

低阶煤粉煤热解提质技术研究现状及发展建议

王向辉, 门卓武, 许明, 翁力, 刘科

(北京低碳清洁能源研究所 北京 102211)

摘要: 为改善低阶煤煤质、提高其利用经济性和安全性, 阐述了国内外主流的低阶煤粉煤热解提质技术的工艺特点及研究进展, 分析了低阶煤粉煤热解提质技术存在的问题, 并对低阶煤粉煤热解提质工艺的发展进行了展望。结果表明: 粉煤热解一般采用固体热载体热解工艺, 具有加热速度快、焦油产量高、热解煤气热值高等优点, 是解决大量粉煤利用的关键技术之一。针对粉煤热解工艺存在的关键技术未实现突破、经济效益差、焦油品质难以有效控制、废水处理难度大等问题, 提出未来应从实现热解关键技术突破、优选热解反应器、开发热解产品深加工技术、研发可提高焦油产率和改善焦油品质的新工艺、开发新型焦油分离和回收技术、开发含有机物废水的处理方法、开发具有高能源转化效率的多联产工艺等7方面进行粉煤热解提质技术的研究。

关键词: 低阶煤; 粉煤; 热解提质; 固体热载体; 多联产; 煤拔头

中图分类号: TD849; TQ536.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2014)06-0036-06

Research status and development proposals on pyrolysis techniques of low rank pulverized coal

WANG Xianghui, MEN Zhuowu, XU Ming, WENG Li, LIU Ke

(National Institute of Clean and Low Carbon Energy, Beijing 102211, China)

Abstract: The research progress and characteristics of the domestic and international mainstream pulverized coal pyrolysis upgrading technologies were introduced in details in order to improve the quality, economy and security of low rank coal. The technical problems existed were analyzed and developing suggestions were proposed for the low rank pulverized coal pyrolysis upgrading technology. The results showed that it was one of the key technologies to use solid heat carrier pyrolysis process for pulverized coal utilization, which have the advantages of high heating speed, high tar yield and calorific value. Due to the issues such as key technical deficiency, low economic efficiency, big tar quality fluctuation and difficult waste water treatment, the research in future should focus on the fields of key technical breakthrough, pyrolysis reactor optimization, pyrolysis products deep processing and utilization, tar yields and tar quality improvement, tar separation and recovery technology, organic waste water treatment and poly-generation technology with high energy conversion efficiency.

Key words: low rank coal; pulverized coal; pyrolysis; solid heat carrier; poly-generation; coal topping

0 引 言

煤炭占中国能源消费结构的75%以上, 其中80%以上用于直接燃烧, 且50%以上供直接燃烧块煤的工业锅炉、工业窑炉及家用燃煤炉使用, 造成煤炭利用效率低、污染物排放超标^[1]。现有主流煤气化技术多以块煤为原料, 随着采煤机械化程度的提

高, 块煤产率由52%~60%降至20%~38%, 加重了块煤短缺, 造成煤粉长期大量积压^[2]。据估计, 全世界2300个煤矿中每年约产生煤粉0.5 Gt, 对其进行合理高效利用尤为重要。随着国内能源需求日益增大, 对低阶煤, 尤其是低阶粉煤的综合转化利用将成为未来能源需求的有力支撑。低阶煤是处于低变质阶段的煤, 分为低变质烟煤和褐煤, 具有水分

收稿日期: 2014-06-09; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2014.06.009

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: 王向辉(1977—), 男, 河北承德人, 高级工程师, 博士, 从事煤热解提质工艺技术开发、煤间接液化工作。E-mail: xhwang_cn@126.com

引用格式: 王向辉, 门卓武, 许明, 等. 低阶煤粉煤热解提质技术研究现状及发展建议[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(6): 36-41.

WANG Xianghui, MEN Zhuowu, XU Ming et al. Research status and development proposals on pyrolysis techniques of low rank pulverized coal [J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(6): 36-41.

