

低质量流速垂直和倾斜并联内螺纹管 两相流不稳定性研究

邓志安^{1,2}, 罗毓珊¹, 陈听宽¹, 王海军¹, 黄凡³, 贾琳²

(1. 西安交通大学多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 西安石油大学
石油工程学院, 710065, 西安; 3. 西部机场集团, 710075, 西安)

摘要: 在 $200\sim 450\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 的低质量流速下, 采用 $\varnothing 31.8\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 的 6 头内螺纹管, 在高压试验台上进行了垂直和倾斜并联内螺纹管两相流不稳定性对比试验研究. 研究表明: 对压力降脉动和密度波脉动, 随着进口压力和质量流速的增加, 发生脉动的界限热负荷增加, 垂直并联管的界限热负荷总是大于倾斜并联管, 说明垂直并联内螺纹管的稳定性更好; 过冷度对脉动发生的界限热负荷和脉动周期的影响出现不同的趋势. 通过对试验数据进行回归处理, 给出了两种条件下发生不稳定性脉动的起始点无因次准则方程.

关键词: 低质量流速; 垂直并联内螺纹管; 倾斜并联内螺纹管; 超临界

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)01-0017-05

Two-Phase Flow Instability in Vertical and Inclined Parallel Rifled Tubes at Low Mass Velocity

DENG Zhi'an^{1,2}, LUO Yushan¹, CHEN Tingkuan¹, WANG Haijun¹, HUANG Fan³, JIA Lin²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyu University, Xi'an 710065, China; 3. China West Airport Group, Xi'an 710075, China)

Abstract: An experiment was conducted to investigate the two-phase flow instability in the vertical parallel rifled tubes and inclined parallel rifled tubes using six-head rifled tubes with a diameter of 31.8 mm in the mass flow rate range of $200\sim 450\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ in a high pressure test loop. The experimental results show that the boundary heat flux of the pressure-drop type oscillation or the density-wave type oscillation increased with the increase of the inlet pressure and the mass flow rate, and the boundary heat flux for the vertical parallel rifled tubes was greater than that for inclined parallel rifled tubes, indicating that the flow in vertical parallel rifled tubes would be more stable. The effects of inlet subcooling degree on the boundary heat flux and the oscillation period exhibited two different trends in the test. In addition, non-dimensional correlations of thresholds of heat flux both in the vertical parallel rifled tube and the inclined parallel rifled tube were obtained by the regression calculation of the test data.

Keywords: lower mass flow rate; vertical parallel rifled tube; inclined parallel rifled tube; super-critical

现代超临界机组最主要的特点就是采用复合变压运行方式, 其中在低负荷运行或启动过程中, 由于

压力和质量流速的降低, 可能发生汽液两相流不稳定性现象, 造成流量和压力的振荡. 这不仅会使管壁

温度波动,引发传热恶化,严重时还可能导致锅炉产生管壁热疲劳并造成爆管事故,给锅炉的正常运行带来很大的威胁。

垂直布置的光管和内螺纹管水冷壁及倾斜布置的螺旋管圈水冷壁是超临界变压运行锅炉中水冷壁的主要型式。内螺纹管的应用极大地改进了锅炉水冷壁的传热特性。关于垂直和倾斜并联管的不稳定脉动现象,很多学者进行过试验研究^[1-10],但以前的试验主要集中在高质量流速和高热负荷条件下,而近期发展的超临界循环流化床锅炉与超临界低质量流速“W”火焰锅炉,其质量流速较低。有关较低质量流速内螺纹并联管束中两相流不稳定性的研究并不多见,因此本文针对上述两种锅炉开展低质量流速下垂直和倾斜并联内螺纹管中的两相流不稳定性研究,并对两种不同放置条件下的两相流不稳定性进行对比,探讨各种参数对流动不稳定性的影响,该研究对低质量流速超临界直流锅炉具有重要意义。

1 试验装置和参数

本试验是在西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室的高温高压试验台上完成的。试验用回路见图 1,试验采用 $\varnothing 31.8\text{ mm}\times 6\text{ mm}$ 的 6 头内螺纹管作为试验段用管。

