构建碳中和电力系统——碳中和公式

高林^{1*}, 郑雅文^{1,2}, 杨东泰^{1,2}, 朱磊³, 李胜¹, 金红光¹

1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100190;

2. 中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049;

3. 北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191

* 联系人, E-mail: gaolin@iet.cn

气候变化已经成为当代人类社会面临的重大挑战。2020年以来, 以控制全球温升1.5°C为目标, 部分国家陆续提出各自的碳中和战略。2020年, 我国碳排放总量超过113亿吨。同年9月22日, 习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布并提出了“中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和”的目标。

1 碳中和概念及其科学内涵

碳中和概念本质上是碳源与碳汇的平衡关系: 碳源即向大气释放CO₂的过程, 碳汇即从大气中吸收CO₂的过程^[1]。在一定时间内, 以地球大气圈为考察体系, 当所有碳源向该体系排放的CO₂量与所有碳汇从该体系吸收的CO₂量相等时, 达到源汇平衡, 即为碳中和。碳源与碳汇种类很多, 既有自然碳源与碳汇, 也有人类活动导致的碳源与碳汇, 平衡关系复杂。其中, 与人类活动相关的最主要碳源即能源利用。2020年, 我国电力(生产)部门碳排放量约40亿吨^[2], 接近总排放量的40%。能源电力是实现碳中和目标的关键减排领域。为此, 本文以电力生产行业为对象, 基于源汇平衡导出电力系统碳中和判别公式, 借以讨论不同能源配比和技术途径对发电系统碳排放的影响关系, 指明电力系统实现碳中和的技术选择。

根据碳元素的来源与含量, 可以将能源分为含碳能源、零碳能源和碳中性能源三类。含碳能源(carbonaceous energy)^[3]主要指化石能源, 其含有开采自地下(远古大气中的碳元素经光合作用转化为生物质, 再经历漫长的地质纪年成为化石燃料)的碳元素, 并在利用过程中以CO₂形式排放至大气。零碳能源(carbon free energy)指太阳能、风能等可再生能源, 其本身不含碳元素, 利用过程也不直接排放CO₂。碳中性能源(carbon neutral energy)^[4]指生物质能, 其含有来自地球大气圈的碳元素, 在生物质生长与利用的较短时间内, 其从大气圈吸收和向大气圈排放的CO₂正负相抵, 不改变大气中的CO₂净含量。图1展示了含碳能源与碳中性能源的碳排放示意图。

含碳能源与碳中性能源利用过程的碳排放量可以表示为^[5]

高林 中国科学院工程热物理研究所研究员。主要研究方向为化工-动力多联产系统、CCUS(CO₂ capture, utilization and storage)技术、碳中和能源系统。

$$E = \frac{44}{12} F C O, \quad (1)$$

式中, E (carbon emission)为CO₂排放量, 单位为kg; F 为消耗燃料的总能量, 单位为kJ, 取决于燃料消耗量与燃料热值; C 为单位燃料能量的含碳量, 单位为kg C/kJ, 取决于燃料种类; O (oxidant factor)为氧化因子, 表示燃料中的碳元素最终转化为CO₂的比例, 无量纲, 取决于燃料燃烧是否充分。由于电力行业锅炉的专业性, 目前大部分火发电机组的氧化因子已经很接近1.0^[6]。为简化计算, 后续公式中氧化因子均取为1.0^[5]。

根据元素平衡, 净碳排放量可以表示为

$$NE = \text{Source} + \text{Sink}, \quad (2)$$

式中, NE (net carbon emission)为电力系统净碳排放量, Source 为系统内碳源排放量, Sink 为系统内碳汇吸收量。

定义 K 为碳回收率, 代表电力系统内碳源排放的CO₂中被系统内碳汇吸收的比例。本文所考虑的均为人工碳汇, 即CO₂捕集、利用与封存(CO₂ capture, utilization and storage, CCUS)技术。基于式(2), 可建立针对不同类型能源的碳平衡关系式, 如下。

对于含碳能源:

$$NE_c = \frac{44}{12} F_c C_c + \left(-\frac{44}{12} F_c C_c K_c \right), \quad (3)$$

其中, 下标 C 表示含碳能源。式中, 即便所有电厂都加装CCUS

图1 含碳能源与碳中和能源的碳排放示意图

Figure 1 Schematic diagram of carbon emissions of carbonaceous energy and carbon neutral energy

设备, 由于技术限制, 其整体碳回收率 $K_C < 1.0$ 、 $NE_C > 0$ ^[7].

