



“双碳”目标下化石能源低碳转化方向探讨

李婉君, 张锦威, 袁小帅, 杨丽平, 朱汉雄, 张小菲, 李梓彤, 刘陆, 刘正刚, 肖宇, 蔡睿, 刘中民*

中国科学院大连化学物理研究所, 大连 116023

* 联系人, E-mail: zml@dicp.ac.cn

习近平总书记多次强调, “实现‘双碳’目标, 不是别人让我们做, 而是我们自己必须要做”。党的二十大报告进一步指出, 对于我国, “推动经济社会发展绿色化、低碳化是实现高质量发展的关键环节”, “加快推动产业结构、能源结构、交通运输结构等调整优化”。 “双碳”目标的提出, 是我国以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴的必然要求。发展的根本目的, 是满足人民对美好生活的向往。过去发达国家高耗能、高排放发展路径, 不仅带来不可持续的环境危机, 还导致发展目的与手段的本末倒置。绿色低碳的转型发展, 一方面将驱动环境与发展之间的相互促进, 另一方面也将驱动经济、产业等向更有竞争力的结构跳跃, 带来新的发展机遇。

我国成为全球碳排放量最大国家的根本原因在于能源及其相关的工业体系主要依赖化石资源。我国碳排放中, 发电(供热)占比约45%, 工业占比约39%, 交通、建筑、农业共占约16%。工业部门的排放主要来源于钢铁、有色、化工、建材四大难减排行业。加速推动化石资源的低碳化应用, 助力于相关领域的转型发展, 对于我国高质量发展将具有重要的意义。

1 化石能源低碳化发展的现状及趋势

1.1 保障能源安全是稳定持续发展的基础

我国是世界最大的能源生产和消费国, 能源是我国工业体系畅通运转、社会经济稳定增长的重要支撑, 只有保障能源安全才能实现经济社会高质量发展。 “富煤、缺油、少气”的化石能源资源禀赋决定了我国以煤为主的能源结构。2022年, 我国煤炭产量45.6亿吨, 煤炭消费量约为42.6亿吨(http://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228_1919011.html), 煤炭生产供应仍有部分缺口, 需要通过释放产能与进口煤炭来弥补产量不足。我国石油和天然气资源缺乏, 但消费需求巨大, 2022年对外依存度分别高达71%和40%(<http://www.cpic.org.cn/detail/59f576d2-7415-4ea7-bad4-ecff0778d998>)。近年来, 我国非化石能源行业快速发展, 非化石能源消费比例从2010年的9.4%增长到2022年的约17.4%(https://www.ndrc.gov.cn/fgsj/tjsj/jjsjgl1/202301/t20230131_1348086.html), 能源结构逐



李婉君 中国科学院大连化学物理研究所科技处副处长兼低碳战略研究中心副主任, 副研究员。主要从事“多能融合”技术体系、能源技术战略、技术评估方法、纳米金催化等研究。



刘中民 中国工程院院士, 现任中国科学院大连化学物理研究所所长、低碳催化技术国家工程研究中心主任、国家能源低碳催化与工程研发中心主任。长期从事能源化工领域应用催化研究与技术开发, 作为技术总负责人主持完成了多项创新成果并实现产业化。

步向清洁低碳化转型。但新能源发展受资源、技术等因素制约, 目前供应能力有限, 尚不能满足当下社会高质量发展的需要。

目前国际经济秩序持续恶化、全球能源市场供需紧张, 进口油、气、煤炭等化石能源的不确定性是我国能源安全极大的威胁。发展必须立足资源禀赋, 以保障能源安全为前提, 先立后破, 有序减量替代, 科学谋划、合理布局, 推动化石能源清洁高效利用。

1.2 发挥化石能源的物质属性, 提高其作为化工原料的综合利用效能

2021年9月, 习近平总书记考察榆林时指出: “煤化工产业潜力巨大、大有前途, 要提高煤炭作为化工原料的综合利用效能, 促进煤化工产业高端化、多元化、低碳化发展, 把

加强科技创新作为最紧迫任务,加快关键核心技术攻关,积极发展煤基特种燃料、煤基生物可降解材料等”,这明确了现代煤化工发展的定位和方向。

煤炭清洁高效转化是煤炭高值低碳利用的重要途径。不同于煤炭燃烧,煤炭转化是通过化学方法将煤炭的物质属性,即煤炭的碳、氢、氧等元素,转变为特定分子组成的气体、液体和固体产品,并进一步转化为能源和化学品的过程。相比煤炭燃烧供能,使用相同数量的煤炭进行转化利用能产生更高的经济价值,且大幅降低碳排放,这必将成为未来化石能源低碳化利用的一个重要方向。

