

研究论文

DOI: 10.11949/0438-1157.

异质材料表面对小间隙通道流动沸腾特性的影响

朱禹^{1,2}, 陈鑫源¹, 王世学^{1,2}(¹ 天津大学机械工程学院, 天津 300350; ² 天津大学国家储能技术产教融合创新平台, 天津 300350)

摘要: 在铜基底上沿流动方向平行嵌入多条环氧树脂以构建异质材料表面, 实验研究了常压去离子水在小间隙通道 (长 54 mm、宽 10 mm、高 1 mm) 内该表面上的流动沸腾特性, 并与纯铜表面进行对比。实验工况为质量通量 200 – 400 kg/(m²·s), 入口温度 80°C。结果表明, 通道内依次出现泡状流、搅拌流和环形流, 且在搅拌流早期观察到流动不稳定现象。异质材料表面提前了沸腾起始点, 过冷沸腾和饱和沸腾阶段其传热系数较纯铜表面分别平均提升 60.1% 和 63.8%, 但临界热通量降低 9.6%。异质材料表面因不稳定流动出现压降骤增, 使压降较纯铜表面平均增加 79.5%, 不稳定流动结束后压降较纯铜表面增加 15.8%。

关键词: 异质材料表面; 小间隙通道; 流动沸腾; 气液两相流; 相变; 传热; 压降

中图分类号: TK124; TK172

文献标志码: AA

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-12

Effect of heterogeneous material surface on flow boiling characteristics in mini-gap channels

ZHU Yu^{1,2}, CHEN Xinyuan¹, WANG Shixue^{1,2}

(¹ School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; ² National Industry—Education Platform of Energy Storage (Tianjin University), Tianjin 300350, China)

Abstract: Multiple epoxy resins were embedded in parallel into a copper substrate along the flow direction to construct a heterogeneous material surface. The flow boiling characteristics of deionized water at atmospheric pressure on this surface in a mini-gap channel (54 mm long, 10 mm wide, 1 mm high) were experimentally investigated and compared with a pure copper surface. The experimental conditions were a mass flux of 200 – 400 kg/(m²·s) and an inlet temperature of 80°C. The results show that bubbly flow, churn flow and annular flow appear sequentially in the channel, with flow instability observed in the early churn flow regime. The heterogeneous material surface advances the onset of boiling. Compared with the pure copper surface, the heat transfer coefficient is enhanced by 60.1% and 63.8% on average during the subcooled and saturated boiling regimes, respectively. Meanwhile, the critical heat flux of the heterogeneous material surface is reduced by 9.56%. Due to the occurrence of flow instability, the heterogeneous surface exhibits a sharp increase in pressure drop, resulting in an average increase of 79.5% compared to the pure copper surface. After the instability subsides, the pressure drop remains 15.8% higher than that of the pure copper surface.

Keywords: heterogeneous material surface; mini-gap channel; flow boiling; gas-liquid flow; phase change; heat transfer; pressure drop

收稿日期: 2026-03-31 修回日期: 2026-05-01

通信作者: 王世学 (1964—), 男, 博士, 教授, wangshixue_64@tju.edu.cn

第一作者: 朱禹 (1982—), 男, 博士, 副教授, zhuyu@tju.edu.cn

引用本文: 朱禹, 陈鑫源, 王世学. 异质材料表面对小间隙通道流动沸腾特性的影响[J]. 化工学报, XXXX, XX(X): 1–12

Citation: ZHU Yu, CHEN Xinyuan, WANG Shixue. Effect of heterogeneous material surface on flow boiling characteristics in mini-gap channels[J].

CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1–12

引 言

电子信息领域的不断发展使高热通量表面冷却难题日益凸显^[1-2]。液体冷却通过单相对流或相变传热可实现高效热耗散^[3], 相较风冷更能满足持续增长的散热需求^[4]。为了提升液冷系统的传热性能, 研究者围绕微针翅、空腔、并联式通道等强化结构开展了大量研究^[5-6]。然而, 这些结构在提升传热性能的同时往往会伴随压降增大、泵功消耗增加等问题^[7-8], 导致冷却系统整体能效下降^[9]。2023年全球数据中心用电量已达1760亿千瓦时, 而其中冷却系统的耗能占比高达43%^[10]。基于此背景, 在满足高热通量散热需求的前提下降低系统能耗已成为冷却系统设计与优化的主要目标之一^[11]。

小间隙通道(一般通道高度为毫米级或以下、通道宽高比不小于5^[12])内的流动沸腾是一种高效的传热方式^[13]。其利用液体相变产生的潜热带走热量从而冷却传热面^[14-16], 且小截面积能降低系统所需的流量和泵功^[17]。上述优势使小间隙通道内的流动沸腾更契合当前电子设备冷却系统高效节能的发展趋势^[18-19]。表面改性是一种无需额外输入能量的被动强化技术^[20-21], 可用于提升流动沸腾传热效果^[22]。目前, 国内外学者已针对表面涂层包覆、加工微纳结构及制备亲疏水特性等不同改性方法进行了研究^[23-24]。这些方法虽可通过调控表面微观形态强化传热性能, 但改性表面存在结构强度低、长期使用易降解的风险, 难以保证冷却系统的长期稳定运行^[2]。

为突破表面改性的局限, Rahman等^[25]提出向传热面中嵌入低热导率材料, 构建两种材料交替排列的双热导率表面。该结构可使热流集中于高热导区域, 促进其表面剧烈沸腾, 低导热区则能向高热导区补给液体、抑制干涸。相比普通表面, 该结构将池沸腾临界热通量(critical heat flux, CHF)和传热系数(heat transfer coefficient, HTC)分别提升4倍和1倍^[26]。还有学者^[27]发现双热导率表面使池沸腾HTC提升至76 kW/(m²·K), 增幅达58%。已有研究表明, 双热导率表面基于材料物性差异的强化机理, 在不依赖复杂表面结构的情况下提升了传热性能^[28-29]。

值得注意的是, 这种异质材料交替排布的表面也具备强化小间隙通道流动沸腾传热的潜力。然而, 现有研究主要集中于池沸腾或常规尺寸通道流

动沸腾, 缺乏该结构在小间隙通道内的流动沸腾传热机理研究。首先, 传热面上的热流集中可在高热导区提升局部过热度, 加速沸腾开始, 激活更多气泡成核位点^[30]。同时, 低导热区由于热流阻隔维持低温润湿状态, 可持续向相邻的剧烈沸腾区补充液体, 在高热通量下抑制局部干涸并促进再润湿^[31]。

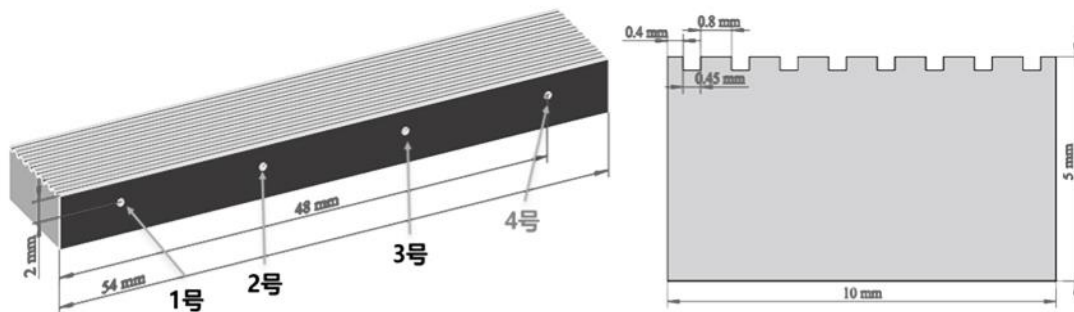
综上所述, 有必要研究异质材料表面对小间隙通道内流动沸腾特性的影响。因此, 本文通过实验研究分析了异质材料表面对小间隙通道内两相流型、传热系数及压降的影响, 并将实验结果与纯铜表面进行对比, 以期高性能、长寿命的流动沸腾强化结构设计提供新的思路。

