



以科技创新推进太阳能热发电产业化发展

2019第五届中国太阳能热发电大会

非均匀热流下槽式集热管内有机工质相变过程 流动沸腾换热特性研究



报告人：赵力

单位：中低温热能高效利用教育部重点实验室，天津大学

2019.08.21

1

研究背景与意义

2

典型流型和换热特性研究

3

流动不稳定性理论分析

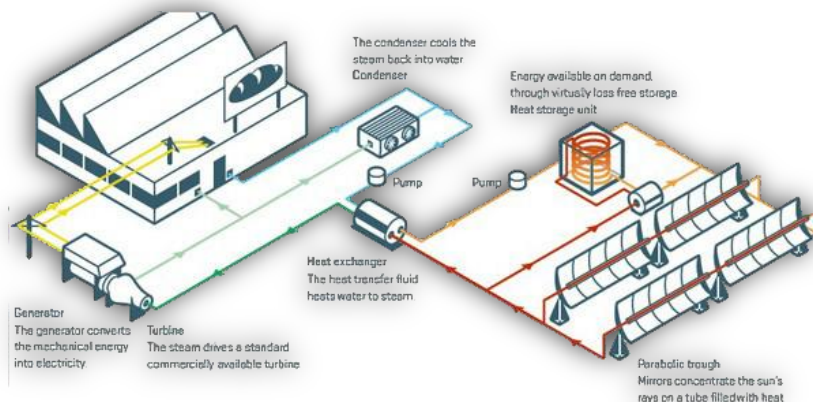
4

总结与展望

1. 研究背景与研究现状



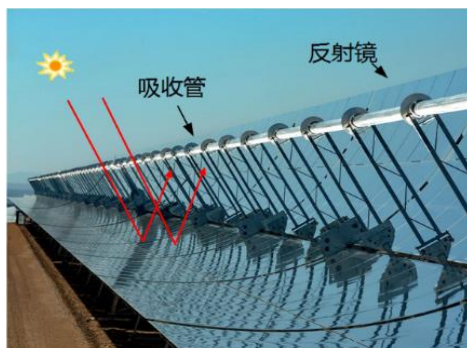
典型的分布式太阳能热发电系统



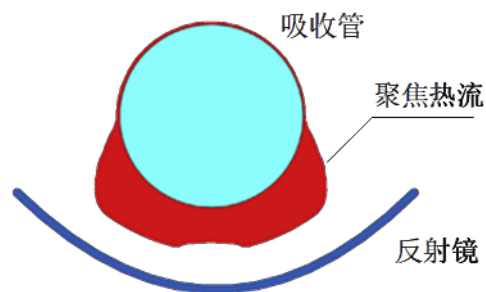
中低温太阳能



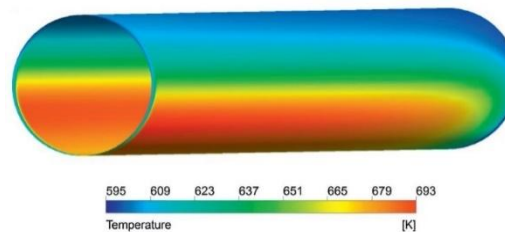
槽式集热器典型的非均匀热流



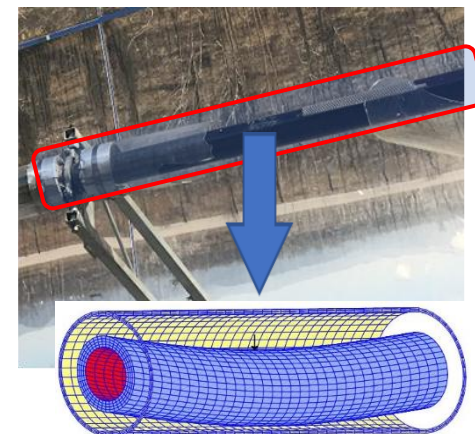
槽式集热器聚光过程



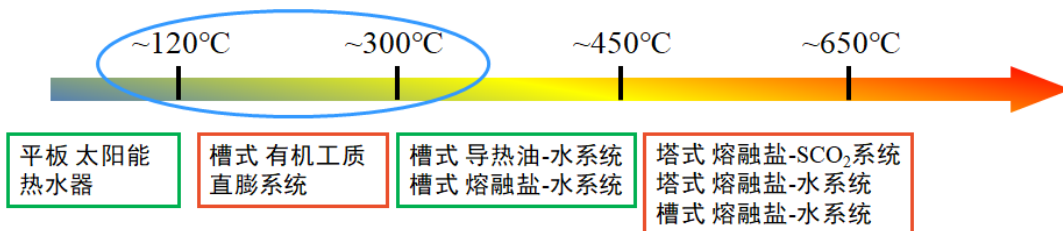
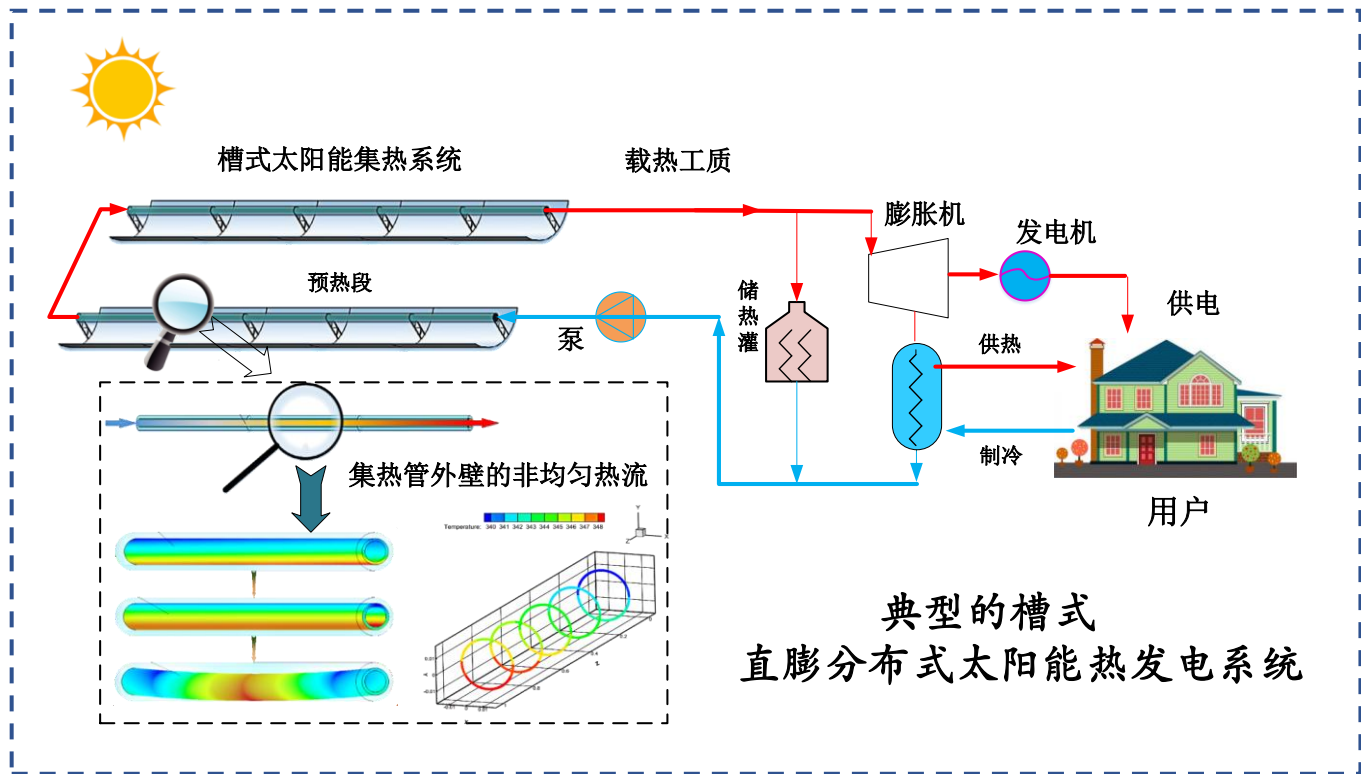
危害



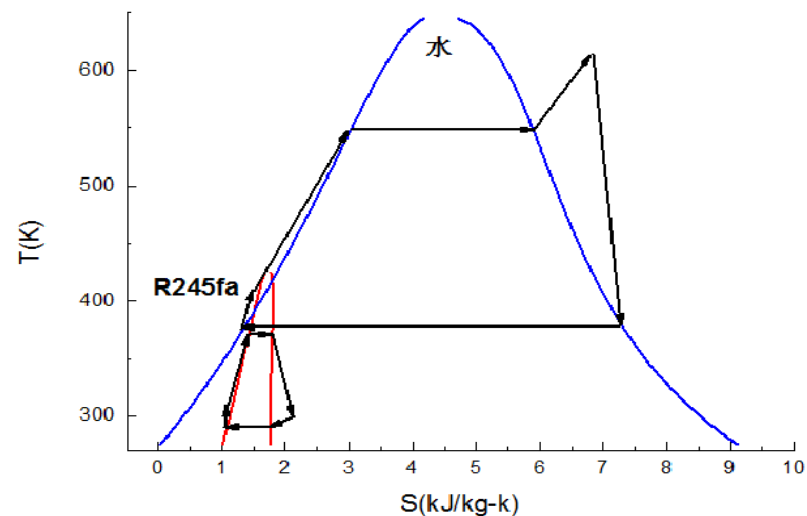
管壁非均匀温度场



1. 研究背景与研究现状

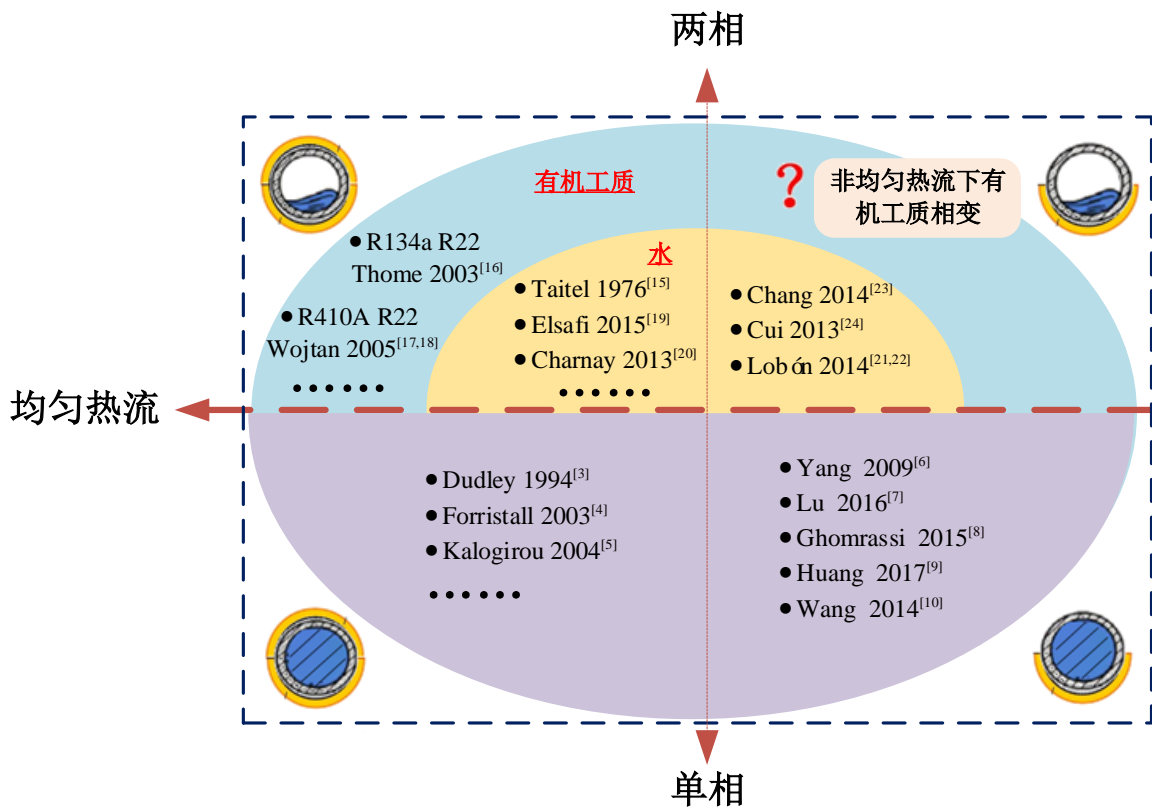


有机工质 R245fa 与水的朗肯循环 T-S 图



- ◆ **低沸点有机工质**作为动力循环工质会比水表现出更大的性能优势!
- ◆ **应用有机工质+槽式直膨系统**, 在分布式供能层面具有应用潜力!

