

文章编号: 1000-8055(2024)10-20220850-13

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220850

微通道内表面活性剂溶液的流动沸腾特性

孙 鸿, 芮子樑, 彭 浩

(南京工业大学 机械与动力工程学院, 南京 211816)

摘 要: 实验研究了溶质浓度为 0~800 mg/kg 的表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS)水溶液在水力直径 0.8 mm 的平直和树形微通道中的流动沸腾特性。结果表明: SDS 对两种微通道的传热效果均有显著强化作用, 在平直和树形微通道中, 最大传热系数分别达 $1.5 \times 10^5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 和 $6 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 400 mg/kg 和 200 mg/kg 的 SDS 水溶液使最大传热系数分别提升 40%。这是由于 SDS 显著增加了成核点数量, 大量气泡团聚且作为整体运动, 工质流动的过程中与壁面摩擦产生活化气泡干扰主流运动, 增强对流传热。平直微通道中流动充分发展, 不稳定膜态沸腾阶段易见局部干涸点, 树形微通道中气液相混合更加均匀, 压降波动幅度较小。SDS 使单相阶段压降显著减小, 沸腾阶段对压降的影响随体积流量增大而减小, 体积流量为 150 mL/min 时压降的变化小于 6%。

关 键 词: 表面活性剂; 微通道; 流动沸腾; 压降; 传热系数

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Flow boiling characteristics of surfactant solutions in microchannels

SUN Hong, RUI Ziliang, PENG Hao

(School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: The flow boiling characteristics of aqueous solutions of surfactant Sodium Dodecyl Sulfate (SDS) with solute concentration of 0—800 mg/kg were investigated in flat and tree-shaped microchannels of 0.8 mm hydraulic diameter. The results showed that SDS significantly enhanced the heat transfer effect of both structures, the maximum heat transfer coefficients of $1.5 \times 10^5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ and $6 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ can be achieved in flat and tree-shaped microchannels, and the aqueous solutions of 400 mg/kg and 200 mg/kg increased the maximum heat transfer coefficients by more than 40%, respectively. As SDS significantly increased the number of nucleation points, many bubbles agglomerated and moved as a whole, and many activated bubbles interfered with the main flow movement during the process of fluid flow and friction with the wall, which enhanced the convective heat transfer. For the flat microchannel, the flow was fully developed, and local dry spots were easily observed in the unstable boiling phase, and more homogeneous mixing of the gas-liquid phase occurred in the tree-shaped microchannel, resulting in smaller fluctuation of pressure drop. The pressure drop in the single-phase flow was significantly reduced by SDS, and the effect on the pressure drop in the boiling phase decreased as the volume flow rate increased, the change in pressure drop at a volume flow rate of 150 mL/min was less than 6%.

Keywords: surfactant; microchannel; flow boiling; pressure drop; heat transfer coefficient

收稿日期: 2022-11-06

基金项目: 国家自然科学基金(51776095); 江苏省研究生科研与实践创新计划(JXBS-004)

作者简介: 孙鸿(1998-), 男, 硕士生, 主要从事沸腾传热研究。E-mail: sunhong_1998@qq.com

通信作者: 彭浩(1981-), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事传热传质设备研究。E-mail: phsight1@hotmail.com

引用格式: 孙鸿, 芮子樑, 彭浩. 微通道内表面活性剂溶液的流动沸腾特性[J]. 航空动力学报, 2024, 39(10): 20220850. SUN Hong, RUI Ziliang, PENG Hao. Flow boiling characteristics of surfactant solutions in microchannels[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 20220850.

符号表

A	换热面积(mm^2)	x_{out}	出口干度
c_p	比定压热容($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	z_{sat}	单相段长度比例
h	微通道壁面平均传热系数($\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$)	η	系统热效率
h_{lv}	工质气液相变潜热(J/kg)	Δp	进出口压差(kPa)
I	电流(A)	ΔT	温差(K)
k_{Cu}	黄铜的导热系数($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	Δx	测温点到换热表面的垂直距离(mm)
L	微通道长度(mm)	缩写	
p_{in}	入口压力(Pa)	CHF	临界热流密度
p_{out}	出口压力(Pa)	ONB	起始沸腾点
Q	加热功率(W)	SDS	十二烷基硫酸钠
Q_{eff}	有效热流(W)	下标	
Q_{total}	总焦耳热(W)	Cu	铜
q_{eff}	有效热流密度(W/mm^2)	eff	有效
q_m	质量流量(kg/s)	in	入口
T_{in}	入口温度(K)	lv	液-气相变
T_{out}	出口温度(K)	out	出口
T_{ref}	工质参考温度(K)	ref	参考
T_{sat}	工质饱和温度(K)	sat	饱和状态
$\bar{T}_{\text{tc}}$	测温点均温(K)	tc	热电偶测温
T_w	微通道壁面温度(K)	total	总的
U	电压(V)	w	微通道壁面

电子设备产生的热流密度随着微型化、集成化趋势加剧而快速上升,例如,Mac Pro(Apple Incorporation,加利福尼亚州,美国)常规运行时功率超过 300 W^[1],散热成为制约电子器件进一步发展的瓶颈之一。因此对设备进行热管理以保证可靠性和性能迫在眉睫,微通道换热器因为结构紧凑、工质流速低的特点受到学术界和工业界关注^[2-3]。此外,沸腾传热拥有传热系数高、壁面温度相对稳定的特点。基于此,微通道内流动沸腾是解决高热流散热的方案之一。

强化微通道沸腾传热已有许多研究。结构方面,Cheng 等^[4]在硅基微通道的侧壁面添加齿状沟槽,实验研究了微通道宽高比、槽间距比和槽深对流动沸腾的影响。结果分为两方面:壁面平均传热系数随通道宽高比变化较大,而随沟槽间距比或槽深的变化较小,且临界热流密度(critical heat flux, CHF)在通道宽高比为 2.5 时达到最大值。其次,多数情况下具有沟槽结构的微通道压降降低,槽的数量和槽的深度对压降影响不大。Lin 等^[5]对具有微翅片、微腔和光滑表面的微通道内流动沸腾进行了数值研究。微翅片表面的成核气泡可诱导涡旋,增强对流传热。此外,相对于光滑表面,微腔表面的传热系数提高了 17.16%,热阻降低了 13.55%。作者认为微翅片表面能够减

小流体的接触角,增加润湿面积,达到强化传热的效果。

相比于微通道复杂结构的加工,在工质中添加表面活性剂以改善工质热物理性质从而强化沸腾传热的方法更加经济便捷。Wang 等^[6]在 6.0 mm × 3.5 mm 截面微通道中使用添加了质量分数为 0.02%~0.6%的水杨酸钠(NaSal)及十六烷基三甲基氯化铵(CTAC)水溶液进行了流动沸腾实验。通过可视化分析发现,0.1%的 CTAC/NaSal 溶液与纯水相比具有更好的流动沸腾性能,CHF 提高约 26%,且 CHF 下的传热系数提高了 36%。Wang 等认为 CATC/NaSal 的加入增加了成核点密度并抑制了气泡凝聚,从而提高了 CATC/NaSal 水溶液过冷流动沸腾的传热系数和 CHF。Wang 等^[7]研究了不同尺寸矩形微通道中的流动沸腾,将表面活性剂十二烷基硫酸钠(sodium dodecyl sulfate, SDS)加入去离子水和 R113 中。SDS 导致溶液接触角显著减小,呈现良好的润湿性。质量分数为 2%时,微通道内沸腾的传热系数和 CHF 分别增加 70% 和 140%,且强化效果与微通道的几何尺寸高度关联,SDS 产生的传热强化效果随着微通道长度和宽度的增加而降低。罗小平等^[8]将质量分数为 0.2%~0.4%的十二烷基苯磺酸钠(SDBS)、十六烷基三甲基溴化铵(CATB)和

