

绿氨制储输用技术路线研究进展

杜宇峰, 黄 晔, 郑化安, 师铜墙, 陈景润, 张 旭, 张 磊, 吴 磊

(陕西氢能研究院有限公司, 陕西 西安 712046)

摘要:在可持续发展和全球能源转型的背景下,绿氨作为一种关键的“零碳”化工原料和能源载体,其战略地位日益凸显。首先基于国内外认证标准厘清了绿氨定义,然后综述了绿氨在制备、储运和应用三大环节的技术路线及研究进展,以期为后续技术研发和工程示范提供参考。在制备方面,重点剖析了在热化学哈伯-博世(H-B)工艺合成氨中的绿氨原料替代路径、温和条件热催化路径、柔性/小型化系统路径,并探讨了电化学合成氨、光催化合成氨等新兴技术的机理、优势和挑战。在储运方面,对比分析了道路、管道和海洋运输的技术特点和适用场景。在应用方面,深入探究了绿氨作为含氢载体(直接氨燃料电池、氨分解制氢)、零碳燃料(氨氢/氨煤/氨与高活性燃料混合燃烧)和化工原料(氨法碳捕集)的多场景应用潜力、技术瓶颈和成本趋势。最后,总结并展望了绿氨在构建零碳工业体系中的关键作用及其政策需求。

关键词:绿氨合成;可再生能源;低碳发展;氨储运技术;氨能应用

中图分类号:TQ042;TQ113.2 文献标志码:A 文章编号:2097-2547(XXXX)XX-001-17

Research progress on technical routes for green ammonia production, storage, transportation and application

DU Yufeng, HUANG Ye, ZHENG Huaan, SHI Tongqiang, CHEN Jingrun, ZHANG Xu, ZHANG Lei, WU Lei

(Shaanxi Hydrogen Energy Research Institute Co., Ltd., Xi'an 712046, Shaanxi, China)

Abstract: Against the backdrop of sustainable development and the global energy transition, green ammonia, as a key “zero-carbon” chemical feedstock and energy carrier, is gaining increasing strategic importance. First, the definition of green ammonia was clarified based on domestic and international certification standards. Then, the technical routes and research progress of green ammonia in the three stages of production, storage and transportation, and application were reviewed, aiming to provide references for subsequent technological research and engineering demonstration. In terms of production, green hydrogen feedstock substitution pathways, mild-condition thermocatalytic pathways and flexible/miniatuized system pathways in the thermochemical Haber-Bosch (H-B) ammonia synthesis process were systematically analyzed, and the mechanisms, advantages and challenges of emerging technologies such as electrochemical ammonia synthesis and photocatalytic ammonia synthesis were discussed. In terms of storage and transportation, the technical characteristics and applicable scenarios of road, pipeline and marine transportation were comparatively analyzed. In terms of application, the multi-scenario application potential, technological bottlenecks and cost trends of green ammonia as a hydrogen carrier (direct ammonia fuel cells and ammonia decomposition for hydrogen production), a zero-carbon fuel (ammonia-hydrogen/ammonia-coal/ammonia-high-reactivity fuel co-combustion) and a chemical feedstock (ammonia-based carbon capture) were systematically investigated. Finally, the key role of green ammonia in constructing a zero-carbon industrial system and its policy requirements were summarized and prospected.

Keywords: green ammonia synthesis; renewable energy; low-carbon development; ammonia storage and transportation technologies; ammonia energy applications

氨可作为合成活性氮化合物的化学原料,对于地球生命至关重要,是化肥等农业原材料的基础。由于具有较高的氢含量和能量密度,且易于储存和

运输,氨是一种潜在的无碳能源载体。在确保能源安全的同时,氨可以通过各种技术路线减少化工、电力、交通和农业等领域的二氧化碳排放^[1]。在全球能

收稿日期: 2025-11-26; 修回日期: 2025-12-31。

基金项目: 陕西省关键核心技术攻关(2024CY2-GJHX-19)。

第一作者: 杜宇峰(1999—), 硕士, 工程师, 研究方向为固体氧化物电池, E-mail: dyf868@stu.xjtu.edu.cn。

源转型背景下,绿氨凭借其全生命周期近零碳排放和高体积氢密度的特性,成为连接可再生能源与工业脱碳的关键桥梁。根据国际可再生能源机构(IRENA)的定义,绿氨必须满足两个基本条件:一是氢源为绿氢,绿氢必须来自可再生能源电解水;二是合成过程需采用清洁能源供能^[2]。绿氢通常是指在生产过程中及全生命周期内温室气体排放强度极低甚至为零的氢气。当前最主流且被广泛认可的绿氢

生产路径是可再生能源电解水制氢。此外,符合严格碳排放标准的生物质制氢、光解水制氢等也被认为是潜在的绿氢制备途径。不同机构/地区绿氨认证标准见表1。其中主要的认定标准包括:全生命周期碳排放强度、可再生能源环节占比和技术路径限制。我国尚未发布统一的国家标准,但有部分团体标准或行业标准在探讨和实施中,例如中国氮肥工业协会已正式启动《绿色合成氨分级标准》的编制工作^[3]。

表1 不同机构/地区绿氨认证标准

Table 1 Certification standards for green ammonia in different organizations/areas

认证标准	机构/地区	内容	现状
《可再生能源指令》两项授权法案	欧盟	绿氨被定义为可再生燃料(RFNBO),需基于可再生氢生产,可再生氢全生命周期碳排放强度 ≤ 28.2 g/MJ(约3.4 kg/kg)	2023年授权,现已实施
《氢能基本战略》低碳氨绿氨标准	日本 国际绿氢组织(GH2)	全生命周期碳排放强度 ≤ 0.84 kg/kg,涵盖制氢及运输环节 温室气体排放强度 ≤ 0.3 kg/kg(仅限绿氢制绿氨)	2023年发布,现已实施 2023年更新,现执行新标准
《创新展望:可再生氢》	IRENA	必须使用可再生电力生产的氢气和空气中净化的氮气,全流程能源和原料均来自可再生能源,未规定具体碳排放限值	2022年发布,属于指南类型
《绿色合成氨分级标准(草案)》	中国	全生命周期碳排放 ≤ 0.8 t/t,制氢绿电比例为100%	团体标准编制中,尚未形成国家标准

近年来,绿氨相关研究逐渐成为热点,其全产业链技术发展受到学术界和工业界关注。已有研究从不同侧面对绿氨进行了综述。例如,部分研究聚焦于绿氨制备技术,针对传统哈伯-博世(H-B)工艺的高温高压环境(350~500 °C、15~25 MPa),采用铁基催化剂条件进行优化,并将绿氢与电化学合成、光催化合成等新兴路线耦合,以降低H-B工艺的高耗能高污染^[4]。另有研究侧重于绿氨储运环节,甲醇、生物柴油和可持续航空燃料(SAF)的输送成本受体积和距离的影响,相比之下将绿氨作为存储氢气的载体可提升时效^[5],该方式在未来多元可持续低碳交通中将发挥重要的作用^[6]。还有研究探讨了绿氨作为燃料的应用,深入分析了其在船舶、发电等场景的燃烧特性、排放控制,以及发动机改装技术。绿氨的能量密度(18.6 MJ/L)大于氢气(5.6 MJ/L)和甲烷(9.8 MJ/L),辛烷值高,抗震抗爆性能好^[7],已被多种场景规划应用。然而,现有研究多侧重于单一环节,缺乏将制备-储运-应用全链条技术路线进行整合,并贯穿技术现状、瓶颈和产业政策的多维度全景式综述。随着绿氨产业化进程加速,从系统集成视角审视各环节技术路线的协同与权衡需求变得日益迫切。在此背景下,梳理并整合绿氨制储输用全链条技术路线的最新研究进展,对于推动其规模化、商业化发展具有重要指导意义。

本文综述内容主要涉及以下3个方面。第一,突破单一环节限制,概述绿氨制备、储运和应用技术路线的全景视图。全文结构见图1。系统梳理从绿色合成氨(包括热化学H-B合成氨的绿氢原料替代、温和条件催化、柔性/小型化系统路径,以及电化学、光催化等新兴路径)到多元化储运模式(包括道路、管道和海洋运输),再到多场景终端应用(包括氢载体、零碳燃料和化工原料)的完整技术链条,揭示各环节之间的技术关联和系统集成需求。

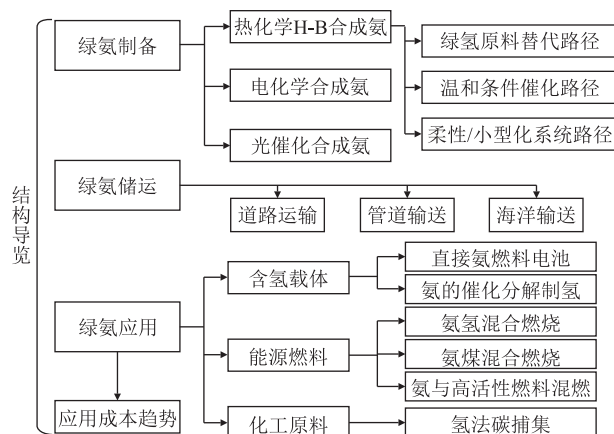


图1 综述结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of review structure

第二,对比分析每个环节不同技术路线的优缺点,根据适用条件匹配应用场景;还对绿氨应用进行成本分析,根据目前研究成果预测未来绿氨的成本走势,为技术路线产业化的优先级判断提供参

考。第三,提出面向产业化的政策和战略展望,根据当前绿氨产业面临的主要挑战,探讨相应的标准制定、基础设施规划和政策激励方向,旨在为相关方提供一个兼顾技术前沿与产业实践的参考框架。

1 绿氨制备技术路线

经典的H-B合成法由于反应条件为高温高压,以及依赖化石燃料(如天然气)经蒸汽重整制氢的

工艺路径,因此其总体能耗和碳排放强度较高,每生产1 kg氨的理论能耗通常在10~13 kW·h^[8]。经过多年发展,绿色合成氨技术逐渐成熟,主要包括热化学H-B合成氨、电化学合成氨和光催化合成氨等,为绿氨制备提供了更多可能路径^[9]。从20世纪初叶至今,随着多相催化的发展和工业应用的推进,合成氨技术不断迭代,以H-B工艺为基础的合成氨催化剂及工艺演进见图2^[10]。

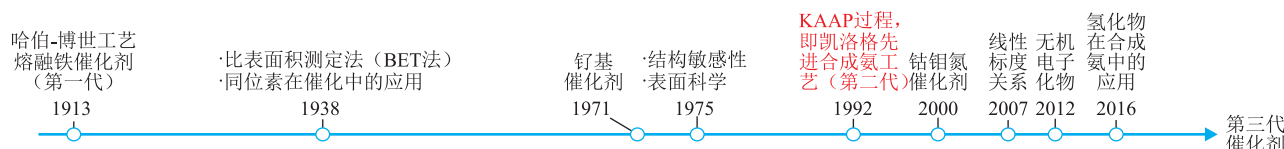


图2 以H-B工艺为基础的合成氨催化剂及工艺演进^[10]

Fig. 2 Evolution of ammonia synthesis catalysts and processes based on H-B process^[10]