1 实验系统和方法

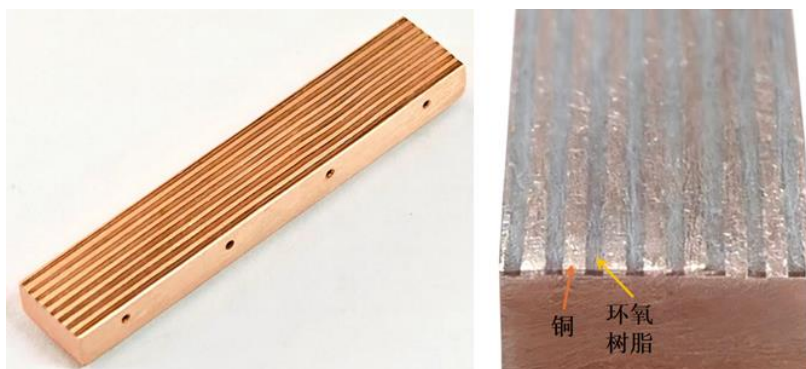
1.1 异质材料表面制备

(1) 采用线切割工艺加工紫铜样品, 将加工完成的样品依次用无水乙醇和去离子水超声清洗15 min, 去除表面的油污及金属碎屑并烘干备用。(2) 按质量配比4:1称取E51环氧树脂与M93固化剂, 倒入烧杯中搅拌10 min直至混合均匀。随即将混合液真空处理15 min排除混合过程引入的气泡, 防止固化后形成气孔影响结构。(3) 将环氧树脂缓慢浇注至铜表面的凹槽内, 确保树脂完全填充凹槽且无溢出。浇注完成后, 将样品置于加热炉上恒温100℃固化20 min。(4) 对固化后的样品依次用50#和2000#砂纸打磨, 去除多余环氧树脂, 直至铜面完全露出且表面平整。将样品再次使用无水乙醇和去离子水超声清洗15 min, 烘干后得到如图1(b)所示的异质材料表面样品。

异质材料表面的结构设计主要考虑环氧树脂与铜的排布方式及尺寸。液体向汽化核心的及时补给是调控沸腾传热的重要因素^[32], 补给不足会导致传热恶化。相较垂直于流动方向的排布方式, 沿流动方向嵌入更能抑制气泡横向聚并和强化液体补给。此外, 嵌入低导热材料的宽度与深度影响传热性能^[25,33]。若宽度不足250 μm难以在传热面形成稳定的温度梯度, 若超过500 μm会过度压缩有效传热区域。而深度超过500 μm会增加热阻, 削弱传热性能^[27]。同时, 两种材料条带数目相同的等周期排列可使表面形成稳定、均匀的温度差分布^[27]。因此, 本文在10 mm宽的表面上以0.8 mm的间距加工了8个0.45 mm宽、0.3 mm深的微槽, 其结构如图1(a)所



(a) 示意图



(b) 实物图

图1 异质材料表面

Fig.1 Heterogeneous material surface

示,尺寸参数见表1。

表1 异质材料表面尺寸参数

Table 1 Size parameters of heterogeneous material surface

尺寸/mm	数值	尺寸/mm	数值
通道长度 L	54	槽间距 W_p	0.8
通道宽度 W	10	槽宽度 W_g	0.45
通道高度 H	1	槽深度 d	0.3

E51 环氧树脂是一种双酚 A 型环氧树脂,固化后硬度高、化学稳定性优异,可承受通道内流体的高速冲刷,且与铜基体黏结性良好。该树脂热导率仅 $0.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,与实验所用铜基热沉形成三个数量级的热导率差异。同时,该树脂最高耐温可达 220°C ,适配本实验的工况要求,因此选用其作为嵌入材料。图2展示了不同材料表面的接触角对比。铜表面的接触角约为 61.3° ,环氧树脂表面的接触角约为 45.8° ,均表现为亲水性。

1.2 实验装置

图3是实验装置示意图,本研究以去离子水为工质。先将去离子水在储水罐中煮沸 1 h 以上,并在此后的实验中全程保持沸腾,以脱除不凝性气



图2 不同表面接触角对比

Fig.2 Comparison of contact angles of different surfaces

体。经过滤器除杂后的去离子水由泵驱动,通过恒温水槽调节入口水温,随后进入实验段完成沸腾传热,最终经冷凝管流回储水罐。温度、压降、体积流量等参数均由对应设备测量,并通过数据采集装置传输至电脑。高速相机布置在实验段上方,以每秒 7000 帧的拍摄速度记录通道内的流型。实验工况为入口温度 $T_{in}=80^\circ\text{C}$,质量通量 $G=200 - 400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,实验装置的详细结构见本课题组前期研究^[34]。

图4是实验段的分解图,自上而下依次为不锈钢板、聚四氟乙烯盖板、玻璃盖板、O 型圈、PEEK (poly-ether-ether-ketone, 聚醚醚酮)板、铜基体及加热棒。PEEK 板与铜基体间采用室温硫化有机硅胶密封,玻璃盖板与 PEEK 板间通过 O 型圈密封,防止实验过程中出现流体泄漏。在距传热面 $D=2 \text{ mm}$ 的孔中(1,2,3,4号)插入四根 K 型热电偶,测温值用于计算传热面温度,热电偶具体位置标注见图 1(a)。

