

DOI: 10.19666/j.rlfed.202312168

我国高碱煤燃烧特性研究和工程应用进展

张海¹, 黄斌², 房凡³, 孙叶柱², 吕俊复¹

(1.清华大学能源与动力工程系, 热科学与动力工程教育部重点实验室, 北京 100084;
2.中国华能集团有限公司, 北京 100004; 3.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 我国具有丰富的高碱煤资源。从基础研究、关键技术和工程实践等方面对高碱煤燃烧技术的研究和工程应用进展做一个较为全面的综述和总结, 特别介绍了液态排渣锅炉全烧新疆高碱煤的机理研究和实践最新状况, 以期为后续开发更为经济、可长期安全大比例掺烧甚至纯烧新疆高碱煤的燃烧技术提供参考。

[关键词] 高碱煤; 碱(土)金属; 燃烧技术; 进展; 综述

[引用本文格式] 张海, 黄斌, 房凡, 等. 我国高碱煤燃烧特性研究和工程应用进展[J]. 热力发电, 2024, 53(1): 1-12.
ZHANG Hai, HUANG Bin, FANG Fan, et al. Progress on research and engineering application of the combustion technologies for high-alkali coals in China[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(1): 1-12.

Progress on research and engineering application of the combustion technologies for high-alkali coals in China

ZHANG Hai¹, HUANG Bin², FANG Fan³, SUN Yezhu², LYU Junfu¹

(1.Key Laboratory for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education,
Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2.China Huaneng Group Co., Ltd., Beijing 100004, China;
3.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: China has abundant high-alkali coal resources. This article provides a comprehensive review and summary of the research and engineering application progress of high-alkali coal combustion technology from the aspects of basic research, key technologies, and engineering practice. In particular, the latest status of the mechanism research and practice of fully burning Xinjiang high-alkali coal in a wet-bottom boiler is introduced. The review aims at providing a reference to develop more economic combustion technology that can safely co-fire a high proportion or even solely burn Xinjiang high-alkali coals in a long operational period.

Key words: high-alkali coal; alkaline (earth) metal; combustion technology; progress; review

21 世纪初, 我国勘探发现新疆准东、伊犁和吐鲁番-哈密地区蕴藏着数千亿吨的煤炭资源。其中准东煤田为我国最大的整装煤田, 预测煤炭资源储量 3 900 亿 t, 已探明储量 2 151 亿 t^[1-3]。因为储量巨大, 又正值国家能源和地方经济发展需求旺盛, 因此, 新疆煤高效利用受到广泛高度重视。

然而, 研究和应用表明, 与我国其他地区的煤质不同, 新疆地区的煤炭普遍存在灰中碱性金属(钠、钾、钙、铁), 尤其碱金属钠含量高的特点。

依据 2018 年发布的中国电力企业联合会标准《电站煤粉锅炉入炉燃料的分类和选择》^[4]划分, 灰中折算 Na₂O 质量分数 (K₂O 折算因子为 0.66) 超过 2.5% 为高碱煤 (2.5%~3.0% 为 I 类; 3.0%~5.0% 为 II 类; 5.0% 以上为 III 类)。目前报道的新疆煤均为高碱煤, 数个矿区的还属 III 类高碱煤。受运输能力和费用的限制, 就近消纳高碱煤最为经济。随着超高压输电线路的建成, “西电东送” “疆电外送” 战略变为可能, 热力发电成为高碱煤的主要利用方式。

收稿日期: 2023-12-04

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目基础能源科技研究专项 (HNKJ20-H50, #U20GJJS05); 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ21-H70)

Supported by: Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ20-H50, #U20GJJS05); Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ21-H70)

第一作者简介: 张海 (1967), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为清洁能源与洁净燃烧技术, haizhang@tsinghua.edu.cn。

通信作者简介: 房凡 (1983), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为燃煤清洁燃烧技术, fangfan@tpri.com.cn。

由于对高碱煤认识不足, 在应用初期, 设计人员一度视之为常规褐煤或者易结渣钙含量较高的神华煤, 致使首批投入运行的燃煤锅炉在高负荷运行时炉内多处水冷壁发生严重的结渣; 同时, 悬挂在炉内的屏式受热面以及放置在水平烟道内的过(再)热器, 甚至尾部的省煤器发生严重的沾污。受热面上结渣和沾污形成的灰层使用吹灰难以解决, 导致传热恶化和金属管材快速腐蚀, 给锅炉造成极大的安全隐患, 同时显著影响机组经济性。这些现象不仅发生在高温燃烧的煤粉炉, 也发生在炉膛温度较低和炉内存有大量固体床料的循环流化床锅炉。可以说, 高碱煤在燃烧过程中出现的受热面沾污结渣问题是其大规模开发利用的重大阻碍。

我国科研人员和工程技术人员从早期工程应用中深刻地认识到新疆高碱煤的特殊性, 所以从“十二五”起便对新疆高碱煤燃烧技术开展了不懈而广泛的研究和技术创新, 取得了丰富的研究成果和显著的技术进步。由于准东煤是目前新疆地区最广泛燃用的煤种, 因此准东煤、高碱煤和新疆煤常指的是同一种煤。本文从基础研究、关键技术和工程实践等方面对高碱煤燃烧技术的研究和工程应用进展进行较为全面的综述和总结, 以期后续开发更为经济、长期、安全大比例掺烧甚至纯烧新疆高碱煤的燃烧技术提供参考。

1 高碱煤的基础研究

1.1 高碱煤的煤质特性

掌握煤质特性是燃烧设备设计的基础。高碱煤煤质特性研究包括常规燃烧特性、煤灰特性、碱金属和碱土金属(AAEM)含量的测定, 以及碱金属赋存形态测定等内容。

1.1.1 常规燃烧特性

常规燃烧特性包括工业分析、元素分析、发热量、着火燃尽特性、热解特性和可磨性等。

表 1 给出了准东煤田 4 个矿区部分煤质参数^[5]。由表 1 可以看出, 这几个矿区的准东煤的挥发分高, 灰分低, 硫分低, 空气干燥基水分较低而热值较高, 其他矿区所报道的也呈现类似特征。

由于准东煤的挥发分与神华煤等烟煤相当, 而灰分更少, 因此其着火温度更低, 热重分析测定值在 300 °C 左右, 燃尽特性良好^[6-8]。

准东煤的哈氏可磨性指数高, 属于易碾磨煤种, 煤的全水分与褐煤相当, 可采用 MPS 型中速磨煤机^[9-10]。

不考虑灰特性的常规燃烧特性分析结果表明, 新疆高碱煤的煤质介于烟煤和褐煤之间, 具有好着火、易燃尽、低硫分、可磨性良好等优点, 是一种具有前景的动力用煤。

表 1 准东煤田 4 个矿区的平均煤质参数

Tab.1 The average coal properties of Zhundong coal from 4 different mines

项目	矿区名称				
	五彩湾	大井	西黑山	梧桐窝子	全区平均
水分 $w_{ad}(M)/\%$	13.000	8.200	8.800	9.600	9.900
灰分 $w_{ad}(A)/\%$	10.900	10.100	10.900	14.100	11.500
挥发分 $w_{daf}(V)/\%$	34.400	32.900	33.300	38.300	34.700
碳 $w_{daf}(C)/\%$	77.300	81.000	76.500	77.700	78.100
氢 $w_{daf}(H)/\%$	3.800	4.000	3.900	4.200	4.000
氮 $w_{daf}(N)/\%$	0.800	0.800	0.940	1.000	0.900
氧 $w_{daf}(O)/\%$	16.500	14.400	15.200	14.900	15.800
低位发热量 $Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$	27.48	28.37	26.80	26.38	27.80
硫 $w_{t,d}(S)/\%$	0.530	0.370	0.270	0.880	0.500
磷 $w_d(P)/\%$	0.014	0.012	0.030	0.040	0.024
氯 $w_d(Cl)/\%$	0.047	0.049	0.070	0.055	0.055
砷 $w_{sd}(A)/(\times 10^{-6})$	2.590		2.020	2.820	2.480

1.1.2 煤灰特性

针对准东煤燃烧工程应用中出现的结渣沾污问题, 高碱煤的煤质特性研究自然地聚焦于煤灰特性, 如灰成分、灰熔点、灰熔融特性、流渣特性等。

表 2 为西安热工研究院有限公司张喜来等^[11]

