CCI Upgrading Technology of Low Rank Coal in USA and its Economic Evaluation

Chen Jin-qing, Lv Hong-ling, Li Qing-song
State Key Laboratory of Heavy oil, China University of Petroleum, Qingdao, China 266555
1. jqchen@upc.edu.cn, 2. honglinglv@upc.edu.cn

Abstract: The effective technologies of handling the low rank coal (LRC) have been considerable interest for all over the world. Embed conventional unit operations and equipment into the continuous-flow design, the novel coal-to-liquid (CTL) mild-temperature pyrolysis process developed by ConvertCoal, Inc. converts the low-rank coals (LRC) into low-emission clean-coal power boiler fuel and syncrude after hydrotreating the recovered coal-tar oil. The technology has some advantages on the coal-tar-oil (CTO) compounds yield, quality, operability and the capital cost. The paper puts emphases on the CCI technological process, characteristics and key technologies. The economies and risks of importing the technology are also presented to improve the technological capability of handling the low rank coal in our country.

Keywords: Convert Coal, Inc. (CCI) process; low rank coals (LRC); mild-temperature pyrolysis (MTP); synthetic crude oil (SCO); catalytic hydrotreating (C-HT)

美国 CCI 劣质煤转化技术及其经济评价

陈金庆，吕宏凌，李青松

中国石油大学（华东）重质油国家重点实验室，山东青岛，中国，266555
1. jqchen@upc.edu.cn, 2. honglinglv@upc.edu.cn

【摘要】 劣质煤的高效利用一直是各国关注的重要问题，美国 ConvertCoal（CCI）公司设计的煤转化技术是针对劣质煤的温和热解工艺，将传统的单元操作和设备融入到连续化工业生产中，提取劣质煤的合成原油用于加氢精制石油，并生产高热值的煤焦燃料（CCF）。该技术在油品质量、产油率、工艺可操作性和投资成本等方面均有较显著的优势。本文重点介绍 CCI 煤转化技术工艺流程、工艺特点和关键技术，并对该工艺的经济性和引进风险进行分析，为提高我国劣质煤综合利用水平提供技术和经济性指导。

【关键词】 CCI 煤转化技术；劣质煤（LRC）；温和热解（MTP）；合成原油（SCO）；加氢精制（C-HT）

1 引言

煤炭目前是世界上蕴藏量最大的常规能源，也是每年产量和消耗量最多的能源形式。全球每年消耗的原煤已超过 60 多亿吨，其中一半以上的资源均是含水率高，热值低的劣质煤[1,2]。由于其含碳量低、煤矸石多，灰分以及硫含量高，机械强度和热稳定性差，难于贮存，且运输成本高，一般直接应用于电场的燃煤，煤质利用率低，且目前全球现有的燃烧技术均不能大幅度地降低由于劣质煤燃烧而带来的废气、废烟、煤粉灰等环境污染问题[3]。因此，如何利用高新技术更加高效、环保、低成本地利用劣质煤资源，缓解目前严峻的能源危机和环境污染问题，已成为全球亟待解决的重要课题之一。

20 世纪 80 年代以来，美国针对本国褐煤、次烟煤等劣质煤储量多的特点，相继开发出 K 燃料技术（K-fuel Process）、催化两段液化 CTSL 工艺、液体溶剂萃取 LSE 液化工艺以及 HTI 共同液化工艺等多项

资金项目：美国 SGI International 公司科研项目
作者简介：陈金庆（1977-），男，博士；主要从事分离工程与储能技术方面的研究

978-1-935068-37-2 © 2010 SciRes.

劣质煤提质技术[4,5]。其中，已大规模商业化应用主要是美国能源部（DOE）与 MR&E 公司合作的褐煤干燥及干馏提质（LFC）技术，该技术于 2008 年由我国大唐集团等引进，并在内蒙古额吉煤矿建设 1×1000t/d 和 2×5000t/d 原煤加工生产线，但 LFC 工艺对原料煤品质要求较高，原料煤灰分含量应小于 5%[6]。最近，美国 ConvertCoal Inc.在 LFC 工艺的基础上形成了 Rinker-England-Skov (RES)煤转化技术（即 CCI 煤转化技术），该技术在油品质量、产油率、工艺可操作性和投资成本等方面均有较显著的优势[7,8]。本文重点介绍 CCI 煤转化技术工艺流程、工艺特点和关键技术，以及对该工艺的经济性和引进风险进行分析，为提高我国劣质煤综合利用能力提供技术和经济性指导。

