

深水池式低温堆供热堆系统准确实时仿真技术研究*

祁琳¹ 姜强¹ 李宗洋² 吴明宇¹ 刘天才¹

(1. 中国原子能科学研究院, 北京 102413

2. 中核战略规划研究总院, 北京 100048)

摘要: 本文以常压深水池式低温供热堆系统为研究对象, 基于vPower仿真支撑平台开发了集总参数模型的系统仿真程序, 并且通过并行耦合技术, 实现了系统仿真程序与基于COBRA-EN的子通道程序的耦合, 并模拟了不同功率水平下的稳态运行工况, 以及断电ATWS工况。通过研究多尺度仿真方法, 解决了使用单一计算程序带来的精度低或计算时间长的问题, 能够为系统参数匹配、工况设计和安全分析提供更加详细和更加准确的数据。

关键词: 低温供热堆 系统仿真程序 子通道程序 耦合

中图分类号: TL333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-9082 (2022) 11-0206-03

按照建模对象的尺度, 通常将热工水力仿真程序分为系统仿真程序、部件尺度分析程序和局部尺度分析程序^[1]。系统仿真程序可以较为准确地模拟系统宏观参数的响应特性, 但是由于系统尺度的模拟采用一维流动与传热模型, 只能得到流动截面的平均参数, 对带有明显多维流动特征的区域不适用, 不能达到安全分析的需求。因此在模拟低温供热堆的运行状态时, 为了满足仿真所需的精度, 需进行不同尺度程序的耦合计算。

本文通过并行耦合技术, 实现基于vPower的低温供热堆系统仿真程序与COBRA-EN程序的耦合, 并模拟了一些运行工况。

一、DHR-200系统仿真程序

DHR-200系统仿真程序采用图形化建模方法, 基于商业仿真支撑平台vPower^[2]建立, 使用表1所示的设备模块来搭建系统仿真模型, 其中包含堆芯、水池、换热器、水泵、阀门、管道等设备和部件, 分别构成了堆水池系统、一/二/三回路系统、池内/外余冷系统模型, 如图1所示。

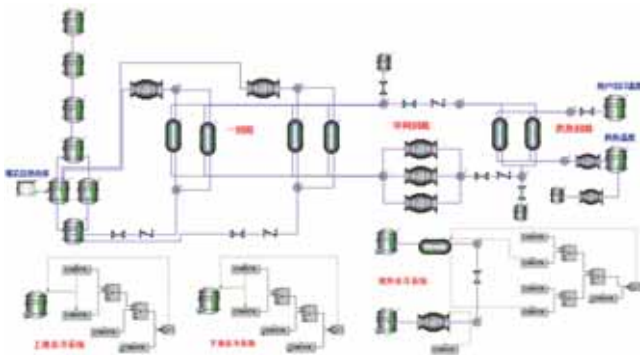


图1 DHR-200系统仿真模型

Figure 1 System simulation model of DHR-200

表1 DHR-200主要设备及部件

Table1 Main equipment and components of DHR-200

子系统	主要设备和部件	模块	数量
堆水池	堆芯	点堆动力学模型+热工水力模型	1
	容器	Tank模块	6
	管路	fFL模块	若干
一回路	一二回路换热器	Htex模块	4
	一回路泵	Pmp模块	2
	阀门	SVlv模块	若干
二回路	二三回路换热器	Htex模块	2
	二回路泵	Pmp模块	3
	定压水箱	Tank模块	2
三回路	循环水泵、补水泵	Pmp模块	2
	用户出入口边界	Tank模块	2
池内余冷	上、下池余冷器	逻辑性模拟	2
	冷却塔	表示性模拟	1
池外余冷	池外冷却器	Htex模块	1
	余冷泵	Pmp模块	1
	设冷水箱	表示性模拟	1

