

低阶煤分质利用转化路线的现状分析及展望

潘生杰¹, 陈建玉², 范飞¹, 李鹏飞¹

(1. 兰州兰石能源装备工程研究院有限公司, 甘肃 兰州 730314; 2. 兰州兰石集团有限公司, 甘肃 兰州 730314)

摘要:为系统了解国内低阶煤分质利用的产物应用现状和技术发展趋势,介绍了低阶煤分质利用的工艺路线与转化路径,并对煤炭热解产生的3种主要产物(煤焦油、热解煤气、半焦)及其工业化应用现状作了阐述。总结了煤焦油、热解煤气和半焦的利用去向,并剖析了低阶煤分质利用目前存在的关键技术问题,提出了未来重点研究方向,还对发展前景进行了展望。通过分析,认为依据我国煤炭资源的分布、低阶煤的储量及其特点,以及国家对煤炭能源政策的引导,在攻克众多共性关键难题的情况下,低阶煤分质利用宜作为上游工序,同时下游配套煤-电-化一体化项目,这种园区项目组团模式的煤炭分质清洁利用将是实现低阶煤利用互利共赢的最佳方式。

关键词:煤炭热解;分质利用;煤焦油;热解煤气;半焦

中图分类号:TQ530.2 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2017)05-0007-06

Present situation analysis and prospect of low rank coal quality-based utilization conversion route

PAN Shengjie¹, CHEN Jianyu², FAN Fei¹, LI Pengfei¹

(1. Lanzhou LS Energy Equipment Engineering Institute Co., Ltd., Lanzhou 730314, China; 2. Lanzhou Lanshi Group Co., Ltd., Lanzhou 730314, China)

Abstract: In order to know systematically the products' application status and the trends of technology development of low rank coal quality-based utilization in China, introduces the process route and conversion path of low rank coal quality-based utilization briefly, and expounds the three main products (coal tar, pyrolysis gas, carbocoal) produced by pyrolysis and their industrial application status. Emphatically summed up how to use coal tar, pyrolysis gas and carbocoal, and analysed the key technology problems of low rank coal quality-based utilization at present, put forward the research directions in future, also on the development prospects were looking forward. Through the analysis, that according to the distribution of coal resources in China, reserves and characteristics of low rank coal, as well as the guidance of the national to the coal energy policy, in conditions of solving the common key problems, low rank coal quality-based utilization should be taken as the upstream process, at the same time, downstream of coal-electricity-chemical industry integration project, this park project group mode for the clean coal quality-based utilization will be the best way to achieve mutual benefit and win-win use of low rank coal.

Key words: coal pyrolysis; coal quality-based utilization; coal tar; pyrolysis gas; carbocoal

0 引 言

我国以煤为主的能源结构在未来相当长的时期内不会改变^[1]。低阶煤(褐煤、长焰煤、弱黏煤和不黏煤等)在我国煤炭蕴藏量中约占50%(其中褐煤约占13%),产量约占目前总量的30%。如何清洁

利用我国丰富的低阶煤资源,实现利用效率和经济效益最大化,是新型煤化工产业重要的课题。2017年2月,国家能源局发布《煤炭深加工产业示范“十三五”规划》^[2],明确提出对成煤时期晚、挥发分含量高、反应活性高的低阶煤进行分质利用。因此,研究开发低阶煤清洁高效利用的新途径势在必行。

收稿日期:2017-03-17;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.05.002

作者简介:潘生杰(1988—),男,甘肃武威人,工程师,从事煤炭气化与热解、煤炭分质利用的研究与开发工作。E-mail:lsstxiaofei@163.com

引用格式:潘生杰,陈建玉,范飞,等.低阶煤分质利用转化路线的现状分析及展望[J].洁净煤技术,2017,23(5):7-12.

PAN Shengjie, CHEN Jianyu, FAN Fei, et al. Present situation analysis and prospect of low rank coal quality-based utilization conversion route [J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(5): 7-12.

