

低质量流速垂直并联内螺纹管中 两相流不稳定性试验研究

黄凡, 罗毓珊, 陈听宽, 王海军, 李晨飞, 邓志安, 姚建安
(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对 600 MW 超临界“W”火焰锅炉低质量流速水冷壁所采用的内螺纹管及锅炉设计参数, 在高压汽水两相流试验台上进行了垂直并联内螺纹管中两相流不稳定性的试验研究, 并观测到了压力降和密度波两种形式的脉动. 在试验参数范围内就系统压力、质量流速、进口过冷度、上游可压缩容积、出口节流度和不对称加热对两相流不稳定性的影响进行了研究和分析. 试验表明, 在垂直并联内螺纹管中, 压力降型脉动出现在干度较低的水动力曲线负斜率段, 为两管整体脉动, 而密度波型脉动出现在干度较高的正斜率区域, 呈管间脉动. 同时, 根据试验结果, 采用均相流模型得到了不稳定发生的界限关系式, 为超临界锅炉低质量流速垂直并联内螺纹管水冷壁的设计与安全运行提供了依据.

关键词: 低质量流速; 垂直并联内螺纹管; 不稳定性; 超临界锅炉; 汽水两相流

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)07-0036-04

Experimental Study on Two-Phase Flow Instabilities in Parallel Vertical Internally Ribbed Tubes at Low Mass Flux

HUANG Fan, LUO Yushan, CHEN Tingkuan, WANG Haijun, LI Chenfei,
DENG Zhi'an, YAO Jian'an

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The experiments on two-phase flow instabilities in parallel vertical internally ribbed tubes were conducted to investigate the hydrodynamic flow characteristics under low mass flux conditions in a 600 MW super-critical W-shaped flame boiler. Two kinds of oscillations, pressure drop oscillation (PDO) and density wave oscillation (DWO), were observed. The influences of pressure, mass flux, inlet sub-cooling, compressible volume, exit throttling, and asymmetric heat flux on the two-phase instability were explored and analyzed. The results show that the PDO occurred at lower exit quality and in the negative slope portion of the Δp - G curves with the in-phase oscillating of both channel flow rates, and DWO occurred at higher exit quality and in the positive slope portion of the Δp - G curves with the out-phase oscillating of channel flow rates. Based on the testing results and the homogeneous model, the threshold expressions of instability were obtained. It is suggested that these findings may be used in the water wall design and its safe operation in super-critical boilers.

Keywords: low mass flux; parallel vertical internally ribbed tube; instability; super-critical boiler; steam-water two-phase flow

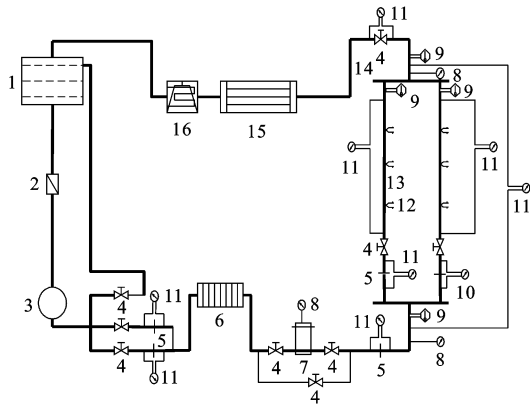
汽水两相流的不稳定性在锅炉的设计中占据十分重要的地位, 如果设计不当, 不仅影响设备的正常

运行,而且会发生安全事故.两相流的不稳定性会造成沸腾受热面的热负荷分配不均、传热恶化、热应力及疲劳损坏等问题,严重时还会引起锅炉爆管,威胁锅炉和蒸汽发生器的整体安全.因此,两相流不稳定性研究对大型直流锅炉的设计和运行有着十分重要的意义^[1-3].前人对光管的垂直单管、双管和多管,以及倾斜并联内螺纹管都做了大量的研究,并取得了很多有价值的结论^[4-6],但尚未见到有关低质量流速条件下垂直并联内螺纹管不稳定性的研究报告.

