

坑口煤制代用天然气的技术经济性分析及发展路线构思

王明华, 李 政, 麻林巍
(清华大学热能工程系, 北京 100084)

摘要:我国天然气供需矛盾日益突出, 价格不断上涨, 供应安全问题也逐渐显现, 而利用较为丰富的煤炭资源制取代用天然气(SNG)将是符合我国国情的可能解决途径之一。本文在描述国外煤制 SNG 发展现状和趋势的基础上, 采用 ASPEN 软件对霍林河商品褐煤制 SNG 工艺流程进行了模拟计算, 并分析了生产 SNG 的技术经济性。对我国今后发展坑口煤制 SNG 的发展方向、发展路线、发展机制提出了一些构思和建议。

关键词:代用天然气(SNG); 煤制 SNG; 技术经济性分析; 褐煤

中图分类号: TQ517.2

文献标识码: C

文章编号: 0253-4320(2008)03-0013-04

Technical and economic analysis on pithead coal to substitute natural gas system and its developing route in China

WANG Ming-hua, LI Zheng, MA Lin-wei

(Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The contradiction between supply and demand on natural gas has been increasing obviously, and the rising price and the issue of energy security is also becoming apparent gradually. So using abundant coal resources to produce the substitute natural gas (SNG) is one of the important ways to resolve the problem. Based on the development status and trends of "Coal To SNG" in foreign countries, the system of "Coal To SNG" is simulated by ASPEN used for huolinhe lignite and its technical economy was analyzed about SNG's cost in this paper. Under the premise of a "win-win" mechanism, the future development of China's "Coal To SNG" is brought forward with some ideas and suggestions in the development direction, route and mechanism.

Key words: substitute nature gas; coal to SNG; technical and economic analysis; lignite

随着社会、经济的快速发展, 我国天然气需求急剧攀升, 在能源结构中的比例迅速增加。而国内天然气仍处于勘探开发早期, 进口也处于起步阶段, 供应能力建设严重滞后, 导致天然气供需矛盾日益突出。预计到 2010 年, 我国天然气需求量将达到 1 000 亿 m^3 ; 到 2020 年, 需求达 2 000 亿 m^3 , 届时需求缺口可能达到 800 亿 m^3 , 天然气供应安全问题也将逐渐显现。在价格方面, 当前我国石油与天然气价格之比为 1:0.24, 国际市场为 1:0.6, 国内天然气价格还没有真正反映天然气资源的稀缺程度和能源品质优势, 国家发展和改革委员会计划以 5% ~ 8% 的年增长速度调整天然气价格^[1]。

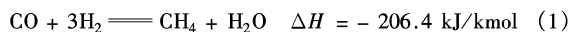
因此, 国内天然气供应将长期存在资源短缺、价格上升以及能源安全等问题, 由此为坑口煤制 SNG 技术的应用提供了一个契机; 它可利用我国资源优势相对较大的煤炭, 尤其是褐煤等劣质煤炭, 通过煤气化、甲烷化, 生产代用天然气。这样不仅能解决劣

质煤炭不适于长距离运输问题, 促进煤炭的高效、清洁利用; 而且可利用已有的天然气管道, 以较低的经济代价, 有效缓解天然气的供需矛盾, 这是劣质煤炭资源进行综合利用的有力措施。

1 甲烷化反应的原理、应用状况与发展趋势

1.1 原理

一氧化碳加氢合成甲烷属于多相催化气相反应, 基本的反应式是:



此反应使用含钴或含镍催化剂, 在 200 ~ 350℃ 下 CO 催化加氢为甲烷, 是 F-T 法合成烃类的一种特殊情况^[2]。甲烷化反应相当于燃料的转化过程, 可使反应前后的能量密度由 11.28 MJ/ m^3 提升到 35.9 MJ/ m^3 。

1.2 应用状况

甲烷化技术通常用于如下 2 种情况: ①用于脱除工艺气体(如精制 H_2 或合成氨原料气)中少量的

收稿日期: 2007-11-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2005CB221207); 国家自然科学基金重大研究计划项目(90210032)

