

准东煤灰熔融性与灰成分相关性分析

刘家利

(西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710032)

摘要:灰熔融性是判别结渣的主要依据之一,但部分准东煤灰熔融温度高,仍具有严重结渣倾向。为了分析准东煤灰熔融性与结渣倾向不吻合的原因,采用煤质数据对比分析法,研究了准东煤灰熔融性与煤灰成分的相关性,说明部分准东煤灰熔融性高主要是煤灰中碱性氧化物含量高引起,得出了准东煤的软化温度与煤灰中的碱性氧化物成分相关性较好,可用碱性氧化物含量/(碱性氧化物含量+酸性氧化物含量)或者当量碱性氧化物含量进行灰熔融性的初步判别,可为准东高钠煤的灰熔融性检测、锅炉设计及电厂的安全燃用提供参考和依据。

关键词:准东煤;煤灰软化温度;碱性氧化物;酸性氧化物

中图分类号:TQ534

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2015)05-0099-04

Correlation analysis of ash fusibility and ash composition of Zhundong coal

LIU Jiali

(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710032, China)

Abstract: Ash fusibility was the main basis for slagging evaluation. Some kinds of Zhundong coal with high ash fusion temperature still slagged seriously. In order to analyze the correlation between Zhundong coal fusibility and ash composition, the coal quality data were analyzed in the paper. The results showed that, high basic oxide in coal ash led to high fusibility of Zhundong coal. The fusion temperature of Zhundong coal had a good correlation with basic oxide components, the ash fusibility could be preliminarily judged by the ratio of basic oxides and sum of basic oxide and acid oxide or equivalent basic oxide. This conclusion provided reference for coal ash fusion temperature test, boiler design and power plant safe operation of Zhundong coal.

Key words: Zhundong coal; coal ash fusion temperature; basic oxide; acid oxide

0 引 言

灰熔融性是目前广泛作为燃煤结渣倾向判别的主要依据之一,具有一定的准确性和实用价值,是锅炉设计考虑的主要参数之一,也是锅炉选型的决定性因素。在发电用煤分类中,选择煤灰熔融性中的特征温度——软化温度(ST)作为评价燃煤结渣性的主要分类指标^[1],根据煤粉锅炉的运行经验,煤灰的 ST 小于 $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 就有可能造成炉膛结渣,妨碍锅炉的连续安全运行,反之,大于 $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时就不用特别注意结渣问题。但该指标也存在局限性,如部分准东煤灰熔融性温度较高,但仍在锅炉燃烧过程

中表现出了严重结渣性^[2]。由于前期对准东煤的燃烧特性不甚了解,很多电厂和锅炉厂在遇到高灰熔融性($ST>1350\text{ }^{\circ}\text{C}$)的准东煤时,仅凭其灰熔融性指标判别其结渣特性,在锅炉设计和运行过程中均出现了问题,导致锅炉设备不能与准东煤的燃烧性能匹配,部分电厂甚至在燃用准东煤时出现了锅炉由于大面积结渣和沾污而停炉,给电厂带来了安全事故,并造成经济损失。因此必须深入研究准东煤的煤质特性,分析引起灰熔融性高的原因。

1 准东煤的基本煤质特性

准东煤的主要特点是煤化程度较低,水分高、灰

收稿日期:2014-12-24;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.05.023

基金项目:华能集团重点科技资助项目(HNKJ12-H08)

作者简介:刘家利(1976—),女,四川新都人,高级工程师,硕士,从事燃煤特性与锅炉设备匹配性的研究。E-mail:liujiali@tpri.com.cn

引用格式: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 softening temperature and ash composition of Zhundong coal[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(5): 99-102, 106.

分低、挥发分较高、煤灰中的碱金属(Na和K)以及碱土金属(CaO和MgO)含量高,这与国内典型的烟煤和褐煤有明显区别。准东煤 $V_{daf}=20\% \sim 33\%$,按照我国煤炭分类,属于弱黏煤和不黏煤类,但因遭受严重氧化,胶质体受压破坏,已不用于炼制焦炭,目前主要用于发电及其他动力化工用煤。