其中,4号位置接近通道出口,流动沸腾发展更加充分,故本文计算采用该处数据。图5是通道沿流动方向的截面示意图,其中通道高度 $H=1\text{ mm}$ 。

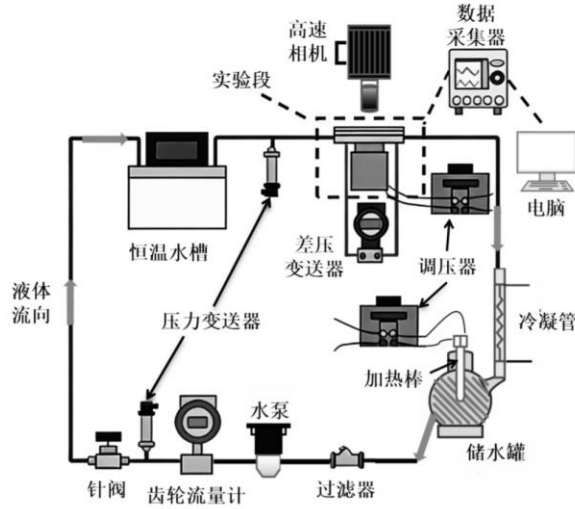


图3 实验装置示意图

Fig.3 Experimental device schematic diagram

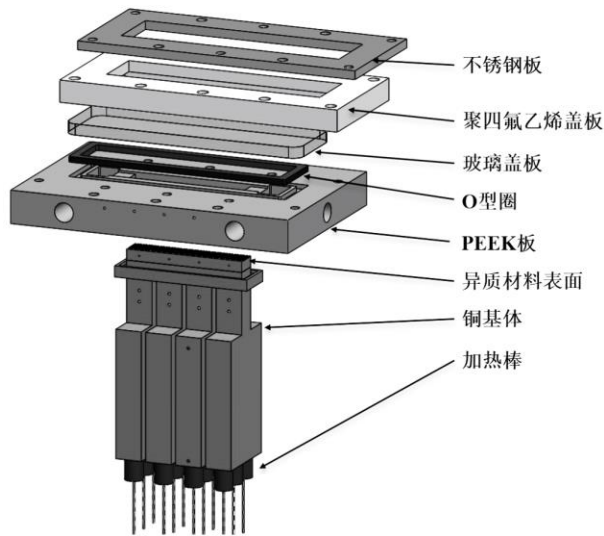


图4 实验段分解图

Fig.4 Exploded view of experiment tal section

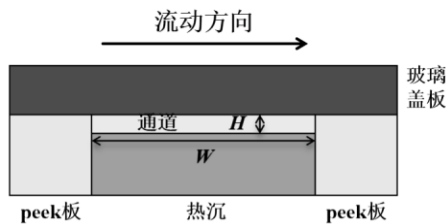


图5 通道截面示意图

Fig.5 Schematic diagram of channel section

1.3 数据处理

(1)质量流量 G

$$G = \rho \frac{V}{WH} \quad (1)$$

式中, G 是质量流量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; V 是实验中测得的体积流量, m^3/s ; W 是通道宽度, m ; H 是通道高度, m ; ρ 是工质密度, kg/m^3 。

(2)有效热流量 q_{eff}

$$q_{\text{eff}} = \frac{Q - Q_{\text{loss}}}{A_b} = \frac{Q - Q_{\text{loss}}}{WL} \quad (2)$$

式中, q_{eff} 是有效热流量, W/m^2 ; Q 是加热量(等于加热棒的总功率), W ; Q_{loss} 是实验段损失的热量, W ; A_b 是热沉底面面积, m^2 ; L 是通道长度, m 。

(3)传热面温度 T_w

$$T_w = T_{\text{tc}} - \frac{q_{\text{eff}} D}{\lambda_{\text{Cu}}} \quad (3)$$

式中, T_w 是4号位置对应上方传热面的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{tc} 是4号位置热电偶测量的温度, $^{\circ}\text{C}$; D 是热电偶测温点距传热面的垂直距离, m ; λ_{Cu} 是铜的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

(4)主流流体温度 T_f

$$T_f = \begin{cases} T_{\text{in}} + \frac{q_{\text{eff}} W l}{\rho V c_p} & (x < 0) \\ T_{\text{sat}} & (x \geq 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$x = \frac{q_{\text{eff}} W l - \rho V c_p (T_{\text{sat}} - T_{\text{in}})}{\rho V h_{\text{fg}}} \quad (5)$$

式中, T_f 是4号位置对应上方的流体温度, $^{\circ}\text{C}$; T_{in} 是入口温度, $^{\circ}\text{C}$; l 是4号位置距实验段入口的水平距离(本研究中为 0.048 m), m ; x 是4号位置对应的干度; h_{fg} 是工质的汽化潜热, J/kg ; c_p 是工质的定压比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; T_{sat} 是4号位置对应上方的流体饱和温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

(5)壁面过热度 ΔT

$$\Delta T = T_w - T_{\text{sat}} \quad (6)$$

式中, ΔT 是壁面过热度, $^{\circ}\text{C}$ 。

(6)传热系数 h

$$h = \frac{Q_{\text{total}} - Q_{\text{loss}}}{(T_w - T_f) A_h} = \frac{q_{\text{eff}}}{T_w - T_f} \quad (7)$$

式中, h 是传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; A_h 是热沉传热面积(本研究中 $A_h = A_b$), m^2 。

(7)压降 Δp

实验系统中的压降由差压变送器与实验通道相连测得,测量数据与预测结果在 $\pm 15\%$ 以内吻合良好。

本实验中参数不确定度的详细方法和数据处理过程见文献^[34],实验参数的最大相对不确定度见表2。

表2 参数最大相对不确定度

Table 2 Maximum relative uncertainties of parameters

参数	最大相对不确定度/%	参数	最大相对不确定度/%
L	0.02	Q	6.97
W	0.03	p_{in}	3.02
H	1.20	Δp	6.75
T	0.1	q_{eff}	3.71
h	15.31	T_w	0.56

2 结果和讨论

2.1 两相流型随热通量的变化

图5展示了实验中观察到的三种两相流型:泡状流、搅拌流和环形流。过冷水流入通道后,上游的流型以单相流或泡状流为主。气相主要在下流聚集并逐步发展演变为各种两相流型,故对流型的分析重点针对通道下游区域。

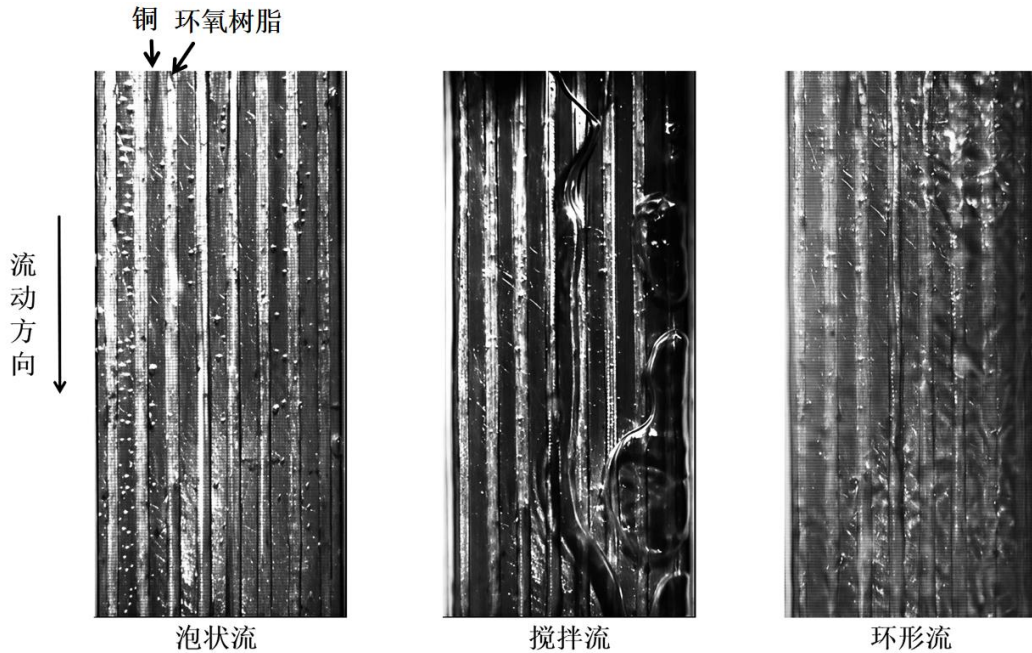
图5 $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{in}=80^\circ\text{C}$ 工况下,通道内的三种流型Fig.5 Three flow patterns in channels at $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $T_{in}=80^\circ\text{C}$

图6展示了 $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{in}=80^\circ\text{C}$ 工况下,通道内泡状流随热通量增加的变化。在 $5.9 - 19.9 \text{ W}/\text{cm}^2$ 范围内,通道内呈现出的流型为泡状流。气泡主要在高热流的铜区域边界处成核,而环氧树脂区域未发现气泡生成。 $5.9 \text{ W}/\text{cm}^2$ 时气泡仅零星分布于铜表面,成核频率低。热通量提升至 $9.6 \text{ W}/\text{cm}^2$,铜区的气泡数量增加、尺寸逐渐增大。 $12.8 \text{ W}/\text{cm}^2$ 时,铜表面有大量气泡密集生成,两侧壁面上气泡开始发生合并。此过程中气相分布由稀疏离散变得聚集,部分气泡会脱离壁面,向出口方向运动一段距离后因流体过冷而破裂。

