

弹性管束外液膜强制诱导波动蒸发换热机理分析

郭雷^{1,2*}, 胡靖^{1,2}

¹武陵山片区生态农业智能控制技术湖南省重点实验室, 湖南 怀化

²怀化学院物电与智能制造学院, 湖南 怀化

收稿日期: 2024年5月20日; 录用日期: 2024年6月20日; 发布日期: 2024年6月27日

摘要

本文建立了弹性管束外液膜强制诱导波动蒸发实验台, 通过实验与数学分析相结合的方法研究弹性管束间两相流传热传质机理。实验通道宽度为0.5~2.0 mm。重点研究两相流流型、压力损失和通道宽度与传热特性之间的关系。实验中观察到三种流动状态, 分别为泡状流、限制泡状流和蒸汽区。在相同宽度的通道中, 过冷沸腾的初始热流随流量的增加呈线性增加。在相同流速下, 过冷沸腾的初始热流随通道宽度的增加而减小。气泡产生频率和脱离直径对壁面传热系数有明显影响。但气泡产生频率的增加也会导致气泡分离直径的减小。通过数学分析, 发现通道尺寸的变化会影响传热系数, 但在强化和弱化换热之间存在一个边界。该研究的理论值与实验值的比较结果吻合较好。

关键词

弹性管束, 强制诱导, 波动蒸发, 机理分析

Mechanism Analysis of Forced Induced Wave Evaporation Heat Transfer by Liquid Film outside Elastic Tube Bundle

Lei Guo^{1,2*}, Jing Hu^{1,2}

¹Hunan Provincial Key Laboratory of Intelligent Control Technology for Wuling-Mountain Ecological Agriculture, Huaihua Hunan

²School of Physics, Electronics and Intelligent Manufacturing, Huaihua University, Huaihua Hunan

Received: May 20th, 2024; accepted: Jun. 20th, 2024; published: Jun. 27th, 2024

*通讯作者。

文章引用: 郭雷, 胡靖. 弹性管束外液膜强制诱导波动蒸发换热机理分析[J]. 应用物理, 2024, 14(6): 436-443.

DOI: 10.12677/app.2024.146048

Abstract

An experimental platform for forced-induced wave evaporation of liquid film outside the elastic tube bundle was established in this paper. The mechanism of two-phase heat and mass transfer between the elastic tube bundle was studied by combining experiment and mathematical analysis. The experimental channel width was 0.5~2.0 mm. The relationship between the flow pattern, pressure loss, channel width and heat transfer characteristics of two-phase flow is studied. Three flow states were observed in the experiment, namely bubble flow, restricted bubble flow and drying zone. In a channel of the same width, the initial heat flow of subcooled boiling increases linearly with the increase of the flow rate. At the same flow rate, the initial heat flow of subcooled boiling decreases with the increase of channel width. Bubble generation frequency and detachment diameter have an obvious influence on wall heat transfer coefficient. However, the increase of bubble generation frequency also leads to the decrease of bubble separation diameter. Through mathematical analysis, it is found that the change in channel size will affect the heat transfer coefficient, but there is a boundary between enhanced and weakened heat transfer. The theoretical values of this study agree well with the experimental values.

Keywords

Elastic Tube Bundle, Forced Induction, Wave Evaporation, Mechanism Analysis

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

G. Ribatshi 等[1]对管束外液膜强制诱导波动蒸发器进行了研究,发现传热强度主要受薄膜厚度和流型的影响。M. B. Bowers 等[2]在研究了两种等效直径为 0.51 mm 和 2.54 mm 的通道后,发现微尺度通道的两相流特性与传统尺度通道有显著差异。E. Ishlbashi 等[3]对不同压力下宽度为 0.97~20 mm 的垂直环形通道中的流动沸腾进行了实验研究,结果表明在 3 mm 以下的通道中,传热效果明显增强,当工作压力升高时,传热系数也相应升高。Krishnan [4]提出了一种新的强化传热公式,以研究在改进的多孔管上乙醇液膜强制诱导波动蒸发的机理,通过理论分析得到了适用于固定热流条件下的经验公式。分析目前的研究,大多数研究集中在对宏观尺寸的降膜热交换器的研究上,现有的研究还不能系统地揭示微细尺寸管束强制诱导传热机理,不同研究者实验结果的重复性较差[5]-[10]。为进一步研究微细尺寸管束外液膜强制诱导波动蒸发两相流的传热机理,本文建立了一套通道宽度为 0.5 mm~2.0 mm 的实验台。采用高速摄像机观察流动型式。用数学分析的方法分析了传热和传质的机理,重点研究传热系数与压降、流型、气泡脱离频率和气泡脱离直径之间的关系。

