

核电站严重事故条件下压力容器外部冷却数值模拟研究

Numerical simulation on the external reactor vessel cooling during severe accident in pressurized water reactor

张祥 薛艳芳

国核华清（北京）核电技术研发中心有限公司

摘 要： 本文采用 iconCFD 计算软件，针对核电站严重事故条件下压力容器外部冷却过程沸腾两相流动行为进行 CFD 建模与分析。采用 iconCFD 计算软件中自带的 volume of fluid 分析模型，自主编写程序修正壁面沸腾模型，改进分离式求解器算法和能量源项的施加方法，对压力容器下封头下朝向加热曲面赋予加热功率，分析了沸腾相变过程中气液两相的流动和传热行为，主要包括：（1）沸腾过程中气泡现象及动力学参数，包括气泡的产生、聚合及脱离现象，气泡脱离直径、脱离频率等；（2）两相流动过程中宏观物理参数场及传热规律，包括两相流动的速度场，压力场，空泡的分布特性、沸腾传热系数等。数值模拟得到的气泡行为跟实验非常类似，沸腾模拟的结果分析也比较合理。

关键词： 核电站、严重事故、沸腾相变、iconCFD、两相流动

Abstract: In this paper, the iconCFD commercial software is used to simulate and analyze the boiling two-phase flow behavior of external reactor vessel cooling process under severe accident conditions. Using the volume of fluid analysis model included in the iconCFD software, a program is developed to modify the wall boiling model, as well as the algorithm of separate solver and application method of the energy source item are improved. Heating power input is applied to the heating surface under the lower head of the pressure vessel. The flow and heat transfer behavior of gas-liquid two-phase in the boiling phase transformation process are analyzed, including: (1) bubble phenomenon and kinetic parameters during boiling, such as bubble generation, coalescence, detachment diameter and frequency (2) Macroscopic physical parameter field and heat transfer principle in the two-phase flow process, including the velocity field of the two-phase flow, the pressure field, the distribution characteristics of the bubble, and the boiling heat transfer coefficient. The bubble behavior obtained by numerical simulation is very similar to the experiment, and the results of boiling simulation are also reasonable.

Key words: Nuclear power plant, Severe accident, Boiling, iconCFD, Two phase flow

1. 前言

压水堆核电站发生严重事故时，堆芯由于失去冷却水将导致堆芯裸露并开始升温、过热，燃料元件由于冷却不足而发生熔化，最终堆芯熔融物落入压力容器下腔室。由于大量衰变热的产生，将对压力容器的完整性构成威胁。一旦压力容器熔穿，熔融物流入堆腔室后，将可能发生安全壳直接加热、蒸汽爆炸、熔融物混凝土相互反应等现象，致使安全壳内升温升压，对安全壳的完整性构成威胁。熔融物堆内滞留（IVR）技术是严重事故缓解的重要措施之一，通过从压力容器外部对熔融物进行充分有效的冷却（external reactor vessel cooling, ERVC），将堆芯熔融物滞留在压力容器内：堆芯熔化初期，冷却水在重力作用下注入到压力容器外壁面和压力容器保温层形成的流道，通过自然循环的沸腾换热带走堆内熔融物产生的衰变热。

本文旨在对 ERVC 过程压力容器外部流动沸腾过程进行 CFD 建模与分析，通过对下封头向下朝向加热曲面赋予加热功率，分析沸腾两相的流动与传热特性。主要包括：（1）沸腾过程气泡现象及动力学参数，包括气泡的产生、聚合及脱离现象，气泡脱离直径、脱离频率等；（2）流动过程宏观参量场及传热规律，包括两相流动的速度场，压力场，空泡的分布特性、沸腾传热系数等。

2. iconCFD 沸腾模型

iconCFD 的沸腾模型是基于 VOF 模型开发的，下面对其进行介绍。

2.1 基本控制方程

连续性方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = \dot{m}_{ph} \quad (1)$$

