



空调管路中冷媒流动噪音的产生机制研究

丁国良

上海交通大学制冷与低温工程研究所 教授

制冷空调换热器技术联盟

理事长

Email: glding@sjtu.edu.cn

2022-01-08



目 录



1. 研究背景



2. 管路内冷媒流型变化的实验研究



3. 管路内冷媒流型变化的模拟研究



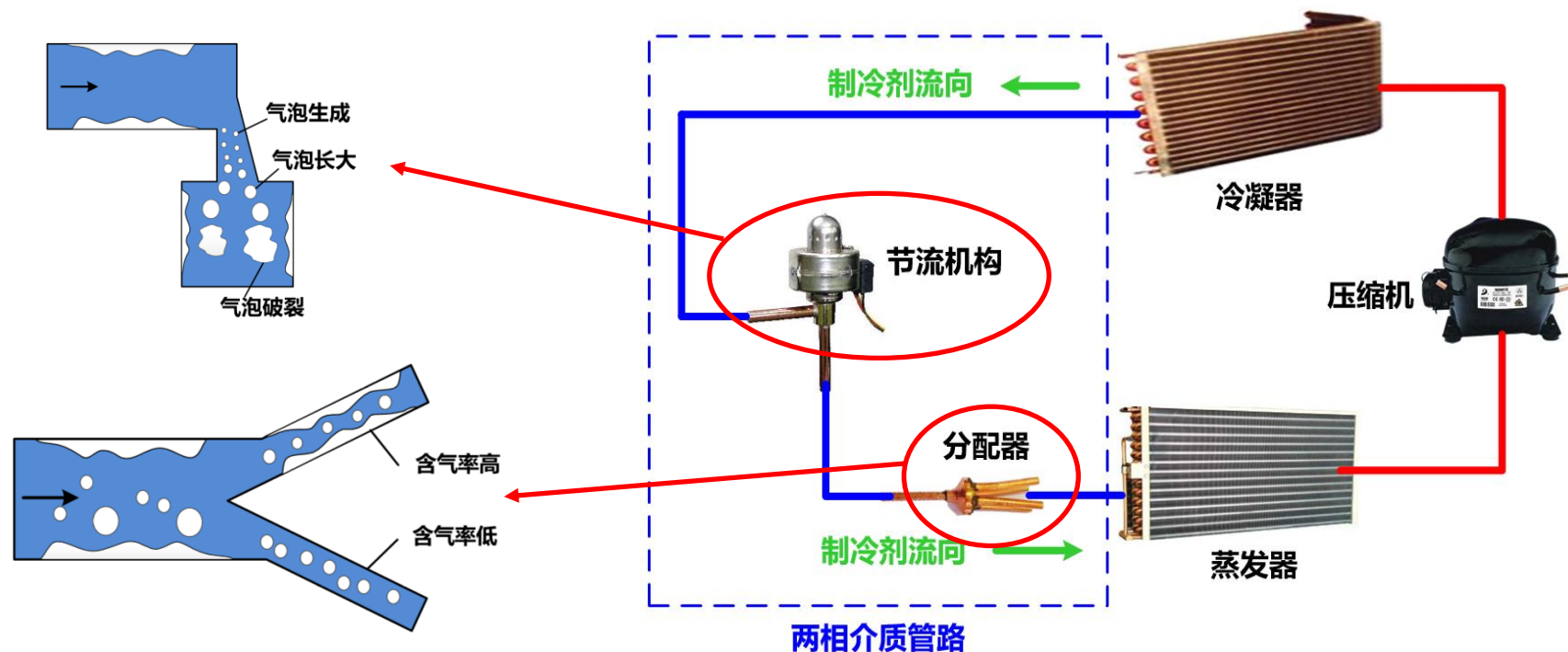
4. 冷媒节流过程的相变空化模拟研究



5. 典型节流元件的流动噪音分析

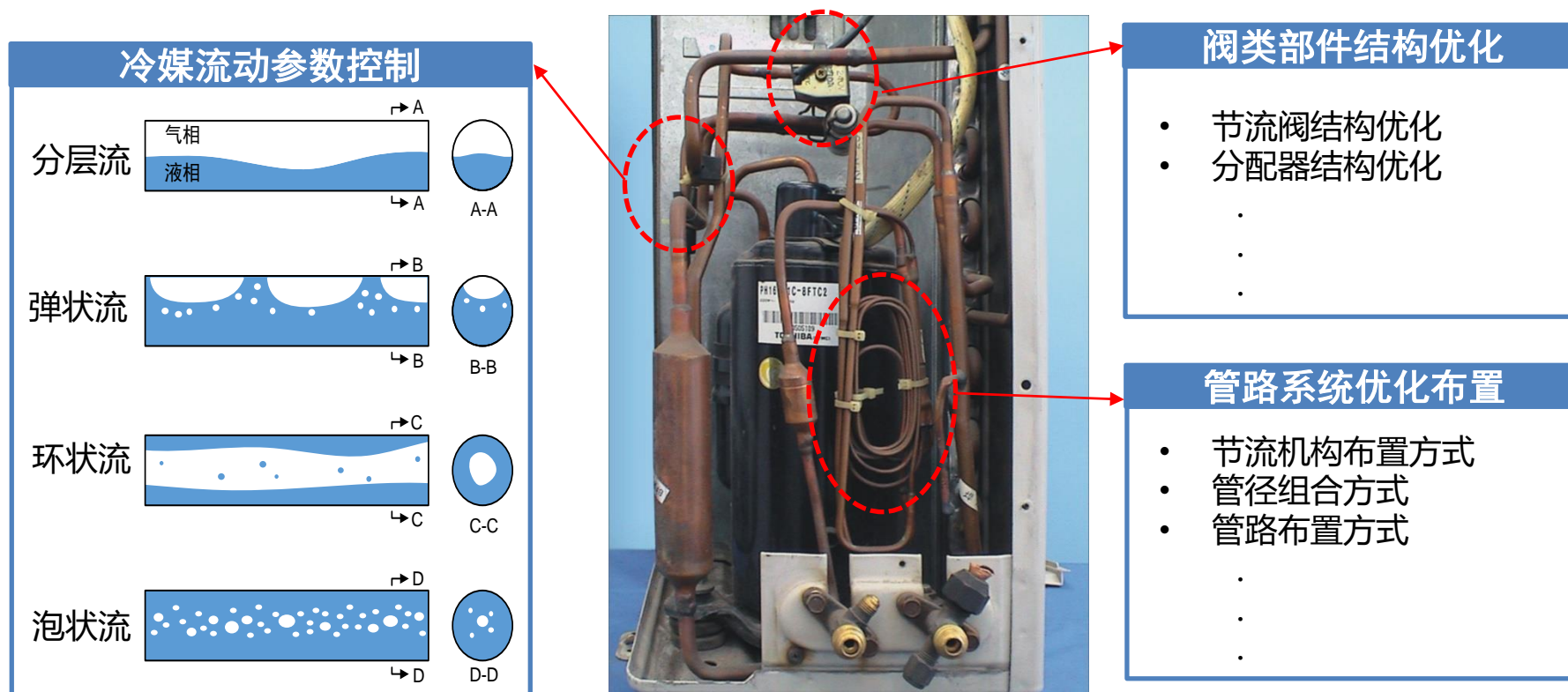
1.1 空调管路内存在冷媒流动异音问题

- **冷媒流动异音的表现形式多样**：从冷凝器出口到蒸发器进口这一段管路中，制冷剂始终处于两相状态，两相冷媒在流动中会遇到突缩、突扩、分路、台阶、拐弯等障碍，使得气泡的形成、长大和破裂过程复杂，导致流动噪音的表现形式多样化。
- **降低冷媒异音的前提是了解两相制冷剂流动噪音产生机理**：包括节流流动噪音机理、分流流动噪音机理等。



