

氢能与储能耦合发展的机遇与挑战

罗志斌[✉], 孙潇, 孙翔, 林海周, 朱光涛

(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)

摘要: [目的] 氢能和储能是实现“碳达峰、碳中和”目标的重要手段, 并且其产业化正步入快速发展时期。氢能与储能的产业与技术创新具有多方面的交叉与融合。文章旨在通过梳理氢能和储能的应用场景与关键技术, 为其耦合发展提供建议。[方法] 具体阐述了氢能的储能角色在构建新型电力系统中发挥的作用及其在交通、建筑、工业等领域中促进碳减排的定位, 分析了氢能与储能的共性关键技术, 并提出推动其耦合发展的建议。[结果] 新能源通过氢能和储能的形式渗透至电力、交通、建筑、工业等领域进行深度脱碳, 但是其产业技术的瓶颈还需要持续突破。[结论] 氢能与储能的共性关键技术可以进行协同研发攻关, 其产业化仍需要酝酿。在推动工程示范的过程中应该积极积累经验, 掌握核心技术, 避免盲目和重复建设。

关键词: 氢能; 储能; 产业化; 机遇; 挑战

中图分类号: TK91; F426.2

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)04-0024-08

开放科学(资源服务)二维码:



The Coupling Development of Hydrogen and Energy Storage Technology: Opportunities and Challenges

LUO Zhibin[✉], SUN Xiao, SUN Xiang, LIN Haizhou, ZHU Guangtao

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

Abstract: [Introduction] Hydrogen energy and energy storage are important tools to achieve the goal of "carbon peak and neutrality." Their industrialization is entering a period of rapid development. The industry and technological innovation of hydrogen energy and energy storage have various intersections and integration. Therefore, the research provides suggestions for their coupling development by sorting out the application scenarios and key technologies of hydrogen energy and energy storage. [Method] The role of hydrogen energy in the construction of new power systems as energy storage technology was specified and the positioning of hydrogen energy in promoting carbon emission reduction in transportation, construction, industry, and other fields was explained. The common key technologies of hydrogen energy and energy storage were analyzed. Suggestions to promote the development of its coupling were also put forward. [Result] New energy penetrates into power, transportation, construction, industry, and other fields for deep decarbonization in the form of hydrogen energy and energy storage, but the bottleneck of their industrial technologies needs to be broken through continuously. [Conclusion] The common key technologies of hydrogen energy and energy storage can be collaboratively researched and developed, and their industrialization still needs to be brewed. In promoting engineering demonstration, we should actively accumulate experience as well as master the core technology and avoid blind and duplicate construction.

Key words: hydrogen energy; energy storage; industrialization; opportunities; challenges

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/>).

收稿日期: 2022-02-16 修回日期: 2022-04-22

基金项目: 中国博士后科学基金项目(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“等离激元制氢催化剂及反应装置研究设计”(ER06671W)

0 引言

碳中和已成为了人类社会应对全球气候变化达成的共识, 世界各国都在积极采取措施努力实现碳中和目标^[1-2]。氢能既是清洁零碳的新能源, 又是重要的储能载体, 具有燃料与原料的双重属性, 是碳替代的重要手段^[3]。随着新能源的大发展, 在新型电力系统构建过程中, 风电、光伏等可再生能源的比例将大幅度攀升, 但其间歇性和波动性容易使得发/用电匹配失衡, 电力系统可调容量、惯量下降。储能是高比例的可再生能源接入电网后, 维持电力系统平稳运行的必然选择。在全球碳中和的时代背景下, 氢能与储能的交叉、融合发展, 将迎来巨大发展前景。

1 氢能在新型电力系统中的作用

氢能作为一种清洁灵活的二次能源, 在新能源为主体的新型电力系统中可作为电力介质的载体, 实现氢-电灵活转化。氢能也是广义上的能量存储形式之一, 如图1所示, 在众多的储能技术中, 氢储能可与新型电力系统高度耦合, 克服新能源电力储存的难题, 实现大规模、长周期、跨季节储能, 支撑新能源成为新型电力系统的低碳能源^[4]。

