中国工程热物理学会传热传质分会第六届青年学术论坛

2023年4月14日-16日，东莞理工学院，东莞

并联微细通道流动沸腾汽液两相流型分布机制的研究进展

报告人：方奕栋 博士 副教授

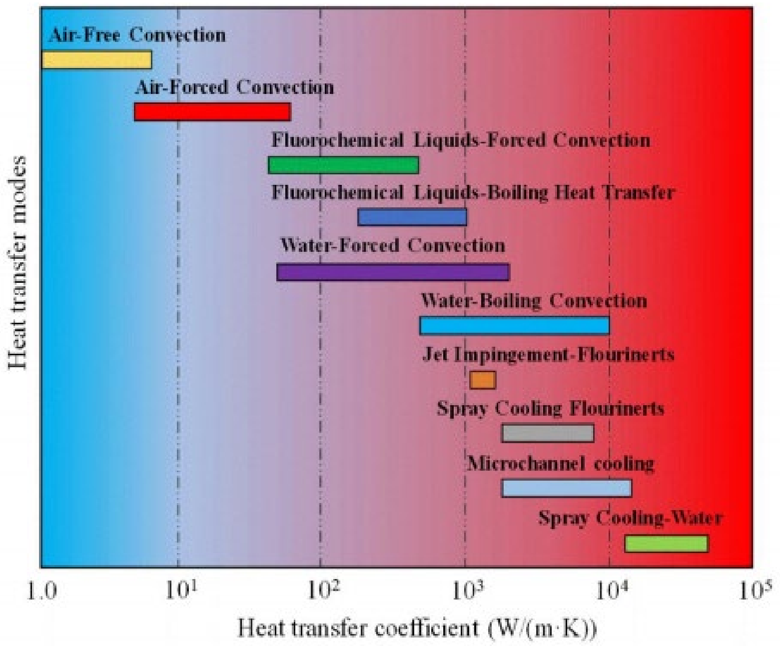
单 位：上海理工大学 能源与动力工程学院

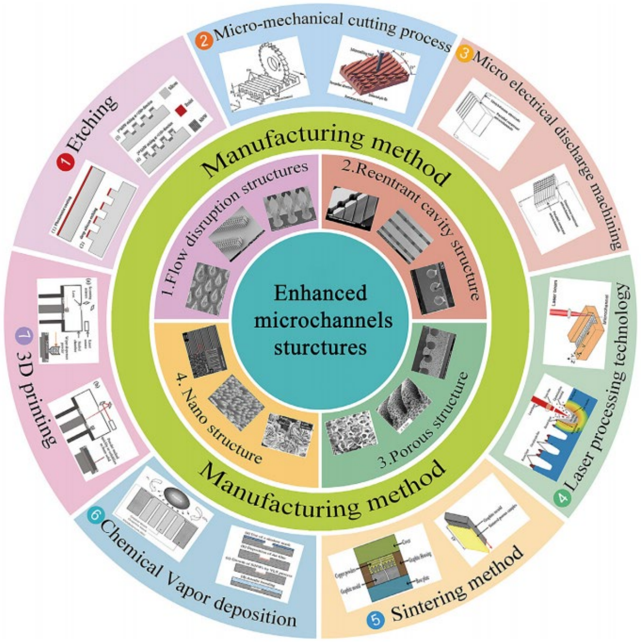
上海市多相流动与传热重点实验室

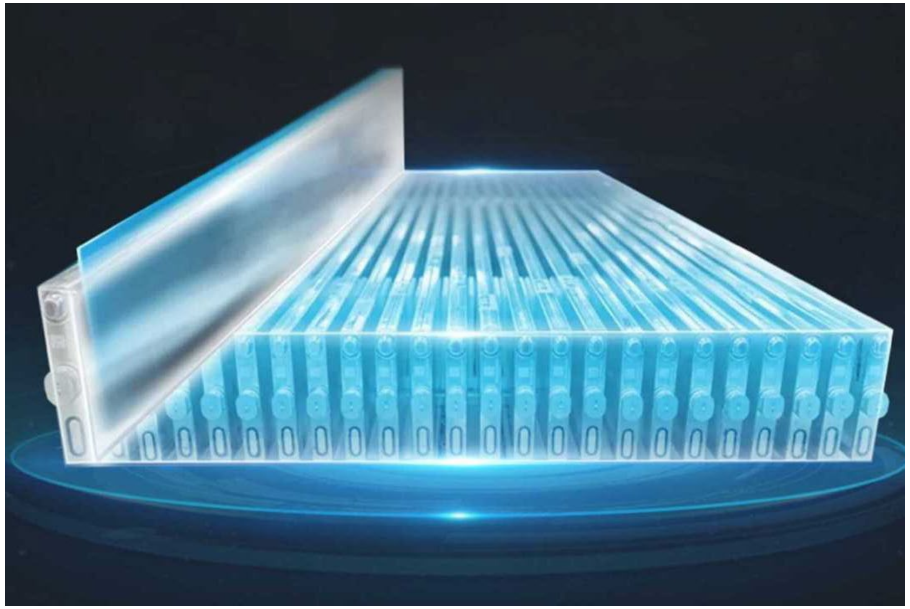
2023年4月15日

两相散热技术工程应用的新挑战

- □ 两相散热能力的主要指标：**临界热流密度**和**换热系数**





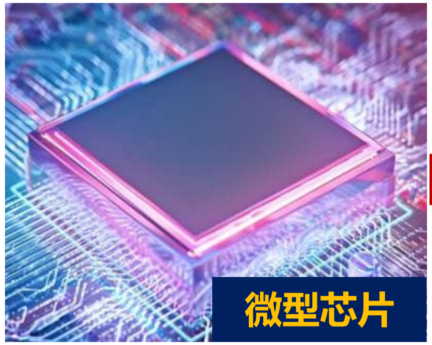


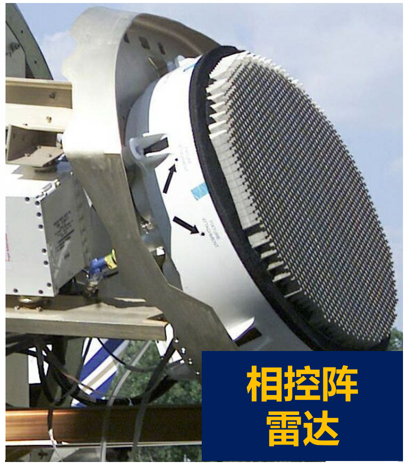
- □ 已有的强化换热方式基本围绕CHF和HTC的提升
- □ 实际应用过程中，针对大面积的散热对象，还需考虑**两相散热的均匀性**

