



## Views &amp; Comments

## 多能融合技术体系助力碳中和的路径探索

李婉君, 朱汉雄, 肖宇, 蔡睿, 刘中民

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

## 1. 引言

2020年9月22日, 习近平总书记在第75届联合国大会上向全世界做出中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取在2060年前实现碳中和的承诺(以下简称“碳达峰、碳中和”), 这既是中国秉持人类命运共同体理念的体现, 也为中国推动绿色低碳高质量发展明确了时间表, 事关我国发展的全局和长远。2005年, 我国二氧化碳排放总量超过美国, 成为全球第一大碳排放国家。随着经济持续快速增长, 我国二氧化碳排放总量在2019年达到 $9.83 \times 10^9$  t, 占全球比重28.8% [1], 人均二氧化碳排放量也随之呈快速增长趋势, 在2018年达到6.8 t [2], 约为全球平均水平的1.5倍。在此背景下, 我国在保障经济持续增长的同时要以远远短于发达国家所用时间实现碳中和, 挑战前所未有的, 任务异常艰巨。

能源领域是我国碳排放的最主要来源, 相关碳排放量占全国总排放量的近90% [3], 因此能源领域的低碳化发展将是碳中和目标达成的关键。碳排放与能源资源的种类、利用方式和利用总量直接相关。我国“富煤、缺油、少气”的资源禀赋及主要依赖传统化石能源的工业体系, 决定了我国能源消费的碳排放强度居高不下。同时, 我国的煤炭、石油、天然气、可再生能源与核能等能源分系统间不协调性逐步显现, 进一步提升了我国能源消费的碳排放强度。因此, 必须破除各能源种类及各能源相关行业之间板块分割、互相独立的体制壁垒, 重构我国能源及相关

工业体系[4], 通过多能融合形成整体优势, 推进其向低碳化、绿色化发展。

要构建“清洁低碳、安全高效”的国家现代能源体系, 必须进一步加强顶层设计和系统规划, 充分发挥科技创新的推动作用, 以变革性技术为引领, 突破行业壁垒, 跨领域促进各种能源种类及产业之间的多能融合, 进而实现我国碳中和远景目标, 支撑我国长远可持续发展。

## 2. 强化原始创新, 促进关键核心技术突破

“十三五”期间, 我国在煤炭清洁高效转化利用、可再生能源与氢能、核安全与先进核能、智能电网、新能源汽车等领域部署了一批重大课题, 着力解决我国能源利用中的关键科学问题, 通过关键核心技术的突破, 带动新能源产业发展, 推动化石能源利用等相关产业技术更新换代, 进而推动了碳减排相关工作。在“十四五”期间, 我国将继续加强原始创新, 持续深入研发国际领先的新材料、新技术、新工艺等。加速发展大规模储能技术、氢能和现代电网智能调控技术, 形成以新能源为主体的新型电力系统, 适应新能源电力生产、输送、并网和消纳环节的大规模、高比例特性, 进而降低发电煤耗, 实现电力系统脱碳。进一步加速煤炭清洁高效转化技术突破与集中示范, 如突破合成气一步法转化高值化学品、煤制芳烃、煤炭分级分质利用关键核心技术等。

从中远期来看, 要加快发展煤炭减量利用的关键技

术，重点突破钢铁、化工、水泥、有色等难脱碳行业的零碳/低碳流程再造技术，推进工业体系深度脱碳。前瞻部署一批前沿性和颠覆性技术，如先进核能、光电催化制氢、跨系统耦合集成与优化、大规模低成本二氧化碳捕集利用和封存（CCUS）等技术的创新与研发，为全社会深度脱碳提供技术支撑。

