

我国石油替代燃料发展研究

马敬昆, 蒋庆哲, 宋昭峥, 柯明, 王瑾瑜

(中国石油大学重质油国家重点实验室, 北京 102249)

摘要:石油替代燃料包括天然气和气态烃以及一些二次能源,如生物质能(乙醇、生物柴油)和煤基燃料(煤制油)、氢能等,开发石油替代燃料并使之形成一个新兴的能源产业是解决石油资源枯竭的主要方法之一。分别阐述了各种石油替代燃料的开发现状、存在问题和开发前景。

关键词:石油替代燃料;天然气;气态烃;生物质能源;煤基燃料;氢能

中图分类号:TE02

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2010)06-0006-06

Analysis on development of alternative fuels in China

MA Jing-kun, JIANG Qing-zhe, SONG Zhao-zheng, KE Ming, WANG Jin-yu

(State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Alternative fuels for petroleum include natural gas, liquid hydrocarbon, and some secondary energy, such as biomass energy (ethanol, biodiesel), coal-based fuels (CTL) and hydrogen energy etc. The paper also expounds the development status, existing problems and development prospect at home and abroad for various alternative fuels of petroleum.

Key words: petroleum alternative fuels; natural gas; liquid hydrocarbon; biomass energy; coal-based fuel; hydrogen energy

受资源的影响,我国原油供求矛盾日益突出,从1993年以来,我国从原来的石油出口国转变为石油进口国,且石油的进口数量逐年上升。对于21世纪石油资源的远景判断,总的来说,大部分石油地质学家、石油经济学家都同意石油产量的峰值理论^[1],也就是说常规石油的产量在21世纪中叶前后将达到最高点,以后石油总产量可能出现下降。因而,从国家能源安全出发,必须积极寻找石油替代能源。

开发石油替代燃料并使之形成一个新兴的能源产业是解决21世纪内石油资源枯竭的主要方法之一。现阶段的节约替代石油、燃料油的途径主要是煤代油、气代油以及生物质燃料的开发和利用。在这一背景下,笔者对石化行业替代燃料和原料的几种主要途径进行了介绍并进行可行性分析。

1 发展洁净煤技术节约和替代燃料油

1.1 煤液化制油

我国是产煤大国,煤炭是我国主要能源,在已探明的化石能源储量中煤炭占94.3%,石油、天然气仅占5.7%，“缺油、少气、富煤”是我国的基本国情。在我国发展以煤为原料的化工产品及煤液化燃料油品,逐步实施以煤液化油品替代石油能源,将成为未来我国煤炭洁净利用的重要发展途径^[2]。2006年

初,国家发展和改革委员会初步规划,到2015年通过煤液化工艺路线制取燃料成品油的产能将达到6000万t/a,投资达4200亿元。

1.1.1 煤液化技术简介

煤炭液化(CTL)有直接液化和间接液化2种技术路线^[3]。直接液化是煤在适当的温度、压力和临氢条件下,催化加氢裂化生成液体烃类及少量气体烃,脱除煤中氮、氧和硫等杂原子的转化过程。具有代表性、最先进的直接液化技术有德国的IGOR工艺^[4]、美国的HTI工艺^[5]、日本的NEDOL工艺^[6],以及第3代油煤共炼工艺(COP)等;间接液化就是先经气化完全破坏煤的分子结构生产合成气($H_2 + CO$),再通过费-托合成生产合成油,合成油再通过进一步加工改质生产清洁油品和高价值化学品。间接液化技术虽然投资相对较高,但其对原料和生产方案均具有较强的灵活性,技术比较成熟,能够生产超清洁燃料和高附加值产品,国外已有大规模工业化生产经验,具有代表性的有南非SASOL公司间接液化工艺^[7]、Shell SMPS工艺^[8]、MobH MTC间接液化工艺^[9]以及Methanex公司的MTG工艺等。

