

# A Primary Analytical Programme of Temperature in CFR Steam Generator

Xiaolong Jiang, Huajin Yu, Lina Zhu

Fast Reactor Department, China Institute of Atomic Energy, Beijing  
Email: jxlallen@qq.com

Received: Apr. 3<sup>rd</sup>, 2018; accepted: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2018; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The tubes in the steam generator of fast reactor are the proof between water and sodium and the heat-transfer medium between water and sodium, and also it can prevent them from Sodium-Water reaction. Nowadays, CFR600 has been fully developed and will transfer to technological design. In this process, the thermal and hydrologic design of SG is the guarantee of the safety and reliability of fast reactor. This paper will illustrate a primary programme on analyzing the temperature in CFR steam generator.

## Keywords

Steam Generator, Temperature Field, Meshing, Porous Medium Model

---

# 快堆蒸汽发生器温度场计算初步方案

蒋小龙, 余华金, 朱丽娜

中国原子能科学研究院堆工部, 北京  
Email: jxlallen@qq.com

收稿日期: 2018年4月3日; 录用日期: 2018年4月23日; 发布日期: 2018年4月30日

---

## 摘要

快堆蒸汽发生器的换热管壁是钠和水蒸汽的隔离屏障, 是热传输系统介质钠和动力转换系统介质水蒸汽之间的实体屏障, 是快堆中避免发生钠-水反应的实体边界。CFR600的方案设计已经完成, 要进一步进行工艺设计。其中关键设备蒸汽发生器的热工水利设计与分析对反应堆装置的安全可靠运行具有重要意义。本文将就如何对蒸汽发生器内三维温度场的仿真计算初步方案进行阐述。

## 关键词

蒸汽发生器, 温度场, 网格划分, 多孔介质模型

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

能源是现代经济社会发展的基础, 是经济社会发展的重要制约因素, 能源安全事关经济安全和国家安全, 能源消耗对生态环境的影响日益突出。能源是国民经济的基础, 随着社会经济的发展, 常规能源已不能满足各国对能源的需求。核能由于具有高效、清洁、安全等特点, 正成为世界各国能源发展的方向。核能在保障我国能源供应与安全、保护环境、优化能源结构、实现我国经济社会的可持续发展等方面, 具有重要的意义。近年来, 随着全球能源消费的不断增长, 人们越来越担心世界能源供应的可持续性。目前, 煤、石油、天然气资源仍然是能源消耗的主要途径, 但是由于技术和经济因素等, 其开发效率存在较大差异。面对日益紧张的能源需求和不可再生能源消耗所带来的环境污染, 应积极开发新型可再生能源, 包括太阳能、风能、潮汐能等, 而核能成熟的运行经验表明它是新能源开发中最具发展前景和应用价值的可再生能源之一。无论使用何种堆型, 核电站的安全性始终居于主导地位[1]。1979年, 美国三里岛核电站由于操作人员的失误等原因致使反应堆堆芯严重损坏, 大量裂变产物进入安全壳, 放射性物质泄露至环境, 国际原子能机构将其定为5级核事故。1986年, 前苏联切尔诺贝利核电站的一个反应堆在试验中突然爆炸, 释放出大量放射性物质, 被称为核电史上最严重的灾难。2011年, 日本福岛核电站在遭遇地震和海啸自然灾害后, 堆芯核燃料衰变产生的余热无法导出, 导致部分堆芯融化, 大量放射性物质外泄。这三次重大核电事故给世人敲响了警钟, 必须加强对核电安全的重视。

目前, 60万千瓦工业规模的原型/示范快堆电站 CFR600 的研发已经启动, 中核集团在“龙腾 2020 科技创新计划”中设立专项资金进行研发, 国家也对快堆的关键技术研发、能力建设等进行了投入。CFR600 的方案设计已经完成, 要进一步进行工艺设计。其中关键设备蒸汽发生器的热工水利设计与分析对反应堆装置的安全可靠运行具有重要意义[2]。钠-水蒸汽发生器是位于二回路主冷却系统和水蒸汽系统之间的能量交换装置, 实现了钠侧道水蒸气侧热量的传输。蒸汽发生器的换热管壁是钠和水蒸汽的隔离屏障, 是热传输系统介质钠和动力转换系统介质水蒸汽之间的实体屏障, 是快堆中避免发生钠-水反应的实体边界。此外, 蒸汽发生器要保证在额定工况和事故工况下从二回路主冷却系统导出热量。所以快堆蒸汽发生器的结构和功能的完整性对于快堆的安全运行具有重要意义。因此, 本课题将开展蒸汽发生器一次侧三维温度场的计算分析, 获得蒸汽发生器内部温度、压力、速度等参数的分布情况, 从而为蒸汽发生器传热管的热应力分析和流致振动计算提供必要的输入, 还可为蒸汽发生器的热工水力设计提供校核, 同时还可对下一阶段蒸汽发生器的热工水力试验验证奠定基础。

