

中国实验快堆额定工况下冷热钠池数值分析

Numerical Analysis of CEFR Hot and Cold Plenums in Normal Condition

许义军, 陆道纲, 杨红义, 杨福昌

(中国原子能科学研究院快堆工程部, 北京, 102413)

摘要: 应用计算软件 STAR-CD 对中国实验快堆(CEFR)的正常运行工况进行了三维数值分析, 其中使用了多孔介质模型对屏蔽柱的影响进行了模拟, 给出了冷热钠池的三维温度场和流场, 并同已有的热工设计进行了比较, 并着重分析了浮升力在数值模拟计算中的影响, 为事故工况下的设备动态分析以及相应的设备力学分析提供准确的数据。本研究结果对于 CEFR 的优化设计以及事故分析, 具有重要意义。

关键词: 三维数值模拟; 冷热钠池; 工况分析; STAR - CD

Abstract: In this paper, the CFD software STAR-CD is used to simulate the normal operating conditions of hot and cold plenums in CEFR which is one of very important conditions in steady state. Complex 3-dimensions model has been setuped by using porous medium method. The temperature and velocity distributions of hot and cold plenums have been given after simulation. And these results have been compared with the data of the thermal designs of CEFR which have been completed. Meanwhile, the influence of the buoyancy forces in simulation is analyzed. The results of the calculation is valuable for the CEFR design and accident analysis.

Key words: 3-dimension numerical analysis; cold and hot plenums; regime analysis; STAR - CD

1 引言

中国实验快堆的额定工况是指反应堆处于 100%功率下的运行状态, 是 CEFR 正常运行工况中一个非常重要的工况。对额定工况下反应堆运行状态的研究, 是对反应堆事故工况研究的重要基础, 同时对反应堆安全分析、堆容器及其堆内构件的力学应力分析与评价都有重要的意义。本文就利用目前先进的计算流体力学 (CFD) 软件 STAR-CD 对 CEFR 的堆本体进行三维建模分析。

2 计算程序

STAR-CD 是英国帝国理工大学开发研制, 专门应用于分析涉及流动和质量传递以及热交换问题的商业化 CFD 应用程序系统。STAR-CD 软件具有很强的网格构造能力, 强大而丰富的数学物理模型求解器、异常轻巧和集中的程序结构, 使得它在许多的工程问题中得到广泛应用。STAR (Simulation of Turbulent flow in Arbitrary Regions) 有很多湍流模型可以选用, 如零方程模型、K- 系列模型、K-L 模型及 LES 模型, 以适用不同的工程需要。目前版本主要采用 SIMPLE 算法, 非结构化网格。

3 冷热钠池建模分析

CEFR 冷热钠池均位于主容器内, 主要根据其空间内介质钠的温度不同而命名。冷热钠池

是介质钠在加热前和经过堆芯加热后的主要载体，同中间热交换器，一回路泵，堆芯一起构成 CEFR 一回路主热传输系统。

3.1 计算建模分析

建立合适的计算模型是计算成功的首要前提，由于冷热钠池是一个非常复杂的热力学系统，结构上完全模拟有相当的困难，如许多重要的堆内设备中间热交换器，事故热交换器及其主泵的模拟，所以这些设备必须结合工程实际和软件的功能进行简化分析。另外，堆内还有数量众多的屏蔽柱和很薄的堆内支承隔板，由于其结构同堆的整体尺寸相差很大，也会带来网格构造上的困难，需要在建模中给予特别的考虑。

3.2 模型及其简化

模型在尽可能考虑反应堆真实模拟的前提下，做了适当的简化：

- 由于所研究区域的对称性，计算中选取 180° 作为计算区域；
- 热钠池内的三层水平热屏蔽内由于钠流动非常缓慢，隔板又非常薄，仔细刻画板的形状需要耗费相当多的网格，所以，采用加权的方法等效模拟成固体；
- 热钠池中约有 150 根的屏蔽柱，因正对着一回路钠循环泵的柱子由于排列紧密，钠在其中的流动非常微弱，所以可认为没有流动，这些柱子全部按固体等效处理，剩余的柱子采用多孔介质模型进行模拟；
- 对于一次钠净化系统，只考虑其传热影响。