总结的部分矿区典型高碱煤主要煤灰参数。由表 2 可以看出, 新疆煤灰中 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 等碱性氧化物质量分数偏高, 尤其是 Na_2O 质量分数较高, 因此该煤种也常被称为高钠煤。

刘家利^[12]比较了准东煤与我国动力煤中烟煤、

褐煤的灰分范围，同样显示准东煤具有灰中 SiO₂、Al₂O₃ 酸性氧化物含量偏低，而碱性氧化物含量偏高的特点（表 3）。从灰中碱性氧化物与酸性氧化物的比值（碱酸比 B/A）可以判定准东煤具有严重结渣倾向。高的碱性氧化物含量导致低灰熔融性，灰流温度低、流动特性好^[13]。

尽管理论表明 AAEM 含量高则灰熔点低^[14]，然而有些文献所报道的准东煤的灰熔点却较高，甚

至超过 1 400 °C^[15-16]。这主要是采用《煤灰熔融性的测定方法》（GB/T 219—2008）测定灰熔融特性时，由于制灰温度高，碱金属挥发严重，而准东煤灰中 CaO 含量高，在灰熔点测量过程中起到一定支撑作用，导致测量结果明显高于实际值，对锅炉设计运行无指导意义。因此，在测定高碱煤灰熔点时应该在低温下制得灰样，抑制碱金属的挥发，并采用非常规方法测定^[17-20]。

表 2 国内若干高碱煤主要煤灰参数
Tab.2 Main ash properties of high-alkali coal in China

项目	准东五彩湾煤	准东将二矿煤	准东红沙泉煤	哈密大南湖煤	哈密沙尔湖煤	哈密淖毛湖煤
w _{ar} (M)/%	27.30	26.40	20.70	24.80	29.10	22.20
w _{ar} (A)/%	7.25	9.26	8.69	17.20	7.84	7.89
Q _{net,ar} (MJ·kg ⁻¹)	19.13	20.53	20.33	15.88	16.06	20.08
变形温度 DT/°C	1 320	1 350	1 250	1 290	1 290	1 120
软化温度 ST/°C	1 330	1 360	1 260	1 300	1 300	1 130
流动温度 FT/°C	1 350	1 380	1 280	1 320	1 310	1 130
w(SiO ₂)/%	17.08	25.27	30.09	40.67	29.10	39.83
w(Al ₂ O ₃)/%	6.99	9.52	9.41	20.99	15.88	11.05
w(CaO)/%	27.53	26.42	23.31	11.19	29.32	21.24
w(MgO)/%	7.42	3.64	5.03	4.77	4.52	1.62
w(Na ₂ O)/%	6.08	5.54	4.39	4.61	6.11	4.08
w(K ₂ O)/%	0.46	0.38	0.47	1.58	0.26	1.08
w(TiO ₂)/%	0.61	0.52	0.60	0.99	0.63	0.46
w(SO ₃)/%	21.65	5.71	6.85	5.20	5.15	9.23

表 3 准东煤与我国动力煤中烟煤、褐煤的灰成分范围
Tab.3 The ash content ranges for Zhundong coal and other steam bituminous and lignite coals used for power generation

项目	w/%									熔点/°C
	烟煤			褐煤			准东煤			
	最低	最高	平均	最低	最高	平均	最低	最高	平均	
SiO ₂	19.91	80.88	45.92	10.16	56.42	47.89	1.07	57.85	27.91	1 716
Al ₂ O ₃	8.76	48.60	26.55	5.64	31.38	17.20	4.15	22.88	10.74	2 043
Fe ₂ O ₃	1.15	64.50	7.64	4.67	21.34	9.36	3.80	28.64	11.37	1 566
CaO	0.57	30.41	9.84	5.03	39.02	10.27	4.47	55.88	21.37	2 521
MgO		3.15	1.54	0.11	2.43	3.69	1.61	13.50	7.07	2 799
P ₂ O ₅	0.01	4.88		0.04	2.53					
Na ₂ O		9.57	0.65	0.09	11.38	2.36	2.74	15.92	5.88	1 277（升华）
K ₂ O		9.57	1.03	0.09	11.38	1.44	0.16	2.56	0.77	660（分解）
TiO ₂	0.15	5.36	0.96	0.28	3.76	0.90	0.01	0.68	1.33	1 838
SO ₃	0.07	13.43	4.01	0.63	35.16	6.15	0.55	35.85	13.49	
MnO ₂			0.09			0.07	0.04	0.42	0.12	

吕俊复等^[21]发现：当灰样中碱酸比 B/A < 2.5 时，环境气氛对灰熔融特性无显著影响；而当 B/A ≥ 2.5 时，烟气中 SO₂ 会抑制煤灰中 CaSO₄ 的分解，

提升高温下煤灰中 CaO 质量分数，并减少长石、辉石等低熔点矿物的生成，进而提升煤灰熔融温度。

1.1.3 AAEM 及其赋存形态

AAEM 的赋存形态是影响其释放特性和燃烧特性的重要因素之一^[22-24], 因此成为高碱煤研究的重要内容。目前人们已对高碱煤中 AAEM 的赋存形态获得了较为深入的认识。

AAEM 可粗略分成有机和无机 2 类。有机一部分以羧酸盐的形式存在, 另一部分则以配位形式存在于煤结构中的含氧或者含氮官能团中^[21]。无机 Na 一部分与黏土矿物结合成硅酸钠、铝硅酸钠等, 另一部分可能以 NaCl 形式存在。研究发现新疆高碱煤中的碱金属含量低于碱土金属含量, 碱金属中 Na 的含量高于 K 的含量, 碱土金属中 Ca 的含量高于 Mg 的含量^[25]。

测定 AAEM 的分析方法有逐级提取法(又称浸渍法或者萃取法)和灰成分分析法(包括 X 射线荧光光谱法 XRF、X 射线衍射法 XRD、原子吸收分光光度法 AAS、电感耦合等离子-原子发射光谱法 ICP-AES 等)。扫描电子显微镜 (SEM)、计算机控制扫描电镜 (CCSEM)、电子探针 (EMPA)、红外光谱 (IR)、拉曼光谱等也被用来分析煤中的 AAEM 矿物。逐级提取法的分析结果表明^[26-29]: 准东煤中的 Na 以水溶态 Na 为主, 还有一部分交换态 Na, 酸溶态 Na 和不可溶态 Na 的含量低; K 的含量远低于 Na, 而且 K 主要以酸溶态和不可溶态形式存在。准东煤中 Ca 主要以交换态 Ca 形式存在, 还有一部分为酸溶态 Ca 和不可溶态 Ca, 水溶态 Ca 含量低。但是, 不同研究者的提取条件有差异, 例如提取溶液的浓度、提取时间、提取温度、溶液与煤的混