## 2. 快堆蒸汽发生器简介

CFR600 的研发工作是以 CEFR 为基础的。CEFR 是一座钠冷池式快堆, 一回路由两台主泵、四台中间热交换器、钠泵出口管道、堆芯及相关的流道组成, 这些设备和部件全部放置在一个直径为 8010 mm 的钠池中。正常运行时堆芯钠的入口温度为 360℃, 出口温度为 530℃, 与堆芯上部热钠搅混后平均温度

为 516℃, 进入中间热交换器, 热量由一次钠传给二次钠后, 一次钠从中间热交换器流出口时温度将为 354℃, 与钠池钠搅混后升至 360 射灯弧度, 再由一次钠泵吸入至堆芯。二次钠进入蒸汽发生器一次侧加热二次侧给水使其相变为过热蒸汽。过热蒸汽进入汽轮机做功使汽轮机转动, 将热能转化为机械能, 最后带动发电机发电产生电能。快堆钠-水蒸汽发生器位于二回路和三回路之间, 是将冷却剂产生的热量传给三回路给水, 使之产生一定压力、一定温度的过热蒸汽的关键热交换设备。蒸汽发生器是快堆的重要设备之一, 从循环方式上, 可分为自然循环式和强迫循环式两种。从结构上来分, 则有一体化直流式和模块式设计两种[3]。一体化直流式蒸汽发生器是将蒸发器、过热器、分离器等作为一个整体设计, 形成一个大型热交换器, 美国的 Fermi, 法国的 Super Phoenix, 前苏联的 BH-350 等采用的就是这种类型。模块式设计通常是由数个负担不同职能的且彼此分开的热交换器(如蒸发器、过热器、汽鼓等)构成, 英国的 PFR, 日本的 MONJU, 前苏联的 BH-600 等采用了模块式蒸汽发生器。

CEFR 蒸汽发生器采用直流式设计, 其优点是: 它不需要装设汽水分离器, 结构简单; 静态特性好, 机动性能也好; 由于产生的是过热蒸汽, 在汽轮机高低压缸之间可不装去湿装置, 简化了系统, 并可提高装置的热效率; 其功率重量比较高(约 1.5MW/t), 单台电功率可达 60~65 万千瓦。直流式蒸汽发生器的缺点是: 对给水品质和传热管材的抗腐蚀性能要求较高; 因水容积小, 蓄热能力小, 对自动控制的要求高; 存在流动不稳定性问题。其结构以前苏联 BOP-60 反应堆装置的蒸汽发生器为基础设计, 并考虑了在 BH-800 核电站中引入的一系列技术方案, 是具有蒸发器和蒸汽过热器两个不同功能模块的模块式蒸汽发生器。虽然 CEFR 蒸汽发生器采用模块式设计, 单介质在各模块中的流动是直流式的, 两个模块在结构上设计也是最大限度的保障了具有直流管式的直立式热交换。传热管束是由 239 根  $16 \times 2.5 \text{ mm}$  按三角形排列的传热管组成, 对于蒸发器和过热器, 传热管的长度分别为 11.75 m 和 5.2, 节距分别为 28 mm 和 33 mm。在模块的上部和下部具有相应接管的入口的水腔室和出口的蒸汽腔室, 两个腔室结构相同并由锻件制成, 带有平板管, 中心套管和法兰。蒸汽过热器的腔室和蒸发器的上部腔室是由平盖板封闭的并且由焊接膜片和带有垫圈和螺母的螺栓封闭的。换热器的外壳上带有波纹管温度补偿器。

