

• 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-2024.11.28.0002

终端用能提效减排:路径、趋势及对策*

宣益民** 刘向雷

南京航空航天大学 能源与动力学院,南京 210016

[摘要] 在“双碳”目标的战略引领下,终端用能行业的提效减排已成为推动我国能源低碳转型升级和经济高质量发展的关键路径。本文总结了钢铁、水泥、化工、交通运输、建筑等我国终端用能重点行业的碳排放现状,梳理了其提效减排的主要路径,主要包括源头低碳、过程减碳、末端捕碳等。凝练了终端用能提效减排未来发展面临的共性关键科学问题,包括:(1)如何发展兼顾不同能源禀赋品质的多能互补用能理论与方法,构建源—网—荷—储耦合关联的智慧能源系统?(2)如何重构燃烧、热力循环和综合能源管理等理论、方法和技术,实现转化—利用—回收—储存一体化协同?(3)如何实现热力学属性和动力学过程之间效率与速率的兼容并包,构建碳捕集、转化与利用循环体系?(4)全生命周期能效与碳排放双约束下,如何构建能流与碳流协同设计、控制与优化方法?最后,给出了促进终端用能行业低碳高质量发展的对策建议:瞄准前沿技术和基础理论创新,加快建立绿色、高效、智慧、安全的终端用能理论体系与方法,提升源头创新能力;加快建立健全相关制度,强化高校—科研机构—企业联动,协同攻关行业高碳排放难题;加大示范引领,加速推进终端用能提效减排技术应用,推动终端用能产业低碳升级。

[关键词] 终端用能;提效减排;多源互补;能/碳双控

1 我国终端用能及碳排放现状

从全国来看,在“碳达峰、碳中和”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占12%,而终端用能占总能源消费的88%,其中又以工业用能为主,占比达62%^[1](图1)。另外,据中国碳核算数据库(CEADS)统计,2020年我国CO₂排放总量已达98.787亿吨,其中终端用能直接碳排放占比达51%^[2]。与国际对比,我国碳排放强度(单位美元GDP碳排放)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,终端用能提效减排是实现我国“双碳”重大战略的迫切需要^[3,4]。

从全球来看,终端用能行业的发展与转型又会受到地缘政治、经济发展、气候环境等诸多因素影响^[5]。

2023年,《联合国气候变化框架公约》第28次缔约方大会(COP28)提出“2030年前全球碳排放减少43%,可再生能源翻三倍,能效增速翻一番”的发展目标。欧盟碳边境调整机制(CBAM)即“碳边境税”从2023年10月1日起正式启动并进入过渡阶段,将于2026年开始正式征税。首批征税范围覆盖了钢铁、水泥、铝、化肥、电力、氢6个行业,将强烈冲击我国终端用能行业的发展。以航空为例,碳税会推高我国航空产品成本,其隐含的贸易壁垒会严重影响我国航空业未来发展,尤其会对国产大飞机走向国际市场带来严峻挑战。高能耗、高碳排放行业面临淘汰风险,终端用能提效减排是关乎我国经济发展能否继续融入国际大循环的迫切需要。

基于国家自然科学基金委员会第358期双清论坛“‘双碳’目标下能源转化与利用科学问题”,本文围绕终端用能提效减排,首先介绍了钢铁、水泥、化工、交通等

收稿日期:2024-11-28; 修回日期:2024-12-15

* 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:ymxuan@nuaa.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(52488201)的资助。

引用格式: 宣益民, 刘向雷. 终端用能提效减排:路径、趋势及对策. 中国科学基金, 2025, 39(3): 509–518.

Xuan YM, Liu XL. Enhancing energy efficiency and reducing emissions of energy end-use sectors: Pathways, trends, and strategies. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(3): 509–518. (in Chinese)

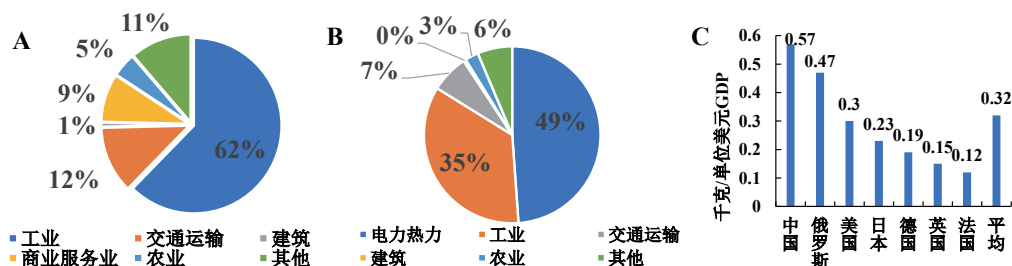


图1 2020年我国终端用能行业能源消费与碳排放情况^[2]: A. 终端用能行业能耗占比; B. 各行业碳排放占比; C. 世界各国碳排放强度对比
Fig.1 Energy Consumption and Carbon Emissions in China's Terminal Energy-Using Sectors in 2020^[2]: A. Proportion of Energy Consumption by Terminal Energy-Using Sectors; B. Sectoral Distribution of Carbon Emissions; C. Comparison of Carbon Emission Intensity Across Countries

终端用能/碳排放重点行业的碳排放现状,重点分析了不同用能行业的提效减排路径;随后,根据重点终端用能行业的减排路径,梳理了我国终端用能提效减排的发展趋势,进一步凝练了共性关键科学问题;最后,给出了推进我国终端用能提效减排的相关对策建议。

2 重点终端用能行业提效减排路径

据中国碳核算数据库测算,2020年我国工业、农业、交通等终端能源消费行业直接碳排放50.517亿吨,是电力、热力能源供应端的1.05倍^[2](图2)。按能源消费行业细分,钢铁、水泥、化工、交通、建筑等重点行业碳排放又约占终端能源消费碳排放的82.74%^[2]。钢铁、水泥、化工、交通、建筑等重点用能行业的节能提效与深度碳减排是支撑国家“2030碳达峰、2060碳中和”战略目标顺利实现的关键。

2.1 钢铁行业

作为重要的“工业粮食”,钢铁是国之基石,支撑着我国经济的快速发展。我国粗钢产量自1996年突破1亿吨以来,一直稳居世界第一,2020年更是突破10亿吨,占据全球总量的50%以上^[6,7]。钢铁行业的蓬勃发展反映了国家总体经济水平的迅速提升。但是,钢铁工业作为

