

摇摆状态下窄通道流动沸腾换热特性研究

肖友军¹, 孙立成², 高璞珍²

(1. 中国船舶重工集团公司第七〇二研究所, 江苏 无锡 214082;
2. 哈尔滨工程大学 核科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 摇摆条件下的两相流动问题得到了越来越多的关注, 本研究对摇摆状态下窄通道内的流动沸腾传热特性进行了实验。整个实验回路安装在一个可以围绕固定轴转动的平台上, 由液压系统驱动, 可以进行角度 15° 和周期 20 s 范围内的摇摆运动。实验段为单面可视的矩形流道。通过对比摇摆和静止状态下流动沸腾传热特性表明: 在实验条件范围内(最小摇摆周期 8s、最大摇摆角度 15°、 $6 \times 10^3 < Re < 2.4 \times 10^4$) 摇摆造成了流量、壁面温度和两相换热系数的周期性的小幅波动, 周期与摇摆周期一致, 摇摆过程对于流动沸腾传热系数的影响很小。同时, 对目前常用的、适用于常规通道和窄通道的流动沸腾传热计算方法进行了评价, 并给出了修正的计算方法。

关 键 词: 摇摆; 两相流动; 窄通道; 矩形通道; 沸腾换热

中图分类号: TK124 文献标识码: A

引 言

两相流动系统在摇摆状态下, 受到附加惯性力的影响, 其流动特性发生变化, 当系统中存在相变时, 影响就会更加复杂。美、日、德等发达国家早在二十世纪六、七十年代就开始研究海洋条件对动力系统的流动和传热特性的影响, 其中公开发表的文献以日本对“陆奥号”的研究为主^[1-2]。近年来, 我国航空航天事业以及船舶制造业的快速发展, 摇摆对流动系统热工水力特性影响的研究引起了很多科研单位的重视, 武汉七一九所和哈尔滨工程大学相继建造了摇摆实验台, 开展了一系列摇摆状态下两相流动和传热性能的研究。现有的研究主要针对摇摆状态下常规通道内单相流动特性的研究^[3-5]。而对摇摆状态下窄通道流动沸腾换热特性的研究很少, 因此本研究通过实验手段研究摇摆状态下窄矩形通道内水流动沸腾换热特性, 在实验范围内得到热流密度、质量含气率、质量流速、摇摆周期、最大摆

摆角度等因素对窄矩形通道内流动沸腾换热特性的影响, 并进行定量分析。

1 实验装置和实验方法

1.1 实验装置

实验热工回路如图 1 所示, 整个实验回路由实验水箱、循环水泵、流量计、预热器、可视化实验段、冷凝器以及连接整个回路的管道、阀门构成。实验工质为蒸馏水, 实验压力为常压。

实验工质在实验水箱和预热器中被加热到试验段入口所需温度, 进入实验段后被继续加热至沸腾, 气液混合物在冷凝器内冷却后回到水箱。实验段为可视化实验段, 一面为石英玻璃板, 另一面为不锈钢板, 通入直流电后, 作为加热壁面使用。流道为矩形, 当量直径 3.5 mm, 有效长度 0.55 m。

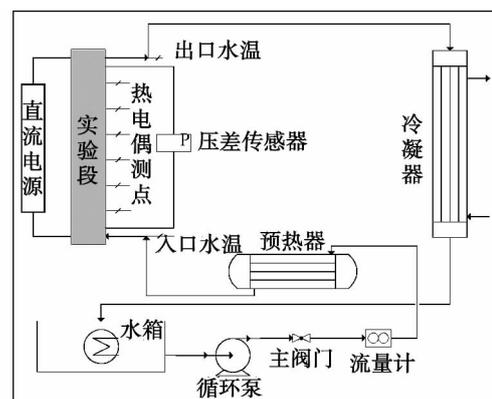


图 1 实验回路简图

Fig. 1 Simplified diagram of the test loop

摇摆台的台面是一个 2.6 m × 3.6 m 的矩形平面。摇摆台的垂直中轴线和热工回路的竖直中轴线重合。整个装置绕 OO 轴线(图 2) 摇摆, 台架的平

收稿日期: 2013 - 03 - 21; 修订日期: 2013 - 04 - 12

作者简介: 肖友军(1986 -), 男, 江苏盐城人, 中船重工第七〇二研究所助理工程师。

衡位置为台面的水平位置,实验段的平衡位置是垂直方向。摇摆台通过液压驱动,在设定的角度内做周期性地摇摆运动,摇摆角度随时间成正弦变化,即:

