

DOI: 10.7652/xjtuxb201607008

超临界循环流化床锅炉水冷壁并联双通道内 流动不稳定性数值分析

谢贝贝¹, 王文毓¹, 聂鑫¹, 刘万宇¹, 谢海燕¹, 杨冬¹, 王凤君², 黄莺²

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 哈尔滨锅炉厂有限责任公司高效清洁燃煤电站锅炉国家重点实验室, 150046, 哈尔滨)

摘要: 针对超临界循环流化床(CFB)锅炉环形炉膛水冷壁中可能出现的流动不稳定性,采用时域法建立了适用于并联双通道流动不稳定性分析的通用计算模型。通过对质量、动量及能量方程一阶迎风差分离散与求解,编写了以 Fortran 语言为基础的流动不稳定性数值计算程序 Dynsys,采用 Dynsys 程序对并联双通道进行数值模拟,结果表明:并联双通道进口压力、温度、总质量流量不变时,在稳态基础上对并联双通道中的通道 1 施加 1.2 倍热负荷扰动,两通道的进口流量随时间变化呈反相脉动;通道内的进口流量与出口流量随时间脉动沿轴向存在 180°的相位差,流量脉动的振幅随时间逐渐减小,最终恢复到稳态值;超临界 CFB 环形炉膛锅炉水冷壁并联双通道内流动是稳定的,与单通道内流动不稳定对比,环形炉膛锅炉水冷壁并联布置有利于提高系统的稳定性。

关键词: 超临界循环流化床锅炉;并联双通道;流动不稳定性;数值分析

中图分类号: TK122 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)07-0045-06

Numerical Analysis on the Flow Instability of Parallel Channels in Water-Cooling Wall of Supercritical CFB Boiler

XIE Beibei¹, WANG Wenyu¹, NIE Xin¹, LIU Wanyu¹, XIE Haiyan¹,YANG Dong¹, WANG Fengjun², HUANG Ying²

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

2. State Key Laboratory of Efficient and Clean Coal-Fired Utility Boilers, Harbin Boiler Co. Ltd., Harbin 150046, China)

Abstract: Aiming at the flow instability problem occurring in the water-cooling wall of a supercritical circulating fluidized bed (CFB) boiler with annular furnace, a general calculation model based on the time-domain method was established for the analysis of flow instability in parallel channels. By employing first-order upwind scheme, the governing equations of mass, momentum and energy were discretized and solved, then the numerical computational program Dynsys was developed in Fortran language. The typical parallel channels were simulated by Dynsys, and the results showed that under the condition of invariable inlet pressure, temperature and total mass flow rate, applying 1.2 times heat load disturbance on the parallel channels, there occurred an out-of-phase fluctuation of inlet flow rate in two channels and there was a phase difference of 180° along the axial direction between the flow pulsations of inlet and outlet in each channel. The amplitude of flow pulsation decreased with time and eventually returned to the

收稿日期: 2015-12-31。 作者简介: 谢贝贝(1991—),女,硕士生;杨冬(通信作者),男,教授。 基金项目:“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2015BAA03B01-01)。

网络出版时间: 2016-04-21

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160421.1043.006.html>

steady state, suggesting that the flow in the parallel channels of supercritical CFB boiler with annular furnace was stable. Compared with the flow instability in single channel, it was confirmed that the parallel-arranged channels in water-cooling wall could improve the stability in a boiler with annular furnace.

Keywords: supercritical circulating fluidized bed boiler; parallel channels; flow instability; numerical analysis

循环流化床(CFB)燃烧技术是一项近 20 年发展起来的清洁煤燃烧技术^[1]。为了实现高效、低污染发电,CFB 锅炉发电技术正朝着超临界、大容量方向发展。超临界 CFB 锅炉主要通过布置中隔墙膜式水冷壁或蒸发水冷屏来解决蒸发受热面布置困难的问题,由此也带来了炉膛过高、经济性差等问题。为此,中国科学院工程热物理所开发了水冷壁采用内圈与外圈并联布置的超临界 CFB 环形炉膛锅炉。为保证环形炉膛锅炉的安全运行,应避免水冷壁中发生流动不稳定现象。国内外学者对超临界流动不稳定性进行了广泛研究^[2-5],涉及到的几何模型包括自然循环回路、强迫循环回路、单通道、双通道^[6-9]等,但这些研究主要是针对超临界水冷堆的,而对超临界锅炉的研究很少。又由于并联双通道内热负荷分布、传热规律以及流量分配与单通道模型相比有很大不同,因此有必要对并联双通道内流动不稳定性进行新的探索与研究。