合比例等。完整提取流程所耗的时间长, 通常需要 60~72 h。为了方便比较不同研究者的实验结果, 需要规范煤中 AAEM 的逐级提取方法^[30]。

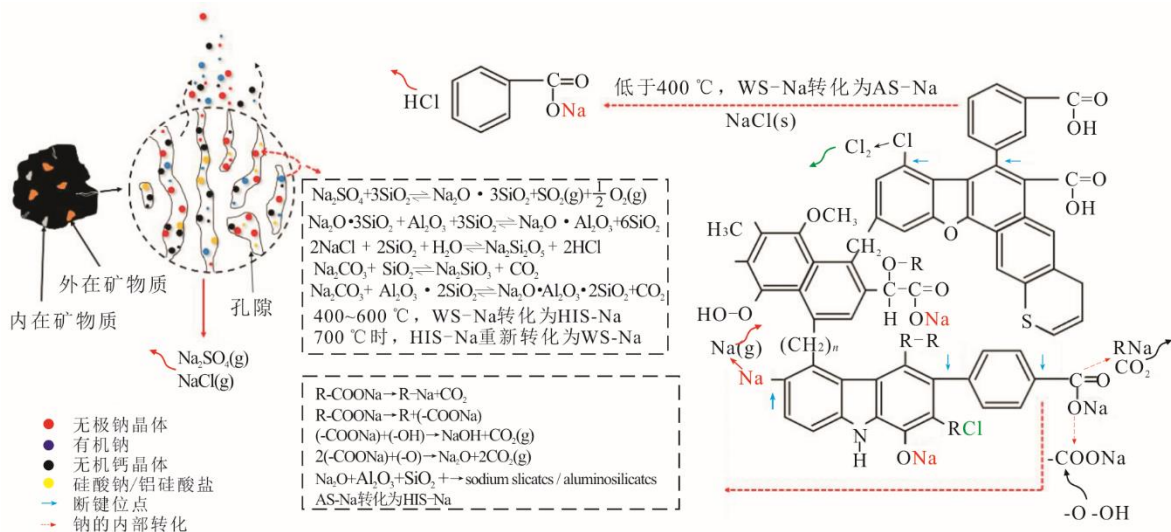
1.2 燃烧过程中 AAEM 迁移特性

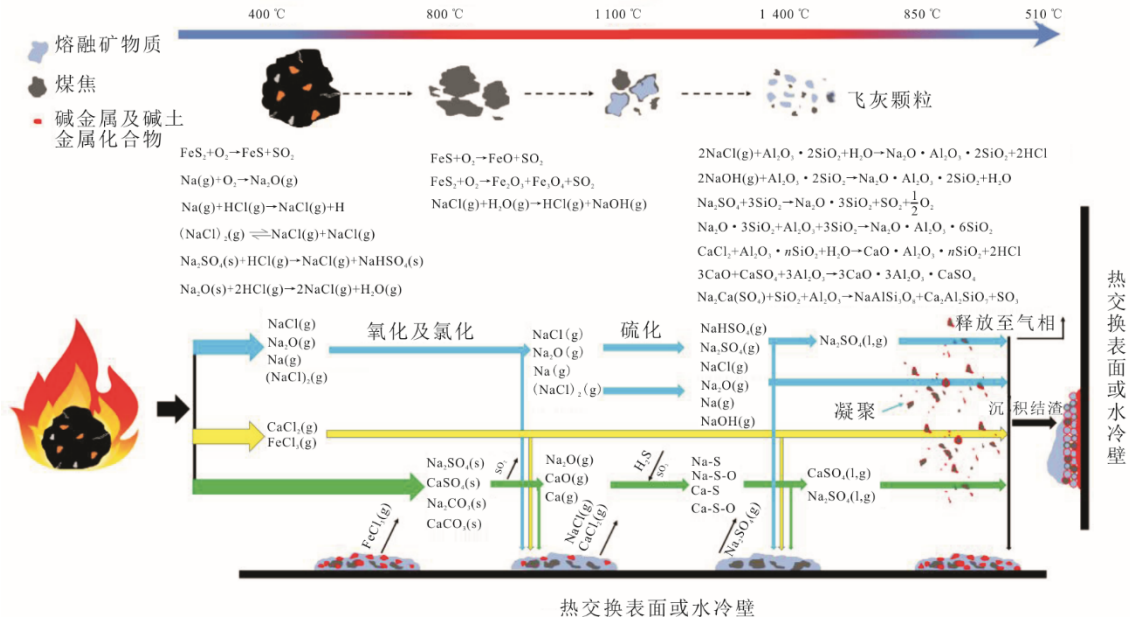
1.2.1 AAEM 的释放特性

AAEM 的释放主要与其赋存形态、反应温度、加热速率、反应气氛等影响因素有关。大量研究表明, 准东煤 AAEM 在热解条件下的释放起始温度较低, 煤中金属 Na 在 550 °C 时便可析出 20%~50%, 超过 800 °C 时, 最高析出量可达 80%。AAEM 的释放与所处的环境气氛相关, 通常在氧化气氛下的起始释放温度比在还原气氛下的更低^[17]。

刘敬^[24]和陶玉洁^[25]等发现, 在燃烧条件下, 准东煤中的碱金属在 400~600 °C 析出最快, 释放温度与灰化温度的影响与 AAEM 在准东煤灰中的含量相关; 而碱金属 Na、Ca 的释放规律不同, Ca 在 1 000 °C 析出最快。

此外, 研究者也发现在释放过程中伴随着 AAEM 的迁移^[22,27,31]。马瑞等^[31]近期较为全面地总结准东煤燃烧过程中 Na 迁移转化机制研究进展, 将燃烧过程中钠的迁移主要分为内部和外部转化 2 个部分。钠的内部转化主要是水溶性 Na 向酸溶性 Na 和少量不溶性 Na 转化; 外部转化主要是以 NaCl(g)、Na₂SO₄(g)、Na 原子以及有机 Na 形式释放的 Na 在氧化、氯化及硫化的作用下形成多种 Na 的化合物, 随着烟气温度降低沉积在飞灰颗粒、炉内换热面上或随烟气排出。高碱煤中 Na 的内、外部转化机理分别如图 1 和图 2 所示。



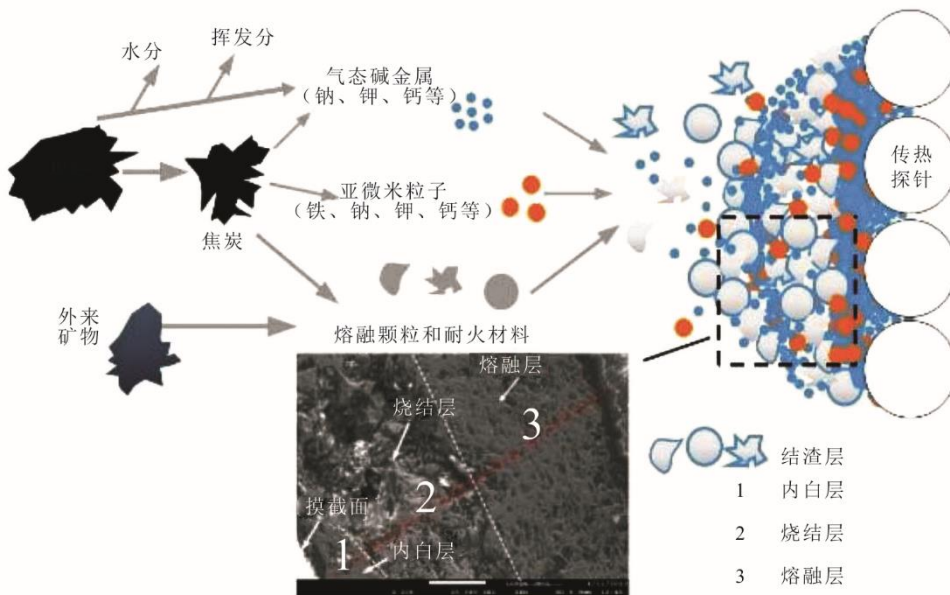


1.2.2 AAEM 的沉积及沾污结渣机理

在加热过程中，煤中的 AAEM 矿物随着煤颗粒温度的升高逐渐发生分解、汽化、升华，进而释放到烟气中。气相 AAEM 矿物是积灰初始沉积层形成的主要组分，许多学者对 AAEM 的沉积机理与过程开展了深入研究。

江锋浩等^[32]综述分析了高碱煤中碱金属的赋存形式及其在燃烧过程中的演变规律与高碱煤燃烧过程中的结渣机理。煤中赋存的 AAEM 在燃烧过

程中与烟气中的其他化合物反应，生成气态的 AAEM 化合物及固态或熔融态的含碱金属矿物质；在碰撞到温度较低的受热面后发生冷凝，硫酸钠及硫酸钙等在受热面表面形成内白层并捕获烟气中灰颗粒，与之反应生成低熔点化合物，促进渣层的生长。AAEM 化合物亦可在固态或熔融态的灰颗粒表面形成液态黏性的涂层，这种带有涂层的颗粒与烟气中含铁矿物质的颗粒加剧了结渣的形成。高碱煤燃烧过程中的沾污结渣机理流程如图 3 所示。



理论研究和小型实验台上的研究可以较好地揭示高碱煤的沾污结渣机理,但是在实际锅炉中烟气流经受热面后温度发生变化,而流经的受热面的温度也不同,因此研究人员还特别关注了烟气沿程中 AAEM 的分布和迁移特性^[33-34]。

