

述 评

褐煤低温热解分级利用现状分析及展望

丁肖肖,李洪娟,王亚涛

(开滦(集团)有限责任公司 煤化工研发中心,河北 唐山 063611)

摘 要:我国“富煤,贫油,少气”的能源现状,决定了很长时间我国仍将以煤炭为主。其中中低阶煤占目前煤炭总探明储量的 50% 以上,为高效利用褐煤等中低阶煤炭资源,笔者对我国褐煤资源的分布特点、物理特性及其干燥脱水、压缩成型和低温热解加工利用现状进行了分析,重点综述了褐煤低温热解技术研究现状,对目前广泛应用的固体热载体热解技术、气体热载体和气-固热载体进行了总结,并从反应器类型、热载体类型、适用范围、进料粒度、目标产品、工业化程度等方面对热解工艺进行了对比,指出了现阶段褐煤分级利用过程中存在的附加值不高、焦油收率低、余热回收和粉尘处理等关键技术问题,并对未来褐煤热解分级炼制工艺进行了展望,提出了通过提高焦油等热解产物的附加值来延伸产品链、开发与其他物质的共热解工艺、完善现有反应器并开发新的热解反应器、通过工艺调整提高褐煤中氧等元素利用率及大型化发展的必要性。提出未来褐煤等中低阶煤综合利用的建议,将褐煤热解提质技术与现有的煤气化、液化、MTO、MTP 等煤化工技术集成,并通过设置适宜的产品目标和设计合理的工艺路线,得到多种高附加值清洁燃料、化工原料以及热能、电力等产品,有效延长褐煤产业链,实现低阶煤分级分质利用,促进我国煤炭转化产业结构调整和优化升级。

关键词:褐煤;低温热解;分级利用;提质

中图分类号:TQ530

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2019)05-0001-07

Present situation analysis and prospect of classification and utilization of lignite pyrolysis at low temperature

DING Xiaoxiao, LI Hongjuan, WANG Yatao

(Coal Chemical R&D Center of Kailuan Group, Tangshan 063611, China)

Abstract: The China's energy situation of "rich coal, poor oil and little gas" determines that China will still be dominated by coal for a long time. Medium and low grade coal accounts for more than 50% of the total proven reserves of coal. In order to make full use of medium and low grade coal (such as lignite) resources of China effectively, the distribution characteristics and physical characteristics of lignite resources in China, as well as the technology of drying, dehydration, compression molding and low-temperature pyrolysis processing and utilization were analyzed in the paper. The research status of low-temperature pyrolysis technology of lignite was emphatically reviewed, and the widely used pyrolysis technology of solid heat carriers, and the gas heat carriers and gas-solid heat carriers were summarized. Moreover, the reactors, types of heat carrier, application, feedstock, production, and degree of industrialization of the typical upgrading lignite pyrolysis techniques at home and abroad were also compared. Furthermore, the key technology issues of lignite upgrading and utilization including products with low-added value, low tar yield, waste heat recovery, and dust treatment were pointed out. The prospect of lignite pyrolysis and classification refining technology in the future was also discussed. In addition, it was necessary to extend the product chain by improving the added value of tar and other pyrolysis products, co-pyrolysis with other materials, design and development of reactor, the higher utilization rate of oxygen and other elements in lignite through process adjustment, and large-scale development. Finally, the suggestions of comprehensive utilization of low rank coal lignite in the future were pointed out. The lignite pyrolysis technology and the existing coal gasification, liquefaction, MTO and MTP coal chemical technology should be integrated. A variety of high value-added clean fuels,

收稿日期:2018-09-19;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18091901

基金项目:河北省创新能力提升计划创新创业人才团队项目

作者简介:丁肖肖(1992—),女,河北邯郸人,助理工程师,主要从事煤化工方面的研究。E-mail:15735160849@163.com

引用格式:丁肖肖,李洪娟,王亚涛.褐煤低温热解分级利用现状分析及展望[J].洁净煤技术,2019,25(5):1-7.

DING Xiaoxiao, LI Hongjuan, WANG Yatao. Present situation analysis and prospect of classification and utilization of lignite pyrolysis at low temperature[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(5): 1-7.