图7展示了 $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{in}=80^\circ\text{C}$ 工况下,通道内搅拌流随热通量增加的变化。在 $19.9 - 70.4 \text{ W}/\text{cm}^2$ 范围内,通道内呈现出的流型为搅拌流。 $41.6 \text{ W}/\text{cm}^2$ 时,两侧存在未发生合并的大气泡,此时能观察到明显的液桥。热通量提升至 $56.1 \text{ W}/\text{cm}^2$,中间区域的液相中气泡大量、剧烈生成,两侧发生

大面积气相聚并,气液两相的碰撞频率增加。 $70.4 \text{ W}/\text{cm}^2$ 时,气相几乎占据整个通道,仅存的少量液体中仍有气泡生成。

图8展示了 $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{in}=80^\circ\text{C}$ 、 $q_{eff}=99.1 \text{ W}/\text{cm}^2$ 工况下,通道内出现的周期性环形流。 0 ms 时通道内气液两相剧烈碰撞,并出现浪花状的边界,液膜沿壁面呈不规则波纹状。随着时间推移至 15.46 ms ,液膜沿壁面形成更规整的环形结构,气液界面波动减弱,流动趋于稳定。至 31.98 ms 时通道内出现完全发展的环形流形态,连续液膜紧贴于壁面,其表面出现均匀的水纹波动,气液两相分布稳定。这种稳定的液膜持续至 45.98 ms ,该过程中始终未观察到液桥存在,随后液膜被来流液体打碎并冲刷离开。

图9展示了 $T_{in}=80^\circ\text{C}$ 时不同质量通量下异质材料表面通道内的流型分布。随着热通量升高,流型依次过渡为泡状流、搅拌流、环形流。质量通量为

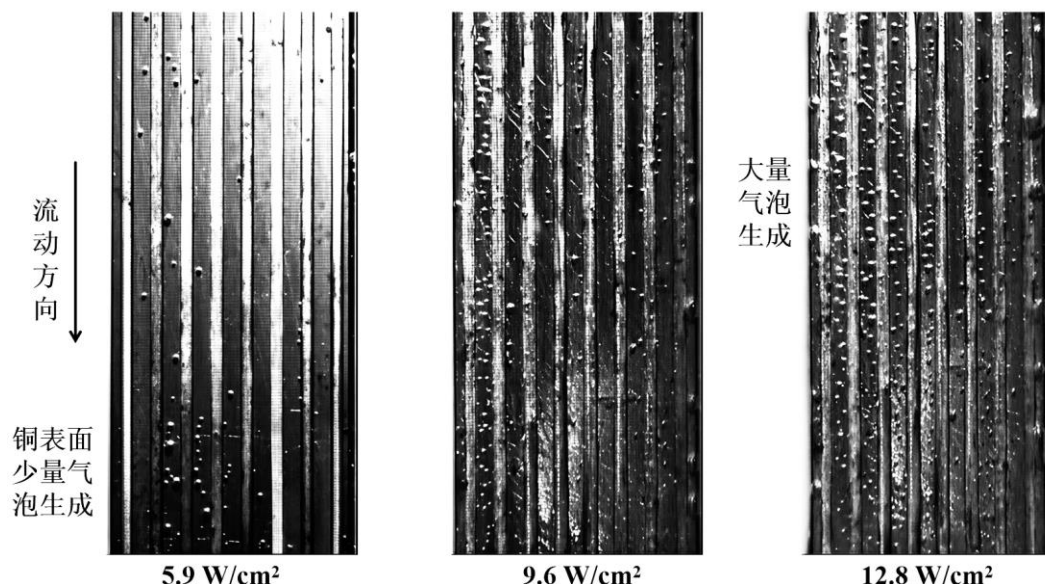


图6 $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$ 工况下,通道内的泡状流随热通量增加的变化

Fig.6 Evolution of bubbly flow in channels with increasing heat flux at $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$

200 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时泡状流、搅拌流和环形流的转变节点分别为 5.9、27.3、77.2 W/cm^2 , 400 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时泡状流、搅拌流和环形流转变的节点分别为 9.6、34.5、106.2 W/cm^2 , 表明质量通量增大推迟了流型的转变。搅拌流初期伴随明显的流动不稳定现象, 随着流体温度升高, 气相冷凝现象不断减弱直至消失,

不稳定流动随之结束。质量通量为 200 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时不稳定流动持续范围为 27.3 – 34.5 W/cm^2 , 400 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时不稳定流动持续范围为 34.5 – 56.1 W/cm^2 。结果表明, 更高的质量通量虽延缓了不稳定流动的出现, 但却扩大了其对应的热通量范围。

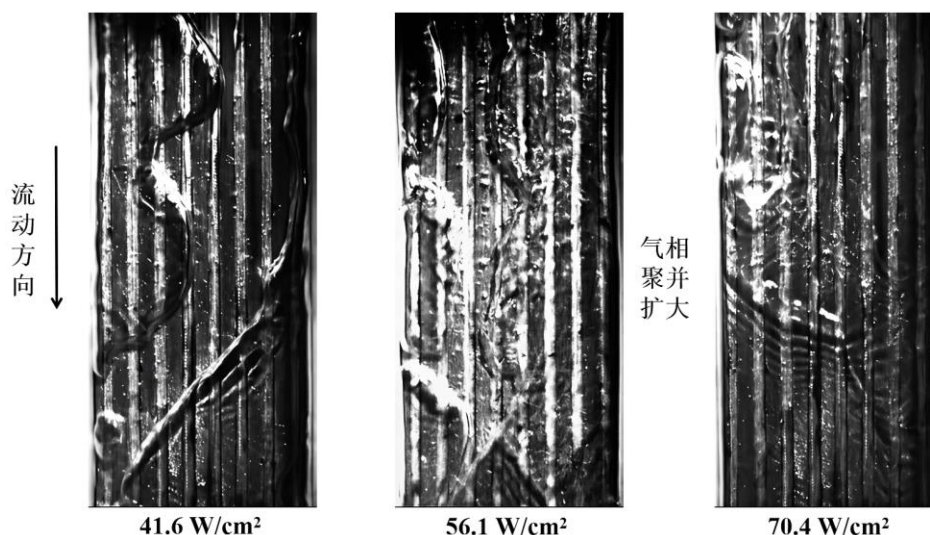


图7 $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$ 工况下,通道内的搅拌流随热通量增加的变化

Fig.7 Evolution of churn flow in channels with increasing heat flux at $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$

图10展示了 $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$ 、 $q_{\text{eff}}=27.3 \text{ W}/\text{cm}^2$ 工况下, 通道内出现的流动不稳定现象。0 ms 时存在一个呈不规则形态附着于壁面的气泡, 其随时间推移逐渐向下游扩展。36.95 ms 时该气泡已占据通道内大部分空间, 直至 76.03 ms 才被来流液

体冲刷脱离壁面。此过程中, 液体的流速下降甚至流动停滞。图11展示了 $G=400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$ 、 $q_{\text{eff}}=48.7 \text{ W}/\text{cm}^2$ 工况下, 通道内出现的流动不稳定现象。0 ms 时通道内发生明显的局部回流现象, 流体携带气泡沿流动方向逆向移动。1.98 ms 时回流区