二、基于COBRA-EN的子通道分析程序

子通道分析程序不仅可以进行稳态计算, 也可以进行瞬态计算, 此时须将功率、入口流量、入口温度等作为瞬态函数的形式输入原程序进行瞬态的计算^[3]。

1. 换热模型

根据低温供热堆的运行参数范围——常压、温差、含汽率, 大流量区 ($Re > 2300$) 的过冷水换热模型使用格尼林斯基gnielinski修正佩图霍夫petukhov公式^[4], 小流量区 ($Re > 2300$) 的过冷水换热模型使用米海耶夫mehev公式^[5]。

$$Nu = \frac{f}{8} (Re-1000) Pr \left[1 + \left(\frac{d}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right] k, \quad f = 0.3164 Re^{-0.25},$$

$$1 + 12.7 (Pr^{2/3} - 1) \sqrt{\frac{f}{8}}$$

$$Re > 2300, \quad Pr \geq 0.5, \quad Nu = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.43} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w} \right)^{0.25}$$

* 基金项目: 稳定基础科研计划资助项目 (BJ19002020)。

$$Re = 10^4 \sim 5.0 \times 10^6$$

对于过冷沸腾和饱和沸腾区域，使用chen公式^[6]：

$$h = 0.023F \left[\frac{G(1-x)D_e}{\mu_f} \right]^{0.8} \left[\frac{\mu_f C_{pf}}{k_f} \right]^{-0.4} \left(\frac{k_f}{D_e} \right) + 0.00122S \left[\frac{k_f^{0.79} C_{pf}^{0.45} \rho_f^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_f^{0.29} h_{fg}^{0.24} \rho_g^{0.24}} \right] (T_w - T_s)^{0.24} (P_w - P_s)^{0.75}$$

$$F = \begin{cases} 1.0, & X_u^{-1} \leq 0.10 \\ 2.35(X_u^{-1} + 0.213)^{0.736}, & X_u^{-1} > 0.10 \end{cases}$$

$$S = \begin{cases} [1 + 0.12(Re_{TP})^{1.14}]^{-1}, & Re_{TP} < 32.5 \\ [1 + 0.42(Re_{TP})^{1.14}]^{-1}, & 32.5 \leq Re_{TP} < 70.0 \\ 0.1, & Re_{TP} \geq 70.0 \end{cases}$$

其中， $X_u^{-1} = \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_g}{\mu_f} \right)^{0.1}$ ，

$$Re_{TP} = \frac{G(1-x)D_e}{\mu_f} F^{1.25} \times 10^{-4}$$

2. CHF模型

根据低温供热堆的运行参数范围选用Shim模型^[7]，但Shim公式水管内流动公式，将其用于棒束通道的计算前需要做适当的修正：

$$q_c = \frac{10^6 \alpha}{D^{K_1}} \exp \left[-\beta \left\{ G^{0.51} X_T^{0.5} (1 + X_T^2)^{1.5} \right\}^{K_2} \right]$$

(1) 管道直径修正： $K_1 = (0.008 / D_e)^{1/3}$ ；

(2) 棒束流动修正： $K_2 = \min \left[0.8, 0.8 \exp \left(-0.5x^3 \right) \right]$ ；

(3) 定位格架修正： $K_3 = 1 + A \exp \left(-B \frac{L_{sp}}{D_e} \right)$

$$A = 1.5K^{0.5} \left(\frac{G}{1000} \right)^{0.2}$$

$$B = 0.1$$

(4) 加热段长度修正： $L / D \geq 5, K_4 = \exp \left[\left(\frac{D_e}{L} \right) e^{2\alpha} \right]$ ，

为按均相流模型求出的空泡份额。

(5) 轴向热流分布修正： $K_5 = \begin{cases} q_{BLA} / q_{LOCAL}, & x > 0 \\ 1.0, & x < 0 \end{cases}$ 。

3.子通道模型

200MW低温供热堆堆芯组件内的燃料棒数目为289，子通道数目为324，轴向控制体数目为43，芯块径向节点数目为5，定位格架位置数目为8，定位格架类型数目为3。

三、耦合方法

1.并行耦合方法

由于vPower仿真平台为商业软件，只能通过用户自定义函数进行编程，因此只能采用并行耦合方法，将两个程序独立编译、独立运行，通过编写耦合接口在计算区域的边界实现程序间数据传递与交换，既保持了原有程序的结构和功能，又便于升级维护^[8]。

