

煤分级炼制清洁燃料系统研究

李初福¹, 门卓武¹, 翁力¹, 刘科²

(1.北京低碳清洁能源研究所,北京 102209;2.中国神华能源股份有限公司 神华科学技术研究院有限责任公司,北京 102209)

摘要:为了实现碎煤分质清洁高效利用,提出一种煤分级炼制清洁燃料系统。该系统以廉价丰富的碎煤为原料,利用固体热载体回转窑热解技术,将碎煤转化为半焦、焦油和煤气等中间产物,然后经煤气变换、深冷分离、焦油加氢、半焦成型等加工过程,最终生产出石脑油、柴油、液化天然气、洁净煤等清洁燃料产品。以年处理1000万t神东长焰碎煤(<25 mm)系统为例进行模拟计算。结果表明:系统每年可生产约618.0万t洁净煤、61.4万t油品和46.0万t液化天然气,原煤增值约3.6倍。通过系统集成与优化,该系统年耗水仅约310万t,能效达到75%以上,废水废固近零排放。在当前市场价格情况下,该系统总投资约125.0亿元,年销售收入约94.1亿元,年创造利税约21.4亿元。投资回收期4~5 a(不含建设期),经济效益显著。

关键词:煤热解;焦油加氢;半焦成型;近零排放;洁净煤

中图分类号:TE626.6;TD849

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2015)01-0086-04

Study on staged refining coal to clean fuels system

LI Chufu¹, MEN Zhuowu¹, WENG Li¹, LIU Ke²

(1.National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy,Beijing 102209,China;

2.Shenhua Science and Technology Research Institute Co.,Ltd.,China Shenhua Energy Co.,Ltd.,Beijing 102209,China)

Abstract: In order to realize higher efficiency and clean utilization of small size coal, a staged refining coal to clean fuels system was proposed. In the system, the raw material was cheap and abundant small size coal. Using the rotary kiln pyrolysis process with solid heat carrier, the small size coal were converted into semicoke, tar and gas intermediate products, then they were refined to clean fuel products such as naphtha, diesel oil, liquefied natural gas (LNG) and clean coal via the gas conversion and low temperature separation, tar hydrogenation and semicoke forming processes. The analog computation was conducted. The results showed that the clean coal, oil and LNG yield per year were 6.18×10^6 , 6.14×10^5 , 4.6×10^5 tons. The raw coal added value were about 3.6 times. By the integration and optimization, the annual water consumption was only about 3.1×10^6 tons, the energy efficiency could reach above 75%, the waste water and solid waste was near zero emissions. Under the current market price, the investment of the system were about RMB 1.25×10^{10} , the annual sales were RMB 9.41×10^9 , the pre-tax profits were RMB 2.14×10^9 . The payback period of investment ranged from 4 years to 5 years which didn't include construction period, the economic benefits were significant.

Key words: coal pyrolysis; tar hydrogenation; semicoke briquetting; near zero emission; clean coal

0 引言

随着大气污染防治工作的推进,我国对清洁的固体和液体燃料需求与日俱增。将丰富的煤炭转化为宝贵的油气资源,对改善能源结构、保障能源安全具有重要意义^[1]。目前,国内的煤制

油、煤制天然气项目正处于大型商业化示范阶段,技术逐渐成熟,但这些过程投资高、能耗高、水耗高^[2-3]。煤热解可生成气体(煤气)、液体(焦油)和固体(半焦)3种形态产物,获得大量高附加值油气产品和高品质半焦产品,并且具有能耗低、水耗低等优点^[4-7]。目前,块煤直立炉气体

收稿日期:2014-07-08;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.01.020

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011AA05A202)

作者简介:李初福(1980—),男,广西桂林人,高级工程师,博士,从事化工过程系统工程方面的科研工作。E-mail:lichufu@nicenergy.com

引用格式:李初福,门卓武,翁力,等.煤分级炼制清洁燃料系统研究[J].洁净煤技术,2015,21(1):86-89.

LI Chufu, MEN Zhuowu, WENG Li, et al. Study on staged refining coal to clean fuels system[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(1): 86-89.

