

文章编号: 0253-9993(2005)02-0210-05

煤和水煤浆炉内结渣积灰动态特性的研究

俞海淼, 曹欣玉, 周俊虎, 李 志, 周志军, 刘建忠, 岑可法

(浙江大学 热能工程研究所 能源清洁利用与环境工程教育部重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 针对低熔点的神华煤和高熔点的水煤浆在炉内的结渣特性, 采用灰污热流计, 分别选择炉膛高温主燃区和炉膛较低温度的中上部作为模拟的结渣和积灰部位进行试验研究。主要通过灰污热流的动态变化、SEM, XRD 和能谱分析揭示炉内沾污结渣特性和灰污热流变化规律。结果显示, 在炉内高温区, 神华煤比水煤浆的灰渣沉积率高, 灰污热流衰减快, 低熔点的复杂共熔体——钙长石 $(\text{Ca}, \text{Na}) \text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_8$ 和较低熔点的赤铁矿是神华煤灰沾污结渣性强的关键因素; 而在炉膛较低温度区域, 神华煤的灰沉积率高于水煤浆, 但灰污热流衰减却要慢。

关键词: 水煤浆; 锅炉; 沾污结渣; 灰污热流

中图分类号: TQ534.4 **文献标识码:** A

Research on the dynamic characteristic of ash deposition in boilers burning coal and coal water slurry

YU Haimiao, CAO Xin-yu, ZHOU Jun-hu, LI Zhi, ZHOU Zhi-jun, LIU Jian-zhong, CEN Ke-fa

(Clean Energy and Environment Engineering Key Lab of Ministry of Education, Institute for Thermal Power Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Using heat flux probe analysed the slagging characteristics of Shenhua Coal with low melting point and CWS (Coal Water Slurry) with high melting point. The high temperature combustion section and lower temperature section in boiler were correspondingly chosen as simulative slagging and ash deposition region. The change rule of resultant flux and the fouling and slagging characteristics in boiler were discussed with dynamic changes of resultant flux, SEM, XRD and element analysis. The results display: on the high temperature combustion section, the deposition accumulating rate of Shenhua coal is higher than CWS, and the resultant flux attenuation is more rapid; on the lower temperature section in boiler, the ash accumulating rate of Shenhua coal is higher than CWS too, but the resultant flux attenuation is slower than CWS. The complex compound in low melting point—— $(\text{Ca}, \text{Na}) \text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_8$ and hematite are regarded as the key factor of strong fouling and slagging characteristics.

Key words: coal water slurry; boiler; fouling and slagging; resultant heat flux

目前锅炉严重的结渣问题, 特别是结渣速率及其对热流密度的影响对锅炉的设计计算和沾污条件下的优化操控有待进一步提高^[1]。神华煤作为目前我国用量最大的动力煤种之一, 燃烧经济性好, 但同时神华煤是一种低熔点、易沾污结渣的煤^[2]。而水煤浆作为一种代油燃料, 灰熔点较高, 沾污结渣较轻, 但国内外尚无学者对其沾污结渣的机理和灰污热流衰减规律进行详细研究。因此, 采用灰污热流计模拟炉内水冷壁沾污结渣的动态过程, 对其沾污结渣特性和灰污热流变化规律进行研究很有实际意义。

收稿日期: 2004-11-23

作者简介: 俞海淼 (1976-), 男, 浙江杭州人, 博士研究生。Tel: 13958113701, E-mail: hmyuzj@sohu.com

1 灰污热流计

根据傅立叶定律: $q = -\lambda dt/dx$, 对于一维稳态导热, 已知材料的导热系数 λ , 则测出导热方向上任两点间的温差, 即可求出热流密度 q 即 $q = \lambda (t_1 - t_2) / \delta$. 根据这一原理, 笔者设计出带不锈钢探头的灰污热流计, 如图 1 所示. 由热电偶测得 t_1 和 t_2 , 经数据采集仪获取温度信号后保存于计算机内. 随着炉内空间颗粒不断黏附在不锈钢探头表面, 灰污热阻加大, 探头中的 t_1 和 t_2 将随之动态变化, 并被记录下来, 从而获知热流密度 q 的动态变化. 根据炉内高温主燃区和较低温度区域分别设计成水冷和空冷 2 种型式.

