

研究论文

# 加热上升管内过冷流动沸腾数值模拟

王小军, 陈炳德, 黄彦平, 孙 奇

(中国核动力研究设计院空泡物理和自然循环国家级重点实验室, 四川 成都 610041)

**摘要:** 采用计算流体动力学 (CFD) 程序 CFX4.4 对加热上升管内过冷流动沸腾工况下气水两相流动局部两相流参数 (空泡份额和汽泡尺寸) 进行了数值模拟。对数值差分方法、相关模型 (界面力和汽泡诱导的紊流) 和汽泡尺寸进行了敏感性分析。空泡份额分布计算结果与实验结果比较表明, 在低空泡份额工况下, 两者符合较好, 在高空泡份额工况下两者存在一定偏差, 并且气相速度和汽泡尺寸的计算结果不理想。计算结果与实验结果之间的差异说明程序模型对于加热上升管内过冷流动沸腾模拟并不完善, 建立更为合理的汽泡尺寸模型, 考虑汽泡的合并和撕裂是必要的。

**关键词:** CFX4.4; 过冷流动沸腾; 空泡分布; 两流体模型

中图分类号: TL 333

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2006) 07-1353-06

## Simulation of vertical upward sub-cooled boiling flow in a pipe

WANG Xiaojun, CHEN Bingde, HUANG Yanping, SUN Qi

(State Key Laboratory of Bubble Physics and Natural Circulation, Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Multidimensional modeling of vertical upward subcooled boiling flow was performed and the local two-phase flow parameters (void fraction and bubble size) were calculated by using the computational fluid dynamics code—CFX4.4, in which lateral interfacial effects based on a three-dimensional two-fluid model were accounted for. A sensitivity analysis of the difference method, interfacial force and bubble-induced turbulence and bubble size was made. The method of using the CFD code for prediction of sub-cooled boiling flow in a pipe was established. The predicted lateral distributions of void fraction showed excellent agreement with the measurements at low void fraction, but somewhat larger difference at higher void fraction in vertical upward sub-cooled boiling flow. The predicted lateral distributions of vapor velocity and bubble diameter were not satisfactory. The results showed that a reasonable bubble diameter model and modeling of bubble coalescence and tearing would be necessary for improving calculation accuracy.

**Key words:** CFX4.4; subcooled boiling flow; void distribution; two-fluid model

### 引 言

在许多工业领域都会遇到过冷流动沸腾, 研究

过冷流动沸腾的流动特性和传热特性具有重要意义。过去大多采用实验方法进行研究, 且大多研究采用截面平均参数来进行分析, 未考虑各流动参数

2006-06-21 收到初稿, 2006-08-30 收到修改稿。

联系人及第一作者: 王小军 (1971—), 男, 博士, 副研究员。

基金项目: 中国核动力研究设计院空泡物理和自然循环国家级重点实验室基金项目 (51482010103ZS8601)。

Received date: 2006-06-21.

Corresponding author: Dr. WANG Xiaojun. E-mail: w\_xjun@126.com

Foundation item: supported by the State Key Laboratory of Bubble Physics and Natural Circulation, Nuclear Power Institute of China (51482010103ZS8601).

截面非均匀性的影响。可能最早的过冷沸腾气水两相流参数空间效应的研究要追溯到 1967 年 St Pierre 和 Bankoff<sup>[1]</sup>对垂直矩形通道内过冷流动沸腾相分布特性的研究。随后,许多研究者测量了各种通道内的气相空泡份额分布特性<sup>[2-4]</sup>。孙奇<sup>[5]</sup>详细研究了垂直上升管内过冷流动沸腾气水两相流局部参数的分布特性。

20 世纪末,随着计算机技术、数值方法和多相流模型的发展,过冷流动沸腾的多维理论计算分析得以开展,其中应用最为广泛的方法就是采用两流体模型进行数值模拟。Kurul 等<sup>[6-9]</sup>采用两流体模型来分析过冷沸腾,并对模型进行了修正。然而这些模型主要描述的是高压工况下水的沸腾或低压工况下制冷剂的沸腾。近年来,Janssens-Maenhout 等<sup>[10-13]</sup>提出了描述低压下水的过冷流动沸腾的两流体模型。他们均采用了商用 CFD 程序 CFX。Lee 等<sup>[12]</sup>和 Bostjan Koncar 等<sup>[13]</sup>很好地模拟了他们的实验结果,而 Janssens-Maenhout 等<sup>[10]</sup>、Tu 等<sup>[11]</sup>仅仅得到了沿流动方向的横截面平均参数。

