

国内煤制乙二醇现状及发展建议

李学强 郑化安 张生军 陈静升 李 瑶 苗 青 赵鹤翔 张建波

(陕西煤业化工技术研究院有限责任公司 陕西 西安 710065)

摘要: 为了合理利用煤炭,降低煤制乙二醇风险,提高乙二醇产量,介绍了间接法制乙二醇工艺流程。详细分析了国内煤制乙二醇工业化进展。统计分析国内拟建及在建的煤制乙二醇项目。发现煤制乙二醇项目存在催化剂缺少长周期、大规模运行经验,产品质量不稳定,单套反应器生产能力小,产业链过短等技术及市场风险。最后以某煤制乙二醇项目为例,通过成本、收益等的计算,发现当原料煤与燃料煤的单价均为 450 元/t 时,煤制乙二醇的成本为 5403.62 元/t,传统的石油制乙二醇成本为 6300 元/t,因此煤制乙二醇更具有推广前景。

关键词: 乙二醇;合成气;草酸酯;风险分析;生产成本

中图分类号: TQ223.162; TD849

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2014)06-0092-05

Development suggestions for coal to ethylene glycol in domestic

LI Xueqiang ZHENG Huaan ZHANG Shengjun CHEN Jingsheng LI Yao,

MIAO Qing ZHAO Hexiang ZHANG Jianbo

(Shaanxi Coal and Chemical Technology Institute Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to make rational use of coal and reduce the risk of coal to ethylene glycol, meanwhile, increase the ethylene glycol yield, this paper introduced the technological process of ethylene glycol synthesis by indirect method and its industrialization first, then analyzed the proposed and under construction coal to ethylene glycol projects at home. There were technological and market risk. At present, there were no catalysts having long-period and stable operation instance, the products quality varied, the productivity of reactor was low and the industry chain was short. Taking one coal to ethylene glycol project as research object, the cost and benefits were calculated. If both of per ton of feed coal and fuel coal was RMB 450, then the cost of coal to ethylene glycol and traditional oil to ethylene glycol was RMB 5403.62 and 6300 per ton. So the coal to ethylene glycol had good prospect.

Key words: ethylene glycol; synthetic gas; oxalate ester; risk assessment; production cost

0 引 言

乙二醇是一种重要的大宗基础有机化工原料,可用于生产多种化工产品,如聚酯纤维、防冻剂、不饱和聚酯树脂、润滑剂、增塑剂、非离子表面活性剂、炸药、涂料和油墨等,应用领域非常广泛。在中国,乙二醇主要作为聚酯及防冻液的原料,其中聚酯消费占 90% 以上。2013 年国内乙二醇进口量 825 万 t,进口依存度高达 70% 左右,市场缺口巨大^[1]。2014 年,国内新增聚酯产能预计达 500 万 t,将继续拉动乙二醇消费量的增长。乙二醇在中国国民经济发展

中正发挥着越来越重要的作用。乙二醇的生产工艺路线按原料不同可分为石油路线和非石油路线。在现阶段,全球主要的大型乙二醇生产装置均采用石油路线,也称乙烯路线^[2-3],即在银催化剂、甲烷或 H₂ 致稳剂、氯化物抑制剂存在下,乙烯直接被 O₂ 氧化生成环氧乙烷,再与水直接或催化条件下反应生成乙二醇。石油路线经过多年的发展,工艺已趋于成熟,但耗水量大,生产过程副产物多且生产原料受石油价格波动影响较大,无法摆脱对石油资源的依赖。因此,结合中国贫油、少气和相对富煤的能源结构特点,开发一条以煤为原料、经济合理的乙二醇合

收稿日期: 2014-06-06; 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2014.06.024

基金项目: 陕西省科技统筹创新工程计划资助项目(2013KTZB01-04-02)

作者简介: 李学强(1984—),男,河南新乡人,研究员,主要从事煤炭清洁转化利用方面的研究。E-mail: lixq@sxcti.com

引用格式: 李学强,郑化安,张生军,等.国内煤制乙二醇现状及发展建议[J].洁净煤技术,2014,20(6):92-96.

LI Xueqiang ZHENG Huaan ZHANG Shengjun et al. Development suggestions for coal to ethylene glycol in domestic [J]. Clean Coal Technology 2014, 20(6): 92-96.

