程友良,施宏波,张宁,等. 两种高钠煤的掺烧结渣特性对比实验[J]. 煤炭学报,2017,42(11):3021-3027. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0488

CHENG Youliang,SHI Hongbo,ZHANG Ning,et al. Comparative experiments of two high sodium coal mixed burning slagging characteristics[J]. Journal of China Coal Society,2017,42(11):3021-3027. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.0488

两种高钠煤的掺烧结渣特性对比实验

程友良,施宏波,张　宁,赵　娜,史亚骏,薛占璞

(华北电力大学 电站设备状态监测与控制教育部重点实验室,河北 保定　071003)

摘　要:新疆高钠煤储量大,且是良好的动力煤,然而其燃烧过程中结渣沾污严重,对锅炉的安全运行和经济性产生了影响。基于一维炉结渣实验台,对比分析新疆两种高钠煤的结渣特性,经过实验得出:在相同的容积热负荷下,准东高钠煤结渣比大南湖高钠煤要严重;大南湖高钠煤较准东高钠煤更难通过掺烧低钠煤来改善结渣;两种高钠煤均易通过掺烧煤矸石来改善结渣状况且最佳掺烧比例为 10%。该实验结果对新疆地区燃用高钠煤提供一定的参考。

关键词:高钠煤;结渣特性;一维炉;掺烧

中图分类号:TQ534　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:0253-9993(2017)11-3021-07

Comparative experiments of two high sodium coal mixed burning slagging characteristics

CHENG Youliang,SHI Hongbo,ZHANG Ning,ZHAO Na,SHI Yajun,XUE Zhanpu

(*MOE's Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment,North China Electric Power University,Baoding*　071003,*China*)

Abstract:Xinjiang high sodium coal is a good steam coal with large reserves. However,the slagging of combustion process is a serious pollution,and influences the safe operation and economics of the boiler. This paper conducted is the study based on one dimensional furnace slagging test bench to compare and analyze the slagging characteristics of two different higher-sodium coals,through experiments. The result shows that in the same volume heat load,the higher-sodium coal of Zhundong has a high slagging characteristics than that of Dananhu high sodium coal. Dananhu coal is harder than Zhundong coal to reduce slagging by burning mixed low sodium coals. The two high sodium coals can be mixed with coal gangue to improve the slagging condition and the best ratio was 10%. The experimental results provide some guidance for the use of high sodium coal in Xinjiang area.

Key words:high sodium coal;slagging characteristic;one dimensional furnace;mix-burned

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

目前煤炭仍处于并将长期处于我国能源结构中的主导地位[1],其中新疆高钠煤储量大,且是良好的动力煤,然而其燃烧过程中结渣沾污严重,由此引起了锅炉受热面结渣、沾污和高温腐蚀等问题。由于积灰严重,造成锅炉尾部烟道积灰坍塌,严重影响锅炉的安全和经济运行[2]。目前国内外对准东高钠煤燃烧特性的研究较多,刘大海[3]等通过对脱钠过程中钠存在形式进行评估实验,得出:新疆高钠煤中的钠主要以水溶钠为主,有机钠和不可溶钠含量较少。陈川等[4]采用逐级萃取的实验方法对高钠煤进行研究,其中每级萃取都采用不同的萃取液,分别把高钠煤中不同形式存在的钠萃取出来并分析其对燃烧特性的影响。张军等[5]研究发现煤中钠的释放在燃烧初期变化不大,但整体上有变小的趋势,并且在燃烧初期不同形式钠的变化规律不一样。刘敬等[6]研究发现,准东煤中碱金属的释放主要发生在燃烧后期。

收稿日期:2017-04-13　　**修回日期**:2017-08-28　　**责任编辑**:许书阁

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2016MS154,2017MS126)

作者简介:程友良(1963—),男,湖北荆州人,教授,博士生导师。E-mail:ylcheng001@163.com。**通讯作者**:施宏波(1994—),硕士研究生。E-mail:2653534978@qq.com

