

柔性震荡表面强化沸腾实验研究*

黄鹏飞¹⁾ 许道明¹⁾ 马骁婧^{1)2)†} 徐进良¹⁾²⁾

1) (华北电力大学低品位能源多相流与传热北京市重点实验室, 北京 102206)

2) (华北电力大学电站能量传递转化与系统教育部重点实验室, 北京 102206)

摘要

强化沸腾传热对设备热管理性能具有关键作用。传统冷却方式换热效率较低, 难以满足高热流密度电子器件的热管理要求。本文提出一种压电陶瓷驱动柔性表面震荡强化沸腾传热的新方法并基于 100 Hz 典型振动工况开展了饱和池沸腾实验研究。实验结果表明, 相较无振动工况, 当压电陶瓷振动频率 $f=100\text{ Hz}$ 时, 传热系数提升 28.52 %, 气泡脱离直径减小 44.33 %。发现振动与热流密度的耦合作用对气泡脱离机制存在不同的控制规律。在低热流密度下, 气泡脱离主要由浮力主导, 振动仅作为微弱扰动; 而在高热流密度下, 振动引发的惯性力使接触线滞后效应放大, 导致气泡脱离的动力学失稳, 从而促进气泡快速脱离。说明了柔性板的运动状态对气泡脱离过程的控制机理: 柔性板反弹阶段借助惯性力推动气泡脱离, 下降阶段则通过强化液体补给与气液颈部剪切作用, 进一步加速气泡脱离。该研究为气泡脱离过程的调控提供了新思路, 并为柔性震荡表面强化沸腾传热实验系统的设计与优化提供了理论参考。

关键词: 沸腾传热, 气泡动力学, 振动, 柔性材料

PACS: 64.70.fh, 47.20.-k, 44.35.+c, 47.55.dd

基金: 国家重点研发计划项目(批准号:2023YFB4102400)资助项目和北京市自然

科学基金(批准号: 3262025)资助的课题

† 通信作者. E-mail: mxj@ncepu.edu.cn

第一作者. E-mail: 18531211679@163.com

1 引言

提升高性能电子元件散热能力在加速人工智能发展中发挥着重要作用^[1]。人工智能对设备性能的要求很高^[2]，导致服务器组件的热通量极为局部。两相浸没液冷技术利用高效的沸腾热传递机制，成为克服电子器件耗散性能限制的关键方法^[2]。实现这一点的关键在于提升沸腾的热传递效率。强化沸腾传热的方式主要根据是否具有额外施加的能量，具体分为被动式强化(纳米流体^[3]、自驱振动^[4]、表面粗化^[5]等)和主动式强化技术(表面振动、外加磁场^[7]、流体振动、气体注入、外加电场、射流冲击)^[8-10]。

在振动增强沸腾热传递过程中，振动的引入主要分为两种方式，即自驱式与外部施加式。其中，自驱式是借助材料自身特性，捕捉气泡运动及流场运动过程中耗散的能量，使加热器自身产生振动，进而实现沸腾热传递效率的提升，属于被动式沸腾热增强方法^[10-12]。但由于自驱式作为被动增强手段，其驱动力存在局限性，因此对沸腾热传递性能的提升效果较为有限。与自驱式不同，外部施加式振动通过振动激励器、超声发生器等专用设备产生振动，属于主动式沸腾热增强方法^[14]。Navruzov 等人^[15-17]通过使用振动水平加热器，对振动传热的研究做出了重要贡献。实验已证实，加热器的振动极大地改变了传热面的基准温度。研究发现，低频振动能显著降低加热表面的温度，而高频振动则能显著提高加热表面温度。结论是，在振动条件下，热传导面上方蒸汽—液体流动的流体动力学状态变化会导致热传递系数的突然变化。Zitko^[18]通过实验研究了频率为 0—70 Hz、振幅为 0.1—2 mm 的振动表面的池沸腾性能。结果显示，热传递系数随振动频率和幅度增加而增加，最大提升达到 25 %。另一种增强热传导的方法，包括沸腾热传递，是使用超声波 (Legay 等^[19])。然而，这需要外部电源，因此会消耗电

能。Prisnyakov 等人^[20]分析了文献中关于植物结构振动及工作液体中人工启动振动对沸腾过程影响的研究进展。他们得出结论，振动对热和质量传递过程在一定频率和幅度范围内的作用，可能导致热传递系数显著增加（最多 10 倍）或减少。Sathyabhama^[21]研究了频率为 0—25 Hz、振幅为 0—5 mm 的振动铜表面的沸腾热传递性能。结果显示，其频率和幅度均为最大化传热性能，系数可提升多达 26 %。

沸腾热传递涉及周期性气泡成核、膨胀以及离开沸腾表面。理解气泡动力学对于分析沸腾增强至关重要^[22]。Yang 等^[23]通过模拟获得了小密度比下气泡脱离直径与重力加速度的拟合曲线， $D_d \sim g^{-0.514}$ 。Sun 等^[24]通过 LBM 方法研究了高密度比沸腾中 $D_d \sim g^{-0.425}$ 。Sadeghi 等^[25]的模型研究了高密度比下池沸腾中不同重力加速度和表面张力对气泡脱离直径的影响情况，结果表明气泡脱离直径正比于 $g^{-0.354}$ 和 $\sigma^{0.5}$ 。Atashi^[26]研究了振动对垂直铝筒表面沸热传递的影响。振动有效地增加了成核位点。最佳性能出现在 25 Hz，传热系数提升了 116.6 %。Alangar^[27]发现，表面振动会引发湍流流动，从而增强流体混合，减少热边界层厚度，并提高对流传热系数和临界热通量密度。气泡离开时的主要热传递机制是尾流效应的湍流混合^[28]和沸腾表面再润湿^[29]。Zhang^[30]通过实验测量表示气泡脱离频率与气泡脱离直径的 n 次方的乘积为常数。Yi 等^[31]研究了微重力条件下过冷核态池沸腾的气泡动力学和传热行为，结果表明气泡脱离周期正比于 $g^{-1.113}$ 。Hazi 等^[32]通过 LBM 方法模拟了处于停滞和缓慢流动流体中的水平板上非均匀沸腾问题。研究发现，脱离频率正比于 $g^{3/4}$ 。

但目前大多数研究仅关注振动对气泡脱离的定量影响，缺乏对振动引发的脱离机制和动力学过程的详细分析。尤其对特定频率下振动与气泡脱离行为的耦合规律，以及不同热流密度下振动对脱离控制的作用机理，仍有待深入揭示。本文

构建了具有柔性表面的沸腾传热实验装置，实现了表面弯曲振动；基于 $f = 100$ Hz 典型振动工况，开展了柔性表面振动对饱和池沸腾传热性能影响的实验研究，重点分析了该振动条件下气泡动力学行为的变化规律及其传热强化机制。本研究结果为通过柔性材料和表面振动增强沸腾传热的后续研究提供了实验依据，也为浸没式冷却技术的性能提升提供了潜在的技术参考。

2 实验与方法

实验系统如图 1 所示，整体由沸腾实验系统、振动系统、控温系统及观测系统四部分构成，各系统协同配合以保障实验顺利开展。其中，沸腾实验系统包含沸腾实验装置、直流电源、标准电阻 $R_c=2\ \Omega$ 、冷凝管与气密性沸腾容器；观测系统由高速摄像机、同步器及数据采集仪构成。其中，同步器用于实现高速摄像机与数据采集仪的时序对齐，从而保证实验图像与测试数据的同步获取。振动产生系统由信号发生器(Rigol, DG952, 0-50 MHz)、功率放大器(Aigtek, ATA-2042)及压电执行器(浙江申雷超声股份有限公司)组成。信号发生器输出具有设定频率与幅值的交流(AC)信号，经功率放大器放大以提高电压幅值并保持频率不变；随后将放大后的信号加载至压电执行器，从而在对应频率下激励产生振动。温控系统由 PID 控制器、市电交流电源、变压器、加热元件及热电偶组成。热电偶用于实时测量池内水温，并将温度信号反馈至 PID 控制器；PID 接收反馈信号后与设定温度(100°C)进行比较，进而调节变压器的输出电压。通过上述闭环调节，使加热元件的输入功率与池水散热速率相匹配，从而将池水温度稳定维持在设定值附近的较小波动范围内。实验过程中，直流电源输出恒定电流，通过调节电流大小可精准控制沸腾实验装置的热通量密度，满足实验所需的热环境参数。池水经汽