两相散热技术工程应用的新挑战

工程需求

实际应用中的两相散热需兼顾**热流密度**和**大面积**上的**热均匀性**





研究难点

两相换热均匀性 → 流动沸腾过程的**两相流型均匀分布**

科学问题

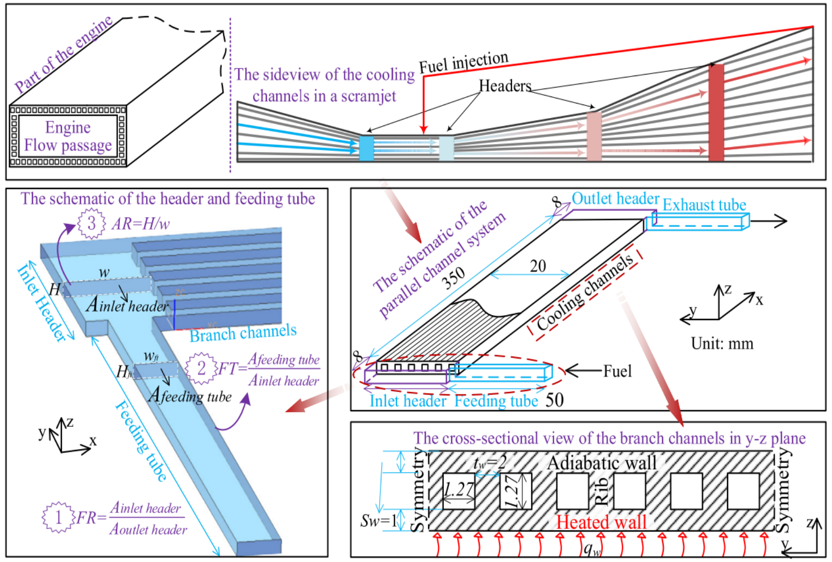
★ 换热结构内部汽液相流动**分布与发展的耦合机理**

★ 以**流型同步**为目标的汽液两相流动**调控机制**

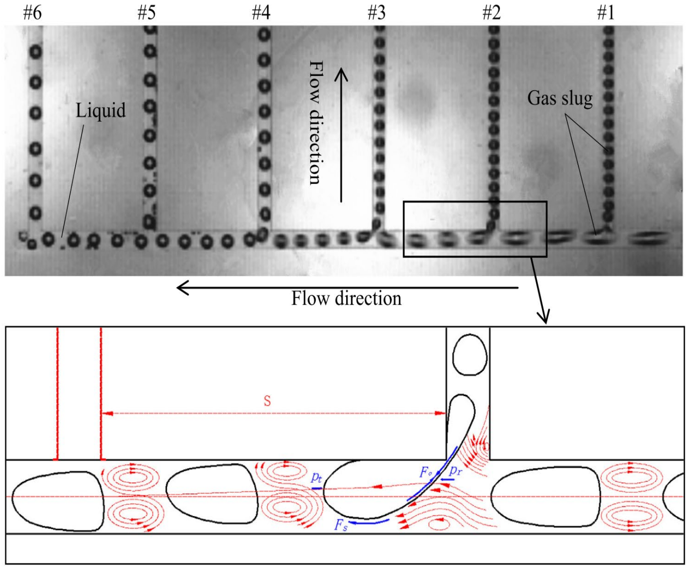
汽(气) 液两相流型分布规律

研究指向

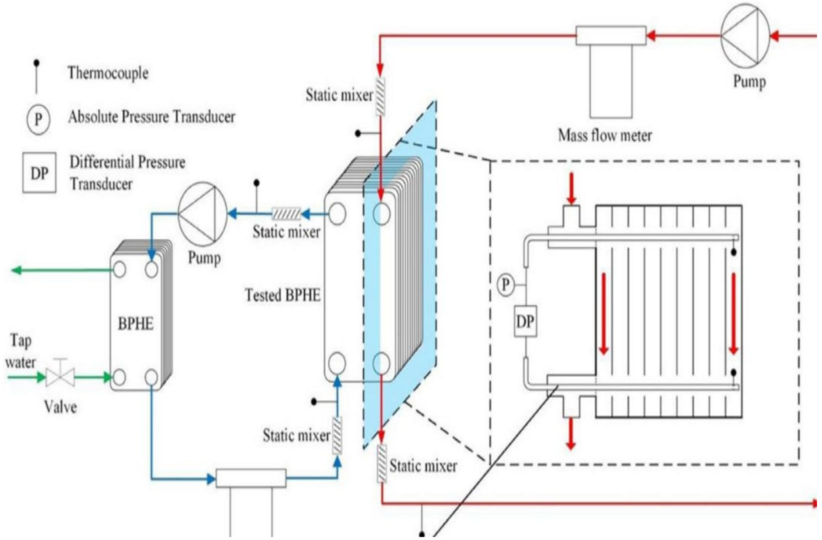
典型通道结构内的Flow Maldistribution及优化



秦江，AESCT，2018



汪双凤，IJHMT，2019

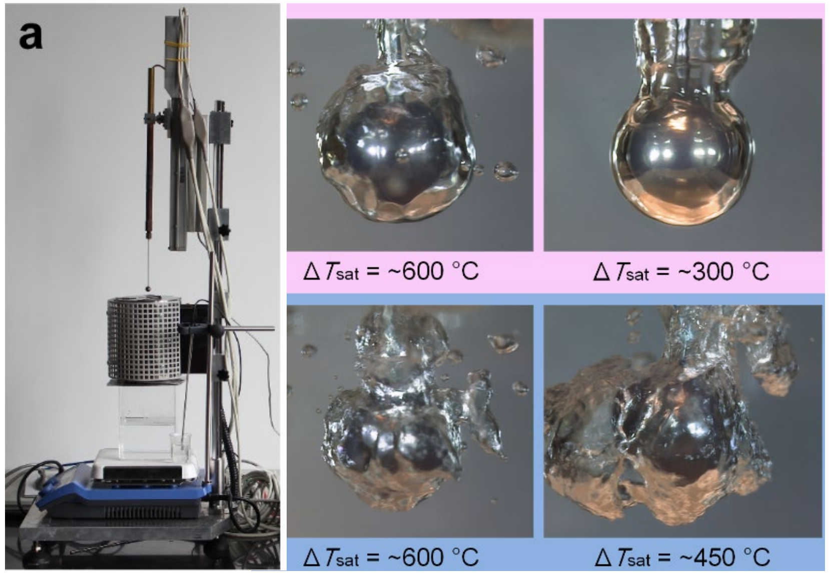


Pega Hrnjak，IJRF，2021

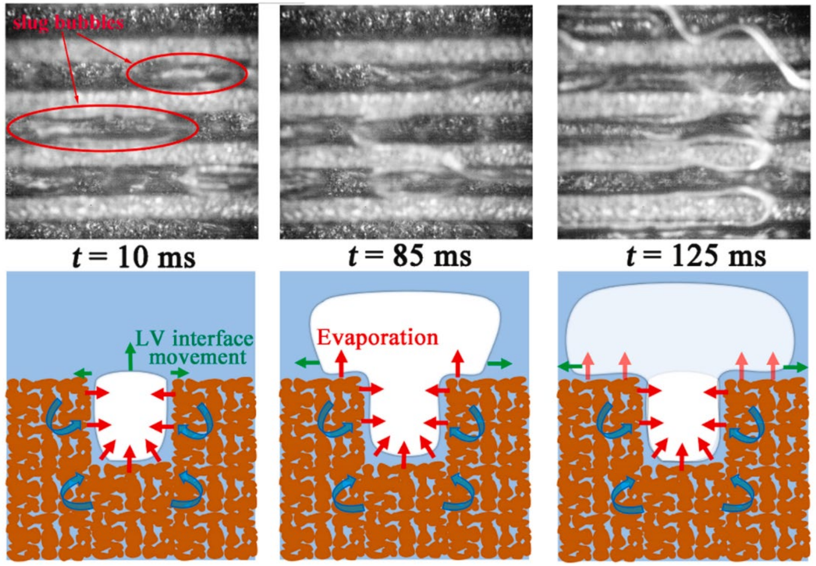
- 侧重点1：采用CFD、流动网格模型或绝热两相流动（气-液）等方法
- 侧重点2：通过结构优化（通道截面、间距等）实现理想流动分布

沸腾换热过程中的汽液两相行为调控

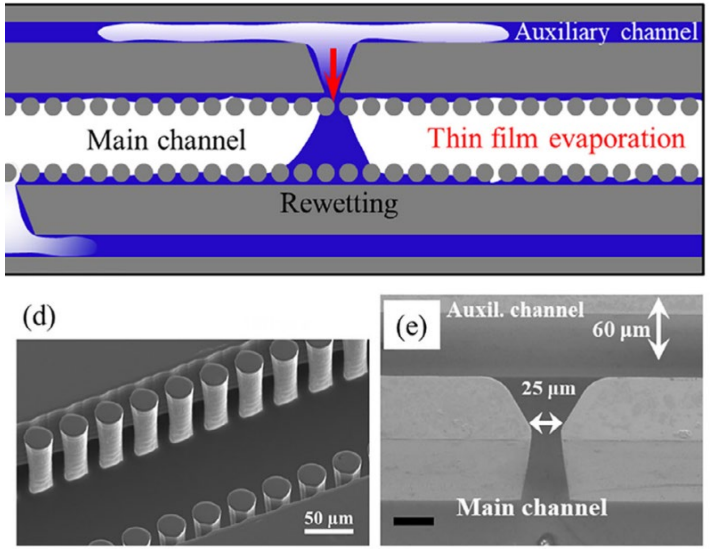
研究指向　小型电子器件、核岛等应用中的高热流密度换热强化



范利武，李佳琦，IJHMT，2017



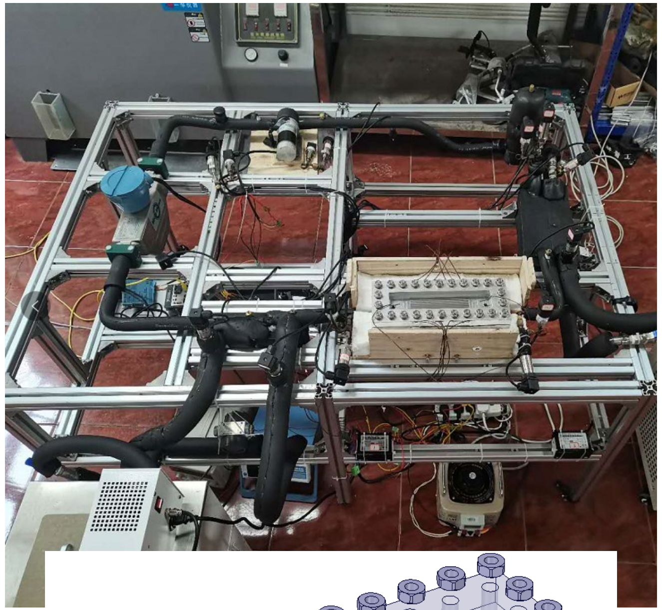
银了飞、贾力，党超，ATE，2023

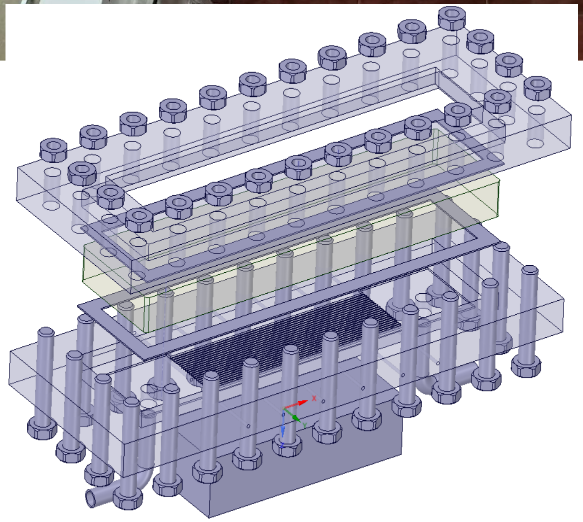


李文明，李琛，IJHMT，2021

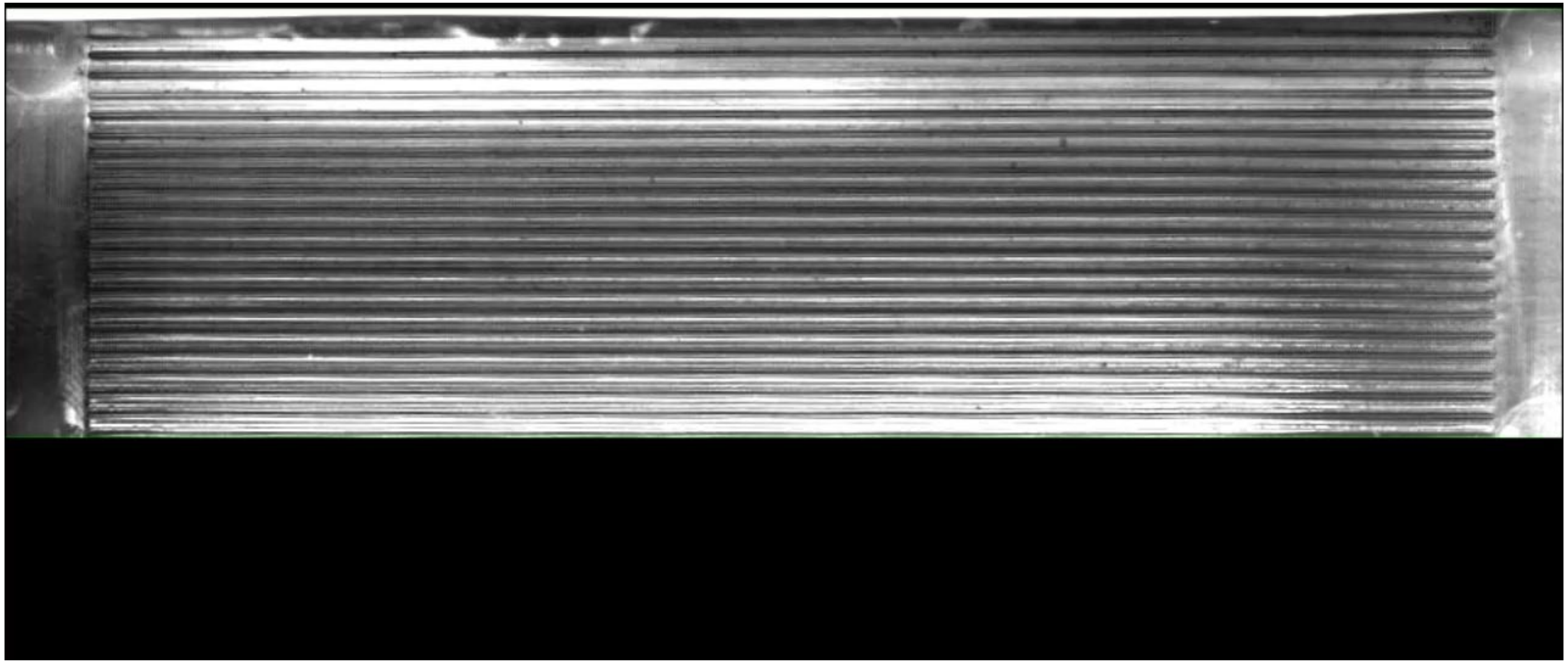
- 侧重点1：通过表面改性（微纳结构涂层）或结构优化干预沸腾行为
- 侧重点2：各类强化手段的HTC/CHF提升效果

制冷剂过冷沸腾的发展规律





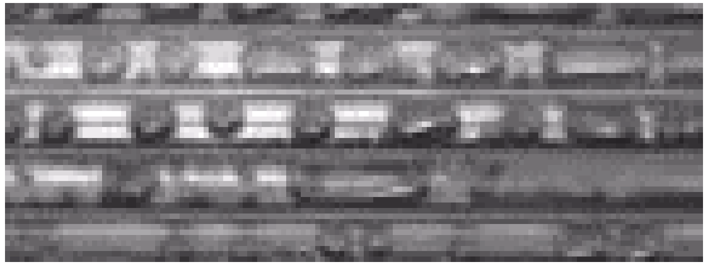
- 实验段：并联通道热沉（参考电池尺寸，1.5×1.5×140 mm）
- 工质：R1233zd(E)（沸点17.9℃ @ 1 atm）
- 热流密度：0.5-10 W/cm²



