

低阶煤提质利用技术专题

[编者按] 2013 年中国原煤产量 36.8 亿 t,低阶煤(包括褐煤、长焰煤、弱黏煤和不黏煤)在中国煤炭储量及产量中均占 50% 以上,已成为中国能源生产和供应的重要组成部分。低阶煤具有水分高、灰分高、发热量低、氢氧含量高、易燃易爆等特点,不适宜直接燃烧和运输,利用能效低,污染严重,因此必须对低阶煤进行提质利用,降低其灰分和水分,提高发热量,或者生产高附加值产品。近年来,低阶煤提质利用技术已有所突破并开始工业化应用,但总体来看,仍处于起步期,大规模低阶煤提质利用技术尚未完全成熟,诸多问题亟待解决。煤炭工业发展“十二五”规划提出“加强低阶煤提质技术的研发和示范”,国家能源科技“十二五”规划也将低阶煤提质改性技术列入重大技术研究领域。鉴于此,本刊组织了“低阶煤提质利用技术”专题,系统报道了低阶煤提质利用技术的研究现状及发展方向,重点介绍了低阶煤流化床提质、热解提质、超临界乙醇脱氧、干法分选及低阶煤制备水煤浆、活性焦、气化催化剂、提取腐植酸等技术,以期为提高低阶煤利用效率,实现低阶煤规模化应用提供技术参考。

褐煤干燥脱水提质技术现状及发展方向

尚庆雨^{1,2,3}

(1. 煤炭科学技术研究院有限公司 节能工程技术研究分院,北京 100013;2. 煤炭资源开采与环境保护国家重点实验室,北京 100013;
3. 国家能源煤炭高效利用与节能减排技术装备重点实验室,北京 100013)

摘要:为实现褐煤合理、高效利用,减轻褐煤利用中的环境污染,阐述了国内外褐煤干燥脱水提质技术现状,论述了国内褐煤干燥脱水提质技术工业化示范项目的进展情况,说明褐煤经干燥脱水提质处理后,可脱除褐煤中大部分水分,发热量显著提高,提质后的褐煤具有较高的附加值,便于运输、贮存及综合利用。针对褐煤干燥脱水提质过程中存在的烟尘排放量大、能耗高、余热难以回收利用、干燥褐煤成型率低、型煤易爆裂产生碎块等问题,从加强褐煤性质和干燥脱水基础理论研究、加强干燥工艺及其配套干燥设备的研发、加强褐煤干燥后产品利用技术研究 3 方面提出了褐煤干燥脱水提质技术的发展方向。

关键词:褐煤;提质;干燥脱水;型煤

中图分类号:TD849 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2014)06-0001-04

Status and development direction of lignite dehydration upgrading technologies

SHANG Qingyu^{1,2,3}

(1. Energy Conservation and Engineering Technology Research Institute, Coal Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China;
2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization (China Coal Research Institute), Beijing 100013, China; 3. National Energy Technology and Equipment Laboratory of Coal Utilization and Emission Control (China Coal Research Institute), Beijing 100013, China)

Abstract: In order to use lignite reasonably and efficiently and reduce the environmental pollution, the paper introduced the status of lignite dehydration upgrading technologies at home and abroad, discussed the development of corresponding industrialization demonstration projects. The results showed that the treatment dehydrated most of the lignite moisture, improved the calorific value, increased the added value, made the transportation, storage and comprehensive utilization more convenient. There were still lots of problems during treatment, such

收稿日期:2014-02-21;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2014.06.001

基金项目:科技部 2012 年国际合作资助项目(2012DFA60860)

作者简介:尚庆雨(1973—),男,河北石家庄人,高级经济师,现任煤炭科学技术研究院有限公司节能工程技术研究分院院长。E-mail: shanqingyu@ccri.com.cn

引用格式: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 #5.

SHANG Qingyu. Status and development direction of lignite dehydration upgrading technologies[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(6): 1-4 #5.

as large flue dust emission, high energy consumption, difficult waste heat recovery, low briquetting rate. After briquetting, the briquette blast into pieces easily. In order to resolve these problems, the paper provided the improvement measures from strengthening basic theoretical research of lignite properties and dehydration, drying process and equipment development, products utilization after lignite drying.

