

钠冷快中子堆主容器的事故瞬态分析

乔雪冬 冯预恒

(中国原子能科学研究院, 北京, 102413)

摘要：主容器系统是中国实验快堆（CEFR）重要子系统之一，用于容纳和支承堆芯和堆内构件以及反应堆主回路的冷却剂，同时也是阻止放射性物质释放的最外部屏蔽。在发生事故时，冷却系统将因主泵的停运而由强迫流动转换为自然对流。本文利用STAR-CD对CEFR主容器的冷却情况进行数值模拟，得到了事故发展过程中温场和流场的瞬态分析结果。

关键词：全厂断电 自然循环 瞬态 温度场

Abstract: As one of important sub-systems of CEFR(China Experimental Fast Reactor), the Main Vessel is not only utilized to containing and supporting Active Zone, but the outside shielding against radioactivity. Under accident situation, because of LOF, the fluid filled in reactor system will take place an exquisite change.

The author have taken a throughout thermal hydromechanics analysis using computational fluid dynamics software STAR-CD, and have got a reasonable result, offered the data to mechanical analysis. It is very important to CEFR for more desirable design and security analysis.

Key words: Blackout accident, Natural circulation, Transient state, Temperature field

1 引言

中国实验快堆（CEFR，建造中）是我国第一座快中子反应堆，其设计热功率为 65MW，电功率为 25MW，于 1997 年完成了初步设计，目前施工设计已经完成。它的主热传输系统一回路采用池式设计，冷却剂为液态金属钠。主容器为包容反应堆的最外层安全屏障，是 CEFR 特有的核心部件，由双层壳组成，反应堆主容器是一回路主冷却系统的重要边界，是反应堆安全的重要部件，包容着反应堆一回路主冷却系统的热腔室和冷腔室，是高温、密封、承压、承重的薄壁容器。冷却剂钠在主容器的双层壳之间流动，确保系统温度不超过限值。^[1]

本文对在全厂断电事故工况下CEFR反应堆冷却系统内所发生的热工流体过程进行了计算分析，目的是为了清楚地反映反应堆主容器间隙内的钠在自然循环条件下的流场和沿高度方向钠的温度变化。在对钠流场和温度场计算的基础上，确定主容器各部分的温度变化。

2 计算程序介绍

计算流体力学软件STAR-CD是分析流动和传热的商业化应用程序，采用基于完全非结构化网格和有限体积方法的核心解算器，具有丰富的物理模型、最少的内存占用、良好的稳定性、易用性、收敛性和众多的二次开发接口。STAR即Simulation of Turbulent flow in Arbitrary Regions，具有丰富的湍流模型可供选用，如零方程模型、K-L模型、K- ϵ 模型及LES模型等。其优点是在某些问题中可以建立足够精确而又数量较少的网格，提供合理又有效简化的传热方程组，能够真实地反映热工流体力学参量的变化。^[2]

3 工况过程特征

全厂断电是指在额定工况下，失去厂外电的同时应急电源启动失效，安全棒因失电而下落并插入堆芯，反应堆装置停运。同时钠泵惰转到零，使通过堆芯的冷却剂流量骤减，蒸汽发生器停运。此后，堆芯内依靠自然循环保持低流量，反应堆装置利用应急余热排出系统逐步冷却。

全厂断电是一个比较严重的事故工况，属于c类，有一定发生的概率，应给予高度重视。能否通过该事故验证，是检验反应堆固有安全性的重要指标。由于钠泵的停运，导致堆芯失流并丧失热阱，使全厂断电事故具有温度变化大，高温持续时间长的特征。以整个钠池作为内边界的主容器系统，由于受到钠池的影响，导致热工参数发生了复杂的变化。

