

中国工程热物理学会传热传质分会第九届青年学术论坛

2026年4月10日-12日 @ 南京航空航天大学 & 南京理工大学



非等宽并联微细通道内的流动沸腾换热特性 及多目标结构优化研究

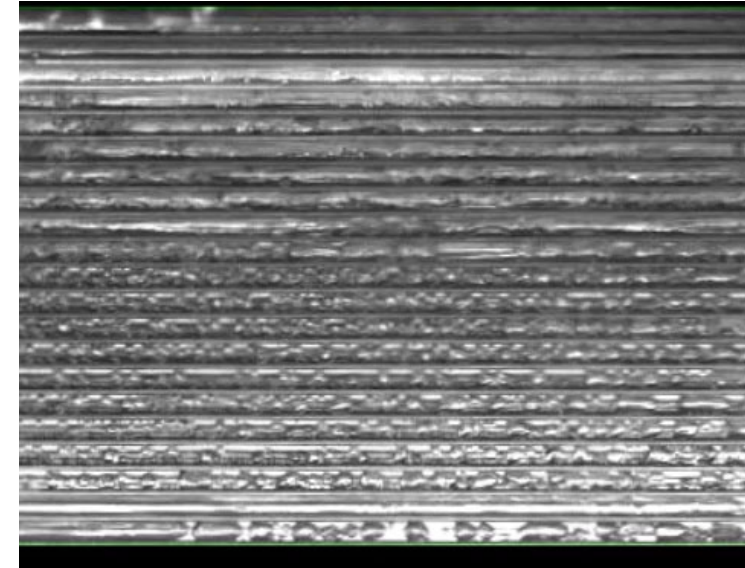
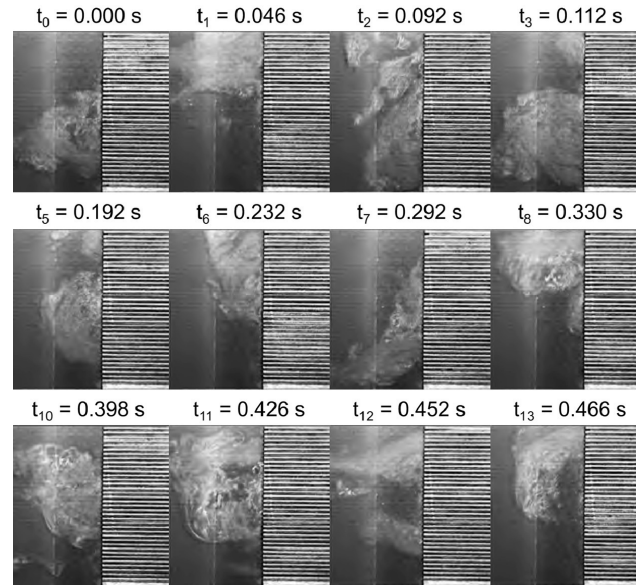
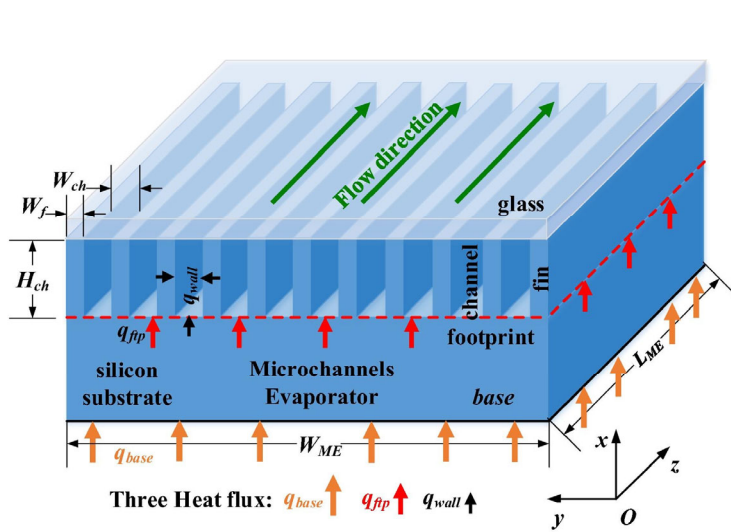
报告人：方奕栋 博士 副教授

**单 位：上海理工大学 能源与动力工程学院
颗粒多相流智能计算与测量研究中心**

2026 年 4 月 11 日

并联通道两相换热的关键挑战

□ 并联微细通道已成为两相换热应用的**典型结构**



□ 结构高效紧凑、且制造友好，在高热流密度换热中具有重要应用潜力

□ 两相流动条件下，易出现**流动失稳**现象，引发局部**干涸**及**温度振荡**

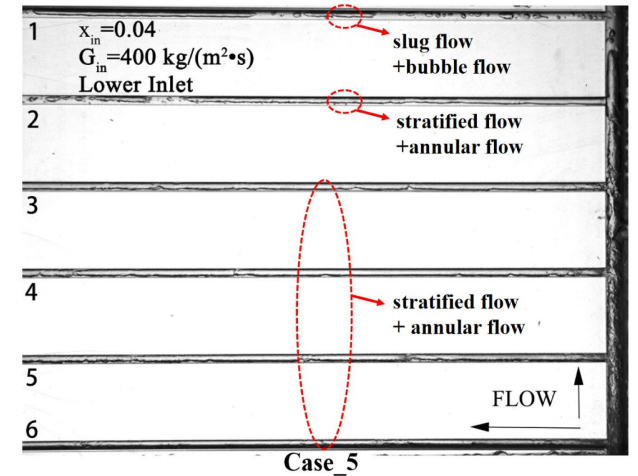
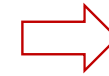
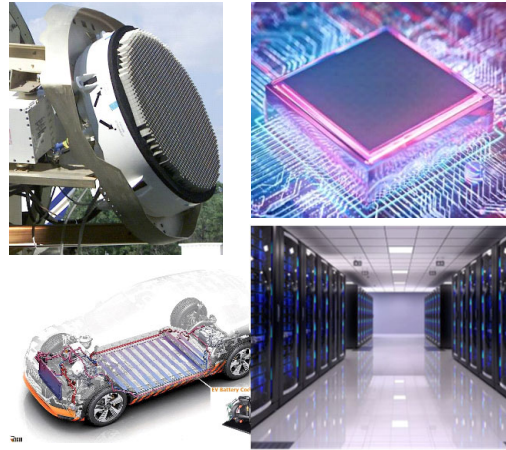
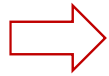
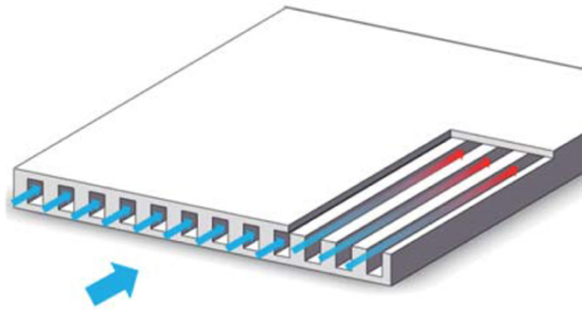
Y. Fang, H. Yang, Y. Huang, L. Fan. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 2025, 115362.

