

# 棒束弯曲对子通道内空气-水两相流动的影响研究

李潘潇, 孙 皖\*, 周文雄, 马在勇, 张卢腾, 潘良明

(重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 深刻理解棒束弯曲子通道在相态特性分布和流动特性演化方面的机制对反应堆的安全设计与分析具有重要意义。本研究对四种不同闭合度(0%、50%、80%和100%)的棒弯曲子通道进行建模, 基于VOF模型, 采用非稳态、隐式分离求解算法对棒束子通道内空气-水两相流动进行模拟计算, 计算工况包括入口含气率分别为0.1的泡状流和0.5的帽状流, 入口混合相质量流速为1.2 m/s。通过对截面平均空泡份额、局部空泡演化及局部二次流的分析, 探究了棒束弯曲对空气-水两相流动的影响; 分析结果表明: 棒束弯曲对截面平均空泡份额影响较小, 但对局部气泡的尺寸及分布影响较大, 使得子通道内弯曲壁面及其对角面容易发生裸露, CHF更有可能发生在该处。

**关键词:** 数值模拟; Fluent; VOF; 两相流; 棒弯曲

中图分类号: TL334

文献标志码: A

文章编码: 0258-0918(2022)04-0768-08

## Effect Study of Rod Bowing on Air-Water Two-Phase Flow in Sub-Channel

LI Panxiao, SUN Wan\*, ZHOU Wenxiong, MA Zaiyong, Zhang Luteng, PAN Liangming

(Key Laboratory of Low-Grade Energy Utilization Technologies & System, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** It is of great significance to the safety design and analysis of reactor to deeply understand the influence mechanism of the rod bowing in the phase distribution and the evolution of flow characteristics. In this paper, four rod bowing sub-channels with different gap closures (0%, 50%, 80% and 100%) were modeled. Based on the VOF model, the air-water two-phase flow in sub-channels was calculated using unsteady-state and implicit-separation algorithm. The calculated condition contains the bubbly flow (inlet void fraction is 0.1) and the

收稿日期: 2021-04-07

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1900400)

作者简介: 李潘潇(1998—), 男, 江苏无锡人, 学士, 现主要从事核科学与技术方面研究

通讯作者: 孙 皖, E-mail: sunwan@cqu.edu.cn

cap flow (inlet void fraction is 0.5). In addition, the inlet mass flow rate of the mixture phase is 1.2 m/s. Based on the analysis of average void fraction at the cross section, local bubble evolution and local secondary flow, the effect of rod bowing on the air-water two-phase flow was studied. The results indicate that the rod bowing has little effect on the average void fraction at the cross section, but a significant influence on the size and distribution of local bubbles. This causes that the curved and diagonal wall surfaces in the sub-channel are prone to be exposed and consequently occurrence of CHF.

**Key words:** Numerical simulation; Fluent; VOF; Two-phase flow; Rod bowing

在反应堆运行过程中, 因受到辐照变形、机械振动、热应力等影响, 反应堆燃料棒束可能发生变形弯曲导致子通道形状的改变。这可能会对冷却剂的流动换热产生不利影响, 威胁反应堆的安全运行。因此, 深刻理解棒束弯曲子通道在相态特性分布和流动特性演化方面的机制对反应堆的安全设计与分析具有重要意义。

目前对于棒弯曲子通道热工水力特性的研究主要是通过实验进行的, 自 1975 年以来, 多位科学家对不同燃料棒束子通道内的热工水力进行了实验研究, 实验结果被用于燃料组件的安全评估。如 1975 年 K.W.HILL 和 F.E.MOTLEY 等人对 4×4 棒束燃料组件展开实验研究<sup>[4]</sup>; 1977 年 E.S.MARKOWSKI 等发表了关于 C-E 型压水堆燃料组件棒束弯曲对 CHF 的实验研究结果<sup>[2]</sup>; 2004 年中国核电研究所(NPIC)用 CHF 实验测量了在冷壁套管微元和典型微元中不同间隙闭合的棒束弯曲的影响<sup>[1]</sup>。实验研究发现棒束弯曲在高压高热流密度时会对 CHF 产生影响, 同时间隙闭合度高于 50% 时棒束弯曲对 CHF 的影响较大。然而实验研究对于微观测量空泡份额的变化及气泡运动速度的难度较大, 捕捉不到气泡的演化过程, 而计算流体动力学(CFD)为微观层面的认识提供了有力工具。因此, 为了研究棒弯曲对子通道内流动特性与气泡演化的影响。本文基于 Fluent 软件, 采用 VOF 模型, 利用非稳态、隐式分离求解算法进行模拟计算, 数值研究了不同含气率下棒弯曲程度对棒束子通道内空气-水流动相态分布的影响。

