

发展新质生产力,实现碳中和

胡山鹰, 金涌, 张臻烨

(清华大学化学工程系, 北京市 海淀区 100084)

Developing New Quality Productive Forces to Achieve Carbon Neutrality

HU Shanying, JIN Yong, ZHANG Zhenye

(Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

摘要:【目的】为应对全球气候变化,中国承诺努力在2060年前实现碳中和,这必将给各行各业带来战略性变革,也是发展新质生产力的契机。为此,从技术创新的视角对我国碳中和目标可能带来的变革进行了解读。【方法】分析了我国实现碳中和主要面临的挑战,阐述了实现碳中和与发展新质生产力的关系,从零碳能源供应、化石资源化利用、CO₂捕集与利用等方面介绍了新质生产力技术的研究方向。【结论】我国碳中和的实现需要新能源的大规模发展、传统产业的高端化转型升级,特别是化石资源化利用,以及持续不断的科技创新研发与应用,乃至颠覆性技术的突破,碳中和的最终实现也离不开CO₂的捕集与利用。

关键词: 双碳; 碳中和; 新能源; 可再生能源; 零碳能源; 化石资源化利用; 碳捕集; 碳排放; 新质生产力

ABSTRACT: [Objectives] In response to global climate change, China has committed to achieving carbon neutrality by 2060, which will inevitably bring strategic transformations across various industries and present an opportunity to develop new quality productive forces. This paper analyzes the potential transformations driven by China's carbon neutrality goal from the perspective of technological innovation. [Methods] This paper investigates the main challenges China faces in achieving carbon neutrality, discusses the relationship between carbon neutrality and the development of new quality productive forces, and highlights research directions in zero-carbon energy supply, fossil resource utilization, and CO₂ capture and utilization. [Conclusions] Achieving carbon neutrality in China requires large-scale development of new energy and advanced

transformation and upgrading of traditional industries, especially the fossil resource utilization. It also requires continuous scientific and technological innovation and application, as well as breakthroughs in disruptive technologies. The successful realization of carbon neutrality also relies on CO₂ capture and utilization.

KEY WORDS: dual carbon; carbon neutrality; new energy; renewable energy; zero-carbon energy; fossil resource utilization; carbon capture; carbon emissions; new quality productive forces

0 引言

在20世纪的100年间,全球经济飞速增长,人类构建了高度发达的工业文明,并逐步走向信息化和智能化时代。这一工业化浪潮的主要动力来源于化石能源。在此期间,全球共计排放了大约9 860亿t的CO₂,大气中的CO₂体积分数也从 2.9×10^{-4} 增加至 3.8×10^{-4} 。进入21世纪后,全球CO₂排放量继续上升,极端气候事件频发。根据联合国气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的多份报告,全球气候变化与大气中CO₂浓度上升之间的关系相当明确,控制温室气体排放日益迫切^[1]。

中国作为负责任的碳排放大国,已然向国际社会郑重承诺,将力争在2030年前实现碳达峰,并在2060年前实现碳中和^[2]。习近平总书记在中央财经委员会第九次会议上指出:实现“双碳”目标,意味着我国将进行一场广泛而深入的经济社会变革,需要将这一目标融入生态文明建设的整体规划中;必须打造一个清洁、低碳、安全且高效的能源体系,限制化石能源的消费总量,努

基金项目: 国家自然科学基金项目(U24B6016); 国家重点研发计划项目(2018YFC1903801)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (U24B6016); National Key Research and Development Program of China (2018YFC1903801).

