舶领域延伸，强化其零碳能源属性。

在化工应用方面，《计划 2024》将绿氢定位为合成氨、甲醇及炼化等高耗氢行业深度脱碳的核心抓手，并重点布局示范项目：俄亥俄州米德尔敦厂通过能源部资助将传统高炉改造为年产 250 万吨氢基直接还原炉及两座 120 MW 电熔炉，首次采用氢气替代焦炭作为还原剂，显著降低碳排放与能耗；密西西比州佩里县项目则建成了全球首个 100% 绿氢驱动直接还原铁（Direct Reduced Iron, DRI）设施，耦合核能余热 (>950 °C) 实现 76% 电解效率，配套地下盐穴储氢系统保障供氢稳定性。较传统高炉工艺，上述绿氢技术可实现 81% 碳减排。

此外，在发电应用与集成混合能源系统方面，固定式氢能系统从备用电源逐渐向电网基荷电源的转型。对此，两版《计划》的对比数据提供了有力佐证：美国 PEMFC 的部署量从《计划 2020》中的逾 8000 台跃升至《计划 2024》中的 23000 台；全球固定式燃料电池发货装机量更是实现跨越式增长，从 2018 年的 220 MW 攀升至《计划 2024》中的逾 500 MW。值得注意的是，氢能通过融入混合能源系统，为电力行业创造了显著的综合价值。混合能源系统（见图 3）通过整合发电、储能与能量转换技术，相比单一技术方案，能够提供更高的系统灵活性与经济性，实现价值提升与成本节约。以耦合核电的氢能系统为例，《计划 2020》中装机容量 100 MW 的系统年产氢量约 4.1 万吨；而《计划 2024》中同等系统预估年产氢量已提升至约 5.4 万吨，体现出核氢耦合生产能力的持续增强。

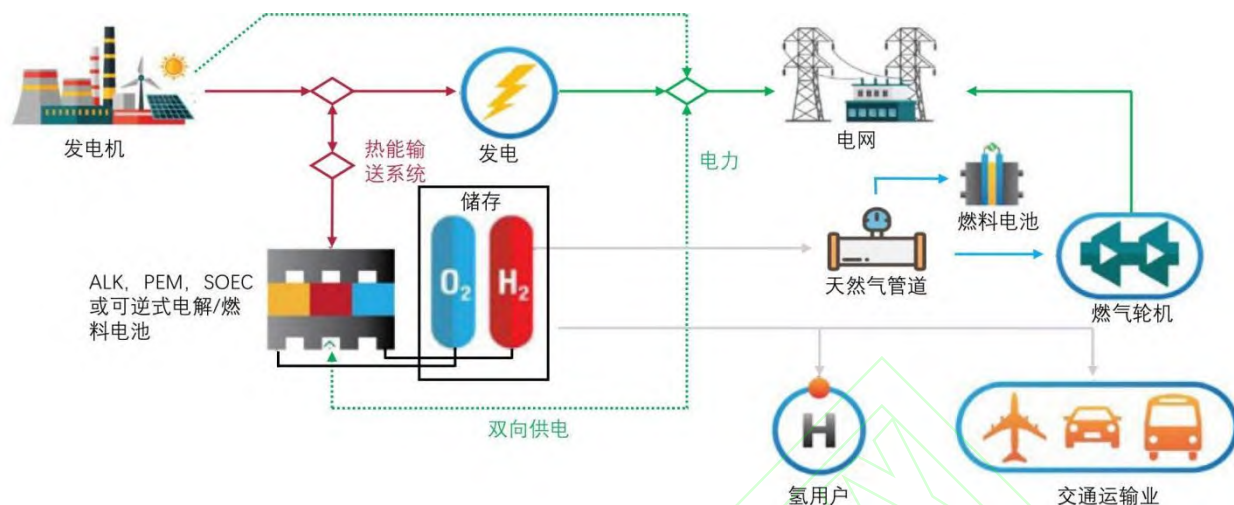


图 3 混合氢能系统结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of hybrid hydrogen energy systems

《计划 2020》应用领域集中于早期市场的技术验证，应用范围有限；而《计划 2024》则进一步推动氢能的多元化应用。通过场景精准化（交通重载、工业高耗、电网基荷）、技术高阶化（高温电解、核氢耦合）、政策协同化（补贴延展、标准统一），构建了氢能应用从示范到规模化的跃迁路径，其核心逻辑在于以场景需求倒逼技术创新与产业链整合，最终实现环境效益与产业经济的双重增值。尤其是在交通和工业减排等具有战略影响力的终端应用场景中实施创新性实践，为规模化商业化奠定基础。

1.4 区域清洁氢气枢纽计划：助力多个领域脱碳工作

在《计划 2024》中，新增了区域清洁氢气枢纽这一模块，《两党基础设施法案》授权拨款 80 亿美元，用于建立区域清洁氢气枢纽计划（Regional Clean Hydrogen Hubs Program，简称 H₂Hubs），该计划旨在创建氢气生产商、消费者及地方基础设施的网络，以加速氢气作为清洁能源载体的应用^[14]。H₂Hubs 计划将构建国家级清洁氢气网络的基础，预计将对电力生产、重型运输、钢铁及合成氨等工业领域的脱碳工作做出重要贡献，同时通过社区利益计划最大化地方社区的利益，图 4 直观展现了美国 H₂Hubs 的战略分布。目前 7 个氢气枢纽已全部选定，覆盖 16 个州并形成差异化技术布局^[26]，7 个氢气枢纽按资源禀赋和基础设施协同可分为三类：化石能源主导型、可再生能源主导型以及混合能源协同型。



Fig. 4 Distribution of H₂Hubs in the USA^[14]

化石能源密集型包括墨西哥湾沿岸枢纽和阿巴拉契亚枢纽：前者获 12 亿美元资助，整合当地丰富的风能、太阳能与化石燃料资源，规划大规模生产绿氢与蓝氢，目标清洁氢年产能逾 100 万吨，创造 4.5

万个就业岗位，重点推动石化、钢铁等高排放工业部门深度脱碳；后者则聚焦于利用当地页岩气资源结合碳捕获技术生产蓝氢，规划年产能达 70 万吨。可再生能源主导型涵盖太平洋西北枢纽、加州枢纽、心脏地带氢能枢纽与中大西洋枢纽：太平洋西北枢纽则完全依赖水电与核能生产绿氢，确保零化石燃料使用，专注于氢能在发电、海运及工业领域的应用，规划绿氢年产能 30 万吨，用于支持西北部电网调峰与零碳港口建设；加州枢纽同样专注绿氢生产并明令禁止化石燃料制氢，重点服务于港口物流及重型卡车运输等场景，预计年二氧化碳减排量 200 万吨；心脏地带枢纽利用风能、太阳能生产绿氢，致力于农业化肥脱碳及寒冷区域供暖，规划年产能 20 万吨绿氢，目标降低化肥生产成本 30%；中大西洋枢纽结合核能与可再生能源进行电解水制氢，并积极开展电解槽技术的创新研发，目标年产能 40 万吨，预计创造 2.08 万个就业岗位，推动东海岸氢能基础设施的互联互通。混合能源协同型则以中西部枢纽为代表，该枢纽获 10 亿美元支持，核心策略为协同开发核能与天然气（粉氢）制氢，通过集成多种制氢工艺提升产能，目标年产量达 50 万吨，加速推进中西部工业走廊的脱碳进程。

美国 H₂Hubs 的布局遵循政策导向与资源禀赋协同原则，因地制宜选择技术路线：例如，德克萨斯州依托化石能源优势发展蓝氢，而加州受严格环保政策约束仅允许绿氢生产。同时，布局遵循产业需求驱动技术适配，加州聚焦占全美 40% 货运量的洛杉矶/长滩港重型卡车脱碳，中心地带则针对农业大州（如明尼苏达州）推动化肥生产脱碳。美国 H₂Hubs 计划是国家能源转型的核心战略，其核心意义在于通过政策工具与市场机制的协同创新，构建多尺度、多技术路径的清洁氢全产业链生态系统，以加速氢能从技术验证向规模化商业应用的范式转型，该计划表明了美国对于清洁氢气的迫切需求，即清洁氢气的生产、加工、交付、储存和终端使用，包括在工业领域的创新应用。

