

DOI: 10.3901/JME.2023.04.274

通断型微通道的结构优化与流动特性研究^{*}

田玉思 焦永刚 孙会凯 刘 斌 韩 飞
(石家庄铁道大学机械工程学院 石家庄 050043)

摘要: 微通道换热器在解决高热流密度下的散热问题时表现出显著优势, 实际工业应用通常采用集成式结构进而充分提高反应效率, 但目前在反应元件集成过程中很容易发生流量分布不均进而影响换热性能, 甚至出现“干蒸”以及“供液过多”的现象。因此, 研究工质在平行微通道内相分配特性对于改善换热效率具有重要的指导意义。通过对通断型微通道进行结构优化, 提出一种带有横向微腔的两侧加宽型微通道结构, 以流动分布、传热特性、两相分配相对偏差以及压降波动来判定通断微通道相分配均匀度。研究结果显示: 通断微通道进行结构优化后显著提高了相分配均匀度, 各支管内气体流量相对偏差小于 40%, 横向微腔的设计使得相邻两个通道间充分混合, 整体流动均匀效果提高了 37.5%。通过对两侧通道进行加宽设计, 起到了气泡过滤器的作用, 减小两侧空间压力, 保证通道内流型以及压力的一致性。

关键词: 微通道; 气液两相流; 流型; 相分配; 压降

中图分类号: TK513

Structural Optimization and Flow Characteristics of the Interrupted Microchannels

TIAN Yusi JIAO Yonggang SUN Huikai LIU Bin HAN Fei
(College of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043)

Abstract: The microchannel heat exchanger has obvious advantages in solving the problem of heat dissipation under high heat flux. In practical industrial applications, the integrated structure is usually adopted to improve the reaction efficiency, however, it is easy to affect the performance of heat transfer by uneven flow distribution in the process of reactor integration, and even leads to the phenomena of “dry steam” or “excessive liquid supply”. Therefore, the study of phase distribution characteristics in parallel microchannels has important guiding significance to improve the heat transfer efficiency. By optimizing the structure of the interrupted microchannel, a two-side-widened microchannel with transverse microcavities is proposed, the phase distribution uniformity of the new microchannel was determined by flow distribution, heat transfer characteristics, relative deviation of the two-phase distribution and pressure drop fluctuation. The results show that the structural optimization of the interrupted microchannel significantly improves the uniformity of phase distribution, and the relative deviation of gas flow in each branch pipe is less than 40%. The design of transverse microcavity makes two adjacent channels fully mixed, and the overall flow uniformity is improved by 37.5%. By widening the channel on both sides of the design, played a bubble filter, which reduce the pressure on both sides of the space and ensure the channel flow between the flow pattern and pressure consistency.

Key words: microchannel; gas-liquid two-phase flow; flow pattern; phase distribution; pressure drop

0 前言

随着现代电子芯片的芯片集成度的增加、功耗

的上升和尺寸的减小, 快速增加的芯片系统发热已经成为先进电子芯片系统研发和应用中的一项重大挑战^[1]。微通道换热器作为一种高换热效率、高安全性能、轻量小巧的换热设备, 在解决高热流密度下微型器件的散热问题时表现出显著优势, 但目前关于微通道换热器的研究还存在很多问题, 集成过

^{*} 石家庄铁道大学研究生创新(YC2021044)和河北省高等学校科学技术研究(QN2018025)资助项目。20220608 收到初稿, 20221224 收到修改稿

程中两相流分布很难呈现出单管效果,容易发生流量分布不均从而显著降低换热性能,甚至出现“干蒸”以“供液过多”的现象。因此,研究工质在平行微通道内相分配特性对于改善换热效率具有重要的指导意义。

两相流分配过程不仅要求相分配均匀,同时也要求通道中流型的一致性,而传统微通道热沉设计并不能满足这一期望。研究人员分析了不同设计参数对流动不均匀分布问题的影响,比如进出口设置、微通道尺寸以及流道数量等。LU 等^[2]通过数值方法对比了五种进出口结构(即 I 型、Z 型、J 型、L 型和 Γ 型排列)对不均匀分布的影响,现“J”型进出口设置可以提供较低的压降以及更均匀的流量分配。CHEIN 等^[3]研究了不同进出口布置的微通道散热器,对比了水平布置下 I 型、N 型、D 型和 S 型进出口设置以及垂直布置下 U 型和 V 型进出口设置,发现垂直布置下 V 型进出口分布不均匀程度较小。XIA 等^[4-5]对不同进出口设计以及封头形状进行了数值研究,发现“I”型进出口布置具有更均匀的流动分布,相比于梯形和三角形封头形状,矩形封头具有更好的流动均匀性。LIU 等^[6]通过试验数据对现有压降理论计算模型进行评价,提出了量纲一参数 Ca ,建立了流型与定量参数之间的压降预测公式,为后续研究并联微通道中两相流型以及换热性能奠定了基础。SIVA 等^[7]从压降特性预估了不均匀分配的原因,研究发现,小水力直径通道下流量分布更为均匀。XU 等^[8-9]对传统微通道结构进行了改进,分析了单相流体的传热行为,结果表明,新型微通道由于传热比表面积的增加以及热边界层的重新发展从而提高了换热性能。