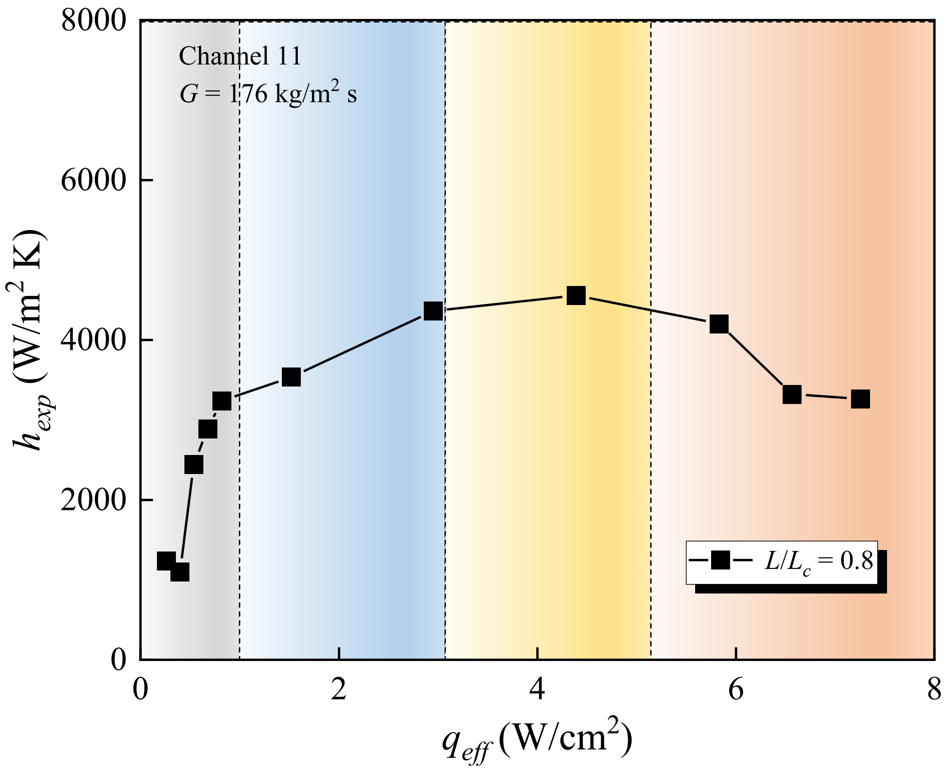
并联通道内两相流型及换热机制

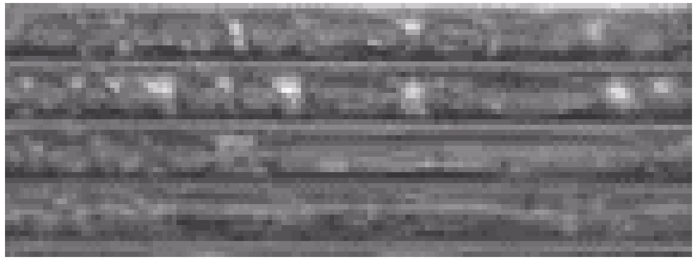
- 随热流密度升高，依次观察到**4种主要流型**

泡状流(Bubbly flow)

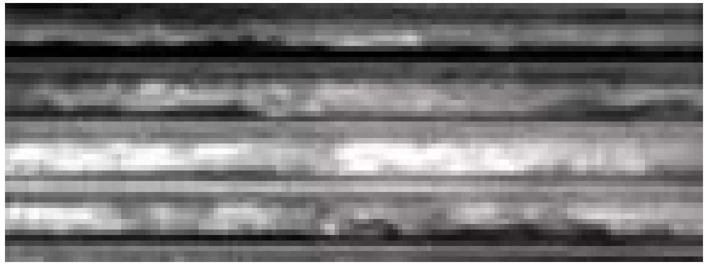


段塞流(Slug flow)





搅拌流(Churn Flow)

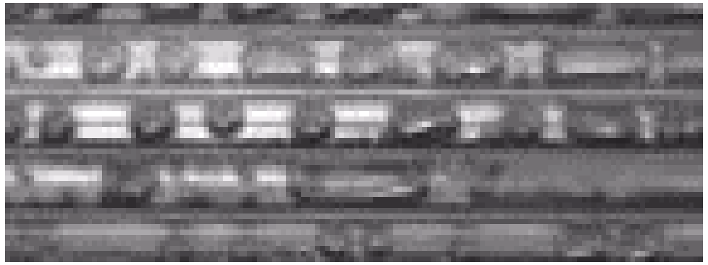


波状流(Wavy-annular)

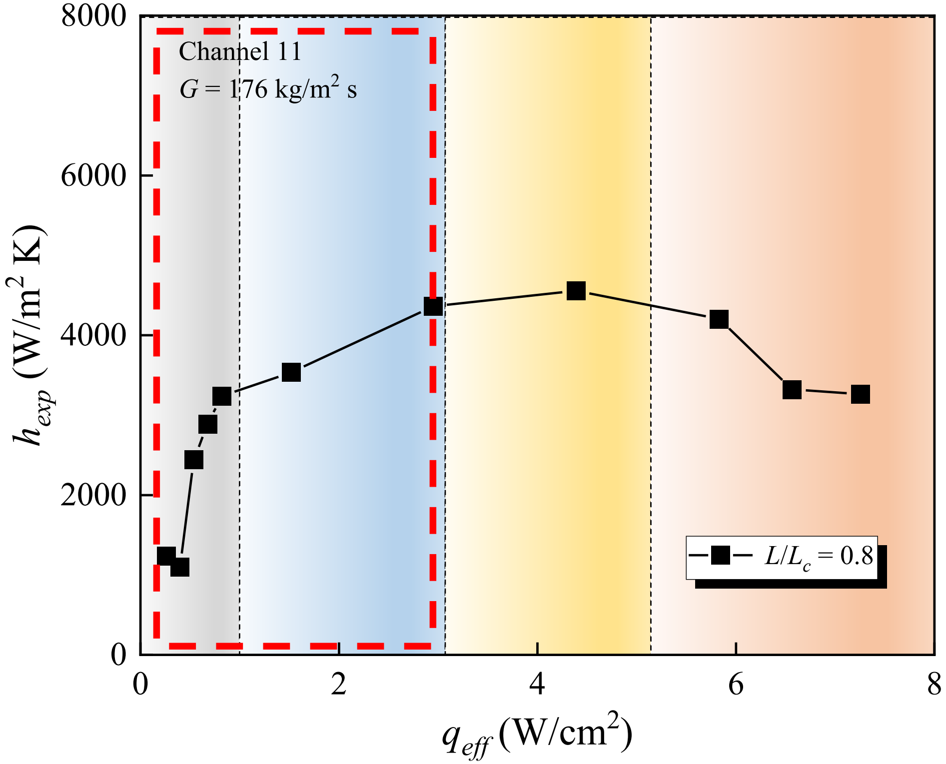
并联通道内两相流型及换热机制

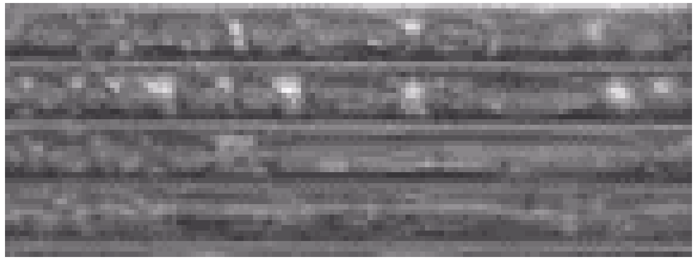
☐ 随热流密度升高，依次观察到**4种主要流型**

泡状流(Bubbly flow)

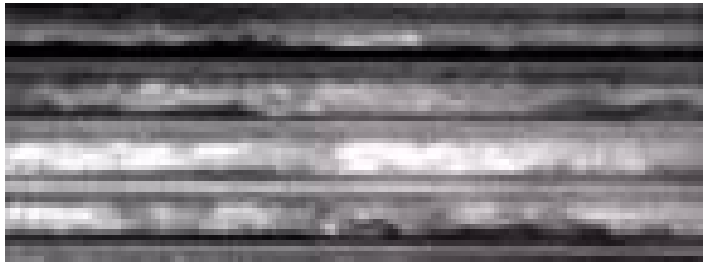


段塞流(Slug flow)





搅拌流(Churn Flow)



波状流(Wavy-annular)

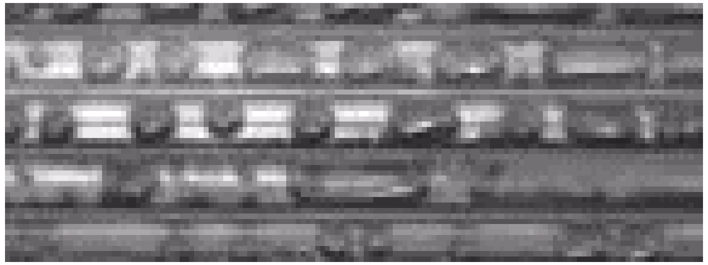
☐ 泡状-塞状流阶段，换热系数随热流密度先快速上升、后缓慢上升

Fang Yidong, Yang Wenliang, Xu Dan, et al. IJHMT, 2021, 121591.

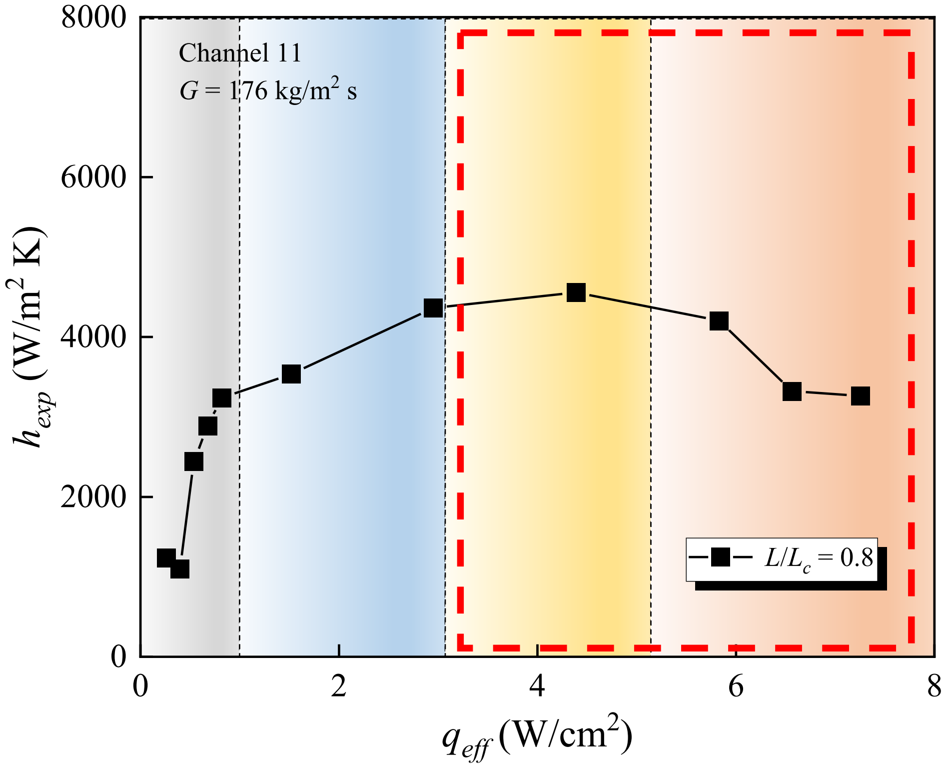
并联通道内两相流型及换热机制

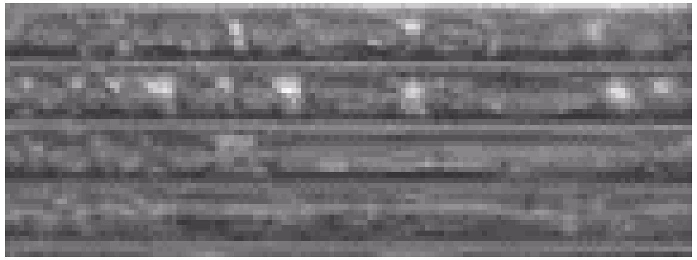
□ 随热流密度升高，依次观察到**4种主要流型**

泡状流(Bubbly flow)

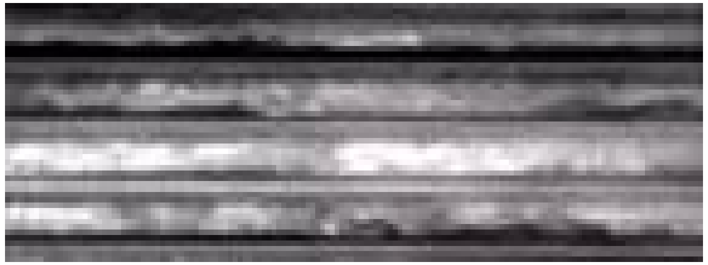


段塞流(Slug flow)





搅拌流(Churn Flow)



波状流(Wavy-annular)

