

我国煤制燃料油技术进展及工业化现状

胡发亭^{1,2,3}, 颜丙峰^{1,2,3}, 王光耀^{1,2,3}, 谷小会^{1,2,3}, 常秋连^{1,2,3}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 煤化工分院, 北京 100013; 2. 煤炭资源开采与洁净利用国家重点实验室, 北京 100013; 3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室, 北京 100013)

摘要:我国富煤贫油少气,以煤为原料生产清洁燃料油具有重要意义。为实现我国煤制燃料油产业健康有序快速发展,论述了煤直接液化、煤间接液化、煤油共炼3种煤制燃料油技术的定义、原理以及工艺流程,概述了煤制燃料油技术在我国的发展历程、技术研究进展及工业化应用现状。对3种煤制燃料油技术工业应用过程中存在的问题、技术难点进行分析,并展望了应用前景。3种煤制燃料油技术在我国均已建成工业示范项目,步入了商业化发展阶段,煤直接液化和煤油共炼由于技术和原料的特殊性,目前均只是建设了一套工业示范装置,而我国已投产或试车成功的煤间接液化项目有10个左右,总产能近千万吨。煤直接液化技术吨油煤耗小,投资和运行成本低,今后应重点提高循环溶剂的质量和数量;煤间接液化技术成熟,是我国重点推广的煤制燃料油技术,未来的发展趋势是拓展产品种类,提高产品附加值;在同时具备适合液化的煤和重质油资源的企业适宜发展煤油共炼产业。国家应加大煤制油研发投入,重点解决目前存在的水耗、能耗、碳排放高等问题,并给予政策支持,促进煤制油产业快速发展,保障国家能源安全。以规划为先导,积极稳妥发展煤制燃料油产业,是煤炭行业未来发展的新格局新趋势。

关键词:煤;燃料油;直接液化;间接液化;煤油共炼

中图分类号:TQ522

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)01-0057-07

Technical progress and industrialization status of coal to fuel oil in China

HU Fating^{1,2,3}, YAN Bingfeng^{1,2,3}, WANG Guangyao^{1,2,3}, GU Xiaohui^{1,2,3}, CHANG Qiulian^{1,2,3}

(1. Coal Chemistry Branch of China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 3. National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control, Beijing 100013, China)

Abstract: China is rich in coal and poor in oil and gas, it is of great significance to produce clean fuel oil by using coal as raw material. In order to realize healthy and orderly development of China's coal to fuel oil industry, the definition, principle and technological process of direct coal liquefaction, indirect coal liquefaction and coal-oil co-processing were introduced. The development course, technology research and industrial application of coal to fuel oil technology in China were reviewed. The existing technical problems and industrial application of three kinds of coal to fuel oil were summarized, and the technical difficulties and application prospects of the three kinds of coal to fuel oil were discussed and prospected. Industrial demonstration projects have been completed for these three types of coal to fuel oil technologies, and have entered the stage of commercial development. Because of the particularity of technology and raw materials, the direct coal liquefaction and coal-oil co-processing have now only built a set of industrial demonstration units. There are about 10 indirect coal liquefaction projects in China that have been put into production or tested successfully, with a total capacity of nearly 10 million tons. It provides an important reference for the long-term planning and policy-making of coal to fuel oil industry in China. Direct coal liquefaction technology with low coal consumption and low investment and operation cost should focus on improving the quality and quantity of circulating solvents in the future. The technology of indirect coal liquefaction is mature, and it is a key popularized technology. The development trend of indirect coal liquefaction technology in the future is to expand the product category and increase the added value of the product. Enterprises with coal and heavy oil resources suitable for liquefaction are suitable for the development of coal-oil co-processing industry. The govern-

收稿日期:2018-12-25;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18122501

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB0600303);NSFC-山西省煤基低碳联合基金资助项目(U1610221)

作者简介:胡发亭(1976—),男,山东菏泽人,高级工程师,研究方向为煤炭直接液化、煤油共炼、煤焦油加氢、精细化工技术等。E-mail:hufating@163.com

引用格式:胡发亭,颜丙峰,王光耀,等.我国煤制燃料油技术进展及工业化现状[J].洁净煤技术,2019,25(1):57-63.

HU Fating, YAN Bingfeng, WANG Guangyao, et al. Technical progress and industrialization status of coal to fuel oil in China[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(1): 57-63.



移动阅读

ment should increase investment in research and development of coal to oil, focusing on solving the existing problems of high water consumption, energy consumption, carbon emissions, etc. The government should give policy support to the coal to oil industry, promote the rapid development of the coal oil industry and ensure the national energy security. It is a new pattern and new trend of development for the coal industry to actively and steadily develop the coal to fuel oil industry under the guidance of planning.

