

以煤气化为核心的多联产能源系统 ——资源/能源/环境整体优化与可持续发展

倪维斗, 李政, 薛元
(清华大学, 北京 100084)

[摘要] 环境污染已成为制约我国经济可持续发展的瓶颈, 按照现有技术, 我国的能源系统是不可持续的。在一次能源以煤为主而且长期不可能大幅度变化的国情下, 如何构建资源、能源、环境整体化的可持续发展能源系统, 是从现在就要开始重点研究并逐步实施的战略性问题。文章在介绍国外可持续能源系统研究的最新进展基础上, 提出以煤气化为核心的多联产能源系统是解决我国未来可持续发展的方向, 详细论述了可能实施的多联产耦合实例, 效益分析以及需要解决的关键技术和科学问题; 对我国实施多联产战略的起步、分层次步骤、政府支持以及相关政策提出了建议。

[关键词] 可持续发展; 多联产; 煤气化; 能源系统

1 按现有技术我国能源系统是不可持续的

1.1 人均用能将不断提高

目前我国人均用能还处于相对低的水平, 约 1 000kg/人·a, 比起美国的 11 000kg/人·a, 日本、德国、俄罗斯等国的 5 000~6 000kg/人·a, 尚有很大差距。当然, 我国由于人均资源贫乏, 国土环境容量有限, 决不可能去追求高能耗, 而是应该有我国特殊的生产与生活方式, 尽量节俭。但是, 随着社会和技术的发展以及人们对生活水平不断提高的企盼, 人均用能肯定要不断增加。按不同机构所作的预测, 在 2030~2050 年期间, 我国人均用能将为 2 500~3 000kg/人·a, 这是不以人的主观意志和行政命令为转移的。

1.2 资源、环境将无法承受

我国人均电力装机容量只有 0.24 kW, 达到真正的小康水平人均至少要 1.0 kW, 即比目前要增加 4 倍, 达到约 $(14\sim 16) \times 10^8$ kW, 届时 CO₂、

SO₂、NO_x、TSP 的排放量都相应大大增加。表 1 是国际上现用火电技术的排放情况:

表 1 国际上火电技术的排放情况

Table 1 International emission level for coal fired power plant

排放技术	单位排放/g (kWh) ⁻¹		
	SO ₂	NO _x	PM ₁₀
1997 年美国煤电平均水平	6.1	3.47	0.16
1997 年美国煤电达到的最好水平	0.46	0.87	0.15
荷兰 Buggenum IGCC 电站(实测)	0.08	0.22	0.033
天然气联合循环	-	0.092	-

由表可见, 即使按脱硫率 95%, 并安装了先进的低 NO_x 燃烧器和脱硝装置, 其污染程度还是十分可观的, 比起整体煤气化联合循环 (IGCC) 和天然气联合循环有较大的差距。对中国来说, 到 2030~2050 年, 不管按那种情景分析, 煤在一次能源中还是要占 50% 以上, 且将来的煤主要用于

[收稿日期] 2000-06-20

[基金项目] 国家重点基础研究发展规划 (973) 资助项目 (G1999022304)

[作者简介] 倪维斗 (1932-), 男, 浙江宁波市人, 中国工程院院士, 清华大学教授, 博士生导师

发电,可能要占整个煤产量的80%以上(目前用于发电的煤为煤总产量的33%)。从而,无论从SO₂、NO_x和悬浮颗粒的排放,还是从温室气体CO₂的排放的角度看,用目前的技术都是不可持续的。此外,湿法脱硫后所得的低质量石膏形成大量的白色二次污染。

世界上城市化的进程不可逆转,大城市的污染问题将变得越来越严重,汽车所排出的CH₄、CO、NO_x和经光合作用形成的5μm以下的颗粒仍是城市的主要污染源。尽管汽车发动机的性能在不断改善,例如美国总统亲自抓的PNGV规划(Partnership for a new generation of vehicles),欲达到的耗油量目标是3L/100km,但即使这样,由于大城市人口集中,百人汽车占有量增加,汽车尾气仍是一个大问题。这个问题在中国尤其突出,目前在世界10大污染严重城市中,中国占了7个,其中北京很不光彩地名列第三。

1.3 我国石油、天然气资源相对贫乏

我国的石油采储比不到15,比世界平均值40要低得多。天然气前景虽然较好,近年发现气田不少,并准备从哈萨克斯坦和西伯利亚引入天然气,但就总量而言,仍不能大幅度地改变我国能源结构。计划中的西气东输计划(管线长达4200km,投资1000多亿元)也只是输气 $120 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,占整个能源的1.2%(目前天然气占一次能源的2%),在2030年能占10%已是最乐观的估计了。多种预测表明,我国石油产量今后只能基本维持现有水平或略有增加 $[(1.6 \sim 2.0) \times 10^8 \text{ t/a}]$ 。目前我国对液体燃料的需求不断增加,2000年已进口 $4000 \times 10^4 \text{ t}$,预计在2005年将是 $9000 \times 10^4 \text{ t}$,2010年将达到 $1.6 \times 10^8 \text{ t}$ 。这些数目是相当惊人的,一方面要消耗大量的外汇,使国家经济受国际油价的影响和冲击,另一方面从能源安全角度也是十分严重的。