作者简介: 王明华(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事双气头多联产系统设计与分析研究, wang-mh05@mails.tsinghua.edu.cn; 李政(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事热力系统仿真、多联能源系统建模及战略研究。

CO 和 CO₂;②城市煤气中 CO 因甲烷化而被解毒。

在 20 世纪 70 ~ 80 年代,美国 and 欧洲利用甲烷化反应,从煤基合成气来制得 SNG,以确保天然气的长期供应。Great Plains 合成燃料公司源于 70 年代美国能源危机,于 1981 年开始建设,1984 年生产出 SNG,年耗原煤 600 万 t,该工艺采用 14 台 Lurgi 流化床气化炉(其中 2 台备用),可副产 1 200 t/d 的无水氨,5 000 t/d 高纯度的 CO₂ 供给加拿大油田用于提高石油采收率(EOR)^[3]。

1.3 发展趋势

由于受到大规模煤气化技术的限制,以及不久之后勘探到大量的天然气资源,此技术的发展停留在了示范阶段,未得到广泛应用。但如今,随着天然气价格不断上涨,一些以天然气为原料的企业承受不住价格风险而纷纷寻找新的出路。另外,以 Texaco 和 Shell 等为典型代表的第二代喷流床气化技术已得到广泛的工业应用,这使得煤炭的大规模综合利用有了保证。

目前在国内外拟建的煤制 SNG 项目有:①GE 公司的 Texaco 气化炉和丹麦 Haldor Topsoe 公司的甲烷化技术,将应用于伊利诺斯州的 Power Holding's 煤气化厂生产 SNG,已于 2007 年 1 月动工,预计 2010 年“煤制天然气”项目将建成,年处理 400 万 ~ 450 万 t 煤^[4]。②美国 Steelhead Energy 公司拟于 2008 年开工建设一座日投煤量 1 万 t 的 SNG-电联合工厂,发电规模 600 MW,SNG 产量 269 万 m³/d;采用 E-gas 气化炉和 2 台 200 MW 的 Siemens W501FD 型燃用中低热值煤气的燃气轮机,将于 2011 年完成^[5]。③大唐国际克什克腾煤制天然气项目,利用周边储量丰富的褐煤和当地的水资源条件,生产天然气及其他副产品,预计 2010 年下半年投产。

由此可见,甲烷化反应是一项成熟的技术,具有长期的工程应用基础,又具有大规模开发的前景,从当前中国能源发展形势来看,已经迎来了一个快速发展的重要契机。为了对煤制 SNG 过程有一个具体的认识,本文对霍林河商品褐煤制 SNG 工艺流程中各关键物流的物质和能量平衡关系进行了 ASPEN 模拟计算;在此基础上,借鉴国外甲烷化技术和国内 IGCC 技术的投资数据,对中国坑口煤制 SNG 进行了初步的技术经济性分析。

2 基于 ASPEN 流程模拟的坑口煤制 SNG 技术经济性分析

2.1 坑口煤制 SNG 系统流程模拟

煤制 SNG 的工艺流程如图 1 所示。从气化炉

来的激冷合成气送入水煤气变换反应器,以调整甲烷合成所需要的氢碳比;再进入脱硫、脱碳单元,收集高纯度 CO₂,并通过 Claus/SCOT 装置回收单质硫;干净的合成气送入甲烷化反应器以生产 SNG,小部分合成气作为干燥煤用的燃料;甲烷化过程放出的大量热用于产生高压蒸汽,驱动蒸汽轮机发电。