常规尺度下关于两相流动以及相变的结论在微尺度中并不适用,一些现象由于通道尺寸的减小而被削弱,不同流型管内压力波动具有很大差异,因此对微通道中流型的研究至关重要。YUE 等^[10]研究了并联微通道中水和 CO_2 的分配特性,发现在高截面含气率时两相流动较均匀,而在入口流型为弹状流时相分配较差,这是由于弹状流下平行微通道各支管中的压力波动差导致的。DUAN 等^[11]为了防止气泡碰撞引起气液两相流动的不稳定性,提出了一种将液料分流的策略来改善平行微分支 T 型接头内的气液两相分布。当气液两相从进口集箱进入并联分支时,两相流体的流量和干度会受到诸多因素的影响。到目前为止,对气液两相流研究大多集中在支管嵌入深度、入口集箱形状以及封头放置方式等。LEE 等^[12]研究了嵌入深度对空气和水在环状流型下

相分配的影响,试验结果表明,通过调整支管嵌入深度可以实现均匀的流量分配。REDO 等^[13-14]设计出一种垂直双室封头结构,与传统封头相比,这种结构在低质量流量下,表现出较好的流量分配。黄翔超^[15]提出了一种新的微通道蒸发器压降模型来预测制冷剂两相分配不均问题,引入了简化的微通道管进口干度分布函数来计算微通道蒸发器内各微通道单管的进口状态。JONES 等^[16]发现将入口集箱优化为矩形时,流量不均匀性降低了 4.7%,进一步说明合理设计入口集箱的形状可以最大化提升散热器性能。SIDDIQUE 等^[17]提出了一种“哑铃式”入口集箱,认为流场中的滞止区以及入口集箱中低速区是造成流动不均匀的主要原因。MAHVI 等^[18]重点研究了饱和 R134a 在换热器集箱内的分配特性,研究结果表明叶片式集箱结构能有效改善相分配情况。

目前为止,对于集成式微通道反应器内多相分配规律的研究尚处于起步阶段,对于进出口位置、封头形状、集箱形状以及设计参数对分配不均问题都已得到研究,然而对于流量分配不均问题尚且没有一种现有方法能有效解决。本文针对带有横向微腔的变宽度微通道结构,通过流动分布、传热特性、两相分配相对偏差以及压降波动来研究通断微通道相分配均匀度,并提出了结构优化的策略。

1 模型设计与计算方法

1.1 三维模型优化设计

平行微通道两相流体通过入口集箱流入平行通道时,各个支管中的流量分布以及偏流现象会出现明显的差异。气液两相流在平行微通道之间的不均匀分配同样也会影响下游通道的性能以及设备安全。图 1 为本研究中微通道散热器的示意图,将传统微通道结构进行了三处改进,首先是入口处微通道阵列,分裂已经充分混合均匀的大气泡;其次是横向微腔的设置,是为了让流体产生横向速度,横向速度的出现可以使相邻两个微通道之间进行充分的混合,再循环形成涡流以此来改善相邻通道之间的相分配,一些来自相邻通道的流体发生聚合,重新聚集成大气泡流入下一个区域;最后是对两侧通道进行了加宽,使两侧空间压力减小,利用压力差促使速度较小的气体向两侧流动,避免了两侧通道充液的现象,从而获得更高的传热系数来强化微通道的换热情况。

模型材料为铜,微通道截面尺寸为 $0.4 \text{ mm} \times$

0.5 mm($W_c \times H$), 相邻通道之间间隔均为 1.1 mm(W_s), 该模型在平行通道结构的基础上, 沿着流动方向设置了四个截面尺寸都为 2 mm×12.6 mm 的横向微腔, 它们将整个微通道分成五个独立的区域。第一个区域长 8 mm, 第二个区域长 11 mm, 第三个以及第四个区域长 10 mm, 最后一个区域长 3 mm, 并且对第二、四、五个区域做了两侧加宽处理。另外, 该模型进出口的位置均在铜板下侧, 进出口方向都垂直于微通道。

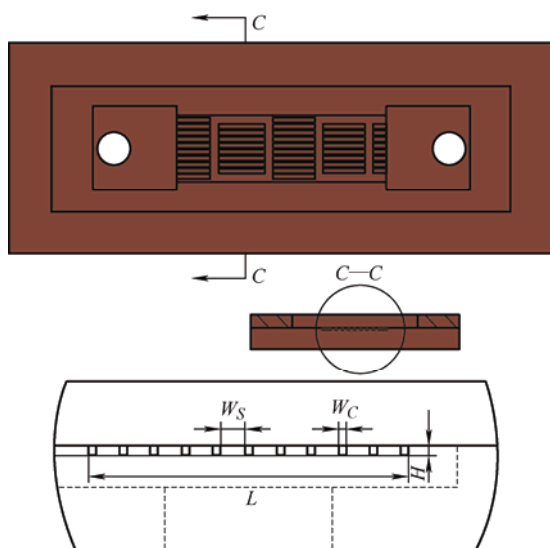


图1 新型通断微通道示意图

1.2 基本假设与计算方法

1.2.1 基本假设

本文用 Fluent 软件对微通道内氮气-水两相流进行了冷态流动特性模拟, 基于多相流(Volume of fluid, VOF)的方法来捕捉气液两相界面的变化, 考虑到微尺度的影响, 现做出了如下假设。

- (1) 流体流动被看作是连续的、稳定的状态。
- (2) 流体在壁面上无滑移。
- (3) 忽略重力对计算的影响, 由于微尺度效应, 表面张力逐渐取代了重力对气液流动的主导地位。
- (4) 气液两相流在微通道内流动过程中和外界无热量交换。