热载体热解制兰炭技术已经很成熟,国内总生产能力达到 8000 万 t/a 以上,但是块煤资源非常有限,价格居高不下;另一方面,大量廉价的碎煤亟待高效清洁转化,国内外相关研究单位开展了很多研究,至今相关的技术尚处于工业化应用探索阶段,如大连理工大学半焦热载体移动床干馏工艺、煤炭科学研究总院外热式回转炉热解工艺、神华集团半焦热载体褐煤移动床提质工艺以及中国科学院、浙江大学、清华大学的循环灰热载体热解工艺等^[8-10]。

现有的煤热解系统主要重视对热解固体产物(半焦)加工利用,而忽视对气、液产物加工利用。笔者提出一种煤分级炼制清洁燃料系统,以廉价丰富的碎煤为原料,利用固体热载体回转窑热解技术,将碎煤转化为半焦、焦油和煤气等中间产物,然后经煤气变换、深冷分离、焦油加氢、半焦成型等工艺,最终生产出石脑油、柴油、液化天然气(LNG)、洁净煤等清洁燃料产品,实现碎煤热解产物综合高效利用。

1 系统介绍

煤分级炼制清洁燃料系统如图 1 所示。系统原理及流程如下:碎煤(小于 25 mm)经干燥后,送入回转窑热解反应器,与 750~850 ℃半焦热载体混合并发生热解,生成半焦、焦油、热解气和水等产物,热解温度控制为 550~600 ℃;焦油经预处理除去粉尘、水分等杂质后,送入加氢装置生产石脑油、柴油等清洁液体产品,半焦送入成型装置,添加 5%~10%的黏结剂成型后作为清洁的洁净煤产品,半焦成型过程同时配入 5%~15%的含酚废水、含油废水、油泥等一起成型,废水中酚、油等物质可被半焦吸附,从而避免了废

水、废固排放,也减少了水耗;煤气经压缩至 3.5 MPa 后,送入变换装置,将其中的 CO 转化为 H₂,控制 CO 体积分数小于 1%,然后进入净化装置,脱除其中的 CO₂和 H₂S 等,最后经深冷分离,得到 LNG 产品,H₂用于焦油加氢装置。

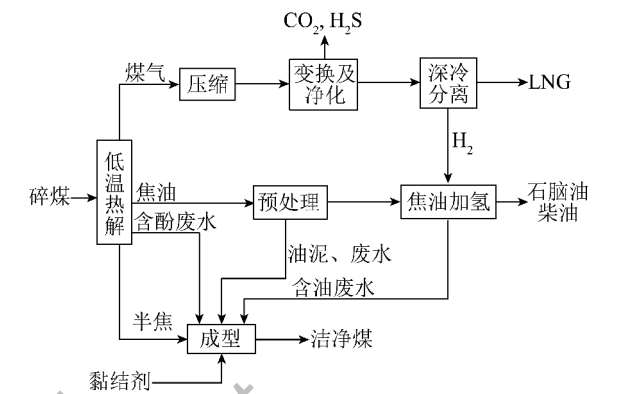


图 1 煤分级炼制清洁燃料系统示意

2 系统模拟

2.1 基础数据

系统模型包括低温热解、煤气压缩、变换及净化、深冷分离、焦油预处理、焦油加氢和半焦成型等部分。利用 Aspen Plus 建立系统模型,物性方法选择 RK-SOAVE 方程。其中,煤低温热解、焦油加氢部分采用收率模型进行计算,其余部分根据热力学平衡进行计算^[11-12]。

模拟所需要的基础数据包括:原煤工业分析和元素分析、热解半焦工业和元素分析、热载体半焦工业和元素分析、热解过程产物分布和焦油加氢产物分布等。系统原煤为神东长焰煤。神东长焰煤、半焦及半焦热载体工业分析和元素分析见表 1。

表 1 神东长焰煤、半焦及半焦热载体工业分析和元素分析 %

项目	工业分析				元素分析				
	M_{ad}	A_d	V_d	FC_d	$w(C_d)$	$w(H_d)$	$w(N_d)$	$w(S_d)$	$w(O_d)$
原煤	10.58	7.25	35.10	57.65	73.51	4.41	0.96	0.35	13.52
热解半焦(600 ℃)	1.02	9.67	13.47	76.86	84.09	1.30	0.77	0.50	3.67
半焦热载体(800 ℃)	0.92	10.36	7.28	82.36	85.49	0.58	0.70	0.49	2.37

热解产物分布及产品性质,在公斤级固体热载体热解试验平台上获得,热解温度 600 ℃。神东长焰煤热解产物半焦产品干基收率 75.0%、焦

油产品干基收率 7.8%、热解气产品干基收率 12.0%和热解水产品干基收率 5.2%。将煤在 20 g 干馏炉内加热至 800 ℃,得到半焦热载体。表

2 为热解煤气各组分的体积分数。煤焦油加氢氢耗为 5.0%左右,石脑油收率为 14.0%,柴油收率为 76.6%,重油收率为 7.5%,水产率为 5.6%^[13-14]。

表2 热解煤气各组分的体积分数 %

$\varphi(\text{H}_2)$	$\varphi(\text{CO})$	$\varphi(\text{CO}_2)$	$\varphi(\text{CH}_4)$	$\varphi(\text{C}_2\text{H}_6)$	$\varphi(\text{C}_2\text{H}_4)$	$\varphi(\text{C}_3\text{H}_8)$	$\varphi(\text{C}_3\text{H}_6)$	$\varphi(\text{C}_4\text{H}_{10})$
25.8	16.8	12.5	32.0	1.7	5.4	3.3	1.9	0.6

