

## “氢能”专题报道导读

为实现我国“碳中和”目标,能源结构改革与升级势在必行,而氢能则是能源转型的必然选择。我国氢能产业尚处于初级阶段,关键材料及核心技术尚未完全实现自主化。加快技术创新、降低开发和使用成本、提升安全性,是实现氢能大规模生产和应用的重要途径。

——本刊编辑部

## 专题: 氢能

# 氢能-煤基能源产业战略转型路径研究

王明华\*

(国能经济技术研究院有限责任公司,北京 102211)

**摘要:**在碳达峰、碳中和的战略目标下,煤基能源的兴衰关系到煤炭、煤电和煤化工上下游各个相关板块,影响面甚广。通过研究能源形态变革的演进规律发现,氢能是架起传统能源与新能源之间的桥梁,是可再生能源高比例发展的推进器,是煤化工/冶金产业转型发展的原料仓,是交通/电力领域多元发展的动力源,是未来电网平衡的稳定器。基于此,研究提出了氢能-煤基能源产业发展的切入点、布局氢源和制氢技术、建设通道、建立一体化产业发展模式、激活煤炭原料属性,实现 CO<sub>2</sub> 零排放。最后阐述了氢能-煤基能源产业发展路径和建议,以切合国家能源发展战略,实现国家应对气候变化的总体目标。

**关键词:**氢能;煤基能源;煤炭战略转型;CO<sub>2</sub> 零排放;燃料电池

中图分类号:TK91

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2021)07-0001-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2021.07.001

## Research on strategic transformation paths for hydrogen energy-coal-based energy industry

WANG Ming-hua\*

(China Energy Economic and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 102211, China)

**Abstract:** Under the strategic goal of “emission peak” and “carbon neutralization”, the rise and fall of coal-based energy will have wide impact on related sections of coal, coal-power and coal chemical industries. Coal-power enterprises need to go ahead for strategic layout and lay a scientific guiding ideology for the transformation of coal-based energy. It can be found through studying the evolution rules of energy morphological change that hydrogen energy is a bridge between traditional energies and new energies, a propeller for high proportion development of renewable energy, a raw material warehouse for transformation and development of coal chemical and metallurgical industries, a power source for diversified development in transportation and power fields, and a stabilizer for future power grid balance. Therefore, an entry point for the development of hydrogen energy-coal-based energy industry is put forward, including layout of hydrogen sources and hydrogen production technology, construction of channels, establishment of integrated industrial development mode, activation of raw material properties of coal and realization of zero emission of CO<sub>2</sub>. Finally, the development path and suggestions are proposed for hydrogen energy-coal based-energy industry in order to meet China's national energy development strategy and achieve China's overall goal to address climate change.

**Key words:** hydrogen energy; coal-based energy; strategic transformation for coal; zero CO<sub>2</sub> emission; fuel cell

2020 年 9 月 22 日,习近平主席在第 75 届联合国大会一般性辩论上郑重宣布,中国将提高国家自主贡献力度,采取更加有力的政策和措施,二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和。据清华大学气候变化与可持续发展研究院“中国低碳发展战略与转型路径研究”表明<sup>[1]</sup>,2℃ 目标导向下,2050 年煤炭一次能源消费量为 5.2 亿 t 标煤,折算实物煤 7.28 亿 t 煤炭;1.5℃ 目标导向下,2050 年煤炭一次能源消费量为 2.5 亿 t 标煤,折算实物煤 3.5 亿 t 煤炭。当前,煤炭需求达

峰已经基本成为国际机构的共识<sup>[2]</sup>,中国在役煤炭产能超过 36 亿 t,煤炭开采领域每年投资额超过 2 000 亿元,累计资产价值近 10<sup>5</sup> 亿元。未来就要面临合理化解过剩产能,避免资产折旧过快导致的债务风险等问题。

加快煤炭行业的战略转型,时间紧迫,任务繁重,煤炭的兴衰关系到煤炭、煤电和煤化工上下游各个相关板块,影响面甚重。煤炭企业需要未雨绸缪进行战略布局,谋划好 2030 年、2060 年两个阶段的发展蓝图,扛起煤炭行业转型旗帜,迈出一条蹄疾步