2 中美氢能发展模式对比

2.1 氢能政策：政府主导与市场驱动的战略差异

中国的氢能政策方向主要采取政府主导的方式，政府在资金支持、产业布局和技术研发等方面发挥了重要作用，通过出台一系列政策文件，如《氢能产业发展中长期规划（2021-2035 年）》，为氢能产业提供政策引导和资金支持，推动氢能技术的创新与产业化^[5]，在《加快工业领域清洁低碳氢应用实施方案》中提出 30 项具体工作部署，涵盖氢冶金、绿色甲醇、氢燃料电池汽车等领域^[27]。此外，政府还通过双边合作和区域协作，与其他国家和地区加强合作，推动氢能在国际市场中的应用与推广。中国重点支持国内氢能市场的建设，促进区域性氢能示范项目的落地，以提升本国氢能产业的自主创新能力和竞争力。

相较而言，美国的氢能政策更加依赖市场机制，强调通过政策工具激励私营企业的参与。美国政府通过投资激励、税收优惠、创新基金等方式，鼓励私营部门在氢能技术研发和产业化中的投入，以推动氢能市场的竞争性发展。此外，美国注重通过国际标准的制定来提升其在全球氢能市场中的主导地位，推动氢能技术和应用标准的国际化，确保其在全球氢能产业链中占据有利位置。近五年中美相关氢能政策对比如图 5 所示。

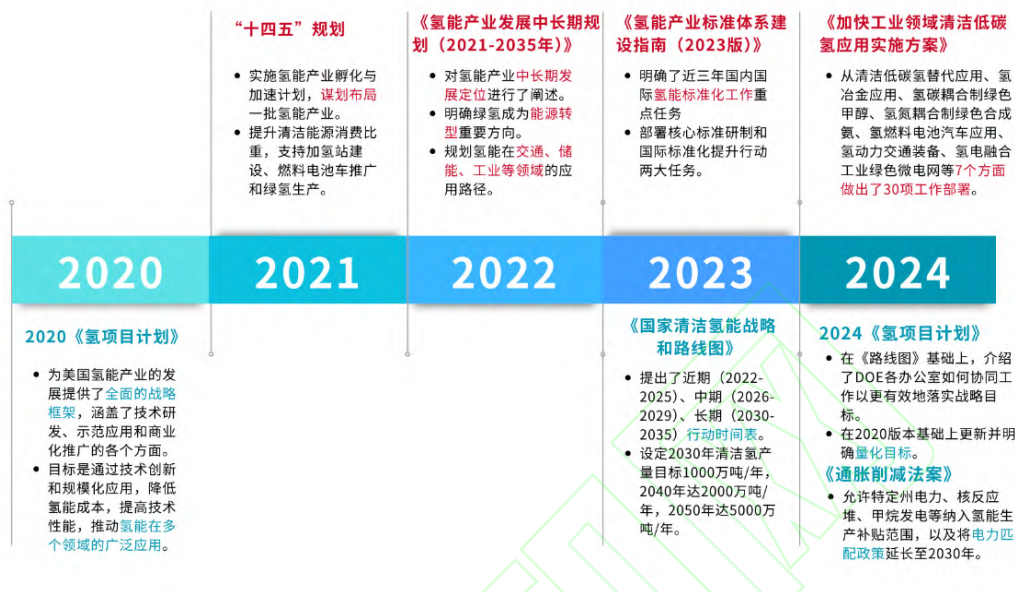


图 5 近五年中美相关氢能政策对比

Fig. 5 Comparison of hydrogen-related policies between China and the USA in the past 5 years

中国的氢能发展战略定位于推动绿色低碳转型和能源安全，特别强调碳中和驱动的氢能产业高质量发展。中国提出，到 2035 年要形成氢能产业的技术创新体系，并逐步扩大氢能能源结构中的比重，计划在 2050 年实现氢能产业的全面商业化应用。美国在《计划 2024》中明确提出氢能将作为清洁能源转型的核心驱动力，计划通过创新驱动氢能产业快速发展，能源安全与全球竞争力并重，提高技术竞争力，以技术领先和产能扩张为基础，主导国际标准与贸易网络，扩大全球影响力。

2.2 氢能技术：产业化开发与关键技术突破的重点对比

在氢能发展的技术重点方面，中美两国的战略存在显著差异。中国的氢能技术布局注重全产业链协同发展，从制氢、储存运输到终端应用，形成完整的技术路径^[28]。中国强调全面布局，通过加强技术研发和产业化应用，推动氢能产业在各个环节的技术突破，尤其是在制氢技术（如电解水制氢、煤制氢、天然气重整等）、氢气储存与运输以及燃料电池的研发应用方面，致力于在各地建设区域化氢能应用示范，推动产业集群式发展。在技术创新方面，中国注重核心技术的自主化，如电解槽、燃料电池等关键设备的研发和产业化。

表 2 展示了中美现阶段的氢能技术重点及发展现状对比。数据显示，美国氢能各环节的关键技术指标仍领先于中国，中国在关键材料及装备研发层面国产化程度有待提升。相比之下，美国的氢能技术战略更侧重于关键技术突破，特别是在高效制氢技术、创新储存方式及氢能与电力系统的深度集成等领域。美国在新《计划 2024》中明确提出，以全球化的视野推动技术创新，通过抢占技术制高点强化产业竞争力。重点关注创新型技术的应用，如高温电解水制氢以及氢能在重型运输、工业等领域的突破，推动氢能的快速商业化和全球推广。

表 2 中美氢能技术重点及发展现状对比

Table 2 Comparison of key hydrogen technologies and development status between China and the USA

技术环节	中国	美国
氢气制取	<ul style="list-style-type: none">● ALK 制氢技术处于国际先进水平，2024 年电解槽全球市场占有率超 50%，单槽最高产氢达 3000 Nm³/h^[29]● 风光制氢一体化项目加速布局	<ul style="list-style-type: none">● PEM 制氢技术成熟，单槽最高产氢达 1000 Nm³/h^[30]● 布局核能高温 SOEC 制氢与地质气开采技术
氢气储运	<ul style="list-style-type: none">● 高压气态储氢技术成熟（如 35 MPaIII 型瓶），但碳纤维依赖进口● 液氢储运研发薄弱● 管道运输应用少● 固态储氢材料研发滞后	<ul style="list-style-type: none">● 重点研发高压气态储氢（如 70 MPaIV 型瓶）与低温液氢^[31]● 开始布局氢气专用管道● 探索有机液体储氢与地下盐穴储氢规模化

加氢站	<ul style="list-style-type: none"> ● 重点布局高压气态加氢站，数量超过 400 个^[32] ● 核心部件如压缩机、阀门、加氢枪、流量计等国产化程度较低 	<ul style="list-style-type: none"> ● 开始布局液氢加氢站 ● 设备自主研发率高，加氢站建设成本较低，并规划跨大西洋氢能贸易网络
燃料电池	<ul style="list-style-type: none"> ● PEMFC：铂金载量 0.2-0.3 mg/cm²；商业化电堆寿命 8000-15000 h；功率密度 3.0-4.0 kW/L ● SOFC：电效率 55%-65%；功率密度 0.5-1.0 W/cm²；寿命衰减速度 0.5%-1.0%/1000 h^[33] ● 膜电极、质子交换膜等燃料电池关键核心技术仍待自主研发突破 	<ul style="list-style-type: none"> ● PEMFC：铂金载量 0.1-0.2 mg/cm²；商业化电堆寿命 10000-25000 h；功率密度 4.0-5.0 kW/L ● SOFC：电效率 60%-65%；功率密度 1.0-1.5 W/cm²；寿命衰减速度 0.1%-0.3%/1000 h^[33] ● 探索超级燃料电池，如无铂 PEMFC、阴离子交换膜燃料电池、双极膜燃料电池等
氢安全技术及相关法规	<ul style="list-style-type: none"> ● 关键安全设备如高精度氢气传感器、超低温阀门、耐氢腐蚀材料等国产化程度较低 ● 加氢站、氢燃料电池汽车等场景安全规范发布，但液氢、输氢管道等新兴领域标准体系滞后于产业发展 	<ul style="list-style-type: none"> ● 高度重视安全技术研发：包括风险评估与建模、氢气泄漏检测与监测、材料科学与氢脆、应用端安全技术等 ● 氢安全检测能力、标准体系健全，但联邦和各州之间法规碎片化