Key words: lignite; upgrading; dehydration; briquette

0 引言

中国褐煤资源丰富,已探明储量达1300多亿t,占全国煤炭储量的13%左右。主要分布在华北地区,约占全国褐煤地质储量的77.8%以上,其中又以内蒙古东部地区赋存最多;其次为西南地区,约占全国褐煤储量的12.5%,其中大部分分布在云南省境内。西南地区的褐煤大部分属年轻褐煤,而华北地区的褐煤则以年老褐煤为主。褐煤是煤化程度最低的煤种,具有水分高、灰分高、挥发分高、表面含氧官能团多、化学反应性强、发热量低等特性,难以分选、储存和直接利用。将褐煤提质后再利用是降低褐煤能耗、提高利用效率的有效途径。目前开发的褐煤提质技术主要有干选提质、干燥脱水提质和热解提质3种,其中干燥脱水提质是褐煤提质的主要手段。褐煤干燥脱水提质是一种以脱水提高发热量为目标的提质方法,包括机械脱水、蒸发脱水、非蒸发脱水3类^[1],以自然蒸发脱水、离心机脱水、低温烘干脱水、热机械脱水、微波脱水和太阳能脱水等研究较多^[2-4]。褐煤经干燥脱水提质处理后,可脱除褐煤中大部分水分,发热量显著提高。同时,提质后的褐煤具有较高的附加值,不仅便于运输和贮存,还可进行发电、成型、气化、液化、焦化、生产化工产品和加工水煤浆等综合利用,对实现节能减排、促进国民经济可持续发展具有重要意义。为此,国内外学者对褐煤干燥脱水提质进行了大量研究,并初步实现工业化生产。国外褐煤干燥提质技术主要有德国年轻褐煤无黏结剂冲压成型工艺^[5],日本神户制钢所(Kobe Steel Group) UBC热油工艺(Upgrading Brown Coal)^[6],均已实现工业化生产。国内褐煤干燥提质技术通常采用蒸发干燥脱水法。中国矿业大学采用气流干燥技术对宝日希勒褐煤进行脱水干燥提质^[7],由山东省科学院工业节能研究中心和山东天力干燥股份有限公司研发的“过热蒸汽内加热流化床干燥技术”在上海建成15万t/a的过热蒸汽内加热流化床干燥实验装置^[8]。国外技术多适于年轻褐煤提质后成型,不适合中国以年老褐煤为主的国情。中国褐煤提质技术虽然也有一些工业化示范

厂,但多存在粉尘量大、安全性差、运行中氧含量难以控制等问题。鉴于此,笔者综述了国内外褐煤干燥脱水提质现状,在分析国内褐煤干燥脱水提质技术存在问题的基础上,提出了褐煤干燥脱水提质的发展方向,以期实现中国褐煤资源的合理、高效利用,减轻褐煤利用中的环境污染。

1 国外褐煤干燥脱水提质技术现状

为了高效利用褐煤资源,美国、澳大利亚、日本、德国等国家很早开始了各种褐煤干燥脱水提质技术的研发,主要有热水干燥、热烟气干燥、流化床或气流床干燥等。经过干燥脱水提质后的褐煤可用于直接燃烧或制备水煤浆,还可制成褐煤砖用于气化^[9-11]。

1.1 美国K燃料干燥脱水提质工艺

美国KFx公司开发了一种将低质煤转变成高质煤的“K燃料工艺”,该技术属于物理和化学相结合的非蒸发脱水工艺,是在一定压力和温度下使煤中含氧官能团分解,褐煤发生改质,煤中水分以液态形式排出,水分排出率达到80%。“K燃料工艺”可将褐煤转变为洁净、高效的烟煤燃料,转变后煤燃料的经济价值是转变前的11倍。经过20a完善,“K燃料工艺”已进入工业应用阶段,但该技术存在能耗高、效率低等问题。

1.2 澳大利亚干燥脱水提质技术

澳大利亚政府资助并委托壳牌石油公司采用Feissner脱水工艺处理苇克菲尔得褐煤,煤的热值可达30MJ/kg。澳大利亚拉筹布褐煤开发(LLD)公司开发的“褐煤稠化技术”利用电厂余热在窑中干燥褐煤,其原理是通过“剪切”打破煤炭结构,达到脱水目的,最终得到煤气19%、水19%和炼焦用型煤62%,其中煤气用于发电减排CO₂,水可回收利用。怀特能源公司的无黏结剂成型BCB(the Binderless Coal Briquetting)技术是将褐煤在管式干燥器中快速升温至105~110℃,不完全干燥的煤粉通过旋风分离器捕集后,进入对辊式成型机压制成型煤。由于干燥温度低,BCB技术提质型煤加工成本低,产品质量较好。