并联通道两相换热的关键挑战

工程需求

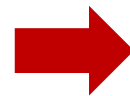
并联微细通道成为两相换热**实际应用的主要结构**

并联通道流动沸腾



研究重点

流动失稳抑制及调控



流动沸腾过程中的**汽液相合理分配**

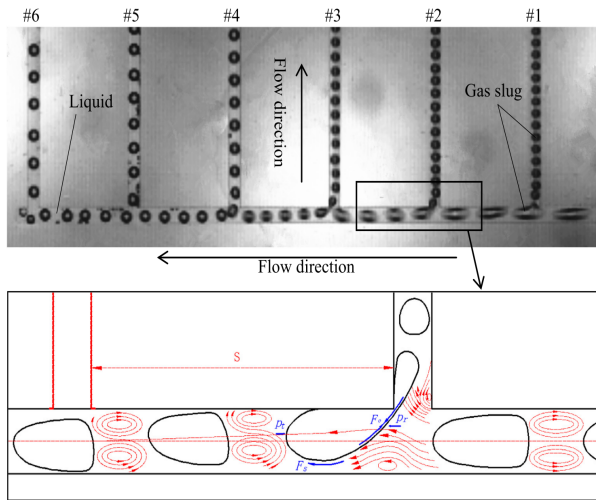
关键问题

- ★ 通道**结构**对并联通道流动沸腾及汽液相分配的**影响规律**
- ★ 面向多工况条件的通道结构多目标**优化建模及设计方法**

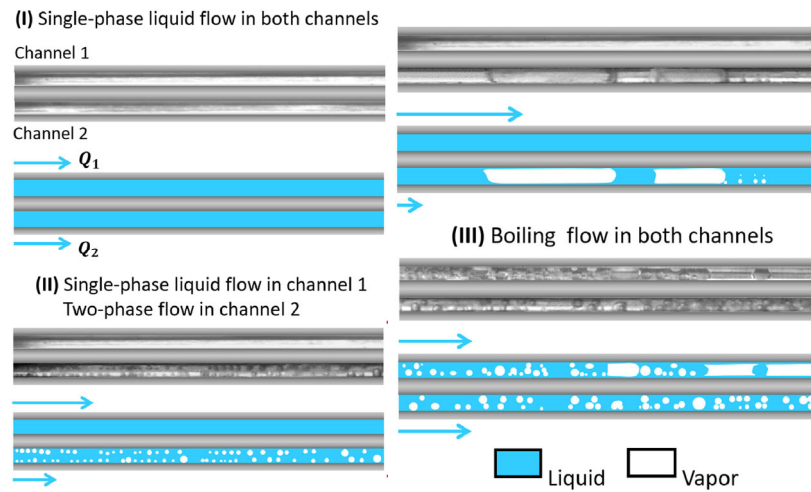
并联通道内的两相流型分布规律

研究指向

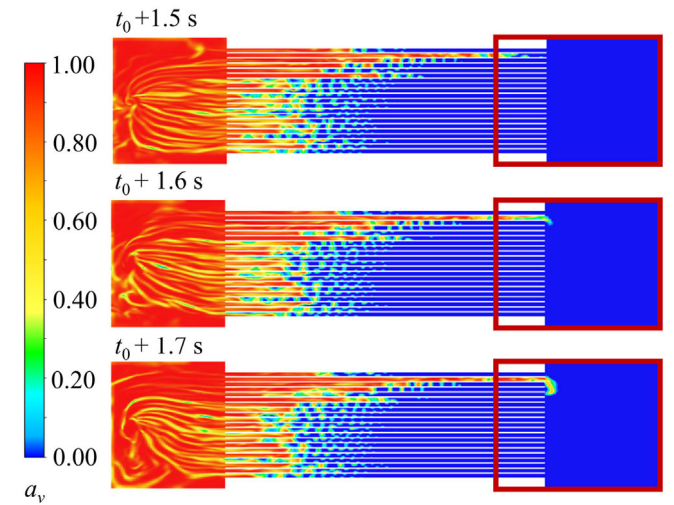
两相流动分配不均的形成机制与演化规律



汪双凤, IJHMT, 2019



J A Weibel, IJMF, 2021



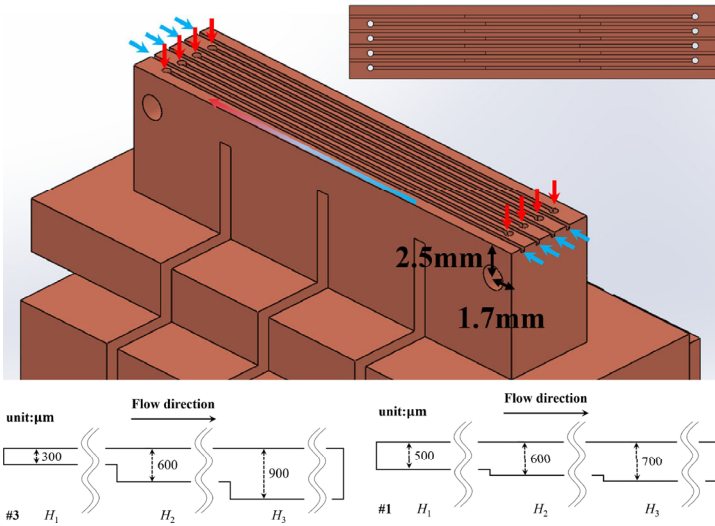
黄钰期, IJHMT, 2024

- 侧重点1: 采用两相流数值模拟, 绝热/非绝热两相流动等方法
- 侧重点2: 探究不同通道内的两相流型演变差异性及其主导机制

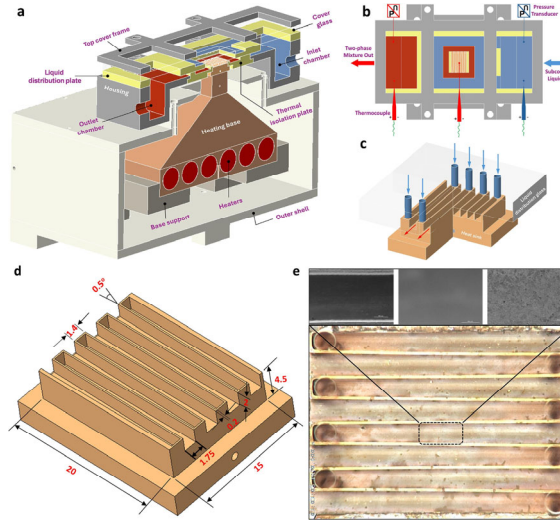
基于非均匀通道尺寸的两相流动调控

研究指向

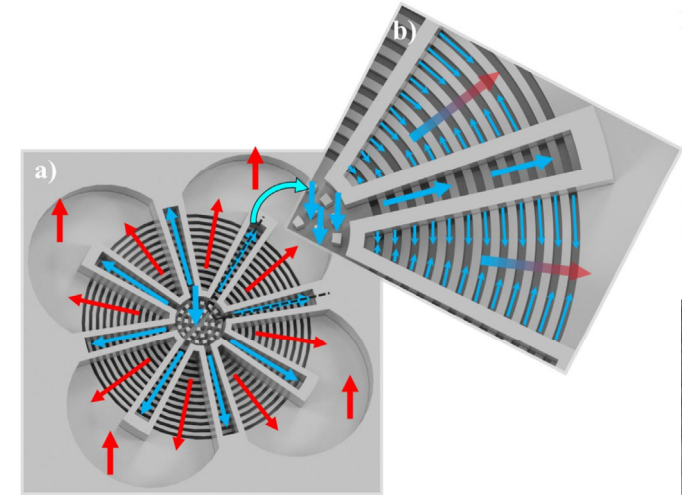
几何非均匀性驱动的两相流动调控与结构设计



李昀, 吴慧英, IJHMT, 2022



蒋星池, ATE, 2025

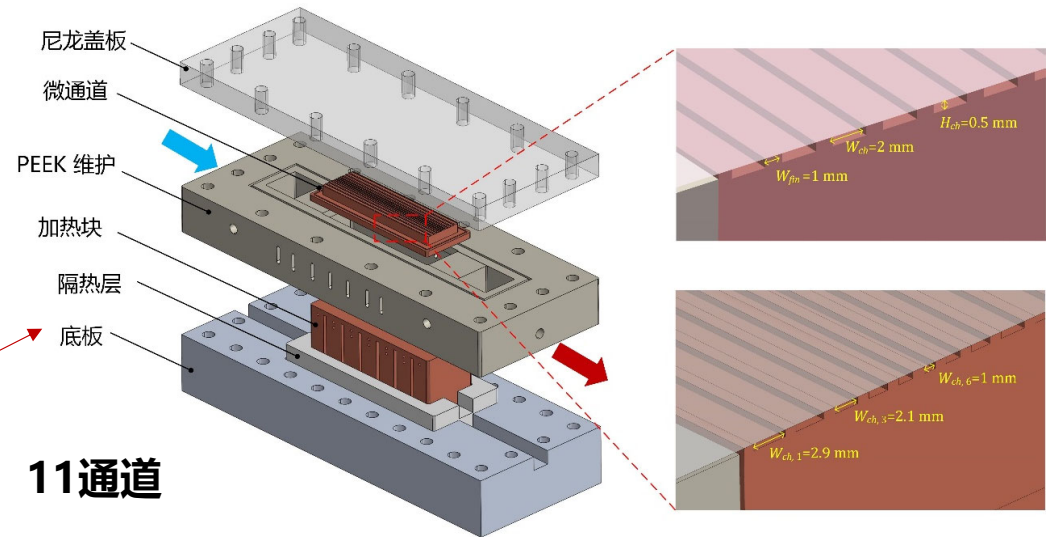
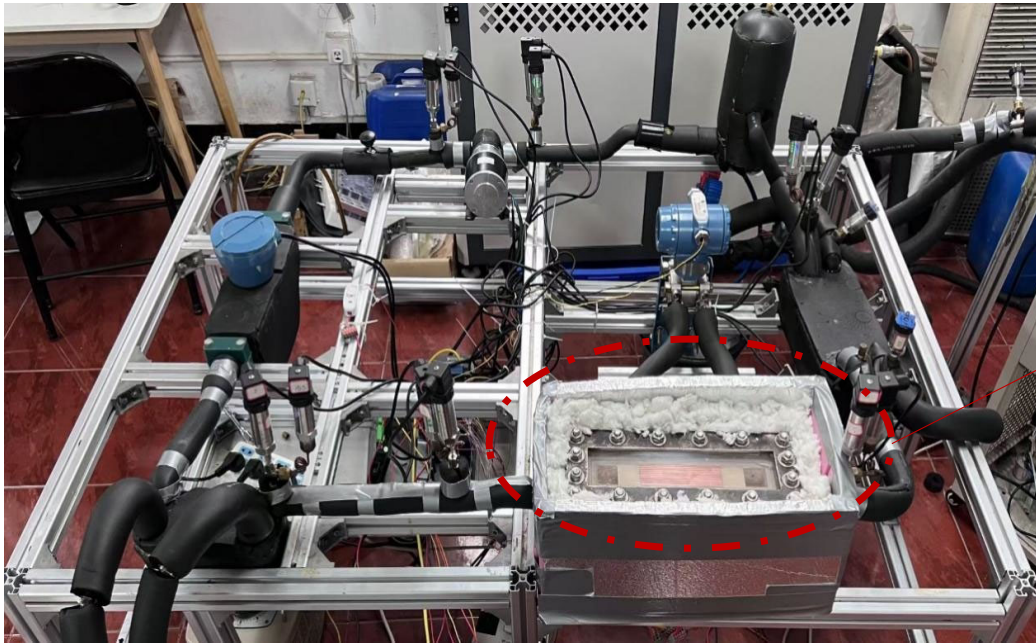


洪思慧, 吴赞, ECM, 2026

- 侧重点1: 引入通道几何参数的非均匀性, 利用**结构差异**改变两相行为
- 侧重点2: 基于**工程经验**或典型构型, 开展换热结构设计及实验验证

非等宽并联微细通道内的流动沸腾换热特性

□ 针对等宽并联通道流量“中间多-两侧少”的分布规律，设计非等宽结构



11通道


- 等宽结构: $W_{ch} = 2 \text{ mm}$
- 非等宽结构: $W_{ch} = 2.9, 2.5, 2.1, 1.7, 1.3, 1 \dots, 2.9 \text{ mm}$

