



面向“双碳”目标的能源转化利用领域前沿交叉战略研究

姜培学^{1*}, 金红光²

1. 热科学与动力工程教育部重点实验室, 清华大学能源与动力工程系, 北京 100084;

2. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190

* 联系人, E-mail: jiangpx@mail.tsinghua.edu.cn

能源转化利用领域碳减排是实现我国碳达峰、碳中和(“双碳”目标)的关键。同时,“双碳”目标将倒逼我国能源转化利用领域碳减排科技创新,推动发展高效、低碳、灵活的化石能源转化利用理论与技术,逐步构建以风能、太阳能等绿色能源为主体并结合储能技术的新型能源和电力系统,推动能源转化利用技术与系统的智能化与智慧化发展,发展包括低碳/零碳技术、负碳技术、碳通量智联技术等在内的完整碳中和技术体系,创新能源转化利用方法、催生多学科交叉增长点,促使能源转化利用技术发展模式发生变革,加快实现高水平科技自立自强,为“双碳”目标的达成提供基础性、战略性支撑。

1 面向“双碳”目标能源转化利用

1.1 科学意义

构建清洁低碳安全高效的能源转化与利用系统实现“双碳”目标是人类社会面临的全球性重大科学课题,单一学科知识和技术已不满足解决变革性科学问题的需求,开展学科前沿交叉研究和新的科研范式是实现面向碳中和的能源变革和未来能源科技快速发展的重要突破口和关键途径。进一步增强多学科交叉融合的意识,积极探索能源与多学科交叉融合创新的有效途径,可为能源创新发展提供无限源泉,引发全球能源变革。

1.2 “双碳”目标与能源转型战略价值

1.2.1 积极应对气候变化的必然选择

我国CO₂排放总量大,据国际能源署估算,2023年我国CO₂排放总量约为126亿吨,年增幅达4.7%,占全球总量的33.7%。其中,88.8%的CO₂排放来自能源直接燃烧,年增幅为5.2%。CO₂等温室气体大量排放导致极端天气频发,引起的暴雨、洪涝和风电灾害造成大量经济损失,已居我国自然灾害之首。同时,气候变化显著影响食品供应安全,例如对水稻、小麦、大豆和大麦等主食可能带来15%~22%的产量降低^[1]。



姜培学 中国科学院院士,工程热物理专家。现任清华大学党委常委、副校长,清华大学国家卓越工程师学院院长,中国节能协会理事长,中国学位与研究生教育学会副会长,第九届国务院学位委员会委员,中国工程热物理学会常务理事,热科学与动力工程教育部重点实验室主任,二氧化碳资源利用与减排技术北京市重点实验室主任。长期从事低碳能源与空天动力领域中极端条件热质传递研究。研究成果应用于航天航空、可再生能源、CO₂利用与地质封存等领域,对相关技术领域的发展起到了重要作用。

气候变化推动各国采取减碳、降碳行动,截至2024年5月,全球已有超过150个国家和地区提出碳中和目标。

1.2.2 维护我国能源安全的必由之路

我国能源消费总量巨大,2023年达到57.2亿吨标准煤,约占世界能源消费总量的26%。同时,我国人均能源消费水平偏低,仅为经济合作与发展组织成员国的65%,不足美国的40%,能源需求增长压力大,我国经济发展仍依赖能源消费^[2]。另一方面,我国能源消费结构仍以煤等化石能源为主。自然资源部发布的《中国矿产资源报告(2023)》显示,2023年化石能源消费占比超过80%,且对外依存度居高不下。在我国能源消费和进口量持续增长的预期下,降低能源整体对外依存度、维护国家能源安全势在必行。

尽管我国传统化石能源储量规模总量不少,但由于消费巨大,不能仅依靠化石能源保障能源独立^[3]。我国风能、太阳能等可再生能源储量具有优势,可装机容量分别为约10亿千瓦、156亿千瓦,且能源来源可控、不受外部干扰。但可再生能源具有分散性、间歇性,不完全适用于大容量、高参数、集中式发电的发展模式,还需攻克关键难点才能支撑国

家能源安全。

立足我国能源资源禀赋和消费结构特点,结合“双碳”目标发展适用于我国中长期经济发展规划的能源转化利用技术是保障国家能源安全和人民生活安定幸福的重要因素。

1.2.3 适应复杂国际贸易形势的关键选择

近期以来,国际碳约束形势日趋严峻。2022年12月13日,欧洲理事会通过关于欧盟碳关税的相关决议,对未采取减排措施或减排力度不足的国家向欧盟出口的产品征收碳关税。2023年,欧盟委员会主席冯德莱恩宣布对中国电动汽车发起反补贴调查。我国主动提出“双碳”目标并努力付诸实施,是消除我国出口产品被征收碳关税的潜在风险、保持国际竞争优势的重要抓手之一。

自冷战结束后,传统能源产业主要受西方国家把持,西方资本任意利用其技术优势对资源富集国家和地区开展经济殖民。“双碳”目标驱动下,能源产业投资迎来新变局,新能源行业产业空间迅速扩大^[4]。我国新能源汽车出口量屡创新高,2023年增幅达到77.2%,产销量占全球比重超过60%。“双碳”目标带动下的能源转化利用领域转型将加快技术创新、加速产业升级,引导我国进一步转换世界分工角色。

1.2.4 驱动我国可持续发展的重要动力

根据2023年国家统计局数据,我国以年均3%的能源消费增速支撑了近10年平均6.6%的经济增长。在“双碳”目标下,我国经济发展必将从资源依赖型转向技术依赖型,加速能源结构绿色低碳转型。低碳/零碳能源技术成为世界各国竞争的焦点,欧盟、美国和日本等各经济体相继推出净零排放转型政策和技术路线图,预计将推动低碳/零碳能源技术成本大幅降低。2021年9月,《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中提出到2025、2030和2060年,我国非化石能源占能源消费比重将分别达到20%、25%和80%的目标,风、光、生物质等可再生能源及核能将成为新型能源体系发展的重点。根据国际能源署Global Hydrogen Review 2021报告,我国光伏发电、绿氢生产成本分别较美国和欧盟低20%~30%和30%~50%,成熟经济的低碳/零碳能源技术将有望支撑我国经济高质量发展。

