

220 t/h锅炉燃烧低挥发分水煤浆 结渣特性的试验研究

周俊虎, 张传名, 刘建忠, 陈瑶姬, 赵卫东, 张光学, 岑可法
(能源洁净利用国家重点实验室(浙江大学), 浙江省 杭州市 310027)

Experimental Study on Slagging Characteristic of Low-volatile Coal Water Slurry in a 220 t/h Boiler

ZHOU Jun-hu, ZHANG Chuan-ming, LIU Jian-zhong, CHEN Yao-ji, ZHAO Wei-dong,
ZHANG Guang-xue, CEN Ke-fa

(State Key Laboratory of Clean Energy Utilization(Zhejiang University), Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

ABSTRACT: Low-volatile coal water slurry (CWS) has an advantage over washed coal CWS in price obviously. When CWS is applied in a boiler, besides the stability of inflammation and combustion, slagging characteristic is another important factor to affect safety and economy in operation of the boiler. Low-volatile CWS was used in large-scale boilers and slagging experiment was processed using silicon carbide rods. This paper used coal ash analysis, changing tendency of slag thickness, mass and deposition rate, X-ray diffractometer (XRD) and scanning electron microscope (SEM), a slagging characteristic decision model based on fuzzing mathematics to predict the slagging, and get the slagging characteristic of low-volatile CWS. The result indicates that the slagging of low-volatile CWS is in an acceptable extent.

KEY WORDS: low-volatile coal water slurry; integration judge; slagging characteristic

摘要: 低挥发分水煤浆比精煤水煤浆在价格上有明显的优势, 在锅炉上燃用水煤浆除考虑着火和燃烧稳定性外, 结渣特性是另一重要的影响锅炉安全经济运行的因素。文中就大型锅炉燃烧低挥发分水煤浆, 利用硅碳棒进行结渣试验, 采用单一结渣指标, 通过对渣层厚度、沉积量和沉积速率的变化分析及 X-射线衍射图谱和扫描电镜分析, 模糊综合评判模型, 获得低挥发分水煤浆燃烧结渣特性。结果表明, 低挥发分水煤浆的结渣情况在可接受的范围内。

关键词: 低挥发分水煤浆; 综合评判; 结渣特性

0 引言

水煤浆是一种新型代油清洁燃料, 目前已在

国部分电厂取代燃油在锅炉上应用^[1-2]。因水煤浆制备方面的要求及掺加了 35% 左右的水分, 一般要求制浆用的煤品质较好, 如洗选精煤或优质烟煤, 这使得水煤浆的成本有所上升, 特别是目前煤炭价格上涨后, 精煤水煤浆的价格也在逐渐提高。因此, 采用原煤或劣质煤制浆在成本上是具有明显优势的。汕头万丰热电厂是我国第一台燃油设计锅炉改烧水煤浆的电厂, 近年来为了降低燃料成本, 探索用低挥发分煤制备水煤浆在锅炉燃烧, 通过调试表明燃烧是成功的。调试过程中还重点对高挥发分水煤浆和低挥发分水煤浆的结渣特性进行了试验研究。结渣是在锅炉内烟气侧受热面出现的影响锅炉正常运行的故障现象。因水煤浆锅炉炉膛一般都布置卫燃带, 如燃料易结渣或运行不理想, 容易引起结渣。因此, 了解水煤浆的结渣特性或对其做出预测对锅炉安全经济运行是非常重要的。

国内外对于煤或水煤浆的结渣情况有较多的研究^[3-7], 对于煤或水煤浆的结渣倾向判断也有一定的研究^[8-13]。结渣特性的判别方式有多种, 如用煤的物理特性进行判别^[14], 或结合无因次炉膛最高温度, 无因次实际切圆直径和煤质特性 4 项判别指标, 利用模糊数学方法建立综合评判模型进行判别^[15], 利用灰色评判系统进行结渣评估^[16]等。本文基于基本煤质特性判别指标和模糊数学综合评判模型, 分析了灰渣的结渣过程, 借助 X-射线衍射(X-ray diffractometer, XRD)和扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)实验对结渣特性进行评判。

