

粉煤流化床燃烧(PC-FBC)中SO₂的生成特性*

陈鸿伟¹, 付松¹, 魏铁铮¹, 金保升², 徐益谦² (1. 华北电力大学动力系, 保定 071003; 2. 东南大学热能工程研究所, 南京 210096)

摘要: 粉煤流化床(PC-FB)是一项燃烧效率高, 同时实现炉内脱硫、低NO_x和N₂O排放的新型高效、清洁煤燃烧技术。在一座0.3MW的试验台上, 系统研究了其SO₂生成与分布特性。主要包括: PC-FBC的SO₂生成特性以及床层温度 T_b 、流化速度 u_0 、二次风率 R_2 、二次风投入位置、二次风喷射角度、喷口尺寸对SO₂生成与分布的影响。试验燃用煤种含硫1.71%。在 $T_b = 820 \sim 920^\circ\text{C}$, $u_0 = 1.2 \sim 3.3 \text{ m/s}$, $R_2 = 30\% \sim 70\%$ 的条件下, 流化床燃烧区(FBCZ)出口SO₂浓度及炉膛出口SO₂浓度SO₂分别为 $520 \sim 600 \text{ m l/m}^3$ 和 $1280 \sim 1300 \text{ m l/m}^3$ 。

关键词: 煤粉, 流化床, 燃烧, SO₂生成特性。

中图分类号: X701.3 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2000)01-0049-04

SO₂ Production Characteristics in Pulverized Coal Fluidized Bed Combustion

Chen Hongwei¹, Fu Song¹, Wei Tiezheng¹, Jin Baosheng², Xu Yiqian² (1. Dept. of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Institute of Thermal Power Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Pulverized Coal-fluidized bed(PC-FB) is a new clean coal combustion technology, which can get a high combustion efficiency and in-furnace desulphuration low NO_x and N₂O emission. In this researching work, production and distribution characteristics of SO₂ in a 0.3MW PC-FB experimental rig were conducted systematically. The influences of many factors, such as bed temperature(T_b), fluidizing velocity(u_0), secondary air ratio(R_2), every layer's secondary air ratio($R_{2i}\%$) etc. were investigated. When $T_b = 820 \sim 900^\circ\text{C}$, $u_0 = 1.2 \sim 1.3 \text{ m/s}$, $R_2 = 30\% \sim 70\%$, SO₂ concentrations were $520 \sim 600 \text{ m l/m}^3$ and $1280 \sim 1300 \text{ m l/m}^3$ at exit of fluidized bed combustion zone and exit of fluidized combustion zone.

Keywords: pulverized coal, fluidized bed, combustion, SO₂ production characteristics.

粉煤流化床燃烧(pulverized coal-fluidized bed combustion, PC-FBC)技术, 将燃煤流化床脱硫过程和煤粉炉的炉内喷钙脱硫过程的特点结合。在粉煤流化床中, 作为脱硫剂的石灰石同煤粉一并从底部加入其流化床燃烧区(fluidized bed combustion zone, FBCZ), 在FBCZ的弱氧化气氛中, 石灰石主要发生氧化态脱硫反应, 同时伴随一部分还原态脱硫反应, 进入悬浮燃烧区(fluidized combustion zone, FCZ)便完成CaS的氧化和沿程的进一步脱硫过程^{*}。为进一步研究粉煤流化床(pulverized coal-fluidized bed, PC-FB)的污染物生成与控制规律, 指导PC-FB

锅炉的设计、运行, 本文在原热态试验研究的基础上, 系统而详细地研究了PC-FBC中SO₂的生成特性以及床层温度, 流化速度, 二次风率, 二次风的投入位置、二次风喷射角度、喷口尺寸对SO₂生成与分布的影响。此研究对PC-FBC的工业应用与数值模拟有重要意义。

