

# 锅炉全烧准东煤沾污结渣特性分析

白 杨

( 神华国神集团公司技术研究院, 陕西 西安 710065 )

**摘 要:**针对燃烧新疆准东煤存在结渣、沾污等问题,在新疆宜化 150 t/h 锅炉全烧准东煤进行实炉测试试验。在全烧准东煤期间,对锅炉炉膛水冷壁、过热器、低温受热面、底渣的结渣形态观测,对以上各部位渣样取样分析。结果显示,锅炉全部燃烧准东煤时存在严重的结渣与沾污问题。结合实验室试验研究及本次实炉测试试验,认为结渣、沾污主要原因是由于煤中钠的氯化物、氧化物、单质气化后形式挥发到烟气中冷凝在高温管壁,与烟气  $\text{SO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等化合生成硫酸盐沉积,煤中铁矿石分解后与  $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  等形成低温共融化合物,降低灰熔融性温度,增加准东煤灰结渣、沉积倾向,煤中高钙、高水分加速了烟气低温段的积灰。

**关键词:**准东煤;结渣;沾污;积灰;氧化钠

中图分类号:TQ533

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2017)03-0118-06

## Analysis of slagging and fouling characteristics in a purely burning zhundong coal boiler

Bai Yang

(Shenhua Guoshen Technical Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to elucidate the problem of severe slagging and fouling during burning Zhundong coal, 150 t/h boiler in Xinjiang Yihua company was used to carry out the assessment on all-Zhundong coal operation. The fouling configuration and morphology of water wall panel, super-heater, low temperature tube, and bottom ash were traced, and the slags from different positions were analyzed. The results show that the boiler suffers seriously slagging and fouling during entirely burning Zhundong coal. The slagging and fouling are caused by various forms of Na-bearing materials, such as sodium chloride and sodium oxides as well as elemental sodium released from coal and accumulated on the high temperature metal surface, reacting with  $\text{SO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  to produce sulfates. The Fe-bearing minerals will decompose and combine with  $\text{CaO}$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  etc to produce low temperature eutectics. Such eutectics can decrease the ash melting temperature and accelerate the slagging and fouling propensity of Zhundong coal. Moreover, Ca and water in coal promote the accumulation of duster in the low temperature tube.

**Key words:** Zhundong coal; slagging; fouling; ash accumulation; sodium oxide

## 0 引 言

新疆准东煤田储藏量近 4 000 亿 t,是我国目前发现的最大整装煤田<sup>[1]</sup>。准东煤着火温度低、燃尽率高、燃烧经济性高、污染物排放低,是优良的动力用煤,但是准东煤中 Na、K 等碱金属元素含量远高于我国现有动力用煤,具有极为严重的结渣、沾污特

性,对燃煤机组的安全稳定运行极为不利,仅能通过掺烧、添加剂等被动手段维持机组运行<sup>[2-3]</sup>。

国内学者对其结渣、沾污机理开展了相关研究,取得了研究成果。如张守玉等<sup>[4]</sup>采用灰沉积试验法对样片微观形貌及元素分析,发现 Na、K 元素在样片内层出现了明显的内层富集现象。刘大海等<sup>[5]</sup>通过萃取试验获取了五彩湾煤中钠的存在形

收稿日期:2017-01-03;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.03.023

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2015BAA04B02)

作者简介:白 杨(1984—),男,陕西榆林人,工程师,从事锅炉燃烧技术研究工作。E-mail: baiyang198497@163.com

引用格式:白杨. 锅炉全烧准东煤沾污结渣特性分析[J]. 洁净煤技术,2017,23(3):118-123.

Bai Yang. Analysis of slagging and fouling characteristics in a purely burning zhundong coal boiler[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(3): 118-123.

