

文章编号:0253-4339(2026)02-0095-08
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20241107002

R1233zd(E)在非等宽并联微通道内的流动沸腾传热实验研究

蔡华宇¹ 方奕栋^{1,2} 卢娣¹ 蒋陈涵¹

(1 上海理工大学能源与动力工程学院 上海 200093; 2 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室 上海 200093)

摘要 对 R1233zd(E)在等宽和非等宽并联微通道内的过冷流动沸腾进行了实验研究,在不同过冷度、质量通量及热流密度条件下对比分析了 2 种通道结构的传热特性。实验结果表明:非等宽并联微通道中核态沸腾的起始(ONB)更早,并且可以保持较低的壁温。质量流量为 1 263 kg/(m²·s)时,非等宽并联微通道的壁面过热度比等宽并联微通道低 3.2 °C。同时,非等宽并联微通道的整体传热性能更优越。当热流密度为 150 kW/m²时,非等宽并联微通道的传热系数(HTC)比等宽并联微通道增加了 30%~50%。此外,非等宽并联微通道的两相压降高于等宽并联微通道,最大增幅为 61%。

关键词 过冷流动沸腾;并联微通道;沸腾传热;传热特性

中图分类号: TB61⁺1; TK124

文献标识码: A

Experimental Investigation on Flow Boiling Heat Transfer of R1233zd(E) in Parallel Microchannel with Variable Width

Cai Huayu¹ Fang Yidong^{1,2} Lu Di¹ Jiang Chenhan¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai, 200093, China)

Abstract The subcooled flow boiling heat transfer of R1233zd(E) in uniform- and variable-width parallel microchannels was investigated experimentally. The heat transfer characteristics of two channel structures were analyzed and compared under different subcooling, mass-flux, and heat-flux conditions. The experimental results reveal that the onset of nucleate boiling (ONB) of the variable-width parallel microchannel occurred earlier and that the wall temperature could be maintained at a lower value. In addition, the overall heat transfer characteristics of the variable-width microchannel were better than those of the uniform-width microchannel. When the mass flux was 1 263 kg/(m²·s), the wall superheat of the variable-width parallel microchannel was 3.2 °C lower than that of the uniform-width parallel microchannel. When the heat flux was 150 kW/m², the coefficient of heat transfer (HTC) of the variable-width parallel microchannel increased by 30%~50% compared with that of the uniform-width parallel microchannel. Moreover, the two-phase pressure drop in the variable-width parallel microchannels was higher than that in the uniform-width parallel microchannels, with a maximum increase of 61%.

Keywords subcooled flow boiling; parallel microchannel; boiling heat transfer; heat transfer characteristic

如今,有限空间内高热流密度的散热已成为制约电子设备寿命及其稳定运行的主要技术因素,因此追求高效冷却解决方案具有重要意义。在众多冷却技术中,微通道流动沸腾由于传热系数高、部件制造简单等优势受到了广泛关注^[1-2]。

然而,微通道流动沸腾也存在一定局限。以常见的并联通道为例,由于入口的分流作用,各通道间的流量较难实现均匀分配。在流动沸腾过程中,该流动分配不均匀现象会导致不同通道间的气液相分布与发展不同步,进而导致局部流动不稳定和传热

恶化。A. Miglani 等^[3]对并联通道热沉内的流动失稳现象进行了实验研究。结果表明,由初始流量分配引起的 Ledinegg 不稳定性会使不同通道的流量分配不断失衡,同时触发壁面温度振荡。李雪娇等^[4-5]研究了 R134a 在并联微通道结构内的流型演变,发现在弹状流和液塞流阶段较易发生流动失稳。苗双双等^[6]研究了甲醇在小通道热沉中流型变化,发现在弹状流/拉长气泡流阶段,多个气泡的合并会导致气相阻塞通道。马爽等^[7]通过可视化实验研究,分析了矩形微通道内两相回流过程中的气泡行为。在课题组

前期研究中^[8-9],也对等宽并联微通道内的两相流动失稳现象进行了初步研究,对不同回流现象进行了分析,同时提出了流动失稳的判定准则。

为解决上述问题,不少学者提出通过表面修饰^[10-12]和结构改性^[13-16]等方法优化两相流动分配,其中基于常规等宽并联微通道结构提出的非等宽通道设计被认为是一种有效方法。Huang Yuqi 等^[17]对非等宽并联通道散热器中 R1233zd(E) 的流动沸腾进行了数值模拟,发现该结构可以通过改善不同通道之间的初始流量分布抑制回流。B. Fu 等^[18]对 HFE-7100 在不同宽高比扩张微通道散热器中的流动沸腾传热特性进行了研究。研究发现,与典型等宽微通道相比,扩张微通道具有更高的传热系数和临界热流密度。Ren Honglei 等^[19]针对动力电池热管理的应用背景,根据热源分布规律提出了具有非等宽微通道的液冷板,并以去离子水和 R141b 为工质进行了单相和两相换热特性实验。结果表明,非等宽微通道液冷板在单相和两相冷却条件下均具有较好的冷却性能。

