



煤的清洁高效利用*

王建国 杨利

(煤转化国家重点实验室(中国科学院山西煤炭化学研究所) 太原 030001)

摘要 世界石油资源日益紧张,全球各国均面临能源、经济和环境可持续发展的重大问题。煤炭在能源结构中的地位非常重要,但传统煤炭利用技术能效低、污染严重、不可持续,因此,洁净煤技术近年来成为能源领域的研发重点。本文从洁净煤技术发展现状出发,重点围绕煤炭资源低碳化利用和替代油气制备优质液体燃料与化学品两大主题,介绍我国在煤炭清洁高效利用方面取得的重要进展,并对我国未来煤清洁高效利用技术研发与应用提出几点建议。

关键词 煤,清洁,高效,利用

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3045.2011.07.015



王建国研究员

1 煤清洁高效利用的意义

能源是人类生存和发展的重要物质基础,在世界一次能源构成中,石油和煤炭占据主导地位。然而,我国石油和天然气资源严重短缺,探明可采储量分别仅为世界人均值的 11%和 5%

^[1]。2009 年,我国原油产量 1.89 亿吨,净进口原油 1.99 亿吨,对外依存度已超过 50%的警戒线^[2]。2010 年,我国原油对外依存度迅速攀升至 55%^[3]。我国煤炭资源相对丰富,长期以来一直是我国的主要能源,而且这种以煤为主体的能源结构将在未来相当

长时期内难以改变。2009 年消耗标准煤 20 亿吨,占一次能源的 64.5%^[4],预计 2010—2050 年的总耗煤量超过 1 000 亿吨标准煤^[5]。目前,煤炭的主要利用方式是直接燃烧用于发电和工业供热,效率低、污染重,不仅造成了资源的巨大浪费,而且导致环境污染严重和温室气体 CO₂ 大量排放。解决煤炭利用过程的效率与环境问题,是当前我国能源发展的必然选择,也是保障我国能源安全的一项重大而长远的战略性任务。

煤的清洁高效利用也是世界各国能源领域发展的重点。“洁净煤技术”概念是 20 世纪 80 年代初美国和加拿大两国就煤炭使用对环境造成严重污染提出的,是“从煤炭开发到利用全过程中,旨在减少污染物排放和提高利用效率的煤炭加工、燃烧、转化及污染控制”等一系列新技术的总称,是“使煤作为一种能源和含碳资源达到最大限度地利用,同时把释放的污染控制在最低水平,以实现煤的高

* 收稿日期:2011 年 2 月 21 日



效、洁净利用”的技术体系。它将经济效益、社会效益与环境效益结合为一体,成为当前世界各国解决煤炭利用问题的主导技术。

2 煤清洁高效利用的国际发展概况及趋势

自上世纪 80 年代开始,发达国家从能源发展的长远利益出发,相继开展了洁净煤技术的研究工作,目前已在一些主要领域取得重大进展,许多科研成果已经推进到商业化阶段,并取得了巨大经济效益。

1986 年 3 月,美国政府率先提出并实施了总投资 69 亿美元的“洁净煤技术示范计划(CCTP)”^[6],使之成为继原子弹、航天、星球大战等计划之后由政府组织的又一个全国性计划。1998 年,为了满足新世纪对煤炭利用效率、环境和经济性的新要求,美国确定投资 26.8 亿美元实施以煤气化、净化、燃气和燃料电池发电、制氢、液体燃料和化工产品合成为主要内容的煤多联产系统的“展望 21 计划(Vision 21)”。2003 年,又提出了投资 10 亿美元的“未来发电计划(FutureGen)”,开展煤发电、制氢以及 CO₂ 捕集和封存的研发工作。2005 年,美国总统布什签署了“2005 年国家能源政策法案”,政府将继续支持煤炭清洁利用方面的技术研发,其后 10 年美国将投资 100 多亿美元加强其能源基础设施建设^[7]。目前,美国在燃烧和脱硫技术方面达到了世界领先水平^[8]。

