

基于RMC和COMSOL的西安脉冲堆 燃料的氢再分布研究

邹璟杰^{1,2} 王立鹏² 赵萌¹ 曹璐² 胡田亮² 姜夺玉² 陈立新²

1(上海交通大学 核科学与工程学院 上海 200240)

2(西北核技术研究所 西安 710024)

摘要 反应堆堆芯模拟计算是核反应堆工程设计的关键环节,涉及中子输运、流动传热等多物理场耦合过程。西安脉冲反应堆(Xi'an Pulsed Reactor, XAPR)采用铀-氢化锆燃料,其高温氢行为会显著影响中子和热工性能,但目前对氢迁移与堆芯物理特性的耦合作用研究仍不充分。本文基于反应堆蒙特卡罗程序(Reactor Monte Carlo code, RMC)与COMSOL多物理场仿真,建立了XAPR的中子学-热力学-氢扩散耦合模型,研究温度梯度与浓度梯度共同作用下的氢再分布规律。结果表明,氢在氢化锆中的扩散行为受温度场及浓度场协同调控,其再分布过程会改变局部氢浓度,进而影响中子学性能和热工水力特性。该研究为XAPR燃料的优化设计和安全评估提供了理论依据和数据支撑。

关键词 西安脉冲反应堆, 金属氢化物, 氢再分布, 多物理耦合, 蒙特卡罗模拟

中图分类号 TL32

DOI: 10.3724/j.0253-3219.2026.hjs.49.250364

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2026.49.250364

Hydrogen redistribution in fuel of Xi'an pulsed reactor based on RMC and COMSOL

ZOU Jingjie^{1,2} WANG Lipeng² ZHAO Meng¹ CAO Lu² HU Tianliang²

JIANG Duoyu² CHEN Lixin²

1(School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

2(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract [Background] Core simulation is essential in nuclear reactor engineering design, involving coupled multiphysics processes such as neutron transport, fluid flow, and heat transfer. The Xi'an Pulsed Reactor (XAPR) utilizes uranium-zirconium hydride (UZrH_x) fuel, in which high-temperature hydrogen behavior significantly affects neutronic and thermal performance. However, existing studies have not sufficiently addressed the coupling effects between hydrogen migration and core physical properties, especially under combined temperature and concentration gradients, which limits accurate safety assessment and fuel optimization. [Purpose] This study aims to develop a high-fidelity multiphysics framework coupling neutronics, thermal-hydraulics, and hydrogen diffusion to investigate hydrogen redistribution behavior in XAPR fuel and its feedback effects on reactor performance. [Methods] A coupled modeling approach was established by integrating the Reactor Monte Carlo Code (RMC) for neutron

国家自然科学基金(No.12275219)资助

第一作者: 邹璟杰, 男, 2001年出生, 2023年毕业于南京航空航天大学, 现为硕士研究生, 研究领域为反应堆物理

通信作者: 王立鹏, E-mail: wang0214@126.com

收稿日期: 2025-10-21, 修回日期: 2026-01-07

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.12275219)

First author: ZOU Jingjie, male, born in 2001, graduated from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2023, master student, focusing on reactor physics