力提升其使用效率，推动可再生能源的替代进程，深化电力系统的改革，并建立一个以新能源为核心的电力新体系。

碳中和指的是实现净零碳排放的状态，对国家或地区而言，实现碳中和意味着需要将社会生产和生活中产生的所有CO₂进行回收，并通过利用或封存手段达到CO₂的净零排放，实现碳元素的人为循环与自然生态的和谐平衡^[3]。

我国实现碳中和主要面临以下挑战：

1) 我国是世界上最大的CO₂排放国，根据国际能源署的公开数据，2021年我国CO₂排放量约106亿t，约占世界CO₂总排放量(336亿t)的1/3。

2) 我国“双碳”目标的2个时间节点(2030年和2060年)仅间隔了30年的时间，相较之下，诸如英国、法国、德国等发达国家从碳达峰到碳中和具有70~80年的过渡期，这为它们在技术和经济层面提供了更多的调整余度和操作灵活性。

3) 我国在追求碳中和目标的同时，必须确保与经济增长同步。2050年，中国的人均国内生产总值(gross domestic product, GDP)需增长至4倍，即从1万美元增长至4万美元，这要求我国需在多个领域进行创新发展并付出极大的努力。

4) 我国作为全球制造业大国，必须推动以科学研究、技术创新、专利申请、软件应用等智力劳动为核心的“制造业”发展，以此驱动创新并确保制造业持续作为财富创造的主导力量。通过制造业、服务业与“制造业”三者相互支撑的健康发展模式，我国才能长期保持其作为制造业大国和强国的地位。然而，为了维持这一地位，稳定的能源供应必不可少，这也为实现碳中和目标带来了额外的挑战。

实现碳中和同样是我国发展的一个契机，转向绿色低碳的新型生产力将成为未来所有经济活动的核心，碳中和将成为推动中国经济增长和转型的最强动力。人们需要理智地协调生态文明建设和经济社会发展的关系，以合理且可承受的方式推进我国经济发展至中等发达国家水平，并与碳中和进程相协调，同时履行构建“人类命运共同体”的承诺。碳中和实现之日，即是中华民族踏上了不可阻挡、永续发展的快车道^[4-5]。

作为全球最大的碳排放国，我国碳排放量巨大的根本原因在于当前以煤为主的能源结构^[6]。为了实现碳中和，从源头上降低化石能源的使用量是不可或缺的措施。在这种情况下，促进化石能源从单纯的能源消耗向资源化利用转变以及调整能源结构，成为了解决问题的关键所在^[3,7]。

随着光伏和风能技术的显著进步，它们的发电成本已经与传统火力发电接近。同时，储能技术也在快速进步，这些技术共同组成了智能电网，为构建零碳排放的电力供应系统创造了条件，这基本上意味着化石燃料可以被替代^[8]。在逐渐减少对化石能源依赖的过程中，石油、煤炭和天然气依然是现代社会不可或缺的资源，因为食物主要由碳水化合物构成，而塑料、橡胶、纤维、涂料等材料则是碳氢化合物，化石能源是获取碳元素的主要渠道。因此，化学化工行业的研究重点应当转向探索碳元素和氢元素在自然界中的循环规律，以及产业系统中优化、循环利用的突破性技术，以确保碳元素能够持续地固定在产品中并得到有效利用，而不是释放到大气中，这是构建生态文明社会的核心目标。

碳中和内涵丰富，既包括技术、路线、政策等维度，也包括国际、国内的不同解读视角，本文主要围绕技术创新的维度从国内视角对碳中和进行解读。

1 碳中和与新质生产力

新质生产力是一种以创新为核心的先进生产力形式，它打破了传统的经济增长模式和生产力发展轨迹，具有高科技、高效率和高质量的特点，并且符合新时代的发展理念。新质生产力源自技术革新的重大突破、生产要素的创新性组合以及产业结构的深度调整、升级，其最明显的特征是全要素生产率的显著提升。创新是其主要特征，质量卓越是其关键所在，而其根本属性则是先进的生产力。科技创新是推动新兴产业、新模式和新动能诞生的关键力量，同时也是新质生产力发展的核心驱动力。

