

中国氢能产业高质量发展前景

孟翔宇¹, 顾阿伦², 邬新国¹, 周剑², 刘滨², 毛宗强^{1,2*}

1. 东莞深圳清华大学研究院创新中心, 东莞 523808

2. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084

摘要 中国氢能产业在新型冠状病毒肺炎(COVID-19)疫情的影响下遇到了暂时困难,但随着疫情防控形势的好转而迎来新的发展机遇。通过回顾2020年中国各地出台的氢能发展政策,分析得出:政策重点主要集中于交通领域,包括氢燃料电池车技术研发、关键设备制造和加氢站建设等,而轨道交通则是未来氢燃料电池技术的发展重点之一;氢能冶金属于新的氢能产业应用领域,许多冶金企业与氢冶金先进国家进行了示范项目合作,这些示范项目的快速推进将有助于实现中国钢铁行业革命性的绿色化转型;绿氢煤化工、绿氢贸易、民用液氢等也将是氢能产业未来发展的重要方向。建议中国明确国家发展战略、积极拓展氢能技术创新领域,以打造高质量氢能产业为抓手,助推中国能源革命和产业转型升级,并在氢能全球化过程中发挥引领作用。

关键词 氢能产业;交通;冶金;国际合作

新型冠状病毒(COVID-19)疫情的暴发,不仅对人类公共健康造成了巨大伤害,而且也对当今世界经济社会发展带来了严重冲击。尽管新冠病毒的来源需要进一步的科学研究论证,但是已有研究人员从一个正在融化的冰川样本中发现了以前未发现的28个病毒群,而这些病毒群被证实已在冰川中被封存了15000余年^[1]。这个发现进一步证实了气候变化对地球生态环境和人类生存安全存在巨大威胁,而应对气候变化则是当前人类面临的迫切问题,需要世界各国通力合作,践行“人类命运共同体”的理念,采取更加坚决、更为有效的措施促进

全球温室气体减排,以维护地球生态环境、保卫人类生存安全、实现人类社会的永续发展。

中国在应对气候变化上比发达国家面临更为紧迫的任务。中国要发展经济、消除贫困,改善民生,实现工业化和现代化,尤其在当前疫情得到有效防控的情形下,面临着复工复产、恢复经济活力的迫切需求,将导致中国未来能源需求持续上升。但是,在当前以化石能源为主的能源结构下,CO₂的排放量也将不可避免地持续增长,而应对气候变化则需减排CO₂。协调这两者的矛盾,就需要改善能源结构、大力发展清洁能源与可再生能源,努力

收稿日期:2020-05-20;修回日期:2020-06-20

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFE0202000);清华大学绿色经济与可持续发展研究中心第二期项目

作者简介:孟翔宇,高级工程师,研究方向为能源战略与规划、可持续发展与低碳政策、节能与新能源技术等,电子信箱:mengxy@tsinghua-dg.org;毛宗强(通信作者),教授,研究方向为氢能及燃料电池技术、氢能政策与战略、标准等,电子信箱:maozq@tsinghua.edu.cn

引用格式:孟翔宇,顾阿伦,邬新国,等.中国氢能产业高质量发展前景[J].科技导报,2020,38(14):77-93;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2020.14.008

促使在有限的排放空间下,以较小的CO₂排放量实现社会经济的可持续发展^[2-4]。在这其中,氢能由于其来源广泛、热值高、清洁无污染、应用范围广等优势,成为中国未来改善能源结构、推动能源革命的不可或缺的能源载体之一^[5]。氢能产业的发展重点历来在于交通领域,主要集中于氢燃料电池车的研发及加氢站建设等,未来氢能在轨道交通的应用将是另一个重点。另外,氢能冶金、绿氢煤化工、民用液氢、“绿氢”生产、氢能贸易等都将是发展的热点,特别是可再生能源电力制氢,又称PTG,既是“绿氢”的来源,也为可再生能源开辟了新的输出途径,将会极大地推动可再生能源的发展。

由于受COVID-19疫情的影响,进入2020年以来,中国氢能产业的建设和发展进入了一个相对短暂的停滞时期。但是,随着国内疫情防控形势的逐渐好转,氢能产业也在随着社会秩序逐渐恢复正常而重新启动。同时也应看到,此次疫情深刻影响了社会大众对涉及公共安全问题的认识,建设一个环

境友好、安全稳定、繁荣进步的社会成为共识,这也成为氢能获得广泛支持的一个有利的外部条件。当前,氢能产业的发展尽管遇到了很大的挑战,但也面临新的机遇,辨析现存问题与优势,展望未来发展趋势,将有助于把握氢能产业的发展方向,促进氢能领域科技进步与产业化布局,并为氢能产业政策制定提供借鉴。

1 交通领域

1.1 氢能政策密集出台,重点在于交通领域

自2019年以来,从国家部门到地方政府,制订了许多推动氢能发展的政策与规划,其中很多都属于氢燃料电池技术在交通领域的应用^[6]。进入2020年,国家和地方出台了许多鼓励氢能发展的政策,截至2020年5月,各地区出台氢能政策如表1所示。

由表1可知,除2020年2月受疫情影响外,1、

表1 2020年国家与地方氢能产业政策

时间	地区/部门	政策名称	主要内容
1月9日	潍坊市	潍坊市氢能产业发展三年行动计划(2019—2021) ^[7]	聚集超过20家燃料电池汽车相关企业,氢能与燃料电池全产业链年产值突破50亿元。建设加氢站8座以上,车辆示范运营规模达到1000辆
1月15日	青海省	2020年青海省政府工作报告 ^[8]	建设国家清洁能源示范省,研究规划氢能核能利用项目
1月19日	教育部、国家发展改革委、国家能源局	储能技术专业学科发展行动计划(2020—2024年) ^[9]	重点推进燃料电池、相变储能、储氢、相变材料等基础理论研究
1月20日	河北省	河北省2020年省重点项目计划 ^[10]	涉及氢能及燃料电池项目共10项,其中新建和续建项目为8项,当年总投资额为19.9亿元;规划前期项目2项,总投资额计划128.8亿元
1月20日	嘉兴市	嘉兴市加快氢能产业发展的工作意见 ^[11]	2020年建成液氢生产企业2家以上和固定式加氢站8座以上,运行氢能汽车200辆以上;到2025年,氢能产业年产值突破300亿元。建成20座以上固定式加氢站;氢能汽车数量突破1500辆;氢能相关规模以上企业数量突破50家
1月21日	天津市	天津市氢能产业发展行动方案(2020—2022) ^[12]	到2022年,氢能产业总产值突破150亿元,建成至少10座加氢站、打造3个氢燃料电池车辆试点示范区,开展至少3条公交或通勤线路示范运营,建成至少2个氢燃料电池热电联供示范项目

表1 2020年国家与地方氢能产业政策(续)

时间	地区/部门	政策名称	主要内容
3月4日	茂名市	茂名市氢能产业发展规划 (征求意见稿) ^[13]	提出“一个目标、两大核心区、三大应用领域、百亿产值”的氢能产业发展战略,提出2022年氢能产业总产值预计达到30亿元,2025年达到100亿元,2030年突破300亿的“三步走”目标
3月6日	张家口市	张家口氢能保障供应体系一期工程 建设实施方案 ^[14]	氢气产能:2022年冬奥会前,氢气产能实现10000 t/a;加氢站:一期工程建设16座,其中,2020年底前建成10座,2021年6月底前建成6座
3月17日	潍坊市	潍坊市促进加氢站建设及运营 扶持办法 ^[15]	分别按照建成时间和加氢规模给予50万~600万元的补贴,在加氢补贴方面给予5~60元/kg的补贴。
3月19日	科技部	国家重点研发计划“制造基础 技术与关键部件”等重点专项 2020年度项目申报指南 ^[16]	共部署38个重点研究任务,2020年拟在氢能、太阳能、风能、可再生能源耦合与系统集成4个技术方向启动14~28个项目,拟安排国拨经费总概算为6.06亿元
3月26日	山东省	济青烟国际招商产业园建设行 动方案(2020—2025年) ^[17]	建设济南“中国氢谷”、青岛“东方氢岛”两大高地,涉及氢燃料电池整车制造等领域
3月31日	河北省	河北省2020年氢能产业重点 项目清单(第一批) ^[18]	氢能产业项目29个,涉及金额45.37亿元;氢燃料电池和整车项目6个,涉及金额15.57亿元;应用示范和技术研发共8个,涉及金额24.51亿元。涵盖制氢、氢能装备、加氢站、燃料电池、整车生产、应用示范、技术研究的氢能全产业链条。其中在张家口市布局项目21个
4月1日	浙江省	浙江省促进汽车消费的若干意 见(2020—2022年) ^[19]	继续对燃料电池汽车给予购置补贴。支持加氢基础设施建设,将新建加氢站用地需求纳入国土空间规划,加强加氢站选址的科学规划,加快推动公交和环卫场站、物流枢纽的加氢基础设施建设
4月10日	国家能源局	中华人民共和国能源法(征求 意见稿) ^[20]	将氢能作为能源种类之一列入意见稿
4月13日	广州黄埔区,广州开发区	广州市黄埔区、广州开发区促 进氢能产业发展办法实施细 则 ^[21]	对新建立的氢能企业或研发机构重大项目,按固定资产投资总额达到5000万、1亿、5亿、10亿元的,分别给予500万、1000万、5000万、1亿元奖励,同一企业按差额补足方式最高奖励1亿元
4月16日	工信部	2020年新能源汽车标准化工 作要点 ^[22]	加快燃料电池电动汽车先关标准的制定,以燃料电池汽车等为重点,组织国内企业、技术机构和专家积极开展专项研究和技术验证,研究国际标准提案并深入参与制定
4月16日	郑州市	郑州市2020年制造业高质量 发展实施方案 ^[23]	编制出台氢燃料电池汽车发展规划,积极实施相关补贴政策,扩大氢燃料汽车产量,推动加氢站建设,增加氢燃料电池汽车示范运营线路