1.1.2 影响我国煤制油产业发展的主要因素

我国《煤炭工业“十一五”发展规划》提出,未来我国煤制油发展方向是采用国内开发的工艺和

收稿日期:2009-12-11

基金项目:国家能源领导小组办公室专项经费任务 A2008038

作者简介:马敬昆(1983-),男,博士生,从事石化节能减排及精细有机合成方向的研究, majingkun@sina.com;蒋庆哲(1961-),男,博士,教授,博士生导师,主要从事炼油化工工艺优化,清洁燃料技术等研究。

技术,建成有规模经济产能的煤炭直接液化示范工程。发展煤炭液化产品是我国“十一五”节能十大重点工程中节约和替代石油工程的重要项目之一。目前我国企业已经拥有自主知识产权的煤炭直接液化工艺,并已进行工业规模示范厂建设。截至2006年底,在建和规划中的煤制油项目规模达到4 017万t/a。有专家预测,到2020年,中国煤制油产业将形成5 000万t/a产能的规模^[10]。

虽然目前煤炭液化已经突破一系列技术难关,就技术层面而言可用于大规模生产,但工业示范过程还存在一系列未知问题,国际上还没有较大规模的生产经验。除技术因素外,影响煤制油产业发展的因素依然很多,环境因素以及建设投资、原料成本、能耗等经济性因素的制约是目前遇到的主要障碍。

(1) 环境因素

二氧化碳的排放是煤制油最受诟病的一个问题,经研究发现,如不考虑回收与存储,相比于石油制柴油,煤制油单位排放量每吨柴油要多出6~9 t CO₂。我国是《京都议定书》的签字国,尽管不受温室气体排放限制,但在减缓全球气候变暖的国际共识下,CO₂减排问题必须在产业发展中予以考虑。煤制油产能增排的CO₂加剧了我国减排的严峻形势。因此,煤制油项目的CO₂实际排放量必须在示范过程中认真检验;另一方面,如果到2020年煤制油实现产能5 000万t/a,间接液化法的年耗水量将达到3.5亿~6.5亿t。按人均年用水20 t计算,相当于2个千万人口城市的耗水量。这无疑增大了环

境的负荷以及经济的投入。

(2) 经济因素

中国工程院院士李大东认为:当前煤制油的投入产出比仅从设备来讲,生产1万t油就需要1亿元的投资,而沿海炼油厂扩建的投入产出比是每增产100万t油投资不超过10亿元,也就是说,每1万t的投入是1 000万元,由此带来的巨大差异使投资方压力倍增。从原料成本来看,煤制油项目启动至今,原煤的价格一路看涨,原煤产地的价格已经达到550元/t以上,翻了几倍,而此期间原油的价格则是大起大落,以目前的煤价为基础制得的油品在市场中不一定有竞争力,这也使煤制油项目经济上的不确定性大大提高。

表1和表2分别为投资年产成品油250万t的煤制油项目(直接液化)和炼油项目的投入对比。可以发现,煤制油资金及水、电、燃料投入均远高于同等规模炼厂投入。

表1 煤制油与炼油项目投资对比表 万元

项目	煤液化项目	炼油项目
建设投资	1579104	277917
固定资产	1389930	243077
装置部分	1176020	182192
系统及辅助工程	213910	60885
无形资产	38905	5800
递延资产	11034	1400
预备费	139235	27640
流动资金	27135	43062
建设期利息	120651	15916
总投资	1726890	336895

(上接第5页)

参考文献

- [1] 薛祖源. 关于推进化工行业节能减排工作几点设想[J]. 化工设计, 2009(2): 3-7.
- [2] 郭嘉, 邹文敏, 池海安, 等. 湖北省无机化工中、小企业节能现状及发展趋势[J]. 化学工业, 2009(11): 10-12.
- [3] 吴金慧. 碳减排: 化工行业有潜力[N]. 中国化工报, 2009-11-30(1).
- [4] 陈铁, 李瑞. 年产10万t项目为国庆60周年献礼: 二氧化碳全降解塑料大规模产业化[N]. 中国化工报, 2009-10-01(2).
- [5] 庞利萍, 徐岩. 捕集应用才是CO₂减排正途[N]. 中国化工报, 2009-09-22(2).
- [6] 解决煤化工的环境问题[J]. 化工文摘, 2009(5): 14-15.
- [7] 李军. 中外专家把脉中国能源结构及利用效率清洁化低碳化是转型迫切选择[N]. 中国化工报, 2009-11-24(6).
- [8] 岳华, 岳晓钰, 王磊磊, 等. 太阳能和生物质能互补供暖系