实现“双碳”目标要依靠大幅度、颠覆性的科技创新，要发展高端制造业等新质生产力。具

体来说,对于制造业,实现“双碳”目标的主要努力方向是产业结构改变,推动传统资源从密集型、低端重工业向高端制造业、高技术产业的转变与升级,降低对钢铁、水泥等高能耗产品的依赖度,同时刺激对高端工业产品、服务及绿色环保产品需求的增长。随着信息技术、智能产业、5G、互联网、医疗保健、交通等领域技术的进步,重工业在产业结构中的比重预计将大幅降低。此外,通过技术节能措施和科技创新提高能源利用效率,比如提升发电效率可能会减少10%~20%的火力发电碳排放,提高能源利用效率还可以进一步降低生产每吨钢铁、水泥等重工业产品的综合能耗,进而显著减少工业领域的能源使用。

我国在高端制造业转型方面近年来已经取得很大进展,如5G/6G通信、量子信息传递、纯电动汽车、电池、光伏风电、高铁等技术已处于全世界领先水平,而大型工程机械、无人机、核电等技术位于并跑水平,在民用航空、人工智能、机器人等领域已建立了较强基础的产业,但还有很多领域仍在加快追赶中,如芯片、制药、高端材料等先进技术。未来的出路唯有科技创新,大力研发低能耗、高附加值产品,如作为高端制造基础的以下先进材料:

1) 信息产业配套,包括高纯试剂、高档光刻胶、封装材料。

2) 生化产业配套,包括医药、活体3D打印材料、靶向合成。

3) 精细化、个性化设计,包括有机发光半导体、碳纤维、滤膜材料、光电膜、卤化丁基橡胶、特种聚合物(双峰、超高分子量、耐冲、茂金属聚乙烯)纳微限域合成等。

2 零碳能源供应

碳中和目标的提出对于风能、太阳能、生物质能和氢能等能源是重大利好,进而引发第三次能源革命。当前,我国发电主要依赖燃煤的火力发电厂,电力系统CO₂排放量约占全国总排放量的37%。光伏和风电产业技术的不断突破已使21世纪20年代的光伏发电成本降至0.068美元/(kW·h),陆地风电成本降至0.053美元/(kW·h),海上风电

成本降至0.115美元/(kW·h),这些成本已经接近同期火力发电的成本(约为0.05美元/(kW·h))。根据绿色和平组织发布的国际能源革命报告,地球从太阳获得的可再生能源总量是全球能源需求的3 078倍,其中,生物质能是20倍,风能是200倍,太阳能则是2 850倍。根据国家统计局发布的数据,西北地区的风光资源丰富,尤其是内蒙古、新疆、甘肃、青海、宁夏等地区的风光资源可开发量高达每年397万亿kW·h,这相当于三峡水电站发电量的4 700倍。

2023年我国可再生能源发电累计装机容量达到14.5亿kW,占全部发电装机容量的比重超过50%,预计到2050年可再生能源将成为能源消费总量主体。为此,到2060年我国风光发电装机容量还要增加近10倍,基本能满足主要的电力需求,加上其他可再生能源及核能,告别化石能源时代是完全可能的,但也对可再生能源、规模储能、电网等整体行业都提出了很高的要求。

风力发电和太阳能发电的一个主要限制因素是发电的间歇性,这要求配备相应的调峰和储能系统以建立智能电网,满足工业和日常生活的电力需求^[9]。调峰手段可通过改变电力消费模式(如储热、制冷、日常用电)和调整化石能源发电站的输出功率来实现。储能技术在碳中和能源系统中扮演着至关重要的角色,它不仅能够平衡可再生能源的波动性,提高能源利用效率,还能在电力需求高峰期释放能量,保障电网稳定^[10]。因此,储能技术是实现可再生能源安全、高效利用的关键,对于推动我国能源结构转型和实现碳中和目标具有重要意义^[11]。化学储能(包括锂电池、钒液流电池等)、水力储能、压缩空气储能、机械储能等是当前储能技术研发的重点领域^[12],未来随着电动汽车数量的增加,它们也将成为平衡电力供需的重要储能工具。除了尚在研究阶段的核聚变发电外,结合储能和调峰技术的可再生能源(如光伏)智能电网将成为人类未来能源的终极解决方案。

