

年产 40 亿 m^3 煤制天然气气化工工艺及装备选型

刘耀明^{1,2,3} 秦江艳^{3,4} 曹文晋^{1,2} 王涛¹

(1. 建投通泰投资有限公司, 内蒙古鄂尔多斯 010300; 2. 河北建设投资集团有限责任公司, 河北石家庄 050051;
3. 煤炭工业河北建设建设工程质量监督站, 内蒙古鄂尔多斯 017209; 4. 国电建投内蒙古能源有限公司, 内蒙古鄂尔多斯 017209)

摘要: 某年产 40 亿 m^3 煤制天然气项目配置煤炭资源拟定为准中矿区的房子梁井田和达赖梁井田, 为选择适合这 2 个井田煤炭煤质的气化工工艺和技术设备, 对目前工业广泛采用的 3 种煤气化工工艺类型, 包括移动床气化工工艺、流化床气化工工艺和气流床气化工工艺的具体技术特点进行分析, 系统论述了各种技术代表气化工炉类型以及商业运行情况。同时, 对项目配套煤炭资源煤质进行了详细分析。结果表明: 仅有固态排渣移动床碎煤加压气化工炉(简称碎煤炉)适合配置煤种, 其中房子梁井田煤质完全适合, 达赖梁井田煤质相对适合。根据内蒙地区煤炭的 1:1 配置政策, 项目所配原料煤中的粉煤必须也用于煤制气原料, 气化工工艺可考虑“双气头”方案, 即移动床气化工技术与气流床气化工技术搭配。

关键词: 煤制天然气; 气化工工艺; 气化工炉; 选型; 煤质

中图分类号: TQ546; TD894 文献标志码: A 文章编号: 1006-6772(2014)05-0086-04

Gasification process and equipment selection for 0.4 billion cubic meters per year coal gasification project

LIU Yaoming^{1,2,3}, QIN Jiangyan^{3,4}, CAO Wenjin^{1,2}, WANG Tao¹

(1. HCIG&Tongtai Investment Co. Ltd. Ordos 010300, China; 2. Hebei Construction Investment Group Co. Ltd. Shijiazhuang 050051, China;
3. Supervision Station of Construction Project Quality Hebei Construction Investment of Coal Industry Ordos 017209, China;
4. Inner Mongolia Energy Co. Ltd. China Electric Construction and Investment Ordos 017209, China)

Abstract: The coal for 0.4 billion cubic meters per year coal gasification project was produced in Fangziliang and Dalailiang underground mine field. Analyzed the coal properties. To choose the appropriate process and equipment, analyzed the characteristics of moving-bed gasification, fluidized-bed gasification and entrained flow gasification. Discussed the typical boilers and their commercial operation. The results show that the pressurized moving-bed loose coal gasifier is completely fit to the coal of Fangziliang underground mine field. By the coal blending policy in Inner Mongolia, the fine coal in raw material must be used. So adopt the moving bed gasification and entrained flow gasification.

Key words: coal gasification; gasification process; gasifier; selection; coal property

0 引 言

建投通泰投资有限公司(简称建投通泰)40 亿 m^3 煤制天然气项目位于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗大路工业园区, 是国家为推进煤炭深加工产业自主创新和升级, 提升煤炭资源转化效率和综合利用水平, 根据国家《能源发展“十二五”规划》和《煤炭深加工示范项目规划》的要求, 重点规划发展

的清洁能源示范项目。煤制天然气是将煤经过气化工、变换、净化和甲烷化等步骤变为天然气的过程。在整个过程中, 气化工是煤制天然气工艺的第一步^[1-2]。选择不同的气化工炉相应气态产品的组分会有显著变化, 这意味着后续工艺流程的选型和规模也将变化, 因此气化工炉的选型是工艺选型的关键。目前煤制天然气气化工炉炉型较多, 但没有一种炉型适合所有煤种的气化工^[3-4]。详细了解每一种潜在在

收稿日期: 2014-05-20; 责任编辑: 宫在芹 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2014.05.021

作者简介: 刘耀明(1983—), 男, 山西临县人, 工程师, 硕士, 主要从事能源技术管理工作。E-mail: yaomingliu@126.com

引用格式: 刘耀明, 秦江艳, 曹文晋, 等. 年产 40 亿 m^3 煤制天然气气化工工艺及装备选型[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(5): 86-89, 96.

LIU Yaoming, QIN Jiangyan, CAO Wenjin, et al. Gasification process and equipment selection for 0.4 billion cubic meters per year coal gasification project[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(5): 86-89, 96.

