

专论与评述

# 我国煤炭液化技术产业化前景展望

杜铭华<sup>1</sup> 舒歌平<sup>2</sup>

(1. 煤炭科学研究总院北京煤化学研究所, 北京 100013; 2. 神华集团有限责任公司, 北京 100011)

**摘要:** 阐明了煤炭液化产业化对平衡能源结构, 解决石油短缺具有重要意义。认为我国煤炭液化产业化在技术上和经济上已经可行, 在中国有广阔的发展前景, 并指出了煤炭液化产业化需要解决的问题。

**关键词:** 煤液化; 产业化; 展望

中图分类号: TQ529

文献标识码: C

## Prospects for industrialization of coal liquefaction technology in China

DU Ming-hua<sup>1</sup>, SHU Ge-ping<sup>2</sup>

(1. Beijing Research Institute of Coal Chemistry, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. Shenhua Group, Beijing 100011, China)

**Abstract:** Industrialization of coal liquefaction technology is very important to balance the energy mix, and resolve the lack of petroleum resource. It is thought that industrialization of coal liquefaction technology has become applicable economically and technologically in China, and it has a bright future. Some problems that must be resolved in the industrialization are also pointed out.

**Key words:** coal liquefaction; industrialization; prospect

我国石油探明可采剩余储量仅有 33 亿 t, 储采比小于 22 年。1993 年开始我国已从石油出口国转变为石油进口国, 1997 年我国的石油净进口量超过 3 000 万 t, 1999 年达到 4 000 多万 t, 2000 年超过 6 000 万 t。如果没有非常重大的勘探发现, 可以预见, 我国石油产量不会有明显的增加, 大约维持在 1.6 亿 ~ 1.7 亿 t。随着国民经济的增长, 石油短缺在我国已成为不可回避的严峻现实。据保守估计, 到 2010 年国内石油供应短缺大约在 1 亿 t/a, 占消费总量约 38%; 到 2020 年, 短缺量大约 1.4 亿 t/a, 占消费总量的 44%; 到 2050 年, 短缺量及占消费量比例分别为 3.3 亿 t/a 和 77%。

我国的煤炭资源远比石油丰富, 到 1996 年底, 我国煤炭已探明的保有储量大于 10 000 亿 t, 经济可采储量 1 145 亿 t。

石油资源匮乏和国内石油供应不足已成为中国

能源发展的一个严峻现实, 随着国民经济的发展, 石油供需矛盾将呈持续性扩大趋势。煤炭作为相对充足的能源资源, 可获得性好, 价格低廉, 将煤转变为“优质”液体燃料, 逐步建成中国煤炭液化新产业, 正在成为国内能源界、科技界和经济界的共识。煤炭液化技术产业化对平衡我国能源结构, 解决石油短缺, 保证能源安全稳定供给具有重大战略意义和现实意义。

## 1 煤炭液化技术及进展

煤炭液化技术是将固体的煤炭转化为液体燃料、化工原料等产品的先进洁净煤技术。煤炭液化技术中又可分为煤的直接液化技术和煤的间接液化技术。

煤的直接液化技术是将固体煤在高温、高压下与氢反应, 将其降解和加氢从而转化为液体油类的

收稿日期: 2002-06-19

作者简介: 杜铭华, 男, 1952 年生, 研究员, 博士生导师, 煤科总院北京煤化所所长, 从事煤化学研究与煤化工工程开发, 洁净煤技术研究, 能源技术、经济研究; 舒歌平, 男, 1961 年生, 研究员, 博士, 原煤科总院北京煤化学研究所副所长, 长期从事煤炭直接液化技术研究, 现在神华集团煤液化技术部从事煤直接液化技术产业化工作。

工艺,又称加氢液化。煤直接液化油可生产洁净优质汽油、柴油和航空燃料。煤的直接液化工艺流程见图 1。

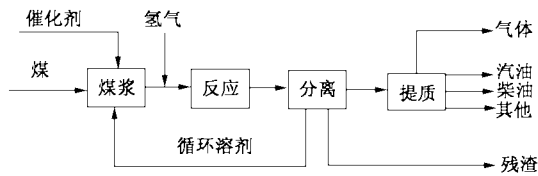


图 1 煤的直接液化工艺流程

该工艺是把煤先磨成粉,再和自身产生的液化重油(循环溶剂)配成煤浆,在高温(430~465℃)和高压(17~30 MPa)下直接加氢,将煤转化成汽油、柴油等石油产品,1 t 无水无灰煤可产 500~600 kg 油,加上制氢用煤,约 3~4 t 原煤产 1 t 成品油。

