

## 大容量锅炉锅筒两侧水位测量偏差问题的研究

刘福国<sup>1</sup>, 牟春华<sup>2</sup>, 谭哲令<sup>3</sup>

(1. 山东电力研究院 热能所, 山东 济南 250002; 2. 日照发电厂, 山东 日照 276826;

3. 山东电建三公司, 山东 日照 276826)

**摘要:** 大容量锅炉锅筒两侧普遍存在着水位测量偏差, 影响着机组的安全运行, 作者分析了水位偏差产生的根源, 介绍了使用均压管降低测量偏差的经验和效果, 给出了在设计 and 运行上防治水位测量偏差的措施。

**关键词:** 锅炉; 锅筒水位; 液位测量; 校正计算

中图分类号: TK223.1<sup>+</sup>3 文献标识码: A

## 1 问题的提出

蒸发量在 1 000 t/h 以上的电站锅炉, 锅筒长度达 20 m ~ 40 m; 设计工作压力在 18 MPa 以上, 锅筒内部布置了不同类型、数目繁多的汽水分离装置; 两侧通常配有双色水位计和差压式水位计, 前者用于表盘监视, 后者用于保护和调节系统。随着锅炉容量的增加: (1) 锅筒长度和容积增大; (2) 炉内热负荷分布不均的程度增加, 烟气参数场偏置趋于恶化, 从而导致锅筒内部的汽水状态的分布也越来越不均匀, 这给水位的测量带来了新的课题。

近年来投产的 300 MW 及以上的大容量机组, 锅筒两侧都不同程度地存在着水位测量偏差的问题。偏差严重者, 锅筒一侧的水位计指示在正常水位时, 另一侧已高于或低于跳闸值, 导致锅炉水位保护动作而跳闸, 现举两例如下:

(1) 十里泉电厂 300 MW 机组 6 号锅炉, 1997 年 12 月 18 日 0 时 20 分, 机组满负荷运行, 锅筒两侧的差压式水位计分别指示为 -220 mm 和 +75 mm, 在增加给水的过程中, 一侧水位达到 -65 mm 时, 另一侧已超过 +300 mm, 锅筒水位高保护动作, 锅炉 MFT。

(2) 日照电厂 350 MW 机组 1 号锅炉, 1999 年 8 月 19 日 14 时 14 分, 机组 325 MW 负荷运行, 锅筒南

侧三个差压式水位计指示为 -5 mm 左右, 北侧两个差压式水位计指示达到 200 mm 以上, 见表 2, 锅筒水位高于 +203 mm, 保护动作, 锅炉 MFT。

## 2 锅筒两侧水位偏差的成因分析

## 2.1 差压式水位计的测量原理

差压式水位计的测量的基本原理见图 1, 不考虑动态特性时, 根据静力学原理, 并引入锅筒内水中的截面含汽率  $\varphi$ , 可以写出:

$$P_+ = L\rho_a g \quad (1)$$

$$P_- = \rho'_s(1-\varphi)gH + \rho''gH + \rho''g(L-H) \quad (2)$$

$$\Delta P = P_+ - P_- \quad (3)$$

$$h = H - H_0 \quad (4)$$

由式(1) ~ 式(4) 可得锅筒水位读数和差压转换的基本公式:

$$h = \frac{L(\rho_a - \rho'')g - \Delta P}{(1-\varphi)(\rho'_s - \rho'')g} - H_0 \quad (5)$$

式中

$h$  — 锅筒水位读数, m

$L$  — 平衡容器的水位高度, m

$\rho_a$  — 平衡容器水的密度, kg/m<sup>3</sup>

$\rho'_s, \rho''$  — 锅筒中水和饱和蒸汽的密度, kg/m<sup>3</sup>

$\Delta P$  — 测量压差, Pa

$\varphi$  — 锅筒水内的截面含汽率, %

$H_0$  — 锅筒水侧接点距锅筒零位的垂直距离, m

文献 [3] 给出了截面含汽率的计算方法:

$$\varphi = 25.30 \left( \frac{D}{F} \right)^{0.8} (\Delta\rho)^{-0.72} (\rho'')^{-0.68} \quad (6)$$

收稿日期: 2000-04-13; 修订日期: 2000-10-18

作者简介: 刘福国(1969-), 男, 江苏邳州人, 山东电力研究院工程师。

[7] VALENZUELA J, GLICKSMAN L. Particle to particle heat transfer in fluidized bed drying [J]. *Powder Technology*, 1984, 38: 63-72.