式,认为五彩湾煤中钠主要为水溶钠,有机钠主要以羧酸盐形式存在。魏博等<sup>[6]</sup>利用一维沉降炉试验系统进行准东煤燃烧试验,在沉降炉底部不同烟气温度处采用沉积取样探针收集灰样,进而得到 Na、Ca 及 S 的迁移规律及其在结渣过程中所起作用。杨换凌等<sup>[7]</sup>采用广义梯度近似算法,建立 NaCl 与 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的吸附计算模型,结果表明:NaCl 与 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 之间的吸附能力高,使之容易黏结在受热面形成严重的结渣。相关实验室试验、建模分析的研究存在试验周期短、采集数据准确性低,不能捕捉结渣、沾污过程形态,不能完全模拟各种反应气氛、传热特性对碱金属元素赋存形态影响的不足。因此,还需要通过半工业化或实炉试验,稳定燃烧工况,进一步揭示结渣、沾污机理。本文选择新疆宜化的一台 150 t/h 锅炉进行 100% 全烧准东煤实炉试验,建立全烧准东煤反应工况,进行了为期 8 d 的试验,对各时间段内结渣、沾污形态观测及不同受热面结渣、积灰采样与分析,为深入分析准东煤燃烧结渣、沾污机理及其预防提供指导。

## 1 锅炉概况

新疆宜化自备电厂锅炉由武汉锅炉厂设计制造,锅炉为中压、单汽包自然循环、固态排渣、全钢架悬吊结构、紧身封闭煤粉锅炉,无中间再热,采用湿式刮板捞渣机。

锅炉炉膛结构尺寸深 6.8 m,宽 6.8 m,高 24.3 m,最上层燃烧器至锅炉出口烟窗中心距离

14.87 m,主要技术参数见表 1。

表 1 锅炉技术规范

Table 1 Boiler technical specification

项目	数值
锅炉最大连续蒸发量(B-MCR)/(t·h <sup>-1</sup> )	150
额定主蒸汽压力(B-MCR)/MPa	3.82
给水温度/°C	140
锅炉保证效率/%	91
炉膛出口过剩空气系数	1.20
空气预热器出口一次风温度/°C	312.4
空气预热器出口二次风温度/°C	312.4
炉膛出口烟气温度/°C	1 056.9
空气预热器出口烟气温度(修正后)/°C	145.0

锅炉采用中速磨煤机正压冷一次风直吹式制粉系统,共配置 3 台 HP583 型中速磨煤机,2 台运行,1 台备用。燃烧器采用四角布置切向燃烧方式,水平固定,假想切圆直径为 395 mm,燃烧器设计参数见表 2。

表 2 燃烧器设计参数

Table 2 Burner design parameters

项目	风率/ %	风速/ (m·s <sup>-1</sup> )	风温/ °C	风量/ (m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )
一次风	25.99	30.8	66	53 701
二次风	69.01	44.3	301	220 367

锅炉以宜化五彩湾露天矿煤为设计煤,设计煤与校核煤的基本煤质资料见表 3。

表 3 锅炉设计煤与校核煤煤质资料

Table 3 Coal quality comparison of design coal and check coal of boiler

煤种	工业分析/%				元素分析/%					Q <sub>gr,ar</sub> / (MJ·kg <sup>-1</sup> )	Q <sub>net,ar</sub> / (MJ·kg <sup>-1</sup> )	哈氏可磨 性指数		
	M <sub>t</sub>	M <sub>ad</sub>	A <sub>ar</sub>	V <sub>daf</sub>	C <sub>ar</sub>	H <sub>ar</sub>	N <sub>ar</sub>	O <sub>ar</sub>	S <sub>t,ar</sub>					
设计煤种	20.33	11.20	10.90	36.00	54.78	2.75	0.62	10.11	0.51	21.15	20.05	102		
校核煤种 1	23.94	12.29	4.35	33.95	56.35	3.27	0.47	11.04	0.58	21.63	20.28	—		
校核煤种 2	18.50	10.06	3.43	30.80	61.78	3.00	0.44	12.51	0.34	22.79	21.75	113		
煤灰熔融特征温度/°C				煤灰成分分析/%										
煤种	变形温 度/10 <sup>3</sup>	软化温 度/10 <sup>3</sup>	半球温 度/10 <sup>3</sup>	流动温 度/10 <sup>3</sup>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ti <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MnO <sub>2</sub>
设计煤种	1.02	1.05	1.07	1.095	18.12	8.34	8.44	37.47	4.21	4.28	0.41	0.41	21.59	0.170
校核煤种 1	1.23	1.28	1.30	1.32	29.58	10.25	5.02	24.27	3.94	4.78	0.56	0.85	21.33	0.186
校核煤种 2	1.48	>1.50	>1.50	>1.50	9.42	6.12	7.27	43.77	12.68	9.25	0.78	0.57	9.15	0.094

