

技术进展

煤液化技术研究现状及其发展趋势

常丽萍

(太原理工大学煤科学与技术教育部和山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 能源安全和环境保护是我国 21 世纪应引起高度重视的问题, 煤炭既是能源的主要提供者, 也是大气污染的主要污染源, 其高效洁净利用不容忽视, 煤炭液化技术是解决此矛盾的有效途径之一。对煤液化的发展历程、开发和应用现状以及发展趋势和产业化前景进行了概括, 详细介绍了煤直接液化、间接液化和煤与废塑料共液化技术的特性、影响因素及其关键问题, 并提出了煤液化技术在我国今后发展的一些看法和建议。

关键词: 煤; 直接液化; 间接液化; 共液化

中图分类号: TQ529

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2005)10-0017-04

Present status and developing trends of coal liquefaction techniques

CHANG Li-ping

(Key Laboratory of Coal Science and Technology of the Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Energy safety and environmental protection are the problems which China ought to pay great attention to. Coal is the major energy source, and also the major pollution source discharged to the air, efficient and clean use of it allows of no negligence. The technology of coal liquefaction is one of the main ways to resolve the problems. The development course, research status, exploitation and their application and the outlook of industrialization of coal liquefaction techniques are briefly reviewed in this paper. The characteristics, influencing factors and the key problems of direct, indirect coal liquefaction and co-liquefaction of coal and waste plastic are discussed. Some suggestions and viewpoints are given for the future coal liquefaction research and development in China.

Key words: coal; direct liquefaction; indirect liquefaction; co-liquefaction

随着我国经济的快速发展, 能源消费急剧增加, 20 世纪 90 年代我国已成为石油净进口国。2003 年, 我国已是全球仅次于美国的第二大石油进口国和消耗国, 能源安全, 尤其是石油安全已成为必须引起高度重视的问题。我国“多煤炭、少石油、缺天然气”的能源资源特点决定了我国能源在较长时期内以煤为主的格局不会改变, 确立我国的能源安全战略, 必须从这一基本条件出发。充分利用我国丰富的煤炭资源解决石油短缺问题并保证能源安全供给, 是我国能源安全战略的一条有效而又可行的途径。

1 煤液化技术及其研发现状

以煤为原料, 在一定反应条件下生产液体燃料和化工原料的煤炭液化技术通常有直接液化和间接液化 2 种工艺路线。煤炭和石油一样, 都是碳氢化合物, 但煤的氢含量和氢碳比远远低于汽油、柴油, 氧含量却较高, 因此无论采用何种技术路线, 其关键

技术都是提高氢碳比。上述 2 种技术合成的产品具有很好的互补性: 直接液化合成的燃料转化效率较高; 间接液化产品使用效率较高, 比直接液化产品的环保性能好, 但副产物多^[1]。

1.1 煤直接液化技术

直接液化是指将煤粉碎到一定粒度后, 与供氢溶剂及催化剂等在一定温度 (430 ~ 470℃)、压力 (10 ~ 30 MPa) 下直接作用, 使煤加氢裂解转化为液体油品的工艺过程。最早的液化工艺中没有使用氢气和催化剂, 是先将煤在高温、高压的溶剂中溶解, 产生高沸点的液体。1927 年, 德国首次建成了第一座煤直接液化工厂, 所使用的液化技术被称为 Pott-Broche 液化工艺或者 IG Farben 液化工艺, 该技术受关注的程度及其发展随石油价格的波动而变化。

煤直接液化技术主要包括: ①煤浆配制、输送和预热过程的煤浆制备单元; ②煤在高温高压条件下进行加氢反应, 生成液体产物的反应单元; ③将反应

收稿日期: 2005-06-12; 修回日期: 2005-07-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2004CB2176002) 项目

作者简介: 常丽萍 (1964-), 女, 博士, 教授, 主要从事煤的洁净、优化转化方面的研究, 0351-8605802, lpchang@tyut.edu.cn。

生成的残渣、液化油、气态产物分离的分离单元；④稳定加氢提质单元。相继开发出的典型煤炭直接液化技术有：美国的氢煤法 H-Coal 和 HTI 工艺、德国的二段液化 IGOR (Integrated Gross Oil Refining) 工艺、日本的 NEDOL 工艺和我国的神华工艺^[2]。尽管国际上已进行大型中试的各种煤直接液化工艺至今均未商业化，但围绕改进这些工艺的应用基础研究却始终不断，主要集中在反应器的改善、反应机理的探讨、煤的组成对煤浆流变特性的影响、溶剂作用及其性质、催化作用和新的催化剂、逆反应对液化的影响和抑制、降低液化过程中的氢耗等方面。

