

两相并联换热通道间流量分配特性实验研究

辛鹏飞, 王文

(上海交通大学机械与动力工程学院, 200240, 上海)

摘要: 为提高两相流动换热通道的换热能力及系统性能,探究其并联换热通道中流量分配不均的特征,开展了以水为工质的两并联通道换热实验,对流量分配不均所带来的参数变化进行研究。实验参数变化主要包括进口温度、热流密度、进口流量,以及外部扰动、集管结构带来的流量分配差异。将实验结果与模型计算结果进行了对比,结果表明:并联换热通道间流量分配不均时,优先沸腾通道中流量较少,未沸腾通道出口温度明显降低;增加进口温度、增加热流密度、降低进口流量会导致流量分配不均的出现,其产生和消失对应的进口温度、热流密度、进口流量分别变化了 24.8°C 、 175.6 W/m^2 、 19.8% ,并存在滞后现象;扰动会加速流量分配不均的出现,对应进口温度相差 3.2°C ;集管结构会影响优先沸腾通道的位置,单相状态下流量较少的通道倾向于优先沸腾。研究结果可为提高并联换热通道流量分配的均匀性提供参考。

关键词: 并联换热通道;流量分配;两相流;流动换热

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202401009 **文章编号:** 0253-987X(2024)01-0099-09

Experimental Study on Flow Distribution Characteristics of Parallel Two-Phase Heat Transfer Channels

XIN Pengfei, WANG Wen

(School of Mechanical and Power Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: This study aims to improve heat transfer performance and operating stability in a two phase cooling system while exploring the characteristics of flow maldistribution in parallel channels. An experimental setup with two parallel channels using water as the working fluid is established to examine the impact of flow maldistribution on system performance. The main factors considered include inlet water temperature, heating flux density, and mass flow rate, and the obtained experimental data are compared with the theoretical calculation results. The results demonstrate that flow maldistribution in parallel channels leads to uneven flow distribution and significant temperature deviations. Specifically, the channel with the less flow experiences boiling first, while the unboiling channel exhibits a considerable reduction in outlet temperature. Additionally, certain factors contribute to the occurrence of flow maldistribution. Increasing the inlet temperature, increasing the heat flux density and reducing the inlet flow rate could lead to flow maldistribution, meantime, the inlet temperature, heat flux density and inlet flow rate corresponding to the occurrence and disappearance of flow maldistribution changed by 24.8°C , 175.6 W/m^2 , and 19.8% ,

respectively, and there are lags among them; the external disturbance might accelerate the appearance of flow maldistribution, the corresponding difference of inlet temperature is about 3.2°C in experiment; the header structure affects the position of the firstly boiling channel, and the channel with less flow rate in the single-phase state tends to preferentially boil. These research findings provide valuable insights for improving flow distribution uniformity in parallel channels.

Keywords: parallel channels; flow distribution; two phase; flow and heat transfer

并联换热通道在锅炉水冷壁^[1-2]、太阳能吸热器^[3-4]、核反应堆蒸汽发生器^[5]及电子设备冷却^[6]等各种能源化工领域都有着较多的应用。泵驱两相流动换热系统结构紧凑性高,能够提供较高的换热能力,并可适应较宽的换热需求,在电子散热中的应用越来越广泛^[7]。但是,在蒸发的并联换热通道中,极易出现通道间两相流的不均匀分配,影响系统的换热能力^[8],甚至导致局部烧干和壁温飞升。

并联器件间流量分配不均属于流量漂移不稳定,与通道的内部和外部压降特征曲线相关。并联通道间的流量分配不均是由非单调的通道内部特征曲线与流动沸腾系统中泵供应曲线之间的相互关系而产生的^[9-10]。通道内的流量与压降的非线性关系,使得在满足并联器件两端压降相同的条件时,得到的结果存在多值性。Akagawa等^[11]首先对由3根平行通道组成的蒸发器进行了理论和实验研究,以R-134a为冷却剂,表明可以根据单管的内部特征曲线估计多管中的流量分配、滞后以及流量漂移的开始。Minzer等^[12-13]研究了两管道太阳蒸汽发生器中的流量分配情况,并提出了简化模型,得到了两管道在不稳定点发生流量漂移的瞬态过程。Baikin等^[14]将Minzer的理论扩展到4个并行通道的实验中,研究了不均匀加热下的流量分布状况,发现流量倾向于进入不加热的通道中,并得到了总进口流量变化时的通道内流量、压降的变化。Barnea等^[15]利用实验和理论研究了总流量、加热功率变化时,各通道内流量以及通道间压降的变化,并在静态实验中观察到了滞后现象,在动态实验中观察到了反流现象。彭传新等^[16]研究了并联通道中的流量漂移流动不稳定性,表明流量漂移型流动不稳定出现的原因是,空泡份额增加引起先出热通道流体重力压降的下降。Hayat等^[17]在4根并行通道的动态实验中观察到了滞后的现象,以及在不稳定工况点的漂移中观察到趋向不同稳定的过程,表明流量分配的结果与动态迁移的过程有关。

此外,在并联微通道中也存在类似的现象。

Van Oevelen等^[18-19]针对平行微通道开发了一种模拟两相流分布的方法,将单个平行通道的压降模型与泵曲线相结合的流动网络,采用广义特征值的方法来求解稳定性。结果表明:当有两个以上通道运行在负斜率区域时,系统是不稳定的;一个通道运行的负斜率区域时,稳定与不稳定都有可能。Migliani等^[10,20]通过实验研究了在通道间有无热传导的情况下,不均匀加热对两通道内流量分布的影响。