$$\theta = \theta_{\max} \sin(2\pi t/T) \quad (1)$$

式中: θ —瞬时摇摆角度,rad; θ_{\max} —最大摇摆角度,rad; T —摇摆周期,s。

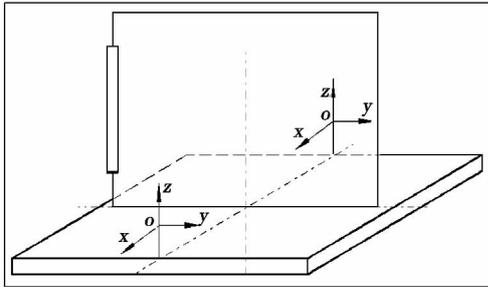


图 2 摇摆台示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the rolling test rig

1.2 实验数据处理

换热系数的计算分为过冷沸腾段和饱和沸腾段分别计算,以平衡态含气率为 0 处作为饱和沸腾起始点。过冷沸腾段和饱和沸腾段的长度通过下式计算:

$$L_{\text{sub}} = \frac{M c_{p,f} (T_{\text{sat}} - T_{\text{in}})}{q_{\text{eff}} W} \quad (2)$$

$$L_{\text{sat}} = L - L_{\text{sub}} \quad (3)$$

式中: M —质量流量,kg/s; $c_{p,f}$ —水的比定压热容, $J/(kg \cdot K)$; q_{eff} —热流密度, J/m^2 ; W —加热面的宽度,m。

通道内局部流动沸腾换热系数 h_i 定义为:

$$h_i = \frac{q_{\text{eff}}}{(T_{w-in\ i} - T_{f\ i})} \quad (4)$$

式中: $T_{w-in\ i}$ —测点处内壁面温度, $^{\circ}C$; $T_{f\ i}$ —测点处水的温度, $^{\circ}C$ 。

内壁面温度通过一维平板导热方程得到:

$$T_{w-in\ i} = T_{w-out\ i} - \frac{1}{2} \frac{\Phi}{\lambda} d^2 \quad (5)$$

式中: $T_{w-out\ i}$ —热电偶测得的外壁面温度, $^{\circ}C$; Φ —加热平板单位体积内的热流密度, J/m^3 ; λ —加热材料导热系数, $W/(m \cdot K)$; d —加热壁面的厚度,m。

测点处水的温度分过冷沸腾段和饱和沸腾段分别计算,单相段中水的温度按线性变化计算,即:

$$T_{f\ i} = T_{\text{in}} + \frac{L_i}{L_{\text{sat}}} (T_{\text{sat}} - T_{\text{in}}) \quad (6)$$

式中: L_i —测点处距试验段入口处的长度,m。

2 实验结果分析

图 3 和图 4 给出的是静止和摇摆状态下流量、内壁面温度、壁面过热度和换热系数随时间的变化规律。对比图 3 和图 4 可以发现:摇摆状态下,参数随时间变化有明显的周期性,变化周期和摇摆周期基本相同。而静止状态下的变化规律和摇摆时不同,参数变化没有稳定的周期,并且变化的幅度也小于摇摆状态。