3.3 多孔介质模型及其适用性的验证

热钠池中的屏蔽柱，尺寸小，但数量多，实际模拟需要大量的时间和网格，计算的经济性差，所以有必要使用多孔介质模型来进行合理的简化。该模型考虑大量的固体构件对流动、传热产生的影响，假设固体构件均匀分布于控制体内，用分布阻力来考虑固体构件对动量交换和分布热源来考虑对能量交换的影响。其压降和速度的关系如下式：

$$-K_i u_i = \frac{\partial p}{\partial x_i}$$

其中， K_i 为多孔介质的渗透率，为速度的准线性关系式，如下式：

$$K_i = \alpha_i |\vec{v}| + \beta_i$$

式中， α_i ， β_i ($i=1, 2, 3$) 分别为三个相互正交方向的系数，每个方向的 α_i 和 β_i 的值可以相同，也可以不同。

整个模型的计算就是求得各个方向上的渗透率值。为了得到在实际钠池模拟中屏蔽柱各个方向渗透率的值，又构造 1 个模拟屏蔽柱真实流动的小模型和相应的多孔介质小模型，如图 1 所示。通过给真实流动的小模型以不同的速度值，得到相应的渗透率，再通过线性关系式得到系数 α_i 、 β_i 值。然后将 α_i 、 β_i 值带入到相应的多孔介质的小模型，通过设置相同的整体几何结构、物性、边界条件、压降取点位置来进行计算，最后将得到的压降和渗透率的值进行比较，以确认 α_i 、 β_i 值是否正确。二者的比较结果列于表 1，由于 z 向压降极小，程序中的系数设为无穷大：

表 1 屏蔽柱实际流动模拟和多孔介质流动模拟数据比较

方向	屏蔽柱实际流动			多孔介质流动			误差率	
	$u/(m \cdot s^{-1})$	P/Pa	K	P/Pa	K			
R 向	0.1	17.59	1150	66204.3	135	18.85	1122.7	-2.37%
向	0.2	69.17	2202	66204.3	135	70.82	2053.5	-6.8%

从表中的比较可以看出，二者之间符合的很好，可以满足工程计算的需要，并应用到实际的钠池模拟中去。

3.4 网格生成

计算中网格的生成约占整个工作量的 60%，所以，网格的数量、质量及类型的选取均非常重要。网格生成时考虑了几个重要的原则，如网格的光顺性，正交性，结点分布特性等。最终采用了整体拉伸的方法，使用了单独的六面体网格、局部加密和网格耦合技术，较为详细的刻画出了 -6.40m，-9.445m 高度的隔板和 R=2.30m 的隔板。由于冷热钠池计算的复杂程度不同，所以，在描述冷池时使用了较少的网格，而在堆芯出口区域却使用了较多的网格。最后共生成 33754 个网格，其中流体网格数量为 19730 个。计算中使用的网格示于图 2。

3.5 计算方法

计算中的压力修正方法为 PISO 算法，该方法是 SIMPLE 法的改进方法，具有收敛速度快的特点，但其每步计算时间较长。采用该算法的主要目的是提高收敛速度，并为后续的瞬间计算做准备。对紊流模型的选择，本计算采用标准的 $k-\varepsilon$ 模型，其经验系数为： $C_{\mu} = 0.09$ ， $C_{\varepsilon 1} = 1.44$ ， $C_{\varepsilon 2} = 1.92$ ， $C_{\varepsilon 3} = 1.44$ ， $C_{\varepsilon 4} = -0.33$ ， $Pr_k = 1$ ， $Pr_{\varepsilon} = 1.219$ 。

3.6 计算边界条件

根据计算区域的不同，使用了下列边界条件：

- 热钠池入口的温度和流量边界条件，按燃料区分为三区，见表 2，出口为中间热交换器的入口，为压力边界条件；
- 冷钠池的入口为中间热交换器的出口，单个流量为 77.36kg/s，温度为 354.3，出口为一回路钠循环泵的入口，为压力边界条件；
- 钠液面的散热热流密度为 1kw/m²；
- 1 台钠循环泵支撑冷却系统带走的热量为 536kw，1 台事故热交换器带走的热量为 52.5kw，一次钠净化系统引出管带走的热量为 12.7kw；
- 堆容器冷却系统带走的热量为 1782kw；
- 堆芯围桶内侧温度分布如下：在 -8.225m 以下均按 360 等温分布，在 -8.225m 到组件上端 -6.85m 处，温度从 360 ~ 440 线性增加；

