

文章编号:1004-8774(2014)05-0006-05

组合螺纹烟管锅炉烟管筒模型试验与运行验证

梁耀东,陈 干,徐 甫,李之光

(北京盛昌锅炉公司,北京 102600)

摘 要:详细介绍了组合螺纹烟管锅炉中对流受热面部件——立式螺纹烟管筒的水动力模型试验结果,包括验证相似条件,水流旁通及其防止试验、排除空气试验等;在此基础上明确提出防止水流旁通的最佳结构措施和烟管筒上部不可能形成气垫的看法,均已得到运行验证。

关键词:水动力;相似;模型试验;立式烟管筒;组合螺纹烟管锅炉

中图分类号:TK229

文献标识码:A

Model Research of the Combined Corrugated Fire-tubes Boiler and Its Operation Proving

LIANG Yao-dong, CHEN Qian, XU Fu, LI Zhi-guang

(Shengchang Boiler Co., Beijing 102600, China)

Abstract: Introduces the hydrodynamic model test results of the convection heating surface parts vertical fire-tubes drum of combined corrugated fire-tubes boiler, including the proving test similarity conditions, the flow by-pass and its prevent test, the air remove test and so on. On that basis, put forward the best structures to prevent the flow by-pass, and approves that the air pad is not possible, all of which are achieved by operation proving.

Key words: hydrodynamics; similarity; model test; vertical fire-tubes drum; combined corrugated fire-tubes boiler

0 序言

组合螺纹烟管锅炉是由国人经过结构创新改进、技术完善,自行设计开发的水火管锅炉^[1]。组合螺纹烟管锅炉的突出特点是:锅炉本体仅由炉膛(辐射受热面)与螺纹烟管筒(对流受热面)组成,多个模块式螺纹烟管筒代替了大直径锅壳,使锅炉容量大增(可达 200 t/h 或更大)、压力不受限制、钢耗进一步下降、制造安装简便、大容量锅炉高度明显减小(节省锅炉房基建投资)、对水质的适应性较强。

立式烟管筒是组合螺纹烟管锅炉的核心部件,由于对它的水动力特性在理论与实践上均缺乏深入了解,特别是热水锅炉高温烟管筒中水流分布对安全可靠性的影响等无资料可询、无实例可考,因此,有必要对立式高温烟管筒建立试验模型,通过模型试验获取相关数据及依据,为组合螺纹烟管锅炉设计提供可靠技术支持。



第一作者:梁耀东(1960—),毕业于哈尔滨工业大学动力工程系,高级工程师。主要从事锅炉、热能工程技术与产品的研发与设计工作。

1 模型试验装置

本模型试验参照 ZLL 29—1.0/115/70 型组合螺纹烟管锅炉(见图 1)的高温烟管筒实物,遵从相似规律^[2],按照模型与实物 1:3 的比例,制作螺纹烟管筒模型,并选择了水泵等附件组成该试验装置,其中烟管筒模型截面积 $f_{\text{模筒}} = (\pi/4) \times (0.433^2 - 108 \times 0.025^2) = 0.09424 \text{ m}^2$ 。烟管筒模型总图与模型照片见图 2,模型结构参数见表 1,烟管筒模型试验系统见图 3,烟管筒模型试验系统装置照片见图 4。

表 1 烟管筒实物与模型结构参数

序号	名称	符号	单位	数 值	
				实物	模型
1	管子数量	n	根	108	108
2	管子外径	d	m	0.076	0.025
4	管子长度	l	m	3.08	1.027
5	烟管筒内直径	D	m	1.3	0.433
6	烟管筒内高度	h	m	3.08	1.027