Key words: coal; fuel oil; direct liquefaction; indirect liquefaction; coal-oil co-processing

0 引言

我国“富煤、缺油、少气”的能源禀赋特点决定了在相当长时期内,煤炭仍是我国基础能源和重要原料。2017年我国石油对外依存度达67.4%,估计到2020年将超过70%,这将对我国能源战略安全构成巨大威胁^[1-3]。因此发展煤制燃料油技术并进行产业化,可有效缓解因富煤缺油给我国能源安全带来的挑战,有利于促进煤炭产业转型升级,是实现煤炭清洁高效利用的重要途径^[4-5]。煤制油技术可提供现有石油化工技术难以制备的高品质柴油、汽油,尤其是军用和航空航天特种燃料,因此煤制燃料油能大大提升我国油品质量和生产特种燃料油。煤制燃料油技术是将固态煤转化为类似于石油原油的液体。即以煤炭为起始原料,经物理或化学加工(热解/气化/液化等)过程,生产汽油、柴油、航空煤油和液化石油气等清洁燃料和高附加值石油化工产品的利用技术。根据不同加工过程,煤基制油技术可分为煤直接液化(DCL)、煤间接液化(ICL-FT)、油煤共炼(COCP)三大类。这3种技术路线在我国均已建成示范项目,掌握了自主知识产权,打通了工艺流程,步入商业化发展阶段。

本文介绍了3种煤制燃料油技术的定义、特点及技术进展,概述了其技术现状及产业发展情况,总结了各类煤制燃料油技术工业应用过程中出现的问题,对煤制燃料油技术的前景进行展望,以期促进我国煤制燃料油技术的完善和工业化规模的壮大。

1 煤直接液化制燃料油技术

1.1 原理及工艺

煤直接液化是煤炭在高温高压下,借助供氢溶剂和催化剂,经热溶解、热萃取、热分解和加氢等物理化学过程,将大分子煤转化成小分子油,脱除O、N、S等杂原子,生产洁净的液体燃料油和化工原料。

煤和溶剂、催化剂配制成油煤浆和氢气混合后经泵送入直接液化反应器进行煤直接液化反应。煤浆在反应器中首先进行煤的热溶解,溶剂分子扩散进入煤三维交联的大分子结构。反应器内部温度

升到250℃左右时,煤中一些弱键发生断裂,产生可萃取的物质;反应器内部温度超过250℃后,煤中一些不稳定的键开始断裂;温度超过350℃时,煤的大分子结构发生热分解反应,较弱的桥键迅速断裂,形成反应活性很高的自由基碎片。这些自由基从供氢溶剂、溶解氢气和煤的母体中获得氢原子并稳定下来,形成分子量分布很宽的产物,包括前沥青烯、沥青烯等中间产物和分子量低的油或气体分子^[6-8]。如果自由基碎片不能及时得到氢原子,自由基就会相互结合生成分子量更大的物质甚至结成半焦。煤直接液化反应历程如图1所示。

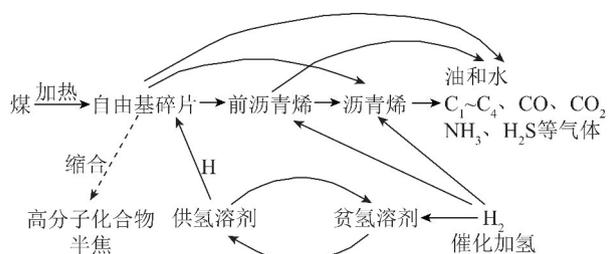


图1 煤直接液化反应过程示意

Fig. 1 Schematic diagram of reaction course in direct coal liquefaction

自1913年德国Bergius发明煤直接液化技术以来,煤直接液化工艺不断进步发展。煤直接液化工艺催化剂类型、反应器型式、固液分离方式不同,但都包括4个主要工艺单元:①煤浆制备单元。将煤破碎至0.15 mm以下,与溶剂、催化剂制备成均匀的油煤浆。②反应单元。高温高压条件下在反应器内进行煤直接加氢反应,生成液体物。③分离单元。分离出加氢液化反应生成的气体、液化油和固体残渣。④提质加工单元。对液化油进行加氢精制,进行芳环饱和和脱硫、脱氮等过程,得到合格的汽油、柴油或其他化学等产品^[9]。煤直接液化工艺原则流程如图2所示。

