

DOI: 10.19666/j.rlfed.202410215

干燥对褐煤破碎自燃爆炸等特性的影响研究

郭前鑫¹, 杜佳军¹, 罗晟², 曹忠友¹, 魏明波², 刘润民³, 白杨²

(1. 神华神东电力有限责任公司, 陕西 西安 710076;

2. 国能宝清煤电有限公司, 黑龙江 双鸭山 155600;

3. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 为研究不同干燥条件对宝清褐煤干燥后破碎率和粉化率的影响, 以及不同干燥水分对煤样自燃和爆炸特性的影响, 开展了原煤烘干试验、不同水分煤样的自燃特性及爆炸特性试验。结果表明: 烘干炉炉温 300 °C 以上及较高的加热终端温度, 可以获得较高的煤样脱水率; 粒径较小的煤粒易获得较高的脱水率及较低的破碎率; 粒径 6~13 mm 煤粒的粉化率在不同干燥条件下都是最大的; 宝清原煤为易自燃煤种, 随着干燥后煤样水分的降低, 原煤的自燃倾向减弱, 变为中等自燃倾向煤种; 试验煤样随着煤样水分的升高, 爆炸倾向减弱; 随着煤粉细度 R90 的增大, 煤粉的爆炸倾向降低。因此在宝清褐煤干燥技术的工程应用过程中, 应减少粒径 6~13 mm 煤粒的占比, 以降低干燥过程中的粉化率; 应适当降低煤粉输送过程中的风温, 或适当增大煤粉细度, 以降低爆炸倾向。

[关键词] 褐煤; 干燥; 破碎粉化; 自燃倾向; 爆炸倾向

[引用本文格式] 郭前鑫, 杜佳军, 罗晟, 等. 干燥对褐煤破碎自燃爆炸等特性的影响研究[J]. 热力发电, 2025, 54(4): 172-178. GUO Qianxin, DU Jiajun, LUO Sheng, et al. Effects of drying on crushing, spontaneous combustion, and explosion characteristics of lignite[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(4): 172-178.

Effects of drying on crushing, spontaneous combustion, and explosion characteristics of lignite

GUO Qianxin¹, DU Jiajun¹, LUO Sheng², CAO Zhongyou¹, WEI Mingbo²,
LIU Runmin³, BAI Yang²

(1. Shenhua Shendong Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710076, China;

2. Guoneng Baoqing Coal and Electric Chemical Co., Ltd., Shuangyashan 155600, China;

3. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to study the effects of different drying conditions on crushing rate and pulverization rate of Baoqing lignite after drying, as well as the effects of different drying moistures on spontaneous combustion and explosion characteristics of the coal samples, several experiments were conducted, like the drying of raw coal, and the spontaneous combustion and explosion characteristics of coal samples with different moisture contents. The results show that, a drying furnace temperature above 300 °C and a higher heating terminal temperature can achieve a higher coal sample dehydration rate. Coal particles with smaller particle sizes tend to achieve higher dehydration rates and lower crushing rates. The pulverization rate of 6~13 mm coal particles is the highest under different drying conditions. Baoqing raw coal is a type of coal that is prone to spontaneous combustion. As the moisture content of the dried coal sample decreases, the spontaneous combustion tendency of the raw coal weakens and becomes a type of coal with moderate spontaneous combustion tendency. As the moisture content of the coal sample increases, the explosion tendency of the test coal sample decreases. As the fineness of coal powder R90 increases, the explosion tendency of coal powder decreases. Therefore, in the engineering application process of Baoqing lignite drying technology, the proportion of 6~13 mm coal particles should be reduced to lower the pulverization rate during the drying process. The air temperature during coal powder transportation

收稿日期: 2024-10-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFB4005704)

Supported by: National Key Research and Development Program (2023YFB4005704)

第一作者简介: 郭前鑫 (1970), 男, 高级工程师, 从事电力技术开发和管理工作, 18706830601@163.com。

should be appropriately reduced, or the fineness of coal powder should be appropriately increased to reduce the tendency for explosion.