综上所述,非等宽微通道结构在调节两相流动分布及强化换热方面具有一定潜力。为进一步研究该结构对传统并联通道内两相工质流动沸腾的影响,本文设计了非等宽并联微通道,以 R1233zd(E) 为工质,结合可视化手段,从沸腾曲线、传热特性、压降等方面,对非等宽并联微通道内的流动沸腾传热特性进行了研究,并与等宽并联微通道结构进行了对比分析。

1 实验方法

1.1 实验系统及方案

实验系统如图 1 所示。实验系统由制冷剂循环、冷却液循环以及数据采集系统组成。主要部件为储液罐、齿轮泵(Vikda, CS120)、预热器(恒温水浴加热)、实验段和冷凝器(恒温水浴冷却)。过冷状态下的制冷剂在泵的驱动下从储液罐进入预热器,在预热器中与来自恒温水浴 B 的热水进行换热,达到实验工况所要求的入口过冷度之后,制冷剂进入实验段进行换热,并以气液两相状态进入冷凝器,被冷凝成过冷液体后回到储液罐。

实验过程中的数据采集及处理通过 CRio-9045 数据采集模块及 Labview 实现。此外,采用高速摄像机在 1 000~3 000 fps 的速率下捕捉两相流动瞬态。各传感器的精度与量程如表 1 所示。

实验选择低压制冷剂 R1233zd(E) 作为工质,其在标准大压下的饱和温度为 18.26 °C,是目前电子器

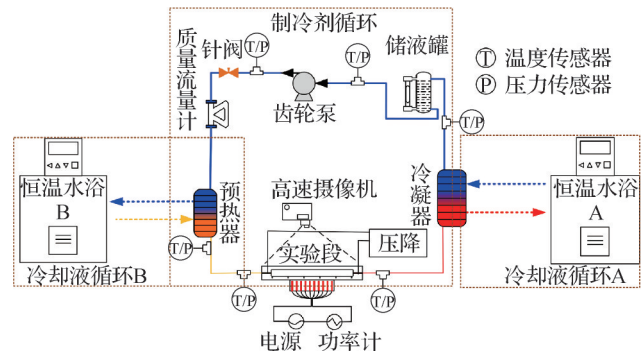


图 1 实验系统

Fig.1 Experimental system

表 1 传感器精度及量程

Tab.1 Accuracy and range of sensors

传感器	精度	量程
温度传感器	±0.1°C	-20~80 °C
压力传感器	±0.5%	0~1 MPa
质量流量计	±0.1%	0~1 000 kg/h
T型热电偶	±0.5 K	-100~200 °C

件热管理领域常用工质之一。实验工况如表 2 所示。

表 2 实验工况

Tab.2 Experimental conditions

入口压力/Pa	热流密度/(kW/m ²)	质量通量/[kg/(m ² ·s)]	入口过冷度/°C
150	0~14	505~2 020	5, 8

1.2 实验段结构

实验段结构如图 2 所示,主要由透明可视化窗口、微通道、加热块和底座组成。为了便于实验段部分的拆卸,基板设计为 3 个独立的部分,外壳、微通道和加热块。微通道和加热块均由铜制成,28 根加热棒(220 V-80 W)以纵向的方式插入来提供加热功率,而用于固定实验段的外壳和绝缘层均由 PEEK 制成。为分析等宽与非等宽并联微通道的传热特性,本文设计了 2 种并联通道结构。如图 2(b)和(c)所示,等宽并联微通道由 11 根长为 120 mm 的微通道组成,其截面尺寸为 2 mm × 0.5 mm(宽×高);非等宽并联微通道的长度及单根通道的高度均与等宽并联微通道相同,而通道宽度则呈现对称梯度变化:中心通道宽度为 1 mm,其相邻的 2 根通道宽度为 1.3 mm,其余两侧对称通道的宽度均以 0.4 mm 的数值增加,分别为 1.7、2.1、2.5 和 2.9 mm。2 种微通道流道的结构参数对比如表 3 所示。

热电偶测点布置如图 3 所示。考虑到并联通道结构本身可能产生的流量分配及传热均匀性问题,

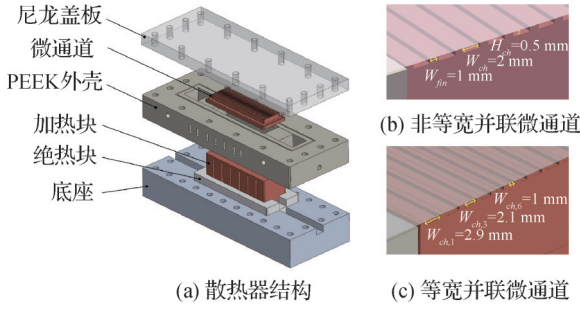


图 2 实验段结构

Fig.2 Structure of experimental section

表 3 等宽/非等宽微通道的结构参数

Tab.3 Structural parameters of uniform and variable width microchannel		
通道类	长×高	宽度
等宽	120×0.5	2.0
非等宽	120×0.5	2.9、2.5、2.1、1.7、1.3、1.0

