

Low-Carbon Economy and Low-Carbon Technology of Coal

Jinxing Wu, Kaijie Yin, Yankai Pan

Zheng Zhou University Research Centre of Energy Saving Technology, zheng zhou, China

Email: wujx@zzu.edu.cn

Abstract: This paper describes the characteristics and importance of the low-carbon economy. It points out that low-carbon coal utilization technologies is the key to achieving low-carbon economy in China; In this paper, the low carbonization technologies such as efficient combustion, advanced coal chemical industry and carbon capture and storage are introduced. These provide the way to developing the technology of switching from high-carbon to low-carbon energy and realizing the low-carbon economy.

Keywords: low-carbon economy; switching from high-carbon to low-carbon energy; coal chemical industry; carbon capture and storage; efficient combustion

低碳经济与煤的低碳化技术

吴金星 尹凯杰 潘彦凯

郑州大学节能技术研究中心, 郑州, 中国, 450001

Email: wujx@zzu.edu.cn

摘要: 本文简述了低碳经济的特征及其重要性, 指出煤的低碳化利用技术是中国实现低碳经济的关键; 介绍了煤炭高效燃烧、新型煤化工及碳的捕捉和封存等相关的低碳化技术, 为发展高碳能源低碳化利用技术、实现低碳经济提供了方向。

关键词: 低碳经济; 高碳能源低碳化; 煤化工; 碳捕捉和封存; 高效燃烧

1 引言

冰川融化、海平面上升、生态系统退化、自然灾害频发等大量事实表明, 全球气候变暖的后果将触及粮食、水资源、能源、生态以及公共安全, 甚至直接威胁到人类的生存和发展。在气候变暖已经成为全人类威胁的今天, 我们正在毫无选择地走向“低碳经济”。化石能源的大量消耗是导致空气中 CO₂ 浓度增加的主要原因, 亦是全球气候变暖的主要诱因。在可预见的未来, 非化石能源大规模替代化石能源任重道远。那么, 究竟什么是低碳经济? 如何实现化石能源的低碳化利用以缓解全球变暖的趋势? 这已成为摆在我们面前迫切需要解决的重要问题。

2 低碳经济简述

2003年2月, 英国贸工部发布了题为《我们未来的能源—创建低碳经济》的能源白皮书, 时任英国首相布莱尔在序言中首次提出英国将转向“低碳经济”

发展。所谓低碳经济, 是指在可持续发展理念指导下, 通过技术创新、制度创新、产业转型、新能源开发等多种手段, 尽可能地减少煤炭、石油等高碳能源消耗, 减少温室气体排放, 达到经济社会发展与生态环境保护双赢的一种经济发展形态。

低碳经济是以低能耗、低污染、低排放为基础的经济模式, 是人类社会继农业文明、工业文明之后的又一次重大进步。发展低碳经济是一场涉及生产模式、生活方式、价值观念和国家权益的全球性革命。其实质是提高能源利用效率和创建清洁能源结构, 发展低碳技术、产品和服务, 确保经济稳定增长的同时消减温室气体的排放量。其核心是能源的高效率和洁净的能源结构, 关键是技术创新和制度创新。

低碳经济具有经济性、技术性和目标性三大基本特征^[1]。

首先是经济性: 包含两层含义, 一是低碳经济应按照市场经济的原则和机制来发展。二是低碳经济的

发展不应导致人们的生活条件和福利水平明显下降。也就是说,既反对奢侈或能源浪费型的消费,又必须使人民生活水平不断提高。

其次是技术性:也就是通过技术进步,在提高能源效率的同时,也降低 CO₂ 等温室气体的排放强度。前者要求在消耗同样能源的条件下人们享受到的能源服务不降低;后者要求在排放同等温室气体情况下人们的生活条件和福利水平不降低,这两个“不降低”需要通过能效技术和温室气体减排技术的研发和产业化来实现。

最后是目标性:发展低碳经济的目标是将大气中温室气体的浓度保持在一个相对稳定的水平上,不至于带来全球气温上升影响人类的生存和发展,从而实现人与自然的和谐发展。

低碳经济是世界经济发展的趋势,是应对气候变化的现实选择,是我国可持续发展的内在需求,已成为我国经济发展的重要动力。

发展低碳经济,最主要的是两点:第一,经济发展模式和社会消费模式向低碳方向转变;第二,发展低碳技术。

3 煤的低碳化利用技术

3.1 发展高碳能源低碳化利用技术刻不容缓

在不久的将来,低碳技术将成为国家核心竞争力的一个标志——谁掌握了先进的低碳技术,谁就拥有了核心竞争力^[1]。低碳技术的基础是传统的化石能源高效洁净利用和可再生能源等新能源替代,即构建低碳型能源体系。其技术途径有非化石能源的开发和利用、提高能源利用效率以及高碳能源的低碳化利用三大方面^[2]。