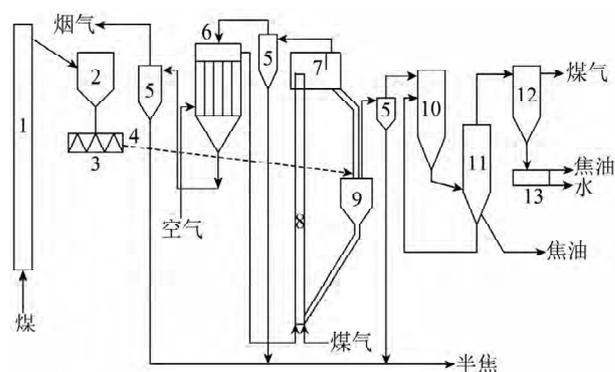
高、挥发分高、灰分高、易自燃、强度差等特点,极大限制其直接开发利用。为改善低阶煤煤质、提高其利用经济性和安全性,国内外学者针对低阶煤热解提质技术开展了大量研究。国外开发了以苏联 ETCH 工艺、美国 K-Fuel 工艺、德国鲁奇-鲁尔工艺(L-R)^[3-7]、美国 Toscoal 工艺^[3,8-10]为代表的低温热解工艺;国内大连理工大学^[3,7,11]、浙江大学^[12-21]、中国科学院过程工程研究所^[22]、陕西华祥能源科技集团有限公司等根据粉煤特点开发了流化床热解工艺,但在工程化过程中出现了诸如高温物料输送困难、高温密封不严、高温热解气除尘不净、焦油品质差等问题,未能实现工业化。国家能源科技“十二五”规划将低阶煤提质改性技术和中低温煤焦油制清洁燃料及化学品关键技术列为重大技术研究计划,低阶煤热解提质技术迎来了良好的发展机遇。鉴于此,笔者阐述了国内外主流的低阶煤粉煤热解提质技术,分析了热解提质技术存在的问题,并对今后低阶煤粉煤热解提质工艺的技术路线给出了发展建议,以促使煤热解提质工艺早日实现工业化。

1 低阶煤粉煤热解提质工艺

煤热解提质工艺是煤深度干燥的基础上,在非氧化气氛下继续升温,发生一系列复杂的物理化学反应,脱除大部分挥发分,得到半焦、低温焦油和热解煤气等产品的过程。热解是利用煤炭组成与结构特征生产替代紧缺油气资源的煤温和转化过程,也是利用煤本身结构特点联产芳香烃化学品的最有效方法,其转化条件温和、工艺流程短、煤种适应性强、能效高、水耗低。产品半焦可用作燃料、气化原料,低灰分半焦亦可作为制备水煤浆、型焦、活性炭等的原料;煤焦油加氢裂解可生产汽油、柴油和燃料油;采用固体热载体技术产生的高热值煤气可直接作为工业原料和民用燃气,采用气体热载体技术产生的低热值煤气只能作为工业燃料。受粉尘夹带、原料透气性差等因素影响,低阶煤粉煤热解提质技术在工艺选择上主要以固体热载体为主。

1.1 德国 L-R 低温热解工艺

L-R 低温热解工艺是德国鲁奇公司和鲁尔公司在 1949 年联合开发的以获取多量焦油为目的的固体热载体内热式热解方法,以低阶煤或油页岩为热解原料,其工艺流程如图 1 所示。L-R 工艺以自产半焦为热载体,采用粉煤进料。煤经干燥提升管提升到煤仓,经螺旋输送机进入煤输送管,在冷的热解



1—干燥提升管;2—干燥煤仓;3—螺旋给煤机;4—煤输送管;
5—旋风分离器;6—空气预热器;7—热半焦收集器;8—半焦加热提升管;9—移动床热解反应器;10—焦油捕集器;
11—除尘器;12—冷却器;13—油水分离器