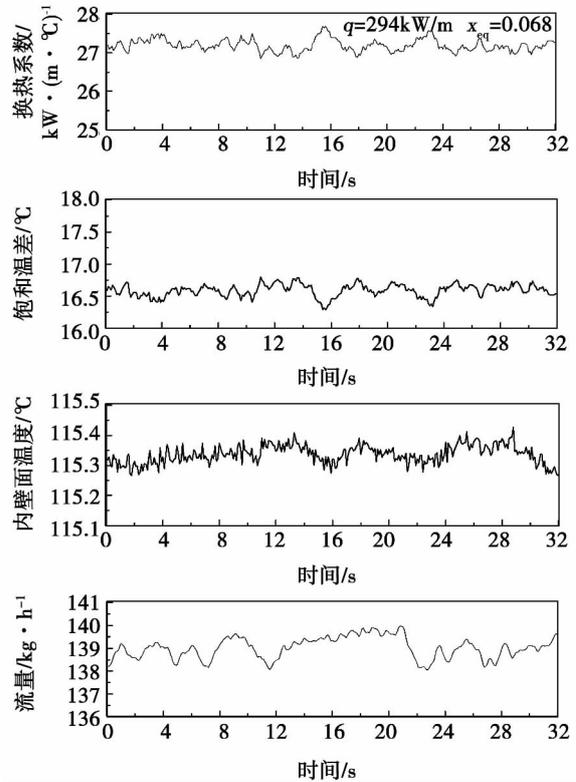


图 3 静止状态下各参数随时间的变化

Fig. 3 Changes of various parameters with time under the static state

图 5(a) 和图 5(b) 给出的是静止和摇摆条件下沿流动方向局部换热系数的变化规律,可以看出:在单相段,摇摆和静止状态下的换热系数差别很小;在两相段,摇摆对流动沸腾换热特性的影响逐渐显现出来,摇摆状态下的换热系数略小于静止状态,并且摇摆运动越来越剧烈,摇摆对换热系数的影响越大。

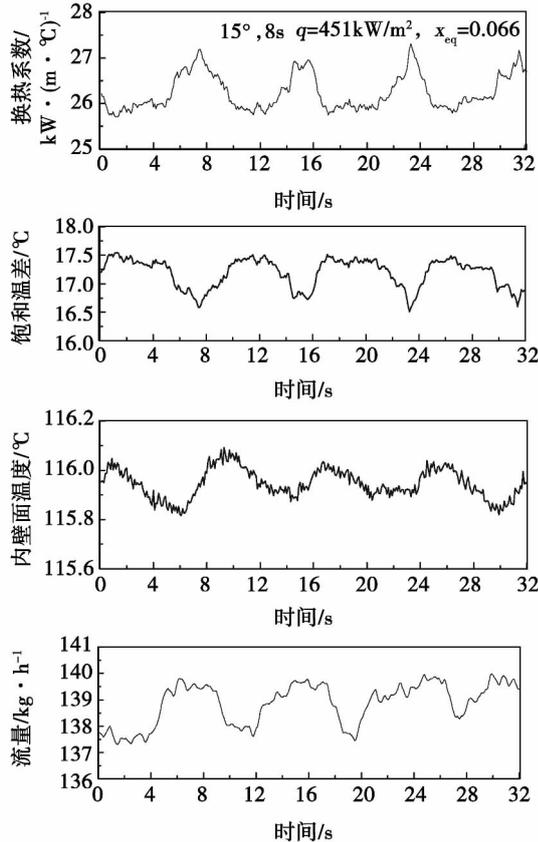


图 4 摇摆状态下各参数随时间的变化
Fig. 4 Changes of various parameters with time under the rolling state

对于强迫循环下摇摆运动对换热特性的影响, 哈尔滨工程大学的黄振曾做过一些分析^[6]: 摇摆运动主要从两个方面影响强制循环条件下的换热特性: 一、摇摆会降低强制循环的流量; 二、摇摆会加剧加热管壁面附近流体的扰动。这两种因素对传热有相反的影响作用, 至于哪种影响占主导作用, 取决于管道内流体流动的情况。在低雷诺数范围内, 第一个因素对传热的影响占主导地位, 摇摆越剧烈, 换热特性越强。随着雷诺数的逐渐增大, 此时强制循环的流量已经很大, 自然循环对传热的影响可以忽略, 此时摇摆对传热的影响主要表现在摇摆加剧了加热管壁面附近流体的扰动, 摇摆越剧烈, 换热特性越强; 当雷诺数超过一定范围, 管内流体的扰动已经非常剧烈, 强制循环的流量非常大, 这种状态下摇摆对换热特性的影响可以忽略不计。本研究所进行的实验中 Re 数接近 12 500, 强制循环的流量也非常大, 此时两种因素对传热的影响都非常小, 摇摆对换热