1.2.2 数值计算方法

通过采用湍流气液两相流的双流体模型, 第 i 相的有效控制方程如下。

连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha^i \rho^i) + \nabla \cdot (\alpha^i \rho^i \mathbf{u}^i) = 0 \quad (1)$$

式中, α^i 是第 i 相的气体体积分数, 被看作是时间和空间的连续函数, ρ^i 为第 i 相的密度, \mathbf{u}^i 为第 i 相的速度。

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha^i \rho^i \mathbf{u}^i) + \nabla \cdot (\alpha^i \rho^i \mathbf{u}^i \otimes \mathbf{u}^i) = -\alpha^i \nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}^i + \alpha^i \rho^i \mathbf{g} \quad (2)$$

式中, \mathbf{g} 为重力加速度, $\boldsymbol{\tau}_T^i$ 为湍流涡旋黏度, 表达式如式(6)所示, $\boldsymbol{\tau}^i$ 为第 i 相湍流应力张量。

$$\boldsymbol{\tau}^i = \alpha^i (\mu^i + \mu_T^i) \left[\nabla \mathbf{u}^i + (\nabla \mathbf{u}^i)^T \right] \quad (3)$$

湍流模型: 本文主要研究新型结构下气液两相流的分配特性, 在流动过程中两相之间的相互作用较强, 横向微腔处不断产生漩涡, 流道内的流动状态很不稳定, 因此采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 分别对气液两相的湍流动能方程 k 和湍流耗散率 ε 方程分别求解^[19-20]。

$$\frac{\partial (\alpha^i \rho^i k^i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha^i \rho^i k^i \mathbf{u}^i) = \nabla \cdot \left(\alpha^i \frac{\mu_T^i}{\sigma_k} \nabla k^i \right) + \alpha^i \boldsymbol{\tau}_T^i : \nabla \mathbf{u}^i - \alpha^i \rho^i \varepsilon^i + S_{k^i} \quad (4)$$

$$\frac{\partial (\alpha^i \rho^i \varepsilon^i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha^i \rho^i \varepsilon^i \mathbf{u}^i) = \nabla \cdot \left(\alpha^i \frac{\mu_T^i}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon^i \right) + \alpha^i \frac{\varepsilon^i}{k^i} (C_{1\varepsilon} \boldsymbol{\tau}_T^i : \nabla \mathbf{u}^i - C_{2\varepsilon} \rho^i \varepsilon^i) + S_{\varepsilon^i} \quad (5)$$

其中, 湍流应力张量 $\boldsymbol{\tau}_T^i$ 表示为

$$\boldsymbol{\tau}_T^i = \mu_T^i \left[\nabla \mathbf{u}^i + (\nabla \mathbf{u}^i)^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}^i) \mathbf{I} \right] - \frac{2}{3} (\rho^i k^i) \mathbf{I} \quad (6)$$

式中, \mathbf{I} 为单位张量。

各相湍流黏度 μ_T^i 表示为

$$\mu_T^i = C_\mu \rho^i \frac{(k^i)^2}{\varepsilon^i} \quad (7)$$

SPEZIALE 等^[21-22]修正了 $k-\varepsilon$ 湍流模型的经验常数。

$$C_{1\varepsilon} = 1.44 \quad C_{2\varepsilon} = 1.92 \quad C_\mu = 0.09 \\ \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (8)$$

式中, $\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ 分别为湍动能 k 和耗散率 ε 的湍流 Pr 数。

在湍流中, 气泡尾迹中所产生的气泡同样会带来湍流动能的产生和耗散, 根据 YAO 和 ELGHOBASHI 的模型^[23-24], 这种效应被嵌入到两个源项中。

$$S_{k^i}^{\text{int}} = -(M^D + M^{MA}) (u_g - u_l) \quad (9)$$

$$S_{\varepsilon^i}^{\text{int}} = C_{3\varepsilon} \frac{S_{k^i}^{\text{int}}}{\tau} \quad \frac{S_{k^i}^{\text{int}}}{\tau} = \left(\frac{(d^l)^2}{\varepsilon^i} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

式中, M^D 、 M^{MA} 分别为动量方程中施加在分散相上的平均阻力和附加质量力, 下标 g 和 l 分别为气相和液相。 D^l 是分散相 l 的气泡直径。对于不同的气液系统, 系数 $C_{3\varepsilon}$ 的取值范围为 0.6~1。

1.3 网格独立性检验

为了检验计算准确性, 对网格数量进行了独立性验证。考虑到计算精度并且保证模拟结果的真实有效, 且保证气泡能维持基本的形状, 计算区域使用了 0.04 mm 和 0.02 mm 两种尺寸的网格。本文采用了非稳态的数值解法, 网格数量和时间步长的设置极为重要, 选用 1272186 的网格满足计算精度的要求, 为了使收敛平稳, 时间步长控制在 1×10^{-6} 以下。

1.4 数值模型验证

为验证模型可靠性, 本文针对 TRIPLETT 等^[25]的试验工况, 对直径为 1.1 mm 和 1.45 mm 的圆形微通道建立了模型, 工质为空气和水, 为了得到可靠准确的计算结果, 用 Fluent 软件对模型进行了二维数值模拟, 模拟时采用速度进口边界条件, 出口边界为压力出口。