采用硅碳棒在锅炉上进行结渣沉积量、沉积速率等方面研究，并结合燃料中灰成分预测结渣特性，还应用模糊数学方法进行结渣判断，预测结果与结渣特性试验结果相吻合。

1 试验设备简介

试验是在汕头万丰热电厂 1 号锅炉中进行，此锅炉为原燃油锅炉改烧水煤浆锅炉，型号为 WGZ220/9.8-15 型，为武汉锅炉厂生产。炉膛为矩形截面炉室，其尺寸为 7.67 m×7.558 m，燃烧器区域高度为 3.851 m，并铺有卫燃带。主要参数如下：锅炉额定蒸发量 187 t/h；额定蒸汽压力 9.8 MPa；额定蒸汽温度 540 ℃；给水温度 215 ℃；冷空气温度 20 ℃；排烟温度 142 ℃；热空气温度 320 ℃；锅炉计算效率 91.8%；燃料种类水煤浆；燃料耗量 26488 kg/h；炉膛出口温度 1040 ℃；炉膛容积热强度 $627 \times 10^3 \text{ kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ 。

2 试验方法和内容

2.1 试验方法

在稳定工况下，通过水冷壁上的测试孔，采用非冷却硅碳测试棒插放在主燃烧区域的同一点进行结渣试验。每 30 min 将硅碳棒往外拉大约 12 cm，直到硅碳棒不再处于燃烧区域为止。

对于取出的样品，待冷却后，放置于振荡器上振荡 15 min，以去除较疏松浮灰，剩余沉积灰渣定义为粘附型渣，这类沉积的多少和煤粉实际燃烧过程中结渣倾向相关。将振荡后的硅碳棒称量，求取各个煤种硅碳棒的增重，这一质量即为粘附型积灰的质量，再除以时间和硅碳棒面积就得到灰渣沉积速率。

2.2 试验工况及内容

工况 1 为高挥发分水煤浆，工况 2 和工况 3 为低挥发分水煤浆(3 个工况氧含量分别为 2.67%、3.71%和 3.73%，其他工况条件详见文献[17])。试验内容包括高、低挥发分水煤浆灰成分结渣特性预测，不同工况炉膛燃烧区域结渣量(厚度)、结渣速率试验，水煤浆结渣特性的模糊数学综合评价模型的建立与应用。

3 煤灰成分预测结渣特性

3.1 煤灰成分预测方法

利用煤灰成分进行结渣分析预测一般采用 T_{ST} ，碱酸比(B/A)，硅铝比，硅比G，铁铝比，锅炉结渣

常数 S_z 以及综合判别指数R来判别^[3]。具体的计算方法如表 1 所示。

表 1 结渣特性指数
Tab. 1 Slagging characteristic exponents

指数	表达式
碱酸比(B/A)	$\frac{w(\text{Fe}_2\text{O}_3) + w(\text{CaO}) + w(\text{MgO}) + w(\text{Na}_2\text{O}) + w(\text{K}_2\text{O})}{w(\text{SiO}_2) + w(\text{Al}_2\text{O}_3) + w(\text{TiO}_2)}$
硅铝比	$w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$
硅比 G	$\frac{w(\text{SiO}_2)}{w(\text{SiO}_2) + w(\text{CaO}) + w(\text{MgO}) + \text{当量}\text{Fe}_2\text{O}_3}$
铁钙比	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)/w(\text{CaO})$
综合判别指数 R	$1.237B/A + 0.282w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3) - 0.0023T_{ST} - 0.0189G + 5.415$
锅炉结渣指数 S_z	$S_z = (q_F + q_{Hr}) \cdot R^{0.317}$

注： q_F 为炉膛截面热负荷， q_{Hr} 为燃烧区域有效计算壁面热负荷。

3.2 煤灰成分分析

表 2 为 3 个工况中水煤浆特性分析及软化温度数据，表 3 为水煤浆的煤灰成分分析。

表 2 水煤浆特性及软化温度

Tab. 2 Characteristic and softening temperature of CWS

工 况	工业分析/%				$Q_{\text{net,ar}}$ (kJ/kg)	元素分析/%					$T_{ST}/\text{℃}$
	M_t	A_{ar}	V_{ar}	FC_a		C_{ar}	H_{ar}	N_{ar}	S_{tar}	O_{ar}	
1	36.04	6.7	17.42	39.84	19376	50.07	2.57	0.72	0.8	3.1	1457
2	35.61	10	10.22	44.17	19108	49.15	2.66	0.8	1.3	0.48	>1500
3	34.94	10.14	10.29	44.63	19372	49.51	2.67	0.78	1.1	0.86	>1500