采用低质量流速技术的超临界锅炉是目前各锅炉集团公司研究和发展的重点项目.低质量流速内螺纹管垂直管圈和燃烧炉膛的结合,使水冷壁进口不设节流圈即可将温度的不平衡降低至最小,并且炉膛结构简单,制造、安装和维护费用低^[7-8].改善水冷壁的水动力特性是我国设计的低质量流速超临界锅炉需要解决的主要技术问题之一,因此系统研究该炉型的垂直并联内螺纹管中的两相流不稳定性,对我国大型低质量流速超临界机组的自主开发有非常重要而现实的意义.

1 试验装置及参数

试验装置为西安交通大学电加热高压水回路系统,如图1所示.



1:高位水箱;2:过滤器;3:高压泵;4:调节阀;5:孔板流量计;6:预热线段;7:脉冲箱;8:压力表;9:铠装热电偶;10:进口集箱;11:差压表;12:热电偶丝;13:试验段;14:出口集箱;15:冷凝器;16:冷却塔

图1 高温高压试验台示意图

试验段为 $\varnothing 31.8 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ 的内螺纹管,材料为SA-213T12.每根管长为7 m,其中加热段管长为6.7 m,每根试验段的加热功率可达260 kW.两管平行并联垂直布置,管间距为0.6 m.为使两管的流量和压力均匀分配,用上下两个 $\varnothing 60 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 的集箱相连.

本试验的参数范围是:系统出口压力 $p=3, 5, 7, 9, 11 \text{ MPa}$;质量流速 $G=200, 300, 400, 450 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;进口过冷度 $\Delta t_{\text{sub}}=30, 50, 70, 90 \text{ }^\circ\text{C}$;脉冲箱充气比 $V_N/V_1=1/4, 1/2$;不对称加热比 $q_1/q_2=0.5, 0.75, 1$;内壁热负荷 $q=0 \sim 260 \text{ kW}/\text{m}^2$.

试验采用以固定流量增加热负荷的方法进行.在不同的参数组合下,本试验共完成了71个工况.

2 试验结果和分析

本试验在不同参数条件下观察到两种形式的脉动,即压力降型脉动(PDO)和密度波型脉动(DWO).通过计算得到的典型水动力特性曲线如图2所示^[9].

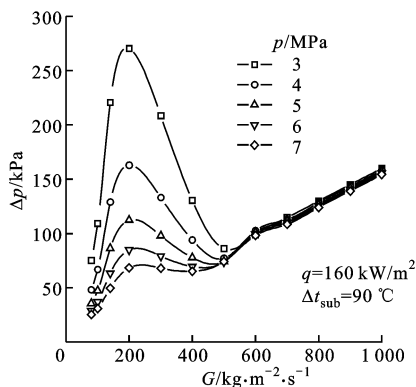


图2 典型水动力特性曲线

2.1 压力降型脉动

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^[10].本试验所得出的结果与这个结论相吻合,即在投入脉冲箱的情况下出现压力降脉动,不投入脉冲箱的时候始终观测不到压力降脉动.本试验观测到的压力降脉动周期 τ 约为113~268.5 s,开始脉动的界限干度 x_c 为0.02~0.1.

2.1.1 系统压力对压力降脉动的影响 系统压力对发生压力降脉动的界限干度和界限热负荷都有较明显的影响,如图3、4所示.例如,当 $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $\Delta t_{\text{sub}}=90 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $V_N/V_1=1/4$ 、出口节流系数 $K=50$ 时,系统出口压力 p 为3、5、7 MPa 对应的界限热负荷 q_c 分别为61、72、78 kW/m^2 ,界限干度 x_c 分别0.061、0.078、0.09.随着压力的升高,发生压力降脉动的界限干度和界限热负荷也相应增大.这是由于压力增加使汽相和液相的密度差减小,静态水动力特性曲线负斜率减小,系统的稳定性增强.本

试验中,当 $p > 9$ MPa 时,就不再有压力降脉动发生. 试验中还可观测到,随着系统压力的升高,脉动的振幅减小.

