

两相流动中单气泡尺度实时电流测量法

戴逸航¹ 何嘉诚^{1,2} 陈颖^{1,2}

(1 广东工业大学材料与能源学院 广州 510006; 2 广东省功能软凝聚态物质重点实验室 广州 510006)

摘要 针对柔性电子热管理中两相换热器微通道内气泡生长特性难以可视化测量的问题,本文提出一种基于气液电导差异的单气泡尺度实时电流测量方法(简称RTECM法),结合单气泡在微通道中经历膨胀、延展和逃逸3个过程的可视化演变特性,建立了从电阻推导出气泡横截面尺度与长度的理论方法,二者最大偏差为13.4%。进一步将RTECM法与传统可视化直接测量法进行了对比,发现RTECM法拥有敏感的电流分辨率(10^{-11} A),可克服高速摄像机分辨率和帧速率有限的不足。RTECM法可通过电流的微小变化探测气泡起始尺寸、气泡在微通道中膨胀的最大尺度以及气泡逃逸速率。最后对通道结构尺寸与溶液电导率等参数进行了敏感性分析。

关键词 微通道两相流;气泡尺度;电流变化;实时测量;敏感性分析

中图分类号:TK124;TK313

文献标识码:A

Real-Time Electrical Current Measurement Method for Single-Bubble Scale Analysis in Two-Phase Flow

Dai Yihang¹ He Jiacheng^{1,2} Chen Ying^{1,2}

(1. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Functional Soft Condensed Matter, Guangzhou 510006, China)

Abstract To address the challenges associated with visualizing and measuring bubble growth characteristics in the microchannels of two-phase heat exchangers used for flexible electronic thermal management, this study proposes a real-time electrical current measurement method (RTECM) based on the electrical conductivity differences between gas and liquid at the single-bubble scale. Using the visualized variation characteristics of a single bubble in a microchannel undergoing three processes (expansion, elongation, and escape), a theoretical method was established for deriving the cross-sectional scale and length of the bubble from electrical resistance. The theoretical calculations showed good agreement with the experimental data, with a maximum deviation of 13.4%. Moreover, the RTECM method outperformed the visualization measurement method. The measurement results of the two methods were in good agreement. The results further showed that the RTECM method possesses a high current resolution (10^{-11} A), overcoming the limitations of high-speed CCD in terms of resolution and shooting angle. By capturing minor changes in electrical current, the minimum bubble size, maximum bubble expansion size, and escape speed in the channel can be measured. Finally, a sensitivity analysis was conducted to evaluate the effects of channel structural dimensions and solution electrical conductivity.

Keywords two-phase flow in microchannel; bubble size; electrical current variation; real-time measurement; sensitivity analysis

随着5G、人工智能、新能源汽车等产业快速迭代,电子器件向高集成度、高功率密度方向发展,芯片发热量激增,散热效率已成为制约设备性能、寿命与小型化的核心因素,高端处理器满载热流密度已突破 $1\ 000\ \text{W}/\text{cm}^2$,高效散热技术需求迫切^[1-2]。

传统金属基散热模组虽导热系数优异,但存在诸多固有缺陷:与水-乙二醇冷却液长期接触易发生电化学腐蚀^[3];金属是良导体,需额外铺设绝缘层,既增厚又引入热阻^[4];金属材料在异形结构制备与复杂场景适配方面受加工工艺限制,难以兼顾轻量化

收稿日期:2026-04-02;修回日期:2026-04-15;录用日期:2026-04-16

责任编辑:田甜

基金项目:国家自然科学基金(52436003)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52436003).)



移动阅读

与结构自由度^[5]。相比之下,高分子材料凭借其优异的化学稳定性、绝缘性、轻量化及设计灵活性等优势,逐渐成为电子散热领域的重要研究方向。已有研究表明,掺杂定向氮化硼纳米片的先进聚合物纳米复合材料导热系数达 $16.3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,击穿强度最高为 $432 \text{ kV}/\text{mm}$,兼具优异绝缘性与柔韧性,已在电源热管理等应用中受到关注^[4];以聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)材料制成的脉动热管展示了较好的传热性能^[6];采用PDMS为基底的创新蛇形换热器具易模塑、透明、可直接贴合冷却面的优势,较铜基蛇形换热器降温 17% ^[7]。

随着电子设备功率日益增长,流动沸腾传热具有更高的换热能力,被视为下一代高功率电子热管理的理想途径^[8]。流动沸腾传热的性能与气泡动力学行为密切相关,准确测量微通道内气泡的尺寸、频率与空泡份额是计算流动沸腾传热系数、构建精确两相传热模型的关键^[9-10]。传统两相传热模型通常依托气液两相相互作用的机理分析并引入经验关联式,但微通道内流型转变频繁、界面行为高度非线性,导致模型一般对工质性质与几何尺度较为敏感,跨结构、跨工况的适用性与可迁移性不足。近年来,数据驱动方法开始被引入沸腾传热研究。Y. Suh等^[11]提出了一种数据驱动的深度神经网络,能够自动提取气泡图像中的多层次视觉特征与物理统计特征(如气泡尺寸、数量、合并行为等),并实时预测沸腾热通量,平均误差仅为 6% 。S. Chang等^[12]提出了一种基于VISION-IT的机器学习辅助框架,从 $30\,000$ 张流动沸腾图像中自动检测并跟踪 $155\,000$ 个气泡,提取包括两相空间统计、界面特征及气泡动力学等物理特征来预测临界热通量,结果显示,在质量流率为 $40 \text{ g}/\text{s}$ 时误差仅为 1% 。采用数据驱动方法获得可靠沸腾传热预测模型的前提是准确的气泡特征数据集,因此,建立一种稳定、可在线获取气泡体积或空泡份额的方法具有重要意义。

