

# 中国氢能高质量发展的路径建议与政策探讨

张灿<sup>1</sup>, 张明震<sup>2,✉</sup>, 申升<sup>3</sup>, 陈凡<sup>4</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)管理学院, 北京 100083; 2. 中电建新能源集团有限公司, 北京 100101;  
3. 湖南大学化学化工学院, 湖南长沙 410082; 4. 宁波大学中国乡村政策与实践研究院, 浙江宁波 315211)

**摘要:** [目的]在“双碳”目标下, 中国氢能大有可为。基于中国氢能产业发展的现状, 围绕存在的问题, 对氢能高质量发展的路径和政策进行探讨。[方法]对国内外相关政策、文献和案例进行了梳理和分析, 从路径和政策两个角度做了总结。[结果]在路径方面, 利用氢能促进交通领域和工业领域的低碳化, 将氢能与现有油气能源储运管网体系耦合, 利用氢能促进可再生能源标准化, 发展(光伏、风能等可再生能源发电)电解制氢, 加大氢燃料电池商用推广等, 是中国氢能高质量发展的有效保证; 在政策方面, 完善国家氢能的顶层政策设计, 细化氢能“制储输用”专项研究的政策支持, 加快制定氢能相关的标准和规范, 加强氢能产业的战略联盟建设以及健全氢能市场供需协调等, 是中国氢能高质量发展的重要保障。[结论]文章提及的相关的路径建议和政策探讨可为相关部门和行业人员提供一定参考。

**关键词:** 氢能; 能源政策; 能源结构; 能源转型; 高质量发展

中图分类号: TK91; F403

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)04-0011-13

开放科学(资源服务)二维码:



## Path Suggestion and Policy Discussion for China's High-Quality Development of Hydrogen Energy

ZHANG Can<sup>1</sup>, ZHANG Mingzhen<sup>2,✉</sup>, SHEN Sheng<sup>3</sup>, CHEN Fan<sup>4</sup>

(1. School of Management, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;  
2. Power China Renewable Energy Co., Ltd., Beijing 100101, China;  
3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China;  
4. Institute of Chinese Rural Policy and Practice, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

**Abstract:** [Introduction] Under the "carbon peak and neutrality" goal, China's hydrogen energy has great potential. Based on the status quo of China's hydrogen energy industry development, this paper studies the paths and policies for the high-quality development of hydrogen energy in China around the existing problems. [Method] Relevant policies, literature, and cases at home and abroad were sorted out, analyzed, and summarized from the two perspectives of path and policy. [Result] In terms of paths, using hydrogen energy to promote the decarbonization of the energy system in transportation and industry, integrating hydrogen energy with the existing oil and gas energy storage and transportation pipeline system, using hydrogen energy to standardize renewable energy, developing hydrogen production by electrolysis (photovoltaic, wind and other renewable energy power generation), increasing the commercial promotion of hydrogen fuel cells, etc., are effective paths for the high-quality development of hydrogen energy in China. In terms of policy, improving the top-level policy design of national hydrogen energy, refining the policies support for special research on hydrogen energy "production, storage, transportation and utilization," accelerating the formulation of hydrogen energy-related standards and norms, strengthening the construction of strategic alliances of the hydrogen energy industry and improving the coordination of supply and demand in the hydrogen energy market, etc., are essential guarantees [Conclusion] The relevant path suggestions and policy discussions mentioned in the research can provide a reference for relevant departments and industry personnel.

**Key words:** hydrogen energy; energy policy; energy structure; energy transition; high quality development

收稿日期: 2022-01-13 修回日期: 2022-03-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“钨酸铈@MOF 光阳极的构建及其甘油选择性氧化性能的研究”(22008059)

2095-8676 © 2022 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

目前传统化石能源仍是推动经济社会快速发展的主要能源,但传统化石能源的碳排放也带来了一系列问题。能源体系清洁低碳化是全球趋势,也是中国能源体系的发展目标<sup>[1]</sup>。氢是来源广泛、清洁高效的二次能源。加快推进中国氢能利用与发展,是改善国家能源体系,保障国家能源安全,积极应对气候变化的良好路径之一<sup>[2-4]</sup>。

2020年12月21日,国务院新闻办公室发布《新时代的中国能源发展》白皮书。白皮书中提到,中国已经成为世界上最大的能源生产国,同时也是世界上最大的能源消费国,未来要加快风能、太阳能、生物质能等非化石能源开发利用,推动低碳能源来替代高碳能源,可再生能源替代化石能源<sup>[5]</sup>。在“碳达峰、碳中和”目标下,国家能源体系建设和国家能源安全是重大的战略问题,中国氢能的利用与发展是促进中国能源体系清洁低碳转型的重要举措<sup>[6-7]</sup>,利用氢能,发展氢能,有助于改善国家能源结构,促进国家能源系统清洁低碳转型,是保障国家能源安全的重要措施之一<sup>[8-10]</sup>。

目前,中国氢产量世界第一,中国氢能行业增速和市场规模增速也是第一。但与此同时,中国制氢仍以传统化石燃料和工业副产物为主(灰氢),而且储氢运输、氢加注基础设施建设等环节的综合成本高企,导致中国的氢能产业平衡成本整体高。未来应逐步提高天然气重整以及CCUS等先进技术制氢(蓝氢)比例,充分利用光伏发电、风电等可再生能源电解水制氢(绿氢),加大攻关核心技术和关键零部件,并在政策引导和市场建设方面进行统筹协调。文章在调研中国氢能现状的基础上,结合国家和地区政策,对中国氢能高质量发展的路径和政策进行探讨并提出部分建议。

## 1 中国氢能高质量发展的路径建议

### 1.1 利用氢能促进交通领域的能源体系低碳化

氢燃料电池车与常规电动车辆相似,但是以氢燃料为动力。从交通实用的角度看,燃料电池电动

机的适用范围不仅包括轿车、卡车、公共汽车,还包括火车、渡船和叉车等其他交通工具。传统储能电池能源容量有限,能量密度低,氢燃料电池被认为是能源体系低碳化转型过程中对传统储能电池的补充<sup>[11]</sup>。氢能的清洁和灵活使得氢燃料电池具有许多优势。氢燃料电池具有高密度能量和高效率,非常适合轿车、卡车、公共汽车等远程重载交通工具以及出租车等高利用率交通工具。虽然氢燃料电池车在近期会遇到传统天然气汽车的挑战,但现实应用情况印证氢燃料电池车具有更短的燃料加注时间和更大的续航里程,相较于传统天然气汽车有明显优势。此外,随着氢能产业的技术进步,各环节的规模经济也会使成本大幅下降。未来氢燃料电池车有巨大商用潜力,是促进交通领域的能源体系低碳化的重要方式之一<sup>[12]</sup>。

除上述领域外,氢能还可应用于铁路、航海和航空航天领域的能源体系低碳化。在轨道交通等铁路部门,由阿尔斯通公司制造的第一批氢能火车正取代传统铁路上运行的柴油列车,在德国北部进行商业化服务试验。氢能火车无需配套架空电线,能够减少高额建设费用,英国、荷兰和奥地利等国也计划在未来几年采用氢能火车,以促进铁路轨道交通领域的能源体系低碳化<sup>[12-14]</sup>;在航海运输等海事部门,海运用氢发展迅速,氢燃料电池船在客运渡轮、摆渡船等相关的各个部门均有示范项目<sup>[15]</sup>。氢燃料电池还可用于替代目前以汽油、柴油为燃料的传统船只,减少港口船只氮氧化物、硫化物等污染物排放,同时避免港口电气连接安装费用。长途航海运输船舶的液化用氢被认为是航海交通领域低碳化的最佳方式之一,将有助于实现国际海事组织制定的“到2050年温室气体排放减少50%”的目标<sup>[12,16]</sup>;在航空航天领域,研究人员正在开展燃料电池相关的电力推进技术研发和试验,许多国家将在2020—2050年期间陆续部署,例如,德国的HY4示范项目就是利用氢燃料电池驱动小型螺旋桨飞机<sup>[17-18]</sup>。

