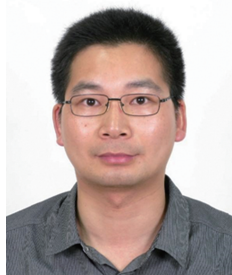


2060 碳中和



欧训民 副教授
清华大学

欧训民,清华大学能源环境经济研究所能源系统分析方向副教授、博士生导师。清华大学工学学士、管理学硕士、管理学博士毕业。兼任中国能源研究会能源系统工程专委会副秘书长、*Energy* 能源与交通交叉领域编辑(Subject Editor)。研究方向为低碳技术战略、储能与氢能系统分析、全生命周期分析和交通能源战略。主持国家级和省部级课题40余项,撰写专著10部,发表SCI/SSCI检索论文50余篇,在《人民日报》署名刊发文章3篇;入选联合国IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change,政府间气候变化专门委员会)第六次评估报告主要作者(Lead Author)。曾获北京市优秀博士论文奖(2011)、清华大学学术新人奖(2015)和国家能源软科学研究成果奖(2016)等多项荣誉。

面向不同应用场景的中国氢能制储运用全产业链碳足迹分析

王明华¹,陈泽宇²,王雯¹,任磊²,刘建喆²,欧训民²

(1.国家能源集团技术经济研究院,北京 100084;2.清华大学 能源环境经济研究所,北京 100084)

摘要:氢能是一种用途广泛、绿色低碳的潜在清洁能源,其在安全性、能量密度、储运便捷性等诸多方面与氢能相比具有一定优势。我国氢能应用在交通、电力等领域的应用尚处于起步阶段,相关碳足迹研究备受关注。重点对加氢站、氨燃料供给站、发电厂和化工厂等应用场景下的中国氢能全产业链进行分阶段的全生命周期碳足迹分析,并重点分析氢能用于交通燃料和电力掺烧场景的碳排放水平。结果表明:从不同技术路线看,所有场景下网电电解水制氢—HB(Haber-Bosch process,哈勃法)合成氨—液氨厢车运氨—网电裂解氨制氢路线的碳足迹水平最高,超过600 g/MJ(以CO₂当量计);风电电解水制氢—HB合成氨—管道输氨—光伏发电裂解氨制氢路线的碳足迹水平最低,低于40 g/MJ。从制储运用各阶段分开看,除风电电解水制氢—合成氨路线外,氢能生产阶段的碳排放占比最高。从影响因素看,制氢、合成氨和氨裂解制氢等各阶段的电力消耗水平及电力碳排放系数对氢能全产业链的碳足迹高低具有重要影响。从氢能具体应用的交通用能案例看,相对于传统石油基燃料,采用可再生电力进行制氢并生产的绿氨和采用碳捕捉技术的化石能源生产的蓝氨技术路线都具有大幅降低(80%以上)碳排放水平的优势。

关键词:氢能;碳足迹;应用场景;碳中和;低碳能源;低碳燃料

中图分类号:TQ53;TK114 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2024)05-0001-12

Carbon footprint analysis of China's ammonia energy production-storage-transportation-utilization full-chain for different application scenarios

WANG Minghua¹, CHEN Zeyu², WANG Wen¹, REN Lei², LIU Jianzhe², OU Xunmin²

收稿日期:2023-06-20;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.CN23062001

基金项目:国家能源集团科技资助项目(GJNY-22-154);国家自然科学基金资助项目(72174103)

作者简介:王明华(1980—),男,江西九江人,高级工程师。E-mail:17230032@ceic.com

通讯作者:欧训民(1978—),男,湖南宁乡人,副教授,博士。E-mail:ouxm@mail.tsinghua.edu.cn

引用格式:王明华,陈泽宇,王雯,等.面向不同应用场景的中国氢能制储运用全产业链碳足迹分析[J].洁净煤技术,2024,30(5):1-12.

WANG Minghua, CHEN Zeyu, WANG Wen, et al. Carbon footprint analysis of China's ammonia energy production-storage-transportation-utilization full-chain for different application scenarios[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(5): 1-12.



移动阅读

(1. CHN Energy Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 100084, China;

2. Institute of Energy, Environment and Economy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Ammonia energy is a widely used, green and low-carbon new type of clean energy, which has outstanding advantages over hydrogen energy in terms of safety, energy intensity, easy-to-storage and transport, and many other aspects. The application of ammonia energy in transportation, power, chemical and other sectors in China is still in its infancy, but the related carbon footprint research has received much attention. This study conducted a step-by-step life cycle carbon footprint analysis of China's ammonia energy's full industrial chain under application scenarios such as hydrogen refueling stations, ammonia fuel supply stations, and power plants, and focus on analyzing the carbon emission level of ammonia energy used in the scenario of transportation fuel and power sector. The research results show that, from the perspective of different technology routs, in all scenarios, the carbon dioxide emissions of ammonia energy in the whole life cycle of the electrolyzed water hydrogen production HB (Haber Bosch process) synthetic ammonia liquid ammonia vehicle route are the highest, more than 600 g/MJ. Hydrogen production from renewable energy electrolyzed water - HB synthetic ammonia - pipeline transmission route has the lowest carbon dioxide emission in the whole life cycle of ammonia energy, which is lower than 40 g/MJ. For each stage, the fuel production stage accounts for the highest proportion of carbon footprint in all stages of production, storage and application of various ammonia production technology pathway, except for the renewable energy electrolysis ammonia production pathway. From the perspective of influencing factors, the power consumption level and its carbon emission factor in each stage of hydrogen production, ammonia generation and ammonia cracking for hydrogen production play an important role in the carbon footprint of the whole industrial chain of ammonia energy production, storage and utilization. From the perspective of application scenarios, in the scenarios of chemical plants, steel plants, and power plants, due to the short transportation distance and low energy consumption for storage and transportation, the carbon dioxide emissions throughout the full life cycle of 1 MJ ammonia energy are relatively low. From the perspective of application scenarios, in the field of transportation, the green ammonia and blue ammonia technology pathway has the advantage of significantly reducing the carbon footprint (more than 80%) compared with traditional petroleum fuels.

Key words: ammonia energy; carbon footprint; application scenario; carbon neutrality; low carbon energy; low carbon fuel

0 引言

控制温室气体(Greenhouse Gases, GHG)排放是低碳发展的核心内容。温室气体指大气层中自然存在的和由于人类活动产生的能够吸收和散发由地球表面、大气层和云层所产生的、波长在红外光谱内的辐射的气态成分(GB/T 32150—2015《工业企业温室气体排放核算和报告通则》),主要包括《京都议定书》规定的二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟碳化物(PFCs)与六氟化硫(SF₆),后5种气体根据不同物质的100 a时间尺度的全球增温潜力折算成CO₂当量计算。温室气体排放称为碳排放,如无特殊说明,本文中碳排放即为温室气体排放的简称。

产品碳足迹(Product Carbon Footprint, PCF)在国际标准ISO 14067(第1版,2018年8月)《温室气体-产品碳足迹-量化要求和指南》中定义为产品系统中的温室气体排放量和温室气体去除量之和,以CO₂当量为单位表示,基于使用气候变化单一影响类别的生命周期评价。这里的生命周期(Life Cycle, LC)是指产品系统中前后衔接的一系列阶段,从自然界或从自然资源中获取原材料,直至最终处置(GB/T 24040—2008《环境管理 生命周期评价 原则与框架》);而生命周期评价(Life Cycle

