

600 MW 超临界 CFB 垂直并联内 螺纹管两相流压力降不稳定试验研究

邓志安, 罗毓珊, 陈听宽, 王海军

(西安交通大学多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘 要:在 600 MW 超临界 CFB 水冷壁变负荷实际运行条件下, 以水冷壁实际采用的 $\Phi 28.6 \times 5.8$ mm 的 4 头内螺纹管为研究对象, 在高压汽水两相流回路上对垂直并联管中汽液两相流压力降型不稳定进行了试验研究。确定了压力、质量流速、进口过冷度以及上游可压缩容积对垂直并联内螺纹管两相流压力降型脉动的影响。结果表明, 随压力增大, 发生脉动的临界热负荷增加, 界限干度逐渐升高, 系统稳定性增强, 脉动周期先变长后变短, 脉动的振幅逐渐减小。本试验中, 当压力 $P > 6$ MPa 时, 就不再有压力降脉动发生; 随着质量流速的增加, 脉动发生的界限热负荷升高, 而脉动的周期减小; 进口过冷度对密度波脉动呈现单值性影响, 随进口过冷度增加, 界限热负荷单调增加, 界限干度的变化表现出不同的趋势, 在较低的质量流速下, 随着过冷度的增加, 界限干度单调下降; 在较高的质量流速下, 随着过冷度的增加, 界限干度单调上升; 上游可压缩容积对界限热负荷的影响较小, 随充气比的增大, 脉动的周期和幅值逐渐增大。

关键词:超临界; 循环流化床; 低质量流速; 垂直并联内螺纹管; 汽-液两相流; 压力降脉动

中图分类号: TK223.4 文献标识码: A

引 言

循环流化床(CFB)作为新一代的燃烧技术, 具有氮氧化物排放低、可实现在燃烧过程中直接脱硫、燃料适应性广、燃烧效率高(可达 97.5%~99.5%)和负荷调节范围大等优势, 已成为当前煤炭洁净燃烧的首选炉型^[1]。CFB 锅炉由于其固有的优势和燃烧特性, 其更易于向大型化和超临界方向发展。在超临界直流锅炉中, 工质的质量流量较低而温度很高, 所以对水冷壁的冷却能力有较高的要求, 而超临界循环流化床锅炉炉膛内较低的温度和热流密度满足了对水冷壁冷却能力的要求。另外, 超临界循环流化床锅炉炉内热流分布有利于水冷壁金属温度的

控制; 其次, 循环流化床锅炉的低温燃烧特性和较高的固体颗粒浓度, 保证了水冷壁的吸热能力^[2~3]。在超临界 CFB 锅炉启动和变负荷运行工况中有可能发生两相流不稳定性。本研究以 600 MW 超临界 CFB 水冷壁实际采用的内螺纹管为研究对象, 以其变负荷运行工况为试验工况参数, 对垂直并联管中汽液两相流压力降型不稳定进行了试验研究。

压力降脉动是两相流中常见的不稳定类型, 在热力系统中, 由于压力降脉动的存在, 使得水冷壁流量、管壁温度等发生周期性的波动, 不仅降低了热力系统的运行性能, 而且严重威胁着设备的运行安全性。关于垂直并联管高压汽-水两相流压力降脉动现象, 有过很多试验研究报导^[4~6], 但以前的试验主要针对高质量流速和高热负荷锅炉水冷壁, 直接针对较低质量流速锅炉水冷壁的研究并不多见, 且大部分研究都在光管中进行, 垂直并联内螺纹管在高温高压条件下的不稳定性研究在国内也未见报导, 因此, 进行较低质量流速条件下的垂直并联内螺纹管两相流不稳定研究具有重要意义。

1 试验装置和试验方法

本试验是在西安交通大学动工程多相流国家重点实验室的高温高压试验台上完成的。试验管路系统如图 1 所示。高位水箱中的去离子水首先通过过滤器过滤, 再经高压柱塞泵加压, 经流量调节阀和流量孔板后进入到预热段升温, 并达到设定的进口过冷度, 通过阀门、脉冲箱(经过或不经过)进入到分配集箱, 分配到两根几何尺寸相同的试验管段内, 被加热为具有一定干度的汽水混合物, 并经过汇集集箱后, 流出试验段。