美国采用恒湿无矿物质基高位发热量 $Q_{gr,mmmf}$ ^[3]作为次烟煤的主要判据,我国煤炭分类简表中对其不做分类必须的指标。准东煤的干基矿物质含量 MM_d 尚无分析数据,可近似地按 $MM_d = 1.1A_d + 0.1w(S_{i,d})$ 估算,计算得出准东煤的 $Q_{gr,mmmf}$ 的平均值为28.14 MJ/kg。可见,按照美国的煤分类标准应归于次烟煤 sub-bituminous A 阶($Q_{gr,mmmf} = 24.4 \sim 26.7$ MJ/kg)(大致相当于我国煤分类中的弱黏煤和不黏煤)。

$$Q_{gr,mmmf} = \frac{100 - M_{ad}}{100} Q_{gr,dmmf} = \frac{100 - M_{ad}}{100} \times \frac{100 - A_d}{100 - MM_d} \times Q_{gr,daf} \quad (1)$$

表1 我国主要动力用煤灰成分及熔点^[5]

项目	烟煤			褐煤			准东煤			对应项目	
	最低	最高	平均	最低	最高	平均	最低	最高	平均	化学特性	熔点 $T_m/^\circ\text{C}$
$w(\text{SiO}_2)/\%$	19.91	80.88	45.92	10.16	56.42	47.89	1.07	57.85	27.91	酸性	1716
$w(\text{Al}_2\text{O}_3)/\%$	8.76	48.60	26.55	5.64	31.38	17.20	4.15	22.88	10.74	酸性	2043
$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/\%$	1.15	64.50	7.64	4.67	21.34	9.36	3.80	28.64	11.37	碱性	1566
$w(\text{CaO})/\%$	0.57	30.41	9.84	5.03	39.02	10.27	4.47	55.88	21.37	碱性	2521
$w(\text{MgO})/\%$	—	3.15	1.54	0.11	2.43	3.69	1.61	13.50	7.07		2799
$w(\text{P}_2\text{O}_5)/\%$	0.01	4.88		0.04	2.53					碱性	
$w(\text{Na}_2\text{O})/\%$	—		0.65			2.36	2.74	15.92	5.88	碱性	1277 升华
$w(\text{K}_2\text{O})/\%$	—	9.57	1.03	0.09	11.38	1.44	0.16	2.56	0.77	碱性	660 分解
$w(\text{TiO}_2)/\%$	0.15	5.36	0.96	0.28	3.76	0.90	0.01	0.68	1.33	酸性	1838
$w(\text{SO}_3)/\%$	0.07	13.43	4.01	0.63	35.16	6.15	0.55	35.85	13.49		
$w(\text{MnO}_2)/\%$			0.09			0.07	0.04	0.42	0.12		

对国内典型烟煤(67组,其中19组灰熔融性小于1300℃,48组灰熔融性大于1300℃)、褐煤(20组,其中19组灰熔融性小于1300℃,1组灰熔融性大于1300℃)以及准东煤(66组,其中41组灰熔融性小于1300℃,25组灰熔融性大于1300℃)的历史数据进行了统计,煤灰成分的比较见表1。

准东煤与国内典型烟煤和褐煤的平均灰成分比较,主要特点是 SiO_2 、 Al_2O_3 酸性氧化物偏低,而

式中, M_{ad} 为空干基水分含量,%; $Q_{gr,dmmf}$ 为煤样干燥无矿物质基高位发热量,MJ/kg; A_d 为干基灰分含量,%; $Q_{gr,daf}$ 为煤样干燥无灰基高位发热量,MJ/kg。

2 煤灰成分对准东煤灰熔融性的影响

2.1 准东煤的灰成分特性

目前测试的灰成分主要包括 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 TiO_2 、 SO_3 和 MnO_2 (P_2O_5)。根据煤灰中化学成分的离子势,可将这些氧化物分为两类:其中 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TiO_2 属于酸性氧化物,定义为A;而 Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 属于碱性氧化物,定义为B。一般认为酸性氧化物含量越多,煤灰的熔融温度越高,碱性氧化物含量越多,灰熔融温度越低^[4]。

各种化合物对应的熔点见表1。煤灰熔融性取决于煤内的无机矿物质组成,而矿物质又与化学成分密切相关。当煤灰化学组成不同时,其矿物质组成往往不同,因而煤灰的熔融性也不同。

Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO 、 Na_2O 碱性氧化物偏高,其中MgO的平均值甚至高于国内典型烟煤和褐煤的最高值。由于准东煤灰成分的特殊性,导致其灰成分对灰熔融性的影响规律有别于已有的研究结果。表1中烟煤、褐煤以及准东煤的平均ST分别为1360、1180和1231℃。尽管准东煤的平均ST高于国内典型褐煤或者某些低灰熔融性烟煤,但在锅炉燃烧过程中均表现出比褐煤锅炉和低灰熔融性烟煤锅炉更严重的结渣性能。

2.2 B/A 及 B/(B+A) 与灰熔融性的相关性

文献[1]指出酸碱比值对流动温度的影响总体趋势是:随着酸碱比增大,流动温度有升高的趋势,即对于国内其他煤种(高钠准东煤除外),煤灰中的酸性物质越高,其灰熔融性越高。准东煤 B/A 与 ST 的相关性如图 1 所示。从图 1 准东煤灰熔融性与 B/A 的相关性可见,当 B/A 大于 2 时,ST 大都在 1300 °C 以上,且随着碱酸比增加灰熔融性有升高的趋势,而当 B/A 小于 2 时,B/A 与灰熔融性 ST 的相关性并不明显,但 ST 大都小于 1300 °C。可见,对于准东煤碱性氧化物尤其是碱土金属氧化物含量较高是导致其灰熔融性较高的原因。但碱性氧化物含量的增加,会增加炉膛结渣和锅炉高温受热面的沾污积灰速度。 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ (准东煤主要是 Na_2O) 对锅炉运行的危害严重,会引发高温区受热面的严重沾污堵灰甚至金属的液态腐蚀,文献[6]认为灰中 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量 3% ~ 6% 已经能导致严重停炉事故。

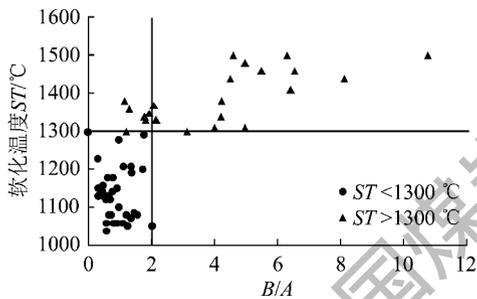


图 1 准东煤 B/A 与 ST 的相关性

图 2 是准东煤以及国内典型烟煤和褐煤的灰熔融性 ST 与 B/(B+A) 的相关性。由图 2 可见,国内典型烟煤和褐煤以及准东煤有明显的分布区域,国内烟煤和褐煤灰熔融性在 1300 °C 以上的煤种主要分布在 IV 区,而 1300 °C 以下的主要分布在 I 和 V 区,该区域和准东煤灰熔融性 ST 小于 1300 °C 重合。而准东煤灰熔融性在 1300 °C 以上的主要分布在 II 和 III 区域,和国内的典型高灰熔融性煤的分布区域截然不同,这也是尽管部分准东煤灰熔融性较高,甚至大于 1500 °C 但仍有严重结渣性的原因之一。

国内典型的低灰熔融性煤及高灰熔融性煤的灰熔融性 ST 与 B/(B+A) 的相关性较好,有明显的分布区域。对于灰熔融性 ST 大于 1300 °C 的煤, B/(B+A) 小于 0.2, 分布在 IV 区域, 而准东煤则分布在 II 和 III 区域; 对于灰熔融性 ST 小于 1300 °C 的煤, 分布在 I 区域和 V 区域, B/(B+A) 基本在 0.2 ~ 0.7, 与准东煤相同, 只是准东煤 V 区域分布的概率更高。

由图 2 可见, 可以通过煤灰中的 B/(B+A) 的含量进行准东煤 ST 的初级判断:

$$B/(B+A) < 0.5, ST < 1300 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$B/(B+A) \geq 0.7, ST \geq 1300 \text{ } ^\circ\text{C}$$

而 $0.5 \leq B/(B+A) < 0.7$ 时, ST 的灰熔融性很难判别, 需通过实验确定, 根据已有的统计数据, ST < 1300 °C 的概率为 56%, ST > 1300 °C 的概率为 44%。

