

• 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-2025.02.02.0004

能源低碳高效转化*

金红光^{1**} 刘启斌¹ 白章²

1. 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190

2. 中国石油大学(华东) 新能源学院, 青岛 266580

[摘要] 碳减排是实现“双碳”目标的重要方向,化石能源的低碳高效转化和可再生能源高效开发是其关键潜力所在,能源低碳高效转化科技创新与变革也将是助力形成绿色供能格局的必由之路。面对碳减排的艰巨性和复杂性,能源利用科学理论的突破是重要抓手,需要立足我国国情,提炼主攻方向,明确研究目标导向,综合考虑多层面能源技术创新,厘清当前能源转化与利用的关键科学问题。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面临的重大需求,以及通过自然科学和基础科学等多学科交叉支撑所取得的主要进展和成就,并凝练了能源低碳高效转化领域未来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;化石能源低碳利用;可再生能源高效开发;碳减排

能源是经济发展的源动力,也是关系到国家安全和经济社会可持续发展的关键因素。能源领域作为影响碳排放总量的重要因素,也是实现碳减排的关键潜力所在,在助力实现“双碳”目标的过程中有着重中之重中的地位^[1]。为此,在以化石能源为能源结构主体下的背景下,明确我国能源低碳转化的方向与重点任务,依托能源利用科学理论的突破与革新将促进能源低碳高效转化科技创新与变革,是推动实现“双碳”目标、形成绿色供能格局^[2-4]的必由之路。

目前,受资源禀赋等因素的影响,煤炭依旧是我国的主力能源。2024年,煤炭和石油等化石能源消费占全国能源消费总量的71.4%,可再生能源近年来也经历了跨越式发展,风光发电装机比例已超过40%,但尚未形成可靠的主体能源供应支撑^[5,6]。煤炭等化石能源是我国能源安全保障的压舱石,要实现碳达峰必须立足基本国情,构建能效、清洁与低碳相容与协调的三位一体新模式,以协调能源、经济、安全之间的发展矛盾。因此,亟待探索变革性燃料低碳转化方法和技术路线,明确碳

减排重大方向,提出适合国情、经济安全的低碳转化研究目标,进一步探索和研发先进高效利用能源理论与方法,为实现“双碳”目标奠定坚实基础。

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,与会专家对“双碳”目标下能源低碳高效转化技术的发展现状与趋势、未来主要研究方向和科学问题进行了梳理,深入研讨与凝练能源低碳高效转化的关键科学问题,并提出了国家自然科学基金委员会在各主题相关领域的基金资助战略建议,以进一步有序推进“双碳”目标、助力国家能源结构的绿色低碳转型。

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

“双碳”目标给能源技术的发展提出了新要求,也带来了新的机遇。受资源禀赋等因素影响,煤炭是我国能

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

本文受到国家自然科学基金项目(52488201)的资助。

引用格式: 金红光, 刘启斌, 白章. 能源低碳高效转化. 中国科学基金, 2025, 39(3): 489–497.

Jin HG, Liu QB, Bai Z. Low carbon and efficient conversion of energy. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(3): 489–497. (in Chinese)

源安全保障的压舱石,燃煤发电作为我国的主力电源,承担着电力系统灵活调节主体和电力安全稳定供应的兜底保障作用,利用好煤炭这一稳定、经济且自主保障程度较高的能源,对保障我国能源结构清洁低碳转型、经济社会高质量发展具有重要意义^[7]。目前,煤炭等化石燃料消费量占全国能源消费总量的80%以上,使得我国每年的碳排放量超过100亿吨;另外,传统的燃煤发电等方式不符合能的梯级利用与低碳转化,有待进一步创新传统的转化和利用技术^[8]。为实现我国能源和产业结构的调整,既不能期望一蹴而就,也不能忽视碳捕集带来的额外能耗和经济代价过高的实际,传统能源逐步退出应建立在新能源安全可靠的替代基础上,以降低对经济发展和社会稳定所造成的严重冲击。

因此,亟需发展能效、清洁与低碳相容与协调的三位一体新模式,协调能源、经济、安全之间的矛盾与难点,探索变革性低碳转化方式,以确保在能源转型过程中,既能满足社会经济发展的需求,又能有效应对气候变化等挑战^[9,10]。为实现这一目标,应重点关注能源转化环节,发展高效低碳与灵活协同的化石能源利用技术,这也是实现碳减排的主攻方向,对我国“双碳”战略至关重要。此外,可再生能源与氢能也是新型战略产业与碳减排主力军,以及煤炭等化石能源与太阳能、生物质能等可再生能源的绿色能源互补耦合技术也将作为重要的发展方向,然而针对多种不同特性能源的转化利用,必须厘清多种复杂组分燃料的转化耦合作用机制,并对互补和耦合过程进行调控以实现高效转化的目标^[11,12]。