对于碳中和能源:

$$NE_{CN} = \frac{44}{12} F_{CN} C_{CN} + \left(-\frac{44}{12} F_{CN} C_{CN} K_{CN} \right) + \left(-\frac{44}{12} F_{CN} C_{CN} \right), \quad (4)$$

其中, 下标CN表示碳中和能源. 在碳中和能源利用过程中, CO_2 排放量 $\frac{44}{12} F_{CN} C_{CN}$ 与生物质生长过程 CO_2 吸收量 $-\frac{44}{12} F_{CN} C_{CN}$ 正负相抵, 则式(4)简化为

$$NE_{CN} = -\frac{44}{12} F_{CN} C_{CN} K_{CN}. \quad (5)$$

根据式(5), 如果生物质电厂配置了CCUS技术, 则 $K_{CN} > 0$ 、 $NE_{CN} < 0$, 即为负排放.

而对于零碳能源, C_{CF} 均为0, NE_{CF} 恒为0:

$$NE_{CF} = \frac{44}{12} F_{CF} C_{CF} \stackrel{C_{CF}=0}{=} 0, \quad (6)$$

其中, 下标CF表示零碳能源.

基于式(3)、(5)、(6), 由化石能源(含碳能源)、零碳能源(非生物质可再生能源)与碳中和能源(生物质能)构成的电力系统的总净碳排放量为

$$NE = \sum_{i=C,CN,CF} NE_i = \frac{44}{12} F_C C_C + \sum_{i=C,CN} \left(-\frac{44}{12} F_i C_i K_i \right), \quad (7)$$

其中, NE (net carbon emission)代表电力系统的 CO_2 净排放量, 单位为kg.

定义无量纲参数 R , 表示该电力系统的输入能源中含碳

能源所含碳占系统总输入碳量的比例, 即

$$R = \frac{F_C C_C}{F_C C_C + F_{CN} C_{CN}}, \quad (8)$$

则式(7)可简化为

$$NE = \frac{44}{12} \left[R(1 - K_C) - (1 - R)K_{CN} \right] \sum_{i=C,CN} (F_i C_i). \quad (9)$$

显然, 当 $NE \leq 0$ 时, 该电力系统即可以实现碳中和或负排放.

通常碳中和以一定的电力产品输出为前提, 为此, 电力系统碳排放强度的物理意义更全面:

$$I_c = NE / \sum_{i=C,CN,CF} (F_i \eta_i) = \frac{44}{12} \left[R(1 - K_C) - (1 - R)K_{CN} \right] \sum_{i=C,CN} (F_i C_i) / \sum_{i=C,CN,CF} (F_i \eta_i), \quad (10)$$

其中, I_c 为电力系统碳排放强度, 单位为 $kg/(kW \cdot h)$, 表示电力系统产出单位发电量所排放的 CO_2 量; η_i 表示不同发电技术的供电效率, 则 $\sum_i (F_i \eta_i)$ 为电力系统的总发电量, 单位为 $kW \cdot h$.

通过碳排放强度 $I_c \leq 0$, 即可判别电力系统是否实现碳中和:

$$\left[R(1 - K_C) - (1 - R)K_{CN} \right] \sum_{i=C,CN} (F_i C_i) / \sum_{i=C,CN,CF} (F_i \eta_i) \leq 0. \quad (11)$$

对于多能源输入的电力系统, 要实现碳中和目标, 需要满足上述碳中和公式.

2 构建碳中和电力系统的技术途径

根据公式(11), 电力系统实现碳中和主要存在3种技术途径.

