

引用格式: 罗志斌, 孙潇, 蔡春荣, 等. 绿色氢基能源技术研究进展与产业化现状 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(3): 20-32. LUO Zhibin, SUN Xiao, CAI Chunrong, et al. Research progress and current status of industrialization for green hydrogen-based energy technologies [J]. Southern energy construction, 2025, 12(3): 20-32. DOI: 10.16516/j.ceec.2025-042.

绿色氢基能源技术研究进展与产业化现状

罗志斌[✉], 孙潇, 蔡春荣, 张春文

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 氢基能源是以氢作为主要介质转化形成的二次能源, 对推动能源体系低碳转型, 实现碳中和目标, 具有重要意义。研究氢基能源产业的关键技术和发展现状, 有助于对氢基能源产业的发展提出前瞻性的建议。[方法] 文章综述了氢气以及氨、甲醇和可持续航空煤油等绿色氢基燃料的生产、储运和应用三大环节的关键技术及其技术成熟度, 研判了氢基能源产业技术的难点和发展方向, 并基于国内外氢基能源的发展形势, 分析了我国氢基能源产业发展的现状。[结果] 绿色氢基能源关键技术持续取得突破、核心装备国产化水平不断提高、示范项目的规模进一步扩大, 但目前氢基能源产业的发展仍处于初期阶段, 制约生产效率和推广应用的技术难题依然存在, 规模化和降低成本是产业发展的重要方向。[结论] 推动氢基能源产业的发展, 需要夯实科技创新基础, 围绕重点领域“卡脖子”技术攻关, 加快自主创新产品的国产化。进一步加快储运基础设施建设并拓展下游应用场景, 逐步建设和完善适应行业发展的产业政策和标准体系。

关键词: 氢能; 绿氨; 绿色甲醇; 可持续航煤; 氢基能源; 产业化

DOI: 10.16516/j.ceec.2025-042

文章编号: 2095-8676(2025)03-0020-13

CSTR: 32391.14.j.ceec.2025-042

中图分类号: TK91; TQ122



论文二维码

Research Progress and Current Status of Industrialization for Green Hydrogen-based Energy Technologies

LUO Zhibin[✉], SUN Xiao, CAI Chunrong, ZHANG Chunwen

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] Hydrogen-based energy is a secondary energy source produced by the conversion of hydrogen as the major medium, which is of great significance for promoting the low-carbon transformation of the energy system and achieving the goal of carbon neutrality. The study of the key technologies and development status of the hydrogen-based energy industry contributes to provide forward-looking suggestions for the development of the industry. [Method] This paper reviewed the key technologies and their technological maturity in the production, storage and transportation and application of green hydrogen-based fuels such as hydrogen, ammonia, methanol and sustainable aviation fuel, assessed the difficulties and development directions of hydrogen-based energy technology, and analyzed the current situation of the development of hydrogen-based energy industry in China based on the global development status. [Result] The key technologies of green hydrogen-based energy continues to make breakthroughs, the localization level of core equipments continues to improve, and the scale of demonstration projects is further expanded. However, the development of hydrogen-based energy industry is still in the early stage and the technical challenges restricting production efficiency and application still exist. Scaling up and reducing costs are important directions of the industry's development. [Conclusion] To promote the development of the hydrogen-based energy industry, it is necessary to strengthen the foundation of scientific and technological

收稿日期: 2025-02-25 修回日期: 2025-04-06 网络首发日期: 2025-05-15

基金项目: 广东省新型电力系统技术创新项目“液氢-超导复合储能在新型电力系统中的应用模式研究”; 中国能建广东院科技项目“海上风电耦合氢能制备及储运技术研究”(EV11041W)

innovation, focus on key areas of critical technologies research, and accelerate the localization of independent innovation products. Furthermore, it is necessary to accelerate the construction of storage and transportation infrastructure and expand downstream application scenarios, as well as gradually establish and improve the industrial policy and standard system that adapts to the development of the industry.

Key words: hydrogen energy; green ammonia; green methanol; sustainable aviation fuel; hydrogen-based energy; industrialization

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

随着全球“双碳”战略的推进,绿氢产业在快速发展,特别是在工业和能源等一些难以通过电气化实现减碳的领域,绿氢发挥着越来越重要的作用^[1-2]。氢气的质量能量密度(120 MJ/kg)高,但是其在标准状态下体积能量密度(10.23 MJ/Nm³)较低,仅约为甲烷(34.04 MJ/Nm³)的30%。目前氢气储运形式以压缩气态氢和液态氢为主,短期看无法满足氢能产业发展对氢气远距离、低成本、大规模储运的要求^[3]。

氨和甲醇作为储氢载体的研究近年来热度持续上升,加之,随着航运业与航空业的脱碳需求,绿色甲醇、绿色合成氨、可持续航煤等清洁燃料也在迅速发展^[4-6]。如图1所示,氢能源逐渐扩大成了内涵更加丰富的氢基能源。

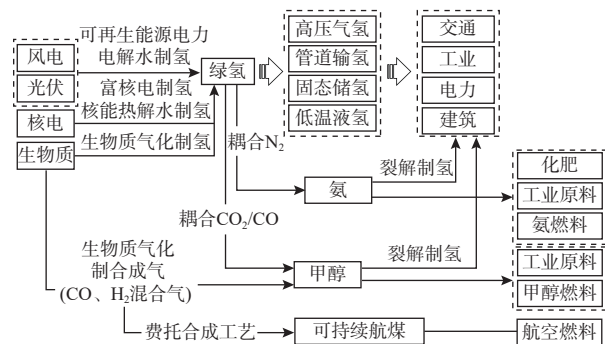


图1 氢基能源产业链示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the hydrogen-based energy industry chain

本文中氢基能源泛指氢、氨、甲醇等用以替代煤炭、石油等高碳含量化石能源的低碳/零碳燃料,是围绕氢气生产及利用的多元能源形式,有助于工业、交通、电力和建筑等领域的脱碳,支撑我国实现碳中和目标。氢基能源产业的内容非常丰富,产业链包含制备、储存、运输和应用四大环节,各个环节涉及的关键技术与核心装置也比较多,对应的技术

成熟度也不尽相同,理清关键产业技术与装备的技术路线与技术成熟度,有助于把握氢基能源产业的发展方向,对推进其商业化发展具有重要的支撑作用^[7-8]。

1 氢能产业

氢能作为一种清洁零碳、灵活高效、应用广泛的新型能源,是我国战略性新兴产业和未来产业发展的重点方向。氢能产业链主要划分为氢气制备、储运以及应用三大部分。

1.1 氢气制备

我国是全球最大制氢国,2023年全国氢气产量约3550万t。按制氢过程消耗的能源分类,氢气来源包括化石燃料制氢、可再生能源制氢(主要是水电解制氢)和工业副产氢等^[9]。根据中国氢能联盟预测,2060年我国的氢气需求总量将达到1.3亿t,占终端能源消费的15%~20%。

根据国际可再生能源机构(IRENA)报道,按照氢气的来源,可以将其划分为绿氢、蓝氢和灰氢^[10]。其中,通过可再生能源电解水制取的氢气为绿氢,生产过程中没有二氧化碳(CO₂)排放,实现100%绿色氢气生产;通过化石燃料制取氢气(如天然气裂解制氢、含氢工业尾气提取氢气等),产生的CO₂会被捕集、存储并被利用,整个过程实现CO₂零排放,生产的氢气被认为是蓝氢;而通过化石燃料生产氢气,产生的CO₂直接排放到大气中,生产的氢气称为灰氢。