1.2 煤间接液化技术

煤炭间接液化是先将煤气化、净化生产出 H₂/CO 体积比符合要求的合成气，然后以其为原料在一定温度、压力和催化剂条件下合成液态产品的工艺过程，简称 F-T 合成。煤炭间接液化的 3 个主要产品是烃类燃料、甲醇和二甲醚。1936 年，德国建成世界上第一座煤间接液化工厂并迅速发展，二次大战结束时，煤间接液化和直接液化厂共可生产汽油约 400 万 t/a，占德国汽油总消费量的 90%。和直接液化一样，随着廉价石油的发现，煤炭间接液化也相继停产。尽管在 20 世纪 50 年代初期和中期，美国的煤炭液化技术有了一些发展，但由于石油价格下

降，煤炭液化技术越来越缺乏吸引力。除南非之外，其他国家在 20 世纪 70 年代初才开始重视煤液化技术。

煤炭间接液化技术主要包括：①大型加压煤气化、备煤和脱硫、除尘净化系统的造气单元；②在固定床、循环流化床、固定流化床和浆态床等合成反应器中进行合成反应的 F-T 合成单元；③将反应产物进行分离的分离单元；④后加工提质单元。近年来，国内外对 F-T 合成烃类液体燃料技术的研究开发工作都集中于如何提高产品的选择性和降低成本方面。造气单元中，煤气化技术的发展趋势主要为：增大气化炉的断面，以提高产量；提高气化炉温度和压力，以增加空收率；采用粉煤气化，以降低对煤质的要求；研制气化新工艺和气化炉新结构，以减少基本建设投资和操作费用。以粉煤添加催化剂的水煤浆为原料的德士古气化炉和两段陶氏气化炉、以干粉煤为原料的 GSP 炉和 Shell 公司开发的 SCQP 炉均适合用于生产合成气，国内自行开发的多喷嘴水煤浆气化炉也具有较好的发展前景^[3]。

目前，商业化生产的煤炭间接液化技术主要有南非的 Sasol 液化工艺 (LTFT、HTFT 工艺)、荷兰 Shell 公司的固定床 (SMDS) 工艺和美国 Mobil 公司的甲醇制汽油 (MTG) 工艺、低压合成二甲醚工艺等，其他间接液化工艺只达到小试规模的程度，和 Shell 工艺或

(上接第 16 页)

第二，积极研发生产、安全无害的生态友好技术，特别是用高新技术改造传统的纺织工业，为调整产品结构、促进对外贸易和国民经济的发展做出贡献；第三，积极争取 ISO 14000 等标准的认证。

随着科技发展日新月异、人们环保意识的日益提高，生态友好纺织品的需求量正以前所未有的速度增长，生态友好染整技术的创新发展已是大势所趋，备受瞩目。毋庸置疑，生态友好纺织品及其染整创新技术研究的深入开展对人类的可持续发展具有十分重要的战略意义，在 21 世纪必将具有更广阔的发展前景。