Corresponding author: WANG Lipeng, E-mail: wang0214@126.com

Received date: 2025-10-21, revised date: 2026-01-07

transport simulation with COMSOL multiphysics for thermal-hydraulic and hydrogen diffusion analysis. Firstly, the core of XAPR was spatially discretized into 3 030 units, and a one-dimensional single-channel model was used for coolant flow, and a three-dimensional heat conduction model was applied to the solid fuel region. Then, hydrogen diffusion in UZrH_x was modeled using a simplified flux equation incorporating Fickian diffusion and Soret thermo diffusion. Finally, the model was validated against classical experimental data from Huang *et al.* (2 000) and compared with CFD simulations for a 3×3 fuel assembly, and the influence of hydrogen redistribution process on the reactor physical characteristics was explored. **[Results]** Simulation results show that the hydrogen redistribution is jointly governed by temperature and concentration fields. Under 2 MW steady-state operation, hydrogen migrates from high-temperature regions toward cooler areas, resulting in a radial H/Zr ratio ranging from 1.46 at the fuel center to 1.96 near the cladding. The effective multiplication factor (k_{eff}) is decreased from 1.013 817 to 1.001 202 after one coupling iteration, indicating a clear negative reactivity feedback due to hydrogen migration. The maximum fuel temperature is decreased by 3.1%, and the calculated temperature distribution in the instrumented fuel element C10 agrees with experimental data within a 1.2% deviation. **[Conclusions]** Hydrogen redistribution in UZrH_x fuel is a coupled thermo-diffusion process that significantly influences local neutronic and thermal-hydraulic behavior. The established RMC-COMSOL framework in this study provides an effective tool for evaluating hydrogen management strategies in hydride-moderated reactors and offers critical theoretical and data support for fuel design optimization and safety assessment under long-term high-power operating conditions.

Key words Xi'an pulsed reactor, Metal hydride, Hydrogen redistribution, Multi-physics coupling, Monte Carlo simulation

反应堆堆芯模拟计算是核反应堆工程设计的核心内容之一。核反应堆系统涉及中子输运、流动传热、结构力学等多物理场耦合过程,这些物理现象在堆芯内相互耦合、协同作用,共同决定了反应堆的运行特性。通过高性能计算平台开展多物理场耦合仿真,能够精确表征堆芯内部的复杂物理现象,从机理层面揭示核反应堆多物理耦合作用的内在规律,这对于提升反应堆核设计水平和安全分析能力具有重要价值^[1-3]。

西安脉冲反应堆(Xi'an Pulsed Reactor, XAPR)是一座低温低压的池式脉冲反应堆,具有堆芯尺寸小、中子泄漏强、局部中子扰动大、堆芯功率和温度分布极不均匀的特点。对其进行完整的核安全计算分析评估,是确保西安脉冲堆堆芯安全运行,提升脉冲堆安全水平的重要技术手段之一^[4-5]。近年来,XAPR的稳态和瞬态运行特性已得到广泛研究。尽管取得了这些进步,但仍然存在一些问题。首先,孤立进行的中子学或热工水力学计算没有考虑堆芯的相互作用和耦合效应,因此不能充分反映XAPR的实际运行过程。其次,现有的核热耦合计算依赖于确定性代码来促进耦合过程。然而,这种方法需要为中子计算建立多群或少群截面,从而导致显著的近似值^[6]。同时,XAPR采用铀-氢化锆燃料,研究表明,在高温下氢在氢化锆中会发生离解、迁移和再分

布,导致局部氢浓度变化,进而显著影响XAPR的反应性、功率空间分布和温度空间分布。Huang等^[7]通过程序计算进行了温度梯度下氢化锆中氢再分布的估计;Yu等^[8]采用机器学习分子动力学模拟氢在 ZrH_x 中的扩散路径,揭示温度与成分对扩散势垒的影响;Yamanaka等^[9]通过实验测定 ZrH_x 的热导率与膨胀系数,建立氢浓度-力学性能关联模型。然而,目前反应堆研究多以核热耦合和核热力耦合为主^[10-11],对于氢化锆燃料的氢再分布与中子学、热工特性的耦合作用研究仍不充分,导致难以准确评估实际运行中的氢行为及其对反应堆物理特性的反馈效应。

本文通过耦合蒙特卡罗程序RMC(Reactor Monte Carlo code)^[12]与多物理场仿真平台COMSOL,构建了一个高效的中子学-热工-氢扩散耦合分析平台。精确的三维耦合有利于反应堆的工程分析,在本耦合框架中采用三维耦合方式^[13]。在此框架内,RMC负责提供精确的三维功率分布,COMSOL则依次求解冷却剂通道的流动传热、固体区域的导热以及氢化锆燃料中的氢扩散过程,同时也探究了氢再分布过程对反应堆物理特性的影响。利用这一平台,建立了XAPR的高保真耦合模型,揭示温度梯度与浓度梯度共同作用下的氢再分布规律。