绿色合成氨的上游原料主要包括绿电、绿氢和绿氮。绿电是指来自可再生能源的电力,发电过程不需消耗化石燃料,几乎不会产生CO₂等温室气体;绿氢是指利用绿电电解水制得的氢气,我国规定单位绿氢的碳排放量应当小于4.9 kg/kg^[11]。其他来源氢气,在满足全生命周期近零碳排放的要求时,也可纳入绿氢范畴。在现行标准下暂未明确定义“绿氮”,本文认为“绿氮”是指利用绿电驱动空气分离装置,通过物理或化学过程从空气中提取的高纯度氮气。绿氨工艺需要同时满足“零碳源头、高效转化和纯净产品”三重约束,而且不同路线还有特殊要求^[12]。需要指出的是,现有全球合成氨产能的氢源具有显著的地域特征。例如,中东和北美地区制氢主要以天然气为原料,而中国作为全球最大的氨生产国,产能中煤制氢占据了主导地位。绿氨制备的核心变革在于,无论现有基底是何,都需转向以可再生能源驱动的电解水制氢(绿氢)作为唯一合格氢源。以下主要针对传统工艺耦合绿氢、低温低压催化合成、柔性/小型化合成氨、电化学合成氨、光催化合成氨等制备方法进行总结。

1.1 热化学H-B合成氨

1.1.1 绿氢原料替代路径

当前产业化最成熟的路线是在传统H-B工艺基础上耦合绿氢制备,其核心在于绿电与合成系统的动态耦合,绿氢替代是其中的重点,电解水制氢绿色合成氨流程见图3^[13]。电解水制绿氢技术主要包括碱性电解槽(AWE)、质子交换膜电解槽(PEM)、固体氧化物电解槽(SOEC)和阴离子交换膜电解槽(AEM)等;光解水制绿氢技术主要包括光

催化分解水、光电催化分解水和光伏-光电耦合体系;生物质制绿氢技术主要包括热化学法制氢和生物法制氢两大路径^[14]。

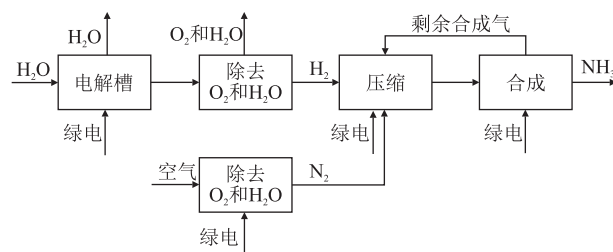


图3 电解水制氢绿色合成氨流程示意图^[13]

Fig. 3 Schematic diagram of green ammonia synthesis process based on water electrolysis for hydrogen production^[13]

电解水制绿氢产业化较为成功,被广泛用于绿氨工厂的建设。LIMA等^[15]将总焓成本作为核心经济性评价指标,该指标是一个综合性度量,其计算范围涵盖了从可再生能源发电、电解水制氢、氮气分离到氨合成的全流程。所有输入的一次能源(以其焓值计量)对应的完全成本通常包括资本支出、运营维护费用和燃料(电力)成本等,并以单位产量氨所消耗的总焓值(MW·h/t)的形式呈现,从而便于从能源品质和系统集成的角度综合评价不同技术路线的理论经济潜力。研究结果显示,在当前阶段、短期(至2030年)及长期(至2050年)3种时间尺度下,耦合绿氢制氨技术的总焓成本在2050年预计介于12.5~32.5 MW·h/t之间;其中水力发电耦合SOEC制氢方案最具吸引力,风力发电耦合PEM制氢次之。BICER等^[16]通过生命周期评估比较了不同供能方式的制氨方法。结果表明,基于水力发电的供能方式具有最高的可持续性指数,焓效率高达46.4%,

相比其他方法对环境更加友好。PAGANI等^[17]介绍了一种新型绿氢制氨系统(荷兰),该系统采用海上风电、加压管存储,以及AEM与PEM结合的柔性制氢等技术,减少碳排放高达50%,其AEM和PEM制氢的平准化成本(H_2 计)分别为43.46 CNY/kg和49.45 CNY/kg。ISHAQ等^[18]提出了一种基于海上风能的绿色氨生产系统的瞬态模型,研究建议采用完全离网的海上地点来生产绿氨。结果表明,海上风电场和电解槽成本分别占总成本的45%和29%。

SUN等^[19]设计了一种结合PEM制氢、从废气中回收氮气和H-B工艺的绿氨生产系统。结果表明,系统模型与工厂数据具有良好的一致性,能源效率达48.8%,等效能耗(NH_3 计)为37.6 GJ/t。

目前我国绿氨工厂建设显著加速,国家能源局公布了《关于开展绿色液体燃料技术攻关和产业化试点工作(第一批)的通知》,其中包括3个绿氨工厂项目(表2)。全国范围内,绿氨项目布局更为密集,这印证了我国绿氨产业已形成规模化发展的雏形。

表2 绿色液体燃料技术攻关和产业化试点项目^[20]

Table 2 Key technology research and industrialization pilot projects for green liquid fuels^[20]

项目名称	实施单位	建设规模/ $\times 10^4$ (t·a ⁻¹)	技术路线
远景零碳技术(赤峰)有限公司152 $\times 10^4$ t/a零碳氨项目(P1期30 $\times 10^4$ t/a合成氨)	远景零碳技术(赤峰)有限公司	30	项目采用大型低压氨合成工艺,依托智能系统进行全域控制,力争实现超低负荷、超宽负荷范围下的运行
中能建松原氢能产业园(绿色氢氨醇一体化)项目	中能绿色氢氨新能源(松原)有限公司	20	项目采用柔性合成氨工艺,利用独创的源网荷储实时平衡技术,可在30%~110%负荷下安全、稳定运行
大安风光制绿氢合成氨一体化项目	国家电投集团大安吉电绿氢能源有限公司	18	项目采用柔性合成氨工艺,利用独创的源网荷储实时平衡技术,可在30%~110%负荷下安全、稳定运行

改良H-B法成为当前规模化生产的重点发展方向,包括开发高效催化剂、推进绿氢原料替代,以及设计负载灵活型工厂等方式^[21]。SINGH等^[22]综述了温和条件下改良H-B法合成绿氨的策略,强调通过调控反应机制和动力学突破进行材料开发、利用可再生能源驱动氮还原,以及通过界面调控、质子传递限制和电解质设计提升效率和产量。SONG^[23]等设计并优化了基于低压H-B技术的电制氨工艺,结合液氨冷却的系统能源效率达到73.75%,绿氨单位电耗低至7.64 kW·h/kg,该设计有助于高效生产并储存绿氨。MACFARLANE等^[24]规划了未来氨经济的路线图,预计未来十年仍将由H-B技术主导,并逐渐通过二氧化碳封存实现工艺优化,耦合绿氢的H-B工厂有望在2030年左右发挥关键作用,而全电化学技术将在2040年左右开始显著发力。

1.1.2 温和条件热催化路径

理论计算的应用推动了在过渡金属(TM)表面低温低压催化合成 NH_3 的发展,为进一步在温和条件下生产,避免传统H-B工艺的苛刻条件,设计新型催化剂^[25]、创新反应机制和优化工艺系统成为研究的重心。使用钌(Ru)基催化剂能够将反应温度控制在300~400 $^{\circ}C$ 、压力降至5~10 MPa,显著提升了催化效率和系统灵活性,且相关参数显著低于传统H-B工艺,但成本较高且存在氢中毒问题^[26]。近期的研究方向主要是通过使用不同载体和促进剂对Ru进行电子或结构修饰,通过调控催化活性中心

的电子和几何结构,优化其对氮气的吸附及活化过程。具体而言,引入特定的金属组分(如Ru、Co和Mo)或构建特殊的活性位点(如B5位点、界面位点),可以调整活性金属的d带电子结构,削弱 $N\equiv N$ 键,或为 N_2 分子侧向配位、端位加氢等提供更加有利的活化路径。此外,通过载体调控(如使用具有强电子给体能力的碱金属/碱土金属修饰的载体)或构建限域纳米结构,可以创造局域电子富集或空间受限的反应微环境,进一步增强对反应中间体的稳定作用,从而在较低的温度和压力下获得较高的氨合成速率和选择性。这些方法能够优化催化过程,实现低温低压催化^[27]。

KLAAS等^[28]综述了4种在温和条件下制氨的方法,包括固态合成、熔盐合成、热化学循环和光催化路线,探究了从 H_2O 和 N_2 出发直接生产氨的可能路线,其中无需生产氢气的中间步骤。结果表明,目前的生产率尚不能满足工业应用需求。LIU等^[29]研究了一种新型微波响应催化剂,采用钌掺杂锶基钙钛矿或碳纳米管制备复合材料,增强了Ru纳米颗粒上的界面反应。结果表明,在300 $^{\circ}C$ 、0.1 MPa条件下, NH_3 产率为1.04 mmol/(g·h),72 h内未出现失活现象。WANG等^[30]探究了双金属催化剂上的反应动力学。结果表明,该催化剂能够将活化能从传统热催化工艺的89 kJ/mol显著降低至43.56 kJ/mol。WANG等^[31]提出了一种由 $H_4SiW_{12}O_{40}(SiW_{12})$ 溶液结合Pt/TiO₂和Ru/C催化剂颗粒组成的协同催化体

系。结果表明,在温度低于 100 °C、氢气压力低于 1 atm (1 atm = 101325 Pa) 的条件下进行氮气的多相加氢反应,可以消除 Ru/C 上的氢中毒。

1.1.3 柔性/小型化系统路径

针对可再生能源间歇性、波动性特点,以及氢气储运难的问题,柔性/小型化合成氨工艺应运而生。柔性合成氨工艺的关键在于通过工艺流程的优化和调控,实现生产过程的宽负荷调整,以适应可再生能源的波动性;进一步地,通过放宽工作温度和压力的限制,使得合成氨装置的小型化、灵活化成为可能^[32]。柔性合成氨技术可从多个方面对制氨过程进行优化,例如开发面向动态运行的绿电耦合化工设计方法,优化催化剂在多稳态工况下的活性可操作区间,开发电-氢-氨综合调控技术。

通过将工艺流程分解为多个柔性制造单元,实现小时级、甚至更小时域尺度上对风光波动的跟随;通过调整弛放气流量、氨分离温度和合成气组分等,能够在生产负荷大范围、高频率波动下实现操作压力的小范围波动;在不大量增加设备投资的情况下,实现设备长期安全可靠运行,降低可再生能源制氨负荷波动对制氢效率和设备安全等的影响^[33]。GOTTHEIL 等^[34]提出了一种使用多向固定床反应器实现负载柔性氨合成的新方法。模拟结果表明,系统可在一个较宽的负荷范围内运行,在 10% 的负荷下也能实现至少 20% 的高氮转化率。PATEL 等^[35]开发了一个柔性绿氨合成模型,用于模拟评估动态进料条件对过程稳定性和操作灵活性的影响。结果表明,每小时 20% 的进料流量斜坡速率受到反应器催化剂热循环的限制。ZHOU 等^[36]比较分析了不同的柔性合成绿氨策略,提出一种稳定灵活的操作策略,与连续柔性工况相比,采用该策略时产氨负荷波动率降低了 79.89%。

1.2 电化学合成氨

电化学氮还原反应(NRR)因其能够在可再生电力驱动下于温和条件下进行,故被视为 H-B 工艺潜在的替代路线^[37]。现有研究主要围绕高温体系 (> 200 °C) 与常温常压体系展开:前者常使用钙钛矿或熔盐电解质来传导质子或氮化物离子,虽可获得较高的法拉第效率和转化率,但对能耗和材料有较高要求^[38];后者直接以水为质子源,避免了单独制氢步骤,理论上具备更优的能量效率,相关过程涉及 N₂ 在催化剂表面的吸附、解离及逐步加氢。电化学固氮合成氨的过程见图 4。由图 4 可知,在金属原子表面, N₂ 分子解离成单个 N 原子,并逐步与 H 原

