

环境湿度对煤粉吸水特性的影响

周沛然^{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:煤粉广泛应用于锅炉燃烧中,含水率过高会影响煤粉存储和锅炉生产安全。煤会吸附环境中的水分,为了研究环境湿度对煤粉吸水率的影响,选用3类不同变质程度的原煤制成煤粉,收到基煤粉为I组,烘干外水后煤粉为II组,共6个样品,在45%和70%两种环境湿度条件下研究了煤粉的吸水特性。45%和70%湿度时,I组含水率曲线均为持续增加后出现下降拐点,再小幅上升直至基本稳定。II组含水率曲线变化趋势则不同,45%湿度时,含水率一直上升直至稳定。70%湿度时,变化趋势为先增加而后出现下降拐点,再上升直至基本稳定。45%湿度时,3种煤粉出现拐点时含水率相比70%湿度时低4%~5%,主要是由于拐点产生的原因不同,45%环境湿度下出现的第一类拐点是源于氢键断裂导致煤粉对水产生解吸影响。70%环境湿度下出现的第二类拐点是因煤粉吸附水后煤氧复合作用产生润湿热,样品自身水分蒸发的逸出量超过吸附量后产生的。2种湿度条件下,在吸附达到饱和后,II组煤粉含水率均低于I组煤粉,是由于干燥煤样时,发生了一定程度的提质改性,同时孔隙结构会有少量坍塌破坏,煤的疏水性增加,导致干燥基吸附平衡时含水率低于收到基。II组的绝对吸水量和吸水速率均高于I组,是由于环境水蒸气与烘干煤自身毛细管压差大于I组造成的。70%湿度时的吸附水量和吸附速率均高于45%湿度时,其余试验条件均基本相同,是因为湿度大时水蒸气分压力大,水蒸气更易被煤粉吸附,更易主动进入煤粉内部结构中,说明环境湿度是影响煤粉吸附水量和速度的一个重要因素。最后还比较了不同变质程度煤粉对水的吸附情况,由于低阶煤表面静电势和活性官能团多于高阶煤,故而吸水性能强于高阶煤,在45%环境湿度时,环境蒸气压与3种煤粉毛细管压力相差不大,故而吸附量较小且相差不大;在70%环境湿度时,该规律表现较为明显。

关键词:煤粉;吸水;氢键;环境湿度

中图分类号:TQ53;TK16 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2019)04-0094-06

Effect of environmental humidity on the water absorption characteristics of pulverized coal

ZHOU Peiran^{1,2,3}

(1. Energy Conservation and Engineering Technology Research Institute, China Coal Research Institute, Beijing 100013, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mining and Environment Protection, Beijing 100013, China;

3. Energy State Key Laboratory of Coal Efficient Utilization and Energy-saving Equipment, Beijing 100013, China)

Abstract: Pulverized coal is widely used in boiler combustion. The high moisture content will affect the safety of pulverized storage coal and boiler production. Coal adsorbs the moisture in the environment. In order to study the influence of environmental humidity on water absorption of pulverized coal, the three kinds of raw coal with different metamorphic degree were selected to prepare pulverized coal. The samples were divided into two groups, the group I was the basic pulverized coal, and the group II was dry coal, and a total of six samples were collected. The water absorption characteristics of pulverized coal were studied under the conditions of 45% and 70% ambient humidity. At

收稿日期:2018-09-04;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.18090401

基金项目:中煤科工集团重点资助项目(2018-TD-ZD001)

作者简介:周沛然(1985—),男,河北唐山人,工程师,硕士,研究方向为煤炭洁净燃烧与综合利用。E-mail:49456462@qq.com

引用格式:周沛然.环境湿度对煤粉吸水特性的影响[J].洁净煤技术,2019,25(4):94-99.

ZHOU Peiran. Effect of environmental humidity on the water absorption characteristics of pulverized coal[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(4): 94-99.



