

# 我国煤基多联产系统的发展潜力及技术路线研究

王侗, 刘培, 麻林巍, 李政, 倪维斗

(清华大学热能工程系, 清华-BP 清洁能源教育与研究中心, 北京 100084)

**摘要:** 煤基多联产技术是先进清洁的煤炭利用技术, 是综合解决我国能源系统主要问题的关键技术。针对我国多联产系统概念不清的现状, 本文根据我国国情总结提炼出了多联产系统的定义及分类方法。同时, 随着我国能源需求的不断增加, 我国液态燃料供应紧张的问题日渐凸显, 煤基液态燃料的发展势在必行, 本文通过建立能源安全损益模型, 得出了我国煤基替代燃料发展的最优规模。在此基础上, 对我国多联产系统的发展潜力进行分析, 提出了到 2030 年前我国煤基多联产系统的发展战略和技术路线。

**关键词:** 能源系统; 煤基替代燃料; 多联产; 煤基多联产; 发展战略和路线

**中图分类号:** TK-9 **文献标识码:** A

## Study on China's Developing Potential and Technical Route of Coal-Based Co-Production System

Wang Ti, Liu Pei, Ma Linwei, Li Zheng, Ni Weidou

(Tsinghua-BP Clean Energy Research and Education Centre, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The technology of coal-based poly-production, as the advanced coal-utilization technology, is the key way to solve China's main problems on energy. Considering that China has not reached a joint conclusion about the concepts of co-production system, firstly this paper provided the method of defining and classifying co-production system based on China's condition. With the increasing demand of China's energy consumption, liquid fuel is gradually in shortage supply, so coal-based liquid fuel is on the way. Then, by building the energy security profit model, this paper also proposes the optimal scale of developing China's coal-based alternative fuel. At last, based on the analysis of coal-based alternative fuel, the authors put forward the developing strategy and routine of co-production system till 2030.

**Key words:** energy system; coal-based alternative fuel; co-production system; coal-based co-production; developing strategy and routine

### 一、前言

从 2000 年至 2009 年, 我国石油消费总量从  $2.26 \times 10^8$  t 增至 2009 年的  $3.85 \times 10^8$  t<sup>[1]</sup>。交通消耗占我国每年石油消费的 30% 以上<sup>[1]</sup>, 由于我国汽车

保有量不断地攀升, 这一比例还在继续增长。我国 2008 年原油及其成品油净进口量约为  $2 \times 10^8$  t<sup>[1]</sup>, 对外依存度达到 53%, 液态燃料供应问题面临严峻的挑战。由我国液态燃料的供应问题可以看出, 我国能源需求的快速增长已经对能源与生态环境提出

收稿日期: 2015-11-04; 修回日期: 2015-11-06

作者简介: 王侗, 清华大学热能工程系, 硕士研究生, 主要研究方向为能源发展; E-mail: wt\_wt1@163.com

基金项目: 中国工程院重大咨询项目“中国煤炭清洁高效可持续开发利用战略研究”(2011-ZD-7)

本刊网址: www.engingsci.cn

了巨大的挑战，而煤炭作为我国能源供应的主体，自然要承担相应的责任。因此，要解决我国能源所面临的挑战，关键在于发展先进的煤炭利用技术<sup>[2]</sup>。多联产系统正是一条先进的煤炭利用技术路线，是解决能源问题与生态挑战的重要途径<sup>[3]</sup>。

## 二、多联产系统的定义及分类

近年来，国内外对于多联产尚没有统一的描述方法。在总结国内外多联产系统研究现状的基础上，本节对多联产系统进行了定义及分类。

### (一) 多联产系统定义

以提高物质和能量综合利用效率以及减少污染物排放为目的，将传统上以煤为原料、分别单独生产电力和化工品的工艺过程有机地耦合在一起，所形成的新型电力和洁净燃料联合生产系统称为多联产（能源）系统。

根据是否强调化工生产和电力生产的有机关联，本文提出了广义多联产和狭义多联产的概念。

广义多联产定义为：以煤气化技术（包括煤完全气化，部分气化，热解等）为“龙头”，从产生的合成气来进行跨行业、跨部门的联合生产，以同时获得多种高附加值的化工产品（包括脂肪烃和芳香烃）和多种洁净的二次能源（气体燃料、液体燃料、电力等）的优化集成能源系统。简言之，广义多联产系统着重于强调以煤气化为龙头，多产品输出的能量系统。