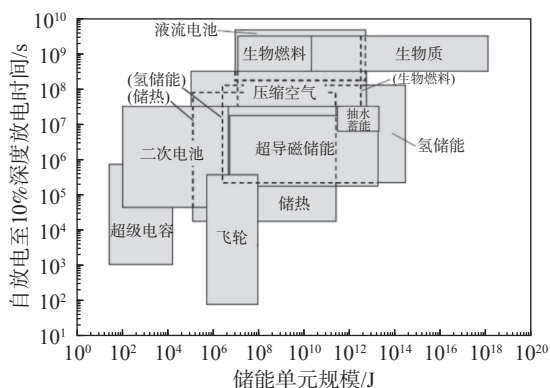


图1 各类储能技术的自放电时间与单元规模^[4]

Fig. 1 All storage technologies, mapped by self-discharge time and unit size^[4]

氢气作为能源载体, 本身并不含有碳元素, 其是否能发挥脱碳作用取决于其生产方式。根据国际可再生能源机构(International Renewable Energy Agency, IRENA)报道, 按照氢气的来源, 可以将其划分为绿氢、蓝氢和灰氢^[5]。其中, 通过可再生能源电力电解水制取的氢气为绿氢, 这一过程中没有二氧

化碳(CO₂)的产生, 实现100%绿色氢气生产; 通过化石燃料制取氢气(如天然气裂解制氢、含氢工业尾气提取氢气等), 产生的CO₂会被捕集、存储并被利用, 整个过程实现CO₂零排放, 生产的氢气被认为是蓝氢; 而通过化石燃料生产氢气, 产生的CO₂直接排放到大气中, 生产的氢气称为灰氢。从碳中和目标的角度而言, 要实现脱碳, 绿氢是最终的选择。

根据IRENA的预测, 如按照《巴黎协定》约定的将本世纪全球气温升幅控制在1.5℃以内, 到2050年全球需要5 TW可再生能源电力用于生产绿氢, 折合约4×10⁸ t绿氢^[6]。而根据中国氢能联盟的报道, 2030年我国的氢气需求量在3.5×10⁷ t, 2050年则达到6×10⁷ t, 在我国的终端能源体系中的比重将超过10%^[7]。

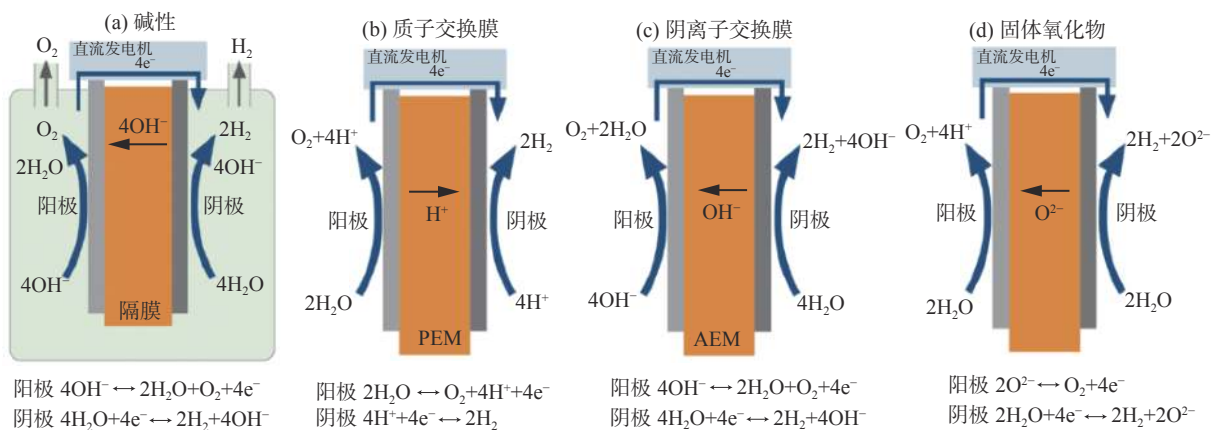
现阶段, 由于电解水制氢的成本相对于化石燃料制氢仍然较高, 直接推广使用绿氢仍缺乏经济性, 因此氢能的推广是从减少灰氢过渡到以蓝氢为主, 最终将广泛采用绿氢。除了政策与市场, 绿氢的生产成本是其规模化的重大阻力。绿氢成本的两大组成部分包括可再生能源电价与电解水装置。新能源规模的扩大与发电技术进步会使可再生能源电价逐步降低。2021年, 全球光伏发电最低中标电价1.04美分/kW(折合人民币约0.066元/kW, 沙特), 而我国光伏发电最低中标电价约0.147元/kW(四川甘孜)。但仅依靠降电价并不能使绿氢相比于蓝氢更具经济优势, 还需要提高电解水技术成熟度及降低其电解槽的生产成本。目前, 全球有四种主流的电解水技术, 包括碱性(Alkaline)电解水技术、质子交换膜(Proton Exchange Membrane, PEM)电解水技术、阴离子交换膜(Anion Exchange Membrane, AEM)电解水技术和固体氧化物(Solid Oxide)电解水技术, 如图2所示, 其中碱性和PEM的商业化成熟度较高, 尽管AEM和固体氧化物拥有巨大的发展前景, 但是其仍处于实验室阶段, 仅有少量企业和原型机制造商在推动其生产制造及商业化^[8]。

