

应用伽马射线对垂直上升管内环状流液膜及扰动波特性的研究

赵 于, 毕勤成, 吕海财, 胡日查

(西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室 陕西 西安 710049)

摘 要: 采用单束伽马射线与高速摄像相结合的方法, 利用无干扰动态测量技术对垂直上升管内环状流液膜及扰动波进行了系统性的研究, 研究表明, 在液相折算流速不变时, 随着气相折算流速的增高, 管壁液膜厚度逐渐减小。当扰动波在管中剧烈变化时, 射线计数率较低, 反映出液相成分较多, 结合环状流扰动波的特性, 还研究得出了在流体温度变化范围较小时, 温度的改变对计数率影响不大的结论。

关键词: 伽马射线; 环状流; 液膜; 扰动波; 垂直上升管

中图分类号: TK124 文献标识码: A

引 言

一般研究环状流液膜特性的实验方法主要有射线衰减法、荧光法、探针触点法等测量方法^[1-6]。在这些方法中探针触点法由于结构及测量原理简单、应用范围广、适用于一般测量环境, 所以目前是应用较多的研究方法。但受限于探针自身的传感精度和液相导电的程度, 测量滞后较大, 特别是它的探头或多或少都会影响到液膜测试点原有边界条件, 从而破坏了液膜的流动特性, 以至于不能准确反映出液膜真实的厚度。相比于射线法的动态无干扰测量技术, 探针法误差较大。

本研究基于单束伽马射线衰减理论设计了一套结合高速摄像的动态测量系统, 利用该系统对垂直上升管内环状流液膜及其扰动波特性的进行了一系列的基础研究, 建立了射线计数率与环状流管壁液膜变化关系曲线, 确定出了平均液膜厚度与液膜外层平均厚度的变化区间, 对不同气相、液相折算流速下液膜变化规律进行了对比分析, 利用高速摄影记录下了环状流扰动波产生的瞬间图像并结合采集数据做了机理性分析, 为使用动态测量技术研究气-液两相流提供一定的理论基础。

1 实验原理与实验系统

1.1 实验原理

伽马射线测量的原理是根据射线穿过物体时, 伽马光子与该物质发生电子对效应、康-吴效应以及光电效应, 射线强度被衰减。由于不同的物体自身结构不同, 所以伽马射线穿过不同物体时衰减的程度也不同, 衰减的能量被物体吸收。图1直观地反映了伽马射线测量气液两相流体的原理。

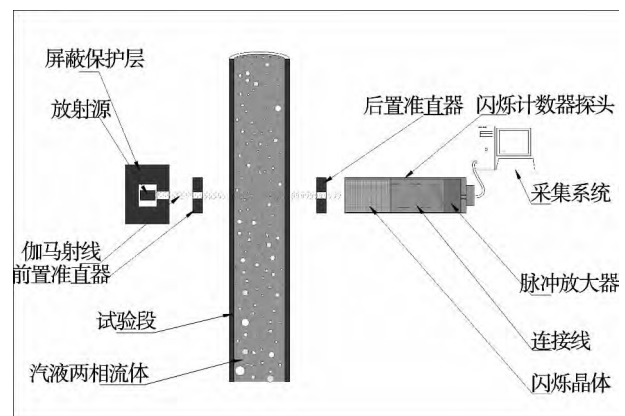


图1 伽马射线测量原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the measurement by using gamma ray

设放射源强度为 I_0 , 射线穿过吸收物质的距离为 x , 物质对射线的线性吸收系数为 μ , ρ —密度, I —射线强度, 根据 Beer-Lambert's 定律, 可得:

$$I = I_0 \exp(-\rho\mu x) = I_0 \exp(-kx) \quad (1)$$

对于气液两相流体, 式(1)转化为:

$$I = I_0 \exp [(-\rho_a \mu_a x_a) + (-\rho_w \mu_w x_w)] \quad (2)$$

则气液两相流体分别为:

收稿日期: 2013-05-23; 修订日期: 2013-06-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划) 基金资助项目(2009CB219805)

作者简介: 赵 于(1982-), 男, 陕西西安人, 西安交通大学博士研究生。

$$I_a = I_0 \exp(-\rho_w \mu_a x_a) \quad (3)$$

$$I_w = I \exp(-\rho_w \mu_w x_w) \quad (4)$$

$$I = I_a + I_w \quad (5)$$

1.2 实验系统

整个实验台的搭建在西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室完成。空气-水两相流实验台主要分为3个部分:气路、水路和高速摄像与伽马射线采集系统。