本试验采用超临界锅炉水冷壁管圈实际使用的

收稿日期: 2009-01-13; 修订日期: 2009-02-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10975111)

作者简介: 邓志安(1962-), 男, 河南许昌人, 西安交通大学博士研究生。

规格为 28.6 mm×5.80 mm 4 头内螺纹管作为试验段用管, 试验段为两管垂直并联向上布置型式。

预热段和试验段都采用交流电直接加热管子的方式模拟锅炉受热面的热负荷。

试验段由两根并联管和管子两端的进口和出口集箱组成, 每根试验段管子总长为 8.35 m, 其中加热段为 6.7 m, 试验段压差测点垂直总高度为 6.82 m, 试验段的两并联管间距为 600 mm, 用上下两个不锈钢集箱相连。

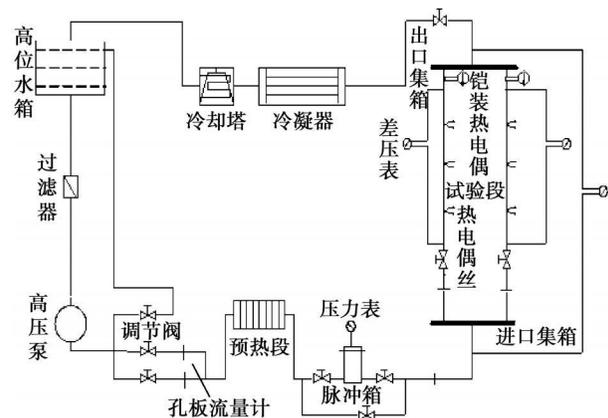


图 1 高温高压试验管路示意图

试验段总进口流量由装在控制阀门后的孔板流量计测量, 各分管流量由装在进口集箱后各分管的孔板流量计测量。试验段进出口流体温度分别由安装在试验段分管进、出口的 NiCr-NiSi 铠装热电偶测量。在进出口集箱外的总管上以及每个试验段两端装有取压环室, 用于测量差压和进出口压力。加热功率是通过测量流过加热管段的电流和加在其两端的电压得到的。以上测量信号通过 IMP35951C 数据采集板自动采集后存入工控机进行处理, 并对总流量、各管分流量、总压差、各管分压差和总压力等主要特征参数用多笔函数记录仪进行同步记录。

本试验所有工况都采用固定压力和流量、逐步增加热负荷的方法进行。逐步等量地增加试验段热负荷, 直到出现稳定的脉动工况, 通过计算机采集该点数据, 然后继续增加热负荷, 直到管壁发生温度飞升并超出可以控制的范围或功率增加到设计最大功率便完成了一个试验工况。

本试验的主要参数范围为: 系统压力 $P=3、4、5、6、7、9、11.5$ 和 12 MPa, 每个分管质量流速 $G=200、300、400$ 和 450 kg/(m²·s), 进口过冷度 $\Delta t_{sub}=18、30、50、70、90、110$ °C, 脉冲箱充气压力比 $P_s/P_e=1/4、1/2、3/5$, 出口节流系数 $K=20、50、80$, 内壁

热负荷 $q=0 \sim 260$ kW/m², 不对称加热比 $q_1/q_2=1/2、3/4、1$ 。

2 试验结果及分析

2.1 垂直并联内螺纹管压力降脉动特征

压力降型脉动是由于系统中存在较大的可压缩容积和系统的水动力特性曲线具有负斜率区而在系统中形成不稳定现象。产生压力降脉动必须具备两个条件: (1) 系统中要有足够的可压缩容积; (2) 系统的水动力特性曲线存在负斜率段。二者缺一不可^[7]。

在实验中, 压力降型脉动发生时, 系统的主要参数(总压力和总流量、总压差和分管压差、管壁温度等)都做较大幅度 and 较长周期的波动, 干度的变化范围达到 0~1, 脉动周期为 130~245 s, 压力脉动的幅值为 0.5 MPa, 各并联支管流量脉动幅值为 147 kg/(m²·s), 且两并联支管做同向脉动。图 2 为本试验中出现的典型的垂直并联内螺纹管压力降脉动总流量、分管流量、总差压、分管差压、试验段进口压力和管壁温度变化曲线。