收稿日期:2014-05-08

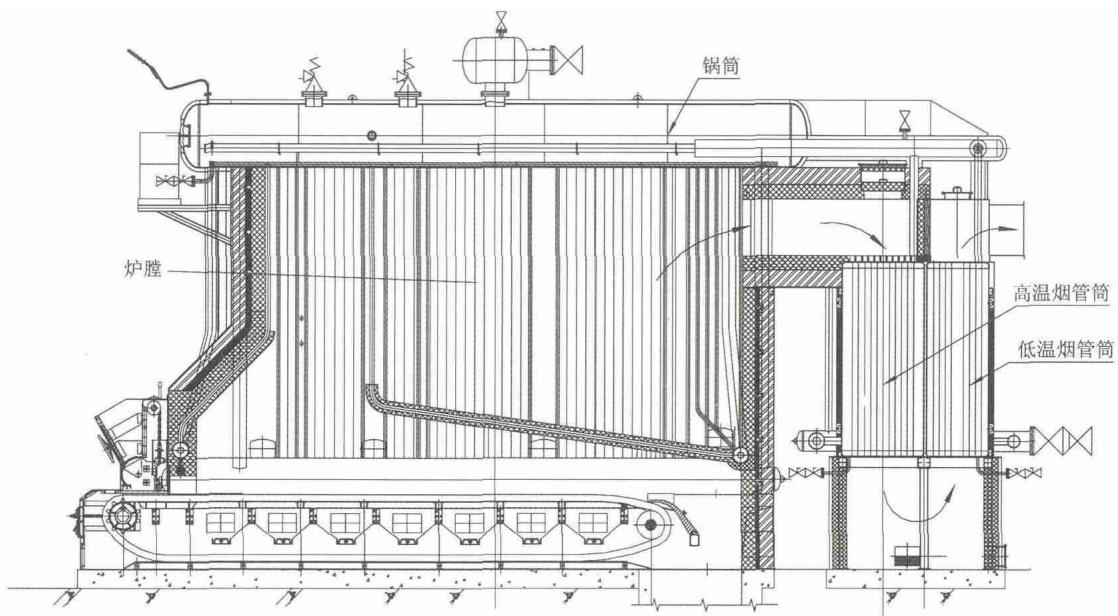
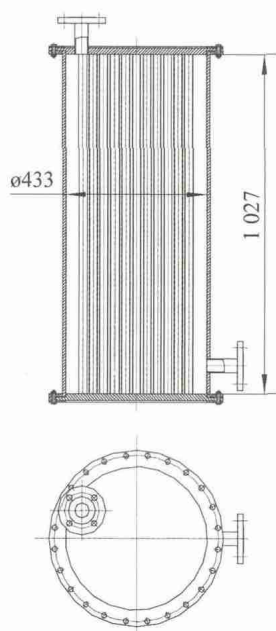


图1 29 MW 组合螺纹烟管热水锅炉示意图



烟管筒模型图



烟管筒模型实物照片

图2 烟管筒模型图与实物照片

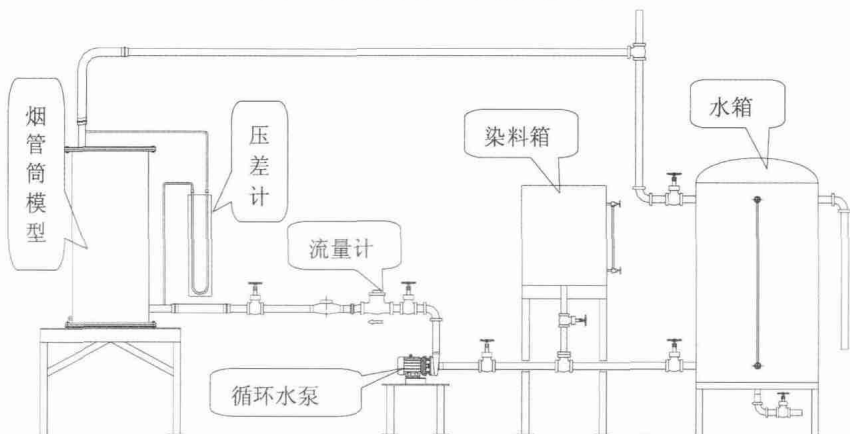


图3 烟管筒模型试验系统装置图

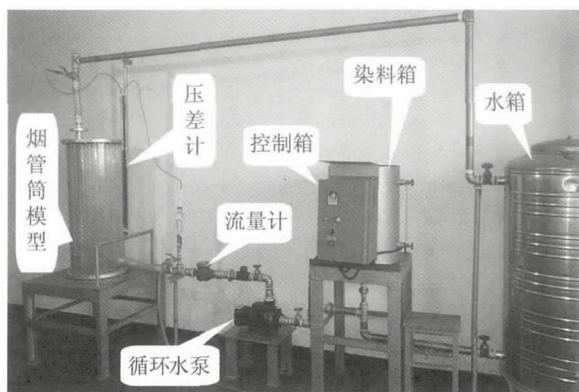


图4 烟管筒模型试验系统装置照片

2 相似条件

(1)按单相流体动力相似条件^[2]:

①几何相似:取相似倍数 $c_l = l_{\text{模}}/l_{\text{实}} = 1/3$ (模型的线性尺寸是实物的三分之一)。

②边界条件相似:模型与实物同为直流进出。

③雷诺数相等: $Re_{\text{模}} = Re_{\text{实}}$ 或

雷诺数大于第二自模区临界值: $Re_{\text{模}} > Re_{\text{II}}$, 此时, 模型循环水泵的流量可大为减小。

29 MW 组合螺纹烟管锅炉高温烟管筒实物雷诺数为

$$Re_{\text{实}} = \rho_{\text{实}} w_{\text{实}} l_{\text{实}} / \mu_{\text{实}} = 970 \times 0.0265 \times 0.112 / (337 \times 10^{-6}) = 8551$$

