

2026数据中心冷却高峰论坛

智冷·降碳 赋能数字未来

烧结多孔微通道冷板内流动沸腾传热特性研究

汇报人：张志强

研究团队：刘圣春 李雪强 王志明 张志强

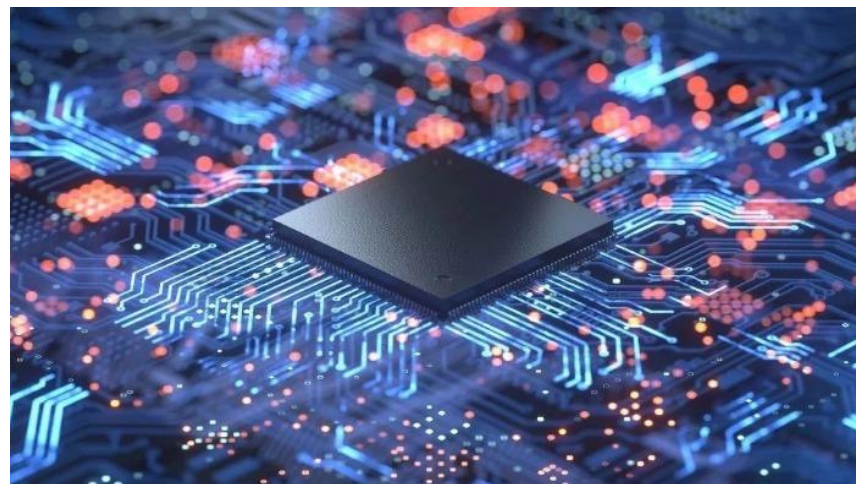
天津商业大学机械工程学院

先进液冷技术及系统联合实验室



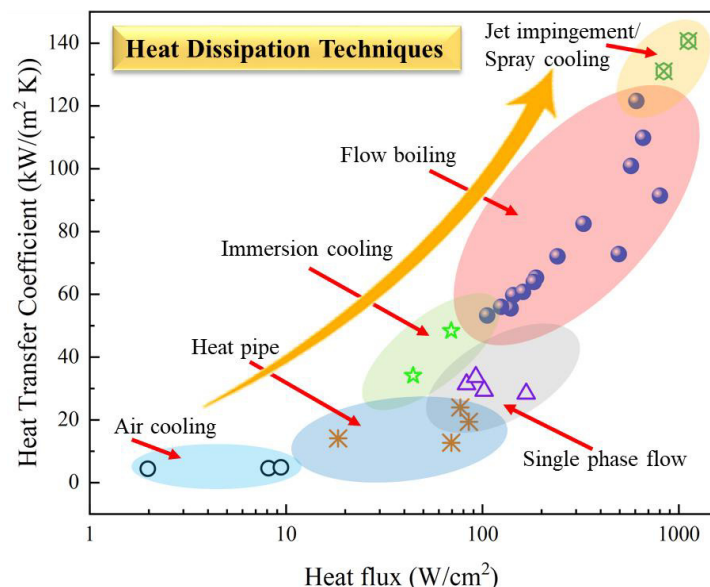
需求牵引

AI算力爆发，芯片热流密度剧增，亟需高效热管理技术

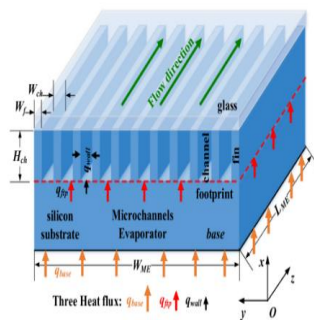
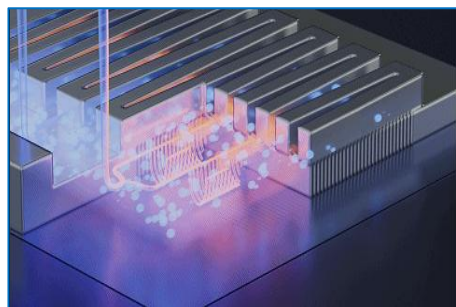


- 电子设备不断趋于小型化，电子模块封装密度持续增加；
- 单位面积热流密度急剧升高；
- 过热导致器件性能下降、寿命缩短甚至失效；
- 温度分布不均匀引发热应力，影响系统可靠性。

1. 研究背景



不同冷却技术的传热性能分布



微通道流动沸腾换热技术

❌ 传统空冷、液冷技术

✅ 微通道流动沸腾换热技术

- 功耗低
- 紧凑式、微型化
- 壁面温度均匀
- 传热系数高
- 工质需求小
- 重量尺寸小

电子模块温度需控制在 85°C 以下!

温度高极易导致电子器件的损坏

水的流动沸腾无法适用!

只有低沸点工质

(如制冷剂、电子氟化液等)

可适用于电子系统的相变冷却!

