

• 专题二:双清论坛“‘双碳’目标下能源转化与利用科学问题”•

DOI: 10.3724/BNSFC-2025.02.02.0002

“双碳”目标下能源转化与利用科学问题*

金红光^{1**} 郭烈锦² 宣益民³ 姜培学⁴ 关永刚⁵

1. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190
2. 西安交通大学 绿色氢电全国重点实验室, 西安 710049
3. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016
4. 清华大学 能源与动力工程系, 北京 100084
5. 国家自然科学基金委员会 工程与材料科学部, 北京 100085

[摘要] 构建“清洁低碳、安全高效”的现代化能源体系、推动实现“双碳”目标是国家重大需求,基于国家自然科学基金委员会第358期“双清论坛”,本文总结了我国能源绿色低碳转型研究及产业发展所面临的挑战和难点,梳理了近年来在能源低碳高效转化、绿色氢电与长时储能、终端用能提效减排等领域取得的主要进展和成就,凝练了能源转化与利用领域未来5~10年所面临的重大关键科学问题,探讨了前沿研究方向和科学基金资助战略。

[关键词] 碳达峰、碳中和;能源低碳转化;长时储能;终端提效;绿色氢电

能源是国民经济的命脉,是国家安全与社会发展的基石。受资源禀赋等因素影响,煤炭不仅是我国能源结构的主体,也是我国能源安全保障的压舱石。然而,现如今化石能源的主导地位与碳减排之间存在的显著矛盾,也是实现“双碳”战略目标所需面临的重大挑战^[1,2]。

实现“双碳”目标,碳减排是根本,能源是重中之重。一方面,化石燃料的大量燃烧与粗放利用导致我国每年排放的CO₂总量超过100亿吨,位列全球首位,亟待探索变革性能源低碳转化方法和技术路线。另一方面,我国可再生能源、资源丰富,太阳能、风能等绿色发电产业已实现跨越式发展,风光发电装机容量也已超过火电,然而风光等可再生能源存在的间歇、波动、分散等固有属性导致发电效率低、灵活调控难度大,亟需探索和发展高效率、低成本的规模化可再生能源利用理论与方法^[3-5]。面对碳减排任务的艰巨性和复杂性,要立足我国国情,提炼碳减排主攻方向,并以“双碳”目标为导向综合考虑多层次能源技术创新,引导厘清当前能源转化与利用的关键科学问题,原创建立适合当前时代发展的

能源利用基础科学理论,发展变革性能源低碳转化与利用技术,探索经济安全的低碳发展路线,科学有序推进实现“双碳”目标^[6,7]。

在此背景下,国家自然科学基金委员会工程与材料科学部会同化学科学部、计划与政策局联合召开了主题为“‘双碳’目标下能源转化与利用科学问题”的第358期双清论坛,来自国内26所高校和科研院所的50位专家学者应邀参加了本次论坛。与会专家对“双碳”战略下能源低碳高效转化、绿色氢电与长时储能、终端用能提效减排等领域的发展现状与趋势、未来主要研究方向和科学问题进行了深入研讨与凝练,并梳理了国家自然科学基金委在各主题相关领域的建议资助方向,为助力国家能源结构的绿色低碳转型贡献科学建议。

1 能源低碳转化与高效利用面临的重大机遇与挑战

1.1 能源低碳高效转化领域的发展现状、机遇与问题

面对日益严峻的能源与环境问题,推动能源低碳转

收稿日期:2025-02-02; 修回日期:2025-06-17

* 本文根据国家自然科学基金委员会第358期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者, Email: hgjin@iet.cn

引用格式: 金红光, 郭烈锦, 宣益民, 等. “双碳”目标下能源转化与利用科学问题. 中国科学基金, 2025, 39(3): 474-488.

Jin HG, Guo LJ, Xuan YM, et al. The energy conversion and utilization of scientific problems for achieving “dual carbon” goal. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(3): 474-488. (in Chinese)

型、实现能源清洁高效利用,已成为我国能源发展的重要任务。我国是以煤炭为主的能源消费大国(图1),在未来相当长的时期内,煤炭仍将在我国能源结构中占据主导地位。据预测,2030年前我国能源消费需求将持续稳定增长,能源消费增量部分主要靠清洁能源提供,但煤炭年消费量仍将保持在35亿吨左右,因此,实现煤炭等化石能源的清洁高效转化是推动传统能源结构低碳转型的重中之重^[8,9]。

能源是社会与经济发展的基础,世界各国均高度重视能源安全,竭力发展先进能源技术,保障能源供给。虽然各国的资源禀赋差异大,发展方向各有侧重,但能源利用清洁化是共同的发展趋势。煤炭作为我国能源安全保障的压舱石,也是重要的基础能源和化工原料,为国民经济和社会稳定发展提供了重要支撑。目前,煤炭的主要利用方式是直接燃烧发电和工业供热,燃煤发电也作为我国主要电力供应方式,是电力安全稳定供应的核心,虽然能够用于电力系统灵活性调节,支撑可再生能源灵活性并入^[10,11],但总体上能量利用效率低、污染重、碳排放量高。此外,我国石油和天然气的消耗量巨大,2024年我国石油和天然气净进口量分别为5.53亿吨和1 822亿立方米,对外依存度分别高达71.9%和40.9%^[12],能源安全形势非常严峻,伴随我国经济的快速发展,石油、天然气供应缺口势必逐年加大,油气能源的高对外依存度态势仍将长期存在,推动能源供给多元化和提升国内产能刻不容缓。

能源转化是碳减排主攻的方向,发展高效低碳与灵活协同的化石能源利用技术是我国能源领域的当务之急,对于实现“双碳”战略至关重要。煤炭清洁高效转化,不仅可以缓解我国能源供应紧张局面,保障国家能

源安全,也是构建我国清洁低碳、安全高效的能源体系的必然选择。目前主要面临以下困难与挑战:

(1)化石能源低碳转化理论与方法。煤炭等化石能源在相当长的时期内仍然是我国的主体能源,传统的煤炭直接燃烧等方式导致能量转化的不可逆损失大、碳排放强度高,存在的关键技术挑战包括:碳氢解耦与低碳协同转化,CO₂低能耗分离;煤制清洁燃料能效低、产物组分灵活调变难,有待变革技术,实现成套工艺验证;燃煤发电机组超低负荷工况安全性、经济性和环保性差,难以满足可再生能源高效消纳等。面对实现“双碳”目标等国家重大需求,有待深入研究碳氢燃料转化熵增原理与解耦调控方法等关键科学问题,以探索高效低碳的化石能源转化技术。

(2)可再生能源高效转化理论与方法。面对可再生能源存在显著的波动性、间歇性与随机性等问题,需要深入研究可再生能源高效转化理论与方法,以提升大规模可再生能源利用的高效性、可靠性和经济性,需要解决的关键挑战包括:可再生能源能质能势转化与梯级利用,长时储能技术;宽波段、高载能太阳辐射光子高效利用难,高聚光太阳能引起聚光精度与可靠性下降问题;生物质利用存在原料多样性、转化路径多元性、产物复杂性及污染控制系统等问题,导致利用效率低、品质差、经济性差;复杂多尺度多物理耦合机理下的风能高质量利用问题,包括超大型长柔叶片气弹稳定性、复杂大气边界层作用机理、风电场群尾流协同控制等。

(3)多能源互补系统理论与方法。在保障能源供应安全与加速能源结构低碳转型的双重约束下,需要针对多元化能源属性特征,探索“能量互补、能势耦合”的多能协同转化原理,亟待解决的难点与挑战包括:可再生

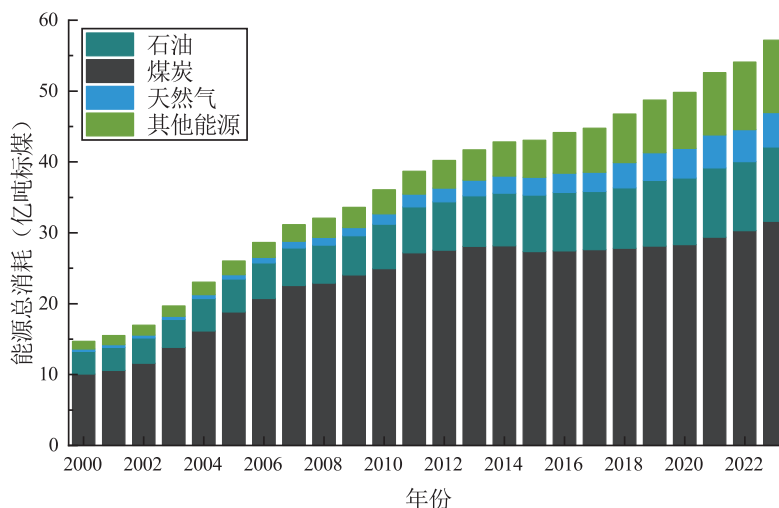


图1 我国能源总消耗量(数据来源:中国统计年鉴2024)

Fig.1 China's Total Energy Consumption (Data Source: China Statistical Yearbook 2024)

能源与化石能源的多能互补技术;多能互补的正逆循环耦合理论;基地型多能互补系统的构建与方法;分布式多能互补系统的构建与方法;多能互补的“源网荷储”系统的柔性互联与协同调控机制。