低阶煤由于煤化程度低,富含水分、发热量低,具有低灰、低硫、高挥发分、高活性、易燃易爆等特点^[3],不宜直接燃烧和远距离运输。与新型煤化工五大路径(煤制油、煤制气、煤基甲醇制烯烃、煤制乙二醇和煤制芳烃)相比,低阶煤先分级提质后开发利用的方法,可显著提升碳和热的转化率,降低能耗与水耗,能效高、污染小,适合在我国低阶煤资源丰富、生态脆弱和水资源缺乏的地区开发利用。

低阶煤分质利用(也称分级利用)指煤炭经热解分解为煤焦油、煤气和半焦的气、液、固三相物质,实现对原料的分质,再根据各类产物性质及结构差异,结合周边项目的原料供应和状况布局,梯级转化、区别加工、延伸产业链,生产化工原料和各类精细化学品,最终实现对煤炭转化全过程“分质转化、

梯级利用、能化结合、集成联产”的新型利用方式。

1 低阶煤分质利用转化路线选择及其主要产物利用途径

煤炭热解也称煤炭干馏,指煤在隔绝空气的系统中加热,在不同温度下发生一系列物理变化和化学反应的复杂过程^[4]。低阶煤通过热解生成液体(煤焦油,占比5%~10%)、气体(热解煤气,占比20%~30%)、固体(半焦,占比60%~75%)3种形态的产品。热解是低阶煤分质利用工艺路线的龙头。通过优化组合产品方案和各环节工艺流程,逐级分质、梯级利用,能够形成多种产物的不同工艺转化路线,如图1所示^[5-6],最终实现“物质循环利用,能量梯级利用”。

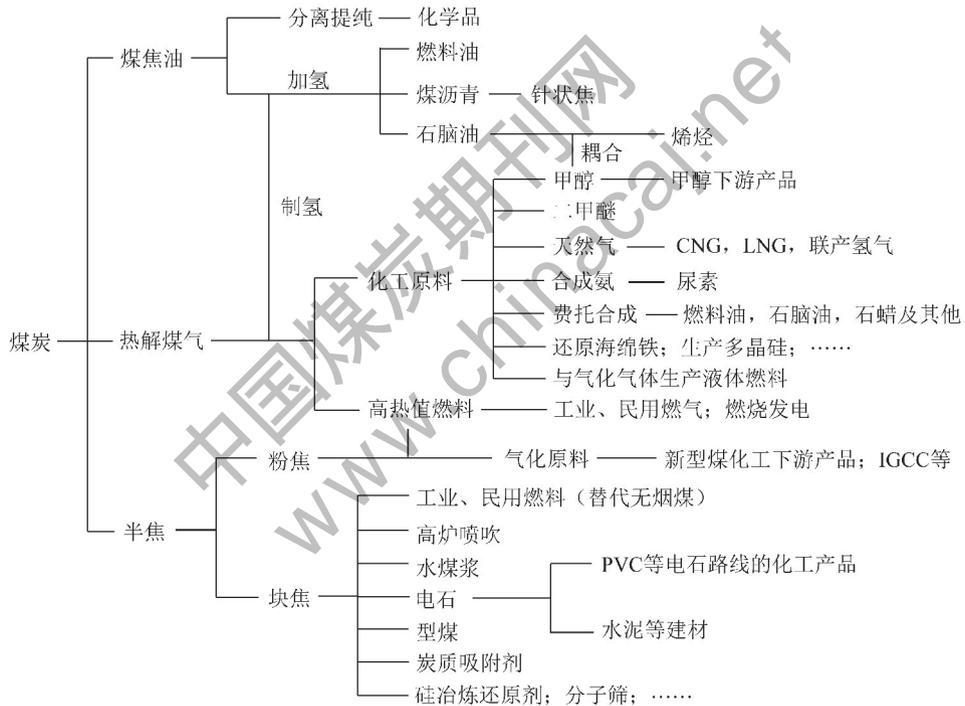


图1 煤炭分质利用转化路线选择^[5-6]

Fig. 1 Selection of conversion route for coal quality-based utilization^[5-6]

