

DOI: 10.19666/j.rlfed.202410211

高水分褐煤干燥前后燃烧性能试验研究

杜佳军¹, 郭前鑫¹, 曹忠友¹, 白杨², 赵勇纲¹, 向小凤³, 徐长亮²

(1. 神华神东电力有限责任公司, 陕西 西安 710032;

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] 利用着火炉及一维炉试验平台对宝清高水分褐煤及其不同水分干燥褐煤的着火、燃尽及结渣性能进行试验研究。结果表明: 宝清高水分褐煤的着火温度415℃, 极易着火; 相对于水分对着火温度的影响, 细度对着火温度的影响更加显著; 在低负荷下, 水及水蒸气在燃烧初期对焦炭的消耗速率影响大; 宝清高水分褐煤由于水分高, 燃烧初期反应剧烈, 飞灰可燃物质量分数迅速降低, 结渣趋势也更强, 但过高的水分不利于燃烧后期焦炭的燃尽; 随着煤粉细度 R_{90} 升高, 煤粉燃尽率下降。但总体说来, 宝清高水分褐煤及干燥煤的燃尽率均在99%以上, 属于极易燃尽; 氧量对燃尽率的影响效果不明显。

[关键词] 高水分褐煤; 干燥; 着火; 燃尽; 结渣

[引用本文格式] 杜佳军, 郭前鑫, 曹忠友, 等. 高水分褐煤干燥前后燃烧性能试验研究[J]. 热力发电, 2025, 54(7): 153-159.
DU Jiajun, GUO Qianxin, CAO Zhongyou, et al. Experimental study on combustion performance of high moisture lignite before and after drying[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(7): 153-159.

Experimental study on combustion performance of high moisture lignite before and after drying

DU Jiajun¹, GUO Qianxin¹, CAO Zhongyou¹, BAI Yang², ZHAO Yonggang¹,
XIANG Xiaofeng³, XU Changliang²

(1. Shenhua Shendong Electric Power Co., Ltd. Technology Research Institute, Xi'an 710032, 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: The ignition, burnout, and slagging performance of Baoqing lignite raw coal and its dried lignite with different moisture contents was experimentally investigated using an ignition furnace and one-dimensional furnace test platform. The results show that, the ignition temperature of Baoqing raw coal is 415 °C, which is highly prone to ignition. Compared to the influence of moisture on ignition temperature, the effect of fineness on ignition temperature is more significant. At low loads, the water and steam react with the water gas of coke in the early stages of combustion, which has a significant impact on the consumption rate of coke. Due to its high moisture content, raw coal undergoes intense reactions during the initial combustion stage, resulting in a rapid decrease in mass fraction of combustible materials in fly ash and a stronger tendency towards slagging. However, excessive moisture is not conducive to the complete combustion of coal powder in the later stage of combustion. As the fineness of coal powder R_{90} increases, the burnout rate of coal powder decreases. But overall, the burnout rate of both Baoqing raw coal and dry coal is above 99%, indicating the Baoqing coal is highly flammable, and the effect of oxygen on burnout rate is not significant.

Key words: high moisture lignite; dry; ignition; burnt out; slagging

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^[2-4]。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

修回日期: 2024-12-15

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: 杜佳军(1983), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电站锅炉燃烧技术, 11170275@ceic.com。

烧、结渣等一系列问题,提高锅炉效率^[5-6]。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。近年来,张博等^[8-10]总结了高含水低品质煤干燥脱水提质技术进展。秦谊等^[11-14]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。Pusat 等人^[16-19]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^[20-23]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,由于水分降低、热值升高,其反应活性、燃尽效果、结渣趋势等都较干燥前有所不同^[24-25]。本文对宝清褐煤干燥前后的着火、燃尽及结渣特性进行试验对比,结论为现役设备改烧干燥褐煤可行性评估提供依据,对推动褐煤干燥技术的工程推广有积极作用。

1 试验条件

1.1 试验系统

着火炉实物如图 1 所示。着火炉工作原理为:用电热丝将碳化硅炉壁以规定的升温速率(5~8 °C/min),缓慢均匀加热;通过圆管形一次风喷嘴以 16.7 MJ/h 的入炉热量向下喷入煤粉/空气混合物,混合物通过炉膛时,吸收炉壁的辐射热,并与滞留热空气对流换热升温;随着炉壁温度升高,射流混合物的温度也逐步升高,射流混合物一旦达到着火温度时会发生爆燃,记录爆燃时的炉壁温度,即为着火温度。