1.2 绿色氢电与长时储能领域的发展现状、机遇与问题

目前,我国仍以化石能源为主体,为了大幅减排二氧化碳,需加快转向可再生能源,提高其在能源结构中的比重。能源是具有能量和物质双重属性的客体,按照其自然禀赋特性可分为过程性能源和载能体能源两大类,当前全球能源供给体系的主体技术是将一次能源转化成电能,再依靠电能的输配来满足用能终端需求。二次能源电能和氢能均可以经过一次能源转化和生产而来,但电作为过程性能源,自身难以存储;氢作为载能体能源可以多种相态存在,方便存储运输^[13,14]。当以化石能源为一次能源的主体时,基于化石能源易存储、易输运特性,采取一次能源源头端的人为调配可克服社会生产和生活中终端用能与供能体系在时间和空间及地域上的不匹配,但传统化石能源发电方式带来的环境污染和生态破坏问题也十分严重。随着能源转型的推进,当太阳能、风能等过程性能源逐步替代化石能源成为一次能源主体时,由于电能的过程性禀赋令其难以维持长时间、稳定存在,传统的一次能源调配方式不再适用,这正是传统能源转化利用技术和产业及其供给体系存在的根本性不足^[15-17]。我国风光等可再生能源资源丰富,但主要以转化为电能等方式加以利用,即时不用就难以储存,甚至导致大规模弃电,推动能源绿色转型需直接将可再生能源转化为易储存易输送的载能体能源,生产高附加值的绿色能源产品,目前主要面临以下困难与挑战:

(1)化石能源转化利用过程的多目标有机统一。现有化石能源利用方式难以兼顾高效、清洁、低碳与资源高值化等多重目标,亟需实现其转化利用过程的有机统一。因此,必须从源头革新传统化石能源燃烧发电及化工技术,发展既能大幅降低有害物与温室气体排放、加速推进“双碳”目标,又能支撑能源资源化与高值化新型产业构建的革命性化石能源制氢/电技术。存在的关键技术挑战包括:煤炭超临界水气化制备绿氢系统集成与优化;煤炭超临界水气化发绿电系统集成与优化;太阳能驱动CO₂还原制碳氢燃料系统一体化设计理论等。

(2)可再生能源转化单一、难储、成本高、效率低。当前可再生能源利用以风光发电为主,供给体系面临转化形式单一、能量难以直接储存、成本高企及效率低下等瓶颈,阻碍其大规模替代化石能源。因此,迫切需要

发展能与可再生能源间歇性、波动性、过程性禀赋特性高度适应和匹配的先进技术,实现将过程性风光能直接、低成本、高效率地转化为足量易储易输的载能体能源(如氢能),并解决大规模长时储存问题。亟待解决的难点与挑战包括:直接太阳能光热电一体化氢热电联供过程关键科学问题;高温化水电解制氢系统吸—放热转换与高效绿氢制取;适应瞬时宽功率波动的风光储能电解制氢;储氢功能体系的一体化设计理论;沙戈荒新能源基地火储联合调频关键技术等。

(3)基于绿色氢电与长时储能实现安全高效洁净低碳的能源产业转型。推动以绿色氢电为核心载体、辅以长时储能的能源产业深度转型,是实现安全高效洁净低碳目标的关键路径,但仍面临系统性协同与产业化落地的重大挑战。因此,必须着力突破绿色氢能生产、高效储运转换(氢电互转)及大规模长时储能等环节的关键科学与技术瓶颈,构建多能互补、协同优化的能源系统,以支撑安全高效洁净低碳的能源产业革命性转型。需要解决的关键挑战包括:AI赋能增强生物质源有机分子电解制氢;生物质化学链制绿氢过程负碳机制;基于有机液体的高效氢电转化及强化传输机制;抽水蓄能发绿电系列关键问题;适应瞬时宽功率波动的风光储能电解制氢(系统协同)等。

1.3 终端用能提效减排领域的发展现状、机遇与问题

在“双碳”战略目标下,“清洁、低碳、高效”三位一体的能源利用模式已成为能源发展的硬约束。追踪能源从源头生产到终端消费全生命周期,能源开采、转换、运输、分配等中间过程的耗能仅占12%,而终端用能占总能源消费的88%,终端用能所直接产生的碳排放占比达51%。与国际对比,我国碳排放强度约为世界平均水平的1.8倍,工业碳排放强度约为发达国家的3~5倍,此外,终端用能行业的发展与转型受到地缘政治、经济发展、气候环境等诸多因素影响。欧盟碳边境调整机制(CBAM)即“碳边境税”的首批征税范围覆盖了钢铁、水泥、铝、化肥、电力、氢能等行业,将强烈冲击我国终端用能行业的发展,高能耗、高碳排放行业面临淘汰风险,上述6个行业作为我国终端用能/碳排放的重点行业,合计碳排放56.3亿吨,占终端用能总排放的77.6%^[18]。对此,发展源头低碳、过程减碳、末端捕碳全链条提效减碳的用能技术,将成为我国终端用能行业绿色发展的必经之路。

实现终端能源高效利用和排放减少是促进实现“双碳”目标的重要环节和潜力所在,但由于终端用能场景的多元性、复杂性、用能设备的异构独立性问题,现阶段终端用能减排在实践中仍然需要跨学科的合作和持

续创新,目前主要面临以下困难与挑战:

(1)多元能源互补的用能增效减碳机制与调控方法。终端用能结构正经历从化石能源主导向可再生能源主导的深刻变革,驱动电、热、冷、燃料等能量形式从独立供给向多形式互补匹配的新范式转变^[19,20]。然而,这一转变面临重大挑战:不同终端能源能质特性差异显著,行业用能场景各异,源—网—荷—储多环节强关联耦合,以及多元混合动力匹配、宽工况燃烧与污染控制、余能余热高效回收利用、高功率电热协同、高密度储/释能、环境能源耦合增效、多源能流/物质流智能调控等技术难题。迫切需要发展多元能源高效互补利用的创新理论与协同调控新技术,以实现用能增效减碳的核心目标。此外,对于深度减碳增效的传统评价方法往往局限于单一环节,而当前发展趋势要求向全生命周期的能/碳协同控制转变。因此,在构建上述多元能源互补匹配利用的新范式和调控技术时,必须融入全生命周期视角和能/碳双控的理念,将不同时空尺度上原本离散的用能过程有机耦合与协同匹配,从而在多元能源输入、全生命周期能效与碳排放双重约束下,支撑智慧型能/碳双控多能互补终端用能系统的设计与实现。

(2)用能过程低碳重构原理与跨时空一体化协同。现有的以粗放燃烧与传统热力循环为主的用能方式存在能量传递转化独立规划设计的瓶颈,增效减排空间有限,亟需构建变革性用能方式与动力循环过程,实现转化—利用—回收—储存环节一体化协同及新型热力设备/动力系统统筹设计。存在的关键技术挑战包括:基于可变热力循环与物理化学协同的焓/功转化;净零碳燃料稳定燃烧及温室气体/污染物协同控制;高功率燃料电池多子耦合输运转化与长稳服役;富气/纯氢冶炼化工重构与能质协同;航空飞行器综合能量系统效能评价;源—网—荷—储跨时空耦合与全流程用能匹配。因此,亟待从能量流/物质流协同视角出发,发展新型燃料高效可靠燃烧与超高效热力循环技术,突破传统能效极限,协同匹配跨时空能量转换/物质转化过程,突破终端“源—储—网—荷”多尺度协同智能运行新技术。

(3)CO₂低能耗捕集、高效活化与定向转化。CO₂捕集存在能耗高、分子稳定活化难、转化路径复杂、定向性差等关键技术瓶颈,严重制约钢铁、化工等重点行业深度减碳及碳循环利用这一“兜底”措施的落地^[21,22]。亟待解决的难点与挑战包括:跨尺度CO₂动态扩散吸附机理与低能耗高选择性捕集方法;大规模CO₂地质注入—封存的增储机理和安全监测风险防控;光—热—电多场耦合驱动CO₂定向转化机制与有序协同原理;工业CO₂排放—捕集—转化—一体化机理与匹配调控策略;CO₂转

化过程物质微观动态迁移演化规律与稳定性提升;全生命周期能/碳一体化终端用能系统设计优化与控制。因此,迫切需要发展光/热/电多模态耦合的变革型负碳技术,研发CO₂捕集与定向转化的跨时空尺度能质传递与转化协同匹配方法,突破高效、低成本、规模化的技术瓶颈,推动碳资源循环利用技术走向实际应用。

2 能源低碳转化与高效利用研究的主要进展和成果

能源科学的发展离不开能源转化与利用技术的进步,而技术进步离不开理学、工学等多门类学科的支撑,特别是与基础物理化学等各相关学科(如热力学、材料学、工程学等)的密切交叉。近年来,得益于上述学科的交叉融合与协同发展,在能源高效低碳转化、绿色氢电与长时储能、终端用能提效减排等研究领域取得了一系列突出成果。

2.1 含碳能源高效清洁低碳利用

2.1.1 煤炭高效清洁燃烧的基础研究

煤炭作为我国主体能源,将持续为可再生能源大比例消纳提供关键调峰支撑。科技部2030煤炭科技规划明确要求保持煤炭基础能源地位,持续研发低碳清洁高效发电技术,以增强新能源消纳能力。国际共识方面,美日等发达国家也制定了聚焦高效灵活发电、碳捕集和多能互补的煤炭利用研究计划。立足我国以煤为主的基本国情,推动煤炭与新能源优化组合至关重要^[23]。

当前,发展煤与氨、煤与生物质等无碳低碳燃料掺混燃烧技术,对火电领域实现“双碳”目标和支撑氢能产业发展具有重要战略意义,在优化燃烧、减排增效、提升电网灵活性和增强可再生能源消纳方面作用显著^[24,25]。然而,现阶段煤与无碳低碳燃料掺混燃烧技术,普遍面临燃烧稳定性、污染物协同控制及设备适应性等共性挑战。掺氢燃烧需考虑氢气火焰传播速度过快对燃烧器设计的特殊要求;掺氨燃烧则需要强化燃烧手段并精细控制氮氧化物排放;生物质掺烧则需解决燃料特性差异带来的燃烧与污染控制问题。为此,我国学者正深入探索煤掺氢掺氨的多相着火燃烧机制、稳燃与污染物生成调控规律,并着力研发大容量高比例掺混系统技术和关键装备,以期为煤氨等高效清洁燃烧项目的工程应用提供科学理论、共性方法、关键技术和装备支撑。