移动阅读

45% and 70% ambient humidity, the water content curve of group I shows a downward inflection point after continuous increase, then rises slightly until it is basically stable. The trend of water content curve in group II is different under two humidity. At 45% ambient humidity, the moisture content of pulverized coal in group II rises until it is stable. At 70% ambient humidity, the trend of change is to first increase, then declines inflection point, and then rises until it is basically stable. At 45% ambient humidity, the water content of three kinds of pulverized coal at inflection point is 4%–5% lower than that at 70% ambient humidity, mainly due to the different reasons of inflection point. The first inflection point at 45% ambient humidity is the desorption effect of pulverized coal on water due to hydrogen bond breakage. The second inflection point at 70% ambient humidity is due to the wetting heat generated by the combined action of coal and oxygen after coal powder adsorbing water. The amount of evaporation from the sample itself exceeds the amount of adsorption. Under two humidity conditions, the moisture content of pulverized coal in group II is lower than that of pulverized coal in group I after the adsorption reaches saturation. The reason is that when the dry coal sample is dried, a certain degree of upgrading and modification has taken place. At the same time, the pore structure will collapse a little, and the hydrophobicity of the coal will increase, resulting in that the moisture content of the dry base is lower than that of the received base when the adsorption equilibrium is reached. The absolute water absorption and water absorption rate of group II are higher than those of group I, because the difference of capillary pressure between ambient water vapor and drying coal is greater than that of group I. When the amount of water adsorbed and the rate of adsorption at 70% humidity are higher than those at 45% humidity, the other experimental conditions are basically the same, because when the humidity is high, the partial pressure of water vapor is high, the water vapor is more easily absorbed by pulverized coal, and it is easier to actively enter the internal structure of pulverized coal, indicating that environmental humidity is an important factor affecting the amount and speed of water adsorbed by pulverized coal. At last, the water adsorption of pulverized coal with different metamorphic degree is compared. Because the surface electrostatic potential and active functional groups of low rank coal are more than those of high rank coal, the water absorption performance of low rank coal is stronger than that of high rank coal. When the ambient humidity is 45%, the ambient vapor pressure is not different from the capillary pressure of three kinds of pulverized coal, so the adsorption capacity is small and there is little difference. At 70% environmental humidity, the law is more obvious.

Key words: pulverized coal; water absorption; hydrogen bond; environmental humidity

0 引言

煤是大分子结构,孔隙结构发达。其吸(脱)附特性很大程度上取决于自身孔隙结构^[1],表面活性化学键不稳定且活性较强,易发生反应。因此煤储存过程中,为了维持自身的相对稳定性,会吸附包括水在内的其他物质来降低自身表面能^[2]。煤粉作为煤化工原料和锅炉燃料,具有燃烧充分,热效率高,较传统燃煤锅炉清洁环保等特点^[3]。煤粉锅炉多见于大型火电站锅炉,随着煤粉锅炉小型化技术的进步,也逐渐应用于工业生产及市政热力等方面^[4]。中小型煤粉锅炉相比电站锅炉,炉膛空间小,燃烧组织难度大,对燃料品质要求较高,一般选用热值较高的动力煤。煤粉含水率要求严格,过高时影响设备稳定运行,对安全生产造成重大隐患。工业煤粉锅炉用户体量小,分布比较分散,考虑到经济效益,建设锅炉房时不同时配套煤粉站,多从区域性制粉站直接采购,密闭罐车和吨袋运输是较常见的方式^[5]。运输时煤粉易受潮,产生润湿热,温度升高极易导致自燃^[6]。因此研究煤粉对水的吸附特性,对于保障中小型工业煤粉锅炉的生产安全具有重要意义。

近年来,部分学者对煤吸附水进行研究,李祥春

等^[2]对煤吸附水的微观机理进行研究,得出煤吸附水为多层吸附的结论;张锦萍等^[7]研究了提质煤的复吸水特性,得出降低—OH和C=O的相对含量,可显著降低提质煤的复吸水率;金智新等^[8]建立了煤的大分子结构模型,在分子尺度下分析了煤对水的吸附行为,发现水的吸附量和等量吸附热与温度负相关,与压力正相关。前人对煤吸附水的研究主要是基于煤层气开采、煤田注水等方面,针对燃料煤粉吸水的研究较少,本文主要通过研究不同环境湿度下对煤粉吸附水的影响,以期对煤粉安全储存和保障燃料煤粉质量提出实用建议。

1 试验

1.1 吸附相关理论

分子间的相互作用力为范德华力,范德华力的大小与分子大小有关,煤是大分子结构,孔隙结构丰富,表面不均匀,含有多种含氧官能团,对水分子具有较强的吸引力,能够吸附一定量的水分子。煤吸附水属于多层吸附,常选用BET模型或改进的BET模型,该模型将langmuir模型的应用范围由单层吸附扩展到多层吸附,计算公式为

$$m = \frac{m_0 Kx}{(1-x)(1-x+Kx)} \quad (1)$$

式中, m 为相对蒸气压为 x 时的吸附量; m_0 为单层吸附容量; K 为与吸附能有关的常数。

1.2 试验样品制备及流程

自购3种煤样A、B、C,原煤煤阶 $A>B>C$,磨制成煤粉,粒度达到通过0.074 mm筛90%以上,将3种煤粉按照GB/T 211—2017《煤中全水分的测定方法》规定烘干其外水分待用。将收到基煤粉定为I组,烘干外水后的煤粉定为II组。