3 化石资源化利用

化石资源化利用是指煤炭、石油、天然气不

作为能源，而是作为原材料经由化学反应转化为工业产品。随着可再生能源的迅速发展，化石能源的用量势必减少，其资源化利用比重将会增加。

3.1 煤炭利用转型

我国富煤、缺油、少气，煤炭资源化利用是应对油气资源匮乏的重要举措^[13]，但要使煤中的碳元素固定在产品中而非流入大气，也是一个巨大的挑战。目前，我国主要通过煤气化、煤焦化、低温干馏、煤的直接加氢液化等方式对煤炭资源进行综合利用。煤炭转化为化学品的工艺主要包括煤制油、煤制烯烃、煤制芳烃、煤制乙二醇和甲醇等。近年来，甲醇行业迅速发展，以煤制合成气为起点，通过甲醇生产丙烯、芳烃及其下游的精细化工产品产业链得到了迅猛扩展，成为行业主流^[14]。

尽管煤化工能将煤炭转化为化学品，曾被视作煤炭资源化利用的优良途径，在过去10年，研究者开发了煤基乙烯、丙烯和煤制乙二醇的生产技术，并将它们应用于聚酯制造，建立了年产千万吨的产能规模。然而，这一将煤炭从燃料转变为原料的生产过程能耗较高，CO₂排放量较大，水资源消耗也较多，并且在经济性上与石油基生产路径相比优势也不明显。从长远来看，煤化工终将被更优的资源化利用方式所取代，现有的煤化工路径难以满足人们既要把煤转变成原料，又要使生产过程中CO₂排放尽量少的要求，还需要另辟蹊径。

褐煤等年轻煤种的化学组成中氢碳摩尔比是0.8，如果直接燃烧，其中大量宝贵的氢元素也被烧掉。未来煤炭资源化利用的推动首先要依靠分质利用，我国已经发展了多种褐煤分质利用技术，通过中低温干馏，可获得粉状半焦和碳氢化合物、粗苯、轻重焦油、沥青等产品，少部分碳氢化合物可用于蒸汽-燃气联合循环发电以供电网调峰，大部分进入后续生产链。其中，半焦可作为优质还原剂，用于CO₂的资源化利用。

煤干馏得到的碳氢化合物可以进一步在1 000 °C高温下二次裂解为H₂等产物，使H₂产量提高2~3倍以上，得到大量廉价的H₂。按现阶段我国燃煤消耗量计算，若全部采用分质利用技术，

则每年可生产约1.5亿t H₂。当前我国每年煤制氢为0.2亿t，未来需求远不止于此，生产1 t煤制氢伴随11 t CO₂排放，1.5亿t H₂相当于可减少煤制氢26.5亿t CO₂的排放量。大量的H₂资源可推动绿氨、氢燃料电池、氢能炼钢及CO₂资源化利用等产业的发展。

通过煤干馏过程获得的半焦，在约1 000 °C的高温下，能够作为还原剂将CO₂还原成CO。CO因其具有较高的化学活性，可以与天然气、H₂等进行反应，生成多种化学品，并且还可用于生物发酵生产乙醇等过程^[15]，这样就把CO₂排放源改造成了消纳CO₂的碳汇。

3.2 石油利用转型

目前，我国石油炼制能力在每年6亿~7亿t。在现行的石油资源化利用途径中，大约只有20%的石油通过热解和催化裂解等方法转化为烯烃、芳烃，进而用于生产有机化学品。当前面临的问题包括反应条件要求严格、原油转化为化学品的效率较低等，特别是作为石化行业标志性产品的聚乙烯年产量大约只有3 000万t，仅占原油加工量的约5%，且我国还需要每年进口大约1 000万t的高性能聚乙烯。随着未来燃油车的逐步减少直至淘汰，炼油过程中需要大幅降低汽油、煤油、柴油和润滑油的比例，同时增加石脑油的比例，通过生产烯烃、芳烃等中间产品，最终制造出各种高分子材料。