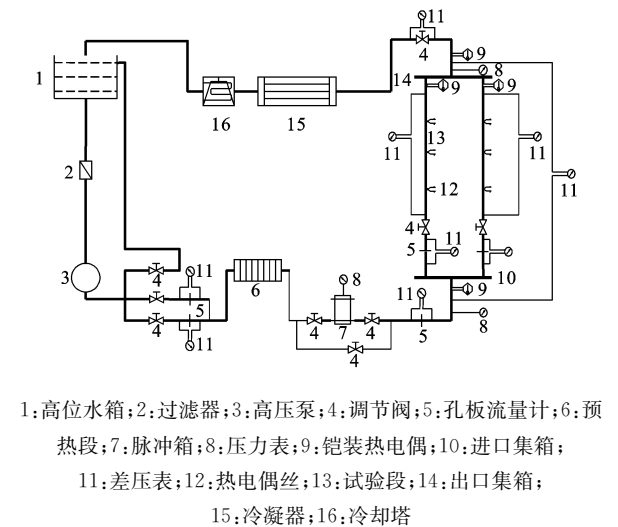


图 1 高压汽水两相流试验台示意图

试验段布置型式分别为两管并联倾斜向上和垂直向上。加热段采用三点加热方式,试验段并联管间距为 0.6 m,试验段压差测点垂直总高度为 6.5 m,上下用两个 $\varnothing 60\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 的不锈钢集箱相连,倾斜并联管与水平面的倾角为 19.5 °。

试验过程测量参数有:系统总流量及分管流量、

系统压力、试验段进出口压差及分管压差、进出口工质温度、加热段管壁温度和各加热段加热功率等。试验段进口总流量由装在控制阀门后的孔板流量计测量,经 ST3000/900 差压变送器转换为电压信号,送到信号采集系统;试验段各分管流量由装在进口集箱后各分管的孔板流量计测量,差压变送器精度为 0.25 %。试验段进出口流体温度分别由安装在试验段分管的进口和出口的 $\varnothing 3\text{ mm}$ 的镍铬-镍硅铠装热电偶测量,绝对测量误差为 2.5 °C。管子沿试验段长度方向各点的壁温变化,由安装在管子壁面的热电偶丝测量,其绝对测量误差为 1.5 °C。压差和压力测量由装在进出口集箱外的总管以及每个试验段两端的取压环室进行,用导压管接入罗斯蒙特 1151 型电容式差压变送器或压力变送器测量。压力变送器精度为 0.25 %,量程为 2~16 MPa,采集系统的精度为 0.02 %。电加热功率通过测量流过加热管段的电流和加在两端的电压得到,加热电流和电压信号经变换后送入数据采集系统。

所有的测量信号都通过 7 块英国 Solartron 公司生产的 IMP35951C 数据采集板进行采集,并通过与采集板连接的计算机来对试验工况进行监视和数据处理。

本试验工况的主要参数范围如下:系统压力 $p=3,4,5,6,7,9,11.5\text{ MPa}$,每个分管质量流速 $G=200,300,400,450,500\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,进口过冷度 $\Delta t_{\text{sub}}=30,50,70,90,110\text{ }^{\circ}\text{C}$,脉冲箱充气压力比 $p_{\text{s}}/p_{\text{e}}=1/4,1/2,3/5$,出口节流系数 $K=20,50,80$,内壁热负荷 $q=0\sim 260\text{ KW}/\text{m}^2$ 。

本试验分别观察到压力降和密度波两种脉动现象,在试验中对内螺纹管在两种不同布置条件下发生不稳定性的影响参数进行了对比研究,并分别得出了内螺纹管在两种布置条件下发生脉动的阈值拟合关系式。

2 压力降脉动比较

压力降脉动是不稳定中常见的现象,发生压力降脉动时,各并联管呈整体同相脉动,脉动周期远大于密度波脉动,但不同布置条件下的工作参数界限值有较大区别。

2.1 压力的影响

图 2 所示为倾斜和垂直并联内螺纹管产生脉动时界限热负荷 q_{c} 随压力变化的对比结果,可以看出:当发生压力降脉动时,界限热负荷都随压力增高而增高;在相同压力条件下,垂直并联内螺纹管发生

压力降脉动的界限热负荷高于倾斜并联内螺纹管,说明垂直并联内螺纹管的稳定性优于倾斜并联内螺纹管.