锅炉炉膛设计布置 6 支蒸汽吹灰器,水平烟道

对流受热面布置 4 支蒸汽吹灰器,尾部烟道安装激

波吹灰器。后续在炉膛又增加7支蒸汽吹灰器,水平烟道增加了8支蒸汽吹灰器,尾部烟道激波吹灰器更换为16个CO<sub>2</sub>长吹灰器。

## 2 试验条件

准东煤田范围大,不同矿区煤灰成分差异较大<sup>[8-9]</sup>,煤灰中SiO<sub>2</sub>含量为9%~50%,Na<sub>2</sub>O和K<sub>2</sub>O含量为4%~10%,CaO含量为12%~35%,MgO为3%~10%,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为5%~15%。本文以准东宜化五彩湾露天矿煤为对象进行研究。

根据1号锅炉运行情况进行了燃烧调整,保证锅炉煤粉着火良好,燃烧火焰不发生偏转,主要进行了以下准备工作:①磨煤机出口一次风调平。经调平后,各磨煤机各一次风管流量偏差均调整在±5%(表4)。②表盘磨煤机通风量标定。磨煤机通风量标定结果见表5,由试验结果可见各台磨煤机风量显示值均比实测值偏小,需按试验给出的修正系数进行修正。③煤粉细度调整。对各台磨煤机煤粉细度调整后,为了掌握磨煤机的实际运行状况,依次对3台磨煤机进行煤粉取样和筛分,结果见表6。

表4 磨煤机出口一次风速调平结果

Table 4 Outlet primary wind speed of coal mill

项目	A 磨煤机				B 磨煤机				C 磨煤机			
	调前		调后		调前		调后		调前		调后	
	气流速度/ (m·s <sup>-1</sup> )	偏差/ %										
1号管	16.89	-2.38	16.90	0.04	22.72	-4.52	24.39	1.96	16.47	5.15	15.86	-2.79
2号管	16.55	-4.52	16.54	-2.09	23.22	-2.28	24.15	0.99	16.30	4.16	16.20	-0.70
3号管	17.23	-0.39	17.22	1.93	23.70	-0.19	23.42	-2.07	14.69	-6.34	16.50	1.13
4号管	18.51	6.58	16.90	0.05	25.35	6.32	23.68	-0.98	15.03	-3.96	16.70	2.36

表5 磨煤机通风量标定结果

Table 5 Results of primary air flow in the entrance of coal mill

项目	实测一次风管风 速/(m·s <sup>-1</sup> )	实测入磨一次风 量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	风量标 定系数
A 磨煤机	16.89	12 752	0.72
B 磨煤机	23.91	18 015	0.63
C 磨煤机	15.62	12 158	0.78

表6 煤粉细度调整结果

Table 6 Results of adjustment pulverized coal fineness

项目	调前			调后		
	分离器挡 板位置	R <sub>90</sub> / %	R <sub>200</sub> / %	分离器挡 板位置	R <sub>90</sub> / %	R <sub>200</sub> / %
A 磨煤机	53	22	4	45	15.8	1.4
B 磨煤机	55	19.6	4	50	16	1.8
C 磨煤机	55	13.6	1.4	—	—	—

