

研究论文

以煤焦混合物为燃料的循环流化床 锅炉 SO₂ 排放特性

段伦博, 陈晓平, 梁 财, 李英杰, 李庆钊, 赵长遂
(东南大学洁净煤发电及燃烧技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210096)

摘要: 在工业运行的 410 t · h⁻¹ 循环流化床锅炉上进行烟煤、70% 烟煤 + 30% 石油焦和 50% 无烟煤 + 50% 石油焦的燃烧试验, 研究了运行参数对 SO₂ 排放特性的影响。结果表明, 3 种燃料均能达到良好的燃烧效果, 炉内温度场分布均匀。在相同燃烧条件下, 不同燃料 SO₂ 排放量与其中的含硫量呈正相关关系。SO₂ 排放量随温度的升高先减小后增大, 存在最佳脱硫温度; 随钙硫比的增大而减小; 随过量空气系数的增大而减小; 随飞灰再循环量的增大而减小。对于不同种类的石灰石, 大比表面积和高比孔容积的石灰石对 SO₂ 有较好的脱除效果。考察了燃用不同燃料的最佳温度、钙硫比和过量空气系数, 阐述了飞灰再循环和石灰石微观结构在循环流化床锅炉脱硫中的机理和作用, 以期对循环流化床的设计和运行工作提供指导。

关键词: 循环流化床; 石油焦; SO₂ 排放; 飞灰再循环; 微观结构

中图分类号: TQ 038.7

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 03-0728-07

SO₂ emission characteristics of circulating fluidized bed boiler co-firing coal and petroleum coke

DUAN Lunbo, CHEN Xiaoping, LIANG Cai, LI Yingjie, LI Qingzhao, ZHAO Changsui

(Key Laboratory of Clean Coal Power Generation and Combustion Technology of Ministry
of Education, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: The combustion characteristics of a 410 t · h⁻¹ circulating fluidized bed (CFB) boiler burning the fuels of bituminous coal (BC), 70% BC + 30% petroleum coke (PC) and 50% anthracite (AN) + 50% PC were studied. The effects of operation parameters, including bed temperature, molar ratio of Ca to S, excess air coefficient, fly ash recirculation rate and limestone microstructure on SO₂ emission were investigated. Test results indicated that all the three kinds of fuels burned adequately in the boiler, and the bed temperature distribution was uniform. For different fuels, SO₂ emission was correspondingly related to fuel sulfur content with the same operation parameters. With increasing bed temperature, SO₂ concentration in the flue gas reduced first and then increased. There was an optimal desulfurization temperature. For burning BC only or 70% BC + 30% PC, the optimal desulfurization temperature was about 850 °C, while it was between 850-870 °C for burning 50% AN + 50% PC, because of the different sulfur contents in the fuel. The SO₂ concentration decreased with increasing Ca/S ratio, excess air coefficient and fly ash recirculation rate. The results also showed that the microstructures of limestones including specific surface area and specific pore volume had distinct impact on their SO₂ retention. Larger

2007-06-08 收到初稿, 2007-08-27 收到修改稿。

联系人: 赵长遂。第一作者: 段伦博 (1982-), 男, 博士研究生。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目 (2006CB705806); 国家科技支撑计划项目 (2006BAA03B02-10)。

Received date: 2007-06-08.

Corresponding author: Prof. ZHAO Changsui. E-mail: cszhao@seu.edu.cn

Foundation item: supported by the National Basic Research Program of China (2006CB705806), and the National Key Technology R&D Program (2006BAA03B02-10).

specific surface area and higher specific pore volume could enhance their SO₂ capture activities to a certain extent. The optimal temperatures, Ca/S ratios and excess air coefficients for different fuels were recommended for industrial application.

