



“气泡连珠”强化沸腾传热实验研究

马骁婧^{1,2*}, 王淞鹤¹, 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

* E-mail: mxj@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2025-03-20; 接受日期: 2025-08-29; 网络版发表日期: 2025-12-16

国家自然科学基金(批准号: 52206196)和国家重点研发计划(编号: 2023YFB4102400)资助项目

摘要 算力提升背景下数据中心规模不断扩大, 高能耗问题日益突出. 两相浸没式冷却技术因具有较强的换热能力成为有望解决数据中心高能耗问题的有效手段. 提升沸腾换热的性能对提升两相浸没式冷却技术的散热效率至关重要. 本文提出并研究了一种基于压电陶瓷驱动柔性加热器振动强化沸腾传热的新方法. 柔性加热器表面相对固定表面沸腾传热系数提升55.67%, 临界热流密度推迟了25.99%. 发现振动频率为200 Hz时特有的“气泡连珠”现象, 气泡脱离频率最大提升了362.10%. 得到了实现气泡合并的速度及加热器位移条件, 基于加热器振动特性与气泡生长特性耦合推导了实现气泡连珠的最佳振动频率范围, 得到最佳频率范围公式. 本文为气泡调控提供了新思路, 为发展基于柔性材料的沸腾强化表面研究提供了理论参考.

关键词 沸腾换热, 气泡动力学, 表面振动, 柔性材料

1 引言

近年来, 人工智能(AI)技术的迅速发展正在重新塑造人们的生产生活与管理方式, AI技术已经在多个领域, 多个维度展现出其价值与潜力^[1]. AI技术的高速发展需要有足够强大的算力作为支撑, 然而在算力提升的过程中, 芯片的功耗和发热量也会迅速上升. 例如, AI模型的训练过程需要处理海量的数据, 计算极为复杂的矩阵, 这一过程对硬件设备提出了极高的要求. 为了适应AI技术的发展, 数据中心的规模不断扩大, 服务器设备的密度和性能不断提高. 高性能和高密度服务器的功耗和发热量迅速增加, 甚至局部热流已经超过了1 kW/cm², 数据中心功耗和发热量的激增

导致其散热面临重大挑战, 已经成为制约AI发展不可忽视的因素^[2].

浸没式冷却由于其出色的冷却性能逐渐受到人们的广泛关注, 单相浸没式冷却的冷却能力是空冷的1000~3000倍, 两相浸没式冷却甚至更高. 两相浸没式液冷技术采用换热效率较高的沸腾换热, 是突破电子设备散热性能的重要手段, 而突破的关键在于提高沸腾换热过程的换热效率^[3]. 众所周知, 提高沸腾换热的技术主要可分为被动式(如表面结构^[4]、表面改性^[5]等)和主动式(如外加电磁场^[6]、外加振动^[7]等)强化技术, 其中主动式强化技术的效果尤为显著, 特定条件下能将沸腾换热效率提高10倍以上. 振动是强化沸腾换热的有效手段之一, 虽然振动本身会对设备的寿命造

引用格式: 马骁婧, 王淞鹤, 徐进良. “气泡连珠”强化沸腾传热实验研究. 中国科学: 技术科学, 2026, 56: 381–392

Ma X J, Wang S H, Xu J L. Boiling heat transfer enhancement by “bubble train” (in Chinese). Sci Sin Tech, 2026, 56: 381–392, doi: 10.1360/SST-2025-0053

成一些损伤,但能有效提高沸腾换热系数,因此许多学者进行了利用振动强化沸腾传热的研究。

通过振动来强化沸腾换热的技术引入振动的方式主要有两种,一种是自驱式,另一种是外部附加式,二者各有利弊。自驱式是指利用材料自身及沸腾过程中的流场运动特性和气泡运动特性,捕获气泡运动和流场运动时逸散的能量,使物体本身产生振动,从而达到强化沸腾传热的目的,是一种被动式强化手段。Unno等人^[8]开展了自驱动振动元件过冷池沸腾实验,他们在加热器上方放置一个铜板,当加热表面产生的气泡与上板冷表面接触时,气泡的冷凝萎缩会诱导铜板振动。当上板的振动频率与气泡产生频率相当时,强化最为显著。与无铜板相比,换热系数提高了20%。本研究团队^[9,10]也提出了一种利用一对柔性翅片的振动来促进气泡脱离的新方法,柔性翅片在张开过程中能捕获气泡的动能和表面能转化为自身弹性势能,在闭合过程中将弹性势能回馈给气泡提高其动能,结果表明,气泡的脱离频率和气泡在通道内的上升速度最大分别提高了86%和17%。然而自驱式振动作为被动式强化手段其驱动力来源有限,对沸腾性能的提升有限。

外部附加式是指利用激振器、超声波发生器等设备产生振动,并将振动直接作用于沸腾加热器表面或流场,引入了外部能量,属于主动式强化手段^[11]。外部附加式振动强化沸腾传热技术主要研究作用于加热器表面的机械振动及作用于整个流场的超声振动。超声振动最佳强化效果出现在过冷沸腾和自然对流换热阶段,饱和沸腾与核态沸腾阶段的强化效果略显不足^[12,13]。此外,有研究表明超声波是一种低能量波,易在介质中衰减,只有在共振或大功率情况下才能发挥显著强化换热的作用,而高频超声振动引起的设备共振会对设备造成破坏性损伤^[14]。两相浸没式冷却换热过程以饱和沸腾与核态沸腾为主,且服务器设备在高频超声共振下会出现性能下降甚至设备损坏等问题,故超声振动不适用强化两相浸没式冷却技术。

有研究表明,对沸腾表面直接施加一定频率和振幅的机械振动可以显著增强沸腾换热^[15]。Prisnyakov等人^[16]分析了已有文献中表面振动对沸腾传热性能的影响。他发现表面振动对沸腾传热的强化在核态沸腾区有更出色的表现,在一定频率和振幅内振动对于沸腾换热系数的提升在2倍以上,且换热系数的提升

与振动的频率和振幅成正比。Vinko和Naim^[17]通过实验研究了振动表面的池沸腾性能,实验的振动频率为0~70 Hz,振幅为0.1~2 mm。结果表明,换热系数随振动频率和振幅的增加而增加,最大提升为25%。Eid和Gomaa^[18]实验研究了一端均匀加热振动刨床翅片对换热效率的影响,振动频率为12.5~50 Hz,振幅为9~27 mm,结果发现换热效果有显著改善,最大可达85%,换热效率随频率增加而增加。然而,一些学者得到了不同的结果。Sathyabhama和Prashanth^[19]进行了振动频率为0~25 Hz,振幅为0~5 mm的振动铜表面沸腾传热性能研究。他们发现,随着振动频率和振幅的增加,振动对沸腾换热性能的提升存在一个最佳的频率和振幅,且换热系数最大提升为26%,继续提高振动的频率和振幅会导致传热恶化,换热系数下降。由此可见,关于振动频率和振幅对沸腾性能的影响尚无普适性的结论,甚至部分研究的结果相背。

