

空气分级燃烧炉膛壁面温度分布研究

李森^{1,2}, 徐通模¹, 惠世恩¹

1 西安交通大学 能源与动力工程学院 陕西 西安 710049

2 中国科学院 力学研究所 北京 100190

(Tel: 010-82544232, Email: liisen@163.com)

摘要: 本文在 1MW 切向燃烧煤粉炉试验台上进行了空气分级燃烧试验, 研究了空气分级燃烧时炉膛壁面温度分布规律。试验结果表明, 在空气分级燃烧时主燃区壁面温度分布相对于炉壁中心位置呈左右不对称分布, 炉壁最高温度大致出现在旋转气流的上游, 壁面温度分布不均匀系数为 0.244; 燃尽区下部壁面温度分布也呈不对称分布, 最高温度出现在旋转气流的下游, 壁面温度分布不均匀系数为 0.106; 燃尽区上部壁面壁面温度分布分布均匀。

关键词: 空气分级; 壁面温度; OFA

0 前言

炉内空气分级燃烧是一种有效的低 NO_x 燃烧技术, 其基本原理是将燃烧所需空气分两阶段完成: 第一阶段将炉内燃烧所需要的总空气量的 70%~90% 从主燃烧器供入炉内, 第二阶段把燃烧所需剩余的空气(称之为燃尽风)从炉膛上部送入。燃尽风(over-fire air) OFA 送入位置所处的炉膛横截面可以看作是主燃区和燃尽区的分界面, 炉膛下部区域称之为主燃区, 上部称之为燃尽区[1, 2]。主燃区燃烧处于贫氧气氛(即还原气氛), 该区过量空气系数(air stoichiometric ratio) SR1 小于 1, 抑制 NO_x 生成; 第二阶段把燃烧所需剩余的空气(称之为燃尽风)从炉膛上部送入, 该区称之为燃尽区, 该区过量空气系数(air stoichiometric ratio) SR2 大于 1, 燃烧处于氧化气氛, 使得燃料燃尽。

由空气分级降低 NO_x 原理可知, 炉内空气分级依靠控制炉内燃烧气氛和降低火焰中心温度达到降低 NO_x 排放的目的, 这必然影响炉内温度场的分布, 从而影响了炉膛壁面的热负荷分布。在电站锅炉实际运行中, 炉膛壁面热负荷分布对受热面安全运行有很重要的影响。过高的壁面热负荷会使得受热面内传热恶化, 同时壁面热负荷沿炉膛宽度方向分布不均匀也会使受热面内工质水动力循环不稳定[3]。在空气分级燃烧时, 炉膛主燃区处于还原气氛, 热负荷高的壁面处易结焦, 这些直接影响到受热面安全运行。因此, 在空气分级试验中, 研究炉膛壁面温度分布有很重要的现实意义, 为实际锅炉设计和实际运行提供一定的指导。本文在 1MW 切圆燃烧煤粉炉试验台上进行了空气分级燃烧试验研究, 关于 NO_x 脱除试验结果可参见文献[4], 这里主要研究了空气分级燃烧时炉膛壁面温度分布规律。