1. 研究背景与研究现状



水平管内流体流动换热过程研究分布

非均匀热流 + 有机工质



槽式直膨系统
应用参考

针对有机工质的槽式直膨系统研究尚未得到重视!

1

研究背景与意义

2

典型流型和换热特性研究

3

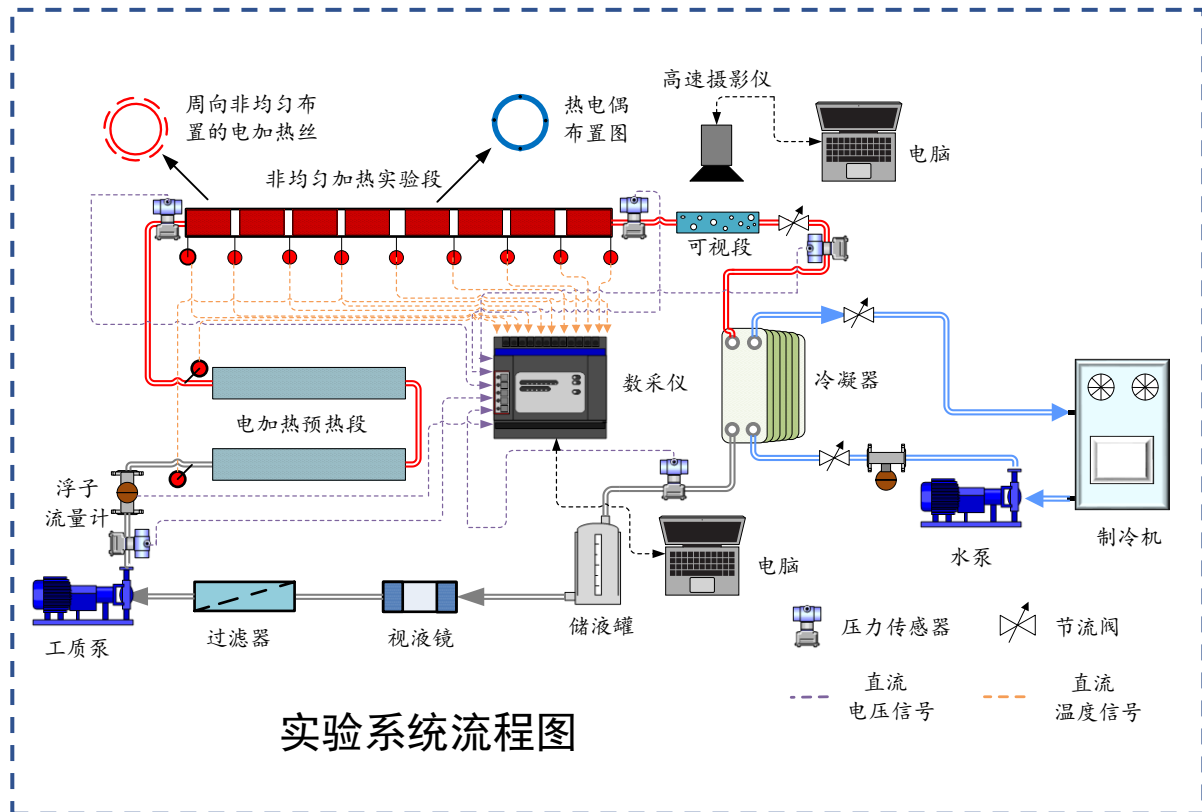
流动不稳定性理论分析

4

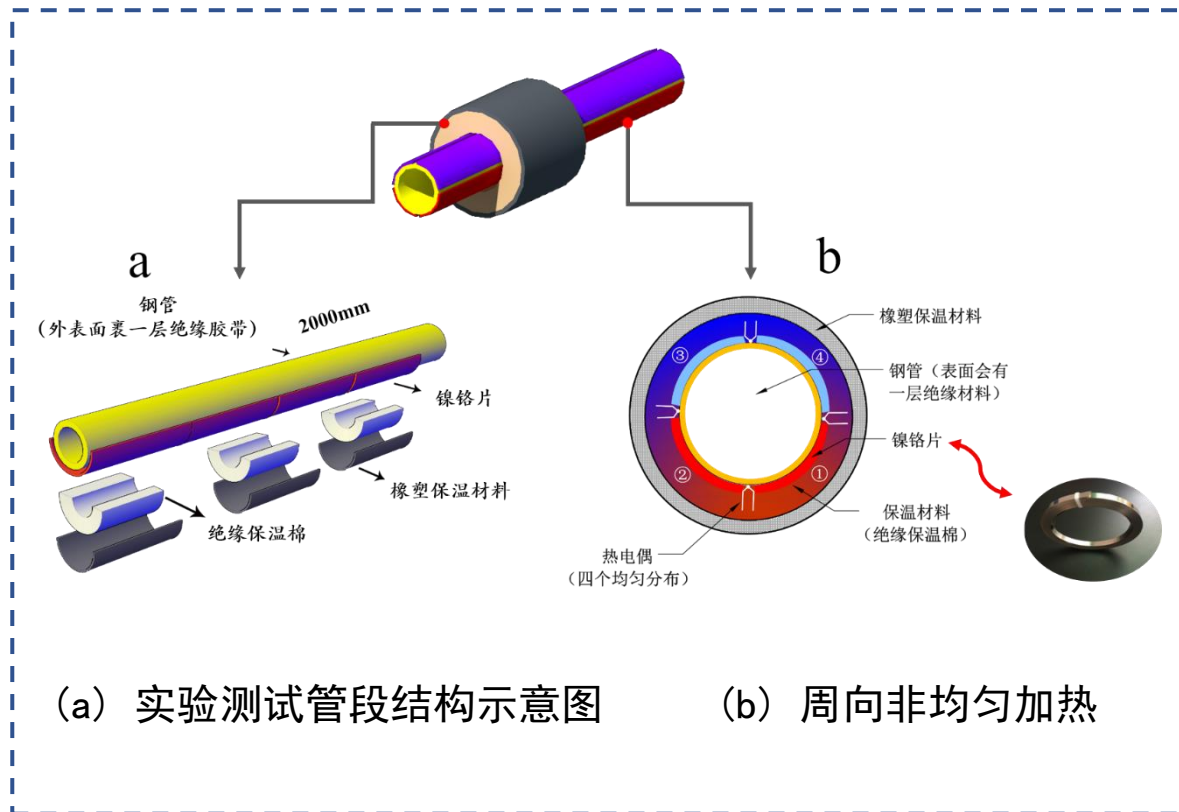
总结与展望

2. 典型流型和换热特性研究

实验台介绍



实验系统流程图



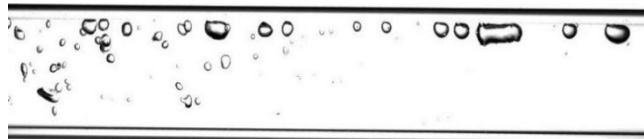
(a) 实验测试管段结构示意图

(b) 周向非均匀加热

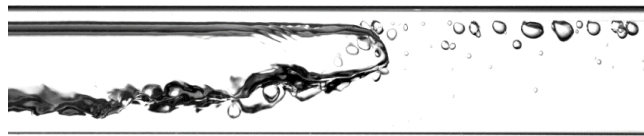
建立非均匀热流条件下水平管内流动沸腾换热电加热实验台。

2. 典型流型和换热特性研究

非均匀热流下典型流型分布 (工质R245fa)



(a) Bubbly flow
 $q=22.4\text{kw/m}^2$
 $G=192.9\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ $x=0.017$



(b) Bubbly-plug flow
 $q=22.4\text{kw/m}^2$
 $G=275.6\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ $x=0.083$

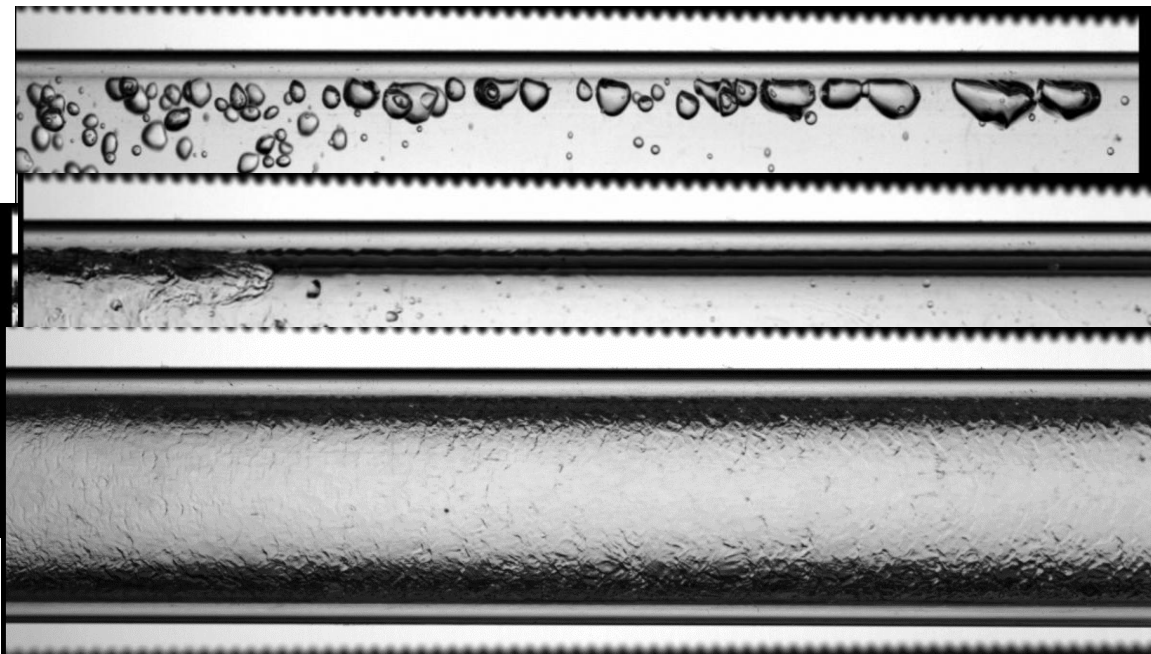


(c) Stratified-wavy flow
 $q=35.9\text{kw/m}^2$
 $G=192.9\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ $x=0.14$