参考文献

- [1] 常平. 20 世纪我国重大工程技术成就 [M]. 广州: 暨南大学出版社, 2002. 277.
- [2] 华浴达, 徐福生. 改变世界面貌的科技 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996.
- [3] 孙汉文. 现代科学技术概论 [M]. 北京: 中国经济出版社, 1999.
- [4] 杨锦宗. [J]. 中国工程科学, 2002, 4(10): 21 - 25.
- [5] 闵恩泽, 吴巍, 等. 绿色化学与化工 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [6] 宋心远, 沈煜如. [J]. 印染, 1999, (9): 49 - 50.
- [7] 陈荣圻. [J]. 印染, 1999, (6): 38 - 42.
- [8] 章杰. [J]. 中国染料, 2004, (1): 9 - 11.
- [9] 宋心远, 沈煜如. [J]. 印染, 1999, (10): 50 - 51.
- [10] 杨锦宗, 张淑芬. [J]. 精细化工, 2002, 19(9): 1 - 5.
- [11] 唐人成, 赵建平, 梅士英. Lyocell 纺织品染整加工技术 [M]. 北京: 中国纺织出版社, 2001.
- [12] Verein Zur Forderung der Forschung und Entwicklung in der. Process for the reduction of dyes [P]. US 5244549, 1993 - 09 - 14.
- [13] Perkins W S. [J]. Textile Chemist and Colorist, 1999, 1(3): 25 - 27.
- [14] 王文利. [J]. 功能材料, 2004, 35: 2624 - 2627.
- [15] Wolfgang B, Gert N, Willi S, et al. Water-soluble sulfur dyes, their preparation and use [P]. DE 4234222 A1 19940414. 1994 - 4 - 14.
- [16] Sandoz Ltd. Pigments, Their Production and Use [P]. US 5300148, 1994 - 04 - 05.
- [17] 张淑芬, 杨锦宗. [J]. 染料与染色, 2003, 40(4): 185 - 188.
- [18] 王文利, 张淑芬, 杨锦宗. [J]. 功能材料, 2004, 35: 2586 - 2588.
- [19] Welch C M. [J]. Text Res J, 1988, 58(9): 480 - 485.
- [20] Wang Wenli, Zhang Shufen, Yang Jinzong. [J]. Chinese Chemical Letters, 2005, 16(4): 554 - 556.
- [21] Wang Wenli, Zhang Shufen, Yang Jinzong. Proceedings of the World Engineers' Convention [C]. Shanghai, 2004, G 195 - 200.
- [22] Wang Wenli, Zhang Shufen, Yang Jinzong. [J]. Functional Materials, 2005, 36(6): 958 - 961.
- [23] Park J, Shore J. [J]. SDC, 1999, 115(10): 298 - 305. ■

Sasol 工艺类似,只是所用专有催化剂不同。研制这些工艺的公司包括 Kavemer 公司、美国 Exxon 公司和 Syntroleum 公司。

1.3 煤与废塑料共液化技术

煤直接液化中氢的作用是合成液化粗油和使原料煤中的氧、硫、氮转变为 H_2O 、 H_2S 、 NH_3 而除去,氢耗量的高低直接影响液化产物的成本,降低氢耗是煤直接液化科研工作者关注的重点问题,改善工艺流程和寻求新的供氢来源是其 2 个主要解决途径。

已形成巨大“白色污染”源的城市固体垃圾——废塑料属于富含碳氢元素的大宗物料,与液化原料煤相比具有较高的 H/C 原子比和适宜于液化的分子链结构。废塑料与煤的共液化对煤具有供氢作用,可以大大减少煤液化时的氢气耗量,同时反应条件也相对温和^[4],有利于液相产物生成,是废塑料回收利用生产清洁液体燃料和有用化学品的合理选择。

与煤直接液化相比,煤与废塑料共液化反应中间产物更多、更复杂,如何在共液化过程中有效地将部分脂肪氢转移到煤上是共液化工艺成败的关键。如果工艺条件不适当,氢转移和加氢反应就不能很好地进行,煤热解生成的自由基碎片就可能发生缩合反应,导致油收率降低,并生成大量难以处理的副产物。废塑料的裂解和煤催化热解能否达到协调一致,与所用原料、催化剂、煤和废塑料的配比等有关。不同品种的废塑料裂解加氢液化的性能差别很大,但存在共轭大 π 键时与煤的相容性较好^[5]。由于废塑料能在较低温度下完成热裂解反应且基本不受氢分压影响,因此废塑料分子链的无规断裂主要以内部氢对自由基的饱和分子重排反应为主;而煤的加氢热解反应和氢分压关系很大,反应温度也高得多,在同一个反应器中往往难以兼顾。Anderson 等^[6-7]进行了先将废塑料进行热裂解得到液态物(PDL),然后将这些高氢含量的 PDL 用于第二次煤液化的二段式工艺,研究结果表明,煤液化转化率得到了明显提高。

煤与废塑料共液化制取液体燃料和化工产品是一项富有前景的新工艺,国内外在这方面的研究还处于起始阶段,共液化反应机理、最佳操作工艺及反应条件的优选和合适催化剂的研制等问题还有待系统深入研究。