成工艺路线,符合中国的可持续发展战略。目前,国内掀起了开发煤基乙二醇的热潮,煤制乙二醇技术已经成为煤化工行业关注的焦点。笔者旨在对国内煤制乙二醇技术的工艺路线、工业化进展、技术风险以及经济成本等进行总结,以期对煤制乙二醇技术的开发与投资提供参考。

1 煤制乙二醇技术

煤制乙二醇技术即以煤为原料经过一系列反应得到乙二醇的过程。根据中间反应过程的不同,可分为直接法和间接法^[4-6]。直接法合成乙二醇首先通过煤气化技术制取合成气($\text{CO} + \text{H}_2$),再由合成气一步反应直接制得乙二醇。从原子经济性角度考虑,直接法合成乙二醇原子利用率最高,最简单有效,具有可观的工业开发价值,但直接法原料转化率低,反应条件苛刻,催化剂成本高,距离工业化应用仍有一定距离^[7-9]。本文主要介绍间接法合成乙二醇。

1.1 煤制乙二醇工艺路线

间接法即草酸酯法,指通常所说的煤制乙二醇工艺。该方法将煤气化、变换、净化、分离提纯后分别得到 CO 和 H_2 , CO 经过催化耦联得到草酸酯,经高纯 H_2 加氢后精制,最终获得聚酯级乙二醇。该方法工艺流程短、成本低,在煤化工领域引起了持续而广泛的关注。

经过国内外煤化工专家的不懈努力,煤制乙二醇技术得到了长足的发展,逐步趋于完善,各技术的工艺流程大体相似。

1) 煤经过气化、变换和净化后的 CO 原料气,采用催化氧化技术除去氢和氧,再以分子筛脱水,其催化剂主要是铂、钨或铂-钨合金(有的技术方采用深冷分离对 CO 原料气进行提纯,净化后气体中有害杂质含量控制在 $\varphi(\text{硫化物}) \leq 1.15 \times 10^{-6}$, $\varphi(\text{NH}_3) \leq 200 \times 10^{-6}$, $\varphi(\text{H}_2) \leq 100 \times 10^{-6}$, $\varphi(\text{O}_2) \leq 100 \times 10^{-6}$, $\varphi(\text{H}_2\text{O}) \leq 100 \times 10^{-6}$, N_2 、 CO_2 、 CH_4 、 Ar 等在该反应体系中为惰性气体。净化后的 CO 气体与亚硝酸甲(乙)酯混合,导入装有钨系催化剂的列管反应器中,在 $100 \sim 150\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $0.1 \sim 0.3\text{ MPa}$ 条件下进行羰基化反应,得到草酸二甲(乙)酯,同时释放出 NO 气体。

2) 草酸二甲(乙)酯经汽化器气化后与计量加入的 H_2 混合,然后进入列管式加氢反应器在 $180 \sim 230\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $2 \sim 3\text{ MPa}$ 条件下气相加氢,得到乙二醇和

甲(乙)醇,催化剂由早期的铜铬系发展为现在的铜硅系。产物由循环水冷却后经过多塔精馏得到聚酯级乙二醇,尾气经回收有用组分后送入加热炉或锅炉燃烧。甲(乙)醇循环至亚硝酸酯制备段与羰基化反应段释放出的 NO 在 O_2 的作用下生成亚硝酸甲(乙)酯,重新得到草酸酯反应的原料,因此该路线理论上并不消耗 NO 和甲(乙)醇。

1.2 国内煤制乙二醇工业化进展

20世纪70年代末期,国内一批科研机构开始对 CO 催化制备草酸酯及衍生物技术进行研究,主要有中国科学院福建物质结构研究所、华烁科技股份有限公司、华东理工大学、天津大学、中石化上海石油化工研究院、上海戊正工程技术有限公司、上海华谊集团和西南化工研究设计院等。

中国科学院福建物质结构研究所从20世纪80年代早最开展“ CO 气相催化合成草酸酯并加氢制乙二醇”研究^[10-11]。1991年开始进行200 mL模试研究,2006年与江苏丹化集团、上海金煤化工新技术有限公司合作,开展了300 t/a乙二醇中试,2008年完成万吨级工业实验。2009年在内蒙古通辽市建成了200 kt/a煤制乙二醇工业示范项目,成功制得工业级乙二醇,在世界范围内率先实现了全套煤制乙二醇技术的工业化应用。以此技术为基础,河南煤业化工集团与丹化科技股份有限公司在河南布局了5套200 kt/a煤制乙二醇装置,打造国内最大的煤制乙二醇生产基地。