(d) Annual flow
 $q=22.4\text{kw/m}^2$
 $G=275.6\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ $x=0.34$

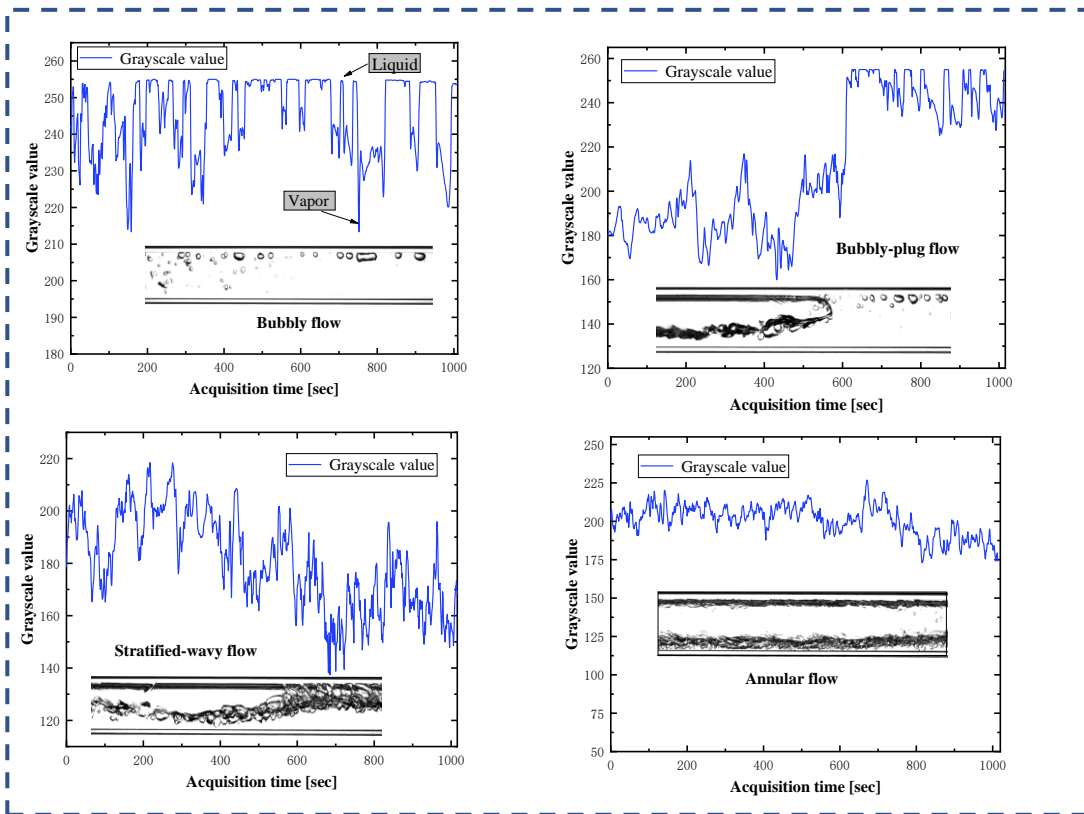
典型流型视频拍摄



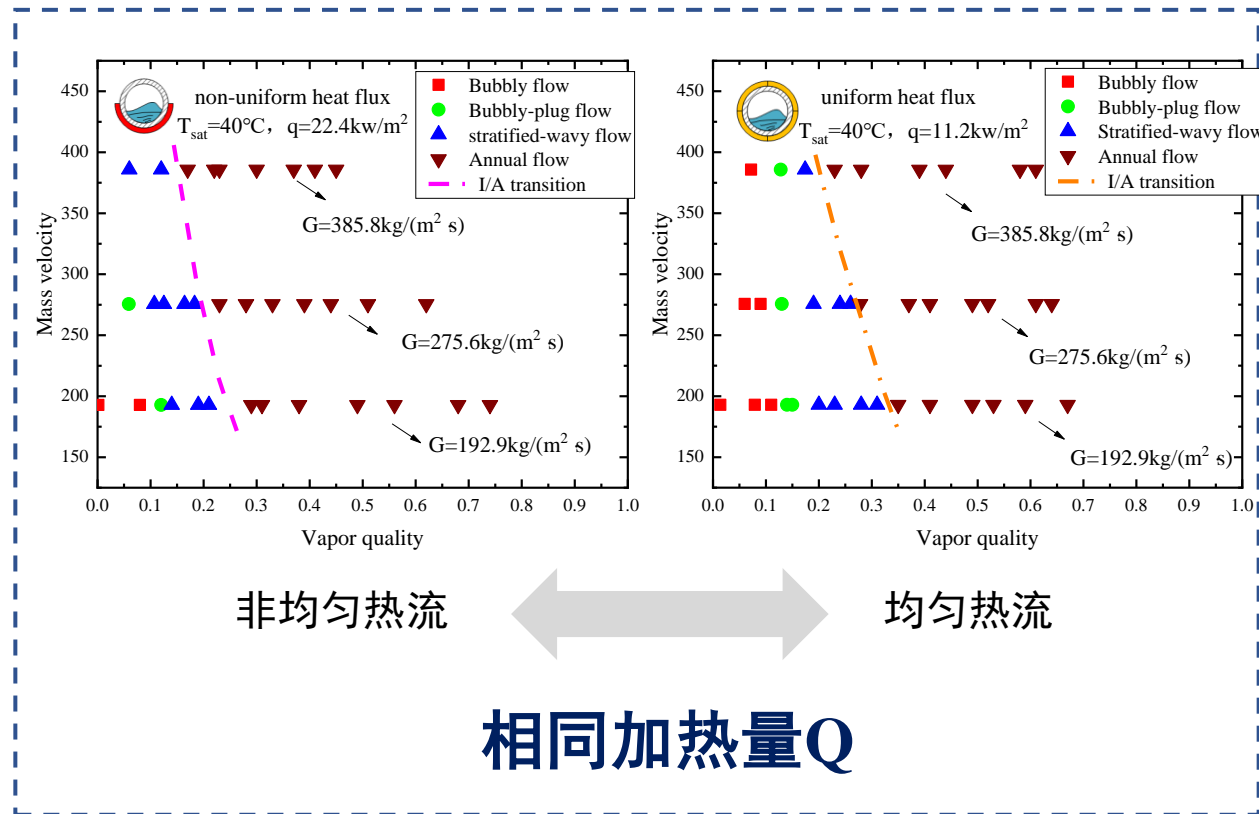
通过高速摄影技术识别出非均匀热流下水平管内：**泡状流、泡状-塞状流、分层一波状流、环状流**四种典型流型分布

2. 典型流型和换热特性研究

典型流型灰度值脉动序列图



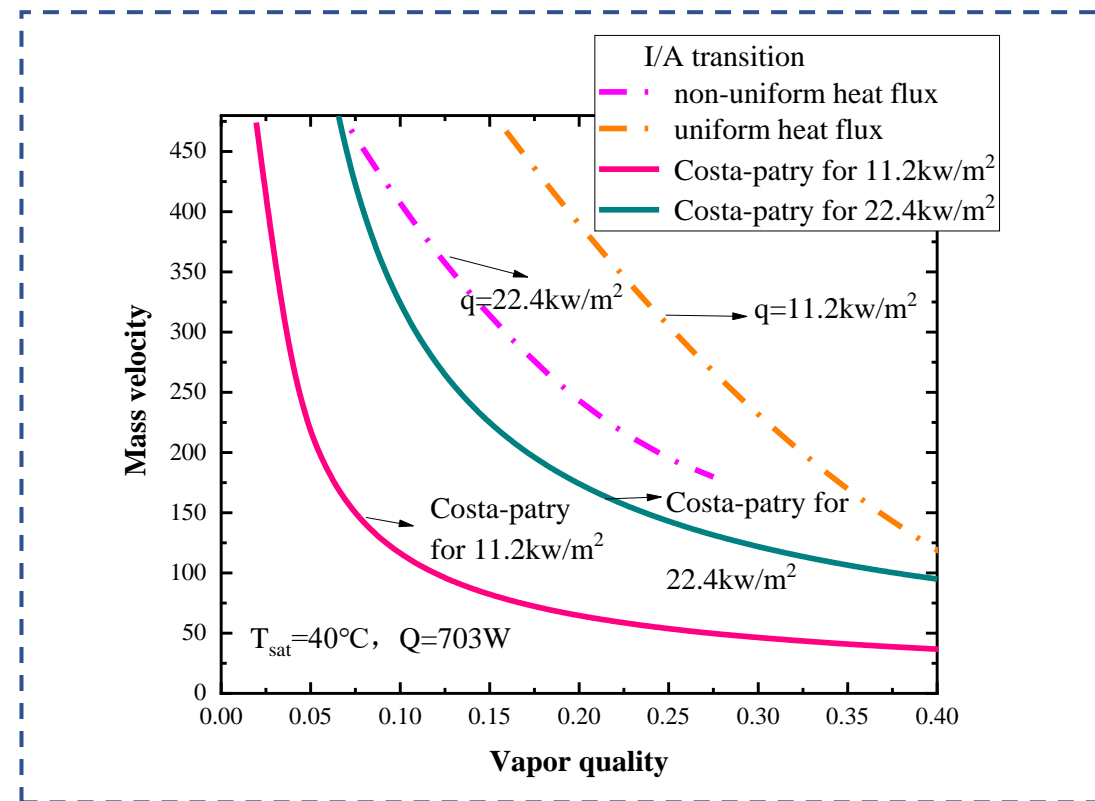
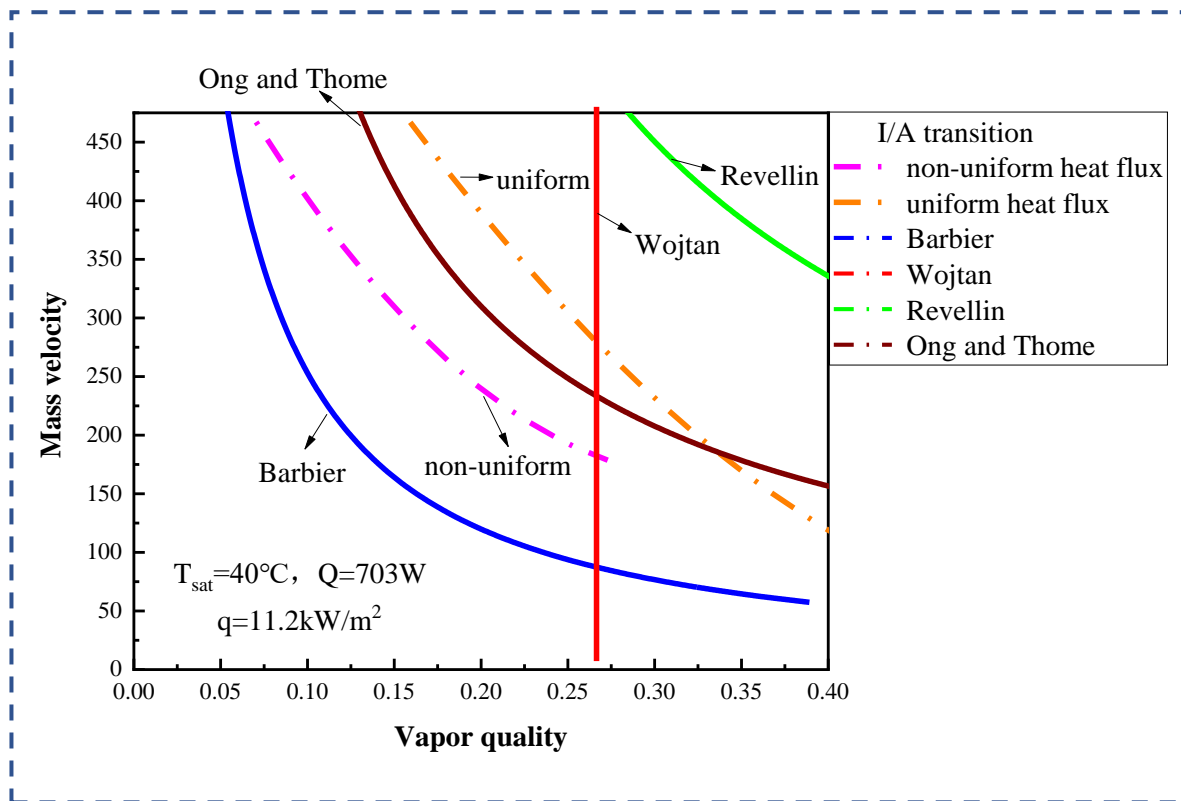
流型图