石油资源化利用对催化裂解技术的突破提出了较高要求。社会各界合力推动石油催化裂化技术研发，已取得可观进展，如中石化公司利用增强型催化裂解(deep catalytic cracking, DCC)技术，即DCC-plus，使得汽油、柴油收率由原设计的45%降低至39%^[16]。清华大学魏飞教授团队^[17]通过提高反应温度及催化剂、原油比例，并控制催化剂与原油接触时间，成功实现了产品中烯烃、芳烃等化学品的高收率(70%~80%)。改良催化剂、优化反应器等方式是提高乙烯、丙烯、芳烃等化学品综合收率的有效手段，将打通石油与下游精细化学品的连接，使“减油增化”成为可能。

此外，我国还需要积极开发具有更高性能的石化产品。以我国聚乙烯产业为例，目前线性低

密度聚乙烯的生产能力已超出市场需求,但高性能产品(如双峰聚乙烯、茂金属聚乙烯以及超高分子量聚乙烯)仍然主要依赖进口,这一状况亟待改变。只有当我国掌握了先进材料的生产技术,才能促进制造业向高品质、高附加值和低碳排放的方向发展。

3.3 天然气利用转型

天然气中碳氢摩尔比为1:4,是很重要的碳减排资源。现阶段天然气资源化利用方式主要包括天然气制氢、合成低碳烯烃等,如利用锌-铬催化剂在高温高压条件下生成相似比例的乙烯、丙烯与丁烯^[18-20]。天然气制氢伴生的CO₂排放量也较少。

天然气作为还原剂,具有巨大的资源化利用潜力。天然气可作为还原剂参与CO₂的转化利用,生产下游化学品。研究者已实现在极短接触时间的条件下,利用天然气与O₂直接合成乙炔,该反应的副产物CO和H₂均有很高利用价值^[21-22]。

国内天然气价格相对较高,以往工业应用因成本问题而受到限制,天然气主要被用于居民烹饪和取暖等生活领域,其能源利用效率并不理想。例如,使用天然气烧开水时,只有30%~40%的热量真正用于加热水;而如果使用电热水壶,能量利用率则可以超过90%。在可再生能源充分发展的前提下,用电的能量利用率远大于用天然气的能量利用率。从实现碳中和的角度出发,在大量绿色电力供应的基础上,民用能源应当积极推广电气化,将天然气替换出来,以此作为降低CO₂排放的有效手段。

4 CO₂捕集利用

随着新能源技术的进步,在充足能源供应的基础上,将CO₂资源化利用被视为回收CO₂和实现碳中和的最理想方法^[23]。将CO₂与化石资源化利用相结合,有助于构建工业领域的良性碳循环。CO₂资源化利用的主要方式包括光合作用、矿化处理、化学品合成等途径。

光合作用是人类向自然界学习的一种利用CO₂的方式^[24]。藻类是光合效率最高的生物,研究人员充分利用其特性,将CO₂高效转化为生物

燃料。通过精心设计的反应器结构和优化藻类培养液中的CO₂分布,确保了藻类生长所需的光照条件以及充足的CO₂供应,从而使得单位面积的CO₂固定量能够达到自然界中的数十倍^[25]。另一种更为积极的手段是人为设计出效率更高的人工光合作用系统,这种系统通过在细菌表面构建人工光能捕获装置,将捕获的光能传递给细菌,进而将CO₂转化为醋酸,该系统的太阳能到化学能的转换效率能够超过3%^[26]。CO₂还能作为温室气体肥,起到保温、增产的作用,被广泛应用于农业生产。

CO₂矿化处理在固碳方面拥有巨大的潜力^[27]。在人类目前能够开发的深度范围内(地下15 km深),理论上硅酸盐的储存量能够封存至少4万亿t的CO₂。此外,还可以利用建筑废弃物作为吸收剂来固定CO₂。快速吸收矿化已经能通过化学循环的方法实现^[28],但目前尚处于实验室阶段。