1.1 煤焦油的利用途径

低阶煤热解过程中产生的煤焦油是黑褐色、具有刺激性气味的黏稠状液体^[7]。这种混合物成分极其复杂,组分有上万种。

原料煤种或热解工艺不同,将导致产生的煤焦油在组分与性质上存在极大差异。中低温煤焦油密度为 $0.95 \sim 1.10 \text{ g/cm}^3$,主要由大量含氧化合物和脂肪族长链烃类混合构成,其中酚及其衍生物含量 $10\% \sim 35\%$,烷烃 $2\% \sim 10\%$,烯烃

$3\% \sim 5\%$,环烷烃约 10% ,芳烃 $15\% \sim 25\%$ ^[8],而焦油沥青含量相对较少,比较适于提取多环芳香烃类;或经催化加氢改质,加工成汽油、柴油等洁净液体燃料;也可作为化工原料深加工后获得苯、酚、吡啶等精细化工产品。

1.1.1 制取燃料油

目前,煤焦油制得燃料油品大多采取加氢轻质化工艺。煤焦油加氢轻质化技术是应用高压氢改质及裂化的原理脱水、脱杂、脱重金属,使烯烃

和芳烃饱和、原料烃裂解成较小的分子,并通过异构化等反应将质量较差的重质原料转化为优质产品的过程;生产的清洁燃料油可替代石油产品。现阶段工业化项目多采用固定床加氢技术,未来发展趋势包括开发配套技术、完善悬浮床加氢技术,最为关键的是开发高效、高适应性的加氢催化剂和反应器。

鉴于煤焦油加氢制汽柴油调和油工艺的优点,煤焦油轻质化制燃料油品项目在国内已成为投资热点,这一技术已有初步工业化规模。

1.1.2 深加工制取化工原料

该工艺路线将生产石脑油、燃料油等油品的工艺链延伸,生产酚类、橡胶溶剂等化合物,或者从石脑油中将芳烃组分抽提进一步深加工。张军民等^[9]认为中低温煤焦油适宜选择先提酚、后加氢的燃料-化工型路线。该路线优先提取中低温煤焦油中的高附加值组分,经济性更好。

1.1.3 煤焦油沥青的加工利用

煤焦油沥青是切除轻质、中质馏分后的残余物,多用以生产煤系针状焦、型煤黏结剂、改质沥青、各类沥青防腐漆等^[10]。另外,改性的煤系筑路沥青、沥青延迟焦生产技术、改质沥青生产技术、沥青碳纤维生产技术等也是新型利用方式。这些技术将煤焦油加工的产业链延伸,焦油中的价值最低但含量最大的重组分得到有效利用,经济价值得到体现。

1.2 热解煤气的利用途径

热解煤气组成复杂,主要组分为氢气(10%~30%)、甲烷(18%~28%)、一氧化碳(10%~20%)、二氧化碳(23%~48%)、硫化氢(小于1%)、C₂以上不饱和烃类(3%~13%)及其他气体(1%~5%)^[11],有效组分含量高达50%~90%,煤气热值在13.40~23.02 MJ/Nm³^[12]。热解煤气组成差异决定其利用途径不同,主要用于高热值气体燃料、化工合成原料气、制氢、制甲醇及多联产技术等。

1.2.1 高热值燃料

主要应用于民用燃气、工业燃气和脱硫脱氮后直接燃烧发电等领域。

1) 民用燃气。净化后的热解煤气热值较高,CO含量低,利于长距离输送,环境污染小,比较适合通入城市供气管网作为居民用气。

2) 工业燃气。主要用于焦化企业作为加热燃料,或冶金行业中作为炼钢、轧钢燃料。

3) 脱硫脱氮后直接燃烧发电。主要有蒸汽发电、燃气轮机发电及内燃机发电等形式。

1.2.2 化工原料或产品

1) 转化为合成气制取甲醇及二甲醚

甲醇和二甲醚是新型的煤基车用替代燃料。将热解煤气中的CH₄经催化转化为合成气(CO和H₂),CO、CO₂与H₂在催化剂作用下反应生成甲醇;可由合成气一步法制二甲醚。

2) 制取高纯度H₂

热解煤气中H₂含量10%~30%,国内基本采用变压吸附(PSA)提取高纯度H₂;或将热解煤气先转化为合成气,再通过水煤气变换反应转化为H₂。提纯以后的H₂可用作煤焦油轻质化的氢气来源。

