

DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2014.01.008

景晓霞 杨云龙 李志强 等. 褐煤物化结构对水分复吸的影响 [J]. 洁净煤技术 2014 20(1): 29-33.

褐煤物化结构对水分复吸的影响

景晓霞^{1,2} 杨云龙¹ 李志强¹ 刘 晓¹ 常丽萍¹ 鲍卫仁¹

(1. 太原理工大学 煤科学与技术省部共建国家重点实验室培育基地 山西 太原 030024;
2. 运城学院 应用化学系 山西 运城 044000)

摘要: 阐述了褐煤中水分的赋存形态及其在受热过程中的转化行为。分析了不同提质干燥过程中褐煤物化结构的变化,探讨了褐煤物化结构与水分脱除及复吸的关系。结果表明:褐煤表面丰富的孔结构和大量亲水性含氧官能团是其水分较高的主要原因。干燥提质过程中,孔结构坍塌和交联反应的剧烈程度对于抑制复吸非常重要。加热过程中褐煤表面活性含氧官能团的数量、形成和分解行为直接影响褐煤的持水和吸氧能力,含氧官能团的分解会使煤的疏水性增加,自燃倾向性降低。最后说明褐煤提质的关键是水分的高效安全脱除,脱水煤表面氧化和水分复吸的抑制,并提出了抑制提质褐煤复吸水分的可能途径是依据不同组成、结构褐煤的水分赋存和脱除行为,针对性地改善干燥操作条件,调节样品孔径分布、比表面积和表面含氧官能团的存在形态及数量。

关键词: 褐煤; 水分; 复吸; 干燥; 孔结构; 比表面积; 含氧官能团

中图分类号: TD849; TQ536

文献标识码: A

文章编号: 1006-6772(2014)01-0029-05

Influence of lignite physical and chemical structure on moisture re-absorption

JING Xiaoxia^{1,2}, YANG Yunlong¹, LI Zhiqiang¹, LIU Xiao¹, CHANG Liping¹, BAO Weiren¹

(1. State Key Laboratory of Coal Science and Technology Co-founded by Shanxi Province and the Ministry of

Science and Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Department of Applied Chemistry, Yuncheng University, Yuncheng 044000, China)

Abstract: Introduce the existing forms of moisture in lignite and its conversion in heating process. Analyse the physical and chemical structure changes of lignite during different upgrading drying processes. Investigate the influence of lignite structure on its moisture removal and re-absorption. The results show that abundant pore structure and hydrophilic oxygen-containing functional groups on lignite surface lead to high moisture in lignite. During upgrading drying process, pore structure collapse and cross-linking reaction play an important part in restraining moisture re-absorption. The number of functional oxygen-containing groups on lignite surface and their formation and decomposition directly influence the moisture and oxygen holding capacity of lignite. Their decomposition can enhance the hydrophobicity and weaken spontaneous combustion. The key to lignite upgrading is the efficient removal of moisture and restraining of dehydrated lignite oxidation and moisture re-absorption. To better restrain moisture re-absorption, it can improve upgrading condition, adjust pore-size distribution, surface area as well as forms and amounts of oxygen-containing functional groups based on the moisture existing forms and its removing performance.

Key words: lignite; moisture; re-absorption; drying; pore structure; specific surface area; oxygen-containing functional groups

收稿日期: 2013-10-21 责任编辑: 白娅娜

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2012CB214902)

作者简介: 景晓霞(1978—),女,山西运城人,讲师,在读博士,研究方向为低阶煤提质。通讯作者: 鲍卫仁(1964—),男,博士生导师。

E-mail: lpchang@tyut.edu.cn

0 引言

煤炭是中国的主要能源,随着经济的快速发展,煤炭消耗规模不断扩大,高品质煤资源紧张和劣质煤高效利用是必然趋势。中国褐煤资源相对丰富,约占全国探明煤炭保有资源储量的13%。褐煤氧含量、氢含量、挥发分高,化学反应性强,作为化工原料或燃料利用具有一定优势,但因其水分高,发热量低,易风化自燃,很大程度上限制了其开采和应用,须在大规模有效利用前进行提质处理。