由于缺乏突破性的原始创新和协同手段,实现能源安全和低碳发展目标依然存在严重挑战。为解决这一重大能源安全问题,亟需构建适合国情、经济安全的低碳转化技术路线,在全面梳理国内外煤炭高效低碳清洁发电、清洁转化技术和碳捕集利用与封存技术(Carbon Capture, Utilization, and Storage; CCUS)的现状与发展趋势的基础上,充分发挥化石燃料兜底保障的战略支撑作用,基于理论创新和技术创新,重点突破能源清洁化与多元化的低碳转化技术及关键科学问题。也需要进一步坚持先立后破,探寻可再生能源和长时储能,化石能源和二氧化碳捕集、利用与封存技术,氢能和低碳等不同能源品种之间的互补、协调、替代关系,以推动构建化石燃料与可再生能源高效低碳转化的协同发展体系。

1.2 关键科学问题

为实现上述核心关键任务,需要发展能质转化、碳氢转化以及低碳转化三者相容与协同的变革性低碳转化技术,攻克变革性燃烧、煤气化、碳氢解耦、太阳能、氢

能动力、低碳型多能互补系统等关键技术的底层原理,从而开拓高效低碳能源利用新途径,主要包括以下三方面的关键科学问题。

(1)碳氢燃料转化熵增原理与解耦调控方法。面对“多煤、少油、缺气”的能源禀赋,煤炭等化石能源在相当长时期内仍然在我国能源结构中占据重要地位,然而传统的煤炭等化石能源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。为此,亟需从燃料源头在节能的同时捕集CO₂,实现高碳能源低碳利用,开展从设备到系统、稳态到瞬态多时空尺度基础理论与技术研究,继续强化化石燃料变革性发电技术的研发投入,通过基础研究及先进技术研发,攻克关键科学问题,解决工程应用难题,推动发展适合我国国情的低能耗低成本的低碳技术路线。

(2)可再生能源高效转化理论与方法。受供给侧主导,我国可再生能源装机容量逐年递增,常规水电、风电、太阳能发电、生物质发电等装机容量均居世界第一,但仍面临发电量较低、城乡应用差距大、应用缺乏创新等一系列难题,以及“因地制宜发展可再生能源”策略的实施不到位等挑战。因此,亟需推动理论创新、技术创新、模式创新和政策创新以提高风能、太阳能、海洋能、生物质能等可再生能源的转化利用效率。

(3)“能量互补、能势耦合”的多能协同转化原理。基于物质流、能量流、环境流、经济流的全生命周期分析,集成多能源高精配置、差异调质,过程强化、精准调控,以及能源转化技术与装备,响应多能互补系统转化、供热、发电过程的物质流和能量流关键参数调控机制。根据不同区域资源禀赋和市场需求,通过人工智能模型寻优,实现多能源理论与技术的衔接壁垒突破,通过多场耦合实现能量的传递与储存、能量品质的提升,增强系统韧性。

2 主要研究进展与成果

2.1 变革性化石燃料低碳高效转化理论与方法

2.1.1 煤炭解耦分级气化与协同转化

在我国能源消费结构中,煤炭仍占据主要地位。为协调能源、经济、安全之间的发展矛盾,推动“双碳”目标实现,亟需变革煤炭利用转化路径。其中,煤气化技术通过将煤转化为富氢合成气,实现了煤炭源头高效转化,已成为当前煤炭清洁利用核心技术和脱碳关键突破口^[13]。然而,煤气化技术存在着气化不可逆损失大、氧气空分功耗大、CO和H₂相互混合、组分分离能耗高等问题^[14]。对此,我国科学家创新提出了碳氢组分解耦的煤炭热解气化分级技术,通过半焦制备、半焦—CO₂气

化、CO变换产H₂三步工艺流程,形成了以化学能梯级利用和能势匹配为核心的煤炭利用新方法,提高了气化效率,具有煤炭分级利用、碳组分富集、CO和H₂解耦、高浓度CO₂分离能耗低等独特优势^[15]。

2.1.2 化石燃料低碳燃烧理论与方法

在能源结构转型的过渡期,化石燃料短期内仍将在能源供给结构中占据重要地位。因此,迫切需要在现有能源基础设施基础上,深入探索并优化化石燃料自身的低碳燃烧技术,提升化石燃料燃烧效率、降低其碳排放强度,保障能源安全与平稳过渡^[16]。近年来,特定类型的新型低碳燃料研究取得进展,为化石能源替代提供了潜在路径。其中,含氧含氮燃料及富氢燃料已在交通、航运等领域完成了示范或小规模应用^[17,18]。然而其基础燃烧理论体系仍不完善,存在燃烧效率低、燃烧产物不可控等问题,部分燃料仍局限于掺混应用^[19]。为加速新型燃料从基础研究走向规模化工程应用,亟需深入理解其燃烧本质特性,揭示燃料的氧化路径、中间产物演化、污染物生成机理及火焰动力学特性。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过程。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。对此,我国学者致力于结合高精度实验诊断与先进计算模拟,系统构建并验证新型燃料的燃烧反应机理模型;深入研究实际设备工况下的燃料燃烧特性、污染物生成规律及控制策略;探索优化燃料配方、燃烧器设计及运行控制方案,以克服燃料固有缺陷,提升其工程应用的可行性和性能^[20,21]。