图 1 着火炉实物

Fig.1 Physical picture of the ignition furnace

一维火焰炉为电加热积木式结构,炉体立置,烟道水平布置,整体呈“L”型,炉体由锥体炉顶

和 6 级可分别控制壁温的电加热炉组成,如图 2 所示。每级有 6 个测孔,可以根据试验要求沿火焰流程测定火焰温度,并抽取烟气及焦碳试样。对每一种煤均进行 2 个基本工况的试验,获得评价试验煤种的数据。2 个工况的给煤量以入炉热量控制,分别为 23.03、46.06 MJ/h。

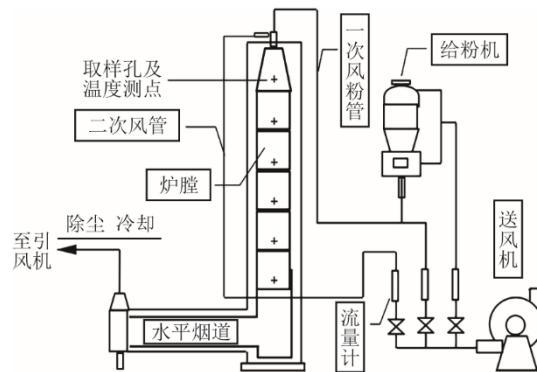


图 2 煤粉燃烧一维火焰炉试验台

Fig.2 One dimensional flame furnace test bench for coal powder combustion

1.2 试验煤样及工况

试验煤样的原煤煤质检测数据见表 1。

表 1 煤样主要煤质参数

Tab.1 Main coal quality parameters of coal samples

项目	宝清电厂煤场堆煤
全水分 $w_t(M)/\%$	32.80
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 $Q_{gr,v,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	13.98
收到基低位发热量 $Q_{net,v,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	12.67

试验过程中,首先用马弗炉对原煤进行烘干,获得 33%(原煤化验结果 32.8% \approx 33%)、26%、20%、13% 4 种水分的煤样。然后测试原煤及干燥煤样在不同水分、煤粉细度、氧量下的着火温度、燃尽率及结渣情况,获得着火、燃尽及结渣随不同影响因素的变化规律。

2 结果与讨论

2.1 水分对燃烧性能的影响

2.1.1 着火温度

图 3 为煤粉细度 $R_{90}=25\%$ 、氧量 3.5% 条件下,

不同干燥程度的煤样煤粉气流着火温度 IT 随宝清原煤煤样水分的变化规律。宝清原煤的着火温度为 $415\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，相对于胜利褐煤着火温度 $460\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、宝日希勒褐煤 $440\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，宝清原煤的着火温度 IT 偏低。宝清褐煤干燥后煤样的着火温度随着水分下降而下降，即干燥后煤样的全水分越低，煤样的煤粉气流着火温度越低，着火性能越好。煤样水分由 33% 降低为 13% ，煤粉着火温度下降 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

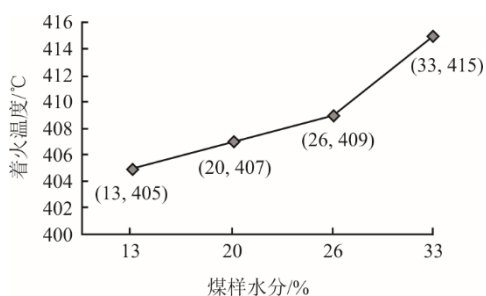


图 3 煤粉气流着火温度随煤样水分的变化
Fig.3 The variation of ignition temperature of coal powder airflow with coal sample moisture content