子结合形成 NH₃。

当前研究聚焦于在温和条件下提升 NRR 的效率和选择性,其核心挑战包括抑制竞争性析氢反应(HER)、调控反应路径以提高 NH₃ 选择性,以及认识多电子转移过程中的中间体行为^[40]。为此,常用策略包括优化电解质物化性质、设计高效催化剂(如贵金属、非贵金属及非金属材料),并通过缺陷工程、杂原子掺杂、表面功能化和界面工程等手段调控催化剂电子结构,以促进氮活化并抑制 HER,而后续将进一步探索催化分子和先进材料的优化手段^[41]。近年来,相关文献不仅报道了具体进展,还逐步形成了清晰的研究脉络。LI 等^[42]通过大数据分析发现,常温 NRR 已成为主流方向,而催化剂创新仍是重点。CUI 等^[43]指出尽管在催化剂设计方面已取得进展,但其在 NRR 整个电化学系统中的合理设计仍需改进,且实际应用仍面临严峻挑战。KATAYAMA 等^[44]利用疏水性离子液体提升 NH₃ 产率,发现局部微环境调控和分子修饰可以进一步提升系统效率。LIU 等^[45]指出当前 NRR 研究缺乏统一标准,导致结果难以复现,呼吁建立针对 NRR 催化剂活性的标准化实验协议。WANG 等^[46]则提出结合仿生纳米材料与原位表征技术推动 NRR 的理性设计。

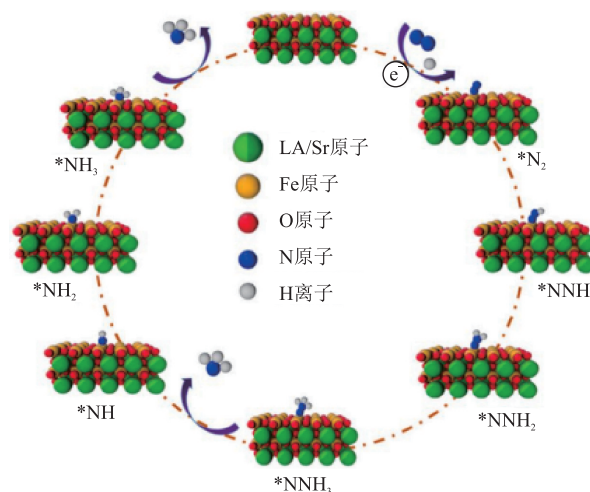


图 4 电化学固氮合成氨示意图^[39]

Fig. 4 Schematic diagram of electrochemical nitrogen fixation for ammonia synthesis^[39]

综上,NRR 研究已从初期广泛探索发展到对“效率-选择性-稳定性”协同优化的深层次攻关。对本文而言,后续研究需着重从以下维度展开:一是系统梳理 NRR 技术瓶颈,揭示其活性-选择性的制约因素,尤其是 HER 竞争机制和中间体调控策略;

二是突出标准化和可重复性的重要性,正确认识实验规范、数据验证和协议统一对未来研究的关键作用;三是强化从实验室到应用的总体视角,客观分析当前NRR在能效、规模放大和长期稳定性等方面的实际问题,并指出未来走向产业化的可能技术路径。

1.3 光催化合成氨

光催化合成氨直接利用太阳能光子或等离子体驱动 N_2 和 H_2O 转化为 NH_3 ,无需制氢中间步骤,是一种极具前景的绿氨制备技术^[28]。与电化学NRR相比,其反应动力学通常较慢,且面临光吸收范围窄、载流子复合迅速、HER竞争激烈和规模化困难等挑战。从工业应用角度考虑,当前催化剂的产率仍然较低,难以高效利用全光谱能量和提高总体产量,难以在合适的反应器系统中放大^[47]。光催化过程主要包括光吸收激发载流子、电子-空穴对分离与迁移、表面反应位点 N_2 活化,以及吸收水源中的质子形成 NH_3 ,详细过程见图5^[28]。

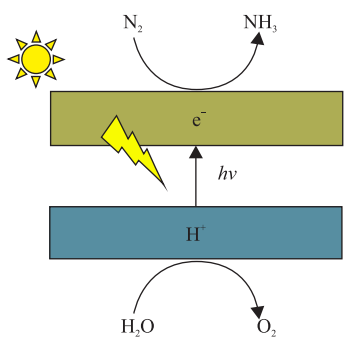


图5 N_2 光催化转化制 NH_3 示意图^[28]

Fig. 5 Schematic diagram of photocatalytic conversion of N_2 to NH_3 ^[28]

为提升光催化效率,相关研究主要围绕材料设计和系统优化展开,包括开发无机半导体(如 TiO_2 基材料、金属硫化物和碳材料)、仿生催化剂和复合光电体系,并通过掺杂、缺陷工程、晶面调控和等离子体增强等策略改善材料光吸收和电荷分离性能^[48]。近年来,优化策略逐渐体系化,涵盖原子级机理研究、纳米级催化剂设计、反应微环境调控和宏观反应器工程4个层面(图6),并以此实现了对 N_2 活化与光子利用能力的协同提升^[49]。相关代表性研究进一步揭示了关键机制和发展方向。KURTZ^[50]报道的仿氮酶二硫化铁钼催化剂展现了生物启发策略在高温光催化中的应用潜力。ZHAO等^[51]通过Cu掺杂拓展了材料光响应范围(至700 nm),说明元素掺杂是调节能带结构的有效手段。BO等^[52]

通过Fe掺杂稳定 TiO_2 中的氧空位并调控局部电子结构,这为通过缺陷工程理性设计催化剂提供了新思路。

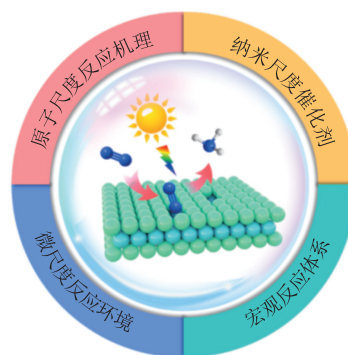


图6 优化光催化合成氨性能的策略^[49]

Fig. 6 Strategies for optimizing performance of photocatalytic ammonia synthesis^[49]

光催化合成氨的相关研究已从单一材料筛选迈向多尺度、跨层次的系统优化。后续研究应注重:一是厘清“材料-机制-系统”之间的关联,阐明催化剂微观结构如何影响光生载流子行为和 N_2 活化路径;二是突出多尺度整合的优化思路,从原子级机理到宏观反应器设计,构建相应的分析框架;三是正视规模化挑战,专门讨论在反应器放大中的实际问题,并展望可能的中试和工程化路径。

绿氨制备技术路线对比见表3,内容包括适用条件、核心优势和关键挑战,可为产业化路径选择提供参考。

综上所述,当前绿氨制备技术呈现出“传统工艺主导、新兴路径并存”的多元化发展格局。在传统的热化学H-B合成氨方法中,以绿氢原料替代路径最为成熟,是当前规模化示范项目的主流选择,但其经济性仍受绿电和电解槽成本制约。温和条件催化路径能够降低反应温度和压力,并提升能效,但需高效催化剂。柔性/小型化系统路径可匹配可再生能源波动性特点,是提升系统适应性和绿电消纳能力的关键方向,但其动态调控策略和工程实践经验仍需进一步积累。电化合成氨和光催化合成氨虽在实验室阶段展现出降低能耗的潜力,但普遍面临催化剂效率、选择性和长期稳定性的核心能力挑战,且存在产物收率低、实验协议不统一导致的实验结果难重现等问题,距离工业化应用尚有距离。

未来绿氨制备技术的发展应聚焦以下方向:一是在材料层面,持续开发高效、稳定、低成本的新型催化体系,特别是对非贵金属和仿生催化材料的探索;二是在系统层面,深化对“电-氢-氨”多能流耦合

的智能调控研究,优化柔性运行策略以匹配可再生能源特性;三是在标准层面,推动建立统一的实验

和性能评价标准,确保基础研究数据的可靠性和可比性,为技术放大和工程转化奠定坚实基础。

表3 绿氨制备技术路线对比

Table 3 Comparison of green ammonia production technology routes

技术路线	适用条件	优势	不足与挑战
绿氢原料替代路径	当前产业化最成熟,绿电动态耦合能力是关键	工艺成熟,运行经验丰富,可规模化生产(万吨级),利用现有H-B工艺基础	仍依赖高温高压,能耗较高,绿氢成本占主导,需配套大规模绿电和电解槽
温和条件热催化路径	温和条件(< 300 °C, < 1 MPa), 需新型高效催化剂	显著降低反应温度和压力,提高系统灵活性和能效,降低能耗和碳排放潜力大	催化剂成本高、易氢中毒,新型催化剂的长期稳定性、活性及工业化放大待验证,目前产率相对较低
柔性/小型化系统路径	适应可再生能源间歇性、波动性,关键在于宽负荷运行能力	适应风光波动性,利于绿电消纳,实现装置小型化、分布式布局,降低储氢需求和系统成本,可在低负荷下高效运行	控制系统复杂,对催化剂在动态工况下的活性和稳定性要求高,需开发智能调控策略,工业化实践经验仍在积累中,经济性需进一步验证
电催化合成氨	常温常压或略高温(> 200 °C, 熔盐电解质),直接电解N ₂ 和H ₂ O	理论能效高,可在环境条件下操作,具有模块化潜力,直接利用可再生电力	存在与析氢反应的激烈竞争,法拉第效率低,催化剂易失活,缺乏标准化协议导致结果难重现,工业化差距较大
光催化合成氨	常温常压,无需中间制氢步骤,需高效光催化剂	直接利用丰富的太阳能,反应条件温和,理论上过程清洁	光量子效率低,催化剂产率远低于工业需求,放大性差、反应器设计困难,催化剂稳定性存在问题,工业化应用前景尚不明朗

2 绿氨储运技术路线

绿氨储运主要包括道路运输、管道输送和海洋运输的3种技术路线,其中道路运输仍是区域供氨主要方式,并通过轻量化和智能化推动边际成本下降;管道输送决定了百万吨级项目的经济性,旧管网改造将加速产业的规模化发展;海洋运输将在未来主导全球贸易,绿氨海洋运输的经济性相比绿氢更具优势^[53]。氨气有毒、具有腐蚀性,且易燃易爆(爆炸极限为15.7%~27.4%),液氨的毒性比汽油或甲醇高3个数量级,在安全方面需要注意^[54]。同时,氨的储运已经累计了较多的处理经验,遵守安全规定则不会引起较大风险。

2.1 道路运输

氨的道路运输采用深冷常压(-33 °C)或常温高压(0.8~2.2 MPa)的液化技术,通过双层真空绝热槽车运输,以抑制氨的挥发。在目前的供应体系中,较多使用卡车将氨从合成工厂运送到目的地,灵活性较高,但运输成本、能源消耗和碳排放量也较高。由于液氨的毒性和易挥发性,故存在氨泄漏的潜在事故风险,使其不适合在移动应用中直接使用,因此下游绿氨供应系统需要替代运输方式^[55]。KLERKE等^[54]研究发现氨储存在金属氨络盐中可以保持较高的体积密度,同时可以减少氨的安全问题。LI等^[56]采用生命周期评估、多准则决策和SWOT分析相结合的方法,探讨了绿氨燃料在交通运输中的优势劣势。结果表明,应用于道路交通是当前最优选择,其储运方式相对成熟且经济高效。BOERO等^[57]采