失水山梨糖醇单油酸酯(Span80)加入 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{R141b}$ 纳米流体中,在 $2.0\text{ mm} \times 1.0\text{ mm}$ 截面微通道中进行流动沸腾实验。结果表明,表面活性剂对沸腾区域的传热系数影响显著,且表面活性剂强化因子由大到小依次为 SDBS、CATB、Span80,作者认为强化作用的机理是表面活性剂使得气泡脱离直径变小,气泡更容易脱离壁面。

表面活性剂的作用往往与微通道内气泡的形成与脱离相联系,但气泡生长过程难以完全观测,因此表面活性剂的强化机理虽有讨论却无共识。Bhuva 等^[9]研究了不同结构微通道中沸腾时的气泡行为,认为压力是作用在气泡上的主要力,尾随气泡和前导气泡的压力一定程度上决定了气泡的行为,提高微通道中流动的混合性能够增强对流传热并降低流动沸腾的不稳定性。Hu 等^[10]计算了局部液气表面张力,认为气泡行为和界面吸附受表面活性剂扩散机制的控制,界面吸附过程与气泡生长迁移同时进行。Guo 等^[11]在非离子表面活性剂溶液中发现 Bubble-Bubble 渗透现象,表面活性剂分子向气泡根部聚集,有效促进下一个气泡的成核。新成核的气泡加速了初始气泡的离开,也通过形成一个微小的蒸汽通道与初始气泡相互作用。Guo 等认为这种现象是表面活性剂溶液增强传热的原因之一。

表面活性剂在矩形通道中的沸腾强化作用已得到大量证实,但目前新型微通道换热器中存在大量复杂的扰流结构,表面活性剂在这些复杂结构微通道中的作用机制研究仍较少。本文提出一

种新型树形微通道结构,通过高速摄像机观察不同溶质浓度的离子型表面活性剂(SDS)水溶液在其中的流动沸腾现象,研究不同实验工况下沸腾传热系数、压降等特性及瞬时流态,并与平直通道进行对比,获得表面活性剂对复杂微通道内沸腾传热的影响规律。

1 实 验

1.1 工质的物理性质

实验工质由去离子水与离子型表面活性剂 SDS 制备不同溶质浓度的溶液,分别为 0(纯水)、100、200、400、800 mg/kg。实验工质在 293.15 K 和 353.15 K 时的剪切黏度及表面张力系数如表 1 所示。

表 1 SDS 水溶液物性^[12]

Table 1 Physical properties of SDS aqueous solution^[12]

溶质浓度/ (mg/kg)	剪切黏度/(mPa·s)		表面张力系数/(mN/m)	
	293.15 K	353.15 K	293.15 K	353.15 K
0	0.995	0.348	72.576	63.460
100	1.002	0.350	66.935	62.515
200	1.012	0.350	65.974	61.829
400	1.027	0.350	59.316	58.477
800	1.043	0.349	53.892	53.236

1.2 实验系统

实验系统如图 1 所示,由蠕动泵、预热器、实验段、冷却器、高速摄像机、数据采集系统等组成。冷却工质由水浴预热(WB100-1)至所需的入

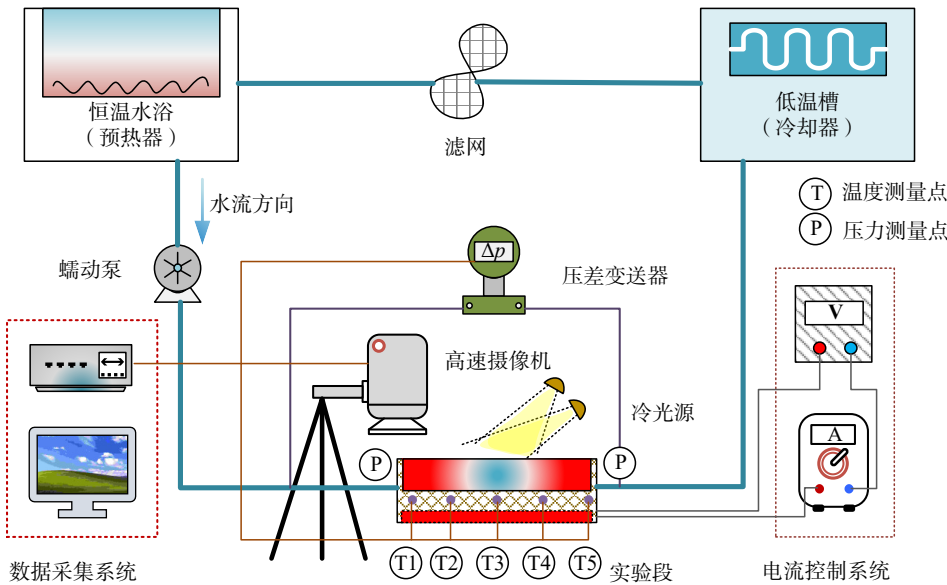


图 1 实验环路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental loop

口温度,然后由蠕动泵(Coleparmer L/S 35)以恒定的体积流量输入回路。实验段热源为直流电源(TDGC5-1kVA)供电的电加热棒,工质进入微通道受热沸腾后进入低温槽(XODC-8010F)冷却,并再次进入回路形成循环。入口和出口的液体温度和压降分别用铠装热电偶(WRNK-191)和压差(Δp)变送器(EJA110A)测量。沸腾过程中的瞬时两相流态可依靠带同轴变焦镜头的高速摄像机(Nikon-R320S)观察。相关实验数据保存至无纸记录仪(KSC24AOR)。

1.3 微通道结构

实验段结构如图 2(a)所示,底座及封盖由聚四氟乙烯制成,微通道由黄铜制成,透过玻璃盖能清晰地观测微通道内流动沸腾状况。微通道的两侧均有积液槽,减少蠕动泵运行时的脉冲效应^[13]。微通道侧面均布了 5 个测温点 T1~T5,入口及出口处进行温度和压力的测量。平直与树形微通道的实物和详细尺寸如图 2(b)和图 2(c)所示,微通道深度均为 0.5 mm,水力直径均为 0.8 mm。

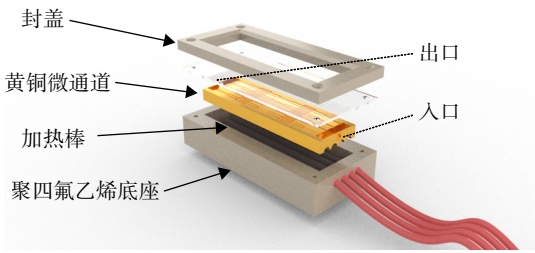
1.4 实验工况

表 2 为实验工况。实验时 $p = 101.3 \text{ kPa}$, $T_{\text{in}} = 353.15 \text{ K}$ 。

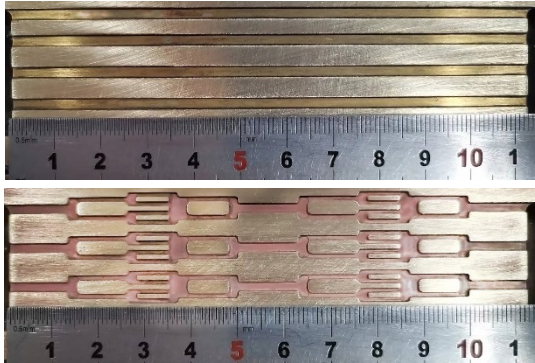
1.5 数据处理

加热模块为电加热,产生的焦耳热 Q_{total} 为:

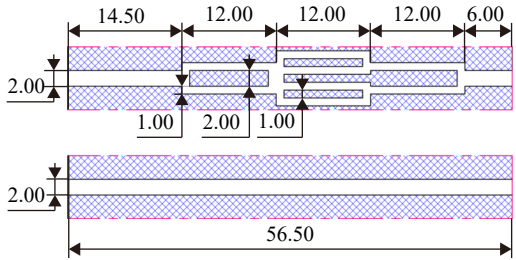
$$Q_{\text{total}} = U \times I \quad (1)$$



(a) 实验段结构图



(b) 实验段实物图



(c) 微通道几何尺寸

图 2 实验段说明(单位: mm)

Fig. 2 Test section schematic (unit: mm)

