

储能技术经济性分析



有机液体规模化氢储运技术经济分析

陈万生, 齐随涛, 周一鸣, 张时荣, 韦晶晶
(西安交通大学化工学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 氢能产业的发展是我国实现能源转型、达成“双碳”目标的重要途径, 然而氢气的低密度、易泄漏及易致金属脆化等特性, 导致其高效、安全储运仍面临技术瓶颈, 亟待发展经济可行的大规模储运方案。本研究系统评述了现有氢储运技术的优势、局限与发展趋势, 通过比较分析, 提出有机液体(liquid organic hydrogen carrier, LOHC)氢储运技术因其高储氢密度、安全性和可利用现有油品储运设施等优势, 在大规模、长距离氢储运中展现出独特潜力。通过构建涵盖运输规模、距离、载体类型和运输方式的多参数氢储运成本分析模型, 比较了三种有机液体氢储运体系在不同场景下的经济性, 并进一步对关键参数进行了经济敏感性分析。经济分析表明, 在所选用的三种有机液态氢载体中, DBT/ H_{18} -DBT体系的氢储运平准化成本较TOL/MCH、NEC/ H_{12} -NEC体系低11%~34%, 是理想的储氢载体, 海运运输成本低于陆运1/3, 是更适合有机液体的运输方式; 敏感性分析表明工艺能耗与燃料成本是影响有机液体经济性的关键敏感因素, 是技术优化的重点方向。最后, 将有机液体氢储运技术与其他主流氢储运技术的平准化成本进行比较, 明确了各技术的适用边界与市场定位。本研究为有机液体氢储运技术的规模化应用提供了系统的技术经济分析框架, 为氢能商业化储运路径选择提供了理论依据和数据支撑。

关键词: 储氢技术; 氢能; 输送; 有机液体; 经济分析

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2025.0830

中图分类号: TK 91

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 02-658-12

Techno-economic analysis of large-scale hydrogen storage and transportation via liquid organic hydrogen carriers

CHEN Wansheng, QI Suitao, ZHOU Yiming, ZHANG Shirong, WEI Jingjing

(School of Chemical Engineering and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: The development of the hydrogen energy industry is a crucial pathway for China to achieve energy transition and fulfill its dual-carbon goals. However, the intrinsic properties of hydrogen, including low density, high leakage risk, and susceptibility to metal embrittlement, pose significant challenges to its safe and efficient storage and transportation. Consequently, there is an urgent need to develop economically viable solutions for large-scale hydrogen storage and transport. This paper systematically reviews the advantages and limitations of existing hydrogen storage and transportation technologies and identifies liquid organic hydrogen carrier (LOHC) technology as one of the most promising options for large-scale, long-distance hydrogen delivery. By establishing a multi-parameter cost analysis model, this

收稿日期: 2025-09-11; 修改稿日期: 2025-10-20。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(22038011)。

第一作者: 陈万生(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为能源转化过程多相催化剂的设计, E-mail: cwscc@stu.xjtu.edu.cn; 通信作者: 齐随涛, 教授, 研究方向为能源转化过程多相催化剂的设计, E-mail: suitaoqi@mail.xjtu.edu.cn。

引用本文: 陈万生, 齐随涛, 周一鸣, 等. 有机液体规模化氢储运技术经济分析[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(2): 658-669.

Citation: CHEN Wansheng, QI Suitao, ZHOU Yiming, et al. Techno-economic analysis of large-scale hydrogen storage and transportation via liquid organic hydrogen carriers[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(2): 658-669.

study quantitatively evaluates the effects of transport scale, transport distance, carrier type, and transport mode on the techno-economic performance of LOHC systems and further conducts sensitivity analysis of key parameters. The results indicate that, among the three LOHC systems examined, the DBT/H₁₈-DBT system achieves a levelized hydrogen storage and transportation cost that is 11%—34% lower than those of the TOL/MCH and NEC/H₁₂-NEC systems, identifying it as the optimal hydrogen carrier. In addition, maritime transportation costs for LOHCs are less than one-third of land transportation costs, demonstrating that shipping is the more suitable transport mode for organic liquid-based hydrogen. Sensitivity analysis reveals that process energy consumption and fuel cost are the dominant factors affecting LOHC economics, providing clear directions for technological optimization. Comparative analysis further confirms that the DBT/H₁₈-DBT system maintains strong cost competitiveness and stability across different transport scales, offering a feasible technological pathway for the future commercialization of hydrogen storage and transportation.

Keywords: hydrogen storage technologies; hydrogen energy; transportation; LOHC; economic analysis

氢气被视为21世纪最具发展潜力的能源之一^[1-2]。在我国深入推进能源革命、力争实现“双碳”目标的战略背景下,氢能产业已被定位为战略性新兴产业,氢储能更被列入“十四五”新型储能核心技术装备攻关重点方向。实现“双碳”目标的核心在于构建以新能源为主体的新型能源系统,而氢能恰是协调可再生能源规模化发展与能源系统稳定运行的关键媒介。其中,基于风光发电的电解水制氢技术(绿氢)是实现深度脱碳的核心路径,然而,氢能产业的全链条发展仍面临严峻挑战。我国能源资源与负荷中心呈逆向分布,氢能供需存在显著的空间错配:富饶的风光资源催生了西部、北部地区的绿氢制备产业,而庞大的氢能消费市场却集中在东南沿海工业带。这一“有氢不用、需氢不生”的格局,使得氢能的大规模、长距离、低成本高效安全储运成为氢能大规模应用的关键。

目前已有诸多研究对各类氢储运技术的原理进行综述比较,本研究聚焦于“大规模、长距离”这一特定应用场景,对不同技术路线的成本构成与场景适用性进行系统性的分析。通过构建多参数经济分析模型,系统评估了有机液体(liquid organic hydrogen carrier, LOHC)储氢路线的技术经济性,揭示对有机液体氢储运平准化成本影响的关键因素和不同因素的作用机制,旨在为我国氢储运技术规模化发展提供理论基础。

1 现有氢储运技术

根据氢储存时所处的相态,现有的氢储运技术可分为气态、固态、液态三种。

1.1 气态氢储运技术

1.1.1 高压气态氢储运

高压气态氢储运是目前最成熟、应用最广的技术^[3],其通过压缩氢气(多为35 MPa^[4])提高密度,但体积储氢密度仍偏低(15~18 kg/m³)。陆运依靠长管拖车,储氢密度低,车辆自重高,经济运输半径不超过200 km^[5-6]。船运虽通过降低自重比展现出一定成本潜力^[7],但受经济性与安全性制约,亦难适用于长距离航运^[8-9]。为满足长距离规模化氢储运需求,高压气态氢储运技术仍面临材料、成本与运输方面的挑战:高性能碳纤维依赖进口,内衬氢脆问题尚待解决;70 MPa系统成本显著高于35 MPa,压缩能耗大导致整体能效仅为85%~90%;运输过程中0.1%~0.5%的日蒸发损失^[10-12]。当前的研究重点在于开发新型储氢容器材料,同时结合智能压力管理等系统技术,以推动该技术沿“材料突破→系统优化→规模应用”路径发展。

1.1.2 管道输氢

管道输氢在大规模、长距离氢输送方面具有明显的成本优势,已逐步走向规模化^[9]。目前全球已建成约5000 km纯氢管道,其中欧洲占比超过

60%，工作压力多在 4~10 MPa^[13]。然而，管道输氢仍面临多重挑战：一是钢管、阀门等材料在纯氢环境下使用年限大幅降低^[14]；二是氢气的单位能量输送成本是天然气的 3 倍以上^[15]；三是尚未形成统一标准与规范体系。