微通道内低沸点工质流动沸腾传热

2. 研究现状

- ◆ 流动不稳定性
- ◆ 临界热流密度提前发生
- ◆ 局部热点
- ◆ 流阻较大

↓
换热恶化

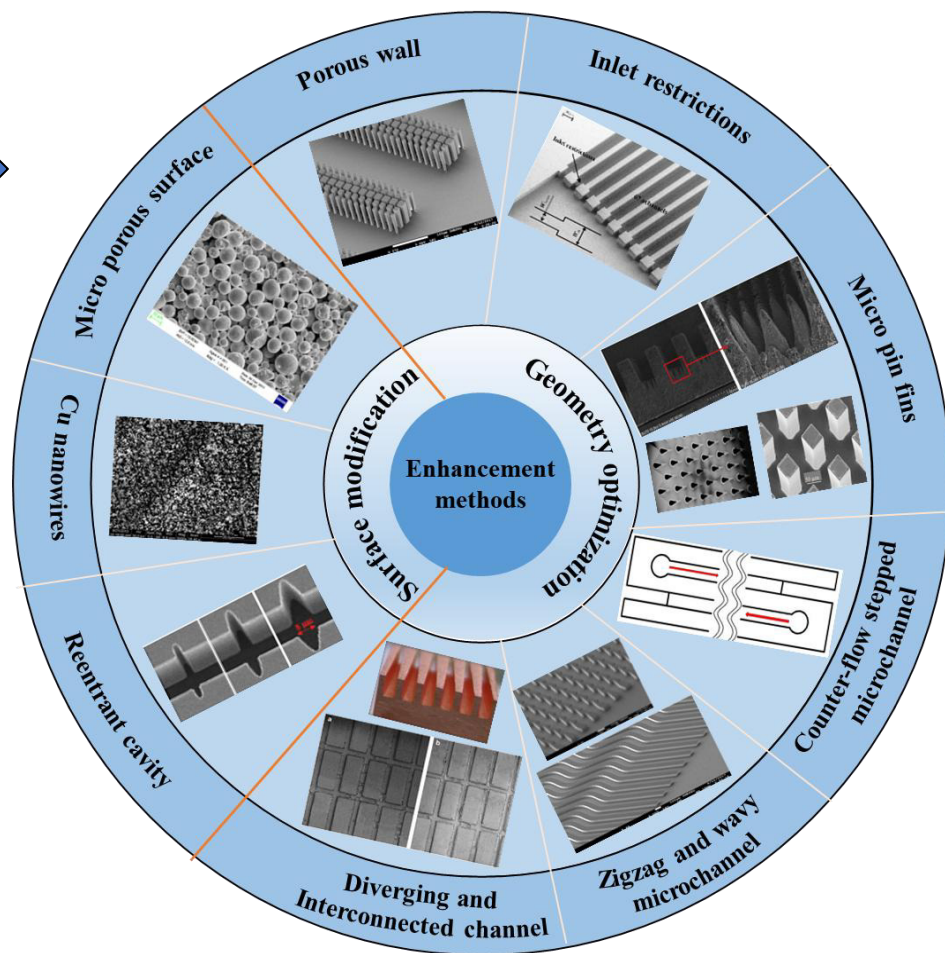
强化换热

稳流减阻

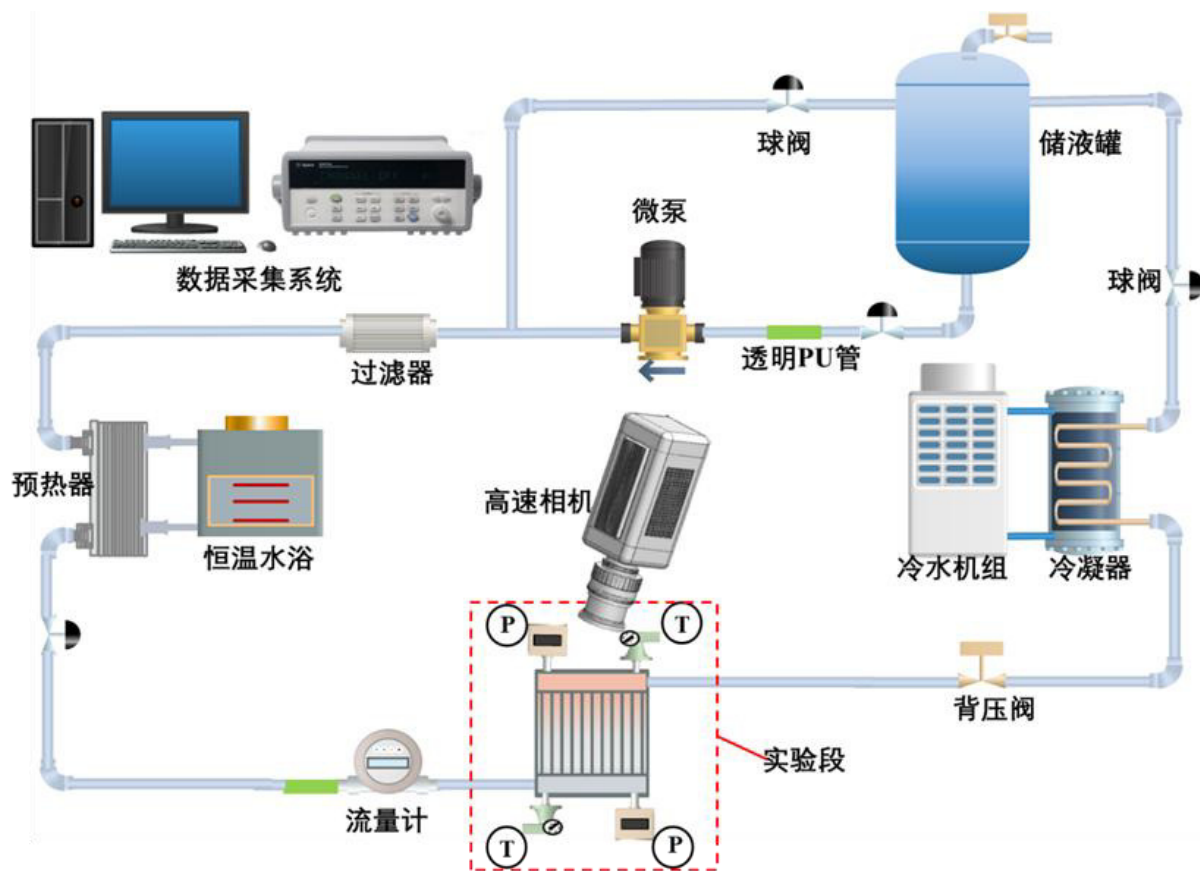
流道
拓扑



表面
改性



➤ 实验系统



微通道冷板流动沸腾可视化实验平台示意图

➤ 单相实验验证

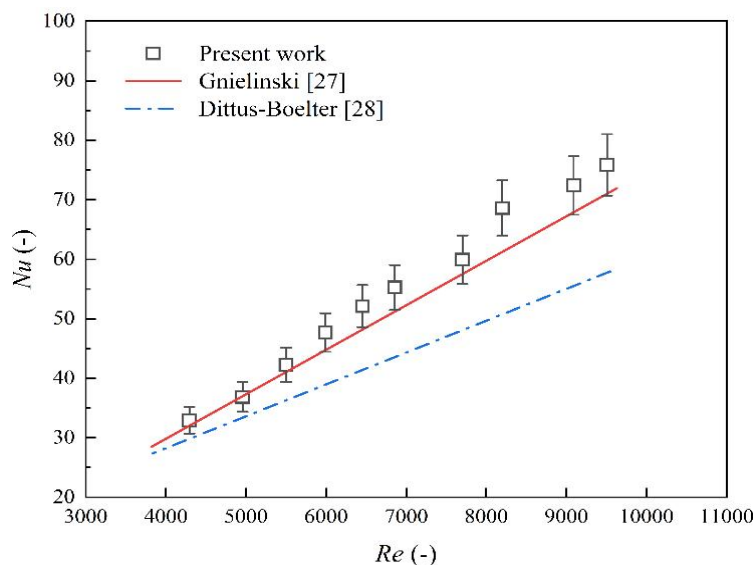
Gnielinski模型:

$$Nu = \frac{(\frac{1}{8})(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\sqrt{f/8}(Pr^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{D_h}{L} \right)^{2/3} \right] \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.01}$$

$$f = (1.82 \lg Re_f - 1.64)^{-2}$$

Dittus-Boelter模型:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$$



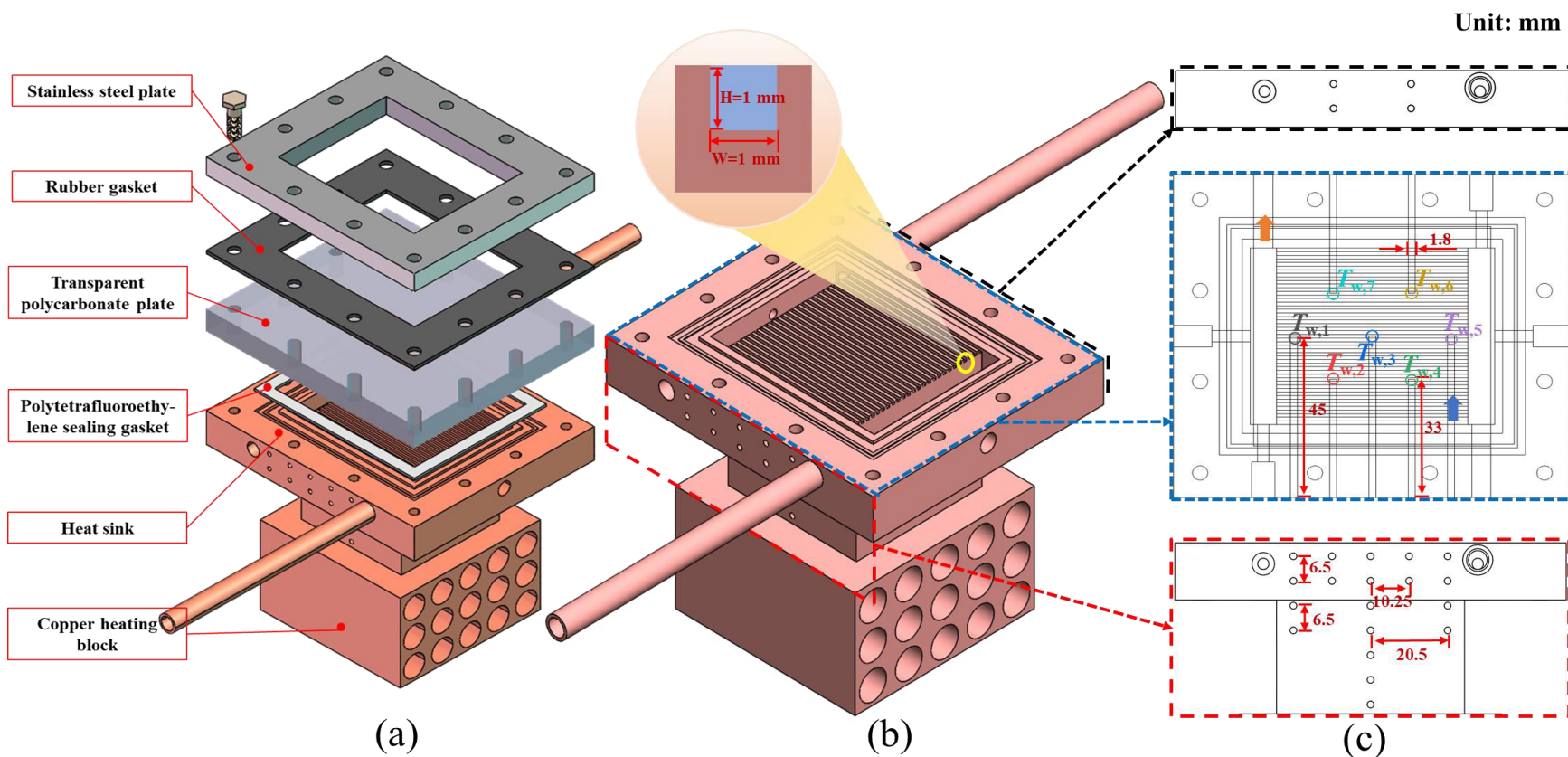
单相流动实验结果与关联式预测值对比

热流密度 vs 壁面过热度

- ① V. Gnielinski, New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow, International chemical engineering, 16(2) (1976) 359-368.
- ② F.W. Dittus, L.M.K. Boelter, Heat transfer in automobile radiators of the tubular type, International Communications in Heat and Mass Transfer, 12(1) (1985) 3-22.