2. 实验研究

本文实验系统的设计如图 1 所示。流动环路主要由储液罐、泵、预加热装置、体积流量计、实验段和冷凝器组成。本实验所用工质为去离子水,通过隔膜计量泵升压,使其在系统中循环。去离子水经预热器预热,使其温度稳定在 27℃左右,经流量计后,进入实验段入口,在实验段内流动的过程中,吸收两侧加热板的热量温度升高,达到两相流状态,管束外液膜强制诱导波动蒸发过程中产生的蒸汽或汽 -

水混合物流过冷凝器, 凝结成低温水后流回储液罐, 完成一个循环。两侧加热板的最大加热功率为 500 W。实验段通道的宽度为 0.5 mm~2.0 mm。实验段经过酸洗、碱洗和表面光滑处理以达到精度要求。

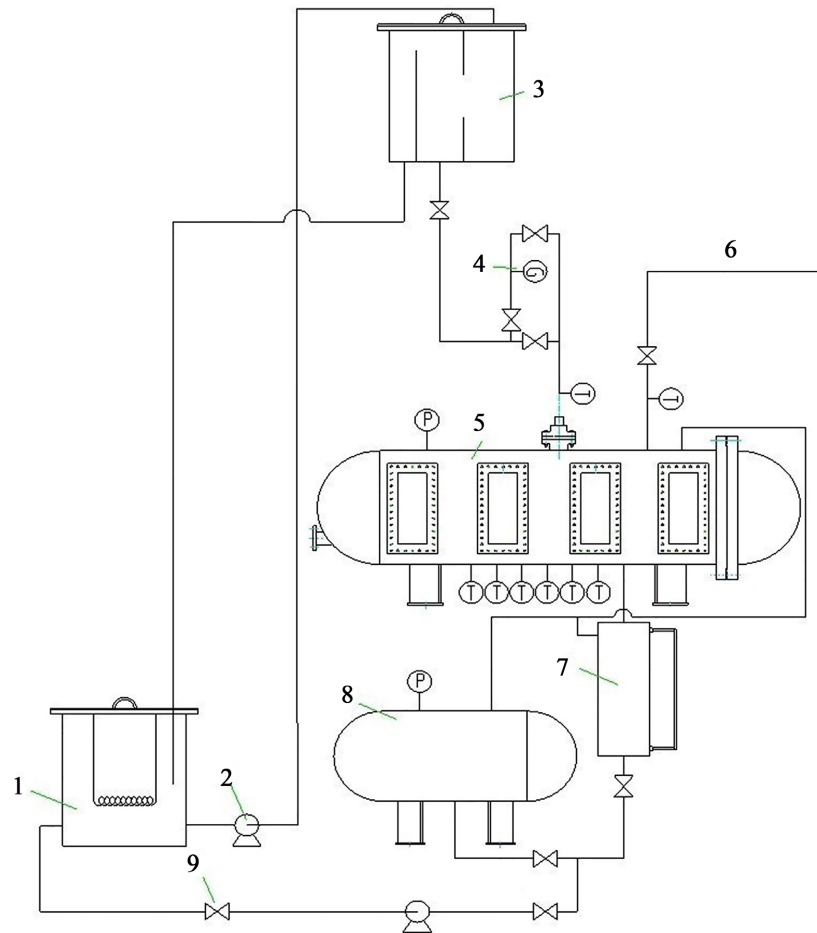


Figure 1. Design of the experimental system and structure diagram of each part
图 1. 实验系统的设计及各部分结构图