武汉华烁科技股份有限公司于2006年开始进行煤制乙二醇技术3种关键催化剂的研究。2009年与五环科技和鹤壁宝马集团共建300 t/a中试。2011年7月中试装置打通全流程。2011年12月通过了国家能源局验收,并积极筹建鹤壁宝马集团50 kt/a煤制乙二醇项目^[12]。

华东理工大学肖文德、李伟等自主开发了羰基合成催化剂和酯加氢催化剂,草酸二甲酯转化率95%,乙二醇选择性可达90%^[13-15]。其显著特点是对气源的纯度要求大大降低, CO 原料气中的 H_2 体积分数可达 2×10^{-3} 。华东理工大学与上海华谊集团合作,先后开展了实验室研究、32 t/a模试研究,于2012年底开始1500 t/a中试,形成了完整的工艺包并在安徽无为规划了200 kt/a的乙二醇项目。2010年底由华东理工大学、淮化集团以及上海浦景化工技术有限公司合作建成了千吨级煤制乙二醇中试装置并打通了全流程,淮化集团的10万t级

工业示范装置已于2012年6月正式启动。

天津大学自1987年开始进行合成气制乙二醇成套技术的开发研究,并得到了国家“九五”科技攻关计划、“十一五”科技支撑计划的支持。王保伟等^[16]、许根慧等^[17]开发的催化剂贵金属负载量大降低,如果能够顺利实现工业化,对于节约成本非常有意义。天津大学在2003年完成了3 t/a草酸二乙酯模试。2009年完成30 t/a草酸二甲酯中试、吨级草酸二甲酯加氢实验,2012年完成1500 t/a草酸二甲酯中试、1 t/a草酸二甲酯加氢模试。2014年4月,由天津大学和贵州鑫晨煤化工集团公司合作建设的千吨级黄磷尾气制乙二醇/乙醇中试装置通过中国石油和化学工业联合会组织的专家组现场考核验收,在同一装置上,采用同一催化剂,仅通过改变操作条件就可用黄磷尾气高选择性地分别生产乙二醇和乙醇,基于此技术的3万 t/a黄磷尾气制乙二醇项目计划于2015年6月中间交工。

中石化将“积极发展煤化工”列为“十二五”期间的发展目标任务。煤制乙二醇技术是其“10条龙”项目之一,由中石化上海石油化工研究院负责,自主开发了羰化、加氢催化剂及整个工艺流程。2011年,扬子石化1000 t/a煤制乙二醇中试顺利完成,2012年9月在湖北化肥厂开工建设20万 t/a煤制乙二醇项目,2013年11月中间交工,并于2014年3月9日产出达到国家优等品标准的聚酯级乙二醇。

随着河南煤业5套20万 t/a煤制乙二醇的稳步推进,尤其是新疆天业集团5万 t/a电石尾气制乙二醇的高质量运行,国内煤制乙二醇建设及规划如雨后春笋,在建及拟建的煤制乙二醇项目产能达到了847万 t/a。国内拟建及在建的煤制乙二醇项目见表1(中试项目没有列在其中)。

2 煤制乙二醇风险分析

2.1 技术风险

煤制乙二醇技术的开发拓宽了乙二醇生产的原料来源,但是该技术尚未完全成熟,仍有待商业化运行的检验。目前主要存在四大问题:一是虽然宇部兴产的羰基化技术有较长时间工业运行经验,但国产羰基化催化剂在工业条件下长周期运行的效果仍有待验证;二是各家技术方的加氢催化剂都还没有稳定的长周期、大规模工业化运行经验;三是产品质量尚不稳定,只有乙二醇产品能够连续稳定的达到