表 2 堆芯燃料分区的流量和温度

分区号	描述	流量 (kg / s)	温度 ()
1	第一和第二流量区	123.03	546.04
2	第三和第四流量区	144.05	542.118
3	除燃料区以外的其它区	33.57	419.37

4 计算结果及其分析

4.1 热钠池分析

热钠池的范围主要包括在-9.445m 以上半径在 2.430m 以内的部分，同时也包括-6.4m 以上半径在 3.800m 以内的部分。

图 3 为 3 个流量分区内的流速分布,从流动分布上看,最大流速在堆芯出口处,为 1.243m/s。从堆芯第一、第二分区出来的钠流体,首先受到中心测量柱的阻挡,然后沿着中心测量柱向上流动,一直到达液面,接着通过屏蔽柱和屏蔽支撑筒的入口窗,最终流向中间热交换器的入口处。从堆芯第三分区出来的钠流体,由于流速较低,所以,受到第二分区中较高流速的影响,在屏蔽柱以内的热钠池区域会发生较大范围的搅混,产生一个流动涡,其流态示于图 4a,其中可以明显看到流体在多孔介质内的流动情况。

对半径为 2.43m 圆筒上的入口窗的流动分析中可以看到,在上部,钠的流向是对着中间热交换器的,而最下排的流动是流向屏蔽柱一侧的,相比较而言,这部分流量是较小的,不会对额定工况下堆的传热产生大的影响,而在事故工况下,这部分倒流量会对堆芯的冷却产生较好的影响。在热池外围的流动示于图 4b,由于有多个散热冷源的存在,如堆容器冷却系统、泵支撑冷却系统、事故热交换器的冷却等,这些区域的流动都沿着冷却壁面向下进行,而在接近-6.40m 处的流动都非常微弱。

图 5a 为整个热钠池屏蔽柱内的温度分布,可以看到在不同区域,有着较大的温度差异。最高温度为堆芯出口温度,第一、二分区的平均温度为 540 ,第三区的温度较低,约为 430 。堆芯出来的钠,经过搅混后的在没有经过 12 个入口窗前的热钠池的平均温度约为 528 ,温度的分布较为均匀。而位于-6.4m 隔板以上的热池钠温有着自下而上的温度梯度,其中中间热交换器的入口温度为 522 ,而在接近底部的最低温度却仅有 480 ,位于泵支撑冷却系统的边上,示于图 5b。同时,也可以看到,在同一高度上,泵支撑冷却系统周围的流体也有较大的温差(图 6),另外,冷热钠池较大的温差也反映在高度变化上(图 7),给出在 $t = 730$ 时,不同半径上沿高度的温度变化情况。

4.2 冷钠池分析

在额定功率下,冷钠池的分析比较简单,主要是冷钠池的形状较为简单,流动形式相对来说也比较单一,冷池的入口温度为 354 ,单个中间热交换器的流量为 77.36kg / s,其流动形式示于图 8a 所示,其中冷池的出口流速为 0.7870m/s,温度为 359.3 。整个冷池的温度分布受边界条件的影响较大,其中最高温度为 363.2 ,位于靠近-6.4m 的隔板附近,最低温

度为 354.5 ，位于对称边界附近(图 8b)。同理，位于-9.445m 隔板以下钠的温度也均在 360 左右，流动形式更为微弱。

4.3 同已有的热工设计的比较

已有的热工设计参数，大多来自俄罗斯的计算，二者比较列于表 3

表 3：现有计算同已有的热工设计的比较

比较项目	已有的热工设计值	现计算值	相差
	温度()	温度()	
中间热交换器入口温度	516	522	6
热池搅混温度(屏蔽柱内)	530	528	2
热池搅混温度(屏蔽柱外)	516	520	4
三层水平热屏蔽底层	403	390	13
三层水平热屏蔽上层	471	485	14
事故热交换器入口温度	516	520	4
事故热交换器出口温度	478	503	25
冷池平均温度	360	354	6