1 计算模型

1.1 并联双通道模型

基本并联双通道模型由下联箱、加热段和上联箱 3 部分组成。在基本并联双通道模型基础上,熊挺等搭建了并联双通道实验装置^[10]。用 Dynsys 软件进行数值分析时需简化实验装置,建立图 1 中并

联双通道流动不稳定性分析计算模型。由图 1 可知:加热段采用热构建进行模拟,使热负荷沿管长均匀分布;进口段与上升段采用节流装置模拟,保证管道进、出口节流系数不变。初始几何参数与热工参数如表 1 所示。与此同时,作出如下基本假设:①工质沿管道一维流动;②同一横截面上温度场与速度场分布均匀;③不考虑轴向热传导;④在能量守恒方程中忽略黏性耗散、动能和势能的影响;⑤不考虑金属管壁蓄热。

表 1 计算模型参数

参数	特性与数值
流向	垂直向上
内径/m	0.006
外径/m	0.011
进口段长度/m	0.2
加热段长度/m	3
上升段长度/m	0.35
进口压力/MPa	23.2
进口温度/℃	220
总质量流量/kg·s ⁻¹	0.033 3
总加热功率/KW	60~75
进口节流系数 $k_{in,1}, k_{in,2}$	5.4, 5.5
出口节流系数 $k_{out,1}, k_{out,2}$	4.93, 6.46

1.2 控制方程

并联双通道系统在进口处质量守恒,即

$$\frac{\partial M_{1,in}}{\partial t} + \frac{\partial M_{2,in}}{\partial t} = 0 \tag{1}$$

式中: $M_{1,in}, M_{2,in}$ 为通道 1、2 的进口质量流量。
对于并联双通道系统中的通道 1 与通道 2,均有以下守恒方程。

质量守恒方程

$$\frac{1}{A} \frac{\partial M}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \tag{2}$$

动量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{1}{A} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{M^2}{\rho A^2} \right) + \frac{\partial P}{\partial z} = \\ -\rho g \sin\theta - \left[\frac{f}{d} + K_{in}\delta_d(z) + K_{out}\delta_d(z-L) + \right. \\ \left. K_{jb}\delta_d(z-z_{jb}) \right] \frac{M^2}{2\rho A^2} \end{aligned} \tag{3}$$

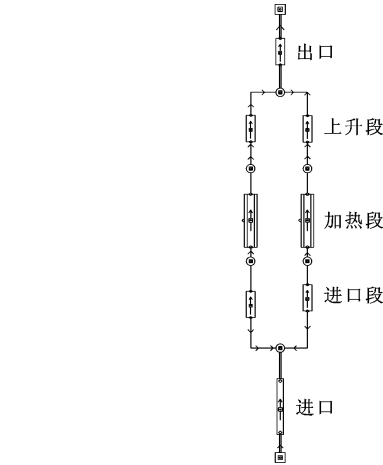


图 1 并联双通道流动结构示意图

能量守恒方程

$$\frac{1}{A} \frac{\partial(Mh)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = q_1 \quad (4)$$

状态方程

$$\rho = f(h, P) \quad (5)$$

式中: L 为管长; d 为内径; A 为横截面积; ρ 为流体密度; h 为比焓; M 为质量流量; P 为压力; θ 为流动方向与水平面的角度; K_{in} 为进口节流系数; K_{out} 为出口节流系数; K_{jb} 为局部阻力系数; f 为摩擦阻力系数; δ_d 为狄拉克函数; q_1 为线密度。