Key words: lignite; dry; crushing and pulverization; spontaneous combustion tendency; explosive tendency

我国褐煤资源丰富^[1]。但由于褐煤水分高、热值低等原因,褐煤锅炉效率低、运行成本高、可靠性差。褐煤干燥提质技术通过对入炉煤进行预干燥,降低入炉煤水分、提高热值。有助于解决褐煤锅炉机组存在的燃烧、结渣等一系列问题,提高锅炉效率^[2-6]。另外褐煤干燥提质后,还可以降低外运成本,提高经济效益。

褐煤干燥提质技术在德国、美国、澳大利亚等褐煤丰富的国家有多年的理论研究和应用实践^[7]。我国的褐煤干燥系统、干燥褐煤高效发电系统设计和工程化应用尚处于起步阶段,需开展更深层次的研究^[8-20]。近年来,张博等^[8]总结了高含水低品质煤干燥脱水提质技术进展。秦谊等^[11]对褐煤干燥利用中的煤干燥特性进行了研究。Liu 等人^[15]对伊敏褐煤在不同温度下的干燥特性及过程动力学进行了分析。Song 等人^[16]对褐煤粗颗粒在固定床中的干燥动力学进行了研究。董琨等^[20]研究了低温烘焙提质对褐煤着火燃烧特性的影响。

褐煤干燥后,原煤粒度、自燃特性、爆炸趋势等都较干燥前有所不同^[21-25]。本文对宝清褐煤干燥前后的破碎、自燃以及爆炸特性进行试验对比,结论可为现役设备改烧宝清干燥褐煤可行性评估提供依据。

1 试验条件

1.1 试验系统

1.1.1 烘干试验装置

为探究褐煤干燥后破碎及粉化的影响因素,制作了简易干燥装置,具体如图1所示。

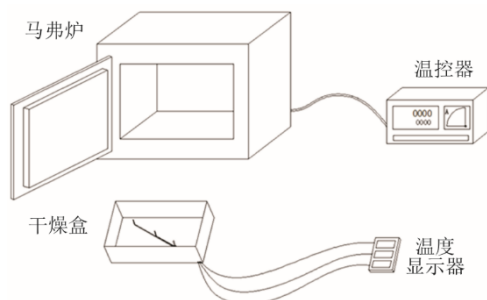


图1 褐煤干燥试验系统

Fig.1 Schematic diagram of the lignite drying test system

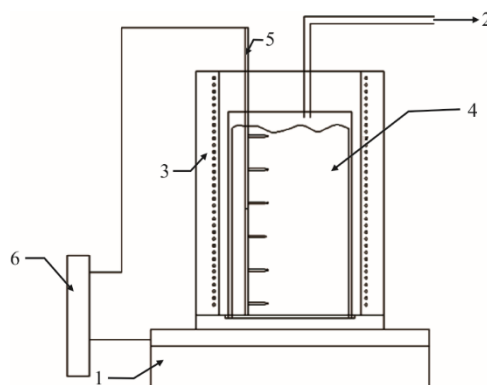
干燥盒对角线上布置3只热电偶监控煤层

温度。将煤样筛分后,取1~3 mm、3~6 mm、6~13 mm、13~25 mm 4个粒度等级。每次取一个粒度等级的等量煤样,放置于干燥盒内,在马弗炉中等温加热到不同干燥终温,取出并筛分,得到破碎率和粉化率。

试验设置不同的加热炉温度(200、300、400 °C),分析升温速率对破碎率和粉化率的影响,分别设置煤层干燥终端温度(终温)为70、80、90、100、110 °C,研究干燥终温对破碎率和粉化率的影响。破碎率为干燥后破碎产物(粒径小于原煤最小粒径)占总产物的百分比;粉化率为干燥后粒径小于1 mm的产物占总产物的百分比。

1.1.2 自燃试验装置

图2为原煤自燃试验装置示意。该装置通过模拟原煤堆积状态下,煤堆温度逐渐升高,达到临界点时,原煤的耗氧量迅速上升,确定原煤的自燃温度。



1—电子秤; 2—去氧表; 3—试样; 4—加热丝;
5—热电偶; 6—数据采集板。

图2 电加热式柱形原煤自燃装置示意

Fig.2 Schematic diagram of the electric heating cylindrical coal spontaneous combustion device

定义自燃倾向指数:

$$\delta = (\varphi_{O_2(t_1)} - \varphi_{O_2(t_2)}) / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中: $\varphi_{O_2(t_1)}$ 为氧量降低速率超过0.1%/min,并持续降低时的氧量,%; $\varphi_{O_2(t_2)}$ 为最终稳定氧量,%; t_1 为氧量开始迅速降低时刻; t_2 为氧量最终稳定时刻。