表 2 实验工况

Table 2 Operational conditions of experiments

编号	体积流量/ (mL/min)	表面活性剂溶质 浓度/(mg/kg)	有效热流密度/ (W/mm ²)
组 1	90	0	0.043 5~0.289 8
	120	0	0.043 5~0.307 0
	150	0	0.043 5~0.289 8
组 2	90	100	0.043 5~0.307 0
	120	100	0.043 5~0.307 0
	150	100	0.043 5~0.307 0
组 3	90	200	0.043 5~0.387 6
	120	200	0.043 5~0.387 6
	150	200	0.043 5~0.387 6
组 4	90	400	0.043 5~0.387 6
	120	400	0.043 5~0.387 6
	150	400	0.043 5~0.387 6
组 5	90	800	0.043 5~0.365 9
	120	800	0.043 5~0.365 9
	150	800	0.043 5~0.365 9

实验工质单相流动时,受热温度上升,将增加的显热定义为有效热流量 Q_{eff} :

$$Q_{\text{eff}} = \int_{T_{\text{in}}}^{T_{\text{out}}} c_p \times q_m \times dT \quad (2)$$

实验工况下水的比定压热容取常数 4.2 kJ/(kg·K)。式(2)可改写为:

$$Q_{\text{eff}} = c_p \times q_m \times (T_{\text{out}} - T_{\text{in}}) \quad (3)$$

假设在加热棒上方的微通道底面是均匀受热,则有效热流密度 q_{eff} 为:

$$q_{\text{eff}} = \frac{Q_{\text{eff}}}{A} \quad (4)$$

系统与环境之间存在热交换,因此存在热量损失,定义热效率 η 为:

$$\eta = \frac{Q_{\text{eff}}}{Q_{\text{total}}} \times 100\% \quad (5)$$

根据纯水的单相传热来计算整个系统的热效率。纯水的体积流量为 180 mL/min, 在 13 组不同的恒定热流密度下进行单相传热实验, 根据式(3)计算有效热流量, 根据式(5)计算热效率, 并使用二次多项式拟合获得热效率曲线如图 3 所示。实验系统热效率随热流密度上升而缓慢下降, 在实验工况范围内能够保持在 93% 以上, 热量损失的主要原因为微通道实验段上表面玻璃盖板处未进行保温处理。

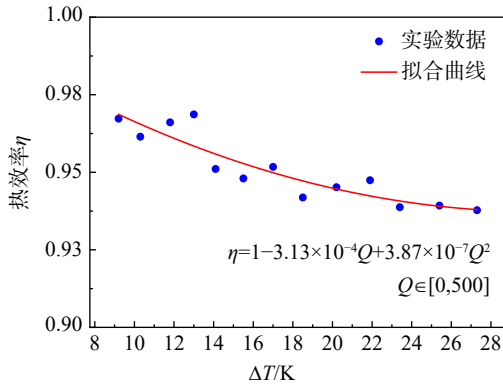


图 3 实验系统热效率

Fig. 3 Thermal efficiency of the experimental system

微通道测温点距离通道底表面距离为 1.5 mm, 采用一维导热计算通道底表面的温度 T_w :

$$T_w = \bar{T}_{tc} - q_{eff} \times \frac{\Delta x}{k_{Cu}} \quad (6)$$

式中 k_{Cu} 为铜质微通道的热导率, 取 108 W/(m·K)。微通道的壁面平均传热系数 h 可表示为:

$$h = \frac{q_{eff}}{T_w - T_{ref}} \quad (7)$$

微通道出口的热平衡干度 x_{out} 可表示为:

$$x_{out} = \frac{Q_{eff} - c_p q_m (T_{out} - T_{in})}{q_m h_{lv}} \quad (8)$$

实际计算时将微通道入口处至 z_{sat} 视为单相流动, z_{sat} 至出口视为两相流动。流体参考温度 T_{ref} 表示为:

$$T_{ref} = \begin{cases} \frac{T_{in} + T_{out}}{2} & x_{out} \leq 0 \\ \frac{T_{in} + T_{out}}{2} \cdot \frac{z_{sat}}{L} + T_{sat} \frac{L - z_{sat}}{L} & x_{out} > 0 \end{cases} \quad (9)$$

本实验中计算不同工况压降采用进出口之间的压力差值 Δp :

$$\Delta p = |p_{out} - p_{in}| \quad (10)$$

1.6 不确定度分析

本实验中, 对于计算参数 $Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$, 已知直接测量参数 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ 的不确定度, 则根据误差传递理论, 计算参数 Y 的相对误差为:

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

蠕动泵的精度为 ± 0.01 mL/min, 实验中的最小流量为 90 mL/min。T 型热电偶的精度达 ± 0.1 K。压差变送器的测量精度为 $\pm 0.075\%$, 测量范围为 0~10 kPa, 实验中所测的最小压差为 0.1 kPa。万用电表的精度为 $\pm 0.1\%$, 电压测量范围为 0~600 V, 电流测量范围为 0~10 A。实验中所测的最小电压为 56.4 V, 最小电流为 1.2 A, 计算得到相关参数的不确定度如表 3 所示。

表 3 参数的不确定度

Table 3 Uncertainty analysis of parameters

参数	不确定度/%
加热功率	± 1.06
有效热流密度	± 1.83
传热系数	± 9.23
压降	± 7.5

2 结果与讨论

2.1 流 态

2.1.1 平直微通道流态

平直微通道中有效热流密度 $q_{eff} = 0.12, 0.15, 0.20, 0.24, 0.30$ W/mm² 时的瞬时流态如图 4 所示。在较低热流密度 ($q_{eff} < 0.2$ W/mm²) 下, 微通道内流体随着温度逐渐接近沸点而产生细小的气泡, 且这些细小气泡首先从靠近侧壁面与换热底面夹角处开始生成。随着热流密度的增大, 气泡逐渐生长并且相邻气泡边界逐渐贴近, 当气泡直径达到脱离直径 (大致为微通道直径的一半^[14]), 则在流体的作用力下脱离加热表面。从单个流动角度, 流道内大部分直径较大的气泡会与脱离气泡合并后逐渐形成泡状流, 较小的气泡则会留在加热表面继续生长并等待下一次主动或被动地脱离。

当有效热流密度进一步增大 ($q_{eff} > 0.2$ W/mm²), 平直微通道内出现明显的弹状流态, 工质沸腾后气相占比明显增大, 出现液体和气体交替流动的现象, 气泡的宽度覆盖通道宽度, 因此加热表面

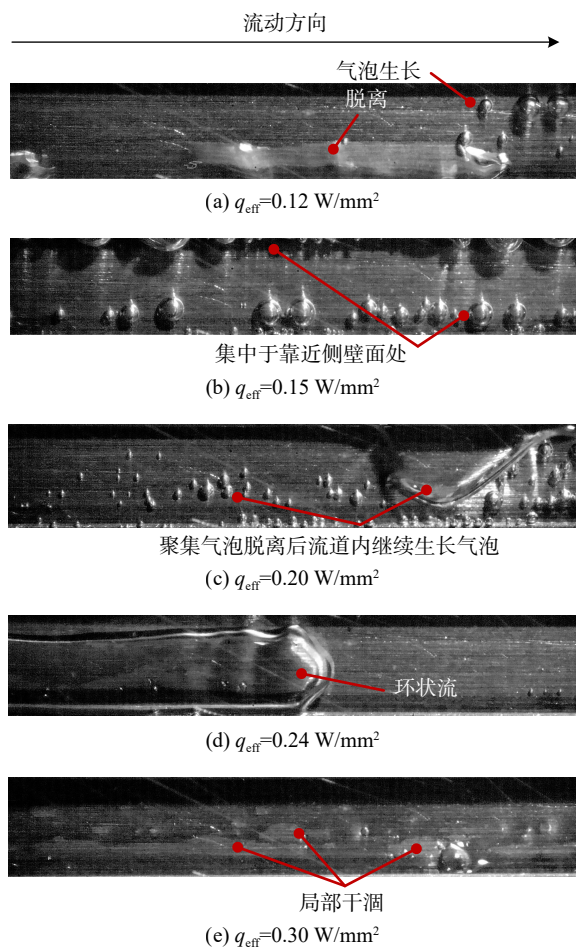


图 4 不同热流密度下平直微通道流态

Fig. 4 Flow patterns of flat microchannel at different heat fluxes

上附着的气泡一生成便会与弹状大气泡碰撞合并,此阶段微通道的振动与沸腾不稳定性明显增加。当气相占比超过液相,则进一步发展为环状流,狭长的气泡占据了大部分微通道空间,气泡的尾部存在局部干涸的迹象,此时流体进入膜态沸腾阶段,加热表面上的液体快速沸腾,形成一层薄的液膜与许多干涸点,气相占据微通道空间的绝大部分,对应的传热系数有明显的下降。