沸腾传热是气泡周期性地地在沸腾表面成核、生长、脱离而发生的过程。深入研究气泡动力学,了解气泡成核、生长、脱离过程的机理与影响因素,是准确分析沸腾强化机理的必要途径^[20]。气泡在成核的过程中,其底部与加热面之间会形成微米量级的微液层,微液层由于直接接触高温表面会在极短时间内迅速蒸发并发生剧烈传热^[21]。此外,在气泡成核的瞬间,气液界面因表面张力变化会引发局部对流,周围冷流体被吸入成核点附近替换被加热液体,形成微尺度对流^[22]。通过合理的方式修饰沸腾表面可以合理分布成核点,充分发挥成核阶段的传热潜力,强化沸腾传热。Atashi等人^[23]研究了振动对竖直铝圆柱表面沸腾换热的影响,发现振动能够有效增加成核点位,最佳的沸腾换热性能出现在振动频率为25 Hz时,换热系数提升了116.6%。气泡的生长过程是气泡演化过程中的第二个阶段。气泡生长过程的核心传热机制也是微液层蒸发,且比成核阶段的微液层蒸发更强。在微液层蒸发的过程中,气泡的体积会不断膨胀并挤压周围液体,从而破坏了原有的热边界层结构,使热边界层的厚度变薄,温度梯度增大,同时冷流体从主流区补充至加热面附近,最终表现出换热增强^[24]。减薄边界层厚度,是提高微液层换热的有效手段。Alangar^[25]在关于表面振动对沸腾换热影响的研究中发现,表面振动引起的湍流流动增强了流体混合,有效地减薄了热边界层厚度,提高了对流换热系数和临界热流密度。气泡的脱离过程

是气泡演化中极为重要的过程. 气泡的脱离直径和脱离频率是决定沸腾传热性能的两个重要参数, 气泡脱离过程的主要传热机制是尾流效应^[26]引起的湍流混合及沸腾表面再湿润^[27]. 湍流混合的强度及再湿润过程中的瞬态传热效率都与气泡的脱离直径和脱离频率有关. 关于改善气泡脱离直径和气泡脱离频率的技术, 前人已经做了大量研究. 微纳结构^[28]、纳米流体^[29]、自驱式振动^[10]等都是广泛应用的改进手段, 其基本原理是通过调节力平衡, 减小气泡脱离对浮力的需求, 进而减小气泡脱离所需体积, 缩短气泡生长周期, 最终表现为气泡脱离直径减小, 气泡脱离频率增加, 表面振动也是有效手段之一. Alimoradi等人^[30]在研究 0~50 Hz 表面振动对沸腾的影响时发现, 表面振动能增大气泡与流体间的位移差, 而惯性力是流体位移的函数, 故惯性力增大, 且惯性力是促进气泡脱离的力, 因此气泡脱离所需的浮力减小, 气泡脱离直径减小同时气泡脱离频率增加.

通过对振动强化沸腾传热的研究现状分析发现, 目前研究的重点大多停留在表面振动对沸腾换热性能的影响, 较少深入研究表面振动强化沸腾换热性能的机理, 尤其是对气泡动力学的影响. 此外, 现有加热器

表面振动的研究大多振动频率在百赫兹以内, 振幅为毫米级. 然而, 气泡运动周期通常为几十毫秒, 因此振动频率在百赫兹以上时会更契合气泡周期, 且有望实现更好的沸腾性能. 振动作用的加热面以刚性表面为主, 极少看到关于柔性表面振动强化沸腾的研究, 因此柔性表面振动改善沸腾的相关研究目前存在不足, 亟需更多的研究来补充这方面的空缺.

本文针对目前研究的不足之处, 采用不锈钢作为沸腾加热器, 利用压电陶瓷作为振动源, 进行了柔性表面振动强化沸腾传热实验. 本文研究了柔性表面振动对沸腾传热性能及气泡动力学的影响机理. 在实验中观察到了气泡间纵向合并及脱离形成的气泡连珠现象, 分析了气泡连珠的形成机理并结合柔性加热器振动特性推导了实现多气泡连珠最佳振动频率范围公式.

2 实验原理

整个实验系统由振动发生系统、控温系统、观测系统及池沸腾实验系统组成, 如图1所示. 振动发生系统包括压电陶瓷驱动装置和压电陶瓷. 压电陶瓷驱动

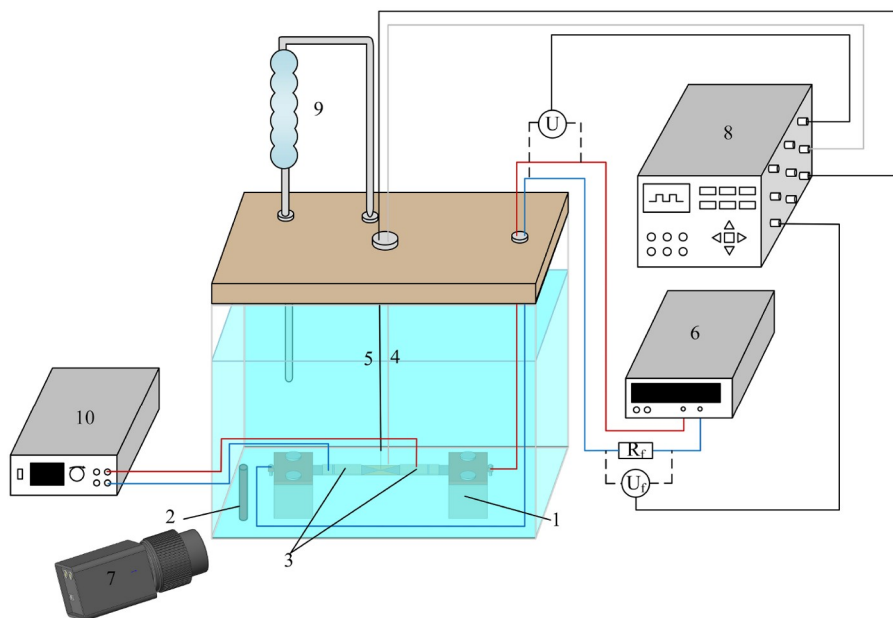


图1 (网络版彩图)实验系统(1, 沸腾装置; 2, 加热棒; 3, 压电陶瓷; 4, 热电偶(水中); 5, 热电偶(壁面); 6, 直流电源; 7, 高速摄像机; 8, 数据采集系统; 9, 冷凝器; 10, 驱动电源)

Figure 1 (Color online) Experimental system (1, boiling setup; 2, heating rod; 3, piezoelectric ceramic; 4, thermocouple (water); 5, thermocouple (wall); 6, direct current (DC) power supply; 7, high-speed camera; 8, data acquisition system; 9, condenser; 10, driving power supply).