1.3 科技创新支撑构建多能融合的新型能源体系

当前,能源革命、工业革命的实现亟需科技革命,叠加数字化、智能化发展趋势,一场前所未有的大变革正在启动。科技创新是支撑“双碳”目标实现的根本动力。经过多年发展,我国能源科技创新取得重要阶段性进展,有力保障了能源安全,促进了产业转型升级,为“双碳”目标的实现奠定了良好基础。但是,实现“双碳”目标要求能源结构、生产生活方式的颠覆性变革,现有工业体系的重构和战略性新兴产业的兴起,都需要科技的支撑和推动,需要以“双碳”新理念重新审视传统过程,把握战略机遇,积极应对挑战,增强科技创新,重构能源与工业体系,推动其绿色低碳发展。

2 化石能源低碳化转化方向

面向国家发展清洁低碳、安全高效能源体系建设要求,面向“双碳”目标,我们提出通过技术创新实现多种能源之间互补融合的“多能融合”理念与技术框架^[1,2],如图1所示。多能

融合是指综合考虑能源资源在加工利用过程中的能源属性和物质(原料/材料)属性,通过新技术、新模式破除各能源种类之间条块分割、互相独立的技术和体制壁垒,促进化石能源与非化石能源、各能源子系统之间、各能源资源加工利用不同过程之间的能量流、物质流和信息流的集成融合,实现能源资源利用的能量效率、物质效率、环境效益、生态效益、经济效益和社会效益等多目标的优化。基于多能融合理念,提出了以化石能源清洁高效利用与耦合替代、非化石能源多能互补与规模应用、工业低碳零碳流程再造和数字化智能化集成优化为四条主线,以合成气/甲醇平台、储能平台、氢能平台、二氧化碳平台为四平台的多能融合技术体系。

结合多能融合技术体系框架,化石资源的低碳化转化可以从化工之间耦合发展、化工与其他难脱碳行业融合发展、可再生能源与化工耦合等技术路径进行探索实现。

2.1 石油化工与煤化工的耦合发展

长期以来,石油化工和煤化工分属两个不同门类的产业,相互之间难以协调。现代煤化工的快速发展,使得煤经甲醇生产多种清洁燃料和基础化工原料成为可能,为石油化工和煤化工协调发展带来了新的机遇。煤化工与石油化工耦合发展,既可以保障石化产业安全,促进石化原料多元化,还可以形成煤化工与石油化工产业互补、协调发展的新格局^[3]。

如图2所示,煤化工与石油化工的协调发展,可以从两方面来实现。一方面,进一步拓展煤化工工艺技术及其产业化应用,实现大规模的煤制烯烃、芳烃等大宗化学品,尤其可以发挥煤制含氧化合物的优势,形成对现有石油化工产品的

