

专论与评述

# 中国煤化工生态工业系统超结构的构建与分析

周丽<sup>1</sup>, 胡山鹰<sup>2</sup>, 李有润<sup>2</sup>, 金涌<sup>2</sup>

(1. 清华大学能源环境经济研究所, 北京 100084;  
2. 清华大学化学工程系生态工业研究中心, 北京 100084)

**摘要:** 由于石油紧缺, 中国能源安全问题日益得到关注, 煤化工再次成为投资热点。相对而言, 我国煤化工产业还存在技术落后、资源浪费、环境污染、产业结构不合理以及政策体系不完善等问题。因此必须针对性地对其进行产业调整与改革。通过引入生态工业理念, 提出了煤化工生态工业系统理念, 阐明煤化工生态工业系统的概念, 揭示煤化工生态工业系统的基本原理, 指出煤化工生态工业系统的特点, 并构建煤化工生态工业系统的超结构, 从而为煤化工生态工业系统的理论研究和系统优化奠定基础。

**关键词:** 煤化工; 生态工业; 原理; 特点; 超结构

**中图分类号:** TQ-9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2010)09-0001-04

## Establishment and analysis of super-structure for coal-chemical eco-industrial system in China

ZHOU Li<sup>1</sup>, HU Shan-ying<sup>2</sup>, LI You-run<sup>2</sup>, JIN Yong<sup>2</sup>

(1. Institute of Energy, Environment and Economy, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** In China, because of the lack of petroleum, coal chemical industry has been paid more and more attention. However, the traditional coal chemical industry still has some problems, such as lower technologies, resource wasting, environmental pollution, irrational industrial structure and incomplete policy system and so on. Therefore, this industry needs to be retrofitted by new development pattern. In this paper, eco-industrial concept is brought into the current industrial system. Then the concept of coal-chemical eco-industrial system is put forward, the basic principles of it are revealed, the characteristics are pointed out, and the super-structure of it is built. These could be the foundation for the theoretical research and system optimization of coal-chemical eco-industrial system in the future.

**Key words:** coal chemical industry; eco-industry; principles; characteristics; super-structure

目前煤炭焦化、煤气化-合成氨-化肥是中国主要的煤化工产业。我国煤化工产业正逐步从以焦炭、电石、煤制化肥为传统的煤化工产业向以石油替代产品为主的现代煤化工产业转变。煤化工产业的发展对于缓解我国石油、天然气等优质能源供求矛盾, 促进钢铁、化工、轻工和农业的发展, 起到了重要的作用<sup>[1-2]</sup>。

但是, 煤化工产业的发展对煤炭资源、水资源、生态、环境、技术、资金和社会配套条件要求较高。由于工艺流程长、技术复杂, 目前我国煤化工产业新技术和新设备的基础研究依然薄弱, 煤化工产品结构 with 质量仍不尽合理, 存在技术落后、资源浪费严重、环境污染加剧以及产业结构不合理等问题<sup>[3-9]</sup>。其中, 特别是我国煤化工的现有产业结构单一, 主要生产大量焦炭、合成氨以及电石等高耗能产品, 下游产品结构很不完善。此外, 产业还缺少有效的产业内外耦合和生产链网, 生产过程中的副产物、废物和

能量没有得到充分利用而导致综合利用率低, 带来一系列生态环境问题。最后, 近几年石油市场紧缩造成煤焦化、煤电石、煤合成氨等传统煤化工行业的过度生产, 造成市场饱和、开工率不足等严重后果。

总体而言, 我国煤化工产业取得了巨大进步, 但是在发展过程中也凸现出 2 个矛盾: 一个是巨大市场需求与目前较低利用效率的矛盾, 另一个是可持续发展的需求与污染排放严重的矛盾。这些矛盾如果不加以解决, 将会给我国社会 and 经济发展带来一系列严重问题。因此, 如何更加有效地、清洁地利用煤资源成为工业界和学术界的讨论热点和研究重点。同时, 人类科学的发展往往与自然界密切相关, 自然生态界高效完美的食物链和生态圈成为人们学习效仿的对象。生态工业学者将生态理念融合于已有的工业体系形成了工业生态学(industrial ecology, IE), 于是人们将工业生态学理念具体应用于传统的煤化工产业建立了煤化工生态工业系统。煤化工