在这种工况下中间热交换器入口即高度-5.85米处的钠温（额定值516℃）变化非常缓慢，整个14000秒的期间内堆芯入口钠温几乎一直保持在额定值即360℃左右。在控制棒插入堆芯后的40秒时刻，一次钠泵停转，进而冷却系统的钠逐渐停止强迫流动，但是主容器的热屏蔽被钠池上层的钠加热，间隙内的钠随之也被加热，靠近钠池的下降流道中的钠温度较高，相对于同高度的上升通道的钠密度较低，在体积力的作用下就形成了与额定工况下的强迫流动反向的势，随着下降与上升通道的温差的增大，体积力的作用越来越强，逐渐形成与正常工况流向相反的自然循环流动。

4 计算模型及主要简化

计算域由内到外包括以下几个部分：径向热屏蔽、冷却系统下降通道、钠隔板、冷却系统上升通道、主容器、氩气层、保护容器、保温层等。大致为直圆筒状结构，总高度12.6米，最内层的径向屏蔽直径7.6米，最外层保温层外径达8.4米（见图1），而主容器的上下钠通道宽度仅有0.045m（见图2）。设备尺寸巨大，流道面积非常狭窄，给计算带来相当大的难度，建模过程中需要对网格进行严格的控制，同时考虑体积力的影响。

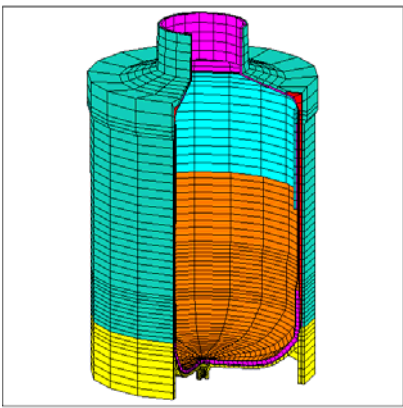


图1 系统三维几何模型网格划分效果图

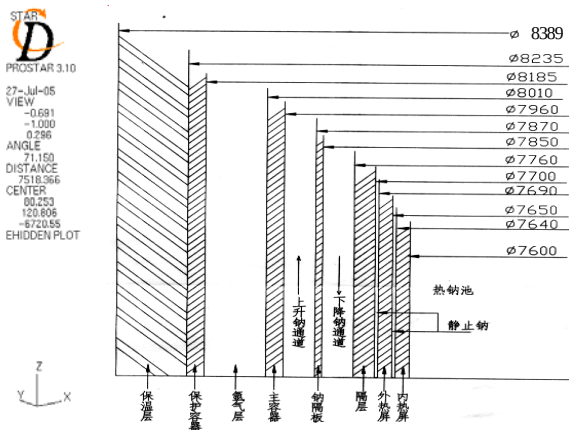


图2 系统结构图

采用简化折算的方法来处理三层热屏蔽（包括中间的钠）的传热效应。由于三层热屏蔽之间的热钠层较薄，且钠的导热率较高，故经过折算后，其相应的参数为：^[4]

导热率： $\lambda = 24.043 \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$

比热： $C_p = 670 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$

密度： $\rho = 6974 \text{ kg/m}^3$

其它材料的物性参数:

主容器:

热导率: $\lambda = 14.54 + 0.015T \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$;

比 热: $C_p = 503 + 0.1725T \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$;

密 度: $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

保温层材料:

热导率: $\lambda = 0.0408 + 0.000186T \text{ W/(m} \cdot ^\circ\text{C)}$;

比 热: $C_p = 502 \text{ J/(kg} \cdot ^\circ\text{C)}$;

密 度: $\rho = 174 \text{ kg/m}^3$ 。

液态钠物性参数:

密度 = $16.0185 \cdot [593566 - 7.7504 \cdot 10^{-3} (1.8t + 32) - 0.2872 \cdot 10^{-6} (1.8t + 32)^2 + 0.0603 \cdot 10^{-9} (1.8t + 32)^3] \text{ (kg/ m}^3\text{)}$

比热 = $41.86 \cdot [0.389352 - 1.10599 \cdot 10^{-4} (1.8t) + 3.41178 \cdot 10^{-8} (1.8t)^2] \text{ (J/kg K)}$