迄今为止,过冷流动沸腾的多维分析计算最常用的方法就是采用多维两流体模型进行模拟。CFX 是近年来新开发的工业上用来模拟各种流动和传热过程功能强大的流体动力学分析程序。本文采用程序 CFX4.4 对加热上升管内过冷流动沸腾工况下气水两相流体三维流动局部两相流参数(空泡份额和气泡尺寸)进行了数值模拟。

### 1 计算模型

本计算主要采用孙奇<sup>[5]</sup>的垂直上升管内过冷流动沸腾气水两相流局部参数的实验数据进行数值分析。该实验加热管为  $\phi 32 \times 4$ ,全长 1.304 m,其中加热段长 1.0 m,气水两相界面参数测量位置位于离加热段出口 50 mm 处。双探头光学探针被用于测量气水两相局部参数,如空泡份额、界面速度、汽泡尺寸(即 Sauter 直径)、汽泡频率和界面密度等。详细实验描述参考文献 [5]。实验进行了不同压力、质量流密度、热通量和热平衡含汽率工况下相分布特性研究。本文仅选择 3 个实验工况用于计算分析,具体实验参数见表 1。

由于圆管为轴对称结构,计算选用二维圆柱坐标进行网格划分流体域,如图 1 所示。轴向网格数为 150,径向网格数为 24。增加 500 mm 长的入口

段主要是使进入加热区域的流体速度分布更接近实验条件,免除入口效应的影响。

表 1 加热上升管内气水两相流局部特性研究实验工况  
Table 1 Conditions of different experiment in study of local characteristics of vertical upward steam-water flow

No.	$p$ /MPa	$Q$ /kW · m <sup>-2</sup>	$G$ /kg · m <sup>-2</sup> · s <sup>-1</sup>	$t_m$ /°C	$X$ /%
1	0.999	542.61	573.8	130.68	0.08
2	0.992	527.66	578.6	137.95	0.16
3	0.991	734.94	587.3	125.7	0.23

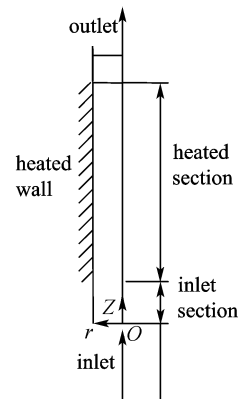


图 1 CFD 数值计算几何模型

Fig. 1 Physical model of CFD simulation

### 2 计算方法

采用有限容积法离散控制方程,对流项离散格式中体积含汽率采用迎风格式,压力采用中心差分格式,其余采用程序的缺省差分格式(即混合差分格式),对于压力修正方程和体积份额计算采用代数多网格法(AMG)加速收敛。其余求解均采用全场 STONE 方法,流体的压力-速度耦合基于改进的 SIMPLE 算法(即 SIMPLEC),相间传输项耦合采用 Spalding 的相间滑动算法(IPSA)的改进方法(即 IPSA-C)。对体积份额、横向速度、焓和界面力等变量采用不同的松弛因子以增强收敛性。

计算中,液相水作为连续相,设为紊流;蒸汽作为弥散相,设为层流。入口边界根据实验工况测量的液相水平均速度给定两相平均流速,液相温度为入口水温,气相温度为饱和温度。出口选择压力边界,即出口压力为一常数,并假设两相处于同一个压力场。加热壁给定热通量。与加热壁相对的另一面边界设定为对称边界,即所有的变量数值对

称，速度沿边界无法向矢量，没有穿过边界的扩散。在加热壁和非加热壁面对液相水设定为无滑动边界条件，即为 0 速度；对气相设定为自由滑动边界条件，即切向应力为 0。相间曳力采用 Ishii Zuber 模型，相间传热采用 Lanz Marshall 关系式。计算采用的两流体模型及相关界面传输模型描述参考文献 [14]。

### 3 模型敏感性分析

#### 3.1 汽泡诱导紊流的影响

对于实验工况 1，汽泡诱导紊流的影响分析结果如图 2 所示。由图可以看到，随着 Sato 模型中汽泡诱导的紊流系数 CMUPI 增加，径向空泡份额降低，特别是近壁区下降较多。主要原因是随着 Sato 模型中汽泡诱导的紊流系数增加，液相的有效紊流黏度升高，则紊流交混加强，近壁区汽泡较多，紊流交混也更为剧烈。而由汽泡诱导的紊流大大加强了界面之间的质量、动量和能量的横向传输，特别是在加热壁附近区域。中心区域的气液两相热量交换更为充分则会降低壁面附近的流体温度进而影响到壁面的液相蒸发率，因为流体温度降低，就会直接影响到汽泡脱离直径的计算，较小的汽泡脱离直径则使用于蒸发的热通量减小，从而导致近壁区域空泡份额降低。由图还可以看到，当汽泡诱导的紊流系数为 0.6 时，模型能较好地模拟空泡份额的径向分布。