自燃倾向判别等级见表1。

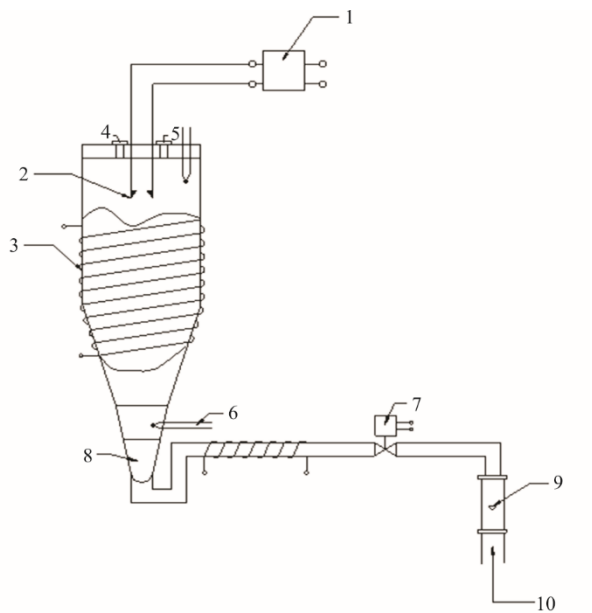
表 1 自燃倾向判别等级

Tab.1 Classification of spontaneous combustion tendency

自燃倾向判别等级	耗氧速率 $\delta/(\% \cdot \text{min}^{-1})$
难	<0.5
中	0.5~1.5
易	>1.5

1.1.3 爆炸试验装置

图 3 为煤粉/空气混合物爆炸试验台示意。通过调节煤粉/空气混合物温度、质量浓度、氧体积分数、煤粉细度等，模拟不同制粉系统出口风粉混合物的状态。点火能量在 5~30 J 内可调，试验可测试温度、压力的瞬时变化，确定爆炸强度。



1—高压变频整流器；2—电极；3—加热圈；4—防暴孔；5—测压孔；
6—热电偶；7—电磁阀；8—煤粉；9—流量计；10—压缩空气。

图 3 煤粉/空气混合物爆炸试验台示意

Fig.3 Schematic diagram of the coal powder/air mixture explosion test bench

用一定体积和压力的压缩空气将一定质量的煤粉样品送入 20 L 的爆炸罐中，同时点火源放电打火。通过改变进入爆炸罐煤粉的质量，可以测出点燃爆炸的最低煤粉质量浓度，即煤粉爆炸下限质量浓度。

1.2 试验煤样及试验工况

试验煤样的原煤煤质检测数据见表 2。试验首先用马弗炉在不同炉温和加热终端温度条件下对原煤进行烘干，获得煤样不同烘干条件下的失水率、破碎率及粉化率。对 33%（原煤）、26%、20%、13% 4 种水分的煤样进行自燃和爆炸试验，获得水分、细度等因素对自燃和爆炸的影响规律。

表 2 煤样主要煤质参数

Tab.2 Main coal quality parameters

项目	数值
全水分 $w_t(M)/\%$	32.8
空气干燥基水分 $w_{ad}(M)/\%$	11.74
收到基灰分 $w_{ar}(A)/\%$	19.06
干燥基挥发分 $w_d(V)/\%$	41.22
收到基碳 $w_{ar}(C)/\%$	34.70
收到基氢 $w_{ar}(H)/\%$	2.76
收到基氮 $w_{ar}(N)/\%$	0.43
全硫 $w_{t,ar}(S)/\%$	0.28
收到基高位发热量 $Q_{gr,v,ar}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	13.98
收到基低位发热量 $Q_{net,v,ar}/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$	12.67

2 结果与讨论

2.1 失水率、破碎率、粉化率

2.1.1 失水率

图 4 为炉温 200 °C 时各种粒径煤粒的失水率。由图 4 可知：随着干燥终端温度的升高，各粒径煤粒的失水率逐渐增大；在较高的干燥终端温度下，粒径对失水率的影响显著，大颗粒由于比表面积小，失水率低。炉温 300、400 °C 时，由于加热强度增加，粒径对失水率的影响并不明显。