狭义多联产定义为：利用已参与化工合成后的合成气再去发电的方式称为（化工-动力）多联产。狭义多联产系统从化工生产和动力系统的特点出发，强调两者的有机关联。

### (二) 多联产系统的分类

#### 1. 以煤气化形式分类

基于煤气化技术的不同，目前多联产系统的主要技术方向可以分为以下3类：①以煤热解燃烧为核心的多联产系统；②以煤部分气化为核心的多联产系统；③以煤完全气化为核心的多联产系统。

#### 2. 以产品形式分类

多联产系统将化石能源中的碳、氢、氧元素最大限度地转化为能量产品和可存储并适应社会需求

的化工产品，化学品载体的选择随多联产工艺、技术的改变和以该化学品为原料的下游工艺链的改变而不同。目前的多联产发展模式，煤基多联产化工产品主要包括：燃料甲醇、二甲醚、甲酸、乙二醇、煤制天然气、煤基低碳烯烃等。

#### 3. 以流程结构形式分类

根据多联产系统流程结构形式及集成程度不同，多联产系统可以分为并联型多联产系统和串联型多联产系统两大类。并联型系统是指化工流程与动力流程以并联方式连接在一起，合成气平行地供给两大系统。串联型系统是指化工系统与动力系统以串联形式连接在一起，合成气首先经历化工生产流程，部分组分转化为化工产品，部分组分作为燃料送往热力系统。

## 三、煤基多联产液体燃料的发展潜力

随着我国经济的快速增长，交通对于石油的依赖将更加严重。而煤基液体燃料转化技术是将固体的煤炭转化为车用液体燃料的洁净煤技术，这为缓解我国液体燃料的供应问题指出了一条可供发展的道路。

本节分析了我国煤基多联产液体燃料技术的发展上限，同时从能源安全与经济的角度对发展煤基多联产液体燃料进行了损益分析，综合分析出了液体燃料的发展潜力。

### (一) 用于煤基替代燃料生产的煤炭资源潜力

煤炭近年来在全国一次能源消费中的占比始终维持在70%左右<sup>[1]</sup>。2009年我国煤炭消费总量达到 $2.95 \times 10^9$  t，同比增加 $2.1 \times 10^8$  t<sup>[1]</sup>。我国煤炭的主要利用途径如图1和图2所示。

目前，电力、钢铁、建材和化工占我国煤炭消费总量的85%以上<sup>[4]</sup>。按这些主要部门来预测煤炭需求，2030年约为 $3.7 \times 10^9 \sim 4.0 \times 10^9$  t，2050年约为 $3.5 \times 10^9 \sim 3.8 \times 10^9$  t。其中化工用煤量2030年为 $3.5 \times 10^8 \sim 4 \times 10^8$  t，2050年为 $4 \times 10^8 \sim 4.5 \times 10^8$  t<sup>[5]</sup>。除去合成氨、电石、煤制烯烃以及民用液体燃料（例如，部分二甲醚）生产的用煤量，可用于生产车用液体燃料的资源量最多为 $1 \times 10^8 \sim 2 \times 10^8$  t。而若考虑上述更严格的煤炭可持续产能约束和煤炭消费的碳排放约束，实际上可用于生产

