

# 改进型 UP 锅炉水冷壁管热敏感性的研究

田 圃\* 陈昕宽 毕勤成

(西安交通大学)

[摘要] 针对国产改进型 UP 锅炉水冷壁经常爆漏的实际情况,分析了在 UP 锅炉中广泛使用的 H22× 5.5 mm 四头内螺纹管的热敏感性。从多种角度计算了影响热敏感性强弱的因素,包括干度、热负荷、管段高度、进出口局部阻力等,讨论了热敏感性对锅炉运行的影响,对锅炉的设计和运行提出某些建议。

关键词 UP 锅炉 水冷壁 内螺纹管 热敏感性

中图法分类号 TK 223. 31

## 1 内螺纹管的热敏感性

水冷壁热敏感性系指炉内火焰中心偏斜或炉内过程出现波动时,使水冷壁各级出口焓值和温度偏离设计值的敏感程度<sup>[1]</sup>。

热敏感性问题是在近几年来国内外研究的新问题之一,本文主要对流量敏感性系数进行了计算:

流量敏感性系数

$$K_{MQ} = \frac{Q}{M} \frac{\partial M}{\partial Q} \Big|_{\Delta P} \quad \text{压降 } \Delta P \text{ 不变} \quad (1)$$

考虑管段高度为  $\Delta L$  的垂直上升并联管组,平均管吸收的是大小为  $q$  的热负荷,中点焓值为  $i$ ,质量流速为  $G$  这里的热负荷是指单位时间单位膜式壁投射面积上所吸收的热量,所以长度为  $\Delta L$  的单管的吸热量为:

$$Q = q \cdot s \cdot \Delta L \quad (2)$$

式中  $s$  是膜式壁的节距(对 UP 炉来说,  $s = 35 \text{ mm}$ ) 偏差管吸收的是大小为  $q + dq$  的热负荷,相应的中点焓值为  $i + di$ ,质量流速为  $G + dG$  在后面的计算中,均以中点处的物性参数所得的摩擦阻力系数作为整个管长的摩擦阻力系数,而摩擦阻力系数是随压力和干度变化的,定义摩擦阻力公式为:

$$\Delta P_m = ZG^2 \quad (3)$$

$Z$  为管子阻力系数,于是平均管和偏差管的管屏压降为:

$$\Delta P = ZG^2 + \Delta L [\bar{d}] g \quad (4)$$

$$\Delta P_p = Z_p G_p^2 + \Delta L [\bar{d}]_p g \quad (5)$$

式中:下标  $p$  系指偏差管,  $[\bar{d}]$  指计算重

位压降时的管子平均密度。

对于垂直上升的蒸发管组而言,热敏感性与压力损失(摩擦阻力和局部阻力)和重位压降的相对大小及变化趋势密切相关。用下式定义具有相同结构的并联垂直上升管组中由于吸热偏差所引起的偏差管的流量偏差系数:

$$Z_p = \frac{G_p}{G} \quad (6)$$

令  $B = \frac{\Delta L g}{\frac{1}{2} G^2}$ , 根据并联管压差相同的原理,上

式可化为:

$$Z_p = \frac{B[\bar{d}] - B[\bar{d}]_p}{Z_p} + \frac{Z}{Z_p} \quad (7)$$

$B$  反映了管组的重位压差与流动阻力的比值。在流量和偏差管的吸热偏差一定的条件下,管子内径  $D$  对截面含汽率的影响不大<sup>[3]</sup>,对重位压降乃至流量偏差系数的影响可不计。上式根号中的第一项越大,流量偏差系数也越大,热敏感性越小,所以在流量和吸热偏差一定的条件下,质量流速越大,第一项越小,热敏感性越强;反之第一项越小,热敏感性越弱。因而可得出结论:质量流量一定时,内径小的光管热敏感性强。换句话说,内径小的光管中摩擦阻力在总阻力中所起的作用较大,所以其热敏感性较强。而内径相同的内螺纹管与光管相比,前者有较大的热敏感性(因为内螺纹管的阻力系数较大)。改进型 UP 直流炉大量使用的 H22× 5.5 mm 四头内螺纹管,通流截面直径仅 11 mm,且内外壁面

