

DOI: 10.19666/j.rlfed.202305056

耦合炉内气相碱金属检测的结渣预报系统研究

黄书益¹, 王志超², 白彬¹, 岑新坤¹, 张雄³, 蒲旻³, 姚斌³

(1.国家能源集团乐东发电有限公司, 海南 乐东 572500;

2.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

3.华中科技大学煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

[摘要] 高碱煤在燃烧过程中释放的碱金属导致炉膛受热面的沾污、结渣问题, 影响锅炉运行的安全性, 开展炉内结渣趋势的判断研究具有重要意义。采用煤灰成分分析的结渣趋势判别方法与火焰发射光谱技术结合, 在锅炉上安装了一套火焰发射光谱系统用于检测炉内气相碱金属质量浓度, 使用气冷式取样枪在炉膛出口区域开展结渣试验以获得沉积样的沉积趋势。根据在线监测结果, 开发了一种动态预测炉内沾污结渣预报系统。试验结果表明, 系统能够实时反映燃烧工况下各参数的监测结果, 可以对当前燃烧状态下的结渣趋势进行提示, 为预防结渣和进行燃烧调整提供参考。

[关键词] 电站锅炉; 高碱燃料; 气相碱金属; 火焰发射光谱; 结渣

[引用本文格式] 黄书益, 王志超, 白彬, 等. 耦合炉内气相碱金属检测的结渣预报系统研究[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 99-105. HUANG Shuyi, WANG Zhichao, BAI Bin, et al. Investigation of slagging prediction system in boilers coupling measurement of gaseous alkali metal in furnace[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 99-105.

Investigation of slagging prediction system in boilers coupling measurement of gaseous alkali metal in furnace

HUANG Shuyi¹, WANG Zhichao², BAI Bin¹, CEN Xinkun¹, ZHANG Xiong³,
PU Yang³, YAO Bin³

(1.Ledong Power Plant, China Energy, Ledong 572500, China; 2.Xian Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
3.State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The alkali metals released during combustion of high alkali coals can easily lead to fouling and slagging of the heated surfaces of the furnace, affecting the safety of boiler operation, and it is significant to carry out the research of the slagging trend prediction. In this paper, a system for dynamic prediction of slagging trends in the furnace was developed by combining the slagging trend discrimination method based on ash composition analysis with flame emission spectroscopy. Firstly, a flame emission spectroscopy system was installed on the boiler to measure the gas phase alkali metal concentration in the furnace, and then a slagging trends test was carried out in the furnace exit area to obtain the deposition trend of the ash samples. Finally, a dynamic predictive system for predicting slagging in the furnace was developed and applied to the boiler by combining the slagging discriminating trends based on ash composition analysis of different coal samples and online monitoring of gas-phase Na concentrations, which can reflect the monitoring results of each parameter under the current combustion conditions in real-time, indicate the slagging trend in the current combustion state, thus enabling combustion adjustment instructions to prevent severe slagging.

Key words: power plant boiler; high alkali fuel; gas phase alkali metal; flame emission spectroscopy; slagging

收稿日期: 2023-05-04

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB4202002)

Supported by: National Key Research and Development Program (2022YFB4202002)

第一作者简介: 黄书益(1969), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为 ICT、数据分析和人工智能算法及企业数字化转型和智慧电厂建设。

通信作者简介: 王志超(1986), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为火力发电领域燃料特性及其与锅炉匹配性、准东煤沾污结渣防控等技术, wangzhichao@tpri.com.cn.

高碱煤在炉内燃烧过程中产生的气相钠(Na)、钾(K)等碱金属化合物,遇到温度稍低的过热器和再热器即凝结在管壁上,形成白色薄灰层,进而粘结飞灰并继续形成粘着物,使灰层增厚^[1-7],从而使得炉膛出口烟气温度上升,导致锅炉排烟温度升高,使机组经济性降低。因此,开展炉内气相碱金属检测对于火电厂燃煤锅炉沾污结渣防治具有重要作用,有助于提高燃煤发电机组的安全经济性。

近年来,基于光学的燃烧过程中碱金属原位测量技术^[8-9],尤其是基于自发辐射分析的火焰发射光谱技术(flame emission spectroscopy, FES)得到广泛应用^[10-11]。它不需要外加光源,依靠收集、分析火焰自发辐射诊断燃烧,环境适应好、装置结构简单,目前已被用于实验室燃烧火焰^[12-17]、中试燃烧装置^[18-20]及工业级锅炉/窑炉^[21-23]中气相碱金属释放特性的原位检测。

