



微泡群强化汽化的高效蒸发器研究

张瑞敏 蔡灏亭 佟薇 刘军 赵玉刚

Study on the high-performance evaporator for enhanced gasification via microbubble clusters

Zhang Ruimin, Cai Haoting, Tong Wei, Liu Jun, Zhao Yugang

引用本文:

张瑞敏, 蔡灏亭, 佟薇, 等. 微泡群强化汽化的高效蒸发器研究[J]. 空气动力学学报, 2026, 44(1): 118–127. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2024.0074

Zhang Ruimin, Cai Haoting, Tong Wei, et al. Study on the high-performance evaporator for enhanced gasification via microbubble clusters[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2026, 44(1): 118–127. DOI: 10.7638/kqdlxxb-2024.0074

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2024.0074>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

推进剂微射流冷却对高温非平衡气动热的影响机理

Mechanism of propellant micro-jet cooling effects on high-temperature non-equilibrium aerodynamic heating

空气动力学学报. 2025, 43(4): 20–29 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2024.0084>

微纳颗粒两相流系统中湍流脉动效应研究综述

Review of turbulent fluctuation effect on nano-particle two-phase flow system

空气动力学学报. 2021, 39(3): 109–120 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0030>

热湍流多重态与热输运效率实验研究

Experimental study of multiple states and heat transport in turbulent thermal convection

空气动力学学报. 2022, 40(2): 188–198 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0386>

基于OPTICS聚类算法的流场结构特征分析方法

A modified OPTICS clustering algorithm for analyzing flow characteristics

空气动力学学报. 2021, 39(5): 27–43 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0002>

冷却塔群塔干扰条件下脉动风压分布模式

Distribution patterns of fluctuating wind pressure of grouped cooling towers

空气动力学学报. 2021, 39(3): 33–43 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2020.0180>

扩大斜切式缓冲结构对时速400 km铁路隧道口微气压波缓解研究

Mitigation of micro-pressure wave at 400 km/h railway tunnel exit by oblique enlarged tunnel-hood

空气动力学学报. 2021, 39(5): 151–161 <https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0101>

地址: 四川省绵阳市二环路南段8号11信箱9分箱

电话: 0816-2463375

Email: kqdlxxb@163.com



关注微信公众号

获得更多资讯信息

文章编号: 0258-1825(2026)01-0118-10

微泡群强化汽化的高效蒸发器研究

张瑞敏¹, 蔡灏亭¹, 佟薇², 刘军², 赵玉刚^{1,*}

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海市动力工程多相流与传热重点实验室, 上海 200093;

2. 深圳市英维克科技股份有限公司, 深圳 518129)

摘要: 提高蒸发器汽化效率对能源管理与强化传热至关重要。为探索高效蒸发方法, 本研究提出一种通过主动通入微气泡群以强化工质汽化的新技术。实验采用以微孔泡沫钛网制成的微气泡发生器, 通过改变操作模式(持续加热/无加热)、泡沫钛平均孔隙(2, 5, 10 μm)及气体流量(1~15 NL/min)等条件, 量化研究其对蒸发效果(出汽量、液体温降)的影响, 并结合高速摄像对气泡动力学行为进行机理分析。结果表明, 在无加热模式下, 通入平均孔隙为 10 μm 、流速为 15 NL/min 的微泡群时, 温度降幅达 30 $^{\circ}\text{C}$, 对应出汽量达到未通气泡时的 38 倍; 在持续加热模式下, 相同参数的微泡群使温度下降约 15 $^{\circ}\text{C}$, 出汽量提升至未通气泡时的 1.7 倍。机理研究表明, 微气泡群的引入大幅增加了气液相变界面面积, 其上升过程带来的扰动及内部不可凝气体对蒸汽分压的改变, 共同加速了界面处的汽化过程, 从而实现蒸发效率的提升。该方法无需外场作用或表面改性, 操作简便, 为强化蒸发提供了新途径。

关键词: 相变换热; 微泡群; 蒸发; 汽化; 传热传质; 蒸发器

中图分类号: TK124 文献标识码: A doi: 10.7638/kqdlxxb-2024.0074

Study on the high-performance evaporator for enhanced gasification via microbubble clusters

Zhang Ruimin¹, Cai Haoting¹, Tong Wei², Liu Jun², Zhao Yugang^{1,*}

(1. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, School of Energy and Power Engineering,

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shenzhen Envicool Technology Co. Ltd, Shenzhen 518129, China)

Abstract: Enhancing the vaporization efficiency of evaporators is crucial for improved energy management and heat transfer enhancement. To explore efficient evaporation methods, this study proposes a novel technique that actively introduces microbubble clusters to intensify the vaporization of the working fluid. Experiments were conducted using a microbubble generator fabricated from microporous titanium foam mesh. The effects of key parameters, including operation mode (continuous heating/no heating), average pore size of the titanium foam (2, 5, 10 μm), and gas flow rate (1-15 NL/min), on the evaporation performance (vapor output, liquid temperature drop) were quantitatively investigated. The associated bubble dynamics were analyzed via high-speed visualization. The results indicated that under the no-heating condition, the introduction of microbubble clusters with an average pore size of 10 μm and a flow rate of 15 NL/min led to a temperature drop of 30 $^{\circ}\text{C}$, while the corresponding vapor output increased by 38 times compared to the case without bubbles. Under the continuous heating mode, microbubbles with the same parameters caused a temperature decrease of approximately 15 $^{\circ}\text{C}$ and enhanced the vapor output by a factor of 1.7. Mechanistic studies reveal that the microbubble clusters

收稿日期: 2024-06-03; 修订日期: 2024-09-06; 录用日期: 2024-09-10; 网络出版时间: 2025-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(52276079)

作者简介: 张瑞敏(2000—), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 研究方向: 强化蒸发、相变换热. E-mail: 222210089@st.usst.edu.cn

通信作者: 赵玉刚*, 副教授, 研究方向: 相变换热, 界面效应. E-mail: ygzhao@usst.edu.cn

引用格式: 张瑞敏, 蔡灏亭, 佟薇, 等. 微泡群强化汽化的高效蒸发器研究[J]. 空气动力学学报, 2026, 44(1): 118–127.

Zhang Ruimin, Cai Haoting, Tong Wei, et al. Study on the high-performance evaporator for enhanced gasification via microbubble clusters[J].

Acta Aerodynamica Sinica, 2026, 44(1): 118–127(in Chinese). doi: 10.7638/kqdlxxb-2024.0074

substantially increase the vapor-liquid phase change interface area. The agitation caused by the rising bubbles and the alteration of vapor partial pressure due to the presence of non-condensable gas collectively accelerate the vaporization process at the interface, thereby enhancing the evaporation efficiency. This method requires no external fields or surface modifications, offering a simple and effective new approach for enhanced evaporation.

