

# 垂直相分离冷凝管内流型调控的数值研究

孙东亮<sup>①</sup>, 徐进良<sup>①\*</sup>, 陈奇成<sup>②</sup>, 曹桢<sup>②</sup>

① 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

② 华北电力大学低品位能源多相流与传热北京市重点实验室, 北京 102206

\* 联系人, E-mail: xjl@ncepu.edu.cn

2012-10-18 收稿, 2013-01-24 接受

国家自然科学基金青年项目(51106049)、国家重点基础研究发展计划(2011CB710703)、国家自然科学基金国际合作项目(51210011)、北京市自然科学基金(3112022)、河北省自然科学基金(E2011502057)和中央高校基本科研业务费专项基金(12MS44)资助

**摘要** 基于非能动相分离概念, 开发了新型相分离冷凝管, 形成了“气在管壁, 液在中心”的分布模式. 目前我们已经实验研究了相分离冷凝管对流型的调控作用, 并定性分析了其内在机理. 为了深入研究这种新型结构内在的流型调控机理, 基于跨尺度网格系统及 VOF 方法, 对垂直相分离冷凝管内单个气弹的调控过程进行了数值研究. 研究发现气弹从光管区域进入流型调控区域后, 液膜厚度减少了近 70%; 气弹上升速度提高了 1 倍多, 带动环隙区域内液体速度和速度梯度的大幅提高, 从而起到减薄流动边界层的作用; 气弹上升速度的大幅提高引起环隙区域和核心区域内流体质量和动量的交换, 同时引起核心区域内流体的自维持脉动, 促进了近壁区和主流区内液体的交混, 以上 3 个因素将对提高设备冷凝换热性能起到积极的作用.

## 关键词

相分离  
流型调控  
金属丝网  
冷凝换热  
数值模拟

近几年来, 由于能源短缺、环境恶化, 低品位能源利用成为了热门研究课题, 其中有机朗肯循环系统(Organic Rankine Cycle, ORC)是利用低品位能源(如余热、太阳能、地热能等)的有效方法之一<sup>[1]</sup>. ORC 系统主要面向低品位能源, 效率较低, 提高效率的有效途径是极大限度的降低系统不可逆损失, 对于部件蒸发器和冷凝器来说就是尽量提高其换热性能, 减小管道两侧的换热温差. 冷凝器管内有有机工质的冷凝换热系数小于  $1000 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ <sup>[2]</sup>, 与管外冷却水换热系数具有相同量级, 管道内外的热阻近似相等, 因此强化管内冷凝传热能够大幅提高冷凝器的换热性能. 在提高余热利用效率、减小换热过程不可逆性及换热器制造成本多重约束下, ORC 系统对管内相变传热提出了新的挑战, 强烈需求极低温差下相变传热强化的新原理与新方法.

传统强化换热管, 如各类结构沟槽管<sup>[3-6]</sup>, 主要通过扰动流体和限制流体边界层的发展来提高换热

性能. 传统管道中通常气体分布于管道中心而液体靠近壁面, 液体在近壁区积聚, 引起较大的液体热阻, 表现为相分布与传热不协同, 导致传热恶化, 因此提高多相传热的关键问题是如何实现流型与传热之间的协同. Lips 和 Meyer<sup>[7]</sup>实验研究了 R134a 在倾斜光滑管内的对流凝结过程, 表明相分布对传热系数具有显著影响.

2012 年, 作者所在课题组基于非能动相分离概念提出了相分离冷凝管<sup>[8,9]</sup>, 在管道中心悬空插入单层柱状金属丝网, 将调控区域划分成环隙区域及核心区域. 由于表面张力作用, 迫使气弹在环隙区域内流动, 核心区域内充满液体, 实现了与传统管内完全相反的相分布, 同时实现了流型与传热之间的协同. 目前, 作者所在课题组已实验研究了相分离冷凝管对流型的调控作用, 并定性分析了其内在机理.