化产生的蒸汽流经冷凝回流管时快速冷凝，随后回流至沸腾池，以此维持系统内水位稳定及压力平衡，避免实验环境参数波动。实验结束后，通过冷却管将池水温度逐步降至环境温度，完成整个实验流程。

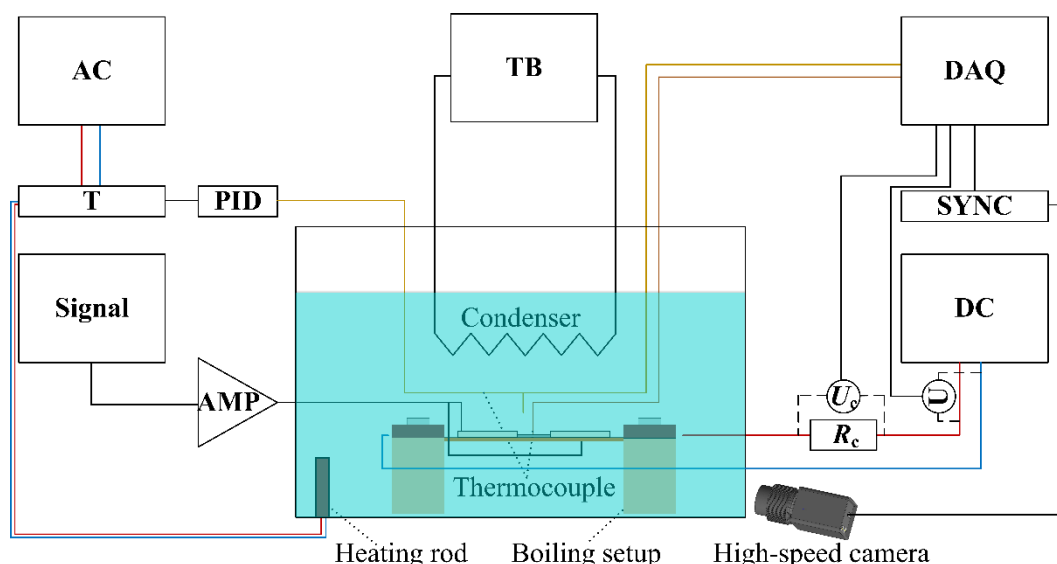


图 1 实验系统

Fig.1. Experimental System

沸腾实验装置(图 2(a))由不锈钢加热元件、测温热电偶、聚酰亚胺薄膜、压电陶瓷及铜电极组件构成。热电偶被置于加热元件与薄膜之间，用于测量沸腾表面温度。采用耐热粘合剂(KE-45)将聚酰亚胺薄膜粘接于不锈钢加热元件表面，具体安装方式如图 2(b)所示。由于聚酰亚胺薄膜厚度极薄（仅 0.05 mm 量级）且导热性能良好，其热阻可忽略不计，因此热电偶测得的温度可近似视为沸腾表面的真实壁温。后续壁面过热度 ΔT 和热传递系数 h 计算均基于该测点温度进行。

铜电极组件包含铜盖板与 PEEK 底座(40 mm×20 mm×20 mm)，底座顶部开设 10 mm 宽凹槽，用于固定加热器。压电陶瓷(20 mm×10 mm×0.5 mm)通过环氧粘合剂(Kingsda K-3880)固定，与铜电极组件间距为 5 mm。当特定频率与幅度的交流信号施加于压电陶瓷时，其会通过膨胀与收缩产生振动。该振动促使柔性加

热器以相同频率发生纵向振动，振动幅度由输入信号的频率与幅度共同决定。

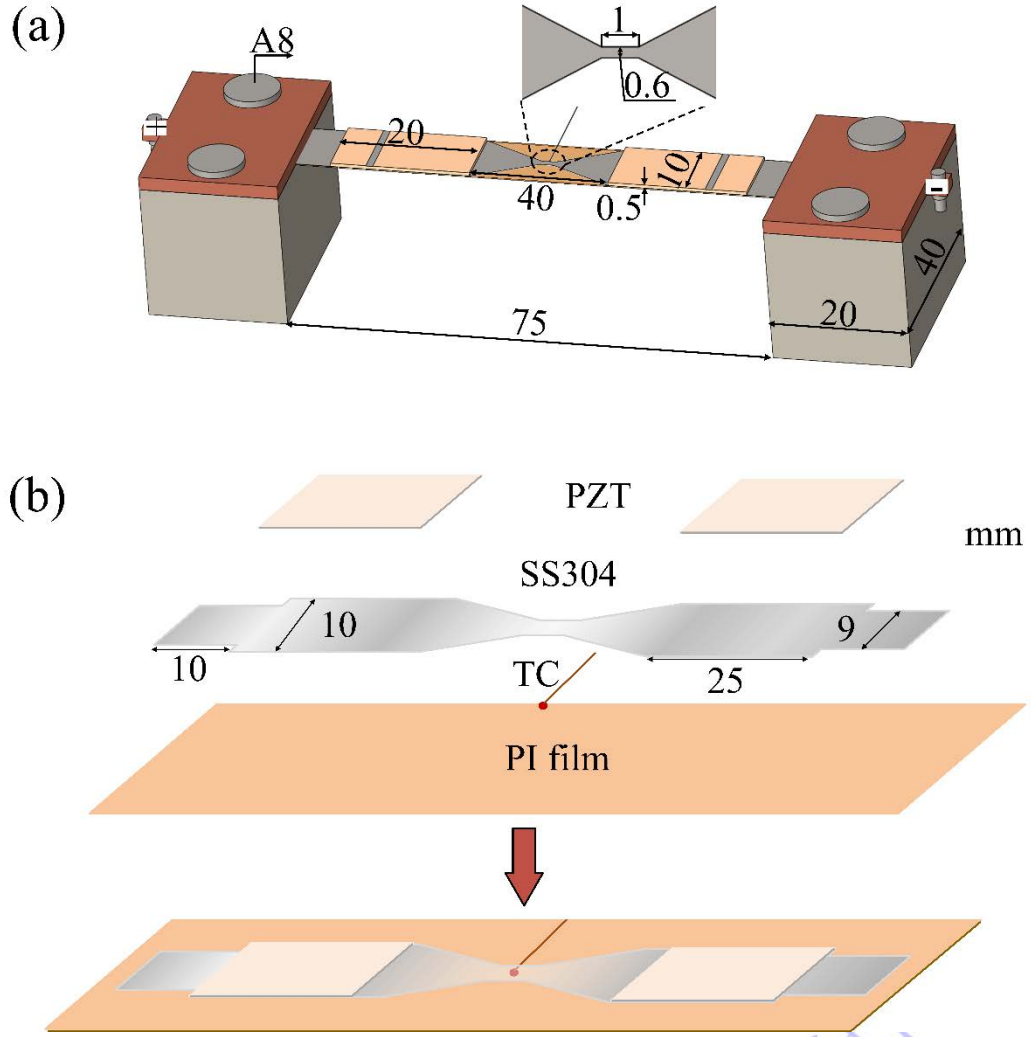


图 2 沸腾实验装置的结构(a)实验装置；(b)加热器的结构

Fig.2. Structure of the boiling experimental setup (a) Experimental setup;(b) Structure of the heater