近年来进口石油又引发了一个新的问题,即所购买的廉价高硫原油,用我国目前普遍使用的催化裂化装置和工艺炼制出的汽油、柴油在含硫方面离国际标准有很大差距,要彻底改变炼制工艺和装备则需要数以千亿计的资金。

1.4 再生能源

再生能源固然是清洁能源,应当在政策、机制和技术上加大力度,加速推广。但由于这类能源能源密度小,单位功率价格高,随机性大,要在整个

能源中占较大的份额是不太可能的,若有10%已是最乐观的预测了。

因而,从中国的现实出发,在一次能源以煤为主的情况下,如何构建资源、能源、环境整体化的可持续发展能源系统,是从现在就要开始重点研究并逐步实施的战略性问题,也就是说,如何从国家多个行业集成的高度把清洁利用煤这篇大文章做好。

2 以煤气化为核心的多联产系统是能源可持续发展的重要组成部分

从全世界范围来讲,工业的发展,化石能源的大量应用,已经给我们共同的家园——地球,带来了严重的环境恶化的后果,且还面临更严重的挑战。因而,各个国家、各个工业部门都在寻求资源消耗少,能源转化效率高,总体排放少的系统。例如:

美国能源部(DOE)提出的Vision 21(展望21)能源系统^[1](见图1),其基本思想是以煤气化为龙头,利用所得的合成气,一方面用以制氢供燃料电池汽车用,另一方面通过高温固体氧化物燃料电池和燃气轮机组成的联合循环转换成电能,能源利用效率可达50%~60%,排放少,经济性比现代煤粉炉高10%。

Shell公司提出Syngas Park(合成气园)的概念^[2],它亦以煤的气化或是石油和渣油气化为核心,所得的合成气用于IGCC发电,用一步法生产甲醇和化肥,并作为城市煤气供给用户(图2)

生态工业园的研究正在不断深入人心并取得成果,生态工业是指仿照自然界生态物质循环的方式来规划工业生产系统的一种工业模式^[3]。在生态工业系统中,各个生产过程不是孤立的,而是通过物料流、能量流和信息流互相关联的,一个生产过程的“废物”可以作为另一个过程的原料而加以利用。生态工业追求的是系统内各生产过程从原料、中间产物、废物到产品的链接和耦合,从而达到资源、能源、投资的最优利用,以及对环境最友好。

