

电站煤粉锅炉掺烧强结渣煤的混煤结渣性能研究

阎维平¹, 陈吟颖¹, 邢德山¹, 高宝桐², 张立岩³

(1. 华北电力大学, 河北省保定市 071003; 2. 华北电力科学研究院, 北京市西城区 100045;
3. 大唐国际发电股份有限公司下花园发电厂, 河北省张家口市 075300)

Performances of Pulverized-coal Boilers Burning Heavy Slagging Blending Coals

YAN Wei-ping¹, CHEN Yin-ying¹, XING De-shan¹, GAO Bao-tong², ZHANG Li-yan³

(1. North-China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China; 2. North-China Electric Power Research Institute, Xicheng District, Beijing100045, China; 3. Xiahuyuan Power Plant of Datang International Power Generation CO.,LTD., Xiahuyuan 075300, Hebei Province, China)

ABSTRACT: The slagging performance of the blended heavy slagging coals is investigated for 100MW and 200MW boilers of a power plant in North China. Based on measurement and analysis of coals characteristics and ash composition, the main slagging parameters and tendency of the coal quality index of different blending ratios are predicted with the principle of coal blending and thermal calculation of the furnace. Reasonable blending ratios are presented for two boilers. The spot experimental result shows: To avoid heavy slagging of the discharge heater surface of the furnace, the blending ratios are not less than 50% for the 410t/h boiler and it can be properly added to 80% for the 670t/h boiler. The theoretical results are in agreement with experimental results.

KEY WORDS: thermal power engineering; dry ash extraction coal boiler; blended ratio; blended coal; slagging properties.

摘要: 该文研究了华北某发电厂 100 MW、200 MW 燃煤机组由现烧的弱结渣煤改烧强结渣混煤的炉膛受热面结渣性能变化。在煤质与灰分成分测量与分析的基础上, 根据工程上动力用煤配煤原则, 并结合锅炉炉膛热力计算与 2 台锅炉的设计特点, 分析预测了不同掺混比的混煤煤质主要结渣指标与程度, 得到 2 台锅炉掺烧强结渣煤的合理比例。在理论分析基础上的试烧实验结果表明: 在锅炉满负荷运行工况下, 为避免炉膛出口受热面严重结渣, 410t/h 锅炉掺烧强结渣煤的比例不宜超过 50%; 670t/h 锅炉掺烧强结渣煤的比例可适当增加到 80%。实际试烧实验结果与理论预测基本吻合, 该研究方法可为大型煤粉锅炉掺烧强结渣煤提供一定理论分析依据。

关键词: 热能动力工程; 固态排渣炉; 强结渣性煤; 掺烧比;

基金项目: 教育部重点实验室“电站设备状态监测与控制”项目。

混煤; 结渣性能

0 引言

华北某发电厂 100 MW、200 MW 发电机组分别为 HG-410/100-9 型、HG-670/140-9 型单锅筒自然循环锅炉, π 型布置, 四角切圆燃烧, 中间仓储式热风送粉系统, 原设计煤及现烧煤均为弱结渣煤。

近年来, 为了降低发电成本, 该电厂希望能在不改造设备的条件下, 改烧、或与弱结渣煤掺烧大于 50% 的当地廉价、强结渣煤, 因此, 掺烧强结渣性煤后可能造成的锅炉炉膛出口受热面严重结渣, 成为锅炉安全经济运行中的突出问题。为了确定避免锅炉炉膛严重结渣的合适掺烧比例, 本文对现烧煤、拟掺烧煤的煤质及其灰分进行了比较详细的检测分析, 应用合理的工程实用计算与预测方法, 并结合锅炉炉膛热力计算, 对 2 台锅炉掺烧强结渣煤的结渣指标、影响因素与合适的掺烧比例进行了比较深入的研究和预测。在理论分析的基础上, 采用 50%~70% 的强结渣煤掺混比例进行了锅炉试烧, 以验证分析结果。该研究方法与实践验证对国内电厂普遍存在的同类问题具有一定的工程参考价值。

1 锅炉炉膛结渣分析与预测方法

固态排渣煤粉锅炉炉膛的结渣程度主要取决于煤的灰熔融特性, 还与灰分含量、燃烧方式、炉膛结构和运行工况等有关^[1-3]。如果在锅炉上直接进行试烧实验, 则除了要较长的周期及大量人力、物力耗费外, 还要承担炉内严重结渣造成事故的风险。