型的技术特点和项目配置煤炭资源的煤质特点, 确定与煤炭资源匹配的气化炉型, 是气化炉选型的关键。

1 煤制天然气气化工艺类型

煤制天然气技术可分为直接合成天然气技术和间接煤制天然气技术^[5-7]。目前商业化运行的技术大多是间接煤制天然气技术, 其核心步骤单元分为气化、变换、净化、甲烷化。其中气化步骤是煤制天然气工艺的第一步, 是煤化工与传统化工的主要区别, 也是煤制天然气项目工艺方案选择的关键^[8-9]。根据气化炉气化方式的不同, 目前煤气化工艺主要可以分为 3 类: 移动床、流化床和气流床^[10-12]。

1.1 移动床气化工艺

移动床气化工艺经历了常压气化和加压气化 2 个阶段, 常压气化工艺包括常压移动床 (UGI) 技术, 富氧连续气化技术等。由于移动床常压气化效率较低, 目前移动床煤气化工艺已经全面进入加压气化阶段^[13-14]。根据排渣物理形态又分为固态排渣移动床碎煤加压气化工艺和液态排渣移动床碎煤加压气化工艺。

1.1.1 固态排渣移动床碎煤加压气化工艺

在工业应用中较为成熟的移动床碎煤加压气化工艺为鲁奇碎煤加压气化工艺, 19 世纪 30 年代问世, 由德国鲁奇公司开发, 是最早大规模工业化, 同时也是在世界范围内应用最广的气化技术, 运行中的气化炉已有数百台。气化炉本体由内、外 2 层厚钢筒组成, 两筒间装满水形成水夹套, 防止炉体承受高温, 同时与外部的水蒸汽收集器相连, 可以将水蒸汽引出供气化炉自用。间歇进料和排灰由供煤煤锁和排灰灰锁控制, 实现气化炉连续气化, 煤气带出的较大显热量通过废热锅炉回收。碎煤加压气化有以下特点: ① 气化阶段在生成 CO 和 H_2 的同时生成大量甲烷, 对于以甲烷为最终目标产品的煤制天然气工艺有先天优势, 可降低后续工艺负荷; ② 原料煤颗粒尺寸要求苛刻, 煤粒要求为 6 ~ 50 mm, 原料利用率低, 大量粉煤要配粉煤气化炉或燃煤锅炉处理; ③ 碎煤加压气化工艺总体反应温度较低, 煤在炉体内滞留时间较长, 经历干燥区、干馏区、甲烷生成区、燃烧区等区域, 因此副产较多的焦油、酚和氨, 副产品价值高; ④ 由于反应产物的水相中含有较多的焦油、酚、氨等有机物, 反应污水量大, 处理困难, 实现“零排放”难度大; ⑤ 氧耗低、冷煤气效率高; ⑥ 固态排

渣, 适于灰熔融性较高煤种。

1.1.2 液态排渣移动床碎煤加压气化工艺

液态排渣移动床碎煤加压气化工艺又称熔融排渣 (BGL) 气化技术, 此技术由英国煤气公司和鲁奇公司在鲁奇炉的基础上联合开发。BGL 气化技术将鲁奇炉的干粉排渣改为熔融排渣, 提高了气化反应温度, 气化用水蒸汽大大减少, 气化效率和气体成分有了很大改进, 废水排放量比鲁奇气化大量减少, 废水处理变得相对容易。BGL 熔渣气化技术和鲁奇气化比较有以下特点: ① 可在炉内形成局部高温 (约 1600 $^{\circ}\text{C}$) 气化区, 气化率高、气化强度大, 可有效降低蒸汽用量和污水产生量; ② 煤中剩余的矿物质在高温下熔化, 经循环水激冷形成无渗滤性的玻璃质固体碎渣粒由炉底部排出, 炉渣无害化程度高; ③ 液态排渣方式决定了 BGL 气化炉更适合灰熔融性低的煤种。虽然 BGL 相对鲁奇炉有蒸汽用量少, 污水排放少等优点, 但国内目前运行的 BGL 装置问题较多, 还未实现稳定开车。