导热系数 = $1.72958 \cdot [54.306 - 1.878 \cdot 10^{-2} (1.8t + 32) + 2.0914 \cdot 10^{-6} (1.8t + 32)^3] \text{ (W/m K)}$

5 边界条件

流量及温度边界条件由系统程序提供。^[5]

本计算的外部边界条件为堆坑空气: 温度为 50°C , 对流换热系数为 $10\text{W/m}^2\text{C}$ 。

内边界为主容器内表面。其温度边界条件较为复杂, 在高度-6.4米处以上的热钠池有热分层现象, 即不同高度段的温度分布有比较明显的差异; -6.4米以下冷池钠温总体变化趋势一致, 在正常工况下为 360°C , 发生事故后温度升高。在高度方向上根据其流体温度情况进行分段描述, 整个反应堆主容器内部流体介质在全厂断电工况下的温度分布情况见表1。需要说明的是, 在有温度变化的情况下, 无论是时间上还是在空间上, 温度都不应该出现突变, 并假定按线性规律变化。

表1 钠池中钠温随时间的变化 ($^\circ\text{C}$)

段名	钠液面	热钠池	三层热屏蔽		
高度 (米) 时间 (秒)	-3.40	-4.5*~-5.85	-6.15	-6.29	-6.4
0.00	516.00	516.00	471.00	425.00	403.00
40.00	515.96	500.00	471.00	425.00	400.00
400.00	515.63	461.00	450.00	390.00	370.00
1300.00	514.80	461.00	430.00	370.00	370.00
2600.00	513.60	460.00	370.00	370.00	370.00
6000.00	510.46	412.82	370.00	370.00	370.00
14400.00	503.70	412.47	370.00	370.00	370.00

计算域出入口分别位于高度-8.3米处上升流道进口和-6.4米处下降流道出口。上升通道进

口在冷池里取钠，事故中保持360℃基本不变，但是其流量却有较大的变化，在0-40秒之间，从强迫流动的40kg/s一直降到0kg/s。与主泵惰转曲线相似，其流量变化遵循双曲线规律（图3）。从40秒开始，开始建立流动方向相反的自然循环，到2600秒自然循环稳定，流量为0.95kg/s。此时，原有的冷却系统进口变为出口，原有的下降通道的出口变为入口。自然循环形成阶段流量变化幅度很小，且时间跨度大，因此计算中取线形近似。

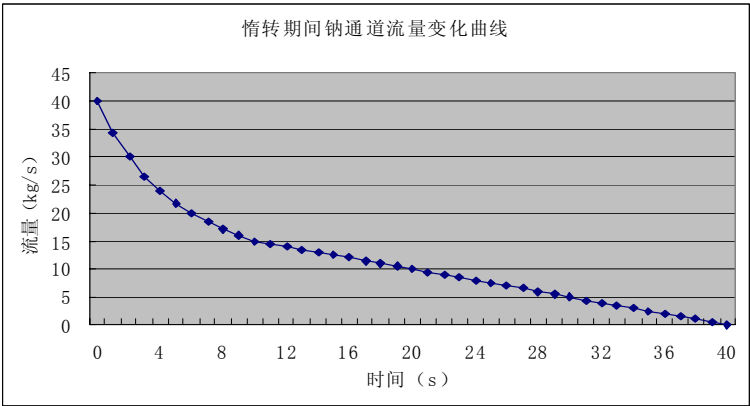


图3 流量曲线

6 结果及分析

1) 系统设备温度场

钠池热分层现象导致主容器不同高度段温度变化趋势不同。图4显示了温度层的各分界点钠温变化情况，工况前期温度普遍升高，原因是事故发生后冷却剂流量显著减少，导致冷却能力下降。2600秒后上升趋势变慢，在6000秒时达到峰值，然后位置较高的部位温度下降，在一6.4米以上反应堆的热池部分，事故后期自然循环冷却使温度逐渐降低；而-6.4米以下的冷池，在正常工况下就保持360℃的相对低温，由于丧失热阱，在热池的影响下计算区域下部温度保持上升的趋势。反映在图7中高度-6.4米处的温度曲线与其它高度处的不同，在后期温度还是保持上升，只是幅度非常小，且时间跨度相当大，其影响很小。