移动阅读

chemical raw materials and heat energy, electric power are obtained by setting the appropriate product objectives and designing reasonable technology route. The lignite industry chain should be effectively extended to realize the classification and quality utilization of low-grade coal, and promote the structural adjustment and optimization and upgrading of China's coal industry.

Key words: lignite; low-temperature thermolysis; grade use; upgrading

0 引言

我国煤炭储量相对于石油、天然气等能源较丰富,中低阶煤占煤炭总探明储量的55%,其中褐煤占13%左右,主要分布在内蒙古、云南、山西和陕西等地^[1]。由于成煤时间短,煤化程度较低,具有“三高两低”的特点,即水分高(30%~60%)、挥发分高(>40%)、灰熔融温度高(>30%),热值低(11.71~16.73 MJ/kg)、灰熔融温度低(<1 250 ℃),这些特点限制了其高效利用^[2-4]。褐煤的高含水量使其在干燥过程中发生收缩、粉化,燃烧过程中可燃性差、成型效果差、运输成本高,新开采的褐煤机械性能差,易破碎和自燃,不适合长期储存和远距离运输。目前大部分褐煤用于直接燃烧发电,导致配套的干燥设备能耗高,发电效率偏低(<35%)^[5],且燃烧过程中排放的粉尘、硫氧化物、氮氧化物以及汞等重金属,对环境造成了严重污染^[6-7]。随着国内烟煤及无烟煤等优质煤炭的大量开采和消耗,预计以褐煤为代表的低阶煤将成为煤炭综合开发和利用的重点^[8-9]。

根据褐煤的结构、组成和不同组分的反应性,通过热解、气化、液化等方式,将其优化集成为洁净的气、液、固体燃料和高附加值的化学品,提高煤的利用效率,同时有效脱除煤中的污染物,不仅是经济和环境发展的要求,也是我国能源发展的战略要求^[10-11]。

1 褐煤资源开发及加工利用技术

干燥脱水技术、压缩成型技术和低温热解技术是现阶段褐煤提质的主要技术^[12-13]。干燥脱水技术主要分为蒸发干燥和非蒸发干燥^[14],蒸发干燥是通过直接或间接的能量加热,使水分以气态形式脱除;非蒸发干燥是通过加热使煤中的亲水性含氧官能团分解,水分在煤孔收缩过程中以液态形式脱除。干燥通过脱除水分,降低了后续过程的能耗,但也可能出现更严重的积灰、结垢、粉化和爆炸等问题^[12]。压缩成型技术是通过在粉煤中添加一定比例的黏结剂或添加剂后,经高压或剪切作用,从本质上改变煤的煤阶,从而得到满意的理化性质的块煤制品^[15]。低温热解(400~650 ℃)是在隔绝空气条件下,煤受

热发生一系列复杂的物化反应,得到煤气、焦油和半焦的过程,一般热解过程包括3个阶段^[16]:①干燥脱气阶段(室温至300 ℃)。游离水、空隙中吸附的少量CH₄、CO、CO₂脱除,褐煤发生脱羧反应,生成少量CO₂和H₂O。②热分解阶段(300~600 ℃)。以分解、解聚反应为主,同时释放大量的挥发分,生成热解气、焦油^[17]。③热缩聚阶段(>600 ℃)。以缩聚反应为主,半焦转变为焦炭^[18]。低温热解反应条件温和,耗能少,生产成本低,且热解产物焦油中含有丰富的BTX(苯、甲苯和二甲苯)和PCX(酚、甲酚和二甲酚)等高附加值物质,提酚后的焦油还可直接加氢制备燃料油^[19-20];热解煤气不仅是高热值燃料,直接用于民用和工业燃气,还可用来制取高纯度H₂、合成甲醇及二甲醚、制取天然气等^[21-22];半焦的挥发分和硫含量降低,反应性和发热量提高,不仅可直接作为固体燃料使用,还可作为高炉喷吹燃料、还原剂和制备碳质吸附剂等^[23-24]。