能源、水资源、矿石资源消耗大的资源密集型产业,发展的同时也带来了巨量的能源消耗以及严重的污染物排放问题^[8,9]。据统计,2020年,我国钢铁碳排放总量为19.264亿吨,占全国总排放的19.50%,仅次于电力行业,而且吨钢二氧化碳排放量约1.8吨,远高于发达国家1.2吨/吨钢的碳排放强度^[10]。

居高不下的吨钢碳排放强度,一方面是由于我国钢铁行业以铁矿石高炉炼钢为主,流程长、能耗高、排放大,而废钢电炉冶炼的短流程工艺占比不足10%,显著低于世界平均水平^[11];另一方面则源自我国以煤炭为主的资源禀赋,导致炼钢过程能源消耗以煤炭、焦炭为主,造成生产过程碳排放强度进一步增加^[12]。面向国家“双碳”战略,作为工业领域最大的碳排放来源,钢铁行业提效减排首当其冲,迫切需要发展可再生能源/化石能源互补供给、协同增效的高炉熔炼方法,推进富氢/纯氢变革性高炉冶炼技术的进步,实现冶炼工艺提质增效^[8];提出余热余压高效梯级回收利用新方法,推动热质循环技术/设备变革,开展炼钢全流程节能低碳重构;研发固废、气废高值化利用技术,发展可再生能源驱动的废弃物与CO₂耦合转化新方法,实现碳资源循环利用(图3)。

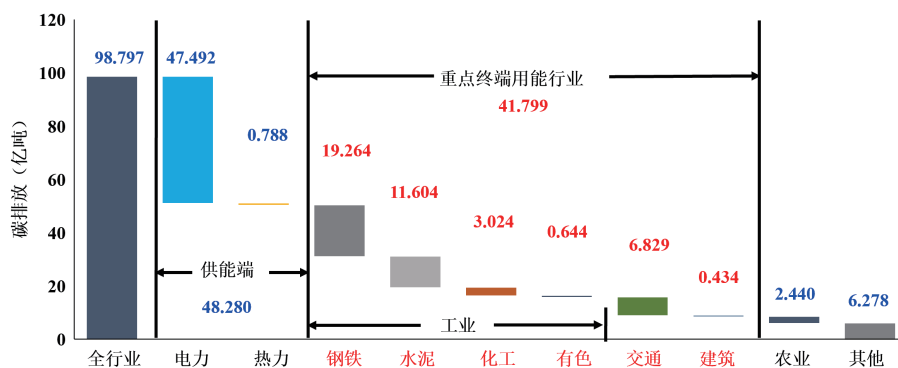
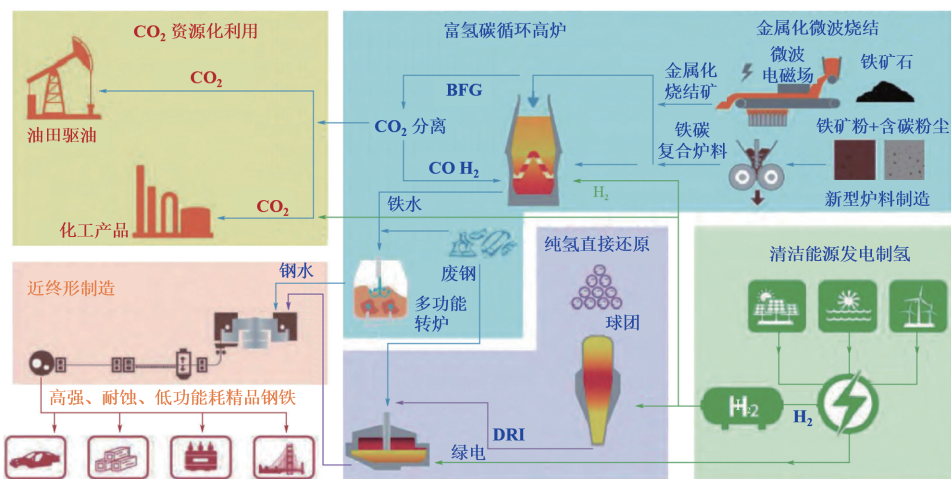


图2 2020年我国二氧化碳排放总量及各行业直接碳排放对比^[2]
Fig.2 Total CO₂ Emissions and Sectoral Comparison of Direct Carbon Emissions in China in 2020^[2]

图3 中国宝武碳中和冶金技术路线图^[13]Fig.3 Carbon Neutral Metallurgical Technology Roadmap of China Baowu Steel^[13]

2.2 水泥行业

1985年以来,我国水泥产量连续38年稳居世界第一,2020年达到24亿吨,约占全球水泥产量的54%^[14](图4)。巨大的水泥消费量造成了大量碳排放^[15,16],2020年,水泥行业碳排放总量达到11.604亿吨,占全国总碳排放比例约11.74%,为工业领域仅次于钢铁行业的碳排放大户^[2](图4)。据中国建筑材料科学研究总院统计,我国水泥行业碳排放主要由工艺过程排放、能源消费排放以及间接用电排放组成,分别占据该行业总碳排放的62%、33%和5%^[13]。工艺过程排放占比近2/3的原因在于煅烧石灰石制氧化钙是制备水泥的必经工序,获取1吨氧化钙熟料理论CO₂排放量高达0.78吨。同时,我国水泥行业能耗强度约98~136千克标煤/吨,虽与欧美水平持平或更优,但能源消耗排放主要源自水泥窑炉以煤炭为主(占比近80%)的化石燃料燃烧供热过程,减排降碳仍有较大空间^[17,18]。

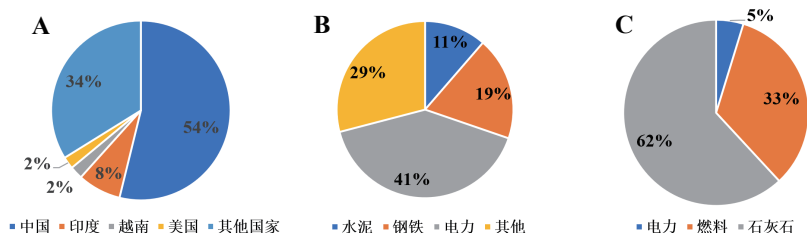
结合碳排放现状,水泥行业提效减排的主要措施包括:(1)源头低碳:近期突破工业窑炉高效清洁燃烧技术,提升能效,未来使用太阳能、生物质、氢能等清洁能源取代燃煤,实现高比例清洁能源耦合驱动水泥合成;