2.耦合机制

本研究中使用的耦合机制为系统仿真程序到子通道分析程序的单向耦合，待保护参数和控制逻辑设计完成后，可实现双向耦合。耦合机制如下图所示。

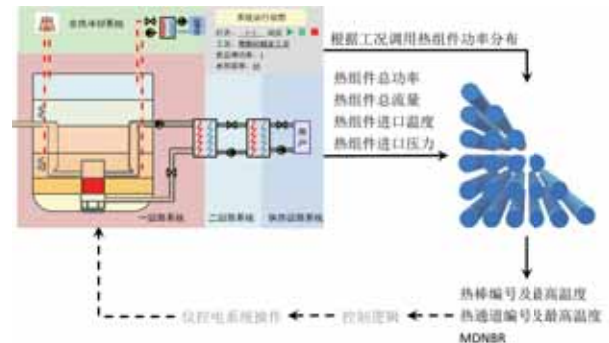


图2 耦合机制

Figure2 Coupling mechanism

四、工况模拟

1.稳态运行工况

模拟了低温供热堆第一循环堆芯寿期初不同功率水平下

表2 DHR-200稳态工况仿真数据

Table 2 Steady state simulation data of DHR-200

功率水平/MW	25	50	80	100	120	140	160	180	200
堆芯出口温度/℃	76.248	78.773	82.627	85.199	87.736	90.321	92.891	95.656	98.005
堆芯进口温度/℃	71.742	71.306	70.650	70.210	69.771	69.329	68.891	68.636	68.014
二回路热侧温度/℃	78.524	77.683	80.866	82.989	85.083	87.218	89.344	91.661	93.568
二回路冷侧温度/℃	75.601	70.160	68.824	67.955	67.053	66.157	65.264	64.555	63.493
三回路热侧温度/℃	72.510	74.518	77.622	79.694	81.735	83.815	85.886	87.780	90.029
三回路冷侧温度/℃	59.992	59.992	59.992	59.992	59.992	59.992	59.992	59.992	59.992
燃料棒平均温度/℃	152.08	168.61	189.85	200.38	212.88	223.48	234.07	244.77	253.064
热棒最高温度/℃	227.84	383.50	570.16	694.60	819.04	943.47	1067.91	1192.53	1316.79
热通道最高温度/℃	78.84	85.49	93.35	98.58	103.82	109.05	114.29	119.71	124.76

的额定运行工况，部分关键参数的计算结果如表2所示。

根据以上参数得出热工水力设计流量对应的堆芯进出口温度随功率的变化如下图右所示，图左为第一循环堆芯进出口温度随反应堆功率的变化设计曲线。

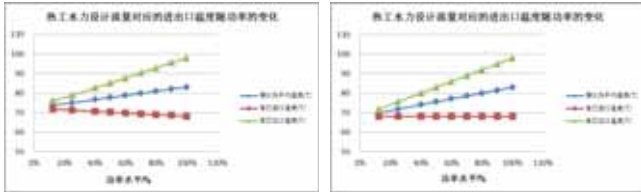


图3 堆芯进出口温度随功率的变化

Figure 3 Core inlet and outlet temperature changes with power

可以看出，与设计值相比，慢化剂平均温度随功率水平的变化趋势完全吻合，但是在低功率下运行时堆芯入口温度的仿真值偏高，这是由于功率降低后一二回路换热器冷热侧进出口温差均减小，但仍需保持一定的逆流换热温差，即换热器热侧进口温度高于冷侧出口温度，热侧出口温度高于冷侧进口温度，(根据设计，一二回路换热器的算术平均温差 $\delta_{12}=4.5^{\circ}\text{C}$ ，二三回路换热器的算术平均温差 $\delta_{23}=3.5^{\circ}\text{C}$)，因此各换热器热侧进口温度无法下降过多，所以热侧进口温度略微上升。