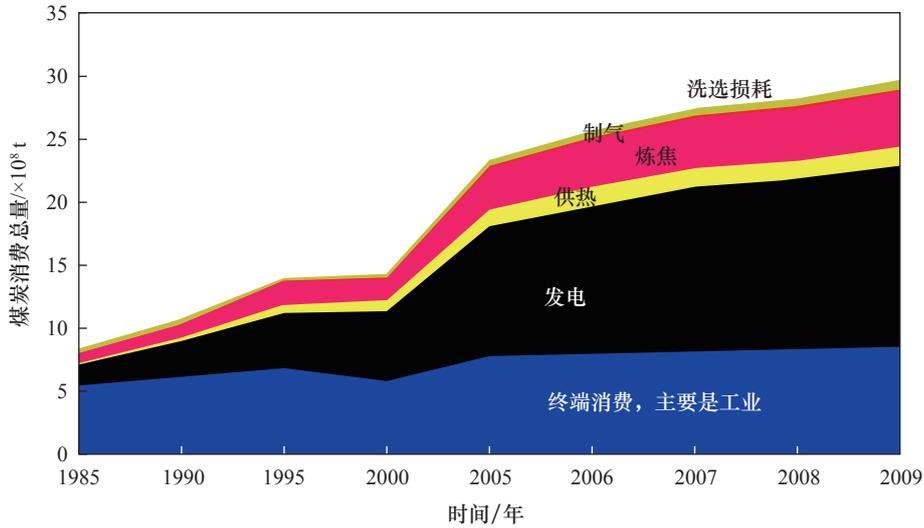


图 1 我国煤炭消费总量和构成的历史变化趋势<sup>[1]</sup>

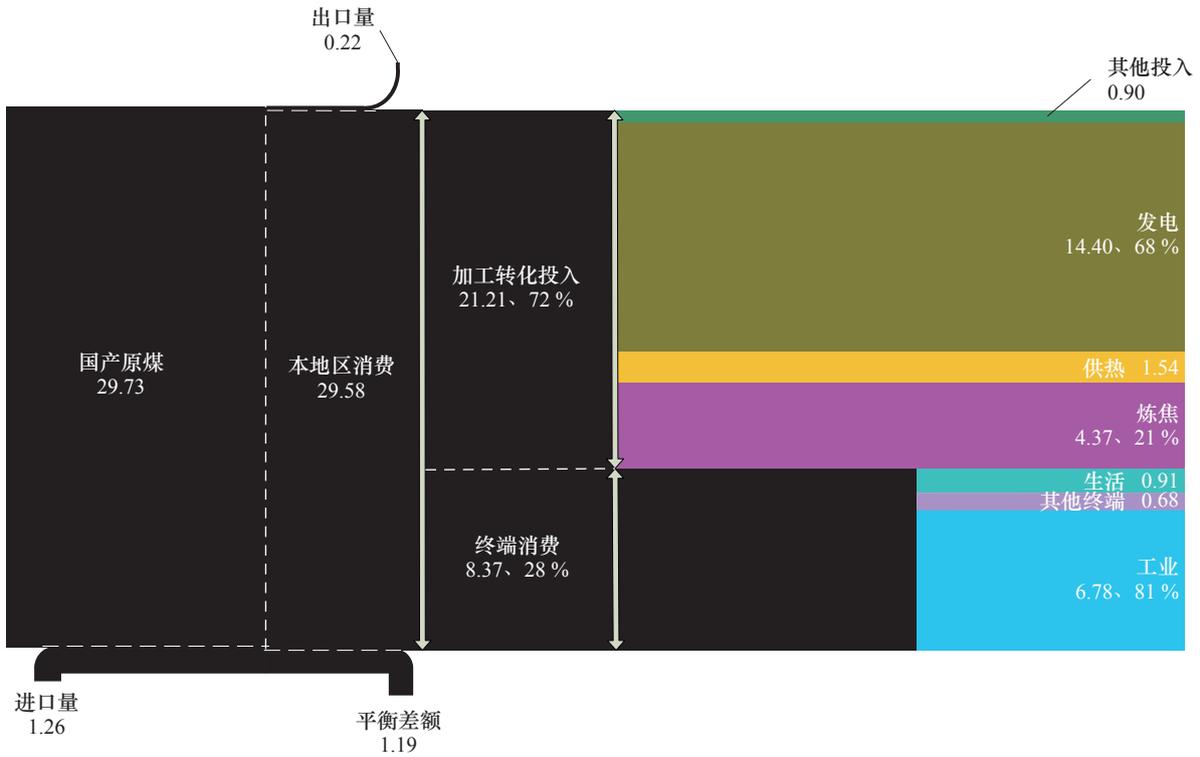


图 2 2009 年我国煤炭能流图（单位： $\times 10^8$  t）<sup>[1]</sup>

液体燃料的资源规模可能更小。

## （二）煤基替代燃料发展损益分析

本节从能源安全入手，建立了能源安全损益分析模型，并对建立石油战略储备和发展煤基液体燃料进行了定量分析，确定两者的最优平衡关系。

### 1. 能源安全损益分析模型

本节参考了美国橡树岭国家实验室定量研究的

方法，根据石油战略储备（SPR）和替代燃料（ALF）对于能源安全不同作用机理，建立计算石油战略储备和替代燃料发展的最优规模模型，即能源安全损益分析模型<sup>[6]</sup>。