Assessment, LCA)是对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价(GB/T 24044—2008《环境管理 生命周期评价 要求与指南》)。与只包括部分生产过程排放的核算方法相比,碳足迹核算包含产品上下游全过程排放。

氢能和氨能发展日益受到重视,成为重要的技术发展方向。氢能由于安全性低、燃点低、易燃易爆、储运难度大等劣势,在当前氢能大规模推广应用方面存在一定阻碍,而氨燃料作为一种无碳化合物,燃烧时不产生CO₂,只产生水和氮气及少量NO_x,是一种可以代替化石燃料的新型绿色能源。同时,氨是富氢载体,氢元素高达17.6%,可作为储运氢的载体;具有能量密度高、安全性高、易被压缩液化、储运难度小等优势^[1]。

氨用途较广泛,用于化肥、燃料等诸多领域。目前,日本等国开展了氨作为燃料的研发应用,其主要应用领域集中于燃气轮机、内燃机及燃料电池等领域。我国是合成氨大国,每年合成氨总产量约5 000万t,占世界总产量的1/3^[2]。2021年我国合成氨表观消费量为5 990万t。从发展趋势看,化肥领域消费合成氨占比呈下降趋势,非肥料领域的消费主要应用于环保、新材料和化学品等工业领域。总体来看,合成氨消费呈现刚性支撑特点,在2030年前规模仍将保持增长,预计到2025年国内合成氨总需求

约 6 400 万 t/a。近年来,受国内淘汰落后产能及能耗双控等影响,合成氨产能有所下降,但未来工业领域需求增加,将刺激合成氨产能进一步提升,预计到 2025 年,国内合成氨总产能达到 7 000 万 t/a^[3]。

我国合成氨原料结构与国际合成氨原料结构差异较大。国际上合成氨以天然气为主要生产原料,国内合成氨以煤为主要原料,占总产能的 77%。我国氨生产主要是以煤气化—HB (Haber - Bosch process, 哈勃法) 技术,即通过煤气化制氢技术取得氢气,以及空气分离制氮工艺获取氮气,并通过高温高压条件下加入催化剂采用 HB 工艺实现氨的合成。氢能储运目前以液氨厢车储运技术为主,氨气经液化通过厢车运输至以化工厂为代表的应用场景用于化肥、制冷剂 etc 化工产品的制作生产^[3]。

当前我国氨的应用约 80% 集中于化肥领域^[4],作为燃料应用的研究尚处于起步阶段。现有研究表明,氨在燃料等领域具有突出优势性能,在交通、电力等诸多领域能作为燃料使用。夏鑫等^[5]研究氨混合燃料体系的性能,针对不同混合氨燃料的性能进行交通领域应用分析,对我国碳中和背景下氨燃料的应用发展提出系统性展望。徐也茗等^[6]研究氨作为发动机燃料和燃料电池在交通领域的应用,介绍其作为车用能源的优越性及局限性,认为应加快氨燃料的研发应用。高正平等^[7]系统综述零碳电力下氨燃料燃烧技术,论述氨燃料在燃气轮机、内燃机、燃料电池及锅炉等领域的应用技术,认为氨燃料对能源替代具有重要作用。

总体来看,现有研究多集中于氢能作为燃料在交通、发电等领域的应用展望,对于不同应用场景氢能制取、储运、应用的分阶段碳排放和全产业链碳足迹分析较少。从国际相关研究看,CHISALITA 等^[8]测算出天然气重整制氨阶段的 CO₂ 排放量为 163 g/MJ (以 CO₂ 当量计,下同);BICER 等^[9]测算出天然气重整—HB 合成氨阶段碳排放为 108 g/MJ,测算出煤气化—HB 合成氨阶段的碳排放为 172 g/MJ。刘婷婷^[10]测算出煤气化—HB 合成氨的碳排放为 223 g/MJ。总体而言,氢能碳足迹的相关研究数据匮乏、缺乏时效性。

因此基于中国氢能制储运用实际情况,进行面向不同应用场景并包含制氨、储氨、运氨、氨应用各阶段的全产业链碳足迹计算,具有学术和实践价值。

1 模型方法

1.1 计算框架

功能单位设定为 1 MJ 氢能,并采用氢能热值为 18.6 MJ/kg^[11] 进行换算。氢能源链碳足迹计算框架如图 1 所示。基于 Tsinghua-LCA 模型^[12] 开展生命周期评价,测算氢能产品从原材料获取直到生产应用的全生命周期温室气体排放强度(简称碳强度),即进行面向不同应用场景的中国氢能制、储、运、用全产业链(包含氢能生产、氢能运输、氢能生产、氢能运输和氢能利用各阶段)的碳足迹分析,其中氢能生产阶段包括空气分离制氮、合成氨、氨气提纯等工序,氢能利用阶段包括可能的氨裂解制氢工序。

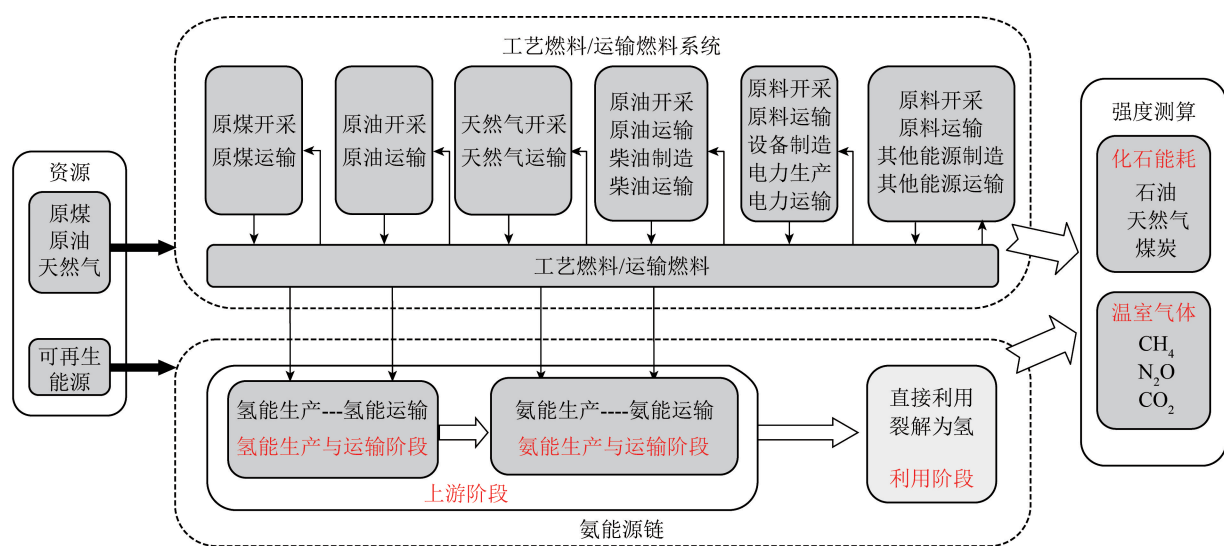


图 1 氢能源链碳足迹计算框架

Fig.1 Carbon footprint calculation framework for ammonia energy chain

研究对象包括以传统化石能源制氨为代表的煤气化—HB 合成氨、天然气重整—HB 合成氨、电解

水制氢—HB 合成氨,以及以风电为代表的可再生能源电解水制氢—HB 合成氨的多条技术路线;氨

能或其裂解生产的氢能的应用场景主要包括加氢站、氢能发电站、化工厂、氨燃料供给站和氢能发电站等。值得指出的是,氨在化工厂的利用,目前主要用作原料,而非提供能源的物质,严格来说不是能源的应用,但为了研究框架完整性和分析结果可比性,本研究仍将这个场景定义为广义的“氢能直接用于化工厂场景”。