收稿日期: 2010-07-08

作者简介: 周丽(1983-), 女, 博士, 助理研究员, 研究方向为能源研究领域; 胡山鹰(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为生态工业研究领域, 通讯联系人, 010-62794513, hxr-dce@tsinghua.edu.cn。

生态工业系统是指与传统煤化工相对的工业形态,是综合考虑自然、工业和社会共同发展的产业体系,它与其他产业、整个工业系统、自然以及社会密切相关。

## 1 系统的构建思路

### 1.1 基本原则<sup>[10]</sup>

#### (1) 碳转化。

碳是煤中的主导元素,煤化工生态工业系统的根本基础是煤炭转化,煤炭转化是将煤中的碳转化为初级产物或者部分终端产品,煤化工生态工业系统最终是要把煤炭转化的各种初级产物进一步加工成多种洁净二次能源产品和基础化学品。同时,除了进入终端产品中的碳之外,剩余的大部分碳都以二氧化碳的形式排放,因此提高碳转化率是降低煤化工二氧化碳排放的根本途径。

#### (2) 产品多样化。

煤化工产业的目的是以煤为原料生产各种有用的化工产品或替代石油的能源产品。任何一种转化技术的目标产品都是由其工艺特征所决定的,而且往往品种有限,有的甚至很单一。而煤化工生态工业系统将多种煤炭一次转化及二次深加工技术集成优化为一个系统,实现煤中碳转化形式的多元化,可以同时生产出多种目标产品。从另一角度看,目标产品的多元化和灵活化也非常有利于系统在不同外界情况下积极响应调整,不仅可以尽可能地将原料“吃光榨净”,取得较高的原料转化率,也能保证系统取得良好的经济和社会效益。

#### (3) 资源耦合。

虽然煤化工产品以及副产物种类丰富,但是产品的主要成分都是碳氢化合物,可以将其产业内部之间以及与外部其他产业合理耦合。不同企业或工艺流程间的横向耦合及资源共享,不仅丰富了原料来源,也为废物找到下游的“分解者”,建立了工业生态系统的“食物链”和“食物网”。这不仅可以有效提高资源利用率,还可以增强产业结构的关联耦合强度,从而实现有机整合。

#### (4) 废物循环。

自然生态系统的逐级利用使得系统中不存在“废物”。煤化工生态工业系统就是模仿自然生态系统,通过关联技术或工艺改革,不仅减少了传统煤化工所包含的废弃物种类,更减少了废弃物的数量。虽然煤化工副产品的来源和种类丰富,但是副产物的主要成分仍是以煤中的碳、氢、硫等为主,通过废物在自身所在系统或者其他系统中的循环利用,从而实现废弃物的资源化与减量化。

### 1.2 系统构建<sup>[11]</sup>

要构建煤化工生态工业系统就必须在现有系统基础上进行改进,从而获得新的工业产业体系。

首先基于资源耦合、产品共生、废物循环以及污染控制若干基本原则,对现有煤化工系统进行物质流以及能量流分析。从物质流和能量流分析看出,由于煤原料富碳,大量碳元素没有进入产品而是以CO<sub>2</sub>形式排放,因此提出与富氢的天然气和煤层气耦合,并实现多产品的联产共生和废物循环机制,从而通过工艺路径组合减少碳排放。其次,在新的产业系统构建过程中,在设计新系统的评价方法时,不仅要借鉴生态工业理念,而且要将政策法规的变化及其导致的政策指标反映在系统构建中,包括技术路线的规模限制、气候变化舆论压力与低碳经济发展所需要的二氧化碳排放限制以及煤炭、天然气等资源的使用限制等。最后,基于资源、环境和经济三重指标对传统系统进行资源、能源以及投资等的模型优化配置,得到综合考虑资源、环境和经济全面发展的煤化工生态工业系统。整个系统的构建过程如图1所示,它的基本目标是通过成员间资源共享耦合、废物循环再利用、丰富产品种类等方法形成资源和能源效率高、环境污染排放少、经济产出高的煤化工产业体系。它强调的是经济、环境和社会功能的协调和共进,是一种新兴的产业体系。