建立石油战略储备或发展替代燃料，经济成本主要包括基础设施建设成本、运行维护成本和购买资源或燃料的相关成本<sup>[7]</sup>。对于替代燃料来说，还应包括相关的 CO<sub>2</sub> 处理成本，这些成本都可以直接

计算出来。但建立战略储备或发展替代燃料得到的收益只有在石油中断的时候才能显现出来，其原理如图3所示。建立石油战略储备或发展替代燃料，是为了尽可能的避免进口油额外成本以及由于石油短缺造成的本国国内生产总值（GDP）损失，而避免的损失就是它们的收益了。图4描述了发展替代燃料的收益和代价，是否存在“最佳点”以及如何寻找“最佳点”是替代燃料损益分析中的关键问题。

2. 最优规模定量分析

我国发展替代燃料应该优先考虑煤基替代燃料，本小节选取煤制油为研究对象，选取2010—2030年，

对我国发展替代燃料进行定量分析，根据石油战略储备和煤基燃料两种方式同时发展的情况计算发展煤基替代燃料的成本和收益，分析是否应该发展替代燃料以及发展多大规模的替代燃料。

计算结果如图5所示，其中，图5a为三维立体图，图5b为对应的等高线图。计算结果表明在建立 $1.7 \times 10^8$  t石油战略储备和发展 $0.7 \times 10^8$  t替代燃料时，将有最大收益约1600亿元。在最佳规模附近，其收益也较大，所以图5中中心圆圈内的点均可以认为是较优规模，即截至2030年，我国建设 $1.5 \times 10^8 \sim 2 \times 10^8$  t石油战略储备，同时发展 $0.5 \times 10^8 \sim 1 \times 10^8$  t的替代能源，将有较大的收益。

