

双碳背景下绿色氨能的应用场景及展望

罗志斌^{1,✉}, 孙潇¹, 高啸天^{1,2}, 林海周¹, 朱光涛¹

(1. 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;

2. 北京理工大学化学与化工学院, 北京 100081)

摘要: [目的] 氨作为零碳燃料容易实现安全、低成本运输, 被认为是与氢能具备相同发展潜力的理想能源。了解氨能源产业链各环节核心技术的发展现状, 有助于把握氨能源产业发展前景和方向。[方法] 通过调研氨能源产业链中制备、储运、利用等各环节涉及的核心技术与应用场景, 分析产业发展面临的问题, 提出相应的发展建议。[结果] 传统的哈伯法合成氨技术已非常成熟, 通过绿氢原料替代或者采用光催化、电催化、生物酶催化、等离子驱动等新型技术合成氨可实现氨生产的绿色转型。绿氨的储运可以依托传统的合成氨储运基础设施以及供应链, 并加强氨燃料加注站等配套设施的建设。氨燃烧、氨燃料电池、氨储能等氨能利用技术需要持续研发攻关, 探索开展应用示范。[结论] 发展氨能源产业技术符合我国构建清洁低碳、安全高效绿色能源体系的要求, 对保障我国能源安全也有积极意义。但是氨能源产业化推广仍然面临诸多挑战, 需要合理规划布局, 从政策、金融、创新平台、标准体系建设等多方面予以保障。

关键词: 氨; 燃料; 关键技术; 产业链; 机遇; 挑战

中图分类号: TK91; TQ113.2 **文献标志码:** A

文章编号: 2095-8676(2023)03-0047-08

开放科学(资源服务)二维码:



Development Prospects and Application Scenarios of Green Ammonia Energy Industry Under the Background of Carbon Peak and Neutrality

LUO Zhibin^{1,✉}, SUN Xiao¹, GAO Xiaotian^{1,2}, LIN Haizhou¹, ZHU Guangtao¹

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

2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: [Introduction] As a zero-carbon fuel, ammonia is easy to achieve safe and low-cost transportation and thus is considered to be an ideal energy source with the same development potential as hydrogen energy. Understanding the development status of core technologies in each link of the ammonia energy industry chain will help grasp the development prospects and direction of the ammonia energy industry. [Method] By investigating the core technologies and application scenarios involved in key links (including preparation, storage, transportation, and utilization) of the ammonia energy industry chain and analyzing the problems faced by the industry development, this study put forward corresponding development suggestions. [Result] Although the traditional Haber process for ammonia synthesis is very mature, the green transition of ammonia production can be achieved via green hydrogen feedstock substitution or adoption of new ammonia synthesis technologies such as photocatalysis, electrocatalysis, bioenzyme catalysis, and plasma drive. The storage and transportation of green ammonia can rely on the traditional synthetic ammonia infrastructure as well as supply chain, and the construction of supporting facilities such as ammonia fuel filling stations should be also strengthened. Ammonia combustion, ammonia fuel cells, ammonia energy storage and other ammonia energy utilization technologies need to be continuously researched and developed as well as explored for application demonstration. [Conclusion] The development of green ammonia energy industry is in line with the requirements of building a clean, low-carbon, safe and efficient green energy system in China, and it has a positive impact on our country's energy security. However, the industrialization promotion of ammonia energy still faces many challenges and requires reasonable planning as well as layout and support from policy, finance, innovation platforms and standard system.

收稿日期: 2022-03-01 修回日期: 2022-04-24

基金项目: 中国博士后科学基金项目“光/电催化 CO₂ 还原: 高选择性催化剂的设计与应用”(2020M682996); 中国能建广东院科技项目“制氢关键技术应用研究”(EV06041W); 中国能建广东院科技项目“等离子制氢催化剂及反应装置研究设计”(ER06671W)

Key words: ammonia; fuel; key technology; industry chain; opportunities; challenges

2095-8676 © 2023 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

能源危机、环境污染以及气候变化是人类社会生存与发展面临的重要问题。全球以化石燃料为主体的能源体系使二氧化碳(CO₂)排放日益增多,导致了全球气候变化、环境污染等问题。“碳达峰、碳中和”是全球应对气候变化的共识,寻找低碳、清洁的新型燃料成为了能源领域可持续发展的重要途径^[1]。

氢气和氨是两种不含碳元素的燃料,燃烧不产生 CO₂,是替代化石燃料、降低碳排放、减少环境污染极具发展前景的新型燃料^[2-3]。氢能的发展较早,一直以来都是世界各国清洁能源战略发展的重中之重。近年随着“碳达峰、碳中和”的理念不断深化,氢能作为“碳中和”的重要抓手,在全球能源转型中扮演着重要角色,迎来了前所未有的爆发式增长^[4]。然而,现阶段氢能的发展仍面临安全性差、储运技术不成熟等关键性问题,阻碍了其产业化发展。氨是现代工业及农业化肥的重要化工原料,也是天然的储氢介质,其含氢比例高达 17.6 wt%,可进行高效储氢。此外,氨也具备能量密度高、易液化储运、安全性高等优势^[5]。因此,以氨作为氢能载体的研究成为了热点,氢氨互补的绿色能源产业也正在加速布局^[6]。