2 CCI 煤转化技术

CCI 煤转化技术是 ConvertCoal 公司于 2006 年提出的美国第三代煤连续热解工艺。该工艺是基于劣质煤温和热解技术设计，是一种独特的，连续化、可大规模生产的工业技术，可在燃烧之前将劣质煤（LRC）中所含的煤焦油提取出来，转化为合成原油（SCO），并为火电厂提供高热值、低污染的清洁煤燃料（CCF）[8]。

2.1 CCI 煤转化工艺流程

CCI 煤转化工艺基于是 LFC 劣质煤温和热解和干馏处理过程的技术，从优化产品质量和产量方面设计煤转化过程，将传统的单元操作和设备融入到连续化生产流程中，该工艺包含一系列处理单元[9]。图 1 为 CCI 煤转化技术工艺总流程图。

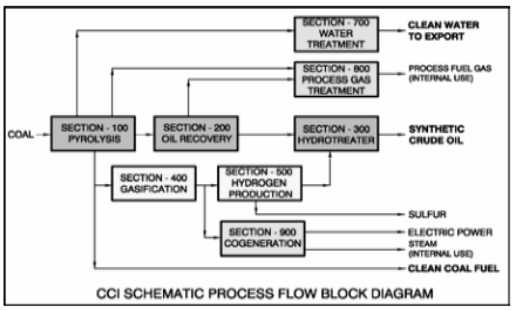

Figure1. Schematic sketch of the total CCI coal-to-liquid process

图 1. CCI 煤转化技术工艺总流程图

原料煤一般为含 25-50 w%水分，5-15 w%灰分和 30-40 w%的挥发性物质褐煤或亚烟煤。经原煤干燥和热解阶段，原煤被除湿和提纯，脱去几乎所有的水分和煤中大量易挥发性的燃料气（主要为 CO、CO_2、NH_3、CH_4 和 H_2S 等），再经气体冷凝装置回收煤焦油（CTO），由加氢精制可制备工业应用的合成原油（SOC），热解过程得到的固体清洁煤燃料（CCF）经气化并按传统合成气制氢工艺，为煤焦油加氢过程提供氢气，并回收煤中所含的硫，剩下的煤焦燃料是一种可用于发电和还原铁矿石的工业原料，其热值较原料煤增加 40%~50%，电厂燃煤锅炉的热效率提高 5~%10%，火焰温度升高 35℃左右，硫、氮和汞含量显著降低。采用美国西部低硫煤所生产的 CCF 符合美国环保局 2010 年 CAIR 排放标准[10]。该工艺技术除劣质煤外无需外界供应物质和能量，自身可实现工业化规模的连续性生产，将劣质煤中高附加值油份和燃料气等在燃烧之前提取出来，同时减少 CO_2、SO_2、NO_x 等污染环境的气体排放，实现了高效、环保、低成本综合地利用劣质煤资源，是一种较先进的劣质煤处理技术，具有较大的实际应用价值。

2.2 CCI 煤转化关键技术

CCI 煤转化工艺过程包含三个独立的核心处理单元，即劣质煤的干燥及热解工艺、煤焦油（CTO）回收工艺和煤焦油加氢处理工艺[11]。另外，该工艺还包括一些辅助的工艺过程，如水气回收和清理工艺，基于煤气化的制氢工艺，CTO 分馏过程，热电联产技术以及安全和排放控制系统等等。

2.2.1 劣质煤干燥及热解

劣质煤原料首先经过原煤粉碎过程，并筛选分离出粒径小于 6 mm 的煤粉，输送入干燥段。图 2 为 CCI 煤转化技术的煤干燥和热解工艺流程图。干燥过程为两段干燥，煤粉先在 100℃下干燥，水分减少至 8 w%，再进入下一段干燥，干燥温度为 270℃，水分降至 3 w%。经过此两段干燥，劣质煤中 35 w%左右的硫、氮，85~95 w%挥发性汞化合物以及少量可挥发性气体，如：CO、CO_2、NH_3、CH_4 和 H_2S 等，随着水分一起挥发除去。干燥段涉及的加工设备均为商业化装置，其主要的工艺设计参数有：除水量，劣质煤粉碎度，工艺气体空速，汞脱除与回收量，换热方式以及过程能量优化。