绿水青山才是金山银山,能源领域的减污降碳协同增效是促进经济社会发展全面绿色转型的总抓手。硫、氮氧化物等大气污染物伴随着能源活动而产生,随着《大气污染防治行动计划》、“蓝天保卫战”和“双碳”目标的相继提出与实施,粗放型能源消费逐渐减少,我国主要大气污染物排放量的攀升势头逐步被遏制^[5]。在“双碳”目标背景下推动碳污协同治理,促进交通、建筑等领域电气化,我国绝大部分地区PM_{2.5}年均浓度将降低到WHO指导值(10 μg/m³)以下。以能源消费为主体降低CO₂等温室气体排放有利于缓解气候变化、推动产业转型升级、推进生态文明和美丽中国建设,是保障人民幸福和国家可持续发展的长久之策。

1.3 能源转型的发展规律和特点

世界各国能源转型发展先后经历了“煤炭-石油天然气-可再生”时代,我国也沿着该规律继续发展^[6]。美国侧重于能源独立,目前能源对外依存度低于4%。欧盟着重低碳发展,推进“去煤化”,发展可再生能源,2020年非化石能源占比28.8%。日本奉行“节能优先”政策,2020年能源对外依存度96%,但单位GDP能耗仅为世界平均水平的54%。与其他国家不同,我国能源转型窗口期短。从碳达峰到碳中和,全球平均用时53年,我国仅有30年时间。因此,我国能源转型总体发展规律和特点体现为:(1) 能源生产加速向清洁低碳转型;(2) 能源消费方式更加灵活多样;(3) 能源传输系统根本性变革重塑。

2 国内外发展现状和态势

2.1 化石能源低碳转化利用

在我国能源消费结构中,化石能源占比和油气对外依存度居高不下。国家统计局数据显示,2023年我国煤炭消费31.6亿吨标准煤、占能源消费总量55.3%,原油消费总量7.7亿吨、占能源消费总量18.4%、对外依存度约72.9%,天然气消费总量约3908亿立方米、占能源消费总量8.6%、对外依存度40.5%。我国的能源转型工作任重道远,仍需兼顾我国多煤少气的资源禀赋,逐步提升传统化石能源和新能源在电力系统中的优化组合,同时加强低碳零碳负碳技术的发展,科学有序做好化石能源主导向可再生能源主导的过渡,实质性推进实现碳达峰碳中和目标^[7]。

在煤炭利用方面,我国现有11亿千瓦煤电机组大多处于投产初期、中期,具有强有力的保电力、保电量、保调节的作用,需要充分发挥现有发电机组作用。我国预计在2030年煤电装机达14亿千瓦峰值,灵活调峰能力大幅提升,污染物排放大幅度降低,达到污染物超低排放限值的煤电机组约10.3亿千瓦,约占全国煤电总装机容量的93.0%。另外,我国的超高参数超临界发电、煤气化联合循环发电等化石能源清洁高效利用技术在国际上具有领先优势。根据中国电力企业联合会发布的《中国电力行业年度发展报告2023》,2022年全国6000 kW及以上火电厂供电标准煤耗300.7 g/kWh,比2021年降低1.0 g/kWh。在煤炭消费结构中,非电力部门用煤下降、电力部门用煤占比提高,有利于推动煤炭减污降碳和更清洁高效利用。国家能源集团技术经济研究院发布的《中国煤炭、电力和碳市场年度报告(2022-2023年)》显示,2023年中国煤炭消费量为约48亿吨,其中电力、钢铁、化工和建材4个行业用煤合计41亿吨,占全社会煤炭消费量的比重为85%左右,分散式利用的“散煤”占煤炭消费的比重逐渐减少。2023年全社会新增煤炭消费量中,发电用煤占到70%以上,更多的煤炭进入到发电行业,使煤炭的消费模式变得相对清洁和高效。

CO₂捕集利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)是化石能源低碳利用的关键技术,但我国现有技术成本高、规模小,与国外差距较大^[8]。低能耗CO₂捕集技术通过气-固循环反应耦合化学链燃烧的方式,形成CO₂和H₂O两种生成物,实现低能耗CO₂分离捕集,德国、美国、日本和我国已开展小规模实验。CO₂地质封存方面,咸水层封存容量大、可实施性强,国际已达到商业运行水平,例如澳大利亚Gorgon项目最高设计封存能力达400万吨/年。国内已注入项目仅有国家能源投资集团牵头于鄂尔多斯盆地开展的试点项目,封存能力30万吨/年且已关停。

2.2 可再生能源高效转化利用

我国可再生能源发展迅速,但占比仍然较低。2023年我国累计风电装机4.4亿千瓦,占总装机容量的15.1%;发电量8858.7亿千瓦时,占总发电量的9.4%。同年我国太阳能装机6.1亿千瓦,占总装机容量的20.9%;发电量5841.5亿千瓦时,占总发电量的6.2%。同期英国、德国等国的风光发电量占比均超过40%,成为第一大电源。根据国务院2021年发布的《2030年前碳达峰行动方案》,我国将全面推进风电、光电大规模开发和高质量发展,预计2030年风能、太阳能发电总装机容量将达到12亿千瓦以上,我国西部和北部地区将成为重点建设区域。在上游产业支撑方面,我国晶体硅产业整体发展势头良好,但导电银浆等部分关键材料研发相对落后,仍以美国技术为主。我国6 MW以上风电机组核心零部件国产化率较低,其中主轴承的16%、海上风机变压器的100%市场由国外垄断,仍需要加大大规模风力发电设备关键技术攻关。相较于国外风电场功率预测的研究,国内起步较晚,仍缺少成熟的风电场功率预测技术^[9]。