1 理论模型

1.1 RMC 计算模型

在燃料棒功率分布的计算中,本研究基于蒙特卡罗方法,采用清华大学工程物理系 REAL 团队自主研发的三维蒙特卡罗中子输运程序 RMC^[14]。该程序通过模拟中子与核燃料的随机碰撞过程,精确求解中子通量密度分布。

首先,基于脉冲堆几何结构建立全堆模型,包含 101 根标准燃料元件;继而采用精细化空间离散策略——轴向划分 10 层、径向划分 3 圈,将燃料区域离散为 3 030 个独立计算单元,以实现功率的精确计算^[15]。RMC 通过跟踪数亿中子历史,在每个单元内统计中子与相应核素发生作用的概率,结合预置核数据库的微观截面参数,依据 $P=\kappa \cdot R_f$ 逐单元计算裂变功率密度,其中 κ 为每次裂变平均释放能量, R_f 为裂变反应率^[16]。最终,通过汇总计算结果,直接得到了燃料棒尺度的三维功率分布。

1.2 热工水力计算模型

1.2.1 固体传热模型

固体传热模型采用经典的稳态导热方程:

$$\nabla \cdot (-\lambda \nabla T) = Q \quad (1)$$

式中: λ 为燃料或包壳的热导率; Q 为燃料区域的功率密度, $\text{W} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

燃料芯块和包壳之间的间隙,可以看作是一个没有内热源的薄层空间^[17],依据方程:

$$q = h_g (T_g - T_{g+1}) \quad (2)$$

式中: q 为燃料芯块和包壳之间的换热热流密度; h_g 为气隙传热系数; T_g 和 T_{g+1} 分别为气隙左侧和右侧的温度。

包壳外侧的边界条件为热通量边界:

$$-\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T) = h(T_{\text{ext}} - T) \quad (3)$$

式中: T_{ext} 和 h 分别为一维流体模型计算得到的流体的温度和对流换热系数; $\vec{n}$ 为边界的法向量。

1.2.2 单通道模型

本文为了简化计算提高效率,对流体部分的计算采用了单通道模型。单通道模型是反应堆堆芯热工水力计算中常用的模型,是一种简化的通道,在堆芯中只考虑单根燃料棒和其对应的冷却剂通道之间的能量传递,而忽略与相邻通道之间的能量影响^[18]。

流体的轴向温度分布采用能量守恒方程进行求解:

$$\frac{dT}{dz} = \frac{P_{\text{linear}}(z)}{c_p Q_m} \quad (4)$$

式中: T 为流体温度, K ; z 为轴向高度, cm ; P_{linear} 为线

功率, $\text{W} \cdot \text{cm}^{-1}$; c_p 为冷却剂的比热容, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; Q_m 为冷却剂的质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对流换热系数的推导涉及的参数有流体密度 $\rho(z)$ 、动力黏度 $\mu(z)$ 和导热系数 $\lambda(z)$ 。在本模型中,以上三个参数可以通过温度 $T(z)$ 的关系式得到。相关的关系式如下:

$$v(z) = \frac{Q_m}{\rho(z)s} \quad (5)$$

式中: $v(z)$ 为冷却剂在高度 z 处的流速; s 为冷却剂通道的径向面积。

根据式(5)可以计算得到雷诺数 $Re(z)$:

$$Re(z) = \frac{\rho(z)v(z)d}{\mu(z)} \quad (6)$$

式中: d 为冷却剂通道的等效直径。

由式(6)可以得到普朗特数 $Pr(z)$:

$$Pr(z) = \frac{\mu(z)c_p}{\lambda(z)} \quad (7)$$

根据雷诺数和普朗特数可以计算出贝克来数 $Pe(z)$:

$$Pe(z) = Re(z)Pr(z) \quad (8)$$

将式(8)代入到棒束通道下的传热关系式中可以得到努塞尔数 $Nu(z)$:

$$Nu(z) = 4.0 + 0.33 \left(\frac{p}{\Phi} \right)^{3.8} \left(\frac{Pe}{100} \right)^{0.86} + 0.16 \left(\frac{p}{\Phi} \right)^{5.0} \quad (9)$$