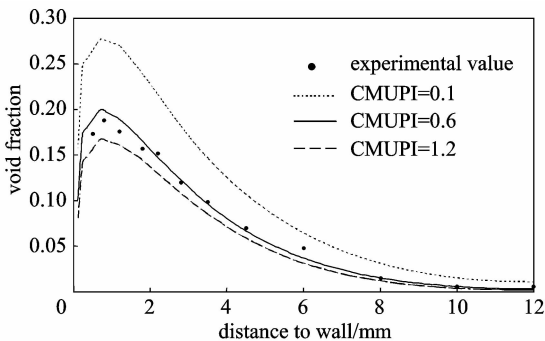


图 2 汽泡诱导紊流对空泡份额分布的影响  
Fig. 2 Effect of bubble-induced turbulence on void fraction evolution

#### 3.2 非曳力的影响

对于实验工况 1，非曳力（紊流耗散力 TD；浮升力 LF；壁面润滑力 WL；虚质量力 VM）的影响分析结果如图 3 所示。图中“none”表示计算时未采用非曳力模型。由图可以看到，不考虑非曳

力时，计算结果较差，无法得到满意的径向空泡份额分布。当考虑非曳力的影响时，紊流耗散力展平了径向的空泡份额分布；浮升力对径向空泡份额的影响较小，仅使近壁区的空泡份额有所降低；而壁面润滑力的增加使得计算结果能较好地反映空泡份额的径向分布特征，比较准确地预测了近壁区域空泡份额的峰值，然而虚质量力对计算结果几乎没有影响，但增加虚质量力模型使计算收敛减慢，并且当虚质量力系数大于 0.1 时计算发散。因此，对于非曳力，计算时采用紊流耗散力、浮升力和壁面润滑力就能很好地得到过冷流动沸腾径向气水两相相分布特性。

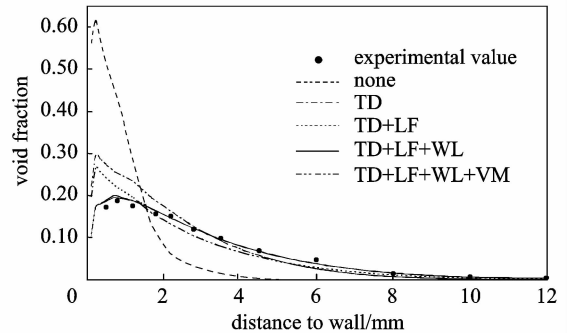


图 3 非曳力对空泡份额分布的影响  
Fig. 3 Effect of non-drag forces on void fraction evolution

考虑到界面力非曳力模型系数取值会因人而异，同时为了更好地认识和了解紊流耗散力、浮升力和壁面润滑力这 3 个界面力的作用机理，找到适合研究对象和实验工况范围内的合理界面力模型，选取实验工况 1 分别对它们进行了系数敏感性分析，如图 4~图 6 所示。从图 4 可以看到，随着紊流耗散力系数 CTD 的增加，径向空泡份额分布越平坦，近壁区空泡份额峰值向加热壁面移动。当紊流耗散力系数选取 0.4 时，计算结果与实验结果符合较好。从图 5 可以看到，浮升力使气泡向近壁区移动，随着浮升力系数 CL 的增加，近壁区空泡份额的峰值会增加，相对其他位置影响较小。当浮升力系数选取 0.1 时，计算结果与实验结果符合较好。从图 6 可以看到，壁面润滑力使汽泡离开加热壁面，壁面润滑力系数 C1、C2 对计算结果影响较大，它不仅改变空泡份额径向分布曲线，也改变空泡份额峰值的径向位置。当壁面润滑力系数分别选取 -0.01、0.05 时，计算结果与实验结果符合较好。