2.3 绿色氢电与长时储能

近年来世界主要国家均已将氢能上升至国家能源战略高度,美国、欧洲和日本等发达国家和地区纷纷制定氢能发展规划,大力推动氢能相关技术和产业发展。2023年,我国氢能产量达3550万吨,居世界首位。2022年国家印发《氢能产业发展中长期规划(2021-2035年)》,明确提出构建清洁化、低碳化、低成本的多元制氢体系,重点发展可再生能源制氢,严格控制化石能源制氢,预计2030年氢能可在终端能源消费中占比达5%,2050年可达10%。目前,绿氢成本约40元/kg,与商业期望阈值18元/kg仍有较大差距。

大规模储能是支撑可再生能源大规模接入、源-网-荷-储柔性网系统变革的关键技术。由戴德梁行和中国电池工业协会储能分会联合发布的《中国储能产业集群发展白皮书》显示,2023年我国新型储能已投运装机量超300亿瓦时,提前实现“十四五”基本规模目标,且发展迅猛。储能产业逐渐从研发示范向商业化发展,新型储能将面临全面规模化、市场化的发展趋势。电化学和物理储能为现阶段主要技术路

线,抽水蓄能在各类储能装机量的占比最高,但未来增长空间有限。锂离子电池在电化学储能中占据主导地位,钠硫电池、液流电池等仍在快速发展中。另外,热储能因能量密度高、转化效率高和应用成本低,也逐渐成为未来储能的重要组成部分。但目前仍存在供需匹配程度不够的问题,新能源配储、火电配储、电网储能、用户储能的等效利用系数远低于40%。储能成本较高、储热与压缩空气储能等技术成本约为1000元/千瓦时,尚未达到商业化水平^[10]。

2.4 多能互补与能源互联网

“大规模—超高压—高集中—远距离跨区输送”和“分布式-智能微网-多能互补-需求侧消纳”两种不同模式有机结合是未来能源系统的发展方向^[11]。美国著名学者杰里米·里夫金认为^[12],未来能源体系的特征是能源生产民主化、能源分配互联网化,新能源和互联网之间结合产生的“能源互联网”为第三次工业革命的标志。2022年国内已建成88个分布式能源项目,发电装机总容量为2184 MW。通过能级匹配的多能源介质耦合利用、余能直接转化与品位提升等技术实现工业流程再造,逐步缩小与国外差距。

从2010年到2023年,我国电网规模增长约1倍,是目前世界上规模最大的电网。中国电力企业联合会发布的《中国电力行业年度发展报告2024》显示,截至2023年底全国完成跨区输电能力超过1.8亿千瓦、与去年持平,全国完成跨区输送电量8497亿千瓦时、同比增长9.7%。但我国在电网构建领域缺少气电等灵活电源,对新型电力系统形态构建更加迫切,需要变革电源并网方式、形成柔性电网结构,该挑战也属于国际空白的、世界性难题。未来跨省跨区电力流将逐渐增大,潮流由单向变为双向,柔性调节能力增强,以充分发挥电网的间接储能作用^[13]。

在油气管网方面,我国油气管网规模已超过18万公里(天然气11.59万公里、原油3.18万公里、成品油3.19万公里),相较2010年增加1倍。我国需要充分利用管网实现西部能源基地、东部海上的天然气、氢气、低碳液态能源(液氨、甲醇)等多介质互联互通以及与电网融合传输。我国正加强“西气东输”“南气北上”“东北入关”等油气管网建设,构建天然气“全国一张网”,消除输气瓶颈、强化资源灵活调配和互供互保能力,提高设施资产利用效率。实现西部能源基地、东部海上电能、天然气、氢气、液态储氢载体(液氨、甲醇)等多种介质融合输送和能源互联互通,以及超临界/密相CO₂管道输送,提高系统整体效率。

随着多类型的能源系统、能源负载和能源储存装置分布式发展,基于物联网技术将供电侧和用户侧能源信息融合,建立能源互联网将使得决策更加高效、智慧、鲁棒。近10年来,我国推动建设了首批能源互联网示范项目,并逐渐向多元化、规模化发展。由清华大学能源互联网创新研究院发布的《2024年国家能源互联网发展年度报告》显示,

2014~2024年能源互联网企业由3000余家增长至32万余家,年复合增长率约50%。截至2023年底,我国能源互联网上市企业数量超过1600家,总市值超25万亿元。能源互联网与数字孪生等技术交叉融合将是未来的主要发展模式,需要优化物理系统的测量感知、实现物理实体与数字虚拟空间的同步映射。

2.5 终端用能提效减排

我国的能源消费集中在工业、居民生活、交通运输等领域。国务院2020年发布的《新时代的中国能源发展》白皮书显示,我国工业终端用能接近18亿吨标煤,占总能耗40%左右,远高于发达国家水平。我国加工制造业占比大,2023年生产了全球54%钢铁、60%铝、70%水泥和32.7%汽车,导致我国单位GDP能耗高至0.48吨标准煤/万元,约为经济合作与发展组织成员国3倍、世界平均水平1.44倍,节能降耗难度大。预计2035年,我国工业终端用能为18.89亿吨标煤,占总能耗36%。预计到2060年,社会用电量增至15.7万亿千瓦时,电能终端用能占比将从目前27%提高到2060年接近70%。随着电能替代加速,交通、锅炉、制冷等领域原来大量使用的煤炭、油气等能源,将逐步由绿色的电能所替代^[14]。热能是终端用能及能耗的主要形式之一,我国工业能耗50%以上以废气、废水的形式转化为余热,其中仅30%被重新利用。热泵作为主动热回收装置,可借助外部能源提升余热品位,具有重要价值。在未来电气化供热的趋势下,热泵也进一步成为重要载体,应该继续优化热泵的循环工质和系统构型,对热泵全生命周期进行评价^[15]。在我国实现“双碳”目标的初期阶段,仍然需要强化终端节能与余能回收,并开展针对性规划。

