

水平并联管子系统中气液两相流 在联箱内的压力分布研究

吴东垠 (西安热工研究所)

林宗虎 (西安交通大学)

[摘要] 通过对水平并联管子系统中联箱的四种连接方式的一系列试验研究和分析工作,得出了该系统中气液两项流在联箱内的压力分布计算方法。计算结果和试验值相符良好,为水平并联管子系统的气液两相流流量分配计算提供了必要的计算式。

关键词 气液两相流 联箱 压力分布

分类号 TK223

符 号

u —工质流速; m/s
 G —工质质量流速; $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
 d —联箱内径; m
 L —联箱长度; m
 ρ_m —均相流体的平均密度; kg/m^3
 λ —均相流体的摩擦阻力系数;
 K —均相流体在联箱内的压力变化系数;
 ϕ —两相流体在联箱内的压力变化系数;

角 标

f —分配联箱;
 h —汇集联箱;

前 言

锅炉受热面大都是由许多并联在进口联箱和出口联箱上的管子组成,即并联管子

系统。例如,炉膛水冷壁、过热器、再热器和省煤器的受热面都属于并联管子系统。当多管并联工作时,各管的工作条件可能不同,如果并联系统的水动力工况不佳,各管将发生严重的流量偏差,则受热面管子系统的工作可靠性就不能得到保证。在锅炉受热面中,过热器、再热器、中小型锅炉的水冷壁和非沸腾式省煤器的进口工质均为单相流体,各并联管中的流量分配较易均匀,对此已经进行过较广泛的研究,现有的计算方法能保证其安全运行。

但在大型强制循环蒸汽锅炉的水冷壁中,为减少热偏差,水冷壁常分为几段,在居中的水冷壁段,进口工质及出口工质有时均为汽水混合物。此外,在化工、核能等工业设备中也存在进、出口工质均为气液两相流的并联管子系统。对于进出口为两相工质的并联管子的流量分配计算是一个重要而复

收稿日期 1993 05 27 修改定稿 1993 07 13

本文联系人 吴东垠 男 28 助工 710032 西安热工研究所

杂的问题,至今国内外在这方面研究得很不够⁽²⁾。为了进行这方面的研究,必须掌握气液两相流在联箱内的压力分布计算方法。

1 试验系统及试验方法

试验是在图1所示的水—空气试验台上完成的,试验工质为水—空气混合物。试验系统由水回路和气回路两部分组成。

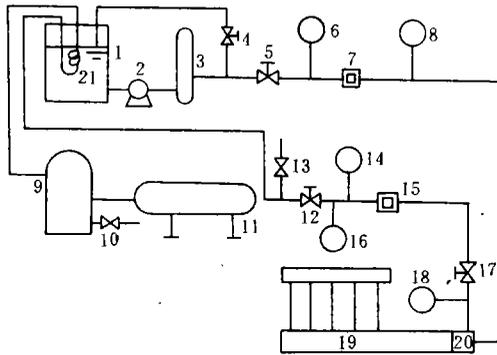


图1 水—空气试验回路

1—水箱;2—水泵;3—稳压器;4、5、12、17—调节阀;6、16、18—压力计;7、15—转子流量计;8、14—温度计;9—储气罐;10、13—旁通阀;11—空气压缩机;19—试验段;20—气水混合器;21—冷却盘管

1.1 气回路部分

试验所用空气由空气压缩机11提供,压缩空气首先进入储气罐9,储气罐9除具有稳压作用外,还可以由旁通阀10来排污,以得到清洁的空气。由于压缩空气温度高于环境温度,因此,用冷却盘管21来降温,从而使压缩空气温度接近水温。为了便于调节气量,在气测量系统以前装旁通阀13和调节阀12,这样将压缩空气调整到试验所需要的参数,具有一定流量和压力的空气进入气水混合器20与水回路引出的水混合。

1.2 水回路部分

贮存于水箱1的水经水泵2升压,然后流过稳压器3以消除管路水流的脉动。从稳压器3引出的水分两路:一路通过旁通阀4流回水箱1;另一路经过调节阀5进入水测量系统,通过调节阀5和旁通阀4把水调整到试验所需的流量和压力,然后进入气水混合器20与气回路引来的空气形成水—空气两相流,一起进入试验段19,准备进行试验。