传统的合成氨产业已相对成熟,而新兴的氢能

源产业仍在探索阶段。

1 氨的合成

合成氨工业与制氢工业密切相关,我国氢气总量超过三分之一用于合成氨。德国化学家 HABER F 从 1902 年开始研究利用氢气与氮气直接合成氨: $N_2(g) + 3H_2(g) \rightleftharpoons 2NH_3(g)$, 于 1909 年研发改进的循环合成法成为了工业上合成氨普遍采用的方法,即哈伯法合成氨技术。全球氨产量每年高达 2 亿 t,接近 98% 的氢气原料来源于化石燃料,如天然气裂解、煤气化、生物质裂解等,氮气则通过空分装置直接从空气中获得,虽然生产成本低,但是碳排放量巨大,并且哈伯法合成氨反应条件还比较苛刻,需要 450~600 °C 的高温以及 10~25 MPa 的压力,其生产过程的能耗占据全球能源供应的 2%^[7]。因此,在“碳中和”的愿景下,寻求绿色替代方案,实现合成氨工业的节能减排势在必行。

合成氨工业减排主要有两大路线:一条路线是以清洁氢气为原料(绿氢,生产过程中不产生碳排放)替代灰氢(生产过程中产生大量碳排放),即利用可再生能源电力电解水生产的绿氢进行原料替代,哈伯法合成氨的其他工艺过程维持不变,生产设备改造成本较低^[8],如图 1 所示。

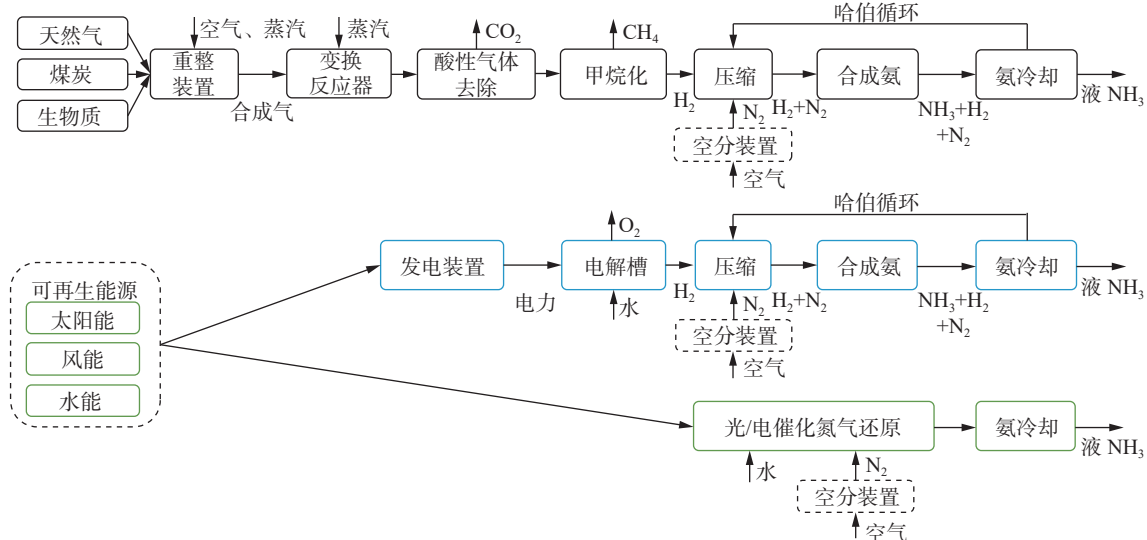


图 1 氨的各类生产路径概述^[8]

Fig. 1 Summary of various production paths for ammonia^[8]

2021年底德国工业巨头蒂森克虏伯与阿联酋签订合同, 将依托阿联酋哈里发工业区的800 MW光伏电站建设电解水制氢装置生产绿氢用于合成氨。氢气使用成本是制约合成氨进行绿氢原料替代的最重要因素。根据估算, 化石燃料制氢成本在1.5~2.0元/Nm³, 而电解水制氢成本在4.0~5.0元/Nm³[9]。

另一条路线是开发新型合成氨技术, 在温和条件下, 进行高效、低能耗、低排放氨生产。近些年, 科学家们正在积极探索许多绿色的合成氨技术, 包括光催化合成氨、电催化合成氨、生物酶固氮合成氨、等离子体驱动合成氨等[10], 如图2所示, 其中光催化与电催化合成氨的关注度较高。