用生命周期方法评估了氨在道路运输中的可持续性。结果表明,车载运输的方式对碳减排的贡献较小,有必要在上游过程中实施减少碳足迹的方案。YOU等^[58]采用综合数学模型分析了绿氢、绿氨和液化天然气(LNG)的运输成本。结果表明,道路运输液氨的方式更昂贵。

2.2 管道输送

随着未来需求的增长,液氨管道的建设将降低运输成本和能源消耗。由于管道建设投资高、周期长,利用现有管道网络改造后输送氨是一种可行的选择。然而,现有多产品管道的最初设计是用于满足成品油运输,可能无法直接连接合成氨工厂和消费目的地,因此需要设立更多的中转点,或者铺设新的液氨管道来扩大范围^[53]。液氨管道以全压式或半冷式运行,适用于基地集输,其中全压式为1.8~2.5 MPa,适用于200 km内的输送,钢材需耐氨腐蚀(腐蚀裕量≥3 mm);半冷式约-33 °C、0.8 MPa,输送距离可达500 km,需配套制冷和保冷系统^[59]。

TU等^[60]通过研究我国氨运输的不同模式,开发了多产品管道集成的绿色氨供应链,优化了绿色供氨系统,结果表明,液氨管道运输能耗降低了31.71%,碳排放降低了41.34%。KHAVARI等^[61]研究了地下管道绿氨储存的长期调度方法,发现通过管理季节性能源波动可在短期内增加18%的利润。TENG等^[62]分析了232起氨管道事故,提出了一种新的定量风险评估方法,用于确定氨管道的安全距离,可为管道运输安全管理提供指导。KOJIMA等^[63]测算了管道运输绿氨和绿氢的往返效率。结果表明,绿

氨和绿氢的效率分别为23%~42%和28%~52%，随着电解电压的降低而提高。

2.3 海洋运输

尽管海运碳排放在全球碳排放中占比较低,但作为主要的大宗原料运输方式,其运输量占到全球贸易量的90%,而将氨作为燃料的第一个主要市场可能就是海上运输^[24]。超大型液氨运输船(VLAC)主要采用全冷式A型独立液舱设计,配合多级复叠制冷系统(通常包含乙二醇水溶液,作为中间载冷剂的次级循环)维持货舱内液氨处于常压饱和状态,其单船液氨装载容量已突破 $9.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,而针对运输过程中产生的蒸发气,VLAC集成了先进的综合管理系统确保蒸发气液化回收^[64]。虽然绿氨目前并未大量作为替代燃料,但当其成本降至合理水平后,将有望被迅速且大量地用于海上运输^[65]。

GALIMOVA等^[59]量化比较了从可再生资源丰富的北非和南美洲向欧洲出口绿氨的成本,发现从智利通过海运进口比从摩洛哥通过管道进口更具成本效益,认为绿氨的中长途运输更为经济,而管道运输成本过高。LU等^[66]首次提出了在能量转换中的远洋耦合框架,开发了从澳大利亚生产绿氨送到日本应用的综合评估方法,发现绿氨的投用可以减少不可再生能源消耗达29.64%。SEO等^[67]提出了从美国、沙特阿拉伯和澳大利亚向韩国跨洋运输氨的方案。结果表明,氨燃料成本最高,单位运输成本约为柴油的两倍。ZHAO等^[68]采用全生命周期成本将海洋运输与管道运输进行了对比。结果表明,海洋运输的平准化成本仅为管道运输的约三分之一。综合分析其技术参数、经济性和环境影响,突出规模适应性、碳排放差异和安全风险管控的要点,3种绿氨储运技术路线的对比情况见表4。

表4 绿氨储运技术路线对比

Table 4 Comparison of green ammonia storage and transportation technology routes

技术路线	适用条件	优势	不足与挑战
道路运输	区域短途运输主力,深冷常压(-33℃)或常温高压(0.8~2.2 MPa)槽车	灵活性高,基础设施相对完善(现有液氨运输体系),技术成熟	长距离成本高,存在氨泄漏安全风险,不适合大规模运输,对下游应用安全性要求高
管道输送	适用于百万吨级项目,中短距离集输,全压式或半冷式,可改造旧管网使用	大规模运输成本最低,能耗和碳排放显著低于道路运输,输送稳定可靠,适合基地间连接	初始投资巨大、建设周期长,需耐氨腐蚀钢材及保冷设施,管网布局灵活性低
海洋运输	主导全球绿氨贸易,超大型液氨运输船,全冷式A型舱,配套蒸发气管理系统	长距离、大宗运输最具经济性,利用现有LNG基础设施潜力,国际能源运输的关键,碳排放占比相对小	船舶和港口基础设施需改造或新建,存在海上运输安全和环境风险,经济性不足,往返效率较低

综上所述,道路运输、管道输送和海洋运输构成了绿氨储运体系的三大支柱,在运输距离、规模经济和适用场景上各自具有明确的比较优势。道路运输凭借其高度灵活性,在区域短途供应中不可或缺,但高昂的单位运输成本和潜在的安全风险制约了其在大规模、长距离场景下的应用。管道输送在百万吨级项目中展现出最低的吨公里成本和较好的环境效益,是连接大型生产基地与消费中心的关键基础设施,然而其巨额初始投资、较长建设周期和网络布局的刚性是主要制约因素。海洋运输则定位于全球化绿氨贸易,超大型船舶带来的规模效应使其在跨洋运输中极具经济性,而当前船舶与港口专用设施的短缺、往返能效的损耗,以及对国际航运法规的适应性是需要行业协同解决的系统性挑战。

3 绿氨应用技术路线

目前,绿氨的多场景应用主要通过三大路径实现,即含氢载体、零碳燃料和化工原料(图7)。

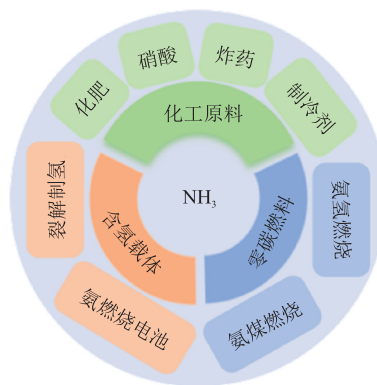


图7 氨能应用途径示意图

Fig. 7 Schematic diagram of ammonia energy application pathways

在含氢载体领域,绿氨作为绿氢的载体,可以用于燃料电池供能,还可以直接作为氢源输送至终端,从而解决绿氢长距离储运挑战^[69]。在零碳燃料领域,绿氨可逐步应用于氨氢燃烧的运力场景,还可以应用于氨煤燃烧的工业场景(电厂、窑炉等),通过利用氨的燃烧特性来部分替代化石燃料^[70]。在

化工原料领域,约80%的氨用于化肥生产,此外还包括硝酸、炸药等的生产,未来绿氨将延续氨作为基础化工原料的核心角色,同时还可拓展用于氨法碳捕集等低碳技术,利用其低成本和高吸收效率捕集 CO_2 ,实现资源循环利用^[71]。

3.1 含氢载体

3.1.1 直接氨燃料电池

氨可以直接用作燃料电池的原料,通过电化学反应供能,其中质子交换膜氨燃料电池和碱性氨燃料电池在短期内无法满足氨燃料的规模化应用,而固体氧化物燃料电池具有高度的燃料灵活性,是最有前景的氨燃料电池类型^[72]。直接使用氨燃料的固体氧化物燃料电池($\text{NH}_3\text{-SOFC}$)具有能量转换效率高、二氧化碳排放近零、系统结构紧凑、集成度较高的优点,以及工作温度与氨分解反应适配($300\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$)、电极材料兼容、反应热互补强化等独特优势,具有广阔的应用前景,其实现大规模应用很大程度上取决于资本成本的降低、电极材料的改进和体积功率密度的提高^[73]。 $\text{NH}_3\text{-SOFC}$ 的工作原理见图8。由图8可知, NH_3 在阳极分解成 H_2 和 N_2 ,按照氧离子传导($\text{NH}_3\text{-SOFC-O}$)和质子传导($\text{NH}_3\text{-SOFC-H}$), H_2O 将分别在阳极和阴极生成。

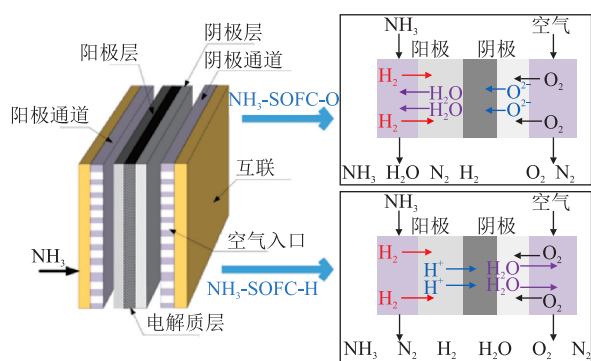


图8 直接使用氨燃料的固体氧化物燃料电池工作原理^[74]

Fig. 8 Working principle of solid oxide fuel cells using ammonia as direct fuel^[74]

针对船用燃料,MACHAJ等^[5]认为使用氨动力固体氧化物燃料电池能够提高能量转换效率,并构建了新型的船舶动力替代方案。QUACH等^[75]开发了全尺寸 $\text{NH}_3\text{-SOFC}$ 电堆,通过对比纯氨、完全重整氨和部分预重整氨的性能,得出在温度高于 $710\text{ }^\circ\text{C}$ 时,氨燃料在典型工作范围内($0.2\sim 0.5\text{ A}/\text{cm}^2$)的性能与氢相当。KHATUN等^[76]采用高熵合金(HEA)对Ni-SDC阳极表面进行改性,发现HEA沉积减少了Ni团聚,从而提高了材料50 h后的稳定性。LI等^[77]研

究了变工况条件下 $\text{NH}_3\text{-SOFC}$ 的动态响应特性,发现实验结果主要取决于氨分解吸热过程引起的气体浓度和温度随时间和空间的变化。ZHANG等^[78]系统研究了大型 $\text{NH}_3\text{-SOFC}$ 的稳定性。结果表明,在 $750\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1\text{ L}/\text{min}$ 氨流量条件下进行长期试验(500 h),系统运行稳定。

3.1.2 氨催化分解制氢

氨的催化分解反应过程包括 NH_3 分子吸附在催化剂的活性位点上,随后发生脱氢、重组和脱附,最终生成 N_2 和 H_2 ,该过程可以分为氨的热催化和电催化^[79]。在常压、无催化剂的条件下, $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时氨气转化率只有1%,目前工业中应用的热催化氨分解技术操作温度约 $800\text{ }^\circ\text{C}$,这不仅显著高于热力学极限,还导致生产 H_2 的能耗较高,且存在安全隐患^[80]。电催化氨作为一种替代高温热催化的技术,能够在接近常温条件下生产高纯 H_2 ,具有广阔的应用前景,其氨电解的理论电压仅为 0.06 V ,远低于水分解的 1.23 V ,具有热力学优势。传统电催化使用的饱和氨水能量密度较低,易生成 NO_x 副产物,工业化应用受限。相比之下,液氨的能量密度是饱和氨水的3倍,且无副产物产生,对金属储罐和运输设施的腐蚀性较低,通常在液氨中加入支撑电解质(如金属氨基化合物 MNH_2 , $\text{M}=\text{Li}$ 、 Na 或 K)或无机铵盐(如 NH_4Cl 、 NH_4NO_3),以提高电解效率^[81]。绿氨催化分解制氢是当前推进氢能发展的重要方式,其转化过程见图9。绿氨通过热催化、电催化、光催化和等离子电解等方式生成绿氢的模式受到了研究者广泛关注。