刘家利[7]分析准东煤严重结渣倾向与其较高的灰熔点不符合的原因,论证了准东煤煤灰中碱性氧化物含量高是引起其灰熔融性高的主要原因。

许多学者研究了两种煤的不同掺混比例对煤灰熔点的影响[8-10],实验表明,灰熔点的变化和掺烧的比例不成线性关系。王学斌等[11]研究了温度和 SiO_2 添加物对高钠煤中碱金属赋存形态及迁移特性的影响。马岩等[12]发现,在一定范围内升高准东煤灰的硅铝比(SiO_2/Al_2O_3)可以降低灰熔点,而在这个范围外,灰熔点受硅铝比的影响减小。崔育奎等[13]研究了高钠煤掺混不同比例低钠煤对混煤灰熔融特性的影响。结果表明两种煤在不同比例的掺混下,混煤灰的熔融温度与相应三元相图上的液相线温度具有一定的相似性,而与两种煤的掺混比例不呈线性关系。李红等[14]以五彩湾煤与乌东煤及这两种煤的不同掺烧比例的混煤为研究对象,研究其物理化学特性、燃烧特性、结渣沾污特性,并对各种混煤的着火、燃尽和结渣性进行了评定,分析得出了高钠煤与低钠煤及其混煤的结渣倾向。王礼鹏等[15]采集了新疆某电厂燃用75%准东煤时锅炉各部位的灰渣样,并对灰渣样进行了系统分析。杨忠灿等[16]引进了德国美国高钠煤评价指标并通过对乌鲁木齐周边煤种的燃烧试验,论述了 100,200 和 300 MW 等级锅炉安全掺烧准东煤时的准东煤灰中的钠含量。随关于新疆地区煤种研究的深入,准东高钠煤已经可以作为发电用煤,但将哈密大南湖矿区的高钠煤作为大规模燃煤发电用煤仍处于起步阶段[17],本文利用一维炉结渣实验台对这两种高钠煤的结渣特性进行了对比研究,对新疆地区燃用高钠煤的掺烧具有一定的指导意义。

1 实验系统及方法介绍

1.1 实验系统

一维火焰炉的结构为电加热积木式,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。实验炉包括送风、给粉、空气预热、测温及取样系统。该实验炉的系统简图如图 1 所示。

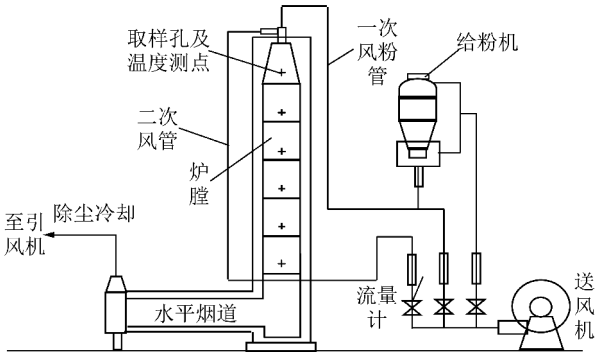


图 1 煤粉燃烧一维火焰炉实验台

Fig. 1 One dimensional furnace slagging test bench of coal combustion

沿炉膛高度方向,每隔 30 cm 开有一个 ϕ3 cm 的径向测量孔,用于测量火焰温度以及插入结渣探针。结渣探针选取规格为 1.5 cm×18 cm×1 cm 的硅碳棒,硅碳棒上表面粗糙度一定,硅碳棒外沿由不锈钢管固定,结渣面近似垂直于烟气方向放置。

由硅碳棒取渣的特殊性,硅碳棒表面温度到达熔融温度时,灰渣表面开始融化,其捕捉飞灰的能力增强,当硅碳棒温度继续升高时,表面熔融灰渣达到临界黏度值后灰渣黏性减小,导致液态灰渣在重力作用下摊开,灰渣均匀分布且厚度减小,表面温度也随之降低,此时厚度达到动态平衡,灰渣停止生长,仅在某一范围内波动。结渣时间由煤的灰分来决定。