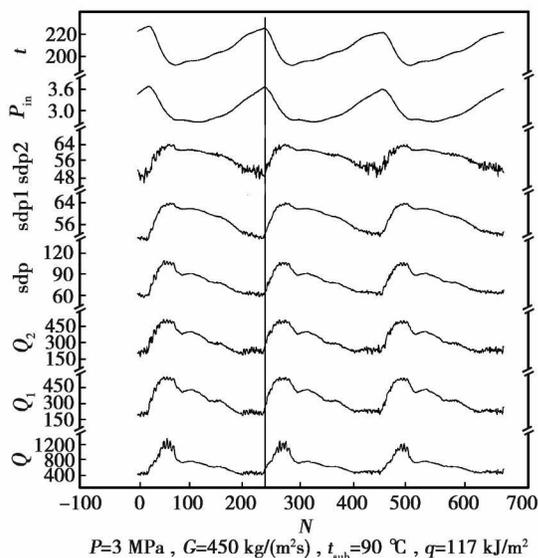


图 2 典型垂直并联内螺纹管压力降脉动曲线

2.2 压力降脉动各主要参数影响

2.2.1 系统压力的影响

系统压力对压力降脉动有较大影响, 如图 3 所示, 增加系统压力, 发生压力降脉动的界限热负荷增加, 系统的稳定性增加。这是由于压力增加汽液两相的密度差减小, 系统的“刚性”增加, 静态水动力特性曲线负斜率减小。由试验数据分析, 发生压力降

脉动时的界限干度值随压力升高而升高。本次试验中, 当压力 $P > 6 \text{ MPa}$ 时, 就不再有压力降脉动发生。

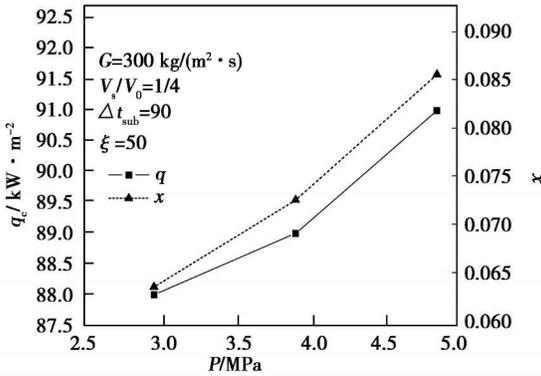


图 3 压力对界限热负荷的影响

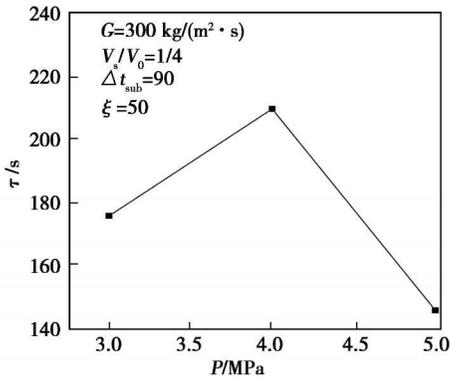


图 4 压力对脉动周期的影响

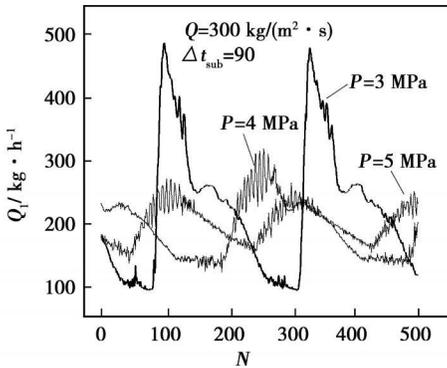


图 5 压力对流量脉动幅值的影响

系统压力对脉动周期的影响如图 4 所示。从实验中观查到: 脉动周期随压力的升高先变长后变短, 系统压力 4 MPa 是脉动周期的拐点。这是由于系统压力对脉动周期的影响是比较复杂的。一方面随着压力的增加, 汽液两相密度差变小, 增加了气液混合物的平均密度, 降低了流速, 使得脉动的周期随压力