Key words: circulating fluidized bed; petroleum coke; SO₂ emission; fly ash recirculation; microstructure

引 言

循环流化床燃烧技术具有燃料适应性广、燃烧效率高、氮氧化物排放低、炉内脱硫成本低、负荷调节比大和负荷调节快等优点，对我国以煤炭为主要燃料的电力行业发展具有重要意义。我国循环流化床电站锅炉的数量近 3000 台，装机总容量近 40000 MW，约占全国总装机容量的 8%。其中 100~200 MW 循环流化床机组已投入运行近百台，300 MW 循环流化床机组已投入运行 8 台，600 MW 超临界循环流化床锅炉国产化研制项目进展顺利，我国已是世界上循环流化床锅炉装机数量最多、装机容量最大的国家。

石油焦（又名生焦、延迟焦）是以原油蒸馏后的重油或其他重油经延迟焦化工艺而生成的，属炼油工艺的副产品，产量约为原料油的 25%~30%。其热值高，挥发分及灰分低，硫、氮元素及钒、镍等碱金属含量高，属劣质燃料。石油焦中硫的含量决定了其最终用途。硫含量小于 2% 的石油焦通常用于生产电极，硫含量在 2%~5% 之间的石油焦通常被认为是燃料级石油焦。已有的研究结果和实际运行经验表明，由于高着火点和长燃尽时间，在煤粉炉中掺烧石油焦很难达到理想效果；除非安装昂贵的烟气脱硫装置，SO₂ 的排放值很难达到环保要求。利用循环流化床燃烧技术回收石油焦热量是石油焦利用的主导方向^[1-2]。

我国石油焦年产量达 800 万吨，将其作为循环流化床锅炉的燃料，在动力生产中具有很大的经济

优势，但其燃烧的污染物排放问题不容忽视^[3]。Zhao 等^[4-6]在实验室规模的循环流化床装置上进行过循环流化床煤焦混烧的 SO₂ 排放特性研究，认为不同燃料 SO₂ 排放的差异主要与其含硫量和燃烧特性有关，但在工业运行的循环流化床锅炉上的此类研究还未见报道。本文在额定蒸发量 410 t·h⁻¹ 的循环流化床锅炉上分别对烟煤、无烟煤掺烧石油焦的 SO₂ 排放特性进行了试验研究和比较分析，所得结果对我国燃用煤、石油焦混合燃料循环流化床锅炉的开发、设计和运行具有一定借鉴意义。

1 燃料及脱硫剂特性

试验燃用的燃料为烟煤（BC）、无烟煤（AN）和石油焦（PC），燃料收到基元素分析和工业分析如表 1 所示。由表可见，石油焦的碳含量为 83.96%，高于试验用无烟煤；灰分非常低，只有 1.57%；挥发分为 8.36%，比试验用无烟煤低；热值高达 31.88 MJ·kg⁻¹。石油焦中硫含量高达 5.09%，高于试验用烟煤；试验所采用的 3 种燃料，烟煤、70% 烟煤 + 30% 石油焦和 50% 无烟煤 + 50% 石油焦中的硫含量分别为 4.51%、4.68% 和 3.82%。表 2 和表 3 分别为试验所用两种脱硫剂石灰石 a（limestone a）和石灰石 b（limestone b）的成分特性及粒度分布。由表可见，两种石灰石均具有较高的钙含量，其粒度分布也相似，质量平均粒径分别为 14.13 μm 和 15.45 μm。

表 1 燃料元素分析及工业分析(收到基)

Table 1 Ultimate and proximate analyses of fuel (as received)

Fuel	Ultimate analysis					Q _{dw} /MJ·kg ⁻¹	Proximate analysis			
	C _{ar} /%	H _{ar} /%	O _{ar} /%	N _{ar} /%	S _{ar} /%		M _{tol} /%	A _{ar} /%	V _{ar} /%	C _{fix} /%
BC	52.90	3.14	3.57	0.66	4.51	20.09	5.90	29.32	21.37	43.41
AN	66.56	3.07	0.25	0.38	2.55	22.70	9.30	23.58	9.82	57.30
PC	83.96	3.35	0.13	1.00	5.09	31.88	5.91	1.57	8.36	84.16