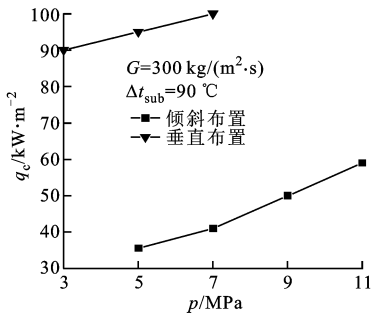


图 2 压力对界限热负荷的影响(压力降脉动)

2.2 质量流速的影响

质量流速对流动不稳定具有重要的影响,如图 3 所示,在两种布置型式下,随着质量流速增加,产生压力降脉动的界限热负荷增加,且影响是单值性的.垂直布置的内螺纹管中发生压力降脉动的界限热负荷总是大于倾斜布置的内螺纹管,即垂直布置的内螺纹管的稳定性高于倾斜布置的内螺纹管.

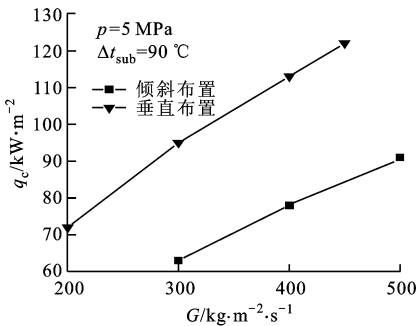


图 3 质量流速对界限热负荷的影响(压力降脉动)

2.3 进口过冷度的影响

进口过冷度对发生压力降脉动的影响比较复杂.如图 4 所示,在垂直布置的内螺纹管中,随着进口过冷度增加,产生脉动时的界限热负荷增加,而在倾斜布置的内螺纹管中,随着进口过冷度增加,界限热负荷出现下降的现象.当过冷度小于 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 时,在相同进口过冷度条件下,倾斜布置的内螺纹管的稳定性高于垂直布置的内螺纹管,而当过冷度大于 $75\text{ }^\circ\text{C}$ 以后,倾斜布置的内螺纹管的稳定性却低于垂直布置的内螺纹管.

这是因为在过冷度较小时,管内平均干度较大,出口节流对脉动的影响变大,相对于垂直并联管而言,倾斜并联管具有更大的出口阻力,因此倾斜并联

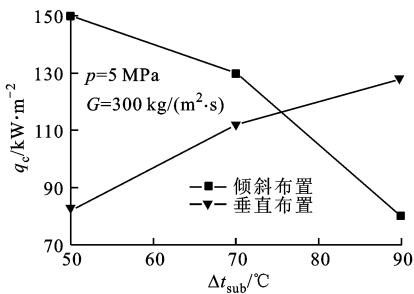


图 4 进口过冷度对界限热负荷的影响(压力降脉动)

管具有更高的界限热负荷;当进口过冷度增大后,相同热负荷下加热段内的平均干度较小,单相液体区变长,相对于倾斜并联管而言,垂直并联管具有更大的重位压降,这就相当于增大了管内进口阻力和试验段的压力,从而使界限热负荷增加.

3 密度波脉动比较

密度波脉动试验是在试验段上游没有投入脉冲箱的条件下进行的.密度波脉动发生时,进口总流量、出口总压力和试验段总压差基本保持不变,两分管间的流量和压差做反相脉动,产生管间能量交换.试验中发现,倾斜和垂直放置的内螺纹管发生脉动时的主要特性曲线变化趋势基本一致,但发生脉动的界限值不同,说明两者的差异主要是由管子布置型式不同所造成的压降不同而产生的.