2.2 模拟结果

以年处理 1000 万 t 神东长焰碎煤(小于 25 mm,水分 12%)系统为例进行模拟计算,年工作时间为 8000 h,模拟结果如下:

原料	
神东煤/(万 t·a ⁻¹)	1000.0
黏结剂/(万 t·a ⁻¹)	28.0
燃料动力	
神东煤/(万 t·a ⁻¹)	70.0
电能/MW	130
中间物料	
煤气/(亿 m ³ ·a ⁻¹)	10.7
煤焦油/(万 t·a ⁻¹)	67.1
氢气/(万 t·a ⁻¹)	3.1
产品	
洁净煤/(万 t·a ⁻¹)	618.0
石脑油/(万 t·a ⁻¹)	8.8
柴油/(万 t·a ⁻¹)	47.9
重油/(万 t·a ⁻¹)	4.7
LNG/(万 t·a ⁻¹)	46.0
能量转化效率/%	77.6

对于煤低温热解部分,根据给定的工艺条件(干燥温度 200 ℃,热解温度 600 ℃,半焦热载体温度 800 ℃),模拟得到半焦热载体与干燥煤质量比为 3.3,半焦产品干基收率为 60.5%,焦油产品(水含量 3.0%,固含量 3.8%)干基收率为 7.2%,煤气产品干基收率为 10.0%。半焦产品中热载体半焦(800 ℃)占 82%,热解半焦(600 ℃)占 18%,半焦产品挥发分为 8.7%。模拟结果表明,该系统焦油加氢规模为 62.5 万 t/a,煤低温热解副产煤气中的氢气组分和 CO 变换制取的氢气可以满足自产焦油加氢需要,不需要进行 CH₄组分的蒸汽转化制氢,可以降低制氢成本。模拟结果表明,该系统可年产洁净煤(水分 6.0%,挥发分小于 10.0%)618.0 万 t,石脑油 8.8 万 t,柴油为 47.9 万 t,重油为 4.7 万 t,LNG 为 46.0 万 t,系统能效达到 75%以上,高于煤直接制油、煤制天然气过程的能效(约 60%)。

3 用水分析及优化

我国煤炭资源与水资源分布极不平衡,因此耗水量高低已成为限制煤化工产业发展的重要因素之一。对煤分级炼制清洁燃料系统用水过程进行分析,该系统主要耗水过程包括热解气终冷器、余热锅炉、半焦冷却器、压缩机中间冷却器、变换反应过程、变换气终冷器、油品终冷器、半焦与黏结剂混合过程等。年加工 1000 万 t 煤分级炼制清洁燃料系统用水及废水处理如下:

低温热解	
热解气水冷器/(t·h ⁻¹)	93.3
油水分离器/(t·h ⁻¹)	-56.8
废热锅炉/(t·h ⁻¹)	41.0
半焦冷却器/(t·h ⁻¹)	210.3
煤气压缩	
中间冷却器	24.1
变换及净化	
CO 变换/(t·h ⁻¹)	38.8
变换气余热锅炉/(t·h ⁻¹)	16.9
变换气水冷器/(t·h ⁻¹)	10.6
气液分离器/(t·h ⁻¹)	-37.5
焦油加氢	
焦油预处理/(t·h ⁻¹)	-2.4
油气冷却器/(t·h ⁻¹)	31.9
油水分离器/(t·h ⁻¹)	-4.6
半焦成型	
半焦/黏结剂混合器/(t·h ⁻¹)	63.8
合计*	390.6

注:* 不包含 CO 变换过程,该过程蒸汽消耗来源于低温热解过程

系统每小时耗新鲜水为 390.6 t(其中熄焦耗水占到约 53.8%),年耗水量为 312.5 万 t,每转化 1 t 原煤耗水约 0.3 t,煤直接制油、煤制天然气等煤化工过程中每处理 1 t 标准煤需要消耗水 2~3 t。

该系统主要废水包括煤低温热解产生的含酚废水以及焦油预处理及加氢产生的含油废水约 51 万 t/a,可以全部用于半焦成型过程,废水中酚、油等物质可被半焦吸附,解决了废水处理难题,降低了鲜水

耗约16%;变换工艺冷凝水约30万t/a,主要含有甲醇等杂质,经汽提后,可以全部用作锅炉给水,降低了新鲜水耗约10%,实现了工艺废水的近零排放。

4 应用前景与挑战

对1000万t/a规模煤分级炼制清洁燃料系统主要经济指标进行初步估算,结果表明,在当前市场价格情况下,该系统总投资约125.0亿元,年销售收入约94.1亿元,年创造利税约21.4亿元,原煤实现增值3.6倍,投资回收期4~5a(不含建设期),经济效益显著。该系统具有“投资低、水耗低、能耗低、排放低”优势,工业应用前景广阔。