2.3 氢能应用：本土示范与全球扩展的目标对比

在氢能的应用领域方面，中国和美国的战略呈现出不同的侧重点。中国的氢能应用战略主要围绕本土示范展开，优先满足国内需求，并重点支持交通和工业领域的示范项目。例如中石化新疆库车绿氢示范项目——于 2023 年 6 月 30 日顺利产氢并连续安全运行近 600 天。先后完成了万吨级电解水制氢工艺与工程成套技术、绿氢储运工艺技术、智能控制系统研发等创新成果^[34]。国内相关氢能应用工程示范项目如表 3 所示。

表 3 国内氢能应用工程示范项目
Table 3 Domestic demonstration projects for hydrogen applications

年份	项目名称	地区	示意图	发展现状
2021 年	宁夏宝丰一体化太阳能电 解水制氢储能及综合应用 项目	宁夏宝丰		2021 年 4 月顺利投产，2025 年 3 月，该项目扩建工程获批。配套建设光伏电站及储能设施，氢气已稳定供应厂内煤化工装置，实现部分原料替代。该项目首创将新能源直供煤化工生产系统，实现可再生能源向高端化工新材料的有效转化。
2022 年	安徽六安兆瓦级制氢综合 利用工程	安徽六安		2022 年 7 月顺利投运，项目实现了从可再生能源发电、兆瓦级 PEM 电解水制氢、多模式储氢到燃料电池发电回馈电网的全流程闭环运行，为中国首次实现兆瓦级制氢-储氢-氢能发电的全链条技术贯通。
2023 年	新疆库车绿氢项目	新疆库车		2023 年 6 月建成投产，规划年产绿氢 2 万吨，配套光伏装机容量 300MW 以上。所产氢气通过管道输送至当地炼化企业，用于替代天然气制氢，该项目是国内首个万吨级光伏制氢项目。
2024 年	吉林大安风光制绿氢合成 氨一体化项目	吉林大安		正在建设中，预计 2025 年 7 月下旬产出首批绿氢，规划年产绿氢 3.2 万吨，绿氨 18 万吨。项目将大规模整合风电、光伏制氢，并耦合合成氨工艺，旨在打造绿氢合成绿氨的完整产业链示范。建成后将成为中国最大的绿氢合成绿氨创新示范项目。

中国在交通领域的氢能应用也非常广泛，相关部门积极推动氢燃料电池公交车、氢动力卡车等项目的示范运行，以解决城市交通的碳排放问题^[35]：包括在北京冬奥会期间投入超 1000 辆氢能巴士，在上海投放 80 辆氢能网约车等。此外，中国还致力于氢能在钢铁、化肥等能源密集型行业的应用，力求通过产业化推动碳减排和能源转型，据《中国氢能大数据报告》显示，工业领域占中国氢能消费总量的 80%，2030 年钢铁、合成氨行业绿氢替代率将达 30%。

与中国的本土氢能示范不同，美国更加注重全球市场的扩展：通过技术联盟、资源控制、金融工具三大抓手构建氢能全球化网络。DOE 主导资源布局，在智利阿塔卡马沙漠投建 25GW 光伏制氢基地，锁定南美 70% 绿氢产能，同时通过金融杠杆强化市场控制，向发展中国家提供氢能专项贷款，并要求采购美国企业设备比例不低于 60%，形成隐性市场绑定。这种多层次、立体化策略成效显著，推动美国氢能产业出口额从 2020 年 12 亿美元激增至 2024 年 54 亿美元，预计 2030 年将占据全球绿氢贸易量的 35%。此外，美国在氢能应用场景的选择上更为聚焦，集中于交通及电力领域，如氢能重卡、航空、船舶和综合能源系统^[36]：《计划 2024》规划 2030 年氢燃料电池重卡系统成本降至 80 \$/kW，以推动陆路运输脱碳；同时布局海空领域——DOE 与波音合作开发 2030 年商用液氢支线客机，在西雅图港试点氢动力拖船配套液氢储运技术，锁定航空/海运等难减排领域解决方案。此外，氢能与电力系统的深度融合，推动能源存储和分布式能源系统的全球化应用，也是美国氢能战略的重要组成部分。截至 2024 年底，Bloom Energy 公司在全球范围内累计分布式发电装机容量接近 1 GW，为苹果、谷歌等企业数据中心及美国国防部办公楼提供数百千瓦级 24 小时不间断分布式电源。

3 中国氢能发展路径及突破口

3.1 聚焦绿色氢能，明确区域角色

作为实现碳中和愿景的战略性技术载体，绿色氢能正加速演进为中国能源体系深度变革的核心支撑，预估至 2030 年我国绿氢占比将达到 15%^[37-38]。基于这一定位，建议以绿氢为核心驱动要素，通过三重维度对能源体系产生变革性影响：其一，以绿氢为载体规模化消纳风光电力，突破可再生能源边际成本约束，提升能源系统韧性；其二，依托绿氢证书交易市场与碳配额联动机制，形成“生产-消费”双向碳约束闭环，加速能源消费结构低碳化转型；其三，通过绿氢-化工-交通产业耦合产生的系统性减排效应，推动碳达峰进程前移^[39]，为全球气候治理提供可验证的中国方案。

战略层面上，除了聚焦绿色氢能，可以参照美国 H₂Hubs 计划，针对不同地区发挥区域特色优势，实施“区域协同梯度发展”战略，如图 6 所示。表 4 呈现了中国氢能发展区域布局对美国 H₂Hubs 计划的借鉴关系，体现了中国基于自身资源禀赋与产业特征的区域化发展路径。具体战略建议如下：（1）参考美国太平洋西北枢纽及心脏地带枢纽的发展经验，在西北风光资源富集区及东北可再生资源密集区，充分发挥本土风光资源优势，重点发展绿氢规模化生产及配套储能调峰能力，旨在实现风光资源与氢能产业链的本地化高效整合^[40]。例如以甘肃酒泉、新疆哈密等国家级清洁能源基地为枢纽构建“源网荷储一体化”绿氢生产基地，实现特高压柔性直流输电与电解水制氢系统深度耦合，并在电力系统调峰需求超过制氢负荷阈值时，启动跨区域氢能管网建设（即“西氢东输 2.0 工程”），形成氢、氨基燃料与甲醇等多载体协同输送体系^[5]。（2）借鉴美国墨西哥湾沿岸枢纽与中大西洋枢纽的产业脱碳路径，京津冀重工业集群立足本区域产业结构，以高碳排行行业的深度脱碳为核心，着力推进蓝氢技术示范与应用^[41]，在钢铁 DRI、重型交通及化工灰氢替代耦合碳捕集、利用与封存（Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS）技术等场景实现深度脱碳^[42-44]，推动重工业区域碳中和；（3）长三角科技创新区对标中大西洋枢纽及中西部枢纽，发挥技术引领作用，聚焦突破制氢、储运等产业链关键环节的核心技术，打造氢能产业集聚地，涵盖催化剂研发（如 Pt/C 催化剂替代技术）、膜电极制造（如超薄复合质子交换膜）及系统集成（如兆瓦级 PEMEC 电堆）等领域的氢能技术创新生态产业区^[45]，通过政产学研用协同创新机制，突破科研技术瓶颈，强化本土技术自主创新能力。（4）珠三角港口区则参照加州枢纽及太平洋西北枢纽在港口与贸易领域的探索，依托其发达的港口网络，积极试点绿氢应用场景，探索跨境氢能贸易模式，提升氢能在全球供应链中的渗透作用^[46]。例如以广州南沙氢能产业园、深圳国际低碳城及佛山仙湖实验室为战略支点^[47]，重点布局氢能“制储输用”全产业链，通过建立与国际接轨的氢能产品认证体系（包括 EUCAR III 级储氢瓶认证、ISO14687-2 氢品质标准），形成面向东盟市场的区域性氢能离岸贸易枢纽，预计 2030 年实现氢能装备出口额占全球市场份额 12%-15%，深度参与全球氢能价值链重构^[48]。



图 6 中国氢能区域协同梯度发展图

Fig. 6 Regional collaborative gradient development of hydrogen energy in China

表 4 中美氢能发展对标区域

Table 4 Regional benchmarking of hydrogen development between China and the USA

中国区域	对标美国区域	发展重点
西北风光富集区	太平洋西北枢纽 心脏地带氢能枢纽	绿氢、储能调峰
京津冀重工业地区	墨西哥湾沿岸枢纽 中大西洋氢能枢纽	工业降碳、钢铁/化工蓝氢
长三角科技创新区	中大西洋氢能枢纽 中西部枢纽	制氢技术、储运系统研发
珠三角港口区	加州枢纽 太平洋西北枢纽	港口贸易、绿氢试点