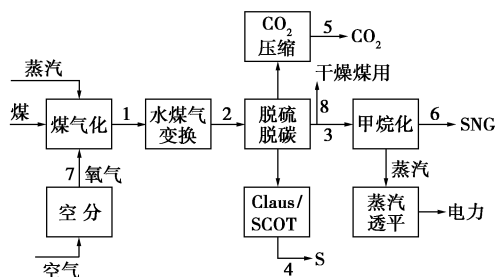


图 1 煤制代用天然气流程示意图

2.1.1 计算基准

煤种采用内蒙古霍林河商品褐煤,其成分及低位热值见表 1^[6]。气化煤量 7 500 t/d,采用干煤粉气化炉,CO₂ 为输送介质,激冷流程;无备用气化炉,全厂可用率取 90%。

表 1 霍林河商品褐煤的成分及低位热值

C _{ad}	H _{ad}	O _{ad}	N _{ad}	S _{ad}	A _{ad}	M _{ad}	Q _{net,ar} /MJ·kg ⁻¹
48.14	3.45	13.83	0.84	0.46	23.40	9.88	13.48

2.1.2 关键物流参数及分析

按图 1 中标识的各关键物流号所对应的流程模拟参数如表 2 所示,可以发现,煤制 SNG 过程可以产生 3 种主要的副产品:电力、CO₂ 和单质硫。

表 2 煤制 SNG 流程中各关键物流参数

物流号	1	2	3	4	5	6	7	8
组成(摩尔分率)								
CO	0.2819	0.1651	0.2475					0.2475
H ₂	0.1273	0.4954	0.7397			0.0083		0.7397
CH ₄			0.0001			0.9382		0.0001
H ₂ O	0.5602							
CO ₂	0.0261	0.3321	0.0053		1	0.0252		0.0053
H ₂ S	0.0015	0.0024						
O ₂								99.9
N ₂	0.0031	0.0050	0.0074			0.0283	0.1	0.0074
S					1			
流量/ kmol·h ⁻¹	35502	21991	13886	49	6636	4005	4634	696
温度/°C	205	40	200			260	280	200
压力/MPa	3.0	2.7	2.5	0.1	13.6	2.0	4.0	0.1

在本文的研究中,主产品 SNG 的年产量为 6.68 亿 m³,甲烷含量为 94% 的高质量 SNG。通过对甲烷化过程热量利用产生的电力,除厂用外,还可对外输送 8 MW;高纯度 CO₂ 收集率为 90.8%,日产 7 007 t,单质硫年产 11 603 t,全厂一次能源综合利用效率(HHV)为 61.5%。

2.2 坑口煤制 SNG 的经济性分析

对流程模拟所展现的坑口煤制 SNG 系统进行经济性分析,SNG 成本估算公式为^[7]:

$$\text{SNG 成本} =$$

$$\frac{\text{投资费用} \times \text{CRF} + \text{年操作费用} - \text{副产品年销售收入}}{\text{SNG 年产量}} \quad (1)$$

其中 CRF 为年平均投资费用率,计算公式为:

$$\text{CRF} = \frac{i}{1 - (1 + i)^{-n}} \quad (2)$$

其中 i 为贴现率, n 为生产年限;年操作费用包括每年的燃料费用和运行维护费用。

2.2.1 计算假定

工程生产年限为 25 年,贴现率取 10%;原料价格:褐煤 100 ~ 200 元/t;副产品价格:电价 0.30 元/kWh,硫磺 700 元/t,CO₂ 50 ~ 100 元/t。

2.2.2 SNG 成本估算与分析

表 3 为煤制 SNG 的投资与运行维护费用估算,相应的数据来自文献[7-9]。

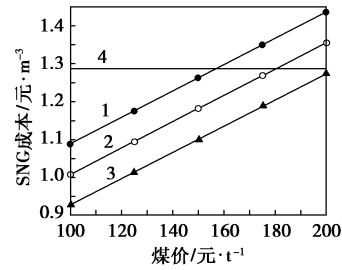
表 3 煤制 SNG 总投资与运行维护费用估算

百万元/年

投资费用		运行维护费用	
煤的预处理	360	原料煤	232 ~ 464
煤气化	560	消费品	23
空气分离	608	工资福利	59
S 脱除及回收	184	税收/保险	70
水煤气变换	160	维护	82
CO ₂ 脱除及压缩	368	副产品收入	
甲烷化	520	S	- 8
发电	400	CO ₂	- 216 ~ - 108
水处理	104	电	- 18
辅助设备	328		