3.1 压力的影响

不论是垂直并联还是倾斜并联的内螺纹管,系统发生密度波脉动时的界限热负荷都随压力增高而增高,系统的稳定性增加.图 5 为 $G=400\text{ kg/(m}^2\cdot\text{s)}$, $\Delta t_{\text{sub}}=90\text{ }^\circ\text{C}$ 时,压力对发生密度波脉动的界限热负荷的影响.从图中可以看出,系统压力对发生密度波脉动的界限热负荷存在单值性的影响.其原因是:一方面由于系统的压力升高,使得汽液两相的密度差减小,在相同的体积含汽率下,高压时的压降扰动导致的质量流速变化较低压时要小,从而使压力和流速的反馈减弱,因而密度波脉动不容易发生;另一方面,高压时来自沸腾边界变化的扰动对密度波的扰动变小,而两相流流型的转化也变得不如低压时那么剧烈,因此随着压力的升高,发生密度波脉动需要的能量更大.

就两种不同的管子布置条件而言,在相同压力下,垂直并联条件下发生脉动时的界限热负荷总是大于倾斜并联条件下的,其稳定性更好,且压力越

高,垂直并联管的稳定性优势越明显。

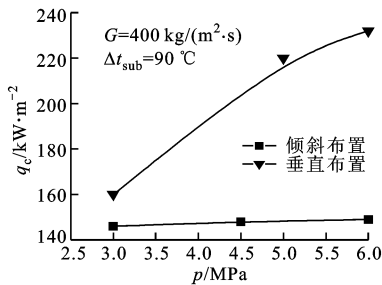


图5 压力对界限热负荷的影响(密度波脉动)

3.2 质量流速的影响

质量流速对发生密度波脉动的界限热负荷有显著的影响,从图6可以看出,随着质量流速的增大,脉动发生的界限热负荷升高.这是因为随质量流速的增加,单相液区内的摩擦压降增大,而单相液区内的摩擦压降与流进系统的液体是同相位的,因此摩擦压降抑制了流量波动,增加了系统稳定性,提高了界限热负荷.另外,在相同的质量流速下,垂直并联条件下发生脉动时的界限热负荷总是高于倾斜并联条件下的,稳定性更好,其原因是垂直放置时产生的重位压降更大。

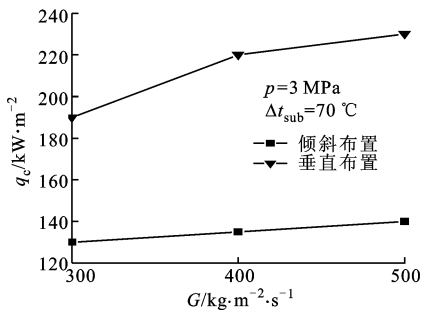


图6 质量流速对界限热负荷的影响(密度波脉动)

3.3 过冷度的影响

图7、8分别给出了系统压力为3 MPa时,进口过冷度对发生脉动时的界限热负荷和脉动周期 τ 的影响.进口过冷度增加,发生脉动时的界限热负荷单调增加,发生脉动的周期也相应增加.其原因是由于进口过冷度增加,单相区变长,两相区变短,相当于出口节流减小而增加了进口节流,从而使界限热负荷升高,系统的稳定性增强。

从图7可以看出,在相同的过冷度下,垂直并联管产生脉动的界限热负荷总是小于倾斜并联内螺纹管.其原因是密度波脉动属管间脉动,任何一个分管产生脉动都会影响系统的稳定性,在相同的热负荷

下,质量流量较低的分管内会出现较高的干度,使系统稳定性降低,而在较高干度下,出口节流对脉动的影响也变大,相对于垂直并联管而言,倾斜并联管具有更大的出口阻力,因此倾斜并联管具有更高的界限热负荷。

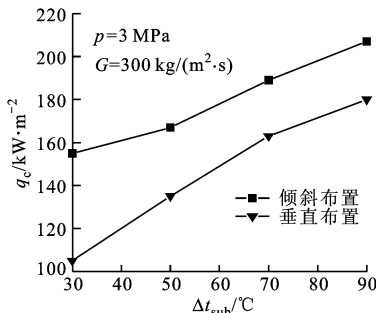


图7 进口过冷度对界限热负荷的影响(密度波脉动)