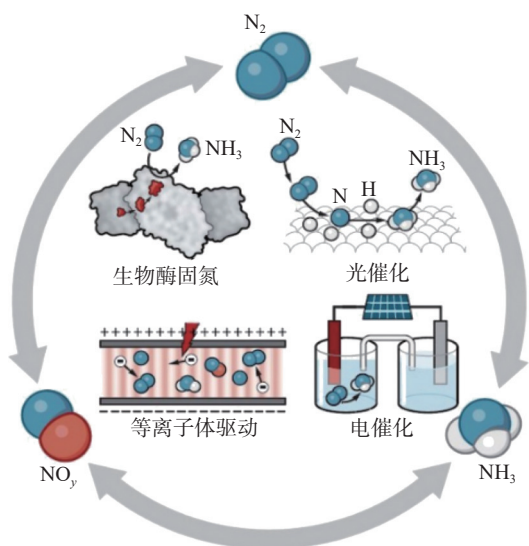


图2 潜在的无碳排放合成氨路径^[10]

Fig. 2 Potential carbon-free ammonia synthesis paths^[10]

新型的合成氨方法, 其核心是可以实现在温和条件下(常温常压)有效活化氮氮三键, 大幅度降低合成氨所需的能耗^[10]。然而, 这些新型合成氨技术还处于实验室研发阶段, 仍需要克服反应选择性差、反应速率低等难题, 尽管近年来取得了较大的进展, 但离商业化还有一段距离。

2 氨的储运

氨气在常温(25℃)条件下, 0.8~1.2 MPa压力下即可液化, 根据其物理性质和存储特点, 采用液氨的形式进行氨的储运是十分便捷、经济的^[11]。基于我国成熟的合成氨工业, 氨的运输和配送体系都相对成熟。按照运输方式可以分为陆运、海运和管网

运输。小规模、短距离运输采用液氨槽罐车; 在氨需求规模大、长距离运输的情况下, 采用高压管道输送氨气的方式, 可以满足更加高效经济的要求, 相比液氨槽罐车具有显著的成本优势。在相同的输送条件下, 以氨为载体输送的能量比天然气多一倍。随着氨能源产业的发展, 管网输氨是大规模、长距离运氨的方向之一。美国正在运营的氨气输送管道长度接近5000 km。现阶段, 管道输氨的管网建设投资成本较高, 并且我国的运营经验不足, 相关的安全规范标准体系也不健全, 仍需要积极探索和发展。全球范围内采用液氨船进行液氨洲际运输的商业模式已十分完善, 依托氨燃料这一载体, 可实现全球分布不均衡的可再生能源再分配^[12]。

3 氨能应用技术

氨气本身是重要的氮素肥料, 用作氮肥的“化肥氨”占我国氨气消费总量的近70%, 同时氨作为重要的无机化工或有机化工的基础原料, 用于生产铵、染料、炸药、各类合成材料等“工业氨”占我国氨气消费总量的近30%。随着氨气的能源属性的开发, 伴随着绿色合成氨技术和各类氨燃料技术的发展和成熟, 氨能的应用场景将不断拓展丰富。