现有气泡测量方法主要包括高速摄影法^[13]、扫描电镜法^[14]、激光诱导荧光法^[15]、透明加热元件法^[16]和红外热成像法^[17]等。其中,前3种方法均需要可直接观察气泡的视窗,无法对不透明高分子换热器管内工质的流动沸腾行为进行测量。红外热成像是通过直接测量表面温度来获取热流密度分布信息,进而推测气泡的变化过程,但该方法一般存在时空分辨率不足的问题^[17]。综上所述,亟需一种无需可视化仍可获取气泡动态特性参数的测量方法。

因此,本文提出一种基于气液电导率差异的单气泡尺度实时电流测量方法(a real-time electrical

current measurement method, RTECM):在微通道两端布置电极,通过电化学工作站记录微通道内气泡尺度变化产生的电流值来实时表征气泡尺度。本文结合可视化实验现象,建立了气泡半径与长度的测量原理,考察了工质电导率和微通道特性对测量结果的影响作用,证实了实时电流测量单气泡尺度方法的精准性,该方法无需可视化视窗,具有很高的普适性。

1 单气泡尺度实时电流测量方法的测量原理

1.1 微通道气泡形状的演变特性

为了观察微通道中单气泡的生长过程,本文搭建了实验装置,将 Na_2SO_4 溶液池连通在1个竖直放置的PDMS(聚二甲基硅氧烷)微通道上,使溶液充满整个通道,在微通道一端设置一个电极,另一个电极浸入液池,中间连接电化学工作站(CHI760F,上海辰华仪器有限公司),使用Chronoamperometry Parameters模式,电化学工作站对微通道提供恒定电压,并记录测得的电流值,如图1所示,微通道下方连接注射泵1(TYD01雷弗流体智能设备制造有限公司),为 Na_2SO_4 溶液池补液,微通道中间连接1个空气进口,连接注射泵2注入空气,在微通道内形成一个独立的气泡。使用高速摄像机(G820M-Pro,合肥中科君达视界技术股份有限公司)同步观察记录气泡的生长演变过程。

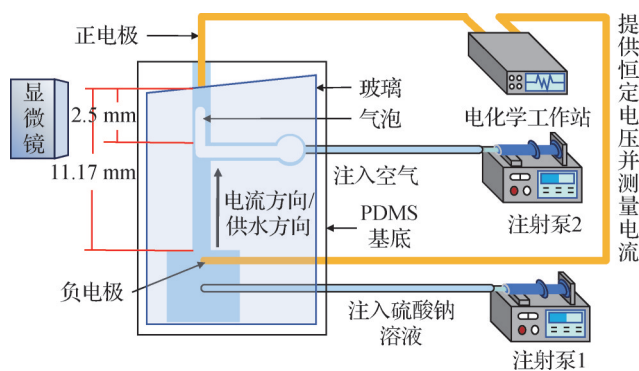


图1 微通道气泡尺度测量实验系统

Fig.1 Experimental system for bubble scale measurement in microchannel

气泡尺度测量实验台和PDMS微通道如图2所示。实验各部件及测试仪器参数如表1所示。

实验中,气体从通道中间入口注入,在溶液中形成气泡,并随着气体不断注入慢慢长大,气泡行为的可视化监测由微距显微系统和高速相机完成。图3所示为气泡生长过程的可视化图,可以清晰看到气泡生长有3个阶段:1)气泡被注入通道后慢慢长大,

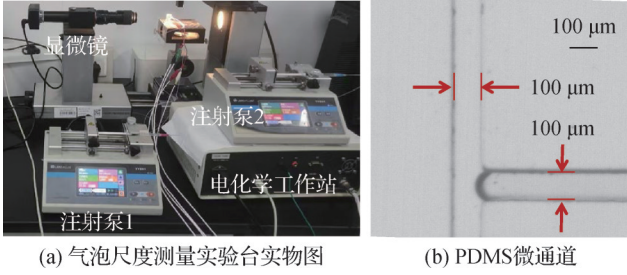


图2 气泡尺度测量实验台与PDMS微通道

Fig.2 Experimental setup for bubble scale measurement and PDMS microchannel

表1 测量实验台主要测量仪器参数

Tab.1 The range and accuracy of major measuring instruments

部件名称	参数
注射泵1,2	空气流量 1~10 $\mu\text{L}/\text{min}$, 溶液流量 1~200 $\mu\text{L}/\text{min}$
高速摄影机	分辨率 1 280×1 024 像素, 帧速率 200 帧/s
电化学工作站	测量误差 $\pm 10^{-11}$, 采集间隔 0.02 s

填充通道整个横截面;2)气泡沿通道变长,直至抵达出口的过程;3)气泡从通道流出,逐渐变小,直至消失。

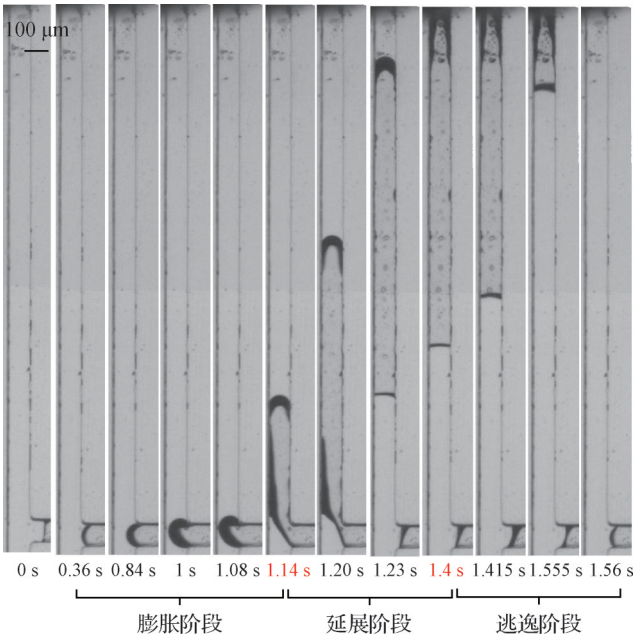


图3 气泡在微通道中演变过程

Fig.3 Evolution of bubbles in microchannel

1.2 物理模型

根据可视化结果,建立气泡在微通道中的生长过程的物理模型:

1)当 $r \leq a/2$ 时, a 为微通道截面边长,如图4(a)所示,此时气泡未受微通道壁面挤压,呈自由球状,气泡半径按一定径向生长速率 v_1 增长,直至气泡边沿触

及通道壁面。

2)当 $a/2 < r < r_{\max}$,如图4(b)所示,在该阶段,气泡仍有膨胀空间,继续长大至最大截面半径 r_{\max} ($r_{\max} = a\sqrt{2}/2$)^[18],气泡在微通道中截面形状不再是圆, r 为气泡截面半径。

以上气泡直径小于 r_{\max} 的阶段为膨胀阶段。

3)当 $r = r_{\max}$ 时,如图4(c)所示,气泡的横截面大小保持不变,气泡以轴向生长速率 v_2 向微通道长度方向延展生长,气泡开始变成近乎圆柱状,称此阶段为延展阶段。

4)当气泡长大至微通道上端出口时,如图4(d)所示,气泡开始逃逸, l_b 不断缩小,气泡以气泡逃逸速度 v_3 变小,直至气泡 r 和 l_b 恢复为0,称该阶段为逃逸阶段。

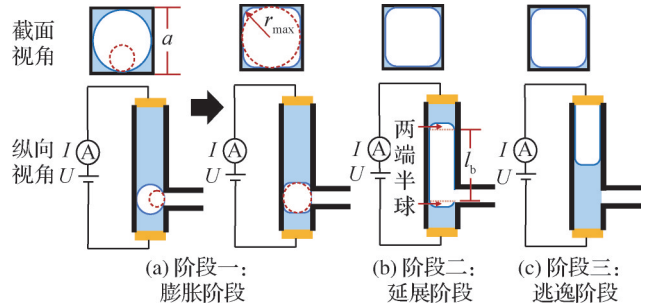


图4 气泡生长过程的物理模型

Fig.4 Physical model of bubble growth process

1.3 数学模型

根据1.2节的模型将微通道内的气液系统简化为一维电阻模型,如图5所示,微通道总电阻由通道内流体的体相电阻与微通道载体的表面电阻并联组成;其中体相电阻部分由微通道内纯液体段电阻、气液共存段电阻串联构成,气液共存段的等效电阻由气泡气相与剩余液相的并联电阻共同决定。为方便建立模型,进行如下假设:

1)忽略气泡两端突起的体积,将气泡视为两端平滑的气柱(证明过程见支撑材料第1节);

2)微通道横截面积保持恒定,纯液段电阻与气液共存段电阻在通道内为串联;

3)微通道总电导为体相电导与表面电导之和,因此表面电阻与通道内流体体相电阻呈并联关系;

4)液体工质为均匀导电介质,电极与液体接触面积保持不变。

在上述假设基础上建立分段电阻模型。

1)膨胀阶段,当 $r \leq a/2$ 时:

$$S_0 - S_b = a^2 - \pi r^2 \quad (1)$$

将膨胀阶段可视化气泡球缺等效为等体积球

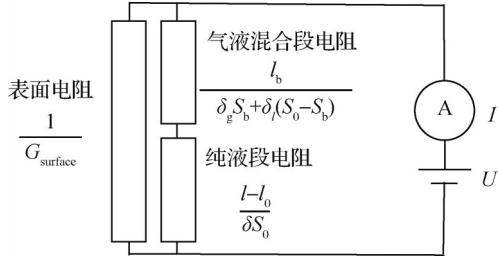


图5 微通道中气泡电阻的等效电路图

Fig.5 Equivalent circuit of bubbles electrical resistance in microchannel

形,其等效半径为:

$$r_{eq} = [x(3r_b^2 + x^2)]^{1/3}/2 \quad (2)$$

2)膨胀阶段,当 $a/2 < r < a\sqrt{2}/2$ 时:

$$S_b = a\sqrt{4r^2 - a^2} + 4r^2 \arcsin\left(\frac{a}{2r}\right) - \pi r^2 \quad (3)$$

微通道内气泡的体相电阻大小:

$$R_{bulk} = \frac{l_b}{\delta_g S_b + \delta_l(S_0 - S_b)} + \frac{l - l_b}{\delta_l S_0} \quad (4)$$

联立式(1)~式(4),可得:

$$I(r) = UG_{surface} + \frac{U}{\frac{l_b}{\delta_g S_b + \delta_l(S_0 - S_b)} + \frac{l - r}{a^2}} \quad (5)$$

3)延展阶段:

$$I(l_b) = UG_{surface} + \frac{U}{\frac{l_b}{\delta_g S_b + \delta_l(S_0 - S_b)} + \frac{l - l_b}{\delta_l S_0}} \quad (6)$$

解出气泡长度 l_b 的显式关系 $l_b = f(I)$ 为:

$$l_b(I) = \frac{\delta_g S_b + \delta_l(S_0 - S_b)}{S_b(\delta_l - \delta_g)} \left(\frac{U\delta_l S_0}{I - UG_{surface}} - l \right) \quad (7)$$

通过实验测量气泡体积变化引起的电流变化,联合上述数学模型,便可获得气泡的形状变化。

1.4 理论模型的实验验证

为了说明 RTECM 法的可行性与准确性,假设气泡体积增加速率为注入空气的速率,得到气泡体积随时间的变化规律,代入数学模型计算得到电流随时间的变化规律并与电流实际测量值进行对比,结果如图6所示。可以看出,模型计算曲线与实测数据曲线吻合良好。在膨胀阶段(0~1.08 s),电流最大偏差(13.4%)出现在1.08 s,此时电流下降趋势开始增大,气泡进入下一阶段,使误差增大;在延展阶段(1.08~1.4 s),电流最大偏差(12.2%)出现在1.18 s,该时刻为电流剧烈变化后降至低电流值的时间点;在逃逸阶段(1.4~1.56 s),电流最大偏差为1.1%,在电流回升结束的时刻1.56 s。上述不同阶段的最大偏差值均出现在电流剧烈变化的时刻,即气泡进入