□ 对等宽/非等宽并联微通道，开展两相流型分布及换热特性对比分析

非等宽并联微细通道内的流动沸腾换热特性



□ 流型演变规律及分布特征



泡状流

段塞流

层流

分层流

等宽

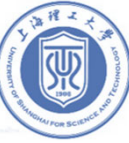
非等宽

□ 等宽：

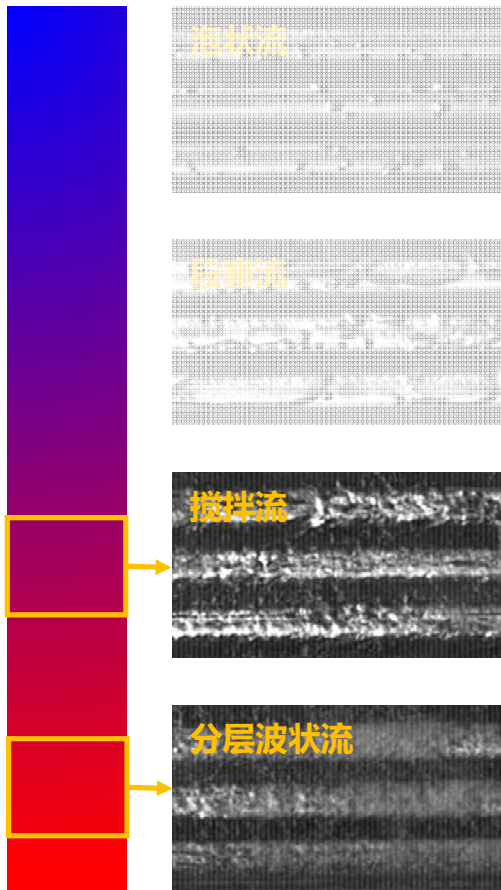
- **两侧**通道 — 汽泡初始核化位置靠前，汽泡少且尺寸大→段塞流
- **中间**通道 — 存在较长过冷段，汽泡多且尺寸小→泡状流

□ 非等宽：两侧和中间通道**均存在过冷段**，初始核化位置较接近

非等宽并联微细通道内的流动沸腾换热特性



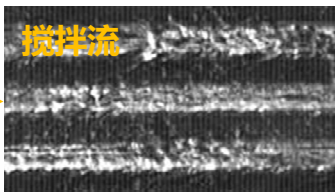
□ 流型演变规律及分布特征



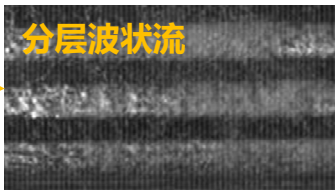
泡状流



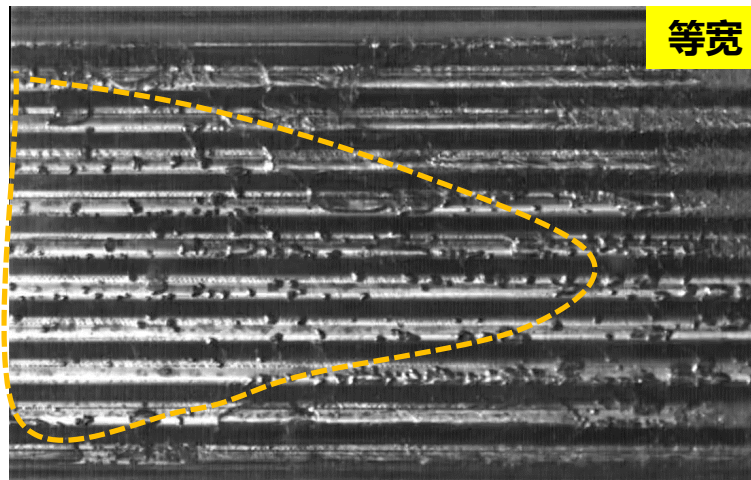
搅动流



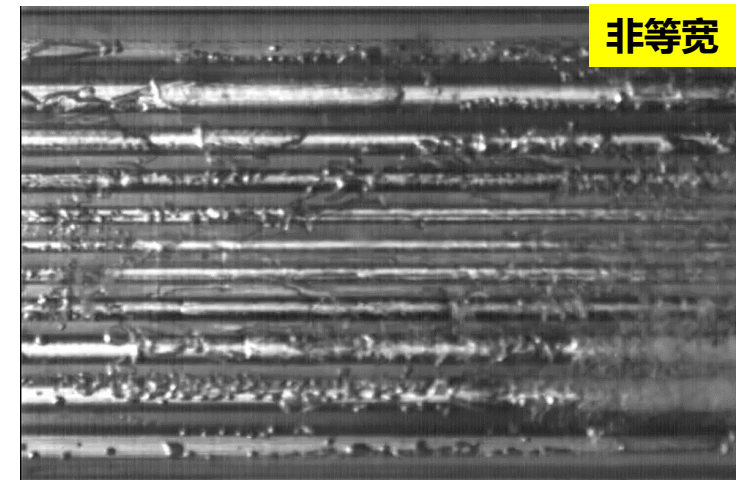
搅动流



分层波状流



等宽



非等宽

□ 等宽:

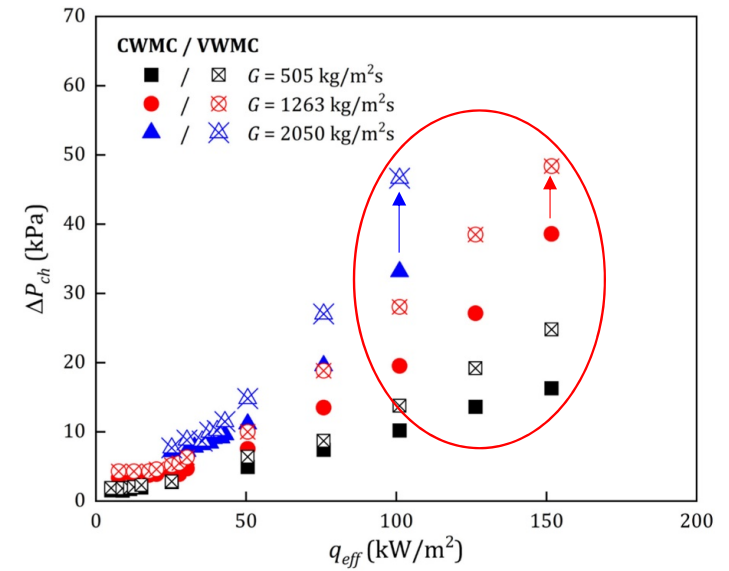
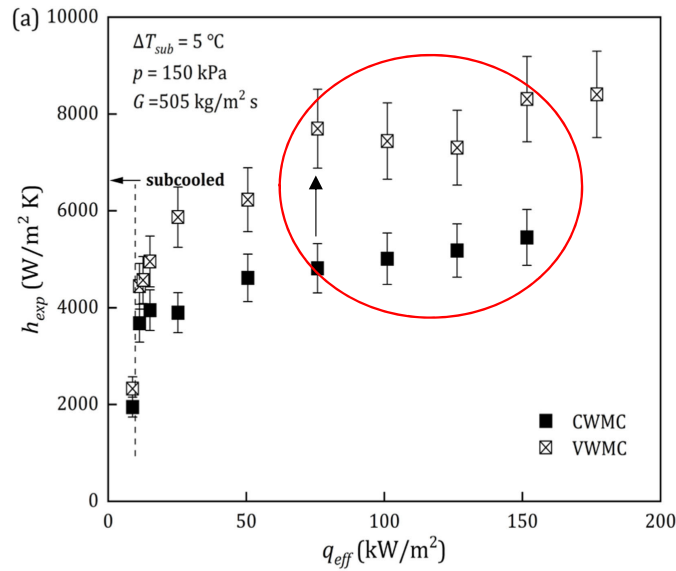
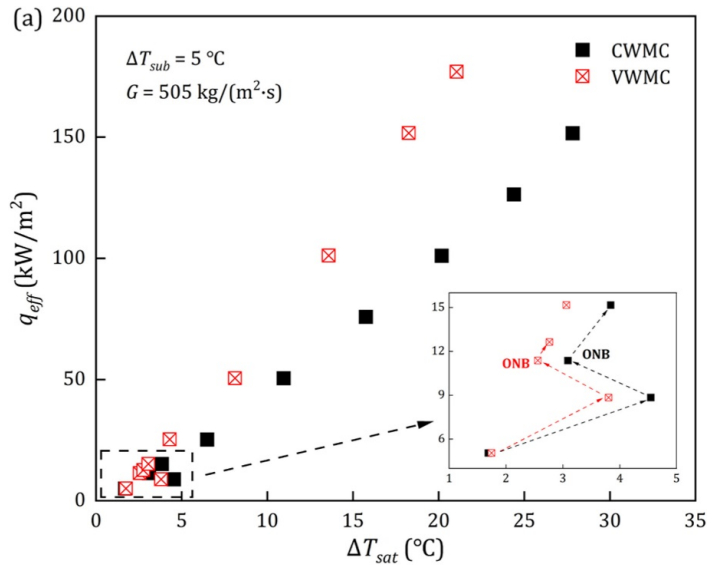
- **两侧**通道 — 搅动流-环状流过渡状态
- **中间**通道 — 仍处于泡状流-塞状流阶段，相界面清晰可见