1.2 实验方法

选取典型的大南湖高钠煤及其与大南湖低钠煤配煤、准东高钠煤及其与准东低钠煤配煤、两种高钠煤添加不同比例的煤矸石在相同工况下进行一维炉结渣性实验,对比分析其结渣特性。煤种特性参数见表 1。

实验选取一维火焰炉结渣工况,给粉量以入炉热量控制,保证一维炉容积热负荷 290 kW/m^3,炉内过量空气系数为 1.25。具体实验条件见表 2,3,在结渣源上沉积下的灰渣依照其黏结的紧密程度由强到弱进行分类赋值,见表 4。

表 1 新疆的地区高钠煤及当地低钠煤的工业及元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analysis of Xinjiang high sodium coal and low sodium coal

样品	工业分析/%			$Q_{net,ar}$/	元素分析/%				
	M_{ar}	A_{ar}	V_{daf}	(MJ·kg^{-1})	C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	$S_{t,ar}$	O_{ar}
准高煤*	25.8	7.74	30.67	18.38	53.59	2.28	0.47	0.55	9.57
大高煤*	27.2	16.31	42.52	14.75	42.17	2.29	0.61	0.49	10.93
准低煤*	21.3	24.68	31.8	14.68	42.61	2.15	0.51	0.22	8.53
大低煤*	24.2	24.86	46.93	13.42	37.09	2.43	0.63	0.44	10.35

注:准高煤*表示新疆准东地区的高钠煤;大高煤*表示新疆哈密大南湖地区的高钠煤;准低煤*表示新疆准东地区的低钠煤;大低煤*表示新疆哈密大南湖地区的低钠煤。

中国知网期刊网 www.chinacaj.net

表 2　入炉热量及风量

Table 2　In-furnace heat value and air flow

工况	入炉热量/($MJ \cdot h^{-1}$)	入炉总空气量/($Nm^3 \cdot h^{-1}$)	一次风		二次风		炉膛容积热负荷/($MJ \cdot h^{-1}$)
			风率/%	风温/℃	风率/%	风温/℃	
结渣工况	46.06	14.05	45	22	55	200	46.06

表 3　电加热控制最低壁温

Table 3　Minimum wall temperature of electrical heating　　℃

工况	第 1 级	第 2 级	第 3 级	第 4 级	第 5 级	第 6 级
结渣工况	900	1 000	1 100	1 100	1 100	1 000

表 4　渣型赋值

Table 4　Assignment list of slagging types

渣型	特征	赋值 N
熔融	硅碳棒表面由全熔融致密凝固渣层所覆盖,并有渣泡形成	2.50
黏熔	沉积灰层由部分凝固渣层凝固黏聚而成,已无法切刮	1.75
强黏聚	灰渣坚硬,切刮后硅碳棒上仍残留不规则黏结硬渣	1.00
黏聚	灰层黏聚成硬渣、切刮困难,仍能切刮	0.50
弱黏聚	灰有明显黏聚特征,切下灰渣具有一定硬度	0.25

每组实验结束,记录渣棒样图以及相关实验数据,按下式计算结渣特性指数 S_c 并对结渣特性等级进行比较。

$$S_c = 100N_{max}/[0.5(T_{max} + T_2) - 1\,000] \quad (1)$$

$$S_c = 100N_{max}/[T_{max} - 0.25(T_{max} - T_2) - 1\,000] \quad (2)$$

其中,S_c 为煤粉燃烧的结渣特性指数;N_{max} 为结渣最严重的渣型对应的赋值;T_{max} 为结渣最为严重的渣型对应的火焰温度,℃,当结渣等级最为严重的渣棒有两级及以上时,T_{max} 选取温度较低值;T_2 为结渣等级次为严重的渣型对应的火焰温度;当与结渣等级最为严重的渣棒相邻的渣棒结渣均为次严重结渣等级时,T_2 选取温度较高值。当结渣等级最为严重与次为严重的渣型相差一个等级时,采用式(1)。当结渣等级最为严重与次为严重的渣型相差两个及以上等级时,采用式(2)。