然而,当前氢能在促进中国交通领域低碳化方面也存在不少问题。与混合动力汽车相同,氢燃料电池车的推广与应用需要同步配套加氢基础设施,而氢燃料电池车数量又直接影响氢加注基础设施的

布局建设,各环节紧密相扣,相互协同。中国在利用氢能促进交通领域的能源体系低碳化时要重点关注两个方面:一方面,当前氢加注基础设施不完善,制造商对氢燃料电池车的投资、研发及制造会相对谨慎,同时缺乏成熟便捷的氢加注燃等基础设施也会影响消费端对氢燃料汽车的消费意愿;另一方面,虽然中国对氢能产业提供政策支持,但在氢燃料汽车大规模成熟商用之前,因成本和利润,将不会大规模铺设加氢站等基础设施。因此,利用氢能促进交通领域的低能源体系低碳化时应统筹规划和布局。

### 1.2 利用氢能促进工业领域的低碳化

氢拥有工业原料和能源产品双重身份,是工业领域低碳化的重要可行方案之一。工业领域对氢的需求量极大,如氨生产、炼油、炼钢等,其中氨、甲醇等合成化学化工行业是氢的主要工业消费领域(约占33%);石油天然气炼化行业是氢的第二大工业消费领域(约占27%);钢铁行业的退火环节也需消耗大量氢气(约占3%);玻璃制造、食品行业氢化脂肪、部分散装化学品、半导体、发电机冷却以及航天火箭氢推进剂等对氢的需求量也是极大<sup>[19]</sup>。此外,工业领域对高等级热量需求大,如果用氢气代替天然气和其他化石燃料,通过氢燃烧产生高于650℃的高等级热量,就可减少传统燃料用量,降低碳排放,还可以有效节省燃料成本。

以往,氢大多是由传统化石能源制取或工业副产的“灰氢”,不但成本高昂,而且违背了我国构建低碳、高效的清洁能源体系和实现“双碳”目标的宗旨。利用光伏、风能等多种可再生能源制取氢气将是未来发展的重要方向,氢气制取的方式不再单一<sup>[20-21]</sup>。随着氢气制取逐渐低碳化,作为工业原料和能源产品的氢能将具有广泛的应用前景,预计2050年,工业领域氢能需求将超过 $3.5 \times 10^7$  t<sup>[22]</sup>。同时,工业领域也是氢的长期需求客户,该领域对氢的长期需求关系可有效稳定氢价格和产量。工业领域往往对原料成本非常敏感,长期稳定的供需关系可产生规模经济,使得氢成本逐渐趋于甚至低于传统化石能源成本,使得工业领域大规模应用氢成为可能。目前,全球工业部门近一半的碳排放来自钢铁、合成氨、乙烯、水泥等工业品生产过程,充分利用氢的双重身份,是促进工业领域低碳化的有效路径<sup>[23-24]</sup>。

### 1.3 将氢能与现有油气储运体系深度耦合

中国已建成大规模的石油、天然气管网,有着成熟的能源输运体系。因此,将氢与天然气混合并注入现有的天然气管网送往终端用户,是一项大规模使用氢的可行性设想<sup>[17,25]</sup>。长远来看,通过气体配比、技术改造等方式实现现有天然气管网输送氢气,可降低工业或居民对天然气的依赖,同时还可将大量氢储存在管网中。

氢气注入中国现有天然气管网,一方面具有可操作性,另一方面可加强氢能与现有油气储运体系的深度耦合,是实现多能耦合的有效路径之一。氢气接入现有天然气管网可以避免昂贵的工程建设,终端用户稳定的长期大规模需求则可以助力制氢等上游产业的发展。另外,电力的大规模储存难度较大,但将氢气注入现有天然气管网可以让氢在管网中大规模储存。当工业或居民用电不需要满负荷生产时,可以利用富余电力制氢且成本可能会低于氢气注入管网的使用成本,这种错峰利用可以应对季节性的大幅需求波动。例如,日本已采用管网输送氢气进行家庭热电联供。现有天然气管网体系成熟且容量大,即使是低混合度氢气(混合浓度一般不超过20%),仍可大量储存,而这些氢气可由无法大规模储存的可再生能源电力制取,这就相当于间接储存了大量可再生能源。例如,欧洲天然气管网体系中以甲烷形式储存的能量折合约为1200 TWh,这大约相当于欧洲天然气需求总量的五分之一,而这些甲烷大多由欧洲地区光伏、风能、潮汐能等可再生能源间接制取<sup>[25-26]</sup>。

2019年12月9日,国家石油天然气管网集团合并成立。合并前,中国大陆油气主干管道共 $9.6 \times 10^4$  km,中石油、中石化、中海油分别占63%、31%、6%,全国省级干线管网共 $2.5 \times 10^4$  km,三大石油公司与其他主体各占50%。合并后成立的国家管网公司主要负责全国油气干线管道、部分储气调峰设施的投资建设,干线管道互联互通及与社会管道联通,组建“全国一张网”。国家管网公司除负责原油、成品油、天然气的管道输送,对全国油气干线管网运行进行统一调度,还定期向社会公开剩余管输和储存能力,实现基础设施向所有符合条件的用户公平开放。以北京油气调控中心为例,2019年5月25日至6月1日,北京油气调控中心协调上中下游,统筹安排天然气全管网大型联合动火作业,作业期间资源调整总量

突破  $8 \times 10^7 \text{ m}^3$  天然气,为中国石油天然气管网调整规模最大的作业之一<sup>[27]</sup>。以上述案例为基准,如果以混合浓度不超过 20% 的氢气注入北京油气调控中心的现有管网,仅该次作业时间内的现有管网将储存运输  $1.6 \times 10^7 \text{ m}^3$  氢气。可见,氢气在未来能够与现有的石油天然气管网很好地结合和发展。

氢气与现有石油天然气管网能源储运体系结合,还需要关注氢气与现有天然气的最佳混合浓度。氢气的最佳混合浓度在很大程度上取决于现有管网结构、气体组分等,除了要重点考虑燃气轮机、孔隙储存、压缩站和压缩天然气储罐,气体流量探测器、数量变压器和流量码表等管网配套设备,还要考虑工业或居民终端应用的指标。现有研究表明,在氢混合浓度相对较低(10%~20%)的情况下,不需要对基础设施进行重大改造,氢气直接注入现有管网就可以安全使用,而当氢气混合浓度超过 20%,则需要对现有的基础设施和终端应用设备进行改造,在特殊情况下,对特定地区按照纯氢标准进行基础管网、终端应用改造可能更经济<sup>[26]</sup>。例如,英国利兹市正按照纯氢标准对现有基础管网设施进行改造。利兹地区内有成熟的工业集群、大型煤电站和近海气田,地区内天然气管网已老化,利兹地区计划采用适合氢气储运的聚乙烯管道和目前最先进的设备,在未来 40 年内对整个天然气管网进行逐步更换,用氢气取代天然气,以满足该地区内工业或居民的终端能源需求。

#### 1.4 利用氢能促进可再生能源的标准化

20 世纪石油危机之后,美国政府便开展了大规模以太阳光为代表的可再生能源研究,相继制定和强化了《可再生燃料标准》《能源独立和安全法案》等可再生能源的技术标准和法律规则,利用产业引导、税收政策、价格杠杆等方式促进美国可再生能源发展<sup>[21]</sup>。经过多年发展,在可再生能源领域,目前中国已是全球最大的风力涡轮机、光伏板生产国,可再生能源的技术、投资和产能位居全球前列。联合国可再生能源咨询机构数据显示,中国从 2010 年开始就成为全球可再生能源的最大投资国,可再生能源为改善中国能源结构和全球气候做出了巨大贡献<sup>[28-30]</sup>。