为了深入研究这种新型结构内在的流型调控机理, 本文将对垂直相分离冷凝管内单个气弹的调控

**引用格式:** 孙东亮, 徐进良, 陈奇成, 等. 垂直相分离冷凝管内流型调控的数值研究. 科学通报, 2013, 58: 954-960

**英文版见:** Sun D L, Xu J L, Chen Q C, et al. Numerical study of flow pattern modulation in a vertical phase separation condenser tube. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-013-5734-1

过程展开数值研究. 对于两相流问题, 数值求解方法主要有: 颗粒轨道模型<sup>[10]</sup>、双流体模型<sup>[11]</sup>和运动界面追踪技术, 其中运动界面追踪技术最能准确、全面地反映相界面的信息. 在运动界面追踪技术中 VOF 方法<sup>[12]</sup>和 Level Set 方法<sup>[13]</sup>得到了最广泛的使用, 因为这两种方法通过函数隐式的捕捉界面, 可以非常容易地处理具有复杂界面拓扑变化的两相流动和传热问题, 并且与其他方法相比占用内存小, 方法本身简单、直观. 目前, FLUENT 是最广泛使用的数值模拟软件, 它采用了 VOF 方法追踪相间的运动界面, 得到了广泛的应用<sup>[14]</sup>. 本文将基于 FLUENT 中的 VOF 方法和跨尺度网格系统研究光管区域和流型调控区域内液膜厚度、气弹上升速度、以及流场的变化规律, 分析研究新型结构对冷凝换热的强化机理.

### 1 垂直相分离冷凝管物理结构及其网格系统

图 1 为垂直相分离冷凝管结构示意图, 一单层柱

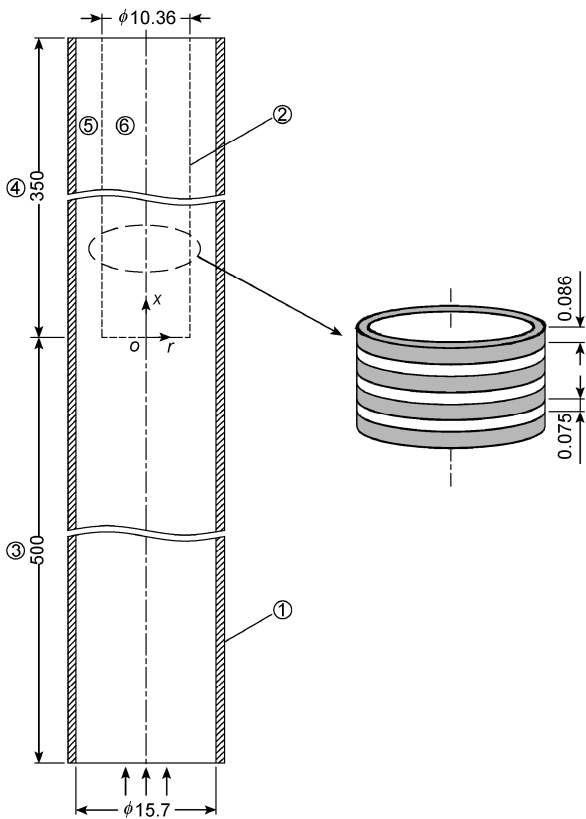


图 1 垂直相分离冷凝管结构示意图(mm)

- ① 管壁; ② 金属丝网; ③ 光管区域; ④ 流型调控区域; ⑤ 环隙区域; ⑥ 核心区域

状金属丝网悬空在管道中心, 将管道分为光管区域(500 mm)和流型调控区域(350 mm), 同时流型调控区域又被分为环隙区域和核心区域. 管道直径为 15.7 mm, 核心区域直径为 10.36 mm, 环隙区域内外径之差为 2.6 mm, 金属丝的宽度为 0.086 mm, 网孔宽度为 0.075 mm.