Keywords: phase transformation heat; microbubble clusters; evaporation; vaporization; heat and mass transfer; evaporator

0 引言

蒸发过程伴随气液相变会释放大量潜热,因而具有良好的传热性能。这种高效的热传递方式,被广泛应用于核电厂和压水堆^[1-2]、工业零件清洗^[3-4]、飞机与航空热管理^[5-7]、纸浆和造纸行业^[8-9]等多领域。蒸发系统因其散热潜力大、换热效率高、温度分布均匀,成为制冷制热循环中的重要组成部分^[10-11];同时,太阳能驱动蒸发也发展成为一种环保、可持续的水净化方法^[12-14];此外,实现高效蒸发冷却对于数据中心冷却也至关重要^[15]。因此,提高蒸发效率、增大汽化量、探索高效蒸发新技术,并深入研究其机理,对于强化换热、优化能源管理,从而提高能源有效利用率具有重要意义。

目前,强化汽化技术主要分为主动和被动两类。主动技术主要包括电场、磁场和超声强化3种。电场可以改善流动,增加气泡释放频率并防止相邻气泡聚结,还可通过拉长气泡促使其分离,从而强化汽化过程^[16-18];磁场技术则通过驱动流体阻止工作液体内部颗粒沉积,或减小气泡脱离直径,增加气泡脱离频率并促进池内铁磁流体循环,进而强化蒸发^[19-20];超声强化主要通过促进气泡的快速运动与分离来强化蒸发^[21-22]。被动技术则包括改变表面润湿性^[23-24]、在工作液体中直接添加纳米颗粒^[25-26]或表面活性剂^[27-28]等方式来强化汽化。此外,许多研究人员将主动与被动技术相结合以强化相变换热^[29-30]。上述强化手段的主要机理可以归纳为以下几种:1)增大传热面积,提高传热速率;2)增加成核位点,从而提升汽核密度;3)促进气泡的生成与脱离,抑制气泡聚合;4)促进接触线附近的液体供应与循环,延缓蒸汽膜的形成。Yuan等^[31]采用集成的气泡泵形成分离的气液通路以增强传热,通过促进气泡脱离并加强补充液体对加热表面的冲击来提高传热速率。Wang等^[32]利用等离子体共振加热纳米流体,使之产生大量气泡,该方法无需将大量工作液体加热至成核温度,即可在初始阶段实现温度急剧下降。Yan等^[33]在绝缘油中通过电弧诱导产生气泡,发现气泡在电弧持续期间呈现

脉动增长模式,而非持续膨胀。这些强化蒸发方法均存在各自的局限性。改变表面结构或添加各类功能材料,会增加运行成本,且难以在大型容器中投入使用。而通过外场来强化汽化则面临以下挑战:首先,外场具有不均匀性,难以精确调控至最佳状态;其次,主动强化技术通常涉及复杂的装置改进,导致结构复杂和成本上升;最后,某些过程可能产生如氢气、汞等有害物质,对人体造成伤害。因此,现有的强化蒸发方案普遍存在运行成本较高、规模化应用困难、可能产生有害物质等问题,亟需发展一种新型的高效蒸发方法以实现汽化过程的强化。

两相系统的池沸腾强化换热一直是国内外研究热点,而蒸发冷却系统作为两相浸没池沸腾系统中热量由内而外传递的关键环节,其研究关乎整体系统能否高效稳定运行。因此,本文提出一种通过添加微泡群来增加汽化核心、提高蒸发速率的方法,旨在优化蒸发条件并提升蒸发效率。该方法将压缩空气通入微米级泡沫钛网,形成粒径稳定的气泡来强化蒸发。本文提出一种操作简便且易于实现的微泡群生成方法,并研究了不同模式、不同孔隙率以及不同流量对蒸发效率的影响。机理研究发现,微泡群的添加大幅增加了汽化发生的界面,加速了汽化过程。气泡中不可凝气体的存在改变了混合气泡内部的蒸气分压,使得液体工质在气-液界面处即使低于平衡沸点仍能保持显著的汽化能力。使用高速摄像机拍摄单气泡的生长过程,分析了其生成、脱离及长大等动力学过程对汽化的促进机制。此方法无需电场、超声等外场强化,也不必改变加热界面拓扑形貌或添加微纳米颗粒,即可实现高效蒸发,因而具有简便、易于实现且经济高效的优点。

1 实验系统和数据处理

1.1 实验系统

为了探究蒸发器的蒸发效率,定量测量蒸汽汽化量及工作液体温度变化,搭建了如图1(a)所示的实验装置示意图。实验装置主要由蒸发器、微泡群生成系统、加热系统、冷凝系统、数据采集系统和相关实验仪器组成。