日本早在 1980 年就成立了“新能源产业技术综合开发机构(NEDO)”,从事洁净煤技术和新能源的研发,并于 1995 年组建了“洁净煤技术中心(CCTC)”。1993 年推出了“新阳光计划”,把原来各自独立推进的有关新能源、节能和地球环境 3 个领域的技术研发进行整合。1999 年又制定了“21 世纪煤炭技术战略计划”,提出 2030 年前分 3 个阶段开发洁净煤技术,最终实现煤作为燃料的完全洁净化。其主要项目有:先进发电、高效燃烧、脱硫脱氮和降低烟尘、利用煤气的燃料电池、煤炭制造二甲醚和甲醇、水煤浆、煤炭液化和煤炭气化等^[9]。

20 世纪 80 年代,欧盟制订了“兆卡计划(Thermic Program)”,主旨是促进欧洲能源利用新技术的开发,减少对石油的依赖和煤炭利用造成的环境污染,提高能源转换和利用效率;主要目标是减少各种燃煤污染物以及温室气体排放,使燃煤发电更加洁净,通过提高效率,减少煤炭消耗。90 年代末,Shell 公司提出了合成气园(Syngas Park)的煤多联产系统,该系统包括:煤气化、净化、燃气发电、甲醇、化肥、化学品合成和特殊气体制备等单元过程。

3 我国煤清洁高效利用的研究概况及重要进展

我国也已把洁净煤技术作为调整煤炭产业结构,提高煤炭及其加工产品价值,改善环境,实现煤炭工业可持续发展的战略对策。1994 年成立了“煤炭工业洁净煤工程技术研究中心”,1995 年 9 月成立了“国家洁净煤技术开发推广应用领导小组”,1997 年 6 月国务院批准了《中国洁净煤技术“九五”计划和 2010 年发展纲要》,并将发展煤洁净高效转化列入《中国 21 世纪议程》中最优先发展的科技项目。洁净煤技术还被列为《煤炭工业“十五”规划》的 4 大战略之一,并指出煤炭工业必须走资源利用率高、安全有保障、经济效益好、环境污染少、全面协调和可持续发展的道路。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中明确将煤炭的清洁高效综合利用确定为能源领域的优先发展主题。胡锦涛总书记在 2010 年 6 月 7 日两院院士大会上指出:大力发展能源资源开发,利用科学技术,坚持系统谋划、节能优先、创新替代、循环利用、绿色低碳、安全持续,加强煤清洁高效综合利用、煤制天然气、煤制高值化学品的技术研发。

根据我国煤炭消费呈现多元化格局的特点,本着环境与发展协调统一、环境效益与经济效益并重的原则,不仅将煤作为一种能源,而且作为一种重要的含碳资源,围绕煤炭高效低碳化利用、替代油气制备优质液体燃料和化学品利用的两大主题,发展煤清洁高效利用技术,以促进我国社会、经济和生态环境的协调发展,保障我国能源安全。

近年来,我国在煤炭清洁高效利用技术中所取得的重要进展如下:

3.1 燃烧技术

煤的传统利用方式中,燃烧是较为成熟的技术,发展目标是提高燃烧效率、降低污染物和 CO_2 排放。其关键技术在于锅炉技术的研发,循环流化床锅炉(CFB)由于其燃料适应性和环保特性而得到大规模的研究开发和商业应用,CFB 的高参数化一直是技术开发追求的指标。

目前,国外大容量 CFB 开发阵营主要有:法国通用电气阿尔斯通集团(Alstom)公司和美国福斯特惠勒能源工程(Foster Wheeler)公司。Alstom 公司成功开发了 300 MW 循环流化床锅炉,并完成了 600 MW 超临界 CFB 的研究开发和设计工作。Foster Wheeler 公司研发了世界首台 460 MW 超临界循环流化床锅炉,于 2009 年 7 月在波兰完成性能试验转入商业运行,并完成 600 MW 超临界 CFB 的研究开发。