不同生长阶段的时间点,这可能是气泡在通道内膨胀速率并不完全与注气速率相等的原因,该对比结果验证了 RTECM 法的可行性与准确性。

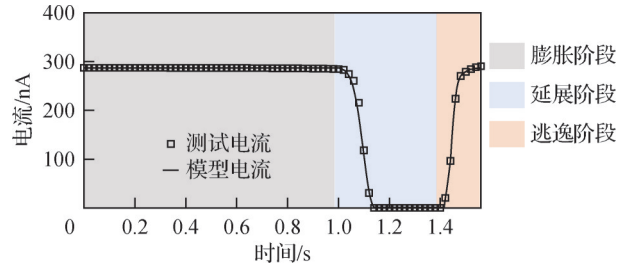


图6 实测电流与理论模型电流对比

Fig.6 Comparison of measured and theoretical currents

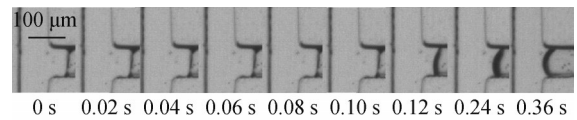
2 单气泡尺度实时电流测量方法与可视化法的测量结果对比

为进一步研究 RTECM 法的优劣,将该方法与可视化方法同时用于气泡生长过程的测量,同步采集可视化图像与实时电流信号,对比各个阶段气泡动力学行为与电流响应情况。

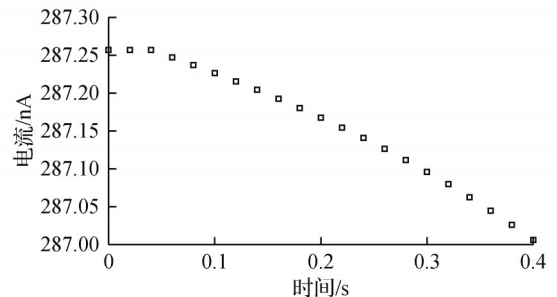
2.1 气泡等效截面半径随时间变化规律

为了考察气泡变化的全过程,图7给出了气泡在进入微通道初期的可视化图像和电流变化图。图7(a)展示了气泡进入微通道的可视化图像,在0.36 s时气泡开始进入微通道,体积为 $1832.59 \mu\text{m}^3$,折算为等效截面半径为 $7.59 \mu\text{m}$ 。由图7(b)的实时电流变化可知,在0.04 s时电流变小,说明此时已有气体进入微通道,该电流对应的气泡等效截面半径为 $4.54 \mu\text{m}$ 。上述结果表明,电流对气泡体积变化更为敏感,本文提出的 RTECM 法具有更高的分辨率。

如图8所示,随着气泡继续膨胀直至与壁面接



(a) 气泡进入初期的可视化图像



(b) 实时电流变化曲线

图7 气泡进入微通道初期的可视化结果与电流响应

Fig.7 Visualization results and current response at the initial stage of bubble entering the microchannel

触,在0.36~1.005 s,2种方法测量结果偏差为2.1%~13.7%,该差值主要来源于可视化图像处理中的边缘识别偏差和气泡变形。气液界面随着注气的进行,开始进入纵向微通道,并且在1.005 s后开始上升形变,气相所占体积不断增长、液相有效导电面积被逐渐挤占,导致整体电阻增加,电流值下降。

2种方法测得的气泡膨胀结束时间截然不同:高速摄像机可观察到在1.015 s时气泡膨胀至最大等效半径为60.25 μm ,而电流曲线记录的最大气泡半径70.01 μm 出现在1.12 s。由此可见,相比于可视化法,RTECM法可克服视窗和摄影仪分辨率的局限,能够测量更小尺度的气泡和气泡最大膨胀尺度,可用于早期成核与气泡微小变化动力学的定量研究。

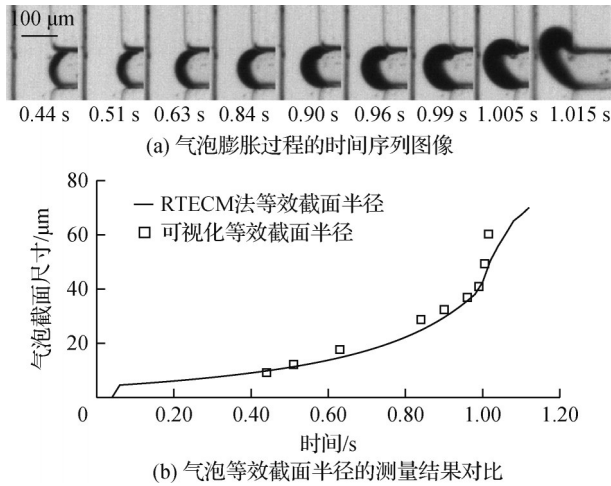


图8 气泡膨胀阶段的可视化图像与截面半径对比

Fig.8 Visualization of bubble expansion and comparison of cross-sectional dimensions

2.2 气泡纵向生长规律

图9所示为气泡在延展阶段沿通道轴向生长的连续变化过程。可视化结果显示,气泡达到最大截面半径后纵向延展成长为气柱,上气液界面向顶端出口移动。当气泡长到一定长度后,就会自动脱离注气口,实验中即刻停止注气,气泡上下气液界面,气泡保持长度不变向上移动,此时气相在微通道中基本占比不变,同时电阻发生较小变化,电流进入平台期。

将气泡纵向生长长度测量结果与可视化进行对比,如图10所示,RTECM法与可视化得到的气泡长度吻合极好,偏差在2.3%~10.6%,最大偏差出现在1.17 s,即RTECM法测得的最大长度为1.689 mm,可视化最大长度为1.651 mm,二者偏差为10.6%。偏差来源主要是理论模型将气泡简化为等截面气柱,计算得到的柱形长度与可视化看到的前端略微收缩的气柱长度不一致。故RTECM法只能获得等截面柱