2　实验结果及分析

2.1　准东高钠煤及大南湖高钠煤灰渣

图 2 为准东高钠煤及大南湖高钠煤在结渣实验中所得渣棒样貌,可见准东高钠煤属于严重结渣煤种,渣型等级为熔融,其熔融态灰渣主要出现在前 2 级渣棒即 1 200 ℃以上的高温,其灰渣在高温下发生严重熔融烧结,与渣棒黏结严重,不易清除。大南湖高钠煤同样属于严重结渣煤种,渣型等级为熔融,其中处于 1 300 ℃烟温区域的第 1 级渣棒覆盖了较厚的非玻璃体熔融状灰渣,其底层呈均匀熔融状而熔渣外表面则黏结了坚硬的沉积灰颗粒。对比准东高钠煤可知,在同样的容积热负荷下,准东高钠煤的结渣要明显比大南湖高钠煤要严重,其灰渣量也明显高于准东高钠煤。这两种灰渣渣型与燃用高钠煤实际锅炉中灰渣较为相近。实际锅炉中此类灰渣由于高温下熔融且与水冷壁黏结严重,普通参数吹灰蒸汽难以将其彻底清除。实验灰渣渣型及其对应烟温见表 5。



准东高钠煤　　大南湖高钠煤

图 2　准东高钠煤及大南湖高钠煤渣棒样貌

Fig. 2　Slag rod condition of Zhundong and Dananhu high sodium coal

表 5　准东及大南湖高钠煤结渣实验渣型及烟温

Table 5　Slagging type and gas temperature of Zhundong and Dananhu high sodium coal

煤种		第 1 级	第 2 级	第 3 级	第 4 级
准高煤	烟温/℃	1 345	1 255	1 175	1 088
	渣型	熔融	熔融	强黏聚	黏聚
大高煤	烟温/℃	1 295	1 215	1 175	1 056
	渣型	熔融	强黏聚	强黏聚	黏聚

2.2　两种高钠煤掺烧当地低钠煤灰渣

目前新疆高钠煤的应用以和当地的低钠煤掺烧使用为主,图 3 为准东高钠煤与当地的低钠煤掺烧所

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

得灰渣样貌。由于该低钠煤灰分较大,碱金属含量相对较低,随高钠煤的混煤比例降低,混煤渣型样貌得到明显改善:90% 高钠煤比例下,渣棒上灰渣在前两级呈熔融大颗粒状,较之准东高钠煤所结灰渣玻璃光泽消失;80% 高钠煤比例下,非玻璃体状熔融灰渣均匀覆盖第 1 级渣棒,第 2 级则未出现熔融态灰渣;70% 高钠煤比例下煤种结渣性明显改善,前 3 级渣棒均表现为黏熔渣型。60% 及 50% 高钠煤比例下灰渣渣型为易清除黏聚渣型,该比例混煤结渣性接近烟煤的结渣性。实验灰渣渣型及其对应烟温见表 6。

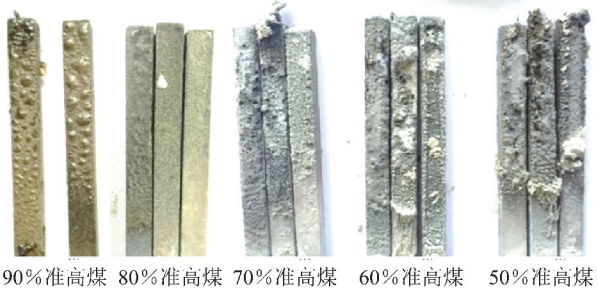


图 3 准东高钠煤与当地的低钠煤掺烧渣棒样貌

Fig. 3 Slag rod condition of Zhundong high sodium coal blended with low sodium coal