韩雨佳等^[12]较早地在实验室 Hencken 平面燃烧器上开展了准东煤射流火焰中气相碱金属在线测量研究。试验结果表明,Na的发射光谱信号能表征Na的相对析出量。He等人^[13]提出了一种从Na的绝对光谱强度获得火焰中气相Na含量的标定方法,有效识别了生物质颗粒在平面燃烧器上燃烧过程中挥发分析出、焦炭、灰分3个阶段的K释放特性;并开展了高碱煤燃烧过程中气相Na的释放特性研究^[14-15],还用上述标定方法研究了城市固体废物燃烧中气相Na、K的释放特性^[17]。文献^[21]研制了一套便携式光谱测量系统,原位检测了2台垃圾焚烧炉内燃烧温度、气相碱金属、热辐射放热量等参数,测量结果能反映燃料、负荷的变化,且与

灰分中碱金属分析结果一致。Lou^[22]、蒲旻^[23]等分别将便携式系统用于350、300 MW火电机组准东煤燃烧锅炉内气相碱金属检测中;检测结果可反映燃料、负荷变化对气相Na释放的影响,验证了高岭土对气相Na释放的抑制作用以及液态排渣炉内液渣对释放的气相Na的捕集作用;系统能长期稳定运行,基于在线获得的气相碱金属含量能够为炉内受热面的沾污、结渣的预报为燃烧调整提供指导。

本文在上述研究的基础上,首先在1台350 MW火电机组前后墙对冲燃烧锅炉上安装一套在线式FES系统,对炉内气相碱金属质量浓度进行在线检测;其次,开展炉内结渣样品分析试验,探寻气相碱金属质量浓度与结渣程度的关联性;最后,提出耦合炉内气相碱金属检测的结渣预报,为炉内结渣的预报防治提供新的手段。

1 试验设备

1.1 试验锅炉

350 MW 机组燃煤锅炉为 HG-1135/25.4-YM1 型超临界直流锅炉,采用引进三井-巴布科克公司技术的低 NO_x 轴向旋流煤粉燃烧器,前、后墙对冲燃烧方式。锅炉燃用神华煤,而神华煤的挥发分较高、灰熔点较低,容易出现炉内结渣与积灰。同时,部分神华煤中碱金属含量较高,在燃烧过程中释放为气态,也会加重炉内结渣的情况。

1.2 火焰发射光谱系统

为在线检测炉内气相碱金属释放量,在该锅炉上安装了一套火焰发射光谱在线监测系统,其结构如图1所示。

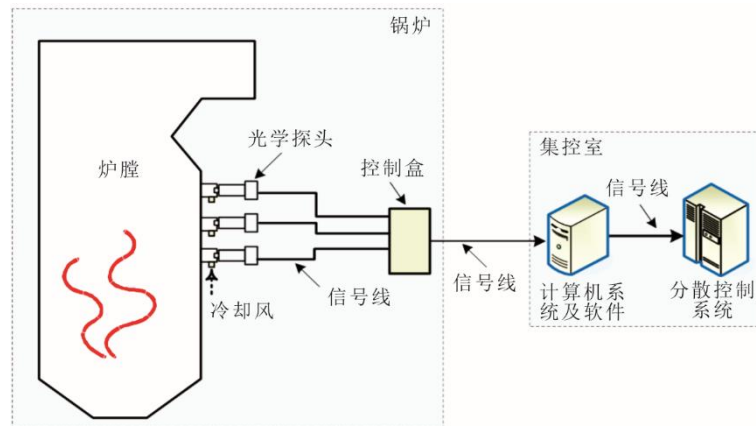


图1 火焰发射光谱系统结构
Fig.1 Schematic of flame emission spectroscopy

该系统由光学探头、信号线缆、控制盒、计算机系统及软件组成。安装在炉膛看火孔处的3支光

学探头用于收集的炉内燃烧火焰发射光谱信号,并通过就地控制盒将3路光谱信号传输到位于集控

室的计算机中。由自行开发的应用软件对光谱信号进行处理,根据 FES 测量原理获得被测位置的炉内燃烧温度及气相 Na 质量浓度^[10-11,13,15],并将结果发送到机组分散控制系统(DCS)中,并在 DCS 中开发了碱金属检测结果及结渣预报界面。

