

气液两相横向绕流错列管束上阻力系数和阻力脉动系数的试验研究

苏新军¹, 王 栋², 林宗虎²

(1. 天津商业大学 天津市制冷技术重点实验室 天津 300134;

2. 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: 采用电阻应变仪和梁式电阻应变传感器, 试验研究了气液两相流横向冲刷三排错列排列管束时的阻力和脉动阻力系数。测试管采用 $\phi 30$ mm 的有机玻璃圆柱; 气液两相流的流型为细泡状流; 两相隙缝流雷诺数的范围为 $2.0 \times 10^4 \sim 6.0 \times 10^4$; 截面含气率的范围在 $0 \sim 0.30$ 。试验发现, 随着含气率的增加, 圆柱上的脉动阻力系数减小; 随着 Re 数的增大, 脉动阻力系数减小。错列圆柱上的阻力系数随含气率的增加而增加。

关 键 词: 气液两相流; 脉动阻力系数; 隙缝流; 错列管束

中图分类号: O359 文献标识码: A

引 言

在管壳式热交换器、蒸汽发生设备以及其它许多动力及化工设备中, 常出现气液两相流动工况。这些设备中的换热管束常为错列形式, 当气液两相流横向冲刷错列管束时, 会诱发管束的振动。根据对单相流中流体诱发管束振动的研究, 诱发振动的机理有 2 种: (1) 周期性的旋涡脱落; (2) 紊流随机脉动。对气液两相流横向冲刷管束的研究证明^[1], 当含气率较小时, 振动主要是由于旋涡的脱落引起的。当气液两相流横向冲刷错列管束发生旋涡脱落时, 在流体流动的垂直(升力)方向对管子产生一脉动力, 即所谓的脉动升力, 其大小反映了圆柱振动的强弱。

流体横向冲刷管束时, 除了由于旋涡脱落引起管束在横向方向的振动外, 圆柱表面压力梯度的存在、旋涡脱落位置的变化和来流的紊流脉动, 也会在顺流方向引起振动。一般顺流方向圆柱的振动用阻力脉动系数来度量。

很多研究者对单相流中错列管束上受到的脉动作用力做了研究, 但由于两相流比单相流更加复杂, 迄今为止, 尚未见到有关气液两相流横向冲刷错列

圆柱时相关脉动作用力的文献报道。

在单相流中, 对脉动力的试验研究主要通过 2 种方法: 一是通过测量沿圆柱表面的脉动压力的分布, 用间接的方法得出管子上受到的脉动升力; 二是应用电阻应变仪测量圆柱受到的作用力, 取其时均值作为阻力的值, 而测量值和时均值之差作为脉动作用力的值。

本研究采用后一种方法, 对矩形管内垂直上升的气液两相流横向冲刷错列管束时受到的阻力进行了研究。试验在气液两相流回路上进行^[2], 截面含气率的范围为 $0 \sim 0.3$, 气液两相流的流型为细泡状流, Re 数的范围为 $2.0 \times 10^4 \sim 6.0 \times 10^4$ 。

1 试验装置和数据处理方法

1.1 试验装置

本试验是在气液两相流回路上进行的^[2], 所采用的脉动作用力测量装置如图 1 所示, 试验前对此测力系统进行了静态标定和动态标定, 以满足本试验对所测定的低频振动的小力值测量的需要。本研究所采用的试验装置及试验仪器的详细资料请参照文献[2]。

试验用错列圆柱的排列形式如图 2 所示。 P 为纵向节距, T 为横向节距。

错列圆柱采用 Weaver 等人的分类方式布置^[3], 如图 3 所示。本试验分别测量了 3 种标准错列布置形式(平行三角形, 旋转正方形, 正三角形)的圆柱上受到的脉动升力。

1.2 试验数据的处理

气液两相流中, 流速采用两相流的平均流速 (v_{mp} (m/s)), 即:

收稿日期: 2012-04-27; 修订日期: 2012-05-31

作者简介: 苏新军(1970-), 男, 河北顺平人, 天津商业大学副教授、博士。

$$v_{\text{mtp}} = (q_L + q_G) / A \quad (1)$$

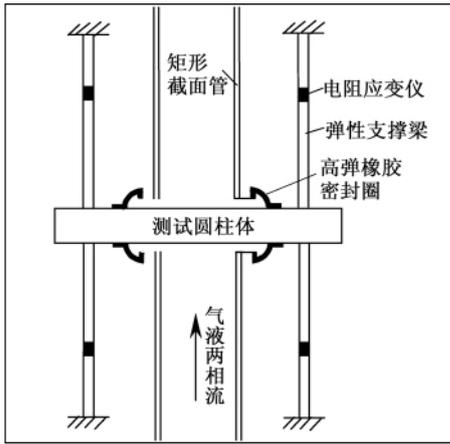


图 1 动态小力值传感器示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the dynamic small force sensor

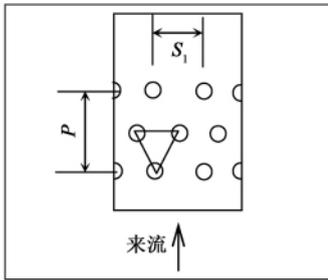


图 2 试验段错列圆柱示意图
Fig. 2 Schematic drawing of the staggered cylinders in the section under the test

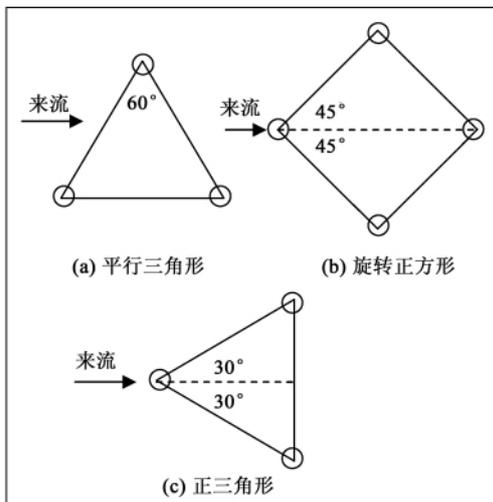


图 3 标准圆柱排列形式示意图
Fig. 3 Schematic drawing of the standard cylinder arrangement mode

式中: A —矩形截面管道的流通面积; q_L 、 q_G —试验段内的液相和气相的体积流量。由于水的体积对较小的压力、温度变化不太敏感,而气体体积随压力及温度变化而变化很大,根据状态方程, q_G 可用下式修正:

$$q_G = \frac{p_G}{p_m} \cdot \frac{t_m}{t_G} \cdot q'_G \quad (2)$$

式中: p_G —气相的分压力; p_m —两相流的静压; t_m —两相流的平均温度; t_G —此处气相的温度; q'_G —为玻璃转子流量计试验测量值。

来流的截面含气率为 α , 根据 Арманд 的研究^[4] 采用下式计算:

$$\alpha = C\beta = C \cdot \frac{q_G}{q_G + q_L} \quad (3)$$

式中: β —体积含气率; C —经验常数, 等于 0.833。

来流的平均密度 ρ_m 按下式计算:

$$\rho_m = \alpha\rho_G + (1 - \alpha)\rho_L \quad (4)$$

式中: ρ_G 、 ρ_L —气相和液相密度。

按管子隙缝间的流速计算的两相隙缝流 Re 数按式(5)计算:

$$Re = (v_{\text{tp}}^g \times D) / \nu_L \quad (5)$$

式中: v_{tp}^g —气液两相在两管隙缝间的平均流速, m/s 按式(6)计算; ν_L —液相的动力粘度, 在上式中之所以采用 ν_L 是由于经常覆盖在圆柱表面的液体层比边界层厚好几倍^[5] 其余参数与式(1)相同。

两相隙缝流流速 v_{tp}^g 采用下式计算:

$$v_{\text{tp}}^g = \frac{S_1}{S_1 - D} \times v_{\text{mtp}} \quad (6)$$

折算液相隙缝 Re 数采用下式计算:

$$Re = \frac{V_{\text{sp}}^g \times D}{\nu_L} \quad (7)$$

式中: v_{sp}^g —单相液体隙缝流流速, 按下式计算:

$$v_{\text{sp}}^g = \frac{S_1}{S_1 - D} \times v_{\text{msp}} \quad (8)$$

式中: v_{msp} —液相来流平均流速, 按式(9)计算:

$$v_{\text{msp}} = q_L / A \quad (9)$$

利用阻力的均方根值来无量纲化, 可得出脉动阻力系数 C'_D 为:

$$C'_D = \sqrt{F_D^2} / \left(\frac{1}{2} \rho_m V_g^2 DL \right) \quad (10)$$

式中: F'_D —阻力的脉动量; L —测试圆柱浸入流体中的长度。

利用阻力的时间平均值来无量纲化, 可得出时均阻力系数 C_D 即:

$$C_D = \sqrt{F_D^2} / \left(\frac{1}{2} \rho_m V_g^2 DL \right) \quad (11)$$

2 试验结果和讨论

2.1 脉动阻力系数与含气率及 Re 数的关系

图 4 是 3 种错列圆柱上脉动阻力系数与含气率的关系曲线,从图中我们可以看到一个趋势:随着含气率的增加,圆柱上的阻力脉动系数减小。一般认为,由于空气加入后,圆柱间的流体的紊流强度增大,造成圆柱上脉动阻力的增大;但在气液两相垂直向上流动中,在两相之间存在较大的密度差,空气的流速较大,使两相流的流速远大于折算液相流速,因此使得阻力脉动系数减小。这也说明,在气液两相流中,随着含气率的增大,气泡抑制了圆柱在顺流方向的振动。

由图 4 还可以看出,随着 Re 数的增大,阻力脉动系数减小。

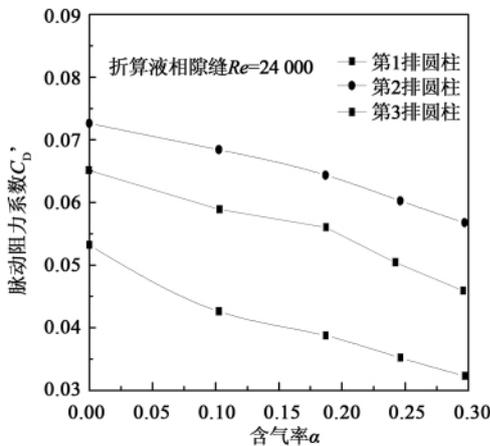


图 4 脉动阻力系数与含气率和 Re 数的关系

Fig. 4 Relationship between the fluctuation resistance coefficient with the gas content and Re number

2.2 时均阻力系数

在设计换热设备时,流动阻力是一系列重要性数据之一。

管束的流动阻力,取决于气液两相流体在管间容积内的流动特性。当横向绕流管束时,出现特有的加速和减速流动,圆柱上发生旋涡的脱落,在圆柱的尾部造成旋涡流动区,因而导致两相流体动能的损失。这样,设备中管束的排列方式对其流动阻力有影响。当管束内管排数较小时,在总流动阻力中还要考虑流体进入管束首排以及从管束尾部流出时所造成的附加阻力的影响。

图 5 是正三角形排列、旋转正方形排列和平行三角形排列的错列圆柱中的第三排圆柱上的阻力系数与含气率的关系曲线。由图 5 可以看出:圆柱上的阻力系数在较小的含气率时,随含气率的增加而增加较大,而在较大的含气率时,阻力系数的曲线区域平缓。这说明在较小的含气率时,空气对阻力的影响较大,而在含气率较大时,由于含气率的增加,液相占据的份额减小,气相占据的份额增大,速度增大,粘性减小,圆柱表面的边界层减薄,所以阻力系数曲线趋于平缓。

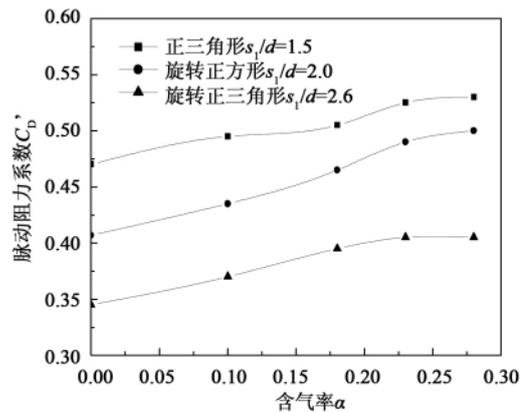


图 5 时均阻力系数和含气率的关系

Fig. 5 Relationship between the time-averaged resistance coefficient with the gas content

阻力主要取决于横向相对管距,并随其减小而增大。而对于纵向管距,由于旋涡占据的空间随纵向管距的增大而扩大。因而在一些情况下对阻力也有影响。在错列管束中影响更大,从图 5 可以看出这种影响。阻力随纵向节距的增加而增大,因为形成旋涡的管间容积的大小主要取决于纵向节距。