VOF 方程：

$$\frac{\partial \alpha_l}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [u_j \alpha_l + u_c \alpha_l (1 - \alpha_l)] = -\frac{\alpha_l}{\rho_l} \frac{D\rho_l}{Dt} - \dot{m}_{ph} \left[\frac{1}{\rho_l} - \alpha_l \left(\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_g} \right) \right] \quad (2)$$

动量方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g + \sigma K \frac{\partial \alpha_l}{\partial x_j}, \quad K = -\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \alpha_l}{\partial x_i} / \left| \frac{\partial \alpha_l}{\partial x_i} \right| \right) \quad (3)$$

能量方程：

$$\rho C_p \frac{\partial}{\partial t} (T) + \rho C_p \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho u_j T - \left(\frac{\mu_t}{Pr_t} + \beta \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) = \dot{m}_{ph} h_{lat} + \dot{h}_{ew}, \quad \beta = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (4)$$

2.2 相变模型

相变模型包括壁面相变模型和内部相变模型。那么整体质量源项就是壁面相变的质量源项跟内部相变的质量源项之和。

$$\dot{m}_{ph} = \dot{m}_{ew} + \dot{m}_e \quad (5)$$

壁面相变模型只应用于近壁面第一层网格，由壁面相变引起的质量源项施加于近壁面第一层网格。

$$\dot{m}_{ew} = \frac{C_{ew} q_b xArea}{V_{cell} h_{lat}} \frac{\alpha_l}{\alpha_{l0}} \quad (6)$$

上式中，沸腾热流密度 q_b 由下面将要介绍的壁面沸腾模型计算。 C_{ew} 表示沸腾热流（沸腾热流一部分用于产生相变，一部分用于瞬时冷凝对流体的加热）中用于相变的比率。那么用于加热流体的热量为：

$$\dot{h}_{ew} = \frac{(1 - C_{ew}) q_b xArea}{V_{cell}} \frac{\alpha_l}{\alpha_{l0}} \quad (7)$$

这表示当 $C_{ew} = 1$ 时，所有的沸腾热用来产生相变，当 $C_{ew} = 0$ 时，所有的沸腾热流用来加热流体。沸腾热流密度通过下面的 Rohsenow 壁面沸腾模型^[1]来估计：

如果 $T_c < T_{sat}$ ， $q_{all} = q_b + q_c$ ；如果 $T_c \geq T_{sat}$ ， $q_{all} = q_b$ 。

$$q_b = \mu_l h_{lat} \sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_g)}{\sigma}} \left[\frac{C_{pl}(T_w - T_{sat})}{C_{qw} h_{lat} Pr_l^{n_p}} \right]^m \underbrace{\max \left[0, \min \left(1, \frac{T_w - T_c}{T_w - T_{sat}} \right) \right]}_{\text{correlation part for film boiling}} \quad (8)$$

$$q_c = h_c (T_c - T_w) \quad (9)$$

由于初始时刻 T_w 的值未知，沸腾热流密度在求解能量方程时通过 Newton-Raphson 方法来估计。

内部相变模型应用于所有内部流体区域。由内部相变产生的质量源项如下。

$$\dot{m}_e = \frac{HTC_x Area (T_c - T_{sat})}{h_{lat}} \frac{\alpha_l}{\alpha_{l0}} \quad (10)$$

$$\dot{m}_c = \frac{HTC_x Area (T_c - T_{sat})}{h_{lat}} \frac{1 - \alpha_l}{1 - \alpha_{l0}} \quad (11)$$

3. 计算流程

iconCFD 的原始沸腾模型采用分离式求解器，具体的计算流程如图 3.1 所示。第一步，先评估沸腾热流密度。由于沸腾热流密度的计算公式（Rohsenow 的模型）不包含蒸气和液体分率相关的参数，所以在连续性方程和 VOF 方程求解之前进行评估也比较合理。沸腾热流密度在本次能量方程求解时不使用。在第二步的连续性方程和 VOF 方程的计算中，使用第一步计算的沸腾热流密度来计算相变（参与相变的热流密度占比按照方程（7）中的 C_{ew} 来确定）。由于在第一步中并没有使用沸腾热流密度来求解能量方程，所以这种方法也可以称为“先相变”的方法（商用 CFD 软件是“先发热”的方法^[2, 3]）。真实情况下，若周围液态水温度接近饱和温度，则物理现象是相变发生而温度基本不变。所以“先相变”的方法更接近真实的现象。在第三步中，考虑了第二步中相变引起的物理量的变化，在能量方程中同时考虑沸腾热流密度和相变潜热。