褐煤中水分以不同形式赋存于煤中,其脱除的难易程度与褐煤孔结构特性和化学结构特征密切相关。褐煤中水分脱除后,其物理结构和表面活性基团发生不可逆转的变化,对褐煤复吸、氧化性能及进一步转化过程中的反应活性有显著影响。目前,对褐煤干燥提质技术的研究很多,但对干燥提质过程中褐煤物理、化学结构的变化及其与提质褐煤的复吸、氧化行为间的关联还没有系统的认识。本文拟以褐煤中水分存在形式的认识为基础,对褐煤干燥提质技术中物理化学结构的变化进行分析,以探讨褐煤结构变化与水分间的关系以及抑制提质褐煤对水分复吸的可能途径。

1 褐煤中水分的赋存形态

褐煤中水分赋存形态按照分类依据的不同主要有表面游离水、毛细凝结水、化学吸附水、分解释放水、煤颗粒间的水;可冻结水和不可冻结水;外在水、内在水和凝结水等。Allardice等^[1-2]考察了褐煤等温吸附和脱附的性质后认为Yallourn褐煤中水分主要有两种存在形式,其中80%水分脱除所吸收的热量与游离水的蒸发热相同,说明这部分水的性质与自由水相同,可通过蒸发的方式脱除。但剩下的20%水分脱除过程中吸收的热量远大于自由水的蒸发潜热,脱除过程中发生了化学键的断裂,说明这部分水分主要依靠与褐煤表面的亲水性吸附点位形成化学键而吸附,仅依靠蒸发很难脱除,且其含量会因褐煤煤种的不同而有所变化。Deevi等^[3]对褐煤中水分进行了较详细地划分,认为水分主要以4种形式存在,除表面自由水外,将剩余水分分为毛细凝结水、与极性基团和阴离子通过氢键作用的化合态吸附水及化学有机物和无机物分解释放的水分。在之前研究的基础上,Karthikeyan等^[4]进行了更深入的研究,对水分的划分也更具体。将

褐煤中水分分成了五类,即表面水、游离水(两种类型)、内吸附水和毛细水。其中表面水指吸附在褐煤表面的水分;游离水主要指煤颗粒间的水分和附着在煤颗粒表面的水分;内吸附水指煤颗粒的微孔和毛细孔中的水分;毛细水主要指存在于煤颗粒之间的毛细孔中的水。Mraw等^[5]从能否冻结的角度对褐煤中水分进行了研究,在低温条件下研究了Wyodak煤样中的水分及其降温过程中的热容变化,发现只有1/3水分与自由水性质相同,在低温下可以冻结,可冻结水分存在于煤的大孔中,不可冻结水分存在于煤样内表面或微孔中。田忠坤^[6]考虑了褐煤开采运输过程中会与环境交换一部分水分,将褐煤水分分为外在水、内在水和凝结水。外在水即褐煤开采、堆放和运输过程中,失去一部分水分或由外部环境吸收水分后保留在褐煤中的自由水;内在水主要指成煤过程中残留下来的水分,煤化程度越低,内在水含量越高;凝结水主要指化合态的吸附水及煤本身内在与矿物质结合的结晶水。3种水分的高低随煤种的不同而有所变化。尽管已有研究对褐煤中水分存在形式进行分类,但目前还没有统一的分类方法,国内多数研究者将褐煤中水分按照外在水、内在水和凝结水进行分类。

将褐煤中不同形式的水分进行区分,并准确测定较难实现,目前测量不同形式水分的方法主要有冷冻差热量分析和热天平热重分析。文献[7-9]通过对褐煤的冷冻差热量分析发现,随温度降低,褐煤水分表现出不同的结冰特性,在273 K褐煤中部分水发生相变并凝固释放热量,当温度降低至260 K时又有部分水发生结冰同时释放出相对较少热量,计算可得两个温度下冷冻凝固的“可结冰水”含量,褐煤水分总量与“可结冰水”之差即“不可结冰水”含量。文献[10-11]采用热天平获得褐煤等温干燥脱水特性,通过TG和DTG曲线计算某一时刻样品含水率和干燥速率,认为干燥速率和含水率关系曲线的拐点是褐煤等温干燥过程中不同形式水分对应不同干燥机理的显示。