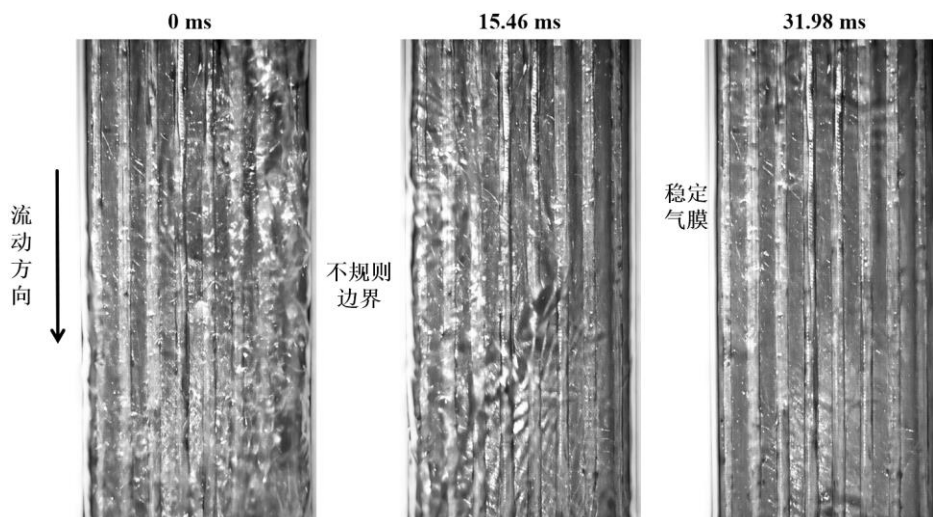


图8 $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$ 、 $q_{\text{eff}}=99.1 \text{ W}/\text{cm}^2$ 工况下,通道内的周期性环形流

Fig.8 Periodic annular flow in channels at $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$, $q_{\text{eff}}=99.1 \text{ W}/\text{cm}^2$

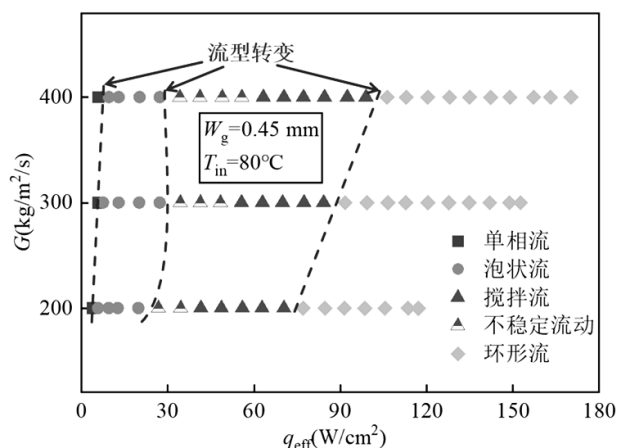


图9 $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$ 时不同质量通量下通道内的流型分布

Fig.9 Flow pattern distributions in channels under different mass fluxes at $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$

域向上游迁移,气泡与液体碰撞后形成涡旋结构,气液界面卷曲变形。3.99 ms时涡旋形态进一步发展,逆向流动的范围逐步扩大。200 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时流动不稳定性表现为气泡缓慢生长直至堵塞通道,使流动短暂停滞;400 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时表现为部分液体迅速回流,与气泡碰撞形成涡旋。结果表明,更高的质量通量延缓了触发失稳的节点,但也使失稳时的现象更剧烈。

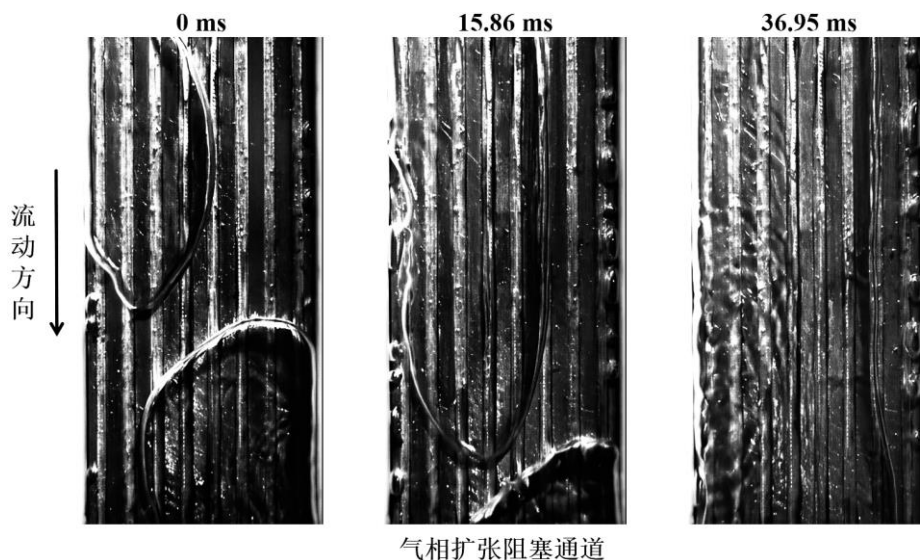
2.2 异质材料表面对传热特性的影响

为更直观地展现异质材料表面对流动沸腾特性的影响,将实验数据与本组前期研究的纯铜表面数据^[17]进行对比。图12展示了 $G=400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$ 工况下,纯铜表面和异质材料表面的沸腾曲线。实验中沸腾起始点 (onset of boiling, ONB) 主要依据

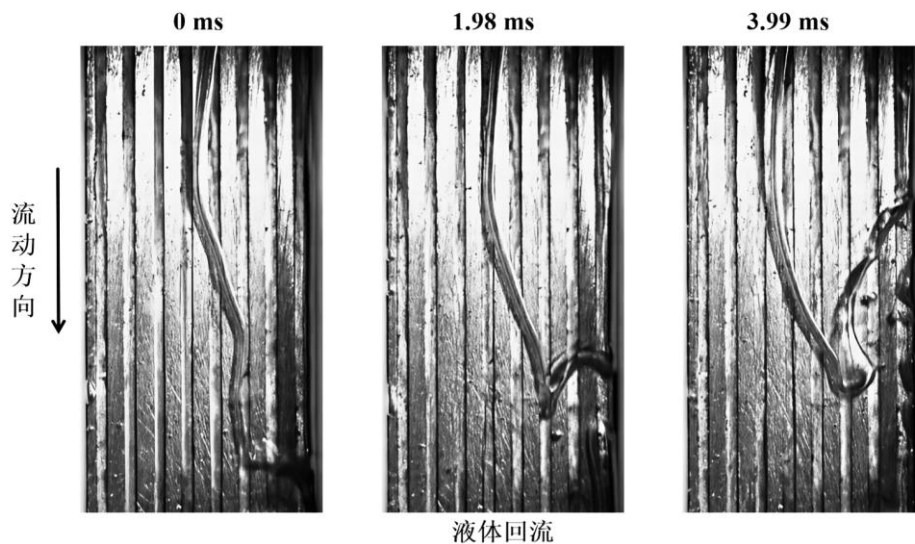
高速可视化图像进行判断,以通道内首次出现可稳定观测的成核气泡为准,并结合沸腾曲线中壁面过热度的明显斜率变化确认。纯铜表面和异质材料表面 ONB 点对应的热通量分别为 $36.8 \text{ W}/\text{cm}^2$ 和 $9.6 \text{ W}/\text{cm}^2$,异质材料表面使沸腾起始点提前。这一现象主要源于异质材料表面的热流被低热导率的环氧树脂区域阻隔,从而集中流向高热导率的铜区域。相比纯铜表面,异质材料表面上铜区域的局部热通量更高,使壁面过热度增加,进而提前触发核态沸腾。