2 影响煤炭液化特性的主要因素

煤直接液化和间接液化工艺都受原料煤质、压力、温度、催化剂等因素的影响,液化方法不同,对煤

质的要求也有所不同^[8]。

各国对直接液化用煤的要求存在较大的差异,日本和前苏联的一些学者主张采用低灰分煤,欧美有些学者则认为采用价格低廉的高灰、高硫煤有利于降低液化成本。但高灰煤在磨碎过程中耗电多,尤其是含黄铁矿高的煤硬度大而耗电更大,对提高液化工厂的生产效率和固、液分离也都不利。煤中镜质组最大平均反射率是反映煤化程度的重要指标,一般煤化程度较低的煤易于液化。煤中镜质组和稳定组是加氢液化的活性组分,反应性高,而惰质组则难以液化。直接液化初期,煤的热解自由基主要依靠煤自身的 H 原子获得稳定,因此煤中的 H/C、O/C 原子比对液化特性影响较大;醚键含量高,反应活性好,但同时羧基、羟基和甲氧基含量高,液化反应过程中大量生成的水会导致 H 耗量过大^[9]。一般要求灰分质量分数低于 5%,洗选性能好,可磨性好,水分含量低,氢含量高,氧、硫和氮等杂原子含量低,镜质组和稳定组含量高,惰质组含量低的煤作为原料^[10]。文献^[11]认为,当煤中的碳质量分数为 80%~85%、H/C 原子比 >0.8 、挥发分产率 $>40\%$ 、活性组分质量分数约 90%、灰分质量分数 $<9\%$ 时,原煤或洗精煤具有较好的液化特性。

实际上,液化用煤对煤质的系列要求存在着许多相互矛盾。采取配煤或预处理等方法,有望解决这些问题。郭万喜等对甘肃省大有地区的高硫褐煤与天祝地区的气煤配煤进行的试验结果^[12]显示,这 2 种煤由于具有物理、化学变化分界点的差异,使得一定反应时间内中间产物的产生与转化相对均匀,可有效缓解大有煤反应相对较快、后期中间产物急剧减少,天祝煤反应相对滞后、后期中间产物转化较少的不利因素;液化反应中对活化氢的需求相对均匀,过程中的供氢作用得以保障;而且由于上 2 种煤中的含硫矿物不同,配煤后煤中固有催化剂的效用得到了改善,油产率得到明显提高。

催化剂的研究和开发是降低煤直接液化成本、提高液化油收率的关键技术之一。煤炭科学研究院北京煤化工研究分院对煤直接液化催化剂的筛选和开发进行了大量的工作,主要进行了高活性超细催化剂、天然矿物催化剂的筛选和微粉碎及其评价,从我国的硫铁矿、钛铁矿、铝厂赤泥、钨矿渣、钼矿飞灰、高炉飞灰等 27 种天然矿物中优选出 5 种活性较高的催化剂^[13-14]。神华集团已决定在其煤直接液化示范工程第一条示范生产线中采用此高效催化剂。

煤加氢液化是强的放热反应,反应器内反应温度的分布、温度控制以及热稳定性是至关重要的问题。高温快速液化体系中如有足够的活性氢,短时间内便可得到很高的转化率,高温快速液化可行。煤直接液化反应中,煤浆加热系统中温度、压力的变化会使煤浆特性发生较大变化,煤浆在液化过程中的黏度变化、影响因素以及流变行为是设计液化反应器和油煤浆输送系统时需考虑的重要问题。但煤的结构及其成分复杂,不同煤种之间的差异较大,对产生黏度峰原因的认识还存在较大的分歧。

循环溶剂贯穿于煤直接液化的各个流程单元,在整个工艺流程中起着非常重要的作用。循环溶剂是从液化产物中分出的组分,加氢稳定后具有供氢能力,同时循环溶剂也作为新鲜煤的制浆介质,经预热升温后又返回液化反应部分,直接或者间接参与液化反应。适当的循环溶剂可以很好地溶解溶胀、稀释分散的煤粒,使气、液、固三相反应系统处于相对均匀的体系,有利于油煤浆的输送、预热和煤的热裂解反应、加氢反应及抑制结焦。

与直接液化技术相比,煤间接液化对煤质的要求相对较低,原则上所有能气化生产合成气的煤种均可,当然存在最佳经济效益的问题,不同的煤种应选择适宜的气化方法。例如,鲁奇加压气化技术对煤的种类和粒度有一定要求,如果采用 Sasol 煤间接液化技术而没有适合鲁奇加压气化的煤种,可选择较为先进的粉煤气流床气化工工艺。一般来说,对煤质的要求^[9]主要有:易磨或中等难磨;水分含量较低,灰分质量分数低于 15%;水煤浆制气工艺要求煤的成浆性能要好(一般要求水煤浆质量分数大于 60%,最好在 65%以上);固定床气化工工艺一般要求煤的灰熔点温度 > 1 250℃,流化床、气流床气化工工艺要求煤的灰熔点温度 < 1 300℃。温度、催化剂不同的 F-T 工艺,所得产品分布、目标产物也不相同。以高质量柴油和蜡为目标产品,应选择浆态床工艺;以生产烯烃类化工产品为主,则选择固定流化床工艺较好。