□ 非等宽: 所有区域均已进入搅动流-环状流过渡状态

非等宽并联微细通道内的流动沸腾换热特性



□ 换热特性及压降对比



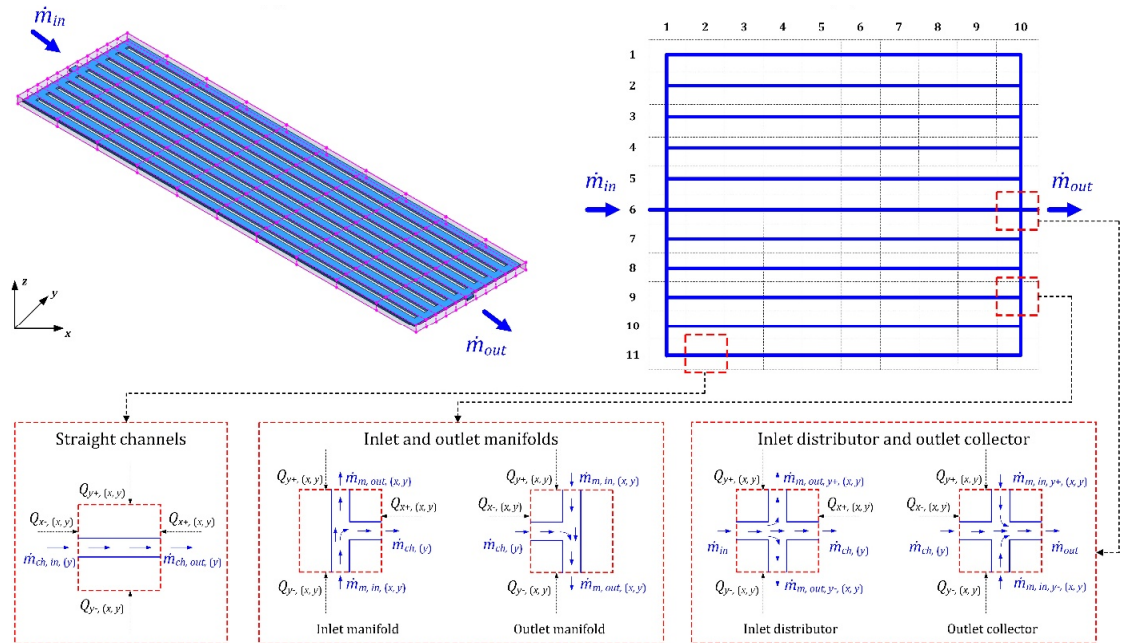
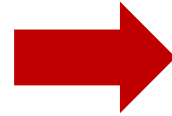
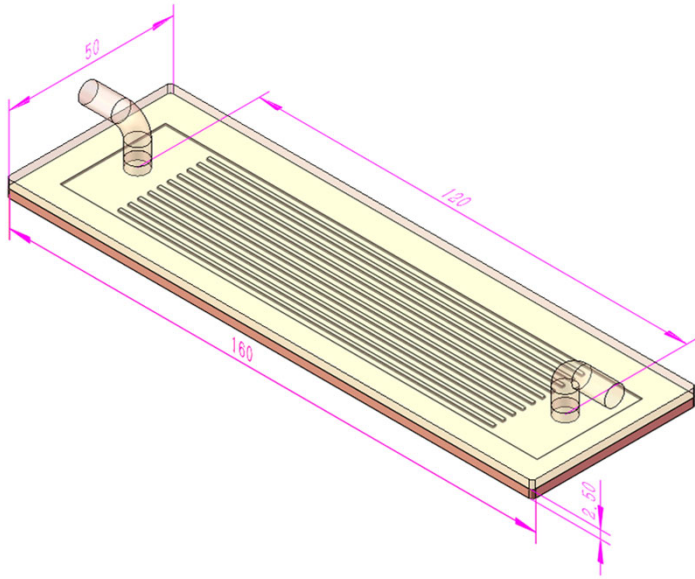
□ 非等宽结构的核态沸腾起始更早，换热系数最高可提升60%，但压降有所提升

□ 需构建系统的结构设计方法，以达到换热能力-流动阻力-两相分布的多维度平衡

C. Jiang, D. Lu, W. Yu, Y. Fang, et al. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 2025, 126986.

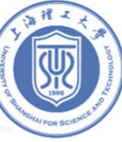
并联微细通道两相换热的数值建模

□ 并联通道结构的分布式参数建模

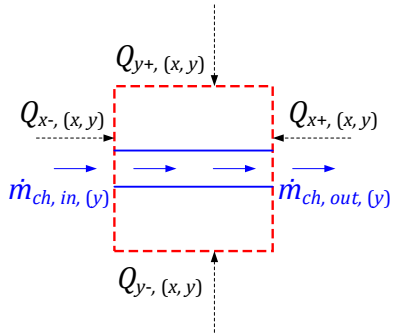


□ 将并联通道离散成有限个控制体单元，分别定义其进出口状态

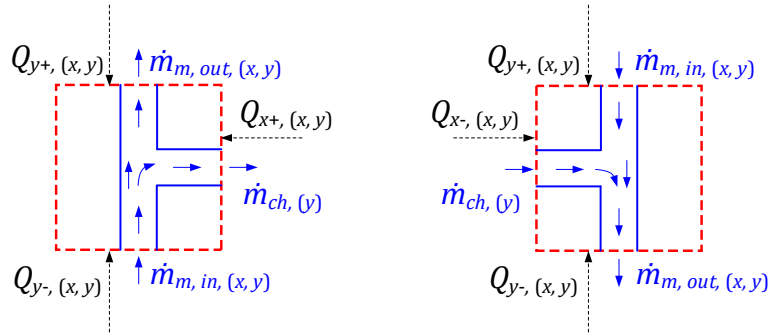
并联微细通道两相换热的数值建模



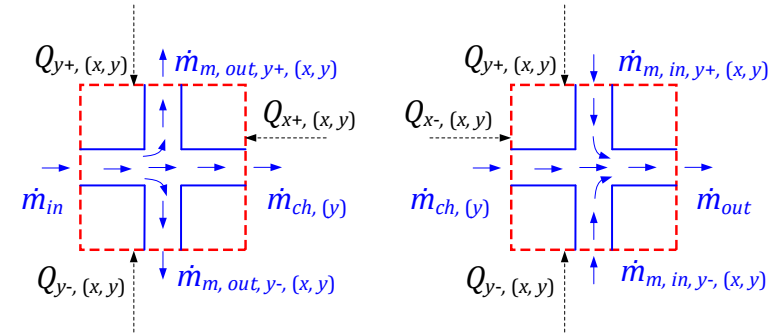
直通道



入口/出口集流管



入口分流/出口汇流



质量守恒

$$\dot{m}_{ch, in, (x, y)} = \dot{m}_{ch, out, (x, y)}$$

$$\dot{m}_{m, in, (x, y)} = \dot{m}_{m, out, (x, y)} + \dot{m}_{ch, (y)}$$

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{m, out, y+, (x, y)} + \dot{m}_{m, out, y-, (x, y)} + \dot{m}_{ch, (y)}$$

动量守恒

$$P_{in, (x, y)} - P_{out, (x, y)} = \Delta p_{stat, (x, y)} + \Delta p_{acc, (x, y)} + \Delta p_{f, (x, y)}$$

$$\begin{cases} P_{m, in, (x, y)} - P_{ch, (y)} = \Delta p_{stat, (x, y)} + \Delta p_{f, (x, y)} + \Delta p_{acc, (x, y)} + \Delta p_{bend, (x, y)} \\ P_{m, in, (x, y)} - P_{m, out, (x, y)} = \Delta p_{stat, (x, y)} + \Delta p_{f, (x, y)} + \Delta p_{acc, (x, y)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} p_{in} - p_{ch, (y)} = \Delta p_{stat, (x, y)} + \Delta p_{f, (x, y)} + \Delta p_{acc, (x, y)} \\ p_{in} - p_{m, out, y+, (y)} = \Delta p_{stat, (x, y)} + \Delta p_{f, (x, y)} + \Delta p_{acc, (x, y)} + \Delta p_{bend, (x, y)} \end{cases}$$

能量守恒

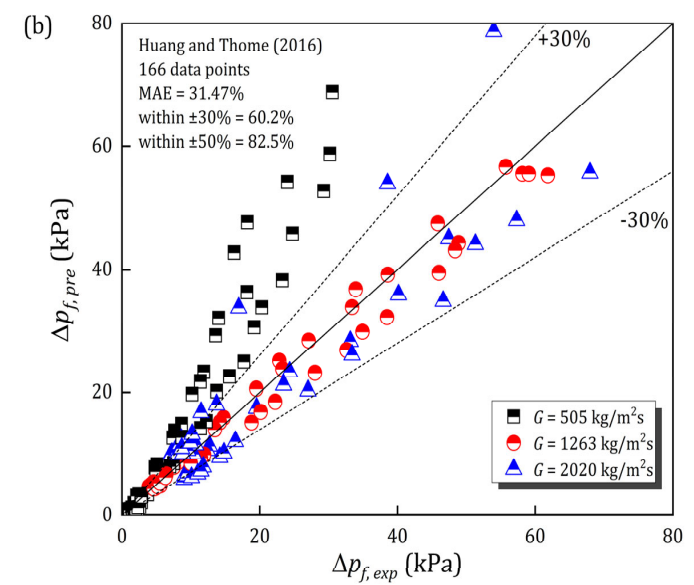
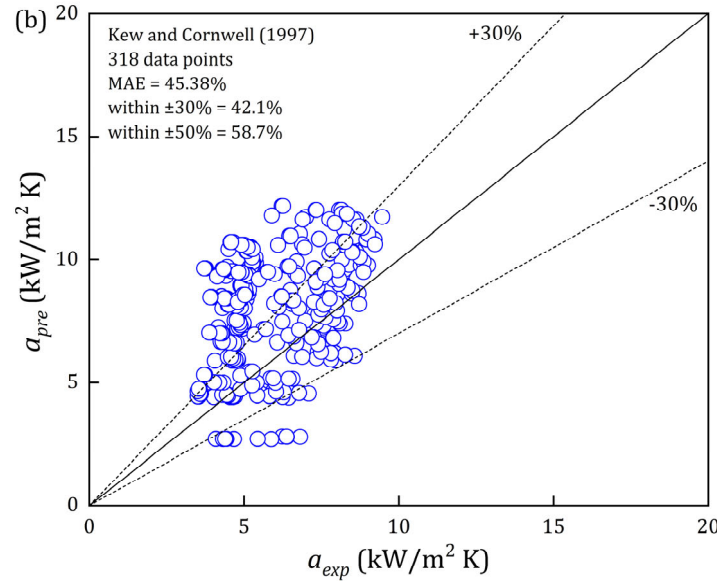
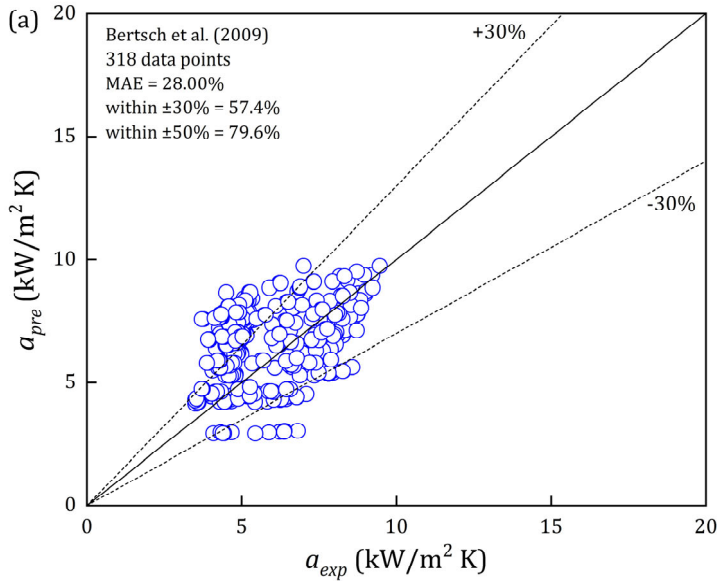
$$Q_{b, (x, y)} + Q_{x+, (x, y)} + Q_{x-, (x, y)} + Q_{y+, (x, y)} + Q_{y-, (x, y)} + Q_{r, (x, y)} = 0$$