沸腾实验在 $p_0=0.1013 \text{ MPa}$ 下进行。不可冷凝气体通过沸水去除超过两个小时，直到加热表面无气泡，随后在泳池水温 T_f 维持在 99.7°C 的情况下开始沸腾实验。实验过程中，通过调整电源电流控制热通量密度 q 。 q 的计算方法如下所示：

$$q = \frac{I^2 R t}{A} \quad (2a)$$

其中 I 和 A 分别表示电源电流和热交换面积, 单位分别为 A 和 m^2 ; R_t 是不锈钢在核沸点区的电阻, 单位为 Ω 。 R_t 的计算方法如下所示:

$$R_t = \frac{U_1 - U_2 - U_{cr}}{I} \times 0.244 \quad (2b)$$

其中 U_{cr} 、 U_1 和 U_2 分别表示接触电阻、电源电压和标准电阻电压, V。

壁面过热度 ΔT 和热传递系数 h 为:

$$\Delta T = T_w - T_s \quad (2c)$$

$$h = \frac{q}{T_w - T_f} \quad (2d)$$

其中 T_w 和 T_f 表示沸水壁和去离子水的温度, $^{\circ}\text{C}$; T_s 表示去离子水在大气压力 $^{\circ}\text{C}$ 下的饱和温度。

在沸腾实验之前, 测量了不锈钢的表面特性。使用 3D 光学显微镜(Bruker Contour GT - K, USA)评估表面形貌, 不确定度为 0.3 nm。接触角采用 Dataphysics OCA15 plus(GER)测量, 不确定度为 0.1° 。将水滴放在表面上, 并使用显微镜记录其形状。然后用数字软件处理图像以获得接触角值。表面特性结果为: 不锈钢表面的平均粗糙度为 $R_a=0.951 \mu\text{m}$, 接触角为 $\theta_{CA}=80^{\circ}$ 。

对本实验数据系统进行误差分析, 电源电压 U_1 测量不确定度为 0.57 %, 电阻电压 U_2 的不确定度为 0.77 %, 流体温度 T_b 的不确定度为 0.51 %, 壁面温度 T_w 的不确定度为 0.20 %, 热通量 q 的不确定度为 6.12 %, 传热系数 h 的不确定度为 6.82 %。

3 结果与讨论

3.1 柔性板表面沸腾传热性能

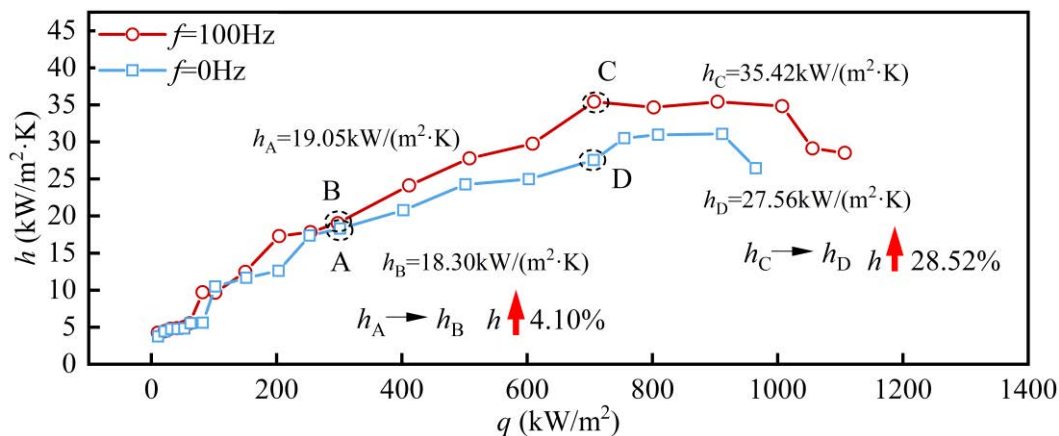


图 3 柔性板沸腾传热系数 h 随热流密度 q 的变化曲线

Fig.3. The curve of the heat transfer coefficient of the flexible plate for boiling process
varying with the heat flux density

图 3 为 $f=0$ Hz 与 $f=100$ Hz 的沸腾曲线图，其所示结果表明， $f=100$ Hz 振动工况的沸腾曲线较无振动工况($f=0$ Hz)上移，这一现象说明，振动频率下的沸腾传热曲线优于无振动工况。与无振动工况相比，A 点和 C 点相较于 B 点和 D 点分别提升了 14.51%，28.52%。沸腾传热性能的强化效应，主要源于加热表面气泡的快速脱离，下文将从气泡动力学视角深入分析气泡实现快速脱离的内在机理。

3.2 气泡动力学

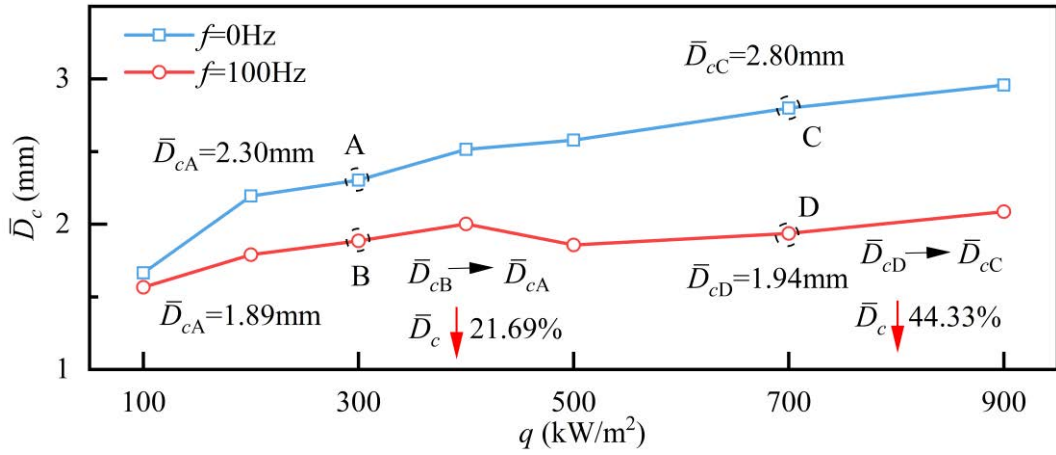


图 4 热流密度与平均基圆直径关系

Fig.4. Relationship between heat flux density and average base circle diameter

图 4 为 $f=0\text{ Hz}$ 与 $f=100\text{ Hz}$ 的气泡平均基圆直径与热流密度关系图，无振动工况时，气泡平均基圆直径随着热流密度的增加而增加，；当 $f=100\text{ Hz}$ 时，发现当处于低热流密度时，气泡平均基圆直径随着热流密度的增加而增加， $\bar{D}_{cB}$ 相较 $\bar{D}_{cA}$ ，平均基圆直径减小了 21.69 %；而随着热流密度的增加，气泡基圆直径突然减小，随后继续随着热流密度的增加而增加， $\bar{D}_{cD}$ 相较 $\bar{D}_{cC}$ ，平均基圆直径减小了 44.33 %。说明随着热流密度的增加，气泡的脱离形式发生了变化。

为了研究这种情况，我们统计了 $f=100\text{ Hz}$ 不同热流密度下的气泡脱离形式。基于实验观测结果，我们将气泡脱离类型分为两类：浮力主导脱离和柔性板振动主导脱离。各个类型的具体特征与脱离形式如下：