图 6 是与 Joo 等人的实验数据的比较^[6]。阻力系数根据式(11)计算,式中的速度 V_g 用折算液相隙缝流速 V_L 代替(即将液相隙缝流速折算到整个横截面上),而 Joo 的数据是利用沿管子周向的压力分布计算得到。由图可以看出,本实验所得阻力系数大于 Joo 的数据,而在折算液相隙缝 $Re = 37\ 000$ 时,当含气率 $\alpha \geq 0.14$ 后小于 Joo 的数据。其原因是采用了直接测量力得到的阻力系数,而 Joo 等人研究是利用沿管子周向压力分布计算得到的阻力系数;更主要的是因为 Joo 等人采用的是来流液相的折算流速,而本试验采用的是气液两相流的缝隙混合流速,在截面含气率较小时,这两个流速较为接近,所以时均阻力系数曲线差异不大,而在较大的含气率时,由

于气相份额的增加,气液两相流体混合物流速远大于液相的折算流速,使得两种曲线差异较大。

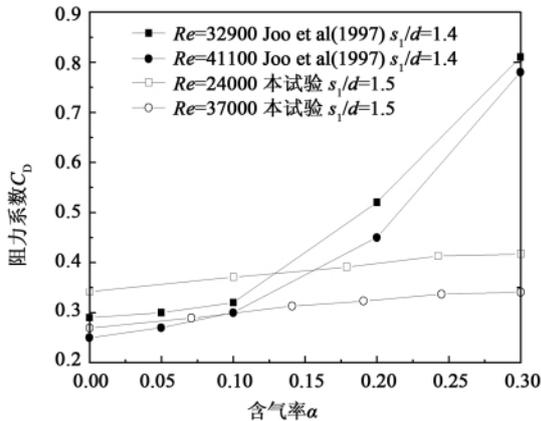


图 6 正三角形错列管束上的时均阻力系数与含气率的关系

Fig. 6 Relationship between the time-averaged resistance coefficient with the gas content in a normal triangle staggered tube bundle

3 结 论

采用小力值传感器实验研究了 3 种错列排列管束的阻力和脉动阻力系数,并将实验结果和 Joo 等人实验结果进行比较^[6],发现在小含气率时两种实验结果吻合较好,而在含气率较大时有较大差异,原因在于采用测量作用在圆柱上的阻力代替了利用圆柱表面压力分布的计算求解阻力,并用缝隙混合流速取代来流液相折算流速。实验结果表明:

(1) 气液两相流横向冲刷错列圆柱时,圆柱上的脉动阻力系数随着含气率和 Re 数增加而减小。

(2) 错列圆柱上的阻力系数随含气率增加而增加。在较小含气率时,随含气率的增加而增加较大;在较大的含气率时,阻力系数的曲线区域平缓。

(3) 错列圆柱上的阻力主要取决于横向相对管距,并随其减小而增大。而纵向节距的增大也会使阻力增加。

参考文献:

[1] In-Cheol Chu, Heung June Chung, Seungtae Lee. Flow-induced vibration of nuclear steam generator U-tubes in two-phase flow [J]. Nuclear Engineering and Design 2011, 241: 1508 - 1515.

[2] 苏新军, 张修刚, 林宗虎. 错列圆柱表面周向压力分布的试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(1): 1 - 4. SUN Xin-jun, ZHANG Xiu-gang, LIN Zong-hu. Experimental study of the pressure distribution on the surfaces of staggered cylinders along the circumferential direction [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University 2001, 35(1): 1 - 4.

[3] Weaver D S, Fitzpatrick J A. A review of cross-flow induced vibration in heat exchanger tube arrays [J]. J. of Fluids and Structures, 1988, 2: 73 - 93.

[4] 林宗虎, 王树众, 王 栋. 气液两相流和沸腾传热 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003. LIN Zong-hu, WANG Shu-zhong, WANG Dong. Gas-liquid two-phase flow and boiling heat transfer [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2003.

[5] Inoue A, Kozawa Y, Yokosawa M, et al. Study on two phase cross flow, part I: flow characteristics around a cylinder [J]. Int J Multiphase Flow, 1986, 12(2): 149 - 167.