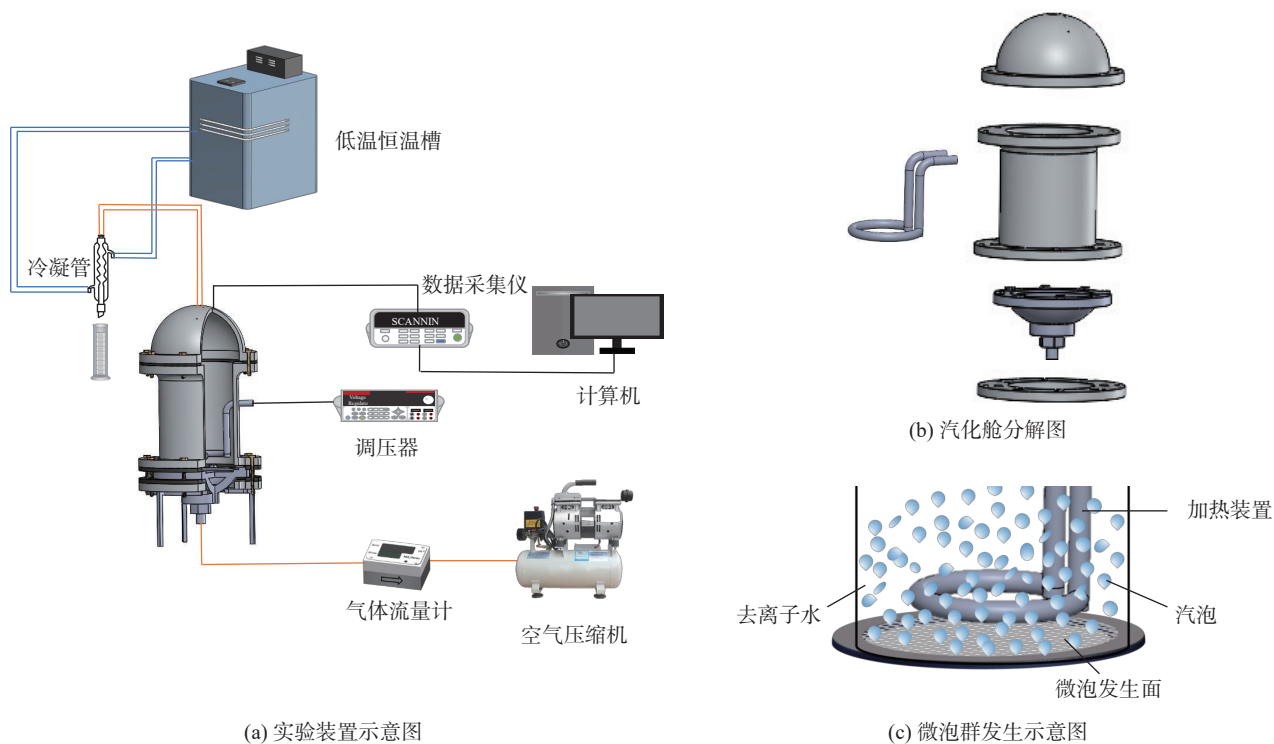


图1 实验装置图

Fig. 1 Diagram of the experimental setup

微泡群生成系统由无油空气压缩机(OTS-750, 奥突斯公司)、气体流量计(MHMF5619, 广州铭鸿仪表)和微泡发生器构成。气体流量计的测量范围为 $5 \sim 2 \times 10^4$ mL/min, 精度为 $\pm 1.5\%$ FS。空气压缩机用于驱动微泡发生器生成不可凝气体, 气体在压差作用下通过微孔形成气泡; 气体流量计则通过控制气体流速来控制实验过程中微泡群的生成速率。加热系统由加热器(500 W)和可编程调压器(AC6803B, Keysight)组成。可编程调压器的工作范围为 $0 \sim 220$ V, 测量精度为全量程的 $\pm 0.25\%$, 用于维持实验所需加热功率。加热器可以将工作液体加热至沸腾状态, 并保持一定功率运行, 实验采用的加热功率为500 W。冷凝系统包括气液分离装置、冷凝管、低温恒温槽(BILON-W-1004S, 比朗仪器制造有限公司)以及连接所需的硅胶软管。低温恒温槽内所用制冷剂为乙二醇, 实验过程中, 制冷剂温度维持在 $(5 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 。冷凝系统的功能是将工作液体蒸发的蒸汽收集、冷凝并对汽化量进行具体测量。蒸发器作为工作介质的载体, 用于集成微泡发生器、加热系统及冷凝系统。蒸发装置最外侧使用聚乙烯材料的隔热棉包裹, 防止热量散失, 起到保温作用。数据采集系统用于实时监测蒸发过程中工作液体的温度变化, 主要装置包括数据采集仪(DAQ970A, Keysight)、热电偶(直径0.255 mm, TT-T-30-SMPW, Omega)和计算机。为便于机理观察研究, 使用高速摄像机(5KF20, 千眼狼)记录完整的汽泡生

成过程, 从而更好地分析汽泡动力学行为。

1.2 蒸发器及微泡发生器设计

微泡发生器及蒸发器(发生汽化的载体)是本文实验的核心装置。蒸发器的设计如图1(b)所示, 蒸发器总尺寸(直径 $\times$ 高)为 $16\text{ cm} \times 25\text{ cm}$, 由3部分组成: 最上层为带有1个法兰的半球空腔, 设置空腔是为了更好地收集蒸汽; 中间层为上下两侧带有法兰的空心圆柱, 内部装有工作液体; 最下层是微泡群生成系统和中间液体层的连接装置。为保证其气密性, 上中下3部分通过法兰连接。半球空腔上开有3个不同孔径通孔, 作用分别是供热电偶穿过来测量温度、连接气液分离装置以及补充液体, 确保除实验变量外其他条件保持恒定。腔体壁和半球空腔厚度均为0.5 cm, 空心圆柱侧面开有两个通孔, 用于连接加热设备, 使蒸发器内液体达到并维持沸腾状态。蒸发器内所用工作液体为去离子水。

微泡发生装置的示意图如图1(c)所示, 为保证通入的不凝性气体形成均匀汽泡, 将漏斗形骨架与上盖板连接, 中间夹有多孔泡沫钛网(昆山隆圣宝金属材料公司), 尺寸(直径 $\times$ 厚度)为 $10\text{ cm} \times 0.1\text{ cm}$, 平均孔隙分别为2、5、10 μm 。不同平均孔隙泡沫钛对应的扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)照片如图2所示。装置各连接部分均采用橡胶圈进行密封, 以保证气密性。

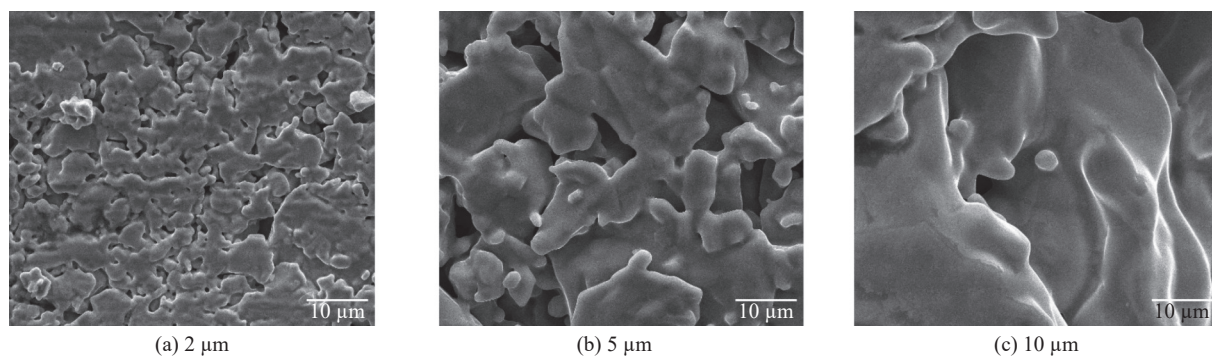


图 2 不同平均孔隙泡沫钛 SEM 图

Fig. 2 SEM images of titanium foams with varying average pore sizes

1.3 实验方法

将蒸发器置于微泡发生器上部，空气压缩机内的压缩空气在泵的压力下进入实验系统，通过测量出汽量即可得到不同实验条件下的蒸发量。加热器的初始功率由交流电源控制；将低温恒温槽与冷凝装置相连来收集冷凝液滴，以计算蒸汽带走的热量；气体流量计用于控制微泡群的生成流量，通过数据采集仪采集蒸汽、液体、壁面以及室内的温度，并用计算机同步记录并保存数据，方便后续工作的处理。

本实验在 $(23 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的环境下进行。实验时，工作液体初始温度保持在 $(100 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。每组实验工况重复 3~5 次，本文给出的出汽量为平均值。图 3 为 5 次重复实验在 120 s 内的液体温度变化曲线，用于验证实验的可重复性。实验过程中，确保除时间变量外，其他条件均保持一致。结果表明，实验误差在 0.8 % 以内。

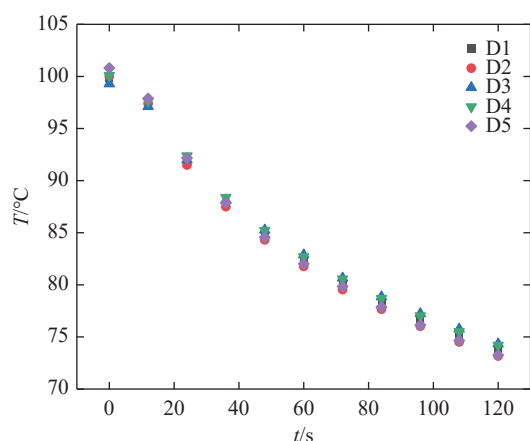


图 3 实验可重复性验证

Fig. 3 Experimental repeatability verification

在每次实验开始前，将工作液体加热至沸腾以去除液体中的不可凝气体，避免不可凝气体对实验结果产生影响。实验中将蒸发器内部压力维持在约 0.115 MPa，控制精度为 $\pm 1.6\%$ 。通过高速摄像机对汽泡动力学行为进行拍摄，高速摄像机的帧率设置为 1000 fps，图像分辨率为 1920×1080 ，所获影像用于后续汽泡动力

学行为分析及强化蒸发机理研究。

1.4 实验数据处理和不确定性分析

为了对比不同工况下的强化蒸发效果，选取出汽量和余液温度变化作为评价指标。连续运行时，可以将核心蒸发舱视为准平衡系统，并采用能量方程来分析：

$$P = Q_a - Q_r + Q_g + Q_h \quad (1)$$

式中： P 为加热器产生的热量； Q_a 为空气显热； Q_r 为蒸发过程中工作液体温降损耗的热量； Q_g 为蒸汽带走的热量； Q_h 为系统漏热，即通过蒸发器壁面散失到环境中的热量。根据物体的吸收和放热公式^[34]， Q_a 的计算如式(2)所示：

$$Q_a = c_{pg} \rho_g V_g \Delta T \quad (2)$$

式中： ρ_g 为空气密度； V_g 为空气的体积流量； ΔT 为实验过程中空气的温差；实验过程中空气的比热容 $c_{pg} = 1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ，低于水的比热容，且空气的体积流量较小，相对整个实验系统来说，此部分热量可以忽略。实验过程中，蒸发器腔体内部状态保持相对稳定。通过计算可知，相比于整个实验系统，此处漏热不足 0.01 %，可以忽略排气时带走的热量。