美国一些著名大学,如MIT,耶鲁大学、普林斯顿大学都在积极开展生态工业的理论和实验的研究。

近年来人们提出绿色化学的概念,即用化学的技术和方法去减少或消灭那些对人类健康,社区安全,生态环境有害的原料、催化剂、溶剂和试剂、

产物、副产物等的使用和产生，因而从源头上根除污染，而不是在有害物质产生后再进行尾部处理。

绿色化学已列入日本的“新阳光计划”和欧洲、拉美等国的“绿色化学与技术科研计划”。

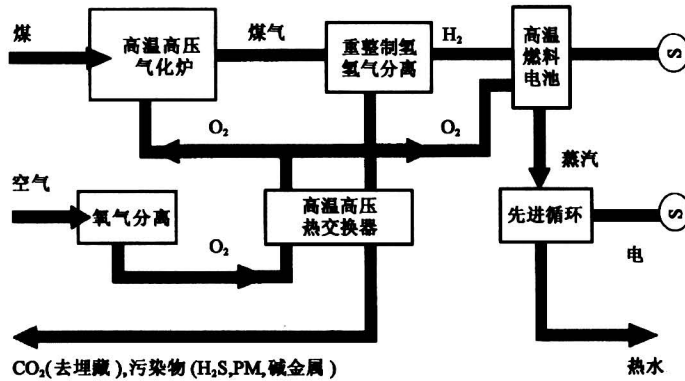


图 1 展望 21 能源系统

Fig.1 Vision 21 energy system

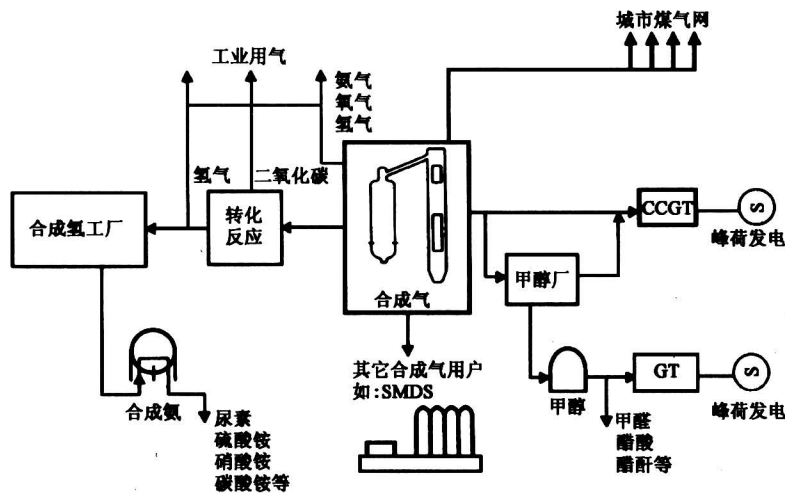


图 2 Shell 合成气园概念

Fig.2 Syngas Park concept of Shell Company

在石化企业中建立 IGCC 动力站，燃用厂内生产的廉价重质渣油、沥青、石油焦或 Orimulsion 油，它既能为化工流程生产提供合成原料气，又能用于提供合成气生产所需的电能和蒸汽，使电能、热能的生产过程与化工过程有机地结合起来，使所生产的化工产品和电能的成本降低。这类装置在全世界已有数十套，而且还在进一步发展。其中比较典型的是意大利 ISAB 公司装置，它的输出功率为 522 MW^[4]（见图 3）

从这些例子看出，出于能源问题面临资源与环境的压力，全世界都在寻求解决问题的有效途径。但由于长期以来各工业部门所管辖领域之间的

分隔，例如：发电、动力、石化和化工甚至于冶金，都在本行业内单独寻求最优解，实际上这些局部最优并不一定是整体最优。多联产系统正是从整体最优角度和跨越行业界限，所提出的一种高度灵活的资源/能源/环境一体化系统。其基本思路可用图 4 表达，其要点为：