2.1.3 化石燃料制氢协同转化理论与技术

我国原油对外依存度已连续七年高达70%以上,天然气的对外依存度也达到40%以上,严重影响国家能源安全。煤炭作为我国主要的一次能量来源,通过煤制油气技术可有效保障油气安全,推动我国能源电力安全稳定转型^[22,23]。针对现有煤制油气反应器单台容量小、能耗和CO₂排放高、水耗大、新能源利用率低等问题,我国科学家近期基于规模化、大型化、与可再生能源耦合的路线,开发了超大规模气—固—液三相反应器、煤特性匹配的直接转化新型催化剂制备技术等关键煤制油气技术,实现了煤制油气产业升级和煤炭的低碳高效利用。通过与绿电、绿氢等可再生能源深度耦合,有效减少了工艺和供能过程碳排放,油品产物产出率超过60%,综合能效达60%以上^[24]。此外,基于间接转化方法开发了高性能费托合成催化剂与高产能浆态床反应器以及高温固定流化床费托合成技术,通过将煤间接转化与绿氢、绿电耦合,碳排放降低30%,形成了煤间接转

化合成油品和高端化学品柔性生产技术,丰富了油品种类,实现了油化互切^[25]。

2.1.4 高效低碳富氧燃烧超临界CO₂发电系统

富氧燃烧超临界CO₂燃气轮机发电系统采用透平侧富氧燃烧技术,燃烧直接加热循环工质CO₂,并在循环冷端冷却后实现CO₂和H₂O分离,同时利用超临界CO₂工质特性,通过优化热力参数提升循环效率,是一种实现化石燃料清洁高效与灵活低碳发电的革命性技术^[26,27]。该技术在展现显著优势的同时,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、系统灵活调控机制缺乏理论支撑等关键挑战。为此,亟需从设备到系统、稳态到瞬态的多时空尺度开展基础理论与技术研究。

国内学者围绕上述问题开展了系统性工作:在基础理论层面构建了涵盖发电机组与外部环境的广义能量系统,揭示了燃煤发电机组能耗的时空分布规律,并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;同时,原创性提出半闭式热力循环“流程解构”分析与构建方法,阐明了流程拓扑与参数优化的节能原理^[28]。在关键技术研发方面针对高压富氧燃烧及CO₂传热机理,开展了高精度燃烧数值模拟与加压气化研究,构建了CO₂透平一体化设计程序,并提出近临界点附近“类沸腾”理论^[29]。在系统集成与动态控制领域完成了全工况燃机/IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle)发电系统设计,开展了燃机启停及变负荷动态运行策略研究,为化石燃料高效低碳灵活发电技术提供了理论与方法支撑^[30]。

2.1.5 大规模低能耗碳捕集利用与封存

研发低能耗高效率的CO₂捕集利用成套技术,是实现碳中和目标的兜底保障^[31]。为攻克这一关键领域,国内学者聚焦技术瓶颈,开展了全链条创新研究,目前研发了全流量低能耗CO₂捕集技术,通过开发高容量低反应热CO₂捕集材料、研制超大型高效分离装备^[32],并创新CO₂捕集全系统能量梯级利用技术,在烟气全流量CO₂捕集工业示范工程中,大幅降低了吸收剂损耗和再生热耗。此外,开发了可再生能源/绿氢耦合的CO₂制清洁燃料技术,通过构建“可再生能源发电→绿氢生产→CO₂还原”的绿色碳循环体系,形成现代煤化工与可再生能源、绿氢、碳捕集利用与封存的耦合创新模式^[33,34]。通过十万吨级CO₂转化制清洁燃料工业验证,该技术体系年消纳可再生能源超过10万吨标煤,实现了百万吨级CO₂规模化捕集与高效转化为清洁燃料,为我国“双碳”目标的实现提供了从捕集到利用的全链条技术支撑与工程范例。

2.2 可再生能源高效转化

2.2.1 先进太阳能制燃料原理与方法

太阳能燃料是实现碳中和可持续发展的重要技术,可以将间歇、波动、低能量密度的太阳能,通过热化学反应转化为稳定、高密度的太阳能燃料(氢或合成气)化学能^[35-37]。包含了太阳能驱动含碳/含氢物质的重整、裂解、气化反应等技术路径,其中太阳能直接裂解CO₂制氢是更为环保和理想的制氢方式,但是反应条件比较苛刻,CO₂具有极高的吉布斯自由能和热力学电势,关键问题归结到降低CO₂裂解过程中碳氧双键断裂的反应活化能。传统单一的光、热、电等催化CO₂的方式都不同程度存在转化效率不高、能源利用低、反应条件苛刻等缺点,复合的高温电催化虽降低了反应条件要求,但仍需依赖高品位电能消耗,且电堆电阻热又造成损失。光热—电梯次协同耦合模式通过引入高品位电子,优先降低光热催化过程中CO₂分子的活化能,进而协同优化反应条件,为高效、低成本的CO₂还原与绿氢联产提供了新路径,但仍面临着高活性与稳定性的多功能催化剂开发,光—热—电多场耦合体系中电子、光子、声子等协同作用机制不清晰以及一体化反应装置设计等问题与挑战。