不管国外还是中国,发展可再生能源是改善能源体系,保障能源安全,促进经济社会可持续发展的重要能源战略,可再生能源还被赋予了节能减排,控

制温室气体排放和减少大气污染等使命<sup>[31-32]</sup>。可再生能源虽然如此重要,但也存在许多缺陷,最明显的就是可再生能源利用效率不高,系统消纳能力不足。中国资源禀赋与负荷中心呈逆向分布,资源和负荷匹配较差。例如光伏、风能等可再生能源丰富的地区常常也是负荷低的非经济发达地区,可再生能源就地消纳困难,部分地区因季节因素,可再生能源生产又经常不足,而部分地区可再生能源建设速度快,但配套建设相对滞后,富余电力并网难输送难储存难,效率不均匀导致可再生能源难以进行标准化利用与管理<sup>[29,31]</sup>。

氢和电作为能量载体,可在能量转换中相互补充。未来能源体系不断低碳化,利用可再生能源产生的间歇性效率不均匀电力来制取氢,再将氢输送到工业、居民、交通运输等领域,是可再生能源标准化利用和管理的一种可行性途径,氢的灵活性使得可再生能源标准化成为一种趋势<sup>[28]</sup>(如图 1 所示)。例如,石油天然气炼化、合成氨等工业领域广泛使用的传统化石燃料可以被可再生能源电力制取的氢所取代;冬季等大风量季节,利用风力发电等可再生能源电力制取氢,再将氢气注入天然气管网为居民提供能源,不仅可以减少天然气消耗,还可以应对季节性能源需求高峰;交通运输领域使用氢燃料电池驱动,而氢气由可再生能源电力制取,可以减少传统燃油消耗,是一种低碳化选择。

从中长期来看,在配套设施缺乏或建设昂贵的情况下,氢的灵活性使得可再生能源的长距离输送和分配利用更加具有可行性。例如,利用海上风电等可再生能源电力在海上制取氢,然后通过管网将氢气输送到陆地,其成本远低于铺设海底输电线路的成本。澳大利亚、日本目前已开展了这方面的实验,并取得了良好的应用效果<sup>[28,33-34]</sup>。氢与电之间的灵活转换,使得多种可再生能源的标准化利用与管理成为可能。同时,可再生能源电力制取氢气再通过管网运输,使得可再生能源的长距离运输成为可能。利用氢来标准化利用与管理可再生能源,为构建清洁低碳的中国能源体系提供了更多可能性。

#### 1.5 发展(可再生能源发电)电解制氢

目前,中国制氢仍以传统化石燃料和工业副产物为主,长期综合来看经济性差,且与清洁低碳、可持续发展的“双碳”目标不符。电解制氢,尤其是利

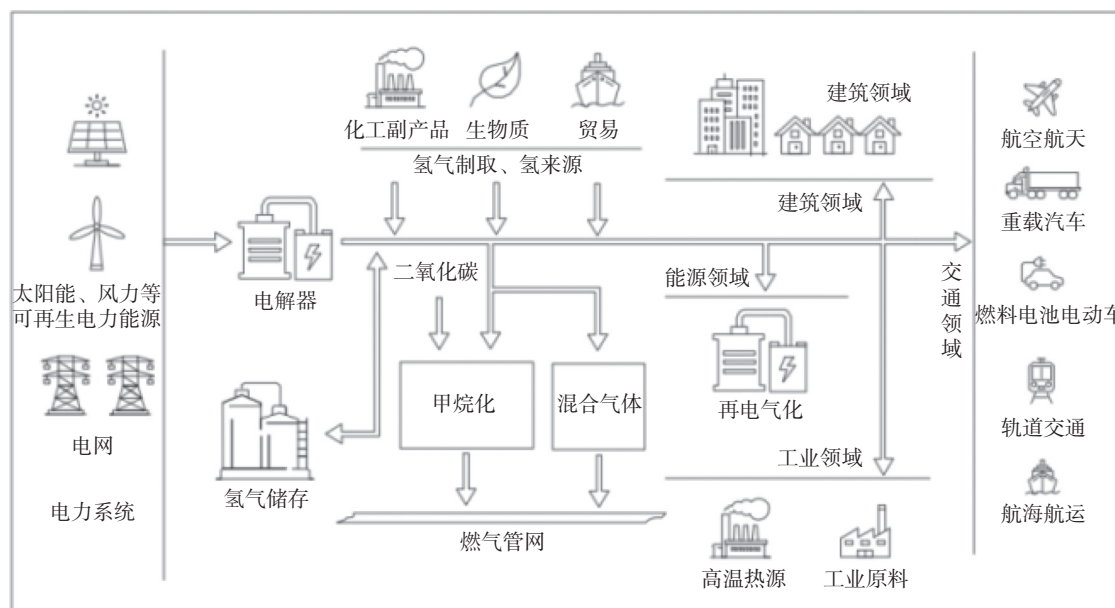


图1 利用氢能可促进可再生能源标准化

Fig. 1 Diagram of promoting the standardization of renewable energy by hydrogen energy

用可再生能源发电的电解制氢在未来大有可为,其中较为成熟的是碱性电解制氢和质子交换膜电解制氢。

碱性电解技术自20世纪20年代以来一直被用来制造氯碱等化工产品,技术成熟,产量巨大,但并没有用于制取氢气,氢气只是氯碱工业的副产品;固体氧化物电解制氢具有极高的效率潜力,但因其需要高温反应环境,目前仍处于开发阶段;质子交换膜电解制氢因其灵活和高效的特点,正迅速占领市场。质子交换膜电解制氢技术功耗小,反应效率高,在短时间内(10~30 min)能够以比名义负载更高的反应能力运行(最高可达200%),具有向上和向下的调节能力。质子交换膜电解制氢技术可以提供高效率反应而不降低生产能力,规模效应下,质子交换膜电解技术可以极大地降低客户的制氢成本<sup>[9,25]</sup>。成熟的碱性电解制氢技术的主要设备是电解槽,技术的改进使得电解槽寿命比原来更长,用户可使用更久。从目前的使用成本和产量来看,碱性电解技术的平均成本远低于逐步占领市场的质子交换膜电解技术。但近几年随着技术进步和大规模推广,质子交换膜电解技术相对而言更加高效,规模效应也使得质子交换膜电解技术的平均成本显著降低。例如,丹麦、日本、阿拉伯联合酋长国等国家已开始利用大型光伏电站发电进行质子交换膜电解制氢,智利则采用光伏、风能联合发电进行质子交换膜电解制氢<sup>[16,18,26]</sup>。

固体氧化物电解制氢技术则是在700~1000℃的高温状态下,利用蒸汽和二氧化碳反应制取氢气。与碱性电解制氢技术、质子交换膜制氢电解技术在正常温度下反应不同,固体氧化物电解制氢技术在高温下有着更快的反应动能,可以实现更高的电解效率,因此是一种具有更大潜力的电解制氢技术。而且,从热力学角度来看,固体氧化物电解技术的部分热量可以来自光伏或工业废热,比碱性电解技术、质子交换膜技术更节省电力供热需求。虽然固体氧化物电解制氢技术具有巨大潜力,但该技术尚不成熟,投资成本高,目前仍处在实验室环境和小规模演示阶段。与质子交换膜电解制氢技术需要大量的铂来作为催化剂不同,固体氧化物电解制氢技术的反应电极、反应催化剂主要为陶瓷和部分特殊材料,造价相对低廉,而且光伏等可再生能源的热能不需要转变为电,可以直接参与或补充固体氧化物电解制氢的过程。因此长期来看,固体氧化物电解制氢技术更具有工业级应用潜力<sup>[9,25]</sup>。根据欧洲能源部门统计数据估算,0.2 MW 质子交换膜电解槽每天大约可生产900 kg 氢气,可供25辆普通公共汽车使用1天。例如,丹麦利用光伏、风能等可再生能源发电占其电力总量的90%以上,近年来其电网价格持续下降,在技术不断进步,效率不断提高的情况下,利用价格不断下降的电力,尤其是可再生能源电力制氢,氢的