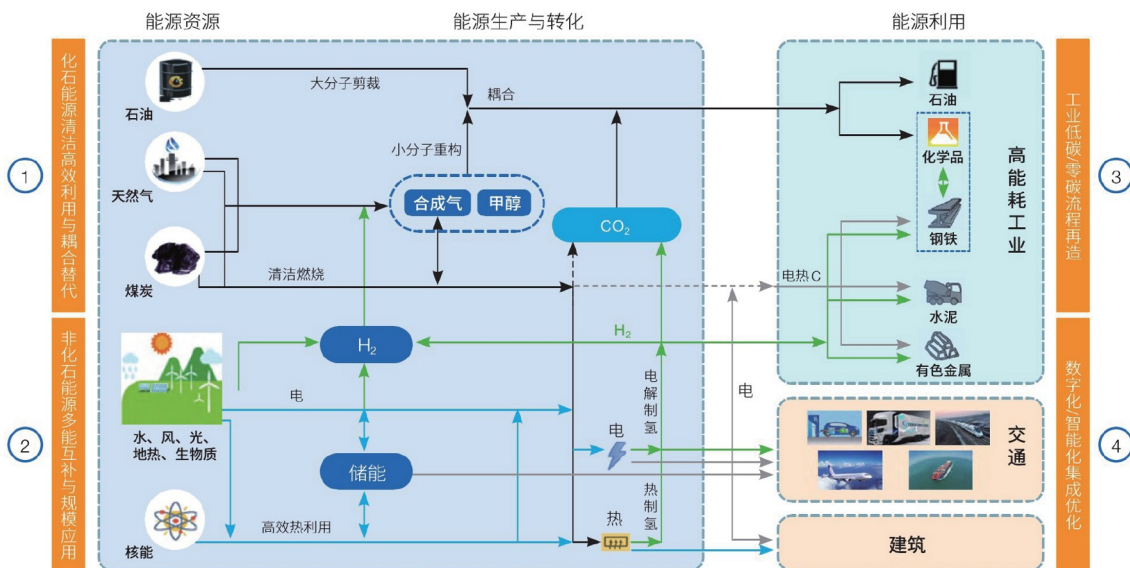


图1 (网络版彩色)“四主线、四平台”的多能融合技术体系^[2]

Figure 1 (Color online) Multi-energy integration technology system of “four mainlines and four platforms”^[2]

补充。另一方面,煤化工过程是小分子重构,石油化工过程为大分子剪裁,利用煤化工与石油化工各自工艺过程的特点,研发两者相互耦合的新技术,如甲醇石脑油耦合制烯烃、甲醇甲苯耦合制对二甲苯等,有望有效促进产业互补发展^[4]。以甲醇石脑油耦合为例,利用石脑油制烯烃的强吸热与甲醇制烯烃的强放热,兼顾考虑相似的反应条件和催化剂,将石脑油原料和甲醇原料耦合起来制取烯烃,利用反应过程中的吸热-放热平衡,可以提高系统的能效和碳原子利用率。相比传统技术路线,吨烯烃产品能耗降低1/3~1/2,石脑油利用率提高10%^[2]。

2.2 难减排行业与化工的融合发展

钢铁、水泥等工业部门成为难减排行业的重要原因是以煤炭作为能源。如果能够在发挥煤炭能源属性的同时，进一步利用其物质属性，将钢铁、水泥等工业过程与化工相融合，有望为其减碳提供一条新途径。钢铁行业的尾气中含有大量的一氧化碳，如能作为原料利用，既可以降低碳排放，又可以提升经济效益。例如，利用钢厂尾气生产乙醇，全国25%的钢厂尾气可生产1000万吨乙醇。2022年，河南煤焦集团有

限公司采用中国科学院大连化学物理研究所研发的合成气经二甲醚羰基化制备乙醇(DMTE)技术路线,开展的20万吨/年焦炉煤气制乙醇的工业示范一次投产成功(http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2023-01/12/content_7056433.html). 还可进一步考虑对相关工业流程进行改造,如通过控制燃烧过程,使化石能源部分燃烧供热的同时生成重要的化工原料——一氧化碳,减少相对稳定难转化的二氧化碳的产生。如果在甲烷气氛下进行水泥熟料焙烧,如图3所示,在适宜的催化剂作用下,使甲烷与碳酸钙分解产生的二氧化碳发生干重整反应生成一氧化碳和氢气,直接作为原料生产甲醇等化学品,同时可以解决水泥生产中因碳酸钙分解产生的二氧化碳过程排放问题。

2.3 可再生能源与化工的系统耦合

Power to X技术是指通过一系列的路径实现可再生能源电力的转化、存储,其中X可以是氢气、合成气、燃料等,既可以实现季节性或非高峰储能应用中有效地将电能转换为化学能,平抑可再生能源的波动性和间歇性,又能够提供除电力外多形式的能源介质,形成对能源体系的有效补充^[5]。

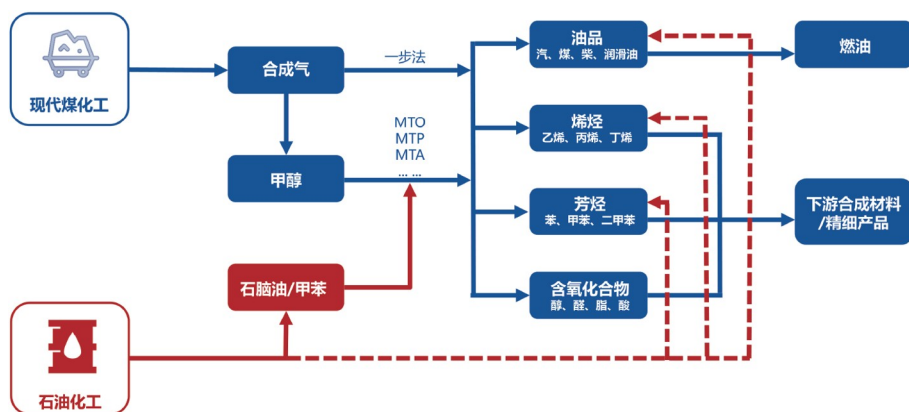


图 2 (网络版彩色)现代煤化工与石油化工耦合发展路线^[4]

