

# 基于 RELAP5/FLUENT 耦合程序的熔盐堆 反应性引入瞬态分析

何帆<sup>1,2,3</sup> 蔡翔舟<sup>1,2,3</sup> 郭威<sup>1,2,3</sup> 何龙<sup>1,3</sup> 崔蕾<sup>1,2,3</sup>

1(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国科学院先进核能创新研究院 上海 201800)

**摘要** 熔盐堆具有良好的中子经济性、固有安全性和可在线换料等特点。以石墨慢化通道式熔盐堆(Molten Salt Reactor, MSR)为研究对象,基于 RELAP5/FLUENT 耦合程序,建立了熔盐堆一回路模型,并在熔盐堆堆芯分别引入 0.000 1、0.000 2 和 0.000 5 反应性的情况下进行瞬态分析。结果表明:在堆芯反应性引入下,由于堆芯负的温度反应性,堆芯内最高温度和熔盐出口温度远低于安全允许限值,验证了熔盐堆具有良好的应对反应性引入事件的能力。

**关键词** RELAP5/FLUENT, 熔盐堆, 反应性引入, 热工水力

**中图分类号** TL99

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2021.hjs.44.030601

## The transient analysis of molten salt reactor reactivity insertion based on RELAP5/FLUENT coupled program

HE Fan<sup>1,2,3</sup> CAI Xiangzhou<sup>1,2,3</sup> GUO Wei<sup>1,2,3</sup> HE Long<sup>1,3</sup> CUI Lei<sup>1,2,3</sup>

1(Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

3(Innovative Academies in TMSR Energy System, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** [Background] Molten salt reactor (MSR) is an ideal advanced reactor with good neutron economy, inherent safety and online refuelling. [Purpose] This study aims to evaluate the transient behavior of reactive insertion transients of MSR. [Methods] Based on the RELAP5/FLUENT coupling program and the establishment of the primary circuit model, the graphite-moderated channel type molten salt reactor was studied, and transient analysis was conducted when the reactor core was inserted with 0.000 1, 0.000 2, and 0.000 5 reactivities. [Results] The results show that under the concerned reactivity insertion, the maximum temperature of the reactor core and the outlet temperature of the salt are both lower than the safety allowable limit due to the negative temperature reactivity of the reactor core. [Conclusions] This study verifies the good response ability of MSR to reactivity insertion events.

**Key words** RELAP5/FLUENT, Molten salt reactor, Reactivity insertion, Thermal-hydraulic

中国科学院前沿科学重点研究项目(No.QYZDY-SSW-JSC016)资助

第一作者: 何帆, 男, 1990年出生, 2013年毕业于西安交通大学, 现为博士研究生, 研究方向为熔盐堆热工水力分析

通信作者: 蔡翔舟, E-mail: caixiangzhou@sinap.ac.cn

收稿日期: 2020-09-22, 修回日期: 2020-11-10

Supported by Frontier Science Key Research Project of Chinese Academy of Sciences (No.QYZDY-SSW-JSC016)

First author: HE Fan, male, born in 1990, graduated from Xi'an Jiaotong University in 2013, doctoral student, focusing on the molten salt reactor thermal hydraulic analysis

Corresponding author: CAI Xiangzhou, E-mail: caixiangzhou@sinap.ac.cn

Received date: 2020-09-22, revised date: 2020-11-10

熔盐堆由于其良好的中子经济性、固有安全性、可在线添换料和处理裂变产物等特点,在2002年的四代堆国际论坛上被评选为6种先进核能系统之一<sup>[1-2]</sup>。作为唯一的液态堆,熔盐堆无需复杂的燃料制备工艺,其直接将核燃料盐溶解于氟盐冷却剂中。液态堆中燃料熔在流经石墨慢化剂通道时发生裂变反应释放能量,裂变热直接沉积在载热剂(燃料盐)里,液态堆的独特设计决定其传热与传统的反应堆完全不同<sup>[3-5]</sup>。熔盐堆基于在线取样加料系统可以通过在泵碗处放入燃料胶囊以在线补充反应性<sup>[6-7]</sup>,在堆芯满功率运行时,若由于人为的原因,错误的往泵坑里放入了一个加料胶囊,胶囊内固态燃料盐缓慢溶解并进入堆芯,将引入一个较小的客观的正反应性。因此,反应性引入瞬态分析是熔盐堆瞬态分析中十分重要的研究内容。

在以RELAP5程序为代表的核反应堆系统瞬态分析和事故安全分析中<sup>[8-10]</sup>,采用集总参数法将主要过程简化为一维模型,基于半隐式方法可快速地求解中子学方程<sup>[11]</sup>,进行反应堆的瞬态分析<sup>[12-15]</sup>,但无法描述熔盐堆堆芯的温度分布等三维现象,存在一定的局限性。本文以石墨慢化通道式熔盐堆为研究对象,基于RELAP5/FLUENT耦合程序<sup>[16]</sup>,堆芯区域采用FLUENT建模分析,堆芯以外的熔盐堆系统进行RELAP5建模。相对于单独的RELAP5程序系统分析而言,RELAP5/FLUENT耦合程序在进行