1.2 解决冷媒流动噪音问题需要开展的研究

- **冷媒流型变化规律**：掌握不同工况下冷媒在管路中的流型特征，获得流型与噪音的关系。
- **复杂相变的机理**：掌握节流过程中冷媒相变空化的机制，获得冷媒相变与噪音的关系。
- **流动噪音的降噪思路**：从单体阀类部件结构优化、整个管路系统结构优化、以及冷媒流动参数控制三个层面上综合考虑降噪改进方法。

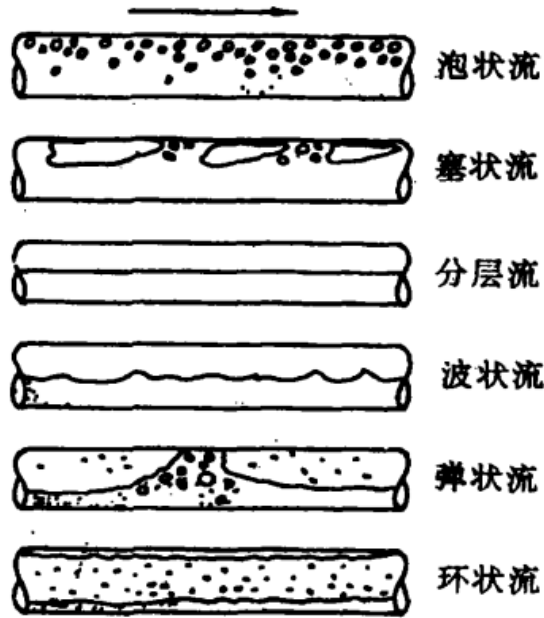


2.1 流型研究的目的

- 获得**水平管**内流型变化规律及流型转化条件

水平管内常见的两相流型

- 基本流型：泡状流、塞状流、弹状流、分层流、波状流和环状流



水平管内流型转化条件

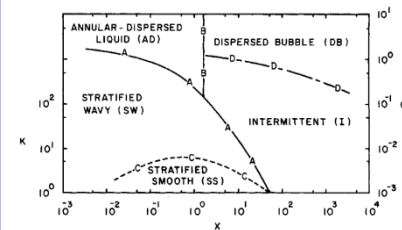
- 波状分层流和间歇流或弥散环状流转化条件 $F^2 \left[\frac{1}{C_2^2} \frac{\bar{U}_G d \bar{A}_L / d \bar{h}_L}{\bar{A}_G} \right] \geq 1$

- 分层流与波状分层流转化条件

$$K \geq \frac{2}{\sqrt{\bar{U}_L s \bar{U}_G}}$$

- 间歇流与弥散泡状流转化条件

$$T^2 \geq \frac{8 \bar{A}_G}{S_i \bar{U}_L^2 (\bar{U}_L \bar{D}_L)^{-n}}$$



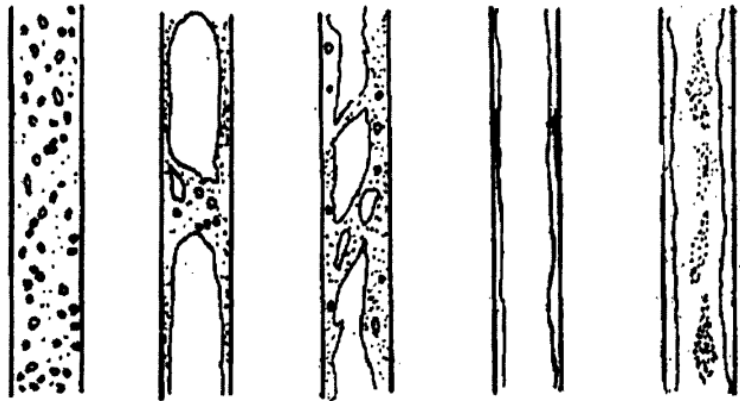
F、K、T为表示流型转化边界的无量纲数

2.1 流型研究的目的

- 获得**竖直管**内流型变化规律及流型转化条件

竖直管内常见的两相流型

- 基本流型：泡状流、弹状流和环状流，无分层流
- 过渡流型：弥散泡状流、搅混流（乳沫状流）、细束环状流等



1. 泡状流 2. 弹状流 3. 乳沫状流 4. 环状流 5. 细束环状流

竖直管内流型转化条件

- 泡状流与弥散泡状流转化条件

$$U_{LS} + U_{GS} = 4.0 \left\{ \frac{D^{0.429} \left(\frac{\sigma}{\rho_L} \right)^{0.089}}{v_L^{0.072}} \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G)}{\rho_L} \right]^{0.446} \right\}$$

- 泡状流与弹状流转化条件

$$U_{LS} = 3.0 U_{GS} - 1.15 \left[\frac{g(\rho_L - \rho_G) \sigma}{\rho_L^2} \right]^{1/4}$$

- 环状流与搅混流转化条件

$$U_G = \left(\frac{4K}{3C_d} \right)^{1/4} \frac{[\sigma g(\rho_L - \rho_G)]^{1/4}}{\rho_G^{1/2}}$$