式中: p 表示节距; Φ 表示燃料元件的外直径。

根据努塞尔数可以求出换热系数 $h(z)$:

$$h(z) = \frac{Nu(z)\lambda(z)}{d} \quad (10)$$

1.3 氢再分布机理

相较于其他含氢材料,金属氢化物具有更高的含氢密度。在温度梯度或浓度梯度的驱动下,氢可在氢化物内部发生迁移与重新分布,从而形成空间上的浓度差异。这种浓度分布的变化会进一步影响反应堆内的中子输运行为与热工水力特性。首先进行燃料、慢化剂和包壳区域的热传导计算,采用 COMSOL 自带的固体传热模块即可完成,需要注意不同材料之间的接触热阻情况,对于燃料芯块和包壳间的气隙热阻,在 COMSOL 中,依据 COMSOL 自带的接触特征,选择热接触模型为等效薄热阻层,选择燃料芯块外表面作为源边界,选择包壳内表面作为目标边界进行设置。得到燃料的温度场分布后,进一步研究燃料中氢的扩散和迁移过程,共有三种效应决定金属氢化物内部氢的再分布,分别是:1) 浓度扩散(Fickian 效应),从高浓度区扩散到低浓度区;2) 热扩散(Soret 效应),从高温区扩散到低温区;3) 应力效应,从高压区扩散到高拉伸区。这三种

驱动力的叠加决定了氢化物内部氢的扩散通量 J_H ，定义为：

$$J_H = -D \left[\nabla C + \frac{Q^* C}{RT^2} \nabla T - \frac{CV^*}{RT} \nabla \sigma \right] \quad (11)$$

式中： D 是氢在基质中的扩散系数； C 是氢的浓度； Q^* 为输运热； T 为温度，K； R 是气体常数； $\nabla \sigma$ 为应力梯度； V^* 是来自诸如裂变产物或气体等溶质的膨胀体积，这种整体应力场和体积差是晶格畸变或材料变形的结果。由于氢化物中的应力梯度参数相对较小，在本文所研究的 2 MW 稳态运行条件下，燃料棒中由温度梯度引起的热应力水平较低，温度引起的燃料外部边界位移远小于新燃料状态下的间隙尺寸，且应力低于屈服应力^[19]。具体而言，基于西安脉冲堆燃料棒 ($\Delta x \approx 0.5$ m)、温差 ($\Delta T \approx 500$ K) 和最大热应力 ($\sigma_{\max} \approx 10$ MPa)^[19]等典型参数的计算表明，浓度扩散项与热扩散项的量级均为 10^{-8} ，而应力扩散项的量级仅为 10^{-14} ，相差达 6 个数量级。因此，在当前的稳态分析中，应力梯度项对于氢再分布的总体影响非常有限。故而对于氢化物扩散建模，通常忽略应力梯度驱动的扩散。因此式(11)可以简化为：

$$J_H = -D \nabla C - D \left(\frac{Q^* C}{RT^2} \right) \nabla T \quad (12)$$

进一步推导为：

$$J_H = -D \left[\nabla C + k_s \nabla (\ln(T - T^{\text{abs}})) \right]; k_s = \frac{Q^*}{RT^2} \quad (13)$$

式中： k_s 为 Soret 因子； T^{abs} 为绝对零度。

这里使用 COMSOL 自带的物理场模块系数形式偏微分方程实现。质量扩散计算时需要以上一步计算的温度场作为初始输入，进而完成热扩散和浓度扩散，在金属氢化物中，Soret 效应的热扩散和

Fickian 效应的浓度扩散产生的是两个相反的作用，温度梯度引发 Soret 扩散通量，造成氢浓度的不平衡，从而导致浓度梯度，Fickian 扩散被激活，最终两种扩散效应将达到平衡状态，导致净扩散通量等于零。