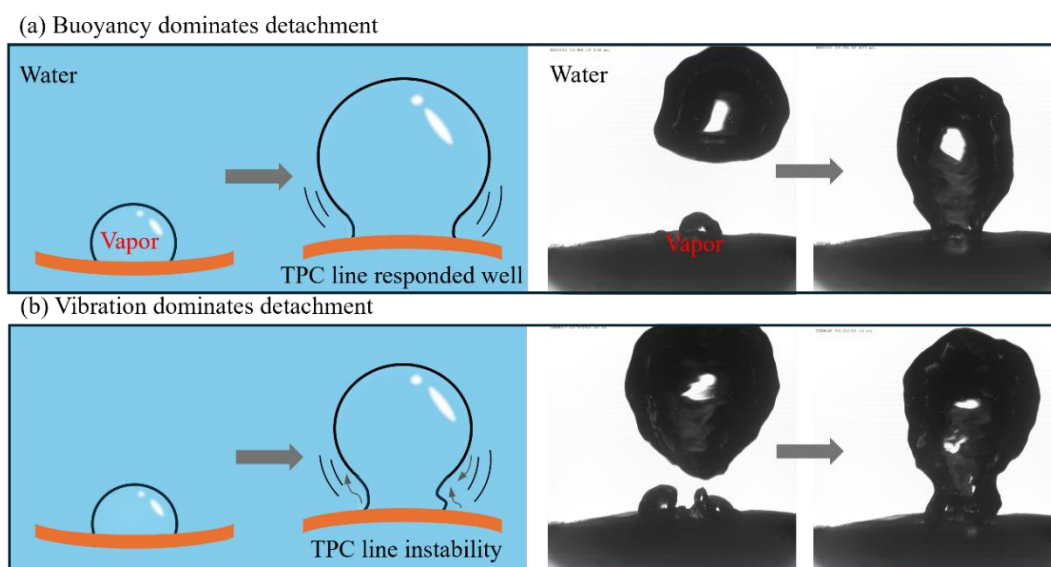


图 5 气泡脱离类型(a)浮力主导脱离；(b)柔性板振动主导脱离

Fig.5. Bubble detachment types:(a) Detachment dominated by buoyancy; (b) Detachment dominated by elastic plate vibration

图 5(a)对应振动频率 $f = 100 \text{ Hz}$ 、热流密度 $q = 300 \text{ kW/m}^2$ 工况，属于浮力主导型气泡脱离。该工况下，柔性板振动在低热流密度下仅作为周期性位移扰动存在，其所施加的位移变化速率始终处于三相接触线可响应范围内，气泡在生长过程中主要受浮力作用驱动，当浮力克服气泡与加热表面的附着力时，气泡从表面脱离。

图 5(b)对应振动频率 $f = 100 \text{ Hz}$ 、热流密度 $q = 700 \text{ kW/m}^2$ 工况，在高热流密度下，柔性板振动提供了不可忽略的周期性位移速率约束，使气泡快速生长引发的接触线响应滞后被显著放大，从而触动力学失稳。其脱离机制可概述为：气泡生长脱离过程中，柔性板在振动作用下产生上下往复运动，形成周期性惯性力；该惯性力促使气泡基圆直径呈现“增大—缩小”的周期性变化，进而打破气泡与表面的附着力平衡，推动气泡快速脱离。

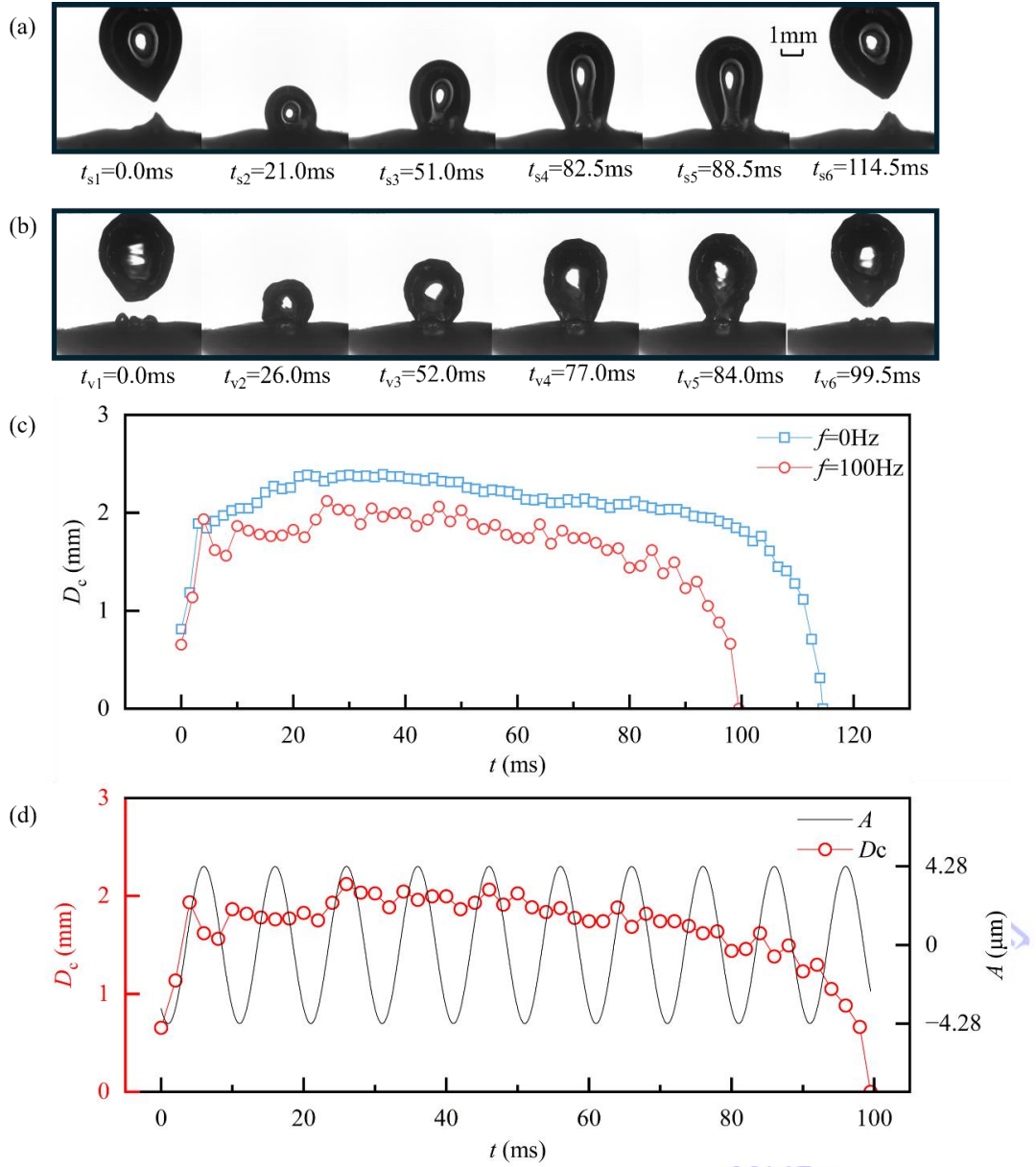


图 6 $q = 300 \text{ kw/m}^2$ 时的气泡动力学 (a) 无振动时气泡脱离图像; (b) $f = 100 \text{ Hz}$ 时气泡脱离图像; (c) 气泡基圆直径; (d) 气泡基圆直径与柔性板振幅耦合

Fig.6. Bubble dynamics at $q = 300 \text{ kw/m}^2$ (a) Image of bubble detachment without vibration; (b) Image of bubble detachment at $f = 100 \text{ Hz}$; (c) Diameter of the bubble base circle; (d) Coupling of the bubble base circle diameter with the amplitude of the elastic plate

图 6(a), (b) 分别为无振动工况以及 $f=100\text{Hz}$ 时气泡的脱离运动图像, 此时由图 6(c) 可知, 在低热流密度条件下, 气泡的生成与生长速率较低, 气泡体积随时

间的变化较为缓慢。在柔性板振动的作用下，基底位移虽为周期性强迫，但其在单位时间内所要求的几何调整速率仍处于三相接触线可响应的范围之内。此时，三相接触线能够通过连续迁移来协调气泡几何形态的变化，从而保持良好的位移相容性。

在该工况下，尽管柔性板持续振动，三相接触线的位移变化与基底运动之间仅存在微弱滞后，气泡形态始终接近准平衡状态。气泡基圆半径通过缓慢回缩逐渐减小，脱离过程表现为连续、平滑的准静态滑脱过程，未出现明显的局部颈缩或突发失稳现象。