本文共设计了 3 种热电偶测孔的深度,分别对应位于实验段中轴线的通道 6,以及位于实验段两侧通道 2 及通道 10。在实验段安装过程中,通过水平打孔的方式将热电偶布置在上述通道的下方,每根通道下方 7 个热电偶孔对应的流动距离分别为 2、20、40、60、80、100、118 mm,用于反映不同通道的沿程壁面温度,从而获取传热特性分布规律。

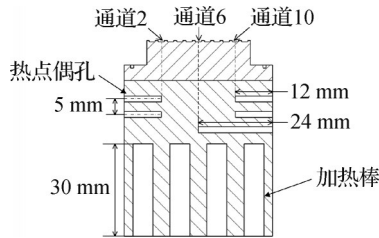


图 3 热电偶位置

Fig.3 Thermocouple positions

2 实验数据处理

2.1 传热特性计算

实验过程中,根据傅里叶导热定律计算出实际底部壁面温度:

$$T_w = T_{tc} - \frac{qd_{tc}}{\lambda} \quad (1)$$

式中: T_w 为实验段壁面平均温度,K; T_{tc} 为实验段热电偶处测点温度,K; q 为实验段的热流密度, kW/m^2 ; d_{tc} 为热电偶与实验段壁面间的距离,mm; $\lambda=400 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 为实验段底部材料铜的导热系数。

实验段内部的名义热流密度 q_{eff} :

$$q_{\text{eff}} = Q_{\text{eff}}/A \quad (2)$$

式中: Q_{eff} 为实验段中的有效加热量,W; A 为加热面积, cm^2 。

由于本实验段采用底部加热块的方式加热,则可用底部和底部等截面直肋计算:

$$A = \begin{cases} n(W_{\text{ch}} + 2\eta H_{\text{ch}})L & \text{等宽} \\ \sum_{i=1}^n W_{\text{ch},i} + 2\eta H_{\text{ch}}L & \text{非等宽} \end{cases} \quad (3)$$

肋效率 η 计算:

$$\eta = \frac{\tanh[mH_{\text{ch}}]}{mH_{\text{ch}}} \quad (4)$$

肋系数 m 计算:

$$m = \sqrt{\frac{2(W_{\text{fin}} + L)h_{\text{exp}}}{(W_{\text{fin}} + L)\lambda}} \quad (5)$$

式中: n 为通道数量, $n=11$; L 、 W_{ch} 、 H_{ch} 和 W_{fin} 分别为通道总长度、宽度、高度和肋的宽度,mm; h_{exp} 为流动沸腾传热系数, $\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$ 。

流动沸腾传热系数 h_{exp} 计算:

$$h_{\text{exp}} = \frac{q_{\text{eff}}}{T_w - T_f} \quad (6)$$

局部流体温度 T_f 计算:

$$\begin{cases} T_f = T_{f,\text{in}} - \frac{Q_{\text{eff}}L}{mL_{\text{ch}}c_p}, \text{单相} \\ T_f = T_{\text{sat}}, \text{饱和} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $T_{f,\text{in}}$ 、 T_{sat} 分别为流体的入口温度和饱和温度,K; L_s 为流动距离,mm; c_p 为比定压热容, $\text{J/(kg}\cdot\text{K)}$ 。

本实验产生的压降^[20]计算如下:

$$\Delta p = (p_{\text{in}} - \Delta p_c) - (p_{\text{out}} + \Delta p_e) \quad (8)$$

$$\Delta p_c = \frac{G^2}{2\rho_1} \left[1 - \left(\frac{A_{\text{small}}}{A_{\text{large}}} \right)^2 + K_c \right] \quad (9)$$

$$\Delta p_e = \frac{G^2}{\rho_1} \frac{A_{\text{small}}}{A_{\text{large}}} \left(1 - \frac{A_{\text{small}}}{A_{\text{large}}} \right) \psi_s \quad (10)$$

式中: p_{in} 、 p_{out} 分别为压力传感器测量的入口和出口流体压力,Pa; Δp_c 为实验段入口到微通道入口的收缩压降,Pa; Δp_e 为微通道出口到实验段出口的膨胀压降,Pa; A_{small} 、 A_{large} 分别为通道横截面积和出入口汇流段面积, cm^2 ; G 为质量通量, $\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$; ρ_1 为液体密度, kg/m^3 ; K_c 和 ψ_s 分别为层流的不可恢复损失系数和分相流动叠加因子。