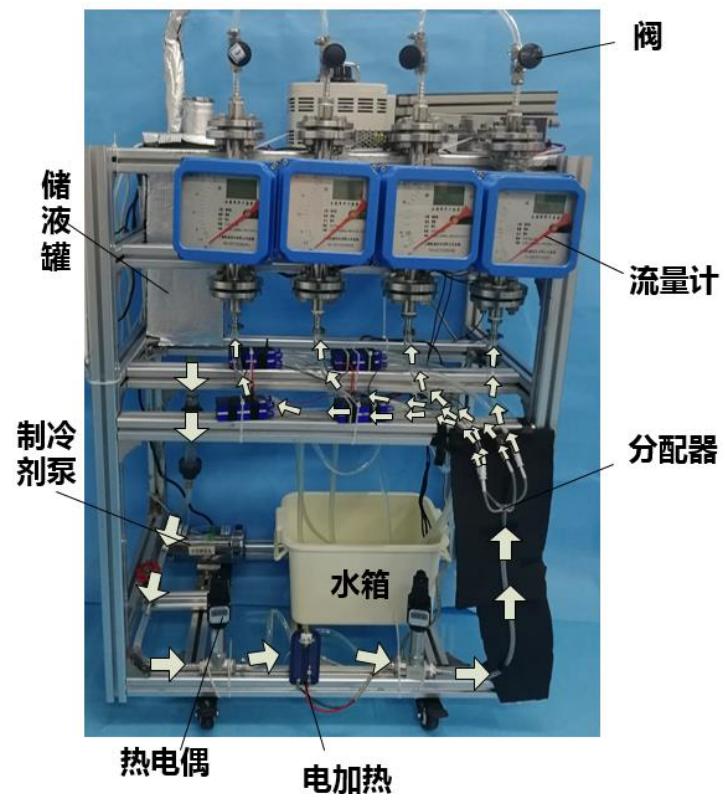
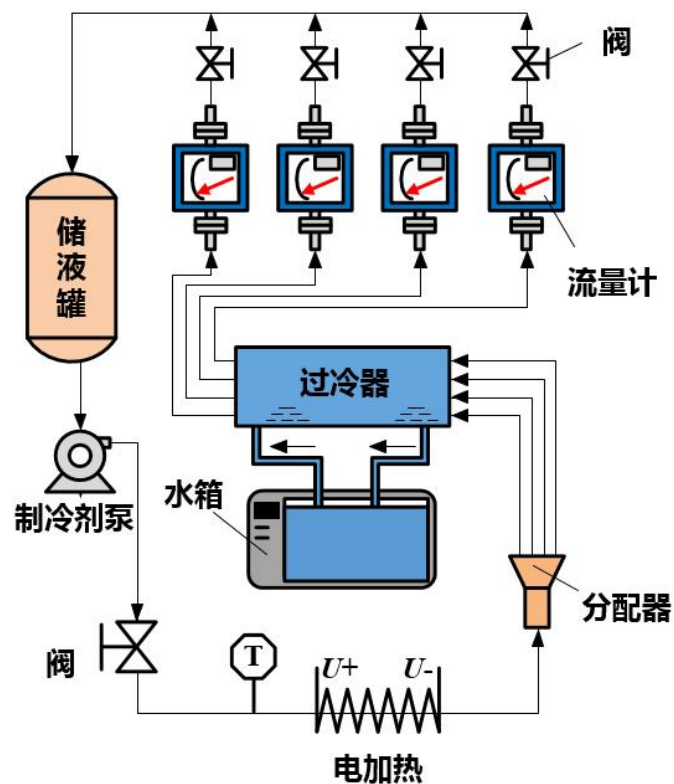
- 弹状流与搅混流转化条件

$$l_E = \frac{l_s U_G}{0.35 \beta \sqrt{gD}} \sum_{n=2}^{\infty} (e^{\beta/2n} - 1)$$

2.2 冷媒流型可视化实验方法

➤ 流型可视化实验台

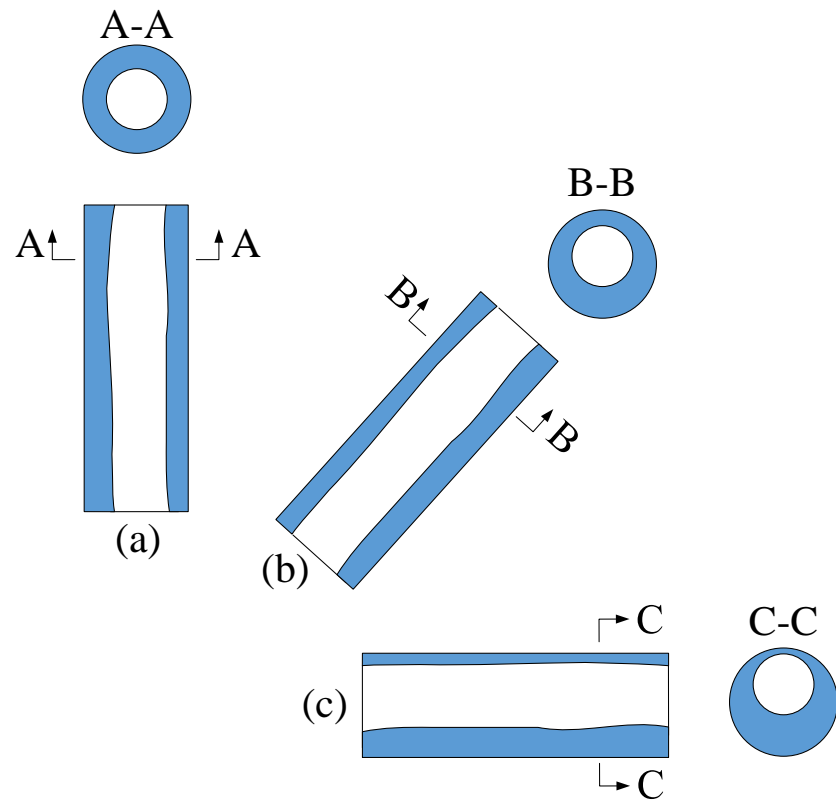
- **试验台：**主要包括储液罐、水泵、球阀、电加热模块、温度传感器T1和T2、调压器、半导体制冷模块、4个流量计以及实验样件。
- **循环工质：**采用常压制冷剂 R141b。



