

褐煤提质技术研究进展

屈进州^{1,2}, 陶秀祥^{1,2}, 刘金艳³, 张舒洁^{1,2}, 张博^{1,2}, 盛宇航^{1,2}

(1. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116; 2. 煤炭加工与高效洁净利用教育部重点实验室, 江苏 徐州 221008;

3. 福州大学 紫金矿业学院, 福建 福州 350108)

摘要: 由于褐煤存在高水分、高灰分、低发热量、易于风化和自燃的缺陷, 致使其加工利用受到限制, 为高效利用丰富的褐煤资源, 减小褐煤利用过程中产生的环境问题, 针对国内外在褐煤干燥脱水、成型和热解方面的提质研究, 综述了国内外褐煤蒸发和非蒸发脱水干燥脱水技术、无黏结剂和黏结剂成型提质技术以及热解提质技术的研究现状, 并对我国褐煤提质加工技术的研究方向进行了探讨。

关键词: 褐煤; 提质; 干燥脱水; 成型; 热解

中图分类号: TQ536 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2011)11-0121-05

Research Progress on Upgrading Technology of Lignite

QU Jin-zhou^{1,2}, TAO Xiu-xiang^{1,2}, LIU Jin-yan³, ZHANG Shu-jie^{1,2}, ZHANG Bo^{1,2}, SHENG Yu-hang^{1,2}

(1. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. The MOE Key Lab of Coal Processing and Efficient Utilization, Xuzhou 221008, China; 3. Zijin Mining School, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Due to the high water content, high ash content, low calorific value, easy weathering and spontaneous combustion shortages existed in the lignite, the processing and utilization of the lignite was restricted. In order to high efficiently utilize the rich lignite resources and to reduce the environment problems occurred from the utilization of the lignite, according to the study on the lignite drying and dewatering, briquetting and pyrolysis upgrading at home and abroad, the paper stated the research status of the lignite evaporation and non-evaporation dewatering technology, non-binder and binder briquetting upgrading technology and pyrolysis upgrading technology at home and abroad. Finally, the paper had a discussion on the research orientation of the lignite upgrading and processing technology in China.

Key words: lignite; upgrading; drying and dewatering; briquette; pyrolysis

提质加工是一种从源头上提高原煤质量, 改善原煤品质, 减少运力消耗, 降低碳排放的低碳能源技术, 是高碳能源低碳化利用的重要途径。以低碳能源技术为主体的低碳技术的实质是能源的洁净、高效、廉价开发和利用^[1]。褐煤经过提质, 水分显著降低 60%~70%, 发热量大幅度提高 4.19~6.28 MJ/kg, 既可防止煤炭自燃、便于运输和贮存, 又有利于发电、造气、化工等使用^[2-3]。

1 褐煤资源分布及其特性

目前, 在我国已探明的褐煤保有储量中, 以内

蒙古东北部地区最多, 约占全国褐煤保有储量的 3/4; 以云南省为主的西南地区的褐煤储量约占全国的 1/5; 东北、华东和中南地区的褐煤仅占全国的 5% 左右^[4]。褐煤是煤化程度最低的煤种, 可分为硬褐煤和软褐煤(俗称土状褐煤)。褐煤孔隙率高, 反应性强, 煤中含氧量大(15%~30%), 大部分以含氧官能团的形式存在, 以酚羟基(—OH)为主, 其次是羧基(—COOH)和羰基(=CO), 甲氧基(—OCH₃)较少^[5]。褐煤含水高(30%~50%)、灰分高(15%~30%)、挥发分高(>37%)、发热量低(12.56~14.65 MJ/kg), 热

稳定性差,易风化碎裂、易氧化自燃,不适于长途运输^[6]。

2 褐煤提质技术现状

褐煤提质是指褐煤经脱水、成型和热解等加工过程后,其组成和结构发生变化,转化成具有近似烟煤性质的提质煤^[3]。国内外褐煤提质技术大致可分为干燥脱水提质技术、成型提质技术和热解提质技术3大类^[7]。