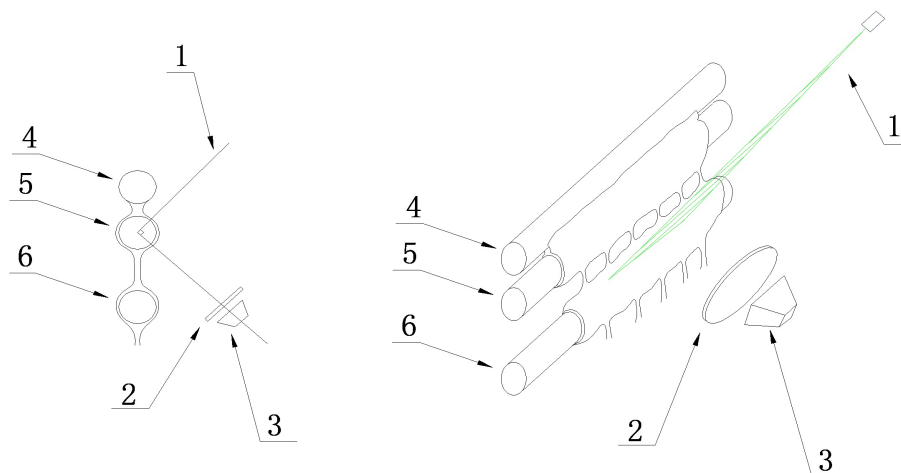


Figure 2. Schematic diagram of visual measurement of forced induced wave evaporation of liquid film outside the bundle
图 2. 管束外液膜强制诱导波动蒸发实验可视化测量示意图

在实验段 5 中, 设置了四组管束外液膜强制诱导波动蒸发束。管束间距分别为 0.5、1.0、1.5 和 2.0 mm。实验段的长度 L 设置为 1000 mm。有效实验长度 L_e 为 900 mm。采用 9 对均匀布置在加热管壁上的热电偶测量工作介质温度。热电偶位置距入口的距离分别为 100、200、300、400、500、600、700、800 和 900 mm。在每个测温位置的热电偶均为成对布置, 以减小测量误差和防止在加热过程中可能造成的损坏。实验段表面采用 5 mm 厚的透明有机玻璃板密封。整个实验部分采用保温和阻燃材料进行处理。通过调节进口处去离子水的流量 G 和进口水温 T_m , 在实验段中可以设置高速摄像机观测到不同的两相流流型。管束外液膜强制诱导波动蒸发实验示意图如图 2 和表 1 所示。

Table 1. Parameters range of narrow-channel falling film experiment

表 1. 液膜强制诱导波动蒸发实验参数范围

序号	通道宽度(mm)	加热功率(W)	体积流量(L/h)
1	0.5	0~500	0~15
2	1.0	0~500	0~20
3	1.5	0~500	0~20
4	2.0	0~500	0~20

实验设备的介绍及精度等级如下: (1) 预热器。加热功率可在 0~2 kW 之间调节, 温度可在 0°C~100°C 之间调节。(2) WM20/1.0 隔膜计量泵。流量可在 0~20 L/h 之间调节, 测量精度为 $\pm 1.0\%$, 适用于在-30°C~120°C 的温度下传输粘度为 0.03~800 mm²/s 的介质。(3) FMC-8D 液体体积流量计。它可用于测量多相流量。测量范围为 0~20 L/h, 精度为 $\pm 0.2\%$ 。(4) 风冷式冷凝器。风量为 8.04 m³/min。(5) FMC8201 压力变送器。测量范围可在 0~50 kPa 之间调整, 精度为 $\pm 0.25\%$, 工作温度范围为-10°C~120°C。(6) FLUKE2625A 数据采集仪器, 可设置 21 个模拟输入通道, 通过 RS-232 接口获取温度数据, 精度为 ± 0.1 °C。温度测量范围为-200°C 至 400°C。

实验过程和步骤: 首先, 检查实验系统各部件的连接情况。二, 启动制冷机组, 确保冷凝器的正常运行。第三, 打开仪表, 启动数据采集仪表和差压变送器。第四, 启动隔膜计量泵, 调节流量, 观察仪器是否在预期值下工作。第五, 打开加热电源, 加热窄通道实验件。第六, 在实验段内汽液两相流达到期望值后, 再稳定一段时间, 并记录所需的数据。第七, 调整参数, 输入下一个工况。第八, 重复步骤 1~7, 直到测试了所有的工作条件。

3. 实验结果及分析

本文采用一个 5000 fps 的高速相机来获得 512 × 512 像素的图片。表 2 和图 3 为本实验中观察到的典型流型。当加热管的加热功率设置为 500 W 时, 实验部分出现了三种两相流流型。流型变换所对应的体积流量随通道尺寸的减小而减小。例如, 在宽度为 $s = 2.0$ mm 的窄通道中, 当体积流量 G 增加到超过 15.47 L/h 时, 在实验部分只能观测到孤立泡状流这一种流型。在宽度为 $s = 1.5$ mm 的窄通道中, 当 $G > 14.42$ L/h 时, 只能观测到孤立泡状流这一种流型。在 $s < 1.0$ mm 的窄通道中, 当 $G > 10.8$ L/h 时, 只能观测到孤立泡状流这一种流型。当体积流量 G 变小时, 流型开始随着流量发生了转变。