1.2 固态氢储运技术

固态氢储运技术通过材料对氢气的可逆吸脱附实现储放，分为物理储氢与化学储氢两类。物理储氢依赖范德华力吸附氢气，常见的有碳基材料(如活性炭)和有机多孔材料(如 MOFs、COFs)。前者储放氢迅速、循环性能好，但工作温度低，储氢容量有限^[16]；后者储氢容量大，但需低温高压条件，且材料的制备工艺与稳定性仍待提升^[17]。化学储氢则通过材料与氢气反应实现，主要有金属基材料(如 Mg₂Ni)和配位氢化物(如 NaAlH₄)。金属基材料成本低、储放氢可逆，但循环稳定性差；配位氢化物理论储氢量高，但存在放氢动力学差、产物不纯等问题^[17]。总体而言，储放氢动力学缓慢、容量衰减(约 0.5%/次)及部分材料成本高等瓶颈，制约了该技术在大规模、长距离氢储运场景中的应用。

1.3 液态氢储运技术

1.3.1 液氢储运

液氢储运是将氢气深冷至 -253℃ 以下液化，并储存于真空绝热容器中实现运输^[18]。尽管液氢储运可参考液化天然气储运，但仍面临若干挑战：液化能耗高，约占氢气能量 30% 以上；储运过程存在蒸发损失(每天 0.1%~1%)；低温下储氢装备易发生氢致脆裂^[19]。因此，该技术领域未来仍需关注新型低能耗液化工艺、蒸发气智能回收技术及耐低温复合材料等方面的研究，以提升整体能效与安全性。

1.3.2 液氨氢储运

氨作为氢载体，具备储氢密度高(质量分数 17.6%)、易液化及合成与储运产业链成熟等优势^[19]，其瓶颈主要在放氢环节。氨催化热解制氢需在 800~850℃ 下进行，能耗高；氨电解制氢技术尚处于示范阶段^[20]。此外，传统氨合成过程碳足迹较高，储运中还存在氨逃逸风险。基于此，该技术未来应遵循“低碳合成-高效转化-终端应用”路径，一是开发低碳/零碳合成技术；二是通过反应器设计与催化剂优化降低氨分解能耗^[21]；三是推动氨的直接终端应用，如三菱重工开发的氨-氢混合

燃烧轮机^[22]。

1.3.3 有机液体氢储运

有机液体(LOHC)氢储运技术基于不饱和有机物与氢气之间的可逆加/脱氢反应实现氢的储放，载体在常温常压下为液态，可直接利用现有石油产品储运基础设施^[23-24]，具有安全性高、载体可循环等优势，被视为实现氢能大规模、长距离输送的潜在技术路线之一^[25]。目前，主流的有机液氢载体可分为芳烃与含氮杂环两类，芳烃类化合物储氢密度高、原料易得，是最早被提出的储氢载体之一，已有商业示范，以甲苯/甲基环己烷(toluene/methylcyclohexane, TOL/MCH)和二苄基甲苯/全氢二苄基甲苯(dibenzyltoluene/perhydro-dibenzyltoluene, DBT/H₁₈-DBT)为代表。前者在 2019 年已实现了从文莱到日本跨洋运输氢气的商业化示范，但因 TOL 沸点较低，以气态形式参与反应，增加了系统的复杂性^[26]；后者则因 DBT 载体出色的热稳定性(-30~360℃ 为液态)与安全性，被德国 Hydrogenious Technologies 公司成功商业化，连续加氢装置单台产能达 500 kg H₂/h，脱氢催化剂寿命突破 5000 小时。含氮杂环可降低有机液体脱氢焓和脱氢温度，但增加 C—N 键断裂、烷基转移和歧化等副反应的发生；若氮原子上连接有甲基/乙基，则会因几何效应而减少副反应发生。故 *N*-乙基咔唑/全氢 *N*-乙基咔唑(*N*-ethylcarbazole/perhydro-*N*-ethylcarbazole, NEC/H₁₂-NEC) 成为目前最受关注的含氮杂环类储氢载体，缺点是其储氢量较低，价格昂贵，载体投资大。

氢储运过程中，有机液体因其相态存在运输优势。而储放氢环节中加氢是放热、体积减小的过程，较为容易实现，Pt、Pd、Rh、Ru 等贵金属是常用的加氢催化剂，可实现完全加氢；非贵金属如 Ni 活性较差。脱氢是强吸热、分子数增加的反应，需在高温下进行，导致高能耗、副反应及催化剂稳定性降低，是当前有机液体氢储运技术的主要瓶颈。Pt 因其活化 C—H 键断裂能力强而活化 C—C 键断裂能力弱，常用于芳烃脱氢^[27]；而 Pd 对含氮杂环体系表现更优^[28]。研究者们对催化剂进行了一系列改性以降低有机液体脱氢温度，提高脱氢活性与选择性，如调控载体比表面积、表面酸性和表面官能团，以增加活性金属的分散度、调控活性金属电子密度、强化氢溢流效应^[29-31]；引入第二金属形成双金属合金结构调控活性位点的电子结构和几何

环境^[32]；对催化剂进行热处理增强负载金属的稳定性^[27]。

未来该技术的突破依赖于载体、催化剂与系统工艺的协同创新：在载体层面，需借助AI辅助分子设计与理论计算预选，开发兼具高储氢量、低脱氢能耗和适宜物理性质的新分子，如谷歌DeepMind的GNoME模型预测了包括储氢材料的数百万种新材料，大幅缩短研发周期^[33]；在工艺层面，通过反应器优化、催化剂创新和系统热集成管理来降低整体能耗；最终将有机液体氢储运技术整合进一个智能、高效的氢能输配网络，支撑跨区域氢能贸易与规模化应用。

管道输氢、液氢、液氨、有机液体氢储运技术均具有实现大规模、长距离氢储运的潜力。管道初始投资巨大、灵活性差，受地理和政策规划限制严

格；液氢液化能耗高昂，对储运设备的绝热性能要求极高，且存在持续的氢气蒸发损失问题；液氨具有毒性，分解能耗高，运输过程存在氨逃逸风险，存在安全、成本及环保方面问题。相较而言，有机液体储氢密度低于液氢、液氨，但在加脱氢能耗、运输及安全方面有较好优势，且其可直接利用现有燃油储罐、管道及运输槽车等设施，仅需进行适度改造与材质兼容性验证^[23-24]。由于有机液体氢储运技术核心成本与其储氢介质物化特性及其加/脱氢反应性能密切相关，本研究分析计算了TOL/MCH、NEC/H₁₂-NEC、DBT/H₁₈-DBT三种代表性有机液体的氢储运成本，并与其他氢储运技术如管道气氢、液氢、液氨的氢储运成本进行横向比较与适用场景分析以明确各技术的定位与经济适用边界，见表1。