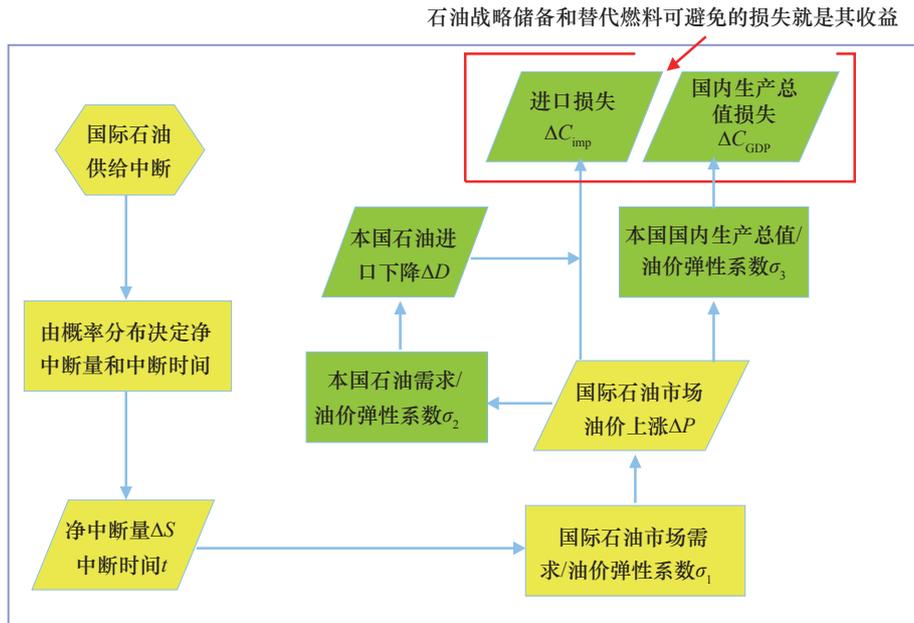


图3 石油战略储备和替代燃料的收益计算原理示意图

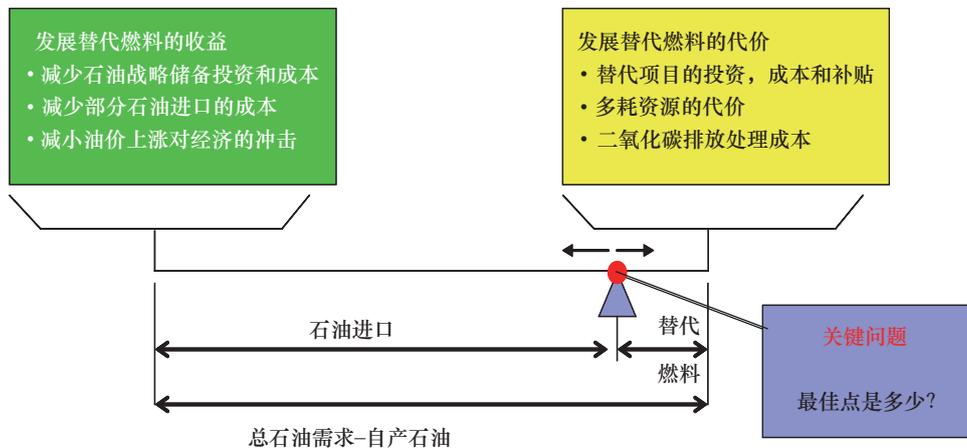


图4 替代燃料损益分析计算原理示意图

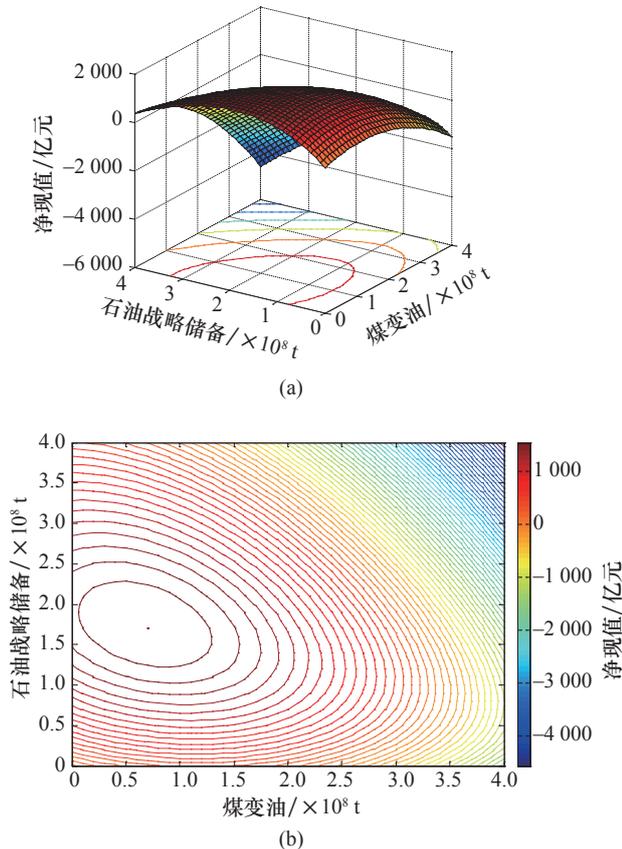


图5 不同石油战略储备和替代能源规模下的净收益

### (三) 煤基液态燃料发展建议

(1) 2020年后煤基替代燃料的发展还取决于能源安全的局势和国家应对气候变化的整体考虑,但考虑煤炭可持续产能的制约和碳捕获与封存技术(CCS)的前景尚不明确,煤基液体燃料的总量发展规模不宜过大。

(2) 通过对能源安全与收益建模分析表明,在保障能源安全的过程中,石油战略储备和煤基替代燃料均有一定的最优规模,在基准情景假设下,同时建立  $1.5 \times 10^8 \sim 2 \times 10^8$  t 石油战略储备和  $0.5 \times 10^8 \sim 1 \times 10^8$  t 替代燃料时,对于保障能源安全有最大的收益。

(3) 在进行替代燃料发展决策时,要充分考虑到未来油价的走势,并做相应的损益分析。

## 四、我国多联产系统发展战略及技术路线

### (一) 我国多联产系统发展的现状

我国多联产系统的发展目前具有以下三个特点:

(1) 我国多联产系统总体上已经进入工业示范

早期,虽然尚没有得到广泛推广,但是技术日趋成熟,为大范围技术推广打下了良好的基础;

