

“双碳”愿景下的能源技术变革

涂云川, 魏子栋*

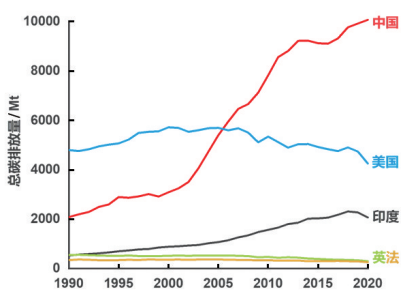
重庆大学化学化工学院, 特种化学电源全国重点实验室, 重庆 400044

摘要 在“双碳”战略的推动下,我国将迎来经济社会绿色低碳转型的关键时期。能源技术的创新将逐步引导原本高能耗、高排放的传统工艺向低能耗、零排放的绿色工艺转型发展。主要梳理了氢能对难脱碳行业绿色低碳转型所发挥的重要媒介作用,介绍了能源基础研究领域所取得的关键性技术突破,并对构建多能融合、清洁低碳、安全高效的新型能源体系作出展望。

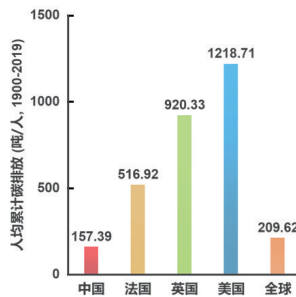
关键词 碳达峰;碳中和;氢能;能源结构;技术变革

2020年9月22日,习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上郑重承诺:我国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。碳达峰碳中和明确了我国经济社会发展全面绿色转型的战略方向和目标要求。当前,我国二氧化碳排放总量较大(约100亿t,图1(a))^[1],其中以煤炭利用为主的能源生产碳排放45亿t,钢铁、

化工、有色、建筑等工业应用碳排放39亿t,而碳汇仅13亿t,导致现有能源结构碳失衡。虽然我国目前是碳排放第一大国,但我国承担了全球30%的制造业,人均累计碳排放(1900—2019年)仅为美国的13%(图1(b))^[2]。而一个国家的发展程度同人均累计碳排放密切相关,我国人均累计碳排放仍低于全球平均水平,这意味着我国实现碳中和具有一定挑战。



(a) 主要国家总碳排放量对比



(b) 主要国家及全球人均累计碳排放量对比

图1 主要国家碳排放量对比

收稿日期:2023-09-10;修回日期:2023-09-24

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB4000300);国家自然科学基金重大项目(22090030);国家自然科学基金项目(52021004)

作者简介:涂云川,助理研究员,研究方向为电催化界面的动态表征技术,电子信箱:yctu@cqu.edu.cn;魏子栋(通信作者),教授,研究方向为新能源材料化学与化工,电子信箱:zdwei@cqu.edu.cn

引用格式:涂云川, 魏子栋. “双碳”愿景下的能源技术变革[J]. 科技导报, 2023, 41(19): 142-148; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.19.016

实现碳达峰碳中和,是党中央经过深思熟虑做出的重大战略决策,事关中华民族永续发展和人类命运共同体构建。从世界各国碳达峰碳中和时间表看,我国相对较晚,我国政府为我国基于化石能源的工业过程争取了难得的发展时间。中国科学院围绕“双碳”战略牵头组织了碳中和重大咨询项目,并提出了能源技术发展路线图(图2)^[9],该路线分为3条主线:(1)化石能源清洁高效利用与耦合替代;(2)可再生能源多能互补与规模应用;(3)低碳化、智能化多能融合。随后,中国科学院制定并实施了“科技支撑碳达峰碳中和战略行动计划”^[10],部署了8项行动、18项重点任务,强调原创性、关键性、颠覆性技术是促进能源结构绿色低碳转型的驱动力。以能源技术革命推动能源产业绿色低碳转型,将引发一场广泛而深刻的经济社会系统性变革。党的十九大确立了我国到2035年跻身创新型国家前列的战略目标,近年来我国不断完善国家创新体系,深入贯彻“消费革命、供给革命、技术革命、体制革命、国际合作”能源安全新战略,加强原创性、引领性科技攻关,在能源技术领域取得了一系列突破性成果。