现阶段看,化石燃料制氢在成本方面占据极大优势,由于电解水制氢成本高,短期内很难成为氢气的主要来源,工业副产氢具备成本低、存量等优势将成为短中期发展的重点(见表1)。进入中期阶段,将以可再生能源电解水制氢、煤制氢+CCUS等大规模集中供氢为主,工业副产氢为辅助来源。远期来看,将以可再生能源制绿氢为主,煤制氢配合CUSS、生物质制氢等技术作为补充。

表 1 主要制氢技术情况对比^[11]
Tab. 1 Comparison of the major hydrogen production methods^[11]

技术类型	化石燃料制氢	工业副产氢	电解水制氢	新型制氢
技术细分	煤气化制氢 天然气裂解制氢 甲醇裂解制氢	焦炉煤气 合成氨/醇尾气 氯碱副产氢 丙烷脱氢等	碱性电解水制氢 PEM电解水制氢 SOEC电解水制氢 AEM电解水制氢	生物质制氢 核能制氢 太阳光催化制氢
技术优势	技术成熟度高、产量大、成本低	工业副产品成本较低、投资小	设备简单、运行稳定、无碳排放	—
技术不足	工艺流程长、碳排放量大	建设地址受限、产量不可控	能耗高、制氢成本高	实验室研究阶段
成本水平/(元·kg ⁻¹)	6 ~ 15	8 ~ 20	15 ~ 40	—
碳排放情况	煤制氢: 20 ~ 30 kg CO ₂ /kg H ₂ 天然气制氢: 10 ~ 15 kg CO ₂ /kg H ₂	种类较多, 通常在1 ~ 5 kg CO ₂ /kg H ₂ 范围	零碳排放(清洁电力, 如是网电需要考虑电源结构)	零碳排放
消费占比/%	~ 78	~ 21	~ 1.0	—

注: 成本水平、消费占比为2024年数据。

从“双碳”战略目标而言, 根据制氢原料的本质, 仅有不产生碳排放的可再生能源制氢是理想的制氢路径, 其他制氢工艺将随着各应用领域脱碳的发展要求, 逐步退出市场或者压缩存量。

可再生能源电解水制氢主要依托电解水装置(见表 2), 目前碱性(ALK)电解槽的商业化程度最高、经济性最好, 随着质子交换膜(PEM)电解槽的技术成熟和商业化推进, 基于其电解水制氢的能效更高、同等制氢能力比 ALK 电解槽体积更小的优点, 发展前景也相当巨大^[11-12]。新型电解槽固体氧化物(SOEC)电解槽和阴离子交换膜(AEM)电解槽的应用示范也在逐步推进^[13-14]。新疆库车绿氢项目已初步建成我国首个万吨级光伏制绿氢的规模化示范工

程, 其贯通了光伏制氢、储运、炼化全链条, 验证了绿氢规模化工业应用的可行性。

1.2 氢气储运

氢气的储存方式按照氢气的相态可以划分为气态储氢、液态储氢和固态储氢三大类。氢气的运输与储存的技术路线相同, 不同于氢气的储存, 氢气的运输除了满足氢气高密度、安全储存的要求, 还需要解决灵活转运的问题。从长远来看, 氢能若要实现净零排放的潜力, 大规模储运是必然趋势。

1.2.1 气态氢储运

1) 高压储氢瓶

高压储氢瓶储氢是目前技术成熟度最高的储氢方式, 也是全球范围内最常用、应用场景最丰富的储

表 2 各类电解槽技术参数对比^[14]
Tab. 2 Comparison of technical parameters of various electrolyzers^[14]

电解槽类型	ALK	PEM	SOEC	AEM
技术成熟度	商业化阶段	商业化阶段	应用示范阶段	应用示范阶段
电解液/质	20% ~ 30%KOH	纯水	Y ₂ O ₃ /ZrO ₂	碱液/纯水
最大单机规模	25 MW(5 000 Nm ³ /h)	5 MW(1 000 Nm ³ /h)	~ 1 MW(200 Nm ³ /h)	~ 1 MW(200 Nm ³ /h)
制氢效率/%	60 ~ 80	65 ~ 85	75 ~ 95	60 ~ 75
系统电耗/(kWh·Nm ⁻³)	4.5 ~ 5.5	4.0 ~ 5.0	3.0 ~ 4.0	4.0 ~ 5.0
工作温度/℃	65 ~ 100	70 ~ 95	650 ~ 1 000	65 ~ 95
操作压力/MPa	1.0 ~ 3.2	2.0 ~ 5.0	0.1 ~ 1.5	0.1 ~ 3.0
负荷范围/%	30 ~ 110	5 ~ 110	30 ~ 110	5 ~ 110
技术优势	技术成熟度高、成本较低	氢气压力大、纯度高、响应迅速	无贵金属催化剂、系统效率高, 可利用高温废热替代部分电耗	可减少贵金属催化剂、结构紧凑、响应速度快

注: 相关数据以2024年为参考基准。

氢技术。高压储氢瓶储氢即通过高压将氢气压缩到一个可以承载较高压力的容器中, 高压容器内储存的氢气以气态形式存在, 氢气的储量与容器内的压力成正比, 压力越高, 储存的氢气越多。气罐是最常见的压力容器, 具有储存能耗低、较低压力时成本低、简便易行, 通过减压阀调控氢气的释放, 工作温度范围广, 可在常温和零下几十度条件下正常使用^[15]。

目前, 高压气态储氢容器种类主要划分为纯钢制金属瓶(Ⅰ型)、钢制内胆纤维缠绕瓶(Ⅱ型)、铝内胆纤维缠绕瓶(Ⅲ型)及塑料内胆纤维缠绕瓶(Ⅳ型), 见表 3。由于高压气态储氢容器Ⅰ型、Ⅱ型质量储氢密度较低并且氢脆问题严重, 难以满足车载质量储氢密度要求; 而Ⅲ型、Ⅳ型瓶由内胆、碳纤维强化树脂层及玻璃纤维强化树脂层组成, 明显减少了气瓶质量, 提高了单位质量储氢密度。国内主要采用 35 MPa 碳纤维复合瓶储运, 日本、美国等发

达国家主要使用 70 MPa 储氢瓶。35 MPa 氢气密度约为 23.7 kg/m³, 70 MPa 储氢罐中氢气密度约为 39.6 kg/m³, 质量密度约为 5.7 wt%^[16]。

提高储氢罐氢气储存压力, 可以提高其储氢能力, 但随着压力的增大, 储氢的安全性也会大大降低, 存有泄漏、爆炸的安全隐患。因此, 高压储氢瓶除了向轻量化、高压化、低成本等方向发展, 还需要重点探索新型储氢罐材料在匹配更高压力下储氢需求的安全性和质量稳定性。在材料科学方面, 通过开发碳纤维复合材料、金属基复合材料、高熵合金等新型储氢瓶材料, 进行储氢材料微观结构调控, 以及在金属材料中添加钛、钒等抗氢元素, 可以有效降低储氢瓶的氢脆敏感性; 在工程技术方面, 通过保护涂层、离子注入与掺杂等表面处理技术, 或者无应力制造、焊接工艺改进等制造优化工艺, 均有助于缓解储氢瓶的氢脆问题。

表 3 不同类型储氢瓶技术参数对比^[15]

Tab. 3 Comparison of technical parameters of different types of hydrogen storage cylinders^[15]