(2) 我国液体燃料高度短缺,生态环境保护形势严峻,多联产系统的发展具有广阔的空间;

(3) 我国多联产系统发展仍面临缺乏主导设计、难以打破行业分割以及缺乏相关政策、法规支持等挑战。

### (二) 我国多联产系统的发展规模

目前我国的煤炭利用方式主要是直接燃烧,能源利用效率较低,且污染排放量大。以整体煤气化联合循环(IGCC)为代表的清洁煤发电技术效率高(目前已达43%)、排放低,是以煤为主的高效洁净能源动力系统的重要技术方向。以煤气化为基础,将整体煤气化联合循环发电技术与煤基燃料、化工品生产过程集成形成的煤基多联产系统,将煤的单一利用模式发展成了综合利用模式,可以实现煤炭的高效、洁净、经济利用。

根据我国现状及能源需求分析,2020年前我国煤基多联产发展的潜力预计为煤基多联产发电5000~10000 MW,清洁燃料(合成天然气、液体产品)及化工品(烯烃等)每年直接或间接替代  $5.5 \times 10^7$  t 油,并在考虑二氧化碳捕集预留设计的情况下实现零排放氢电联产系统的示范。到2030年,煤基多联产发电潜力20~100 GW,清洁燃料(合成天然气、液体产品)及化工品(烯烃等)生产潜力为每年直接或间接替代约  $1 \times 10^8$  t 油品。

### (三) 我国多联产系统的发展布局

煤基多联产系统根据煤种、产品、集成方式等不同而有各种不同的形式;根据不同地区资源条件和产品市场的不同,煤基多联产系统发展应有不同的模式。

#### 1. 在煤炭基地发展煤炭梯级利用联产项目

结合大型煤炭基地的资源条件,通过煤基多联产技术同时生产电力、清洁燃料和化工品,真正实现电力和清洁燃料、化工品生产的内在集成,可大幅提高系统的整体物质能量转换效率,降低水资源消耗,减少污染物及  $\text{CO}_2$  温室气体的排放。

#### 2. 在中东部地区,发展不同产业融合的联产系统

在产业集中地,通过煤基多联产系统生产电力、氢气、燃料气、化工品等同时与其他产业如钢铁、炼化等结合。通过不同产业间的横向联合,进一步

提高整体效率，降低成本。

#### (四) 我国多联产系统的发展战略

##### 1. 战略思想

(1) 以“自主创新，重点突破；多元发展，合理布局”为指导思想。坚持自主开发、坚持科技创新，发展符合国情的多联产系统；在多联产系统的关键技术上形成突破；制订多元化的系统方案和发展模式；因地制宜、因时制宜，根据实际需要和资源禀赋等在重点地区布局适当规模的多联产系统，促进多联产系统的示范、推广和产业化发展<sup>[8]</sup>。

(2) 以“一个统领，两个创新，突破三类技术，做好四个协同”为发展思路。以煤炭可持续发展为统领，充分利用多联产系统能效高、排放少的优势；依托多联产系统的自主技术创新，以创新的方式发展以多联产系统为核心的新型产业；在发电方面，重点突破整体煤气化联合循环以及整体煤气化联合循环+碳捕获、利用与封存的关键技术；在化工方面，重点突破煤制油、煤制烯烃、醇醚燃料以及碳捕获、利用与封存等关键技术；在系统优化和集成方面，重点突破煤基多联产、煤炭和其他能源协同利用的多联产，以及和碳捕获、利用与封存的集成等方面的关键技术。

##### 2. 战略目标

(1) 2020年：通过5~6套整体煤气化联合循环系统示范突破煤气化及富氢燃料发电技术，同时有序开展10套左右的煤基多联产系统示范，突破关键单元技术及系统集成技术，为多联产技术产业化奠定坚实基础。

(2) 2030年：通过扩建已有示范项目和新建项目，总共建成20套左右多联产系统，实现多联产技术产业化。重点对五种技术流程进行工业放大，并对多联产系统加装二氧化碳捕集系统进行技术示范。