表 3 水煤浆的灰成分分析

Tab. 3 Ash composition of CWS

工 况	元素分析/%							
	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{MgO})$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{TiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{K})$	$w(\text{Na})$
1	9.1	0.67	2.92	2.27	24.37	57.48	0.84	2.35
2	17.23	0.69	2.77	1.5	23.36	51.76	0.69	2
3	16.92	0.57	2.94	2.06	22.67	51.97	0.8	2.07

由表 2 和表 3 可见，工况 1 为高挥发分水煤浆，工况 2、3 为低挥发分水煤浆，这 2 种水煤浆在燃料特性和灰成分方面有一定差别，因此除了在着火和燃烧方面有区别外，灰渣的熔融特性也会有一定的区别。表 4 是采用表 1 中的结渣特性指数进行预测的结果(表中结渣判别依据见表 6 和文献[14])，由表可见，高挥发分水煤浆属轻微结渣，低挥发分水煤浆结渣较重一些，属中轻结渣。

表 4 还列出了根据实际结渣实验所得到的硅碳

表 4 燃料特性判别结果

Tab. 4 Result of fuel characteristic judgement

工况	燃料特性判别结果							实际结论	
	$T_{ST}/\text{℃}$	B/A	硅铝比	G	铁钙比	R	S_z		判别
1	1457,	0.20,	2.36,	81.9,	3.12,	1.43,	1.2,	较轻微	轻微结渣
2	>1500,	0.32,	2.22,	71.4,	6.22,	1.63,	1.6,	偏较轻	中轻结渣
3	>1500,	0.32,	2.29,	71.8,	5.76,	1.64,	1.8,	中轻	中轻结渣

棒的结渣情况所得出的结论，与先前预测判别相比较，可以看出通过燃烧特性计算和炉膛结构计算所得出的结渣趋势与实际所得到的结渣效果较一致，稍有出入。

4 燃烧区结渣量与结渣速率

对硅碳棒上的结渣进行称重测量和分析，可计算出各工况的结渣量、结渣厚度与结渣速率，见图 1~3。

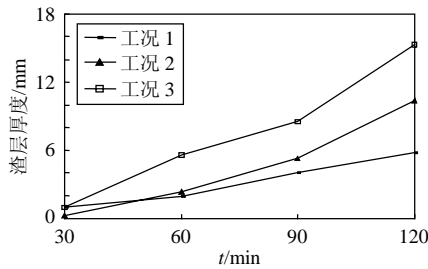


图 1 3 个工况的渣层厚度变化

Fig. 1 Changes of slagging thickness in three conditions

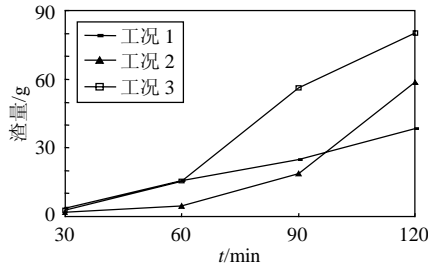


图 2 3 个工况的灰渣沉积量变化

Fig. 2 Changes of slagging deposition in three conditions

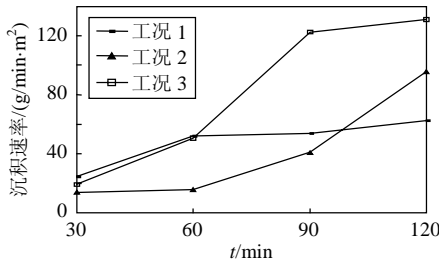


图 3 3 个工况的灰渣沉积速率变化

Fig. 3 Changes of slagging deposition rate in three conditions

由图可见，在 3 个工况中，工况 1 的曲线都较为平稳，且绝对值较小，因此可以判别其结渣倾向比其余 2 个工况为轻，与实际情况也十分吻合(见图 4~6)。从总的趋势上来看，工况 2 与工况 3 的沉积量、沉积厚度与沉积速率均大于工况 1，其中工况 3 的结渣要比工况 2 重，主要原因一方面是由于低挥发分水煤浆结渣特性本身要比高挥发分水煤浆差，另一方面煤中灰分含量高也是其中原因。