- 摩擦压降
- 两相换热系数

并联微细通道两相换热的数值建模



□ 换热及摩擦压降关联式修正

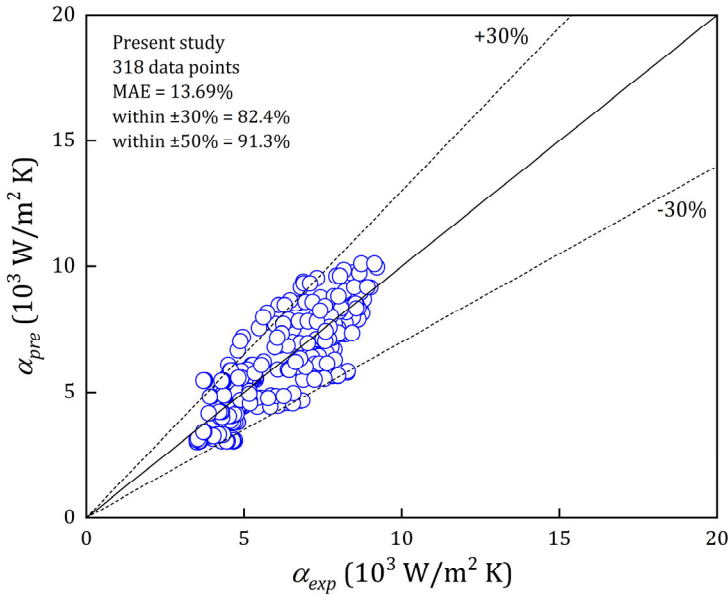


□ 将实验数据与代表性换热/摩擦压降关联式进行对比，选择合适的关联式进行修正

并联微细通道两相换热的数值建模



□ 换热及摩擦压降关联式修正

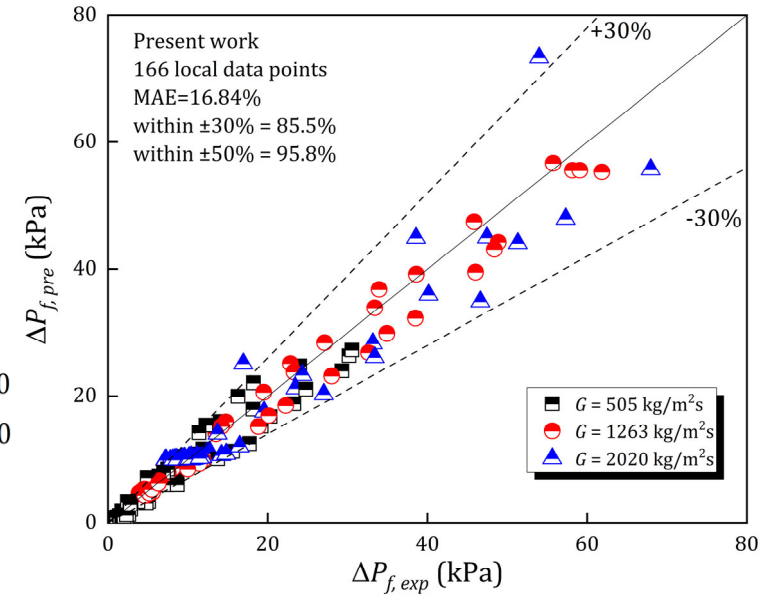


修正后的Bertsch关联式

$$\alpha_{tp} = 0.69 \cdot F \alpha_{FC} + 0.88 \cdot S \alpha_{NB}$$

Chisholm系数表达式

$$C = \begin{cases} 21(1 - e^{-0.319D_h}) & , Re_{lo} \leq 1000 \\ 0.0034 Re_v^{2.01} Re_{lo}^{-1.15} & , Re_{lo} > 1000, Re_v \leq 2000 \\ 0.51 Re_v^{0.01} Re_{lo}^{0.34} & , Re_{lo} > 1000, Re_v > 2000 \end{cases}$$



□ 对Bertsch关联式、Mishima-Hibiki关联式中的Chisholm系数进行修正

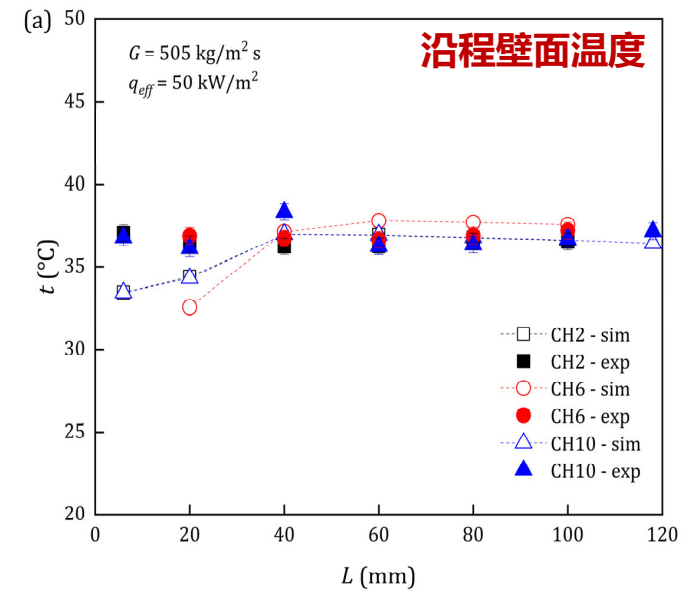
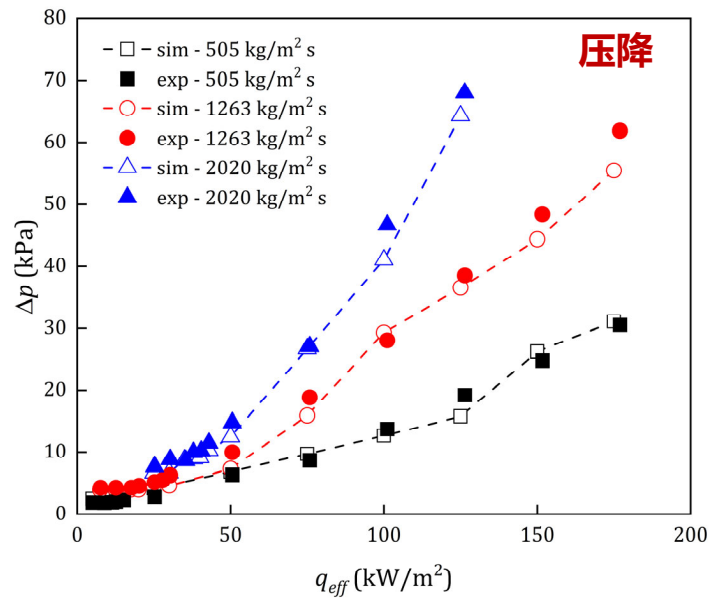
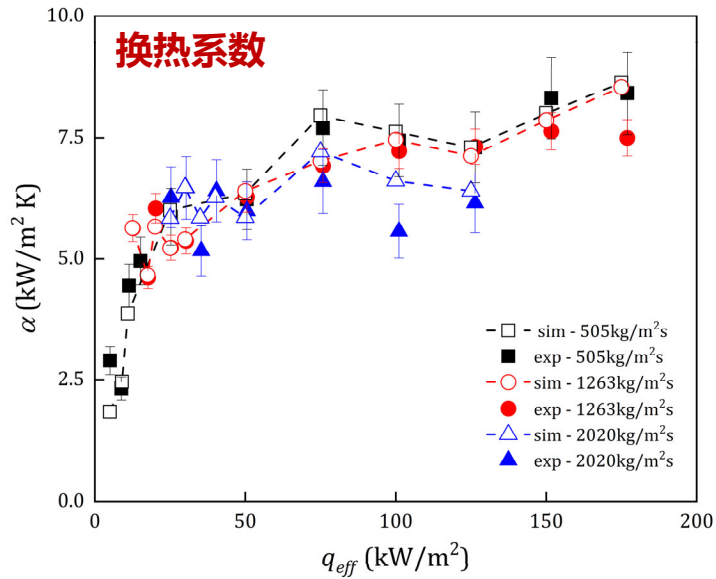
□ 修正后的换热系数及摩擦压降预测误差降至13.69%、16.84%