##### 3. 战略措施

(1) 重点突破多联产系统的关键科学技术。针对多联产系统的三类关键技术，尽快设立国家科技攻关重大专项，重点突破其中的关键科学技术问题。包括：①整体煤气化联合循环和整体煤气化联合循环+碳捕获、利用与封存关键科学技术研究开发；②煤化工多联产+碳捕获、利用与封存的关键科学技术研究开发；③广义多联产系统+碳捕获、利用与封存的关键科学技术研究开发。

(2) 合理布局多联产系统工业示范，并进一步

大规模推广。2020年前，建设采用以下工艺流程的不同规模的煤基多联产系统各两套：①基于煤气化的合成气一次通过电力/甲醇联产系统，发电容量300 MW，甲醇合成 $3 \times 10^5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ；②基于煤气化的合成气再循环电力/甲醇联产系统，发电容量250 MW，甲醇合成 $3 \times 10^5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ；③基于气化煤气和焦炉煤气双气头的合成气一次通过电力/甲醇联产系统，发电容量300 MW，甲醇合成 $3 \times 10^5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ，焦炉煤气消耗 $8 \times 10^8 \text{ Nm}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ ；④基于煤炭热解气化燃烧分级转化的合成气一次通过电力/甲醇联产系统，发电容量200 MW，甲醇合成 $1.5 \times 10^5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ，联产焦油 $1 \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ ；⑤基于煤炭和生物质共气化的合成气一次通过电力/甲醇联产系统，发电容量200 MW，甲醇合成 $1.5 \times 10^5 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2030年前通过扩建已有示范项目和新建项目，总共建成20套左右多联产系统，实现多联产技术产业化，重点对以上五种技术流程进行工业放大，并对多联产系统加装二氧化碳捕集系统进行技术示范。

2030年后开展产业化推广，最终达到总发电能力 $2 \times 10^7 \text{ kW}$ 至 $1 \times 10^8 \text{ kW}$ ，清洁燃料（合成天然气、液体产品）及化工品（烯烃等）每年直接或间接替代 $5 \times 10^7 \sim 1 \times 10^8 \text{ t}$ 石油的规模，为保证国家能源安全做出实质性贡献。

(3) 重点培育和发展多联产系统的相关产业。除发展多联产系统的产品生产本身这一产业外，重点培育如下配套产业，支撑多联产系统的产业化发展。包括：①动力设备制造产业，重点是自主的燃用合成气或富氢气体的燃气轮机装备制造；②煤气化设备制造产业，包括煤气化、部分气化、热解等；③煤化工合成设备制造产业，包括煤制油、煤制系统、甲醇和二甲醚的合成反应器、催化剂和配套设备等；④多联产系统集成设计和咨询服务等其他相关产业；⑤醇醚燃料产业，重点包括甲醇汽车、灵活燃料车、二甲醚汽车和二甲醚民用设备等。