[6] Joo Y, Dhir V K. An experimental study of drag on a single tube and on a tube in an array under two phase cross flow [J]. Int J Multiphase Flow, 1994, 20(6): 1009 - 1019.

(辉 编辑)



亚洲第一个浮动液化天然气项目

据《Gas Turbine World》2012 年 9 - 10 月刊报道, GE Oil & Gas 已接到一份给马来西亚 Petronas 供应由燃气轮机驱动的压缩机轮系, 用于亚洲第一个 FLNG(浮动液化天然气)装置。该装置停泊在沙捞越州民都鲁海岸外约 180 km。

压缩机轮系是液化过程重要的组成部分, 它把天然气冷却到液态。GE 设备供应的范围包括 4 台 PGT25 + G4 燃气轮机发电机系统、2 台由 PGT25 + G4 燃气轮机驱动的压缩机组和 2 台由电动机驱动的离心压缩机组。

GE 预定在 2013 年 8 月把它的设备交付给马来西亚。

计划于 2015 年第四季度启动, 该浮动(海上)液化天然气装置被设计成一年生产 120 万吨液化天然气。

在投入生产后, 该装置将使马来西亚液化天然气总的生产能力从目前的一年 2 570 万吨增加到一年 2 690 万吨。

(吉桂明 摘译)

that measured by using a laser Doppler particle analyzer (PDPA) . It has been found that when the particle diameter of the liquid drop in the sparse phase zone along the radial direction has little change and is irrelative to the particle velocity ,the corrected LHF model can predict the liquid drop velocity in the lower reaches of the flow field atomized. With an increase of the axial length of the mist torch ,the predicted values of the liquid drop velocities in both atomization center and rim are more and more close to the test values. **Key words:** effervescent atomization ,liquid drop velocity ,prediction model

气液两相横向绕流错列管束上阻力系数和阻力脉动系数的试验研究 = **Experimental Study of the Resistance Coefficient and Fluctuation Coefficient of a Staggered Tube Bundle Laterally Going Around by a Gas-liquid Two-phase Flow** [刊 汉]SU Xin-jun (Tianjin City Key Laboratory on Refrigeration Technology ,Tianjin Commerce University ,Tianjin ,China ,Post Code: 300134) ,WANG Dong ,LIN Zong-hu(National Key Laboratory on Multiphase Flow in Power Engineering ,Xi'an Jiaotong University ,Xi'an ,China ,Post Code: 710049) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(2) . - 154 ~ 157

By using a resistance strain meter and a beam type resistance strain sensor ,experimentally studied were the resistance coefficient and fluctuation resistance coefficient of a staggered tube bundle in three tows laterally swept by a gas-liquid two-phase flow. Organic glass cylinders with a diameter of $\phi 30$ mm were used as the tubes for testing ,the flow pattern of the gas-liquid two-phase flow was of cell shape and the Reynolds number of the two-phase gas flow was within a range from 2.0×10^4 to 6.0×10^4 with the void fraction in the section ranging from 0 to 0.30. It has been found from the test that with an increase of the void fraction and the Reynolds number ,the fluctuation resistance coefficient of the cylinders will decrease while the resistance coefficient of the staggered cylinders will increase with an increase of the void fraction. **Key words:** gas-liquid two-phase flow ,fluctuation resistance coefficient ,gap flow ,staggered cylinder

流化床 O_2/CO_2 燃烧(V) - 褐煤的高氧浓度燃烧优化 = **O_2/CO_2 Combustion in a Fluidized Bed(V) -Optimization of Lignite Combustion at a High Oxygen Concentration** [刊 汉]ZHAO Ke ,TAN Li ,DUAN Cui-jiu , et al(Engineering Thermophysics Research Institute ,Chinese Academy of Sciences ,Beijing ,China ,Post Code: 100190) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2013 28(2) . - 158 ~ 163

When combustion at a high oxygen concentration takes place in a circulating fluidized bed ,the thermal fragmentation and combustion characteristics of lignite will change. To optimize the combustion of lignite at a high oxygen concentration ,the influence of the primary air oxygen concentration and the secondary air flow proportion on the combustion stability ,pollutant formation characteristics and combustion efficiency was studied in a 0.15 MW circulating fluidized bed test system. The test results show that lignite can realize a stable combustion when the oxygen concen-