2.1 提高化石能源利用效率, 减少含碳能源消耗

根据式(10), 在 F_C (含碳燃料消耗量)不变的情况下, 提高 η_C (含碳燃料利用效率)可以增大分母, 电力产出增加, 碳排放强度下降. 如图2所示, 2000年以来, 我国火电行业的平均供电煤耗逐年下降, 截至2019年降至308 g/(kW·h), 相应地, 火电机组的平均碳排放强度从1026 g $CO_2/(kW \cdot h)$ 下降到了806 g $CO_2/(kW \cdot h)$. 然而, 发电能耗的下降趋势已经渐趋平缓, 继续通过节能降耗来降低碳排放的潜力越来越小. 事实上, 通过节约用电等能源消费端的节能措施, 同样可以减少电力消耗, 从而降低整体的碳排放, 但本文讨论的对象为电力生产系统, η 为电力生产效率, 未涵盖消费端节能因素.

图2 (网络版彩色)我国火电机组平均供电煤耗与碳排放强度变化趋势。数据来自中国电力企业联合会网站

Figure 2 (Color online) The descend trend of coal consumption and carbon emission intensity of coal-fired power plants in China. Data are from the website of China Electricity Council

2.2 调整能源结构,降低含碳能源占比

可再生能源均为零碳能源或碳中性能源。式(10)表明,通过增加可再生能源发电量,可以在不改变分子的情况下增大分母,显著降低电力系统碳排放强度。将式(10)作简单变形可得到

$$I_C = \frac{44}{12} F_C C_c \left(F_C \eta_C / \sum_{i=C, CN, CF} (F_i \eta_i) \right), \quad (12)$$

其中, $F_C \eta_C / \sum_{i=C, CN, CF} (F_i \eta_i)$ 表示含碳能源发电量占比。由于中国煤炭发电量占含碳能源发电量的~90%, 此处采用标煤热值含碳量计算电力系统碳排放强度。国家统计局的数据显示, 2000~2020年, 我国电力装机中可再生能源的比例从24.9%上升到41.2%, 发电量占比从16.4%上升至26.8% (<https://cec.org.cn/menu/index.html?217>, <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>)。基于这一数据, 可以通过式(12)估算得到电力系统的碳排放强度相应降低了30%~35%。

大部分战略研究预测碳中和情境下, 可再生能源将成为发电主力。需要指出的是, 储能等技术手段虽然不能直接影响碳排放强度, 但可以提升电网对可再生能源电力的消纳能力, 在满足相同电力需求的前提下, 替代含碳能源电力生产, 达到间接减少碳排放的效果。

2.3 CO₂捕集、利用与封存技术

CCUS技术是唯一能够实现含碳能源低碳利用的技术, 也是唯一能够实现负排放的技术。如图3所示, 对于含碳能源, CCUS构建了一个碳循环, 将含碳能源释放的CO₂进行捕集并重新封存于地下; 而对于碳中性能源, CCUS则打破了原有的碳循环, 将碳中性能源从环境中吸收的CO₂封存于地下, 从而

图3 (网络版彩色)人工碳汇(CCUS技术)对碳循环的影响

Figure 3 (Color online) The effect of artificial carbon sink (CCUS technology) on the carbon cycle

产生负排放效果。从式(10)可知, 提高 K (含碳能源电厂配备CCUS)或 K_{CN} (碳中性能源电厂配备CCUS)值, 可以直接减少碳排放。需要指出的是, 由于化石能源电厂的 K_C 值无法等于1 (典型的CCUS技术, K 通常在90%~95%左右^[8-10]), 要实现碳中和, 生物质电厂的 K_{CN} 必须大于0, 这意味着负排放技术是实现碳中和目标的必要技术。

需要特别强调的是, 虽然提高 K 值能够直接减少碳排放, 但 K 值与 η 并非相互独立。由于CO₂捕集需要额外消耗能量, 配备CCUS技术燃煤电厂的发电效率将显著下降, 这是目前阻碍CCUS技术大规模推广的关键障碍之一。所谓CO₂捕集能耗, 即从大规模集中排放源(如发电厂)的烟气或燃料气中分离得到高浓度CO₂所消耗的能量, 通常用效率惩罚(由于捕集CO₂导致的发电厂供电效率的降低)表征^[11,12]。捕集能耗除了与分离工艺的效率有关, 还与分离工艺对能量利用过程所造成的影响有关。降低捕集能耗的途径可以概括为: (1) 改进分离工艺, 提高分离效率; (2) 提高分离前CO₂浓度, 减小理想分离功; (3) 优化分离工艺与能量利用过程之间的系统集成。