煤的间接液化技术是先将煤气化,然后合成燃料油和化工产品。煤间接液化工艺流程见图 2。

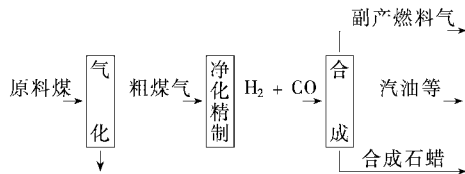


图 2 煤的间接液化工艺流程

煤间接液化工艺先把煤全部气化合成成气,然后在催化剂存在下合成为油品和其他化学品,约 5~7 t 煤产 1 t 油。

### 1.1 煤炭直接液化技术

煤炭直接液化技术的发展始于 20 世纪初的德国。1913 年,德国的柏吉乌斯(Bergius)首先研究了煤的高压加氢,从而为煤的直接液化奠定了基础,并获得了世界上第一个煤炭液化专利。1927 年,德国在莱那(Leuna)建立了世界上第一个煤炭直接液化厂,规模 10 万 t/a。1936~1943 年德国又先后有 11 套煤炭直接液化装置建成投产。到 1944 年,德国煤炭直接液化工厂的油品生产能力已达到 4.23 Mt/a,为德国在第二次世界大战中提供了 2/3 的航空燃料和 50% 的汽车和装甲车用油。当时的液化反应条件较为苛刻,反应温度为 470℃,反应压力为 70 MPa。在第二次世界大战前后,美国、日本、法国、意大利、原苏联等国也相继进行了煤的直接液化技术研究。

由于第二次世界大战的破坏,特别是 20 世纪 50 年代以后,中东地区大量廉价石油的开发,使煤炭直

接液化失去了竞争能力和继续存在的必要。美国在这段时间,做了大量的基础研究和开发工作。

1973 年后,由于中东战争,在世界范围内发生了一场石油能源危机,煤炭液化技术又开始活跃起来。德国、美国、日本等工业发达国家,在原有基础上相继研究开发了一些煤炭直接液化新工艺,其中的大部分研究工作重点是降低反应条件,从而达到降低煤液化油生产成本的目的。不少国家已完成了中间放大试验,为建立大规模工业生产厂打下了基础。表 1 为完成了工业性装置验证的煤直接液化工艺及运转情况。有代表意义的是德国的 200 t/d 新的二段液化(IGOR)工艺,美国的 600 t/d 氢煤法(H-coal)工艺和日本的 150 t/d NEDOL 工艺。

表 1 完成工业化装置验证的煤直接液化工艺及运行情况

国家	工艺	规模/ t·d <sup>-1</sup>	使用 时间	连续进 煤时间	累计进 煤时间	油收 率/%
美国	H-Coal	200~600	1980~1982 年 (3 年)	44 天 (1 056 h)	—	51
美国	SRC-II	50	1976~1981 年 (5 年)	—	—	44
美国	EDS	250	1980~1982 年 (2.5 年)	55 天 (1 321 h)	445 天 (10 692 h)	45
德国	IGOR	200	1981~1987 年 (6 年)	208 天 (5 000 h)	917 天 (22 000 h)	58
日本	NEDOL	150	1997~1998 年 (2 年)	80 天 (1 920 h)	259 天 (6 200 h)	58
日本	BCL	50	1987~1990 年 (4 年)	73 天 (1 760 h)	417 天 (10 000 h)	54

注:油收率为干燥无灰基煤的百分数。

德国新的 200 t/d 二段液化(IGOR)工艺特点是:①反应条件为温度 470℃,压力 30 MPa;②液化反应和液化油加氢精制在同一高压系统内,可一次得到杂质含量极低的液化精制油,操作成本和设备投资较低;③循环溶剂采用加氢油,供氢性能好,煤液化转化率高。

美国的 600 t/d 氢煤法(H-coal)工艺特点:①反应器采用沸腾床,并采用活性较高的钴-钼催化剂,煤液化转化率高;②由于反应器底部有重油循环泵,延长了重质油的反应时间,轻油产率较高。

日本的 150 t/d NEDOL 工艺特点:①由于循环溶剂采用预加氢,催化剂为合成硫化铁,故反应条件温和,温度 430~460℃,压力 17~20 MPa;②轻油产