1.3 日本干燥脱水提质技术

日本在褐煤干燥脱水提质方面也做过大量研究。比较典型的工艺有以非蒸发脱水为代表的 UBC 热油工艺和 D-K 工艺。两者均是在一定压力和温度下对褐煤进行干燥脱水提质。UBC 工艺特点是用轻油去除褐煤中的水分,通过机械分离方式从脱水的煤浆中回收油,得到提质煤粉,最后将提质煤粉压制成型,褐煤化学性质基本不改变。D-K 工艺是间歇式饱和蒸汽脱水的改进,装置由可实现半连续运转的 4 个压力釜组成,从褐煤中脱除的水分呈液态,煤质变化类似于天然的煤化作用,但操作温度和压力较高。

1.4 德国干燥脱水提质技术

德国开发的褐煤干燥提质技术主要有科林蒸汽流化床煤干燥技术(DWT)和热压脱水工艺(MTE)。DWT 技术属于过热蒸汽流化床法褐煤蒸发脱水干燥技术,其原理是褐煤中水分在蒸汽流化床中被蒸汽吸收,干燥褐煤通过旋转阀从干燥器导出,在干燥过程生成的二次蒸汽(流化蒸汽和从褐煤中蒸发的水分)部分返回干燥器作为流化蒸汽循环使用。该工艺的特点是蒸汽既作为干燥介质又作为流化介质。MTE 由德国多特蒙德大学 Strauss 等研究开发,MTE 是褐煤在 220 °C 下经过工艺热水预热、过热蒸汽加热、加压脱水及闪蒸进一步脱水 4 个工艺阶段,加热后的褐煤通过挤压脱水,属于热脱水和机械脱水相结合的脱水工艺。

2 国内褐煤干燥脱水提质技术现状

随着中国优质煤炭资源的短缺以及廉价、丰富褐煤资源的大规模开采,褐煤的高效利用日益受到关注。近年来国内学者对褐煤干燥脱水提质技术进行大量研究,形成了一些工业化示范项目。

2.1 主要技术

1) 褐煤热水干燥脱水提质技术。褐煤热水干燥是将褐煤与水的混合物放入高压釜中加热至预定温度,待样品冷却至室温后排出。湿热处理模拟自然界中褐煤向高变质煤转化的变质过程,使褐煤水分和含氧官能团分别以气态和液态的形式排出^[12-13]。杨俭等^[14]对褐煤进行热水干燥工艺研究,确定了热水干燥的最佳温度,使褐煤由低变质煤转化成工艺性质与高变质煤类似的提质褐煤。锡林郭勒盟蒙元煤炭有限责任公司采用北京柯林斯达科技发展有限公司的带式炉干燥工艺干燥褐煤,脱水

后的产品水分可控制在 8% 以下。内蒙古呼伦贝尔东能化工有限公司的新型滚筒式干燥工艺能使褐煤水分由 34% 降至 15% 以下,满足了褐煤造气工艺对原料煤的要求。黑龙江省能源环境研究院利用水热方法对褐煤进行干燥脱水实验,使褐煤内水由 21.49% 降至 10.62%,挥发分降低,发热量和固定碳增加。褐煤经热水干燥后,褐煤内水大幅降低,可降低 50% 以上,不再吸收空气中水分;褐煤挥发分降低 10% 左右,这主要是因为褐煤中含氧官能团——羟基和羧基在高温高压环境下大量脱去,形成 CO₂ 等小分子气体并很好地溶解到水体中;干燥过程中脱除了煤中内水和煤分子的含氧侧链,使碳含量和发热量大大提高,且表面性能改善。褐煤热水干燥相当于人工煤化作用,使褐煤工艺性质相当于烟煤,但仍保留其反应活性好、易燃烧及燃烧完全等特点,便于储存、运输、制作型煤、气化、燃烧及发电等。