一般结渣分为 3 个阶段^[4]：1) 直径小于 10 μm 的灰粒，由于扩散作用，在管子四周形成的均匀薄



图 4 工况 1 的硅碳棒结渣情况
Fig. 4 Slagging in 1st condition



图 5 工况 2 的硅碳棒结渣情况
Fig. 5 Slagging in 2nd condition



图 6 工况 3 的硅碳棒结渣情况
Fig. 6 Slagging in 3rd condition

层，无粘结性，不受烟速影响；2) 形成内部烧结层，直径大于一般灰粒，低熔点灰分组成，选择性沉积，具有黏性；3) 形成外部烧结层，在温度足够高时，灰分大量沉积，速度十分快。根据试验结果，图 1~3 中 30、60 和 90 min 基本上对应上述 3 个阶段。从渣层厚度的变化曲线来看，与此理论是较为吻合的，在第 3 阶段均大幅上扬。从灰渣沉积量与沉积速率上看，工况 2 可能刚进入或尚未进入结渣的第 3 阶段，从趋势上看，工况 2 的结渣倾向在长时间的烧结中将超过工况 3，但就总体来说，二者的结渣状况还是较为相近的。

由各样品硅碳棒结渣情况分析，由于原煤灰分含量较高，低挥发分水煤浆灰渣沉积较多。高挥发分水煤浆灰渣沉积情况较轻，同时由于炉内温度相对较低(见表 5)，灰渣基本上都呈松散状。

表 5 炉内火焰温度

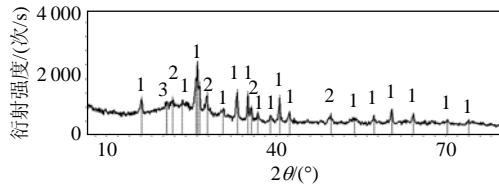
位置	工况 1	工况 2	工况 3
炉膛出口	1137	1162	1173
燃烧区	1269	1275	1283

5 XRD 与 SEM 分析判别

5.1 XRD 分析判别

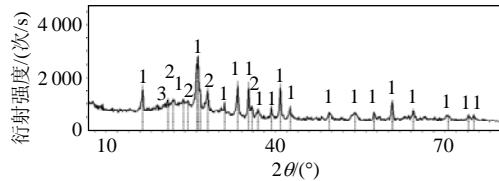
取硅碳棒末端结渣最多处的灰渣进行 XRD 分析，见图 7~9。

从 XRD 的分析图中可以看出，3 种工况下的灰渣在高温时出现的晶体主要是莫来石晶相，莫来石的熔点高达 1810 °C，耐火度高，因此这 3 种工况的水煤浆的结渣性都不严重。工况 3 中较前 2 个工况不同的是还出现了钾微斜长石晶体，此种晶体熔点低，会使高温生成的煤灰样结渣性变强，但由于此种晶体生成量小，对整体煤灰样的结渣性影响不



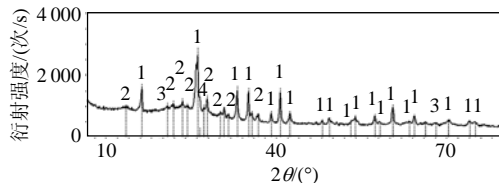
1—莫来石Al₆Si₂O₁₃; 2—钠长石Na(Si₃Al)O₈; 3—石英SiO₂。