表 2 脱硫剂成分特性/%

Table 2 Composition of sorbents/%

Limestone	LOF	SiO ₂	CaO	MgO	Moisture
a	43.21	1.07	54.32	0.65	0.03
b	43.15	1.18	54.70	0.36	0.05

表 3 石灰石的粒径分布

Table 3 Particle size distribution of limestones

Limestone	Particle size distribution/%							
	<1 μm	1—5 μm	5—10 μm	10—20 μm	20—30 μm	30—40 μm	40—50 μm	50—60 μm
a	2.3	15.9	18.4	22.4	16.8	11.9	7.7	4.6
b	3.1	14.4	18.6	22.9	15.2	12.6	8.2	5.0

2 试验系统

试验系统是美国 FW 公司生产的第三代循环流化床锅炉。该锅炉装有飞灰再循环系统，可将空气预热器下灰斗和静电除尘器电场捕集的飞灰送回炉内再燃。锅炉流程图如图 1 所示。锅炉配有先进的 DCS 控制系统，可准确地显示和调整锅炉运行温度、压力、流量等参数。本文所用烟气分析系统以德国德图公司的 testo350XL 型烟气分析仪为核心，包括电加热取样管和过滤、保温等附属装置，用于在线分析空气预热器出口烟道内烟气中 O₂、CO₂、SO₂、NO、N₂O、CO 等烟气成分。

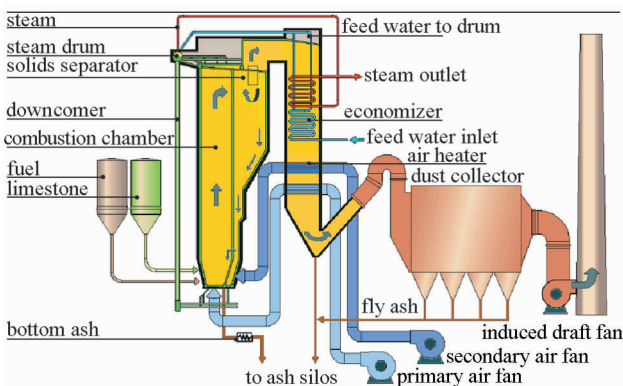
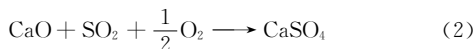


图 1 锅炉流程图

Fig. 1 Flow chart of CFB boiler



本文所述床温为炉膛各测点的温度平均值。试验发现，不同燃料均能取得理想的燃烧效果，以燃用 70% 烟煤 + 30% 石油焦为例，采用飞灰再循环技术，其飞灰和底灰含碳量分别为 6.70% 和 0.23%，处在较先进水平^[7]。炉内温度分布相对均匀，以燃用 70% 烟煤 + 30% 石油焦为例，其炉膛温度分布如图 2 所示，测量误差为 ±5℃。炉内最高温度为 876.7℃，最低温度为 814.1℃，平均温度为 850.1℃。前墙温度比后墙低，因为燃料和再循环飞灰由前墙加入，在前墙未及充分燃烧，热量还未完全释放；03 和 04 测点靠近二次风入口，故温度较测点 01、02、05 和 06 处为低；14 和 15 测点为靠近返料灰入口，温度也较低。

back wall				
07: 849.7℃	08: 874.6℃	09: 874.3℃	10: 876.7℃	11: 854.2℃
12: 835.4℃				13: 846.4℃
AVE: 850.1℃				
14: 814.1℃				15: 819.6℃
02: 855.3℃	03: 844.0℃	04: 834.4℃	06: 854.6℃	
01: 861.3℃			05: 856.8℃	

front wall

图 2 炉内温度分布

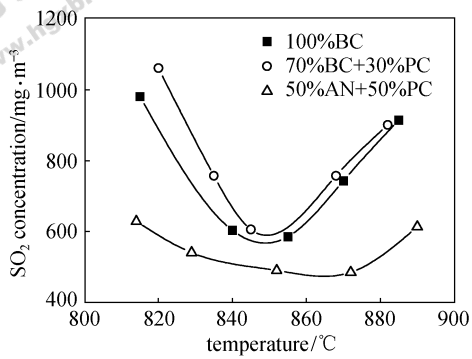
Fig. 2 Temperature field in combustor

3 试验结果及分析

3.1 床温对 SO₂ 排放量的影响

燃料进入炉膛后，挥发分主要在密相区析出，燃料中的硫与氧发生反应生成 SO₂。石灰石的主要成分是 CaCO₃，其在循环流化床燃烧方式中先煅烧后硫化，其反应方程式如下