统[J]. 煤气与热力, 2009, 29(11): 15-17.

- [9] Greenhouse gas emission Characterization and management; P. Gunaseelon C. Buchler; W. R. chan. H/C processing Sept. 2009: 57-70.
- [10] 常晓华, 李新民. 我国发展低碳经济取决于科技创新[N]. 中国化工报, 2009-09-23(1).
- [11] 马岩. 低碳技术要走向前台[N]. 中国化工报, 2009-12-01(4).
- [12] 孟晶. 拜耳蓝星合作开发项目 ODC 电解槽[N]. 中国化工报, 2009-10-26(2).
- [13] 曾刚. 发展低碳经济离不开金融创新[N]. 中国石油和化工, 2009: 40-41.
- [14] 罗阿华. 推进清洁能源, 减少碳排放量: 福建省全方位提速低碳经济[N]. 中国化工报, 2009-11-16(6).
- [15] 姜小毛, 周益民. 江西发布我国首个低碳经济发展白皮书[N]. 中国化工报, 2009-11-03.
- [16] 张勇. 低碳经济: 机遇与挑战[J]. 当代石油石化, 2009, 17(10): 12-17. ■

表 2 煤制油与炼油项目公用工程消耗

项目	煤液化项目	炼油项目
新鲜水耗/万 t·a ⁻¹	1516	235
电耗/万 kWh·a ⁻¹	149136	18900
燃料消耗量/万 t·a ⁻¹	煤 76, 燃料气 34, 燃料油 6.5	燃料气 26

总体来讲,煤液化制油产业是一个高技术、高投入和高风险的新兴产业,其发展道路必须走规模化和集约化的模式。目前,国家需要对其实行宏观控制,集中各方力量,循序渐进。对煤制油项目的选择,既要考虑项目本身的效益和生存能力,又要考虑产业的总体布局;而作为具有战略意义的示范性项目,更应考虑以最低的成本,最大限度地实现技术的消化吸收、设备的本地化、知识产权的自主化^[11]。

1.2 水煤浆替代燃煤燃油

1.2.1 水煤浆简介

水煤浆(CWM)俗称液态煤,是在 20 世纪 70 年代石油危机时产生的一种煤基流体代油燃料。它是选用含硫质量分数 0.5% 以下低硫洗选动力煤粉,与水和添加剂大致按 65:34:1 的比例掺混,经过加工制成的一种新型液体燃料。

作为目前我国替代燃油的理想燃料,水煤浆的应用具有不少优势^[12]:它具有与重油相似的流动性和稳定性,安全可靠性能优于煤粉和重质燃料油;燃烧效率高,一般可达 95%~98% 以上,且储存和运输也是密闭操作的,几乎没有什么损耗,节能效果显著;同时,其排放的烟尘和 SO₂、CO、CO₂ 及氮氧化物等也远低于燃煤,具有一定的环保优势;而我国丰富的煤资源也为水煤浆的生产和应用提供了充足的原料保证。

1.2.2 水煤浆作为替代燃料的可行性

基于水煤浆的应用优势,在我国开发和应用水煤浆技术的前景十分看好。目前,全国水煤浆生产能力已超过 1 200 万 t/a(不包括气化用水煤浆),其中 3 万 t/a 以上规模的水煤浆生产厂家有 30 多个,生产能力超过 900 万 t/a(不包括炉前制浆生产线)^[13]。