2.2 冷媒流型可视化实验方法

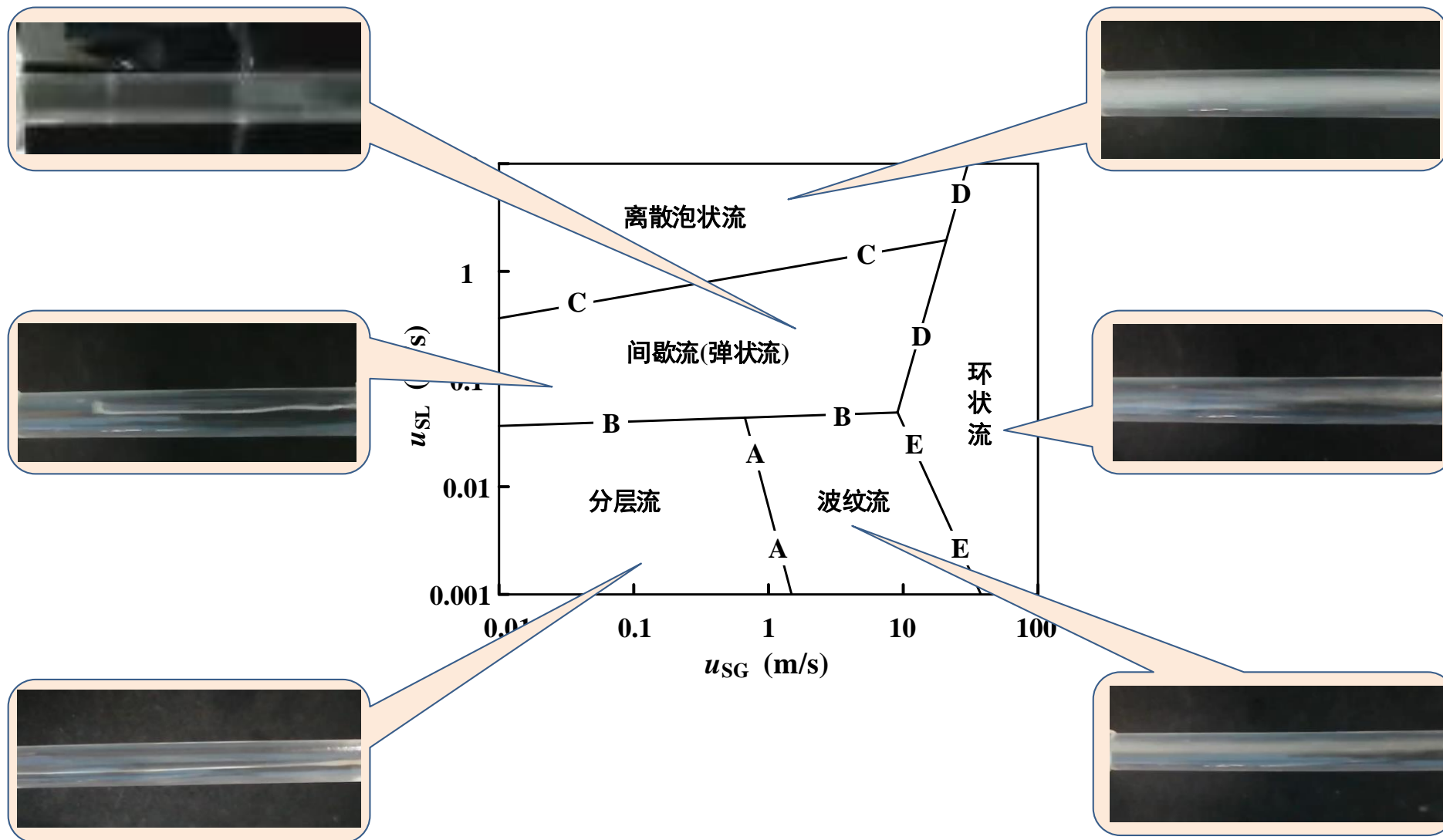
➤ 实验样件

➤ 试验样件：长度 $L > 15$ 倍的管内径 D 的圆管
 $D = 4.8\text{mm}$, $L = 100\text{mm}$



2.3 水平管内R141b流型可视化研究

➤ 流型可视化实验结果



3.1 R32流型图研究思路

通过实验绘制R141b的流型转化图，确定流型转化曲线的函数类型



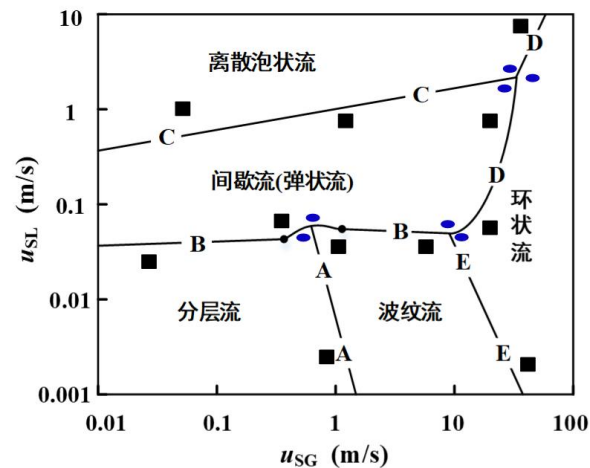
Fluent模拟计算R141b制冷剂的流型转化规律，并与实验结果进行对比修正，并优化模拟设置



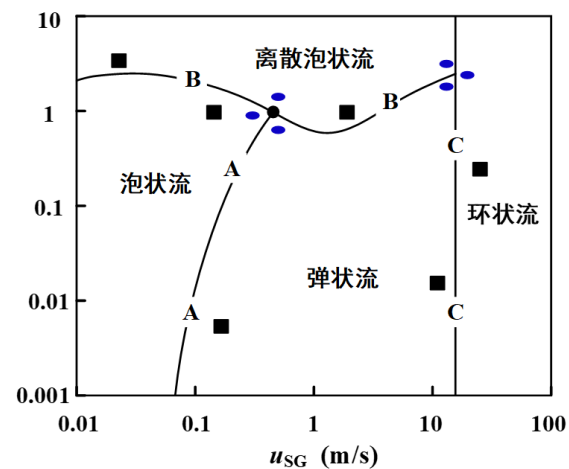
利用R141b流型转化的模拟设置，选取适当的工况点模拟计算R32的流型转化规律



基于有限个模拟测点修正流型图中流型转化曲线函数的系数，使流型转化曲线介于两种流型中间



水平管两相流型转化图



竖直管两相流型转化图

3.2 流型模拟方法

计算模型

模拟方法的比较

模拟方法的确定

- **实验样件**：长度 $L > 15$ 倍的管内径 D 的圆管
 $D = 4.8\text{mm}$, $L = 100\text{mm}$
- **模拟模型**：管径与实验样件保持一致；在保证制冷剂进入圆管后流型充分发展的情况下，选取合适长度的圆管，减少计算量

实验样件



- 长直圆管
- $D = 4.8\text{mm}$, $L = 100\text{mm}$

计算模型



- 长直圆管
- $D = 4.8\text{mm}$, $L = 50\text{mm}/100\text{mm}/150\text{mm}$
- 最小网格尺寸为0.1，边界层区域绘有边界层网格

3.2 流型模拟方法

计算模型

模拟方法的比较

模拟方法的确定

- 根据文献调研的情况，两相流流型模拟常采用VOF模型作为模拟模型、standard k-e作为湍流模型。入口边界条件的选取一般有两类：质量流量入口、速度入口
- 质量流量入口需要分别输入气相和液相的质量流量，但不能直接确定空泡系数。
- 速度入口可以输入空泡系数和总流速，但不能分别给出气相和液相的流动速度。

质量流量入口模拟方法

- 冷媒选取R141b（已有R141b流型图）、R32（真实制冷剂）；
- 入口取为质量流量入口，根据要求输入气相质量流量和液相质量流量；
- 管径保持4.8mm；
- 根据常温条件下冷媒R141b的饱和物性，入口压力选为0.06MPa；
- 采用VOF模型
- 湍流模型选取k-ε模型；
- 长直圆管水平安装

速度入口模拟方法

- 冷媒选取R141b（已有R141b流型图）、R32（真实制冷剂）；
- 入口取为质量流量入口，根据要求输入气液两相总流速和空泡系数；
- 管径保持4.8mm；
- 根据常温条件下冷媒R141b的饱和物性，入口压力选为0.06MPa；
- 采用VOF模型
- 湍流模型选取k-ε模型；
- 长直圆管水平安装