收稿日期:2021-03-15;修回日期:2021-05-19

基金项目:中国工程院咨询项目“中国氢能源与燃料电池发展战略研究”(2019-ZD-3-05)

作者简介:王明华(1980-),男,工学博士,高级工程师,研究方向为能源经济及战略发展研究,通讯联系人,18911898648,17230032@chnenergy.com.cn。

稳的转型发展道路,为煤基能源的转型发展奠定科学的指导思想。

## 1 能源形态变革的演进规律

人类用能形态,由最初的薪柴到化石能源,能源形态发生改变,产生第一次能源革命;然后由热力向电力转变,产品形态发生改变,产生第二次能源革命;到现在,由太阳能/风能等可再生能源直接到电力-氢能-储能-化学品,能源形态和产品形态都发生了改变,必将迎来第三次能源革命。

在第三次能源革命中,碳、氢、电是 3 个重要的基本单元,从满足社会生活需求的角度看,碳元素、碳氢化合物都将被作为化工原料,而不是燃料;从满足社会动力需求的角度看,热力、电力和动力都可以由氢能和电力来提供,储氢与储电将扮演重要的角色。

其中,氢能系统从氢的制取,到氢的储运,再到氢的交易以及分发和应用,中间还有氢能的检测与认证,氢能牵起了一条长长的产业链,其中既有相关设备的制造,也有庞大的基础设施建设;既有资源产业链,也有材料产业链,还有各种使用场景外溢的商业价值。氢能的发展需要构建一套满足氢属性的基础设施,全产业链是互相促进、螺旋上升的一个过程。

## 2 氢能架起传统能源与新能源之间的桥梁

氢能产业发展的 2 个标志性事件:一是丰田 Mirai 二代,作为氢能产业发展最具展示度的乘用车,技术成熟,已商业化生产和使用<sup>[3]</sup>。二是欧盟氢能战略<sup>[4]</sup>,重点是依靠风能、太阳能生产氢能,倡导 CO<sub>2</sub> 减排。分析发现,与以往伴随石油价格高涨而形成氢能研究热潮不同,新一轮氢能产业的快速发展有 2 个全新的动力:第一个新动力来自于技术本身,氢能产业的相关技术已进入成熟期;第二个新动力则是由于可再生能源的高速发展,为氢能提供了新的机遇。新动力的出现,将极大促进氢能产业快速进入商业化应用领域。

### 2.1 氢能是可再生能源高比例发展的推进器

可再生能源的高速发展,为氢能提供了前所未有的新机遇。随着可再生能源制氢成本的不断下降,以及环境治理和 CO<sub>2</sub> 排放成本的增加,化石能源制氢和工业副产氢的竞争力将变弱,氢能将逐步过渡到由可再生能源电解水制氢。此外,通过美国国家可再生能源实验室(NREL)研究表明,当可再生能源在电源结构中占到较高比重时,单纯依靠短周期(小时级)储能将无法满

足月度乃至季节性储能将是实现高比例可再生能源调峰的主要手段,NREL 研究结论表明,10 h 以上的储能需求中,氢储能更具竞争力。总体而言,在电力领域,氢能作为能源媒介,通过可再生能源电解制取,可实现大规模储能,增强电力系统灵活性,从而又反过来促进可再生能源在能源结构中更高比例的发展。

### 2.2 氢能是煤化工/冶金产业转型升级发展的原料仓

氢能可以促进传统化石能源的转型升级,由燃料向原料彻底转变。不仅可以作为反应物生产合成氨,还能够作为还原剂用于炼钢;最关键的,可以将化石能源中的碳,与可再生能源制取的氢相结合,形成碳-化学的基本原料 CO+H<sub>2</sub>,生产满足人类日常需要的纺织品服装、饮料瓶、包装材料、可降解塑料、甚至轮胎和安全气囊等日常用品,实现 CO<sub>2</sub> 零排放。把工业文明给地球穿上的厚厚的棉袄,逐渐给它一层一层脱去,让地球慢慢回到有序状态。最终还可捕获空气中的温室气体 CO<sub>2</sub> 或者 CH<sub>4</sub>,实现对地球温室气候的平衡调控。