1.3 边界条件

对于并联双通道模型,设定边界条件:进口压力 P_{in} 为常数;进口温度 T_{in} 为常数;进口总质量流量 $M_{t,in}$ 为常数;通道 1 的出口压力 $P_{out,1}$ 与通道 2 的出口压力 $P_{out,2}$ 相等;两通道的加热功率相等。

2 数值计算

2.1 离散方法

采用内节点法沿工质流动方向对通道 1 与通道 2 进行网格划分,将速度与压力均存于同一套网格节点上并对控制方程进行离散。

质量守恒方程

$$A \frac{\rho_{i+1}^{j+1} - \rho_{i+1}^j}{\Delta t} + \frac{M_{i+1}^{j+1} - M_i^{j+1}}{\Delta z} = 0 \quad (6)$$

能量守恒方程

$$A \frac{(\rho h)_{i+1}^{j+1} - (\rho h)_{i+1}^j}{\Delta t} + \frac{(Mh)_{i+1}^{j+1} - (Mh)_i^{j+1}}{\Delta z} = q_{i+1}^{j+1} \quad (7)$$

动量守恒方程

$$\begin{aligned} & \frac{M_i^{j+1} - M_i^j}{\Delta t} + \frac{1}{A \Delta z} \left[\left(\frac{M^2}{\rho} \right)_{i+1}^{j+1} - \left(\frac{M^2}{\rho} \right)_i^{j+1} \right] + \\ & \frac{A}{\Delta z} (P_{i+1}^{j+1} - P_i^{j+1}) = -\rho_i^{j+1} g A \sin \theta - \\ & \frac{1}{2A} \left(\frac{M^2}{\rho} \right)_i^{j+1} \left[\frac{f_i^{j+1}}{d_n} + K_{in} \delta_d(z) + K_{out} \delta_d(z-L) \right] + \\ & K_{jb} \delta_d(z-z_{jb}) \end{aligned} \quad (8)$$

状态方程

$$\rho_i^{j+1} = f(h_i^{j+1}, P_i^{j+1}) \quad (9)$$

2.2 求解与验证

选取时间步长 Δt 为 0.02 s、空间步长 Δz 为 0.01 m 进行数值计算。对离散方程稳态求解时,令方程组中的有关时间导数项为 0;瞬态求解时,在稳态计算结果上施加加热负荷扰动。具体求解流程如图 2 所示。