工业化社会的能源结构特征是高碳性的化石能源占主导地位。在化石能源中,煤炭依然是储采比(指年末剩余储量除以当年产量得出剩余储量按当前生产水平尚可开采的年数)最大的能源。国际上公认“煤炭在未来 50 年仍将是世界的主要能源”。

在我国一次能源消费中,煤炭差不多占到 70%,石油只占到 20%,天然气更少,只有 3.5%。即使在化工原料中,煤炭也占到 50%左右。这种消费现状是由我国的化石能源禀赋特点“多煤、少油、缺气”所决定的。针对这种特殊能源消费结构,在我国发展高碳能源的低碳化利用技术主要是发展煤的低碳化利用技术。

化石能源的碳排放系数都很高,其中煤炭的 CO₂

排放量约为 2.66 吨/吨标准煤,石油为 2.02,天然气为 1.47。这三个数据说明,煤炭是化石能源中碳排放系数最高的。因此,煤炭作为含碳量最高的高碳能源,如何实现它的低碳化利用是实现低碳经济的关键。重视和加强煤炭的低碳化利用技术刻不容缓。

我国在十一届全国人大常委会第十次会议通过的《关于积极应对气候变化的决议》中提出“高碳能源低碳化利用”,充分表明我国已经在政策上对这个问题的给予了高度重视。换句话说,“高碳能源低碳化利用”已经由一种科学倡导变成了国家意志。

3.2 我国高碳能源低碳化的基本要求及内容

高碳能源低碳化的基本要求是高效率、低排放、少污染,从能源的来源、转化过程、输运过程、终端利用过程这 4 个环节全程控制。

在我国,高碳能源低碳化主要是指煤的低碳化利用,具体来说包括:加大原煤入洗比重,减少原煤的输出和直接燃烧,从源头上控制污染物排放;加快煤炭高效转化技术开发,降低煤炭消费强度,减少转化过程中的污染排放;加大煤炭及煤基产品消费环节污染物排放控制与治理技术的研发,实现煤炭及煤基产品的清洁化利用。

支撑这一主题的能源科学与技术发展战略主要有以下内容:高碳能源利用的循环经济型多联产;低碳产品合成技术与低碳排放过程;新型清洁煤燃烧技术;劣质煤的利用和煤转化过程中污染物排放控制、治理和利用技术;煤炭高附加值综合利用生产技术;CO₂ 捕获和封存的技术(CCS, Carbon Capture and Storage)。上述几个主要内容的研究既是我国“十一五”研究的内容,也是即将制定的“十二五”能源领域战略规划的重点。

3.3 煤的低碳化利用技术

由于煤炭在一次能源中占据重要地位,对煤炭的低碳化利用研究得到了足够的重视,并取得了一定的突破。低碳化技术成果多以提高燃烧效率、以煤气化为核心的新型煤化工及 CO₂ 的捕捉和封存为基础。本文仅以几个方面介绍煤的低碳化利用^[3~8]。

3.3.1 煤的液化技术

煤的液化技术分为直接液化和间接液化。

煤直接液化是指煤在高温、高压、催化条件下与氢气反应直接转化成液体油品,然后经过提质加工得到汽油、柴油等产品。通常 3~4t 原料煤产生 1t 成品

油。据估计，煤直接液化生产每吨油品的 CO_2 排放量约为 3.5t，有 70% 以上 CO_2 浓度高于 90%，利于 CO_2 的封存。煤直接液化曾在二战时期的德国实现过工业化生产。

煤间接液化主要由煤气化、合成和分离精制三步骤组成，通过煤气化制合成气($\text{CO}+\text{H}_2$)，再通过费托合成生产液体油品的技术。煤炭间接液化通常约 4~5t 煤产生 1t 成品油，煤间接液化过程生产每吨油品的 CO_2 排放量约为 6t，约有 75% 以上 CO_2 浓度高于 90%，利于 CO_2 的封存。煤间接液化在南非已有 50 多年的大规模生产历史，技术相对比较成熟。我国自主知识产权的煤间接液化技术也已经完成了万吨级的中试开发，正在进行大规模示范厂的建设。