Guglielmini^[21]指出,影响两相流分布特征的变量可分为几何因素、操作条件和流体特性。单相流分布不均大都是由于结构导致的,两相流分布不均是由于不稳定性引起的,如流量漂移、压降振荡、密度波振荡等^[7]。流量分布不均发生时,往往是多个因素共同影响、相互作用的结果,从而导致了并联系统中流量分布的复杂特征,因此对并联两相流系统中的流量分布一直是研究的重点和热点。

现有的文献中关于并联通道间流量分配的实验研究主要集中探究各通道的流量占比,忽略了分配不均对壁面温度的影响,且影响因素的研究主要集中在进口流量上,参数影响研究不充分。因此,本文建立了以水为工质的两通道实验装置,实验研究了进口温度、加热功率变化对流量、温度的影响,以及一定的扰动对参数变化的影响,而且对实验中产生的现象和相关参数的滞后性进行了分析。

1 实验系统介绍

实验原理如图1(a)所示, $T_1 \sim T_8$ 为不同位置处流体温度。系统以去离子水为工质,通过上游齿轮泵进行驱动,调节转速以保持出口流量恒定,流体经过预热器加热至设定温度,随后进入入口集管。为便于支路流量测量分析和保持出口压力恒定,支路出口维持开放结构。为提高集管流量分配的均匀性,在入口集管内部添加了孔板^[22],结构如图1(b)所示。实验段由两根长度为1 000 mm、内径为4 mm、外径为6 mm的不锈钢管道组成,并在其外部缠绕加热线圈及保温材料以模拟温控热沉,加热线圈可提供的

最大加热功率为 1 600 W,热流密度可达 1 600 W/m,通过变压器对输出功率进行控制。为了减少壁面导热对测温的影响,在实验段两端各预留 100 mm 不加热区域,在此区域对进出口温度进行测量。

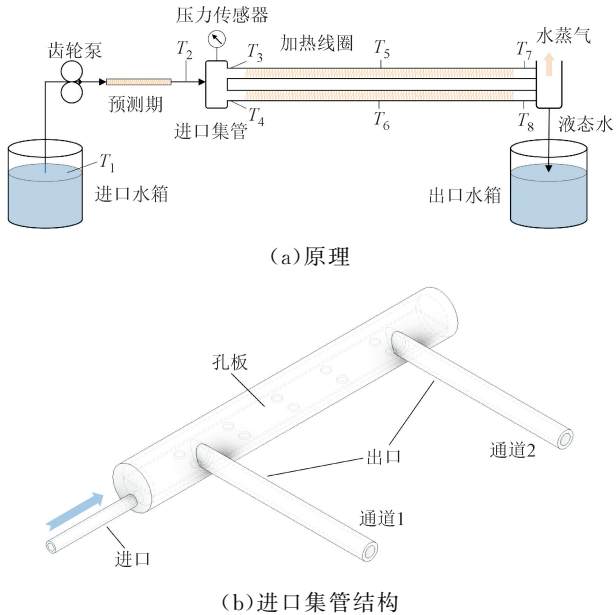


图 1 两通道实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of two experimental device

压力传感器型号为 MIK-P300,放置在进口集管处对进口压力进行测量。温度传感器采用 K 型热电偶,利用四线制铂电阻对其进行标定,标定后的误差为 0.3 K。热电偶的布置位置如图 1(a)所示,主要分布在进口及实验段每条支路,实验段中间位置也布置了测温点,用来检测运行过程中的壁温状态以及管道内流体是否烧干。系统中的总流量通过对泵特征曲线进行拟合,得到流量与转速的关系,出口为单相支路中的流量是通过进口温度与出口温度计算得到。管道中的加热功率可通过输出电流和电压求得,并在单相工况中确定其有效加热功率。实验中各物理量的不确定度如表 1 所示。

表 1 实验中各物理量的不确定度
Table 1 Uncertainty analysis of physical quantity parameters

参数	不确定度
温度 T/K	0.3
绝压 $p/\%$	0.5
质量流量 $\dot{m}/\%$	0.54
加热功率 $P/\%$	2

对单个通道的动量方程沿长度进行积分,得到单个通道的流量变化模型^[23]

$$\frac{L}{A_i} \frac{dW_i}{dt} = p_{in} - p_{out} - F_i(W_i) \tag{1}$$

式中: L 为通道长度; A_i 为通道截面积; W_i 为质量流量; p_{in} 为进口压力; p_{out} 为出口压力; $F_i(W_i)$ 为通道内压降特征。

假设 N 个并联通道的进出口压力相同、出口压力保持恒定,其进口压力为

$$p_{in} = \sum_{i=1}^N A_i F_i(W_i) / \sum_{i=1}^N A_i + p_{out} \tag{2}$$

求解式(2)可得到对应工况下的流量分配情况,采用李雅普诺夫一次近似理论来判定工况点的稳定性^[24],当特征根的符号为负时,工况点稳定的,表明系统受到扰动后会恢复初始状态。

2 结果分析

2.1 进口温度的影响

图 2 表示在进口流量 $W_{in}=0.0053\text{ kg/s}$ 和热流密度 $Q'=322.65\text{ W/m}$ 不变的情况下,改变进口温度对两通道内流体温度的影响。随着进口温度的提高,流体出口温度与管壁温度同时上升。当通道入口温度达到 $61.5\text{ }^\circ\text{C}$ 时,两个通道内开始产生流量漂移。靠近集箱入口的通道 1 的出口温度急剧上升直至出现沸腾,通道 2 的出口温度却逐渐下降,表明通道 2 中的流量逐渐增加,这是由于优先沸腾的通道中会得到更少的工质。当通道 1 中的流体达到沸腾时,其中间位置的壁面温度也随之上升,直到与流体温度达到平衡,此测点位置处于两相状态。同时,通道 2 出口温度也有较大波动,这是由于通道 1 出口间歇性流动及内部的流型变化,导致通道 2 内流速产生变化,影响其换热能力,通道 2 壁面温度也伴随较大波动。