2.6 能源转化利用数智化

目前我国人工智能(artificial intelligence, AI)、5G、物联网等技术高速发展,将打通冷、热、电、氢、气等多种能源联接界面,并通过数字化赋能,实现能源系统整体效能大幅提升。2022年,包括图灵奖得主Yoshua Bengio在内的顶尖科学家发文^[16],指出了机器学习对碳中和的重要性。2021年,人工智能全球合作伙伴组织(Global Partnership on Artificial Intelligence, GPAI)建议各国政府关注AI对加速碳中和实现的潜力并予以支持。2021年世界互联网大会乌镇峰会上,提出人工智能赋能绿色计算大有可为。AI技术正在被运用到各行各业,包括电网负载预测、航班规划、碳排放量的精确评估、数据中心的节能等。目前我国已利用AIoT技术监控碳排放,优化智能机组控制、感知和预测电网负载,进行智能调峰和调度均衡,对网线故障进行检测和预警,以及对用电系统进行节能优化等。随着可再生能源占比逐年提高,发展多能源系统人工智能的需求愈发迫切。需要将多能源系统的生产和消费过程与大数据理念结合,整合不同时空尺度、各类采集范围的能源数据,建立标准化能源系统多源数据、挖掘

用户用能特性,提高系统运行效率。能源系统的智能硬件和智慧软件面临着从单一部件向多智能设备的集成化、协同化发展需求,进而满足包括系统调试、运行和控制在内的全生命周期运维智能。

3 能源转化利用方向前沿交叉领域的关键科学问题

3.1 化石能源低碳转化利用

我国化石能源低碳转化利用领域的发展目标包括:(1)提高机组发电效率的新循环、新工质、新材料及工艺开发;(2)满足可再生能源消纳,提高超低负荷工况安全性、经济性和环保性;(3)部分燃用特殊燃料的机组提高效率、降低污染物排放。

能效、清洁与低碳问题本质在于能量利用与组分调控,能量转化和污染物/碳组分的生成演化之间存在着内在关联,这种内在关联为同时解决能效、清洁与低碳问题提供了突破口。针对燃料转化源头突破口,构建能源低碳转化能质能势理论与梯级利用方法,包括探索新的燃料转化或反应路径,将燃料化学能的一步粗放释放转化为逐级有序释放,燃料化学能梯级利用;探索组分解耦与定向迁移方法,利用燃料化学能驱动碳组分富集,降低CO₂分离能耗。以实现化石能源转化利用过程的多目标有机统一为发展思路,面临的重要研究方向和关键科学问题阐述如下。

重要研究方向包括:(1)燃料源头脱碳。在CO₂生成源头富集含碳组分,降低CO₂的分离能耗,即燃料源头脱碳的高碳能源低碳利用方向。代表性技术包括采用煤制清洁燃料过程中捕集CO₂、煤炭分级气化的低碳发电系统或氢/电联产系统、替代燃料合成后脱碳的醇/电联产技术以及反应/分离耦合的源头脱碳系统等。(2)变革性燃烧方式。开拓非空气燃烧(全氧燃烧、富氧燃烧等)和无火焰燃烧等变革性燃烧方式。(3)变革性煤气化方式。通过热解、焦化和气化等过程实现煤的分步转化,达到组分对口、分级转化,即燃料化学能有序转化、组分定向调控的目标。(4)规模灵活/多能互补发电。大幅提升燃煤机组运行灵活性,支撑高比例可再生能源并网消纳。(5)大规模低能耗碳捕集利用与封存。CCUS技术提高规模、降低能耗与成本,实现工业/能源转化脱碳。

关键科学问题包括:(1)化石能源能质转化原理。燃料化学能的转化原理;“能量互补、能势耦合”多能协同转化原理;能源低碳转化新原理、新方法。(2)化石能源碳氢转化原理与解耦调控方法。碳氢解耦熵增最小原理;碳氢解耦理论与梯级利用方法;能质与碳氢协同转化理论与方法。(3)化石能源高效清洁利用方法。化石燃料高效低排放燃烧技术;化石燃料高效催化转化机理;天然气耦合可再生资源动力循环原理;能碳双约束下的终端用能系统设计、优化与控制。(4)低能耗碳捕集原理与碳组分定向转化方法。碳捕集最小化原理;碳

流监测与输运机理; 碳组分定向迁移的低碳转化原理. (5) 大规模CO₂地质封存的设计体系和实时监测-预警-决策系统. 复杂储层储量预测与评估; 储层物性测量与增储; 长期安全封存机理与大面积储层监测.

前沿交叉领域包括: (1) 煤炭、天然气等化石能源变革性转化利用涉及动力工程及工程热物理与原子分子物理、表界面物理化学、化学工程、材料科学、电气工程等领域交叉. 例如, 研究煤粉低碳清洁燃烧技术基于原子/分子尺度燃烧反应原理、涉及气固表面反应动力机制, 并与高性能材料表征技术结合, 形成跨尺度研究体系. (2) 规模灵活/多源互补燃煤发电系统涉及动力工程及工程热物理与系统集成、智能感知与预测、运筹学等领域交叉. 例如, 面向未来能源系统的灵活燃煤发电机组需要通过实时调度规划满足波动性可再生能源消纳、海量用户需求. (3) 大规模低能耗碳捕集利用与封存涉及动力工程及工程热物理与材料化学与工程、地质/地球科学、石油工程、计算机科学与工程、人工智能等领域交叉. 例如, 高效固体吸附材料研发需要理解吸附气体与多孔材料表面物理作用机制, 大规模CO₂地质封存涉及地球科学、石油工程, 长期监测需要大规模并行计算、人工智能模式识别.

3.2 可再生能源高效转化利用

我国可再生能源高效转化利用领域的发展目标包括: (1) 克服太阳能波动性、间歇性特点, 提升全波段转化利用率; (2) 突破大型风电叶片设计、高效抗台风发电机组以及智慧风电场技术; (3) 协同解决生物质“三多一复杂”(原料种类多、转化技术多、转化产物多、能源转化过程与污染物控制系统复杂)的特性.

