

褐煤流化床提质性能研究

赵振新¹, 王永胜², 朱书全³

(1. 河南城建学院 化学与材料工程学院 河南 平顶山 467044; 2. 河南能源化工集团有限公司 河南 郑州 450004;
3. 中国矿业大学(北京) 化学与环境工程学院 北京 100083)

摘要: 针对褐煤水分高、发热量低、易风化自燃等特点, 以内蒙古褐煤为研究对象, 进行了褐煤静态干燥实验和褐煤提质多因素实验。以 O₂ 体积分数 10.5% 的烟气为干燥介质, 在分析褐煤流化床提质干燥机理的基础上, 对褐煤进行流化床动态提质实验。结果表明: 褐煤提质水分控制在 5% 左右为宜。褐煤粒级小于 3 mm 时, 温度对煤样干燥速度影响最大, 其次是煤样粒度, 风速对干燥速度影响最小。确定全粒级、0.5~1.25、1.25~2、2~3 mm 褐煤临界流化风速分别为 38、20、40 和 50 m³/h。褐煤适宜提质温度和时间分别为 200~240 °C 和 5~8 min。最后建立了褐煤提质模型, 说明褐煤提质规律与提质介质温度、风速密切相关, 该模型对褐煤提质生产具有指导作用。

关键词: 褐煤; 提质; 流化床; 临界流化风速; 干燥速度

中图分类号: TD849; TQ53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2014)06-0023-05

Upgrading of lignite by fluidized bed

ZHAO Zhenxin¹, WANG Yongsheng², ZHU Shuquan³

(1. School of Chemistry and Materials Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467044, China;

2. Henan Energy and Chemical Industry Group Co., Ltd., Zhengzhou 450004, China;

3. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The lignite has the disadvantages of high moisture, low calorific value and easy spontaneous combustion. The essay took lignite in Inner Mongolia as object, carried out the lignite static drying test and upgrading multi-factor test. Taking the flue gas in which the O₂ volume fraction was 10.5% as drying medium, the serial experiments of fluidized bed upgrading based on the analysis of fluidized bed upgrading principle were conducted. The results showed that the optimum moisture was around 5%. When the lignite size was below 3 mm, the temperature affected the drying rate most, followed by lignite size and air speed. The paper determined the critical fluidized air speed for total size fraction 0.5 to 1.25 mm, 1.25 to 2 mm, 2 to 3 mm was 38, 20, 40, 50 m³/h respectively. The optimum upgrading temperature and time was 200 to 240 °C and 5 to 8 minutes. At last, an upgrading model was built which had a guidance function to lignite upgrading.

Key words: lignite; upgrading; fluidized bed; critical fluidized air speed; drying speed

0 引 言

褐煤是一种低变质程度煤种, 机械强度低, 易风化粉碎, 自燃倾向强, 水分高, 不易化学加工, 难以分选和储存, 造成单位能量运输成本较高, 长距离输送经济性差, 这些性质严重限制了褐煤的开采利用^[1-2]。多年来褐煤产量不到全国原煤产量的 4.5%, 近年来随着优质煤源的短缺, 人们对褐煤的重视程度逐渐提高, 2012 年褐煤产量已达到全国煤

炭产量的 10% 左右^[3-5]。由于褐煤碳、氢含量低, 氧含量高, 水分一般为 30%~40%, 有的高达 50% 以上, 直接当燃料使用, 经济性有限, 燃烧效率低, 浪费巨大, 污染严重。因此降低水分、提高能量密度便成为褐煤加工利用的关键问题之一。大规模开发和利用褐煤的关键是对褐煤进行有效提质, 是实现褐煤气化及液化, 获得煤基化工原料的主要途径之一^[6-7]。目前褐煤提质技术很多, 在工业性实验方面也取得了一些进展。褐煤提质技术大致可分为机

收稿日期: 2014-06-16; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.2014.06.006

基金项目: 河南省科技攻关资助项目(122102210395); 平顶山市重点科技攻关资助项目(2013066)

作者简介: 赵振新(1972—), 女, 河北唐山人, 副教授, 博士, 从事煤炭清洁利用及新材料的制备研究。E-mail: zzx@hncj.edu.cn

引用格式: 赵振新, 王永胜, 朱书全. 褐煤流化床提质性能研究[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(6): 23-27.