2.1.2 树形微通道流态

树形微通道中的瞬时流态与平直微通道中有较为显著的区别。如图 5 所示,在沸腾的初始阶段,树形微通道内流态与平直微通道内相似,气泡由夹角处率先产生,也发生类似的聚集与堆积,在分岔结构处,气泡的脱离路径遭遇阻碍。在较低热流密度($q_{eff} < 0.15$ W/mm²)时,气泡直径被微通道尺寸限制,且以球形气泡为主,此时主要受表面张力与惯性力的影响^[15]。在遭遇阻碍时,气泡碰撞后产生挤压但不会分割,会在两条分支流道中随机选择一条继续移动。当气相率增大,通

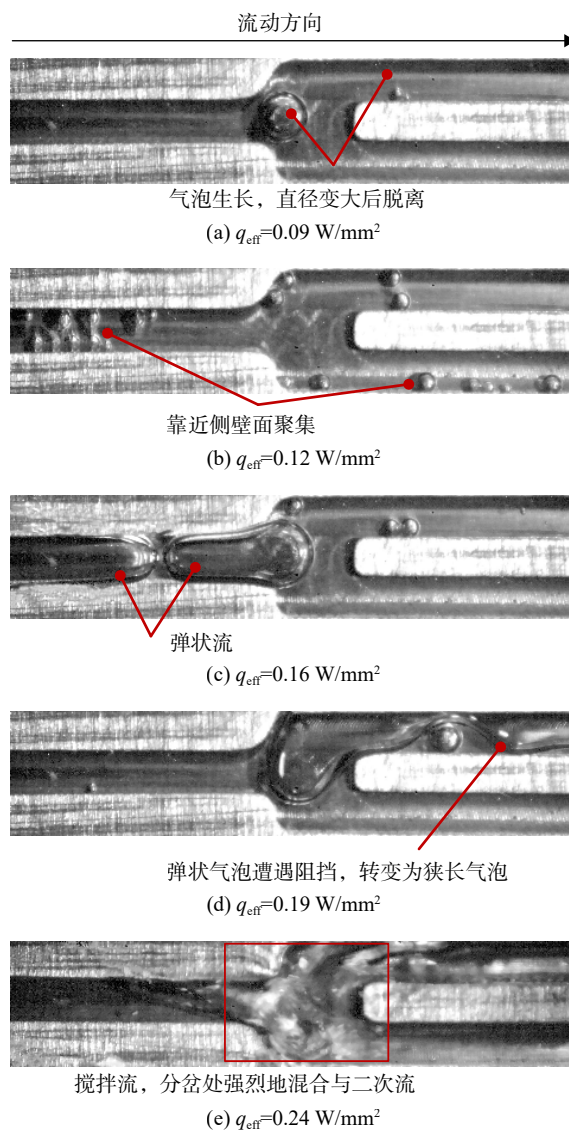


图 5 不同热流密度下树形微通道流态

Fig. 5 Flow patterns of tree-shaped microchannel at different heat fluxes

道内气泡逐渐转变为弹状气泡,流经分岔处时被分割,形成狭长的气泡在分支流道汇合处合并。

分岔处的涡旋可以在高热流密度($q_{eff} > 0.2$ W/mm²)下观测到,剧烈沸腾时可以见到明显的搅拌流态,气相占据微通道上部并且对微通道内的流态产生很大影响。大量的气泡在障碍处快速碰撞然后分割,使得流道截面突变处产生二次流与涡旋,在实验工况范围内未见明显的局部干涸现象,可见树形微通道中的扰流结构使得流体混合加强,气泡的生长合并过程易被切割,显著抑制了局部大面积气相的出现。

2.1.3 表面活性剂 SDS 对流态的影响

添加了表面活性剂 SDS 的去离子水在流动沸腾时展现出与纯水显著的差异,图 6 中列举了

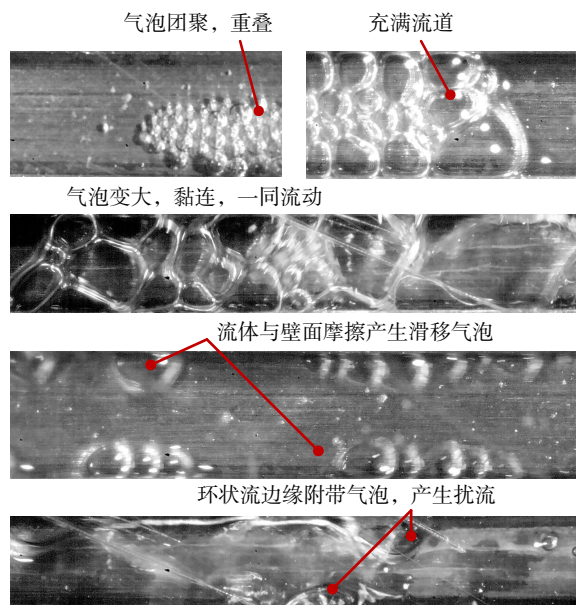


图 6 表面活性剂 SDS 对流态的影响

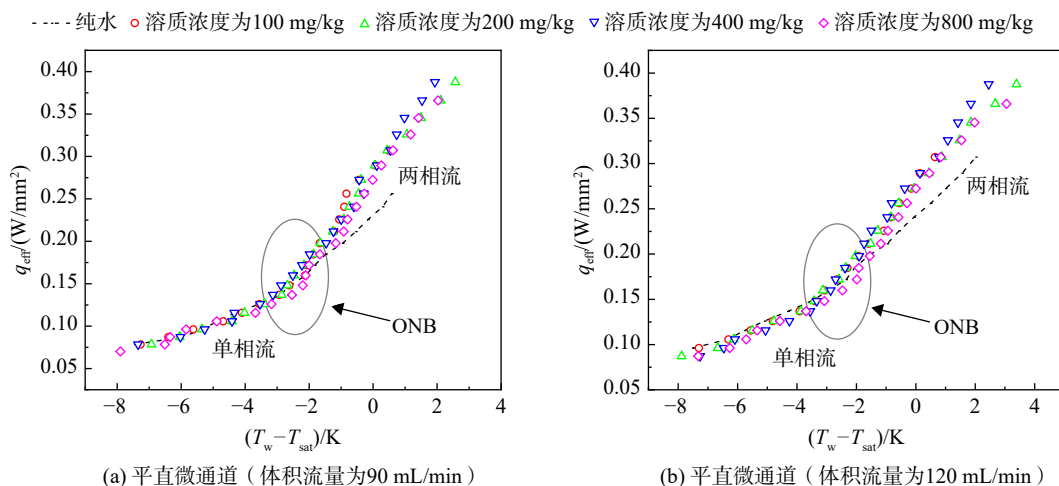
Fig. 6 Effect of surfactant SDS on flow patterns