蒸发系统漏热 Q_h 的计算表达式如式(3)所示：

$$Q_h = -\lambda_p A \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

式中：隔热材料的导热系数 $\lambda_p = 0.33 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ， A 为蒸发器壁面的有效散热面积， dT/dx 为沿隔热棉厚度方向的温度梯度。计算可知 $Q_h = 0.17 \text{ W}$ ，热损失小于 0.1 %，相对于输入功率来说，可以忽略系统漏热的影响。

蒸发过程中工作液体温降损耗的热量 Q_r 的计算表达式如式(4)所示：

$$Q_r = c_{pw} \rho_w V_1 \Delta T_1 \quad (4)$$

式中：去离子水的定压比热容 $c_{pw} = 4.2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ， ρ_w 为沸腾时去离子水的密度， V_1 为初始去离子水的

体积, ΔT_1 为实验过程中工作液体的温度变化量。

蒸发过程蒸汽带走的热量 Q_g 的计算表达式如式(5)所示:

$$Q_g = (\rho_w V_1 - \rho'_w V_2) \lambda_1 + \rho_c U \lambda \quad (5)$$

式中: λ 为蒸汽在大气压下的汽化潜热, $\lambda = 2676 \text{ kJ/kg}$; λ_1 为蒸汽的凝结潜热, $\lambda_1 = 149.1 \text{ kJ/kg}$; ρ'_w 为 120 s 后对应温度下的液体密度; V_2 为蒸发 120 s 后去离子水的体积; ρ_c 为 5°C 时冷凝水的密度; U 为经冷凝管收集的冷凝水体积。

在实验过程中, 分别在两种不同模式下对热量公式进行了验证。利用 ImageJ 软件对气泡的直径进行分析计算, 得到气泡在生长过程中的变化。为确保实验数据处理的准确度, 造成不确定性的参数包括热电偶温度、加热棒功率、气体流量计流量, 以及出汽量测量和实验室环境因素导致的误差。热电偶测量的不确定度近似为 $\pm 0.5\%$, 功率计算的不确定性近似为 $\pm 3.84\%$, 流量测量的不确定度近似为 $\pm 3.33\%$, 出汽量测量的不确定度近似为 $\pm 5\%$, 环境因素的不确定度近似为 $\pm 1.67\%$ 。根据标准误差分析^[35], 实验的总不确定度为 7.34%。

2 实验结果与分析讨论

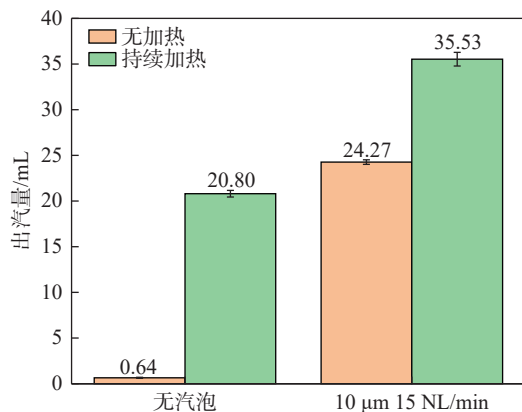
2.1 不同模式对蒸发的影响

为探究不同加热模式对蒸发过程的影响, 本研究设置了两种实验模式: 第一种为无加热模式, 对工作液体加热至沸腾后, 将加热器功率设置为 0 W , 使其自然降温; 第二种为持续加热模式, 设置功率为 500 W , 对工作液体持续加热, 保持外界热量输入。

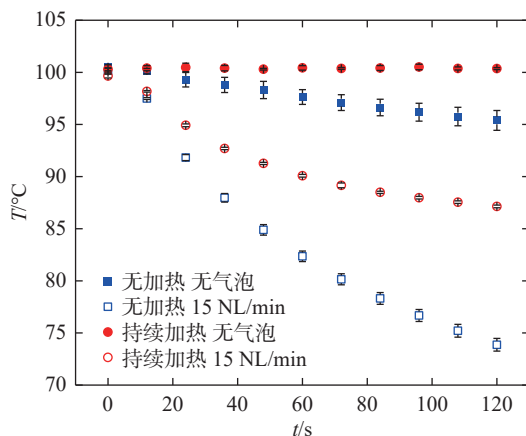
图 4 为不同模式下液体温度随时间的变化及不同条件下的出汽量。在无加热模式下, 未通入微泡群时, 工作液体温度随时间缓慢下降约 5°C ; 而当通入平均孔隙为 $10 \mu\text{m}$ 、流速为 15 NL/min 的微泡群时, 温度降幅达 30°C 。对应出汽量达到未通汽泡时的 38 倍。根据公式(1)可知, 当输入功率为 0 W 时, 在 120 s 的时间内, 随着 ΔT 增高, V_2 逐渐减小, 出汽量便会随之增大。

在持续加热模式下, 未通入微泡群时, 工作液体因持续受热而维持在沸腾状态; 当通入孔隙率为 $10 \mu\text{m}$ 、流量为 15 NL/min 的微泡群后, 温度下降约 15°C , 相应出汽量也达到了不通汽泡时的 1.7 倍。

在两种不同模式下, 通入微泡群都会引起工作液体温度下降, 但是下降速率有所不同, 若工作液体自身降温带走热量相同, 加热模式对应的出汽量显著增



(a) 出汽量变化



(b) 液体温度曲线

图 4 不同模式下有汽泡对蒸发的影响

Fig. 4 Effect of microbubble cluster on evaporation in different modes

高。从图 4(a)中可以看出, 无加热模式下未通入微泡群时, 工作液体持续降温, 出汽量明显低于加热模式。持续加热条件下的出汽量约为无加热模式的 33 倍, 且温度变化更慢。微泡群的通入提供了更多的汽化核心, 有效促进气液之间的潜热传递^[36], 从而加速液体相变过程, 在相同时间内获得更多的出汽量。

2.2 不同平均孔隙对蒸发的影响

为研究不同平均孔隙对蒸发的影响, 实验采用平均孔隙分别为 2、5、 $10 \mu\text{m}$ 的泡沫钛网产生相应尺寸的微泡群进行对比。

从图 5 中可以明显观察到, 在模式、初始温度和通入微泡群流量相同时, 微泡群直径变化不会对工作液体的降温速率产生明显影响。不同平均孔隙泡沫钛网产生的出汽量均处在误差范围内。更高平均孔隙的泡沫钛网产生的微泡群平均直径更大, 但是在 2 min 内无明显的强化蒸发效果, 温度曲线近乎相似, 生成的出汽量也差距不大。

为从理论上分析微泡群表面积对汽化过程的强化机制, 引入如式(6~9)所示的汽泡动力学基本公式:

$$\int_{\partial V} u_r dS = 4\pi R^2 R' \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \int_V r \cos \theta dV = \frac{4}{3} \pi R^3 v_e \quad (7)$$

$$V_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n V_i \quad (8)$$

$$S_{\text{total}} = \sum_{i=1}^n S_i \quad (9)$$

式中： V 为汽泡体积； S 为汽泡表面积； ∂V 为汽泡边界，即汽泡表面； R 为汽泡半径； R' 为 R 的时间导数； r 为球坐标上的径向距离； v_e 表示汽泡相对于环境的迁移速度； u_r 为汽泡表面的速度分量。