注:R<sub>90</sub>和R<sub>200</sub>分别是煤粉在90、200 μm筛孔筛子余量占总量的百分数, %。

## 3 全烧准东煤锅炉运行情况

2016年8月5—13日进行了8d的新疆宜化

150 t/h 锅炉全烧准东煤的测试。运行期间,当锅炉蒸发量连续超过130 t/h时,炉膛结焦严重,燃烧器喷口、过热器迎风面严重结焦,水平烟道、省煤器、空气预热器严重积灰,排烟温度偏高(正常180℃以上,最高210℃),仅能通过吹灰器频繁吹灰维持锅炉正常运行。此锅炉燃烧新疆准东煤存在严重的沾污、结渣问题。

### 3.1 炉膛水冷壁

锅炉蒸发量在130 t/h以上运行2h后,水冷壁轮廓已不明显,管子表面均包裹了一层外表熔融的渣层。停炉后进入炉膛观察,炉膛全部被渣层覆盖,渣层厚度在10~20 mm,水冷壁上无大渣块,如图1所示。而水冷壁上熔融状的渣滴落或顺着水冷壁流到冷灰斗上,温度降低后凝结,逐渐形成大块,随着运行时间增长,这些渣块逐渐增大、变硬,难以自行掉落,停炉后仍留在冷灰斗上,只能定期停炉人工清除,如图2所示。

### 3.2 高温过热器

高温过热器进口吹灰器能覆盖的位置较干净,但在吹灰盲区或吹灰有效半径末端存在严重积灰,如图3(a)所示。高温过热器出口、低温过热器进口之间也布置有蒸汽吹灰器,吹灰器的吹扫作用使渣



图 1 水冷壁结渣

Fig. 1 Slagging of water wall



图 2 冷灰斗上大渣块

Fig. 2 Large slag in cold ash hopper

层厚度较小,但 2 个位置沾污情况类似,均有一个底层硬壳覆盖在管子上,吹灰器无法清除,如图 3(b)。高温过热器管间吹灰器不能覆盖的位置,存在管间“搭桥”现象,如图 3(c)。



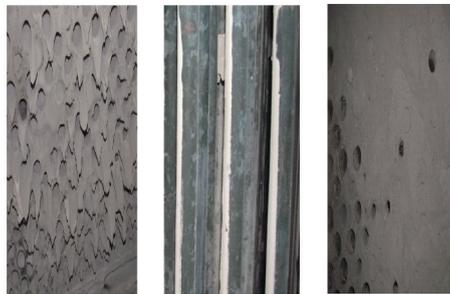
(a) 进口 (b) 出口 (c) 管间搭桥

图 3 高温过热器进、出口及管间积灰

Fig. 3 Ash accumulation in entrance, exit and middle of high temperature superheater

### 3.3 尾部受热面

锅炉尾部烟道一级高温空气预热器、省煤器处灰均有一定硬度,可形成固定形状,用手捏时碎成小块,不会形成粉状,由于管排为叉排管束,吹灰器难以吹到内层管排,管间积灰较重。二级空气预热器及以下部位,基本上没有成型灰存在,均为粉状,空气预热器管内堵灰严重,尤其是四角位置,存在大面积管子堵死现象(图 4)。



(a) 三级预热器 (b) 省煤器 (c) 二级预热器

图 4 尾部受热面积灰

Fig. 4 Ash accumulation in back of the boiler chamber

锅炉底部排渣渣量严重偏小,捞渣机捞出的多为块状碎渣,如图 5 所示,渣硬度较高。



图 5 锅炉底渣形态

Fig. 5 Morphology of bottom ash in boiler

## 4 锅炉燃烧准东煤结渣、沾污机理

试验期间,对锅炉各部位灰、渣进行了取样,其成分及灰熔融性见表 7。由此可知, $\text{Na}_2\text{O}$  出现了明显的选择性富集, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{K}_2\text{O}$  呈现了相应的富集。 $\text{Na}_2\text{O}$  在炉膛及水平烟道灰渣中含量明显偏高,基本上是煤灰中  $\text{Na}_2\text{O}$  含量的 1.5 倍以上。 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  在锅炉底渣及水冷壁渣中偏高, $\text{K}_2\text{O}$  在水冷壁渣中含量偏高。