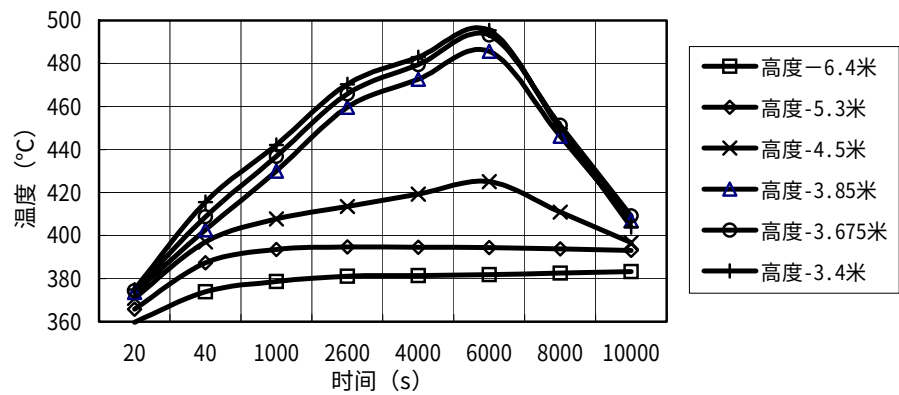


图 4 主容器温度分布

系统其它设备温度变化趋势与主容器类似，图5至图8为事故初期、主泵停运、自然循环稳定及事故末期各时刻系统温度场分布。可以看出，系统内边界热屏蔽的热分层现象比较明显，经过通道内钠的冷却后，主容器等设备温度分布均匀，没有出现剧烈变化的奇点。

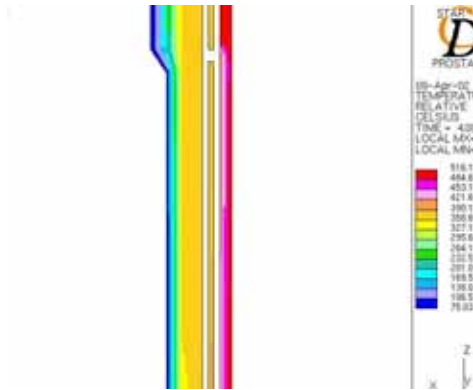


图5 0秒时刻温度场



图6 40秒时刻温度场



图7 2600秒时刻温度场

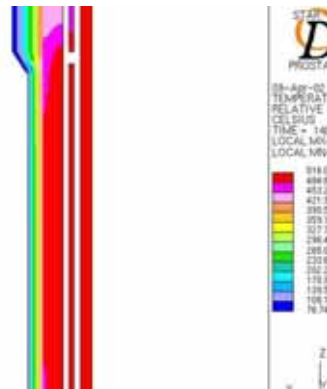


图8 14000秒时刻温度场

2) 钠的流场

40秒时刻强迫循环已经停止。整个流场已不再是稳定的速度分布，同之前的流动相比，在上下通道内，各自形成了相对独立的旋涡。在各流道内部也出现数个局部自然循环的旋涡。整体上看，上下流道与外部质量交换基本停止，而与外部以及内部各设备之间的热交换由于每一个小的流动循环仍然在继续。2600秒时自然循环已经建立，原来的下降流道变为上升流道，出口变为入口，再次形成持续稳定的流动，流速保持在0.001m/s。

3) 钠的温度场

2600秒时刻，钠温场与正常工况有很大不同，热钠池温度升高，使两通道上部温度都大幅升高，而下部由于强迫循环停止，冷池的钠回流到主容器冷却系统中，-6.4米处回落到接近冷池的温度（见图9、图10）。