体的平均长度,难以表征变形气泡形状。

在1.17 s时,气泡底部脱离注气口开始整体向上滑移,气液界面张力平衡状态改变,气泡为适应新的约束条件而发生弛豫。由图9中1.17 s与1.23 s的气泡图变化可知,在表面张力作用下气泡长度在0.06 s内缩短,在气泡截面半径不变的情况下,电阻较大的气相在微通道中的体积占比降低,电流值发生短时间内的升高,从而导致气液两相区电阻的变化速率发生改变,在电流信号上表现为增长速率突变。该变化也可在可视化图上清晰地看到,说明2种方法均可捕捉气泡形态的体积变化。

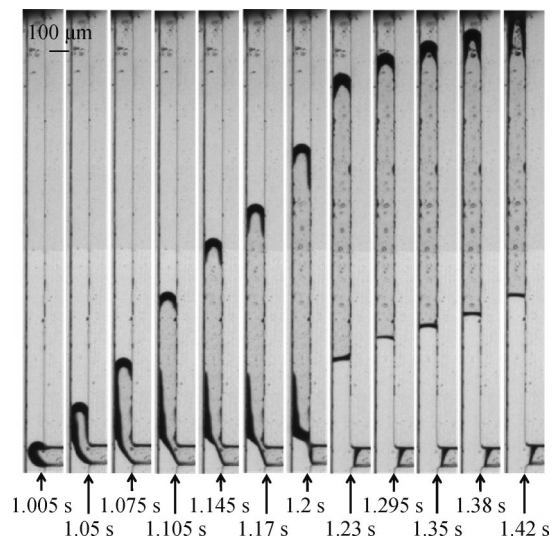


图9 气泡纵向生长过程的时间序列图像

Fig.9 Time-series images of longitudinal bubble growth

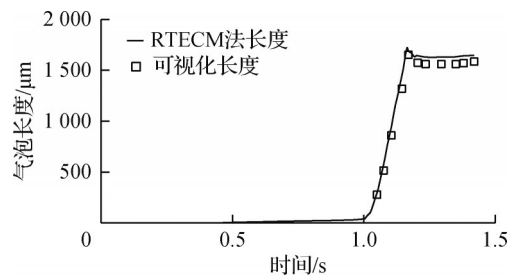


图10 气泡纵向生长长度测量结果对比

Fig.10 Comparison of measured and visualized longitudinal bubble lengths

2.3 气泡逃逸速度

图11所示为气泡在逃逸阶段的快速排出过程。当气泡上气液界面纵向延伸至微通道出口时,即进入逃逸阶段,上气液界面消失,下气液界面开始上升,且上升速度越来越快,微通道中气相减少,电阻减小,电流值逐渐升高恢复至原水平值。

气泡逃逸速度的变化如图12所示,二者在大部分时间段吻合情况良好,1.44 s时最小偏差为1%,此时

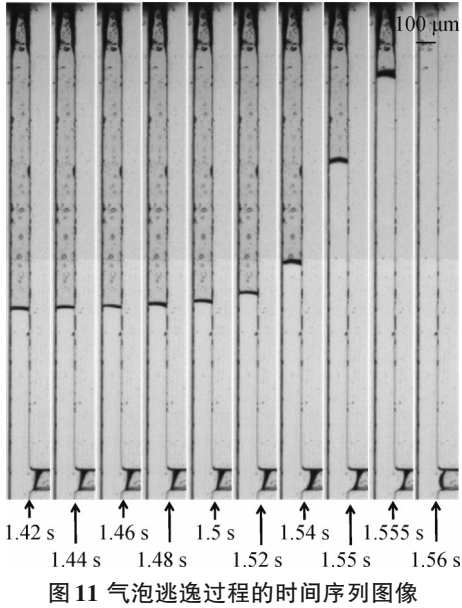


图 11 气泡逃逸过程的时间序列图像

测量速度为 0.462 mm/s, 可视化速度为 0.466 mm/s。但随着气泡的逃逸, 气泡与微通道壁面接触面积减小, 气液固三相线缩短, 阻碍气泡逃逸的钉扎力随之减小, 气泡逃逸速度快速增加, 二者测量结果出现较大偏差, RTECM 法测得在 1.56 s 时的逃逸速度达到最大值 (68.53 mm/s), 与可视化速度 (78.1 mm/s) 偏差为 11.7%。由可视化结果可知, 气泡在完全逃逸出微通道前, 1.555 s 附近气泡出现回缩现象, 电化学工作站却未能捕捉到该电流的变化。RTECM 法在气泡处于高速变化时, 受使用的电化学工作站的采集频率限制 (仅为高速摄像仪的 1/4), 测量数据的时间间隔不及高速摄像仪。若能采用具有更高采集频率的电化学工作站, 可提升 RTECM 法对气泡瞬变过程的测量能力。

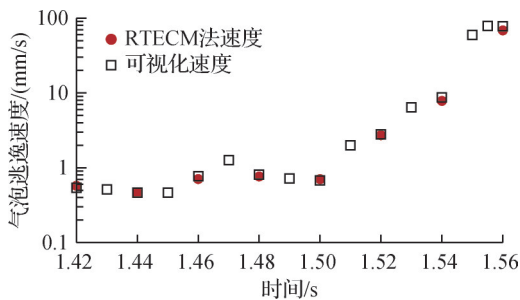


图 12 气泡逃逸过程测量速度与可视化速度对比

3 不同注气速率下气泡演化特性与电流信号响应规律分析

在证明 RTECM 法准确性的基础上, 本节研究不

同注气速率 v_q (1、5、10 $\mu\text{L}/\text{min}$) 对气泡动态演化行为的影响规律。

不同注气速率下测试电流与理论模型电流对比如图 13 所示。 $v_q=1 \mu\text{L}/\text{min}$ 时测试电流与理论模型电流最大偏差为 8.1%, 出现在 0.32 s; $v_q=5 \mu\text{L}/\text{min}$ 时最大偏差为 13.4%, 出现在 1.08 s; $v_q=10 \mu\text{L}/\text{min}$ 时最大偏差为 11.6%, 出现在 2.68 s。3 种注气速率下最大偏差处均出现在电流迅速下降阶段。当 v_q 为 1、5、10 $\mu\text{L}/\text{min}$ 时测试电流最小值分别为 0.07、0.99、31.68 nA, 且 $v_q=10 \mu\text{L}/\text{min}$ 时电流未出现持续低电流值的平台区, 而电流值越小说明气泡电阻占微通道电阻比例越大。