2 褐煤低温热解工艺

根据热解条件和方式,热解工艺和产品方案各异,按供热方式可分为外热式和内热式^[25],外热式中热介质与原料不直接接触,热量由管壁传入,该方式可保证挥发产物不被稀释,但也具有煤料加热不均匀、半焦质量差和焦油收率低的缺点;内热式的加热介质与原料直接接触,热效率高,没有复杂的加热调节设备。按照加热介质,内热式分为固体热载体、气体热载体和气-固热载体,固体热载体以半焦或热灰作为循环热载体,充分利用高温固体的显热,同时避免了煤气被稀释^[26];气体热载体将热烟气引入热解反应器中,但热烟气中的CO₂和惰性气体会稀释煤气,降低产气品质。

2.1 固体热载体热解工艺

1) LR 工艺。鲁奇鲁尔煤气公司开发,是典型的用热半焦为热载体的低温热解技术,其以制取焦油为目的,原料以褐煤、弱黏煤等高挥发分(35%~46%)的低煤化度煤为主。1963年在前南斯拉夫投建了生产能力为1 600 t/d的生产装置,其工艺流程为褐煤经分选后,粉碎至0~5 mm,经螺旋给料器进入输送管,在干馏煤气的推动下进入热解器,煤与循环热解半焦在机械搅拌的热解器中混合,反应器温

度为 480~590 ℃,得到的煤气与焦油蒸气在气液分离系统进行分离,半焦一部分用作燃料,一部分作为热载体循环使用。

2) TOSCOAL 工艺。美国油页岩公司开发,以陶瓷球为热载体,原料以弱黏结性煤和非黏结性烟煤为主^[10]。工艺流程为:将 6 mm 以下的粉煤加入提升器中,经热烟气预热后与高温瓷球进入温度为 427~510 ℃的热解反应器和旋转滚筒,煤气与焦油蒸气由旋转滚筒的顶部排出后在气液分离器中分离,热球与半焦经滚筒的筛网分离,陶瓷球经载体提升器进入瓷球加热器循环使用^[27]。

3) ETCH-175 工艺。由俄罗斯开发,以多灰煤、褐煤及泥煤为原料。工艺流程为:褐煤经破碎后,经烟气预热干燥(水分降至 4% 以下)后,被旋风器送入热解反应器与半焦热载体混合、反应,热解反应器温度为 600~650 ℃,烟气经处理后分离出煤气、焦油等产品,半焦部分进入载体提升管作为固体热载体循环使用,部分作为固体产品排出。

4) Garrett 工艺。最初由美国 Garrett 研究与开发公司开发,后与西方石油公司共同对其进行改进^[28]。以高温半焦为热载体,以生产气体和液体燃料为目的。工艺流程为:褐煤磨碎至 0.074 mm 以下,与高温半焦一起送入热解反应器,为避免焦油的二次分解,停留时间很短。煤气和焦油经冷凝分离后作为产品输出,半焦一部分作为热载体循环,另一部分作为产品排出^[29]。

5) 新法干馏工艺(DG 工艺)。由大连理工大学开发,主要由煤干燥及提升、半焦流化燃烧及提升、煤焦混合、煤干馏等部分组成^[30-31]。工艺流程为:褐煤磨碎至 6 mm 以下与半焦热载体在螺旋式混合器中混合,后输送至热解反应器中进行快速反应,反应器温度为 500~650 ℃,热解半焦在提升过程中加热,通过半焦储槽再进入反应器循环使用,该工艺已在陕西神木运行了 2 套 60 万 t/a 的工业化装置。

6) “煤拔头”工艺(BT 工艺)。由中科院过程所于 20 世纪 80 年代开发,以高温循环灰为热载体,工艺流程为:粉煤由给煤机送入快速固-固混合器,与高温循环灰混合后进入下降管反应器,煤在管中发生快速热解反应,生成煤气、焦油和半焦,煤气在气固分离器中与半焦和循环灰分离,再在急冷装置中与焦油分离后排出,分离后的半焦进入循环流化床燃烧加热循环灰,加热后的热灰经分离后进入热载体料仓循环利用。该工艺在河北廊坊建成了处理量 10 t/d 规模的煤拔头中试平台,搭建了 3 套每年万吨以上处理量的工业性试验装置^[21]。