表 6 准东高钠煤与当地的低钠煤掺烧结渣实验渣型及烟温

Table 6 Slagging type and gas temperature of Zhundong high sodium coal blended with low sodium coal

掺烧比例		第 1 级	第 2 级	第 3 级
90% 准高煤	烟温/℃	1 340	1 220	1 180
	渣型	熔融	熔融	无
80% 准高煤	烟温/℃	1 335	1 210	1 160
	渣型	熔融	黏熔	无
70% 准高煤	烟温/℃	1 238	1 214	1 180
	渣型	黏熔	强黏聚	黏聚
60% 准高煤	烟温/℃	1 258	1 214	1 182
	渣型	黏熔	强黏聚	黏聚
50% 准高煤	烟温/℃	1 278	1 230	1 209
	渣型	黏熔	强黏聚	黏聚

图 4 为大南湖高钠煤与当地的低钠煤掺烧所得灰渣样貌。本实验中混煤比例从 10% 增至 90%,共计 9 组混煤结渣实验。大南湖高钠煤混煤比例较低时,黏熔状灰渣不规则分布于渣棒表面,部分灰渣表面呈现暗红色,推测可能为含铁晶体的析出所致。随大南湖高钠煤的比例升高,可知灰渣沉积量有变大趋势,渣型由黏熔变为熔融,当大南湖高钠煤比例升至 40% 时,灰渣渣型转变为熔融灰渣。随混煤比例从 50% 升至 100% 时,灰渣渣型宏观上无明显差异。这说明大南湖高钠煤结渣倾向不易通过高比例混煤改善,主要原因在于大南湖高钠煤灰成分中的碱金属百分比含量较低且灰分的基数总量高,同时大南湖低钠煤的碱金属百分比含量与大南湖高钠煤相差不是很大,从而导致掺烧低钠煤时混煤的碱金属百分比含量变化较小。实验灰渣渣型及其对应烟温见表 7。

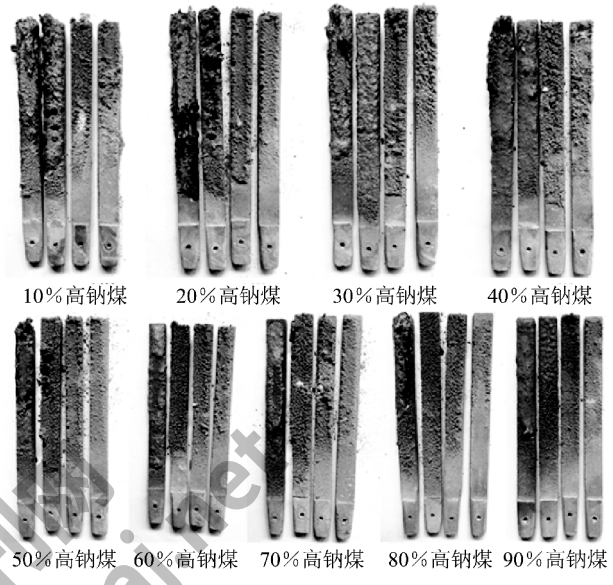


图 4 大南湖高钠煤与当地的低钠煤掺烧渣棒样貌

Fig. 4 Slag rod condition of Dananhu high sodium coal blended with low sodium coal

表 7 大南湖高钠煤与当地的低钠煤掺烧结渣实验渣型及烟温

Table 7 Slagging type and gas temperature of Dananhu high sodium coal blended with low sodium coal

掺烧比例		第 1 级	第 2 级	第 3 级
90% 大高煤	烟温/℃	1 270	1 188	1 147
	渣型	熔融	强黏聚	黏聚
80% 大高煤	烟温/℃	1 265	1 170	1 145
	渣型	熔融	强黏聚	黏聚
70% 大高煤	烟温/℃	1 258	1 195	1 120
	渣型	熔融	强黏聚	黏聚
60% 大高煤	烟温/℃	1 260	1 185	1 112
	渣型	熔融	强黏聚	黏聚
50% 大高煤	烟温/℃	1 271	1 201	1 136
	渣型	熔融	强黏聚	黏聚
40% 大高煤	烟温/℃	1 253	1 187	1 110
	渣型	黏熔	黏熔	黏聚
30% 大高煤	烟温/℃	1 265	1 207	1 119
	渣型	黏熔	黏熔	黏聚
20% 大高煤	烟温/℃	1 283	1 212	1 121
	渣型	黏熔	黏熔	黏聚
10% 大高煤	烟温/℃	1 250	1 187	1 106
	渣型	黏熔	黏熔	黏聚