工业煤粉锅炉燃用煤粉含水率要求一般低于5%,故试验选取的煤粉含水率均控制在5%以内,测定的3种煤粉原始样品外水含水率分别为:煤粉A 2.13%,煤粉B 3.86%,煤粉C 4.86%。

选定一湿度水平,将少量煤粉样品均匀平摊至干燥灰皿上,取一恒温恒湿的密闭空间,将灰皿置于该环境湿度下进行均匀增湿,每隔30 min记录一次质量变化数据,记录数据时将灰皿内外壁面上所附着水蒸气擦干后称重,直至吸附饱和和试验结束,吸附饱和标准为:连续3次记录质量时质量均不变或极为接近。

为了接近煤粉锅炉的实际应用环境,本次试验参考以往用户条件,共选择2个湿度水平,分别为45%和70%,试验环境温度均为22℃。

2 试验结果与分析

2.1 环境湿度对煤粉吸水特性的影响

2.1.1 45% 环境湿度

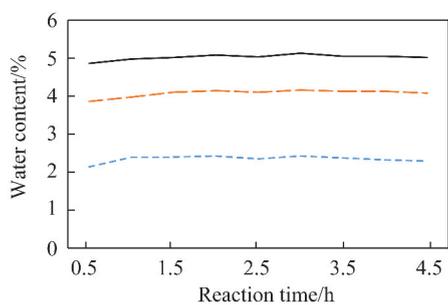
环境湿度为45%时2组煤粉的吸附水量始末数据见表1。

表1 45%湿度时试验数据
Table 1 Test data of 45% humidity

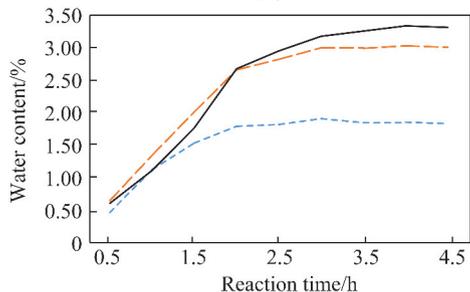
项目	初始质量/g	最终质量/g	最终吸水量/g	最终含水率/%
I组A	1.157 6	1.159 8	0.002 2	2.32
II组A	1.392 4	1.418 4	0.026 0	1.83
I组B	1.189 5	1.192 8	0.003 3	4.12
II组B	1.230 7	1.268 8	0.038 1	3.00
I组C	1.170 6	1.172 9	0.002 3	5.05
II组C	1.172 2	1.212 3	0.040 1	3.31

环境湿度为45%时2组煤粉的含水率变化如图1所示。

由图1可知,I组的吸附水量和吸附速率均低于II组,I组中3种煤样的含水率变化相比II组不明显,曲线最高点相对于最低点只有0.3%的差距,但整个试验过程中,3种煤样均呈现了同样趋势:开



(a) I组



(b) II组

--- Sample A - - - Sample B — Sample C

图1 45%湿度下煤粉含水率随时间变化

Fig. 1 Trend of moisture content of pulverized coal with time under 45% humidity

始阶段含水率持续增加,吸附进行一定阶段时,出现下降拐点后再小幅上升,之后含水率在拐点附近上下小幅波动,直至基本稳定。II组3种干燥煤样含水率一直上升直至稳定。

煤对于水分的吸附作用力包括分子间力和氢键,常见的分子间力有取向力、色散力和诱导力,力的影响范围均较小,常为一个或几个分子直径,称为短程作用力。胶体粒子或微颗粒之间相隔一定距离时,相互间也要产生一种固有引力,这种力的作用范围比范德华力大得多,一般称为长程作用力。煤表面和水分子之间的作用力既有短程相互作用力,又有长程相互作用^[9-11]。

短程作用力中的氢键属于一种不稳定的化学键,强度远低于正常化学键,易被水分子动能破坏、断裂,具有饱和性和方向性。故煤表面氢键对于第1层水的吸附产生较大影响,对其他层的水吸附影响较小;由于其他短程作用力的叠加,煤表面还会对第一层水外的水分子产生吸附,该吸附则受长程作用力影响较大^[8,12]。故煤对于水的吸附并非单层吸附,而是多层吸附。