当出现流量漂移时,降低进口温度,可以发现,通道 1 出口始终处于两相状态,温度没有变化,通道 2 出口流体温度和中间壁面温度则随着进口温度降低。当进口温度降至 $41.8\text{ }^\circ\text{C}$ 时,通道 1 的中间壁面温度开始下降,出口仍为两相状态,表明通道内部沸腾区域开始减少。进口温度降至 $36.7\text{ }^\circ\text{C}$ 时,通道 1 出口温度出现波动并迅速下降,此时通道 2 出口温度迅速上升,直至超过通道 1 出口温度,两个通道壁面温度与出口温度变化相同。可见,流量分配不均的产生和消失对应的进口温度有很大差异,达到 $24.8\text{ }^\circ\text{C}$,表明流量分配对于进口温度具有一定滞后特性,即增加和减少进口温度对流量分配产生的影响不同。出现滞后现象是由于稳定工况点存在多值

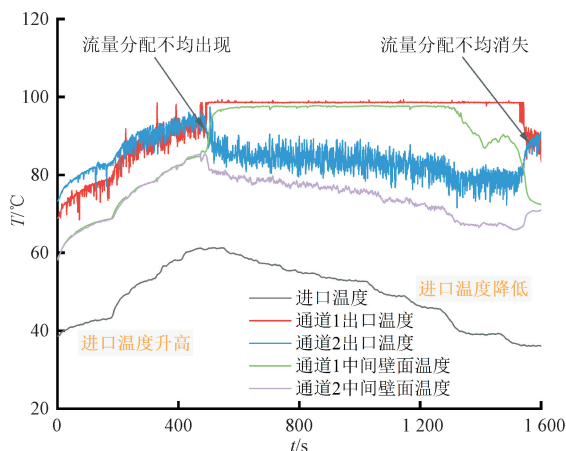


图2 进口温度变化对通道温度的影响

Fig. 2 The effect of inlet temperature change on channel temperature

性,以及参数增加和减少时所经历的瞬态轨迹不同导致的。

图3展示了上述流量分配不均产生的压力波动(Δp)情况,由于原始信号含有较多的杂质信号,其波动的能量在很宽的频谱范围内,为方便分析,将杂质信号进行了小波分析滤波。随着进口温度的上升,通道内的压降呈下降趋势,这是由于流体黏度降低所导致的。当出现流量分配不均匀时,压降波动随之出现,且压降有明显的上升趋势。随着进口温度的降低,压降随之下降,波动也有所减少,直至流量分配不均匀消失,通道内压降恢复到波动前的水平,压力波动也随之消失。小波分析滤波后的信号仍有一定的波动,这可能是由于通道内流型变化产生的,在通道出口存在间歇性流动现象。

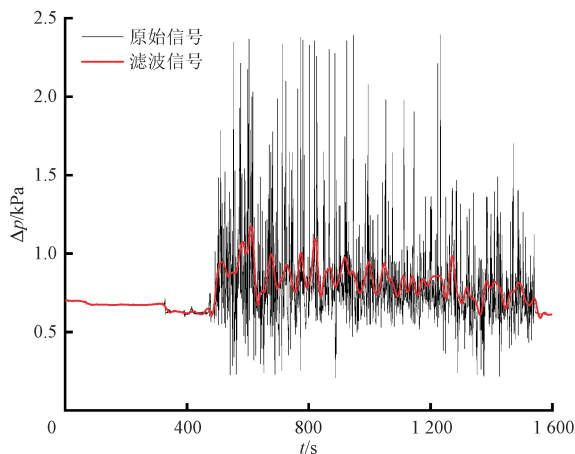


图3 流量分配产生的压力波动情况

Fig. 3 Pressure fluctuations due to flow distribution

2.2 热流密度的影响

热流密度 Q' 变化对通道内流量分布的影响见图4,其中进口温度 $T_{in} = 62.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 流量 $W_{in} = 0.0073\text{ kg/s}$ 。当热流密度提高到 387 W/m^2 时,通道中开始出现流量分配不均现象,通道1出口温度由于流量减少迅速上升,通道2出口温度迅速下降;继续增加热流密度,通道1出口出现过热蒸汽,其中间壁面温度也大于饱和温度,通道中大部分处于烧干的状态。随着热流密度降低,通道2出口温度开始上升,由于进口温度不变、热流密度降低,表明通道2中的流量开始降低,而通道1中的流量对应增加,通道1中间壁面温度也随之降低。当热流密度降低到 211.4 W/m^2 时,通道2出口温度迅速上升,通道1出口温度出现波动,直至两者温度达到一致,通道中流量恢复到均匀的状态。实验中,流量漂移产生和消失对应的热流密度相差 175.6 W/m^2 ,表明流量分配对于热流密度同样存在滞后特性。通道中产生流量分配不均时,两者对应的出口温度为 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明即使在单相工况区域时,也会出现流量分配不均。流动中存在的扰动使通道中的流量产生波动,当某个通道由于流量波动到达沸腾起始点时,流量出现分配不均。