1.2.1 气路部分

空气压缩机产生的空气经过针形调节阀进入主路,气路旁路通过球阀控制主路空气流量。空气经过稳压罐后,压力稳定的空气依次通过空气过滤器和质量流量计,其中空气过滤器主要过滤从空压机流出空气中携带的机油,为了精确地测量空气的流量,本实验选用的是西门子公司 MASS 2100 DI15 科里奥利质量流量计和 MASS 6000 变送器,量程为 0~300 kg/h,测量误差小于 0.1%。

1.2.2 水路部分

水箱出来的水经过离心水泵加压后经过针形调节阀进入主路,旁路利用针形调节阀调节主路水流量以满足实验要求。在进入流量计前依次进行了测压和测温,水路流量计选用的是 E-mag DN15 电磁流量计,量程范围为 0~300 kg/min,测量误差为 0.2%。在空气-水两相流研究中,气-水混合器是一个很关键的连接部分。传统地研究空气-水两相流实验所用的混合器就是简单的 T 型混合器,由于空气密度相比水的密度要小很多,经过对比发现 T 型混合器虽然结构简单,但是空气-水两相流体混合的并不好,尤其是在空气流量较低时,混合结果较差。本实验在充分考虑空气和水自身密度的条件下,为了使空气和水得到最大程度的混合,设计图 3 所示的气-水混合器。垂直段有气-水两路引入,气路在下,水路在上,上部设计缩口起到稳定气-液两相混合流动的作用。在实际观测中,混合器内气-水两相混合程度较好,特别是气流速度较高的环状流,混合程度最好。实验段尺寸为 $\Phi 25 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 3 \text{ 500 mm}$,材料为有机玻璃。

1.2.3 伽马射线采集系统部分

实验选用的放射源为 Cs-137,能量为 662 KeV,放射源和实验段之间装置了前置准直器,目的调整伽马射线宽束和窄束之间的变化范围,尺寸为 $\Phi 5 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 。实验段后部射线探头内感光晶体选用的是 NaI(Tl) 晶体(一般情况下,NaI 晶体的相

比其它晶体如 CsI(Na)、CsI(Tl)、CsF 等探测效率最高,最高可达到 100%)。实验工况为气相压力 0~0.2 MPa,折算速度 3~13 m/s,液相折算速度 0~0.6 m/s。