王永贞等^[33]借助 ICP、SEM-EDX、XRD 及灰熔点测试手段对燃烧准东宜化煤的 330 MW 电站锅炉烟气沿程沉积样分析研究。结果表明:后墙水冷壁、后屏再热器至低温过热器处沉积样均由松散的大小不一的小球及渣块混合而成,分隔屏过热器与后屏过热器沉积样呈现大的骨架结构;根据沉积样形貌、组成成分及矿物组成分析,将沉积样分为硅酸盐类与硫酸盐类,分隔屏过热器与后屏过热器为硅酸盐类沉积样,后墙水冷壁、后屏再热器至低温过热器为硫酸盐类沉积样。类似地,史航等^[31]采用 XRF、ICP-OES、XRD 测试方法对某燃用准东五彩湾煤的某 350 MW 机组煤粉锅炉的沿程沉积样品进行分析。结果表明:水冷壁、一级过热器及末级再热器沉积样硬度较大,屏式过热器沉积样结构疏松。对沉积样进行组分分析,发现中低温区域沉积样(末级再热器及一级过热器)以硫酸盐为主;高温区域沉积样(水冷壁及屏式过热器)以硅酸盐/硅铝酸盐为主;末级再热器沉积样结构分层明显,沾污最为严重,其 Na 含量高于其他区域,且 Na 含量从贴近管壁内层到外层逐渐降低,与此同时 Ca 含量逐渐增加。

1.2.3 高温熔渣对碱金属的捕捉作用

高温熔渣对碱金属的捕捉作用随着近期使用液态排渣锅炉全烧准东煤的工业试验项目的实施而受到重视。

李明强等^[35]通过模拟旋风炉中自身液渣与高碱煤相互的边界反应,揭示高碱煤中碱金属与熔渣作用过程中的物相及元素迁移行为,发现煤中不同矿物元素在界面反应过程中有不同的迁移特性,发现外层熔渣中主要物相为 CaSO_4 , 同时有相当含量的 $\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 Na_2SO_4 ; 而内层渣主要含有 Ca、Al、Fe、Mg 等元素。液渣对 Na、K 的捕捉率超过 50%, 结合量子化学对液渣捕捉高碱煤中元素的行为机理进行了研究。

乌晓江等^[36]通过搭建高温模拟反应装置探究液态排渣过程中高碱煤碱金属与熔渣矿物质反应机制,发现高碱煤与高温熔渣反应过程中挥发的 Na、K、Ca、Fe 等元素与高温熔渣反应,生成富含

Na、K 的变钾铁矾、三斜钾沸石、新硅钙石、白矾、斜钾铁矾等硫酸复盐和硅铝系复盐;煤中部分 Na、K 等元素通过高温熔渣的固化作用被富集固化至熔渣中。

Wu 等人^[37]基于 20 MW 液态排渣卧式燃烧中试试验台开展实验研究,结果发现:液态渣中 Na_2O 质量分数在 2.3%~8.6% (原煤灰中 Na_2O 质量分数 7.66%), 液态渣中钠的主要存在形式为 Na-Al-Si 系共晶化合物,这表明液态渣对 Na 有一定的捕获效果,并能以共熔物的形式排出炉膛。

张翔等^[38]在 3 MW 试验台上研究新疆高碱煤沾污结渣特性,发现在炉膛燃烧区域的渣样主要以含铁、钙矿物为主,如磁铁矿(Fe_3O_4)、钙硅石(CaSiO_3)等;在高温对流受热面区域,由于煤中 Na、K 等碱金属的升华、冷凝作用以及沾污层与烟气中 SO_2 、飞灰颗粒之间的物理化学反应,其沾污层主要以熔点较低的无水石膏(CaSO_4)、无水芒硝(Na_2SO_4)以及 Na-Al-Si 和 Ca-Al-Si 的低温共熔体。这些低温共熔体在较低的温度下有较强的黏性,能够进一步捕捉烟气中的飞灰颗粒,加速沾污层厚度的增长。

近期,兰德辉等^[39]利用小型卧式液态排渣锅炉对液渣对碱金属的捕捉作用进行研究。结果表明:炉内液渣中 Fe 元素会粘结在硅铝酸盐颗粒表面,增加其黏性,加强捕获灰颗粒的能力;而采用卧式液态排渣炉燃用高碱煤能有效缓解炉膛内壁沾污、结渣问题,且液渣对碱金属 Na、K 等的捕捉效率达 50% 以上,高于添加高岭土对 Na 的捕捉效率。胡兴雷等^[40]搭建了一维沉降炉碱金属高温释放试验系统,开展了高碱煤低温热解实验以及测试分析,结果表明,温度是影响碱金属释放的主要因素。在燃烧初期,水溶性 Na 的释放主要以分子形式释放,Ca、Fe 对等元素对燃烧初期 Na 的释放影响并不显著;而在温度达到 1 300 °C 以上时,Ca、Fe 等元素相比水溶性 Na 更易与 Si 和 Al 的氧化物形成低温共熔物,此时的液渣为 Na-Ca-Fe-Al-Si-O 的低温共熔物,这促进了可溶性 Na 的释放以及对不溶性 Na 的捕捉,且 K 的释放机制与 Na 相似。

上述机理研究和实炉验证表明了液态排渣工艺能够有效捕捉高碱煤中的碱金属,并使 Na-Ca-Fe-Al-Si 等低温共熔物以液态渣的形式排出炉膛,降低了后续受热面附近的碱金属总量,实现对飞灰的改性,有望从根本上解决高碱煤中 AAEM 所带来的受热面沾污与结渣问题。

2 高碱煤沾污和结渣防控技术

我国各大锅炉制造厂、高等院校和科研院所的科技人员都非常重视高碱煤沾污和结渣防控技术的研究与开发,也已形成一系列行之有效的技术防控技术,多位学者在不同时期从不同角度进行了综述^[4,11,41-42]。

2.1 掺烧低碱煤

掺烧(或称混煤燃烧)是一种常用于应对易结渣煤燃烧的燃烧技术。掺烧能使不同煤种在燃烧中发生反应,改变燃烧产物和灰烬颗粒成分,影响灰沉积特性,最终实现缓解灰沉积问题的目的。对于准东煤,掺烧低碱煤可以降低液相 AAEM 硫酸盐的生成,从而减轻锅炉沾污,多个电厂采用这一方法后取得良好效果^[4,8,43-45]。

陈大元等^[46]分析近 30 台掺烧准东煤锅炉设计煤质和入炉煤质特点,结合不同矿区准东煤在一维火焰炉上的结渣和煤灰烧结沾污性能测试结果,得到了影响准东煤锅炉安全运行的关键煤质指标,建议将以下煤质指标控制在安全范围内: $w(\text{Na}_2\text{O}) \leq 4\%$; $w(\text{Fe}_2\text{O}_3) \leq 10\%$, 当 $w(\text{CaO}) > 15\%$ 时, $w(\text{Fe}_2\text{O}_3) \leq 8\%$; $w(\text{CaO}) \leq 20\%$, 碱性组分 $B \leq 36\%$, $B/A \times w(\text{Na}_2\text{O}) \leq 2.3$ 。然而,受限于当地的低碱煤的资源,掺烧的经济性较差。如果运输费用降低,疆煤外送后,在内地电厂进行掺烧不失为一条高碱煤的利用途径^[8]。

2.2 掺混高岭土

另一种常规的途径是掺混高岭土,其原理是利用高岭土在高温下生成高熔点物质,固化高碱煤碱金属的释放,并提高灰熔点^[47-50]。

张利孟等^[48]的实验研究表明,掺混高岭土后准东煤灰熔融温度呈现先下降后上升趋势。掺混比例为 3% 时,准东煤灰以钙黄长石、铁橄榄石、镁硅钙石为主,三者易形成低温共融物,导致此比例下灰熔融温度大幅降低;添加比例超过 6% 后,灰中矿物质由易形成低温共融的钙黄长石向高熔点的钙长石转变,软化温度 ST 快速上升至 1 380 °C。结渣指标计算结果表明,高岭土在原煤中掺混比例达到 6% 时,能够有效缓解准东煤结渣。

目前,相当数量的电厂在高负荷下采用掺混高岭土这种方法。白杨等^[50]报道了五彩湾电厂 350 MW 机组锅炉掺混 7.5% 高岭土调控煤灰成分的实施情况,对制粉系统、燃烧系统、吹灰系统

的运行参数进行深度协同优化后实现了锅炉长期安全运行,经济效益显著。对该厂而言,掺混高岭土经济性强于掺混煤矸石。综合文献报道,高岭土的掺烧量在 5%~10%;对于一些高碱煤适应性强的机组,在掺配约 3% 高岭土情况下可长周期安全稳定运行^[8,45-48]。

虽然高岭土能显著提升机组安全及经济性,但近年高岭土价格逐年升高、供不应求,掺烧对机组的经济性有一定负面影响,需要提高高岭土的使用效率或者寻求其他经济高效的无机添加剂^[39]。