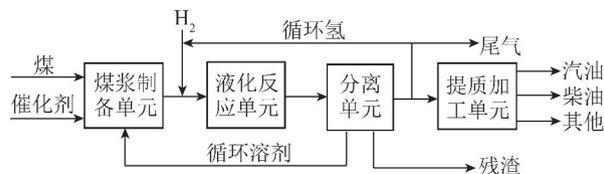


图2 煤直接液化工艺原则流程

Fig. 2 Principle flow of direct coal liquefaction

1.2 技术进展

建国初期,中国科学院大连化学物理研究所曾开展煤炭液化的试验研究。后来由于大庆油田的发现和开发,煤炭液化制油技术随之中断。从20世纪70年代末开始我国重新开始煤炭直接液化技术研究,并被列为国家重点科研项目,煤炭科学研究总院成为主要承担单位,许多高等院校和研究机构也参加了研究与开发^[10-11]。

30多年来,煤炭科学研究总院对我国上百个煤种进行了煤直接液化试验,选择液化性能较好的28个煤种在0.1 t/d小型连续试验装置上进行了54次运转试验,选出15种适合液化的中国煤,液化油收率可达50%以上(无水无灰基煤),对其中4个煤种进行了煤炭直接液化工艺条件研究,开发了高活性的煤直接液化高效催化剂^[12-14]。

2003年,煤炭科学研究总院开发了具有自主知识产权的将逆流反应器、环流反应器和煤液化油(含循环溶剂)在线加氢反应器串联的煤直接液化工艺(CDCL工艺)。该工艺将逆流反应器和环流反应器串联用于煤加氢液化工艺,同时将溶剂加氢和液化油稳定加氢串联到煤加氢液化中。较难液化的煤和重质液化油进入环流反应器,油收率高。2003—2005年又自主开发了铁基纳米级催化剂,可均匀地分散在煤颗粒表面,用量是常规催化剂的1/3~1/4,液化油收率可高出常规铁系催化剂5%,该催化剂已经应用于神华煤直接液化示范工程^[8]。

2001年,神华集团联合国内研究机构,成功开发了具有自主知识产权的神华煤直接液化工艺技术。2002—2008年,神华集团对神华煤直接液化工艺技术进行了实验室小试、6 t/d工艺开发中试工艺验证及工艺条件优化试验,形成了成熟的煤直接液化工艺技术^[15]。2004年8月,神华煤直接液化示范工程项目在内蒙古鄂尔多斯市的神东矿区开工建设。2007年第1条生产线基本建成,2008年进入单机和各装置的全面调试阶段,2008年12月30日投煤试运转成功。

近年来,我国相关科研院所、企业也进行了煤直接液化工艺技术的开发研究工作,取得了一定成果。中国科学院山西煤炭化学研究所和中科合成油技术有限公司联合建立了万吨级的温和加氢液化中试装置。肇庆市顺鑫煤化工科技有限公司针对褐煤开发了一种利用热溶催化从煤炭中制取液体燃料的煤直接液化工艺技术。

1.3 工业化现状

2001年3月,我国神华集团的煤直接液化示范

工程项目建议书获得国务院批准,该项目设计规模为年产500万t油品,分2期建设。一期工程建设规模为年产320万t油品,总投资245.35亿元,由3条主生产线(单条108万t)组成,每条生产线包括煤液化、煤制氢、溶剂加氢、加氢改质和催化剂制备等14套主要生产装置^[16]。

2004年8月25日,神华集团煤直接液化项目在内蒙古自治区鄂尔多斯市伊金霍洛旗乌兰木伦镇开工建设。2007年末,神华集团煤直接液化示范工程项目一期工程第1条生产线建设成功,设计年耗煤345万t,生产各种油品108万t,其中柴油72万t、液化石油气10.2万t、石脑油25万t、酚等其他产品0.8万t。2008年12月30日,进行投煤试车,至12月31日,生产流程全部打通,顺利实现油渣成型,产出合格的柴油和石脑油。2014年2月对该项目进行了72h连续运转监测,对能耗、水耗等主要指标进行了标定。认为该项目为世界首套百万吨级煤直接液化工业化示范装置,形成了具有自主知识产权,达到世界领先水平的成套技术,填补了国内外空白。目前神华煤直接液化示范工程项目处于正常生产阶段,日产柴油2000t,产品销售势头良好^[17]。

2 煤间接液化制燃料油技术

2.1 原理及工艺

煤间接液化制油是煤炭和气化剂先气化产生合成气(CO+H₂),再以合成气为原料合成液体燃料和化学产品的过程。间接液化的合成反应称为费托(F-T)合成,其生成油品的反应方程式主要有

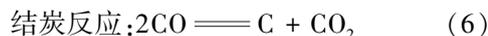
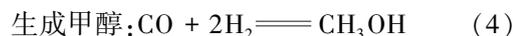
生成烷烃:



生成烯烃:



另外还有一些副反应



除了以上反应外,还有生成更高碳数的醇以及醛、酮、酸、酯等含氧化合物的副反应^[18-20]。

煤炭间接液化工艺主要由4个步骤组成:煤气化,煤气净化,合成反应,产物分离精制^[21],其基本工艺流程如图3所示。

2.2 技术进展

建国前我国就开始了煤间接液化制油技术研究工作,并在引进国外技术的基础上建设了工业化装

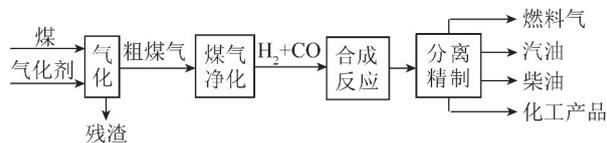


图3 煤间接液化制油技术原则流程

Fig. 3 Principle flow of indirect coal liquefaction

置。新中国成立后,我国重新恢复和扩建了二战期间停产的煤间接液化制燃料油装置。后来大庆油田发现,1967年锦州煤间接液化制燃料油装置停产,煤炭间接液化研究工作中断。

鉴于20世纪70年代发生的2次世界石油危机以及我国煤炭资源丰富的国情,20世纪80年代初,我国恢复了间接液化的研究开发工作,开发单位主要是中国科学院山西煤炭化学研究所、山东兖矿集团有限公司、中国科学院大连化学物理研究所、清华大学等及其他大专院校和科研机构,都取得了一定成果^[22-24]。

中国科学院山西煤炭化学研究所在分析MTG(甲醇制汽油)和Mobil浆态床工艺的基础上,提出将传统F-T合成与沸石分子筛相结合的固定床两段合成工艺(MFT工艺)。其技术特点是一段由合成气经F-T合成生产的烃直接经二段分子筛重整后即可获得成品汽油。由于固定床技术生产效率偏低、产品结构需进一步优化,其又开发了以廉价铁基催化剂和先进的浆态床为核心与以长寿命钴基催化剂和固定床/浆态床为核心的浆态床-固定床两段法间接液化合成油工艺(SMFT工艺)技术^[25]。

21世纪以来,中国科学院山西煤炭化学研究所进行共沉淀Fe-Cu催化剂和浆态床反应器的研发,于2002年建成了年产油千吨级的SMFT中试装置。该装置在2002年9月实现了第1次试运转,并合成出第1批粗柴油,到2003年底已累计获得了数十吨合成粗油品^[26]。2003年底又从粗柴油中生产出无色透明的高品质柴油。

山东兖矿集团有限公司于2002年12月在上海组建上海兖矿能源科技研发有限公司,开展煤间接液化制油技术的研发工作,包括催化剂的开发研究、工艺设计软件的开发和设备与工艺的开发等,于2003年6月研发出可供工业化、具有国内自主知识产权的煤间接液化制油铁基催化剂。该催化剂的各项性能指标均优于或接近国外同类催化剂。在成功开发出费托合成反应器模拟软件和低温费托合成煤制油全过程模拟软件的基础上,完成了低温费托合成浆态床反应器的开发和费托合成工艺的研发工作^[27]。

兖矿集团还进行了高温费托合成技术的研发,包括催化剂、高温费托合成固定流化床反应器、高温费托合成工艺等。高温费托合成制油技术的主要产品为汽油、柴油、含氧有机化合物和烯烃。与低温费托合成产品相比,高温过程产品中优质化学品和烯烃产品比例更大,具有更好的市场适应性。2006年,建设了万吨级的高温费托合成中试装置和相应的100 t/a的催化剂装置,2007年中试装置投料试车,完成了中试试验与工艺验证工作。

2.3 工业化现状

我国最早从二战期间开始进行煤间接液化制油技术的研究和装置建设,1937年日军引进德国常压固定床费托合成技术在锦州石油六厂建设煤制油厂,规模为100 t/a,1943年建成投产,二战结束时停产。1941年在重庆开始建设煤间接液化制油厂,建国后,于1950年恢复并扩建了锦州煤制油装置,1959年产量最高时达到4.7万 t/a,后来由于大庆油田的发现,这些煤间接液化制油装置全部关闭。

