

文章编号:0253-9993(2011)02-0179-06

# 神华现代煤制油化工工程建设与运营实践

张玉卓

(神华集团有限责任公司,北京 100011)

**摘要:**回顾了神华集团煤直接液化示范工程和神华包头煤制烯烃示范工程的建设与运营实践,介绍了两大工程解决的技术放大、催化剂开发、核心装置设计等技术难题以及取得的反应器材质选择、超大锻件制造、非常规大型设备吊装、设备运行等关键技术成果。最后结合国际原油供求形势,对现代新型煤制油和煤化工技术及产业的发展前景进行了简要分析,提出未来煤炭清洁转化的发展将以煤的合理、清洁、高效转化为基础,以建立煤制油、煤制化学品与燃气、蒸汽联合循环发电为主线的多联产体系为手段,以建立循环经济、提高效率、改善环境和降低消耗及实现 CO<sub>2</sub> 的零排放为目标,并向大型化、规模化和集约化发展。

**关键词:**煤制油;煤化工;示范工程

**中图分类号:**TE665 **文献标志码:**A

## Construction and operation of Shenhua's modern coal-to-liquid-and-chemicals demonstration projects

ZHANG Yu-zhuo

(Shenhua Group Corporation Limited, Beijing 100011, China)

**Abstract:** Reviewed the construction and operation of Shenhua's direct coal-to-liquid demonstration project and coal-to-olefins demonstration project and presented the solved engineering roadblocks, such as technique amplification, catalyst development, core device design, and achieved key technological achievements, such as reactor material choice, super huge forging manufacturing, transnormal equipment installation, equipment operation. At last, with the international oil supply and demand situation, put forward the development of clean coal conversion will be based on large scale intensive clean coal conversion engineering technologies and proposed the outlook of modern coal-to-liquid-and-chemicals techniques and industry will be very bright.

**Key words:** coal-to-liquid; coal chemical; demonstration project

我国进口原油数量已超过国内原油产量,进口依存度超过50%,且有逐年提高的趋势。石油价格高企使我国进口成本越来越高,如2008年,石油进口消费外汇达1 293亿美元,占当年GDP的2.94%<sup>[1]</sup>。国内石油供需矛盾,已经成为制约我国经济发展和经济安全的主要因素之一。因此,21世纪我国能源战略的重点就是要多元化保证石油供应。我国煤炭资源相对丰富,通过煤炭清洁转化实现石油替代,具有极为重要的战略意义和经济价值。

我国十分重视煤清洁转化技术的开发利用。2001年,国家批准煤直接液化制油项目,神华集团率先实施“煤制油工程”。2008年,世界上首套百万吨级煤直接液化示范工程由神华集团在内蒙古鄂尔多斯市建成并投入示范运行,核心技术采用神华集团和煤炭科学研究总院联合开发的煤直接液化技术。2005年,国家批准实施煤制烯烃示范工程,神华集团在包头开始筹建全球首套工业化装置。2010年,神华包头煤基烯烃项目建成并投入示范运行,核心技术

采用中国科学院大连化学物理研究所开发的 DMTO 技术。

目前,神华集团两套大型煤制油化工示范装置已经取得初步成效,通过示范工程的建设及运营,使我国在这一战略领域掌握了一批核心技术和工业产权,并在技术开发、工程设计、关键设备、工程建设、工厂运行及生产管理等方面积累了丰富的经验,培养了大批人才,为新型煤制油化工产业的稳定、健康和可持续发展奠定了基础。

### 1 神华集团煤直接液化示范工程建设与运营

煤加氢直接液化的理论是德国人(BERGIUS)首先提出来的<sup>[2]</sup>,1927 年第 1 个工厂在德国建成,之后又建了 10 余个工厂,每个厂平均产能 30 多万 t,总产能 423 万 t。这被认为是第 1 代煤直接液化技术,其主要技术特点是采用天然催化剂,反应压力 60 MPa,这些工厂在二战后期被摧毁。之后,由于中东廉价石油的大规模开发,煤直接液化制油中止了 30 多年。国际石油危机发生后,美国、德国和日本等国家重新开始开发新一代煤直接液化技术,陆续建设了多个中试工厂,但都没有实现工业化。这被作为第 2 代煤直