ZHAO Zhenxin, WANG Yongsheng, ZHU Shuquan. Upgrading of lignite by fluidized bed[J]. Clean Coal Technology, 2014, 20(6): 23-27.

械法、蒸发法和非蒸发法3类^[8-9]。日本 UBC (Upgrading Brown Coal) 技术5步法提质褐煤,但由于油加热介质工艺需要加温加压,对工艺和设备要求较高,同时油料成本也很大,影响了该技术的进一步应用。美国 KF_x 公司的“K 燃料工艺”(K-Fuel Process) 可提高褐煤热值,但由于采用高温高压设备,投入成本高,过程控制相对复杂,且无法干燥煤粉,限制了该工艺的应用。机械热挤压(MTE)脱水技术利用剪切原理破坏煤炭结构,实现煤炭脱水,但该技术对中国内蒙古的年老褐煤不适用。对于褐煤低温提质,须根据不同煤质特性优化工艺条件,从而指导提质工艺选择^[10-13]。流化床作为一种高效换

热器,具有传热效率高、换热面积大、占地小、能耗低、操作简便等优点,在化工、冶金、煤炭等领域得到广泛应用^[14-15]。笔者选取中国具有代表性的蒙东地区褐煤为研究对象,利用小型流化床干燥实验装置对其进行低温提质研究,以期丰富褐煤提质理论研究基础,为未来蒙东地区褐煤提质利用提供技术支持。

1 实验条件

1.1 实验煤样

实验选用内蒙古蒙东褐煤为原料,褐煤煤质分析见表1。

表1 褐煤煤质分析

工业分析/%						元素分析/%					发热量/(MJ·kg ⁻¹)			
M_{ar}	M_{ad}	A_d	V_d	V_{daf}	FC_{daf}	$w(C_{ad})$	$w(H_{ad})$	$w(N_{ad})$	$w(O_{ad})$	$w(S_{ad})$	$Q_{gr,ar}$	$Q_{net,ar}$	$Q_{gr,ad}$	$Q_{net,ad}$
33.61	20.40	11.16	40.49	48.83	51.17	57.54	4.74	1.02	16.69	0.31	16.49	16.00	19.45	19.11

褐煤 M_{ar} 为 33.61%, 属典型的老年褐煤; A_d 为 11.16%, 属低灰分煤, 品质较高; 硫含量为 0.31%, 为低硫煤; 氧含量较高, 达 16.69%。 $Q_{net,ar}$ 为 16.00 MJ/kg。

1.2 实验装置及流程

流化床适用于无凝聚作用的散粒状物料的提质干燥, 颗粒直径 0.03 ~ 6 mm, 设备简单, 生产能力大, 热效率高。除去物料中非结合水分时, 热效率可达 70% 左右, 除去物料中结合水分时, 热效率为 30% ~ 50%。实验装置和流程分别如图 1、图 2 所示。空气通过鼓风机进入空气转子流量计。 N_2 经减压阀减压后进入 N_2 转子流量计。 N_2 与空气体积比为 1:1.2 种气体混合后进入气体电加热器加热到设定温度, 通入流化床, 混合气中 O_2 体积分数为 10.5%。

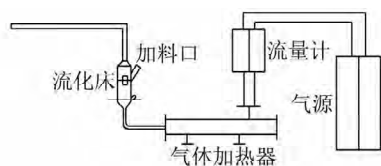


图1 实验装置

1.3 实验方法

1) 褐煤静态干燥特性。为初步考察褐煤干燥提质特性, 在烘箱中进行加热失重实验。用称量瓶分别称取 5 份粒度小于 3 mm 煤样 5 g, 将煤样放入烘箱中保持 120 °C 恒温干燥, 按不同时间从烘箱取