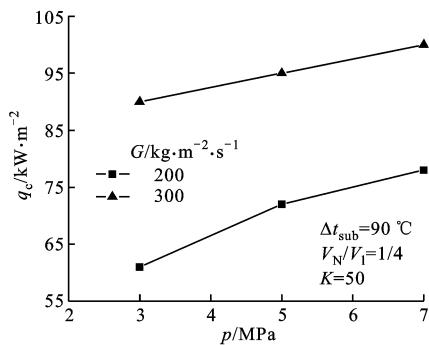


图3 压力对界限热负荷的影响

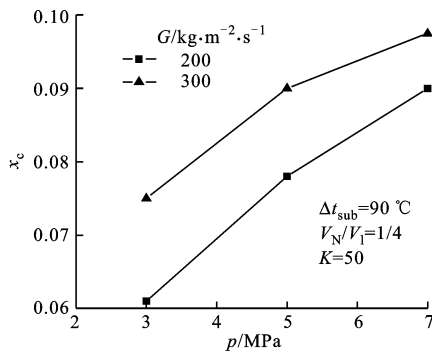


图4 压力对界限干度的影响

2.1.2 质量流速对压力降脉动的影响 质量流速对界限热负荷的影响存在明显的单值性. 如图5所示,随着质量流速的不断增大,界限热负荷单调上升. 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.

2.1.3 进口过冷度对压力降脉动的影响 本试验研究发现,随着进口过冷度的增加,界限热负荷不断升高,界限干度不断增大. 同时,由于水动力曲线负斜率段变陡,使得压力、流量和压差等参数的脉动振幅增大.

2.1.4 上游可压缩容积的影响 在本管型的试验中观察到,随可压缩容积的增大,界限热负荷略有下降,但影响较小. 这是因为“W”火焰低质量流速锅炉所使用的内螺纹管管径较大,为 $\varnothing 31.8 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$,且试验段较长,为7 m,故其削弱了可压缩容积对脉动的影响. 随着充气比的增大,界限干度变化不十分明显,略有增加.

2.1.5 出口节流的影响 在相同的压力、进口流量和进口过冷度条件下,增加出口节流系数,会使得两

相区的阻力增加,系统稳定性降低,界限热负荷和界限干度都明显降低,从而使压力降脉动更容易发生. 如图6所示,在压力、质量流速和可压缩容积等其他参数相同,过冷度不同的条件下, $K=80$ 时的脉动周期明显比 $K=50$ 时的脉动周期大. 如当 $p=3$ MPa, $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $V_N/V_I=1/4$, $\Delta t_{\text{sub}}=50$ °C时, $K=50$ 的 τ 为191 s, $K=80$ 的 τ 为242 s.