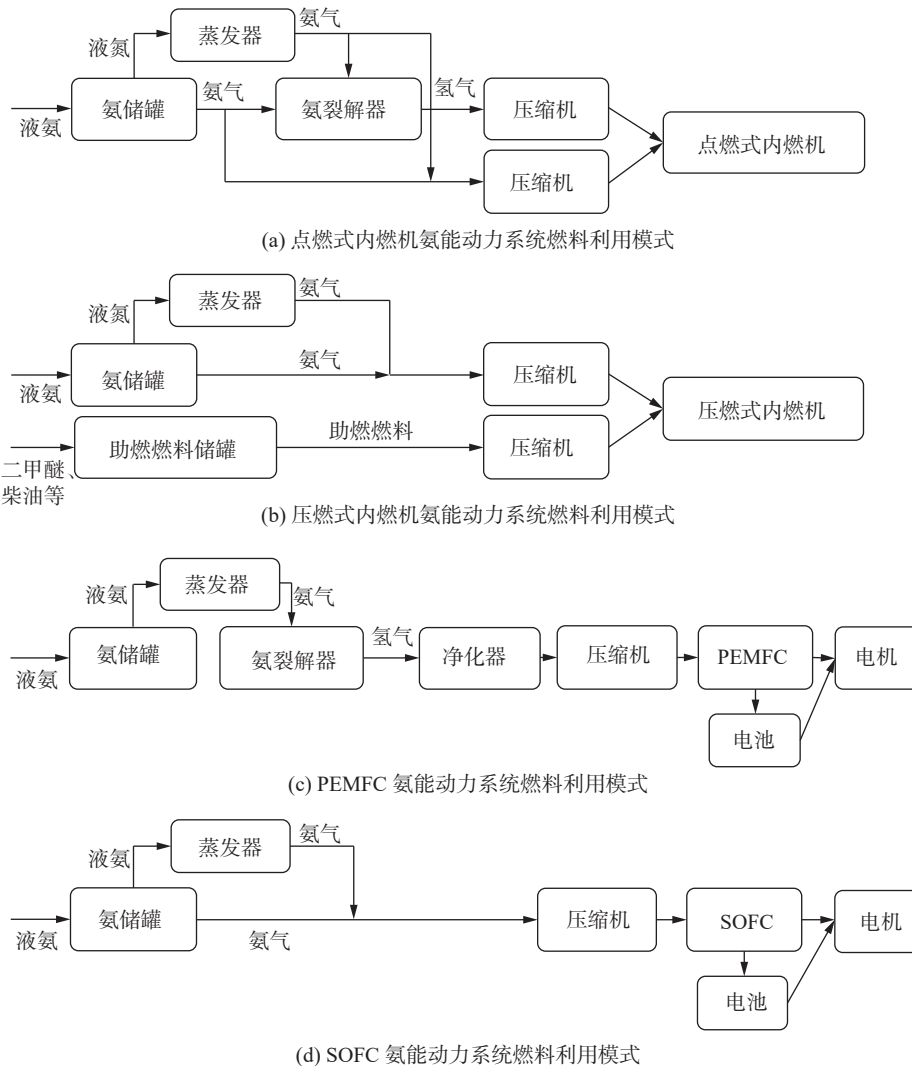
3.1 氨直燃技术

早在第二次世界大战时期, 由于战乱中断了石油运输, 比利时便尝试用氨作为公共汽车的燃料, 继而拉开了氨(NH₃)、肼(N₂H₄)等氨基燃料用于内燃机理论研究的序幕。相对于其他燃料, 氨的自然燃温度较高(651℃)、火焰的传播速度慢、可燃范围窄(按空气体积比计算在16%~25%)、汽化热高等理化特性, 如表1所示^[13], 导致其燃烧性能不佳, 需要与其他燃料混燃以提高燃烧质量。

氨混合其他气体燃料用作内燃机燃料是比较理想的直燃方式。气态燃料如氢气、汽油等更适合点燃式发动机, 它们可以与气态氨混合引入发动机内; 高辛烷值燃料如二甲醚、生物柴油等具有更好的点火特性则更适合压燃式发动机。混合氨燃料用于点燃式发动机与压燃式发动机动力系统的利用模式如图3(a)和图3(b)所示^[8]。这些氨燃料内燃机适用于乘用车、公共汽车、重型卡车、船舶等, 2021年底中国船舶及海洋工程设计研究院牵头设计研发的氨燃料动力超大型油船获得了中国船级社与美国船级社

表 1 氨气与其他燃料的特性对比^[13]Tab. 1 Comparison of properties between ammonia and other fuels^[13]

燃料	液氨	液氢	天然气	乙醇	汽油	柴油
密度/(kg·m ⁻³)	617.00	70.85	716.00	789.00	700.00 ~ 780.00	820.00 ~ 845.00
储存压力/MPa	1.11(20 ℃)	0.10(-253 ℃)	25.33	0.10(常压)	0.10(常压)	0.10(常压)
空燃比	6.14	34.78	14.39	6.52	15.11	14.72
质量低位热值/[MJ·(kg) ⁻¹]	18.61	121.00	38.10	26.90	44.00	43.00
体积低位热值/(MJ·L ⁻¹)	11.48	8.57	27.20	21.22	30.80 ~ 34.32	35.26 ~ 36.34
单位体积空气燃烧热/(MJ·m ⁻³)	2.53	2.88	2.40	2.47	2.39	2.34
单位质量空气燃烧热/[MJ·(kg) ⁻¹]	3.03	3.45	2.88	2.96	2.87	2.81

图 3 各类氨燃料动力系统构型概述^[8]Fig. 3 Summary of various ammonia fuel power system configurations^[8]

的原则认可 (Approval in Principle, AIP) 证书。

航运业的碳排放量占全球碳排放总量的 2%, 其减排也是重要的课题。沿海和内陆的水域短途货运

船和油轮等可以通过电气化或者采用生物燃料进行脱碳, 而远途尤其是洲际大型油船的脱碳则有可能通过绿色氨燃料实现。氨燃料动力船舶的推广需要

在港口建设氨气加注站点满足燃料供给, 因此未来最先采用氨燃料动力的船只应该是那些液氨的运输船。据相关研究的统计数据, 如果全球三分之一的船舶改用氨燃料, 氨气的消耗总量将与全球现有的氨气产能持平, 与此同时, 全球航运业进行绿氨燃料替代作为船舶减排的重要途径已逐渐成为共识。因此, 氨燃料动力船舶的推广也为绿氨提供了巨大的应用市场^[8]。

氨燃气轮机发电技术也在不断取得突破, 日本2021年最新的研究成果实现了70%的液氨混合天然气在2 MW级燃气轮机中的稳定燃烧, 并且这一燃烧过程还同时抑制了氮氧化物的产生。氨燃气轮机发电技术的持续进步也将助力发电领域的脱碳, 预计2025年氨燃气轮机将实现商业化。