装置中的信号源(Rigol, DG952, 0~50 MHz)产生具有一定频率和幅值的交流信号, 经过功率放大器(Aigtek, ATA-204)放大幅值(频率不变)后作用于压电陶瓷(浙江神镭超声有限公司生产), 压电陶瓷会产生相应频率的振动。控温系统由PID装置、电网交流电源、变压器、加热棒、热电偶组成, 热电偶能够测量池水的实时温度并将温度信号传递给PID装置, PID装置接收到温度信号后与设定温度(100℃)进行对比, 从而控制变压器的电压输出, 进而使加热棒的功率与池水散热功率相当, 从而保持池温维持在设定温度附近。观测系统包括高速摄像机、同步器、数据采集系统。高速摄像机和数据采集系统通过同步器同时触发, 同步采集气泡运动图像及传热数据, 并保存在指定位置。池沸腾实验系统由沸腾实验装置、直流电源、标准电阻 $R_c = 2\ \Omega$ 、冷凝回流管、冷却管、沸腾池组成, 实验过程中通过控制直流电源输出恒定电流, 从而控制沸腾实验装置的热流密度, 池水汽化形成的蒸汽经过冷凝回流管时会迅速凝结并回流到沸腾池中, 保证池水水位稳定及气压平衡, 实验结束时用冷却管将池水温度降至室温。

沸腾实验装置由不锈钢加热器、测温热电偶、聚酰亚胺薄膜、压电陶瓷、铜电极组成。热电偶位于不锈钢元件和薄膜之间用于测量沸腾表面的温度, 薄膜与不锈钢利用耐热胶(日本, 信越KE-45)黏合, 如图2(a)所示。铜电极由铜盖板和底座组成, 底座的长、宽、高

分别为40、20和20 mm, 采用聚醚醚酮(PEEK)材质, 且上表面中间有10 mm宽的凹槽, 配合铜盖板固定加热器, 压电陶瓷尺寸为20 mm × 10 mm × 0.5 mm, 使用环氧胶(金士达K-3880)固定于距离铜电极5 mm处。加热器尺寸如图2(b)所示, 中间较窄的部分为沸腾区域#6 (0.6 mm × 1 mm), 两端较窄部分为固定区域(9 mm × 10 mm)。器件的刚性根据Timoshenko给出的梁的变形量比值公式来判定, 即 $\eta = FL^2 / 3EI > 0.01$ ^[31]。本文实验中所使用压电陶瓷最小出力 F 为1800 N, 结合沸腾加热器的尺寸可以得到加热器为柔性表面。

实验前测量了不锈钢表面的表面特征, 使用3D光学显微镜(Bruker, ContourGT-K, USA)测量测试表面的表面形态, 不确定度为0.3 nm。表面的接触角由Data-physics (OCA15 plus, GER)测量, 不确定度为0.1°。不锈钢表面粗糙度为0.951 μm , 接触角 $\theta_{CA} = 80^\circ$ 。

实验过程中使用高速相机捕捉气泡运动, 以2000 fps速率记录。图片大小为1016 × 1016, 分辨率为7.1 μm 。不锈钢的热流范围在0~1215.9 kW/m², 且最高温度为148.0℃。电路电压采用示波记录仪(DL750, YOKOGAWA, Japan), 常用量程0~10 V, 精度为0.5%, 误差为0.05 V。实验中, 电源电压 U_1 和标准电阻电压 U_2 测量最大值分别为8.81和6.50 V, 实验参数误差如表1所示。

本次实验中, 使用PZT-5压电陶瓷作为振动源带动沸腾表面振动, 其各项参数如表2所示。沸腾实验在大

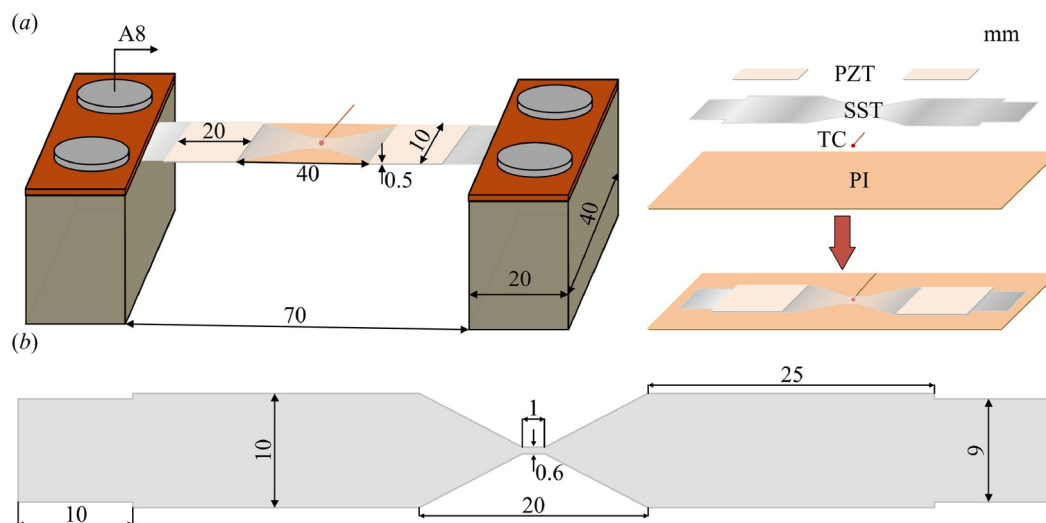


图2 (网络版彩图)沸腾装置。(a) 装置结构; (b) 加热器尺寸

Figure 2 (Color online) Boiling setup. (a) Structure of the setup; (b) dimensions of the heater.

表 1 测量和导出参数不确定度**Table 1** Uncertainty in measured and derived parameters

Parameter	Uncertainty (%)
Power voltage U_1	0.57
Resistor voltage U_2	0.77
Liquid temperature T_b	0.51
Wall temperature T_w	0.20
Heat flux q	6.12
Heat transfer coefficient h	6.82

表 2 压电陶瓷参数**Table 2** Parameters of piezoelectric ceramics

Parameter	Value	Unit
Frequency constant N_t	1970	m Hz
Piezoelectric constant d_{33}	826×10^{-12}	m/V
Elastic constant E_{33}	4.6×10^{10}	N/m
Density ρ	7.91×10^3	kg/m ³
Size ($l \times d \times h$)	$10 \times 10 \times 0.5$	mm
Minimum output $F_{\min}$	1800	N

气压 $P_0 = 0.1013$ MPa 下进行, 使用去离子水作为工质, 控制池温为 99.7°C . 通过调节电源输出电流来控制加热装置的热流密度, 计算方法如下.

$$q = \frac{I^2 R_t}{A} = \frac{U_2^2 R_t}{A R_c^2}, \quad (1)$$

$$R_t = \frac{U_1 - U_2 - U_c}{I} \times 0.244. \quad (2)$$

壁面过热度 and 换热系数:

$$\Delta T = t_w - t_s, \quad (3)$$

$$h = \frac{q}{t_w - t_f}. \quad (4)$$

电阻值 R_t 由电阻率 ρ_t 、横截面积 S 、长度 l 决定:

$$R_t = \frac{\rho_t l}{S}. \quad (5)$$

通过采集电压数据(电源两端电 U_1 和标准电阻两端电压 U_2), 20°C 时柔性不锈钢加热器的电阻 $R_{20} = 0.3998 \Omega$ 来估算接触电阻(实验过程假设接触电阻不会随温度变化):

$$R_c = \frac{U_1 - U_2}{I} - R_{20}. \quad (6)$$

本次实验研究了振动频率为 $0 \sim 200$ Hz 的柔性振动表面沸腾性能, 具体振动参数如表 3 所示.