本研究的研究边界包括直接排放和各种工艺燃料、运输燃料使用量对应的间接排放,其中风电和光伏发电的碳排放包括相关电力设备制造、安装与维护各阶段的间接排放。

1.2 模型介绍

Tsinghua-LCA模型由层次递进的2个部分组成:①中国主要终端能源的LCA能源及GHG排放强度计算的基础平台(以下简称基础平台);②具体燃料路线的LCA能耗与GHG排放微观计算的分析程序(以下简称分析程序)。“基础平台”采用基于计算机EXCEL软件的迭代运算方法,可求出我国主要终端能源的全生命周期(或上游阶段)化石能源及GHG排放强度数据清单。“分析程序”为基于燃料路线子阶段划分和相应终端能源消费状况,结合终端能源全生命周期强度数据清单,可求出具体燃料路线的全生命周期能耗和GHG排放的自主开发程序。

模型中终端能源全生命周期化石能源强度(E_{LC})为1 MJ终端能源获取过程中包括原料投入的一次化石能源总消耗量(MJ/MJ);终端能源全生命周期碳排放强度(G_{LC})则为1 MJ终端能源获取和利用过程中导致的GHG排放量(g/MJ)。

一次化石能源输入考虑煤炭、石油和天然气(Natural Gas, NG),共计3种;重点分析的终端能源为煤炭、石油、天然气基燃料及电力,共计9种;全生命周期分为4个子阶段进行考虑:原料生产、原料运输、燃料生产和燃料运输。终端能源中精煤由原煤经分选和运输后才用作终端能源;精制天然气由原始天然气加压运输后才用作终端能源。

在测算全生命周期清单时,系统边界扩展到相关工艺燃料和交通燃料的直接使用及其相应的LCA能耗和GHG排放,但不考虑工厂基建和交通工具制造等活动导致的间接能耗。

相应的计算方法为

$$F_{LC} = \sum_z \sum_j \sum_i (E_{m,z,j} P_{j,i}), \quad (1)$$

式中, F_{LC} 为全生命周期一次化石能源强度,MJ/MJ,即获取和使用1 MJ燃料所导致一次化石能源强度;

i 为一次能源种类(原煤、原气、原油); j 为工艺燃料种类(煤、天然气、汽油、柴油、燃料油、电力); m 为技术路线; z 为各生产加工和运输阶段; $E_{m,z,j}$ 为生产阶段 z 的工艺燃料终端能源 j 的消耗量,MJ/MJ; $P_{j,i}$ 为工艺燃料与一次化石能源的折算系数。

$$G_{LC,G} = \sum_{z=1}^4 \sum_{j=1}^6 E_{m,z,j} (D_{G,j} + U_{G,j}), \quad (2)$$

式中, $G_{LC,G}$ 为全生命周期第 G 类GHG排放强度,g/MJ,即获取和使用1 MJ燃料所导致第 G 类GHG排放量; G 为GHG种类(CO_2 、 CH_4 和 N_2O),3种GHG按照全球增温潜力系数统一折算为 CO_2 当量(G_{LC}); $D_{G,j}$ 为直接排放系数; $U_{G,j}$ 为上游排放系数。

1.3 计算过程

与前文提到的分析程序计算过程相同,本研究包括3个步骤:①整理氢能生产、氢能运输、氢能生产、氢能运输和氢能利用各阶段的能耗数据;②更新终端能源全生命周期碳强度系数;③测算各阶段的碳排放水平和汇总核算氢能全产业链碳足迹数值。

2 数据整理

对应氢能生产、氢能运输、氢能生产、氢能运输和氢能利用各阶段的碳排放分析需求,本研究数据整理工作重点包含原料生产、原料运输及燃料生产、燃料运输和燃料应用阶段的各种能耗数据收集,以及终端能源全生命周期碳强度系数更新整理。

2.1 原料生产、原料运输及燃料生产阶段

2.1.1 煤气化—HB合成氨技术路线

现阶段,煤气化—HB合成氨是我国最主要的制氨技术,以先进流化床技术煤气化方法为重点。

1)原料生产阶段。主要考虑原料煤在煤炭生产、加工过程中消耗的能源及产生的碳排放。1 MJ煤在煤炭开采加工阶段消耗的一次能源量,分别是煤0.066 MJ、石油0.003 MJ和天然气0.002 MJ^[13]。

2)原料运输阶段。主要考虑原料煤在煤炭运输过程中消耗的能源及产生的碳排放。1 MJ煤在煤炭运输阶段消耗的一次能源量,分别是煤0.02 MJ、石油0.012 MJ和天然气0.001 MJ^[13]。

3)燃料生产阶段。主要考虑煤和电的消耗,1 MJ氨生产阶段的电耗、煤耗分别是煤1.61 MJ和电0.23 MJ^[14-15]。

2.1.2 天然气重整—HB合成氨技术路线

天然气重整—HB合成氨主要消耗的制氢原料为天然气,在重整制氢及HB(Haber-Bosch

Process,哈勃法)过程中还消耗部分电力。

1)原料生产阶段。主要考虑天然气生产、加工过程中消耗的能源及产生的碳排放。1 MJ 天然气在天然气开采加工阶段消耗的一次能源量分别是煤 0.066 MJ、石油 0.007 MJ 和天然气 0.145 MJ^[13]。

2)原料运输阶段。主要考虑原料天然气在运输过程中消耗的能源及产生的排放。1 MJ 天然气在运输阶段消耗的一次能源分别是煤 0.050 MJ、石油 0.012 MJ 和天然气 0.001 MJ^[13]。

3)燃料生产阶段。即天然气重整—HB 合成氨主要过程——天然气重整过程,此阶段主要考虑天然气及电力消耗,1 MJ 氨能在燃料生产阶段消耗天然气 1.94 MJ、电 0.15 MJ^[14-17]。

2.1.3 电解水制氢—HB 合成氨技术路线

电解水制氢—HB 合成氨的碳排放分析分为网电电解水制氢—HB 合成氨、可再生能源电力(以风电和光伏发电为代表)电解水制氢—HB 合成氨 2 条路线。网电电解水制氢—HB 合成氨中,网电在原料生产、原料运输及燃料生产阶段中有大量能耗及碳排放,而风电和光伏发电等则在上述阶段相对较小。

1)原料生产阶段。主要考虑各种发电技术的能耗及排放。1 MJ 网电原料生产阶段的一次能源消耗量,分别是煤 0.158 MJ、石油 0.008 MJ 和天然气 0.009 MJ^[13]。

2)原料运输阶段。主要考虑网电在运输阶段的能耗及碳排放。1 MJ 网电作为制氢制氨的原料在运输阶段的一次能源消耗量,分别是煤 0.006 MJ、石油 0.029 MJ 和天然气 0.002 MJ^[13]。