实验段介绍

设计并加工了一体式可视化微通道实验段；



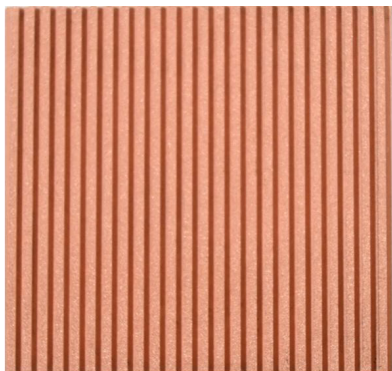
实验段示意图

➤ 微通道结构

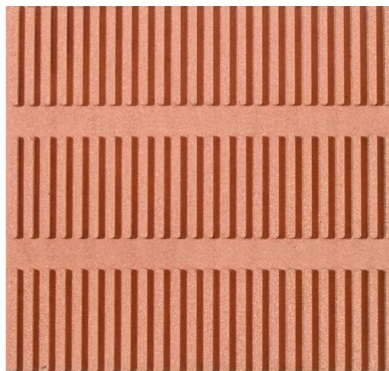
设计制备了光滑平行、多孔平行以及多孔分段微通道；



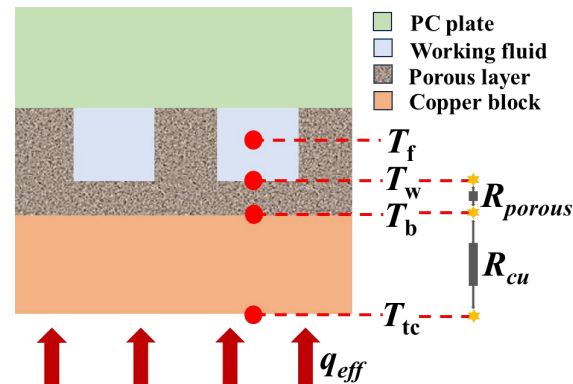
平行光滑



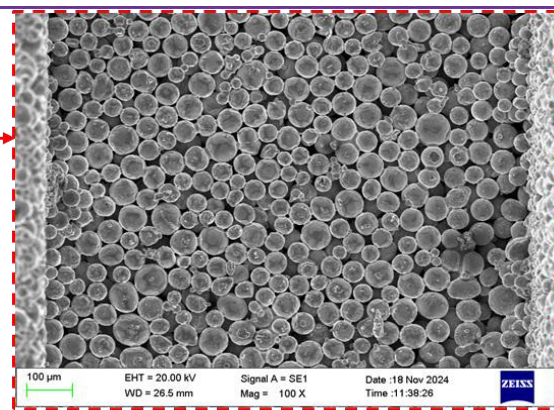
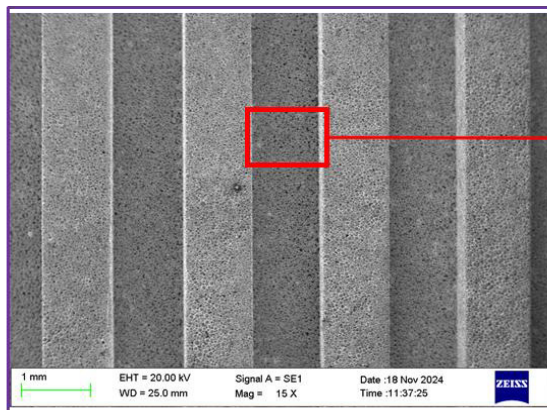
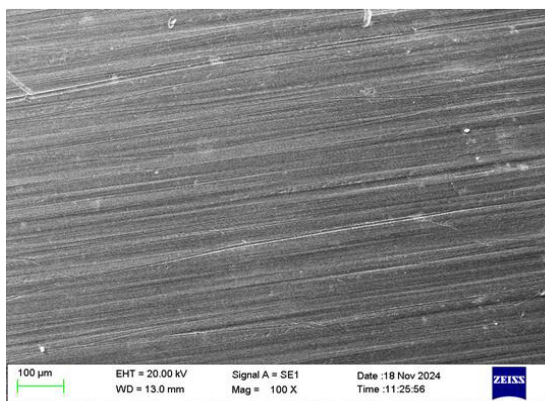
多孔平行



