

恒温下准东煤粉燃烧特性研究

王天龙, 刘志强, 李路江, 贾永会

(国网河北能源技术服务有限公司, 河北 石家庄 050000)

摘 要:针对准东煤碱金属含量高导致灰熔融温度低、在燃烧过程中容易造成沾污及结焦等问题,利用恒温热重实验系统,研究了准东煤的燃烧特性及温度、煤种掺混等对燃烧特性的影响。实验结果表明:单煤煤种燃烧过程中,不同煤种燃尽时间、燃烧速率存在显著差异,其中路茂通坎乡煤种和永华金泰煤种差异最大,路茂通坎乡煤种易着火,燃烧速率快,燃尽时间短;随着温度升高,单煤燃烧失重曲线发生左移,燃尽时间缩短,燃烧速率上升,表明温度升高会加速煤粉燃烧,并且 1 000 °C 后提高温度对焦碳燃尽的促进作用更明显;掺混燃烧过程中,掺烧高挥发分的煤种可以有效改善煤粉燃烧初期着火特性,而掺烧高固定碳煤种可使燃尽时间延长,从而降低燃尽率;混煤掺烧能够提高灰熔点,有效改善准东煤熔融特性,从而在煤源方面减少或者避免炉膛受热面沾污、结渣,确保锅炉运行的安全性和经济性。

关 键 词:准东煤;恒温热重;灰熔点;高挥发分低灰分;高碱金属

中图分类号:TK227.1 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.04.012

[引用本文格式]王天龙,刘志强,李路江,等. 恒温下准东煤粉燃烧特性研究[J]. 热能动力工程,2022,37(4):86-93. WANG Tian-long, LIU Zhi-qiang, LI Lu-jiang, et al. Study on combustion characteristics of zhundong coal under constant temperature[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(4): 86-93.

Study on Combustion Characteristics of Zhundong Coal under Constant Temperature

WANG Tian-long, LIU Zhi-qiang, LI Lu-jiang, JIA Yong-hui

(State Grid Hebei Energy Technology Service Co., Ltd., Shijiazhuang, China, Post Code: 050000)

Abstract: Aiming at the problems of low ash melting temperature caused by high alkali metal content in Zhundong coal and fouling and coking in the combustion process, the thermostatic thermogravimetric experimental system was used to study the combustion characteristics of Zhundong coal and the influence of temperature and blended coal on the combustion characteristics. The research results show that during the combustion of single coal, there is a significant difference in the burnout time and the combustion rate between different types of coal, among which LM and YH have the largest difference. By comparison, LM has better ignitability, faster combustion and shorter burnout time. With increasing temperature, the weight loss curve of single coal shifts left, the burnout time shortens and the burning rate enhances, indicating that the coal combustion accelerates at higher temperatures, and the positive effect of higher temperature on char burnout is more significant above 1 000 °C. During the combustion of blended coal, the high-volatile coal can improve the ignition characteristics at the initial stage of burning effectively. However, the burnout time of blended coal can be prolonged by mixing with high fixed carbon coal, leading to a lower burnout rate. Furthermore, the blending combustion can increase the ash melting temperature, improving the melt-

收稿日期:2021-05-19; 修订日期:2021-06-26

基金项目:国网河北能源技术服务有限公司科技项目(TSS2020-17)

Fund-supported Project: Science and Technology Project of Hebei Energy Technology Service Co., Ltd. in State Grid Corporation of China(TSS2020-17)

作者简介:王天龙(1986-),男,河北石家庄人,国网河北能源技术服务有限公司硕士研究生。

ing characteristics of Zhundong coal effectively. This helps to reduce or avoid the contamination and slagging of heating surface, thereby ensuring the security and economy of boiler.

Key words: Zhundong coal, thermostatic thermal weight, ash melting point, high volatile content and low ash content, high alkali metal

引 言

准东煤田是我国目前探明的最大的整装煤田^[1]。准东煤具有燃点低、燃尽率高、燃烧经济性和高和污染物排放低的特点^[2]。根据国标 GB/T15224—2018《煤炭质量分级》,准东煤平均含硫量 0.24%,在国内煤炭资源中属于低硫分煤种^[3],其挥发分含量高、灰分低且热值高,是一种良好的动力用煤。但与此同时,准东煤灰熔融温度低,煤中钙、钠、钾等碱金属含量较高,尤其是 Na₂O 含量多在 5% 以上,远超过目前国内典型烟煤甚至是褐煤的含钠水平,在燃用过程中容易造成碱金属沾污、结焦等问题^[4-5]。目前,众多学者对准东煤燃烧过程中结渣、结焦特性和碱金属含量及赋存形态对灰熔融特性的影响进行了研究^[6-8]。