3)燃料生产阶段。在 PEM (Proton Exchange Membrane,质子交换膜)电解水路线下,1 MJ 氨能的电耗为 2.13 MJ^[18-20]。

2.2 燃料运输和燃料应用阶段

2.2.1 燃料运输阶段

1)气氨厢车方式。该方式是将制取的氨气通过压缩加压到一定气压水平后,将其输送至大型储氨钢瓶后经气氨厢车运输至应用地点,氨气压缩过程中的能耗主要为电耗。王月姑等^[16]研究表明该阶段压缩耗电为 0.18 kWh/kg(以氨计),而运输柴油消耗为 0.25 L/km(针对储运量为 9 000 kg/车)。

2)管道输送方式。该方式主要考虑氨气压缩电耗。文献^[21]表明 2 000 km 输氢管道和输氨管道的运送成本分别为 6.50 和 1.17 元/kg(以氨计,合 0.21 元/kg(以氨计))。参考我国洛阳—济源 25 km 输氢管道的输氢能耗作为 750 km 液氨管道的输氨

能耗,该项目年输送能力为 21.97 万 t/a,压缩耗电为 0.18 kWh/kg^[22]。

3)液氨槽车方式。该方式将氨气降温至-33 ℃使其液化后装入液氨储罐中,经液氨槽车运送至应用场地。该方式碳排放分析主要考虑液化过程中能耗及运输油耗,一辆一次可储运 27 000 kg 的液氨槽车,耗油 0.25 L/km^[22]。

4)液氨船舶方式。该方式主要考虑将氨液化电耗及船舶行驶过程中油耗,参考 NIERMANN 等^[23]、KIM 等^[24]研究案例,本研究船舶每天耗油 56 t(针对 58 600 t 运载量),具体数据见表 1。

表 1 液氨船舶方式的基本参数

Table 1 Basic parameters of liquid ammonia ship mode

参数	数值
耗油/(t·d ⁻¹)	56
时速/(km·h ⁻¹)	27.78
液化耗电/(kWh·kg ⁻¹)	0.6

5)液氨厢车方式。该方式将氨液化后储存至液氨钢瓶中,通过厢车储运至指定应用场景。参考王月姑等^[16]数据,对于一次可储运 10 000 kg 的液氨槽车,其 100 km 耗油 25 L,具体数据见表 2。

表 2 液氨厢车方式基本参数

Table 2 Basic parameters of liquid ammonia tank car mode

参数	数值
柴油消耗/(L·km ⁻¹)	0.25
储运量/(kg·车 ⁻¹)	10 000
液化耗电/(kWh·kg ⁻¹)	0.6

2.2.2 燃料应用阶段

主要考虑氢能裂解为氢气的阶段(如有)和氨气或氢气利用阶段。由于在化工厂、燃料供给站、发电厂等应用场景中,如果直接使用氢能,该阶段不产生直接碳排放。如果氢能作为交通或电力燃料运输至加氢站、氢能发电厂后,先进行氨裂解制氢工序并对氢能进行应用,对应 1 kg 氨裂解为氢工序的耗电水平为 3.26 kWh/kg^[25]。

2.3 终端能源全生命周期碳强度系数

中国主要终端能源的全生命周期化石能源强度和碳强度见表 3,中国主要终端能源全生命周期碳强度系数参考文献^[13]。这些强度清单数据可结合第 3.1 节和 3.2 节提到的氢能制储运用各阶段的终端能源消耗水平,从而计算氢能全生命周期碳排放(即碳足迹)。另外,根据文献^[26],主要考虑发电设备制造、安装和维护各阶段的间接碳排放的光伏发电和风电的电力全生命周期碳排放水平分别为

29.2 和 8.6 g/kWh(以 CO₂ 当量计,下同)。

表 3 中国主要终端能源的全生命周期化石能源强度和碳强度

Table 3 Full life cycle fossil energy intensity and carbon intensity of China's major terminal energy sources

项目	全生命周期化石能源强度/(MJ·MJ ⁻¹)	全生命周期碳强度/(g·MJ ⁻¹)
原煤	1.075	98.6
原始天然气	1.147	68.1
原油	1.102	79.6
精煤	1.090	99.7
精制天然气	1.152	69.8
柴油	1.269	93.1
汽油	1.278	91.0
燃料油	1.205	91.4
电力	2.663	237.1

3 结果与讨论

3.1 不同应用场景下的氢能碳足迹

氨的用途趋于多样化,除用作工业原料,还可用

作燃料推动航运、交通行业低碳化发展,以及用作发电厂燃料,因此对加氢站、氢能发电厂、化工厂、氨燃料供给站和氢能发电厂等应用场景开展区分不同氢能运输方式的氢能碳足迹分析具有重要意义。这些场景中,存在氢能运输距离的区别以及氢能直接利用或裂解为氢后利用的区别。研究发现不同应用场景下,氢能碳足迹水平差异显著。

3.1.1 氢能裂解为氢用于加氢站场景

加氢站场景下氢能全产业链的碳足迹水平见表 4。该场景下,海洋船舶、管道输送方式的距离分别为 1 200、750 km,其他方式为 130 km^[26]。网电电解水制氢—HB 合成氨—液氨厢车运氨—网电分解氨制氢路线的全生命周期碳排放量总量最高,为 657.7 g/MJ。风电电解水制氢—HB 合成氨—管道输送气氨—光伏发电分解氨制氢路线的全生命周期碳排放量最低,为 18.4 g/MJ。总体上,传统化石能源—HB 合成氨、网电电解水制氢—HB 合成氨路线是全产业链碳排放相对较高的技术路线;制氢、合成氨和氨分解制氢各阶段均采用绿电的电—氢—氨、电—氢—氨—氢转化路线的全产业链碳排放最低。

表 4 加氢站应用场景下氢能全产业链碳足迹水平

Table 4 Carbon footprint level of the entire ammonia energy industry chain under the application scenario of hydrogen refueling stations