本文除图 5 外，过量空气系数均为 1.2。在选用石灰石 b、钙硫摩尔比为 2.5 时，床温对不同燃料的 SO₂ 排放浓度影响如图 3 所示。由图可见，在 800~900℃ 的范围，燃用不同燃料，SO₂ 排放

图3 床温对 SO₂ 排放浓度的影响Fig. 3 Effect of temperature on SO₂ emission

量与其硫含量呈正相关关系，这是因为随着燃料含硫量的升高，相同的燃烧条件和钙硫摩尔比下，单位质量的燃料燃烧释放出的 SO₂ 浓度升高。

随着炉膛温度的升高，SO₂ 排放浓度呈现先降低后升高的趋势，存在一个最佳脱硫温度^[6,8]。硫酸盐化反应是 SO₂ 浓度的一级反应，反应速率常数 k 可表示为

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_s} + \frac{1}{k_m} + \frac{\lambda}{D_e}$$

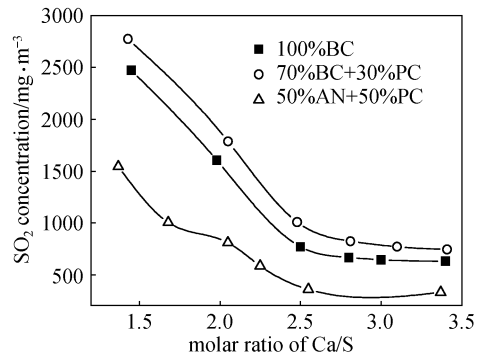
式中 k_s 为硫酸盐化反应的本征速率常数； k_m 为颗粒外表面的气膜传质系数； D_e 为内孔扩散的有效扩散系数； λ 为反应界面至颗粒表面的距离。循环流化床锅炉中存在强烈的床料返混，颗粒团不断形成和解体，并向各个方向运动，脱硫剂颗粒具有良好的外部传质条件，气膜传质可以忽略。温度太低时， k_s 太小导致 k 太小，反应速率过慢，脱硫效果差。温度过高，虽然 k_s 足够大，但一方面脱硫剂烧结、孔隙特性变差， D_e 减小导致 k 减小，反应速率降低，对脱硫不利；另一方面生成的 CaSO₄ 在高温下将发生分解反应，重新生成 SO₂，使其浓度增加；因此存在一个最佳脱硫温度。

不同燃料的最佳脱硫温度不尽相同，这与燃料含硫量有关。燃料含硫量高，相同温度下燃烧产生的 SO₂ 浓度相应增高，在较低温度下就能生成较多的 CaSO₄ 产物^[9]（其摩尔体积为 52.2 cm³ · mol⁻¹，大于反应物 CaO 分子的 10.9 cm³ · mol⁻¹），覆盖在 CaO 表面，减少 CaO 活性比表面积，使反应速率降低，最终导致硫酸化反应消耗的 SO₂ 量比燃煤产生和 CaSO₄ 分解产生的 SO₂ 少，SO₂ 排放浓度呈上升趋势。而对于含硫量低的燃料，这一趋势将会发生在一较高温度。由图 3 可知，燃用烟煤+石油焦混合燃料或纯烟煤的最佳脱

硫温度为 850℃，燃用无烟煤+石油焦混合燃料的最佳脱硫温度在 850~870℃ 之间；在 800~900℃ 温度范围内，燃用高硫燃料时 SO₂ 排放浓度随温度的变化比燃用低硫燃料时更为敏感。