2.1.2 低碳燃料高效清洁燃烧机制

随着气候变化问题日益严重,国际社会对于环境保护和碳减排的关注度也越来越高,在此背景下,需要综

合考虑能源供给比例和减碳技术成熟度。碳中和燃料与现有设备适应良好,可以迅速实现降碳,寻求其改进和优化已刻不容缓,近年来,含氧含氮燃料研究取得了一定进展,然而理论体系仍不完善,虽然部分燃料已经开始推广,但仍然存在诸多问题。与此同时,富氢燃料虽在部分行业已具备实际应用条件,但也仅局限在部分燃料的掺混应用上。为了使基础研究向实际应用场景迈进,利用高性能实验设备,需通过高精度在线检测技术从分子层面揭示燃烧本质特性,并且探索高温、高压等极端燃烧工况下的高精度数值模拟方法,从而深刻揭示燃烧反应机理^[26]。然而,研究过程仍面临诸多挑战,每种新型燃料的新结构都带来了全新的复杂化学反应机制。此外,新型低碳燃料也存在稳定性、储存和运输等多方面的不足,尚待改进。为应对上述挑战,我国学者致力于深入研究实际应用场景下燃料的燃烧特性和设备工况,通过运用宽范围高精度实验设备与建模方法,已成功实现高精度诊断与仿真。

2.1.3 煤炭超临界水气化制备绿氢/发电系统集成与优化

传统化石能源(如煤、油、天然气)制氢由于短时间内可以大规模生产氢气,是目前氢能的主要来源之一。但传统化石能源制氢会产生大量二氧化碳等有害物质,造成严重的环境污染和碳排放,并加剧气候变化。对此,我国科学家在近期自主研发的超临界水蒸煤制氢发电多联产技术能够实现煤炭低成本、大规模地无害化利用,同时利用化石能源的能量和物质禀赋^[27-29]。该技术使用水作为反应介质,在高温高压条件下将煤炭转化为氢气,同时将一部分有害物质转化为无害气体,溶解在超临界水中,以均相超临界混合流体形式从气化反应器顶部引出,可用来实现完全洁净无污染零排放的高效转化利用,这从源头上消除了传统燃煤污染物 SO_x 、 NO_x 和其他气体、粉尘颗粒污染物的产生。该技术在实现绿色发电供热供蒸汽的同时,实现煤中物质的高值化转化与完全利用,可联产 H_2 和高纯 CO_2 ,在不会大幅增加能耗的前提下实现高质价多联产,继而可进行化工工艺链匹配创新,如直接合成氨、联产高价含碳化学品等,特别是与下游氢气直接罐装/液化等工艺匹配较好,显著提高了储能效率^[30]。

2.1.4 燃烧中碳捕集的基础研究

针对燃烧中的碳捕集技术,美国能源部已将第二代富氧燃烧、化学链燃烧等视为最具发展潜力的 CO_2 捕集技术,并列入到2025—2030年的碳捕集利用与封存技术(Carbon Capture, Utilization, and Storage; CCUS)工业化示范规划中。富氧燃烧作为一种燃烧中的碳捕集技

术,具有相对成本低、易规模化、适于存量机组改造等优势,是最可能大规模推广和商业化的CCUS技术之一^[31]。第一代富氧燃烧技术通过不断技术革新,已逐步达到百万吨级工业示范与商业推广规模,而新一代的富氧燃烧技术主要以无焰富氧燃烧与加压富氧燃烧为主,实现了富 CO_2 高压气氛下燃料高效清洁燃烧和 CO_2 富集降耗的自洽协同,已针对火电、钢铁、水泥、石化等难减排行业研制了高效稳定燃烧器关键设备,以及新一代富氧燃烧碳捕集新工艺,并建立了低成本大规模分离/制备高浓度气态 O_2 的新原理、新方法和新工艺。

化学链燃烧是将传统燃料与空气直接接触反应的燃烧过程分解为两个气固反应,从而实现燃料与空气的分离^[32],具有高效、清洁、低碳的优势。我国学者提出基于机器学习赋能高效廉价氧载体主动设计及活性衰减阻滞方法^[33],交互式反应器间热质传递自动平衡原理及慢速反应强化机制以及化学链燃烧装置数值设计理论和灵活调控准则。通过研究表明,基于该新型化学链燃烧技术有助于降低燃烧及 CO_2 捕集全过程的能耗,由于化学链技术具备解耦特性,使得利用该技术能够从燃料利用源头实现低能耗碳捕集,除了燃烧以外,在其他能源转化领域仍具有低碳优势^[34],同时氧载体作为中间反应物可携带氧原子与能量,有利于过程中物质与能量分配的优化。化学链与气化技术相结合避免空气混入或降低对空分装置的需求,可制备得到较高纯度合成气,降低系统换热负担,进一步提升气化效率和碳捕集效率。

2.1.5 高效低碳富氧燃烧超临界 CO_2 燃气轮机发电系统设计理论

富氧燃烧超临界 CO_2 燃气轮机发电系统采用透平侧富氧燃烧技术,并利用超临界 CO_2 工质特性,通过优化热力参数提升循环效率,是推动实现化石燃料清洁高效与灵活低碳发电的革命性技术^[35,36]。然而,该技术仍面临超高参数极端条件下能量转换机理尚不清晰、物质流与能量流匹配复杂,系统灵活调控机制不明等问题,亟需从设备到系统、稳态到瞬态多时空尺度开展基础理论与技术研究。对此,国内学者构建了涵盖发电机组与外部环境的广义能量系统分析理论,提出设备性能提升与流程拓扑优化相结合的能耗协同调控方法,并创新了半闭式热力循环“流程解构”分析与构建方法,揭示流程拓扑与参数优化节能原理。针对高压燃烧富氧燃烧及 CO_2 传热机理,开展了高精度燃烧数值模拟、加压气化研究,提出近临界点附近“类沸腾”理论,并进一步完成全工况燃机/IGCC发电系统设计,开展燃机/IGCC的动态策略研究,获得燃机启停及变负荷动态运行策略,为促

进化化石燃料高效低碳灵活发电技术进步提供理论支撑^[37]。

2.2 可再生能源高效开发与利用

2.2.1 风能高质量开发利用

为实现“双碳”战略目标,风能高质量开发利用成为我国能源发展的重要方向,截至2024年底,我国风电总装机容量521 GW,占世界风电装机总量的46%^[38]。风电场自主规划设计是我国风电产业打破国外技术垄断、提升全球竞争力的关键环节,近年来,我国在精细化风资源评估、智能化微观选址、尾流效应控制与协同优化等领域取得显著突破。例如,在国产化软件生态构建方面,通过推动自主风资源评估、微观选址及运维管理软件的标准化与国际化认证,减少对国外工具的依赖;通过AI+物理模型融合,结合机器学习与CFD仿真,提升复杂地形下的风电场建模精度,并优化风机布局与运行策略;在风电场群协同控制方面,发展了基于数字孪生的动态优化算法,实现电场—电网协同调频,提高可再生能源消纳能力。但上述方面都仍面临诸多挑战,亟需在核心技术上实现自主可控,努力从“跟跑”迈向“并跑”。

我国风电机组呈现大型化、规模化、数智化、经济化的特点,但大型风电叶片设计、高效抗台风机组以及智慧风电场技术发展面临诸多挑战。对此,国内学者围绕风力机气动结构载荷特性、风电场多尺度数值建模及风电智能规划设计开展了深入研究。针对风力机流固耦合及控制问题,系统开展了以试验测试为主、数值仿真为辅的风力机基础研究,建立了风电叶片气动—结构—载荷—气弹—稳定性半反问题设计与分析平台,开发了风电叶片气动—结构一体化设计关键技术体系,提高了机组风能利用效率。进一步建立了基于工程尾流模型、计算流体动力学方法及数值天气预报模式的考虑高精度复杂山地的陆上大气边界层、海气耦合大气边界层作用的风电场多尺度耦合建模理论与方法,构建了更高精度尾流模型,并基于各类优化算法,提出了全场尾流偏航控制策略,从而提高风电场整场发电量。此外,借助大数据和云计算技术发掘风不同链端大量数据的价值,解决传统风电场“数据孤岛”的问题,以实现贯穿风电场全生命周期的智慧应用服务,促进降本增效^[39]。

2.2.2 太阳能多能耦合驱动碳氢循环系统构建与增效机制

太阳能的规模化高效利用对于实现碳中和目标具有重要意义,其关键在于克服其分散性、间歇性与低能量密度等固有挑战,这依赖于对全光谱太阳能的深度有序转化与光、热、电、化学能的多维协同,核心突破在于

揭示高密度聚光光子流与物质相互作用的独特机制,其展现的突破传统热力学极限的物理化学效应为高效转化提供了新可能^[40,41]。深入探索光子—电子—声子的耦合传递规律及其驱动物相变化、化学反应与热效应的机理,并借助人工微结构设计裁剪材料能带与表面特性,是实现由传统光热驱动向更高效的光子直接驱动变革的理论基础。通过聚光分频、能流聚集、能势提升及多子耦合等核心技术的系统集成,构建光热电一体化有序转化框架,显著提升太阳能向高品位化学能与电能的转化效率,为多能协同奠定科学基石。

太阳能多能协同驱动的碳氢循环系统,其根本价值在于构建了一条可持续的“负碳”能源与物质转化路径。通过全光谱梯级利用与过程集成优化,系统性地降低了分步转化中的能量耗散;持续挖掘高品位光子直接驱动、多场协同调控及人工微结构设计带来的效率提升潜力,不断逼近能量转换的物理化学极限^[42,43]。国内学者将煤炭超临界水气化技术与可再生能源驱动的CO₂还原制化学品及燃料技术相结合^[44],提出通过构筑并集成高效绿色光电催化能源转化与物质合成新体系,构建与水和CO₂还原匹配的高效、高附加值化合物合成的新型光电催化阳极(氧化)替代反应,重建光电催化分解水制氢和CO₂还原体系。通过光催化、热催化、电催化等多能耦合催化技术将可再生能源高效转化,驱动由工业尾气和超临界水蒸煤等富集的高纯CO₂还原,生成多种燃料和有机化合物^[42,45],基于新型阳极(氧化)反应耦合的光电催化制氢和CO₂还原技术的能量转化效率可大幅提高^[46]。为此既从源头改变了当前化石能源的利用方式,又采用可再生能源驱动产物CO₂的转化,实现碳和氢的循环利用,具有实现系统“碳中和”的潜力。