2.1.2 燃尽率

图 4 为试验煤样水分分别为 33% 、 26% 、 20% 时，一维炉沿程飞灰可燃物质量分数的变化情况。

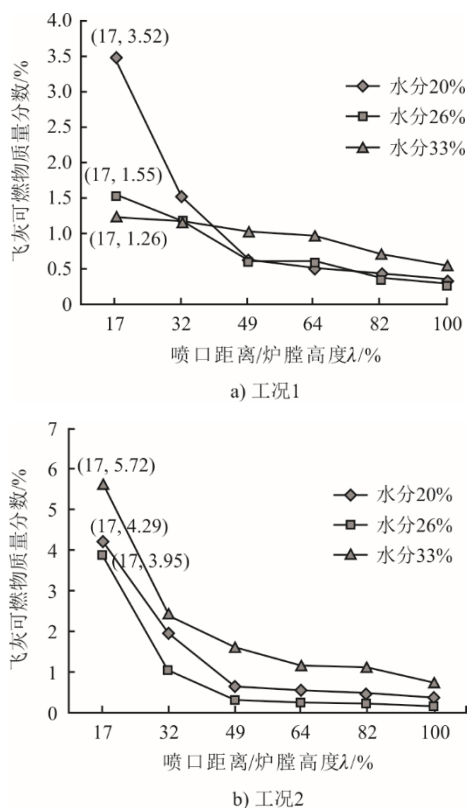


图 4 不同水分煤样一维炉沿程飞灰可燃物质量分数比较
Fig.4 The mass fraction of combustible matters in fly ash of coal samples with different moisture contents in one-dimensional furnace

图 4a)工况 1 (入炉热量 23.03 MJ/h)，在喷口距离/炉膛高度 λ 为 17% 位置抽取飞灰，3 种煤样水分下，飞灰可燃物质量分数分别为 1.26% 、 1.55% 、 3.52% 。可见随着水分的降低，燃烧初期，飞灰中可燃物的消耗速率逐渐下降，飞灰可燃物逐渐升高。说明宝清褐煤在低负荷下，水及水蒸气在燃烧初期对焦炭的消耗贡献大。

图 4b)工况 2 (入炉热量 46.06 MJ/h)，由于炉内烟气流增加，煤粉及烟气在炉内停留时间短，在 λ 为 17% 位置抽取的飞灰，相较于工况 1，飞灰可燃物质量分数普遍较高。但工况 2 由于入炉热量的提高，炉内整体温度水平高于工况 1，水分对燃烧初期煤粉反应速率的影响不及工况 1 显著。

炉膛出口，在 λ 为 100% 位置处抽取飞灰，工况 1 及工况 2 中水分 33% 的煤样飞灰可燃物质量分数均最高。说明水分虽然在煤粉燃烧初期对焦炭的消耗速率影响较大，但过高的水分不利于燃烧后期煤粉的燃尽。

图 5 为 2 个工况下，试验煤样的一维火焰炉燃尽率 B_p 随煤样水分的变化。由图 5 可知，宝清原煤及干燥煤的燃尽率均较高，在 99% 以上，且随着水分的下降，燃尽率 B_p 先升高再下降。2 个工况都重复相同的规律，在煤样水分 26% 时，获得最高的燃尽率。水分对燃烧的影响有 2 个方面：一方面，水蒸气的热容较大，水的气化潜热及水蒸气显热会吸收一部分燃烧热，降低火焰温度和燃烧强度，对燃烧和燃尽不利；另一方面，水及水蒸气在燃烧初期对燃烧强度及煤粉燃尽有积极作用。

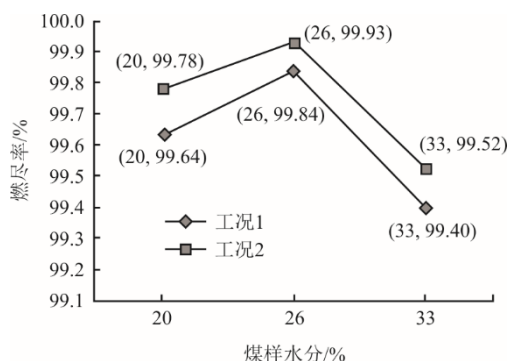


图 5 试验煤样一维火焰炉燃尽率 B_p
Fig.5 The burning rate B_p of the experimental coal samples in one dimensional flame furnace

2.1.3 结渣情况

图 6 为水分 33% 、 26% 、 20% 3 种水分的煤样在细度 $R_{90}=25\%$ 、氧量 3.5% 条件下，碳化硅棒的结渣情况。每张图片上的 6 个渣棒从左到右分别对应一