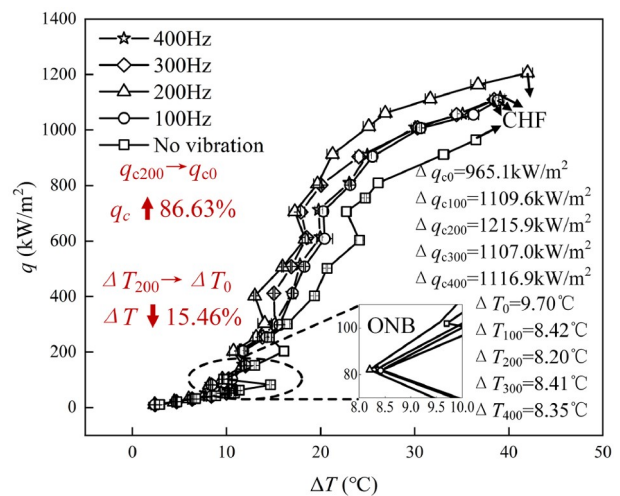
3 实验结果与讨论

3.1 柔性振动表面的沸腾性能

实验测定了 $0 \sim 400$ Hz 振动频率下, 以去离子水为工质的饱和池沸腾的沸腾曲线, 沸腾换热结果如图 3 所示, 无振动、100 Hz、200 Hz、300 Hz 和 400 Hz 下的过热度最大标准差分别为 0.60°C , 0.83°C , 0.78°C , 0.83°C 和 0.54°C . 从图 3 中可以看出, 振动频率为 100 Hz 的沸腾曲线相较于无振动时的沸腾曲线左移, 振动频率为 200 Hz 的沸腾曲线相较于无振动时的沸腾曲线左移幅度更大. 由此可见, 所有频率振动下的沸腾传热性能相对于无振动时均有所提升, 其中 200 Hz 振动频率下的沸腾传热性能表现最好. 与无振动时相比, 振动频率为 200 Hz 时, 沸腾表面的沸腾起始点(ONB)下降了 15.46% , 临界热流密度提高了 25.99% .

表 3 振动参数**Table 3** Vibration parameters

Frequency (Hz)	Voltage (V)	Average amplitude (μm)
0	121.1	0
100	121.1	8.56
200	121.1	45.67

**图 3** (网络版彩图)不同振动频率下的沸腾曲线**Figure 3** (Color online) Boiling curves at various vibration frequencies.

当振动频率超过200 Hz时, 沸腾性能相对于200 Hz工况下降, 随着振动频率的进一步增加, 沸腾曲线逐渐趋近于无振动下的结果. 400 Hz的沸腾曲线近乎与100 Hz的曲线重叠. 本文后续研究聚焦于无振动、100 Hz和200 Hz振动频率下的3组最具代表性的结果. 我们将从气泡动力学角度分析在200 Hz振动频率下沸腾传热性能最佳的原因.

3.2 柔性振动表面的气泡动力学

图4为0~200 Hz振动频率下的气泡动力学参数, 其中图4(a)气泡的脱离频率, 图4(b)气泡的脱离直径, 无

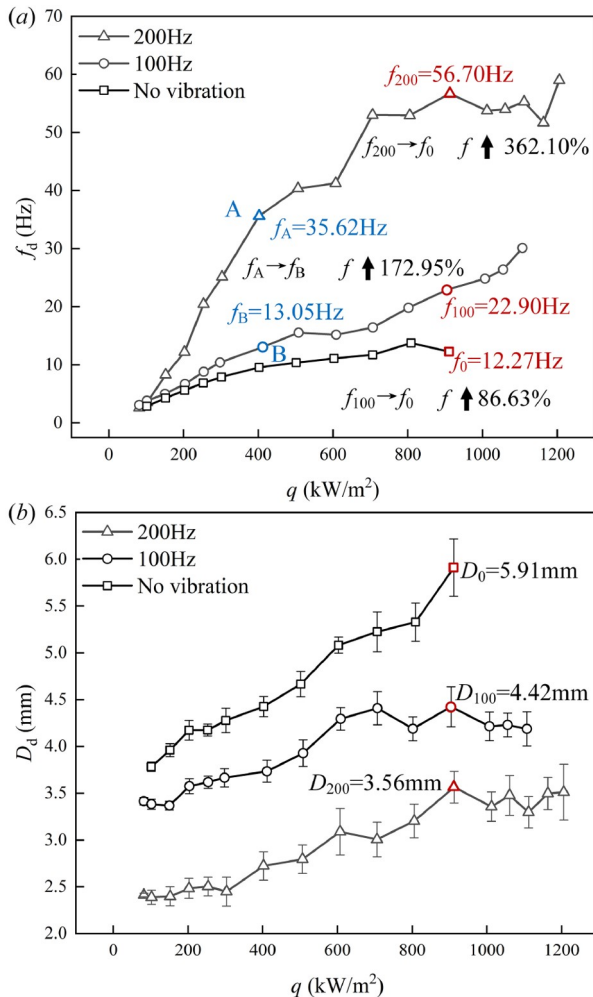


图4 (网络版彩图) 0~200 Hz内气泡的脱离频率和脱离直径. (a) 气泡脱离频率; (b) 气泡脱离直径

Figure 4 (Color online) Bubble departure frequency and diameter at vibration from 0 to 200 Hz. (a) Bubble departure frequency; (b) bubble departure diameter.

振动、100 Hz、200 Hz下的气泡脱离直径标准差最大值分别为0.31, 0.21和0.30 mm. 观察图4(a)发现, 相较于无振动时, 振动频率为100和200 Hz时的气泡脱离频率在热流密度超过200 kW/m²后均有明显提升. 最大提升出现在热流密度为910 kW/m²附近, 振动频率为100 Hz时的气泡脱离频率从无振动时的12.27 Hz提升到22.90 Hz, 提升了10.63 Hz, 相较于无振动时提高了86.63%. 振动频率为200 Hz时气泡的脱离频率为56.70 Hz, 与无振动时相比提高了44.43 Hz (362.10%). 气泡脱离直径的提升也较为明显, 如图4(b)所示, 在相同热流密度下, 振动频率为100和200 Hz时的气泡脱离直径相对于无振动时的气泡脱离直径平均减小了17.95%和42.01%. 最大减小出现在热流密度为910 kW/m²附近, 100 Hz振动频率下的气泡脱离直径由无振动时的5.91 mm减小到了4.42 mm, 减小了1.49 mm, 而振动频率为200 Hz时的气泡脱离直径进一步减小到了3.56 mm, 相较于无振动时减小了2.35 mm (39.76%). 综上所述, 振动显著改善了气泡动力学参数, 且相较于无振动时, 振动频率为200 Hz时提升更为明显.