但发展水煤浆产业也存在着一些问题,集中表现在技术要求和市场开发 2 个方面。水煤浆技术包含水煤浆的制备、运输、应用和环境处理等方面,是跨行业多学科的复杂系统工程^[14]。水煤浆锅炉配套设备较多,设备投资大是该锅炉推广应用的一个瓶颈。虽然水煤浆市场潜力巨大,但由于在水煤浆厂的建设 and 燃烧使用方面,国家缺乏正确的引导机

制,使水煤浆市场发育不够完善,仍呈初级状态。用户和投资者互存顾虑,对水煤浆替代燃油持谨慎和观望态度。

水煤浆的经济性有许多可变因素,其经济性是相对于燃油、燃气用户而言,一般 2.0~2.2 t 水煤浆可替代 1 t 燃料油,分析实际工程项目运行结果,与燃重油或天然气锅炉相比,水煤浆锅炉所节约的运行成本,一般只要连续运行半年到一年,就可以收回水煤浆锅炉建设的全部投资^[15]。

综合各方面因素,水煤浆的应用在实际经济运行、企业投资成本和环保政策因素等方面都具有很高的综合性价比,是替代燃油最有竞争力的新型燃料,其市场发展前景非常广阔。要促进水煤浆市场的健康发展,国家必须在政策方面进行引导,结合我国国情,在技改贷款、投资、税收等方面应给予优惠政策,同时,也要指导企业在投资体制、合作方式、营销服务等方面有所创新^[16]。

2 天然气替代工业燃料和石化原料

天然气是当今世界的理想能源,大力发展天然气,既符合世界能源结构发展趋势,也是提高能源效率和缓解环境压力的重要途径之一。

2.1 我国天然气利用的总体情况

我国是世界上最早利用天然气的国家之一,天然气可采储量为 22 万亿 m³^[17]。2008 年,全国天然气产量约为 774.74 亿 m³,比 2007 年增加 81.11 亿 m³,增幅约为 12%。随着我国经济的持续增长,天然气输送干线网络工程的投入运营,我国天然气年均消费增长率保持在 15% 左右。

“十一五”以来,我国从能源结构调整、加强环保、构建和谐社会和可持续发展等基本国策出发,将大力发展天然气开发利用作为一项长期的战略,推出了一系列支持和鼓励发展国内天然气、进口国外天然气的政策,为天然气产业快速发展创造了良好的条件。同时,我国天然气资源比较丰富,基础设施逐步完善,市场需求前景广阔,已经具备加快天然气发展的基本条件^[18]。表 3 给出了我国天然气 20 年消费结构的发展目标的变化,可以看到 2020 年发电用天然气将由 2000 年的 48×10⁸ m³ 增至 650×10⁸ m³,发展迅速;民用天然气将由 110×10⁸ m³ 增至 500×10⁸ m³;化工原料用天然气将保持稳定发展,由 110×10⁸ m³ 增至 290×10⁸ m³。

表3 我国天然气发展目标和消费结构

项目	2000年	2010年	2020年	2000年	2010年	2020年
	消费量/ 10 ⁸ m ³	消费量/ 10 ⁸ m ³	消费量/ 10 ⁸ m ³	消费比 例/%	消费比 例/%	消费比 例/%
发电	48	250	650	16	30	41
民用燃料	110	310	500	38	38	32
化工原料	110	170	290	38	21	18
煤油制氢	15	50	70	5	6	4
汽车燃料	10	40	80	3	5	5
总计	293	820	1590	100	100	100

2.2 天然气在石油石化企业的利用

目前在石油石化企业,比较实际的是用天然气替代工厂系统的供热、发电锅炉燃料油,以及以天然气为化工原料合成氨和甲醇等^[19]。这些应用在技术和环保上均可行,需要研究的关键问题是气源供应是否连续可靠和经济上是否合理。

2.2.1 天然气替代燃煤燃油

天然气作为动力燃料,可替代当前的煤炭、煤气和燃料油,替代煤炭从经济效益和用户承受能力来看不可行,煤气在工业领域的用量也不大,因此天然气作为动力燃料主要用来替代燃料油。