### 2.3 氢能是交通/电力领域多元发展的动力源

氢能应用到交通/电力领域的核心设备是氢燃料电池,是将氢气的化学能转化成电能。早期燃料电池的应用主要集中在航空航天等特殊领域,且技术已相对成熟。在民用领域<sup>[5-7]</sup>的应用主要包括交通运输、发电和无人机等新兴方向三大类。受益各国政策的支持,氢燃料电池汽车技术上取得较大突破,丰田、本田、现代等均推出了各自的量产燃料电池汽车,氢燃料电池商用车在国内发展的也是如火如荼。氢燃料电池商业化进程正在加速,交通领域是其最具潜力的应用方向之一。

### 2.4 制氢-燃氢电站将是未来电网平衡的稳定器

质子交换膜水电解制氢技术,负载调节迅速,可随着可再生能源间歇性负荷的波动进行生产;并可参与电网系统调频,增强电网的稳定。在可再生能源电力富余时制氢,进行能量储存,然后通过固体氧化物燃料电池(SOFC)或者纯氢燃气-蒸汽联合循环发电来满足电力负荷调节的需求。在未来燃煤火电机组作为备用容量不足以承担更大规模可再生能源发电的调峰需求时,这种制氢-燃氢电站模式对未来作为电网侧主力调峰电源点具有重要意义,也就是说制氢-燃氢电站实现了削峰填谷的作用,使得源-网-荷-储达到了稳态的平衡。

由此可见,从可再生能源到氢能,从氢能到电力、交通、煤化工、钢铁等行业,氢能实现了能源与原料的跨界,构建起了传统能源与新能源之间耦合的通道。

### 3 氢能-煤基能源产业发展的契入点

从全球看,氢能利用产业链在技术上不存在障碍,产业发展已进入导入期,发展的重点在于扩大规模、降低成本,寻求适宜的商业模式。当前,氢能产业发展机遇有 3 个方向:产品、渠道与终端。具体而言,涉及氢能产业上中下游的 3 个层面,就是氢源、基础设施和市场应用,最终可实现氢能产业——风光电氢一体化发展模式,耦合煤炭资源,实现转型发展。

#### 3.1 氢源布局与制氢创新技术

一方面,随着可再生能源发电平价上网,电解水制氢成本将持续下降,作为全周期零碳排放技术,可再生能源发电制氢潜力很大。在氢能产业发展初期,氢源布局涉及到水资源状况、可再生能源发电成本、运氢渠道和氢能市场潜力等多个环节,合理的氢源布局,将是氢能产业成功迈出第一步的重要选择。

另一方面,做好可再生能源水电解制氢技术的研发,特别是提前布局质子交换膜水电解技术的研发。质子交换膜水电解是效率更高的一种方式<sup>[8]</sup>,也是电解水制氢的重点发展方向,将是氢源行业提升全产业链核心竞争力的技术砝码。

#### 3.2 铁路/航运输氢通道建设

在输氢通道上,渠道多样,如高压气态长管拖车、液氢槽车、铁路集装箱液氢、轮船液氢和氢气专用管道等,各种方式的输氢成本<sup>[9]</sup>有如下特点:①长管拖车运输成本随距离增加大幅上升,运输半径宜在 200 km 范围内。②液氢运输成本对距离不敏感。当加氢站距离氢源点 100~500 km 时,液氢

槽车公路运输的价格基本恒定;大于 200 km 后成本低于气态长管拖车,500 km 以上成本增加较快。而液氢集装箱铁路运输在 100~1 000 km 长距离运输中,运输成本几乎恒定,当氢气规模较大时,液氢集装箱铁路运输将具有明显的成本竞争优势。③氢气管道运输成本虽然较低,但前提是规模经济和高利用率两个因素缺一不可;在当前加氢站尚未普及、站点较为分散的情况下,管道运氢的成本不占优势。

#### 3.3 氢能一体化产业发展模式

利用沿海、沿江港口,开展氢燃料电池重卡、氢燃料电池叉车<sup>[10]</sup>、加氢站于一体的氢能产业示范区,通过技术攻关、集成和优化,降低成本和造价,为探索和实践氢能产业做好商业模式探索和战略布局。