表 1 不同氢储运技术对比
Table 1 Comparison of different hydrogen storage technologies

技术类型	关键参数	储氢容量	优势	挑战
高压储氢 ^[3-12, 34-36]	35 MPa	18 kg/m ³	技术成熟	体积储氢密度低
	70 MPa	39 kg/m ³	储氢密度增加	安全风险高，耐压容器要求高
管道输氢 ^[6, 13-15]	4~10 MPa	—	大规模输氢成本低	管道材质要求高，固体投资高，灵活性差
固态储氢 ^[16-17, 33, 37]	碳基材料	1.2%~8.9%	储氢简单快捷、安全性高	储放氢条件苛刻、速率低，循环稳定性差
	MOF 材料	1.89%~7.2%	储氢量高	储放氢条件苛刻，技术成熟度不足
	金属基储氢材料	0.1%~6.7%	材料成本较低，储放氢可逆	循环稳定性较差、储放氢条件苛刻
	配位氢化物	4%~10%	理论储氢量高	放氢动力学性能差，产物不纯
液氢储运 ^[16-19]	T≤20 K	70.8 kg/m ³	储氢容量高，状态稳定	液化能耗高，蒸发损失
液氨氢储运 ^[19-22]	NH ₃	17.6%	储氢容量高	毒性，运输过程氨逃逸
有机液体氢储运 ^[25, 34, 38]	TOL/MCH	47.4 kg/m ³	储氢密度高 便于储存和运输	加脱氢过程发生相变
	NEC/H ₁₂ -NEC	58 kg/m ³		载体单价高
	DBT/H ₁₈ -DBT	57 kg/m ³		脱氢速率慢、温度高

2 三种有机液体氢储运成本分析

2.1 氢储运成本计算方法

三种有机液体氢储运成本可分为两个模块，即加脱氢成本和运输成本。计算中选取5吨/天、50吨/天和500吨/天三个氢储运规模，分别对应示范项目或区域中小型供氢、城市或工业园区供氢和跨区域的大规模供氢场景。

2.1.1 加脱氢成本

加脱氢成本包括加脱氢能耗、加脱氢设备投资、载体损耗及加脱氢运维成本。加脱氢能耗由氢气压缩能耗、预热冷却能耗、反应能耗组成，用公

式(1)计算，其中压缩能耗参考Eberle等^[45]的研究，反应物和产物的预热冷却、加脱氢反应能耗根据加/脱氢各阶段温度和反应焓计算，以上数据见表2、表3，考虑我国氢源多分布在“三北”地区，年平均温度接近0℃，故将其设为加氢起始温度。加脱氢设备投资采用公式(2)计算，参考规模与投资见表3，设备使用寿命按20年计，为反映规模经济效应，引入比例因子进行成本修正^[40]。载体损耗指在加脱氢反应中因发生副反应而损耗的载体成本，每次加脱氢载体损耗设为0.01%，载体价格见表2，采用公式(3)计算。加脱氢运维成本由加脱氢人力成本和加脱氢维护成本组成，人力成本基于行

业平均薪资(8000 元/月)计算, 维护成本依据工程经济学惯例, 按加脱氢设备投资的 3% 估算。

$$OC_q = [Q_c + (HU + CU)(1 - \eta)]W_{Hd} \times 1000 \times 365 \quad (1)$$

$$IE_x = C_0 \left(\frac{S_x}{S_0} \right)^\alpha / i \quad (2)$$

$$OC_m = \frac{W_{Hd}}{W_h} 0.01\% \times P_m \times 365 \quad (3)$$

式中, OC_q 为年氢气加脱氢能耗成本, 元/年; Q_c 为氢气压缩能耗成本, 元/kg; HU 为热集成前氢

气加脱氢热公用工程能耗成本, 元/kg; CU 为热集成前氢气加脱氢冷公用工程能耗成本, 元/kg; η 为系统热集成效率; W_{Hd} 为日储氢理论值, 吨/天; S_0 为参考规模, 300 吨/天; C_0 为参考设备投资费用, 5.84×10^8 元; S_x 为设计规模, 300 吨/天; IE_x 为设计规模加脱氢设备年化投资费用, 元/年; α 为比例因子, 取 0.6; i 为项目周期, 20 年; OC_m 为年载体损耗成本, 元/年; W_h 为载体质量储氢密度; P_m 为载体单价, 元/吨。

表 2 三种有机氢载体的物化数据

Table 2 Physicochemical data of three liquid organic hydrogen carriers

分类	甲苯/环己烷 ^[34]	二苄基甲苯/全氢二苄基甲苯 ^[34, 39]	N-乙基咔唑/全氢 N-乙基咔唑 ^[34, 39]
能量密度/(kWh/L)	1.6	1.9	2.5
富氢/贫氢载体熔点/℃	-127/-95	<-50/-39	-85/65
富氢/贫氢载体沸点/℃	101/111	371/388	271/166
加/脱氢反应焓/(kJ/mol H ₂)	68.3	64.5	50.6
脱氢温度/℃	>300	260-310	140~220
毒性	低毒	无毒	刺激性
易燃易爆性	易燃	非爆炸性	—
介质成本/(元/吨) ^①	6000	21000	320000

注: ①介质成本来源于布克化工网。

表 3 三种储氢体系加脱氢反应相关数据

Table 3 Data of hydrogenation and dehydrogenation for three liquid organic hydrogen carriers

储氢体系	加氢压力/MPa	氢气压缩能耗 ^[40] /(MJ/kg H ₂)	加氢各段温度/℃			脱氢各段温度/℃			热集成效率 η / % ^[39]	参考规模 ^[39] /(吨/天)	参考投资 ^[39] /万元
			起始	反应	冷却	起始	反应	冷却			
TOL/MCH	2	5.1	0	170 ^[41]	50	20	360 ^[42]	50	72.5	300	58400
NEC/H ₁₂ -NEC	6	7.1	0	120 ^[43]	50	20	200 ^[44]	50	66.7	300	58400
DBT/H ₁₈ -DBT	3	6.0	0	200 ^[39]	50	20	270 ^[39]	50	80	300	58400

2.1.2 运输成本

有机液体采用罐车陆运与船舶海运。陆运采用油罐车运输(罐体容积 30.4 m³, 载重 20.4 吨)。陆运运输距离选择 200~1500 km, 分别对应省级或城市群内部供氢(200~500 km)、跨省/跨经济区供氢(500~1200 km)和国际/特定大陆走廊供氢(1200 km 及以上)。陆运成本由陆运设备投资、燃料成本、陆运运维成本组成。陆运设备投资即罐车采购费用, 用公式(4)计算; 燃料成本用公式(5)计算; 陆运运维成本包括人力和维护成本, 计算方法与加脱氢运维费用相同。

$$IE_c = \frac{W_{Hd}}{M/t} \times \frac{i}{n} \times P_c / i \quad (4)$$

$$OC_f = \frac{W_{Hd} \times 365}{M} \times D \times f_0 \quad (5)$$

式中, IE_c 为陆运设备年化投资, 即购车费用,

元/年; M 为运输设备单次载氢量, 吨; t 为单次运氢时间, 天; n 为罐车寿命, 10 年; P_c 为罐车单价与残值之差, 4.47×10^5 元/辆; OC_f 为年燃料成本, 元/年; D 为往返路程, km; f_0 为车辆单位运输距离燃料成本, 2.4 元/km。

海运采用油轮运输(载重 27300 吨, 容积 30283 m³, 油耗 20 吨/天, 航速 14 节/时)^[46]。海运运输距离选择 1000~10000 海里, 分别对应区域短途海运(1000~3000 海里)、跨洋中等距离氢能贸易(3000~5000 海里)和全球氢能贸易路线(7000~10000 海里)。海运运输成本可分为固定成本和航运成本^[47], 固定成本包括船只租赁费、港口费等, 按总运输成本的 60% 计算, 航运成本包括燃料费、人力成本、维护成本等, 其中燃料费按航运成本的 70% 计算, 海运运输成本采用公式(6)计算。

$$OC_s = \frac{f_0 \times \frac{D}{M}}{0.4 \times 0.7} \times W_{H_2} \times 365 \quad (6)$$