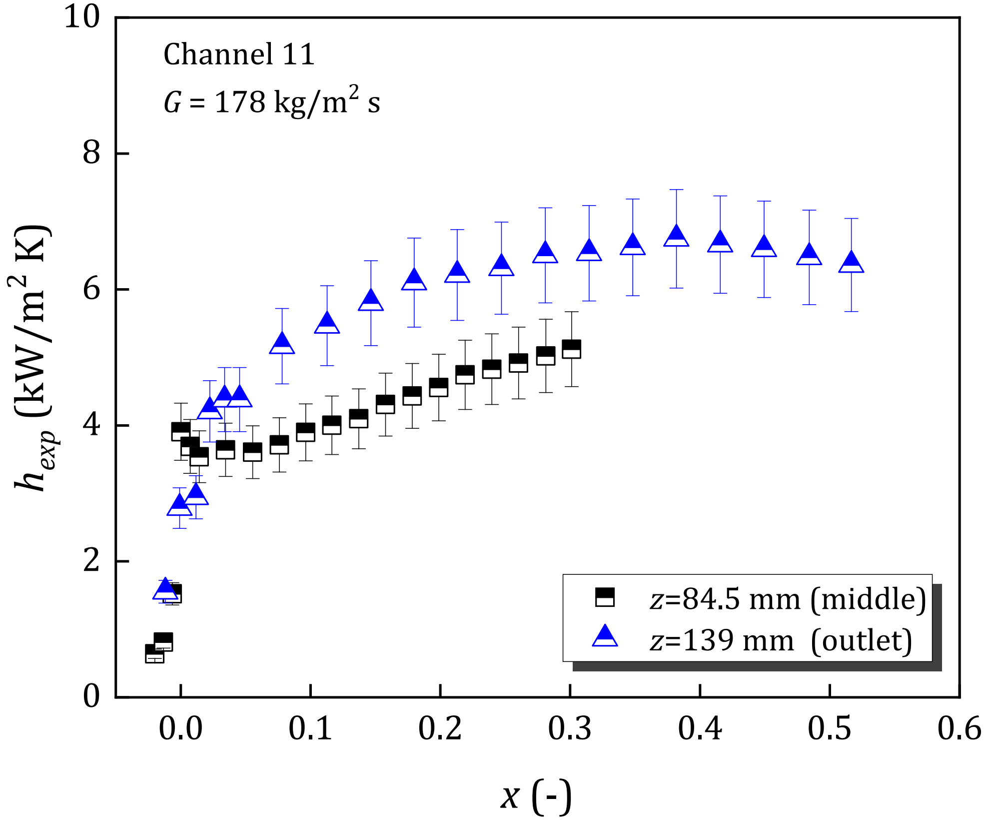
□ 搅拌流-波状流阶段，换热系数趋于平缓，且出现下降趋势

Fang Yidong, Yang Wenliang, Xu Dan, et al. IJHMT, 2021, 121591.

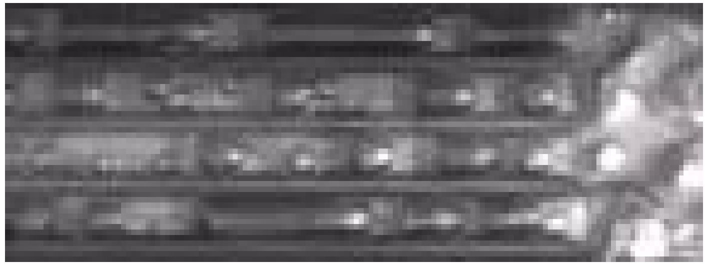
通道沿程的流型发展

中段-孤立汽泡

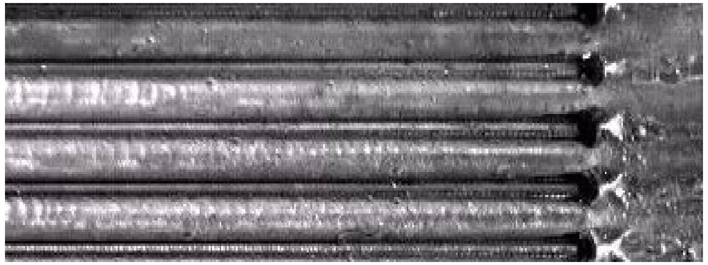
中段-波形环状流



出口-拉长汽塞

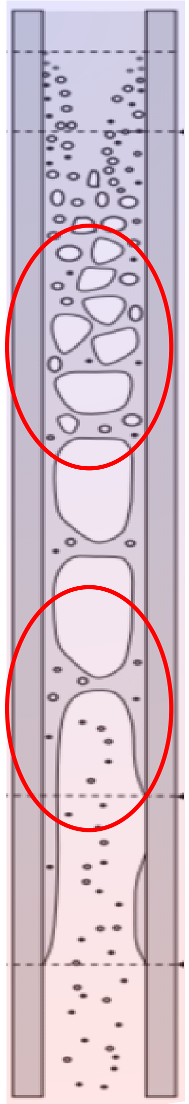


出口-局部干涸



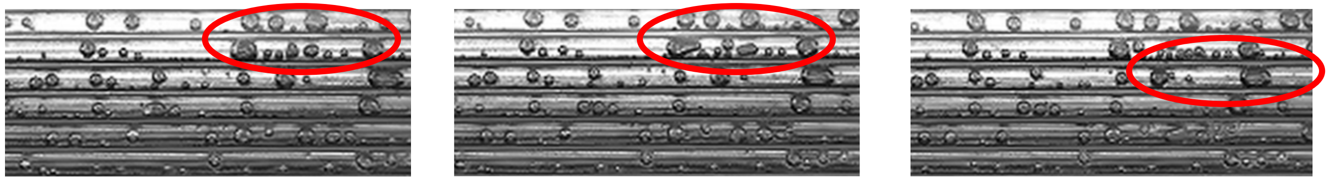
- **通道沿程的流型发展与工质热力学参数变化相对应**
- **存在热流密度、质量通量、干度等因素的共同作用**