表1 2020年国家与地方氢能产业政策(续)

时间	地区/部门	政策名称	主要内容
4月23日	财政部、工信部、科技部、发改委	关于完善新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知 ^[24]	选择有基础、有积极性、有特色的城市或区域,重点围绕关键零部件的技术攻关和产业化应用开展示范,中央财政将采取“以奖代补”方式对示范城市给予奖励
4月23日	上海市	促进上海市汽车消费若干政策 ^[25]	新增4万个非营业性客车牌照额度投放数量,支持物流等公共领域增加燃料电池汽车示范线,年内计划新建5座加氢站,同步研究加氢站布局规划和相关扶持政策
4月24日	河北省	河北省人民政府办公厅关于加快推动首都“两区”建设重点突破的意见 ^[26]	推动氢能产业创新中心建设,编制修订一批氢能产业国家、行业和企业标准,推进氢燃料电池发动机、大规模风光储互补制氢、氢燃料电池大巴车项目投产,加氢站总量达到10座,加快打造氢能产业生态园区
4月26日	如皋	如皋经济技术开发区关于市场化招商有效项目信息引荐奖励办法 ^[27]	对在区内投资氢能项目的第一引荐者实施奖励。
4月27日	国家发展改革委、交通运输部	长江三角洲地区交通运输更高质量一体化发展规划 ^[28]	加快新能源和清洁能源汽车、船舶推广应用,新增或者替换的城市公共汽车、物流配送车辆全面采用新能源汽车或清洁能源汽车
4月27日	上海市	上海市推进新型基础设施建设行动方案(2020—2022年) ^[29]	新建10万个电动汽车充电桩、20座左右加氢站
4月27日	新乡市	新乡市氢能与燃料电池产业发展规划及实施意见 ^[30]	2020年内开通2条燃料电池公交车示范线,建设加氢站2~3座,燃料电池汽车运行规模达到50~100辆;2021—2025年,建成加氢站10~20座,燃料电池车辆1000辆以上,建成氢能社区1个;2026—2030年,建成加氢站40~50座,燃料电池车辆1万辆以上,建成氢能社区5个以上
4月27日	常熟市	常熟市关于氢燃料电池产业发展的若干政策措施 ^[31]	对个人采购氢燃料电池汽车给予补贴,乘用车5万元/辆;轻型客车、货车8万元/辆;大中型客车、中重型货车13万元/辆。加氢站建设最高补贴额不超过400万元
4月28日	铜陵市	铜陵氢能产业发展规划纲要 ^[32]	在2022年,培育聚集氢能企业超过20家,氢能相关产值达到15亿~30亿元,在2025年培育企业超过30家,产值达到80亿~100亿元,而到2030年,达到300亿~500亿元
4月29日	财政部	关于征求《关于开展燃料电池汽车示范推广的通知》(征求意见稿)意见的函 ^[33]	具体被征询意见的有北京市、山西省、上海市、江苏省、河南省、湖北省、广东省、四川省。有3点量化依据:(1)产业基础;(2)示范经验;(3)加氢站基础设施建设
5月6日	宁夏回族自治区	自治区人民政府办公厅关于加快培育氢能产业发展的指导意见 ^[34]	到2025年,力争建成1~2座日加氢能力500公斤及以上加氢站;积极支持银川市率先开通1~2条示范公交线路运营氢燃料电池公交车,并逐步扩大到银川都市圈城际间氢燃料电池客运车示范运营

表1 2020年国家与地方氢能产业政策(续)

时间	地区/部门	政策名称	主要内容
5月6日	广东省	广东省培育新能源产业集群行动计划(2021—2025年)(征求意见稿) ^[35]	到2025年,要达到氢燃料电池兆瓦,在氢燃料电池领域培育出具有国际先进水平的技术创新型龙头企业,全省要建成加氢站约90个,使珠三角加氢设施体系基本建成
5月19日	国家能源局	关于建立健全清洁能源消纳长效机制的指导意见(征求意见稿)	将探索建立清洁能源就地消纳模式。清洁能源富集地区,鼓励推广电制氢等应用,采取多种措施提升电力消费需求,扩大本地消纳空间

3、4月都有相关氢能政策出台。尤其随着国家复工复产、复商复市政策的推行,各地氢能产业政策也在3月和4月集中出台。这反映出各地对于推动氢能产业发展的热情不变。同时也应注意到,各地氢能产业政策大部分都集中于交通领域,发展氢燃料电池车、建设加氢站成为许多地区推动氢能产业发展的首选。

特别需要关注的是,2020年4月10日,国家能源局发布的《中华人民共和国能源法(征求意见稿)》中,氢能被列为能源范畴。这是中国第一次从法律上确认氢能属于能源。从2020年开始,氢气将被纳入国家统计局的年度能源统计;另外,4月23日,财政部、工业和信息化部、科技部、发展改革委联合发布了《关于完善新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知》,其中改动最大的是有关燃料电池汽车的补贴政策。第一,推出了“开展燃料电池汽车示范应用”的新模式;第二,明确了“重点围绕关键零部件的技术攻关和产业化应用”补贴原则;第三,确定了“以奖代补”的补贴方针。对于氢能和燃料电池汽车产业而言,这两个国家级新政是两个重大有利政策。氢能入法表明氢能的能源属性终于被国家认可;补贴政策调整,表明国家的目标是建立完整的氢能和燃料电池汽车产业链,突破关键技术,形成布局合理、协同发展的良好局面。

1.2 氢能重大项目集中启动,井喷态势明显

随着疫情防控形势的好转,交通领域内氢能产业的一些重大项目也在陆续推进,形成了井喷的发展态势。2020年3月16日,上海捷氢科技有限公司燃料电池项目开工仪式在上海嘉定区安亭镇正式举行^[36]。该氢燃料电池项目位于嘉定氢能港,项

目总投资5亿元,建成后园区将实现研发办公、测试验证、中试生产、氢气供应四大功能。一期产能将达到12000台套,计划于2021年8月投产,预计2024年实现产值12亿元。

2020年3月31日,潍柴集团20000台氢燃料电池发动机工厂在山东省潍坊市正式投产^[37]。相关资料显示,自2018年以来,潍柴全面启动燃料电池产业园建设项目,经过一年多的建设,项目建成了覆盖燃料电池关键材料、单电池、电堆、发动机、动力总成及整车的全套研发试验台架,具备了完整的燃料电池系统及整车测评能力,建成了两万套级产能的燃料电池发动机及电堆生产线,是目前全球最大的氢燃料电池发动机制造基地。

近期,日本丰田计划与一汽集团携手投资约85亿元在天津建设一座新工厂,计划生产纯电动、插电式混合动力和燃料电池汽车,目前还未透露其中纯电动、插混和燃料电池车各自的比例^[38]。天津市政府在《天津市氢能产业发展行动方案(2019—2022年)》中提出,要大力推动天津市氢燃料电池整车产业发展,鼓励一汽丰田引入国际先进氢燃料电池车型产品;积极引进整车生产企业开展氢燃料电池汽车的样车开发和批量生产^[12]。结合丰田2019年在电动化上的一系列动作,此次一汽丰田筹建的新能源汽车工厂,不仅是丰田进军中国电动汽车市场的重要举措,更是丰田进军中国氢燃料电池汽车市场的重要一步。

同时,现代汽车积极布局中国市场,计划2030年将在中国投放1000辆氢燃料汽车。2018年,现代汽车对外公布了“燃料电池电动车2030展望”。根据计划,预计到2030年,现代汽车燃料电池车的