部分 SDS 水溶液中气泡的独特沸腾行为, 拍摄位置取平直和树形微通道的后三分之一处, 树形微通道取最小分支流道。在沸腾的初始阶段, 加热表面的气泡成核点显著增加, 且有明显的群生现象, 细小气泡不仅在加热表面相互靠近, 甚至在垂直方向也有堆积。随着热流密度增大, 气泡生长过程中, 与纯水不同, 气泡不再到达脱离直径后脱离加热表面, 而是与周围的气泡形成整体, 气泡之间相互挤压, 直到充满流道截面, 在某个时刻一起向出口移动。一整群的气泡之间在流动过程中显著地产生变形、换位, 但始终以整体的形式运动, 说明表面活性剂使得溶液的表面张力显著变化。以气泡脱离为分界点, 可以将上述整个气泡行为分为气泡生长团聚阶段和气泡整体脱离阶段^[16]。

除了在加热表面上产生更多气泡, 工质在流动过程中与壁面摩擦, 壁面吸附表面活性剂分子使得近壁面处气液界面张力降低, 因此产生更多液膜并能够保持稳定。当气液相混合的主流工质流过被活化的界面, 产生大量的活化气泡, 活化气泡的生长速度显著快于加热表面的气泡, 会在极短时间内产生并从两侧壁面向通道中心汇合, 大部分情况下, 活化气泡的运动会上干干扰了主流工质。大量存在的活化气泡也使气液交替前进时的流动带有剧烈的混合与二次流。

2.2 沸腾曲线

图 7 所示为平直与树形微通道中不同体积流量与 SDS 溶质浓度下的沸腾曲线。体积流量对沸腾曲线的影响较为显著, 相同有效热流密度下, 体积流量越大微通道壁面过热度越小。沸腾曲线的斜率达到最大后减小, 这是由于微通道内气泡不断增加, 气泡生长合并速率提高导致局部气相占比过高, 核态沸腾向不稳定膜态沸腾转变。对于平直微通道, 不同溶质浓度的 SDS 水溶液之间沸腾曲线在单相流阶段相差较小, 这是由于单相阶段流体黏性底层的传热主要通过热传导进行^[17], 少量表面活性剂对去离子水黏度的改变较小。到达起始沸腾点 (onset of nucleate boiling, ONB) 之后, SDS 水溶液相比纯水在相同壁面过热度下能够承受更高的热流密度, 且不同溶质浓度 SDS 水溶液之间差异较小, 因此高的 SDS 溶质浓度不会显著增加微通道流动沸腾强度。对于树形微通道, 体积流量对沸腾曲线的影响相比平直通道中有所减弱, 这是由于树形扰流结构中大量存在的涡旋使得流动更加均匀。由图 7(c) 和图 7(d) 可以看出, 溶质浓度为 200 mg/kg 的 SDS 水溶液在受热时具有最低的壁面过热度, 反映出较高的传热强



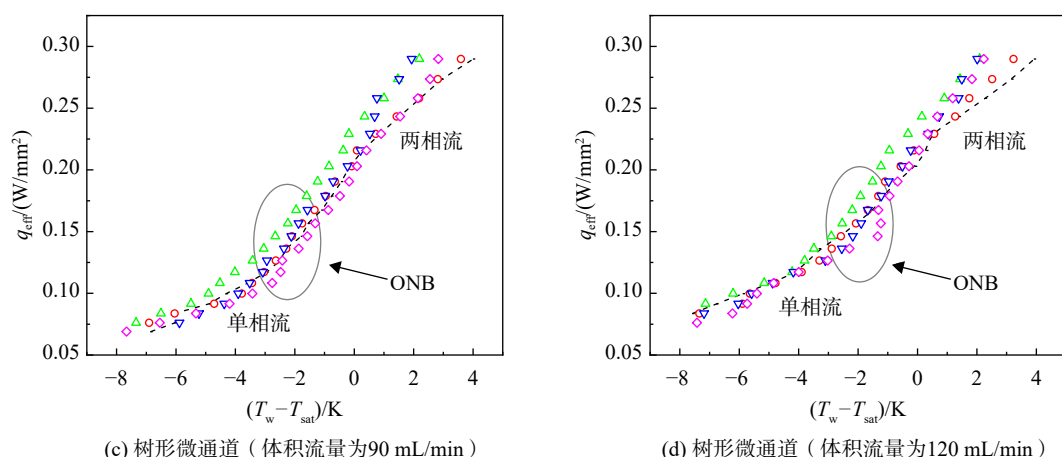


图 7 平直与树形微通道沸腾曲线

Fig. 7 Boiling curves for flat and tree-shaped microchannels

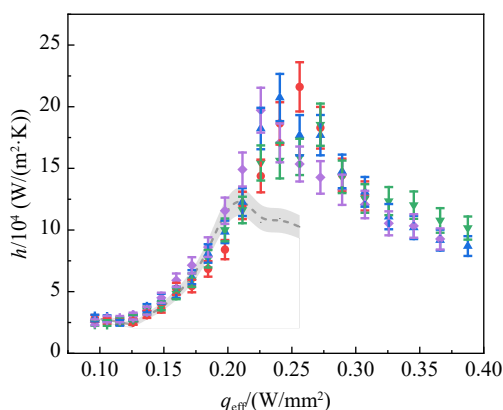
度, 这表明少量 SDS 的加入可以使得工质的沸腾强度显著提升。

2.3 传热系数

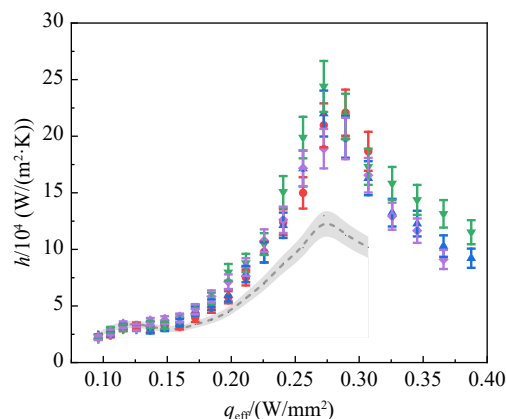
传热系数的大小直观地体现了微通道的传热性能。从图 8 中可看出, 表面活性剂的加入使得两种微通道的传热系数均有显著的提升。微通道中工质进入核态沸腾阶段后, 传热系数随着热流密度的增大显著上升, 此时, 导热及对流传热的强度均在提升。热流密度升高至一定程度后, 传热系数的增大会逐渐减缓, 这是由于微通道内主要流态向弹状流转变, 核态沸腾逐步被抑制而进入不稳定膜态沸腾阶段。当微通道内流态出现局部干涸点时, 气相占比过大, 对流传热被抑制, 微通道底部表面的薄液膜蒸发占据主导, 因而最大传热系数点也可视为核态沸腾向不稳定膜态沸腾的转折点。在平直微通道中测试的 3 种体积流量下, 传热系数变化趋势相似: 在 $q_{\text{eff}} < 0.2 \text{ W/mm}^2$ 时, SDS 水溶液与纯水的传热表现差异不大, 此

时对应过冷沸腾阶段, 流体中含有少量的气泡, 且大部分停留在加热表面, 因此对流动影响较小。而 SDS 的溶质浓度水平整体较小, 所以对工质沸点、汽化潜热的改变非常微小, 与纯水呈现相似的传热系数。当微通道内流体受热到达核态沸腾阶段, SDS 的溶质浓度对传热系数的影响随着热流密度的上升逐渐提高, 与纯水传热系数的差异在进入不稳定膜态沸腾阶段时达到峰值, 体积流量为 90 mL/min 和 120 mL/min 时 400 mg/kg 溶质浓度的 SDS 水溶液可分别使传热系数最大提升 44.53% 和 68.22%。最大传热系数从过冷流动时的 $2 \times 10^4 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 逐渐增加到大于 $1.5 \times 10^5 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 的峰值, 但此后, 微通道内流体进入不稳定膜态沸腾阶段, 传热系数随着流动不稳定性的增强和气相占比的增加而持续下降, 微通道内传热形式由强制对流传热和沸腾传热共同控制逐渐转为沸腾传热主导^[18]。整体而言, 在平直微通道中, 400 mg/kg 溶质浓度的 SDS 水溶液在各体

--- 纯水 ● 溶质浓度为 100 mg/kg ▲ 溶质浓度为 200 mg/kg ▼ 溶质浓度为 400 mg/kg ◆ 溶质浓度为 800 mg/kg



(a) 平直微通道 (体积流量为 90 mL/min)