为了更深入了解气泡动力学变化, 我们对振动频率为200和100 Hz时的气泡运动图像进行分析. 实验过程中观察到的3种气泡脱离形态如图5所示, 分别为单气泡脱离、双气泡合并脱离、多气泡连珠脱离. 图5(a)为无振动时 $q = 911$ kW/m²时的单气泡脱离的运动图像, 单气泡脱离存在于所有工况, 是最基本的脱离形态. 双气泡合并脱离过程可以概括为: 气泡1首先在沸腾表面正常成核, 生长最后脱离, 在气泡1脱离沸腾表面开始上浮的同时, 气泡2成核并迅速生长, 随后气泡2的顶部与气泡1底部接触并开始融合, 最后在气泡1的帮助下, 气泡2以远小于正常脱离直径的尺寸从沸腾表面脱离, 至此双气泡合并脱离过程结束, 如图6(b)所示(200 Hz, 912 kW/m²). 图5(c)为振动频率为200 Hz, $q = 912$ kW/m²的多气泡连珠脱离过程的运动图像, 多气泡连珠可以视为出现了多次双气泡合并脱离过程, 即在上述双气泡合并脱离过程中的气泡2脱离沸腾表面的同时, 气泡3迅速成核、生长, 随后气泡3顶部再次与气泡2底部接触并融合, 最后气泡3同样以较小的尺寸脱离沸腾表面. 随后的气泡继续循环上述合并过程, 直至新生成的气泡无法接触到已脱离气泡, 整个多气泡连珠脱离过程结束. 由此可见, 两类气泡连珠均减小了气泡脱离直径, 缩短了气泡周期, 进而提升了气

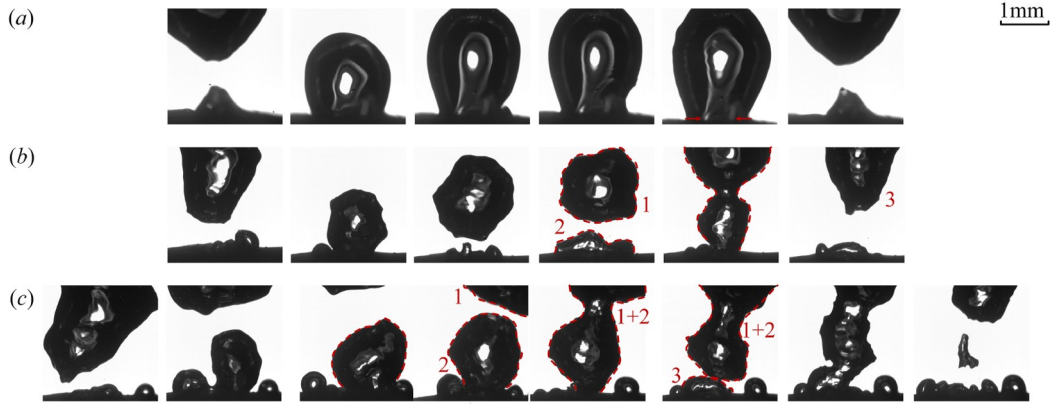


图 5 (网络版彩图)气泡脱离形态. (a) 单气泡; (b) 双气泡连珠; (c) 多气泡连珠

Figure 5 (Color online) Bubble departure morphology. (a) Single; (b) bubble train (double); (c) bubble train (multiple).

泡脱离频率, 是振动能显著改善柔性表面气泡动力学的重要原因. 然而, 两类气泡连珠都只出现在振动频率为 200 Hz 时, 振动频率为 100 Hz 与无振动时都只有单气泡脱离一种形态. 双气泡连珠脱离在 $q \geq 200 \text{ kW/m}^2$ 后出现, 且在 $q \geq 400 \text{ kW/m}^2$ 后现象较为明显, 而多气泡连珠在 $q \geq 700 \text{ kW/m}^2$ 开始出现, 但出现频率较低. 因此, 双气泡合并与多气泡连珠并非柔性表面振动时一定出现, 而是要满足一定的条件.

3.3 气泡连珠的动力学分析

为了更好地探究气泡连珠形成的条件, 我们对单气泡脱离和双气泡合并时的气泡和加热器的运动速度 v , 位移 Δx 进行了分析. 如图 6(a) 所示, 以沸腾表面静止时的高度为基准, 已脱离气泡的位移为 Δx_{up} , 新气泡的自身位移为 Δx_{gr} , 加热器振动给予气泡的附加位移为 Δx_{u} . 气泡的位移变化是通过高速摄像机捕捉的不同时刻图像中气泡底部的像素点位的差值 Δpi 及单位像素的长度 ($7.1 \mu\text{m}$) 计算, 即

$$\Delta x = \Delta pi \times 0.0071. \quad (7)$$

气泡的运动速度 v 由各自对应的位移 Δx 及发生该位移所用时间所决定. t_1 时刻已脱离气泡的位移为 Δx_{up1} , t_2 时刻已脱离气泡的位移为 Δx_{up2} , 新气泡的生长位移为 Δx_{gr1} , t_3 时刻新气泡的生长位移为 Δx_{gr2} , 加热器振动给予气泡附加位移为 Δx_{u} . 则已脱离气泡的上升速度 v_{up} , 新气泡的自身生长速度 v_{gr} , 及加热器振动给予气泡的附加速度 v_{u} 可分别表示为

$$\begin{aligned} v_{\text{up}} &= \frac{\Delta x_{\text{up2}} - \Delta x_{\text{up1}}}{t_2 - t_1}, \\ v_{\text{gr}} &= \frac{\Delta x_{\text{gr2}} - \Delta x_{\text{gr1}}}{t_3 - t_2}, \\ v_{\text{u}} &= \frac{\Delta x_{\text{u}}}{t_3 - t_2}. \end{aligned} \quad (8)$$

图 6(b), (c) 中的黑色曲线代表气泡的运动速度, 红

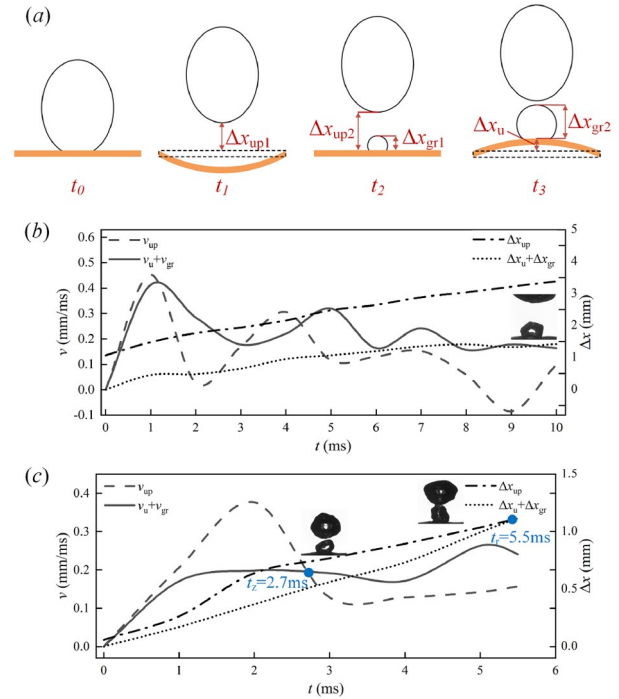


图 6 (网络版彩图)不同气泡脱离形态下的气泡速度和位移. (a) 单气泡; (b) 气泡连珠

Figure 6 (Color online) Analysis of bubble velocity and displacement in various departure morphologies. (a) Single bubble; (b) bubble train.

色曲线代表气泡的运动位移. 图6(b)为100 Hz时411 kW/m² (图4中B点)单气泡脱离的速度和位移曲线, 可以看出单气泡脱离时已脱离气泡的上升速度 v_{up} 在较长的时间内大于新气泡的追及速度 $v_{gr} + v_u$, 因此已脱离气泡的位移 Δx_{up} 与新气泡的位移 $\Delta x_{gr} + \Delta x_u$ 间的差距越来越大, 新气泡无法追上已脱离气泡并与之融合. 图6(c)为200 Hz时402 kW/m² (图4中A点)双气泡连珠的速度和位移曲线, 可以看出在 t_z 之前, 已脱离气泡的上升速度 v_{up} 依旧高于新气泡的追及速度 $v_{gr} + v_u$, 然而在 t_z 之后, $v_{gr} + v_u$ 超过了 v_{up} , 此后新气泡的位移 $\Delta x_{gr} + \Delta x_u$ 与已脱离气泡的位移 Δx_{up} 间的差距越来越小, 直至 t_r 时新气泡追上已脱离气泡, 实现气泡合并.