型号	I	II	III	IV	V
生产工艺	纯钢质金属	钢质内胆、纤维缠绕	铝质内胆、纤维缠绕	塑料内胆、纤维缠绕	无内胆、纤维缠绕
工作压力/MPa	20 ~ 30	10 ~ 50	30 ~ 70	≥ 70	
重量/体积比/(kg·L ⁻¹)	0.9 ~ 1.3	0.6 ~ 0.95	0.35 ~ 1.0	0.3 ~ 0.8	
使用寿命/a	15	15	15/20	15/20	研发中
典型体积储氢密度/(kg·m ⁻³)	15	20	25	≥ 40	

注: 重量/体积比是储氢瓶重量与其体积的关系, 体积储氢密度是储氢瓶储氢量与其体积的关系。

2)管道输氢

管道输氢可以分为天然气管道掺氢输送和纯氢管道输送两种方式。长远来看, 在所有的氢气输运方案中, 管道运输是最经济方式, 也是未来的趋势, 制约其发展的因素除了技术成熟度之外, 主要是建设成本的影响。根据目前的项目建设成本来看, 直接建设氢气长输管道的造价超过 60 万美元/km, 天然气管道的造价在 25 万美元/km 左右, 氢气管道造价是天然气管道的 2.5 倍左右。

在材料与工艺方面, 高压输氢管道需要开发高钢级抗氢管材、非金属管材及阻氢涂层等技术, 研发满足高压氢气环境服役要求的焊材及合适的焊接工艺。截至目前发展情况来看, 世界各国主要推动的是天然气管道掺氢输送示范, 纯氢管道输送项目较少^[17]。

1.2.2 液态氢储运

液态氢储运泛指低温液氢及其他以液态形式储运氢气的方式, 包括液氨、甲醇、液态有机氢载体 (Liquid Organic Hydrogen Carrier, LOHC) 等。

1)低温液氢储运

低温液态储氢是一种氢气的物理储存方式, 将氢气在压缩条件下冷却至-253 ℃, 使之液化并存储在绝热真空储存器中, 其具有更高的储氢密度。在-253 ℃(沸点)时液态储氢密度约为 71.0 g/L, 是 15 ℃时加压至 70 MPa 的气态储氢密度的 1.8 倍, 是标准状态下气态氢的 845 倍^[18]。

液氢的优势是储氢密度大, 并且纯度高, 可以满足各种氢能应用场景的用氢品质需求。但是液氢技术路线门槛较高, 目前液氢规模化制储运运用技术和经验都集中在航天产业, 此外液氢工厂投资成本大、

氢液化能耗也较高。液氢技术的发展,需要开展多方面“卡脖子”难点的攻关:进行氢气液化工艺流程优化与重构,降低液化过程能耗;加强临氢材料的抗氢脆性能研究;加强绝热材料研发,提高液氢储运设备的绝热性能;加强液氢泵、液氢管路、阀门、低温密封件等关键零部件研究等^[19]。

2) 液氨储氢

氨可由氢气和氮气化合反应获得,可以充当氢气的载体,通过“氢-氨-氢”模式进行绿氢储运是破解大规模氢储运难题的重要方式之一^[20]。氨气在标准大气压下-33℃(240.15 K)就能实现液化,其液化、储存条件远低于液氢,并且液氨的体积储氢密度是液氢的 1.5 倍。氨通常以液体形式运输和储存,其储运技术成熟。从当前全球“氨经济”的布局情况来看,氨作为氢气载体在全球大规模贸易领域具有显著优势^[21]。

3) 甲醇储氢

甲醇和氨一样,也是传统的化工产品,具备成熟的生产和储运基础设施,可以作为氢气储运载体的大规模推广应用。

工业生产甲醇基本上都采用合成气路线,甲烷直接氧化法、二氧化碳加氢法等路线也有研究,但是其技术成熟度不高,这两种方法并未广泛应用于工业生产。结合碳中和目标的发展原则,甲醇作为氢载体的技术路线必然是二氧化碳加氢合成,并且二氧化碳的来源需要采用生物质原料,或者是直接空气捕集^[22-23]。

4) 液态有机氢载体储氢

液态有机氢载体储氢技术基于不饱和液体有机物在催化剂作用下进行加氢反应,生成稳定化合物,当需要氢气时再进行脱氢反应,关键在于选择合适的储氢介质,见表 4。

表 4 典型的几类有机液态氢载体^[24]

Tab. 4 Typical classes of organic liquid hydrogen carriers^[24]

储氢材料(氢油)	熔点/℃	沸点/℃	理论储氢量/wt%
环己烷	6.5	80.7	7.19
甲基环己烷	-126.6	101	6.18
反式-十氢化萘	-30.4	185	7.29
咔唑	244.8	355	6.70
乙基咔唑	68	190	5.80

1.2.3 固态氢储运

固态储氢技术原理是基于固体材料对氢气的吸附和脱附。根据吸附性质不同,储氢材料可以分为物理吸附和化学吸附两类。储氢材料通过金属氢化物的形式来将氢气储存在合金中。吸氢过程中,合金储氢材料在一定的温度和氢气压力下,发生放热反应吸收氢气生成金属氢化物;放氢过程中,金属氢化物需要吸收大量的热,分解释放氢气。其微观机理为:氢分子首先吸附在金属表面,随着氢键断裂而解离成氢原子,氢原子通过内部扩散进入金属原子的间隙形成金属固溶体,之后固溶体中的氢原子进一步向金属内部扩散,达到固溶转化为化学吸附的活化能后从而形成氢化物^[25]。

固态储氢技术路线主要可分为金属氢化物,配位氢化物,碳材料,金属有机骨架材料(MOFs)和水合物储氢等。金属氢化物为固态储氢主流技术路线,涉及材料包括镁系、钛系、钒系、稀土系及复合储氢合金等;其中镁系合金储氢量最大,最高可达 7.6%,但放氢温度高,通常需要 300℃;钛系、钒系、稀土系储氢合金储氢容量为 1.4%~2.4% 不等,放氢温度明显较镁系合金低。除了传统的镁基、钛基储氢材料,配位氢化物如硼氢化钠、氨硼烷等新型储氢材料的研究也备受科研人员们的关注,其储氢量理论值达到 19.6 wt%,且具备清洁无污染、释氢可控等优势,将极大地提升氢气的存储效率和安全性。

氢气储运是连接上游制氢和终端用氢的关键环节,现阶段仍面临储氢密度低、储运成本高等问题,见表 5。除了高压气态储氢,其他氢储运技术大多数处于小规模示范或实验室研究阶段,随着技术成熟度提高,氢储运成本将快速下降。尽管高压气态储氢是目前技术成熟度最高、商业化应用最广泛的氢储运技术,但其仅适用于 200 km 以内的短距离运输,见图 2。

1.3 氢能应用

按照《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》划分标准,氢能应用场景主要包括交通、储能、发电和工业四大类。

1) 交通领域

氢能在交通领域应用包括乘用车、商用车、火车、船舶、航空器和混氢天然气(HCNG)汽车等,其中氢燃料电池汽车是交通领域的主要应用场景,关

表 5 几类储氢载体的特性对比

Tab. 5 Comparison of the characteristics of several types of hydrogen storage carriers