Figure 2 (Color online) Schematic of process integration between coal chemical and petrochemical industry^[4]

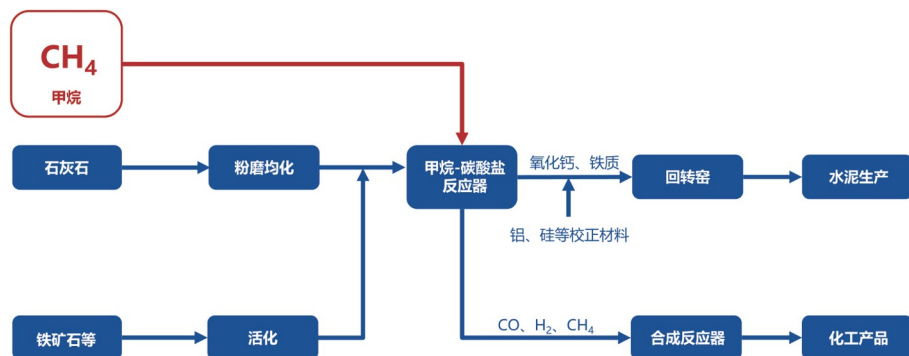


图3 (网络版彩色)水泥生产耦合干重整反应示意图

Figure 3 (Color online) Schematic of coupling dry reforming reaction in cement production

Power to H_2 是其中非常重要的一条路径。氢能具有能量、物质双重属性, 将是难减排行业深度减排的关键。分析典型的现代煤化工过程可以发现, 除了煤直接液化是在催化剂的作用下通过加氢液化将煤转化为液态产物之外, 煤间接液化、煤制天然气、煤制化学品等过程, 几乎都是先将煤气化, 生成以一氧化碳和氢气为主的合成气, 通过水煤气变换调整合成气中一氧化碳与氢气的比例, 再将合成气净化之后作为原料制备其他产品。在煤气化到合成气净化这一过程中, 约50%的原料碳被转化为二氧化碳排放, 只有50%左右的原料碳被转化为合适的反应气, 进而转化为产品。如果能够将可再生能源与核能等清洁能源制氢技术^[6]与煤气化工艺耦合(图4), 绿氢的引入可以取代传统的水煤气变换工艺, 从源头减碳, 并大幅提高煤炭利用效率, 同时生成的绿氧应用于煤气化过程可以降低对空分的需求, 进而降低燃料煤的使用。

此外, 绿氢也可以在其他工业领域形成对化石资源的替代, 比如在钢铁行业中, 以氢气代替煤炭作为还原剂(氢冶金), 有望颠覆传统的高炉-转炉流程, 带动钢铁工艺流程新的

技术革命, 并实现“低碳”甚至“零碳”工艺的产业化应用^[7]。

Power to X 还有一种重要形式是电催化二氧化碳还原制合成气, 以合成气作为平台化合物向下延伸至多种化学品和燃料。该路径可以将二氧化碳转化为高附加值的化学品或燃料, 实现可再生能源消纳利用的同时, 将化学品生产与化石资源解耦, 有助于缓解我国石油资源短缺的问题^[8]。电解二氧化碳产生的一氧化碳可以与煤气化产生的一氧化碳形成可以互补替代的碳源, 与电解水制得的氢组成合成气向下游转化^[9]; 也可以通过对水和二氧化碳的共电解生成合成气^[10](图5)向下游转化, 制取烯烃、芳烃、含氧化合物及燃料等。

3 中国科学院技术路径探索与进展

2022年3月, 中国科学院正式发布了“中国科学院科技支撑碳达峰碳中和战略行动计划”(以下简称“双碳”行动计划)^[11], 以“解决核心问题为抓手”, 系统地提出了八大行动、18项重点任务, 其中技术方面聚焦基础前沿交叉创新和关键技术突破, 系统部署和推进化石能源高效清洁利用、可