2) 微波干燥脱水技术。微波干燥脱水利用微波辐射对极性水分子的极强选择性,可同时作用于褐煤内外部水分子,具有连续生产、速度快、效率高、温度可控、脱出的水易于回收等特点。浙江大学能源清洁利用国家重点实验室采用微波辐射脱水技术对内蒙古褐煤进行干燥脱水研究。结果表明,采用微波干燥脱水可在较低温度(110 °C 左右)快速脱除褐煤的表面水、毛细管水和吸附水,仅需 5 min 就可将褐煤全水分降低 73%,内水降低 65% 以上,褐煤干燥产品水分降至 10% 以下。微波脱出的水分经冷凝冷却回收后进入用户水处理系统,净化成工业用水或绿化用水^[15-16]。

3) 利用太阳能干燥褐煤技术。浙江大学利用褐煤高吸水性及褐煤产地太阳能丰富的特点,开展太阳能干燥褐煤技术研究,探索太阳能干燥褐煤的影响因素和规律。在温室型太阳能干燥系统中,太阳能辐射越强、煤粒越小、煤层越薄,越有利于褐煤干燥;在温室-集热型太阳能干燥系统中,太阳能干燥薄层褐煤主要发生在降速干燥阶段,干燥曲线和干燥速率曲线呈指数变化。通过计算 2 种干燥系统的太阳能热利用效率发现 2 种干燥系统效率均较高,其差距在整个干燥阶段仅为 11% 左右,研究结果将对今后褐煤干燥示范生产线建设及工业化应用提供科学依据^[17]。

2.2 示范项目

1) 白音华煤电公司煤提质干燥项目。白音华煤电公司煤提质分公司的褐煤脱水干燥提质工程项

目规划规模1500万t/a,一期规划规模300万t/a,建设2条150万t/a生产线,是目前世界上最大的单条褐煤提质生产线。该工艺过程为干燥脱水—干选排矸—降温,可将褐煤水分由35%左右降至10%~15%,发热量由14.7 MJ/kg左右增至18.8 MJ/kg以上。主要设备为振动混流干燥器和复合式干选机,目前一期第1条生产线安装完毕,整个生产系统进入调试阶段。

2) 大唐国际锡林浩特褐煤滚筒干燥技术。该项目总体规划年处理量2000万t,已于2008年6月完成中试,目前正在进行一期规模 6×100 t/h褐煤干燥工程建设。以内蒙古胜利东二号露天煤矿褐煤为原料,通过干燥提质,为大唐系统内火电厂、煤化工项目提供优质褐煤。该工艺采用带有扬料装置的滚筒干燥机,通过热烟气与褐煤直接接触换热实现褐煤干燥脱水,褐煤入料粒度小于30 mm。该技术可将全水分35%~40%的褐煤干燥至15%以下,但存在水分复吸及系统安全等问题。

3) 其他褐煤干燥脱水提质项目^[18]。辽宁西乌旗春成集团500万t/a滚筒干燥提质技术项目已建成首条50万t/a生产线,并于2003年投入运转。唐山市神州机械有限公司在西乌旗科达褐煤提质公司70万t/a的SZ振动混流干燥技术项目于2010年9月投入运转。北京柯林斯达科技发展有限公司在内蒙锡林浩特蒙元煤炭公司建的一期30万t/a褐煤物理干燥脱水提质项目于2010年12月投入运转,干燥褐煤的水分在8%以下,热值可达21 MJ/kg以上。

3 褐煤干燥脱水提质存在问题及发展方向

3.1 存在问题

近年来,中国开发了多种褐煤干燥脱水提质技术,但由于研发工作起步较晚,褐煤干燥脱水提质技术还处于实验研究和工程化初始应用阶段。部分褐煤干燥脱水技术已实现工业化示范或工业化应用,但存在不少问题:①回转管式蒸发干燥技术存在外排粉尘量大、污染环境,直接加热导致转筒干燥设备内氧含量难以控制,极易引起爆炸等问题;②烟尘排放量大、能耗高、余热难以回收利用;③部分干燥脱水技术的褐煤干燥程度浅,水分降低幅度小,干燥后褐煤水分高达10%以上,干燥产品水分复吸严重;④干燥后的褐煤密度低、体积大、粒度小,直接外运造成产品损失及粉尘飞扬,严重污染环境;⑤褐煤易