研发低能耗、低成本的CO₂捕集技术, 是实现碳中和目标的关键挑战之一。当前CO₂捕集的主要方法包括燃烧后捕集、燃烧前捕集和富氧燃烧, 其具体能耗与成本数据如表1所示。其中, 燃烧后捕集技术最为成熟, 而燃烧前捕集以及新一代的燃料源头捕集技术则具有更大的节能潜力^[7,14,15]。根据

表1 CO₂捕集技术路线能耗与成本^[13]

Table 1 The energy consumption and cost of CO₂ capture technical routes^[13]

技术名称	捕集能耗代价(效率下降)(%)	成本(\$/(t CO ₂))
燃烧后捕集技术	8~13	29~51
燃烧前捕集技术	7~10	13~37
富氧燃烧技术	10~12	21~50

第21届联合国气候变化大会(巴黎, 2015年)发布的《中国碳捕集与封存示范和推广路线图》^[16], 新一代的低能耗捕集技术有望在2030年前后将捕集能耗降低至5个百分点以内, 同时将捕集成本降低至20~30 \$/(t CO₂).

3 结论

作为最主要的CO₂排放行业, 电力系统的碳排放任重道远. 电力系统碳中和公式表明, 提高化石能源利用效率以实

现碳减排虽然有效, 但受限于逐渐减小的火电厂节能潜力, 难以作为应对碳减排的主要技术途径; 提高可再生能源发电占比, 能够使电力系统的碳排放强度快速下降, 是目前电力行业的主要减碳途径. 但是, 虽然节能与发展可再生能源都能够降低电力系统碳排放强度, 要实现碳中和目标, CCUS技术以及负排放技术将不可或缺; 而CCUS大规模推广首先要克服CO₂捕集能耗的技术障碍. 构建碳中和电力系统需要节能增效、可再生能源利用以及CCUS技术的多技术协同.

致谢 感谢国家重点研发计划(2016YFB0600803)资助.

推荐阅读文献

- 1 Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, et al. Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change. Technical Report, IPCC. 2014
- 2 Comprehensive Project Report Writing Team. Research on China's long-term low-carbon development strategy and transformation path (in Chinese). China Popul Resour Environ, 2020, 30: 1–25 [项目综合报告编写组. 《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告. 中国人口·资源与环境, 2020, 30: 1–25]
- 3 Piatkowski N, Wieckert C, Weimer A W, et al. Solar-driven gasification of carbonaceous feedstock—A review. *Energy Environ Sci*, 2011, 4: 73–82
- 4 Saidur R, Abdelaziz E A, Demirbas A, et al. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renew Sustain Energy Rev*, 2011, 15: 2262–2289
- 5 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Technical Report, IPCC. 2006
- 6 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Technical Report, IPCC. 1996
- 7 Bui M, Adjiman C S, Bardow A, et al. Carbon capture and storage (CCS): The way forward. *Energy Environ Sci*, 2018, 11: 1062–1176
- 8 Brandl P, Bui M, Hallett J P, et al. Beyond 90% capture: Possible, but at what cost? *Int J Greenh Gas Control*, 2021, 105: 103239
- 9 Liu X, Yang S, Hu Z, et al. Simulation and assessment of an integrated acid gas removal process with higher CO₂ capture rate. *Comput Chem Eng*, 2015, 83: 48–57
- 10 Mletzko J, Ehlers S, Kather A. Comparison of natural gas combined cycle power plants with post combustion and oxyfuel technology at different CO₂ capture rates. *Energy Procedia*, 2016, 86: 2–11
- 11 Goto K, Yogo K, Higashii T. A review of efficiency penalty in a coal-fired power plant with post-combustion CO₂ capture. *Appl Energy*, 2013, 111: 710–720
- 12 Boot-Handford M E, Abanades J C, Anthony E J, et al. Carbon capture and storage update. *Energy Environ Sci*, 2014, 7: 130–189
- 13 Department of Science and Technology for Social Development, Ministry of Science and Technology. The Administrative Center for China's Agenda 21. Roadmap for Carbon Capture, Utilization and Storage Technology in China. Technical Report. Beijing: Science Press, 2019
- 14 Ishida M, Jin H G. A new advanced power-generation system using chemical-looping combustion. *Energy*, 1994, 19: 415–422
- 15 Gao L, Jin H G, Liu Z L, et al. Exergy analysis of coal-based polygeneration system for power and chemical production. *Energy*, 2004, 29: 2359–2371
- 16 Jin H G, Wood A, Seiler A, et al. Roadmap for Carbon Capture and Storage Demonstration and Deployment in the People's Republic of China. Technical Report, Asian Development Bank. 2015