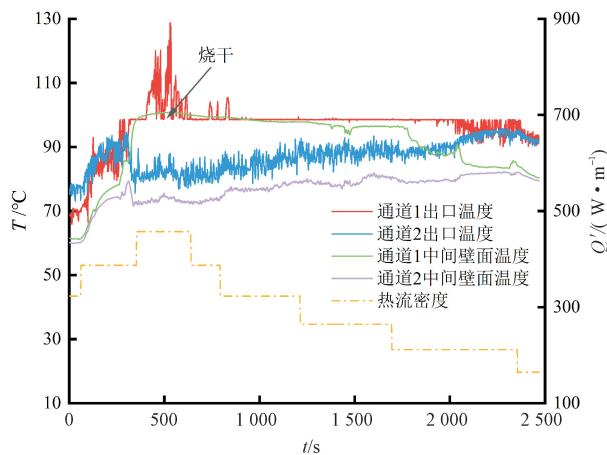
图4 热流密度变化对通道流量分配的影响(高流量 $W_{in} = 0.0073\text{ kg/s}$)Fig. 4 The effect of heat flux change on channel flow distribution (high flow rate $W_{in} = 0.0073\text{ kg/s}$)

图5展示了较低的质量流量($W_{in} = 0.0048\text{ kg/s}$)下热流密度对通道内流量分配的影响,进口温度 $T_{in} = 60.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与高质量流量相比,其出现流量分配不均的出口温度明显上升,约为 $95.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,这是由于高质量流量下通道达到沸腾所需的热流密度增加,较高的热流使其更加不稳定。此外,随着热流密度的进一步增加,在无沸腾的通道2出口也观察到了排

气现象,而出口的温度并未达到饱和温度。这表明,在通道 1 中产生了气弹反流的现象,返回集管中的气体随液体从通道 2 中排出,使其出口温度间歇性达到沸腾温度。从图 5(b)可以看出,由于存在气弹反流,使得压降存在较大的波动,尤其是通道 1 出口烧干时,其压差可波动到 8.2 kPa,随着热流密度的减少,压降波动也随之降低。

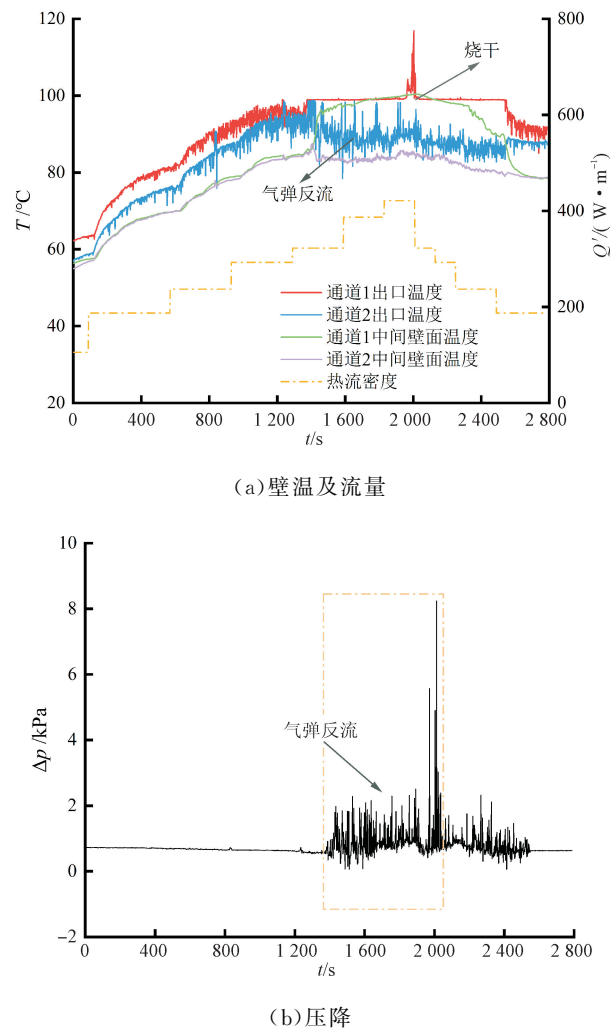
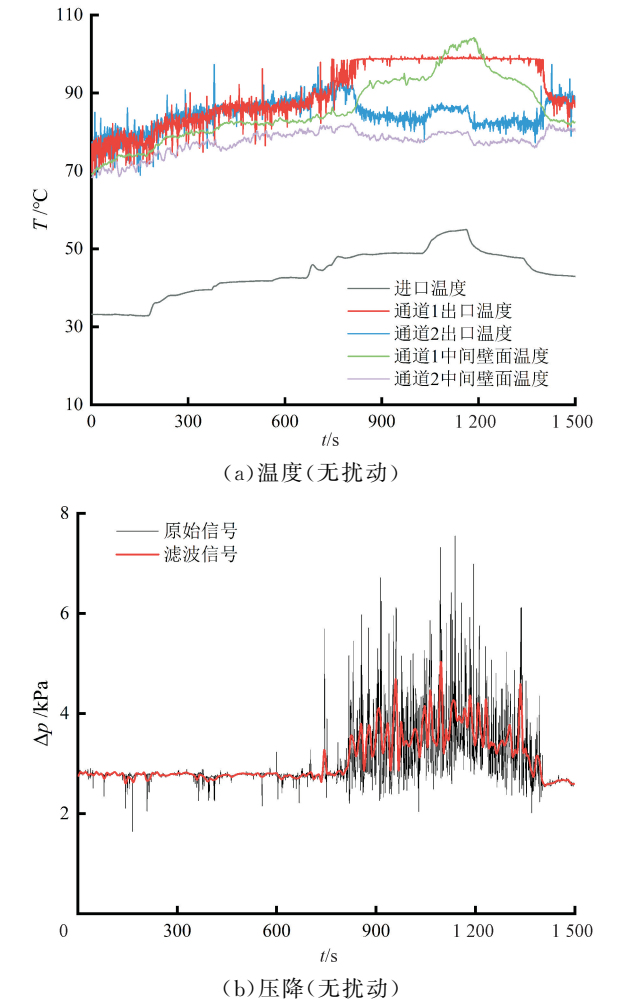