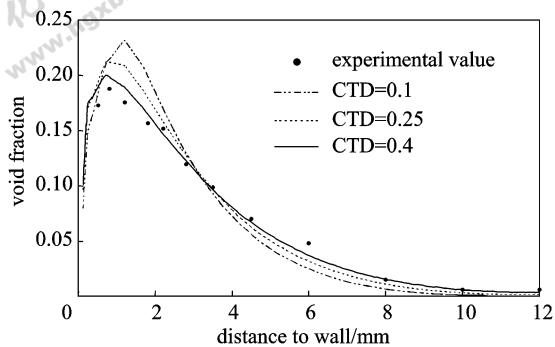


图 4 紊流耗散力系数对空泡份额分布的影响  
Fig. 4 Effect of turbulent dispersion force on void fraction evolution

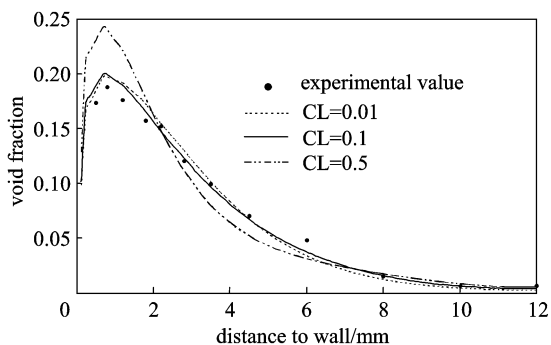


图 5 浮升力系数对空泡份额分布的影响  
Fig. 5 Effect of lift force on void fraction evolution

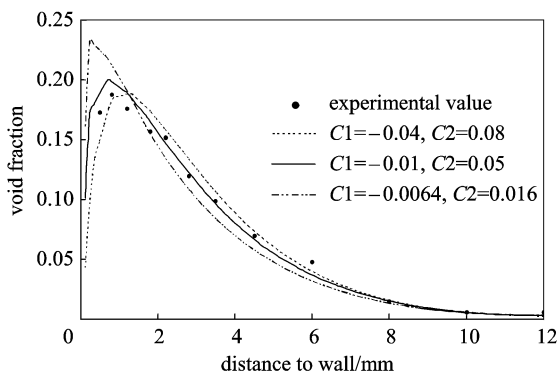


图 6 壁面润滑力系数对空泡份额分布的影响  
Fig. 6 Effect of wall lubrication force on void fraction evolution

### 3.3 气泡尺寸的影响

在多相流计算分析时，常常将气泡尺寸看作常数。这与实际情况完全不同，往往气泡具有不同尺寸和形状。在过冷流动沸腾中，气泡尺寸不仅沿流动方向不断变化，在径向也会因位置不同而差别较大。因而就气泡大小计算模拟的好坏对计算结果来说至关重要。本文也对气泡尺寸的影响进行了分析

并与实验所得局部 Sauter 直径进行了比较，结果如图 7 所示。图中分别对气泡直径为常数和通过线性关系式来计算进行了比较。线性关系式是指采用 CFX4.4 中根据过冷度来计算局部气泡直径。从图中可以看到，采用 2 mm 气泡平均直径时的计算结果较差外，其他两种情况下，不同气泡直径的模拟对径向空泡份额的分布影响较小。计算时采用线性关系式可使计算的径向空泡份额分布与实验值符合较好。气泡直径为 2 mm 时，空泡份额峰值最高，这主要是由于较小的气泡直径造成壁面润湿力较小，从而无法使气泡离开壁面。同时，较小的气泡直径也增加了冷凝率，由图可见，两相区也变窄了。

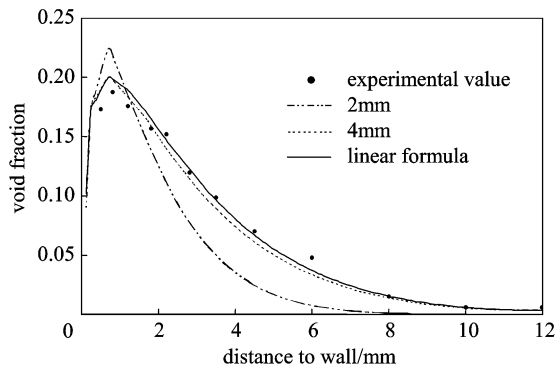


图 7 气泡尺寸对空泡份额分布的影响  
Fig. 7 Effect of bubble size on void fraction evolution

## 4 计算结果与实验结果的比较

根据以上敏感性分析结果，确定了模拟过冷流动沸腾的两流体相关模型参数。然后对 3 个实验工况进行计算分析，计算的径向空泡份额分布与实验结果如图 8 所示。从图中可以看到，在低含汽率工况下，该模型能较好地预测径向空泡份额分布情况，这表明本文采用的两流体模型和数值方法能较好地描述垂直上升管内过冷流动沸腾。随着含汽率的增加，计算结果偏差略大，特别是近壁区峰值附近空泡份额分布偏差稍大。这可能是由于计算未考虑高含汽率工况下必然存在的气泡的合并与分裂等的影响。