(b) 平直微通道 (体积流量为 120 mL/min)

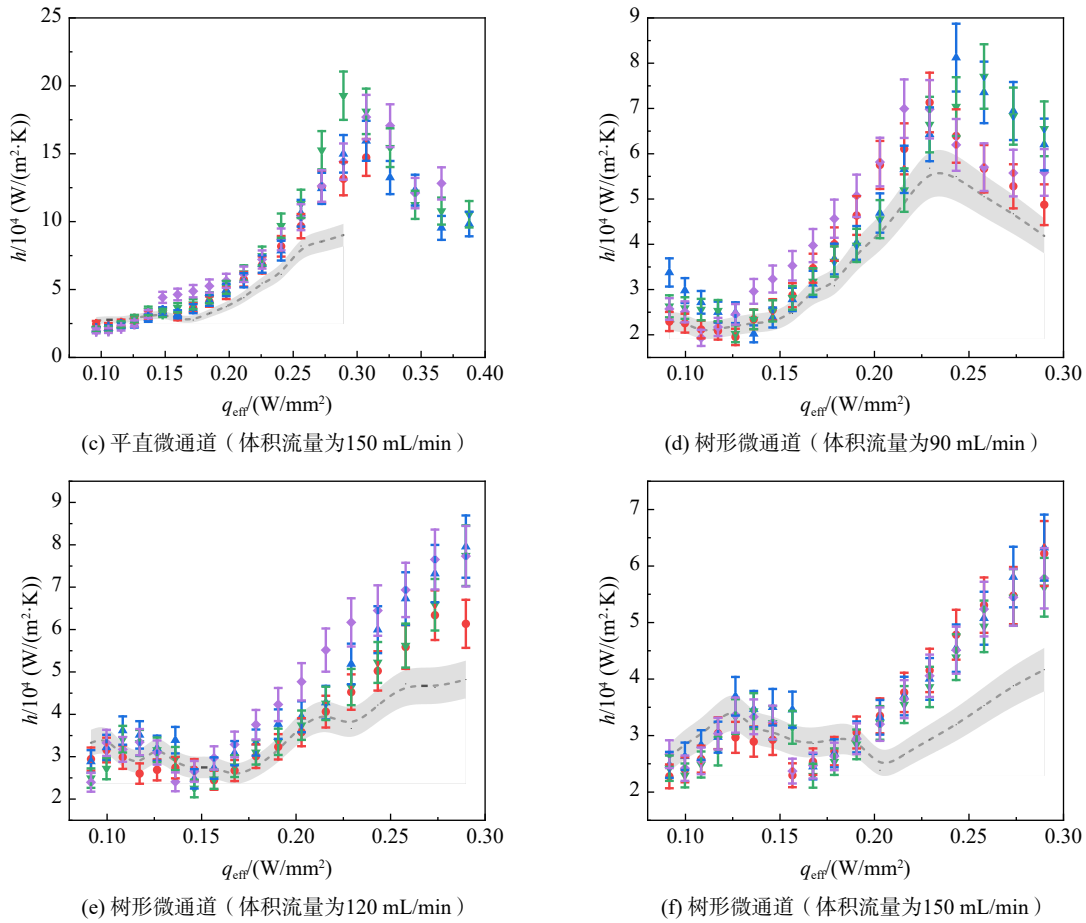


图 8 不同 SDS 溶质浓度下传热系数随热流密度变化

Fig. 8 Variation of heat transfer coefficient with heat flux at different SDS concentrations

积流量下的平均传热系数最大。

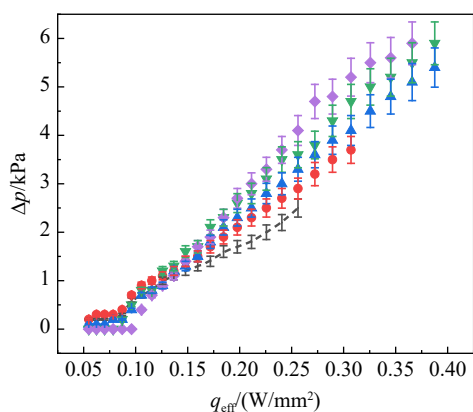
在树形微通道中,结构的改变使得流动沸腾的传热系数波峰略微向后移动,这是由于扰流结构的存在使得两相流动混合增强,且微通道的扩缩变径减少了局部大面积气相的出现,能够使工质更晚进入不稳定膜态沸腾阶段。200 mg/kg 溶质浓度的 SDS 水溶液在 3 种体积流量下使得传热系数最大分别提升 42.96%、68.64% 和 51.80%,不同流量下最大传热系数在实验工况范围内均能达到 $6 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,且在体积流量大于 120 mL/min 的情况下树形微通道内依旧处在核态沸腾强化阶段,传热系数还未达到峰值。可见无论在平直还是树形微通道结构中,少量的表面活性剂均能够使流动沸腾传热性能有效提升。平直微通道的传热系数总体要高于树形微通道,主要有两个原因:一方面是由于保证两种结构微通道总体尺寸、水力直径相等,平直微通道的换热面积较树形微通道大 28%。另一方面,树形结构微通道中流道的不断分开与合并导致各段的局部流速

存在较大差异。结合流态可发现,树形微通道中没有观测到明显的局部干涸,因此在可承受热流密度及传热稳定性方面,树形微通道相比平直微通道具有明显优势。

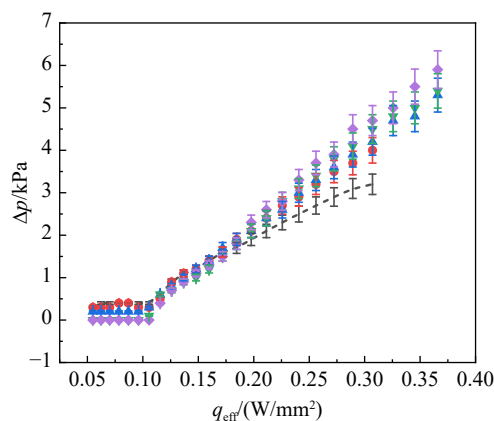
2.4 压 降

从图 9 可见,表面活性剂对流动沸腾压降的影响是显著的,总体上,单相阶段表面活性剂 SDS 可以显著降低流动阻力,沸腾阶段,含有表面活性剂的去离子水呈现更高的压降。在两种微通道中,纯水在单相阶段均具有最大的压降,在大体积流量下摩擦压降更大,且出口干度越大时体积流量对压降的强化作用越明显。单相阶段,流体的流动阻力与热流密度无关,压降曲线的斜率几乎为 0。随着加热热流的增大,曲线斜率发生突变,可以推测此时微通道中开始沸腾,产生气泡,气相的扰动使得微通道进出口压差增大,此外相变的过程引起气液两相混合物平均密度变低^[19],导致工质流速增加。低体积流量下工质更早到达 ONB 点,90 mL/min 时平直与树形微通道

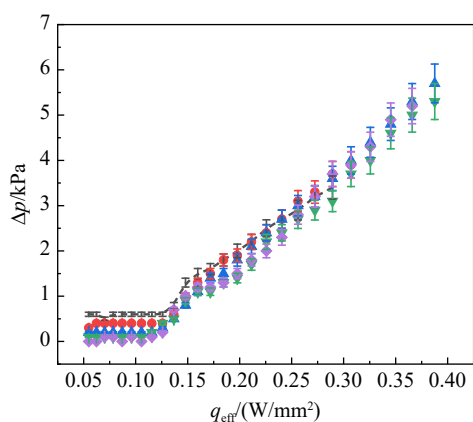
--- 纯水 ● 溶质浓度为100 mg/kg ▲ 溶质浓度为200 mg/kg ▼ 溶质浓度为400 mg/kg ◆ 溶质浓度为800 mg/kg