维护从上到下的 6 个测孔（分别在 λ 为 17%、32%、49%、64%、82%、100%位置）。由图 6 可以看到：各煤样沿一维炉从上到下，结渣程度逐渐减弱；随着水分的降低，一维炉内的结渣逐渐减弱。水分 33% 和水分 26% 工况。第 1、2、3 级渣棒上的渣型为熔融（碳化硅棒表面由全熔融致密凝固渣层所覆盖，并有渣泡形成），第 4 级为粘熔（沉积灰层由部分凝固渣层粘聚而成，用小刀无法切割）；水分 20% 的工况，第 1、2 级渣棒上的渣型为熔融，第 3 级为粘熔。

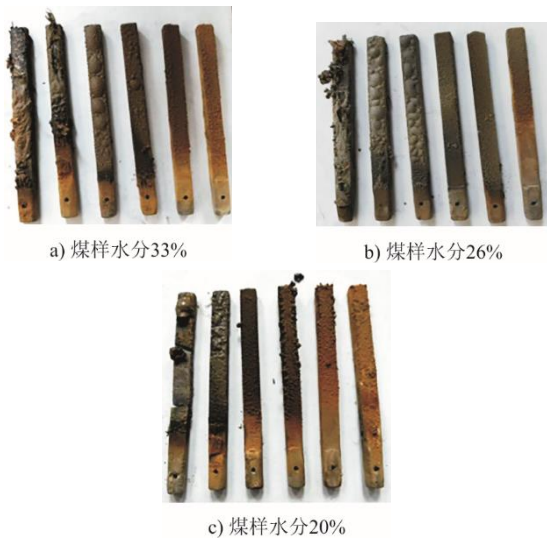


图 6 不同煤样水分条件下结渣情况比较

Fig.6 The slagging situations of coals with different moisture contents

表 2 为试验煤样水分分别为 33%、26%、20% 时，一维炉沿程温度及渣型的情况。由表 2 可以看到：随着煤样水分的减少，燃烧初期烟温降低，熔融型渣的覆盖区域减小。主要原因为在煤样燃烧初期，水及水蒸气对焦炭的消耗速度影响较大。原煤样由于水分高，燃烧初期燃烧强度大，烟气温度高，熔融型渣覆盖区域大，延伸到第 3 级渣棒的位置。

表 2 不同水分条件下煤样的温度及渣型

Tab.2 The temperatures and slagging types of coal samples with different moisture contents

煤样水分		测点			
		1-6	2-6	3-6	4-6
33%	烟温/°C	1 280	1 278	1 210	1 165
	渣型	熔融	熔融	熔融	粘熔
26%	烟温/°C	1 269	1 240	1 206	1 162
	渣型	熔融	熔融	熔融	粘熔
20%	烟温/°C	1 280	1 240	1 180	1 120
	渣型	熔融	熔融	粘熔	粘聚

2.2 细度对燃烧性能的影响

2.2.1 着火温度

图 7 为试验煤样的变煤粉细度试验，分别将宝

清原煤和 20% 干燥煤样的 R_{90} 控制在 15%、25% 和 35%。由图 7 可知，随着煤粉细度提高，即 R_{90} 升高，煤粉气流着火温度上升。对 2 种水分的煤粉，当细度由 15% 增大到 35%，着火温度均增加了约 20 °C。相对于水分对着火温度的影响，细度对着火温度的影响更加显著。

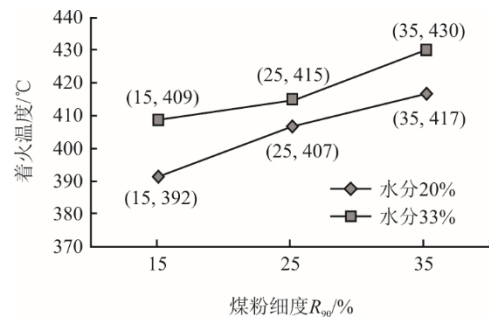
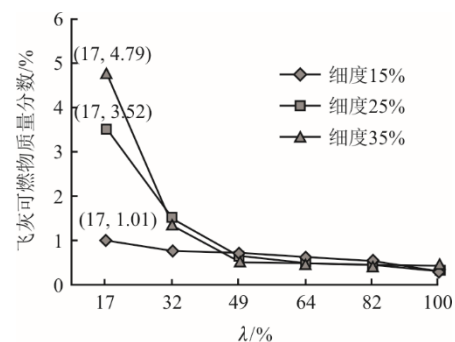