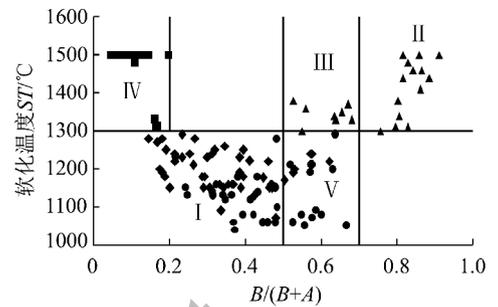


图 2 灰熔融性 ST 与 B/(B+A) 的相关性

2.3 准东煤灰中硅铝比与灰熔融性的相关性

硅和铝的综合影响因素可用硅铝比 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 来表示。图 3 列出了准东煤和国内典型烟煤和褐煤的 ST 与 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 的关系。可见国内烟煤和褐煤 ST 大于 1300 °C 和小于 1300 °C 的主要分布在 A 区和 B 区, 随着硅铝比的增加, 煤灰熔融性有明显的降低趋势。准东煤 ST 大于 1300 °C 和小于 1300 °C 的煤主要分布在 C 区和 D 区, 随着硅铝比的增加, 煤灰熔融性也有明显的降低趋势。但与国内烟煤和褐煤比较, 其分布范围更广导致按常规方法测定的灰熔融性数值变动甚大, 硅铝含量与灰熔融性的规律性不如国内烟煤和褐煤。

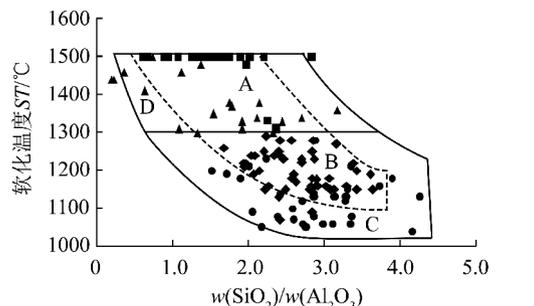


图 3 煤灰中硅铝比与灰熔融性的相关性

2.4 当量灰成分与灰熔融性的相关性

把准东煤灰成分中的 SO_3 和 MnO_2 (或者 P_2O_5)

去掉,将剩余的灰成分之和定为100%,再折算到相关的灰成分含量,本文称之为当量灰成分,在原有灰成分的化学符号上加“'”表示),其余已有定义的指标若为当量灰成分计算得出,也相应称为当量指标,同样在原有的符号上加“'”表示。

$$\text{当量 } Y = X / (B + A) \times 100\% \quad (2)$$

式中, Y (如 SiO_2' 、 CaO' 等)代表当量灰成分含量; X (如 SiO_2 、 CaO 等)代表相应灰成分含量。

当量 $A' = X_1 + X_2 + X_3$ (X_1 、 X_2 、 X_3 代表当量酸性氧化物的含量),当量 $B' = X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + X_8$ (X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 、 X_8 代表当量碱性氧化物的含量);

根据表1中的各项灰成分中的熔点和当量灰成分进行了准东煤灰熔融性的计算:

$$T_{\text{dj}} = \frac{\sum X_{\text{di}} T_{\text{ri}}}{100} \quad (3)$$

式中, T_{dj} 表示当量计算煤灰软化温度 ST' , $^{\circ}\text{C}$; X_{di} 表示当量灰成分含量; T_{ri} 表示对应灰成分的熔点, $^{\circ}\text{C}$;参见表1。

实验室测得的 ST 和根据式(3)计算得出的当量计算 ST' 的相关性如图4所示,可见当量计算 ST' 与 ST 具有较强的相关性,相关指数 R^2 为 0.7089,拟合公式如下

$$T_{\text{dj}} = 1.0102X + 752.68, R^2 = 0.7089 \quad (4)$$

式中, X 表示实验室测量所得煤灰软化温度 ST , $^{\circ}\text{C}$ 。

对于准东煤,图4也表明了准东煤的灰熔融性和当量灰成分具有较强的相关性,高熔点氧化物含量越高,煤灰熔融性也越高。

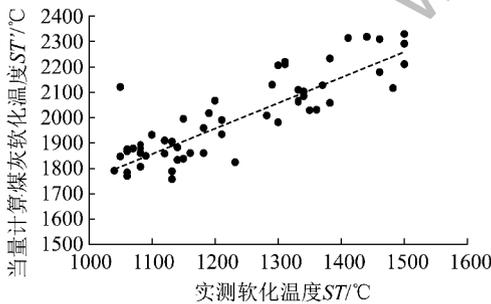


图4 准东煤 ST 与当量计算 ST' 的相关性

2.5 准东煤当量 B 与灰熔融性的相关性

图5是准东煤当量 B' 与 ST 的相关性。 B' 小于50%时,随着 B' 的增加灰熔融性有下降的趋势;反之,当 B' 大于50%时,随着 B' 的增加灰熔融性有升高的趋势。也可用 B' 初步预测准东煤的灰熔融性。可见:

$B' < 50\%$ 时, $ST < 1300^{\circ}\text{C}$,

$B' > 70\%$ 时, $ST > 1300^{\circ}\text{C}$,

$50\% \leq B' \leq 70\%$ 时, ST 需通过实验确定。

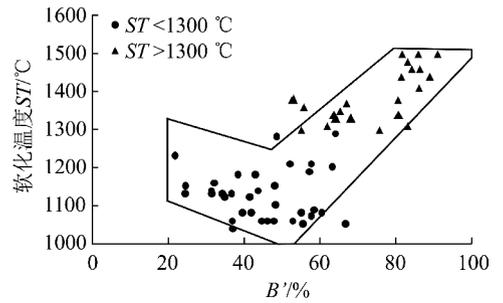


图5 准东煤当量 B' 含量与 ST 相关性

2.6 利用灰成分数据对准东煤灰熔融性的预测

通过准东煤 ST 与当量灰成分的相关性进行拟合^[7-8],得出准东煤的煤灰软化温度 ST_{nh} 的拟合公式:

$$ST_{\text{nh}} = \sum_{i=1}^8 k_i X_i \quad (5)$$

相关系数 $R^2 = 0.7428$

式(5)中, k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 、 k_5 、 k_6 、 k_7 和 k_8 分别为 42.50、51.34、39.40、49.51、44.75、45.51、15.42 和 49.24。

X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 、 X_7 和 X_8 分别表示 SiO_2' 、 $\text{Al}_2\text{O}_3'$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3'$ 、 CaO' 、 MgO' 、 $\text{Na}_2\text{O}'$ 、 $\text{K}_2\text{O}'$ 和 TiO_2' 。

将 ST_{nh} 和 ST 进行比对,88%的预测结果与实测结果的偏差在 80°C 以内,96%的偏差在 100°C 以内,最大偏差为 302°C ,最小偏差为 1°C ,绝对偏差的平均值为 53.66°C ,而目前规定的 ST 在不同实验室的测量偏差为 80°C ^[9],因此采用式(5)的预测结果具有较高的精度。

3 结 论

1) 煤灰成分中碱性氧化物含量高是造成部分准东煤灰熔融性较高的主要原因,准东煤无论灰熔融性高低均具有严重结渣倾向,对于准东煤采用灰熔融性指标作为结渣性能判别精度较低。

2) 灰成分中的 $B/(B+A)$ 以及当量 B' 指标可作为准东煤灰熔融性的初级判别。

3) 给出了准东煤灰熔融性 ST_{nh} 的计算模型, ST_{nh} 结果与实测 ST 的偏差在 80°C 和 100°C 以内的比例分别达到 88% 和 94%,具有较高的精度。

参考文献:

[1] 孙亦祿. 煤中矿物杂质对锅炉的危害[M]. 北京:水力电力出版社,1994:19. (下转第106页)

表1 输渣系统对比

项目	埋刮板输送机加斗提机	带式输送机
系统复杂程度	较复杂,由埋刮板输送机和斗式提升机组成	较简单,由输送带和滚筒或链轮组成
运行维护工作量	埋刮板机和斗提机需经常维护易损件	仅需对输送带进行维护,但需防止输送带发生跑偏
输渣温度/℃	150~250	40~250
设备布置情况	布置所需空间较大	常规输送带布置空间较大,大倾角输送带布置空间小
渣量适应性	可承受较大渣量变化	可承受大范围渣量变化
系统能耗	能耗高	能耗低
系统风险	故障不易发现且容易扩大	注意渣温过高易引起输送带烧损

在传统的CFB锅炉输渣系统的设计中,为了防止输送带烧损,往往选择埋刮板机加斗提机输渣系统。随着滚筒冷渣器技术提高,锅炉底渣温度控制在150℃以下是完全可靠的,因此对于大型CFB机组,选择埋刮板输送机加斗提机输渣系统和带式输送机输渣系统都可行。