在不同的质量流速下，流型转变的起始干度有所不同，随着质量流速的增大，间隙流向环状流转换的干度逐渐减小。

2. 典型流型和换热特性研究

已有流型转换曲线做对比

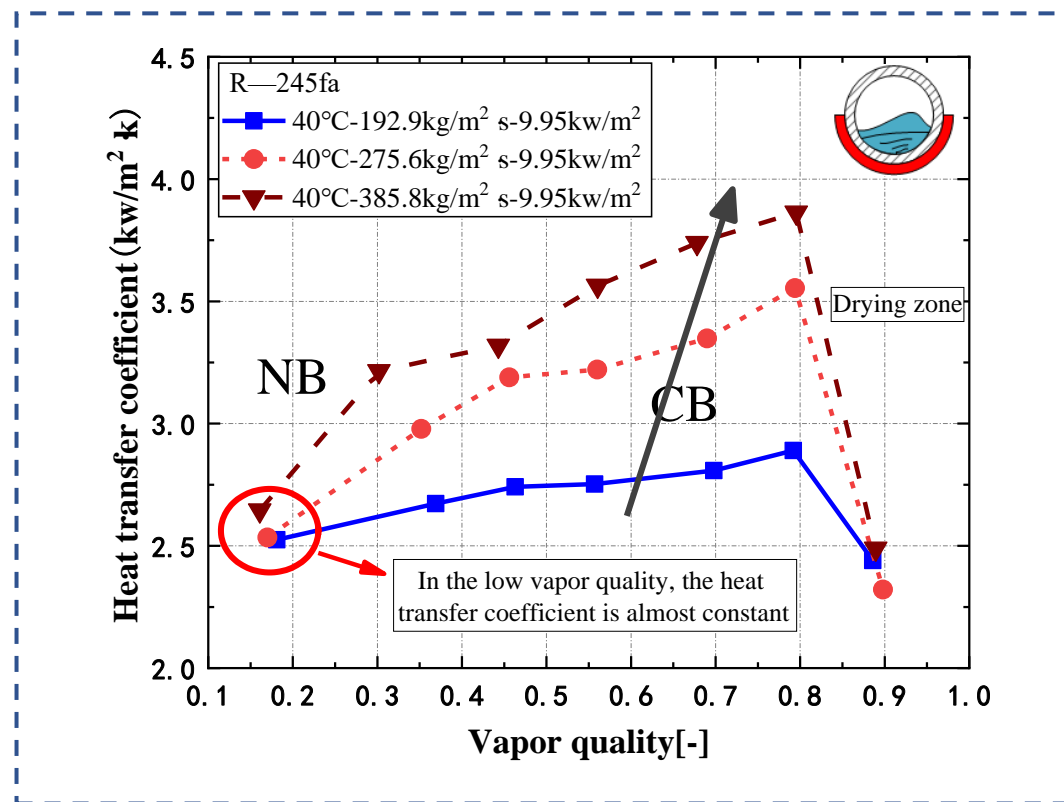


非均匀热流导致管内的流动不稳定性，加速了间歇流向环形流的过渡！

2. 典型流型和换热特性研究

非均匀热流下沸腾换热特性

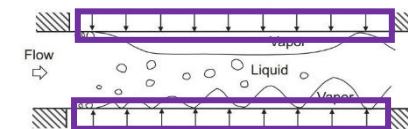
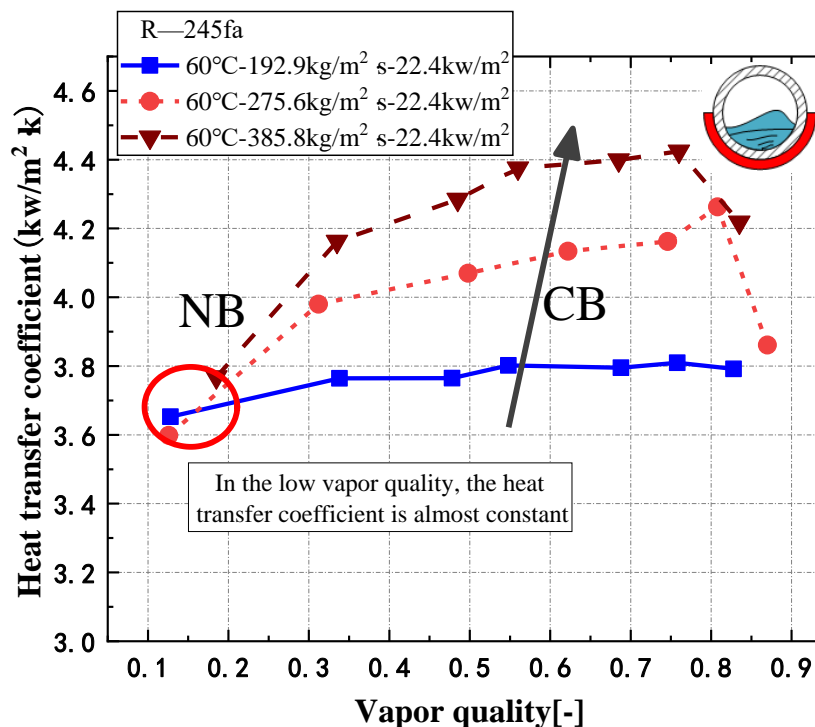
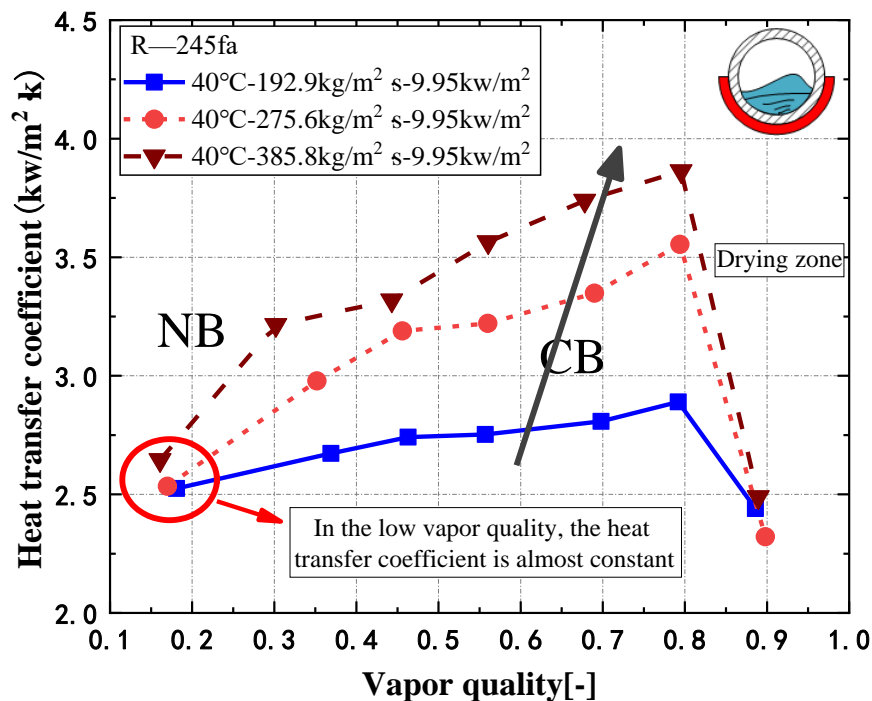
| 类别 | 饱和温度 T_{sat} °C | 热流密度 q kW/m ² | 质量流速 G kg/(m ² ·s) |
|-------|----------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 变热流密度 | 40 | 9.95, 22.4, 35.9 | 275.6 |
| | 60 | 9.95, 22.4, 35.9 | 275.6 |
| 变质量流速 | 40 | 9.95 | 192.6, 275.6, 385.8 |
| | 40 | 22.4 | 192.6, 275.6, 385.8 |
| | 60 | 35.9 | 192.6, 275.6, 385.8 |
| 变饱和温度 | 40, 60 | 22.4 | 257.6 |
| | 40, 60 | 35.9 | 385.8 |