各对比工况下的流型模拟结果如图 2 所示, 通过控制气液表观速度观察到的主要流型有泡状流、弹状流、搅拌流、弹环状流及环状流这几种经典流型, 其中 j_g 和 j_l 分别为气液两相表观速度, 二者定义为 $j_g = \frac{Q_g}{A} = \frac{m_g}{\rho_g A}$, $j_l = \frac{Q_l}{A} = \frac{m_l}{\rho_l A}$, 其中 A 为流体所占通道的截面积, Q_g 和 Q_l 分别为气相和液相的体积流量, m_g 和 m_l 分别为气相和液相的体积流量。当气相表观速度远小于液相表观速度时, 通常会出现泡状流型(见#1#2), 泡状流中气相以不规则类球型气泡的形式连续分布在液相中; 当气液两相表观速度基本相等且速度较小时, 会形成弹状流型(见#3#4), 弹状流中气相以“泰勒”气弹的形式交替出现在液相中, 且气弹尾部伴随有小气泡; 在气液两相表观速度基本相等且都控制在 10 m/s 左右时, 会形成搅拌流型(见#5), 搅拌流则是由于流动紊乱进而破坏气弹形状, 气环中间夹杂着大量液滴, 此时流动状态很不稳定; 在气相表观速度远大于液相表观速度时, 通常会出现弹环状流型(见#6), 此时气相被一层平滑液膜包裹着, 通常以小液环和少量液弹的形式出现, 是弹状流和环状流之间的过渡流型; 当气相表观速度远大于液相表观速度且二者相差几

十倍时, 通常会出现环状流型(见#7#8), 此时流道中心形成连续气相, 周围被一层很薄的液膜包围, 气相中间掺杂有少量液滴, 模拟流型结果与 Triplett 文献的试验流型相吻合。

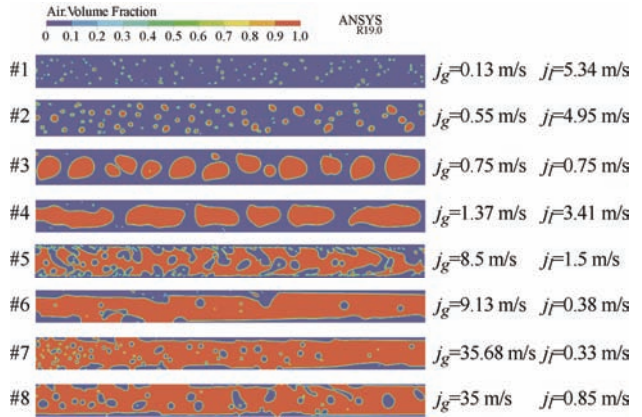


图 2 各对比工况下模拟流型图

此外, 将上述各工况下气液表观速度作为坐标参数与文献[25]所得出的流型转变图进行比较, 表现情况如图 3 所示, 根据模拟工况的气液两相表观速度在流型转变图中绘制图线, 对比图 2 和图 3 可以看出, 模拟结果与流型图的分区结果吻合较好, 进一步保证了本文计算模型的合理性及计算结果的可靠性, 计算模型可用于后续模拟研究。

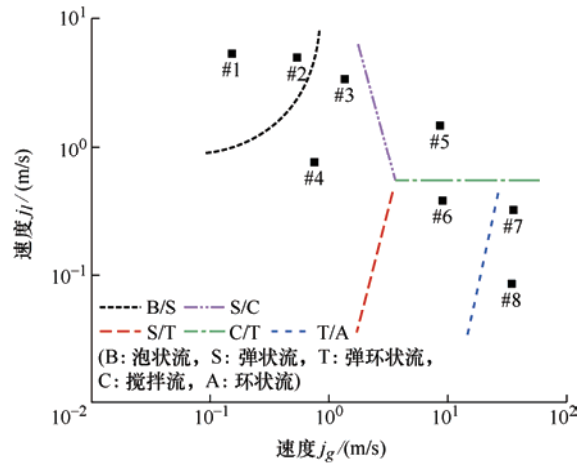


图 3 各工况在 Triplett 流型图中的表示

2 新型通断微通道内流动和传热特性

为了研究新型微通道的传热特性, 本文通过数值模拟对比了三种不同结构的并联微通道, 分别如图 4~6 所示, 为了进一步提高相分配均匀度, 在通断微通道的基础上, 提出了两侧流道加宽的优化设计方案, 也就是下文所提到的新型通断微通道。