跟商业 CFD 软件的方法相比，这种新的流程更容易保证能量的守恒，从而能够稳定完成计算。另外，针对热源施加方法的问题，为了提高收敛性，将壁面热源的热流密度施加到近壁面第一层网格作为体积热源，跟相变热源项一起作为能量方程的源项存在。这会提高整个方程计算的收敛性。具体的计算流程图如图 3.2 所示。

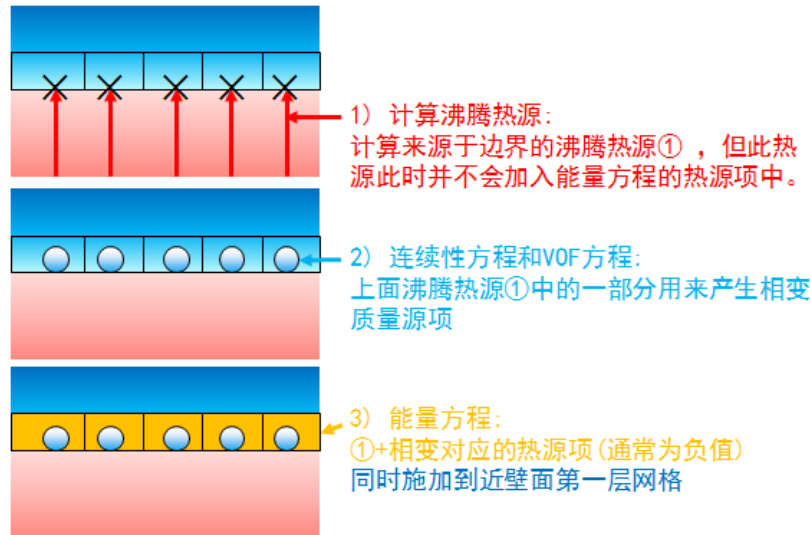


图 3.1 iconCFD 新开发的求解流程

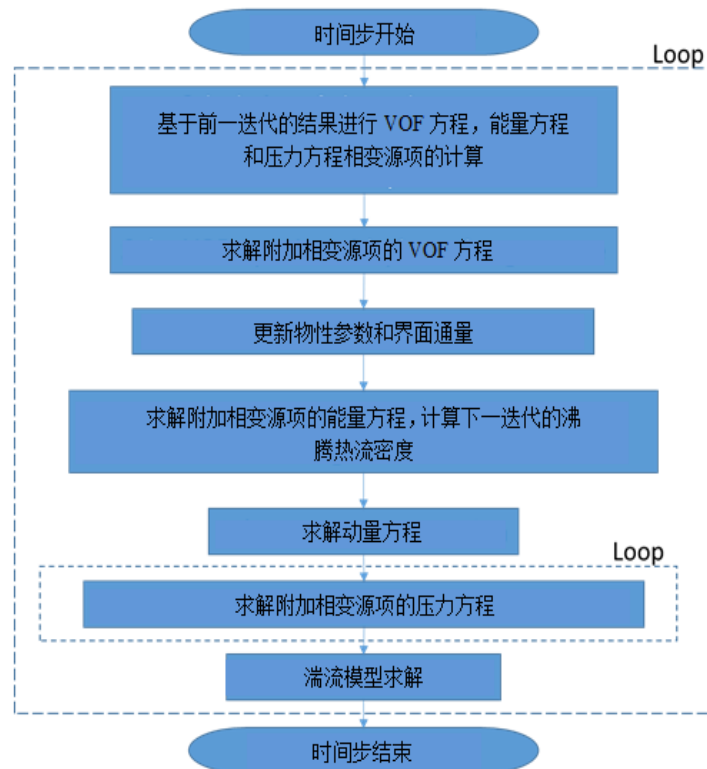


图 3.2 计算流程图

4. 结果与分析

4.1 几何模型

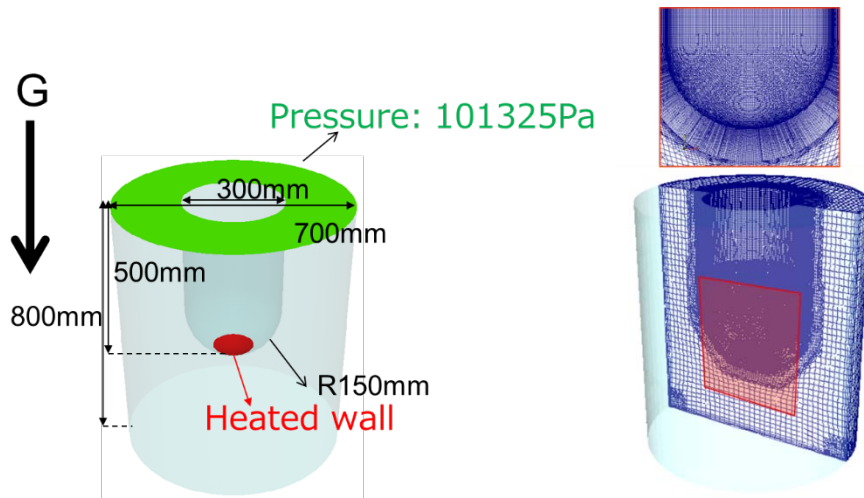


图 4.1 几何模型结构

图 4.1 给出了计算的几何模型。此目标为三维缩比模型。根据几何信息使用 iconHexMesh 建立网格模型，总网格数为 2,079,698，在近壁面有 40 层网格。

表 4.1 和表 4.2 给出了计算相关的物理模型和物性参数。

表 4.1 物理模型设定

基本控制方程	
连续性方程	
N-S 方程	浮升力 + 表面张力
VOF 方程	
能量方程	
湍流模型	k-omega SST
沸腾模型	壁面沸腾: Rohsenow 模型
	内部相变模型
速度和压力的耦合算法	PIMPLE

表 4.2 物性参数

物性参数	液态水	水蒸气
密度	体积膨胀	理想气体
运动粘度	2.94e-7 m ² /sec	2.05e-4 m ² /sec
比热	4217 J/(kg K)	2077 J/(kg K)
导热系数	0.679 W/(m K)	0.5976 W/(m K)
表面张力系数	0.0589 N/m	
潜热	2.256e6 [J/kg]	
饱和温度	Antoine 方程	

4.2 计算结果分析

图 4.2 给出了 0.72 MW/m^2 热流密度下的气泡形态变化（一个周期）。水蒸气体积分数为 0.9 的等值面定义为气泡界面。根据结果可知，随着热流密度的增加，最大气泡厚度增加，沸腾周期也延长。通过与试验结果的对比^[4, 5]，计算结果与真实的沸腾现象吻合较好。