2.2 不确定度分析

实验中参数的不确定度可由 Moffat^[21]公式计算得到:

$$U_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial X_i} U_{X_i} \right)^2} \quad (11)$$

式中: R 和 X 分别为间接测量量和直接测量量。

不确定度的详细范围如表 4 所示。

表 4 计算参数不确定度
Tab.4 Uncertainties of calculation parameters

参数	不确定度
Q_{eff}	$\pm 1.4\%$
h_{exp}	$\pm (4.75\% \sim 16.38\%)$
G	$\pm 2.13\%$

3 结果和讨论

3.1 实验系统验证

为确保实验数据的可靠,在实验段进入保温阶段时对实验系统进行了热损失标定,如图 4 所示,2 个实验段有效加热量与实际加热量的偏差基本在 20% 以内。根据不同工况下的热损失平均占比,确定本实验系统的有效加热量为实际加热量的 90%。

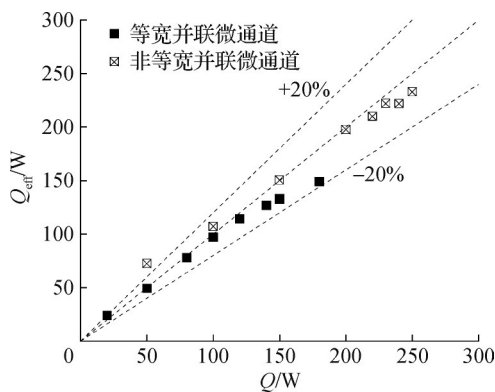


图 4 实验系统热损失标定

Fig.4 Calibration of heat loss in experimental system

为验证实验系统的有效性和可重复性,研究选取了 2 种通道进行了单相流动换热验证,分析单相流动时努塞尔数 Nu 随雷诺数 Re 的变化规律,并与 Dittus-Boelter 关联式的预测结果进行了对比,如图 5 所示, Nu 随 Re 的增加而增加,实验结果与关联式预测结果之间的平均绝对误差为 13.1%,可以认为实验系统的可靠性较好。图 6 所示为实验系统在饱和压力为 150 kPa,过冷度为 8 °C 条件下的重复性实验结果,可以看出,2 组相同工况下的沸腾曲线趋势一致且基本重合,因此可以认为实验系统具备重复性。

3.2 沸腾曲线

图 7 所示为在 150 kPa 饱和压力下,质量流量对等宽/非等宽微通道内 R1233zd(E) 沸腾曲线的影响。由图 7 可知,当热流密度达到一定值时,壁面过热度会突然降低,使沸腾曲线产生回折,这是实验段内核态沸腾起始(onset of nucleate boiling, ONB)导致的。

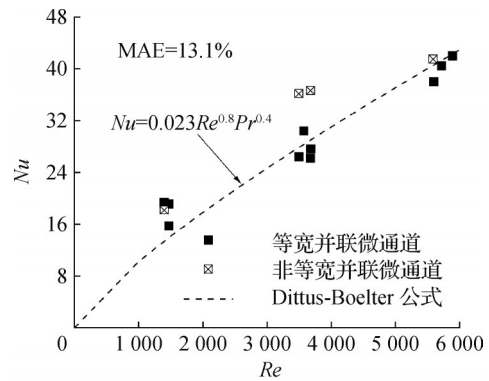


图 5 单相流动验证

Fig.5 Verification of single-phase flow

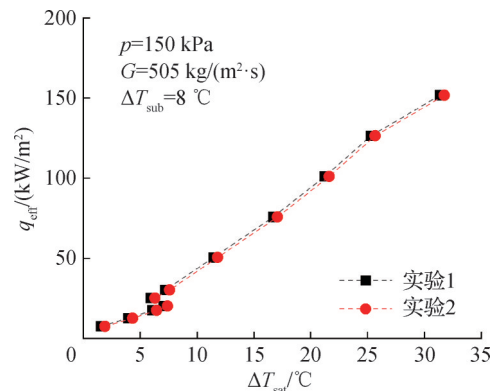
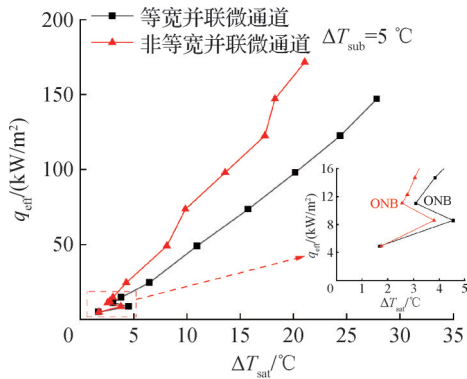