采用固定进口边界条件、改变加热功率的方法

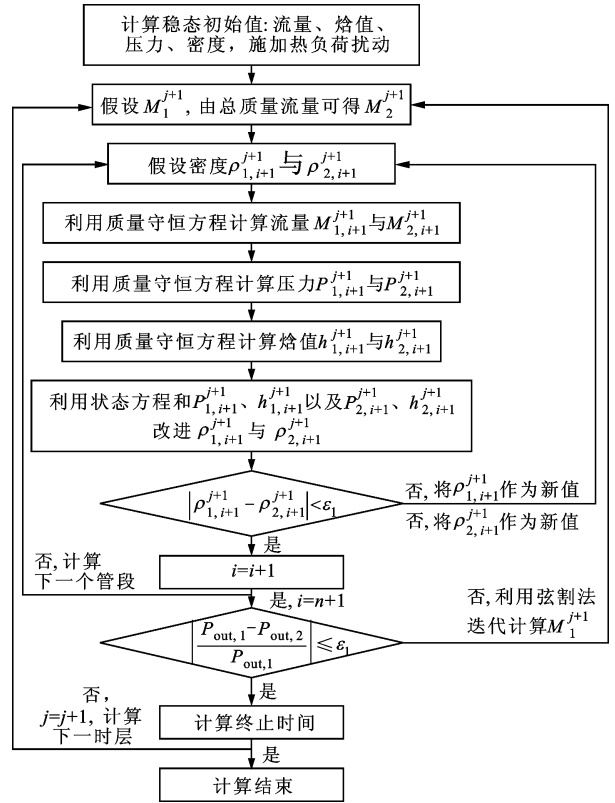


图 2 并联双通道流动不稳定性数值计算流程

求并联双通道发生流动不稳定时的界限功率,并将并联双通道进口流量的动态响应特性作为系统稳定性判断的依据。在加热功率为 66.1、69.9、71.1 kW 的 3 种情况下,可得通道 1、通道 2 进口流量随时间的变化情况,如图 3~5 所示。由图 3 可知,流量脉动衰减振荡,表明在加热功率为 66.1 kW 时系统是稳定的。由图 4 可知,流量脉动等幅振荡,此时加热功率 69.9 kW 为流动不稳定发生的界限功率。由图 5 可知,流量脉动振幅随时间增大,系统发散振荡,可知在加热功率为 71.1 kW 时,流动是不稳定的。由 Dynsys 程序计算所得界限功率(69.9 kW)与实验所得界限功率(68 kW)的相对误差为 2.79%,由此说明 Dynsys 程序用来模拟并联双通道内超临界流动具有一定的可靠性。

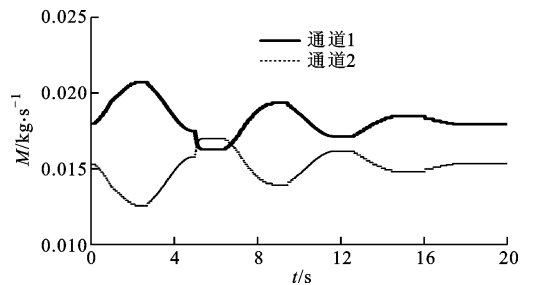


图 3 66.1 kW 时并联双通道进口流量动态响应曲线

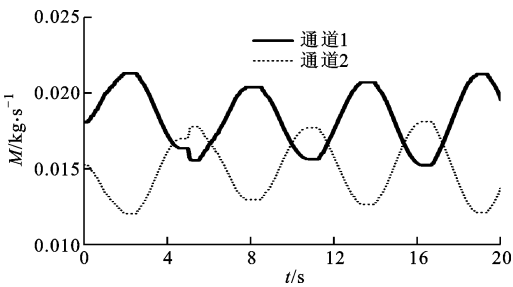


图 4 69.9 kW 时并联双通道进口流量动态响应曲线

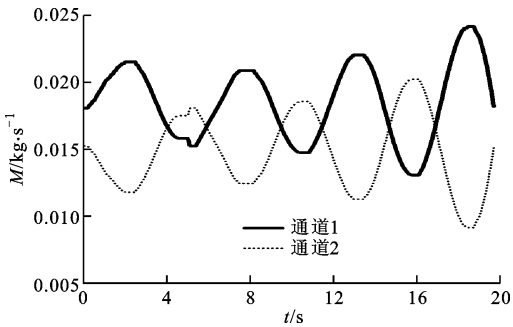


图 5 71.1 kW 时并联双通道进口流量动态响应曲线

3 超临界 CFB 锅炉流动不稳定性分析

3.1 水冷壁结构

超临界 CFB 环形炉膛锅炉水冷壁采用内圈和外圈并联方式,这不仅解决了蒸发受热面、二次风和给料系统布置困难的问题,还减小了炉膛高度,降低了泵损耗,从而提高了经济效益。炉膛外圈前墙回路 1 中水冷壁管绕过旋风分离器为最长管且处于受热最小的区域,回路 6 为受热最强的回路,故可选典型回路 1 与 6 并联作为流动不稳定性分析的并联通道 1 与通道 2,如图 6 所示。炉膛沿高度热负荷分布情况由炉膛结构拟定而成,如图 7 所示。表 2 给出了并联双通道在稳态的初始参数。

表 2 并联双通道稳态时初始参数

参数	数值
内径/m	0.019
外径/m	0.032
进口压力/MPa	10.162
进口焓/kJ·kg ⁻¹	1 343.097
总质量流量/kg·s ⁻¹	0.117 47
进口阻力系数	0
出口阻力系数	0

3.2 并联双通道内流动不稳定性分析

在系统稳态基础上,对并联双通道中的通道 1 在 0~11 s 内施加 1.2 倍热负荷扰动,通道 1 进、出口流量动态响应曲线如图 8 所示,通道 2 内进、出口