图 5 热流密度变化对通道流量分配的影响 (低流量 $W_{in}=0.0048\text{ kg/s}$)
Fig. 5 The effect of heat flux change on channel flow distribution (low flow rate $W_{in}=0.0048\text{ kg/s}$)

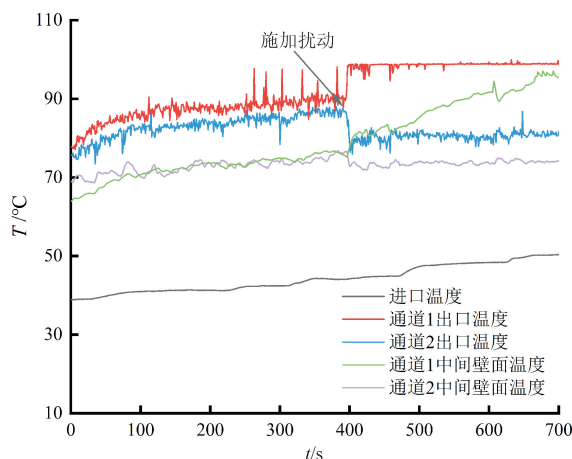
2.3 外部扰动的影响

在热流密度 $Q'=658.50\text{ W/m}^2$ 和进口流量 $W_{in}=0.0061\text{ kg/s}$ 工况下,施加外部振动对流量分配的影响见图 6。图 6(a)、6(b)表示不添加任何扰动时,随着进口温度升高,通道中逐渐产生流量分配不均匀的情况,此时对应的进口温度为 48.7°C 。图 6(c)、6(d)表示在运行过程中给通道施加一定的扰

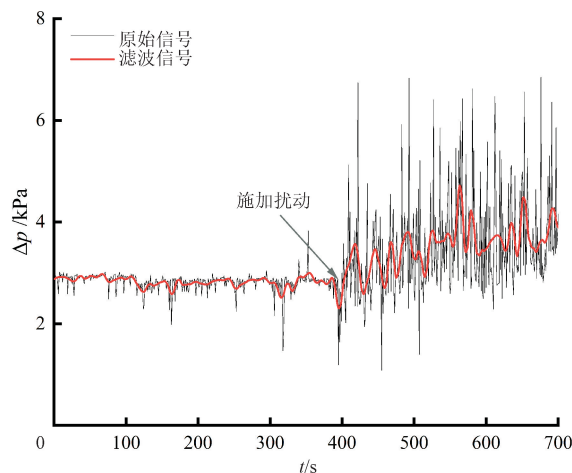
动,出现分配不均对应的进口温度为 44.5°C 。通过对比可以发现:由于存在外部扰动,使得通道在更低的进口温度下便可以出现分配不均,其温差可达 3.2°C ;施加扰动的工况产生分配不均时的温度变化更快。未施加扰动的通道在即将出现分配不均时,低流量的通道出口会出现间歇性的沸腾,逐步演变成出口完全沸腾;在施加扰动的工况中,低流量通道出口会直接变成沸腾状态。未沸腾通道出口温度迅速降低,施加扰动的工况温度降低的幅度更大,这是由于流量分配不均匀出现时对应的进口温度较低。添加扰动并未改变此工况下流量分配不均的结果,即都是通道 1 得到较少的流量。对两个工况下的压降变化进行对比:在有扰动的工况中,伴随着流量变化压降会先有所下降,然后上升;在没有扰动的工况中,压降会缓慢随之上升,没有下降的部分出现。压降变化整体趋势与进口温度的变化相似。此外,在图 6(a)同样观察到了流量分配对进口温度的滞后性,其温差为 5°C ,滞后的温差受到流量和加热功率的共同影响。



(b) 压降(无扰动)



(c) 温度(有扰动)



(d) 压降(有扰动)

图6 外部扰动对流量分配的影响

Fig. 6 The effect of external disturbance on flow distribution

2.4 进口流量的影响

在热流密度 $Q' = 413.23 \text{ W/m}^2$ 和进口温度 $T_{\text{in}} = 60^\circ\text{C}$ 工况下,进口流量变化对通道中流量分配的影响见图7, W_{tot} 为总流量。与上述结果不同的是,沸腾优先出现在了通道2中,表明流量分配的结果存在一定的随机性,与相应的扰动有关。随着进口流量降低,通道中流体温度随之上升,当流量降低至 0.0048 kg/s 时,开始出现流量分配不均,通道2出口温度急剧上升到饱和温度。继续降低流量会使得通道2出口出现严重的过热状态,但通道1中的流体温度却是下降的,表明其中的流量是增加的,且通道2出口的间歇性排液频率也随之下降低,环状流通道内所占的比例有所增加。随着流量增加,通道1中的流体温度未出现明显变化,表明其流量占比在随之降低。当流量增加到 0.00575 kg/s 时,通道中的流量又恢复到初始状态。可见通道中的流量分配不均的产生和