结合锅炉的实际情况,在线式 FES 系统的光学探头安装在上层燃烧器至折焰角区域标高分别为 29、35、44 m 的炉膛左侧墙上,可监测上层燃烧器区域及炉膛上部区域温度和气相 Na 的释放量。光学探头的光谱检测范围为 300~1 000 nm,光谱分辨率为 0.5~0.7 nm,光谱采样时间小于 1 s。使用冷却风对光学探头进行冷却吹扫,保障光学探头长期稳定工作。计算机系统安装在集控室内,内置的软件能在线给出被测位置的燃烧温度和气相 Na 质量浓度,并将检测结果保存在计算机中;同时,通过 Modbus 协议将获得的温度及气相 Na 质量浓度等检测信息输入 DCS 中。

1.3 气冷式取样枪

为获得锅炉燃烧过程的结渣状况,采用取样枪伸入炉膛内,对炉内不同位置进行在线取样。取样枪的冷却介质为压缩空气,空气通过枪体出口被直接排放到炉内,调整空气流量可以控制枪体的温度。取样枪有 1 个可更换的顶部结渣管,管壁表面的积灰结渣样品可使用环氧树脂保留原始形貌,以便对沉积物的形成过程进行分析^[24]。此外,为了模拟沉积后期积灰结渣情况,将一段耐高温陶瓷环(长度 150 mm,内径 60 mm,壁厚 15 mm)单独套在取样枪中段。选取水冷壁区域和 FES 在线监测系统垂直高度接近的观火孔、水平烟道吹灰器预留孔和尾部垂直烟道进行灰沉积取样(图 2)。取样枪伸入炉内后,灰沉积在取样枪的顶部结渣管上。



图 2 取样枪伸入炉内取样

Fig.2 Sampling probe inserted into the furnace for sampling

2 结渣采样试验

2.1 煤质特性

试验中使用了低灰熔点神华煤和高灰熔点准混煤 2 种煤,其煤质分析见表 1。从表 1 可看出,低灰熔点煤具有较高的碱金属含量,Na₂O 和 K₂O 质量分数大于 2.5%,属于高碱煤范畴。

表 1 煤质分析

Tab.1 Analysis of coal properties

项目	低灰熔点神华煤	高灰熔点准混煤	
工业分析 w/%	M _{ad}	12.68	4.90
	A _d	18.92	34.79
	V _{daf}	35.54	38.98
元素分析 w/%	C _d	64.40	49.75
	H _d	3.67	3.27
	O _d	11.38	11.07
	N _d	0.62	0.80
	S _{t,d}	1.01	0.32
发热量/ (MJ·kg ⁻¹)	Q _{gr,d}	24.87	19.26
	Q _{net,d}	24.11	18.59
灰分分析 w/%	Na ₂ O	1.515	0.199
	MgO	2.010	0.287
	Al ₂ O ₃	25.140	50.913
	SiO ₂	46.999	41.828
	P ₂ O ₅	0.085	0.211
	SO ₃	8.693	1.449
	Cl	0.024	0.027
	K ₂ O	1.614	0.456
	CaO	5.562	1.684
	TiO ₂	0.669	1.610
Fe ₂ O ₃	7.424	1.196	
灰熔点分析	DT/°C	1 160	1 490
	ST/°C	1 170	>1 500
	HT/°C	1 190	>1 500
	FT/°C	1 200	>1 500

2.2 试验结果

2.2.1 沉积样分析

在机组满负荷工况下进行了高灰熔点煤(H)和低灰熔点煤(L)的燃烧试验,取样枪在炉内不同取样时间内采集了灰沉积样。图 3 为取样枪顶端和陶瓷环的背风侧沉积样照片。取样枪迎风侧均未出现明显的沉积,而背风侧则有不同程度的积灰,其主要原因是烟气冲击迎风面的速度较大,而烟气流过换热管在背风面产生涡流,使得粒径较小颗粒粘附在换热表面上。不同位置的灰沉积样在宏观形貌上表现不同,顶端结渣管上沉积样较致密且呈灰色,而陶瓷环上沉积样则为松散的灰褐色粗颗粒。这是因为陶瓷环和顶端结渣管表面温度不同,在热

泳力的作用下, 细颗粒更易沉积在较冷的管壁上。



图3 顶端结渣管和陶瓷环沉积样
Fig.3 The depositions on slag tube and ceramic ring

使用高精度天平对 2 种工况下的不同取样时间内的灰沉积样进行称重, 结果如图 4 所示。由图 4 可见, 当全烧低灰熔点煤时, 顶端结渣管和陶瓷环上的灰沉积质量明显大于纯烧高灰熔点煤工况。当沉积时间从 1 h 增加到 3 h 时, 灰沉积速率明显增加, 顶端结渣管和陶瓷环上的沉积样的质量分别增长 2.0 倍和 3.5 倍, 表明当换热器表面生成初始层后, 灰沉积量将在短时间内呈现快速增长趋势。