平衡成本已经可以实现 5~6 美元/kg。随着氢的消费量增加,制氢的规模经济效应越大,制氢成本还会进一步下降。正因如此,智利制定了利用可再生能源电力驱动质子交换膜电解制氢的战略,所得氢气可供大规模出口,日本已将智利列入长期氢进口供应商<sup>[12, 16, 35]</sup>。

在中国改善能源体系,保障能源安全的战略下,技术不断进步的电解制氢将成为中国未来氢气制取的主要方式之一。预计到 2050 年,氢能在中国终端能源体系中的占比将达到 10%,其中可再生能源制氢超过 30%<sup>[36]</sup>。充分利用光伏、风能等可再生能源,将有效改善中国氢能行业和经济性,可以降低中国对传统化石燃料制氢的依赖,有助于改进中国能源体系。

### 1.6 加大氢燃料电池实现商业推广与应用

燃料电池反应原理与发电装置类似,本质是燃料不经过燃烧而直接通过电化学反应转化成电能驱动电动机做功,虽然不同类型的燃料电池应用领域和使用环境不同,但燃料电池的能源效率基本都可达到 60% 及以上<sup>[24-25]</sup>。

目前氢燃料电池配套的车载储氢瓶压力等级分为 35 MPa 和 70 MPa 两种,与之匹配的加氢站固定储氢压力分别为 45 MPa 和 100 MPa。在自然压差下经压力控制、高压管道、加氢机等复杂的设备系统氢气被注入车载储氢瓶。因此相比锂离子电池(锂电池)的充电过程,氢燃料电池的燃料加注效率更优<sup>[37-38]</sup>。在电池车等应用场景,相同体积且相同工况下,氢燃料电池的能量密度大于锂离子电池,且拥有更大的续航能力。例如,特斯拉 Tesla 使用锂电池技术,即使用近七千多颗电池组成的锂电池包,充电时间在几十分钟至几个小时,续航里程最高为 500 km。而丰田 Mirai 的第一代氢燃料电池车,3 个储氢罐装载约 5.6 kg 氢气,燃料加注时间仅为几分钟,续航里程便已轻松超过 500 km。

但是氢燃料电池在材料和系统方面的技术尚不成熟。不仅在中国,在包括日本在内的其他国家,目前氢燃料电池成本也明显高于锂离子电池。例如,中国锂离子电池系统成本约在 1800 元/kWh,燃料电池成本(不包含系统零部件)约在 3000 元/kWh,如果是氢燃料电池,还需要配套储氢系统,整体成本将进一步上升。一辆配备 60 kWh 锂离子电池的比亚迪

E6 的成本在 10 万元左右。而一辆配备 114 kW 氢燃料电池的丰田 Mirai 一代成本超过 50 万元。氢燃料电池的高成本是限制其大规模发展的主要瓶颈。此外,氢燃料电池车是一项庞大的系统工程,涉及到跨行业 and 产业的共性技术。为提供氢燃料电池车的共性技术支撑,中国汽车工程学会发起设立国际氢能燃料电池协会,协会成员包括联合国开发计划署、加拿大巴拉德动力、美国阿贡国家实验室以及丰田、本田、戴姆勒奔驰、上汽集团、中国一汽等汽车企业,希望通过信息共享和技术合作开展氢燃料电池汽车、氢能基础设施的示范推广,促进全球氢燃料电池汽车技术进步。在氢燃料电池核心技术领域,中华人民共和国科学技术部等联合大批产学研机构,制定氢燃料电池相关政策,成立了多个项目推进科技攻关。

《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》于 2016 年发布,提出推进氢能和燃料电池汽车产业化,加速攻关氢燃料电池等关键核心技术,在 2020 年实现氢燃料电池车批量生产和规模化示范应用;2017 年,中国一汽牵头,组织包括东风汽车、同济大学、中国科学院大连化物所等多家企事业单位进行高功率燃料电池发动机项目研究,同期的一系列小型项目加速了氢燃料电池系统中的双极板、交换膜、催化剂、气体扩散技术、储氢容器等核心零部件的技术攻关。2019 年两会期间,中国在政府工作报告中第一次提及氢能,政府对氢能和燃料电池车的重视,标志中国氢能利用与开发迎来大发展期。2020 年 1 月,加拿大巴拉德动力系统和德勤中国在世界消费技术贸易展览会上联合发布《助力未来出行:适用于运输的氢和燃料电池解决方案》白皮书。巴拉德总裁兼首席执行官表示,对于部分商业应用,不出 10 年,运行燃料电池电动汽车的成本就会低于纯电动汽车或燃油汽车。白皮书还预测,随着技术成熟和规模经济,氢燃料成本不断下降,氢加注基础设施不断完善,保守估计氢能商用汽车的制造成本和使用成本可能在未来 10 年内下降 50% 以上<sup>[39]</sup>。中国是全球氢能产量最大的国家,也是全球最大的氢市场之一。在过去几年中,中国氢燃料电池车的商用领域发展迅速,氢在各个领域的开发与利用也迎来了极大发展。随着氢燃料电池、氢燃料电池车相关技术的不断进步,成本不断降低,中国的氢燃料电池

将在未来率先进入大规模商用<sup>[40-42]</sup>。

在实现“双碳”目标的过程中,中国正在构建以新能源为主体的新型电力系统,氢在新型电力系统中广泛而丰富的应用路径值得探讨。国家能源局在2021年下发《关于征求2021年可再生能源电力消纳责任权重和2022—2030年预期目标建议的函》,以确保完成2030年非化石能源占比和消纳目标。氢作为电力与其他能源之间的良好介质,在我国高渗透可再生能源电力系统中扮演着重要角色,目前正快速发展的电氢耦合技术研究和应用,是构建我国新型电力系统的有效路径<sup>[43-45]</sup>。例如,利用可再生能源发电制氢,可促进我国可再生能源消纳;氢发电站的快速响应能力,可缓解电网峰谷平衡压力,为新型电力系统提供更加灵活的调节手段;氢储能具有容量大、储存时间长、清洁无污染等特点,可实现电能大容量长周期的存储;氢燃料电池则通过氢-电转换,可实现电、热、冷等多种能源的耦合互联,是综合能源系统的有效利用路径。

## 2 中国氢能高质量发展的政策探讨

### 2.1 完善氢能顶层政策设计

从国家层面研究制定中国氢能利用与发展的总体规划,可以加快确立氢能在中国能源体系和能源战略中的角色。近几年,中国为加快氢能开发与利用已出台一系列规划设计,从国家层面制定的中国氢能发展战略明确了中国氢能产业链各环节、各阶段性的目标,初步确立了中国氢能开发与利用的相关实施步骤,为中国氢能产业主管部门建立跨部门协调管理机制提出了基本纲领,中国氢能在主要实施路径上已初步形成共识。

中国氢能发展除了要加强顶层设计,还要以企业为主体,以市场为导向,充分发挥企业的主动性和创造性,针对制氢、储氢运输、氢加注基础设施、氢燃料电池车等重点领域,国家要加强相关政策设计、制定和实施,鼓励企业实现技术突破和成本下降<sup>[41]</sup>。氢加注基础设施是氢能产业发展的重要配套设施,更是中国氢能产业发展的基础,但氢加注基础设施成本高昂,同时由于行政审批阻碍,政策细则模糊,氢加注基础设施在中国建设相对缓慢。以氢加注基础设施为例,针对氢加注环节中与氢能基础设施相关的问题,需要从行政上厘清各主管部门权责,提前

设计中国氢能管理政策体系,将氢能纳入规范化的中国能源管理框架,尽可能减少氢加注基础设施的政策制度障碍。另外,围绕氢加注基础设施领域的产业发展,要做好政策引导,围绕加氢站设备核心技术展开重点攻关,尽快完成关键零部件的国产化,减少对外依赖,降低中国加氢站综合成本,同时从顶层设计上引导和跟进投资契机,对标加油站、加气站成熟规范的管理模式,提升中国氢加注基础设施领域的规划、建设、运营、维护等管理水平,探索油、气、电、氢一体化能源站的未来发展路线。