干燥后煤粉进入热解反应器，热解工艺为 CCI 煤转化技术的核心单元，采用温和热解技术，利用直接加热和间接加热相结合的方式，通过惰性吹扫气体逆

流和错流方式加强传热，加热煤粉至 550℃，脱除 CCF 中剩余的挥发性汞化合物，以及 50 w%以上的剩余有机硫和氮化合物，并除去原料煤中包括挥发性煤焦油和非凝结性燃料气的约 2/3 挥发性物质，提取挥发性煤焦油（CTO）。热解反应过程涉及的热解器主要有：横向式炉篦，旋转炉篦，或常用于矿物和石油焦煅烧操作的回转窑，其工艺过程的主要设计参数为：煤软化的温度范围，温度分布和停留时间，气相空速，煤焦油的产量和气相中的浓度，煤粉的加工以及热转移与回收效率等。

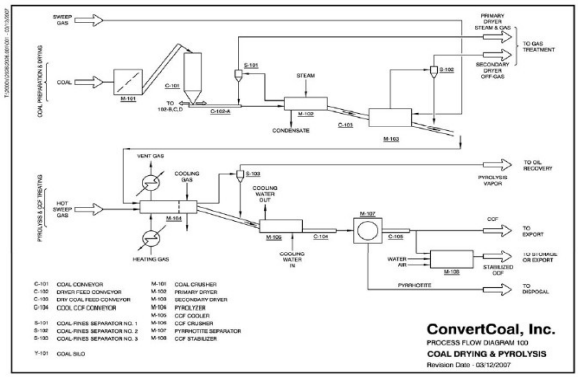

Figure2. Schematic of the continuous coal drying and pyrolysis process

图 2. 煤干燥和热解工艺流程图

2.2.2 煤焦油的回收工艺

热解反应器中的挥发性气体经过冷凝器回收制得挥发性煤焦油（CTO）化合物。其回收过程包括各种 CTO 的组成分析及处理方法。图 3 为 CCI 煤转化技术中煤焦油回收工艺流程图，其冷凝回收方式可采用多种工艺配置，CCI 采用多级冷凝过程可以产生 3 种或更多种不同组成的石油馏分，非凝性燃料气体被分离出作为一种热值更高的工艺燃料使用。由于 CCI 工艺采用的温和热解技术（MTP），其热解温度为 500℃，制得的煤焦油中低沸点组分较多，很少存在沸点高于 500℃的馏分，与焦化炉制备的煤焦油相比，更适合于催化加氢制得合成原油或者分馏制备出化学工业的中间产品。本工艺过程涉及的主要设备有：多级急冷塔，煤焦油吸收塔和冷凝器等，该工艺过程主要根据劣质原料煤的组成，结合 CTO 成分分析设计加工条件，如：冷凝水流量，处理时间，煤焦油组成等。