2.2.3 生物质源高效制氢与脱碳协同转化机制

利用可再生能源制取绿氢,实现可再生电力跨季节长周期大规模储能目标,对新型源网荷储各个环节有很高的应用价值。当前绿氢生产成本较高,绿氢成本约40元/千克,具有商业价值的绿氢成本期望阈值为18元/千克,氢储能的经济性尚未显现。我国学者综合运用碳基催化剂制备、电解槽设计等技术,实现了高效低能耗的绿氢制取技术,可从富含生物质基有机分子的水体中实现绿氢制取。此外,基于材料基因组工程与人工智能技术为生物质电解制氢带来了新的机遇^[47]。我国学者通过对小分子生物质以及制氢催化剂材料进行大规模计算和数据分析,建立生物质制氢的小分子及其电催化剂的材料基因组,结合人工智能技术,将实现交叉学科整合、实验的自动化和高效性,以及低成本的精准预测,最终助力攻克制氢过程中小分

子精选、催化剂设计、微生物选择和反应可控与体系集成等工程问题^[48,49]。

此外,生物质化学链制氢有望实现规模化制氢和二氧化碳的同步脱除,是一种具有应用前景的负碳制绿氢技术^[50]。化学链制氢反应实现了制氢与同步脱碳,省去了传统工艺中水气变换、脱碳、氢气提纯等过程,大幅降低脱碳能耗和制氢成本。化学链耦合电解水制氢采用化学链循环解耦电解析氢和析氧反应,省去昂贵的膜材料,安全性大幅提升,制氢能耗降低至3.4 kWh/Nm³,较传统碱性电解制氢下降30%。另外,我国学者也围绕采用含铁工业固废降成本,通过机器学习高通量筛选与改性,快速获得载氧体优化配方^[51];通过晶格氧与游离氧协同,提高生物质热解气化、脱碳、制氢反应效率,对生物质串行循环反应器微环境与反应协同转化机制和生物质负碳制氢反应系统耦合集成与放大规律进行了深入研究^[52],为生物质高效、低成本、规模化负碳制绿氢新途径提供理论指导。

2.2.4 低成本大规模储能技术

储能是实现可再生能源稳定输出的关键技术,储能技术包括机械储能、电化学储能、储热等^[53]。当前我国储能以抽水蓄能为主,其主要挑战在于大流量、高水头、宽负荷条件下的水泵水轮机设计,在频繁变工况条件下实现水泵水轮机稳定调节。对此,我国学者对抽水蓄能储/释过程工况特性与能量传递机理与水力瞬变下内流压力脉动等进行了深入研究。高温热储能技术因其可耦合发电侧或与用能侧的工业系统耦合,有望在新型电力系统中承担能源调控中心作用而被广泛研究,其中熔融盐高温热储能技术已经在光热电站中实现了商业化,为电网规模热储能提供了宝贵的经验^[54]。流体电池以氢、甲醇、氨等燃料以及电解液为可流动能量载体,由流道、电极、隔膜组成能量转换装置,具有能量与功率解耦、时长灵活、扩展性好、不受地理限制等优点。流体电池中的液态金属电池,采用液态金属电极和熔融无机盐电解质,具有循环寿命长、储能成本低、安全可靠等优势,在中长时储能领域具有重要应用前景^[55]。基于此,国内学者提出了电—热耦合储能系统服役特性调控策略,实现了600 Ah大容量电池稳定运行(15 000循环),并构建了国内首台套5 kW级储能系统,为液态金属电池规模储能应用奠定了坚实的理论和基础。此外,开发了高性能金属离子电容储能电极、电解液、隔膜及单体和模组制备工艺,研究储能温度效应及拓宽工作温度窗口途径,通过火电快速负荷响应及金属离子电容理论与技术研究,可为形成大型沙戈荒新能源基地稳定运行的新理论、新技术和

新装备提供重要支撑。

发展高效、清洁的长时储能技术已成为构建新型能源体系的关键挑战。近年来,基于金属燃烧与金属氧化物绿氢还原构建的储能—释能循环体系逐渐同样引起广泛关注^[56,57]。该技术路线通过在能源富裕时段利用绿色氢气还原金属氧化物生成金属,在能源需求时段通过金属燃烧释放热能和/或驱动发电,从而实现高效、闭环的能量转换与存储。相比传统储能方式,该体系具有能量密度高、原材料储量丰富、产物可回收利用、系统可跨季节运行等优势。在工业领域,该技术有望用于高温热源替代,实现钢铁、水泥等工业过程中的低碳热能供给;在交通运输领域,以金属粉末作为“固态燃料”,可为船舶、长途卡车等提供高密度能源载体,具备良好的运输与补给便利性;在分布式能源系统中,该技术可与光伏、风能等可再生能源互补,提供稳定的长时热电储能解决方案,提升能源自给率和系统韧性。尽管前景广阔,该体系仍面临诸多关键科学问题亟待解决:包括金属燃烧反应的高效调控与再燃性优化、燃烧产物颗粒的结构控制与循环稳定性、金属氧化物的绿氢还原效率与催化机制、系统热管理与动态响应设计,以及储运安全与经济性评估等。未来在材料科学、热工过程与系统集成等多学科交叉领域需要展开深入研究,以推动该储能技术的工程化发展和规模化应用。

2.2.5 风光电解制氢及含能体技术

风光等可再生能源受环境影响大,输出功率质量差、随机性强,与电解制氢耦合运行难以协调,亟需在催化电极材料、反应设备结构、运行控制策略等方面取得基础理论创新和关键技术突破^[58,59]。国内学者揭示了自支撑纳米阵列电极的电荷转移机制及耐受宽功率波动机理,研制了新型气液分离双层流道电解槽结构提升系统耐受波动能力,解决了风能利用过程中瞬时宽功率波动电源下催化电极衰减严重、制氢系统稳定性差等难题。使用光/电催化技术将水/二氧化碳或水/氮气转化为绿氢、绿醇等氢能载体,能够实现长期的绿氢的化学存储,对此我国学者开展了光/电催化合成过程中催化剂创制、器件及反应器设计等核心技术的研发工作,能够通过调控反应条件得到多种氨衍生物,其中产生的绿氢可通过等离子体氨裂解释氢工艺在常温常压下裂解产氢。新型水分解工艺使用氢溢流串联强吸/放热反应,实现原位供热,并耦合NRR和HOR反应,可以提高能量效率和产品附加值,在整个过程中保证原位能量耦合^[60]。基于光伏制氢和无线PEC制氢技术产生的绿氢通过化学催化转化为绿氨或者绿醇,较氢气更稳定、易于储存、运输和分配,可以实现绿氢的安全化学存储。针对光生

驱动力不足及波动性导致膜电极稳定性差等问题,国内学者通过对质子交换膜采取特定的表面处理,使得膜表面涂层在高湿度下可打开气孔实现失水功能,在低湿度下可关闭表面气孔实现保水机制,结合有序化离子膜质子传输通道,可大幅提高质子交换膜的电导率,有效提高燃料电池性能^[61]。此外,水电解制氢技术的高温化可有效优化反应热/动力学特性与装备电/热能量综合管理,在单元—系统多维提升氢气制取效率的同时优化长时储能效率^[62]。

2.3 能源动力的技术发展

2.3.1 保障性能源动力变革与新能源燃料的科学问题

面对我国富煤、缺油、少气的能源资源禀赋,能源安全形势严峻,石油对外依存度高达70%以上,已远超50%的安全警戒线。内燃机作为陆上运输、工程机械、农业机械、船舶及国防装备主导动力,同时也消耗我国60%石油,碳排放量占比近10%。在电气化、智能化程度不断提升的背景下,内燃机由于能量密度高、可靠性高,在重载、长途运输领域优势明显,内燃动力技术与新型动力技术在不同应用场景下可组成优势互补、混合动力的多能耦合系统。当前,内燃动力技术呈现出燃烧高效清洁化、零碳化,系统混动化、智能化的发展趋势^[63]。为了实现内燃动力技术从转换过程、燃料选择到系统运行全过程的提效节能降碳,我国学者针对先进内燃动力多元燃料高效清洁燃烧与能量高效梯级利用开展了深入研究,形成了系列理论创新与关键核心技术,并提出内燃机反应率与混合率协同、总能效率协同耦合的节能提效思想,目前已形成良好的内燃动力学研产协作创新体系^[64]。

另一方面,面对碳中和目标,由化石能源向新能源过渡的绿色转型至关重要。随着“源网荷储”新型电力系统的逐渐完善,可再生能源在新能源存储与燃料脱碳领域发挥重要作用,各国陆续颁布了针对车船动力能源的变革政策,加速进入车船产业低碳甚至零碳时代^[65]。利用零碳电力制取氢、氨和合成燃料,既提供绿色燃料,也将作为一种新型储能方式,在储能规模和储能时间方面具有独特优势,便于储存与运输,可实现跨季节大规模储能与广域共享^[66]。与此同时,电制燃料技术的经济分析表明其成本需综合考虑绿电价格、外部环境、全球碳约束、绿电零边际成本特性以及可再生燃料的大规模制备等多方面因素,以确保其在降低碳排放、提高能源利用效率的同时,实现可持续发展和能源绿色转型。此外,电制燃料的应用还面临着诸多困难和亟需解决的关键科学问题,因此只有加快可再生燃料的研发布局,加大对可再生燃料及其发动机应用的基础研究和关键