1.2 流化床气化技术

流化床气化炉采用粉煤为原料, 用氧化剂 (O_2 或者空气) 进行流化, 温度一般控制在 1000 $^{\circ}\text{C}$ 以下。国外流化床气化技术主要有德国温克勒 (Winkler) 流化床粉煤气化技术、高温温克勒 (HTW) 气化技术、美国 HBR 公司 TRIG 提升管煤气化技术、U-Gas 气化技术。国内主要有灰熔聚气化技术和恩德粉煤常压气化技术等。总体而言, 流化床气化技术工艺操作压力较低、气体带出物含量高且难分离、大型化方面成熟度低, 多处于中试或小规模工业化示范阶段, 目前尚无应用于大型煤化工项目业绩。

1.3 气流床气化技术

气流床气化技术是气化剂 (蒸汽和氧气) 夹带着粉煤 (或煤浆), 通过特殊喷嘴高速喷入炉膛内, 瞬间直接发生火焰反应, 转化为煤气和熔渣的气化方式。气流床气化技术主要分为干粉煤气化技术和水煤浆气化技术, 代表炉型分别为 Shell 气化炉 (干粉)、GSP (Gaskombinat Schnarze Pumpe) 气化炉 (干粉)、航天炉 (干粉)、GE (水煤浆)、对置式多喷嘴 (水煤浆)。气流床气化技术属于液态排渣气化技术适用于灰熔融性较低的原料煤。相对于干粉煤气化技术, 水煤浆气化技术装置运行更稳定, 运行压力更高, 但由于煤浆中水分高, 气化炉本身能效偏低, 同时对煤种的要求也更严, 一般而言, 水煤浆气化技术要求煤种成浆浓度达到 60%, 灰熔融性低于 1350

℃,而干粉煤气化技术对煤种成浆浓度没有要求,灰熔融性低于1500℃。

2 气化炉代表类型及商业化运行

2.1 鲁奇炉炉型

鲁奇碎煤加压气化工艺的代表炉型 Mark4 是当前世界上使用最多的鲁奇炉炉型。赛鼎工程公司(原化工部二院)在国家引进 Mark4 后经过消化吸收再创新已可以自行设计类似炉型——国产碎煤加压气化炉,近期的大唐克旗、大唐阜新、庆华新疆3个项目上均使用了赛鼎工程公司自行设计的国产碎煤加压气化炉。炉体直径3.8 m,设计压力4.0 MPa,日投煤量700~800 t。近期,鲁奇公司在 Mark4 和其后续炉型 Mark5 的基础上推出了炉体直径5 m,设计压力6.0 MPa,日投煤量达1750 t 的 Mark+ 炉型。根据理论计算 Mark+ 炉型不但增大了投煤量与产气量,同时甲烷密度将进一步提高,是很有前景的炉型,但目前尚无实际运行业绩。

2.2 Shell 气化炉

Shell 公司气化技术是目前应用较广的一种先进气化技术,采用纯氧、蒸汽气化,干粉进料,气化温度1400~1700℃,碳转化率达99%,有效组分($\text{CO} + \text{H}_2$)达90%以上,废锅流程,水冷壁结构,采用以渣抗渣方式防腐。炉体下部进料,上部产气,底部液态排渣,要求煤种灰熔融性低,黏温窗口宽。由于气化炉采用废锅流程且结构复杂,加工难度大,投资高,无法设置备用炉,一旦出现故障对生产影响大。该技术于1972年开始在壳牌公司阿姆斯特丹研究院(KSLA)进行煤气化研究,1976年应用于1台6 t/d 煤气化炉,1978年第1套中试装置在德国汉堡郊区哈尔堡炼油厂建成并投入运行,日处理煤量150 t,1987年在美国休斯顿迪尔·帕克炼油厂建成日投煤量250~400 t 的示范装置投产称作 SCGP-1 示范装置。1993年在荷兰的德姆克勒(Demkolec)电厂建成投煤量2000 t/d 的大型煤气化装置,用于联合循环发电,称作 SCGP 工业生产装置。自2001年国内企业开始大量引进壳牌煤气化装置,经过多年摸索,该技术在国内的装置大多已逐步开车正常,技术日渐成熟,然而部分项目依旧存在问题,如大唐多伦煤制烯烃项目至今负荷无法达到设计标准。