制氨方式	氨气运输方式	原料生产阶段	原料运输阶段	氢能生产阶段	氢能运输阶段	产品应用阶段		合计	
						网电用来氨分解制氢	光伏发电用来氨分解制氢	网电用来氨分解制氢	光伏发电用来氨分解制氢
煤制氢+HB 合成氨	气氨厢车	9.2	1.8	180.9	8.0	133.9	5.5	333.8	205.4
煤制氢+HB 合成氨	管道输送	9.2	1.8	180.9	7.4	133.9	5.5	333.2	204.8
煤制氢+HB 合成氨	液氨槽车	9.2	1.8	180.9	24.8	133.9	5.5	350.7	222.3
煤制氢+HB 合成氨	海洋船舶	9.2	1.8	180.9	25.0	133.9	5.5	350.8	222.4
煤制氢+HB 合成氨	液氨厢车	9.2	1.8	180.9	25.2	133.9	5.5	351.0	222.6
天然气制氢+HB 合成氨	气氨厢车	12.8	1.9	141.3	8.0	133.9	5.5	297.8	169.4
天然气制氢+HB 合成氨	管道输送	12.8	1.9	141.3	7.4	133.9	5.5	297.2	168.8
天然气制氢+HB 合成氨	液氨槽车	12.8	1.9	141.3	24.8	133.9	5.5	314.7	186.3
天然气制氢+HB 合成氨	海洋船舶	12.8	1.9	141.3	25.0	133.9	5.5	314.8	186.4
天然气制氢+HB 合成氨	液氨厢车	12.8	1.9	141.3	25.2	133.9	5.5	315.0	186.6
网电电解水制氢+HB 合成氨	气氨厢车	32.6	6.2	459.9	8.0	133.9	5.5	640.5	512.1
网电电解水制氢+HB 合成氨	管道输送	32.6	6.2	459.9	7.4	133.9	5.5	639.9	511.5
网电电解水制氢+HB 合成氨	液氨槽车	32.6	6.2	459.9	24.8	133.9	5.5	657.4	529.0
网电电解水制氢+HB 合成氨	海洋船舶	32.6	6.2	459.9	25.0	133.9	5.5	657.5	529.1
网电电解水制氢+HB 合成氨	液氨厢车	32.6	6.2	459.9	25.2	133.9	5.5	657.7	529.3
风电电解水制氢+HB 合成氨	气氨厢车	0	0	5.5	8.0	133.9	5.5	147.4	19.0
风电电解水制氢+HB 合成氨	管道输送	0	0	5.5	7.4	133.9	5.5	146.8	18.4
风电电解水制氢+HB 合成氨	液氨槽车	0	0	5.5	24.8	133.9	5.5	164.3	35.9
风电电解水制氢+HB 合成氨	海洋船舶	0	0	5.5	25.0	133.9	5.5	164.4	36.0
风电电解水制氢+HB 合成氨	液氨厢车	0	0	5.5	25.2	133.9	5.5	164.6	36.2

3.1.2 氢能裂解为氢用于氢能发电厂场景

氢能发电厂场景下氢能全产业链的碳足迹水平见表5。该场景下,管道输送方式的距离为750 km,其他方式为2 km^[22]。网电电解水制氢—HB合成氨—液氨槽车运氨—网电分解氨制氢路线的全生命周期碳排放量达到最高,为657.2 g/MJ;风电电解水制氢—HB合成氨—管道输送气氨—光伏发电分解

氨制氢路线的全生命周期碳排放量最低,为18.4 g/MJ。总体而言,传统化石能源—HB合成氨、网电电解水制氢—HB合成氨路线仍是全产业链碳排放相对较高的技术路线;制氢、合成氨和氨分解制氢各阶段均采用绿电的电—氢—氨、电—氢—氨—氢、电—氢—氨—氢—电转化路线的全产业链碳排放最低。

表5 氢能发电厂应用场景下氢能全产业链碳足迹水平

Table 5 Carbon footprint level of the entire ammonia energy industry chain in the application scenario of hydrogen power plants

制氨方式	氨气运输方式	原料生产阶段	原料运输阶段	氢能生产阶段	氢能运输阶段	产品应用阶段		合计	
						网电用来氨分解制氢	光伏发用来氨分解制氢	网电用来氨分解制氢	光伏发用来氨分解制氢
						g/MJ	g/MJ	g/MJ	g/MJ
煤制氢+HB合成氨	气氨厢车	9.2	1.8	180.9	7.4	133.9	5.5	333.2	204.8
煤制氢+HB合成氨	管道输送	9.2	1.8	180.9	7.4	133.9	5.5	333.2	204.8
煤制氢+HB合成氨	液氨槽车	9.2	1.8	180.9	24.6	133.9	5.5	350.5	222.1
煤制氢+HB合成氨	液氨厢车	9.2	1.8	180.9	24.7	133.9	5.5	350.5	222.1
天然气制氢+HB合成氨	气氨厢车	12.8	1.9	141.3	7.4	133.9	5.5	297.3	168.8
天然气制氢+HB合成氨	管道输送	12.8	1.9	141.3	7.4	133.9	5.5	297.2	168.8
天然气制氢+HB合成氨	液氨槽车	12.8	1.9	141.3	24.6	133.9	5.5	314.5	186.1
天然气制氢+HB合成氨	液氨厢车	12.8	1.9	141.3	24.7	133.9	5.5	314.5	186.1
网电电解水制氢+HB合成氨	气氨厢车	32.6	6.2	459.9	7.4	133.9	5.5	640.0	511.5
网电电解水制氢+HB合成氨	管道输送	32.6	6.2	459.9	7.4	133.9	5.5	639.9	511.5
网电电解水制氢+HB合成氨	液氨槽车	32.6	6.2	459.9	24.6	133.9	5.5	657.2	528.8
网电电解水制氢+HB合成氨	液氨厢车	32.6	6.2	459.9	24.7	133.9	5.5	657.2	528.8
风电电解水制氢+HB合成氨	气氨厢车	0	0	5.5	7.4	133.9	5.5	146.8	18.4
风电电解水制氢+HB合成氨	管道输送	0	0	5.5	7.4	133.9	5.5	146.8	18.4
风电电解水制氢+HB合成氨	液氨槽车	0	0	5.5	24.6	133.9	5.5	164.1	35.7
风电电解水制氢+HB合成氨	液氨厢车	0	0	5.5	24.7	133.9	5.5	164.1	35.7

3.1.3 氢能直接用于化工厂用氨场景

化工厂场景下氢能全产业链的全生命周期的碳足迹水平见表6。该场景下,管道输送方式的距离为750 km,其他方式为2 km^[22]。由于该场景下氢能为直接利用,没有裂解成氢的阶段,故氢能全生命周期碳足迹水平低于加氢站场景和氢能发电厂场

景。在各技术路线中,全生命周期碳排放总量最多的是网电电解水制氢—HB合成氨—液氨槽车路线,该路线氢能全生命周期碳足迹水平为523.3 g/MJ;最低路线为风电电解水制氢—HB合成氨—管道输送气氨路线,该路线全生命周期碳足迹水平为12.9 g/MJ。

表6 化工厂用氨场景下氢能全产业链碳足迹水平

Table 6 Carbon footprint level of ammonia energy in the entire ammonia energy industry chain under the scenario of using ammonia in chemical plants

制氨方式	氨气运输方式	原料生产阶段	原料运输阶段	氢能生产阶段	氢能运输阶段	合计
						g/MJ
煤制氢+HB合成氨	气氨厢车	9.2	1.8	180.9	7.4	199.4
煤制氢+HB合成氨	管道输送	9.2	1.8	180.9	7.4	199.3
煤制氢+HB合成氨	液氨槽车	9.2	1.8	180.9	24.7	216.6
煤制氢+HB合成氨	液氨厢车	9.2	1.8	180.9	24.7	216.6
天然气制氢+HB合成氨	气氨厢车	12.8	1.9	141.3	7.4	163.4

续表

制氨方式	氨气运输方式	原料生产阶段	原料运输阶段	氨能生产阶段	氨能运输阶段	合计
天然气制氢+HB合成氨	管道输送	12.8	1.9	141.3	7.4	163.4
天然气制氢+HB合成氨	液氨槽车	12.8	1.9	141.3	24.7	180.6
天然气制氢+HB合成氨	液氨厢车	12.8	1.9	141.3	24.7	180.6
网电电解水制氢+HB合成氨	气氨厢车	32.6	6.2	459.9	7.4	506.1
网电电解水制氢+HB合成氨	管道输送	32.6	6.2	459.9	7.4	506.1
网电电解水制氢+HB合成氨	液氨槽车	32.6	6.2	459.9	24.7	523.3
网电电解水制氢+HB合成氨	液氨厢车	32.6	6.2	459.9	24.7	523.3
风电电解水制氢+HB合成氨	气氨厢车	0	0	5.5	7.4	13.0
风电电解水制氢+HB合成氨	管道输送	0	0	5.5	7.4	12.9
风电电解水制氢+HB合成氨	液氨槽车	0	0	5.5	24.7	30.2
风电电解水制氢+HB合成氨	液氨厢车	0	0	5.5	24.7	30.2