利用加氢、水合等工艺,可以将CO₂作为原料用于化学品的制造。近年来,将CO₂加氢转化为甲醇以及将CO₂定向转化为聚酯等生产技术逐渐走向成熟,同时,将CO₂逆合成碳氢化合物的研究也在持续进行中^[29-31]。

通过植树造林能够吸收CO₂,然而,若从生命周期视角看待树木及秸秆等农林残留物,它们分解时会产生大量的甲烷等温室气体。因此,必须开发这些生物质碳化的技术,将生物碳返还土壤中,这样不仅能够保持土壤的水分、缓慢释放肥料,还能提升肥料的利用效率。生物碳具有良好的多孔结构,它也是将大气中的CO₂固定到地下的重要方法。

5 结束语

碳中和是一场重大的社会变革,是未来中国经济增长和转型发展的最大驱动力,有许多重要的创新概念、工艺技术亟待开发,将原本无法达成的目标转化为现实。它将作为指导未来经济活动的关键因素,覆盖科学研究、技术创新、生产流程、投资与消费以及商品流通等各个领域。同时,它将推动生态文明建设和经济发展的和谐共进,依靠创新、规划来逐步实现这一目标。

以史为鉴，石器时代的落幕并非因为矿石的耗竭，而是因为青铜冶炼和铸造技术的进步，同样，化石能源时代的结束不会是因为化石燃料的耗竭，而是人类通过技术革新主动步入新的时代。通过化石资源的化学利用，碳元素可以转变为下游产品的化合物，而不是排放到大气中，从而使化石资源从能源构成中分离出来，实现与碳排放的脱钩。2060年中国碳中和的实现必然是：1) 工业化时代转变为信息化、智能化时代；2) 以可再生能源为主导或核聚变电站商业运营时代；3) 化石燃料转型为化石材料时代；4) 资源循环利用时代；5) 科技颠覆性创新和人才辈出的时代。经济、社会发展彻底摆脱了资源、能源匮乏的困扰，中华民族将无可阻挡地永续辉煌前行。

参考文献

- [1] 郑国光. 支撑“双碳”目标实现的问题辨识与关键举措研究[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 1-8.
ZHENG G G. Problem identification and key measures to support the achievement of carbon peak and carbon neutrality[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 1-8.
- [2] 朱法华, 徐静馨. 双碳背景下中国与主要发达国家电力低碳转型比较[J]. 电力科技与环保, 2024, 40(6): 561-571.
ZHU F H, XU J X. Comparison of low-carbon transformation in electricity between China and major developed countries under the background of carbon peaking and carbon neutrality[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2024, 40(6): 561-571.
- [3] 张臻烨, 胡山鹰, 金涌. 2060中国碳中和: 化石能源转向化石资源时代[J]. 现代化工, 2021, 41(6): 1-5.
ZHANG Z Y, HU S Y, JIN Y. China achieving carbon neutral in 2060, fossil energy to fossil resource era[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(6): 1-5.
- [4] 金涌, 胡山鹰, 朱兵. 能源视角下的中国碳中和构想[J]. 清华金融评论, 2021(12): 26-29.
JIN Y, HU S Y, ZHU B. China's carbon neutrality vision from an energy perspective[J]. Tsinghua Finance Review, 2021(12): 26-29.
- [5] 金涌, 胡山鹰, 朱兵. 中国碳中和之路: 把化石从燃料变成原材料利用[J]. 化工管理, 2021(34): 78-79.
JIN Y, HU S Y, ZHU B. Ways of carbon neutralization in China: turning fossil fuels into raw materials[J]. Chemical Enterprise Management, 2021(34): 78-79.
- [6] 张全斌, 周琼芳. 基于“双碳”目标的中国火力发电技术发展路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(2): 143-154.
ZHANG Q B, ZHOU Q F. Research on the development path of China's thermal power generation technology based on the goal of carbon peak and carbon neutralization[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(2): 143-154.
- [7] 胡山鹰, 金涌. 净碳足迹为零如何实现[J]. 科学大观园, 2021(10): 30-31.
HU S Y, JIN Y. How to achieve carbon neutrality[J]. Grand Garden of Science, 2021(10): 30-31.
- [8] 许洪华, 邵桂萍, 鄂春良, 等. 我国未来能源系统及能源转型现实路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 484-491.
XU H H, SHAO G P, E C L, et al. Research on China's future energy system and the realistic path of energy transformation[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 484-491.
- [9] 孙浩男, 杜鹏, 刘念, 等. 大规模风光储场站功率跟踪优化控制实时仿真[J]. 电力建设, 2024, 45(8): 62-74.
SUN H N, DU P, LIU N, et al. Real-time simulation of optimal power tracking control for large-scale wind-photovoltaic-storage power station clusters [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(8): 62-74.
- [10] 胡迎迎, 李强, 张琳娜, 等. 基于模糊层次分析法-TOPSIS的多元化储能典型场景适用性评估[J]. 电测与仪表, 2024, 61(6): 126-132.
HU Y Y, LI Q, ZHANG L N, et al. Applicability evaluation of diversified energy storage typical scenarios based on fuzzy analytic hierarchy process-TOPSIS[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(6): 126-132.
- [11] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.
WANG X B, GE J, HAN L S, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.
- [12] 汤匀, 岳芳, 王莉晓, 等. 全球新型储能技术发展态