3.3.2 煤制氢技术

氢能是一种洁净的二次能源，在进行能量转换时其产物是水，可真正实现污染物的零排放。在未来可持续能源系统中，将成为主要的载能体，成为主要的终端能源。用煤制氢，可以实现煤的低碳化利用。

煤气化制氢是先将煤炭气化得到以 H_2 和 CO 为主要成分的气态产品，然后经 CO 变换和分离、提纯等处理而获得一定纯度的产品氢。煤气化制氢技术的工艺过程一般包括煤的气化、煤气净化、 CO 的变换以及 H_2 提纯等主要生产环节，工艺流程如图 1 所示。

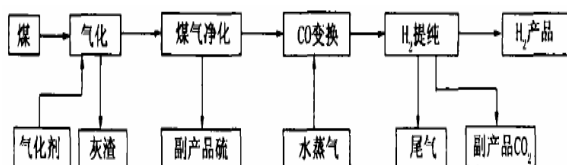


Figure 1. process of hydrogen production from coal
图 1. 煤制氢工艺流程

煤气化制氢过程中，也不可避免地会产生 CO_2 ，但这种高压、高纯度 CO_2 (接近 100%) 完全区别于化石燃料普通燃烧过程产生的常压、低浓度 CO_2 (浓度仅为 12% 左右)，可以更经济地实现 CO_2 的封存。随着 CO_2 埋藏技术的迅速发展，煤气化制氢系统完全可以实现零排放。

3.3.3 煤制天然气技术

煤炭的氢碳原子比一般小于 1: 1，石油氢碳比约为 2: 1，天然气的氢碳比为 4: 1。由此可见，用煤制天然气可以提高氢碳比，降低 CO_2 的排放量，符合低碳经济的要求。

煤制天然气的主要流程为：原煤经备煤单元处理后送气化炉；蒸汽和来自空分的 O_2 作为气化剂从气化炉下部喷入；在气化炉，煤和气化剂逆流接触，经过干燥、干馏和气化、氧化，生成粗合成气，其主要组成为 H_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 H_2S 、油和高级烃；粗合成气经急冷和洗涤送变换单元，经过部分变换和工艺废热回收，进酸性气体脱除单元脱除硫化氢、 CO_2 及其它杂质，送 CH_4 化单元，经预热后送入硫保护反应器，脱硫后进 CH_4 化反应器，得到合格的天然气产品，再经压缩干燥送天然气管网。工艺流程如图 2。

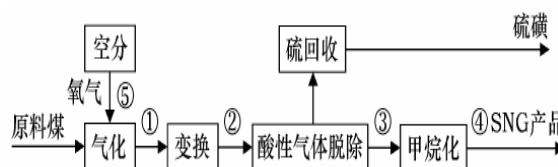


Figure 2. process of gas production from coal
图 2. 煤制天然气工艺流程

煤制天然气的竞争力主要来自于可以采用低价劣质煤，例如含水含灰高、低热值的褐煤。这种煤不太适用于干粉或水煤浆的气流床气化，而比较适于碎煤加压固定床或流化床气化。

世界上第一个也是至今唯一一个商业化煤制天然气项目是位于美国北达科他州的大平原合成燃料厂，产量约 500 万 Nm^3/a 。我国计划在内蒙古建设一套 40 亿 Nm^3/a 和一套 16 亿 Nm^3/a 的煤制合成天然气生产装置，已在开展前期工作。

3.3.4 富氧燃烧技术

该技术是利用空气分离系统获得富氧，然后燃料与 O_2 共同进入专门的富氧燃烧炉进行燃烧，一般需要将燃烧后的烟气重新回注燃烧炉，这一方面降低了燃烧温度，另一方面也提高了 CO_2 的体积分数。由于惰性成分氮气浓度大大降低，无谓的能源消耗大幅度降低，30%~40% 的富氧空气燃烧就可以降低燃料消费 20%~30%，提高了热效率。同时，烟气中 CO_2 的浓度可提高近 90%，从而更容易捕集。