7) 循环流化床煤热解多联产工艺(CFB 工艺)。20 世纪 80 年代由浙江大学于提出的多联产技术方案,将流化床热解炉与循环流化床锅炉紧密结合,通过合适的技术路线获得液体燃料、电力和化学品,是褐煤清洁高效利用未来的重要发展方向。工艺流程为:褐煤通过给料器送入流化床热解炉,与高温热灰混合,快速升温并发生热解反应析出煤气和焦油,煤气在旋风分离器中与热灰和半焦分离,后经冷却装置与焦油分离,净化后的煤气部分作为热解炉流化介质再循环,部分经再净化后供民用或作为其他液体燃料和化工产品的合成原料。焦油用于提取化学品或合成高品位合成油,热灰被重新加热后在热解炉中开始新的循环^[32]。该工艺具有工艺简单、燃料适应性广、工艺参数要求低、煤气产率高等优点,并已分别在云南小龙潭和安徽淮南投建运行了 40 t/h 和 75 t/h 的工业化装置。

表 1 为 7 种典型的固体热载体工艺,除 CFB 工艺适用范围扩展到烟煤外,其余工艺均针对褐煤等低阶煤。Garrett 工艺对原料煤的要求最高,BT 工艺对原料煤的粒度适应性最好。7 种工艺存在的共性问题:转化方式单一,主要产品为半焦;高温半焦为热载体时,得到的半焦产品中含有大量的焦油残渣,且液体焦油中的含尘量高,造成后续焦油加工困难;煤粉和固体热载体采用机械混合方法,加大了设备投资,系统能耗增加。虽然 TOSCOAL 和 CFB 工艺分别用陶瓷球和炉外的高温热灰作热载体,有效改善了设备投资大、系统热效率低等问题,但其陶瓷球使用过程中,磨损和含尘挥发分的净化及热解后灰与半焦的返送等问题也成为其技术难点。

2.2 气体热载体热解工艺

1) ENCOAL 工艺。为美国 SGI 公司于 20 世纪 80 年代开发,以生产含硫量低高热值的固体燃料(PDF)和液体燃料(CDL)为目的。其工艺流程为:将煤破碎至 3~50 mm,给煤机将煤粉送至干燥炉脱水,随后在循环热气的输送下进入热解炉,在 540 ℃下热解,反应后的半焦在卧式回转窑中被急冷后送入贮存器,该半焦易产生粉尘,且易吸附水分,壳牌矿业公司(SMC)针对此问题,开发了 MK 添加剂,问题得到了改善。

2) COED 工艺。由美国食物机械公司和美国煤炭研究局共同开发,采用低压、多段流化床进行热解。热的流化气体逆向对流通始终向前流动的煤和焦,并升温加热固体,在最后流化段,供氧使一部分残余炭燃烧,同时产生热量和流化气体,以供工艺过程需要。

表1 国内外固体热载体工艺比较

Table 1 Comparison of solid heat carrier technology at home and abroad

工艺	反应器	热载体类型	适用范围	进料粒度/mm	目标产品	工业化程度/ (t·d ⁻¹)	存在的问题
LR	移动床	半焦	褐煤、油页岩、 不黏煤、弱黏煤	0~5	半焦、焦油	1 600	焦油中的固体颗粒物达40%~50%，后续焦油加工困难
TOSCOAL	回转炉	陶瓷球	褐煤、弱黏煤	<6	半焦	25	瓷球在600℃以上使用时易受磨损，焦油收率不高
ETCH-175	移动床	半焦	褐煤、泥煤	6	半焦	4 200	半焦混有焦渣，利用价值低
Garrett	气流床	半焦	褐煤等低阶煤	<8	煤气、焦油	—	焦油和半焦黏附设备，煤的微破碎问题使半焦循环量增大，设备处理能力有限
BT	循环流化床	热灰	褐煤	<20	焦油、电	10	热解煤气被直接燃烧发电，未产生高附加值产品；循环热灰输送系统不稳定
DG	移动床	半焦	褐煤、低变质烟煤	6	半焦	150	气固分离设备较多，排渣受温度影响较大
CFB	循环流化床	热灰	褐煤、烟煤	10	电、煤气、焦油	40	煤和高温热灰均匀混合