2.1 干燥脱水提质技术

1) 蒸发脱水技术。蒸发干燥脱水大部分是在较低温度下,以热烟道气、过热蒸气或热油为干燥脱水介质进行脱水^[8-9],可作为炉前脱水技术使用^[7]。蒸汽管式干燥技术是目前工业应用最为成熟的褐煤干燥技术,此技术以0.15~0.55 MPa的饱和蒸气通过管式干燥器将煤加热至100℃左右使水分蒸发,利用随煤进入干燥器的空气脱水,经除尘器分离煤粉后,部分空气经压缩进入干燥器循环,部分排出。此技术能耗较高,尾气排放量较大^[10]。滚筒干燥技术是将煤放入滚筒干燥机中,与热风炉产生的650~700℃热烟气进行质热交换。干燥产品经封闭式排料箱装仓外运;不超过120℃的干燥乏气经旋风除尘器、引风机、湿式除尘器、烟囱排入大气。此技术单机容量较小,不适用于大规模干燥褐煤^[11]。

蒸汽流化床干燥技术(DWT)是以流态化为原理的干燥技术。在流化床干燥器内,来自汽轮机的过热蒸气既作流化介质又作干燥介质(吸收高水褐煤水分)。在此基础上发展的带内部热循环的流化床蒸汽干燥工艺(WTA),其蒸汽潜热完全在工艺过程中循环使用,可明显提高热能利用率^[10,12]。日本三菱重工开发了低阶煤流化床加热提质工艺,先在80~150℃下对原煤干燥,后在250~400℃下快速加热和30~70℃下快速冷却,得到提质煤。试样多数为褐煤,个别为次烟煤,氧含量大多大于15%,固有水分最低12.9%,其余为19.3%~24.7%。不同提质煤的固有水分脱除限度不同,通常随煤化程度升高脱除率降低,即使热处理温度高达350~400℃,固有水分含量也变化不大^[13]。

床混式干燥工艺(BMD)以流化床为热源,利用过热蒸气与流化床分出的热床料流混合携带燃

料干燥脱水,干燥燃料和床料直接送入流化床锅炉燃烧,可干燥高水分的燃料。此工艺可以降低电厂锅炉的投资和规模,构造简单,有较高的电厂热效率。蒸汽空气联合干燥技术为美国Power River Basin发电厂近年开发的一种利用电厂废热加热的热水作干燥介质的集成干燥技术,但其干燥速度和程度比过热蒸气干燥差。经过试验,采用此法降低入炉煤水分后,效率明显提高,CO₂、SO₂排放量明显减少^[10]。

一体化加速旋风提质干燥工艺就是使煤的干燥提质与褐煤电厂锅炉一体化,利用电厂的锅炉烟气进行提质干燥。煤经过2个阶段(加速剪切阶段和旋风紊动阶段)的提质干燥,含水率大幅降低,褐煤结构被很大程度地破坏,变成具有烟煤特性的优质动力煤^[14]。唐山神州机械有限公司开发的振动混流干燥工艺,其设备干燥面积和时间可根据去水率调整,低温干燥前后不发生化学变化,可保持褐煤燃烧优势,但其脱水率不高。在此基础上开发的顺流振动床干燥工艺,可进一步提高振动混流干燥效果^[11]。热油干燥工艺是以热油为干燥介质,常压下对煤、油混合浆加热脱水的提质工艺。原煤首先在热油中进行干燥,大部分油在第2阶段的烟气分离装置中回收再用;小部分油被吸收,用于增加产品的稳定性和提高热值,其工艺成本取决于所能回收油的数量^[8-9]。

2) 非蒸发脱水技术。非蒸发脱水是在一定温度和压力隔绝空气的条件下,改变褐煤的物理和化学结构,脱除部分含氧官能团,并使褐煤含水量下降,疏水性增强的提质技术^[11]。脱水过程中,水分呈液态脱出,不需要蒸发潜热,热效率高^[7]。非蒸发脱水工艺主要有热能脱水、机械热挤压脱水和溶剂萃取脱水等。美国KFx公司20世纪80年代中期开发的K-Fuel工艺已进入工业应用阶段。已粉碎的煤粉送入高压釜(维持3.7 MPa和238℃的压力和温度)中发生破裂,分离出硫化物,蒸发出煤中的水分。经过处理的煤粉和蒸发出的水蒸气可直接送入锅炉进行发电或供热^[3]。

日本D-K工艺可实现褐煤水分在非蒸发条件下加热,使水分以液体状态从褐煤中脱出,其煤质变化类似天然的煤化作用。其中试装置内有4台压力釜,可实现半连续运转,压力釜之间可实现排出蒸汽和热水的回收^[15]。