随着生活水平的不断提高,对城市环境保护的要求也日益高涨,加之产品能耗成本降低的紧迫和使用绿色能源的趋势,原先一些自产焦炉煤气、发生炉煤气和水煤气的工业用户,尤其是大型工业用户纷纷拆掉原有的能耗大、污染大的发生炉、焦炉,对燃烧设备进行技术改造,使用燃烧热值高、无污染、排放量少的天然气。炼厂自用燃料油大部分用于炼厂自备热电系统及锅炉所需燃料,另外炼厂生产装置的加热炉所需燃料,大部分由炼油生产过程中副产品大量干气来平衡,同时需补充部分燃料油和液化石油气,燃料油的消费量约占炼厂自用燃料的10%,这部分燃料油是煤炭不可能替代的。利用天然气替代燃料油,只需增加一套天然气管路和喷嘴即可,投资少,改造容易进行^[20]。以气代油改造可以优化能源结构、改善环境质量,缓解地区能源供需矛盾;还可以提高产品的附加值,产生经济效益。据估计,到2010年工业燃料用气将达到天然气总量的30%左右^[21]。

现阶段,我国工业上大规模应用天然气替代燃料油的主要限制条件是天然气价格缺乏竞争力^[22],高开采成本以及产地远离消费市场是主要原因。天然气的工业燃料用户能承受的气价如表4所示。

表4 天然气工业燃料用户所能承受气价

煤价格/ 元·t ⁻¹	天然气价格/ 元·m ⁻³	燃料油价格/ 元·t ⁻¹	天然气价格/ 元·m ⁻³
400	0.67	2500	2.13
600	1.00	3500	2.98

若气价超过上述水平,天然气替代燃煤和燃油方案在经济上就是不可行的。因此,大力发展天然气产业,降低开采和运输成本进而降低天然气售价是关键。

2.2.2 天然气化工

我国天然气化工起步于20世纪60年代,目前已经形成一定规模,主要用于生产合成氨和甲醇,其他天然气化工产品所占份额相对较小^[23]。2005年天然气化工消费量为150亿m³,占天然气总消费量的30%,远高于国外。全国合成氨产量4596万t,其中20%以天然气为原料生产,其天然气消费量约110亿m³。甲醇产量为535.6万t,其中30%是以天然气为原料,消费天然气约25亿m³。2006年,中海油海南60万t/a天然气甲醇装置建成投产,成为国内最大的生产装置。

天然气的化工利用按转化方式分类,可分为直接法和间接法两大类^[24]:直接转化法是天然气直接反应氧化制取乙烯、甲醇、芳烃等化工产品;间接转化法是天然气先制成合成气,由合成气再生产清洁油品、甲醇、低碳烯烃等化工产品。直接转化法因生产流程短,有希望获得更好的经济效益,因此这方面是未来天然气化工的研究重点之一,主要方向有甲烷直接氧化制甲醇、甲醛、乙烯、芳烃等,但因副产物较多,反应不易控制,目的产物收率较低,目前还主要停留在实验室研究阶段。在间接转化法中,一般先将甲烷制成合成气(H₂+CO)后,再制成液体燃料及其他化工产品,该技术已成为目前天然气化工利用的主要技术路线。

我国天然气化工与国外相比尚有诸多差距(例如,生产装置规模小、工艺落后、能耗高)。此外,我国天然气化工的发展,还面临天然气输送成本、投资以及产业结构调整等诸多因素的制约,许多问题还有赖于国家经济总体实力的发展^[25]。未来我国天然气化工发展的重点是不不断改进和完善现有技术,突破较有希望的科研成果,尽快转化为现实生产力,并加快天然气新应用领域的开发(例如,天然气制乙烯技术),使其具有与石油原料竞争的能力。