### 2.2 细化氢能“制储输用”专项研究的政策支持

针对中国氢能发展的关键核心技术,需要建立中国氢能专项研究机制,加强氢能“制储输运”四大环节基础理论和关键技术的研发投入:

1)在制氢环节,除了继续加强高效煤制氢、天然气(甲烷)高温水蒸气转化制氢等传统化石能源制氢的政策转型引导,逐步降低“灰氢”比例外,还要加强光伏、风能等可再生能源电解制氢等未来主流技术的研究攻关,对包括新型电极、高级质子膜技术、改性电解反应质等在内的相关配套技术加大研发支持,提效降本。目前,可再生能源电力制氢技术面临的挑战难度高,但因其涉及可再生能源与现有能源体系的耦合,有助于培养跨行业专业人才,应加强相关研发的政策支持。

2)在氢气储存运输环节,我国要加强储氢技术、储运装备等方面的基础研究的政策引导。目前较为成熟的氢气储存运输方式是压缩储氢、液化储氢两种方式。我国在35 MPa及以下储氢罐设计制造技术已成熟,但国际主流方向是70 MPa和90 MPa的碳纤维防渗膜混合材料储氢罐,我国应在技术标准、政策支持上与国际主流看齐。另外,更高效的固态多孔吸附储氢、化学储氢技术,以及储氢运输过程中的使用、维护、安全检查等相关配套技术也应给予一定的先导政策支持。

3)在氢加注环节,我国大部分核心关键零部件仍依赖进口,例如氢气接卸再压缩设备、氢气加注防爆枪、站内氢气输运柔性管道等,这些关键设备或零部件采购成本几乎占一座加氢站投资额的80%,所以在氢加注基础设施领域,我国要重点关注包括新型防爆高压压缩机技术研究,防爆加氢枪、柔性防爆防渗输氢管道在内的核心关键零部件的研发制造,

并制定核心零部件生产制造、安全使用的相关检测标准。另外,根据中国工程院研究,氢气装卸、加注全过程的热温控制对保证氢加注基础设施安全极为重要,这也是我国亟须开展的技术研究方向,需要针对性的科技政策引导。氢加注环节是氢能终端利用大规模推广的关键之一,应不断细化该环节研究和建设等的相关政策。

4)在氢能终端利用环节,目前大部分氢作为化工原料、燃料以及还原剂等工业领域被利用,相关政策应鼓励氢在石化、钢铁、水泥等工业领域应用的研发和转化,为氢冶金、氮氢合成氨等技术攻关提供支持。另外,在氢燃料电池的商用领域,目前世界各国都在追求输出功率更大、使用寿命更长、能量密度更高的氢燃料电池。但在质子交换膜、催化剂、氢燃料电池发动机输出功率、单位质量功率密度、低温冷启动性能、成本控制等方面,我国与国际主流氢燃料电池的技术差距仍然很大。除了继续改进氢燃料电池性能,我国还应该加大氢燃料电池整车集成技术研究,同时根据我国不同地域特点,对燃料电池与化石能源气化制氢发电集成技术、家庭高效氢燃料电池供热制冷集成技术的实用性研究分区域展开研究,合理利用政策引导,以支持实际应用带动技术进步。

### 2.3 加快制定氢能相关标准和规范

标准化是在既定范围内获得最佳秩序,促进共同效益,对现实问题或潜在问题确立共同使用和重复使用的条款,以及编制、发布和应用文件的活动。标准通过标准化活动,按照规定的程序经协商一致制定,为各种活动或结果提供规则、指南<sup>[46]</sup>。区别于其他已经成熟的产业,中国的氢能产业目前处于高速发展阶段,技术发展快,产品升级和更新快,氢能标准化面临很大的挑战。

据中国氢能标准化技术委员会介绍,目前致力于氢能标准化的国际组织有2个,即国际标准化组织氢能技术委员会和国际标准化组织道路车辆技术委员会<sup>[47]</sup>。中国从事氢能国家标准化技术的组织目前主要有4个,一是全国氢能标准化技术委员会,主要从事氢能开发与利用标准的研究;二是全国燃料电池及液流电池标准化技术委员会,主要从事燃料电池相关的标准研究;三是全国汽车标准化技术委员会,主要从事燃料电池汽车方面的标准研究;四是全

国气瓶标准化技术委员会车用高压燃料气瓶分技术委员会,主要是车用压缩气瓶相关的标准研究。

中国目前的氢能技术标准体系主要包括8个,分别针对氢加注基础设施管理、氢质量、氢安全、氢工程建设、氢制备、氢储运与加注、氢相关检测等不同体系开展标准化建设。在中国现有近百项氢能相关标准中,涉及氢燃料电池的标准最多,其次为氢气制取标准和燃料电池车标准,而氢安全在内的氢能其他环节的标准还不够完备<sup>[47-48]</sup>。例如,我国针对危化品储存罐、燃油储存罐的系列标准已成熟并实施,以此为目标,要尽快形成针对压缩氢气储存罐、液氢储存罐的设计制造、使用维护、检验检测、安全寿命评估等一系列标准;另外,在氢加注基础设施方面,应对标成熟的传统加油加气站,制定关于氢加注基础设施在设计建设、使用维修等方面的系列标准。中国氢能利用与发展要加快研究和制定相应的规范标准,围绕制氢、储氢运输、氢加注基础设施、氢能终端利用等环节,在借鉴国外氢能相关标准和规范的基础上,制定符合中国国情的氢能标准,构建保障中国氢能高质量发展的国家标准体系。

### 2.4 加强氢能产业战略联盟建设

氢能产业涉及广,任何国家、任何机构或企业不可能全部统揽。因此,成立专项研究联盟、构建政企协商机制,集中力量攻关氢能产业某个技术或环节,是国际氢能开发与利用的常用合作方式。例如,欧盟将氢能作为“未来能源”,为在激烈的国际竞争中抢占优势地位,早在2003年就建立了泛欧洲氢能及燃料电池技术研发平台,以强化氢能的科研协同创新<sup>[14,23]</sup>;美国在20世纪70年代就启动了“Task 40”的联盟协作研究计划,该计划涉及氢能开发与利用全产业、全过程,每一项研究任务都会具体到什么科研组在什么时间达成什么研究目标<sup>[21]</sup>;日本则早在20世纪50年代就制定了《高压气体法》,日本在此法案框架下成立研究联盟开展氢能各个环节的安全利用的协同研究,如今日本氢能利用与发展走在世界最前列<sup>[31,49]</sup>。

2018年2月,中国氢能源及燃料电池产业创新战略联盟在北京成立,该联盟由国家能源集团牵头,国家电网等多家央企参与,是成立时间较早的中国氢能领域跨学科、跨行业、跨部门的国家级产业联盟,但这远远不够。根据国务院发展研究中心、中石



油经济技术研究院等机构预测,到“十四五”末,中国石油需求将接近  $7.3 \times 10^8 \sim 7.5 \times 10^8$  t,天然气需求将达到  $4.2 \times 10^{11} \sim 5 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup>,面临的能源安全问题将更加严峻<sup>[50]</sup>,加强氢能利用与发展的相关研究,有助于改善中国能源进口依赖,保障能源安全。氢能如今是中国能源体系建设和能源安全保障的重要组成部分,加强中国氢能在理论研究、应用研究领域的战略联盟建设,除了聚集产学研各方面的技术资源,强化协同创新外,还可统筹推动包括制氢、储氢运输、氢加注基础设施、氢能终端利用各环节的产业技术。另外,还应该加强建设中国氢能利用与发展在理论、应用领域的研究联盟,协调产业与市场,聚焦联盟成员及相关子项目成员的研究方向,在技术、安全、标准上开展更广泛的深度合作,畅通资金渠道,扩展投资机制,推动中国氢能在军用、民用的跨领域应用,加速中国氢能开发与利用的产业布局。在未来,除了建立类似于中国氢能源及燃料电池产业创新战略联盟之类的大型联盟,中国应鼓励企事业单位、科研机构、民间团体等力量积极建设中国氢能产业中细分领域的战略联盟,并支持这些细分领域联盟在理论和应用领域的创新研究,以联盟协作带动研究合作<sup>[51]</sup>,形成一批具有中国自主知识产权的核心技术,提升氢能产业竞争力。