多孔分段



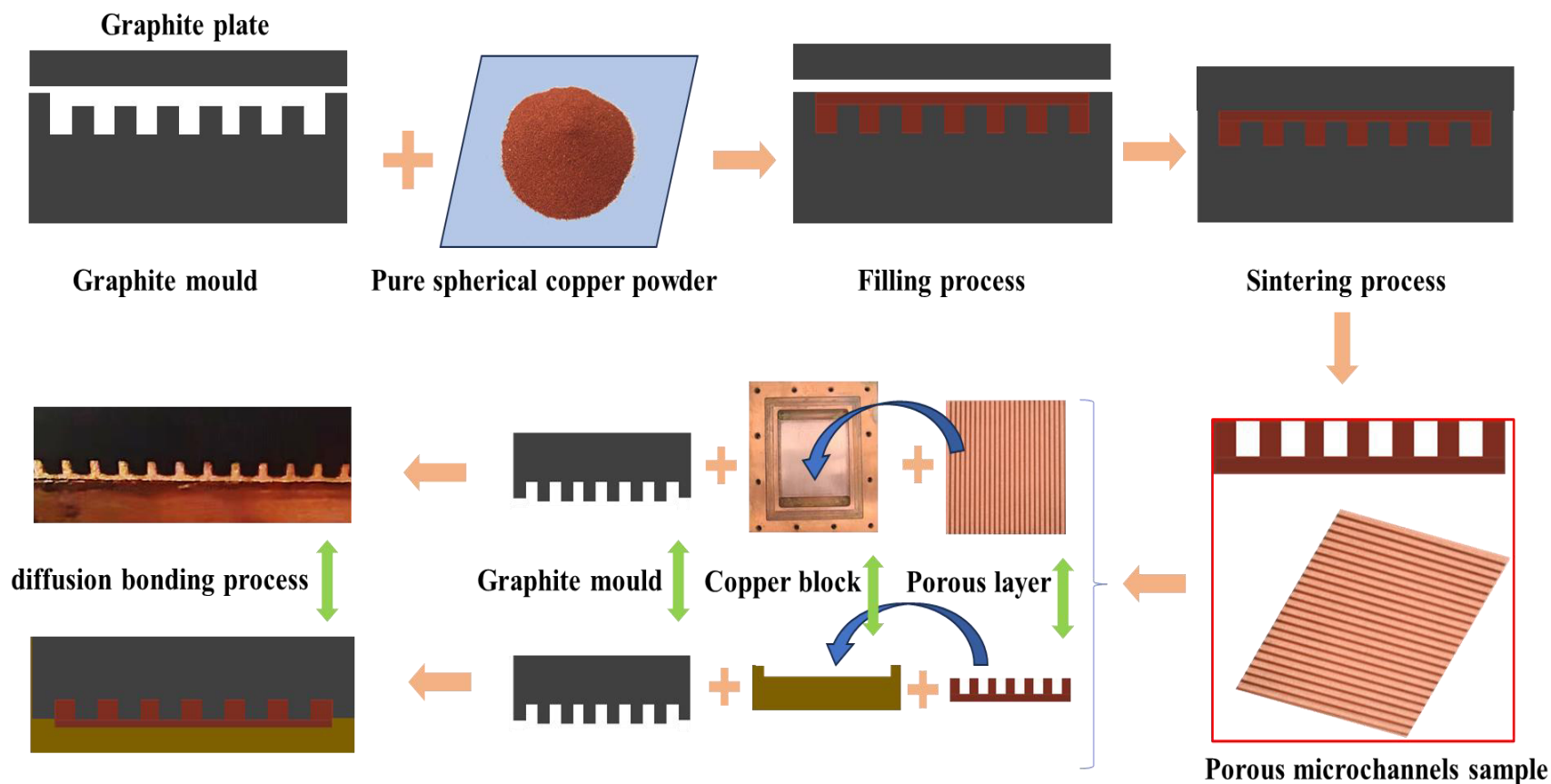
多孔微通道内热传导过程



不同表面电镜图

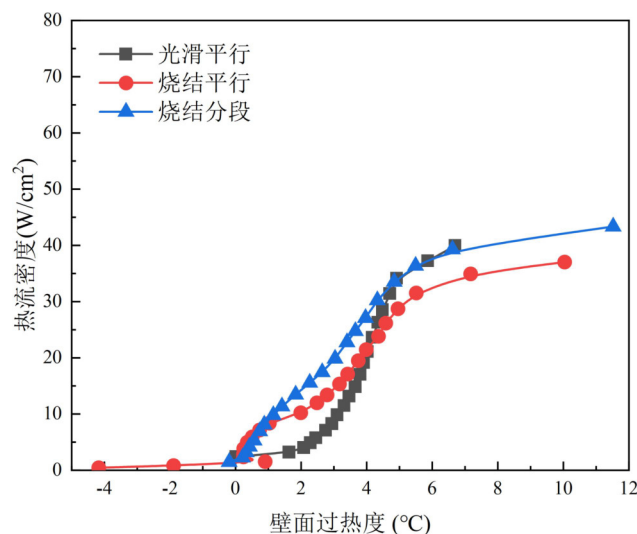
➤ 多孔微通道制备

通过高温烧结法制备了具有不同流道结构的多孔微通道；

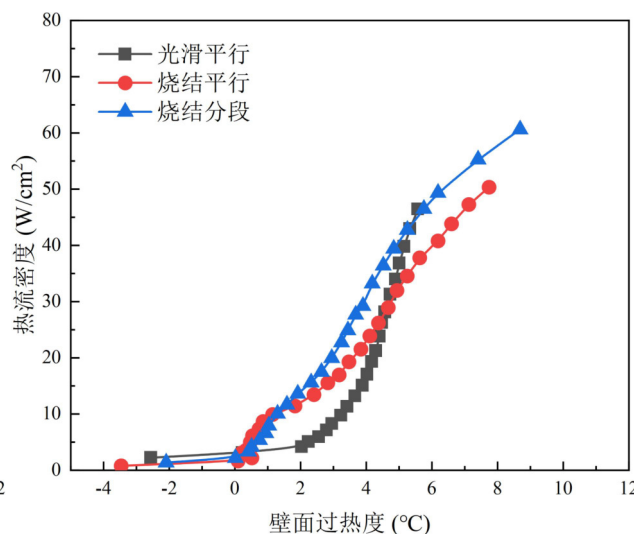


多孔微通道烧结制备流程

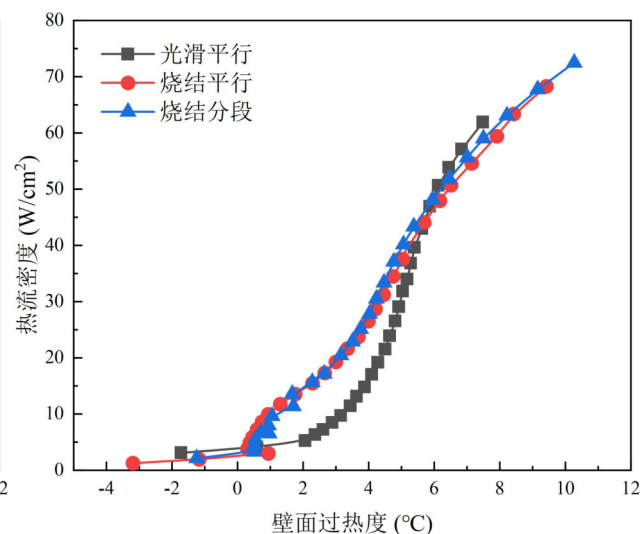
➤ 流动沸腾曲线



$G=590 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$



$G=1060 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

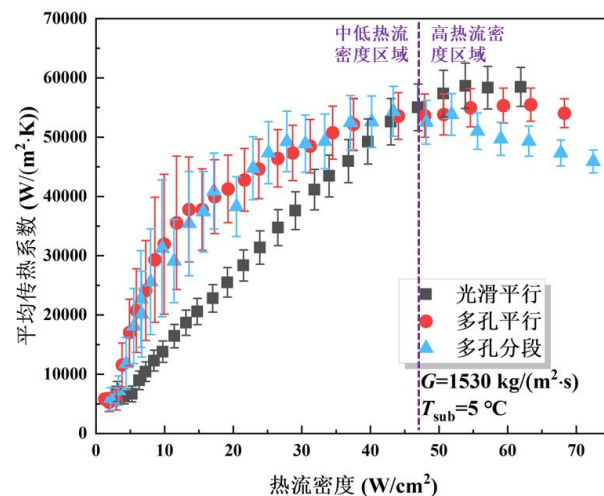
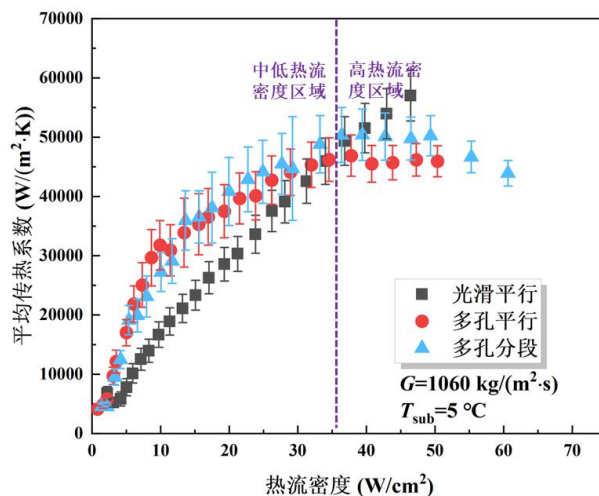
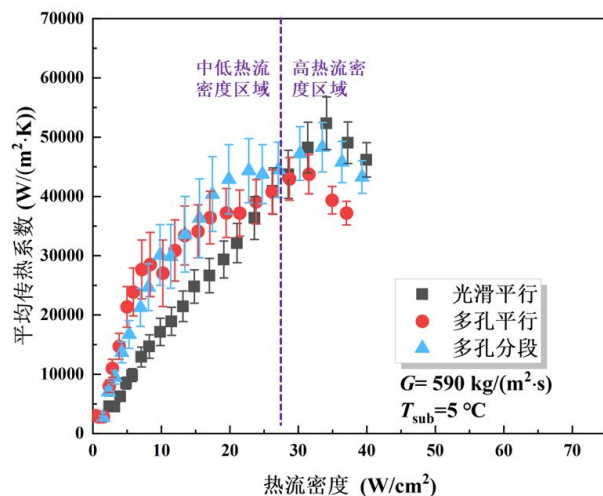