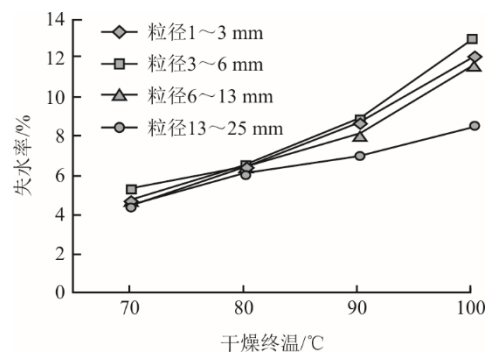


图 4 炉温 200 °C 时各种粒径煤粒的失水率

Fig.4 The water loss rate of coal particles with various sizes at furnace temperature of 200 °C

图 5 为粒径 6~13 mm、13~25 mm 的大粒径煤粒在不同炉温下的失水率。由图 5 可知：在较低的干燥终端温度下，失水率随炉温的变化不明显；在较高的干燥终温条件下，失水率随炉温的变化差异大；炉温 400 °C 相比炉温 300 °C，升温速度更快，加热到达干燥终端温度的时间更短，大颗粒内部的水分来不及蒸发，因此失水率反而低于炉温 300 °C 时的失水率。

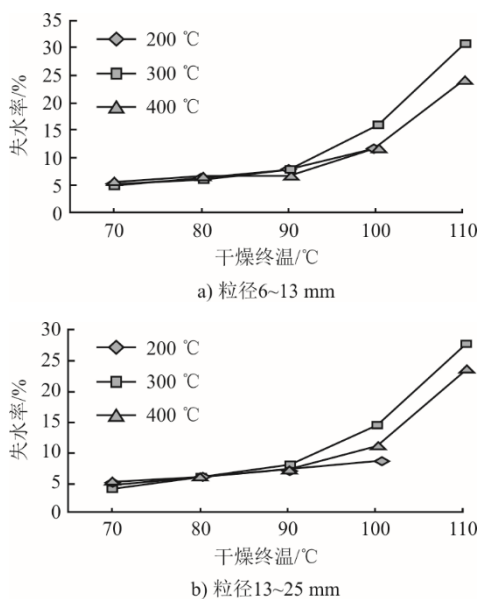


图5 大粒径煤粒在不同炉温下的失水率
Fig.5 The water loss rate of large coal particles at different furnace temperatures