3 生物质能源作为石油替代燃料

生物质能源是指由植物的光合作用固定于地球上的太阳能,通过生物链转化为地球生物物质形态,经过加工为社会生活提供原料的能源^[26]。生物质能具有资源种类多、分布范围广的特点,可转化为电力、燃气和液体燃料等多种高品位能源^[27]。

我国理论生物质能资源有50亿t左右,是我国目前总能耗的4倍左右^[28]。据预测在2020年前后全国生物能源原料总量约折合15亿t标准煤。超过届时全国能源消费需求预计总量28.69亿t标煤的一半^[29]。可见,我国生物质能资源量巨大,具有广阔的发展空间。

生物燃料是以生物质为原料生产的能源物质,种类多样,主要包括燃料酒精、生物柴油、生物氢能和生物电池等,其中燃料酒精和生物柴油这2种能源最具有可行性和实用性^[30],可以替代由石油制取的汽油和柴油,是可再生能源开发利用的重要研究方向。从资源来源和环境保护方面出发,已经被公认为是最有发展前景的替代燃料。

(1) 燃料乙醇

乙醇俗称酒精,是一种最重要的石油替代燃料,以一定的比例掺入汽油可作为汽车的燃料,不但能替代部分汽油,而且排放的尾气更清洁。目前世界上普遍使用的燃料乙醇有两大类,分别是变性乙醇和含水乙醇。

目前,我国燃料乙醇生产技术已经成熟,主要是以玉米为原料,同时正在积极开发甜高粱、薯类、秸秆等其他原料生产乙醇。黑龙江、吉林、辽宁、河南、安徽5省及湖北、河北、山东、江苏部分地区已基本实现车用乙醇汽油替代普通无铅汽油。乙醇汽油占全国汽油总消费量的20%,我国已成为世界上继巴西、美国之后的第三大生物燃料乙醇生产国和应用国^[31]。

燃料乙醇产业与市场发育关系紧密,其发展涉及原料供应、乙醇生产、乙醇与组分油混配、储运和流通及相关配套政策、标准、法规的制定等各个方面。我国生物燃料乙醇产业发展还处于起步阶段,还需在这些方面做出积极的规划与推动,解决产业面临的诸多困难和问题^[32]:原料不足,技术产业化基础薄弱,产品市场竞争力不强,政策和市场环境不完善。

(2) 生物柴油

除了燃料乙醇外,能够替代石油产品的液体燃

料还有油料作物、动物油脂和垃圾油脂等生产的生物柴油。

生物柴油具有与石油柴油相当的黏度、净燃烧能和良好的低温发动机起动性能,此外还有一些独特的优良性能^[33],主要包括:①可再生能源,环保性能高。生物柴油是由动植物油脂为原料制得,原料可生物降解,对环境污染小;同时生物柴油含硫量低,可大大减小SO₂等硫化物的排放量;不含芳香族烷烃,其燃烧废气对人体的危害也低于石油柴油。②燃烧性能好。生物柴油的十六烷值高于石油柴油,因而具有更好的发火性和更短的着火滞后期。③安全性能高。闪点高使生物柴油在运输、存储和使用过程中具有更安全的性能。目前国内外合成生物柴油的方法主要包括:高温裂解^[34]、液体酸碱催化剂催化^[35]、酶催化剂催化^[36]、固体催化剂催化^[37]等技术。

我国的生物柴油发展仍处于初级阶段,但我国政府对发展石油代用能源十分重视,制定了多项政策以促进其发展。“十五纲要”中还将发展生物液体燃料确定为国家产业发展的方向,“十一五”国家科技攻关计划更是将包括生物柴油在内的生物质能源的开发利用列在首位。我国生物柴油的产业化首先在民营企业展开,海南正和生物能源公司、四川古杉油脂化工公司、福建卓越新能源发展公司等建成了年产量1万~2万t的生产装置,主要以餐饮业废油为原料生产生物柴油^[38]。而中国林业科学研究院、中国农业科学院、中国科学院植物研究所、中国科技大学、四川大学、石油大学等众多研究机构和科研院所也纷纷投入了生物柴油的研发工作。