积比大(1:4),这种管子使UP炉水冷壁有较强的热敏感性倾向,运行时燃烧工况与水动力对其管壁温度影响甚大,极易造成超温爆管事故。式(7)对中间焓值*i*求导,当 $di \rightarrow 0$ 时可得:

$$\frac{\partial Z_r}{\partial i} \Big|_{di \rightarrow 0} = \frac{1}{2} \left[ -\frac{1}{Z_p} \frac{\partial Z_p}{\partial i} - B \frac{\partial(\Delta i)_p}{\partial i} \right] \quad (8)$$

定义吸热不均匀系数为:  $Z_r = Q_p / Q$  (9)  
 对上式求导,注意到  $d(\Delta i)_p = 2di$ , 并取  $di \rightarrow 0$ , 可得流量热敏感性系数:

$$K_{MQ} = \left( \frac{\partial Z_r}{\partial Z_p} \right) \Big|_{Z_r \rightarrow 1} = \frac{-1}{\frac{4}{\Delta i} \frac{\partial Z_p}{\partial i} + B \frac{\partial(\Delta i)_p}{\partial i}} - 1 \quad (10)$$

上式中 $\Delta i$ 是平均管的焓增,而不是 $di$ ,从后面的计算中可以看到, $\Delta i$ 对流量敏感性系数有重大的影响。

## 2 计算与结果分析

本文中所采用的摩擦阻力和重位压降的计算公式详见文献[5]

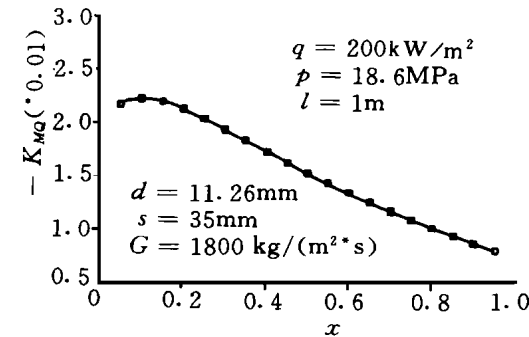


图1 热敏感性随干度的变化

图1表示的是流量热敏感性系数随干度*x*的变化,热敏感性随*x*的增大,先增加,到一定的*x*值后开始下降。图中峰值点对应干度  $x = 0.10$ , 当条件( $G, \Delta L, i$ 等)发生变化时,峰值点的位置会略有移动。

图2表示热敏感性随外壁吸热负荷*q*的变化情况,中点处干度等于0.1,热敏感性随*q*的增大而单调增加,这是因为式(10)中 $\Delta i$ 作用的结果,*q*越大, $\Delta i$ 越大,在其它条件不变的情况下,热敏感性倾向增强。换句话说,*q*越大,达到同样的流量不均匀性系数所需的 $dq$

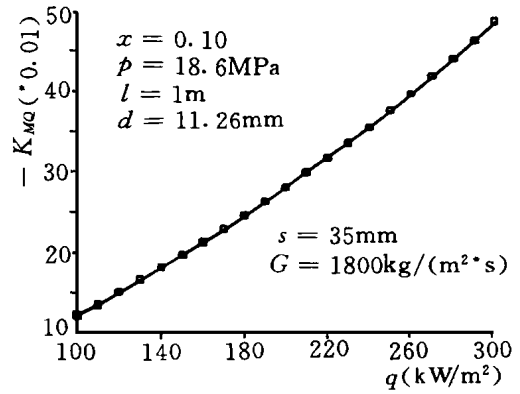


图2 吸热负荷对热敏感性的影响

越小。所以在改进型UP直流炉中应尽力避免出现局部过高的热负荷。

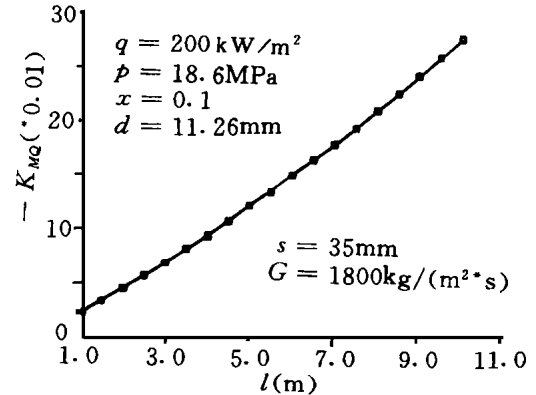


图3 管段高度对热敏感性的影响

图3表示热敏感性随管段高度 $\Delta L$ 的变化情况,当 $\Delta L$ 增大时,导致两方面的结果:一是*B*值增大,这可使热敏感性下降;二是 $\Delta i$ 增加,提高了热敏感性,也可这样理解,即中点处同样焓增的变化所需 $dq$ 降低,这将使热敏感性增强。从结果来看,前一种作用相对来说是很小的,因而总的结果使热敏感性单调增加,且增长的速度非常快。在改进型UP炉中,上下集箱之间的高度差一般很大,因此热敏感性倾向是比较大的。