2.1.2 破碎率

图6为炉温300、400 °C时不同粒径煤粒的破碎率。由图6可知：随着干燥终温的升高，破碎率逐渐增加；在较高的干燥终温下，破碎率随粒径的增大而显著增大。

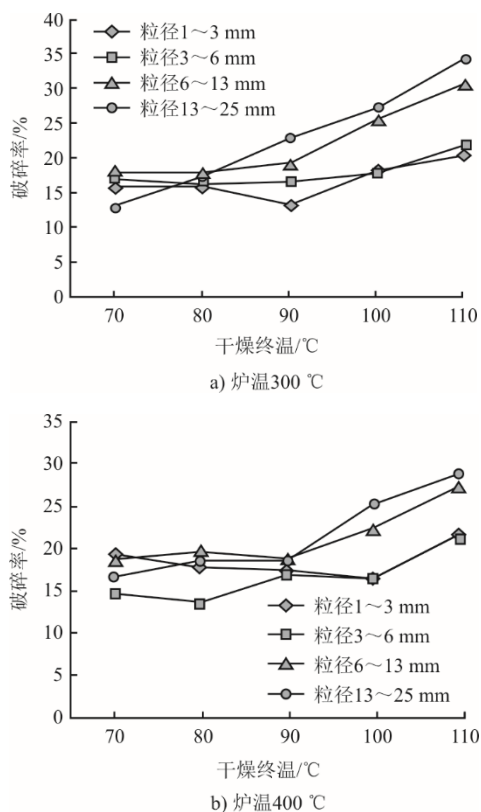


图6 不同粒径煤粒的破碎率
Fig.6 Crushing rates of coal particles with different sizes

2.1.3 粉化率

图7为炉温200、400 °C时不同粒径煤粒的粉化率。由图7可知，随着干燥终温的升高，粉化率逐渐增加。粒径对粉化率的影响除了与升温速率、加热终温等外在因素有关，还与颗粒本身的物理属性有关。较小粒径的煤颗粒，温度较易传导至颗粒核心，颗粒整体的温度均匀性好，热应力小，粉化率较小；随着颗粒粒径的增大，颗粒外层温度与颗粒核心的温度差也越来越大，颗粒的热应力及粉化率增大。但颗粒粒径过大时，颗粒核心区域存在受外界传热影响小的低温内核，继续增加粒径，低温内核的区域也逐渐增加。低温内核区域热应力及粉化率小，随着粒径的增加，颗粒的整体粉化率降低。对于宝清褐煤而言，粒径6~13 mm的煤粒在2种炉温下粉化率都是最大的。因此原煤烘干时，应减少6~13 mm煤粒的占比，以降低粉化率。

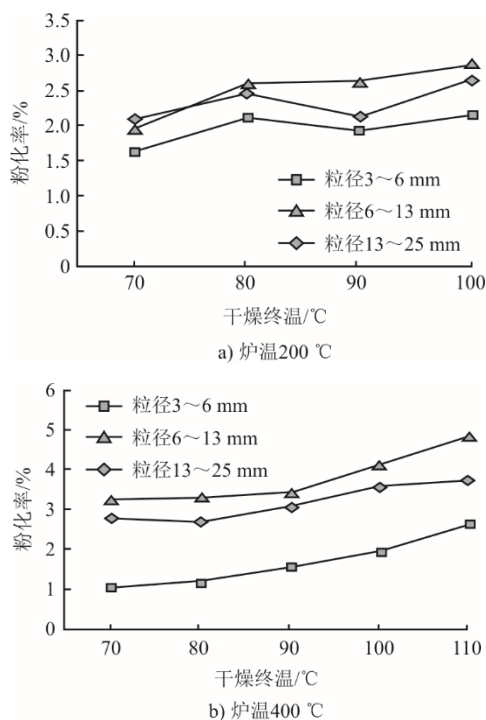


图7 不同粒径煤粒的粉化率
Fig.7 The pulverization rates of coal particles with different sizes

2.2 自燃

图8为4种不同水分试验煤样的自燃特性试验曲线。表3为根据图8计算得出的试验煤样的耗氧速率以及对自燃等级的判别。可见随着干燥后煤样水分的降低，原煤的自燃倾向减弱。原因是：煤中一定量水分促使煤中的各种反应进行，如硫分的酸化等，产生的热量又加快了氧化反应过程，因此

加剧了煤的自然燃。

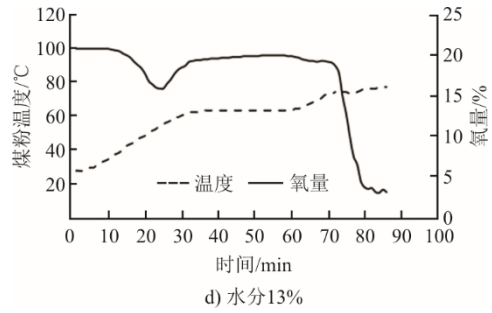
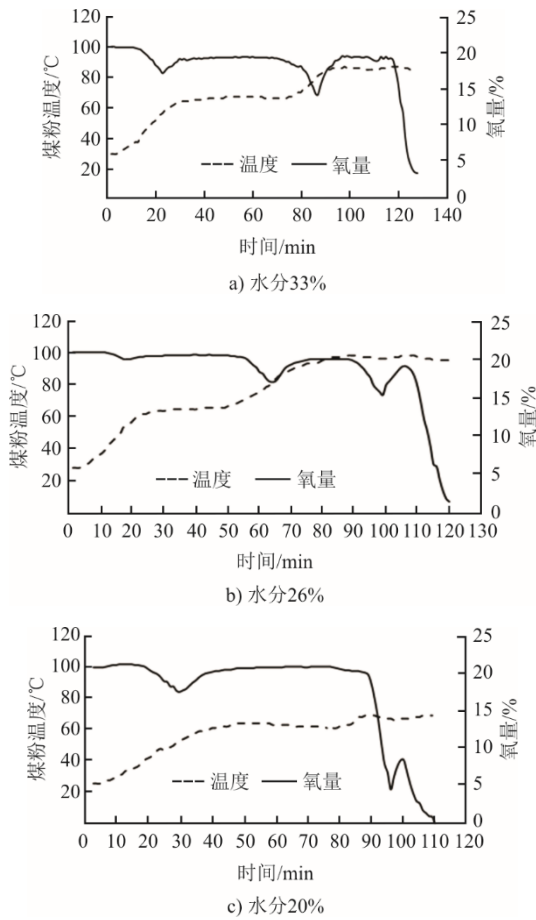