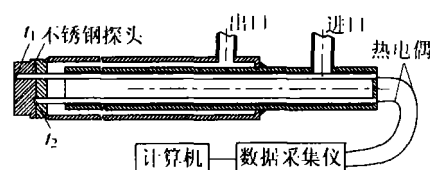


图 1 灰污热流计结构

Fig. 1 Heat flux probe structure

2 锅炉简介和燃料特性

煤粉试验炉为 1.1 m × 1.1 m 的四角切圆燃烧大型试验台, 正四角切圆布置直流燃烧器从下往上依次为下二次风、一次风和上二次风. 燃水煤浆锅炉为某电厂 W GZ410 / 9.8 - 3 型燃油锅炉改造而成, 炉膛横截面为 12 990 mm × 8 070 mm, 燃烧器采用六角切圆布置方式. 试验分别在上述 2 台炉中进行.

试验时在高温的主燃区放入一水冷灰污热流计, 在炉膛的中上部较低温度区放入一空冷灰污热流计. 用于模拟水冷壁积灰结渣的动态过程以及水冷壁的灰污热流变化. 试验炉煤粉为神华混煤 (混有 15% 左右的准葛尔煤), 灰中 Fe_2O_3 和 CaO 含量均明显高于水煤浆燃料, $D_T = 1\ 242$, $F_T - D_T < 50$. 水煤浆燃料灰分较低, 灰中 Fe_2O_3 和 CaO 均较低, 具体燃料特性和灰成分灰融特征温度见表 1, 2

表 1 燃料特性

Table 1 Fuel characteristic

试样	$w(C_{ar})$	$w(H_{ar})$	$w(O_{ar})$	$w(N_{ar})$	$w(S_{ar})$	V_{ar}	A_{ar}	M_{ar}	$Q_{ar,net}/kJ \cdot kg^{-1}$
神华煤	54.87	3.43	9.62	0.80	0.36	23.53	12.71	18.21	20 993
水煤浆	48.18	2.68	5.68	0.54	0.33	21.35	6.17	36.42	18 164

表 2 灰成分和灰熔点特征温度

Table 2 Ash composition and fusion temperature

试样	灰成分 / %								灰熔融特征温度 /			
	$w(Fe_2O_3)$	$w(MgO)$	$w(CaO)$	$w(TiO_2)$	$w(Al_2O_3)$	$w(SiO_2)$	$w(K_2O)$	$w(Na_2O)$	D_T	S_T	H_T	F_T
神华煤	10.36	1.22	11.02	1.19	38.11	36.03	0.54	0.71	1 242	1 277	1 281	1 284
水煤浆	5.44	2.11	6.44	3.26	31.29	39.13	0.64	1.90	1 328	1 373	1 377	1 392

3 试验结果与分析

(1) 灰渣沉积的特征 低熔点的神华煤在高温主燃区的结渣能力很强, 如图 2 (a) 所示. 由表 3 可知其灰渣沉积率为 $39.5\text{ mg}/(\text{h} \cdot \text{cm}^2)$, 远高于在燃水煤浆炉中的沉积率 $19.4\text{ mg}/(\text{h} \cdot \text{cm}^2)$. 而燃水煤浆炉的探头上基本看不到渣 (图 2 (c)), 主要是灰贫, 粒径很小的细颗粒黏附在表层, 初始沉积层已形成, 一次沉积层正在发展, 但捕捉表面未形成. 对于炉膛中上部位温度较低的沾污积灰区, 空冷灰污热流计探头上的积灰并不多 (图 2 (b), (d)). 可见沾污积灰的过程相对结渣要长得多, 燃神华煤的积灰为土黄色, 而燃水煤浆时积灰为青灰色, 沉积率分别为 $10.3, 7.8\text{ mg}/(\text{h} \cdot \text{cm}^2)$.

(2) 灰污热流变化规律 通过计算机实时记录灰污热流计的温度 t_1 和 t_2 , 可以得到灰污热流 q 随沾污结渣的变化规律. 总体上, 热流曲线与温度 t_1 和 t_2 曲线相一致, 由高到低, 这是因为探头上一旦有细灰颗