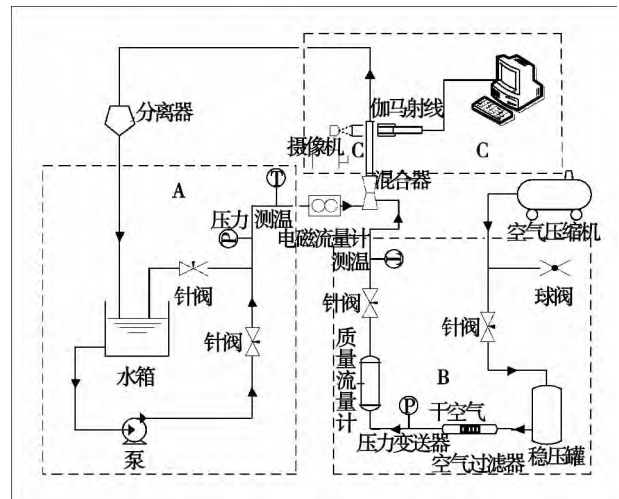


图 2 空气-水两相流实验系统

Fig. 2 Air-water two-phase flow test system

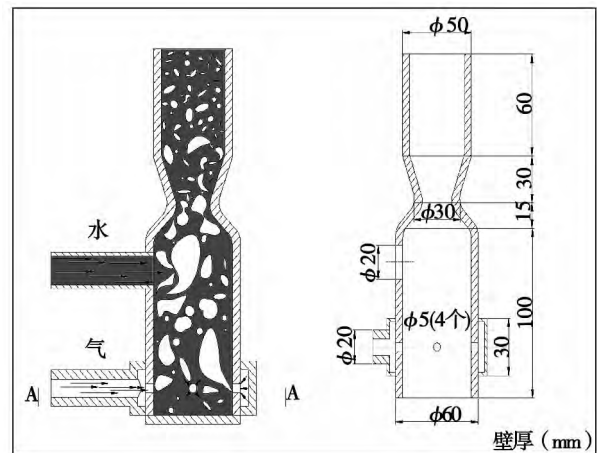


图 3 气-水混合器示意图与设计图

Fig. 3 Schematic and design diagram of an air-water mixer

2 实验结果及分析

2.1 扰动波

在垂直上升管内的环状流存在着两类界面波,一类是皱波,另一类是扰动波。这些界面波的存在使得气体在管内流动比单向流动会产生较大的摩擦压力降,特别是气相流速较高时,产生的压力降会是

单向流动时的几倍。

皱波是界面上细小的表面张力波,他们通常出现在垂直环状流中。在低于某一临界流量时,这些波是界面上仅有的波且过于细小,对于管内气体形成的液滴夹带影响较小,主要作用是在管壁流动的液膜上形成一些摩擦因子,促使气体的压降增大。

扰动波强烈的扰动着气-液两相的分界面,在管道中形成一个完整的圆环,而且在管道长距离内连续存在着。波峰上的液珠被高速的气体带走便形成液体夹带这一现象。

气-液两相流体在垂直上升管中流动时,首先将液相流量保持在一定数值,引入气相并逐渐增加气相流量以达到管内出现环状流的条件。此时管内流动状态比较稳定,进一步增加气相流速,管内流动出现不稳定状态,管壁液膜由于高流速气相作用而出现扰动波。图 4 反映的是管内出现扰动波的变化过程,图 4(a) 表示较稳定的流动状态,图 4(b) 表示管壁液膜受到气相扰动出现扰动波, A 点表示受到扰动而使管壁液膜断裂, B 点表示未受到扰动的一般性液膜。图 5 为出现扰动波后管内流动示意图,沿着流动方向从外到内一般考虑的研究参数有扰动波、液膜外层平均厚度、随机界面波、平均液膜厚度及液膜底层等。

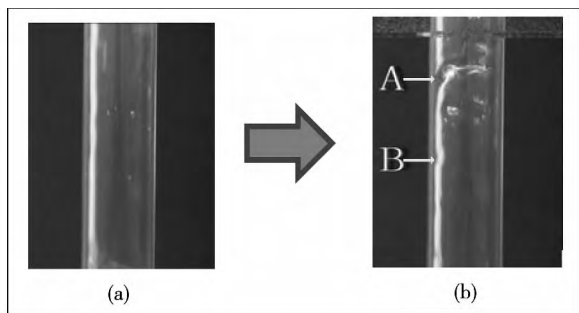


图 4 环状流扰动波拍摄图

Fig. 4 Photo of a disturbance wave in an annular flow

图 6 为射线计数率与液膜流动的变化关系。在气相折算速度 $U_{SC} = 9.1 \text{ m/s}$ 、液相折算速度 $U_{SL} = 0.6 \text{ m/s}$ 条件下,垂直上升管内出现含有扰动波的典型环状流流型,通过之前的标定试验确定了气相和液相的射线计数率范围,发生环状流的射线计数率最低区域一般为 3 740 ~ 3 750。结合并对比此条件下高速摄影可视化图和射线计数率数据,当单束伽马射线测量的是未受到扰动的一般液膜时,射线计数率范围在 3 752 ~ 3 767 之间,平均液膜厚度对

应的计数率数据标定为 3 760。单束伽马射线测量到含有扰动波的管壁液膜时,由于液膜厚度增加,根据射线测量原理可知,射线衰减将会相应增加,计数率降低,据试验可以得出此时计数率数值会降低到 3 742,之后进入下一个测量周期。利用射线法可以比较精确的确定出管内流动状态,计数率数值可以精确的反引出管内平均液膜厚度、液膜外层平均厚度与扰动波产生的情况。

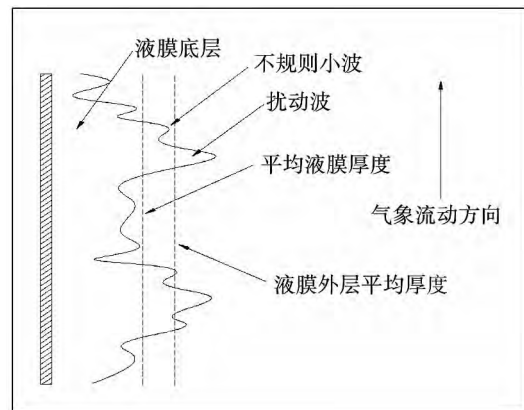


图 5 气-液两相流动界面波示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the interface of a gas-liquid two-phase flow