CEFR 蒸汽发生器一次侧工质流动情况如下: 从中间热交换器而来的温度为 495℃ 的钠, 经入口接管进入过热器下部, 自下而上流经过热器传热管的管间空间, 出口钠温度为 310℃, 最后经下部接管进入钠缓冲罐后, 由钠泵送回中间热交换器。CEFR 二次侧工质流动情况如下: 温度为 190℃ 的给水从蒸发器入口进入蒸发器模块的下部腔室, 流经节流孔板后在传热管内空间自下而上流动, 吸收一次侧的热量, 经过预热、蒸发、加热后达到所需的温度, 产生具有一定过热度的蒸汽, 从蒸发器上部腔室流出。过热蒸汽自蒸发器的连接管道进入过热蒸汽的上部腔室, 然后再过热器的传热管内空间自上而下流动, 温度不断升高到 480℃ 后, 从过热器的下部腔室流出后被送入汽轮机。在给水自下而上流经过热器的过程中, 经历了过冷水、两相流涕和过热蒸汽三种状态, 二在过热器中, 二次侧均为过热蒸汽。由于蒸汽发生器所处的环境复杂, 往往容易引起蒸汽发生器的损坏, 一、二次侧流体的温差, 温度场的波动都会引起传热管的热应力变化, 导致疲劳破损。另外, 由横向流引起的流致振动现象会使得传热管表面与支撑板发生微振磨损, 也可能导致传热管的损坏[4]。

因此, 很有必要开展蒸汽发生器一次侧三维温度场的计算分析, 不仅可为蒸汽发生器传热管的热应力分析和流致振动计算提供必要的输入, 还可为蒸汽发生器的热工水力设计提供校核, 同时还可对下一阶段蒸汽发生器的热工水力试验验证奠定基础。本文将就如何对蒸汽发生器内三维温度场的仿真计算初步方案进行阐述。

### 3. 物理建模和计算方法

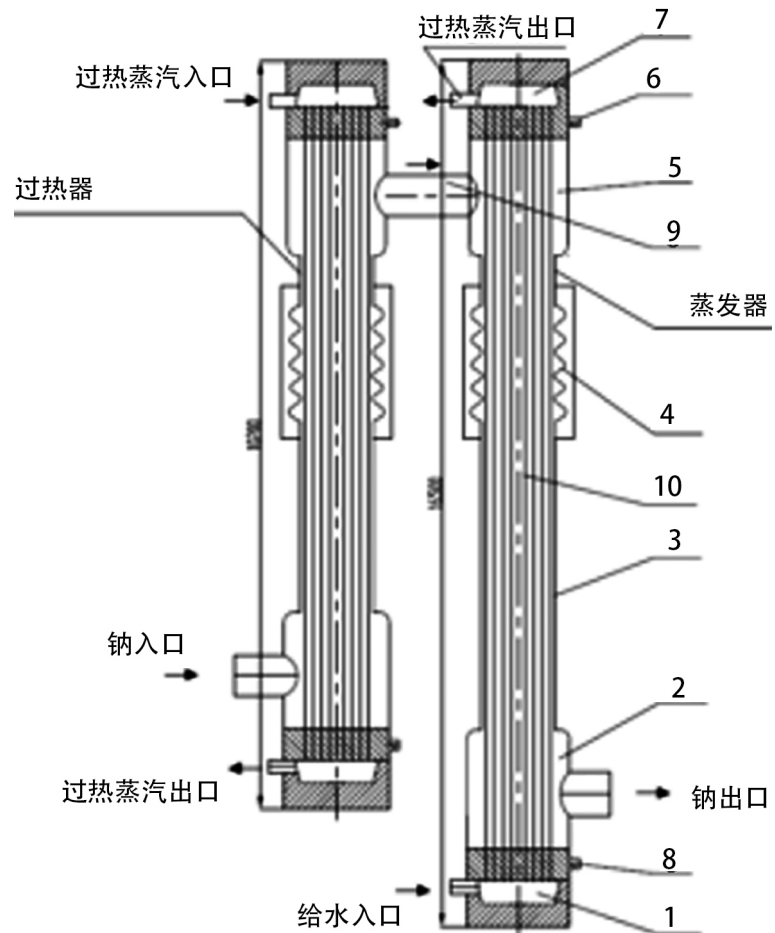
#### 3.1. 几何结构

##### 1) 总体描述

蒸汽发生器整体为模块式蒸汽发生器，由蒸发器和过热器两个单元组成。蒸汽发生器模块布置于 FR 的二回路主冷却系统中。如图 1 所示为蒸汽发生器简图[5]，蒸汽发生器两个功能不同的模块均垂直放置，为立式直管管壳式换热器。蒸汽发生器工作介质为钠和水/蒸汽/过热蒸汽，其中水/蒸汽在管程流动，钠在壳程流动。