出率高。

这些新液化工艺的共同特点是煤炭液化与老液化工艺相比反应条件大大缓和,降低了生产成本。煤炭直接液化作为曾经工业化的生产技术,在技术上是可行的,之所以目前没有工业化生产厂,主要原因是与廉价石油相比,其生产成本偏高。但是,权威机构预测,一旦石油价格达到25美元/桶,煤炭直接液化在经济上就有了竞争力。美国能源部通过几个起步工厂的初步经济分析后指出,如果煤炭直接液化厂通过与现有炼油厂建在一起,可节约投资,降低液化油成本,使生产的液体燃料的价格可以达到相当于石油19~23美元/桶。煤炭直接液化成本高的主要原因是一次投资大、煤炭价格高。但是,煤炭直接液化的研究和发展仍有潜力,还可进一步降低生产成本。

中国从20世纪70年代末开始开展煤炭直接液化技术研究,其目的是用煤生产汽油、柴油等运输燃料和芳香烃等化工原料。煤炭科学研究总院北京煤化学研究所通过国家“六五”、“七五”科技攻关和国际合作,已建成具有国际先进水平的煤炭直接液化、油品提质加工和分析检验的实验室,开展了基础研究和工艺开发,取得了一批科研成果。20年来,该研究所对中国的上百个煤种进行了煤液化试验,选择液化性能较好的27个煤种在0.1 t/d BSU装置上进行了53次运转试验,经过对试验结果的总结分析,选出了15种适合于液化的中国煤,液化油收率可达50%以上(无水无灰基煤),对其中4个煤种进行了煤炭直接液化的工艺条件研究,开发了高活性的煤液化催化剂。利用国产加氢催化剂,进行了煤液化油的提质加工研究,经加氢精制、加氢裂化和重整等工艺的组合,成功地将煤液化粗油加工成合格的汽油、柴油和航空煤油。煤炭液化技术在我国已完成基础性研究,为进一步工艺放大和建设工业化生产厂打下了坚实的基础。

1997~2000年,煤炭科学研究总院分别同德国、日本、美国有关政府部门和公司合作,完成了神华煤、云南先锋煤和黑龙江依兰煤在国外已有中试装置上的放大试验,以及这3个煤种的直接液化示范厂的可行性研究,为建设工业化生产厂打下了坚实的基础。

目前,神华煤直接液化项目已得到国务院的正式批准,年产250万t产品油的一期工程即将启动。在国家有关部门的大力支持下,神华集团将联合煤炭科学研究总院和石油化工科学研究院,结合神华

煤直接液化项目,对煤炭直接液化关键技术、煤液化催化剂、液化油提质加工催化剂以及具有中国自主知识产权的中国煤直接液化工艺进行研究开发。

## 1.2 煤炭间接液化技术

煤炭间接液化技术由煤的气化和费-托合成两大单元技术组成。总部设在南非约翰内斯堡的南非SASOL公司是目前世界上最大的煤炭间接液化企业。

SASOL公司成立于20世纪50年代初,1955年,该公司建成第一座由煤生产燃料油的SASOL-I厂。70年代世界石油危机后,1980年和1982年又相继建成了SASOL-II厂和SASOL-III厂。3个厂年用煤总计达4590万t,其中SASOL-I厂年用煤650万t, SASOL-II厂和SASOL-III厂年用煤3940万t。3个厂主要生产汽油、柴油、蜡、氨、乙烯、丙烯、聚合物、醇、醛、酮等113种产品,总产量达768万t,其中油品458万t,占60%,化工产品310万t,占40%。

SASOL公司有7个自属煤矿,煤炭年产量4900万t,除少量出口外,全部用于气化液化和发电。该公司还有一个炼油厂,年加工进口原油300万t。

SASOL公司应用的煤炭气化技术是德国鲁奇加压气化技术,整个公司有97台气化炉,其中SASOL-I厂有17台(13台MK III型、3台MK IV型和1台MK V型),SASOL-II厂和SASOL-III厂各有40台MK IV型气化炉。3个厂年气化煤合计3213万t。

鲁奇气化炉是固定床加压气化炉,使用的原料是6~75 mm的颗粒煤,操作压力在2.8~3.5 MPa,利用水蒸气和氧气作为气化剂。所得粗煤气中含有焦油、CO<sub>2</sub>、氨、硫化氢等杂质,所以煤气必须净化。采用水洗及低温甲醇洗等工序将煤气中的焦油、CO<sub>2</sub>、氨、硫化氢等除去,得到纯净的合成气。

在合成工段,合成反应器中装有催化剂,在250~350℃和2.5~3 MPa下,合成气经过催化反应得到汽油、柴油、蜡、烯烃、醇类产品,和未反应合成气的混合物。此混合物再经过一系列分离精制过程即得到各种产品。分离出的未反应合成气返回合成反应器。合成反应还副产甲烷、乙烷等气体,在分离后作为城市煤气输出。