瞬态分析的过程中,既可以获得熔盐堆系统的热工水力参数随时间演化过程,同时也可以获得堆芯内部的三维温度分布和流场分布,获得更加详细和更加准确的热工水力参数。本文在堆芯引入不同反应性的事故工况下,进行熔盐堆系统的瞬态模拟,分析了熔盐堆堆芯功率变化过程和系统构件的温度变化过程,并获得熔盐堆堆芯在不同时刻下的三维温度分布。

## 1 石墨慢化通道式熔盐堆简介

本文以一种石墨慢化通道式熔盐堆的初步概念设计为研究对象<sup>[17-18]</sup>。该石墨慢化通道式熔盐堆设计热功率为2 MW,堆芯内直径为190 cm,高度为110 cm。堆芯主容器和堆内金属支撑结构件使用哈氏合金材料,堆芯慢化剂为石墨,泵坑处吹扫气体为氦气<sup>[19-20]</sup>。该熔盐堆的热工水力设计堆本体熔盐进口温度为873.15 K,出口温度为893.15 K。熔盐堆系统的一回路采用含有高富集度<sup>7</sup>Li的LiF-BeF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub>熔盐作为燃料盐,质量流量59.25 kg·s<sup>-1</sup>。二回路采用FLiNaK作为载热剂。图1(a)和(b)分别为石墨慢化通道式熔盐堆的纵向及横向剖面图。堆芯活性区由85个完整组件(包含有84个熔盐通道,中心区域1个样品测试通道)构成<sup>[21]</sup>。组件横截面的尺寸参数如图1(c)所示,其中熔盐通道横截面为半径1.8 cm的圆形,组件对边距为11 cm。

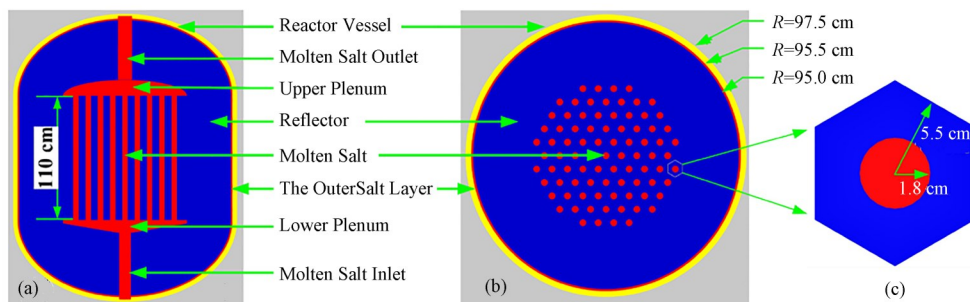


图1 石墨慢化通道式熔盐堆的示意图 (a) 纵剖面图, (b) 横剖面图, (c) 组件横截面  
Fig.1 Sketch diagram of the MSR with graphite moderation (a) Vertical view, (b) Horizontal view, (c) Fuel assembly

熔盐堆系统总体布局简化示意图如图2所示。在燃料盐循环泵的驱动作用下,燃料盐在堆芯中发生核裂变反应释放热量,熔盐温度升高后从堆芯上部出口管,进入热管段,然后流动进入熔盐-熔盐换热器。通过熔盐-熔盐换热器进行热交换后,进入冷管段,再从堆芯下部流入反应堆。二回路冷却盐通过熔盐-熔盐换热器将堆芯热量带走,并最终通过熔盐-空气换热器将热量带到空气环境中。

## 2 回路模型及计算方法

石墨慢化通道式熔盐堆回路的模型化是简化计算完成熔盐堆瞬态分析的前提与基础。根据熔盐堆的特性以及瞬态分析的需要,忽略放化后处理系统以及安全相关系统等,将熔盐堆系统各重要部分简化,建成完整的反应堆一回路系统。二回路系统忽略冷却盐泵和熔盐-空气换热器等构件,并假定熔盐-熔盐换热器二回路侧熔盐入口流量和温度不变。堆芯区域忽略外围熔盐层、外围反射层和控制棒通