4.4 影响本计算的各种因素

虽然 CEFR 额定工况下为强迫循环流动，但是由于在计算中采用了密度随温度变化而变化的关系式，又由于冷热钠池在高度方向上较大的温差，所以浮升力的影响较大，不可忽略。同时，在计算中如果不考虑多孔介质模型的话，计算结果也会有较大的差别，所以，在计算中考虑多孔介质模型是合适的，有助于提高计算的精度。

5 结论

通过以上计算可以看到，计算中使用多孔介质模型是合适的，其应用对复杂的工程问题的解决起重要的作用。同时，得到了 CEFR 在额定工况下冷热钠池内的温度和速度分布，并给出了堆内许多关键部件的温度场，为设备的力学应力分析提供了输入，为进一步的瞬态分析提供了初始条件。

热钠池中具有较为复杂的流动现象，如堆芯出口区域流体的强烈搅混，2.410m 半径上入口窗中下排口的回流等。在中间热交换器入口有着复杂的流动和温度分布，不会是单一值，而且热池内中的钠沿高度方向有着很大的温度梯度，浮升力在计算中有重要作用，不可忽略。通过对这些复杂现象的研究，有助于对反应堆安全的准确把握和进一步的深入认识，以及对目前和今后的 CEFR 设计提供重要的参考和技术支持。