目前,半经验的理论预测方法均是基于灰的理化性质分析与结渣特性的关系进行的大量统计研究,总结出若干评价煤灰结渣程度的指标,主要包括灰熔融特征温度、煤灰粘度、硅铝比 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、碱酸比 B/A 、硅比 G 和综合判别指数 R 等^[4-6]。

其中,硅比 G 与综合判别指数 R 分别按式(1)与式(2)计算^[4]

$$G=(\text{SiO}_2 \times 100)/([\text{SiO}_2]+[\text{Fe}_2\text{O}_3]+[\text{CaO}]+[\text{MgO}]) \quad (1)$$

$$R=1.237B/A+0.282[\text{SiO}_2]/[\text{Al}_2\text{O}_3]-0.0023T_{\text{ST}}-0.0189G+5.415 \quad (2)$$

通过收集我国大量动力用煤的灰渣特性资料,以往的研究对我国动力用煤的结渣程度进行了划分,建议了适合我国煤种的结渣判别界限^[4]。锅炉炉膛结渣还与锅炉壁面热负荷分布、炉内温度分布、近壁处烟气气氛与灰颗粒浓度等因素密切相关。但是,可得到这些数据的炉内过程精确数值计算方法还不够成熟,且耗时费力,无法满足实际工程的需要。因此,尽管现有的各种半经验结渣判别方法均有一定的局限性,但仍然是工程上实用可行的方法。

本文采用国内外通常使用且较为有效的结渣判别分析方法,同时结合锅炉炉膛整体热力计算结果,考虑锅炉炉膛出口温度与灰熔融特征温度等因素,结合现场实际运行工况来预测锅炉掺烧不同比例的强结渣煤的结渣程度,再结合锅炉试烧结果验证预测模型,为掺烧合适比例的强结渣煤提供依据。

2 锅炉动力配煤计算方法

由于煤质及灰分成分试验分析较为昂贵且烦琐,因此,不可能将各种比例的混煤均进行详细全面的测量分析,在工程上均基于各单煤的分析数据、采用比较合理的动力配煤数学模型,预测各种比例混煤的煤质特性。大量统计数据表明,混煤的挥发分、发热量、成分、灰熔融特性等主要指标与单煤间有较好可加性,配煤的实测值与基于线性规划原理的估算值基本吻合,在工程上具有足够高的精度^[7]。而配煤的灰成分与灰熔融特性温度与单煤的关联式在考虑了各单煤灰分及水分的影响后,预测结果更接近于统计的实测值^[8]。

动力配煤的数学模型简述如下:

由2种以上的单煤的收到基水分、灰分、发热量、挥发分或硫分等,按百分数配煤后混煤的对应指标

B_{ad} 由式(3)估算

$$B_{ad} = \sum_{i=1}^n P_i \times S_i / \sum_{i=1}^n P_i \% \quad (3)$$

式中: P_i 为2种以上单煤 i 的配比百分数,%; S_i 为各单煤的收到基水分、灰分、发热量、挥发分或硫分的含量,%。

混煤的灰熔融特征温度(变形温度 DT 、软化温度 ST 、半球温度 HT 、流动温度 FT)及灰成分指标的估算式为

$$B = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \times \left(\frac{100 - M_{ad}^i}{100}\right) \times A_i \times C_i}{\sum_{i=1}^n P_i \times \left(\frac{100 - M_{ad}^i}{100}\right) \times C_i} \quad (4)$$

式中: B 为混煤的灰熔融温度(DT 、 ST 、 HT 、 FT)或灰成分(SiO_2 、 Al_2O_3 ...); A_i 为单煤 i 的灰分含量; C_i 为各单煤 i 的灰熔融温度(DT 、 ST 、 HT 、 FT)和灰成分; P_i 为2种以上单煤 i 的配比百分数,%; M_{ad}^i 为单煤 i 的收到基水分。

3 混煤煤质特性分析

表1为各单煤的元素分析与工业分析数据;表2为各煤的灰成分分析与灰熔融特性试验数据。两表中均包括掺烧煤C与强结渣煤D各50%的混煤测量数据。

由表2可见,D煤灰成分中 $[\text{SiO}_2]$ 含量最高,比全国平均值高12%,燃烧中存在的自由 SiO_2 会与其它化合物形成低熔点的共晶化合物,而且D煤灰中 $[\text{K}_2\text{O}]+[\text{Na}_2\text{O}]$ 含量也明显高于其它煤,接近全国平均值的2倍,致使各个灰熔融特征温度均较低,因此,D煤为典型的强结渣煤。现烧煤为弱结渣煤,掺烧煤C为中等结渣煤。在按较弱结渣煤设计的锅炉炉膛内全烧强结渣煤显然会造成炉膛严重结渣,而与中等结渣煤混烧会降低严重结渣的可能性。