3.1.4 氨能直接用于氨燃料供给站场景

氨燃料供给站场景下氨能全产业链全生命周期的碳足迹水平见表7。该场景下,海洋船舶、管道输送方式的距离分别为1200、750 km,其他方式为

130 km^[22]。该场景与氨能直接用于化工厂用氨场景类似,氨能为直接利用,没有裂解成氢的阶段,故氨能全生命周期碳足迹水平低于加氢站场景和氢能发电厂场景。

表7 氨燃料供给站场景下氨能全产业链碳足迹水平

Table 7 Carbon footprint level of the entire ammonia energy and ammonia energy industry chain in the scenario of ammonia fuel supply stations

制氨方式	氨气运输方	原料生产阶	原料运输阶段	氨能生产阶段	氨能运输阶段	合计
煤制氢+HB合成氨	气氨厢车	9.2	1.8	180.9	8.0	199.9
煤制氢+HB合成氨	管道输送	9.2	1.8	180.9	7.4	199.3
煤制氢+HB合成氨	液氨槽车	9.2	1.8	180.9	24.8	216.8
煤制氢+HB合成氨	海洋船舶	9.2	1.8	180.9	25.0	216.9
煤制氢+HB合成氨	液氨厢车	9.2	1.8	180.9	25.2	217.1
天然气制氢+HB合成氨	气氨厢车	12.8	1.9	141.3	8.0	163.9
天然气制氢+HB合成氨	管道输送	12.8	1.9	141.3	7.4	163.4
天然气制氢+HB合成氨	液氨槽车	12.8	1.9	141.3	24.8	180.8
天然气制氢+HB合成氨	海洋船舶	12.8	1.9	141.3	25.0	180.9
天然气制氢+HB合成氨	液氨厢车	12.8	1.9	141.3	25.2	181.1
网电电解水制氢+HB合成氨	气氨厢车	32.6	6.2	459.9	8.0	506.6
网电电解水制氢+HB合成氨	管道输送	32.6	6.2	459.9	7.4	506.1
网电电解水制氢+HB合成氨	液氨槽车	32.6	6.2	459.9	24.8	523.5
网电电解水制氢+HB合成氨	海洋船舶	32.6	6.2	459.9	25.0	523.6
网电电解水制氢+HB合成氨	液氨厢车	32.6	6.2	459.9	25.2	523.8
风电电解水制氢+HB合成氨	气氨厢车	0	0	5.5	8.0	13.5
风电电解水制氢+HB合成氨	管道输送	0	0	5.5	7.4	12.9
风电电解水制氢+HB合成氨	液氨槽车	0	0	5.5	24.8	30.4
风电电解水制氢+HB合成氨	海洋船舶	0	0	5.5	25.0	30.5
风电电解水制氢+HB合成氨	液氨厢车	0	0	5.5	25.2	30.7

在各技术路线中,全生命周期碳排放总量最多的是网电电解水制氢—HB合成氨—液氨厢车路线,该路线全生命周期碳足迹水平为523.8 g/MJ;最

低的路线为风电电解水制氢—HB合成氨—管道输送气氨路线,该路线全生命周期碳足迹水平为12.9 g/MJ。

3.1.5 氢能直接用于氢能发电厂场景

氢能发电厂场景下,氢能全产业链全生命周期的碳足迹水平见表8。该场景下,管道输送方式的距离为750 km,其他方式为2 km^[22]。该场景下,氢能储运距离较短且氢能为直接利用,没有裂解成氢的阶段,故氢能全生命周期碳足迹水平低于加氢站

场景和氢能发电厂场景。在各技术路线中,全生命周期碳排放总量最多的路线是网电电解水制氢—HB合成氨—液氨槽车路线,其全生命周期碳足迹水平为523.3 g/MJ;最低的路线为风电电解水制氢—HB合成氨—管道输送路线,其全生命周期碳足迹水平为12.9 g/MJ。

表8 氢能发电厂场景下氢能全产业链碳足迹水平

Table 8 Carbon footprint level of the entire ammonia energy industry chain in the scenario of ammonia power plants

制氢方式	氨气运输方式	原料生产阶段	原料运输阶段	氢能生产阶段	氢能运输阶段	合计
煤制氢+HB合成氨	气氨厢车	9.2	1.8	180.9	7.4	199.3
煤制氢+HB合成氨	管道输送	9.2	1.8	180.9	7.4	199.3
煤制氢+HB合成氨	液氨槽车	9.2	1.8	180.9	24.6	216.6
煤制氢+HB合成氨	液氨厢车	9.2	1.8	180.9	24.7	216.6
天然气制氢+HB合成氨	气氨厢车	12.8	1.9	141.3	7.4	159.7
天然气制氢+HB合成氨	管道输送	12.8	1.9	141.3	7.4	163.4
天然气制氢+HB合成氨	液氨槽车	12.8	1.9	141.3	24.6	180.6
天然气制氢+HB合成氨	液氨厢车	12.8	1.9	141.3	24.7	180.6
网电电解水制氢+HB合成氨	气氨厢车	32.6	6.2	459.9	7.4	482.0
网电电解水制氢+HB合成氨	管道输送	32.6	6.2	459.9	7.4	482.0
网电电解水制氢+HB合成氨	液氨槽车	32.6	6.2	459.9	24.6	523.3
网电电解水制氢+HB合成氨	液氨厢车	32.6	6.2	459.9	24.7	523.3
风电电解水制氢+HB合成氨	气氨厢车	0	0	5.5	7.4	12.9
风电电解水制氢+HB合成氨	管道输送	0	0	5.5	7.4	12.9
风电电解水制氢+HB合成氨	液氨槽车	0	0	5.5	24.6	33.1
风电电解水制氢+HB合成氨	液氨厢车	0	0	5.5	24.7	33.2

3.1.6 氢能运输距离对碳足迹的影响

氢能运输阶段的能源消耗主要包括油气等运输用能和氢能液化压缩耗电,对应的碳排放因运输距离变化而不同。不同氢能运输方式在不同运输距离下的碳排放水平如图2所示,不考虑其他影响因素下,不同运输方式在不同运输距离情况的碳排放水平差异性较大。2 500 km运输范围内,采用气体形式运输的管道输送方式和气氨厢车方式的碳排放水平较低,而采用液体形式运输的液氨厢车方式、液氨槽车方式和海洋船舶方式的水平较高。对于这3种运输方式,1 500 km运输距离是管道输送方式和气氨厢车方式的大致平衡点,距离越短,管道输送的低碳优势越明显。超过2 500 km运输范围,海洋船舶方式具有相对较低的碳足迹影响。

3.1.7 与相似研究结果对比

本研究中部分路线的部分阶段在国内外相似研究中有对应结果,总体基本相近。CHISALITA等^[8]