C. Jiang, J. Zhu, Y. Fang, et al. *Appl. Therm. Eng.*, 2026, 130212

并联微细通道两相换热的数值建模



模型验证



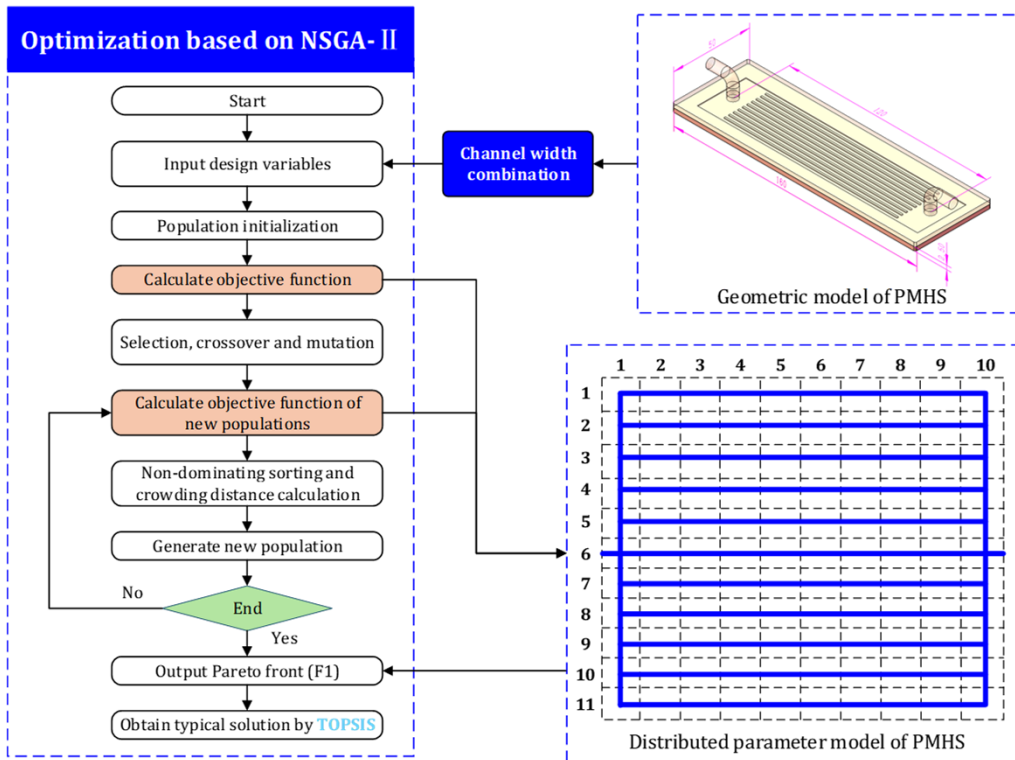
□ 换热系数、进出口压降及沿程壁面温度均与实验数据良好吻合

□ 相比于CFD模拟，分布式参数建模的计算时长可缩短至2-3小时/case

基于模型的并联通道结构多目标优化



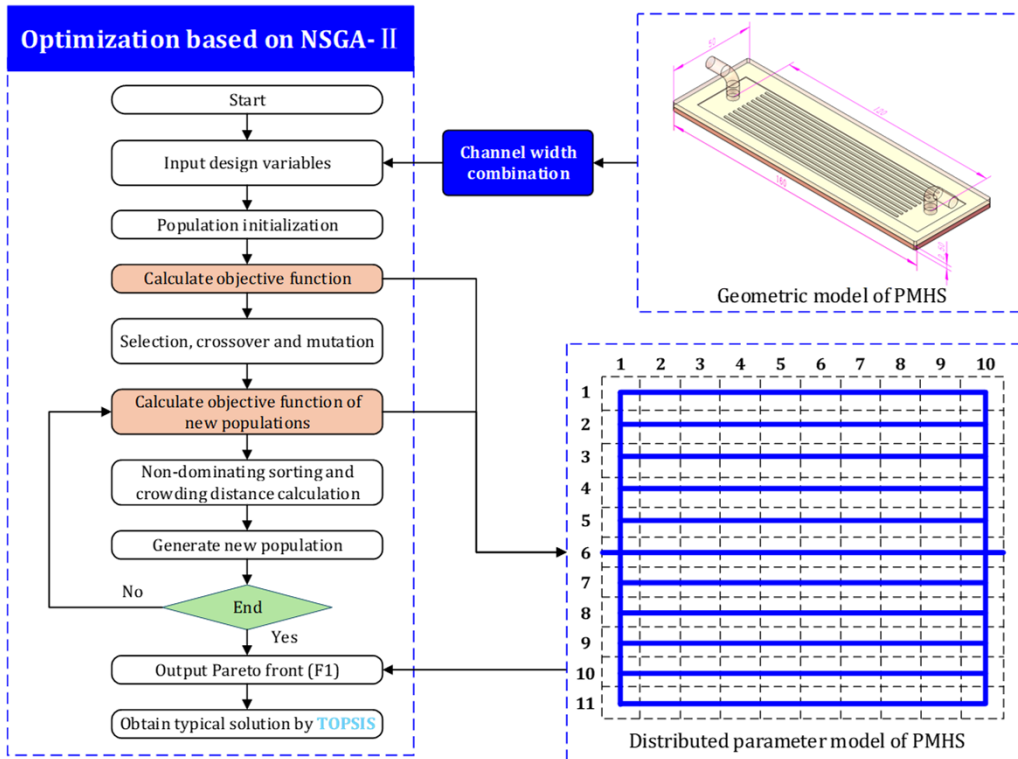
□ 设计变量及目标函数



C. Jiang, J. Zhu, Y. Fang, et al. *Appl. Therm. Eng.*, 2026, 130341

基于模型的并联通道结构多目标优化

□ 设计变量及目标函数



$$X = X(W_{ch,1}, W_{ch,2}, \dots, W_{ch,11})$$

$$W_{ch,1} = W_{ch,11}$$

$$W_{ch,2} = W_{ch,10}$$

.....

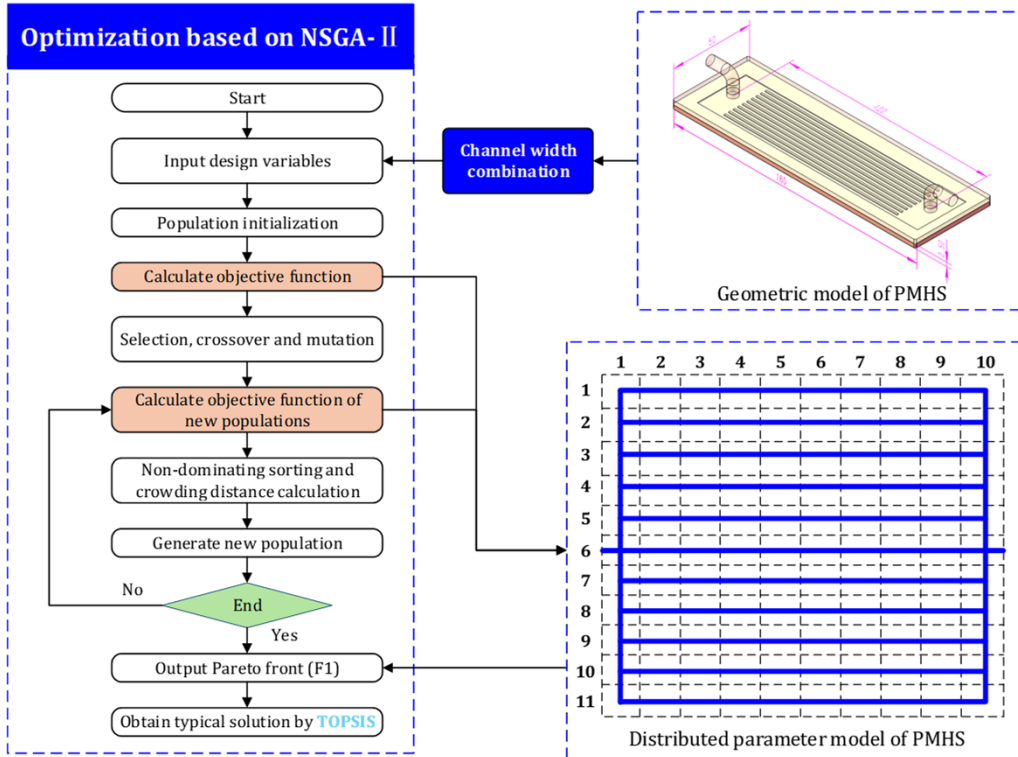
$$W_{ch,5} = W_{ch,7}$$

$$X = X(W_{ch,1}, W_{ch,2}, \dots, W_{ch,6}, \dots, W_{ch,2}, W_{ch,1})$$

□ 基于“非等宽通道”设想，确定宽度集合为优化设计变量

基于模型的并联通道结构多目标优化

□ 设计变量及目标函数



$$X = X(W_{ch,1}, W_{ch,2}, \dots, W_{ch,6}, \dots, W_{ch,2}, W_{ch,1})$$



$$\text{Min } f_1(X) = \Delta p(X),$$

$$\text{Min } f_2(X) = R_{th}(X)$$

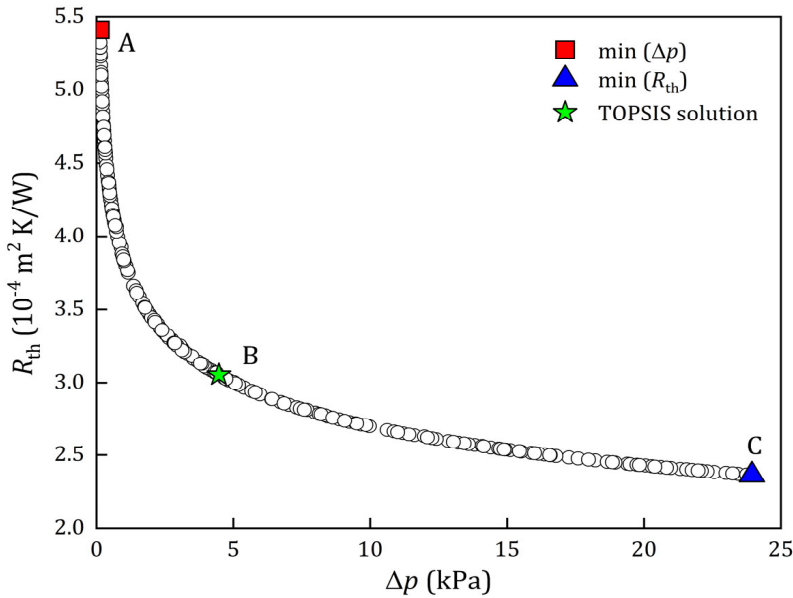
subject to:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{11} W_{ch,i} = 22 \pm 5\% \text{ mm}, \\ 0.5 \text{ mm} \leq W_{ch,i} \leq 2.5 \text{ mm} \end{cases}$$