式中, OC_s 为海运年氢气运输成本, 元/年。

2.1.3 氢储运平准化成本

将加脱氢成本和运输成本的总和分摊到整个项目周期(20年)内的单位质量氢气上, 采用公式(7)计算氢储运平准化成本, 加脱氢和运输各单项成本也采用此法进行平准化处理。

$$LC_{H_2} = \frac{\sum (IE_i + OC_i)(1+r)^{i-1}}{\sum [365 \times CF \times W_{H_2} \times (1-H_{2,loss})]} \quad (7)$$

式中, LC_{H_2} 为氢储运平准化成本, 元/kg; IE_i 为年化总设备投资成本, 元/年; OC_i 为年总运行成本, 包括加脱氢能耗、载体损耗、加脱氢运维费、陆运/海运运输成本(不包含陆运设备投资), 元/年; r 为折现率; CF 为实际产量与理论产量之比, 取 0.95; $H_{2,loss}$ 为氢气日损, 加脱氢过程损耗与载体相同, 0.01%/次, 运输过程损耗不计。

2.2 结果与讨论

2.2.1 三种有机液体氢储运经济性分析

TOL/MCH、NEC/H₁₂-NEC 和 DBT/H₁₈-DBT 三种体系随储运规模、运输距离、运输方式的氢储运平准化成本分析结果如图 1 所示, 网格部分是加脱氢平准化成本, 剩余部分则是运输平准化成本。储运规模、运输距离、载体种类、运输方式对氢储运平准化成本的单因素影响规律如下: 储运规模越大, 氢储运平准化成本越低; 运输距离越大, 氢储运平准化成本越高; 三种有机液体中, DBT/H₁₈-DBT 体系氢储运平准化成本最低, 其陆上氢储运平准化成本较 TOL/MCH 体系、NEC/H₁₂-NEC 体系低 14%~28%、19%~34%; 海运则分别低 19%~30%、11%~32%; 海运的氢储运平准化成本低于陆运。

成本构成与关键参数的关联分析表明, 储运规模、运输距离、载体种类、运输方式四个因素通过影响各单项成本进而影响氢储运平准化成本。其中, 氢气的加脱氢平准化成本仅由储氢规模和载体种类决定。加脱氢设备平准化成本随规模扩大呈非线性骤降: 当储氢规模从 5 吨/天增至 50 吨/天时, 三种有机液体设备平准化成本下降幅度均超过 60%, 而从 50 吨/天增至 500 吨/天时, 该下降幅度仅在 35% 左右, 对应的维护平准化成本也随加脱氢设备平准化成本降低而降低。储氢规模在 50 吨/

天及以上时, 加脱氢设备平准化成本在氢储运平准化成本中占比低于 10%, 从一项关键成本因素退居次要地位。而加脱氢能耗平准化成本是加脱氢平准化成本的主导因素, 由有机液体加脱氢条件及反应焓即载体种类决定, 因此表现出显著的规模刚性。DBT/H₁₈-DBT 体系加脱氢能耗平准化成本最低, 主要归因于三方面: 其一, DBT 质量储氢密度最大 (6.2%), 减少了单位氢气所需载体质量, 直接降低加脱氢公用工程能耗; 其次, DBT/H₁₈-DBT 加脱氢过程无相变, 规避了相变潜热损失; 同时宽液态、无相变的优异物化性质, 以及较高的反应焓更易匹配高品质热源与冷源, 导致 DBT/H₁₈-DBT 具有最高的热集成效率。载体损耗由有机液体加脱氢固有损耗决定, 三种有机液体中 NEC/H₁₂-NEC 因其质量储氢密度最低 (5.8%), 且单价高昂, 致使其载体损耗显著高于 DBT/H₁₈-DBT、TOL/MCH 体系。加脱氢各单项平准化成本受储氢规模、载体种类的影响分析指明了有机液体技术加脱氢过程的降本路径: 有机液体适合大规模氢储运, 小规模时可通过扩大规模来降低加脱氢设备平准化成本, 而中等规模以上则需要通过催化剂与储氢介质等技术创新来突破加脱氢能耗与载体损耗的固有限制。

运输平准化成本不受规模大小影响, 仅由运输距离、载体种类、运输方式决定。运输距离深刻影响有机液体氢储运平准化成本构成: 在短距离场景下, 加脱氢平准化成本在氢储运平准化成本占主导; 而随着距离增加, 运输平准化成本近似线性关系增加, 并最终占据主导地位, 当距离由 200 km 增加到 1500 km 时, 加脱氢平准化成本占比从 77.99%~83.30% 下降至 31.13%~44.26%, 而陆运运输平准化成本则从 16.70%~22.01% 提高到 56.74%~69.87%。相较而言, 海运运输平准化成本对距离敏感性弱于陆运, 这主要是由于大型船舶对运输成本中燃料及运维成本的高效摊薄, 削弱了距离导致的运输成本增长。在运输规模为 50 吨/天时, 1000 海里的氢储运平准化成本与陆运 200 km 相当。与陆运相比, 海运更适合大规模、长距离的氢储运。其中, DBT/H₁₈-DBT 体系的运输成本最低, 对于 50 吨/天的储氢规模, 陆运和海运百公里/海里的运输成本分别为 0.595 元、0.167 元, 低于 TOL/MCH 和 NEC/H₁₂-NEC 体系, 且海运运输成本比陆运运输成本低 1/3。不同有机液体在陆运、海