## 2.5 健全氢能市场供需协调

2011年以来,中国相继发布了《“十三五”战略性新兴产业发展规划》《能源技术革命创新行动计划(2016—2030年)》《节能与新能源汽车产业发展规划(2012—2020年)》《中国制造2025》等文件。2019年4月,中国工信部表示将联合有关部门制定破解中国氢能利用与发展产业化、商业化难题的相关政策,并于10月发布《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)征求意见稿》,强调今后将提高制氢、燃料储运经济性,推进氢加注基础设施建设,完善政策法规环境,有序推进中国氢能市场建设。2020年4月,《能源法》(征求意见稿)也首次将氢能列为能源,对氢能再一次作了重要的谋篇布局。

在构建清洁、低碳的能源体系,应对全球气候危机的背景下,各国政府积极利用和发展氢能,各大能源企业、车企集体发力,全球氢能和燃料电池汽车创新热度不断提升,市场规模不断扩大,氢能市场已进入导入期,中国的氢能也进入新的蓬勃发展阶段。

例如,江苏高度重视氢燃料电池车产业发展,在《江苏省氢燃料电池汽车产业发展行动计划》中明确了产业技术和市场发展路线,南通市依托氢能,打造如皋氢能小镇等特色产业,2018年的新能源及新能源汽车产值已达1300多亿元,成为中国氢能市场蓬勃发展的一个缩影;日本丰田汽车的氢燃料电池技术研究在全球具有很强的技术优势,旗下Mirai是全球首个成功商用的氢燃料电池车,丰田在中国开展各类氢燃料电池技术相关的活动,看好中国氢能市场,希望更好地匹配中国市场需求;韩国现代汽车与全球很多客户建立了广泛的合作联系,与奥迪建立了《专利交叉许可协议》,现代汽车目前已成为市场大客户定制了1600辆氢燃料电池重卡,并以氢能市场供需为基础,建立氢能生态系统;中国长城汽车成立氢能公司,开展氢燃料电池车开发,顺应市场需求,打造集自动驾驶、智能网联技术于一体的新一代氢燃料电池车;国家能源集团北京低碳清洁能源研究院预测,中国将在2030年之前发展100万台氢燃料电池车,中国氢能市场潜力巨大。如今中国氢能已进入市场导入期,中国应该加强市场供需调节机制,以市场为导向,在做好重点客户需求的同时,相关企业也要做好自身市场定位,有序参与中国氢能市场竞争,积极应对中国氢能市场供需协调。

## 3 启示与结语

在这个立足新发展阶段,贯彻新发展理念,构建新发展格局,推动高质量发展的新时代<sup>[52-53]</sup>,中国向国际社会作出“2030年实现碳达峰,2060年实现碳中和”的庄严承诺。在“双碳”目标的实现过程中,氢能一定大有可为。文章在分析中国氢能利用与发展现状的基础上,围绕中国氢能高质量发展中存在的问题,提出了利用氢能率先促进交通领域和工业领域的低碳化,将氢能与现有石油天然气储运体系结合,利用氢能促进可再生能源的标准化利用,发展可再生能源电力制取氢气,加大氢燃料电池的推广与应用等有助于中国氢能高质量发展的路径建议,同时从完善国家层面的氢能顶层政策设计,细化氢能“制储输用”四大环节专项研究的政策支持,加快制定氢能相关标准和规范,加强氢能产业的战略联盟建设,健全氢能市场供需协调机制方面对中国氢能高质量发展的相关政策进行探讨。

## 参考文献:

- [1] 何建坤. 中国能源革命与低碳发展的战略选择 [J]. *武汉大学学报(哲学社会科学版)*, 2015, 68(1): 5-12. DOI: 10.14086/j.cnki.wujss.2015.01.001.
- HE J K. The strategic choice of Chinese energy revolution and low carbon development [J]. *Wuhan University Journal (Philosophy & Social Sciences)*, 2015, 68(1): 5-12. DOI: 10.14086/j.cnki.wujss.2015.01.001.
- [2] 毛宗强. 世界氢能炙手可热 中国氢能蓄势待发 [J]. *太阳能*, 2016(7): 16-19+80. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0417.2016.07.003.
- MAO Z Q. The world's hydrogen energy is hot and China's hydrogen energy is gaining momentum [J]. *Solar Energy*, 2016(7): 16-19+80. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0417.2016.07.003.
- [3] 周云亨, 方恺, 叶瑞克. 能源安全观演进与中国能源转型 [J]. *东北亚论坛*, 2018, 27(6): 80-91+126. DOI: 10.13654/j.cnki.naf.2018.06.007.
- ZHOU Y H, FANG K, YE R K. Evolution of energy security concept and China's energy transition [J]. *Northeast Asia Forum*, 2018, 27(6): 80-91+126. DOI: 10.13654/j.cnki.naf.2018.06.007.
- [4] 胡保林, Maria Krautzberger. 2035年环境质量改善目标与路径 [R]. 北京: 中国环境与发展国际合作委员会, 2019.
- HU B L, MARIA K. Objectives and paths of environmental quality improvement in 2035 [R]. Beijing: China Council for International Cooperation on Environment and Development, 2019.
- [5] 滕玥. 《新时代的中国能源发展》白皮书发布 引领中国能源迈入高质量发展阶段 [J]. *环境经济*, 2021(2): 20-23.
- TENG Y. The release of the white paper "China's Energy Development in the New Era" leads China's energy into a high-quality development stage [J]. *Environmental Economy*, 2021(2): 20-23.
- [6] 郭海涛, 刘力, 王静怡. 2020年中国能源政策回顾与2021年调整方向研判 [J]. *国际石油经济*, 2021, 29(2): 53-61. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7298.2021.02.007.
- GUO H T, LIU L, WANG J Y. Review of China's energy policy and the adjustment orientation in 2021 [J]. *International Petroleum Economy*, 2021, 29(2): 53-61. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7298.2021.02.007.
- [7] 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所. 中国能源革命进展报告(2020) [R]. 北京: 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所, 2020.
- Institute of Resources and Environmental Policy, Development Research Center of the State Council. Progress report on China's energy revolution (2020) [R]. Beijing: Institute of Resources and Environmental Policy, Development Research Center of the State Council, 2020.
- [8] 赵紫原, 李玲. 2021氢能产业发展论坛发言摘编 [N]. *中国能源报*, 2021-09-06(007). DOI: 10.28693/n.cnki.nshca.2021.00.2050.
- ZHAO Z Y, LI L. Excerpts speech from the of the 2021 Hydrogen Energy Industry Development Forum [N]. *China Energy News*, 2021-09-06(007). DOI: 10.28693/n.cnki.nshca.2021.002050.
- [9] 何青, 孟照鑫, 沈轶, 等. “双碳”目标下我国氢能政策分析与思考 [J]. *热力发电*, 2021, 50(11): 27-36. DOI: 10.19666/j.rlf.202104071.
- HE Q, MENG Z X, SHEN Y, et al. Analysis and thinking of hydrogen energy policies in China under "double carbon" target [J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(11): 27-36. DOI: 10.19666/j.rlf.202104071.
- [10] 符冠云, 龚娟, 赵吉诗, 等. 2020年国内外氢能发展回顾与2021展望 [J]. *中国能源*, 2021, 43(3): 45-48. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2355.2021.03.008.
- FU G Y, GONG J, ZHAO J S, et al. Review of hydrogen energy development at home and abroad in 2020 and prospects for 2021 [J]. *Energy of China*, 2021, 43(3): 45-48. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2355.2021.03.008.
- [11] 张羽, 张译匀. 基于专利信息的中国新能源汽车技术创新发展 [J]. *办公自动化*, 2021, 26(6): 59-61. DOI: 10.3969/j.issn.1007-001X.2021.06.023.
- ZHANG Y, ZHANG Y Y. The technological innovation and development of China's new energy vehicles based on the patent information [J]. *Office Automation*, 2021, 26(6): 59-61. DOI: 10.3969/j.issn.1007-001X.2021.06.023.
- [12] 珊克瑞·斯里尼瓦桑, 周希舟, 张东杰. 欧洲氢能发展现状前景及对中国的启示 [J]. *国际石油经济*, 2019, 27(4): 18-23. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7298.2019.04.003.
- SRINIVASAN S, ZHOU X Z, ZHANG D J. Hydrogen development in Europe and its implications for China's hydrogen industry [J]. *International Petroleum Economy*, 2019, 27(4): 18-23. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7298.2019.04.003.
- [13] CLAIRE DIETZ-POLTE V V. The German national hydrogen strategy and international hydrogen partnerships [EB/OL]. (2021-10-06) [2021-11-24]. <https://www.bakermckenzie.com/en/insight/publications/2021/10/german-national-hydrogen-strategy>.
- [14] European Commission. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe [EB/OL]. (2020-07-16) [2021-11-24]. [https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/communication-com2020301-hydrogen-strategy-climate-neutral-europe\\_en](https://knowledge4policy.ec.europa.eu/publication/communication-com2020301-hydrogen-strategy-climate-neutral-europe_en).
- [15] 李勇. 船舶氢燃料电池应用研究 [J]. *内燃机与配件*, 2021(21): 238-239. DOI: 10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2021.21.113.
- LI Y. Application of marine hydrogen fuel cell [J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2021(21): 238-239. DOI: 10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2021.21.113.
- [16] International Energy Agency (IEA). Global hydrogen review 2021 [R]. Paris: IEA, 2021.