需要指出的是，该技术需要专门材料制作的富氧燃烧设备以及空气分离系统，这将大幅度提高系统投资成本。目前大型的富氧燃烧技术仍处于研究阶段。

3.3.5 化学链燃烧技术

化学链燃烧技术是与空气不直接接触的工况下，燃料与金属氧化物反应，CO₂ 产生在专门的反应器中，从而避免了空气对 CO₂ 的稀释。金属氧化物与燃料进行隔绝空气的反应，产生热能、金属单质以及 CO₂ 和水，金属单质再输送到空气反应器中与 O₂ 进行反应，再生成金属氧化物。

反应生成的 CO₂ 和水处于反应器中，所以 CO₂ 的捕获非常容易。该法的经济性要依靠大量可以无数次循环再生的有活性的载氧体，控制载氧体的磨损和惰性是该技术的关键。由于其经济性好，作为烟气中捕集分离 CO₂ 的方法前景看好。

3.3.6 煤基多联产技术

以煤气化为基础的多联产是目前世界公认的一种先进的洁净煤利用技术，是一种代表性的高碳能源低碳化利用技术。

所谓煤基多联产是指通过各种煤炭转换、利用技术的有机集成，获得多种洁净的二次能源（电，甲醇、费托合成燃料、二甲醚等液体燃料，城市煤气、氢等气体燃料）和多种高附加值的化工副产品，以及用于工艺过程产生的有效能量。多联产系统示意如图 3。

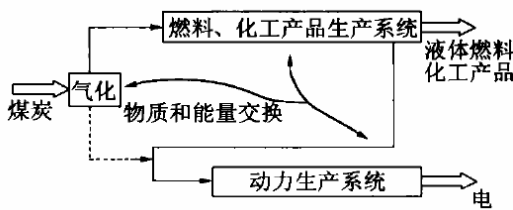


Figure 3. system of coal-based poly-generation
图 3. 煤基多联产系统示意图

煤基多联产的实质是多种产品生产过程的优化耦合，从系统高度出发，最大限度耦合多种一碳化工技术的优越性，将能源产品和化工产品联合生产，充分提高能源的利用效率，减少污染物排放，并有利于 CO₂ 的储存和利用。同时，由于下游能源产品的多样化，系统能调节多个产品之间的“峰—谷”差，使得各流程优化运行，在经济上达到充分的弹性结构，市场竞争力强劲。

但需要指出的是，大规模的多联产系统工艺流程长、技术难度大、能量和物质转换复杂、集成优化理论较薄弱。因此，目前根据目标产品设计出来的各种多联产系统大部分还处于概念或工业示范起步阶段，

但这是实现煤炭能源低碳化利用的重要途径。

3.3.7 整体煤气化联合发电技术

整体煤气化联合发电技术 (IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle) 是最典型的可以进行燃烧前脱碳的系统。在碳基燃料燃烧前，将其化学能从碳转移到其他物质中，再将其分离。IGCC 是当今国际上最引人注目的高效清洁发电技术之一。

IGCC 技术是煤气化和蒸汽联合循环的结合，具有高效、低污、节水、综合利用好等优点，是“绿色煤电”要掌握的重点技术，该技术把过去燃煤直接一次发电过程变成了煤气化两次发电过程。此技术发电效率可达到 43% 以上，随着相关关键技术的不断发展，还能进一步提高到 50% 左右。

IGCC 的工艺过程如下：煤经气化成为中低热值煤气，经过净化，除去煤气中的硫化物、氮化物、粉尘等污染物，变为清洁的气体燃料，然后送入燃气轮机的燃烧室燃烧，加热气体工质以驱动燃气轮机做功，燃气轮机排气进入余热锅炉加热给水，产生过热蒸汽驱动蒸汽轮机做功。其原理如图 4。