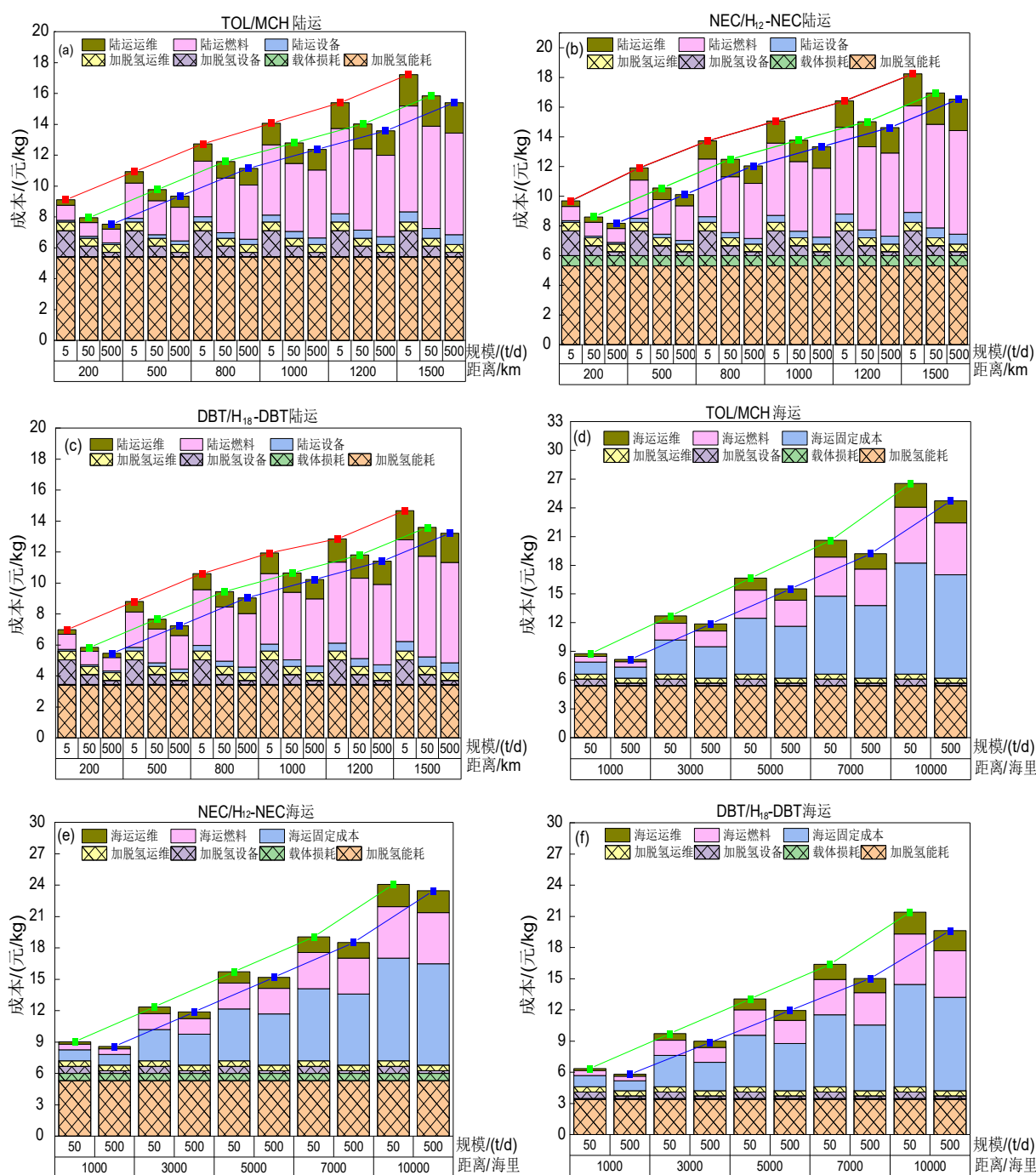


图1 三种有机液体的氢储运平准化成本: (a)~(c) 三种有机液体陆运; (d)~(f) 三种有机液体海运

Fig. 1 Levelized cost of hydrogen storage and transportation for three liquid organic hydrogen carriers: (a)~(c) Land transport for the three LOHC; (d)~(f) Maritime transport for the three LOHC

运场景下的竞争力差异, 取决于载体物化性质与运输方式的匹配度。DBT/H₁₈-DBT 凭借其高储氢质量密度(6.2%)与高体积密度(57 kg/m³), 在质量和体积双重维度上均可实现高效运输, 表现出全面的适应性。因此, 未来构建全球化氢能供应链应优先选择 DBT/H₁₈-DBT 这类物化性能优异的载体, 以实现经济效益的最大化。

综合分析表明, DBT/H₁₈-DBT 体系氢储运平准化成本最低且在全规模段展现出优异的成本稳定性, 是理想的储氢载体。

2.2.2 三种有机液体氢储运平准化成本敏感性分析

为评估计算时关键参数的波动对氢储运平准化成本的影响, 选取四个参数进行敏感性分析: 有机

液体载体损耗、加脱氢设备服役时间、加脱氢能耗及燃料成本, 前两者代表系统固有的材料与设备特性, 后两者反映加脱氢及运输过程中的能源消耗因素, 共同构成了有机液体系统从固定资产投资到日常运营的核心成本维度。在中等储氢规模与运输距离场景(储运规模为50吨/天, 陆运1000 km与海运3000海里)下, 对各参数进行 $\pm 20\%$ 的波动分析, 结果如图2所示。分析表明, 加脱氢能耗与燃料成本为高敏感因子, 其 $\pm 20\%$ 波动将导致氢储运成本产生 $\pm(5\% \sim 10\%)$ 变动; 而载体损耗与设备服役年限则为低敏感因子, 同等波动下成本变化幅度低于 $\pm 2\%$ 。这一结果凸显出工艺能耗控制与燃料成本控制在成本优化中的核心地位。载体损耗对DBT/ H_{18} -DBT、TOL/MCH体系的氢储运平准化成本的影响

甚微, 对NEC/ H_{12} -NEC体系影响相对显著(约 $\pm 1\%$), 反映出不同载体的价格差异。加脱氢设备使用年限直接影响加脱氢设备平准化成本, 相较于延长年限, 设备使用年限缩短对成本的影响更为突出, 其原因在于设备使用年限的缩短会显著增加设备的年化成本, 而使用年限延长带来的成本摊薄遵循收益递减规律, 表明设备耐久性与可靠性对项目经济性的保障作用尤为关键。尽管所有有机液体体系均对加脱氢能耗较为敏感, 但DBT/ H_{18} -DBT表现出相对最低的敏感性, 显示出其在应对能源价格波动方面具备优势。此外, 燃料成本对氢储运平准化成本的影响随运输距离增加而增大, 但海运模式(3000海里)受燃料成本的影响程度弱于陆运(1000 km), 反映出不同运输方式在成本结构方面的差异。

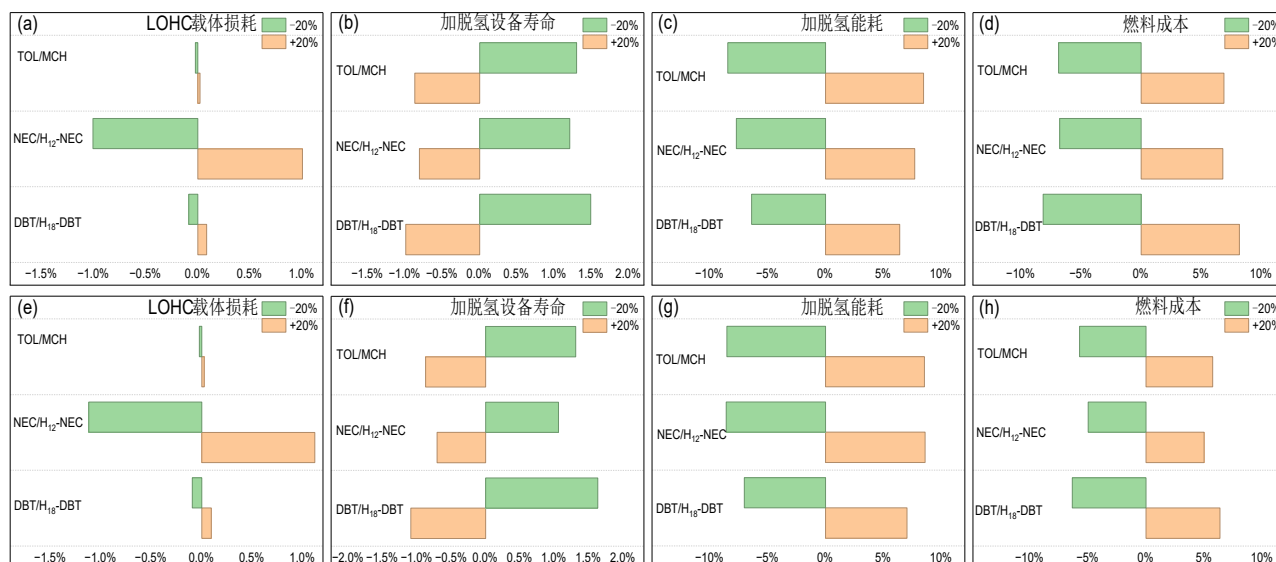


图2 三种LOHC陆上、海上氢储运平准化成本敏感性分析: (a)~(d) 陆运敏感性分析; (e)~(h) 海运敏感性分析
Fig. 2 Sensitivity analysis of land-based and maritime levelized cost of hydrogen storage and transportation for three LOHCs: (a)~(d) Land transport sensitivity analysis; (e)~(h) Maritime transport sensitivity analysis