$G=1530 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

热流密度 vs 壁面过热度

- 光滑平行微通道内核态沸腾起始壁面温度显著大于多孔微通道;
- 由于增加成核位点的同时实现流型重整, 多孔分段微通道最大热流密度72 W/cm², 散热功率1800W (5*5cm²)。

➤ 沸腾传热系数

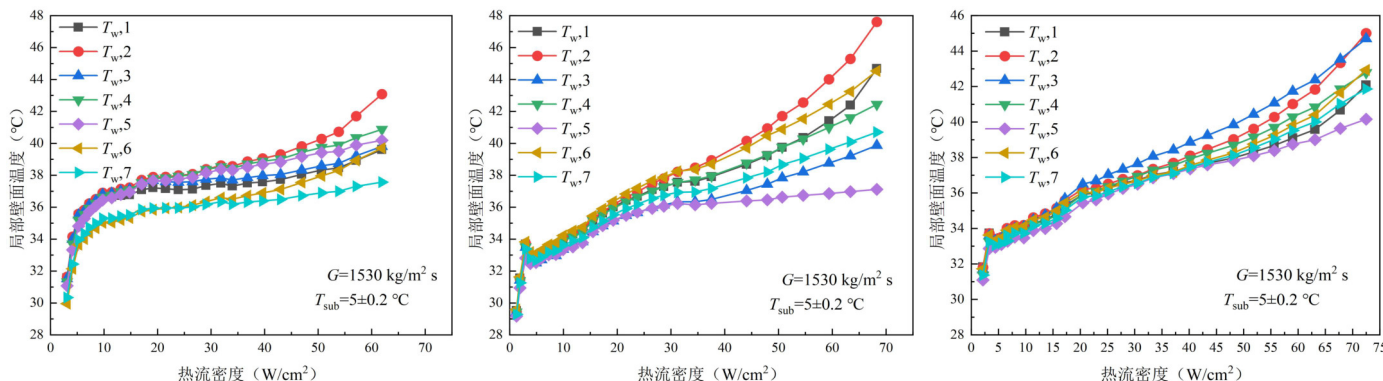


换热系数 vs 热流密度

- 中低热流密度下：多孔微通道内换热系数显著大于光滑平行微通道；
- 高热流密度下：质量流速为 $590 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 和 $1060 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 时，换热系数光滑平行 > 多孔分段 > 多孔平行，质量流速为 $1530 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 时，换热系数光滑平行 > 多孔平行 > 多孔分段。