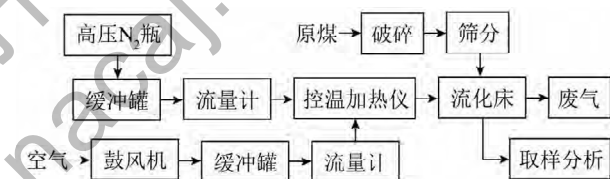


图2 实验流程

出煤样, 盖上称量瓶盖, 放入干燥器中冷却至室温后称重。

2) 褐煤提质多因素实验。采用 800 复合破碎机破碎褐煤, 将 < 3 mm 褐煤筛分成 4 个粒级, 即 < 0.5、0.5 ~ 1.25、1.25 ~ 2、2 ~ 3 mm。用称量瓶各称取 0.5 g 煤样, 将煤样在瓶底铺平, 放入烘箱中, 调整温度到 100、150 和 200 °C 三个水平, 控制风速为低速档、中速档和高速档, 测定不同时间煤样质量, 计算煤样干基湿含量, 分析褐煤提质的影响因素。

3) 褐煤流化床动态提质特性。将一定量褐煤置于流化床内, 达到良好流化时测量计算褐煤流化风速。打开流化床进风口阀门及电加热装置, 预热流化床至设定温度, 称取一定量不同粒级煤样投入流化床, 调节风量, 观察褐煤流态变化, 确定不同粒级煤样的临界流化风速。调节干燥气流流量至能够在流化床炉体中部取样口取到样品, 此流速即为实验所需的临界流化速率。当干燥气流经电加热器加热至设定温度后开始计时, 并取样、称重。每 1 ~ 2 min 从流化床取样 1 次, 称重后的煤样放置于干燥

器中干燥2 h,再次称重,计算煤样干基湿含量。当相邻2次取样称重相等,停止取样并结束实验。煤样干基湿含量 X_d 按下式计算

$$X_d = \frac{G_1 - G_2}{G_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中 G_1 、 G_2 分别为湿煤样和干燥后煤样质量/kg。

2 褐煤静态干燥特性

为分析褐煤干燥提质机理,保持干燥介质的温度、湿度、流动速度不变,进行褐煤静态提质实验。120℃下煤样静态干燥实验结果见表2。由表2可知,没有热气流强迫对流换热时,褐煤干燥速度很慢。当干燥介质的温度、湿度、流动速度等恒定时,褐煤干基湿含量随干燥时间的增加而降低。起始阶段干燥速率较快,随着加热时间的延长,干燥速率逐渐降低,失去最后5%水分消耗的时间,与脱掉初始20%水分所用时间相当,即二者能耗相当。从能耗和效率来看,干燥过程中褐煤水分控制在5%左右较为适宜。

表2 120℃下煤样静态干燥实验结果

干燥时间/min	干基湿含量/%	煤样失水率/%
0	33.61	0
10	24.21	9.40
20	12.01	21.60
30	5.21	28.40
60	0.61	33.00
120	0.41	33.20

3 褐煤提质多因素实验

在研究褐煤静态干燥特性的基础上,以褐煤水分干燥至5%为基准,分析了温度、时间等因素对各粒级褐煤干燥特性的影响,结果见表3。由表3可知,随着温度的升高,相同粒级褐煤水分干燥至5%所用时间明显缩短,因此提高温度可增加褐煤恒速干燥区间;随着风速的提高,相同粒级褐煤水分干燥至5%所需时间缩短,干燥速率略有上升,但总体影响不大。相同干燥温度下,随粒级减小,褐煤水分干燥至5%所需时间缩短,说明煤样粒度越小,越易干燥,干燥时间越短。

因此,褐煤粒级小于3 mm时,温度对煤样干燥速度影响最大,其次是煤样粒度,风速对干燥速度影响最小。可见,在褐煤恒速干燥阶段,传热速度对干燥速度影响最大,传质速度对干燥速度影响相对较

小,该过程属于表面气化控制阶段。

表3 褐煤提质多因素实验结果

温度/ ℃	风速	褐煤水分干燥至5%所需时间/s			
		<0.5 mm	0.5~1.25 mm	1.25~2 mm	2~3 mm
100	低速	420	510	540	720
	中速	420	360	480	720
	高速	420	330	360	600
150	低速	150	210	210	300
	中速	138	180	210	240
	高速	130	160	168	228
200	低速	120	150	210	210
	中速	90	120	180	180
	高速	60	100	156	150