实验得到的气泡尺寸为局部气泡 Sauter 直径。而计算分析时假定气泡为球形，计算得到的直径就等于 Sauter 直径。因此可直接与实验结果进行比较。对于工况 2，气泡尺寸的计算结果和实验值比较如图 9 所示。从实验测得的气泡尺寸径向分布情

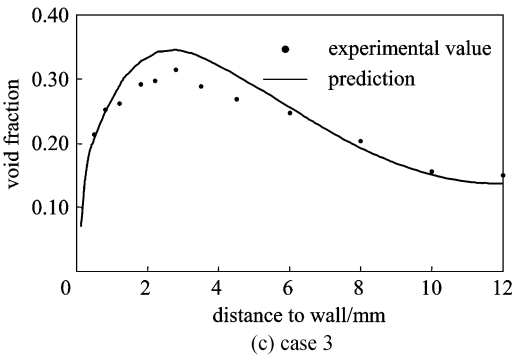
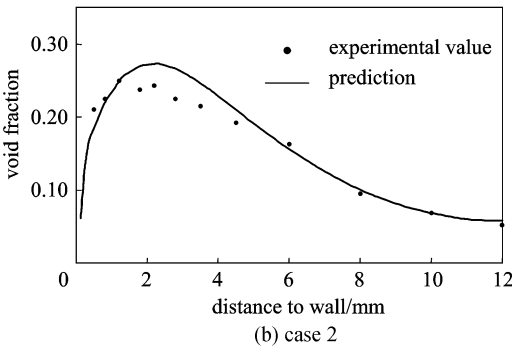
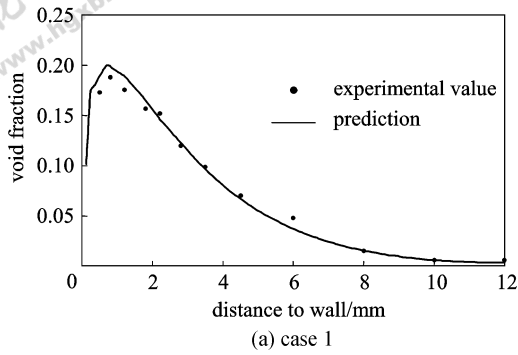


图 8 空泡份额分布计算值与实验值的比较

Fig. 8 Comparison of experimental void fractions with simulations

况可以看到，汽泡在管道中心区域尺寸较大，分布较为均匀，在近壁区，汽泡尺寸较小，与壁面距离越近，汽泡尺寸越小。这主要是因为近壁区的小汽泡逐渐合并为大汽泡并向通道中心迁移。然而计算时是根据液相的局部过冷度采用线性关系式来计算汽泡尺寸。从图 9 中可以看到，在圆管中心区域，计算值与实验值相差较小，在近壁区，两者相差较大。因为根据过冷度来计算汽泡尺寸，在近壁区，离加热壁面越近，局部过冷度越低，计算汽泡尺寸就越大，这与实验结果并不相符。由此可见，采用更为合理的计算汽泡尺寸的模型会提高计算结果的准确性。Bostjan Koncar 等<sup>[13]</sup>就已建立的模型来

计算汽泡尺寸获得了较好的结果。

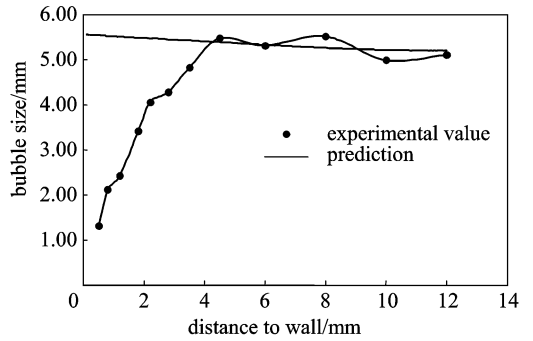


图 9 汽泡尺寸分布计算值与实验值的比较

Fig. 9 Comparison of experimental bubble sizes with simulations

对于实验工况 2，汽泡速度的计算结果和实验值比较如图 10 所示。从图可以看到，两者相差较大。由此可见，计算气水两相界面动量传输的模型并不完善。实际上汽泡尺寸模型对气相速度计算结果影响较大，实验发现的汽泡尺寸分布情况与计算采用的线性分布之间的差异也造成了速度计算结果与实验结果的偏差。计算时，近壁区空泡份额较高，因而气相速度较高，中心区域，空泡份额较低，气相速度也较低。然而实验发现，由于管道中心区液相速度较大，汽泡合并为大汽泡后也向中心区迁移使得中心区气相速度较高，近壁区由于液相速度较低，气相速度也较低，并未在近壁区发现类似于空泡份额分布的速度分布峰值。