合成反应器有两种型式,SASOL-I厂的合成反应器原来是固定床反应器,现改为浆态床反应器,反应温度较低(250℃),主要以生产柴油和蜡为主,合成催化剂主要是钴系催化剂,浆态床反应器和催化剂是SASOL公司开发的技术。SASOL-II厂和SASOL-III厂的合成反应器原来是循环流化床反应器,90年代改为公司自己开发的无循环的流化床反

应器(称为 SAS 合成反应器),其单台生产能力是原来循环流化床反应器的 2 倍。催化剂是 SASOL 公司开发的铁系催化剂,反应温度较高(350℃),主要生产汽油和烯烃等化工产品。

南非在白人统治政权结束后,世界已解除了对它的石油禁运。为了提高经济效益,SASOL 公司的产品结构已由原来的以生产油品为主变为逐步减少油品产量,增加生产化工产品的比重。

南非政府对 SASOL 公司一直有财政补贴和实行优惠政策,直至 1999 年才结束。

中国科学院山西煤化学研究所几十年来一直从事煤炭间接液化技术研究,在合成催化剂和反应器的研究上取得了重要成果,目前在国家有关部门的支持下将对费-托合成关键技术——浆态床反应器和催化剂进行重点研究,并建成千吨级合成油工业中试装置,并完成万吨级煤基合成油工艺设计软件包,提供高性能商品催化剂,为该技术的工业化奠定基础。

## 2 我国煤炭液化技术的经济可行性

中国多煤少油的能源格局和高油价低煤价的条件使得中国煤炭液化商业化前景完全不同于西方发达国家。煤炭科学研究总院与德国、美国和日本有关部门共同进行的中国煤直接液化可行性研究表明,根据不同的煤直接液化工艺和不同的建厂条件,拟建设中的煤直接液化厂的经济性有一定的差异,但差异不是很大。初步研究成果表明,建设一座年产 100 万 t 油的煤直接液化厂,总投资约 100 亿元人民币,全部投资内部收益率 8%~15%,投资回收期为 9~13 年,成品油生产成本 1 400~1 600 元/t,已显示出具有较好的经济效益。

煤炭间接液化技术在同等规模工厂条件下,其经济效益略差于直接液化技术,成品油成本大于 2 000 元/t。

1998 年开始我国原油价格已与国际原油市场接轨,煤炭液化工厂的经济性将受到国际油价涨跌的影响。如果国际市场原油价格在 20~25 美元/桶之间波动,中国的煤炭液化厂将有一定的获利空间。当然,如果国际市场原油价格大于 25 美元/桶,在中国建设煤炭液化厂的前景非常光明。

## 3 我国煤炭液化技术产业化存在的问题

### 3.1 煤炭液化产业化发展的资金问题

建设煤炭液化工厂的主要特点之一是规模较

大,投资较多,工程建设投融资已成为产业化发展的重点问题之一。

目前,国内对煤炭液化发展工作做得较多的部门是煤炭行业的一些大、中型企业或地方政府,其他行业的企业对此了解或参与的较少。作为新型产业的开发和建设,应积极引导国内能源(如煤炭、石油、化工、电力)以及其他行业有实力的大型企业或企业集团参与,以这些企业或企业集团的资金和绩效为基础,通过国内金融市场和境外金融市场实现多渠道、多种方式的融资。

煤炭液化产业同时又是一项战略性的能源基础产业,鉴于该产业的发展对今后几十年国家在能源安全、能源建设和经济发展方面的作用,从目前开始应考虑由政府建立有稳定来源的基金,这种基金的使用方向是确定的,但可由建成后的企业偿还或作为国有资本。特别对工业化示范项目,应通过政府资助、多边贷款、赠款和多渠道资本组合的方式筹集资金。对示范项目中关键技术的开发,政府应从国家的科技发展费用中给予重点扶持。

政府建立的有稳定来源的基金中的一部分应支持国内提高科研开发能力、建立煤炭液化技术创新体系,这一创新体系应包括现有的科研开发机构、企业技术创新部门和社会力量,形成持续性的国家级产业技术发展支撑。

国内经济和经济理论界应对发展煤炭液化产业给予足够的认识 and 关注,就国内外投融资和企业资本运营各方面进行研究并对重点项目给予指导和关注。

### 3.2 煤炭液化产业化发展的自主知识产权问题

国内近 20 年来,跟踪国外技术发展,在煤炭直接液化、间接液化两类技术方面已做了大量基础研究和开发工作,有良好的技术基础。但是,目前国内尚不具备向产业化发展提供成套技术和关键设备的能力,大型煤气化、煤高压加氢液化、气体催化合成、催化剂等关键单元技术还达不到为工业化建设提供支持的水平。