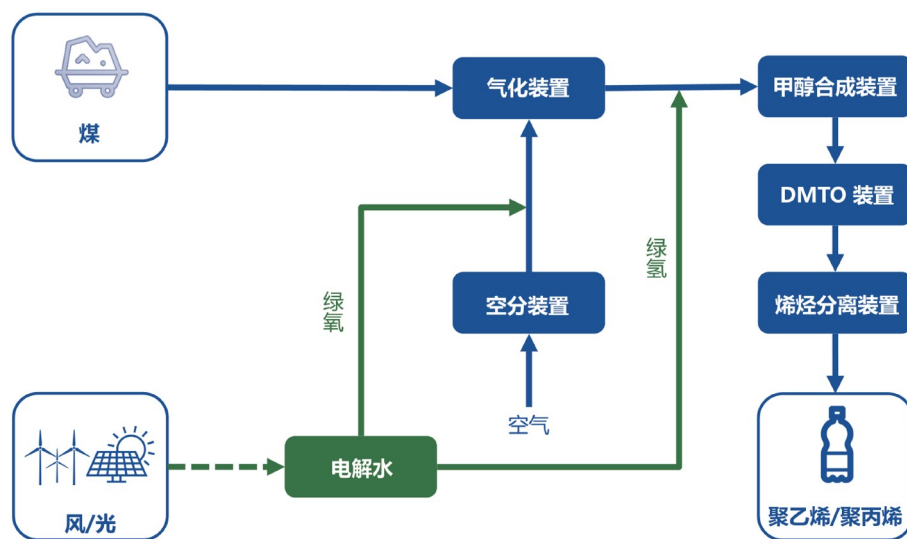


图4 (网络版彩色)现代煤化工与绿氢耦合发展路线

Figure 4 (Color online) Schematic of coupling green hydrogen in coal chemical industry

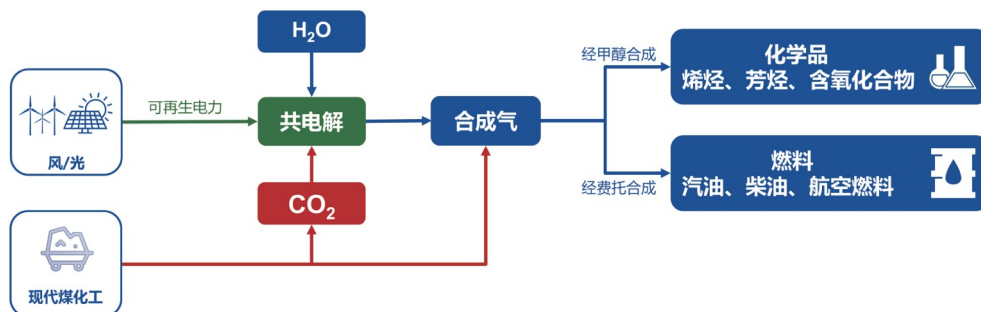


图5 (网络版彩色)现代煤化工与二氧化碳电催化转化耦合发展路线

Figure 5 (Color online) Schematic of coupling carbon dioxide electrocatalytic conversion in coal chemical industry

再生能源、先进核能、储能与多能融合技术、固碳增汇等多项重点技术方向。该行动计划是中国科学院服务国家“双碳”目标的纲领性文件,指导中国科学院从组织机制、项目部署、区域示范、战略研究等方面进行了布局。

在行动计划发布之前,面向国家能源、“双碳”等领域的重大需求,中国科学院先后已组织实施了“未来先进核裂变能”“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”“低阶煤清洁高效梯级利用”“智能导钻技术装备体系与相关理论研究”“变革性纳米技术聚焦”“变革性洁净能源关键技术与示范”“煤炭清洁燃烧与低碳利用”等A类先导专项,前瞻部署了突破能源领域关键科学问题与核心技术的研究。