接液化技术。

我国从 1980 年开始开发煤直接液化技术,煤炭科学研究总院北京煤化学研究所承担了这一任务。科技人员通过自主研发和国际合作,建成 3 套小型连续试验装置,并开发出新型催化剂。国家批准神华集团煤直接液化项目后,一批煤液化核心技术人员进入神华集团,将原创性开发和集成先进技术相结合,历时 3 a,建设了日处理 6 t 煤的工艺开发装置和配套的催化剂制备装置<sup>[3]</sup>;历时 4 a 设计、建造了日处理煤 6 000 t 的大型工业化装置,又经过 2 a 的消缺改造和完善,实现了工厂的稳定操作,连续运转周期超过了 2 000 h。

#### 1.1 煤直接液化示范工程的建设

神华集团煤直接液化第 1 条生产线主要产品方案见表 1,主要工艺流程如图 1<sup>[4]</sup>所示。

表 1 神华集团煤直接液化示范工程产品方案  
Table 1 Product plan of Shenhua's direct coal-to-liquid demonstration project

产品	LPG	石脑油	柴油	苯酚	合计
产量/(万 t · a <sup>-1</sup> )	10.21	24.99	71.46	0.36	107.02

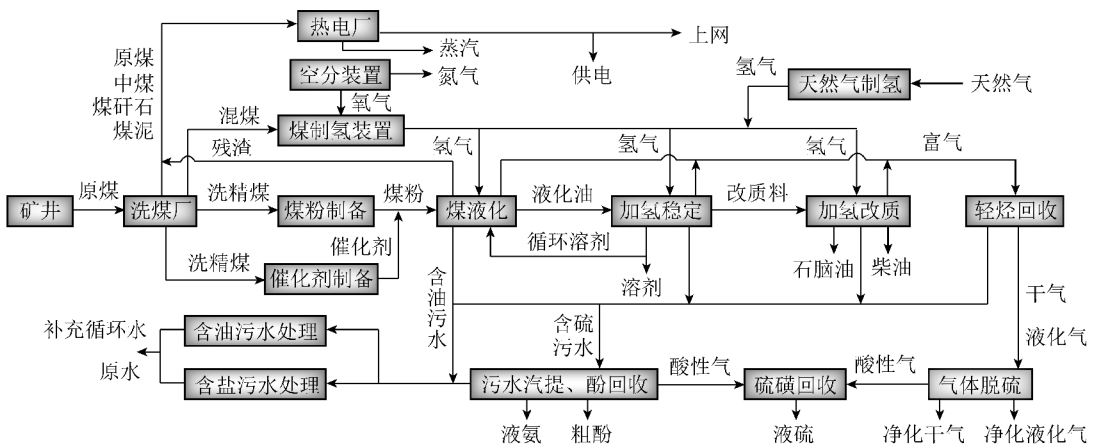


图 1 神华集团煤直接液化示范工程工艺流程

Fig. 1 The flow of Shenhua's direct coal-to-liquid demonstration project

神华集团煤直接液化工艺的主要特点:采用高活性液化催化剂、供氢性循环溶剂、强制循环悬浮床反应器、减压蒸馏分离沥青和固体。此技术方案,反应器利用率高,反应条件缓和,有效防止矿物质沉积,最大限度提高液体收率,同时为液化产品进一步加工提质提供了优质原料<sup>[5]</sup>。

煤直接液化的核心装置是煤液化装置和催化剂制备装置,均为首次工业化。为降低技术风险,原创工艺技术均经历了实验室开发试验、基础模型试验和中间放大试验等开发试验过程<sup>[6]</sup>。

神华集团煤直接液化示范工程的建设过程也是

一个系统的创新过程,集合了国际上先进的煤直接液化技术和当今石油化工领域先进、成熟的单元装置及设备。煤处理、煤浆制备、液化反应器、煤浆加料泵、煤浆循环泵均为世界上首套超大型设备,其处理能力是目前美国、德国、日本百吨级工业性试验装置的 30 倍以上。煤制氢能力达 28 万 m<sup>3</sup>/h;反应器操作压力约 18 MPa,操作温度 440 ~ 460 ℃,在世界上已有的液化工艺中,操作压力和温度较低;相应的材料选择、设备制造等简单。这些特点构成第 3 代煤直接液化技术的主要特征。

在示范工程的设计和建设过程中,为了解决煤直

接液化工程设计、制造和安装的超规范问题,神华集团和国内外相关领域的科研院所、制造商和工程公司建立战略合作关系,联合开发煤液化反应器、超大型双防爆无刷励磁电机、超壁厚不锈钢管道焊接工艺、容积式煤浆进料泵和高耐磨性高差压调节阀等<sup>[7]</sup>,在研发这些产品的同时,形成了一系列的设计、制造和施工规范,补充完善了相关的国标和行业规范,带动了相关产业的快速发展。