3.2 流型模拟方法

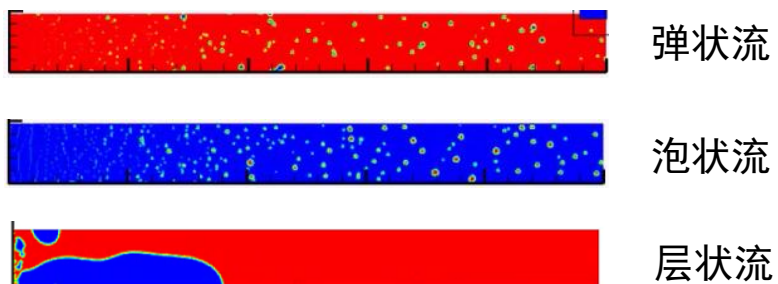
计算模型

模拟方法的比较

模拟方法的确定

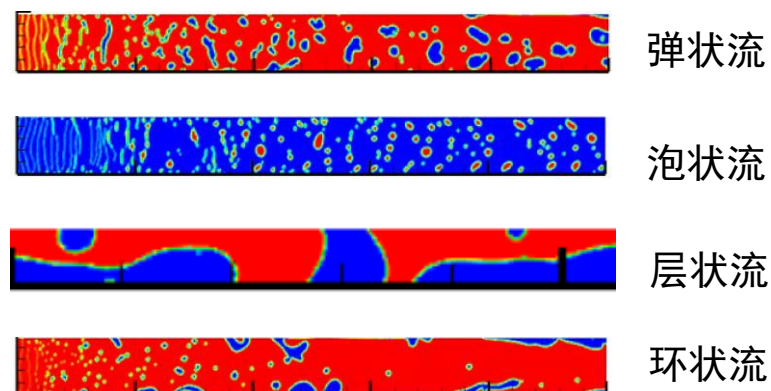
- **质量流量入口模拟结果**：能够实现弹状流、泡状流和层状流，但不能模拟得到环状流。
R141b制冷剂气液两相密度相差 10^3 倍，干度为0.1-0.2时空泡系数很小；模拟得到的空泡系数要小于真实的空泡系数，因此整个流动过程中液相占比很少，模拟效果不理想。
- **速度入口模拟结果**：采用R141b制冷剂，能够实现弹状流、泡状流、环状流和层状流。
- **结论**：按照速度入口边界条件模拟制冷剂的流型转换规律。
- 注：波纹流的运动特性与层状流类似，可归为层状流

质量流量入口模拟结果

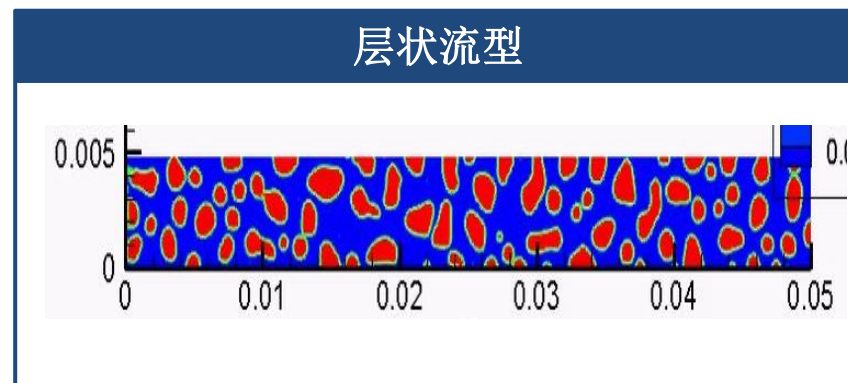
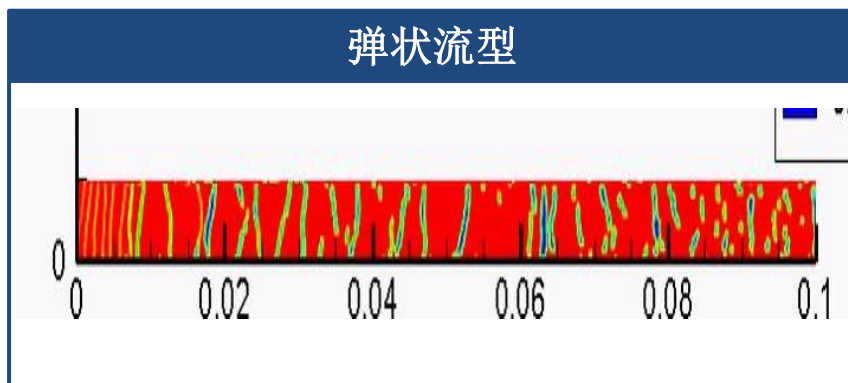
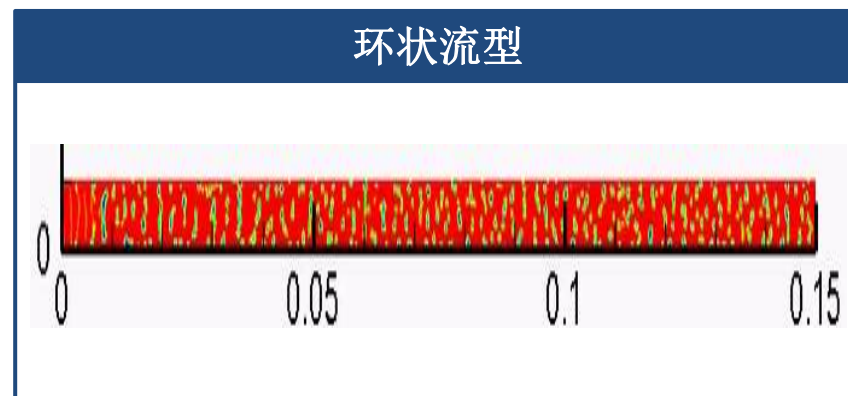
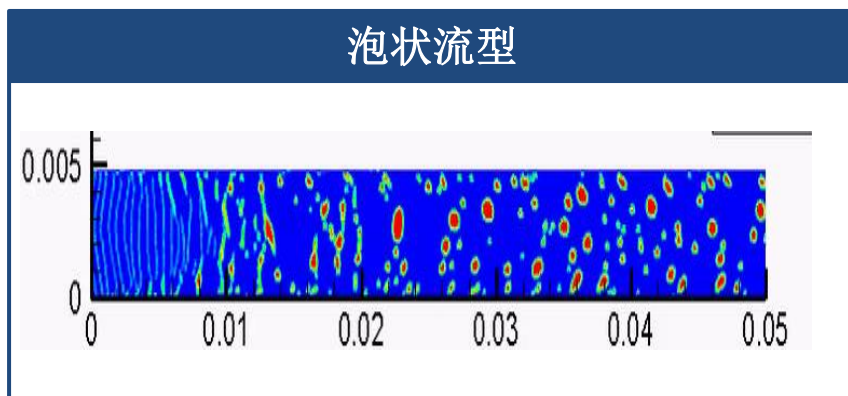