薛瑞轩等人^[9]将准东煤及其混煤利用热重分析仪 (Thermogravimetric Analyzer, TGA) 进行燃烧特性试验。根据煤粉热重曲线分析着火点、着火速率和燃尽性等动力学参数,利用电感耦合等离子光谱发生仪 (Inductive Coupled Plasma Emission Spectrometer, ICP) 和灰熔点测试仪得出煤灰成分及其熔融特性,提出一种结渣结焦的综合判别指数,找出准东煤与其他动力煤种的最佳掺混比,为电厂实际运行给出掺混方案。魏博等人^[10]对准东煤掺烧煤焦进行热重分析,发现随着煤焦掺烧比例的增大,混煤的燃烧特性变差,因此建议减小掺烧煤焦粒径,在电厂实际运行过程中尽可能在下区燃烧器掺配,增加燃烧时间,降低火焰高度,改善燃尽特性。张倩等人^[11]将准东煤以 20%, 40%, 60% 和 80% 的比例掺入无烟煤,利用热重质谱联用法,分析掺混比例对混煤燃烧特性的影响,发现随着准东煤掺入无烟煤着火特性和综合燃烧性能得到改善,燃烧初期活化能降低,反应活性增强。

目前针对煤粉燃烧动力学的研究多采用商用热重分析仪 (Thermogravimetric Analysis, TGA) 进行测

量,其升温速率通常为 20 ~ 30 °C/min,这与煤粉进入高温锅炉炉膛内部迅速升温 (1 000 °C/min) 并处于恒温燃烧实际情况差异较大。此外,考虑到程序升温方法的局限性,无法再现高温条件下 (>1 300 °C) 的煤粉燃烧特性,因此有必要通过其他的燃烧方法对准东煤燃烧动力学进行研究。

对准东煤进行恒温热重实验,探究准东煤的燃烧及掺混特性,并结合煤灰熔融特性给出合适的掺烧方案,为电厂运行提供一定指导。本文采用的恒温热重实验台有效地弥补了程序升温的不足,能够较为真实的反应煤粉进入炉膛内部高温区域快速升温并处于恒定高温环境下的实际燃烧情况,从而得到更为接近实际情况的煤粉燃烧动力学特性。

1 实验部分

1.1 样品

实验选用准东煤田开采的文新佳业 (WX)、九州天电 (JZ)、路茂通坎乡 (LM)、北山 (BS) 和永华金泰 (YH) 5 个煤种,工业分析及元素分析如表 1 所示。将煤样磨碎、筛分,选取 100 ~ 120 目的煤粉进行实验。

1.2 实验系统及过程

恒温热重实验系统如图 1 所示,主要设备包括:智能温控管式炉以提供精准的恒温环境,其恒温区位于管式炉炉膛中间部位,长度 200 mm,温度可调范围为 800 ~ 1 700 °C,控温精度 ±5 °C;数据采集分析系统由烟气分析仪和计算机组成;耐高温支架、刚玉舟和导轨等。

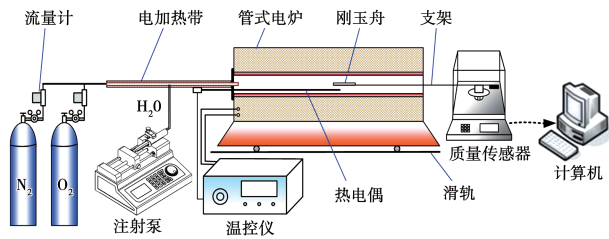


图 1 恒温热重实验系统

Fig. 1 Thermostatic thermogravimetric test platform

表 1 煤的工业分析和元素分析

Tab. 1 Industrial analysis and elemental analysis of coal

煤粉 种类	工业分析/%				元素分析/%					低位发热量 $Q_{ar,net}/MJ \cdot kg^{-1}$
	M	FC	V	A	C	H	O	N	S	
WX	8.42	35.56	27	29	50.23	3.75	8.32	0.74	0.44	17.49
JZ	21.48	42.15	29	7	62.46	3.90	8.36	0.61	0.33	21.12
LM	21.69	19.06	38	22	47.24	3.13	7.86	0.55	1.52	16.71
BS	17.79	44.27	35	3	67.64	4.51	8.00	0.71	0.24	23.58
YH	2.51	46.70	26	24	59.08	3.71	8.20	0.86	1.35	21.64

每次实验都重复以下步骤:将原煤磨制、筛选得到粒径范围为 80 ~ 120 目的煤粉,并按照质量比进行掺混制得混煤试样。实验时每次称取 (80 ± 2) mg 煤样,均匀平铺于长约 80 mm、内壁宽约 20 mm 的刚玉舟内,通入气体流量为 $0.16\text{ m}^3/\text{h}$ 。验证实验证明,该流量可消除此反应工况、此测试质量下煤粉燃烧时气体外扩散阻力的影响^[12-14]。进行恒温热重分析时,将盛有煤样的刚玉舟快速放入管式炉恒温段进行热失重试验,煤样瞬时质量通过数字信号由分析天平传入电脑,根据失重曲线,分析并比较单煤和混煤的燃烧特性。为将误差控制在 3% 以内,每组实验至少重复 3 次。