图 7 煤粉细度对着火温度的影响

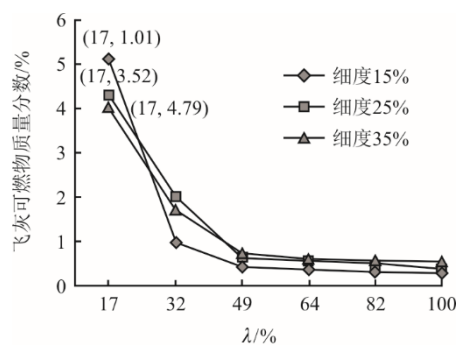
Fig.7 Effect of coal powder fineness on ignition temperature

2.2.2 燃尽率

图 8 为氧量 3.5%、水分 20% 的试验煤样在细度 R_{90} 分别为 15%、25%、35% 时，工况 1（入炉热量 23.03 MJ/h）、工况 2（入炉热量 46.06 MJ/h）一维炉沿程飞灰可燃物质量分数的变化情况。



a) 工况1（入炉热量23.03 MJ/h）



b) 工况2（入炉热量46.06 MJ/h）

图 8 煤粉细度对燃尽的影响

Fig.8 Influence of coal powder fineness on burnout of the coal samples

由图8可知,在λ为17%位置抽取飞灰,3种细度下飞灰可燃物质量分数分别为1.01%、3.52%、4.79%。可见在燃烧初期随着煤样细度 R_{90} 的增加,飞灰可燃物逐渐升高。这说明在低负荷下的燃烧初期,宝清褐煤的煤粉细度对焦炭的消耗速度影响较大。

工况2由于入炉热量的提高,炉内温度升高且燃烧反应强度提升,细度对飞灰可燃物质量分数的影响趋势并不明显。

在炉膛出口,在喷口占全火焰长100%位置处抽取飞灰,3种细度下,2个工况的平均飞灰可燃物质量分数分别为0.5%、0.6%、0.6%。可见随着煤样细度 R_{90} 的增加,煤粉的比表面积逐渐减小,飞灰可燃物质量分数升高。

2.2.3 结渣情况

图9为水分20%的煤样、氧量3.5%条件下,不同细度时煤样的结渣情况。表3为渣型及一维炉沿程温度。由图9和表3可以看到,随着细度 R_{90} 的增大,一维炉内的温度逐渐降低、结渣逐渐减轻。 $R_{90}=15\%$ 工况,第1、2、3级渣棒上的渣型为熔融,第4级为粘熔; $R_{90}=25\%$ 工况,第1、2级渣棒上的渣型为熔融,第3级为粘熔; $R_{90}=35\%$ 工况,第1级渣棒上的渣型为熔融,第2级为粘熔。



图9 不同细度条件下结渣情况比较
Fig.9 The slagging situations of coal samples with different fineness

表3 不同细度条件下煤样的温度及渣型
Tab.3 The temperatures and slagging types of coal samples with different fineness

煤样细度		测点			
		1-6	2-6	3-6	4-6
15%	烟温/°C	1 270	1 250	1 200	1 150
	渣型	熔融	熔融	熔融	粘熔
25%	烟温/°C	1 280	1 240	1 180	1 120
	渣型	熔融	熔融	粘熔	粘聚
35%	烟温/°C	1 269	1 225	1 190	1 130
	渣型	熔融	粘熔	强粘聚	弱粘聚

2.3 氧量对燃烧性能的影响

2.3.1 燃尽率

图10为试验煤样 $R_{90}=25\%$,炉膛出口氧量分别控制在2.5%、3.5%和4.5%时,煤样燃尽性能的测试结果。由图10可知,由于宝清原煤和干燥煤的燃烧性能优良,试验煤样燃尽率均大于99%,氧量对燃尽率的影响不明显。