氢载体	储氢模式	储氢密度/wt%	优势	劣势
液氨	利用合成氨技术将氢气转化成氨气, 进一步液化成液氨	~ 17.8	合成氨工业成熟, 液氨储运设备、基础设施完善, 有利于大规模储运	液氨属于危化品, 具有一定的臭味和毒性, 高效液氨裂解制氢技术成熟度有待提升
甲醇	利用二氧化碳加氢技术将氢气转化为甲醇	~ 12.5	甲醇与液氨类似, 是常用的化工原料, 储运技术和基础设施完善, 有利于大规模储运	甲醇属于危化品, 具有毒性, 现阶段二氧化碳加氢合成甲醇技术仍需提高
液态有机物	利用不饱和液体有机物作为储氢载体(储油), 经过催化加氢反应生成饱和化合物(氢油), 氢油可催化脱氢重新生成储油	~ 5 ~ 8	氢油性质稳定、安全性高, 适合大规模储运	储氢与脱氢都需要经过催化反应, 设备复杂、综合能耗高
固体材料	利用储氢材料与氢气之间发生的物理或化学变化, 转化为固溶体或氢化物的形式进行储氢	~ 1 ~ 8	体积储氢密度高、安全性好, 不需要高压容器	质量储氢密度低、成本较高, 氢气储放过程需特定温度范围

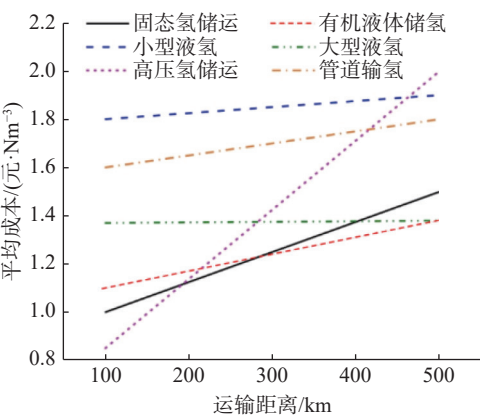


图 2 几种氢储运技术经济性对比^[26]

Fig. 2 Comparison of the economic performance of several hydrogen storage and transportation technologies^[26]

键的核心设备是质子交换膜燃料电池(PEMFC)。

随着我国燃料电池汽车示范城市群的布局, 氢燃料电池汽车产业在持续发展。

2) 储能领域

氢储能的本质是利用氢作为储能载体, 实现电力的存储, 属于化学储能的一种形式, 可与新型电力系统高度耦合, 克服新能源电力储存的难题, 支撑新能源成为新型电力系统的低碳能源。氢储能的储能介质可以是氢, 也可以进一步将氢转化为氢的衍生物如氨、甲醇等, 进行储存。狭义的氢储能是基于“电-氢-电”(Power-to-Power, P2P)的转换过程, 主要包含电解槽、储氢装置和燃料电池、氢燃气轮机、氢内燃机等氢气发电装置。广义的氢储能指的是“电-氢”的单向转换, 电能转换为氢气, 以氢的形态

储存电能(Power-to-Gas, P2G), 或者电制氢之后进一步转化为甲醇和氨气等化学衍生物(Power-to-X, P2X), 可以进行更大规模、更安全地储存^[27]。

面对大规模新型储能需求, 锂离子电池难以胜任, 氢储能将成为大规模、长周期储能的必然选择^[28]。

3) 发电领域

氢能发电是以氢气作为燃料, 通过燃氢燃气轮机、燃料电池等发电装置实现氢能到电能的转换。燃氢燃气轮机的研发重点在于燃烧室和一些辅助部件改造, 从而允许混合燃烧原料气中氢气含量逐步提高, 解决碳排放的问题。燃料电池是将燃料化学能直接转化为电能的一类装置, 目前在发电领域商业化应用的燃料电池有质子交换膜燃料电池(PEMFC)、固体氧化物燃料电池(SOFC)两种^[29]。

4) 工业领域

在工业领域, 目前 95% 以上的氢气仍作为原料用于炼化行业加氢精炼以及化工行业合成氨、合成甲醇等, 但是氢的来源将从目前以化石能源制氢为主即灰氢向可再生能源电解水生产的绿氢逐渐转变。绿氢化工(绿氢替代灰氢)是实现这些行业深度脱碳的重要途径。氢能冶金是钢铁行业碳减排的必然路径, 也是钢铁产业进入一个新时代的标志。

氢作为零碳化工原料下游应用和氢气冶金, 只需利用可再生能源制氢替代化石燃料制氢, 无需传统工艺流程的大规模改变, 核心是解决可再生能源波动性和间歇性与传统工业工艺过程稳态需求的动态匹配, 提高可再生能源的利用效率, 同时开发出更高效、低成本的新型催化剂、反应装置^[30]。

2 氨醇油产业

氢气的质量能量密度(120 MJ/kg)高,但是其在标准状态下体积能量密度(10.23 MJ/Nm³)较低,仅约为甲烷(35.87 MJ/Nm³)的 30%,见表 6。目前氢气储运形式以压缩气氢和液态氢为主,短期看无法满足氢能产业发展对氢气远距离、低成本、大规模储运的要求。

表 6 几种燃料的理化性能对比

Tab. 6 Comparison of physical and chemical properties of various fuels

燃料	气体密度/ (kg·m ⁻³)	液体密度/ (kg·L ⁻¹)	液化 温度/℃	低热值/ (MJ·Nm ⁻³)	低热值/ (MJ·kg ⁻¹)
氢气	0.089 9	0.071	-252.5	10.23	120
氨气	0.771	0.617	-33.5	14.34	18.6
甲醇	常温液态	0.793	64.8	常温液态	19.83
天然气	0.717	~0.45	-161.5	35.87	50.0

氨和甲醇作为储氢载体的研究近年来热度持续上升,加之,随着航运业与航空业的脱碳需求,氨、甲醇作为清洁燃料也在迅速发展。将绿氢转化为氨或者甲醇,极大地提升了其大规模储存的便利性。

2.1 绿氨产业

氨是一种重要的化工原料,广泛应用于化肥、制冷剂等领域,其合成与储运技术成熟,相对于氢更容易储存和运输,并且能够与氢气进行可逆转化,适合作为储氢载体,实现氢的大规模、远距离输送。

除了作为化工原料、储氢载体,合成氨还可作为便携燃料,作为未来航运业脱碳的主力燃料^[31]。

1) 合成氨技术

传统的合成氨工艺采用哈伯-博施法,在高温高压条件下直接由氢气和氮气合成氨(3H₂+N₂=2NH₃),技术成熟度高。全球合成氨产量超过 2 亿 t,主要通过煤气化、天然气裂解等工艺获取氢气原料,生产过程碳排放量大。由于合成氨反应需要在较苛刻的条件下(450~600℃、10~25 MPa)进行,能耗也较高。

如图 3 所示,合成氨工业减排主要有 2 条技术路线:(1)利用可再生能源制取的绿氢替代化石燃料生产的灰氢,合成氨工艺不变,生产设备改造投资较少;(2)开发新型合成氨技术,以降低合成氨能耗和碳排放,包括低温低压合成氨、光催化合成氨、电催化合成氨等。2022 年《Nature Catalysis》刊发了荷兰

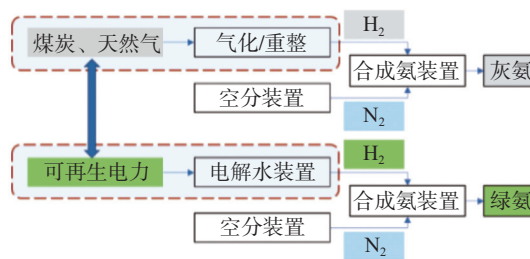


图 3 绿色合成氨与传统合成氨工艺对比

Fig. 3 Comparison of the synthesis process of green ammonia with traditional ammonia