分析第I组煤粉样品含水率曲线,曲线变化幅度较小的原因是:收到基煤粉含水率较高,而外界环境湿度又较低,环境蒸气压相比煤粉内部孔隙和毛细管内压相差不大,故而绝对吸水率相比干燥后煤样低得多;而出现曲线拐点的原因是:吸附过程中氢

键断裂,导致第一层水的吸附产生了解吸现象,含水率下降,而在氢键断裂后,长程作用力对水吸附的影响占主要地位,样品含水率继续上升直至稳定。

而第 II 组煤粉为烘干外水后的干燥煤粉,II 组煤粉曲线没有出现拐点,这是由于 II 组煤粉初始含水量低,对于水的主要吸附作用力仍为短程作用力,即氢键吸附,此时水分子动能较低,尚不足以破坏氢键,故未出现解吸现象。

2.1.2 70% 环境湿度

环境湿度为 70% 时 2 组煤粉的吸附水量始末数据见表 2。

表 2 70% 湿度时试验数据
Table 2 Test data of 70% humidity

项目	初始质量/g	最终质量/g	最终吸水量/g	最终含水率/%
I 组 A	1.132 8	1.187 2	0.054 0	6.70
II 组 A	1.136 7	1.213 4	0.076 7	6.32
I 组 B	1.142 2	1.211 3	0.069 1	9.35
II 组 B	1.146 1	1.254 2	0.108 1	8.62
I 组 C	1.134 7	1.212 8	0.078 1	10.98
II 组 C	1.124 6	1.245 2	0.120 6	9.69

环境湿度为 70% 时 2 组煤粉的含水率变化如图 2 所示。

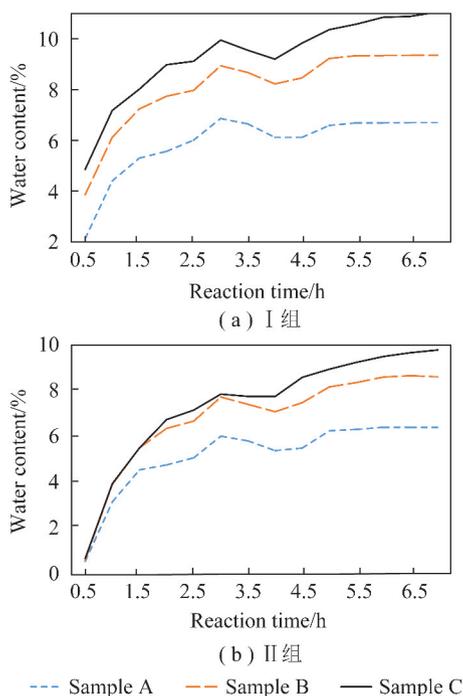


图 2 70% 湿度下煤粉含水率随时间变化

Fig. 2 Trend of moisture content of pulverized coal with time under 70% humidity

由图 1、2 可知,70% 环境湿度时,I 组变化趋势

与 45% 湿度时基本相同,曲线也在中间阶段出现拐点,但含水率上升段的斜率远大于 45% 湿度时;II 组煤粉与 45% 湿度时变化趋势不同,出现了拐点。在此湿度下,收到基煤粉的吸附水量和吸附速率均低于干燥基,但吸附平衡时最终含水率收到基高于干燥基,这主要是由于煤样干燥过程中,对煤样进行了一定程度提质改性,孔隙结构会有少量坍塌破坏,导致干燥后煤样的吸附最终含水率低于收到基。

2.1.3 2 组环境湿度下数据对比

2 种环境湿度时出现拐点时的含水率见表 3。

表 3 试验拐点数据

Table 3 Statistical data of the inflection point

项目	45% 环境湿度		70% 环境湿度	
	拐点时质量/g	拐点含水率/%	拐点时质量/g	拐点含水率/%
I 组 A	1.161	2.42	1.189 3	6.86
II 组 A	—	—	1.209 6	6.03
I 组 B	1.193	4.14	1.205 9	8.94
II 组 B	—	—	1.242 2	7.74
I 组 C	1.173	5.08	1.198 9	9.95
II 组 C	—	—	1.220 6	7.86