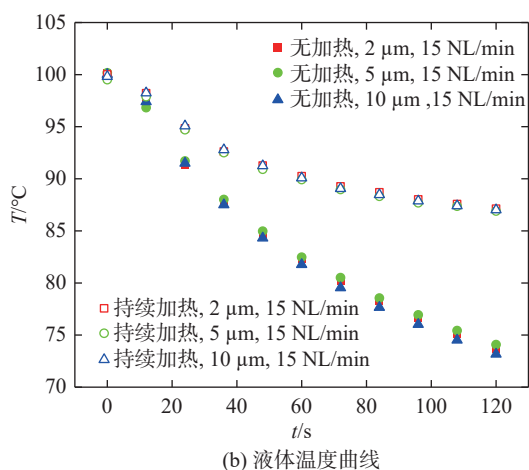
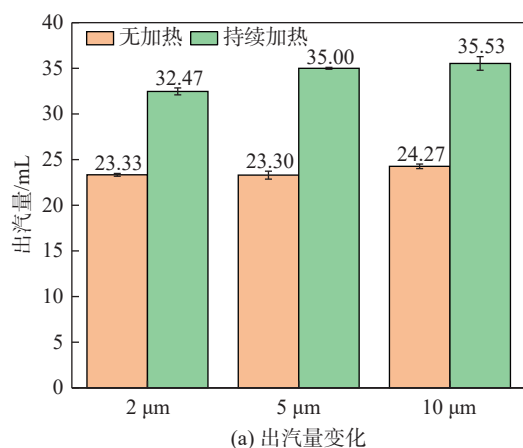


图 5 不同模式下不同平均孔隙对蒸发的影响

Fig. 5 Effects of porosity on evaporation in different models

从公式(6~9)可以得出，当通入不凝性气体总量相同时，汽泡体积 V_{total} 是一定的，但使用更小平均孔隙的泡沫钛可增加微泡群数量，从而使微泡群表面积 S_{total} 增加，气液相变区域随之增加，增强了相变换热强度，进而强化汽化过程^[37]。但在实际工况中，由于通气流量较大，微泡群在脱离发生装置初期极易发生

合并现象，此时平均孔隙对实验造成的影响远小于汽泡合并的影响，因此在其他条件相同时，不同平均孔隙对应的汽化量与液体温度曲线大致相同。在本研究参数范围内，平均孔隙对蒸发的影响不显著。

2.3 不同流量对蒸发的影响

图 6 为无加热模式下不同气体流量对工作液体温度及出汽量随时间变化的影响。结果表明，采用 10 μm 平均孔隙的泡沫钛网时，随着流量从 1 NL/min 增大至 15 NL/min，液体降温速度逐渐增大，在 2 min 时间内，降温约增加 3 倍，对应的出汽量提升至 3.5 倍。

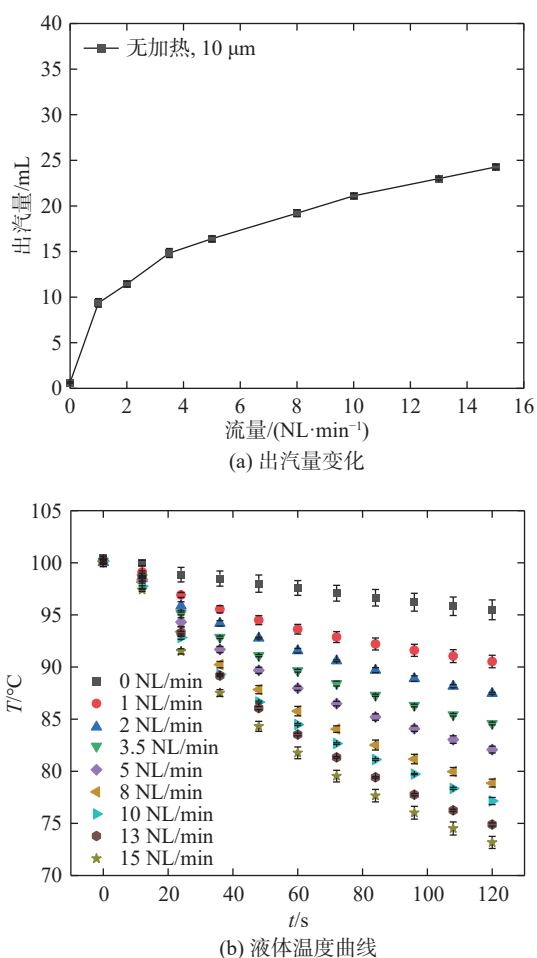


图 6 无加热模式下不同流量对蒸发的影响

Fig. 6 Effects of flow rate on evaporation in non-heating mode

图 7 展示了持续加热模式下不同流量对工作液体温度及出汽量随时间变化的影响。与无加热模式相似，在使用相同平均孔隙的泡沫钛网时，随着流量增大，液体降温速度加快，出汽量相应增加。这是由于气体流量提高使汽泡脱离频率加快，单位时间内汽泡生成数量增多，汽液间换热面积增大，从而增强对流换热，导致最终蒸汽量的增加^[38]。与无加热模式相比，持续加热模式因为有外界持续的热量输入，降温速度更慢，出汽量更大。在持续加热的情况下，工作

液体始终维持高温状态,通入微泡群会导致大量液态水蒸发,并保持较高汽化强度;但无加热模式下,液池温度随着蒸发的进行逐渐降低,液体内部压力下降,出汽量减少。未通入微泡时,仅靠工作液体加热沸腾带走一定热量;而高温下通入微泡群既能促进气泡生长,又可以加速加热棒表面汽核产生的气泡脱离,增强工作液体扰动,从而强化汽化。

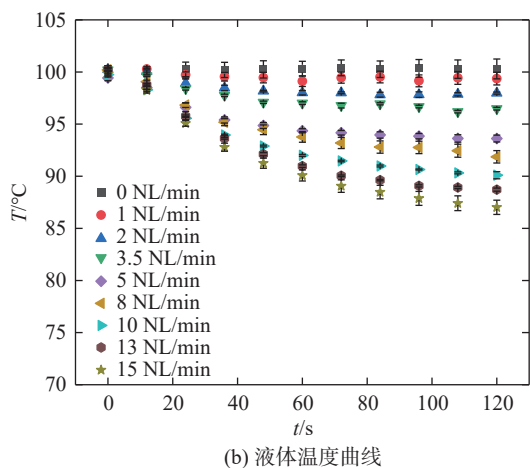
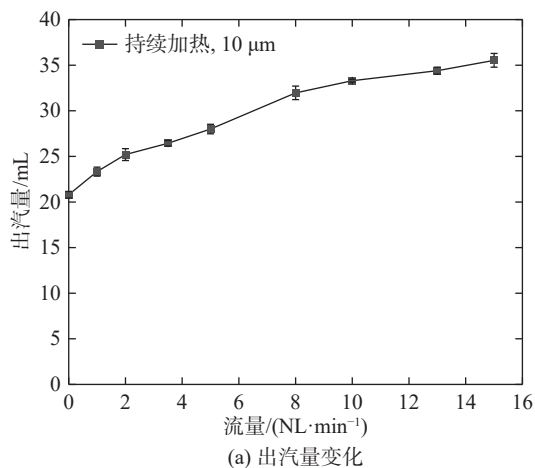