3) 热解煤气制天然气

天然气作为高效清洁的能源,国内需求量日益增大。热解煤气中甲烷含量较高,分离出甲烷是热解煤气高价值的利用途径之一。中低温热解煤气先净化分离脱除杂质,再将H₂与CO、CO₂甲烷化,最终将混合产物中氢气分离制得天然气。

4) 制取H₂联产液化天然气(LNG)

在热解煤气制氢和制天然气两种利用途径的基础上,朱书成等^[13]提出热解煤气制H₂联产LNG的工艺。具体工艺为:中低温煤气经除尘、压缩、变换、净化、深冷分离后,制得H₂和LNG产品,H₂送变压吸附(PSA)提氢装置提纯。该工艺可灵活调节H₂产量,是热解煤气综合利用的较佳选择。

热解气还可用于F-T合成油工艺、生产多晶硅工艺、转化为合成气用于合成氨工业生产尿素、气化煤气与热解煤气共制合成气多联产应用^[12]等。

1.3 半焦的利用途径

1.3.1 直接用作工业和民用燃料

由于热解产生的半焦较原煤水分、挥发分、硫含量均降低,固定碳含量、反应活性、发热量和燃烧效率均提高,燃烧性能良好,污染物排放量大为减少,故直接作为窑炉和锅炉的燃料是其重要利用方式;另外,低温热解半焦几乎不含焦油,黏结为型焦后亦可作为民用燃料^[14],不仅热值高而且洁净耐用。

1.3.2 高炉喷吹燃料

褐煤热解半焦强度小、易磨碎。李鑫等^[15]对热解半焦的物理、化学性质进行化验分析,与高炉喷吹无烟煤相关指标对比,结果显示半焦各项指标均优于无烟煤,极为适于高炉喷吹。但目前国内半焦在

高炉喷吹中并无大规模应用,主要原因是半焦产品多为粉粒,无洗选、灰分大且供应不稳定,大规模工业应用仍受限。

1.3.3 制备水煤浆、型煤

中低灰分的褐煤半焦可用于制备水煤浆作为气化原料,成浆浓度可达60%以上^[14]。通过开发优质黏结剂,半焦经成型后可得到适用于铁合金冶炼的型焦,也可作为工业锅炉燃料、固定床气化用煤、炼焦用煤等。

1.3.4 制备碳质吸附剂(活性焦)

热解半焦微孔结构极为丰富,吸附催化性能强;且由于热解不完全,较容易改性,较为适宜作为兼有吸附、催化双重特性的碳质吸附剂,可部分替代活性炭。目前活性焦已经在净化锅炉(燃煤、燃油)排气、重油裂化排气、垃圾烧炉排气、燃烧炉排气等方面广泛应用^[15],可有效去除废气中硫化物、氮氧化物、烟尘、重金属等污染物。

此外,可将热解与气化结合,热解半焦作为气化炉原料;低灰褐煤热解半焦可用作硅冶炼还原剂,或经加工生产碳分子筛;热解半焦还可用于电石生产等。

2 低阶煤分质利用产业现状及前景

2.1 转化路线产业现状

2.1.1 产业技术现状

相比于块煤热解受到技术瓶颈桎梏难以发展,国内在粉煤热解技术领域取得了一系列重大突破。诸多低阶粉煤热解利用技术已基本完成中试或已建设小型工业示范装置,在不同程度上攻克了一些热解技术难题^[16],例如浙江大学循环流化床煤炭分级转化多联产技术、大连理工大学固体热载体(DG)工艺、陕煤化技术研究院与北京柯林斯达联合开发的低阶煤气化-热解一体化技术(CGPS)、延长石油集团开发的粉煤加压热解制油及半焦气化一体化技术(CCSI)、大唐华银电力与五环工程公司合作开发的洁净煤技术(LCC)工艺、河南龙城集团研发的龙城旋转床低温热解技术、北京神雾集团蓄热式无热载体旋转床干馏技术、陕煤化集团与上海胜帮开发的低阶粉煤气固热载体双循环快速热解技术(SM-SP)、神华模块化固体热载体技术,以及中科院工程热物理所固体热载体粉煤低温热解技术等。