未模拟得到环状流

速度入口模拟结果

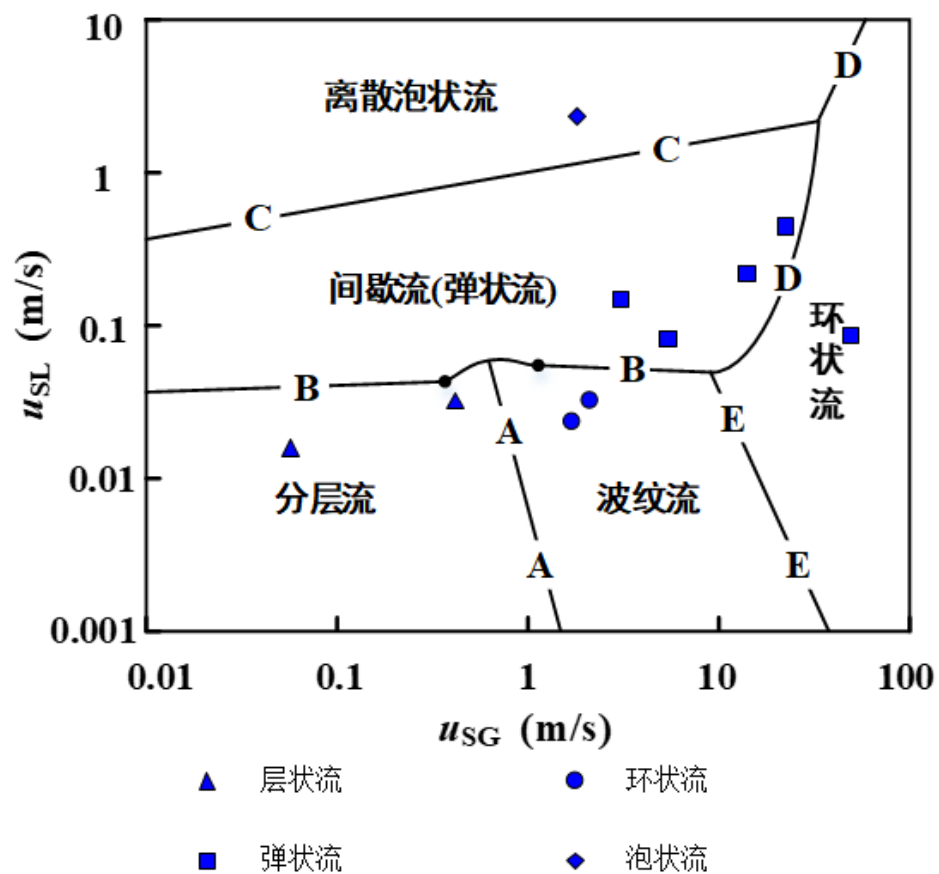


3.3 R141b流型模拟结果



➤ 红色为气相，蓝色为液相

3.4 R141b流型模拟结果与实验结果的对比

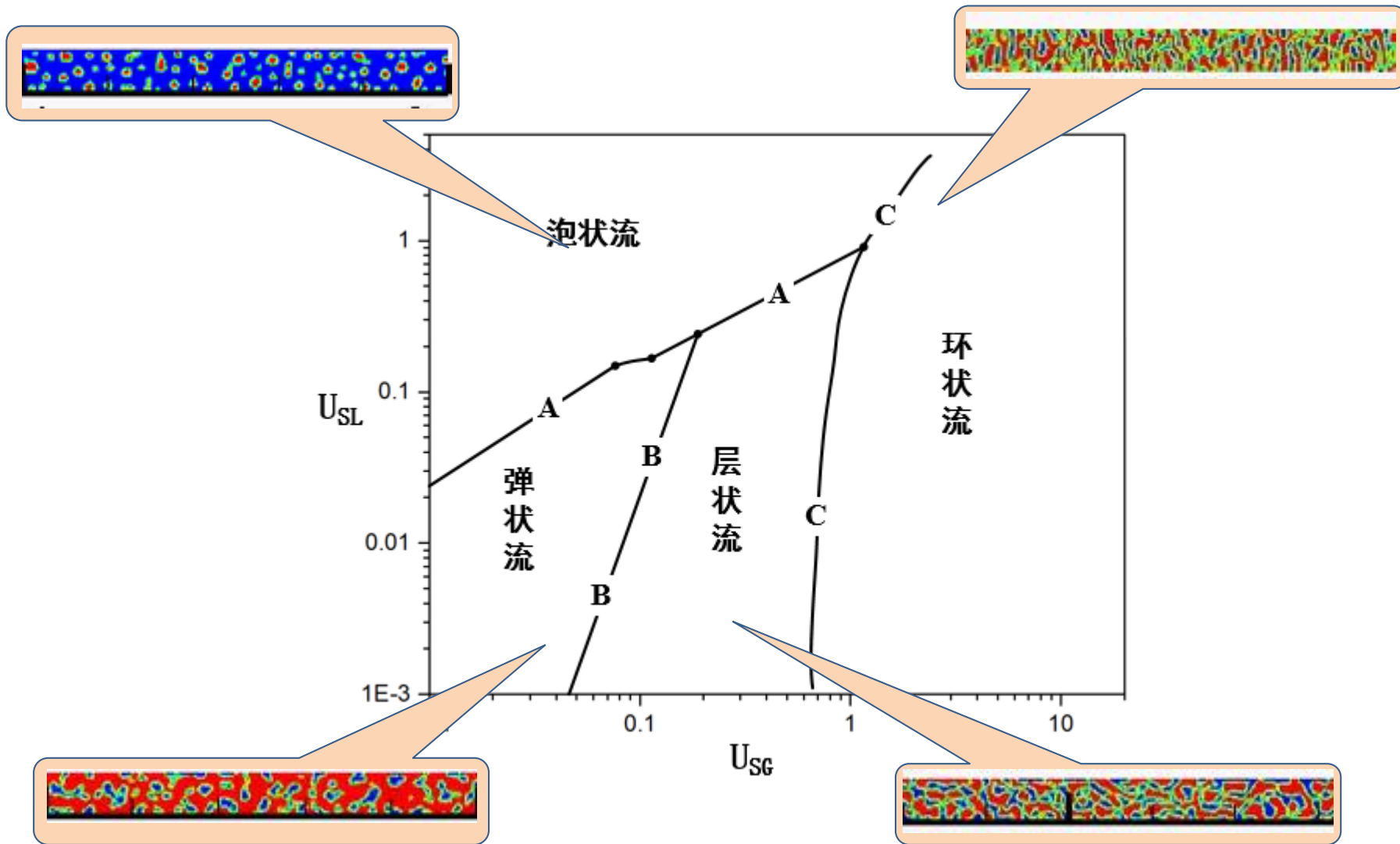


对模拟和实验结果进行对比发现：

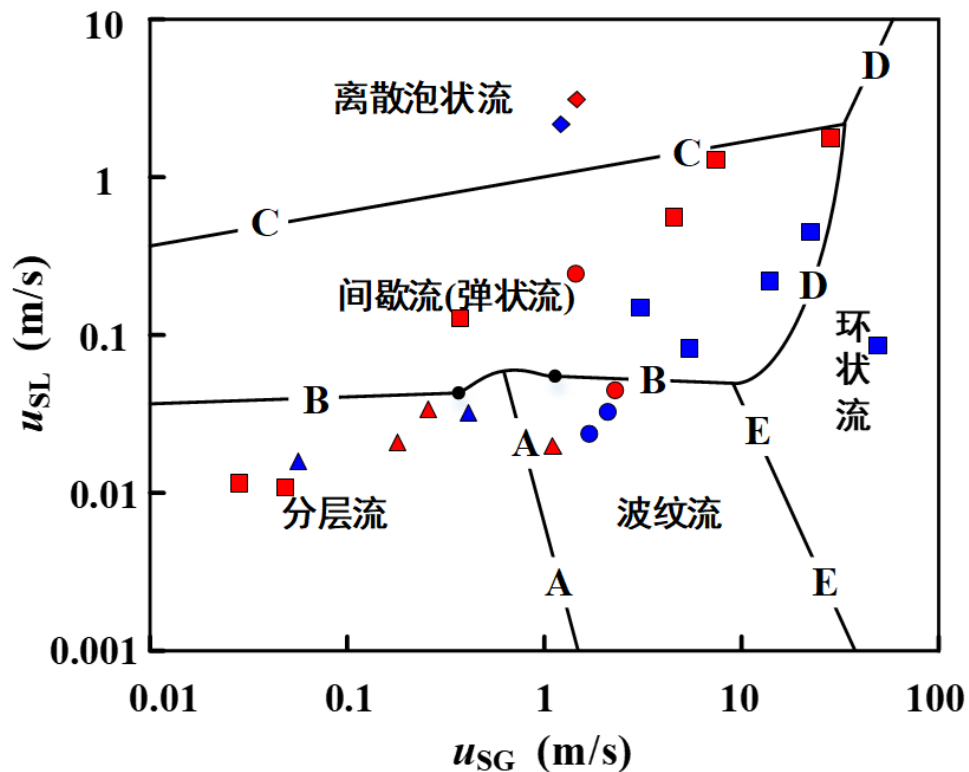
- 离散泡状流的模拟和实验结果基本吻合；
- 实验得到的弹状流区间内选取的工况点在模拟结果中仍保持弹状流；
- 实验得到的环状流区间内选取的工况点在模拟结果中显示为弹状流；
- 实验得到的波纹流区间内选取的工况点在模拟结果中显示为环状流；
- 实验得到的分层流区间内选取的工况点在模拟结果中仍保持分层流；

注：层状流和波纹流对冷媒流动影响规律类似，分析中可合并为一类。

3.5 R32流型模拟结果



3.6 R32流型与R141b流型对比

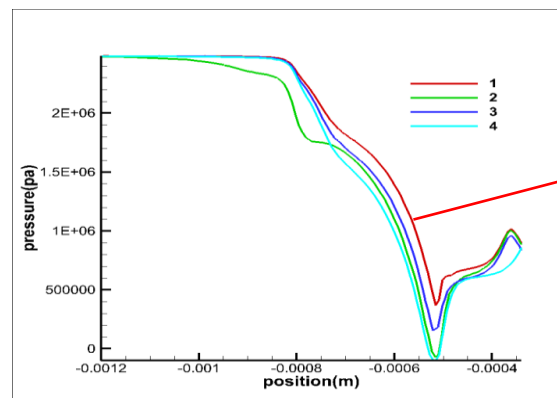
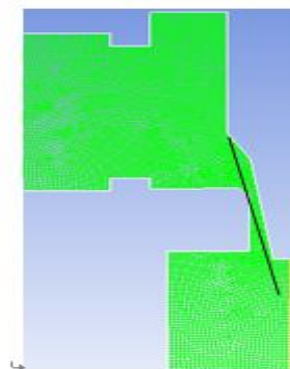
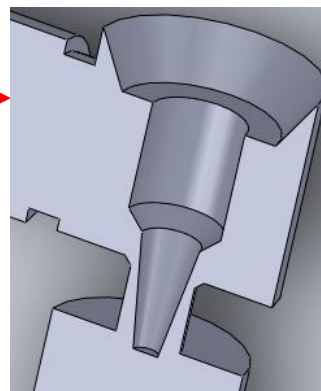
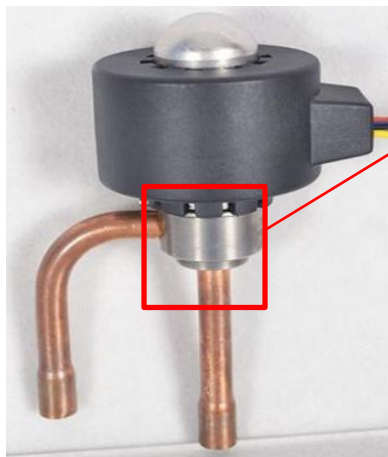


将R32流型图与R141b流型图对比发现：

- 相比于R141b流型图，R32流型图中弹状流区域和层状流区域减小，环状流及泡状流区域增大。
- 在气液折算流速均较低的工况下，由于R32气液两相密度比远大于R141b，相同折算速度条件下制冷剂空泡系数更小，液相堆积情况明显，液相与管内顶部直接接触，表面张力的作用克服重力形成弹状流。

4.1 节流过程分析