4 褐煤流化床动态提质特性

褐煤挥发分高,活性强,易燃易爆。实验以 N_2 、空气体积比1:1的混合气体作为干燥介质, O_2 体积分数控制在10.5%。通过实验确定全粒级、0.5~1.25 mm、1.25~2 mm、2~3 mm褐煤临界流化风速分别为38、20、40和50 m^3/h 。褐煤流化床提质过程中,流态化下煤粒在床层中达到充分混合。在悬浮状态下与干燥介质接触,蒸发面积大,介质对煤粒既有传导换热,又有对流换热,强化了煤粒的传热传质。褐煤流化床提质过程主要分为预热期、初期、中期和后期4个阶段^[16-18]。褐煤流化床提质过程如图3所示。

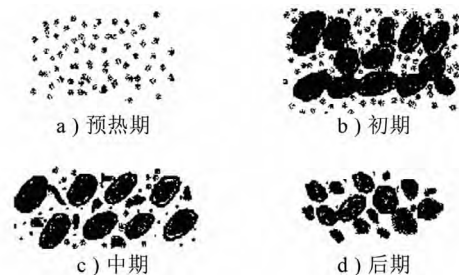


图3 褐煤流化床提质过程

4.1 干基湿含量

不同温度下褐煤干基湿含量与干燥时间的关系如图4所示。由图4可知,风量恒定时,不同温度下煤样流化床提质过程都有一段褐煤干基湿含量快速下降的区域,主要是煤中外在水分去除阶段。之后,干燥曲线趋于平缓,煤样干基湿含量降低速率减小,主要是褐煤中内在水分和剩余外在水分去除阶段。

提质温度为 140、160、180 和 200 °C 时,随着提质温度的升高,褐煤达到临界干基湿含量的时间缩短,最少为 8 min。当提质温度为 200 °C 以上时,褐煤提质速率明显加快。这是因为褐煤在临界干基湿含量之前处于快速干燥区,褐煤干基湿含量随时间延长迅速减小,之后进入慢速干燥阶段,褐煤干基湿含量下降趋缓,直至完全失水完成提质。因此确定褐煤适宜提质温度为 200 ~ 240 °C。

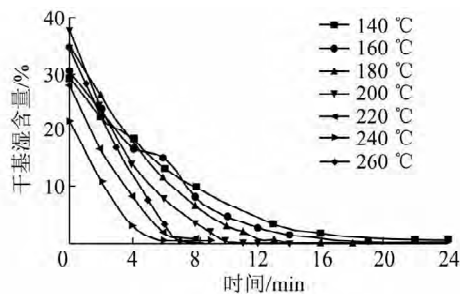


图4 不同温度下褐煤干基湿含量变化

褐煤提质是一个复杂的非稳态传热、传质过程,不仅受提质介质的温度、湿度、流速等影响,也会因煤粒内部结构、物理化学性质及外部形状不同而存在明显差异。诸多学者通过研究不同物料,总结出几种常用的经验、半经验干燥数学模型,用以定量描述物料干燥规律。图4中每条曲线基本符合函数 $y = e^{-x}$ 形式。笔者根据实际情况采用单项扩散模型 Page 方程处理实验数据^[19],通过数据拟合褐煤提质方程,得到褐煤提质模型

$$M = Ae^{-Bt} \quad (2)$$

式中: M 为褐煤水分,%; A 、 B 为提质常数; t 为提质时间, min。

各实验工况的提质常数 A 、 B 见表4。

表4 褐煤提质参数

干燥温度/°C	A	B	R
140	32.4	0.16	0.98
160	43.8	0.24	0.96
180	59.4	0.33	0.94
200	77.5	0.49	0.90
220	34.4	0.44	0.97
240	20.1	0.44	0.91
260	57.1	0.56	0.89

注: R 为线性相关系数

A 、 B 是与时间无关的常数,不同工况下 A 、 B 值各不相同,由此可以得出 A 、 B 是介质气体温度和风速的函数。 R 平均值为 0.936,说明所选褐煤提质