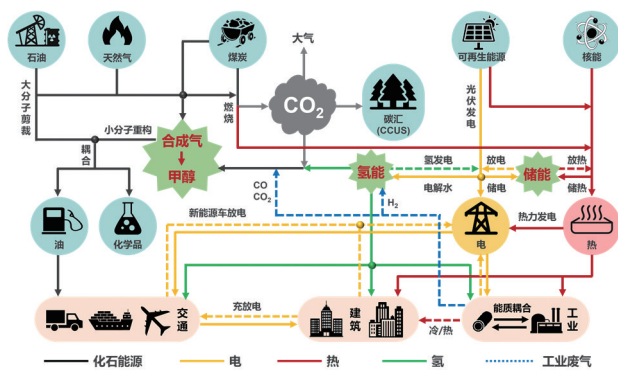


图2 碳中和能源技术发展路线

1 氢能

氢(H_2)是一种来源多样、绿色低碳、应用广泛的二次能源^[9],其战略定位为:氢能是未来国家能源体系的重要组成部分,是对现有能源形式的有益补充,是用能终端实现绿色低碳转型的重要载体,是战略性新兴产业和未来产业重点发展方向^[6]。我国是世界上最大的氢气制造国,氢气年产量约3300

万t,其中96%以上来源于化石能源的化学重整,生产1t氢气(灰氢)将排放7~11t二氧化碳。从制氢原料与成本角度考虑,我国短期将采用化石能源辅以碳捕集、利用与封存(CCUS)技术来制氢(蓝氢),实现低碳化的流程改造,但该技术目前成本较高且CCUS过程仍会耗能。而利用光伏、风能等可再生能源发电进而电解水制氢(绿氢),可实现全流程的无碳化。因此,随着“双碳”进程的推进,绿氢将成为氢能产业的主流。当前,钢铁、水泥、化工、有色等流程工业是能耗和碳排放大户,现有工艺流程体系下碳减排空间较小,是典型的难脱碳行业。行业的深度电气化虽能从一定程度上降低碳排放,但欲达到低碳与零碳要求,则须一系列颠覆性技术推动产业的工业流程再造。而氢能具有能量、物质双重属性,可与电能、热能等多种能源融合,形成多元互补的现代能源供应体系,将成为难脱碳行业实现低碳与零碳发展的重要媒介。我国当前正积极布局氢能产业,已初步掌握氢能制备、燃料电池、储运、加氢等主要技术和生产工艺,面对新形势、新机遇、新挑战,亟需加强顶层设计和统筹谋划,构建制、储、运、用一体化的产业链条,引导氢能产业健康有序发展。

1.1 电解水制氢

目前仅有4%的氢气是通过电解水获取的,与传统化石能源制取的灰氢相比,绿氢的成本是灰氢的3~4倍。但电解水工艺简单、无污染、氢气纯度高且易与可再生能源耦合,因此电解水制氢是未来氢能产业发展的重点。电解水制氢主要分为碱性电解水、质子交换膜(PEM)电解水和固体氧化物电解水3种技术形式^[7]。质子交换膜电解水技术因其抗功率波动以及快速响应等特点,使其与可再生能源耦合更为适合。中国科学院大连化学物理研究所(以下简称“大连化物所”)燃料电池系统科学与工程研究中心通过近30年的技术积累,在高通量膜电极、薄层金属双极板、耐压电解槽等方面不断取得技术性突破,逐步形成了PEM电解水制氢自主知识产权体系。该团队承建的国内首套兆瓦级PEM制氢综合利用站在国家电网安徽公司满功率运行^[8],该系统额定产氢220 Nm³/h。并且该研究团队还于