图 8 不同水分煤样的自然燃特性试验曲线
Fig.8 Characteristic parameter curves of spontaneous combustion test for coal samples

表 3 试验煤样自然燃试验结果汇总
Tab.3 Summary of spontaneous combustion test results

煤样	t_1	$\varphi_{O_2(t_1)}$	t_2	$\varphi_{O_2(t_2)}$	δ	自然倾向判别
水分 33%	116	19.2	124	4.5	1.84	易
水分 26%	106	19.0	119	1.6	1.34	中
水分 20%	87	19.8	104	2.1	1.04	中
水分 13%	71	19.2	79	4.5	1.06	中

2.3 爆炸

爆炸试验条件为：煤样为空干基状态，温度为 50、60、70、80 °C，储气罐压力为 180 kPa，点火能量 18 J，煤粉细度 $R_{90}=15\%、25\%、35\%$ 。表 4 列出了宝清褐煤煤样的爆炸试验结果。

表 4 试验煤样的爆炸试验结果汇总
Tab.4 Summary of explosion test results

煤样名称	煤粉及爆炸罐温度/°C	煤粉细度 $R_{90}\%$	煤粉质量/g	爆炸罐初始压力/kPa	储气罐压力/kPa	爆炸后压力/kPa	爆炸后温度/°C	煤粉爆炸下限热量浓度/(MJ·m ⁻³)	煤粉爆炸下限质量浓度/(kg·m ⁻³)
水分 13%	50	25	5	0	180	180	200	3.96	0.25
	60	25	4	0	180	50	133	3.17	0.20
	70	25	4	0	180	176	212	3.17	0.20
	80	25	3	0	180	115	202	2.38	0.15
水分 20%	50	25	5	0	180	50	150	3.64	0.25
	60	25	5	0	180	130	160	3.64	0.25
	60	15	5	0	180	180	223	3.64	0.25
	60	35	6	0	180	205	220	4.37	0.30
	70	25	4	0	180	27	131	2.91	0.20
	80	25	3	0	180	135	195	2.18	0.15
水分 26%	50	25	6	0	180	190	200	4.09	0.30
	60	25	6	0	180	190	200	4.09	0.30
	70	25	4	0	180	142	180	2.72	0.20
	80	25	3	0	180	94	160	2.04	0.15
水分 33%	50	25	6	0	180	180	220	3.80	0.30
	60	15	6	0	180	160	200	3.80	0.30
	60	25	5	0	180	60	160	3.17	0.25
	60	35	5	0	180	160	180	3.17	0.25
	70	25	4	0	180	150	170	2.53	0.20
	80	25	3	0	180	83	151	1.90	0.15

图9为试验煤样在 $R_{90}=25\%$ 时,不同温度下的煤粉爆炸下限质量浓度的比较。由图9可知,随着温度的升高,煤粉爆炸下限质量浓度降低,煤粉爆炸倾向增强。

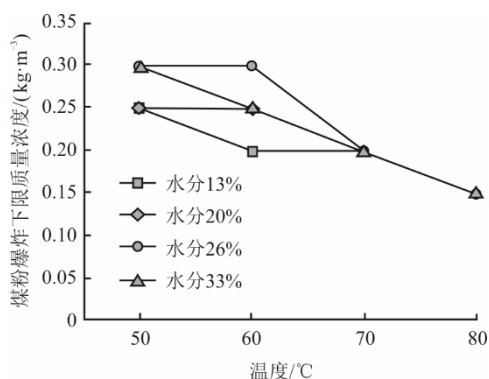


图9 煤粉爆炸下限质量浓度随煤粉温度的变化
Fig.9 The variations of lower limit mass concentration of coal powder explosion with coal powder temperature

图10为试验煤样在 $R_{90}=25\%$ 时,不同水分下的煤粉爆炸下限热量浓度的比较。由图10可知,随着煤样水分的升高,煤粉爆炸下限热量浓度升高,煤粉爆炸倾向减弱。