来自中间热交换器的二回路钠进入过热器的下部钠小室，由下而上流过壳程，通过蒸发器和过热器之间的连管进入蒸发器的上部钠小室，在壳程由上而下流动，从下部钠小室流出，之后流入钠缓冲罐，并有二回路钠循环泵送回中间热交换器。给水泵供给的过冷水流入蒸汽发生器的下部水室，经节流装置后进入换热管。蒸发器的上部蒸汽室内为过热蒸汽，沿溢流管流入过热器上部蒸汽室，并由上而下沿管程流动，微过热蒸汽温度升高到汽轮机发电所需的过热蒸汽，最后输送到汽轮机组。

三回路介质的入口小室和出口小室的结构完全相同，由管板、圆筒和法兰组成，使用平面盖将小室完全封闭，并且用垫片或膜密封。壳体由上部钠腔室、带保护罩的波纹管补偿器和悬挂式支座，蒸发器和过热器之间钠连接管的中心线与支撑面在同一平面上。考虑到传热管换热过程中存在温差热应力，在壳体表面需要安装膨胀节来补偿热应力。换热管为整根无缝钢管。换热管的端部与上管板(或下管板)胀焊，



1-给水入口腔；2-冷却剂出口腔；3-壳体；4-波纹补偿器；5-冷却剂入口腔；6-气体吹扫接管；7-蒸汽出口腔；8-排放接管；9-溢流接管；10-管束

Figure 1. A brief structure diagram of CEFR steam generator

图 1. CEFR 蒸汽发生器简图

沿直线管段在管束的轴向高度上安装有支撑板，用来固定传热管。在模块上部小室的换热管内有接管作为热屏蔽。所有模块在壳程的壳体、接管和管板装备有热屏蔽，除了作为壳体的热屏蔽外，还用于固定支撑板，优化钠的流动[6] [7] [8] [9]。

## 2) 结构参数

蒸汽发生器蒸发器和过热器传热管的规格分别为  $16 \times 2.5 \text{ mm}$  和  $16 \times 3.0 \text{ mm}$ ，高度分别为 17.7 m 和 7.4 m，节距分别为 28 mm 和 33 mm，传热管数目分别为 473 根和 349 根，传热管的材料选用 2.25Cr1Mo，传热管采用正三角形布置。筒体内径分别为 680 mm 和 696 mm，筒体外径均为 900 mm [10] [11] [12]。

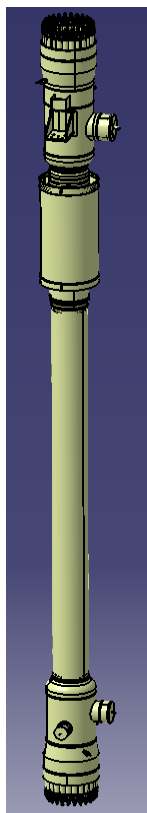
## 3.2. 物理建模

蒸汽发生器一次侧结构采用 CATIA 进行物理建模。CATIA 是一个交互式 CAD/CAM(计算机辅助设计与计算机辅助制造)系统，它功能强大，可以轻松实现各种复杂实体及造型的建构。它在诞生之初主要基于工作站，但随着 PC 硬件的发展和个人的迅速增长，在 PC 上的应用取得了迅猛的增长，已经成为模具行业三维设计的一个主流应用。本课题中使用的 CATIA 版本为 CATIA V5。

本项目物理建模的策略是：

- 1) 简化一些对流动和传热不造成影响的结构
- 2) 分模块构建，模块重新装配

如图 2 所示为蒸汽发生器三维结构总图。从流动方向，蒸汽发生器一次侧(钠侧)主要包括入口腔室、流量分配罩、支撑板、管束、出口腔室等重要部件。如图 3、图 4 和图 5 所示分别为蒸汽发生器顶部剖视图、流量分配罩图以及支撑板图[13]。