产能将达到50万辆。据了解,到2021年,四川现代计划开发8种柴油车型、2种环保车型等共计10种车型,将持续通过研发,来强化商品竞争力,其中包括盛图氢燃料电池车以及重型氢燃料电池车等新产品。

2020年5月11日,国家电投与北京市人民政府签署协议,双方将围绕绿电进京、能源创新、氢能应用、综合智慧能源、能源数字产业、绿色金融等方面开展全方位、宽领域、多层次战略合作^[39]。与此对应的延庆氢能产业园已经动工,项目第一期将在中关村延庆园内建设一座500 kg/d的加氢站,每日能为近33辆氢燃料电池公交车提供加注服务,建成后,将作为延庆区氢能交通重要基础设施,以绿色、零碳、环保的形象,为2020年高山滑雪世界杯延庆站、北京冬奥会测试赛及2022年北京冬奥会期间氢燃料车辆示范运营提供保障,同时对京津冀地区后续氢能项目建设起到良好的示范作用。

综上所述,进入2020年以来,尤其在国内疫情得到有效控制后,氢能产业呈现“报复式”增长态势。

1.3 轨道交通是未来氢能产业发展的热点领域

随着城市化进程的日益加快,城市交通压力与日俱增,交通拥堵与空气污染已成为各城市破解的难题。大力发展地铁、轻轨、有轨电车及市域动车组等城市轨道交通成为推动城市化进程、改善城市交通现状关键所在。作为能耗大户,轨道交通同样带来了能源消耗和环境污染等问题。氢燃料电池有轨电车、城市轻轨、市际动车组等新型供电制式轨道车辆,具有清洁环保、续航里程长、建设周期短、不依赖于复杂的地面供电系统和弓网系统等优点,在具备良显著环境效应的同时,兼具良好的社会经济效应,是促进中国轨道交通的可持续发展重要途径。

当前,百千瓦(100 kW)级以下中小功率质子交换膜燃料电池车系统(PEMFC)系统已在乘用车、大巴车、物流车和重型卡车领域得到成功应用。而大功率(百千瓦甚至兆瓦级)系统,尤其是在轨道交通、舰艇船舶等应用领域的需求正日益迫切^[40-41]。轨道交通用的PEMFC系统,需求功率大,单堆系统无法满足要求,需要采用几个甚至多达几

十个电堆系统构成复杂的多堆混合动力系统,以充分发挥其具备的输出功率大、可靠性强、冗余度高、灵活可靠等优点,应用于燃料电池市域动车组、有轨电车、山地旅游车、站场调车、工程作业车等轨道交通领域^[42-43]。国际上,日本、美国、德国等高速铁路发达国家在大功率燃料电池轨道车辆的技术方面处于领先地位。2020年5月19日,德国完成了世界上首列氢动力列车Coradia iLint的试车,该列车自2018年9月开始服役,行程约18万km^[44]。中国在该领域进行了长期研究,西南交通大学、中车唐山机车车辆有限公司、中车青岛四方机车车辆有限公司、四川荣创新能动力系统有限公司等均做了深入探索,取得了很大的突破^[45]。

目前中国已规划建设现代有轨电车线路总长超过1200 km,运营、在建、规划、拟建市域铁路线路里程超过1万 km,可预见未来氢燃料电池轨道车辆市场规模巨大,将直接带动中国自主知识产权的轨道交通用氢燃料电池车辆的快速发展,具有广阔的前景。

2 氢能冶金

2.1 冶金行业面临巨大减排压力

全球紧迫的深度脱碳化进程将推进产业智能化和低碳化的结合,促使以氢能经济为代表的低碳产业的蓬勃发展。国际钢铁协会估计,每生产1 t钢坯会导致平均1.8 t的CO₂排放,2019年全球钢铁产量达到18.69亿t,意味着钢铁行业的碳排放达到33.64亿t,占比全球碳排放约为6.1%。中国钢铁产量为世界一半,是第一钢铁产量大国。钢铁生产过程中的碳排放主要来自3个过程:一是将铁矿石还原成铁;二是生铁进一步脱碳生成粗钢;三是粗钢成型做成不同钢材;其中还原过程产生了占整个炼钢过程高达90%的碳排放量,因此降低还原过程的碳排放对钢铁行业的低碳发展至关重要。

2.2 氢能冶金的主要技术与项目

全球75%都是在高炉中添加焦炭形式的碳以“还原”铁矿石来炼铁,在这种“碱性氧气转炉”系统中,氧化铁和碳反应生成熔铁、CO和CO₂。在直接

还原铁(direct reduced iron, DRI)工艺中,若使用天然气代替焦炭作为还原剂,来生成海绵铁,可以降低碳排放。而利用氢气作为还原剂,可以使炼铁工序中产生水,而不是CO₂,从而大幅度减少温室气体的排放。氢还原炼铁法有以下的4项核心技术。

1) 氢气增幅技术:通过焦炉煤气(COG)改质,提高COG中氢含量,使其达到高炉氢还原要求。

2) 实际操作中的全新技术开发:氢气吹入技术、炉内化学反应最佳化技术、难还原矿及低品位矿石还原技术、焦炭\烧结矿\炉渣品质设计技术等实际操作中需要的全新技术开发非常重要。

3) 超耐热\超耐腐蚀原材料开发:需要先行开发可以储藏高温、高压氢气和在900℃以上高温下的超耐腐蚀高温材料。

4) 利用氢气的直接还原铁(DRI)生产技术:开

发利用氢气,将铁矿石在固体状态下直接还原成DRI的生产技术,从而使用DRI替代在电炉中使用的高级废钢。

目前欧洲有3个项目是基于氢能炼钢的:HYBRIT、SALCOS 和 H₂Future/Susteel,前两个项目主要是基于目前现有的还原技术,而最后一个是要利用等离子熔融还原技术。这些技术均不需要再利用碳捕集与封存(CCS)、碳捕集与利用(CCU)等技术。根据目前全球现有的技术实践项目来看,预计2030年之前不会有大规模的商业推广潜力。而2019年底德国蒂森克虏伯公司宣布已经通过一个风口将氢气注入到该厂的一个高炉中,是全球首次在商业运行的生产现场开展试验,标志钢铁行业低碳转型发展新阶段的到来。全球氢能炼钢试验项目的投资及减排效果对比如表2所示。

表2 全球氢能炼钢试验项目的技术的投资与减排效果

序号	国别	技术手段	预期减排	投资需求	备注说明
1	日本四家大型钢铁企业	应用氢的试验高炉作业与普通的高炉作业相比	减少近10% ^[46]		如果按照与现有技术中的细煤粉喷吹设备为相同规模设想,推测每座高炉将需要几十亿日元规模的投资 ^[47]
2	韩国	氢还原炼铁工艺开发成功	降低15%以上 ^[48]	9.15亿人民币(研发);每座高炉投资大约2.5亿元人民币	
3	HYBRIT项目(瑞典)	氢还原炼铁工艺	HYBRIT项目有望减少瑞典CO ₂ 排放总量的10% ^[49] ,降低芬兰CO ₂ 总量的7% ^[50]	中试阶段的投资将花费14亿瑞典克朗(瑞典能源署出资接近50%)	HRBRIT的生产成本大约比传统炼钢工艺高出20%~30%,通过欧盟排放交易体系(ETS),随着可再生能源成本的下降和二氧化碳排放成本的增加,预计这一成本差距将会随之缩小;HYBRIT技术需要大量廉价的可再生能源,所有氢气均是通过利用电解方式将电流通过水中而获得。虽然此工艺属于能源密集型,但是如果所需电力可以再生,那么整个工艺的碳排放可以忽略不计
4	SALCOS项目(德国)	氢还原炼铁工艺	减排50%~85% ^[51]		
5	MIDREX H2®(美国)	氢还原炼铁工艺	减排80%		
6	奥钢联	绿色氢气生产		1800万欧元	项目周期是4.5年

2.3 氢能冶金为中国钢铁行业低碳转型提供支撑

2019年中国钢铁产量约为9亿t,按照单位钢铁碳排放强度1.8计算,则钢铁碳排放约为16.2亿t,约占全国碳排放的16%。若按照目前直接还原技术可以实现减排50%,则至少可以减排8亿t CO₂。相关研究^[52]显示还原每吨铁需要的氢气消耗量约为550 Nm³,折合为约为50 kg,若中国2050年钢铁产量减半,预计氢能炼钢大约需要氢气约为2250万t。2020年5月8日,中国钢研科技集团与京华日钢控股集团共同签署《年产50万吨氢冶金及高端钢材制造项目合作协议》,标志着开展具有中国自主知识产权的首套年产50万t氢冶金及高端钢材制造项目建设的启动;而2019年,河钢集团也与意大利特诺恩集团(Tenova)签署谅解备忘录(MOU),商定在氢冶金技术方面开展深入合作,利用世界最先进的制氢和氢还原技术,并联手中冶京诚共同研发、建设全球首例120万t规模的氢冶金示范工程。这些示范项目的快速推进,将有助于实现中国钢铁行业革命性的绿色转型。