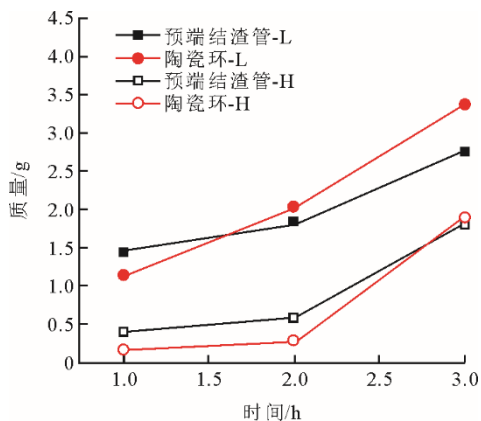


图4 2种煤样不同采样时间沉积样质量
Fig.4 Deposition sample quality at different sampling times for two coal combustion

2.2.2 气相 Na 质量浓度分析

试验期间, 使用火焰发射光谱在线监测系统在标高 29、35、44 m 处的炉内气相碱金属质量浓度进行了连续测量。图 5 为 2 种煤样在满负荷工况下对应采样时间 3 h 内的气相 Na 质量浓度的平均值, 误差棒反映了 3 h 内的数据波动。由图 5 可知, 在锅炉 29 m 以上的区域, 燃用不同煤时, 炉内气相 Na 质量浓度均随锅炉高度增加而降低, 温度的降低

使得部分气相 Na 逐渐冷凝并附着在辐射受热面管壁上。当燃用低灰熔点煤时, 29 m 和 44 m 处监测的气相 Na 质量浓度分别为 12.0 mg/m^3 和 3.4 mg/m^3 ; 当燃用高灰熔点煤时, 两处的气相 Na 质量浓度分别为 1.3 mg/m^3 和 0.3 mg/m^3 , 这表明低灰熔点煤更易结渣。

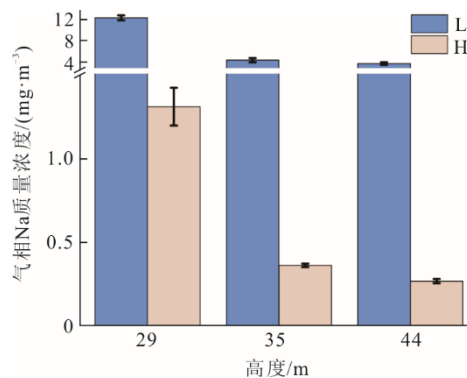


图5 炉内气相 Na 质量浓度监测结果统计
Fig.5 Statistics results of the measured gas phase Na concentrations

3 炉内结渣预报

首先构建煤灰中 Na_2O 质量分数与气相 Na 质量浓度的对应关系, 然后耦合基于 Na_2O 质量分数的结渣趋势, 实现通过气相 Na 质量浓度的检测对炉内结渣趋势的判断。具体步骤如下: 获得 2 种煤样的灰成分分析, 依据灰成分中 Na_2O 质量分数对 2 种煤样的结渣趋势进行判断。表 2 给出了基于 Na_2O 判别煤灰的结渣倾向判别准则^[25]。结合表 1 中的煤灰成分分析结果可知, 低灰熔点煤和高灰熔点煤分别属于高结渣和低结渣倾向。

表2 根据煤灰中 Na_2O 质量分数确定的沾污结渣倾向
Tab.2 Slagging tendency based on Na_2O content in coal ash

$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	结渣倾向
<0.5	低
0.5~1.0	中
1.0~2.5	高
>2.5	严重

第 2 节中使用火焰发射光谱系统获得了燃用 2 种煤样在满负荷条件下炉内气相 Na 质量浓度, 此外可以看出在较短地时间内灰沉积速率明显增强。针对标高 29、35、44 m 3 个测点区域, 获得机组负荷与火焰中气相 Na 质量浓度的对应关系, 并得到不同高度下归一化的气相 Na 质量浓度。建立煤灰中 Na_2O 质量分数和归一化气相 Na 质量浓度

关系,如图 6 所示。结合表 2 中 $w(\text{Na}_2\text{O})$ 所对应的结渣趋势进行耦合,进一步获得基于在线监测结果的实时结渣判别关系(表 3)。