在只出现泡状流的条件下, 气相以极细小气泡的形式分散在液相中。当气泡在管壁上产生时, 它们受到高速液体冲击的影响, 导致气泡迅速脱离管壁。气泡无法增长到足够大以形成受限制泡状流状态。此时, 气相折算速度低, 液相折算速度高。

随着体积流量 G 的减小, 实验段内出现泡状流和受限泡状流两种流型。此时, 沿实验段轴向, 随着壁面产生气泡数量的增多, 小气泡出现合并, 形成较大气泡, 并导致合并后气泡直径大于通道宽度, 出

受限气泡状流。此工况下, 气相流量很高而液相流量较低, 气相在管道核心部分流动, 并会出现微小液滴携带现象。

Table 2. Flow pattern observation under different experimental conditions

表 2. 在不同实验条件下的流型观察

编号	宽度(mm)	流量(L/h)	ΔP (KPa)	流型产生位置与进口之间的距离(mm)			
				单相流	泡状流	限制泡状流	蒸干区
1		15.47	7.4	0~605	605~900	—	—
2	2	12.96	6.9	0~564	565~870	870~900	—
3		9.97	6.8	0~496	497~854	854~876	876~900
4		14.42	8.9	0~723	724~900	—	—
5	1.5	12.60	8.9	0~615	616~877	877~900	—
6		7.62	9.2	0~418	420~765	765~825	825~900
7		10.8	10.1	0~726	727~900	—	—
8	1.0	9.2	9.5	0~465	465~773	773~900	—
9		5.40	8.8	0~405	406~707	707~793	793~900
10		11.7	8.7	0~725	726~900	—	—
11	0.5	7.16	9.4	0~475	476~783	783~900	—
12		3.60	7.5	0~303	304~463	463~644	644~900

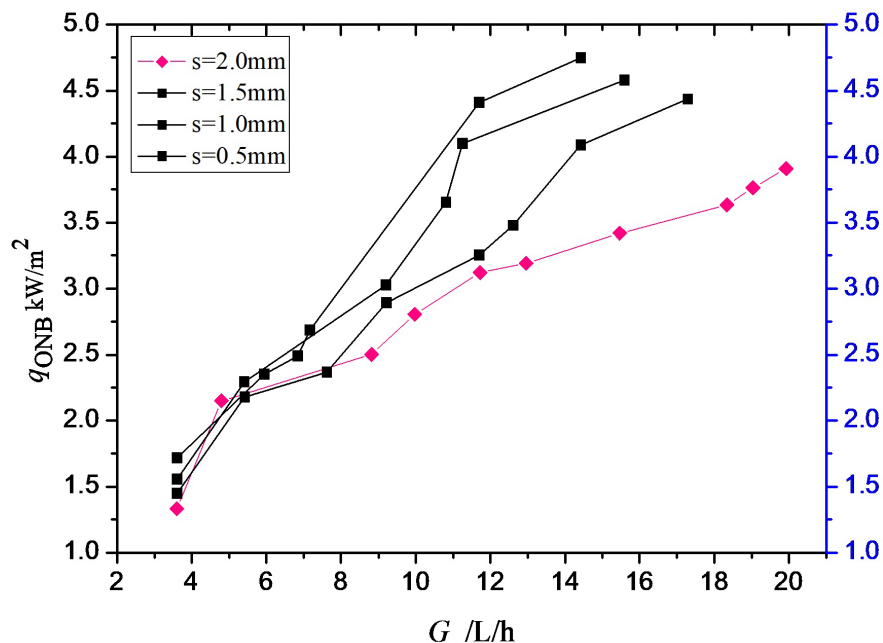


Figure 3. Relation between initial heat flux of subcooled boiling, volume flow rate and channel width

图 3. 过冷沸腾初始热通量与体积流量、通道宽度的关系

调节流量计继续减小体积流量 G , 流经细通道的工质经过充分的加热, 实验段内出现孤立气泡状流、受限块状流和蒸干区三种流型。这是因为当体积流量减小时, 通道内流体的流速也相应减小, 工作介质