2018年启动的“变革性洁净能源关键技术与示范”的战略先导科技专项,旨在通过化石能源清洁高效开发利用与耦合替代、可再生能源多能互补与规模应用、低碳化智能化多能融合等三条主线中的系列变革性技术突破与示范,促进能源技术革命创新示范,目前取得了一系列突破进展。其中,在化石能源利用方面,包信和团队^[12]在界面限域与孔道限域的基础上创新提出了金属氧化物和分子筛耦合的双功能OX-ZEO催化体系,实现了煤经合成气高选择性直接催化转化制低碳烯烃技术,省去了耗水、耗能的水煤气变换和水-氢循环过程,并成功突破了目标产物选择性理论极限。基于该项创新成果,建设了世界首套千吨级规模的中试试验装置(http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202111/14/t20211114_37082682.shtml)。刘中民团队^[13]开发的新一代甲醇制烯烃技术(DMTO-III),通过对催化剂积碳的调控、反应器和工艺过程的创新,不需进行 C_4^+ 回炼,可实现单套工业装置甲醇处理量达300万吨/年以上,烯烃产量从60万吨/年增加到115万吨/年,DMTO-III技术一次性签订了5套100万吨/年烯烃装置的技术许可协议(https://news.gmw.cn/2020-11/10/content_34353496.htm)。该团队还采用非贵金属催化剂,以煤基合成气为原料,经甲醇脱水制二甲醚、二甲醚羰基化和乙酸甲酯加氢合成乙醇的路线(DMTE)^[14],可以直接生产无水乙醇,保障我国粮食安全与能源安全。在10万吨/年示范项目的基础上,技术升级不断迭代,正式建成了全球规模最大的50万吨/年煤基乙醇工业化项目(<http://gxj.yl.gov.cn/shows/13/2434.html>)。丁云杰团队^[15]首次系统地提出了在金属Co和 Co_2C 的界面活性位上合成气催化转化为混合伯醇的理论,开发了合成气直接制(高碳)醇-油联产技术,完成了全球首套万吨级合成气(高碳)醇-油联产工业试验(<https://www.china-news.com.cn/gn/2019/11-26/9018106.shtml>)。同时,还开发了

新一代炭载钴基浆态床合成气制油技术,降低了单元运行能耗,省去脱碳单元,产生的废催化剂经简易焚烧处理后可回收金属钴等,已具备15万吨/年工业示范装置及其运行的实际经验(<https://newenergy.in-en.com/html/newenergy-2412159.shtml>)。田志坚团队^[16]开发的煤基费托合成蜡加氢异构生产高品质润滑油基础油技术,除主产品高品质润滑油基础油之外,该技术还副产无芳烃溶剂油、钻井液、工业白油等高附加值产品。在新疆克拉玛依白碱滩区中试装置上成功开展中试试验,获得了吨级高品质基础油,产品达到III+类润滑油基础油标准等(<https://www.chinanews.com.cn/gn/2021/05-17/9479014.shtml>)。李永旺团队^[17]开发了新一代间接液化煤制油工艺,包括更为优化、工程化水平更高的、消耗更低的费托合成技术和经济性更好的汽-柴-航-化联产组成的新一代中温间接液化成套技术,系统能效由现有百万吨商业化装置的43%~44%提高至49%。全球单套规模最大的煤制油项目——神华宁煤400万吨/年煤间接液化示范项目于2016年建成投产,于2017年满负荷运行,于2018年实现盈利(<https://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2016/12/319237.shtml>)。目前,3套百万吨级商业示范项目实现了满(超)负荷稳定运行,已形成650万吨/年的产能。成卫国团队^[18]采用双位点离子液体催化剂,结合过程耦合强化反应及分离节能新工艺,开发了甲醇为原料制备碳酸二甲酯技术,采用该技术的10万吨/年工业装置已于2021年3月投料开车并产出合格产品(<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1733686540975224447&wfr=spider&for=pc>)。王利国团队研发了非光气异氰酸酯高效羰化/油水缩合/定向热解系列关键技术,建立了全球首套万吨级MDI示范工程(https://www.sohu.com/a/425698903_99986287)。

4 总结

我国碳达峰、碳中和宏伟目标的实现,是一项广泛而深刻的经济社会系统性变革,必须加强统筹规划,全社会共同努力,才能形成永续发展的良性模式。化石资源的使用,不仅涉及二氧化碳排放问题,也与能源安全及产业链、供应链稳定密切相关。必须立足资源禀赋,以保障能源安全为前提,先立后破,有序减量替代。以化石资源的资源化利用为核心,充分发挥科技创新的推动作用,通过石化和煤化工行业耦合、化工与难脱碳行业融合、绿电绿氢在工业领域形成对化石能源替代等技术路径,形成多能融合的发展趋势,有望为“双碳”目标下化石能源的低碳清洁高效利用提供可行路径,助推工业领域绿色低碳高质量发展。

致谢 感谢中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA21000000)资助。

推荐阅读文献

- 1 Xiao Y, Peng Z L, He J D, et al. Science and technology innovation promotes construction of new national energy system (in Chinese). Bull Chin