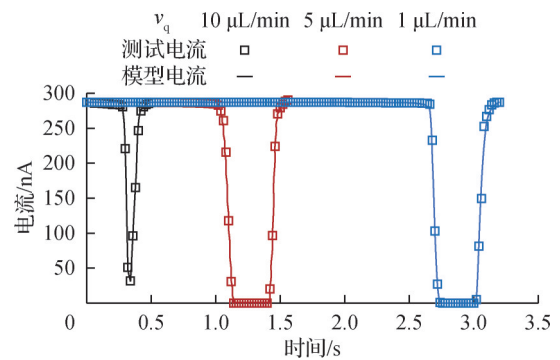


图 13 不同注气速率下测试电流与理论模型电流对比

注气速率能够影响气泡在微通道中的膨胀生长程度。不同注气速率下, 测量气泡等效截面半径和长度与可视化结果对比分别如图 14 和 15 所示, 随着注气速率的升高, 气泡最大等效截面半径呈显著单调递减趋势, 但其出现时间和气泡持续时间随注气速率升高持续提前, 气泡最大长度持续增加。 v_q 为 1、5、10 $\mu\text{L}/\text{min}$ 时, 气泡最大等效截面半径为 65.51、69.79、70.09 μm , 分别出现在 2.74、1.12、0.34 s; 气泡持续时间为 3.20、1.56、0.52 s, 气泡最大长度分别为 1290.05、1677.01、2285.30 μm 。可以发现, 注气速率越高, 单位时间内气泡体积更大, 浮力变大, 气泡轴向发展的动力增强, 因此气泡持续的时间变短, 截面膨胀程度变小。

注气速率还能够影响气泡在微通道中的逃逸速率。不同注气速率下气泡逃逸速率对比如图 16 所示, 取气泡进入逃逸阶段的时间点为 0 s, 虚线为平均速度。由图 16 可知, 不同注气速率下气泡的逃逸速率趋势相同, 且单位时间内气泡体积更大, 浮力变大, 其平均逃逸速率也更大, v_q 为 1、5、10 $\mu\text{L}/\text{min}$ 时的平均逃逸速率分别为 7.14、10.29、12.76 mm/s。

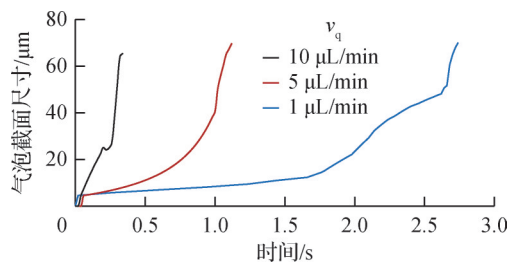


图 14 不同注气速率下气泡等效截面半径测量结果对比
Fig.14 Comparison of measured bubble cross-sectional dimensions under different air injection rates

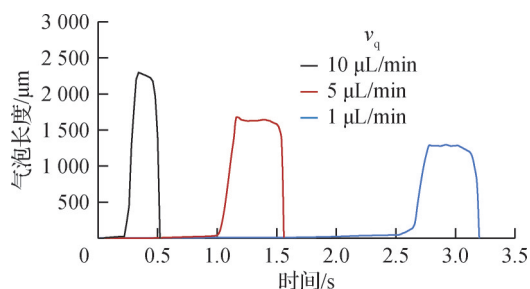


图 15 不同注气速率下测量气泡长度对比
Fig.15 Comparison of bubble lengths measured under different air injection rates

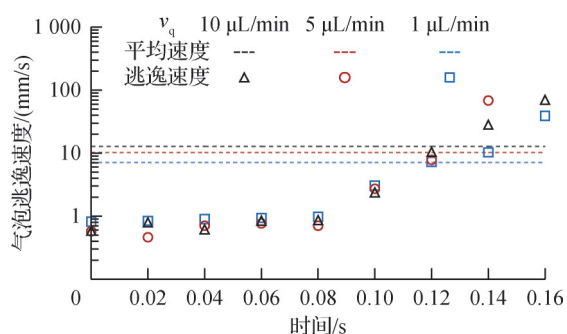


图 16 不同注气速率下气泡逃逸速率对比
Fig.16 Comparison of bubble escape rates under different injection steam rates

4 参数敏感性分析

为验证该检测方法的普适性,进一步探究各物理参数对电流信号的影响机制。由式(7)和式(8)可知,在微通道参数($a=100\ \mu\text{m}$, $G_{\text{surface}}=0.04\ \text{nA}$)不变的前提下,电流 I 只受 δ 、 r_{max} 及 l_b 3 个关键参数的影响。因此,下文使用控制变量法讨论 δ 、 r_{max} 及 l_b 这 3 个关键参数对测试结果的影响。

4.1 溶液电导率对整个气泡生长周期的影响

溶液电导率(δ)是决定微通道初始欧姆电流的核心参数。保持气泡动力学参数($r_{\text{max}}=50\ \mu\text{m}$, $l_b=1.5\ \text{mm}$)不变,模拟 2、4、6 mS/cm 这 3 种电导率的电流响应情况,如图 17 所示。 δ 主要调控电流绝对下降幅值(即曲线初始点电流和膨胀临界点电流之差),不改