[8] 杨海瑞. 循环流化床锅炉密相区内颗粒的横向扩散研究 [D]. 北京: 清华大学热能工程系, 2000.

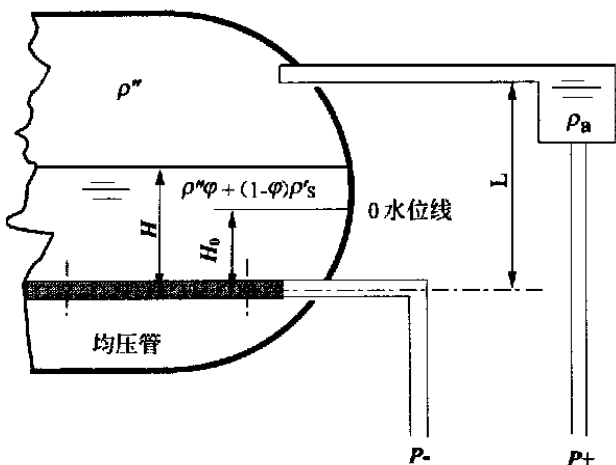


图 1 差压式水位计的测量原理

式中:

$\Delta\rho = \rho' - \rho''$  为饱和水和饱和汽的密度差,  $\text{kg/m}^3$

$D$ — 蒸汽负荷,  $\text{t/h}$

$F$ — 蒸发面积,  $\text{m}^2$

$\frac{D}{F}$ — 锅炉内单位面积上的产汽量,  $\text{t}/(\text{m}^2\text{h})$

## 2.2 水中含汽对锅筒水位测量的影响

### 2.2.1 目前的测量系统—无截面含汽率修正时的水位测量

目前的水位测量系统, 假定锅筒内水和汽的分界明显, 均为饱和状态, 则  $\rho'_s = \rho'$ , 且不考虑锅筒内水的含汽率, 即认为  $\varphi = 0$ , 代入式(5), 得到这种测量系统水位读数和差压转换的公式:

$$h' = \frac{L(\rho_a - \rho'')g - \Delta P}{(\rho' - \rho'')g} - H_0 \quad (7)$$

式中

$h'$ — 不考虑锅筒内水的含汽率时的测量水位,  $\text{m}$

$\rho'$ — 为饱和水密度,  $\text{kg/m}^3$

结合式(5)、式(7)可得到, 在锅筒内同一汽水工况下, 无截面含汽率修正时的水位  $h'$  和有截面含汽率修正时的水位  $h$  的关系如下:

$$h = \frac{h' + \varphi H_0}{1 - \varphi} \quad (8)$$

### 2.2.2 锅筒内的实际汽水状态

锅筒在很高的工作压力下, 实际情况是水中带汽、汽中带水, 汽水界面模糊, 因此, 采用截面含汽率修正的水位更为符合实际情况, 下文称之为“真实水

位”。

由于锅筒容积巨大, 炉膛内热负荷分布不均, 锅筒内不同区域水温不同, 一些区域的水处于欠饱和状态, 另一些区域则可能处于饱和状态, 且有蒸汽逸出(分离器分离下来的水中含汽), 产汽量也不可能均匀, 即截面含汽率  $\varphi$  在锅筒内的不同位置也是不同的。

### 2.2.3 含汽率对锅筒水位测量的影响

当锅筒的“真实水位”(采用截面含汽率修正的水位)为0时, 即  $h = 0$ , 代入式(8), 得到目前的测量系统(不采用截面含汽率修正)显示的水位  $h'$  为:

$$h' = -\varphi H_0 \quad (9)$$

由式(9)可看出, 目前的测量系统测得的水位和锅筒的“真实水位”有一定的偏离, 偏离的大小决定于水位测量系统的结构参数  $H_0$  和锅筒内的截面含汽率  $\varphi$ 。