- Acad Sci, 2019, 34: 385–391 [肖宇, 彭子龙, 何京东, 等. 科技创新助力构建国家能源新体系. 中国科学院院刊, 2019, 34: 385–391]
- 2 Cai R, Zhu H X, Li W J, et al. Development path of energy science and technology under “dual carbon” goals: Perspective of multi-energy system integration (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2022, 37: 502–510 [蔡睿, 朱汉雄, 李婉君, 等. “双碳”目标下能源科技的“多能融合”发展路径研究. 中国科学院院刊, 2022, 37: 502–510]
 - 3 Liu Z M. Coordinated development of coal chemical and petrochemical industries through the integrated multi-energy patterns (in Chinese). *Chin Petrol Ent*, 2022, 452: 12–13 [刘中民. 以多能融合思维促进煤化工与石油化工协调发展. 中国石油企业, 2022, 452: 12–13]
 - 4 Ye M, Zhu W L, Xu S L, et al. Coordinated development of coal chemical and petrochemical industries in China (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 417–425 [叶茂, 朱文良, 徐庶亮, 等. 关于煤化工与石油化工的协调发展. 中国科学院院刊, 2019, 34: 417–425]
 - 5 Gong J, English N J, Pant D, et al. Power-to-X: Lighting the path to a net-zero-emission future. *ACS Sustain Chem Eng*, 2021, 9: 7179–7181
 - 6 Yu H M, Yi B L. Hydrogen for energy storage and hydrogen production from electrolysis (in Chinese). *Strat Study CAE*, 2018, 20: 58–65 [俞红梅, 衣宝廉. 电解制氢与氢储能. 中国工程科学, 2018, 20: 58–65]
 - 7 Wang G D, Chu M S. Green steelmaking technology with low carbon emission (in Chinese). *Sci Technol Rev*, 2020, 38: 68–76 [王国栋, 储满生. 低碳减排的绿色钢铁冶金技术. 科技导报, 2020, 38: 68–76]
 - 8 Garg S, Li M, Weber A Z, et al. Advances and challenges in electrochemical CO₂ reduction processes: An engineering and design perspective looking beyond new catalyst materials. *J Mater Chem A*, 2020, 8: 1511–1544
 - 9 Spurgeon J M, Kumar B. A comparative technoeconomic analysis of pathways for commercial electrochemical CO₂ reduction to liquid products. *Energy Environ Sci*, 2018, 11: 1536–1551
 - 10 Wang Y, Liu T, Lei L, et al. High temperature solid oxide H₂O/CO₂ co-electrolysis for syngas production. *Fuel Processing Tech*, 2017, 161: 248–258
 - 11 He J D, Cao D Q, Duan X N, et al. Give full play to national strategic S&T force to provide vigorous support for carbon peak and carbon neutrality goals (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2022, 37: 415–422 [何京东, 曹大泉, 段晓男, 等. 发挥国家战略科技力量作用, 为“双碳”目标提供有力科技支撑. 中国科学院院刊, 2022, 37: 415–422]
 - 12 Jiao F, Li J, Pan X, et al. Selective conversion of syngas to light olefins. *Science*, 2016, 351: 1065–1068
 - 13 Yang M, Fan D, Wei Y, et al. Recent progress in methanol-to-olefins (MTO) catalysts. *Adv Mater*, 2019, 31: 1902181
 - 14 Liu R, Fan B, Zhi Y, et al. Dynamic evolution of aluminum coordination environments in mordenite zeolite and their role in the dimethyl ether (DME) carbonylation reaction. *Angew Chem Int Ed*, 2022, 61: e202210658
 - 15 Zhao Z, Li Y, Zhu H, et al. A review of Co/Co₂C-based catalysts in Fischer–Tropsch synthesis: From fundamental understanding to industrial applications. *Chem Commun*, 2023, 59: 3827–3837
 - 16 Hu S, Tian Z J, Xin G H, et al. Industrialization of isomerization and asymmetric cracking technology for dewaxing of lube base oil (in Chinese). *Petrol Refin Chem Ind*, 2011, 42: 57–60 [胡胜, 田志坚, 辛公华, 等. 润滑油基础油异构化和非对称裂化(IAC)脱蜡技术工业应用. 石油炼制与化工, 2011, 42: 57–60]
 - 17 Xu J, Yang Y, Li Y W. Recent development in converting coal to clean fuels in China. *Fuel*, 2015, 152: 122–130
 - 18 Zhang S J, Liu Y, Feng G W, et al. Method for synthesizing dimethyl carbonate and ethylene glycol by catalyzing transesterification through load type ion liquid (in Chinese). *PRC Patent*, CN201410327843.2, 2016-01-13 [张锁江, 刘莹, 冯国旺, 等. 中国科学院过程工程研究所. 一种负载型离子液体催化酯交换反应合成碳酸二甲酯联产乙二醇的方法. 中国专利, CN201410327843.2, 2016-01-13]