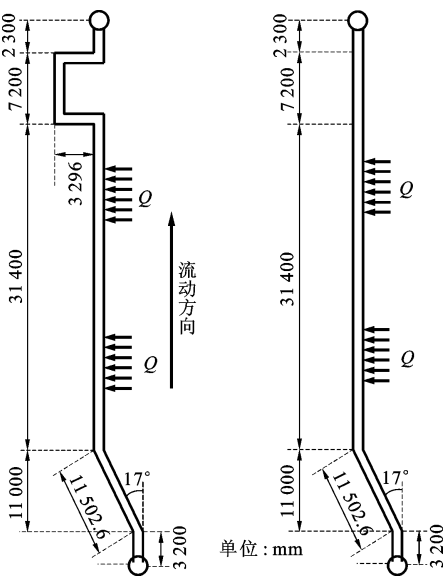


图 6 并联双通道结构示意图

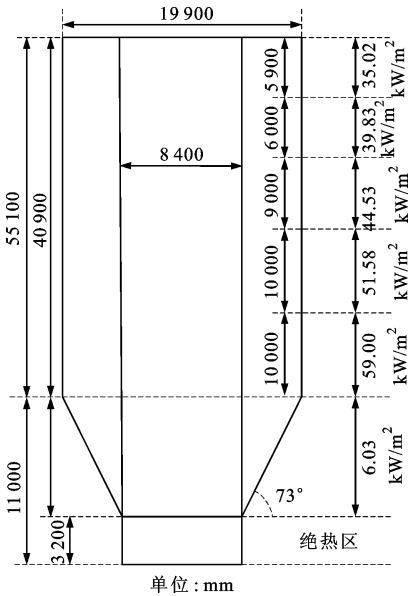


图 7 热负荷沿高度分布图

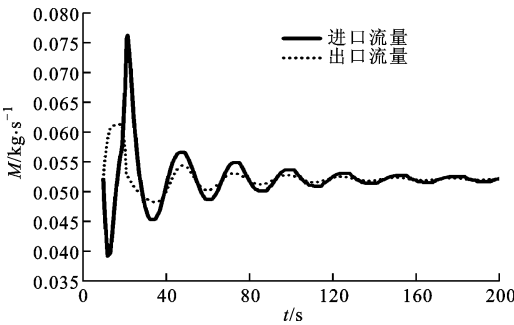


图 8 通道 1 进、出口流量动态响应曲线

流量动态响应曲线如图 9 所示,并联双通道系统进口流量动态响应特性,如图 10 所示。通道 1、通道 2 的进口流量与出口流量随时间波动沿轴向存在明显

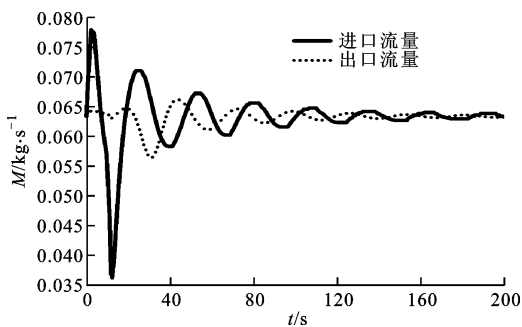


图 9 通道 2 进、出口流量动态响应曲线

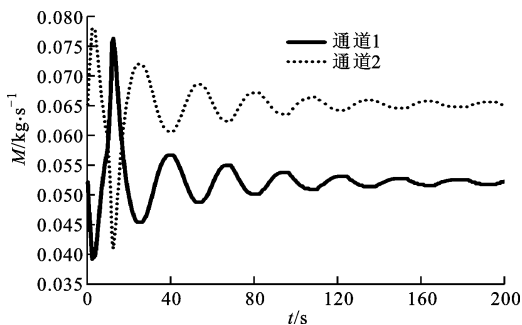


图 10 并联双通道进口流量动态响应曲线

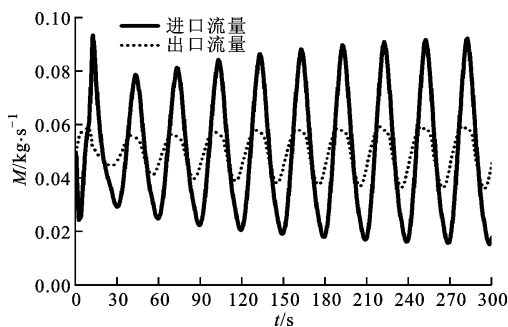


图 11 单通道模型进、出口流量动态响应曲线

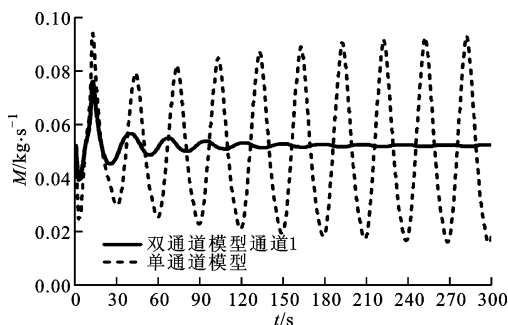


图 12 两种模型下通道进口流量动态响应对比

的相位差,在稳定之前进出口相位差约为 180° 。最终,进口流量与出口流量均恢复稳定值,说明通道 1 与通道 2 内工质流动是稳定的。

由图 10 可知:对通道 1 在 $0\sim 11\text{ s}$ 内施加 1.2 倍热负荷扰动后,通道 1 进口流量因热负荷的突然增加而有所减小,这是由于通道 1 内工质吸热增加的缘故;通道 1 与通道 2 的进口流量呈反相脉动,且脉动振幅随时间衰减,最终两通道的进口流量回到初始值,表明并联双通道内流动是稳定的。

3.3 单通道内流动不稳定性分析

对于单通道模型,设定边界条件:整个通道进、出口的压降差为一定值;进口压力与进口焓值不随时间变化。在与并联双通道相同的初始条件与热负荷扰动下,采用单通道模型对通道 1 进行流动不稳定性分析。两种模型所得的进、出口流量随时间波动如图 11 所示。由图 11 可知,进、出口流量发散振荡,说明通道 1 内工质流动是不稳定的。图 12 给出了两种模型计算得到的通道进口流量动态响应规律。由图 12 可知,在单通道模型下系统流动是不稳定的,而在双通道模型下系统流动则是稳定的,这说明环形炉膛锅炉水冷壁采用并联方式有利于提高系统的稳定性。