煤分级炼制清洁燃料系统主要单元技术中,变换与净化、深冷分离、煤焦油加氢、半焦成型技术已经较为成熟^[14-17],只有大规模碎煤热解技术尚未成熟。碎煤低温热解以固体热载体技术为主,目前制约固体热载体煤热解技术实现工业化应用的主要技术有:①如何控制和降低热解系统中粉尘生成量,降低焦油中粉尘含量,提高系统长周期运转性能;②如何实现热载体与煤的高效均匀混合,保证热解温度均匀,提高热解焦油产率。为解决这些问题,提出了一种固体热载体回转窑煤热解工艺,采用回转窑作为热解反应器,实现煤和固体热载体的均匀混合;采用大粒度半焦作为热载体,通过机械提升循环,减小半焦热载体的破碎,降低粉尘控制难度,正在准备进行千吨级中试试验研究。

5 结 语

煤分级炼制清洁燃料系统可以较好地利用碎煤资源,最终生产出石脑油、柴油、LNG、洁净煤等清洁燃料产品。对该系统进行模拟与分析表明,年处理能力为1000万t煤的系统,每年可生产洁净煤、油品、LNG分别为618.0万、61.4万、46.0万t,实现碎煤分质高效利用,原煤增值约3.6倍,投资回收期为4~5a(不含建设期);该系统年耗水约310万t,能量转化效率达到75%以上,废水废固实现近零排放。煤分级炼制清洁燃料系统具有“投资低、水耗低、能耗低、排放低”等优势,在将煤部分转化为油气资源的同时,也使煤成为更清洁的固体燃料。该系统主要单元技术中,煤气变换、深冷分离、煤焦油加氢、半焦成型等技术已经较为成熟,但是大规模碎煤热解技术尚未成熟,还需要进一步开展基础研究和攻关。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 周忠科,王立杰.我国煤基清洁能源发展潜力及趋势[J].中国煤炭,2011,37(5):24-27.
- [3] 王雷石,段书武.现代煤化工产业能耗状况及节能对策研究[J].洁净煤技术,2012,18(4):1-3.
- [4] 尚建选,王立杰,甘建平,等.煤炭资源逐级分质综合利用的转化路线思考[J].中国煤炭,2010,36(9):99-101.
- [5] 岑建孟,方梦祥,王勤辉,等.煤分级利用多联产技术及其发展前景[J].化工进展,2011,30(1):88-94.
- [6] 贺永德.煤炭热解(干馏)及煤焦油加工技术经济分析[J].中国经贸导刊,2010(18):24-25.
- [7] 关 珺,何德民,张秋民.褐煤热解提质技术与多联产构想[J].煤化工,2011(6):1-9.
- [8] 吕清刚,于旷世,朱治平,等.固体热载体快速热解粉煤提油中试研究[J].煤炭学报,2012,37(9):1591-1595.
- [9] 甘建平.大规模粉煤热解示范的探索与实践[D].西安:西北大学,2011:53-55.
- [10] 李文英,邓 靖,喻长连.褐煤固体热载体热解提质工艺进展[J].煤化工,2012(1):1-5.
- [11] 王 伟,商玉坤,武建军.基于 Aspen Plus 的褐煤热解过程模拟[J].化学工业与工程,2011,28(3):49-53.
- [12] 郑安庆,冯 杰,葛玲娟,等.双气头多联产系统的 Aspen Plus 实现及工艺过程优化(I)模拟流程的建立及验证[J].化工学报,2010,61(4):969-978.
- [13] 滕家辉,李 冬,李稳宏,等.煤焦油加氢氢耗的研究[J].化学反应工程与工艺,2011,27(5):443-449.
- [14] 马宝岐,任沛建,杨占彪,等.煤焦油制燃料油品[M].北京:化学工业出版社,2010:229-231.
- [15] 曹德彧,栗莲芳.焦炉煤气变压吸附制氢工艺的应用[J].煤气与热力,2008(10):23-25.
- [16] 郭毅民.焦粉成型造气技术应用[J].煤化工,2005(3):55-56.
- [17] 马春山,余显军.焦粉成型技术的应用[J].中国氯碱,2011(8):46-48.

征 订 启 事

2015年《洁净煤技术》杂志定价:20元/册,全年6期共120元(含邮费)。可直接向本编辑部索取订单并办理订购业务,欢迎随时订阅。

汇款地址:北京市和平里青年沟路5号煤炭科学研究总院《洁净煤技术》编辑部(100013)

联系电话:(010)84262927-12

传 真:(010)84262114

电子信箱:jjmjs@263.net QQ群:309163437

网 址:www.jjmjs.com.cn