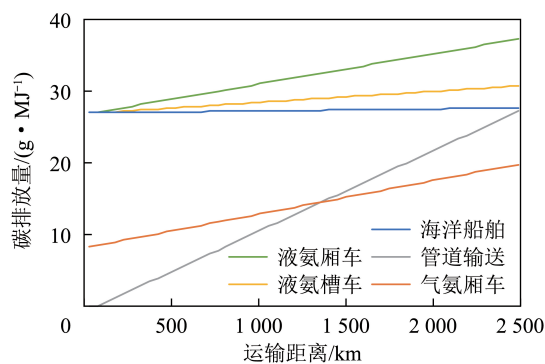


图2 不同氢能运输方式在不同运输距离下的碳排放水平

Fig.2 Carbon emission levels of different ammonia energy transportation methods at different transportation distances

测算天然气重整制氨阶段全生命周期CO₂排放为163 g/MJ;BICER等^[9]测算天然气重整—HB合成氨阶段的全生命周期碳排放为108 g/MJ,与本研究天然气重整—HB合成氨阶段的141 g/MJ相近。刘婷婷^[10]对煤气化—HB合成氨的全生命周期碳排放量

为 223 g/MJ; BICER 等^[9]对煤气化-HB 合成氨的全生命周期碳排放量为 172 g/MJ, 与本研究 181 g/MJ 相近。

3.2 蓝氨技术路线碳排放情况

研究表明, 耦合 CO₂ 捕获与封存技术 (CO₂ Capture and Storage, CCS) 技术是降低传统化石燃料制氢/制氨生产过程中 CO₂ 排放的可能方案, 如煤气化制氢+CCS+HB 合成氨技术可在氢气生产阶段将 CO₂ 捕获封存, 后经压缩输送至指定地点。经测算, 煤气化制氨的氢气生产阶段 CO₂ 排放量为 20 kg/kg (以 H₂ 计), 加入 CCS (假定压缩耗电 0.062 kWh/kg) 技术制取蓝氨制氢生产阶段 CO₂ 排放量为 1.5 kg/kg, 相对前者的 CO₂ 排放量减少 92.5%^[27]。相应的, 煤制氢耦合 CCUS 路线生产的氢气用于制取氨气的路线, 相对常规未耦合 CCUS 技术的煤制氢并制氨的路线, 可减少 80% 左右的氨能制储运用全生命周期碳足迹水平, 接近基于风电电解水制氢进而制取绿氨路线的水平。

3.3 重要绿氨应用案例的碳足迹

交通、发电为氨能主要应用领域, 氨能重型卡车、氨能船舶和氨能混烧发电已有重要研究案例。对于典型重型卡车, 耗氨 0.526 kg/km, 相对应的柴油卡车耗油 0.30 L/km^[22]; 对于船舶, 单位海里耗氨 800 kg, 相对应的燃料油船舶单位海里耗油 776 kg^[28-29]。经测算, 绿氨技术路线下, 各应用案例的碳足迹显著低于其他技术路线, 其中, 绿氨卡车排放 241.17 g/km (以 CO₂ 当量计), 绿氨船舶每千米碳排放量为 202 251g (以 CO₂ 当量计), 绿氨与煤混烧发电排放 471 g/kWh; 蓝氨卡车排放 263.43 g/km, 蓝氨驱动船舶每千米碳排放量为 359 118 g (以 CO₂ 当量计)。绿氨、蓝氨在交通领域与传统化石燃料相比具有显著碳排放优势, 分别减少碳排放 80%、70% 以上。

李俊彪等^[30]研究表明 600 MW 燃煤发电机组平均供电煤耗为 300 g/kWh (以标煤计), 整体发电效率 41%, 机组年利用小时数按 4 000 h 计算, 即发电量 24 亿 kWh/a, 耗煤量 72 万 t/a, 以减排 25% (即替代 25% 燃料煤) 为目标需掺氨约 28 万 t/a。经测算, 1 kWh 煤氨 (灰氨) 混烧发电全生命周期碳排放为 887 g/kWh, 1 kWh 煤电全生命周期碳排放为 570 g/kWh。1 kWh 煤氨 (绿氨) 混烧发电全生命周期碳排放为 471 g/kWh, 与 1 kWh 煤电相比减排 17.36%。结果表明, 绿氨在电力领域也能体现减碳优势, 绿氨发电碳排放最低, 而采用煤气化、天然气重整制氨技术下生命周期发电高于煤电。

4 结 论

1) 不同路线碳足迹差异较大。主要体现为, 各技术路线中, 所有场景下网电电解水制氢—HB 合成氨—液氨厢车输送液氨路线的氨能全生命周期碳足迹水平最高, 风电电解水制氢—HB 合成氨—管道输送气氨路线的氨能全生命周期碳足迹水平最低。传统化石能源制氢—HB 合成氨及网电电解水制氢—HB 合成氨路线的碳足迹水平明显高于风电电解水制氢—HB 合成氨路线。传统化石能源制氢—HB 合成氨路线的燃料生产阶段在全生命周期各阶段碳排放量占比最高。总之, 传统化石能源—HB 合成氨、网电电解水制氢—HB 合成氨路线仍是氨能全产业链碳足迹水平最高的技术路线。

2) 分阶段看, 除风电电解水制氢—HB 合成氨路线外, 其余各技术路线中燃料生产阶段均为碳排放最高阶段。制氢、合成氨和氨分解制氢均采用绿电的电—氢—氨、电—氢—氨—电、电—氢—氨—氢或电—氢—氨—氢—电转化路线的全产业链碳足迹水平最低。氨能运输阶段, 不同运输方式和输送距离对氨能碳足迹产生重要影响, 管道输送和海洋船舶这 2 类方式的碳排放影响相对较小, 分别在 1 500 km 以内和 2 500 km 以上具有低碳运输优势。

3) 分场景看, 以氨能裂解为氢用于加氢站应用场景为例, 碳足迹水平最低的是风电电解水制氢—HB 合成氨—管道输送气氨—可再生电力分解氨为氢能的技术路线, 低于 20 g/MJ; 化工厂用氨、发电厂用氨/氨由于运输距离较短, 储运能耗相对较低, 相应的氨能全生命周期碳足迹水平低于氨能裂解为氢用于加氢站场景。

4) 总体而言, 绿氨路线 (如风电电解水制氢—HB 合成氨路线) 全生命周期碳足迹水平最低。与传统化石燃料相比, 绿氨在交通领域碳排放优势显著, 提供相同交通服务可减少碳排放 80% 以上; 绿氨在电力领域也能体现减碳优势。

5) 相比传统煤气化—HB 合成氨制取灰氨技术, 煤气化+CCS+HB 合成氨制取蓝氨路线减碳优势显著。与传统化石燃料相比, 蓝氨在交通领域碳排放优势显著, 可减少碳排放 70% 以上。

6) 基于上述研究, 建议我国加快绿氨生产技术研发推广, 加快绿氨产业化规模化应用, 并推动大规模、长距离的管道输氨和船舶输氨的工程示范; 积极推动蓝氨相关技术研发和示范, 为灰氨产业低碳发展转型提供可能技术选项。具体政策建议包括: ① 深化战略研究, 基于不同应用场景的实际需求和技术