**Figure 2.** The whole 3-D structure diagram of SG  
**图 2.** 蒸汽发生器三维结构总图

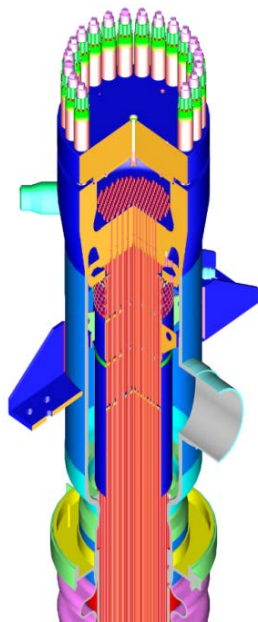


Figure 3. The top sectional view of CERR SG  
图 3. 顶部剖视图

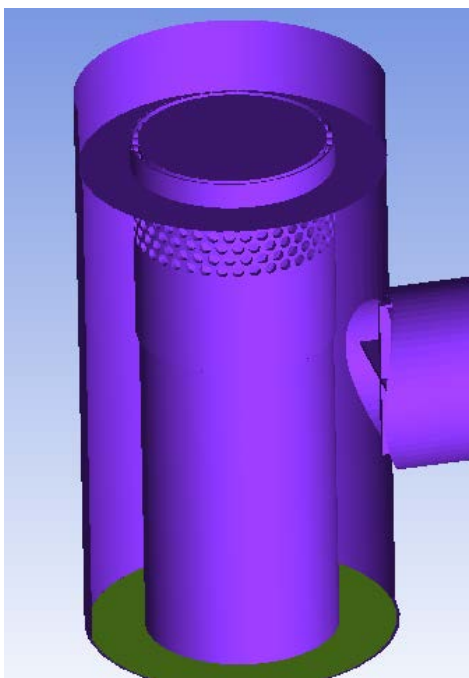


Figure 4. The top sectional view of flow distribution cover  
图 4. 流量分配罩剖视图

### 3.3. 网格划分

从蒸汽发生器设计特性可知，其结构主要呈现如下特征：

1) 内部结构非常复杂

蒸汽器和过热器传热管数目多达 239 根，设计有流量分配罩以及管束支撑板等流动较为复杂的结构。

同时还需要关注入口腔室和出口腔室所引起的突扩和突缩结构。

## 2) 几何尺度范围非常宽广

蒸发器和过热器在长度方向的尺度较大, 分别达到 11,750 mm 和 5200 mm, 但在径向的尺度差异较大, 其中筒体尺度为 504 mm, 可在支撑板缝隙处的尺度竟小至 0.3 mm 量级[14]。

如上述, 蒸汽发生器整体尺寸较大, 而内部结构复杂, 特别是在支撑板处, 换热管与支撑板之间存在毫米级间隙, 以三叶形支撑板为例, 如图 6 为支撑板与换热管的网格, 在网格划分时, 容易发生网格畸变, 并且如果按照实际几何结构建模并划分网格, 网格数量会相当庞大。如果采用整体建模, 其网格数量甚至已经达到百亿量级网格, 这在工程应用上是不可接受的。

因此, 基于以上考虑, 本项目拟采用如下策略进行网格划分:

1) 蒸汽发生器钠侧在总体上采用多孔介质方法进行建模, 但需要在分析蒸汽发生器各部件结构特点的基础上, 在某些重要的局部位置采用精细网格进行建模, 以确定多孔介质模型的输入参数。

2) 根据蒸汽发生器各个段的实际情况确定采用整体几何模型或分段模型, 并比较两种模型的精度和计算效率。

考虑到蒸发器内部固体结构分布均匀, 可以通过采用多孔介质模型对其几何结构进行简化并尽可能采用结构化网格, 在减少网格数量的同时还可以提高网格的质量, 使其在工程应用上可以被接受。多孔介质模型中存在的两个经验参数, 粘性阻力系数及惯性阻力系数, 可以通过对不同局部结构的精细网格建模计算来确定。

而对于一些无法采用多孔介质模型并且对一次侧流体流动传热特性有较大影响的结构, 如钠入口处的流量分配罩如图 7 所示, 决定了其下流区域的流量分配情况, 对流动传热有很大影响。对于该区域可