3.2 突破技术瓶颈，开辟降本路径

氢能产业的技术突破与产业化应用是推动氢能普及的关键。目前，氢能大规模产业化应用仍需克服四大挑战，即完善氢能的行业标准规范、形成“制储输用”完整产业链、构建长距离低成本的氢能运输体系和降低绿氢的生产成本^[49]。

当前中国氢能行业标准体系已初步构建涵盖制备、储运、加注及应用的框架，但仍面临核心技术标准滞后、国际影响力薄弱及安全规范细化不足等挑战。截至 2025 年，国家及行业标准累计发布 159 项，但液氢储运、绿氢认证等细分领域仍存空白，PEMEC、固态储氢等新兴技术缺乏配套标准，国际标准转化率与提案数量显著落后于美日等国。为应对这些挑战，2023 年国家标准委、国家能源局等六部门联合印发《氢能产业标准体系建设指南（2023 版）》，明确提出“到 2025 年支撑氢能制、储、输、用全链条发展的标准体系基本建立”的核心目标，重点布局制修订 30 项以上国家标准及行业标准。该指南以“基础与安全、氢制备、氢储存和输运、氢加注、氢能应用”五大子体系为框架，针对性部署了未来标

准化工作的重点方向，包括核心技术标准研发（如电解水制氢效率评价、液氢储罐材料规范）、多元化应用场景安全标准制定（如氢燃料安全品质检测、氢燃料电池安全要求等）、国际协同机制（ISO、IEC 等国际化）等方向。此外，标准体系落地实施过程需要推进产学研协同创新机制，高校提供技术支持，企业反馈应用需求，通过联合攻关共同推动标准的有效实施与动态优化。

加速突破氢能全产业链技术瓶颈是实现规模化应用与产业化落地的核心路径^[50]。中国氢能产业在制氢、储运、应用等关键环节的技术创新虽取得显著进展，但仍需系统性突破制约大规模商业化的瓶颈问题，制氢环节亟需攻克低成本、高效能绿氢制备技术。一方面，重点开发高性能非贵金属催化剂（如铁基、钴基催化剂）及长寿命、高电流密度的电解槽技术^[51]，降低对贵金属的依赖并提升运行稳定性与效率；另一方面，加速突破风光发电与电解水制氢的动态耦合与柔性控制技术，提升电解槽对可再生能源间歇性与波动性的适应性，响应速度目标 \leq 秒级，是实现大规模绿氢经济性生产的前提。储运环节当前瓶颈在于储运成本高、效率低，需重点攻关高容量、低成本的固态储氢材料以及低能耗、大型化的液氢制备与储运技术，加速其工程化验证与商业化应用进程；此外，需要构建“高压管网+液氢槽车”多模态运输网络，推进高压、大管径输氢管网的规划与建设，将经济运输半径延伸至 2000 公里。用氢环节着力优化燃料电池系统能效评估体系与动力系统集成技术，显著提高能源转化效率，重点推广在长途重卡、轨道交通等交通领域，分布式发电领域以及钢铁、化工等工业领域的高效清洁利用，提升氢能经济价值。通过氢能全产业链技术突破，为大规模氢能生产应用及产业化提供技术支持，支撑氢能经济生态的形成。

产业化应用方面，主要制约绿氢成本下降的两个痛点分别是生产成本与储输成本。在绿氢生产成本中占比最高的为可再生能源电力成本与电解槽投资成本^[52]。图 7 展示了绿氢生产成本的构成及未来变化趋势。国际可再生能源署的测算显示，2020 年全球绿氢生产的平均成本约为 27 元/kg。随着可再生能源发电技术的进步及电解槽技术的不断改进和规模化生产，预计到 2030 年，绿氢的成本将降至 10 元/kg，而到 2050 年，成本有望进一步降低至 6.5 元/kg。2030 年后电价下降幅度放缓，而投资成本保持持续下降趋势，到 2050 年，电力成本预计将占总成本的 70%左右，成为绿氢区域性成本差异的主导性因素。因此，绿电成本和技术投资成本是影响绿氢降本的关键因素，这要求前端可再生能源发电技术和电解槽规模化的持续发展。此外，绿电成本与各区域可再生能源资源禀赋相关，因地制宜发展可再生能源发电制氢也是推进绿氢降本的重要途径^[53]。

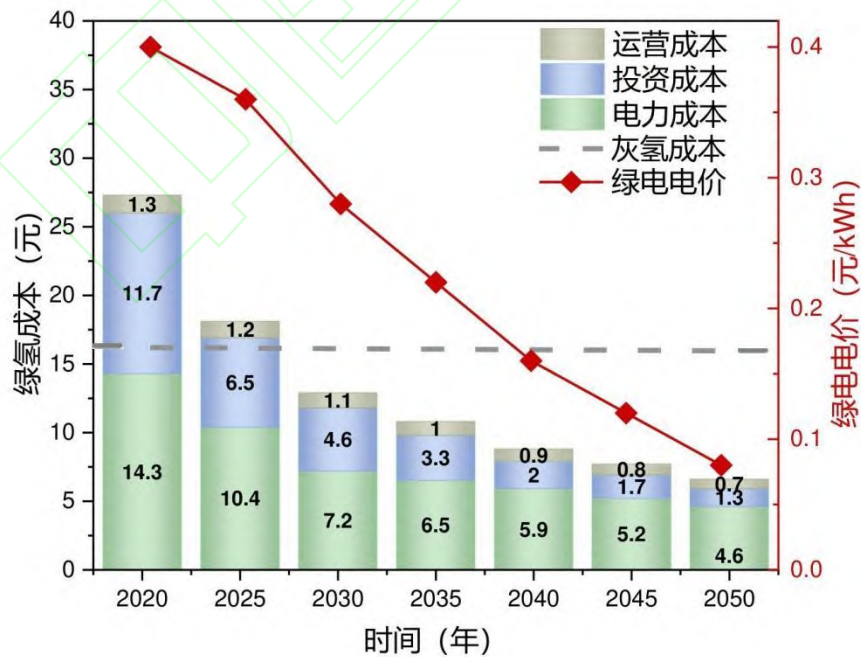


图 7 绿氢成本构成及趋势

Fig. 7 Cost composition and trends of green hydrogen

氢气终端价格还需考虑氢气的储运成本^[54]。图 8 展示了氢储运技术路径的适用范围与经济性测算，氢储运技术经济性体现距离-规模耦合特征：短途场景下，压缩氢气卡车运输成本为 2.6-11 元/kg H₂，其基础设施需求低且灵活性突出；中长距离运输中，液态氢气卡车单次运量提升后成本可降至 14 元/kg H₂；

超大容量管道运输在日运量超 100 吨时成本区间为 0.26-8.12 元/kg H₂，但其经济性需配套规模化储氢设施支撑；跨洲际运输则需依赖液氢船舶，单位运输成本<13 元/kg H₂。管道运输需满足一定日运量的阈值方可实现较低成本，而液态有机氢载体等技术因商业化滞后尚未形成竞争力。目前国内对于输氢管道的建设正在扩大布局^[55]，康保-曹妃甸氢气长输管道项目完成备案并启动勘测，计划 2026 年底投运，项目管道承接内蒙古、河北北部绿氢资源，输送至京津冀地区，年输氢量可达 155 万吨。乌兰察布-燕山石化输氢管道项目准备投建，设计输送量 10 万吨/年，配套 2546 MW 风光制氢项目，替代燕山石化等企业灰氢，并为京津冀地区提供交通用氢。这些项目通过构建覆盖多区域的输氢网络，为氢能产业规模化发展提供了坚实的管道储运支撑，为氢能产业高质量发展奠定基础。