根据对全球电解水技术研究机构的发展情况进行总结, 四大类电解水技术现阶段的研究成果(以2020年为例)和未来的发展目标(以2050年为例)具有比较明确的指标和攻关方向, 如表1所示。

可再生能源大规模发展可以为绿氢的生产提供大量的廉价能源, 并且随着电解水技术的不断成熟,

表1 各类电解水技术现阶段性能及未来研发目标^[8]Tab. 1 Current and future key performance indicators for all electrolyser technologies^[8]

电解槽类型	PEM电解槽			碱性电解槽			AEM电解槽			固体氧化物电解槽		
	项目	2020年	2050年	攻关焦点	2020年	2050年	攻关焦点	2020年	2050年	攻关焦点	2020年	2050年
标准电流密度/(A/cm ²)	1~2	4~6	设计、膜	0.2~0.8	>2	隔膜	0.2~2	>2	催化剂、膜	0.3~1	>2	电解液、电极
电压范围/V	1.4~2.5	<1.7	催化剂、膜	1.4~3	<1.7	催化剂	1.4~2.0	<2	催化剂	1.0~1.5	<1.48	催化剂
操作温度/°C	50~80	80	稳定性	70~90	>90	隔膜、框架、辅助设备	40~60	80	稳定性	700~850	<600	电解液
工作压力/bar	<30	>70	催化剂、膜	<30	>70	隔膜、单电池、框架	<35	>70	膜	1	>20	电解液、电极
负荷范围/%	5~120	5~300	膜	15~100	5~300	隔膜	5~100	5~200	膜	30~125	0~200	电解液、电极
氢气纯度/%	99.9~99.9999		膜	99.9~99.9998	>99.9999	隔膜	99.9~99.9999	>99.9999	膜	99.9	>99.9999	电解液、电极
电压效率/%	50~68	>80	催化剂	50~68	>70	催化剂、温度	52~67	>75	催化剂	75~85	>85	催化剂
电效率(电堆)/(kWh/kg H ₂)	47~66	<42	催化剂、膜	47~66	<42	隔膜、催化剂	51.5~66	<42	催化剂、膜	35~50	<35	电解液、电极
电效率(系统)/(kWh/kg H ₂)	50~83	<45	辅助设备	50~78	<45	辅助设备	57~69	<45	辅助设备	40~50	<40	辅助设备
电堆寿命/(×10 ⁴ h)	5~8	10~12	催化剂、膜、多孔传输层	6	10	电极	>0.5	10	膜、电极	<2	8	全面
电堆单元规模/MW	1	10	膜电极组件	1	10	电极	0.0025	0.002	膜电极组件	0.005	0.2	全面
冷启动时间/min	<20	<5	保温设计	<50	<30	保温设计	<20	<5	保温设计	>600	<300	保温设计
1 MW电堆成本/(美元/kW)	400	100	膜组件等	400	100	电极	—	<100	膜电极组件	>2000	<200	电解液、电极
10 MW系统成本/(美元/kW)	700~1400	<200	整流器、净水	700~1400	<200	辅助设备	—	<200	整流器	—	<300	全面

图2 各种商业化电解水技术的类型^[8]Fig. 2 Different types of commercial electrolysis technologies^[8]

绿氢的生产成本将快速下降^[9]。尽管部分领域可以采用绿电(可再生能源电力)进行替代实现碳减排,但是冶金、化工、水泥的生产过程中需要大量的高品位热能(温度高于 400 ℃),这部分热能难以采用电气化的方式来解决,这些难减排领域则适用氢能替代。因此,绿氢也为可再生能源的进一步发展提供广阔的应用场景。宜电则电、宜氢则氢、电氢耦合将是能源应用体系发展的新形势。

2 绿氢的应用场景及技术路线

绿氢的应用场景主要包括交通、建筑、电力、工业等领域,如图 3 所示。其中交通领域是目前氢能应用的主要领域,绿氢是各经济领域深度脱碳的重要实现路径,同时各经济领域的大规模用氢也将进一步促进氢能产业的发展。

