

# 变曲率螺旋管内两相流型变迁模拟研究

张艳婷<sup>1,2</sup> 庄乃亮<sup>1,2</sup> 李阳阳<sup>1,2</sup> 赵浠君<sup>1,2</sup> 赵行斌<sup>2,3</sup> 汤晓斌<sup>1,2</sup>

(1. 南京航空航天大学核科学与技术系, 南京 211106;  
2. 空间核技术应用与辐射防护工业和信息化部重点实验室, 南京 211106;  
3. 南京航空航天大学航天学院, 南京 211106)

**摘要** 为进一步提升蒸汽发生器螺旋换热管的传热传质性能, 本文提出了一种盘管曲率周期性变化的变曲率螺旋管改进方案。并对变曲率螺旋管内气液两相流动特性开展了数值模拟研究。基于有限元方法, 建立了单根变曲率螺旋管内流体六面体结构化网格, 采用 VOF 模型捕捉相界面, 分析管内液相流场分布特性。研究发现, 在同一根变曲率螺旋管内不同位置管段的两相分布与流型并不相同, 部分管段出现了分层流-波状流-塞状流的间歇性流型变迁现象。这是由于盘管曲率的周期性改变, 使得管内液相所受离心力不断改变, 两相分布在空间位置及时间分布上均不断变化, 产生了两相流型变迁的现象。

**关键词** 气液两相流; 变曲率螺旋管; 流型变迁; 蒸汽发生器; 离心力

中图分类号: TL332 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2024)07-2026-07

## Simulation of Two-phase Flow Pattern Transition in Helical Tubes With Variable Curvature

ZHANG Yanting<sup>1</sup> ZHUANG Nailiang<sup>1,2</sup> LI Yangyang<sup>1,2</sup> ZHAO Xijun<sup>1,2</sup>  
ZHAO Hangbin<sup>2,3</sup> TANG Xiaobin<sup>1,2</sup>

(1. Department of Nuclear Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;  
2. Key Laboratory of Nuclear Technology Application and Radiation Protection in Astronautics, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing 211106, China;  
3. School of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

**Abstract** To further advance the performance of heat and mass transfer in the helical heat exchange tubes of the steam generator, this paper presents an enhancement plan involving a helical tube design featuring periodic curvature changes. A numeric simulation study was conducted to examine the characteristics of a gas-liquid two-phase flow within tubes of varying curvature. By applying the finite element method, a hexahedral structured grid was established for the fluid flow within a single helical tube. The Volume of Fluid (VOF) model was utilized to capture the phase boundary, and the characteristics of the in-tube liquid phase flow field distribution were analyzed. The research found differing two-phase distributions and flow patterns in different sections within the same helically-curved tube, with some sections displaying an intermittent transition phenomenon from stratified flow to wavy flow, and then to plug flow. This phenomenon is attributed to the periodic variations in coil curvature, which in turn continuously alters the centrifugal force experienced by the in-tube liquid phase, leading to a dynamically changing two-phase distribution in both spatial and temporal contexts.

**Key words** two-phase flow; variable curvature helical tube; flow pattern transition; steam generator; centrifugal force

## 0 引言

蒸汽发生器是核反应堆的压力边界以及核电站一、二回路的热交换枢纽, 是核岛三大重要设备之一。螺旋管式蒸汽发生器具有换热性能高、结构紧

凑、热膨胀自补偿性好等优点<sup>[1,2]</sup>, 被应用于第四代堆与小堆技术中。先进高效的螺旋管式蒸汽发生器是核能中长期计划的重点研发对象之一<sup>[3]</sup>。

收稿日期: 2024-01-19; 修订日期: 2024-06-23

基金项目: 国家自然科学基金 (No.12105142); 江苏省博士后科研资助 (No.2021K387C); 国创计划 (No.202210287046Z, No.202310287152Y)