- 势分析[J]. 全球能源互联网, 2024, 7(2): 228-240.
TANG Y, YUE F, WANG L X, et al. International development trend analysis of new energy storage technologies[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2024, 7(2): 228-240.
- [13] 李维明. 煤炭分级分质利用任重道远[N]. 中国煤炭报, 2016-03-09(03).
LI W M. Graded and quality-oriented utilization of coal has a long way to go[N]. China Coal Newspaper, 2016-03-09(03).
- [14] 王建立, 温亮. 现代煤化工产业竞争力分析及高质量发展路径研究[J]. 中国煤炭, 2021, 47(3): 9-14.
WANG J L, WEN L. Competitiveness analysis and high quality development path research of modern coal chemical industry[J]. China Coal, 2021, 47(3): 9-14.
- [15] 王铁峰, 蓝晓程, 王宇, 等. 一种二氧化碳和煤炭生产含氧有机物的系统和工艺: CN112812930A[P]. 2021-05-18.
WANG T F, LAN X C, WANG Y, et al. A system and process for producing oxygen-containing organic compounds from carbon dioxide and coal: CN112812930A[P]. 2021-05-18.
- [16] 蔡建崇, 万涛. 增强型催化裂解技术(DCC-PLUS)的工业应用[J]. 石油炼制与化工, 2019, 50(11): 16-20.
CAI J C, WAN T. Industrial application of DCC-PLUS technology[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2019, 50(11): 16-20.
- [17] 陈继军, 魏飞. 原油直接裂解产品收率可达70%: 访清华大学教授、教育部特聘教授、北京市绿色化学反应工程和技术重点实验室主任魏飞[J]. 中国石油和化工产业观察, 2020(9): 12-15.
CHEN J J, WEI F. The yield of products from direct cracking of crude oil can reach 70%: interview with Wei Fei, professor of Tsinghua University, professor of the Ministry of Education, director of Beijing Key Laboratory of Green Chemical Reaction Engineering and Technology[J]. China Petrochemical Industry Observer, 2020(9): 12-15.
- [18] 陈英杰. 天然气制氢技术进展及发展趋势[J]. 煤炭与化工, 2020, 43(11): 130-133.
CHEN Y J. Technical progress and development trend of hydrogen production from natural gas[J]. Coal and Chemical Industry, 2020, 43(11): 130-133.
- [19] 潘珍燕, 石勇. 中国天然气化工技术现状及发展方向[J]. 石油化工应用, 2020, 39(11): 14-16.
PAN Z Y, SHI Y. The technical present situation and development direction of natural gas chemical industry in China[J]. Petrochemical Industry Application, 2020, 39(11): 14-16.
- [20] 邵聪. 基于化学链技术的天然气利用研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
SHAO C. Research on natural gas utilization based on chemical looping technology[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [21] 赵学英. 部分氧化法天然气制乙炔工艺技术探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(21): 247-248.
ZHAO X Y. Exploration of partial oxidation process for the production of acetylene from natural gas technology[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019, 39(21): 247-248.
- [22] CHEN L, PANNALA S, NAIR B, et al. Experimental and numerical study of a two-stage natural gas combustion pyrolysis reactor for acetylene production: the role of delayed mixing[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2019, 37(4): 5715-5722.
- [23] 胡道成, 王睿, 赵瑞, 等. 二氧化碳捕集技术及适用场景分析[J]. 发电技术, 2023, 44(4): 502-513.
HU D C, WANG R, ZHAO R, et al. Research on carbon dioxide capture technology and suitable scenarios [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(4): 502-513.
- [24] 吴可量. 基于TiO₂的异质结复合纳米光催化剂的制备及人工树叶的构建[D]. 石河子: 石河子大学, 2019.
WU K L. Preparation of heterojunction composite nanophotocatalyst based on titanium dioxide and construction of artificial leaves[D]. Shihezi: Shihezi University, 2019.
- [25] RAZZAK S A, HOSSAIN M M, LUCKY R A, et al. Integrated CO₂ capture, wastewater treatment and biofuel production by microalgae culturing: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 27: 622-653.
- [26] SAKIMOTO K K, WONG A B, YANG P. Self-photosensitization of nonphotosynthetic bacteria for solar-to-chemical production[J]. Science, 2016, 351: 74-77.
- [27] 孔啸, 赵传文, 孙健, 等. CO₂矿化养护全固废碱激发胶凝材料固碳特性及性能强化[J]. 发电技术, 2022, 43(4): 600-608.
KONG X, ZHAO C W, SUN J, et al. Carbon fixation characteristics and performance enhancement of CO₂ mineralized all-solid waste alkali-activated