神华集团煤直接液化示范工程建设自 2004-08-25 正式开工,于 2008 年底全部建成,如图 2 所示。



图 2 神华集团煤直接液化示范工程装置

Fig. 2 Shenhua's direct coal-to-liquid demonstration project

### 1.2 煤直接液化示范工程的生产试运行

神华集团煤直接液化示范工程自 2008-12-30 首次投料试车成功,截至 2010-10-09,示范装置累计投煤 6 次,累计投煤时间 6 253 h,单次连续投煤最长时间为 2 071 h(约 87 d)。煤直接液化装置的负荷率最大达到设计值的 85%;煤的转化率达到设计值的 91%,产品收率达到了 57%,残渣固体含量接近设计值的 50%。各种数据表明,神华集团煤直接液化示范工程取得了成功<sup>[8]</sup>。历次开车运转简况见表 2。

表 2 神华集团煤直接液化示范工程历次开车概况

Table 2 All previous operations of Shenhua's direct coal-to-liquid demonstration project

投煤次数	投煤起止日期		运转时间/h	停车原因
	开始日期	结束日期		
第 1 次	2008-12-30	2009-01-12	303	首次试车后进行消缺
第 2 次	2009-08-31	2009-09-14	352	进口减压阀故障,更换国内研发的阀门
第 3 次	2009-10-01	2009-10-25	570	分馏系统改造
第 4 次	2009-12-21	2010-02-22	1 501	反应器循环泵维修
第 5 次	2010-05-01	2010-07-01	1 456	煤制氢装置故障导致供氢不足
第 6 次	2010-07-15	2010-10-09	2 071	按计划停车检修

首次投煤运转后,2009 年上半年对装置进行了较大的技术改造。运转实践表明,神华煤液化核心设备加氢反应器操作平稳,轴向径向温度分布均匀,完全达到了设计要求。全系统改造消缺后,运转情况日趋完善。2010 年(截止到 2010-10-09)已经累计运行 4 787 h,开工率超过了 70%,加工原煤 145 万 t,生产成品油 38 万 t(柴油 23 万 t,石脑油 11 万 t,液化气 4 万 t),生产高热值残渣 23 万 t,粗酚 1 700 t。柴油、石脑油、液化气等产品和副产品质量达标,产品供不应求。通过历次技术改造,煤直接液化示范工程关键设备的国产化工艺水平有效提升,如含固量 50%、温度达 330 ℃ 国产减压塔底泵的使用时间超过 5 000 h;国产的高温高差压减压阀内构件的使用寿命超过了 1 600 h。关键设备的国产化,可为煤直接液化工业化装置建设降低设备投资,提高项目的经济性。

## 2 神华包头煤制烯烃示范工程的建设与运营

神华包头煤制烯烃示范工程是世界上首套、全球最大的煤基聚烯烃工业化装置,核心装置采用我国自主知识产权 DMTO 工艺技术。示范工程建设本着“标准化、规范化、专业化、一体化”的项目管理思路,2007 年开工,2010 年 8 月一次投料试生产成功,打通全流程,生产出合格产品,达到设计要求。

### 2.1 神华包头煤制烯烃示范工程的建设

神华包头煤制烯烃示范工程于 2006-12-11 获得国家发改委核准,建设规模为 180 万 t/a 甲醇装置、60 万 t/a 甲醇制烯烃装置、30 万 t/a 聚乙烯装置、30 万 t/a 聚丙烯装置,10 万 kW 热电联产装置及其它辅助设施<sup>[9]</sup>。本示范工程是以煤为原料,通过煤气化制甲醇,甲醇转化制烯烃,烯烃聚合工艺路线生产聚烯烃。本示范工程包括六大系统 46 个单元装置。图 3 为神华包头煤制烯烃示范工程工艺流程。