图 6 重复性实验

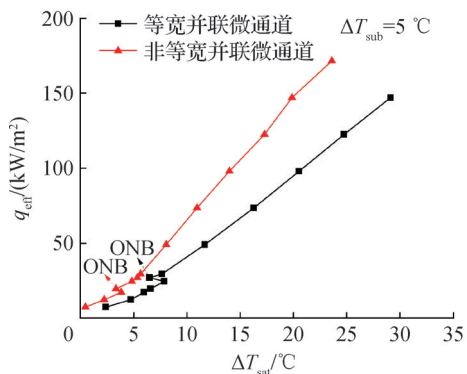
Fig.6 Repeated experiment

对比等宽并联微通道和非等宽并联微通道的沸腾曲线可以发现,不同工况下非等宽并联微通道中 ONB 对应的壁面过热度均低于等宽并联微通道。例如,在 $\Delta T_{\text{sub}}=5\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G=1\ 263\ \text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 工况下(图 7(c)),非等宽并联微通道发生 ONB 时的壁面过热度为 3.3 °C,而相同工况下等宽并联微通道在壁面过热度为 6.5 °C 时才发生 ONB。这是由于非等宽并联微通道设计优化了工质的初始流量分配,使其更容易进入沸腾状态。由图 8 展示的流型图像可知,在低热流密度下,等宽并联微通道初始流量分配不均,气泡基本出现在两侧通道,其余区域仍处于单相换热状态,导致 ONB 时的壁面过热度较高;而非等宽并联微通道气泡分布更加均匀,在其两侧通道及中间通道均有气泡出现,从而降低了 ONB 时的壁面过热度。

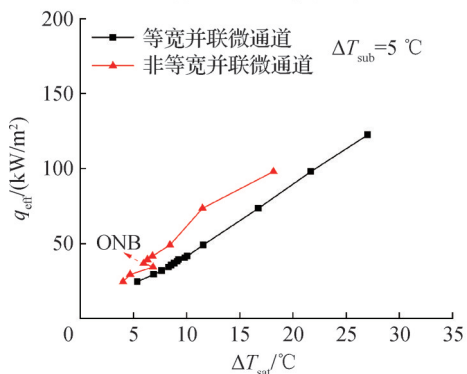
为进一步对比等宽/非等宽并联微通道的局部传热特性,其在不同流动距离的沸腾曲线如图 9 所示。选择 2 个典型通道(通道 6 和通道 10),分别为中间通道和侧边通道。在每根通道中,分别选择 2 个热电偶测量点,分别在通道中部(流动距离为 40 mm)和通道出口附近(流动距离为 100 mm)。由图 9 可知,ONB 后等宽并联微通道在不同通道和流动距离的 2 条沸



(a) $G=505 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$



(b) $G=1\ 263 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$



(c) $G=2\ 050 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

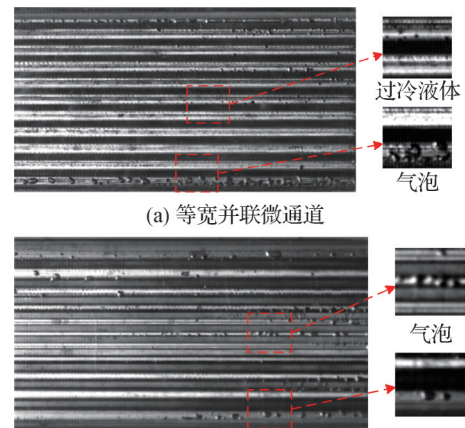
图 7 不同入口条件下等宽/非等宽并联微通道的流动沸腾曲线

Fig.7 Flow boiling curves for uniform and variable width microchannel of under different inlet conditions

腾曲线的差异明显大于非等宽并联微通道。等宽并联微通道在流动距离为 100 mm 时,通道 6 和通道 10 的沸腾曲线之间的差异性最大,而非等宽并联微通道的沸腾曲线几乎重合,说明非等宽并联微通道结构对初始流量的分配有益,且促进了不同通道中工质流动的同时沸腾。

3.3 传热系数

图 10 所示为等宽并联微通道和非等宽并联微通道的整体传热系数(HTC)的对比。从整体看,非等宽并联微通道的 HTC 始终高于等宽并联微通道,表明非等宽并联微通道的整体传热性能更优越。两者