据广州能源研究所生物柴油课题组的不完全统计调查,目前全国生物柴油生产厂家已达到69家,总生产能力为113.63万t/a。其中,山东省的生物柴油生产企业最多,为9个,产能最大的省份为江苏省,为37.32万t/a。然而,廉价、来源稳定的原料供应不足成为了阻碍生物柴油产业发展最大的问题,2008年,许多生物柴油工厂因原料得不到供应而停产,全国生物柴油实际产量仅为30万t左右^[39]。为促进生物柴油产业的健康发展,建设固定的植物原料基地尤为重要。

4 结论与建议

石油替代品各有其应用优势及相当的潜力,具有良好的发展前景。但由于我国许多石油替代燃料的研究开发项目在世界上仍处于起步阶段,缺乏

实际经验,还存在不少限制和争议。在技术可行、经济有效和环保达标的前提下,大力发展各种石油替代燃料和原料是一项提高企业经济效益和竞争力、有利于我国能源结构调整、保障国家经济安全的重大战略措施。国家需要对其实行宏观控制,建立相应法律、法规保证需求,发展基础设施、保证原料来源,循序渐进,从而建立符合我国国情的石油替代燃料产业。

参考文献

- [1] Carlos de Castro, Luis Javier Miguel, Margarita Mediavilla. The role of non conventional oil in the attenuation of peak oil [J]. *Energy Policy*, 2009, 37(5): 1825 - 1833.
- [2] 郝学民, 张浩勤. 煤液化技术进展及展望 [J]. *煤化工*, 2008(4): 28 - 32.
- [3] 贺永德. 现代煤化工技术手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [4] 李克健, 史士东, 李文博. 德国 IGOR 煤液化工艺及云南先锋褐煤液化 [J]. *煤炭转化*, 2001, 24(2): 13 - 16.
- [5] Liu Zhenyu, Shi Shidong, Wang Yong. Coal liquefaction technologies-Development in China and challenges in chemical reaction engineering [J]. *Chemical Engineering Science*, 2010, 65(1): 12 - 17.
- [6] Wasaka Sadao, Itonaga Masumi, Sakawaki Kouji, *et al.* The influence of hydrodynamics on the NEDOL coal liquefaction reaction [J]. *Fuel and Energy Abstracts*, 2004, 45(1): 412 - 418.
- [7] 吴春来. 南非 SASOL 的煤炭间接液化技术 [J]. *煤化工*, 2003(2): 3 - 6.
- [8] 韩德奇, 等. 煤间接液化技术现状及其经济性分析 [J]. *化工科技市场*, 2004(1): 21 - 27.
- [9] 庞刚生. 煤炭液化技术及其发展意义 [J]. *科技情报开发与经济*, 2006, 16(9): 160 - 162.
- [10] 赵颖. 浅谈几种新型燃料能源的发展现状 [J]. *广西轻工业*, 2008(9): 39 - 40.
- [11] 刘俊宝. 石油替代分析—煤液化 [J]. *石油科技论坛*, 2007(3): 24 - 26.
- [12] Liu Jianzhong, Zhao Weidong, Zhou Junhu, *et al.* An investigation on the rheological and sulfur-retention characteristics of desulfurizing coal water slurry with calcium-based additives [J]. *Fuel Processing Technology*, 2009, 90(1): 91 - 98.
- [13] 梁兴, 詹隆, 王国房, 等. 水煤浆厂生产现状与发展 [J]. *煤炭加工与综合利用*, 2007(2): 23.
- [14] Zhou Mingsong, Yang Dongjie, Qiu Xueqing. Influence of dispersant on bound water content in coal-water slurry and its quantitative determination [J]. *Energy Conversion and Management*, 2008, 49(11): 3063 - 3068.
- [15] 谭福太, 刘效洲. 10 t/h 燃油锅炉改烧水煤浆的设计应用 [J]. *节能*, 2009(7): 42 - 43.