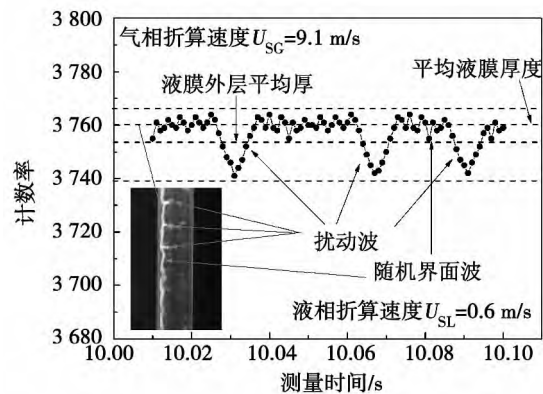


图 6 管壁液膜与射线计数率变化关系图

Fig. 6 Chart showing the variation relationship of the tube wall liquid film with the count rate of ray

2.2 液膜厚度测量

利用射线法测量液膜只能大体反映出液膜随射线变化的规律,此次实验利用伽马射线衰减规律多次标定确定出液膜外层厚度和扰动波波峰在管壁中的尺寸。管壁液膜厚度随气-液两相折算速度变化的规律如图 7 所示,保持液相折算速度不变,随着气

相折算速度的增加,管壁液膜厚度逐渐减小;而在固定气相折算速度不变时,随着液相折算速度的增加,管壁液膜厚度也逐渐增大,并且在气相流速较高条件下,液膜变化的范围在逐渐减小, $U_{SG} = 11.7 \text{ m/s}$ 、 $U_{SG} = 12.8 \text{ m/s}$ 条件下,液膜变化几乎一致。所以,垂直上升管内管壁液膜随液相流速正向变化,随气相流速逆向变化。

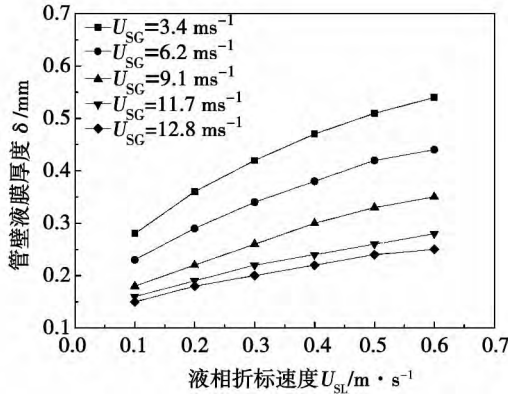


图 7 管壁液膜随气-液两相表观流速变化关系
Fig. 7 Variation relationship of the tube wall liquid film with superficial velocity of a gas-liquid two phase flow

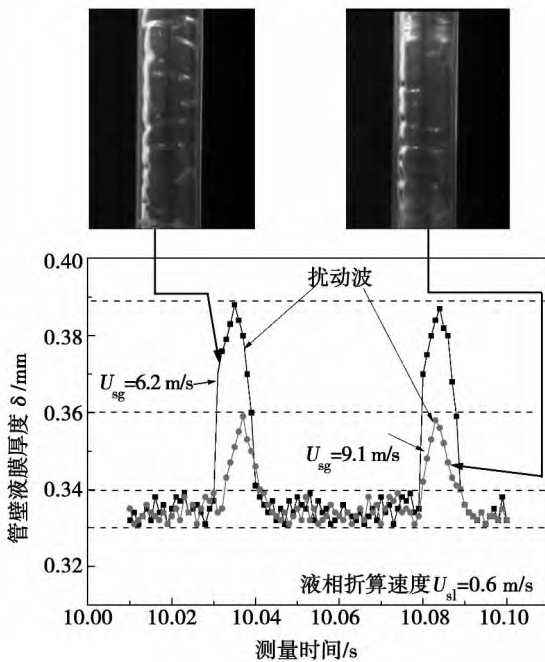


图 8 不同气相流速下液膜厚度变化规律
Fig. 8 Variation law governing the liquid film thickness with various gas-phase flow velocities