## 1 数学模型

VOF 模型<sup>[11]</sup>是建立在固定的欧拉网格下的表面跟踪办法, 建立在两种或多种流体(或相)

不互相混合的前提下。在 VOF 模型中, 不同的流体组分共用着一套动量方程通过引进相体积分数这一变量, 实现对每一个计算单元相界面的追踪。在每个控制容积内, 所有相的体积分数之和为 1。在两相流动计算中, 若液相的体积分数为  $\alpha$ , 则可能存在以下三种情况:  $\alpha=1$  控制体内被液相充满;  $\alpha=0$ , 控制体被气相充满;  $0<\alpha<1$ , 控制体内包含两相流界面。

基于  $\alpha$  的值, 适当的属性和变量在一定范围内分配给每一个控制单元。

体积分数方程跟踪相之间的界面是通过求解一相或多相的容积比率的体积分数方程(连续性方程)来完成的。对于液相, 方程如下

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + v_l \nabla \alpha_l = \frac{S_{\alpha_l}}{\rho_l} + \frac{1}{\rho_l} (m_{gl} - m_{lg}) \quad (1)$$

式中:  $m_{lg}$  ——气相到液相的质量输送;

$m_{gl}$  ——液相到气相的质量输送。

### 1.1 两相界面流体属性

存在于每一控制容积的分相决定出现在输运方程中的两相流界面属性。在两相流系统中, 液相用下标  $l$  表示, 气相用下标  $g$  表示, 如果液相的容积比率被追踪, 那么每一单元中的密度由下式给出:

$$\rho = \alpha_l \rho_l + (1 - \alpha_l) \rho_g \quad (2)$$

通常对于两相系统, 容积比例平均密度采用加权平均的方式给出:

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad (3)$$

所有其他属性(如粘度)都以这种方式计算。

### 1.2 动量方程

通过求解整个区域内的单一的动量方程, 作为结果的速度场由各相共享。两相密度  $\rho$  和粘度  $\mu$  的属性, 即各相的体积分数决定动量方程的求解。

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

### 1.3 表面张力

对于棒束弯曲子通道内的两相流动系统，表面张力不可忽略。Brackbill 等<sup>[8]</sup>在 1992 年提出了连续表面力模型。在计算过程中，附加的表面张力增加到动量方程中源项上，如下式

$$F_{\text{vol}} = \sigma_{\text{lg}} \frac{\rho \kappa_1 \nabla \alpha_1}{\frac{1}{2}(\rho_l + \rho_g)} \quad (5)$$

式中： $\rho$ ——平均密度；

$\sigma_{\text{lg}}$ ——表面张力系数。

## 2 几何模型及网格划分

本文研究所采用的几何流道包括直棒及三种不同弯曲程度弯棒形成的 2×2 棒束子通道共四种通道结构：正常子通道、50%闭合度子通道、80%闭合度子通道以及完全接触的情况。单棒直径为 9.5 mm，棒间距 12.6 mm，子通道全长 400 mm，弯曲部分长度为 250 mm，弯区段距离流道出入口 75 mm。

对于不同弯曲程度的子通道，其网格划分方式不尽相同，有着些许调整，为了保证计算的质量，均采用了结构化的划分方法，网格划分采用 L 型拓扑结构，图 1 给出了不同闭合度