3 绿氢煤化工

3.1 氢能为煤化工产业提供了新的发展方向

煤炭作为中国能源结构的重要组成部分,对于确保中国能源安全具有至关重要的作用。煤化工产业是指以煤为原料,以煤的高效利用为特色,经化学加工使煤转化为气体、液体和固体燃料以及化学品的过程。主要包括煤的气化、液化、干馏以及焦油加工和电石乙炔化工等。当前中国面临煤炭消费压减和CO₂减排的巨大压力,这对煤化工产业的发展带来新的挑战,迫使传统煤化工产业转型升级,在确保煤炭资源高效、清洁利用的基础上走低碳化、集约化发展的道路。而将氢能产业与煤化工产业融合发展,构建“绿氢煤化工”产业,则是实现上述发展目标的有力措施。“绿氢煤化工”是氢能在煤化工产业的应用。它是指利用绿氢(可再生能源制氢)代替灰氢(煤炭制氢)作为原料,从而大幅度减少能源产品(如甲醇、二甲醚)生产过程中的CO₂排放和煤炭用量,实现煤炭资源高效、清洁利用的

新型化工产业。上述特征使“绿氢煤化工”产业在中国未来能源的可持续利用中扮演重要角色,这对于中国减轻燃煤造成的环境污染,降低对进口石油的依赖均有重大意义,也为煤炭产业进行结构调整,走新型工业化发展道路提供了新的方向选择。

3.2 示范项目

2020年1月17日,全球首套千吨级规模太阳燃料合成示范项目在兰州新区绿色化工园区试车成功^[53]。该项目迈出了将太阳能等可再生能源转化为液体燃料工业化生产的第一步。太阳燃料合成是指利用太阳能、风能、水能等可再生能源发电,进而电解水制备绿氢、将CO₂加氢转化制甲醇等液体燃料,把可再生能源存储在液体燃料中。简言之就是利用太阳能等可再生能源、CO₂和水,生产清洁可再生的甲醇等液体燃料(故又被形象地称为“液态阳光”)。这将是未来解决CO₂排放的根本途径之一,也是将间歇分散的太阳能等可再生能源收集储存的一种储能技术,是实现人工光合成绿色能源的一种过程。

该项目由中国科学院院士、中国科学院大连化学物理研究所研究员李灿团队开发并实施。该项目由太阳能光伏发电、电解水制氢、CO₂加氢合成甲醇3个基本单元构成,总占地约289亩(1亩=667 m²),其中光伏发电占地259亩,总投资约1.4亿元,其中光伏发电约5000万元。项目配套建设总功率为10 MW光伏电站,经逆变-整流后,为2台1000 Nm³/h电解水制氢设备提供电力。

该项目对缓解中国能源安全问题具有重要意义。它一方面探索中国西部地区丰富的太阳能等可再生能源的优化利用模式,将太阳能等可再生能源转化为液体燃料甲醇,提供了一条有效利用可再生能源的路径,为解决中国许多地区“弃光、弃风、弃水”问题提供了新的策略;另一方面,太阳燃料甲醇又是绿氢载体,可助于解决氢能储存和运输的安全难题。此外,该项目将CO₂作为碳资源,实现CO₂的积极减排,生产的太阳燃料甲醇为绿色甲醇,不同于传统煤、天然气所制得的甲醇,实现了零碳排放。绿色甲醇的生产是目前国际上兴起的碳捕获储存(CCS)以及进而发展的碳捕获及资源化利用

(CCSU)的发展方向,为推进低碳、清洁的能源革命提供了创新的技术路线。

2020年4月17日,宝丰能源正式开工建设太阳能电解水制氢储能及综合应用示范项目^[54]。该项目计划总投资14亿元,氢气产量将达2万Nm³/h,同时配套建设光伏电站及下游加氢站,预计2020年底投产。该项目是大型国产制氢设备的首次大规模实证应用。同时,也是中国煤制烯烃行业首个引入“绿氢”的项目,将实现制氢与现代煤化工有效整合,综合实现降本增效和节能减排。该项目将采用单台产能1000 Nm³/h的国产最先进高效碱性电解槽,将促进制氢行业技术突破。宝丰能源电解水制氢项目预计每年可减少煤炭消耗25.4万t、减少CO₂排放44.5万t。该示范项目一方面能够压缩企业生产成本;另一方面,顺应国际、国内能源市场的发展趋势,积极拓展清洁能源市场,推动企业从高端煤基新材料领军企业向新能源领域先行者转型布局,真正推动碳资源的综合利用,促进现代煤化工行业与新能源的融合发展,真正实现高质量发展。

4 氢能商品化

2019年6月,国际能源署(IEA)在相关的研究中指出,氢气未来会作为与天然气同等地位的能源物质参与国际贸易,并将取代天然气^[55]。进入2020年后,氢能商品化趋势日益明显,除了传统的加氢站供氢之外,氢能商品化主要表现在绿氢出口以及民用液氢开发两个方面。尤其在COVID-19疫情后复工复产的迫切需求下,更具发展前景。

4.1 绿氢出口潜力巨大

日本已从澳大利亚和文莱进口氢气,特别是在2019年,澳大利亚首次实现了对日本的绿氢出口^[56]。在氢能的国际贸易方面,中国同样具备竞争优势。

首先,中国是世界第一产氢大国,中国每年产氢量约2200万t,占世界氢产量的1/3。规模化制氢在全球和中国都是成熟技术,未来发展的方向是如何进一步提高制氢效率和降低制氢成本及大规模商业化的氢气储运。值得注意的是,现在中国氢

气主要来自煤制氢或工业副产氢,包括丙烷乙烷脱氢、氯碱工业副产氢、煤制甲醇弛放气等,属于“灰氢”,不符合氢能绿色应用的要求。但随着CCS技术的进步和氢能源市场的扩大,煤制氢和CCS技术的结合是下一步技术方向。

其次,中国具备大规模生产“绿氢”的潜力。最近的研究表明^[57],如果利用风能、太阳能成本降低的优势加快装机速度,在“十四五”内,每年可增加53 GW的风能装机容量和每年58 GW的太阳能装机容量。在“十四五”末期,中国可实现非化石能源占整体能源结构的19%的目标。这就给了中国未来生产绿氢,进行绿氢出口提供了坚实的基础。而且,利用可再生能源生产绿氢,能令可再生能源不再单一依靠电网进行消纳,可再生能源除了从电网输出,还可以从氢网输出,形成“输电+输氢”的结构。这使得绿氢成为拯救可再生能源的方式,解决了“弃光,弃风,弃水”的问题,同时也解决高比例可再生能源上网导致电网稳定性问题,具有多方面的协同效应。当前,可以考虑在中西部太阳能、风能资源丰富的地区进行大规模“PTG”示范项目建设,在取得经验后,可考虑逐步推广。

第三,中国具备地理优势。中国紧邻韩国、日本,相对于澳大利亚距离更近。因此,中国可利用地理优势,在靠近日本、韩国的地区如吉林、辽宁、山东等地布局绿氢制造基地、储运基地,大力发展绿氢相关产业,并通过船运液氢、设置输氢管道等进行氢气出口。另外,可利用中西部地区可再生能源丰富的优势,在中西部地区布局绿氢生产基地,可采用铁路运输的方式,通过国际班列向欧洲出口液态绿氢。发展上述绿氢贸易将会改变中国能源的版图,增加氢作为能源商品,并在将来使“氢人民币”取代“石油美元”成为可能。

4.2 民用液氢是重点领域

当前在氢储运环节,液氢越来越引起重视,并逐渐从航空、航天及军用领域扩展到民用领域。低温液态储运在大规模储运情景下具有成本低、运量大、纯度高、充装效率高等优势,但技术难度高并受到装备、政策等条件制约。事实上,中液氢向民用、商用转化进程已落后于发达国家,如何突破液氢自

身物理特性约束、建立高效储运体系及更大规模化发展都是亟待解决的问题。全国氢能标委会从2017年即开始组织国内各企业和高校,编写制订的《液氢生产系统技术规范》《液氢贮存和运输安全技术要求》《氢能汽车用燃料液氢》3项国家标准已于2019年10月审查通过,有望在2020年中期发布实施。在这样的背景下,国内能源企业在液氢产业链上的布局开始涌现。

2019年7月8日,浙江省能源集团有限公司与浙江嘉化能源化工股份有限公司战略合作及液氢工厂项目签约仪式在嘉兴港区举行,标志着中首个商用液氢工厂签约落户嘉兴港区^[58]。这是长三角区域首个工业副产氢气液化提纯制备项目,该项目规模为每小时1 m³液态氢,约合每天1.5 t。