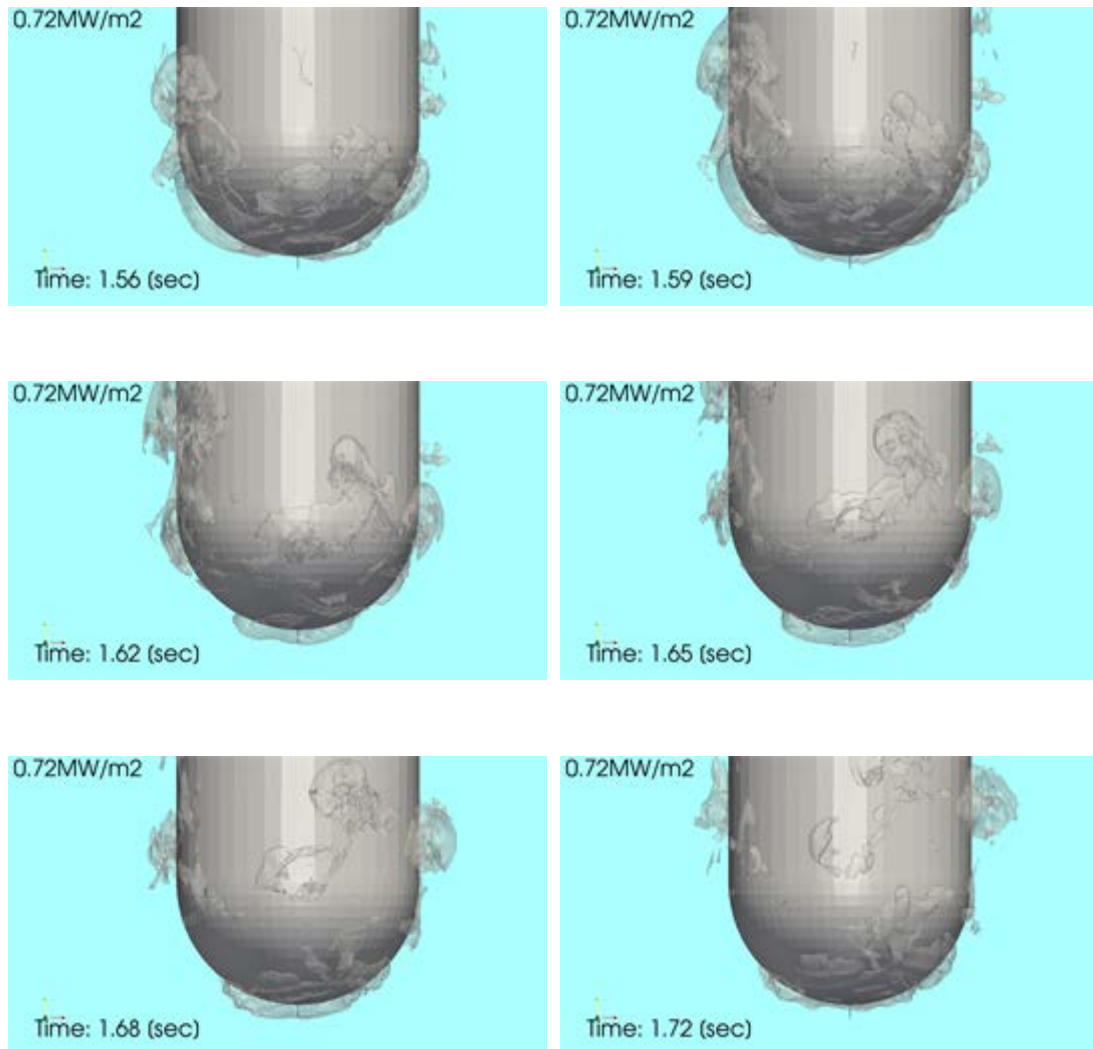
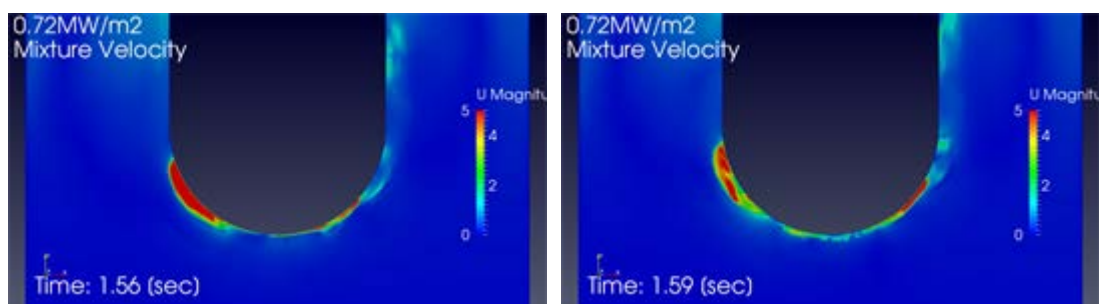