图 1 L-R 低温热解工艺流程

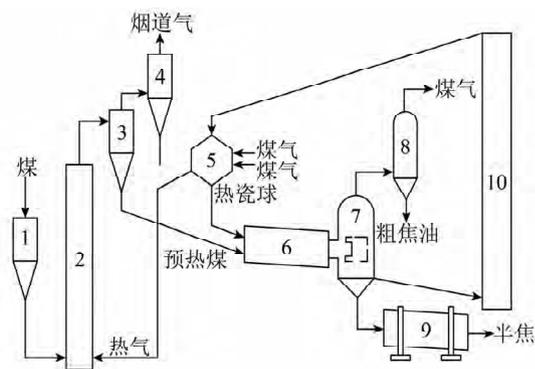
煤气作用下流入热解器,与来自热半焦收集器的约 800 °C 半焦在机械搅拌的移动床热解器中混合,粉煤被加热到 480 ~ 590 °C 发生热解反应。热解气态产物经除尘进入冷凝回收系统,得到焦油和煤气等产品。热解半焦一部分作为产品排出系统,其余部分进入半焦加热提升管中加热作为热载体。

L-R 工艺具有设备结构简单,热解时间短,反应器处理能力大,焦油收率高,煤气发热量高 (12.6 ~ 13.5 MJ/m³),系统热效率高 (86.6% ~ 89.0%) 等优点。主要缺点是焦油含尘量高、分离困难,后处理系统容易堵塞,机械搅拌装置磨损较严重。L-R 工艺曾在西德多斯顿建立了 260 t/d 中试装置并连续运转 200 h。1963 年,以褐煤为原料在前南斯拉夫建立了 2 套生产能力 800 t/d 工业化装置。1983 年,分别在英国和德国建立了烟煤半焦制取液压型焦的工业装置。

1.2 美国 TOSCOAL 热解工艺

Toscoal 低温热解工艺是美国油页岩公司和 Rocky Flates 研究中心在 Tosco-II 油页岩干馏技术基础上开发的煤热解技术,可生产煤气、焦油及半焦。煤气热值较高,符合中热值城市煤气的要求;焦油加氢可转化为合成原油;半焦含有一定挥发分,可用作发电厂燃料或制成无烟燃料(图 2)。

Toscoal 工艺采用转筒式热解反应器、瓷球做热载体。粒度小于 12.7 mm 的干燥煤在预热提升管内被来自瓷球加热器的热烟气预热。预热后的煤加入热解转炉中与热瓷球混合,煤加热到约 500 °C 发生热解反应产生半焦和热解气。半焦在回转筛中与瓷球分离并冷却得到粒度小于 6.3 mm 的半焦产



1—煤仓;2—预热提升管;3—旋风分离器;4—洗涤器;5—瓷球加热器;6—热解转炉;7—回转筛;8—油气分离器;9—半焦冷却器;10—瓷球提升管

图2 Toscoal工艺流程

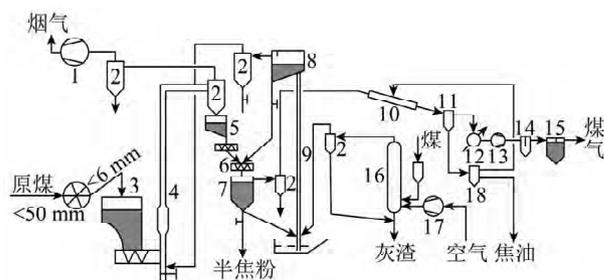
品,瓷球经提升管加热后循环使用;热解气进入油气分离塔冷凝分离得到煤气和粗焦油。瓷球加热所需燃料为自产煤气或燃料油。Toscoal工艺具有加热速度快,焦油产率高等优点;缺点是系统热效率低,设备复杂,维修量大。

怀俄达克次烟煤在Toscoal工艺25 t/d中试装置上的实验结果表明:温度为430~540℃时,半焦产率为44.0%~47.6%、焦油5.2%~8.4%、煤气5.4%~5.7%,煤气热值为18.75~22.03 MJ/m³。

1.3 大连理工大学褐煤固体热载体热解工艺

大连理工大学开发的褐煤固体热载体热解技术(DG工艺)是将干燥褐煤与高温半焦热载体在反应器中快速混合,使其热解析出气态产物,得到轻质油品、煤气和半焦的技术。DG工艺流程如图3所示。