2020年液氢产业迎来新的发展。2020年4月,鸿达兴业股份有限公司在内蒙古自治区建成并投入使用国内第一座民用液氢工厂^[59],公告显示该生产线已生产出液氢、高纯氢和超纯氢,这是中国首次由民营企业生产出液氢产品。同时,也标志着民用液氢实现了零的突破。鸿达兴业在前期已在氢能领域进行大量投入和探索,取得了一定的研究成果,现在该项目处于募集资金投资以促进进行规模化应用和市场化阶段。

2020年4月,中国联手湖南核电宣布投资11亿元建设液氢工厂,全力推进液氢产业高端设备制造、液氢储运、液氢加氢站全产业链建设。此外,还将以液氢工厂为切入点,突破液氢制储运关键技术,培育中国液氢产业高端设备制造业,实现液氢设备和技术的国产化替代。另外,还有国富氢能、深冷股份、中科富海等多家公司也正致力于民用液氢的技术开发的和市场推广。这将带动中国液氢市场的规模化发展,降低成本的同时也会推动燃料电池用氢成本的下降,从而促进燃料电池汽车的良性发展。

随着氢能汽车发展和对高纯氢燃料的规模化需要,美国、欧洲和日本相继把液氢用在了交通领域。在美国已有超过10%的液氢用于燃料电池车辆,且这一比例还在不断提高。目前,全球液氢总产能已超过470 t/d。其中,北美占全球液氢市场总

量的85%以上,而中国仅占1%。从在用建设规模来看,美国本土已有15座以上液氢工厂,产能达326 t/d以上,居于全球首位。此外,欧洲有4座液氢工厂,产能为24 t/d。在亚洲,除了中国,日、韩两国均在积极布局液氢民用市场。近日,韩国纺织和化学企业晓星集团宣布,将与林德集团一起投资3000亿韩元建造全球最大的液氢工厂,其产能可为10万辆氢燃料电池汽车提供燃料。2019年12月,世界上第一艘液氢运输船也在日本亮相。

同时,民用液氢应用的下游技术也在加氢站建设方面得到体现。全球液氢储氢型加氢站建设历史已超过10年,日本和德国均有10座以上的液氢加氢站对外运营。美国除了在加利福尼亚州有5座对外运营的液氢储氢型加氢站之外,典型案例是Plug Power公司建设的109座场内专用加氢站,其中84座为液氢储氢型加氢站,共含311台氢加注机,可为超过2万辆燃料电池叉车进行加注。当前中国加氢站的数量是61座,都是以高压气态方式进行加氢。未来液氢加氢站也将是中国加氢站的发展方向。

除了在氢燃料电池车与加氢站上的应用,液氢在高端制造、冶金、电子等领域亦可发挥巨大作用。正因液氢的应用领域广泛,无论从氢能产业自身还是从制造业发展的角度来看,发展民用液氢都已刻不容缓。同时,民用液氢市场的拓展也是进一步降低用氢成本的关键。

当前液氢民用市场仍处于初期阶段,由于生产氢气和氢液化时的用电模式各异,波谷电、风光弃电或工业副产氢提纯造成的生产成本不同,导致液氢成本差异较大。因此,除了通过技术进步实现用氢成本降低外,扩大民用液氢市场将有利于其他固定投资成本的降低,共同推动氢能市场拓展。

5 国际合作

5.1 氢能全球化

2019年2月,世界能源委员会(WEC)发布的研究^[60]指出,应优先发展氢能经济。原因在于:第一,并不是所有的工业过程都可进行电气化,而是需要

一种碳中性的载体来实现工业生产过程的完全脱碳,而氢气是为数不多可实现这个目标的物质之一;第二,工业生产可作为氢气在其他行业发展的催化剂来实现协同发展。因此,发展氢能国际贸易逐渐成为世界许多国家正在开拓的新领域。

前文已述及,日本已实现从澳大利亚进口氢气。实际上,澳大利亚在氢能贸易上已有详细布局和规划,澳大利亚政府承诺投入1.46亿美元用于支持打造一个清洁、创新、安全和有竞争力的氢行业^[61],其规划的贸易对象涉及许多国家和地区^[62](表3)。

表3 澳大利亚氢能出口潜力

出口国家和地区	2025年			2030年			2040年		
	低案	中案	高案	低案	中案	高案	低案	中案	高案
日本	17	106	275	182	368	803	392	852	1979
出口	8	24	53	40	78	167	107	234	570
潜力	0.3	2	4	4	7	15	13	23	63
/kt	1	3	8	12	38	79	89	197	464
其他地区	0.4	2	5	4	11	23	20	45	106
总和/kt	26	136	345	242	502	1088	621	1350	3180

如表3所示,澳大利亚将日本、韩国、新加坡和中国都列为可以进行氢能出口的国家,体现了利用开发氢能产业带来新发展机遇的战略思路。

2019年11月5日,德国联邦经济事务和能源部、运输部长和数字基础设施部、研究和教育部以及经济合作部联合就“氢在未来能源转型和气候保护方面的作用”举办研讨会^[63],征求科学界、工业界及相关社会代表对《国家氢能战略》的意见。与会专家表示,可再生能源领域未来可能是欧洲与非洲之间搭建新的能源伙伴关系的基石,而氢能为德国工业和技术提供巨大的市场和发展机会。此次会议上,德国联邦运输和数字基础设施部还与H₂Mobility签署谅解备忘录(MOU),进一步扩大加氢基础设施布局,根据协议,到2021年底具备满足60000辆氢燃料电池乘用车和500辆燃料电池商用车加氢的能力。

2019年12月18日标准普尔全球普氏能源资讯(S&P Global Platts)宣布发布全球第一个氢价评估产品,目前在其官网已经出现了第一条氢价格信息。目前标准普尔共有3套计算氢气生产价格的方法,计算因素包括了天然气、电力、甲醇、水、碳排放配额、资本支出等^[64]。这反映了国外主要产氢方式的情况,也反映了目前运输等环节的成本占据了终端氢气价格的大头。

国际可再生能源机构(IRENA)于2019年9月发布了研究报告^[65],详细分析了氢能用于能源脱碳的潜力。结果表明,利用低成本风电和光伏电力制取的氢气将在未来5年内具备与化石燃料制氢相当的成本竞争力,尤其是与配备CCS的天然气制氢相比,更具优势。同时,报告预测2030—2040年间,所有绿色氢气的成本将低于“蓝色氢气”。到2035年,以可再生能源电力平均成本为基准的制氢成本也开始具备与“蓝色氢气”的竞争力,而碳价将进一步提升“绿色氢气”的竞争力,在某些地区“绿色氢气”将在未来3~5年内具备成本竞争力。这将对氢能的国际贸易产生重大促进作用。

5.2 中国机遇

在氢能国际合作逐渐发展的环境下,中国的氢能产业贸易的布局也在逐渐开展。2019年12月18日,北京航天试验技术研究所、中国特检院、中国科学院理化技术研究所、北京低碳研究院等13家单位签署合作协议,成立国内首个液氢协同创新联合体,推进液氢民用化。上海环境能源交易所已经开展碳排放权交易,正筹建进行氢气交易。而中国氢能联盟预测^[66],至2050年中国氢能源供应结构中,灰氢占比逐渐减少,绿氢和生物质能预计会成为绝对主流。这将对氢能发展带来更多机遇。

1) 氢能贸易将加快中国能源革命进程,促使

中国在世界能源体系转型和能源替代变革中发挥引领作用。

建立清洁低碳的能源供应体系是能源生产革命的核心,也是世界主要大国能源战略的主要取向。当今世界的能源变革趋势将促使清洁能源和可再生能源成为未来能源供给结构的主体。由国家发改委公布的《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》中提出:到2020年和2030年,非化石能源占比分别提高到15%和20%,在能源需求总量保持不断增长的同时,持续扩大清洁能源的比例,即意味着其必须保持远高于化石能源的增速。从目前到2030年,中国新建非化石能源发电装机容量将达近10亿kW,相当于美国全部装机总量。这是一项十分艰巨的任务,须通过扩大可再生能源发电的市场应用规模引导其实现。通过发展绿氢贸易,加强氢能国际合作,将有利于可再生能源发电的消纳、平衡电网负荷。并且可以反过来利用绿氢通过大功率燃气轮机发电,代替煤电作为电网基荷,为中国能源结构调整提供了一种可选择的方案。中国未来新增能源需求将主要依靠增加清洁能源供应满足,低碳技术和低碳发展能力越来越成为一个国家核心竞争力的体现。而氢能贸易国际化将为中国实现上述目标提供了难得的机遇,促使中国在未来世界能源体系变革中占据领先地位。