不同通道的流型分布规律



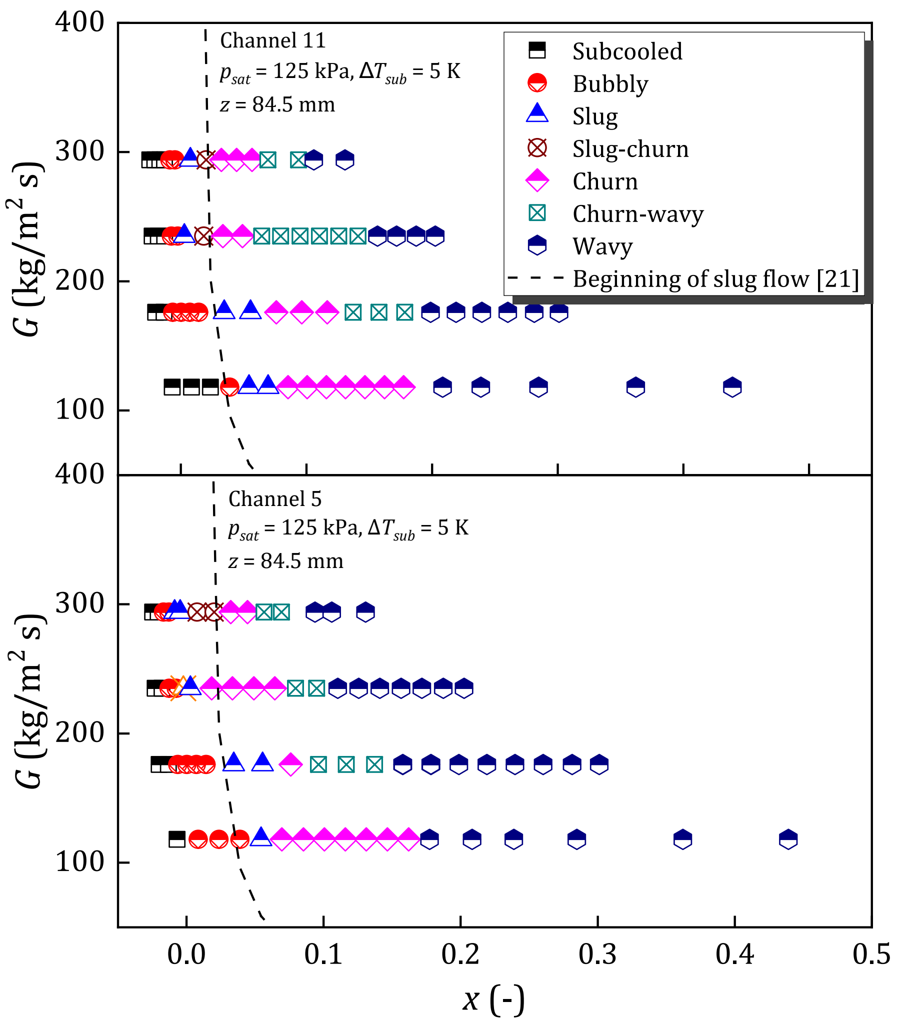
□ 相邻流型间的过渡特征

多个孤立汽泡聚并



单个汽泡受限拉长

相邻汽塞首尾合并

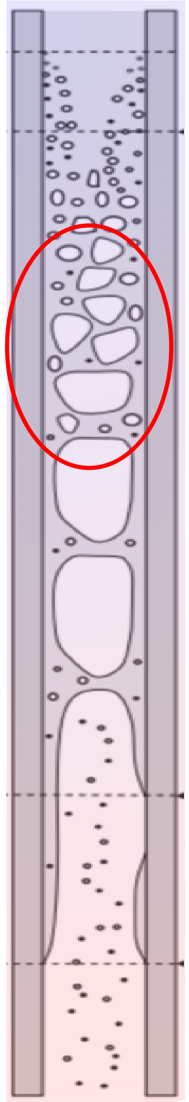


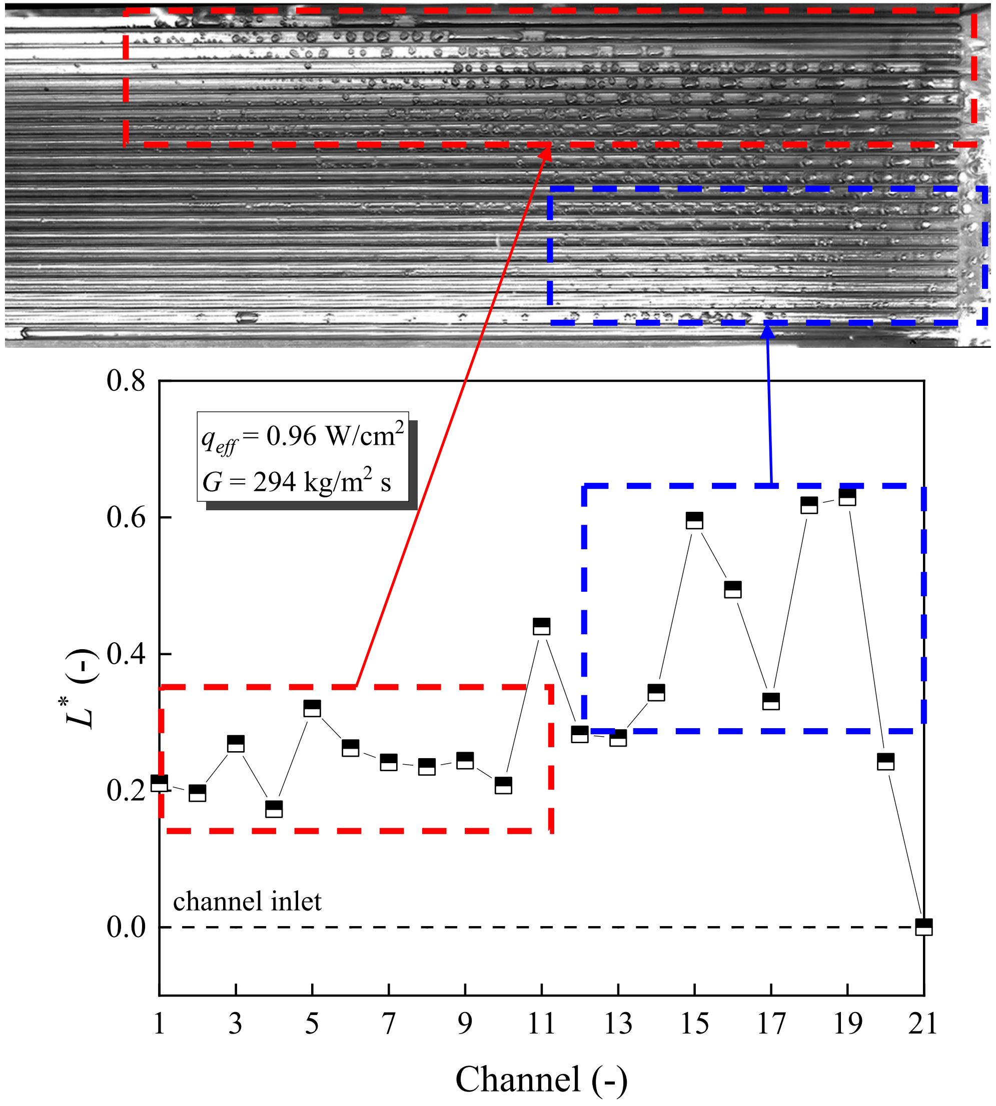
□ 各通道间的流型转换之间存在时间差

□ 同一工况下，各通道实际受不同换热机制主导

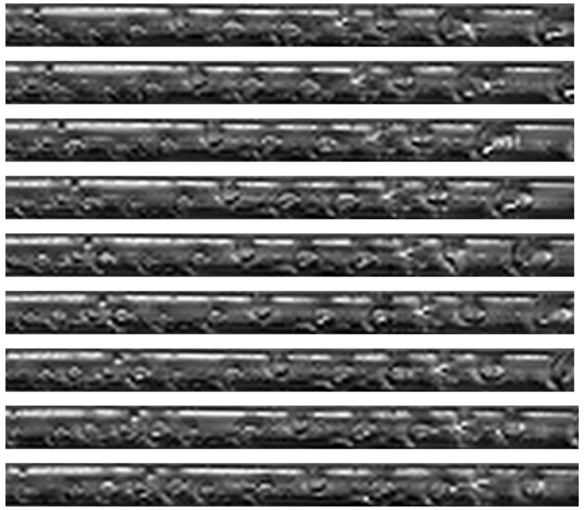
Fang Yidong, Zhang Zhao, Xu Dan, et al. Journal of Thermal Science, 2022 (Accepted Manuscript).

不同通道的汽泡运动特征





通道B, L =100 mm



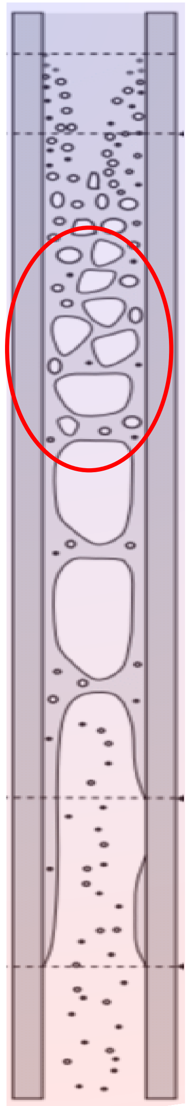
通道A, L =100 mm

- **各通道间的初始核化位置不一致**
- **相同流动距离下流型发展不同步**

L= 100 mm处

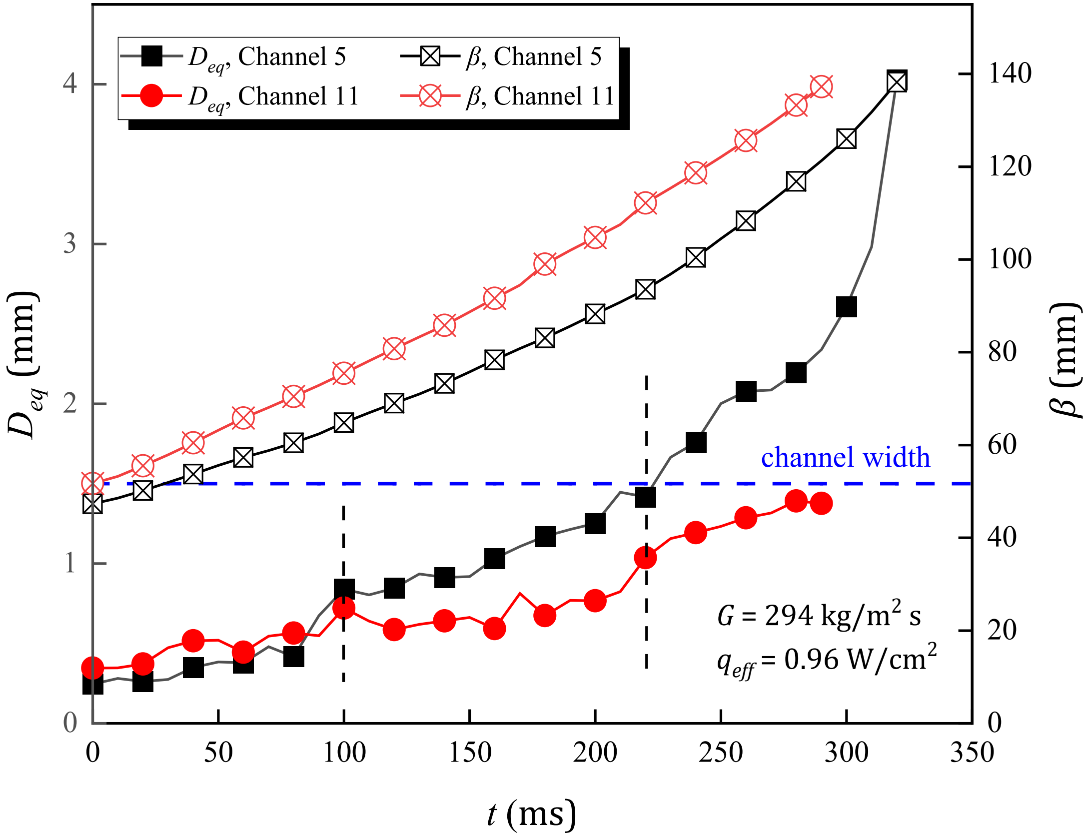
- **通道A（初始核化点靠后），孤立汽泡**
- **通道B（初始核化点靠前），拉长汽塞**

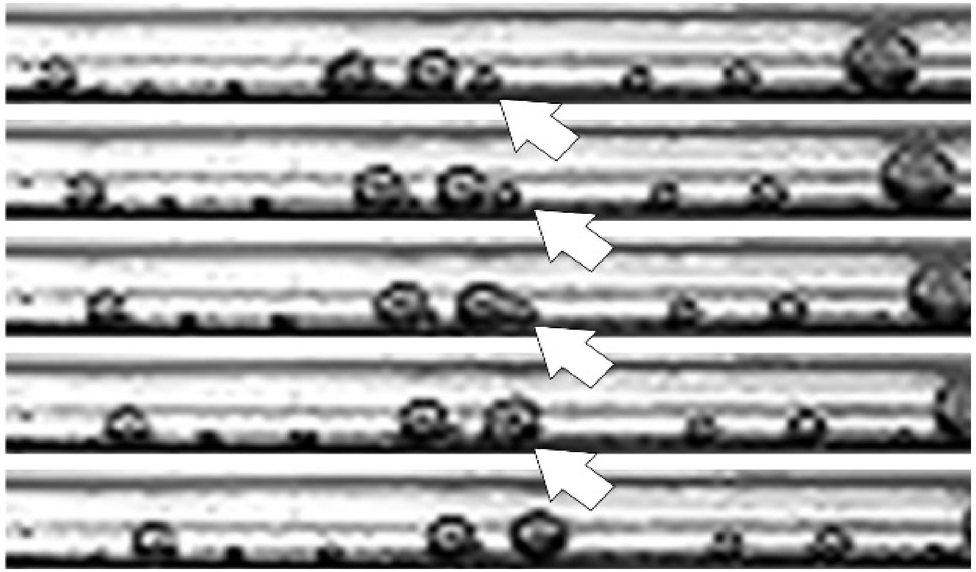
不同通道的汽泡运动特征



□ 汽泡当量直径

$$D_{eq} = \left(6 \cdot V / \pi\right)^{1/3} \qquad V = A_b \cdot H_b$$





□ 通道A，全程均为自由生长

□ 通道B

- 0-100 ms，自由生长
- 100-220 ms，“吞噬”核化汽泡
- >220 ms, 受限发展

Fang Yidong, Zhang Zhao, Xu Dan, et al. Journal of Thermal Science, 2022 (Accepted Manuscript).

汽液两相流型演变同步性的初步探索

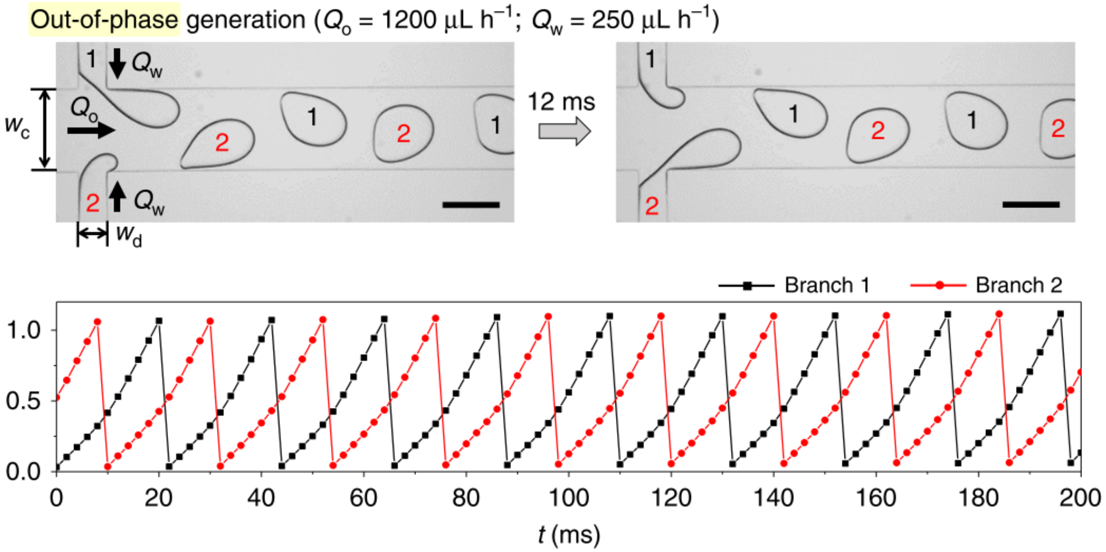
ARTICLE

https://doi.org/10.1038/s41467-020-18930-7 OPEN

Check for updates

Phase synchronization of fluid-fluid interfaces as hydrodynamically coupled oscillators

Eujin Um [1✉], Minjun Kim [1], Hyoungsoo Kim [2], Joo H. Kang [3], Howard A. Stone [4] & Joonwoo Jeong [1✉]

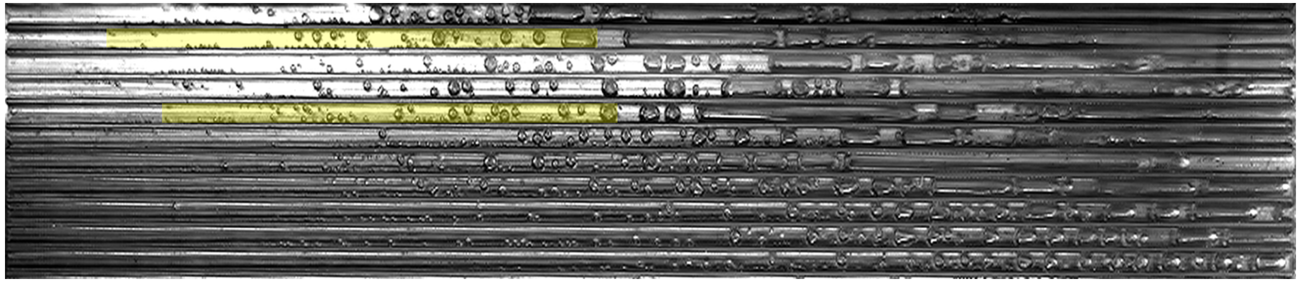


◻ 两相流动同步系数

$$\alpha = \frac{\max(\Delta f_{ij}, f_i - \Delta f_{ij})}{f_i}$$

◻ 泡-塞状流演变特征速度$R_{B\text{-}S}$

- 起始：汽泡的初始核化位置
- 终止：汽泡发生受限拉长的位置
- 时间：上述两个位置对应的帧数



	CASE 1	CASE 2	CASE 3
$R_{B\text{-}S,\ CH5}$	0.24	0.59	0.52
$R_{B\text{-}S,\ CH11}$	0.39	0.37	0.47