图13展示了 $G=400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$ 工况下,纯铜表面和异质材料表面的传热系数曲线。过冷沸腾阶段,异质材料表面的 HTC 较纯铜表面平均提升约 60.1%,其 HTC 的提升速率高于纯铜表面且逐渐增大。这是由于过冷沸腾传热主要受气泡的成核、生长与脱离速率影响,而异质材料表面的热流集中特性使铜区成为气泡的高效成核区。如图14(a)所示,气泡的密集成核促进了泡状流的充分发展,并加速了流型向搅拌流的转变。

进入搅拌流阶段,HTC的增速进一步提高。如图14(b)所示,异质材料表面的环氧树脂区存在热流阻隔,可维持稳定的液体补给。该特性抑制了气相在通道内大面积聚并,避免其阻碍传热,保障铜区持续沸腾。随着热通量升高,热流集中增强,传热面上沿垂直于流动方向形成均匀的温度梯度随之扩大。气泡的成核、生长与脱离过程更频繁,促进了泡状流和搅拌流的发展,从而强化过冷沸腾传热效果。



气相扩张阻塞通道

图 10 $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$ 、 $q_{\text{eff}}=27.3 \text{ W}/\text{cm}^2$ 工况下,通道内出现的流动不稳定现象Fig.10 Flow instability phenomena occurring in channels at $G=200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$, $q_{\text{eff}}=27.3 \text{ W}/\text{cm}^2$ 

液体回流

图 11 $G=400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$ 、 $q_{\text{eff}}=48.7 \text{ W}/\text{cm}^2$ 工况下,通道内出现的流动不稳定现象Fig.11 Flow instability phenomena occurring in channels at $G=400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$, $q_{\text{eff}}=48.7 \text{ W}/\text{cm}^2$

本文通过计算通道内工质干度来判断流动状态,并以干度是否大于0作为进入饱和沸腾的判据。饱和沸腾阶段,异质材料表面的 HTC 仍高于纯铜表面,平均提升约 63.8%,但两种表面 HTC 的增速均明显放缓。随着热通量升高,通道内流型由搅拌流向环形流转变。如图 14(c)所示,气相占据通道内的大部分空间,壁面逐渐被液膜覆盖,核态沸腾受到抑制,液膜在传热面上的薄厚分布不均匀。铜区的液膜较薄甚至局部破裂,而环氧树脂区的液膜相对较厚,可作为液体补给通道。尽管异质材料表面仍可通过自身机制维持较高的传热系数,但基于核态沸腾的强化作用对传热贡献减弱。此阶段两者的传

热机制均由核态沸腾主导转变为气液两相对流传热主导,即通过提高流速增强气液界面扰动强化传热。然而,该机制的强化效率低于核态沸腾,导致传热系数的增速减缓。

纯铜表面和异质材料表面的 CHF 分别为 $188.2 \text{ W}/\text{cm}^2$ 和 $170.2 \text{ W}/\text{cm}^2$,异质材料表面使 CHF 降低 9.6%。饱和沸腾阶段,异质材料表面的热流仍持续向铜区集中,而环氧树脂区的热阻隔作用限制了热量的横向传递,使铜区热量无法快速向周围散失。这种导热特性在不同沸腾阶段中均存在,但在高热通量条件下表现更明显。同时,高热通量下液体汽化速度加快,液相占比逐渐降低,难以维持对高温

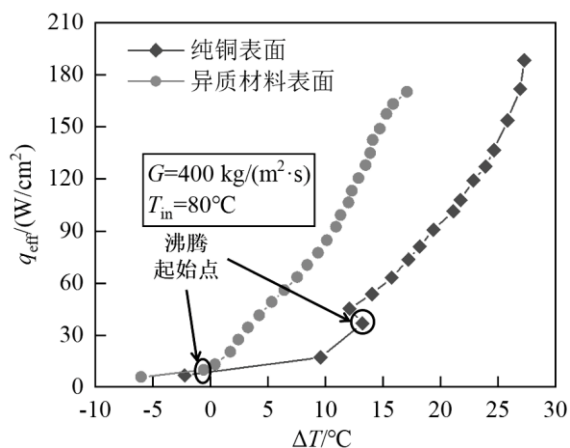


图12 $G=400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$ 工况下,纯铜表面和异质材料表面的沸腾曲线

Fig.12 Boiling curves of pure copper surface and heterogeneous material surface at $G=400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$

区域的有效润湿。如图14(d)所示,铜区域液膜过早蒸发,传热面被气相覆盖而恶化传热。壁面温度因热量积聚在铜区快速升高,不仅导致临界热通量提

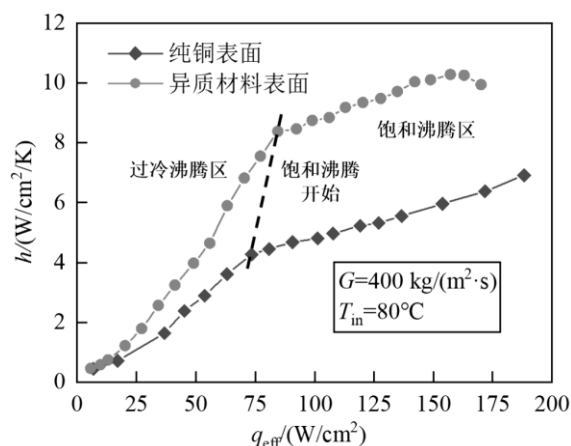


图13 $G=400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$ 工况下,纯铜表面和异质材料表面的传热系数曲线

Fig.13 Heat transfer coefficient curves of pure copper surface and heterogeneous material surface at $G=400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$