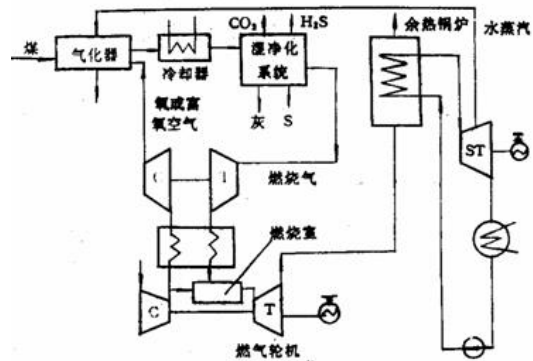


Figure 4. principle of IGCC system
图 4. IGCC 系统原理图

一般 IGCC 系统的气化炉都采用富氧或纯氧技术，所需气体体积大幅度减小，CO₂ 体积分数显著变大，从而大大降低了 CO₂ 捕捉和封存设备的投资和运行费用。

目前，国内石油和化工行业已经建成两个 IGCC 多联产项目。另外华能集团、潞安集团、中电投和申能集团等 IGCC 示范项目已经进入开工或筹备阶段。

4 结语

随着化石能源剩余可采储量的日益减少以及化石

能源开发利用对生态、环境、气候的恶劣影响，发展低碳经济乃至无碳经济作为人类社会的终极目标越来越受到重视，联合国环境规划署把 2008 年世界环境日的主题定为“转变传统观念，推行低碳经济”，表明“低碳经济”理念已引起全球关注。低碳经济将成为新的经济发展模式，并可能演变成为改变全球经济社会发展格局的新规则。我国主张并发展低碳经济是实现可持续发展的重要保证，是积极融入世界文明发展主流的重要标志。

目前，世界各国使用的能源主要还是化石能源，而煤炭比石油和天然气资源丰富，随着世界经济发展，石油供需矛盾会日益加剧，短期内，石油和天然气的最佳替代品还是煤炭。煤炭资源利用将实现从高碳向低碳最终走向无碳的转换，未来的技术及产业市场将十分广阔。实现煤的低碳化利用将是未来世界能源结构调整和保证经济高速发展对能源需求的必由之路。

目前，我国有自主知识产权的、可大规模应用的低碳技术仍然不够成熟，发达国家的核心低碳技术又难以引进。因此，国家应特别注重和支持低碳技术与产品的研发，同时加强国际间的技术交流与合作。只有这样才能早日实现低碳经济，改善我们赖以生存的环境，实现我国的可持续发展目标。

References (参考文献)

- [1] YUAN Nan-you, Concept and Connotation of Low-carbon Economy[J], *Urban Environment & Urban Ecology*, 2010, 23(1), 43-46.
袁男优, 低碳经济的概念内涵[J], *城市环境与城市生态*[J], 2010, 23(1), 43-46.
- [2] ZHOU Xue-shuang, TONG Li, ZHAO Qiu-yue, HENG Shao-qing, Environmental Thinking on Low-carbon Use of China's High-carbon Resources[J], *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(5), 12-16.
周学双, 董莉, 赵秋月, 郑韶青, 中国高碳资源低碳化利用的环保思索[J], *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(5), 12-16
- [3] ZHANG Yu-zhuo, From High-Carbon Energy to Low-Carbon Energy—Prospects of Clean Coal Conversion[J], *Energy of China*, 2008, 30(4), 20-22.
张玉卓, 从高碳能源到低碳能源—煤炭清洁转化的前景[J], *中国能源*[J], 2008, 30(4), 20-22.
- [4] XIE Ji-dong, LI Wen-hua, CHEN Ya-fei, Development Current Situation of Hydrogen From Coal[J], *Clean Coal Technology*, 2007, 13(2), 77-81.
谢继东, 李文华, 陈亚飞, 煤制氢发展现状[J], *洁净煤技术*, 2007, 13(2), 77-81.
- [5] FU Guo-zhong, CHEN Chao, NG Demand and Supply in China and Economic and Technical Analysis of Coal Gasification Technology[J], *Sino-Global Energy*, 2010, 15(6), 28-34.
付国忠, 陈超, 我国天然气供需现状及煤制天然气工艺技术和经济性分析[J], *中外能源*, 2010, 15(6), 28-34.
- [6] MA Suang-chen, SUN Yun-xue, Ma Jing-xiang, et al, Capture technology of carbon dioxide in clue gases from power plant[J], *Electric Power Environmental Protection*, 2009, 25(6), 58-62.
马双忱, 孙云雪, 马京香, 苏敏, 金鑫电厂烟气中二氧化碳的捕集技术[J], *电力环境保护*, 2009, 25(6), 58-62.
- [7] XIAO Yun-han, ZHANG Shi-jie, Coal poly-generation technology and hydrogen technology[J], *Journal of North China Electric Power University*, 2004, 31(6), 5-9.
肖云汉, 张士杰, 煤炭多联产技术和氢能技术[J], *华北电力大学学报*, 2004, 31(6), 5-9.
- [8] SHEN Bao-hong, ZHAO Lu-zheng, Analysis on Switching from High-carbon to Low-carbon Energy Utilization of Coal[J], *Energy of China*, 2010, 32(1), 10-13.
申宝宏, 赵路正, 高碳能源低碳化利用途径分析[J], *中国能源*, 2010, 32(1), 10-13.