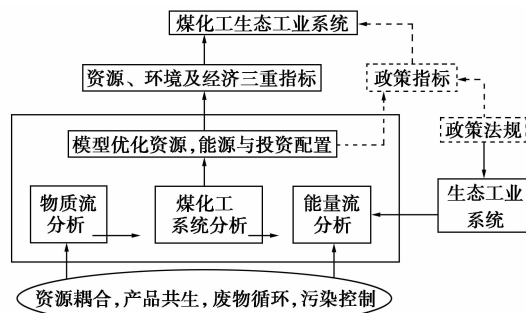
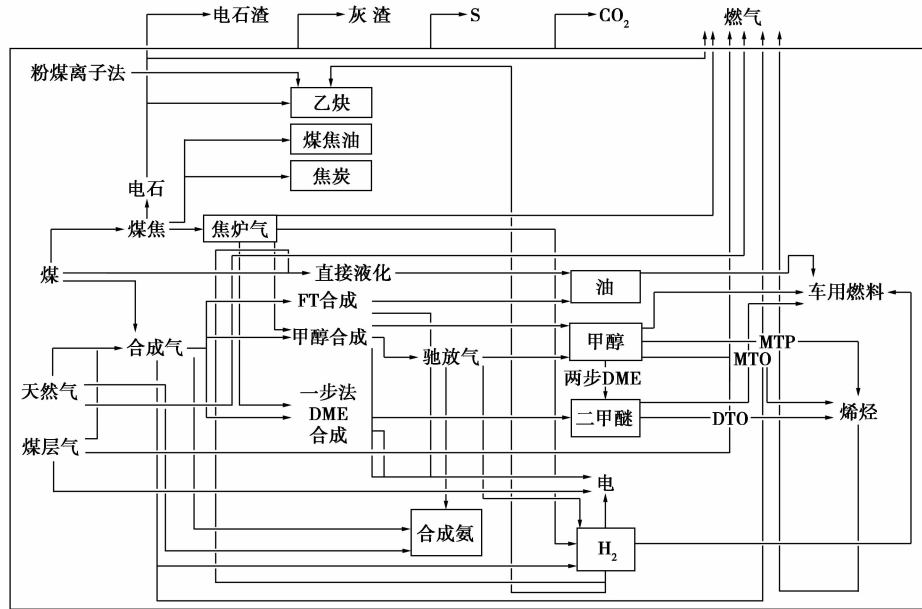


图1 煤化工生态工业系统构建

## 2 系统超结构

基于煤化工生态工业系统的构建理念,结合现有煤化工系统产业结构,可以将其产业结构的超结构系统简要用图2表达。这个系统相当复杂,不仅涉及多种原材料和产品,还包括了一些并没有工业化的新技术。特别是煤制油技术,尽管目前煤制油还无法实现工业化,可预期在未来某一年该技术可以完成工业示范,从而完成大型和专用设备自主化进程。它的复杂性也具体体现了煤化工生态工业系统的3个主要特点<sup>[11]</sup>。

图2 煤化工生态工业系统超结构图<sup>[11]</sup>

### (1) 深加工、高附加值化。

第一,利用炼焦副产物焦炉气生产甲醇、二甲醚等后续化工产品,并满足一定的发电需求。对炼焦副产物煤焦油进行深加工处理转变为具有高附加值的多种化工产品。以上两方面延长并丰富了炼焦传统产业链,大大提高了产业经济价值。第二,在已有焦炭乙炔基础上发展煤一步法乙炔工艺,提高资源利用率。第三,将煤与天然气资源合理耦合,经过气化工工艺发展合成氨、化肥产业链以及醇醚、低碳烯烃产业链,实现资源高效利用。第四,通过焦炉气、煤、天然气以及联产等工艺形式发展煤制氢产业,不仅获得了较高的经济收益,也进一步丰富了已有的产业结构。第五,针对我国能源需求方向,发展煤制油,以及后续油品加工。炼焦、煤制乙炔、煤制化肥、煤制醇醚、煤制氢、煤制油6条产业链构建了丰富的煤化工产业结构。