- [17] International Energy Agency. The future of hydrogen: seizing today's opportunities, 1 [R]. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2019.
- [18] Federal Ministry for Economic Affairs and Energy of Germany (BMWi). The national hydrogen strategy [R]. Berlin: BMWi, 2020.
- [19] U. S. Department Of Energy (DOE). Hydrogen strategy: Enabling a low-carbon economy [R]. Washington: DOE, 2020.
- [20] LUCCHESI P, OHIRA E, LEAVER J, et al. IEA Hydrogen TCP: EOT 2015-2020 and strategic plan 2020-2025 [EB/OL]. (2019-09-11) [2021-11-24]. <https://www.researchbank.ac.nz/bitstream/handle/10652/4745/Lucchesi%2C%20P.%20%282019%29.pdf?sequence=4>.
- [21] 王彦雨, 高璐, 刘益东. 美国国家氢能计划及其启示 [J]. *未来与发展*, 2015, 39(12): 22-29. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0166.2015.12.005.
- WANG Y Y, GAO L, LIU Y D. The inspiration of the national hydrogen energy roadmap of US [J]. *Future and Development*, 2015, 39(12): 22-29. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0166.2015.12.005.
- [22] 符冠云. 氢能在我国能源转型中的地位和作用 [J]. *中国煤炭*, 2019, 45(10): 15-21. DOI: 10.19880/j.cnki.ccm.2019.10.003.
- FU G Y. The status and role of hydrogen energy in China's energy transformation [J]. *China Coal*, 2019, 45(10): 15-21. DOI: 10.19880/j.cnki.ccm.2019.10.003.
- [23] Hydrogen Council, McKinsey & Company. Hydrogen insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness [R]. Brussels: Hydrogen Council, 2021.
- [24] The Hydrogen Technology Collaboration Programme (Hydrogen TCP). Global trends and outlook for hydrogen [R]. Paris: Hydrogen TCP, 2017.
- [25] 邹才能, 张福东, 郑德温, 等. 人工制氢及氢工业在我国“能源自主”中的战略地位 [J]. *天然气工业*, 2019, 39(1): 1-10. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2019.01.001.
- ZOU C N, ZHANG F D, ZHENG D W, et al. Strategic role of the synthetic hydrogen production and industry in Energy Independence of China [J]. *Natural Gas Industry*, 2019, 39(1): 1-10. DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2019.01.001.
- [26] International Energy Agency (IEA). Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector [R]. Paris: IEA, 2021.
- [27] 娜余. 中石油天然气管网进行最大规模资源调整 [EB/OL]. (2019-06-06) [2021-11-14]. [http://www.cinn.cn/headline/201906/t20190606\\_213405.html](http://www.cinn.cn/headline/201906/t20190606_213405.html).
- NA Y. China National Petroleum Corporation's natural gas pipeline network carries out the largest resource adjustment [EB/OL]. (2019-06-06) [2021-11-14]. [http://www.cinn.cn/headline/201906/t20190606\\_213405.html](http://www.cinn.cn/headline/201906/t20190606_213405.html).
- [28] International Renewable Energy Agency (IRENA). Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition [R]. Abu Dhabi: IRENA, 2018.
- [29] 白建华, 辛颂旭, 刘俊, 等. 中国实现高比例可再生能源发展路径研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(14): 3699-3705. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2015.14.026.
- BAI J H, XIN S X, LIU J, et al. Roadmap of realizing the high penetration renewable energy in China [J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2015, 35(14): 3699-3705. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2015.14.026.
- [30] International Renewable Energy Agency (IRENA). World energy transitions outlook 2021 [R]. Abu Dhabi: IRENA, 2021.
- [31] 史立山. 中国能源现状分析和可再生能源发展规划 [J]. *可再生能源*, 2004(5): 17-21.
- SHI L S. Analysis of China's energy status and renewable energy development plan [J]. *Renewable Energy*, 2004(5): 17-21.
- [32] BP. Energy outlook: 2020 edition [R]. London: BP, 2020.
- [33] NIUNOYA M. Hydrogen law and regulation in Japan [EB/OL]. (2021-11-24) [2022-01-13]. <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/japan>.
- [34] KIMURA S, LI Y F. Demand and supply potential of hydrogen energy in East Asia [R]. Jakarta: Economic Research Institute for ASEAN and East Asia, 2019.
- [35] MAGILL J. Europe, Asian nations leading the world in hydrogen development [EB/OL]. (2021-02-24) [2022-01-13]. <https://www.3rdcoastenergy.com/2021/02/24/europe-asian-nations-leading-the-world-in-hydrogen-development/>.
- [36] 黄宣旭, 练继建, 沈威, 等. 中国规模化氢能供应链的经济性分析 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(2): 1-13. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.001.
- HUANG X X, LIAN J J, SHEN W, et al. Economic analysis of China's large-scale hydrogen energy supply chain [J]. *Southern Energy Construction*, 2020, 7(2): 1-13. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.001.
- [37] 王莹. 70 MPa车载储氢气瓶供氢系统及快充过程研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019. DOI: 10.26991/d.cnki.gdlu.2019.001327.
- WANG Y. Research on hydrogen supply system of 70 MPa hydrogen storage cylinder for vehicles and the fast filling process [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019. DOI: 10.26991/d.cnki.gdlu.2019.001327.
- [38] 陈祖志, 管坚, 黄强华, 等. 氢能产业发展现状及其对特种设备行业的机遇和挑战 [J]. *中国特种设备安全*, 2019, 35(9): 1-13+28. DOI: 10.3969/j.issn.1673-257X.2019.09.001.
- CHEN Z Z, GUAN J, HUANG Q H, et al. Current situation of hydrogen energy industry and opportunities and challenges of special equipment industry arising therefore [J]. *China Special Equipment Safety*, 2019, 35(9): 1-13+28. DOI: 10.3969/j.issn.1673-257X.2019.09.001.
- [39] Ballard Power Systems, Deloitte. Fueling the Future of Mobility:

- Hydrogen and fuel cell solutions for transportation [R]. Las Vegas: CES2020, 2020.
- [40] 丁瑶瑶. 专访国家燃料电池汽车及动力系统工程研究中心副主任马天才 最先实现氢燃料电池产业化的一定是中国 [J]. 环境经济, 2021(16): 29-33+28.
- DING Y Y. Interview with MA Tiancai, deputy director of National Fuel Cell Vehicle and Powertrain Engineering Technology Research Center: China must be the first to realize the industrialization of hydrogen fuel cells [J]. Environmental Economy, 2021(16): 29-33+28.
- [41] 中国国际工程咨询有限公司氢能战略研究课题组. 全球氢能发展态势及我国的战略选择 [J]. 财经智库, 2021, 6(4): 124-136+144. DOI: 10.20032/j.cnki.cn10-1359/f.2021.04.008.
- Hydrogen Strategy Research Group of China International Engineering Consulting Corporation. Global hydrogen energy development trend and my country's strategic choice [J]. Financial Minds, 2021, 6(4): 124-136+144. DOI: 10.20032/j.cnki.cn10-1359/f.2021.04.008.
- [42] 马丽, 孙鹏, 张秋. 我国氢燃料电池汽车发展前景探究 [J]. 专用汽车, 2021(8): 83-85+90. DOI: 10.3969/j.issn.1004-0226.2021.08.015.
- MA L, SUN P, ZHANG Q. Explore development prospect of hydrogen fuel cell vehicles in China [J]. Special Purpose Vehicle, 2021(8): 83-85+90. DOI: 10.3969/j.issn.1004-0226.2021.08.015.
- [43] 杨馥源, 田雪沁, 徐彤, 等. 面向碳中和电力系统转型的电氢枢纽灵活性应用 [J]. 电力建设, 2021, 42(8): 110-117. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2021.08.013.
- YANG F Y, TIAN X Q, XU T, et al. Flexibility of electro-hydrogen hub for power system transformation under the goal of carbon neutrality [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(8): 110-117. DOI: 10.12204/j.issn.1000-7229.2021.08.013.
- [44] 刘志坚, 余莎, 梁宁. 考虑制氢储能参与的互联电力系统优化调度研究 [J]. 电力科学与工程, 2020, 36(3): 45-51. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0792.2020.03.007.
- LIU Z J, YU S, LIANG N. The optimal scheduling with hydrogen energy storage participation for interconnected power system [J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(3): 45-51. DOI: 10.3969/j.issn.1672-0792.2020.03.007.
- [45] 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.
- [46] 毛芳, 盛立新. 国际标准化发展新趋势背景下中国标准国际化的现状及路径完善 [J]. 标准科学, 2018(12): 88-91. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5698.2018.12.017.
- MAO F, SHENG L X. Research on international standardization trends, China's participation and path improvement [J]. Standard Science, 2018(12): 88-91. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5698.2018.12.017.
- [47] 薛俊, 裴冯来. 我国氢能标准化工作研究 [J]. 质量与标准化, 2020(7): 50-53. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0918.2020.07.018.
- XUE J, PEI F L. Research on standardization of hydrogen energy and fuel cells in China [J]. Quality and Standardization, 2020(7): 50-53. DOI: 10.3969/j.issn.2095-0918.2020.07.018.
- [48] 曹湘洪, 魏志强. 氢能利用安全技术研究与标准体系建设思考 [J]. 中国工程科学, 2020, 22(5): 144-151. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2020.05.018.
- CAO X H, WEI Z Q. Technologies for the safe use of hydrogen and construction of the safety standards system [J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5): 144-151. DOI: 10.15302/J-SSCAE-2020.05.018.
- [49] 刘平, 刘亮. 日本迈向碳中和的产业绿色发展战略——基于对《2050年实现碳中和的绿色成长战略》的考察 [J]. 现代日本经济, 2021(4): 14-27. DOI: 10.16123/j.cnki.issn.1000-355x.2021.04.002.
- LIU P, LIU L. Japan's green industrial development strategy towards carbon neutral: based on the review of "green growth strategy through achieving carbon neutrality in 2050" [J]. Contemporary Economy of Japan, 2021(4): 14-27. DOI: 10.16123/j.cnki.issn.1000-355x.2021.04.002.
- [50] 彭强. “十四五”末中国石油需求或逼近峰值 天然气需求仍将快速增长 [EB/OL]. [2021-11-14]. <https://finance.sina.com.cn/tech/2021-04-16/doc-ikmxzfmk7220113.shtml>.
- PENG Q. At the end of the "14th Five-Year Plan", China's oil demand may approach peak natural gas demand and will continue to grow rapidly [EB/OL]. (2021-04-26) [2021-11-14]. <https://finance.sina.com.cn/tech/2021-04-16/doc-ikmxzfmk7220113.shtml>.
- [51] 徐家良. 双重赋权: 中国行业协会的基本特征 [J]. 天津行政学院学报, 2003, 5(1): 34-38. DOI: 10.16326/j.cnki.1008-7168.2003.01.006.
- XU J L. Double empower: The essential feature of Chinese guilds [J]. Journal of Tianjin Administration Institute, 2003, 5(1): 34-38. DOI: 10.16326/j.cnki.1008-7168.2003.01.006.
- [52] 新华. 习近平: 深入学习坚决贯彻党的十九届五中全会精神 确保全面建设社会主义现代化国家开好局 [J]. 支部建设, 2021(5): 4-5.
- XIN H. Xi Jinping: In-depth study and resolute implementation of the spirit of the Fifth Plenary Session of the 19th Central Committee of the Communist Party of China Ensure a good start in building a socialist modern country in an all-round way [J]. ZHIBU JIANSHE, 2021(5): 4-5.
- [53] 胡怀国. 新发展阶段的理论逻辑: 一种思想史的视角 [J]. 改

革与战略, 2021, 37(5): 1-10. DOI: 10.16331/j.cnki.issn1002-736x.2021.05.001.

HU H G. Theoretical logic in the new stage of development: A perspective of intellectual history [J]. *Reformation & Strategy*, 2021, 37(5): 1-10. DOI: 10.16331/j.cnki.issn1002-736x.2021.05.001.

#### 作者简介:



张灿

张灿 (第一作者)

1986-, 男, 湖北武汉人, 管理科学与工程博士, 工程师, 主要研究方向为能源经济与管理(e-mail)mr.zhangcan@ucass.edu.cn。



张明震

张明震 (通信作者)

1991-, 男, 河北承德人, 硕士, 主管, 主要从事工业技术经济研究、新能源产业管理(e-mail)492945610@qq.com。

申升

1991-, 女, 湖南邵阳人, 博士, 副教授, 主要从事光催化和新能

源材料研究(e-mail)研究(e-mail)sshenn@hnu.edu.cn。

陈凡

1990-, 男, 湖北监利人, 经济学博士, 助理研究员, 主要从事计量经济和区域发展研究(e-mail)839264854@qq.com。

#### 项目简介:

**项目名称** 钒酸铋@MOF 光阳极的构建及其甘油选择性氧化性能的研究(22008059)

**承担单位** 湖南大学化学化工学院

**项目概述** 项目主要针对高质量绿氢的制造技术进行研究, 对半导体光电水分解制氢进行技术调研, 耦合绿氢制造与精细化学品合成, 降低制氢电力成本, 为未来衔接弹性电网和绿色交通等多个领域提供技术支持。

**主要创新点** (1)利用可替代阳极反应避开析氧反应中较高的能量损耗并同时生成具有高附加值的化学品来降低氢的综合成本;(2)避免质子交换膜的应用, 减少绿氢制造过程中的气体混合, 提升氢气品质, 降低爆炸几率, 提升安全性;(3)通过构筑多组分核壳纳米结构具有可调的壳层结构单元、内部空间结构和化学组成实现绿氢低成本、高质量制备。

(编辑 叶筠英)

## 广 告

云南大唐国际宾川老鹰岩并网光伏电站 EPC 总承包项目	-----	封一
云南大唐国际宾川老鹰岩并网光伏电站 EPC 总承包项目荣获广东省优秀工程勘察设计奖	-----	封二
新型电力系统与储能技术专题特约主编寄语	-----	A1
新型电力系统与储能技术专题特约主编简介	-----	A2
台山海晏镇 500MWp 渔业光伏发电项目	-----	封三
中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司	-----	封四