原料储槽中小于6 mm湿煤送入干燥提升管中,由下部进入的约550℃热烟气提升并干燥。干煤与来自热半焦储槽的约800℃热焦粉在混合器中混合到550~650℃后进入反应器,析出热解气态产物,完成煤的热解反应。生成的半焦被来自流化燃烧炉的800~900℃含氧烟气加热到800~850℃并提升到热半焦储槽,作为热载体循环使用。由热半焦储槽出来的约550℃热烟气去干燥提升管,将湿煤干燥为水分小于5%、温度120℃的干煤,烟气温度降至约200℃。自反应器下部导出的部分焦粉经冷却作为产品出厂。热解气态产物经过热旋风除尘



1—引风机;2—旋风分离器;3—原煤储槽;4—干燥提升管;5—干燥储槽;6—混和器;7—反应器;8—热半焦储槽;9—加热提升管;10—洗气管;11—气液分离器;12—煤气间冷器;13—煤气鼓风机;14—除焦油器;15—脱硫箱;16—流化燃烧炉;17—空气鼓风机;18—分离槽

图3 DG褐煤热解工艺流程

后用80℃水喷淋洗涤并冷却,煤气和洗涤水在气液分离器中分离,水和重焦油去分离槽进行油水分离,煤气经间冷器冷却分出轻焦油,煤气经除焦油、脱硫后送入气柜。DG工艺的优点是加热速度快,热效率高,热解产生的挥发物快速引出,二次热解作用轻,产品焦油产率较高^[3],可达铝甑分析的75%~85%;热解煤气发热量大于16.73 MJ/m³,可作为优质的民用煤气或工业燃气。工艺主要存在固-固混合不均匀且耗时较长、气-固分离设备多、排渣受温度影响较大以及热解粉尘带出量过大等问题。

1992年,在平庄建成首套处理量150 t/d的褐煤固体热载体热解工业实验装置。以水分小于5%、粒度小于6 mm的干燥褐煤为原料,在热解温度550~600℃条件下,干基半焦产率约40%,焦油产率约3%,煤气产率约200 m³/t。在陕西神木富油公司建设的12万 t/a中低温煤焦油综合利用项目中,利用该技术实现长焰煤热解,装置处理能力为60万 t/a。

1.4 浙江大学的多联产技术

浙江大学开发了热-电-气-油多联产技术,以循环流化床技术为基础,集燃烧、热解和气化于一体,能同时生产蒸汽、电力、煤气和焦油。热解气化炉为常压流化床,用水蒸气和再循环煤气为气化剂,运行温度540~700℃时为热-电-气-焦油多联产运行,运行温度750~800℃时为热-电-气三联产运行。多联产工艺流程如图4所示。原料经给煤

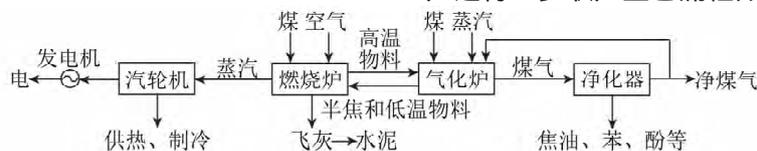


图4 浙江大学热-电-气-焦油多联产工艺流程

煤送入热解气化室热解,析出高热值挥发分,半焦中部分炭与水蒸气发生反应生成水煤气。气化后半焦与循环灰一起送入循环流化床锅炉在 900 ~ 950 °C 下燃烧,加热从热解气化炉来的低温灰并产生蒸汽。从热解气化炉来的粗煤气经冷却、净化后变成净煤气,作为民用燃气或返回气化炉作为气化剂。煤气净化过程中收集的焦油经加氢精制生产高附加值产品。从锅炉出来的高温烟气经冷却、净化后排入大气。由锅炉、烟气冷却器、煤气冷却器产生的蒸汽除少量供气化炉外,其余用于发电、供热。