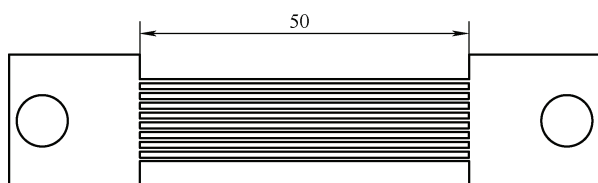


图 4 传统并联直通道示意图

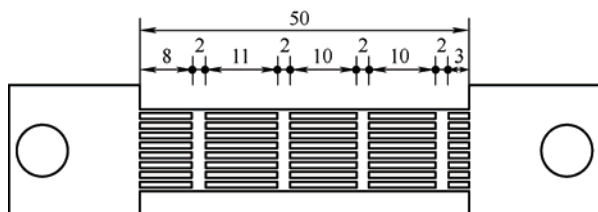


图 5 通断型微通道示意图

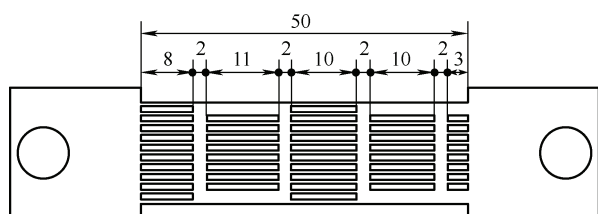


图 6 新型通断微通道示意图

2.1 不同结构下速度分布

图 7 为通断结构与传统结构流场对比图, 这种结构存在两处显著优势: 一是速度矢量图微腔两肩处漩涡的产生, 可以提高壁面处热边界层的扰动现象, 起到强化换热的作用; 二是微腔处产生了主流分离撞击肋壁产生再循环, 随即突缩结构使得流动被挤入下一通道, 这时产生了较高的横向速度, 这一横向速度的出现使相邻两个通道的流体更好地混合, 这一点为后续研究两相流动相分配提供了好的基础。

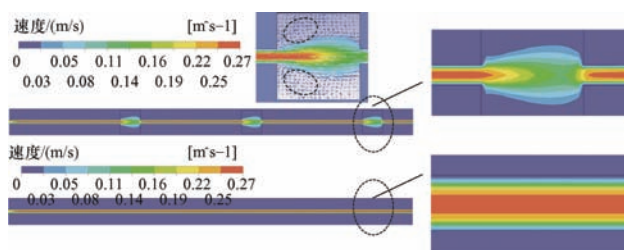


图 7 速度分布对比图

2.2 不同结构下的传热特性

图 8 为 $Re=86.97$, 入口温度为 297.15 K, 底面热流密度为 100 W/cm^2 时两种结构同一位置处底面中线上的温度分布, 两种结构温度分布均为中心对称分布, 通断结构两侧温度沿着中心线方向缓慢递减, 而连续直通道两侧温度沿中心线方向直线下降, 这是由于横向微腔的使得通道中出现了横向速度,

同时在两背处产生旋涡, 流体不断冲击肋壁使得微腔有出现了强化传热的效果, 这也是相比于传统微通道, 通断结构的优势所在。

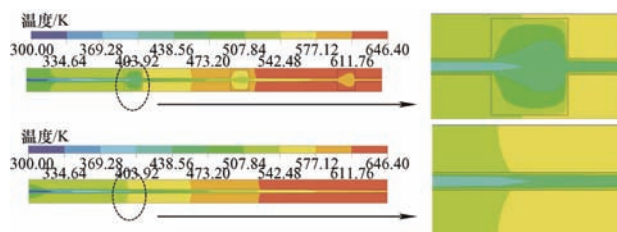


图 8 温度分布对比图

3 并联相分配分析结果

3.1 并联微通道内流型观察

图 9 为入口集箱处相分配情况, 在低含气率的情况下, 见图 9a, 并联通道流量分配最为均匀, 这是因为气体流量很小, 初始气泡也很小, 到达支管的气泡大小小于微通道宽度, 这时的气泡不会破裂, 这些小的气泡会整体进入单独的支通道。这样每个支管的流动阻力是一样的, 不会影响各个支管之间的压力平衡。因此, 在低含气率时, 并联微通道内的分布最为均匀。

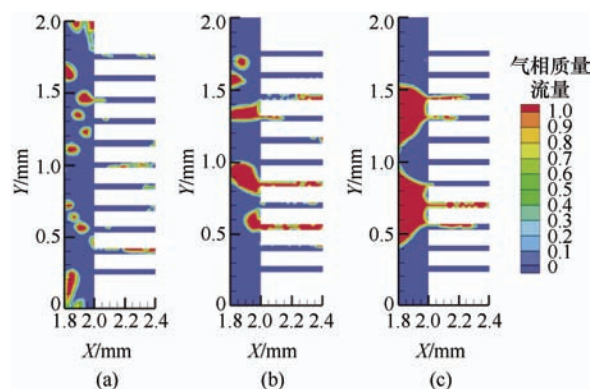


图 9 入口集箱处相分配情况

当气体流量进一步增加时, 见图 9b, 气泡在入口集箱逐渐汇集, 气泡聚合成大气泡, 这时流入支管的气泡会被分裂成较小的子气泡, 流入支管中的气泡也会相应产生弹状流型, 子气泡的大小取决于下游通道的流动阻力, 这一点也是流量分布不均匀的决定性因素。

当气体流量大幅度增加时, 见图 9c, 由于气相速度较慢, 气泡在入口集箱汇聚成大气泡, 微通道内的压降会发生较大的波动, 此时, 相分配最差, 微通道内两相流动变得很不规则, 流型也相应变得不稳定。

综上所述, 入口集箱作为汇集和供应两相流体的必要结构, 在低含气率时有较好的相分配表现, 当气体流量进一步增大时, 集箱内气泡汇集, 产生的大气泡一旦被挤压进入各个支管, 微通道内的压降就会发生大幅度波动, 相分配效果恶劣。