我国循环流化床的主要研发单位有:中科院工程热物理所、清华大学、西安热工研究院、浙江大学等。通过多年的研究和开发,形成了各具特色的循环流化床燃烧技术。其中,中科院工程热物理所已完成容量 <200 MW 循环流化床锅炉的技术示范和产业化应用,通过与多家企业合作,开发生产的系列 CFB 产品超过 2 000 台,并有多台 25 MW—50 MW—135 MW 循环流化床锅炉出口到国外,其燃料包括煤、造气炉渣、石油焦和煤制油油渣等。目前,中科院工程热物理所正在进行 600 MW 超临界 CFB 技术的研究。上海锅炉厂有限公司、东方锅炉(集团)股份有限公司和哈尔滨锅炉厂有限责任公司也正在结合 300 MW 等级及以下容量的 CFB 技术经验和 600 MW—1 000 MW 超临界煤粉锅炉技术经验,自主开发超临界 CFB 技术,以期赶上国际研究开发进程。

3.2 煤炭气化技术

煤的气化是一个热化学过程。它是以煤或煤焦为原料,以氧气(空气、富氧或纯氧)、水蒸气或氢气为气化剂,在高温下通过化学反应,将煤或煤焦中

的有机组分转化为气体的过程。气化煤气的有效成分包括一氧化碳、氢气及甲烷。煤气化技术是煤炭高效、清洁利用的核心技术之一,是发展煤基化学品、煤基液体燃料、合成天然气、IGCC 发电、制氢、燃料电池、工业燃料气及多联产系统等过程工业的基础。

近几年来,针对煤种适应性,世界各国正在进行更新的流化床煤气化技术的开发,如:美国 KBR 公司的 Transport 气化技术、澳大利亚 HRL 公司的流化床加压气化技术以及印度的 BHEL 流化床气化技术等。在市场需求和政府支持下,通过产学研结合,对 Texaco(德士古)、Lurgi(鲁奇)气化技术引进、吸收、再创新,国内自主开发的技术也有了长足的发展,包括:华东理工大学的四喷嘴对置水煤浆气化技术;西北化工研究院的多元料浆气化技术;清华大学的非熔渣—熔渣两段水煤浆气化技术;西安热工研究院的两段式加压干煤粉气化技术;北京航天石化技术装备工程公司自行研发的 HT-L(航天炉)气流床气化技术等。

值得一提的是,针对我国大量的“三高”(高灰、高灰熔点和高硫)煤难于直接采用现有的大规模气化技术的现状,中科院山西煤化所开发的具有自主知识产权的灰熔聚流化床粉煤气化技术,可有效地气化“三高”煤,且具有氧耗低的特点。其特点是灰渣的形成和排渣方式是团聚排渣,技术核心是在流化床中导入氧化性高速射流,使煤中灰分在软化而未熔融的状态下,在一个锥形床中相互熔聚而粘结成碳含量较低的球状灰渣,有选择性地排出炉外。2001 年完成了常压氧气/蒸汽鼓风制合成气的工业示范,2009 年 6 台 0.6 MPa 日处理 320 吨无烟煤的加压气化工业装置在晋城煤业集团 10 万吨/年高硫煤甲醇制汽油(MTG)项目上成功运行,并完成 0.6 MPa—2.5 MPa 无烟煤加压中试气化技术的开发,并将进行工业示范。

3.3 煤炭液化工工艺

煤炭液化是指煤炭通过化学加工转化为液体燃料及化学品的统称,可分为直接液化和间接液化。直接液化是煤在较高温度和压力下与氢反应使



其降解和加氢,从而转化为液体油类的工艺。间接液化是指煤经气化产生合成气($\text{CO}+\text{H}_2$),再以合成气为原料合成液体燃料或化学品。总体上,直接液化热效率比间接液化高,但对原料煤要求高(褐煤或高挥发分烟煤),较适合生产汽油和芳烃;间接液化允许采用高灰分的劣质煤,较适合生产柴油、含氧的有机化工原料和烯烃等。