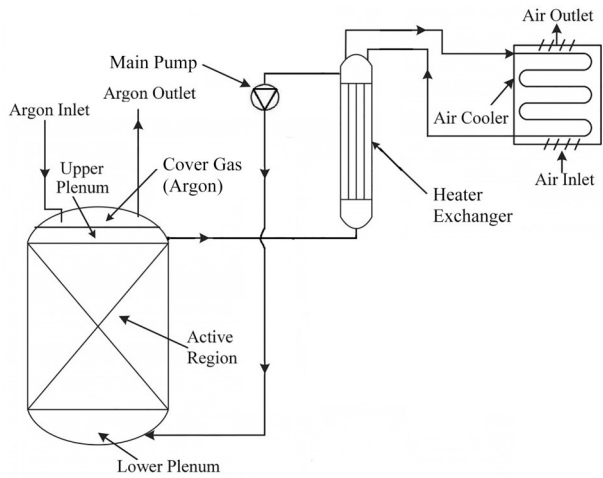


图2 熔盐堆系统总体布局  
Fig.2 Schematic layout of MSR system

道等构件,堆芯区域壁面以及一回路管道均忽略散热因素,采用绝热壁面条件。本文基于已开发的RELAP5/FLUENT耦合程序,堆芯区域采用CFD建模,一回路堆芯外系统和换热器二次侧边界采用RELAP5建模,其模型化如图3(a)所示,堆芯通道编号如图3(b)所示。整个耦合计算的流程如图4所示。

堆芯功率的计算采用中子动力学点堆模型,6组缓发中子的点堆动力学方程如下:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad i=1, 2, \dots, 6 \quad (2)$$

写成矩阵形式:

$$\frac{dy}{dt} = A(t)y \quad (3)$$

$$y(0) = y_0 \quad (4)$$

其中:  $y = [n(t), \bar{C}_1(t), \dots, \bar{C}_N(t)]^T$ ;  $y_0$  为初值。

$$A(t) = \begin{bmatrix} A_1(t) & \lambda_1 & \dots & \lambda_N \\ A_2(t) & -\lambda_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_m(t) & 0 & \dots & -\lambda_N \end{bmatrix}$$

$$A_i(t) = \frac{\bar{\rho}_{i-1}(t)}{\Lambda(t)}, \quad i=2, \dots, m, \quad (m=N+1)$$

$$A_1 = [\rho(t) - \bar{\beta}(t)]/\Lambda(t)$$

点堆中子动力学模型是计算反应堆动态学中最常用的方法,但因为点堆动力学微分方程组存在很强的刚性,所以需要采用隐式求解。本文基于耦合程序中RELAP5自带的点堆计算模块求解点堆方程。点堆方程计算所需要的六组缓发中子份额与先驱核衰变常数数值<sup>[20]</sup>以及堆芯温度反应性系数如表

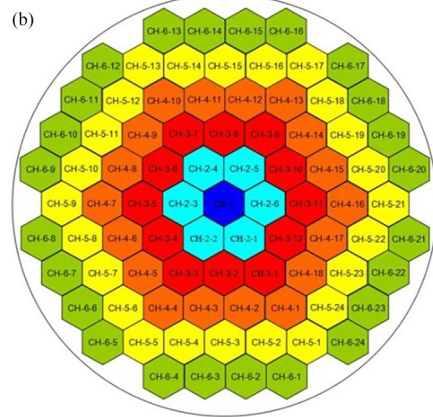
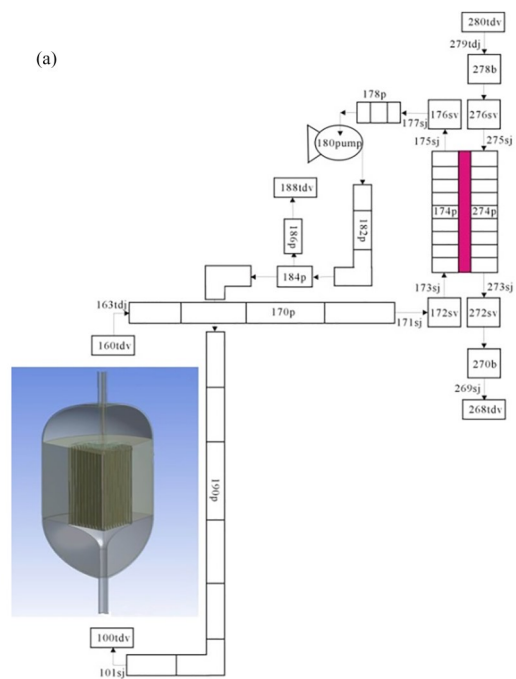


图3 熔盐堆模型(a)和堆芯通道编号示意图(b)  
Fig.3 Schematic of molten salt reactor (a) and channel numbering (b)

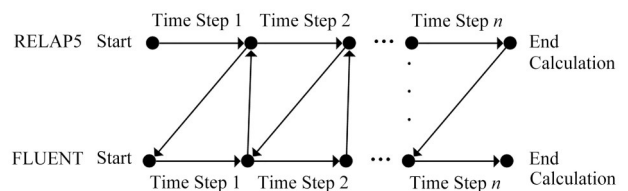


图4 耦合程序计算流程  
Fig.4 Simplified schematic of the coupled program calculation process