3.2 并联微通道内两相流动分布

两相流动相分配可以通过各个支管中液相和气相的质量流量来定义。为了定量分析并联微通道中两相流动在各个支管中的分配情况, 考虑到界面流态的偶发性, 当通道内流型趋于稳定时在各支管出口位置设置监测点, 通过监测不同时刻下九条微通道扁平支管中气液流速以及截面含气率, 并对数据进行加总分别得到每条扁平支管中的总流量, 其结果以气体流量相对偏差 $E(Q_{B,i})$ 的形式体现。

$$E(Q_{B,i}) = \frac{Q_{B,i} - \overline{Q_{B,all}}}{\overline{Q_{B,all}}} \times 100\% \quad (11)$$

式中, i 为各支管编号, $i=1,2,3,4,5$; $Q_{B,i}$ 是支管 i 中的气体总流量, $\overline{Q_{B,all}}$ 是气相在所有支管中的平均总流量。

3.2.1 通断微通道与新型通断微通道相分配的比较

图 10 显示了一组代表性数据点的两相分配情况, 同时图中给出了相同条件下两种结构相分配情况($u_{in}=0.5$ m/s, $\alpha=0.3$, $z=4.5$ mm), 左侧为相应支管编号, 由于集成式微通道具有轴对称几何结构以及相分配对称物理性质, 因此采用 1/2 流域进行模拟。根据所给出的两相图中可知, 在低截面含气率时, 通道中支管 1 和支管 2 充液现象严重, 出现特别小的泡状流型, 而由于惯性力作用, 气相倾向于进入支管 3、4, 通道内出现了环状流型, 挤压进入支管 5 的气泡也相对较少, 使得相同情况下中间支管出现正偏差, 两侧支管出现负偏差, 偏差绝对值小于 40%。随着截面含气率的增大, 支管内气体流量的相对偏差增大, 导致各支管内流量分布更不均匀。在高截面含气率时, 由于惯性力的作用, 气泡在入口集箱处聚合沉积成大气泡, 气泡与壁面接触面积较大而产生大的摩擦阻力, 使得气泡运动速度减慢, 两侧通道挤压进入的气泡较小, 运动速度较快, 充液现象严重, 中间通道几乎被气相充满, 两侧通道几乎没有气相存在, 相分配现象严重恶化, 偏差绝对值几乎为 100%。各支管中子气泡运动速度不一导致了较大的压力波动, 进而造成气泡破裂不均以及流型不均匀程度的增大。

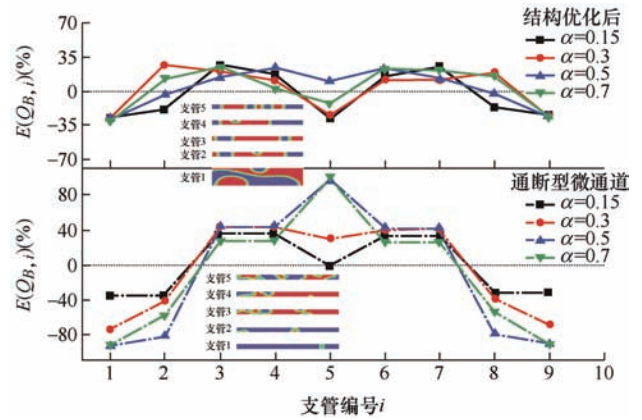


图 10 通断微通道与新型通断微通道气体流量相对偏差 (质量流量为 $39.8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 入口含气率 $0.15 \sim 0.7$)

而在对两侧通道进行了加宽设计后, 新型通断微通道两侧通道的压力减小, 利用压力差促使在入口集箱聚合后的气泡向两侧流动, 避免了两侧通道充液的现象。在相同工况下, 支管内气相分布较为均匀, 支管中流型也保持一致, 都是长度不一的弹状流型, 不同流型下两相流动差异性很大, 支管中流型的一致性也是保证换热性能的必要条件。对于高截面含气率相分配问题, 新型通断微通道在一定程度上优化了相分配效果, 各支管气体流量的相对偏差都小于 40%, 两相流动均匀度提高了 60%。

3.2.2 横向微腔前后相分配的比较

另外, 横向微腔的设置对流动分布不均匀性也有一定的影响, 图 11 为质量流量为 $39.8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, 不同截面含气率在各支管中气体流量均匀度的表现, 从图中对比可以看出, 横向微腔的存在使得气体流量相对偏差整体提高了 37.5%。

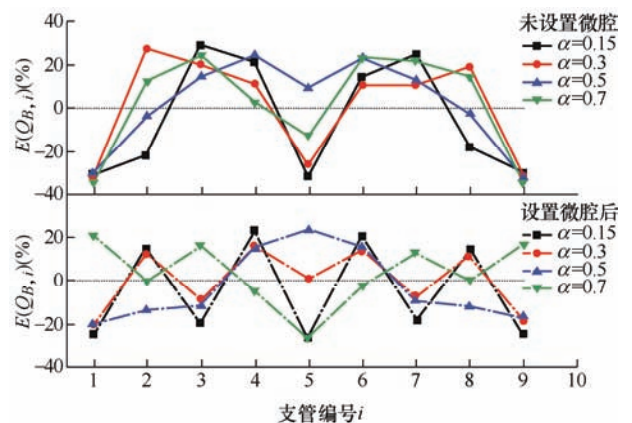


图 11 横向微腔前后气体流量相对偏差 (质量流量为 $39.8 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 入口含气率 $0.15 \sim 0.7$)