近期成功研制出额定产氢量 $2\text{ Nm}^3/\text{h}$ 的固体氧化物电解水制氢样机,为未来大规模固体氧化物电解水制氢奠定了技术基础^[9]。此外,深圳大学谢和平院士团队提出一种全新的海水无淡化原位直接电解制氢技术^[10],该团队联合东方电气集团于近日建成了全球首个海上风电直接电解海水制氢示范项目,其额定产氢量 $1.2\text{ Nm}^3/\text{h}$,并以此为基础提出了一个“海水制氢+绿色甲醇一体化”未来产业蓝图^[11]。

1.2 氢燃料电池

氢燃料电池是通过电化学反应将氢能直接转化为电能的发电装置,运行过程仅生成水。氢燃料电池相比其他传统发电方式具有更高的发电效率,可达到50%以上^[12]。以氢燃料电池为动力的新能源车具有高效、长续航里程、零碳排放等优势,被认为是新能源车的重要发展方向^[13]。大连化物所邵志刚团队突破新一代不锈钢双极板及高性能电堆关键技术,并将相关专利许可给安徽明天氢能公司实施,建成了整套金属板电堆自动化生产线,产品成功应用于多款车型^[14]。该团队技术入股的国创氢能贯通双极板冲压、焊接、镀层到电堆装配的全工艺流程,实现了燃料电池单堆功率200 kW级的突破,并且相关电堆、系统零部件全部实现国产化。大连新源动力通过自主研发实现了氢燃料电池在 -40°C 无损冷启动^[15]。该燃料电池采用自增湿、低铂、高性能膜电极匹配超薄金属双极板设计,使得电池更为集成,达到国际领先水平,并基于此技术建成了国内首套具有自主知识产权的万台级金属板氢燃料电池电堆自动化生产线。

1.3 液态阳光

利用太阳能等可再生能源光催化、光电催化、电催化分解水制取绿氢,再耦合二氧化碳加氢转化制备液体燃料,从而将可再生能源储存在液体燃料中,这一人工光合成液体燃料的过程被形象地称为“液态阳光”(图3)^[16]。该“风光氢+绿色化工”一体化过程可同时实现可再生能源转化利用、二氧化碳消纳、液体燃料生产与大规模储能,为解决我国新疆、青海、内蒙古、甘肃等地区“弃光弃风”现象提供了新的策略。此外,液体燃料甲醇又是绿氢载体,通过现有的油气管道或甲醇运输链完成绿色甲醇

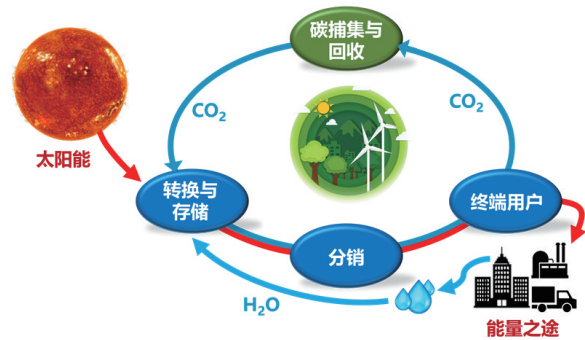


图3 液态阳光

的运输与消纳,将有助于解决氢能储存和运输的安全难题。随着可再生能源发电成本与电解水制氢成本的逐步降低,绿氢的生产成本将大幅降低,结合规模化的CCUS技术生产绿色甲醇,是实现二氧化碳资源化利用、构建人工碳循环的根本途径之一。