3.2 氨燃料电池

相比于直接燃烧, 氨燃料电池具有更高的热效率、低噪音且低排放。按照氨气供给的方式不同, 氨燃料电池可以分为间接氨燃料电池与直接氨燃料电池^[14]。

间接氨燃料电池本质是氨裂解器与氢燃料电池的组合。氨需要先经过氨裂解器分解产生氢气, 再通入氢燃料电池进行发电, 如图3(c)所示。以质子交换膜氢燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)为例, 氨重整气中残留的氨气容易在电解质溶液中反应生成铵根离子, 进而置换质子交换膜中的质子, 从而影响质子交换膜的传导性, 导致燃料电池的性能受到影响。因此, 如果利用氨重整气作为氢燃料电池的燃料还需要气体净化装置对氢气进行除杂。间接氨燃料电池需要氨裂解器、重整气净化装置等, 装置成本高, 系统工艺也更加复杂, 利用氨燃料的难度大, 并不是理想的氨燃料电池模式。

直接氨燃料电池主要有两种类型: 直接供氨式碱性燃料电池与直接供氨式固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC), 其氨气利用模式如图3(d)所示。

碱性燃料电池采用氢氧化钾、氢氧化钠等碱性物质作为电解质传导电极之间的离子, 它是最早进入实用阶段的燃料电池之一, 主要用于短期的空间项目、航天器等。由于碱性燃料电池对二氧化碳等酸性物质比较敏感, 容易生成碳酸盐沉淀导致电池

输出功率骤降, 并且随着新型的燃料电池技术的开发, 碱性燃料电池技术的发展有所放缓。由于氨是弱碱性物质, 正好适用于碱性燃料电池。近年来, 直接供氨式碱性燃料电池的性能有了一定的提升, 其发电效率已经十分接近碱性氢燃料电池的水平。相比于PEMFC, 碱性燃料电池在其阴极反应动力学与降低欧姆极化等方面更具优势。并且, 碱性燃料电池可以使用非贵金属, 相比于使用贵金属(Pt)的PEMFC更具有成本优势。直接供氨式碱性燃料电池后续发展的关键在于开发更高效的催化剂以及化学稳定性、离子传导性更好的交换膜, 以提高其输出功率和效率。

SOFC是全固态的中高温型燃料电池, 能量转化效率高, 可以达到60%以上, 热电联供的效率更是高达80%以上, 其突出的优点是燃料适用性广, 可以采用天然气、氢气、醇类等作为燃料进行发电, 并且不需要采用贵金属作为催化剂, 是全球各发达国家重要的战略储备技术^[15]。氨燃料也适用于SOFC, 在700~900℃工作温度范围内, 氨燃料SOFC的发电效率已接近氢燃料。由于氨燃料SOFC在运行过程中氨氧化释放出的氮自由基容易与氧负离子结合产生氮氧化物, 其推广应用需要解决氮氧化物的排放问题。目前, 已有相关研究成果证明, 通过改善氨燃料SOFC固态电解质的质子传导性可以减少氮氧化物的生成^[16]。

由于没有机械运动部件, 氨燃料SOFC可以避免机械故障带来的发电中断, 可以实现更长时间平稳连续工作。根据SOFC的特性, 氨燃料SOFC可以作为各个规模级别的固定式电站以及大型油轮等海运船舶的发电装置^[17]。

2022年初, 我国自主研发技术的首座氨燃料电池发电站(3 kW级)成功发电并平稳运行, 该发电装置采用低温氨分解催化剂在线制氢, 供应氢燃料电池发电, 属于间接氨燃料电池。

3.3 氢储运载体

近年来氢能热潮已经席卷全球, 氢能产业也成为了我国能源领域发展布局的重点, 但是氢气的长距离、大规模运输至今仍未找到高效、经济、可行的解决方式。根据氨分子的原子组成, 其高比例的含氢量适合充当氢气的存储载体^[18]。

氢气具有易燃易爆的特性, 其存储条件较为苛

刻。在标准大气压的条件下,需要将温度降至 $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ 才可以将氢气液化,这一过程将消耗大量的能量,与之相比,氨只需将温度降至 $-33\text{ }^{\circ}\text{C}$ 便可以液化,能耗需求则大幅度减小。氢气与氮气合成氨,以液氨的形式进行氢气储运,其体积储氢密度约为液氢的 1.5 倍(其中液氨的体积储氢密度约为 102 kg/m^3 ,液氢的体积储氢密度约为 70 kg/m^3)。

日本、澳大利亚等国家已经在积极布局以氨为载体进行大规模氢气输送。澳大利亚依托其丰富的可再生能源与天然气资源优势,将可再生能源电力电解水生产的绿氢和天然气裂解生产的绿氢,转化成液氨,输送到日本、韩国等国家。