1 试验系统

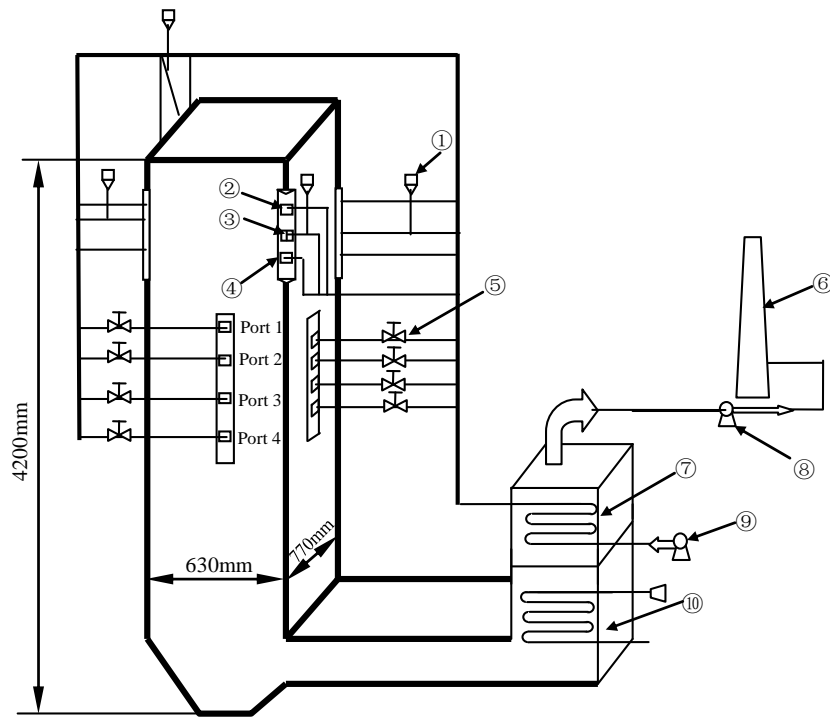


图 1 1MW 煤粉燃烧炉试验台简图: 1, 给粉机; 2, 下二次风; 3, 一次风; 4, 上二次风; 5, 空气-烟气混合器; 6, 烟气再循环风机; 7, 空气预热器; 8, 省煤器; 9, 送风机; 10, 烟囱

图 1 是 1MW 切圆燃烧煤粉炉试验台简图。该试验台炉高 4200mm，炉膛宽 770mm 深 630mm。燃烧器分成两组，上面一组燃烧器布置在四角，包括上二次风、下二次风、一次风；下面一组燃烧器布置在四墙，四个喷口用以研究 OFA 送入位置对炉膛壁面温度的影响。OFA 送入相对位置(或炉膛中心高度相对位置) 定义为：

$$h' = h / D_{ed} \quad (1)$$

上式中， h 为 OFA 喷口（或炉膛中心高度位置）距上二次风的垂直距离， D_{ed} 为炉膛截面当量直径。四个 OFA 口相对位置 h' 分别为 0.13, 0.26, 0.45, 0.68。

一次风喷嘴用分成两个通道，组织水平浓淡燃烧。该燃烧器属于低 NO_x 燃烧器，在本次试验中保持浓淡比为 3:1 不变。一次风和二次风以一定角度从炉膛四角送入炉膛，在炉膛中心形成假象切圆，见图 2。一次风喷口偏离二次风喷口 10° ，这种切圆燃烧系统称之为同心圆反切燃烧系统（CFS II）。在 CFS II 系统中，二次风在大切圆外部形成氧化性气氛，可以防止炉膛壁面结焦。SOFA 喷口布置在四墙形成四墙切圆燃烧系统(见图 3)，该燃烧系统可提高炉膛壁面的热负荷均匀程度，同时减轻再燃区（还原气氛）壁面的结焦程度。本次试验总的过量空气系数保持为 1.15 不变。

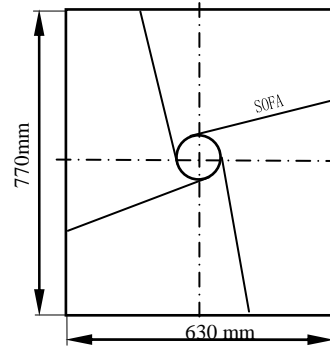
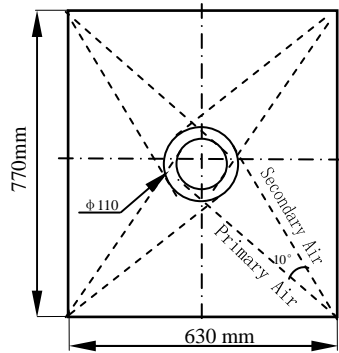


图2 同心圆一次风反切四角切圆燃烧系统(CFS II). 图3 四墙切圆燃烧系统 (WTFS)