◻ 流型演变速率同步系数：0.6<α<0.8

研究过程中发现的新问题

■ 工质流量分配对两相换热分布规律的影响机制

- ✓ 沸腾过程中，换热特性分布的本质是不同流态在空间上的占比
- ✓ 同时包含多种流态，无法用单一换热模型加以描述

■ 回流/振荡等流动失稳的触发机制及其对瞬态换热的影响

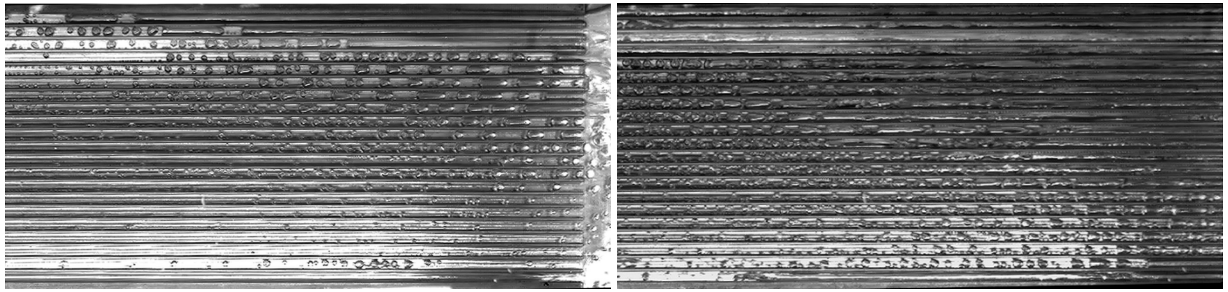
- ✓ 沸腾换热发展过程各阶段的流动失稳物理特征
- ✓ 不同流动失稳特征的机理解释及影响规律分析尚待深入

■ 针对大面积、高热流应用场景的汽液两相行为调控方法

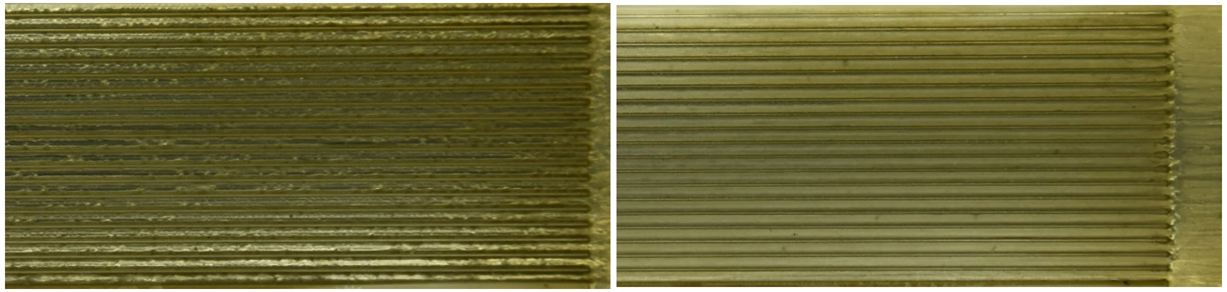
- ✓ 从结构设计、表面改性等角度入手，优化两相换热过程中汽液相行为的同步性
- ✓ 在应用层面，需确定合适的两相换热机制，同时尽可能延缓流型演变

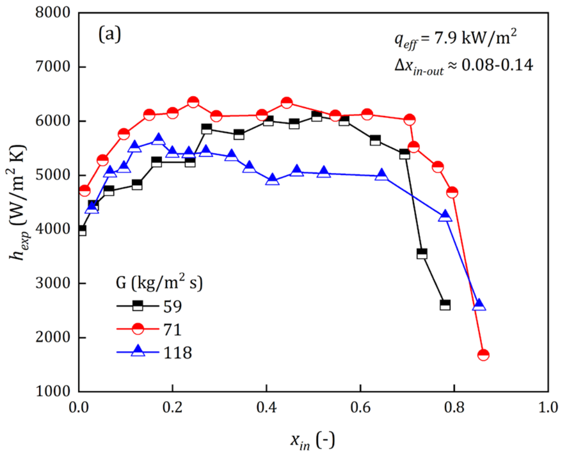
基于流型的换热特性解耦分析

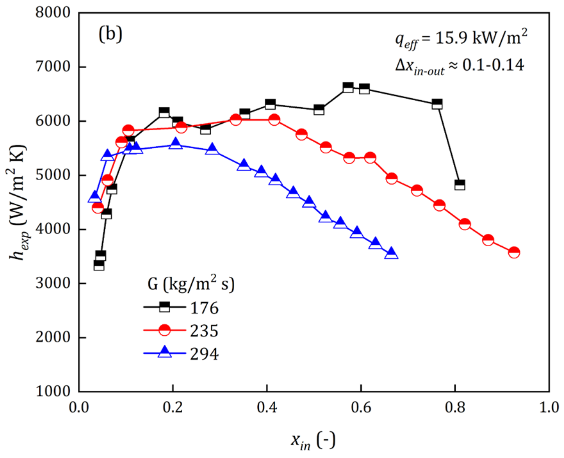
过冷沸腾

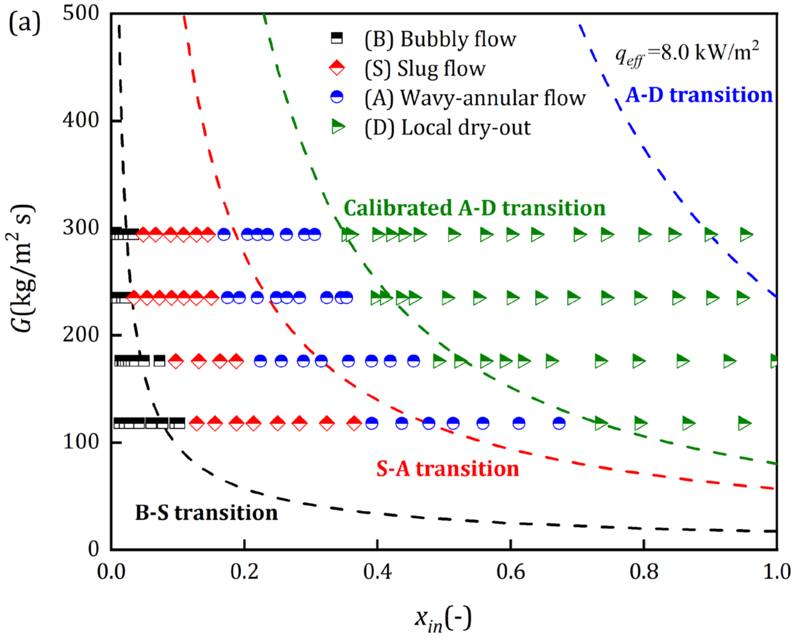


饱和沸腾





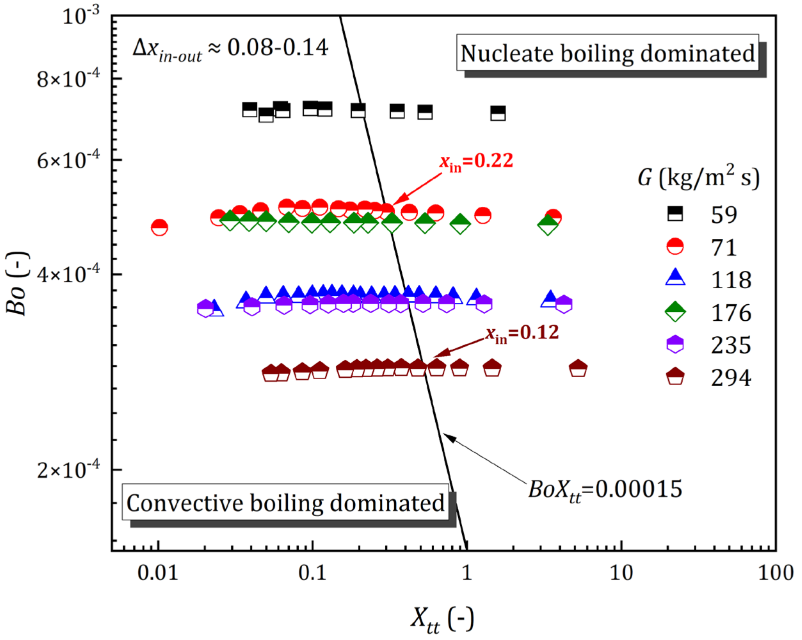


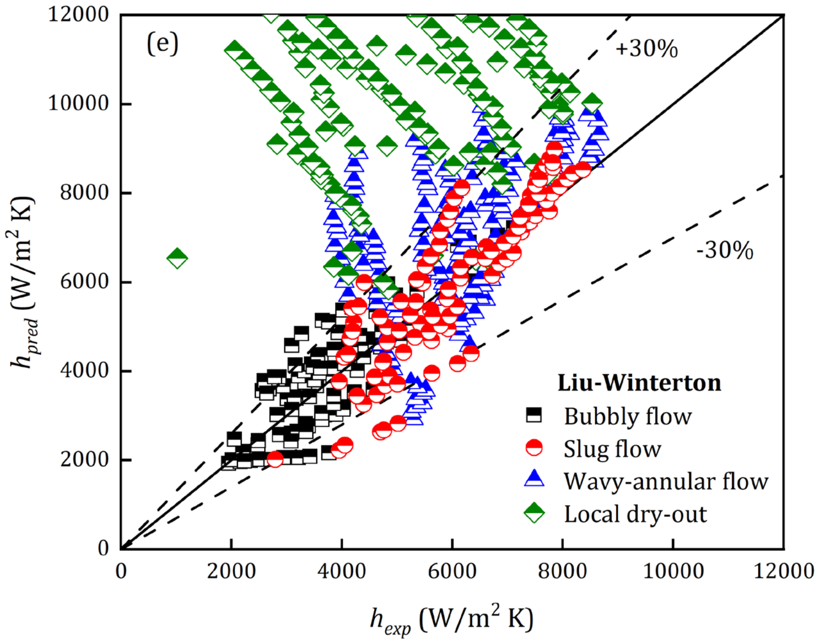


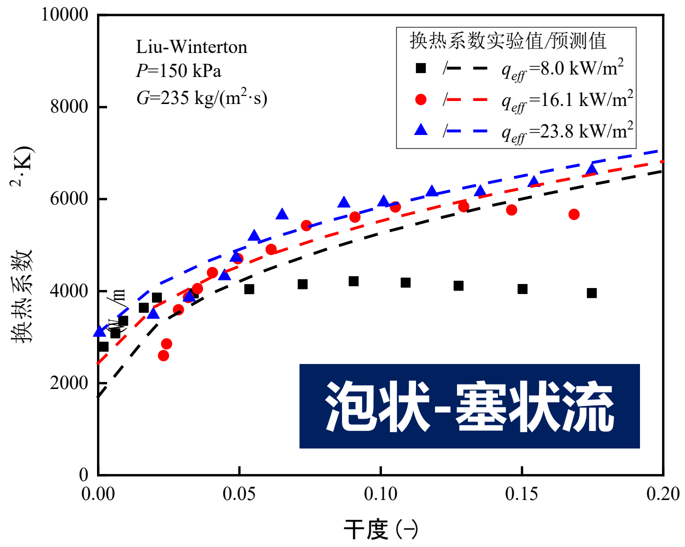
- 限制进出口干度差，将不同流型**依次解耦复现**
- 不同质量通量下，换热系数变化具有相似规律