本文主要针对垂直相分离冷凝管内单个气弹的调控过程展开研究, 由于流动结构的对称性, 我们选取二维轴对称网格系统( $r-x$ )进行计算研究. 由于管内插入了柱状金属丝网, 使得管内存在 3 种不同尺度的空间结构, 如光管区域和核心区域为常规尺度; 环隙区域为小尺度; 网孔区域为微尺度. 对于这种跨尺度空间结构, 如果采用单一的网格系统, 网格数量将异常庞大, 计算很难实现. 如果本问题采用单一的网格系统, 网格数量将达到 5000 万, 对于非稳态两相流动问题, 在如此庞大的网格系统上展开计算, 即使采用并行计算, 完成一个工况的计算, 也需耗时几年, 因此很难满足实际需求. 为此本文针对不同空间结构采用了不同尺度的网格系统, 如光管区域和核心区域网格尺度平均为 0.5 mm, 环隙区域网格尺度平均为 0.1 mm, 网孔区域网格尺度平均为 0.01 mm, 不同尺度的网格通过 5:1 的网格过渡模式进行衔接, 如图 2 所示, 最终生成跨尺度网格系统, 网格数量约为 30 万, 仅为单一网格系统网格数量的 0.6%, 网格数量大幅减小.

在 VOF 方法中引入了体积分数  $\alpha$  的概念, 当  $\alpha=1$  时表示空间内充满了气体; 当  $\alpha=0$  时表示空间内充满了液体; 当  $0<\alpha<1$  时表示空间内同时含有气体和液体, 通过  $\alpha$  在空间上的分布即可以确定相界面的具体位置及形状. 为了精确地捕捉相界面, 本文采用网格动态自适应技术对相界面处的网格进行二级加密, 相界面处的网格被细化了 16 倍, 如图 3 所示.

### 2 控制方程及求解策略

本文对垂直相分离冷凝管内单个气弹的调控过程进行了数值研究, 其中气相为空气, 液相为水. 图 4 显示了气弹的初始位置和尺寸以及计算区域的边界条件, 其中进口为充分发展的速度边界条件:

$$u_{in} = 2\bar{u}_{in} \left[ 1 - \left( \frac{r}{0.00785} \right)^2 \right], \quad (1)$$

式中,  $\bar{u}_{in}$  为进口平均速度, 为 0.1 m/s.