参考文献

[1] 陶文铨，计算传热学的近代进展，北京，科学出版社，1998年。

[2] USER GUIDE, STAR-CD VERSION 3.10, 1999 Computational Dynamics Limited

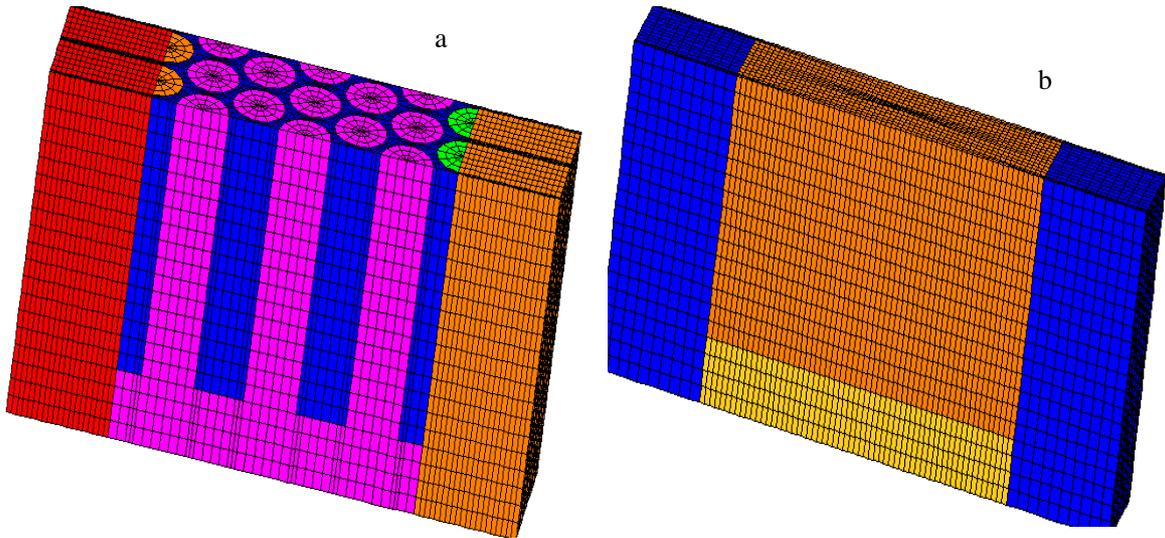


图1 屏蔽柱实际流动模拟 (a) 和多孔介质流动模拟 (b) 网格图

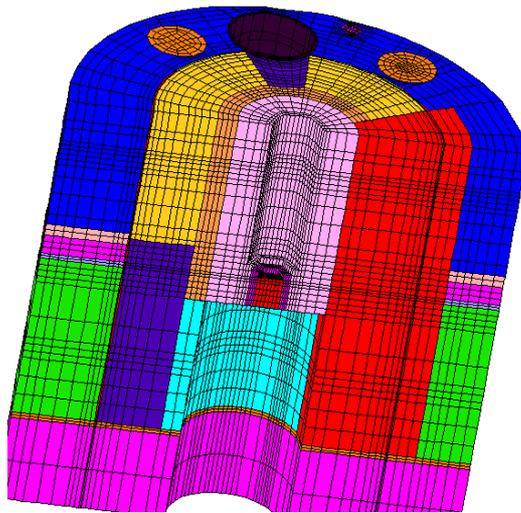


图2 冷热钠池网格划分

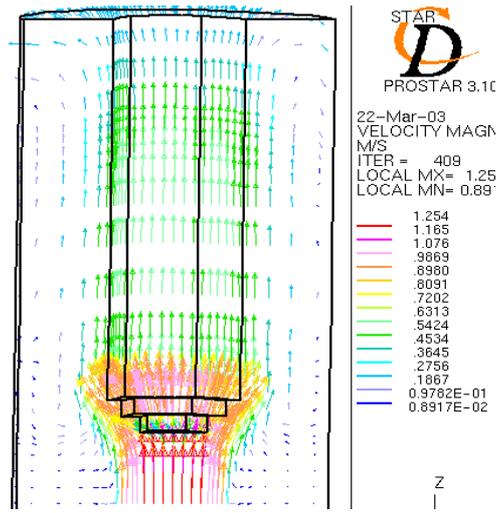


图3 3个入口流量区域内流动示意图

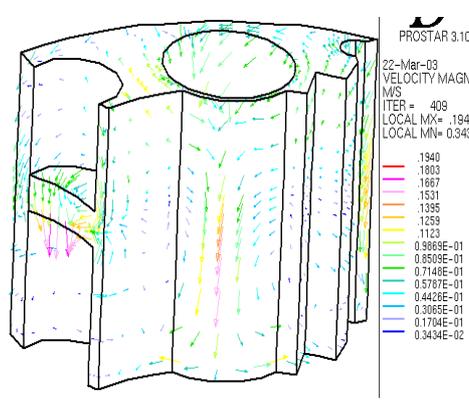
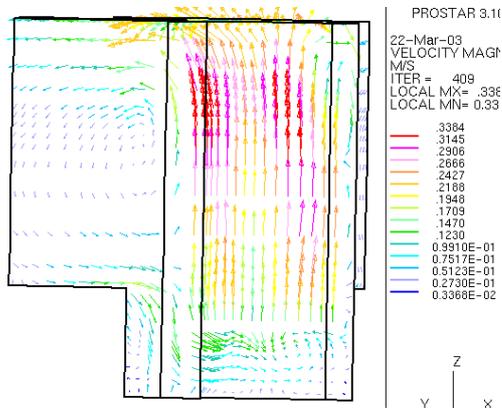