式(6)代入式(9)而得到:

$$h' = -25.3 \left[ \frac{D}{F} \right]^{0.8} (\rho' - \rho'')^{-0.72} \rho''^{-0.68} H_0 \quad (10)$$

锅筒的“真实水位”为零时, 对于电厂中普遍采用的测量系统, 其水位显示值与锅筒内单位面积上的产汽率的关系由式(10)给出。

## 2.3 锅筒内水温分布对锅筒水位测量的影响

锅筒的水温处于欠饱和状态时, 测量系统把欠饱和的水当作饱和水处理时, 测得的水位为  $h''$ ; 按欠饱和水计算得到的水位为  $h$ , 则  $h''$  和  $h$  有如下关系:

$$\frac{h'' + H_0}{h + H_0} = \frac{\rho'_s - \rho''}{\rho' - \rho''} \quad (11)$$

当  $h = 0$  时, 式(11)变成:

$$h'' = \frac{\rho'_s - \rho''}{\rho' - \rho''} H_0 \quad (12)$$

## 2.4 偏差的迭加

对于目前没有引入含汽率和锅筒水温的测量系统, 由于水侧取压管伸入锅筒内的位置不同, 锅筒两侧的水位测量偏差由含汽率和锅筒水温造成的偏差迭加形成。

## 2.5 实例分析

以一台 Foster Wheeler 生产的 FWESA—1189.2/17.14 型锅炉为例, 其锅筒两侧水位偏差有以下特点:

(1) 锅筒两侧显示的水位偏差随机组负荷的增加而增大;

机组负荷	两侧的水位偏差
350 MW	200 ~ 250 mm
310 MW	130 ~ 160 mm
290 MW	95 ~ 110 mm

(2) 机组从满负荷跳闸后, 锅筒两侧的水位偏差立即消失。

该锅炉在 350 MW 满负荷运行状态下, 计算表明, 锅筒内的水处于微欠焓状态。由于锅筒容积巨大, 炉膛内热负荷分布不均, 很容易导致锅筒内水温和水中含汽量的不均匀。