21世纪以来,我国煤间接液化制油技术的研发和产业化进入井喷式发展时期,神华集团、潞安集团、伊泰集团等利用中科合成油公司的具有自主知识产权的专利技术建设了3个20万 t级的煤间接液化制油工业示范厂,均已在2009年前后建成投产并稳定运行。2015年9月,采用兖矿集团自主研发的低温费托合成油技术,由陕西未来能源化工有限公司投资建设的我国首套百万吨级煤间接液化制油项目建成投产,年产柴油78.98万 t、石脑油25.53万 t、液化石油气10.02万 t。2016年12月,神华宁煤集团400万 t/a煤炭间接液化工业示范项目建成投产,该项目采用中科合成油公司的高温浆态床煤间接液化工艺技术,年产油品405万 t,其中柴油273万 t、石脑油98万 t、液化气34万 t;副产硫磺、混醇及硫酸铵等。2017年6月,内蒙古伊泰化工有限责任公司120万 t/a精细化学品项目建成投产,该项目采用中科高温浆态床费托合成成套工艺技术,生产低芳溶剂、石蜡、十六烷值改进剂、LPG、硫酸铵等产品。2017年12月,采用中科合成油公司的高温浆态床费托合成工艺技术,山西潞安集团承建的180万 t高硫煤清洁利用油化电热一体化示范项目一期100万 t煤间接液化制油示范工程建成投产。这些项目的建成投产标志着我国进入了科学有序大规模自主发展煤制油工业的阶段,煤间接液化制油产业化取得了阶段性成果和重点突破,我国在能源战略储备方面迈出了实质性步伐^[28-30]。

目前在建、拟建和规划的煤间接液化制油工业

化项目有内蒙古伊泰煤制油有限责任公司年产200万t煤炭间接液化示范项目、贵州渝富能源开发股份有限公司的600万t/a(一期为200万t/a)煤间接液化制油项目、伊泰伊犁能源有限公司100万t/a煤制油示范项目、伊泰新疆能源有限公司伊泰华电甘泉堡200万t/a煤制油项目、伊泰集团伊犁540万t煤间接液化制油项目(一期100万t/a)、北京能源集团有限责任公司位于内蒙锡林郭勒的500万t/a煤间接液化制油项目等。

3 煤油共炼制燃料油技术

3.1 原理及工艺

煤油共炼也称为煤油共处理技术,是20世纪80年代在煤直接液化工艺基础上发展起来的一种煤制燃料油技术。煤油共炼是将煤和重质油混合后通过反应器并加氢裂解成轻、中质油和少量烃类气体的工艺技术,其优势是煤与重质油之间存在协同效应、原料转化率高、产品质量好等^[31-33]。煤油共炼的基本原理是将煤直接液化工艺中所用的循环溶剂用石油重油或煤焦油代替,如来自石油加工业的重质原油、常压重油或减压渣油,全部或部分取消循环溶剂。在煤油共炼技术中,大部分液体产品从重油中衍生,也有一部分从煤制得。其总目标是在煤液化的同时将石油衍生油提质,减少单位产品的投资和操作费用。煤油共炼制燃料油技术的工艺流程和煤直接液化基本相似,工艺流程是单段或两段。

3.2 技术进展

我国煤油共炼技术的研发工作起步较晚。在煤油共炼用重质油研究方面,煤炭科学研究总院对石油或石油炼制过程的低附加值副产品(高金属含量、高沥青质含量的低品质石油、催化裂化加工过程的回炼油、澄清油、油浆、常减压渣油、润滑油溶剂精制抽出油、催化裂化回炼油、延迟焦化重质油、减黏裂化重质油和加氢裂化重质油)及煤焦油进行了煤油共炼研究,发现不同的重质油对煤油共炼的适应性不同,环烷基重质油与煤有很好的协同作用,石蜡基重质油与煤的共处理效果较差^[34]。

煤炭科学研究总院于2007年在煤直接液化工艺的基础上开发了BRICC煤油共处理工艺,该工艺对石油或石油炼制过程的低附加值重质油及煤焦油均有较好的适应性,能有效抑制结焦反应,煤和重质油的转化率高,油收率高^[35],煤转化率在90%以上,重质油转化率在85%以上,油收率超过70%,达到或超过了国内外同类先进水平。

2011年,延长石油集团在引进国外先进重质油

悬浮床加氢裂化技术的基础上,结合重质油悬浮床加氢裂化和煤直接加氢液化工艺的技术特点,成功开发了延长石油煤油共炼成套工艺技术^[36]。该工艺以中低级煤与重质油为原料,通过在线集成悬浮床加氢裂化-固定床加氢改质技术,采用高效的Fe系催化剂-添加剂体系,有效延缓了反应器及分离系统中的生焦、结焦,从而实现了高惰质煤基重质油的高转化率。该技术将劣质重油加工技术与现代煤化工技术耦合,具有良好的产业化应用前景。