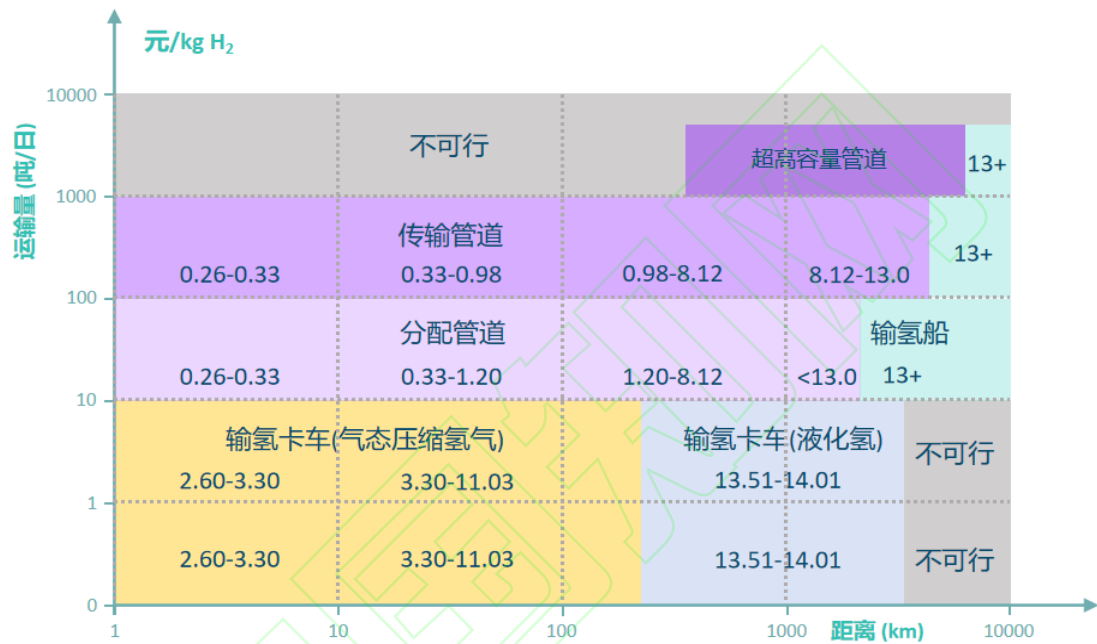


图 8 氢气储运距离、方式与成本的关系对比

Fig. 8 Comparison of distance, method, and cost in hydrogen storage and transportation

3.3 深耕关键场景，撬动高值市场

氢能的应用场景多种多样，但目前市场上尚未出现规模化应用。为了推动氢能的广泛应用，必须聚焦关键场景与高价值市场，明确氢能多元化应用方向，有序推进交通领域示范应用、合理布局发电领域多元应用以及逐步探索工业领域替代应用^[56]。未来，氢能有望广泛应用于工业、交通、建筑及高值化应用等场景。

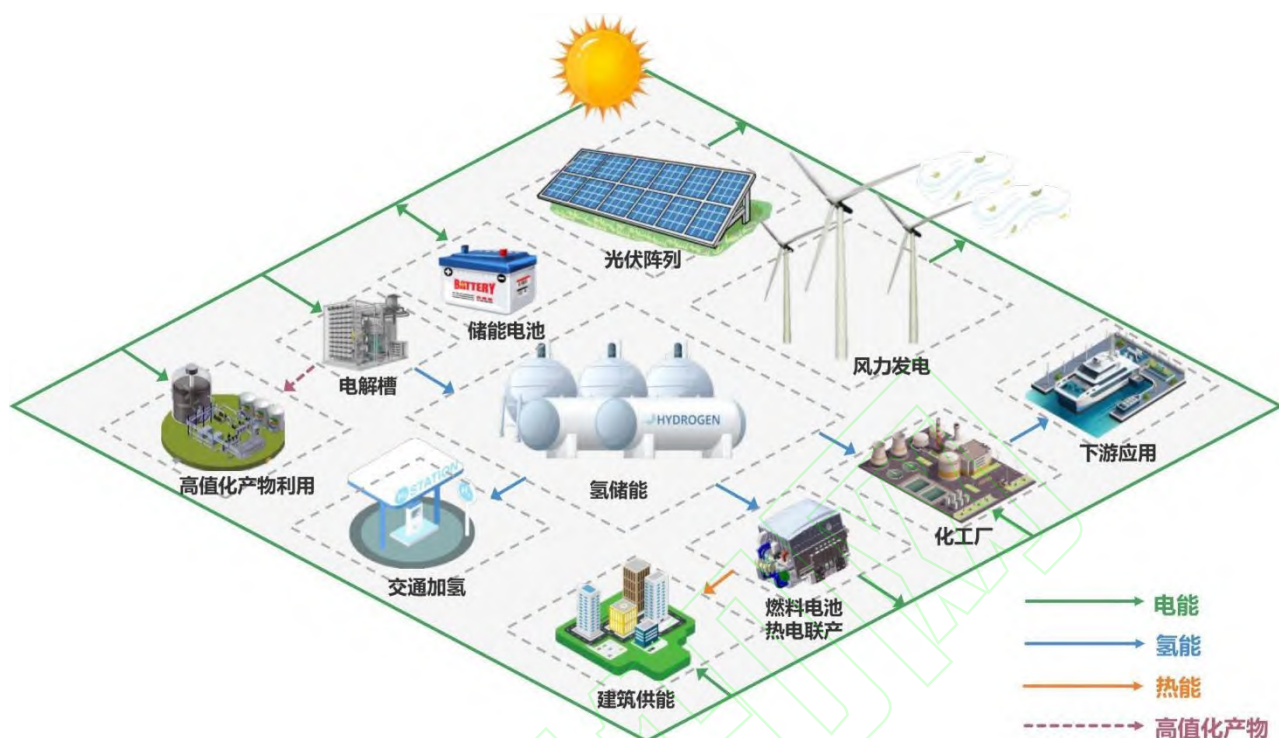


图 9 氢能产业链及高价值应用场景

Fig. 9 Hydrogen industry chain and high-value application scenarios

工业领域。氢能作为传统工业深度脱碳的核心载体已展现出变革性应用潜力，其技术路径主要聚焦于高温工艺热替代、工业原料清洁化及化工产品生产三个维度。当前工业氢能应用仍以碳密集型灰氢为主导，但绿氢电解槽与碳捕集型蓝氢技术正加速突破技术经济性瓶颈^[57]。实证研究表明，通过氢基直接还原 DRI 工艺替代传统高炉炼钢，可使吨钢碳排放降低 92%以上；建材行业中，在水泥熟料生产中引入氢气作为燃料，替代石灰石煅烧所需煤炭，可减少碳酸盐分解造成的碳排放；合成氨与甲醇生产环节采用绿氢替代天然气制氢，结合工艺余热梯级利用，可实现全生命周期碳强度大幅下降。未来随着我国 PEMEC 效率突破 80%、ALK 单槽成本降至 1500 元/kW，叠加碳约束政策驱动，工业氢能渗透率不断提升，正推动我国流程工业向“绿氢+电气化”双轨脱碳范式转型，并催生氢气纯化、高压储运等配套产业的技术协同创新，最终形成具有负排放效应的工业氢能生态系统。

交通领域。氢燃料电池技术正逐步突破长周期、高负荷场景的能源供给瓶颈，其技术路径呈现“商用车先行、场景化渗透”的特征^[58]。当前氢能交通应用聚焦于燃料电池系统功率密度提升与平准化燃料成本优化，驱动重型货运、城际巴士及港口特种车辆等场景形成示范应用集群。以广州高新区为例，500 辆氢燃料电池车实现多场景覆盖，燃料电池系统综合效率超 63.8%；天津港-荣程钢铁零碳货运线路累计减排万吨级 CO₂，验证了氢能重卡在港口-内陆物流链中的经济可行性。据中国氢能联盟预测，至 2030 年我国氢燃料电池汽车保有量将突破 100 万辆，将带动年氢气需求达 150300 万吨，对应碳减排潜力约 2000 万吨当量，同步拉动制氢、储运、加氢站全产业链环节投资，推动交通领域电气化与低碳化协同，减少对石油的依赖。未来氢能将重塑交通能源体系，通过技术迭代、政策协同和全球合作，助力我国交通领域 2030 年实现深度脱碳，并在全球氢能产业链中占据主导地位。