变其周期性与相对变化率。3 种电导率对应曲线初始电流分别为 817.20、988.13、1159.07 nA,绝对下降幅值分别为 50.18、100.34、163.76 nA。 δ 越高,体相电导、无气泡时初始稳态电流越大,相同电阻增量下电流变化绝对值也越大。 δ 为 6 mS/cm 时,初始电流和下降幅值最大,相比 δ 为 2 mS/cm 时下降幅值提升 227%。因此,溶液电导率变化不会改变电流信号的“指纹”特征(如峰值位置、周期、相对变化率),表明该方法具有鲁棒性,可保障流动形态识别与气泡参数测量可靠。对于信噪比要求高的微弱信号检测,可通过适度提高溶液电导率来增大电流变化的绝对幅值,从而提升测量系统的灵敏度和抗干扰能力。

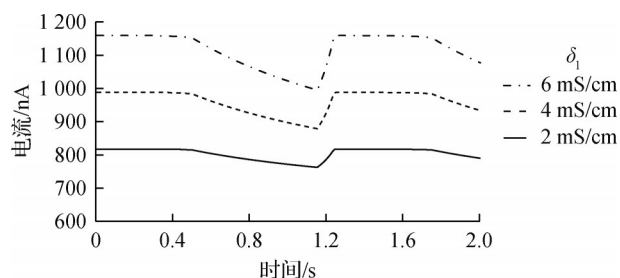


图 17 不同 δ 下电流变化
Fig.17 Current variation for different δ

4.2 气泡最大等效截面半径对整个气泡生长周期的影响

气泡可膨胀的最大等效截面半径(r_{max})是影响导电横截面积的关键参数,不但决定于气体的物性、表面张力、通道尺寸及其表面润湿特性,还受控于气泡压力、温度等,不同 r_{max} 下气泡截面在通道中的形状如图 18 所示。

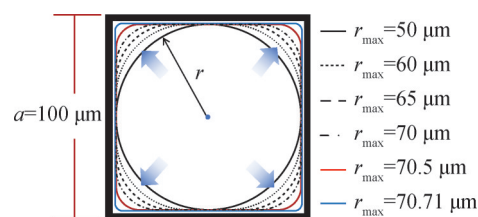


图 18 不同 r_{max} 下气泡截面在通道中的形状
Fig.18 The shapes of bubble cross-sections in the channel under different r_{max}

保持 $\delta=2\ \text{mS/cm}$ 与 $l_b=500\ \mu\text{m}$ 不变,模拟了不同 r_{max} 下的电流变化趋势,如图 19 所示。 r_{max} 越大,气泡最大截面积 $S_{b,\text{max}}$ 越大,气液共存段的等效导电横截面 $S_0-S_{b,\text{max}}$ 越小,电阻值越大。随着 r_{max} 从 $50\ \mu\text{m}$ 增至 $70.71\ \mu\text{m}$,从初始点到逃逸点电流的绝对下降幅值从 50.18 nA 增至 170.93 nA。因此,通道结构、材质、

气泡的物性以及气泡的操控条件均会对通道电阻测试结果产生影响,但不会影响电流的变化趋势,依旧能够为气泡测量和流型判识提供数据依据。

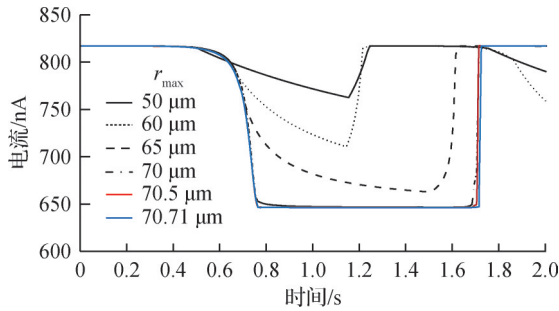


图 19 不同 r_{\max} 的电流变化

Fig.19 Current variation for different r_{\max}

4.3 气泡长度对整个气泡生长周期的影响

气泡长度 (l_b) 是气泡沿通道长度方向长大的参数,决定于气泡生长到气泡逃逸的距离,对气泡膨胀阶段的电阻无作用,但决定延展阶段的电阻。当 $\delta=2\text{ mS/cm}$, $r_{\max}=50\text{ }\mu\text{m}$ 时,图 20 展示了不同 l_b 的电流变化趋势:延展阶段的电流下降幅值与时长由 l_b 与延伸速率 v_2 决定,当 v_2 不变, l_b 从 1.5 mm 增至 2.5 mm 时,电流下降幅值增加了 36.03%。

综上所述,在气泡持续长大且不破裂的情况下, l_b 以线性累积方式影响延展段的电流值,因此,该测量方法可从单一电流信号的分段变化规律中解析气泡横截面尺度和长度的几何特征。

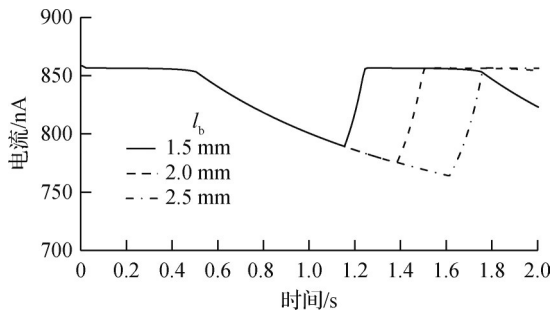


图 20 不同 l_b 下的电流变化

Fig.20 Current variation for different l_b

5 结论

本文提出一种基于气液电导率差异的微通道中单泡尺寸电流实时测量方法,旨在为热管理中微通道两相换热器件提供不依赖可视化的气泡定量测量手段,主要结论如下:

1) 根据气泡在微通道中的生长演变特性,建立了分为气泡膨胀、延展和逃逸 3 个阶段的气泡物理模型及相应的微通道电阻数学模型。通过对比实测电

流和模型计算电流,验证了 RTECM 法的可靠性。

2) 对比了 RTECM 法与高速摄像可视化法的测量结果,发现当测量等效截面半径大于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 时最大偏差为 13.7%。此外, RTECM 法测得的最小气泡尺寸为 $4.54\text{ }\mu\text{m}$, 最大膨胀气泡尺寸为 $70.01\text{ }\mu\text{m}$, 能更清晰记录气泡的演变过程;虽然电化学工作站的采集频率低于高速摄像机,但二者测试气泡逃逸速率的数据在大部分时间几乎相同。

3) 在不同注气速率 ($1、5、10\text{ }\mu\text{L/min}$) 下,电流与模型偏差为 8.1%~13.4%, RTECM 法表现出良好的鲁棒性。

4) 在保持微通道材质与通道尺寸不变的情况下,对溶液的电导率、气泡最大膨胀横截尺度及通道长度进行了敏感性分析。发现这些因素均会对通道电流测试结果产生影响,但不会影响电流的变化趋势,故不会影响气泡测量结果。

本文受东莞市重点领域研发项目 (20241200300072) 资助。(The project was supported by Major Science and Technology of Dongguan (No. 20241200300072).)