3.3 工业化现状

延长石油集团经过多年的系统化研究、中试试验和工业示范装置运行,积累形成了煤油共炼(Y-CCO)成套工业化技术。2012年4月,延长石油集团油煤新技术开发公司在陕西榆林靖边县开工建设45万t/a煤油共炼工业示范装置,该装置是全球首套煤油共炼工业化示范项目,总投资17.9亿元,建设内容主要包括45万t/a加氢裂化装置、6万m³/h制氢装置、22.5万t/a备煤系统以及储罐、变配电、中央控制室等配套工程^[37-39]。

2015年1月,45万t/a煤油共炼工业示范装置投料试车成功,工艺流程全线打通;2015年8月,该装置72h连续运行结果表明在煤粉浓度为41.0%时,煤转化率为86.0%,525℃以上催化裂化油浆转化率为94.0%,液体收率达70.7%,能源转换效率为70.1%,吨产品水耗1.6t。自2015年初转入试车阶段以来,已攻克连续稳定运行技术难题,下一步将以安全、质量、成本、效益为目标,确保该装置平稳高效运行。截至2018年6月8日,该项目第7次试车连续稳定运行273d,圆满完成装置稳定运行9个月。期间加工原料21.35万t,汽油、柴油、液化气总产量12.45万t,汽柴油收率为58.31%,投煤比例30%左右。

4 前景与展望

1)煤间接液化是我国重点推广和大力发展的煤制燃料油技术,但也面临投资和运行成本高等问题,因此拓展产品种类,提高产品附加值是煤间接液化未来发展的重点。

2)国家应加大煤制油研发投入,完善技术战略储备,制定产业发展规划,促进我国能源调整,保障国家能源安全。

3)煤制燃料油技术存在能耗高、水耗高等问题,应集中力量攻关煤制燃料油领域关键技术,加快解决煤制油工艺技术的节水环保问题,努力打造升级版煤制油。

4)我国煤制燃料油是新兴产业,要给予政策支持,提升产业管理水平,优化产业政策环境,促进煤制油产业加快发展。

5 结 论

1)煤直接液化技术吨油煤耗小,油收率高,投资和运行成本低,是我国首先进行工业化示范的煤制燃料油技术。但煤直接液化技术在国外没有工业化示范先例,仅在我国建设了一套工业示范装置,技术成熟度还有待考察。在工业装置运转过程中,发现返回的配制煤浆所需循环溶剂不足,需再返回一定规模的柴油馏分,而柴油裂化会产生一定量气体,降低油收率,并造成循环溶剂的轻质化,因此提高循环溶剂的质量和数量是煤直接液化今后需要进一步研究的重点。

2)煤间接液化技术在南非首先实现了工业化应用,工业装置至今已稳定运行60多年,工艺成熟,生产的油品洁净,无硫、氮等污染物,煤种适应性强。近年来煤间接液化制油在我国实现了一定规模的工业化应用,已有多个工业化装置建成投产,运行状况良好,是我国煤制燃料油技术重点推广的对象。

3)煤油共炼技术能解决煤直接液化存在的溶剂油短缺和柴油十六烷值偏低等问题,煤和重质油存在协同效应,具有氢耗低,油品质量好,生产成本低等优点。但建设煤油共炼工业化项目,需同时满足多个条件,如需有适合液化的煤炭资源和足够的重质油资源,且重质油和煤的匹配性好等。因此,煤油共炼技术的工业化推广应用受到诸多限制。

4)发展煤制燃料油产业,是煤炭产业需要面对的能源供需新格局新趋势,是结合我国能源资源、煤炭产业客观实际转型升级的必然选择。我国相关部门要以规划为先导,积极培育和壮大煤制油产业主体,夯实煤制油产业发展基础,引导我国煤制油产业进入发展的新阶段。

参考文献 (References):

[1] 袁亮,张农,阚甲广,等.我国绿色煤炭资源量概念、模型及预测[J].中国矿业大学学报,2018,47(1):1-8.
YUAN Liang, ZHANG Nong, KAN Jianguang, et al. The concept, model and reserve forecast of green coal resources in China[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(1):1-8.

[2] 阮立军,杨芊.我国现代煤化工产业面临的形势和发展机会[J].煤炭加工与综合利用,2018(2):1-5.
RUAN Lijun, YANG Qian. The situation and development opportunity of modern coal chemical industry in China[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2018(2):1-5.

[3] 黄格省,李雪静,杨延翔,等.我国煤制油技术发展现状与产业发展方向[J].石化技术与应用,2017,35(6):421-427.
HUANG Gesheng, LI Xuejing, YANG Yanxiang, et al. Present situation and development direction of coal to oil production technology in China[J]. Petrochemical Technology & Application, 2017, 35(6):421-427.