研究发现褐煤中水分由于其存在方式不同导致脱除难易程度也不同^[12]。其中外在水最容易脱除,一般通过蒸发可完全脱除;但是内在水和凝结水的脱除比较困难。内在水的脱除受褐煤孔结构的影响,褐煤是由凝固的胶体网状结构和微孔系统组成,其中充满含水介质,存在于胶体网状结构大孔中的游离水和微弱结构的水比较容易脱除,但

存在于微孔系统中的水分只有在较高温度和压力下才能脱除。剩余化合吸附态的水及与矿物质结合的结晶水需要在更高温度和压力下才能释放。与亲水性含氧官能团通过氢键结合的水在释放过程中由于温度较高经常伴随热分解反应发生,结晶水也需要在这种较高温度下才能分解。大部分研究表明在经过气流干燥后,褐煤中外在水分几乎都可以脱除,内在水分会脱除1/2以上,结晶水和化合吸附态的水分几乎不能脱除^[6]。

煤的干燥一般经历充分预热后开始恒速干燥,最后进入降速干燥阶段。但是对于多孔性褐煤来说,干燥脱水是非常复杂的物理过程。水分在物料表面不断扩散,同时内部孔径的水分不断向外迁移。在预热阶段,褐煤水分及其表面温度随时间变化,气流携带的热量一部分用于加热湿物料,其余用于气化水分。在恒速干燥阶段,物料表面保持润湿,从内部向外扩散的水分不小于表面蒸发的水分,此时气流传递给物料的热量几乎全部用于水分的蒸发,干燥速率恒定。随着干燥的继续,物料水分不断降低,当水分降至某一临界值时,内部扩散的水分小于表面蒸发的水分,内部水分不能及时扩散到煤样表面,物料表面变得干燥,蒸发表面开始向内部移动,吸收的热量一部分用于干燥,一部分使物料升温,此时干燥进入降速阶段,直至干燥脱水过程完成^[13-14]。

2 褐煤干燥中物理化学结构变化

褐煤的孔隙或裂隙是外在水分和内在水分的赋存空间。研究褐煤表面具有吸附能力的活性基团、孔隙分布特征和比表面积大小是改善褐煤提质性能的基础。干燥过程中褐煤物理结构和化学结构的变化直接影响提质褐煤的复吸行为。

2.1 物理结构的变化

国外已有褐煤提质过程中物理结构变化的研究,国内研究相对较少。褐煤具有发达的孔结构和表面积,孔隙以大孔和介孔为主,介孔多于大孔,表面积主要由介孔决定^[15]。褐煤具有胶体性质,在加热过程中,由于水分的脱除使褐煤孔隙腾空,发生收缩、坍塌,大孔数量和体积均减少,介孔数量增加^[16]。褐煤的脱水等温线属于典型的S型,且在较低的水蒸气相对分压下其等温线具有滞后效应,主要是由干燥过程中孔结构的收缩引起的^[2]。干燥过程使褐煤原始孔径发生改变,因此干燥脱水煤复

吸后以水分子簇形式存在的水分子减少,说明干燥中褐煤孔结构发生变化^[17]。Androutsopoulos等^[18]在褐煤干燥实验中发现颗粒的收缩和水分的脱除引起了大孔的坍塌,且150~1000 nm孔不断减少,7.5~150 nm孔不断增加。Evans^[19]对澳大利亚Yal-lourn褐煤干燥时发现,大孔和较大毛细孔中的水首先通过蒸发脱除,这个阶段孔结构的变化相对较小;随后为小的毛细管中的水脱除,腾空的小的毛细管发生收缩引起孔的完全坍塌;接着发生吸附态水分的脱除,这个阶段由于晶胞之间的强烈化学键作用,收缩作用更强,从而使褐煤胶体结构坍塌。随着干燥的继续进行,收缩力达到最大,相应的每个晶胞附近有两层水分子。褐煤丰富的孔结构和大量水分使褐煤结构具有胶体性质,干燥过程中发生的收缩作用是不可逆的。Deevi等^[3]通过实验证实了干燥过程中褐煤的孔结构确实发生了不可逆的变化。将煤样制成立方体,干燥后煤样体积收缩,重新吸湿膨胀后的体积是原来的80%。这种收缩作用主要是由于大孔和介孔的坍塌引起的。为了比较,同时对刚性的多孔烟煤进行相同实验,发现干燥失去的水分又会全部吸附在孔中,而对于褐煤来说,只有不到1/2的水分会重新吸附到孔中^[20]。