从图8可以看出,随着进口过冷度增加,两种布置条件下密度波脉动的周期均增加.这是因为过冷度增加,试验段内单相区变长,流体平均密度增大,因此工质通过试验段的流速减小,时间增长,周期随过冷度的增加而增加,但在较小进口过冷度时,垂直放置的内螺纹管的脉动周期小于倾斜并联管,当进口过冷度大于 $40\text{ }^\circ\text{C}$ 后,垂直放置的内螺纹管的脉动周期又大于倾斜并联管.一般来说,过冷度增大,单相阻力与总阻力之比增大,系统的稳定性提高,工质的平均密度增大,脉动的周期变长,但另一方面,过冷度增大,相同热负荷下系统的平均干度减小,总阻力下降,系统内较小的阻力变化就会引起脉动,系统的稳定性降低,二者的相互影响,使过冷度的影响很复杂.因此,对于两种管型存在的这一问题,还有待于在今后的工作中进一步研究。

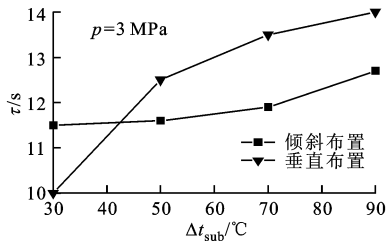


图8 进口过冷度对脉动周期的影响(密度波脉动)

4 发生不稳定性的界限热负荷方程式

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

该方程进行麦夸特法和通用全局优化法的回归,得到了发生不稳定性的拟合方程判别式. 由于试验管的 L/d 很大,可以按一维方程进行推导,从而得到计算倾斜和垂直内螺纹管发生不稳定的数学关联式如下.

质量守恒方程

$$dG/dz = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dz} = & \left(\frac{dp}{dz} \right)_f + \left(\frac{dp}{dz} \right)_a + \left(\frac{dp}{dz} \right)_g = \\ & - \left(\frac{2f_{10}G^2}{D\rho_1} \right) \phi_{10}^2 - G^2 \frac{d}{dz} \left(\frac{x^2}{\rho_g \alpha} + \frac{(1-x)^2}{\rho_l(1-\alpha)} \right) - \\ & (\rho_g \alpha + \rho_l(1-\alpha))g \sin \theta \end{aligned} \quad (2)$$

能量守恒方程

$$d(Gh)/dz = \pi Dq \quad (3)$$

通过对方程(1)~(3)积分,并对其进行无因次化处理,得到下列公式

$$\frac{\Delta h}{r} = f \left(\frac{\Delta p}{gD\rho_1}, \frac{G^2}{gD\rho_1^2}, \frac{\Delta h_i}{r}, \frac{\rho_g}{\rho_l}, \frac{L}{D}, f_{10} \right) \quad (4)$$

根据试验数据进行公式拟合,就可得到各种条件下发生脉动的起始点公式.

倾斜并联内螺纹管发生压力降脉动时

$$\begin{aligned} \Delta h/r = \\ 0.494 \left(\frac{G^2}{gD\rho_1^2} \right)^{-0.29} \left(\frac{\Delta h_i}{r} \right)^{0.237} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.231} \left(\frac{\Delta p}{gD\rho_1} \right)^{0.197} \end{aligned} \quad (5)$$

垂直并联内螺纹管发生压力降脉动时

$$\begin{aligned} \Delta h/r = \\ 2.142 \left(\frac{G^2}{gD\rho_1^2} \right)^{-0.045} \left(\frac{\Delta h_i}{r} \right)^{0.828} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.284} \left(\frac{\Delta p}{gD\rho_1} \right)^{0.28} \end{aligned} \quad (6)$$

倾斜并联内螺纹管发生密度波脉动时

$$\begin{aligned} \Delta h/r = \\ 0.494 \left(\frac{G^2}{gD\rho_1^2} \right)^{-0.591} \left(\frac{\Delta h_i}{r} \right)^{0.282} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.192} \left(\frac{\Delta p}{gD\rho_1} \right)^{0.161} \end{aligned} \quad (7)$$

垂直并联内螺纹管发生密度波脉动时

$$\begin{aligned} \Delta h/r = \\ 270.023 \left(\frac{G^2}{gD\rho_1^2} \right)^{-0.683} \left(\frac{\Delta h_i}{r} \right)^{0.216} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{1.72} \left(\frac{\Delta p}{gD\rho_1} \right)^{0.838} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: Δh 为试验段焓增; r 为试验压力下的汽化潜热; g 为重力加速度; D 为试验段管内径; ρ_g 和 ρ_l 分别为试验压力下的饱和蒸汽密度和饱和水密度; Δh_i 为进口欠焓; Δp 为试验段总阻力.