为了便于肉眼观察管内的两相流流型,试验段的材料选用透明有机玻璃管。如图2所示,图中标出了各部分的结构尺寸。气水混合器1与分配联箱4联接,分配联箱另侧固定,而汇集联箱7两端的M侧和N侧是可以活动的。当联箱N侧固定,工质自M侧流出时,系统为U型连接;当联箱M侧固定,工质自N侧流出时,系统为Z型连接。为了防止汇集联箱出口的背压变化过急,其出口采用细管导出。

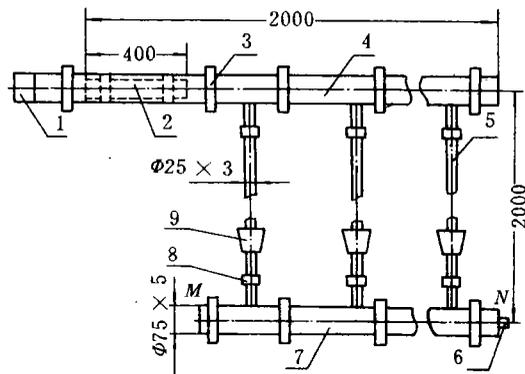


图2 试验段部分

1气水混合器;2加速管;3联箱取压环(共13个);4分配联箱;5管束(共5根);6引出管;7汇集联箱;8管束取压环(共18个);9单孔板双参数流量计(共5个)

原苏联直流锅炉局曾对水平布置的分配联箱中空气—水混合物及汽—水混合物的分配均匀性问题进行过研究⁽³⁾。研究表明:分配联箱中两相流的轴向流速对分配均匀性

影响很大,轴向流速高则分配均匀性好,如果在分配联箱过渡区装设加速管,可以使两相流的流速增大,两相混合均匀。因此,本试验也考虑了在分配联箱过渡区装设加速管的情况。这样,试验可以分 U 型连接系统无加速管、U 型连接系统有加速管、Z 型连接系统无加速管和 Z 型连接系统有加速管四种情况。在图 2 所示的取压环位置取得压力信号,各支管的两相流质量流量和干度是应用林宗虎教授的专利—单孔板双相流量计测量^[1]。

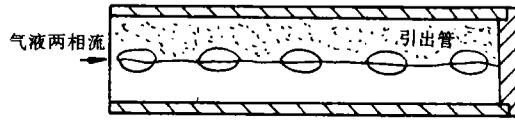
2 联箱内的气液两相流流型分析

水平并联管子系统中两相流在联箱内的流动工况对联箱内的压力分布影响较大。因此,观察联箱内的气液两相流流型是十分必要的。在试验过程中,作者亦对各工况的联箱内流型做了详细的观察和记录。

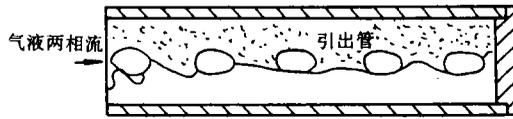
联箱内的气液两相流流型与水平管内的流型存在相同之处,也出现了三种基本流型,即分层流型、波状流型及环状流型。联箱内两相流是变质量流动,加之分配联箱过渡区又装了加速管,使两相流形成射流,联箱内流型还有下列特点。

2.1 当气液两相流质量流量较小时,联箱内所气液两相流分开流动,两相之间存在一个明显的分界面,联箱内流动状况如图 3(a)所示。进一步提高气液两相流的质量流量,特别是气相流量较大时,两相界面上出现涌动波,液面上液滴增多,同时被气相裹携的行程增长,在液面上形成气夹液滴流,此时流型是波状分层流型,流动状况如图 3(b)所示。当气流量继续增大时,联箱内的两相分界面波动剧烈,联箱上部壁面形成液相薄膜,联箱下部液膜相对较厚,联箱中部为气液均相主流,其流动状况如图 3(c)所示。

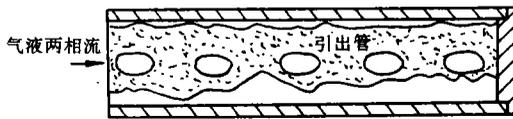
2.2 当分配联箱过渡区装加速管时,联箱中的流动状况也历经上述过程,但与分配联



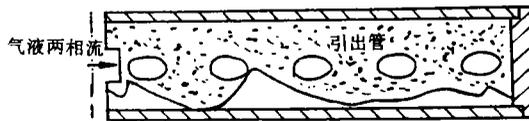
(a) 未设加速管分配联箱内的流型图
(低质量流速、分层流动)