上升与下降通道中钠的温差随时间变化，在0时刻主容器下部和冷却系统热屏蔽下部-6.2米处温差最大，-3.4米处为上升下降通道的交点，通道内钠在强迫循环作用下沿上升通道进入下降通道，带走主容器及保护容器的热量，钠温随流动方向逐渐升高；2600秒时流道内钠温显著升高，同高度上两通道的温差减小，但始终保持下降流道的钠温高于上升流道。这是自然循

环得以实现的原因。

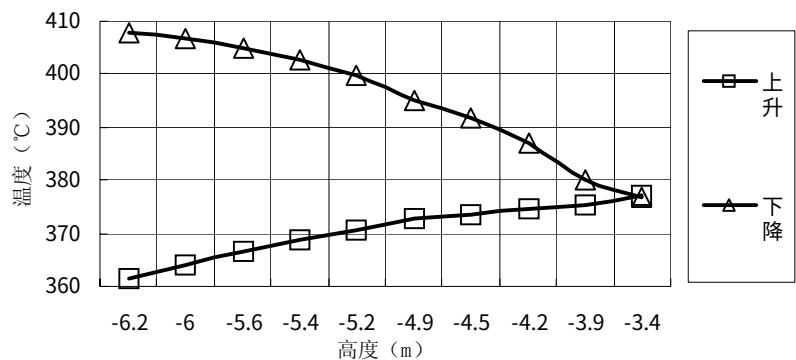


图 9 0秒钠温

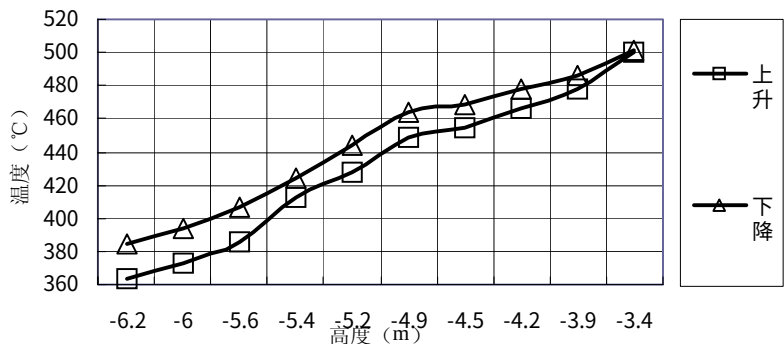


图 10 2600秒钠温

7 结论

本文通过对事故的模拟，得出主容器系统的温度分布，证明：

- 1) 事故环境下，冷却系统可以形成自然循环。
- 2) 事故发生后，冷却系统的钠温总体上有上部升高，下部逐渐靠近冷池的趋势，其冷却能力大大降低。但下降与上升流道保持一定的温差，使自然循环能够利用冷池的钠冷却主容器，达到散热目的。
- 3) 钠池热分层现象对主容器的影响通过冷却系统得到缓解，在高度方向上主容器虽具有一定温差，但温度梯度分布均匀，变化平滑，不会产生大的热应力。从而使主容器的设计和运行可忽略考虑材料高温蠕变的影响。

总之，全厂断电事故导致堆芯失流和丧失热阱同时发生，主容器作为一回路热边界受到相当大的热冲击。本次计算结果表明，冷却系统能够在主泵停运的情况下，通过自然循环带走堆芯衰变热，保证回路压力边界完整。因此在事故工况下，反应堆可以保证其固有安全性。

参考文献：

- [1] 《中国实验快堆运行及事故状态分类》(CEFR.D.DC--001);
- [2] METHODOLOGY, STAR-CD VERSION 3.10, 1999 Computational Dynamics Limited;
- [3] USER GUIDE, STAR-CD VERSION 3.10, 1999 Computational Dynamics Limited;
- [4] 居怀明等. 《载热质热物性计算程序及数据手册》 1996.6 第一版;
- [5] 许义军 《主容器冷却系统三维温度场计算边界条件》;