式中 $\rho_{\text{实}} = 970 \text{ kg/m}^3$ (83.5℃)

$$w_{\text{实}} = G_{\text{实}} / 3600 f_{\text{实}} = 80 / (3600 \times 0.8374) = 0.0265 \text{ m/s} \quad G_{\text{实}} = 80 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$f_{\text{实}} = (\pi/4) \times (1.3^2 - 108 \times 0.076^2)$$

$$= 0.8374 \text{ m}^2 \text{ (烟管筒实物纵向水流截面积)}$$

$$l_{\text{实}} = 4 f_{\text{实}} / U = 4 \times 0.8374 / (\pi \times 1.3 + 108 \times \pi \times 0.076) = 0.1121 \text{ m}$$

$$\mu_{\text{实}} = 337 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s} \text{ (83.5℃水)}$$

可见, 实物雷诺数 $Re_{\text{实}}$ 很大。如遵守 $Re_{\text{模}} = Re_{\text{实}}$ 条件, 模型流量颇大。

(2) Re_{II} 的确定

根据烟管筒模型欧拉准则 Eu 与 Re 数的关系曲线, 来确定 Re_{II} ^[2]。

烟管筒内不加任何孔板与隔板的 Eu 与 Re 数的关系曲线见图5 (Re 数的定性尺寸取烟管筒横截面的当量直径, 流速取横截面对应的纵向流速, 阻力取烟管筒自身内阻)。由图5得 $Re_{\text{II}} = 120$ 。

“通道内被其他物件填充的程度愈大, 进入第二自模区愈早, 即 Re_{II} 愈小”^[2,3], 则烟管筒内设置孔板与隔板时, 模型试验的 Re 数大于120, 完全有效。

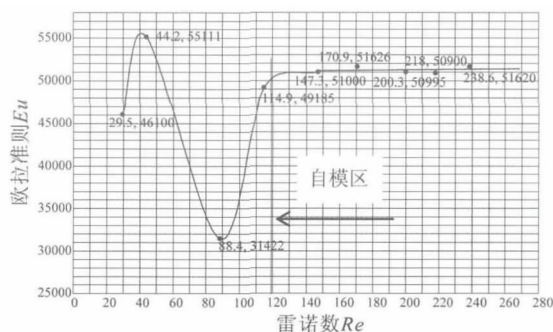


图5 烟管筒模型试验雷诺数与欧拉准则关系曲线图

3 试验内容及过程

3.1 试验内容

本试验分两部分进行, 一是烟管筒水流旁通与防止试验, 二是烟管筒气泡运动规律与空气排出试验; 依据试验结果进行分析总结。

3.2 试验过程

烟管筒水流旁通与防止试验: 在烟管筒内有无管板、隔板及不同安装位置的条件下, 定量测量烟管筒在不同流量下的阻力, 并绘制相应关系曲线图, 以确定自模区; 观察并记录进入自模区状态下烟管筒内管束区、边缘通道等全部水流空间区域流线的运动轨迹与状况, 描绘烟管筒模型水的流线图。

烟管筒气泡运动规律与空气排出试验: 在试验烟管筒内未安装管板、隔板时, 设定不同的进入自模化区的烟管筒平均流速, 观察烟管筒内气泡运动及空气排除情况。

4 试验结果与分析

4.1 水流旁通与防止

烟管筒壁与外圈烟管之间所形成的边缘通道(间隙)会产生流量旁通现象, 大量水将从此处形成短路, 而流过烟管束的水量过少, 则可能于烟管筒上部产生沸腾现象。为此, 进行了计算分析与试验观察。

(1) 模型试验观察

当烟管筒内无管板、隔板(见图6a)时, 流线密集区主要集中在边缘通道, 呈斜线上升; 管束区流线较疏; 说明边缘通道流量颇大, 管束区流量很小。

当在烟管筒内加装缺口管板及隔板(见图6b)时, 流线在开口管板以上的管束区很密集, 流速明显增大。开口管板与隔板的加装明显改变了烟管筒内水的流向, 使进入缺口管板上部以后的水在管束区主要呈横—斜向流动(至出口), 对该区管束及上管板有较好的冲刷作用。