2. 断电 ATWS 事故

本研究为了评估 DHR-200 的安全性，考虑其应对“三无事故”的能力。这里的“三无事故”，即断电 ATWS，同时余热冷却系统也不能投入。计算中采用的假设如下：

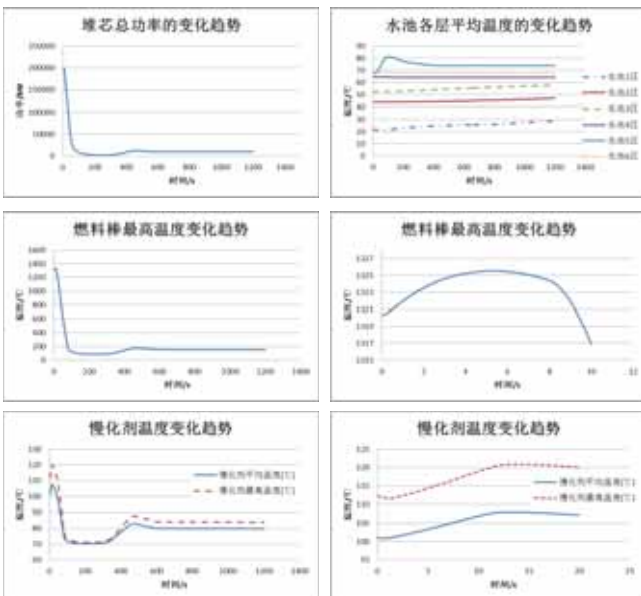


图4 断电 ATWS 工况下系统的响应

Figure 4 System response under power off ATWS condition

- (1) 反应堆初始处于额定满功率状态；
- (2) 全厂断电后，假设泵的惰转时间常数为15s，最终

转速降为0；

- (3) 停堆系统不动作，余热排出系统不投入。

仿真系统部分关键参数的响应如图 4 所示。

事故发生后，一回路泵由于失去电源惰转，堆芯流量迅速下降，燃料棒和慢化剂温度升高，引入的负反应性使反应堆功率迅速下降。之后随着堆芯自然循环的建立，反应堆功率等参数的变化速度都逐渐减慢，水池各层的温度也慢速上升。从图4可以看出，燃料棒最高温度发生在断电的10s之内，这是因为此时堆芯流量降低了而功率仍保持在较高的状态，慢化剂最高温度发生在断电的15s之内，这是燃料棒和慢化剂之间传热滞后引起的。

五、结果分析

本文首次针对200MW低温供热堆开展多尺度仿真研究。通过模拟各稳态运行工况并与设计资料比对，表明该仿真系统具有一定的准确度；通过模拟断电 ATWS 工况，表明该仿真系统能够对事故进行模拟计算，并且能较为合理地模拟出所关注参数的变化趋势。因此本文中建立的系统级和部件级仿真模型以及耦合机制是合理的，且能够提升工况分析的精度。

参考文献

- [1]田兆斐,李磊,郝琛.核动力装置建模与仿真[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2017.
- [2]北京诺思维信科技有限公司[Z].vPower建模培训资料.2009,11.
- [3]贾斌,马帅,史强,等.非能动压水堆热工水力多尺度耦合计算分析研究[J].核科学与工程,2018,38(05):763-773.
- [4]V.Gnielinski, "New equations for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow," International Chemical Engineering, 1976, 16: 359 - 368.
- [5]苏光辉.核动力系统热工水力计算方法[M].北京:清华大学出版社,2013.
- [6]Campolunghi, F., Cumo, M., 1977. Subcooled and bulk boiling correlations for thermal design of steam generators.
- [7]Shim WJ, Lee JS. Prediction of CHF in vertical round tubes with uniform heat flux for water [J]. Journal of Industrial & Engineering Chemistry, 2006, 12(1): 127-133.
- [8]周铃岚,张虹,黄善仿.核反馈对并联双通道自然循环系统流动不稳定性影响[J].原子能科学技术, 2013, 47(04): 557-563.

作者简介：祁琳（1993年7月27日—），女，汉族，山西省襄汾县，硕士，助理研究员，反应堆仿真。