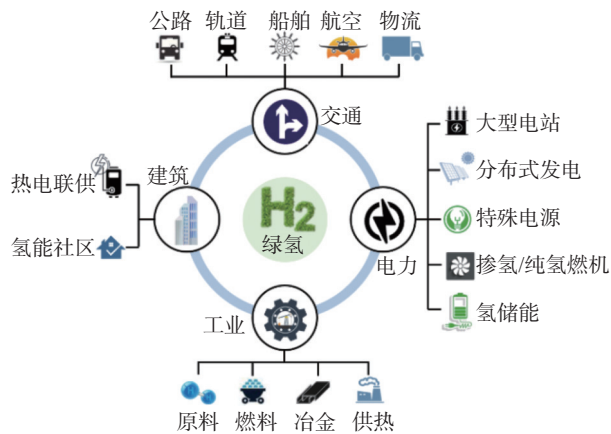


图 3 绿氢的应用场景

Fig. 3 Application scenarios for the green hydrogen

2.1 交通

氢燃料电池技术的发展使氢能可以广泛应用于公路交通、轨道交通、船舶、航空等各种交通领域。氢能源汽车是人们最熟悉的氢能应用场景,其在国际上应用已非常广泛。截至 2021 年,全球各类氢燃料电池汽车保有量已经达到近四万辆,乘用车、公交车、物流车、叉车等多种氢燃料电池汽车已经实现商业化运营。随着氢能源交通技术的进一步完善和普及,氢能交通的市场发展前景在不断壮大^[10]。

2.2 电力

氢能在电力领域的应用主要依托燃料电池技术。其中,固体氧化物燃料电池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)和熔融碳酸盐燃料电池(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)是发电领域最具应用前景的燃料

电池,也是未来大规模清洁发电站的优选对象。集中式可再生能源发电方案可以将周边的氢气运输到发电站进行发电,并利用现有的电力网络进行电力输配。分布式发电一般是指靠近终端用户的小型发电装置,其具有发电技术种类多、发电规模高度可控、设备安装便捷等优点,可为工商业和住宅的电力需求提供灵活解决方案。目前,以 SOFC 为主的分布式发电已在欧美日韩等发达国家和地区开始初步商业化。我国分布式电源技术正在加紧应用示范推广,随着技术进步和成本下降,不断推进商业化进程。

特殊电源主要依托质子交换膜燃料电池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)技术,包括通信基站、数据中心的备用电源和应急电源车等。

掺氢/纯氢燃气轮机也是基于氢能发电清洁能源系统的一部分,如今国际上关于富氢燃料燃气轮机的研究与应用已有较多的业绩,全球掌握比较领先技术的企业包括日本三菱重工、美国通用电气和德国西门子。

氢能发电可用来解决电网削峰填谷、可再生能源电力并网稳定性问题,有利于提高电网安全性和灵活性,大幅度降低碳排放。传统的抽水蓄能在储能领域中占据绝对主导,氢储能等新型储能技术也在不断发展^[11]。众多燃料中,单位质量氢气的能量密度高,具备规模大、响应快、可实现跨季节储能的特点,是少有的能够储存百吉瓦时规模能量以上的储能方式,极具发展潜力。

随着氢能在终端能源消费体系中的占比逐渐升高,氢能作为电力储能介质,将发挥连接可再生能源与电力的纽带作用,成为新型电力系统的有机组成部分,如图 4 所示。与此同时,电力网络和氢能供应链基础设施的协同优化,不仅有利于降低基础设施建设成本,还可以实现电网碳减排、增强氢电耦合体系的时间和空间灵活性^[12]。

2.3 建筑

建筑领域主要针对满足电和热的需求,基于 SOFC 的热电联供系统是主流场景。日本的家用燃料电池发展领先于世界,目前其家用燃料电池热电联供系统的安装量已达数十万套。其次,掺氢供热和纯氢供热技术也在不断研发。现阶段天然气管道内掺入 3% 以内的氢气对新建的天然气管道无影响,终端用户设备燃烧方式不变。