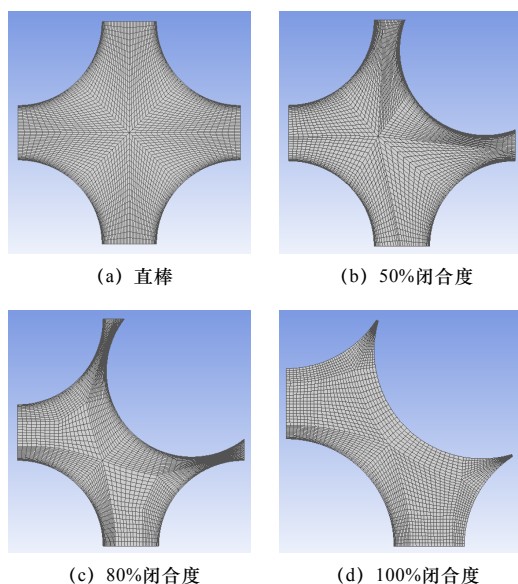


图 1 网格划分  
Fig.1 Mesh division

子通道的最大弯曲截面上网格节点。在计算过程中发现，当网格的最小尺寸低于  $1 \times 10^{-5}$  m 时计算极易发生离散，其可能原因是网格的延伸比较大。故在不同弯曲程度的子通道模型网格划分时均保证了其有较好的膨胀比与延伸比，同时，并在壁面出进行了边界层加密，控制第一层网格  $y^+$  值在 1.3 左右。根据网格无关性测试，各个模型的网格数量控制在 60 万~100 万间能满足计算的收敛性及准确性。具体参数及网格划分情况如表 1 所示。

表 1 网格划分信息

Table 1 The mesh division information			
模型	网格数量	最大纵横比	最低正交质量
Normal	908 352	108.0	0.713
50%	647 168	77.1	0.532
80%	932 580	253.0	0.492
Contact	610 050	227.0	0.526

## 3 计算方法及边界条件

对于棒束弯曲子通道模型模拟空气-水两相流动，空气、水两相可视为不可压缩、等温、定常物性的流体。其中  $\rho_{\text{air}} = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ， $\mu_{\text{air}} = 1.789 4 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ； $\rho_{\text{wat}} = 998.2 \text{ kg/m}^3$ ， $\mu_{\text{wat}} = 1.000 3 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。水的表面张力  $\sigma$  为 0.07 N/m。进一步选择了瞬态 VOF 模型对两相之间的流动过程进行模拟计算。同时考虑到湍流两相间的扰动、子通道模型的高曲率及壁面无加热等其它条件，故选择标准壁面的 RNG  $k-\varepsilon$  模型进行湍流模拟。在求解方法中利用 SIMPLIC 方法耦合流场压力及速度，使用 PRESTO! 方式离散压力，体积分方程采用隐式时间格式离散求解。相间界面采用分段线性界面重构 (PLIC) 追踪，使两相界面更为精细。动量方程、湍流动能方程和湍流耗散率方程利用二阶迎风格式离散，以保证计算得精准性。考虑计算成本及计算精度，时间步长选择 0.000 1 s，既保证计算能够平稳的收敛满足了模拟的可靠性，又使得计算时间不至于过长，且每隔 0.02 s 数据进行保存一次。

边界条件：设置入口边界条件为速度入口边界，两相流速设置为 1.2 m/s；研究了两种入

口含气率 (0.1 和 0.5) 的工况; 出口设定为压力出口, 无回流; 设定入口及出口的湍流模型参数, 水力直径根据几何结构尺寸计算为 11.78 mm, 湍流强度设为 4.85%; 4 个圆弧壁面均设为无滑移壁面条件; 其余面设置为对称边界条件。

## 4 数值模拟结果及分析

本文计算了不同含气率、不同弯曲程度棒束子通道的两相流动, 共 12 个算例, 计算了 0.5 s 内通道的流动情况, 计算发现当 0.22 s 后通道内的流动相对比较稳定, 空泡的演变也比较规则。