2.3 炉膛设计技术

在新锅炉设计时,技术人员非常重视炉膛的设计,提出了高碱煤锅炉的炉膛选型准则,其核心是降低锅炉的热负荷和炉膛出口烟气温度^[4,8,48,50-52]。

杨忠灿等^[4]认为炉膛出口烟气温度(指折焰角尖端向上垂直平面的平均温度)一般取 $DT-100$ °C 和 $ST-150$ °C 中的较低值;可采用加大最上层燃烧器与屏过底部的距离和调整受热面布置等措施来降低炉膛出口烟气温度。

常家星等^[51]在改造 480 t/h 准东煤锅炉时提出了采用空气深度分级,燃烧器小切圆布置,在易结渣和沾污部位增加吹灰器和利用热炉烟管道提高热一次风温等措施,达到低 NO_x 排放和长期连续高负荷运行。

燃用准东煤的煤粉锅炉的炉型主要分为 Π 型炉及塔式炉 2 种。文博等^[52]分析认为塔式炉主要有以下优点:1) 相同条件下,屏底烟气温度较低,炉膛出口截面烟气温度偏差较小;2) 受热面水平布置,无水平烟道,无折焰角,不易堆灰,有利于受热面吹灰器的布置,无吹灰死角;3) 烟气流速向上,灰粒子受重力作用,部分粘聚的大颗粒可通过重力作用回落至炉膛;4) 与 Π 型布置相比,选用塔式锅炉,更易于尾部受热面布置和蒸汽侧参数匹配,从而大幅度降低结渣、沾污、积灰趋势。此外,塔式炉还有占地少的优势,但制造和安装成本较高。

顾玮伦和龙志云^[53]总结分析已投运的大容量燃用高碱煤锅炉运行数据,提出了高碱煤锅炉炉膛选型、燃烧器设计和控制工质侧偏差的关键技术。依据《大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则》(DL/T 831—2015)中相关的规定,建议采取适当放大炉膛断面、增加燃尽高度的措施来防止结渣和沾污,建议选取炉膛容积热负荷 q_v 约为

60 kW/m³, 截面热负荷 q_F 约为 4.2 MW/m², 燃烧器区热负荷 q_B 约为 1.1 MW/m²。新建的 600 MW 等级机组准东煤锅炉 q_V 大都在 60 kW/m³ 以下, 最低甚至接近 50 kW/m³, 相应的 q_F 约 3.8 MW/m², q_B 甚至低至 0.84 MW/m²[52]。

2.4 燃烧器及燃烧组织技术

研究人员在充分认识准东煤燃烧特性的基础上, 提出了燃烧器设计的一些原则[53], 包括:

- 1) 控制主燃区火焰温度, 避免产生局部高温、引起结渣;
- 2) 着火稳定, 燃烧充分, 燃烧动力场易于组织;
- 3) 有效防止结渣和高温腐蚀;
- 4) 控制煤粉燃烧速度, 炉内烟气分布均匀;
- 5) 有效控制 NO_x 排放, 保证高效燃烧。

此外, 随着深度调峰逐渐成为常态, 还需要保障燃烧器的低负荷稳燃能力。

杨忠灿等[4]认为选择切圆燃烧方式时, 燃烧器采用分段布置可增加燃烧器高度, 降低燃烧器区热负荷。燃烧器可以采用水平浓淡燃烧器或在燃烧器侧面加侧边风, 有效减轻一次风偏斜防止结渣。同心正切、同心反切(双切圆或部分一次风对冲、二次风启旋消旋系统对防止锅炉结渣的效果较好, 对消除锅炉出口烟气温度偏差的效果也相对较好。对于燃烧器区结渣较重的锅炉, 应采取调平四角一次风速、适当提高运行氧量和一次风速、降低煤粉细度和均匀分配燃烧器热负荷、二次风正塔配风等。

选择墙式对冲燃烧方式时, 可通过降低外二次风(或三次风)的旋流强度, 减轻燃烧器气流的飞边和结渣现象, 但燃烧器和炉墙之间必须保持一定的距离以防止锅炉侧墙结渣。

2.5 吹灰技术

吹灰是防治锅炉结渣沾污的被动措施, 却也是必不可少的手段。杨忠灿等[4]指出, 首先应考虑在燃烧器区及上部易结焦和沾污高温区布置足够数量的蒸汽吹灰器, 确保其较高的可用率并安排合理的吹灰程序, 对易结渣部位进行选择性的吹灰, 必要时还可考虑在燃烧器区安装适量的水力吹灰器。

董亮等[54]认为使用蒸汽吹灰时, 再热器减温水压力与吹灰蒸汽压力比较接近, 运行过程中也可以避免减温水调节阀开度过小导致调节阀磨损的问题, 如吹灰系统减温水仍取自自主水管路, 可在减温水管路增设多个调节阀, 降低单个调节阀的减压

值。或者在管路上增设其他减压装置, 如多级节流孔、管道变径等装置降低调节阀前后差压。类似地, 白杨等[50]也认为为了确保长伸缩蒸汽吹灰器的高效清灰能力, 在吹灰试验过程中可以适当地提升中长伸缩吹灰器阀后蒸汽压力。

2.6 其他方法

其他方法包括喷涂和洗煤等, 由于价格较高, 目前使用的很少, 不再赘述。

3 高碱煤燃烧技术的工程应用

3.1 新型超(超)临界煤粉锅炉

我国高碱煤燃烧技术取得了显著的进步, 相关成果已经在电力行业得到了推广应用, 锅炉高碱煤掺烧比例由 60% 以下提高到 90% 以上, 但目前仍未能完全实现全烧高碱煤[8]。

3.2 液态排渣煤粉锅炉

华能国际牵头的研究团队在杨柳青热电厂 300 MW 等级液态排渣锅炉上进行了全烧高碱煤 168 h 工业试验。为防止液态排渣锅炉 NO_x 生成量大, 试验前对锅炉进行了深度空气分级改造, 将助燃风分为二次风、三次风 I 和三次风 II 逐级给入, 降低选择性催化还原(SCR)装置入口 NO_x 含量。

试验选用新疆淖毛湖高碱煤, 其入炉煤和灰成分见表 4。

表 4 试验期间入炉煤和灰成分分析 单位: w/%
Tab.4 Analysis of coal and ash composition during the test

项目	数值	
工业分析	收到基水分 M _{ar}	14.01
	收到基灰分 A _{ar}	20.88
	收到基挥发分 V _{daf}	30.15
	收到基固定碳 FC	36.23
灰成分	二氧化硅 SiO ₂	16.64
	氧化铝 Al ₂ O ₃	16.02
	氧化钙 CaO	30.26
	氧化铁 Fe ₂ O ₃	12.53
	三氧化硫 SO ₃	16.24
	氧化钠 Na ₂ O	3.79
	氧化钾 K ₂ O	0.87
	氧化镁 MgO	1.02
二氧化钛 TiO ₂	0.77	
五氧化二磷 P ₂ O ₅	0.08	

结果表明：在 300 MW 负荷下，液态渣对 Na、K 金属捕集率为 54.8%，煤灰中大部分 Na、K 通过液态渣的形式被排出炉膛；SCR 装置入口的 NO_x 质量浓度约 293.15 mg/m^3 （折算到 $\varphi(\text{O}_2)=6\%$ ），未增加脱硝系统负担，表明液态排渣锅炉高温深度空气分级技术具有良好的 NO_x 控制效果；实测锅炉热效率 93.16%，与燃用其他煤种差异不大（最近一次性能试验，燃用掺混烟煤，锅炉效率为 92.81%），可见全烧高碱煤未对锅炉效率产生负面影响。试验期间流渣情况如图 4a)所示，与燃用日常煤种（图 4b)）时液态渣流动情况对比，渣液黏度更低，可见燃用高碱煤时液态渣的流动性更好。

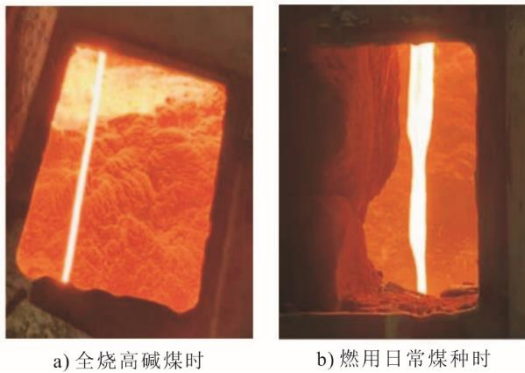


图 4 燃用高碱煤前、后锅炉流渣情况对比
Fig.4 Comparison of the moving slags before and after high-alkali coal is burnt