作者简介: 张艳婷 (1997-), 女, 硕士生, 主要从事蒸汽发生器传热传质研究。

通信作者: 庄乃亮, 副教授, 博士, 主要从事核反应堆热工水力与空间核动力研究, zhuangnailiang@nuaa.edu.cn。

在提高螺旋管式蒸汽发生器的思路与研究方面, Li 等<sup>[4]</sup>研究了半圆形螺旋管内侧和外侧的速度场及温度场的协同作用, 发现由于二次流影响较小, 螺旋管的内侧壁面传热性能低于外侧壁面。Zhang 等<sup>[5]</sup>研究了矩形截面螺旋管内流动与传热特性, 发现增加矩形截面的纵横比会导致截面二次流场减弱, 认为可以通过增强螺旋管内侧壁面区域的二次流场结构来提高传热传质性能。对于螺旋管束布置思路方面, Lee 等<sup>[6]</sup>利用大涡模拟研究了五层定曲率螺旋管束壳侧流场分布, 发现由于管束间存在遮挡, 出现明显的流动死区。Shen 等<sup>[7]</sup>研究了不同螺旋角排列下螺旋管束壳侧流场结构, 发现适度增大螺旋角可以使截面速度分布增大, 流体搅混能力增强。可以看到, 传统的定曲率螺旋管式蒸汽发生器因管内流场结构不再随着流程变化导致管内流体传热传质性能不佳以及在壳侧由于管束间紧密排列管与管之间出现遮挡, 出现低流速区甚至流动死区, 导致壳侧流体横掠冲刷管束不充分、水垢杂质沉积等问题, 无法满足越来越高的换热需求。对此, 本文提出了一种盘管曲率沿管道周期性变化的变曲率螺旋管改进思路, 并采用纵向交叉布置的变曲率螺旋管束结构方案<sup>[8]</sup>, 以实现强化管内流体横向混合以及强化壳侧流体冲刷叉排布置管束的目的, 具体方案见第 1 节。

蒸汽发生器传热管内因不断被加热从而会发生相变, 出现流动沸腾现象, 沸腾过程分为对流换热、过冷沸腾、核态沸腾、液膜对流沸腾和蒸干传热等五个典型流动传热阶段。对螺旋管内两相流型的研究方面, 许多学者采用空气和水开展研究。Zhu 等<sup>[9]</sup>实验研究了螺旋管内空气与水的两相流型, 并提出了流型转换准则。Zhuang 等<sup>[10]</sup>实验研究了螺旋管内空气与水的两相流型, 共发现六种典型流型(泡状流、塞状流、弹状流、环状流、半环状流、分层波状流)。Che 等<sup>[11]</sup>通过模拟与实验对比分析, 认为 VOF 方法可以较好的捕捉相界面。Mansour 等<sup>[12]</sup>通过 VOF 方法分析了螺旋管内空气和水的两相流型、速度分布和二次流场结构。

本文将采用 VOF 方法模拟变曲率螺旋管内空气-水的两相流动特性, 开展变曲率螺旋管内气液两相流型分析。

## 1 变曲率螺旋管结构与管束结构

如图 1 所示, 与典型螺旋盘管不同的是, 该螺旋盘管距离轴心的水平垂直距离是呈现周期性变化的, 即螺旋管的曲率半径随管道沿程周期性变化。将变曲率螺旋盘管纵向交叉布置可得到变曲率螺旋

盘管束结构, 如图 2 所示。本文选用的变曲率螺旋盘管长轴  $D$  为 440 mm, 短轴  $d$  为 280 mm, 圆管内径  $r$  为 16 mm, 节距  $P$  为 60 mm, 倾斜角  $\beta$  为  $6.65^\circ$ 。