由此可见,在建立跨区域的输氢通道时,可有效利用并充分发挥国家既有铁路和航运的资产优势,实现对传统运煤专线转型的同时,还能建立输氢渠道的核心竞争优势。目前,铁路运液氢在航天领域已经积累了丰富经验,可进一步推进开发液氢集装箱的研制和示范,发展铁路运氢,以满足航空航天和未来大规模氢能市场的需求。

#### 3.4 激活煤炭原料属性,实现煤化工产业 CO<sub>2</sub> 零排放

充分发挥煤炭资源富含碳的原料优势,将可再生能源制氢与之结合,不仅省去了煤化工过程水煤气变换反应,且不会排放由于水煤气变换过程产生的大量 CO<sub>2</sub>。碳资源得到充分利用,可以实现生产侧 CO<sub>2</sub> 零排放,系统能量利用效率和经济效益都将得到全面提升。图 1 全面展示了可再生能源制氢与煤化工耦合制取下游化工用品的示意工艺流程,

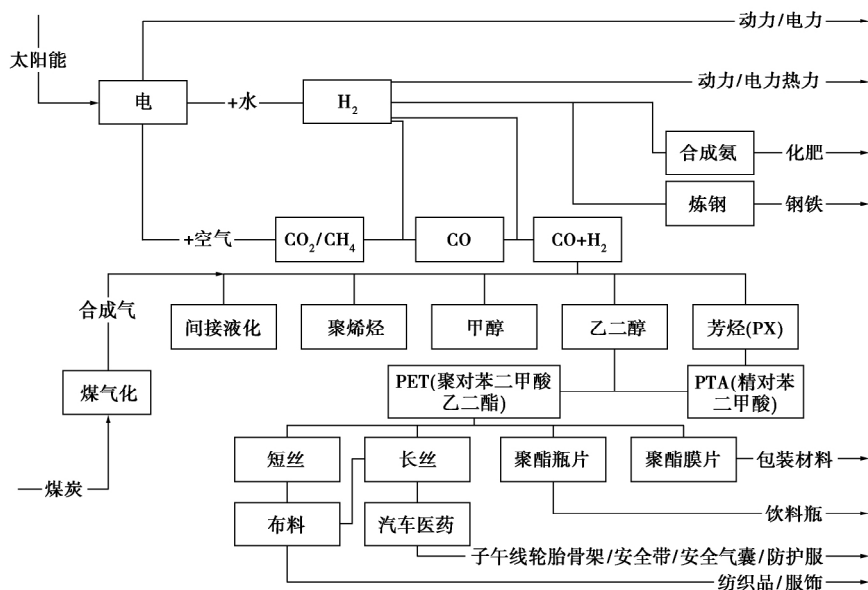


图 1 可再生能源制氢与煤化工耦合制取化工用品的工艺流程示意图

例如,聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)可广泛应用于纤维、胶片、薄膜、树脂和饮料等食品包装的生产。

## 4 氢能-煤基能源产业发展路径和建议

### 4.1 近期发展路径(2020—2030年)

#### 4.1.1 建设氢能产业示范区

在氢能应用领域,氢燃料重卡也是一个重要的增长方向,具有取代柴油重卡的潜力,是氢燃料电池在交通领域应用的发力点。第一,重卡是造成环境污染的主要来源之一;第二,每年重卡销量在100万辆以上,发展空间巨大;第三,氢燃料电池重卡兼具了环保要求和技术要求,排放低,可满足长距离、重载量、爬坡能力强,特别适合在物流密集的港口地区建立柴改氢示范区。

在氢能应用领域,氢燃料叉车也是一个新的增长点。第一,电动化叉车发展空间巨大,我国2019年销量已突破60万辆,是世界最大的市场,增速远超全球平均水平。第二,氢燃料叉车技术不复杂,很成熟,美国已超过3万辆的商业化应用;第三,氢燃料叉车效率高,成本低;第四,港口排放要求严格,是一种很好的应用场景。

可借助2022年北京冬奥会机遇,依托张家口建设的可再生能源制氢项目,在环渤海集装箱货物港内,建设制氢-加氢一体站,逐步推广氢燃料电池重卡和叉车,创新性地打造一个具有社会影响力、经济效益可期、示范性良好的氢能产业一体化发展模式。