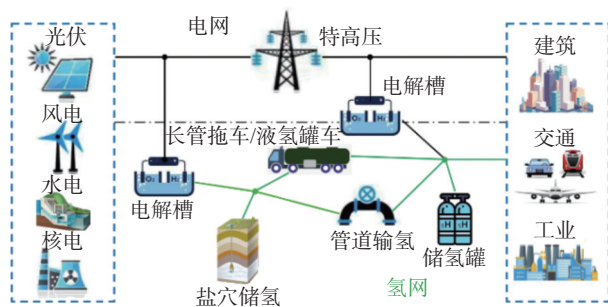


图 4 氢电耦合能源输送系统

Fig. 4 The energy delivery system for power coupling hydrogen

氢能社区是实现氢能“制-储-输-用”综合应用的重要方式,是开拓氢能燃料电池分布式能源和智慧能源产业的新途径,也是国家基础设施建设的重要组成部分。

2019 年日本率先建立了全球第一个氢能社区。我国 2021 年国家重点研发计划也重点支持氢能社区综合示范,推动氢能产业发展。2021 年,广东佛山在南海区规划投资 80 亿元打造全国首个“氢能进万家”智慧能源示范社区,推广可再生能源互联互通的智慧能源型城市建设。

2.4 工业

工业领域包括化工、冶金等,氢气在其中主要扮演原料和燃料的角色^[13]。工业用氢的消费量巨大,仅是存量灰氢的绿氢替代就是巨大的市场。

目前,95% 以上的氢气仍作为原料用于炼化行业加氢精炼以及化工行业合成氨、合成甲醇等。未来,氢气作为化工原料仍将是其主要用途,但是氢的来源将从目前以化石能源制氢为主即“灰氢”向可再生能源电解水生产的“绿氢”转变。绿氢化工(绿氢替代灰氢)是实现这些行业深度脱碳的重要途径。

无机化工中,绿氢应用主要是合成氨;有机化工中,绿氢应用除了石油炼化、合成甲醇,还应用于与 CO₂ 合成高端化学品,如表 2 所示。

冶金工业也是碳排放大户,焦炭作为还原剂使用是冶金行业高碳排放的重要原因。当前全球 75% 的钢铁来自高炉还原工艺,采用焦炭作为还原剂,高炉还原过程的碳排放量占整个炼钢流程的 90%。氢能冶金的原理是利用氢气的高还原性,将氢气替代煤炭作为高炉的还原剂,以减少乃至完全避免钢铁生产带来的碳排放。

随着钢铁行业 CO₂ 减排压力日益增大,日本、瑞典、德国等国纷纷探索应用氢冶金技术并取得一

表 2 中国的二氧化碳加氢合成化学品研究进展情况
Tab. 2 Recent advances in carbon dioxide hydrogenation to chemicals in China

产品	进展
石墨烯	国内外合成技术已完成实验室验证
甲醇	全球首套千吨级规模太阳燃料合成示范项目甲醇装置投产
芳烃	中国科学院大连化学物理研究所李灿院士团队取得进展
甲酸	中科院大连化物所黄延强团队在 CO ₂ 加氢合成甲酸研究中取得新进展
低碳烯烃	中科院大连化物所在 CO ₂ 催化加氢制备低碳烯烃方面取得新进展
高辛烷值汽油	中科院大连化物所通过设计一种新型 Na-Fe ₃ O ₄ /HZSM-5 多功能复合催化剂,成功实现了 CO ₂ 直接加氢制取高辛烷值汽油

定进展。我国相关钢铁企业也在积极布局氢冶金项目。氢能冶金是钢铁行业碳减排的必然路径,也是钢铁产业进入一个新时代的标志^[14]。

全球的工业供热需求巨大,并且 90% 以上依靠化石燃料,而工业供热需求近一半是高品位热能。尽管可再生能源电力可以满足低、中品位热能的需求,但是冶金、化工、水泥等行业生产过程中高品位热能则需要氢燃料来替代。因此,工业供热也是绿氢的一个重要应用场景。

3 氢能和储能的共性关键技术

抽水蓄能、压缩空气储能(包括液化空气储能)以及氢储能是具备大规模储能能力的储能技术。抽水蓄能电站受到地理条件的限制较为苛刻,并且我国可再生能源资源集中的地区往往其水资源也比较有限,无法满足抽水蓄能电站的建设需求,因此,我国抽水蓄能的发展潜力将不断减小。压缩空气储能与氢储能的储能容量大、寿命长,随着其技术的进步和完善,具有强大的发展潜力^[15-16]。现阶段,压缩空气储能的技术较为成熟,我国压缩空气储能的示范项目也正在不断布局。氢储能,尤其氢液化工艺与压缩空气储能(包括液化空气储能)工艺具有较好的耦合性,耦合工艺可以进行能量的梯次利用以提高联合工艺的整体能效,如图 5 所示。此外,这两类储能技术具有相同的关键设备,如压缩机、膨胀机、换热器等,如表 3 所示。因此可以进行协同研发攻关,形成互相促进的产业格局。