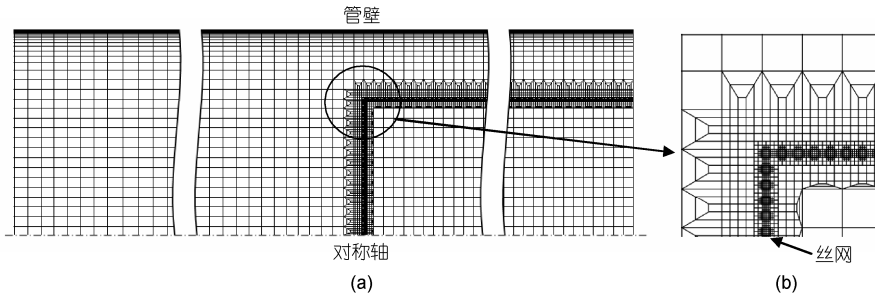


图2 垂直相分离冷凝管跨尺度网格系统  
(a) 网格系统图; (b) 网格局部放大图

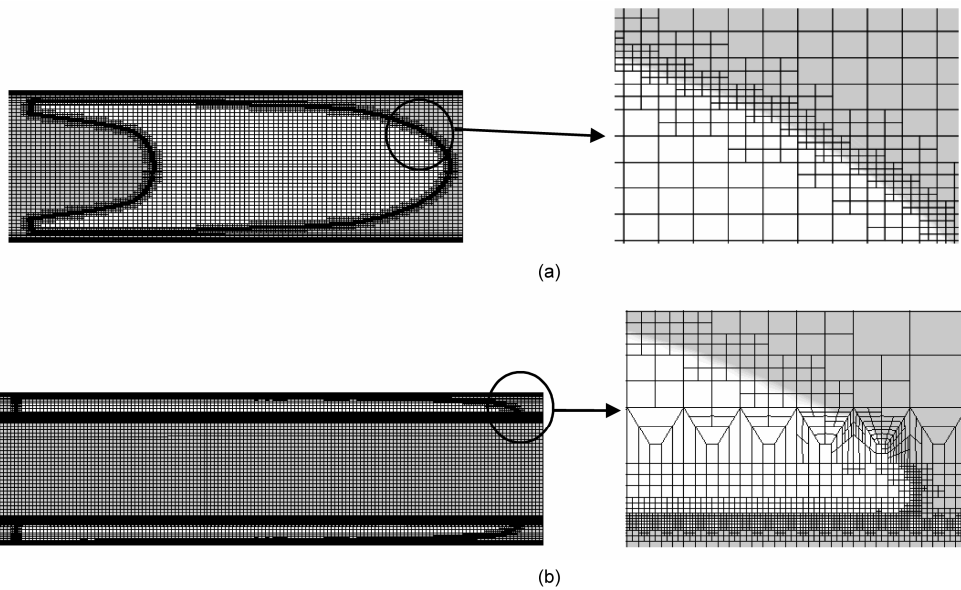


图3 光管区域和流型调控区域内气弹周边网格图  
(a) 光管区域内气弹周边网格图; (b) 流型调控区域内气弹周边网格图

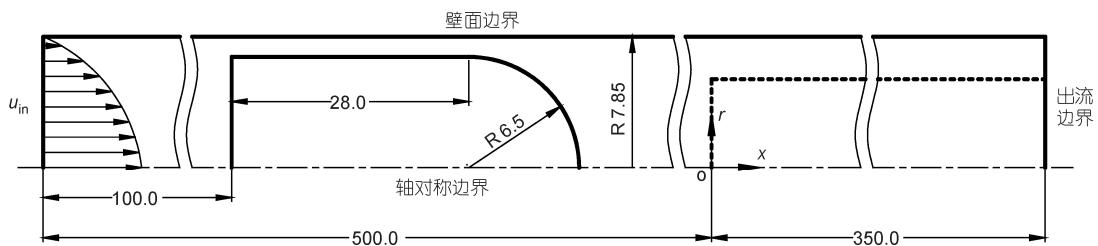


图4 气弹初始形状及边界条件(mm)

本文研究为不可压缩层流非稳态两相流动的问题,当采用VOF方法求解时,整个区域仅需一套控制方程,具体如下.

体积分数 $\alpha$ 的传输方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} \alpha) = 0. \quad (2)$$

连续性方程:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0. \quad (3)$$

动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + F_{vol}, \quad (4)$$

其中

$$\rho = \rho_g \alpha + \rho_l (1 - \alpha), \quad (5)$$

$$\mu = \mu_g \alpha + \mu_l (1 - \alpha). \quad (6)$$

表面张力为表面力, 通过 CSF(continuum surface force)模型<sup>[15]</sup>将表面力转化为体积力

$$F_{vol} = \sigma \frac{\alpha \rho_g \kappa_g \nabla \alpha + (1 - \alpha) \rho_l \kappa_l \nabla (1 - \alpha)}{0.5(\rho_g + \rho_l)}, \quad (7)$$

其中

$$\kappa_g = -\kappa_l = -\nabla \cdot \left( \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \right). \quad (8)$$

式(2)~(8)中, 变量  $t$  为时间,  $\vec{v}$  为速度矢量,  $\vec{g}$  为重力加速度,  $p$  为压力,  $\rho$  为密度,  $\mu$  为动力黏度,  $\sigma$  为表面张力系数,  $\kappa$  为界面曲率, 下标  $g$  和  $l$  分别表示气相和液相.

这里我们采用 VOF 中的 PLIC 方法求解流体体积分数传输方程(2); 采用 SIMPLE 算法联立求解连续性方程(3)和动量方程(4), 用于解决压力与速度的耦合, 其中动量方程对流项采用高阶稳定的有界组合格式—MUSCL. 本文计算所使用的工作站配置为 2 个 8 核 CPU, CPU 主频 2.4 GHz, 内存 24 GB, 计算时同时采用 16 个核进行并行运算, 每个工况计算耗时约 10 天左右.