但是,这些技术仍然在大型工业化装置运行中存在难以回避的问题,例如如何实现长周期商业化

稳定运行等。目前低阶粉煤热解技术还处于需要进一步优化的阶段,低阶煤分质利用正面临新的亟待解决的难题。

2.1.2 存在的问题

1) 技术性问题。① 亟需突破粉煤热解产物油气收率偏低、沥青质含量高的技术瓶颈,目前尚未有一种公认的可规模化进行粉煤热解的成熟技术,现有技术均需改进与完善;② 热解装置中的除尘问题(煤焦油含尘),是近年来粉煤热解技术开发所遇到的最大难题,因为热解原料是粒径细小的粉煤,装置在运行中产生大量煤尘,与热解产物煤焦油混合后,极易堵塞装置设备,下游工序处理难度极大,因此加快发展降尘、抑尘或除尘技术并开发相应装备已成当务之急;③ 至今国内尚无大型工业热解装置^[17],目前所建成的热解炉单炉处理能力不足,与煤炭“十三五”规划要求单炉热解能力达到百万吨级相差甚远,所以提升热解装置规模以适应工业化应用是化工设备制造业需要考虑的关键问题;④ 热解副产的半焦如何得到高附加值利用的问题,现今煤市下,中低温干馏半焦产能已显过剩,煤热解副产的大量半焦如何转化为高附加值的产品并推向市场,将是煤炭分质利用项目的关键。

2) 环保问题。主要是热解粉煤提质及煤焦油加工过程产生的高浓度含酚、含盐废水难以处理,环保投资大等问题尚未得到有效解决,将使产业路径的发展受到制约。

3) 经济性问题。① 原料煤选择范围受限,从中试装置实际运行和理论推导发现,当煤炭(干基煤)含油率不低于5%时,煤炭分质利用经济效益才能凸显;② 需谨慎评估煤炭分质利用项目与大型煤电、煤化工项目的匹配问题;③ 如果国家对煤焦油加氢生产汽油、柴油等油品的企业加征消费税,将严重削弱项目盈利能力和竞争力。

综上,国内煤炭分质转化路线还略显粗放,分级转化技术也有很多关键问题需要破解,亟须国家层面示范工程规范引导。

2.2 产业前景

2.2.1 技术经济

尚建选等^[6]对各种煤转化路线能源利用效率分析发现:煤炭高效热解分质利用应是当前能耗、物耗最低且最清洁环保的煤炭转化利用方式。以煤炭热解为龙头,发展煤炭分质转化产业的经济及节能环保效益相当显著^[18-19],见表1。

表1 煤炭分质利用与其他煤化工路线技术经济分析

Table 1 Techno economic analysis of coal quality-based utilization and other coal chemical route

转化路线	耗标准煤/t	耗新鲜水/t	排入大气碳比例/%	单位产品排放 CO ₂ 量/t	能源转化率/%
煤直接液化	3.5~4.2	>8	70.0	5~6	55~60
煤间接液化	4.5~6.0	>9	71.9	6~7	40~42
煤制天然气	2.2~2.6	>5	67.3	3.5~4.0	50~60
煤制烯烃(MTO/MTP)	5~6	12~19	77.8	5~6	66~77
煤制甲醇	1.8	>8	67.6	2.3~2.5	54
煤制乙二醇	2.5~2.8	2~9.6	80.9	5~6	>25
煤分质利用	2.8~3.4	3~5	50	4~5	60~80

从表1可知,煤炭分质利用与五大煤炭转化路径相比,在煤耗(标煤耗量相对较小或持平)、水耗(约为其他转化路径的1/2或1/3)、碳排放比例(约为其他路径的2/3)、能效(在五大转化路径中最高)等多项指标方面综合考量,均优于其他煤化工转化路线。

2.2.2 发展前景

1)在产业政策方面,国家发改委、能源局等部门近两年下发的《煤炭清洁高效利用行动计划(2015—2020)》、《能源技术革命创新行动计划(2016—2030)》、《煤炭深加工产业示范“十三五”规划》、《中国制造2025—能源装备实施方案》等一系列文件,均明确指出低阶煤清洁高效分质利用产业的发展方向和重点攻关任务,国家已将低阶煤清洁高效分质利用技术纳入“顶层设计”,是低阶煤分级提质利用产业和技术的政策保障。