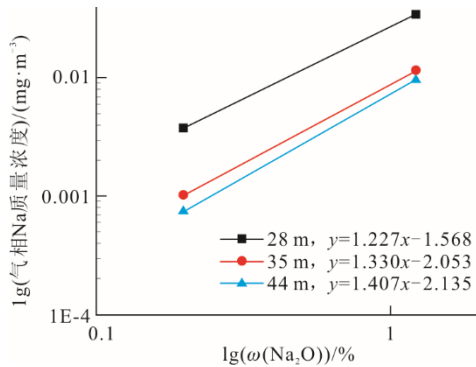


图 6 煤灰中 Na_2O 质量分数和归一化气相 Na 质量浓度关系
Fig.6 Relationship between Na_2O content in coal ash and normalized gas phase Na concentration

通常,在较高的负荷下炉内更易结渣,因为高负荷下炉内燃烧温度更易达到灰熔点,同时气相碱金属质量浓度和灰渣量增多使灰颗粒更易粘附在换热器表面。因此,结渣判别趋势应当考虑当前机组负荷大小。由于结渣行为是一种动态过程,需考虑一定时间内的碱金属释放行为。基于上述试验结

果和分析,提出了一种结渣在线指数 ϕ , 其定义为:

$$\phi = \frac{1}{t_0} \sum_{t-t_0}^t \frac{C}{C_0} \frac{L}{L_0} \quad (1)$$

式中: t_0 为沉积临界时间,取沉积速率变快的临界时间,本文根据第 2 节取 $t_0=180 \text{ min}$; t 为当前时刻; C 为当前气相碱金属质量浓度; C_0 为严重结渣时的临界 Na 质量浓度; L 为机组当前负荷; L_0 为机组额定负荷,即 350 MW。

表 3 根据气相 Na 质量浓度的结渣趋势的判别
Tab.3 Discrimination of slagging tendency based on gas phase Na concentration

气相碱金属质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)			沾污倾向
29 m	35 m	44 m	
[0, 4.0)	[0, 1.2)	[0, 1.0)	不易结渣
[4.0, 9.5)	[1.2, 3.1)	[1.0, 2.6)	一般结渣
[9.5, 29.1]	[3.1, 10.5]	[2.6, 9.3]	中等结渣
>29.1	>10.5	>9.3	严重结渣

基于上述分析,在 DCS 中开发了锅炉结渣预报系统,系统界面如图 7 所示,通过结渣指数的在线计算得到不同区域受热面的结渣趋势的判断,便于运行人员预先进行优化燃烧调整操作。