### 3 计算结果分析

图 5 显示了垂直相分离冷凝管内金属丝网对单个气弹的调控过程, 当气弹碰到柱状金属丝网时, 由于表面张力作用, 气弹从大空间向小空间突破的过程中需消耗较大表面能, 因此气弹无法穿过金属丝网的网孔, 而被迫进入环隙区域, 形成拉长的环形气泡. 流型调控的总体趋势是在环隙区域内形成气液交替的两相流动, 而核心区域内始终充满液体.

图 6 分别给出了光管区域和流型调控区域内气弹的液膜厚度, 光管区域气弹液膜平均厚度为 1.82 mm, 流型调控区域内的环形气弹液膜平均厚度为 0.55 mm, 较光管区域大幅减小, 减小了近 70%. 在相变过程中, 假设壁温恒定, 气弹内温度为饱和温度, 同时假设液膜内温度呈线性分布, 通过傅里叶定律可以得出气弹处壁面的热流密度,

$$q_w = \lambda_l \frac{T_{Sat} - T_w}{h}, \quad (9)$$

式中  $\lambda_l$  为液体导热系数,  $T_{Sat}$  为饱和温度,  $T_w$  为壁面温度,  $h$  为液膜厚度,  $q_w$  为壁面热流密度. 气弹液膜厚度直接决定了气弹处壁面的热流密度大小. 由于气弹从光管区域进入流型调控区域后, 液膜厚度减少了近 70%, 有望使得气弹处壁面热流密度提高到 3.3 倍左右.