1和2所示。熔盐堆相关材料的具体物性参数如表3所示,石墨与哈氏合金采用 $T=873\text{ K}$ 时的常物性参数,熔盐密度随着温度的升高而减少,可由表达式进行计算。

表1 缓发中子数值  
Table 1 Delayed neutron data

组数 Group	缓发中子份额 Delayed neutron fraction / $10^{-5}$	先驱核衰变常数 Precursor decay constant / $s^{-1}$
$\beta_1$	6.17	0.012 5
$\beta_2$	50.61	0.031 9
$\beta_3$	49.79	0.109 4
$\beta_4$	282.31	0.317 2
$\beta_5$	87.28	1.353 8
$\beta_6$	17.51	8.664 3
$\beta_{eff}$	493.67	—

表2 熔盐堆温度反应性系数  
Table 2 Temperature reactivity coefficient of MSR

参数 Parameter	温度反应性系数 Temperature reactivity coefficient / $K^{-1}$
上腔室熔盐 Upper chamber molten salt	-0.000 005 0
活性区石墨 Active area graphite	-0.000 044 6
活性区燃料 Active zone fuel	-0.000 038 2
下腔室熔盐 Lower chamber molten salt	-0.000 004 5

表3 物性参数  
Table 3 Physical parameters

材料 Material	密度 Density / $kg \cdot m^{-3}$	比热 Specific heat capacity / $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$	导热系数 Thermal conductivity / $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	粘度 Viscosity / $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$
LiF-BeF <sub>2</sub> -ThF <sub>4</sub> -UF <sub>4</sub>	3 279.84-0.62 <i>T</i>	1 687.9	0.398 1+0.000 5 <i>T</i>	0.009 4
FLiNaK	2 729.40-0.73 <i>T</i>	1 884.0	0.434 8+0.000 5 <i>T</i>	0.005 6
石墨 Graphite ( <i>T</i> =873 K)	1 860.0	1 750.0	30.0	—
哈氏合金 Hastelloy ( <i>T</i> =873 K)	8 860.0	586.0	20.3	—

### 3 熔盐堆反应性引入分析

#### 3.1 稳态计算

熔盐堆稳态的计算是进行瞬态分析的前提,依

照熔盐堆概念设计所提供的数据对稳态进行计算,并将计算结果与设计参数进行对比。表4为RELAP5/FLUENT耦合程序计算的稳态数值与设计值的对比。由对比结果可知稳态计算值与设计值吻合较好,可以在此基础上进行瞬态计算。

表4 稳态计算值  
Table 4 Steady-state calculation

参数 Parameter	计算值 Calculation	设计值 Design	相对偏差 Relative deviation / %
堆芯功率 Core power / MW	2.061	2.060	0.05
堆芯入口温度 Core inlet temperature / K	873.45	873.15	0.03
堆芯出口温度 Core exit temperature / K	894.15	893.15	0.10
主回路流量 Main circuit flow / $kg \cdot s^{-1}$	59.255	59.250	0.01
换热器二次侧出口温度 Outlet temperature of secondary side of heat exchanger / K	855.86	855.15	0.08

#### 3.2 反应性引入事故分析

在上述稳态分析的基础上,分别在*t*=0时刻堆芯引入0.000 1、0.000 2和0.000 5阶跃反应性,利用RELAP5/FLUENT耦合程序对石墨慢化通道式熔盐堆系统进行瞬态分析。图5分别展示了堆芯引入

0.000 1、0.000 2和0.000 5反应性后800 s内堆芯相对功率随时间的变化。由于熔盐堆裂变功率主要沉积在燃料盐内,堆芯功率迅速上升导致堆芯燃料盐的温度升高。基于熔盐堆负的温度反馈效应,引入的正反应性很快被平衡,这导致堆芯功率很快停止

上升。该过程的峰值功率分别为原功率的 1.10、1.21 及 1.57 倍。由于熔盐的负温度反应性系数慢化剂和堆芯石墨具有很大的热惯性及负温度反应性系数,堆芯熔盐石和石墨慢化剂的温升使得功率在峰值之后缓慢下降,并趋向稳定。在功率趋于稳定后,最终  $t=800$  s 时刻堆芯功率分别为初始时刻的 1.02、1.04 及 1.11 倍。

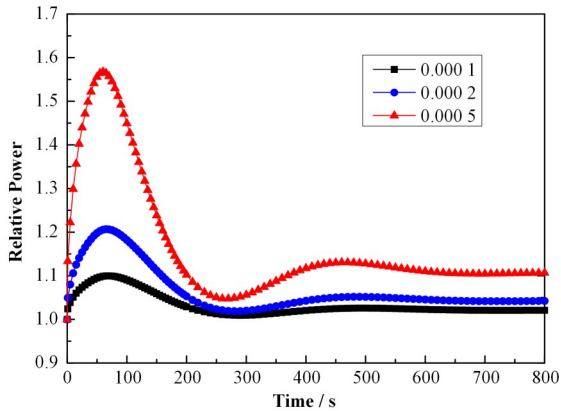


图5 阶跃反应性引入后堆芯相对功率随时间变化  
Fig.5 The relative power after the step reactivity insertion