1.4 绿氨

氨是全球生产及应用最广泛的化学品之一,80%以上的氨用于生产化肥^[17]。目前全球氨产量约2.53亿t,其中98%是通过化石能源制取,其碳排放占全球总排放量的1.8%。2020年,我国合成氨总产量5117万t,占全球合成氨市场份额的30%,其碳排放量为2.2亿t。氨还是一种理想的储氢载体,相比于液氢,液氨具有更高的体积能量密度;常压下氨气液化温度为 -33.5°C ,而氢气液化温度需要低于 -252.8°C 。此外,氨拥有完善的储存与运输技术体系和基础设施,可实现低成本储运,通过液氨运输1 kg氢的远洋运输的成本为0.1~0.2美元^[18],低于通过管道和轮船的氢运输渠道。2022年2月,国家发改委等四部委联合发文《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022年版)》,要求相关行业优化原料结构和生产技术、淘汰落后低效产能,科学落实重点领域节能降碳升级改造,逐步实现高效、低能耗、低排放、可持续的绿色生产工艺。当前,合成氨工业正逐步向电氢驱动的低碳工艺转型,即利用风光等可再生能源发电,经电解水制取绿氢,再耦合传统哈伯法于高温高压下合成绿氨^[19-20]。在“双碳”背景下,伴随着绿氢产业的蓬勃发展,中国企业正积极投资布局“风光电

氢氨”一体化项目。大安风光制绿氢合成氨一体化示范项目已全面开工,项目总投资 63.32 亿元,将建成风光总装机容量 800 MW,新建 46000 Nm³/h 混合制氢系统(50套 PEM 制氢系统,39套碱性制氢系统),年产绿氢 3.2 万 t、绿氨 18 万 t,预减少碳排放 65 万 t/年^[21]。

1.5 绿氢炼钢

以钢铁冶炼为代表的冶金行业是典型的难脱碳行业,近 75% 的钢铁生产采用高炉(炼铁)—转炉(炼钢)工艺,该长流程钢铁冶炼生产工艺以煤炭为能源、焦炭为还原剂。因此,煤和焦炭是钢铁行业碳排放的主要来源。2020 年,我国粗钢产量 10.65 亿 t,扣电后碳排放 14.7 亿 t。目前钢铁行业实现低碳与零碳排放的主要方法包括:废钢再冶炼、氧气高炉、CO₂ 替代 N₂/Ar 转炉底吹技术、CCUS、氢冶炼、钢化联产等^[22]。其中,氢冶炼是利用氢气替代碳来还原铁矿石,可推进炼钢行业全流程脱碳。氢冶炼工艺主要包括高炉富氢冶炼、氢直接还原铁和氢熔融还原铁 3 种方式。此外,钢铁生产尾气中除 CO₂ 外,还含有大量的 CO 和 H₂,是重要的化工原料气,具备以合成气为纽带,发展钢化联产的基础。目前,甲醇制乙醇技术已进入大规模推广阶段,利用全国钢厂尾气中的合成气经由甲醇制乙醇,将改变从粮食生产制取乙醇的单一途径,同时实现污染尾气到清洁燃料大规模生产。

2 其他能源技术

我国是全球最大的能源生产国和消费国,当前面临着世界能源格局的深度调整,全球正在孕育着新一轮的能源技术革命。2016 年 3 月,国家发展改革委、国家能源局印发《能源技术创新行动计划(2016—2030 年)》,除了前文提及的氢能与燃料电池技术创新之外,行动计划还将化石能源高效利用、先进储能、太阳能高效利用以及碳捕集、利用与封存(CCUS)等共计 15 项技术创新列为能源技术革命的重点任务。近年来,我国能源供应能力显著增强,能源科技创新能力和技术装备水平显著提升,取得了一系列具有原创性的重大科技成果,并