图4所示为汽化前( $x < 0$ )的热敏感性情况。从图中可知(正值表示流量减小),热敏感性倾向随干度的升高而上升,但数值很小,甚至会出现自补偿特性,出现这种情况的原因是:单相水的焓增变化对重位压降下降的影响相对于对摩擦阻力系数提高的影响来说较

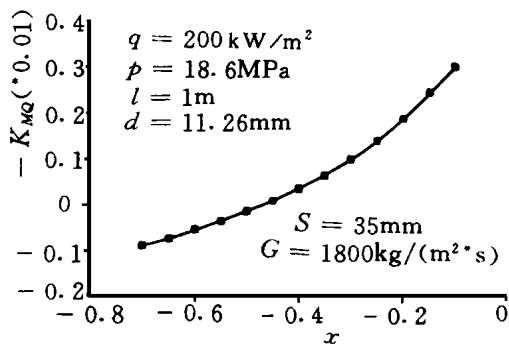


图 4 欠热水的热敏感性

大, 流量减小得很少甚至反而增加, 但欠热过大也使热面利用不经济。

### 3 管屏进出口局部阻力对热敏感性的影响

前面的讨论基于忽略进口和出口处的局部阻力的前提。当局部阻力不应被忽略时, 必须考虑它们对热敏感性的影响。局部阻力也表达为式 (3) 的形式, 为了讨论方便, 假设  $Z$  不随比容  $v$  和质量流速  $G$  的变化而变化。

一般说来, 进口局部阻力使热敏感性有减小的趋向, 这是因为局部阻力计算式 (3) 中,  $v$  是局部阻力处的比容, 当管屏受热增加时, 它并不随之而变化, 这使入口处局部阻力对热敏感性有一种抑制作用, 且入口处局部阻力越大, 抑制作用越强。但对于有节流阀的下辐射区, 过大的入口节流压降, 可能在阀腔内产生局部汽化, 局部汽化的蒸汽被迅速带进水冷壁, 管内含汽率增加, 导致重位压降迅速下降, 而摩擦压降因含汽率的增大而增大, 使热敏感倾向增强。

出口处的局部阻力总是使热敏感性增强, 其原因如下:

① 管屏出口集箱和炉外混合器差不多位于同一高度, 从出口集箱到炉外混合器这一段管路可视为水平布置, 也就是说, 它没有重位压降来降低因管屏出口焓值增加导致的流量减少。

② 局部阻力计算式中,  $v$  取为出口集箱处的比容值。当管段中心处因吸热负荷变化  $dq$  而产生焓增的变化为  $d(\Delta i)$  时, 出口集箱处焓增的变化为  $2d(\Delta i)$ , 导致  $v$  的变化较大, 从而使敏感性增强。

### 4 热敏感性对锅炉运行的影响

内螺纹管的强敏感性倾向使 UP 炉变负荷的运行达不到设计说明书保证的 3% MCR/min。当热负荷变化同样幅度时, 内螺纹管的工质出口参数较光管变化大, 流通截面仅 11mm, 金属的蓄热对工质影响很大, 管子的抗扰动能力较差, 当热负荷变化时, 需要很长时间才能使水动力稳定下来。因为 UP 炉水冷壁有很多并联结构, 很可能产生脉动现象, 使管子受交变作用, 易使管子遭受破坏, 所以变负荷应尽量缓慢地进行, 使水动力工况有足够时间稳定。考虑到实际运行的需要, 建议变负荷速率为 1% MCR/min, 并密切注视各温度测点的变化情况。

### 5 结 论

(1) 改进型 UP 直流炉的热敏感性比较大, 两相汽水混合物在小干度时热敏感性最强。

(2) 热负荷提高, 热敏感性迅速增强, 因而应竭力避免出现局部的高热负荷区。可通过炉内空气动力工况的匹配调整和燃烧调整来改善水冷壁热敏感性。

(3) 进口处的局部阻力对热敏感性的影响应综合作出评价, 既考虑压降太大导致汽化的影响, 又要考虑进口处局部阻力对热敏感性的抑制作用; 出口处的局部阻力总是使热敏感性增强。