消失对应的进口流量有较大的差异,进口流量增加了 19.8% ,表明流量分配对进口流量有一定的滞后性。

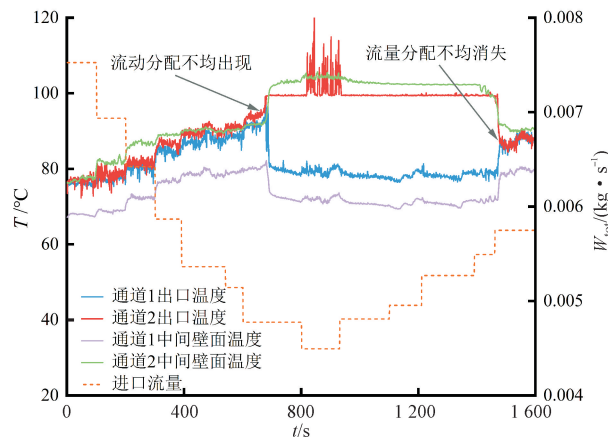


图7 进口流量变化对出口温度的影响

Fig. 7 The effect of inlet flow rate change on outlet temperature

根据总进口流量、加热功率、进出口温度可以得到通道1中的流量占比,如图8所示, W_1 为通道1流量。由于间歇性排液导致出口温度存在一定的波动,因而计算得到的流量占比也会在一定范围内波动,越密集的区域流量占比出现的概率越大。当流量的降低到流量分配不均的起始点时,通道1中的流量占比会迅速增加到 95% 以上,再继续降低流量,其流量占比几乎为1,而通道2中几乎没有流体进入。当进口流量开始增加时,通道1中的流量占比随之减少,当到达流量分配不均消失点时,其流量占比迅速从 70% 恢复到初始的状态。流量增加和减少所对应的流量占比轨迹存在明显差异,总流量发生变化后,其对应流量占比会优先选择与上一工况点相近的流量分配比例。

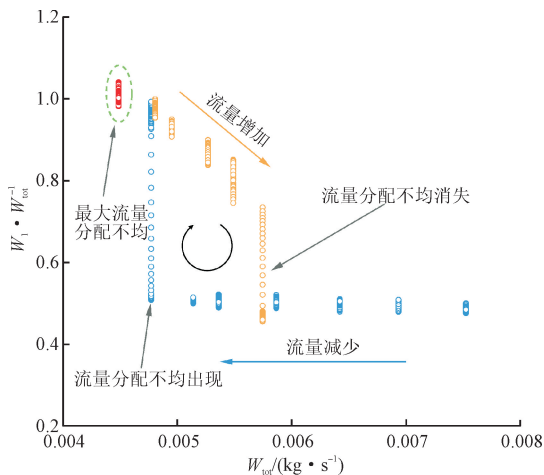


图8 进口流量变化对流量分配的影响

Fig. 8 The effect of inlet flow rate change on flow distribution

2.5 集管影响

从上述实验结果中发现,优先沸腾在通道 1 出现的概率相对大一些,在单相状态下对通道中的流量分布进行实验,如图 9 所示。在实验的流量范围中,两通道中的流量比较接近,通道 2 中的流量 W_2 略高于通道 1 的概率略大一些。

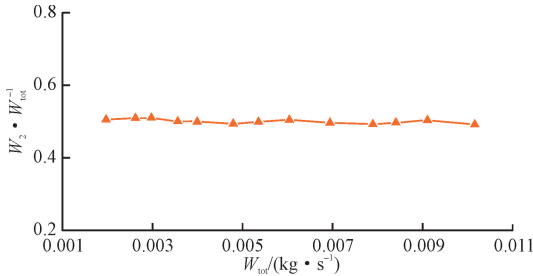


图 9 单相状态下通道 2 流量占比

Fig. 9 Channel 2 flow rate ratio in single-phase state

对进口集管进行 CFD 模拟可分析其所产生影响的机制,采用标准 $k-\epsilon$ 模型,进口质量流量为 0.01 kg/s 恒定。从图 10(a)可以看出,通道 2 进口处的压力大于通道 1,由于出口压力保持一致,因此通道 2 的进出口两端压差比较大。从图 10(b)可以看出,通道中的流速比较相似,通道 2 附近由孔板进入集管上部的流速较大,因而进入通道 2 的流量较多。从图 10(c)可以看出,流体进入集管后会产生很大

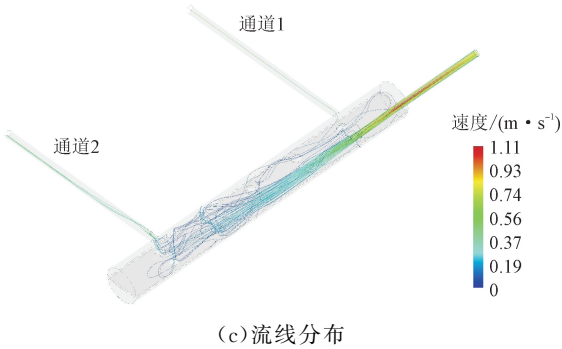
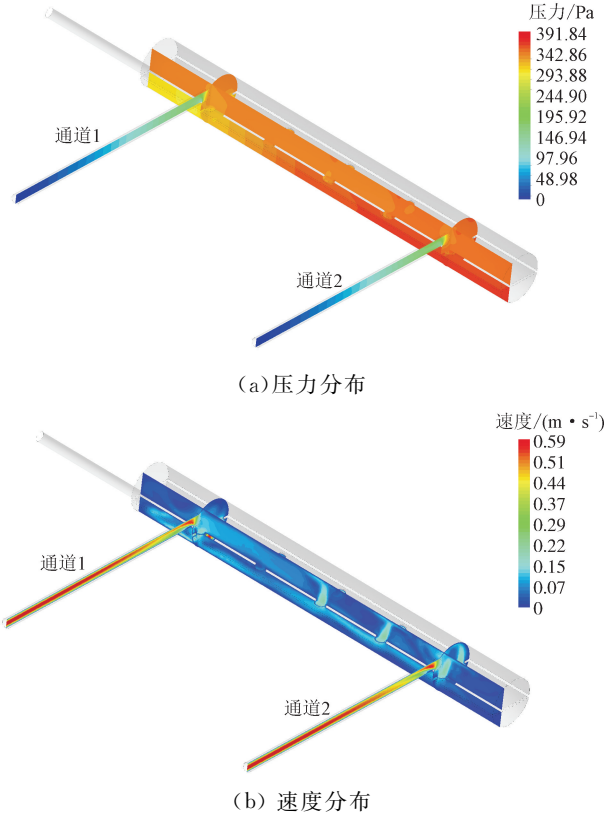