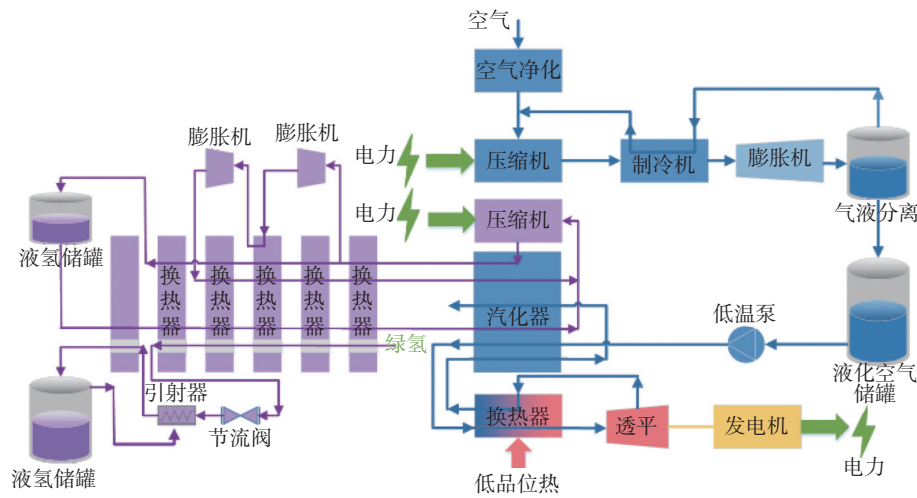


图 5 液氢耦合液化空气工艺流程图

Fig. 5 Process flow chart of liquid hydrogen coupling liquid air

表 3 压缩空气储能、液化空气储能与氢液化工艺的关键设备对比

Tab. 3 Comparison of key equipment of compressed air energy storage, liquid air energy storage and hydrogen liquefaction process

关键设备	储能技术		
	压缩空气储能	液化空气储能	氢液化
压缩机	√	√	√
膨胀机	√	√	√
换热器	√	√	√
压力容器	√	—	—
低温储罐	—	√	√
绝热材料	—	√	√
正仲氢转化器	—	—	√

注: √表示具备该关键设备。

压缩空气储能与氢储能(地下储氢)的建设条件也具有高度相似之处。压缩空气储能是利用电能将空气压缩至高压并存储在地下洞穴(高气密性的岩石洞穴、盐洞、废弃矿井等)或压力容器中^[17]。国外也已开展利用地下洞穴进行氢气储存的研究,压缩空气储能技术相对成熟,其在地质勘探、洞穴密封性、环境保护等方面可作为发展地下储氢的重要借鉴^[18-19]。

4 氢能在新型工业系统中的作用

氢气在工业上的应用早已非常广泛,如图 6 所示。化石燃料制氢是氢气资源的主要来源,包括煤制氢、天然气制氢等,绿氢的比例极低,不足 1%。氢

气作为工业原料用于合成氨、合成甲醇、石油炼化等,其作为燃料直接燃烧用于工业供热的比例也近 15%^[20]。因此,在工业中绿氢取代灰氢或者蓝氢也具有相当大的规模和潜力,如图 7 所示。常规的电力来源于化石能源,但是会带来严重的碳排放及环境污染,在碳中和的发展原则下,尤其国家鼓励新能源电力“能建尽建、能发尽发”,新能源电力的比重将不断增大,其也将以绿氢作为载体应用于工业领域。

根据相关研究机构的数据估算,我国 2020 年氢气的消耗总量在 3.5×10^7 t 左右,其中绿氢约 5×10^5 t; 而到 2060 年实现碳中和,我国氢气的消耗总量将达到 1.3×10^8 t,其中绿氢的规模也将达到 10^8 t^[21]。绿氢替代无疑是工业领域降低碳排放,实现碳中和的重要抓手。