图 8 为液相表观流速 $U_{SL} = 0.6 \text{ m/s}$ 时,两个特定气相折算速度 $U_{SG} = 6.2 \text{ m/s}$ 、 $U_{SG} = 9.1 \text{ m/s}$ 对应的液膜厚度变化对比图。如图 8 所示,在平均液膜厚度区域内,两气相流速下液膜厚度都在该区域内, $U_{SG} = 6.2 \text{ m/s}$ 对应的液膜厚度略高于 $U_{SG} = 9.1 \text{ m/s}$ 对应的液膜厚度。观察高气相流速对应的可视化图可以发现此时液膜明显比高流速下对应的液膜稀薄,扰动波波峰也较低,实验现象与理论基本一致。

2.3 流体温度与质量流速对测量的影响

实验过程中,依据预设工况要求实验管段内流体流量会改变,同时因为水泵的散热作用流体温度也会产生微小变化。若要确定实验是否可以对液膜厚度进行有效地测量,需要对这两个变化量进行研究。图 9 和图 10 为当其它条件不变时,水的温度和质量流速对于计数率的影响。

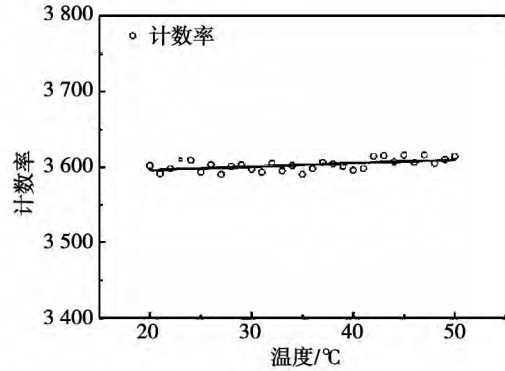


图 9 计数率随流体温度的变化
Fig. 9 Changes of the fluid temperature with the count rate

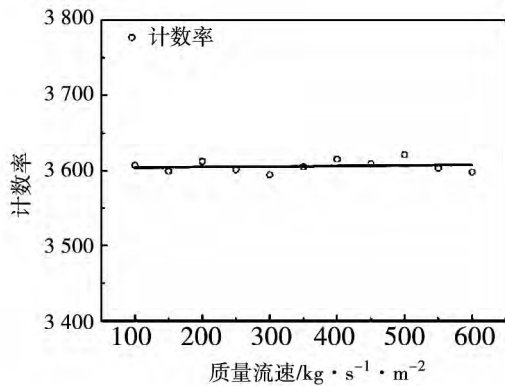


图 10 计数率随流体质量流速的变化
Fig. 10 Changes of the fluid mass flow velocities with the count rate

图 9 说明了计数率随常压下水的温度增加的变化趋势。实验中流体温度在 25 ~ 28 °C 范围内变化,所以可以忽略流体温度对计数率的影响。水的质量流速增加时,计数率数值几乎没有变化,如图 10 所示,说明水的质量流速对于伽马射线的衰减几乎没有影响。

3 结 论

(1) 与目前应用的探针法等测量气-液两相流体相关参数的方法相比,射线法减少了测量时对两相流体流场的干扰,特别是对边界层的干扰。提高了测量精度,真实的反应出垂直上升管内气-液两相流体环状流变化情况。

(2) 扰动波现象是环状流中一个极其重要的现象,国内外研究较多,但目前主要集中在理论分析和一般性测量方法中,本研究利用射线法与高速相对比的方法研究出当液相固定不变时,随着气相折算流速的增加,管壁液膜厚度降低,而射线计数率会随着增加,摄像图也证明了这一试验结论。

(3) 研究了流体温度在较小变化范围内对射线计数率的影响,结果表明,在较小的流体温度变化内,温度的变化对射线计数率的影响不大。

参考文献:

[1] 巴特沃斯. 两相流与传热[M]. 陈学俊译. 北京: 原子能出版

社, 1985.

DButterworth. Two-phase flow and heat transfer [M]. Translated by CHEN Xue-jun. Beijing: Atomic Energy Press, 1985.

[2] 李海清. 两相流参数检测及应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1991.

LI Hai-qing. Two-phase flow parameter inspection & measurement and application [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1991.