(b) 未设加速管分配联箱内的流型图
(中等质量流速、分层波状流)



(c) 未设加速管分配联箱内的流型图
(高质量流速、环状流型)



(d) 有加速管分配联箱内的流型图

图 3 分配集箱内流型图

箱过渡区无加速管时的流动状况相比,最明显的区别是在较低的两相流质量流量时,联箱内就形成较均匀的两相混合射流,其流动状况如图 3(d) 所示。

3 联箱内气液两相流的压力分布计算

正如前面所观察的那样,联箱内的流型很复杂,既非完全均相亦非完全分相,在较高

质量流速时,接近于均相流动。因此,在计算联箱内的压力分布时,首先采用均相模型计算,然后根据试验结果加以修正。

3.1 均相模型流体在联箱内的分布

如图 4 所示,设在分配联箱上取一微段 dx ,对断面 1-1 及 2-2 列出动量守恒方程式,可得:

$$\begin{aligned} [P - (P + dP)] - \lambda \rho_m \frac{dx}{d} \frac{u^2}{2} \\ = \rho_m (u + du)^2 - \rho_m u^2 - \rho_m C_f u du \end{aligned} \quad (1)$$

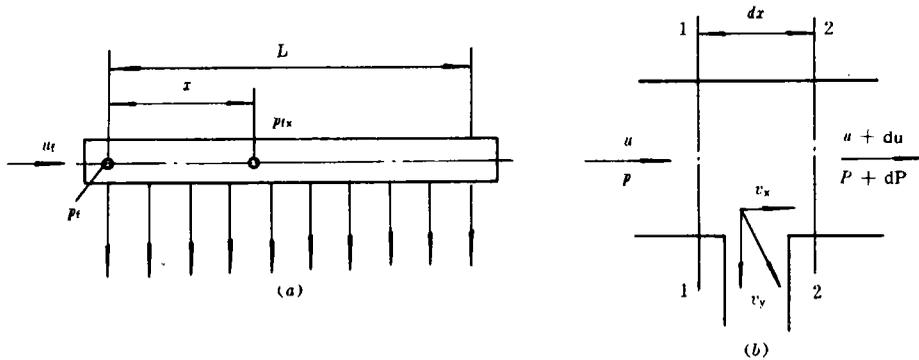


图 4 分配联箱流动工况示意图

上式右边最后一项为工质进入分支管处的轴向动量分量。

$$\rho_m = 1/[x/\rho_g + (1-x)/\rho_l] \quad (2)$$

λ 值采用勃拉齐乌斯 (blasius) 的光滑管计算式,即:

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (3)$$

Re 选用液相雷诺数。

设分配联箱进口处工质流速为 u_i ,且流速沿联箱长度 L 方向按直线规律减小,则距联箱进口端 x 处的工质流速 u 可按下式算得:

$$u = u_i(1 - x/L) \quad (4)$$

将式(4)代入(1),经化简积分后可得距进口端 x 处的工质压力 P_{ix} 与联箱进口压力 P_i 之差,亦即该处工质的压力变化值为:

$$\begin{aligned} \Delta P_{ix} = P_{ix} - P_i = \rho_m \frac{u_i^2}{2} \left\{ \frac{\lambda L}{3d} \left[\left(1 - \frac{x}{L}\right)^3 - 1 \right] \right. \\ \left. - (2 - C_f) \left[\left(1 - \frac{x}{L}\right)^2 - 1 \right] \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

把 $x = L$ 代入式(5)并加以整理,可以得到分配联箱中的总压力变化值 ΔP_{NL} 为:

$$\Delta P_{NL} = \rho_m \frac{u_i^2}{2} \left[(2 - C_f) - \frac{\lambda L}{3d} \right] = K_r \rho_m \frac{u_i^2}{2} \quad (6)$$

K_r 为均相流体在分配联箱内的压力变化系数。上式中 C_f 取单相流体的试验值,即 $C_f = 1.24$ 由上式可得:

$$K_r = (2 - C_r) - \frac{\lambda L}{3d} = 0.76 - \frac{\lambda L}{3d} \quad (7)$$

在图 5 中,距分配联箱进口端 X 处的压力变化值 ΔP_{r1} 由 ΔP_{rL} 及 ΔP_1 之差求得:

$$\Delta P_{r1} = \Delta P_{rL} - \Delta P_1 = K_r \rho_m \frac{u_1^2}{2} - K_r \rho_m \frac{u_1^2}{2} \quad (8)$$