聚酯生产要求,才可以与乙烯路线相比较;四是单套反应器的生产能力较小,如果能有所提高,将会降低生产成本,提高煤制乙二醇的行业竞争力。

表1 国内在建及拟建煤制乙二醇项目

公司名称	所在地	产能/kt	备注
通辽金煤	通辽	200	已投产
通辽金煤	通辽	400	拟建
河南煤业/通辽金煤	濮阳	200	已投产
河南煤业/通辽金煤	新乡	200	已投产
河南煤业/通辽金煤	安阳	200	已投产
河南煤业/通辽金煤	商丘	200	在建
河南煤业/通辽金煤	洛阳	200	试车
鹤壁宝马集团	鹤壁	50	在建
鹤壁宝马集团	鹤壁	200	拟建
华鲁恒升	德州	50	已投产
安徽淮化	淮南	100	在建
新疆天业	石河子	50	已投产
新疆天业	石河子	200	在建
开滦化工	鄂尔多斯	2 × 200	拟建
中石化湖北化肥厂	枝江	200	在建
黔西煤化工	贵州毕节	300	拟建
博源控股集团	锡林郭勒	200	在建
亿利资源集团	鄂尔多斯	300	在建
惠生集团	鄂尔多斯	300	拟建
内蒙古易高煤化	鄂尔多斯	200	拟建
华维能源	鄂尔多斯	200	拟建
东海新能源	鄂尔多斯	3 × 200	拟建
陕西延长石油	榆林	800	拟建
陕西煤业化工集团	陕西渭南	200	拟建
榆林天鸿煤化工	榆林	300	拟建
贵州开阳化工	贵阳	400	拟建
新疆宝泰隆	昌吉州	200	拟建
新疆生产建设兵团农十师	阿勒泰	220	拟建
国电盛世煤电	双鸭山	400	拟建
襄矿泓通	长治	200	在建
阳泉煤业	阳泉	400	拟建
埃新斯新气体公司	枣庄	400	拟建

2.2 市场风险

1) 世界范围内的乙二醇消费主要集中于聚酯,中国高达90%以上,下游消费领域单一,产业链过短。随着全球市场竞争的加剧,中国纺织业出口频繁遭遇贸易摩擦,一旦下游受阻,市场压力会迅速向上游传导,可能对中国乙二醇产业可能造成致命打击。

2) 针对中国乙二醇消费的具体情况,目前中国聚酯瓶片以及长丝和短纤维产能都是世界第一。截

至2013年底中国聚酯产能达到4100万t/a,2014年中国又将有500万t的聚酯产能投放,乙二醇的需求量非常巨大,但是中国乙二醇消费市场主要集中于华东地区,占全国的62.5%,而这些地区又不具备煤制乙二醇所依赖的资源优势。

从保证原料供应角度考虑,煤制乙二醇项目应该建在煤炭资源丰富地区,不过中国的富煤地区远离乙二醇消费市场,在这些地区建设煤制乙二醇项目必须考虑运输难度及物流成本,尤其是西北地区,长距离的产品运输必然会大大削弱煤制乙二醇的产品竞争力。为了尽量降低风险,应在富煤地区的煤化工产业基础上建设煤制乙二醇和聚酯生产项目,打造高度集成的一体化产业基地,即利用煤化工项目的气化、空分等装置为煤制乙二醇项目提供原料,同时引入甲醇制芳烃技术制取对二甲苯,并进一步加工成精对苯二甲酸,最后由精对苯二甲酸与乙二醇聚合为聚酯产品,用固态聚酯产品取代液态乙二醇运输,降低运输成本,提高产品竞争力,降低社会资源消耗。

3) 在稳步推进乙二醇工业化并积极拓展下游产业链的同时,还应该清醒认识到虽然乙二醇在中国供不应求,但是这种情况几乎只存在于中国,世界范围内乙二醇的生产能力已经出现了过剩的态势,国外的生产厂家必将竭力抢占中国乙二醇市场份额。

4) 中国经济在较长一段时间内仍处于高速发展阶段,市场通胀较高,基础原材料价格势必会有一定幅度上涨,此外,国家对经济结构的宏观调控、全球化程度的进一步加深以及随着乙二醇生产技术的成熟造成国内乙二醇项目可能迎来的大量产能集中释放等因素,都会加大煤制乙二醇项目的市场风险。

3 煤制乙二醇工艺成本分析

对某乙二醇技术推广方公开资料计算其煤制乙二醇工厂成本及副产收益。乙二醇的工厂成本可以看做由煤(1.89a + 1.79b)及非煤(3747.62元)2部分成本构成,其中a为原料煤成本,b为燃料煤成本。