3.3.1 煤炭直接液化

20 世纪 30 年代煤炭直接液化始于德国并实现工业化。1973 年发生世界石油危机,多种煤直接液化工艺相继开发并完成中试,如美国的氢煤法(H-Coal)、溶剂精炼煤法(SRC-I、SRC-II)和供氢溶剂法(EDS)等。虽然,这些工艺在技术上具备了建厂条件,但由于投资大、煤液化油生产成本低而尚未工业化。目前,几大工业国正在研发反应条件缓和、油收率高和投资成本低的煤直接液化工艺,典型的有德国的煤液化粗油精制联合(IGOR)工艺、美国碳氢化合物研究公司开发的 HTI 工艺和日本新能源产业技术综合开发机构开发的 NEDOL 工艺等。我国在煤炭直接液化方面的研究始于 20 世纪 70 年代,主要进展有:2005 年,取得 6 吨/天放大工艺验证装置连续运转 400 小时的开发成果;完成的纳米级高效煤直接加氢催化剂已通过 5 个煤种的液化试验,其性能达到国际先进水平,催化剂得到放大规模(与 6 吨/天直接液化装置配套)连续运转的验证;直接液化粗油加氢精制工艺和催化剂制备技术均取得突破,形成具有中国特色的液化油加工技术^[10];2008 年 12 月 31 日,神华鄂尔多斯 100 万吨/年的煤直接液化示范工程顺利实现油渣成型,打通全流程,产出合格的石脑油和柴油等目标产品,这标志着神华煤直接液化示范工程取得了突破性进展,但要达到稳定运行仍然存在较大难度。

3.3.2 煤炭间接液化

主要技术途径有两条:一是从合成气出发生产液体燃料(FT 合成)、气体燃料

(SNG)和各种低碳化工原料(包括甲醇、乙醇和乙二醇等);二是从合成气制备的甲醇出发,催化转化为各种化学品(乙烯、丙烯、芳烃、聚甲氧基二甲醚等)及燃料(汽油)。

3.3.2.1 合成气生产燃料及化学品

(1) FT 合成技术

世界上最早成功商业化的 FT 合成技术是由南非 Sasol 公司开发的,1955 年建成了 Sasol-I 厂,1980 和 1982 年又相继建成了 Sasol-II 和 Sasol-III 厂。目前,南非 Sasol 公司是世界上唯一的煤炭间接液化制油品和化学品大规模生产厂家,产品多达 130 余种^[11]。2009 年,该公司产油量达 710 万吨,约占产品总量的 75%。

我国从 20 世纪 50 年代开始 FT 合成技术的研发。中科院山西煤化所作为发展 FT 合成技术的主要单位,从 20 世纪 80 年代开始煤基合成液体燃料的研发工作,2001 年“低温浆态床技术中试”项目立项,2002 年 9 月实现了千吨级中试平台(图 1)的第一次运转^[12]。随后,启动了“高温浆态床铁基合成油”工业示范项目,共投资 75 亿元,分别在内蒙古伊泰、山西潞安和神华建设了 3 个 16 万吨/年—18 万吨/年的工业示范厂,目前伊泰和潞安的 2 个示范厂运行平稳。各项主要技术和经济指标均处于世界领先水平(图 2),催化剂产能是国外同类技术的



图 1 山西太原小店千吨级费托合成液体燃料中试平台,2002 年 9 月 8 日生产出第一批粗油产品

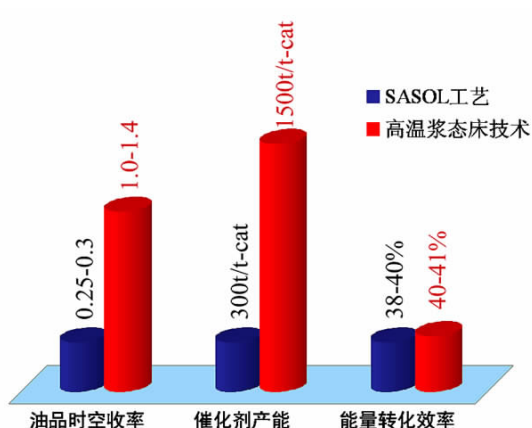


图2 中科院山西煤化所高温浆态床费托合成技术和 Sasol 工艺主要指标对比(72 小时标定结果)