科学家^[32]采用氢化钾嵌石墨作为高效催化剂,成功在 250~400℃、低于 1 MPa 条件下合成氨。

2) 氨的应用

氨的传统应用领域为氮素肥料和化工原料,随着其能源属性的开发,氨作为燃料的应用场景也在不断地拓展丰富。

(1) 直接燃烧

相比于甲烷等常规燃料,氨的自燃点为 651℃,燃烧活性较低,通常需要与其他燃料混燃以提高燃烧质量。

氨混合氢气、甲烷等气态燃料作为内燃机的燃料是比较理想的直燃方式,适用于重型卡车、船舶等交通工具。燃煤锅炉和燃气轮机也可以进行掺氨燃烧发电,进行部分燃料替代实现减碳。现阶段,国际上已有中国、日本、韩国明确提出了燃煤锅炉掺氨降碳。

(2) 燃料电池

氨燃料电池相比于直接燃烧的热效率更高,噪声和排放也低。氨燃料电池主要是碱性燃料电池和固体氧化物燃料电池两类。碱性燃料电池采用氢氧化钾等碱性物质作为电解质,氨是弱碱性物质适用于碱性燃料电池,并且可以使用非贵金属催化剂,相比与质子交换膜燃料电池更具备成本优势,但需要开发更高效的催化剂和离子传导性、化学稳定性更好的膜材料。氨燃料固体氧化物燃料电池的发电效率已接近氢燃料,但是需要解决氮氧化物的排放问题^[33]。

(3) 氢储运载体

氢的大规模、低成本储运是氢能产业发展的重要环节,同时也是我国氢能布局的瓶颈。氨气的液化能耗远低于液氢,液氨的氢体积密度也高于液氢,并且氨的技术体系、标准规范也较为成熟,非常适合

充当氢气的大规模储运载体。

2.2 低碳甲醇产业

甲醇与氨类似,既是传统的工业原料,又是新型的燃料,还可以作为绿氢大规模发展的重要载氢介质。特别是国际航运业在迈向脱碳的过程中,绿色甲醇是倍受关注的绿色燃料^[34]。

1) 甲醇合成技术

2024年全球甲醇产能大约1.76亿t,几乎全都由煤、天然气等化石燃料生产。化石燃料经合成气(CO 、 H_2)生产甲醇($\text{CO}+2\text{H}_2=\text{CH}_3\text{OH}$)的工艺是甲醇合成工业的主流方式。

如图4所示,甲醇行业降碳有2条技术路线,(1)采用生物质替代化石燃料制备合成气,合成甲醇的工艺主要改造前端原料制合成气的设备;(2)改用二氧化碳加氢制甲醇工艺,根据碳源和氢源的碳排放情况综合考虑合成甲醇的碳排放强度。双鸭山绿色甲醇与绿色航油示范基地项目,采用生物质气化制合成气(CO 、 H_2)耦合新能源电解水补氢的模式,生产绿色甲醇与可持续航空煤油,是基于电-氢-碳深度协同的新能源基地开发模式。

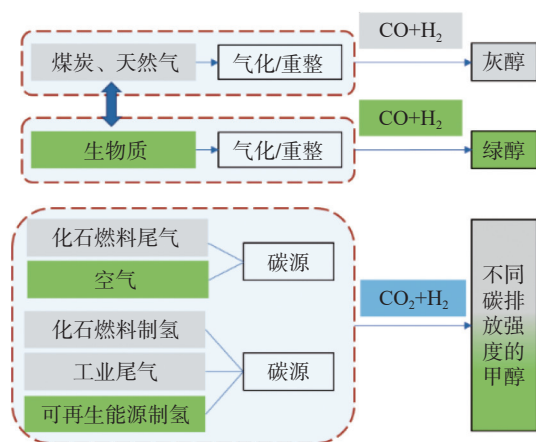


图4 不同碳排放强度的甲醇合成工艺

Fig. 4 Methanol synthesis processes with different carbon emission intensities

2) 甲醇利用

甲醇作为传统化工原料,超过60%用于合成甲醛、乙酸、乙烯等化学品,再通过这些基础化学品合成塑料、建筑材料等。甲醇也作为燃料使用,可与汽油混合生产甲醇汽油,作为原料生产甲基叔丁基醚等作为汽油的添加剂。

绿色甲醇是新兴的绿色燃料,是替代传统原油

燃料的重要选择。甲醇动力车辆的研究自20世纪90年代以来一直在持续开展,近年来由于全球推动碳中和的浪潮,众多示范项目在研究船用绿色甲醇燃料的应用。

进一步地,甲醇作为遍及全球的商品,其作为大规模储运氢气的载体,可以较低成本地使用现有的基础设施促进氢气的储存、运输^[35]。

2.3 可持续航空煤油产业

传统航空煤油是由不同馏分的烃类化合物组成的石油产品,可持续性航空煤油则是利用清洁原料制造,化学组成和燃烧性质与传统航空煤油类似,可以直接使用在航空发动机中实现减碳的清洁燃料。

可持续航空煤油的生产原料非常多样化,因此合成路线也有很多种,如表7所示,目前主流的生产路线主要有4条^[36]。

1) 油脂加氢

油脂加氢(Hydroprocessed Esters and Fatty Acids, HEFA)是利用动植物油脂作为原料,经过加氢还原和烷烃异构化等工艺,生产出与传统航空煤油组成类似的可持续航空煤油。油脂加氢工艺是最早采用的可持续航空煤油制备技术,技术成熟度较高,已实现规模化生产。

2) 气化-费托合成

气化-费托合成(Gasification/Fischer-Tropsch)是利用农林废弃物、富含纤维素的能源作物等作为原料,经过气化形成合成气(CO 、 H_2 混合气),进而经过费托合成反应装置,生成可持续航空煤油。气化-费托合成工艺初步进入工程示范阶段,已建成部分工程示范项目。

3) 醇类制油

醇类制油(Alcohol-to-Jet)是利用可以转化为醇类的各类生物质,如农林废弃物、玉米、甘蔗等作为原料,经过脱水、聚合、加氢脱氧等一系列工序,以醇类作为中间产物转化为可持续航空煤油。醇类制油工艺目前处于工程示范阶段,尚未实现规模化生产。

4) 电制燃料

电制燃料(Power-to-Liquid)是直接利用二氧化碳和氢气作为原料,经过二氧化碳加氢反应生成可持续航空煤油。电制燃料工艺的原料来源广泛,发展潜力巨大,但是需要清洁电力生产的绿氢和直接空气捕集的二氧化碳来满足生成可持续航空煤油的

表 7 几种合成可持续航空煤油技术对比
Tab. 7 Comparison of several synthetic sustainable aviation fuel technologies

路线	原料	中间体	主要工序	技术成熟度
油脂加氢	动植物油脂、藻类植物	脂类	油脂提取、加氢脱氧、烷烃异构化	商业化可行性最高的工艺， 预计2030年前占据市场主导地位
气化-费托合成	农林废弃物、富纤维能源作物	CO、H ₂	气化、费托合成	商业化试点
醇类制油	农林废弃物、玉米、甘蔗	醇类	发酵、脱水、聚合、加氢转化	商业化试点
电制燃料	大气CO ₂	CO ₂	直接空气碳捕集、可再生能源电解水制氢、	发展中，直接空气碳捕集和清洁电力制氢， 减排潜力和生产潜力大
	清洁电力	H ₂	二氧化碳加氢合成	