图7 持续加热模式下不同流量对蒸发的影响

Fig. 7 Effects of flow rate on evaporation in continuous heating mode

2.4 可视化研究气泡生成

沸腾和蒸发过程中的传热速率会受各种汽泡动力学参数的影响^[39-40]。针对沸腾与蒸发实验,高速摄像技术已成为观测汽泡形成、发展、聚合、脱离等过程的标准研究方法^[41-42]。为清楚看到汽泡的生长过程,我们对独立汽泡行为进行观察并验证理论的正确性,如图8所示。在此基础上,结合等效直径方法进行计算^[43],通过具体数据来观察不同池温下汽泡生长过程中的直径变化,如图9所示。

图8展示了工作液体沸腾时,单个汽泡的生长过程。可以明确看到,在持续沸腾的工作液体中,汽泡

吸收大量的潜热并得到充分的膨胀,汽泡体积明显增大。在脱离加热表面时,其直径约为初始阶段的3倍。

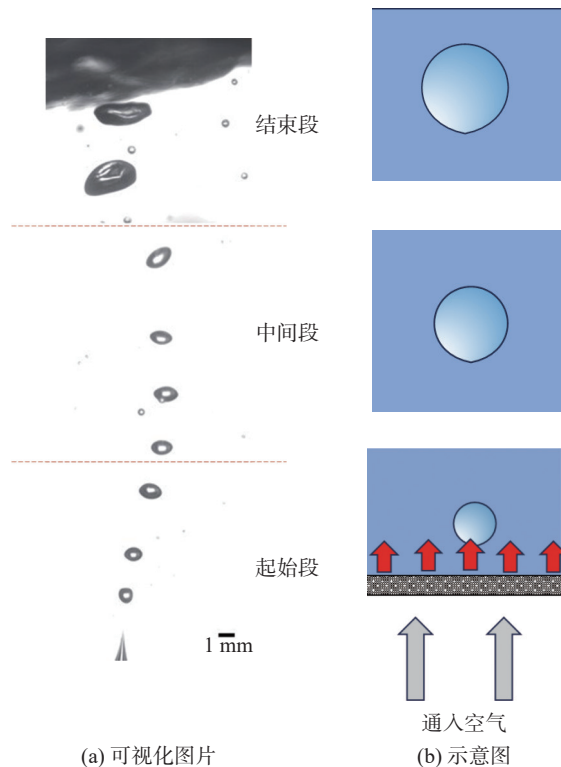


图8 沸腾工作液体中单个汽泡的生长过程

Fig. 8 Growth process of a single vapor bubble in boiling working liquid

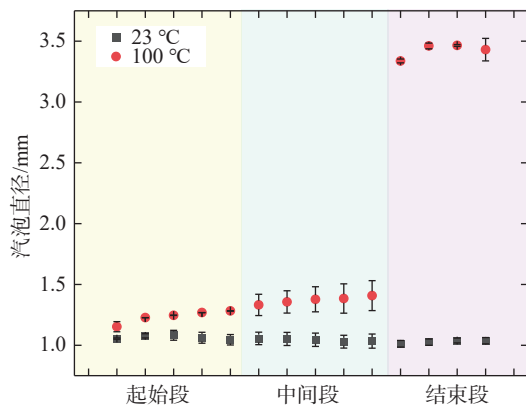


图9 不同池温下汽泡生长直径变化对比

Fig. 9 Comparison of changes in diameter of vapor bubble growth at different pool temperatures

为进一步验证微泡群对蒸发的强化机制,结合理论计算对高速摄影数据进行分析,具体如公式(10)所示:

$$v = \frac{2R^2\rho g}{9\mu} \quad (10)$$

式中: ρ 表示去离子水密度, g 为重力加速度, μ 为去离子水的动力黏度, v 为汽泡的终端速度。

当工作液体温度约为 23 ℃ 时, 汽泡在生长结束段直径约为 1.07 mm。通过高速摄像机记录图像及 Matlab 软件后续处理可以得到, 此时汽泡的终端速度 v 约为 0.16 m/s。当工作液体温度约为 100 ℃ 时, 汽泡在生长结束段直径约为 3.35 mm, 此时汽泡的终端速度 v 约为 0.31 m/s, 对应温度下饱和去离子水的相关数据见表 1。理论计算可得, 汽泡直径增大了约 2.61 倍, 而实验观测值则为 3.13 倍。实际过程中工作液体一直处于沸腾状态, 汽泡上升导致周围液体压力下降, 致使内压降低, 减压导致汽泡体积进一步增大。根据拉普拉斯方程(式(11)), 表面张力效应降低, 汽泡内压会进一步降低, 最终导致实际汽泡直径大于理想状态。若将气液界面的附加压力变化考虑在内, 实验结果基本与理论计算接近。

$$\Delta p = 2\gamma/R$$

(11)

式中: Δp 表示汽泡内外压差, γ 表示汽泡表面张力。

表 1 大气压下饱和去离子水的热物理性质

Table 1 Thermophysical properties of saturated deionised water at atmospheric pressure

$T/^\circ\text{C}$	$\mu/(\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1})$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
23	0.946×10^{-6}	997.45
100	0.295×10^{-6}	958.40

从图 9 可以看出, 与 23 ℃ 工况相比, 沸腾状态下 (100 ℃) 汽泡体积呈现显著增长趋势, 汽泡在上升过程中不断吸收周围过热液体的热量, 促使大量液体汽化, 使汽泡逐渐变大。由 Antoine 方程^[44], 即公式 (12) 可知, 液体温度从 23 ℃ 升温到 100 ℃ 时, 其饱和蒸汽压从 0.5 kPa 增加到 2.5 kPa, 汽泡内空气分压下降、蒸汽分压上升。微泡群可以看作是大量单汽泡的集合, 在沸腾液体中, 通入微泡群时, 其生长规律与单汽泡类似, 蒸汽分压力的上升增强了汽化动力, 从而提高蒸发效率。

$$\ln p = A - B/(T + C)$$

(12)

式中: p 为温度 T 对应的纯液体饱和蒸汽压; A 、 B 、 C 分别是在温度为 T 时, 去离子水的经验性公式推导的对应参数, 详细数据见表 2。

表 2 去离子水的 Antoine 方程参数

Table 2 Parameters of the Antoine equation for deionised water

$T/^\circ\text{C}$	A	B	C
23	8.11	1750.29	235.0
100	7.97	1668.21	228.0

微泡群在生长过程中会与加热器表面产生的汽泡发生相互作用, 不仅促进其生长和脱离, 还会对周

围工作液体产生扰动, 通过微对流进行能量的传递^[28]。微泡群的运动同时增强了工作介质的对流强度, 并可能引发加热器表面再润湿, 从而加强换热^[45]。在持续加热条件下, 汽泡的聚并也会使汽泡的脱离频率增加, 显著增加汽泡的换热^[46], 进而提升蒸发速率。此外, 微汽泡表面扰动导致汽泡表面积增大, 进一步加强了汽泡表面的换热^[47]。上述机理与不同模式及不同实验条件下的结果相符, 说明微泡群可通过强化汽化过程实现高效蒸发。结合单汽泡可视化研究对蒸发汽化机理的分析进一步验证了实验的准确性。