2) 氢能贸易将促使中国进行能源技术创新和产业变革,打造新型能源产业,重塑产业链业态和竞争格局。

全球应对气候变化的紧迫形势将促进世界范围内经济发展方式的低碳转型,并伴随激烈的国际经济、贸易和技术竞争。由于可再生能源发电技术进步和大规模应用,使得其成本呈快速下降趋势。2020年4月28日,阿布扎比(Abu Dhabi)的一个2GW的光伏电站投标中,法国EDF和中国晶科电力(Jinko Power)联合体投出了0.7934美分/(kW·h)的全球最低电价,使得电价低于1美分/(kW·h)的设想在个别地区得以实现。而美国能源部预计到2030年,全球光伏发电的平均成本将下降到3美分/(kW·h),成为最有经济竞争力的发电技术。这将使得绿氢的生产成本可以大幅度降低,令氢能

在能源竞争中占据优势。同时绿氢贸易将促进超大规模氢储运技术提前实施,相关的技术、设备及产业得以迅速发展。当前先进氢能技术已成为国际技术竞争的前沿和热点领域,成为世界大国能源战略必争的高新科技产业,氢能产业的快速发展将吸引巨额投资,带来新的经济增长点、新的市场和新的就业机会,中国需要紧紧抓住这一有利时机,筑牢国内氢能产业发展基础,为“两个百年”战略目标的实现提供坚实支撑。

3) 氢能国际合作将有利于中国“一带一路”倡议的实施,提升国际关系话语权,树立负责任大国形象。

当前全球能源变革的趋势,为中国推动能源革命提供了良好的国际合作环境和发展共赢的机遇。通过发展绿色氢能贸易全方位加强国际合作,就需要推动氢能产业对外深度融合,打造世界范围内有竞争力的国际企业,并积极参与国际氢能体系的建设,扩大话语权和影响力。特别是要注重和加强在“一带一路”倡议框架下,沿线国家氢能领域的合作,如出租设备、输出技术、生产绿氢、出售绿氢、分享利润等,支持发展中国家氢能体系建设,在全球应对气候变化治理体制建设中发挥积极的引领作用,体现中国作为发展中大国的责任担当。尤其在当下,受COVID-19疫情影响,反全球化浪潮出现,在这种情形下,更需要中国保持战略定力,以大力发展氢能产业为着力点之一,统筹国内经济转型升级和国际应对气候变化的两个大局,实现环境友好型和气候适宜型绿色低碳可持续发展路径,为世界各国探索和建设生态文明树立典范。

6 未来发展政策建议

当前中国氢能产业既拥有很好发展机遇,也面临很多结构性的障碍。以发展氢能产业为措施促进可再生能源的大规模应用,推动世界能源体系变革,是在保护地球生态安全目标下的全球合作行动。通过发展氢能产业来促进能源结构调整,不能完全依靠市场配置资源,更需要强化政府目标导向,需要强有力政策措施的支撑和制度保障,从促

进氢能产业长期稳定发展角度出发,构建系统化的发展路径。

6.1 以国家战略为指导,强化氢能产业发展顶层设计

中国在《巴黎协定》中提出的2030年国家自主减排贡献目标体现了国家长期低碳发展战略的理念和路径,也为氢能产业发展指明了方向。近年来,许多地区陆续出台了很多氢能产业发展规划,但依然缺乏国家层面的整体战略构想,导致各地区产业发展的低水平重复建设、恶性竞争及同质化问题严重。需尽快发布国家层面的氢能产业发展规划,指导全国氢能产业布局,防止低水平重复建设,加快淘汰落后产能,优化产业链结构。关键是要以促进中国CO₂排放早日达峰为导向,落实氢能产业的整体发展目标和宏观政策措施。当前,应明确将氢能产业列入国家“十四五”发展规划,并将发展任务分解到每个地区,作为约束性指标以落实各级政府氢能产业发展的目标责任制,保证国家整体发展目标的实现。应保持国家政策的延续性和权威性,原先公布实施的对氢能的补贴政策应该持续执行或及时用新政策代替原有政策,不应出现政策空白,使产业界迷茫。

6.2 政府管理与市场机制相结合,强化氢能的能源属性,形成促进氢能产业发展的制度体系和实施机制

中国为推动能源和经济的低碳转型,制定了一系列政策措施,强化绿色低碳发展的制度保证,健全法制和政策体系,然而在氢能方面的法律体系和政策措施并不完善。2020年4月10日,国家能源局发布《中华人民共和国能源法(征求意见稿)》中第一次将氢能列为能源范畴。而令人遗憾的是,该征求意见稿仅在附则中将“氢能”作为术语“能源”一词注释时列举的诸种能源种类之一,反映出该意见稿对氢能的重视程度不够,落后于国内氢能产业的实践和发展。氢能在能源中定位的缺失,使其在促进可再生能源开发和能源低碳化发展方面的潜力被忽视,将严重制约氢能在现代能源体系中发挥重要作用。因此,未来需要在明确提高氢能定位,

并在可再生能源开发利用、基础设施建设、投资贸易等多个方面拓展氢能的发展空间。

要强化各级政府的氢能产业发展目标责任制,应明确将氢能产业发展指标纳入今后国家和地方的每一个五年发展规划。同时要改革和完善促进氢能产业发展的财税金融等政策体系、氢能产品价格形成机制和资源、环境税费制度。加强能源市场机制改革,既要破除某些领域的市场垄断,也要纠正和避免市场的无序竞争,努力建立公正公平、有效竞争和统一开放的氢能市场结构和氢能市场体系。要强化氢能标准和产品能效标识及产业准入政策,要以国家中长期战略和目标为导向,强化政府约束性目标、强制性标准和财税金融等政策,与市场机制相结合,健全以开发氢能产业推动能源革命和建设低碳社会的制度保障。

另外,要重视“碳价”机制对氢能产业发展的促进作用。中国已启动并开始建设全国统一碳排放权交易市场,涵盖了中国主要的高耗能领域,明确的碳价信号可促进企业更多地生产和使用“绿氢”而非“灰氢”,这有利于促进中国氢能产业的转型升级。碳市场发展过程中建立的碳排放统计、监测和核查体系,也是推动氢能产业未来由“灰氢”向“绿氢”转变,实现低碳及可持续发展重要的能力建设,并有利于提高相关氢能企业在碳排放方面的公信力和碳减排透明度,契合国家应对气候变化战略目标的内在需求。

6.3 以创新驱动,走新型氢能产业高品质发展道路

中国氢能产业仍处于早期快速发展阶段,在当前经济发展与环境保护的双重压力下,要走创新驱动的高品质发展路径。产业的发展 and 布局要体现绿色低碳的理念,避免高碳的“灰氢”产业粗放式发展模式,努力建设以“氢能经济”为特色的低碳社会。要加强先进氢能产业的技术创新,进行超前布局。中国当前在可再生能源的技术和产业化方面都走在世界前列,要利用好可再生能源技术和产业优势,推广先进高效的可再生能源制氢(PTG)产业,高密度、低成本的储氢、运氢产业。要努力扩大氢能的应用领域,除目前正在大力推进的氢能交通

领域外,其他领域如氢冶金、绿氢煤化工等也应积极支持,将技术优势转化为产业优势和经济优势。要推动先进氢能前沿技术的研发和示范,占领氢能科技的制高点,打造国家的竞争优势,顺应并引领全球氢能技术创新和发展的进程。

6.4 全面统筹,以发展氢能产业为重要抓手,打造国内经济发展与国际应对气候变化协同共赢的局面

以发展氢能产业为重点,推动中国能源革命,优化能源结构,不仅有利于减缓CO₂排放,也有利于替代石油、天然气等化石能源进口,保障国家能源安全。因此,加快布局氢能产业,推进能源革命和经济低碳转型,既能够为应对气候变化起到支撑作用,也回应了国内可持续发展的内在需求,具有多方面协同效应,要全面统筹,分步骤层层推进。先进氢能技术及其产业也是新的经济增长点,能源体系变革也将促进经济社会的可持续发展。因此,要把氢能产业作为国家和企业新的发展机遇,顺应世界潮流,打造自身先进氢能技术及产业的核心竞争力,以绿色低碳的发展理念和发展模式,实现国民经济的可持续发展。