特性的影响很小。

3 静止状态下流动沸腾换热特性研究

根据窄矩形通道内饱和沸腾段 ($x_{eq} > 0$) 流动沸腾换热的实验结果, 我们对现有的适用于常规通道以及适用于窄通道的计算方法进行了评价。其中 Edelman 和 Gungor 方法适用于常规通道的流动沸腾换热的计算^[7-8], Lazarek - Black、Sun - Mishima、Tran 方法适用于微小通道内流动沸腾换热的计算^[9-11]。图 6 是入口温度 $71\text{ }^\circ\text{C}$ 、流量为 140 kg/h 和 200 kg/h 的实验结果与已有的计算方法的比较结果。图 6 中均给出了 $\pm 40\%$ 误差线, 平均绝对误差 (MAE) 采用采用式 (7) 计算, 其预测结果如表 1 所示。

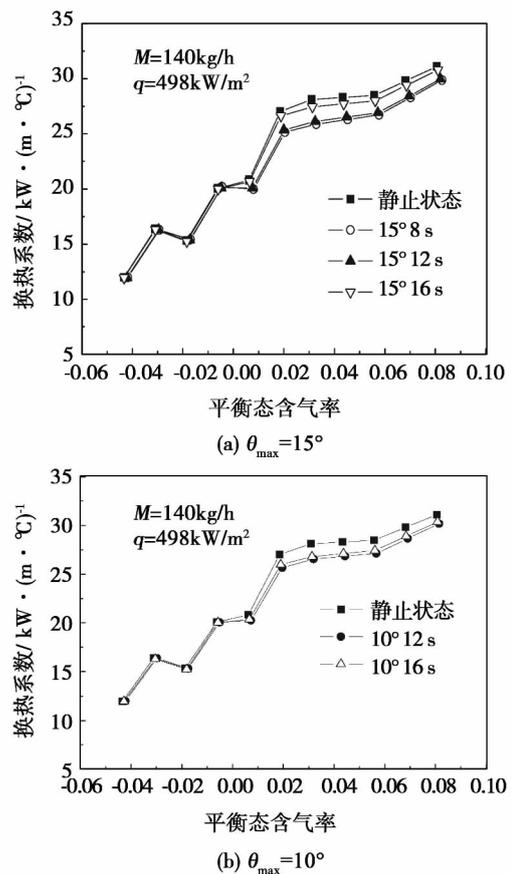


图 5 摇摆状态下换热系数的变化规律
Fig. 5 Variation law governing the heat transfer coefficient under the rolling state

$$MAE = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left| \frac{h_{tp,cal} - h_{tp,exp}}{h_{tp,exp}} \right| \times 100\% \quad (7)$$