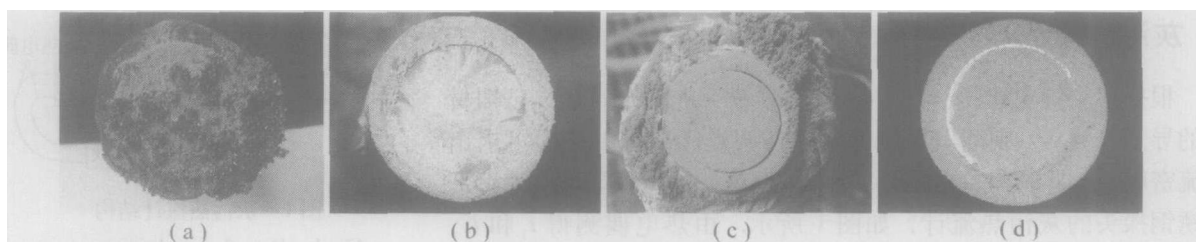


图 2 燃神华煤和水煤浆时水冷与空冷探头上灰渣样

Fig. 2 The deposition on probe burning Shenhua coal and CWS

- (a) 燃神华煤时水冷探头上灰渣样 ($T_g = 1\ 340$); (b) 燃神华煤时空冷探头上灰渣样 ($T_g = 1\ 000$);
(c) 燃水煤浆时水冷探头上灰渣样 ($T_g = 1\ 270$); (d) 燃水煤浆时空冷探头上灰渣样 ($T_g = 950$)

粒黏附上, 由于灰污热阻的存在, 导致 t_1 和 t_2 的相应减小. 随灰污热阻的增加, 有效吸收热流必然减少^[3]. 需要指出的是试验在大型试验台和电站锅炉中进行, 温度有时会有波动, 但并不影响热流的总体变化趋势.

从图 3 (a) 的灰污热流曲线可知, 燃神华煤粉时灰污热流 q_c 衰减的很快, 由 $q_{\max} = 225\text{ kW/m}^2$ 降至 $q_{\min}$ 约为 100 kW/m^2 , 衰减率高达 $0.60\text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$, 见表 3. 此外, 灰污热流 q 衰减到 85% 清洁热流 (q_{85}) 所需时间为 50 min. 而对应燃水煤浆锅炉, 由图 3 (c) 知灰污热流衰减则要慢得多, 衰减率为 $0.49\text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$, 热流达到 q_{85} 所需时间为 105 min, 比神华煤多 1 倍以上. 两者热流衰减率与其灰渣沉积率结果是一致的. 从热流衰减至 q_{85} 所需时间、灰渣沉积率和热流衰减率可知神华煤的结渣能力明显高于水煤浆, 这是燃神华煤锅炉设计运行中需要特别引起重视的. 与易结渣高温区域不同的是, 在温度相对较低的炉膛中上部, 由于空冷的灰污热流计探头上沾污积灰量较少, 热流衰减相对要缓慢得多. 图 3 (b), (d) 中灰污热流曲线变化很平缓, 热流衰减率分别仅为 0.17 和 $0.23\text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$, 远低于高温区的 0.60 和 $0.49\text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$. 其热流衰减至 q_{85} 所需时间也分别延长为 180 和 130 min, 与此对应, 通过收集探头上的积灰量可知其灰渣沉积率也明显降低, 分别为 10.3 和 $7.8\text{ mg}/(\text{h} \cdot \text{cm}^2)$, 见表 3.

需要指出的是, 燃神华煤时空冷灰污热流计上灰渣沉积率高于燃水煤浆时的, 而热流衰减率却比燃水煤浆时快. 之所以如此, 很可能与所沉积灰的物理和化学特性有关, 如颗粒的细度、灰的导热系数等^[4]. 具体分析将在下面结合 SEM 微观结构展开.