4 绿色氨-氢能源产业耦合发展模式

为了实现碳中和目标,全球可再生能源的装机规模将持续发展扩大。氨既是重要工业原料,又可作为化学燃料使用,其原料与燃料的双重属性与氢类似。随着氢能技术的不断进步,氨作为可再生能源大规模运输载体的潜力逐渐显现^[19]。未来由可再生能源制取的氨与氢将在大部分领域取代化石燃料,成为可再生能源技术的核心组成部分,氨能与氢能的产业耦合发展将不断深化,在共性关键技术方面互相促进,协同发展,如图 4 所示。

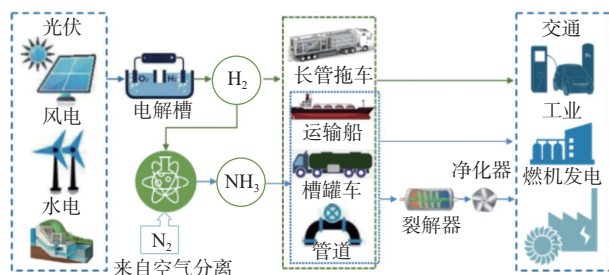


图 4 氨能与氢能产业链耦合网络

Fig. 4 Coupling network of ammonia energy and hydrogen energy industry chains

无论是绿氨还是绿氢,源头都来自可再生能源。绿氨由绿氢作为原料经合成获得,两者的生产环节都依赖于电解水制氢技术,电解槽及电价的成本下降都可直接促进绿氢与绿氨的成本下降;在储运方面,氨气与氢气的储运都可以通过管道、液化气船、槽罐车等进行运输。由于氨更容易液化,以液氨形式运输效率远高于高压气态形式运输,通常不考虑以气态形式运输;在利用环节,氨气和氢气均可直接

应用于交通(燃料电池、内燃机)、工业(化工原料)、发电(燃料电池、燃气轮机)等领域^[20]。氨气也可以进一步裂解,以氢气的形式应用于以上场景。

5 氢能技术发展机遇与挑战

5.1 氢能技术发展的机遇

氨具有原料和燃料的双重属性,其与氢在构建新能源体系中的角色和定位相似,可作为可再生能源大规模、长距离转移的介质。氨与氢在关键技术与应用场景方面重合度较高,进一步地,在全球范围内,氢能技术与产业也有了一定的布局与发展,氨能可以依托氢能产业的基础进行快速渗透,与氢能形成耦合发展的态势,助力碳达峰、碳中和^[21]。

氨能技术的发展具有以下多方面的优势:

1)氨不含有碳元素,燃烧利用不会产生碳排放,燃烧爆炸的风险小于汽油、天然气等燃料。此外,氨具有刺激性气味,如发生泄露可以快速觉察,有利于及时处理安全风险。

2)氨的液化相比于氢较为容易(常温 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下, $0.8\sim 1.2\text{ MPa}$ 便可以液化),并且液氨的体积能量密度可以达到液氢的 1.5 倍,比液氢具有更高效的能量运输效率。传统的工业合成氨产业已较为完整和成熟,可以依托现有的技术、基础设施以及供应链实现氨的大规模、远距离高效运输。

3)氨作为良好的储氢载体,也是解决当前氢储运难题的有效方式之一。其次,氨作为零碳燃料也不断在被认可,成为氢能之外又一理想能源,可以借鉴和依托氢能产业的发展基础进行快速推广。

4)氨燃料电池、氨燃料发动机、氨燃气轮机等技术正在持续进步,氨能在航运、发电等领域的应用场景也在不断丰富,为绿氨产业发展提供广阔的空间。

5.2 氨能技术面临的挑战

氨作为能源应用,无论是技术还是产业上都还处于比较早期的阶段,大规模推广应用还面临着技术和商业上的挑战。

1)氨的燃烧性较差,目前需要和其他燃料进行混合燃烧才能保障燃烧质量,且燃烧产物中含有会污染大气的氮氧化物,尤其一氧化二氮是一种强效温室气体,同等质量的一氧化二氮产生的温室效应是二氧化碳的 265 倍,需要改进燃烧技术提高燃烧

效率以及减少氮氧化物的排放。

2) 氨作为能源和燃料的利用仍处在初期研发阶段, 氨燃料技术并不成熟, 大多数处于实验室验证或概念设计阶段, 仍需要积极推动工程示范积累运营经验, 实现商业化成熟。