- cementitious materials[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(4): 600-608.
- [28] LACKNER K S, WENDT C H, BUTT D P, et al. Carbon dioxide disposal in carbonate minerals[J]. Energy, 1995, 20(11): 1153-1170.
- [29] 朱维群, 王倩, 唐震, 等. 二氧化碳资源化利用的工业技术途径探讨[J]. 化学通报, 2020, 83(10): 919-922.
- ZHU W Q, WANG Q, TANG Z, et al. Discussion on engineering technologies to the resource utilization of carbon dioxide[J]. Chemistry, 2020, 83(10): 919-922.
- [30] 朱维群, 王倩. 碳中和目标下的化石能源利用新技术路线开发[J]. 发电技术, 2021, 42(1): 3-7.
- ZHU W Q, WANG Q. Development of new technological routes for fossil energy utilization under the goal of carbon neutral[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(1): 3-7.
- [31] 霍景沛, 林冲, 陈桂煌. 光催化二氧化碳还原催化体系研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2020, 18(3): 8-14.
- HUO J P, LIN C, CHEN G H. Research progress in photocatalytic reduction catalyst system of carbon dioxide[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2020, 18(3): 8-14.

收稿日期: 2024-10-21。

修回日期: 2024-11-20。

作者简介:



胡山鹰

胡山鹰(1965), 男, 博士, 教授, 研究方向为生态工业、循环经济等, hxr-dce@tsinghua.edu.cn;



金涌

金涌(1935), 男, 中国工程院院士, 教授, 研究方向为清洁化工工艺等, jiny@mail.tsinghua.edu.cn;



张臻焯

张臻焯(2000), 女, 博士研究生, 研究方向为工业碳排放、CCUS技术等, zhenye-z21@mails.tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 尚彩娟)