为了确定合理的掺烧强结渣煤的比例,将煤C与50%、60%、70%和80%强结渣煤D掺混,按前述计算方法,由单煤测量数据估算各个混煤对应的数据。不同比例混煤的煤质、灰分成分与灰熔融特征温度的估算数据见表3与表4。可见,50%的估算值与实验测量值较为相近,因此,可近似认为其它配煤比例混煤特性的计算值合理可用。随强结渣煤掺混比例增大,水分、灰分、低位发热量等均降低,煤质变差。

表 1 各煤的元素与工业分析测量值

Tab. 1 Ultimate and approximate analysis of coals

项目	原设计煤 410	原设计煤 670	现烧煤 B	掺烧煤 C	强结渣煤 D	实测 D:C (1:1)	
元素分析 %	C _{ar}	70.13	51.0	48.36	69.02	45.20	56.98
	H _{ar}	3.93	2.55	2.94	3.88	2.74	3.33
	O _{ar}	7.01	6.48	8.9	7.26	11.31	8.78
	N _{ar}	0.68	0.72	0.67	0.69	0.46	0.58
	S _{ar}	1.11	0.8	1.29	1.08	0.81	0.98
工业分析 %	M _{ar}	9.8	9.96	9.6	22.6	15.6	14.6
	A _{ar}	7.34	28.49	8.47	16.88	22.4	14.75
	V _{ar}			24.24	23.34	24.59	23.64
	F _{car}			57.69	37.18	37.57	47.61
	Q _{net,ar} /(MJ/kg)	22.69	18.73	18.09	27.11	16.86	21.96
煤种	烟煤	烟煤	烟煤	烟煤	贫煤	烟煤	

表 2 各煤的灰成分分析及灰熔融性分析测量值 (弱还原性气氛)

Tab. 2 Composition and fusibility of coal ash (weakly reducing atmosphere)

项目	现烧煤 B	掺烧煤 C	结渣煤 D	D:C(1:1)
SiO ₂ /%	52.42	49.79	54.04	56.17
Fe ₂ O ₃ /%	7.75	18.38	8.71	10.69
Al ₂ O ₃ /%	25.81	21.41	16.41	18.47
CaO/%	3.96	3.16	8.15	4.74
MgO/%	0.94	0.76	0.59	1.28
TiO ₂ /%	1.14	0.59	0.57	0.88
SO ₃ /%	3.74	1.60	6.56	3.81
K ₂ O/%	1.34	0.79	2.07	1.76
Na ₂ O/%	0.92	0.18	1.75	1.31
P ₂ O ₅ /%	0.21	0.64	0.93	0.29
T _{DT} /°C	1240	1110	1100	1140
T _{ST} /°C	1380	1310	1130	1200
T _{HV} /°C	1400	1370	1170	1230
T _{FT} /°C	1420	1460	1190	1360
结渣性	中偏轻	中等	严重	严重

表 3 强结渣煤 D 与中等结渣煤 C 的混煤元素及工业分析估算值

Tab. 3 Estimates of ultimate and approximate analysis of different proportion blended coals

项目	估算 D:C (50%:50%)	估算 D:C (60%:40%)	估算 D:C (70%:30%)	估算 D:C (80%:20%)	
元素分析 %	C _{ar}	57.2	54.8	52.4	50.0
	H _{ar}	3.31	3.12	3.08	2.97
	O _{ar}	9.29	9.69	10.10	10.5
	N _{ar}	0.58	0.55	0.53	0.51
	S _{ar}	0.95	0.92	0.89	0.86
工业分析 %	M _{ar}	16.10	17.40	18.70	20.00
	A _{ar}	12.68	13.52	14.36	15.20
	V _{ar}	23.74	23.70	23.61	23.34
	F _{car}	47.44	45.38	43.33	41.28
	Q _{net,ar} /(MJ/kg)	21.99	20.96	19.94	18.91

表 4 强结渣煤 D 与中等结渣煤 C 的混煤灰成分及熔融温度估算值

Tab. 4 Estimated composition and fusibility (weakly reducing atmosphere) of different proportion blended coals