增大而变大; 另一方面, 在压力增加的情况下, 界限热负荷和界限干度都相对增大, 增加了混合物含气率, 汽液平均密度减小, 在同样的质量流速下, 流体流速增大, 在同样长的流体管道, 流体流过时间相应减小。脉动的振幅随着系统压力的升高而减小, 从而系统的稳定性增强。系统压力对流量脉动振幅的影响如图 5 所示。

2.2.2 质量流速的影响

图 6 为进口质量流速对界限热负荷的影响。质量流速对界限热负荷的影响存在明显的单值性。随着质量流速的不断增大, 界限热负荷值单调上升。这是因为当质量流速增加时, 要达到相同的出口干度, 试验段的热负荷必然增加。从这个角度看, 增加质量流速使系统的稳定性增强。

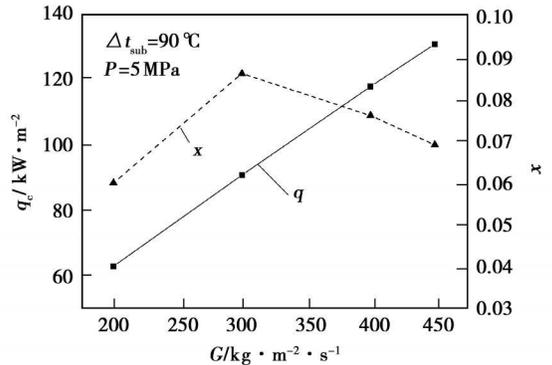


图 6 质量流速对界限热负荷的影响

从图 6 看出, 质量流速对发生压力降脉动的界限干度的影响比较复杂。压力增加, 发生压力降脉动的界限干度随之增大; 随质量流速增加, 发生压力降脉动的界限干度先升高而后下降。其原因是: 当质量流速增加时, 要达到相同的出口干度, 相应地必须增加试验段的热负荷, 热负荷增加的比例与质量流速增加的速率相比较小, 不能达到同样出口干度所需要的热量。也就是说, 以单位工质焓值增加衡量, 增加质量流速使发生压力降脉动的界限干度降低。从界限干度的图中也可以分析, 干度的变化并不是一个定值, 在质量流速较低时, 随着质量流速增加, 界限干度增加, 而在较高质量流速条件下, 质量流速增加, 界限干度减小。

如图 7 所示, 随着质量流速的增大, 脉动的周期减小。这主要由于工质流过试验段的时间减少, 使得脉动的反馈时间减少。

在本次试验中, 观测到质量流速对压力脉动幅值的影响不十分明显。说明在本试验参数和工况

下,对垂直并联内螺纹管,质量流速对压力脉动幅值的影响较小。

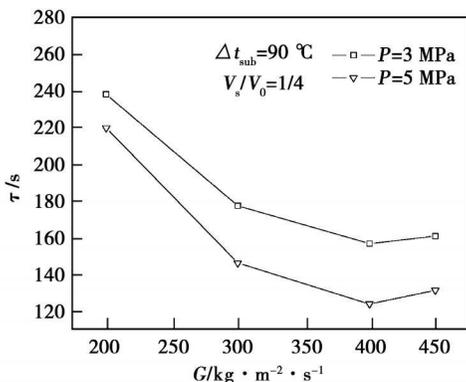


图 7 质量流速对脉动周期的影响

2.2.3 进口过冷度的影响

如图 8 所示,进口过冷度对压力降脉动起始点有很大影响,本试验中,进口过冷度的影响是单值的。随着进口过冷度的增加,界限热负荷不断升高;进口过冷度增加,相当于试验段中单相段变长,阻力增加,相当于增加了进口节流,使系统更加稳定。