3 煤炭液化技术的经济性分析

影响煤炭液化制合成油技术的经济因素主要有:①原油、成品油的价格;②整个装置的投资规模;③反应器生产效率;④廉价高效催化剂的研制与生产;⑤建厂条件、地理位置;⑥原料煤的品质和价格,当地水、电供应情况;⑦整个工艺流程的集成化程度以及与市场一致的产品构成等。

中德、中日和中美政府间分别对在我国建设煤炭直接液化示范厂的可行性研究结果表明,陕西、内蒙古的东胜地区、云南先锋地区和黑龙江依兰地区建设煤炭液化厂都具有较好的经济效益和社会效益。与工业发达国家相比,我国煤炭产地的煤价、人工费用相对低廉,大部分设备可以国产化,在这些地区煤液化油的生产成本相对较低。研究表明,国际市场原油价格在 17~20 美元/桶波动时,年产 100 万 t 油的直接液化工厂就有生存空间;在 20~25 美元/桶波动将有一定的获利空间;大于 25 美元/桶时,其前景非常光明,具有较好的经济效益^[15]。

对将煤首先气化成 CO 和 H₂,通过水汽变换反应转化为一定 H/C 原子比的合成气并对其进行净化处理,再通过催化合成(F-T 合成等)转化为烃类化合物的煤间接液化来说,煤造气(气化、空分、净化)装置投资占总投资的 60%~70%,是制约煤制油装置投资和回报期的主要因素。F-T 合成装置投资占总投资的 15%~20%,反应器在整个装置投资中也占有不可忽视的份额,在煤造气装置投资难以降低的情况下,采用投资相对较低、生产效率较高的合成反应器,同时使用廉价高效的铁催化剂或长寿命高活性催化剂将会显著降低合成油的生产成本,这是改善合成油技术经济性的关键所在。浆态床反应器处理气量大、单台反应器生产能力高、反应器结构简单,是煤间接液化的主流工艺。将煤气化生产的贫氢合成气直接引入装有铁催化剂的浆态床反应器中,在发生 F-T 合成烃反应的同时发生水汽变化反应,不需在合成装置前设置变换装置,有利于提高煤制油的经济效益。产品改质装置投资约占 15%,优化工艺操作条件,调整产品结构,生产高品质且不含硫、氮的清洁产品也是提高煤制油技术经济性的一个重要指标。

煤间接液化工工艺 5~7 t 煤产 1 t 油,直接液化工工艺(包括制氢用煤)3~4 t 原煤产 1 t 成品油^[14]。煤直接液化工工艺和间接液化工工艺原料动力煤消耗按同样规模预测吨液体产品综合效益分析,由于间接液化增加了煤造气等一系列过程,必须扩大规模分离提纯多种产品,其投资稍高于直接液化工工艺,经济效益略差于直接液化工工艺。但间接加氢液化工工艺比直接液化工工艺条件相对温和,其工艺过程、技术难度、设备材质与制造、操作维修等都比直接液化简单,技术风险小,对原料煤质适应性强。煤直接液化与低温间接液化产品相比,前者柴油馏分中直链烃含量

(下转第 22 页)

美国 FCC 汽油占汽油总量的 1/3 左右,而我国 FCC 汽油占汽油总量的 3/4 左右,这是造成国产汽油中硫含量高的主要因素。从我国的资源、投资等方面的条件看,短时间内迅速提高汽油中重整、烷基化等高品质汽油组分含量是不现实的,降低 FCC 汽油中硫含量是生产低硫汽油的关键。

FCC 汽油中典型的有机硫化物包括硫醇、噻吩及其衍生物等,它们在 FCC 汽油馏分中的分布特点见表 1^[8]。

表 1 FCC 汽油中有机硫化物的类型及其分布

馏分	馏程范围/℃	占汽油质量分数/%	占总硫质量分数/%	含硫化物主要类型
轻馏分	C ₅ ~ 120	60	15	硫醇
中馏分	120 ~ 175	25	25	噻吩和烷基噻吩
重馏分	175 ~ 220	15	60	苯并噻吩和甲基苯并噻吩