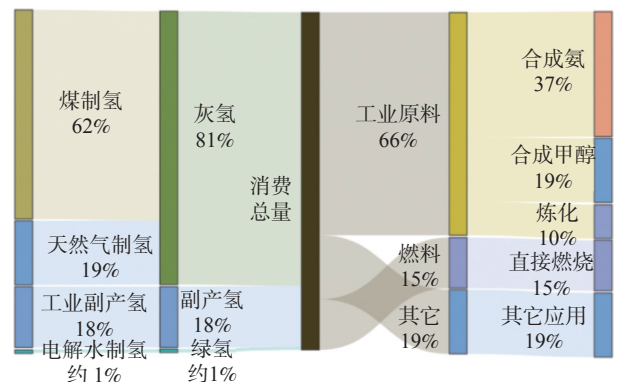


图 6 我国的氢气生产及消费结构图^[20]

Fig. 6 Illustration of the structure for hydrogen production and consumption in China^[20]

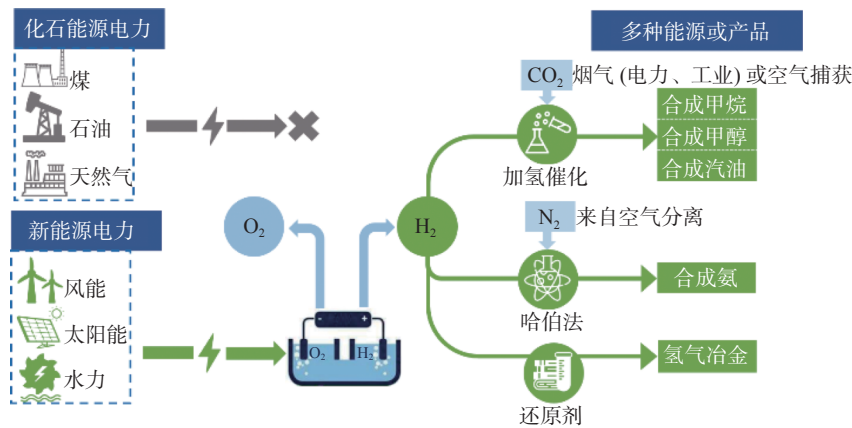


图7 绿氢在工业上的应用场景

Fig. 7 Application scenarios for the green hydrogen in the industry

5 总结与展望

“碳达峰、碳中和”目标下,可再生能源的建设规模也在不断扩大,但是鉴于其波动性、间歇性的特点,并不能全部以电能的形式融合到电力系统中。储能可以快速、大规模地在电网侧、发电侧、用户侧全面发展,有利于保障新能源为主体的新型电力系统的稳定性。氢能也是广义上的储能,其具备燃料与原料的双重属性,是新能源渗透工业领域,促进其低碳转型的重要介质。新能源通过电解水制氢的形式转化成绿氢,对工业领域中的用氢场景进行替代(绿氢替代灰氢),并解决无法通过绿电替代减碳的场景。

氢能与储能都是现在与未来明确的发展方向,并具备巨大的产业市场前景,现阶段,两者面临的共同问题是技术不够成熟、工程示范经验不足、利用成本高昂等。除了政策和资金的支持,应该更关注关键技术的攻关和核心装备的研发,基于可靠的成套技术,合理布局,有序进行工程应用示范,积累运营经验,实现技术进步与成本降低。

参考文献:

- [1] International Renewable Energy Agency (IRENA). World energy transitions outlook 2022: 1.5 °C pathway [R]. Abu Dhabi: IRENA, 2022.
- [2] International Carbon Action Partnership (ICAP). Emissions trading worldwide: Status report 2022 [R]. Berlin: ICAP, 2022.
- [3] International Energy Agency (IEA). The role of low-carbon fuels in the clean energy transitions of the power sector [R]. Paris: IEA, 2021.
- [4] GOSWAMI D Y, KREITH F. Energy efficiency and renewable

energy handbook (2nd ed.) [M]. Boca Raton: Chemical Rubber Company Press, 2015.