对于新建电厂,建议选择带式输送机输渣系统,以提高输送系统的经济性,同时在设计过程中应保证此系统在输送过程中的安全性和可靠性。如果系统设计之初选择了埋刮板机加斗提机的输渣系统,由于系统布置方式以及布置空间的问题,很难实现带式输送机输渣系统的改造。

4 结 语

为了保证CFB锅炉机组输渣系统具有稳定以及连续可控的输渣能力,对我国常用的3种底渣输送方式进行比较,结果表明采用埋刮板机加斗式提升机和大倾角带式输送机2种输渣系统较为合理。通过分析这2种输渣系统的工作原理、存在的问题以及适用条件,表明埋刮板输送机加斗提机的输渣系统和带式输送机输渣系统均适用于CFB锅炉机组,但带式输送机输渣系统简单、维护量小、能耗低,更适用于新建大型CFB锅炉机组。高效的输渣系统不仅可以提高CFB锅炉运行的稳定性,以及CFB锅炉内的物料平衡,而且可以稳定炉内燃烧,提高燃烧效率,保证CFB锅炉机组的安全稳定运行具有重

要的意义。

参考文献:

- [1] 徐志. 超临界循环流化床锅炉数学模拟与设计优化 [D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [2] 曾兵. 循环流化床锅炉选择性排渣冷却系统研究 [D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [3] 蒋敏华. 大型循环流化床锅炉技术 [M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [4] 刘平,周涛. 循环流化床锅炉冷渣器灰渣传热过程研究 [J]. 热力发电,2011,40(10):13-16.
- [5] 舒陈. 循环流化床锅炉选择性排渣装置的冷模试验研究 [D]. 重庆:重庆大学,2010.
- [6] 王超,程乐鸣,邱坤赞,等. 循环流化床锅炉添加脱硫剂对热平衡的影响 [J]. 热力发电,2011,40(3):72-77.
- [7] 罗必雄. 大型循环流化床锅炉机组工艺设计 [M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [8] 丁岩峰,张春霞,孙奉昌. 对大型循环流化床锅炉机组底渣输送方式的探讨 [J]. 电站辅机,2011,32(2):36-38.
- [9] 胡明华. 火电厂灰渣输送技术经济适用性优化研究 [D]. 保定:华北电力大学,2012.
- [10] 卢来印,倪泰山. 浅谈链斗式输送机和埋刮板输送机在输送锅炉底渣上的优缺点 [J]. 煤炭工程,2007,39(6):65-66.
- [11] 崔凯. 刮板输送机可靠性工程方法研究 [D]. 太原:太原理工大学,2012.
- [12] 秦午鹏. 刮板输送机的发展现状与趋势 [J]. 黑龙江纺织,2012(4):30-32.
- [13] 刘艳妮. 大倾角带式输送机的动态分析 [D]. 济南:山东科技大学,2011.
- [14] 蔡丽蓉. 大倾角皮带输送机在锅炉输渣系统中的应用 [J]. 福建轻纺,2009(9):46-47.
- [15] 吾斯曼·托乎提,季书文. 浅谈大倾角皮带输送机在煤炭行业的应用:基于常见故障分析及处理方法 [J]. 企业导报,2012(2):276-278.

(上接第102页)

- [2] 孟建强. 准东煤燃烧及结渣特性研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
- [3] DL/T 831—2002,大容量煤粉燃烧锅炉炉膛选型导则 [S].
- [4] 李平,梁钦锋,刘霞,等. 酸碱比值与助熔剂对煤灰熔融流动温度影响的研究 [J]. 大氮肥,2010(33):107-110.
- [5] 相大光,姚伟. 电厂用煤煤质评价指标相关性研究及测试评价方法 [R]. 西安:西安热工研究院有限公司,1996:11.
- [6] 杨忠灿,刘家利,姚伟,等. 准东煤灰沾污指标研究 [J]. 洁净煤技术,2013,19(2):82-84.
- [7] 樊泉桂,潘攀. 化学组分及单组分熔融温度与煤灰熔融温度的相关性分析 [J]. 锅炉技术,2007,38(6):10-12.
- [8] 刘筱华,李晋文. 浅谈利用灰成分计算灰熔融性 [J]. 中国高新技术企业,2009(12):51.
- [9] GB 219—2008,煤灰熔融性的测定方法 [S].