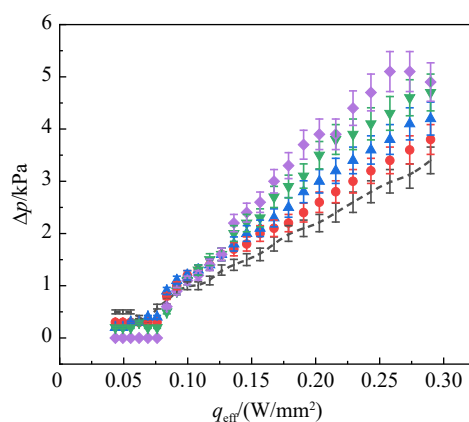
(a) 平直微通道 (体积流量为90 mL/min)



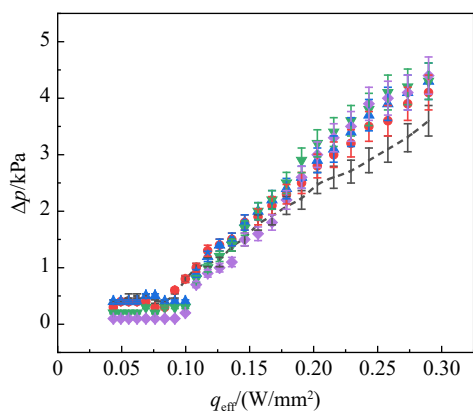
(b) 平直微通道 (体积流量为120 mL/min)



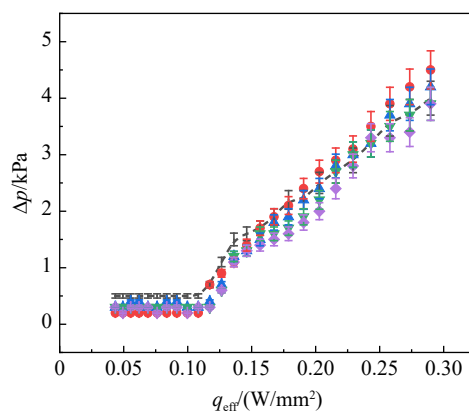
(c) 平直微通道 (体积流量为150 mL/min)



(d) 树形微通道 (体积流量为90 mL/min)



(e) 树形微通道 (体积流量为120 mL/min)



(f) 树形微通道 (体积流量为150 mL/min)

图9 微通道内流动沸腾压降

Fig. 9 Pressure drop of flow boiling in microchannels

均在 $q_{\text{eff}} = 0.08 \text{ W/mm}^2$ 左右开始进入沸腾阶段。

表面活性剂 SDS 对流动沸腾压降的影响与溶质浓度高度相关。在平直微通道中, 800 mg/kg 溶质浓度的 SDS 水溶液在单相阶段具有最低的压降几乎为 0, 在沸腾阶段则具有最大的压降。以有效热流密度 $q_{\text{eff}} = 0.25 \text{ W/mm}^2$ 时为例, 3 种体积流量下 SDS 水溶液流动沸腾产生的压降分别较纯水提高 64%、37% 及 3%, 可以看出在低体积

流量下表面活性剂的影响更加显著。树形微通道中同样的有效热流密度下 800 mg/kg 溶质浓度的 SDS 水溶液使得压降分别提升 70%、29% 及下降 5.6%, 这与平直微通道中的情况接近, 因此表面活性剂对压降影响的幅度在相同水力直径的微通道中是类似的。值得注意的是, SDS 对压降的影响具有自限性, 即随着体积流量的增加压降变化不显著, 体积流量较低时工质流动产生的压降本

身较低, 而大体积流量时压降增幅不明显, 树形微通道相比平直微通道优势明显。

2.5 沸腾不稳定性

压降波动是描述沸腾不稳定性的关键参数, 在固定有效热流下时长 2 s 的压降波动对比如图 10 所示。图 10(a)与图 10(b)的冷却工质均为纯水, 在体积流量分别为 90 mL/min 和 150 mL/min 时对比了平直微通道与树形微通道的压降波动。可以看出, 90 mL/min 时压降波动幅度显著低于 150 mL/min, 且低体积流量下平直微通道与树形微通道的差异更小。在单相流动阶段, 树形微通道的压降均值高于平直微通道, 这是因为两者水力直径类似的前提下, 树形微通道具有扰流结构, 使得流动阻力有一定的提高。在两相流阶段, 压降情况反转, 平直微通道相比树形微通道体积流量为 90 mL/min 和 150 mL/min 时压降均值分别高 10% 与 17.9%, 原因是平直微通道内两相流体流动并无阻碍, 较易发展成为充分的湍流, 气泡从球形生长为弹状气泡和狭长气泡的过程更加顺利, 这与捕捉的瞬时流态相互吻合, 而气泡的行

为在很大程度上影响了出口的压力, 从而使得平直微通道在沸腾阶段具有更高的压降均值。此外, 从图 10(c)和图 10(d)对比可以看出, 树形微通道的压降波动幅度显著低于平直微通道。一方面, 树形微通道中难以发展成为充分的湍流使得总体压降较小, 另一方面, 树形微通道中明显的二次流和涡旋使得两相流体混合更加均匀, 连续的气液交替前进在分岔结构处遭到破坏, 使得压降波动幅度极小。

表面活性剂 SDS 降低了压降波动的幅度, 原因是 SDS 降低了气液相界面的表面张力, 抑制了气泡之间的合并, 由于细小气泡在流动和破裂时对于压降的影响均小于大气泡, 从而抑制了压降波动的幅度。树形结构对于流体的混合作用与 SDS 对于气液相的混合作用叠加时, 能够最大程度降低微通道的振动幅度, 如图 10(d)所示, 压降波动较小。从这个角度出发, 表面活性剂使用在树形或是其他具有扰流结构的微通道中, 不仅能在单相阶段显著降低流体流动阻力, 在沸腾阶段也不会增加不稳定性。