本文为了论述炉膛壁面温度分布方便,这里采用相对位置来表示。在计算某点在炉膛宽度和深度的相对位置时,文中采用炉膛宽度 a 作为沿炉膛宽度方向的基准尺寸,用炉膛深度 b 作为沿炉膛深度方向的基准尺寸。宽度方向(或深度方向)的相对坐标 X (或 Y)取旋流气流上游燃烧器出口位置为 0 点,取下游燃烧器出口位置为 1.0 。考虑到试验炉膛比较瘦高,选择炉膛横截面当量直径 D_e 作为沿炉膛高度方向的基准尺寸更有实用性。炉膛高度方向的相对坐标 Z 方向向下,为了与 SOFA 喷口沿炉膛高度方向相对位置表示方法一致,在这里采用与式(1)一致的方法,选择上二次风喷口水平中心截面所处的高度位置作为坐标 z 方向的零点。此时,炉膛内某点的相对位置可用相对坐标 X 、 Y 、 Z 来表示:

$$X = \frac{x}{a}, \quad Y = \frac{y}{b}, \quad Z = \frac{z}{D_e} \quad (2)$$

式中:

x 、 y 、 z ——分别为某点在上述坐标系中的坐标/mm;

D_e ——炉膛横截面当量直径/mm。

试验中利用镍铬-镍硅热电偶测量了后墙壁面温度,温度测量系统采用英国 IMP (Isolated Measurement Pod) -35951C 采集板,通过测量热电偶的电压来计算温度。

2 煤粉的制备

在本次试验中,主燃料和再燃燃料采用同一种煤,即神木烟煤,其工业分析和元素分析见表 1。

表1 神木烟煤工业分析和元素分析

工业分析, wt % (as air-dry)				
水分	灰分	挥发分	固定碳	低位发热量 (kJ kg^{-1})
2.6	6.56	32.76	58.08	28370
元素分析, wt % (as air-dry)				
C	H	O	N	S
73.63	4.54	11.38	0.95	0.34

3 试验结果与讨论

以前试验结果表明,主燃区过量空气系数 SR 为 0.85 时, NO_x 脱除效率最高^[4], 因而在本次试验研究 SR 为 0.85 时炉膛壁面温度分布规律。

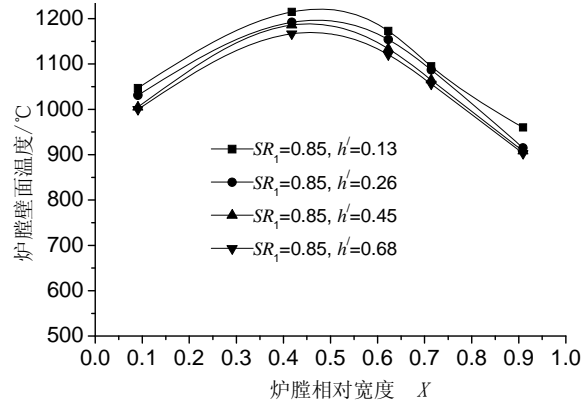


图 4 炉膛相对高度 $Z=-0.215$ 处后墙壁面温度沿宽度方向的分布

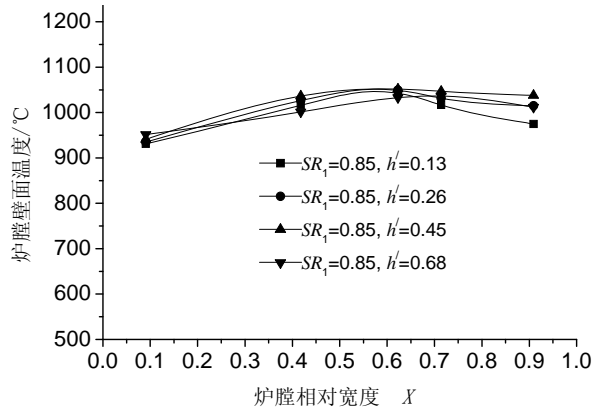


图 5 炉膛相对高度 $Z=0.89$ 处后墙壁面温度沿宽度方向的分布

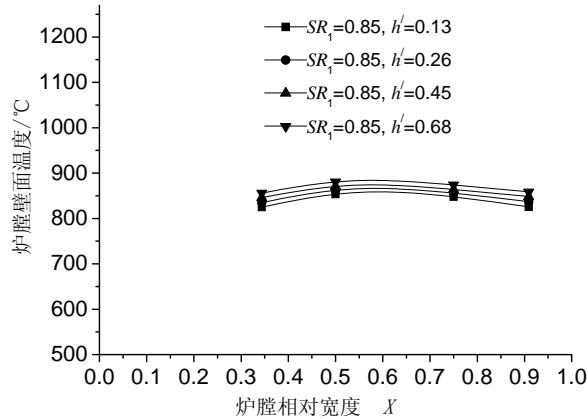


图 6 炉膛相对高度 $Z=1.707$ 处后墙壁面温度沿宽度方向的分布

图 4、图 5 和图 6 分别为主燃区过量空气系数 $SR=0.85$ 时, 炉膛相对高度 $Z=-0.215$ 、0.89 和 1.707 壁面温度分布。由此可以看出, 炉膛下部区域 ($Z=-0.215$, 主燃区) 壁面