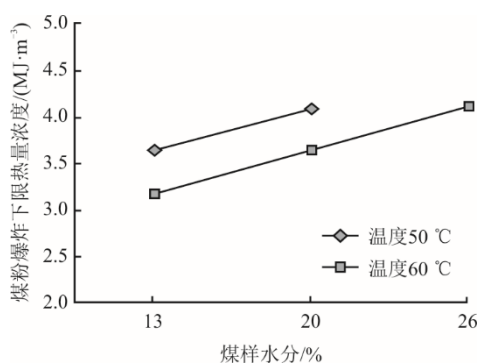


图10 煤粉爆炸下限热量浓度随煤样水分的变化
Fig.10 The variations of lower limit heat concentration of coal powder explosion with coal sample moisture content

随着煤粉细度 R_{90} 的增大,煤粉比表面积减小,煤粉的爆炸倾向降低。

3 结 论

炉温 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及较高的加热终端温度,可以获得较高的宝清褐煤脱水率;粒径较小的煤粒易获得较高的脱水率及较低的破碎率;原煤烘干时,应减少粒径 $6\sim 13\text{ mm}$ 煤粒的占比,以降低粉化率。

宝清褐煤原煤为易自燃煤种,干燥后煤样水分降低,原煤的自燃倾向减弱,变为中等自燃倾向煤种。这主要是因为煤中一定量的水分促使煤中发生

各种反应,产生的热量又加快了氧化反应过程,因此加剧了煤的自燃。

随着试验煤样水分的升高,其爆炸倾向减弱;随着风粉温度的升高,其爆炸倾向增强;随着煤粉细度 R_{90} 的增大,煤粉的爆炸倾向降低。宝清褐煤原煤干燥后,由于水分降低,爆炸倾向增加。可适当降低煤粉输送过程中的风温,或适当增大煤粉细度,以降低爆炸倾向。

【参 考 文 献】

- [1] 陈际显,尹凤交,吴静,等.褐煤不同干燥技术的优缺点分析[J].山东化工,2023,52(3):123-126.
CHEN Jixian, YIN Fengjiao, WU Jing, et al. Analysis of advantages and disadvantages of different drying technologies for lignite[J]. Shandong Chemical Industry, 2023, 52(3): 123-126.
- [2] GUO L, ZHAI M, WANG Z T, et al. Comparison of bituminous coal and lignite during combustion: combustion performance, coking and slagging characteristics[J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(3): 802-812.
- [3] WU X J, JI H S, DAI B Q, et al. Xinjiang lignite ash slagging and flow ability under the weak reducing environment at $1\ 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ —a new method to quantify slag flow velocity and its correlation with slag properties[J]. Fuel Processing Technology, 2018, 171: 173-182.
- [4] WU X J, ZHANG X, YAN K, et al. Ash deposition and slagging behavior of Chinese Xinjiang high-alkali coal in 3 MWth pilot-scale combustion test[J]. Fuel, 2016, 181: 1191-1202.
- [5] PANAGIOTIDIS I, VAFIADIS K, TOURLIDAKIS A, et al. Study of slagging and fouling mechanisms in a lignite-fired power plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 74: 156-164.
- [6] LIU X C, TSUYOSHI H, MORIYASU N, et al. Effects of hydrothermal treatment coupled with mechanical expression on combustion performance of Loy Yang lignite[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 126(3): 1925-1935.
- [7] 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.
- [8] 张博,姚少宇,孙宗盛,等.高含水低品质煤干燥脱水提质技术进展[J].洁净煤技术,2024,30(1):31-41.
ZHANG Bo, YAO Shaoyu, SUN Zongsheng, et al. Technological advances in drying for quality improvement of high-moisture, low-quality coal[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(1): 31-41.
- [9] SONG Z L, YAO L S, JING C M, et al. Drying behavior of lignite under microwave heating[J]. Drying Technology, 2017, 35(4): 433-443.
- [10] HE Q, CHEN J, MIAO Z, et al. Thermal fragmentation and pulverization properties of lignite in drying process and its mechanism[J]. Drying Technology, 2017, 36(12): 1404-1412.
- [11] 秦谊,张惠芬,夏美英,等.褐煤综合利用中原料煤干燥特性研究[J].化学工程,2015,43(11):60-65.
QIN Yi, ZHANG Huifen, XIA Meiyang, et al. Drying