3) 尽管传统的合成氨工业基础设施完善, 但是氨作为燃料所需要的基础设施, 如氨燃料加注站等仍需要进一步加强, 解决氨能源示范项目燃料需求, 推进其产业化。

4) 氨仍属于危化品, 氨能源产业技术发展有一定阶段之后, 在必要的环境和安全条件下将氨能作为能源管理, 保障氨能在各领域的多元化、规模化发展。

5) 氨能高效利用正在成为近期全球关注的焦点, 然而这仅仅是起点, 要推动氨能的规模化和有序发展, 还需要建设完整的配套体系。从国家层面进行氨能顶层设计, 尽快编制国家的氨能产业发展规划, 明确氨能的战略定位和发展目标, 鼓励可再生能源丰富区先行先试, 带动氨燃料降成本; 围绕氨燃料生产、储运、加注、利用等环节, 加快建立完善的氨能源标准体系; 建立国家氨能源技术创新平台, 围绕氨燃料电池、氨燃料发动机、氨燃气轮机等的关键材料、技术、核心零部件进行研发攻关, 探索可再生能源制氨、分布式氨能发电等前沿技术开发。

6 结论

低碳氨在全球脱碳中发挥重要作用, 在未来的应用场景多种多样, 有望成为新一代能源技术。氨也是优质的清洁能源载体, 可以解决大规模间歇性可再生能源(风能、太阳能等)的储存与运输难题。尤其我国油气资源匮乏, 对外依存度高, 探索发展氨能对保障我国能源安全具有重要战略意义。现阶段氨燃料技术的高效利用仍十分具有挑战性, 需要从政策支持、创新平台、标准体系全方位布局, 保障核心技术、关键设备的研发攻关, 积极探索应用示范工程, 推进其产业化发展。

参考文献:

- [1] International Energy Agency. Ammonia technology roadmap: towards more sustainable nitrogen fertiliser production [R]. Paris: International Energy Agency, 2021.
- [2] 姚若军, 高啸天. 氢能产业链及氢能发电利用技术现状及展

望[J]. *南方能源建设*, 2021, 8(4): 9-15. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.002.

YAO R J, GAO X T. Current situation and prospect of hydrogen energy industry chain and hydrogen power generation utilization technology [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(4): 9-15. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.002.

- [3] 蔡绍宽. 双碳目标的挑战与电力结构调整趋势展望[J]. *南方能源建设*, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002.

CAI S K. Challenges and prospects for the trends of power structure adjustment under the goal of carbon peak and neutrality [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(3): 8-17. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.03.002.

- [4] MCKINLAY C J, TURNOCK S R, HUDSON D A. Route to zero emission shipping: hydrogen, ammonia or methanol? [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2021, 46(55): 28282-28297. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.066.

- [5] VALERA-MEDINA A, XIAO H, OWEN-JONES M, et al. Ammonia for power [J]. *Progress in energy and combustion science*, 2018, 69: 63-102. DOI: 10.1016/j.peccs.2018.07.001.

- [6] MACFARLANE D R, CHEREPANOV P V, CHOI J, et al. A roadmap to the ammonia economy [J]. *Joule*, 2020, 4(6): 1186-1205. DOI: 10.1016/j.joule.2020.04.004.

- [7] SMITH C, HILL A K, TORRENTE-MURCIANO L. Current and future role of Haber-Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape [J]. *Energy & environmental science*, 2020, 13(2): 331-344. DOI: 10.1039/C9EE02873K.

- [8] HANSSON J, FRIDELL E, BRYNOLF S. On the potential of ammonia as fuel for shipping: a synthesis of knowledge [R]. Göteborg, Sweden: Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), 2020.

- [9] 张轩, 王凯, 樊昕晔, 等. 电解水制氢成本分析[J]. *现代化工*, 2021, 41(12): 7-11. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2021.12.002.

ZHANG X, WANG K, FAN X Y, et al. Cost analysis on hydrogen production via water electrolysis [J]. *Modern Chemical Industry*, 2021, 41(12): 7-11. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2021.12.002.

- [10] CHEN J G, CROOKS R M, SEEFELDT L C, et al. Beyond fossil fuel-driven nitrogen transformations [J]. *Science*, 2018, 360(6391): eaar6611. DOI: 10.1126/science.aar6611.

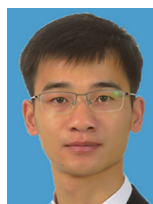
- [11] 夏鑫, 蔺建民, 李妍, 等. 氨混合燃料体系的性能研究现状[J]. *化工进展*, 2022, 41(5): 2332-2339. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2021-1131.

XIA X, LIN J M, LI Y, et al. Research progress on performance and application of ammonia fuel on engines [J]. *Chemical industry and engineering progress*, 2022, 41(5): 2332-2339. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2021-1131.