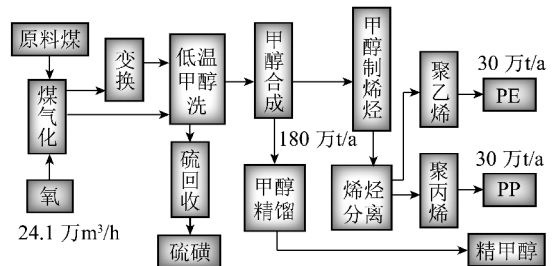


图 3 神华包头煤制烯烃示范工程工艺流程

Fig. 3 The flow of Shenhua's Baotou coal-to-olefins demonstration project

煤制烯烃示范工程主要产品为聚乙烯、聚丙烯、丁烯、碳五馏份、乙烷、丙烷及硫磺等化工产品,主要产品方案见表 3。

表 3 神华包头煤制烯烃示范工程产品方案

Table 3 Product plan of Shenhua's Baotou coal-to-olefins demonstration project

产品	主产品		副产品			中间产品		
	聚乙烯	聚丙烯	硫磺	混合 C <sub>4</sub>	混合 C <sub>5</sub>	MTO 级甲醇	聚合级乙烯	聚合级丙烯
产量/(万 t · a <sup>-1</sup> )	30	30	2.18	9.89	2.62	180	30	30

煤制烯烃示范工程的核心装置——甲醇制烯烃装置——采用中国科学院大连化学物理研究所开发的 DMTO 技术,该技术仅完成了日处理甲醇 50 t 的中试装置建设和运转,示范工程的规模为日处理甲醇 5 500 t 装置,较中试装置放大了 110 倍,需要解决降低催化剂耗量、处理好均衡取热、反应器材质的选择、耐磨材料的选择等一系列工程技术难题。MTO 反应产物含乙酸,按照要求要选择不锈钢材料,造价非常高,通过研究,采用耐磨内衬的冷壁设计,降低了投资;反应再生器通过优化,大胆采用了内外取热结合方式,将 MTO 烯烃分离的急冷水和水洗的低压蒸汽进行一体化综合优化设计,提高了热效率。针对甲醇制烯烃装置设计难度大、设备制造安装难等新课题,在工程设计、采购、施工等各阶段进行了详细工作安排,尤其对反应器现场制作、分片组段吊装、主风机安装、衬里施工、烘衬等问题进行反复研究,最终确定反应器采用大、小筒结构,筒体分片制造、现场组对的工程方案。

煤制烯烃示范工程主要配套装置煤气化装置单台气化炉日处理煤炭 1 500 t(6.5 MPa),单台空分装置制氧量为 60 000 m<sup>3</sup>/h,均属于国内最大规模。仅从单台设备而言,在设备制造、安装调试、开车维护方面技术难度已经很高。本示范工程由 7 台大型气化炉、4 套大型空分装置联合运行,设计建设难度非常大。在项目管理上,充分协调制造厂商、施工单位,优化作业流程,使气化炉采购运输与吊装、设计与气化框架施工、框架施工与设备吊装深度交叉,筑炉与管道安装、烘炉与仪表调试并行作业,空压机组采购运输与吊装、压缩厂房施工与机组安装、油洗与安装交叉进行,管道安装、吹扫、分子筛装填、裸冷、珠光砂装填无缝衔接,既节约了建设时间,又保证了建设质量<sup>[10]</sup>。

煤制烯烃示范工程于 2007-01-01 正式开始建设,2010-05-28 所有装置和设施建成,工厂建设历时 41 个月。图 4 为神华包头煤制烯烃示范工程装置。

## 2.2 神华包头煤制烯烃示范工程的生产试运行

神华包头煤制烯烃示范工程投料试车分为两个阶段<sup>[11]</sup>:



图 4 神华包头煤制烯烃示范工程装置

Fig. 4 Shenhua's Baotou coal-to-olefins demonstration project

(1) 第 1 阶段。化工装置投料试车阶段,以生产出合格的甲醇为目标。本阶段投料试车历时 57 d。2010-05-30,联合化工装置的气化装置开始投煤,7 月 3 日甲醇装置生产出合格的 MTO 级甲醇,7 月 25 日计划停车。7 月 26 日至 8 月 7 日对化工装置进行消缺整改,为第 2 阶段联合化工装置和石化装置同步投料试车提供保障。

(2) 第 2 阶段。化工和石化装置同步投料试车阶段,打通全流程。本阶段投料试车历时 54 d。2010-08-08,甲醇制烯烃装置投甲醇,8 月 9 日气化装置投煤,开始联合化工和石化装置同步投料试车,到 8 月 21 日生产出全部合格产品,9 月 30 日计划停车,投料试车结束。顺利打通全厂工艺流程,生产出所有主产品和副产品,投料试车一次成功。