浙江大学在实验室建立了 1 MW 多联产实验台并进行了大量实验研究。以粒径 0 ~ 8 mm 大同煤为原料、0.5 mm 石英砂为循环物料,进行了主要目标产品为煤气和热电的气化与燃烧耦合实验。进煤设计量 120 kg/h,燃烧炉温度 950 °C,气化炉温度 750 °C,煤气中 H₂、CO、CH₄ 体积分数分别为 45.1%、17.4%、11.5%。以粒径 0 ~ 8 mm 的低硫、高灰、高灰熔融性淮南烟煤为原料,进行了目标产品为煤气、焦油和热电的热解与燃烧耦合实验。热解温度由 500 °C 增至 700 °C 时,焦油产率随温度的升高先增加后下降;600 °C 时最大焦油产率为 6.8%,为格金分析的 75.4%^[16]。产生的煤气热值较高,达 12 ~ 14 MJ/m³。燃料热解气化时,其中的有机硫、挥发分氮先行脱出,循环流化床锅炉脱硫、脱硝比普通锅炉容易,故装置的 SO_x、NO_x 排放较低;装置燃料适应性广,收到基挥发分在 20% 以上、粒度 0 ~ 8 mm 的煤都适用于该装置。

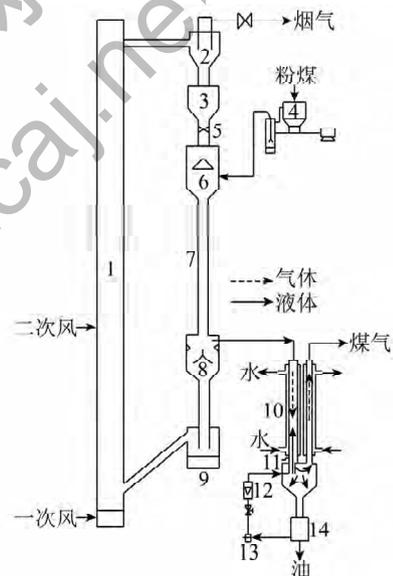
在国家高技术研究发展计划(863 计划)的支持下,浙江大学和淮南矿业集团合作建立了 12 MW 循环流化床热-电-气-焦油多联产工业示范装置,并于 2007 年 8 月试运行。2009 年 6 月启动由 1 台 135 MW 循环流化床锅炉和 2 台流化床热解气化炉组成的多联产系统,产生的煤气部分分离 H₂ 后,进行燃气轮机联合循环发电;焦油经脱渣、分离后加氢生产燃料油。目前,浙江大学已完成了 35、75、130 和 420 t/h 等热电气多联产系统的设计,其中 75 t/h 热电气三联产锅炉已在江苏成功运行。

1.5 中国科学院过程工程研究所“煤拔头”工艺

20 世纪 80 年代,中国科学院过程工程研究所郭慕孙院士根据煤炭特性提出了提取煤炭中轻质组分进而实现煤炭分级、综合利用的“煤拔头”新工艺,其采用循环流态化技术实现工艺系统的高度集成,属于多联产范畴^[23-25]。“煤拔头”工艺的核心

是实现煤炭分级转化,在煤炭燃烧发电前经过快速热解、快速分离和快速冷却,提取煤中气体、液体燃料和精细化学品,拔头后的半焦用于供热和发电^[26-28]。

煤处理量 8 kg/h “煤拔头”工艺流程如图 5 所示。煤炭干燥后经正压加料装置进入固-固混合器,与来自燃烧室的循环热灰迅速混合,煤粉受热升温后送入热解室,在下行过程中发生热解反应。热解产物被送入气-固快速分离器,分离出的气态产物经高温过滤后快速冷却,可凝油气冷却为液体产品,不可凝油气作为可燃气体;分离出的半焦和循环灰继续下行,通过固体返料装置进入燃烧室,半焦燃烧加热循环灰。燃烧升温后的循环热灰被燃烧烟气夹带到炉顶,经气固分离进入热载体料仓,后经高温固体料阀加入固-固混合器,进行新一轮循环。



1—燃烧器; 2—旋风分离器; 3—热载体料仓; 4—加料器;
5—高温阀; 6—快速固固混合器; 7—热解器; 8—快速气固分离; 9—U型阀; 10—冷却器; 11—液体喷嘴;
12—液体流量计; 13—循环泵; 14—液罐

图5 “煤拔头”工艺流程

以粒径小于 0.28 mm 霍林河褐煤为原料、以平均粒径 0.25 mm 普通河砂为床料,在热解温度 660 °C 下,得到热解产品^[27]。其中半焦产率 62.5%、焦油产率 12.0% (其中轻质油产率约 5.6%)、煤气产率 10.8%、热解水 14.7%。煤气可燃组分中 CO 含量最高,其次为 CH₄ 和 H₂,三者之和为 53.1%,煤气热值较高,净化后可作为工业或民用燃气使用。