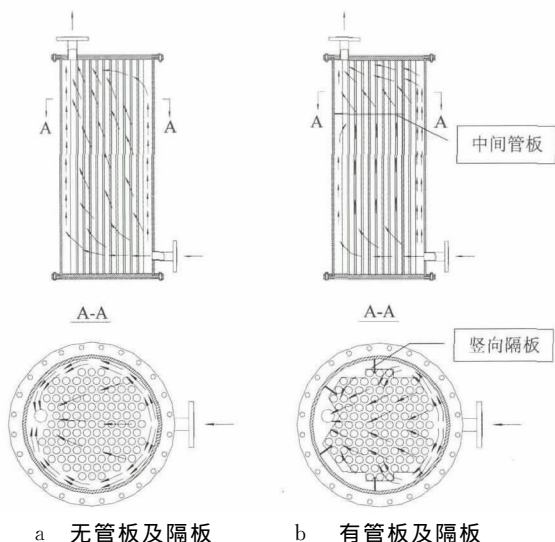


图6 烟管筒模型流线图

缺口管板的安装位置应控制该处的烟温不超过 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, 以防管板上部积存污物时烟管壁超温。

模型试验观察表明应在高温烟管筒内设置必要的改变水流的部件, 以防止烟管筒上部发生沸腾现象。

(2) 计算分析

以 29 MW 组合螺纹烟管锅炉高温烟管筒为例, 其边缘通道的旁通流量近似计算如下:

烟管筒边缘通道与管束平行并列 (见图 7); 边缘通道仅有沿程摩擦阻力, 而管束包含纵向沿程摩擦阻力与横向冲刷错列管排阻力两项叠加。

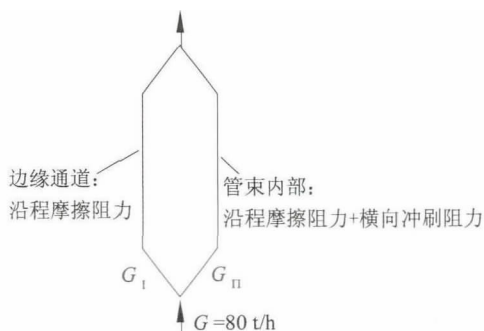


图7 烟管筒平行流束

按平行并列流动阻力相等, 得

$$\lambda_{01} w_1^2 = \lambda_{02} w_2^2 + \zeta w_3^2 \quad (1)$$

式中: $w_1 = G_1 / f_1$ (间隙沿程), $w_2 = G_2 / f_2$ (管束沿程), $w_3 = G_2 / f_3$ (管束横向)

总流量 $G_1 + G_2 = 80\text{ t/h}$

$f_1 = 0.446(1^2 + 3.1^2)^{0.5} = 1.45\text{ m}^2$ (斜向),

$f_2 = 0.391\text{ m}^2$ (近似纵向)

$f_3 \approx 0.5 \times h [\pi \times D - (n \times d_w)] = 1.5\text{ m}^2$

$D = 1.2\text{ m}$, $n = 36$ 根 (管束外圈), 管径 $d_w =$

0.076 m , 高度 $h = 3\text{ m}$

$\lambda_{01} = 0.374$ ——间隙沿程摩擦阻力系数

$\lambda_{02} = 1.53$ ——管束沿程摩擦阻力系数

$\zeta = 3.8$ ——管束横向冲刷阻力系数

上述 3 个阻力系数通过计算获得, 此处从略。

代入式 (1), 得

$$0.374(G_1 / 1.45)^2 = 1.53 [(80 - G_1) / 0.391]^2 + 3.8[(80 - G_1) / 1.5]^2$$

得边缘通道 (间隙) 流量 $G_1 = 71\text{ t/h}$

则管束流量:

$$G_2 = 80 - 71 = 9\text{ t/h}$$

$$G_2 / (G_1 + G_2) = 0.11 = 11\%$$

可见, 进入烟管束的流量约为全部流量的 11% , 而 89% 皆从边缘通道 (间隙) 旁通。

如管束进水 $G_2' = 17\text{ t/h}$ (约为该烟管筒全部进水量的 $1/5$), 管束顶点的水温:

$$t_1' = t_b + 3600 \frac{Q_1}{c G_2'} = 30 + 3600 \frac{2460}{4.187 \times 17000} = 30 + 124 = 154\text{ }^{\circ}\text{C}, \text{ 已接近沸点 } t_b = 159\text{ }^{\circ}\text{C}.$$