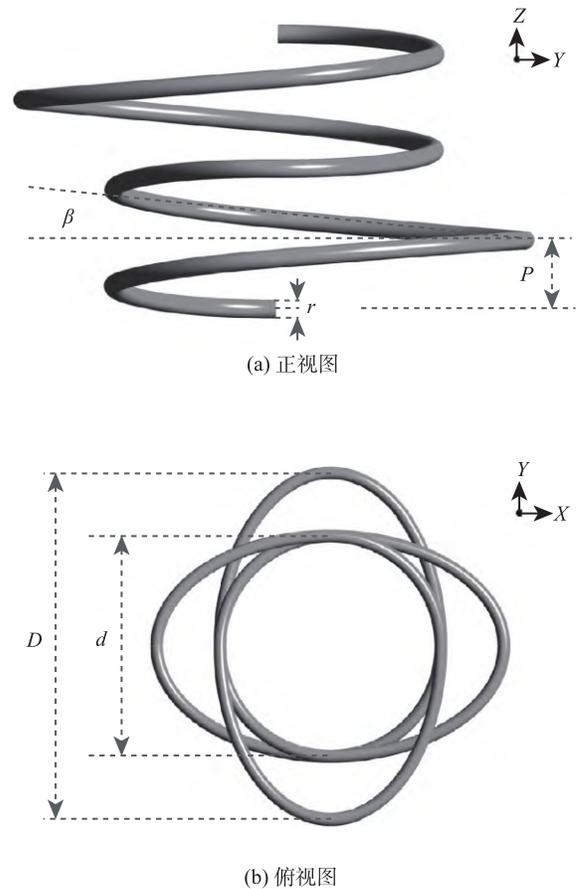


图 1 变曲率螺旋盘管

Fig. 1 Variable curvature helical tube



图 2 纵向交叉布置的变曲率螺旋管束

Fig. 2 Variable curvature helical tube bundle arranged longitudinally

图 3 是变曲率螺旋盘管中心线距离盘管中心轴的水平距离随管程变化曲线。径向坐标是距离的长度, 轴向坐标是变曲率螺旋管沿程轴向角度, 入口处轴向角定义为  $0^\circ$ , 出口处轴向角则为  $1080^\circ$ 。可以看出, 随着轴向角的增大呈周期性变化, 螺旋管的曲率半径也是周期性变化规律。

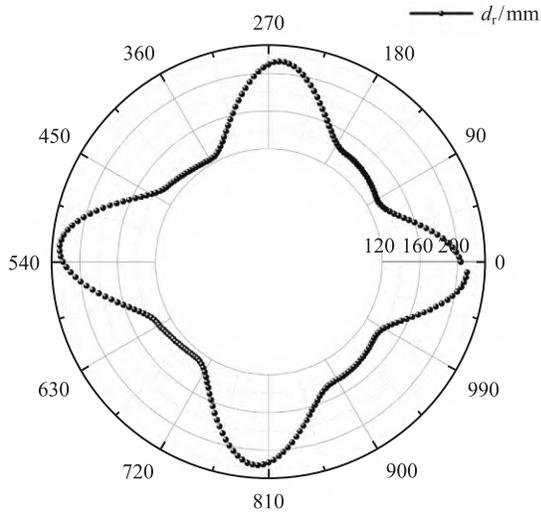


图3 变曲率螺旋盘管  $d_r$  随轴向角的变化曲线  
Fig. 3 Variation curve of helical tube  $d_r$  with axial Angle

## 2 数值模拟方法

### 2.1 网格结构

采用六面体结构化网格,边界层数为5层,增长率为1.2,总节点数为5490425,总单元数为1321600。网格平均正交质量为0.98。

为对比分析不同位置(管段)的气液两相分布,选取了同一根变曲率螺旋管的三个管段(管段A、管段B和管段C)作为代表。每个管段总长350 mm,并在每个管段内各自截取一个横截面,对应为截面a、截面b和截面c,管段与截面选取位置示意图如图4所示。

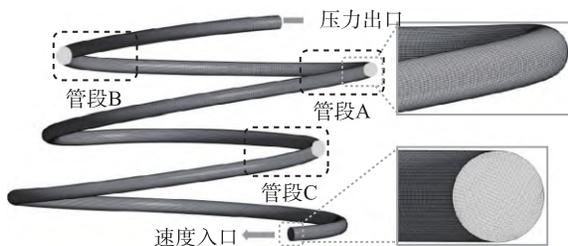


图4 网格划分及选取管段位置说明  
Fig. 4 Meshing and selection of tube areas position description

### 2.2 数值模型与边界条件

流体在管内自下向上流动,两相流模型选用VOF模型精确捕捉相界面<sup>[13]</sup>。湍流模型选用Realizable  $k-\varepsilon$ 模型<sup>[14,15]</sup>。空气设为主相,且与水之间的表面张力为 $0.072 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ ,液相和气相均为不可压缩流体。壁面函数采用Scalable Wall Function(SWF),

求解方法采用PISO算法,压力方程采用PRESTO算法,动量方程、湍流方程均采用二阶迎风格式。时间步长设置为 $0.0001 \text{ s}$ ,入口边界为速度入口,出口边界为压力出口。空气入口速度为 $12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,水入口速度为 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