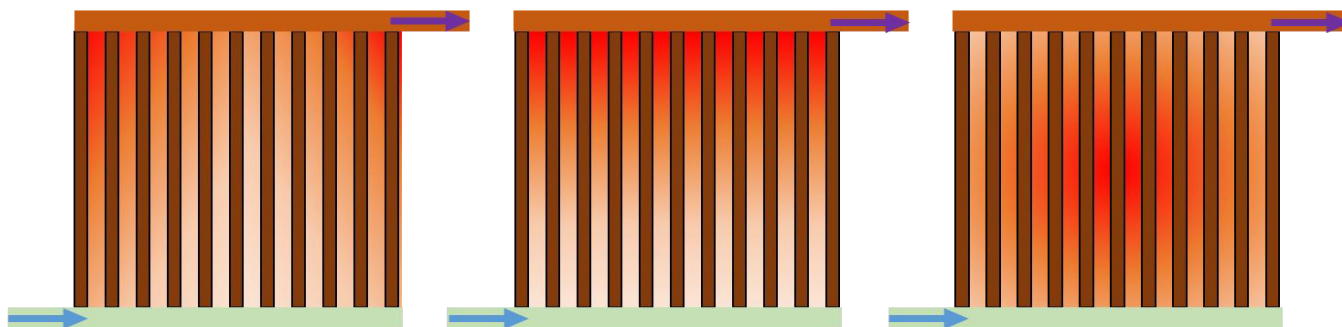
壁面温度分布特性

分析了不同通道壁面温度分布特性，获得了各微通道内温度分布规律；



高温区

低温区



高热流密度下：

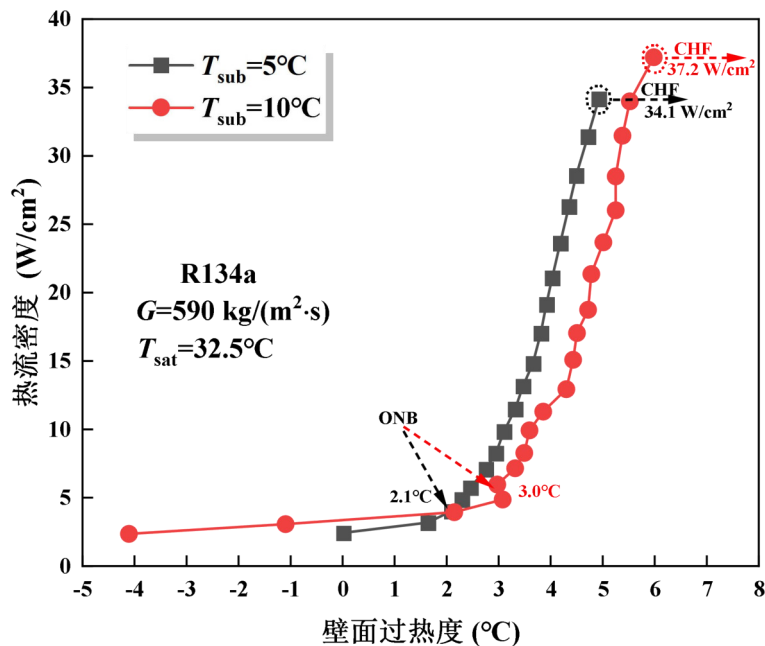
(a).光滑平行结构

(b).多孔平行结构

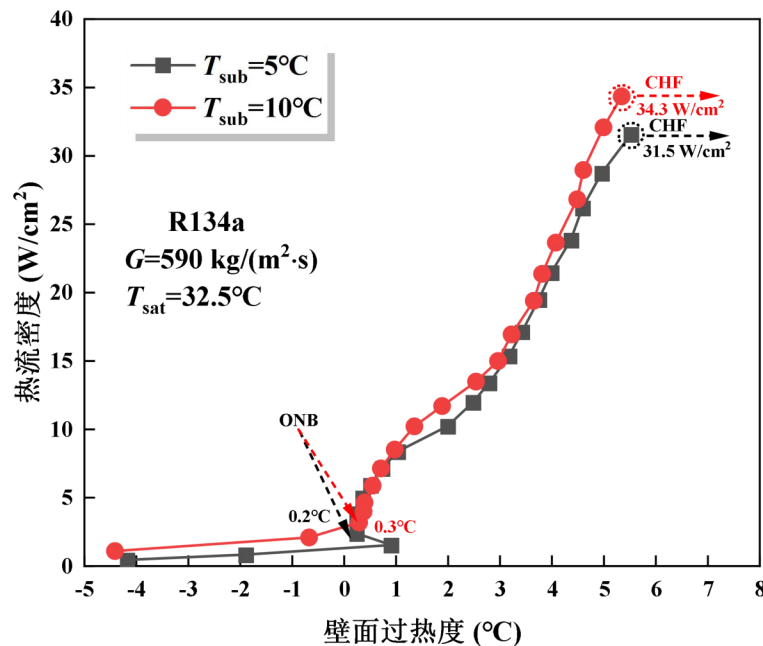
(c).多孔分段结构

- 光滑平行微通道热沉内高温区主要出现在靠近进出口集管的下游区域；
- 多孔平行结构微通道热沉内高温区主要出现在下游区域；
- 多孔分段微通道内最高温度出现在中心区域，与加热块的横截面温度分布一致。