(3) 灰污层微观结构分析 通过

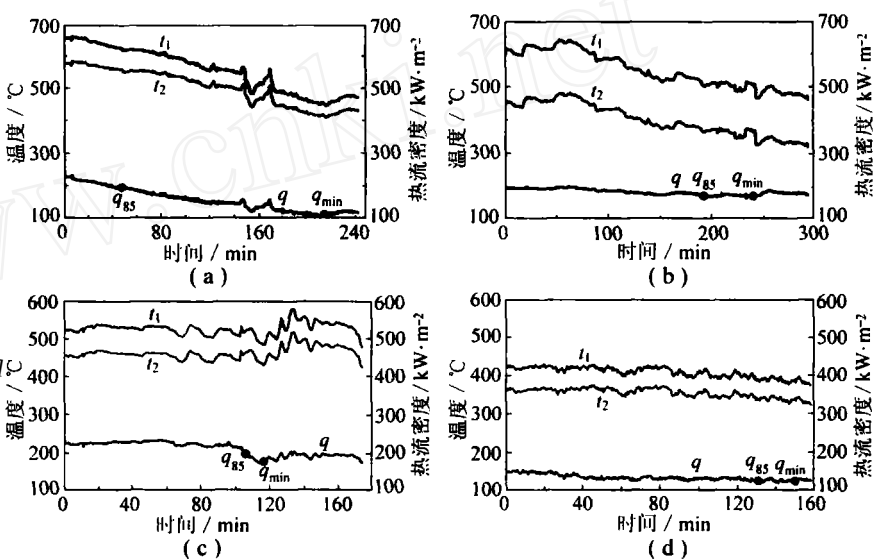


图 3 燃神华煤和水煤浆时灰污热流衰减曲线

Fig. 3 Dynamic changes of resultant flux burning Shenhua coal and CWS

- (a) 燃神华煤时水冷探头灰污热流衰减曲线; (b) 燃神华煤时空冷探头灰污热流衰减曲线;
(c) 燃水煤浆时水冷探头灰污热流衰减曲线; (d) 燃水煤浆时空冷探头灰污热流衰减曲线

慢得多, 衰减率为 $0.49\text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$, 热流达到 q_{85} 所需时间为 105 min, 比神华煤多 1 倍以上. 两者热流衰减率与其灰渣沉积率结果是一致的. 从热流衰减至 q_{85} 所需时间、灰渣沉积率和热流衰减率可知神华煤的结渣能力明显高于水煤浆, 这是燃神华煤锅炉设计运行中需要特别引起重视的. 与易结渣高温区域不同的是, 在温度相对较低的炉膛中上部, 由于空冷的灰污热流计探头上沾污积灰量较少, 热流衰减相对要缓慢得多. 图 3 (b), (d) 中灰污热流曲线变化很平缓, 热流衰减率分别仅为 0.17 和 $0.23\text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$, 远低于高温区的 0.60 和 $0.49\text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$. 其热流衰减至 q_{85} 所需时间也分别延长为 180 和 130 min, 与此对应, 通过收集探头上的积灰量可知其灰渣沉积率也明显降低, 分别为 10.3 和 $7.8\text{ mg}/(\text{h} \cdot \text{cm}^2)$, 见表 3.

表 3 灰污热流计沾污结渣特性

Table 3 The fouling and slagging characteristic on probe

项 目	灰渣沉积率 $/\text{mg} \cdot (\text{h} \cdot \text{cm}^2)^{-1}$	热流衰减率 $/\text{kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{min})^{-1}$	q_{85} 所需时间 $/\text{min}$
燃神华煤水冷热流计	39.5	0.60	50
燃神华煤空冷热流计	10.3	0.17	180
燃水煤浆水冷热流计	19.4	0.49	105
燃水煤浆空冷热流计	7.8	0.23	130

对探头上灰渣样进行 SEM 扫描分析, 如图 4 所示. 由图 4 (a), (c) 对比分析可知, 燃神华煤的水冷灰污热流计上灰渣样颗粒明显大于燃水煤浆时的颗粒, 并且颗粒光洁度差, 大颗粒带有明显的熔融烧结痕迹. 这主要是因为其熔融的二次沉积层渣样已形成. 而燃水煤浆的颗粒主要是由微米级的细颗粒构成, 大量的微珠表面光滑, 相互间尚未烧结熔融. 虽然燃水煤浆时探头上的积灰很薄, 也未开始熔融聚结, 但正是这一疏松的细颗粒层, 空隙率很大, 有效导热系数最小, 低于 $0.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, Godridge 和 Reid 甚至认为是 $0.03 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 接近空气的导热系数. 正是初始灰污热阻很大, 导致灰污热流的明显减弱^[15]. 图 3 (c) 中灰污热流在前 100 min 内无明显减弱, 表明燃该种水煤浆时初始沉积层的形成过程很慢. 又由于水煤浆燃料的低沾污结渣性, 使得其灰污层增长缓慢, 相应热流衰减也较慢. 这一点与燃神华煤时是完全不同的. 神华煤的低熔点特性所带来的强沾污结渣性使得探头上灰渣形成发展很快. 在热流早期快速衰减至 q_{85} 后, 随着灰渣层的进一步发展, 烧结熔融灰渣的大量增长, 灰渣颗粒明显增大, 总体灰污热阻逐步增加, 导致热流的继续衰减.