粉化的煤质特性造成干燥褐煤成型率低,型煤易爆裂产生碎块等。

3.2 发展方向

1) 加强褐煤性质和干燥脱水基础理论研究。褐煤受热过程中易破碎、粉化,是褐煤干燥脱水提质产生粉尘的主要原因。因此,应研究褐煤在不同温度、不同干燥炉内的粉化规律,用以指导开发更切实可行的新型褐煤干燥炉,减少褐煤粉化率,提升褐煤提质技术的应用水平。针对干燥产品易复吸水分的问题,从褐煤水分在煤中的结合状态研究水分复吸的原因并确定水分干燥程度对复吸的影响,解决复吸问题。

2) 加强干燥工艺及其配套干燥设备的研发。褐煤干燥工艺及设备是影响褐煤干燥效率、能耗、产品产率和质量的重要因素,是实现褐煤干燥连续、稳定、安全运行的关键。应加强褐煤干燥新工艺的开发,如微波干燥脱水和太阳能干燥褐煤等。干燥炉属于制约褐煤干燥工艺发展的关键设备,目前尚无可较长时间连续稳定运转的干燥炉,应比较各种干燥设备的优劣,开发能耗低、效率高、环保的干燥设备。各干燥工艺均应加强粉尘治理,对煤粉的分离和收集应集中处理,并采用成型设备回收利用煤粉。

3) 加强褐煤干燥后产品利用技术研究。外运需解决运输中粉尘飞扬及污染环境等问题,干燥后成型需配合褐煤性质及干燥褐煤的成型性等因素进行成型工艺条件与型煤质量关系研究,解决目前干燥褐煤成型时存在的成球率低、型煤强度差、易破裂等问题。褐煤干燥后制粉可用于煤粉锅炉燃烧或制备水煤浆,应加强这方面的示范应用。

4 结 语

褐煤提质加工是实现褐煤高效利用的有效途径之一,而褐煤干燥脱水提质技术是褐煤提质加工的基础,具有工艺简单、投资少、适于在坑口实施等特点。从运行效果看,褐煤干燥提质技术仍不成熟,存在能耗高、效率低、易爆炸、粉尘多、环境污染严重等问题。随着对褐煤干燥脱水技术的深入研究,应从加强褐煤性质和干燥脱水基础理论研究、加强干燥工艺及其配套干燥设备的研发、加强褐煤干燥后产品利用技术研究等方面着手,不断在试运行过程中优化工艺流程,实现褐煤干燥脱水提质技术的健康稳定发展。

(下转第45页)

线有2个峰,70℃的失重峰为褐煤磺化腐植酸中吸附水分脱除峰,440℃的大峰为稠环芳核结构单元裂解过程^[13-14]。DTA曲线70℃的肩峰是水脱附的吸热过程,170℃的峰代表褐煤磺化腐植酸官能团(羟基、羧基、酚羟基等)脱除过程,330℃后开始放热过程,330℃之前为吸热过程。褐煤磺化腐植酸低于200℃时稳定,大于200℃时发生裂解反应,440℃褐煤磺化腐植酸稠环芳核结构单元裂解速率最大。

4 结 论

1) Na_2SO_3 可以作为褐煤腐植酸磺化剂。在设计参数范围内,对褐煤磺化腐植酸磺化影响程度由大到小分别为:磺化温度、磺化时间、磺化剂固液比。制备褐煤磺化腐植酸最佳工艺条件为:磺化温度50℃,磺化剂固液比2:20,磺化时间90 min,此时褐煤磺化腐植酸磺化度为17.72%。

2) 在最佳工艺条件下制备的褐煤磺化腐植酸含有苯环、羧基、羟基、酚羟基,磺酸基团明显增多,发生了磺化反应。褐煤磺化腐植酸在低于200℃时稳定,大于200℃时发生裂解反应。

参考文献:

[1] 高丽娟,王世强,赵雪飞,等.宁夏石嘴山褐煤腐植酸的提取工艺[J].湖北农业科学,2012,51(22):5168-5170.