#### (五) 我国多联产系统发展的技术路线

煤基多联产技术发展路线图如图6所示。

第一阶段为多联产系统关键技术研发及示范阶段。至2020年，依托10套多联产系统示范装置，开展整体煤气化联合循环/联产系统关键技术的自主研发。

第二阶段为多联产系统工业示范阶段。2020年至2030年，完成20套多联产系统示范，并对多联

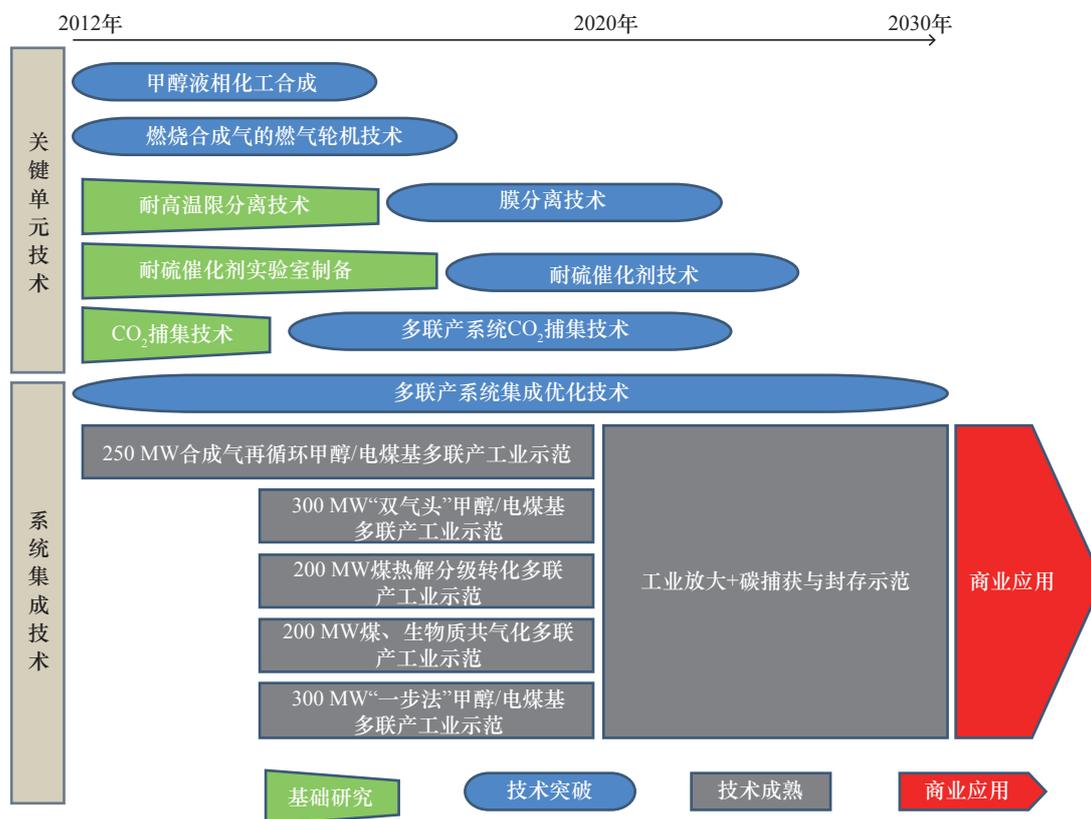


图6 煤基多联产系统技术发展路线图

产系统二氧化碳捕集进行工程示范。

第三阶段为多联产系统产业化阶段。2030 年以后，在我国对多联产系统进行大规模产业化推广。

值得注意的是，多联产系统集成及优化将贯穿整个多联产系统发展阶段。

#### (六) 我国多联产系统发展的政策保障措施

- (1) 理顺管理制度，突破行业分割和部门分割；
- (2) 加强规划制订，合理布局多联产系统的发展；
- (3) 出台相关政策，促进多联产系统顺利发展。

## 五、结语

在我国社会不断发展的过程中同时解决能源规模、效率和环保问题是未来我国能源体系面临的重大挑战<sup>[9]</sup>。能源消费总量的快速增长，能源转换效率的低下，以及在能源生产、转换和使用中带来的环境污染、生态系统破坏等问题，已成为我国社会、经济发展的巨大障碍。多联产技术是在现有能源利用技术基础上的一次本质飞跃，是近期可实现、未

来可发展的新型能源系统，对于促进我国能源与环境协调发展，维护国家能源安全，满足国民经济快速稳定发展都具有重要的战略意义。

#### 参考文献

- [1] 国家统计局能源统计司，国家能源局综合司. 我国能源统计年鉴2009[M]. 北京：中国统计出版社，2010.
- [2] 倪维斗，陈贞，李政. 我国能源现状及某些重要战略对策[J]. 中国能源，2008，30(12)：5-9.
- [3] 倪维斗，郑洪波，李政，等. 多联产系统：综合解决我国能源领域五大问题的重要途径[J]. 动力工程，2003，23(2)：2245-2251.
- [4] 岳福斌. 煤炭蓝皮书——中国煤炭工业发展报告(2006—2010)[R]. 北京：社会科学文献出版社，2008.
- [5] 中国工程院. 我国能源中长期(2030、2050)发展战略研究：电力·油气·核能·环境卷[M]. 北京：科学出版社，2011.
- [6] 徐承恩，刘克雨，赵伏，等. 石油安全和储备战略专题报告[R]. 北京：中国工程院，2004.
- [7] U.S. Department of Energy. Strategic petroleum reserve size study[R]. US: Department of Energy with Interagency Participation, 1990.
- [8] 濮洪九. 中国煤炭可持续开发利用与环境对策研究[M]. 徐州：中国矿业大学出版社，2010.
- [9] 倪维斗，李政等. 基于煤气化的多联产能源系统[M]. 北京：清华大学出版社，2011.