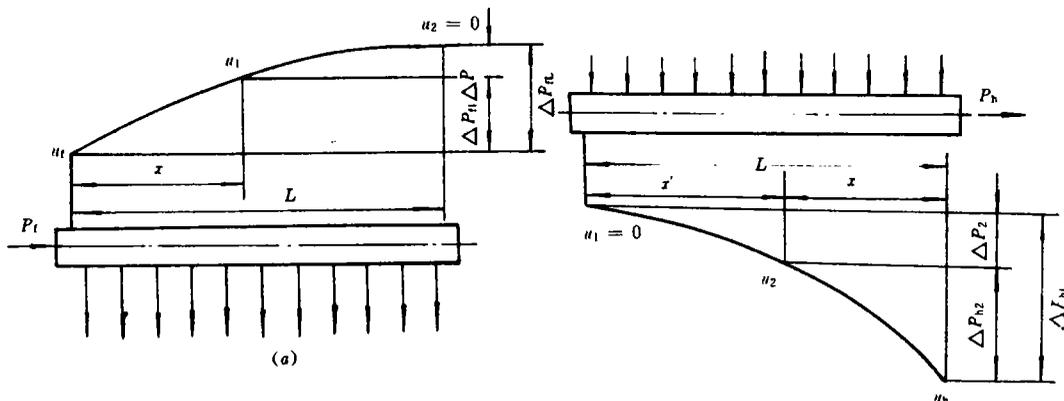


图 5 分配联箱和汇集联箱中任意点的压力变化

按式(4), $u_1 = u_r(1 - x/L)$, 将此式代入式(8)可得:

$$\Delta P_{r1} = \Delta P_{rL} \frac{x}{L} (2 - \frac{x}{L}) \quad (9)$$

式中 ΔP_{rL} 按式(6)计算, 其曲线如图 5(a) 所示。

同理可求得汇集联箱中的总压力变化值 ΔP_{hL} 为:

$$\begin{aligned} \Delta P_{hL} &= \rho_m \frac{u_h^2}{2} [(2 - C_h) + \frac{\lambda}{3} \frac{L}{d}] \\ &= K_h \rho_m \frac{u_h^2}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

C_h 值由试验确定为零, 所以 K_h 值可按式计算:

$$K_h = (2 - C_h) + \frac{\lambda L}{3d} = 2 + \frac{\lambda L}{3d} \quad (11)$$

如图 5(b) 所示, 距汇集联箱出口端 X 处的压力变化值 ΔP_{h2} 由 ΔP_{hL} 及 ΔP_2 之差求得:

$$\begin{aligned} \Delta P_{h2} &= \Delta P_{hL} - \Delta P_2 \\ &= K_h \rho_m \frac{u_h^2}{2} - K_h \rho_m \frac{u_2^2}{2} \end{aligned} \quad (12)$$

由于 u_2 沿联箱长度成线性变化, $u_2 = u_h x'/L = u_h(1 - x/L)$, 将此关系式代入式(12)可得:

$$\Delta P_{h2} = K_h \frac{u_h^2}{2} \rho_m \frac{x}{L} (2 - \frac{x}{L})$$

$$= \Delta P_{hL} \frac{x}{L} (2 - \frac{x}{L}) \quad (13)$$

3.2 气液两相流在联箱内的实际压力分布计算

试验中发现:应用均相模型理论计算两相流体在联箱内的压力分布还存在着很大偏差, 因此有必要对均相模型的计算式加以修正。

在式(6)中, 引入分配联箱的压力分布校正系数 Φ_r , 可以写出气液两相流在分配联箱内的总压力变化值 ΔP_{rL} 为:

$$\Delta P_{rL} = \Phi_r K_r \rho_m \frac{u_1^2}{2} \quad (14)$$

同理, 在式(10)中, 引入汇集联箱的压力分布校正系数 Φ_h , 可以写出气液两相流在汇集联箱内的总压力变化值 ΔP_{hL} :

$$\Delta P_{hL} = \Phi_h K_h \rho_m \frac{u_h^2}{2} \quad (15)$$

在式(14)和式(15)中, 分配联箱和汇集联箱的压力分布校正系数 Φ_r 和 Φ_h 由试验确定。作者在前述的水—空气试验台上对联箱的四种结构进行了近 100 个工况的测试, 取得了大量的试验数据。研究发现:气液两相流