图 6(d)中，柔性板振动幅值曲线由高速相机图像序列经 MATLAB 软件图像处理提取得到，通过边缘识别与位移追踪，结合像素标定关系，定量获取了柔性板中心的实时位移，实现了气泡基圆直径与柔性板振动过程的时间轴同步分析。

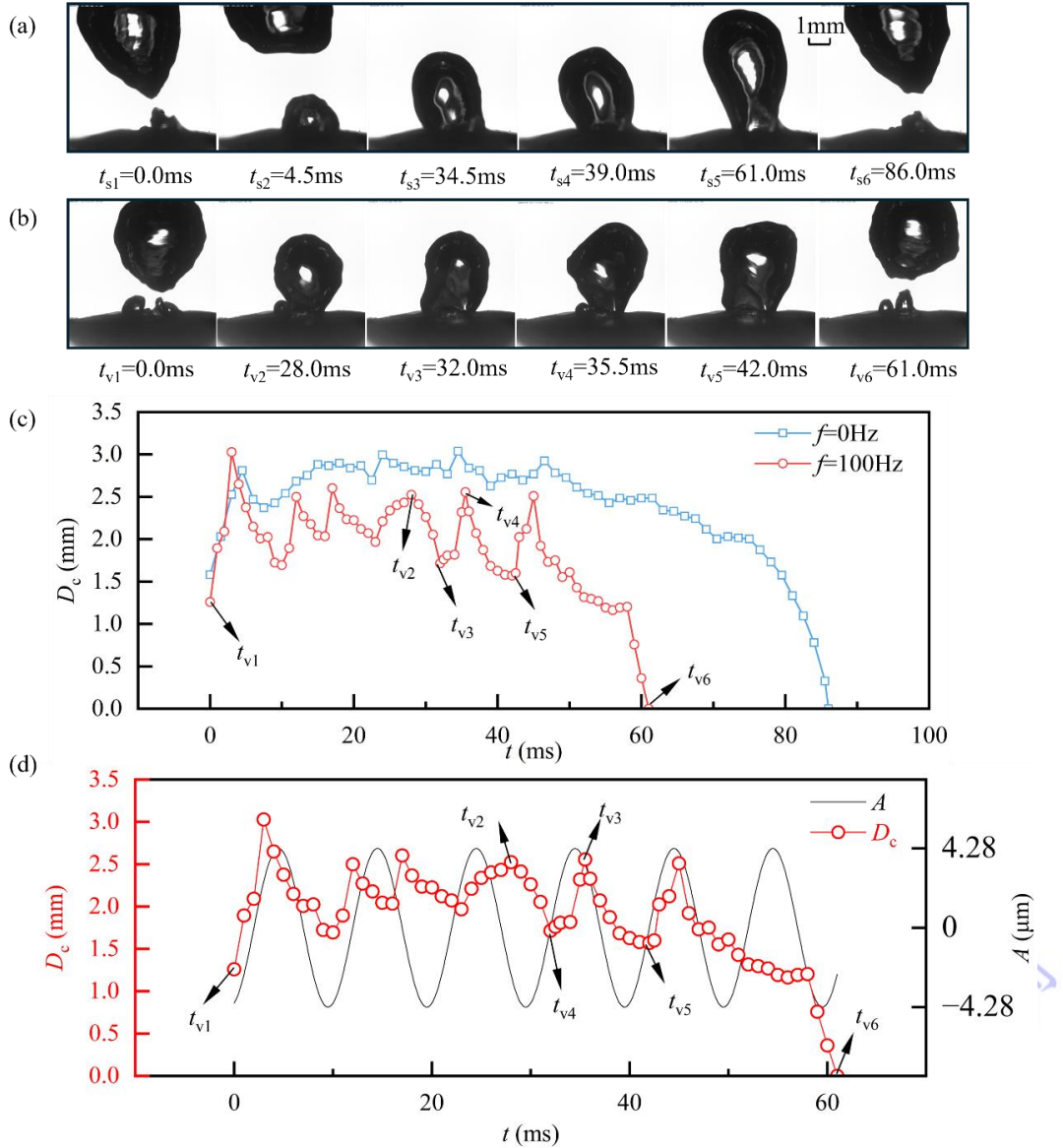


图 7 $q = 700 \text{ kW/m}^2$ 时的气泡动力学(a)无振动时气泡脱离图像；(b) $f = 100 \text{ Hz}$ 时气泡脱离图像；(c)气泡基圆直径；(d)气泡基圆直径与柔性板振幅耦合

Fig.7. Bubble dynamics at $q = 700 \text{ kW/m}^2$ (a) Image of bubble detachment without vibration; (b) Image of bubble detachment at $f = 100 \text{ Hz}$; (c) Diameter of the bubble base circle; (d)

Coupling of the bubble base circle diameter with the amplitude of the elastic plate

由图 7(c)可知，当 $f = 100 \text{ Hz}$ 时，气泡脱离时间缩短了 40.98 %，气泡基圆直径生长受柔性板振荡影响，且基圆直径的脱离回缩阶段相较于无振动工况明显加快，因此此时气泡脱离由柔性板振荡主导。由图 7(d)可知，随着气泡基圆直径

的生长，气泡基圆直径的有效响应速度逐渐降低，其位移变化开始滞后于柔性板运动，从而在两者之间形成明显的相位差。当柔性板在短时间尺度内施加的位移变化速率超过三相接触线所能提供的最大迁移速度时，气泡几何形态的调整已无法仅通过接触线位移来实现，此时系统进入运动学不相容状态。在该状态下，气泡上部仍随基底运动发生位移，而气泡底部受限于滞后的接触线响应，二者之间的位移差只能通过界面的局部拉伸来加以补偿，从而在气泡底部形成逐渐变细的颈部结构。

一旦颈缩过程被触发，该运动学不相容性将进一步放大。随着颈部半径的减小，为维持几何连续性所需的局部位移变化速率迅速增加，而三相接触线的响应速度仍受其自身上限约束，导致颈缩过程呈现自增强特征。最终，颈部在有限时间内发生快速塌缩，气泡以突发方式完成脱离，而非经历缓慢的准静态滑脱过程。

3.3 机理分析

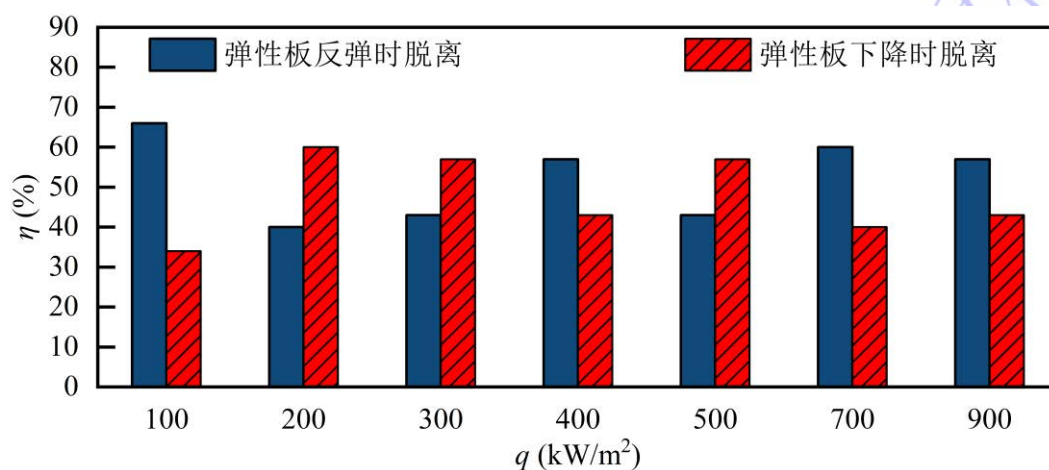


图8 气泡脱离时柔性板状态比例

Fig.8. Proportion of elastic plate state when bubbles detach

由图8可知，在沸腾实验过程中，气泡脱离柔性板时并非仅发生在柔性板的单一运动状态下，而是同时存在两种典型的相位模式，即气泡既可以在柔性板反

弹阶段脱离，也可以在柔性板下降阶段脱离。通过该图可以直观地表明：气泡脱离时刻与柔性壁面的振动相位并非固定对应关系；两种脱离模式在不同热流密度工况下均存在，只是占比有所差异；这一发现为后续分析柔性板振动与气泡动力学行为的耦合关系，提供了基础的现象学依据。