以瞄准重点技术环节背后的关键科学问题、提出变革性解决方案为发展思路, 面临的重要研究方向和关键科学问题阐述如下.

重要研究方向包括: (1) 超临界太阳能热发电技术. 充分利用超临界工质低黏性、高密度等特性, 实现高效率、低成本、高可靠太阳能光热发电, 推动太阳能热发电技术向第四代发展. (2) 新型光伏材料与技术. 通过量子点活性层提高电池对光子的利用率, 以及多种光伏材料叠加提升光吸收范围, 将电池理论效率提升到60%以上. (3) 大型风电叶片与风电场优化设计. 揭示风能利用过程中多尺度多物理耦合作用机理, 提升风电设备运行效率、可靠性, 提高风电机组并网率、利用率. (4) 生物质能高效转化利用技术. 揭示生物质高值化利用的多场耦合能质传递与高效转化协同机制, 发挥生物质能转化利用形式灵活多样的特性, 与未来能源系统互补.

关键科学问题包括: (1) 新型可再生能源热力系统理论. 超临界CO₂布雷顿循环与太阳能热利用系统耦合和优化原理; 高效中低温地热发电传热传质机理及新型耦合发电系统构建原理; 可再生能源热力系统的高效集成与智能耦合. (2)

太阳能高效收集与转化方法. 不同温度品位匹配的相变储热材料与储/放热调控机制; 先进高效的太阳能动力循环装置设计、制造及系统优化方法; 太阳能热化学反应过程机理; 太阳能全光谱梯级利用原理. (3) 风能高质量利用过程多尺度多物理耦合作用机理. 超大型长柔叶片气弹稳定性; 复杂大气边界层作用机理; 流固声耦合过程中的能量转化机理; 风电场群尾流协同控制机制. (4) 生物质全组分热化学/生化转化方法. 生物质定向热解机理与过程强化; 生物质气化多联产产物协同生成及调控机制; 自然生物系统仿生原理、方法及过程强化; 生物质生化转化中热质传递与反应机理; 生物质碳氢定向生化转化和梯级利用理论.

前沿交叉领域包括: (1) 太阳能光热/光伏转化利用, 涉及动力工程及工程热物理与光物理、流体力学、催化与表界面化学、材料化学与工程等领域交叉. 例如, 高性能光伏发电/制氢材料研发需要深入理解光子、电子耦合作用机制及氢元素量子效应作用规律, 精细设计调控催化材料表面活性位点及结构. (2) 大规模风能转化利用, 涉及动力工程及工程热物理与材料制造、机械设计与制造、流体力学、土木工程、人工智能等领域交叉. 例如, 超大型风机叶片需要高性能材料, 耦合流体力学原理设计叶片外形保障外流场作用下叶片稳定性. (3) 生物质高效转化利用, 涉及动力工程及工程热物理与化学工程、催化与表界面化学、植物学等领域交叉. 例如, 生物质定向热解强化可合理设计化学反应流程, 结合流固界面间作用机理, 仿照自然生物反应表面结构, 提升转化效率.

3.3 绿色氢电与长时储能

我国绿色氢电与长时储能领域的发展目标包括: (1) 突破传统化石能源“一把火”烧的转化利用方式, 根绝高污染、高碳排放问题; (2) 协同解决可再生能源波动性强、难以存储、转化形式单一的特性问题; (3) 突破流体电池基础理论及理性设计方法. 以协同解决化石能源高碳排、可再生能源难并网、长时储能技术面临瓶颈为发展思路, 面临的重要研究方向和关键科学问题阐述如下.

重要研究方向包括: (1) 煤炭超临界水气化制备绿氢. 有别于传统“先污染后治理”的链式发展模式, 源头抑制污染物生成, 自然富集CO₂, 实现高质价多联产. (2) 直接太阳能光热电一体化氢热电联供. 将太阳能转化为氢/碳氢燃料利用储存, 实现太阳能的全波段、高效率、低成本、大规模化学储存. (3) 长时储能流体电池. 面向新型能源体系储能要求, 实现容量与功率解耦流体电池技术. (4) 低温致密化长时储氢. 发展高效低温致密化流程设计与优化方法、液氢超轻储罐设计方法及制造工艺, 突破大规模氢气储运瓶颈. (5) 大规模长周期地质储氢. 充分利用地质空间储氢, 提高大规模、长周期氢能存储稳定性, 推动从区域氢经济到广域氢社会发展.

关键科学问题包括: (1) 多相能量流/物质流耦合匹配机

理. 多电子参与的光催化过程碳氢化合物强选择性生成机制; 膜电极多尺度结构内多相多组分输运与电化学反应关联机制; 生物质热解气化、制氢与脱碳反应耦合强化机理; 串行流化床内制氢脱碳反应与热质传递协同调控机制; 储能介质与金属材料界面的热-电化学反应耦合过程. (2) 能量释放端与接收端能势匹配原理. 热化学/电化学反应机理及产物选择性调控和定向提质规律; 储能系统与电厂、高温工业耦合的能势匹配; 储能系统高效集成原理及能量梯级利用方法. (3) 热物理与电化学反应耦合理论与调控方法. 创制高性能的可流动能量载体、匹配能量载体与输入能量品位; 协同调控热、质、电、离子传输热物理过程与电化学反应. (4) 氢能存储/释放机理. 氢-电转换及储输过程中从宏观到微纳尺度传递及动态控制机理; 氢的单质态与化合态蓄能、释放与扩散.

前沿交叉领域包括: (1) 化石能源/太阳能变革性一体化氢热电联产, 涉及动力工程及工程热物理与表界面化学反应过程、化学工程、光物理、电气工程、系统集成等领域交叉. (2) 长时储能流体电池, 涉及动力工程及工程热物理与材料化学与工程、表界面化学、人工智能材料设计等领域交叉. (3) 大规模氢气存储, 涉及动力工程及工程热物理与机械制造与材料设计、地质/地球科学、微生物学等领域交叉.