图 4.2 0.72 MW/m^2 热流密度下的气泡形态变化

图 4.3 给出了 0.72 MW/m^2 热流密度下的速度云图在过轴线截面内的分布。由于沸腾模型是基于 VOF 进行计算的，因此这里的速度是液相和气相的混合速度。图中的高速区代表气泡区域。



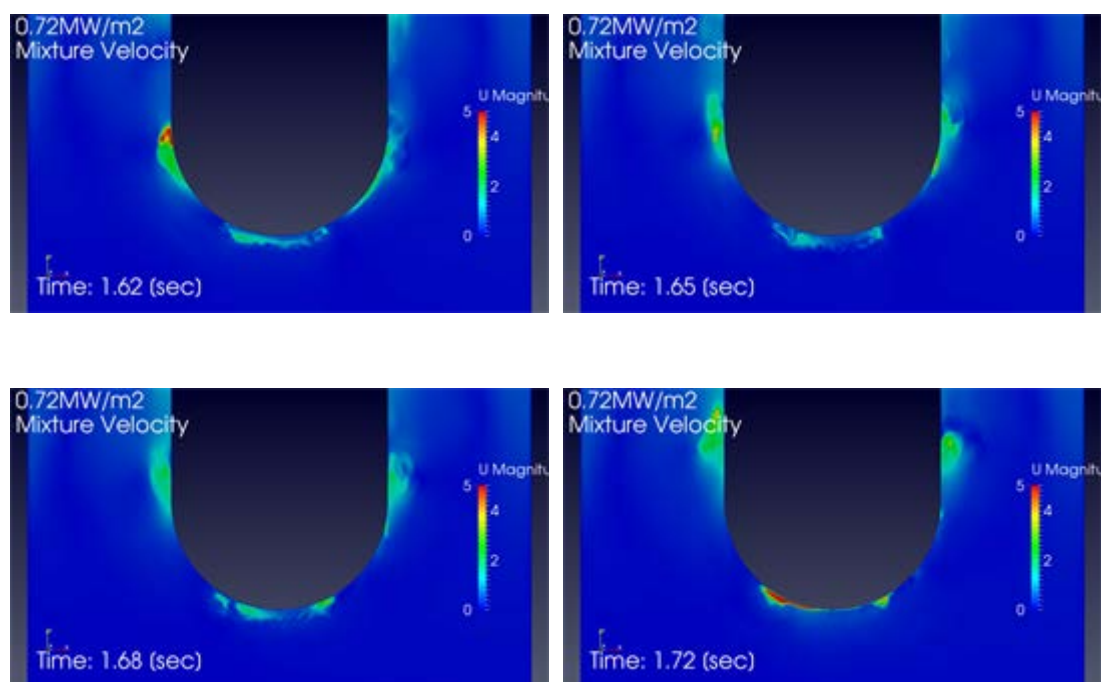
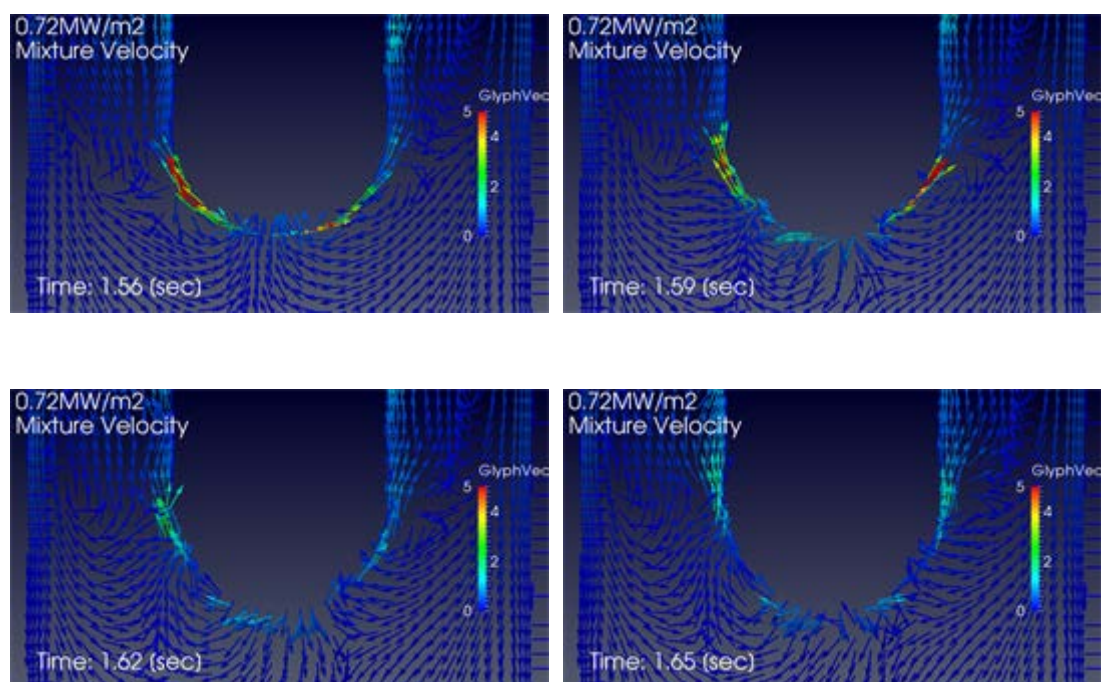