公式的适用范围是: $p=3\sim 9$ MPa, $\Delta t_{\text{sub}}=30\sim 110$ °C, $G=200\sim 450$ kg/(m² · s), $q=30\sim 260$ kW/m². 以上各判别关联式与试验数据的均方根误差均小于 15%.

5 结 论

分别进行了倾斜和垂直并联内螺纹管两相流不稳定性试验,在两种不同放置的管子中都观察到了压力降脉动和密度波脉动,并得到以下结论.

(1)发生压力降脉动时,倾斜并联内螺纹管的界限热负荷小于垂直并联内螺纹管的界限热负荷. 系统的压力、质量流速和进口过冷度都对不稳定发生的界限条件有很大的影响. 进口过冷度在两种放置的管子中呈现不同的影响.

(2)发生密度波脉动时,倾斜并联内螺纹管的界限热负荷小于垂直并联内螺纹管的界限热负荷. 在进口过冷度相同的条件下,倾斜并联内螺纹管的界限热负荷大于垂直并联内螺纹管的界限热负荷.

参考文献:

- [1] 高峰,陈听宽,罗毓珊. 倾斜并联内螺纹管汽-水两相流密度波型脉动试验研究[J]. 核动力工程, 2005, 26(1): 11-14.
GAO Feng, CHEN Tingkuan, LUO Yushan. Experimental research on density wave oscillation of steam-water two-phase flow in parallel inclined internally ribbed pipes [J]. Nuclear Power Engineering, 2005, 26(1): 11-14.
- [2] 高峰,陈听宽,罗毓珊. 大 L/d 倾斜并联光管汽-水两相流不稳定性试验研究[J]. 核动力工程, 2005, 26(2): 130-134.
GAO Feng, CHEN Tingkuan, LUO Yushan. 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.
- [3] WANG Q, CHEN X J, KAKAC, S. Experimental investigation of clensity-wave-type oscillations in a convective boiling upflow system [J]. Int J Heat Fluid Flow, 1994, 15(3): 241-246.
- [4] LIN Z H, VEZIROGLU T N, KAKAÇ S, et al. Heat transfer in oscillation two-phase flows and effect of heater surface conditions[C]// Proceedings of the Seventh International Heat Transfer Conference. Washington, USA: Hemisphere Pub. Corp., 1982: 331-336.
- [5] KARSLI S, YILMAZ M, COMAKLI O. The effect of

- internal surface modification on flow instabilities in forced convection boiling in a horizontal tube [J]. *Int J Heat Fluid Flow*, 2002, 23(6): 776-791.
- [6] PADKI M M, LIU H T, KAKAÇ S. A two-phase flow pressure-drop type and thermal oscillations [J]. *Int J Heat Fluid Flow*, 1991, 12(3): 240-248.
- [7] KAKAÇ S, VEZIROGLU T N, OZBOYA N, et al. Transient boiling flow instabilities in a multi-channel upflow system [J]. *Waerme-Und Stoffuebertragung*, 1977, 10: 175-188.
- [8] MANERA A, ROHDE U, PRASSER H M, et al. Modeling of flashing-induced instabilities in the start-up phase of natural-circulation BWRs using the two-phase flow code FLOCAL [J]. *Nucl Eng Des*, 2005, 235(14): 1517-1535.
- [9] XIAO M, CHEN X J, ZHANG T N, et al. A multivariable linear investigation of two phase flow instabilities in parallel boiling channels under high pressure [J]. *Int J Multiphase Flow*, 1993, 19(1): 65-77.
- [10] 张冀辉, 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(3): 233-236. ZHANG Jihui, CHEN Tingkuan. Experimental study on high pressure steam-liquid two-phase flow pressure drop instability in parallel tube [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2005, 26(3): 233-236.

(编辑 荆树蓉)