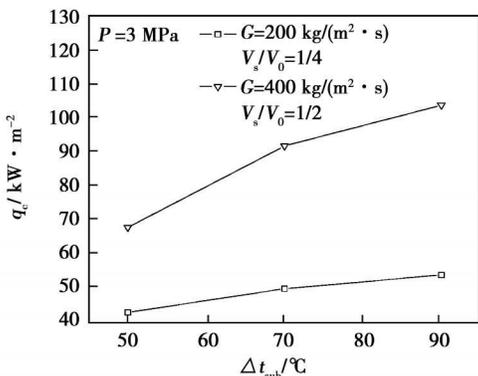


图 8 过冷度对界限热负荷的影响

张冀辉等人认为^[8],进口过冷度的增加将使发生脉动的界限干度增大,脉动周期变长。在本次试验中观察到了两种不同的变化趋势,如图 9 所示。根据荆建刚的研究表明^[9],这种现象出现的原因是由于进口过冷度的多值性的影响;一方面,进口过冷度增加,液相段变长,阻力增加,液相段与总阻力之比增大,相当于增加进口节流,有利于系统更加稳定;另一方面,进口过冷度的增加使得相同负荷下系统平均干度下降,总压降减小,因此对于小扰动的敏感度增强,使得系统稳定性降低。随着进口过冷度的增加,水动力曲线的负斜率区变陡,使进口压力、流量等参数的脉动幅度增大。

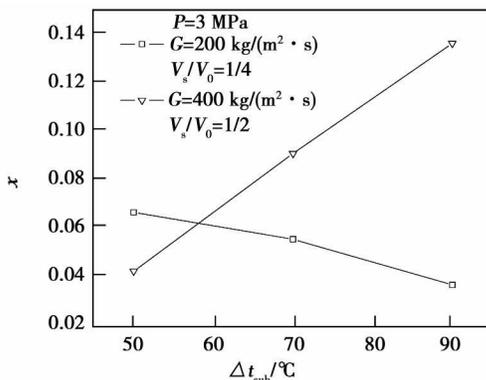


图 9 过冷度对界限干度的影响

在试验中观察到,过冷度对压力波动幅度的影响较小,随着过冷度的增加,脉动的幅度增大,但增加的幅度较小。

2.2.4 上游可压缩容积的影响

如图 10 所示,在压力为 3 MPa、过冷度为 90 C 时,充气比为 1/4 与 1/2 时的界限热负荷曲线几乎重合,说明上游可压缩容积对临界热负荷的影响并不大。但若不加脉冲箱,则观察不到压力降脉动。

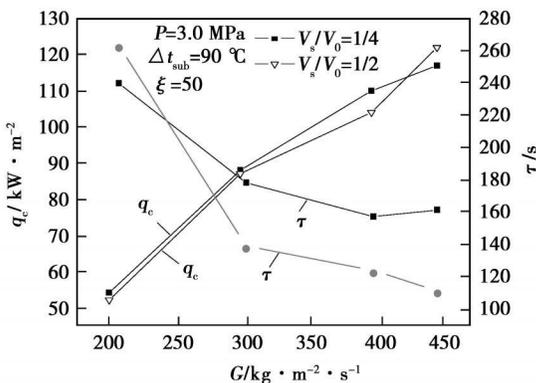


图 10 上游可压缩容积对界限热负荷和脉动周期的影响

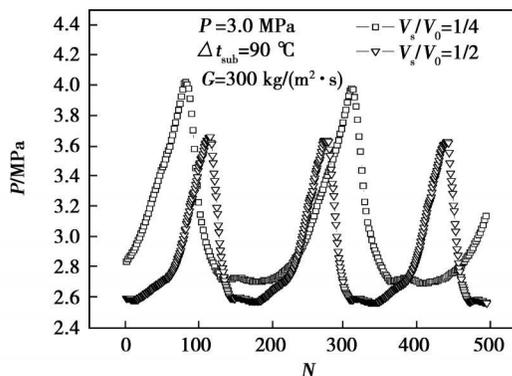


图 11 上游可压缩容积对脉动幅值的影响

从图 10 中可以发现: 在其它参数相同的情况下, 质量流速为 $300 \sim 450 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, $1/4$ 充气比的脉动周期比 $1/2$ 充气比的脉动周期要大; 质量流速为 $200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $1/2$ 充气比的脉动周期比 $1/4$ 充气比的脉动周期要长; 图 11 说明充气比越大压力降脉动的幅值越大。