* 高校博士点基金资助项目

作者简介: 陈鸿伟(1965~), 男, 博士, 副教授, 主要从事煤的高效低污染利用、气-固两相流动与传热的理论研究与技术开发。

* 陈鸿伟. 粉煤流化床燃烧(PC-FBC)热态试验研究及其气-固两相流动的数值模拟. 东南大学博士学位论文, 1996
收稿日期: 1999-06-03

1 试验系统

PC-FB 燃烧试验测点布置、测量系统以及
燃用煤种(含硫为1.71%)等见表1~表3^[1, *]。

表1 炉内烟温测点布置(相对于布风板的高度)

标高/m	1.4	1.81	2.145	2.59	3.7	4.7	5.7
烟温测点	T_4	T_0	T_{12}	T_{13}	T_{14}	T_{15}	T_{16}

表2 炉内烟气取样点布置(相对于布风板的高度)

标高/m	1.81	2.59	3.7	4.7	5.7
取样点	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]

表3 各层二次风布置标高(相对于布风板的高度)

标高/m	1.945	2.345	3.45	3.95
二次风	1层(R_{21})	2层(R_{22})	3层(R_{23})	4层(R_{24})

2 试验结果与分析

2.1 床温 T_b 对 PC-FBC 生成 SO_2 的影响

在普通鼓泡流化床锅炉中,床温升高,煤中的黄铁矿、有机硫迅速同床内的氧发生燃烧反应生成 SO_2 ,煤中的硫酸盐分解生成 SO_2 的速度同时加快。所以,床温升高,床层出口(1[#] 取样点)的 SO_2 浓度则增大。对于粉煤流化床 PC-FB 情况则有所不同。FBCZ 的温度(T_b)对其出口 SO_2 浓度的影响与床层出口处的氧浓度 O'_2 (%) 有关。当 O'_2 高于某个浓度水平时,粉煤流化床床温 T_b 对 SO'_2 的影响规律与普通 FBC 一样。但是,当 O'_2 低于该氧浓度水平时,随着床温 T_b 的升高,PC-FB 的 FBCZ 出口 SO_2 浓度反而下降。试验中,对 O'_2 % 分别等于 4.1%、3.2%、1.8%、0.8%、0.5%、0.2% 时, SO'_2 与 T_b 的关系进行了研究,结果示于图1。可以看出,对于后3种情况,即 FBCZ 内贫氧时, SO'_2 是随 T_b 的升高而降低的。这可能是由于当 FBCZ 内贫氧到一定程度后,煤中的黄铁矿、有机硫与还原成分(H_2 、C、CO)等反应的机率增大,温度的升高又加速了这些反应。

图2 给出 FBCZ 出口 O'_2 (%) 分别等于 4.1% 和 0.5% 条件下炉膛出口烟气中 SO''_2 与床温 T_b 的变化关系。由图2得出,无论粉煤流化床的 FBCZ 出口烟气氧浓度和 FBCZ 内床温如何变化,炉膛出口烟气的 SO_2 浓度 SO''_2 几

乎不发生变化。其原因可能是,虽然 FBCZ 内的烟气成分和床层温度会影响煤中硫的转化率及生成物形态,但是在悬浮空间的高温 and 二次风作用下基本都将最终转化为 SO_2 ,所以,FC-FB 炉膛出口的 SO_2 浓度 SO''_2 基本上是恒定的。

2.2 二次风率 R_2 对 SO_2 生成的影响

二次风率 R_2 增加,一次风率 R_1 就必然减小,加上煤粉在 PC-FB 的 FBCZ 的停留时间延长,床内还原气氛明显增加,一定床温下,煤中占总硫比例很小的硫酸盐的分解得以加速,生成更多的 SO_2 。但占全硫份额较大的 FeS_2 和有机硫,在床层内的反应 $FeS_2 + H_2 \rightarrow FeS + H_2S$ 、 $H_2 + S = H_2S$ 速率加快,生成硫化物的份额增加,所以,床层出口烟气的 SO_2 浓度降低,结果如图3所示。当 R_2 从 30% 增加到 70% 时, SO'_2 由 $600m^3/m^3$ 下降为 $529m^3/m^3$, SO''_2 则由 $1290m^3/m^3$ 增加到 $1320m^3/m^3$ 。 SO''_2 随 R_2 增大而略有提高的原因,可能是 R_2 增大使煤粉在 PC-FB 内的停留时间得以延长的缘故。