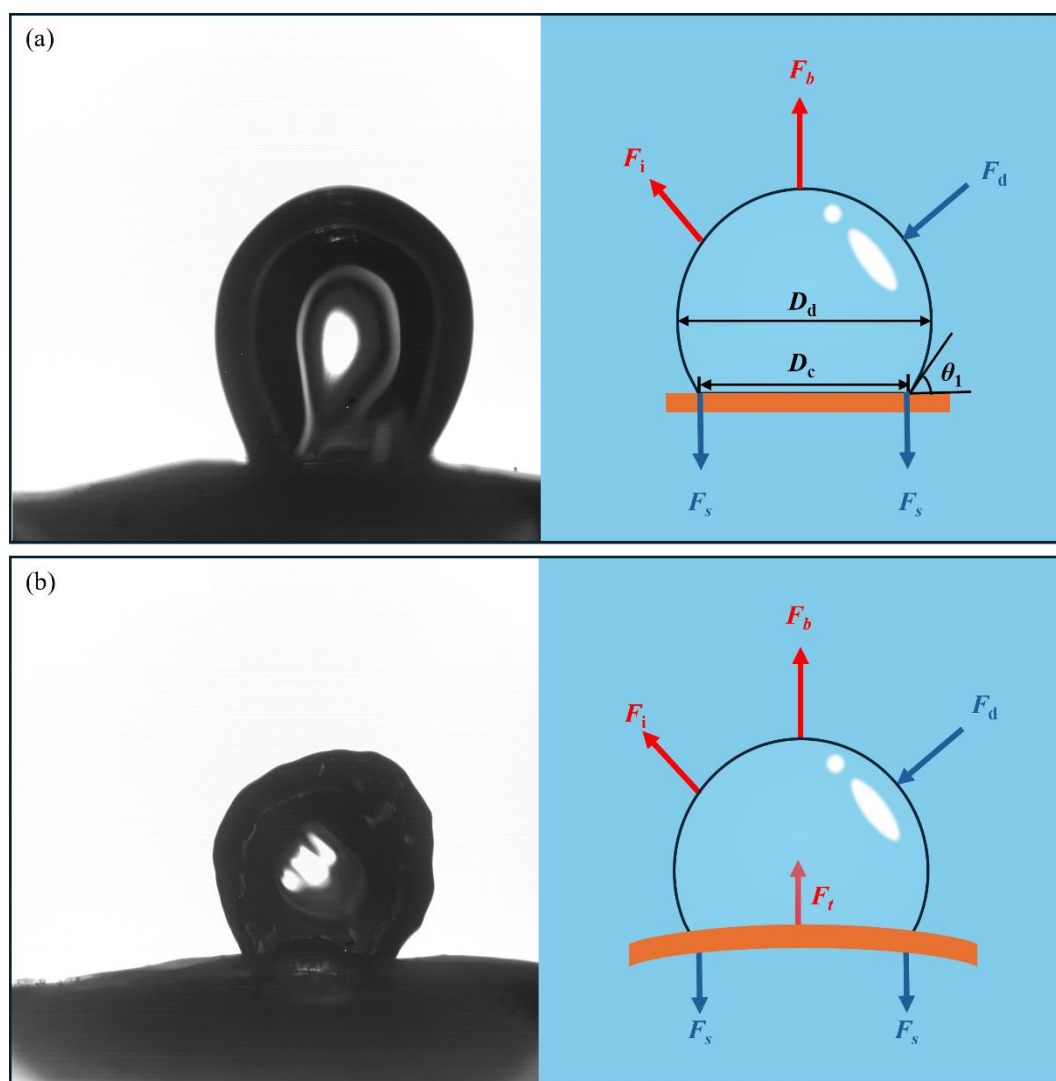


图 9 气泡不同时刻的受力分析(a)无振动时；(b)柔性板反弹时

Fig.9. Force analysis of the bubble at different times (a) without vibration; (b) when the elastic plate rebounds

柔性板无振动时气泡脱离：在无振动工况下，柔性板保持静止，气泡在加热表面上成核、生长、脱离，仅在浮力、表面张力等力共同作用下达到受力平衡临

界状态时发生脱离。此时气泡脱离完全由自然浮力主导，无外部振动带来的附加惯性力与运动干扰，是沸腾传热中最典型、最基础的气泡脱离形式。

在气泡动力学相关研究中，通常将阻碍气泡从液体表面脱离的力定义为“负力”，将促进气泡实现脱离的力定义为“正力”。当液体发生蒸发过程时，气泡内部压力升高，体积随之膨胀；当作用于气泡的正力幅值超过负力时，气泡将从液体表面发生脱离现象。

该模型进一步明确了正负力的构成：将浮力(F_b)、与惯性力(F_i)界定为正力，将阻力(F_d)与表面张力(F_s)界定为负力。

$$\Sigma F = F_b + F_i - F_d - F_s \quad (3a)$$

上述合力“ ΣF ”为气泡脱离阶段的上升动力提供支撑。

在本模型体系内，气-液两相界面处的表面张力，其本质源于液体表面层分子间相互作用的非均衡性，该张力大小主要由液-气两相界面的固有物理化学性质所决定。对于体系内气泡的表面张力，本模型假设其大小依赖于气泡底部接触线的特征直径，相应表达式为：

$$F_s = \pi \sigma D_d \sin \theta \quad (3b)$$

作用在球形气泡上的浮力“ F_b ”可以使用阿基米德原理计算，并且可以通过以下方式估计：

$$F_b = \frac{\pi \rho_l g D_d^3}{6} \quad (3c)$$

当气泡从加热表面上脱离时，气泡的惯性会影响它的运动。惯性力通常与气泡加速度成正比。气泡的惯性力可以表示为：

$$F_i = \rho_v V_b a \quad (3d)$$

气泡在液体中上升时会受到流体的阻力。这个阻力与气泡的相对速度以及气

泡的形状和大小有关。拖曳力可以写为：

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_l v^2 \frac{\pi D_d^2}{4} \quad (3e)$$

柔性板反弹时气泡脱离：柔性板从向下运动的最低点向上回弹的过程中，板的运动方向由向下转为向上，带动附着在其表面的气泡同步向上运动；当板的回弹加速度足够大时，气泡所受合力为正力，使气泡在板的回弹阶段从板面脱离的现象。

当压电陶瓷以频率 $f = 100 \text{ Hz}$ 振动，且柔性板反弹时，会给气泡一个额外的推力^[33]