1) 以煤或石油焦或高硫重渣油为原料（后者可以和石化企业结合），用纯氧或富氧气化后生成的合成气（主要成分为 CO+H₂）通过净化可得到纯元素硫。

2) 合成气可有多种用途，一部分可用作：城市煤气，分布式热、电、冷联产；大型发电

(燃料电池或燃气轮机/蒸汽轮机联合循环)；一步法生产甲醇；一步法生产液体燃料 (F-T 液体燃料，二甲醚)；其它化工产品 (合成氨、尿素、醋

酸、烯烃)。

另一部分经过蒸汽重整反应：
 $CO + H_2O \longrightarrow CO_2 + H_2$ 后，

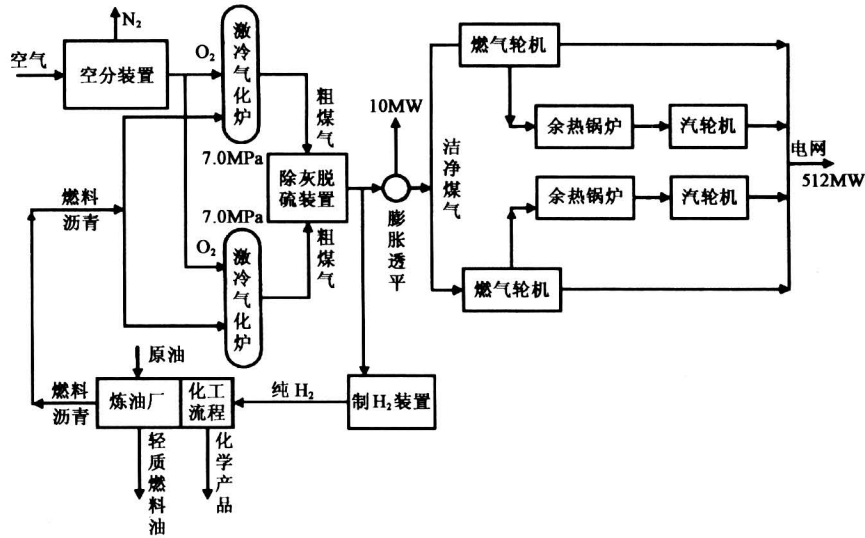


图 3 石化 IGCC 动力站及联产

Fig.3 IGCC power unit and poly-generation in petro-chemical enterprise

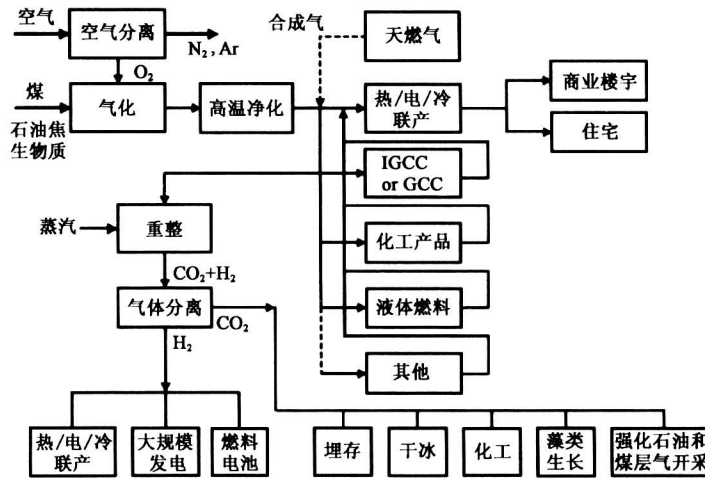


图 4 资源/能源/环境一体化系统

Fig.4 Integrated system for resource, energy and environment

通过气体分离把 H₂ 和 CO₂ 分开。氢气可用于质子交换膜燃料电池，主要用于城市交通的车辆，可以达到零排放，从根本上解决大城市汽车尾气污染问题。

长远来看，氢气作为载体，可作为分布式热、电、冷联供的燃料，实现当地零排放。

3) 分离出来的 CO₂ 的处理^[5]。从表 1 看出，

气化所得的合成气在净化后再燃烧，SO₂ 和 PM₁₀ 都是没有问题的，只要燃烧过程控制得好，NO_x 可比常规煤粉炉电厂大大降低。因此，问题的关键在于温室气体 CO₂ 的处理。由于用这个多联产系统所排放出来的 CO₂ 不像常规燃煤电站那样渗混在烟气 (含有 75% 以上的氮气) 中，而是十分清洁的纯 CO₂ (纯度达 99%)，这样，应用的范围就

大大扩展了。它可以作为化工原料生产化肥，制造干冰，促进植物生长或用于其它工业用途。近年来，在加拿大 Alberta 地区，正在利用 CO₂ 来强化煤层气 (CBM) 的开采。实验表明，煤作为一个微孔物质，它对 CO₂ 的吸附性要大于 CH₄，所以把 CO₂ 注入深层煤 (2 000 m 深，在几十年内不准备开采的)，可得到宝贵的 CH₄，同时又把 CO₂ 埋存了。目前世界上针对 CO₂ 的埋存 (Sequestration) 有很多研究，如把它压缩以后注入深海，注入废弃的油田和天然气田，注入地下含水层等。但这个问题还只是一个初步的设想，真正实施尚需做详细的经济、技术和环境分析。不管怎样，在利用煤时得到纯 CO₂，处理起来相对难度要小得多。

4) 这个系统的最核心一点是所列举的产品 (电、热、冷、化工产品)，它们的生产过程在多联产系统中不是简单的叠加而是有机的耦合和集成，从而比各自单独生产可以简化工艺流程，减少基本投资和运行费用，降低各个产品的成本，调节多个产品 (尤其是发电) 之间的“峰—谷”差，使得各流程优化运行，减少污染。

5) 这个系统高度“灵活”和“开放”，在中国

具体情况下，在煤炭丰富地区，建立这类系统是十分有利的。在具体实施中，可以按照技术进步和投资大小逐步推进，如先实施热、电、甲醇联产，然后再逐步扩大。

图4中所示的只是多联产系统的耦合的大框架，各个相关系统之间的详细物质流、能量流、信息流以及多目标 (技术、经济、资源利用、环境) 优化，须通过复杂系统的研究，并根据当地的具体情况，加以解决。

3 多联产系统中几个可实施的耦合示例

3.1 与发电结合的一步法甲醇生产工艺流程

常规方法是用液相反应来生产甲醇 (图5)。从反应过程来看，合成气进入反应器后，有很大一部分 CO 需要通过变换反应



转化为氢气，以达到甲醇合成过程所要求的进料化学计量比：

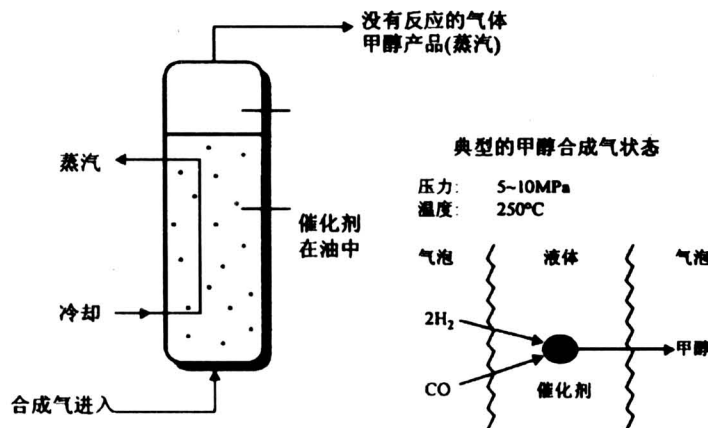


图5 一步法生产甲醇

Fig.5 Once-through production of methanol

通常，参加反应的 CO 只有一小部分 (< 10%) 可以生成甲醇，大量未反应的气体需经分离后，反复、多次进行循环反应，以提高甲醇收率。这样，生产甲醇的工艺流程及设备就较复杂，并要额外消耗分离、循环用的能量。而在多联产系统中，一氧化碳只进行单程 (或称之为一步，英文为 once through) 反应，未反应的合成气不再送回反应器，而是送入燃气/蒸汽联合循环电厂进行动力

利用，这样就避免了设备投资和运行耗费大的多次循环的需要。

3.2 与发电结合的 F-T 工艺流程

和甲醇生产一样，煤间接液化的 F-T 过程也可以是一步法，用不着为了提高收率进行多次循环，而把未反应的合成气引入燃气轮机燃烧室发电 (见图6)。当今，最先进的液相反应器单程转化率可达 80%。避免多次循环转换可以大大降低设备