项目	估算 D:C (50%:50%)	估算 D:C (60%:40%)	估算 D:C (70%:30%)	估算 D:C (80%:20%)
SiO ₂ /%	51.92	52.34	52.77	53.19
Fe ₂ O ₃ /%	13.55	12.58	11.61	10.64
Al ₂ O ₃ /%	14.41	14.81	15.21	15.61
CaO/%	5.56	6.15	6.65	7.15
MgO/%	0.68	0.66	0.64	0.62
TiO ₂ /%	0.58	0.578	0.576	0.574
SO ₃ /%	4.08	4.58	5.07	5.59
K ₂ O/%	1.43	1.56	1.69	1.81
Na ₂ O/%	0.97	1.12	1.28	1.44
P ₂ O ₅ /%	0.79	0.81	0.84	0.87
T _{DT} /°C	1105	1104	1103	1102
T _{ST} /°C	1220	1202	1184	1166
T _{HV} /°C	1270	1250	1230	1210
T _{FT} /°C	1325	1298	1271	1244

4 混煤结渣特性指标计算与结渣程度分析

表 5 所示为按本文前述的各种结渣判别方法，对各混煤的结渣的判别结果。现烧煤 B 与原设计煤的成分有所差别，但其各种结渣指标的评估结果表明，仍属于弱结渣煤，不易结渣，这与锅炉目前运行的实际情况是一致的。拟掺烧煤 C 的绝大部分指标的预测结果表明其属于中等或弱结渣程度的煤；而掺烧煤 D 的绝大部分指标的预测结果表明其属于强结渣煤，且灰渣的变形温度 DT 和 ST 仅相差 30°C，又属于十分突出的短渣煤，极易结渣。对不同比例的掺混煤，随强结渣煤 D 掺混比例增加，结渣越趋于严重。

表 5 各种煤的结渣程度判别结果

Tab. 5 Slagging evaluations of different coal ashes

项目	B	C	D	实测 D:C (50%:50%)	计算 D:C (60%:40%)	计算 D:C (70%:30%)	计算 D:C (80%:20%)
T _{DT} /°C	中等	严重	严重	严重	严重	严重	严重
T _{ST} /°C	轻微	中等	严重	严重	严重	严重	严重
碱碳比 BA	轻微	中等	中等	中等	中等	中等	中等
硅比 G	轻微	中等	中等	中等	中等	中等	中等
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	中等	中等	严重	严重	严重	严重	严重
Fe ₂ O ₃ /CaO	中等	轻微	严重	中等	中等	中偏重	中偏重
综合判别指数 R	中偏轻	中等	严重	中偏重	严重	严重	严重

5 炉膛换热对结渣的影响

锅炉燃烧煤质发生变化时将影响到炉内换热，从宏观的角度，炉膛出口烟温直接反映炉内的换热，而且，经大量实践验证，对 670t/h 以下的煤粉锅炉，现行炉内换热计算方法可以比较准确地估算炉膛出口烟温^[9-12]。炉膛出口烟温与灰的变形温度 T_{DT} 的差值直接影响到炉膛出口受热面的结渣，温差越小，结渣的可能性越大。

结合该厂 670t/h 与 410t/h 锅炉目前的实际运行数据计算的燃各混煤的炉膛出口温度计算结果见表 6, 燃用不同混煤时炉膛出口烟温相差不大, 仅随着掺混比例增加, 炉膛出口温度略有升高, 但炉膛出口烟温 T'' 与灰的变形温度 T_{DT} 的差值变化较为明显。现烧煤的 $T'' - T_{DT}$ 温差均超过 150°C , 正常运行中基本不存在炉膛出口受热面结渣, 与实际情况吻合。全烧强结渣煤 D 时, 温差最小, 尤其是 410t/h 锅炉的温差仅 13.5°C , 极易发生结渣, 而 670t/h 锅炉的温差为 42.8°C , 结渣不如 410t/h 锅炉严重。

表 6 670t/h、410t/h 锅炉不同煤质炉膛出口烟温及与灰变形温度的温差($^{\circ}\text{C}$)

Tab. 6 Temperature differences between furnace exit and ash deformation temperature

项目	炉型	B	D	50%:50%	60%:40%	70%:30%	80%:20%
T''	670t/h	1055.5	1057.2	1052.2	1052.4	1052.9	1053.8
	410t/h	1085.7	1086.5	1083.0	1083.2	1083.9	1084.6
$T'' - T_{DT}$	670t/h	184.5	42.8	87.8	51.6	50.1	48.2
	410t/h	154.3	13.5	57	20.8	19.1	17.4