图4 屏蔽柱内 (a) 外 (b) 热钠池流动分布图

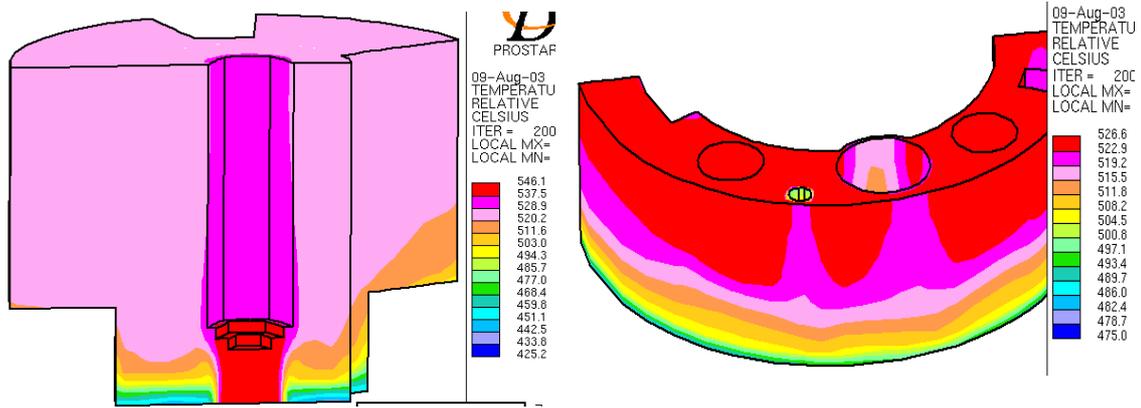


图 5 屏蔽柱内 (a) 外 (b) 热钠池温度分布图

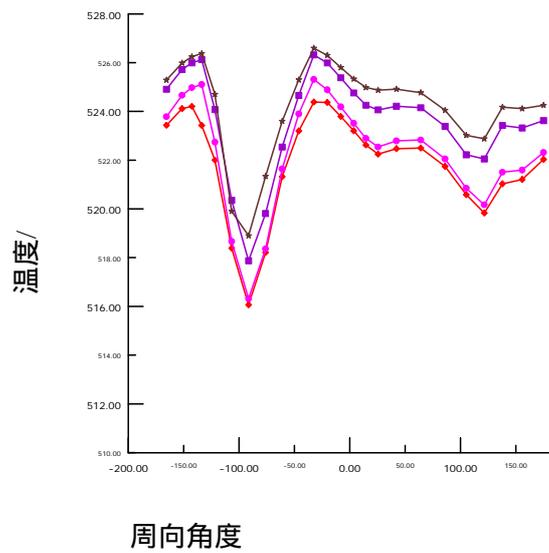


图 6 泵支承外钠温周向温度分布

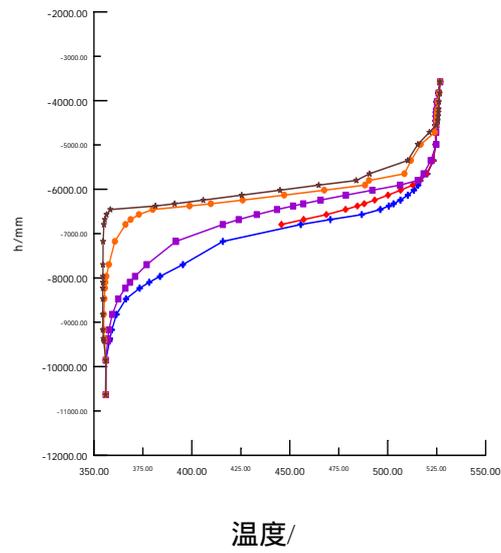


图 7 热钠池高度方向温度分布 (= 73°)

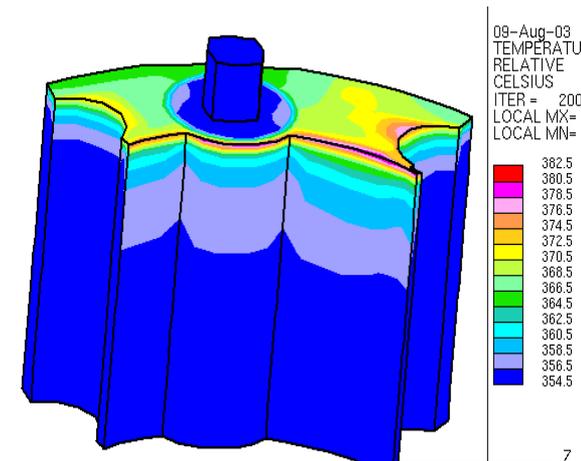
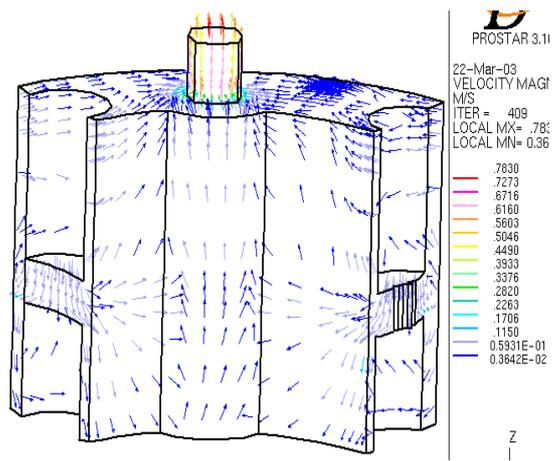


图 8 冷池内钠流动 (a) 和温度(b)分布图