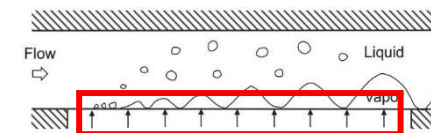
随着干度的增加，**换热系数呈先增大后减小的趋势！**

2. 典型流型和换热特性研究

① 变质量流速对换热系数的影响



均匀加热

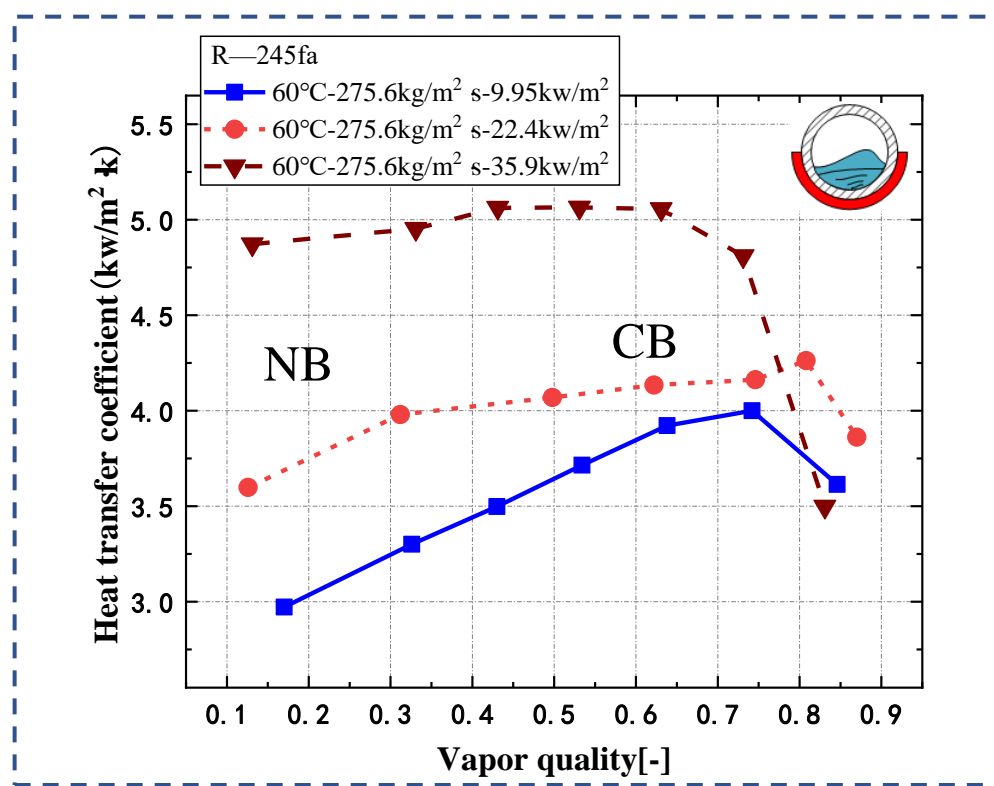
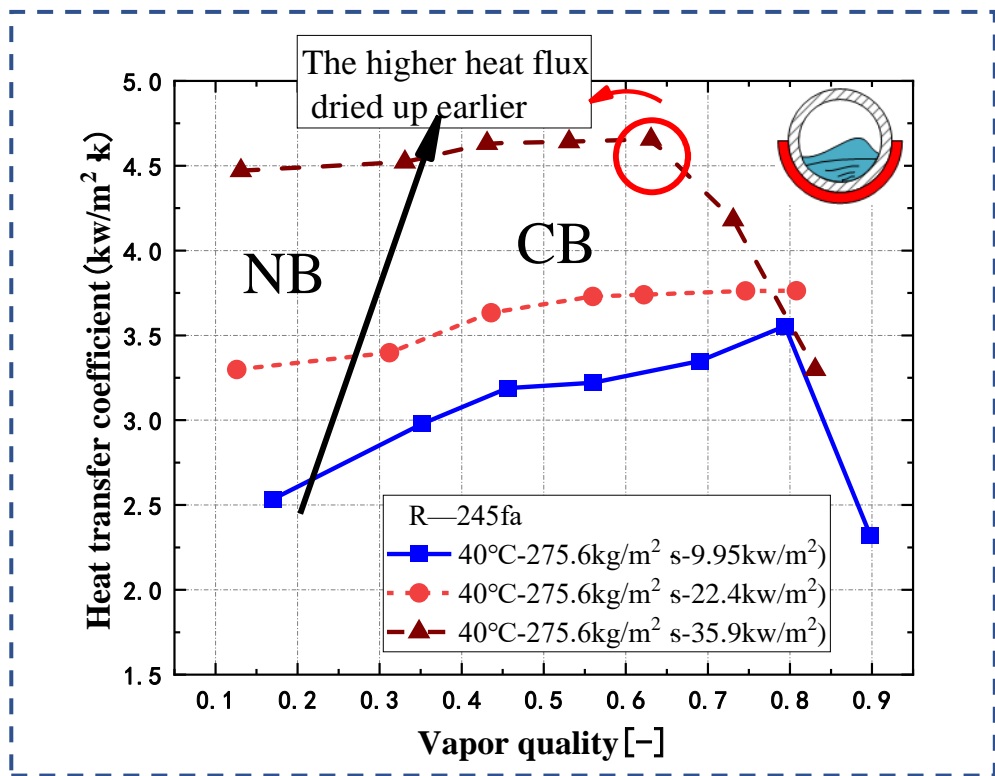


非均匀加热

非均匀热流提高气泡的产生速率，因此两相沸腾换热主要受气泡作用的影响，核态沸腾占主导作用，在低干度下增加质量流速对换热系数几乎没有影响。

2. 典型流型和换热特性研究

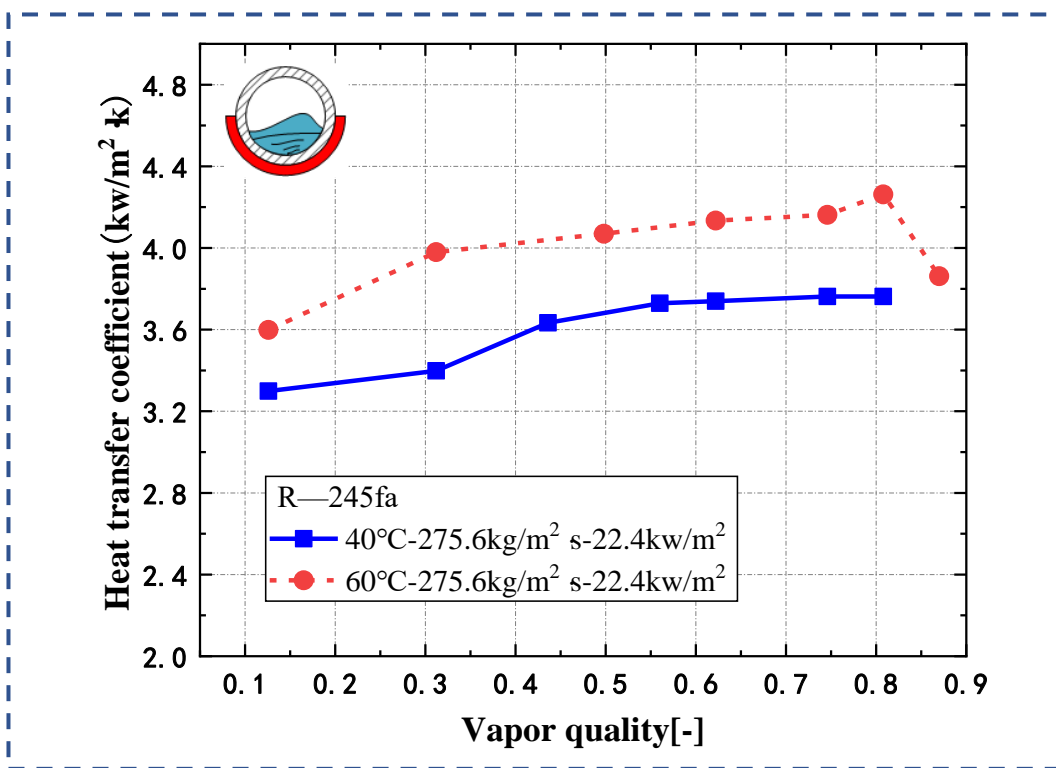
② 变热流密度对换热系数的影响



较大的热流密度伴随着较高的壁面过热度，容易形成更多的汽化核心，气泡生成的速率和脱离壁面的频率随之增大，核态沸腾显著增强。

2. 典型流型和换热特性研究

③ 变饱和温度对换热系数的影响



根据克拉贝龙公式—产生半径为 R 的气泡所需的过热度:

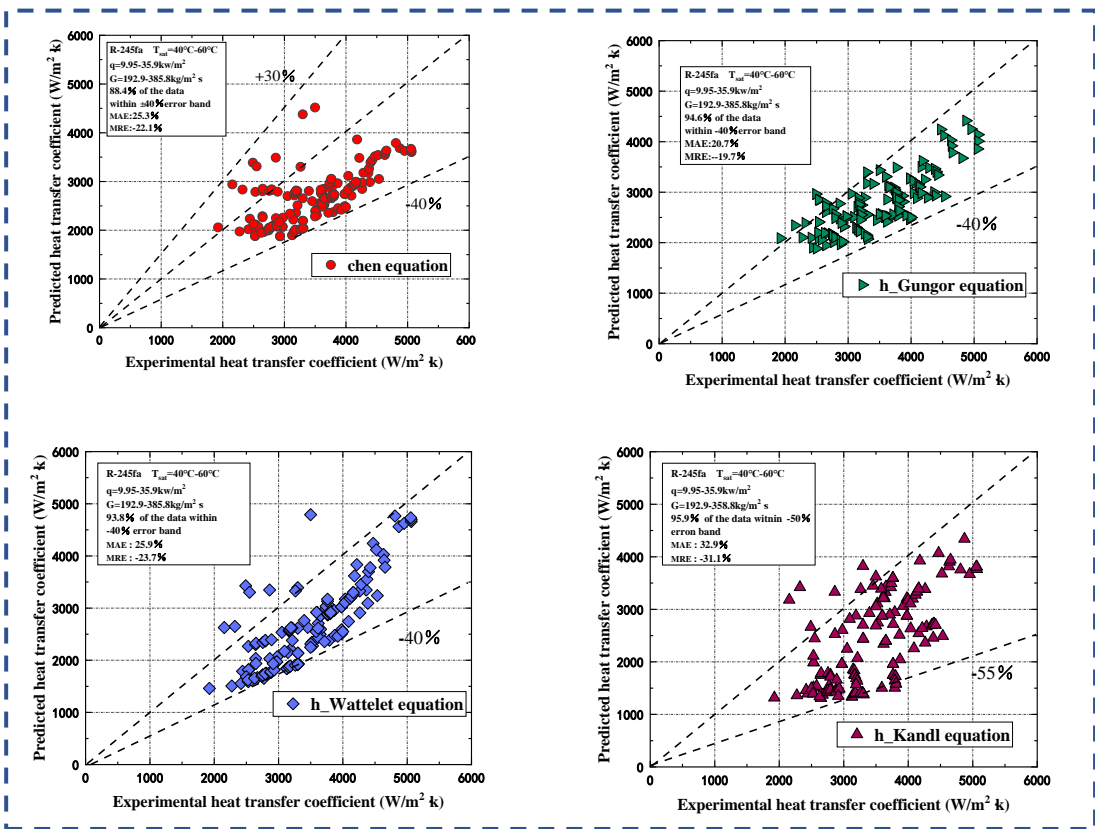
$$\Delta T = \frac{2\sigma T_{\text{sat}}}{h_r \rho_v R}$$

| 饱和温度 °C | 表面张力 N/S | 气相密度 kg/m ³ | 汽化潜热 J/kg | 所需过热度 °C |
|------------|-------------|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| 40 | 0.01212 | 14.124 | 1.8114×10 ⁵ | 3.789×10 ⁻⁶ /R |
| 60 | 0.00959 | 25.679 | 1.6775×10 ⁵ | 2.671×10 ⁻⁷ /R |

饱和温度增大，产生气泡所需的过热度减少，此时汽化核心增多，换热系数增加。

2. 典型流型和换热特性研究

已有关联式对实验结果的预测性



| 公式类型 | 公式名称 | 公式形式 |
|------|---------------------|--|
| 叠加型 | Chen 公式 | |
| | Gungor-Winterton 公式 | $h_{tp} = Fh_{cb} + Sh_{nb}$ |
| 渐进型 | Wattelet 公式 | $h_{tp} = \left[(Fh_{cb})^{5/2} + h_{nb}^{5/2} \right]^{2/5}$ |
| 增强型 | Kandikar 公式 | $h_{tp} = \max(h_{cb}, h_{nb})$ |