上述分析结果从敏感性维度揭示了有机液体氢储运成本的关键驱动因素: 工艺能耗与燃料成本构成主要变动风险, 而载体损耗与设备寿命的影响相对有限。该结论进一步明确了技术优化的重点方向——应通过催化体系与工艺创新持续降低加脱氢能耗, 并依托运输方式优选与物流策略调整以控制燃料成本, 从而系统提升有机液体氢储运路线的经济竞争力与市场适应性。

2.2.3 氢储运技术成本比较与适用场景分析

为明确各氢储运技术的市场定位与经济性适用边界, 表4列出了DBT/ H_{18} -DBT体系与高压气氢、

固态储氢、液氢、液氨及管道输氢等主流氢储运技术的平准化成本对比。

在区域中小规模供氢场景(如10吨/天)中, DBT/ H_{18} -DBT体系展现出优异的成本稳定性, 随着运输距离从50 km延伸至1000 km, 其氢储运平准化成本由5.6元/kg平缓上升至11.3元/kg, 在200 km及以上的氢储运场景中显著优于距离敏感性极高的高压气氢。从成本构成来看, 在50 km的基准距离下, DBT/ H_{18} -DBT、固态储氢、液氢、液氨四种技术的氢储运平准化成本可近似为其加脱氢平准化成本, 分别为5.6元/kg、9.8元/kg、11.4元/kg、

15.2 元/kg，固态储氢因实际应用中储氢密度低而运输成本最高，虽然液氢、液氨因储氢密度较高而在运输环节具备一定成本优势，但 DBT/H₁₈-DBT 体系在总成本控制上表现更好，即便在 1000 km 的长距离运输中，仍保持明显的经济性优势，确立了其在中短途、中小规模氢能供应中的经济优势。

表 4 不同技术的氢储运平准化成本
Table 4 Levelized cost of hydrogen storage and transportation for different technologies

氢储运技术	距离/km										
	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
20 MPa ^[22] 气氢	—	7.6	11.3	15.1	17.8	22.1	—	—	—	—	—
30 MPa 气氢 ^[6] (10 t/d)	5.1	6.8	10.5	14.1	17.6	21.2	24.7	28.2	31.8	35.5	39.0
镁基固态储氢 ^[6] (10 t/d)	9.8	10.1	11.2	12.1	13.1	14.0	14.9	15.8	16.7	17.6	18.7
液氢 ^[6] (10 t/d)	11.4	11.5	11.7	12.1	12.3	12.5	12.9	13.1	13.3	13.6	13.8
液氢 ^[40] (20 t/d)	—	—	5.71	—	6.06	—	6.42	—	7.13	—	7.85
DBT/H ₁₈ -DBT(10 t/d)	5.6	5.9	6.5	7.1	7.7	8.4	8.9	9.5	10.2	10.7	11.3
LOHC ^[40] (20 t/d)	—	—	7.13	—	8.92	—	10.71	—	12.49	—	14.27
液氨 ^[6] (10 t/d)	15.2	15.3	15.5	15.9	16.1	16.3	16.6	16.8	17.0	17.4	17.6
管道气氢 ^[40] (20 t/d)	—	—	15.7	—	28.56	—	42.83	—	58.55	—	78.53
管道气氢 ^[6] (177 t/d)	25% 利用率	—	—	4.3	—	8.1	—	11.9	—	15.8	—
	50% 利用率	—	—	2.4	—	4.3	—	6.2	—	8.1	—
	75% 利用率	—	—	1.7	—	3	—	4.3	—	5.6	—
	100% 利用率	—	—	1.4	—	2.4	—	3.3	—	4.3	—
	DBT/H ₁₈ -DBT(177 t/d)	4.7	5.0	5.6	6.2	6.8	7.4	8.0	8.6	9.2	10.4
DBT/H ₁₈ -DBT(177 t/d, 海运)	—	—	4.56	—	4.73	—	4.89	—	5.06	—	5.23

注：为保持与其他研究数据的可比性，表中 DBT/H₁₈-DBT 体系的成本数据系选取部分相同规模，采用本方法计算得出。

管道输氢的核心优势在于随着规模扩大，单位氢气的运输成本随基础设施投资成本被摊薄而大幅降低，因此输送规模和管道利用率是其氢储运平准化成本的决定性因素。当规模从 20 吨/天提升到 177 吨/天，氢储运平准化成本可降低 90% 以上，在大规模(177 吨/天)、管道利用率超过 50% 的场景下，管道在 1000 km 以内的中短途氢储运平准化成本显著低于其他陆运技术，但当距离超过此阈值后，优势逐渐减弱。然而，管道的高沉没成本特性决定了它仅适用于需求稳定、规模巨大的“能源主干网”。DBT/H₁₈-DBT 体系则在海运场景中展现出卓越的距离适应性，在大规模氢储运场景(177 吨/天)中，其氢储运平准化成本从 200 km 至 5000 km 仅增长 82%。即使在面对 100% 管道利用率时，DBT/H₁₈-DBT 体系在超过 1000 km 的长距离运输中仍展现出经济竞争力。由此可见，管道输氢仅适用国内或邻国间 1000 km 以下稳定的大规模氢储运，更长距离的大规模氢储运场景，有机液体海运更具经济性。

从成本构成角度分析，DBT/H₁₈-DBT 体系在加脱氢环节的成本显著低于固态储氢、液氢液化和液

氨的合成/裂解所需设备与能耗成本。即使在经济性较差的陆运模式下，其对距离的敏感性仍远低于高压气氢和固态储氢，在海运模式下，其敏感性甚至低于大规模、100% 利用率的管道输氢。独特的成本特性使得 DBT/H₁₈-DBT 在多个规模与距离区间均显示出优势，展现出较高的普适性。

3 结 语

本研究系统综述了现有氢储运技术的研究进展，构建了涵盖运输规模、距离、载体种类及运输方式的多参数氢储运成本分析模型，重点对三种典型有机液体的氢储运技术进行了全链条经济性评估，并与其他主流氢储运技术进行了对比分析，得出以下结论：

(1) 高压气态氢储运与固态氢储运因密度或成本限制，主要适用于短途场景。液氨，液氢，管道输氢及有机液体储氢技术则更适宜于长距离、大规模氢储运。液氨运输虽可利用现有基础设施，但氨分解能耗高、有毒性、易泄漏、会毒化燃料电池；液氢虽纯度极高，但高昂的液化成本制约其发展；管道输氢仅适用于大规模固定路线；有机液态氢载

体凭借高储氢密度、可利用现有基础设施及便于安全运输的优势, 最具应用潜力。

(2) 三种有机液体中, DBT/H₁₈-DBT体系氢储运成本在陆运、海运中均展现优势且具有优异的成本稳定性, 在同等储运条件下, 其陆上氢储运平准化成本较TOL/MCH体系、NEC/H₁₂-NEC体系分别低14%~28%、19%~34%, 海运则分别低19%~30%、11%~32%, 是理想的储氢载体。