低碳要求，规模化生产需要充足、廉价的可再生能源电力和成熟的直接空气捕集二氧化碳技术，短期内还比较难实现。

3 氢基燃料产业发展现状

3.1 氢基燃料产业技术难点与发展方向

如表 8 所示，与传统氢基燃料相比，绿色氢基燃料的优势在于其零碳/低碳排放，但是其作为新兴产业，技术和成本目前仍是制约其发展的重大阻碍。新能源电力电解水制氢耦合化工过程是生产氢基燃料的常规技术路线，以新能源电力直接电催化一步合成氨、醇以及其他碳基燃料的低碳能源技术，是新型的氢基燃料合成技术，亦称电制燃料技术(Power

to X)。电制燃料技术通过将富余的可再生能源电力直接转化为氢、氨、甲醇等燃料，实现大规模、长周期、跨区域储能，弥补可再生能源发电的波动间歇性缺陷。另一方面，电制燃料技术以 H₂O、CO₂ 等廉价、来源丰富的简单分子为原料，发展潜力巨大。丹麦托普索等科技企业推动的绿电与电催化、碳捕集技术深度协同的 e-fuels(电制甲醇、电制可持续航空煤油)项目已初步实现商业化试点。

此外，氢基燃料生产依托的可再生能源资源主要集中在西北、华北等地区，与东部沿海消费市场呈现明显的逆向分布。氢基能源产业的发展，除了降低生产成本、提高生产效率，仍需要推动跨区域大规模、低成本转运的基础设施建设。

表 8 氢基能源产业技术难点与发展方向
Tab. 8 Technical difficulties and development direction of hydrogen-based energy industry

燃料	技术难点	发展方向
氢气	体积能量密度低、大规模储运难度大；电解制氢效率低	大规模、低成本、高效制氢技术；大规模、低成本、高效氢储运技术
氨气	有毒化学品；燃烧性能差；合成能耗高	高效燃烧技术；高效氨氢转换技术
甲醇	毒性、腐蚀性；含碳燃料	绿色合成技术
可持续航空煤油	原料来源多、预处理工艺复杂；技术路线多， 除了脂类之外的合成路线成熟度低	大规模、低成本合成技术

3.2 氢基燃料产业政策

随着全球能源结构转型的加速，绿色氢基燃料逐渐成为各国政府和能源企业关注的焦点。美国、日本、欧盟等已陆续发布国家氢能产业规划，加速推进绿色氢基能源发展。欧盟将氢能视为推动能源转型和深度脱碳的核心战略。2020 年欧盟颁布了《EU Hydrogen Strategy》，提出分阶段推动氢能发展，贯通绿氢“制储输用”全产业链条；2021 年欧盟继续推出《Fit for 55》计划，明确到 2030 年实现减排 55%，并将氢能纳入碳市场改革和碳边境调节机制，推动工

业领域的绿氢替代；2023 年欧洲理事会新修订《Renewable Energy Directive》，明确将氢能纳入碳市场改革框架。2024 年欧盟已建成电解槽产能超过 6 GW，绿氢需求超过 800 万 t，绿氢在氨、甲醇生产中的替代加速。

氢能是我国的战略性新兴产业和未来能源发展的重点领域，在政策的持续推动下，氢能的技术突破和产业应用取得了显著的进展。我国 2022 年发布了《氢能产业发展中长期规划(2021—2035 年)》，明确氢能是战略性新兴产业的重点方向，是构建绿色

低碳产业体系、打造产业转型升级的新增长点^[37]; 2023 年起, 河北、广东、新疆、内蒙古等多地政策允许在化工园区外建设电解水制氢加氢一体站; 多地市持续为绿氢生产、加氢站、燃料电池汽车、氢基燃料关键技术创新或产品提供奖补政策; 2025 年我国实施的《中华人民共和国能源法》将氢能纳入能源管理体系, 解决了此前氢气作为危化品管理带来的审批复杂、应用受限等问题。随着政策支持的不不断加强, 我国绿色氢基能源产业取得了显著进展, 成为全球产业发展的重要推动力量。2024 年我国可再生能源制氢产能全球领先, 超过 12 万 t/a, 约占全球 50%; 预计 2025 年我国氢能产业产值突破万亿大关, 燃料

电池汽车保有量超过 5 万辆。

3.3 氢基燃料产业发展情况

在国内减碳政策和国际碳排放合规的双重推动下, 我国的氢基燃料技术研发和产业项目部署进入快车道。近几年, 绿色氢基燃料项目规划、投产的数量均呈现增长的态势, 但受限于产业成熟度和经济性, 项目建设速度较为缓慢, 并且绿色氢基燃料的生产成本仍远高于传统燃料, 如何走通商业化模式是关键问题。特别是“绿氢+氨/醇一体化”项目, 由于项目单体规模大, 规划和建设期更长, 并且该发展模式兴起于近两年, 仅有少数项目进入实质建设阶段(见表 9 和表 10)。

表 9 典型绿色氢基燃料项目介绍
Tab. 9 Introductions of typical green hydrogen-based fuel projects

项目名称	建设内容	技术路线	项目亮点
新疆库车绿氢示范项目	新建300 MW光伏电站, 2万t/a制氢能力的电解水制氢厂, 21万Nm ³ 的储氢球罐, 输氢能力2.8万Nm ³ /h的输氢管线及配套输变电设施	光伏制氢	全国首个万吨级光伏绿氢项目
内蒙古达茂旗制氢示范工程	新建120 MW风电, 80 MW光伏, 电化学储能20 MW时, 12 000 Nm ³ /h电解水制氢装置, 氢气年产能7 800 t	风光制氢	全国首批大规模可再生能源制绿氢示范项目
洮南市风电耦合生物质绿色甲醇一体化示范项目	新建680 MW风电, 80万t/a生物质预处理产线, 年产绿色甲醇25万t	风电制氢耦合生物质气化制绿色甲醇	世界首台纯氧加压循环流化床生物质气化系统, 单炉生物质处理量300 t/d
双鸭山绿色甲醇与绿色航油示范基地项目	建设年产20万t绿色甲醇、30万t绿色航油, 配套风光发电、生物质收储及预处理、制氢储氢、生物质气化及合成航油装置等	风光制氢耦合生物质气化制甲醇、费托合成航煤	全球首个十万吨级风光氢融合生物质绿色航油示范项目
中能建松原氢能产业园(绿色氢氨醇一体化)项目	年产60万t绿色合成氨和6万t绿色甲醇, 配套建设3 GW新能源项目	风光制氢合成氨、生物质富氧燃烧CO ₂ 加氢制甲醇	全球最大体量的绿色氢氨醇一体化项目

表 10 绿色氢基燃料项目产能统计
Tab. 10 Statistics of green hydrogen-based fuel projects by capacity

类别	规划数量/项	规划总产能/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	投产数量/项	投产产能/(10 ⁴ t·a ⁻¹)
绿氢	>700	>800	10	>12
绿氨	>120	>2 000	—	—
低碳甲醇	>100	>2 400	—	—
可持续航空煤油	>20	>700	4	45