因此, 高温烟管如不采取措施, 烟管筒管束上部即会沸腾。

(3) 运行验证

最初, 29 MW 组合螺纹烟管热水锅炉, 在高温烟管筒内未加装管板、隔板等改变水流的部件时, 在烟管筒上部已明显听到沸腾声响。

依据模型试验结果, 对高温烟管筒进行了设计改进: 在烟管筒上部横截面加装了缺口管板, 在缺口管板上部的边缘通道加装了防短路竖直隔板。此后运行时, 不再有沸腾声响。

4.2 气体不可能聚集成气垫

(1) 空气排出试验

试验烟管筒内未安装管板、隔板时, 设定三个不同的进入自模化区的烟管筒平均流速 0.0035 m/s 、 0.0065 m/s 、 0.0087 m/s , 观察烟管筒内的空气排除情况。试验表明, 管筒上水速度快慢, 在上烟管筒顶部区域均不会形成气垫。

(2) 小气泡运动规律

供热系统循环水会溶解少量气体 (空气), 这些气体随循环水进入到锅炉的烟管筒, 当水被加热时, 会有少量气体析出。模型试验观察发现, 水中的小气泡会随水运动而排除, 未能分离与聚集成气垫。

(3) 气体不可能聚集成气垫的壁温计算分析

烟管入口区段壁温:

① 烟管入口区段为水或汽水混合物

计算图见图 8。

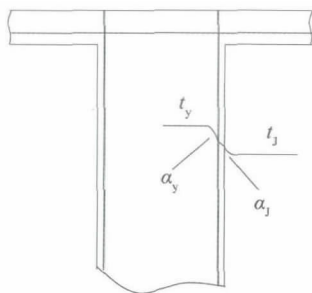


图 8 烟管入口管段壁温计算图

传热系数(按平板公式计算,误差很小):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_y} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_j}} \approx \frac{1}{\frac{1}{80} + \frac{0.003}{44} + \frac{1}{5000}} = 78.3 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$$

式中,烟气侧(螺纹烟管)放热系数 α_y 取 $80 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$,碳钢管板热阻 δ/λ 很小,水或汽水混合物放热系数 α_j 取 $5000 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$ 。

热负荷:

$$q = K(t_y - t_j) = 78.3 \times (950 - 204) = 58400 \text{ W/m}^2$$

壁温:

$$t_{bi} = t_j + q/\alpha_j = 204 + 58400/5000 = 206 \text{ °C}$$

②假设烟管入口区段形成蒸汽垫

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_y} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_j}} \approx \frac{1}{\frac{1}{80} + \frac{0.003}{44} + \frac{1}{50}} = 30.8 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$$

式中,烟气侧(螺纹烟管)放热系数 α_y 取 $80 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$,碳钢管板热阻 δ/λ 很小,蒸汽垫放热系数 α_j 参照锅炉热力计算方法^[4],近似取 $50 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{°C)}$ 。

$$q = K(t_y - t_j) = 30.8 \times (950 - 204) = 23000 \text{ W/m}^2$$

$$t_{bi} = t_j + q/\alpha_j = 204 + 23000/50 = 204 + 460 = 664 \text{ °C}$$

可见,如果形成蒸汽垫,壁温已达 $600 \sim 700 \text{ °C}$,烟管将明显氧化起皮,甚至被压瘪(介质外压力)。

(4)运行验证


ZLL 29—1.0/115/70 组合螺纹烟管热水锅炉经一个供暖冬季的运行检验,烟管入口区段未见氧化脱皮现象。可见,该段烟管的壁温在允许范围,同时证明了该区段不会存在气垫。

5 结论

组合螺纹烟管热水锅炉高温烟管筒系水火管式对流受热面,其内部的水流分布、水流工况对烟管筒的安全运行关系重大。

模型试验与实物运行表明,高温烟管筒内应设置必要的改变水流的部件,以防止烟管筒上部发生沸腾现象;部件的几何尺寸及安装位置对防止水流旁通至关重要。

试验观察表明,烟管筒上水速度快慢,在烟管筒顶部区域均不会形成气垫,烟管筒内的空气可以全部排除;混杂于水中的小气泡会随水的运动而排除,

未能在烟管筒顶部分离与聚集成气垫。 

参考文献

- [1]李之光,梁耀东,牛全正,等.工业锅炉现代设计与开发[M].北京:中国标准出版社,2011.
- [2]李之光.相似理论与模化(理论及实用)[M].北京:国防工业出版社,1982.
- [3]С. С. Кутателадзе и др. Моделирование теплоэнергетического оборудования. Изд. «Энергия», 1966.
- [4]工业锅炉设计计算方法编委会.工业锅炉设计计算方法[M].北京:中国标准出版社,2005.

合理利用资源

保护生态平衡

促进经济持续发展