中国科学院在2017年启动了“变革性洁净能源关键技术与示范”的战略性先导科技专项，以促进能源技术创新示范。目前取得了一批原创性重大成果。例如，突破了液流电池关键材料制备技术与批量化技术，在大连市建成了全球首套100 MW级液流电池储能电站示范项目[5-6]；陈海生团队[7]在压缩空气储能关键技术方面取得了突破性进展，并正在建设一套100 MW/400 MW·h的示范项目；包信和团队[8]研发的一种新型催化技术，利用金属氧化物-分子筛（OX-ZEO）复合催化体系，可实现煤基合成气一步转化直接制烯烃，极大地降低了水耗和能耗，从原理上颠覆了传统费托合成（FT）过程；新一代甲醇制烯烃技术（MTO）实现甲醇单耗降低10%，单套烯烃装置产能从每年60万吨提高至100万吨[9]；李灿团队[10]开发了 $ZnZrO_x$  固溶体催化剂[11]，通过光伏发电-电解水制氢-二氧化碳加氢技术耦合，实现了规模化可再生能源制备液体燃料（甲醇）。此外，甘肃省正在建设首座第四代熔盐核反应堆[12]。

### 3. 跨领域联合攻关,推进多能融和技术体系突破

多能融合是打破现有能源领域行业板块壁垒，推动各能源系统间资源优势的“合并”，重构我国能源及重工业体系，实现高碳行业的绿色低碳循环发展的可行手段。为助力实现碳中和，笔者提出多能融合战略技术路线图[13]，即“三主线、三平台”体系（图1）。

第一条主线是化石能源清洁高效利用与耦合替代。煤炭燃烧产生的二氧化碳排放约占我国能源相关碳排放总量的70%以上[14]，据《中国能源统计年鉴2020》，我国在2019年用于发电及供热的燃煤占煤炭消费总量的60% [15]。使用可再生能源或核能发电取代火电是降低二氧化碳排放最有效的方式，但仍需保留一定数量的可灵活调变的火电厂，以保障电力系统稳定可靠。煤炭作为原料将在化工生产中发挥更重要的作用。例如，利用合成气/甲醇作为平台，推进现代煤化工与石油化工的互补融合，制备烯烃、芳烃、乙醇和乙二醇等。同时，煤化工过程与石油化工过程的耦合可以有效提高碳原子利用率及能量利用效率，例如，甲醇和石脑油耦合转化为轻质烯烃[16]。

第二条主线是可再生能源的规模化应用。我国提出，到2030年非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右[17]，到2050年这一比例有望超过70% [18]。可再生能源规模化发展是首要任务，未来将占据我国能源结构比重的60%。然而可再生能源（如风能和太阳能）的主要问题