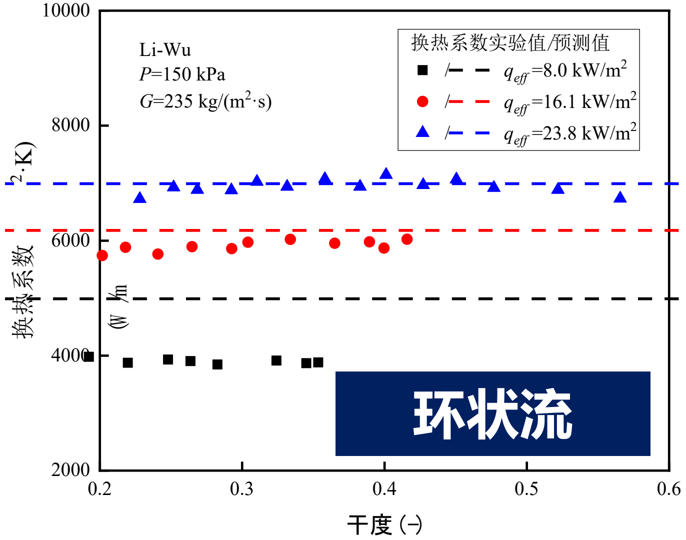
基于流型的换热特性解耦分析

- 对核态沸腾-对流沸腾主导区域的转变界限进行划分
- 针对泡状-塞状流、环状流，分别用Liu-Winterton、Li-Wu公式进行换热系数校验





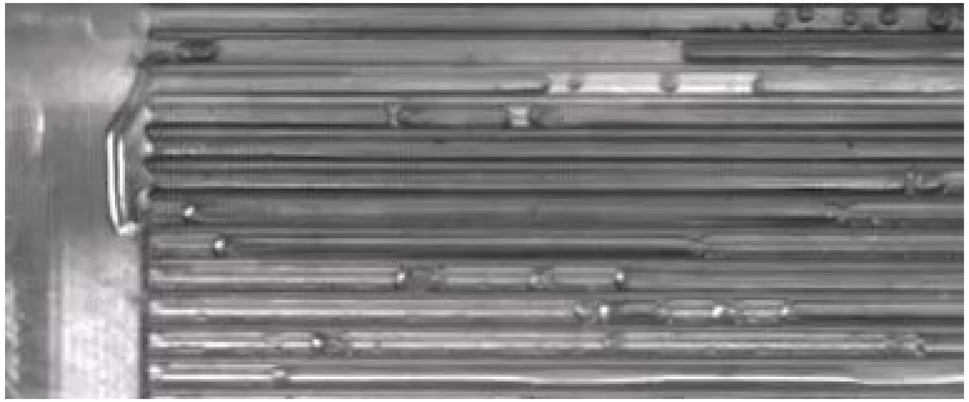




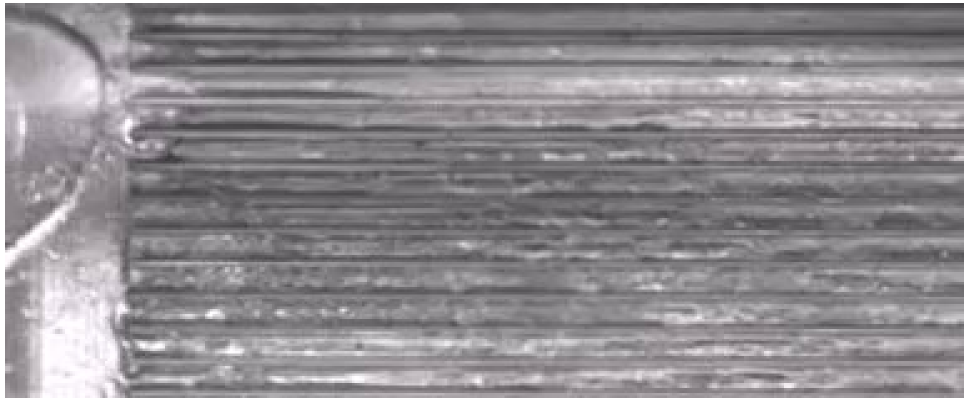
Fang Yidong, Lu Di, Yang Wenliang, et al. IJHMT, 2023 (Under review).

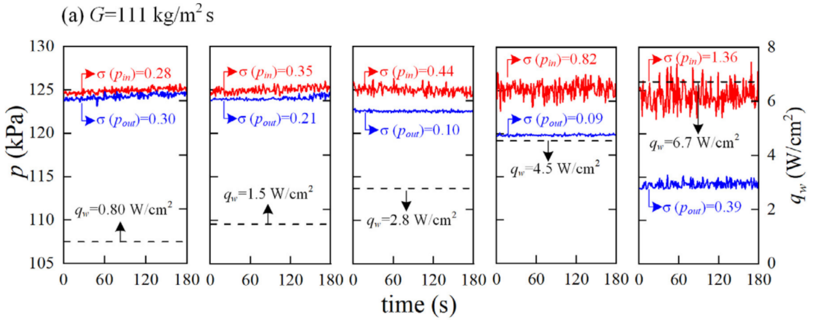
流动失稳特征及压力振荡

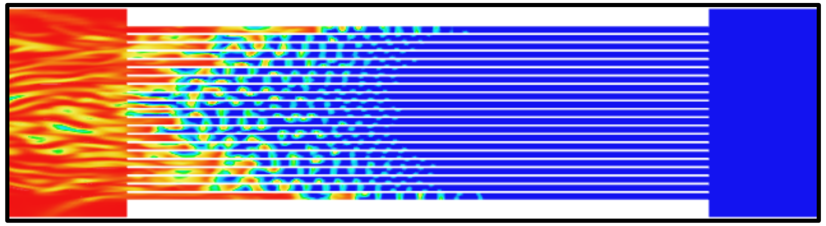
泡状-塞状回流

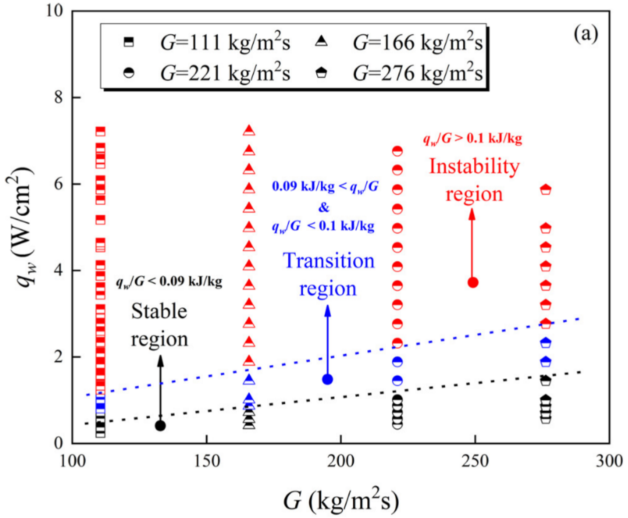


搅拌-波状流动周期切换









- 随热流密度升高，**回流模式**发生改变
- 进口压力振荡高于出口压力（并联通道失稳）
- 存在多种流动失稳机制的**叠加效应**

Xu Dan, Fang Yidong, Zhang Zhao, et al. IJHMT, 2022, 122585

现有研究总结

- 提取两相流动的局部物理特征，发现不同通道间的流型发展呈**时空不同步**
- 对泡状-塞状流阶段的汽泡自由生长—受限发展过程进行分析，发现不同通道在**汽泡初始核化位置、生长速率、运动速度**等方面存在明显差异
- 推断**并联通道流量分配**是造成这一现象的主要原因，目前缺乏通道内部流量定量测量的有效手段，考虑引入数值模拟手段获取具体信息
- 提出描述两相流型演变同步性的**无量纲数**，对不同通道的泡状-塞状流**演变特征速度的同步性**进行初步分析，后期拟进一步完善流型演变同步性的评价方法
- 基于饱和沸腾实验，实现**流型演变过程不同阶段的解耦复现**，划分不同换热机制的主导区域，根据流型发展应用不同关联式对相应流型进行校验
- 观察到**泡状流回流、搅拌流-波状流周期切换**等多种流动失稳模式

国内外同行近期重要进展 — 并联通道流量分配测量方法

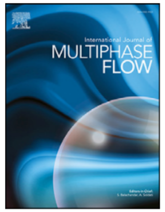
International Journal of Multiphase Flow 139 (2021) 103644

Contents lists available at ScienceDirect

International Journal of Multiphase Flow

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijmulflow

ELSEVIER



Measurement of flow maldistribution induced by the Ledinegg instability during boiling in thermally isolated parallel microchannels

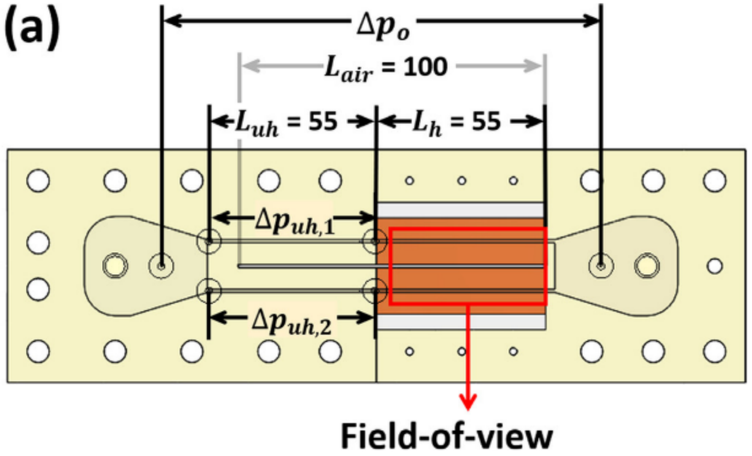
Check for updates

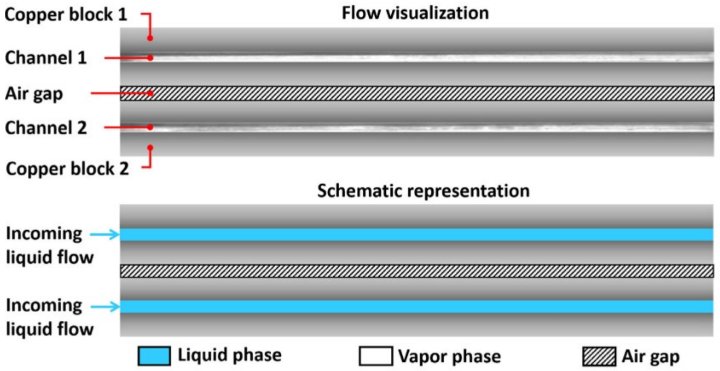
Ankur Miglani[2], Justin A. Weibel*, Suresh V. Garimella[1]

Cooling Technologies Research Center, School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN 47907 USA

S.V. Garimella，J.A. Weibel

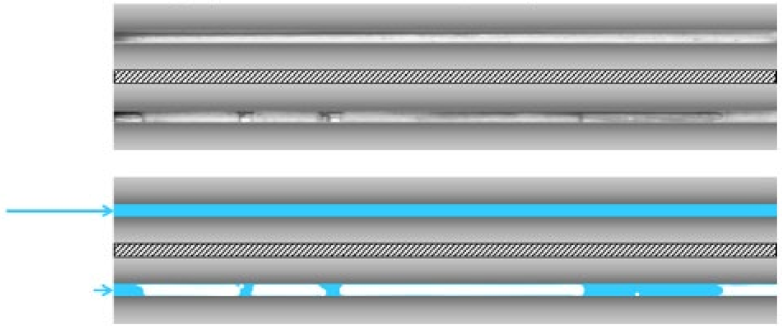
普渡大学





P_T = 18.41 W: Severe flow maldistribution

Single-phase flow in channel 1; two-phase flow in channel 2



国内外同行的近期重要进展 — 两相流型调控

International Journal of Heat and Mass Transfer 133 (2019) 1219–1229

ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

International Journal of Heat and Mass Transfer

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijhmt

Realizing highly coordinated, rapid and sustainable nucleate boiling in microchannels on HFE-7100