6.5 加强国际合作,引领全球氢能产业共同发展,建设人类命运共同体

应对气候变化是全人类共同的任务,需要各国加强合作,共同应对挑战。当前要特别加强在以氢能产业为代表的先进能源技术和产业领域务实合作,创造更多的共商、共建、共享和共赢的合作机遇。首先要加强与氢能强国(地区)合作,如日本、韩国、加拿大、欧盟等,同时也要加强发展中国家之间的“南南合作”,中国要结合“一带一路”倡议的实施步骤,加强与沿线国家先进氢能技术和基础设施建设的合作,发挥中国在新能源等领域的技术优势,推进先进制氢和储氢、运氢及氢能应用技术为代表的氢能产业的互联互通,促进可再生能源资源的跨国优化开发和互补利用,把发展氢能产业作为在应对气候变化背景下,促进能源变革和经济转型的重要机遇,共同探索合作共赢、共同发展的绿色低碳发展路径,为促进全球应对气候变化、建设人类命运共同体做出新的贡献。

7 结论

受 COVID-19 疫情的冲击,中国氢能产业的发展遇到了暂时的困难,但是氢能产业发展的推动力未变,新的形势将更有利于氢能发展。未来中国将以促使 CO₂ 排放早日达峰为导向,促进产业转型升级和经济高质量发展,而氢能产业则将为中国实现上述战略目标提供可靠支撑,为实现为全球生态安全做出新的重大贡献。

参考文献 (References)

- [1] Zhong Z P, Solonenko N E, Li Y F, et al. Glacier ice archives fifteen-thousand-year-old viruses[J/OL]. [2020-04-30]. <https://doi.org/10.1101/2020.01.03.894675>.
- [2] 何建坤. 全球气候治理变革与我国气候治理制度建设[J]. 中国机构改革与管理, 2019(2): 37-39.
- [3] 翁玉艳, 张希良, 何建坤. 全球碳市场链接对实现国家自主贡献减排目标的影响分析[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 27-33.
- [4] 何建坤. 积极推进中国特色全国碳排放权交易市场建设[N]. 中国环境报, 2019-09-27(3).
- [5] 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.
Mao Zongqiang. The world's hydrogen energy is hot, China's hydrogen energy is ready to develop[J]. Solar Energy, 2016(7): 16-19, 80.
- [6] 孟翔宇, 顾阿伦, 邬新国, 等. 2019年中国氢能政策、产业与科技发展热点回眸[J]. 科技导报, 2020, 38(3): 172-183.
- [7] 潍坊市发展和改革委员会. 潍坊市氢能产业发展三年行动计划[EB/OL]. (2020-01-09)[2020-01-09]. http://fgw.weifang.gov.cn/zwgk/kszc/nyghfzk/202001/t20200109_555-1688.html.
- [8] 刘宁. 2020 青海省政府工作报告[EB/OL]. (2020-01-15)[2020-01-15]. http://district.ce.cn/newarea/roll/202002/03/t20200203_34211623.shtml.
- [9] 教育部, 国家发展改革委, 国家能源局. 储能技术专业学科发展行动计划(2020—2024年)[EB/OL]. (2020-01-19)[2020-01-19]. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s705-6/202002/t20200210_419693.html.
- [10] 河北省重点建设领导小组办公室. 河北省重点建设领导小组办公室关于印发《河北省 2020 年省重点项目计划》的通知[EB/OL]. (2020-01-20)[2020-01-20]. <http://>

- hbdrc.hebei.gov.cn/web/web/zdb_gzdt/2c9473846fa80d4-0016fc1fdac6e058e.htm.
- [11] 嘉兴市发展改革委. 嘉兴市加快氢能产业发展的工作意见[EB/OL]. (2020-01-20)[2020-01-20]. http://www.jiaxing.gov.cn/art/2020/1/20/art_1580052_41773627.html.
- [12] 天津市人民政府. 天津市人民政府办公厅关于印发天津市氢能产业发展行动方案(2020—2022年)的通知[EB/OL]. (2020-01-26)[2020-01-21]. <http://www.tjrd.gov.cn/tjfq/system/2020/02/02/030015109.shtml>.
- [13] 茂名市工业和信息化局. 茂名市氢能产业发展规划(征求意见稿)[EB/OL]. (2020-03-03)[2020-03-03]. <http://www.maoming.gov.cn/hdjlpt/yjzj/answer/3433>.
- [14] 张家口发展和改革委员会. 张家口氢能保障供应体系一期工程建设实施方案[EB/OL]. (2020-03-09)[2020-03-09]. <http://www.zjk.gov.cn/govaffair/content.jsp?code=00047197x/2020-14766>.
- [15] 潍坊市工信局. 潍坊市促进加氢站建设及运营扶持办法[EB/OL]. [2020-03-17]. http://xxgk.weifang.gov.cn/sj-xw/202003/t20200326_5578901.html.
- [16] 科技部. 科技部关于发布国家重点研发计划“制造基础技术与关键部件”等重点专项2020年度项目申报指南的通知[EB/OL]. (2020-03-19)[2020-03-23]. https://service.most.gov.cn/kjih_tztg_all/20200323/3246.html.
- [17] 山东省人民政府办公厅. 济青烟国际招商产业园建设行动方案(2020—2025年)[EB/OL]. (2020-03-26)[2020-03-26]. http://www.shandong.gov.cn/art/2020/3/26/art_107861_106321.html.
- [18] 河北省发展改革委. 河北省2020年氢能产业重点项目清单(第一批)[EB/OL]. (2020-03-31)[2020-03-31] <http://hbdrc.hebei.gov.cn/web/web/xxgkcyfz/2c947384711656-26017133be78c8417e.htm>.
- [19] 浙江省发展和改革委员会. 浙江省促进汽车消费的若干意见(2020—2022年)[EB/OL]. (2020-04-01)[2020-04-01] http://fzggw.zj.gov.cn/art/2020/4/1/art_1599552_42453086.html.
- [20] 国家能源局. 中华人民共和国能源法(征求意见稿)[EB/OL]. (2020-04-10)[2020-04-10]. http://www.nea.gov.cn/2020-04/10/c_138963212.htm.
- [21] 广州市黄埔区发展和改革局. 广州开发区发展和改革局. 广州市黄埔区 广州开发区促进氢能产业发展办法实施细则[EB/OL]. (2020-04-13)[2020-04-14]. http://www.hp.gov.cn/gzhpfg/gkmlpt/content/5/5790/post_57904-38.html#4177.
- [22] 工业和信息化部. 2020年新能源汽车标准化工作要点[EB/OL]. (2020-04-16)[2020-04-16]. <http://www.miit.gov.cn/n1146285/n1146352/n3054355/n3057585/30575-92/c7864986/content.html>.
- [23] 郑州市工业和信息化局. 郑州市2020年制造业高质量发展实施方案[EB/OL]. (2020-04-16)[2020-04-16]. <http://public.zhengzhou.gov.cn/07AAC/326230.jhtml>.
- [24] 财政部, 工业和信息化部, 科技部, 发展改革委. 关于完善新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知[EB/OL]. (2020-04-23)[2020-04-23]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-04/23/content_5505502.htm.
- [25] 上海市发改委. 关于提振消费信心强力释放消费需求的若干措施—促进上海市汽车消费若干政策[EB/OL]. (2020-04-23)[2020-04-27]. <http://fgw.sh.gov.cn/fzggdt/20200427/bd28a883b8c549458a10630b7dcabbd0.html>.
- [26] 河北省人民政府办公厅. 关于加快推动首都“两区”建设重点突破的意见[EB/OL]. (2020-04-24)[2020-04-28]. http://hbepb.hebei.gov.cn/xwzx/szfwj/202004/t20200428_94996.html.
- [27] 如皋经济技术开发区. 如皋经济技术开发区关于市场化招商有效项目信息引荐奖励办法[EB/OL]. (2020-04-26)[2020-04-26]. <http://www.chinaautoms.com/m/view.php?aid=13267>.
- [28] 国家发展改革委, 交通运输部. 长江三角洲地区交通运输更高质量一体化发展规划[EB/OL]. (2020-04-27)[2020-04-27]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/2-02004/t20200427_1226858_ext.html.
- [29] 上海市人民政府. 上海市推进新型基础设施建设行动方案(2020—2022年)[EB/OL]. (2020-04-27)[2020-05-07]. <http://www.shanghai.gov.cn/nw2/nw2314/nw2315/nw-4411/u21aw1443340.html>.
- [30] 新乡市人民政府. 新乡市氢能与燃料电池产业发展规划和新乡市氢能与燃料电池产业发展实施意见[EB/OL]. (2020-04-27)[2020-05-07]. http://www.xinxiang.gov.cn/sitesources/xxsrnzf/page_pc/zwgk/zfwj/szfwj/article-4d22988679ef45c087d883f2a4b6fd0e.html.
- [31] 常熟市人民政府. 常熟市关于氢燃料电池产业发展的若干政策措施[EB/OL]. (2020-04-27)[2020-05-07]. <http://www.changshu.gov.cn/zgcs/zfxxgk/showinfo.aspx?infoid=c92a70ba-e8e8-427f-beae-5e4b027a0783>.
- [32] 铜陵市人民政府. 铜陵氢能产业发展规划纲要[EB/OL]. (2020-04-29)[2020-05-07] http://www.tl.gov.cn/zx-zx/xwzx/136/202004/t20200429_1080424.html.
- [33] 财政部. 关于征求<关于开展燃料电池汽车示范推广的通知>(征求意见稿)意见的函[EB/OL]. (2020-05-10)[2020-05-10]. <http://www.es.cn.com.cn/news/show-1037-508.html>.
- [34] 宁夏回族自治区人民政府. 自治区人民政府办公厅关于加快培育氢能产业发展的指导意见[EB/OL]. (2020-