2.3 二次风投入位置对 SO_2 生成的影响

从粉煤流化床的 FBCZ 随烟气进入 FCZ 的气体 and 固体硫化物(H_2S 、 COS 、 FeS 、 FeS_2 等),与二次风相混合,气体硫化物与未燃挥发分一道同二次风提供的氧发生均相氧化反应而生成 SO_2 和 CO_2 ; 经部分燃烧的煤粉中的碳、 FeS_2 及 FeS 与二次风的氧发生多相氧化反应而生成 Fe_2O_3 和 SO_2 。由于均相反应比气固多相化学反应易于进行,所以,当某个区段的二次风风量较少,气、固成分的截面分布较均匀时,前者的均相反应会优先消耗掉大部分氧,从而抑制煤灰中黄铁矿硫、硫化亚铁硫及有机硫的释放与向 SO_2 的转化;反之,当该区段的二次风量增大或气、固成分的截面分布有利于煤灰与二次风优先混合时,除气体硫化物外, FeS_2 和 FeS 中的硫亦会迅速地转化成 SO_2 。由此,可以推断出,随着下一、二层(表3)二次风风量的增大,即二次风投入位置下移,煤灰中的 FeS_2 、 FeS 和有机硫会迅速被氧化生成 SO_2 ,从而使区段出口烟气的 SO_2 浓度迅速接近最终值。图4中对应于3种二次风分配比例粉煤流化床的FCZ内

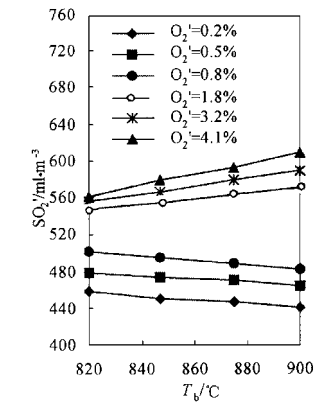


图1 FBCZ 出口烟气 SO_2 浓度 SO_2' 与床温 T_b 的关系

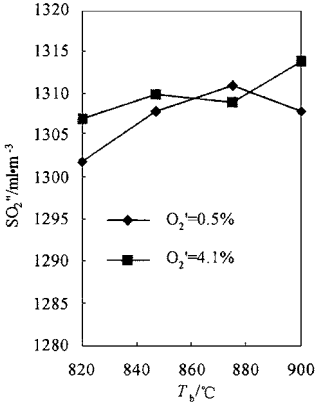


图2 床温 T_b 对炉膛出口烟气 SO_2 浓度 SO_2'' 的影响

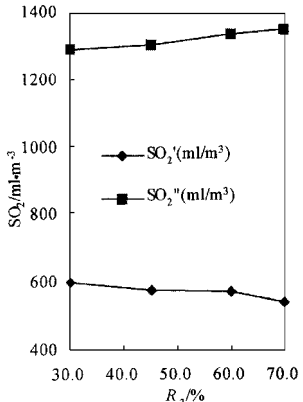


图3 PC-FBC 二次风率 $R_2\%$ 与 SO_2' 、 SO_2'' 的关系

SO_2 浓度分布曲线说明了这一点.