图6和图7分别显示了在阶跃反应性引入后的瞬态计算过程中,熔盐堆系统堆芯进出口的温度和换热器二回路侧熔盐出口温度随时间的演化。在 0.000 1、0.000 2 和 0.000 5 阶跃反应性引入后,随着堆芯功率的增加,熔盐出口温度逐渐增加,峰值温度分别达到 896.9 K、899.5 K 和 907.5 K。随着功率降低并趋于稳定,熔盐出口温度随之逐渐降低并趋向稳定,分别达到 895.5 K、896.7 K 和 900.2 K。由于一回路熔盐出口温度的增加,换热器二回路侧 FLiNaK 熔盐出口温度先逐渐增加,分别达到峰值温度 856.9 K、857.9 K 和 861.1 K,然后趋向稳定,最终分别达到 856.3 K、856.8 K 和 858.3 K。

在  $t=50$  s 时刻,RELAP5/FLUENT 耦合程序计算的 CH-2-6、CH-3-11 和 CH-5-21 三个熔盐通道在轴向上的温度分布以及 RELAP5 程序单独计算的堆芯节点的温度分布如图8所示。在 RELAP5 程序单独计算中,由于 RELAP5 程序的局限性,下腔室采用一个单独控制体描述,无法描述下腔室的结构,导致堆芯活性区入口温度均为 879.12 K;堆芯活性区功率沿着轴向分布,在 0.55 m 高度处功率密度最大,因此熔盐在堆芯活性区温度逐渐上升,通道出口处温度可达 899.64 K,并且在中间节点附近熔盐温度变化最大。而在 RELAP5/FLUENT 耦合程序的分析中,由于耦合程序可以对堆芯以及上下腔室进行三维建模分析,因此熔盐在流经下腔室中会导致熔盐在不同区域的温度不同,从而在进入不同的堆芯活

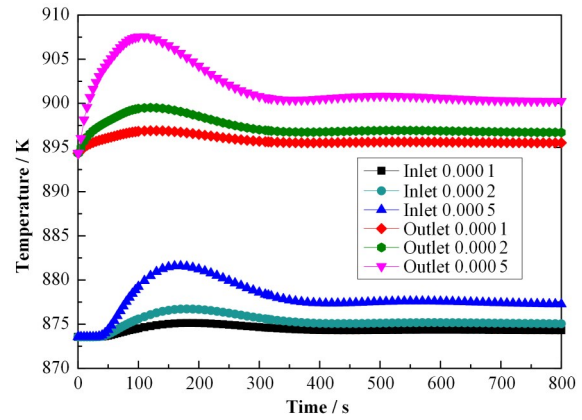


图6 阶跃反应性引入后熔盐堆系统堆芯进出口温度随时间变化

Fig.6 The temperature evolutions of the core inlet and outlet of molten salt reactor system after the step reactivity insertion

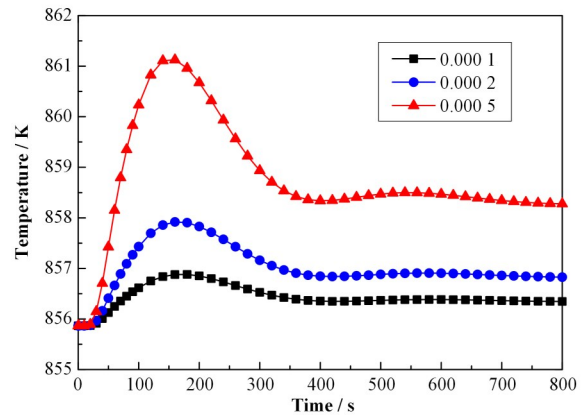


图7 阶跃反应性引入后换热器二次侧出口熔盐温度随时间变化

Fig.7 The salt temperature evolutions of the secondary side of the heat exchanger after the step reactivity insertion

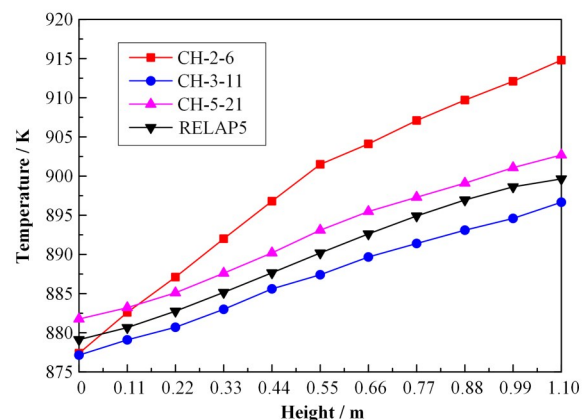


图8 RELAP5/FLUENT 程序熔盐通道和 RELAP5 程序堆芯节点在  $t=50$  s 的温度分布示意图

Fig.8 The temperature distribution of molten salt of the RELAP5/FLUENT and RELAP5 at  $t=50$  s