3) 多段回转炉热解工艺(MRF工艺)。由煤炭科学研究总院北京煤化所开发^[33]。适用于褐煤、长焰煤、弱黏煤等年轻煤，主要以制备优质半焦为目的。工艺流程为：褐煤破碎至6~30 mm，煤或煤气燃烧外部供热煤至600~700℃，得到半焦、煤气和焦油，煤气和焦油在冷却系统分离，半焦在增碳炉中进一步脱除挥发分。该工艺在内蒙古拉尔市投建规模为2万t/a的示范装置，效果不理想。

4) LCC工艺。该工艺由大唐华银电力公司和中国五环工程有限公司以美国LFC工艺为基础共同开发，工艺流程为：煤干燥—煤提质—煤净化，褐煤破碎至合适的粒径，在干燥炉内干燥后，送入热解炉内热解，生成的半焦在急冷盘中冷却后排出，热解气经除尘、冷却等处理后直接利用。此工艺已在内蒙古锡林浩特投建运行了30万吨级的工业化示范

装置。

5) CSIRO工艺。由澳大利亚联邦科学与工业研究院于20世纪70年代开发，采用循环流化床技术，煤种适应性强，工艺流程为：氮气将煤粉送入流化床反应器，在液化石油气和空气燃料形成的烟气以及经电加热器预热的氮气加热作用下，发生快速的热分解反应，产物经过冷却、分离后得到半焦、焦油和煤气等产品。

表2对比了5种典型的气体热载体热解工艺，气体热载体工艺较固体热载体工艺对煤粉的进料粒度要求较宽。5种工艺主要以煤气和焦油为主要产品，但焦油中的固含量多，品质难以控制且焦油与细粒半焦在器壁上的黏附，影响设备运行，由于外部供气需要多余的设备，投资成本增大，且效率不高。

表2 国内外气体热载体工艺比较

Table 2 Comparison of gas heat carrier technology at home and abroad

工艺	反应器	适用范围	进料粒度/mm	目标产品	工业化程度	存在的问题
ENCOAL	—	褐煤、次烟煤	3~50	半焦、焦油	1 000 t/d	焦油品质控制及后续系统堵塞问题
COED	流化床	褐煤	—	煤气	—	过程复杂，在操作性和规模放大上存在问题
MRF	回转炉	褐煤	6~30	焦油、半焦、煤气	167 t/d	连续生产易出现粉尘沉积和堵塞，煤粉化严重，系统复杂，能耗高，生产能力有限
LCC	—	褐煤、次烟煤	3~50	半焦、低温焦油	30万t/a， 150万t/a(拟建)	半焦、焦油产品质量差，需外供热量，运行成本高
CSIRO	循环流化床	褐煤	—	焦油	20 kg/h	热解气夹带的部分细粒半焦与焦油等冷凝物的分离比较困难

3 褐煤热解分质利用发展趋势

1) 提高焦油、半焦、热解气产品的附加值,延伸产业链。褐煤提质主要得到半焦、焦油和燃料气3种产品。褐煤等低阶煤清洁高效梯级利用的主要路线包括低温热解-油品提质-半焦燃烧发电,低温热解-油品提质-半焦气化-合成和加氢热解-半焦气化-费托合成-油品共气化等。就目前利用情况看,半焦主要以燃料出售或直接循环回燃烧炉给系统供热,其价值没有得到充分开发,针对半焦的化学活性高、热值高、多孔等特点,将其制成还原剂和多种煤基材料。热解焦油中含有其他原料中不可替代的多种高附加值化学品,如PCX(苯酚、甲酚、二甲酚)。而目前的研究不够深入,且在利用过程中仅进行粗分离后出售或直接燃烧,造成资源浪费,未来应以焦油为原料,通过不同工艺生产对苯二酚、高间位比混甲酚、萘二甲酸、邻苯二甲酰亚胺等产品^[34-35],提高焦油附加值。热解气不仅可作为燃气使用,还可以合成多种液体燃料,亦可通过不同的合成工艺对其进行延伸来生产化工产品和材料等。