[4] 李振宇,黄格省.推动我国能源生产革命的途径分析[J].化工进展,2015,34(10):3521-3528.
LI Zhenyu, HUANG Gesheng. Analysis on ways to promote energy production revolution in China[J]. Chemical Industry and Engineering progress, 2015, 34(10):3521-3528.

[5] 俞珠峰,王强,罗腾.现代煤化工该朝什么方向发展[J].煤炭加工与综合利用,2017(12):1-4.
YU Zhufeng, WANG Qiang, LUO Teng. What direction should modern coal chemical industry develop[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2017(12):1-4.

[6] 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,2003.

[7] 李克健,吴秀章,舒歌平.煤直接液化技术在中国的发展[J].洁净煤技术,2014,20(2):39-43.
LI Kejian, WU Xiuzhang, SHU Geping. Development of direct coal liquefaction technologies in China[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(2):39-43.

[8] 史士东.煤加氢液化工程学基础[M].北京:化学工业出版社,2012.

[9] 王勇.煤直接液化反应动力学的高压釜试验研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2007.

[10] 刘华.提高煤直接液化催化剂活性的研究进展及展望[J].洁净煤技术,2016,22(4):105-111.
LIU Hua. Improvement of catalysts activity for direct coal liquefaction[J]. Clean Coal Technology, 2016, 22(4):105-111.

[11] 张德祥.煤制油技术基础与应用研究[M].上海:上海科学技术出版社,2013.

[12] 李克健,程时富,蔺华林,等.神华煤直接液化技术研发进展[J].洁净煤技术,2015,21(1):50-55.
LI Kejian, CHENG Shifu, LIN Hualin, et al. Study and development of Shenhua direct coal liquefaction technology[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(1):50-55.

[13] 谷小会.直接液化重质产物中油含量分析的影响因素[J].煤质技术,2018(2):55-58.
GU Xiaohui. The main influencing factors in the analysis of liquefied petroleum products in the direct liquefaction of heavy coal[J]. Coal Quality Technology, 2018(2):55-58.

[14] 韩来喜.煤直接液化工业示范装置运行情况及其前景分析[J].石油炼制与化工,2011,42(8):47-50.
HAN Laixi. Operation of a coal direct liquefaction industrial demonstration unit and prospect analysis[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2011, 42(8):47-50.

[15] 张继明,舒歌平.神华煤直接液化示范工程最新进展[J].中国煤炭,2010,36(8):11-14.
ZHANG Jiming, SHU Geping. Newest progress of Shenhua direct coal liquefaction demonstration plant[J]. China Coal, 2010, 36(8):11-14.