- [16] Wang Renjiu, Zhang Rongzeng, Xu Zhiqing. Theoretical models of light scattering applied in sizing particles in coal water slurry [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004, 14(1): 64 - 66.
- [17] 郭高, 高建华, 郭宗滨, 等. 异军突起的中国天然气产业 [J]. *城市燃气*, 2009(4): 9 - 14.
- [18] 胡文瑞. 天然气业务快速发展中要高度重视的几个问题 [J]. *天然气工业*, 2008, 28(1): 1 - 4.
- [19] 李良, 孙祥, 胡晓浩, 等. 中国石化天然气产业发展方向与发展策略 [J]. *天然气工业*, 2009(3): 121 - 124.
- [20] 贺罡. 中国天然气资源开发利用的技术经济研究 [D]. 成都: 西南石油学院, 2005.
- [21] 史晓飞. 我国天然气开发与利用的问题探讨 [J]. *内蒙古石油化工*, 2006(8): 19 - 20.
- [22] 李国平, 杨洋. 中国煤炭和石油天然气开发中的使用者成本测算与价值补偿研究 [J]. *中国地质大学学报: 社会科学版*, 2009, 9(5): 36 - 42.
- [23] 钱伯章. 天然气化工技术现状与发展趋势 [J]. *江苏化工*, 2004, 32(5): 1 - 6.
- [24] 雍瑞生, 谭斌, 王科. 天然气化工的技术进展与发展机遇 [J]. *天然气化工*, 2009, 34(4): 70 - 75.
- [25] 余黎明. 我国天然气化工产业资源利用的前景分析 [J]. *化学工业*, 2008(4): 11 - 12.
- [26] 吴创之. 生物质能现代化利用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [27] 张杰衫. 生物质能源及其在我国的发展概况 [J]. *天然气技术*, 2007, 2(1): 76 - 79.
- [28] 孔令刚, 蒋晓岚. 生物质及其开发利用的价值与意义 [J]. *中国科技论坛*, 2007, 9(9): 100 - 104.
- [29] 刘新建, 王寒枝. 生物质能源的现状和发展前景 [J]. *科学对社会的影响*, 2008, 3(3): 5 - 9.
- [30] 汪卫东. 我国汽车代用燃料的研究发展现状及前景 [J]. *北京汽车*, 2006(1): 37 - 41.
- [31] 吴创之, 庄新妹, 周肇秋, 等. 生物质能利用技术发展现状分析 [J]. *可再生能源*, 2007, 29(9): 35 - 41.
- [32] 李志军. 生物燃料乙醇发展现状、问题与政策建议 [J]. *中国生物工程杂志*, 2008, 28(7): 139 - 141.
- [33] Knothe Gerhard, Steidley Kevin R. Lubricity of components of biodiesel and petrodiesel [J]. *Energy & Fuels*, 2005(19): 1192 - 1200.
- [34] 吴庆余, 缪晓玲, 徐翰. 利用热藻快速热解制备生物柴油的方法: 中国, 1446883A [P]. 2003.
- [35] Dorado M P, Ballesteros E, Lopez F J, *et al.* Optimization of alkali-catalyzed transesterification of brassica oil for biodiesel production [J]. *Energy and Fuels*, 2004, 18(1): 77 - 83.
- [36] 杨继国, 林炜铁, 吴军林. 酶法合成生物柴油的研究进展 [J]. *化工环保*, 2004, 24(2): 116 - 120.
- [37] Furuta S, Matsubashi H, Arata K. Biodiesel fuel production with solid superacid catalysis in fixed bed reactor under atmospheric pressure [J]. *Catalysis Communications*, 2004, 5(12): 721 - 723.
- [38] 闵恩泽, 唐忠, 杜泽学, 等. 发展我国生物柴油产业的探讨 [J]. *中国工程科学*, 2005, 7(4): 1 - 4.
- [39] 杨仕品. 生物柴油产业发展的现状及前景 [J]. *贵州农业科学*, 2009, 37(1): 157 - 160. ■