Summary for “构建碳中和电力系统——碳中和公式”

Critical equation of carbon neutrality for power systems

Lin Gao^{1*}, Yawen Zheng^{1,2}, Dongtai Yang^{1,2}, Lei Zhu³, Sheng Li¹ & Hongguang Jin¹¹ Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;² School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³ School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China* Corresponding author, E-mail: gaolin@iet.cn

By the end of 2020, most countries in the world have successively proposed carbon-neutral targets. Among them, the major economies in the world, such as the United States (USA), the European Union, Japan, and Canada, have proposed to achieve carbon-neutral targets by 2050. As the world's largest carbon emitter, China has a total carbon emissions of more than 11.3 billion tons, accounting for about 30% of global carbon emissions. Therefore, the carbon emission reduction required for China is much higher than that of other economies, and its carbon-neutral tasks are obviously more complex and diversified. On 22 September 2020, the Chinese government announced in the 75th Session of the UN (United Nations) General Assembly (New York, USA) that China aims to achieve carbon neutrality before 2060. The announcement of the carbon-neutral target clearly indicated that China needs to carry out a self-revolution to achieve zero CO₂ emissions before 2060.

The concept of carbon neutrality is essentially a balance between carbon sources and carbon sinks. The carbon source is the process of releasing CO₂ into the atmosphere, and the carbon sink is the process of absorbing CO₂ from the atmosphere. Investigating the atmospheric system within a certain period, when the amount of CO₂ emitted by all carbon sources into the system is equal to the amount of CO₂ absorbed by all carbon sinks from the system, carbon neutrality can be achieved. There are various carbon sources and sinks in nature with complicated relationships. Among them, the most important carbon source related to human activities is energy production. In 2020, China's power sector emitted about 4 billion tons of CO₂ per year, which is close to 40% of the total emissions. Thus, the power sector is one of the key areas in emission reduction to achieve the carbon-neutral goal.

Building a carbon-neutral power system is the only way to achieve decarbonization in the energy sector. Based on the carbon balance principle, this paper proposed the critical equation of carbon neutrality for power systems. And the further strategies in establishing a carbon-neutral power system were explored according to the carbon neutrality equation: (1) Improve energy efficiency thus reducing the consumption of carbonaceous energy; (2) adjust the energy structure and reduce the proportion of carbonaceous energy; (3) rebuild the balance of sources and sinks by adopting CO₂ capture, utilization and storage (CCUS) technology to achieve low-carbon utilization of carbonaceous energy. Results indicate that, although improving energy efficiency of carbonaceous energy is effective in CO₂ mitigation, it is limited by the declining energy saving potential of thermal power plants to be the main technical way in carbon emission reduction. Besides, increasing the proportion of renewable energy can quickly reduce the carbon emission intensity of the power system, which is currently the main technical way to reduce the CO₂ emission of the power system. However, although energy conservation and the development of renewable energy can reduce the carbon emission intensity of the power system, the CCUS technology and the negative emission technology will be indispensable to achieve the goal of carbon neutrality. And the large-scale promotion of the CCUS technology must overcome technical obstacles of the rather high energy consumption of CO₂ capture. Thus, building a carbon-neutral power system in the future requires a combination of energy efficiency, renewable energy and CCUS technology.

carbon neutrality, CO₂ capture, utilization and storage (CCUS), power system, carbon emission intensity

doi: [10.1360/TB-2021-0509](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0509)