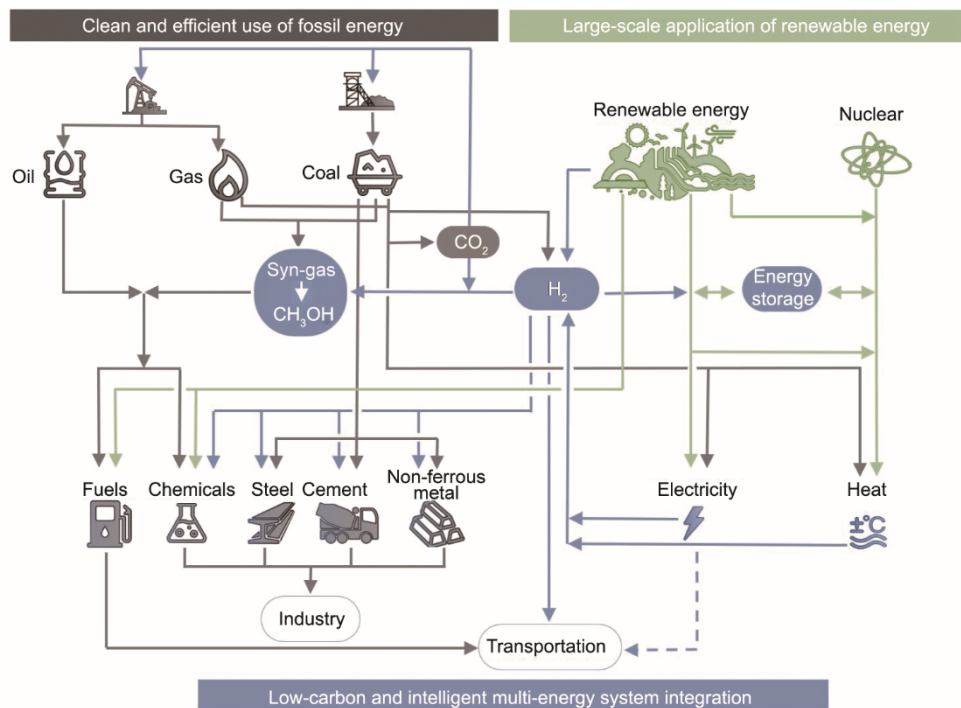


图1. 多能融合战略技术路线图。

在于其“靠天吃饭”，存在间歇性和波动性。需要利用大规模的储能平台来推动可再生能源大规模、高比例发展。

第三条主线是低碳与数字化智能化集成优化。尽管可再生能源发电比例的持续增加将有效降低能源系统的碳排放，碳排放强度较高的工业领域，如钢铁、水泥、化工和有色等，是碳减排的另一个重点。除了推进不同工业间的科技创新与融合发展外，利用可再生能源或核能发电，电解水制备绿氢，对于促进工业转型非常重要。例如，利用钢厂尾气作为碳源制备乙醇，可以促进钢铁行业和化工行业的融合发展，形成具有经济性的新型循环价值链[19]。初步估算，全国钢铁厂25%的剩余尾气可生产约1000万吨乙醇，减少排放约2000万吨二氧化碳。此外，与传统高炉工艺相比，使用绿氢冶金将减少近八成二氧化碳排放[20]。向煤制烯烃工艺补充足量绿氢可降低该工艺过程碳排放约70% [21]。同时，大数据和人工智能等数字技术将从生产、运输、分配到消费等方面对整个能源价值链产生巨大影响。

#### 4. 发挥典型示范作用，以点带面形成低碳发展新格局

我国能源应用场景复杂，无法用一套通用的模式解决全国碳达峰、碳中和面临的所有问题。选取典型区域或行业进行跨领域集成示范，可以有效地促进技术迭代，系统创新体制机制，探索我国现代能源体系的建设路径，进而以点带面促进低碳发展新格局的形成。目前，以中国科学院洁净能源创新研究院为代表的一批国内能源领域的科研机构与陕西省合作，以能源技术革命为引领，在榆林建设国家级能源革命创新示范区[22]，探索构建符合西部地区资源、环境特征，能支撑西部绿色可持续发展的多能融合能源体系，建设多能融合大型产业化示范基地，助推高碳城市的低碳化发展。

#### 5. 小结

为实现我国碳达峰、碳中和宏伟目标，需要统筹构建清洁低碳、安全高效的国家能源体系，不仅需要破除各能源相关行业壁垒，进而形成合力，也需要因地制宜地构建区域低碳化清洁能源供应系统，在突破关键技术的基础上，通过区域能源革命促进全国能源革命。只有通过顶层设计、全社会共同努力，才能形成可持续发展的良性模式。