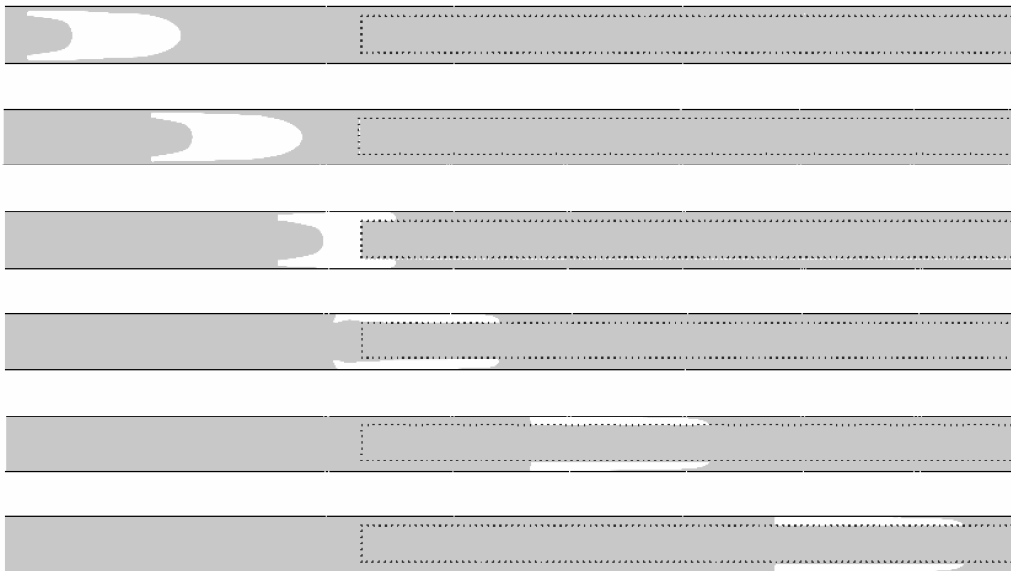


图 5 单层柱状金属丝网对气弹的调控过程  
起始位置  $x_s = -100$  mm, 结束位置  $x_e = 180$  mm

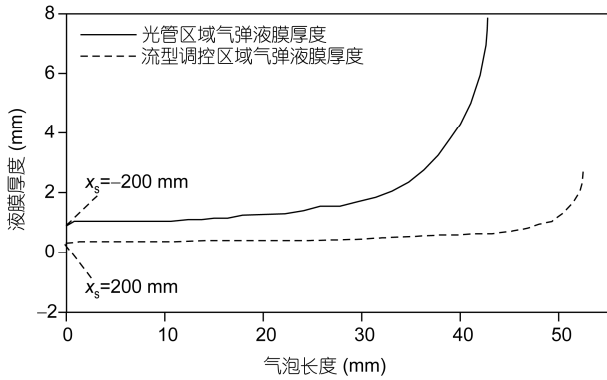


图6 光管区域和流型调控区域内气弹液膜厚度

光管区域气弹起始位置  $x_s = -200$  mm, 流型调控区域气弹起始位置  $x_s = 200$  mm

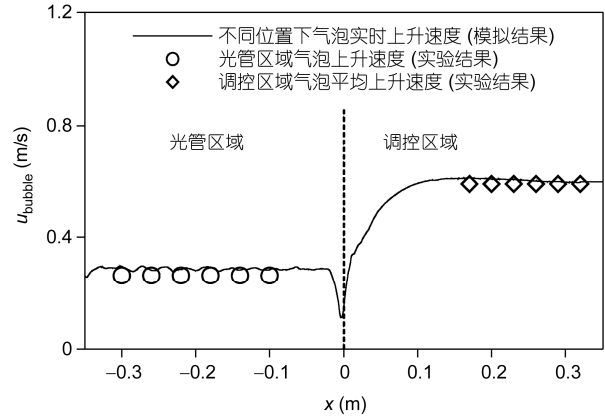


图7 不同轴向位置下气弹上升速度

图7显示了从光管区域到流型调控区域气弹上升速度的变化曲线。在光管区域内,气弹平均上升速度约为0.29 m/s;当气弹碰到金属丝网后,气弹受到丝网的阻碍,上升速度大幅下降,最低降到0.11 m/s,当气弹完全进入环隙区域后,气弹上升速度急剧提高,然后逐渐趋于稳定;在流型调控区域内,气弹上升速度稳定后数值约为0.6 m/s。从图7还可以看出气弹上升速度的数值结果与实验结果吻合较好,验证了所采用的网格系统和数值方法的可行性及准确性。

光管区域内的气弹进入流型调控区域后上升速度大幅提高,速度由0.29提高到了0.6 m/s,提高了1倍多。环形气弹上升速度的大幅提升将带动环隙区域内液体速度大幅提高。图8分别给出了光管区域气弹前端横截面AB上的轴向速度分布和流型调控区域气弹前端横截面CD上的轴向速度分布。横截面CD上靠近管壁的环隙区域内速度和速度梯度远远大

于横截面AB上相应位置的速度和速度梯度。近壁区速度和速度梯度的提高,将起到减薄流动边界层的作用,这将对提高设备换热性能起到积极的作用。

由于环形气弹上升速度的大幅提升将引起环隙区域和核心区域内的流体通过丝网进行强烈的质量和动量交换,如图9所示,环形气弹前端的液体由环隙区域流进核心区域,环形气弹后端的液体在核心区域和环隙区域间周期性地震荡,最终流回环隙区域。同时引起核心区域产生自维持脉动流,如图10所示,在核心区域的流体出现周期性的向上和向下流动现象。丝网处的质量和动量交换以及核心区域产生的自维持脉动流均有利于近壁区和主流区液体的交混,从而提高设备整体换热性能。