投资和系统复杂程度，减少运行费用，其经济性是显而易见的。

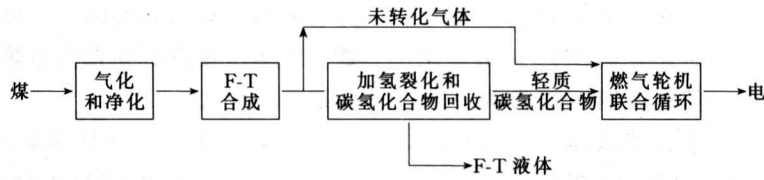


图 6 单程 F-T 液体和电力联产

Fig.6 Co-generation of F-T liquid fuel and electricity with once-through method

类似的思路还可以用于优质柴油的替代燃料二甲醚 (DME) 的生产中。

3.3 把多联产系统所排出的 CO₂ 注入深煤层

合成气通过蒸汽重整转换成 CO₂ 和 H₂，经廉价的膜分离以后，所获得的 CO₂ 可注入深煤层以强化煤层气的开采，这样做所得到的经济和环境效益是十分明显的：

如图 7 所示，1.56kmol 的煤经气化和蒸汽重整以后得到 2.18kmol 的 H₂ 和 1.54kmol 的 CO₂，把后者连同用 CBM 作原料的制氢厂排出的 0.46kmol 的 CO₂ (共 2.0kmol) 注入深煤层，可以

“挤”出 1.0kmol 的 CBM。用“挤”出的 CBM 制氢和发电 (用于内部工艺过程需要)。这种配置，从能量平衡来看，含 806.8MJ 热量的煤，可获得 1136MJ 热量的氢气 (用于燃料电池汽车或是城市热、电、冷联供)，以氢为载能体的能量增值了 41% (由于深煤层中有 1.0kmol CBM 的加入)，而 CO₂ 的排放只有 0.56kmol。从整个碳平衡来看，若是常规煤和 CBM 燃烧，共要产生 2.56kmol 的 CO₂，而现在只有 0.56kmol，是常规的 1/5，其环境效益是十分突出的。

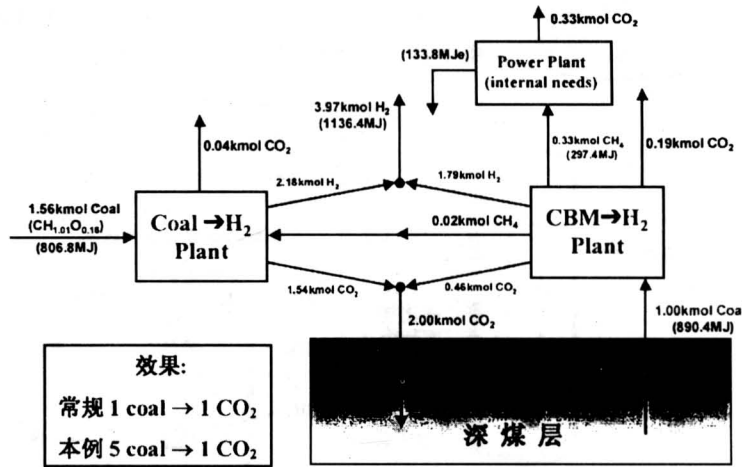


图 7 用 CO₂ 注入深煤层强化煤层气开采

Fig.7 Enhancement of CBM production using CO₂ injection

另一个方案是以制氢和发电并重，从煤制氢分离出来的 CO₂ 注入深煤层所得的 CBM 可用于高效发电 (燃气/蒸汽联合循环，热效率可达 58% ~ 60%) (见图 7)，这样做，整个系统对外排放的 CO₂ 可以减少 50% 以上，能源利用效率也很高。

3.4 和普通煤粉锅炉耦合，提供脱硫所需的 NH₃

对目前占绝大多数并还要制造和长期使用的煤粉锅炉来说，寻找低基本投资和低运行费用、减少二次白色污染 (低质石膏) 的烟气脱硫技术，是我

国发电工业的一项重要任务。能对 SO₂ 和 NO_x 一体化脱除的电子束脱硫技术不失为一种选择。但比较麻烦的是，电子束脱硫需要 NH₃ 水，这对通常单独运行的火电厂是一件不容易组织的事，但若和多联产结合起来，NH₃ 水的供应就不成问题了。同时，作为脱硫物副产品可以得到优质的肥料 (硫酸铵)，并且免除了二次白色污染。

3.5 多联产耦合的概念还可用于钢铁工业

目前正在发展的非高炉炼铁已是炼铁与能源转

换的综合。在这种新的工艺系统中，炼 1×10^6 t 铁，除铁矿外，需投入 1.3×10^6 t 煤，与此同时可得到大量的 CO 和 H₂，其中 CO 浓度为 48% ~ 80%，H₂ 浓度为 8% ~ 30%。这些气体通过适当的化工流程，可制成约 5×10^5 t 的 DME。