3.4 多能互补与能源互联网

我国多能互补与能源互联网领域的发展目标包括: (1) 提高风、光等可再生能源稳定性, 满足大电网、远距离传输; (2) 多时空互补及源汇匹配能源生产消费.

以未来传统能源系统、可再生能源系统匹配融合为发展思路, 面临的重要研究方向和关键科学问题阐述如下.

重要研究方向包括: (1) 多能互补分布式能源系统. 基于多能互补、协同转化原理, 能量梯级利用, 避免冷热能量输运瓶颈限制, 降低电力输配损耗、实现灵活调峰. (2) 多能互补系统的优化调度算法. 多能互补系统整体接入智能电网, 根据负荷预测值接受调度指令, 合理分配传统机组、多能互补系统任务, 解决能量集成与过程协同问题. (3) 多能互补系统效益评价指标. 构建多能互补系统规划设计评价体系, 实现一体化电源开发方案、储能配置方案、输送通道建设方案等的客观评价. (4) 多尺度时域空域能源互联网. 揭示面向消纳极高比例可再生能源的新型能源网络结构特征与演化路径, 建立跨尺度时域空域能源网络的关键支撑技术体系.

关键科学问题包括: (1) 多能互补分布式供能系统的多形态能量协同转化与高效储释理论. (2) 能源动力系统的多能互补与有序转化. (3) 多能源供应体系下的能量利用系统优化.

前沿交叉领域包括: (1) 多能互补能源系统及其优化调度算法、效益评价指标, 涉及动力工程及工程热物理与系统集成、运筹优化、信息与通信等领域交叉. (2) 能源互联网及智能电网, 涉及动力工程及工程热物理与系统集成、电气科学与工程、信息与通信等领域交叉.

3.5 终端用能提效减排

我国终端用能提效减排领域的发展目标包括: (1) 协同利用不同终端用能载体形态, 梯级利用大温度范围内多级能量; (2) 能质一体化综合利用, 充分发挥能源资源作用.

以能源化、资源化、减碳化发展思路提高终端用能效率、减少碳排, 面临的重要研究方向和关键科学问题阐述如下.

重要研究方向包括: (1) 一体化协同转化-利用-回收-储存. 构建变革性用能/循环过程, 统筹推进新型热力设备/系统设计. (2) 碳循环利用技术. 协同关联碳排放重点技术与低碳燃料重生技术, 实现碳循环利用. (3) 全生命周期能/碳双控. 全生命周期与碳排放双约束下, 构建智慧型能/碳双控终端用能系统. (4) 工业余热回收利用. 高温多形态工业余热回收、能质多效高质化利用, 实现工业零碳或大规模脱碳. (5) 车船动力能源变革. 电力/可再生燃料等先进内燃动力提效节能降碳, 为未来车/船动力多元化提供重要基础支撑. (6) 氢/全电航空动力技术. 研制氢/电航空动力关键部件, 优化整机热管理, 实现航空动力净零排放.

关键科学问题包括: (1) 能/碳一体化用能理论. (2) 跨时空、全流程低碳高效用能方法. (3) 碳循环用能技术.

前沿交叉领域包括: (1) 终端用能全生命周期能/碳一体化循环利用, 涉及动力工程及工程热物理与系统集成、化学工程、材料科学等领域交叉. (2) 变革性动力技术, 涉及动力工程及工程热物理与材料科学与工程、交通与运载工程、机械涉及制造、海洋工程等领域交叉.

3.6 能源转化利用数智化

我国能源转化利用数智化领域的发展目标包括: (1) 通过人工智能等信息技术平抑未来电力系统中数以亿计的电源和负荷波动; (2) 以光速平衡海量供需匹配; (3) 人工智能赋能能源生产、传输和消费等紧密耦合、相互转化的能源环节.

以信息化、数字化、智能化为发展思路支撑未来能源系统柔性、快速、平稳运行, 面临的重要研究方向和关键科学问题阐述如下.

重要研究方向包括: (1) 能源系统数字孪生. 通过数据感知融合、数据驱动建模、VR展示等技术建立能源系统全要素数字孪生模型, 实时再现反应系统全部状态, 提升决策执行能力. (2) 智能化数字仿真方法. 通过数字化、信息化手段, 利用大数据和人工智能技术, 建立智慧能源系统高保真数值模拟及智能化数字仿真方法. (3) 人工智能感知与决策. 从发电/输电到用能/储能, 融合感知和预测电网负载、智能调峰和调度均衡, 对用电系统进行节能优化.

关键科学问题包括: (1) 基于可解释性人工智能方法的能源转化利用系统的宏观性能与模型. (2) 分布式供能及多能互补数字孪生技术和数据驱动智能决策. (3) 智慧能源系统高保真数值模拟及智能化数字仿真.

前沿交叉领域包括: 数智化技术赋能能源转化利用系统, 涉及动力工程及工程热物理与通信与信息系统、计算机科学、人工智能、智能系统、系统科学与系统工程、控制理论与控制工程等领域交叉。

4 我国在能源转化利用领域的发展思路与政策建议

4.1 关注变革性能源技术及其新质生产力的创建

能源领域技术研发具有投入规模大、研发时间长、见效慢等特点。我国能源领域技术研发投入的集中度不高、持续时间不长、强度不足等问题长期存在, 分散现象比较突出。实现“碳中和”目标, 必须转变科研投入方式, 构建国家科技力量, 通过新型举国体制开展有组织的技术攻关。面向世界科技前沿, 能源领域亟待布局一批前沿技术攻关, 抢占未来技术高地。

4.2 注重区域协调统筹, 有序推进新能源稳步发展

以太阳能、风能为主的新能源的存在形式和转化方法多种多样, 具有鲜明的互补性和耦合性等特点。在新能源工程建设方面, 陆上的沙漠、戈壁、荒漠是重要的风光基地, 应该注重区域协调、统筹有序推进, 充分利用西部、北部地区太阳能, 实现沙漠、戈壁、荒漠可再生发展。在东部沿海地区有序推进海上风电, 统筹推进水、电、光一体化梯级利用、分布式利用。基于源荷匹配理论逐步将产能转移到西部, 从全生命周期考虑可再生能源开发利用过程中的高效能质传递, 实现全国一盘棋的多能互补综合利用能源系统构建, 为未来新能源利用提供可行性场景。