当掺混强结渣煤的比例为 50%:50% 时, 两台炉的该温差值均较大, 如果不出现炉膛出口烟温分布较大不均匀的工况, 则可以避免炉膛出口受热面结渣。随掺混强结渣煤的比例增加, 温差均减小, 但是, 670t/h 锅炉的温差值在掺混比例低于 70%:30% 的范围内均大于 50°C , 正常运行时是可以避免严重结渣的; 而 410t/h 锅炉的温差值只有在掺混比例为 50%:50% 时大于 50°C , 而继续增大掺混比例时温差值仅在 20°C 左右, 炉膛出口受热面发生严重结渣的可能性很大, 难以避免。

表 7 给出了 2 台锅炉炉膛的各个热负荷计算值, 显然, 410t/h 锅炉的各个热负荷均明显高于 670t/h 锅炉, 实际运行经验也表明, 410t/h 锅炉比 670t/h 锅炉更易发生炉膛结渣。但各个热负荷计算值均在有关规范推荐的范围内, 因此, 一般不会发生炉膛壁面严重结渣, 但对炉膛出口受热面的结渣有较大的影响。

表 7 满负荷时锅炉炉膛热负荷计算值

Tab. 7 Thermal load calculation results of furnaces

负荷/(t/h)	热负荷	B	C	D
670	q_v	121.1	122.2	120.6
	q_F	3398.7	3429.0	3385.1
	q_{rh}	1781.9	1797.8	1774.8
410	q_v	118.43	119.59	118.04
	q_F	2984.52	3013.83	2974.63
	q_{rh}	1511.33	1526.18	1506.32

根据以上分析, 在锅炉满负荷运行工况下, 410t/h 锅炉掺烧强结渣煤的比例不超过 50% 时可以避免炉膛出口受热面严重结渣。670t/h 锅炉掺烧强

结渣煤的比例可适当增加, 但不宜超过 80%, 以避免炉膛出口受热面严重结渣而影响发电机组的安全运行。两台锅炉 70% 负荷时的各个计算结果表明, 在较低负荷运行时, 不易在炉膛出口受热面结渣, 掺烧强结渣煤的比例可以适当增加。

6 掺烧强结渣煤的现场试验

锅炉结渣除与上述因素有关外, 还与运行方式、制粉系统出力等现场因素有关^[13-14]。因此, 电厂在参考计算分析结果的基础上, 在 2 台锅炉上分别进行了试烧实验, 掺烧强结渣煤的比例在 50%~70% 之间, 由掺混约 50% 强结渣煤开始逐步增加掺混比例至 70% 左右。由于现场测量条件与仪器的限制, 只能通过观察锅炉运行参数与炉膛出口受热面的结渣情况的方法, 验证掺烧的结果。运行结果表明, 满负荷掺烧约 70% 的强结渣煤时, 410t/h 锅炉在炉膛出口处结渣较严重, 670t/h 锅炉结渣轻微, 试烧结果与计算分析结果基本一致。2 台炉的运行参数与经济性均无大的变化。因此, 本文在分析预测现役锅炉燃用不同煤的结渣程度所采用的测量、计算与分析方法在工程上是可行的, 具有较好的实用性和一定的准确性。

7 结论

大型电站锅炉改烧或掺烧强结渣煤时, 在不进行设备改造的条件下, 需要根据详细的煤质及灰分测量数据, 对拟掺烧的单煤及混煤的灰结渣特性进行分析, 并结合锅炉实际运行工况的炉膛热力计算, 综合分析和确定合理可行的掺烧比例。在理论分析基础上的试烧实验结果表明, 在锅炉满负荷运行工况下, 为避免炉膛出口受热面严重结渣, 410t/h 锅炉掺烧强结渣煤的比例不宜超过 50%; 670t/h 锅炉掺烧强结渣煤的比例可适当增加到 80%。本文所采用的测量、计算与分析方法在工程上是可行的、具有一定的准确性。该研究方法可为大型煤粉锅炉掺烧强结渣煤提供一定理论分析依据。

参考文献

- [1] 赵玉晓, 李瑞扬, 孙斌, 等. 解决六角切圆锅炉结渣问题的研究及工程应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 231-236.
Zhao Yuxiao, Li Ruiyang, Sun Bin, et al. Research and engineering application on solving slagging problem of hexagonal tangentially fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 231-236(in Chinese).