煤炭液化产业化发展势必需要国内科研及工业技术配套发展,这是由于引进国外技术建设世界上第一个现代煤直接液化工厂本身就是工业化开发的过程,从未来多个产业基地的建设和形成产业群的长远发展分析,完善和发展液化技术将是一个长期的过程。因此开发具有自主知识产权的煤液化技术不但是当前工业化建设的需求,也是未来几十年产业化建设和工业化生产的需求。

参照国外的开发经验和历程,组织国内的工艺研究、工程设计、装备制造等行业的研究开发力量,实现跨越式的发展,估计需大约5~8年时间完成国内煤炭液化技术开发,到“十一五”和2010年后,配合国内产业化建设的高峰期到来,逐步形成中国煤炭液化科研、设计、装备制造、工程建设、工厂运行的成套队伍和能力。因此可以认为,“十五”期间将是中国煤炭液化技术研究和开发的关键时期。若错过这一时机,将使国内技术在今后发展中处于竞争劣势,也必将影响或推迟煤炭液化产业化发展的进程,其损失将是巨大的。

### 3.3 煤炭液化产业化发展的风险问题

煤炭液化产业化的主要特点之一是一次性投资较大,这势必给煤炭液化产业化带来较大的风险,尤其是煤炭直接液化技术,虽然经过20多年的开发,其液化条件大大缓和,液化成本大大减低,但毕竟现在没有一个商业工厂,在工厂建设和工厂运行中没有实际的经验可借鉴。因此,虽然煤炭液化产业化对我国有重要的现实意义和战略意义,但在目前阶段不应一哄而上,应选择条件合适的企业和地点进行煤炭液化产业化小规模示范,待条件成熟后再进行大规模产业化生产。建设煤炭液化工业化示范工厂是今后产业化发展的重要起点,将为今后产业化发展奠定扎实的基础。

## 4 我国煤炭液化技术产业化前景展望

煤炭液化技术在中国有广阔的发展前景,主要有下列因素:

(1)中国有丰富的可供煤炭直接液化的煤炭资源。其中近一半可用于煤炭直接液化,这是煤炭液化产业化在中国发展的基础。

(2)中国石油资源短缺。随着经济的高速增长,

中国已从石油出口国成为石油进口国。加大石油勘探力度后至今未发现令人振奋的大油田。大量进口石油又是国力所不及的。寻找石油替代品,解决中国石油资源短缺是中国长远的能源政策。这是煤炭液化技术在中国发展的前提。

(3)中国的煤炭液化技术研究进行了很长时间,已完成基础性研究,为煤炭液化技术在中国的发展打下了很好的基础。

(4)地方积极性高。一些富煤缺油省份急切盼望煤炭液化技术能在当地商业化,一方面解决石油资源的短缺,另一方面可以带动地方经济的发展。

(5)中国物价低廉。中国是发展中国家,坑口煤炭价格、劳动力价格、设备价格等都较低廉,在中国建设煤炭液化生产厂可减少投资,降低液化油成本。这是在中国发展煤炭液化技术的一个有利条件。

(6)中国政府非常重视煤炭液化技术。由于煤炭液化技术是平衡能源结构,解决石油资源短缺,减少环境污染的重要途径,受到了中国政府和国家领导人的高度重视。国家已把煤炭直接液化技术产业化列入第十个五年计划中,煤炭直接液化在21世纪必将成为我国的一项新兴重要工业产业。

目前,煤炭液化技术实现商业化应用的主要制约因素是其经济上与石油的竞争能力。一些观察家认为随着石油产品需求的日益增加,特别是在运输业的应用,世界石油产量在2010~2020年开始下降,石油资源的不断枯竭,石油勘探和开采的成本也将大幅度上升,石油价格的上涨也将成为必然。另外,中国作为一个发展中的经济大国,把石油资源依赖于从某些地区或某几个国家进口,这也潜伏着巨大的危机。未雨绸缪,立足于丰富的煤炭资源,发展中国的煤炭液化技术具有特别重要的战略意义。■

## 《现代化工》网站介绍

《现代化工》网站网址为:<http://www.xdhg.com.cn>、<http://xdhg.periodicals.net.cn> 和 <http://xdhg.chinajournal.net.cn>,欢迎广大读者访问。从网上,您可以查到近年《现代化工》文章目录,了解对稿件的要求及投稿注意事项,也可以在网上了解我们的广告联系办法、期刊订阅方法,以及近期授权的中国化工专利公告。另外,如果您对我刊有什么建议和意见,也可以在网上留言。