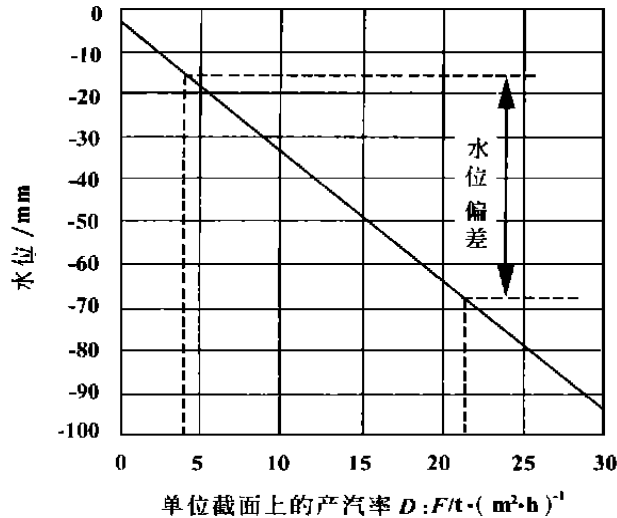


图 2 锅筒水位与单位面积产汽率的关系

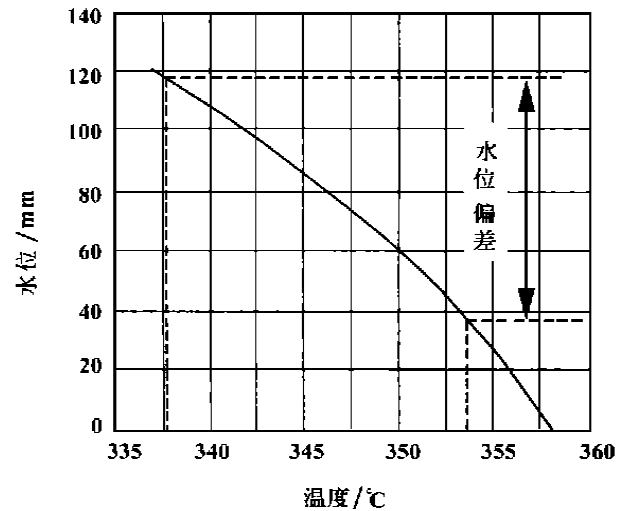


图 3 锅筒水位与锅筒内水温度的关系

锅筒及测量系统的设计参数如下:  $L = 1\ 120\ \text{mm}$ ,  $\rho_a = 1\ 006.36\ \text{kg/m}^3$  (水温取  $20\ ^\circ\text{C}$ ),  $\rho'' = 134.26\ \text{kg/m}^3$ ,  $H_0 = 483\ \text{mm}$ ,  $F = 31.86\ \text{m}^2$ , 将上述

参数代入式(10)、式(12)得到: 机组满负荷运行, “真实水位”为零水位时, 该锅炉的测量系统显示的水位值与单位面积上的产汽率、锅筒内水温度的曲线关系如图 2、图 3。

从图 2、图 3 可以看出:

(1) 若锅筒两侧单位面积的产汽率分别为  $4\ \text{t}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$  和  $22\ \text{t}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ , 两侧的测量系统显示的水位值相差近  $50\ \text{mm}$ 。若锅筒两侧水温度分别为  $338\ ^\circ\text{C}$  和  $353\ ^\circ\text{C}$ , 两侧的测量系统显示的水位值相差  $70\ \text{mm}$ 。锅筒两侧水位计的水侧取压管在锅筒内位置不同, 其附近局部区域产汽率和锅筒水温度存在着差异, 由此会引起了锅筒两侧的水位偏差。

(2) 随着锅炉负荷的增加, 锅筒内产汽率的不均匀程度和局部区域水温度的差别会增大, 两侧的水位偏差也将随之增大。

(3) 锅炉从满负荷跳闸后, 锅筒内产汽量骤降, 局部区域产汽率的差异也会减少, 锅筒水温度也趋于平衡, 两侧的水位偏差消失。

上述特征都和现场的观察一致。

### 3 锅筒水位测量管路的改进

由上面的分析可以看出, 水位计的水侧取压管伸入锅筒内的位置不同, 其附近局部区域产汽率和锅筒水温存在着差异, 由此会引起了锅筒两侧的指示水位偏差。使用均压管能够有效减少锅筒两侧的水位偏差: 将伸入锅筒内的水侧取压管加长, 使之跨越整个锅筒长度, 取压管上分布十个小孔, 用于均衡锅筒长度方向上液体的静压力, 从而减轻锅筒两侧的水位偏差, 这种取压管称为均压管, 见图 1。

#### 3.1 设计均压管时注意事项

(1) 均压管的数量等于锅筒水位计的水侧接点数目。

(2) 按照表 1 选用均压管和均压孔的尺寸。

(3) 均压管的长度从一侧水位计的水侧接点开始, 一直延伸到锅筒另一侧封头的中心以内  $25.4\ \text{mm}$ 。

表 1 均压管和均压孔的设计

长度	均压管尺寸	均压孔个数	均压孔尺寸
15—42 m	ID38×10 mm	10 mm	8 mm

(4) 均压管上布置十个均压孔, 两侧位于锅筒封头中心的位置各设一个均压孔, 另外的 8 个均压孔,

如果可能,沿均压管均匀分布,或者在下降管之间的距离上均匀分布,设计时遵守以下原则:

(A) 尽可能让 10 个均压孔沿均压管均匀分布;

(B) 如果某些均压孔正好位于下降管附近,应对其作调整,让部分均压孔在下降管之间均匀分布;