SALEHABADI等^[83]全面综述了氨分解制氢催化剂的研究进展,评估不同催化剂的活性,认为贵金属稀有且昂贵,非贵金属(特别是具有各种氧化态的过渡金属)、固态复合材料和双金属材料可被作为贵金属的有效替代品。CHA等^[84]提出了一种可以持续、规模化运行的氨制氢高效工艺,自主开发的催化剂性能超过了大多数已报道的催化剂,氨转化率大幅提升,氢气价格最多可降低50%,二氧化碳减排近80%。YE等^[85]设计了一种与质子交换膜燃料电池推进系统集成的氨裂解装置,在船用条件下对比了氨裂解制氢与纯气态氢的性能。结果表明,氨制氢的效率更高、设备容积更小,全生命周期温室气体排放量减少约88%。MUSSO等^[86]开发了以锆酸钇为载体的镍基催化剂。结果表明, $650\text{ }^\circ\text{C}$ 下,当Ni含量最低(10%,质量分数)时, NH_3 分解率最高。XU等^[87]采用碳热还原法制备了30% $\text{Co}/\text{SiC-700}$ 催化剂。结果表明,利用 Co_3O_4 纳米

粒子增加活性位点后,550 °C下氨转化率为78.3%。SHAN等^[88]利用计算流体动力学研究了固定床催化反应器中氨的分解。结果表明,加热壁面的传热显著提高了反应器中的原料转化率,而较高的压力倾

向于抑制氨分解和制氢的正向反应。MATIN等^[89]采用单锅甘油辅助多元醇反应法制备了PtSn合金纳米颗粒。结果表明,其电催化性能比Pt/C提高了1.9~4.5倍,大幅改善了氨的电催化性能。

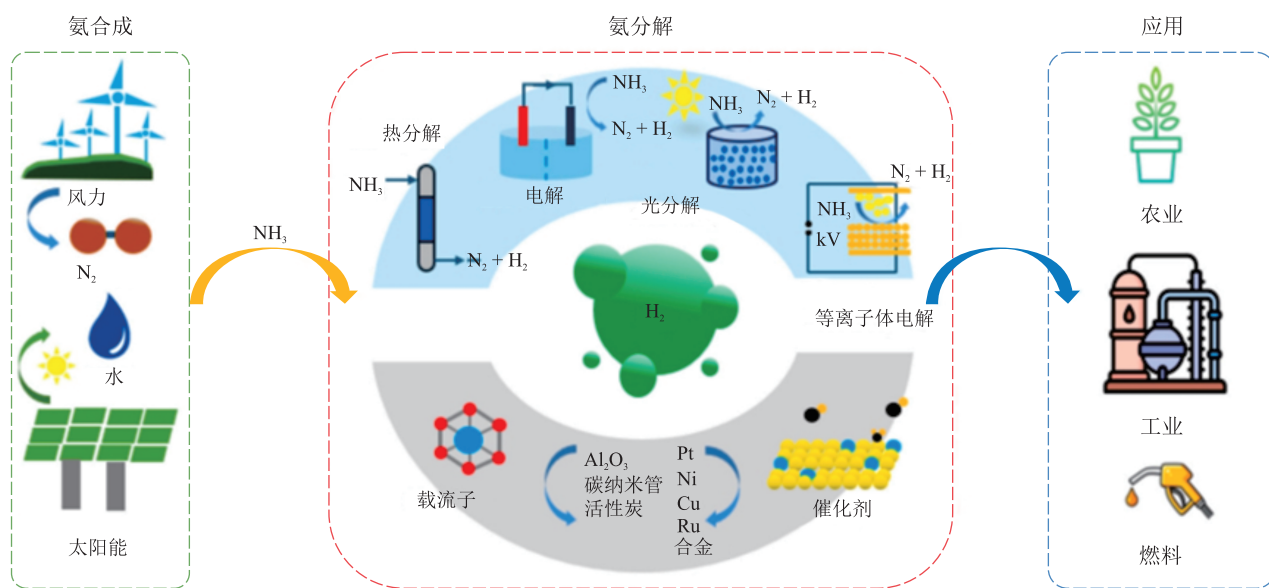


图9 绿氨催化分解制氢的转化过程^[82]

Fig. 9 Conversion process of hydrogen production from catalytic decomposition of green ammonia^[82]

3.2 能源燃料

经过发动机改造,氨可以直接作为内燃机和燃气轮机燃料,适用于热电联产,这是绿氨作为零碳燃料的最佳应用场景。然而,氨存在点火质量较差,以及与碳氢燃料相比能量密度较低、燃烧速率较低且可燃性极限较窄的缺陷,同时还存在氮氧化物排放量高的潜在缺点,这造成对氨能合理用作燃料的技术要求更高。研究人员通过与更具活性的燃料(例如氢气、甲醇等)混合来改善氨的燃烧,提高点火质量和火焰稳定性;还通过在轻微贫氧条件下运行、废气再燃烧或选择性催化,从而防止 NH_3 与 NO_x 结合生成 N_2 和 H_2O ^[70]。目前,氨与氢、煤等高活性燃料的混合燃烧是研究的重点方向。

3.2.1 氨氢混合燃烧

在实际燃烧器中,需要对氨燃烧的火焰进行增强,可将氨与其他助燃剂掺混燃烧。由于氢气的燃烧速率较高,氨氢混合燃烧是比较好的选择,能够提高燃烧的稳定性 and 燃烧效率。同时,氨燃料本身就具有较高的氢密度,可以在催化剂的作用下分解产生氢,不需要额外的储氢设备即可得到氢燃料。CHIONG等^[7]综述了氨燃烧技术在火花点火发动机、压缩点火发动机和燃气轮机上的研究进展。结果表明,在火花点火发动机中,通常采用氨解离或

单独供氢的方式,氢质量分数约10%时才能达到约30%的热效率,这进一步说明部分预混燃烧是氨氢燃气轮机研究的热点之一。SÁNCHEZ等^[90]设计了一种完整的纯氨船舶推进系统,包括发动机、氨分解反应器和选择性催化还原反应器,系统的能量和烟效率分别为42.4%和48.1%,这表明未来氨基船舶是一种有竞争力的替代方案,可用于海运脱碳。BICER等^[91]对氨氢驱动船舶进行了全生命周期评价。结果表明,氨驱动船舶的全球变暖潜值(约0.0017 kg/t)远小于重油驱动的跨洋船舶,每公里可减少33.5%的二氧化碳排放。GAO等^[92]建立了新型氨氢椭圆旋转发动机点火优化模型,其有效地改善了火焰的反向旋转传播,热效率提高了2.03%,氨排放量降低了74.04%。

3.2.2 氨煤混合燃烧

我国燃煤发电产生的二氧化碳排放量占总排放的约34%,将氨用于锅炉掺烧,无需大规模改造现有火电设备,该技术具有投资成本低、能源利用率高、减少碳排放的优势。在火电厂的锅炉上安装纯氨燃烧器或者煤掺氨燃烧器,协调氨煤混燃模式并不困难。日本政府及企业重视氨的替代应用,已经完成了中试规模的氨煤混烧实验,并规划在1000 MW燃煤机组上开展氨煤混燃实验,计划在2030中

期实现混燃 20% 的氨^[74]。当前,燃煤电厂以 3%~5% 的比例混烧氨可以作为我国实施碳减排路线的较好选择,预计到 2035 年用于电力行业的绿氨供应将更加充足^[93]。CUI 等^[94]利用高速摄像集成光学系统研究了氨煤混合比对燃烧的影响。结果表明,提高混氨比有助于煤粉的着火和挥发性燃烧,混氨比越高越有利。CUI 等^[95]通过电加热双温区气化燃烧实验平台探究了氨煤共烧的系统工程。结果表明,气化技术能够提高氨煤共烧的脱硝和燃烧能力。LIU 等^[96]模拟研究了掺氨对燃煤锅炉一次燃烧区 NO 生成特性的影响。结果表明,不同注氨位置下,NO 排放量随 NH₃ 混合比的提高而增加。LIU 等^[97]通过分析 771 组实验结果,评估了氨煤混合工艺的进料特性和操作参数对 NO_x 形成的影响。结果表明,氨在混合燃料中的占比大小是直接影响因素。

3.2.3 氨与高活性燃料混合燃烧

高活性燃料引燃氨的双燃料燃烧模式可以通过多点引燃的方式有效促进氨的高效清洁燃烧,有望成为一种内燃机脱碳的理想方案。在内燃机中双燃料燃烧模式需要改进的工况和喷射系统如下:增加先导喷油孔使高活性燃料的火焰传播更快,优化喷射方案使氨与高活性燃料更好地混合,提高预混氨和空气等效比使混合火焰更充分,提高氨能量分享比(降低高活性燃料使用量)使碳排放减少^[7]。XU 等^[98]对氨和柴油驱动的船用发动机性能及排放进行了实验和数值研究。结果表明,其当量比需要比天然气发动机更高才能正常运行,NO 和 N₂O 排放之间存在消长关系,需要进一步改进细节。REITER 等^[99]研究了氨和柴油双燃料的压燃式发动机的燃烧和排放特性。结果表明,氨的整体转化率接近 100%。MAO 等^[100]研究了氨和聚甲氧基二甲醚(PODE₃)双燃料的燃烧性能,测定了点火延迟时间、层流燃烧速度和燃烧稳定性等,验证了 NH₃-PODE₃ 双燃料发动机的有效性和适用性。ZUO 等^[101]模拟研究了氨能比对氨-柴油双燃料发动机性能的影响。结果表明,氨能比为 80% 的氨气直喷模式是首选方案,最高指示热效率为 47.22%。WEN 等^[102]采用多重光学诊断分析了氨和正庚烷的双燃料的燃烧稳定性,系统描述了燃烧过程的变化。结果表明,点火延迟对环境温度的变化更为敏感。

3.3 化工原料

采用氨作为吸收剂进行二氧化碳捕集,具有原料来源广泛、供应方便和价格较低的优势。氨水溶液具有 CO₂ 吸收量大、低成本、低腐蚀性和不易降解

等优点,是常规捕获烟气和其他工业排放中 CO₂ 的极具前途的溶剂之一。碳酸氢铵加热到 60 °C 即可分解,解吸能耗较低,而且可作为铵肥或复合肥用于农业,具有较高的经济价值。此外,电厂多用液氨和尿素进行脱硝脱硫,现有水氨基碳捕集(AAP)及其增强技术还能实现脱碳,最新研究旨在利用一类氨吸收剂解决污染物排放问题。氨基 CO₂ 捕集的强化方法见图 10。组合技术可以显著提高吸收剂二氧化碳吸收性能,后续研究应进一步优化氨基多污染物吸收系统中化学和物理增强技术之间的协同关系^[103]。SIDDIQUI 等^[104]开发了一种基于风能的新型氨基二氧化碳捕集系统,捕集成本约 0.7~1.6 CNY/kg,速率约 3.5 kg/s。FENG 等^[105]提出了一种乙醇-生物质协同氨碳捕集技术。结果表明,生物炭和乙醇对氨吸收 CO₂ 具有协同效应,传质效率提高了 15.4%。LI 等^[106]比较了氨基碳捕集中 NH₄HCO₃ 还原生成的原位碳源和外部碳源,揭示了还原机理,这有助于氨基碳捕集的工业化实施。LIU 等^[107]耦合了微生物电解、固废回收和正向渗透等技术用于氨碳捕集和废物再用。结果表明,NH₃ 和 CO₂ 回收率分别可达 100% 和 62%。