图7为振动频率为200 Hz, 热流密度在912 kW/m²附近的双气泡合并与多气泡连珠过程中已脱离气泡的底部高度变化和加热器的振动特性曲线. 上方曲线为已脱离气泡的底部距离沸腾表面高度的变化, 气泡附着在沸腾表面时距离为0, 气泡脱离沸腾表面后距离逐渐上升. $t_0 \sim t_3$ 为双气泡合并脱离过程, 气泡1于 t_0 时刻成核, t_1 时刻脱离后, 气泡2迅速生长并于 t_2 时刻与气泡1融合, 最终融合体于 t_3 时刻一同脱离沸腾表面. 结合加热器振动特性曲线可以发现, 气泡的融合(t_2)发生在加热器上升运动阶段, 而气泡的两次脱离分别发生在加热器的下降(t_1)和上升(t_3)运动阶段. 进一步观察多气泡连珠($t_3 \sim t_8$)过程, 气泡3在 t_3 时刻成核, 于 t_4 时刻脱离同时气泡4成核并生长, 在 t_5 时刻与气泡3合并, 随后融合体在 t_6 时刻脱离且气泡5迅速成核、生长, 于 t_7 时刻与气泡4融合, 新的融合体最终在 t_8 时刻脱离. 结合振动特性曲线发现, 气泡融合时(t_5, t_7)加热器处于上升运动阶段, 而气泡脱离时(t_4, t_6, t_8)都位于加热器下降运动阶段. 通过对比气泡合并与气泡连珠过程中的关键节点能发现, 气泡在加热器上升阶段发生融合, 在加热器下降阶段发生脱离更利于连珠实现.

3.4 气泡连珠与加热器振动特性耦合

通过对气泡连珠现象的动力学分析可以发现, 实现气泡合并需要考虑两个因素, 气泡的速度和位移. 如图8所示, 以沸腾表面静止时的高度为基准, 由于气泡不能无限生长, 气泡的追及位移存在一个最大值 $\Delta x_{max} = \Delta x_{grm} + \Delta x_{um}$. 若 $v_{gr} + v_u < v_{up}$ 或 $\Delta x_{up} > \Delta x_{max}$, 气泡的脱离形态为单气泡脱离, 若 $v_{gr} + v_u > v_{up}$ 且 $\Delta x_{up} < \Delta x_{max}$, 气泡的脱离形态为双气泡合并或多气泡连珠脱离.

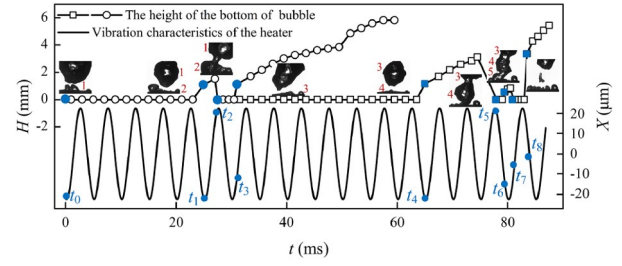


图7 (网络版彩图)气泡运动和振动位置的关系

Figure 7 (Color online) The relationship between bubble motion and vibration location.

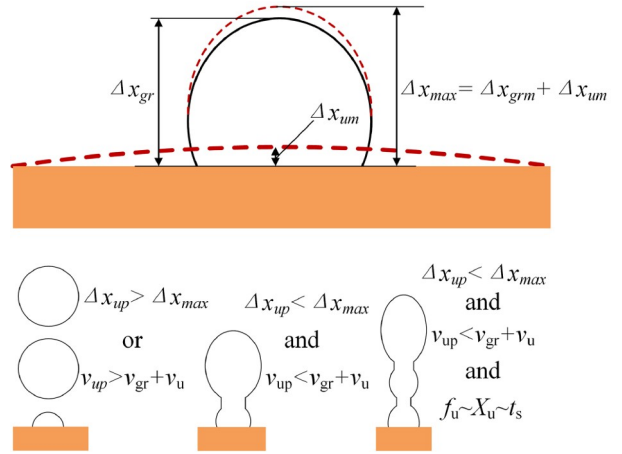


图8 (网络版彩图)气泡连珠的发生条件

Figure 8 (Color online) Conditions for the occurrence of bubble train.

通过图8的分析我们发现, 多气泡连珠现象的出现与加热器的振动特性密不可分. 此外, 多气泡连珠本质上是连续出现多次双气泡连珠, 因此也必须满足图8所述的气泡速度和位移关系. 然而, 新气泡的追及速度和位移与加热器的振动特性同样密切相关. 首先加热器的振幅 X_u 直接影响新气泡位移中的 Δx_{um} ($\Delta x_{um} = \frac{1}{2}X_u$), 进而影响气泡的最大追及位移 Δx_{max} . 其次气泡追及速度中的 v_u 取决于加热器振幅和频率:

$$v_u = \frac{fX_u}{2}. \quad (9)$$

因此振幅越大, 频率越高, v_u 越大, 更容易满足合并条件. 然而, 加热器振动过程是一个上下往复的运动过程, 振动并非始终有助于新气泡追及已脱离的气泡, 想要实现多气泡连珠还需要加热器振动特性(频率 f_u 和振幅 X_u)与气泡周期的配合.

为了更好地实现气泡连珠现象及提高多气泡连珠

的频率, 我们对气泡连珠过程中的气泡周期同加热器的运动耦合. 如图9所示, 为了使加热器的周期性振动始终有益气泡连珠形成, 需要让气泡的融合都发生在加热器上升运动阶段, 气泡的脱离过程都发生在加热器下降运动阶段, 因此发生融合、脱离的时刻最晚位于加热器振动曲线周期的波峰和波谷.

我们将整个融合脱离过程中的首个气泡产生到脱离的时间定义为首个气泡的气泡周期 $T_0 = t_{d0} - t_i$, 将气泡1脱离到形成融合体 R_1 形成的时间称为融合周期 $T_{m1} = t_{m1} - t_{d0}$, 融合体 R_1 形成到脱离的时间定义为脱离周期 $T_{d1} = t_{d1} - t_{m1}$. 多气泡连珠过程可以视为连续出现多次气泡合并. 例如, 融合体 R_1 与气泡3融合形成融合体 R_2 再到融合体 R_2 的脱离过程可以视为 $T_{m2} = t_{m2} - t_{d1}$ 和 $T_{d2} = t_{d2} - t_{m2}$. 则融合周期和脱离周期可表示为

$$\begin{cases} T_r = \frac{T_{r1} + T_{r2} + T_{r3} + \dots + T_{rm}}{n}, \\ T_t = \frac{T_{t1} + T_{t2} + T_{t3} + \dots + T_{tm}}{n}. \end{cases} \quad (10)$$