□ 结合现实约束条件，确定热阻及压降作为优化目标函数

基于模型的并联通道结构多目标优化

□ 典型优化结构及最优解



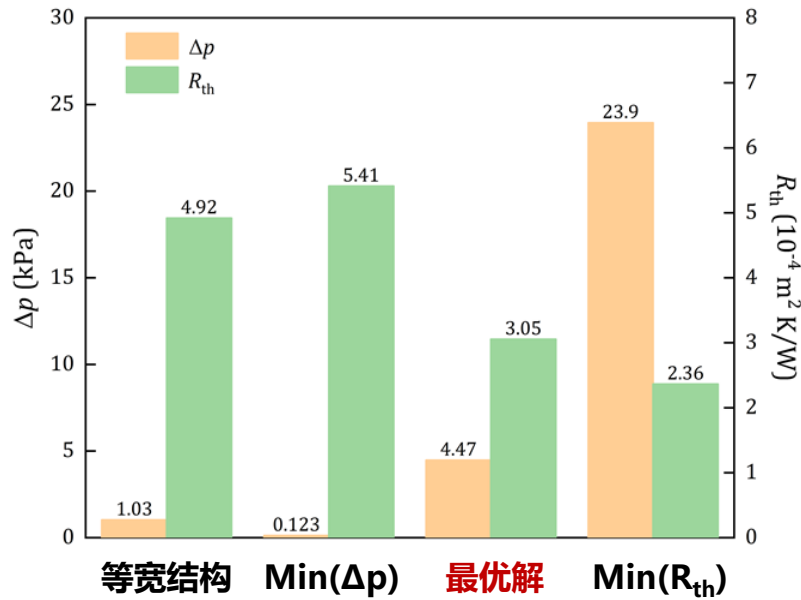
优化目标	设计参数 X (mm)	通道宽度总和 (mm)
压降最小	1.669, 1.833, 2.393, 2.308, 2.383, 2.500, ..., 1.833, 1.669	23.672
TOPSIS 最优解	1.623, 1.828, 2.142, 2.144, 2.385, 0.523, ..., 1.828, 1.623	20.767
热阻最小	2.005, 1.766, 2.105, 2.500, 2.272, 0.500, ..., 1.766, 2.005	21.796
等宽结构	2, 2, 2, ..., 2, 2	22

□ 根据多种宽度组合迭代求解，形成基于**热阻-压降权衡**关系的帕累托前沿

□ 结合TOPSIS择优策略，确定**兼顾换热能力-压力损失的最优解**

基于模型的并联通道结构多目标优化

□ 典型优化结构及最优解



优化目标	设计参数 X (mm)	通道宽度总和 (mm)
压降最小	1.669, 1.833, 2.393, 2.308, 2.383, 2.500, ..., 1.833, 1.669	23.672
TOPSIS 最优解	1.623, 1.828, 2.142, 2.144, 2.385, 0.523, ..., 1.828, 1.623	20.767
热阻最小	2.005, 1.766, 2.105, 2.500, 2.272, 0.500, ..., 1.766, 2.005	21.796
等宽结构	2, 2, 2, ..., 2, 2	22

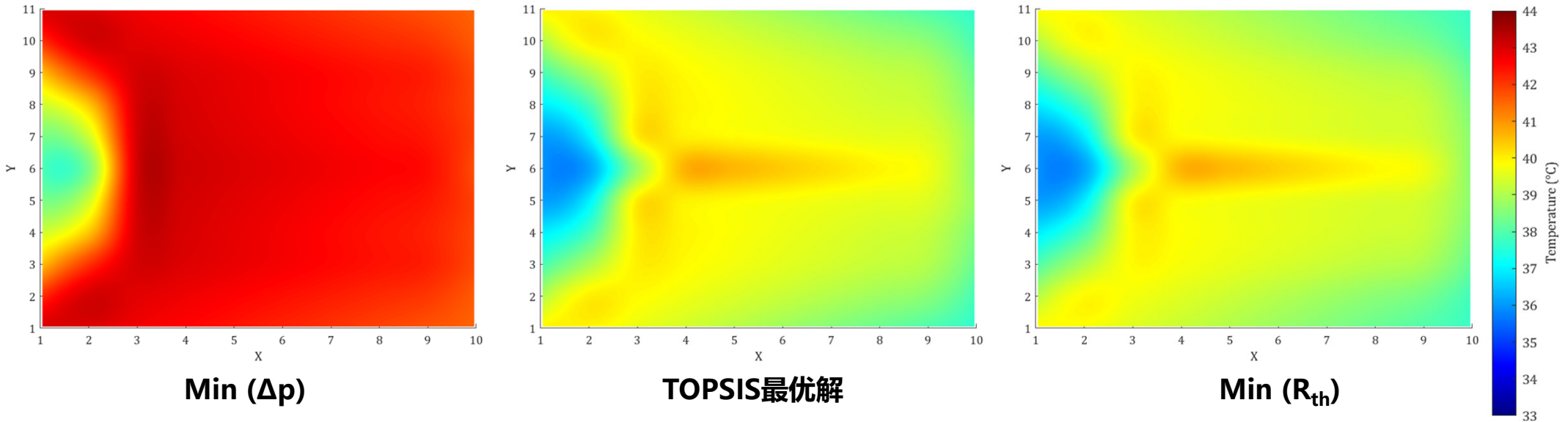
□ 根据多种宽度组合迭代求解，形成基于**热阻-压降权衡**关系的帕累托前沿

□ 结合TOPSIS择优策略，确定**兼顾换热能力-压力损失的最优解**

基于模型的并联通道结构多目标优化



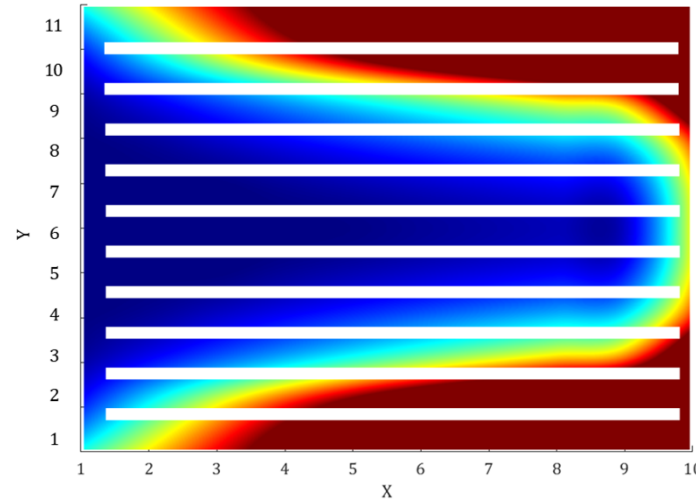
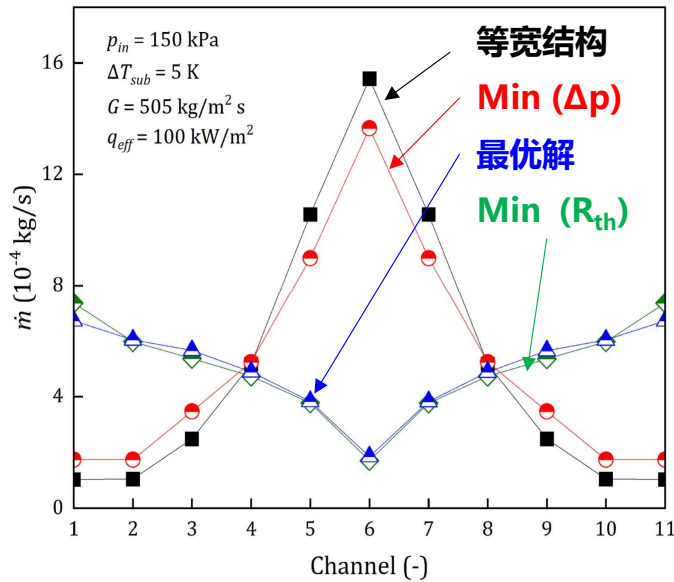
□ 典型解对比分析 — 温度分布



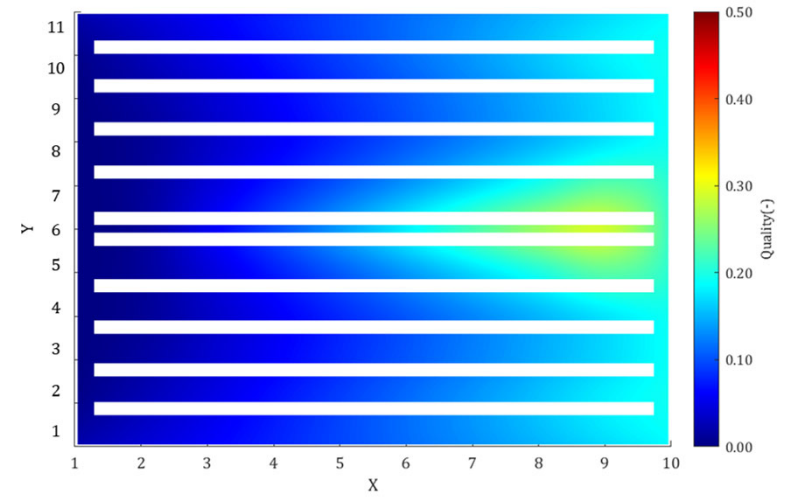
□ 最优解有限压降代价条件下，其换热特性与最小热阻解相当

基于模型的并联通道结构多目标优化

典型解对比分析 — 流量分配及干度分布



Min (Δp)



TOPSIS最优解

□ 最优解有限压降代价条件下，其换热特性与最小热阻解相当

□ 通过调节通道宽度组合，使得各通道流量分配更为均匀，防止局部高干度出现



现有研究总结

- 提出采用**非等宽通道**设计，改善并联通道结构的初始流量分配
- 对等宽/非等宽并联微细通道内的两相换热进行了对比研究，发现非等宽并联微细通道在沸腾不同阶段均可**优化汽液相分布**，且在**换热特性**方面有明显**提升**
- 由于局部通道收窄，非等宽并联通道在高热流下的**压降增幅较大**
- 针对非等宽通道的结构优化，构建了并联通道**两相换热的分布式参数模型**，并完成了换热系数及摩擦压降关联式标定修正
- 结合实验结果，对模型预测精度进行了分析，发现**模型**在换热系数、压降及沿程壁面温度**预测方面具有较好的准确性**，可以保证后续优化研究的可靠性
- 基于遗传算法，以并联通道的**宽度组合为设计变量**，获得了**不同优化目标下的典型解**，结合分布式参数模型对不同典型解进行了**对比分析**