热脱水工艺采用过热蒸气为热源, 工艺温度约 235 °C, 压力一般 3 MPa 左右。煤中水分在液态下移除, 工艺过程废热蒸气可分级使用, 可回收利用热能, 能耗较低。由于工艺过程中原煤细粉较少, 脱水后的褐煤不易在空气中自燃, 因而可进一步自然干燥。但此法脱水率不高, 系统干燥含水约 23%^[16]。美国 EERC 开发的热水干燥工艺 (HWD) 已生产了一种安全易用、类似液体的燃料。此工艺具有高温、高压、无蒸发、不可逆地去除大量内在水分、可生产水煤浆燃料 (CWFs) 等特点。与商业 CWFs 相比, 不需添加昂贵的添加剂^[8]。德国多特蒙德大学 Strauss 等开发的 MTE (机械热压脱水) 工艺结合了机械力与热法脱水的优点, 将褐煤加热至不高于 220 °C, 通过机械力将水挤出, 同时脱除煤中的大部分可溶离子。该工艺条件较温和, 过程较简单, 比较适合我国褐煤不同组成及结构的特点, 可利用电厂蒸汽资源, 十分适合与电厂的集成^[12, 17]。

日本京都大学 Miura 等^[18]提出的溶剂萃取脱水工艺是将煤层与流动的非极性溶剂在低于 200 °C 下接触, 通过热能使煤中水分释出, 溶入溶剂中, 冷却至室温时, 由于溶解度降低而使水分析出, 经倾析与溶剂分离。利用四氢化萘在 150 °C 下处理含水 50% 的澳大利亚褐煤后, 水分可降至 2% 以下。此法脱除 1 kg 水耗能小于 1 MJ (而通常蒸发脱水至少需 2.3 MJ)。日本中央电力工业研究所的液化二甲醚固体脱水法使用了具有低沸点、易通过压缩液化、与水互溶、无毒、易渗透进入固体材料且对环境无害优点的液化二甲醚 (DME) 为脱水剂, 在干燥褐煤或煤泥时, 所需能量只有传统热脱水方法的 50%^[16]。

2.2 成型提质技术

褐煤成型可同时有效解决干燥褐煤粉尘大、易重新吸水、易自燃的不足^[7], 得到的褐煤型煤具有一定的防水性^[19]。褐煤成型技术主要有无黏结剂成型和有黏结剂成型 2 类^[20]。

1) 无黏结剂成型技术。褐煤无黏结剂成型是将褐煤干燥、加热到一定温度, 保温一定时间后直接在高压下压制成型的技术^[21], 一般需经过原煤的破碎和筛分、干燥、冷却、压制成型等过程。其中, 褐煤无黏结剂成型已实现了工业化大规模生产^[22]。

德国褐煤无黏结剂冲压成型工艺是将原煤在干燥器中干燥, 水分降至 12% ~ 18%。经冷却、分离后破碎至 0 ~ 6 mm, 在带式型煤机中以 50 ~ 200 MPa 的压力挤压, 生产出不同形状的型煤。此工艺早在 1858 年就在西奥多矿井实现了工业化应用, 后来又推广到澳大利亚、印度等国^[15]。

中国化学工程集团与德国泽玛克联合开发的褐煤间接干燥型煤工艺采用管式干燥机 (回转窑系统) 干燥原煤, 特别适用于燃点低、易燃、易爆的低阶煤种的成型提质。由于结构合理、传热效率高, 在褐煤应用过程中取得较好的干燥效果。已建成德国 MIBRAG 百万吨型煤工厂^[23]。

神华国际贸易有限责任公司与中国矿业大学 (北京) 联合开发的热压成型 HPU (Hot Press Upgrading) -06 工艺技术是将褐煤破碎至 0 ~ 3 mm 后进行气流干燥。在热反应器中经轻度热解后, 再进入成型机中辊压成型^[3]。

澳大利亚亚太煤钢公司开发的“冷干 (Cold-dry)”工艺利用剪切原理打破煤的碳结构, 挤压成棒状型煤, 可以将含水量约 60% 的褐煤制成水分为 8% ~ 14% 的型煤, 所得的型煤发热量可达烟煤水平。澳大利亚联邦科学与工业研究组织 (CSIRO) 与墨尔本大学联合开发的褐煤稠化技术利用电厂余热打破煤的结构, 对褐煤进行脱水干燥。最终产出 19% 的煤气、19% 的水、62% 的炼焦用型煤^[13]。