图7 工况1的XRD图谱分析
Fig. 7 XRD of 1st condition



1—莫来石Al₆Si₂O₁₃; 2—钠长石Na(Si₃Al)O₈; 3—石英SiO₂。

图8 工况2的XRD图谱分析
Fig. 8 XRD of 2nd condition



1—莫来石Al₆Si₂O₁₃; 2—钠长石Na(Si₃Al)O₈; 3—石英SiO₂;
4—微长斜石KAlSi₃O₈。

图9 工况3的XRD图谱分析
Fig. 9 XRD of 3rd condition

是太大。因此，从XRD的图谱分析中可以看出，3种煤灰的结渣性都不强。

5.2 SEM分析判别

取硅碳棒的末端结渣最多处的渣块进行SEM分析，见图10~12。

从3个工况的灰渣的SEM结果可以清晰地看到，工况1的灰渣样最为稀松，且没有产生熔融现象，

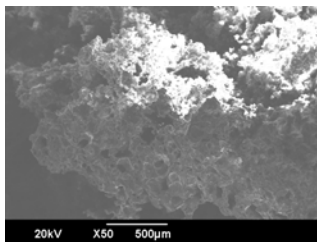


图10 工况1的灰渣样
Fig. 10 Slagging sample SEM in 1st condition

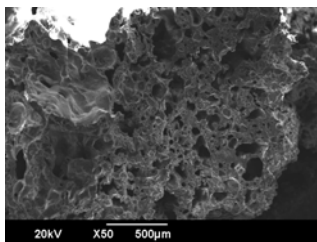


图11 工况2的灰渣样
Fig. 11 Slagging sample SEM in 2nd condition

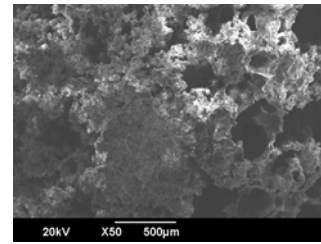


图12 工况3的灰渣样
Fig. 12 Slagging sample SEM in 3rd condition

可以认定工况1的结渣是轻微的，也是3种工况中最轻的。工况2与工况3的灰渣样都产生了一定的熔融现象，但工况2较为轻微一些，留有相当多的空隙，而工况3则出现了部分接连成片的烧结区域，可能与其中存在熔点低的钾微斜长石晶体有关。

6 模糊综合评判模型

6.1 模糊综合评判模型

评判模型利用模糊数学原理，考虑了多项指标的综合影响，注意分级界限的模糊性，并确定判别结果属于某个等级的置信度，以使判别指标更客观实际^[18-19]。其评判步骤如下：

- 1) 选取因素集， $x = \{x_1, x_2, \dots, x_j\}$ 。
- 2) 确定评判等级， $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_k\}$ 。
- 3) 确定权重集， $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ，根据各结渣指标的置信度计算各指标权重系数。
- 4) 确定隶属函数，并由该模糊映射求出模糊

关系矩阵： $R_f = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix}_{n \times m}$ 。

当结渣程度分为3个等级时，可采用半梯形函数，隶属函数如图13所示。

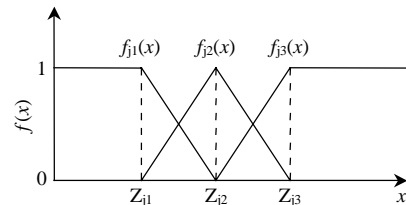


图13 不同等级的隶属函数
Fig. 13 membership function of different grades

- 5) 综合评判 $b = A \cdot R_f$ 。最后按照最大隶属原则， b 中元素最大的为其综合评判结果。

6.2 模糊综合评判模型应用

为了提高判别的准确性，本模型选用了4个基本指标和综合指数 R 作为评判因素。因此，煤种结渣的评判模型和评判结果为：

1) 确定模糊因素集, $X = \{T_{ST}, B/A, w(\text{SiO}_2)/w(\text{Al}_2\text{O}_3), G, R\}$ 。

2) 确定评判等级, $Y = \{\text{轻微结渣, 中等结渣, 严重结渣}\}$ 。

3) 确定权重集A: 5个结渣指标的置信度分别为: 83%、69%、61%、67%、90%^[20]; 进行归一化处理得到各因素的权重 $A = \{0.224, 0.186, 0.165, 0.181, 0.244\}$ 。

4) 隶属函数的确定: 采用线性函数, 隶属函数曲线如图 13 所示。表 6 给出了各因素的结渣倾向判别界限^[20]。据此可以画出各因素的隶属函数曲线, 根据表 4 中各因素值与隶属函数曲线得到各因素隶属函数, 并由此得到该因素的模糊关系矩阵。