2.2.2 变革性太阳能光热利用原理与方法

太阳辐射光子波段宽、载能高,通过聚光太阳能技术还可达到超过1 000 kW/m²的高密度^[38]。对此,我国学者基于太阳能高密度聚光烧制陶瓷/水泥实验和光分子直接驱动水蒸发实验,发现了高载能高密度光子流作为高品位能量源与物质表面或体结构直接作用可产生突破热力学极限的新现象^[39,40]。此外,还发现波长在400~3 000 nm的太阳光子直接驱动化学或物理反应与传统的光热驱动化学物理过程存在较大机理差异^[41]。因此,亟需探索光子—电子—声子吸收耦合传递过程中的能量高效转换机理,研究聚光光子驱动材料体系物相变化、化学反应和热效应机制。进而支撑发展人工微结构形成量子阱、量子线和量子点对太阳光作用下能带结构设计及表面物理性质的裁剪方法,将太阳能热驱动变革为太阳能光驱动,为太阳能高效率转换提供新理论。

2.2.3 生物质能高值高效转化方法与技术

生物质作为一种可再生的物质能源,可通过物理转化、生物化学和热化学等多种方式对其进行利用形式转变^[42]。物理转化可通过压缩、榨取等简单手段在一定程度上改变生物质燃料的能量密度;生物法使用酶、微生物来实现物质代谢和能量转换过程,可以获得甲烷与氢气等高质量燃料。但与物理法和生物化学转化相比,以热化学技术为依托的转化利用方式在生产速率和产品形式等方面更具优势,可短时间获得大批量预期形式

能源,生产气、液、固等多类型燃料^[43]。其中,可持续航空燃料(Sustainable Aviation Fuel, SAF)作为利用可再生资源或者废弃物,通过化学精炼方法生产的化学燃料,是助力航空业实现深度脱碳、迈向绿色可持续发展的关键着力点之一^[44]。但目前生物质制SAF面临生物质结构差异大导致反应机理复杂、反应路线冗长、热质传递效率低、催化转化相间传质阻力大效率低等挑战和瓶颈。对此,国内学者研究了生物质亚/超临界液化技术,开发了原位供氢、生化—热化学耦合联产乙醇和芳烃、基于相态调控的加氢脱氧强化技术,建立了首个秸秆原料水热转化中试系统,航油性能指标达到ASTM-D7566生物航油产品标准要求,为构建生物航煤全产业链、低成本生物航煤制备技术路线以及推动我国生物航煤规模化商业应用提供了有力支撑。

2.2.4 风力发电高效转化设计方法与调控机制

为实现“双碳”战略目标,风能高质量开发利用是我国能源发展的重要方向。然而,随着风机叶片尺寸的不断增大,几何非线性效应、截面面内和面外翘曲等非经典的效应,将对叶片结构动力学和动态响应产生显著影响^[45]。对此,国内学者研究了复杂陆气/海气边界层理论,揭示了风电机组与大气边界层的多物理耦合作用机理,通过考虑几何非线性等因素,构建了更符合超大型长柔叶片动力学的气弹稳定性分析模型,并进一步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。此外,随着风电场群基地的规模化发展,风电场尾流效应的影响愈发显著。目前尾流控制缺乏基于先进传感和智能感知、风电场尺度工程尾流模型的风电场群协同控制方法。对此,我国学者构建了更高精度尾流模型,基于各类优化算法,提出了全场尾流偏航控制策略,利用先进传感和控制方法,发展了基于智能传感和优化控制算法的代理模型,实现了风电场间的协同运行控制,降低尾流影响,实现了风电场群的功率提升和载荷降低;并借助大数据和云计算技术发掘风电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,实现贯穿风电场全生命周期的智慧应用服务,促进了风能开发的降本增效^[46]。

2.3 多能源互补系统与方法

2.3.1 煤/可再生能源互补机理与方法

可再生能源发电固有的波动性、间歇性与随机性,对电力系统的安全可靠供应构成严峻挑战,亟需具备高度灵活性的调节电源予以支撑^[47]。在可预见的较长时期内,煤电凭借其经济性、安全性与可靠性,仍将是保障

电力系统灵活调节主体功能及稳定供应兜底作用的核心电源。然而,现有灵活调峰技术在机组安全稳定运行、经济环保效益方面存在显著局限,其调峰能力亦难以匹配可再生能源大规模高比例消纳的需求^[48]。为此,我国学者成功研发了具备规模灵活性与快速启停特性的先进煤电机组,显著提升了煤电的灵活调节与支撑保障能力,并通过煤电与可再生能源的深度协同互补,有效促进了可再生能源的大规模高效消纳^[49,50]。该创新技术采用耦合高效储热的灵活燃煤发电系统架构,从本质上解决了传统燃煤发电灵活运行安全性不足、智能调控水平低的瓶颈问题,预期可在15%~100%的宽广负荷区间内实现高达6% P_e/min 的变负荷速率智能运行。进一步地,通过在50 MW级煤电—储能耦合示范工程中的验证,该技术使系统变负荷速率突破10% P_e/min ,显著增强了系统低成本平抑可再生能源波动性与间歇性的能力,并优化了多种电源时序生产与电网调度间的协同性。