4 结 论

(1)建立了适用于并联双通道内超临界流动不

稳定性分析的数学计算模型,并编写了计算程序 Dynsys。Dynsys 程序计算所得的流动不稳定性边界与已有实验结果符合良好,表明 Dynsys 程序能有效地预测并联双通道内流动不稳定性边界。

(2)采用双通道模型对超临界 CFB 环形炉膛锅炉水冷壁的流动不稳定性进行数值模拟,结果表明:在进口压力、温度、总质量流量不变的情况下,施加 1.2 倍热负荷扰动,两通道的进口流量反相相脉动,最终流量恢复到稳态值,表明超临界 CFB 环形炉膛锅炉并联双通道内水动力流动是稳定的。

(3)采用单通道模型对超临界 CFB 环形炉膛锅炉水冷壁的流动不稳定性进行数值模拟,并与双通道模型计算结果对比,可得环形炉膛锅炉水冷壁采用并联布置方案有利于提高系统的稳定性。

参考文献:

- [1] YANG Dong, PAN Jie. Experimental investigation on heat transfer and frictional characteristics of vertical upward rifled tube in supercritical CFB boiler [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(2): 291-300.
- [2] 李捷. 超临界水堆流动不稳定性研究现状 [J]. 科技视界, 2015(25): 257-258.
- LI Jie. The research status of flow instability in supercritical water reactor [J]. Science & Technology Vision, 2015(25): 257-258.