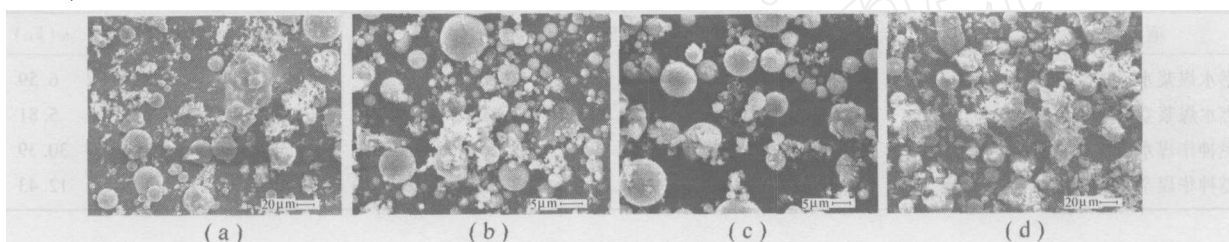


图 4 燃神华煤和水煤浆时探头上灰渣样 SEM

Fig. 4 SEM of the deposition on probe during Shenhua coal and CW S

(a) 燃神华煤时水冷探头灰渣样 SEM; (b) 燃神华煤时空冷探头灰渣样 SEM;

(c) 燃水煤浆时水冷探头灰渣样 SEM; (d) 燃水煤浆时空冷探头灰渣样 SEM

在图 4 (b), (d) 中, 空冷灰污热流计探头上水煤浆灰颗粒相对要粗, 而神华煤灰的颗粒却很细, 较粗的颗粒沾污积灰后颗粒间间隙较大, 灰层的导热性变差, 使得灰污热阻增加, 加快了热流衰减. 这可能是燃水煤浆时炉膛中上部区域灰沉积率低而热流衰减快的主要原因.

(4) 物相和能谱分析 通过对灰污热流计探头上灰渣样进行 XRD 物相分析, 如图 5 所示. 由图 5 可知, 燃神华煤水冷探头上灰渣物相以钙长石—— $(\text{Ca}, \text{Na}) \text{Si}_2 \text{Al}_2 \text{O}_6$ 、赤铁矿、莫来石等为主, 可见原煤灰中含量较高的 Fe, Ca 和 Si, Al 等在炉内反应生成低熔点的复杂共熔体钙长石和较低熔点的赤铁矿是神华煤灰沾污结渣性强的关键因素. 空冷探头上灰样物相是无水石膏、莫来石、方解石、赤铁矿等. 表明灰中 CaO 和 SO_2 , CO_2 反应生成 CaSO_4 , CaCO_3 等物质对炉内沾污积灰起到积极作用. 图 5 显示, 燃水煤浆水冷探头上灰渣物相以莫来石、石英、无水石膏为主, 以及部分赤铁矿和硅线石 ($\text{Al}_2 \text{SiO}_5$). 显然主要物

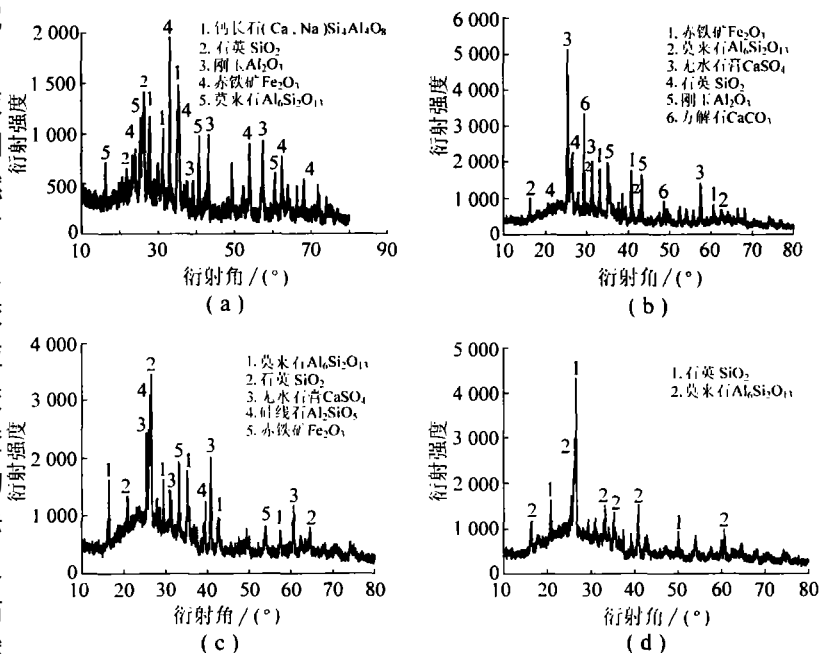


图 5 燃神华煤和水煤浆时探头上灰渣样 XRD

Fig. 5 XRD of the deposition on probe during Shenhua coal and CW S

(a) 燃神华煤时水冷探头灰渣样 XRD; (b) 燃神华煤时空冷探头灰渣样 XRD;