2.3.2 太阳能热化学互补与制氢方法

碳氢燃料直接燃烧过程常伴随显著的不可逆损失,制约能量转换效率并增加环境成本。聚光太阳能技术作为一种可再生能源利用方式,其能势匹配特性与直接燃烧截然不同,为突破传统能效瓶颈提供了契机。基于“品位匹配、梯级利用”的科学思想,国内学者开创性地发展了太阳能热化学互补技术研究,系统揭示了聚光太阳能光热转换过程中的能质能势匹配机理,从能量转化源头剖析能质损失,精准定位低碳转化突破口,成功构建了太阳能热化学互补制氢方法体系^[51]。通过利用太阳能驱动碳氢燃料的低碳化高效转化,实现了能源利用效率的实质性跃升。该技术可以进一步耦合燃气循环、蒸汽循环、超临界二氧化碳循环等新型动力循环^[52],深度挖掘聚光太阳能动力与燃料互补的协同增效潜力,显著提升了整体能量转换效率,为减少温室气体排放、推动能源结构绿色低碳转型提供关键科技支撑。

2.3.3 “风光水火储氢”综合智慧能源系统构建理论与调控方法

大力推动太阳能、风能等可再生能源及清洁能源的规模化开发与高效利用,是实现“双碳”战略目标的核心技术路径^[53]。通过集成具有不同时间与空间特性的能源形态,实现互补协同利用,是提升能源系统运行稳定性与整体效率的必然选择^[54]。在此背景下,我国学者前瞻性地布局了“风光水火储氢”一体化系统研究,创新性融合抽水蓄能、储热、储电、储氢等多元储能技术的削峰填谷功能,结合风、光、水、火等多能互补模式,系统性构

建综合智慧能源体系,以统筹优化国家能源结构^[55,56]。通过在全国多地部署实施系列国家级示范项目,该体系有效提升了能源清洁利用水平和电力系统运行效率,为科学指导大型清洁能源基地规划开发、深化源—网—荷—储协调互动机制提供了重要实践基础,对系统性解决我国能源问题、加速实现“双碳”目标具有重大战略意义和推动作用。

3 建议重点资助与方向

近年来,通过多学科的交叉融合,我国已在能源高效低碳转化技术领域取得了突出进展。但不可忽视的是,鉴于能源对于“双碳”目标的特殊性和重要性,以及用能新格局的多元复杂性,还需要围绕国家重大需求,聚焦能源转化与利用中的关键科学问题,深化与相关基础学科的交叉融合,提升研究水平,深入探索变革性低碳技术,推动能效提升、清洁利用与低碳发展相协调的“三位一体”新模式,着力突破传统链式用能局限,构建新型低碳能源转化利用体系,推动低碳能源产业高质量发展。本次双清论坛凝练了“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年能源转化与利用应着重围绕以下4个发展方向开展多学科交叉开展原创性研究。

3.1 碳氢燃料低碳高效转化利用的技术革新

应以碳氢燃料源头为突破口,构建能源低碳转化的能质能势理论,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的创新研究,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,实现煤转化过程的低碳化及近零排放。具体关注变革性燃烧、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;以促进解析能质转化原理、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。

3.2 大力推进可再生能源多元化发展与高效利用技术

环境污染防治与碳排放目标推动着可再生能源的发展,但当前太阳能、风能、生物质能等灵活转化优势并未体现,清洁能源的总体用量和转化效率严重不足,且减碳潜力尚未被充分挖掘,需要进一步推动多元可再生能源的高效整合与优化。针对可再生能源转化过程中

能量、物质、环境流(例如碳排放)之间的相互影响,应将协同调控作为技术发展的突破口。通过权衡产物价值与环境污染问题的正负效益,建议重构价值理论体系,以指导平衡调控,实现双赢。为推动可再生能源的高效转化,应加强技术交叉与学科融合,推动多学科交叉促进可再生能源的技术革新,为面向双碳目标的“可再生能源+X”变革提供支持。需进一步强调可再生能源的可持续性,特别是从减少碳排放的角度出发,继续加强以能源高效转化为主体的利用模式;基于价值体系的重构,应该协同发展高品质材料、化工原料等多方面,为“能源+X”的创新模式提供实践支撑,以实现绿色智慧发展的目标。

3.3 积极促进煤炭与可再生能源的协同理论与融合应用

燃煤发电需不断提升运行灵活性,为电网消纳新能源提供调峰服务;发展多联产技术,满足社会多元化的用能需求;同时探索与低碳能源互补的高效低碳发展路径,这些新技术的开发亟需解决复杂热力系统动力学、多能流变工况能势匹配等基础理论新问题。为此,需要深入研究热力系统构型与参数协同调整实现超低负荷能势匹配的方法,揭示多联产系统多输出能流与外界时变用能需求的能量品位匹配机制,建立煤炭与太阳能、风能等多能流通过电热互换、储热实现能量输入端能势匹配的理论方法,优化基于瞬态波动过程的能势匹配调控策略。研究成果将为高效灵活燃煤发电系统构型设计、控制系统开发提供新思路和新方法,为燃煤发电机组的高效运行、灵活调控和多能联供提供理论指导。