#### 致谢

本研究得到中国工程院战略咨询项目(2020-XY-6)支持。

#### References

- [1] I.c.BPp.. Statistical review of world energy 2020. 69th ed. London: BP, p.l.c.; 2020.
- [2] International Energy Agency. CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion, 2020 edition. Paris: International Energy Agency; 2020.
- [3] Chen JH. An empirical study on China's energy supply-and-demand model considering carbon emission peak constraints in 2030. *Engineering* 2017;3(4): 512–7.
- [4] Xiao Y, Peng ZL, He JD, Liu ZM. Science and technology innovation promotes construction of new national energy system. *Bull Chin Acad Sci* 2019; 34(4): 385–91. Chinese.
- [5] Chen DJ, Qi HN, Sun TT, Yan C, He YY, Kang CZ, et al. Polybenzimidazole membrane with dual proton transport channels for vanadium flow battery applications. *J Membr Sci* 2019;586:202–10.
- [6] Lu W, Li X, Zhang H. The next generation vanadium flow batteries with high power density—a perspective. *Phys Chem Chem Phys* 2018;20:23–35.
- [7] Zhou XZ, Xu YJ, Zhang XJ, Xu DH, Linghu YQ, Guo H, et al. Large scale underground seasonal thermal energy storage in China. *J Energy Storage* 2021; 33:102026.
- [8] Bao XH. Nano confinement and catalytic conversion of energy molecules. *Chin Sci Bull* 2018;63(14):1266–74. Chinese.
- [9] Yang M, Fan D, Wei Y, Tian P, Liu Z. Recent progress in methanol-to-olefins (MTO) catalysts. *Adv Mater* 2019;31(50):1902181.
- [10] Wang J, Li G, Li Z, Tang C, Feng Z, An H, et al. A highly selective and stable ZnO–ZrO<sub>2</sub> solid solution catalyst for CO<sub>2</sub> hydrogenation to methanol. *Sci Adv* 2017;3(10):e1701290.
- [11] Han YM. [“Liquid sunshine” makes us closer to “carbon neutrality”]. *China Science Daily* 2020 Nov 11;Sect 3:1. Chinese.
- [12] Wang JQ, Dai ZM, Xu HJ. Research status and prospect of comprehensive utilization of nuclear energy. *Bull Chin Acad Sci* 2019;34(4):460–8. Chinese.
- [13] Zhu HX, Geng XY, Xiao Y, Cai R, Liu ZM. Strategic path for energy revolution in northwest China in the new era. *Strateg Study Chin Acad Eng* 2021;23(1): 92–100. Chinese.
- [14] Wang JN, Yan G. [Accelerate to peak the carbon emissions and promote highquality economic development]. *Economic Daily* 2021 Jan 4; Sect 1: 3. Chinese.
- [15] Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. *China energy statistical yearbook 2020*. Beijing: China Statistics Press; 2021.
- [16] Ye M, Zhu WL, Xu SL, Liu ZM. Coordinated development of coal chemical and petrochemical industries in China. *Bull Chin Acad Sci* 2019;34(4):417–25. Chinese.
- [17] China Global Television Network. President Xi's speech at Climate Ambition Summit 2020 [Internet]. Beijing: China Daily; [updated 2020 Dec 13; cited 2021 Aug 15]. Available from: <http://www.chinadaily.com.cn/a/202012/13/WS5fd575a2a31024ad0ba9b7ac.html>.
- [18] Project Report Preparation Team. Comprehensive report on China's long-term low-carbon development strategy and transition path. *China Popul Resour Environ* 2020;30(11):1–25. Chinese.
- [19] Wu ZL, Wang H, Yang PZ, Ren XG. Commercialization progress of ethanol production from tail-gas of steel plants. *China New Technol New Prod* 2019;13: 133–4. Chinese.
- [20] Griesser A, Buergler T. Use of HBI in blast furnace. *Berg Huetttenmaenn Monatsh* 2019;164:267–73.
- [21] Jin GZ, Zhang X, Zhu HX, Li JJ, Zhang MZ, Xiao Y, et al. Research on multi-energy and innovation integration development of modern coal chemical industry to meet the challenge of carbon emission reduction. *China Coal* 2021; 47(3):15–20. Chinese.
- [22] The Publicity Department of the CPC Yulin Municipal Committee. Shaanxi Yulin: construct demonstration zone for energy revolution innovation. *People's Daily* 2019 Dec 11;Sect 13. Chinese.