在分配联箱内的压力分布校正系数 Φ_r 与分配联箱入口质量流速 G_r (有加速管时为加速管出口的质量流速) 关系很大, 应用数学方法可拟合如下关系式:

当 $10 \leq G_r \leq 40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,

$$\Phi_r = 9.74433 - 0.647618G_r + 1.86115 \times 10^{-2}G_r^2 - 1.8847 \times 10^{-4}G_r^3 \quad (16)$$

当 $45 \leq G_r \leq 135 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,

$$\Phi_r = 5.96764 - 5.67038 \times 10^{-2}G_r - 9.55108 \times 10^{-6}G_r^2 + 1.16761 \times 10^{-6}G_r^3 \quad (17)$$

当 $G_r \geq 135 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,

$$\Phi_r = 1 \quad (18)$$

式(16)和式(17)给出气液两相流在分配联箱内的压力分布校正系数 Φ_r 与质量流速 G_r 的函数关系; 当质量流速 G_r 超过一定值时, 即 $G_r \geq 135 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 压力分布校正系数 Φ_r 为常数, 且 $\Phi_r = 1$ 。这是因为在质量流速较低时, 气液两相流动工况趋近分相流动, 由于两相流体之间的扰动和两相界面的相互摩擦, 气液两相流的压力变化值大于相同条件下均相流体的压力变化值, 因此, $\Phi_r > 1$ 。随着质量流速的增加, 联箱内轴向流速增大, 气液混合趋近均匀, 两相流体的压力变化值逐渐接近均相流体的压力变化值, 于是 Φ_r 逐渐减小并接近于常数 1。当质量流速 $G_r \geq 135 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 气液两相流动可以视为均相流动, 两相流体的压力变化值与均相流体的压力变化值相同, 即 $\Phi_r = 1$ 。

需要指出: 当 $40 \leq G_r \leq 45 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时该区间是分配联箱入口端有无加速管的过渡区。也就是说对应于加速管出口截面的质量流速大于 $45 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 而对应于分配联箱入口截面的质量流速小于 $40 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

同时, 作者也得出两相流在汇集联箱内的压力分布校正系数 Φ_h 与汇集联箱出口质量流速 G_h (对应于引出管截面) 的关系式:

当 $45 \leq G_h \leq 180 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,

$$\Phi_h = 0.829551 - 1.15149 \times 10^{-2}G_h - 6.80327 \times 10^{-5}G_h^2 - 1.39883 \times 10^{-7}G_h^3 \quad (19)$$

当 $G_h \geq 180 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,

$$\Phi_h = 0.145$$

以上解释与分配联箱的情况类似, 所不同的是质量流速 G_h 对应于汇集联箱出口的引出管截面, 相应 Φ_h 较小。

因此, 两相流沿分配联箱和汇集联箱长度方向的实际压力变化值计算式应为:

$$\Delta P_{r1} = \Phi_r K_r \rho_m \frac{u_r^2}{2} \frac{x}{L} (2 - \frac{x}{L}) \quad (21)$$

$$\Delta P_{h2} = \Phi_h K_h \rho_m \frac{u_h^2}{2} \frac{x}{L} (2 - \frac{x}{L}) \quad (22)$$