符号说明

- a —— 微通道截面边长, μm
- G_{surface} —— 微通道截面边长, nA/V
- I —— 测量电流, nA
- l —— 微通道总长度, Mm
- l_b —— 气泡长度, Mm
- R_{bulk} —— 体相电阻, Ω
- r —— 气泡等效截面半径, μm
- r_b —— 球缺底面半径, μm
- r_{\max} —— 气泡最大等效截面半径, μm
- S_0 —— 微通道横截面积, μm^2
- S_b —— 气泡横截面积, μm^2
- t —— 时间, s
- U —— 施加电压, V
- x —— 球缺高度, μm
- v_q —— 注气速率, $\mu\text{L/min}$
- v_1 —— 膨胀阶段径向生长速率, $\mu\text{m/s}$
- v_2 —— 延展阶段轴向生长速率, mm/s
- v_3 —— 逃逸阶段速度, mm/s
- δ_l —— 液相电导率, mS/cm
- δ_g —— 气相电导率, mS/cm

参考文献

- [1] Koseki K, Tanaka Y. Feasibility study of ebullient cooling technology for SiC power devices with extremely high heat generation density of $1\ 000\ \text{W/cm}^2$ [C]//2020 23rd International Conference on Electrical Machines and

- Systems (ICEMS), 2020: 1866–1871.
- [2] 毛春林, 刘汉敏, 孙健, 等. 芯片封装均温板壳体的传热特性研究[J]. 制冷学报, 2022, 43(1): 138–144. (Mao Chunlin, Liu Hanmin, Sun Jian, et al. Research on heat transfer characteristics of vapor chamber integrated heat spreader for chip package[J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(1): 138–144.)
- [3] 雷涛, 陈绍高, 刘秀丽, 等. 乙二醇冷却液的劣化检测及增材制造 AlSi₁₀Mg 铝合金在其中的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2025, 45(4): 1014–1024. (Lei Tao, Chen Shaogao, Liu Xiuli, et al. Corrosion behavior of laser additive manufacturing AlSi₁₀Mg Al-alloy in ethylene glycol coolant and detection of coolant degradation [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2025, 45(4): 1014–1024.)
- [4] Chen Jin, Huang Xingyi, Sun Bin, et al. Highly thermally conductive yet electrically insulating polymer/boron nitride nanosheets nanocomposite films for improved thermal management capability [J]. ACS Nano, 2019, 13(1): 337–345.
- [5] Ghani U, Wazir M A, Akhtar K, et al. Microchannel heat sinks—a comprehensive review [J]. Electronic Materials, 2024, 5(4): 249–292.
- [6] Lin Y H, Kang S W, Wu T Y. Fabrication of polydimethylsiloxane (PDMS) pulsating heat pipe [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(2/3): 573–580.
- [7] Souza R R, Sá Barbosa F M, Nobrega G, et al. Experimental study of an innovative elastomer-based heat exchanger [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 49: 103365.
- [8] Shang Huiqing, Xia Guodong, Cheng Lixin, et al. Comprehensive review of enhancement techniques and mechanisms for flow boiling in micro/mini-channels [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 258: 124783.
- [9] Zhang Junqiang, Zou Zhengping, Fu Chao. A review of the complex flow and heat transfer characteristics in microchannels [J]. Micromachines, 2023, 14(7): 1451.
- [10] Yang Bin, Zhu Xin, Wei Boan, et al. Computer vision and machine learning methods for heat transfer and fluid flow in complex structural microchannels: a review [J]. Energies, 2023, 16(3): 1500.
- [11] Suh Y, Bostanabad R, Won Y. Deep learning predicts boiling heat transfer [J]. Scientific Reports, 2021, 11: 5622.
- [12] Chang S, Suh Y, Shingote C, et al. BubbleMask: autonomous visualization of digital flow bubbles for predicting critical heat flux [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 217: 124656.
- [13] Ali Abid H, Ong J W, Lin E S, et al. Volume and rate measurement of slowly generated gas bubbles [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2020, 72: 101694.
- [14] Yu Kai, Chen Liu hao, Zhang Weifeng, et al. Behaviour of polymer-coated composite nanoparticles at bubble-stabilizing interfaces during bubble coarsening and accelerated coalescence: a Cryo-SEM study [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2023, 633: 113–119.
- [15] Coppeta J, Rogers C. Dual emission laser induced fluorescence for direct planar scalar behavior measurements [J]. Experiments in Fluids, 1998, 25(1): 1–15.
- [16] Surtaev A, Serdyukov V, Malakhov I, et al. Nucleation and bubble evolution in subcooled liquid under pulse heating [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 169: 120911.
- [17] Li Wenming, Joshi Y. Capillary-assisted evaporation/boiling in PDMS microchannel integrated with wicking microstructures [J]. Langmuir, 2020, 36(41): 12143–12149.
- [18] Kadam S T, Kumar R. Twenty first century cooling solution: microchannel heat sinks [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014, 85: 73–92.

通信作者简介

陈颖,女,教授,广东工业大学材料与能源学院,13602873181, E-mail:chenying@gdut.edu.cn。研究方向:微尺度流动及传热、能源材料及应用。

About the corresponding author

Chen Ying, female, professor, School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, 86–13602873181, E-mail: chenying@gdut.edu.cn. Research fields: microscale flow and heat transfer; energy materials and application.

扫码获取支撑材料