(4) UP 炉变负荷运行应尽量缓慢地进行。

#### 参考文献

- 1 张才根等. UP 型锅炉水冷壁的热敏感性. 锅炉技术, 1992, (1): 1~7
- 2 上海锅炉厂. 石洞口电厂 1025t/h 亚临界压力直流锅炉产品设计说明书. 石洞口发电厂运行科, 1987年
- 3 林宗虎. 气液两相流和沸腾传热. 西安交通大学出版社, 1987
- 4 王孟浩. 锅炉双相流体水动力学中的若干问题(一). 锅炉技术, 1985, (8): 21~33
- 5 西安交通大学多相流国家重点实验室. 200MW UP 型锅炉防止水冷壁爆漏的研究, 1995

作者简介 陈听觉, 男, 1935年生, 1956年交通大学锅炉专业毕业, 现为西安交通大学教授, 博士生导师。长期从事多相流与传热、锅炉设计与节能技术等方面的教学与研究, 获国家科技进步二等奖、三等奖, 国家自然科学基金三等奖等国家及省部级科技奖励 18 项, 出版著作 12 本, 发表论文 180 余篇, 获国家级有突出贡献专家等称号。通讯处: 710049, 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室。

运用彩色 CCD 测量火焰温度场的试验研究及误差分析 = **An Experimental Study of Flame Temperature Field Measurement By the Use of a Colored CCD Camera and Its Error Analysis** [刊, 中] / Wang Fei, Xue Fei, Ma Zengyi, et al (Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(2). - 81- 84

The flame temperature field distribution in a power plant boiler plays a very significant role in ensuring the safe operation of the power station and achieving a correct diagnosis of the boiler combustion conditions. The use of computer-based image processing techniques has in recent years been accorded great attention in the study both at home and abroad of combustion flame temperature field measurements. The present paper deals with the calculation of a furnace flame temperature field by using a colored CCD camera with a detailed analysis of the calculation error under this method being given. The test results show that the proposed method features ease of application with good prospects for its use on work-sites. Key words image processing, temperature field, CCD

改进型 UP 锅炉水冷壁管热敏感性的研究 = **A Study of the Thermal Sensitivity of a Modified UP Boiler Water Wall Tubes** [刊, 中] / Tian Pu, Chen Tingkuan (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(2). - 85- 87

In the light of the commonly encountered water wall tube explosion leakage of home-made modified UP boilers an analysis is made of the thermal sensitivity of  $\Phi 22 \times 5.5$  mm four-head internally ribbed tubes commonly used in UP boilers. Various factors affecting the degree of sensitivity are calculated from a multitude of variables, including dryness, thermal load, tube section height, inlet and outlet local resistance, etc. Also discussed is the influence of thermal sensitivity on the operation of boilers with some proposals for the boiler design and operation being given. Key words UP boiler, water wall, internally ribbed tubes of water wall, thermal sensitivity

循环流化床烟气脱硫技术及其实验研究 = **Circulating Fluidized Bed Flue Gas Desulfurization Technology and Its Experimental Study** [刊, 中] / Huang Zhen, Wu Yinghai, Wang Wenliang (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(2). - 88- 90

Presented in this paper are the specific features of several kinds of flue gas desulfurization technology. A desulfurization test study is conducted on a variable-speed circulating fluidized bed through the use of dry slaked lime powder as a desulfurizing agent. Under the condition of Ca/S ratio being 1.1 and the injection of a proper quantity of water a desulfurization rate of above 85% can be attained. Key words circulating fluidized bed, desulfurization, flue gas desulfurization, desulfurization efficiency

角管式蒸汽锅炉再循环管的实验研究 = **An Experimental Study of Corner-Tube Steam Boilers** [刊, 中] / Meng Zhaopeng, Lu Wei, et al (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1998, 13(2). - 91- 95

Through an analysis of the circulation principle of a corner-tube steam boiler side wall water wall tubes the authors have identified the major factors affecting the hydrodynamic characteristics of circulating tubes and set up a test rig for the study of their hydrodynamic characteristics. An experimental study is also performed of the mechanism of influence of thermal load