3.2 钙硫比对 SO₂ 排放量的影响

钙硫比是影响 SO₂ 排放量的最重要因素之一。在工业运行中，要取得 90% 以上的脱硫效率，根据燃料和脱硫剂的不同，需要 2.5~4 左右的钙硫比^[10]。由图 4 可见，在 850℃、石灰石 b 为脱硫剂时，随着钙硫比的增加，SO₂ 排放量呈急剧下降趋势，在钙硫比达 2.5 后，下降趋势趋于平缓；钙硫比在 1.4~2.5 之间，燃用纯烟煤和烟煤+石油焦混合物 SO₂ 排放浓度比燃用无烟煤+石油焦 SO₂ 排放浓度随钙硫比增大而减小的速率快。

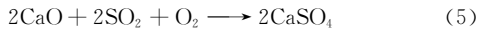
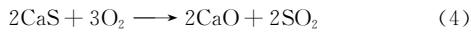
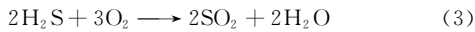
图4 钙硫比对 SO₂ 排放浓度的影响Fig. 4 Effect of molar ratio of Ca/S on SO₂ emission

在钙硫比由小变大的过程中，开始炉内维持一个较高的 SO₂ 浓度水平，此时加大石灰石投入量，石灰石迅速煅烧生成 CaO，SO₂ 气体与 CaO 的碰撞概率大大增加，SO₂ 被 CaO 大量捕集，SO₂ 浓度迅速下降至一较低水平，继续投入石灰石，由于 SO₂ 相对于 CaO 的浓度降低，导致反应速率降低，SO₂ 浓度下降趋势变缓。从运行角度看，钙硫比控制在 2.5 比较合理，太小，则脱硫效率低，SO₂ 排放浓度高，不符合排放标准而造成较严重的环境污染；太大，则会降低石灰石的利用率，增加运行成本。

3.3 过量空气系数对 SO₂ 排放浓度的影响

在循环流化床燃烧中，炉膛密相区氧浓度较低，存在大量的焦炭和 CO，处于还原气氛，燃料中的硫会以 H₂S 形式析出，与脱硫剂反应主要生成还原态脱硫产物 CaS^[11]。进入稀相区后，若存在足够的氧气，H₂S 和 CaS 仍会被氧化成 SO₂ 和

CaSO₄，反应方程式如下



因此，在流化床锅炉燃烧过程中，脱硫剂的有效利用率一定程度上取决于炉膛中的氧浓度，而实现氧浓度增大的办法之一就是增大过量空气系数。由图 5 可见，在石灰石 b 为脱硫剂、钙硫比为 2.5、温度为 850℃ 条件下，过量空气系数增大，SO₂ 浓度随之减小。但在锅炉实际运行中，不能只考虑 SO₂ 排放量来确定过量空气系数，还应考虑排烟损失、灰渣可燃物损失等各方面因素。综合考虑，燃煤和石油焦混合燃料的过量空气系数应控制在 1.2 ~ 1.3。

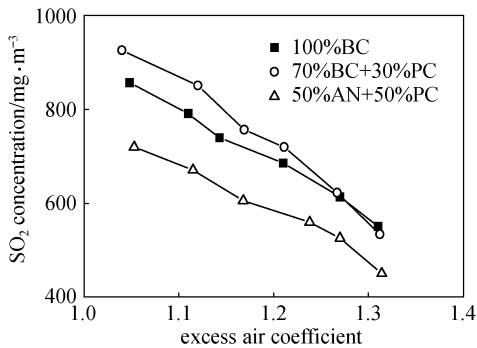


图 5 过量空气系数对 SO₂ 排放浓度的影响

Fig. 5 Effect of excess air coefficient on SO₂ emission

3.4 飞灰再循环对 SO₂ 排放浓度的影响

循环流化床锅炉采用飞灰再循环技术主要是为了降低飞灰中的含碳量，提高锅炉热效率，但在提高脱硫剂利用率方面的贡献却容易被忽视^[12]。由于存在大量未反应的脱硫剂，循环流化床飞灰属于活性飞灰^[13]，其中钙的存在形态及含量见表 4。由表可知，飞灰中存在 17.37% 未分解的 CaCO₃，以及 7.50% 已分解而未被硫化的 CaO。