为了验证模型的有效性, 基于我们开发的 5×5 棒束空气-水两相流动实验数据拟合得到的两相摩擦压降模型<sup>[12]</sup>, 通过对比模拟的总压降与模型计算的总压降来验证模型的有效性。如表 2 所示, 对于入口含气率为 0.1 和 0.5 的工况, 其模拟的总压降相对偏差在 20% 以内, 具有较好的吻合性。

表 2 模型有效性验证

入口含气率	模型计算/Pa			模拟值/Pa	相对偏差/%
	重力压降	摩擦压降	总压降	总压降	
0.1	3 614.5	1 512.6	5 127.1	5 959.8	16.24
0.5	2 563.4	1 426.5	3 990.0	4 228.7	5.98

### 4.1 子通道内平均空泡份额

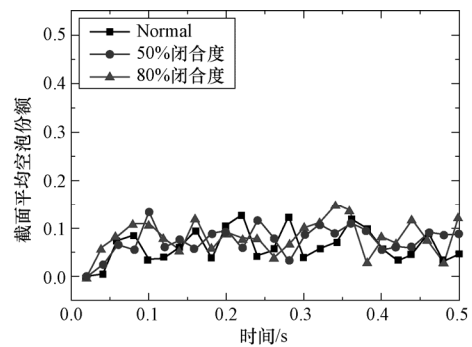
棒束弯曲必然使得冷却剂通道变窄, 子通道内平均空泡份额可能会受到一定的影响。而平均空泡份额的变化往往反映了冷却剂流动结构的变化。为了研究棒束弯曲对子通道内空泡份额的影响, 本文在子通道模型上选择三个轴向横截面, 分别位于棒弯曲最大处、棒弯曲最大截面上游 130 mm 处及棒弯曲最大截面下游 130 mm 处。

(1) 含气率=0.1

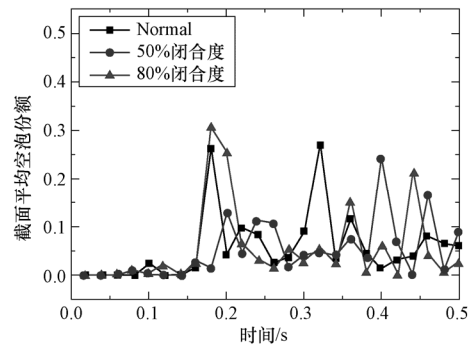
入口含气率为 0.1 时各截面的平均空泡份额随时间变化曲线如图 2 所示。观察截面平均空泡份额沿轴向的变化, 在棒束通道入口附近区域 [见图 2 (a)], 由于空气和水以均匀混合的方式进入, 此时截面平均空泡份额波动较小; 而随着流动发展, 小气泡逐渐聚合成为大气泡,

大气泡流经所监测截面时, 受气泡截面面积变化较大的影响, 截面平均空泡份额呈现出较大的波动 [见图 2 (b) 和 (c)]。

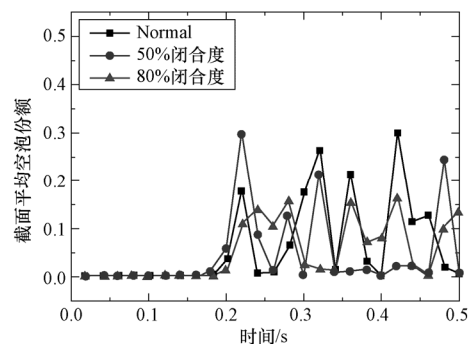
观察含气率=0.1 时各截面的平均空泡份额随时间变化曲线, 发现不同弯曲程度子通道在弯曲段中部截面上的平均含气率峰值较为接近, 但 80% 闭合度子通道在弯曲段出口截面的含气率峰值相对较低, 即棒束弯曲程度较大时, 流道内气泡的体积会相对较小, 但其流速也相对较快。



(a) 棒弯曲最大处上游 130 mm



(b) 棒弯曲最大截面处



(c) 棒弯曲最大处下游 130 mm

图 2 截面平均空泡份额随时间变化 (入口含气率为 0.1)