3 结 论

在 600 MW 超临界 CFB 水冷壁变负荷实际运行条件下, 以水冷壁实际应用的 4 头内螺纹管为研究对象, 在低质量流速条件下, 对垂直并联管中汽液两相流压力降型不稳定进行了试验研究, 通过试验发现, 当压力降型脉动发生时, 系统的主要参数都做较大幅度和较长周期的波动, 干度的变化范围达到 $0 \sim 1$, 脉动周期为 $130 \sim 245 \text{ s}$, 压力脉动的幅值为 0.5 MPa , 各并联支管做同向脉动, 并得出结论如下:

(1) 随系统压力增加, 发生压力降脉动的界限热负荷增加, 界限干度逐渐升高, 系统稳定性增加; 发生脉动的周期变化为先长后短, 发生流量脉动的振幅逐渐减小。本试验中, 当压力 $P > 6 \text{ MPa}$ 时, 就不再发生压力降脉动。

(2) 随着质量流速增加, 发生压力降脉动的界限热负荷和界限干度逐渐升高, 而脉动周期变短。

(3) 随着过冷度增大, 界限热负荷不断升高; 过

冷度对界限干度的影响趋势为: 在较低的质量流速下, 随着过冷度的增加, 界限干度单调下降; 在较高的质量流速下, 随着过冷度的增加, 界限干度单调上升。

(4) 随可压缩容积的不断增大, 压力降脉动的周期和幅值逐渐增大, 而对界限热负荷影响不大。

参考文献:

- [1] SKOWYRA R S, CZARNECKI T S, SUN C Y, et al. Design of a supercritical pressure circulating fluidized bed boiler with vertical water walls // Proceedings of the 13th Int Conference on FBC [C]. Orlando: ASME, 1995: 17-22.
- [2] BURSI J M, LAFANECHERE L, JESTIN L. Basic design studies for a 600 MWe CFB boiler (270, $2 \times 600 \text{ }^\circ\text{C}$) [J]. Circulating Fluidized Technology VI, ed. J Werther, Wüzhning Germany, 1999, 913: 22-27.
- [3] RAJARAM S. Next generation CFBC [J]. Chemical Engineering Science, 1995, 54: 5565-5573.
- [4] 王 苹. 垂直上升管内汽-液两相流不稳定的实验研究与数值计算 [D]. 西安: 西安交通大学, 1989.
- [5] 陈听宽, 荆建刚, 罗毓珊. 垂直并联管内高压汽水两相流压力降型脉动的研究 [J]. 工程热物理学报, 2000, 21(2): 224-228.
- [6] 荆建刚. 垂直并联管汽水两相流不稳定性的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 1996.
- [7] DING Y, KAKAQ S, CHEN X J. Dynamic instabilities of boiling two-phase flow in a single horizontal channel [J]. Experimental and Thermal Fluid Science, 1995, 11: 327-342.
- [8] 张翼辉, 陈听宽. 并联管内压力降型水动力不稳定的试验研究 [J]. 核动力工程, 2005 26: 233-236.

(编辑 何静芳)

新技术、新工艺

过热蒸汽汽轮机级磨蚀的减少

据《Электрические станции》2008 年 12 月号报道, 多年来在汽轮机的高压缸和中压缸内观察到前几级的静叶和动叶、围带、围带上面的密封和围带的销钉的磨蚀。

随着在具有直流锅炉的动力机组上采用中性-酸性水工况并随着汽轮机启动和卸载次数增加, 高压缸和中压缸级静叶和动叶磨蚀的强度也随之增加。

磨损是由从锅炉过热器和蒸汽管道带出的氧化皮碎片引起的, 并导致汽轮机经济性和可靠性明显地降低。

根据对现有的防止磨蚀方法的分析, 提议在汽轮机前安装碎片的惯性捕集器来代替在进汽管道垂直下降管段后面的肘形弯管。

利用空气的模型试验和完成的计算表明, 这种装置实际上可以从汽流完全除去最有侵蚀危险的固体微粒。

完成了捕集器的工作设计并把它装在大功率汽轮机中压缸的前面。

(吉桂明 摘译)