- [16] 王薇,舒格平,章序文,等.煤直接液化过程中供氢溶剂的组成分析[J].煤炭转化,2018,41(4):48-55.
WANG Wei, SHU Geping, ZHANG Xuwen, et al. Composition of hydrogen donor solvent in the coal direct liquefaction process[J]. Coal Conversion, 2018, 41(4):48-55.
- [17] 张传江,王云,韩来喜.提高煤直接液化油品收率研究[J].内蒙古石油化工,2017(6):4-7.
ZHANG Chuanjiang, WANG Yun, HAN Laixi. Study on improving the yield of direct coal liquefaction oil[J]. Inner Mongolia Petrochemical, 2017(6):4-7.
- [18] 赵海坤.年产100万吨煤间接液化合成油过程模拟及分析[D].太原:太原理工大学,2012.
- [19] 张皓荐.Zr, K改性费托合成铁基催化剂的研究[D].上海:华东理工大学,2012.
- [20] 刘团会.煤间接液化制油的研究[D].西安:西北大学,2007.
- [21] 孙启文,吴建民,张宗森,等.煤间接液化技术及其研究进展[J].化工进展,2013,32(1):1-12.
SUN Qiwen, WU Jianmin, ZHANG Zongsen, et al. Indirect coal liquefaction technology and its research progress[J]. Chemical Industry and Engineering progress, 2013, 32(1):1-12.
- [22] 唐宏青.现代煤化工新技术[M].北京:化学工业出版社,2016.
- [23] 刘春萌,安广萍,余中云.我国煤制油产业发展前景展望[J].辽宁化工,2018,6(1):523-526.
LIU Chunmeng, AN Guangping, YU Zhongyun. Prospects for the development of china's coal oil industry[J]. Liaoning Chemical Industry, 2018, 6(1):523-526.
- [24] 高晋生,张德祥.煤液化技术[M].北京:化学工业出版社,2005.
- [25] 相宏伟,唐宏青,李永旺.煤化工工艺述评与展望IV.煤间接液化技术[J].燃料化学学报,2001,29(4):289-297.
XIANG Hongwei, TANG Hongqing, LI Yongwang. Perspectives on R&D in coal chemical industry IV. Synthesis of fuels from coal via Fischer-Tropsch reaction[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2001, 29(4):289-297.
- [26] 相宏伟,杨勇,李永旺.煤间接液化:从基础到工业化[J].中国科学:化学,2014,44(12):1876-1892.
XIANG Hongwei, YANG Yong, LI Yongwang. Indirect coal liquefaction: From foundation to industrialization[J]. Scientia Sinica Chimica, 2014, 44(12):1876-1892.
- [27] 吴建民,孙启文,岳建平,等.煤间接液化中费托合成单元装置的涌分析[J].化学工程,2012,40(12):53-56,78.
WU Jianmin, SUN Qiwen, YUE Jianping, et al. Exergy analysis of Fischer-Tropsch synthesis unit apparatus during coal indirect liquefaction[J]. Chemical Engineering, 2012, 40(12):53-56, 78.
- [28] 李贺.中国煤间接液化技术及未来前景概述[J].内蒙古石油化工,2014,6(7):97-99.
LI He. Coal indirect liquefaction technology and its future prospect in China[J]. Inner Mongolia Petrochemical, 2014, 6(7):97-99.
- [29] 李凯,孟迎,袁秋华.煤间接液化技术的发展现状及工程化转化[J].煤炭与化工,2017,40(8):34-36.
LI Kai, MENG Ying, YUAN Qiuhua. Development and engineering transformation of indirect coal liquefaction technology[J]. Coal and Chemical Industry, 2017, 40(8):34-36.
- [30] 温晓东,杨勇,相宏伟,等.费托合成铁基催化剂的设计基础:从理论走向实践[J].中国科学:化学,2017,47(11):1298-1311.
WEN Xiaodong, YANG Yong, XIANG Hongwei, et al. Design basis of iron based catalysts for Fischer synthesis: from theory to practice[J]. Scientia Sinica Chimica, 2017, 47(11):1298-1311.
- [31] 马风云,孙志强,吴航航等.提高低阶煤/环烷基减压渣油共液化转化率与柴油馏分含量的方法;CN106635109A[P].2017-05-10.
- [32] 闫瑞萍,朱继升,杨建丽,等.催化裂化油浆与兖州煤加氢共处理的研究[J].石油学报(石油加工),2001,17(5):7-11.
YAN Ruiping, ZHU Jisheng, YANG Jianli, et al. Study on hydro-coprocessing of Yanzhou coal and catalytic cracking slurry oil[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2001, 17(5):7-11.
- [33] 朱豫飞.煤油共炼技术的现状与发展[J].洁净煤技术,2013,19(4):68-72.
ZHU Yufei. Actuality and development of coal and oil co-processing technologies[J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(4):68-72.
- [34] 王学云.八道湾煤与重油加氢反应匹配性研究[D].北京:煤炭科学研究总院,2016.
- [35] 王学云,张晓静,董亚飞,等.煤油共炼交互影响的初步分析[J].煤质技术,2016(1):34-37.
WANG Xueyun, ZHANG Xiaojing, CHEN Yafei, et al. The primary analysis of coal-oil co-processing interactions[J]. Coal Quality Technology, 2016(1):34-37.
- [36] 孙育滨.悬浮床耦合固定床加氢裂化用于煤液化及重劣质油轻质化技术进展[J].广东化工,2018,45(14):166-167.
SUN Yubin. Progress in suspension-bed coupling fixed-bed hydrocracking for coal liquefaction and heavy oil lightweighting[J]. Guangdong Chemical Industry, 2018, 45(14):166-167.
- [37] 杨兆中,朱静怡,李小刚,等.微波加热技术在非常规油资源中的研究现状与展望[J].化工进展,2016,35(11):3478-3483.
YANG Zhaozhong, ZHU Jingyi, LI Xiaogang, et al. Progress in researches on microwave heating in unconventional oil resources[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(11):3478-3483.
- [38] 黄传峰,李大鹏,杨涛.煤油共炼技术现状及研究趋势讨论[J].现代化工,2016,36(8):8-13.
HUANG Chuanfeng, LI Dapeng, YANG Tao. Status and research trends of co-processing of coal and oil[J]. Modern Chemical Industry, 2016, 36(8):8-13.
- [39] 李慧慧,蒋中山,黄传峰,等.含铁废渣对煤油共炼催化作用的考察[J].现代化工,2016,36(6):83-88.
LI Huihui, JIANG Zhongshan, HUANG Chuanfeng, et al. Effect of iron-containing waste on the catalysis of coal-oil co-processing[J]. Modern Chemical Industry, 2016, 36(6):83-88.