Fig.2 The variations of average void fraction at the cross section with time (inlet void fraction=0.1)

(2) 含气率=0.5

入口含气率为 0.5 时各截面的平均空泡份额随时间变化曲线如图 3 所示。观察截面平均空泡份额沿轴向的变化, 与含气率为 0.1 时工况具有同样的变化趋势, 但由于空泡份额增大, 入口处均匀的小气泡较早地发生聚合成为大气泡, 因此在最大截面上游 130 mm 仍观测到较

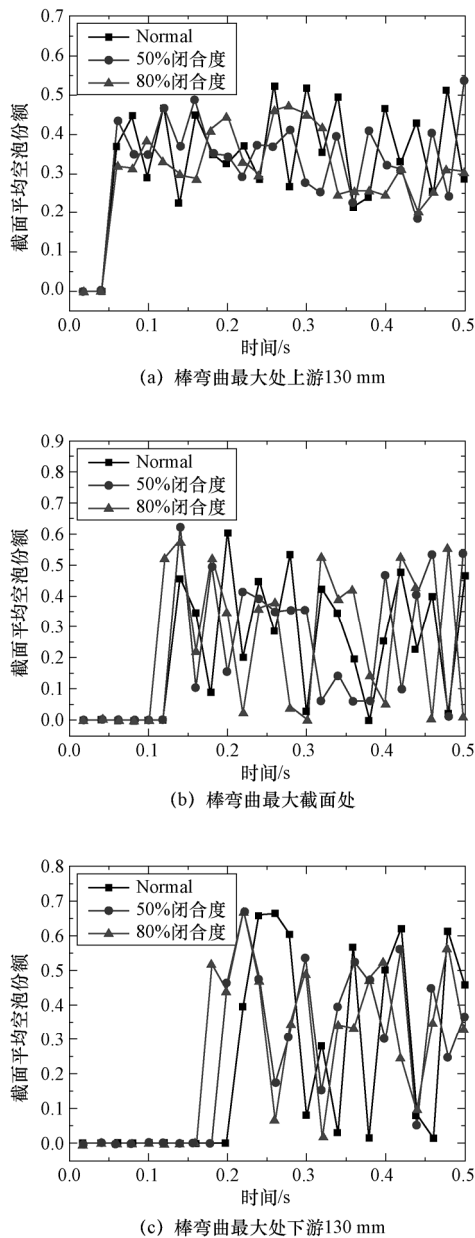


图 3 截面平均空泡份额随时间变化 (入口含气率为 0.5)

Fig.3 The variations of average void fraction at the cross section with time (inlet void fraction=0.5)

大的截面平均空泡份额波动。观察含气率=0.5 时各截面的平均空泡份额随时间变化曲线, 发现闭合度较大的子通道的空泡份额与闭合度较小的子通道的空泡份额之间并没有较大差距, 其峰值较为近似, 但由于闭合度高的子通道截面面积相对较小, 因此其内部的气弹体积也相对较小。

4.2 棒弯曲对空泡演化的影响

如图 4 为入口含气率为 0.1 时子通道内流型近似泡状流。气相向流道中心聚集, 形成近似圆柱体, 头部偏球形的较大气泡。同时在四个流道分支上也观察到连续的体积相对较小的气泡。随着闭合度的不断增加, 流道中心气泡在径向受到压迫从而在轴向产生一定的延伸。弯曲段附近流道分支上的气泡数目增加, 其与流道中心气泡结合的概率也有所增加。随着闭合度的不断增加, 弯曲段内气泡间的距离逐渐增大, 其主要原因是弯曲段入口对气泡有一定的加速作用, 且闭合度大的子通道加速作用更明显, 因此弯曲段内气泡的速度相对较快。