由表 3 可知,45% 湿度出现拐点时含水率相比 70% 湿度低得多,这主要是由于这 2 个拐点产生的原因不同,45% 时拐点产生是由于氢键断裂导致对水产生解吸影响,而 70% 时拐点产生则是由于煤粉吸附水后,表面羟基与水相互作用,产生润湿热,促进了煤氧复合作用,产生热量,内能发生变化^[13-14],出现了一定的水蒸发量,在样品达到拐点含水率时,样品水分蒸发后的逸出量超过吸附量^[15],样品质量有所降低,而后水分蒸发后温度下降,逸出量下降,质量再次上升直至达到吸附量饱和。

2 种湿度条件下,I 组收到基无论是出现拐点还是达到饱和时的含水率均高于 II 组,在吸附水量达到饱和后,II 组煤粉含水率仍低于 I 组煤粉,这是由于干燥煤样时,发生了一定程度的提质改性,提质改性过程中,温度升高,煤粉中亲水的羧基及羟基等含氧官能团分解,数量减少,同时孔隙结构会有少量坍塌破坏,煤的疏水性增加,导致干燥基吸附平衡时含水率低于收到基^[7,16-17]。70% 湿度时没有出现氢键断裂拐点的原因主要是:由于第 2 次设定环境湿度较大,在初始阶段煤粉含水率增速较快,而数据记录周期较长,在 2 次记录周期内有可能出现相应拐点但未能记录,且该拐点波动量相对于第 2 次含水率增加量比较而言也较小,曲线上体现不明显。

对比2种环境湿度下,70%湿度比45%湿度下收到基出现拐点时的含水率高4%~5%,同种样品达到饱和时的含水率相比45%湿度时高出4.2%~4.9%,吸附水量更大,70%湿度时的2组煤粉达到最终吸附水饱和的时间比45%湿度多约2.5 h。70%湿度下的I组煤粉初始吸水率斜率远大于45%湿度时,说明在该湿度环境下,煤粉吸水速率更快。其余条件如粒度、试验样品量、样品初始含水率等均基本相同,主要原因是由于湿度大时水蒸气分压力大,水蒸气更易被煤粉吸附,水蒸气更易主动进入煤粉内部结构中,且对同种煤粉而言,环境湿度越大,达到吸附平衡时的含水率也越高,说明环境湿度是影响煤粉吸附水量和速度的一个重要因素。

2.2 煤阶变化对煤粉吸水特性的影响

将3种煤粉的吸附水量进行比较(仅比较收到基煤粉),见表4。

表4 煤粉吸附水率比较

Table 4 Comparison of the water sorption rate of coal sample

项目	45%湿度吸附水率/%	70%湿度吸附水率/%
I组A	0.19	4.57
I组B	0.26	5.49
I组C	0.19	6.12

由表4可知,其他条件均相同时,45%湿度下,3种煤粉的吸水率均较低,且相差不大,主要是由于环境蒸气压与毛细管压力相差不大。而70%湿度时,煤阶越高的煤粉,吸水率越低。由于随着原煤煤阶的降低,表面静电势更多,具备较大静电势的分子表面积和活性官能团也越多,低阶煤的吸水特性优于高阶煤^[18]。

本次试验选取的样品均属烟煤或次烟煤,煤阶程度差别不大,在较低湿度条件下,吸水率较接近,而在较高湿度条件下,上述规律表现较明显。

3 结论

1)煤对水的吸附不是单层吸附,而是多层吸附,分为短程和长程作用力,第1层吸附时主要作用力为氢键,第2层之外主要作用力为长程作用力。

2)70%湿度出现拐点时含水率比45%湿度时高4%~5%,是由于产生拐点的原因不同,前者是由于吸附水产生润湿热导致,后者是由于在吸附过程中氢键断裂导致。

3)在2种环境湿度时,收到基煤粉的吸附水量和吸附速率均低于干燥基,主要是由于环境中水蒸

气压力与收到基煤粉的毛细管压力差值小于干燥基煤粉;吸附平衡时的终了含水率收到基高于干燥基,这主要是因为干燥煤样的过程中,孔隙结构坍塌破坏。

4)低阶煤表面静电势和活性官能团多于高阶煤,故而吸水性能强于高阶煤,在45%环境湿度时,环境蒸气压与3种煤粉毛细管压力相差不大,吸附量较小且相差不大;在70%环境湿度时,该规律表现较为明显。

参考文献(References):