(c) 燃水煤浆时水冷探头灰渣样 XRD; (d) 燃水煤浆时空冷探头灰渣样 XRD

相莫来石和石英的高熔点是水煤浆灰沾污结渣性不强的重要原因。空冷探头上灰样物相主要是莫来石和石英。因而高熔点物相导致较低灰沉积率将使得水煤浆炉内积灰情况得到较好改善。

对灰污热流计探头上灰渣样进行能谱分析, 分析结果见表 4, 结合 XRD 物相分析发现燃神华煤的水冷灰污热流计探头上灰渣样中 Fe 富集显著, 含量高达 30% 以上, 物相分析也显示赤铁矿含量很高, 表明 Fe 对高温区域结渣的促进作用明显; 而在空冷灰污热流计探头灰样中 Fe 相对要少得多, 对较低温度区域的沾污促进作用没有前者那么明显。此外, 空冷灰污热流计探头上灰样 S 和 Ca 明显富集, S 和 Ca 含量达 7.89% 和 16.05%, 并结合成 CaSO_4 形式黏附在壁面上, 对沾污的促进作用明显。

表 4 灰污热流计探头上灰渣样元素成分

Table 4 Element composition of the deposition on probe									%
项 目	w (Na)	w (Mg)	w (Al)	w (Si)	w (S)	w (K)	w (Ca)	w (Ti)	w (Fe)
燃水煤浆水冷探头上灰	3.11	4.68	27.14	36.58	4.10	1.22	13.76	2.82	6.59
燃水煤浆空冷探头上灰	3.16	1.53	30.15	43.39	2.11	1.29	10.39	2.17	5.81
燃神华煤水冷探头上灰	1.62	1.82	23.06	43.39	3.28	0.86	9.93	1.39	30.39
燃神华煤空冷探头上灰	2.46	2.54	24.63	30.06	7.89	1.82	16.05	2.12	12.43

燃水煤浆时水冷灰污热流计探头上灰样相对空冷探头上灰样, Fe, Ca, S 较多, 物相中也有一些赤铁矿和无水石膏; 而空冷灰污热流计探头上灰样 Fe, Ca 较少, 以 Si, Al 含量最为突出, 这与燃神华煤时空冷灰污热流计探头上灰样 S 和 Ca 明显富集是完全不同的。

4 结 论

(1) 神华煤的灰渣沉积率高, 灰污热流衰减快, 衰减率高达 $0.60 \text{ kW} / (\text{m}^2 \cdot \text{min})$; 而水煤浆的沉积率明显要低, 灰污热流衰减较慢, 衰减率为 $0.49 \text{ kW} / (\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 。灰污热流 q 衰减到 85% 清洁热流所需时间神华煤不到水煤浆的一半。表明神华煤结渣性明显强于水煤浆, 水煤浆的结渣性较弱。

(2) 在炉膛较低温度区域, 神华煤的灰沉积率高于水煤浆, 但灰污热流衰减却要慢, 表明灰污热流的衰减不仅与燃料的沾污积灰能力有关, 还与积灰的颗粒度、导热系数等物理化学特性有关。

(3) 神华煤中含量较多的 Fe, Ca 和 Al, Si 等在炉内反应生成低熔点的复杂共熔体——钙长石 (Ca, Na) $\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_6$ 和较低熔点的赤铁矿是神华煤灰沾污结渣性强的关键因素, 水煤浆沾污结渣性不强的重要原因是其主要物相为高熔点莫来石和石英等。

(4) 在炉膛较低温度区域, 与神华煤积灰中 S 和 Ca 明显富集完全不同, 水煤浆积灰 Si, Al 含量很高, 其主要物相为莫来石和石英。

参考文献:

- [1] Paist A, Poobus A, Tiikma T. Probes for measuring heat transfer parameters and fouling intensity in boilers [J]. Fuel, 2002, 81: 1 811 ~ 1 818
- [2] 程志强, 王桂芳, 姚 伟, 等. 安全经济燃用神华煤的几点建议 [J]. 热力发电, 2002 (3): 62 ~ 64
- [3] 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
- [4] Benson S A. Ash formation and deposition [A]. Coal Science and Technology Vol. 20: Fundamentals of Coal Combustion for Clean Coal Efficient use [C]. Amsterdam: Elsevier, 1993
- [5] 撒应禄. 锅炉受热面外部过程 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1994