2.3 两种高钠煤掺烧煤矸石灰渣

图 5 为大南湖高钠煤与不同比例煤矸石掺烧的

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

渣棒样貌,由于大南湖高钠煤灰分较大所以从 5% 开始掺烧。当掺烧 5% 煤矸石时,第 1 级渣棒仍为熔融型,但相比大南湖高钠煤第 1 级渣棒熔融的渣泡消失并出现黑色的熔融物质,这表明结渣有明显减轻的趋势。当掺烧 10% 煤矸石时,第 1 级渣棒介于黏熔和强黏聚之间,更接近强黏聚渣型。此时结渣已经得到明显的改善,接近烟煤的结渣性。实验灰渣渣型及其对应烟温见表 8。

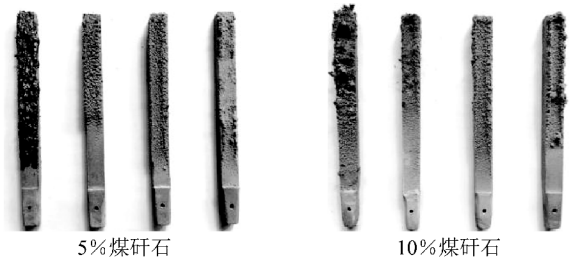


图 5　大南湖高钠煤与不同比例煤矸石掺烧的渣棒样貌

Fig. 5　Slag rod condition of Dananhu high sodium coal blended with different proportion of coal gangue

表 8　大南湖高钠煤与不同比例煤矸石掺烧的结渣实验渣型及烟温

Table 8　Slagging type and gas temperature of Dananhu high sodium coal blended with different proportion of coal gangue

煤种		第 1 级	第 2 级	第 3 级	第 4 级
5% 煤矸石	烟温/℃	1 284	1 221	1 162	1 082
	渣型	黏熔	强黏聚	强黏聚	黏聚
10% 煤矸石	烟温/℃	1 265	1 214	1 155	1 068
	渣型	黏熔	黏聚	黏聚	黏聚

图 6 为准东高钠煤与不同比例煤矸石掺烧的渣棒样貌,由于准东高钠煤灰分较小所以从 3% 开始掺烧。当掺烧 3% 的煤矸石时,前两级渣棒表现为熔融,但相比与准东高钠煤,其中有光泽的玻璃体渣泡消失,结渣有明显减轻的趋势。当掺烧 6% 的煤矸石时,前两级渣棒表现为黏熔,结渣得到了改善。当掺烧 10% 的煤矸石时,第 1 级渣棒表现为黏熔,但更接近强黏聚渣型,结渣得到了明显的改善。

综上可见,无论是准东高钠煤还是大南湖高钠煤,当煤矸石掺烧比例达到 10% 时结渣都得到了明显的改善,达到灰渣对锅炉的影响在可控范围内,利用锅炉吹灰蒸汽基本可以清除。所以在高钠煤的开采洗选过程中,可适当保留些煤矸石,以达到改善结渣的作用。实验灰渣渣型及其对应烟温见表 9。

2.4　结渣指数 S_c

根据式(1),(2)计算得到结渣指数 S_c,结果见表 10 ~ 12。



图 6　准东高钠煤与不同比例煤矸石掺烧的渣棒样貌

Fig. 6　Slag rod condition of Zhundong high sodium coal blended with different proportion of coal gangue