模型比较合适,对实际生产具有指导作用。在生产工况稳定的情况下,可通过抽样检查求得褐煤提质至最终水分所需时间,避免时间过长造成燃料及电力浪费,或时间不够导致提质后褐煤水分达不到要求。

4.2 含湿量比

褐煤完全失水所需时间不仅与提质时间有关,还与褐煤初始湿含量及平衡湿含量直接相关。褐煤初始湿含量较高时,以同样温度提质到相同湿含量所需时间较长,拟合曲线不方便。为此,需进一步归一化处理,引入含湿量比 MR

$$MR = \frac{X_d - X_e}{X_0 - X_e} \quad (3)$$

式中: X_e 为平衡湿含量,%; X_0 为初始湿含量,%。

不同温度下褐煤 MR 变化如图5所示。

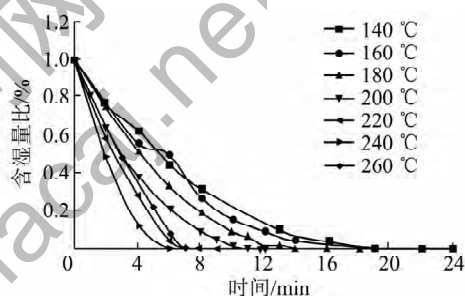


图5 不同温度下褐煤 MR 变化

由图5可知,随着提质时间的增长,褐煤 MR 呈减小趋势。提质初期 MR 减小幅度较大,当 MR 降至 0.20 时,褐煤干基湿含量为 3% 左右,其提质速率变得很小, MR 变化趋于平缓。140 °C 下 MR 由 0.20 降至 0 需要 7 min, 240 °C 时也需要 2.5 min 左右。确定褐煤适宜提质时间为 5 ~ 8 min。褐煤由于煤化程度低,成煤时间短,本身含有羟基、羧基、羰基、胺基等活性基团。这些基团易与水以氢键形式结合,导致褐煤水分高。同时,煤是多孔性物料,具有很大比表面积,表面自由能较高,具有一定的吸附性能,属于吸湿性多孔物料,吸附和结合的水称为吸附化学结合水。这种化学结合水既不同于表面水(外水),也不同于结晶水。表面水完全靠物理吸附于煤粒表面,易干燥脱去;结晶水属于分子结构水,很难除去;化学结合水脱去难易程度介于两者之间,脱去化学结合水需消耗一定能量。

一般来说,当褐煤干基湿含量比较大时,褐煤内水会以液态水形式移至煤粒表面蒸发层,以蒸汽形式移出。在蒸发开始阶段,蒸发层靠近煤粒表面,然

后逐渐向煤粒内部移动,向内部移动越深,煤粒干基湿含量越小,则煤粒孔隙中的流动阻力越大,此时煤粒内湿量传输以蒸汽迁移为主,由此排出一定水分所需时间更长。

5 结 论

1) 褐煤静态干燥速度很慢,从能耗和效率来看,褐煤提质水分控制在5%左右为宜。

2) 褐煤粒度小于3 mm时,温度对煤样干燥速度影响最大,其次是煤样粒度,风速对干燥速度影响最小。可见,在褐煤恒速干燥阶段,传热速度对干燥速度影响最大,传质速度对干燥速度影响相对较小,该过程属于表面气化控制阶段。