➤ 沸腾曲线（不同过冷度）



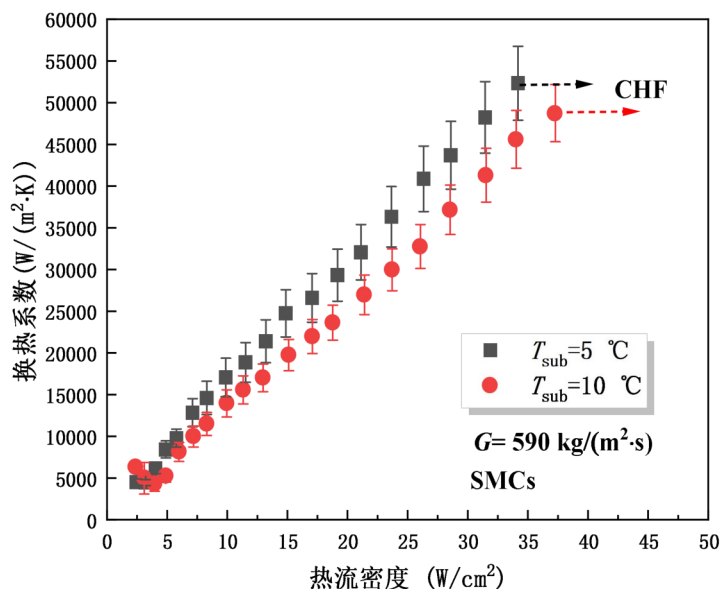
(a) 光滑平行微通道



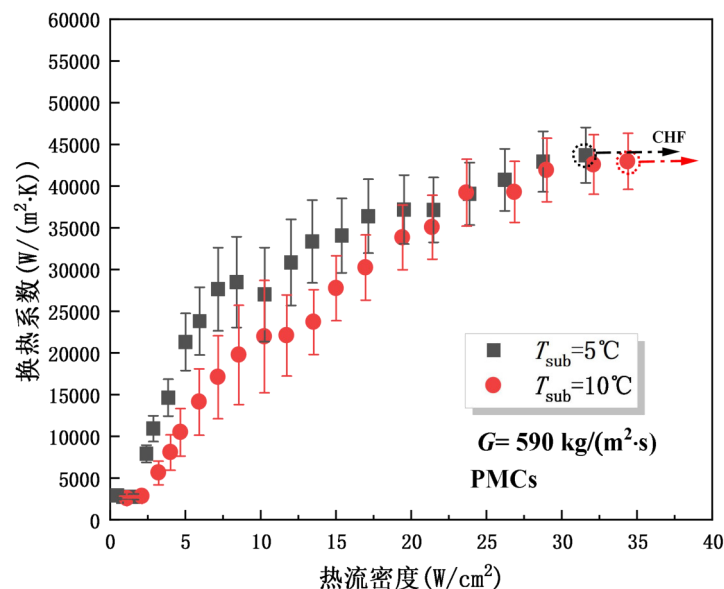
(b) 多孔平行微通道

- 高过冷度下沸腾起始点（ONB）所需壁面过热度增加，平行微通道内更显著；
- 临界热流密度随过冷度增加而提升，光滑结构内CHF略高。

➤ 流动沸腾换热系数（不同过冷度）



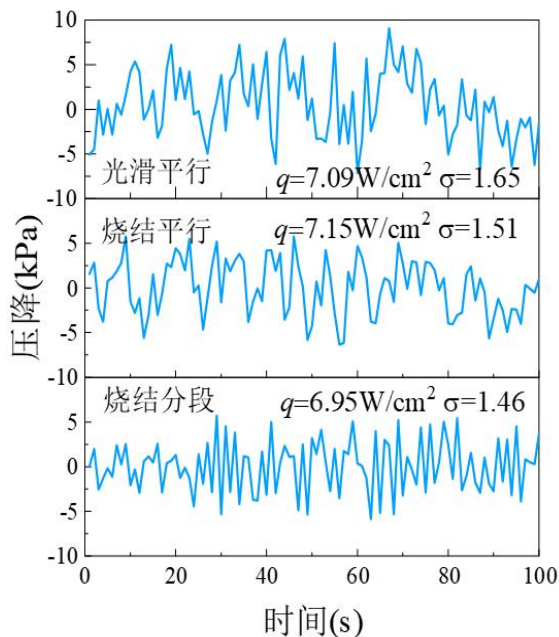
(a) 光滑平行微通道



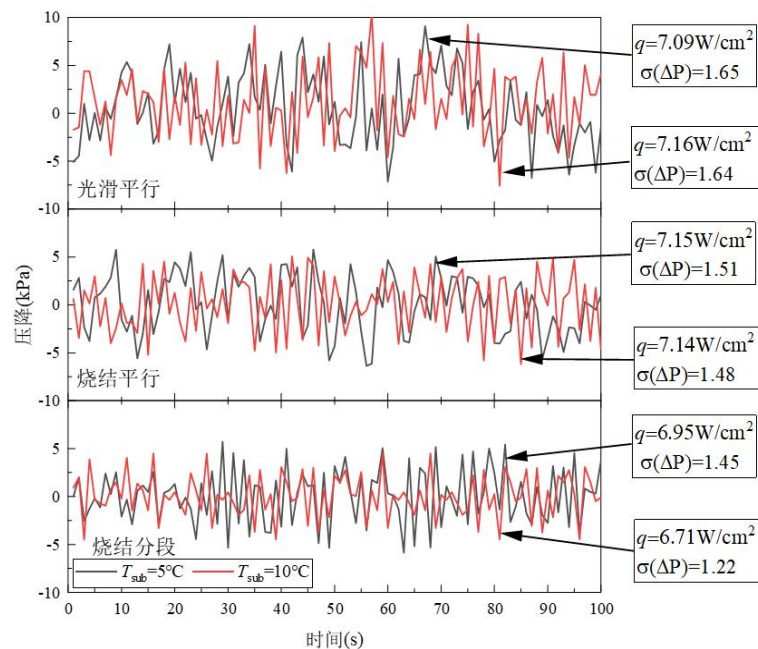
(b) 多孔平行微通道

- 低过冷度下换热系数较高；
- 光滑微通道冷板内，热流密度越高，低过冷度下换热系数增长更快；
- 多孔微通道冷板内，高热流密度下过冷度影响较小。

➤ 流动沸腾不稳定性



通道结构的影响

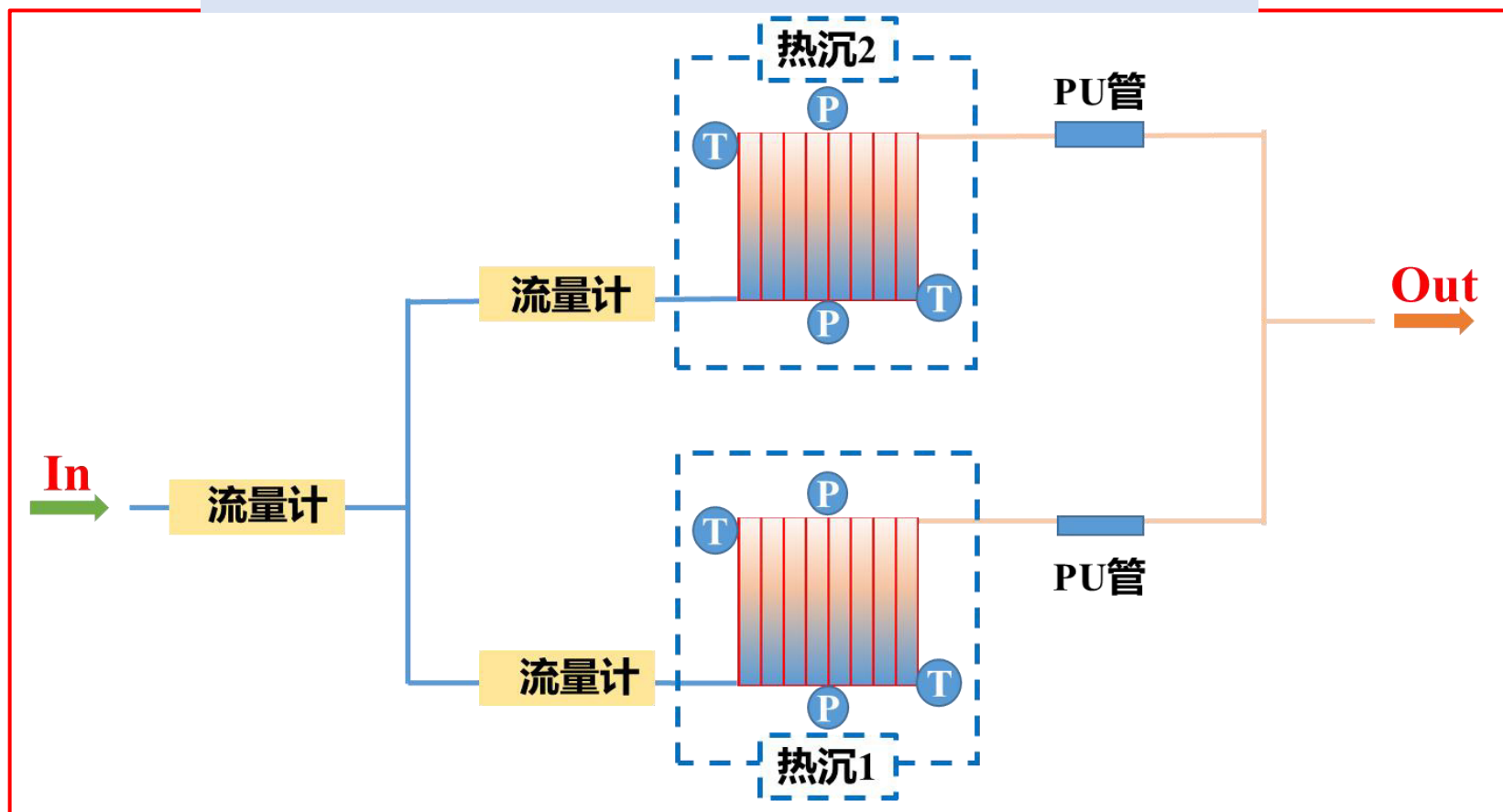


入口过冷度的影响

- 多孔微通道有效降低压降震荡不稳定性，较高的入口过冷度降低不稳定性震荡。

➤ 并联冷板两相热管理

并联冷板管路系统





感谢各位专家和同仁!

联系方式: 16622811335 (同微信)
zhangzhiqiang@tjcu.edu.cn