图 10 进口集管内流动数值模拟

Fig. 10 Numerical simulation of flow in inlet container

扰动,在通道 2 进口区域流线更为密集,表明此处流速较大。当通道中开始出现流量分配不均时,可能会出现两通道的出口温度交替达到沸腾的情况,如图 2、图 5 所示,随后产生的流量漂移结果一定程度上受集管结构和加热功率差异的影响。

2.6 实验结果与模型对比

将图 8 中的变进口流量工况下的流量占比与模拟进行对比,对应工况点如图 11 所示。流体从集管到并行支管中需要经过变流道截面,要考虑进口区域的局部压降^[25],根据实验,两通道热流密度存在一定的差异,计算得到通道 1 流量占比分布。从图 11 可以看出,流量分配得到的工况点都位于稳态。当流量减少到一定数值时,工况点位于不稳定区域,因而会迅速产生流量漂移,通道 1 流量占比增加;再次减少流量,通道 1 流量占比会略有增加。继续增加流量时,通道 1 流量占比分布轨迹会沿着稳态分布线运行,且流量占比逐渐减小,直到在某一特定流量下其稳态分布只有均分工况点时,流量开始

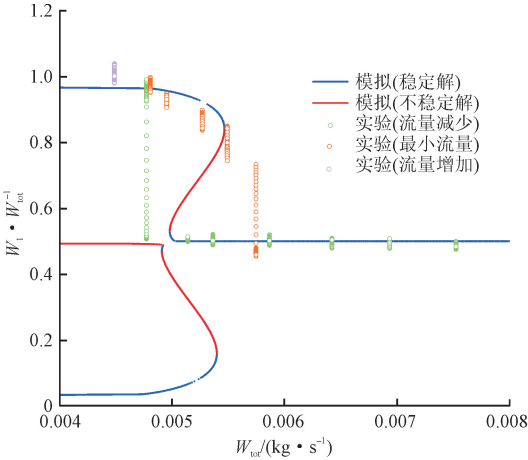


图 11 变流进口量下实验结果与模型对比

Fig. 11 Comparison of experimental results and model under variable inlet flow rate

恢复到均匀分布状态。由于流量的变化是不连续的,因而在流量漂移出现和消失对应的工况点上,存在一定的偏差,除此之外,其余工况点预测的比较好,几乎在其稳定分布的范围内。

3 结 论

本文基于泵驱两相散热系统,建立了以水为工质的两个长为 1 000 mm、内径为 4 mm 的双通道两相流动换热的实验装置,对通道间的流量分配特性进行了研究,主要结论如下。

(1)在进口流量 $W_{in}=0.005\ 3\ \text{kg/s}$ 和热流密度 $Q'=322.65\ \text{W/m}^2$ 下,进口温度达到 $61.5\ ^\circ\text{C}$ 时,靠近入口处的通道中优先出现沸腾,远离入口处的通道由于流量较大而导致出口温度较低;降低入口温度至 $41.8\ ^\circ\text{C}$ 时流量分配恢复均匀分配,对应的进口温度相差 $24.8\ ^\circ\text{C}$,进口温度对流量分配的影响有一定滞后性。

(2)在相同流量和进口温度下,加热功率增加到一定程度会导致流量分配不均。质量流量增加到 $0.002\ 5\ \text{kg/s}$,流量分配不均出现时对应的通道出口温度降低 $5.5\ ^\circ\text{C}$;高热流密度下出现明显的气弹反流特征,流量分配对热流密度存在滞后现象,热流密度相差 $175.6\ \text{W/m}^2$ 。

(3)扰动会加速通道中流量分配不均的出现,对应进口温度相差 $3.2\ ^\circ\text{C}$;降低进口流量会引起流量漂移,当流量增加 19.8% 时,分配不均的现象会消失,其产生和消失对应的进口流量相差 $0.000\ 95\ \text{kg/s}$ 。

(4)通过单相实验和 CFD 模拟流量分配的对比分析可以发现,集管设计会影响优先出现沸腾通道的位置,单相状态下流量较少的通道倾向于优先沸腾。

参考文献:

- [1] YAN Jingwen, JIN Donghao, LIU Xin, et al. A coupled combustion and hydrodynamic model for the prediction of waterwall tube overheating of supercritical boiler [J]. *Fuel*, 2023, 334(Part 1): 126589.
- [2] 谢贝贝, 王文毓, 聂鑫, 等. 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 [J]. *西安交通大学学报*, 2016, 50(7): 45-50.
- XIE Beibei, WANG Wenyu, NIE Xin, et al. Numerical analysis on the flow instability of parallel channels in water-cooling wall of supercritical CFB boiler [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2016, 50(7): 45-50.
- [3] NATAN S, BARNEA D, TAITEL Y. Direct steam generation in parallel pipes [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2003, 29(11): 1669-1683.
- [4] 郝芸, 王跃社, 胡甜, 等. 极不均匀热负荷下腔式吸热器受热面流量和壁温分布的试验研究 [J]. *中国科学院大学学报*, 2017, 34(2): 141-145.
- HAO Yun, WANG Yueshe, HU Tian, et al. Experimental studies on the flow and wall temperature distribution of solar cavity receiver under non-uniform heat flux [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2017, 34(2): 141-145.
- [5] SHI Wei, YI Feng, ZHAO Pengcheng, et al. Flow distribution investigation and sensitive analyses on reverse flow in U-tubes of steam generator under natural circulation [J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2021, 154: 108112.
- [6] 谢本军, 莫政宇. 并联 U 型通道冷板冷却动力电池的换热特性 [J]. *内燃机与配件*, 2023(4): 13-15.
- XIE Benjun, MO Zhengyu. Heat transfer characteristics of parallel U-shaped channel cold plate cooling power battery [J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2023(4): 13-15.
- [7] ZHANG Lei, HU Guilin, BI X T. Two-phase flow in parallel channels: mal-distribution, hysteresis and mitigation strategies [J]. *Chemical Engineering Science*, 2022, 247: 117044.
- [8] PRABHAKARA RAO B, KRISHNA KUMAR P, DAS S K. Effect of flow distribution to the channels on the thermal performance of a plate heat exchanger [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2002, 41(1): 49-58.
- [9] BOURE J A, BERGLES A E, TONG L S. Review of two-phase flow instability [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1973, 25(2): 165-192.
- [10] MIGLANI A, WEIBEL J A, GARIMELLA S V. Measurement of flow maldistribution induced by the Ledinegg instability during boiling in thermally isolated parallel microchannels [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2021, 139: 103644.
- [11] AKAGAWA K, KONO M, SAKAGUCHI T, et al. Study on distribution of flow rates and flow stabilities in parallel long evaporators [J]. *Bulletin of JSME*, 1971, 14(74): 837-848.
- [12] MINZER U, BARNEA D, TAITEL Y. Flow rate distribution in evaporating parallel pipes: modeling and experimental [J]. *Chemical Engineering Science*, 2006, 61(22): 7249-7259.
- [13] MINZER U, BARNEA D, TAITEL Y. Evaporation

- in parallel pipes: splitting characteristics [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2004, 30(7/8): 763-777.
- [14] BAIKIN M, TAITEL Y, BARNEA D. Flow rate distribution in parallel heated pipes [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011, 54(19/20): 4448-4457.
- [15] BARNEA D, SIMKHIS M, TAITEL Y. Transient data for flow of evaporating fluid in parallel mini pipes and comparison with theoretical simulations [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2015, 77: 58-64.
- [16] 彭传新, 胥元锋, 袁德文, 等. 并联通道流量漂移流动不稳定性研究 [J]. *核动力工程*, 2021, 42(S1): 17-20.
- PENG Chuanxin, ZAN Yuanfeng, YUAN Dewen, et al. Research on hydrodynamic drift instability of parallel channels [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2021, 42(S1): 17-20.
- [17] HAYAT R R, BARNEA D, TAITEL Y. Transient flow of evaporating fluid in multiple parallel pipes, theory and experiments [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 161: 120287.
- [18] VAN OEVELEN T, WEIBEL J A, GARIMELLA S V. Predicting two-phase flow distribution and stability in systems with many parallel heated channels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 107: 557-571.
- [19] VAN OEVELEN T, WEIBEL J A, GARIMELLA S V. The effect of lateral thermal coupling between parallel microchannels on two-phase flow distribution [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 124: 769-781.
- [20] MIGLANI A, SOTO A, WEIBEL J A, et al. The effect of uneven heating on the flow distribution between parallel microchannels undergoing boiling [J]. *Journal of Electronic Packaging*, 2021, 143(4): 041107.
- [21] GUGLIELMINI G. Two-phase flow distribution to parallel channels in compact heat exchangers [C]// *Proceedings of the 24th National UIT Heat Transfer Conference*. Naples, Italy: [s. n.], 2006: 13-22.
- [22] 吴学红, 孟浩, 丁昌, 等. 平行流换热器流量分配均匀性研究 [J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2015, 36(5): 53-57.
- WU Xuehong, MENG Hao, DING Chang, et al. Study on the uniformity of flow distribution of the parallel-flow heat exchanger [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2015, 36(5): 53-57.
- [23] TAITEL Y, BARNEA D. Transient solution for flow of evaporating fluid in parallel pipes using analysis based on flow patterns [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2011, 37(5): 469-474.
- [24] 辛鹏飞, 苗建印, 匡以武, 等. 液体冷却并联通热沉中的流量分配特性 [J]. *上海交通大学学报*, 2023, 57(10): 1355-1366.
- XIN Pengfei, MIAO Jianyin, KUANG Yiwu, et al. Flow distribution characteristics among microchannel heat sinks in pumping liquid cooling system [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2023, 57(10): 1355-1366.
- [25] IDELCHIK I E. *Handbook of hydraulic resistance* [M]. 4th ed. Danbury, CT, USA: Begell House, 2008: 483-574.

(编辑 杜秀杰)