表 9　准东高钠煤与不同比例煤矸石掺烧的结渣实验渣型及烟温

Table 9　Slagging type and gas temperature of Zhundong high sodium coal blended with different proportion of coal gangue

煤种		第 1 级	第 2 级	第 3 级	第 4 级
3% 煤矸石	烟温/℃	1 330	1 274	1 198	1 085
	渣型	熔融	熔融	强黏聚	黏聚
6% 煤矸石	烟温/℃	1 310	1 260	1 185	1 080
	渣型	黏熔	黏熔	强黏聚	黏聚
10% 煤矸石	烟温/℃	1 300	1 270	1 195	1 090
	渣型	黏熔	强黏聚	黏聚	黏聚

表 10　准东高钠煤及当地低钠煤配煤掺烧结渣指数 S_c

Table 10　Slagging index S_c of Zhundong high sodium coal blended with low sodium coal

煤样	准高煤	准低煤	90% 准高	80% 准高	70% 准高	60% 准高	50% 准高
N_{max}	2.50	1.75	2.50	2.50	2.50	1.75	1.75
S_c	1.06	0.74	0.89	0.91	0.77	0.74	0.68

由上述结果分析可见,在同样的容积热负荷下,准东高钠煤 S_c 值大于大南湖高钠煤 S_c 值,即准东高钠煤结渣较大南湖高钠煤要严重。在准东高钠煤与低钠煤配煤掺烧实验中,由结渣指数 S_c 可知,随准东高钠煤掺烧比例的减小,S_c 值不断降低,结渣有明显减轻的趋势,而在大南湖高钠煤和低钠煤配煤掺烧实验中,随大南湖高钠煤掺烧比例的不断减小,S_c 值变化不大,结渣没有明显减轻的趋势,分析认为主要是由于准东高钠煤灰成分中的碱金属百分比含量较高

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

且灰分的基数总量低,同时准东低钠煤的碱金属百分比含量与准东高钠煤相差较大,从而导致掺烧低钠煤时混煤的碱金属百分比含量变化较大,所以易通过掺烧低钠煤改善结渣,而大南湖高钠煤灰分中的碱金属百分比含量较低且灰分的基数总量高且大南湖低钠煤的碱金属百分比含量与大南湖高钠煤相差不是很大,所以不易通过掺烧低钠煤改善结渣。在高钠煤掺烧煤矸石的实验中,不论是大南湖高钠煤还是准东高钠煤,随煤矸石的掺烧比例的增加,S_c 值都有明显的降低,当掺烧煤矸石比例达到 10% 时两种煤的结渣都有了明显的改善,说明煤矸石对于高钠煤的结渣有着明显的改善作用,其原因为通过掺烧煤矸石,增加灰的基数总量,从而导致碱金属百分比含量变低,改善了结渣情况。

表 11 大南湖高钠煤及当地低钠煤配煤掺烧结渣指数 S_c

Table 11 Slagging index S_c of Dananhu high sodium coal blended with low sodium coal

煤样	大高	大低	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
N_{max}	2.50	1.75	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	1.75	1.75	1.75	1.75
S_c	0.91	0.84	1.0	1.03	1.03	1.04	0.98	1.04	0.95	0.95	1.04

表 12 两种高钠煤掺烧煤矸石结渣指数 S_c

Table 12 Slagging index S_c of two high sodium coal blended with coal gangue

煤样	大高掺 5%	大高掺 10%	准高掺 3%	准高掺 6%	准高掺 10%
N_{max}	1.75	1.75	2.50	1.75	1.75
S_c	0.71	0.69	0.98	0.78	0.61

3 结 论

(1)大南湖高钠煤和准东高钠煤都具有严重的结渣倾向,在同样的容积热负荷下,准东高钠煤的结渣状况比大南湖高钠煤要严重。

(2)准东高钠煤易通过掺烧低钠煤降低灰成分中碱金属百分比含量,改善结渣状况,而大南湖高钠煤不易通过掺烧低钠煤改变灰成分中碱金属百分比含量来改善结渣状况。

(3)大南湖高钠煤和准东高钠煤均可以通过掺烧煤矸石改善结渣状况,且当掺烧煤矸石比例达到 10% 时,两种高钠煤的结渣状况均得到明显改善。

参考文献(References):

[1] 杨丽. "十二五"期间中国煤炭科技的发展方向[J]. 洁净煤技术,2013,19(1):112-114,124.
YANG Li. Development direction of China coal science and technology during the "Twelfth Five-Year Plan"[J]. Clean Coal Technology,2013,19(1):112-114,124.