gineering for Thermal Energy & Power. - 2009, 24(6). - 737 ~ 740

On a CFB (Circulating Fluidized Bed) cold-state test rig with a riser section having a net height of 4.0 meters and an inner diameter of 0.19 meters, an experimental study has been performed of the radial gas mixing in the following two flow patterns; i. e. fast bed and pneumatic conveyance. The bed material used in the test was river sand, $d_p=120\ \mu\text{m}$ and the real density $\rho_s=2400\ \text{kg/m}^3$. The particle cyclic flow rate (G_s) and fluidized air speed (U_g) can be controlled independently on the test rig. The variation relationship of the pressure gradient between the upper and lower bed layers with the fluidization air speed can be used to ascertain the zone where a fast fluidization is present. By using a plunger flow model and with CO_2 serving as a tracer gas, the radial gas mixing was tested at three air speeds. The tendency of Dr changing with the particle concentration was obtained in the following two flow patterns, the fast bed and pneumatic conveyance. It has been found that in the pneumatic conveyance flow pattern, Dr will decrease with an increase of the particle concentration while in the fast bed flow pattern, Dr will increase with a particle concentration increase. In conjunction with the existence status of solid particles in various flow patterns, the different influence of the flow patterns on Dr can be reasonably explained. **Key words:** circulating fluidized bed, gas-solid flow pattern, radial gas mixing

600 MW 超临界 CFB 垂直并联内螺纹管两相流压力降不稳定试验研究 = **Experimental Study of the Two-phase Flow Pressure Drop Instability in Vertical Parallel Inner Threaded Tubes of a 600 MW Supercritical CFB (Circulating Fluidized Bed)** [刊, 汉] / DENG Zhi-an, LUO Yu-shan, CHEN Ting-kuan, et al (National Key Laboratory on Multi-phase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009, 24(6). - 741 ~ 745

Under the practical load-variation operating condition of a 600 MW supercritical CFB (Circulating Fluidized Bed) water wall and with the actually-used $\Phi 28.6 \times 5.84$ -head inner threaded tubes in the water wall serving as an object of study, experimentally studied was the pressure drop instability of the gas-liquid two-phase flow in vertical parallel tubes of HP steam-water two-phase flow loops. Determined was the influence of pressure, mass flow speed, inlet supercooling degree and upstream compressible volume on the pressure drop pulsation of the above tubes. The research results show that with an increase of the pressure, the critical heat load at which a pulsation occurs will increase, the limit dryness will gradually go up, and the system stability will be improved. The pulsation period will be first extended and then shortened with the amplitude of the pulsation being gradually diminished. In the present experiment, when the pressure is greater than 6 MPa, no pressure drop pulsation will occur. With an increase of the mass flow speed, the limit heat load at which a pulsation occurs will increase while the pulsation period will diminish. The inlet supercooling degree will exercise a monodromy influence over the density wave pulsation. With an increase of the inlet supercooling degree, the limit heat load will monotonically increase and the change of the limit dryness will exhibit different tendencies. At a relatively low mass flow speed, with an increase of the supercooling degree, the limit dryness will diminish monotonically. At a relatively high mass flow speed, with an increase of the supercooling degree, the limit dryness will rise monotonically. The upstream compressible volume will have a relatively small influence on the limit heat load. With an increase of the gas-filling ratio, the pulsation period and amplitude will also gradually increase. **Key words:** supercritical, circulating fluidized bed, low-mass flow speed, vertical parallel inner threaded tube, gas-liquid two-phase flow, pressure-drop pulsation

方柱体与圆柱体气液两相涡街特性的研究 = **Study of Gas-liquid Two-phase Vortex Street Characteristics of a Square Cylinder and a Circular One** [刊, 汉] / ZHOU Yun-long, DIAO Cheng-dong, CAO Ru (College of Energy Source and Mechanical Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2009, 24(6). - 746 ~ 749

When a gas-liquid two-phase fluid in a vertically ascending tube with a rectangular section transversely scours a horizontally arranged cylinder, under certain conditions, an alternating vortex shedding phenomenon will occur at the back of the cylinder. By adopting a tube-wall pressure-difference method to study the vortex shedding characteristics of the above flow