表 4 飞灰中的钙组成

Table 4 Calcium components in fly ash

Calcium component	Content/%
CaCO ₃	17.37
CaSO ₄	18.30
CaO	7.50

在石灰石 b 为脱硫剂、钙硫比为 2.5、床温为 850℃、燃煤时，飞灰再循环对 SO₂ 排放浓度的影响如图 6 所示。开始采集数据的时刻记为 0，

每隔 15 min 取 1 个数据点，前 5 个数据点未投入飞灰再循环系统，第 5 个数据点采集完后立即投入飞灰再循环系统，并将飞灰旋转阀转速调至 3 r·min⁻¹，15 min 后采集下一个数据点，然后将飞灰旋转阀转速调至 6 r·min⁻¹，同样采集数据后调整旋转阀转速至 9 r·min⁻¹，并稳定在此转速采集 5 个数据点。

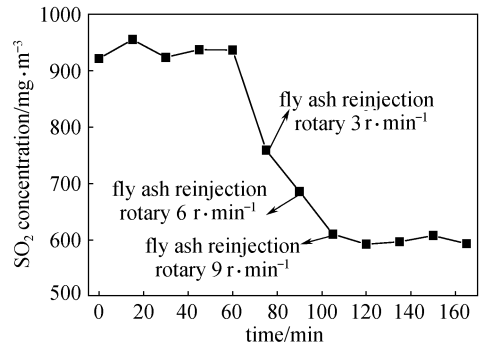


图 6 飞灰再循环对 SO₂ 排放量的影响

Fig. 6 Effect of fly ash recirculation on SO₂ emission

由图 6 可见，飞灰再循环系统投入后，飞灰被重新送入炉膛，SO₂ 排放量下降；随着飞灰旋转阀转速的提高，飞灰再循环量增大，SO₂ 排放量降低的幅度相应增大。在循环流化床设计运行中，通常所说的钙硫比为表观钙硫比，即单位时间内投入炉内的石灰石钙含量与入炉煤硫含量的摩尔比，可炉内的真实钙含量还应包括旋风分离器分离下来的循环灰和飞灰再循环系统回送的飞灰中的活性钙，包括碳酸钙和氧化钙。Anthony 等^[14] 研究认为，在炉内脱硫过程中，尽管脱硫产物 CaSO₄ 会覆盖在 CaO 表面，降低硫化反应的速率，但如果石灰石在炉内停留足够长的时间，还是能达到一个高的钙利用率。飞灰再循环使得飞灰中的活性钙重新回到炉膛，炉膛中的真实钙硫比增大，活性钙在炉膛内的停留时间变长，SO₂ 的排放量显著降低。飞灰再循环不仅可以提高锅炉效率，还可提高钙利用率。

3.5 石灰石微观结构对 SO₂ 排放浓度的影响

不同种类的石灰石具有不同的脱硫效果，石灰石钙含量和粒度通常是循环流化床电厂选择石灰石的一个重要指标。然而，石灰石的微观结构作为影响其脱硫能力的另一个重要指标^[15-16] 却往往被忽略。由表 3 和表 4 可知，本文选用的两种石灰石具有相似的钙含量和粒径分布，但它们的脱硫效果却具有较大差异。