## 3 计算结果与讨论

### 3.1 变曲率螺旋管内两相总体分布

图5所示为变曲率螺旋管内2个时刻的空气与水总体分布。浅色区域是空气,深色区域是水。可以看出在不同管段内两相流型并不同,接下来将对管段A、B、C内的两相分布依次分析。

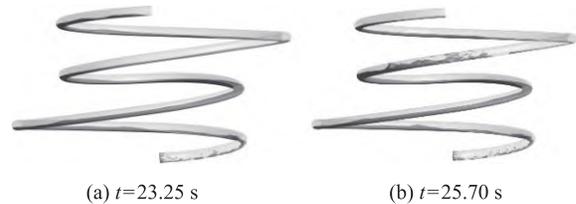


图5 管内两相总体分布  
Fig. 5 Phase interface distribution at different times

### 3.2 管段A的两相流型分析

图6是 $t=22.24 \text{ s}$ 至 $t=22.72 \text{ s}$ 管段A的相分布云图。在 $t=22.24 \text{ s}$ 时,管段A内液态水平稳缓慢的流动,管内流型为分层流, $t=22.50 \text{ s}$ 时,由于液态水已经流经了多处曲率变化比较大的管段,且期间内高速气体对液态水的夹带作用,液态水在截面a附近时,速度很小,导致液相由连续相转变为非连续相。当 $t=22.63 \text{ s}$ 时,由小波浪发展为的速度很快、幅度很大的大波浪开始流经管段A,管内流型为塞状流,随着时间的推移,在 $t=22.70 \text{ s}$ 时抵达截面a,随后流经截面a,与管底部的水交汇。

图7是截面a在不同时刻的相分布云图(浅色区域代表空气,深色区域代表水)。可以看出,液相一开始分布在管道底部, $t=22.7 \text{ s}$ 时,波浪前端流经截面a,由于波浪速度很快,所以在流动过程中受到的离心力也会变大,因此可以看到在 $t=22.7 \text{ s}$ 、 $t=22.9 \text{ s}$ 和 $t=25.9 \text{ s}$ 时,液相分布在管外侧。

图8(a)是截面a的空泡份额随时间演变曲线。可以看出,空泡份额整体数值在0.6至1.0之间波动,波动幅度很大,由1.0急剧下降至0.6附近。 $t=22.50 \text{ s}$ 至 $t=23.5 \text{ s}$ 、 $t=25.5 \text{ s}$ 至 $t=26.5 \text{ s}$ 这两个区间内出现了数值为1.0的情况。结合图6和图7,得到流体在管段A内流动,一开始液态水在管底部平稳缓慢的流动,流型为分层流,由于高速气体

对液体表面的持续冲刷, 相界面出现了明显的波动, 流型由分层流变迁为分层波状流, 空泡份额数值在 0.9 至 1.0 区间波动, 由于液相持续受到离心力及气相的夹带作用, 由连续相转变为非连续相, 流体继续流动, 小波浪发展为速度很快、幅度很大的大波浪流经管段 A, 对管段 A 内的流体进行搅混, 空泡份额由 1.0 急剧下降至 0.6, 波浪的经过使空泡份额数值在  $t=23.0$  s 附近波动, 流型由分层波状流变迁为塞状流, 持续约 0.5 s 后, 流型再次变迁为分层波状流。 $t=25.5$  s 至  $t=26.5$  s 区间内也出现了分层波状流-塞状流的流型变迁现象。