- 05-06)[2020-05-06]. http://www.nx.gov.cn/zwgk/gfxwj/202005/t20200506_2055453.html.
- [35] 广东省能源局. 广东省培育新能源产业集群行动计划(2021—2025年)(征求意见稿)[EB/OL]. (2020-05-06)[2020-05-06]. <http://drc.gd.gov.cn/hdjlpt/yjzj/answer/42-37>.
- [36] 总投资5亿元,捷氢科技燃料电池项目正式开工[EB/OL]. (2020-03-16)[2020-05-07]. <http://www.sinohytec.com/article.php?id=574>.
- [37] 潍柴集团年产20000台氢燃料电池发动机工厂正式投产[EB/OL]. (2020-03-31)[2020-05-07]. http://www.xinhuanet.com/power/2020-04/01/c_1210539452.htm.
- [38] 外资大举杀入,丰田现代抢先布局-中国燃料电池车加速从商到乘[EB/OL]. (2020-03-24)[2020-03-24]. <https://finance.sina.cn/stock/relnews/cn/2020-03-24/detail-ii-mxyqwa2911023.d.html>.
- [39] 国家电投与北京市签订氢能等战略合作协议[EB/OL]. (2020-05-13)[2020-05-13]. <http://www.china-nengyuan.com/news/156094.html>.
- [40] Han Y, Li Q, Wang T, et al. Multisource coordination energy management strategy based on SOC consensus for a PEMFC-battery-supercapacitor hybrid tramway[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(1): 296-305.
- [41] Yan Y, Li Q, Chen W, et al. Hierarchical management control based on equivalent fitting circle and equivalent energy consumption method for multiple fuel cells hybrid power system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(4): 2786-2797.
- [42] Yan Y, Li Q, Chen W, et al. Optimal energy management and control in multimode equivalent energy consumption of fuel cell/supercapacitor of hybrid electric tram[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(8): 6065-6076.
- [43] Shen G R, Liu J, Wu H B, et al. Multi-functional anodes boost the transient power and durability of proton exchange membrane fuel cells[J]. *Nature Communications*, 2020, doi: 10.1038/s41467-020-14822-y.
- [44] Coradia iLint-世界首例氢动力铁路客运列车[EB/OL]. (2020-05-19)[2020-05-19]. https://www.sohu.com/a/37-7020197_180330.
- [45] 陈维荣,安祺,王轶欧,等.一种混合储能式有轨电车系统的配置优化方法:CN110896246A[P]. 2020-03-20.
- [46] 日本确认氢还原炼铁法可减排二氧化碳10%[EB/OL]. (2017-01-10)[2017-01-12]. <http://www.worldmetals.com.cn/viscms/bianjituijianxinwen1277/20170112/240018.html>.
- [47] COURSE50项目第二阶段研发课题:将逐步模拟4000~5000 m³高炉的技术开发[EB/OL]. (2018-05-13)[2020-05-13]. http://www.sohu.com/a/231443680_313737.
- [48] “氢能炼钢”来了,180万吨钢仅需一台高温气冷堆机组-中国宝武介入,韩国 posco、瑞典已领跑[EB/OL]. (2019-03-12)[2020-03-12]. https://mp.weixin.qq.com/s/SXiB_i95fhcH8R15zTEYXA.
- [49] HYBRIT项目将进入中试阶段[EB/OL]. (2018-08-28)[2020-03-28]. <http://www.worldmetals.com.cn/viscms/bianjituijianxinwen1277/20180906/245527.html>.
- [50] 将为钢铁制造业带来革命性变化的项目——突破性氢能炼铁技术(HYBRIT)[EB/OL]. (2019-02-10)[2020-02-10]. http://www.sohu.com/a/293905313_313737.
- [51] SALCOS. Our climate strategy for sustainable steel production[EB/OL]. (2020-05-19)[2020-05-19]. https://salcos.salzgitter-ag.com/en/index.html?no_cache=1.
- [52] Vogl V, Åhman M, Nilsson L J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 203: 736-745.
- [53] 全球首套规模化太阳燃料合成示范项目试车成功[EB/OL]. (2020-01-17)[2020-01-17]. https://www.sohu.com/a/367559353_655817.
- [54] 瞄准“终极能源”低碳市场 宝丰能源14亿元投建“绿氢”项目[EB/OL]. (2020-04-21)[2020-04-21]. <https://tech.sina.com.cn/roll/2020-04-21/doc-iirczymi7446387.shtml>.
- [55] International Energy Agency. The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities report prepared by the IEA for the G20, Japan[R]. Paris: IEA, 2019.
- [56] MARIJA MAISCH 澳大利亚已成功将氢气出口到日本[EB/OL]. (2019-04-01)[2020-05-07]. https://www.xianjichina.com/special/detail_392782.html.
- [57] Energy Research Institute of Academy of Macroeconomic Research, NDRC, China National Renewable Energy Centre. China renewable energy outlook 2019[R]. Beijing: NDRC, 2019.
- [58] 浙江省能源集团有限公司. 国内首个商用液氢工厂签约落户嘉兴港区[EB/OL]. (2019-07-08)[2019-07-16]. <http://www.cec.org.cn/hangyeguangujiao/qiyezixun/2019-07-16/192620.html>.
- [59] 江苏化工网. 中国首个民用液氢项目将如期上线[EB/OL]. (2020-04-09)[2020-04-09]. http://www.jschemnet.cn/news_detail.asp?id=187533.

- [60] 世界能源委员会. 氢能—工业催化剂(加速世界经济在2030年前实现低碳目标[EB/OL]. (2019-03-06)[2019-03-06]. <http://www.nengyuanjie.net/article/24432.html>.
- [61] COAG Energy Council. Australia's national hydrogen strategy[EB/OL]. (2019-11-22)[2020-04-09]. <https://www.nortonrosefulbright.com/en-au/knowledge/publications/208576fc/coag-energy-council-releases-australias-national-hydrogen-strategy>.
- [62] Acil Allen Consulting. Opportunities for Australia from hydrogen exports[R]. Sydney: ARENA, 2018.
- [63] 美国打响了争夺氢能大国第一枪[EB/OL]. (2019-11-12)[2020-05-17]. <https://www.ofweek.com/hydrogen/2019-11/ART-180820-8420-30416774.html>.
- [64] 氢气将成为大宗商品? 标准普尔发布全球首个氢价评估方案[EB/OL]. (2019-12-20)[2019-12-20]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20191220/1030149.shtml>.
- [65] IRENA. Hydrogen: A renewable energy perspective[R]. New York: IRENA, 2019.
- [66] 中国氢能联盟. 中国氢能源及燃料电池产业白皮书(2019版)[R]. 北京: 中国氢能联盟, 2019.

Prospect of high quality development of hydrogen energy industry in China

MENG Xiangyu¹, GU Alun², WU Xinguo¹, ZHOU Jian², LIU Bin², MAO Zongqiang^{1,2*}

1. Tsinghua Innovation Center in Dongguan, Dongguan 523808, China

2. Institute of Nuclear Power and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract China's hydrogen industry is encountering temporary difficulties under the influence of the COVID-19 pandemic, but with the improvement of the situation of pandemic containing, it has ushered in new development opportunities. By reviewing the hydrogen energy development policies issued in China in 2020, it is concluded that the policies mainly focus on in the field of transportation, including research and development of hydrogen fuel cell vehicle technology, key equipment manufacturing and construction of hydrogen refueling station, while rail transit is one of the development focuses of hydrogen fuel cell technology in the future. In addition, hydrogen metallurgy is a new application field. Many metallurgical enterprises are cooperating with advanced countries in demonstration projects, which may promote to realize revolutionary green transformation of China's iron and steel industry. At the same time, green hydrogen coal chemical industry, green hydrogen trade and civil liquid hydrogen are also important directions for the future development. Under the current situation, it is suggested that China should make clear its national development strategy, actively expand new areas of hydrogen energy technology innovation, focus on high-quality hydrogen energy industry, boost China's energy revolution and industrial transformation and upgrading, and play a leading role in the process of hydrogen energy globalization.

Keywords hydrogen industry; transportation; metallurgy; international co-operation ●



(责任编辑 刘志远)