图 7 为在温度 850℃、钙硫比 2.5、飞灰旋转转速 9 r·min⁻¹ 的情况下，两种不同种类的石灰石对 SO₂ 排放量的影响。由图可见，石灰石 a 比石灰石 b 具有更好的捕集能力，究其原因，是由两种石灰石煅烧产物的微观结构不同造成的。石灰石进入炉内后，先煅烧后硫化，硫化反应的活性在一定程度上取决于煅烧产物的孔隙结构。孔隙结构差的孔在反应中提供较小的比表面积和比孔容积，孔口易被堵塞，孔空间易被充满，阻碍了 SO₂ 气体在孔内的扩散，使反应提前终止。孔隙结构较好的孔这一现象则较迟发生，从而达到较高的硫化程度。从两种石灰石煅烧产物的累积比表面积和累积比孔容积（图 8 和图 9）可以看出，石灰石 a 在整个孔径范围内累积比表面积达到 10.38 m²·g⁻¹，大于石灰石 b 的 2.58 m²·g⁻¹；石灰石 a 的累积比孔容积为 0.090 m³·g⁻¹，大于石灰石 b 的 0.015 m³·g⁻¹。将石灰石的微观结构作为考评石灰石品质的一个重要指标，对循环流化床锅炉经济运行具有重要意义。

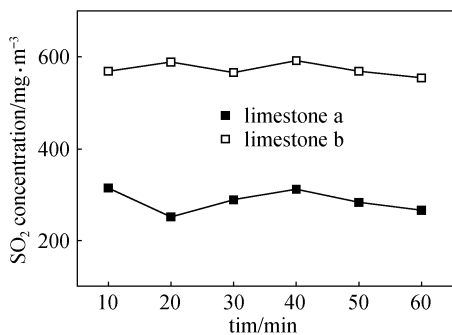


图 7 石灰石种类对 SO₂ 排放量的影响

Fig. 7 Effect of limestone category on SO₂ emission

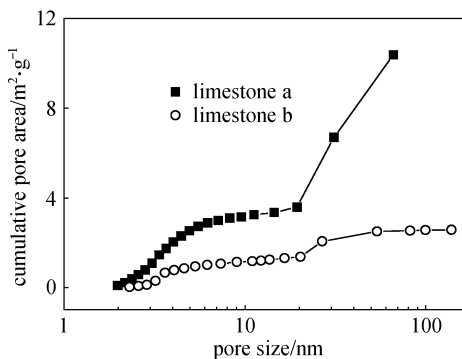


图 8 累积比表面积

Fig. 8 Cumulative pore area

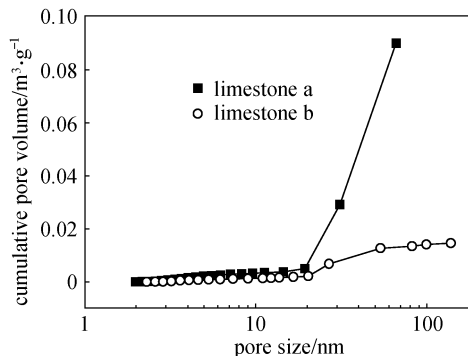


图 9 累积比孔容积

Fig. 9 Cumulative pore volume

4 结 论

(1) 蒸发量为 410 t·h⁻¹ 的循环流化床锅炉燃用 70% 烟煤 + 30% 石油焦和燃用 50% 无烟煤 + 50% 石油焦均能获得理想的燃烧效果，炉内温度场分布均匀合理。

(2) 循环流化床锅炉存在一个最佳脱硫温度，对于高硫燃料这一温度在 850℃ 左右，而低硫燃料这一温度稍高，在 850~870℃ 之间。

(3) SO₂ 排放量随着钙硫摩尔比的增大而减小，钙硫摩尔比增大的过程中，减小趋势先剧烈后变得缓慢；钙硫摩尔比大于 2.5 后，这一趋势不再明显。工业运行的推荐钙硫摩尔比为 2.5。

(4) 过量空气系数增大，会降低 SO₂ 排放量，实际生产运行中，过量空气系数应控制在 1.2~1.3。

(5) 飞灰再循环可以提高钙的利用率。随着飞灰再循环量的增加，炉内真实钙硫比增大，石灰石在炉内停留时间增长，SO₂ 排放量降低。

(6) 石灰石的微观结构影响其脱硫能力，大比表面积和高比孔容积的石灰石具有较好的脱硫效果。

符 号 说 明

- A_{ar}——收到基灰分
- C_{ar}——收到基碳元素
- C_{fix}——收到基固定碳
- H_{ar}——收到基氢元素
- LOF——石灰石烧失量
- M_{tol}——收到基水分
- N_{ar}——收到基氮元素
- O_{ar}——收到基氧元素