图 2 为褐煤和 CO₂ 价格对 SNG 成本的敏感性分析。可以看出,随着煤价的下降和 CO₂ 销售价格的增加,SNG 的成本是下降的,且都低于 1.5 元/m³;当随着煤价的进一步下降和 CO₂ 销售价格的上升,还可低于 1.29 元/m³(2002 年原国家计委规定西气东输管道天然气平均价格)。由此可见,通过坑口煤

气化制 SNG 具有较好的经济可行性。



CO₂ 销售价格:1—50 元/t;2—75 元/t;3—100 元/t;4—西气东输

图 2 煤价和 CO₂ 销售价格对 SNG 成本的影响

3 我国发展坑口煤制 SNG 的构思

3.1 发展方向

煤制 SNG 可以高效清洁的利用我国较为丰富的煤炭资源,尤其是劣质煤炭;还可利用生物质资源,拓展生物质的利用形式;使得 SNG 具有作为中小城市民用燃料的可行性,这对提升城市现代化建设水平、提高人民生活质量具有一定的推动作用,并为集中收集分散的 CO₂ 排放源提供了技术可行性。根据我国国情和国外经验,建立煤制 SNG 工厂从选址、风险和规模上应具有一定的选择,并由于其具有 CO₂ 减排优势和提高能源安全作用,故可以争取政策上的扶持。

选址:煤炭(特别是劣质煤炭,如褐煤等)资源丰富地区,附近具有天然气管道、CO₂ 管道(或离油田较近)或适于地理埋存地质。

风险:与相关公司(如燃气公司和油田等)签订固定价格规律的长期供应合同,减轻价格波动对企业造成的风险。

规模:能满足一个中等城市工业及民用燃料需求,如山西太原。

政策:政府提供低息贷款。

另外,对坑口煤制 SNG 过程中的关键技术问题(如甲烷化反应器及催化剂等)进行探讨和解决是十分必要的;因为随着天然气的大力普及、价格的不断提高和管网的广泛发展,煤制 SNG 技术路线在稳定天然气供应和增强能源安全等方面将会发挥重要的作用。

3.2 发展路线

在我国发展煤制 SNG,各项常规技术已有较广泛的应用和发展,如水煤浆气化和干燥粉气化、空分、耐硫变换、脱硫脱碳、锅炉和汽机等技术。甲烷化反应器及催化剂在传统应用中也取得了一定的经验,而大规模应用可以借鉴国外成熟技术。为此,扎实稳步的在中国推进煤制 SNG 发展路线,无论是对

新技术储备,还是对已有技术推广,都将具有积极的推动意义。煤制 SNG 分为近期、中期和远期 3 个发展阶段,各个阶段的形式和主要研究内容如表 4 所示。

表 4 煤制 SNG 各个发展阶段的目标和主要研究内容

阶段	目标	主要研究内容
近期	基础技术研发	前期资源及能源消费结构论证,单元技术研究(特别是甲烷化反应催化剂选择及反应器设计),系统集成方案比较
中期	示范项目	地域的选择,中试规模,成本估算,环境影响评价,运行模式——单产还是联产的确定,政策机制的建立
远期	大范围推广、产业化	单元技术的大型化,总体规模,产品成本,政府/企业效益

作为煤炭储藏的大省,山西正在积极发展煤化工等增值项目,如在山西南部建立煤制 SNG 工厂,则可利用西气东输管道,将生产的 SNG“上网”,以补充我国东部对天然气的大量需求,收集的高纯度 CO₂ 可以输送至中原油田、胜利油田或河南油田以提高石油采收率;如在山西北部建立煤制 SNG 工厂,则可建立一条通往北京的 SNG 管道,为北京工业及民用燃料提供气源,降低天然气对外依存度和稳定其价格都将有积极的意义,收集的高纯度 CO₂ 可以输送至华北油田、胜利油田或大港油田以提高石油采收率。