[2] 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.

[3] 刘大海,张守玉,陈川,等. 新疆高钠煤脱钠提质过程中钠存在形式[J]. 煤炭学报,2014,39(12):2519-2524.
LIU Dahai, ZHANG Shouyu, CHEN Chuan, et al. Existence form of sodium in the high sodium coals from Xinjiang during its sodium removal process[J]. Journal of China Coal Society,2014,39(12):2519-2524.

[4] 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.

[5] 张军,汉春利,颜峥,等. 煤中钠在燃烧初期行为的研究[J]. 燃料化学学报,2001,29(1):49-53.
ZHANG Jun, HAN Chunli, YAN Zheng, et al. Experimental studies on the behavior of sodium of coal in the initial stage of combustion[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology,2001,29(1):49-53.

[6] 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.

[7] 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):99-102,106.
LIU Jiali. Correlation analysis of ash fusibility and ash composition of Zhundong coal[J]. Clean Coal Technology,2015,21(5):99-102,106.

[8] WU X J, ZHANG Z X, CHEN Y S, et al. Main mineral melting behavior and mineral reaction mechanism at molecular level of blended coal ash under gasification condition[J]. Fuel Process Technol,2010,91(11):1591-1600.

[9] QIU J R, LI F, ZHENG Y, et al. Influences of mineral behaviour on blended coal ash fusion characteristics[J]. Fuel,1999,78(8):963-969.

[10] 李楠,姚伟,赵勇纲,等. 相图法在准东高钠煤掺烧研究中的应

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

用[J]. 热力发电,2016,45(1):49-53,92.
LI Nan,YAO Wei,ZHAO Yonggang,et al. Application of CALPHAD method in cocombustion of Zhundong coal[J]. Thermal Power Generation,2016,45(1):49-53,92.

[11] 王学斌,魏博,张利孟,等. 温度和 SiO_2 添加物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(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(8):84-88.

[12] 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):20-25.
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):20-25.

[13] 崔育奎,张翔,乌晓江. 配煤对新疆准东高碱煤沾污结渣特性的影响[J]. 动力工程学报,2015,35(5):361-365.
CUI Yukui,ZHANG Xiang,WU Xiaojiang. The effect of coal blending ratio on slagging/fouling characteristics of Zhundong Xinjiang high-alkali coal[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2015,35(5):361-365.

[14] 李红,王桂芳. 五彩湾煤燃烧特性的试验研究[J]. 动力工程学报,2014,34(6):427-431,442.
LI Hong,WANG Guifang. Experimental study on combustion characteristics of Wucaiwan coal[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2014,34(6):427-431,442.

[15] 王礼鹏,赵永椿,张军营,等. 准东煤沾污结渣特性研究[J]. 工程热物理学报,2015,36(6):1381-1385.
WANG Lipeng,ZHAO Yongchun,ZNANG Junying,et al. Research on the slagging and fouling characteristics of Zhundong coal[J]. Journal of Engineering Thermophysics,2015,36(6):1381-1385.

[16] 杨忠灿,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.

[17] 严陆光,夏训诚,吕绍勤,等. 大力推进新疆大规模综合能源基地的发展[J]. 电工电能新技术,2011,30(1):1-7.
YAN Luguang,XIA Xuncheng,LÜ Shaoqin,et al. Great promotion of development of large scale integrative energy base in Xinjiang[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2011,30(1):1-7.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net