#### 4.1.2 建设氢能与煤基能源耦合的项目示范

结合西北地区的风光基地、露天矿和煤化工工厂,临近建设制氢厂,一方面,在现有煤化工项目和新建煤化工项目附近,开展煤化工与可再生能源制氢耦合的科技项目示范;另一方面,在露天矿开展氢燃料电池重卡的示范应用;在铁路沿线开展液氢集装箱铁路运输的科技项目示范。

#### 4.1.3 开展科技示范项目

利用现有资源,开展制氢、储氢和输氢的科技项目示范。依托张家口风光资源,建设制-储-输氢系统集成与示范项目,重点开发低成本规模化制氢工艺路线,研发质子交换膜水电解技术和储氢技术。

### 4.2 远期发展路径

随着未来可再生能源电力在电力消费结构中占大多数以后,作为备用容量的燃煤电厂难以满足电网的调峰需求时,此时响应速度快、功率负荷调节范围宽的燃氢电厂势必成为不可或缺的优质电源点。届时,选择水资源丰富、电力市场化完善、靠近氢能

终端或者靠近液氢铁路专线的地方,多点布局制氢-燃氢一体化电站。以质子交换膜水电解制氢为龙头,建设固体氧化物燃料电池(SOFC)电站或者燃氢轮汽轮机联合循环电站,为周边提供冷、热、电、氢等多种能源产品。

通过消纳多余的风光电力来制氢进行储存,满足对电网削峰填谷调节的同时,液化氢气通过液氢集装箱铁路运输至煤化工工厂、石油化工厂、合成氨厂、炼钢厂或加氢站等用氢市场,打通整个完整的氢能产业链。实现制、储、运、加、用一体化发展模式,彻底完成对煤炭路线的全面转型,总体设计国家氢能-煤基能源远期战略构想:一些煤矿,利用矿区土地和设施,向风光发电转型;一些燃煤电厂,向SOFC电厂或燃氢电厂转型;一些煤化工,用煤制氢向可再生能源制氢转型;铁路/轮船运输设施,从运煤向运氢转型,打造一种以可再生能源为主的电-氢-储-运-化一体化氢能发展模式。

### 4.3 建议

制定详细的氢能-煤基能源产业发展战略路线图,在盘活现有技术、资产和项目的基础上,响应国家和各地方政府的氢能产业发展政策,形成可再生能源制氢、输氢和氢能应用的一体化氢能产业发展模式。依靠科技引领,项目示范,增强氢能产业发展的效益,探寻一条煤炭转型之路,把握好可再生能源、氢能和煤炭的协同发展关系,以切合国家能源发展战略,实现国家碳达峰、碳中和的总体目标。

### 参考文献

- [1] 何建坤.中国低碳发展战略与转型路径研究项目成果[R].北京:清华大学气候变化与可持续发展研究院,2020.
- [2] 张国宝.煤炭消费提前达峰之后[J].能源评论,2016(9):1.
- [3] 中国氢能联盟.中国氢能及燃料电池产业白皮书[R].北京:中国氢能联盟,2019.
- [4] Hydrogen roadmap Europe: A sustainable pathway for the European Energy Transition. Fuel cells and hydrogen joint undertaking[EB/OL].http://www.ihfca.org.cn/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=8&id=191.html,2019-2-11/2021-3-1.
- [5] 赵永志,蒙波,陈霖新,等.氢能源的利用现状分析[J].化工进展,2015,34(9):3248-3255.
- [6] 谭旭光,余卓平.燃料电池商用车产业发展现状与展望[J].中国工程科学,2020,22(5):152-158.
- [7] 衣宝廉.燃料电池和燃料电池车发展历程及技术现状[M].北京:中国科技出版传媒股份有限公司,2018.
- [8] 孙邦兴,杨华,骈松.PEM型电解水制氢设备在电厂的应用[J].山东化工,2020,49(8):182-184.
- [9] 国际氢能委员会,中国氢能联盟.氢能平价之路[R].北京:中国氢能联盟,2020.
- [10] 李小霞.氢燃料叉车在绿色港口建设中的应用[J].中国港口,2020(9):60-61.■