3 结 论

本研究为探索高效蒸发方法, 提出并实验研究了一种通过主动通入微气泡群以强化液体汽化的新技术。通过搭建实验台架, 定量研究了操作模式、泡沫钛孔隙率及气体流量对蒸发性能的影响, 并结合高速摄像对气泡动力学行为进行了机理分析。主要得到以下结论:

- 1) 在无加热与持续加热两种模式下, 微气泡的引入均能大幅提升工质汽化量并加剧工作液体温降。在无加热模式下, 出汽量最大可提升至基准的 38 倍; 在持续加热模式下, 也可提升 1.7 倍, 证实了该技术是一种有效的强化蒸发手段。
- 2) 工质汽化量随气体流量增加呈对数增长, 当流量从 1 NL/min 增大至 15 NL/min 时, 出汽量可提升约 3.5 倍。在本实验参数范围内 (孔隙率 2、5、10 μm), 泡沫钛的平均孔隙对蒸发效果的影响较小, 表明在本文条件下气体流量是关键参数。
- 3) 机理分析表明, 微气泡群通过提供大量附加汽化核心增大传热面积、上升扰动强化传质、改变界面蒸汽分压三种机制驱动液体在低于平衡沸点下持续汽化。

相较于需要外场强化或表面改性的现有方法, 本方法仅需通入微气泡就能实现高效蒸发, 具有操作简便、无需复杂改装的实用化优势, 为强化蒸发技术提供了新方案。需要说明的是, 本文的理论工作部分还有所欠缺, 主要有以下 3 点原因: 1) 微汽泡生长是由近汽膜界面蒸汽压梯度驱动的非稳态模式, 该传质过程与泡内涡状流动强耦合; 2) 实验观测可以看到汽泡自脱离基底一直存在较大的变形, 无法以简单的标准球开展流动和热力学分析; 3) 高空间密度和快速膨胀模式导致汽泡之间的合并频繁发生, 不能简单地看作多个单一汽泡的集合效应。因此, 本文的后续工作拟重点分析单一汽泡在近沸点液相中的的动力学行为,

建立流体力学和热力学模型,为蒸发效率增强效果提供更明晰的物理解释。

参 考 文 献:

- [1] 王琳娜, 陈楚琦, 曾文杰, 等. 小型压水堆核电厂蒸汽排放控制系统仿真研究[J]. 核动力工程, 2024, 45(2): 178–182.
Wang Linna, Chen Chuqi, Zeng Wenjie, et al. Simulation study on steam dump control system of small pressurized water reactor nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineering, 2024, 45(2): 178–182(in Chinese).
- [2] Fernández-Arias P, Vergara D, Orosa J A. A global review of PWR nuclear power plants[J]. Applied Sciences, 2020, 10(13): 4434.
doi: 10.3390/app10134434
- [3] Yan Feng, Pi Yehua, Yang Zaoli. Numerical simulation of vapor-liquid two-phase saturated steam fluent flow and atomizing jet cleaning[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2022, 2022: 1–9.
doi: 10.1155/2022/6452253
- [4] Kravchenko I N, Amelin S S, Kurmenev D V, et al. Formation of the working flux in an abrasive jet for steam cleaning[J]. Russian Engineering Research, 2022, 42(7): 685–688.
doi: 10.3103/S1068798X22070176
- [5] Mermer E, Ünal R. Passive thermal control systems in spacecrafts[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2023, 45(3): 160.
doi: 10.1007/s40430-023-04073-5
- [6] 叶一琳, 马瑞. 热流密度对航天蒸发器流动传热影响的研究[J]. 工程热物理学报, 2023, 44(6): 1681–1689.
Ye Yilin, Ma Rui. Study on the influence of heat flux density on the flow heat transfer of aerospace evaporator[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(6): 1681–1689(in Chinese).
- [7] 仇璐珂, 王新军, 韩宇萌, 等. 蛇形冷却通道中的蒸汽流动与换热特性研究[J]. 空气动力学学报, 2011, 29(2): 235–239.
Qiu Luke, Wang Xinjun, Han Yumeng, et al. Study on the flow and heat transfer characteristic of steam in serpentine internal cooling channel[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2011, 29(2): 235–239(in Chinese).
doi: 10.3969/j.issn.0258-1825.2011.02.019
- [8] Khanam S, Mohanty B. Energy reduction schemes for multiple effect evaporator systems[J]. Applied Energy, 2010, 87(4): 1102–1111.
doi: 10.1016/j.apenergy.2009.05.003
- [9] Díaz-Ovalle C O, Jafari S M. Multiple-effect evaporators in the food industry: fundamentals, design, simulation, control, and applications[J]. Food Engineering Reviews, 2023, 15(4): 691–717.
doi: 10.1007/s12393-023-09350-6
- [10] Erdinc M T. Two-evaporator refrigeration system integrated with expander-compressor booster[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, 154: 349–363.
doi: 10.1016/j.ijrefrig.2023.06.023
- [11] 龚光彩, 安劲霖, 张明发, 等. 具有防融霜装置的蒸发器结霜特性及性能仿真研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(4): 442–449.
Gong Guangcai, An Jinlin, Zhang Mingfa, et al. Study of frosting characteristics and performance simulation of evaporator with defrosting device[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(4): 442–449(in Chinese).
doi: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2022-1927
- [12] Liu Y, Tian Y, Liu N, et al. A self-adaptive and regenerable hydrogel interfacial evaporator with adjustable evaporation area for solar water purification[J]. Small, 2024, 20(4): e2305903.
doi: 10.1002/sml.202305903
- [13] Xu P T, Gao J K, Xia M S, et al. Same volume, larger output: 3D trapezoidal multi-interface solar evaporator for concentrated seawater desalination and wastewater treatment[J]. Desalination, 2024, 581: 117581.
doi: 10.1016/j.desal.2024.117581
- [14] Valadez-Renteria E, Oliva J, Oliva A I, et al. A solar evaporator fabricated from corncob waste for the desalination of seawater and removal of oil/herbicides from contaminated water[J]. Chemosphere, 2024, 350: 141030.
doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.141030
- [15] Avgerinou M, Bertoldi P, Castellazzi L. Trends in data centre energy consumption under the European code of conduct for data centre energy efficiency[J]. Energies, 2017, 10(10): 1470.
doi: 10.3390/en10101470
- [16] 高明, 章立新, 全晓军, 等. 电场作用下矩形肋表面汽泡运动规律研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(7): 1484–1489.
Gao Ming, Zhang Lixin, Quan Xiaojun, et al. Investigation of boiling bubble dynamics on a rib heating surface under an electric field[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(7): 1484–1489(in Chinese).
- [17] 郭俊, 李双菲, 陈彦君, 等. 非均匀电场强化水的池沸腾传热特性实验研究与分析[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(3): 788–796.
Guo Jun, Li Shuangfei, Chen Yanjun, et al. Experimental study and analysis of water pool boiling heat transfer enhanced by non-uniform electric field[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(3): 788–796(in Chinese).
- [18] Shahriari A, Birbarah P, Oh J, et al. Electric field-based control and enhancement of boiling and condensation[J]. Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering, 2017, 21(2): 102–121.
doi: 10.1080/15567265.2016.1253630
- [19] Shojaeian M, Yildizhan M M, Coşkun Ö, et al. Investigation of change in surface morphology of heated surfaces upon pool boiling of magnetic fluids under magnetic actuation[J]. Materials Research Express, 2016, 3(9): 096102.
doi: 10.1088/2053-1591/3/9/096102
- [20] Abdollahi A, Salimpour M R, Etesami N. Experimental analysis of magnetic field effect on the pool boiling heat transfer of a ferrofluid[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 1101–1110.
doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.10.019
- [21] 李长达, 张伟, 刘广林, 等. 超声波对池沸腾换热的影响[J]. 节能技术, 2016, 34(6): 527–532.
Li Changda, Zhang Wei, Liu Guanglin, et al. Effect of ultrasound on pool boiling heat transfer[J]. Energy Conservation Technology, 2016, 34(6): 527–532(in Chinese).
doi: 10.3969/j.issn.1002-6339.2016.06.010
- [22] Tang J G, Sun L C, Wu D, et al. Effects of ultrasonic waves on subcooled pool boiling on a small plain heating surface[J]. Chemical Engineering Science, 2019, 201: 274–287.
doi: 10.1016/j.ces.2019.03.009
- [23] Kim S J, Bang I C, Buongiorno J, et al. Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2007, 50(19-20): 4105–4116.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.02.002
- [24] Phan H T, Caney N, Marty P, et al. Surface wettability control by nanocoating: The effects on pool boiling heat transfer and nucleation mechanism[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52(23-24): 5459–5471.
doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.06.032
- [25] Ma Xu, Song Yindong, Wang Yang, et al. Amelioration of pool boiling