特别是在传统微通道以及通断微通道中都发现了泡状流、弹状流和环状流, 但是在新型通断结构中, 弹状流型存在较多而环状流出现较少, 这是因

为传统结构中气泡在集箱处聚合沉积成大气泡,与壁面接触面积较大而产生较大的摩擦阻力,使得气体运动速度减慢,在惯性效应力作用下气相成比例地进入距离入口最近的支管中,这时中间支管“蒸干”而边侧支管“充液过多”,温度场分布不均,换热面积得不到有效利用,从而显著影响换热器性能。新型微通道则通过设置横向微腔以及对两侧进行加宽处理,起到气泡过滤器的作用,此时沉积在集箱处的大气泡受到两侧界面张力的影响无法直接进入流体通道,反而会向两侧流通面积较大的地方流动,将两相流体进行分离,使得两侧充液现象减弱,各支管内气流量大体保持一致,保证了同一操作条件下各支管内流型的一致性,平衡了下游支管中的流动阻力,最大化利用了集成式换热器的有效换热面积。这种气液分相结构强化了微通道沸腾换热效果,提高了汽化核心数。

3.2.3 入口气体质量流量对相分配的影响

图 12 为相同质量流量下不同截面含气率时新型通断微通道中两相流流动行为,从图中可以观察到,当两相流体通过入口集箱进入支管时,各支管中的流量分配是中心对称的,气泡分裂液体流量在中间以及两侧通道中分布较多,支管中的液体质量流量与气体质量流量的分布成反比,中间通道和两侧通道出现了最小值。从图中可以看出,随着截面含气率的增大,两相流量偏差也随之增加,这是因为在低截面含气率的情况下,气泡通过集热器进入各支管时,汇集的气泡直径与支管直径相差较小,气泡发生破裂的概率远小于高含气率,这时各个支管中的流动阻力相差较小,各个支管中的气体流量以及流型均匀化。在低截面含气率下,通断结构以及新型通断结构都有较好的相分配情况,当继续增加气相流量时,通断结构的各支管气体流量以及流型偏差较大,两侧供液过多,这时换热效果较差,

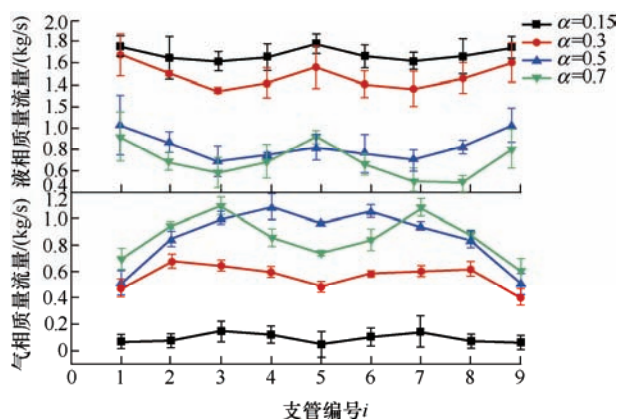


图 12 各支管中标准液体和气体流量(质量流量为 $39.8 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, 入口含气率 $0.15 \sim 0.7$)

而新型通断微通道采用了气液分相结构,各支管中气体流量相差不大,各支管中流型基本保持一致,大幅度提升了换热器的换热效果。

4 支通道中的压降波动

对新型通断微通道流动过程中的一条支管数据进行监测,得到了一段时间内三种典型流型与其压降波动的变化规律,如图 13 所示,泡状流由于较小的表观气速与表观液速,压降波动幅度很小,维持在 2 kPa 范围内;随着微腔处的气体不断扰流产生漩涡,大气泡进入通道内间歇出现了弹状流,此时通道内的压降波动幅度有所增加,维持在 7 kPa 范围内;当气体流量增大形成环状流时,气液两相互作用力在通道内产生了较大扰动,压降沿流动方向发生了强烈振荡,湍流黏度增强,此时压差波动幅度也随之产生剧烈振荡,压差波动峰值达到了 8 kPa 左右。通过以上分析可以看出,随着横向微腔处两相相互作用不断扰动,支管内产生不同流型压力波动范围值也随之波动,因此可依据压差波动曲线判别流型,为流型转变提供了重要依据。

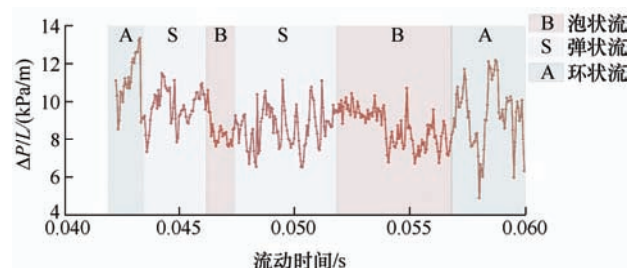


图 13 压降波动随流动时间变化图

5 结论

在微通道热沉中,流量分配不均的问题非常关键,并联管内温度不均匀可能导致相关系统崩溃,因此提出了变宽度的新型通断微通道作为缓解传统并联微通道中流量分配不均问题的新方法。利用数值模拟新型通断型微通道气液两相流动分配,以相对偏差量化了相分配均匀性,结果如下。

(1) 新型通断微通道提高了相分配均匀度,在对其进行结构优化后,各支管内气体流量相对偏差小于 40% ,新型通断微通道的流动均匀度相比通断型微通道提高了 60% ,弱化了高含气率时入口集箱所产生的不均匀分配现象。