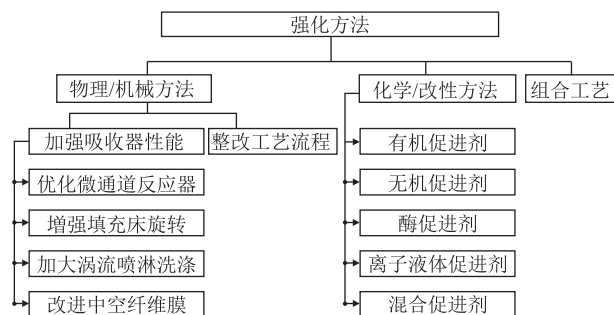


图 10 氨基 CO₂ 捕集的强化方法^[103]

Fig. 10 Enhancement methods for amine-based CO₂ capture^[103]

3.4 绿氨成本趋势分析

目前研究主要关注绿氨生产的工艺技术,随着绿氨在零碳产业中的应用规模不断扩大,绿氨技术的经济性研究也逐渐受到重视,其中大部分研究都涉及供应链的技术经济评估。传统工艺中产能调节灵活性较为有限,现有工艺需要绿氢、绿电的大规模稳定供应来维持连续生产,绿氨项目中用于实现原料稳定供应、平衡波动性的储氢储能设备投资成本和折旧摊销巨大,推高了绿氨成本(4500~5500 CNY/t)^[108]。随绿电电价下降和新工艺成熟,未来绿氨成本将持续下降。当前基于传统 H-B 法的绿氨生产积累了丰富的运行经验,而应用柔性合成工艺或新工艺系统

的绿氨生产还有待市场验证,其总成本呈快速下降趋势,有望至2030年降至约3000 CNY/t。

ZHAO等^[9]基于全生命周期方法研究了我国绿氨的生产投资效益,分析了主要制度激励和氧协同效应对投资的影响。结果表明,开工率、氨价格、电解槽效率和电价是影响绿氨投资的关键因素,研究指出三北地区的绿氨生产可以与制氧和制绿氨相结合。CESARO等^[10]预测了大型绿氨发电厂的平准化成本。结果表明,到2040年部分地区的绿氨价格可能会低于2800 CNY/t,平准化成本为1169~1379 CNY/(MW·h),将能够与天然气、生物质能或燃煤电厂CCUS竞争。VIGNESWARAN等^[11]研究发现,当可再生电力成本低于150 CNY/(MW·h)且征收碳税(1050 CNY/t)时,绿氨作为含氢载体

具有应用经济性。SADIQ等^[11]基于所开发的规模生产绿氨的技术经济模型,预测规模化绿氨的平准化成本为3892~4760 CNY/t,且未来将进一步降低。ÖZMEN等^[12]利用机器学习开发了用于预测氨平准化成本的模型。结果表明,该模型相比于技术经济模型的回归效果更佳,将有助于项目投资前的决策。HALIM等^[13]探讨了未来新加坡绿氨发电厂的技术经济性和环境影响。结果表明,直接将氨作为发电厂的燃料相比于通过氨裂解制氢更加可取,其中直接使用绿氨最具碳减排成本效益。

归纳对比了绿氨作为含氢载体、零碳燃料和化工原料的多场景应用情况,内容涵盖技术原理、性能指标和经济性瓶颈,并评估了当前成本和未来降本趋势,结果见表5。

表5 绿氨应用技术路线对比

Table 5 Comparison of green ammonia application technology routes

绿氨应用	具体技术/场景	优势	不足/挑战
含氢载体	直接氨燃料电池:固体氧化物燃料电池,氨在阳极直接分解利用	能量转换效率高,CO ₂ 近零排放,系统紧凑,燃料储运便利,工作温度匹配氨分解,与氢燃料性能相当	高温运行,电极材料长期稳定性需提升,系统动态响应需优化,资本成本高,功率密度需提高
	催化分解制氢:热催化(高温)、电催化(常温)将氨分解为氢气	提供高纯度绿氢,解决氨长距离储运难题,氨电解理论电压低,液氨能量密度高、无副产物	热催化需高温,能耗高,存在安全隐患,电催化需高效稳定催化剂抑制HER、提高选择性,催化剂成本和活性是关键,系统需要集成优化
零碳燃料	氨氢混合燃烧:掺混氢气提高氨的燃烧速率和稳定性	改善氨的点火和燃烧性能,利用氨自身高氢密度,船舶应用减排潜力大,系统效率较高	需额外氢气或现场裂解装置,需改造发动机/燃烧器,存在未燃氨和NO _x 排放问题,燃烧控制复杂
	氨煤混合燃烧:燃煤电厂锅炉中掺烧绿氨	利用现有火电设施,改造成本低,快速减少煤电碳排放,掺烧比例灵活,有利于煤粉着火	NO _x 排放风险增加,需优化掺烧工艺和脱硝技术,经济性依赖绿氨成本下降和碳约束政策
化工原料	氨-高活性燃料混燃:氨与柴油/PODE ₃ 等混合,高活性燃料引燃	实现氨高效清洁燃烧,降低高活性燃料用量,减碳,双燃料模式灵活性高,特定方案热效率高	需改进喷射系统和燃烧室设计,需更高当量比,存在NO与N ₂ O排放权衡,燃烧稳定性受工况影响,燃料系统复杂性增加
	吸收烟气中CO ₂ 生成铵盐,再生后回收CO ₂ 并循环	吸收容量大、成本低、腐蚀性较小,再生能耗相对低,产物有农用价值,可与电厂现有脱硝脱硫结合,强化技术提升效率	存在氨逃逸造成二次污染,需优化吸收剂配方和工艺参数抑制挥发,传质效率仍需提高,系统集成与放大挑战,捕集成本需进一步降低,要求系统对多污染物协同处理

综上所述,绿氨作为含氢载体、零碳燃料和化工原料的应用,正从技术探索迈向多元化示范,展现出连接氢能产业链与终端行业深度脱碳的巨大潜力。然而,不同应用路径在迈向规模化、商业化的过程中仍面临一系列共性或特有的挑战。在含氢载体路径中,高温运行、电极材料长期稳定性和高昂的资本成本是直接氨燃料电池(NH₃-SOFC)当前的主要瓶颈;氨催化分解制氢则亟需开发高效、稳定且廉价的催化剂,以降低热催化能耗和提高电催化选择性。在零碳燃料路径中,核心挑战在于高效清洁燃烧技术的突破,无论是氨氢、氨煤还是氨-高活性燃料的混合燃烧,均需在提升燃烧稳定性和

效率的同时,严格控制未燃氨的泄漏和氮氧化物(NO_x)的生成。在化工原料路径中,氨法碳捕集技术虽具有吸收容量大、成本相对较低的优点,但氨逃逸造成的二次污染、系统传质效率的提升,以及复杂工业烟气的多污染物协同处理,仍是其工程放大和广泛应用的关键障碍。

4 结语与展望

本文系统梳理了绿氨在制备、储运和应用全链条的技术路线及进展,旨在为构建零碳能源与工业体系提供技术参考和决策支持。对文献报道和工程实践的综合分析表明,当前绿氨技术的发展呈现

出“传统工艺主导、新兴路径并存、系统集成初探”的阶段特征。在制备环节,热化学哈伯-博世(H-B)工艺中的绿氢原料替代路径凭借其可规模化能力和成熟度,已成为万吨级示范项目的主要方向;温和条件催化路径还处于长时效、大规模应用催化剂的开发阶段;柔性/小型化系统路径能够提升系统韧性、实现分布式生产,但亟待积累工程实践经验;电化学合成氨和光催化合成氨等新兴路径在实验室层面展现出突破传统工艺高能耗瓶颈的潜力,但距离工业化应用尚远。在储运环节,已形成适配不同场景的“道路-管道-海运”互补体系,其中道路运输灵活,但长距离运输成本和安全风险较高;管道输送在百万吨级项目中吨公里成本和碳排放最低,但初始投资巨大、网络布局刚性;海洋运输在全球化大宗贸易中规模经济性显著,但面临专用船舶、港口设施短缺,国际规则适应不足等系统性挑战。在应用环节,绿氨正沿着含氢载体、零碳燃料和化工原料三大路径开拓市场。绿氨作为含氢载体,直接氨燃料电池和氨催化分解制氢面临着高温可靠性、电极寿命和高效廉价催化剂开发的难题;作为零碳燃料,其混合燃烧技术的核心在于实现高效清洁燃烧,同时需严格控制未燃氨泄漏和氮氧化物生成;作为化工原料,氨法碳捕集需解决氨逃逸问题,提升传质效率并实现多污染物协同处理。

为实现绿氨从“示范项目”到“支柱产业”的跨越,未来研发和布局需要聚焦于4个层面的协同突破。一是基础材料和催化科学的持续创新。亟须发展高效、稳定、低成本的新型催化体系,特别是非贵金属催化剂、仿生催化材料和适用于动态工况的柔性催化剂,并借助原位表征和计算模拟技术深入揭示其构效关系和反应机理。二是系统集成和智能调控技术的深度优化。应着力发展电-氢-氨多能流耦合的协同设计和智能调控策略,优化柔性合成、多式联运和终端应用(如氨燃料电池与清洁燃烧)等环节的系统效率、安全性和经济性。三是标准体系和基础设施的同步构建。加快建立覆盖绿氨全生命周期的碳排放核算、产品认证和安全规范体系,并前瞻性规划和改造与之配套的管道、港口和储运等基础设施。四是政策引导和市场机制的协同发力。通过碳定价、绿色金融和消费补贴等多元化政策工具,有效连接技术创新与市场需求,降低产业链初期投资风险,加速绿氨在发电、航运和工业原料等领域的规模化替代。唯有协同推进技术、设施、标准和政策的系统创新,绿氨方能真正发