前触发,还使得接近临界热通量时传热系数下降。

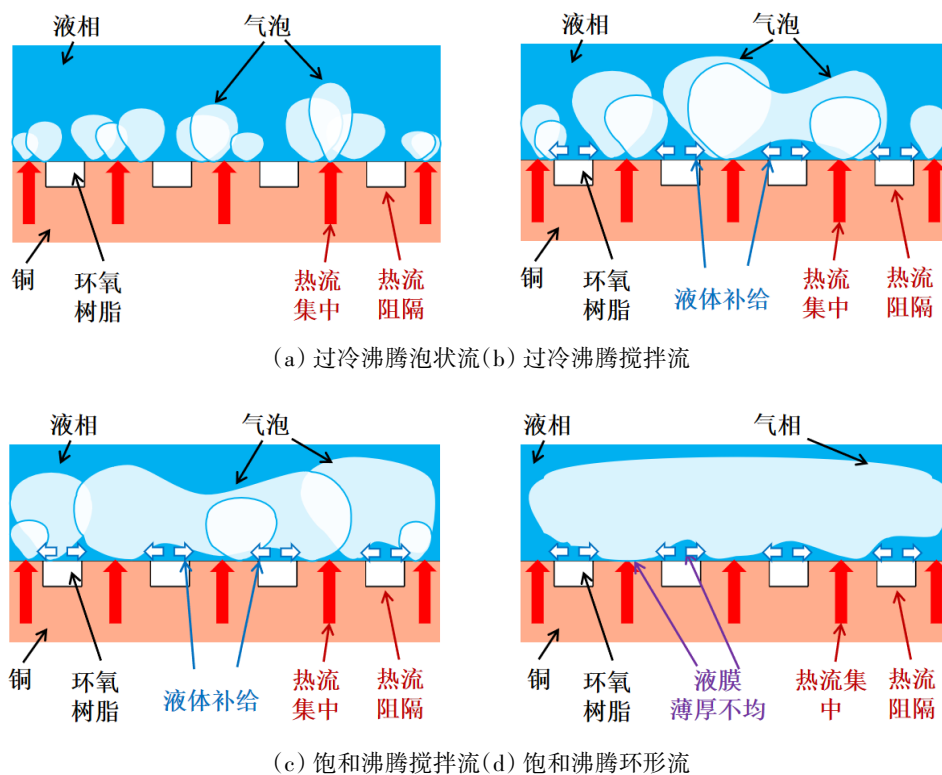


图14 异质材料表面通道内的气泡行为示意图

Fig.14 Bubble behavior schematic in channels with heterogeneous material surface

2.3 异质材料表面对压降特性的影响

图15展示了 $G=400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$ 工况下,纯铜表面和异质材料表面的压降随热通量增加的

变化。低热通量阶段,通道内以单相流和泡状流为主。因更早开始沸腾且核态沸腾更充分,异质材料表面的压降略高于纯铜表面。随着热通量升高,两

种表面均出现压降骤增,此阶段异质材料表面使压降增加 79.5%。本实验中的压降损失主要源自于沿程摩擦阻力^[34],流动不稳定性引起的通道内摩擦阻力增大导致了压降骤增。高热通量阶段,两种表面通道内逐渐发展为气相主导的两相流。壁面与流体、气液两相界面间的摩擦阻力提升,压降随热通量升高而增加。由于二者均使用无附加结构的空通道,整体摩擦阻力的水平相近,异质材料表面使压降仅增加 15.8%。

图 16 展示了 $G=400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$ 、 $q_{\text{eff}}=48.7 \text{ W}/\text{cm}^2$ 时,纯铜表面和异质材料表面 2 分钟内入口压力随时间的变化,异质材料表面的入口压力震荡幅度更大。如图 9、10 所示,异质材料表面通道内的气相短时间内大量积聚,导致气泡堵塞通道更频繁、持续时间更长,引起了更强的流动不稳定性,导致通道内流动阻力增加。为维持恒定质量通量,入口处需提供更高压力以克服流动阻力,最终导致入口压力短时间内大幅波动。

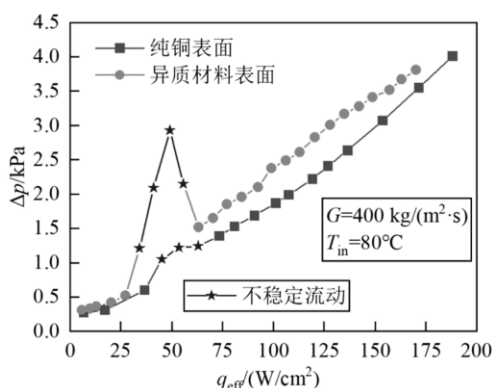


图 15 $G=400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$ 工况下,纯铜表面和异质材料表面的压降随热通量增加的变化

Fig.15 Variation of pressure drop on pure copper surface and heterogeneous material surface with increasing heat flux at $G=400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$

3 结 论

本文以入口温度 80°C 、质量通量 $200 - 400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的常压去离子水为工质,实验研究了异质材料表面对小间隙通道流动沸腾的两相流型、传热特性和压降特性的影响,并与纯铜表面对比分析,主要结论如下:

(1) 实验过程中,观察到通道内的流型随热通量升高依次出现泡状流、搅拌流和环形流,搅拌流早期出现了流动不稳定现象。质量通量增大会议

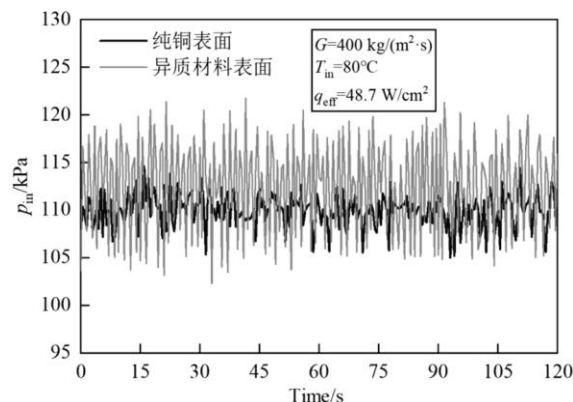


图 16 $G=400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$ 、 $q_{\text{eff}}=48.7 \text{ W}/\text{cm}^2$ 时,纯铜表面和异质材料表面 2 分钟内入口压力随时间的变化

Fig.16 Inlet pressure variation on pure copper surface and heterogeneous material surface with time in 2 minutes at $G=400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $T_{\text{in}}=80^\circ\text{C}$, $q_{\text{eff}}=48.7 \text{ W}/\text{cm}^2$

缓流型的发展过程,加剧不稳定流动并扩大其对应的热通量区间。异质材料表面在搅拌流阶段出现的气相积聚、堵塞现象更频繁,流动不稳定性更明显。

(2) 异质材料表面通过热流集中使气泡成核所需的热通量由 $36.8 \text{ W}/\text{cm}^2$ 降至 $9.6 \text{ W}/\text{cm}^2$,提前了 ONB。过冷沸腾阶段其 HTC 较纯铜表面平均提升 60.1% 且提升速率逐渐增大,饱和沸腾阶段 HTC 平均提升 63.8% 但增速放缓。同时,异质材料表面的 CHF 降至 $170.2 \text{ W}/\text{cm}^2$,较纯铜表面降低 9.6%。

(3) 低热通量下,异质材料表面的压降略高于纯铜表面。随后两种表面均因不稳定流动引起的阻力升高出现压降骤增,此阶段异质材料表面使压降平均增加 79.5%。高热通量下,两种表面的压降随热通量升高而增加,异质材料表面使压降仅平均增加 15.8%。

(4) 后续研究可聚焦异质材料表面上低导热区域的间距、宽度和深度等排列参数对小间隙通道流动沸腾 HTC、CHF 的影响,进一步提升异质材料表面的传热性能。

符 号 说 明

- A_b ——热沉底面面积, m^2
- A_h ——热沉传热面积, m^2
- c_p ——比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
- D ——热电偶测温点距传热面的垂直距离, m
- d ——环氧树脂槽的深度, m
- G ——质量通量, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- H ——通道高度, m

h ——传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
 h_{fg} ——工质汽化潜热, J/kg
 L ——通道长度, m
 l ——测温点距实验段入口的水平距离, m
 p_{in} ——入口压力, kPa
 Δp ——压降, kPa
 Q ——加热量, W
 Q_{loss} ——实验段损失的热量, W
 q_{eff} ——有效热通量, W/m^2
 T_i, T_{sat} ——分别为流体温度和流体饱和温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_{in} ——入口温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_{tc} ——热电偶测量温度, $^{\circ}\text{C}$
 T_{w} ——传热面温度, $^{\circ}\text{C}$
 ΔT ——壁面过热度, $^{\circ}\text{C}$
 V ——体积流量, m^3/s
 W ——通道宽度, m
 $W_{\text{g}}, W_{\text{p}}$ ——分别为环氧树脂槽的宽度、间距, m
 x ——干度
 λ_{Cu} ——铜的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
 ρ ——密度, kg/m^3