(3) 氢储运技术路径的选择高度依赖于运输距离与规模: 高压气氢适用于短距离、小规模场景; 管道在1000 km以下、大规模(如177吨/天)且高管道利用率的稳定输送中成本最优; 而DBT/H₁₈-DBT体系则展现出更广泛的适应性, 在中小规模(10吨/天)下成本可控(6.5~11.3元/kg), 在大规模长距离海运(200~5000 km)中成本增幅仅约82%, 成为兼顾灵活性、稳定性与跨区域经济性的理想选择。

参考文献

- [1] 孟翔宇, 陈铭韵, 顾阿伦, 等. "双碳"目标下中国氢能发展战略[J]. 天然气工业, 2022, 42(4): 156-179. DOI: 10.3787/j. issn. 1000-0976.2022.04.015.
MENG X Y, CHEN M Y, GU A L, et al. China's hydrogen development strategy in the context of double carbon targets[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(4): 156-179. DOI: 10.3787/j. issn.1000-0976.2022.04.015.
- [2] BALL M, WIETSCHEL M. The future of hydrogen—Opportunities and challenges[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(2): 615-627. DOI:10.1016/j.ijhydene.2008.11.014.
- [3] 李敬法, 李建立, 王玉生, 等. 氢能储运关键技术研究进展及发展趋势探讨[J]. 油气储运, 2023, 42(8): 856-871. DOI: 10.6047/j. issn.1000-8241.2023.08.002.
LI J F, LI J L, WANG Y S, et al. Research progress and development trends of key technologies for hydrogen energy storage and transportation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(8): 856-871. DOI: 10.6047/j. issn. 1000-8241.2023.08.002.
- [4] MUTHUKUMAR P, KUMAR A, AFZAL M, et al. Review on large-scale hydrogen storage systems for better sustainability[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(85): 33223-33259. DOI:10.1016/j.ijhydene.2023.04.304.
- [5] 冯展博, 孟凡玉. 氢能储运技术优缺点比较分析及未来发展探讨[J]. 能源技术与管理, 2023, 48(4): 30-33. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-9943.2023.04.009.
FENG Z B, MENG F Y. Comparative analysis and future development discussion on hydrogen energy storage and transportation technology[J]. Energy Technology and Management, 2023, 48(4): 30-33. DOI:10.3969/j. issn. 1672-9943. 2023.04.009.
- [6] 张仲军, 金子儿, 曾玥, 等. 我国氢能规模化储运方式经济性分析[J]. 中国能源, 2023, 45(12): 27-37.
ZHANG Z J, JIN Z E, ZENG Y, et al. Economic analysis of large-scale hydrogen energy storage and transportation in China[J]. Energy of China, 2023, 45(12): 27-37.
- [7] GeV scoping study delivers zero emission supply chain for green hydrogen[R]. Australia: Global Energy Ventures, 2021.
- [8] D'AMORE-DOMENECH R, LEO T J, POLLET B G. Bulk power transmission at sea: Life cycle cost comparison of electricity and hydrogen as energy vectors[J]. Applied Energy, 2021, 288: 116625. DOI:10.1016/j.apenergy.2021.116625.
- [9] COMER B, GEORGEFF E, STOLZ D, et al. Decarbonizing bulk carriers with hydrogen fuel cells and wind-assisted propulsion: A modeled case study analysis[R]. Washington: International Council on Clean Transportation, 2022.
- [10] RIVARD E, TRUDEAU M, ZAGHIB K, et al. Hydrogen storage for mobility: A review[J]. Materials, 2019, 12(12): DOI: 10.3390/ma12121973.
- [11] Onboard Type IV compressed hydrogen storage system—Cost and performance status[R]. Washington: U. S. Department of Energy, 2025.
- [12] ZHOU L. Progress and problems in hydrogen storage methods [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2005, 9(4): 395-408. DOI:10.1016/j.rser.2004.05.005.
- [13] 王惠颖. 氢气长输管道技术现状分析[J]. 机电产品开发与创新, 2025, 38(4): 80-82. DOI:10.3969/j.issn.1002-6673.2025.04.025.
WANG H Y. Analysis of the current situation of hydrogen long-distance pipeline technology[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2025, 38(4): 80-82. DOI: 10.3969/j.issn.1002-6673.2025.04.025.
- [14] 陈昌华, 贺杨, 李春洋, 等. 高压加氢闸阀的失效模式分析及研究[J]. 阀门, 2024(8): 990-993. DOI:10.16630/j.cnki.1002-5855.2024.08.006.
CHEN C H, HE Y, LI C Y, et al. Failure analysis and improvement plan of high-pressure hydrogenation gate valve[J]. Chinese Journal of Valve, 2024(8): 990-993. DOI: 10.16630/j. cnki. 1002-5855.2024.08.006.
- [15] Natural Gas with Hydrogen Pipeline Cost Model. Model results and comparative analysis[R]. Washington: U. S. Department of Energy, Office of Fossil Energy and Carbon Management (FECM), 2024.
- [16] 刘晓杰, 刘峻, 韩文杰, 等. 储氢技术研究进展及挑战与机遇[J]. 现代化工, 2025, 45(8): 79-84, 89. DOI: 10.16606/j. cnki. issn0253-4320.2025.08.015.
LIU X J, LIU J, HAN W J, et al. An overview of hydrogen storage technologies: Research progress, challenges, and opportunities [J]. Modern Chemical Industry, 2025, 45(8): 79-84, 89. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.08.015.
- [17] 刘彪, 白海强, 康玲, 等. 固态储氢材料研究进展[J]. 低碳化学与化工, 2025, 50(7): 125-135, 144. DOI: 10.12434/j. issn. 2097-2547.20240373.
LIU B, BAI H Q, KANG L, et al. Research progress on solid hydrogen storage materials[J]. Low-Carbon Chemistry and