挥其作为零碳能源枢纽和工业脱碳关键载体的战略价值,为全球可持续发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1] MORLANÉS N, KATIKANENI S P, PAGLIERI S N, et al. A technological roadmap to the ammonia energy economy: Current state and missing technologies [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 408: 127310.
- [2] IRENA. Innovation outlook: Renewable ammonia [R]. Masdar: IRENA, 2022.
- [3] ZHAO H, KAMP L M, LUKSZO Z. The potential of green ammonia production to reduce renewable power curtailment and encourage the energy transition in China [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(44): 18935-18954.
- [4] SHIN B J, HAN S J, DEVKOTA S, et al. Comparative 3E (Energy, Economic, and Environment) study of gray, blue, and green ammonia: Low-pressure Ru-based and high-pressure Fe-based Haber-Bosch processes [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 148: 150090.
- [5] MACHAJ K, KUPECKI J, MALECHA Z, et al. Ammonia as a potential marine fuel: A review [J]. *Energy Strategy Reviews*, 2022, 44: 100926.
- [6] PUKAZHSELVAN D, SANDHYA K S, FAGG D P, et al. The future of clean transportation: Hydrogen, batteries, ammonia, and green methane in perspective [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2026, 226: 116286.
- [7] CHIONG M C, CHONG C T, NG J H, et al. Advancements of combustion technologies in the ammonia-fuelled engines [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 244: 114460.
- [8] OJELADE O A, ZAMAN S F, NI B J. Green ammonia production technologies: A review of practical progress [J]. *J Environ Manage*, 2023, 342: 118348.
- [9] SONI K, LANJEKAR P R, PANWAR N L. Biomass-based green ammonia: Pathways, technologies, and sustainability for a carbon-neutral future [J]. *Unconventional Resources*, 2025, 8: 100241.
- [10] WANG Q R, GUO J P, CHEN P. Recent progress towards mild-condition ammonia synthesis [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2019, 36(1): 25-36.
- [11] NOUSSAN M, RAIMONDI P P, SCITA R, et al. The role of green and blue hydrogen in the energy transition—A technological and geopolitical perspective [J]. *Sustainability*, 2020, 13(1): 298.
- [12] SALEHMIN M N I, KIONG T S, MOHAMED H, et al. Transition pathway from blue to green ammonia production: Comparative insight into technoeconomic, environmental, and policy framework [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 143(1): 147-178.
- [13] ZHOU H R, CHEN Z W, MENG W L, et al. Design, global

- energy integration, and sustainability analyses of a process coupling renewable energy water electrolysis for hydrogen production with ammonia synthesis [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12: 112892.
- [14] OUSSMOU B, SIGUE S, ABDERAFI S. Review of green hydrogen production technologies, to choose the optimal process of electrolysis-renewable energy [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2026, 225: 116205.
- [15] LIMA A, TORRUBIA J, TORRES C, et al. Dynamic small-scale green ammonia non-renewable and renewable exergy costs up to 2050: Short and long-term projections under IEA energy transition scenarios [J]. *Renewable Energy*, 2026, 256: 123891.
- [16] BICER Y, DINCER I, ZAMFIRESCU C, et al. Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135(1): 1379-1395.
- [17] PAGANI G, HAJIMOLANA Y, ACAR C. Green hydrogen for ammonia production—A case for the Netherlands [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 52(1): 418-432.
- [18] ISHAQ H, SHEHZAD M F, CRAWFORD C. Transient modeling of a green ammonia production system to support sustainable development [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(99): 39254-39270.
- [19] SUN R T, SUN L, LI J. Techno-economic evaluation of green ammonia synthesis for renewable energy storage using rigorous models [J]. *Energy*, 2025, 336: 138068.
- [20] 国家能源局综合司. 关于开展绿色液体燃料技术攻关和产业化试点工作(第一批)的通知[R]. 北京: 国家能源局, 2025.
General Department of the National Energy Administration. Notice on carrying out the first batch of pilot projects for technological breakthroughs and industrialization of green liquid fuels [R]. Beijing: National Energy Administration, 2025.
- [21] SALMON N, BAÑARES-ALCÁNTARA R. Impact of process flexibility and imperfect forecasting on the operation and design of Haber-Bosch green ammonia [J]. *RSC Sustainability*, 2023, 1(4): 923-937.
- [22] SINGH S, MOHAMMED A K, ALHAMMADI A A, et al. Hypes and hopes on the materials development strategies to produce ammonia at mild conditions [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(89): 34700-34739.
- [23] SONG G H, CHEN Y M, HE Y F, et al. Techno-economic and life cycle greenhouse gas assessment of green ammonia produced by low-pressure Haber-Bosch process [J]. *Energy Nexus*, 2025, 17: 100379.
- [24] MACFARLANE D R, CHEREPANOV P V, CHOI J, et al. A roadmap to the ammonia economy [J]. *Joule*, 2020, 4(6): 1186-1205.
- [25] 方萍, 陈康欣, 林雨婷, 等. MoO_x状态调控及其对VO_x/MoO_x-TiO₂催化剂脱硝性能和热稳定性的影响 [J]. *石油化工高等学校学报*, 2024, 37(4): 40-48.
FANG P, CHEN K X, LIN Y T, et al. The regulation of MoO_x state and its effect on the denitration performance and Thermal stability of VO_x/MoO_x-TiO₂ catalysts [J]. *Journal of Petrochemical Universities*, 2024, 37(4): 40-48.
- [26] BROWN D E, EDMONDS T, JOYNER R W, et al. The genesis and development of the commercial BP doubly promoted catalyst for ammonia synthesis [J]. *Catalysis Letters*, 2014, 144(4): 545-552.
- [27] FORREST S J K, SCHLUSCHASS B, YUZIK-KLIMOVA E Y, et al. Nitrogen fixation via splitting into nitrido complexes [J]. *Chemical reviews*, 2021, 121(11): 6522-6587.
- [28] KLAAS L, GUBAN D, ROEB M, et al. Recent progress towards solar energy integration into low-pressure green ammonia production technologies [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(49): 25121-25136.
- [29] LIU F J, ZHANG Y, WANG T T, et al. Ru-doped Sr_xO_y/CNT as microwave-responsive catalysts for low-temperature and atmospheric pressure ammonia synthesis [J]. *Chemical Engineering Science*, 2025, 318: 122196.
- [30] WANG Z Y, HE H, TAN S L, et al. Low-temperature plasma-assisted ammonia decomposition catalyzed with bimetallic catalysts: Kinetic study and energy-efficiency analysis [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 139(1): 730-739.
- [31] WANG L X, FENG Y, SUN W, et al. Ambient-pressure and low-temperature hydrogenation of nitrogen to ammonia in a synergetic catalytic system [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 493: 152506.
- [32] ZHOU J Z, TONG B, WANG H M, et al. Flexible design and operation of off-grid green ammonia systems with gravity energy storage under long-term renewable power uncertainty [J]. *Applied Energy*, 2025, 388: 125629.
- [33] LIU L C, FEI T, ZHAO H R, et al. High-performance flexible gas sensor for ultrasensitive ammonia detection via straightforward all-in-one synthesis technology [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2025, 441: 137958.
- [34] GOTTHEIL L, BREMER J. Enabling load-flexible ammonia synthesis via polytropic fixed-bed reactors [M]//MANENTI F, REKLAITIS G V. *Computer Aided Chemical Engineering*. Oxford: Elsevier, 2024, 53: 1891-1896.
- [35] PATEL R, SOLEIMANI MEHR A, VALVERDE J I, et al. Studying the effect of dynamic operation conditions on green ammonia production synthesis loop [J]. *Journal of Process Control*, 2025, 150: 103436.
- [36] ZHOU J H, ZHANG Z Y, ZHANG R Z, et al. Optimal capacity and multi-stable flexible operation strategy of green

- ammonia systems: Adapting to fluctuations in renewable energy [J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 314: 118720.
- [37] DENG J, IÑIGUEZ J A, LIU C. Electrocatalytic nitrogen reduction at low temperature [J]. *Joule*, 2018, 2(5): 846-856.
- [38] 胡博, 吴俊宏, 李锋. 电化学技术在二氧化碳捕集与转化中的研究进展[J]. *低碳化学与化工*, 2025, 50(11): 110-120.
- HU B, WU J H, LI F. Research progress of electrochemical technology in carbon dioxide capture and conversion [J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2025, 50(11): 110-120.
- [39] XU Y S, XU X, CAO N, et al. Perovskite ceramic oxide as an efficient electrocatalyst for nitrogen fixation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(17): 10293-10302.
- [40] WANG Y T, WANG C H, LI M Y, et al. Nitrate electroreduction: mechanism insight, in situ characterization, performance evaluation, and challenges [J]. *Chemical Society Reviews*, 2021, 50(12): 6720-6733.
- [41] ZHU X J, MOU S Y, PENG Q L, et al. Aqueous electrocatalytic N₂ reduction for ambient NH₃ synthesis: Recent advances in catalyst development and performance improvement [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8(4): 1545-1556.
- [42] LI C Y, CHU S W, HO C Y, et al. A comprehensive review of critical factors affecting green ammonia synthesis by electrochemical process [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12: 114454.
- [43] CUI X Y, TANG C, ZHANG Q. A review of electrocatalytic reduction of dinitrogen to ammonia under ambient conditions [J]. *Advanced Energy Materials*, 2018, 8(22): 1800369.
- [44] KATAYAMA A, INOMATA T, OZAWA T, et al. Electrochemical conversion of dinitrogen to ammonia induced by a metal complex-supported ionic liquid [J]. *Electrochemistry Communications*, 2016, 67: 6-10.
- [45] LIU H M, GUIJARRO N, LUO J S. The pitfalls in electrocatalytic nitrogen reduction for ammonia synthesis [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2021, 61: 149-154.
- [46] WANG J, FENG T, CHEN J X, et al. Electrocatalytic nitrate/nitrite reduction to ammonia synthesis using metal nanocatalysts and bio-inspired metalloenzymes [J]. *Nano Energy*, 2021, 86: 106088.
- [47] WU S G, LI H, WANG W K, et al. Bioinspired molybdenum-based catalysts for photo/electrocatalytic nitrogen fixation: From fundamentals to sustainable ammonia, urea, and nitrate synthesis [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2025, 525: 170466.
- [48] MARTÍN A J, SHINAGAWA T, PÉREZ-RAMÍREZ J. Electrocatalytic reduction of nitrogen: From Haber-Bosch to ammonia artificial leaf [J]. *Chem*, 2019, 5(2): 263-283.
- [49] TANG Y, SONG Y, JIA J, et al. Engineering green ammonia photoproduction from nitrogen: Advances, challenges and perspectives [J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2026, 112(1): 111-154.
- [50] KURTZ D A. Turning up the heat on photo-catalytic ammonia production [J]. *Joule*, 2021, 5(4): 762-764.
- [51] ZHAO Y X, ZHAO Y F, SHI R, et al. Tuning oxygen vacancies in ultrathin TiO₂ nanosheets to boost photocatalytic nitrogen fixation up to 700 nm [J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(16): 1806482.
- [52] BO Y N, WANG H Y, LIN Y X, et al. Altering hydrogenation pathways in photocatalytic nitrogen fixation by tuning local electronic structure of oxygen vacancy with dopant [J]. *Angewandte Chemie-International Edition*, 2021, 60(29): 16085-16092.
- [53] ABDELLATIEF T M M, AL-ASHEH S, ALAMI A H. Transportation of green hydrogen and green ammonia [M]// OLABI P A G. *Comprehensive Green Materials*. Oxford: Elsevier, 2025: 570-581.
- [54] KLERKE A, CHRISTENSEN C H, NØRSKOV J K, et al. Ammonia for hydrogen storage: Challenges and opportunities [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2008, 18(20): 2304-2310.
- [55] WALLINGTON T J, WOODY M, LEWIS G M, et al. Green hydrogen pathways, energy efficiencies, and intensities for ground, air, and marine transportation [J]. *Joule*, 2024, 8(8): 2190-2207.
- [56] LI C J, HAO Q W, ZHANG W, et al. Development strategies for green hydrogen, green ammonia, and green methanol in transportation [J]. *Renewable Energy*, 2025, 246: 122904.
- [57] BOERO A, MERCIER A, MOUNAÏM-ROUSSELLE C, et al. Environmental assessment of road transport fueled by ammonia from a life cycle perspective [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 390: 136150.
- [58] YOU Y J, KIM S, LEE J C. Comparative study on ammonia and liquid hydrogen transportation costs in comparison to LNG [J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2023, 15: 100523.
- [59] GALIMOVA T, FASIHI M, BOGDANOV D, et al. Feasibility of green ammonia trading via pipelines and shipping: Cases of Europe, North Africa, and South America [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 427: 139212.
- [60] TU R F, LIU C Y, SHAO Q, et al. Pipeline sharing: Optimal design of downstream green ammonia supply systems integrating with multi-product pipelines [J]. *Renewable Energy*, 2024, 223: 120024.
- [61] KHAVARI F, CHOI Y. A novel long-term scheduling framework for underground green ammonia storage: Balancing seasonal fluctuations and export pathways [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 193: 152360.
- [62] TENG L, LING P D, ZHAO C B, et al. A data-driven risk assessment framework for ammonia pipelines: Insights from