表2、表3为原辅材料成本(计算式为1013.32 + 1.89a)及公用工程成本(计算公式为1390.97 + 1.79b),其中电费成本为1241.97元/t。副产为硫酸、硫酸铵、混合醇酯、粗碳酸二甲酯(DMC),总收益为619.07元。制造成本包含折旧费、维修费以及

其他制造成本,总共为1237.4元;运营成本包含工资及附加、管理费用、营销成本、平均财务费用,总计为725元。随着各家工艺技术的不断完善,非煤部分的成本将趋于相近水平,如煤价以450元/t计,煤部分成本为1656元,约占总成本的30.6%,此时项目投资企业所掌握的煤炭资源将会对煤制乙二醇成本造成较大的影响。

煤制乙二醇项目的建设必须考虑到国际市场的冲击,包括进口产品与进口原料对国内市场的影响,以及煤制乙二醇的技术水平,同时应考虑到中国乙二醇消费市场的特点从而选择合适的生产厂址。建设乙二醇项目必须认识到几乎所有的市场缺口都在中国,而全球市场产能过剩的现实,稳健投资。

表2 煤基乙二醇生产原辅材料成本

项目	单价/ (元·t ⁻¹)	单耗/ (t·t ⁻¹)	成本/ (元·t ⁻¹)
原料煤	a	1.890	1.89a
O ₂	349.90	0.669	234.08
甲醇	2350.00	0.097	227.95
硝酸	1282.00	0.065	83.33
NaOH	1154.00	0.050	57.70
液氨	2564.00	0.010	25.64
催化剂			384.62

表3 煤基乙二醇生产公用工程成本

项目	单价/ (元·t ⁻¹)	单耗/ (t·t ⁻¹)	成本/ (元·t ⁻¹)
燃料煤	b	1.79	1.79b
新鲜水	2	37	74
循环水	0.1	750	75

当原料煤与燃料煤价格同取450元/t时,乙二醇工厂成本为5403.62元/t,而国内传统的石油路线乙二醇成本在6300元/t左右。因此,如果煤制乙二醇技术能够稳定生产出聚酯级产品,其生产成本较传统石油路线将有优势。不过,国外的石油路线生产工艺技术先进,尤其中东地区以当地非常廉价的乙烷为原料生产乙二醇^[18],与这些地区的进口乙二醇相比,煤制乙二醇并不具备成本优势。

此外,需要指出的是此工艺中煤需要经过煤气化工段成为合成气,若使用电石炉气或焦炉尾气作原料,将节省巨大的煤气化的投资成本;此处计算的仅为煤制乙二醇的工厂成本,考虑到技术成熟度、装

置负荷及稳定性、税收、运费等因素,其利润空间将被进一步压缩。

4 结 语

聚酯产业的持续发展大大拉动了国内市场对乙二醇的需求,为中国的经济和社会发展带来了巨大的经济和社会效益。长期以来,国内的乙二醇自给率维持在较低水平,在一定时间内乙二醇仍存在较大缺口,煤制乙二醇技术拥有较大的市场空间。

待煤制乙二醇示范项目完善成熟后,如能在国内合理布局建设,将能有效提高国内乙二醇市场的自给能力,具有重要的战略与现实意义。200 kt/a煤制乙二醇项目投资约为20亿~25亿元,与动辄百亿规模投资的煤制油、煤制烯烃项目相比,投资要小的多,准入门槛更低,也更容易推广。所以,近年来,随着国家产业政策的支持以及国内众多科研院所的积极推广,煤制乙二醇项目在国内迎来了一股规划与投资的热潮。

煤制乙二醇技术总体仍处于商业化生产的前期,有待工业化验证与进一步完善细节,急于推广仍会有较大风险。上马煤制乙二醇项目应充分考虑产品的市场需求、项目规模与投资、产品质量和成本竞争力,投资企业也应认真评价自身的资源与经济优势以及现有的设施与技术储备,审慎投资,适度发展煤制乙二醇。

参考文献:

[1] 骆 雁. 国内乙二醇生产现状及发展趋势[J]. 齐鲁石油化工, 2012, 40(1): 64-67.