可以被壁面充分加热。受限气泡在运动过程中不断合并, 形成环状气块, 由于通道尺寸较窄, 环状气块底部的液膜层在极短的时间内就会汽化形成蒸干。在本实验的流型观测中, 能够清晰的看到泡状流、蒸干区的存在, 以及受限泡状流从产生到消失的过程, 但未能观测到环状流的存在。

4. 数学模型与求解方法

4.1. 过冷沸腾过程的传热特性

根据本文的实验结果, 入口过冷度 Δt 、体积流量 G 和通道宽度 s 对过冷沸腾起始点的热通量 q_{ONB} 都有很大的影响, 如图 3 和图 4 所示。由图 3 分析可知, 在相同通道宽度条件下, 过冷沸腾起始点的热通量 q_{ONB} 随流量 G 的增加而逐渐增加, 该变化接近线性趋势。在相同的流速下, 过冷沸腾起始点的初始热通量 q_{ONB} 随通道宽度 s 的减小而增大。这种情况是由于工作介质在狭窄通道中的流量较快, 导致加热时间缩短所致。由图 4 分析可知, 四种窄通道内过冷沸腾起始点的热通量 q_{ONB} 随进水温度的升高而降低, 下降速率的趋势相同。当流量为 $G < 4 \text{ L/h}$ 时, 通道宽度对过冷沸起始点的热通量 q_{ONB} 没有明显影响。

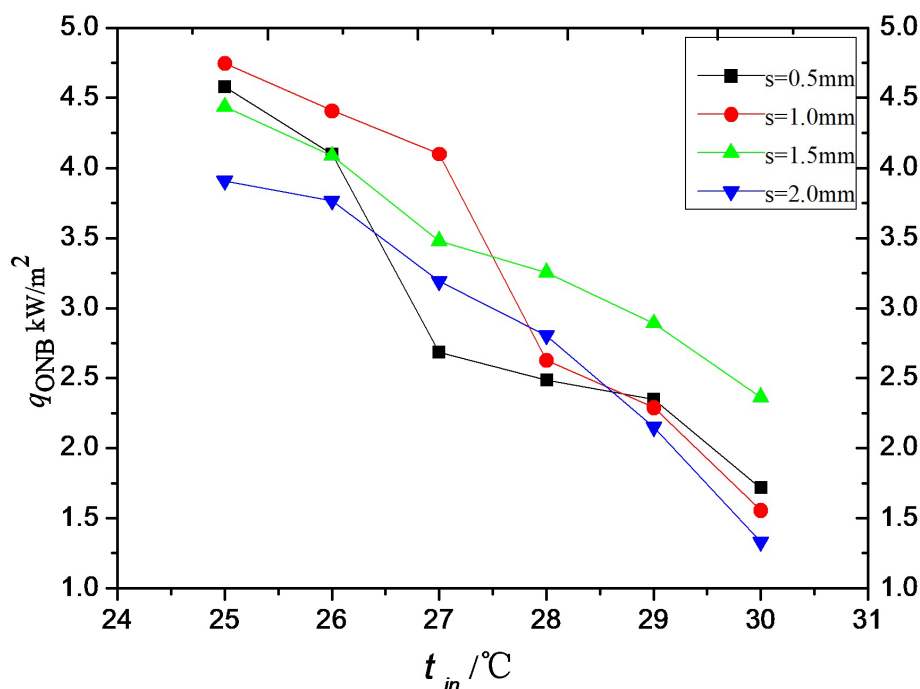


Figure 4. Relation between initial heat flow, inlet water temperature and channel width
图 4. 初始热流与进水温度、通道宽度的关系

4.2. 饱和沸腾换热特性

饱和沸腾换热区域是以气泡的相变潜热为主要的传热方式, 其传热过程与气泡的生成频率 f_g 、脱离直径 D_d 及通道宽度 s 等有较大关系, 而与工质入口过冷度 Δt 和体积流量 G 关系不大。图 5 和图 6 给出了饱和流动沸腾换热系数与气泡生成频率 f_g 、气泡脱离直径 D_d 及通道宽度 s 的关系。从图中可见, 气泡生成频率的增加直接导致了壁面换热系数的升高。Jakob 认为, 气泡脱离直径和频率之乘积为一不变值, $f_g D_d^n = c_0$, 气泡脱离频率的增加必然导致气泡脱离直径的减小。现有文献一般认为, 气泡的脱离直径在 2.0 mm 左右, 本研究中实验所用通道尺寸介于 0.5~2.0 mm 之间。当所形成气泡直径大于脱离直径而小于通道宽度时, 即 $D_d \leq D \leq s$, 随着气泡直径的不断增大, 总换热系数呈减小的趋势; 但当 $D > s$ 后, 气泡