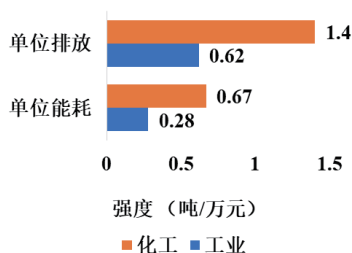
(2)过程减碳:采用钢渣、电炉渣等钙基固废及地聚物等替代原料,发展水泥原料煅烧释放二氧化碳与原位转化耦合制可持续燃料一体化技术,减少碳酸钙分解制氧化钙熟料工艺过程碳排放;(3)末端捕碳:推进低成本二氧化碳捕集与转化利用^[15],突破二氧化碳捕集能耗高、成本高的瓶颈。

2.3 化工行业

化学工业涉及石油炼化、化学品加工、医药产品以及橡胶制造等诸多领域,是关系国家经济命脉和战略安全的重要行业之一。国民经济的快速发展,带来了化工行业规模的迅速扩大。据国家应急管理部数据,2010年以来我国化工行业规模一直居世界第一,2018年化工产量占到了全球产量的40%。2020年,我国化工产业碳排放为3.024亿吨^[2]。虽然总碳排放量占比不到4%,但受限于“富煤、贫油、少气”的资源禀赋,我国化工行业严重依赖煤化工,工艺流程长、碳排放强度大,导致能耗强度、排放强度却远高于其他工业领域,达到工业领域平均数值的两倍以上^[19](图5)。

化工行业绿色低碳是大势所趋,全面、科学、合理地促进化工行业高质量发展至关重要。未来化工行业提

图4 2020年我国水泥行业二氧化碳排放情况^[13]:A. 各国水泥产量对比;B. 我国各行业碳排放占比;C. 我国水泥行业碳排放构成Fig.4 CO₂ Emissions in China's Cement Industry in 2020^[13]: A. Comparison of Cement Production Among Countries; B. Sectoral Distribution of Carbon Emissions in China; C. Composition of Carbon Emissions in China's Cement Industry

图5 我国化工行业能耗和碳排放强度^[2]Fig.5 Energy Consumption and Carbon Emission Intensity in China's Chemical Industry^[2]

效减碳主要依赖于:(1)清洁能源耦合减碳,推进可再生能源电力、绿氢替代传统煤炭驱动化工体系,实现炼化、煤化工与清洁能源深度耦合;(2)化工工艺节能增效,推进原油炼化一体化技术,开发合成气一步法制高值化学品等短流程化工工艺,实现绿色化工流程再造;(3)碳捕集与转化技术,突破低能耗CO₂捕集与绿氢耦合制绿色甲醇、绿氨等基础化工产品技术,构建化工碳循环体系。

2.4 交通运输

改革开放以来,我国交通基础设施领域实现了跨越式发展。2018年,我国公路网总里程14.3万千米,商业铁路里程超过13万千米,地铁总里程达5 700千米,均居世界第一位^[20]。公路、铁路、地铁里程的增加,带来了我国交通运输行业客运量和货运量不断增加。相应地,我国交通运输行业碳排放自2005年以来以约8.1%的增速持续增长,2020年碳排放量达到6.829亿吨,约占总碳排放量的6.91%^[2]。据分析,交通运输业碳排放中公路交通占据绝对主导,约为行业总碳排放的86.76%,是交通运输业碳减排的重点领域^[21](图6)。同时,现阶段以电力驱动的高铁、地铁本质上是相对节能的运输方式,陆路交通运输业碳减排的主力在于公路运输。此外,民航运输业碳排放虽然仅占交通运输业总排放的6.09%,但因碳排放发生在平流层,对温室效应的影响相比地面碳排放更为严重,因此成为了脱碳最难最慢的交通运输领域^[21]。

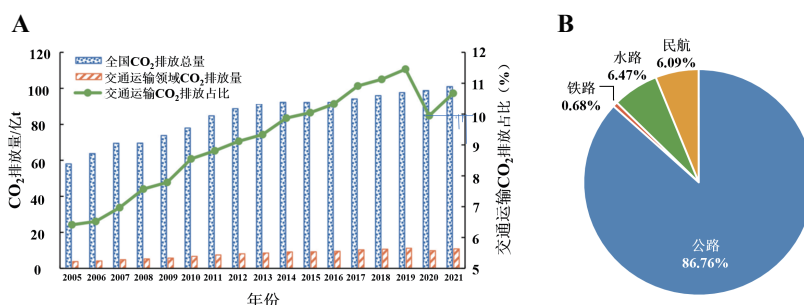
域^[21]。

鉴于社会快速发展导致人类生活消费需求和社会活动范围频率显著增加,迫切需要科学技术进步来抵消碳排放量的增加。交通运输行业提效减排的主要突破点在于:(1)发展高比能、快充放、宽温域动力电池技术,推动混合动力与纯电力取代化石能源动力系统,提升动力系统新能源供给占比;(2)推进可持续燃料替代,发展低成本规模化制备氢、甲醇、可持续航空燃料等技术,突破兆瓦级高功率密度燃料电池、高可靠氢涡轮等动力技术;(3)改变“孤立式”的能量管理方式,实现系统间能量优化匹配与动态调控,建立能量产生、收集、利用、排散一体化的综合能量管理方法。

2.5 建筑行业

我国建筑能源消费中电力占比超35%,生物质能为15%,化石能源直接消费占比30%(煤炭、石油、天然气各10%),主要用于采暖与热水(60%)、烹饪(14%)、电器(14%)、制冷(7%)等方面^[22]。2020年,我国建筑行业直接碳排放量为0.434亿吨,占总碳排放的0.44%,主要来自生物质与化石能源燃烧供暖和烹饪等直接能源消费^[2]。与主要发达国家建筑行业碳排放占总排放量中10%~20%的占比相比,我国建筑行业碳排放比例明显偏低^[2]。据预测,我国的城市化率将从2017年的58%提高到2050年的75%^[23]。城市化进程加快,居民生活水平持续提升,将导致建筑行业碳排放占比持续增长(图7)。

未来全行业碳减排大趋势下,建筑行业提效减排的主要途径包括:(1)稳步推进建筑供暖、生活热水、烹饪等向电气化发展,构建以清洁能源为主的建筑能源体系,降低化石能源直接消费占比,实现建筑能源系统的节能减碳;(2)推进太阳能、地源/水源/空气源热泵等自然能源份额提升,突破电驱动高效储冷储热耦合空调/热泵技术,高效利用自然能源,减少对传统化石能源燃烧供热依赖;(3)有机融合光伏/光热、储能、直流配电和柔性用能等技术,实现建筑能源产—储—用一体化,突破