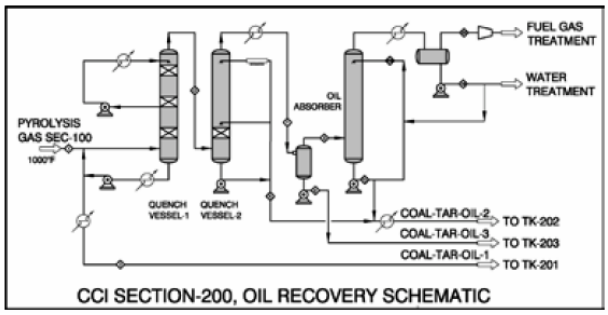

Figure3. Schematic of coal-tar-oil (CTO) recovery process

图 3. 煤焦油（CTO）回收工艺流程图

2.2.3 煤焦油加氢处理工艺

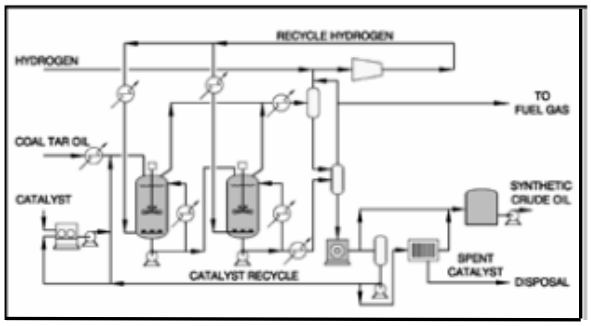

Figure4. Schematic of CTO catalytic hydrotreating (C-HT) process

图 4. 煤焦油 C-HT 加氢精制工艺流程图

煤焦油加氢过程所需的氢气由煤焦燃料气化制氢获得（如图 1 所示），加氢技术为接触反应加氢精制工艺（catalytic hydrotreating，C-HT），提高油品轻质化并脱出硫、氮等杂质。图 4 为 CCI 煤转化技术的煤干燥和热解工艺流程图。用于加氢的煤焦油必须保证低硫（<0.3w%），无沥青和重金属(如 V, Ni, Fe, Mo)化合物，以免催化剂中毒，并影响合成原油质量[12,13]。加氢装置可以采用固定床或搅拌反应器，固定床设计和操作简单，尤其是最近高效 HDS 催化剂的应用，提升了固定床的优势，搅拌反应器结构较简单，优势在于催化剂价格低廉且可连续性回收[14]。C-HT 过程可以避免结焦，并提高合成原油产率，采用美国西部低硫半烟煤生产的 SCO 重度 0.975g·mL，芳烃 60 w%，沸点高于 440℃馏分小于 7 w%，硫含量小于 0.1 w%氮含量小于 0.2 w%。该过程涉及的设备主要有加氢精制反应器和分馏装置。其主要的设计工艺参数根据

978-1-935068-37-2 © 2010 SciRes.

CTO 组成和 SCO 产量及质量确定，如：反应停留时间、反应温度、氢气流量等。

另外，辅助工艺主要为 CCI 煤转化技术提供能量和氢气，处理回收劣质煤中水分，主要利用过滤、气提或吸附除去水中氨、汞、硫和有机物等污染物，补充锅炉供水和冷却塔给水，利用 CTO 分馏工艺提取工业原油和氨基化合物、酚和甲酚类化工产品以及 CCF 的稳定处理工艺等。

2. 3 CCI 煤转化工艺特点

CCI 劣质煤转化工艺是一种针对劣质煤而设计的连续温和热解工艺，基于现有的工业化设备集合传统的单元操作过程实现连续化生产，在油品质量、产量和热回收等工艺方面进行了优化设计，其工艺特色主要包括：1) 煤干燥热解过程采用直接加热和余热回收间接加热的方式，节省能源消耗。2）汞回收通过吸附方法，并采用独立的处理单元。3）热解反应器采用旋转窑，并通过优化停留时间、气速、加热介质温度及热解温度提高 CTO 产量和质量。4）优化设备和工艺流程脱除原煤中水和硫。5）采用搅拌反应器 C-HT 工艺合成原油，由 CTO 分馏工艺制备化工中间产品。6）从操作和成本方面最优化 MTP 过程装置。

另外，本工艺还可将蒸汽与电力生产融合至整个工艺流程中，其混合气及水的分离工艺均采用较先进的处理技术，并可直接输出电能。

3 CCI 技术项目经济评价及风险

CCI 劣质煤转化工艺在技术和经济双重可行性的条件下进行工艺流程设计。为评价该技术的经济性，CCI 公司于 2007 年建立了处理能力为 10, 000 t/d 的示范工厂 RPD-01[15]。原料为怀俄明州含水 29 w%，灰分 6 w%的半烟煤，日产出 5000 t 清洁煤燃料提供 500 MW 粉煤发电厂，7100 桶合成原油和 3000t 工艺用水。从原料煤评估、工厂处理能力、CCF 和 CTO 产量以及当地经济地理条件决定的项目总投资等方面进行合理经济评价。表 1 为 RPD-01 示范工程的经济性评价结果。

目前，CCI 项目在美国主要受国际油价持续较低的影响，虽然 CCI 煤转化工艺尚未建立商业化企业，RPD-01 经济评价该项目现今的总投资年返回率在 25%~30%。从长远角度而言，考虑石油资源的日益短缺，CCI 技术在经济上应该具有较大的优势。

Table 1. Results of economic evaluation on RPD-01 of CCI project

表 1. CCI 示范工程 RPD-01 经济评价

处理能力（*t/d*）		10,000*
清洁煤燃料 CCF（*t/d*）		5000*
合成原油（*t/d*）		1310(合：8200 bbl)*
操作时间（*d /y*）		350
投资费用（$ *mil/y*）	劣质煤	70.0
	总操作及维护费	19.4
	总投资费用	89.4
产品价值（$ *mil/y*）	合成原油 SCO	143.5
	清洁煤燃料 CCF	66.5
	总产值	210.0
年总利润（$ *mil/y*）		120.6
企业固定资产投资（$ *mil*）		500

* 劣质煤价格 $ 20/t，清洁煤燃料价格 $ 38/t，合成原油价格 $ 50/bbl.