水冷壁渣中  $\text{Na}_2\text{O}$  含量接近煤灰中  $\text{Na}_2\text{O}$  含量的 2 倍,分析认为准东煤中钠分别以氧化物、氯化物、单质形式挥发到烟气中<sup>[10-13]</sup>,在高温(700 ~ 800 °C 以上)燃烧环境中发生升华,冷凝在换热面壁上,然后再与烟气中的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  等化合,形成各种硫酸盐,例如  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{Na}_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ 、 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_7$  等密实黏结沉淀层。

低温过热器进口管壁外硬壳中  $\text{Na}_2\text{O}$  含量最高,已达到煤灰中  $\text{Na}_2\text{O}$  含量的 3 倍左右,是因为该位置的烟温随负荷变化在 600 ~ 700 °C 变化,与钠氧化物、氯化物、单质的气化温度接近<sup>[14-16]</sup>,分析是由于该区域烟温降低, $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{NaAlSiO}_4$ 、

CaSO<sub>4</sub> 大量凝结在壁面所致。费斯顿管与高温过热器进口处烟温和壁温较高,钠盐气相凝结少,难以形

成沉积层,因此该处灰中 Na<sub>2</sub>O 含量反而比低温过热器处低。

表7 各受热面灰渣成分及灰熔融性结果

Table 7 Results of ash constituent and ash fusibility in different heating surface

项目	新疆宜 化煤	炉底渣	水冷 壁渣	费斯顿 管渣	高过入 口硬块	低过入 口硬块	未级预热 器入口灰	省煤器 出口灰	高温预热 器出口灰
DT/10 <sup>3</sup> ℃	1.30	1.13	1.13	1.31	1.32	1.46	1.34	>1.50	>1.50
ST/10 <sup>3</sup> ℃	1.31	1.14	1.14	1.32	1.33	1.48	1.35	>1.50	>1.50
HT/10 <sup>3</sup> ℃	1.32	1.15	1.15	1.33	1.34	>1.50	1.36	>1.50	>1.50
FT/10 <sup>3</sup> ℃	1.33	1.16	1.16	1.34	1.35	>1.50	1.37	>1.50	>1.50
w(SiO <sub>2</sub> )/%	9.02	11.24	17.48	18.89	14.95	10.81	12.21	10.91	13.44
w(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%	4.70	4.85	6.55	7.58	6.59	3.19	6.65	4.81	4.24
w(Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%	7.70	19.21	15.04	9.24	6.35	4.57	8.28	6.89	6.71
w(CaO)/%	43.94	48.78	29.54	34.91	35.80	33.56	46.54	55.40	53.70
w(MgO)/%	10.26	10.56	5.70	9.33	9.63	7.91	10.93	11.70	11.03
w(Na <sub>2</sub> O)/%	6.33	1.11	11.66	8.56	9.41	18.94	6.73	6.03	5.43
w(K <sub>2</sub> O)/%	1.11	0.23	1.70	0.50	0.52	0.64	0.28	0.19	0.25
w(TiO <sub>2</sub> )/%	0.31	0.55	0.58	0.59	0.64	0.54	0.59	0.58	0.59
w(SO <sub>3</sub> )/%	15.58	3.29	11.02	9.42	15.35	19.15	6.70	2.60	3.58
w(MnO <sub>2</sub> )/%	0.170	0.055	0.059	0.067	0.070	0.052	0.104	0.120	0.095

在尾部烟道的各受热面积灰中,Na<sub>2</sub>O 含量与原煤灰中接近,且随着烟气流程逐渐降低,显示 Na<sub>2</sub>O 逐渐完成从气态到固态的转变,钠盐不是引起积灰的主要因素。此时,煤中钙矿物质在炉内高温分解 CaO 或单质钙的气相形式释放<sup>[17-18]</sup>,与烟气中 SO<sub>2</sub> 反应生成的硫酸钙,在尾部低温受热面上沉积,同时,高水分煤种加速了在尾部烟道积灰。煤中 Fe 主要以磁铁矿晶体存在<sup>[19]</sup>,高温氧化气氛下分解反应生成 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,与 CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等形成低温共融化合物,降低灰熔融性温度,增加准东煤灰沉积倾向。