9 个均压孔的开孔方向应位于均压管底部,另一个均压孔布置在均压管的顶部,作为排汽孔。

(5) 均压管在锅筒内的标高应低于水位计在锅筒上的水侧接点的标高。

### 3.2 均压管对水位偏差的改进效果

以上述算例中的锅炉为例,安装均压管前后,锅筒两侧水位偏差的情况见表 2。

表 2 安装均压管前后,水位偏差的对比

时间/偏差	负荷 /MW	水位值/mm						最大偏差 /mm		
		(1/2/3/4/5/6/7)								
安装	99 年 8 月 14 日	345	-8/-9/18/-3/-3/174/226							235
均压	99 年 8 月 19 日	323	-7/-3/20/2/-7/185/246							253
管前	99 年 8 月 27 日	350	-76/-79/103/-80/-87/98/110							212
	99 年 9 月 8 日	345	-37/-35/118/-35/-42/120/129							171
安装	99 年 9 月 10 日	349	-72/-75/25/-75/-85/19/32							117
	99 年 9 月 10 日	350	-72/-68/52/-71/-73/50/60							133
均压	99 年 11 月 20 日	352	-62/-69/31/-64/-77/38/50							137
	99 年 11 月 27 日	348	-74/-76/14/-74/-80/9/22							102
管后	99 年 12 月 25 日	350	-59/-77/45/-65/-56/11/19							96

注: 1, 2, 5 是锅筒南侧测点, 3, 6, 7 是北侧测点, 1, 2, 3 是调节用水位, 4 是调节用水位三取二运算结果, 5, 6, 7 是保护用水位。

从表 2 可看出, 安装均压管后, 锅筒两侧水位偏差明显降低。

## 4 引起水位偏差的其它原因

### 4.1 平衡容器的冷凝条件

水位计的平衡容器在设计上是不保温的, 应保证有良好的冷凝条件, 锅筒两侧平衡容器的冷凝条件不同, 会引起两侧的水位偏差。对上例中的水位计, 计算表明, 满负荷运行时, 如果一侧的冷凝器中水温为 20℃, 另一侧水温为 30℃, 由于冷凝条件的不同引起两侧水位计的指示偏差达到 73 mm。

### 4.2 给水分配管

给水分配管使给水按预订部位分配, 并与锅水

均匀混合, 以组织合理的锅内水工况。锅筒单侧进水的锅炉, 如果给水分配装置设计不合理, 会引起锅筒内局部区域产汽率和锅水温度存在着较大的差异, 从而引起两侧水位计的指示偏差。

### 4.3 炉内燃烧状况

从表 2 可以看出, 安装均压管后, 锅炉在不同的运行工况下, 锅筒两侧的水位计的指示偏差在 96 mm ~ 171 mm 之间变化, 可见运行方式对水位偏差的影响。炉内热负荷分布不均造成炉膛内受热面的吸热偏差导致锅筒内局部区域产汽率和锅水温度的不同, 从而引起两侧水位计的指示偏差。运行中, 在对磨煤机分离器挡板调整后, 煤粉变细, 着火距离变短, 火焰偏向后墙的情况有明显改善, 两侧水位计的指示偏差比挡板调整前明显减小, 见表 2 中 9 月 8 日和 9 月 10 日的对比。

### 4.4 水位计结构

从式(9)可以看出, 减小水位计的结构参数  $H_0$ , 不仅可以提高水位计的测量精度, 而且在相同的截面含汽率偏差下, 两侧水位计的指示偏差也会成正比例下降。

减小水位计的结构参数  $L$ , 可以降低因平衡容器的冷凝条件不同而引起的水位计的指示偏差。

### 4.5 运行操作

在锅筒水位控制范围内, 维持较低的水位, 有利于减少两侧水位计的指示偏差。

锅炉高负荷运行, 紧急补水时, 两侧水位计的指示偏差会增大; 如果高压加热器未投入, 锅筒进水的过冷度较大, 情况会更加严重。

### 参考文献:

[1] 刘福国. 日照电厂 350 MW 机组锅炉专业调试报告[R]. 山东电力研究院, 1999.  
 [2] 刘福国. 日照电厂 350 MW 机组锅炉性能考核试验报告[R]. 山东电力研究院, 2000.  
 [3] 杨平. 用单室平衡容器测量锅炉汽包水位的校正计算和误差分析[J]. 热力发电, 1997(2): 7-11.