2.3 GSP 气化炉、科林气化炉

西门子公司拥有的 GSP 气化技术与科林公司气化技术起源相同,技术相似^[15]。该技术气化温度

1400~1600℃,碳转化率大于99%,有效气体($\text{CO} + \text{H}_2$)约为90%以上,激冷流程,水冷壁结构,采用以渣抗渣方式防腐。炉体上部进料,下部产气,底部液态排渣,要求煤种灰熔融性低,黏温窗口宽。该技术20世纪70年代由当时的前民主德国燃料研究所开发,首先在德国弗莱堡先后建成热负荷3.5 MW 的中试装置。1984年在黑水泵气化厂建成了单炉日投煤量720 t 的示范装置。2008年捷克整体煤气化联合循环发电(IGCC)项目建成投产1套200 MW 工业规模的气化装置,然而气化原料为移动床产生的焦油等液体废料而非以煤为原料。近年来,随着国内煤化工的发展,IGCC 气化技术重新获得新生。2007年8月贵州开阳年产50万t合成氨工程,引进科林技术。2008年9月神华宁煤60万t煤基烯烃工程,引进 GSP 气化技术,并于2010年11月投料成功。另外,山西兰花集团合成氨项目、中电投新疆合成天然气(SNG)项目、神华宁煤煤制油项目等多个项目均已选定 GSP 气化技术。

2.4 航天炉

航天粉煤加压气化技术(HT-L 气化)由中国航天科技集团公司北京航天动力研究所研制,是自主研发并具有自主知识产权的煤气化成套技术。该技术采用单烧嘴组合燃烧器、激冷流程,与 GSP、科林属同类型气化技术,煤种要求相似。2008年10月,安徽临泉化工股份有限公司建成投产1套 HT-L 粉煤加压气化示范装置,年产合成氨15万t;2008年10月,濮阳龙宇化工公司建成投产1套 HT-L 粉煤加压气化装置,年产甲醇20万t;2011年11月,鲁西化工建成投产1套 HT-L 粉煤加压气化装置,年产尿素30万t。

2.5 GE 水煤浆气化炉

GE 水煤浆加压气化原名为德士古水煤浆加压气化,是目前世界上先进的、成熟气化技术之一,有激冷流程、废锅流程、激冷废锅联合流程3种模式^[16]。该工艺特点为单台气化炉生产能力较大(日投煤量可达2000 t),操作压力高且变换灵活(最高可达8.7 MPa),耐火砖结构,液态排渣,碳转化率高,湿法磨煤,供料安全,三废排放少,处理简单,技术成熟,运行稳定。技术缺点是煤浆中水分大,导致氧耗大、能效低;煤质要求苛刻,水煤浆成浆浓度要求达到60%,煤炭灰熔融性低于1350℃。由于技术成熟,国内应用较多,山东鲁南化肥厂、上海焦化厂、渭河煤化工集团安徽淮南化工厂都已引进该煤

气化工艺,并投入生产。

2.6 对置式多喷嘴水煤浆

对置式多喷嘴水煤浆加压气化技术是华东理工大学、原鲁南化肥厂、中国天辰工程公司在 GE 水煤浆加压气化法的基础上通过自主研发开发的工艺。多喷嘴水煤浆气化技术基本工艺流程为:制备的水煤浆经煤浆加压泵加压喷入四喷嘴撞击流气化炉,与纯氧进行燃烧和部分氧化反应,生成含有 CO 和 H_2 的水煤气。该技术除具有与 GE 相同的技术特点外,其理论碳转化率更高,比煤耗、比氧耗更低,有效气含量更高,目前日投煤量 2000 t 气化炉已投产,并已开发日投煤量 3000 t 炉型。

3 配套煤炭资源煤种分析

煤制气项目配置煤炭资源初步拟定为准中矿区的房子梁井田(北部)和达赖梁井田(南部),煤炭具有以下特点:①变形温度约为 $1500\text{ }^\circ\text{C}$,适用于固态排渣气化技术,灰分中 SiO_2 、 Al_2O_3 含量高,原煤中含量均达到 45% 左右,精煤中 SiO_2 约 30%, Al_2O_3 约 50%,如果降低煤炭灰熔融性可添加 CaO;②煤炭硬度较高,不易破碎,落下强度试验结果均可达到 85% 以上;③挥发分高,干燥无灰基挥发分达到 37%,格金实验焦油产量为 7.9%~12.2%,移动床加压气化技术焦油潜在产量高;④北部煤田 CO_2 反应活性高,1100 $^\circ\text{C}$ 下 CO_2 反应活性达到 88%,南部煤田煤炭煤化程度较高, CO_2 反应活性有所降低,1100 $^\circ\text{C}$ 下反应活性 61.9%, CO_2 反应活性降低造成气化炉生产效率降低;⑤热稳定性高,煤的热稳定性 TS_{+6} 达到 95% 以上;⑥北部煤田黏结性较低,黏结指数为 0,南部煤田黏结性增加,黏结指数为 16,如果采用移动床加压气化技术需要增设搅拌破黏装置;⑦北部煤田水分较高,全水分 11.8%~16.4%,内水 7%~9%,南部煤田有所降低,全水分 10.4%,内水 5.6%;⑧含硫量高,约 1%;⑨固定碳较低,分选煤固定碳约为 50%。根据煤种特点及气化炉特点,仅有固态排渣移动床碎煤加压气化炉(简称碎煤炉)适合配置煤种特点,其中北部煤田煤质完全适合,南部煤田煤质相对适合。