2.4 二次风喷射角度对 SO_2 生成的影响

某区段处气、固成分的截面分布, 若有利于部分燃烧的煤粉与二次风优先混合, 就会加快煤灰中的 FeS_2 、 FeS 、有机硫的氧化反应而使其中的硫及早转化为 SO_2 . 要获得这样的气、固成分的截面分布, 粉煤流化床的四角切圆二次风就需以较小的角度(射流与其下游壁面的夹角)喷入悬浮空间, 才能形成中心颗粒浓度低, 周围颗粒浓度高的分布, 达到颗粒优先与二次风混合的目的. 煤灰颗粒粒径愈粗二次风的这个作用就越大. 也就是说, 在 PC-FBC 中改变最下一

层二次风的入射角度, 此效果才最为明显. 图5所示, 曲线 A、B 所对应的第1层四角切圆二次风入射角度 β 分别是 30° 和 20° , 余下各层四角切圆二次风的 β 均为 30° 的情况下, 粉煤流化床的 FCZ 沿轴向 SO_2 浓度分布, 曲线 A、B 在第二取样点处的烟气 SO_2 浓度相差 67 ml/m^3 .

2.5 二次风喷口大小对 SO_2 生成的影响

在 PC-FB 结构参数及运行参数均保持不变的条件下, 仅改变其第一层四角切圆二次风喷口的大小, 测得其相应的 FCZ 沿轴向的 SO_2 浓度分布曲线, 如图6所示.

从图6可以看出, 随着第1层四角切圆二次

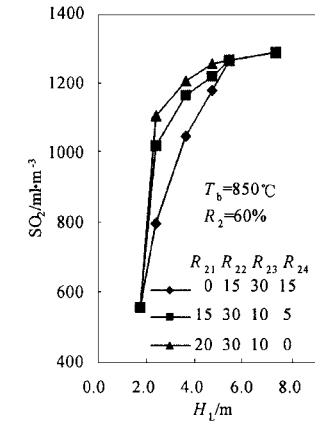


图4 不同二次风投入位置时 FCZ 内 SO_2 浓度分布

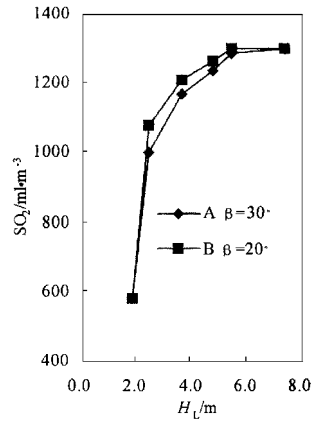


图5 二次风入射角对 FCZ 内烟气 SO_2 浓度分布的影响

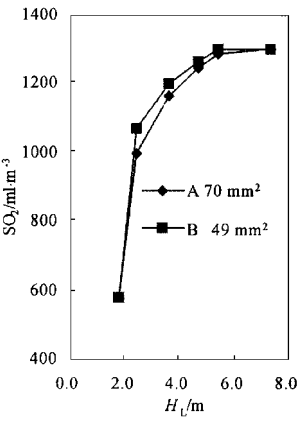


图6 二次风喷口尺寸对 FCZ 内烟气 SO_2 浓度分布的影响

风喷口由 70m^2 减小为 49m^2 ,第2取样点测得的烟气 SO_2 浓度则由 $1005\text{m}^3/\text{m}^3$ 增至 $1060\text{m}^3/\text{m}^3$.原因在于喷口尺寸缩小,该层二次风的射流速度增大,射流穿入主气流的深度增加,所形成的旋转射流场的旋涡强度增强,从而加快了氧的对流扩散及其向煤灰颗粒的扩散过程,其结果是增强了气、固硫化物氧化生成 SO_2 的反应过程.

2.6 流化速度对 SO_2 生成的影响

流化速度 u_0 的提高意味着粉煤流化床的FBCZ、FCZ内燃烧的容积热负荷 q_v 增大. q_v 的增大,一方面使煤粉及各烟气成分在粉煤流化床炉内的停留时间缩短,使煤粉在其中所释放有机硫、无机硫且转化为 SO_2 的份额减小;另一方面则使PC-FB的FBCZ、FCZ内温度水平提高,促使煤粉中硫的释放及其向 H_2S 或 SO_2 的转化.