4 试验值与理论值的比较

限于篇幅, 文中是分别在联箱的四种连接方式时, 各选择 3 个具有代表性的工况, 把理论值与试验值做了比较, 其曲线如图 6 和图 7 所示。

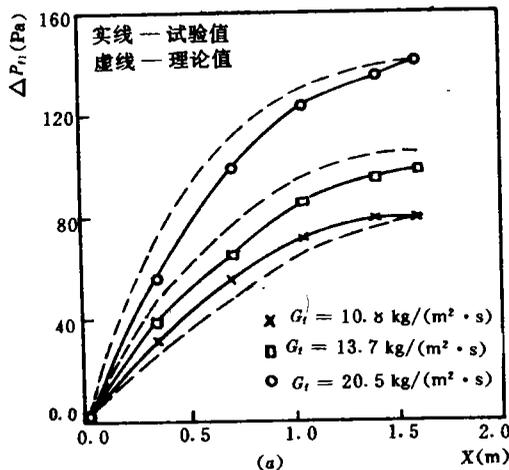


图 6(a) U 型无加速管时, 气液两相流沿分配集箱的静压变化值 ΔP_{r1} 随距离分配集箱入口距离 x 的变化曲线

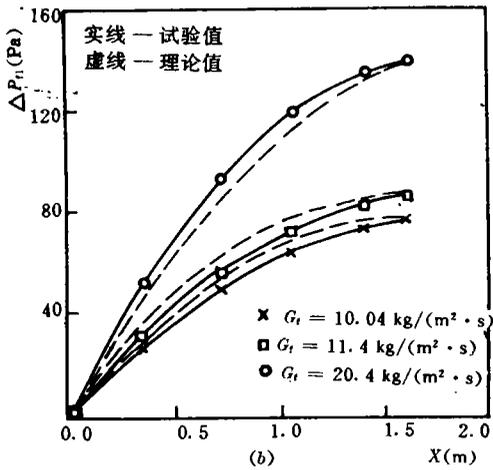


图 6(b) U型有加速管时,气液两相流沿分配集箱的静压变化值 ΔP_{r1} 随距离分配集箱入口距离 x 的变化曲线

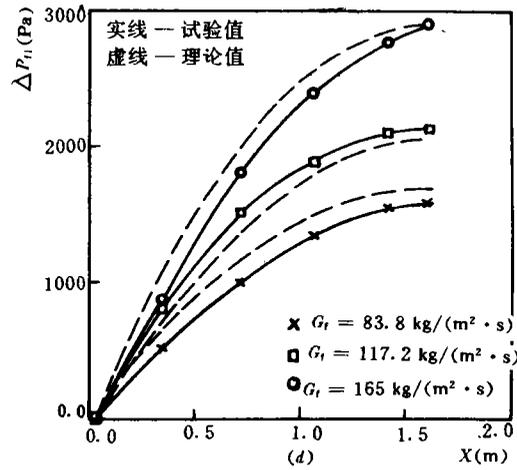


图 6(d) Z型有加速管时,气液两相流沿分配集箱的静压变化值 ΔP_{r1} 随距离分配集箱入口距离 x 的变化曲线

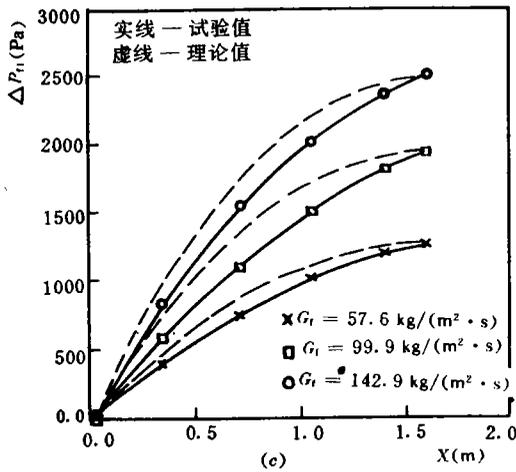


图 6(c) Z型无加速管时,气液两相流沿分配集箱的静压变化值 ΔP_{r1} 随距离分配集箱入口距离 x 的变化曲线

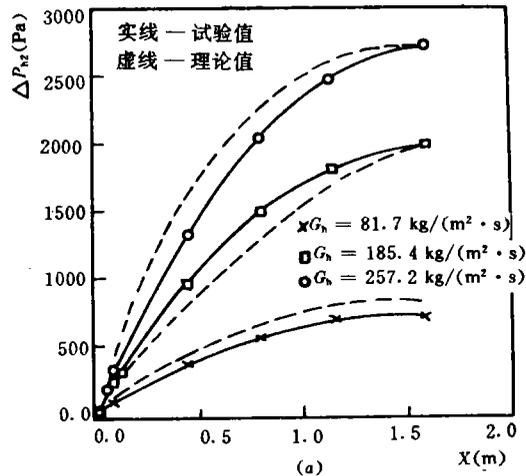


图 7(a) U型无加速管时,气液两相流沿汇集集箱的静压变化值 ΔP_{r2} 随距离汇集集箱出口距离 x 的变化曲线

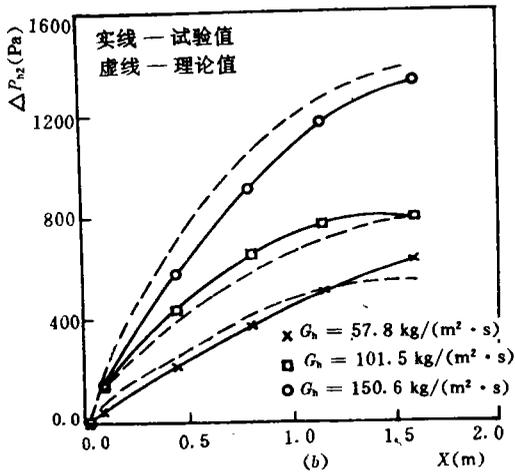


图 7(b) U型有加速管时,气液两相流沿汇集集箱的静压变化值 ΔP_{h2} 随距离汇集集箱出口距离 x 的变化曲线

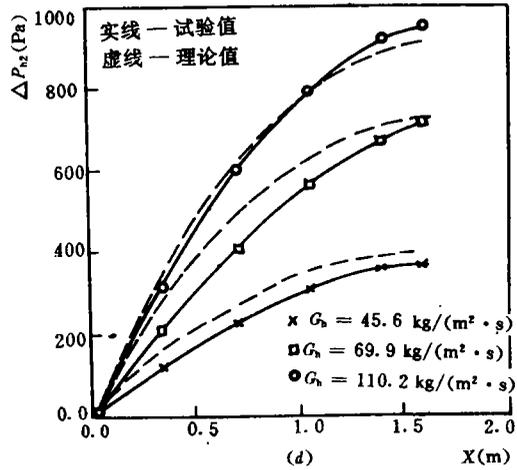


图 7(d) Z型有加速管时,气液两相流沿汇集集箱的静压变化值 ΔP_{h2} 随距离汇集集箱出口距离 x 的变化曲线

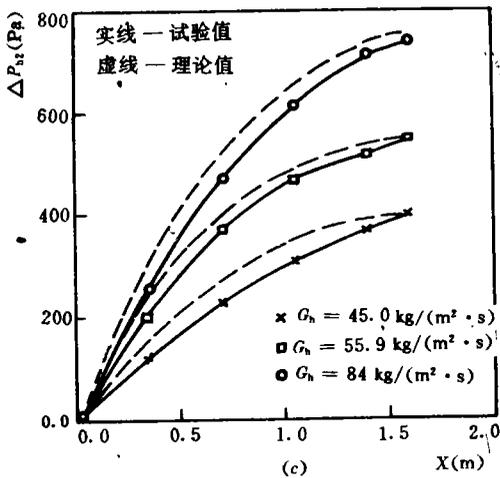


图 7(c) Z型无加速管时,气液两相流沿汇集集箱的静压变化值 ΔP_{h2} 随距离汇集集箱出口距离 x 的变化曲线

从图中可见,理论值与试验值吻合较好,其均方根误差在 20% 以内,可见应用式

(21) 和 (22) 计算两相流体沿分配联箱和汇集联箱长度方向的压力变化值是合适的。

5 结论

1 气液两相流在水平联箱内的流型既非完全均相亦非完全分相。本文在研究联箱内的压力分布时,首先从均相模型入手,然后根据试验结果进行修正,从而得出两相流沿联箱长度方向的压力变化值计算式。

2 计算结果和试验值比较表明两者相符良好,本文的研究工作为水平并联管子系统的气液两相流流量分配计算提供了必要的计算式。

参 考 文 献

- 1 林宗虎. 气液固多相流测量. 中国计量出版社, 1988
- 2 T. Kubo, et al. Bulletin of the JSME. 1973. 16(99)
- 3 林宗虎编. 气液两相流和沸腾传热. 西安大学出版社. 1987

() *heat recovery boiler, regeneration restriction, simulation calculation, STIG cycle*

(151) **A Study on the Combustion Stability of Utility Boilers** Chen Gang, Li Fekin, et al. (*Central China Polytechnical University*)

This paper gives a brief description of the theory of boiler combustion stability and presents several types of combustion stabilizing devices, among others, boundary jet-flow bluff-body combustion stabilizer, central return-flow combustion stabilizing device, inward/outward duplex return flow combustion stabilizer, intersection type high concentration pulverized coal burner. Their practical applications have shown that significant economic benefits have been attained as a result of their combustion stabilizing effect due to degreasing and also their enhanced combustion efficiency. **Key words:** *stable combustion, combustion theory, boiler*

(155) **An Exploratory study on the Development of Circulating Fluidized Bed Boilers** Zhang Zidong, Wu Wenyuan, Bao Yilin, Bei Rushan, Zhao Mingquan (*Power Engineering Department of the Harbin Institute of Technology*)