技术研发的支持力度,设定短期、中期、长期的研发目标,才能实现可再生燃料基础理论和关键技术系列突破,加快创新成果转化与应用。

2.3.2 氢航空动力发展趋势与挑战

为实现“双碳”目标下的能源转型,考虑全球航空业绝对碳排放量逐年增加这一现状,2023年10月,工业和信息化部、科学技术部、财政部、中国民用航空局联合印发《绿色航空制造业发展纲要(2023—2035年)》,旨在推动“绿色航空”发展,实现绿色低碳航空转型^[67]。据统计,航空业贡献了全球约2%~3%的CO₂排放量,仅次于陆路交通领域。面对这一碳减排难题,国际民航组织的研究表明,基于较为乐观的技术进步前景,到2050年航空业仍有65%的碳排放缺口需要通过可持续航空燃料(Sustainable Aviation Fuel, SAF)来填补。

可持续航空燃料的制备技术路线多样,其中通过利用可再生能源制备获得航空替代燃料正在航空业低碳转型上扮演着越来越重要的角色^[68]。包括通过费托合成(FT-SPK)与电转液(Power-to-Liquid, PtL)技术等。费托合成技术首先将生物质或煤炭气化生成碳氢合成气,再通过费托合成反应转化为液态烃类燃料;而电转液技术则通过将费托合成与可再生能源电力结合,通过电解水所制得的绿氢与空气中直接获取的CO₂反应合成燃料,实现近乎零碳排放的航空燃料生产。目前将氢能应用于航空动力的途径主要有三种:氢作为燃料直接应用于传统航空发动机、氢燃料电池以及基于氢能的新循环和混合热力循环。相比传统燃油,氢的质量热值高,可燃极限宽,但上机直接燃烧仍存在多方面技术有待攻克,且氢燃料电池的功率密度等关键参数也需要进一步提升。考虑到基于氢能的航空动力涉及众多学科的交叉融合,我国学者提出了氢制备、氢储运、氢燃烧、氢电池等一体化应用全链条关键技术与核心理论。

此外,针对传统飞机存在的能源分布复杂、效率低,系统管路长、质量大,可靠性低、维护困难等终端用能问题,将二次能源逐步统一为电能并进行分配与传输的多电/全电飞机的出现,将极大简化系统架构,在提升可靠性与维护性的同时还降低了飞机的燃油消耗与碳排放。多电/全电飞机提升了飞机能量管理效率,为飞机系统能量综合管理奠定基础。早在20世纪80年代,美国、欧洲等已提前布局多电/全电技术,我国在电力电子、电力系统等学科具有良好基础,但在多电/全电飞机电力系统方面的研究与国际先进水平尚存在一定差距,亟需加强该领域的基础性研究。大容量全电力电子化电力系统需要结合飞机电能供给侧与机载电子装备侧的特点,通过

“机—电—磁—热—力”多物理场强耦合以及时空与资源强约束,从而构建具有大功率、非线性、高可靠特征的多电/全电飞机电力系统,但同时也面临着系统架构与能量优化,系统高频、高效、高可靠电能变换以及稳定机理与可靠运行等关键技术与挑战。

2.3.3 面向高比功率动力循环的跨/超临界流体热物理研究

高比功率动力技术具有紧凑化、微型化、高负荷、大功率、能源适配性强和节能提效等特性^[69],对于提高车辆、舰船、飞行器移动平台动力以及煤炭清洁高效利用、可再生能源等终端用能的效率和减排具有重要意义。目前,CO₂、N₂、Xe、Ar等单组分或混合流体(工质)的临界参数与环境适配好,密度高、黏度低,而跨/超临界流体热动力技术具有紧凑、高效、灵活、振动级小、比功率高和无排放的优势,能够进一步提高热能利用效率,是国际前沿与热点研究方向,但也存在诸多关键科学问题需要研究,包括跨/超临界多组分流体非平衡态凝结相变机理^[70],跨/超临界混合流体湍流输运机理与模式理论,跨/超临界流体热气动弹性耦合机理及设计新理论等。我国学者已在超临界流体热物性、湍流动力学特性和布雷顿循环热动力技术等方面开展了深入研究,取得了丰硕的成果,构建了超临界流体流动传热机理与湍流模型,建立了多组分流体状态方程。

2.4 低碳高效终端用能方法与理论

2.4.1 工业节能与供能的高效调控机制

根据国际能源署(IEA)的统计数据,全球终端能耗中的冷热占比高达51%,其中建筑和工业能耗成为主要的能源消耗领域,实现碳中和的关键在于降低上述领域冷热能供应的碳排放量^[71]。

针对建筑节能领域的空调热湿调控及能效提升,我国学者提出了耦合降温除湿和冷凝热用于再生的开闭耦合式除湿热泵循环^[72],使夏季空调系统COP提升近一倍,达到节能和环保的双重效果。针对太阳能光伏发电效率提升与热回收,克服温度效应和电热联产,可将80%以上的太阳辐射转换为有用的电能和热能。与单纯光伏电池相比,PVT提高发电量10%以上。针对耦合光伏—储电—电网的建筑供能调控,在建筑电气化的发展过程中实现能源系统耦合建筑一体化设计与建造,建筑与电力系统实现智能交互,能源达到自给率60%~70%。针对储热及热泵调控,打造以储热与热调控为核心的能源终端热脱碳路径,对高密度储热技术、储热中的热泵增量储能及能质调控供能以及相关科学问题开展深入研究与探索。考虑到碳中和背景下热能供应将发生由化石燃料燃烧转向可再生能源供热的根本性

变化,通过热泵利用空气热能等实现高效供热,是供热降碳的关键。

2.4.2 高温多形态工业余热回收及能质多效高质化利用

工业领域能源消耗在我国能源消耗中占据主导,特别是冶金、建材、化工等高能耗行业的工业余热资源丰富,但回收利用率仅为1/3,巨大的热能浪费问题亟待解决,高温余热回收也已成为实现工业零碳或大规模脱碳的关键^[73]。在冶金行业,高温烟气、荒煤气、高炉渣、钢渣、有色金属渣等都是回收重点,已有的技术如高温高含尘烟气、高炉渣、固体散料的余热回收技术正在逐渐应用^[74],然而荒煤气、钢渣、有色金属渣的余热回收技术仍处于研究探索阶段,诸多技术难题亟待攻克。

荒煤气含有高温热能、化学能和压力能等多种余能,有色金属渣则具有显著的有价金属和余热回收潜力,此外我国钢渣堆存量巨大但利用率仅为30%。针对上述三种工业余热资源的形态与特征,我国学者提出了“能源化—资源化—减碳化”的多效高质综合利用策略,旨在全方位提升能量与物质利用效率,实现能量回收利用与物料资源化减碳化利用的双重目标,并分别制定了相应的高温高含尘易结焦工业可燃废气余热回收技术、高温有色金属熔渣余热及资源高效回收与高质利用技术以及高温碱性熔渣余热回收及全量化利用技术^[75]。在处理多相热质传递与转化的余热回收利用过程中,研究人员通过调控气—固—液三相组分及温度,成功实现了抑爆、防结焦—积灰—腐蚀—磨损,从而提高能量回收利用率及物料资源化利用品质和功能。这一系列研究成果不仅丰富了我国工业余热回收技术的体系,也为我国实现零碳或大规模脱碳目标提供了重要技术支撑。

2.4.3 氢能存储与过程装备技术

低成本长时氢/电储存输运技术是实现国家能源绿色转型的关键。地质储氢是大规模储氢方式之一,我国学者基于地质调查、模型试验与数值模拟等手段,提出影响储氢库建设的主要地质指标,科学评估了储库安全性与经济性,可实现储氢库场址优选和长周期安全运维^[76]。低温液态储氢主要经压缩、冷却液化等过程将氢气储存于高度绝热容器中,通过减压阀等控制汽化排放氢气,当前液氢储运温度为-253℃,运行压力1~300 atm,氢气密度约为71 kg/m³,储氢密度大于5 wt%。与低温液态储氢相比,低温高压储氢同样具备优势,我国学者研究表明以外部冷源将高压氢气冷却至储存温度制取低温高压氢气,能耗远低于传统液氢气化法。此外,通过在储氢容器中填充多孔吸附材

料可提高储氢密度并降低储氢压力,但传统低温高压储氢容器尚无法同时耐受低温和高压^[77]。对此,我国学者对深冷高压临氢环境下材料损伤与断裂机理进行了深入研究,建立了热—机—化多场耦合下装备的绝热—强度失效理论与设计方法,构建了基于气—气液共存—超临界的热力学分析模型,形成了供氢过程温度、压力、物态及其质量比的多参数优化控制技术。在有机液态储氢技术领域,存在有机介质—催化剂体系活性差、稳定性不足、寿命短等问题,对此国内学者通过优化有机储氢介质分子结构设计,开展新型原子对催化剂研制,突破了贵金属易结焦的瓶颈,实现了C-H键的活化和有机液体选择性脱氢,并建成了百公斤级绿氢储运撬装装置。当前,我国已经建设了百余座加氢站,正建设分布式氢动力平台,并将进一步发展传统优势能源与光伏、风电、氢能等新能源的多能互补、深度融合和制—储—输氢一体化技术,将氢气的生产、储存和输送相互衔接,从而进一步提高整个氢能源系统的能效,降低系统的能耗和成本,提高环保水平,并逐步形成完整的氢产业链,持续推动产业链的升级和转型。

2.4.4 自然工质CO₂动力/制冷循环

降低CO₂排放是国家重大战略需求,以CO₂作为能量转换工作介质的热力循环减排潜力突出,欧美日韩已相继布局了国家研究计划与示范,我国起步较晚,基础研究薄弱,并且关于CO₂的全功率谱系尚不完整,关键共性技术仍显不足。其中,发电系统高效化是各国CO₂发电系统新一轮技术竞争的核心,动力系统高效化是CO₂动力系统移动式应用的关键,冷热系统自主化是CO₂冷热联供技术在国内大范围推广应用的必然选择^[78]。自然工质CO₂循环技术是一种创新的碳减排方法,通过直接利用CO₂作为工质进行动力/制冷循环发电和制冷,是碳捕集、利用和封存(CCUS)领域的主要方向。此外,自然工质CO₂循环技术能够替代非CO₂温室气体工质,实现CO₂的直接替代并有效减少温室效应。