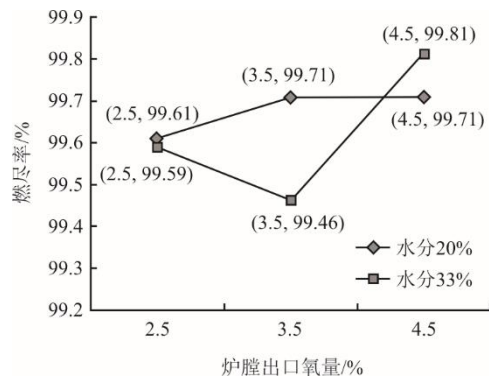


图10 不同运行氧量下的燃尽率 B_p 比较
Fig.10 The burnout rates B_p under conditions with different operating oxygen levels

2.3.2 结渣情况

图11为水分20%的煤样、 $R_{90}=25\%$ 条件下,不同氧量的结渣情况。表4为渣型及一维炉沿程温度情况。由图11和表4可以看到:氧量3.5%的工况,炉内温度最高,结渣最为严重,第1、2级渣棒上的渣型为熔融,第3级为粘熔;其他2个工况,第1级渣棒上的渣型为熔融,第2级为粘熔。





c) 氧量4.5%

图 11 水分 20%、不同氧量条件下结渣情况比较
Fig.11 The slagging situations under conditions of 20% moisture and different oxygen levels

表 4 不同氧量条件下煤样的温度及渣型
Tab.4 The temperatures and slagging types of coal samples under conditions with different oxygen contents

氧量		测点			
		1-6	2-6	3-6	4-6
2.5%	烟温/℃	1 259	1 172	1 130	1 097
	渣型	熔融	粘熔	粘聚	弱粘聚
3.5%	烟温/℃	1 280	1 240	1 180	1 120
	渣型	熔融	熔融	粘熔	粘聚
4.5%	烟温/℃	1 260	1 200	1 168	1 080
	渣型	熔融	粘熔	粘聚	弱粘聚

3 结 论

1) 煤粉细度 $R_{90}=25\%$ 、氧量 3.5% 条件下, 宝清原煤的着火温度 IT 为 415 °C; 干燥后煤样的水分越低, 煤粉气流着火温度越低; 宝清褐煤在低负荷下的燃烧初期, 水及水蒸气对焦炭的消耗速度影响较大; 过高的水分不利于燃烧后期煤粉的燃尽; 随着煤样水分的减少, 熔融型渣的覆盖区域减小, 结渣趋势减弱。因此宝清褐煤干燥后结渣趋势减弱、燃烧经济性提高, 但须防范着火性能提高而引起的各种燃烧问题。

2) 对于宝清原煤和 20% 干燥煤样, 当煤粉细度 R_{90} 由 15% 增大到 35%, 着火温度增加了约 20 °C; 相对于水分对着火温度的影响, 细度对着火温度的影响更加显著; 随着煤粉 R_{90} 升高, 燃尽率 B_p 下降, 但总体来说, 宝清原煤及干燥煤的燃尽率均较高, 在 99% 以上; 随着煤粉 R_{90} 升高, 燃烧前期的温度降低, 结渣趋势明显减弱。因此可以适当提高干燥后煤粉的运行细度, 既可以获得较高的燃尽效率, 又降低了制粉电耗, 更重要的是可以平衡干燥后水分降低造成的着火性能提高而带来的不利影响。

3) 氧量 3.5% 的工况, 炉内温度水平最高, 结渣最为严重。由于宝清原煤和干燥煤的燃烧性能优良, 氧量对燃尽率的影响效果不明显, 因此可以采

取低氧运行方式, 既可保持较高的燃烧经济性, 降低辅机电耗, 又能降低炉膛出口的 NO_x 生成量。

[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 1300°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 3MWth 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, YAO L, JING C, et al. Drying behavior of lignite under microwave heating[J]. Drying Technology, 2016, 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 Meiyong, 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: 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]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 4-7.
ZHAO Fengfeng. Experimental study Xilinhot lignite drying kinetics and moisture re-adsorption characteristics[D]. Harbin: 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] 张一听, 贾文科, 郭昉, 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(51): 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(51): 2096-2105.
- [22] 马有福, 袁兴旺, 王子睿, 等. 基于过热蒸汽干燥开放式制粉燃褐煤[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)

广告目次

《热力发电》	封三
浙江顺豪新材料有限公司	后彩插 1
西安热工研究院有限公司	后彩插 2—27
上海冠龙阀门节能设备股份有限公司	后彩插 28