(2) 横向微腔的设计使得相邻通道间充分混合,整体流动均匀效果提高了 37.5% 。

(3) 提出一种带有横向微腔的两侧加宽型微通道结构, 使沉积在集箱处的大气泡受到两侧界面张力的影响无法直接进入流体通道, 保证了同一操作条件下各支管内流型一致性, 平衡了下游支管中的流动阻力, 最大化利用了集成式换热器的有效换热面积。这种气液分相结构强化了微通道沸腾换热效果, 提高了汽化核心数。

(4) 不同流型下压力波动幅值不同, 可依据压差波动曲线判别流型, 为流型转变提供了重要依据。

参 考 文 献

- [1] 王辉, 汤勇, 余建军. 相变传热微通道技术的研究进展[J]. 机械工程学报, 2010(24): 101-106.
WANG Hui, TANG Yong, YU Jianjun. Recent advances of the phase change micro-channel cooling structure[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010(24): 101-106.
- [2] LU M, WANG C C. Effect of the inlet location on the performance of parallel-channel cold-plate[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2006, 29(1): 30-38.
- [3] CHEIN R, CHEN J. Numerical study of the inlet/outlet arrangement effect on microchannel heat sink performance[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(8): 1627-1638.
- [4] XIA G, JIANG J, WANG J, et al. Effects of different geometric structures on fluid flow and heat transfer performance in microchannel heat sinks[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 80: 439-447.
- [5] 贾玉婷, 夏国栋, 马丹丹, 等. 水滴型凹穴微通道流动与传热的熵产分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 141-148.
JIA Yuting, XIA Guodong, MA Dandan, et al. Entropy generation analysis of flow and heat transfer in microchannel with droplet reentrant cavities[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 141-148.
- [6] LIU S, JIAO Y, GAO B, et al. Experimental and numerical study of two-phase flow in a rectangular mini-channel with sudden expansion structure[J]. Journal of Enhanced Heat Transfer, 2020, 27(2): 173-194.
- [7] SIVA V, PATTAMATTA A, DAS S. Effect of flow maldistribution on the thermal performance of parallel microchannel cooling systems[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 73: 424-428.
- [8] XU J, GAN Y, ZHANG D Y, et al. Microscale heat transfer enhancement using thermal boundary layer redeveloping concept[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48(9): 1662-1674.
- [9] XU J, SONG Y, ZHANG W, et al. Numerical simulations of interrupted and conventional microchannel heat sinks[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(11-26): 5906-5917.
- [10] YUE J, BOICHOT R, LUO L, et al. Flow distribution and mass transfer in a parallel microchannel contactor integrated with constructal distributors[J]. AIChE Journal, 2009, 56(2): 298-317.
- [11] DUAN C, LIU Z, ZHU C, et al. Distribution of gas-liquid two-phase flow in parallel microchannels with the splitting of the liquid feed[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 398: 125630.
- [12] LEE J, LEE S. Distribution of two-phase annular flow at header-channel junctions[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 28(2-3): 217-222.
- [13] REDO M A, JEONG J, GIANNETTI N, et al. Characterization of two-phase flow distribution in microchannel heat exchanger header for air-conditioning system[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 106: 183-193.
- [14] REDO M A, JEONG J, YAMAGUCHI S, et al. Characterization and improvement of flow distribution in a vertical dual-compartment header of a microchannel heat exchanger[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, 116: 36-48.
- [15] 黄翔超. 考虑制冷剂两相分配不均的微通道蒸发器降压模型[J]. 机械工程学报, 2016, 52(16): 156-161.
HUANG Xiangchao. Microchannel evaporator pressure drop model with considering refrigerant maldistribution[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(16): 156-161.
- [16] JONES B J, LEE P S, GARIMELLA S V. Infrared micro-particle image velocimetry measurements and predictions of flow distribution in a microchannel heat sink[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(7): 1877-1887.
- [17] SIDDIQUE A, MEDHI B J, AGRAWAL A, et al. Design of a collector shape for uniform flow distribution in microchannels[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2017, 27: 075026.
- [18] MAHVI A J, GARIMELLA S. Two-phase flow distribution of saturated refrigerants in microchannel heat exchanger headers[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 104: 84-94.

- [19] AVETISSIAN A, PHILIPPOV G, ZAICHIK L I. The effect of turbulence on spontaneously condensing wet-steam flow[J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235(10-12): 1215-1223.
- [20] AVETISSIAN A, PHILIPPOV G, ZAICHIK L I. Effects of turbulence and inlet moisture on two-phase spontaneously condensing flows in transonic nozzles[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(17-18): 4195-4203.
- [21] SPEZIALE C G. On nonlinear K- ϵ and K- ϵ models of turbulence[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1987, 178: 459-475.
- [22] GATSKI T, SPEZIALE C G. On explicit algebraic stress models for complex turbulent flows[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1992, 254: 59-78.
- [23] YAO W, MOREL C. Volumetric interfacial area prediction in upward bubbly two-phase flow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(2): 307-328.
- [24] ELGHOBASHI S, ABOU-ARAB T W. A two equation turbulence model for two phase flows[J]. Physics of Fluids, 1983, 26(4): 931-938.
- [25] TRIPLETT K, GHIAASIAAN S M, ABDEL-KHALIK S, et al. Gas liquid two-phase flow in microchannels Part I: Two-phase flow patterns[J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25(3): 377-394.

作者简介: 焦永刚(通信作者), 男, 1976 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为微尺度换热与节能技术。

E-mail: jyg76@emails.bjut.edu.cn