利用 HR-4 型灰熔点测定仪和 ICP-5000 系列电感耦合等离子体发射光谱仪,对准东单煤及其混煤进行灰熔点测试,并对煤灰成分进行检测。

1.3 数据处理方法

可失重余额:

$$\gamma = \frac{m_t - m_\infty}{m_0 - m_\infty} \times 100\%$$
(1)

整体余额:

$$\eta = \frac{m_t}{m_0} \times 100\%$$
(2)

式中: m_0 —煤粉初始质量,g; m_t — t 时刻的煤粉质量,g; m_∞ —煤粉燃尽时剩余质量,g; γ —可失重组分余额,%; η —整体余额,%。

2 实验结果与讨论

2.1 准东煤燃烧特性

2.1.1 单煤燃烧特性实验

对选取的 5 种准东煤煤样在实验温度为 $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$

的空气气氛下进行恒温热重实验,实验结果如图 2 所示。

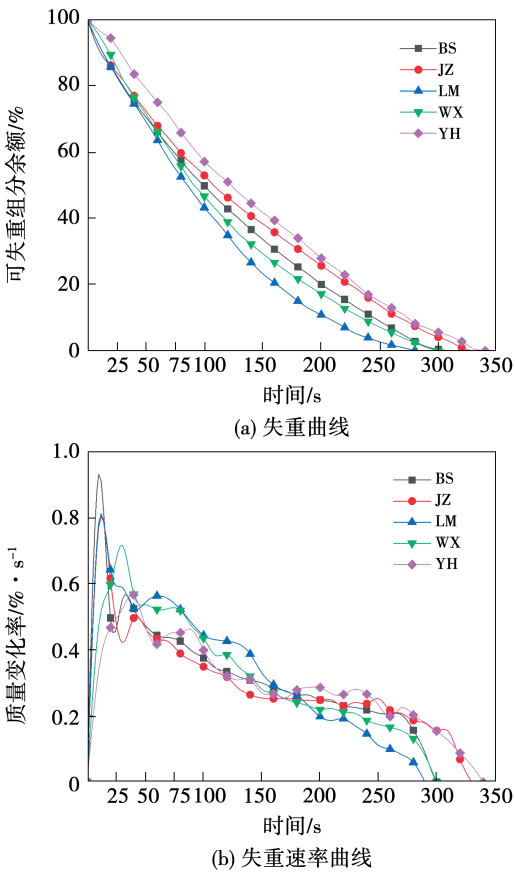


图 2 单煤燃烧特性曲线

Fig. 2 Combustion characteristic curve of single coal

由图 2 可知,当实验温度为 $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 时,对比各种煤的着火特性与燃尽特性,发现不同煤种燃尽时间、燃烧速率存在不同程度的差异,其中 LM 煤和 YH 煤差异最大。LM 煤种易着火,燃烧速率快,燃尽时间短,而 YH 煤种燃尽时间则相对较长,这是由

于燃烧过程可以分为挥发分析出燃烧和固定碳燃烧两个阶段。着火阶段主要为挥发分析出燃烧,在氧气充足的条件下,挥发分易析出燃烧,导致燃烧速率加快,促进固定碳燃烧^[15-16],LM 煤挥发分高达 38%,固定碳含量仅有 19.06%,相比之下 YH 煤固定碳含量相对较高,约为 46.70%;两者煤质成分差异较大是导致二者燃烧特性存在显著差异的主要原因。