褐煤的表面积较大,主要由大孔和介孔的数量决定,干燥中大孔结构的坍塌必定引起表面积和体积的变化。Evans^[19]证明了褐煤脱除表面自由水时体积保持不变,脱除毛细水和多层水分时,体积明显减小。当失去单层水分时,体积变化可忽略,有时体积可能会增加。如果增大干燥温度和压力,大孔结构不断坍塌形成介孔,表面积和体积减少,但是微孔的孔体积和表面积几乎不变^[21]。干燥中除发生孔结构变化外,还发生了煤的交联反应,交联反应使煤的孔隙率降低。Charriere等^[22]考察了褐煤的吸附和脱附热力学曲线,发现存在严重滞后现象,主要是因为交联反应封闭了部分孔隙从而限制了水分的复吸。Geoffrey等^[23]研究了蒸汽干燥情况下褐煤物理结构的改变。当蒸汽过热度较低时,干燥过程中只有少量水分析出,煤的孔结构中还含有大量水分,但由于蒸汽本身温度很高,仍发生了交联反应。当蒸汽过热度较高时,干燥后煤中大量水分脱除,孔结构发生了严重的坍塌和交联反应。

褐煤的蒸发干燥使水直接以气态形式脱除,蒸发过程的发生主要依靠外界直接或间接提供水蒸发所需热量。蒸发干燥主要有热风转筒干燥,蒸汽

流化床干燥、热油干燥和微波、太阳能干燥等。由于蒸发干燥使用的蒸汽中含有空气,容易燃烧爆炸,所以一般在常压低温下进行。由于蒸发干燥只是对煤样进行加热处理,将热量传递给煤样,因此处理后煤样会发生严重复吸。而非蒸发干燥是使煤中水分以液态形式脱除,主要有机械-热挤压脱水。非蒸发干燥一般在高温高压下处理煤样,通过加压改变了褐煤的孔结构,因此干燥后褐煤复吸量较少。而且热压过程生成的煤焦油不易从褐煤缝隙和毛细孔中脱除,冷却后封闭孔结构,减少表面积,大大减少脱水褐煤的复吸,但这种方法设备投资较大,运行费用较高^[24-26]。

2.2 化学结构的变化

褐煤的高水分特性除了与发达的表面及孔隙结构有关外,还与其表面的活性官能团密切相关。水分子和含氧基团通过氢键作用吸附在煤颗粒表面,被吸附的水通过分子间力的作用吸附其它水分子,进而形成多层吸附。加热过程中褐煤表面活性含氧官能团的数量、形成和分解行为直接影响煤的持水和吸氧能力,含氧官能团的分解会使煤的疏水性增加,自燃倾向性降低。

大量研究证明,不同煤种的化学性质受煤表面含氧官能团的种类和数目影响很大,煤中的氧分为极性态氧和非极性态氧,前者如羟基、羧基、酚羟基,后者常见的如醚氧基等^[3,27]。其中前者通过氢键与水分子进行缔合,活性较强,具有较强的亲水性;而后者分子中氧的极性较弱,与水的缔合作用较小,为非活性含氧官能团。亲水性含氧官能团的种类和数量是影响褐煤表面疏水性的另一个重要参数。通过 BET 方程可得到单分子层水的吸附能力与煤的孔结构和表面亲水性官能团数量的关系。文献[2]报道,当水分较低时,水分通过氢键作用吸附在微孔表面,随着水分的增加,一部分水分会存在于毛细孔中,当水分继续增加,水分和煤表面之间没有任何结合力,成为自由水,这部分水存在于煤样颗粒之间。活性含氧官能团的种类不同,与水作用力大小也不相同,对于低阶煤来说,羧基含量是影响煤表面润湿性的最主要因素,其次为羟基;煤阶越高,亲水性表面含氧官能团含量越少,其水分也越少。王娜^[28]通过实验发现含氧官能团对褐煤表面疏水性的影响顺序为:羧基>酚羟基和羟基>羰基。羧基是与煤表面性质关系最密切的含氧官能团,对褐煤进行脱水提质以提高其表面疏水