建筑领域。在建筑能源系统的低碳化转型进程中，氢能构建了新型零碳能源供给体系^[59]。在技术路径上，依托光伏发电电解水制氢系统，耦合燃料电池热电联供与建筑光伏一体化技术，形成“光-氢-储-热”多能互补系统。该系统通过合理的容量配置方案和能量管理策略，综合能效能够达到 80%以上。目前，国内佛山智慧能源社区、杭州绿色建筑科技馆等示范项目已验证了氢能在建筑场景实现调峰供电、余热回收中的经济可行性。面向未来，关键发展方向包括：研发高压固态储氢及氨载体储氢技术，破解储能设施的空间约束；推动氢能与地源热泵技术耦合，实现建筑冷-热-电三联供；构建基于氢储能的“虚拟电厂”模式，平抑光伏出力波动，并参与电力需求侧响应等。国际能源署预计，至 2050 年氢能在建筑供热领域的渗透率可能达到 8%-12%；而中国氢能联盟则预测 2040 年我国建筑氢能需求占比达 5%-7%。

预期随着燃料电池耐久性突破与建筑光伏-氢能系统自洽率提升，氢能将推动建筑能源系统形成“光氢储直柔”五位一体架构，最终构建零碳建筑能源生态系统^[60]。

高值化应用领域。当前，绿氢产业发展面临的核心瓶颈之一在于其居高不下的生产成本，这主要由可再生能源电力成本与氢气储运环节的费用共同构成。然而，可再生能源发电的单位电价和氢气的储运成本，均受制于地区资源禀赋和项目规模等因素，短期内实现显著下降的可能性有限。在此背景下，探索绿氢的多元化高附加值应用途径，以提升项目整体经济性，显得尤为重要。在关注电解水制氢产物氢气应用的同时，充分挖掘电解水副产物氧气的潜在价值，是实现绿氢项目经济性增效的有效策略。特别是在西藏等高寒、高海拔地区，对氧气供应和供热存在迫切需求。在此类特殊环境下，若能采用光伏电解水制氢制氧，结合热电联产技术路径，不仅能满足房屋建筑的电热负荷需求，更能通过利用电解水副产的氧气实现弥散或集中供氧，从因地制宜的副产物需求角度显著提升项目的经济效益。进一步地，针对电解水制氢过程中阳极析氧反应（Oxygen Evolution Reaction, OER, $2\text{H}_2\text{O} - 4\text{e}^- = \text{O}_2 + 4\text{H}^+$ ）的较高能耗（标准电势 $E_0 = 1.23\text{V}$ ），可以探索采用更低能耗、更高价值的氧化反应进行替代。例如，将 OER 替换为醛基（如糠醛、5-羟甲基糠醛等生物质衍生化合物）氧化反应，采用该技术路径，不仅可以降低阳极的过电势，且阴阳极均能产氢，实现制氢能效的大幅提升^[61]。此外，从经济性角度看，醛基氧化的反应物投入产出价值比达到 1: 5 甚至更高，通过反应物到产物的高价值转化，可实现显著的经济性提升，弥补绿氢项目的成本投资，并且打通“生物质-高值化化学品-氢能”的多联产路径。目前，此类基于高附加值氧化反应替代 OER 的制氢技术路径仍处于实验室研究阶段，将其从实验室推向工业化规模生产，需要克服一系列关键性挑战，包括实现连续稳定运行、大规模产物选择及分离纯化等，并确保与现有化工体系（如生物质炼制、氢能应用等）的有效衔接。在放大过程中，实验室条件下表现优异的电化学体系可能面临传质与传热效率、电流密度分布均匀性、催化剂长周期稳定性等方面的工程难题，这些问题亟待深入研究和突破。

4 结论

氢能作为实现碳中和目标的核心技术载体，其战略布局与技术路径的优化对全球能源体系转型具有深远意义。本文基于 DOE 发布的《计划 2020》与《计划 2024》，系统分析美国氢能战略的阶段性转型及其与中国的差异化特征，并结合中美在政策导向、技术突破与应用场景的对比，提炼出中国氢能产业发展的关键路径，得到以下主要结论：

（1）美国氢能战略的转型体现了从技术储备向规模化商业应用的系统性跃迁。《计划 2020》以技术研发为核心，重点突破电解槽效率、储运成本等关键问题；而《计划 2024》则转向全球化竞争与商业化推广，通过供应链布局、技术出口等方式把握全球氢能市场，通过税收抵免与区域清洁氢气枢纽补贴协同推进绿氢降本，突破商业化瓶颈。技术层面，美国从多样化技术探索转向聚焦高温 SOEC、核氢耦合等前沿技术创新；应用层面，其战略重心从早期示范转向交通重载（氢能重卡、航空）、工业脱碳（钢铁、化工）及电网基荷等多元化场景。

（2）中美氢能发展战略在政策逻辑、技术路线与应用场景上呈现显著差异。政策层面，中国以政府主导模式推动全产业链布局，通过《氢能产业发展中长期规划（2021-2035 年）》明确阶段性目标与区域示范项目，强调技术自主可控；而美国则依赖市场机制，通过税收优惠与私营资本激励加速商业化进程。技术层面，中国在 ALK 产能与成本控制上占据优势，但关键材料（如 PEMEC 催化剂、储氢瓶碳纤维）仍依赖进口；美国则聚焦高温电解、液氢储运等前沿技术。应用推广方面，中国以本土工业脱碳与交通示范为主，而美国更注重全球化市场拓展与高附加值领域。这些差异既反映了两国资源禀赋与产业结构的差异，也揭示了技术路线竞争中的互补潜力。

（3）中国氢能发展需立足国情，提出三条氢能发展中国式核心路径：①区域协同梯度发展。依托西北/东北风光禀赋打造绿氢生产基地，通过“西氢东输”工程构建跨区域输氢网络；在京津冀重工业区推动氢基直接还原铁等工艺替代，实现高碳产业低碳转型；以长三角、珠三角为技术创新与国际贸易枢纽，突破关键设备国产化并积极参与国际标准制定。②全产业链技术突破：优先攻克绿氢降本瓶颈和系统安全能效，加速高压气态储运向液氢、管道输送升级，推动燃料电池寿命与功率密度提升；同时完善标准体系，填补液氢储运、绿氢认证等领域空白。③高价值场景优先落地：聚焦工业、交通、建筑及高值化应用四大领域，通过“示范项目-规模化推广-商业模式创新”三阶段路径，实现环境效益与经济效益双赢。