- [12] LAVAL A, HAFNIA, TOPSOE H, et al. Ammonfuel-an industrial view of ammonia as a marine fuel [R]. Singapore:

- Hafnia, 2020.
- [13] 丁梦豪, 胡以怀, 高雨顺, 等. 氨燃料在发动机中的应用研究 [J]. *能源与节能*, 2021(12): 163-165. DOI: [10.16643/j.cnki.14-1360/td.2021.12.062](https://doi.org/10.16643/j.cnki.14-1360/td.2021.12.062).
- DING M H, HU Y H, GAO Y Q, et al. Application of ammonia fuel in engines [J]. *Energy and energy conservation*, 2021(12): 163-165. DOI: [10.16643/j.cnki.14-1360/td.2021.12.062](https://doi.org/10.16643/j.cnki.14-1360/td.2021.12.062).
- [14] 郝学殷, 徐荣琦, 吕涵, 等. 氨燃料电池用于电力应急发电工作的前景探讨 [J]. *电力科学与工程*, 2020, 36(8): 63-71. DOI: [10.3969/j.issn.1672-0792.2020.08.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-0792.2020.08.010).
- HAO X Y, XU R Q, LÜ H, et al. Discussion on the feasibility of ammonia fuel cell used in emergency power generation [J]. *Electric power science and engineering*, 2020, 36(8): 63-71. DOI: [10.3969/j.issn.1672-0792.2020.08.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1672-0792.2020.08.010).
- [15] 曹静, 王小博, 孙翔, 等. 基于固体氧化物燃料电池的高效清洁发电系统 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(2): 28-34. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.004](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.004).
- CAO J, WANG X B, SUN X, et al. High-efficiency clean power generation system based on solid oxide fuel cell [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(2): 28-34. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.004](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.004).
- [16] 郭朋彦, 聂鑫鑫, 张瑞珠, 等. 氨燃料电池的研究现状及发展趋势 [J]. *电源技术*, 2019, 43(7): 1233-1236. DOI: [10.3969/j.issn.1002-087X.2019.07.044](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-087X.2019.07.044).
- GUO P Y, NIE X X, ZHANG R Z, et al. Research status and development trend of ammonia fuel cells [J]. *Chinese journal of power sources*, 2019, 43(7): 1233-1236. DOI: [10.3969/j.issn.1002-087X.2019.07.044](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-087X.2019.07.044).
- [17] 于琳竹, 王放放, 蒋昊轩, 等. 氨储能在新型电力系统的应用前景、挑战及发展 [J/OL]. *化工进展*: 1-20 (2023-02-09) [2023-04-13]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1817>.
- YU L Z, WANG F F, JIANG H X, et al. Application prospect, challenge and development of ammonia energy storage in new power system [J/OL]. *Chemical Industry and Engineering Progress*: 1-20 (2023-02-09) [2023-04-13]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2022-1817>.
- [18] 滕霖, 尹鹏博, 聂超飞, 等. “氨-氢”绿色能源路线及液氨储运技术研究进展 [J]. *油气储运*, 2022, 41(10): 1115-1129. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2022.10.001](https://doi.org/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]. *Frontier & overview*, 2022, 41(10): 1115-1129. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2022.10.001](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2022.10.001).
- [19] 张克金, 马亮, 姜明慧, 等. 我国绿色氨能源技术与产业展望 [J]. *汽车文摘*, 2023(1): 25-33. DOI: [10.19822/j.cnki.1671-6329.20210281](https://doi.org/10.19822/j.cnki.1671-6329.20210281).
- HANG K J, MA L, JIANG M H, et al. Green ammonia energy technologies and industrial prospects in China [J]. *Automotive digest*, 2023(1): 25-33. DOI: [10.19822/j.cnki.1671-6329.20210281](https://doi.org/10.19822/j.cnki.1671-6329.20210281).
- [20] 徐也茗, 郑传明, 张韞宏. 氨能源作为清洁能源的应用前景 [J]. *化学通报*, 2019, 82(3): 214-220. DOI: [10.14159/j.cnki.0441-3776.2019.03.004](https://doi.org/10.14159/j.cnki.0441-3776.2019.03.004).
- XU Y M, ZHENG C M, ZHANG Y H. Application prospect of ammonia energy as clean energy [J]. *Chemistry*, 2019, 82(3): 214-220. DOI: [10.14159/j.cnki.0441-3776.2019.03.004](https://doi.org/10.14159/j.cnki.0441-3776.2019.03.004).
- [21] 王放放, 于琳竹, 李琦, 等. “双碳”背景下燃煤电厂制氨与氨利用进展 [J]. *化学通报*, 2023, 86(3): 323-332. DOI: [10.14159/j.cnki.0441-3776.2023.03.009](https://doi.org/10.14159/j.cnki.0441-3776.2023.03.009).
- WANG F F, YU L Z, LI Q, et al. Progress of ammonia production and utilization in coal-fired power plants under the background of "dual carbon" [J]. *Chemistry*, 2023, 86(3): 323-332. DOI: [10.14159/j.cnki.0441-3776.2023.03.009](https://doi.org/10.14159/j.cnki.0441-3776.2023.03.009).

作者简介:



罗志斌

罗志斌(第一作者, 通信作者)

1989-, 男, 广东清远人, 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研究与产业化(e-mail)luozhibin@gedi.com.cn。

孙潇

1993-, 女, 湖南长沙人, 浙江大学制冷与低温专业博士, 主要从事液化空气储能与氨储运工作(e-mail)sunxiao@gedi.com.cn。

(编辑 叶筠英)