2) 发展褐煤与其他物质的共热解工艺并完善和开发新的反应器。褐煤富碳少氢,在热解过程中通过加氢可提高其转化率,但外加纯氢的成本较高,因此寻找廉价的氢源是关键。生物质是一种高氢、高挥发分物质,与褐煤的石墨化程度和热解温度相近,共热解时能够同时得到大量的焦油、煤气和高碳半焦。研究表明,当共热解时,生物质对褐煤热解有促进或抑制的相互作用^[36-37],与煤单独热解相比,煤与生物质共热解时,生物质中的一部分碳被固定在半焦中,从而使半焦产率增加,半焦颗粒的孔隙率和比表面也有所增加。液化残渣、废弃塑料、废弃橡胶等资源,其在与褐煤共热解时存在一定的协同作用,可提高焦油的产率,改善半焦性质^[38]。开发褐煤与生物质、液化残渣等资源的共热解,不仅可提高热解效率,改善热解产品,也可避免资源浪费和环境污染。由于热解过程中,二次反应严重,导致焦油品质差,应针对初级与二次反应的不同控制机理,完善并开发出可控二次反应的反应器,以抑制重质组分生成,防止管路堵塞,并降低热解油分离难度,实现焦油和热解气的高收率。

3) 提高元素/能量利用效率。褐煤中含有丰富的氧元素,在褐煤中主要以含氧官能团形式存在,其在煤热解过程中会与氢结合生成热解水,消耗煤中大量氢,降低热解生成的自由基对氢的利用率,使热解产物产率低、品质差。通过合适的工艺将褐煤中

的氧转移至焦油产品中的酚类化合物等含氧组分或半焦表面,不仅可减少热解水的产生,同时可提高焦油中高附加值化合物的含量,使煤中各元素得到合理高效利用^[39]。但目前对于煤中氧元素的迁移规律还有待进一步研究。

4) 扩大项目规模。目前,由于部分运行或间歇运行装置长周期稳定生产差,产业链短,且配套的环保不完善,油气粉尘分离和焦油加氢精制等技术不成熟,同时,低阶煤装备和基地大型化进程缓慢,缺少统筹的一体化分级利用全产品链建设,我国已实现工业推广的热解装置规模小,褐煤热解炉的最大生产能力每年仅为几十万吨,随着烟煤等优质煤炭资源的减少,褐煤的加工利用应在现有规模的基础上,开发并设计单系列百万吨级的热解炉及其附属设备,满足大型化、规模化和工程化的要求,从而使褐煤资源得到高效开发,实现热-电-油-气的多联产。

4 结 语

我国褐煤资源丰富,对其利用及相关技术的开发不仅是经济发展的要求,也是我国能源发展的战略性要求。近年来,国内外均已开发出了多种褐煤热解工艺,且部分已经实现了工业化生产,但其中仍存在诸多问题,如产品附加值不高、焦油收率低、余热回收和粉尘处理等,限制了其大型化的发展。未来将褐煤热解提质技术与现有的煤气化、液化、MTO、MTP等煤化工技术集成,并通过设置适宜的产品目标和设计合理的工艺路线,得到多种高附加值清洁燃料、化工原料以及热能、电力等产品,有效延长褐煤产业链,实现低阶煤分级分质利用,促进我国煤炭转化产业结构调整和优化升级。

参考文献(References):

- [1] 赵奇. 中国褐煤资源清洁高效利用现状[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(2): 9-14.
ZHAO Qi. Clean and efficient utilization of lignite resources in China[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(2): 9-14.
- [2] 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.
SHANG Qingyu. Status and development direction of lignite dehydration upgrading technologies[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(6): 1-4.
- [3] 卜颖颖. 振动流化床干燥褐煤过程中的传热特性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [4] 汪寿建. 褐煤干燥成型多联产在工程实践中的应用和发展[J]. 化工进展, 2010, 29(8): 1379-1387.
WANG Shoujian. Application and development of lignite drying for