国内外同行近期重要进展 — 微柱群结构拓扑优化

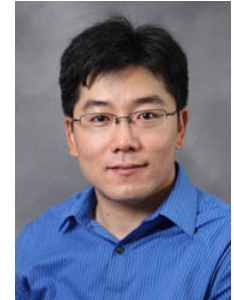


Applied Thermal Engineering 249 (2024) 123337



Contents lists available at ScienceDirect
Applied Thermal Engineering

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



Research Paper

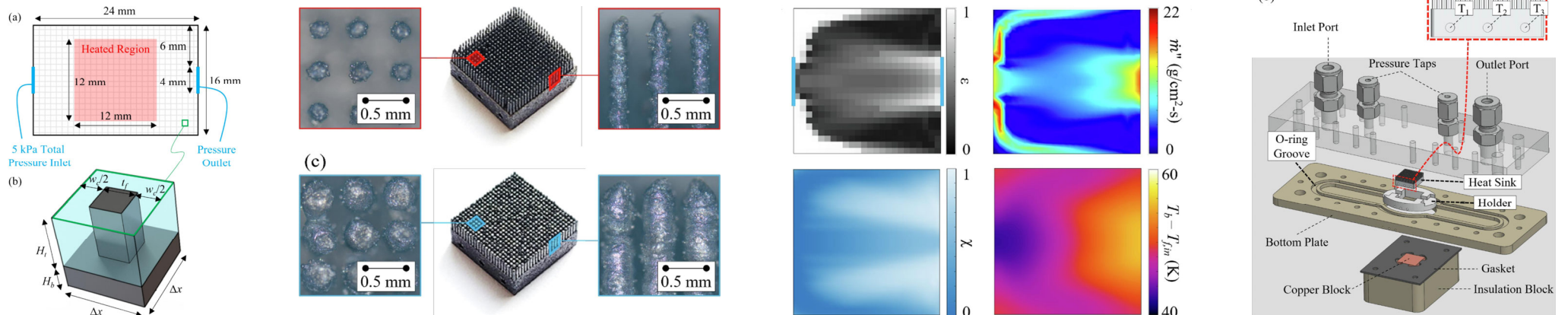
An approach for topology optimization of heat sinks for two-phase flow boiling: Part 1 – Model formulation and numerical implementation

Serdar Ozguc, Liang Pan, Justin A. Weibel*

Cooling Technologies Research Center and School of Mechanical Engineering, Purdue University, 585 Purdue Mall, West Lafayette IN 47907, United States



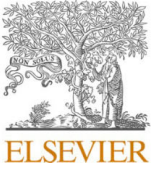
J.A. Weibel, Liang Pan (潘亮)
普渡大学



国内外同行近期重要进展 — 两相流多保真拓扑优化



International Journal of Heat and Mass Transfer 239 (2025) 126585



Contents lists available at ScienceDirect
International Journal of Heat and Mass Transfer

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



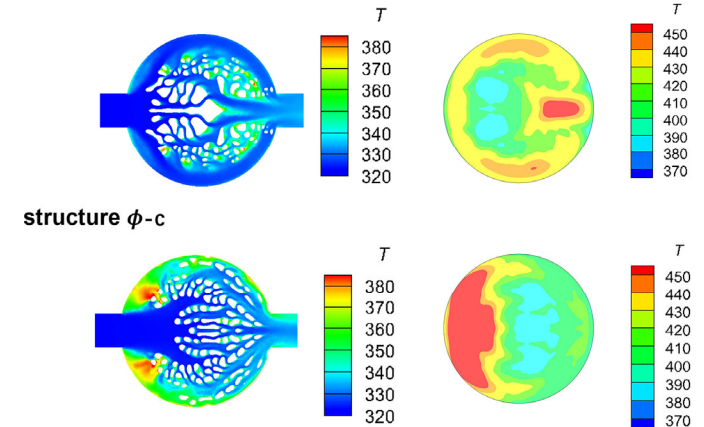
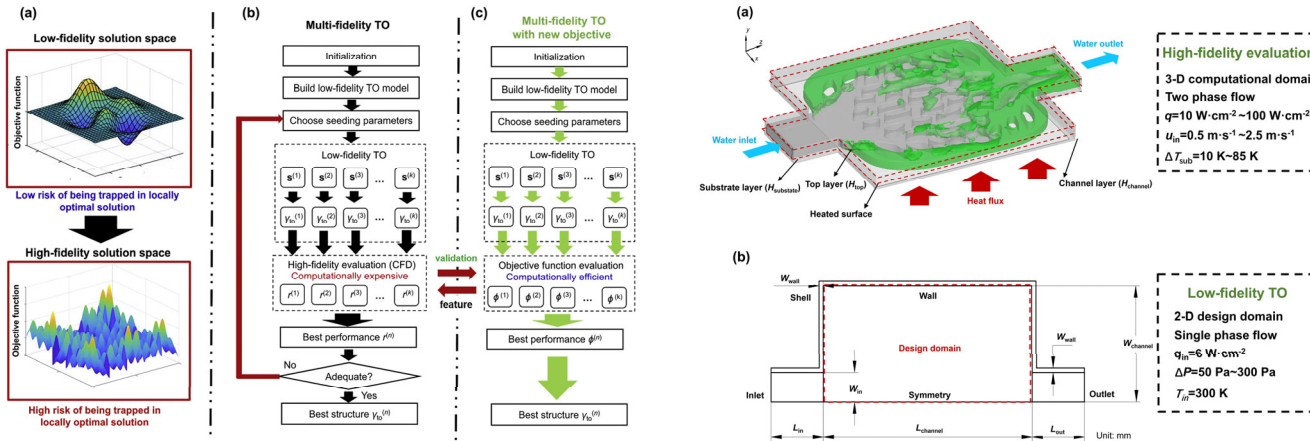
陈黎, 西安交通大学

Multi-fidelity topology optimization of flow boiling heat transfer in microchannels

Yi Yuan^a, Li Chen^{a,*}, Qirui Yang^a, Hanbing Ke^b, Lingran Gu^a, Wen-Quan Tao^a

^a Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

^b Science and Technology on Thermal Energy and Power Laboratory, Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan, Hubei 430205, China



未来研究展望

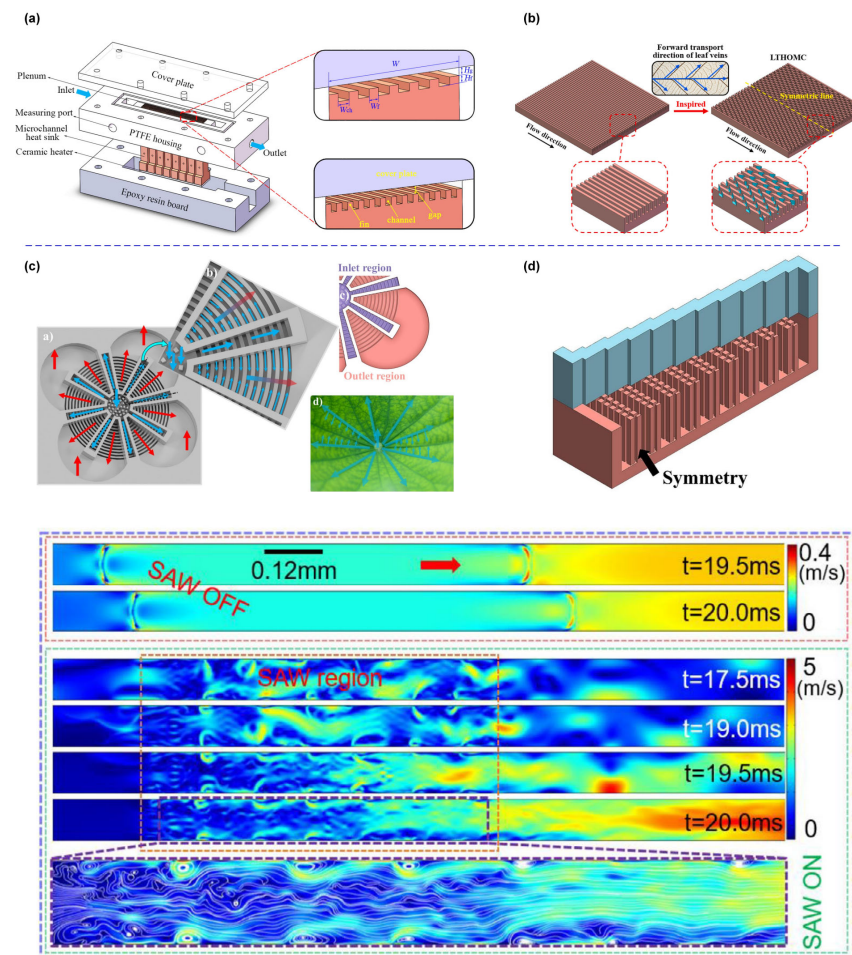


□ 机制研究

- ✓ 结构参数对两相流动行为影响的**普适性规律**
- ✓ 两相流动**非稳态行为**的**高效预测**方法与模型发展
- ✓ 基于**外场作用**的两相流动**主动调控**机制探索

□ 工程应用

- ✓ 面向复杂运行工况的通道结构设计方法
- ✓ 基于模型驱动的两相流动快速预测工具开发
- ✓ 结合主动调控的两相流动稳定性提升与验证



研究团队



卢娣, 25届硕士



蒋陈涵, 23级硕士
拟录取天津大学博士研究生
获“吴业正教育基金”奖学金



陈铭思
24级硕士



朱菁
24级硕士

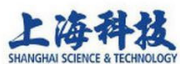


邓栩昌
24级硕士

致谢



上海市自然科学基金面上项目



基于声表面波激励的并联通道流动失稳调控机制研究



浙江银轮机械股份有限公司

泵驱两相冷却系统两相冷板设计与开发



俞小莉 教授



黄钰期 教授



范利武 教授



蔡伟华 教授



赵嘉毅 副教授

中国工程热物理学会传热传质分会第九届青年学术论坛

2026年4月10日-12日 @ 南京航空航天大学 & 南京理工大学



感谢关注，敬请批评指正！



Email: yidongfang@usst.edu.cn