性区的熔盐通道时熔盐温度有较大不同,如熔盐在进入CH-2-6、CH-3-11和CH-5-21三个通道 $z=0.0$  m处的平均温度分别为877.4 K、877.1 K和881.7 K。由于在RELAP5/FLUENT耦合程序中,堆芯功率存在着三维分布,靠近堆芯中心区域的CH-2-6功率密度高于堆芯外侧区域的CH-5-21功率密度,因此在不同的通道中,熔盐温度变化也有较大区别。在通道CH-2-6中,熔盐温度从通道入口 $z=0.0$  m的877.38 K增加到通道出口 $z=1.1$  m的914.8 K;在通道CH-5-21中,熔盐温度从通道入口 $z=0.0$  m的881.75 K增加到通道出口 $z=1.1$  m的902.7 K。

图9分别显示了在阶跃反应性引入的瞬态计算过程中,在不同时刻下堆芯截面的温度分布示意图。在引入0.000 1阶跃反应性后,在 $t=60$  s时刻堆芯石

墨最高温度达到968.0 K,熔盐在上腔室最高温度可达900 K;同样地,在引入0.000 2和0.000 5阶跃反应性下,堆芯石墨最高温度分别可达982.1 K和1 006.4 K,熔盐在上腔室最高温度分别可达908.2 K和920.0 K。由于熔盐堆采用液态形式的燃料,不存在燃料融化的问题。在事故分析中,评价该事件的安全准则包括:1)燃料盐循环系统压力边界金属材料最高温度应低于1 073 K;2)燃料盐温度低于1 473 K。从上述分析可以看出,堆芯内部熔盐的最高温度远低于其安全限值,熔盐出口温度也远低于合金材料的安全限值。在熔盐堆堆芯中,石墨组件内的功率由组件内熔盐冷却,因此在同一高度位置处同一组件内熔盐的温度明显低于组件石墨的温度,温度差可达20~30 K。