2)在热解技术进展方面,据报道,目前桉桉煤炭分质利用的粉煤热解效率、热解炉规模、半焦高附加值利用、高浓度含酚废水处理等技术瓶颈均有所突破。北京神雾集团蓄热式无热载体旋转床干馏技术、陕煤化集团与北京柯林斯达的CGPS技术、延长石油集团的CCSI技术等正在进行百万吨级工艺包编制或工业化设计。如果相关技术实现工业化并相互取长补短、耦合优化,其带来的技术革新意义无疑是十分巨大的。

3)在投资产出比方面,煤制气、煤制油项目技术和设备投资约占总投资的80%,而分质利用项目占比约为68%,尤其是核心装备的国产化实现,导致成本降低的空间很大;按照各自的投资收益率计算,煤制气的投资回收期约11a,直接液化约8a,分质利用约5a。因此,低阶煤分质利用的投资产出比

最高,经济性优势明显。

4)从我国煤炭资源分布来看,低阶煤资源大量蕴藏于西北、中北、东北地区的边缘省份,新疆准东、陕西榆林、内蒙古中东部、黑龙江、云南等拥有较高含油率的褐煤。从煤化工整体战略布局来看,大型低阶煤分质利用项目应作为上游工序规划建设在煤炭资源地就地转化,同时下游配套煤-电-化一体化项目,宜煤则煤,宜油则油,宜气则气^[20],构筑起跨行业耦合发展的煤热解-煤化工-精细化工-煤电-建筑材料等多联产构架。

3 结 语

1)低阶煤分级利用技术通过热解提质将煤炭分解为粗煤气、煤焦油、半焦三相物质,再分别以适宜的转化路径梯级利用;粗煤气、煤焦油、半焦与化工路线相结合,延长了产业链;在国家政策的鼓励下,低阶煤分级利用在“十三五”期间将得到“井喷式”的发展契机。

2)低阶煤分质利用转化路线贯彻着对“资源和能量”综合利用的理念。通过原料、工艺、装备、过程的优化组合,尤为注重物质与能量的集成利用,兼顾节能减排、保护生态、经济最优原则,在多联产构架、组团式发展的模式下,能够实现热能平衡、余热梯级利用、废能互用^[21]。

3)技术性问题、经济性问题、环保问题仍然是低阶煤分质利用无法回避的制约因素。若能够在国家层面给予示范工程规范引导,集中技术优势逐一突破关键瓶颈的桉桉,低阶煤分质利用将不仅是实现各方互利共赢的清洁利用方式,也将为目前煤炭行业供给侧改革、去产能化提供重要的解决途径。

参考文献(References):