下角标

Cu ——铜
 eff ——有效的
 f ——流体
 fg ——流体与气体
 g ——槽
 h ——传热
 in ——入口
 loss ——损失
 p ——间距
 sat ——饱和状态
 tc ——热电偶
 w ——壁面

参考文献

- [1] Shang H Q, Xia G D, Cheng L X, et al. Comprehensive review of enhancement techniques and mechanisms for flow boiling in micro/mini-channels[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, **258**: 124783.
- [2] Wang K C, Shi Y, Chen J J, et al. A biomimetic microchannel heat sink for enhanced thermal performance in chip cooling[J]. Biomimetics, 2025, **10**(7): 459.
- [3] Parizad Benam B, Sadaghiani A K, Yağcı V, et al. Review on high heat flux flow boiling of refrigerants and water for electronics cooling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, **180**: 121787.
- [4] Chen X G, Hu C D, Liang J, et al. Efficient two-phase liquid cooling and optimization technology on the chip side based on high-power data centers: Summary and prospects[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, **223**: 115994.
- [5] Smakulski P, Pietrowicz S. A review of the capabilities of high heat flux removal by porous materials, microchannels and spray cooling techniques[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, **104**: 636–646.
- [6] Zhao G, Wang X L, Negnevitsky M, et al. An up-to-date review on the design improvement and optimization of the liquid-cooling battery thermal management system for electric vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, **219**: 119626.
- [7] Alberti G, Alvino A, Ambrosi G, et al. Active CO_2 two-phase loops for the AMS-02 tracker[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2014, **29**(4): 4–13.
- [8] Deng D X, Zeng L, Sun W. 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.
- [9] Mousa M H, Yang C M, Nawaz K, et al. Review of heat transfer enhancement techniques in two-phase flows for highly efficient and sustainable cooling[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, **155**: 111896.
- [10] 李安香, 张伟, 张开, 等. 双碳目标下数据中心能源计量体系构建方法[J]. 计量科学与技术, 2025, **69**(9): 24–30.
Li A X, Zhang W, Zhang K, et al. Energy measurement system construction method under dual carbon goals[J]. Metrology Science and Technology, 2025, **69**(9): 24–30.
- [11] 徐捷, 吕玉峰, 刁曙豪, 等. "双碳"目标下数据中心绿色发展可行路径研究[J]. 网络安全和信息化, 2023(9): 1–4.
Xu J, Lv Y F, Diao S H, et al. Research on the feasible path of green development of data center the goal of "double carbon"[J]. Cybersecurity & Informatization, 2023(9): 1–4.
- [12] Mohammed H I, Sardari P T, Giddings D. Multiphase flow and boiling heat transfer modelling of nanofluids in horizontal tubes embedded in a metal foam[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, **146**: 106099.
- [13] Fang Y D, Lu D, Yang W L, et al. Saturated flow boiling heat transfer of R1233zd(E) in parallel mini-channels: Experimental study and flow-pattern-based prediction[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, **216**: 124608.
- [14] Asadi M, Xie G N, Sunden B. A review of heat transfer and pressure drop characteristics of single and two-phase microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, **79**: 34–53.
- [15] Hu C Y, Yang X P, Ma Z H, et al. Research on heat transfer and flow distribution of parallel-configured microchannel heat sinks for arrayed chip heat dissipation[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, **255**: 124003.
- [16] Liang G T, Mudawar I. Review of channel flow boiling enhancement by surface modification and instability suppression schemes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, **146**: 118864.
- [17] 朱禹, 李雪, 王世学. 高热通量下高度对微小间隙通道内流动沸腾特性的影响[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2023, **56**(3): 242–251.
Zhu Y, Li X, Wang S X. Effect of channel height on flow boiling characteristics in minigap channels at high heat fluxes[J]. Journal of Tianjin University, 2023, **56**(3): 242–251.
- [18] 孙帅杰, 张程宾. 微通道流动沸腾研究综述[J]. 建筑热能通风空调, 2021, **40**(1): 44–49, 99.

- Sun S J, Zhang C B. Review on flow boiling in microchannels[J]. Building Energy & Environment, 2021, **40**(1):44–49, 99.
- [19] Mudawar I, Kim S, Lee J. A coupled level-set and volume-of-fluid (CLSVOF) method for prediction of microgravity flow boiling with low inlet subcooling on the international space station[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, **217**: 124644.
- [20] Singh S K, Sharma D. Review of pool and flow boiling heat transfer enhancement through surface modification[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, **181**: 122020.
- [21] Dedov A V, Khaziev I A, Laharev D A, et al. Study of Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Enhancement on heating surfaces Modified by Beam Technologies [J]. Heat Transfer Engineering, 2022, **43**(7): 598–607.
- [22] Cao C Y, Cheng J. Fabrication of robust surfaces with special wettability on porous copper substrates for various oil/water separations[J]. Chemical Engineering Journal, 2018, **347**: 585–594.
- [23] Kumar J, Negi S. Effect of additive manufacturing-based surface modification on pool boiling heat transfer: a review[J]. Progress in Additive Manufacturing, 2024, **10**(5): 1–25.
- [24] Chu H Q, Xu N, Yu X Y, et al. Review of surface modification in pool boiling application: Coating manufacturing process and heat transfer enhancement mechanism[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, **215**: 119041.
- [25] Rahman M M, Pollack J, McCarthy M. Increasing boiling heat transfer using low conductivity materials[J]. Scientific Reports, 2015, **5**: 13145.
- [26] Rahman M M, McCarthy M. Boiling enhancement on nanostructured surfaces with engineered variations in wettability and thermal conductivity[J]. Heat Transfer Engineering, 2017, **38** (14): 1285–1295.
- [27] Heidary A, Moghadasi H, Saffari H. Impact of dimensional characteristics of low-conductive channels on the enhancement of pool boiling: An experimental analysis[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, **209**: 106710.
- [28] Utaka Y, Xie T X, Chen Z H, et al. Critical heat flux enhancement in narrow gaps via different-mode-interacting boiling with nonuniform thermal conductance inside heat transfer plate[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, **133**: 702–711.
- [29] Chen Z H, Xie T X, Utaka Y. Enhanced critical heat flux in pool boiling applying the method of different-mode-interacting boiling for water[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, **201**: 123578.
- [30] 宇高義郎, 郭嘉翔, 陈志豪. 微通道流动沸腾过程中异态相干沸腾的强化传热研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2020, **53**(09): 917–923.
- Utaka Y, Guo J X, Chen Z H. Enhanced heat transfer of different-mode-interacting boiling in microchannel flow boiling[J]. Journal of Tianjin University, 2020, **53**(9): 917–923.
- [31] Omisanya M I, Chen Z H, Utaka Y. Enhanced flow boiling heat transfer in narrow gap with different widths using different-mode-interacting boiling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, **226**: 125471.
- [32] Kandlikar S G, Widger T, Kalani A, et al. Enhanced flow boiling over open microchannels with uniform and tapered gap manifolds [J]. Journal of Heat Transfer, 2013, **135**(6).
- [33] Heidary A, Moghadasi H, Saffari H. On the influences of low-conductive channels in the pool boiling amendment: Empirical investigation with providing correlation[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2022, **36**: 101484.
- [34] 李雪. 高热通量下微小间隙通道内的流动沸腾特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
- Li X. Flow boiling characteristics in micro/mini channels with high heat flux surface[D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.