2.1.2 温度对煤粉燃烧特性的影响

为研究温度对煤燃烧特性影响,选取 BS 煤样在实验温度为 800,1 000 和 1 200 ℃ 下进行热重分析,实验结果如图 3 所示。

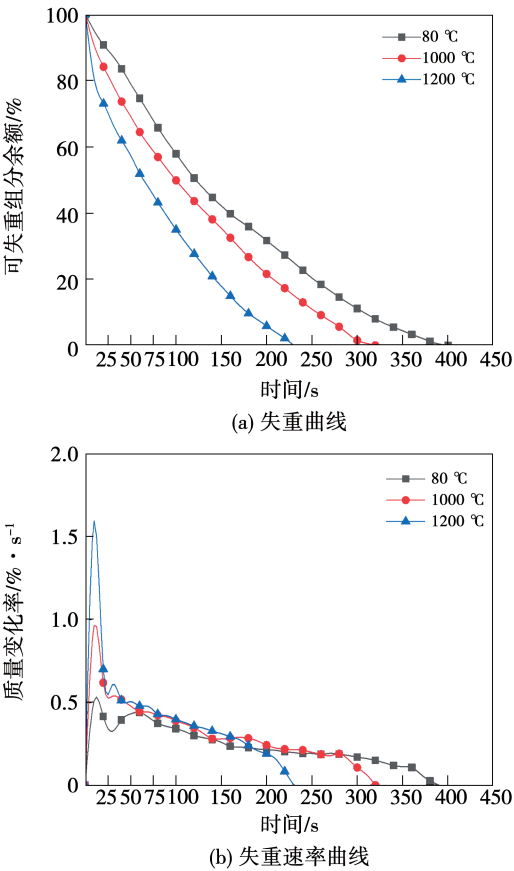


图 3 不同温度下 BS 煤燃烧特性

Fig. 3 Combustion characteristic curves of BS coal at different temperatures

由图 3 可知,BS 煤在不同温度下燃尽时间、燃烧速率、着火特性均发生显著变化。当实验温度由 800 ℃ 上升到 1 000 ℃,1 000 ℃ 上升至 1 200 ℃ 时,

失重曲线均发生左移,燃尽时间不同程度上缩短,燃烧速率上升,表明温度升高会加速煤粉挥发分析出燃烧,从而对剩余焦碳的燃尽起到促进作用。当实验温度由 800 ℃ 上升到 1 000 ℃ 时,BS 煤燃尽时刻提前 72 s;当实验温度由 1 000 ℃ 上升到 1 200 ℃ 时,BS 煤燃尽时刻提前 115 s。对比 BS 煤两个升温区间实验可知,当温度由 1 000 ℃ 上升到 1 200 ℃ 时,BS 煤燃烧特性曲线左移程度比 800 ℃ 上升到 1 000 ℃ 大,这可能是在超过 1 000 ℃ 后提高温度对焦碳燃烧反应影响较大,烟煤燃烧过程中挥发分析出较快,焦碳燃烧过程占据煤粉的大部分燃烧时间^[17]。因此,当温度升高至 1 200 ℃ 时,使烟煤燃烧中后期的剩余焦碳反应速率加快,与快速析出挥发分燃烧阶段衔接更好,导致燃烧特性曲线左移,燃尽时间缩短,燃烧速率上升。

2.1.3 混煤燃烧动力学实验

考虑到准东煤的结焦特性,采用灰熔点高的 (BS、WX 和 YH) 与其他灰熔点较低的煤 (LM、JZ) 进行掺混,以期能够改善劣质煤结焦情况,同时能够提高燃烧性能,提高锅炉效率。

选取 BS、WX、和 YH 3 种煤分别与 LM、JZ 2 种灰熔点较低的煤进行掺混,实验温度恒定为 1 000 ℃,实验结果如图 4 所示。

掺混 BS 煤后,混煤燃烧特性曲线均介于两种单煤之间,BS - JZ 热重曲线相对于 JZ 发生一定程度上的左移,而 BS - LM 相对于 LM 曲线发生右移。BS - JZ 混煤燃尽时间短,这可能是由于 BS 煤灰分含量较低,仅为 3%,掺混 BS 煤后混煤整体灰分含量减小,燃烧过程中灰分对氧气的阻碍作用减小,同时挥发分向外析出,扩散阻力减小,从而使得可燃成分能够更好地与氧气接触发生反应^[18],导致燃烧反应快速进行,燃尽时刻提前。而 BS - LM 混煤曲线变化较为特殊,可以看出燃烧初期热重曲线下落较快,燃烧速率较大,而燃烧后期曲线下落较为平缓,表明燃烧速率减小。这是由于 LM 煤种挥发分含量高,导致燃烧初期所需着火热低,燃烧初期挥发分析出燃烧快,导致燃烧初期燃烧速率快。

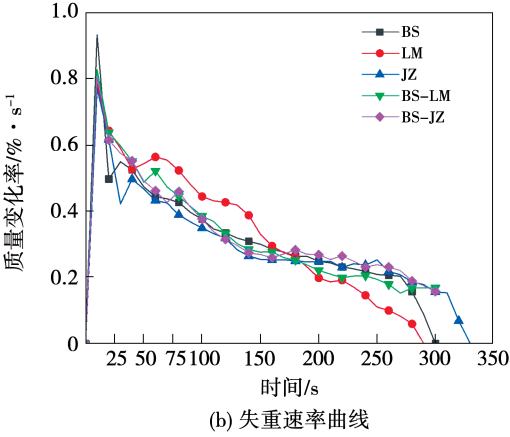
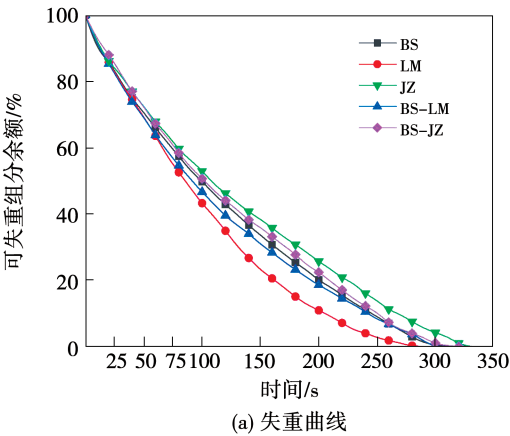