为了保证气泡的融合和脱离分别在加热器向上和向下运动的过程中完成, 因此加热器的振动周期所需满足的条件为

$$\begin{cases} \frac{\bar{T}_r}{n_1 + 0.5} \leq T \leq \frac{\bar{T}_r}{n_1}, \\ \frac{\bar{T}_t + \bar{T}_r}{n_1 + n_2 + 1} \leq T \leq \frac{\bar{T}_t + \bar{T}_r}{n_1 + 0.5}, \end{cases} \quad n_1 \geq n_2 \geq 0, \quad (11)$$

其中, n_1 , n_2 为融合与脱离过程中所经历的完整的振动周期次数, 取决于融合周期 $\bar{T}_r$ 与脱离周期 $\bar{T}_t$ 的大小, 通过调节 n_1 和 n_2 可以得到气泡连珠在不同振动频率下的耦合曲线, n_1 与 n_2 的取值规则如图10所示. 初始输入 $\bar{T}_r$ 与 $\bar{T}_t$ 的实验值, n_1 与 n_2 默认为0, 振动周期 T 取 $(\bar{T}_r + \bar{T}_t)/2$, 随后由判断条件决定是否对 n_1 与 n_2 的值进行重新定义, 当所有判断条件都满足后输出 n_1 与 n_2 的最终值. 随后可由输出的 n_1 与 n_2 的值及实验所得 $\bar{T}_r$ 与 $\bar{T}_t$ 得到最佳振动频率范围:

$$\begin{cases} \frac{n_1}{\bar{T}_r} \leq f \leq \frac{n_1 + 0.5}{\bar{T}_r}, \\ \frac{n_1 + n_2 + 1}{\bar{T}_t + \bar{T}_r} \leq f \leq \frac{n_1 + 0.5}{\bar{T}_t + \bar{T}_r}, \end{cases} \quad n_1 \geq n_2 \geq 0. \quad (12)$$

根据实验中振动频率为200 Hz时的气泡连珠过程中的融合周期 $\bar{T}_r$ (6.22 ms)、脱离周期 $\bar{T}_t$ (4.33 ms), 结合

式(9)和(10)得到不同热流密度下与气泡连珠耦合的最佳振动频率范围, 如图11所示. 整个实验过程中的最佳振动频率最大值为285.71 Hz, 最小值为75.92 Hz, 整体平均值为192.36 Hz. 在最佳振动频率范围内气泡的融合和脱离过程能够被控制发生在加热器的上升运动和下降运动阶段, 从而保证加热器振动给气泡带来的附加速度 v_u 和附加位移 Δx_u 能够促进气泡连珠形成, 同时可通过调节加热器的振幅 X_u 的大小来有目的地调节气泡连珠发生的频率.

浸没式冷却常用冷却液为低表面张力的电子氟化

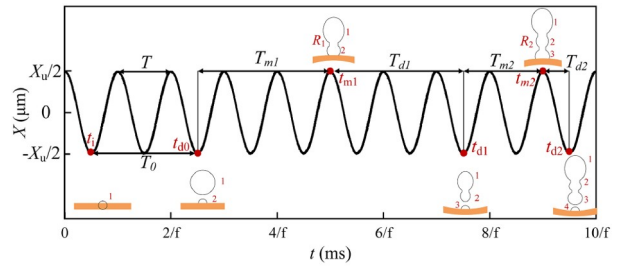


图9 (网络版彩图)气泡周期与振动特性的耦合

Figure 9 (Color online) The coupling of bubble period and vibration characteristics.

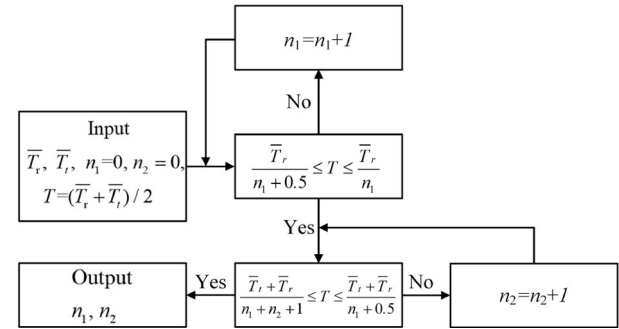


图10 n_1 与 n_2 的取值

Figure 10 The values of n_1 and n_2 .

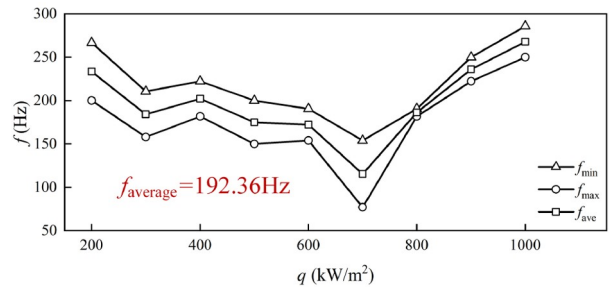


图11 (网络版彩图)最佳频率范围

Figure 11 (Color online) Optimal frequency range.

液。相较于去离子水为工质的沸腾气泡脱离尺寸更小,频率更高^[32]。气泡尺寸的减小会导致气泡的生长位移 Δx_{gr} 减小,因此需要增大振幅使气泡有足够的追及位移 Δx_{max} 来保证气泡连珠现象更容易发生。气泡脱离频率增大的内在表现是气泡的运动周期变短,根据式(10)和(12),最终表现为最佳调控频率增大。此外,实际工程应用中的热负荷变动较大,导致最佳振动频率变动,因此需根据热负荷来调节振动频率。未来研究中可嵌入热负荷动态识别模块,根据实时热负荷自动调节振动频率以实现精准控制。研究智能化热控表面是传热强化技术革新的战略方向,本研究为发展智能化热控设备提供了研究方向。

4 总结

本文搭建了可实现柔性表面弯曲振动的沸腾传热

实验系统。基于柔性材料与压电陶瓷产生的机械振动,研究了加热器表面振动如何改善柔性材料的气泡动力学。主动强化技术提升传热表现的同时也引入了系统的复杂性,由于振动带来的器件寿命及损耗问题需要在实际中进一步改良研究。本文的方法对于基于柔性表面的沸腾强化具有工程意义,也为智能设备引入传热领域提供了研究思路。研究结果如下。

(1) 加热器的表面振动显著提高了沸腾传热性能。振动能够有效降低沸腾表面的ONB点,降低壁面过热度,推迟CHF,其中CHF最大提升了25.99%。

(2) 观察到气泡连珠脱离现象,可显著改善气泡动力学参数,提高传热性能。实现气泡连珠脱离过程必须满足两个条件,即 $v_{gr} + v_u > v_{up}$ 且 $\Delta x_{up} < \Delta x_{max}$ 。