$$F_t = m(2\pi f)^2 A(t)^2 \quad (3f)$$

其中 A 为柔性板振幅。此时的合力 F 为：

$$\Sigma F = F_b + F_i + F_t - F_d - F_s \quad (3g)$$

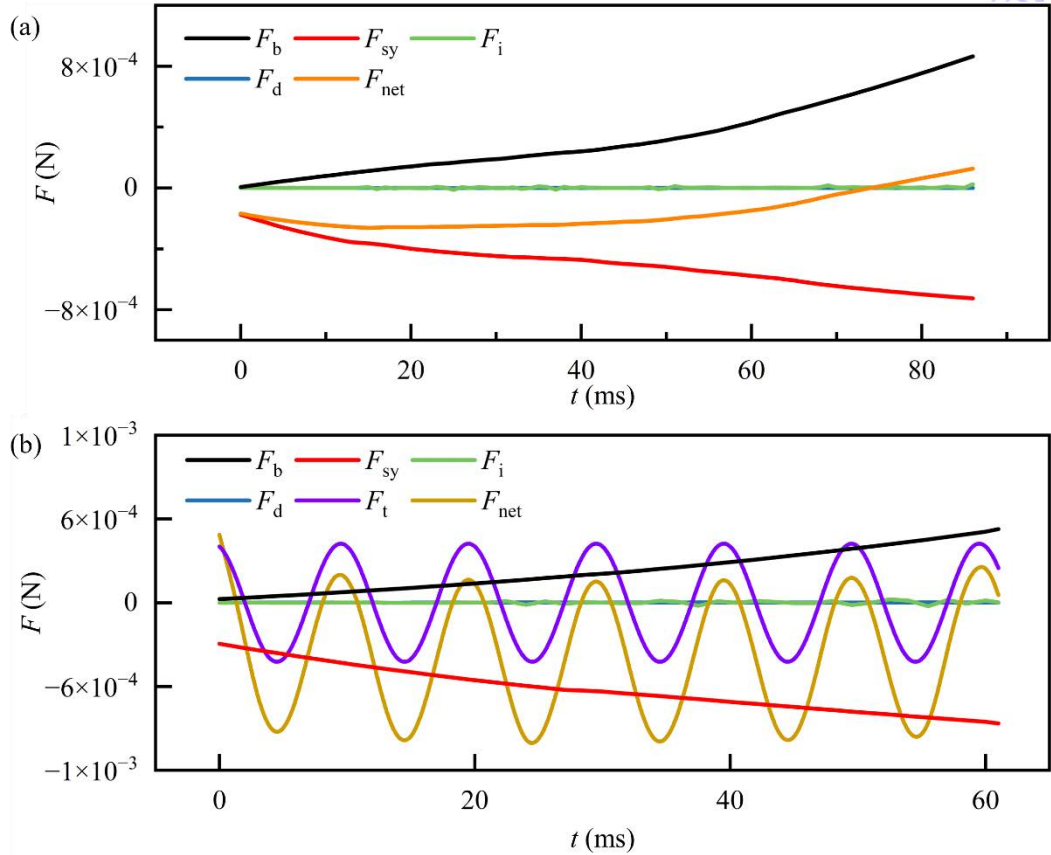


图 10 气泡脱离力平衡模型(a) $f=0\text{ Hz}$; (b) $f=100\text{ Hz}$

Fig.10. Bubble detachment force balance model (a) $f=0\text{ Hz}$; (b) $f=100\text{ Hz}$

图 10 所展示的分析建立了气泡膨胀过程中作用力与相应气泡直径之间的相关性。图 10(a)为无振动时力平衡模型在 $q=700\text{ kW/m}^2$ 时的力-脱离时间的关系；而图 10(b)为 $f=100\text{ Hz}$ ， $q=700\text{ kW/m}^2$ 时的力平衡模型，可见，由于柔性板弹力的存在，气泡合力呈现“正—负”的周期性变化，进而打破气泡与表面的附着力平衡，推动气泡快速脱离。

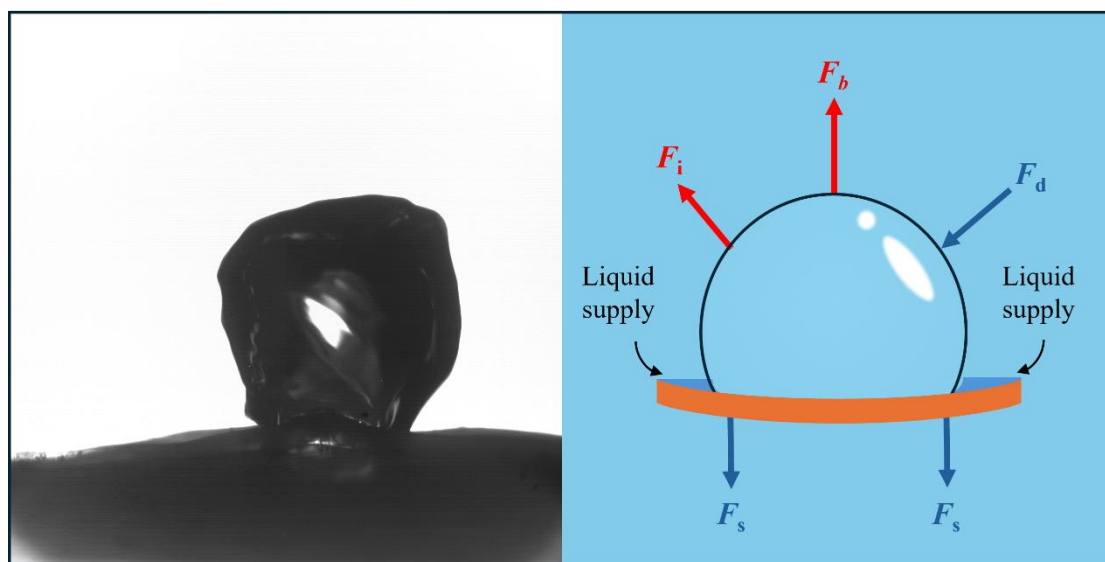


图 11 柔性板下降时强化气泡脱离机理

Fig.11. Mechanism of enhanced bubble detachment during the descent of the elastic plate

柔性板下降时气泡脱离：指气泡脱离时刻，柔性板正处于从上运动的最高点向下运动的下降相位，此时板的运动方向向下。

图 11 所示结果表明，柔性板下降时可以调控气泡受力状态，进而强化液体补给过程。具体而言，当柔性板发生向下位移时，其会在气泡下方诱导形成凹形结构；相较于柔性板处于水平状态的情形，该凹形结构可显著增大气泡下方可用于液体补给的有效体积。液体补给量的增加会对气泡颈部产生“剪切”力学作用，

此作用可显著加速气泡颈部的收缩与断裂进程，最终推动气泡脱离。

4 结论和展望

本文以柔性板为研究对象，通过实验研究与机理分析，探讨了 $f=100\text{ Hz}$ 典型简谐振动工况下柔性板振动对饱和池沸腾气泡脱离行为及传热性能的影响，表明了该工况下加热器振动的沸腾传热强化机制，实验结果表明：

(1)在 $f=100\text{ Hz}$ 振动条件下，柔性板振动能显著提高池沸腾的传热能力，其平均传热系数相较无振动工况最大提升 28.52%，验证了该频率下振动对沸腾传热的强化作用。

(2)气泡脱离直径在 $f=100\text{ Hz}$ 下较基准工况最多可减小 44.33 %，这表明该频率下振动加速了气泡脱离过程，使得气泡在更小的直径就能够脱离加热表面。

(3)进一步的机理分析说明： $f=100\text{ Hz}$ 时，在不同热流密度条件下，气泡脱离行为呈现出不同的控制机制。在低热流密度下，气泡的脱离主要受浮力的主导，而振动的作用较为微弱；而在高热流密度下，振动对气泡脱离的影响则变得更加显著，尤其在 $q=700\text{ kW/m}^2$ 时，振动引起的惯性力与接触线滞后的相互作用导致了“运动学不相容”，触发了气泡的快速颈缩脱离。

(4)通过剖析 $f=100\text{ Hz}$ 下柔性板振动对气泡脱离过程的影响，本文进一步识别了气泡脱离时柔性板的两种典型运动状态（反弹与下降），并讨论了这两种状态下的不同强化机制。柔性板反弹通过外加惯性力改变气泡的脱离条件，而下降状态则通过引入凹形补液空间与加速颈部剪切促进气泡快速断裂。

需要说明的是，本文仅选取了典型振动频率工况（ $f=100\text{ Hz}$ ）开展柔性板振动对饱和池沸腾传热特性的实验研究，所得结论仅反映该特定频率下的气泡动力

学行为与强化传热机理，未对不同振动频率进行系统研究。后续研究将在此基础上，拓展对不同频率的工况分析，进一步揭示振动频率对气泡脱离行为、传热强化效果的影响规律，完善柔性表面强化沸腾传热的机理，从而为工程应用中振动参数的优化提供更全面的理论支撑。