参考文献

- [1] Guan D, Wang B, Zhang J, et al. Hydrogen society: from present to future[J]. *Energy & Environmental Science*, 2023,16(11):4926-4943.
- [2] Glenk G, Reichelstein S. Economics of converting renewable power to hydrogen[J]. *Nature Energy*, 2019,4(3):216-222.
- [3] 张锐. 新能源能否创造新政治:氢能的地缘政治影响[J]. *国际展望*, 2025,17(01):87-109.
ZHANG R. Can New Energy Create New Politics? An Analysis of the Geopolitical Impact of Hydrogen, 2025,17(01):87-109.
- [4] 万燕鸣, 熊亚林, 王雪颖. 全球主要国家氢能发展战略分析[J]. *储能科学与技术*, 2022,11(10):3401-3410.
WAN Y M, XIONG Y L, WANG X Y. Strategic analysis of hydrogen energy development in major countries[J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2022, 11(10): 3401-3410.
- [5] 国家发展改革委国家能源局. 氢能产业发展中长期规划(2021-2035 年)[EB/OL]. [2022-03-23]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2022-03/23/c_1310525630.htm.
NDRC NEA. Medium and long term plan for the development of hydrogen energy industry (2021-2035)[EB/OL]. [2022-03-23]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2022-03/23/c_1310525630.htm.
- [6] 孟翔宇, 邬新国, 顾阿伦, 等. 国际氢能发展战略及对中国的启示[J]. *前瞻科技*, 2024,3(4):121-133.
MENG X Y, WU X G, GU A L, et al. International Hydrogen Energy Development Strategy and Its Enlightenment to China[J]. *Science and Technology Foresight*, 2024, 3(4): 121-133.
- [7] 董溯战, 经天逸. 美、韩两国氢能法律制度比较研究[J]. *中国石油大学学报(社会科学版)*, 2024,40(06):46-56.
DONG S Z, JING T Y. Comparative study on hydrogen legal systems of the United States and South Korea[J]. *Journal of China University of Petroleum (Social Sciences Edition)*, 2024, 40(06): 46-56.
- [8] 李洁, 赵宏. 氢能产业发展的国际经验与启示[J]. *中国经贸导刊*, 2023(10):51-53.
LI J, ZHAO H. International experience and enlightenment of hydrogen industry development[J]. *China Economic & Trade Herald*, 2023(10): 51-53.
- [9] 赵学良. 美国氢能及燃料电池产业发展现状及启示[J]. *当代石油石化*, 2021,29(10):10-15.
ZHAO X L. Development Status and Enlightenment of U.S. Hydrogen Energy and Fuel Cell Industry[J]. *Petroleum & Petrochemical Today*, 2021,29(10):10-15.
- [10] 李晓勤, 张华, 康争光. 美国清洁氢气战略和路线图对我国发展清洁氢气的启示与建议[J]. *新能源科技*, 2023,4(1):1-5, 11.
LI X Q, ZHANG H, KANG Z G. Thoughts and suggestions for China's development of clean hydrogen from the United States clean hydrogen strategy and roadmap[J]. *New Energy Technology*, 2023, 4(1): 1-5, 11.
- [11] Department of Energy (DOE). Department of Energy Hydrogen Program Plan[R]. Department of Energy (DOE), 2020.
- [12] Department of Energy (DOE). U.S. Department of Energy Announces \$8 Million for Projects to Advance Electrolyzer and Fuel Cell Manufacturing RD&D through National Lab Consortium[EB/OL]. [2024-09-30]. <https://content.govdelivery.com/accounts/USEERE/bulletins/3b91749>.
- [13] Department of Energy (DOE). US National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap[R]. Department of Energy (DOE), 2023.
- [14] Department of Energy (DOE). Department of Energy Hydrogen Program Plan[R]. Department of Energy (DOE), 2024.
- [15] 李岚春, 刘清, 陈伟, 等. 新阶段美国清洁能源战略解构与比较研究[J]. *中国科学院院刊*, 2024,39(8):1348-1364.
LI L C, LIU Q, CHEN W, et al. Research and implications of the US clean energy strategy[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2024, 39(8): 1348-1364.
- [16] EXECUTIVE OFFICE OF THE PRESIDENT. Implementation of the Energy and Infrastructure Provisions of the Inflation Reduction Act of 2022[EB/OL]. [2022-09-16]. <https://www.federalregister.gov/documents/2022/09/16/2022-20210/implementation-of-the-energy-and-infrastructure-provisions-of-the-inflation-reduction-act-of-2022>.
- [17] Department of Energy (DOE). HYDROGEN SHOT:Water Electrolysis Technology Assessment[R]. Department of Energy (DOE), 2024.
- [18] 程德宝, 蔺建刚, 魏乃腾, 等. 氢气输送管道技术发展现状[J]. *油气储运*, 2024,43(6):624-631.
CHENG D B, LIN J G, WEI N T, et al. Review of hydrogen transmission pipeline technology development[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(6): 624-631.
- [19] 廖红波, 张雪霞, 岳嘉玲, 等. 氢气储运技术发展及展望[J]. *太阳能学报*, 2024,45(11):691-699.
LIAO H B, ZHANG X X, YUE J L, et al. Development and prospect of hydrogen storage and transportation technology[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2024, 45(11): 691-699.
- [20] 李玉星, 刘翠伟, 彭浩平, 等. 氢能运输方式与技术发展现状及挑战[J]. *前瞻科技*, 2024,3(2):81-93.
LI Y X, LIU C W, PENG H P, et al. Current status and challenges of hydrogen energy transportation methods and technological development[J]. *Science and Technology Foresight*, 2024, 3(2): 81-93.
- [21] 杨洋. 氢气储存技术研究进展[J]. *石化技术*, 2023,30(8):22-24.
YANG Y. Research progress of hydrogen storage technology[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2023, 30(8): 22-24.
- [22] 颜祥洲. 关于氢气储存技术方法的研究[J]. *能源与节能*, 2022(5):59-61.
YAN X Z. Hydrogen storage technologies and methods[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2022(5): 59-61.
- [23] 苗乃乾, 张诗洋, 张蕾蕾, 等. 碳中和背景下化工行业的绿氢应用展望[J]. *化工设计通讯*, 2023,49(11):200-202.
MIAO N Q, ZHANG S Y, ZHANG L L, et al. Prospects for the application of green hydrogen in the chemical industry under the background of carbon neutrality[J]. *Chemical Engineering Design Communications*, 2023, 49(11): 200-202.
- [24] 徐江荣, 宋奥, 洪佳璇, 等. 低碳背景下氢应用现状与前景展望[J]. *能源环境保护*, 2023,37(1):65-73.
XU J R, SONG A, HONG J X, et al. Application status and prospect of hydrogen under low carbon background[J]. *Energy Environmental Protection*, 2023, 37(1): 65-73.
- [25] 上海科技发展研究中心. 布局氢能核心产业环节 重资投入氢能中心建设—美国氢能研发与产业布局动态跟踪分析[R].2024.
SHANGHAI SCIENCE AND TECHNOLOGY DEVELOPMENT RESEARCH CENTER. Deploying core hydrogen industry segments with heavy investment in hydrogen hubs: tracking analysis of U.S. hydrogen R&D and industrial layout[R]. [S.l.]: Publisher unknown, 2024.
- [26] 陶誉仁, 范松, 钟磊. 绿氢产业发展面临的挑战和对策分析[J]. *上海节能*, 2024(12):1887-1894.
TAO Y R, FAN S, ZHONG L. Challenges faced by the development of green hydrogen industry and countermeasures[J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2024(12): 1887-1894.
- [27] 国家能源局工业和信息化部国家发展改革委. 加快工业领域清洁低碳氢应用实施方案[EB/OL]. [2024-12-30]. <https://www.nea.gov.cn/20241231/22b72793b0c946a4b9bfc2b06612b32e/c.html>.
NATIONAL ENERGY ADMINISTRATION, MINISTRY OF INDUSTRY AND INFORMATION TECHNOLOGY, NATIONAL DEVELOPMENT AND REFORM COMMISSION. Implementation plan for accelerating the application of clean and low-carbon hydrogen in industrial fields[EB/OL]. [2024-12-30].
- [28] 陈秋阳, 陈云伟. 国际氢能发展战略比较分析[J]. *科学观察*, 2022,17(2):1-12.
CHEN Q Y, CHEN Y W. Comparative analysis of international hydrogen energy development strategies[J]. *Science Focus*, 2022, 17(2): 1-12.