Summary for “‘双碳’目标下化石能源低碳转化方向探讨”

Perspective on the low-carbon transformation pathways of fossil energy under dual carbon goals

Wanjun Li, Jinwei Zhang, Xiaoshuai Yuan, Liping Yang, Hanxiong Zhu, Xiaofei Zhang, Zitong Li, Lu Liu, Zhenggang Liu, Yu Xiao, Rui Cai & Zhongmin Liu^{*}

Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China

^{*} Corresponding author, E-mail: zml@dicp.ac.cn

China has the world's largest carbon dioxide emissions primarily due to its reliance of the energy and industrial systems on fossil resources, especially coal. A low-carbon pathway for fossil resources not only involves reducing CO₂ emissions but also the energy security and the stability of industrial and supply chains, which is of great importance to China's high-quality development. To reduce CO₂ emissions from fossil fuels, it is imperative to promote their comprehensive utilization as chemical feedstock instead of fuel with multi-energy system integration. Multi-energy system integration can break through the existing barriers in the energy sector and promote the integration of the resource advantages of various energy systems. In addition, it can reconstruct the energy and heavy industry system and realize the green and low-carbon circular development of high-carbon industries in China. By promoting the integrated development of coal chemical and petrochemical industries, the safety of the petrochemical industry could be ensured, the diversified utilization of petrochemical raw materials could be promoted, and a new framework of complementary and coordinated development between coal chemical and petroleum chemical industries could be established. Integration of chemical industry with sectors such as steel and cement can achieve deep decarbonization in hard-to-abate industrial sectors. For example, utilizing carbon monoxide from steel industry exhaust gases and coupling it with chemical industry processes can co-produce steel and chemicals with significant emission reduction potential. Additionally, innovative approaches such as methane atmosphere calcination of cement clinker can effectively address process emissions in the cement industry while directly producing synthesis gas for downstream chemical production. Power to X, which refers to a bundle of ways to convert, store, and reconvert electricity, offers a great opportunity to couple renewable energy with fossil fuels. Water could be electrolyzed to produce hydrogen using renewable electricity. Hydrogen, a clean and versatile energy carrier, can be used in the industrial process reengineering to drive low- and zero-carbon transformations through technological innovation, which is crucial for deep decarbonization of hard-to-abate sectors. For example, the coupling of green hydrogen and coal-to-olefins process can eliminate the need for water-shift reaction in traditional coal gasification processes, reducing carbon emissions from the source and significantly improving coal utilization efficiency. Moreover, the green oxygen produced in the electrolysis process can be used in the gasification process and reduce the demand for air separation, consequently lowering the usage of fossil fuel energy. CO could be produced by electrocatalytic reduction of CO₂ with renewable electricity, which could then be used to synthesize fuels. In the low-carbon transition path of fossil energy, the Chinese Academy of Sciences (CAS) has proactively positioned itself in addressing key scientific issues and core technologies in the energy field. Key breakthroughs have been made in areas such as coal-to-synthesis gas selective catalytic conversion of low-carbon olefins, new-generation methanol-to-olefins technology, coal-to-methanol-to-ethanol technology, direct synthesis of high-carbon alcohols with oil co-production from synthesis gas, new-generation synthesis gas-to-oil technology, new-generation indirect coal liquefaction to oil technology, and the technique of hydroisomerization for producing high-quality lubricating base oil from coal-based Fischer-Tropsch synthetic wax, dimethyl carbonate synthesis from methanol with a dual-site ion liquid catalyst, and non-photogas isocyanate preparation technology. The aim is to explore a low-carbon innovation and development path for fossil energy utilization that aligns with China's national conditions.

dual carbon goals, fossil energy, low-carbon transformation, hard-to-abate sectors, technical innovation

doi: [10.1360/TB-2023-0556](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0556)