5) 综合评判结果 $b = A \cdot R_f$, 得到的综合评判结果及与实际情况的对比如表 7^[14]。由表可见, 模糊数学综合评判模型的准确性高于单一结渣指标的评判准确性, 与实际情况较为符合。

表 6 各结渣指标的结渣倾向判别界限

Tab. 6 Judgment limit of slagging factors

判别指标	严重结渣	中等结渣	轻微结渣
$T_{ST}/^\circ\text{C}$	<1 260	1 260~1 390	>1 390
B/A	>0.4	0.206~0.4	<0.206
硅铝比	<2.65	1.87~2.65	<1.87
G	<66.1	66.1~78.8	>78.8
R	>2.5	1.5~2.5	<1.5

表 7 评判结果与实际情况对比表

Tab. 7 Comparison of judgment results and experiment results

工况	综合评判 b	评判等级	实际结渣状况
1	(0.689, 0.267, 0.044)	轻微结渣	轻微结渣
2	(0.421, 0.525, 0.054)	中轻结渣	中轻结渣
3	(0.399, 0.547, 0.054)	中轻结渣	中轻结渣

7 结论

1) 单一结渣指标对高、低水煤浆结渣性进行了判别, 结果表明本研究高挥发分水煤浆属轻微结渣, 低挥发分水煤浆属轻微或中轻结渣, 结渣特性都不严重。

2) 利用硅碳棒研究了炉内燃烧区域结渣量、结渣厚度和结渣速率的变化规律, 结果表明该锅炉上应用的 2 种水煤浆结渣特性基本相似, 由于低挥发分含灰量高和灰成分不同的原因, 其结渣量、结渣厚度和结渣速率大于高挥发分水煤浆, 但结渣都基本上呈松散型。

3) 对结渣棒上的灰渣进行 XRD 图谱和 SEM 分析, 得知工况 1 是 3 种工况中结渣性最弱的, 为轻微结渣, 工况 2 与工况 3 相近, 为中轻结渣, 与

结渣试验和预测结果相符。

4) 通过建立模糊数学综合评判模型, 对 2 种水煤浆的结渣性进行评判, 结果表明高挥发分水煤浆属轻微结渣而低挥发分水煤浆属中轻结渣。因其综合了各项评判指标, 准确度较高, 与实际的结渣状况对比结果也较为理想。

5) 实验分析的结果说明, 本试验所用低挥发分水煤浆在 220 t/h 锅炉上燃烧结渣情况不严重, 是可以推广应用的。

参考文献

- [1] 张传名, 刘建忠, 周俊虎, 等. 220 t/h 燃油锅炉改烧水煤浆技术及应用[J]. 热力发电, 2006, 35(5): 30-33.
Zhang Chuanming, Liu Jianzhong, Zhou Junhu, et al. Technology of retrofitting designed 220 t/h oil-fired boiler into coal-water-slurry fired one and application thereof[J]. Thermal Power Generation, 2006, 35(5): 30-33(in Chinese).
- [2] Ceng J L, Cao X Y, Zhao X, et al. Application of CWS combustion technology to power plants in guangdong province of China[C]. Proceedings of ICOPE, Kobe Japan, 2003: 415-419.
- [3] 周俊虎, 赵晓辉, 杨卫娟, 等. 神华煤结渣倾向和结渣机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(8): 31-36.
Zhou Junhu, Zhao Xiaohui, Yang Weijuan, et al. Study on the ash deposition propensity and mechanism of shenhua coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(8): 31-36(in Chinese).
- [4] 俞海森, 曹欣玉, 周俊虎, 等. 煤和水煤浆炉内结渣积灰动态特性的研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(2): 210-214.
Yu Haimiao, Cao Xinyu, Zhou Junhu, et al. Research on the dynamic characteristic of ash deposition in boilers burning coal and coal water slurry[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(2): 210-214(in Chinese).
- [5] 兰泽全, 曹欣玉, 周俊虎, 等. 炉内灰渣沉积物中矿物元素分布的电子探针分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 114-119.
Lan Zequan, Cao Xinyu, Zhou Junhu, et al. The electron probe analysis of mineral elementary distribution at ash deposition from furnace[J]. Proceedings of CSEE, 2005, 25(2): 114-119(in Chinese).
- [6] Ripatmanomai S, Fungtammasan B, Bhattacharya S. Characteristics and composition of lignites and boiler ashes and their relation to slagging: The case of Mae Moh PCC boilers[J]. Fuel, 2009, 88(1): 116-123.
- [7] Woosung Park, Myongsook S. Oh. Slagging of petroleum coke ash using Korean anthracites[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2008, 14(3): 350-356.
- [8] 赵显桥, 曹欣玉, 兰泽全, 等. 基于粗集理论的煤灰结渣模糊综合评判权系数确定方法研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(2): 222-225.
Zhao Xianqiao, Cao Xinyu, Lan Zequan, et al. Study of the method fro determining weighting coefficient of coal ash slagging fuzzy combination forecast based on rough set theory[J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2): 222-225(in Chinese).
- [9] 兰泽全, 曹欣玉, 周俊虎, 等. 模糊模式识别在水煤浆锅炉结渣特性判别上的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 216-219.
Lan Zequan, Cao Xinyu, Zhou Junhu, et al. Application of fuzzy pattern identification for slagging characteristics judgement in coal water slurry fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7):