硫醇是一种具有特殊臭味的化合物,通常存在于轻馏分汽油中,可采用 Mercox 工艺^[9]通过催化反应萃取脱除。噻吩及其衍生物是 FCC 汽油中的主要硫化物类型,约占硫化物总量的 80% 以上,它们的脱除较为困难,即使在加氢过程中也不易被除去。汽油中的硫醇、噻吩及其衍生物等有机硫化物具

(上接第 20 页)

少,环烷烃及芳烃含量高,十六烷值低,凝点较低,硫氮等杂质含量较高,后者以链烷烃组分为主,十六烷值过高,不含硫氮杂质,但凝点较高^[16]。若将煤直接液化和间接液化联合起来,可省却复杂的后加工提质系统,可显著降低煤液化装置的投资和加工成本。

目前,我国还没有一套成熟的煤液化新工艺的商业化示范装置运转,结合工业化的要求,在国外先进工艺技术基础上,借鉴工业试验装置经验,应对煤液化技术的工艺工程问题进行深入探讨,最大程度上提高煤液化技术经济合理性和可操作性,以实现大规模的商业化生产。从油品供应趋势和技术发展来看,煤液化技术具有广阔的市场前景,会产生较好的技术和经济效益。

4 结语

新一代煤液化产业的发展对于解决我国石油短缺,合理、有效利用能源,对于我国的能源安全和可持续发展都具有重大的战略意义。煤液化技术可以实现煤炭资源价值的梯级利用,达到煤炭资源价值利用效率和经济效益的最大化,满足煤炭资源利用

有一定的极性,基于此开发出了多种汽油脱硫工艺,如吸附脱硫、萃取脱硫等。

2 渗透汽化汽油脱硫过程传递机理

渗透汽化过程是利用膜对不同组分的溶解和扩散能力的差异实现液体混合物的分离。渗透汽化汽油脱硫过程的传质机理可以通过溶解-扩散模型进行解释^[10]。如图 1 所示,膜的上游为一定温度的含硫汽油,在膜的下游通过真空泵产生负压,通过采用对含硫化物具有选择性的渗透汽化膜,可以使汽油中的有机硫化物优先通过膜被汽化带走。该传质过程可分为 3 步:①被分离物质在上游膜表面上被选择性吸附和溶解;②穿透组分在膜中扩散;③穿透组分在膜下游变成气相,经脱附与膜分离。

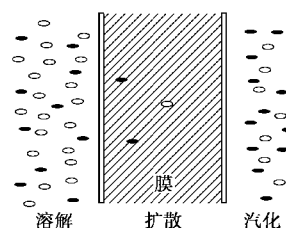


图 1 溶解-扩散模型

的环境友好。与开发煤基醇醚替代燃料一样,有计划、大规模发展和开发高效煤液化技术也是我国发挥资源优势,实现多元化补给,保障能源供应安全的重要战略措施。

参考文献

- [1] 黄清.[J].中国能源,2004,26(3):45-47.
- [2] 叶青.[J].煤炭科学技术,2003,31(4):1-3.
- [3] 韩德奇,陈平,何承涛,等.[J].化工科技市场,2004,(1):21-27.
- [4] 吴自强,许士洪,刘志宏.[J].现代化工,2001,21(2):9-12.
- [5] 胡发亭,胡劲飞,李克健.[J].煤化工,2004,(3):14-18.
- [6] Anderson L L, Tuntawiroon W.[J]. ACS Div Fuel Chemical Preprints, 1993,38(3):816-820.
- [7] Orr E C, Tuntawiroon W, Ding W B, et al.[J]. ACS Div Fuel Chemical Preprints, 1995,40(1):44-50.
- [8] 杨秀敏.[J].煤炭技术,2004,23(6):109.
- [9] 朱晓苏.[J].煤化工,1997,(3):32-39.
- [10] 李大尚.[J].煤化工,2004,(1):17-23.
- [11] 吴春来.[J].煤炭转化,1994,17(3):9-15.
- [12] 郭万喜,刘兵元,李苹.[J].煤化工,2004,(2):10-15.
- [13] 徐振刚.[J].煤化工,2003,(3):8-12.
- [14] 杜铭华,舒歌平.[J].现代化工,2002,22(9):1-5.
- [15] 张福琴,王立生,杨维军.[J].石油规划设计,2004,15(4):21-22.
- [16] 张哲民,门卓武.[J].炼油技术与工程,2003,33(7):58-61. ■