3.4 进一步推动多能互补统筹推进能源结构的优化

大力推进多能互补系统集成与灵活调控,除构建可再生能源为主的风光水火储氢系统的方式提升能源清洁利用水平和电力系统运行效率,应进一步优化不同维度上多种能源形式与转化方式的耦合与集成,探究多能互补系统的复杂机理。这需基于热力学等基础理论,合理划分不同的能量耦合等级进行合理划分,阐明各层面的深度耦合集成机理,从能量品位出发,分析综合能源转化热力特性,建立能源转化与终端能源生产过程中的能量传递与释放关联模型,分析耦合过程不可逆性与品位提升之间的交互影响;结合能量转化机制和非稳态多物理场分布的理论研究,深入理解并揭示一次能源、动力余热转化的品位匹配耦合机理,为复杂多能互补能源系统集成、高效运行以及运维提供理论支撑。研究成果将有助于指导送端电源基地规划开发和“源—网—荷—储”协调互动,对解决我国能源问题、满足经济社会发展需求以及实现“双碳”目标具有重要推动作用。

4 结语

能源转化的脱碳发展是碳减排主攻的方向,发展能源低碳高效转化科学理论与应用技术对我国碳中和战略至关重要,是实现可持续发展和推动能源结构绿色转型的必由之路。近年来,基于国家战略导向与能源学科协同发展,我国已取得了低碳能源技术研究的突破性进展和大规模可再生能源发电应用的跨越式发展,但基础科学用能理论应用尚未成熟,还存在载体能脱碳转化方法以及绿色能源高效可靠转化技术不足等问题,导致尚未形成可靠的绿色电源支撑作用和低碳能源消费高占比格局。后续需要进一步以碳中和作为目标导向,推动发展能源低碳高效转化开发技术,构建新型低碳能源体系,以实现巨量碳减排和保障可持续发展。

参考文献

- [1] 国家能源局. 2023年能源工作指导意见. (2023-04-06)/[2025-06-17]. https://zfxgk.nea.gov.cn/2023-04/06/c_1310710616.htm.
- [2] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见. (2022-02-10)/[2025-06-17]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202202/t20220210_1314511_ext.html.
- [3] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案. (2022-05-30)/[2025-06-17]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-05/30/content_5693013.htm.
- [4] 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. (2021-10-24)/[2025-06-17]. https://www.gov.cn/zhengce/2021-10/24/content_5644613.htm.
- [5] 国家统计局. 中华人民共和国2024年国民经济和社会发展统计公报. (2025-02-28)/[2025-06-17]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202502/t20250228_1958817.html.
- [6] 国家发改委, 国家能源局, 国家标准委. 碳达峰碳中和标准体系建设指南. (2024-02-04)/[2025-06-17]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202402/content_6933519.htm.
- [7] 刘峰, 曹文君, 张建明, 等. 我国煤炭工业科技创新进展及“十四五”发展方向. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1—15.
Liu F, Cao WJ, Zhang JM, et al. Current technological innovation and development direction of the 14th Five-Year Plan period in China coal industry. Journal of China Coal Society, 2021, 46(1): 1—15. (in Chinese)
- [8] 国家能源投资集团有限责任公司. 中国能源展望2060: 能源产业迈向碳达峰碳中和. 北京: 科学出版社, 2023.
China Energy Investment. China Energy Outlook 2060: The Energy Industry's Path towards Carbon Peak and Carbon Neutrality. Beijing: Science Press, 2023. (in Chinese)
- [9] 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)
- [10] 陈晓红, 胡东滨, 曹文治, 等. 数字技术助推我国能源行业碳中和目