为此,我国学者已建立了工质物性—循环构型协同的CO₂循环理论,揭示了CO₂物性与循环效率的本征关系,建立了跨临界分流吸热、双级压缩等循环新构型的提效机制,并发明了CO₂跨临界动力循环内燃机余热回收技术和CO₂跨临界制冷循环提效技术,成功研制了世界首套冬奥会CO₂制冰系统和世界首台重卡CO₂余热回收系统^[79,80]。自然工质CO₂动力/制冷循环技术已成为我国CO₂工质循环领域的标志性进展,对我国实现“双碳”目标进程中的CO₂利用与工质替代具有重要意义。

3 未来5~10年能源低碳转化与高效利用领域的发展目标及资助重点

3.1 发展目标

近年来,通过多学科交叉融合,我国已在能源高效低碳转化、绿色氢电与长时储能、终用能提效减排等技术领域取得了突出进展。但不可忽视的是,由于能源的特殊性和重要性,以及用能新格局的多元复杂性,还需要围绕国家重大需求,针对当下能源转化与利用中的关键科学问题,全面提升研究水平,进一步充分探索变革性低碳技术,实现能效、清洁与低碳相容协调“三位一体”的发展新模式,力争突破传统链式用能弊端,构建低碳转化能源利用新体系,推动低碳能源产业发展。

3.2 重大研究计划建议

我国已对能源系统发展提出了新要求,已从“能耗双控”转向“碳排放双控”。如何以最小的代价突破碳中和约束的关键瓶颈、构建新一代能源系统是重大挑战,面对不同的规模层级、资源禀赋、发展状态等多元化科学难题,需要获取新一代能源系统的最佳形态特征和演化路径。

建议设立关于绿色低碳能源转化、多能源互补与融合等领域的重大研究计划。面对能源低碳变革发展新趋势,需从基础理论、创新方法、关键技术等多层面、多维度布置研究计划,突破从理论到应用全链条科学与科技瓶颈。此外,面对能源多元化发展新趋势,充分利用信息和人工智能等新技术,在工程热物理、化学化工、电力电子多学科交叉层面,推动低碳能源理论与技术发展,共同助力实现“双碳”目标。

3.3 建议重点资助与方向

经过深入研讨,与会专家凝练了“双碳”目标下能源转化与利用重大关键科学问题,并建议未来5~10年能源转换与利用应着重围绕以下5个领域,通过多学科交叉开展原创性研究。

(1) 碳氢燃料低碳转化

应以碳氢燃料源头为突破口,构建能源低碳转化能质能势理论,推动实现能效、清洁与低碳三位一体的相容协调发展。建议继续加强化石燃料变革性利用技术的研发投入,开展循环构型及工质选取等方面创新研究,发展高效低碳与灵活协同的化石能源发电技术,并通过开展从设备到系统、稳态到瞬态多时空尺度的基础理论与技术研究,推动新型高效低碳动力循环创新发展;探索基于提供特种油品和高端化学品的煤基生产新途径,以及与石油和天然气互补发展的新技术,耦合消纳可再生能源,并实现煤转化过程中的低碳化及近零排

放。关注变革性燃烧、煤气化、碳氢解耦、氢能动力系统、低碳型多能互补系统等变革性低碳技术。促进解析能源能质转化原理、碳氢转化熵增原理与解耦调控方法、碳捕集能耗最小化原理与碳组分定向转化方法等重大科学问题。

(2) 可再生能源高效转化利用

应重点关注可再生能源转化能效提升,价值体系重构以及复杂结构优化等关键问题,鼓励探索变革性技术和研发关键能源装备。建议进一步开展太阳能、风能、生物质等广泛可再生能源自主创新技术,如新一代太阳能热发电、制燃料先进系统、风力机自主设计与智慧化平台、生物质高值高效转化方法与碳减量评估等,并开展全系统能源图谱研究,从系统到单元,以提高效率并降低成本。进行绿色能源多能互补系统与方法研究,深化化石能源与可再生能源融合互补理论,并积极探索太阳能高密度光分子驱动物相反应方案,推动风电与太阳能、水能、火力发电和储能储氢技术的综合应用。秉持“能源+X”的创新思路,推动绿色能源与高价值产业协同,基于价值体系重构协同高品质材料、化工原料等,践行绿色智慧发展。

(3) 波动性能源制备氢及含能体的高效转化机制

大力发展直接太阳能全光谱光热电耦合驱动的一体化氢热电联产联供技术,实现产氢和发电两种模式的自动转换,能够通过自动调控机组运行模式直接与能源消费端匹配。此外,开展高温电解水制氢系统吸/放热转换与高效绿氢制取、适应瞬时宽功率波动的风光储能电解制氢、基于有机液体的高效氢电转化及强化传输机制、抽水蓄能绿电储释、长时间储热材料设备及系统、流体电池基础理论及理性设计方法、液态金属储能电池材料体系及服役特性、沙戈荒新能源基地火储联合调频关键技术等方面研究。

(4) 含碳能源清洁高效低碳绿色制氢等含能体及氢高效存储机制

大力发展以超临界水蒸煤技术为代表的煤炭绿色清洁高效低碳新型制氢发电多联产技术。发电部分可发挥超临界水蒸煤技术模块化可串、并联和灵活增减的优势,实现能源供给体系内供需间的灵活高效调峰,确保电网调峰过程的高效、清洁、低碳;尽可能增大其产品中转化成载能体—氢能的比例,最大程度地实现化石能源的资源化、高价值转化,并因地制宜将产业链延长制备高值化学品。建立生物质制氢的小分子及其电催化剂的材料基因组,攻克制氢过程中小分子精选、催化剂设计、微生物选择和反应可控与体系集成等工程问题,采用化学链等关键技术实现制氢与同步脱碳。针对

所制备氢气,重点开展低成本大空间高安全地质储氢理论、低温液态储氢系统设计理论、低温高压氢气制备方法、双层真空复合材料储氢容器的绝热与强度性能调控机制、有机液体储放氢体系分子C-H键催化重构反应机制、氢能装备及储氢功能体系一体化设计理论等研究。

(5) 低碳与高效终端用能方法与理论

依托终端用能提效降碳目标,加强统筹协调“基础研究—关键技术—工程开发”多层次研究体系,以促进低碳用能基础理论和关键技术系列突破。建议继续加强多元能源互补用能的增效减碳机制与调控方法研究,开展多源能量流、物质流协同转化机制研究,发展多元混合动力热/电/功匹配下的系统灵活互联、智能调控,并通过多形态余能回收及多效化利用进一步推动互补用能系统完善提高;积极探索用能过程低碳重构原理与跨时空一体化协同新体系,进一步发展碳中性和零碳动力变革性技术,探索重点用能行业重构机制及能质协同新途径,并实现零碳体系下的源—网—荷—储跨时空全流程用能匹配;针对CO₂低能耗捕集、高效活化与定向转化挑战,进行低能耗CO₂捕集方法的跨尺度协同机理与定向转化原理研究,发展高可靠性的大规模CO₂封存安全监测风险防控方法,探索工业CO₂排放、捕集、转化一体化策略及全生命周期能/碳设计。

4 结 语

推动能源结构绿色转型是我国乃至全球的战略目标,是实现可持续发展和“双碳”战略的必经之路。基于能源交叉学科发展,我国已在高效低碳能源技术研究方面取得了突破性进展,但能势基础理论和科学用能方法应用发展尚未成熟,还存在载能体脱碳转化方法欠缺、绿色波动电源稳定消纳困难以及终端能源装备低效等技术问题,导致尚未形成低碳能源消费高占比格局。未来,需要进一步以构建新型低碳转化能源利用体系为目标,推动发展高效低成本大规模能源脱碳与绿色能源开发技术,以实现巨量CO₂减排和保障国家能源安全。本文梳理了“双碳”目标下能源转化与利用技术研究与应用现状,并针对当前能源发展的瓶颈问题,提出了未来5~10年能源学科交叉发展目标与资助重点的建议。

参 考 文 献

- [1] 于贵瑞,郝天象,朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 423—434.
Yu GR, Hao TX, Zhu JX. Discussion on action strategies of China's carbon peak and carbon neutrality. Bulletin of Chinese Academy of