图 6 管段 A 的相分布云图

Fig. 6 Phase distribution cloud image of tube area A

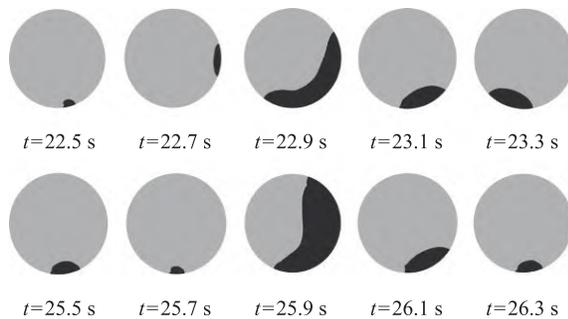
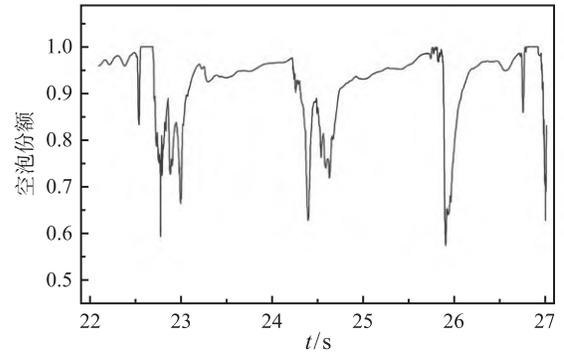


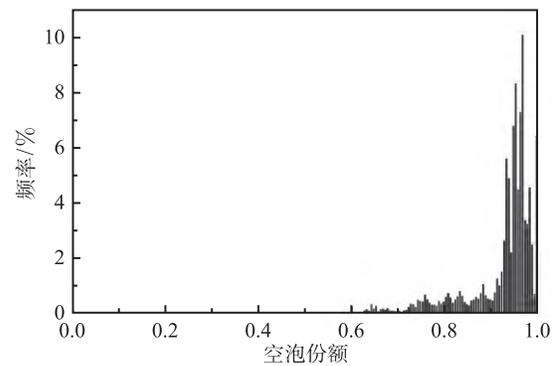
图 7 截面 a 的相分布云图

Fig. 7 Phase distribution cloud image of section a

图 8(b) 是空泡份额概率密度直方图。可以看出空泡份额集中在 0.6 至 1.0 之间, 且在 0.95 附近有一个明显的波峰, 气相面积基本占据管道面积的 0.8 倍以上。



(a) 空泡份额随时间演变曲线



(b) 空泡份额概率密度直方图

图 8 空泡份额随时间演变曲线 (a)、概率密度直方图 (b)

Fig. 8 Time-series analysis of void fraction (a), probability density histogram (b)

### 3.3 管段 B 的两相流型分析

如图 9 所示是 B 段内相分布云图。和管段 A 内相分布云图相似,  $t=25.6$  s 时刻水在管底部平穩



图 9 管段 B 的相分布云图

Fig. 9 Phase distribution cloud image of tube area B

缓慢地流动，流型为分层波状流。流体继续在管内流动，由于速度小且高速气体的夹带作用，在  $t=25.8\text{ s}$  时液相不再是连续相，经过  $0.2\text{ s}$  后，流经管段 A 的波浪开始抵达管段 B，并且逐渐发展为速度很快、幅度很大的大波浪，波浪在管段 B 内持续了  $0.22\text{ s}$ ，流型由分层波状流变迁为塞状流。由于离心力的作用，很明显的看出水在流动过程中向管外侧偏移。

从截面 b 的相分布云图可以看出， $t=22.7\text{ s}$  以及  $t=22.9\text{ s}$ ，截面内均为气相， $t=25.5\text{ s}$  至  $t=25.9\text{ s}$  内，气相体积逐渐增大，但液态水仍比较平稳的在管底部流动，直至  $t=26.1\text{ s}$  时，第二个波浪抵达截面 b，增强了流体的搅混。

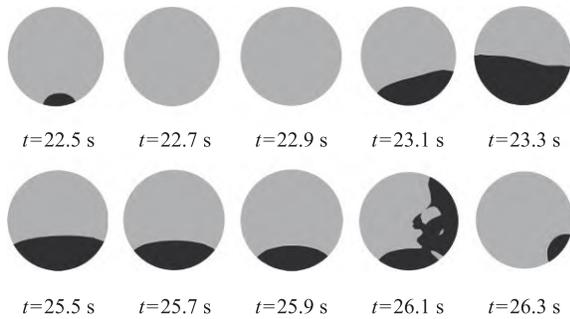


图 10 截面 b 的相分布云图

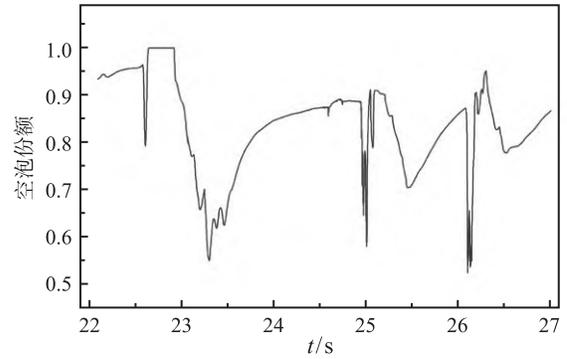
Fig. 10 Phase distribution cloud image of section b