(3) 将多气泡连珠的形成机理与加热器振动特性进行了耦合,给出了最佳振动频率公式,可以通过调节振动的频率和振幅来实现定向调节气泡运动。

参考文献

- Huang M, Luo J, Mo D, et al. FIND BEAR: An explainable artificial intelligence platform for stages automatic recognition in pool boiling. *Appl Therm Eng*, 2025, 261: 125117
- Alkrush A A, Salem M S, Abdelrehim O, et al. Data centers cooling: A critical review of techniques, challenges, and energy saving solutions. *Int J Refrig*, 2024, 160: 246–262
- Kim J, Choi H, Lee S, et al. Computational study of single-phase immersion cooling for high-energy density server rack for data centers. *Appl Therm Eng*, 2025, 264: 125476
- Gao W H, Fu K, Xu X H, et al. Experimental investigation on flow boiling heat transfer of R134a in a minichannel heatsink with copper foam fins (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2022, 52: 333–342 [高武焕, 付铠, 徐向华, 等. 泡沫铜肋细小通道热沉中的R134a流动沸腾换热实验研究. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 333–342]
- Hu Y, Wang C, He Y. Design of a smart wettability-regulating surface for enhancing pool boiling heat transfer using the lattice Boltzmann method. *Ind Eng Chem Res*, 2023, 62: 17253–17262
- Chen Y J, Gong J H, Ding J, et al. Lattice Boltzmann method study of pool boiling on an electrowetting substrate. *Int Commun Heat Mass Transfer*, 2023, 149: 107160
- Luo X P, Li G Z, Liu Q, et al. Study on boiling flow characteristics of nanorefrigerant in microchannels under ultrasonic waves (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2022, 52: 1212–1222 [罗小平, 李桂中, 刘倩, 等. 超声波作用下微细通道内纳米制冷剂沸腾流动特性研究. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1212–1222]
- Unno N, Yuki K, Taniguchi J, et al. Boiling heat transfer enhancement by self-excited vibration. *Int J Heat Mass Transfer*, 2020, 153: 119588
- Han C, He M, Ma X, et al. Bubble necking in a confined channel formed by a pair of elastic plates. *Int J Heat Fluid Flow*, 2024, 107: 109425
- Ma X, He M, Han C, et al. Boiling heat transfer enhancement by a pair of elastic plates. *Int J Heat Mass Transfer*, 2024, 227: 125580
- Wu X, Yang J, Liu Y, et al. Investigations on heat dissipation performance and overall characteristics of two-phase liquid immersion cooling systems for data center. *Int J Heat Mass Transfer*, 2025, 239: 126575
- Iida Y, Tsutsui K. Effects of ultrasonic waves on natural convection, nucleate boiling, and film boiling heat transfer from a wire to a saturated liquid. *Exp Therm Fluid Sci*, 1992, 5: 108–115
- Guo Y, Zhu Q, Song S, et al. Effects of ultrasound on bubble dynamic behavior of flow boiling in microchannel. *Ultrason Sonochem*, 2024, 111:

107099

- 14 Kim H Y, Kim Y G, Kang B H. Enhancement of natural convection and pool boiling heat transfer via ultrasonic vibration. [Int J Heat Mass Transfer](#), 2004, 47: 2831–2840
- 15 Zhang B, Gong S, Dong S, et al. Experimental investigation on vibration characteristics of subcooled and saturated pool boiling. [Appl Therm Eng](#), 2023, 218: 119297
- 16 Prisnyakov V F, Prisnyakov K V. Action of vibrations on heat and mass transfer in boiling. [J Eng Phys Thermophys](#), 2001, 74: 1015–1023
- 17 Vinko Z, Naim A. Boiling heat transfer from oscillating surface. [J Enh Heat Transf](#), 1994, 1: 191–196
- 18 Eid E I, Gomaa M E. Influence of vibration in enhancement of heat transfer rates from thin plannar fins. [Heat Mass Transfer](#), 2009, 45: 713–726
- 19 Sathyabhama A, Prashanth S P. Enhancement of boiling heat transfer using surface vibration. [Heat Trans Asian Res](#), 2017, 46: 49–60
- 20 Yu X Y, Huang W S, Liu X L, et al. Thermal-hydraulic performance and optimization for finned-tube heat exchanger in gas wall-hung boilers. [Appl Therm Eng](#), 2025, 262: 125241
- 21 Utaka Y, Hu K, Chen Z, et al. Measurement of contribution of microlayer evaporation applying the microlayer volume change during nucleate pool boiling for water and ethanol. [Int J Heat Mass Transfer](#), 2018, 125: 243–247
- 22 Marie A, Cioulachtjian S, Lips S, et al. Thermal interactions between nucleation sites and the solid wall during pool boiling of a pure fluid: A review. [Int J Therm Sci](#), 2022, 174: 107388
- 23 Atashi H, Alaei A, Kafshgari M H, et al. New pool boiling heat transfer in the presence of low-frequency vibrations into a vertical cylindrical heat source. [Exp Heat Transfer](#), 2014, 27: 428–437
- 24 Giustini G, Jung S, Kim H, et al. Evaporative thermal resistance and its influence on microscopic bubble growth. [Int J Heat Mass Transfer](#), 2016, 101: 733–741
- 25 Alangar S. Effect of boiling surface vibration on heat transfer. [Heat Mass Transfer](#), 2017, 53: 73–79
- 26 Michaie S, Rulière R, Bonjour J. Experimental study of bubble dynamics of isolated bubbles in water pool boiling at subatmospheric pressures. [Exp Therm Fluid Sci](#), 2017, 87: 117–128
- 27 Ami T, Schulenberg T. Prediction of wetting phenomena of a microlayer of gas bubbles. [Int J Heat Mass Transfer](#), 2019, 133: 769–777
- 28 Cao S, Guo J, Wang G, et al. Flow boiling heat transfer performance of R245fa in a vertical enhanced evaporator tube with sintering and electroplating composite coats. [Appl Therm Eng](#), 2024, 246: 122937
- 29 Hu Y, Li H, He Y, et al. Effect of nanoparticle size and concentration on boiling performance of SiO₂ nanofluid. [Int J Heat Mass Transfer](#), 2017, 107: 820–828
- 30 Alimoradi H, Zaboli S, Shams M. Numerical simulation of surface vibration effects on improvement of pool boiling heat transfer characteristics of nanofluid. [Korean J Chem Eng](#), 2022, 39: 69–85
- 31 Timoshenko S, Goodier J. Theory of Elasticity. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1951
- 32 Kim J H, You S M, Pak J Y. Effects of heater size and working fluids on nucleate boiling heat transfer. [Int J Heat Mass Transfer](#), 2006, 49: 122–131

Boiling heat transfer enhancement by “bubble train”

MA XiaoJing^{1,2}, WANG SongHe¹ & XU JinLiang^{1,2}

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

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

With the great demand of computing power, data centers are experiencing a substantial expansion in scale, and the associated high energy consumption has emerged as a critical concern. Two-phase immersion cooling holds great promise in solving the energy consumption issues of data centers owing to its remarkable heat transfer capabilities. Improving the boiling performance is of utmost importance for immersion cooling technique. In this study, a novel heat transfer enhancement approach is proposed, which utilizes piezoelectric ceramics to induce the vibration of a flexible heater. Experimental results demonstrate that the surface boiling heat transfer coefficient of the flexible heater exhibits a 55.67% increase compared to that of a fixed surface, and the critical heat flux is enhanced by 25.99%. A unique “bubble train” phenomenon is observed at a vibration frequency of 200 Hz, and the bubble departure frequency is increased by a maximum of 362.10%. The conditions of velocity and heater displacement for bubble coalescence are determined. Through the coupling of the vibration characteristics of the heater and those of bubble growth, the optimal frequency range for bubble train is derived, along with its corresponding formula. This research provides a theoretical foundation for the development of boiling-enhanced surfaces based on flexible materials and benefits the bubble manipulation.

boiling heat transfer, bubble dynamics, surface vibration, flexible material

doi: [10.1360/SST-2025-0053](https://doi.org/10.1360/SST-2025-0053)