[3] Belt R J, Van't J M C Westende. Time and spatially resolved measurements of interfacial waves in vertical annular flow [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36, 570 - 587.

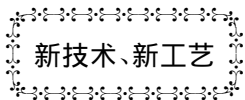
[4] Pravin Sawant, Mamoru Ishii, Tatsuya Hazuku, et al. Properties of disturbance waves in vertical annular two-phase flow [J]. Nuclear Engineering and Design, 2008(12), 3528 - 3541.

[5] Schubring D, Ashwood A C, Shedd T A, et al. Planar laser-induced fluorescence (PLIF) measurements of liquid film thickness in annular flow. Part I: Methods and data [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36(10), 815 - 824.

[6] Schubring D, Shedd T A, Hurlburt E T. Planarlaser-induced fluorescence(PLIF) measurements of liquid film thickness in annular flow. Part II: Analysis and comparison to models [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2010, 36, 825 - 835.

[7] Paras S V, Karabelas A J. Properties of the liquid layer in horizontal annular flow [J]. International Journal of Multiphase flow, 1991, 17, 439 - 454.

(丛 敏 编辑)



热水锅炉水冷壁管破坏的原因

《Электрические станции》2012 年 3 月刊给出了热水锅炉水冷壁管破坏的主要原因。表明了管网水的质量、结构因素、炉膛状态及不充分检查在这些破坏中所起的作用。作为水冷壁管内表面和外表面一侧的横向裂纹,列出了疲劳和疲劳-腐蚀损伤的特点。分析了经受多循环加载受损伤金属标准和专门的检验结果。给出了防止热水锅炉水冷壁管损伤的最重要建议。

(吉桂明 摘译)

伽马射线对垂直上升管内环状流液膜及扰动波特性研究 = **Study of the Characteristics of an Annular Flow Liquid Film and Disturbance Waves in a Vertical Riser by Using Gamma Rays** [刊, 汉] ZHAO Yu, BI Qin-cheng, LU Hai-chai, HU Ri-cha (National Key Laboratory on Multi-phase Flows in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(1). - 53 ~ 57

By using a single beam gamma ray in combination with the high speed video camera shooting, the non-interference dynamic measurement technology was used to conduct a systematic study of an annular flow liquid film and disturbance waves in a vertical riser. The research results show that when the superficial velocity of the liquid phase is kept constant, the liquid film thickness on the tube wall will gradually decrease with a rise of the superficial flow velocity of the gas-phase. When the disturbance waves change drastically inside the riser, the count rate of the ray will be relatively low, reflecting that the liquid phase component is relatively big. In combination with the disturbance wave characteristics of the annular flow, the authors have also studied and concluded that when the range of the temperature of the fluid is relatively small, any change of the temperature has little influence on the count rate. **Key words:** gamma ray, annular flow, liquid film, disturbance wave, vertical riser

660 MW 超超临界对冲燃煤锅炉降低 CO 排放的试验研究 = **Experimental Study of a 660 MW Ultra-supercritical Opposed Combustion Coal-fired Boiler for Reducing CO Emissions** [刊, 汉] XIA Wen-jing (Zhongye Huatian Engineering Technology Co. Ltd., Nanjing, China, Post Code: 210019), HENG Li-jun (School of Energy Source and Building Environment Engineering, Henan Urban Construction College, Pingdingshan, China, Post Code: 467036), HE Chang-zheng, WEI Hong-qi (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(1). - 58 ~ 64

The burners of ultra-supercritical or supercritical opposed combustion coal-fired boilers mostly adopt advanced swirling burners with low NO_x emissions and in-furnace air staged combustion technology. The combustion in the main combustion zone of the burners is conducted under the condition of insufficient oxygen and rich fuel in a hope to contain the emissions of NO_x . However, this will lead to an excessively high CO emissions concentration of the boilers and any deviation possibly existing in the combustion in the furnace will make such a phenomenon become more outstanding. With a 660 MW ultra-supercritical opposed combustion coal-fired boiler serving as the object of study, the correlation among CO emissions, CO_x emissions and efficiency was analyzed on the basis of a combustion adjustment test. The research results show that negative correlation characteristics do exist among them. On this basis, an ideal balance point was found out between the cost-effectiveness and safety of the boiler during its operation, making the boiler maintain its efficiency higher than 93.7% and the CO and NO_x emissions attain around 500 and 250 mg/