Circulating ratio, as an important design parameter of CFG boilers, exercises a significant influence on boiler design and operation. In this paper the authors deal with the dependence of the circulation ratio on the following factors: the selection of circulating materials, combustion efficiency, separation efficiency of separators, the arrangement of heating surfaces in a dense phase region, superheated steam temperature, etc. In addition, some helpful suggestions concerning the above are also presented. **Key words:** *circulating fluidized boiler, circulating ratio, low circulating ratio, circulating materials*

(159) **Jet-flow Device—a Useful Tool for Enhancing Circulation Water Velocity in Natural Circulation Hot Water Boilers** Zhu Qunyi, Zhang Peting, et al. (*Harbin Institute of Technology*)

Theoretical analysis and experimental study results are given of the performance of a jet-flow device employed in the circulating circuit of natural circulation hot water boiler. Presented in the paper is also a formula for calculating additional head ΔP of the said circuit after the installation of a straight-tube nozzle and a conical one. **Key words:** *hot water boiler, jet-flow device, straight-tube nozzle, conical nozzle*

(163) **A Mathematical Model for the Optimized Design of Heat Pipe Air Preheater of a Utility Boiler** Huang Xinyuan (*Power Engineering Department of Shandong Polytechnical University*)

This paper presents a mathematical model for the optimized design of the heat pipe air preheater of a utility boiler. The control condition of the preheater minimum tube wall temperature has been introduced into the constraint function vector. Some explanatory notes are given regarding the specific features of the method involving the use of optimization techniques during the design of the heat pipe air preheater. A specific calculation example is also presented. **Key words:** *utility boiler, heat pipe, air preheater, mathematical model*

(168) **A Study on the pressure Distribution in Headers of Gas-Liquid Two-Phase Flows in a Horizontal Parallel Tube System** Wu Dongyin (*Xi'an thermotechnical Institute*); Liu Zonghu (*Xi'an Communications University*)

() Through a series of experimental study and analysis of four types of connecting modes of headers in a horizontal parallel tube system the authors have come up with a method for calculating the pressure distribution of in-header gas-liquid two-phase flows in the said tube system. The calculation results are in good agreement with those obtained by tests. Thus is provided an essential formula for calculating the flow distribution of gas-liquid two-phase flows in a horizontal parallel tube system, **Key words:** *gas-liquid two-phase flow, header, pressure distribution*

(176) **Optimized Design of Flexible Membrane Couplings** ····· Wang Xingfeng, Fang Honghuai (*Mechanical Engineering Department of Nanjing Aeronautical Institute*)

By introducing an improvement on Powell's unconstrained optimization method, the authors propose an efficient constrained function method. With the use of this method a study has been conducted of the optimized design and calculation aimed at the attainment of coupling minimum weight and rigidity under the condition of meeting strength, rigidity and vibration requirements. The membrane strength and rigidity calculation being based on a finite element analysis, it is essential to solve a series of issues concerning finite element pre-processing (automatic division of elements, automatic division of loads) and post-processing (the drawing of isolines). The authors have also developed a set of relatively refined software system for the optimized design of membrane configurations (designated ODFC for short). **Key words:** *optimization, membrane, coupling*

(180) **Development of a Microcomputer-based Multi-channel Intelligent Flowmeter** ····· Zhu Deshu, et al. (*East China Shipbuilding Institute*)

This paper deals with the hardware and system software of a microcomputer-based multi-channel intelligent flowmeter with a detailed description of the creation of a flow measurement compensation model for the said flowmeter. Practical operation has shown that the above-cited model plays a key role in enhancing the measurement precision during operations under off-design conditions. **Key words:** *steam flow, compensation measurement, orifice plate, multi-channel intelligent flowmeter*

(186) **An Improved PI Controller of Thermotechnical Processes with Substantial Time Delay Characteristics** ····· Yang Yongbin (*Harbin Institute of Technology*)

The author has proposed an improved PI controller of thermotechnical processes with substantial time delay characteristics. The controller virtually constitutes a specific example of Smith forecast control. However, prior to the design of such a controller, it is not necessary to have a precise understanding of the mathematical model of the processes. The control parameters can also be adjusted on the basis of on-site operation results just like those of the PI controller. The said controller has significant potential for widespread applications in process control. **Key words:** *PI control, Smith forecast control, control of thermotechnical processes*