性主要是针对羧基的脱除。将中国褐煤在 300 °C, SANS 液压成型机中制成煤后发现,羧基脱除率明显高于羟基和其它含氧官能团,热态成型提质改性主要以脱除羧基为主。大量研究还发现干燥过程中羧基会大量分解,内蒙古褐煤在 N₂ 中干燥,干燥温度超过 150 °C 时,羧基官能团开始分解^[29];澳大利亚褐煤在 150 ~ 300 °C 热水中干燥时,也表现为羧基超过 150 °C 开始分解,当温度增至 200 °C 时,分解量增加^[30]。因此干燥脱水提质过程中羧基含量会大大减少,增加了褐煤的疏水性。

褐煤脱水提质过程中,脱除羧基的同时,其它活性含氧官能团也有所降低。通过比较原煤和提质煤的傅立叶红外光谱,发现提质煤表面的极性官能团大大减少^[28]。Allardice 等^[2]采用真空干燥的方式对澳大利亚褐煤进行等温干燥,发现当实验温度大于 60 °C 时,含氧官能团分解析出 CO₂;内蒙古褐煤在空气、N₂ 气氛下进行干燥,超过 250 °C 时出现含氧官能团的分解,生成碳氧化物^[29];澳大利亚褐煤在 150 ~ 300 °C 的热水中干燥时,酚类官能团在 150 °C 开始分解,200 °C 时分解特别明显;醇类官能团在 200 °C 时保持稳定,温度超过 200 °C 分解速率逐渐增大;温度超过 150 °C 时,羧基分解量增加^[30]。

目前工业上应用的蒸发干燥工艺在常压低温(大约 100 °C)下进行,活性含氧官能团几乎不发生分解;非蒸发干燥工艺(例如热水干燥技术,温度大约在 235 °C,压力一般在 3 MPa 左右)是将煤水混合物装入高压容器内,密闭抽真空后加热该高压容器。褐煤表面大量的羧基、羟基和甲氧基在高温高压下都会发生分解,产生 CO₂、SO₂ 等小分子气体的同时,将水分从毛细孔中排出。褐煤脱水提质过程中,极性官能团变化与环境气氛、干燥设备等热处理操作条件有关,在密闭的高温热压成型提质过程中,羧基脱除率明显高于羟基和其它含氧官能团,其它活性含氧官能团明显减少。在真空管式炉中对褐煤进行干燥时,含氧官能团发生分解释放 CO₂,在空气和 N₂ 气氛下,羧基、羟基、醇类和羰基都会不同程度地分解,且温度越高,分解越剧烈。

3 结 语

褐煤的干燥脱水及提质煤的复吸行为主要与褐煤中水分的赋存形态、孔结构、表面积及表面大量活性含氧基团有关。褐煤干燥提质过程中,几乎

全部外在水分和 1/2 内在水分可以脱除,褐煤中凝结水越少,干燥越彻底,复吸量越少。干燥提质过程中,孔结构发生坍塌和交联反应,会封闭褐煤表面的部分孔径,减少褐煤表面积,也就减少了水分的赋存空间,使脱掉的水分不会发生复吸,因此孔结构坍塌和交联反应的剧烈程度对于抑制复吸非常重要。同时,干燥提质过程中活性基团发生分解,极性含氧官能团的减少提高了褐煤表面疏水性,可以选择不同的反应气氛和操作条件加速活性含氧基团的分解以抑制干燥后褐煤的复吸行为。基于褐煤脱水的基础研究,有针对性地对不同结构和组成特性的煤样进行操作条件的改善,孔径分布、比表面积和表面含氧官能团存在形态及数量的调节,是抑制提质煤复吸的有效途径。

参考文献:

- [1] Allardice D J, Evans D G. The brown-coal/water system: Part 1. The effect of temperature on the evolution of water from brown coal[J]. Fuel, 1971, 50(2): 201-210.
- [2] Allardice D J, Evans D G. The brown-coal/water system: Part 2. Water sorption isotherms on bed-moist Yallourn brown coal[J]. Fuel, 1971, 50(3): 236-253.
- [3] Deevi S C, Suuberg E M. Physical changes accompanying drying of western US lignites[J]. Fuel, 1987, 66(4): 454-460.
- [4] Karthikeyan M, Zhonghua W, Mujumdar A S. Low-rank coal drying technologies-current status and new developments[J]. Drying Technology, 2009, 27(3): 403-415.
- [5] Mraw S C, Naas-O'Rourke D F. Water in coal pores: Low-temperature heat capacity behavior of the moisture in wyodak coal[J]. Science, 1979, 4409(205): 901-902.
- [6] 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.
- [7] Norinaga K, Kumagai H, Hayashi J, et al. Classification of water sorbed in coal on the basis of congelation characteristics[J]. Energy & Fuels, 1998, 12(3): 574-579.
- [8] Norinaga K, Hayashi J, Kudo N, et al. Evaluation of effect of predrying on the porous structure of water-swollen coal based on the freezing property of pore condensed water[J]. Energy & Fuels, 1999, 13(5): 1058-1066.
- [9] Allardice D J, Clemow L M, Favas G, et al. The characterisation of different forms of water in low rank coals and some hydrothermally dried products[J]. Fuel, 2003, 82(6): 661-667.
- [10] 魏砾宏, 姜秀民, 李爱民, 等. 矿物成分对超细化煤粉燃烧特性影响的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(8): 5-10.
- [11] 李庆钊, 赵长遂. O₂/CO₂ 气氛煤粉燃烧特性试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(35): 39-43.
- [12] 陶建红. 褐煤干燥特性研究[J]. 洁净煤技术, 2010, 16(4): 67-69.
- [13] 李先春. 褐煤提质及其燃烧行为特性的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- [14] 王秀军, 张守玉, 彭定茂, 等. 多孔介质干燥机理在褐煤热力脱水中的应用[J]. 煤炭转化, 2011, 34(1): 82-86.
- [15] Nugroho Y S, McIntosh A C, Gibbs B M. Low-temperature oxidation of single and blended coals[J]. Fuel, 2000, 79(15): 1951-1961.
- [16] Vorres K S, Wertz D L, Malhotra V, et al. Drying of Beulah-Zap lignite[J]. Fuel, 1992, 71(9): 1047-1053.
- [17] Mraw S C, O'Rourke D F. Water in coal pores: The enthalpy of fusion reflects pore size distribution[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1982, 89(1): 268-271.
- [18] Androutsopoulos G P, Linardos T J. Effects of drying upon lignite macro-pore structure[J]. Powder Technology, 1986, 47(1): 9-15.
- [19] Evans D G. The brown-coal/water system: Parts 4. Shrinkage on drying[J]. Fuel, 1973, 52(3): 186-190.
- [20] Martin L G, Stephen C M, Jon S G, et al. Coal physical structure: porous rock and macromolecular network[J]. Fuel Processing Technology, 1986, 12(3): 31-49.
- [21] Hulston J, Favas G, Chaffee A L. Physico-chemical properties of Loy Yang lignite dewatered by mechanical thermal expression[J]. Fuel, 2005, 84(14/15): 1940-1948.
- [22] Charriere D, Behra P. Water sorption on coals[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2010, 344(2): 460-467.
- [23] Geoffrey D B, Jackson W R, Fedir W. Pressurized steam drying of Australian low-rank coals Part 2. Shrinkage and physical properties of steam dried coals, preparation of dried coals with very high porosity[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 64(1/3): 13-23.
- [24] 崔义, 周鹏. 褐煤干燥成型技术的研究[J]. 洁净煤技术, 2012, 18(1): 42-44.
- [25] 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.
- [26] 曾钦, 李军, 王慧香, 等. 内蒙古某褐煤干燥特性的实验研究[J]. 洁净煤技术, 2011, 17(2): 57-59.
- [27] 李敏. 煤表面含氧官能团的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2004.
- [28] 王娜. 提质低阶煤热解特性及机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010.
- [29] Arash Tahmasebi. Drying of Chinese Lignite: Drying Characteristics, Chemical Changes and Mathematical Modeling[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2012.
- [30] Murray J B, Evans D G. The brown-coal/water system: Parts 3. Thermal dewatering of brown coal[J]. Fuel, 1972, 51(4): 290-296.