#### 4 结论

本文基于跨尺度网格系统及VOF方法,对垂直相分离冷凝管内单个气弹的调控过程进行了数值研

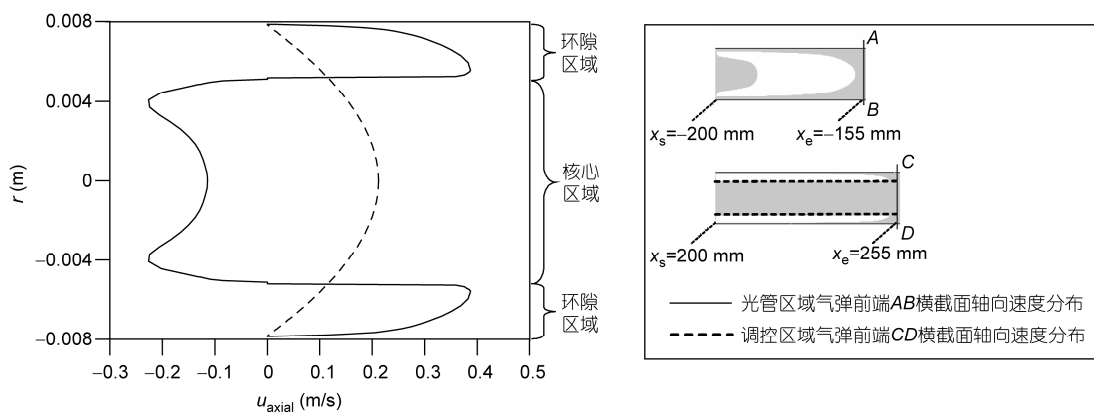


图8 不同横截面上的轴向速度分布

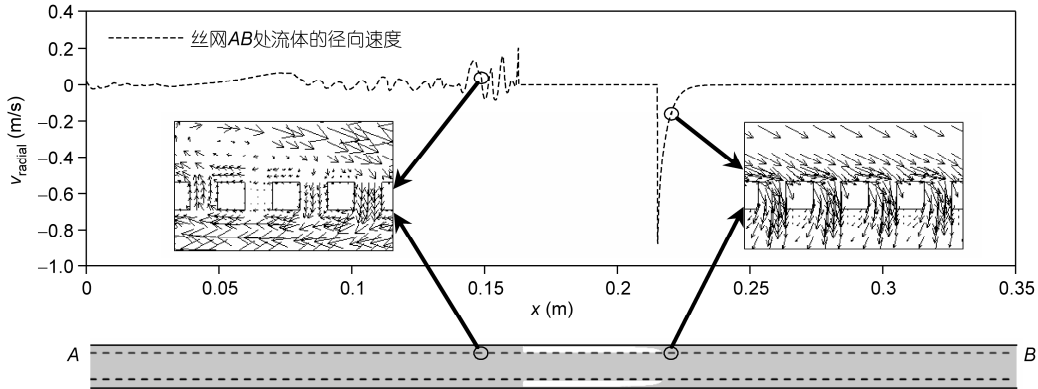


图 9 环隙区域与核心区域间流体的交换

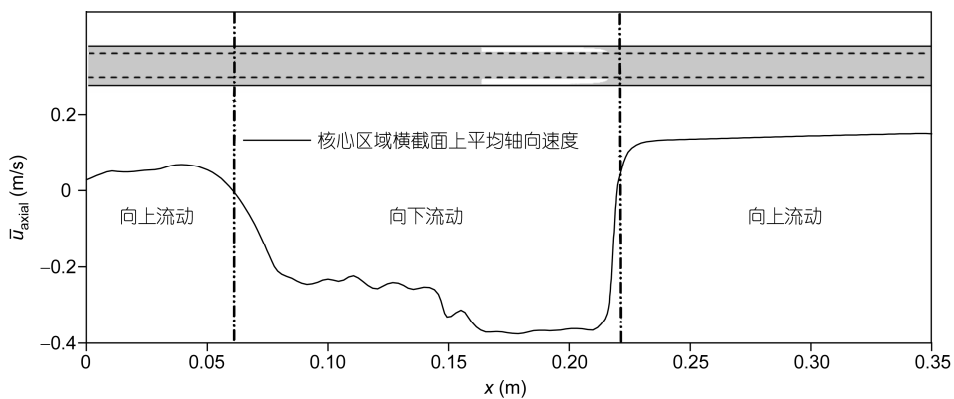


图 10 核心区域内的流体脉动流

究,研究了光管区域和调控区域内液膜厚度、气弹上升速度、以及流场的变化规律,得出以下结论.