本文建立的多物理平台的整体结构如图 1 所示。在初始启动阶段，通过 RMC 中子计算得到轴向功率分布和径向功率分布，随后通过 COMSOL 的“模型向导”开始创建新模型。单通道方法需要在同一个模型下创建两个组件，分别是一维流体组件以及三维固体组件。流体部分计算使用 COMSOL 自带的物理场模块系数形式偏微分方程实现，通过“插值”函数代入轴向功率分布，求解得到三维传热计算中需要使用的流体冷却剂温度及对流换热系数。完成流体计算后，在此模型基础上创建燃料棒三维几何组件，通过“固体传热”模块完成传热计算，其中边界条件“热通量”中的外部温度和传热系数即通过“插值”函数手动传递获得上文计算得的流体温度及对流换热系数，功率分布则通过创建“解析”函数载入中子计算中得到的轴向功率及径向功率。在得到燃料棒组件的温度场后，再通过添加“系数形式偏微分方程”物理场模块实现氢扩散的计算。在完成 COMSOL 计算得到温度场和氢再分布场后，通过 COMSOL 自带的的功能导出数据包含 (x, y, z) 坐标及温度/(H/Zr)的文件。同样将每根燃料棒按照“径向三圈，轴向十层”的方法划分，共计 3 030 个区域。随后通过自主编写的 Python 脚本读取 COMSOL 导出的数据文件，按此 3 030 分区进行空间映射与体积平均，最终为 RMC 程序提供 3 030 组一一对应的温度与 H/Zr 比参数。

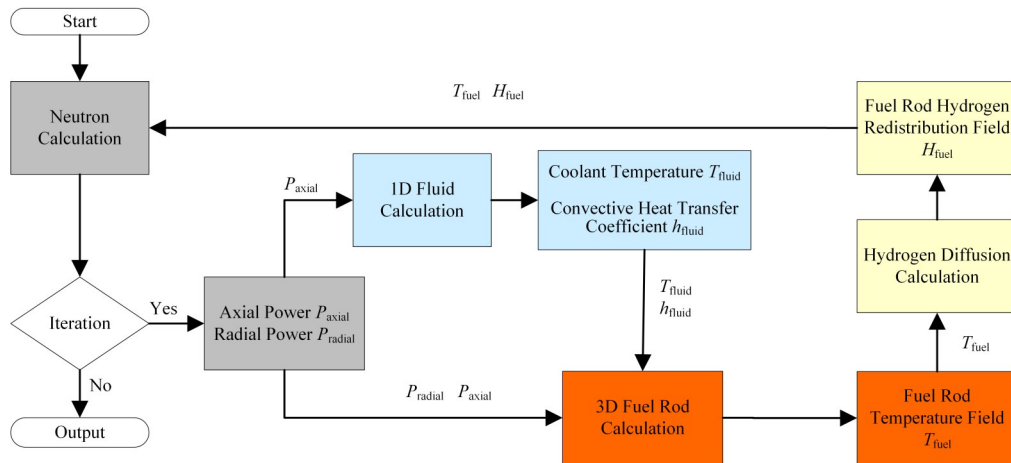


图1 氢再分布计算流程图
Fig.1 Flowchart for hydrogen redistribution calculation

在 RMC 程序中，通过创建热化库索引文件并配置相应参数，实现了在线热化抽样功能^[20-21]。首先，

在程序目录下建立热化截面索引文件，添加所需材料的热库路径信息；在输入卡中设置热化处理关键

字开启在线热化抽样功能,并在相对应的栅元后添加“tmp=温度”关键字(温度单位为K),程序运行时将自动对索引文件中包含的材料进行在线热化截面计算,而未索引的材料则保持默认处理。氢浓度的反馈则根据得到的H/Zr数据动态更新该栅元中氢化锆材料的原子密度,完成配置后执行计算,从而同时耦合了温度效应与氢浓度变化对中子学截面的反馈。再得到新的功率分布进行迭代计算,直至达到收敛。