如图 11(a) 所示，在  $t=22.5\text{ s}$  至  $t=23.5\text{ s}$  内，空泡份额数值为 1.0，且持续了约为  $3\text{ s}$ ，随后又急剧下降到 0.5 左右。液相也不再是连续相。空泡份额整体数值在 0.5 至 1.0 范围内波动，相比于管段 A，管段 B 的液态水只有一个时间段为非连续相，这是由于第一个波浪继续流动抵达管段 B，并与水交汇，使得该管段内水的体积占比增大，高速气体对液体的夹带作用减弱使液相不再连续。如图 11(b) 所示，空泡份额的概率密度分布在 0.5 至 1.0 区间，峰值于 0.85 附近。

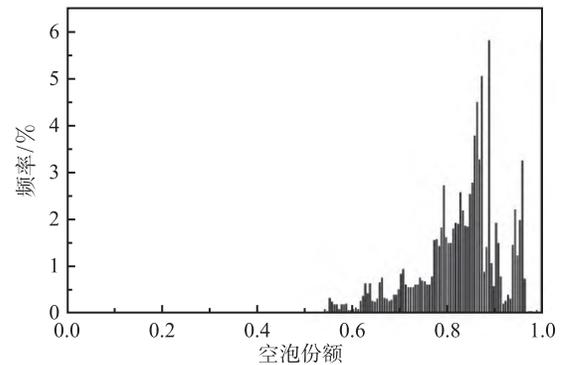
### 3.4 管段 C 的两相流型分析

管段 C 的相分布云图如图 12 所示，截取时间分别为  $t=25.00\text{ s}$  和  $t=25.03\text{ s}$ 。图 13 是截面 c 的相分布云图，可以看出，管底部的水厚度约占管径的一半，相界面几乎接近于水平，但是还是能看出有明显的波动。结合管段内相分布云图可以得出，由于气相速度远大于液相速度，所以高速空气会冲刷相界面，产生连续的扰动波浪。此时管内的流型为典型的分层波状流。

图 14(a) 是截面 c 的空泡份额随时间演变曲线。空泡份额在 0.3 至 0.6 之间波动，波动幅度有明显



(a) 空泡份额随时间演变曲线



(b) 空泡份额概率密度直方图

图 11 空泡份额随时间演变曲线 (a)、概率密度直方图 (b)  
Fig. 11 Time-series analysis of void fraction (a), probability density histogram (b)



图 12 管段 C 的相分布云图

Fig. 12 Phase distribution cloud image of tube area C

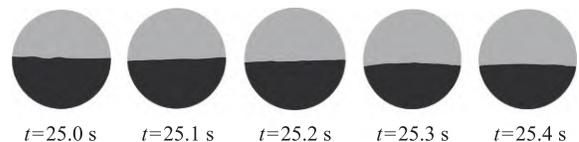


图 13 截面 c 的相分布云图

Fig. 13 Phase distribution cloud image of section c

的规律性，且有三处比较明显的峰，峰值大约为 0.58，每个峰宽的宽度约为  $1.5\text{ s}$ ，说明了流体在流动期间有波浪生成，小波浪逐渐演化为较大的波浪，随后较大的波浪在流经截面 c 后又演化为小波浪，即生成的波浪间歇性的流经管段 C。如图 14(b) 所示，空泡份额概率密度直方图呈现双峰分布，第一个峰明显高于第二个峰。