这四个关联式均是在均匀热流的边界条件下建立的，而与均匀加热相比，**非均匀热流**更有利于气泡的产生，**加热效率更高**，因此沸腾换热系数更大。

2. 典型流型和换热特性研究

新关联式的建立

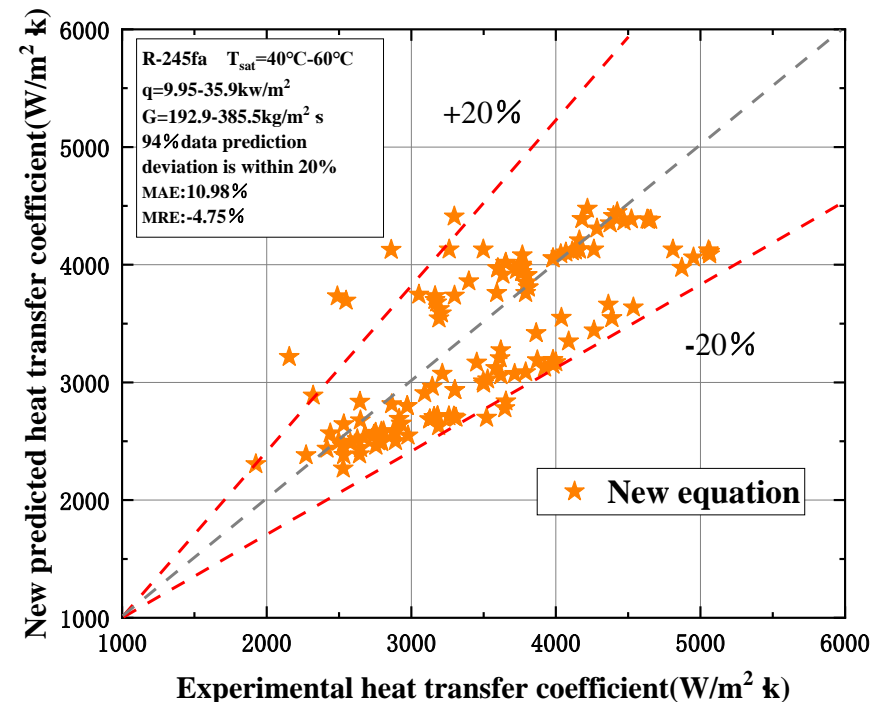
$$h_{tp} = Fh_{cb} + Sh_{nb} \qquad h_{cb} = 0.023 Re_l^{0.8} Pr_l^{0.4} \frac{\lambda}{d}$$

$$S = (A + B * F^C * Re_l^L)^M \qquad h_{nb} = 55 Pr^{0.12} (-\log_{10} P_r)^{-0.55} M^{-0.5} q^{0.67}$$

A, B, C, L, M—待定系数

系数拟合结果:

| A | B | C | L | M |
|-------|-----------------------|------|-------|-------|
| 1.027 | 5.85×10^{-8} | 1.54 | 1.382 | -3.75 |



新关联式对于94%的数据预测偏差在±20%以内，其中新关联式计算值与实验数据的平均预测偏差为-4.75%，绝对平均偏差分别为10.98%。

1

研究背景与意义

2

典型流型和换热特性研究

3

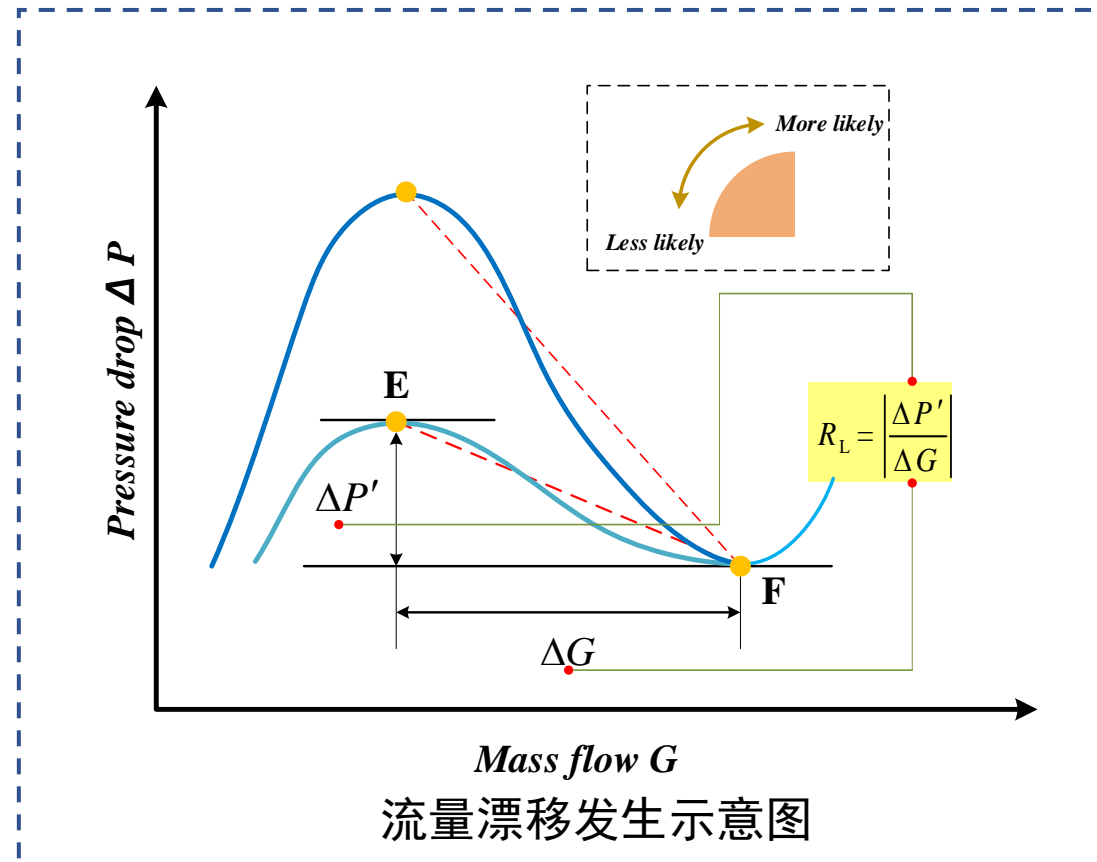
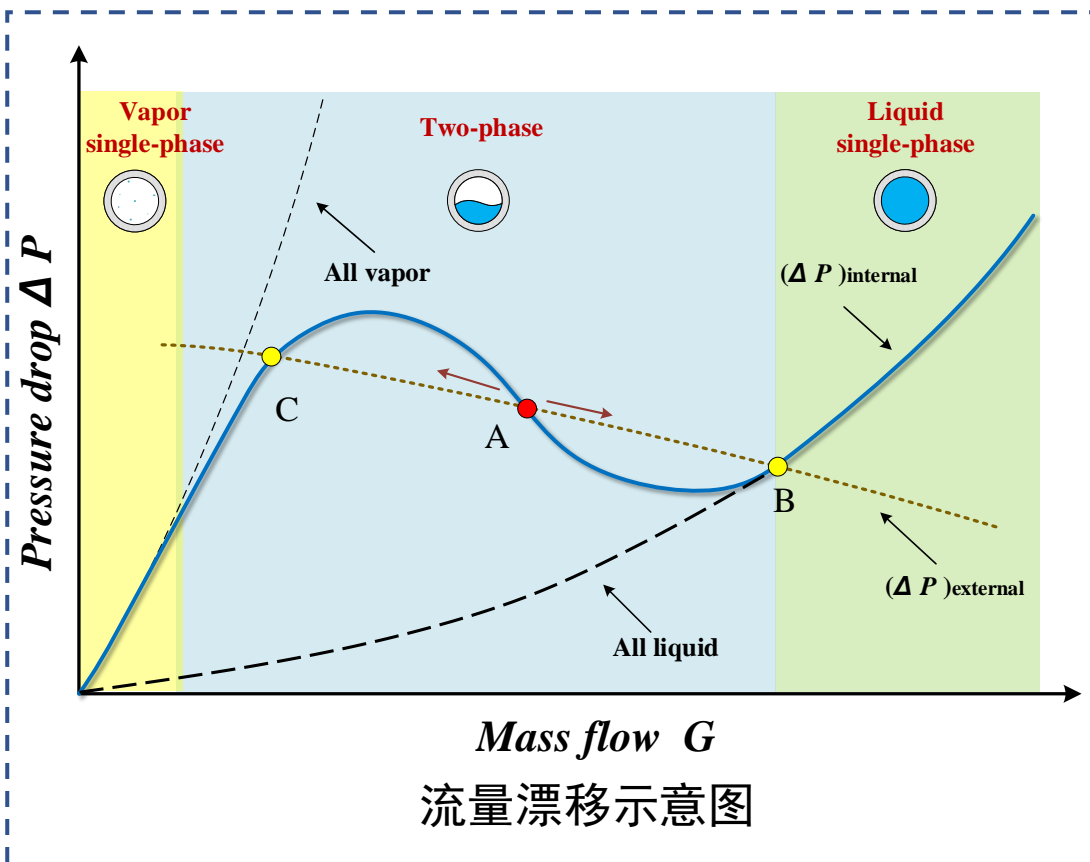
流动不稳定性理论分析