CCI 公司为降低该项目的技术风险，其工艺流程中涉及的设备均采用其他化工单元操作中已工业化的装置，且每个工艺模块独立单元操作，可进行工程化模拟、测试操作及验证设备性能，严格地界定其流程的技术风险。由于 CCI 煤转化项目大规模商业化应用，直接引进进行商业化运作还须考虑其投资风险、其他同类技术的成熟度、地方经济、地理条件等，使 CCI 这一劣质煤转化的新技术真正为我国的经济和社会发展创造价值[16]。

5 结语

CCI 煤转化技术将劣质煤转变为电厂的清洁煤燃料并合成原油和化工中间产品，能实现劣质煤的高效、环保、低成本的综合利用。我国一直是煤炭的主要消费国，低价劣质煤在我国的储量也较大，占到煤炭总储量的 55%左右。CCI 技术对于我国高效利用劣质煤资源具有较强的技术和经济参考价值，在综合考虑项目成本、技术风险、项目可行性及当地经济地理条件等因素的基础上评价其技术的合理性，改善我国劣质煤的利用效率，实现节能减排，高效发展清洁能源。

致谢

作者感谢山东省泰山学者建设工程的支持。

References (参考文献)

[1] 郭树才. 煤化工工艺学[M]. 北京：化学工业出版社, 2006, P 119-126.
Guo Shucai. Coal Chemical Technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press. 2006, P 119-126.

[2] Zhang Yonggui. Technology on Utilization of Inferior Coal [J].*Coal Chemical Industry*, 2002, 102(5), P24-27(Ch).
张永贵. 劣质煤利用技术[J]. 煤化工, 2002, 102(5), P24-27.

[3] Wan Yongzhou, Xiao Lei, Tao Xiuxiang. Progress on dewatering and pre-drying technology of lignite[J]. *Coal Engineering*, 2008, 8, P91-93 (Ch).
万永周, 肖雷, 陶秀祥, 等.褐煤脱水预干燥技术进展[J]. 煤炭工程，2008, 8, P91-93.

[4] Yin Liqun. Lignite resources and utilizaton outlook in China[J]. *Coal Scinece and Technology*, 2004,32(8), P12-14 (Ch).
尹立群.我国褐煤资源及其利用前景[J].煤炭科学技术 2004,32(8), P12-14.

[5] Stanton R W, Warwick P D, Swanson S M. Tar yields from low-temperature carbonization of coal facies from the Powder River Basin, Wyoming, USA[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2005,63(1-2),P13-26.

[6] The ENCOAL Mild Coal Gasification Project A DOE Assessment[J]. *U. S. Department of Energy*. March, 2002.

[7] ConvertCoal, Inc.Project Scope, Technology and Development. www. convertcoal.com/papers/CCI-Sec-7. pdf

[8] ConvertCoal,Inc. CCI Coal-char-fule advantages. www. convertcoal.com/papers/CCI-Sec-2.2_2.3. pdf

[9] ConvertCoal, Inc. brochure. http://www.convertcoal.com/ brochure/ __ brochure2. pdf

[10] Skov E R, England D C, Henneforth J C, *et al.* Syncrude and Syncoal Production by Mild-Temperature Pyrolysis Processing of Low-Rank Coals I[J]. *AIChE Spring National Meeting, Houston*, Texas, April 22-26, 2007

[11] Skov E R, Neubauer D. Syncrude oil and upgranded syncoal production from mild temperature pyrolysis of LRC[J]. *International Freiberg Conferencee on IGCC and XTL technologies*, Germany,9 May,2007

[12] Wildschut J, Mahfud F H, Venderbosch R H, *et al*. Hydrotreatment of Fast Pyrolysis Oil Using Heterogeneous Noble-Metal Catalysts[J]. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2009, 48 (23), P10324–10334

[13] Leckel D. Catalytic Hydroprocessing of Coal-Derived Gasification Residues to Fuel Blending Stocks: Effect of Reaction Variables and Catalyst on Hydrodeoxygenation (HDO), Hydrodenitrogenation(HDN), and Hydrodesulfurization (HDS)[J]. *Energy Fuels*, 2006, 20 (5), P1761–1766

[14] Skov E R, England D C, Rinker F G, *et al*. Coal-Tar Chemicals and Syncrude Oil Production from Low-Rank Coals Using Mild-Temperature Pyrolysis II[J]. *AIChE Spring National Meeting*, Houston, Texas, April 22-26, 2007

[15] Skov E R, Rinker F G, England D C. CCI Reference Plant Design for Conversion of LRC to Clean-Coal Fuel and Synthetic Crude Oil[J]. *EUEC–2008 Session E5*

[16] Zhang Yonggui. Low Rank Coal Liquefaction Technology and its Evaluation [J].*Coal Chemical Industry,* 2003, 108(5), P16-19. (Ch).
张永贵. 劣质煤液化技术及其经济评价[J]. 煤化工, 2003, 108(5), P16-19.

978-1-935068-37-2 © 2010 SciRes.