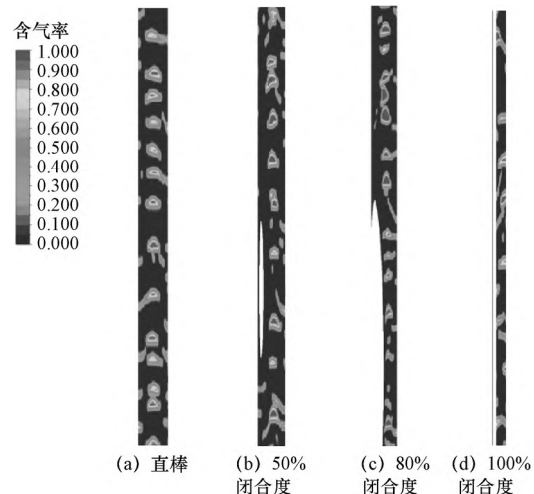


图 4 不同闭合度子通道 y-z 面两相分布图 (入口含气率为 0.1)

Fig.4 The contours of phase distribution at y-z plane for rod bowing with different gap closures (inlet void fraction=0.1)

如图 5 所示为入口含气率为 0.5 时子通道内流型近似弹状流, 四个圆弧壁面处, 气弹周围的液膜被撕破, 许多流道分支内的气泡与流道

中心的气泡结合。随着闭合度的不断增大，流道中心内泰勒气泡变得更加扁平，修长。靠近弯曲壁面的两个流道分支内的气相体积明显减少，大量气泡在另一边的流道分支内聚集。泰勒气泡在经过弯曲段后逐渐变厚，但整体偏向弯曲壁面的对角面一侧并与之有大面积的接触。随着闭合度的不断增加，弯曲段内泰勒气泡间的距离也逐渐增大。

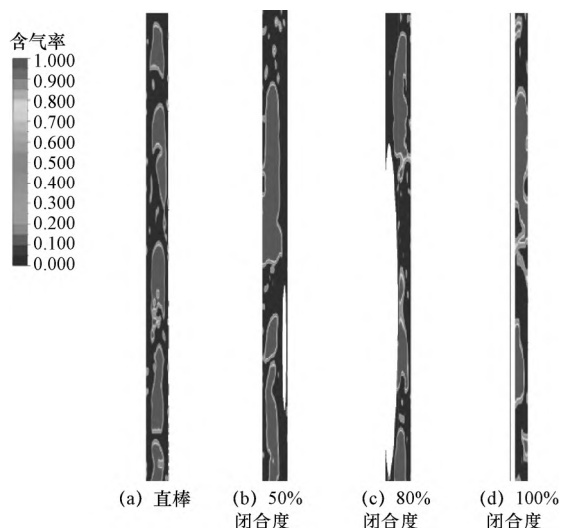


图 5 不同闭合度子通道  $y$ - $z$  面两相分布图  
(入口含气率为 0.5)

Fig.5 The contours of phase distribution at  $y$ - $z$  plane for rod bowing with different gap closures (inlet void fraction=0.5)

### 4.3 棒弯曲对局部空泡分布的影响

#### (1) 入口含气率=0.1

如图 6 棒弯曲最大截面处两相分布云图，流道中心的气泡形状随着闭合度的不断增加，整体形状逐渐扁平化。当一根棒束与另外两个完全接触时，流道严重压缩变形，流道中心的气泡出现与弯曲壁面接触的情况，即弯曲棒束壁面出现裸露，此时该处的传热将急剧恶化，严重时可能导致 CHF 的提前发生。50%闭合度子通道中心气泡下部存在极为突兀的凹陷，如图 7 所示，在该处凹陷附近可以观察到一个较大的二次流涡流，涡流的旋向与凹陷极为匹配，这种情况在 80%闭合度模型的其它截面中也能观察到。