2 模型验证

2.1 铀氢锆燃料芯块

本研究首先考察了扩散效应对多物理场耦合的影响机制。为验证所建立的扩散模型的准确性,以Huangs团队^[7]基于有限差分法自编程序求解氢再分布的经典实验作为基准案例,本研究中则采用COMSOL多物理场仿真平台的有限元方法构建了标准燃料棒模型。该圆柱形燃料棒的几何参数设定为半径0.5 cm、高度1 cm,初始H/Zr原子比1.6,具体计算参数详见表1。通过施加 $150 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的线功率密度和677 K表面温度边界条件,成功获得了燃料棒的三维温度场分布。

基于上述温度场数据,结合表2所列材料特性

表1 UZrH_x燃料传热与氢再分布计算参数
Table 1 Calculation parameters for heat transfer and hydrogen redistribution of UZrH_x fuel

参数 Parameter	值 Value
热导率 Thermal conductivity / $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	17.6
密度 Density / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	8 260
燃料栅元半径 Fuel pin radius / m	0.005
输运热 Heat of transportation (Q^*) for hydrogen / $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	5.3 ± 1.6
扩散系数 Diffusion coefficient / $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	1.53×10^{-11} $\exp(-14\,000/RT)$
冷却水温度 Cooling water temperature / K	563.15
氦气初始压强 Initial pressure of helium gas / Pa	101 325

参数,建立了UZrH_x燃料体系的氢扩散模型并进行瞬态计算。数值模拟结果如图2所示,在温度梯度驱动下,氢原子呈现从高温核心区向低温表面区域定向迁移的特征规律。UZrH_x表面氢浓度随时间的扩散过程如图3所示,可以看出,本研究基于有限元的仿真值与Huangs^[7]的基于有限差分法的计算结果吻合良好,吻合度优于Mehta^[22]的仿真值。图4展现了不同时间下UZrH_x中 x 的径向分布,可以看出,随着时间的推移,UZrH_x表面H/Zr由初始1.60持续上升,直至达到1.66的稳态值。

表2 3×3燃料组件的传热计算参数
Table 2 Calculation parameters for heat transfer of 3×3 fuel assembly

材料 Material	密度 Density / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	热导率 Thermal conductivity / $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	比热容 Specific heat / $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	动力黏度 Dynamic viscosity / $\text{Pa}\cdot\text{s}$
燃料 Fuel	7 000	15	300	—
冷却剂 Coolant	759.85	5 826	4 899	0.000 091 77

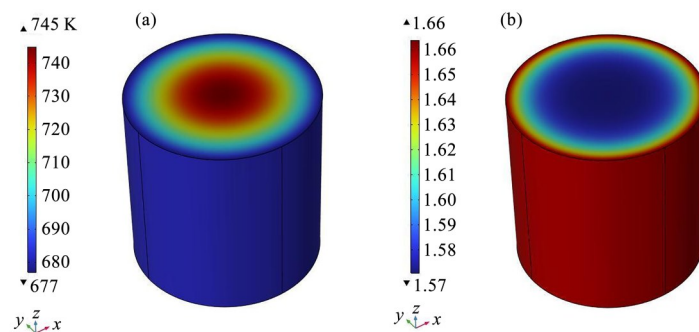


图2 UZrH_x燃料温度场和氢浓度H/Zr分布(彩图见网络版) (a) 温度场, (b) H/Zr分布
Fig.2 Temperature field and H/Zr distribution of UZrH_x fuel (color online) (a) Temperature field, (b) H/Zr distribution

2.2 九棒束CFD/单通道对比

为了系统评估单通道模型在热工水力分析中的计算精度与效率,本研究设计了一个简化的3×3燃料组件基准算例,采用计算流体力学

(Computational Fluid Dynamics, CFD)全三维仿真与单通道一维简化模型进行对比验证。算例聚焦于单相流条件下的基础传热特性,暂不考虑格架、管座等结构件的影响。