图7曲线(a)、(b)分别是在保持总的过量空气系数不变条件下,PC-FB流化速度 u_0 从 1.2 升至 3.3m/s 时,FBCZ出口和炉膛出口烟气 SO_2 浓度 SO'_2 和 SO''_2 的变化.由图7曲线(a)可以看出,当 u_0 从 1.2m/s 升至 2.1m/s 时, SO'_2 从 $538\text{m}^3/\text{m}^3$ 增加到 $574\text{m}^3/\text{m}^3$;当 u_0 由 2.1m/s 升高时,FBCZ出口的烟气 SO_2 浓度则由 $574\text{m}^3/\text{m}^3$ 下降至 $553\text{m}^3/\text{m}^3$.前者是因为流化速度较小时,提高 u_0 使FBCZ的烟温 T_b 大幅度升高,从而使 q_v 增大的后一方面的作用大于其前一方面的作用.后者是因为流化速度超过一定数值后,再进一步提高,床温 T_b 增势平缓,从而使 q_v 增大的前一方面的作用大于其后一方面的作用.对于后者还有可能是因为 u_0 过高导致FBCZ乳化相中的煤粉浓度迅速增加,使煤中硫转化为 H_2S 等硫化物的量增多,且 T_b 的提高亦会加速这些反应的速度.

图7曲线(b)所示,当 u_0 从 1.2m/s 升至 3.3m/s 时,粉煤流化床炉膛出口烟气 SO''_2 从 $1303\text{m}^3/\text{m}^3$ 增至 $1316\text{m}^3/\text{m}^3$.其中 $1.2\sim 2.1\text{m/s}$ 的范围内, SO''_2 的增幅较大; $2.1\sim 3.3\text{m/s}$ 的范围内, SO''_2 基本保持不变.说明当粉煤流化床具

有较高的温度后,在试验的流化速度范围内,煤粉在FC-FB内均能最大限度地释放所含的硫并转化成 SO_2 .

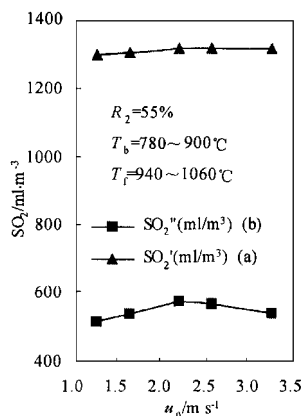


图7 PC-FBC流化速度 u_0 对 SO'_2 、 SO''_2 的影响

3 结 论

(1) 当PC-FB的FBCZ内贫氧时,其出口处烟气中 SO'_2 浓度随着床层温度 T_b 升高而降低;当FBCZ内有一定氧浓度时,床温 T_b 升高, SO'_2 浓度亦随之上升.在试验范围内PC-FBC炉膛出口烟气中 SO_2 浓度基本与床温 T_b 无关,大致稳定在 $1300\text{m}^3/\text{m}^3$ 的水平上.

(2) 二次风率 R_2 增大,PC-FB的燃烧区出口 SO'_2 浓度下降,其炉膛出口 SO_2 浓度 SO''_2 则略有上升.

(3) 二次风投入位置下移时,烟气中的 SO_2 浓度将更为迅速地接近最终值.二次风入射角度减小和二次风喷口尺寸减小,相同风量下,都有利于加速 SO_2 的生成.

(4) 在试验范围内流化速度较低时,加快 u_0 热负荷 q_v 增大,床温明显升高,FBCZ出口的 SO'_2 浓度和炉膛出口的 SO''_2 浓度则相应升高;当 u_0 超过某值再进一步提高时, SO'_2 浓度随之降低,而 SO''_2 浓度基本不变.

参考文献

- 1 陈鸿伟等.粉煤流化床燃烧(PCF-FBC)的热态试验研究.动力工程,1996,(2):31~39