- [1] 宋华岭,金智新,于斌,等.高科技发展战略支持下的我国煤炭资源安全战略研究:第五届中国软科学学术年会论文集[C].北京:中央文献出版社,2005:512-518.
- [2] 国家能源局.国家能源局关于印发《煤炭深加工产业示范“十三五”规划》的通知[EB/OL].(2017-02-08)[2017-03-16].http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto83/201703/t20170303_2606.htm?keywords
- [3] 尚庆雨.褐煤干燥脱水提质技术现状及发展方向[J].洁净煤技术,2014,20(6):1-4,45.
SHANG Qingyu. Status and development direction of lignite dehydration upgrading technologies[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(6):1-4,45.
- [4] 许红霞.浅谈我国在煤炭热解技术中的研究发展[J].煤炭技术,2013,32(10):217-218.
XU Hongxia. Discussion on research and development of in china coal pyrolysis technology department of [J]. Coal Technology, 2013,32(10):217-218.
- [5] 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,2010,11.
- [6] 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):98-101.
SHANG Jianxuan, WANG Lijie, GAN Jianping, et al. Thinking of donversion route of comprehensive utilizationof coal resources by categories and qualities [J]. China Coal, 2010, 36(9):98-101.
- [7] 朱影.煤焦油轻质组分的分离与分析[D].徐州:中国矿业大学,2014:1-3.
- [8] 罗熙,张军民.中低温煤焦油加氢技术及产业发展分析[J].煤化工,2012,6(3):6-9.
LUO Xi, ZHANG Junmin. Analysis on Technology and industry development of the hydrogenationof mid-low temperature coal tar [J]. Coal Chemical Industry, 2012, 6(3):6-9.
- [9] 张军民,刘弓.低温煤焦油综合利用[J].煤炭转化,2010,33(3):92-96.
ZHANG Junmin, LIU Gong. Comprehensive utilization of low-temperature coal tar [J]. Coal Conversion, 2010, 33(3):92-96.
- [10] 徐春霞.煤焦油的性质与加工利用[J].洁净煤技术,2013,19(5):63-67.
XU Chunxia. Characteristics and processing utilization of coal tar [J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(5):63-67.
- [11] 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.
LI Wenyong, DENG Jing, YU Changlian. Development of lignite pyrolysis with solid heat carrier [J]. Coal Chemical Industry, 2012(1):1-5.
- [12] 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.
CEN Jianmeng, FANG Mengxiang, WANG Qinhui, et al. Development and prospect of coal staged conversion poly-generation technology [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2011, 30(1):88-94.
- [13] 朱书成,白太宽,张立新.低温热解煤气制氢联产LNG的方法[P].CN103803492A;2014-05-01.
- [14] 陶凤惠,曾鸣,施杰,等.褐煤低温干馏及产物的利用[J].洁净煤技术,2014,20(1):78-82.
TAO Fenghui, ZENG Ming, SHI Jie, et al. Lignite low-temperature pyrolysis and utilization of its products [J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(1):78-82.
- [15] 李鑫,张生军,徐婕,等.粉煤热解产物焦粉的综合利用[J].洁净煤技术,2013,19(5):74-76.
LI Xin, ZHANG Shengjun, XU Jie, et al. Comprehensive utilization of pulverized coal pyrolysis product coke powder [J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(5):74-76.
- [16] 邹涛,刘军,曾梅,等.煤热解技术进展及工业应用现状[J].煤化工,2017,45(1):40-44.
ZOU Tao, LIU Jun, ZENG Mei, et al. Progress of coal pyrolysis technology and its industrial application status [J]. Coal Chemical Industry, 2017, 45(1):40-44.
- [17] 王建国,赵晓红.低阶煤清洁高效梯级利用关键技术与示范[J].中国科学院院刊,2012,27(3):382-388.
WANG Jianguo, ZHAO Xiaohong. Demonstration of key technologies for clean and efficient utilization of low-rank coal [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3):382-388.
- [18] 尚建选,王立杰,甘建平.陕北低变质煤分质综合利用前景展望[J].煤炭转化,2011,34(1):92-96.
SHANG Jianxuan, WANG Lijie, GAN Jianping. Prospect of the shanbei comprehensive coal grading utilization technology coal conversion [J]. Coal Conversion, 2011, 34(1):92-96.
- [19] 郝丽芳,宋文立,张香平,等.低碳经济下煤热解综合利用技术的应用和发展[J].工程研究,2012,4(3):231-236.
HAO Lifang, SONG Wenli, ZHANG Xiangping, et al. Application and development of pyrolysis technology in low-carbon economy [J]. Journal of Engineering Studies, 2012, 4(3):231-236.
- [20] 金涌,颜彬航,储博钊,等.高效、清洁、高附加值原则指导下适度、有序发展煤化工产业[J].煤化工,2012,40(5):1-6.
JIN Yong, YAN Binhang, CHU Bozhao, et al. Develop coal chemical industry in a moderate and orderly way under the principles of high efficiency, clean conversion and high added-value [J]. Coal Chemical Industry, 2012, 40(5):1-6.
- [21] 甘建平,马晓迅,尚建选,等.煤炭分质转化利用的节能减排分析[J].煤化工,2011,39(4):1-4.
GAN Jianping, MA Xiaoxun, SHANG Jianxuan, et al. Analysis of saving energy and reducing emission in the process of coal grading conversion utilization [J]. Coal Chemical Industry, 2011, 39(4):1-4.