- Sciences, 2022, 37(4): 423—434. (in Chinese)
- [2] 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(6): 1—14.
- Shu YB, Zhang LY, Zhang YZ, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1—14. (in Chinese)
- [3] 刘志成, 伊晓东, 高飞雪, 等. 绿色碳科学: 双碳目标下的科学基础——第292期“双清论坛”学术综述. 物理化学学报, 2023, 39(1): 99—107.
- Liu ZC, Yi XD, Gao FX, et al. Green carbon science: A scientific basis for achieving “dual carbon” goal——Academic summary of the 292nd “Shuang-Qing Forum”. Acta Physico-Chimica Sinica, 2023, 39(1): 99—107. (in Chinese)
- [4] 国家能源局. 2024年全国电力工业统计数据. 2025.
- [5] 邹才能, 熊波, 薛华庆, 等. 新能源在碳中和中的地位与作用. 石油勘探与开发, 2021, 48(2): 411—420.
- Zou CN, Xiong B, Xue HQ, et al. The role of new energy in carbon neutral. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(2): 411—420. (in Chinese)
- [6] 张沈习, 王丹阳, 程浩忠, 等. 双碳目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 189—207.
- Zhang SX, Wang DY, Cheng HZ, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189—207. (in Chinese)
- [7] 熊文杰, 涂远东, 张婧欣, 等. 双碳背景下中国CCUS技术发展现状与建议. 石油学报(石油加工), 2025: 1—14.
- Xiong WJ, Tu YD, Zhang JX, et al. Current status and recommendations for China's CCUS technology development under the dual carbon background. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2025: 1—14. (in Chinese)
- [8] 袁亮. 煤炭工业碳中和发展战略构想. 中国工程科学, 2023, 25(5): 103—110.
- Yuan L. Strategic conception of carbon neutralization in coal industry. Strategic Study of CAE, 2023, 25(5): 103—110. (in Chinese)
- [9] 陈浮, 王思遥, 于辰辰, 等. 碳中和目标下煤炭变革的技术路径. 煤炭学报, 2022, 47(4): 1452—1461.
- Chen F, Wang SY, Yu HC, et al. Technological innovation paths of coal industry for achieving carbon neutralization. Journal of China Coal Society, 2022, 47(4): 1452—1461. (in Chinese)
- [10] 康重庆, 杜尔顺, 郭鸿业, 等. 新型电力系统的六要素分析. 电网技术, 2023, 47(5): 1741—1750.
- Kang CQ, Du ES, Guo HY, et al. Primary exploration of six essential factors in new power system. Power System Technology, 2023, 47(5): 1741—1750. (in Chinese)
- [11] 谭增强, 王一坤, 牛拥军, 等. 双碳目标下煤电深度调峰及调频技术研究进展. 热能动力工程, 2022, 37(8): 1—8.
- Tan ZQ, Wang YK, Niu YJ, et al. Research progress of deep peak regulation and frequency modulation technology for coal-fired power plant under double-carbon targets. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(8): 1—8. (in Chinese)
- [12] 中国石油集团经济技术研究院. 2024年国内外油气行业发展报告. 2025.
- [13] 许传博, 刘建国. 氢储能在我国新型电力系统中的应用价值、挑战及展望. 中国工程科学, 2022, 24(3): 89—99.
- Xu CB, Liu JG. Hydrogen energy storage in China's new-type power system: Application value, challenges, and prospects. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 89—99. (in Chinese)
- [14] 康俊杰, 赵春阳, 周国鹏, 等. 风光水火储多能互补示范项目发展现状及实施路径研究. 发电技术, 2023, 44(3): 407—416.
- Kang JJ, Zhao CY, Zhou GP, et al. Research on development status and implementation path of wind-solar-water-thermal-energy storage multi-energy complementary demonstration project. Power Generation Technology, 2023, 44(3): 407—416. (in Chinese)
- [15] 王峰江, 刘鹏, 李荣春, 等. “双碳”目标下先进发电技术研究进展及展望. 热力发电, 2022, 51(1): 52—59.
- Wang XJ, Liu P, Li RC, et al. Research progress and prospects of advanced power generation technology under the goal of carbon emission peak and carbon neutrality. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 52—59. (in Chinese)
- [16] 张金平, 周强, 王定美, 等. “双碳”目标下新型电力系统发展路径研究. 华电技术, 2021, 43(12): 46—51.
- Zhang JP, Zhou Q, Wang DM, et al. Research on the development path of new power system to achieve carbon peaking and carbon neutrality. Integrated Intelligent Energy, 2021, 43(12): 46—51. (in Chinese)
- [17] 许涛, 王国春, 董昱, 等. 新型电力系统平衡机理及演进过程研究. 中国电机工程学报, 2025, 45(1): 1—14.
- Xu T, Wang GC, Dong Y, et al. Research on power balance mechanism and evolution of new power system. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 1—14. (in Chinese)
- [18] Guo LJ, Ou ZS, Liu Y, et al. Technological innovations on direct carbon mitigation by ordered energy conversion and full resource utilization. Carbon Neutrality, 2022, 1(1): 4.
- [19] 金红光, 刘启斌, 隋军. 多能互补的分布式能源系统理论和技术的研究进展总结及发展趋势探讨. 中国科学基金, 2020, 34(3): 289—296.
- Jin HG, Liu QB, Sui J. Theory and technology of multi-energy complementary distributed energy system: Summary of the research progress and development trend. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2020, 34(3): 289—296. (in Chinese)
- [20] 邵桂萍, 许洪华. 可再生能源综合系统现状与未来发展趋势研究. 太阳能, 2024(7): 127—132.
- Shao GP, Xu HH. Research on present situation and future development trend of renewable energy integrated system. Solar Energy, 2024(7): 127—132. (in Chinese)
- [21] 张贤, 李阳, 马乔, 等. 我国碳捕集利用与封存技术发展研究. 中国工程科学, 2021, 23(6): 70—80.
- Zhang X, Li Y, Ma Q, et al. Development of carbon capture, utilization and storage technology in China. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 70—80. (in Chinese)
- [22] 袁士义, 马德胜, 李军诗, 等. 二氧化碳捕集、驱油与封存产业化进展及前景展望. 石油勘探与开发, 2022, 49(4): 828—834.
- Yuan SY, Ma DS, Li JS, et al. Progress and prospects of carbon dioxide capture, EOR-utilization and storage industrialization. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(4): 828—834. (in Chinese)
- [23] 程超, 高丹, 张衡, 等. 煤炭与新能源融合发展场景与关键技术. 中

- 国工程科学, 2024, 26(4): 52—62.
- Cheng C, Gao D, Zhang H, et al. Integrated development of coal and new energy sources: Scenarios and key technologies. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(4): 52—62. (in Chinese)
- [24] 李宇航, 田舒嫚, 张普选, 等. 燃煤电站锅炉掺氨燃烧特性及对锅炉影响研究进展. *热力发电*, 2025, 54(5): 13—24.
- Li YH, Tian SM, Zhang PX, et al. Research progress on combustion characteristics of ammonia co-firing in coal-fired power plant boilers and its influence on boilers. *Thermal Power Generation*, 2025, 54(5): 13—24. (in Chinese)
- [25] Liu QW, Zhong WQ, Yu AB, et al. Co-firing of coal and biomass under pressurized oxy-fuel combustion mode: Experimental test in a 10 kWth fluidized bed. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 431: 133457.
- [26] Fichtner J, Gegner A, Ninow J, et al. Hydrogen enriched natural gas as fuel for CHP units. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(90): 35280—35290.
- [27] 郭栋, 周臣臣, 葛志伟, 等. 煤炭超临界水气化技术研究进展. *现代化工*, 2024, 44(3): 43—47, 52.
- Guo D, Zhou CC, Ge ZW, et al. Advances on coal supercritical water gasification. *Modern Chemical Industry*, 2024, 44(3): 43—47, 52. (in Chinese)
- [28] Luo K, Dong RQ, Li XJ, et al. Thermodynamic and safety analysis for hydrogen production in a supercritical water gasification system of coal by multi-oxidizers distribution. *Energy*, 2025, 331: 137105.
- [29] Zhang F, Chen WJ, Wang SZ, et al. Investigation of the reaction mechanism for supercritical H₂O/CO₂ gasification of coal. *Energy*, 2025, 320: 135441.
- [30] Xue XD, Han W, Xin Y, et al. Proposal and energetic and exergetic evaluation of a hydrogen production system with synergistic conversion of coal and solar energy. *Energy*, 2023, 283: 128489.
- [31] Zhang YY, Li WR, Cheng XY, et al. Air and oxy-fuel combustion characteristics of coal gangue and weathered coal blends. *Energy*, 2023, 284: 128660.
- [32] 李振山, 李维成, 刘海洋, 等. 中国化学链燃烧技术研发进展与展望. *中国电机工程学报*, 2024, 44(18): 7200—7221.
- Li ZS, Li WC, Liu HY, et al. Development and prospect of chemical looping combustion technology in China. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(18): 7200—7221. (in Chinese)
- [33] Song YW, Lu YJ, Wang MM, et al. Screening of natural oxygen carriers for chemical looping combustion based on a machine learning method. *Energy & Fuels*, 2023, 37(5): 3926—3933.
- [34] Li YS, Luo CH, Xu JH, et al. A cold start-up method with combining chemical-looping combustion and catalytic combustion for a methanol reformer. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49: 668—679.
- [35] Qin TY, Yan XP, Yuan CQ, et al. Review of system design and operation control technology of supercritical CO₂ power cycle. *Energy Conversion and Management*, 2025, 326: 119462.
- [36] Seo SB, Kim HW, Kang SY, et al. Techno-economic comparison between air-fired and oxy-fuel circulating fluidized bed power plants with ultra-supercritical cycle. *Energy*, 2021, 233: 121217.
- [37] Ren SY, Feng X, Wang YF. Emergy evaluation of the integrated gasification combined cycle power generation systems with a carbon capture system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 147: 111208.
- [38] 中国石油规划总院. 中国油气与新能源市场发展报告(2025). 北京: 石油工业出版社, 2025.
- CPPEI. Report on the Development of China's Oil and Gas and New Energy Markets (2025). Beijing: Petroleum Industry Press, 2025. (in Chinese)
- [39] Li PY, Che YB, Hua AR, et al. A data-physics hybrid-driven layout optimization framework for large-scale wind farms. *Applied Energy*, 2025, 392: 125908.
- [40] 朱涛, 李强, 宣益民, 等. 太阳能光伏/光热化学利用系统. *工程热物理学报*, 2021, 42(4): 999—1003.
- Zhu T, Li Q, Xuan YM, et al. A photovoltaic/thermochemical hybrid solar system. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(4): 999—1003. (in Chinese)
- [41] 赵宁, 王江江, 姚梓博, 等. 基于太阳能全光谱利用的制氢发电系统性能研究. *热力发电*, 2022, 51(11): 74—82.
- Zhao N, Wang JJ, Yao ZB, et al. Performance analysis of hydrogen production power generation system based on full-spectrum utilization of solar energy. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(11): 74—82. (in Chinese)
- [42] Xu C, Tang QJ, Tu WG, et al. Photon and phonon powered photothermal catalysis. *Energy & Environmental Science*, 2024, 17(13): 4461—4480.
- [43] 关键, 马荣, 李东辉, 等. 全光谱太阳能光热催化制氢研究进展. *洁净煤技术*, 2024, 30(12): 22—37.
- Guan J, Ma R, Li DH, et al. Recent advances in full-spectrum solar photothermocatalytic hydrogen production. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(12): 22—37. (in Chinese)
- [44] Wang WZ, Zhao QY, Lu BR, et al. Pure hydrogen gas production in a coal supercritical water gasification system with CO₂ as transporting medium. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 237: 121529.
- [45] Xiao ZR, Zhang LS, Tan XY, et al. Advances in oxygen defect-mediated photothermal catalytic CO₂ hydrogenation reduction. *Advanced Functional Materials*, 2025, n/a(n/a): 2500339.
- [46] Zhu HR, Xu HM, Huang CJ, et al. Recent advances of the catalysts for photoelectrocatalytic oxygen evolution and CO₂ reduction reactions. *Chinese Journal of Catalysis*, 2024, 62: 53—107.
- [47] 王智, 孙溪悦, 颜蓓蓓, 等. 玉米秸秆梯度厌氧发酵耦合热解机制解析. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2025, 58(5): 541—550.
- Wang Z, Sun XY, Yan BB, et al. Mechanism analysis of corn stalk gradient anaerobic digestion coupled pyrolysis. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2025, 58(5): 541—550. (in Chinese)
- [48] 李紫龙, 闫洪远, 杨俊, 等. 碳中和背景下生物质能利用途径与产业现状. *能源与环保*, 2025, 47(1): 142—147.
- Li ZL, Yan HY, Yang J, et al. Utilization ways and industrial status of biomass energy in context of carbon neutrality. *CHINA ENERGY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION*, 2025, 47(1): 142—147. (in Chinese)
- [49] 赵丹丹, 赵伟, 单锐, 等. 新型纸浆污泥生物炭基催化剂的制备及其催化合成生物柴油研究. *太阳能学报*, 2023, 44(9): 432—439.
- Zhao DD, Zhao W, Shan R, et al. Study on preparation of modified