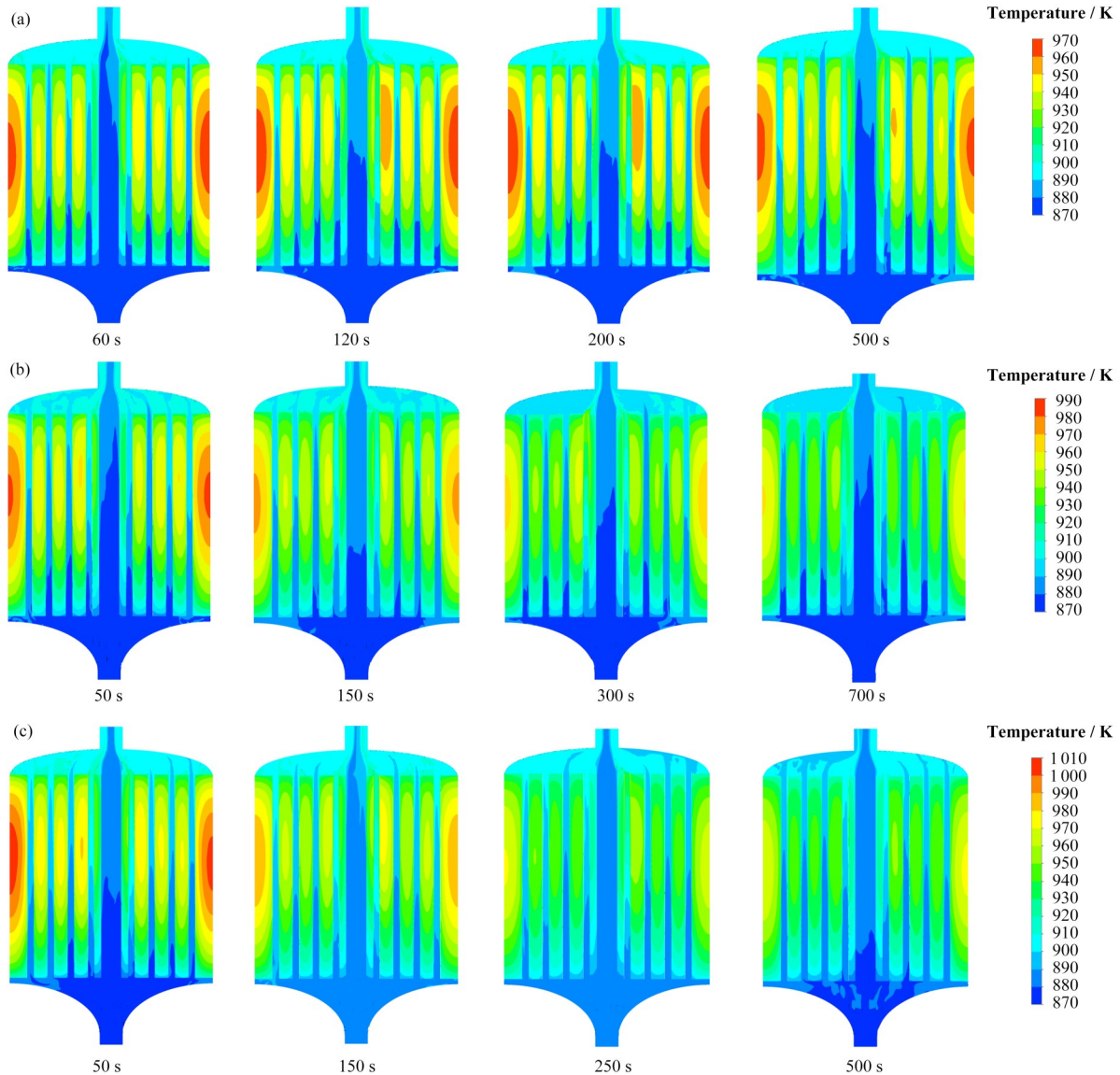


图9 0.000 1 (a)、0.000 2 (b)和0.000 5 (c)阶跃反应性引入后堆芯内不同时刻的温度分布  
Fig.9 The temperature distribution after 0.000 1 (a), 0.000 2 (b) and 0.000 5 (c) step reactivity insertion at different time

在整个瞬态过程中,反应性引入后由于堆芯功率的变化,由于堆芯内的熔盐和石墨具有较大的体积热容和导热性能,熔盐和石墨组件温度在初期缓慢上升,并在功率向稳定后堆芯内的温度分布也逐渐趋于稳定。在整个反应性引入的过程中,由于具有良好的负反馈特性,熔盐堆能有效应对阶跃反应性引入的事故工况。

#### 4 结语

本文针对熔盐堆反应性引入事件,基于RELAP5/FLUENT耦合程序分析了0.000 1、0.000 2和0.000 5阶跃反应性引入后石墨慢化通道式熔盐堆系统的瞬态行为,经分析表明:

1)熔盐堆具有良好的负反馈特性,能有效应对阶跃反应性引入的事故工况。

2)熔盐堆采用氟盐作为燃料的载体和冷却剂,石墨作为慢化剂,具有较大的体积热容和导热性能。当反应堆功率突然增加时,能有效防止堆芯内部石墨和燃料盐温升过快。

3)当堆芯引入0.000 5阶跃反应性时,堆芯石墨最高温度为1 006.4 K,燃料盐最高温度仅为920.0 K,远低于安全限值。

#### 参考文献

- 1 蔡翔舟,戴志敏,徐洪杰. 钍基熔盐堆核能系统[J]. 物理, 2016, **45**(09): 578 - 590. DOI: 10.7693/wl20160904. CAI Xiangzhou, DAI Zhimin, XU Hongjie. Thorium molten salt reactor nuclear energy system[J]. Physics, 2016, **45**(09): 578 - 590. DOI: 10.7693/wl20160904.
- 2 Serp J, Allibert M, Beneš O, *et al.* The molten salt reactor (MSR) in generation IV: overview and perspectives[J]. Progress in Nuclear Energy, 2014, **77**: 308 - 319. DOI: 10.1016/j.pnucene.2014.02.014.
- 3 Deng B, Cui Y, Chen J G, *et al.* Core and blanket thermal-hydraulic analysis of a molten salt fast reactor based on coupling of OpenMC and OpenFOAM[J]. Nuclear Science and Techniques, 2020, **31**(9): 85. DOI: 10.1007/s41365-020-00803-9.
- 4 Li G C, Zou Y, Yu C G, *et al.* Influences of  $^7\text{Li}$  enrichment on Th-U fuel breeding for an Improved Molten Salt Fast Reactor (IMSFR) [J]. Nuclear Science and Techniques, 2017, **28**(7): 97. DOI: 10.1007/s41365-017-0250-7.
- 5 周俊,陈金根,余呈刚,等. FLi/FLiBe盐中 $^7\text{Li}$ 富集度对熔盐快堆钍铀转换性能的影响研究[J]. 核技术, 2019, **42**(11): 110601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.110601.
- 6 Beall S E, Haubenreich P N, Lindauer R B, *et al.* MSRE design and operations report: reactor safety analysis report [R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1964. DOI: 10.2172/4034157.
- 7 Moore R L. MSRE design and operations report: nuclear and process instrumentation[R]. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1972. DOI: 10.2172/4630184.
- 8 Nuclear Safety Analysis Division. RELAP5/MOD3.3 code manual volume I: code structure, system models, and solution methods[M]. Information Systems Laboratories, Inc., December 2001.
- 9 Nuclear Safety Analysis Division. RELAP5/MOD3.3 code manual volume II: user's guide and input requirements[M]. Information Systems Laboratories, Inc., 2001.
- 10 Nuclear Safety Analysis Division. RELAP5/MOD3.3 code manual volume VIII: programmers manual[M]. Information Systems Laboratories, Inc. December 2001.
- 11 Vadi R, Sepanloo K. An improved semi-implicit direct kinetics method for transient analysis of nuclear reactors [J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, **30**: 162. DOI: 10.1007/s41365-019-0690-3.
- 12 姜淑颖,程懋松,戴志敏,等. RELAP/SCDAPSIM/MOD4.0程序的FHR应用扩展及验证[J]. 核动力工程, 2016, **37**(6): 33 - 36. DOI: 10.13832/j.jnpe.2016.06.0033. JIANG Shuying, CHENG Maosong, DAI Zhimin, *et al.* Extension and validation of RELAP/SCDAPSIM/MOD4.0 code on FHR[J]. Nuclear Power Engineering, 2016, **37**(6): 33 - 36. DOI: 10.13832/j.jnpe.2016.06.0033.
- 13 周波,严睿,邹杨,等. 正常运行工况熔盐堆主回路衰变热特性研究[J]. 核技术, 2018, **41**(4): 040602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.040602. ZHOU Bo, YAN Rui, ZOU Yang, *et al.* Analysis of decay heat in primary loop of molten salt reactor under normal conditions[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(4): 040602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.040602.
- 14 Shi C B, Cheng M S, Liu G M. Development and application of a system analysis code for liquid fueled molten salt reactors based on RELAP5 code[J]. Nuclear Engineering and Design, 2016, **305**: 378 - 388. DOI:

- 10.1016/j.nucengdes.2016.05.034.
- 15 施承斌, 程懋松, 刘桂民. RELAP5 应用于液态燃料熔盐堆的扩展及验证[J]. 核动力工程, 2016, **37**(03): 16 - 20. DOI: 10.13832/j.jnpe.2016.03.0016.  
SHI Chengbin, CHENG Maosong, LIU Guimin. Extending and verification of RELAP5 code for liquid fueled molten salt reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2016, **37**(03): 16 - 20. DOI: 10.13832/j.jnpe.2016.03.0016.
- 16 何帆, 蔡翔舟, 郭威, 等. RELAP5/FLUENT 耦合程序的开发[ED/OL]. 2020-11-03. <http://www.aest.org.cn/CN/10.7538/yzk.2020.youxian.0325>.  
HE Fan, CAI Xiangzhou, GUO Wei, *et al.* Development of coupled program based on RELAP5/FLUENT[ED/OL]. 2020-11-03. <http://www.aest.org.cn/CN/10.7538/yzk.2020.youxian.0325>.
- 17 何龙, 余呈刚, 郭威, 等. 石墨慢化通道式熔盐堆的稳态热工水力计算模型[J]. 原子能科学技术, 2019, **53**(2): 319 - 325. DOI: 10.7538/yzk.2018.youxian.0344.  
HE Long, YU Chenggang, GUO Wei, *et al.* Steady thermal-hydraulic analysis model for graphite-moderated channel type molten salt reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, **53**(2): 319 - 325. DOI: 10.7538/yzk.2018.youxian.0344.
- 18 Yu C G, Zou C Y, Wu C, *et al.* Sustainable supply of <sup>99</sup>Mo source in a 2 MW molten salt reactor using low-enriched uranium[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2020, **160**: 109134. DOI: 10.1016/j.apradiso.2020.109134.
- 19 王凯, 焦小伟, 杨群, 等. 紧急停堆棒落棒时间对熔盐堆反应性引入瞬态的影响[J]. 核技术, 2020, **43**(9): 090606. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.090606.  
WANG Kai, JIAO Xiaowei, YANG Qun, *et al.* The effect of scram rod drop time on the consequences of molten salt reactor reactivity insertion transient[J]. Nuclear Techniques, 2020, **43**(9): 090606. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2020.hjs.43.090606.
- 20 周振华. 2 MW 液态钍基熔盐堆流量分配设计[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2016.  
ZHOU Zhenhua. Core flow distribution for the 2 MW thorium molten salt reactor with liquid fuel[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- 21 何龙. 熔盐堆稳态和瞬态核热耦合模型建立及安全特性研究[D]. 上海: 中国科学院上海应用物理研究所, 2018. DOI: 10.1016/j.theochem.2004.04.042.  
HE Long. Development of a steady state and time-dependent coupled neutronics/thermal-hydraulics model and safety characteristics research for the molten salt reactor[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, 2018. DOI: 10.1016/j.theochem.2004.04.042.