### (2) 共生耦合、环境友好。

在产业内部,炼焦、煤制乙炔、煤制化肥、煤制醇醚、煤制氢、煤制油6条产业链之间紧密相连。其中焦炭是电石法乙炔的必备原料,焦炉气可用于生产醇醚、合成氨以及氢气,煤与天然气耦合生产醇醚、合成氨以及油品,氢气是煤直接法炼油的必备原料之一,废气二氧化碳是生产化肥的主要原料之一,以及甲醇路线可副产合成氨与氢气等。在产业外部,废气中的二氧化硫可转化为硫磺用于生产硫酸,粉煤灰与电石渣可作为建筑材料的原材料,电石主要污染物电石渣可改制为脱硫剂,焦炉气可作为城市煤气以及尾气用于燃气轮机和蒸汽轮机发电等。该

系统将产业内部以及产业之间合理耦合,形成多种共生耦合关系,加强废物的循环再利用,提高能源资源利用效率,进一步加强煤化工产业整体资源利用率以及产业经济竞争优势,体现生态工业和循环经济理念。

### (3) 战略储备,以煤代油。

针对我国“多煤少油”以及能源匮乏、能源需求大的特点,发展“以煤代油”。“以煤代油”不仅包括字面意义上由煤直接生产油品,更包含了以煤为源头经由下游产品制取传统石油原料提取的化工产品。具体包括煤气化制油、煤直接液化制油和煤气化醇醚路线,还包含了充分利用大量廉价的焦炉气资源发展焦炉气醇醚产业路线,更包含了从煤经由醇醚制取低碳烯烃的线路,改变乙烯、丙烯等基本有机化工原料只能从石油中提炼获取的制约。“以煤代油”不仅为缓解我国能源供需矛盾做出一定贡献,也是我国长远的能源战略储备,真正实现了产业结构发展与国家发展的结合与统一。

该超结构可以作为研究煤化工技术路线优化的基础和平台,支持几方面的研究。第一,从产业结构角度出发,通过技术路线的优化组合可以研究如何降低炼焦比例,使煤炭更多的被使用于生产高附加值产品。第二,从政策影响因素出发,可以将二氧化碳排放等外部条件作为模型的约束条件,研究在一定政策和经济环境下,煤炼焦比例以及煤化工技术路线选择的变化情况。第三,从物质利用效率角度出发,通过丰富产品结构、资源共享,产业结构中可以有更多的耦合关系,从而研究如何充分利用现有

资源,尽可能地增加副产物在其他行业中的应用,获得更好的资源利用强度和系统链接密度。

此外,应用该平台可以进一步探讨几个问题:第一,煤作为最主要的原料,其价格对系统的产业结构优化、产品数量都有较大影响,研究煤炭价格变化对该系统的影响具有重要意义;第二,天然气作为有益补充,适量使用天然气作为化工原料,是否可以带来经济收益和环境效益,这是未来重要的研究内容;第三,当社会、政府、企业以及科研机构向煤化工产业投入更多财力、人力时,整个体系的平均技术成熟度将会提升,研究其产业竞争力将会发生如何变化。