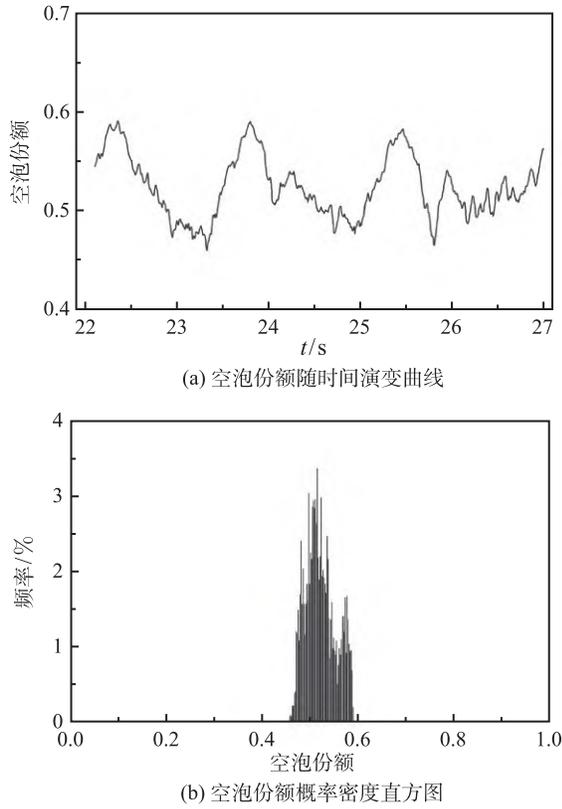


图 14 空泡份额随时间演变曲线 (a)、概率密度直方图 (b)  
 Fig. 14 Time-series analysis of void fraction (a), probability density histogram (b)

### 3.5 不同管段的空泡份额对比

图 15、16 分别为不同截面的空泡份额随时间变化曲线与概率密度直方图。可以看出, 流体在流动过程中, 不同位置处的空泡份额随时间的变化有

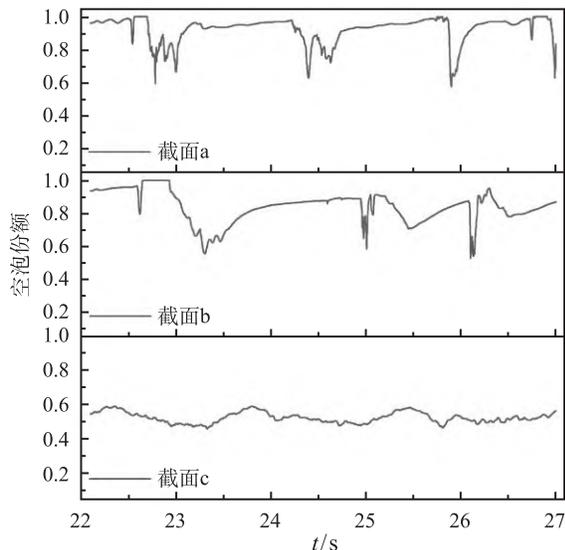


图 15 截面 a、b、c 处的空泡份额随时间变化曲线  
 Fig. 15 Time-series analysis of void fraction of sections a, b, and c

很大的差异, 越靠近管出口处, 变化越大。空泡份额数值集中的范围也不一样, 发生流型变迁的管段空泡份额集中范围更宽。说明流体在流动过程中, 因发生了分层流-分层波状流-塞状流的间歇性流型变迁, 导致相界面变化很大, 相应的截面空泡份额数值波动频率和幅度均有显著的差异。

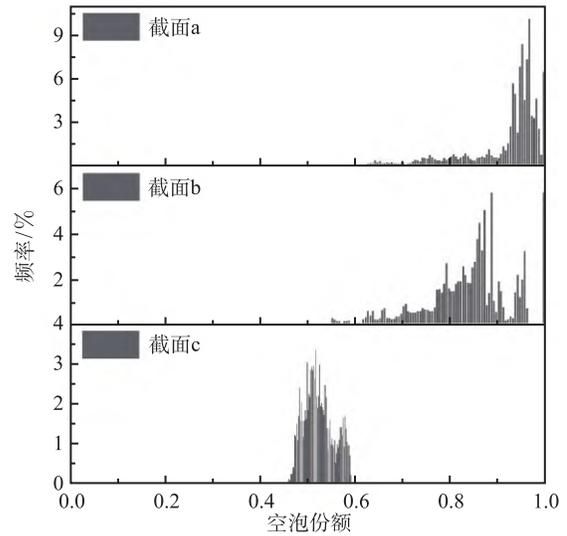


图 16 截面 a、b、c 处的空泡份额的概率密度直方图  
 Fig. 16 Void fraction histogram of sections a, b, and c