Q_{dw} ——低位发热量, $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

S_{ar} ——收到基硫元素

V_{ar} ——收到基挥发分

References

- [1] Chen Jihui, Lu Xiaofeng. Progress of petroleum coke combusting in circulating fluidized bed boilers—a review and future perspectives. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, **49** (3): 203-216
- [2] Anon. Key trends in the petroleum coke industry worldwide. *Mater. Technol.*, 2003, **18** (2): 115
- [3] Anthony E J, Jia L. Agglomeration and strength development of deposits in CFBC boilers firing high sulfur fuels. *Fuel*, 2000, **79** (15): 1933-1942
- [4] Zhao Changsui, Wang Wenxuan, Wang Fengjun, *et al.* SO_2 emission characteristics from co-firing of petroleum coke and coal in circulating fluidized bed. *Journal of Southeast University: English Edition*, 2005, **25** (1): 48-52
- [5] Zhao Changsui, Wang Wenxuan, Wang Fengjun, *et al.* Emission control of gaseous pollutants from co-firing of petroleum coke and coal in CFB//17th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Jacksonville, Florida, USA; ASME, 2003; 925-934
- [6] Wang Wenxuan (王文选), Wang Fengjun (王凤君), Han Song (韩松), *et al.* Investigation on SO_2 emission of petroleum coke combustion blending with coal in CFB. *Journal of Combustion Science and Technology* (燃烧科学与技术), 2003, **9** (6): 507-510
- [7] Lü Junfu (吕俊复), Zhang Shouyu (张守玉), Liu Qing (刘青), *et al.* Investigation on carbon content in fly ash in circulating fluidized bed. *Power Engineering* (动力工程), 2004, **24** (2): 170-174
- [8] Lü Qinggang (吕清刚), Yong Yumei (雍玉梅), Na Yongjie (那永洁), *et al.* Influence of coal on SO_2 and NO_x emissions of circulating fluidized bed combustion. *Proceedings of CSEE* (中国电机工程学报), 2005, **25** (1): 142-146
- [9] Ma Linzhan (马林转), Ning Ping (宁平), Qing Chun (卿春). Experimental study on circulating fluidized bed boiler desulfurization. *Environmental Engineering* (环境工程), 2005, **23** (5): 47-51
- [10] Nowak W. Clean coal fluidized-bed technology in Poland. *Applied Energy*, 2003, **74** (3/4): 405-413
- [11] Jib Talukdar, Prabir Basu, Jay H Greenblatt. Reduction of calcium sulfate in a coal-fired circulating fluidized bed furnace. *Fuel*, 1996, **75** (9): 1115-1123
- [12] Laursen Karin, Duo Wenli, Grace J R, *et al.* Characterization of steam reactivation mechanism in limestone and spent calcium sorbents. *Fuel*, 2001, **80** (9): 1293-1306
- [13] Stanislav V Vassilev, Christina G Vassileva. A new approach for the classification of coal fly ashes based on their origin, composition, properties, and behaviour. *Fuel*, 2007, **86** (10/11): 1490-1452
- [14] Anthony E J, Iribarne A P, Iribarne J V, *et al.* Fouling in a 160 MWe FBC boiler firing coal and petroleum coke. *Fuel*, 2001, **80** (7): 1009-1014
- [15] Fan L S, Jiang P, Agnihotri R, *et al.* Dispersion and ultra-fast reaction of calcium-based sorbent powders for SO_2 and air toxics removal in coal combustion. *Chemical Engineering Science*, 1999, **54** (22): 5585-5597
- [16] Robin W Hughes, Dennis Lu, Edward J Anthony, *et al.* Improved long-term conversion of limestone-derived sorbents for *in situ* capture of CO_2 in a fluidized bed combustor. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2004, **43** (18): 5529-5539