- thermal performance utilizing graphene-silver hybrid nanofluids[J]. Powder Technology, 2022, 397: 117110.
doi: [10.1016/j.powtec.2022.117110](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117110)
- [26] Hu Yanwei, Li Haoran, He Yurong, et al. Effect of nanoparticle size and concentration on boiling performance of SiO₂ nanofluid[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 107: 820–828.
doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.090](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.090)
- [27] Babu R, Das M K. Effects of surface-active agents on bubble growth and detachment from submerged orifice[J]. Chemical Engineering Science, 2018, 179: 172–184.
doi: [10.1016/j.ces.2018.01.028](https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.01.028)
- [28] 郭东升, 李小斌, 张红娜, 等. 表面活性剂溶液过冷池沸腾中的气泡穿透行为[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(5): 1316–1323.
Guo Dongsheng, Li Xiaobin, Zhang Hongna, et al. Penetration behavior between vapor bubbles in subcooled pool boiling of surfactant solution[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(5): 1316–1323(in Chinese).
- [29] Khooshechin M, Fathi S, Salimi F, et al. The influence of surfactant and ultrasonic processing on improvement of stability and heat transfer coefficient of CuO nanoparticles in the pool boiling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 154: 119783.
doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119783](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119783)
- [30] Zhang Jinxin, Luo Xiaoping, Wang Liangfeng, et al. Combined effect of electric field and nanofluid on bubble behaviors and heat transfer in flow boiling of minichannels[J]. Powder Technology, 2022, 408: 117743.
doi: [10.1016/j.powtec.2022.117743](https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117743)
- [31] Yuan Luling, Hong Fangjun, Cheng Ping. Pool boiling enhancement through a guidance structure mounted above heating surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 139: 751–763.
doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.067](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.067)
- [32] Wang Zhaolong, Quan Xiaojun, Yao Wei, et al. Plasma resonance effects on bubble nucleation in flow boiling of a nanofluid irradiated by a pulsed laser beam[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2016, 72: 90–94.
doi: [10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.12.030](https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2015.12.030)
- [33] Yan Chenguang, Xu Ya, Zhang Peng, et al. Investigation of the gas bubble dynamics induced by an electric arc in insulation oil[J]. Plasma Science and Technology, 2022, 24(4): 044003.
doi: [10.1088/2058-6272/ac5af9](https://doi.org/10.1088/2058-6272/ac5af9)
- [34] 刘银龙, 徐国强, 付衍琛, 等. 高超声速发动机碳氢燃料预冷器换热特性[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(1): 208–217.
Liu Yinlong, Xu Guoqiang, Fu Yanchen, et al. Heat transfer characteristics of a hydrocarbon fuel precooler for hypersonic engines[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2022, 40(1): 208–217(in Chinese).
doi: [10.7638/kqdlxxb-2021.0291](https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0291)
- [35] Kline S J, McClintock F A. Describing uncertainties in single-sample experiments[J]. Mechanical Engineering, 1963, 75: 3–8.
- [36] Sezer N, Khan S A, Koç M. Amelioration of the pool boiling heat transfer performance via self-assembling of 3D porous graphene/carbon nanotube hybrid film over the heating surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 145: 118732.
doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118732](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118732)
- [37] Zhang Aman, Li Shimin, Cui Pu, et al. A unified theory for bubble dynamics[J]. Physics of Fluids, 2023, 35(3): 033323.
doi: [10.1063/5.0145415](https://doi.org/10.1063/5.0145415)
- [38] Zhang Jian, Yu Yong, Qu Chen, et al. Experimental study and numerical simulation of periodic bubble formation at submerged micron-sized nozzles with constant gas flow rate[J]. Chemical Engineering Science, 2017, 168: 1–10.
doi: [10.1016/j.ces.2017.04.012](https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.04.012)
- [39] Mohanty R L, Das M K. A critical review on bubble dynamics parameters influencing boiling heat transfer[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 78: 466–494.
doi: [10.1016/j.rser.2017.04.092](https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.092)
- [40] 赵建福, 张良, 杜王芳, 等. 单气泡池沸腾传热中的重力效应数值模拟[J]. 空气动力学学报, 2021, 39(3): 121–129.
Zhao Jianfu, Zhang Liang, Du Wangfang, et al. Numerical simulation of gravity effect on heat transfer in single bubble pool boiling[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2021, 39(3): 121–129(in Chinese).
doi: [10.7638/kqdlxxb-2021.0039](https://doi.org/10.7638/kqdlxxb-2021.0039)
- [41] Michae S, Rulière R, Bonjour J. Experimental study of bubble dynamics of isolated bubbles in water pool boiling at subatmospheric pressures[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2017, 87: 117–128.
doi: [10.1016/j.expthermflusci.2017.04.030](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.04.030)
- [42] Siedel S, Cioulachtjian S, Bonjour J. Experimental analysis of bubble growth, departure and interactions during pool boiling on artificial nucleation sites[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 32(8): 1504–1511.
doi: [10.1016/j.expthermflusci.2008.04.004](https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2008.04.004)
- [43] Chen Yujie, Zou Yu, Sun Dongliang, et al. Molecular dynamics simulation of bubble nucleation on nanostructure surface[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 118: 1143–1151.
doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.079](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.079)
- [44] Thomson G W. The Antoine equation for vapor-pressure data[J]. Chemical Reviews, 1946, 38(1): 1–39.
doi: [10.1021/cr60119a001](https://doi.org/10.1021/cr60119a001)
- [45] Yajima S, Io N, Miyazaki K, et al. Heat flux partitioning and macrolayer observation in pool boiling of water on a surface with artificial nucleation sites[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2022, 194: 122924.
doi: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122924](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.122924)
- [46] Leong K C, Ho J Y, Wong K K. A critical review of pool and flow boiling heat transfer of dielectric fluids on enhanced surfaces[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 112: 999–1019.
doi: [10.1016/j.applthermaleng.2016.10.138](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.10.138)
- [47] Ueno I, Hattori Y, Hosoya R. Condensation and collapse of vapor bubbles injected in subcooled pool[J]. Microgravity Science and Technology, 2011, 23(1): 73–77.
doi: [10.1007/s12217-010-9235-4](https://doi.org/10.1007/s12217-010-9235-4)

(本文责编: 张天航)