- [29] 薛世翔,王森,唐超杰,等.碱性水电解槽反向电流现象产生的原理与改进策略[J].太阳能,2024,(12):65-71.
XUE S X, WANG S, TANG C J, et al. Mechanism and improvement strategy of reverse current phenomenon in alkaline water electrolyzer [J]. Solar Energy, 2024, (12): 65-71.
- [30] 张显峰,唐乾,刘伟,等.PEM 电解制氢技术问题及现状分析[J].山东化工,2024,53(04):105-109.
ZHANG X F, TANG Q, LIU W, et al. Technical Problems and Current Situation Analysis of PEM Electrolysis Hydrogen Production[J]. Shandong Chemical Industry, 2024, 53(04): 105-109.
- [31] 韩利,李琦,冷国云,等.氢能储存技术最新进展[J].化工进展,2022,41(S1):108-117.
HAN L, LI Q, LENG G Y, et al. Latest research progress of hydrogen energy storage technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(S1): 108-117.
- [32] 陈思宇,王集杰,李灿,等.氢能产业链的关键问题及对策建议[J].前瞻科技,2024,3(4):134-146.
CHEN S Y, WANG J J, LI C, et al. Key Issues of Hydrogen Energy Industry Chain and Corresponding Countermeasures[J]. Science and Technology Foresight, 2024, 3(4): 134-146.
- [33] 新型储能技术创新路线图编委会.新型储能技术创新路线图[M].北京:机械工业出版社,2024.
New Energy Storage Technology Innovation Roadmap Compilation Committee. Technology Innovation Roadmap for New Energy Storage[M]. Beijing: China Machine Press, 2024.
- [34] 彭扬.中国石化新疆库车绿氢示范项目顺利产氢[N].中国石化报,2023-06-30.
PENG Y. Sinopec's Xinjiang Kuqa green hydrogen demonstration project successfully produces hydrogen[N]. China Petrochemical News, 2023-06-30(01).
- [35] 陈文淼,凌文.中国氢能交通发展关键问题与对策建议[J].前瞻科技,2024,3(4):58-68.
CHEN W M, LING W M. Key issues and countermeasures for hydrogen energy development in transportation field of China[J]. Science and Technology Foresight, 2024, 3(4): 58-68.
- [36] HYDROGEN AND FUEL CELL TECHNOLOGIES OFFICE. Multi-Year Program Plan[R]. Washington: U.S. Department of Energy, 2024.
- [37] 朱兴珊,沈学思.从天然气到氢:中国新型能源体系的演化[J].国际石油经济,2023,31(08):1-15.
ZHU X S, SHEN X S. From natural gas to hydrogen: evolution of China's new energy system[J]. International Petroleum Economics, 2023, 31(08): 1-15.
- [38] 王浩然,冯天天,崔若莉,等.碳交易政策下绿氢交易市场与电力市场耦合效应分析[J].南方能源建设,2023,10(3):32-46.
WANG H R, FENG T T, CUI M L, et al. Analysis of coupling effect between green hydrogen trading market and electricity market under carbon trading policy[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(3): 32-46.
- [39] 国务院.2030年前碳达峰行动方案[EB/OL]. [2021-10-26]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
STATE COUNCIL OF CHINA. Action plan for carbon peaking before 2030[EB/OL]. [2021-10-26]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm.
- [40] 张鹏,吴昊,张佳丽,等.中国风光大型基地与氢储能高比例耦合发展研究——以“三北”地区为例[J].水力发电,2023,49(11):16-23.
ZHANG P, WU H, ZHANG J L, et al. Research on high-proportion coupling development of large-scale wind-solar bases and hydrogen storage in China: case study of "Three-North" region[J]. Water Power, 2023, 49(11): 16-23.
- [41] 杨楠.京津冀工业生产碳排放清单研究与重点城市工业低碳发展情景分析[D].北京工业大学环境与生命学部,2021.
YANG N. Research on carbon emission inventory of Beijing-Tianjin-Hebei industrial production and scenario analysis of industrial low-carbon development in Tangshan[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2021.
- [42] 于樾,王峰,齐洲洪,等.氢基直接还原铁工艺技术及应用[J].钢铁研究学报,2024,36(3):283-298.
YU Y, WANG F, QI Y H, et al. Technology and applications of hydrogen-based direct reduced iron process[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2024, 36(3): 283-298.
- [43] 吴居东.一汽解放汽车有限公司新能源重型卡车发展战略研究[D], 2023.
WU J D. Research on the development strategy of the new energy heavy truck in FAW JIEFANG Automotive[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [44] 张馨艺.绿氢耦合煤化工发展路径研究[J].石油石化物资采购,2023(24):64-66.
ZHANG X Y. Research on development path of green hydrogen coupled with coal chemical industry[J]. Petroleum & Petrochemical Material Procurement, 2023(24): 64-66.
- [45] 康明斯中国.康明斯中标中国石化首个2.5MW PEM制氢项目[EB/OL]. [2021-11-18]. <http://www.china-nengyuan.com/news/175542.html>.
CUMMINS CHINA. Cummins wins Sinopec's first 2.5MW PEM hydrogen production project[EB/OL]. (2021-11-18)[2025-06-18]. <http://www.china-nengyuan.com/news/175542.html>.
- [46] 何青,孟照鑫,沈铁,等."双碳"目标下我国氢能政策分析与思考[J].热力发电,2021,50(11):27-36.
HE Q, MENG Z X, SHEN Y, et al. Analysis and reflection on China's hydrogen policies under the "Dual Carbon" goals[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 27-36.
- [47] 许苑,吴宏禄,王佳奥,等."双碳"背景下广州市氢能能源的创新发展方向[J].科技风,2024(06):1-5.
XU Y, WU H L, WANG J A, et al. Innovative development direction of hydrogen energy in Guangzhou under "Dual Carbon" background[J]. Technology Wind, 2024(06): 1-5.
- [48] 周亚敏.全球氢能竞赛的驱动因素、当前格局及经济地理效应[J].全球化,2024(03):107-115.
ZHOU Y M. Driving factors, current pattern and economic-geographic effects of global hydrogen competition[J]. Globalization, 2024(03): 107-115.
- [49] 李继峰.氢能大规模产业化应用需克服四大挑战[EB/OL]. [2024-04-09]. <https://www.drc.gov.cn/DocView.aspx?chnid=379&leafid=1338&doid=2907654>.
LI J F. Four major challenges to be overcome for large-scale industrial application of hydrogen energy[EB/OL]. [2024-04-09]. <https://www.drc.gov.cn/DocView.aspx?chnid=379&leafid=1338&doid=2907654>.
- [50] 付强,杨洗,金辉,等.中国氢能产业链技术现状及发展趋势[J].油气与新能源,2024,36(4):19-30.
FU Q, YANG G, JIN H, et al. Technical status and development trends of hydrogen energy industry chain technology in China[J]. Petroleum and New Energy, 2024, 36(4): 19-30.
- [51] 常进法,肖瑶,罗兆艳,等.水电解制氢非贵金属催化剂的研究进展[J].物理化学学报,2016,32(7):1556-1592.
CHANG J F, XIAO Y, LUO Z Y, et al. Recent progress of non-noble metal catalysts in water electrolysis for hydrogen production[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2016, 32(7): 1556-1592.
- [52] 林云海.中国绿氢产业规模化发展的挑战、实践与方向[J].中外能源,2023,28(07):15-20.
LIN Y T. Challenges, practices and directions for large-scale development of China's green hydrogen industry[J]. Sino-Global Energy, 2023, 28(07): 15-20.
- [53] 周孝信,赵强,张玉琼,等."双碳"目标下我国能源电力系统发展趋势分析:绿电替代与绿氢替代[J].中国电机工程学报,2024,44(17):6707-6721.

- ZHOU X X, ZHAO Q, ZHANG Y Q, et al. Development trend of China's energy and power system under "Dual Carbon" goals: green electricity substitution and green hydrogen substitution[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6707-6721.
- [54] 单彤文, 宋鹏飞, 李又武, 等. 制氢、储运和加注全产业链氢气成本分析[J]. 天然气化工(C1 化学与化工), 2020, 45(01): 85-90+96.
- SHAN T W, SONG P F, LI Y W, et al. Cost analysis of hydrogen across the full industry chain of production, storage, transportation and refueling[J]. Natural Gas Chemical Industry (C1 Chemistry and Chemical Engineering), 2020, 45(01): 85-90+96.
- [55] 杨静, 王晓霖, 李遵照, 等. 氢气长距离管输技术现状与探讨[J]. 压力容器, 2021, 38(02): 80-86.
- YANG J, WANG X L, LI Z Z, et al. Current status and discussion on long-distance pipeline transportation technology of hydrogen[J]. Pressure Vessel Technology, 2021, 38(02): 80-86.
- [56] 张全斌, 周琼芳. "双碳"目标下中国氢能产业应用场景与展望[J]. 经济界, 2021(05): 19-25.
- ZHANG Q B, ZHOU Q F. Application scenarios and prospects of China's hydrogen energy industry under "Dual Carbon" goals[J]. Economists, 2021(05): 19-25.
- [57] 周和平. 国内氢能市场现状及制氢、储运氢技术研究应用进展[J]. 维纶通讯, 2023.
- ZHOU H P. Domestic hydrogen market status and research progress in hydrogen production, storage and transportation technologies[J]. Vinylon Communications, 2023.
- [58] 任全成, 徐熊, 卢华鹏. 氢燃料电池技术在汽车行业的未来发展与应用前景[J]. 2023.
- REN Q C, XU X, LU H P. Future development and application prospects of hydrogen fuel cell technology in automotive industry[J]. Automotive Engineering, 2023.
- [59] 吴德敏. 氢能助力建筑碳减排途径与前景初探[J]. 建设科技, 2022(19): 27-31.
- WU D M. Preliminary study on ways and prospects of hydrogen energy to help building carbon emission reduction[J]. Construction Science and Technology, 2022(19): 27-31.
- [60] 蒋东方, 贾跃龙, 鲁强, 等. 氢能在综合能源系统中的应用前景[J]. 中国电力, 2020, 53(5): 135-142.
- JIANG D F, JIA Y L, LU Q, et al. Application prospect of hydrogen energy in integrated energy systems[J]. Electric Power, 2020, 53(5): 135-142.
- [61] 李兴龙, 傅尧. 糠醛氧化合成糠酸[J]. 化学进展, 2022, 34(6): 1263-1274.
- LI X L, FU X. Furfural oxidation to synthesize furoic acid[J]. Progress in Chemistry, 2022, 34(6): 1263-1274.