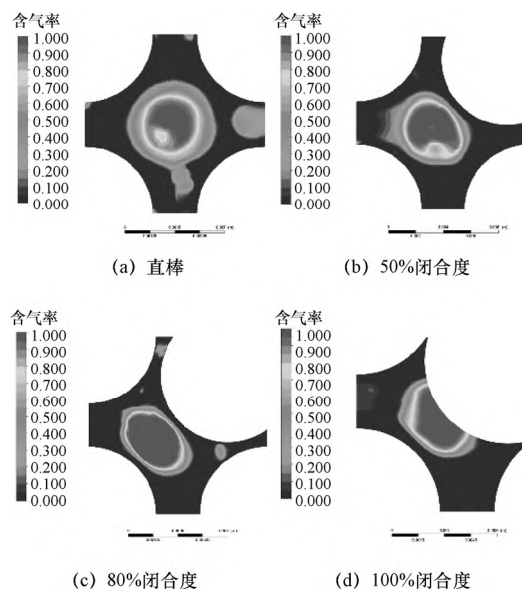


图 6 棒弯曲最大处两相分布云图 (入口含气率为 0.1)  
Fig.6 The contours of phase distribution at the plane with maximum rod bowing (inlet void fraction=0.1)

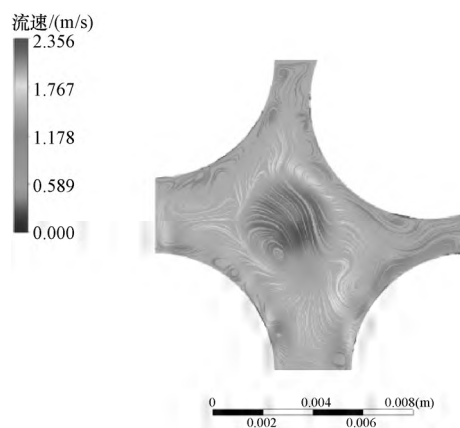


图 7 50%闭合度子通道二次流流线图  
(入口含气率为 0.1)

Fig.7 The secondary flow at rod bowing with a gap closure of 50% (inlet void fraction=0.1)

#### (2) 入口含气率为 0.5

如图 8 所示为入口含气率 0.5 时流道中心存在体积较大的泰勒气泡，其易与四个圆弧壁面发生接触。直棒通道内，气弹可能与任意壁面发生接触，从而使壁面出现裸露情况，而在较高弯曲程度时则主要与弯曲壁面或其对角面相接触，即 CHF 更有可能发生在这两个壁面。在泰勒气泡的气芯内夹杂着一些小液滴，液滴夹带现象更易在壁面弯曲时的子通道内被观察到。在子通道的一些部位，截面平均空泡份额

大大高于 0.5, 此时该界面呈现在高含气率时出现的液相堆积在四个流道分支内, 中心流道被气相完全占据的情况, 这种情况在完全接触模型中极为普遍。在 50% 闭合度子通道模型中观察到靠近弯曲壁面对角线一侧的两相界面发生向内的凹陷。如图 9 所示, 弯曲面对侧两流道分支内形成了两个较强的二次流涡流, 在其影响下, 两相界面产生了较为明显的畸变。

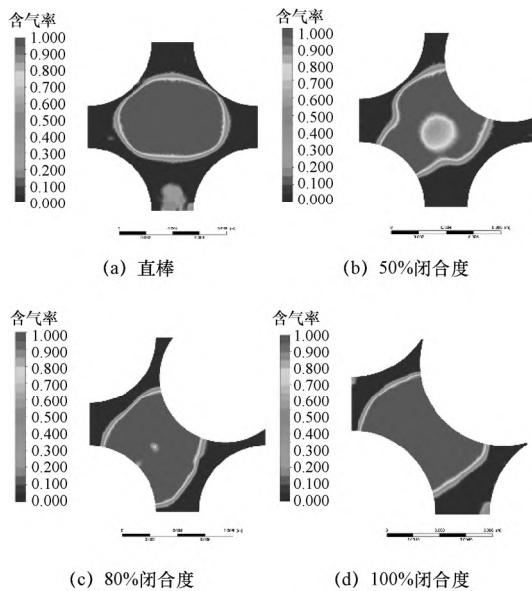


图 8 棒弯曲最大处两相分布云图 (入口含气率为 0.5)

Fig.8 The contours of phase distribution at the plane with maximum rod bowing (inlet void fraction=0.5)