煤制烯烃示范工程核心 MTO 装置运行负荷最高达到 90%,甲醇转化率 100%,双烯选择性 80.3%,丙烯和乙烯合格率均达到 99.9%,各项指标达到设计值,生产运行稳定,装置负荷已经超过盈亏平衡点,具备盈利能力。示范工程初次投料实现了 5 台气化炉同时运行,单台气化炉日负荷最高达到了 105%,净化装置单系列日负荷最高达到了 110%,甲醇装置的日负荷最高达到了 95%。中间产品 MTO 级甲醇浓度在 93%~95%,满足甲醇制烯烃装置原料甲醇质量要求。聚合级丙烯和聚合级乙烯质量达到了设计指标,且优于石油基烯烃的质量,达到了国标优级品指标。初次投料试生产累计生产 MTO 级甲醇 23.7 万 t,聚丙烯 2.1 万 t,聚乙烯 1.5 万 t,C<sub>4</sub> 产品 0.82 万 t,C<sub>5</sub> 产品 0.36 万 t,硫磺 718 t。

煤制烯烃示范工程投料试车成功,为我国“煤代油”开辟了一条新的途径。

### 3 新型煤制油和煤化工发展展望

据有关组织预测,到2020年,我国石油消费量至少也需要4.5亿t,石油对外依存度达到60%~62%。我国石油供应、消费和进口形势非常严峻。

与国内石油需求增长迅速形成鲜明对照的是国际石油生产和供应形势不容乐观。近10a国际原油产量年平均增长率仅有1.09%;近5a国际原油产量年平均增长率不超过0.5%。而相应的原油价格已经从1998年的12.72美元/桶增长到2008年97.26美元/桶,增加了6.65倍,最高石油价格甚至达到了147.25美元/桶。图5为国际石油产量及(布伦特)石油价格变化趋势<sup>[12]</sup>。

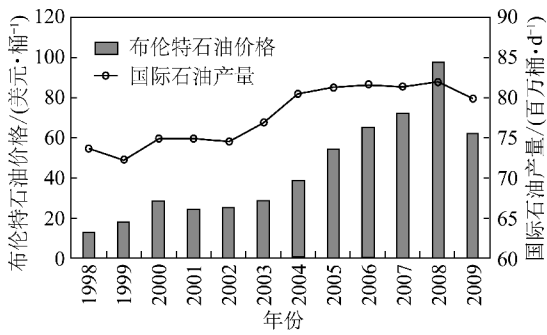


图5 国际石油产量及价格变化趋势

Fig. 5 Tendency of international oil production and price

随着国际石油价格的不断上涨,国内外众多能源公司也纷纷把注意力投向新型煤制油和煤化工产业。面对我国以煤为主的能源结构现实,开展新型煤制油和煤化工产业示范工程建设及试验,发展新型煤制油和煤化工产业,对我国具有重要的现实意义。特别是在高油价背景下,新型煤制油和煤化工项目建设不但能提高国家的能源安全供应保障,而且能为企业带来丰厚的财务回报期待,发展煤基替代能源产品成为我国众多能源公司的重要选择<sup>[13]</sup>。

目前,气候变化特别是温室气体排放已经成为国际社会普遍关心的重大全球性问题。能源消费的增加,特别是化石能源消费量的增加,必然会带来温室气体排放量的增加。与石油、天然气等燃料相比,单位热量燃煤引起的二氧化碳排放比使用石油、天然气分别高出约36%和61%。我国政府承诺:到2020年我国单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%~45%。以煤为主的能源资源和消费结构使我国在降低单位能源的二氧化碳排放强度方面比其他国家面临更大的困难。与传统的煤直接燃烧相比,现代煤制油和煤化工CO<sub>2</sub>排放浓度高,比较适宜于CO<sub>2</sub>捕获与封存(CCS)。神华集团通过国际合作,已经在

鄂尔多斯煤制油现场实施国内首个万吨级CO<sub>2</sub>捕获与封存项目实验。该项目选在鄂尔多斯盆地神华煤直接液化厂附近,目前首先开展CO<sub>2</sub>含盐水地层埋藏,CO<sub>2</sub>注入井建设完成,深度2862m,近期实现CO<sub>2</sub>封存约10万t/a。本项目计划2010年建成,2011年开始CO<sub>2</sub>注入试验。未来,煤制油和煤制化学品可与CCS结合,实现CO<sub>2</sub>近零排放。