- 标实现的路径探析. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1019—1029.
- Chen XH, Hu DB, Cao WZ, et al. Path of digital technology promoting realization of carbon neutrality goal in China's energy industry. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9): 1019—1029. (in Chinese)
- [11] Zhang ZE, Pan SY, Li H, et al. Recent advances in carbon dioxide utilization. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 125: 109799.
- [12] Kheshti M, Ding L, Bao WY, et al. Toward intelligent inertial frequency participation of wind farms for the grid frequency control. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(11): 6772—6786.
- [13] Zou CC, Ma MD, Zhou N, et al. Toward carbon free by 2060: a decarbonization roadmap of operational residential buildings in China. Energy, 2023, 277: 127689.
- [14] 李济超, 韩巍, 马文静, 等. 基于分级气化的燃烧前CO₂捕集发电系统及性能分析. 动力工程学报, 2024, 44(8): 1253—1263, 1297.
- Li JC, Han W, Ma WJ, et al. Performance analysis of a power generation system with pre-combustion CO₂ capture based on staged coal gasification. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(8): 1253—1263, 1297. (in Chinese)
- [15] Li JC, Han W, Song XY, et al. Near-zero carbon emission power generation system enabled by staged coal gasification and chemical recuperation. Energy, 2024, 306: 132406.
- [16] Li TX, Duan YQ, Wang YM, et al. Research progress of ammonia combustion toward low carbon energy. Fuel Processing Technology, 2023, 248: 107821.
- [17] Hua Y, Zhang YM, Gao DS. Ammonia composite combustion with alcohol/ether: a systematic review from engine applications to combustion enhancement and emission mechanisms. Energy Conversion and Management, 2024, 322: 119160.
- [18] 周梅, 楚育纯, 王兆林, 等. 氨-丙烷混合燃料降碳燃烧的排放特性. 燃烧科学与技术, 2020, 26(3): 257—264.
- Zhou M, Chu YC, Wang ZL, et al. Emission characteristics of NH₃-C₃H₈-air mixture for carbon reduction combustion. Journal of Combustion Science and Technology, 2020, 26(3): 257—264. (in Chinese)
- [19] 黄佐华, 张英佳, 姜雪, 等. 发动机燃烧定向调控理论、方法和技术. 中国科学(技术科学), 2023, 53(10): 1665—1673.
- Huang ZH, Zhang YJ, Jiang X, et al. Theory, method, and technology of engine combustion directional regulation. Scientia Sinica (Technologica), 2023, 53(10): 1665—1673. (in Chinese)
- [20] Zhang WB, Zhang ZY, Chen H, et al. A review on performance, combustion and emission of diesel and alcohols in a dual fuel engine. Journal of the Energy Institute, 2024, 116: 101760.
- [21] Chen H, Wang H, Chen ZY, et al. Research progress on the spray, combustion and emission of polyoxymethylene dimethyl ethers as a diesel blend fuel: a review. Fuel, 2022, 324: 124731.
- [22] 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. China oil, gas and new energy market development report (2025). Beijing: Petroleum Industry Press, 2025. (in Chinese)
- [23] Song W, Liu PG, Chen XY, et al. Research progress of catalysts for direct coal liquefaction. Journal of Energy Chemistry, 2025, 100: 481—497.
- [24] 赵亮, 姜海明, 毛旭涛, 等. 大型煤制油装置的先进过程控制技术. 现代化工, 2025, 45(4): 255—258.
- Zhao L, Jiang HM, Mao XT, et al. Research on advanced process control technology for large-scale coal-to-liquid plants. Modern Chemical Industry, 2025, 45(4): 255—258. (in Chinese)
- [25] 吴建民, 孙启文, 董满祥, 等. 高温固定流化床费托合成技术及其产物加工路线. 化工进展, 2020, 39(S1): 12—20.
- Wu JM, Sun QW, Dong MX, et al. High temperature fixed-fluidized bed Fischer-Tropsch synthesis technology and its products processing route. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(S1): 12—20. (in Chinese)
- [26] 刘沁雯, 钟文琪, 邵应娟, 等. 固体燃料流化床富氧燃烧的研究动态与进展. 化工学报, 2019, 70(10): 3791—3807.
- Liu QW, Zhong WQ, Shao YJ, et al. Research trends and recent advances of oxy-fuel combustion of solid fuels in fluidized beds. CIESC Journal, 2019, 70(10): 3791—3807. (in Chinese)
- [27] 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.
- [28] Li Y, Wang NN, Guan HJ, et al. Optimization study of CO₂ capture unit for subcritical coal-fired power generation unit based on Ebsilon and Aspen plus. Energy Conversion and Management, 2022, 269: 116111.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 李济超, 韩巍, 马文静, 等. 基于分级气化的燃烧前CO₂捕集发电系统及性能分析. 动力工程学报, 2024, 44(8): 1253—1263, 1297.
- Li JC, Han W, Ma WJ, et al. Performance Analysis of a Power Generation System with Pre-combustion CO₂ Capture Based on Staged Coal Gasification. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(8): 1253—1263, 1297. (in Chinese)
- [32] Jiang WF, Li XS, Gao G, et al. Advances in applications of ionic liquids for phase change CO₂ capture. Chemical Engineering Journal, 2022, 445: 136767.
- [33] Guo WW, Liu SJ, Tan XX, et al. Highly efficient CO₂ electroreduction to methanol through atomically dispersed Sn coupled with defective CuO catalysts. Angewandte Chemie International Edition, 2021, 60(40): 21979—21987.
- [34] Liu H, Guo W, Fan Z, et al. Comparative life cycle energy, water consumption and carbon emissions analysis of deep *in situ* gasification based coal-to-hydrogen with carbon capture and alternative routes. Journal of Cleaner Production, 2023, 426: 139129.
- [35] 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)