除以上工艺外, 还有澳大利亚 White 公司开发的热烟气直接干燥成型 (BCB) 技术^[24]。

2) 有黏结剂成型技术。褐煤有黏结剂成型工艺主要是针对煤化度高的褐煤, 黏结剂有黏土、腐植酸、生物质、淀粉、沥青等^[22]。

国内李登新等^[20]研究的黏结剂 FX (工业废弃物的混合物) 适用于褐煤成型。将粉煤于 100 °C 下烘干, 趁热与黏结剂 FX 均匀混合后, 立即在自制的压力机上成型, 常温下自然风干 6 h, 即可制得工业用型煤。

日本神户制钢所的 UBC (Upgrading Brown Coal) 工艺是采用轻质油作为黏结剂高效去除褐煤中水分的提质工艺。此工艺将粉化的煤与可回收油 (常用石油基轻质油) 及重油混合制成煤浆, 在蒸发器中加热蒸出水分后, 采用离心机分离、再生脱水浆液中的油品, 得到提质粉煤, 最后将提质煤压

块成型。已在印尼加里曼丹岛建成产能为 600 t/d 的示范工厂^[25]。

20 世纪 80 年代,日本开发的生物质黏结剂粉煤成型工艺用于褐煤成型,采用锯末、甘蔗渣、玉米秸、稻草等为生物质黏结剂,加入量在 10% ~ 25%。若在成型时添加粉状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 或 CaCO_3 等脱硫剂,可固定煤中 60% ~ 80% 的硫。日本曾用泰国褐煤生产出生物质褐煤型煤,以绿色援助计划向我国临沂矿务局汤庄煤矿援建一座 1 万 t/a 的型煤示范厂^[13]。

2.3 热解提质技术

褐煤的热解是指在隔绝空气(惰性气体气氛、或氢气存在) 500 ~ 600 °C 条件下将褐煤加热,生成煤气、焦油、粗苯和焦炭或半焦的过程,又称为干馏^[22-26]。

德国 Lurgi GmbH 公司开发的 L-S 低温热解工艺是工业上应用的内热式气热载体典型工艺。在干燥段,褐煤或成型褐煤(粒度 25 ~ 60 mm) 用燃烧气逆流干燥后,在干馏段被 600 ~ 700 °C 燃烧气(不含氧)加热至约 500 °C 发生热分解,生成产物经过冷却后,得到半焦、焦油和热解水。德国 Lurgi GmbH 公司和美国 Ruhrgas AG 公司联合开发的 L-R 低温热解工艺是以褐煤、不黏煤、弱黏煤及油页岩等为原料的内热式固热载体典型工艺。在干馏器内,初步预热的小块原煤同来自分离器的热半焦混合,发生热解反应,生成的半焦经烧除残碳、气固分离后,返回干馏器循环;逸出的挥发物经除尘、冷凝、回收焦油后,得到较高热值的煤气^[3-15]。

美国 SMC 和 SGI 于 1987 年合作开发的 LFC (Liquid From Coal) 技术把煤的干燥、热解和钝化技术相耦合,可将低阶煤提质成性质稳定的低硫高热值固体燃料 PDF (Process Derived Fuel), 同时还可得到部分经济价值更高的低硫工业燃料油副产物 CDL (Coal Derived Liquids)^[27]。

澳大利亚 CSIRO 开发的流化床快速热解工艺,对多种烟煤、褐煤进行了热解研究。煤粉用氮气喷入流化床反应器,与反应器底部进入的液化石油气燃烧产生的烟气和电加热器预热的氮气接触,在反应器中快速热解(停留时间小于 0.5 s),产物经分离、冷却后得到半焦、焦油、热解气等^[15]。

煤炭科学研究总院北京煤化工分院针对我国低

阶煤(褐煤、长焰煤、低变质烟煤)开发的 MRF 工艺,利用多段串联回转炉可对低阶煤进行干燥、热解、增碳等不同阶段的热加工,得到较高产率的焦油、中热值煤气及优质粒状半焦。依据半焦用途可在较大范围调整原煤粒度^[15-28]。日本日车公司与九红公司合作开发的二段加热提质工艺是将煤干燥后在 250 ~ 450 °C 下干馏,冷却后用干馏段产生的焦油涂敷,以减少煤表面孔隙,改善其自然性^[13]。