受限变形, 改变了通道中的流动特性, 换热系数反而呈现上升趋势。数学解与实验数据吻合较好, 表明窄通道的增强传热不是绝对的, 而是与气泡分离直径和气泡分离频率有关。

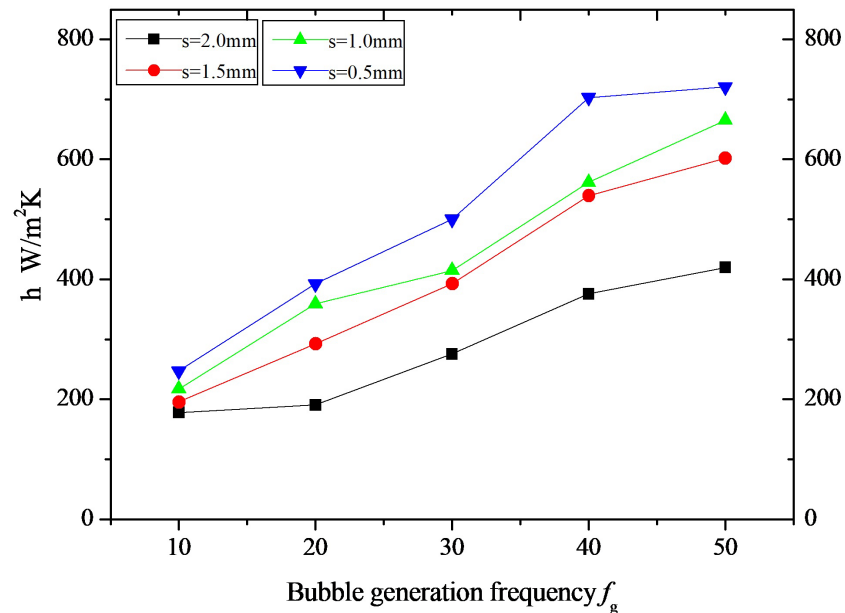


Figure 5. Relation between heat transfer coefficient and bubble generation frequency
图 5. 传热系数与气泡产生频率的关系

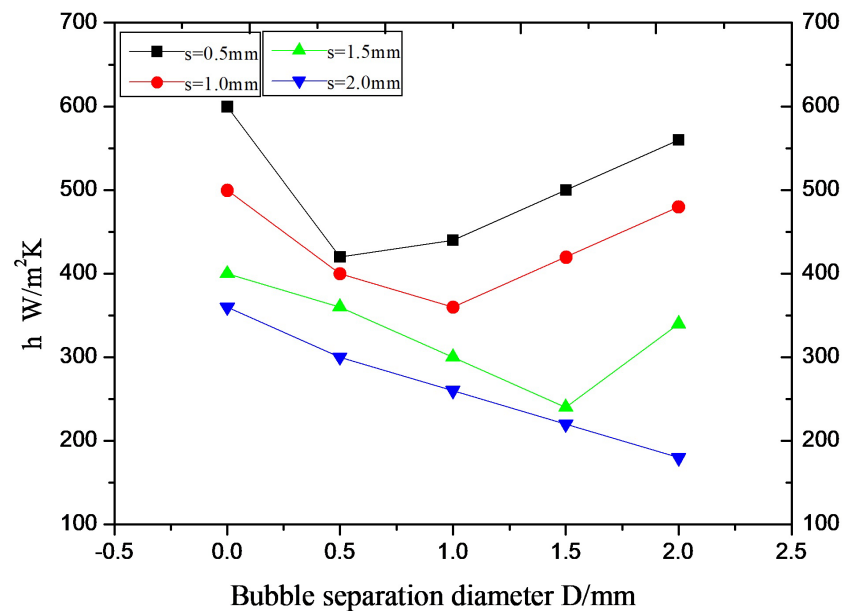


Figure 6. Relation between heat transfer coefficient and bubble separation diameter
图 6. 传热系数与气泡分离直径之间的关系