- [1] 张占涛,王黎,张睿,等. 煤的孔隙结构与反应性关系的研究进展[J]. 煤炭转化,2005,28(4):62-68,85.
ZHANG Zhantao, WANG Li, ZHANG Rui, et al. Research development correlation between pore structure and reactivity of coal[J]. Coal Conversion, 2005, 28(4): 62-68, 85.
- [2] 李祥春,聂百胜. 煤吸附水特性的研究[J]. 太原理工大学学报,2006,37(4):417-419.
LI Xiangchun, NIE Baisheng. Study of characteristics of coal adsorbing water[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37(4): 417-419.
- [3] 宋春燕,张鑫,李婷. 高效煤粉锅炉替换层燃锅炉技术改造与能效分析[J]. 洁净煤技术,2015,21(3):98-102,106.
SONG Chunyan, ZHANG Xin, LI Ting. Technical and energy analysis of replacement of layer combustion boiler with efficient pulverized coal fired boiler[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(3): 98-102, 106.
- [4] 尚庆雨. 我国工业煤粉锅炉技术现状及发展趋势[J]. 煤炭科学技术,2016,44(1):201-206.
SHANG Qingyu. Current status and development trend of pulverized coal industrial boilers in China[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1): 201-206.
- [5] 于清航. 煤粉加工配送中心关键技术及经济性分析[J]. 洁净煤技术,2015,21(4):80-84.
YU Qinghang. Key technical equipment and economic analysis of pulverized coal preparation and distribution system[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(4): 80-84.
- [6] 梁晓瑜,王德明. 水分对煤炭自燃的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报,2003,22(4):472-474.
LIANG Xiaoyu, WANG Deming. Effects of moisture on spontaneous combustion of coal[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003, 22(4): 472-474.
- [7] 张锦萍,张成,丘永琪,等. 低温热提质褐煤的复吸水特性研究[J]. 工程热物理学报,2015,36(12):2760-2765.
ZHANG Jinping, ZHANG Cheng, QIU Yongqi, et al. Study on moisture re-adsorption and combustion characteristics of a lignite after mild thermal upgrading[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(12): 2760-2765.
- [8] 金智新,武司苑,邓存宝,等. 基于蒙特卡洛方法的煤吸附水机理[J]. 煤炭学报,2017,42(11):2968-2974.
JIN Zhixin, WU Siyuan, DENG Cunbao, et al. H₂O adsorp-

- tion mechanism in coal basing on Monte Carlo method[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(11): 2968-2974.
- [9] PRAUSNITZ J M, LICHENTHALER R N, AZEVEDO E G. 流体相平衡的分子热力学[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 1990.
- [10] 程兰征, 陈鸿贤, 韩宝华. 简明界面化学[M]. 大连: 大连工学院出版社, 1988.
- [11] 亚当森 A W. 表面物理化学(上册)[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [12] 聂百胜, 何学秋, 王恩元, 等. 煤吸附水的微观机理[J]. 中国矿业大学学报, 2004, 33(4): 379-383.
NIE Baisheng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Micro-mechanism of coal adsorbing water [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2004, 33(4): 379-383.
- [13] 徐精彩, 许满贵, 文虎, 等. 煤氧复合速率变化规律研究[J]. 煤炭转化, 2000, 23(3): 63-66.
XU Jingcai, XU Mangui, WEN Hu, et al. Study on the rate of coal-oxygen reaction [J]. Coal Conversion, 2000, 23(3): 63-66.
- [14] 周沛然. 典型动力煤煤粉自燃倾向性研究[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2010.
- [15] 张玉涛, 王都霞, 仲晓星. 水分在煤低温氧化过程中的影响研究[J]. 煤矿安全, 2007(11): 1-4.
ZHANG Yutao, WANG Duxia, ZHONG Xiaoxing. Study on influence of water on low-temperature oxidation of coal [J]. Safety in Coal Mines, 2007(11): 1-4.
- [16] 郑艳. 提质褐煤表面官能团及复吸水特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [17] 孙成功, 吴家珊, 李保庆. 低温热改质煤表面性质变化及其对浆体流变特性的影响[J]. 燃料化学学报, 1996, 24(2): 174-180.
SUN Chenggong, WU Jiashan, LI Baoqing. Surface properties of thermally upgraded low-rank coals and their effect on the rheological behavior of coal water slurry [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1996, 24(2): 174-180.
- [18] 高正阳, 杨维结. 不同煤阶煤分子表面吸附水分子的机理[J]. 煤炭学报, 2017, 42(3): 753-759.
GAO Zhengyang, YANG Weijie. Adsorption mechanism of water molecule on different rank coals molecular surface [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(3): 753-759.