图 4 BS 混煤燃烧特性曲线

Fig.4 Combustion characteristic curves of BS blended coal

因此,采用 BS-LM 混煤可以提高燃烧速率,从而改善着火特性;此外,这种混煤式还可以减少煤灰量,减少炉内受热面积灰、结渣,提高锅炉运行的安全性和经济性。

由图 5 可知,在掺烧 WX 煤后,发现 WX-JZ 混煤燃烧特性 WX 与单煤燃烧特性相似,混煤燃烧特性曲线均介于两种单煤之间。在掺烧 LM 煤后,燃烧特性曲线相对于 WX 单煤发生小幅度左移;在掺烧 JZ 煤后,燃烧初期燃烧速率明显增加,燃烧特性曲线发生小幅度右移。这可能与 LM 煤种挥发分含量高有关,通过混煤提高挥发分含量,从而改善煤粉燃烧初期的着火特性;对于燃尽时间较长的 JZ 煤,由于 WX 煤燃烧初期所需着火热低,燃烧初期水分蒸发快,有利于加速挥发分析出燃烧,即 WX 煤燃尽特性优于 JZ 煤,因此通过掺混后 WX-JZ 混煤可以有效改善 JZ 煤种的燃尽特性,从而使燃尽时刻提前。

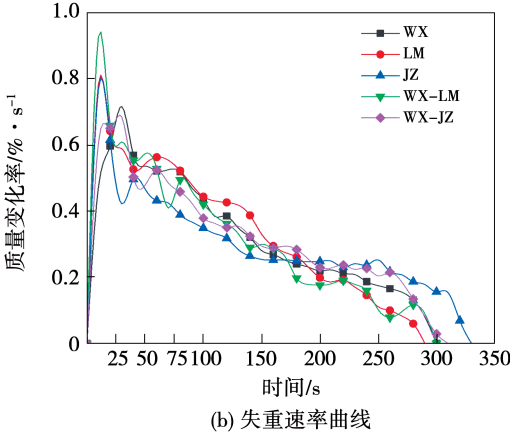
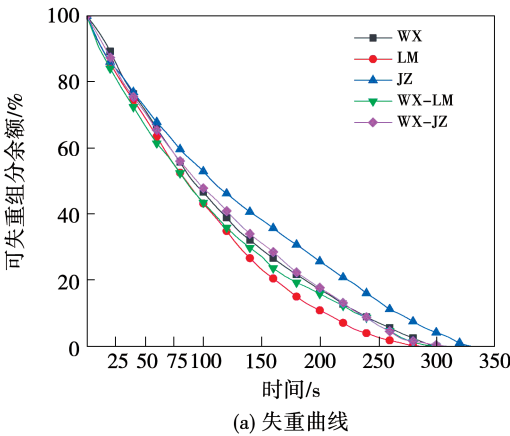


图 5 WX 混煤燃烧特性曲线

Fig.5 Combustion characteristic curves of WX blended coal

通过 WX-JZ 混煤可以有效改善 JZ 煤种的燃尽特性,而 WX-LM 燃烧混煤迅速,失重速率高,燃尽时间短,因此在实际生产过程中根据需要可考虑采用这两种掺烧方案。

由图 6 可知,在掺烧 YH 煤后,YH-LM 混煤失重曲线均介于两种单煤之间,而 YH-JZ 混煤燃烧特性得到明显改善,混煤燃尽时间较两种单煤更短。由 YH 单煤曲线可知,由于该煤种固定碳含量高,因燃尽时刻较长,燃烧开始阶段燃烧速率低,挥发分析出燃烧供给所需着火热不足,对剩余焦碳的燃烧促进作用不大,导致燃尽时间长;而对于 LM、JZ 这些燃烧特性相对优于 YH 的煤种,通过掺混后发现燃尽时间均有不同程度上的缩短,这是由于这 3 种煤本身挥发分含量高、灰分低等特点,燃烧过程中挥发分析出燃烧快,灰分低阻燃作用小,导致燃烧性能优于 YH 煤,掺烧后改善了 YH 煤种的燃尽特性。