- [2] 李永华, 陈鸿伟, 刘吉臻, 等. 褐煤及烟煤混煤综合燃烧特性的试验研究[J]. 动力工程, 2003, 23(4): 2495-2500.
LI Yonghua, Chen Hongwei, Liu Jizhen, et al. Experimental research on the comprehensive behavior of combustion for soft and brown blending coals[J]. Power Engineering, 2003, 23(4): 2495-2500(in Chinese).
- [3] 陈吟颖, 石惠芳, 阎维平. 达拉特发电厂 3 号锅炉炉膛结渣的研究[J]. 动力工程, 2003, 23(5): 2635-2638.
Chen Yinying, Shi Huifang, Yan Weiping. Furnace slagging research on the boiler no. 3 of dalate power plant[J]. Power Engineering, 2003, 23(5): 2635-2638(in Chinese).
- [4] 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.
- [5] 阎维平, 梁秀俊, 周健, 等. 330MW 燃煤电厂锅炉积灰结渣计算机在线监测优化吹灰[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 84-88.
Yan Weiping, Liang Xiujun, Zhou Jian, et al. Ash monitoring and soot blowing optimization of a 300MW coal fired utility boiler [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 84-88(in Chinese).
- [6] 陈宝康, 阎维平, 李鹏飞. 基于神经网络的电站锅炉辐射受热面污染监测[J]. 动力工程, 2003, 23(5): 2660-2664.
Chen Baokang, Yan Weiping, Li Xiaofei. Fouling monitoring of radiant surface in station boiler based on artificial neural network [J]. Power Engineering, 2003, 23(5): 2660-2664(in Chinese).
- [7] 扬国华. 动力煤分级配煤技术[J]. 动力工程, 2003, 23(3): 2397-2400.
Yang Guohua. A new process for coal blending combined with size classification of coal[J]. Power Engineering, 2003, 23(3): 2397-2400(in Chinese).
- [8] 陈怀珍, 陈文敏. 动力配煤主要煤质指标的正确计算方法[J]. 洁净煤技术, 1999, 5(4): 42-46.
Chen Huaizhen, Chen Wenmin. Correct calculation method of main coal quality index in steam coal blending[J]. Clean Coal Tecnology, 1999, 5(4):42-46(in Chinese).
- [9] 谷俊杰, 鲁许鳌, 张小勇. 软计算方法在煤灰结渣特性评判中的应用[J]. 锅炉技术, 2002, 33(7): 24-28.
Gu Junjie, Lu Xuao, Zhang Xiaoyong. Application of a soft computing method in judgment on characteristic coal ash slagging[J]. Boiler Technology, 2002, 33(7): 24-28(in Chinese).
- [10] 李凤瑞, 陈耀如, 池作和, 等. 一种既能保证煤粉燃烧器稳燃又能缓解炉膛结渣的方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 84-87.
Li Fengrui, Chen Yaoru, Chi Zuohe, et al. A Method assuring flame stability in coal fired burner and weaking slagging[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11): 84-87(in Chinese).
- [11] 黄千钧. 以煤灰碱酸比与硅铝比的乘积作为动力用煤结渣指数的探讨[J]. 动力工程, 2004, 24(3): 340-345.
Huang Qianjun. The product of base/acid and silica/alumina of ash in steal coal-an index to ash slagging tendency[J]. Power Engineering, 2004, 24(3): 340-345(in Chinese).
- [12] 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): 216-220.
Lan Zequan, Cao Xinyu, Zhou Junhu, et al. Application of fuzzy pattern identification for slagging characteristics judgment in coal-water-slurry fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 216-220(in Chinese).
- [13] 陈刚, 丘纪华, 郑楚光. 偏转二次风对炉内结渣的影响[J]. 动力工程, 2004, 24(1): 5-9.
Chen Gang, Qiu Jihua, Zheng Chuguang. The influence on the slagging in furnace caused by biased secondary air for tangential fired boiler [J]. Power Engineering, 2004, 24(1): 5-9(in Chinese).
- [14] 张晓杰, 王阳, 李振中, 等. 褐煤及其混煤燃烧、结渣特性的实验研究[J]. 动力工程, 1999, 19(6): 428-434.
Zhang Xiaojie, Wang Yang, Li Zhengzhong, et al. Experimental research on the combustion and slagging characteristics of brown coal blends[J]. Power Engineering, 1999, 19(6): 428-434(in Chinese).

收稿日期: 2006-02-21。

作者简介:

阎维平(1955—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事高效低污染煤燃烧理论、电站锅炉煤粉燃烧技术和锅炉安全经济运行的教学和研究, yanweiping@263.net。

(编辑 贾瑞君)