4—5 倍,催化剂在单位油品中的成本只有国外技术的 1/3。目前,正在进行现有技术的产业化(360 万吨/年—540 万吨/年大规模商业化)开发和后续技术的研究与开发。兖州矿业集团 2003 年底建成了 1 万吨/年的间接液化工业示范装置,2004 年 3 月底投料试车成功。采用该技术建设的 100 万吨/年示范工厂的前期工作已基本完成,具备了建设大型工业化装置的技术条件。同时,中科院山西煤化所以生产高附加值化学品为目标的钴基固定床 FT 合成技术也取得重大突破,在山西潞安进行的万吨级工业侧线试验获得成功,催化剂实现了 2 000 小时的稳定运转,CO 转化率 85%,C5+ 收率在 85% 以上,2010 年 11 月 15 日通过了中科院组织的技术鉴定。这些研究成果使我国煤制油技术整体水平处于国际领先地位。

(2)煤制天然气(SNG)技术

该技术的发展可以追溯到上世纪 70 年代,国际上许多大型能源公司都拥有专有技术,如 Topsoe 公司的 TREMP 工艺、Davy 公司的 CRG 工艺以及英国 BG 与德国 Lurgi 公司合作的 HICOM 工艺等。其商业化运行的重要标志是美国大平原 389 万标准立方米/天的煤制天然气工厂,到目前已稳定运行 20 余年。我国煤制天然气技术

是煤气化、煤气净化及煤气甲烷化的集成技术,产品气中甲烷含量高达 95% 以上,完全可以替代天然气使用。2009 年 8 月 30 日,第一个经国家发改委核准的大唐国际 40 亿立方米/年示范工程在内蒙古克什克腾旗开工建设,预计 2012 年投产后向北京提供天然气。2009 年 12 月,第一个民营企业内蒙古汇能 16 亿立方米/年煤制天然气项目通过国家发改委核准,并开始建设^[13]。

(3)合成气制乙二醇技术

乙二醇是一种战略性的化工基本原料。1965 年,Fenton 等人发现的醇类氧化羰化合成草酸酯的反应奠定了煤制乙二醇的科学基础。目前最成熟、最具工业化前景的技术是两步法制乙二醇技术。如日本宇部兴产公司采用常压气相法生产草酸酯的过程虽未实现工业化,但已完成模试和中试试验。20 世纪 80 年代,随着我国 C1 化学与化工研究计划的启动,多家科研单位展开了 CO 氧化耦联制草酸酯、草酸的研发工作,中科院福建物构所成功开发出高活性 CO 气相催化合成草酸酯催化剂。1993 年,通过 200 ml 催化剂 1 000 多小时寿命考察的模试试验,打通了工艺路线。2008 年 6 月,完成了万吨/年乙二醇工业装置,并生产出符合 GB4649-93 优级品标准的乙二醇产品。2009 年 12 月,在内蒙古通辽高新技术开发区建成世界第一套 20 万吨/年乙二醇工业示范装置(图 3),并于 12 月 7 日试车成



图3 20 万吨/年乙二醇工业示范装置



功。

3.3.2.2 甲醇制化学品及燃料

(1) 甲醇制备烯烃技术

目前,公开报道开发或者拥有甲醇制低碳烯烃技术的主要机构有 Exxon-Mobil、UOP、中科院大连化物所等。另外,Lurgi、清华大学等相继开发了甲醇制丙烯(MTP)技术。我国的甲醇制烯烃技术取得了重大突破。2006年,中科院大连化物所与陕西新兴煤化工科技发展有限公司合作首次完成了万吨级(1.67万吨/年)甲醇制烯烃(DMTO)流化床工艺技术工业性试验,甲醇转化率>99%,乙烯和丙烯选择性达到79.1%,每吨低碳烯烃的甲醇单耗为2.96吨。2010年8月8日,神华包头60万吨/年DMTO工业化装置(图4)正式投料,一次开车成功。目前,该装置运行稳定,甲醇转化率100%,乙烯和丙烯选择性大于80%,标志着我国甲醇制烯烃技术的研发处于国际领先地位。