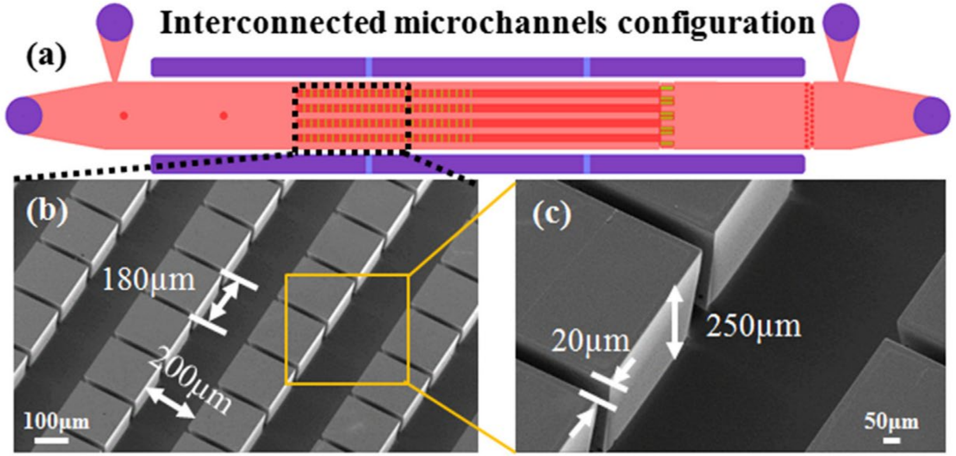
Check for updates

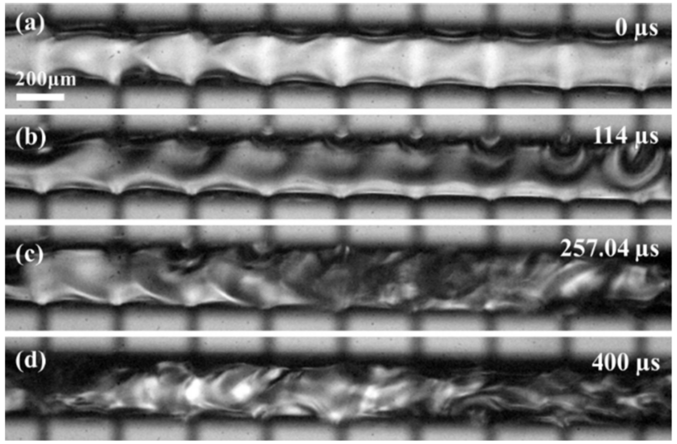
Jiaxuan Ma, Wenming Li, Congcong Ren, Jamil A. Khan, Chen Li *

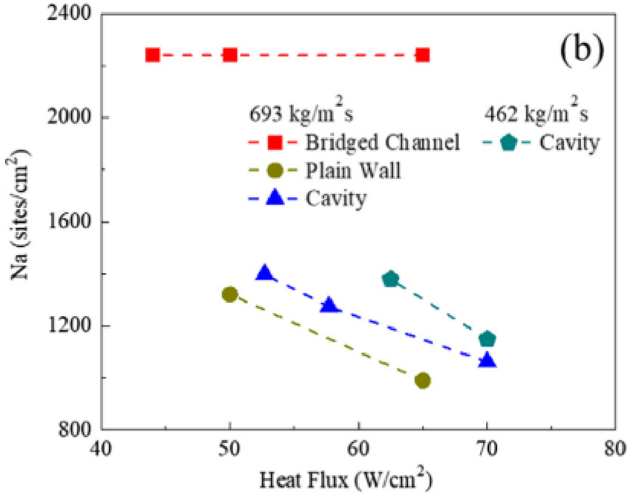
Department of Mechanical Engineering, University of South Carolina, Columbia, SC 29208, United States

李琛，李文明

南卡罗莱纳大学







国内外同行的近期重要进展 — 异态相干沸腾行为

Applied Thermal Engineering 191 (2021) 116893

Contents lists available at ScienceDirect

Applied Thermal Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apthermeng

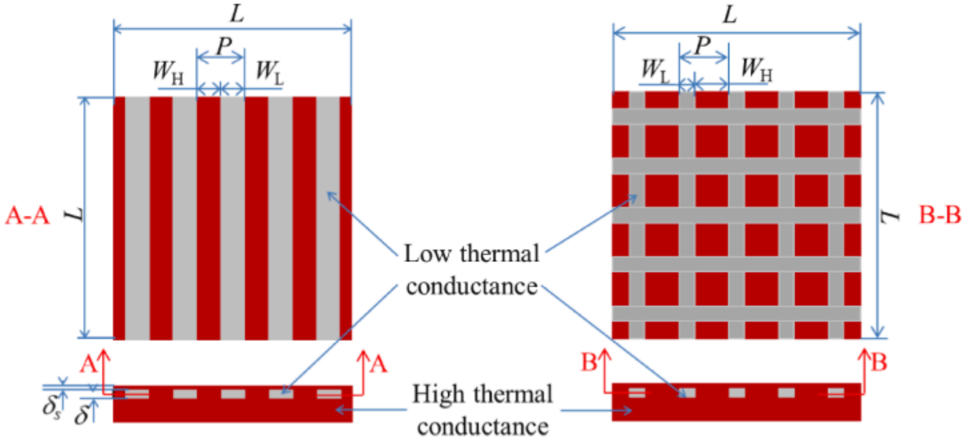
Effect of material arrangement pattern on different-mode-interacting boiling in narrow gaps with two liquid supply systems

Tianxi Xie [a,b], Yoshio Utaka [a,b,c,*], Zhihao Chen [a,b,*], Toshiki Hirotani [c], Shoji Mori [d]

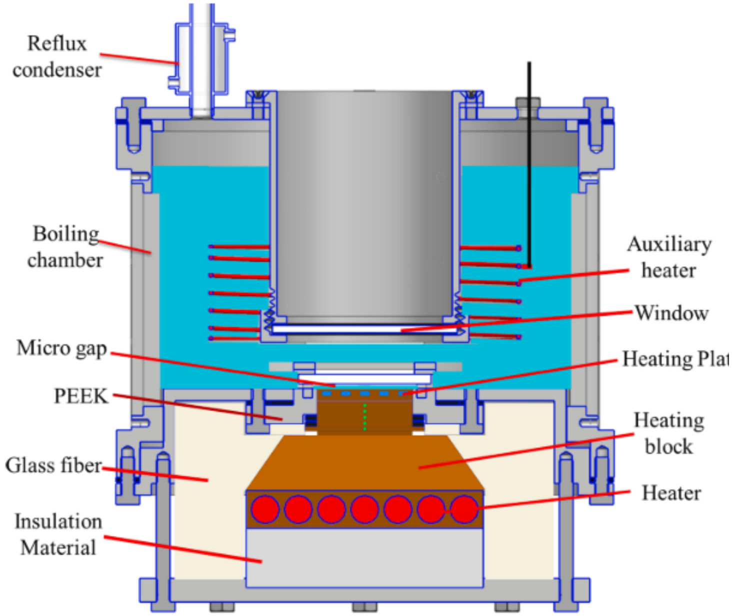
[a] School of Mechanical Engineering, Tianjin University, No. 135 Yaguan Road, Tianjin Haihe Education Park, Tianjin 300350, China
[b] Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy (Tianjin University), Ministry of Education, China
[c] Faculty of Engineering, Tamagawa University, 6-1-1 Tamagawagakuen, Machida, Tokyo 194-8610, Japan
[d] Department of Mechanical Engineering, Kyushu University, 744 Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819-0395, Japan

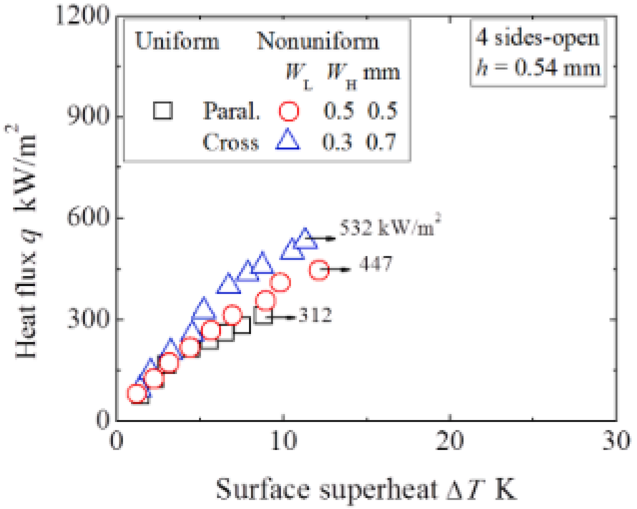
陈志豪，宇高义郎，森昌司

天津大学，九州大学



(a) Parallel arrangement (b) Cross arrangement





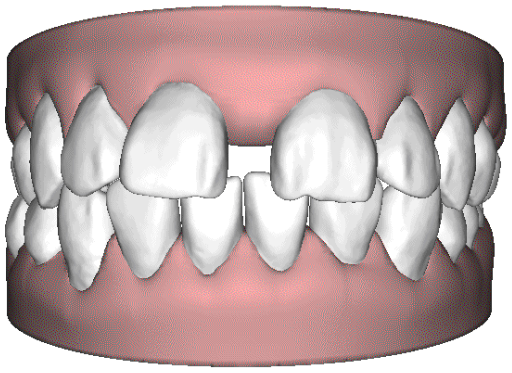
未来研究展望

□ 微观机理

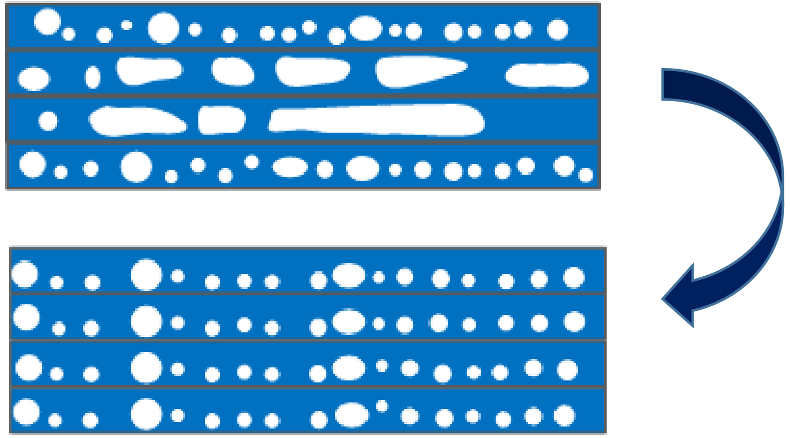
- ✓ 换热结构内部汽液两相流型分布的定量表征
- ✓ 局部调控手段作用下的汽液相输运及再分配
- ✓ 两相流型多区域复合分级调控的协同作用机制

□ 工程应用

- ✓ 面向实际应用，形成可规模化、标准化的换热结构设计及换热表面制备工艺
- ✓ 针对实际对象（芯片阵列、电池模组等），在代表性工况下开展换热性能测试
- ✓ 两相工质流动分配和温度均匀性的主动调控



口腔正畸：局部-全局修复



并联通道：流型同步性的局部-全局调控

致谢

浙江大学 能源工程学院

俞小莉 教授，范利武 研究员，黄钰期 教授



Honeywell

霍尼韦尔 刘泰、白三卯、林恩新 博士

□ 采用低压制冷剂R1233zd(E)的动力电池两相冷却回路换热性能研究

银轮股份
YINLUN CO.,LTD

浙江银轮 王晶鑫、许霖杰 博士

□ 直冷式板式换热器板片两相流动可视化研究

致谢

毕业研究生

2020届硕士：沈嘉丽（协助指导）、叶飞（协助指导）

2021届博士：朱悦（协助指导）

2022届硕士：杨文量、胡凌韧

2022届博士：徐丹

在读研究生

2020级硕士：王雨晨、张昭

2021级硕士：劳伟超、陈庆虎

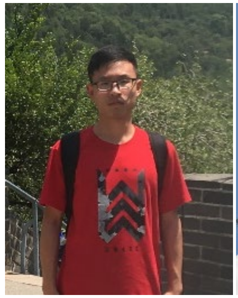
2022级硕士：卢娣、蔡华宇









感谢您的关注，敬请批评指正！

报告人： 方奕栋 博士 副教授
邮 箱： yidongfang@usst.edu.cn
主 页： https://ndxy.usst.edu.cn/2021/1227/c13028a263627/page.htm