- co-production in engineering practice[J]. Chemical Industry and Engineering Process, 2010, 29(8): 1379-1387.
- [5] 郭晓克, 肖峰, 严俊杰, 等. 高效褐煤发电系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(26): 23-31.
GUO Xiaoke, XIAO Feng, YAN Junjie, et al. Study on efficient lignite-fired power system[J]. Proceeding of the CSEE, 2011, 31(26): 23-31.
- [6] 赵亚莹, 石海鹏, 杭珊珊. 褐煤燃烧污染物排放特性的实验研究[J]. 东北电力大学学报, 2012, 32(2): 33-37.
ZHAO Yaying, SHI Haipeng, HANG Shanshan. The experimental study of lignite combustion pollutant emission characteristics[J]. Journal of Northeast Dianii University, 2012, 32(2): 33-37.
- [7] WEN Chang, XU Minghou, HE Lanlan, et al. CCSEM investigation on the mineral transformation and fine ash formation during lignite pyrolysis and combustion[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(4): 703-706.
- [8] 李兴平. 刘家口选煤厂煤泥浮选提质试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [9] 田由甲. 白音华褐煤可溶物的结构特征及在热解过程中的转化规律[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- [10] 邵俊杰. 褐煤提质技术现状及我国褐煤提质技术发展趋势初探[J]. 神华科技, 2009, 7(2): 17-22.
SHAO Junjie. Development Status of lignite quality improvement technology and development trend of China's lignite quality improvement technology[J]. Shenhua Technology, 2009, 7(2): 17-22.
- [11] LIU Fangjing, WEI Xianyong, FAN Maohong, et al. Separation and structural characterization of the value-added chemicals from mild degradation of lignites: A review[J]. Applied Energy, 2016, 170(15): 415-436.
- [12] 刘思明. 低阶煤热解提质技术发展现状及趋势研究[J]. 化学工业, 2013, 31(1): 7-13.
LIU Siming. Study on development and trends of low rank coal pyrolysis extraction technology[J]. Chemical Industry, 2013, 31(1): 7-13.
- [13] 仇欢欢. 含氧官能团含量对褐煤水分回吸性及热解反应性影响[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [14] 王秀军, 彭定茂, 黄凤豹, 等. 褐煤脱水改质技术[J]. 洁净煤技术, 2010, 16(3): 83-86.
WANG Xiujun, PENG Dingmao, HUANG Fengbao et al. The de-watering technology for lignite[J]. Clean Coal Technology, 2010, 16(3): 83-86.
- [15] 王东升, 白向飞, 刘明锐, 等. 浅析褐煤半焦成型技术及利用前景[J]. 煤质技术, 2017(6): 1-4.
WANG Dongsheng, BAI Xiangfei, LIU Mingrui et al. Discussion on the lignite semicoke modling technology and its application prospect[J]. Coal Quality Technology, 2017, (6): 1-4.
- [16] 高晋生. 煤的热解、炼焦和煤焦油加工[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
- [17] 刘明强. 褐煤低温热解及半焦燃烧、成浆特性的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [18] 高松平. 褐煤加压快速热解过程中甲烷逸出规律及机理研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- [19] 张军民, 刘弓. 低温煤焦油的综合利用[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.
- [20] 李冬, 李稳宏, 高新, 等. 中低温煤焦油加氢改质工艺研究[J]. 煤炭转化, 2009, 32(4): 81-84.
LI Dong, LI Wenhong, GAO Xin, et al. Hydro-upgrading process of medium and low temperature coal tar[J]. Coal Conversion, 2009, 32(4): 81-84.
- [21] 郭志航. 褐煤热解分级转化多联产工艺的关键问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
GUO Zhihang. Research on the key issues of lignite pyrolysis based staged conversion polygeneration technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [22] LI Y, WANG T, YIN X, et al. Design and operation of integrated pilot-scale dimethyl ether synthesis system via pyrolysis/gasification of corn cob[J]. Fuel, 2009, 88(11): 2181-2187.
- [23] 白宗庆, 李文, 尉迟唯, 等. 褐煤在合成气气氛下的低温热解及半焦燃烧特性[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(5): 726-732.
BAI Zongqing, LI Wen, YUCHI Wei, et al. Low temperature pyrolysis of lignite in the presence of syngas combustion characteristics of derived char[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(5): 726-732.
- [24] 李跃斌. 褐煤半焦作还原剂的直接还原铁及焙烧研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
LI Yuebin. The research of the direct reduction of iron and roasting based on lignite solid char[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [25] 郭树才. 煤化工工艺学[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2006.
GUO Shucai. Coal chemical technology[M]. second edition. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [26] 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, 40(1): 1-5.
LI Wenyong, DENG Jing, YU Changlian. Development of lignite pyrolysis with solid heat carrier [J]. Coal Chemical Industry, 2012, 40(1): 1-5.
- [27] 郝瑛轩. 甲烷-低阶煤微波共热解研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.
HAO Yingxuan. Study on microwave pyrolysis of low rank coal at methane atmosphere [D]. Jiaozuo: Henan University of Technology, 2014.
- [28] 何德民. 煤、油页岩热解与共热解研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
HE Demin. Pyrolysis and coprolysis of coal and oil shale [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [29] 董鹏飞. 气固逆流下行床煤热解实验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
DONG Pengfei. Experimental investigation on coal pyrolysis in gas-solid countercurrent downer reactor[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [30] 徐瑞芳. 陕北煤低温干馏生产工艺及改进建议[J]. 洁净煤技