5. 结论

(1) 本文研究发现通道尺寸对壁面传热系数有很大的影响。在体积流量较高的条件下, 降低通道宽度可以提高壁面传热系数, 但在低体积流量区域, 这种影响并不明显, 说明在此情况下通道尺寸的减小并

不能增强传热能力。

(2) 入口过冷度、体积流量和通道宽度对过冷沸腾起始点的热通量均有较大影响。在相同的通道宽度条件下, 过冷沸腾起始点的热通量随流量的增加而逐渐增加。在相同的流速条件下, 过冷沸腾起始点的热通量随通道宽度的减小而增大。

(3) 气泡产生频率的增加, 直接导致了管壁传热系数的增加和气泡分离直径的减小。当产生的气泡直径大于偏脱离直径而小于通道宽度时, 气泡在生长过程中不受通道宽度的限制, 传热系数会随气泡直径的增加而减小。随着气泡不断长大, 其直径超过通道宽度时, 气泡被通道壁挤压变形, 流动特性随之发生变化, 传热系数开始呈现上升趋势。

致 谢

2023 年湖南省自然科学基金项目“水源热泵制冷系统中弹性管束自诱导振动节能关键技术研究”(No. 2023JJ50452), 2022 年湖南省教育厅科学研究项目“管束外液膜强制诱导波动蒸发节能减碳关键技术研究”(No. 22C0498)、武陵山片区生态农业智能控制技术湖南省重点实验室研究项目(No. ZNKZN2021-06)。

参考文献

- [1] Ribatski, G. and Jacobi, A.M. (2005) Falling-Film Evaporation on Horizontal Tubes—A Critical Review. *International Journal of Refrigeration*, **28**, 635-653. <https://doi.org/10.1016/j.jirefrig.2004.12.002>
- [2] Bowers, M.B. and Mudawar, I. (1994) High Flux Boiling in Low Flow Rate, Low Pressure Drop Mini-Channel and Micro-Channel Heat Sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **37**, 321-332. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(94\)90103-1](https://doi.org/10.1016/0017-9310(94)90103-1)
- [3] Ishibashi, E. and Nishikawa, K. (1969) Saturated Boiling Heat Transfer in Narrow Spaces. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **12**, 863-893. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(69\)90153-7](https://doi.org/10.1016/0017-9310(69)90153-7)
- [4] Ajith Krishnan, R., Balasubramanian, K.R. and Suresh, S. (2018) Experimental Investigation of the Effect of Heat Sink Orientation on Subcooled Flow Boiling Performance in a Rectangular Microgap Channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **120**, 1341-1357. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.12.133>
- [5] Guo, L., Zhang, S. and Cheng, L. (2010) Nucleate Boiling in Two Types of Vertical Narrow Channels. *Frontiers of Energy and Power Engineering in China*, **5**, 250-256. <https://doi.org/10.1007/s11708-010-0128-4>
- [6] Karmakar, A. and Acharya, S. (2021) Numerical Simulation of Falling Film Flow Hydrodynamics over Round Horizontal Tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **173**, Article ID: 121175. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121175>
- [7] Özdemir, M.R., Mahmoud, M.M. and Karayiannis, T.G. (2020) Flow Boiling of Water in a Rectangular Metallic Microchannel. *Heat Transfer Engineering*, **42**, 492-516. <https://doi.org/10.1080/01457632.2019.1707390>
- [8] Lin, K., Shi, D., Jog, M.A. and Manglik, R.M. (2020) General Correlations for Laminar Flow Friction Loss and Heat Transfer in Plain Rectangular Plate-Fin Cores. *Journal of Heat Transfer*, **142**, Article ID: 121801. <https://doi.org/10.1115/1.4048091>
- [9] Manoharan, S., Deodhar, A.M., Manglik, R.M. and Jog, M.A. (2019) Computational Modeling of Adiabatic Bubble Growth Dynamics from Submerged Capillary-Tube Orifices in Aqueous Solutions of Surfactants. *Journal of Heat Transfer*, **141**, Article ID: 052002. <https://doi.org/10.1115/1.4042700>
- [10] Choi, H., Li, C. and Peterson, G.P. (2021) Dynamic Processes of Nanobubbles: Growth, Collapse, and Coalescence. *Journal of Heat Transfer*, **143**, Article ID: 102501. <https://doi.org/10.1115/1.4051323>