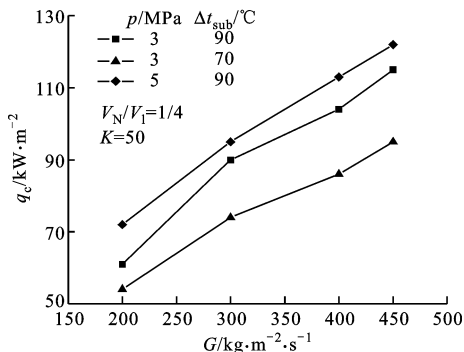


图5 质量流速对界限热负荷的影响

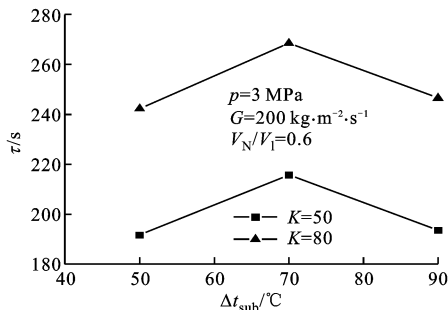


图6 出口节流对脉动周期的影响

2.2 密度波型脉动

试验中,当系统不投入脉冲箱时,随着试验段热负荷增大到一定值,系统会出现密度波型脉动,其特点是进口总流量、进口总压力和试验段总压差基本保持不变,两个分管间的流量和压差做严格反相脉动. 发生密度波脉动时,壁温没有飞升. 本试验观测到的密度波脉动周期约为7.5~11 s,开始脉动的界限干度为0.6~0.8. 发生脉动时,继续增加热负荷,脉动的频率增加,分管流量和分管压差脉动的幅值也增加.

2.2.1 系统压力对密度波脉动的影响 如图7所示,随着压力的升高,界限热负荷与界限干度均升高. 这种现象的出现主要有两个原因:其一,由于系统压力升高,使得气液两相的密度差减小,在相同的体积含气率条件下,高压时的压降扰动导致的质量流速变化较低压条件下小,使压力和流速的反馈减

弱,因而密度波脉动不容易发生;其二,密度波的扰动还来自沸腾边界变化的扰动变小,而两相流现象的变化也变得不如低压时那么剧烈,因此发生密度波脉动就需要更大的能量.随着系统压力的增加,脉动周期变长.当 $p \geq 7$ MPa 时,本试验就不再有密度波型脉动产生.

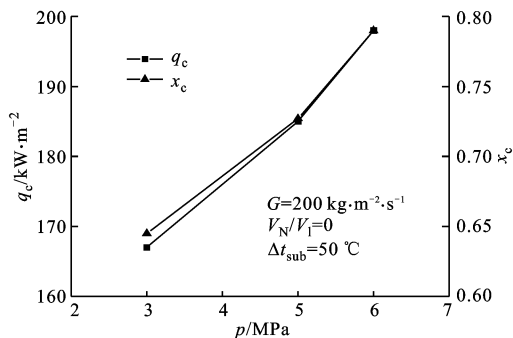


图 7 压力对界限热负荷及界限干度的影响

2.2.2 过冷度对密度波脉动的影响 随进口过冷度增加,界限热负荷单调增加,界限干度也相应增加.这是由于增加进口过冷度使得试验段中两相区长度变短、单相区长度变长,相当于出口节流减小而增加了进口节流,使系统的稳定性增强,从而界限热负荷升高.如图 8 所示,进口过冷度增加,脉动周期也变长.

2.2.3 质量流速对密度波脉动的影响 质量流速对密度波脉动的界限热负荷和周期有显著的影响,而对界限干度的影响很小.随着质量流速的增大,脉动发生的界限热负荷升高,而脉动的周期变短.

2.2.4 不对称加热对密度波脉动的影响 不对称加热的试验研究表明:①发生密度波型脉动时,两分管间流量脉动相位 180° 反相,总流量、总压力和总压差均保持不变,与对称加热(两分管热负荷相同)时一样,两分管的流量和压差的脉动幅值由于热负荷不同而略有不同,热负荷较低的管 1 脉动幅值

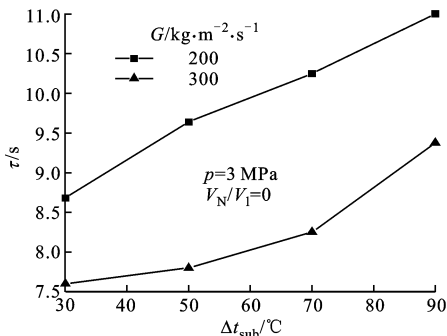


图 8 过冷度对脉动周期的影响

较小,而热负荷较高的管 2 脉动幅值大于管 1,但两分管脉动周期相同;②两个分管的界限热负荷(以热负荷高的分管为准)随着加热不均匀程度的增大而增大.