- Chemical Engineering, 2025, 50(7): 125-135, 144. DOI:10.12434/j.issn.2097-2547.20240373.
- [18] 吕翠, 王金阵, 朱伟平, 等. 氢液化技术研究进展及能耗分析[J]. 低温与超导, 2019, 47(7): 11-18. DOI:10.16711/j.1001-7100.2019.07.003.
- LYU C, WANG J Z, ZHU W P, et al. Research progress and energy consumption analysis of hydrogen liquefaction technology [J]. Cryogenics and Superconductivity, 2019, 47(7): 11-18. DOI: 10.16711/j.1001-7100.2019.07.003.
- [19] MACHAJ K, KUPECKI J, MALECHA Z, et al. Ammonia as a potential marine fuel: A review[J]. Energy Strategy Reviews, 2022, 44: 100926. DOI:10.1016/j.esr.2022.100926.
- [20] 熊景阳, 贺星, 梁前超. 船舶领域氨制氢技术研究进展[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(11): 18-20, 26. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9730.2023.11.004.
- XIONG J Y, HE X, LIANG Q C. Research progress of ammonia hydrogen production technology in ship field[J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(11): 18-20, 26. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9730.2023.11.004.
- [21] WU C L, JIN Y, FAN Y Y, et al. Membrane reactor supported by MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$) for hydrogen production by ammonia decomposition[J]. Energy & Fuels, 2023, 37(13): 9760-9769.
- [22] 王明华. 氢能储运技术经济性分析及建立绿氢储运基地设想[J]. 现代化工, 2023, 43(6): 1-5. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.06.001.
- WANG M H. Economic analysis on hydrogen energy storage and transportation technologies and tentative plan in establishing a green ammonia storage-transportation base[J]. Modern Chemical Industry, 2023, 43(6): 1-5. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2023.06.001.
- [23] JORSCHICK H, GEIßELBRECHT M, EßL M, et al. Benzyltoluene/dibenzyltoluene-based mixtures as suitable liquid organic hydrogen carrier systems for low temperature applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(29): 14897-14906. DOI:10.1016/j.ijhydene.2020.03.210.
- [24] ABDIN Z, TANG C G, LIU Y, et al. Large-scale stationary hydrogen storage via liquid organic hydrogen carriers[J]. iScience, 2021, 24(9): 102966. DOI:10.1016/j.isci.2021.102966.
- [25] WULF C, ZAPP P. Assessment of system variations for hydrogen transport by liquid organic hydrogen carriers[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(26): 11884-11895. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.198.
- [26] 邢承治, 赵明, 尚超, 等. 有机液体载氢储运技术研究进展及应用场景[J]. 储能科学与技术, 2024, 13(2): 643-651. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0523.
- XING C Z, ZHAO M, SHANG C, et al. Research progress and application scenarios of storage and transportation technology with liquid organic hydrogen carrier[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(2): 643-651. DOI:10.19799/j.cnki.2095-4239.2023.0523.
- [27] 石利斌, 彭东岳, 李云鹏, 等. 有机液体储氢体系以及脱氢催化剂研究进展[J]. 石油学报(石油加工), 2025, 41(1): 89-103. DOI:10.3969/j.issn.1001-8719.2025.01.010.
- SHI L B, PENG D Y, LI Y P, et al. Research progress of liquid organic hydrogen carrier system and dehydrogenation catalysts [J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2025, 41(1): 89-103. DOI:10.3969/j.issn.1001-8719.2025.01.010.
- [28] YANG M, DONG Y, FEI S X, et al. A comparative study of catalytic dehydrogenation of perhydro-N-ethylcarbazole over noble metal catalysts[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(33): 18976-18983. DOI:10.1016/j.ijhydene.2014.09.123.
- [29] ZHOU Y M, QI S T, TAN X, et al. Regulating the Pt dispersion by increasing the specific surface area of Al_2O_3 support for perhydro-dibenzyltoluene catalytic dehydrogenation reaction[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 57: 52-59. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.12.034.
- [30] TUO Y X, MENG Y, CHEN C, et al. Partial positively charged Pt in $\text{Pt/MgAl}_2\text{O}_4$ for enhanced dehydrogenation activity[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2021, 288: 119996. DOI: 10.1016/j.apcatb.2021.119996.
- [31] SHI L B, ZHOU Y M, TAN X, et al. Dielectric barrier discharge plasma grafting carboxylate groups on $\text{Pt/Al}_2\text{O}_3$ catalysts for highly efficient hydrogen release from perhydro-dibenzyltoluene [J]. Catalysis Science & Technology, 2022, 12(5): 1441-1449.
- [32] MURATA K, KURIMOTO N, YAMAMOTO Y, et al. Structure-property relationships of Pt-Sn nanoparticles supported on Al_2O_3 for the dehydrogenation of methylcyclohexane[J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4(5): 4532-4541.
- [33] MERCHANT A, BATZNER S, SCHOENHOLZ S S, et al. Scaling deep learning for materials discovery[J]. Nature, 2023, 624(7990): 80-85. DOI:10.1038/s41586-023-06735-9.
- [34] CHU C Y, WU K, LUO B B, et al. Hydrogen storage by liquid organic hydrogen carriers: Catalyst, renewable carrier, and technology—A review[J]. Carbon Resources Conversion, 2023, 6(4): 334-351. DOI:10.1016/j.crcon.2023.03.007.
- [35] 李默宇, 梁胜彪, 孟庆云, 等. 碳纤维湿法缠绕用高模量高韧性环氧树脂基体[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(2): 72-77. DOI:10.3969/j.issn.1003-0999.2009.02.018.
- LI M Y, LIANG S B, MENG Q Y, et al. Toughness epoxy resin with high modulus for carbon fiber wet filament winding[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(2): 72-77. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0999.2009.02.018.
- [36] 罗渊, 刘强, 王源鑫, 等. 空心玻璃微球储氢研究进展[J]. 功能材料, 2023, 54(6): 6011-6020. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2023.06.002.
- LUO Y, LIU Q, WANG Y X, et al. Recent development of hydrogen storage in hollow glass microspheres[J]. Journal of Functional Materials, 2023, 54(6): 6011-6020. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2023.06.002.
- [37] ARIHARAN A, VISWANATHAN B, NANDHAKUMAR V. Nitrogen-incorporated carbon nanotube derived from polystyrene and polypyrrole as hydrogen storage material[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(10): 5077-5088. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.01.110.
- [38] 王奥诚, 王春雅, 徐春明, 等. 液态有机氢载体体系及其加氢-脱氢催

- 化剂研究进展[J/OL]. 石油学报(石油加工), 2025, 1-18. <https://link.cnki.net/urlid/11.2129.TE.20250616.1432.002>.
- WANG A, WANG C, XU C, et al. Research progress in liquid organic hydrogen carrier systems and their hydrogenation-dehydrogenation catalysts[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2025, 1-18. <https://link.cnki.net/urlid/11.2129.TE.20250616.1432.002>.
- [39] TSOGT N, GBADAGO D Q, HWANG S. Exploring the potential of liquid organic hydrogen carrier (LOHC) system for efficient hydrogen storage and Transport: A Techno-Economic and energy analysis perspective[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 299: 117856. DOI:10.1016/j.enconman.2023.117856.
- [40] RONG Y, CHEN S Y, LI C J, et al. Techno-economic analysis of hydrogen storage and transportation from hydrogen plant to terminal refueling station[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 52: 547-558. DOI:10.1016/j.ijhydene.2023.01.187.
- [41] LINDFORS L P, SALMI T, SMEDS S. Kinetics of toluene hydrogenation on Ni/Al₂O₃ catalyst[J]. Chemical Engineering Science, 1993, 48(22): 3813-3828. DOI: 10.1016/0009-2509(93)80224-E.
- [42] HAMAYUN M H, HUSSAIN M, MAAFA I M, et al. Integration of hydrogenation and dehydrogenation system for hydrogen storage and electricity generation-simulation study[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(36): 20213-20222. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.06.053.
- [43] SHI J M, BAI X F. *In situ* preparation of ultrafine Ru nanocatalyst supported on nitrogen-doped layered double hydroxide by nitrogen glow discharge plasma for catalytic hydrogenation of N-ethylcarbazole[J]. Applied Organometallic Chemistry, 2020, 34(9): e5777. DOI:10.1002/aoc.5777.
- [44] DONG Y, YANG M, ZHU T, et al. Fast dehydrogenation kinetics of perhydro-N-propylcarbazole over a supported Pd catalyst[J]. ACS Applied Energy Materials, 2018, 1(8): 4285-4292.
- [45] EBERLE U, FELDERHOFF M, SCHÜTH F. Chemical and physical solutions for hydrogen storage[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2009, 48(36): 6608-6630. DOI: 10.1002/anie.200806293.
- [46] GODINHO J, HOEFNAGELS R, BRAZ C G, et al. An economic and greenhouse gas footprint assessment of international maritime transportation of hydrogen using liquid organic hydrogen carriers[J]. Energy, 2023, 278: 127673. DOI:10.1016/j.energy.2023.127673.
- [47] RODRIGUE J P. The geography of transport systems[M]. 6th Edition. London: Routledge, 2024.