图6 我国交通行业二氧化碳排放情况^[19,20]:A. 交通运输行业二氧化碳排放变化;B. 交通运输行业二氧化碳排放组成Fig.6 CO₂ Emissions in China's Transportation Sector^[19,20]: A. Trends in CO₂ Emissions from the Transportation Industry; B. Composition of CO₂ Emissions in the Transportation Industry

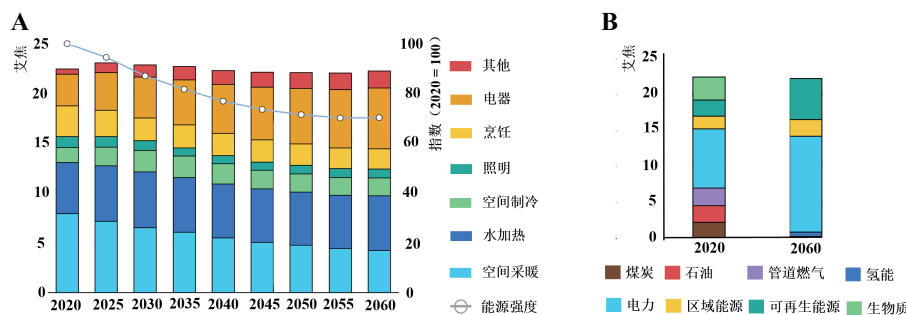


图7 我国建筑行业未来用能情况预测^[24]:A. 建筑能源消费用途变化;B. 建筑能源消费组成

Fig.7 Projected Energy Consumption in China's Building Sector^[24]: A. Evolution of Energy Consumption by End Use; B. Composition of Building Energy Consumption

能源产—储—用动态匹配技术,打造零碳建筑用能系统。

3 终端用能提效减排发展趋势及面临的共性关键科学问题

从本文第二节对我国重点终端用能行业提效减碳路径的分析来看,立足源头低碳、过程减碳、末端捕碳全链条提效减碳的用能方式,终端用能行业将呈现如下发展趋势:(1)源头,多源互补、匹配利用;(2)过程,转化—利用—回收—储存相互关联;(3)末端,碳循环利用技术初见端倪;(4)全生命周期,能/碳双控需求愈加迫切。本文将在下面四个小节中对上述四个发展趋势及其面临的关键科学问题进行梳理和分析。

3.1 趋势一:多源互补、匹配利用

我国当前的终端用能模式仍然主要依赖化石能源,这也是导致高能耗和高碳排放问题的根本原因之一。在“碳达峰、碳中和”战略目标下,现有的由化石能源主导的终端用能模式将逐步过渡到化石能源与可再生能源并重的模式,最终变成由可再生能源主导的模式^[25]。随着太阳能、风能、氢能等可再生能源在我国重点终端用能行业中的占比将逐步提高,传统的电、热、冷、燃料等能源形式将逐渐向多源互补互融、协同匹配利用的新型能源

架构转变(图8),如何充分发挥每种能源的优势,提升系统整体的稳定性与灵活性,成为实现能源低碳转型的关键^[26,27]。因此,迫切需要推动可再生能源与化石能源的互补利用和深度互融,并充分考虑各类能源的品质禀赋,突破现有独立发展模式下的能量转换和利用方式。

鉴于航空领域是减碳脱碳最难的终端用能行业之一,这里以混合动力推进航空飞行器为例来进行阐述。混合动力推进是一类以传统航空燃料和清洁能源(如电能、氢能等)作为能量来源的航空飞行器,其兼具航空燃料能量密度高/动力足的优势以及电动、氢能等低排放的优点。首先,需要指出,航空飞行器在飞行过程中包含了起飞、低速飞行、加速、高速飞行、着陆等多种过程,用能需求多变。由于涡轮、燃料电池、动力电池等供能组件的功率输出特性差异巨大,亟待发展新型高效混合动力架构,探究混合动力系统能量转换与传递规律,揭示热/电/功匹配机制和多模态协同原理,建立能量主动调控与动态互补方法,使不同动力模式优势兼容。另外,在混合动力模态切换过程中,燃烧进口参数呈现非稳态、强波动特性,易引发熄火、燃烧不充分等问题,严重影响混合动力系统的安全性及排放特性,亟待揭示动态进口参数下流动、燃烧、火焰传播、污染物生成等非定常演化机制,提出动力模态变化过程中稳定、高效、低排放

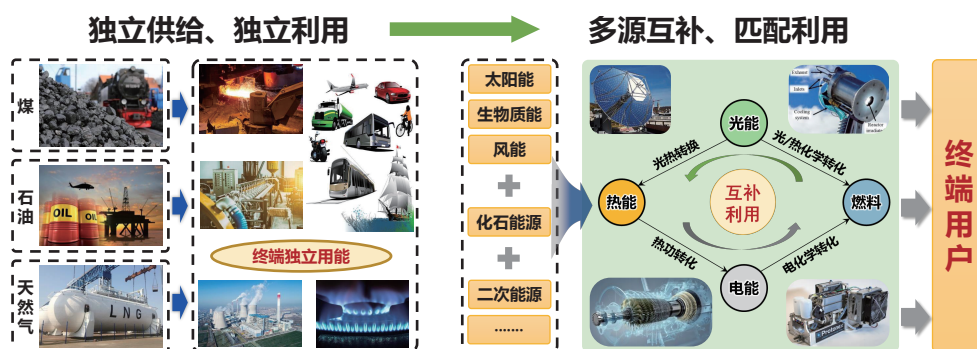


图8 终端用能“多源互补、匹配利用”发展趋势

Fig.8 Development Trends of “Multi-Source Complementarity and Optimized Utilization” in Terminal Energy Use

燃烧调控方法和策略。

共性关键科学问题:终端用能涉及多种能源的输入与匹配利用,如何发展兼顾不同能源禀赋品质的多能互补用能理论与方法,构建源—网—荷—储耦合关联的智慧能源系统?由于可再生能源、化石能源等终端能源的品质禀赋存在本质差异,例如全光谱太阳能兼具波段和能量的双重属性,不同化石能源的能势亦存在显著差别,互补利用过程中需要同时考虑不同能源的能量和品位双重属性,充分发挥各类能源的禀赋品质,从而实现多能源互补匹配。另外,不同行业用能差异性大、用能场景多样,源—网—荷—储耦合关联强,需要追踪能源输入、转化、输出等终端用能各环节,建立全链条匹配方法,进而实现多能协同转化利用与主动调控。