在国家高技术研究发展计划(863 计划)和中国科学院知识创新工程方向性项目的支持下,中国科

学院过程工程研究所完成了对蒸发量 75 t/h 循环流化床燃烧锅炉的改造,建立了煤处理量 5 t/h 的“煤拔头”工业示范装置。2011 年在廊坊开工建设 10 t/d 煤炭热解中试平台,2013 年 12 月该平台连续运转 10 d,进入实验运转阶段。系统调试期间,装置累计运行 90 h,热解煤处理量达到 200 kg/h。吨煤产焦油 105 kg、煤气 132 m³,煤气热值高达 28 MJ/m³。煤气中 CH₄、H₂、CO 体积分数分别为 34%、21%、17%,还含有少量低碳烷烃和烯烃等。

2 粉煤热解提质技术存在问题

1) 关键技术未取得实质性突破。热解反应机理一直是国内外学者的研究重点,但因煤种差异、反应条件、热载体等不同而未形成公认理论,从而无法对热解反应进行有效预测,影响热解产品质量。同时,诸如热载体与煤的混合、热解产物的气固高温分离、热载体的连续循环及分配、煤气净化系统堵塞等工程化问题尚未解决。

2) 经济效益差。煤热解工艺的高值产品是焦油,对热解焦油进行有效深加工和综合利用是项目经济效益主要来源。由于目前热解装置普遍规模较小,运行成本高且无法形成焦油加工产业链。热解煤气一般作为工业燃气利用,未进行分级高值利用。此外,作为热载体的半焦不仅难以冷却、储存和运输,且含有大量焦渣,热值下降,利用价值降低^[29]。

3) 焦油品质难以有效控制。进入冷却系统的粉尘无法与焦油有效分离,焦油含尘量高不利于其深加工利用且易堵塞管路。通过水或氨水洗煤气急冷分离焦油,分离效果差。由于焦油、氨水和焦油渣的密度差较小,在气液分离器中依靠密度分离法分离焦油较为困难^[30-31]。

4) 废水处理难度大。煤热解产生的废水量大,回收循环利用困难,且热解过程中易生成苯、酚等有机物,增加了废水处理难度。

3 粉煤热解提质技术发展建议

1) 实现热解关键技术突破。未来应重点关注大型热解技术及装备,反应器优化及先进除尘技术,焦油、煤气与粉尘三相分离技术,新型催化热解催化剂研制,余热回收利用技术,焦油加氢制燃料油技术,半焦成型技术,水回收利用及处理技术等领域发展,力争实现关键技术突破,促进煤热解工艺发展。

2) 优选热解反应器。采用移动床或低速旋转

气流床热解装置,减弱煤热解过程中受到的机械冲击,降低粉化率;反应器在低气速下操作,降低气体对粉尘的夹带能力,减轻高温气固分离器负荷,从而降低油气中粉尘含量。

3) 研究热解产品深加工利用技术。充分利用热解半焦孔隙丰富、化学活性高、比电阻高、热值高等特点,将其制成还原剂、炭质吸附剂和高炉喷吹燃料等高附加值产品,提高热解半焦的经济性。将热解半焦粉与热解酚水混合制成水焦浆作为气化原料,成浆浓度高。深入开展焦油深加工前期工作,将煤焦油加氢制取燃料油。采用先进气相分离技术从煤气中分离出高值的 CH₄和 H₂。CH₄作为民用燃气输出, H₂作为焦油加氢原料,剩余气体作为普通工业燃气,实现热解煤气的分级利用。

4) 开发可提高焦油产率和改善焦油品质的新工艺。在煤热解过程中应用催化功能热载体,实现煤的定向热解,调节气液产品组成。将热解煤气中分离出的 H₂通入热解反应器,实现加氢热解工艺,可提高焦油产率及焦油中轻质组分比例。采用富氢生物质与煤的共热解技术,可抑制煤热解生成自由基间的聚合,提高焦油产率,改善焦油品质。