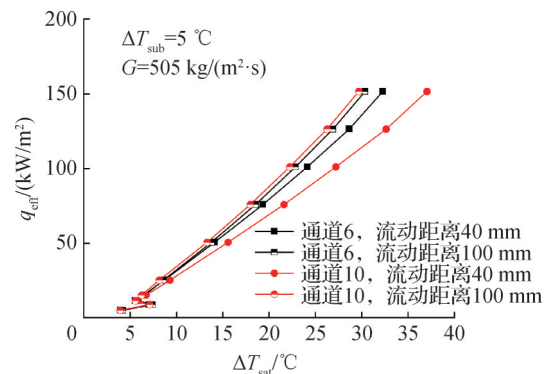


(a) 等宽并联微通道

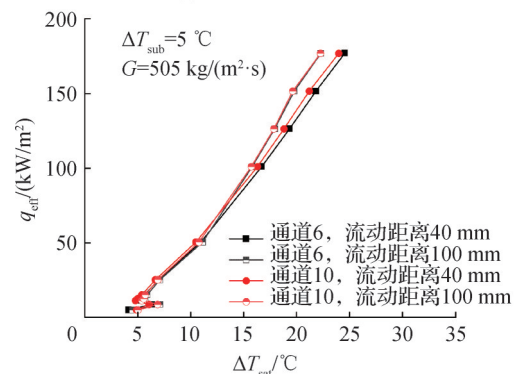
(b) 非等宽并联微通道

图 8 泡状流阶段的对比流型图

Fig.8 Flow pattern comparison diagram of bubble flow



(a) 等宽并联微通道



(b) 非等宽并联微通道

图 9 等宽/非等宽并联微通道不同位置的流动沸腾曲线
Fig.9 Flow boiling curves of uniform and variable width microchannel at different locations

HTC 的变化趋势基本一致,在低热流密度下快速上升,在 ONB ($q_{\text{eff}} \geq 25 \text{ kW}/\text{m}^2$) 后随着热流密度的增加趋于平稳。当热流密度低于 $25 \text{ kW}/\text{m}^2$ 时,通道内的主要换热模式是单相强迫对流。当热流密度增至 $25 \sim 30 \text{ kW}/\text{m}^2$ 时,主要换热机制转化为核态沸腾。随着主要换热机制的转变,非等宽并联微通道对流动分配不均匀的调节作用更加明显,HTC 也快速上升。当在高热流密度 ($q_{\text{eff}}=150 \text{ kW}/\text{m}^2$) 时,对比在质量通量为

505 kg/(m²·s)和 1 263 kg/(m²·s)情况下的 HTC,非等宽并联微通道分别比等宽并联微通道增加了 30%和 50%,这是由于非等宽并联微通道改善了流动的不均匀和抑制了沸腾传热后期的局部换热恶化。

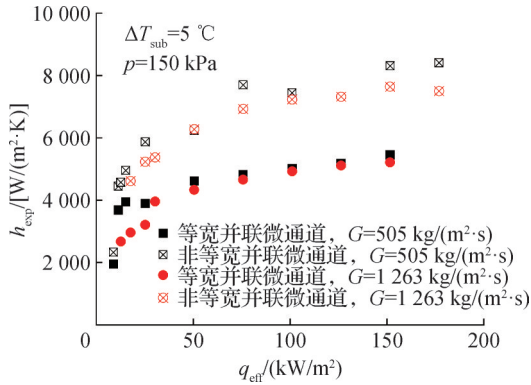


图 10 不同质量通量下的等宽/非等宽并联微通道传热系数
Fig.10 Coefficient of heat transfer of uniform and variable width microchannel under different mass fluxes

图 11 所示为不同质量通量条件下,非等宽并联微通道和等宽并联微通道在不同通道中的局部 HTC。选择中心通道(通道 6)和侧边通道(通道 10),在入口过冷为 5 °C、热流密度为 75 kW/m²的条件下进行分析。随着质量通量的逐渐增加,等宽并联微通道和非等宽并联微通道的局部 HTC 均出现逐渐减小的趋势,且非等宽并联微通道的侧边通道 10 的局部 HTC 基本比等宽并联微通道要高,这是由于非等宽并联微通道改善了流动分配不均匀。此外,非等宽并联微通道的 HTC 在流动距离 2 mm 和 100 mm 之间的 HTC 提升大于等宽并联微通道,说明非等宽并联微通道提高了在不同流动距离的换热效果。

3.4 压降

图 12 所示为非等宽并联微通道和等宽并联微通道在不同质量通量和热流密度下的两相压降。不同质量通量下的压降随热流密度的增加呈现出相同的增加趋势。原因是随着热流密度的增加,气相质量逐渐增加,在整个通道中所占比例逐渐增大,导致截面孔隙率和气-液界面剪应力增加,因此摩擦压降增大。此外,随着热流密度的增加,非等宽并联微通道与等宽并联微通道的压降间隙逐渐增大,非等宽并联微通道的压降超过了等宽并联微通道。压降升高可能是考虑到工质流量分配,非等宽并联微通道中间通道变窄增加了流动阻力,导致了出入口压力梯度增大。相比于等宽并联微通道的压降最大提升幅度为 61%,考虑到非等宽并联微通道相较于等宽并联微通道传热性能有较大提升,导致的压降增大可以接受。