- [5] International Renewable Energy Agency (IRENA). Hydrogen: A renewable energy perspective [R]. Abu Dhabi: IRENA, 2019.
- [6] International Renewable Energy Agency (IRENA). Decarbonising end-use sectors: Practical insights on green hydrogen [R]. Abu Dhabi: IRENA, 2021.
- [7] 中国氢能联盟.《中国氢能及燃料电池产业白皮书2020》[M].北京:中国氢能联盟,2021.
China Hydrogen Alliance. White paper on China hydrogen and fuel cell industry [M]. Beijing: China Hydrogen Alliance, 2021.
- [8] International Renewable Energy Agency (IRENA). Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolyzers to meet the 1.5 °C climate goal [R]. Abu Dhabi: IRENA, 2020.
- [9] 郭博文, 罗聘, 周红军. 可再生能源电解制氢技术及催化剂的研究进展 [J]. 化工进展, 2021, 40(6): 2933-2951. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2020-1889.
GUO B W, LUO D, ZHOU H J. Recent advances in renewable energy electrolysis hydrogen production technology and related electrocatalysts [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(6): 2933-2951. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2020-1889.
- [10] 王敏键, 陈四国, 邵敏华, 等. 氢燃料电池电催化剂研究进展 [J]. 化工进展, 2021, 40(9): 4948-4961. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2021-1087.
WANG M J, CHEN S G, SHAO M H, et al. Recent advances of electrocatalysts in hydrogen fuel cells [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2021, 40(9): 4948-4961. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2021-1087.
- [11] 高啸天, 郑可昕, 蔡春荣, 等. 氢储能用于核电调峰经济性研究 [J]. 南方能源建设, 2021, 8(4): 1-8. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.04.001.
GAO X T, ZHENG K X, CAI C R, et al. Research on economy of hydrogen energy storage for nuclear power peak shaving [J]. Southern Energy Construction, 2021, 8(4): 1-8. DOI: 10.16516/

- j.gedi.issn2095-8676.2021.04.001.
- [12] KEBEDE A A, KALOGIANNIS T, VAN MIERLO J, et al. A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 159: 112213. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112213.
- [13] YUSAF T, FERNANDES L, ABU TALIB A R, et al. Sustainable aviation—Hydrogen is the future [J]. *Sustainability*, 2022, 14(1): 548. DOI: 10.3390/su14010548.
- [14] 高建军, 齐渊洪, 严定夔, 等. 中国低碳炼铁技术的发展路径与关键技术问题 [J]. *中国冶金*, 2021, 31(9): 64-72. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.20210386.
GAO J J, QI Y H, YAN D L, et al. Development path and key technical problems of low carbon ironmaking in China [J]. *China Metallurgy*, 2021, 31(9): 64-72. DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.20210386.
- [15] 李相俊, 马会萌, 姜倩. 新能源侧储能配置技术研究综述 [J]. *中国电力*, 2022, 55(1): 13-25. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202109032.
LI X J, MA H M, JIANG Q. Review of energy storage configuration technology on renewable energy side [J]. *Electric Power*, 2022, 55(1): 13-25. DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202109032.
- [16] 陆王琳, 陆启亮, 张志洪. 碳中和背景下综合智慧能源发展趋势 [J]. *动力工程学报*, 2022, 42(1): 10-18. DOI: 10.19805/j.cnki.jcspe.2022.01.002.
LU W L, LU Q L, ZHANG Z H. An overview of the integrated energy systems' development under the background of carbon neutralization [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2022, 42(1): 10-18. DOI: 10.19805/j.cnki.jcspe.2022.01.002.
- [17] 李广阔, 王国华, 薛小代, 等. 金坛盐穴压缩空气储能电站调相模式设计与分析 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(19): 91-99. DOI: 10.7500/AEPS20210120006.
LI G K, WANG G H, XUE X D, et al. Design and analysis of condenser mode for Jintan salt cavern compressed air energy storage plant of China [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(19): 91-99. DOI: 10.7500/AEPS20210120006.
- [18] TARKOWSKI R. Underground hydrogen storage: Characteristics and prospects [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 105: 86-94. DOI: 10.1016/j.rser.2019.01.051.
- [19] ZIVAR D, KUMAR S, FOROOZESH J. Underground hydrogen storage: A comprehensive review [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(45): 23436-23462. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.138.
- [20] 齐正平. 中国能源大数据报告(2021)——能源综合篇 [R]. 北京: 中国电力传媒集团公司, 2021.
QI Z P. China's energy big data report (2021): Energy comprehensive [R]. Beijing: China Power Media Group Co., Ltd, 2021.
- [21] 徐硕, 余碧莹. 中国氢能技术发展现状与未来展望 [J]. *北京理工大学学报(社会科学版)*, 2021, 23(6): 1-12. DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2021.3061.
XU S, YU B Y. Current development and prospect of hydrogen energy technology in China [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2021, 23(6): 1-12. DOI: 10.15918/j.jbitss1009-3370.2021.3061.

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, 广东省电力设计研究院博士后, 主要研究方向为氢能、储能以及二氧化碳利用技术与产业化(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, 广东省电力设计研究院博士后, 主要研究方向为液化空气储能与氢储运(e-mail)sunxiao@gedi.com.cn。

(编辑 叶筠英)