- [36] Qu WJ, Hong H, Jin HG. A spectral splitting solar concentrator for cascading solar energy utilization by integrating photovoltaics and solar thermal fuel. *Applied Energy*, 2019, 248: 162—173.
- [37] Xu C, Tang QJ, Tu WG, et al. Photon and phonon powered photothermal catalysis. *Energy & Environmental Science*, 2024, 17(13): 4461—4480.
- [38] 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)
- [39] Wang Y, Wang ZF, Lei DQ, et al. Technology verification of Portland cement clinker production driven by concentrated solar energy directly. *Renewable Energy*, 2024, 232: 121064.
- [40] Guo D, Liu HT, Zang CC, et al. Experimental study on the direct firing of ceramic ware using concentrated solar energy. *iScience*, 2024, 27(7): 110222.
- [41] Tang SL, Sun J, Hong H, et al. Solar fuel from photo-thermal catalytic reactions with spectrum-selectivity: a review. *Frontiers in Energy*, 2017, 11(4): 437—451.
- [42] 贾意久, 石雅丽. 生物质能源利用研究进展. *科技导报*, 2023, 41(16): 55—75.
Jia YJ, Shi YL. The research progress of biomass energy utilization. *Science & Technology Review*, 2023, 41(16): 55—75. (in Chinese)
- [43] Ong HC, Chen WH, Farooq A, et al. Catalytic thermochemical conversion of biomass for biofuel production: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 113: 109266.
- [44] 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)
- [45] Fan ZX, Zhu CC. The optimization and the application for the wind turbine power-wind speed curve. *Renewable Energy*, 2019, 140: 52—61.
- [46] 宗豪华, 孙恩博. 水平轴风力机主动尾流控制综述. *空气动力学学报*, 2022, 40(4): 51—68.
Zong HH, Sun EB. Review of active wake control for horizontal-axis wind turbines. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2022, 40(4): 51—68. (in Chinese)
- [47] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判. *中国电机工程学报*, 2021, 41(18): 6245—6259.
Li H, Liu D, Yao DY. Analysis and Reflection on the Development of Power System Towards the Goal of Carbon Emission Peak and Carbon Neutrality. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(18): 6245—6259. (in Chinese)
- [48] 苟星, 贺克伦, 陈磊, 等. 基于特征值的电—热综合能源系统扰动分析. *工程热物理学报*, 2023, 44(3): 703—711.
Gou X, He KL, Chen L, et al. Eigenvalue-based disturbance analysis of integrated electric power and thermal system. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(3): 703—711. (in Chinese)
- [49] 严新荣, 胡志勇, 张鹏威, 等. 煤电机组运行灵活性提升技术研究与应用. *发电技术*, 2024, 45(6): 1074—1086.
Yan XR, Hu ZY, Zhang PW, et al. Research and application of operation flexibility improvement technology for coal-fired power unit. *Power Generation Technology*, 2024, 45(6): 1074—1086. (in Chinese)
- [50] Lin XJ, Zhang N, Zhong W, et al. Regional integrated energy system long-term planning optimization based on multi-energy complementarity quantification. *Journal of Building Engineering*, 2023, 68: 106046.
- [51] 焦钊, 刘泰秀, 陈晨, 等. 太阳能热化学循环制氢研究进展. *科学通报*, 2022, 67(19): 2142—2157.
Jiao F, Liu TX, Chen C, et al. Advances in solar thermochemical cycles for hydrogen production. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(19): 2142—2157. (in Chinese)
- [52] Xin TT, Xu C, Liu YH, et al. Thermodynamic analysis and economic evaluation of a novel coal-based zero emission polygeneration system using solar gasification. *Applied Thermal Engineering*, 2022, 201: 117814.
- [53] 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)
- [54] 王永真, 康利改, 张靖, 等. 综合能源系统的发展历程、典型形态及未来趋势. *太阳能学报*, 2021, 42(8): 84—95.
Wang YZ, Kang LG, Zhang J, et al. Development history, typical form and future trend of integrated energy system. *Acta Energiac Solaris Sinica*, 2021, 42(8): 84—95. (in Chinese)
- [55] 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 & 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)
- [56] 杨文强, 邢小文, 覃姝仪, 等. 大规模风/光互补制储氢系统协调控制策略研究. *电力电子技术*, 2020, 54(12): 24—27, 55.
Yang WQ, Xing XW, Qin SY, et al. Study of coordination control strategy of large-scale wind/PV hybrid hydrogen energy system. *Power Electronics*, 2020, 54(12): 24—27, 55. (in Chinese)

Low Carbon and Efficient Conversion of Energy

Hongguang Jin^{1*} Qibin Liu¹ Zhang Bai²

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

2. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

Abstract Carbon emission reduction is an important direction to achieve the “dual-carbon” goals, and the low-carbon and efficient transformation of fossil energy and the efficient development of renewable energy have been regarded as the key potential route. The innovation and transformation of low-carbon and efficient energy conversion technology is the essential pathway to help China form a green energy supply pattern. Faced with the difficulty and complexity of carbon reduction, it is necessary to base on the national conditions of China, refine the main direction and clarify the research target orientation, comprehensively consider multi-level energy technology innovation, and clarify the key scientific issues in current energy conversion and utilization. Based on the 358th “Shuangqing Forum” of National Natural Science Foundation of China, this paper summarizes the major needs faced by China’s energy green and low-carbon transformation research and industrial development. It reviews the main progress and achievements in recent years, through interdisciplinary research of natural and basic sciences. Furthermore, the major key scientific issues in this field for the next 5 to 10 years are refined, and also proposes the cutting-edge research directions and scientific funding strategies.

Keywords Carbon Peak; Carbon Neutrality; low carbon utilization of fossil fuel; efficient conversion of renewable energy; carbon emission reduction

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