4.3 立足国内国际双循环, 推进“一带一路”能源合作

当前世界能源发展正处在大变革的时代, 面临着资源匮乏、环境污染、气候变化、健康贫困等问题, 推动绿色低碳能源转型是人类命运共同体构建的共同之路。新型能源体系的构建是重中之重, 从宏观战略角度我国应当放眼于全球市场供给和需求, 从不同地域、不同路径合理布局能源战略。一方面, 以国内循环为主, 大力发展新能源经济, 充分释放我国巨大的内需潜力; 另一方面, 利用好国内国际双循环, 建设高水平开放型经济新体制, 以高水平开放赢得国际合作与竞争新优势, 实现能源产业开放包容、互联互通。建议充分发

挥“一带一路”国家能源资源、市场需求优势, 围绕“一带一路”倡议与共建国家在能源合作领域不断深入, 建设具有中国特色国际领先的能源系统变革新范式。

4.4 实现能源系统智能化、信息化, 加快智慧能源系统构建

智能化、信息化是传统能源和新能源转型发展的必由之路。在实现碳中和目标的同时, 必须兼顾能源系统的安全性和经济性, 其复杂程度远超常规管理学、规划学方法的应用条件, 必须引入智能化、信息化等手段。保障可再生能源的可持续健康发展、实现源荷的合理布局、满足电网的灵活协调规划, 亟须结合大数据与人工智能技术对能源系统进行科学合理的规划与调控, 以大规模绿色计算支持复杂能源网络与系统的绿色低碳转型。

4.5 “产学研用商”紧密结合, 推动变革性能源技术发展

推动变革性能源技术发展, 亟须打破基础研究与工程应用之间的鸿沟。需要以问题为导向, 产学研用商紧密结合, 针对学界的问题和业界的问题紧密开展研究合作。对于已初步验证变革性原理、具有产业化前景的项目, 建议设立重大产学研合作计划、推动技术商业化。开展从材料、工艺、设备到系统的全链条研究, 突破共性关键技术点, 研发变革性能源转化与利用技术, 促进能源产业变革性发展。

4.6 加强前沿学科交叉研究, 助力能源科技高水平自立自强

能源转化利用技术发展不仅是自下而上的技术本体创新发展, 在推动能源领域碳减排的过程中, 需考虑我国的地地区能源资源禀赋以及国民经济角色, 统筹全国的碳排放目标及路径, 统筹传统能源与新能源的优化组合, 统筹发展碳移除与新型能源动力技术, 在保障国家能源安全的前提下降低碳排放。通过数字化、信息化手段, 在“双碳”目标的约束下进行方向性以及随时间演变的布局, 与信息科学、人工智能、管理科学与工程等学科进行前沿交叉研究, 从而科学地服务于“双碳”目标的实现, 形成智慧能源技术的培育环境, 促使学科交叉研究为面向“双碳”目标约束的能源转化利用技术与智能化智慧化发展提供强劲动力。

致谢 感谢国家自然科学基金委员会-中国科学院前沿交叉研判战略研究联合项目(L2224035)资助。在项目资助下召开了面向“双碳”目标的能源转化利用前沿交叉战略研讨会, 感谢程时杰院士、包信和院士、锥建斌院士、南策文院士、李应红院士、成会明院士、邹志刚院士、宣益民院士、何雅玲院士、张锁江院士、张清杰院士、郭烈锦院士、汤广福院士、赵天寿院士、张亚勤院士和多位学者拨冗参会并提供报告、建议, 文中不另做引用。感谢国家自然科学基金委员会于2023年11月27~28日举办第358期双清论坛, 国内知名高校及科研院所的著名专家学者围绕“双碳”目标下能源转化与利用科学问题及学科发展战略提供建议并展开讨论, 为本文提供了重要帮助。