工业试验表明，液态排渣锅炉有望实现长周期清洁、高效、安全地全烧高碱煤。

3.3 半塔式循环流化床燃煤锅炉

尽管循环流化床锅炉的燃烧温度比煤粉锅炉低得多，但在燃用准东煤时出现过严重的沾污、结渣问题^[55-56]。新疆米东热电厂由东方锅炉厂生产的亚临界 300 MW 循环流化床在运行中暴露准东煤强沾污结渣特性。锅炉按照淮南煤设计，炉膛温度约为 $950 \text{ }^\circ\text{C}$ 。投运后改烧准东煤，3 个月后锅炉再热汽温呈现不断下降趋势，导致锅炉被迫停炉。检查发现尾部烟道受热面严重堵灰，炉膛内有少量焦块，分离器出口水平烟道受热面表面形成覆盖渣层，高温过热器上层管子结渣严重^[47-48]。

清华大学基于长期的循环流化床锅炉和准东煤的研究经验，开发了全烧准东煤的半塔式循环流化床锅炉^[56]。锅炉设计采用单炉膛、尾部单烟道、半塔式布置的自然循环炉型，由唐山锅炉厂制造，锅炉整体布置如图 5 所示。床温控制在 $880\sim 890 \text{ }^\circ\text{C}$ ，

控制炉膛出口烟气温度的低于 $650 \text{ }^\circ\text{C}$ ，将 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上烟温区域受热面，包括高温过热器、中温过热器、低温过热器、蒸发器、省煤器布置在分离器之前的炉膛中。

该炉采用石灰石进行炉内脱硫，将 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上烟温区域受热面布置在锅炉的炉膛中，通过实际燃用准东煤（灰中 Na 质量分数最高值约 6%）锅炉进行了工业验证。260 t/h 准东煤循环流化床锅炉建成投运后，燃用灰分中 Na_2O 质量分数 6.0% 的准东煤，锅炉运行 1 年后检查，炉膛受热面没有结渣现象，且在运行期间，炉膛受热面的吹灰器没有投运，炉内受热面无积灰^[57]。

目前存在的问题是对流受热面磨损较严重，影响机组长周期运行，如何在防沾污和防磨损方面实现平衡还待进一步研究^[8]。

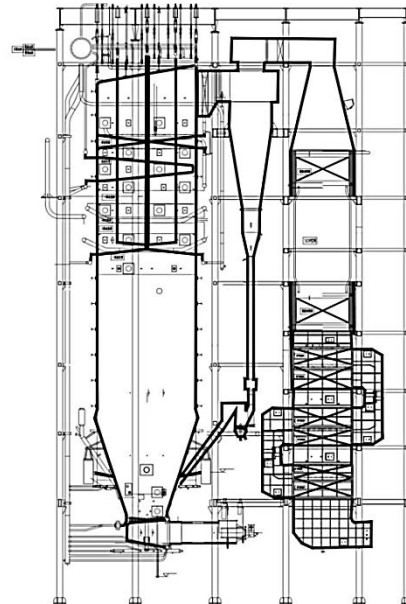


图 5 全烧准东煤的 260 t/h 循环流化床锅炉
Fig.5 The 260 t/h CFB boiler burning pure Zhundong coal

此外，采用半塔式循环流化床锅炉全燃准东煤迄今为止只在 1 个工程上得到实施，需要全面总结经验，完善设计。特别地，此工程的容量较小，锅炉容量放大后的炉体支撑、受热面布置、防磨，以及制造成本控制等都是未来需要研究的课题。

4 结论与展望

1) 大规模、安全、高效、清洁燃用新疆地区的煤炭对保障我国能源安全、实现“双碳”目标和发展西部经济具有重大意义。新疆煤炭具有良好的动力煤特征，但碱金属含量高，导致锅炉受热面严

重沾污、结渣,影响机组的安全性和经济性。

2) 从新疆大煤田被探明至今的近20年,我国研究人员和工程技术人员通过不懈努力,在高碱煤燃烧特性和技术开发取得了巨大成就,基本上掌握了高碱煤的燃烧特性和沾污、结渣机理,新建的电站锅炉大多数可安全长期燃用90%甚至以上的高碱煤,而且在液态排渣锅炉和半塔式循环流化床锅炉上实现了全烧准东煤的个别工程案例。多数早先投运的固态排渣锅炉也可以通过掺烧和掺混高岭土实现锅炉的高负荷安全运行。

3) 然而,不管是液态排渣锅炉和半塔式循环流化床锅炉都尚处于全烧高碱煤的探索阶段,均只在单一工程上实施,现有的半塔式循环流化床锅炉的容量只有260 t/h,技术成熟度仍待加强,且局限于掺烧煤种和高岭土资源,成本较高。因此,面向大批的存量 and 新建机组,持续加大相关基础问题的研究和关键技术的开发力度,发展全烧高碱煤燃烧技术仍十分必要且相当迫切。

4) 高碱煤是一个统称,研究表明其灰特性与产煤矿区有密切联系,各矿区甚至各煤层的煤质都可能存在显著不同,在锅炉设计和运行中不能想当然地不加区别。此外,特别值得后期关注的还有,一些矿区,如沙尔湖等矿区的高碱煤具有高碱高氯的特征,高氯元素含量将带来严重的腐蚀问题,燃用这些煤种挑战性更强,需要针对性地开展相关燃烧基础研究和关键技术开发。

【参考文献】

- [1] 周海魂. 新疆煤炭产业的市场前景和发展方向[J]. 中国煤炭, 2007, 33(7): 23-25.
ZHOU Haihun, Market prospect and development direction for Xinjiang coal industry[J]. China Coal, 2007, 33(7): 23-25.
- [2] 孙海勇, 杨芊, 樊金璐. 新疆煤炭及煤化工产业发展现状与趋势分析[J]. 煤炭经济研究, 2020, 40(2): 57-61.
SUN Haiyong, YANG Qian, FAN Jinlu. Development status and trend analysis of Xinjiang coal and coal chemical industry[J]. Coal Economic Research, 2020, 40(2): 57-61.
- [3] ZHOU J, ZHUANG X, ALASTUEY A, et al. Geochemistry and mineralogy of coal in the recently explored Zhundong large coal field in the Junggar basin, Xinjiang, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 82(1/2): 51-67.
- [4] 电站煤粉锅炉入炉燃料的分类和选择: T/CEC 154—2018[S]. 北京: 中国电力企业联合会, 2018: 1.
Infurnace fuel classification and selection for the coal burning power boilers: T/CEC 154—2018[S]. Beijing: China Electricity Council, 2018: 1.
- [5] 陈新蔚, 庄新国, 周继兵, 等. 准东煤田煤质特征及分布规律[J]. 新疆地质, 2023, 31(1): 89-93.
CHEN Xinwei, ZHUANG Xinguo, ZHOU Jibing, et al. Coal quality and its distribution of the Eastern Junggar Coalfield in Junggar Basin, Xinjiang[J]. Xinjiang Geology, 2023, 31(1): 89-93.
- [6] 杨忠灿, 刘家利, 何红光. 新疆准东煤特性研究及其锅炉选型[J]. 热力发电, 2010, 39(8): 38-44.
YANG Zhongchan, LIU Jiali, HE Hongguang. Study on properties of Zhundong coal in Xinjiang region and type-selection for boiler burning this coal sort[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(8): 38-44.
- [7] 刘威, 张忠孝, 乌晓江, 等. 高碱煤燃烧特性试验研究[J]. 电站系统工程, 2014, 30(2): 20-22.
LIU Wei, ZHANG Zhongxiao, WU Xiaojiang, et al. Experimental study of high-alkali coal on combustion characteristic[J]. Power System Engineering, 2014, 30(2): 20-22.
- [8] 杭伊焯, 金晶, 杨浩然, 等. 准东煤燃烧特性试验研究[J]. 动力工程学报, 2020, 40(3): 185-190.
HANG Yixuan, JIN Jing, YANG Haoran, et al. Experimental study on combustion characteristics of Zhundong coal[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(3): 185-190.
- [9] 徐哲, 董晓宇. 全烧准东煤中速磨煤机的选型参数探讨[J]. 中国高新技术企业, 2015(12): 159-160.
XU Zhe, DONG Xiaoyu. The research on the type-selection parameters for the vertical mills for full Zhundong coal firing[J]. China High-Tech Enterprises, 2015(12): 159-160.
- [10] 车长发, 郭宏亮. MPS-HP-II型中速磨煤机碾磨新疆准东煤的应用[J]. 中阿科技论坛, 2019(2): 74-76.
CHE Changfa, GUO Hongliang. Application of MPS-HP-II medium-speed coal mill for grinding Xinjiang Zhundong coal[J]. China-Arab States Science and Technology Forum, 2019(2): 74-76.
- [11] 张喜来, 王志超, 周广钦, 等. 电站锅炉高碱煤燃用技术发展现状及展望[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 133-141.
ZHANG Xilai, WANG Zhichao, ZHOU Guangqin, et al. Present situation and prospect of high alkali coal combustion technology in power plant boiler[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 133-141.
- [12] 刘家利. 准东煤灰熔融性与灰成分相关性分析[J]. 洁净煤技术, 2015, 21(5): 99-102.
LIU Jiali. Correlation analysis of ash softening temperature and ash composition of Zhundong coal[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(5): 99-102.
- [13] 杨燕梅, 张海, 张扬, 等. Si/Al/Na/Ca对准东煤灰熔融特性的影响[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(8): 1858-1863.
YANG Yanmei, ZHANG Hai, ZHANG Yang, et al. Effect of Si/Al/Na/Ca on ash fusion characteristics of Zhundong coal[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2018, 39(8): 1858-1863.
- [14] 杨燕梅, 张海, 吴玉新, 等. 不同灰化温度下准东煤碱/碱土金属的析出特性[J]. 燃烧科学与技术, 2015, 21(4): 297-300.
YANG Yanmei, ZHANG Hai, WU Yuxin, et al. Release of alkali/alkaline earth metal species in Zhundong coal at different ashing temperatures[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2015, 21(4): 297-300.
- [15] 茅锦达, 王恩禄, 李德立, 等. 煤灰沾污结渣判别指标与准东煤实际沾污结渣程度关联分析[J]. 锅炉技术, 2022, 53(5): 15-20.
MAO Jinda, WANG Enlu, LI Deli, et al. Correlation analysis between identification indicators of coal ash