总之，只要打破行业界限，从全国的资源、能源/环境整体优化的高度来思考，还可以创新出更多、更新的多联产系统，在构建我国可持续发展的资源/能源/环境一体化系统方面做跨越式的前进。

4 多联产系统的效益

上面已提及一些多联产系统的效率与环境效益，下面，通过一些计算可以对热、电联产，热、电、甲醇三联产和热、电、甲醇、合成气四联产的经济环境效益给出一些定量的概念。这里还不涉及蒸汽重整生产 H₂ 用于驱动车辆和 CO₂ 注入地层强化 CBM 开采等内容。即使这样，其效益已十分可观了。计算的基本数据来自美国文献，每个产品的规模都是 400MW，或是电、或是热、或是甲醇、或是合成气。比较的基础是单独运行的现代煤粉锅炉电站发电以及单独的工业锅炉供热（其中，亦可含供冷）。

图 8 是热、电、生产三种情况的价格比较。若是热、电单独生产，则电价为 3.36 美分/kWh，热价为 1.5 美分/kWh，用煤粉锅炉的热电站，两者联供，维持热价不变，则电价下降为 3.06 美分/kWh；用 IGCC 热、电联供，则电价进一步下降为 2.44 美分/kWh。

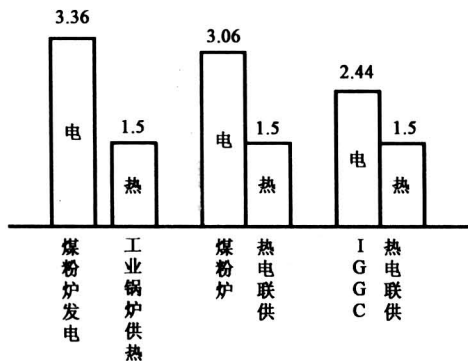


图 8 热、电生产三种情况的价格比较 (维持热价不变)

Fig.8 Economic comparison for different cases of heat and electricity cogeneration

图 9 为热、电、甲醇三联产两种情况下的价格

比较。若 IGCC 热电联供，另外单独生产甲醇，则甲醇的价格为 12 美分/L，若是用 IGCC 为中心的热、电、甲醇三联供，由于生产甲醇的工艺流程和设备简化，在维持热、电价格不变情况下，甲醇的价格可降至 7 美分/L，下降幅度为 40%。

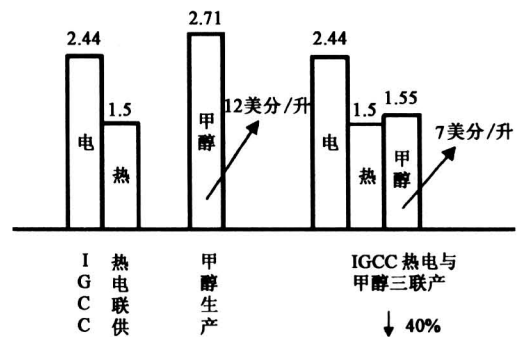


图 9 热、电、甲醇三联供两种情况的价格比较

Fig.9 Economic comparison for tri-generation of heat, electricity and methanol

图 10 是热、电、甲醇、合成气四联供两种情况的价格比较。若 IGCC 为中心热、电、甲醇三联供，另外合成气单独生产，则合成气的价格为 4.8 美元/GJ，若是结合在一起实行四联供，由于规模效应，在维持热、电、甲醇不变情况下，合成气的价格可降至 2.6 美元/GJ，下降幅度为 46%。

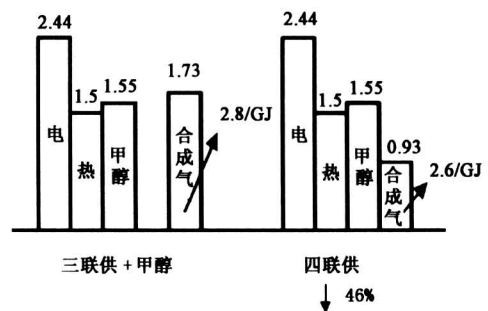


图 10 热/电/甲醇/合成气两种情况的价格比较

Fig.10 Economic comparison for quad-generation of heat, electricity, methanol and syngas.

归纳起来，若以四种产品分别生产为比较基础，四联产从基本投资，产品价格，作为原料煤的消耗有图 11 所示的初步定量结果：基本投资下降

38%，单位能量价格下降 31%，煤耗量下降 22.6%，CO₂ 的排放亦相应减少 22.6%。

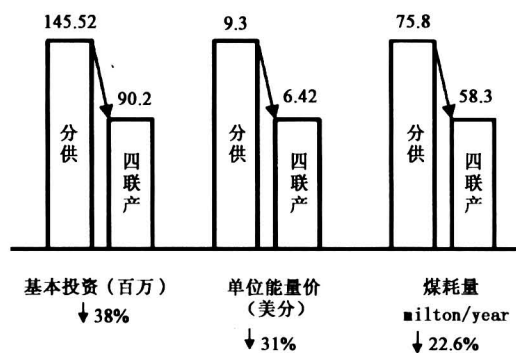


图 11 四联产的基本投资，价格和资源/环境效益

Fig. 11 Benefit of investment, energy consumption and environment for quad-generation