- waste paper pulp biochar-based catalyst and its catalytic application for biodiesel production. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(9): 432—439. (in Chinese)
- [50] 吴笛, 吴石亮, 肖睿. 规模化生物质气化-化学链制氢技术研究进展与展望. *新型电力系统*, 2023(2): 184—199.
- Wu D, Wu SL, Xiao R. Progress and prospect of large-scale hydrogen production based on biomass gasification-chemical looping technology. *NEW TYPE POWER SYSTEMS*, 2023(2): 184—199. (in Chinese)
- [51] Wang JZ, Chen G, Chen YH, et al. Intelligent mixture optimization for stabilized soil containing solid waste based on machine learning and evolutionary algorithms. *Construction and Building Materials*, 2024, 445: 137794.
- [52] Full J, Ziehn S, Geller M, et al. Carbon-negative hydrogen production: Fundamentals for a techno-economic and environmental assessment of HyBECCS approaches. *GCB Bioenergy*, 2022, 14(5): 597—619.
- [53] 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(5): 1516—1552.
- Chen HS, Li H, Xu YJ, et al. Research progress on energy storage technologies of China in 2022. *Energy Storage Science and Technology*, 2023, 12(5): 1516—1552. (in Chinese)
- [54] Xiao T, Xu JL, Xie J, et al. Advanced encapsulation strategies for high-temperature molten salt: Synthesis methods and performance enhancement. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025, 218: 115818.
- [55] Close J, Barnard JE, John Chew YM, et al. A holistic approach to improving safety for battery energy storage systems. *Journal of Energy Chemistry*, 2024, 92: 422—439.
- [56] Jing HL, Yang HT, Yu XH, et al. Research advances on metal fuels without carbon dioxide emissions. *International Journal of Green Energy*, 2024, 21(3): 570—588.
- [57] Prabu S, Vinu M, Chiang KY, et al. Bimetal-organic frameworks derived redox-type composite materials for high-performance energy storage. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2024, 669: 624—636.
- [58] Hosseini SE, Wahid MA. Hydrogen from solar energy, a clean energy carrier from a sustainable source of energy. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(6): 4110—4131.
- [59] Ibáñez-Rioja A, Järvinen L, Puranen P, et al. Off-grid solar PV-wind power-battery-water electrolyzer plant: Simultaneous optimization of component capacities and system control. *Applied Energy*, 2023, 345: 121277.
- [60] 刘研, 刘雅琦, 邢立文, 等. 电催化析氢反应中的氢溢流效应. *化学进展*, 2024, 36(2): 244—255.
- Liu Y, Liu YQ, Xing LW, et al. Hydrogen spillover effect in electrocatalytic hydrogen evolution reaction. *Progress in Chemistry*, 2024, 36(2): 244—255. (in Chinese)
- [61] Zhou TT, Wang C, Cheng XZ, et al. Two-phase flow characteristics on porous layer in PEM electrolyzer under different flow channel layouts. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 80: 249—260.
- [62] Duan F, Wei XJ, Huang YJ, et al. Performance evolution of typical electrocatalysts with electrolyte temperature during alkaline water electrolysis. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2023, 127(17): 8041—8047.
- [63] Qi YL, Liu W, Liu S, et al. A review on ammonia-hydrogen fueled internal combustion engines. *eTransportation*, 2023, 18: 100288.
- [64] Wang XC, Gao JB, Chen ZM, et al. Evaluation of *Hydrous* ethanol as a fuel for internal combustion engines: A review. *Renewable Energy*, 2022, 194: 504—525.
- [65] Guan YR, Shan YL, Hang Y, et al. Unlocking global carbon reduction potential by embracing low-carbon lifestyles. *Nature Communications*, 2025, 16: 4599.
- [66] 高建刚, 姜亚鹏, 包宝青, 等. 绿氢转化制绿色甲醇与绿氨. *化工进展*, 2025, 44(4): 1987—1997.
- Gao JG, Jiang YP, Bao BQ, et al. Green methanol and green ammonia synthesis by green hydrogen. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2025, 44(4): 1987—1997. (in Chinese)
- [67] 工业和信息化部, 科学技术部, 财政部, 等. 绿色航空制造业发展纲要(2023-2035年). 2023.
- [68] 郭汀汀, 李华杰, 聂卫东, 等. 全球减碳背景下生物航油产业发展分析. *中国能源*, 2023, 45(6): 47—56.
- Guo TT, Li HJ, Nie WD, et al. Analysis of the development of the sustainable aviation fuel under the background of global carbon reduction. *Energy of China*, 2023, 45(6): 47—56. (in Chinese)
- [69] Xu C, Zhang Q, Yang ZP, et al. An improved supercritical coal-fired power generation system incorporating a supplementary supercritical CO₂ cycle. *Applied Energy*, 2018, 231: 1319—1329.
- [70] Ren QQ, Yang ZW, Liu Y, et al. Study on the criterion of the onset of heat transfer deterioration for supercritical CO₂ in upward flow. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 248: 123223.
- [71] Wang XY, Du Q, Lu C, et al. Exploration in carbon emission reduction effect of low-carbon practices in prefabricated building supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 368: 133153.
- [72] Li Q, Wang RZ, Ge TS. A mathematical model to predict the properties of solid desiccant heat pump by self-refined mesh algorithm. *Energy Conversion and Management*, 2024, 301: 118078.
- [73] 顾大钊, 李阳, 李根生, 等. 面向2040年我国碳中和重点领域工程科技发展战略研究. *中国工程科学*, 2024, 26(5): 80—90.
- Gu DZ, Li Y, Li GS, et al. Development strategy of engineering science and technology in key fields of carbon neutrality in china toward 2040. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(5): 80—90. (in Chinese)
- [74] Wei RF, Xia JJ, Zhou D, et al. Carbothermal reduction of flue gas desulfurization ash through the utilization of waste heat from steel slag: Investigating performance and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 499: 155883.
- [75] Zhang DJ, Ma T. Study on slagging in a waste-heat recovery boiler associated with a bottom-blown metal smelting furnace. *Energy*, 2022, 241: 122852.
- [76] Zeng LP, Sander R, Chen YQ, et al. Hydrogen storage performance during underground hydrogen storage in depleted gas reservoirs: A review. *Engineering*, 2024, 40: 211—225.
- [77] Li KX, Dong XQ, Wang HC, et al. Study on the influence factors of gravimetric hydrogen storage density of type III cryo-compressed hydrogen storage vessel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 96: 680—691.
- [78] Li TL, Gao RZ, Wang JY, et al. Synergetic characteristic of a novel

- thermally-driven CCHP system based on supercritical and transcritical CO₂ cycles. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236: 121727.
- [79] Zhang XA, Wang X, Yuan P, et al. Achieving effective engine thermal management and waste heat storage utilisation by coupling the dual-pressure organic Rankine cycle system with hybrid electric truck. *Journal of Energy Storage*, 2024, 98: 113016.
- [80] Li LG, Liu K, Tian H, et al. A low-carbon CO₂ ice rink technology for the Winter Olympics. *Science Bulletin*, 2023, 68(23): 2877—2880.

The Energy Conversion and Utilization of Scientific Problems for Achieving “Dual Carbon” Goal

Hongguang Jin^{1*} Liejin Guo² Yimin Xuan³ Peixue Jiang⁴ Yonggang Guan⁵

1. *Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

2. *State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*

3. *School of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210016, China*

4. *Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

5. *Department of Engineering and Materials Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China*

Abstract Developing a “clean, low-carbon, safe and efficient” modern energy system is a major national demand to promote the realization of the “dual carbon” goal. This paper, based on the 358th “Shuangqing Forum”, summarizes the challenges and difficulties faced by energy green low-carbon transition research and industrial development. It reviews the main progress and achievements made in recent years in the fields of energy low-carbon and efficient transformation, green hydrogen electricity and long-term energy storage, and end-use energy efficiency improvement and emission reduction. In addition, it summarizes the major key scientific issues in the field for the next 5~10 years. And the research direction and funding strategy of science fund are discussed.

Keywords carbon dioxide peaking, carbon neutrality; low-carbon energy conversion; long-duration energy storage; terminal improvement; green hydrogen and electricity

金红光 中国科学院院士,主要从事热力学和能源低碳系统理论与方法的研究。现任中国工程热物理学会荣誉理事长、《工程热物理学报》主编、中国科学院工程热物理研究所学术委员会主任。

(责任编辑 贾祖冰 张强)

* Corresponding Author, Email: hgjin@iet.cn