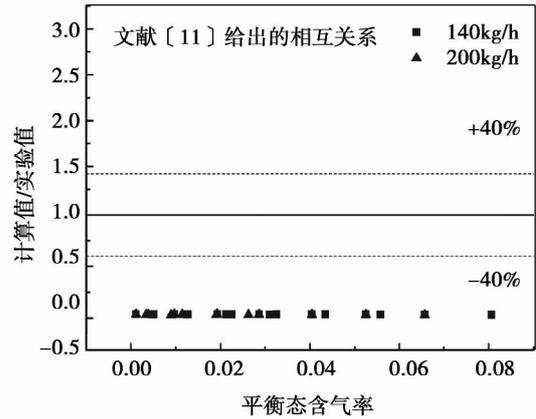
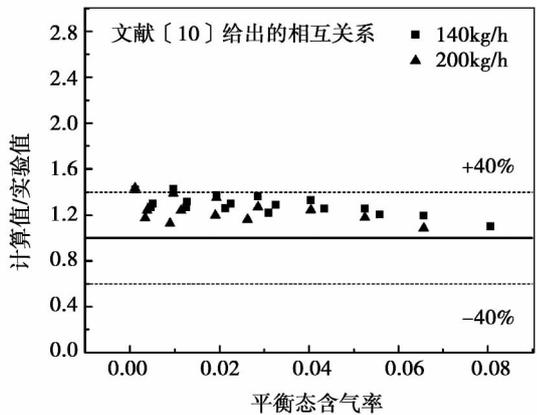
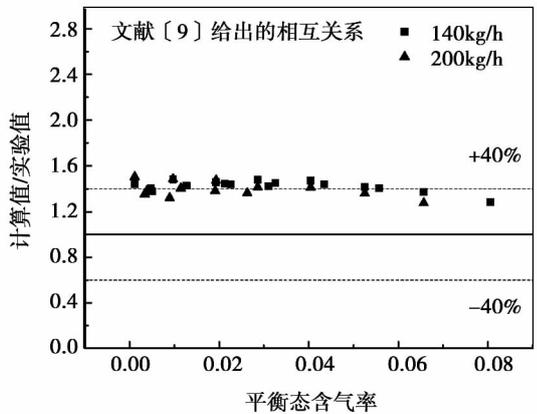
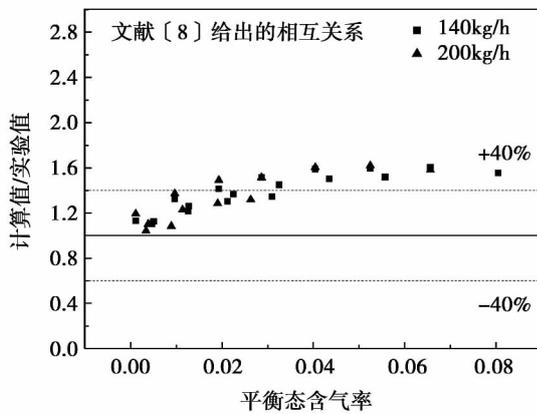
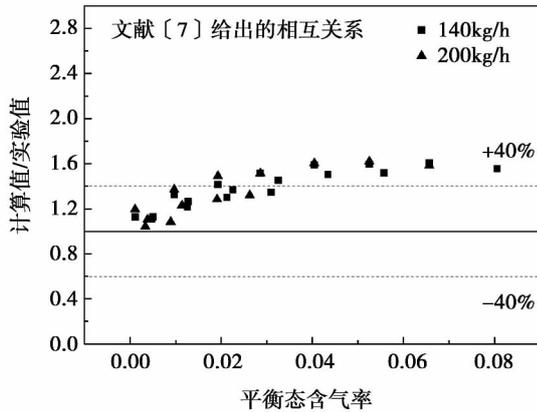


图 6 两相换热系数常规通道和微小通道
关联式计算值与实验值的比值
Fig. 6 The ratio of the calculation value and the
test one of the heat exchange coefficient calculated
by using the correlation formulae
for a conventional and micro channel

表 1 模型误差比较

Tab. 1 Comparison of the errors of the model

作者	MAE/%
Edelstein	66.6
Gungor	36.7
Lazarek - Black	41.4
Sun - Mishima	26.7
Tran	96.5