随着我国国民经济的发展和对环境保护要求的提高,从对优质液体燃料及化学品等多方面的重大需求看,充分利用我国以煤为主的能源结构现实,优化终端能源结构和解决煤炭利用过程中引起的环境污染问题已迫在眉睫。发展煤炭的清洁转化和高效利用,多元化保证石油供应,实现能源-经济-环境协调发展,将是21世纪我国能源建设的重要方向之一<sup>[14]</sup>。

未来煤炭清洁转化的发展将是以煤的合理、清洁、高效转化为基础,以建立煤制油、煤制化学品与燃气、蒸汽联合循环发电为主线的多联产体系为手段,以建立循环经济、提高效率、改善环境和降低消耗及实现CO<sub>2</sub>的零排放为目标,并向大型化、规模化和集约化发展。

### 4 结论与建议

(1) 神华煤直接液化示范工程和煤制烯烃示范工程的成功建设和成功运营,使我国成为目前世界上唯一掌握百万吨级煤直接液化关键技术的国家和首先掌握煤制烯烃工业化生产技术的国家,为我国煤炭的清洁转化和高效利用探索出了一条适合我国国情的由高碳向低碳化发展的新途径<sup>[15]</sup>。

(2) 目前,石油安全供应问题已经成为世界性难题,也已成为影响我国经济社会发展的重要因素。结合我国以煤为主的能源结构特点,实施为清洁煤代油战略,发展现代煤制油和煤化工产业是一个比较现实的选择。未来煤炭清洁转化技术的发展将是以现代煤制油和煤制化学品为主线,并与燃气、蒸汽联合循环发电形成多联产体系,辅助CCS,实现CO<sub>2</sub>的零排放。

(3) 发展现代煤制油和煤化工产业必须实现大型化、规模化、集约化、自动化生产,以便于改善环境、提高效率、降低消耗。发展现代煤制油和煤化工产业受技术、装备、人才、市场、资本、建设环境等各方面的制约,具有相当大的投资风险,需要国家在技术开发、工程示范及产业培育等方面给予一定的政策支持。发展现代煤制油和煤化工产业不能一哄而上,必须科学管理、正确引导、合理布局、稳步推进。

(4) 现代煤制油和煤化工作为未来煤代油和清洁煤转化的重要方向,将在我国能源产业建设和国民经济发展中发挥重要作用。

#### 参考文献:

- [1] 国家统计局. 中华人民共和国 2009 年国民经济和社会发展统计公报[R]. 2010.
- [2] 舒歌平, 史士东, 李克健. 煤炭液化技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [3] 吴春来. 煤直接液化[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [4] 舒歌平. 神华煤直接液化技术及示范工程进展[A]. 煤炭清洁高效转化利用工业示范总结大会论文集[C]. 2010.
- [5] 张玉卓. 中国神华煤直接液化技术新进展[J]. 中国科技产业, 2006(2): 32-35.  
Zhang Yuzhuo. New development of China Shenhua direct coal liquefaction technology [J]. Science & Technology Industry of China, 2006(2): 32-35.
- [6] 神华集团有限责任公司. 神华煤直接液化示范工程关键技术优化总结报告[R]. 2006.
- [7] 中国神华煤制油化工有限公司北京工程分公司. 神华煤直接液化示范工程建设总结[R]. 2008.
- [8] 中国神华煤制油化工有限公司鄂尔多斯煤制油分公司. 神华煤制油示范工程生产运行情况总结报告[R]. 2010.
- [9] 中国寰球工程公司. 神华煤制烯烃项目可行性研究报告[R]. 2006.
- [10] 中国神华煤制油化工有限公司北京工程分公司. 包头煤制烯烃项目建设总结报告[R]. 2010.
- [11] 中国神华煤制油化工有限公司包头煤化工分公司. 包头煤制烯烃项目试车总结报告[R]. 2010.
- [12] BP 集团. BP 世界能源统计年鉴 2010[M]. 2010.
- [13] 高聚忠. 近期国家对煤化工和石油化工政策导向研究[A]. 煤制油化工战略与管理课题研究报告(论文集)[C]. 2010.
- [14] 谢克昌. 煤化工发展与规划[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [15] 张玉卓. 神华煤转化现状与未来发展[A]. 2010 世界煤制油大会论文集[C]. 2010.

## 2011 年第 1 期更正说明

《煤炭学报》2011 年第 36 卷第 1 期封面目次中“综合信息”的页码“109”应为“166”,特此更正,由此给您带来的不便敬请谅解。

本刊编辑部