- [2] 赵振新,朱书全,马名杰,等.中国褐煤的综合优化利用[J].洁净煤技术,2008,14(1):28-31.
- [3] 张钊,周霞萍,王杰.复合碱型腐植酸型煤黏结剂的特性研究[J].洁净煤技术,2011,17(1):37-40.
- [4] 王高伟,胡光洲,孔倩,等.煤炭腐植酸的基本性能及其工农业应用[J].煤炭技术,2007,26(11):111-114.
- [5] 张遵,王旭峰,韩琳,等.磺化反应工艺研究进展[J].化学推进剂与高分子材料,2007,5(1):38-42.
- [6] 刘奎,孙淑和,王仙凤.腐植酸磺化度测定方法的研究(I)[J].腐植酸,1990(1):41-45.
- [7] 郑平.煤炭腐植酸的磺化[J].腐植酸,1982(3):1-5.
- [8] 田玉川,司马义·努尔拉.丙烯酸-磺化腐植酸吸水树脂的合成[J].合成树脂及塑料,2013,30(6):68-73.
- [9] 张光华,刘龙,李俊国,等.磺化腐植酸接枝改性共聚物合成及性能研究[J].煤炭转化,2013,36(2):92-96.
- [10] 高保娇,吴念,李延斌,等.水溶性高分子链中磺酸盐基团含量的电导滴定测定法[J].高分子学报,2004(4):605-609.
- [11] 刘莹,刘政,刘民,等.阜新褐煤中腐植酸的提取[J].光谱实验室,2011,28(5):2036-2039.
- [12] Kucerik J, Kovár J, Pekar M. Thermoanalytical investigation of lignite humic acids fractions[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2004, 76(1):55-65.
- [13] Nan Zhao, Yintian Zheng, Yizhong Lü. Characterization and three-dimensional structural modeling of humic acid using molecular dynamics[C]//Functions of natural organic matter in changing environment. 杭州:浙江大学出版社,2013:187-189.
- [14] 崔英德,黎新明,尹国强,等.绿色高吸水树脂[M].北京:化学工业出版社,2008.

(上接第4页)

参考文献:

[1] 戴和武,谢可玉.褐煤利用技术[M].北京:煤炭工业出版社,1999.

[2] 顾晓愚.低阶煤热力改性提质加工的研究[J].洁净煤技术,2009,15(1):89-92.

[3] 刘建忠,周俊虎,岑可法,等.利用太阳能实现褐煤脱水提质的带式传递干燥系统及方法:中国,201010251124.9[P].2010-08-10.

[4] 王春阳,周国江.褐煤溶剂萃取的基础研究[J].应用能源技术,2007(8):13-14.

[5] 王晓磊,李翔,李志凯.浅谈褐煤干燥成型技术现状[J].煤质技术,2013(2):17-21.

[6] 郭艳玲,胡俊鸽,周文涛,等.日本神户制钢的褐煤提质技术[J].煤化工,2011(4):5-8.

[7] 王纪华,马艳梅,赵宏宇,等.宝日希勒褐煤的热压提质试验研究[J].洁净煤技术,2012,18(3):33-36.

[8] 蒋斌,李胜,高俊荣,等.褐煤干燥技术发展及应用现状[J].洁净煤技术,2011,17(6):69-72.

[9] 朱书全.褐煤提质技术开发现状及分析[J].洁净煤技术,

2011,17(1):1-4.

- [10] 曲洋.褐煤干燥技术现状及应用潜力的探讨[J].黑龙江科技信息,2013(1):94-95.
- [11] 蒋斌,高俊荣,贾世阳,等.褐煤干燥脱水技术的研究进展[J].干燥技术与设备,2011,9(2):64-68,53.
- [12] 王毅,王志青.褐煤水热改质及改质废水催化气化的研究[J].煤炭转化,2012,35(3):28-32.
- [13] 鞠春红,张伟君,王志成,等.褐煤热干燥改质后的性能研究[J].化学与黏合,2012,34(1):36-38.
- [14] 杨俭,董平,李拥军,等.褐煤水煤浆燃料的试验研究[J].煤炭转化,1996,19(4):68-72.
- [15] 刘建忠,虞育杰,罗炉林,等.低阶煤脱水改性新技术研究[C]//第二届全国褐煤干燥、提质技术与产业发展论坛文集.昆明[s.n.]2011.
- [16] 黄大军.褐煤微波脱水回收利用初探[J].煤炭工程,2012,44(S2):123-124.
- [17] 罗炉林.太阳能干燥褐煤的实验研究[D].杭州:浙江大学,2011:13-49.
- [18] 梁永煌,游伟,张卫星.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):1-6.