- 术,2010,16(2):41-44.
- XU Ruifang. Progress of low temperature coal carbonization and improvement suggestions in Northern Shaanxi [J]. Clean Coal Technology, 2010, 16(2): 41-44.
- [31] 白佳伦. 粉煤低温快速干馏半工业化试验的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2014.
- BAI Jialun. Semi-industrial pilot studies of pulverized coal low temperature fast carbonization [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014.
- [32] 葛立超. 我国典型低品质煤提质利用及分级分质多联产的基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- GE Lichao. Basic research on typical low-quality coal upgrading and poly-generation system based on the cascade utilization of coal [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [33] 夏浩, 刘全润, 马名杰. 褐煤提质技术现状[J]. 洁净煤技术, 2010, 16(4): 56-58.
- XIA Hao, LIU Quanrun, MA Mingjie. Progress of lignite upgrading technology [J]. Clean Coal Technology, 2010, 16(4): 56-58.
- [34] 吕京鹏, 曹祖宾, 李建华, 等. 中低温煤焦油馏分油的酚抽提精制工艺研究[J]. 煤化工, 2007, 35(1): 55-57.
- LYU Jingpeng, CAO Zubin, LI Jianhua, et. al. Phenol extraction from fraction of medium and low temperature coal tar and phenol refining [J]. Coal Chemical Industry, 2007, 35(1): 55-57.
- [35] 刘巧霞. 陕北中低温煤焦油中酚类化合物的提取研究[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- LIU Qiaoxia. Study on extraction phenols of the medium and low temperature coal tar from north Shaanxi [D]. Xi'an: Northwest University, 2010.
- [36] 唐初阳. 影响生物质和煤共热解油产率和品质的机理研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2017.
- TANG Chuyang. Mechanism research on the influence on yield and quality of tar derived from co-pyrolysis of biomass and coal [D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2017.
- [37] 朱绒. 生物质碱金属在煤/生物质共热解过程中迁移影响因素研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017.
- ZHU Rong. Impact of biomass alkalis migration on coal char during co-pyrolysis of coal and biomass [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017.
- [38] 李晓红, 马江山, 薛艳利, 等. 褐煤与煤直接液化残渣共热解产物半焦性能研究[J]. 燃料化学学报, 2015, 43(11): 1281-1286.
- LI Xiaohong, MA Jiangshan, XUE Yanli, et. al. Properties of semi-coke from co-pyrolysis of lignite and direct liquefaction residue of Shendong coal [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2015, 43(11): 1281-1286.
- [39] 冯晓博. 褐煤中有机氧的赋存形态及在热解过程中迁移规律的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016.
- FENG Xiaobo. Research on forms of organic oxygen in lignite and the transformation mechanism during pyrolysis process [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2016.