4 工艺及炉型比选

三大类气化技术中,移动床气化技术、气流床气化技术相对较成熟,流化床气化技术目前尚处于技术发展阶段,应用于大型煤化工项目风险较大。由

于移动床气化技术反应温度较低,在气化阶段可生产大量甲烷(8%~13%),以天然气为目标产物时,气化阶段所产甲烷可占到总产品的 30%~45%,可有效降低后续工艺生产负荷,从而降低投资。同时由于移动床气化技术氧耗较气流床技术低,显著降低空分投资,因此以移动床气化技术为“气头”的煤制天然气工艺总体投资低于气流床技术。移动床气化工艺可副产大量焦油、粗酚等高附加值产品,可显著提高能量转化效率,增加项目收益,以移动床气化技术为“气头”,总体煤制天然气项目效率可达 56% 以上,而气流床技术约 50%。煤炭灰熔融性高与液态排渣技术要求煤炭灰熔融性低的矛盾,造成本项目中固态排渣气化技术优于液态排渣气化技术。因此最适宜的气化技术是固态排渣移动床气化技术。Mark4 炉、Mark+ 炉同为移动床气化技术,Mark4 有大量业绩而 Mark+ 仅有理论数据,虽然 Mark+ 设计性能指标高,但从设备可靠性和风险控制角度考虑建议选取 Mark4 炉。《“十二五”期间煤炭深加工示范项目能效和资源消耗指标》要求煤制天然气项目全厂能效高于 56%,因此从实际投资、收益角度和项目审批角度考虑,现阶段煤制天然气项目优先选用移动床气化工艺。

移动床气化技术对煤粒度要求高(6~50 mm),无法消耗所有原料煤,因此在煤炭利用上应从“洁配度”角度统筹考虑,对煤炭实行分级利用。鉴于目前内蒙古地区煤炭的 1:1 配置政策,项目所配原料煤中的粉煤必须也用于煤制气原料,气化工艺可考虑“双气头”方案,即移动床气化技术与气流床气化技术搭配。

5 结 语

根据目前成熟气化炉工艺特点、公司煤炭资源数量与质量以及其他新型煤化工项目气化方案,建投通泰有限公司建议煤制天然气项目气化工艺初步方案如下:①优先采用成熟可靠且效率较高、直径 3.8 m 的 4.0 MPa 级碎煤加压气化炉。②40 亿 m^3 天然气若分 2 期建设,一期可考虑全部采用碎煤加压气化炉,二期根据煤灰铝项目推进进度及 6 mm 以上精煤产量,酌情考虑外购碎煤方案和“双气头”气化方案。③如果二期采用“双气头”气化方案,优先选用干粉煤气化技术,以降低改良粉煤灰熔融性的成本。

(下转第 96 页)

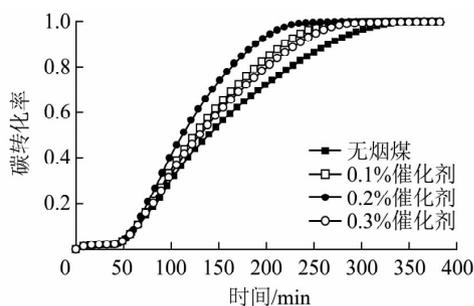


图6 催化剂加入量对碳转化率的影响

由图6可以看出,加入催化剂后,样品的失重过程加快,最大失重速率由0.7041%/min增大为0.8034%/min,在反应时间和温度相同时,浆样的碳转化率明显变大。但这一规律并不随着催化剂加入量的增加而持续变化,说明该煤种在特定粒度下的水煤浆浆样,有一个较佳的催化剂加入量。针对本项目所选取的无烟煤,催化剂1的最佳加入量为0.2%。

4 结 语

研究的无烟煤具备较好的成浆性能,利用分级研磨工艺,制浆浓度可达67.3%。由于其煤质特点,无烟煤反应活性较差,但通过优化粒度级配和加入催化剂等方式,煤样的燃烧特性和气化特性都有了显著提高。下一步的研究应详细考察温度、压力对无烟煤及低挥发分煤气化反应活性的影响,并进行多种催化剂的催化气化实验,开发高性价比的催化剂。