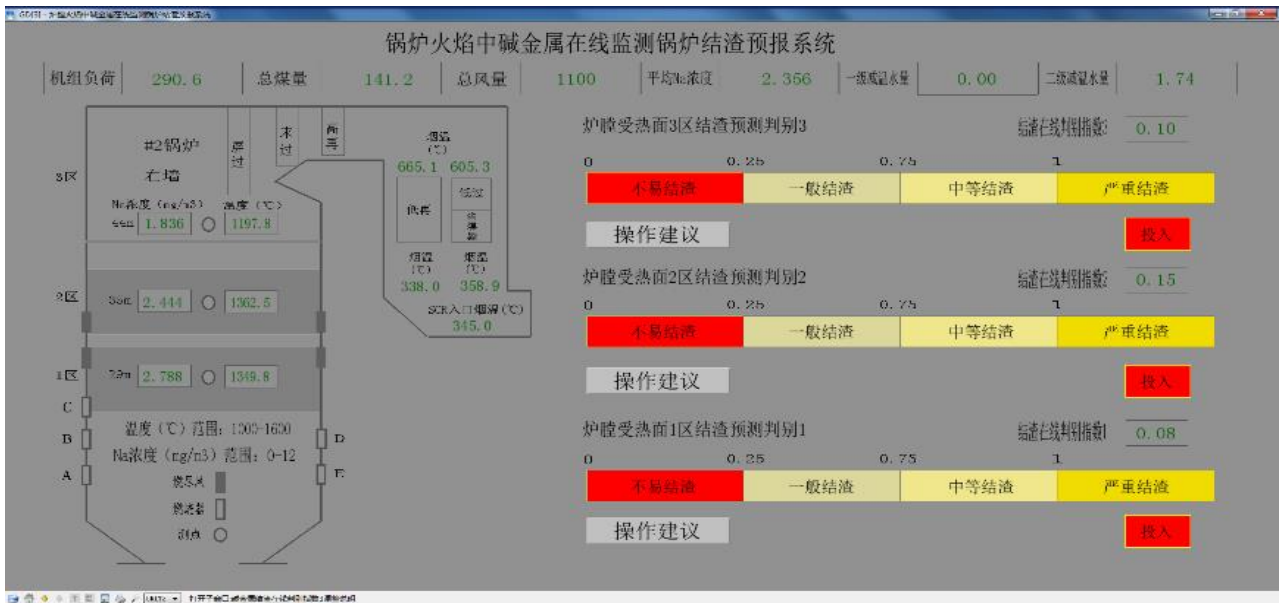
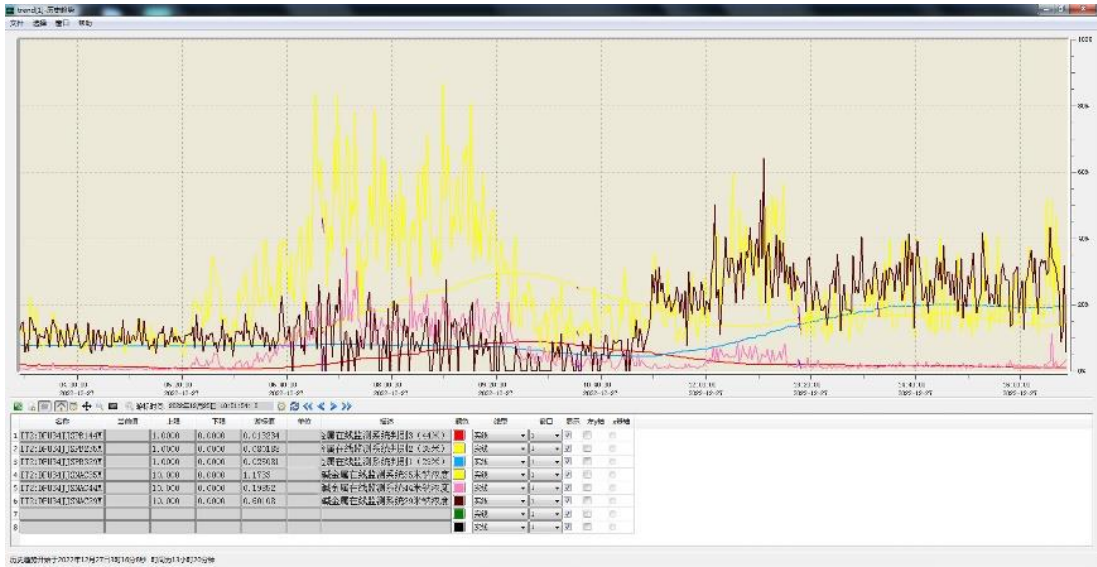


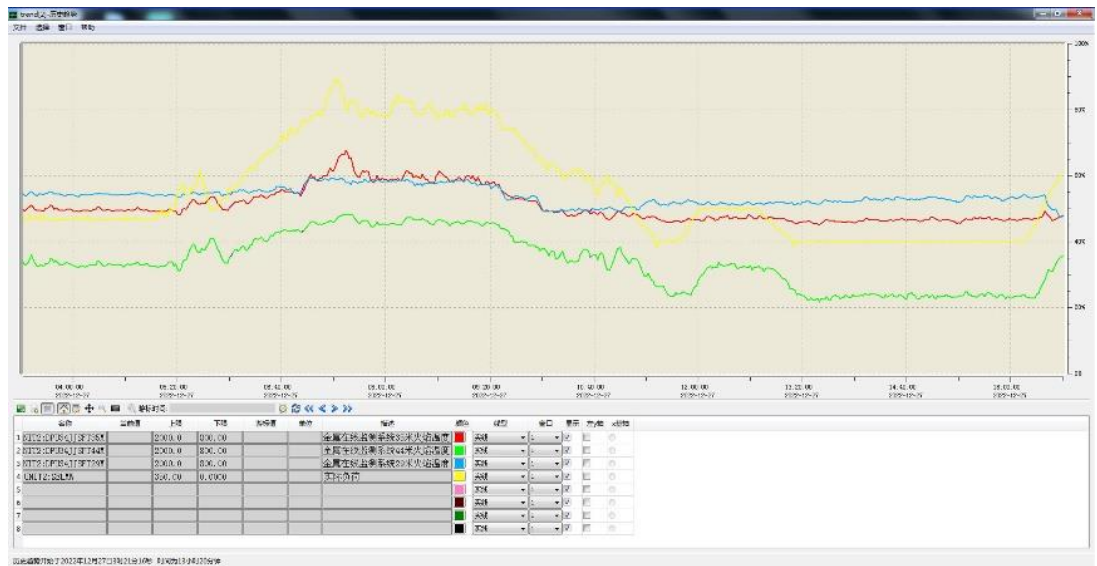
图 7 锅炉结渣预报系统界面
Fig.7 Interface of boiler slagging prediction system