5) 开发新型焦油分离和回收技术。采用热煤气高温除尘并经静电除焦器除去大部分焦油,冷却得到大部分含酚废水和轻油的工艺^[30]或采用热煤气经旋风除尘器除尘后进入激冷塔冷却,冷却后的塔顶气进入静电捕集器回收大部分液体煤焦油产品的工艺^[32],实现煤焦油的有效分离。对于粗焦油的油渣分离技术,采用一般重力离心分离方法难以分离,国内某机械厂研制的加压过滤方法有望取得突破,以规模化应用于煤热解焦油的分离工艺。

6) 开发含有机物废水的处理方法。一是从源头上减少废水的产生,如对热解固态产品采用间接冷却方式、对热解气采用油冷工艺等;二是利用该废水和半焦粉制成水煤浆,作为燃料或气化原料。在高温燃烧和水煤浆气化温度下(1100~1300℃),苯、酚等有机物将剧烈燃烧分解成水和碳氧化物,可有效治理含有机物的热解废水^[30]。

7) 开发具有高能源转化效率的多联产热解工艺。基于循环流化床燃烧的固体热载体煤热解工艺,可合理利用循环流化床锅炉优势,实现热-电-油-气-化学品多联产,克服传统固体热载体工艺存在问题,提高半焦、焦油和煤气的利用效率。循环流化床锅炉的热灰本身就是高温热载体,无需增加

额外热载体加热设备; 在利用煤炭燃烧发电/供热前, 低成本提取煤中富含的高价值“油气”, 整个系统经济效益显著; 热解半焦和热载体不需分离, 全部直接燃烧发电, 高温半焦的显热得到完全利用, 系统热效率高; 煤中大部分含硫含氮化合物在热解过程中富集脱除, 燃烧工艺的脱硫脱氮负荷显著降低, 降低了净化系统投资, 提高了净化效率。

参考文献:

- [1] 徐振刚, 刘随芹. 型煤技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001: 10-15.
- [2] 李元宗, 郑利红, 武利生. 沥青乳化液粘结剂型煤的试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2000, 31(6): 633-634.
- [3] 郭树才. 煤化工工艺学[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2006: 19-26.
- [4] Braginskii O B. Production of ethylene in western european countries[J]. Chemistry and Technology of Fuels and Oils, 1967, 3(8): 607-609.
- [5] Hughmark G A. Power requirements and interfacial area in gas-liquid turbine agitated systems[J]. Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development, 1980, 19(4): 638-641.
- [6] Rammler R W, Luigi K. Synthetic fuels from lurgi coal pyrolysis[J]. Energy Progress, 1982, 2(2): 121-129.
- [7] 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.
- [8] Atwood M T, Schulman B L. The toscoal process - pyrolysis of western coals and lignites for char and oil production[J]. Preprints of Papers American Chemical Society Division of Fuel Chemical, 1977, 22(2): 233-252.
- [9] 高建. 世界各国油页岩干馏技术简介[J]. 煤炭加工与综合利用, 2003(2): 44-46.
- [10] Carlson F B, Yardumian L H, Atwood M T. Toscoal process for low temperature pyrolysis of coal[J]. Transaction of the Society of Mining Engineering of AIME, 1974, 256(2): 128-131.
- [11] 郭树才, 罗长齐, 张代佳, 等. 褐煤固体热载体干馏新技术工业性试验[J]. 大连理工大学学报, 1995, 35(1): 46-50.
- [12] 骆仲决, 王勤辉, 方梦祥. 煤的热电气多联产技术及工程实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 15-22.
- [13] 方梦祥, 骆仲决, 王勤辉, 等. 循环流化床热电气三联产装置的开发和应用前景分析[J]. 动力工程, 1997, 17(4): 21-27.
- [14] 方梦祥, 岑建孟, 王勤辉, 等. 25MW循环流化床热、电、煤气多联产装置[J]. 动力工程, 2007, 27(4): 635-639.
- [15] 王勤辉, 骆仲决, 方梦祥, 等. 12兆瓦热电气多联产装置的开发[J]. 燃料化学学报, 2002, 30(2): 141-146.
- [16] 王勤辉, 方梦祥, 岑建孟, 等. 循环流化床热电气焦油多联产技术的研究与开发[C]//第一届中国循环流化床燃烧理论与技术学术会议暨全国电力行业CFB机组技术交流服务协作网第六届年会论文集. 张家界: 中国电力企业联合会, 2007: 57-61.
- [17] 王俊琪, 方梦祥, 刘耀鑫, 等. 以循环灰热解为基础的热电气多联产技术的开发与进展[J]. 能源工程, 2004(2): 39-43.
- [18] 温亮, 岑建孟, 石振晶, 等. 气化床炉温对热电气焦油多联产技术的影响[J]. 动力工程, 2009, 29(8): 789-793.
- [19] 岑可法, 骆仲决, 方梦祥, 等. 新颖的热、电、燃气三联产装置[J]. 能源工程, 1995(1): 17-19, 30.
- [20] Fang M, Luo Z, Li X *et al.* A multi-product cogeneration system using combined coal gasification and combustion[J]. Energy, 1998, 23(3): 203-212.
- [21] 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.
- [22] 郭慕孙. 煤拔头工艺[C]//中国科学院第九次院士大会报告汇编. 北京: 科学出版社, 1998: 202-204.
- [23] 张秋民. 褐煤热解提质技术与多联产构想[C]//2010中国新型煤化工发展及示范项目进展论坛文集. 北京: 中国煤炭学会煤化工专业委员会, 2010: 43-51.
- [24] 姚建中, 郭慕孙. 煤炭拔头提取液体燃料新工艺[J]. 化学进展, 1995, 7(3): 205-208.
- [25] 崔丽杰, 姚建中, 林伟刚. 喷动-载流床中粒径对内蒙霍林河褐煤快速热解产物的影响[J]. 过程工程学报, 2003, 3(2): 104-108.
- [26] 王杰广, 吕雪松, 姚建中, 等. 下行床煤拔头工艺的产品产率分布和液体组成[J]. 过程工程学报, 2005, 5(3): 241-245.
- [27] 王杰广. 下行循环流化床煤拔头工艺研究[D]. 北京: 中国科学院过程工程研究所, 2004: 165-172.
- [28] Wang J, Lu X, Yao J *et al.* Experimental study of coal topping process in a downer reactor[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2005, 44(3): 463-470.
- [29] 梁永煌, 游伟, 章卫星. 关于我国褐煤提质技术的应用现状及存在问题的解决方案[J]. 化肥设计, 2012, 50(6): 1-9.
- [30] 苑卫军, 李建胜, 郭健. 褐煤提质系统若干问题的探讨与分析[J]. 煤炭加工与综合利用, 2009(4): 37-39.
- [31] 苑卫军, 王辉, 李见. 褐煤热解提质系统的煤气净化及脱硫[J]. 能源工程, 2013(6): 57-60.
- [32] 陈钢, 黄学群. LCC低阶煤转化提质技术的开发与应用[J]. 化肥设计, 2011, 49(5): 7-11.

(上接第35页)

- [8] 李全, 张永奇, 王洋. 流化床制活性焦用于水处理的研究[J]. 煤炭转化, 2008, 31(2): 74-77.
- [9] 王婧, 张忠孝, 金晶, 等. 中国典型煤种煤焦水蒸气气化反应特性研究[J]. 上海理工大学学报, 2009, 31(2): 139-144.
- [10] 吴鹏, 朱书全, 王娜, 等. 热解温度对型煤半焦气化反应活性的影响[J]. 煤炭转化, 2010, 33(4): 35-39.
- [11] 文芳. 热重法研究煤焦H₂O气化反应动力学[J]. 煤炭学报, 2004, 29(3): 350-353.
- [12] 刘铁峰, 房倚天, 王洋. 不同彬县焦的水蒸气气化反应动力学研究[J]. 燃料化学学报, 2009, 37(2): 161-165.
- [13] 苗文华, 张旭辉, 姜军清, 等. 活性焦孔径分布对COD吸附及脱色能力的影响[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(2): 47-50.
- [14] 张守玉, 吕俊复, 岳光溪, 等. 煤种及炭化条件对活性焦孔隙结构的影响[J]. 煤炭学报, 2003, 28(2): 167-172.