温度分布相对于炉壁中心位置呈左右不对称分布，炉壁最高温度点大致处于旋转气流的上游；炉膛中部区域（ $Z=0.89$ ，燃尽区）壁面温度分布相对于炉壁中心位置也炉膛上部区域（ $Z=1.707$ ，燃尽区）壁面温度分布均匀，可以认为呈对称分布。炉膛壁面温度分布可以直接反映壁面热负荷变化规律，壁面温度高的区域热负荷高^[5, 6]。因此，在空气分级燃烧时主燃区壁面热负荷相对于炉壁中心位置呈左右不对称分布，炉壁最高热负荷大致出现在旋转气流的上游；燃尽区下部壁面热负荷也呈不对称分布，但最高热负荷出现在旋转气流的下游；燃尽区上部壁面热负荷分布均匀。造成上述壁面热负荷分布特征的原因如下：

①炉膛下部处于燃烧热负荷较高的区域，该区域燃烧剧烈，燃烧火球在炉膛中旋转上升，而炉膛四角距火焰中心较远，辐射强度较弱，同时受到旋转气流冲刷也较弱，这使得炉膛四角温度较低。燃烧火球在炉膛中旋转过程中，煤粉气流一边运动，一边着火燃烧，从而造成沿炉膛宽度方向某一位置壁面温度出现了最高值，这个最高值的位置取决于燃料特性、燃烧工况和炉膛结构等因素。在其它条件相同，优质煤燃烧时，煤粉着火及时，燃烧速度快，这一最高温度位置就偏向于旋转气流的上游，而低挥发分或高灰分的劣质煤燃烧时，燃烧速度较慢，着火推迟，这一最高温度位置就偏向于旋转气流的下游。本试验燃用着火特性较好的神木烟煤，因而炉膛下部燃烧区域壁面最高温度出现在旋转气流的上游。

②由于空气分级燃烧时，主燃区处于贫氧燃烧，使得大量延迟燃烧的焦炭在炉膛中部随着旋转气流运动而燃烧。由于焦炭燃烧属于异相燃烧，燃烧反应相对迟缓，因而炉膛中部区域壁面最高温度位置大致处于旋转气流的下游。

③在炉膛上部区域，可燃物减少，旋转气流实际切圆直径大，这使得旋转气流沿炉膛壁面宽度方向对炉膛壁面冲刷和辐射作用更加充分，所以沿炉膛宽度方向的壁面温度分布均匀。

同样由图 4、图 5 和图 6 可以看出，燃尽风 OFA 喷口相对位置 h' 对不同位置壁面的温度分布影响规律是不同的，因而对壁面温度影响也不同。炉膛下部区域（ $Z=-0.215$ ，主燃区）壁面温度（或热负荷）随着燃尽风 OFA 喷口相对位置的上移而降低，而炉膛中部和上部区域（ $Z=0.89$ 和 1.707 ，燃尽区）壁面温度（或热负荷）随着燃尽风 OFA 喷口相对位置的上移而升高。这是由于炉膛下部区域处于贫氧燃烧，随着燃尽风 OFA 喷口相对位置的上移，分级燃烧程度提高，炉膛下部燃烧强度下降，该区域炉膛温度（或热负荷）随着燃尽风 OFA 喷口相对位置的上移而下降（见图 3），这使得炉膛壁面受到的辐射换热下降，因而后墙壁面下部区域壁面温度（或热负荷）降低。然而燃尽风 OFA 喷口相对位置的上移使得大量被延迟燃烧的焦炭进入炉膛中、上部区域继续燃烧，这些区域所对应炉膛壁面受到的辐射换热增大，因而后墙壁面中、上部区域温度（或热负荷）上升，见图 5 和图 6。