建设了一批具有国际先进水平的重大能源技术示范性工程。

2.1 化石能源高效利用

因我国“富煤、贫油、少气”的资源禀赋特点,以碳—化学与化工为核心的煤化工技术蓬勃发展,关键核心技术处于国际领先水平。近年来,我国在碳—分子催化转化方面已取得一系列令人瞩目的研究成果。在合成气(CO+H₂)转化方面,其主要的科学挑战是产物选择性的调控。因此,合成气转化产物复杂多样,可以是低碳烯烃、芳烃或汽油、柴油等碳氢化合物,也可以是甲醇、乙醇、乙二醇等重要含氧化合物。中科合成油基于高温浆态床费托合成铁基催化剂技术,实现了多个百万吨级的煤经合成气高效制备清洁油品的工业化应用^[23],该技术及其成套工艺在产能、产物选择性、系统能效等核心技术指标均处于国际领先水平。近来,基于 OX-ZEO^[24-25]、接力催化^[26]等催化转化新过程迎来快速发展。在二氧化碳转化方面,国内多个团队已在二氧化碳热催化加氢制甲醇、烯烃或芳烃等方面取得了一些重要进展,并且液态阳光^[27](CO₂ 加氢制甲醇)、CO₂ 加氢制汽油技术^[28]均完成了千吨级工业示范。在甲醇转化方面,第三代甲醇制烯烃(DMTO-III)技术开始规模化应用,形成了 2000 万 t/年煤制烯烃战略产业,实现了煤炭高效利用,保障我国能源安全。

2.2 储能

随着间歇性可再生能源发电产业快速发展,未来电力大规模并网的情况下,电力系统安全稳定运行需要配套相应的大规模储能技术,从而有效解决电力系统电量平衡、可再生能源消纳等问题。除抽水蓄能外,压缩空气储能技术因其容量大、成本低、寿命长、安全环保等特点备受关注。基于中国科学院工程热物理研究所自主研发的核心技术,国际首套百兆瓦级先进压缩空气储能系统在河北张家口顺利并网发电^[29]。该项目总规模为 100 MW/400 MWh,系统额定设计效率达 70%,是目前世界单机规模最大、效率最高的新型压缩空气储能电站。另外,电化学储能产业迎来快速发展期,全球已装机 6625 MW,随着技术与产业迭代,其成本呈快速下

降趋势。大连融科储能突破关键材料制备和高功率密度电堆的设计与集成技术,全球首套百兆瓦级全钒液流储能系统在大连并网发电^[30]。该项目是国家能源局批准建设的首个国家级大型化学储能示范项目,总建设规模为200 MW/800 MWh,是迄今全球功率最大、容量最大的液流电池储能调峰电站。在锂电池方面,我国已是世界第一方阵的引领者,重庆大学锂电及新材料遂宁研究院开发的可充电高性能锂硫电池,其质量比能量和体积比能量是商用锂离子电池的2.5倍^[31]。该项目已完成国内首条锂硫电池中试线的建造与测试,并在电动摩托和中型无人机上实现产品应用(图4)^[31]。



图4 高性能锂硫电池及其产品应用

2.3 人工光合成

在自然界中,绿色植物经光合作用可将二氧化碳和水合成淀粉,但这一过程大约存在60个生化反应,能量利用效率较低且生长周期较长。受光合作用的启发,中科院天津工生所在淀粉人工合成方面取得突破性进展^[32],在国际上首次实现二氧化碳到淀粉的从头合成,打通了光能—电能—化学能的转化路线。该路线淀粉人工合成只需要11个步骤,其速率是玉米淀粉合成速率的8.5倍,使淀粉生产从传统农业种植模式向工业车间生产模式转变成为可能,并为二氧化碳原料合成复杂分子提供了新的技术路线。该所研究人员在人工转化二氧化碳合成己糖方面也取得新突破^[33],基于碳素缩合、异构、脱磷等酶促反应,建立了一种从二氧化碳等