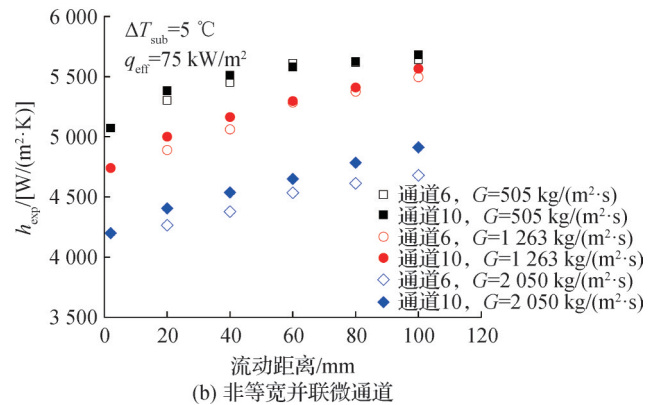
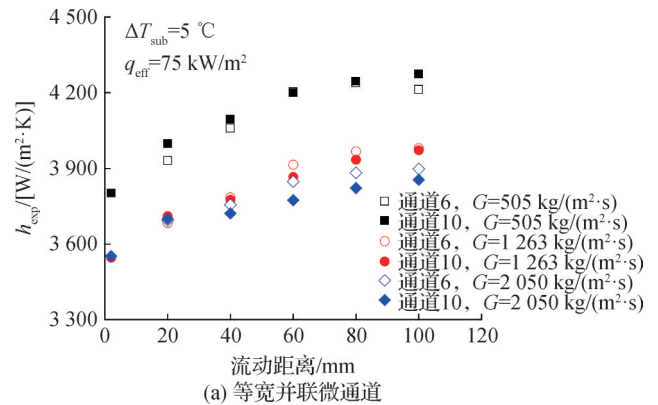


图 11 等宽/非等宽并联微通道在不同位置的局部传热系数
Fig.11 Local coefficient of heat transfer of uniform and variable width microchannel at different locations

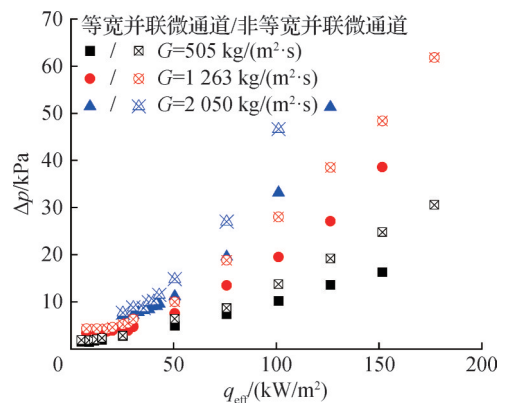


图 12 不同质量通量下等宽/非等宽并联微通道的两相压降
Fig.12 Two-phase pressure drops of uniform and variable width microchannel under different mass fluxes

4 结论

为了进一步研究并联微通道中换热不均匀的问题,针对 R1233zd(E)在均匀等宽并联微通道和非等宽并联微通道内过冷度为 5、8 °C,质量通量为 505~2 020 kg/(m²·s),热流密度为 0~14 kW/m²时的传热性能进行了实验研究,对比分析了 2 种微通道结构的流动沸腾曲线、传热系数变化规律和压降的影响,得到如下结论:

1)非等宽并联微通道核态沸腾起始(ONB)早于等宽并联微通道。在沸腾起始时,等宽并联微通道的壁面过热度为 $6.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,而非等宽并联微通道的壁面过热度下降至 $3.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。随着热流密度增加,非等宽并联微通道的壁面过热度上升趋势更为缓慢。

2)在质量通量为 $505\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 和 $1\ 263\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 情况下,非等宽并联微通道的传热系数分别比等宽并联微通道提升了30%和50%。在高热流密度($q_{\text{eff}}=150\text{ kW}/\text{m}^2$)下,非等宽并联微通道可以更有效地向下游区域补充过冷液体,从而抑制局部烧干导致的传热性能恶化。

3)非等宽并联微通道的压降高于等宽并联微通道:当质量通量为 $505\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 时,随着热流密度从 $5.05\text{ kW}/\text{m}^2$ 增至 $176.94\text{ kW}/\text{m}^2$,非等宽并联微通道的压降从 1.88 kPa 增至 30.56 kPa ,等宽并联微通道的压降从 1.54 kPa 增至 16.3 kPa 。相比于等宽并联微通道,非等宽并联微通道的压降最大提升幅度为61%。