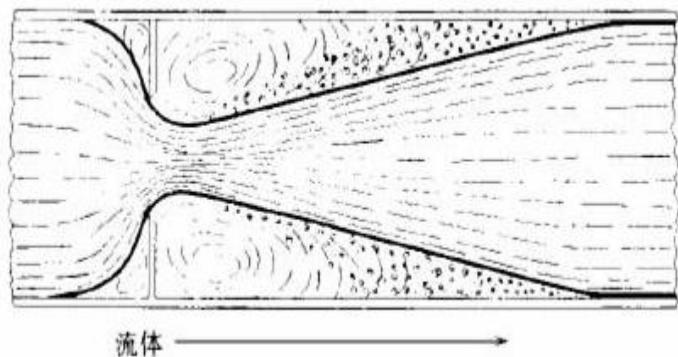
- ▶ 节流过程中存在空化相变：冷媒以高压过冷态进入节流突缩区域中，压力骤降，冷媒中的微小气核不断长大成气泡；经过节流区后压力回升，气泡又发生溃灭，从而辐射出能量产生流动噪音。



冷媒节流过程中，压力先骤降后回升

4.2 节流过程空化传质模型

判断是否空化的条件



空化数 σ 的定义如下：

$$\sigma = \frac{P_L - P_v}{0.5\rho v^2}$$

其中， P_L 是出口压力， P_v 是饱和蒸气压，

ρ 是制冷剂密度， v 是制冷剂流速。

空化发生的条件是 $\sigma < 1 \sim 1.5$ 。

空化传质模型

Singhal-Et-Al 空化模型：

- 当前制冷剂压力低于饱和压力时，发生从液相到气相的传质；
- 当前制冷剂压力高于饱和压力时，发生从气相到液相的传质。

若 $P \leq P_v$ ，

$$R_e = F_{vap} \frac{\max(1.0, \sqrt{k})(1 - f_v - f_l)}{\sigma} \rho_v \rho_l \left[\frac{2}{3} \left(\frac{P_v - P}{\rho_l} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

若 $P > P_v$ ，

$$R_c = F_{cond} \frac{\max(1.0, \sqrt{k})f_v}{\sigma} \rho_v \rho_l \left[\frac{2}{3} \left(\frac{P - P_v}{\rho_l} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