(上接第89页)

参考文献:

- [1] 汪宝林. 煤气化化学与技术进展[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(3): 69-74.
- [2] 李 瑶, 郑化安, 张生军, 等. 煤制合成天然气现状与发展[J]. 洁净煤技术, 2013, 19(6): 62-66, 69.
- [3] 亢万忠. 当前煤气化技术现状及发展趋势[J]. 大氮肥, 2012, 35(1): 32-40.
- [4] 钱 卫, 黄于益, 张庆伟, 等. 煤制天然气(SNG)技术现状[J]. 洁净煤技术, 2011, 17(1): 27-31.
- [5] 赵 亮, 陈允捷. 国外甲烷化技术发展现状[J]. 化工进展, 2012, 31(S1): 176-179.
- [6] 田基本. 煤制天然气气化技术选择[J]. 煤化工, 2009, 10(5): 19-24.
- [7] 苗兴旺, 吴 枫, 张数义. 煤制天然气技术发展现状[J]. 氮肥技术, 2010, 31(1): 6-8.
- [8] 胡四斌. 煤制合成天然气项目工艺方案与技术经济比较[J].

参考文献:

- [1] 何国锋, 詹 隆, 王燕芳. 水煤浆技术发展与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [2] 陈雪枫. 中国无烟煤利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [3] 何国锋. 水煤浆新技术研发与实践[M]. 北京: 中国石化出版社, 2012.
- [4] 马志刚, 方梦祥, 张 锋, 等. 无烟煤的燃尽特性分析[J]. 热力发电, 2008, 37(1): 13-16.
- [5] 于遵宏, 王辅臣. 煤炭气化技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [6] 陈朝柱, 俞建洪. 开发利用我省无烟煤制造水煤浆的可行性分析[J]. 福建能源开发与节约, 2001(2): 24-27.
- [7] 姜秀民, 杨海平, 刘 辉, 等. 粉煤颗粒粒度对燃烧特性影响热分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 142-145.
- [8] 公旭中, 郭占成, 王 志. Fe₂O₃ 催化无烟煤燃烧燃点降低机理的实验研究[J]. 化工学报, 2009, 60(7): 1707-1713.
- [9] 代松涛, 许慎启, 于广锁. 煤气化反应动力学实验研究方法进展[J]. 煤炭转化, 2008(7): 86-90.
- [10] 陈家仁. 煤炭气化的理论与实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2007.
- [11] 张济宇, 林 驹, 黄文沂, 等. 低活性劣质无烟煤的催化气化[J]. 煤炭转化, 2001(10): 32-39.
- [12] 匡建平. 黑液水煤浆催化气化机理以及气流床气化数值模拟研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [13] 刘 艳. 利用热重分析仪研究煤的催化气化[D]. 西安: 西北大学, 2007.
- [14] 王晓鹏. 不同煤种水煤浆与黑夜水煤浆在常压和加压条件下的气化特性[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [15] 陈亚妮. 热重法研究煤焦-CO₂的催化气化反应性[D]. 西安: 西北大学, 2009.

化肥设计, 2012, 50(4): 1-4.

- [9] 朱瑞春, 公维恒, 范少锋. 煤制天然气工艺技术研究[J]. 洁净煤技术, 2011, 17(6): 81-83.
- [10] 郭东升. 中国煤制天然气发展现状研究[J]. 广州化工, 2013, 41(2): 1-4.
- [11] 蔺华林, 李克健, 赵利军. 煤制合成天然气现状及其发展[J]. 上海化工, 2010, 35(9): 25-29.
- [12] 蔡东方, 王 黎, 徐 静, 等. 煤制天然气煤气化技术的研究现状及分析[J]. 洁净煤技术, 2011, 17(5): 44-46.
- [13] 张 腊, 米金英. 干煤粉加压气化技术的现状和进展[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(2): 74-78.
- [14] 王 鹏, 张科达. 碎煤加压固定床气化技术进展[J]. 煤化工, 2010, 37(1): 5-6.
- [15] 包福军. GSP粉煤气化生产天然气变换工艺改进的探讨[J]. 广州化工, 2014, 42(7): 16-17.
- [16] 马园媛. 关于水煤浆气化技术在我国的应用发展[J]. 科技与企业, 2014(6): 264.