参考文献

- [1] GARIMELLA S V, PERSOONS T, WEIBEL J A, et al. Electronics thermal management in information and communications technologies: challenges and future directions [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2017, 7(8): 1191–1205.
- [2] SINGH S, MALIK A, MALI H S. A critical review on single-phase thermo-hydraulic enhancement in geometrically modified microchannel devices [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 235: 121729.
- [3] MIGLANI A, WEIBEL J A, GARIMELLA S V. An experimental investigation of the effect of thermal coupling between parallel microchannels undergoing boiling on the Ledinegg instability-induced flow maldistribution [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2021, 139: 103536.
- [4] LI Xuejiao, JIA Li, DANG Chao, et al. Visualization of R134a flow boiling in micro-channels to establish a novel bubbly-slug flow transition criterion [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018, 91: 230–244.
- [5] 李雪娇. 微细通道内低沸点工质流动沸腾特性的实验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017. (LI Xuejiao. Experimental study on boiling characteristics of low boiling point working fluid in micro-channel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.)
- [6] 苗双双, 陶建云, 张程宾, 等. 蒸发器内流动沸腾过程的可视化实验及调控[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(7): 1827–1831. (MIAO Shuangshuang, TAO Jianyun, ZHANG Chengbin, et al. Visualization and regulation of flow boiling process in evaporator[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(7): 1827–1831.)
- [7] 马爽, 李洪伟. 矩形并联微通道中流量分配与流动沸腾传热特性实验研究[J]. 东北电力大学学报, 2021, 41(6): 33–42. (MA Shuang, LI Hongwei. Experimental study on flow distribution and flow boiling heat transfer in rectangular parallel microchannel[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2021, 41(6): 33–42.)
- [8] XU Dan, FANG Yidong, ZHANG Zhao, et al. Experimental investigation on flow boiling instability of R1233zd(E) in a parallel mini-channel heat sink for the application of battery thermal management [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 188: 122585.
- [9] 徐丹. R1233zd(E)在平行微细通道内的流动沸腾换热及失稳机制研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2022. (XU Dan. Study on flow boiling heat transfer and instability mechanism of R1233zd(E) in parallel microchannels[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science & Technology, 2022.)
- [10] 李昀, 曹杰, 华夏, 等. 短程逆流式微通道内的流动沸腾传热特性实验研究[J]. 化工学报, 2023, 74(11): 4501–4514. (LI Yun, CAO Jie, HUA Xia, et al. Experimental investigation on flow boiling heat transfer characteristics in short flow passage counter-flow microchannels[J]. CIESC Journal, 2023, 74(11): 4501–4514.)
- [11] ZHAN Zengkun, CHEN Lixia, ZHANG Hongna, et al. Numerical study on heat transfer enhancement by viscoelastic fluid pulsating laminar flow in rectangular microchannel heat sinks [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 213: 118734.
- [12] SUN Jia, LIN Yuhao, LI Junye, et al. Heat transfer and visualization of flow boiling on nanowire surfaces in the microchannel [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 256: 124064.
- [13] LIU Chang, ZHOU Jianhong, CHENG Kai, et al. Flow thermohydraulic characterization of open diverging microchannel heat sink for high heat flux dissipation [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 227: 120396.
- [14] LIN Yuhao, LUO Yang, LI Wei, et al. Single-phase and two-phase flow and heat transfer in microchannel heat sink with various manifold arrangements [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 171: 121118.
- [15] 冀昕宇, 张梵通, 杨小平, 等. 楔形歧管微通道流动与沸腾换热[J]. 化工学报, 2024, 75(11): 4196–4204. (JI Xinyu, ZHANG Yuantong, YANG Xiaoping, et al. Flow and boiling heat transfer in wedge-shaped manifold

- microchannel [J]. *CIESC Journal*, 2024, 75(11): 4196–4204.)
- [16] 呼和仓, 陈占秀, 李源华, 等. 圆柱肋片直径对流动沸腾影响的数值研究[J]. *低温与超导*, 2024, 52(5): 72–80. (HU Hecang, CHEN Zhanxiu, LI Yuanhua, et al. Numerical study of the effect of cylindrical fin diameter on flow boiling [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2024, 52(5): 72–80.)
- [17] HUANG Yuqi, CHEN Ke, TANG Xiaoyu, et al. Two-phase flow oscillation and distribution in parallel channels during R1233zd (E) subcooled flow boiling: a numerical study [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 218: 124778.
- [18] FU B, LEE C, PAN C. The effect of aspect ratio on flow boiling heat transfer of HFE-7100 in a microchannel heat sink [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 58(1/2): 53–61.
- [19] REN Honglei, JIA Li, DANG Chao, et al. Experimental investigation on pouch lithium-ion battery thermal management with mini-channels cooling plate based on heat generation characteristic [J]. *Journal of Thermal Science*, 2022, 31(3): 816–829.
- [20] ALAM T, LEE P S, YAP C R, et al. Experimental investigation of local flow boiling heat transfer and pressure drop characteristics in microgap channel [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2012, 42: 164–174.
- [21] MOFFAT R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1988, 1(1): 3–17.

通信作者简介

方奕栋, 男, 硕士生导师, 上海理工大学能源与动力工程学院, 制冷与低温工程研究所, 18721742164, E-mail: yidongfang@usst.edu.cn。研究方向: 电池/电子器件高效散热。

About the corresponding author

Fang Yidong, male, master supervisor, Institute of Refrigeration and Cryogenics, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, 86–18721742164, E-mail: yidongfang@usst.edu.cn. Research fields: highly efficient heat dissipation of batteries and electronic devices.