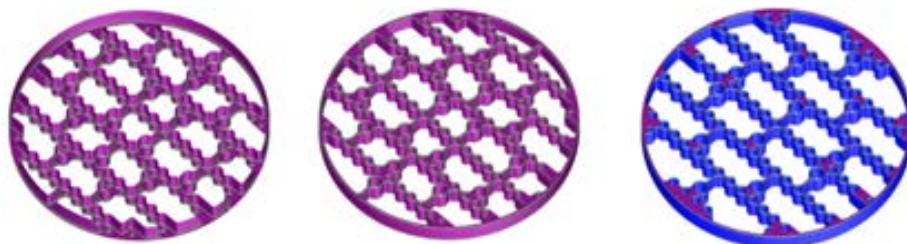


Figure 5. The diagram of the shoe plates

图 5. 支撑板图

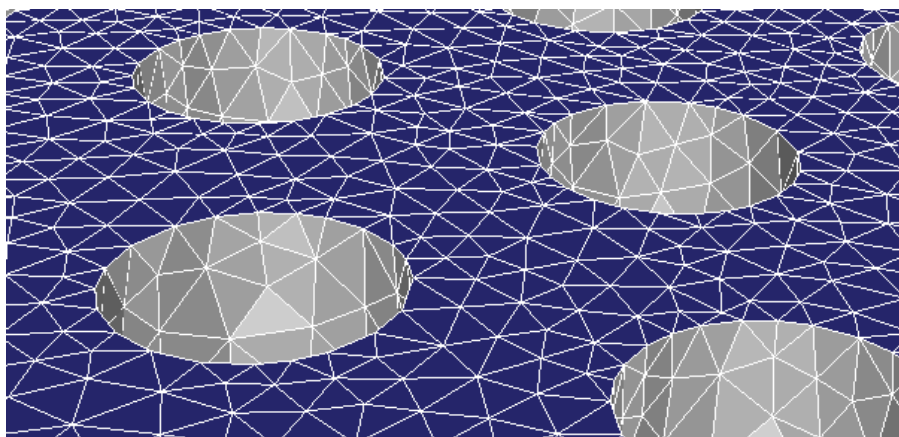


Figure 6. The gridding of the tubes and shoe plates

图 6. 支撑板与换热管网格

以采用精细网格建模，以获取准确的流量分配情况[15]。

### 3.4. 多孔介质模型

对于支撑板和传热管构成的管束区域，由于其结构复杂且尺寸跨度较大，故对该区域用多孔介质建模处理。如图 8 为一块支撑板与 20 倍水力直径长度的传热管构成的一个计算模块，用以计算多孔介质模型中，管束区域的粘性阻力系数和惯性阻力系数。

对于单相和多相介质，多孔介质可以使用表观速度或物理速度的形式。基于表观速度的多孔介质模型能够较好模拟多孔介质区内部的压力损失。可以通过在 N-S 方程中添加源项来模拟计算多孔材料中流体所受到的阻力，源项主要由惯性损失项和 Darcy 粘性阻力项组成。