1) 钠在炉内不同部位分布不均匀。比较而言,低温过热器入口受热面(500~700℃)灰渣中钠含量最高。主要是钠的氧化物、氯化物、单质气化后凝结在管壁,然后再与烟气中的 SO<sub>2</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等化合,形成各种硫酸盐沉积。

2) 炉底渣的 Na 含量远低于炉内其他部位渣块。炉底渣大部分为自然脱落的表面渣块。可见,燃烧过程中煤中 Na 首先挥发、附着于高温金属表面,并不断富集形成牢固、坚硬的底渣及结渣源。

3) 准东煤中 Ca 在高温下以 CaO、单质 Ca 的气相形式释放,释放的 Ca 组分与烟气中 SO<sub>2</sub> 生成硫酸盐,随着烟气温度降低析出后沉积在受热面。

## 5 结 论

1) 锅炉全烧准东煤时炉内存在严重的结渣及沾污问题。其水冷壁结渣机理与普通低灰熔融性煤的结渣有很大不同,需要采用不同的处理方式。从目前数据来看,Na<sub>2</sub>O 在水冷壁渣中有富集,可判断其对水冷壁结渣有促进作用。

2) 从水平烟道各受热面灰、渣的实验室分析结果来看,Na<sub>2</sub>O 在其中起着很关键的作用,尤其是烟温区间接近 Na<sub>2</sub>O 气化温度时管壁沾污最重,沾污层难以通过蒸汽吹灰有效清除。