注: 统计数据截至2024年底, 绿氢投产项目统计为10 MW容量以上的数量。

4 结论

4.1 结论

氢基能源作为全球能源转型的重要方向, 有望成为全球能源革命的核心力量, 其发展前景广阔且

多维, 但目前产业尚处于发展的初期阶段, 仍面临多方面的挑战。

1) 产业技术瓶颈有待突破

绿色合成氨、低碳甲醇、可持续航空煤油都依赖绿氢原料, 而可再生能源是绿氢主要的能量来源,

目前适应可再生能源波动间歇性的氢基燃料柔性生产技术和智能控制系统尚未成熟,生产效率低、能量损耗高。

2) 基础设施与市场推广存在障碍

氢基燃料的推广应用需要配套足够的储运、加注设施,目前全球的加氢站、氨醇储罐及加注站等基础设施数量少且分布不均匀。此外,绿色氢基燃料的终端成本仍远高于传统燃料,规模化降成本仍需要时间。

3) 政策与标准体系缺失

尽管氢能已被我国明确纳入能源管理体系,但是氢能相关基础设施的归口管理仍不明确,跨部门协调困难,制约项目的投建营;并且,我国尚未建立国家层面的绿色氢基燃料认证标准,与国际绿色认证体系衔接不足,限制了我国氢基燃料产业的全球化布局。

4.2 建议

展望2025年,氢基燃料产业发展需要采取措施,持续推动解决能源“不可能三角(供给安全、价格低廉和清洁环保)”、走通商业模式、提升产品性能等。

1) 持续开展关键技术与核心装备创新

构建高校、科研机构与企业之间的长期稳定合作框架,开展产学研合作。面向绿色氢基燃料产业发展的需求,进一步提升电解槽的制氢效率和稳定性,实现质子交换膜电解槽、阴离子交换膜电解槽等新型电解槽、氢气液化装置等涉及的关键材料、核心零部件国产化。对符合创新要求的氢能项目给予审批绿色通道等优惠政策,并引导社会资金成立氢能专项基金,加快创新技术的产业化。

2) 积极拓展绿色氢基燃料下游产业链

加快推动氢气管道/天然气掺氢管道、加氢站、液氨/甲醇储运与加注等基础设施建设;进一步挖掘绿氢下游应用场景,拓展氢能应用领域;探索绿氨、绿色甲醇作为航运低碳燃料之外的能源应用。

3) 探索建立氢基燃料绿色认证体系与行业标准

结合我国氢基燃料应用场景,制定适应行业发展的项目申请、立项、建设、运营、管理标准体系,对标发达国家和地区绿色燃料产业相关政策,建立我国的绿色认证体系。

参考文献:

- [1] Hydrogen Council, McKinsey & Company. Hydrogen insights 2024 [EB/OL]. (2024-09-17) [2025-02-20]. <https://hydrogen-council.com/en/hydrogen-insights-2024>.
- [2] Grattan Institute. Hydrogen: hype, hope, or hard work? [EB/OL]. (2023-12-03) [2025-02-20]. <https://grattan.edu.au/report/hydrogen-hype-hope-or-hard-work>.
- [3] International Energy Agency. Net zero by 2050: a roadmap for the global energy sector [EB/OL]. (2021-05-18) [2025-02-20]. <https://www.iea.org/events/net-zero-by-2050-a-roadmap-for-the-global-energy-system>.
- [4] 罗志斌, 孙潇, 孙翔, 等. 氢能与储能耦合发展的机遇与挑战 [J]. 南方能源建设, 2022, 9(4): 24-31. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.003.
LUO Z B, SUN X, SUN X, et al. The coupling development of hydrogen and energy storage technology: opportunities and challenges [J]. Southern energy construction, 2022, 9(4): 24-31. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2022.04.003.
- [5] 肖楷, 高啸天, 李震, 等. “双碳”目标背景下的甲醇技术及其应用 [J]. 内蒙古电力技术, 2025, 43(1): 3-10. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2025.0002.
XIAO K, GAO X T, LI Z, et al. Methanol technology in context of dual carbon target and its application [J]. Inner Mongolia electric power, 2025, 43(1): 3-10. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2025.0002.
- [6] 郑可昕, 高啸天, 范永春, 等. 支撑绿氢大规模发展的氨、甲醇技术对比及应用发展研究 [J]. 南方能源建设, 2023, 10(3): 63-73. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.007.
ZHENG K X, GAO X T, FAN Y C, et al. Comparison and application prospects of ammonia and methanol technologies supporting large-scale development of green hydrogen energy [J]. Southern energy construction, 2023, 10(3): 63-73. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.03.007.
- [7] 陈伟平, 施仲涨, 林皓然, 等. 我国绿氢产业发展现状分析与建议 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(1): 193-203, 210. DOI: 10.6043/j.issn.0438-0479.202405031.
CHEN W P, SHI Z Z, LIN H R, et al. Analyses and suggestions on current development status of China's green hydrogen industry [J]. Journal of Xiamen University (natural science), 2025, 64(1): 193-203, 210. DOI: 10.6043/j.issn.0438-0479.202405031.
- [8] 黄晟, 杨振丽, 李振宇. 氢产业链发展的路径分析 [J]. 化工进展, 2024, 43(2): 882-893. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2023-1497.
HUANG S, YANG Z L, LI Z Y. Analysis of optimization path of developing China's hydrogen industry [J]. Chemical industry and engineering progress, 2024, 43(2): 882-893. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2023-1497.
- [9] International Energy Agency. Global hydrogen review 2024 [EB/OL]. (2024-10-02) [2025-02-20]. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>.