图4 60万吨/年煤制烯烃工业化装置

(2) 甲醇制聚甲氧基二甲醚技术

聚甲氧基二甲醚(DMM_{3.8})是一种性能良好的燃料添加剂,迄今为止还没有实现工业化的技术。主要原因是制备DMM_{3.8}的关键单元“缩聚控制”反应条件苛刻、过程复杂、产品收率不理想等。最近,中科院兰州化物所采用功能化离子液体催化剂取得了突破,不仅完成了功能化离子液体催化剂的制

备和甲醇制三聚甲醛的中试试验,而且打通了甲醇与三聚甲醛反应制备DMM_{3.8}的工艺流程,形成了拥有自主知识产权的甲醇制DMM_{3.8}技术。

(3) 甲醇制汽油(MTG)技术

该技术最早是由美国Mobil公司于20世纪70年代开发的。它为煤或天然气合成高辛烷值汽油开辟了一条有效途径。20世纪80年代,Mobil公司以ZSM-5分子筛为催化剂完成了两段法固定床技术工业示范,并在新西兰建成的年产50万吨汽油的工业装置上实现了商业运行^[14]。在流化床技术方面,Exxon-Mobil公司和德国伍德公司完成了每天甲醇耗量15.9立方米的流化床工艺中试。我国MTG技术的研发始于20世纪80年代,中科院山西煤化所在ZSM-5分子筛催化剂研制方面取得了长足的进步,并和赛鼎工程公司、云南煤化工集团公司等单位合作,成功开发了“固定床绝热反应器一步法甲醇转化制汽油技术”,2007年在云南煤化

工集团完成了3500吨/年汽油的工业示范试验。目前正在云南建设20万吨/年汽油的商业运行装置。

4 煤清洁高效利用的建议及对策

就我国而言,在今后相当长的时期内,煤炭仍将是主要的能源。传统的利用方式是粗放的、不可持续的,发展煤炭清洁高效综合利用技术,实现

节能减排是我国能源产业发展的必然选择。洁净煤技术一直是一个重要的科学和技术问题,涉及煤电、煤化两个行业,跨领域、跨学科,是一项庞大的系统工程。今后应围绕煤炭低碳化利用和替代油气制备优质液体燃料与化学品两大主题(图5),确立基础研究→核心技术突破→系统集成→产业化平

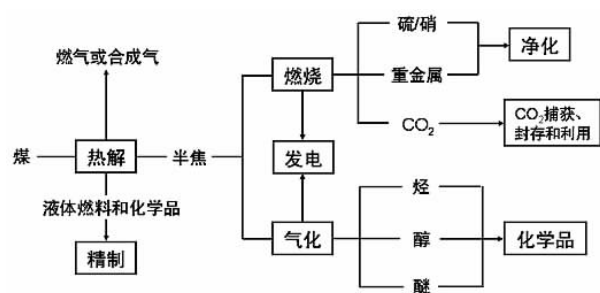


图5 煤清洁高效利用路线图

台的发展模式,开展煤的清洁高效利用。

洁净煤技术产业化是发展洁净煤技术的核心,为加快我国洁净煤技术的发展及其产业化,应着重做好以下几方面的工作:

①根据我国发展洁净煤技术的目标,加大基础研究力度,把基础研究作为技术进步的核心动力,使基础研究与技术开发紧密结合,在此基础上加速核心技术的工业化进程。

②为促进中国洁净煤技术的产业化及推广应用,应根据市场需求,选择适合我国国情及发展阶段的洁净煤技术。确定重点,明确任务,开展国内和国际合作的研究、开发、示范和推广应用。

③从整体能效的角度考虑,以资源综合利用为核心,以循环经济和低碳经济理念为指导,发展高效定向转化催化技术、先进发电技术和煤气化技术,并通过优化工艺、系统集成和发展多联产技术,提高能效,减少CO₂排放。

④充分考虑煤炭的结构和组成特征,发展煤炭清洁高效梯级利用技术。利用低阶煤中挥发性烃类化合物可以在温和条件下直接提取油气和化学品的特点,提高煤炭利用效率和利用价值。