(上接第91页)

式的计算和比较,推荐采用周佩正推荐式计算煤液化油窄馏分的假临界压力。此结论对于其他煤种和高于300℃馏分的适用性需要进一步研究和讨论。

参考文献:

[1] 杨春雪,冯 杰,徐 英. 神华煤液化油窄馏分的临界性质[J]. 燃料化学学报, 2008, 36(5): 534-539.
 [2] ASTM D2892—2010 Standard test method for distillation of crude petroleum(15-theoretical plate column) [S].
 [3] 王迎春,凌开成,申 峻,等. 神华煤液化油馏分密度的分析测定[J]. 煤炭转化, 2006, 29(2): 24-28.
 [4] 张海军,凌开成,申 峻,等. 神华煤液化油黏度的测定与分析[J]. 煤炭转化, 2006, 29(3): 40-43.
 [5] 朱肖曼. 神华煤液化油窄馏分饱和蒸气压的测量与计算[J].

[2] 朱建芳,钱伯章. 环氧乙烷的技术进展与市场分析[J]. 化工科技市场, 2007, 30(7): 1-7.
 [3] 王海蕾,刘 昱. 环氧乙烷生产技术[J]. 化工科技, 2012, 20(3): 67-70.
 [4] 候志扬. 合成气路线生产乙二醇技术进展[J]. 精细化工原料及中间体, 2008(4): 35-39.
 [5] 应卫勇. 煤基合成化学品[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 265-277.
 [6] 江镇海. 国内外合成气制乙二醇技术进展[J]. 合成技术及应用, 2010, 25(4): 27-30.
 [7] Gresham W F. Preparation of polyfunctional compounds: US, US2636046 [P]. 1953-04-21.
 [8] 赵宇培,刘定华,刘晓勤,等. 合成气合成乙二醇工艺进展和展望[J]. 天然气化工, 2006, 31(3): 56-60.
 [9] Nakamura Shuzo. From syn gas to glycol - in onestep [J]. Chemtech, 1990, 20(9): 556-564.
 [10] 陈贻盾,李国方. “用煤代替石油乙烯合成乙二醇”的技术进步[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(1): 1-10.
 [11] 周张锋,李兆基,潘鹏斌,等. 煤制乙二醇技术进展[J]. 化工进展, 2010, 29(11): 2003-2009.
 [12] 陈伟建,孔渝华,闫常群,等. 煤制合成气生产聚合级乙二醇中试开发[J]. 化工设计通讯, 2012, 38(3): 1-6.
 [13] 计 扬. CO催化偶联制草酸二甲酯反应机理、催化剂和动力学的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2010.
 [14] 惠胜国. 草酸二甲酯催化加氢制乙二醇反应机理的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2012.
 [15] 刘会杰. 草酸二甲酯加氢制乙二醇 Cu/SiO₂催化剂改性研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2010.
 [16] 王保伟,马新宾,李振花,等. CO气相偶联制草酸模拟放大研究[J]. 中国工程科学, 2001, 3(2): 79-85.
 [17] 许根慧,马新宾,王保伟,等. CO偶联制备草酸二乙酯的方法: 中国, 200710060003. 4 [P]. 2008-03-19.
 [18] 孙玉净,于春梅. 我国煤制乙二醇产业化现状与前景[J]. 化学工业, 2012, 30(1): 49-52.

洁净煤技术, 2013, 19(3): 68-70.

[6] 朱肖曼,李培霖,史士东,等. 神华上湾煤液化油窄馏分密度和黏度随温度变化规律的研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(6): 681-684.
 [7] 朱肖曼,李培霖,王 雨,等. 煤液化生成油窄馏分平均分子量的研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(3): 386-389.
 [8] 马沛生. 化工数据[M]. 北京: 中国石化出版社, 2003: 42-66.
 [9] 毛学锋,高振楠,李文博,等. 煤炭直接液化油中酚类化合物的GC/MS研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(9): 1249-1253.
 [10] 高振楠,李文华. 煤液化油中酚类化合物分布特征研究[J]. 煤炭转化, 2010, 33(2): 27-31.
 [11] 朱肖曼,王 伟,李培霖,等. 神华煤液化油窄馏分假临界性质的研究(I) 假临界温度[J]. 煤炭转化, 2010, 33(1): 31-33.
 [12] GB/T 2540—1981,石油产品密度测定法(比重瓶法) [S].
 [13] SH/T 0169—1992,矿物绝缘油平均分子量测定法(冰点降低法) [S].