- fouling and slagging and Zhundong coal fouling and slagging degree in the utility boilers[J]. *Boiler Technology*, 2022, 53(5): 15-20.
- [16] 王岩, 高继录, 陈晓利, 等. 新疆准东煤结渣沾污特性研究[J]. *东北电力技术*, 2018, 39(10): 23-25.
WANG Yan, GAO Jilu, CHEN Xiaoli, et al. Research on coking and contamination characteristics of Xinjiang Zhundong coal[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2018, 39(10): 23-25.
- [17] 杨燕梅. 准东煤碱/碱土金属赋存形态与释放特性的研究[D]. 北京: 清华大学, 2017: 1.
YANG Yanmei. Occurrence modes and release characteristics of alkali and alkaline earth metal species in Zhundong coals[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017: 1.
- [18] 杨燕梅, 杨欣华, 刘青, 等. 灰化温度对准东煤灰组分分析的影响[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(10): 2441-2447.
YANG Yanmei, YANG Xinhua, LIU Qing, et al. Effect of ashing temperature on analysis of Zhundong coal ash[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(10): 2441-2447.
- [19] 刘成昌, 赵林, 孙峰, 等. 灰化方法对高碱燃料成灰特性影响的实验研究[J]. *工程热物理学报*, 2022, 43(5): 1416-1421.
LIU Chengchang, ZHAO Lin, SUN Feng, et al. Experimental study on the effects of ashing method on the ash characteristics of high-alkali fuel[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2022, 43(5): 1416-1421.
- [20] 谭雪梅, 史鉴, 胡南, 等. 高碱金属燃料灰结渣特性表征方法[J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(增刊 2): 460-465.
TAN Xuemei, SHI Jian, HU Nan, et al. Characterization of slagging about high alkali metal fuel ash[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(Suppl.2): 460-465.
- [21] 吕俊复, 史航, 吴玉新, 等. 烟气气氛对准东煤灰熔融特性影响的显微观察[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 263-273.
LYU Junfu, SHI Hang, WU Yuxin, et al. Influence of flue gas atmosphere on Zhundong coal ash melting characteristics through microscopic observation[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 263-273.
- [22] 李勇, 肖军. 燃煤过程中碱金属赋存迁移规律及相关研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2005, 11(1): 39-44.
LI Yong, XIAO Jun. The occurrence and migration mechanism of alkali metal during coal-fired process and research progress[J]. *Clean Coal Technology*, 2005, 11(1): 39-44.
- [23] 陈川, 张守玉, 刘大海, 等. 新疆高钠煤中钠的赋存形态及其对燃烧过程的影响[J]. *燃料化学学报*, 2013, 41(7): 832-838.
CHEN Chuan, ZHANG Shouyu, LIU Dahai, et al. Existence form of sodium in high sodium coals from Xinjiang and its effect on combustion process[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2013, 41(7): 832-838.
- [24] 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 Zhihua, XIANG Feipeng, et al. Modes of occurrence and transformation of alkali metals in Zhundong coal during combustion[J]. *Journal of Fuel Chemistry and Technology*, 2014, 42(3): 316-322.
- [25] 陶玉洁, 张彦威, 周俊虎, 等. 准东煤在燃烧过程中的矿物演变过程及 Na、Ca 释放规律[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(5): 1169-1175.
TAO Yujie, ZHANG Yanwei, ZHOU Junhu, et al. Mineral conversion regularity and release behavior of Na, Ca during Zhundong coal's combustion[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(5): 1169-1175.
- [26] 祁慧, 赵永椿, 姚斌, 等. 水洗脱除准东煤中水溶性钠的影响因素分析[J]. *热力发电*, 2015, 44(9): 14-18.
QI Hui, ZHAO Yongchun, YAO Bin, et al. Influence factors of removing water soluble sodium in Zhundong coal by water washing[J]. *Thermal Power Generation*, 2015, 44(9): 14-18.
- [27] 姚宇翔, 金晶, 钟程鹏, 等. 准东煤中钠的赋存形态及挥发特性[J]. *煤炭转化*, 2016, 39(1): 1-5.
YAO Yuxiang, JIN Jing, ZHONG Chengpeng, et al. Occurrence mode and volatilization characteristic of sodium in Zhundong coal[J]. *Coal Conversion*, 2016, 39(1): 1-5.
- [28] 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(增刊 1): 130-135.
WANG Zhihua, LI Qian, LIU Jing, et al. Occurrence of alkali metals in Zhundong coal and its migration during pyrolysis process[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(Suppl.1): 130-135.
- [29] 准东煤煤质燃烧及沾污机理研究实验分析报告[R]. 上海: 上海普华煤燃烧技术研究中心, 2014: 43-44.
The analysis report on the combustion and fouling characteristics for Zhundong coal[R]. Shanghai: Shanghai Puhua Coal Combustion Technology Center, 2014: 43-44.
- [30] YANG Y, WU Y, ZHANG H, et al. Improved sequential extraction method for determination of alkali and alkaline earth metals in Zhundong coals[J]. *Fuel*, 2016, 181: 951-957.
- [31] 马瑞, 魏博, 范卫东, 等. 准东煤燃烧过程中钠迁移转化机制研究进展[J]. *洁净煤技术*, 2023, 29(10): 27-53.
MA Rui, WEI Bo, FAN Weidong, et al. Research progress of sodium migration and transformation during combustion of Zhundong coal in China[J]. *Clean Coal Technology*, 2023, 29(10): 27-53.
- [32] 江锋浩, 张守玉, 黄小河, 等. 高碱煤燃烧过程中结渣机理研究进展[J]. *煤炭转化*, 2018, 41(2): 1-8.
JIANG Fenghao, ZHANG Shouyu, HUANG Xiaohu, et al. Research progress on slagging mechanism during high alkali coal combustion process[J]. *Coal Conversion*, 2018, 41(2): 1-8.
- [33] 王永贞, 金晶, 刘敦禹, 等. 330 MW 燃准东煤电站锅炉烟气沿程灰沉积特性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(21): 6373-6380.
WANG Yongzhen, JIN Jing, LIU Dunyu, et al. Characterization of ash deposits along the flue gas for Zhundong coal combustion in a 330 MW boiler[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(21): 6373-6380.
- [34] 史航, 吴玉新, 郭前鑫, 等. 准东煤碱金属在 350 MW 煤粉炉内的沿程分布特性[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(23): 6981-6986.
SHI Hang, WU Yuxin, GUO Qianxin, et al. Distribution characteristics of the alkali in Zhundong coal along the flue gas of a 350 MW pulverized coal furnace[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(23): 6981-6986.
- [35] 李明强, 樊俊杰, 张忠孝, 等. 液渣捕捉高碱煤中碱金属特性及机理[J]. *燃烧科学与技术*, 2017, 23(5): 429-435.
LI Mingqiang, FAN Junjie, ZHANG Zhongxiao, et al. Mechanism study on liquid slag capture of alkali metal[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2017, 23(5): 429-435.
- [36] 乌晓江, 丘加友, 张翔, 等. 高温熔渣对高碱煤碱金属捕捉特性研究[J]. *锅炉技术*, 2019, 50(1): 1-5.