碳一化合物合成己糖的方法,实现了高转化率与构型可控的己糖人工合成。

2.4 太阳能电池

太阳能电池是直接将太阳能转化成电能的装置,根据半导体材料的不同,可分为晶硅太阳能电池和薄膜太阳能电池。晶硅太阳能电池属第一代太阳能电池技术,按材料形态可分为单晶硅电池和多晶硅电池,而应用最为广泛的要属单晶硅电池,其国内市占率超过了90%。中科院上海微系统所的研究团队创造性地提出边缘圆滑处理技术^[34],将硅片边缘的表面和侧面尖锐的“V”字型沟槽处理成平滑的“U”字型沟槽,实现了轻质、柔性单晶硅太阳能电池的批量生产。然而,单晶硅电池的生产能耗巨大,同时产生大量的污染,随着光伏行业的快速发展,业内竞争的不断加剧,清洁高效的新型太阳能电池技术备受关注。钙钛矿太阳能电池就是其中极具发展潜力的新一代半导体光伏发电技术之一。中国科学技术大学徐集贤团队针对钙钛矿电池中长期普遍存在的“钝化-传输”矛盾问题,提出了一种多孔绝缘接触(PIC)的新型结构和突破方案^[35],实现了p-i-n反式结构器件稳态认证效率的世界记录(效率达到25.5%),并在多种基底和钙钛矿组分中展现出普适性。另外,西湖大学王睿团队及其合作者发现一种新的甲脒铅碘钙钛矿取向成核方法,即加入添加剂“戊脒”,使得在室温下就能形成更高结晶度、更低缺陷的黑相甲脒铅碘基钙钛矿^[36]。

3 结论与展望

产业转型存在挑战。当前,难脱碳行业减碳低碳化以及电氢替代进程所需的新工艺流程开发投资成本巨大,会增加企业的额外成本。在没有专门的政策支持或对绿色工艺有明确要求的情况下,企业因较大的投资负担会导致其绿色低碳转型的动力有限。因此,需要分行业统筹谋划,设计特定的碳中和技术路线,并出台有效的激励/约束制度,从而协调该行业共同推进绿色低碳转型。另外,产业转型决不能仅仅依靠政府财政补贴,必须坚持市场

为导向,鼓励竞争。政府应加强顶层设计,加大对科技研发、产业示范的投入力度,加快相关产业技术迭代速度,推动产业结构绿色转型。

实现“双碳”目标急不得,也等不得。我国当前必须面对经济要发展、能源要增加、排放要降低的现实问题,我国资源禀赋是“富煤、贫油、少气”,煤等化石能源在我国能源结构中至关重要。清洁可再生能源还需要技术创新、成本控制、市场拓展等诸多因素协同推进,短时间盲目调整能源结构将不利于我国能源安全,影响国计民生。应立足我国国情,科学有序推进能源体系变革。“双碳”目标体现了我国在全球气候变化中的大国担当,是推动构建人类命运共同体的重大举措。“双碳”进程是风险挑战与战略机遇并存、技术为王的关键时期,谁的技术更为先进,谁将在国际竞争中取得优势。急不得,意味着在相当长的一段时期内,我国仍须坚定不移地依靠化石燃料发展经济;等不得,意味着应积极谋划与布局,抢占技术高地获得产业主导权,助力中华民族伟大复兴与永续发展。

三端发力推进能源结构转型。从能源发电、能源消费、人为固碳三端协同发力,推动我国新型能源结构的大转型,最终实现“双碳”目标。在能源发电方面,我国风光等可再生能源丰富,潜力巨大。随着太阳能、风能等领域技术和产业迭代,发电成本将逐步降低。2021年,我国陆上风电装机3.02亿kW(可开发量99亿kW);光伏发电装机3.06亿kW(可开发量1361亿kW)。在能源消费方面,通过工艺流程再造,稳步推进高耗能行业由传统热碳驱动向电氢驱动的低碳技术工艺变革。在人为固碳方面,需大力发展土壤固碳、微藻生产、矿物碳化、二氧化碳转化、生物能源碳捕捉与储存等固碳增汇技术。

颠覆性技术亟需突破。能源体系绿色低碳转型需要有颠覆性、变革性技术支撑。要特别关注对深度脱碳可发挥关键作用的战略性技术,当前这些技术往往还不太成熟、成本较高,需对其进行全面系统性评估并加以政策扶持,加快研发和产业化进程。在煤炭无害化开采、天然气水合物开发、先进核能、化石能源优化利用、新型能源、现代电网、能

源互联网以及生物质、土壤、海洋固碳增汇等能源技术领域仍有诸多革命性、颠覆性技术亟需突破。

参考文献(References)