### 3 系统优化与分析结果讨论

煤化工生态工业系统集成优化模型是在产业超结构基础上,将不同技术路线的生产量设定为优化变量,选取资源、环境和经济三方面的系列指标,在一定资源、环境、经济限制条件下,考虑不同指标的权重关系,以系统各个评价指标的综合评价结果为目标进行系统优化计算,最终得到最优的煤化工生态工业系统,该系统的考察时间设定为2020年。在均衡考虑资源、环境和经济三重指标条件下,基于初步的模型优化与计算<sup>[11]</sup>,煤化工生态工业相对于传统煤化工体现出若干优势与改进。首先从产业结构角度分析,产业中焦炭比例提高了近15%,大大提高了系统的高附加值比例;其次从产业的经济效益角度分析,其资源生产力水平大大提高。所谓资源生产力是指产业单位消耗自然资源的平均经济产值,该指标从2005年的548元/t提高到828元/t,表明系统能够更好地使用资源,用更少的资源生产更多的产品,获得更大的经济回报;最后从产业的系统网络角度分析,其共生指数显著提高。共生指数表示系统产业结构中的共生关系占有生产关系的比例,该指标从2005年的0.588提高到0.675,表示生态工业系统通过丰富产品结构、资源共享,产业结构中有更多的耦合关系,具有更高的耦合密度,从而获得更好的资源利用强度。以焦炉气为例:焦炉气是现有煤化工产业的主要排放物之一,2005年焦炉气的利用率较低,大部分以废物形式直接排放,而生态工业系统中,焦炉气得到了充分利用,几乎所有焦炉气都应用于化工生产,比例高达99.84%。总之,应用该平台,可以通过模型优化,基于定量与定性结合的方法,探讨如何应用这些新技术,从而实现资源的高效配置组合、污染的有效减少以及高附加值化工产品的生产。

随着中国经济的快速发展、对能源需求的日益增加以及环境保护压力的日益增强,如何充分、高效地利用煤炭资源已经成为中国可持续性发展的重要诉求之一。本文将生态工业理念应用于传统的煤化工产业,提出了煤化工生态工业系统的概念和构建方式。在原有煤化工产业基础上,通过产业共生耦合大力发展下游产品,发展石油替代化工产品。本文通过深入分析,在理论分析方面做出一些尝试性探讨,进一步提出了该系统的4个基本系统原理和三大产业特点。最后,基于以上分析和理论分析,构建了煤化工生态工业系统的超结构,为未来煤化工生态工业系统的系统理论研究和系统优化奠定了基础。然而,煤化工生态工业系统的最终实现不仅需要更加系统深入的优化情景分析,更需要产业内外各个方面的协调、监督、配合与完善。一个产业的革新与升级不仅仅停留在理论研究和工业技术层面,还需要政策法规、保障措施、企业管理、教育宣传、社会氛围等多方面的共同进步。从长远看,煤化工生态工业系统对环境、能源和经济都有益处,它将成为未来我国煤化工的主要方向和必然趋势。

### 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国国民经济和社会发展统计公报(1995—2006)[M]. 北京: 中华人民共和国国家统计局, 2008.
- [2] 崔民选. 2006中国能源发展报告[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2006.
- [3] 中国煤炭市场网. 煤化工产业不能重蹈焦炭电石的覆辙[EB/OL]. [2006-09-09]. <http://www.cctd.com.cn/detail/06/09/09/00075127/content.html>.
- [4] 胡山鹰. 我国资源产业的可持续发展策略—基于煤、磷资源产业研究[M]. 北京: 清华大学化工系生态工业研究中心, 国家发改委, 2004.
- [5] 吴学红. 电石工业现状及发展建议[J]. 河南化工, 2001(12): 4-5.
- [6] 冯元琦. 化肥的布局品种和节能: 为“十一五规划”建言献策[J]. 中国农资, 2006(1): 18-19.
- [7] 胡山鹰. 化学工业资源节约技术及措施[M]. 北京: 清华大学化工系生态工业研究中心, 中国工程院, 2006.
- [8] 曹仑, 张卫峰, 高力, 等. 中国合成氨生产能源消耗状况及其节能潜力[J]. 化肥工业, 2008, 35(2): 20-24.
- [9] 张健, 梁钦锋, 郭庆华, 等. 煤化工行业CO<sub>2</sub>的排放及减排分析[J]. 煤化工, 2008, 139(6): 8-12.
- [10] 徐振刚. 煤基能化联产系统集成优化与评价方法[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2004.
- [11] 周丽. 煤化工生态工业系统构建与分析[D]. 北京: 清华大学, 2009. ■