- WU Xiaojiang, QIU Jiayou, ZHANG Xiang, et al. Experimental study on the alkali metal capture characteristics of slag at high temperature[J]. Boiler Technology, 2019, 50(1): 1-5.
- [37] WU X, ZHOU Y, SUN Y, et al. Ash deposition and slagging behavior of Xinjiang high-alkali coal in a 20 MW_{th} cyclone combustion test facility[C]. Singapore: Springer Singapore, 2022.
- [38] 张翔, 乌晓江, 陈楠. 新疆高碱煤沾污结渣特性中试实验研究[J]. 锅炉技术, 2016, 47(4): 44-47.
- ZHANG Xiang, WU Xiaojiang, CHEN Nan. Experimental study on Xinjiang high-alkali ash deposition and slagging behavior in a 3 MW_{th} pilot scale test facility[J]. Boiler Technology, 2016, 47(4): 44-47.
- [39] 兰德辉, 樊俊杰, 张忠孝, 等. 卧式液态排渣旋风炉燃烧高碱煤试验研究[J]. 洁净煤技术, 2020, 26(4): 119-126.
- LAN Dehui, FAN Junjie, ZHANG Zhongxiao, et al. Experimental study on combustion of high alkali coal in horizontal liquid slag cyclone furnace[J]. Clean Coal Technology, 2020, 26(4): 119-126.
- [40] 胡兴雷, 李丹, 张海东, 等. 高碱煤液态排渣燃烧条件下碱金属释放特性研究[J]. 锅炉技术, 2023, 54(4): 30-39.
- HU Xinglei, LI Dan, ZHANG Haidong, et al. Study on alkali release characteristics during the slag tapping combustion of high-alkali coal[J]. Boiler Technology, 2023, 54(4): 30-39.
- [41] 郭涛, 曹林涛, 黄中, 等. 准东高钠煤燃烧利用技术研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(1): 331-333.
- GUO Tao, CAO Lintao, HUANG Zhong, et al. Research on using technology in Zhundong high sodium coal combustion [J]. Coal Technology, 2015, 34(1): 331-333.
- [42] 靳雍华, 程智海, 娄中发. 锅炉高效燃烧新疆高碱煤方法综述[J]. 上海电力大学学报, 2023, 39(5): 467-471.
- JIN Yonghua, CHEN Zhihai, LOU Zhongfa. Summary of efficient combustion methods for Xinjiang high alkali coal in boilers[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2023, 39(5): 467-471.
- [43] 杜智华, 姚伟, 方顺利, 等. 350 MW 机组锅炉掺烧准东煤结渣问题分析[J]. 热力发电, 2015, 44(11): 109-113.
- DU Zhihua, YAO Wei, FANG Shunli, et al. Investigation on slagging problem occurred on a 350 MW boiler co-fired Zhundong coal[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(11): 109-113.
- [44] LI J, ZHU M, ZHANG Z, et al. The mineralogy, morphology and sintering characteristics of ash deposits on a probe at different temperatures during combustion of blends of Zhundong lignite and a bituminous coal in a drop tube furnace[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 149: 176-186.
- [45] ZHU C, TU H, BAI Y, et al. Evaluation of slagging and fouling characteristics during Zhundong coal co-firing with a Si/Al dominated low rank coal[J]. Fuel, 2019, 254: 115730.
- [46] 陈大元, 刘家利, 方顺利, 等. 准东煤锅炉掺烧时煤灰成分控制研究[J]. 热力发电, 2020, 49(1): 26-33.
- CHEN Dayuan, LIU Jiali, FANG Shunli, et al. Control of coal ash composition during co-combustion of Zhundong coal boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(1): 26-33.
- [47] XU L L, LIU J, KANG Y, et al. Safely burning high alkali coal with kaolin additive in a pulverized fuel boiler[J]. Energy & Fuels, 2014, 28(9): 5640-5648.
- [48] 张利孟, 董信光, 刘科, 等. 高岭土对准东煤结渣特性及矿物质演变的影响[J]. 燃料化学学报, 2015, 43(10): 1176-1181.
- ZHANG Limeng, DONG Xinguang, LIU Ke, et al. Effect of kaolin on ash slagging and mineral conversion of Zhundong coal[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2015, 43(10): 1176-1181.
- [49] 乌晓江, 张翔, 陈楠. 高岭土对新疆高碱煤沾污结渣特性的影响研究[J]. 锅炉技术, 2017, 48(2): 5-9.
- WU Xiaojiang, ZHANG Xiang, CHEN Nan. Effect of adding clay on ash fouling/slagging characteristic of Xinjiang high alkali coal[J]. Boiler Technology, 2017, 48(2): 5-9.
- [50] 白杨, 郭洋洲, 高国栋, 等. 煤粉锅炉高比例燃用准东高碱煤试验研究[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 157-166.
- BAI Yang, GUO Yangzhou, GAO Guodong, et al. Experimental study on burning high ratio of Zhundong high alkali coal in a pulverized coal boiler[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 157-166.
- [51] 常家星, 杨忠灿, 李尚华, 等. 480 t/h 锅炉改烧准东煤改造[J]. 热力发电, 2014, 43(3): 116-119.
- CHANG Jiaying, YANG Zhongcan, LI Shanghua, et al. Retrofitting for burning Zhundong coal for a 480 t/h boiler[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 157-166.
- [52] 文博, 杨忠灿, 屠竞毅, 等. 大型准东煤锅炉炉型和燃烧方式选择研究[J]. 热力发电, 2021, 50(10): 71-77.
- WEN Bo, YANG Zhongcan, TU Jingyi, et al. Selection of furnace type and combustion mode for large scale boiler firing Zhundong coal[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(10): 71-77.
- [53] 顾玮伦, 龙志云. 燃用高碱煤大容量高效锅炉的关键技术研究[J]. 锅炉制造, 2020(4): 9-12.
- GU Weilun, LONG Zhiyun. Research on the key technology of high capacity and high efficiency boiler burning high alkali coal[J]. Boiler Manufacturing, 2020(4): 9-12.
- [54] 董亮, 郭森, 张国付. 某 660 MW 超超临界锅炉吹灰系统减温水调节阀工作异常分析[J]. 锅炉制造, 2020(4): 7-8.
- DONG Liang, GUO Sen, ZHANG Guofu. Abnormal operation analysis of the spray control valve of soot blowing system of a 660 MW ultra supercritical boiler[J]. Boiler Manufacturing, 2020(4): 7-8.
- [55] 邱忠, 梁进林. 循环流化床锅炉燃烧新疆准东五彩湾煤的对策探讨[J]. 应用能源技术, 2012(12): 16-19.
- QIU Zhong, LIANG Jinlin. Circulating fluidized bed boiler burning Xinjiang Wucaiwan Area in Zhundong coal measures[J]. Applied Energy Technology, 2012(12): 16-19.
- [56] 陈衡, 王云刚, 马海东, 等. 循环流化床锅炉燃用准东煤结渣、沾污分析[J]. 热能动力工程, 2015, 30(3): 431-435.
- CHEN Heng, WANG Yungang, MA Haidong, et al. Analysis and study of the slagging and contamination of a CFB boiler burning Zhundong-originated coal[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2015, 30(3): 431-435.
- [57] 史航, 杨燕梅, 吴玉新, 等. 260 t/h 全烧准东煤循环流化床锅炉设计与运行[J]. 中国电力, 2017, 50(11): 28-32.
- SHI Hang, YANG Yanmei, WU Yuxin, et al. Design and operation of the 260 t/h circulating fluidized bed boiler burning Zhundong coal[J]. Electric Power, 2017, 50(11): 28-32.

(责任编辑 刘永强)