- [10] International Renewable Energy Agency. Green hydrogen auctions: a guide to design [EB/OL]. (2024-10-30) [2025-02-20]. <https://www.irena.org/Publications/2024/Oct/Green-hydrogen-auctions-A-guide-to-design>.
- [11] XIE Y H, LUO F, YANG Z H. Strategies for the enhancements in catalytic performance and stability of anodic electrocatalyst in PEM water splitting [J]. *Energy reviews*, 2024, 3(4): 100103. DOI: 10.1016/j.enrev.2024.100103.
- [12] WANG C R, STANSBERRY J M, MUKUNDAN R, et al. Proton exchange membrane (PEM) water electrolysis: cell-level considerations for gigawatt-scale deployment [J]. *Chemical reviews*, 2025, 125(3): 1257-1302. DOI: 10.1021/acs.chemrev.3c00904.
- [13] CHEN W, SUN C W. Recent advances in high temperature solid oxide electrolytic cells [J]. *Energy materials*, 2025, 5: 500045. DOI: 10.20517/energymater.2024.144.
- [14] LIU H, YU M, TONG X F, et al. High temperature solid oxide electrolysis for green hydrogen production [J]. *Chemical reviews*, 2024, 124(18): 10509-10576. DOI: 10.1021/acs.chemrev.3c00795.
- [15] 周树辉, 王秀林, 段品佳, 等. 高压气态储氢技术形势分析 [J]. *储能科学与技术*, 2023, 12(8): 2668-2679. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0139.
- ZHOU S H, WANG X L, DUAN P J, et al. Analysis of high-pressure gaseous hydrogen storage technology [J]. *Energy storage science and technology*, 2023, 12(8): 2668-2679. DOI: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0139.
- [16] 梁前超, 赵建锋, 梁一帆, 等. 储氢技术发展现状 [J]. *海军工程大学学报*, 2022, 34(3): 92-101. DOI: 10.7495/j.issn.1009-3486.2022.03.016.
- LIANG Q C, ZHAO J F, LIANG Y F, et al. Progress in hydrogen storage technology [J]. *Journal of naval university of engineering*, 2022, 34(3): 92-101. DOI: 10.7495/j.issn.1009-3486.2022.03.016.
- [17] 李天娇, 谢飞, 张瑛, 等. 天然气管道掺氢输送技术研究进展 [J]. *油气储运*, 2024, 43(12): 1337-1347. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.12.002.
- LI T J, XIE F, ZHANG Y, et al. Advancements in hydrogen-blended natural gas pipeline transmission technology [J]. *Oil & gas storage and transportation*, 2024, 43(12): 1337-1347. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.12.002.
- [18] 王昊成, 杨敬瑶, 董学强, 等. 氢液化与低温高压储氢技术发展现状 [J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(3): 102-113. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.H22123101.
- WANG H C, YANG J Y, DONG X Q, et al. Review on hydrogen liquefaction and cryo-compression hydrogen storage technologies [J]. *Clean coal technology*, 2023, 29(3): 102-113. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.H22123101.
- [19] 王鑫, 陈叔平, 朱鸣. 液氢储运技术发展现状与展望 [J]. *太阳能学报*, 2024, 45(1): 500-514. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-1559.
- WANG X, CHEN S P, ZHU M. Development status and prospect of liquid hydrogen storage and transportation technology [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2024, 45(1): 500-514. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-1559.
- [20] 滕霖, 尹鹏博, 聂超飞, 等. “氨-氢”绿色能源路线及液氢储运技术研究进展 [J]. *油气储运*, 2022, 41(10): 1115-1129. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.10.001.
- TENG L, YIN P B, NIE C F, et al. Research progress on "ammonia-hydrogen" green energy roadmap and storage & transportation technology of liquid ammonia [J]. *Oil & gas storage and transportation*, 2022, 41(10): 1115-1129. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.10.001.
- [21] 杜东, 王小林, 张国生, 等. 氢能产业发展现状及展望 [J]. *石油科技论坛*, 2023, 42(2): 96-104. DOI: 10.3969/j.issn.1002-302x.2023.02.012.
- DU D, WANG X L, ZHANG G S, et al. Present conditions and prospects of ammonia energy industrial development [J]. *Petroleum science and technology forum*, 2023, 42(2): 96-104. DOI: 10.3969/j.issn.1002-302x.2023.02.012.
- [22] 刘迪, 汤玮健, 韩伟, 等. 绿氢时代的船用燃料: 绿色甲醇和绿氨 [J/OL]. *化工进展*, 2025: 1-9(2025-01-03) [2025-02-20]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2024-1771>.
- LIU D, TANG W J, HAN W, et al. Marine fuels in the era of green hydrogen: green methanol and green ammonia [J/OL]. *Chemical industry and engineering progress*, 2025: 1-9(2025-01-03) [2025-02-20]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2024-1771>.
- [23] LI J G, WU C N, CAO D F, et al. Green methanol-an important pathway to realize carbon neutrality [J]. *Engineering*, 2023, 29: 27-31. DOI: 10.1016/j.eng.2023.08.005.
- [24] 刘若璐, 汤海波, 罗凤盈, 等. 液态有机储氢技术应用与展望 [J]. *现代化工*, 2025, 45(2): 47-51, 56. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.02.010.
- LIU R L, TANG H B, LUO F Y, et al. Application and prospect of liquid organics hydrogen storage technology [J]. *Modern chemical industry*, 2025, 45(2): 47-51, 56. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.02.010.
- [25] ABDECHAFIK E H, AIT OUSALEH H, MEHMOOD S, et al. An analytical review of recent advancements on solid-state hydrogen storage [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2024, 52: 1182-1193. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.10.218.
- [26] 黄嘉豪, 田志鹏, 雷励斌, 等. 氢储运行业现状及发展趋势 [J]. *新能源进展*, 2023, 11(2): 162-173. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2023.02.009.
- HUANG J H, TIAN Z P, LEI L B, et al. Advances and development trends of hydrogen storage and refueling industry [J]. *Advances in new and renewable energy*, 2023, 11(2): 162-173. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2023.02.009.
- [27] SHU K Y, GUAN B, ZHUANG Z Q, et al. Reshaping the energy landscape: explorations and strategic perspectives on hydrogen

- energy preparation, efficient storage, safe transportation and wide applications [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2025, 97: 160-213. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2024.11.110](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.110).
- [28] LIU K, DING Y L. Large-scale energy storage for carbon neutrality [J]. *Engineering*, 2023, 29: 1. DOI: [10.1016/j.eng.2023.09.010](https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.09.010).
- [29] HWANG J, MAHARJAN K, CHO H. A review of hydrogen utilization in power generation and transportation sectors: achievements and future challenges [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2023, 48(74): 28629-28648. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2023.04.024](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.024).
- [30] NEUWIRTH M, FLEITER T, MANZ P, et al. The future potential hydrogen demand in energy-intensive industries - a site-specific approach applied to Germany [J]. *Energy conversion and management*, 2022, 252: 115052. DOI: [10.1016/j.enconman.2021.115052](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.115052).
- [31] ZHANG Z H, ZHANG H J, JIANG H Y, et al. Green ammonia: revolutionizing sustainable energy for a carbon-free future [J]. *Journal of materials chemistry A*, 2024, 12(48): 33334-33361. DOI: [10.1039/D4TA07339H](https://doi.org/10.1039/D4TA07339H).
- [32] CHANG F, TEZSEVIN I, DE RIJK J W, et al. Potassium hydride-intercalated graphite as an efficient heterogeneous catalyst for ammonia synthesis [J]. *Nature catalysis*, 2022, 5(3): 222-230. DOI: [10.1038/s41929-022-00754-x](https://doi.org/10.1038/s41929-022-00754-x).
- [33] CHENG Q, MUHAMMAD A, KAARIO O, et al. Ammonia as a sustainable fuel: review and novel strategies [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2025, 207: 114995. DOI: [10.1016/j.rser.2024.114995](https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114995).
- [34] ZHAO N, YANG J Y, AI T C, et al. From methanol to power: energy, economic and life-cycle assessments of several pathways [J]. *Journal of cleaner production*, 2025, 486: 144501. DOI: [10.1016/j.jclepro.2024.144501](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144501).
- [35] SCHORN F, BREUER J L, SAMSUN R C, et al. Methanol as a renewable energy carrier: an assessment of production and transportation costs for selected global locations [J]. *Advances in applied energy*, 2021, 3: 100050. DOI: [10.1016/j.adapen.2021.100050](https://doi.org/10.1016/j.adapen.2021.100050).
- [36] WANDELT S, ZHANG Y H, SUN X Q. Sustainable aviation fuels: a meta-review of surveys and key challenges [J]. *Journal of the air transport research society*, 2025, 4: 100056. DOI: [10.1016/j.jatrs.2024.100056](https://doi.org/10.1016/j.jatrs.2024.100056).
- [37] 国家能源局. 氢能产业发展中长期规划 (2021-2035 年) [EB/OL]. (2022-03-23) [2025-02-20]. https://zfxgk.nea.gov.cn/2022-03/23/c_1310525630.htm.
National Energy Administration. Medium and long-term plan for the development of hydrogen energy industry (2021-2035) [EB/OL]. (2022-03-23) [2025-02-20]. https://zfxgk.nea.gov.cn/2022-03/23/c_1310525630.htm.

作者简介:



罗志斌

罗志斌 (第一作者, 通信作者)

1989 年, 男, 天津大学化学工艺博士, 主要研究方向为氢能、储能以及二氧化碳利用技术与产业化(e-mail) luozhibin@gedi.com.cn。

(编辑 徐嘉铖)