图 8 为燃用 2 种煤样混烧 12 h 内的连续检测值。其中图 8a)为 3 个区域处的气相 Na 质量浓度和结渣在线判别指数,图 8b)为机组负荷和火焰温度。由图 8 可见:温度和气相 Na 质量浓度均与负荷呈正相关;由于负荷变化导致火焰高度的变化,44 m

处温度变化趋势更为明显。高负荷下,29 m 和 35 m 测点区域温度差异不大。结渣在线指数反映了近 3h 的结渣趋势,其变化滞后于机组负荷,根据判别结果显示为不易结渣趋势,与现场实际情况一致,表明高钠煤掺烧低钠煤可减轻或防止结渣。



a) 气相 Na 质量浓度和结渣在线判别指数



b) 负荷和温度

图 8 锅炉 12 h 连续监测数据
Fig.8 12-hour continuous monitoring data from boilers

4 结 语

通过光谱发射系统获得炉内不同高度的气相 Na 质量浓度，利用取样枪获得炉膛灰沉积物，结合现有结渣趋向的研究，提出了耦合气相 Na 质量浓度和机组负荷的结渣在线判别指数，并将研制的锅炉结渣预报系统应用于现场，对锅炉炉内不同区域进行结渣趋势的动态预报。研究表明：炉膛燃烧器区域气相 Na 质量浓度远高于炉膛出口处，灰沉积速率在 2~3 h 内明显升高。结渣在线判别指数滞后于锅炉负荷的变化，锅炉结渣预报系统能够较为准确地预报当前燃烧工况下的结渣趋势。后续的

工作将对不同煤种和不同炉型进行试验验证，综合考虑煤质特性、锅炉结构参数特性、贴壁气氛以及运行氧量等因素对锅炉结渣的影响，逐步完善该结渣预报系统。

[参考文献]

[1] 岑可法, 樊建人, 池作和, 等. 锅炉和热交换器的积灰、结渣、磨损和腐蚀的防止原理与计算[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 1.
CEN Kefa, FAN Jianren, CHI Zuohe, et al. Principles and calculations for the prevention of ash accumulation, slagging, wear and corrosion in boilers and heat exchangers[M]. Beijing: Science Press, 1994: 1.