4

总结与展望

3. 流动不稳定性理论分析

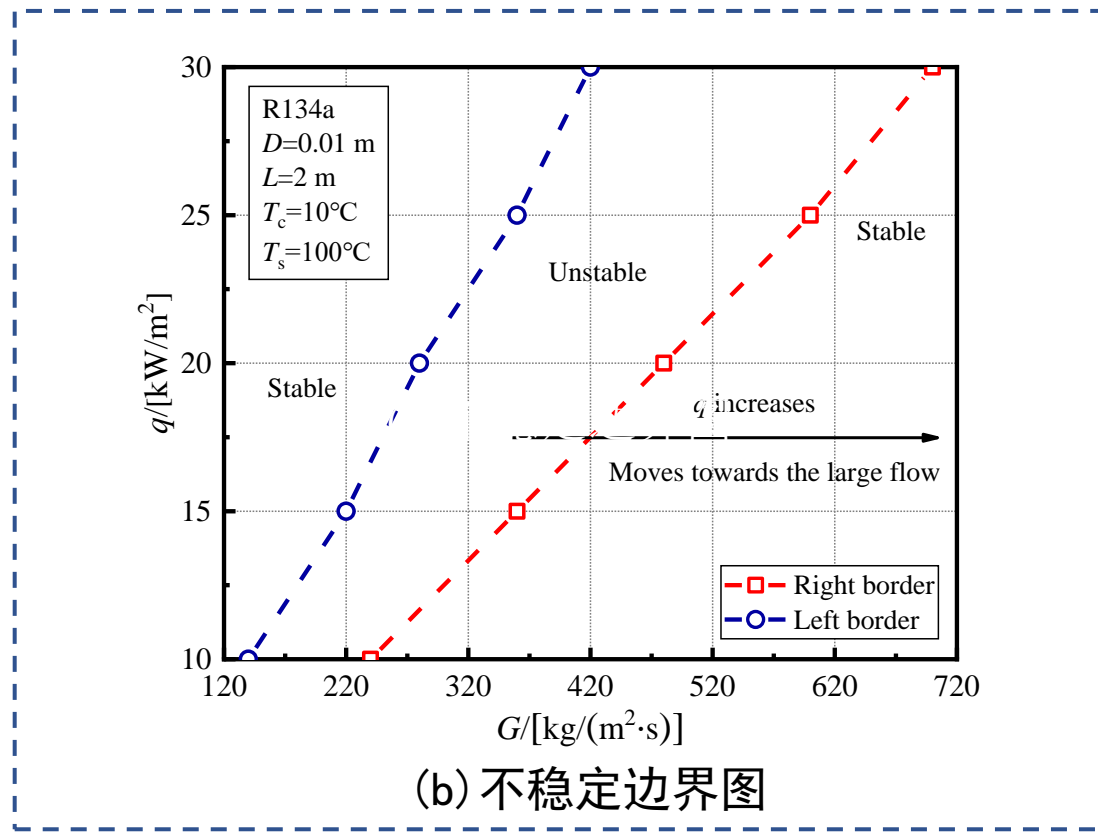
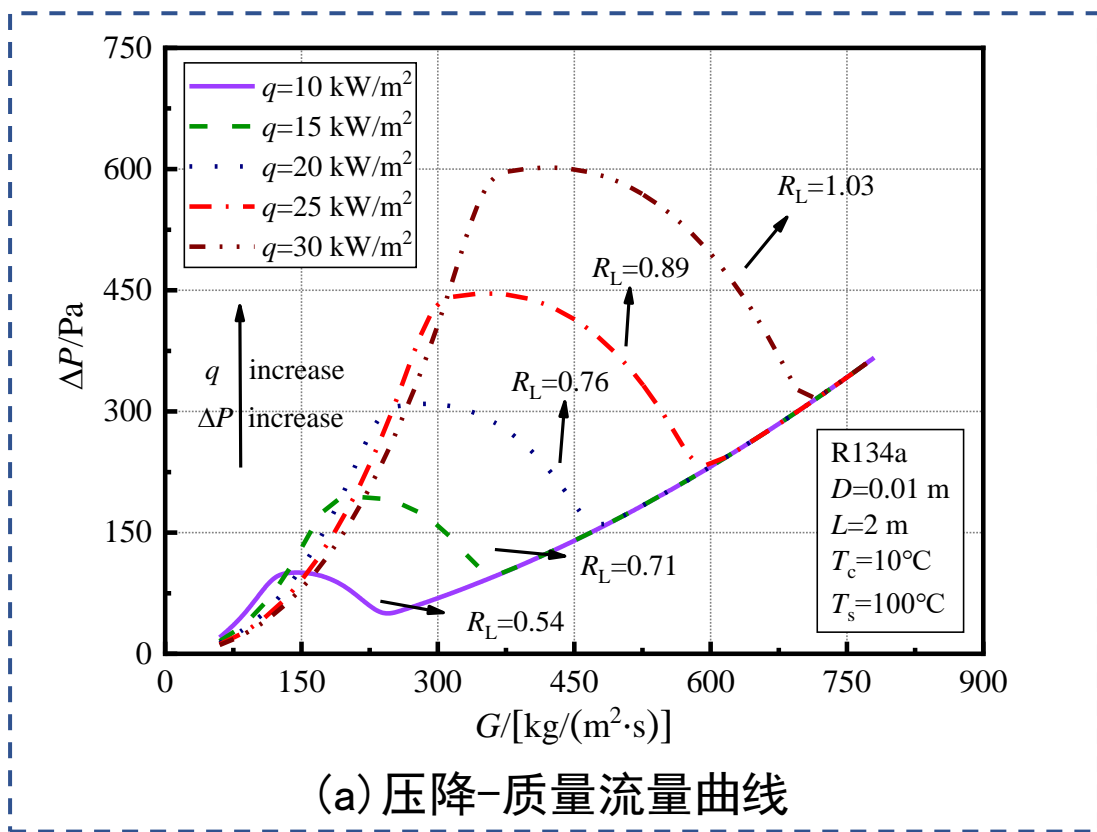
水平管内有机工质两相流动流量漂移研究



建立了流体流动的一维稳态模型，对发生**流量漂移**的影响因素进行分析。

3. 流动不稳定性理论分析

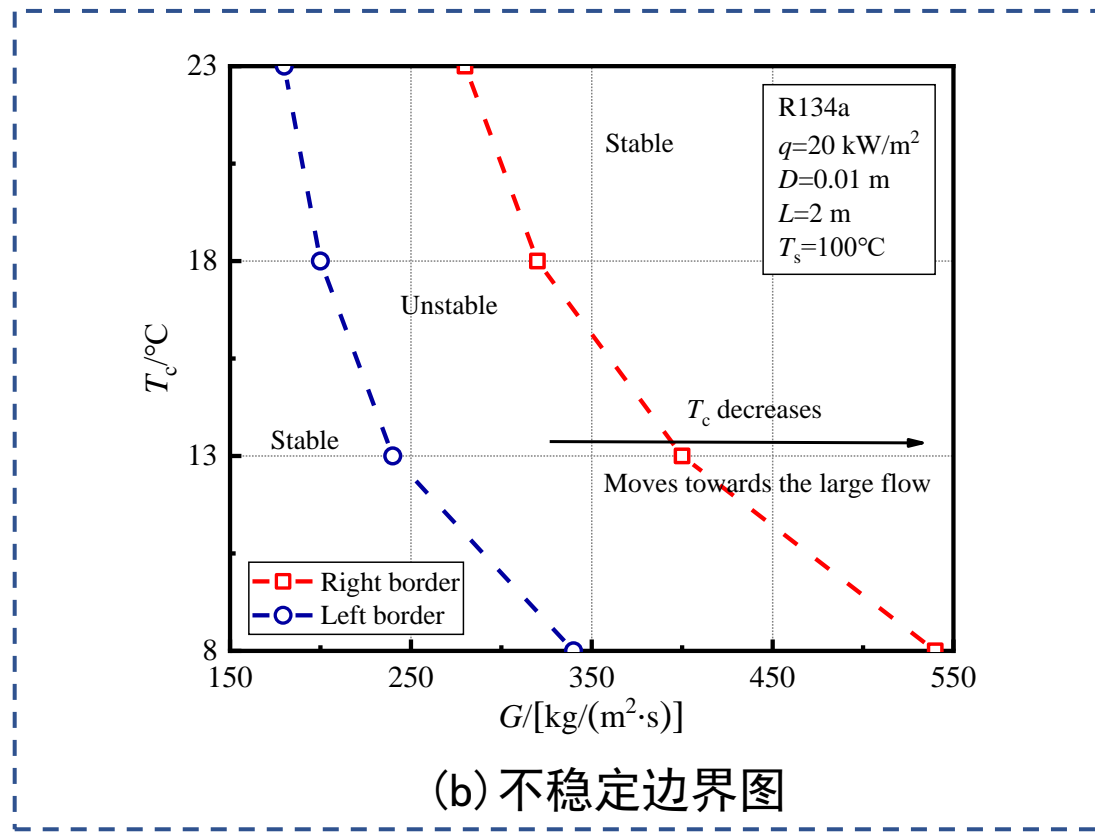
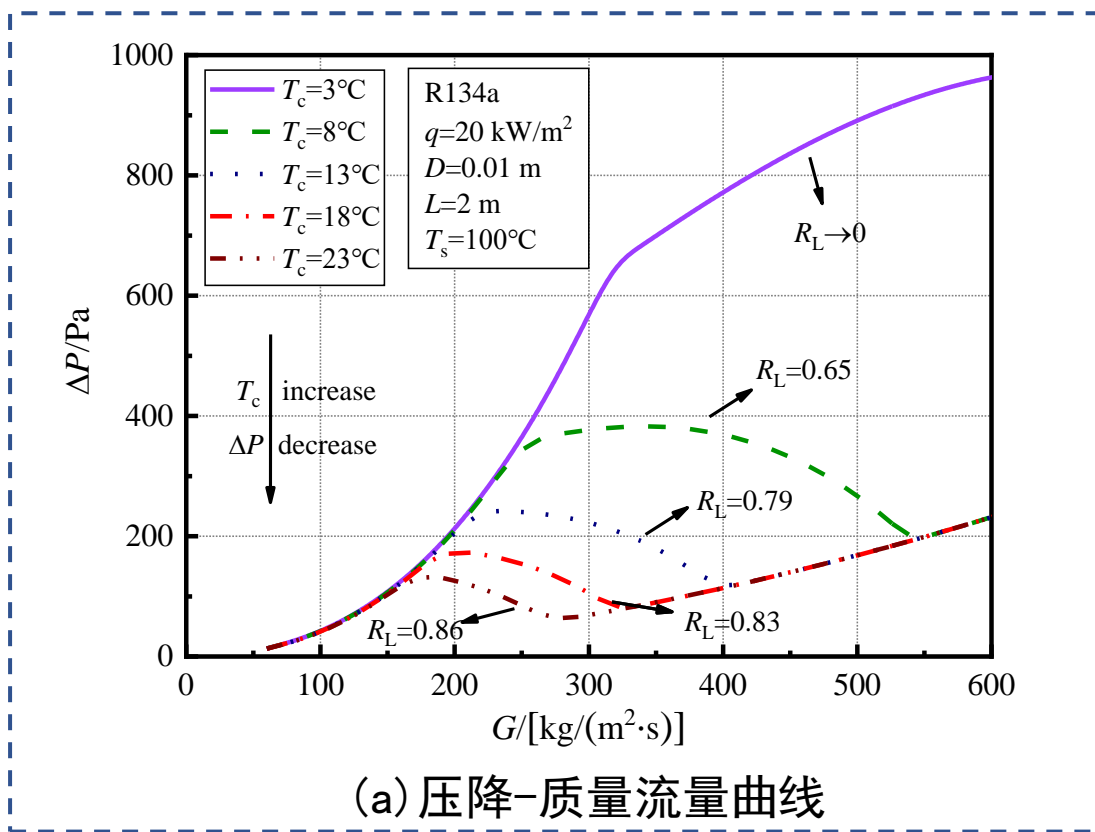
R134a在不同热流密度下的Ledinegg不稳定性