- 216-219(in Chinese).
- [10] Lawrence A, Kumar R, Nandakumar K, et al. A novel tool for assessing slagging propensity of coals in PF boilers[J]. *Fuel*, 2008, 87(6): 946-950.
- [11] Ma Zhanhua, Iman F, Lu P, et al. A comprehensive slagging and fouling prediction tool for coal-fired boilers and its validation/application[J]. *Fuel Processing Technology*, 2007, 88(11-12): 1035-1043.
- [12] 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.
- [13] Su S., Pohl J H, Holcombe D, et al. Slagging propensities of blended coals[J]. *Fuel*, 2001, 80(9): 1351-1360.
- [14] 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: 109-111.
- [15] 赵利敏. 电站锅炉结渣的模糊合评判[J]. *热力发电*, 1998, 8(5): 8-10.
- Zhao Limin. Comprehensive fuzzy assessment of slagging in utility boiler furnaces[J]. *Thermal Power Generation*, 1998, 8(5): 8-10(in Chinese).
- [16] 王桂明, 谢峻林. 煤结渣性能的灰色评判[J]. *武汉理工大学学报*, 2002, 24(4): 32-35.
- Wang Guiming, Xie Junlin. Grey clustering judgment on slagging performance of coal[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2002, 24(4): 32-35(in Chinese).
- [17] 张传名, 刘建忠, 周俊虎, 等. 低挥发分水煤浆燃烧特性及其在燃油锅炉上的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(8): 34-39.
- Zhang Chuanming, Liu Jianzhong, Zhou Junhu, et al. Combustion characteristics of low-volatile coal water slurry and its utilization in oil boilers[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(8): 34-39(in Chinese).
- [18] 舒红宁, 黄镇宇, 董一真, 等. 基于煤灰成分的非线性结渣模糊综合预测模型的研究[J]. *电站系统工况*, 2006, 22(4): 11-12.
- Shu Hongning, Huang Zhenyu, Dong Yizhen, et al. Slagging fuzzy integrated judgment model with nonlinear function based on coal ash component[J]. *Power System Engineering*, 2006, 22(4): 11-12(in Chinese).
- [19] 叶琳, 刘建忠, 张保生, 等. 一种水煤浆燃料结渣综合评价模型及其应用[J]. *电站系统工程*, 2007, 23(3): 27-31.
- Ye Lin, Liu Jianzhong, Zhang Baosheng, et al. An all-around slagging propensity decision model for CWS[J]. *Power System Engineering*, 2007, 23(3): 27-31(in Chinese).
- [20] 岑可法, 周昊, 池作和. 大型电站锅炉安全及优化运行技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 252-263.



周俊虎

收稿日期: 2008-06-05。

作者简介:

周俊虎(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事燃料的燃烧及污染物排放与控制, enejzhou@zju.edu.cn;

张传名(1970—), 男, 博士研究生, 经济师, 主要从事水煤浆燃料的制备和在大型锅炉上的燃烧应用;

刘建忠(1965—), 男, 博士, 教授, 主要从事燃料的燃烧及污染物排放与控制。

(责任编辑 王庆霞)