3.2 趋势二:转化—利用—回收—储存相互关联

现有终端用能行业仍主要依赖直接燃烧和传统热力循环等低效能量利用方式。对于此类用能方式,能量的传输、转化、利用等各环节独立规划、独立设计,增效减排空间有限。在推进“双碳”战略目标实现的大背景下,以提高节能减排和提高能效为抓手,构建变革性用能/循环过程,创新研发一体化协同转化—利用—回收—储存等各环节关键技术,统筹推进新型热力设备/系统的设计和拓扑优化,日益成为未来终端用能的重要发展方向(图9)。然而,面向终端用能,构建涵盖源—网—储—用各环节的新型、绿色、低碳、高效、柔性、数智化的能源体系仍任重道远。目前,高效的转化—利用—回收—储存一体化用能方式尚未建立。

以航空飞行器节能增效为例,进行分析讨论。首先,对于现有航空发动机,以传统航空燃料为主的动力

系统通常采用布雷顿循环,热效率提升空间有限。而对于以氢能等可持续航空燃料(SAF)为主的动力系统,传统热力循环的适用性仍然存在争议。比如,氢燃料相对传统航空燃油的燃烧速率更快,易诱导振荡燃烧、回火等现象,这在威胁航空动力安全性的同时,也对热力循环的可靠性提出了挑战。一方面,后续研究亟待揭示防回火、热声稳定、宽范围、变工况氢气稳定燃烧机理,需要阐明高速湍流条件下氢宽工况燃烧反应动力学机制;另一方面,亟待从能量流与物质流协同视角出发,构筑自适应、快响应、变拓扑的能量利用新体系,构建变革性超高效热力循环,发展新型燃料高效可靠燃烧技术。另外,从航空飞行器能量管理来看,现有能量组件和热控系统独立管理的节能增效模式对进一步提高航程、降低碳排放的作用有限。创新发展“多源互联”的新型能/热综合管理已经成为航空飞行器节能增效的关键技术途径之一。美国空军研究实验室(AFRL)所启动的综合飞行器能量技术计划通过设计理念革新,在F-35战斗机中构建了自适应能/热综合管理系统,使航程提升了10%,强力支撑了美国的军事能源变革。因此,亟待创建新型机载能流系统架构,阐明强约束下多介质多源能量梯级利用原理,提出热能高效回收利用、大功率脉冲负载下的储能系统设计方法,实现全系统“源—储—网—荷”多尺度协同智能化运行。

共性关键科学问题:现有终端用能系统节能减碳空间越来越窄,如何创新发展能流架构,重构燃烧、热力循环和综合能源管理等理论、方法和技术,实现转化—利用—回收—储存一体化协同?传统热力循环效率已经接近极限,在多能源输入下,需要考虑不同能源的禀赋

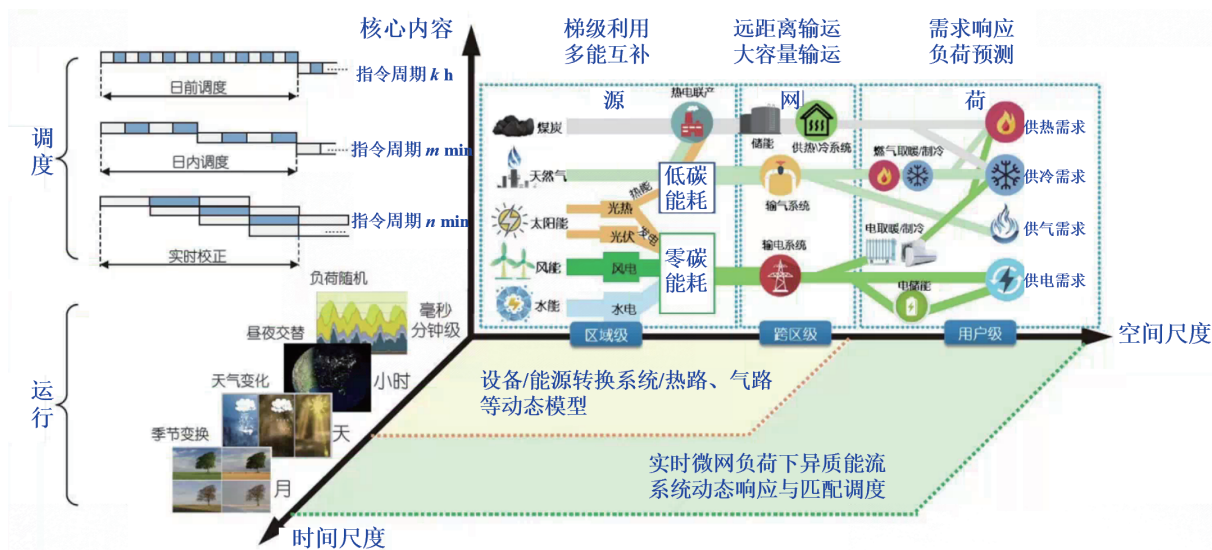


图9 未来“源—网—荷—储”复合供能能源系统^[28]

Fig.9 Future Integrated Energy System Based on “Source-Grid-Load-Storage” Coupling^[28]

品质,重构动力循环,发挥不同能源的最大效能。另外,终端用能转化、利用、回收、储存涉及微观、介观、宏观不同空间尺度能量转换/能质转化的相互耦合和协同匹配,亟待建立不同时空尺度下能量流/物质流的同频耦合方法,实现跨时空尺度的一体化用能和调控。

3.3 趋势三:碳循环利用技术初见端倪

我国以化石能源为主的能源消费结构短期内难以改变,发展碳捕集与转化等负碳关键技术,实现碳的循环利用,是钢铁、化工、水泥、交通等重点终端用能行业深度碳减排的关键,也是未来全行业实现碳中和的“兜底”措施^[29,30]。碳循环利用技术在终端用能行业已初见端倪,例如,在齐鲁石化—胜利油田百万吨级CCUS项目中,化工过程中产生的二氧化碳被用于开采石油(图10)。然而,碳循环利用的用能体系尚未构建。

以可持续航空燃料(SAF)制备为例,利用可再生能源驱动生物质或CO₂合成SAF燃料替代传统航空煤油,再通过涡轮、燃料电池等方式产生动力,可实现碳“取之于自然、还之于自然”。但是,合成液态SAF燃料仍然面临效率低、成本高、选择性差等挑战,亟须突破CO₂定向活化、有序合成液态航空燃料技术,发展生物质低成本高选择性解聚合成可持续燃料方法。同时,SAF燃料合成工艺多样、燃料成分复杂,物理与化学特性与传统燃料差异大,快速着火机制、高效燃烧机理、燃烧稳定性和燃料腐蚀性仍不明晰,预冷、间冷和回热等非常规循环模式中SAF燃料非稳态流动、相变及换热机理的认识不够深入,宽包容高效利用面临严峻挑战,亟须发展多元混合燃料宽范围、高精度燃烧反应动力学模型,提出碳烟/CO/NO_x等污染物的排放抑制策略,突破多元混合燃料灵活高效稳定燃烧技术、温室气体与污染物排放协同控制方法,以及换热装置性能优化与振荡抑制方法。