热流密度越强，压降越大，但在水平管中热流密度对N的影响很小。

3. 流动不稳定性理论分析

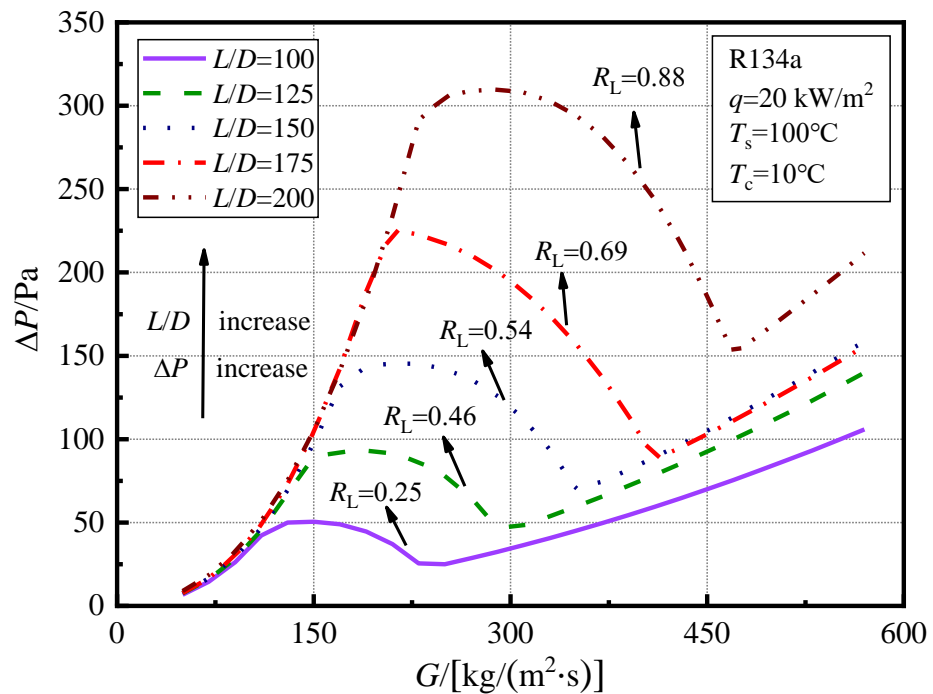
R134a在不同入口过冷度下的Ledinegg不稳定性



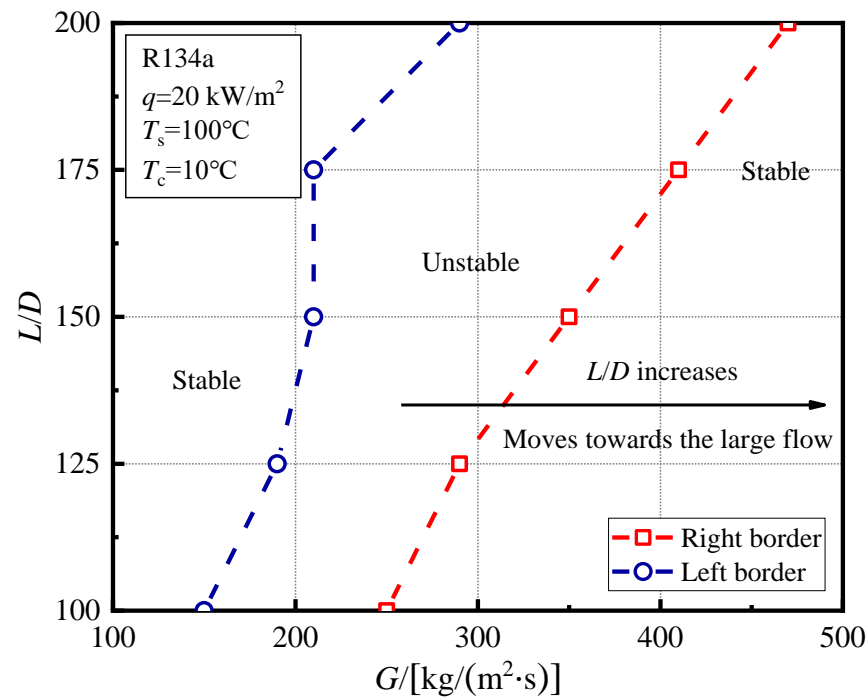
入口过冷度减小，压降增大，N变小，系统越稳定。

3. 流动不稳定性理论分析

R134a在不同长径比下的Ledinegg不稳定性



(a) 压降-质量流量曲线

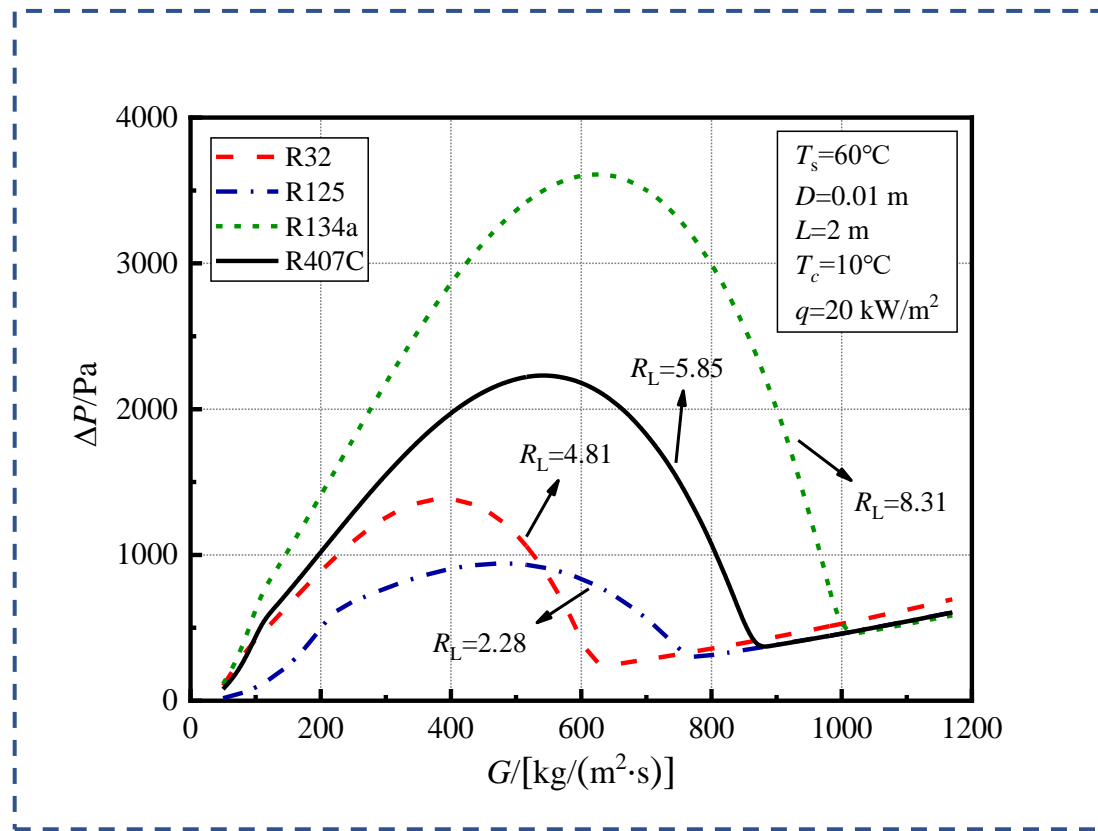
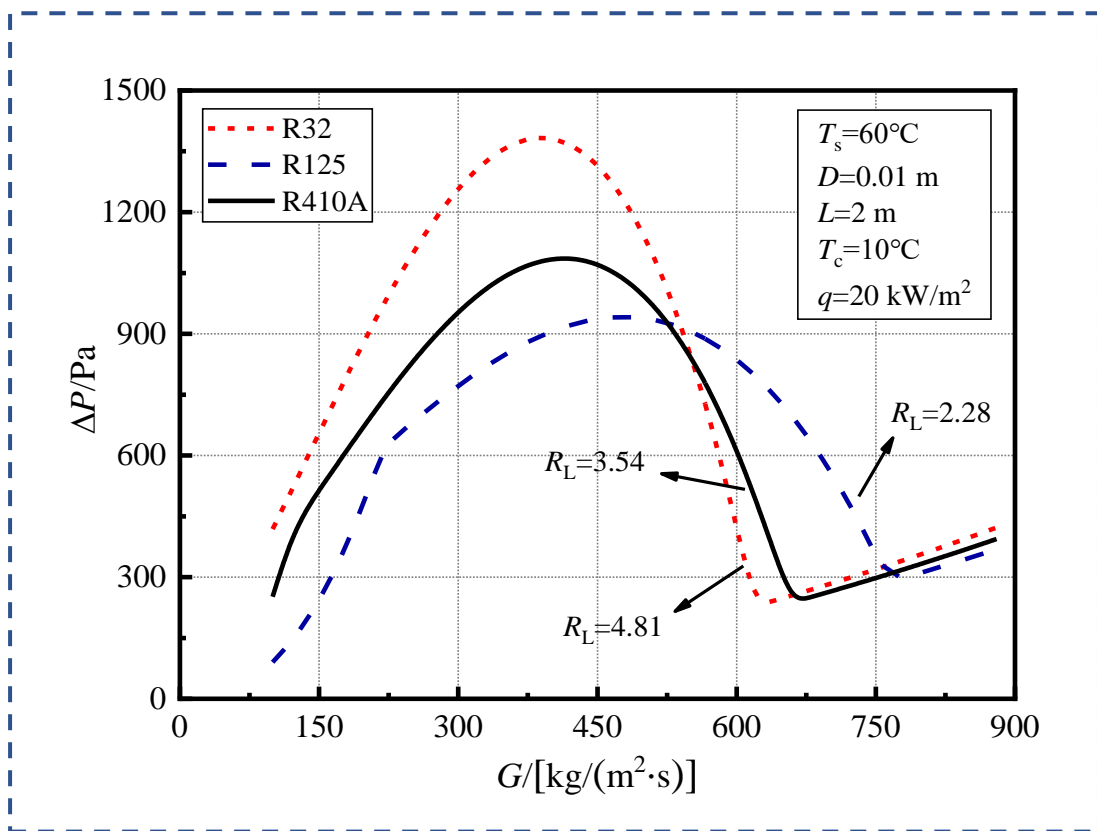


(b) 不稳定边界图

长径比减小，压降减小，N减小，压降特性曲线趋于平缓，系统越稳定。

3. 流动不稳定性理论分析

不同有机工质的压降-质量流量特性曲线



混合工质R410A和R407C R_L 的关系分别是：**R32>R410A>R125、**
R134a>R407C>R32>R125

1

研究背景与意义

2

典型流型和换热特性研究

3

流动不稳定性理论分析

4

总结与展望

4.总结与展望

总 结

➤ 在非均匀热流条件下，观察到水平管内有机工质**四种典型的流型**分布，在流型图上**I/A的转换曲线**要比均匀加热在更低的干度条件下发生。

➤ 对非均匀热流下水平管内有机工质沸腾换热特性，分析了**干度、质量流速、热流密度**和**饱和温度**对换热系数的影响，并基于**实验数据**提出了新的换热系数关联式。

在水平集热管中，建立了流体流动的一维稳态模型，提出**表征流量漂移可能性的L**，分析了有机工质R134a的**流量漂移**特性。

4. 下一步工作计划

➤ 非均匀热流下水平管内有机工质相变过程管壁温度场的优化

研究**有机工质物性**（粘度、导热系数等）对其相变过程的影响；研究**非共沸有机工质温度滑移特性**对管壁温度场的影响。

➤ 热量分布对流量漂移的影响

周向**热量分布不均匀**（单调递增、单调递减等）时，纯工质（混合工质）的**流量漂移规律**，分析比较其与均匀热量分布的不同

➤ 混合工质流量漂移规律

探究**近共沸工质**和**非共沸工质**发生流量漂移的相同点和不同点，及混合工质与其组元的关系



以科技创新推进太阳能热发电产业化发展

2019第五届中国太阳能热发电大会

谢谢各位专家
敬请批评指正



报告人：赵力

jons@tju.edu.cn



中低温热能高效利用教育部重点实验室（天津大学）

Key Laboratory of Efficient Utilization of Low and Medium Grade Energy, MOE, Tianjin University