3) 烟气温度低于 Na<sub>2</sub>O 气化温度后,Na<sub>2</sub>O 逐渐变为固态,对积灰的影响减小,此时主要是 CaO 起主要作用。

4) 按现有技术水平,增加吹灰器,提高易结渣部位的吹灰次数,以及采取必要的设备调整等措施,是锅炉燃烧准东煤必不可少的手段,新锅炉设计中应充分考虑管壁吹损问题。

5) 对于燃烧准东煤新建锅炉,应从燃烧方式、热负荷参数、炉膛出口烟温、煤粉细度和吹灰器布置等方面考虑,有效防止锅炉燃烧器区和炉膛出口受热面的沾污和结渣。

## 参考文献 (References) :

- [1] 甘昶春, 胡隽秋. 新疆煤炭开发与煤化工产业科学发展研究[J]. 煤炭经济研究, 2012, 32(10): 13-25.  
Gan Changchun, Hu Junqiu. Study on coal development and coal chemical in dusty scientific development in Xinjiang[J]. Coal Economic Research, 2012, 32(10): 13-25.
- [2] 宋汉疆. 新疆准东煤田煤炭综合利用问题探讨[J]. 西部探矿工程, 2008(9): 149-151.
- [3] 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-firing Zhundong coal[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(11): 109-113.
- [4] 张守玉, 陈川, 施大钟, 等. 高钠煤燃烧利用现状[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 1-13.  
Zhang Shouyu, Chen Chuan, Shi Dazhong, et al. Situation of combustion utilization of high sodium coal[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2013, 33(5): 1-13.
- [5] 刘大海, 张守玉, 涂圣康, 等. 五彩湾煤中钠在热解过程中的形态变迁[J]. 燃料化学学报, 2014, 42(10): 1190-1196.  
Liu Dahai, Zhang Shouyu, Tu Shengkang, et al. Transformation of sodium during Wucaiwan coal pyrolysis[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2014, 42(10): 1190-1196.
- [6] 魏博, 谭厚章, 王学斌, 等. 准东煤灰沉积与无机元素迁徙特性研究工程[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(8): 1783-1788.  
Wei Bo, Tan Houzhang, Wang Xuebin, et al. Deposition ash deposition and inorganic element transformation during zhundong coal combustion[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(8): 1783-1788.
- [7] 杨换凌, 张忠孝, 乌晓江. 碱煤中 NaCl 与水冷壁吸附作用的量子化学研究[J]. 上海理工大学学报, 2013, 35(5): 410-414.  
Yang Huanlin, Zhang Zhongxiao, Wu Xiaojiang. Quantum chemistry calculation for the adsorption of NaCl on waterwall in high alkali coal[J]. University of Shanghai for Science and Technology, 2013, 35(5): 410-414.
- [8] 苏国庆, 姚伟, 何红光. 新疆准东煤矿煤质特性试验研究[J]. 煤质技术, 2015(4): 24-29.  
Su Guoqing, Yao Wei, He Hongguang. Experimental research on coal characteristics of coal sample from Xinjiang Zhundong coalmine[J]. Coal Quality Technology, 2015(4): 24-29.
- [9] 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): 38-41.  
Yang Zhongcan, Liu Jiali, He Hongguang. Study on properties of zhundong coal in Xinjiang region and type-selection for boilers burning this coal sort[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(8): 38-41.
- [10] 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 Zhihua, Li Qian, Liu Jing, et al. Occurrence of alkali metals in Zhundong coal and its migration during pyrolysis process[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2014, 34(S1): 130-135.
- [11] Wang X H, Zhao D Q, He L B, et al. Modeling of a coal-fired slagging combustor; Development of a slag submodel[J]. Combustion and Flame, 2007, 149(3): 249-260.
- [12] Milenkovic J, Alexopoulos A H, Kiparissides C. Flow and particle deposition in the Turbuhaler: A CFD simulation[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2013, 448(1): 205-213.
- [13] 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 Qingsong, Wang Chang'an, Che Defu, et al. Alkali metal occurrence mode and its influence on combustion characteristics in Zhundong coals[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2014, 20(3): 216-221.
- [14] Zhang Xiaoyu, Zhang Haixia, Na Yongjie. Transformation of sodium during the ashing of Zhundong coal[J]. Procedia Engineering, 2015, 102: 305-314.
- [15] 聂立, 白文刚, 冉桑铭, 等. 新疆高钠煤积灰特性试验研究[J]. 动力工程学报, 2015, 35(2): 108-112.  
Nie Li, Bai Wengang, Ran Shenming, et al. Experimentai study on ash deposit on characteristics of high sodium coais from Xinjiang[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(2): 108-112.
- [16] Sathe C, Hayashi J, Li C Z, et al. Release of alkali and alkaline earth metallic species during rapid pyrolysis of a Victorian brown coal at elevated pressures[J]. Fuel, 2003, 82(12): 1491-1498.
- [17] 杨涛, 李文广, 吴莎, 等. 新疆高钙钠煤燃烧设备结焦机理研究[J]. 燃料化学学报, 2015, 43(11): 1322-1326.  
Yang Tao, Li Wenguang, Wu Sha, et al. Study on fouling mechanism in a boiler burning Xinjiang coal with high content of calcium and sodium[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2015, 43(11): 1322-1326.
- [18] 王学斌, 魏博, 张利孟, 等. 温度和 SiO<sub>2</sub> 添加剂对准东煤中碱金属的赋存形态及迁徙特性的影响[J]. 热力发电, 2014, 43(8): 84-88.  
Wang Xuebin, Wei Bo, Zhang Limeng, et al. Effect of temperature and silicon additives on occurrence and transformation characteristics of alkali metal in Zhundong coal[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(8): 84-88.
- [19] 马岩, 黄镇宇, 唐慧儒, 等. 准东煤灰化过程中的矿物演变及矿物添加剂对其灰熔融特性的影响[J]. 燃料化学学报, 2014, 42(1): 20-24.  
Ma Yan, Huang Zhenyu, Tang Huiru, et al. Mineral conversion of Zhundong coal during ashing process and the effect of mineral additives on its ash fusion characteristics[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2014, 42(1): 20-24.