- characteristics of raw coal in comprehensive utilization of brown coal[J]. *Chemical Engineering*, 2015, 43(11): 60-65.
- [12] 杨云龙, 刘晓, 景晓霞, 等. 干燥时间对褐煤孔结构变化及其复吸行为的影响[J]. *太原理工大学学报*, 2013, 44(4): 15-19.
YANG Yunlong, LIU Xiao, JING Xiaoxia, et al. Effect of drying time on the change of pore structure and re-adsorption behavior of lignite[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2013, 44(4): 15-19.
- [13] 张锦萍, 张成, 谭鹏, 等. 含氧官能团对提质褐煤复吸水特性的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(35): 6279-6285.
ZHANG Jinping, ZHANG Cheng, TAN Peng, et al. Influence of oxygen-containing groups on moisture re-adsorption characteristics of upgraded lignite[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(35): 6279-6285.
- [14] SONG Z L, YAO L S, JING C M, et al. Experimental study on the characteristics of ignition during microwave drying of lignite[J]. *Energy Technology*, 2016, 9(4): 1077-1083.
- [15] LIU R T, LIU M, HAN X Q, et al. Drying characteristics and kinetics analyses for Yimin lignite at various temperatures[J]. *Drying Technology*, 2021, 39(7): 912-924.
- [16] PUSAT S, AKKOYUNLU M T, ERDEM H H, et al. Drying kinetics of coarse lignite particles in a fixed bed[J]. *Fuel Processing Technology*, 2015, 130(1): 208-213.
- [17] XU Y, PEI Z, GAO M Q, et al. Thermal fragmentation and pulverization behavior of lignite during the vibration drying process and its grey relational analysis of multi-factors[J]. *Drying Technology*, 2023, 41(4): 549-560.
- [18] 赵锋锋. 锡林浩特褐煤干燥动力学及水分复吸特性的研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2014: 4-7.
ZHAO Fengfeng. Experimental study Xilinhot lignite drying kinetics and moisture re-adsorption characteristics [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2014: 4-7.
- [19] KHATAMI R, STIVERS C. Ignition characteristics of single coal particles from three different ranks in O₂/N₂ and O₂/CO₂ atmospheres[J]. *Combust Flame*, 2012, 159: 3554-3568.
- [20] 董琨, 胡中发, 周博斐, 等. 低温烘焙提质对褐煤着火燃烧特性的影响[J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(1): 148-153.
DONG Kun, HU Zhongfa, ZHOU Bofei, et al. Effect of low-temperature torrefaction and upgrading on the ignition and combustion characteristics of lignite[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(1): 148-153.
- [21] 张一昕. 贾文科, 郭旸, 等. 粒径对褐煤非薄层干燥及干燥褐煤自燃与复吸特性的影响[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(5): 2096-2105.
ZHANG Yixin, JIA Wenke, GUO Yang, et al. Effect of particle size on lignite drying and the spontaneous combustion and resorption characteristics of dried lignite under non-thin layer processes[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(5): 2096-2105.
- [22] 马有福, 袁兴旺, 王子睿, 等. 基于过热蒸汽干燥开式制粉燃褐煤[J]. *中国煤炭*, 2024, 50(6): 110-117.
MA Youfu, YUAN Xingwang, WANG Zirui, et al. An efficient lignite-fired power generation process based on a super-heated-steam-dried open pulverizing system[J]. *China Coal*, 2024, 50(6): 110-117.
- [23] YUAN Y, LI S Q, YAO Q. Experimental and numerical analyses on ignition and burnout characteristic of low-rank lignite and semi-char blends[J]. *Clean Coal Technology and Sustainable Development*, 2016, 31: 69-74.
- [24] ZHAO P F, ZHONG L P, ZHU R, et al. Drying characteristics and kinetics of Shengli lignite using different drying methods[J]. *Energy Conversion and Management*, 2016, 120: 330-337.
- [25] ZHOU Y F, GAO M Q, MIAO Z Y, et al. Physicochemical properties and combustion kinetics of dried lignite[J]. *Energy*, 2024, 289: 129928.

(责任编辑 邓玲惠)