当然，以上是比较简单的计算，针对具体情况对数据必须加以调整，但是多联产系统（最初的四联产）的资源/能源/环境的效益是十分明显的。

西部大开发是 21 世纪我国的一个伟大工程，但若只是单纯利用西部的天然资源，只是资源输出，肯定不会从根本上改变西部地区落后的现状，一定要有新的思路，采用新的技术，使资源增值。多联产系统的概念是一个有益的启示。

另一方面，由于 SO₂ 的污染（疾病、酸雨等），我国很多地方限制燃用高硫煤，这样，有很多高硫煤地区（西南的贵州，四川）煤矿生产就面临很大困难，资源无法利用，设备闲置，工人下岗等，引发很多经济和社会问题。利用多联产战略就可以使原来的资源得到充分利用，得到增值，环境友好，对这些地区的开发大有好处。

5 多联产系统的关键技术和科学问题

这个系统虽然比较庞大复杂，但其绝大部分是现有成熟系统和技术、设备的优化集成，全国从运行到设备制造都已积累了大量经验和能力，设备的绝大部分（80%以上）均可在国内生产。需要研究开发的可以分成两大部分，一是系统方面的问题；二是关键设备和部件。

5.1 系统方面

因为多联产系统是一个跨行业、跨学科的巨大

复杂系统，由于各个生产过程在物质流、能量流、信息流、价值流的相互交叉、耦合，其复杂程度远远超过单个产品的生产（实际上，现代化电厂、化工厂本身已是一个巨大复杂系统）。此外，还有更多外界条件的制约，如资源的数量与质量，开采的难易，交通运输，市场的供需、环保标准和收费……，这些因素是时变的，非线性的，所以从系统工程角度有大量的科学问题要进行研究，如多层次集成建模，各生产过程资源/经济/环境的最优耦合，各种不同联产系统，不同配置下的经济与环境的全生命周期分析，复杂系统的稳态和动态特性，多目标的最优控制与运行，巨大复杂系统运行的鲁棒性、安全性，实时监测控制系统和海量数据的处理等等。

为此必需构筑一个计算机平台，有丰富的模型库，包括多个生产过程和主要设备的动、静态模型；可以任意连接各个生产过程和设备的流体网络；有多目标优化的算法和全生命周期分析；有分析能量有效利用的熵分析和夹点技术；各个小系统和整个系统的鲁棒性分析；各个小系统和整系统的控制策略；要把先进的方法，如人工神经网络，遗传算法，包括非线性系统的最新成就（混沌、分形、班图等）引入进来。用这样的平台可对多联产系统进行全面分析。

5.2 在关键设备和部件方面

大致有以下几个主要需要下大功夫研究的问题：

气体分离的膜技术 在多联产系统生产的各个阶段需要各种气体的大流量、低能耗、廉价的分离。例如，在用于 IGCC 的煤的气化中，空气中氧和氮的分离，用目前的空分装置耗能很大，空分耗能占整个发电量的 15% 以上。再如，CO₂ 和 H₂ 的分离，合成气经蒸汽重整后所得的 CO₂ 和 H₂ 用金属和非金属（陶瓷）膜加以分离^[6]，使之比目前的变压吸附方法降低成本。在膜工程方面应有新的思路，如把催化和分离结合起来，这是一个突破口。

新工艺技术 一步法液相催化反应工程与技术（甲醇，F-T 液体，二甲醚）；各个产品的新的工艺流程、新的环境友好的催化剂和催化工程、反应工程（甲醇、DME、烯烃……）；先进的高温（如固体氧化物 SOFC）和低温（质子交换膜 PEM-FC）燃料电池技术，前者可用于分布式热、电、冷联

供，后者用于车辆。

先进的高温、高效燃气轮机 21世纪的化石能源和资源的利用均以燃气轮机为核心。我国已在着手研究、部署先进燃气轮机在我国发展的战略，近期恐仍以引进或合作生产为主。这是我国在能源领域面临的重大挑战。

氢气的存储和基础设施管道材料 氢气作为新的零排放的载能体前景十分吸引人，但其储运、分配是应用上的瓶颈，必须加速研究灵活、方便、低价格的氢的储运新技术。我国在碳纳米管和纳米石墨球储氢，超级活性炭吸附储氢，镁基复合材料储氢方面都有自己的特色，国际上也正在起步阶段，应加大投入。该技术是能源领域跨越式发展的重要方面。

CO₂ 的处理和应用 应尽量开辟 CO₂ 的应用领域。作为化工原料，促使植物和海藻生长是一个方面。此外，在 CO₂ 注入深煤层以强化 CBM 开采方面可以开展国际合作（如加拿大 Alberta 地区），申请世界组织的基金，在国内有条件的地区做生产性试验等。对把 CO₂ 注入采空的油田、天然气田与含水层应作详细的前期技术经济分析。