图 4.3 0.72 MW/m^2 热流密度下的速度云图在过轴线截面内的分布

同理，图 4.4 给出了 0.72 MW/m^2 热流密度下的速度矢量云图在过轴线截面内的分布。



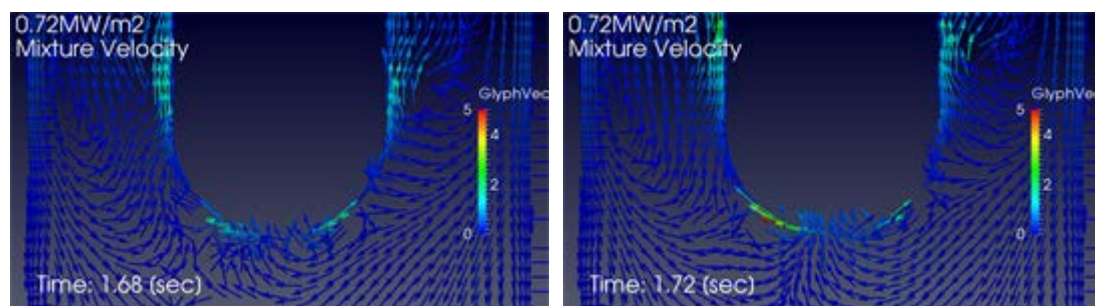


图 4.4 0.72 MW/m² 热流密度下的速度矢量云图在过轴线截面内的分布

5. 结论

本文采用 iconCFD 计算软件，针对核电站严重事故条件下压力容器外部冷却过程沸腾两相流动行为进行 CFD 建模与分析。主要结论如下：（1）随着加热热流密度的增加，下封头底部最大气泡厚度增加，沸腾周期延长，加热壁面的温度也随之升高；（2）分析了沸腾相变过程中气液两相的流动和传热行为，获得了速度云图和矢量图在过轴线截面内的分布。

本文的计算分析，对于理解核电站严重事故条件下下封头外部冷却过程中的两相流动和传热规律具有较高的理论依据和数据支撑。

6 参考文献

- [1] Rohsenow, W. M., “A Method of Correlating Heat Transfer Data for Surface Boiling Liquids”, Trans. ASME, 74, 969–976 (1952).
- [2] CD-adapco, USER GUIDE, STAR-CCM+ Version 8.04.
- [3] ANSYS, Fluent Theory Guide 18.2.
- [4] Wei Lu et al., “Experimental investigation of 3-D ERVC process for IVR strategy - CHF limits and visualization of boiling phenomena”, Nuclear Engineering and Design, 322, 240–255 (2017).
- [5] F. B. Cheung et al., “A hydrodynamic critical heat flux model for saturated pool boiling on a downward facing curved heating surface”, Int. J. Mass Transfer, 40-6, 1291–1302 (1997).