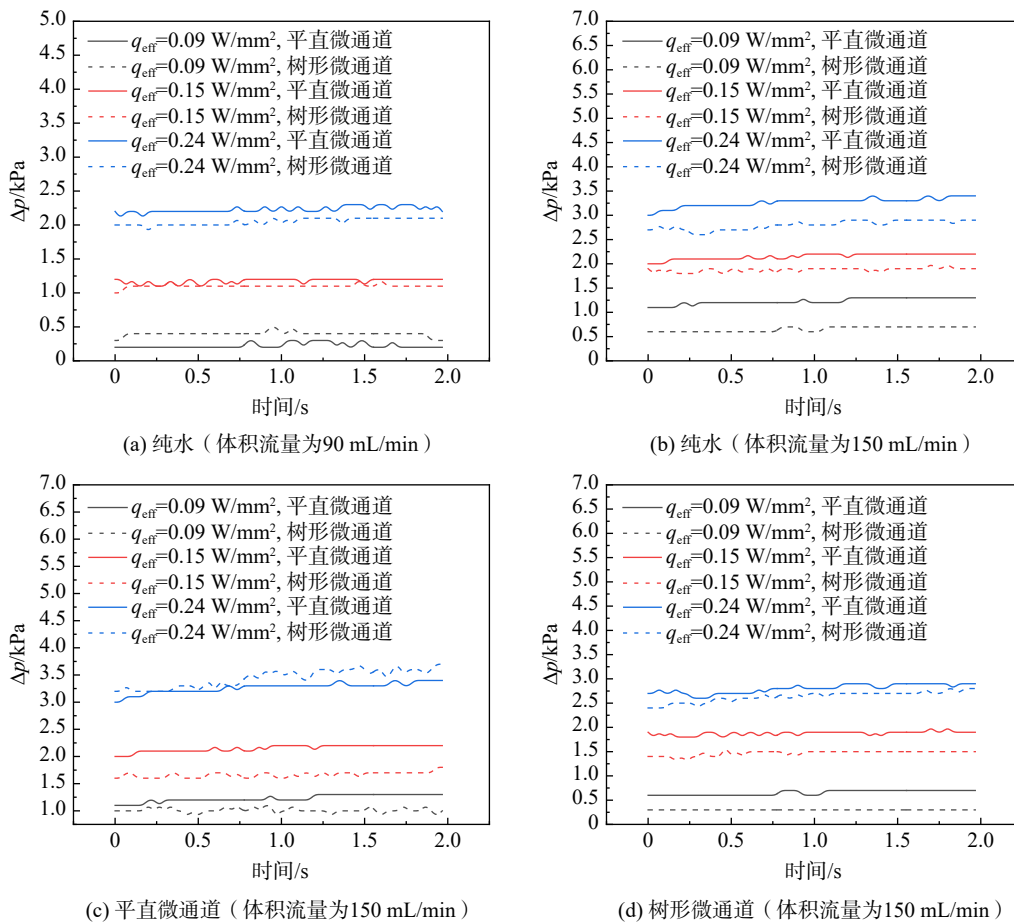


图 10 压降波动对比

Fig. 10 Comparison of pressure drop fluctuations

树形结构与表面活性剂的特性相互契合。树形结构的优点是增强对流,强化气液相混合,延迟了工质从核态沸腾向不稳定膜态沸腾的转变,这能够提升可承受热流密度及传热稳定性。缺点是增加了沿程阻力,而表面活性剂能够降低单相阶段的压降,大体积流量下沸腾阶段的压降增加不明显。此外,表面活性剂还可以抑制沸腾的压降波动幅度。

3 结 论

本实验使用纯水与表面活性剂 SDS 作为工质,研究了表面活性剂对平直和树形微通道中流动沸腾特性的影响规律。得出的主要结论如下:

1) SDS 显著改变了微通道内的瞬时流态,在两种结构微通道中,在过冷沸腾阶段都观察到大量团聚的气泡,成核点显著增加。气泡之间相互黏连,挤压,且作为一个整体一同运动。在饱和沸腾阶段,工质与微通道壁面摩擦产生大量活化气泡,使得工质在微通道中前进的过程伴随着强烈的搅拌与混合,减少了局部干涸的出现。

2) SDS 的加入使得两种结构的沸腾传热系数均有显著的提升。在平直微通道中,400 mg/kg 溶质浓度的 SDS 水溶液传热表现较好,不同体积流量下工质的最大传热系数提升 44.53%,达 $1.5 \times 10^5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。在树形微通道中,200 mg/kg 溶质浓度的 SDS 水溶液能够使工质的最大传热系数提升 42.96%,达 $6 \times 10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

3) 两种结构中均观察到 SDS 有效降低微通道内单相流动时的阻力。沸腾阶段,随着体积流量增大,SDS 对压降的影响持续降低。体积流量为 90 mL/min 时 800 mg/kg 溶质浓度的 SDS 水溶液带来的压降增加达 70%,体积流量为 150 mL/min 时压降的变化小于 6%。此外,SDS 减小了压降波动幅度,树形微通道中使用 SDS 产生的沸腾不稳定性最小。

参考文献:

- [1] Apple Incorporation. Mac Pro Technology Overview[EB/OL]. (2021-08-01) [2022-11-06]https://www.apple.com/mac-pro/pdf/Mac_Pro_White_Paper_Aug_2021.pdf.
- [2] DENG Daxiang, ZENG Long, SUN Wei. A review on flow boiling enhancement and fabrication of enhanced microchannels of microchannel heat sinks[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 175: 121332.
- [3] SADIQUE H, MURTAZA Q. Heat transfer augmentation in microchannel heat sink using secondary flows: a review[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 194: 123063.
- [4] CHENG Xiao, YAO Yuanpeng, WU Huiying. An experimental investigation of flow boiling characteristics in silicon-based groove-wall microchannels with different structural parameters[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 168: 120843.
- [5] LIN Yuhao, LUO Yang, LI Wei, et al. Enhancement of flow boiling heat transfer in microchannel using micro-fin and micro-cavity surfaces[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2021, 179: 121739.
- [6] WANG Jue, SAKASHITA H, LI Fengchen, et al. Heat transfer and CHF in subcooled flow boiling of aqueous surfactant solutions[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 93: 131-138.
- [7] WANG Pingyang, ZHAO Xinglin, LIU Zhenhua. Experimental study on boiling performance of wetting fluids in three-dimensional rectangle microchannels[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2020, 56(9): 2639-2652.
- [8] 罗小平, 彭子哲, 李海燕. 微细通道内表面活性剂对 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{R141b}$ 流动沸腾传热的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 1-8, 155.
- LUO Xiaoping, PENG Zizhe, LI Haiyan. Effects of surfactants on flow boiling heat transfer of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{R141b}$ in microchannels[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(5): 1-8, 155. (in Chinese)
- [9] BHUVA V J, JANI J P, PATEL A, et al. Effect of bubble coalescence on two-phase flow boiling heat transfer in racoon microchannel: a numerical study[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 182: 121943.
- [10] HU Zicheng, LIU Xiaoyuan, WANG Qian. Calculation and analysis of excess adsorption and surface tension of aqueous surfactant solutions under pool boiling conditions[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 185: 122416.
- [11] GUO Dongsheng, LI Xiaobin, ZHANG Hongna, et al. Bubble behaviors during subcooled pool boiling in water and nonionic surfactant aqueous solution[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 159: 120087.
- [12] 胡自成. 表面活性剂水溶液池核沸腾传热强化的研究[D]. 江苏 镇江: 江苏大学, 2012.
- HU Zicheng. Research on nucleate pool boiling heat transfer enhancement of aqueous surfactant solutions[D]. Zhenjiang Jiangsu: Jiangsu University, 2012. (in Chinese)
- [13] 马杰, 孙栗, 李松林, 等. 相变微胶囊悬浮液在树形微通道内的热力特性[J]. 航空动力学报, 2021, 36(12): 2545-2554.
- MA Jie, SUN Li, LI Songlin, et al. Thermal performance of microencapsulated phase change material slurry in treelike microchannels[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2021, 36(12): 2545-2554. (in Chinese)
- [14] 申利梅, 季俊杰, 罗凡, 等. 微通道冷却非均匀热流密度芯片的流动换热特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(6): 1809-1816.
- SHEN Limei, JI Junjie, LUO Fan, et al. Flow and heat transfer characteristics of micro-channel cooling chip at non-uniform heat flux[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(6): 1809-1816. (in Chinese)
- [15] 邱俊城, 李强, 陈雪梅. 微通道过冷流动沸腾汽泡动力学行为研究[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(10): 2665-2671.
- QIU Juncheng, LI Qiang, CHEN Xuemei. Study on the bubble dynamic behavior of subcooled flow boiling in microchannel[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(10): 2665-2671. (in Chinese)

- [16] 梅响, 姚元鹏, 吴慧英. 连通微通道内过冷流动沸腾传热强化机理分析[J]. 化工进展, 2022, 41(6): 2884-2892.
MEI Xiang, YAO Yuanpeng, WU Huiying. Analysis of heat transfer enhancement mechanism on subcooled flow boiling in interconnected microchannels[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(6): 2884-2892. (in Chinese)
- [17] 张子涛, 吴越, 何坤, 等. 微通道内稀乳液流动沸腾换热特性的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(4): 60-70.
ZHANG Zitao, WU Yue, HE Kun, et al. Experimental research on the flow boiling heat transfer characteristic of dilute emulsion in micro-channel[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(4): 60-70. (in Chinese)
- [18] 张宗卫, 郑东生, 张盛辉, 等. R141b 在矩形微尺度通道中的两相流传热特性[J]. 航空动力学报, 2018, 33(8): 1793-1800.
ZHANG Zongwei, ZHENG Dongsheng, ZHANG Shenghui, et al. Two-phase heat transfer characteristics of R141b in rectangular micro-channels[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(8): 1793-1800. (in Chinese)
- [19] 李根, 方贤德, 罗组分, 等. 过载环境下水平管内水的流动沸腾特性[J]. 航空动力学报, 2022, 37(1): 46-54.
LI Gen, FANG Xiande, LUO Zufen, et al. Flow boiling characteristics of water in a horizontal tube under hypergravity environment [J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(1): 46-54. (in Chinese)

(编辑: 王碧琚)