3 试验结果的回归

根据试验结果,采用均相流模型,得到不稳定性的守恒方程式.对方程进行积分和无因次化,得到了判定不稳定发生的无因次方程式.结合试验数据,对该方程进行回归,得到发生不稳定性的拟合方程判别式.

压力降脉动的起点公式

$$\frac{\Delta h}{h_m} = 4.559 \left(\frac{G^2}{gd\rho_l^2} \right)^{-0.337} \left(\frac{\Delta h_i}{h_m} \right)^{0.528} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.419} \left(\frac{\Delta p}{gd\rho_l} \right)^{0.572}$$

密度波脉动的起点公式

$$\frac{\Delta h}{h_m} = 1.37 \left(\frac{G^2}{gd\rho_l^2} \right)^{-0.144} \left(\frac{\Delta h_i}{h_m} \right)^{0.264} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{-0.057} \left(\frac{\Delta p}{gd\rho_l} \right)^{-0.312}$$

与试验数据比较并计算,以上公式计算结果与试验数据的均方差在 1.1% 以内.

4 结 论

本文以我国设计的 600 MW 超临界“W”火焰锅炉为研究背景,在低质量流速工况条件下,对垂直并联内螺纹管水冷壁两相流的不稳定性进行深入细致的试验研究和理论分析,得到了以下主要结论.

(1)根据试验数据,计算得到了试验系统在不同条件下的水动力特性曲线.

(2)在本试验的参数范围内,得到了不发生脉动的界限压力值.

(3)详细论述了系统压力、质量流速、进口过冷度、可压缩容积、出口节流度、不对称加热等参数对不稳定界限热负荷、界限干度、脉动周期和脉动振幅的影响.

(4)采用均相流模型,根据试验结果得到了垂直并联内螺纹管中汽液两相流压力降型脉动和密度波型脉动发生的界限关系式.

参考文献:

- [1] 陈昕宽. 并联管两相流不稳定性的研究[M]. 西安:西安交通大学出版社,2004:63-80.
- [2] 鲁钟琪. 两相流与沸腾传热[M]. 北京:清华大学出

- 版社,2002:111-125.
- [3] 徐济堃. 沸腾传热和气液两相流 [M]. 北京:原子能出版社,1993:313-357.
- [4] 荆建刚. 垂直并联管高压汽水两相流不稳定性研究 [D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院,1995.
- [5] 高峰. 超临界螺旋管圈锅炉并联倾斜内螺纹管汽水两相流不稳定性研究 [D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院,2006.
- [6] 高峰,陈听宽,罗毓珊,等. 大 L/d 倾斜并联光管汽-液两相流不稳定性实验研究 [J]. 核动力工程,2005,26(2):130-134.
- GAO Feng, CHEN Tingkuan, LUO Yushan, et al. Experimental investigation on instabilities of steam-water two-phase flow in large L/d inclined parallel upward smooth pipes [J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26 (2): 130-134.
- [7] 王忠会,孟建刚. 我国发展超临界“W”火焰锅炉状况的分析 [J]. 电力建设,2007,28(9):65-69.
- WANG Zhonghui, MENG Jiangang. Analysis of development status of supercritical W-shape flame boiler in China [J]. Electric Power Construction, 2007, 28 (9): 65-69.
- [8] 孙丹,陈听宽,罗毓珊,等. 内螺纹管临界压力区内水的传热特性研究 [J]. 西安交通大学学报,2001,35(3):234-238.
- SUN Dan, CHEN Tingkuan, LUO Yushan, et al. Water heat transfer characteristics of internally ribbed tube in the near critical pressure region [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001,35(3):234-238.
- [9] 中华人民共和国机械工业部. JB/Z201-83 电站锅炉水动力计算方法 [S]. 上海:上海发电设备成套设计研究所,1983.
- [10] 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.

(编辑 荆树蓉)