对比的结果发现,现有的流动沸腾换热系数关联式的计算值和实验值有一定的差距,这是因为很大一部分经验或半经验换热系数关联式是在高含气率下的实验得到的,而且实验的环境以及使用的传热工质也不尽相同。其中 Tran 方法的预测误差最大,达到 96.5%; Sun - Mishima 方法的预测结果最接近实验值,预测误差为 26.7%,并且计算值和实验值的变化趋势一致。这是因为 Sun - Mishima 方法在 Lazarek - Black 方法的基础上引入了表征流体惯性力和表面张力之比的韦伯数,得到了较为理想的结果,这也表明当通道尺寸较小时,尺寸效应对流动沸腾换热特性的影响变强。在这一结果的启发下,在实验值的基础上通过多元线性回归的方法对 Lazarek - Black 关联式系数进行了修正,得到了窄矩形通道内低含气率情况下的换热系数关联式:

$$h_{tp} = 13.64 \cdot Re_{lo}^{1.0158} \cdot Bo^{0.8338} \cdot \frac{\lambda_l}{De} \quad (8)$$

新得到的换热系数关联式的预测值和实验值的平均绝对误差为 2.3%。在低含气率区间,该换热系数关联式很好的预测了实验结果。

4 结 论

通过对摇摆状态下窄通道流动沸腾换热特性的实验研究得出以下结论:

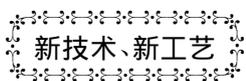
(1) 摇摆造成了流量、壁面温度和两相换热系数的周期性的小幅波动,周期与摇摆周期一致,波动幅度要略高于静止条件,摇摆过程对于流动沸腾过程产生了一定影响,但在实验条件范围内(最小摇摆周期 8s、最大摇摆角度 15° 、 $6 \times 10^3 < Re < 2.4 \times 10^4$) ,由于流道尺寸较小,相对于表面张力的作用而言,摇摆产生的附加惯性力影响很小,所以,摇摆运动对流动沸腾传热特性的影响很小。

(2) 用现有的适用于常规通道以及适用于窄通道的换热关联式对实验结果进行了评价,结果表明 Sun - Mishima 关联式的计算精度最高,平均相对误差仅为 26.7%。这归因于关联式中引入了表征惯性力和表面张力之比的韦伯数,也表明当通道尺寸较小时,尺寸效应对流动沸腾换热特性的影响变强。在 Lazarek - Black 关联式的基础上,基于实验结果给出了一个新的低含气率条件下窄通道的换热计算关系式,其计算误差在 $\pm 10\%$ 以内。

参考文献:

- [1] Ishida T, Yao T, Teshima N. Experiments of two-phase flow dynamics of marine reactor behavior under heaving motion [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1997, 34(8): 771 - 782.
- [2] Murata H, Sawada K, Kobayashi M. Natural circulation characteristics of a marine reactor in rolling motion and heat transfer in the core [J]. Nuclear Engineering and Design 2002, 215(1-2): 69 - 85.
- [3] 高璞珍,王兆祥,刘顺隆. 起伏对强制循环和自然循环的影响 [J]. 核科学与工程, 1999, 19(2): 116 - 120.
GAO Pu-zhen, WANG Zhao-xiang, LIU Shun-long. Influence of the fluctuation on the forced and natural cycles [J]. Nuclear Sciences and Engineering, 1999, 19(2): 116 - 120.
- [4] 庞凤阁,高璞珍,王兆祥. 摇摆对常压水临界热流密度影响的实验研究 [J]. 核科学与工程, 1997, 17(4): 367 - 371.
PANG Feng-ge, GAO Pu-zhen, WANG Zhao-xiang. Experimental study of the influence of the rolling on the critical heat flux density of water at the normal pressure [J]. Nuclear Sciences and Engineering, 1997, 17(4): 367 - 371.
- [5] 高璞珍,刘顺隆,王兆祥. 纵摇和横摇对自然循环的影响 [J]. 核动力工程, 1999, 20(3): 228 - 231.
GAO Pu-zhen, LIU Shun-long, WANG Zhao-xiang. Influence of the longitudinal and lateral rolling on the natural cycles [J]. Nuclear Power Engineering, 1999, 20(3): 228 - 231.
- [6] 黄 振. 摇摆对竖直单管内单相流体传热特性的影响 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
HUANG Zhen. Influence of the rolling on the heat transfer characteristics of a single-phase fluid inside a vertical single tube [D]. Harbin Engineering University, 2009.
- [7] Edelstein S, Perez A J, Chen J C. Analytic representation of convective boiling functions [J]. AIChE, 1984, 30(5): 840 - 841.
- [8] Gungor K E, Winterton R H S. Simplified general correlation for saturated boiling and comparisons of correlation with data [J]. Chemical Engineering Research and Design, 1987, 65(3): 254 - 260.
- [9] Lazarek G M, Black S H. Evaporative heat transfer, pressure drop and critical heat flux in a small vertical tube with R-113 [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1982, 25(7): 945 - 960.
- [10] Sun L C, Mishima K. An evaluation of prediction methods for saturated flow boiling heat transfer in mini-channels [J]. International Journal Heat Mass Transfer 2009, 52(23-24): 5323 - 5329.
- [11] Tran T N, Wambsganss M W, France D M. Small circular and rectangular channel boiling with two refrigerants [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1996, 23(3): 485 - 498.