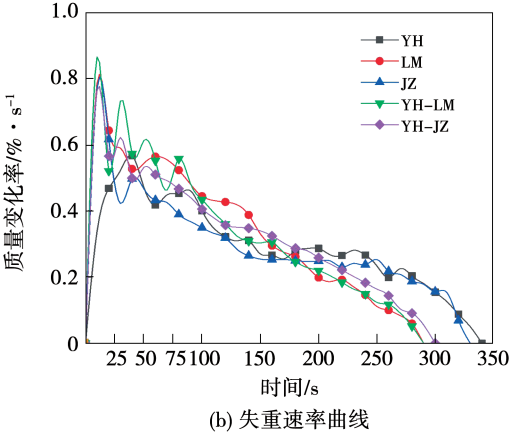
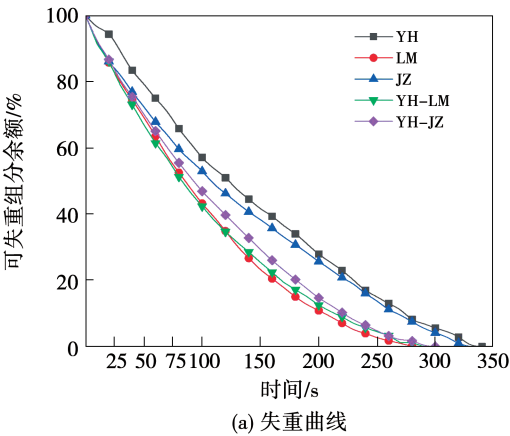


图 6 YH 混煤燃烧特性曲线

Fig.6 Combustion characteristic curves of YH blended coal

综上,YH-LM 与 YH-JZ 两种掺混方案的着火、燃尽性能均有一定程度上的改善。通过混煤掺

烧,YH 煤的燃尽特性得到有效改善。

2.2 准东煤灰熔融特性

表 2~表 4 为煤灰熔点及成分分析。由表 2~表 4 可知,BS、WX、YH 3 种煤的灰熔点较高,而 LM、JZ 两种燃煤的灰熔点温度则普遍较低。这是由于煤灰成分中 SiO₂ 含量较低,K₂O、Na₂O 和 CaO 碱金属含量较高从而导致 LM、JZ 灰熔点均偏低^[19]。一般来说,锅炉在运行过程中,灰熔点低的煤灰粒非常容易达到熔点,从而附着在锅炉受热面上,导致沾污、结焦现象的产生,降低了燃料的利用率,严重威胁锅炉机组的安全运行。

表 2 单煤灰熔点
Tab.2 Single coal ash melting points

煤种	灰熔融温度/℃			
	DT	ST	HT	FT
WX	1225	1296	1312	1323
JZ	1093	1114	1120	1125
LM	1097	1108	1117	1128
BS	1250	1310	1342	1437
YH	1258	1301	1328	1399

注:DT 变形温度;ST 软化温度;HT 半球温度;FT 流动温度

混煤煤灰的熔融特性是由煤灰在高温下发生的一系列物理化学变化决定的,不同的煤灰成分含量生成不同的矿物质,各个矿物质之间可能存在低温共熔的现象^[20]。

表 3 单煤灰成分分析
Tab.3 Analysis of single coal ash composition

煤种	煤灰成分/%							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O + Na ₂ O	TiO ₂	SO ₃
WX	54.16	40.66	0.91	1.41	<0.05	0.36	0.97	1.27
JZ	66.15	24.08	2.64	2.58	<0.05	3.01	0.76	0.64
LM	58.57	22.28	3.15	7.27	<0.05	2.66	0.70	5.27
BS	65.67	22.87	2.51	3.04	<0.05	2.63	0.66	2.58
YH	67.91	21.79	3.06	3.04	1.47	1.02	0.58	1.09

表 4 混煤灰熔点
Tab.4 Mixed coal ash melting points

混煤	灰熔融温度/℃			
	DT	ST	HT	FT
BS-LM	1196	1267	1271	1282
BS-JZ	1171	1212	1231	1281
WX-JZ	1189	1215	1229	1248
WX-LM	1134	1197	1217	1240
YH-JZ	1222	1250	1261	1283
YH-LM	1233	1260	1271	1290

结合图 7、图 8 与图 9 可以看出,混煤煤种的灰熔点温度介于其掺混单煤煤种的灰熔点温度之间,将 BS、WX、YH 3 种熔点较高的单煤与 2 种低熔点的燃煤如 JZ、LM 以原煤质量比为 1:1 进行掺混,可适度提高原低熔融点煤种的灰熔点温度。当混煤灰中 SiO₂ 含量逐渐升高之后,增加的 SiO₂ 在灰中主要以晶体形式存在(熔点为 1 300 ℃),抑制煤灰熔融^[21]。因此,在实际运行过程中,结焦问题严重时可以考虑选择掺混高灰熔点的煤,以提高混煤灰熔