为评价壁面温度分布的均匀程度，这里定义炉膛壁面某截面温度分布不均匀性系数 δ 为：

$$\delta = \frac{(t_{\max} - t_{\min})}{t_m} \quad (3)$$

式中： t_{\max} —测量截面上最高温度/°C； t_{\min} —测量截面上最低温度/°C； t_m —测量截面上平均温度/°C。

表 2 空气分级燃烧时炉膛壁面不同高度处温度分布平均不均匀系数

炉膛壁面相对高度 Z	-0.215	0.89	1.707
平均温度不均匀系数 $\bar{\delta}$	0.244	0.106	0.042

由表 2 可以看出，炉膛下部区域（ $Z=-0.215$ ，处于主燃区）、中部区域（ $Z=0.89$ ，处于燃尽区）和上部区域（ $Z=1.707$ ，处于燃尽区）壁面温度分布不均系数在不同工况下变化范围分别为 0.244、0.106 和 0.042。这说明炉膛下部主燃区壁面热负荷分布不均匀程度较大，随着高度增加壁面热负荷分布趋于均匀，在炉膛上部燃尽区壁面热负荷分布已经很均匀了。这是由于在燃烧状态下，高温烟气粘滞性很大，对气流的运动有很大的阻滞作用，只有在炉膛下部主燃烧区域气流旋转比较强烈，而随着炉膛内旋转气流的上升，由于气流粘性力和炉膛壁面阻力的作用，气流这种旋转运动则会很快衰减了，旋转气流的实际切圆直径逐渐增加，这使得旋转气流沿炉膛壁面宽度方向对炉膛壁面冲刷和辐射作用充分，因而炉膛上部壁面热负荷分布沿宽度方向变得相对均匀。

4 结 论

在空气分级燃烧时主燃区壁面温度分布相对于炉壁中心位置呈左右不对称分布，炉壁最高温度大致出现在旋转气流的上游，温度不均匀系数为 0.244；燃尽区下部壁面温度分布也呈不对称分布，最高温度出现在旋转气流的下游，温度不均匀系数为 0.106；燃尽区上部壁面温度分布均匀。

参考文献

- [1] Spliethoff, U Greul, H Rüdiger, et al. Basic effects on NO_x emissions in air staging and reburning at a bench-scale test facility. *Fuel*,1995,75(5):560-564.
- [2] B Coda, F Kluger, D Förtsch, et al. Coal-nitrogen release and NO_x evolution in air-staged combustion. *Energy & Fuels*,1998,12(6):1322-1327.
- [3] 陈学俊, 陈听宽. 锅炉原理. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [4] S Li, T M Xu, P Sun, et al. NO_x and SO_x emissions of a high sulfur self-retention coal during air-staged combustion. *Fuel*,2008,87(6):723-731.
- [5] 徐仁德, 张今朝. 由实测管壁温度确定炉膛壁面热负荷的方法. *动力工程*, 1986(3):46-51.
- [6] 谭厚章, 徐通模, 余战英, 等. 四墙切圆燃烧方式壁面热负荷分布试验研究. *工程热物理学报*, 2000, 21(4):525-528.

The experimental study on the temperature profiles of furnace wall during air staged-combustion

Sen Li ^{1,2}, Tongmo Xu ¹, Shien Hui ¹

1 State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering , Xi'an Jiaotong University , Xi'an 710049

2 Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,, Beijing, China, 100080, Tel: 010- 82544231

Abstract: The temperature profiles of furnace wall during in-furnace air staged combustion were investigated in a 1MW tangentially-fired pulverized coal furnace. The experimental results suggest that the temperature profiles of furnace wall in primary combustion zone are asymmetrical distributions, the maximum temperature occurs in the downstream of combusting flue flow, and the nonuniform coefficient of the temperature profile is 0.244; in the lower burnout zone, the temperature profiles are also asymmetrical distributions, the maximum temperature occurs in the upstream of combusting flue flow, and the nonuniform coefficient of the temperature is 0.106; in the upper burnout zone, the temperature profiles are uniform.

Keywords: Air staged combustion; Furnace temperature; OFA