⑤建立洁净煤技术的识别、筛选和评价方法,完善评价指标体系。采用技术-经济-环境的综合定量方法对煤炭开发利用技术进行评价,提出洁净煤技术进一步发展指标或目标,持续改进,促进洁净煤技术全面发展。

⑥制定相应的政策法规,为促进洁净煤技术的

发展提供法律环境,加强关于洁净煤技术的宣传,提高公众意识等。

⑦加强国际交流与合作,了解国际同领域的发展动态,利用全球资源,引进国外先进人才和技术,并培养国内技术人才。

主要参考文献

- 1 刘刚,宋华岭.中国能源缺口解析.中国矿业,2008,17(8): 1-4.
- 2 汪孝宗.我国石油对外依存度超50%严重影响能源安全.中国经济周刊,2010年1月26日,<http://news.qq.com/a/20100126/001304.htm>
- 3 国家发展和改革委员会.预计今年我国石油对外依存度约55%.http://www.gov.cn/jrzq/2010-12/28/content_1774553.htm
- 4 中国2020年或将建成全球最大煤清洁转化产业.http://www.cpicorp.cn/zhxx/201009/t20100919_126263.htm
- 5 倪维斗.能源体系转型须打好“煤炭牌”.http://www.cas.xw/zjsd/201010/t20101027_2995287.shtml
- 6 Coal: Energy for the Future. Washington, D C: National Academy Press, 1995.
- 7 中国能源编辑部.发展洁净煤技术、促进我国经济、能源、环境协调发展.中国能源,2006,28(7): 卷首语.
- 8 胡社荣,李岚飞.中国洁净煤技术和若干问题的思考.自然杂志,1998,20(4): 237-240
- 9 Ebara N. R & D of coal utilization technology in Japan. Fuel Processing Technology, 2000, 62: 143-151.
- 10 杜铭华.关于中国煤化工发展的几点讨论.煤质技术,2006,1: 1-3.
- 11 曹征彦.中国洁净煤技术.北京:中国物资出版社,1998.
- 12 Peter Aldhous. China's burning ambition. Nature, 2005, 435: 1152-1154.
- 13 陈贵锋.洁净煤技术产业发展机遇与挑战.中国能源,2010,32(4): 5-8.
- 14 钱伯章.甲醇制汽油路线及其应用.化工设计通讯,2009,35(4): 31-36.

Clean and Highly Efficient Utilization of Coal

Wang Jianguo Yang Li

(State Key Laboratory of Coal Conversion, Institute of Coal Chemistry, CAS 030001 Taiyuan)

Abstract With the decrease of petroleum resource, all of countries have to face an extremely important problem of sustainable development of energy and economy and protection of environment. The traditional techniques for using coal led to low energy utilization efficiency, severe pollution and non-sustainability. Therefore, development of clean coal utilization technology has attracted much attention. In this paper, the recent research progress in the development of clean coal utilization technology was reviewed. It involves in the combustion of coal to make power and the conversion of coal to fuels and chemicals. In the last section, how to use coal in future and develop clean and highly efficient technology for utilizing coal was proposed.

Keywords coal, clean, highly efficient, utilization

王建国 中国科学院山西煤炭化学研究所所长,研究员,博士生导师,中科院“百人计划”入选者。1962年出生。1996年作为洪堡学者,赴德国 Erlangen 大学合作研究,1998年回山西煤化所工作。中科院煤转化国家重点实验室主任,《燃料化学学报》主编,兰州大学兼职教授。主要从事烃醇合成及转化催化剂与反应过程的实验和理论研究。在国际学术刊物包括 *J. Am. Chem. Soc.*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, *J. Phys. Chem.*, *J. Catal.*, *Ind. Eng. Chem. Res.*, *Chem. Eng. Sci.*, *Appl. Catal.* 等发表论文 160 余篇。主持完成国家自然科学基金重大项目、中科院“百人计划”等多项课题,“973”首席科学家,中科院战略性先导科技专项“低阶煤清洁高效梯级利用关键技术与示范”负责人。E-mail:jgwang@sxicc.ac.cn