(何静芳 编辑)

# 工 程 应 用 文 章 优 先 刊 登

which has the following dimensions: length 900 mm, width 100 mm and height 5200 mm. The particle transverse dispersion in the above-cited zone can be described with the help of a one-dimensional dispersion model. The model calculation results are in very good agreement with experimental data. Through the experimental data fitting one can obtain the particle transverse dispersion factor  $D_{sr}$ . The tests show that with the increase in fluidizing air speed and stationary bed height there will be an increase in the transverse dispersion factor. The transverse dispersion factor will decrease with the increase in particle diameter. Finally, an empiric formula was given for the transverse dispersion factor with the fluidizing air speed, stationary bed height and particle diameter serving as influencing factors. **Key words:** circulating fluidized bed, transverse dispersion factor, hot tracer particle

**大容量锅炉锅筒两侧水位测量偏差问题的研究 = An Investigation of the Deviation in Water Level Indication at the Two Ends of the Boiler Drum of a Large-sized Boiler** [刊, 汉] / LIU Fu-guo (Thermal Energy Institute under the Shandong Provincial Electric Power Research Academy, Jinan, China, Post Code: 250002), MOU Chun-hua (Shandong Rizhao Power Plant, Rizhao, Shandong Province, China, Post Code: 276826), TAN Zhe-ling (Shandong No. 3 Electric Power Construction Co., Rizhao, Shandong Province, China, Post Code: 276826) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 399 ~ 402

A recurrent problem in recent years is the measurement discrepancy in water level indication at the two ends of the drum of a large-sized boiler. This can affect the safe operation of a power plant. After an analysis of the root cause of this deviation the authors present their successful experience in employing uniform-pressure tubes for coping with the issue and recommend some effective measures both in design and operation aimed at reducing the discrepancy of water level measurement. **Key words:** boiler, boiler drum water level, liquid level measurement, correction of calculation

**适用于无烟煤燃烧的新型涡流拱特性的研究 = A Study of the Features of a Novel Vortex Arch Suited for the Combustion of Anthracite Coal** [刊, 汉] / ZHUANG Zheng-ning, ZHU Chang-xin, TANG Gui-hua (Energy Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 403 ~ 405, 430

Presented is a kind of new technology incorporating a vortex arch suited for the burning of anthracite coal in a traveling-grate boiler. Through modeling tests an experimental investigation was conducted of the features of the vortex arch along with an analysis of its working mechanism. As a result, identified are the key conditions to be met for achieving the optimum structural dimensions of a vortex arch. The results of study indicate that the vortex arch can effectively increase the suction and transport quantity of gas flow from a rear arch to a front one, contributing to an increase in the front arch temperature. During its practical use for the first time it has been found that the vortex arch is conducive to the timely ignition of a furnace firing flaxseed coal of category III accompanied by an intensified combustion. **Key words:** stoker boiler, anthracite coal, vortex arch, intensified combustion

**中小煤粉炉运行优化新方法研究 = An Investigation of New Methods for Attaining an Optimized Operation of Small and Medium-sized Pulverized Coal-fired Boilers** [刊, 汉] / WANG Xin-xin, XU Xiang-dong (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 406 ~ 408, 382

On the air feed control loop of a computer-based control system for present-day small and medium-sized pulverized coal-fired boilers there usually lack suitable economic indexes to evaluate the boiler operating efficiency. In this regard some new methods are proposed to optimize the control of the above-cited boilers. Based on the counterbalance calculating method of boiler thermal efficiency and the energy balance of boiler furnace the authors have come up with a set of discriminating criteria through a detailed deductive process. The above-mentioned criteria can be employed to evaluate the boiler thermal efficiency and reflect the variation trend of the latter in case of a change in air feed rate. All the above has been accomplished by taking into account the practical operating data of boilers and neglecting some secondary unimportant factors. With the above discriminating criteria serving as a basis a continuous optimization was conducted with respect to the target of the air feed control loop, i. e. the oxygen content in flue gas, thereby achieving the aim of an optimized combustion process through the proper adjustment of air-coal ratio. **Key words:** pulverized coal-fired boiler, optimized operation, discriminating criteria for evaluation of thermal efficiency