3.3 发展机制

煤制 SNG 项目的顺利实施必须牵涉到政府、燃气公司和企业本身,他们之间的利益以及整个项目带来的公共利益,经分析如表 5 所示。由此可以看出,工程本身具有“双赢”机制,能带来较大的公共利益。

表 5 “双赢”机制

单位	支出	收益
政府	低息贷款	CO ₂ 排放指标,能源安全,稳定价格,提供工作岗位
燃气公司	固定价格规则的 SNG 购买合同	具有政府担保的价格机制,长期供应的稳定气源
企业本身	研发、建设;运行、管理和维护;基本投资	合理的风险与投资回报
公共利益	劣质煤炭的开发利用,提升技术储备,气源与价格长期稳定,降低天然气对外依存度,CO ₂ 减排、EOR 和地理埋存研究,污染物的低排放,水资源的低消耗,增加就业机会	

4 结论和建议

本文通过对坑口煤制 SNG 系统研究及在我国

发展的构思,得到如下的结论:

(1)通过 ASPEN 软件对煤制 SNG 流程的模拟计算,结果表明,7 500 t/d 霍林河商品褐煤可制取 SNG 6.68 亿 m³/a,并副产高纯度 CO₂ 7 007 t/d 和单质硫 11 603 t/a,全厂 HHV 效率为 61.5%。

(2)经济性分析表明,如果煤价下降和 CO₂ 销售价格提高,SNG 的成本是下降的,且都低于 1.5 元/m³;当在煤价较低、CO₂ 销售价格较高的情况下,SNG 的成本可以降低到西气东输的天然气价格。

(3)今后我国发展坑口煤制 SNG,在建立完善的“双赢”机制的前提下,在发展方向上,应注意选址、风险、规模及政策等因素;在发展路线上可实施“三步走”战略。

总而言之,坑口煤制 SNG 是高效清洁利用中国较为丰富的煤炭资源,来生产短缺的天然气,然后并入天然气管网;再利用已有的天然气管道和 NGCC 电厂,在冬天供暖期间,将生产的 SNG 供给工业和民用作为燃料用于供暖;在夏天用电高峰时,部分 SNG 用于发电;在非高峰时期,可以转变为 LNG 以作战略储备;从而省去了新建燃煤电厂或改建 IGCC 电厂的投资和建立铁路等基础设施的费用,并保证了天然气供应的渠道和实现了 CO₂ 的减排。由此可见,煤制 SNG 是一举数得的有效措施,有望成为未来劣质煤炭资源和生物质资源等综合利用的发展方向。

参考文献

- [1] 陈亮.发改委给天然气涨价定调 加快与国际接轨步伐[EB/OL][2006-11-10].http://news.xinhuanet.com/fortune/2006-11/10/content_5311875.htm.
- [2] J 法尔贝,王杰,等.一氧化碳化学[M].北京:化学工业出版社,1985.
- [3] 唐宏青.碳一化工新技术概论[M].成都:氮肥与甲醇编辑部,2006.
- [4] Haldor Topsoe. From coal to substitute natural gas using TREMP™[EB/OL][2007-01-03].<http://www.topsoe.com>.
- [5] Steelhead Energy. New energy systems: Gasification technologies[EB/OL][2007-02-23].<http://www.crc.siu.edu>.
- [6] 尹立群.霍林河矿区褐煤的特性及其利用[J].洁净煤技术,2004,10(3):53-55.
- [7] 麻林巍.以煤气化为核心的多联产系统研究[D].北京:清华大学,2005.
- [8] David Gray, Salvatore Salerno, Glen Tomlinson. Potential Application of Coal-Derived Fuel Gases for the Glass Industry: A Scoping Analysis[C]. Virginia: Mitretek Technical Report, 2004: 1-19.
- [9] 何芬.IGCC 经济性估算[D].北京:清华大学,2006. ■