共性关键科学问题:终端用能/碳排放成分复杂,捕集能耗高、转化效率低,如何实现热力学属性和动力学

过程之间效率与速率的兼容并包,构建碳捕集、转化与利用循环体系? CO₂捕集能耗高,地质封存高通量注入困难、封存空间利用率不足,分子稳定、活化难,转化路径复杂、定向选择性差等碳循环利用领域的关键技术挑战仍亟待解决,迫切需要建立低能耗、低成本、易再生、规模化的CO₂高效捕集方法,发展可再生能源驱动的光/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、规模化二氧化碳循环制备碳氢燃料的技术瓶颈,推动碳资源循环利用技术走向实际应用。

3.4 趋势四:全生命周期能/碳双控需求愈加迫切

传统终端用能行业能耗与碳排放评价通常只关注单一指标、单一环节,缺乏从用能系统全生命周期的角度开展降低能耗与减碳协同研究^[32]。国家“双碳”战略目标下,终端用能全生命周期能/碳双控需求愈加迫切,包括从能耗“一维”评价到清洁、低碳、安全、高效、经济性“多维”评价,从“单一用能环节”到“从摇篮到坟墓”全生命周期的能耗/碳排放协同控制,从单一过程技术革新到多能互补全生命周期能/碳双控变革性技术研发与经济性分析^[33,34](图11)。

以建筑行业为例,传统的建筑能效评估往往仅考虑建筑使用阶段的能源消耗和碳排放,但忽略了建筑材料的生产、运输和施工阶段的碳排放,以及建筑拆解和废弃后的处理环节^[35]。为了实现全生命周期的能耗和碳排放双控,需要将建筑设计、建材生产、能源消耗、运营管理、维修、拆除等各个环节进行协同优化,从而构建出一个全生命周期的碳排放优化体系,从而实现“由摇篮到坟墓”的能效与碳减排的优化与协同。以绿色航空动力系统为例,传统航空器性能评价一般主要关注耗油率、燃烧碳排放等单一指标;未来航空器向多源混合动力模式发展,关注电动、混合动力、氢能源、生物能源和替代燃料等不同绿色能源航空器的能耗和碳排放特性

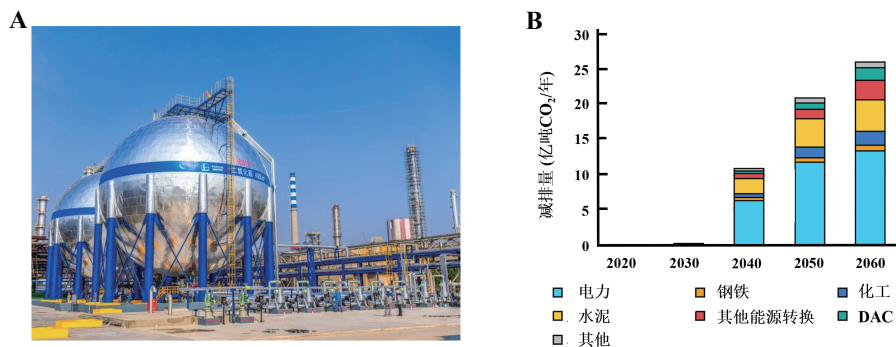


图10 碳捕集、存储与利用技术:A. 齐鲁石化—胜利油田百万吨级碳捕集项目^[31];B. 我国未来CCUS技术需求

Fig.10 Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technologies: A. Qilu Petrochemical-Shengli Oilfield Million-Ton-Scale Carbon Capture Project; B. Future Demand for CCUS Technologies in China

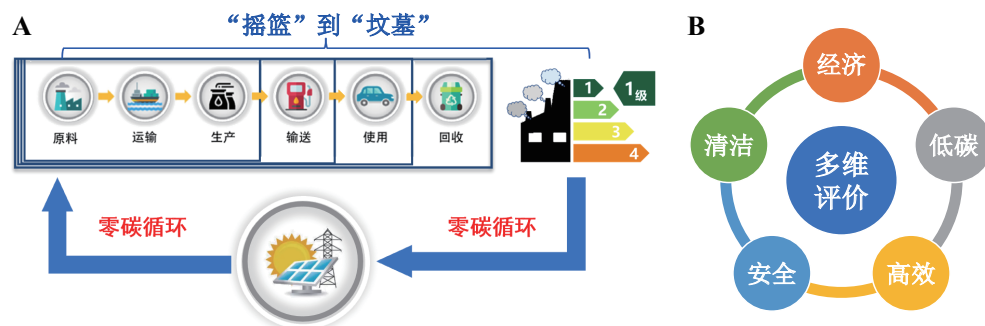


图11 未来终端用能全生命周期能/碳双控与多维评价体系

Fig.11 Future Lifecycle Energy/Carbon Dual-Control and Multidimensional Evaluation System for Terminal Energy Use

变化,而现状是真实能耗与碳排放数据库不完善,航空器终端用能难以全面衡量时空封闭的全生命周期碳排放强度,碳减排潜力提升空间不明晰。因此,迫切需要多学科交叉融合,构建油电混、氢/电、SAF燃料等多能源互补互融的绿色航空器全生命周期能/碳综合设计与控制方法,从单一环节的节能降碳到全生命周期的能/碳双控,实现多能源由源到荷全环节全过程能/碳协同优化。

共性关键科学问题:全生命周期能效与碳排放双约束下,如何提出构建终端用能系统能流与碳流协同设计、控制与优化方法?在多元能源输入、全生命周期能效与碳排放双约束下,亟须将不同时空尺度原本离散的不同过程有机耦合与协同匹配,建立和发展终端用能的变革性能源科学理论与方法,提出能/碳一体化系统设计、优化与智能调控策略,从而构建智慧型能/碳双控多能互补终端用能系统。