由于气弹从光管区域进入流型调控区域后,液膜平均厚度由 1.82 mm 减小到了 0.55 mm,减少了近 70%,因此有望使得气弹处壁面热流密度提高到 3.3 倍左右.

光管区域内的气弹进入流型调控区域后上升速度大幅提高,速度由 0.29 m/s 提高到了 0.6 m/s,提高了 1 倍多.

环形气弹上升速度的大幅提升将带动环隙区域

内液体速度和速度梯度的大幅提高,从而起到减薄流动边界层的作用,这将对提高设备换热性能起到积极的作用.

丝网处液体的质量和动量交换以及核心区域产生的自维持脉动流均有利于近壁区和主流区内液体的交混,从而提高设备整体换热性能.

通过以上分析我们可以得出,垂直相分离冷凝管不但实现了“气在管壁、液在中心”的薄液膜流动模式,而且起到了改善流场的作用,这些因素均有利于大幅提高设备的换热性能.

### 参考文献

- 1 Chen Q C, Xu J L, Chen H X. A new design method for Organic Rankine Cycles with constraint of inlet and outlet heat carrier fluid temperatures coupling with heat source. *Appl Energ*, 2012, 98: 562-573
- 2 Laohalertdecha S, Wongwiset S. The effects of corrugation pitch on the condensation heat transfer coefficient and pressure drop of R-134a inside horizontal corrugated tube. *Int J Heat Mass Transf*, 2010, 53: 2924-2931
- 3 Graham D M, Chato J C, Newell T A. Heat transfer and pressure drop during condensation of refrigerant 134a in an axially grooved tube. *Int J Heat Mass Transf*, 1999, 42: 1935-1944

- 4 Cavallini A, Del Col D, Doretti L, et al. Heat transfer and pressure drop during condensation of refrigerants inside horizontal enhanced. *Int J Refrig*, 2000, 23: 4–25
- 5 Miyara A, Otsubo Y. Condensation heat transfer of herringbone micro fin tubes. *Int J Therm Sci*, 2002, 41: 639–645
- 6 Suriyan L, Somchai W. The effects of corrugation pitch on the condensation heat transfer coefficient and pressure drop of R134a inside horizontal corrugated tube. *Int J Heat Mass Transf*, 2010, 53: 2924–2931
- 7 Lips S, Meyer J P. Experimental study of convective condensation in an inclined smooth tube. Part I: Inclination effect on flow pattern and heat transfer coefficient. *Int J Heat Mass Transf*, 2012, 55: 395–404
- 8 Chen H X, Xu J L, Li Z J, et al. Flow pattern modulation in a horizontal tube by the passive phase separation concept. *Int J Multiphas Flow*, 2012, 45: 12–23
- 9 陈宏霞, 徐进良, 王伟. 一种内分液罩式冷凝换热管. 中国专利, CN102278904A. 2011-12-14
- 10 罗坤, 樊建人, 岑可法. 气固两相流动中颗粒扩散的转捩现象. *科学通报*, 2006, 51: 2810–2817
- 11 Morales-Ruiz S, Rigola J, Rodriguez I, et al. Numerical resolution of the liquid-vapour two-phase flow by means of the two-fluid model and a pressure based method. *Int J Multiphas Flow*, 2012, 43: 118–130
- 12 Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundary. *J Comput Phys*, 1981, 39: 201–225
- 13 Yan Z L, Xie W J, Geng D L, et al. The ninth-mode sectorial oscillation of acoustically levitated drops. *Chin Sci Bull*, 2011, 56: 3284–3288
- 14 Araujo J D P, Miranda J M, Pinto A M F R, et al. Wide-ranging survey on the laminar flow of individual Taylor bubbles rising through stagnant Newtonian liquids. *Int J Multiphas Flow*, 2012, 43: 131–148
- 15 Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension. *J Comput Phys*, 1992, 100: 335–354