## 4 结 论

本文提出了一种盘管曲率周期性变化的变曲率螺旋管改进方案, 并基于 VOF 模型模拟了变曲率螺旋管内空气-水两相流动现象。主要结论如下:

1) 在变曲率螺旋管不同位置出现了两相分布规律并不不同的现象。部分管段内是分层流, 而有些管段则出现了分层流-波状流-塞状流的间歇性过渡, 即流型变迁现象。

2) 从两相受力分析角度看, 与传统的定曲率螺旋管两相流型不同, 在变曲率螺旋管内流体在不同位置所受离心力的大小和方向始终处于变化中, 叠加气体对液体的夹带作用, 最终产生了同一根管内不同管段位置处的两相分布并不不同的现象。

本文提出的改进方案进一步丰富了螺旋管强化传热传质的改进思路, 加深了对两相流在管内随着空间位置与时间演化特性的认识。

### 参 考 文 献

[1] Fsadni A M, Whitty J P M. A Review on the Two-Phase Heat Transfer Characteristics in Helically Coiled Tube Heat Exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 95: 551-565

[2] Naphon P, Wongwises S. A Review of Flow and Heat

- Transfer Characteristics in Curved Tubes [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2006, 10(5): 463–490
- [3] Abram T, Ion S. Generation-IV Nuclear Power: A Review of the State of the Science [J]. *Energy Policy*, 2008, 36(12): 4323–4330
- [4] Li Y X, Wu J H, Zhang L, et al. Comparison of Fluid Flow and Heat Transfer Behavior in Outer and Inner Half Coil Jackets and Field Synergy Analysis [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2011, 31(14/15): 3078–3083
- [5] Zhang L, Li J Q, Li Y X, et al. Field Synergy Analysis for Helical Ducts with Rectangular Cross Section [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 75: 245–261
- [6] Lee S J, Hassan Y A. Numerical Investigation of Helical Coil Tube Bundle in Turbulent Cross Flow Using Large Eddy Simulation [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2020, 82: 108529
- [7] Shen C, Liu L M, Xu Z Y, et al. Influence of Helix Angle on Flow and Heat Transfer Characteristics of Lead-Bismuth Flow in Helical-Coiled Tube Bundles [J]. *Annals of nuclear energy*, 2023, 180: 109483
- [8] 庄乃亮, 汤晓斌, 杨晨皓等. 一种变曲率盘绕的蒸汽发生器螺旋盘管组件: CN113465436B [P]. 2022-06-17  
ZHUANG nailiang, TANG xiaobin, YANG chenhao, et al. Spiral Coil Assembly of Steam Generator with Variable Curvature: CN113465436B [P]. 2022-06-17
- [9] Zhu H Y, Li Z X, Yang X T, et al. Flow Regime Identification for Upward Two-Phase Flow in Helically Coiled Tubes [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 308: 606–618
- [10] Zhuang N, Zhang K, Manera A, et al. X-Ray Radiography and High-Speed Videography Measurement on Void Fraction in Helical Coil [C]// *International Topical Meeting on Advances in Thermal Hydraulics*, 2018: 250–262
- [11] Che S, Breitenmoser D, Infimovskiy Y Y, et al. CFD Simulation of Two-Phase Flows in Helical Coils [J]. *Frontiers in Energy Research*, 2020, 8: 65
- [12] Mansour M, Landage A, Khot P, et al. Numerical Study of Gas-Liquid Two-Phase Flow Regimes for Upward Flow in a Helical Pipe [J]. *Industrial And Engineering Chemistry Research*, 2019, 59(9): 3873–3886
- [13] Hirt C W, Nichols B D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries [J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201–225
- [14] Sarkar S, Lakshmanan B. Application of a Reynolds Stress Turbulence Model to the Compressible Shear Layer [J]. *Aiaa Journal*, 1990, 29(5): 743–749
- [15] Speziale C G, Sarkar S, Gatski T B. Modelling the Pressure-Strain Correlation of Turbulence-An Invariant Dynamical Systems Approach [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1991, 227: 245–272