特点,探索多元氢能利用手段;② 加快氢能全产业链系统化部署,扩大氢能储运基础设施,构建成熟稳定的氢能供应体系;③ 在部分区域试点开展光伏制氢、风电制氢等示范项目,构建多元氢能供应格局,并推进氨氢一体化发展,为氢能提供示范性应用项目,最终形成氢能规模化应用的全产业链。

参考文献 (References):

- [1] 吴锦,邹隆志,陈扬,等.双碳目标下以煤炭为基础的氨合成与清洁利用的未来与挑战[J].洁净煤技术,2023,29(7):21-50.
WU Jin,ZOU Lonazhi,CHEN Yang, et al. Future and challenge of coal based ammonia synthesis and clean utilization under the double carbon target. *Clean Coal Technology*, 2023, 29 (7): 21-50.
- [2] 中国航天报.航天科技六院北京11所余压能回收液力透平:向着低能耗时代前进[EB/OL].(2023-05-31)[2023-06-18].
<http://m.spacechina.com/n2014789/n2014809/c3832950/content.html>.
- [3] 李建伟.“绿电-绿氢-绿氨”一体化发展现状与趋势.中国车用氢能发展蓝皮书2022.北京:社会文献科学出版社,2022.
- [4] 能化大数据.氨氢能源的现状[EB/OL].(2023-05-31)[2023-06-18].
<http://www.cnmhg.com/Industry-Information/c0814edcafb336d9c9e01330a5bb7926.html>.
- [5] 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.
XIA Xin,LIN Jianmin,LI Yan,et al. Research progress on performance and application of ammonia fuel on engines [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2022, 41 (5): 2332-2339.
- [6] 徐也著,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.
XU Yeming,ZHENG Chuanming,ZHANG Yunhong. Application prospect of ammonia energy as clean energy [J]. *Chemistry*, 2019, 82 (3): 214-220.
- [7] 高正平,涂安琪,李天新,等.面向零碳电力的氨燃烧技术研究进展[J].洁净煤技术,2022,28(3):173-184.
GAO Zhengping,TU Angi,LI Tianxin, et al. Recent advances on ammonia combustion technology for zero-carbon power [J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28 (3): 173-184.
- [8] CHISALITA D A,PETRESCU L,CORMOS C C. Environmental evaluation of European ammonia production considering various hydrogen supply chains[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 130:109964
- [9] BICER Y,DINCER I,VEZINA G, et al. Impact assessment and environmental evaluation of various ammonia production processes [J]. *Environmental Management*, 2017, 59:842-855.
- [10] 刘婷婷.基于LCA的页岩气和传统能源制氨的环境影响比较研究[D].大连:大连理工大学,2021.
- [11] GHASSAN Chehade, IBRAHIM Dincer. Progress in green ammonia production as potential carbon-free fuel [J]. *Fuel*, 2021, 299:120845.
- [12] 欧训民,张希良.中国车用能源技术路线全生命周期分析 [M].北京:清华大学出版社,2011.
- [13] 欧训民,彭天铎,张茜,等.中国电动汽车的发展规模及其能源环境资源影响研究:模型、方法和应用[M].北京:经济管理出版社,2019.
- [14] 王翔.新型煤气化与常压固定床煤气化工艺探讨:生产合成氨的能耗与污染物对比分析[J].氮肥技术,2019,40(6):7-11.
WANG Xiang. Discussion on new coal gasification and atmospheric fixed bed gasification: Comparison and analysis of energy consumption and pollutants during synthetic ammonia production [J]. *Nitrogenous Fertilizer Technology*, 2019, 40 (6): 7-11.
- [15] REN K, ZHANG T Z, TAN X F, et al. Life cycle assessment of ammonia synthesis based on pulverized coal entrained flow gasification technology in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 328:12968.
- [16] 王月姑,周梅,王兆林,等.以氨燃料为介质的全生命周期储能效率估算[J].储能科学与技术,2018,7(2):301-308.
WANG Yuegu, ZHOU Mei, WANG Zhaolin, et al. Life-cycle energy efficiency estimation of large-scale ammonia fuel energy storage system [J]. *Energy Storage Science and Technology*, 2018, 7 (2): 301-308.
- [17] COX B, TREYER K. Environmental and economic assessment of a cracked ammonia fuelled alkaline fuel cell for off-grid power applications [J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 275:322-335.
- [18] NOSHERWANI S A, RUI C N. Techno-economic assessment of commercial ammonia synthesis methods in coastal areas of Germany [J]. *The Journal of Energy Storage*, 2021, 34:102201.
- [19] 中国电力企业联合会.中国电力行业年度发展报告2020 [M].北京:中国建材工业出版社,2020.
- [20] ZAMFIRESCU C, VEZINA G, RASO F, et al. Comparative life cycle assessment of various ammonia production methods [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135:1379-1395
- [21] 吴全,沈珏新,余磊,等.“双碳”背景下氢-氨储运技术与经济性浅析[J].油气与新能源,2022,34(5):27-33,39.
WU Quan, SHEN Juexin, YU Lei, et al. Analysis on the hydrogen-ammonia storage and transportation technology and economical efficiency against the "dual-carbon" background [J]. *Petroleum Planning & Engineering*, 2022, 34 (5): 27-33, 39.
- [22] 陈泽宇.中国氢能、氨能全产业链平准化成本和碳足迹研究 [D].北京:清华大学,2023.
- [23] NIERMANN M, DRÜNERT S, KALTSCHMITT M, et al. Liquid organic hydrogen carriers (LOHCs): Techno-economic analysis of LOHCs in a defined process chain [J]. *Energy & Environmental Science*, 2019, 12 (1): 290-307.
- [24] KIM A, YOO Y, KIM S, et al. Comprehensive analysis of overall H₂ supply for different H₂ carriers from overseas production to inland distribution with respect to economic, environmental, and technological aspects [J]. *Renewable Energy*, 2021, 177: 422-432
- [25] 李志军,刘京京,陈爱琴,等.可再生能源转化为氨氢能源体系技术和经济性分析[J].上海节能,2022(9):1125-1131.

- LI Zhijun, LIU Jingjing, CHEN Aiqin, et al. Technical and economic analysis on renewable energy conversion to ammonia hydrogen energy system [J]. Shanghai Energy Saving, 2022(9): 1125-1131.
- [26] 王彦哲,周胜,王宇,等.中国核电和其他电力技术环境影响综合评价[J].清华大学学报(自然科学版),2021,61(4): 377-384.
- WANG Yanzhe, ZHOU Sheng, WANG Yu, et al. Comprehensive assessment of the environmental impact of China's nuclear and other power generation technologies [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology),2021,61(4):377-384.
- [27] 罗仁英.煤制氢气生命周期碳足迹研究[D].北京:中国石油大学,2020.
- [28] 中国电动汽车百人会.开启氢能在交通工业建筑储能领域的多场景应用[R].北京:中国电动汽车百人会,2022.
- [29] WU Shengwei, MIAO Bin, CHAN Siew Hwa. Feasibility assessment of a container ship applying ammonia cracker-integrated solid oxide fuel cell technology [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022,92(1): 1586-1595.
- [30] 李俊彪,王明华.基于不同情景模式的燃煤掺氨发电技术的经济性分析[J].中国煤炭,2022,48(5): 54-59.
- LI Junbiao, WANG Minghua. Economic analysis of ammonia mixed coal fired power generation technology based on different scenario modes [J]. China Coal, 2022,48(5): 54-59.