4 对策建议

从全国来看,在“碳达峰、碳中和”战略目标下,“清洁、低碳、高效、数智”四位一体的能源利用模式已成为能源发展的硬约束。从全球来看,随着欧盟等国家碳边境税等相关政策的实施,我国进入国际市场的产品都要从全生命周期来看碳排放并征收碳税。在这种形势下,我国终端用能的提效减排,既关系到“双碳”战略目标的实现,也关系到我国的经济能否继续融入国际大循环的行列里去。因此,经过“双清论坛”的讨论,我们提出如下建议:

(1)瞄准前沿技术和基础理论创新,加快建立绿色、高效、智慧、安全的终端用能理论体系与方法,提升源头创新能力。终端用能的绿色低碳重构涉及复杂能量传递和转换,单一燃烧、热力循环用能理论存在不适应性;终端用能环节多、时空尺度跨度大、源—网—荷—储强耦合,静态孤立链式用能方法亟待变革;终端用能涉及行业众多、学科面广,运用单一学科方法技术难以构建

碳循环用能体系。因此,亟待加强深化能源科学的基础和应用基础研究,建议整合国内优势力量,支持组建跨学科的绿色低碳多能互补终端用能系统研究中心,围绕构建多能互补互融的清洁低碳安全高效数智的变革性能源体系及用能架构的重大目标,设立相关的重大研究计划、重大项目和重点项目群,深入开展原创性、变革性能源科学和碳循环利用的理论与方法研究及协同攻关,创建能/碳一体化的用能理论,建立跨时空、全流程低碳高效用能方法,创新发展、持续深化可再生能源介入的多能互补互融变革性理论与方法,研究面向终端用能过程节能减排的新概念、新原理和新方法,提升我国终端用能理论和方法的源头创新能力。

(2)加快建立健全相关制度,强化高校—科研机构—企业联动,协同攻关行业高碳排放难题。针对各终端用能行业提效减排关键环节,建议创新政策保障、体制机制、应用模式等,充分调动高校教师、科技人员、企业人员的积极性和创造性,大力推动产学研协同攻关关键技术与科技成果转移转化,实现教育、科技、产业一体化推进。新技术的推广过程包含了技术的萌芽期、期望膨胀期、泡沫化的谷底期、稳健成长期和实质生产的高峰期五个阶段,坚实深厚的基础和应用基础研究、高校—科研机构—企业的协同合作及相关政府配套政策,是有效释放产业创新能力、保障终端用能绿色转型的关键所在。

(3)加大示范引领,加速推进终端用能提效减排技术应用,推动终端用能产业低碳升级。终端用能涉及的行业面广,关键技术众多,建议强化全生命周期的技术经济性评价意识,针对终端用能源头低碳、过程减碳、末端捕碳等关键技术和关键装备,开展全生命周期碳排放核算与评估,建立产品碳足迹管理体系,制定低碳高效技术转化应用目录与共享机制,形成可复制的低碳用能样板示范工程与绿色智慧用能园区,结合碳税政策及市场化手段,推动终端用能增效减排科技成果落地推广,带动更多终端用能企业低碳升级与绿色转型。

参考文献

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴2020. 北京: 中国统计出版社, 2020.
National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook 2020. Beijing: China Statistics Press, 2020. (in Chinese)
- [2] 中国碳核算数据库 (CEAD). 中国分部门核算碳排放清单 1997 - 2021. (2025-02-06)/[2024-04-15]. <https://www.ceads.net.cn/data/nation/#1402>.
- [3] Luke G, Nicolas G. Global carbon budget 2020. *Earth System Science Data*, 2020, 12(4): 3269—3340.
- [4] Ritchie H, Roser M. Where in the world do people emit the most CO₂? *Our World in Data*, 2024.
- [5] M. Economics, Industrial transformation 2050: Pathways to net-zero emissions from EU heavy industry. University of Cambridge Institute for Sustainability Leadership (CISL): Cambridge, UK, 2019.
- [6] 刘志强. 钢铁业, 稳步迈向中高端. 人民日报, 2022-05-18(18).
- [7] 中国节能协会冶金工业节能专业委员会, 冶金工业规划研究院. 中国钢铁工业节能低碳发展报告(2024-10-24)/[2020-12-25]. <http://trade.jnbw.org.cn/xingye/2020/1218/30451.html>.
- [8] Kang Z, Liao QL, Zhang Z, et al. Carbon neutrality orientates the reform of the steel industry. *Nature Materials*, 2022, 21(10): 1094—1098.
- [9] Li X. Innovation for green. *Nature Materials*, 2022, 21(10): 1092—1093.
- [10] 高玉冰, 邢有凯, 何峰, 等. 中国钢铁行业节能减排措施的协同控制效应评估研究. 气候变化研究进展, 2021, 17(4): 388—399.
Gao YB, Xing YK, He F, et al. Research on co-control effectiveness evaluation of energy saving and emission reduction measures in China's iron and steel industry. *Climate Change Research*, 2021, 17(4): 388—399. (in Chinese)
- [11] Lei TY, Wang DP, Yu X, et al. Global iron and steel plant CO₂ emissions and carbon-neutrality pathways. *Nature*, 2023, 622(7983): 514—520.
- [12] 王国栋, 张龙强, 付静, 等. “双碳”背景下我国废钢资源高质循环利用战略研究. 中国工程科学, 2024, 26(3): 63—73.
Wang GD, Zhang LQ, Fu J, et al. High-Quality Recycling and utilization of China's steel scrap resources in the context of carbon peaking and carbon neutrality. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(3): 63—73. (in Chinese)
- [13] 中国宝武钢铁集团有限公司. 2021中国宝武钢铁集团有限公司绿色低碳发展报告(2024-10-24)/[2022-12-25]. <https://www.baogaoting.com/info/226224>.
- [14] 中国建筑材料科学研究总院有限公司. 中国水泥行业碳中和路径研究. (2024-10-24)/[2023-07-17]. <https://www.efchina.org/Reports-zh/report-cip-20230913-zh>.
- [15] Ellis LD, Badel AF, Chiang ML, et al. Toward electrochemical synthesis of cement—an electrolyzer-based process for decarbonating CaCO₃ while producing useful gas streams. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(23): 12584—12591.
- [16] Guo YY, Luo L, Liu TT, et al. A review of low-carbon technologies and projects for the global cement industry. *Journal of Environmental Sciences*, 2024, 136: 682—697.
- [17] Cheng D, Reiner DM, Yang F, et al. Projecting future carbon emissions from cement production in developing countries. *Nature Communications*, 2023, 14: 8213.
- [18] 落基山研究所, 中国水泥协会. 加速工业深度脱碳: 中国水泥行业碳中和之路. (2024-10-24)/[2022-08-31]. <https://rmi.org.cn/wp-content/uploads/2022/08/RMI水泥报告.pdf>.
- [19] 东方证券. 基础化工行业深度报告—化工碳中和系列报告(2024-10-24)/[2021-03-28]. <https://stock.tianyancha.com/qmp/report/2/04f554fd3818787ab1d547ddff75f220.pdf>.
- [20] 能源转型委员会 (ETC), 落基山研究所. 中国2050: 一个全面实现现代化国家的零碳图景. (2024-10-24)/[2019-11-21]. 2019. <https://rmi.org.cn/wp-content/uploads/2022/07/ETC.pdf>.
- [21] 李晓易, 谭晓雨, 吴睿, 等. 交通运输领域碳达峰、碳中和路径研究. 中国工程科学, 2021, 23(6): 15—21.
Li XY, Tan XY, Wu R, et al. Paths for Carbon Peak and Carbon Neutrality in Transport Sector in China. *Strategic Study of CAE*, 2021, 23(6): 15—21. (in Chinese)
- [22] 国际能源署(IEA). 中国能源体系碳中和路线图. (2024-10-24)/[2021-09-29]. <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-carbon-neutrality-in-china?language=zh>.
- [23] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Building Energy Conservation Research Center, Tsinghua University. *Annual Development Research Report on Building Energy Efficiency in China*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019. (in Chinese)
- [24] 周伟, 王雪成. 中国交通运输领域绿色低碳转型路径研究. 交通运输研究, 2022, 8(6): 2—9.
Zhou W, Wang XC. Green and low-carbon transformation path in China's transportation sector. *Transport Research*, 2022, 8(6): 2—9. (in Chinese)
- [25] International Energy Agency. Net Zero Roadmap: A Global Pathway to Keep the 1.5°C Goal in Reach. Paris: IEA, 2023.
- [26] Liu ZQ, Cui YP, Wang JQ, et al. Multi-objective optimization of multi-energy complementary integrated energy systems considering load prediction and renewable energy production uncertainties. *Energy*, 2022, 254: 124399.
- [27] Chen MZ, Lu H, Chang XQ, et al. An optimization on an integrated energy system of combined heat and power, carbon capture system and power to gas by considering flexible load. *Energy*, 2023, 273: 127203.
- [28] 李明佳, 郭嘉琪, 马腾, 等. “源-网-荷-储”式异质能流复合供能系统的研究现状及发展趋势. 科学通报, 2023, 68(15): 1941—1958.
Li MJ, Guo JQ, Ma T, et al. Research status and development trend of generation-grid-load-storage type integrated systems with heterogeneous energy flows. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(15): 1941—1958. (in Chinese)
- [29] Davis SJ, Lewis NS, Shaner M, et al. Net-zero emissions energy systems. *Science*, 2018, 360(6396): eaas9793.
- [30] Meys R, Kästelhön A, Bachmann M, et al. Achieving net-zero greenhouse gas emission plastics by a circular carbon economy. *Science*, 2021, 374(6563): 71—76.
- [31] 人民网. 我国首个百万吨级碳捕集利用与封存项目投产. (2024-10-15)/[2022-08-30]. <http://sd.people.com.cn/n2/2022/0830/c166192-40102561.html>.