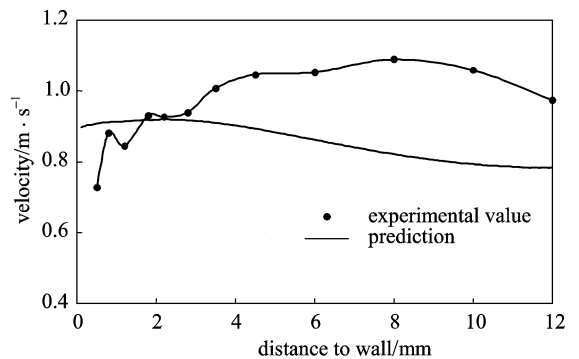


图 10 汽泡速度分布计算值与实验值的比较

Fig. 10 Comparison of experimental bubble velocities with simulations

## 5 结 论

采用计算流体动力学 (CFD) 程序 CFX4.4 对加热上升管内过冷流动沸腾工况下气水两相流动局部两相流参数 (空泡份额和汽泡尺寸) 进行了数值

模拟。在低含汽率工况下,垂直上升管内空泡份额径向分布计算分析结果与实验结果符合较好。在模拟过冷流动沸腾时,非曳力中浮升力、紊流耗散力和壁面润滑力对空泡份额的径向分布影响较大,并且由汽泡诱导的紊流交混对计算结果也会产生较大的影响。

同时也要看到,在高热平衡含汽率工况下,计算结果与实验结果还有一定的差异。特别是汽泡尺寸和汽泡速度的分布偏差较大。因此,采用更为合理的汽泡尺寸计算模型,高含汽率工况时考虑汽泡的合并与撕裂等都有助于改善计算结果,提高计算的准确性。

## References

- [1] St Pierre C C, Bankoff S G. Vapor volume profiles in developing two-phase flow. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1967, **10**: 237-249
- [2] Sekoguchi K, *et al.* Prediction method of flow patterns in subcooled and low quality boiling regions. *Bull. Jpn. Soc. Mech. Eng.*, 1981, **24**: 834-841
- [3] Bartel M D. Experimental investigation of subcooled boiling [D]. West Lafayette: Purdue University, 1999
- [4] Lee T H, *et al.* Local flow characteristics of subcooled boiling flow of water in a vertical concentric annulus. *Int. J. Multiphase Flow*, 2002, **28**: 1351-1368
- [5] Sun Qi (孙奇). Experimental research on local characteristics of a vertical upward steam-water flow [D]. Chengdu: Nuclear Power Institute of China, 2000
- [6] Kurul N, Podowski M Z. Multidimensional effects in forced convection subcooled boiling//Proceedings of the Ninth International Heat Transfer Conference. Jerusalem, Israel, 1990: 21-26
- [7] Lai J C, Farouk B. Numerical simulation of subcooled boiling and heat transfer in vertical ducts. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1993, **36**: 1541-1551
- [8] Lahey R T Jr, Drew D A. The analysis of two-phase flow and heat transfer using a multidimensional, four field, two-fluid model. *Nucl. Eng. Des.*, 2001, **204**: 29-44
- [9] Roy R P, *et al.* Turbulent subcooled boiling flow—experiments and simulations. *J. Heat Transfer*, 2002, **124**: 73-93
- [10] Janssens-Maenhout G, *et al.* Subcooled nucleate boiling at low pressure and low heat flux//Preceedings of 3rd International Conference on Multiphase Flow. Lyon, France, 1998
- [11] Tu J Y, Yeoh G H. On numerical modeling of low pressure subcooled boiling flows. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2002, **45**: 1197-1209
- [12] Lee T H, *et al.* Local flow characteristics of subcooled boiling flow of water in a vertical concentric annulus. *Int. J. Multiphase Flow*, 2002, **28**: 1351-1368
- [13] Bostjan Koncar *et al.* Modelling of local two-phase flow parameters in upward subcooled flow boiling at low pressure. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2004, **47**: 1499-1513