3) 通过对同粒级褐煤进行流态化实验,确定全粒级褐煤临界流化风速为 $38 \text{ m}^3/\text{h}$ 。0.5~1.25 mm、1.25~2 mm、2~3 mm褐煤临界流化风速分别为20、40和 $50 \text{ m}^3/\text{h}$ 。褐煤适宜提质温度为200~240℃,适宜提质时间为5~8 min。最后建立了褐煤提质特性方程,确立了褐煤提质模型,该模型对褐煤提质生产具有指导作用。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 初 茉,李华民.褐煤的加工与利用技术[J].煤炭工程,2005,37(2):47-49.
- [3] 陈海旭.我国褐煤燃前脱灰脱水提质现状[J].中国煤炭,2009,35(4):98-101.
- [4] 赵振新,马步伟,朱书全.褐煤脱水动力学性能试验研究[J].煤炭科学技术,2012,40(10):120-123.
- [5] 熊友辉.高水分褐煤燃烧发电的集成干燥技术[J].锅炉技术,2006,37(S1):46-49.
- [6] 张继臻,种学峰.煤质对Texaco气化装置运行的影响及其选择[J].化肥工业,2009,29(3):3-6.
- [7] Küçük A, Kadioğlu Y, Gülaboğluc M Ş. A study of spontaneous combustion characteristics of a turkish lignite: particle size, moisture of coal, humidity of air[J]. Combustion and Flame, 2003, 133(3):255-261.
- [8] 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,2008,40(8):91-93.
- [9] Wang H, Dlugogorski B Z, Kennedy E M. Analysis of the mechanism of the low-temperature oxidation of coal[J]. Combustion and Flame, 2003, 134(1/2):107-117.
- [10] Yoshiki Sato, Satoshi Kushiyama, Katsunobu Tatsumoto et al. Upgrading of low rank coal with solvent[J]. Fuel Processing Technology, 2004, 85(14):1551-1564.
- [11] Hiroyuki Nakagawa, Akio Namba, Marc Böhlmann et al. Hydrothermal dewatering of brown coal and catalytic hydrothermal gasification of the organic compounds dissolving in the water using a novel Ni/carbon catalyst[J]. Fuel, 2004, 83(6):719-725.
- [12] George Favas, W Roy Jackson. Hydrothermal dewatering of lower rank coals 1: effects of process conditions on the properties of dried product[J]. Fuel, 2003, 82(1):53-57.
- [13] George Favas, W Roy Jackson. Hydrothermal dewatering of lower rank coals 2: effects of coal characteristics for a range of Australian and international coals[J]. Fuel, 2003, 82(1):59-69.
- [14] 金国森.干燥设备[M].北京:化学工业出版社,2002:28-62.
- [15] 雷可夫 M B. 化学工业中的干燥[M].北京:化学工业出版社,1983:70-95.
- [16] 李建国,赵丽娟,潘永康,等.流化床在生物物料热力干燥中的应用[J].化工进展,2005,24(2):190-192.
- [17] 吕 太,张翠珍,曲振尧.粉煤灰干燥特性研究[J].新型建筑材料,2004(8):25-27.
- [18] 王 雷,章明川,吕 太,等.粉煤灰干燥特性的试验研究[J].化学工程,2005,33(4):8-11.
- [19] Hector Iglesias. Handbook of food isotherms: water sorption parameters for food and food components[M]. New York: Academic Press, 1982.

《矿业安全与环保》2015年征订启事

《矿业安全与环保》杂志是属国家煤矿安全监察局主管,由中国煤炭科工集团重庆研究院有限公司与国家煤矿安全技术工程研究中心共同主办,面向国内外公开发行的国家级科技期刊,是煤炭行业具有较高学术影响力的知名期刊之一,系全国中文核心期刊、中国科技核心期刊,中国学术期刊综合评价数据库来源期刊,中国知网、中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊,万方数据数字化期刊群全文入网期刊,中文科技期刊数据库原文收录期刊。以报道煤矿及非煤矿山安全技术、矿山环境保护技术为宗旨,包括矿井瓦斯、煤与瓦斯突出防治技术与装备;矿井通风防火技术与装备;工业粉尘及可燃性气体、粉尘爆炸防治技术与装备;矿山救援技术与装备;矿井水害防治技术;矿山压力与井巷支护技术;安全与环境监测、控制技术;物探与岩土工程技术;煤矿安全管理与评价;矿山热害、污染治理及综合利用等环保技术;兼营广告业务。

《矿业安全与环保》为双月刊、国际标准大16开本、112页,2015年定价18元/册,全年6期共108元。本刊刊号为ISSN 1008-4495、CN 50-1062/TD,邮发代号78-35,欢迎广大读者到当地邮局订阅,也可随时直接汇款到杂志社订阅(邮局和银行汇款请注明“订刊款”字样)。