推荐阅读文献

- 1 Wang X, Zhao C, Müller C, et al. Emergent constraint on crop yield response to warmer temperature from field experiments. *Nat Sustain*, 2020, 3: 908–916
- 2 Su J, Liang Y B, Ding L, et al. Research on China's energy development strategy under carbon neutrality (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2021, 36: 1001–1009 [苏健, 梁英波, 丁麟, 等. 碳中和目标下我国能源发展战略探讨. 中国科学院院刊, 2021, 36: 1001–1009]
- 3 Jin H G, Xuan Y M, He Y L, et al. Engineering thermophysics and sustainable energy development (in Chinese). *Sci Sin-Tech*, 2020, 50: 1245–1251 [金红光, 宣益民, 何雅玲, 等. 工程热物理学科与能源可持续发展. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1245–1251]
- 4 Xu Q H, Li W Q. China's energy security strategy in the context of global carbon neutrality (in Chinese). *J Nantong Univ (Soc Sci Ed)*, 2023, 39: 117–129 [许勤华, 李文琪. 全球碳中和背景下的中国能源安全方略. 南通大学学报(社会科学版), 2023, 39: 117–129]
- 5 Huang Y J, Liu G X, Bo Y, et al. Beijing–Tianjin–Hebei coordinated development toward the carbon peaking and carbon neutrality goals (in Chinese). *Strategic Study CAE*, 2023, 25: 160–172 [黄昱杰, 刘贵贤, 薄宇, 等. 京津冀协同推进碳达峰碳中和路径研究. 中国工程科学, 2023, 25: 160–172]
- 6 Dai H L, Su Y N, Liu J Z, et al. Thinking of China's energy development strategy under carbon neutrality goal (in Chinese). *Petroleum Sci Technol Forum*, 2022, 41: 1–8 [戴厚良, 苏义脑, 刘吉臻, 等. 碳中和目标下我国能源发展战略思考. 石油科技论坛, 2022, 41: 1–8]
- 7 Huang C, Zhang P, Wang W L, et al. The upgradation of coal-fired power generation industry supports China's energy conservation, emission reduction and carbon neutrality (in Chinese). *Thermal Power Gener*, 2021, 50: 1–6 [黄畅, 张攀, 王卫良, 等. 燃煤发电产业升级支撑我国节能减排与碳中和国家战略. 热力发电, 2021, 50: 1–6]
- 8 Huang J, Ma Q, Shi M W, et al. Process and suggestions of CCUS technology development from the perspective of carbon neutrality (in Chinese). *Environ Impact Assess*, 2022, 44: 42–47 [黄晶, 马乔, 史明威, 等. 碳中和视角下CCUS技术发展进程及对策建议. 环境影响评价, 2022, 44: 42–47]
- 9 Li G Y, Yu Y, Wang Y C, et al. Research progress and development trend of wind farm power prediction (in Chinese). *J Drainage Irrig Mach Eng*, 2024, 42: 778–784 [李根银, 郁冶, 王异成, 等. 风电场功率预测的研究进展及发展趋势. 排灌机械工程学报, 2024, 42: 778–784]
- 10 Chen H S, Li H, Xu Y J, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2022 (in Chinese). *Energy Stor Sci Technol*, 2023, 12: 1516–1552 [陈海生, 李泓, 徐玉杰, 等. 2022年中国储能技术研究进展. 储能科学与技术, 2023, 12: 1516–1552]
- 11 Jin H G, He Y L, Yang Y P, et al. Basic scientific issues in distributed energy system (in Chinese). *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2020, 34: 266–271 [金红光, 何雅玲, 杨勇平, 等. 分布式能源中的基础科学问题. 中国科学基金, 2020, 34: 266–271]
- 12 Rifkin J. *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power is Transforming Energy, the Economy, and the World*. New York: Palgrave Macmillan, 2011. <https://lcn.loc.gov/2011009609>
- 13 Tang G F, Zhou J, Pang H, et al. Development of high-purity metal sputtering targets for integrated circuits (in Chinese). *Strategic Study CAE*, 2023, 25: 79–88 [汤广福, 周静, 庞辉, 等. 能源安全格局下新型电力系统发展战略框架. 中国工程科学, 2023, 25: 79–88]
- 14 Shu Y B, Zhang L Y, Zhang Y Z, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry (in Chinese). *Strategic Study CAE*, 2021, 23: 1–4 [舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究. 中国工程科学, 2021, 23: 1–14]
- 15 Hu B, Jiang J T, Wu D, et al. Development status and prospects of industrial high-temperature heat pumps (in Chinese). *J Refrig*, 2023, 44: 1–12 [胡斌, 姜佳彤, 吴迪, 等. 工业高温热泵发展现状与展望. 制冷学报, 2023, 44: 1–12]
- 16 Rolnick D, Donti P L, Kaack L H, et al. Tackling climate change with machine learning. *ACM Comput Surv*, 2023, 55: 1–96

Summary for “面向‘双碳’目标的能源转化利用领域前沿交叉战略研究”

A strategic study of interdisciplinary frontier in the field of energy conversion and utilization for the “dual carbon” goals

Peixue Jiang^{1*} & Hongguang Jin²

¹ Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

² Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

* Corresponding author, E-mail: jiangpx@mail.tsinghua.edu.cn

In China, energy combustion contributes to around 85% of the total carbon dioxide emissions. The reduction of carbon emission through improving efficiency of energy conversion and utilization is crucial for China to meet the “dual carbon” goals.

The focus in China on achieving “dual carbon” goals is propelling innovations in science and technology to reduce carbon emissions, accelerating rapid advancements in effective low-carbon energy transformation and utilization methods. The “dual carbon” goals of China will promote a revolution in technological development modes, redirect the focus of technological progress, introduce innovative energy conversion and utilization methods, and spark interdisciplinary advancements. Besides the disciplines of engineering thermophysics and energy utilization, electrical science and engineering, materials and mechanical engineering, the realization of effective low-carbon energy transformation and utilization methods is also connected to chemistry, earth sciences, information technology, and other disciplines. In the presence of challenges, there will also be a cascade of new opportunities resulting from state-of-the-art interdisciplinary scientific principles and technological inventions in the development of energy conversion and utilization methods.

In this paper, six state-of-the-art directions of energy conversion and utilization are proposed: (1) Low-carbon conversion and utilization of fossil energy, (2) efficient conversion and utilization of renewable energy, (3) green hydrogen / green electricity and long-term energy storage, (4) multi-energy complementarity and energy internet, (5) terminal efficient and low-carbon energy utilization, (6) energy conversion and utilization with digital and intelligence technology. In addition, the corresponding key scientific issues are raised in the disciplines of engineering thermophysics and energy utilization. On this basis, the latest progress in promoting energy transformation and low-carbon development is discussed. Moreover, policy suggestions are put forward in view of existing challenges and future opportunities, including: (1) Paying attention to revolutionary energy technologies and the new quality productive forces in energy technologies, (2) focusing on regional coordination and overall planning, promoting the steady development of renewable energy in an orderly manner, (3) based on the “dual circulation” development pattern, promoting the energy cooperation in the belt and road initiative, (4) realizing the intelligence and informatization of energy systems and accelerating the construction of smart energy systems, (5) propelling integration of industry, university, research, application side and business to promote the development of revolutionary energy technologies, and (6) strengthening interdisciplinary research in cutting-edge directions to achieve high-level self-reliance in energy science and technology. Thus, for achieving the “dual carbon” goals, this paper provides important scientific and technological support for establishing a carbon neutral system of energy transformation and utilization science and technology, which integrates low-carbon/zero-carbon electric energy sources, non-electric energy sources, digital and intelligent technologies.

“dual carbon” goals, energy conversion and utilization, interdisciplinary frontiers, strategic study

doi: [10.1360/TB-2024-0677](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0677)