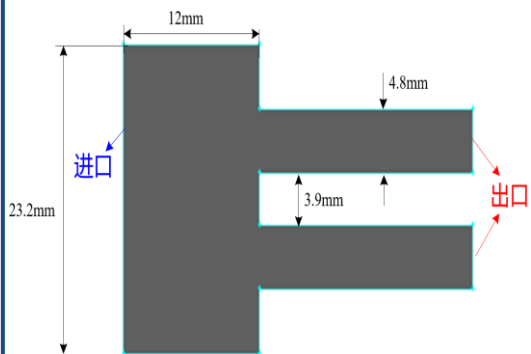
饱和压力通过当地湍流压力波动的估计值来修正：

$$P_v = P_{sat} + \frac{1}{2}(0.39\rho k)$$

其中， F_{vap} 和 F_{cond} 是蒸发系数和冷凝系数，一般取为 $F_{vap} = 0.02$ ， $F_{cond} = 0.01$ 。

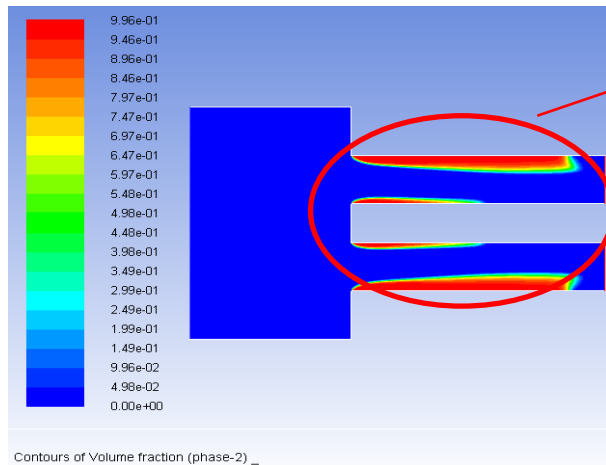
4.3 节流中空化过程的模拟

计算模型



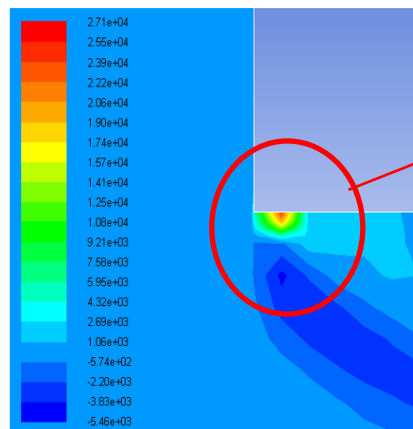
设置项	说明
多相流模型	Mixture模型
能量方程	开启
湍流模型	Realizable k-e模型
材料	R32液相和R32气相(10°C下的饱和物性参数)
相变	空化相变过程, 空化压力0.3Mpa
边界条件	温度入口283k、压力入口1.1Mpa, 压力出口0.1Mpa

相体积分布云图



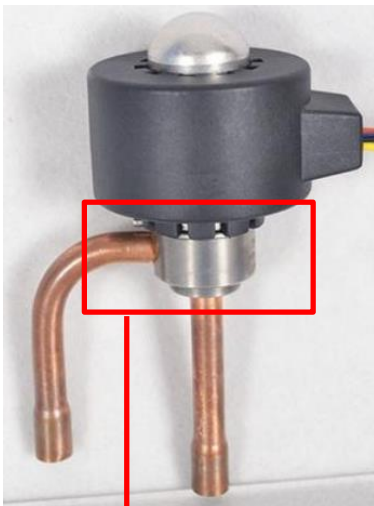
液相流体经分流腔向各支路进行分配时, 在各支路壁面上会产生空化作用, 液体中的小气核会长大成气泡并聚集在壁面上。

空化传质率云图



在管路突缩处, 高的湍动能会导致该区域的空化传质率较高, 产生高的局部相变率, 使得气相逐渐积累并随着主流运动。

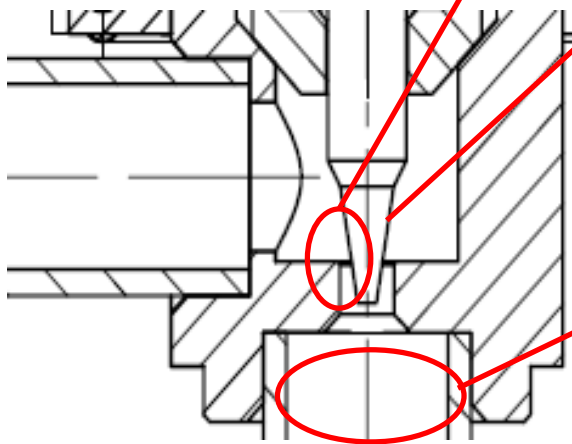
5.1 电子膨胀阀流动噪音分析



噪音问题1: 冷媒相变空化剧烈, 空化气泡的产生与溃灭过程可能辐射啸叫噪声;

噪音问题2: 高速冷媒冲击阀针引起自激振荡, 产生高频噪声;

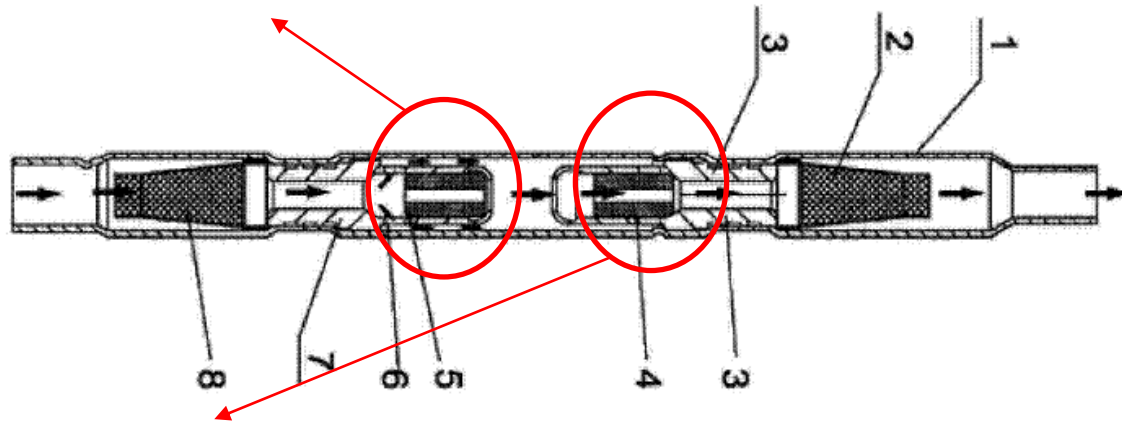
噪音问题3: 流道突缩突扩引起复杂涡流变化, 易产生湍流噪音。



5.2 双向流通单向节流阀的流动噪音分析

- ▶ **空调器中采用的另一种形式节流阀**：单向节流过程中，阀芯运动至一侧端面，冷媒只能从阀芯的细小通道流动；反向流通过程中，阀芯运动至另一侧端面，冷媒能够从阀芯外侧的通流孔流出。
- ▶ **噪音问题**：1) 节流过程的冷媒流动噪音；2) 阀芯运动的金属撞击噪音。

问题1：节流孔直径小，节流孔前后空间突扩，导致压降变化剧烈



问题2：阀芯与阀座撞击时会产生撞击噪音，且阀芯轴向窜动和径向转动时会产生金属摩擦噪音。

谢谢!