- 232 accident cases (1970—2023) [J]. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2025, 2: 100388.
- [63] KOJIMA Y. Round-trip efficiencies of green ammonia and green hydrogen [J]. *Next Energy*, 2025, 8: 100340.
- [64] AL-ABOOSI F Y, EL-HALWAGI M M, MOORE M, et al. Renewable ammonia as an alternative fuel for the shipping industry [J]. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2021, 31: 100670.
- [65] ZINCIR B. Environmental and economic evaluation of ammonia as a fuel for short-sea shipping: A case study [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(41): 18148-18168.
- [66] LU H, LIN B L, CAMPBELL D E, et al. Australia-Japan telecoupling of wind power-based green ammonia for passenger transportation: Efficiency, impacts, and sustainability [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 168: 112884.
- [67] SEO Y, AN J, PARK E, et al. Technical-economic analysis for ammonia ocean transportation using an ammonia-fueled carrier [J]. *Sustainability*, 2024, 16(2): 827 .
- [68] ZHAO F, WANG Z, DONG B, et al. Comprehensive life cycle cost analysis of ammonia-based hydrogen transportation scenarios for offshore wind energy utilization [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 429: 139616.
- [69] GUO J P, CHEN P. Catalyst: NH_3 as an energy carrier [J]. *Chem*, 2017, 3(5): 709-712.
- [70] HERBINET O, BARTOCCI P, DANA A G. On the use of ammonia as a fuel—A perspective [J]. *Fuel Communications*, 2022, 11: 100064.
- [71] 黎园, 陈林, 贾蔚. 天然气化工副产氢的氢能应用及氢-氨融合发展分析[J]. *低碳化学与化工*, 2024, 49(6): 73-79.
- LI Y, CHEN L, JIA W. Analysis of hydrogen energy application of by-product hydrogen from natural gas chemical industry and development of hydrogen-ammonia fusion [J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2024, 49(6): 73-79.
- [72] LIU Y, LUO M Y, LI W Z, et al. Techno-economic analysis of using ammonia as an energy carrier for renewable energy conversion and storage [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 162: 150784.
- [73] LOBOICHENKO V, CASADO-MANZANO M, NAVAS S J, et al. Ammonia as energy source for solid oxide fuel cell technology [J]. *Energy Reports*, 2025, 13: 5828-5847.
- [74] WANG X S, GAO M C, HARRISON A R P, et al. A green ammonia utilization pathway: Integrated ammonia-solid oxide fuel cell systems for efficient power generation [J]. *EnergyChem*, 2025, 7(5): 100167.
- [75] QUACH T Q, LEE D, PARK J Y, et al. Comprehensive analysis of a full-scale solid oxide fuel cell stack fueled by ammonia [J]. *Energy Conversion and Management*, 2026, 348: 120618.
- [76] KHATUN N, LIN C J, LIN J Y, et al. Boosting ammonia-fed solid oxide fuel cell performance via high-entropy alloy anode surface modification [J]. *Fuel*, 2026, 407: 137446.
- [77] LI M, HUANG Z, YAN D, et al. Insight into the dynamic response characteristics of direct ammonia solid oxide fuel cells under variable operating conditions [J]. *Fuel*, 2026, 40: 137319.
- [78] ZHANG Z X, LI D R, HUA X F, et al. Research on the performance and stability of large-sized solid oxide fuel cells operated with direct ammonia fuel [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 178: 150627.
- [79] 徐鑫淼, 刘学武, 梁飞, 等. 储氢合金分离低浓度氢气的实验研究[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2025, 45(6): 35-42.
- XU X M, LIU X W, LIANG F, et al. Experimental study on separation of low-concentration hydrogen using hydrogen storage alloys [J]. *Journal of Liaoning Petrochemical University*, 2025, 45(6): 35-42.
- [80] FAROOQI A S, RAMLI R M, HASNAIN S M W, et al. A comprehensive review on hydrogen production via catalytic ammonia decomposition over Ni-based catalysts [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 97(1): 593-613.
- [81] LEE J E, LEE J, JEONG H, et al. Catalytic ammonia decomposition to produce hydrogen: A mini-review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 475: 146108.
- [82] AIZAZ U, ANSARI M A, MALAIBARI Z O, et al. Frontiers in catalytic ammonia decomposition: A cutting-edge tutorial and review on catalyst innovation trends and techno-economic insights [J]. *Chemical Engineering Journal: Green and Sustainable*, 2025: 100001.
- [83] SALEHABADI A, ZANGANEH J, MOGHTADERI B. Mixed metal oxides in catalytic ammonia cracking process for green hydrogen production: A review [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 63(1): 828-843.
- [84] CHA J R, PARK Y, BRIGLJEVIĆ B, et al. An efficient process for sustainable and scalable hydrogen production from green ammonia [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 152: 111562.
- [85] YE M, SHARP P, BRANDON N, et al. System-level comparison of ammonia, compressed and liquid hydrogen as fuels for polymer electrolyte fuel cell powered shipping [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(13): 8565-8584.
- [86] MUSSO M, VEIGA S, QUEVEDO A, et al. Hydrogen production through catalytic ammonia decomposition using Ni-based catalysts supported on yttrium zirconate [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 159: 150599.
- [87] XU R J, YIN F X, ZHANG J, et al. Preparation of Co/SiC catalyst and its catalytic activity for ammonia decomposition to produce hydrogen [J]. *Catalysis Today*, 2024, 437: 114774.
- [88] SHAN R Q, NGUYEN V B, MA S W, et al. Numerical investigation of ammonia catalytic decomposition in a fixed-

- bed reactor [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 185: 152009.
- [89] MATIN M A, KIM H C, OH Y, et al. Effects of Sn-content and C-support in PtSn alloy nanoparticles on ammonia electrocatalysis for hydrogen production [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 177: 151404.
- [90] SÁNCHEZ A, RENGEL M A M, MARTÍN M. A zero CO₂ emissions large ship fuelled by an ammonia-hydrogen blend: Reaching the decarbonisation goals [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 293: 117497.
- [91] BICER Y, DINCER I. Environmental impact categories of hydrogen and ammonia driven transoceanic maritime vehicles: A comparative evaluation [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018, 43(9): 4583-4596.
- [92] GAO X, DU Y, YANG Z H, et al. Combustion, thermodynamic and emission performance investigation of a novel ammonia-hydrogen dual-fuel elliptical rotary engine with dual-spark ignition: Effects of equivalence ratio and spark ignition timing [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 194: 152417.
- [93] ZHAO H X. The role of green ammonia in meeting challenges towards a sustainable development in China [J]. *Energy*, 2024, 310: 133283.
- [94] CUI M S, LIANG X, DI Y, et al. Study on the effect of ammonia mixing ratio on process of ammonia and coal co-combustion [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2025, 120: 102040.
- [95] CUI B C, ZHANG K J, HUA W J, et al. Ammonia/coal binary fuel gasification-combustion technology: Experimental study of optimal parameters for assisting denitrification and strengthening combustion [J]. *Fuel*, 2026, 405: 136605.
- [96] LIU Q, SONG G F, LIU Z J, et al. Effects of ammonia blending on NO formation characteristics in the primary combustion zone of a coal-fired boiler [J]. *Fuel*, 2026, 406: 137189.
- [97] LIU H M, ZHANG H L, WANG C L, et al. Effect of ammonia blending on the emission behavior of NO_x during coal combustion: A global meta-analysis [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2025, 121: 102182.
- [98] XU L L, XU S J, BAI X S, et al. Performance and emission characteristics of an ammonia/diesel dual-fuel marine engine [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 185: 113631.
- [99] REITER A J, KONG S C. Combustion and emissions characteristics of compression-ignition engine using dual ammonia-diesel fuel [J]. *Fuel*, 2011, 90(1): 87-97.
- [100] MAO J S, MA X, WANG Z, et al. Experimental and kinetic modeling study on laminar burning velocities and ignition delay times of NH₃/PODE₃ blends [J]. *Fuel*, 2026, 404: 136317.
- [101] ZUO Q S, CHEN L Z, CHEN W, et al. Performance analysis of ammonia energy ratio on an ammonia-diesel engine in different fuel supply modes [J]. *Fuel*, 2025, 384: 134038.
- [102] WEN M S, LIU H F, CUI Y Q, et al. Study on combustion stability and flame development of ammonia/*n*-heptane dual fuel using multiple optical diagnostics and chemical kinetic analyses [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 428: 139412.
- [103] SIBHAT M, ZHU Q X, TSEGAY G, et al. Enhancement technologies of ammonia-based carbon capture: A review of developments and challenges [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2024, 136: 104196.
- [104] SIDDIQUI O, ISHAQ H, CHEHADE G, et al. Performance investigation of a new renewable energy-based carbon dioxide capturing system with aqueous ammonia [J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(3): 2252-2263.
- [105] FENG D D, ZHANG Z C, ZHU X S, et al. Mechanism of CO₂ capture by ethanol-biochar functionalized cross-linking enhanced ammonia [J]. *Fuel Processing Technology*, 2023, 247: 107796.
- [106] LI H, GAO J, DU Q, et al. Electrochemical CO₂ reduction from NH₄HCO₃ in ammonia-based carbon capture: Comparison of external and in-situ carbon sources [J]. *Chemical Engineering and Processing—Process Intensification*, 2025, 215: 110361.
- [107] LIU S J, DING G F, GU R Z, et al. Co-capture and recovery of ammonia and CO₂ driven by microbial electrolysis system coupling with mineral carbon sequestration by industrial wastes [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2025, 212: 107931.
- [108] SU R Q, XIAO Y, HAMZA F, et al. Scaling up green hydrogen in China: Economic opportunities and challenges [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2025, 131: 60-69.
- [109] CESARO Z, IVES M, NAYAK-LUKE R, et al. Ammonia to power: Forecasting the levelized cost of electricity from green ammonia in large-scale power plants [J]. *Applied Energy*, 2021, 282: 116009.
- [110] VIGNESWARAN V S, GOWD S C, RAVICHANDRAN V, et al. Green ammonia as hydrogen carrier: Current status, barriers, and strategies to achieve sustainable development goals [J]. *Science of The Total Environment*, 2025, 982: 179646.
- [111] SADIQ M, MAYYAS A, ROCHEDO P R R. Comprehensive techno-economic assessment of Green-Ammonia@Scale production [J]. *Cleaner Engineering and Technology*, 2025, 26: 100964.
- [112] ÖZMEN A, HUI N S. Predictive modeling for levelized cost of green ammonia [J]. *Applied Energy*, 2025, 398: 126399.
- [113] HALIM I, ZAIN N S, KHOO H H. Assessing the feasibility of ammonia utilization for power generation: A techno-economic-environmental study [J]. *Applied Energy*, 2025, 386: 125581.