大连理工大学开发的褐煤固体热载体新法干馏(DG)技术是将褐煤通过与热的载体(热半焦)快速混合加热使其热解而得到轻质油品、煤气和半焦的技术。1992 年在平庄建成一套处理量 150 t/d 的褐煤固体热载体干馏工业性试验装置。此法具有焦油产率高,干馏煤气热值高,单套装置处理能力大,生产不需纯氧,产生的废水量小等优点^[29]。此外还有 ATP 技术^[6]。

中国科学院过程研究所基于下行床快速热解技术的“煤拔头”工艺,以燃料燃烧生成的循环灰为热载体,将热灰与半焦混合,减少了黏结;利用其快速加热、快速分离、快速冷却的特点可有效提取煤炭中的高附加值富氢液体产品;可与现有的电厂循环流化床锅炉相结合,实现油、气、热、电的多联产^[30-31]。

前苏联利用气热载体流化床加热煤粉的 ETCH 煤粉快速热解工艺曾在 Krasnoyarsk 电厂建成了 175 t/h 工业试验装置。该装置试验了很多褐煤(水分 28% ~ 45%,干燥基灰分为 6% ~ 45%),干煤半焦产率为 34% ~ 56%;焦油产率为 4% ~ 10%;煤气产率为 5% ~ 12%;热解水产率为 3% ~ 10%。生产的半焦可作为电站发电燃料,考虑到电、蒸汽及产品净化能耗,装置的能量效率为 83% ~ 87%^[26]。利用高温气体快速热解煤炭的还有日本煤炭快速热解技术^[32]。

乌克兰采用在连续的分层半焦化过程中热解褐煤的工艺可获得大量宝贵的化工原料,可作为石油和天然气加工产品的代用品^[3-13]。

北京柯林斯达公司研发的带式炉低温干馏技术,将粒度为 3 ~ 25 mm 褐煤均匀分布在耐热金属输送带上,依次通过脱水干燥、改性提质,经冷却出炉成为提质褐煤产品。其改性提质过程可调整输送带速度,实现温度自动控制^[33]。

近年来, 利用太阳热解低阶煤引起了许多学者的关注。美国 R. W. TAYLOR^[34] 设计了太阳能气化炉。美国怀特沙漠试验地区堪莫尔实验室利用太阳能对煤炭进行了气化试验, 利用跟踪太阳的定日镜将阳光反射到聚光器上, 聚焦成直径 12.7 cm 的光斑, 将煤炭加热到 1 920 °C, 产生含有 16.1% 的 CO₂、26.9% 的 CO、50.9% 的 H₂、5.4% 的 CH₄ 和 0.7% 碳氢化合物的可燃煤气^[35]。

3 结 语

随着我国易选煤炭资源的不断减少, 相对丰富的褐煤资源优势逐渐凸现出来, 褐煤的提质加工成为近年煤炭加工利用的热点。然而我国的褐煤提质加工还处在起步阶段, 大力发展褐煤提质加工需要在引进国外先进技术的同时, 不断加强国内技术的自主创新与研究。逐步发展适宜电厂集成, 适合我国褐煤不同组成及结构特点的 MTE 工艺、褐煤固热载体法 (DG) 干馏技术等, 在此基础上发展褐煤多联产技术, 加速我国褐煤提质加工技术的步伐, 推进煤炭资源的高碳能源低碳化利用。

参考文献:

- [1] 谢克昌. 高碳能源要低碳化利用 [J]. 山西能源与节能, 2010 (4): 1-4.
- [2] 申宝宏, 赵路正. 高碳能源低碳化利用途径分析 [J]. 中国能源, 2010, 32 (1): 10-13.
- [3] 邵俊杰. 褐煤提质技术现状及我国褐煤提质技术发展趋势探讨 [J]. 神华科技, 2009, 7 (2): 17-22.
- [4] 尹立群. 我国褐煤资源及其利用前景 [J]. 煤炭科学技术, 2004, 32 (8): 12-14, 23.
- [5] 戴和武, 杜铭华, 谢可玉, 等. 我国低灰分褐煤资源及其优化利用 [J]. 中国煤炭, 2001, 27 (2): 14-18.
- [6] 刘光启, 邓蜀平, 蒋云峰, 等. ATP 技术用于褐煤热解提质的技术经济分析 [J]. 洁净煤技术, 2007, 13 (6): 25-28.
- [7] 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.
- [8] 任祥军. 低煤阶煤的干燥进展 [J]. 煤炭加工与综合利用, 1996 (4): 85-87.
- [9] 汪寿建. 褐煤干燥成型工艺技术综述 [J]. 化肥设计, 2009, 47 (5): 1-9.
- [10] 常春祥, 熊友辉, 蒋泰毅. 高水分褐煤燃烧发电的集成干燥技术 [J]. 选煤技术, 2006 (4): 19-21.
- [11] 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.
- [12] 伯叠斯 Ch, 伯杰 S, 斯特劳布 K. 机械-热脱水加工工艺 [J]. 国外选矿快报, 1998 (23): 4-7.
- [13] 田忠坤. 管式气流干燥器提质低阶煤理论与技术的研究 [D]. 北京: 中国矿业大学 (北京), 2009.
- [14] 田忠坤, 朱书全. 一体化加速旋风提质干燥设在褐煤电厂中应用的研究 [J]. 洁净煤技术, 2007, 13 (5): 75-79.
- [15] 戴和武, 谢可玉. 褐煤利用技术 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1999.
- [16] 万永周, 肖 雷, 陶秀祥, 等. 褐煤脱水预干燥技术进展 [J]. 煤炭工程, 2008 (8): 91-93.
- [17] 高俊荣, 陶秀祥, 侯 彤, 等. 褐煤干燥脱水技术的研究进展 [J]. 洁净煤技术, 2008, 14 (6): 73-76.
- [18] Kouichi Miura, Kazuhiro Mae, Ryuichi Ashida, et al. Dewatering of Coal Through Solvent Extraction [J]. Fuel, 2002, 81 (11/12): 1417-1422.
- [19] 王 娜, 朱书全, 杨玉立, 等. 含氧官能团对褐煤热态提质型煤防水性的影响 [J]. 煤炭科学技术, 2010, 38 (3): 125-128.
- [20] 李登新, 孟繁玲, 林永富. 褐煤有黏结剂冷压成型研究 [J]. 煤, 1998, 7 (6): 24-25, 49.
- [21] 王 娜, 朱书全. 褐煤轻度热解与成型关系的研究 [J]. 选煤技术, 2007 (3): 3-6.
- [22] 初 荣, 李华民. 褐煤的加工与利用技术 [J]. 煤炭工程, 2005 (2): 47-49.
- [23] 汪寿建, 傅敏燕, 林彬彬, 等. 回转鼓形多管干燥装置: 中国, 200920083965.6 [P]. 2009-12-16.
- [24] 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.
- [25] Sugita Satoru, Deguchi Tetuya, Shigehisa Takuo. UBC (Upgraded Brown Coal) Process Development [J]. Kobe Steel Engineering Reports, 2003, 53 (20): 4-25.
- [26] 郭树才. 煤化工工艺学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1992.
- [27] 游 伟, 赵 涛, 章卫星, 等. 美国低阶煤提质技术发展概述 [J]. 化肥设计, 2009, 47 (4): 5-9.
- [28] 戴秋菊, 唐武道, 常万林. 采用多段回转炉热解工艺综合利用年青煤 [J]. 煤炭加工与综合利用, 1999 (3): 22-23.
- [29] 郭树才. 褐煤新法干馏 [J]. 煤化工, 2000, 18 (3): 6-8.
- [30] 王杰广. 下行循环流化床煤拔头工艺研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [31] 郭慕孙, 姚建中, 林伟刚, 等. 循环流态化碳氢固体燃料的四联产工艺及装置: 中国, 01110152.0 [P]. 2002-11-06.
- [32] 徐振刚. 日本的煤炭快速热解技术 [J]. 洁净煤技术, 2001, 7 (1): 48-51.
- [33] 董金泽, 马 塋. 芒来煤矿褐煤改性提质试验研究 [J]. 洁净煤技术, 2010, 16 (4): 70-72.
- [34] TAYLOR R W. Solar Gasification of Carbonaceous Materials [J]. Solar Energy, 1983, 30 (6): 513-526.
- [35] 金会心, 郭森魁, 王 华. 利用太阳能对褐煤进行热解的可行性及其发展前景 [J]. 能源工程, 2000 (2): 7-9.