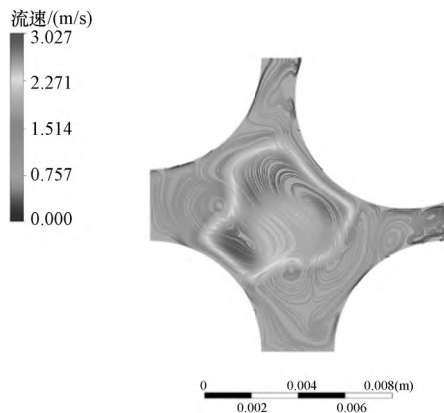


图 9 50% 闭合度子通道二次流流线图 (入口含气率为 0.5)

Fig.9 The secondary flow at rod bowing with a gap closure of 50% (inlet void fraction=0.5)

## 5 结论

本文采用 VOF 模型对棒弯曲子通道内两相

流动进行了数值研究。主要工作和结论如下:

(1) 壁面弯曲对截面平均空泡份额的影响较小, 但在中部截面闭合度大的子通道面积较小, 即空泡的体积也相对较小。

(2) 弯曲壁面会使流道中心气泡形状趋于扁平化, 同时也会使其位置向曲面对角侧偏移, 液相更容易在弯曲壁面流道分支内聚集。在较大闭合度的子通道中弯曲壁面及其对角面容易发生裸露, CHF 更有可能发生在该处。

(3) 两相界面及不规则流道促使了二次流涡流的形成, 而二次流涡流的形成又改变了局部空泡的分布情况, 导致空泡形状的畸变。

## 参考文献:

- [1] Zejun X, Xianhui S, Xuemei L, et al. Experimental research progress on critical heat flux of Chinese PWR [J]. Nuclear Engineering & Design, 2004, 229 (2-3): 213-222.
- [2] Nakajima I, Kikuchi A and Kobori T. A study of the effect of rod-bowing on critical heat flux [J]. Nuclear Engineering and Design, 1977, 42: 237-245.
- [3] Wei L, Pan L M, Zhao M Y, et al. Numerical study of adiabatic two-phase flow patterns in vertical rectangular narrow channels [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110 (5): 1101-1110
- [4] Hill K.W., Motley F.E., Cadek F.F., et al. Effect of a Rod Bowed to contact on critical heat flux in pressurized water reactor rod bundles, 1975, 75-WA/HT-77.
- [5] Wang Y, Wang M, Ju H, et al. CFD simulation of flow and heat transfer characteristics in a 5×5 fuel rod bundles with spacer grids of advanced PWR [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2019.
- [6] Ju Haoran, Wang Mingjun, Wang Yingjie, Minfu Zhao, wenxi tian, Tiancai Liu, Guanghui SU, Suizheng Qiu. Large Eddy Simulation on the Turbulent Mixing Phenomena in 3×3 Bare Tight Lattice Rod Bundle using Spectral Element Method. Nuclear Engineering and Technology, 2020.
- [7] 赵铎. 水平管内气液两相流流型数值模拟与实验研究 [D]. 中国石油大学, 2007.
- [8] 秦汉. VOF 方法在模拟两相流中的应用 [D]. 南京航空航天大学, 2015.
- [9] 潘良高, 徐琛, 柏祥华, 等. 微通道内气液两相流型的数值模拟 [J]. Numerical Simulation of Gas-liquid Two Phase

- Flow Pattern in Micro-channel Heat Exchanger [J]. 制冷技术, 2014 (004): 8-12.
- [10] 赵艳明, 潘良明, 张文志. 垂直上升矩形流道内气液两相流流型图的数值模拟 [J]. 核科学与工程, 2012, 32 (3): 254-259.
- [11] 王晓峰. 窄矩形通道内两相流动实验研究与数值模拟 [D]. 哈尔滨工程大学, 2015.
- [12] Zaiyong Ma, Tingpu Ye, Quanyao Ren, et al., Friction and local pressure loss characteristics of 5×5 rod bundle with spacer grids [J]. Annals of Nuclear Energy, 2020, 140: 107106.