- [1] IEA. Total CO₂ emissions, Countries and regions 1990–2020[EB/OL]. [2023–09–10]. <https://www.iea.org/countries>.
- [2] 中国碳中和框架路线图研究[EB/OL]. (2021–07–11) [2023–09–10]. <https://mp.weixin.qq.com/s/lpsdTGp1Btk1-nkUBph2o0g>.
- [3] 龚剑明, 余和军, 段晓男, 等. 发挥学部智库咨询作用, 服务国家“双碳”战略需求—中国科学院学部“碳中和”重大咨询项目案例[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(7): 1050–1059.
- [4] 中国科学院. 科技支撑“双碳”战略行动计划[EB/OL]. (2022–03–02) [2023–09–10]. https://www.cas.cn/yw/2022-03/t20220302_24826727.shtml.
- [5] Turner J A. Sustainable hydrogen production[J]. Science, 2004, 305(5686): 972–974.
- [6] 国家发展改革委, 国家能源局. 《氢能产业发展中长期规划(2021–2035年)》[Z]. 2022–03.
- [7] IEA. Global hydrogen review 2021[R]. Paris: IEA, 2021.
- [8] 新华社安徽频道. 国内首座兆瓦级氢综合利用示范工程满功率 PEM 电解制氢成功[EB/OL]. (2021–10–08) [2023–09–10]. <https://xhpfmapi.xinhua.com/vh512/share/10304818?channel=wxin>.
- [9] 中国科学院大连化学物理研究所燃料电池研究部. 我所研制出固体氧化物电解池制氢样机[EB/OL]. (2023–06–06) [2023–09–10]. <http://www.fuelcell.dicp.ac.cn/index.jsp>.
- [10] Xie H, Zhao Z, Liu T, et al. A membrane-based seawater electrolyser for hydrogen generation[J]. Nature, 2022, 612(7941): 673–678.
- [11] 全球首个海上风电无淡化海水原位直接电解制氢原理技术装备在福建海试成功[EB/OL]. (2023–06–02) [2023–09–10]. <https://www.szu.edu.cn/info/1161/17871.htm>.
- [12] Jiao K, Xuan J, Du Q, et al. Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells[J]. Nature, 2021, 595(7867): 361–369.
- [13] Debe M K. Electrocatalyst approaches and challenges for automotive fuel cells[J]. Nature, 2012, 486(7401): 43–51.
- [14] 中科院大连化物所研发的氢燃料电池投入应用[EB/OL]. (2020–01–01) [2023–09–10]. <https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2020/2021/434405.shtml>.
- [15] 零下 40°C 无损冷启动! 氢燃料电池探索绿色未来[EB/OL]. (2023–08–09) [2023–09–10]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1773741571443464058&wfr=spider&for=>