点温度,改善准东煤燃用结污、结焦问题。

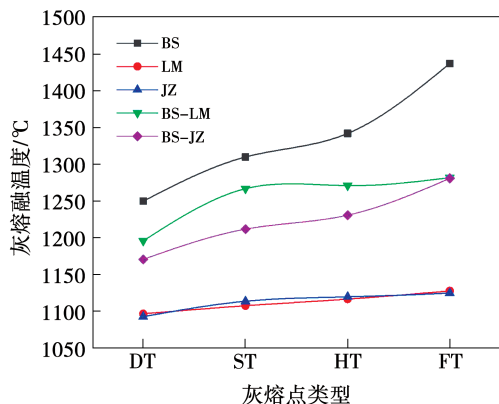


图 7 BS 混煤灰熔点变化

Fig. 7 Changes of BS mixed coal ash melting points

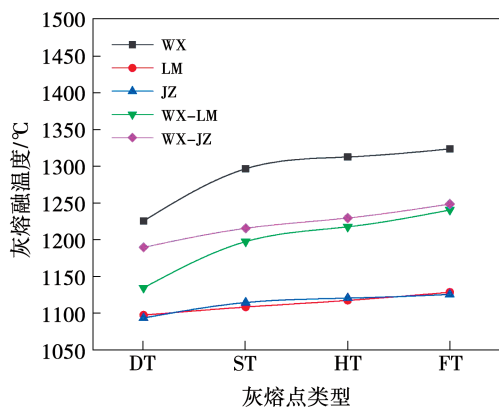


图 8 WX 混煤灰熔点变化

Fig. 8 Changes of WX mixed coal ash melting points

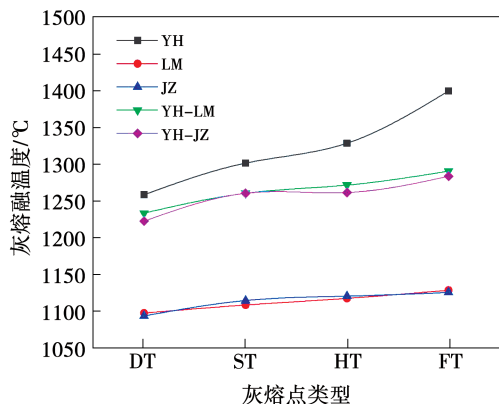


图 9 YH 混煤灰熔点变化

Fig. 9 Changes of YH mixed coal ash melting points

3 结 论

(1) LM 煤易着火,燃烧速率快,燃尽时间短,

而 YH 煤燃尽时间则相对较长;前者挥发分含量高,而后者固定碳含量高,挥发分含量高的煤种在燃烧过程中挥发分容易析出燃烧,并促进后续焦炭的燃烧反应,导致燃烧速率加快,燃尽时间短;

(2) 当实验温度由 800 °C 上升到 1 000 °C 及由 1 000 °C 上升至 1 200 °C 时,BS 煤燃烧失重曲线发生左移,燃烧速率上升,表明温度升高会加速煤粉燃烧,在超过 1 000 °C 后升高温度对焦碳的燃尽促进作用更加明显;

(3) 通过混煤实验发现,将 2 种煤掺混后燃烧特性会得到不同程度改善,效果由于煤种成分不同而不同。总体上,通过掺烧挥发分含量高的煤种可以有效改善煤粉燃烧初期着火特性,而固定碳含量高的煤种燃尽时间较长,不易燃尽,所以应根据具体情况选择合适比例掺烧;

(4) 煤灰成分中 K_2O 、 Na_2O 和 CaO 碱性氧化物含量较高,导致准东煤灰熔点偏低;将灰熔点较高的煤种与灰熔点较低的煤种掺混可提高原低熔点煤种的灰熔点温度,从而在煤源方面上一定程度改善炉膛受热面沾污、结渣现象,确保锅炉安全、经济运行。

参考文献:

- [1] 严陆光,周凤起,黄常纲. 新疆煤炭在全国能源发展中的地位[J]. 电工能新技术,2009(1):1-10.
YAN Lu-guang, ZHOU Feng-qi, HUANG Chang-gang. The status of Xinjiang coal in the national energy development [J]. New Technology of Electric Power, 2009(1):1-10.
- [2] 周海魂,黄新兰. 新疆煤炭资源开发与生态环境保护[J]. 中国煤炭,2011(6):16-19.
ZHOU Hai-hun, HUANG Xin-lan. Development of coal resources and ecological environment protection in Xinjiang [J]. China Coal, 2011(6):16-19.
- [3] GB/T15224—2018,煤炭质量分级[S].
GB/T15224—2018, Classification of coal quality[S].
- [4] 王云刚,赵钦新,马海东,等. 准东煤灰熔融特性试验研究[J]. 动力工程学报,2013,33(11):841-846.
WANG Yun-gang, ZHAO Qin-xin, MA Hai-dong, et al. Experimental study on coal ash fusion characteristics in Zhundong [J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2013, 33(11):841-846.
- [5] 范建勇,周永刚,李培,等. 准东煤灰熔融温度表征结渣特性的试验研究[J]. 煤炭学报,2013,38(S2):478-482.
FAN Jian-yong, ZHOU Yong-gang, LI Pei, et al. Experimental study on coal ash fusion temperature characterization of slagging characteristics in Zhundong [J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013, 38(S2):478-482.