- [3] 张震, 杨星团, 姜培学. 超临界水在垂直管内换热及流动不稳定性研究 [J]. 原子能科学技术, 2015, 49(11): 2011-2016.
- ZHANG Zhen, YANG Xingtuan, JIANG Peixue. Study on the heat transfer and flow instability of supercritical water in vertical tube [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2015, 49(11): 2011-2016.
- [4] 李妍, 陆道纲, 曾小康, 等. APROS 程序在超临界水流动不稳定性分析中的适用性研究 [J]. 核动力工程, 2014, 35(5): 70-73.
- LI Yan, LU Daogang, ZENG Xiaokang, et al. Research on the applicability of APROS program in the analysis of supercritical water flow instability [J]. Nuclear Power Engineering, 2014, 35(5): 70-73.
- [5] OMEROGU G, COMAKLI O, KARAGOZ S, et al. Experimental research of dynamic instabilities in the presence of coiled wire inserts on two-phase flow [J]. The Scientific World Journal, 2013 [2015-12-12]. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/714180>.
- [6] JAIN V, NAYAK A, VIJAYAN P, et al. Experimental investigation on the flow instability behavior of a multi-channel boiling natural circulation loop at low pressures [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(6): 776-787.
- [7] SHEN Zhi, YANG Dong, MAO Kaiyuan, et al. Heat transfer characteristics of water flowing in a vertical upward rifled tube with low mass flux [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 70: 341-353.
- [8] 沈艳荣, 杨冬, 王龙, 等. 600 MW 超临界 W 火焰锅炉流动不稳定性数值分析 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(5): 68-72.
- SHEN Yanrong, YANG Dong, WANG Long, et al. Numerical analysis of flow instability in 600 MW supercritical W flame boiler [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(5): 68-72.
- [9] DUTTA G, ZHANG Chao, JIANG Jin. Analysis of parallel channel instabilities in the CANDU supercritical water reactor [J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, 83: 264-273.
- [10] XIONG Ting, YAN Xiao, HUANG Shanfang, et al. Modeling and analysis of supercritical flow instability in parallel channels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 57(2): 549-557.

(编辑 赵炜 荆树蓉)

(上接第 17 页)

影响不大, 中心距由 $60\ \mu\text{m}$ 增加到 $75\ \mu\text{m}$ 后, q_{CHF} 最大仅提高了 2%; 当 $p/t < 2$ 时, 间距过小使得新鲜液体无法及时补充至气泡脱离处, 导致 q_{CHF} 较低, 并且中心距对 q_{CHF} 影响较大, 中心距由 $60\ \mu\text{m}$ 变为 $45\ \mu\text{m}$ 后, q_{CHF} 最大降低了 14%。

(4) 对相同高度和换热面积的微结构表面而言, 圆柱微结构由于良好的毛细流动性能, 使得其在相同热流密度时, 壁面温度远低于方柱微结构表面, 并且比方柱微结构表面的 q_{CHF} 最大提高了 13%, 比光滑表面提高了 124%, 展现出了良好的换热性能。

(5) 临界热流密度随着过冷度的增大而增大, 同时沸腾起始点有所滞后。

参考文献:

- [1] NDAO S, PELES Y, JENSEN M K. Experimental investigation of flow boiling heat transfer of jet impingement on smooth and microstructured surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(19): 5093-5101.
- [2] BON B, KLAUSNER J F, MCKENNA E. The hoo-doo: a new surface structure for enhanced boiling heat transfer [J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 2013, 5(1): 011003.
- [3] SHOJAEIAN M, KOSAR A. Pool boiling and flow boiling on micro- and nanostructured surfaces [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2015, 63: 45-73.
- [4] WEI Jinjia, HONDA H. Effects of fin geometry on boiling heat transfer from silicon chips with micro-pin-fins immersed in FC-72 [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(21): 4059-4070.
- [5] CHU K H, ENRIGHT R, WANG E N. Structured surfaces for enhanced pool boiling heat transfer [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(24): 241603.
- [6] ZHANG Yonghai, WEI Jinjia, GUO Dong. Enhancement of flow-jet combined boiling heat transfer of FC-72 over micro-pin-finned surfaces [J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2012, 19(6): 489-503.
- [7] HISLER V, VONNA L, LE HOUEROU V, et al. Model experimental study of scale invariant wetting behaviors in Cassie-Baxter and Wenzel regimes [J]. Langmuir, 2014, 30(31): 9378-9383.

(编辑 荆树蓉)