- pc.
- [16] Shih C F, Zhang T, Li J, et al. Powering the future with liquid sunshine[J]. *Joule*, 2018, 2(10): 1925–1949.
- [17] Erisman J W, Sutton M A, Galloway J, et al. How a century of ammonia synthesis changed the world[J]. *Nature Geoscience*, 2008, 1(10): 636–639.
- [18] 毕马威中国. 固碳、储氢、航运燃料、掺混发电: 绿氢行业概览与展望[Z]. 2022–12.
- [19] MacFarlane D R, Cherepanov P V, Choi J, et al. A roadmap to the ammonia economy[J]. *Joule*, 2020, 4(6): 1186–1205.
- [20] Soloveichik G. Electrochemical synthesis of ammonia as a potential alternative to the Haber–Bosch process[J]. *Nature Catalysis*, 2019, 2(5): 377–380.
- [21] 大安风光制绿氢合成氨一体化示范项目如火如荼建设[EB/OL]. (2023–07–28) [2023–09–10]. http://www.daan.gov.cn/daxw/ztbd/202307/t20230728_20967288.html.
- [22] 孟翔宇, 陈铭韵, 顾阿伦, 等. “双碳”目标下中国氢能发展战略[J]. *天然气工业*, 2022, 42(4): 156–179.
- [23] 我公司“高温浆态床费托合成催化剂及其工业应用技术”获中国石油和化工行业技术发明奖一等奖[EB/OL]. (2019–12–16) [2023–09–10]. http://www.synfuelschina.com.cn/content/details_17_742.html.
- [24] Jiao F, Bai B, Li G, et al. Disentangling the activity–selectivity trade–off in catalytic conversion of syngas to light olefins[J]. *Science*, 2023, 380(6646): 727–730.
- [25] Jiao F, Li J, Pan X, et al. Selective conversion of syngas to light olefins[J]. *Science*, 2016, 351(6277): 1065–1068.
- [26] Zhou W, Kang J, Cheng K, et al. Direct conversion of syngas into methyl acetate, ethanol, and ethylene by relay catalysis via the intermediate dimethyl ether[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(37): 12012–12016.
- [27] 我所千吨级“液态太阳燃料合成示范项目”通过科技成果鉴定[EB/OL]. (2020–10–15) [2023–09–10]. http://www.dicp.cas.cn/xwdt/kyjz/202010/t20201015_25717063.html.
- [28] 全球首套千吨级二氧化碳加氢制汽油示范装置开车成功并通过科技成果评价[EB/OL]. (2022–03–04) [2023–09–10]. http://www.dicp.cas.cn/xwdt/kyjz/202203/t20220304_26385450.html.
- [29] 国际首套百兆瓦先进压缩空气储能国家示范项目顺利并网[EB/OL]. (2022–01–02) [2023–09–10]. http://www.iet.cas.cn/news/photo/202201/t20220102_26332457.html.
- [30] 全球最大液流电池储能电站实现并网和电池充电[EB/OL]. (2022–06–06) [2023–09–10]. https://www.dl.gov.cn/art/2022/2026/2016/art_1185_2023796.html.
- [31] 重庆大学研发新款锂硫电池[EB/OL]. (2023–09–06) [2023–09–10]. <http://cq.people.com.cn/n2/2023/0906/c401602-40560540.html>.
- [32] Cai T, Sun H, Qiao J, et al. Cell–free chemoenzymatic starch synthesis from carbon dioxide[J]. *Science*, 2021, 373(6562): 1523–1527.
- [33] Yang J, Song W, Cai T, et al. De novo artificial synthesis of hexoses from carbon dioxide[J]. *Science Bulletin*, 2023, doi: 10.1016/j.scib.2023.1008.1023.
- [34] Liu W Z, Liu Y J, Yang Z Q, et al. Flexible solar cells based on foldable silicon wafers with blunted edges[J]. *Nature*, 2023, 617(7962): 717–723.
- [35] Peng W, Mao K, Cai F, et al. Reducing nonradiative recombination in perovskite solar cells with a porous insulator contact[J]. *Science*, 2023, 379(6633): 683–690.
- [36] Shi P, Ding Y, Ding B, et al. Oriented nucleation in formamidinium perovskite for photovoltaics[J]. *Nature*, 2023, 620(7973): 323–327.

Energy technology revolution under "dual carbon" vision

TU Yunchuan, WEI Zidong*

State Key Laboratory of Advanced Chemical Power Sources, School of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract With the promotion of "dual carbon" strategy, China is ushering in a critical period of the socio-economic green transformation. Gradual changes from traditional processes with high energy consumption and emission to green processes with low energy consumption and zero emission are driven by the innovation of energy technology. This paper mainly reviews the media role of hydrogen energy in the green and low-carbon transformations of the hard-to-decarbonize industries and introduces the key technological breakthroughs in the energy field. Finally, prospects for the construction of a multi-energy integration, low-carbon, safe and efficient energy system are presented.

Keywords carbon peaking; carbon neutrality; hydrogen energy; energy structure; technological change ●



(责任编辑 祝叶华)