参考文献

- [1] Huang M, Luo J, Mo D, Heng Y 2025 *Appl. Therm. Eng.* **261** 125117
- [2] Salah W A, Abuhelwa M 2020 *J. Eng. Sci. Technol.* **15** 455
- [3] Alkrush A A, Salem M S, Abdelrehim O, Hegazi A A 2024 *Int. J. Refrig.* **160** 246
- [4] He M 2024 *D* (in Chinese) [何明 2024 华北电力大学]
- [5] Wang Z, Sun X, Baghoolizadeh M, Esmaeili S, Alkhalifah T, Marzouki R 2025 *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **162** 108659
- [6] Gao W, Fu K, Xu X, Liang X 2023 *Sci. China Technol. Sci.* **66** 3245
- [7] Chen Y J, Gong J H, Ding J, Yu B, Chen L, Li Y G, Tao W Q 2023 *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **149** 107160
- [8] Zhou J, Luo X, Li C, Liang L, Wang G, He B, Tian Z Q 2021 *Ultrason. Sonochem.* **78** 105737
- [9] Bergles A E 2002 *Exp. Therm. Fluid Sci.* **26** 335
- [10] Li W, Dai R, Zeng M, Wang Q 2020 *Renew. Sustain. Energy Rev.* **130** 109926
- [11] Unno N, Yuki K, Taniguchi J, Satake S I 2020 *Int. J. Heat Mass Transfer* **153** 119588
- [12] Han C, He M, Ma X, Xu J, Wang S 2024 *Int. J. Heat Fluid Flow* **107** 109425

- [13] Ma X, He M, Han C, Xu J 2024 *Int. J. Heat Mass Transfer* **227** 125580
- [14] Pereira J, Souza R, Lima R, Moreira A, Moita A 2024 *Micromachines* **15** 281
- [15] Prisnyakov V F, Navruzov Y V, Mamotov P V, Stoichev A V 1992 *Teplofiz. Vys. Temp.* **30** 105
- [16] Navruzov Y V, Stoichev A V 1994 *Teplofiz. Vys. Temp.* **32** 530
- [17] Varaksin A Y 2023 *High Temp.* **61** 739
- [18] Vinko Z, Naim A 1994 *J. Enhanced Heat Transfer* **1**
- [19] Legay M, Gondrexon N, Le Person S, Boldo P, Bontemps A 2011 *Int J Chem Eng* **2011** 670108
- [20] Prisnyakov V F, Prisnyakov K V 2001 *J. Eng. Phys. Thermophys.* **74** 1015
- [21] Sathyabhama A, Prashanth S P 2017 *Heat Transfer Asian Res.* **46** 49
- [22] Yu X Y, Huang W S, Liu X L, Liu P T, Tang G H, Li X L 2025 *Appl. Therm. Eng.* **262** 125241
- [23] Yang Z L, Dinh T N, Nourgaliev R R, et al. 2001 *Int. J. Heat Mass Transfer* **44** 195
- [24] Sun T, Li W, Yang S 2013 *Int. J. Heat Fluid Flow* **44** 120
- [25] Sadeghi R, Shadloo M S 2017 *Numer. Heat Transfer A* **71** 560
- [26] Atashi H, Alaei A, Kafshgari M H, Aeinehvand R, Rahimi S K 2014 *Exp. Heat Transfer* **27** 428
- [27] Alangar S 2017 *Heat Mass Transfer* **53** 73
- [28] Michaie S, Rullière R, Bonjour J 2017 *Exp. Therm. Fluid Sci.* **87** 117
- [29] Ami T, Schulenberg T 2019 *Int. J. Heat Mass Transfer* **133** 769

- [30] Zhang L 2008 *D* (in Chinese) [张璐 2008 清华大学]
- [31] Yi T H, Chen C Y, Lei Z S, Zhao J F 2019 *Chin. J. Space Sci.* **39** 469
- [32] Hazi G, Markus A 2009 *Int. J. Heat Mass Transfer* **52** 1472
- [33] Xing Y, Zhang Y, Ding S, Zheng X, Xu M, Cao Y, Gui X 2020 *Powder Technol.* **361** 812

录用稿件，非最终出版稿

Experimental Study on Surface Strengthening of Boiling by Flexible Oscillation*

HUANG Pengfei¹⁾ XU Daoming¹⁾ MA Xiaojing^{1)2)†} XU Jinliang¹⁾²⁾

1) (Beijing Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer for Low Grade Energy Utilization, North China Electric Power University, Beijing, 102206)

2) (Key Laboratory of Power Station Energy Transfer Conversion and System of Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206)

Abstract

Enhancing boiling heat transfer is of great significance for the thermal management of high heat flux electronic devices. To address the limited heat transfer efficiency of conventional cooling methods and the insufficient understanding of bubble detachment mechanisms in existing studies on vibration-enhanced boiling, this study proposes a method for enhancing saturated pool boiling heat transfer by driving a flexible surface to oscillate using a piezoelectric ceramic actuator. An experimental platform consisting of a boiling system, a vibration excitation system, a temperature control system, and a synchronized visualization system was established. Under atmospheric-pressure saturated pool boiling conditions, the no-vibration case was used as the baseline, and $f = 100$ Hz was selected as a representative vibration frequency to systematically investigate the effects of flexible plate vibration on boiling heat transfer performance, bubble base diameter, detachment time, and bubble detachment mode. Synchronized high-speed imaging and data acquisition were employed to extract key dynamic parameters during bubble growth, retraction, and

detachment. In addition, a bubble force balance model was used to analyze the enhancement mechanisms of bubble detachment under different motion phases of the flexible plate.

The experimental results show that flexible plate vibration can significantly improve saturated pool boiling heat transfer performance. Compared with the no-vibration case, the boiling heat transfer curve shifts upward at $f = 100$ Hz, with the heat transfer coefficient increasing by up to 28.52% and the bubble detachment diameter decreasing by up to 44.33%. These results indicate that flexible surface vibration promotes rapid bubble detachment at a smaller size, thereby enhancing surface rewetting and liquid replenishment. Further analysis reveals that the effect of vibration on bubble detachment is not governed by a single mechanism, but instead exhibits a distinct coupling relationship with heat flux density. At low heat flux density, the bubble growth rate is relatively low, and the three-phase contact line can respond promptly to the periodic displacement of the flexible plate. In this regime, bubble detachment remains primarily governed by buoyancy, while vibration acts only as a weak disturbance. At high heat flux density, however, rapid bubble growth significantly intensifies the lagged response of the contact line. The periodic inertial force introduced by flexible plate vibration further amplifies bubble interfacial deformation, leading to kinematic incompatibility and necking instability at the bubble base, which ultimately triggers rapid bubble

detachment.

Furthermore, two typical phase-dependent mechanisms by which flexible plate vibration promotes bubble detachment are identified. When a bubble detaches during the rebound stage of the flexible plate, the additional inertial force generated by the upward motion of the plate modifies the bubble force balance and reduces the critical condition required for detachment. When a bubble detaches during the descending stage of the flexible plate, the downward deformation of the plate increases the liquid replenishment space beneath the bubble, strengthens the shear effect of the liquid on the gas-liquid neck, and accelerates neck contraction and rupture. These findings demonstrate that flexible surface vibration not only enhances boiling heat transfer performance but also enables active regulation of bubble dynamics by controlling the bubble detachment phase, contact line response, and liquid replenishment process. This study provides experimental evidence and mechanistic insight into boiling heat transfer enhancement using flexible oscillating surfaces and offers a reference for the design of active boiling enhancement technologies for high heat flux thermal management.

Keywords: Boiling heat transfer, Bubble dynamics, Vibration, Flexible materials

* Project supported by National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2023YFB4102400) , Beijing Municipal Natural Science Foundation (Grant No. 3262025)

† Corresponding author E-mail: mxj@ncepu.edu.cn
The first author E-mail: 18531211679@163.com

录用稿件，非最终出版稿