[2] BRYERS R W. Fireside slagging, fouling, and high-

- temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1996, 22(1): 29-120.
- [3] 董明钢. 高钠煤对锅炉受热面结渣、沾污和腐蚀的影响及预防措施[J]. *热力发电*, 2008, 37(9): 35-39.
DONG Minggang. Influence of high-sodium coal upon slagging, contamination, and corrosion on the heating surface of boilers[J]. *Thermal Power Generation*, 2008, 37(9): 35-39.
- [4] 黄东东, 张守玉, 常明, 等. 高钠煤灰烧结特性研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(1): 83-94.
HUANG Dongdong, ZHANG Shouyu, CHANG Ming, et al. Research progress on sintering characteristics of high sodium coal ash[J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(1): 83-94.
- [5] WU X, 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.
- [6] RUAN R, TAN H, WANG X, et al. Evolution of particulate matter in the post-combustion zone of Zhundong lignite[J]. *Fuel*, 2020, 281: 118780.
- [7] LI J, ZHU M, ZHANG Z, et al. Characterisation of ash deposits on a probe at different temperatures during combustion of a Zhundong lignite in a drop tube furnace[J]. *Fuel Processing Technology*, 2016, 144: 155-163.
- [8] FATEHI H, WENG W, LI Z, et al. A. Recent development in numerical simulations and experimental studies of biomass thermochemical conversion[J]. *Energy & Fuels* 2021, 35: 6940-6963.
- [9] 黄书益, 白彬, 岑新坤, 等. 燃烧过程中碱金属原位测量技术综述[J]. *热力发电*, 2022, 51(9): 11-20.
HUANG Shuyi, BAI Bin, CEN Xinkun, et al. Review of in-situ measurement techniques of alkali metal in combustion[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(9): 11-20.
- [10] LIAO W, YAN C, LYU X, et al. A review of on-line measurement methods of alkali metal emissions from combustion by passive spontaneous emission spectroscopy[J]. *Energies*, 2022, 15: 9392.
- [11] 娄春, 张鲁栋, 蒲昉, 等. 基于自发辐射分析的被动式燃烧诊断技术研究进展[J]. *实验流体力学*, 2021, 35(1): 1-17.
LOU Chun, ZHANG Ludong, PU Yang, et al. Research advances in passive techniques for combustion diagnostics based on analysis of spontaneous emission radiation[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanic*, 2021, 35(1): 1-17.
- [12] 韩雨佳, 杨海梅, 许开龙, 等. 准东煤射流火焰碱金属析出在线测量研究[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(6): 1351-1356.
HAN Yujia, YANG Haimei, XU Kailong, et al. On-line measurement of Alkali metal released from the jet flames of Zhundong coal[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(6): 1351-1356.
- [13] HE Z, LOU C, FU J, et al. Experimental investigation on temporal release of potassium from biomass pellet combustion by flame emission spectroscopy[J]. *Fuel*, 2019, 253(1): 1378-1384.
- [14] 汪淑军, 任学军, 高国栋, 等. 准东煤燃烧过程中碱金属释放光谱检测研究[J]. *热力发电*, 2021, 50(6): 141-144.
WANG Shujun, REN Xuejun, GAO Guodong, et al. Spectroscopic investigation on temporal release of alkali metals from combustion of Zhundong coal[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(6): 141-144.
- [15] LI K, YAN W, YU L, et al. Simultaneous determination of Na concentration and temperature during Zhundong coal combustion using the radiation spectrum[J]. *Energy & Fuels*, 2021, 35(4): 3348-3359.
- [16] LI K, YAN W, HUANG X, et al. In-situ measurement of temperature and potassium concentration during the combustion of biomass pellets based on the emission spectrum[J]. *Fuel*, 2021, 289: 119863.
- [17] HE J, LI J, HUANG Q, et al. Release characteristics of potassium and sodium during pellet combustion of typical MSW fractions using the FES method[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 244: 112233.
- [18] 张向宇, 张广才, 陆续, 等. 准东煤旋风燃烧火焰光谱分析方法[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(16): 5643-5649.
ZHANG Xiangyu, ZHANG Guangcai, LU Xu, et al. Spectral analysis method of Zhundong coal combustion flame in cyclone furnace[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(16): 5643-5649.
- [19] 徐志强, 李东阳, 刘玺璞, 等. 新疆高碱煤旋风燃烧火焰中气相碱金属的检测与分析[J]. *热能动力工程*, 2022, 37(7): 111-115.
XU Zhiqiang, LI Dongyang, LIU Xipu, et al. Detection and analysis of gaseous alkali metals of Xinjiang high-alkali coal combustion flame in cyclone furnace[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2022, 37(7): 111-115.
- [20] JING X, PU Y, LI Z, et al. Experimental investigation of gaseous sodium release in slag-tapping coal-fired furnaces by spontaneous emission spectroscopy[J]. *Energies*, 2022, 15: 4165.
- [21] HE X, LOU C, QIAO Y, et al. In-situ measurement of temperature and alkali metal concentration in municipal solid waste incinerators using flame emission spectroscopy[J]. *Waste Management*, 2020, 102(1): 486-491.
- [22] LOU C, PU Y, ZHAO Y, et al. An in-situ method for time-resolved sodium release behaviour during coal combustion and its application in industrial coal-fired boilers[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2021, 38(3): 4199-4206.
- [23] 蒲昉, 刘洋, 傅培昉, 等. 基于火焰光谱的准东煤旋风燃烧过程中碱金属检测[J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(7): 81-87.
PU Yang, LIU Yang, FU Peifang, et al. Research on alkali metal measurement during the cyclone combustion process of Zhundong coal base on flame spectrum[J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(7): 81-87.
- [24] 张泰. 富氧燃烧条件下高碱煤的非均质成灰与沾污特性[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017: 1.
ZHANG Tai. Experimental study on heterogeneous ash formation and fouling characteristics of a high-alkali coal under oxyfuel combustion [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017: 1.
- [25] 杨志灿, 刘家利, 姚伟. 准东煤灰沾污指标研究[J]. *洁净煤技术*, 2013, 19(2): 81-84.
YANG Zhongcan, LIU Jiali, YAO Wei. Fouling index of Zhundong coal ash[J]. *Clean Coal Technology*, 2013, 19(2): 81-84.

(责任编辑 刘永强)