6 多联产系统发展所需的政策支持和起步建议

因为多联产系统是一个跨行业的大系统，需要多行业从国家整体利益的高度加以支持和协同才得以发展，因此首先应打破行业界线，提高认识。

计委、经贸委、科技部把多联产系统纳入有关计划，多层次加以安排、联合和推动，如国家重点基础研究规划，重点在基础理论上；863 和攻关计划，可支持建立一个开放性的工业示范系统。此外，还需在有关政府领导部门总体协调下，制定一定的优惠政策，因为任何新的系统都有一个逐步完善过程和价格下降过程，不应新的系统从一开始就提出过高的要求。

电力部门要放松各种电力生产者的上网限制，并给予合理的价格，这是电力市场改革的核心问题。

如何起步？有两个起步点，一是在煤资源丰富地区，从煤为原料实施多联产，以地区有关部门操作为主。作为第一步可以在市场调查的基础上，先实施电力、甲醇、合成气联产，以后随着经验的增加和资金改善，逐步扩大联产内容，这个起步点的选择可以成为西部大开发的一个重要内容，亦为今后更完善的多联产系统的推广起示范作用。二是在加工高硫原油的石化企业附近，建立以石油焦或是高含硫渣油为气化原料的多联产系统，以排除高硫原油炼制所带来的困难。

结合我国在气化方面已取得的，具有自己知识产权的成果（中国水煤浆气化与煤化工程研究中心和上海华东理工大学合作），联合我国在煤气化和煤化工领域的优势单位，在多联产系统方面走出自己的路子。

提高煤的综合清洁利用，减排温室气体是世界关注的大问题，可以设法取得国际组织（如 UNDP, World Bank, GEF……）的资助；开展国际合作（和国外有经验的大公司和有多联产有较深入研究的大学）；从现在开始，对多联产系统做详细、深入的软科学方面的研究。

参考文献

- [1] Report to the president on federal energy research and development for the challenges of the twenty-first century [R]. President's Committee of Advisors on Science and Technology, Panel on Energy Research and Development, 1997, 4~5
- [2] Anderson B. Coal gasification—a viable and economic alternative for China [C]. CCICED Meeting, 1999
- [3] Graedel T E, Allenby B R, Industrial energy [M]. Englewood Cliffs, NJ Prince Hall, 1995
- [4] 焦树建. 论 IGCC 技术在石化企业中的应用 [J], 燃气轮机技术, 1999, 12 (4): 8~15
- [5] Robert H, Williams. A zero emissions strategy for fossil fuels. Paper presented at Ballard power systems, May, 2000
- [6] Robert H, Williams. Toward zero emission for coal (roles for inorganic membranes). International symposium toward zero emission, Rome, Italy, 1999

Poly-generation Energy System Based on Coal Gasification —Integrated optimization and sustainable development of resources, energy and environment

Ni Weidou, Li Zheng, Xue Yuan
(*Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

[Abstract] Environmental pollution has become the bottleneck of the sustainable economic development of China. The existing energy system is not suitable for sustained need. China has to use coal as the main primary energy for quite a long term. Under such special conditions, it is an urgent strategic problem to be studied and carried out step by step from now on to plan and construct the integrated sustainable energy system with optimal benefits in resource, energy utilization and environmental emission. By introducing the international study and new development in sustainable energy systems, this paper puts forward that poly-generation strategy based on coal gasification is the trend for future development of China's energy industry. Some possible examples for poly-generation and coupling of processes are introduced and their benefits are analyzed. The potential key technical and scientific problems in poly-generation are also pointed out. Finally, the starting procedure, government role and policies for implementing poly-generation strategy in China are proposed.

[Key words] sustainable development; poly-generation; gasification; energy system

《中国工程科学》2000 年第 9 期要目预告

- | | |
|---|---|
| 组织工程学——现代生物生命科学的前沿
..... 张涤生
脉冲 X 射线模拟源技术的发展 邱爱慈
面向 21 世纪的柔性制造技术 邓宏筹
中国酸雨对陆地生态系统的影响
和防治对策 冯宗炜
铸件凝固过程的宏观及微观模拟
仿真研究进展 柳百成
关键技术的突破 促进塔里木气
区的发现 邱中建
创新思维在工程中的应用 周世宁
知识论框架
通向信息—知识—智能统一的理论 ... 钟义信 | 瘦肉猪育种的发展与展望 熊远著
多阶段系统多目标优化的模糊优选动态
规划方法及应用 熊德琪 殷佩海
设周边缝对小湾高拱坝工作性态的影响 ...
..... 杜成斌等
基于混沌振动力学的压路机工程
..... 龙运佳 杨 勇 王聪玲
工程移民决策支持研究 ... 王家耀 姚松龄
废聚丙烯制取汽柴油馏分技术研究
..... 冀 星 钱家麟 王剑秋
面向 21 世纪的稀土工业 杨遇春
气象通讯网络和计算机系统工程
..... 李 黄 王春虎 |
|---|---|