- [32] Bouckaert S, Pales AF, McGlade C, et al. Net zero by 2050: A roadmap for the global energy sector. Paris: IEA, 2021.
- [33] Tollefson J. Innovative zero-emissions power plant begins battery of tests. *Nature*, 2018, 557(7707): 622—623.
- [34] DeAngelo J, Azevedo I, Bistline J, et al. Energy systems in scenarios at net-zero CO₂ emissions. *Nature Communications*, 2021, 12: 6096.
- [35] Du Q, Yang MQ, Wang YL, et al. Dynamic simulation for carbon emission reduction effects of the prefabricated building supply chain under environmental policies. *Sustainable Cities and Society*, 2024, 100: 105027.

Enhancing Energy Efficiency and Reducing Emissions of Energy End-use Sectors: Pathways, Trends, and Strategies

Yimin Xuan* Xianglei Liu

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

Abstract Under the strategic framework of China's "Dual Carbon" goals, enhancing energy efficiency and reducing emissions in end-use sectors is a pivotal step toward facilitating the nation's transition to a low-carbon energy system and achieving high-quality economic development. This study conducts a detailed evaluation of the carbon emission profiles of China's key energy end-use sectors, including steel, cement, chemicals, transportation, and construction. It systematically identifies critical pathways for improving energy efficiency and reducing emissions, including source-level low-carbon initiatives, process-level carbon reduction, and end-level carbon capture. The study further identifies critical common scientific challenges: (1) How to develop multi-energy complementary theories and methodologies that consider diverse qualities of different energy resources, and build intelligent energy systems integrating sources, grids, loads, and storage? (2) How to reconstruct theories, methods, and technologies of combustion processes, thermodynamic cycles, and energy management to achieve synergistic energy transformation, utilization, recovery, and storage? (3) How to balance efficiency and reaction rates between thermodynamic properties and kinetic processes to establish recycling systems for carbon capture, conversion, and utilization? (4) How to develop coordinated strategies for energy and carbon flow optimization under dual constraints of life-cycle energy efficiency and carbon emissions, focusing on system-level design, control, and operational frameworks? Finally, to promote the low-carbon and sustainable advancement of end-use energy sectors, this study presents a series of targeted, actionable recommendations. First of all, a primary focus is suggested to be placed on promoting the development of advanced technologies and foundational theoretical innovations to establish energy systems that are intelligent, efficient, secure, and environmentally sustainable, and to strengthen source innovation capabilities. Secondly, it is suggested to accelerate the establishment and improvement of relevant policies, enhance synergy among universities, research institutions, and industries, for collaboratively addressing technical challenges of reducing carbon emissions. Additionally, it is suggested to underscore the importance of implementing large-scale demonstration projects to accelerate the deployment of innovative technologies, facilitating low-carbon upgrade of energy end-use sectors.

Keywords end-use energy consumption; efficiency enhancement and emission reduction; multi-source complementarity; dual control of energy and carbon

宣益民 中国科学院院士,南京航空航天大学教授,兼任中国工程热物理学会副理事长、教育部第八届科技委能源与交通学部副主任。长期从事能量高效传递、转换利用和储存等教学和科研工作。曾获国家自然科学奖二等奖、国家科学技术进步奖二等奖、国家技术发明奖二等奖、何梁何利基金科学与技术进步奖等。

(责任编辑 陈 鹤 张 强)

* Corresponding Author, Email: ymxuan@nuaa.edu.cn