(辉 编辑)



新技术、新工艺

创办燃气轮机的新合资企业

据《Gas Turbine World》2012年11-12月刊报道, Siemens Gas Turbine Technology(西门子燃气轮机技术公司)、西门子和俄罗斯动力机器公司组建的合资企业,已购买土地,建造投资金额将达2.75亿美元。

该计划是要在俄罗斯的圣彼得堡附近建成一个工业燃气轮机制造和服务的世界中心。

列宁格勒地区的地方长官已经宣布了该项目4900万美元的减免税,预计能在列宁格勒地区产生数百个工作岗位。该工厂计划于2014年投入运行。

(吉桂明 摘译)

words: parameter optimization ,sintering ,dual pressure ,waste heat recovery

摇摆状态下窄通道流动沸腾换热特性研究 = **Study of the Boiling Heat Exchange Characteristics of a Flow in a Narrow Channel Under the Rolling Condition** [刊, 汉] XIAO You-jun (CSIC No. 702 Research Institute , Wuxi ,China ,Post Code: 214000) ,SUN Li-cheng ,GAO Pu-zhen (College of Nuclear Science and Technology ,Harbin Engineering University ,Harbin ,China ,Post Code: 150001) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 ,28(6) . - 585 ~ 589

The problems relating to two-phase flows under the rolling condition have attracted an increasing attention. The authors performed a study of the boiling heat transfer characteristics of a flow in a narrow channel under the rolling condition. The whole test loop was mounted on a platform capable of rotating around a fixed axis. The platform could perform a rolling movement at an angle of 15 degrees and in a period of 20 seconds. The test section was a rectangular flow passage visible at a side. A contrast of the boiling heat transfer characteristics of a flow under the rolling and still condition shows that in the range of the test conditions (minimum rolling period of 8 seconds ,maximum rolling angle of 15 degrees $6 \times 10^3 < Re < 2.4 \times 10^4$) ,the rolling leads to a periodic fluctuation by a small margin of the flow rate ,wall surface temperature and two-phase heat exchange coefficient with such a period being identical to the rolling one. The rolling process has little influence on the boiling heat exchange coefficient of the flow. In the meantime ,the authors have given out their evaluation of the commonly used boiling heat transfer calculation method for flows in both conventional and narrow channels and also provided the correction calculation method. **Key words:** rolling ,two-phase flow ,narrow channel ,rectangular channel ,boiling heat exchange

多尺度状态监测方法在灰污监测中的应用 = **Application of the Multi-dimension State Monitoring Method in the Monitoring of Ash and Fouls** [刊, 汉] LIU Ji-wei (Department of Automation Engineering ,Zhonghuan Information College ,Tianjin University of Science and Technology ,Tianjin ,China ,Post Code: 300380) ,ZENG De-liang ,LIU Ji-zhen ,LI Qing (Beijing City Key Laboratory on Industrial Process Measurement and Control Novel Technologies and Systems ,North China University of Electric Power ,Beijing ,China ,Post Code: 102206) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2013 ,28(6) . - 590 ~ 595