- y on slagging characteristics of coal ash fusion temperature in Zhundong[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38 (S2): 478–482.
- [6] 翁青松,王长安,车得福,等. 准东煤碱金属赋存形态及对燃烧特性的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2014, 20(3): 216–221.
- WENG Qing-song, WANG Chang-an, CHE De-fu, et al. Occurrence forms of alkali metals and their effects on combustion characteristics in Zhundong coal[J]. Combustion Science and Technology, 2014, 20(3): 216–221.
- [7] 王智化,李 谦,刘 敬,等. 准东煤中碱金属的赋存形态及其在热解过程中的迁移规律[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (S1): 130–135.
- WANG Zhi-hua, LI Qian, LIU Jing, et al. Characteristics of alkali metals and their migration during pyrolysis in Zhundong coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(S1): 130–135.
- [8] 刘 敬,王智化,项飞鹏,等. 准东煤中碱金属的赋存形式及其在燃烧过程中的迁移规律实验研究[J]. 燃料化学学报, 2014, 42(3): 316–322.
- LIU Jing, WANG Zhi-hua, XIANG Fei-peng, et al. Experimental study on the occurrence of alkali metals in Zhundong coal and their migration in the combustion process[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2014, 42(3): 316–322.
- [9] 薛瑞轩. 准东煤燃烧与结渣特性研究[D]. 华北电力大学, 2015.
- XUE Rui-xuan. Study on combustion and slagging characteristics of Zhundong coal[D]. North China Electric Power University, 2015.
- [10] 魏 博,文 彪,谭厚章,等. 准东煤掺混焦炭燃烧特性研究[J]. 热力发电, 2017, 46(6): 51–55.
- WEI Bo, WEN Biao, TAN Hou-zhang, et al. Combustion characteristics of Zhundong coal blended coke [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(6): 51–55.
- [11] 张 倩,关彦军,张 锴,等. 准东煤对阳泉无烟煤燃烧性能的影响[C]// 中国化工学会, 2017.
- ZHANG Qian, GUAN Yan-jun, ZHANG Kai, et al. Effect of Zhundong coal on combustion performance of Yangquan anthracite [C]// Chemical Industry Society of China, 2017.
- [12] 王春波,李 超,雷 鸣. 水蒸气对煤焦恒温下燃烧特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2013(32): 8–13.
- WANG Chun-bo, LI Chao, LEI Ming. Influence of steam on combustion characteristics of coal char at constant temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2013(32): 8–13.
- [13] 王金星,王春波. 煤/生物质恒温混燃的协同特性[J]. 华北电力大学学报, 2012, 39(6): 89–93.
- WANG Jin-xing, WANG Chun-bo. Synergistic characteristics of coal/biomass constant temperature mixed combustion [J]. Journal of North China Electric Power University, 2012, 39 (6): 89–93.
- [14] 李 超. 恒温下混煤燃烧特性研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- LI Chao. Study on combustion characteristics of blended coal under constant temperature[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014.
- [15] 马 仑. 混煤燃烧过程中着火促进与燃尽抑制作用的实验与模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- MA Lun. Experimental and simulation study on the effect of ignition promotion and burnout inhibition in the process of coal blending combustion [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2018.
- [16] 马 仑,方庆艳,汪涂维,等. 混煤燃烧过程中的交互作用: 煤种对混煤燃烧与 NO_x 排放特性的影响[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2440–2446.
- MA Lun, FANG Qing-yan, WANG Tu-wei, et al. Interaction in the process of coal blending combustion: the influence of coal types on the characteristics of coal blending combustion and NO_x emission [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2440–2446.
- [17] LEE B H, EDDINGS E G, JEON C H. Effect of coal blending methods with different excess oxygen on unburned carbon and NO_x emissions in an entrained flow reactor[J]. Energy & Fuels, 2012, 26(11): 6803–6814.
- [18] 王 雨,赵 斌,赵利杰,等. 城市污泥与煤矸石混燃实验研究[J]. 电力科学与工程, 2013, 29(10): 54–60.
- WANG Yu, ZHAO Bin, ZHAO Li-jie, et al. Experimental study on mixed combustion of municipal sludge and coal gangue [J]. Power Science and Engineering, 2013, 29(10): 54–60.
- [19] 郑 烨,张 锴,李建波,等. 准东煤和煤矸石共燃对灰熔融特性和钠元素释放行为影响[J]. 环境化学, 2020, 39(8): 83–90.
- ZHENG Ye, ZHANG Kai, LI Jian-bo, et al. Effects of co-combustion of Zhundong coal and coal gangue on ash fusion characteristics and sodium release behavior [J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(8): 83–90.
- [20] 王云刚,赵钦新,马海东,等. 准东煤灰熔融特性试验研究[J]. 动力工程学报, 2013, 33(11): 841–846.
- WANG Yun-gang, ZHAO Qin-xin, MA Hai-dong, et al. Experimental study on coal ash fusion characteristics in Zhundong [J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2013, 33(11): 841–846.
- [21] ZHAO Y, ZHANG Y, BAO S, et al. Effect of stone coal chemical composition on sintering behavior during roasting [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 53(1): 157–163.