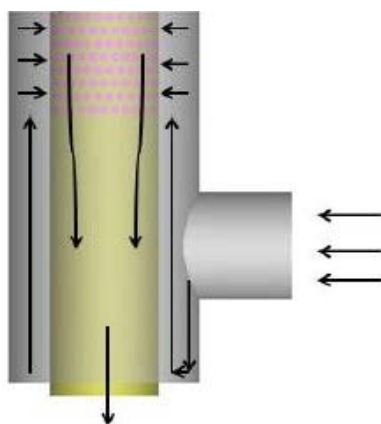


Figure 7. The diagram of the upper flow distribution cover

图 7. 蒸发器上部流量分配罩

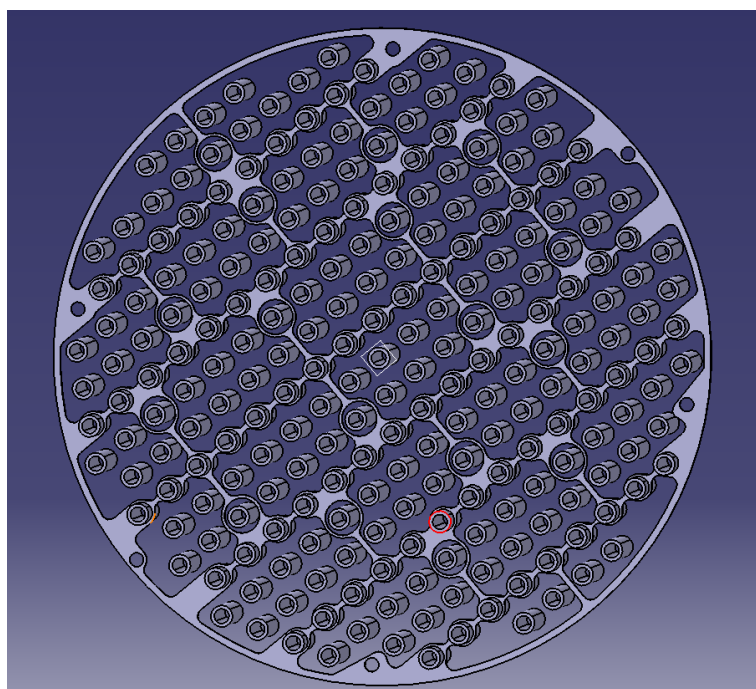


Figure 8. The physical modeling of the tube zone

图 8. 管束区域的物理建模



$$S_i = - \left( \sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (1)$$

其中,  $C$  和  $D$  分别为惯性损失和粘性损失系数矩阵。多孔介质单元中的压降就由这个负的动量源项产生。对于简单的均匀多孔介质, 分别在系数矩阵  $C$  和  $D$  中对角线项带入  $1/\alpha$  和  $C_2$ , 而其它项为零, 则有

$$S_i = - \left( \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (2)$$

其中  $1/\alpha$  及  $C_2$  分别为粘性阻力系数和惯性阻力系数。当多孔介质中流动为层流时, 典型情况下压降与速度成正比, 即多孔介质模型简化为 Darcy 定律:

$$\Delta p = - \frac{\mu}{\alpha} \mathbf{v} \quad (3)$$

于是, 在三个坐标方向上的压降为

$$\Delta p_i = \sum_{j=1}^3 \frac{\mu}{\alpha_{ij}} v_j \Delta n_i \quad (4)$$

$\Delta n_i$  为多孔介质在三个坐标方向上的厚度。

当速度比较高, 或模拟多孔板和管排时, 有时可忽略粘性损失项, 只保留惯性损失项, 则多孔介质方程简化为:

$$\Delta p = - \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \quad (5)$$

或写成三个坐标方向上的压降:

$$\Delta p_i = \sum_{j=1}^3 C_{ij} \Delta n_i \frac{1}{2} \rho |v| v_j \quad (6)$$

在多孔介质中, 当介质的渗透性很大且介质的几何尺度与湍流涡的尺度不发生相互作用时, 可以认为固体基体对湍流的生成和耗散率没有影响。阻力系数一般是基于流体在多孔介质中的表观速度定义的。图 9 显示的为管束区多四面体网格, 可通过以下方法计算多孔介质模型中所需的惯性阻力系数和粘性阻力系数: 可以用多孔介质的压降  $\Delta p$  与速度  $v$  的关系来确定阻力系数。设压降和速度的二次多项式拟合关系式为

$$\Delta p = a_1 v + a_2 v^2 \quad (7)$$

式中  $a_1$  和  $a_2$  为拟合系数。N-S 方程中源项为单位长度的压降, 即

$$S_i = -\Delta p \cdot \Delta n \quad (8)$$

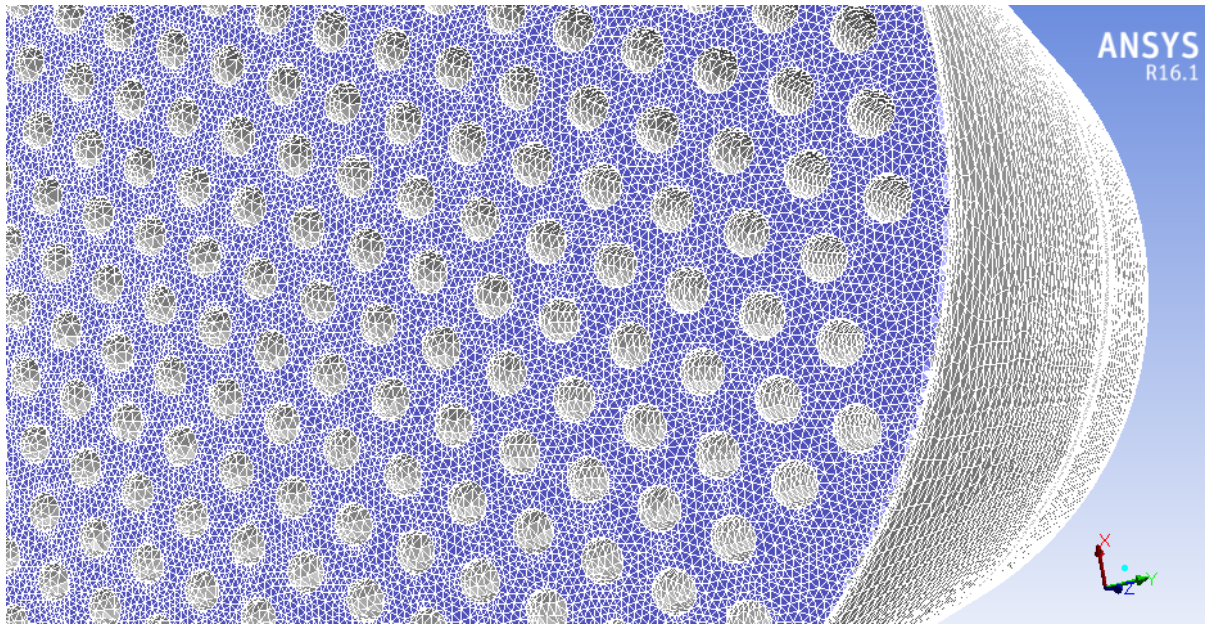
比较式(6)、(11)、(12), 可得阻力系数:

$$C_2 = \frac{a_2}{\rho \Delta n / 2} \quad (9)$$

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{a_1}{\mu \Delta n} \quad (10)$$

#### 4. 计算预期结果与展望

根据已有的工况参数, 可将入口设为质量流量入口( $G_{in} = G_0$ ), 出口为压力出口( $P_{out} = P_{in}$ )。考虑到多孔介质网格尺度较大, 壁面无滑移边界不适用, 本项目将采用滑移壁面, 将壁面摩擦阻力分布添加到



**Figure 9.** The tetrahedral meshing of the tube zone  
**图 9.** 管束计算模块的四面体网格

壁面网格内。蒸汽发生器筒体和管板采用绝热壁面边界。对于一次侧二次侧对流换热边界条件，根据二次侧流体的流动沸腾状态，将该边界分为液相强迫对流换热区、过冷沸腾区、饱和沸腾区、强制对流蒸发区、换热恶化区以及蒸汽过热区。针对不同的区域采用不同的换热系数计算公式，而各区域的起始位置也通过相应的计算公式确定，把二次侧的水流看作是一个负能量源，并通过 UDF 的形式导入 fluent 进行动态求解，以满足不同的运行工况。再将多孔介质区域的粘性阻力系数和惯性阻力系数同样利用 UDF 将其导入到多孔介质区的动量计算方程中，从而达到动量和能量的耦合计算求解。预期可求得蒸汽发生器钠侧温度分布的初步结果。

## 参考文献

- [1] 杨红义, 宋微. 第 4 代核能系统国际论坛(GIF)进展[J]. 中国原子能科学研究院年报, 2007, 1(1): 5-6.
- [2] 徐銖. 发展快堆-保障我国核能可持续发展[J]. 中国核工业, 2008, 1(9): 193-199.
- [3] 何佳闰, 郭正荣. 钠冷快堆发展综述[J]. 东方电气评论, 2013, 27(107): 36-44.
- [4] 程铁平, 崔振华. 可连续移动相边界的直流式蒸汽发生器模型[J]. 核动力工程, 2000, 21(3): 197-202.
- [5] 韩占忠, 王敬, 兰小平. 流体工程仿真计算实例与应用[M]. 北京: 北京理工大学, 2010.
- [6] 西安交大思源科技股份有限公司. 钠-水蒸汽发生器热工水利分析模型报告[M]. 西安: 西安交通大学出版社.
- [7] 黄晓津, 冯元昆, 郭人俊. HTR-10 螺旋管式直流蒸汽发生器的动态数学模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(6): 88-90.
- [8] Wolf, S. and Holmes, D.H. (1991) Critical Heat Flux And Transition Boiling Characteristic for a Sodium-Heated Steam Generator Tube for LMFBR Application. *Journal of Heat Transfer*.
- [9] Fast Reactor Steam Generator with sodium on the Tube Side. IAEA-TECDOC-730, Printed by IAEA in 1994.
- [10] Nandakumar, R., Selvaraj, P., Athmalingam, S., Balasubramaniyan, V. and Chetal, S.C. (2012) Thermal Simulation of Sodium Heated Once through Steam Generator for a Fast Reactor.
- [11] 赵兆颐, 朱瑞安. 反应堆热工流体力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [12] 张旭. 汽液两相流的数学模型鉴别[D]: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 1992.

- 
- [13] 刘大有. 两相流体动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [14] 徐銖. 快堆主热传输系统及辅助系统[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2011.
- [15] 刘伟. 多孔介质传热传质理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1-27.

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-7111, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [nst@hanspub.org](mailto:nst@hanspub.org)