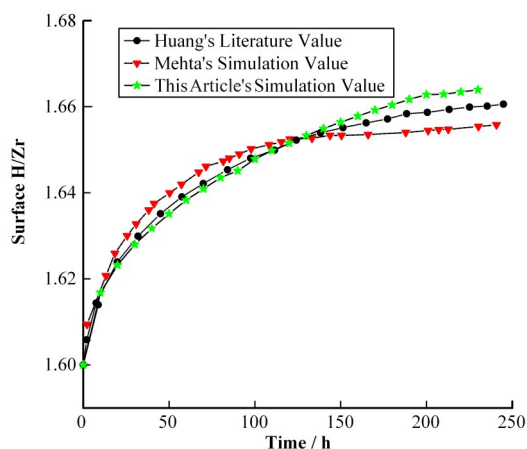

 图3 UZrH_{1.6}表面 H/Zr 随时间的变化
(彩图见网络版)

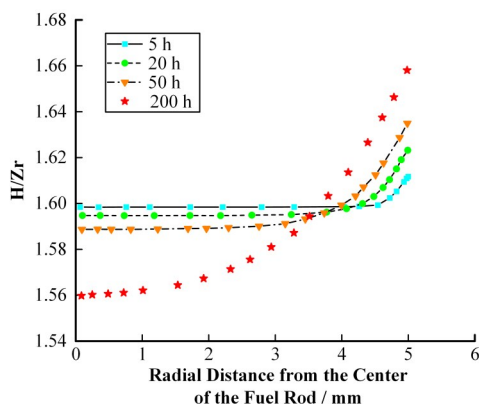
 Fig.3 Variation of UZrH_{1.6} surface H/Zr change with time
(color online)

 图4 UZrH_{1.6}中径向氢浓度 H/Zr 随时间的变化
(彩图见网络版)

 Fig.4 UZrH_{1.6} radial H/Zr change with time (color online)

如图5所示,燃料组件由9根规则排列的ZrH_{1.6}燃料棒构成,呈正方形栅格布置。各燃料棒半径为5 mm,栅距12 mm($P/D=1.2$),高度5 cm。为简化计算域,统一施加轴向均匀分布的线功率密度($100 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1}$)。表2给出了该问题中涉及的材料的热力学性质,CFD方法热工水力计算模型中相关的边界条件列于表3中。

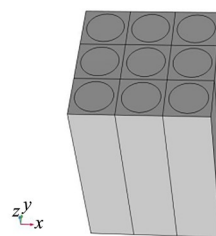


图5 3×3 燃料组件模型示意图

Fig.5 Diagram of 3×3 fuel assembly model

在网格划分方面,CFD模型采用了精细化的结构化网格策略,计算域共包含1 177 553个域单元、106 964个边界单元以及4 532个边单元,以确保流固耦合传热问题的高精度求解。图6展示了CFD模型与单通道模型的计算结果。基于 $k-\omega$ 湍流模型的稳态计算在计算环境下耗时约1 606 s。相比之下,单通道模型采用一维简化方法,仅需100个轴向节点即可描述冷却剂通道的传热特性,在相同硬件条件下单次计算耗时仅15 s,计算效率提升达两个数量级。在计算精度方面,图7展示了两种模型的温度分布对比结果。通过对比可以发现,单通道模型与CFD结果的最大相对偏差仅为1.6%。研究表明,在单相流均匀加热工况下,单通道模型能够以极低

 表3 3×3 燃料组件的边界类型
Table 3 Boundary types of 3×3 fuel assembly

物理量 Physical quantity	边界 Boundary	类型 Type	数值 Value
温度 Temperature / K	入口 Entrance	固定值 Fixed value	293.15
	出口 Exit	零梯度 Zero gradient	—
	侧壁 Side wall	对称 Symmetry	—
压强 Pressure / MPa	入口 Entrance	零梯度 Zero gradient	—
	出口 Exit	固定值 Fixed value	15.5
	侧壁 Side wall	对称 Symmetry	—
湍流动能 Turbulence kinetic energy / $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	入口 Entrance	固定值 Fixed value	0.1
	出口 Exit	零梯度 Zero gradient	—
	侧壁 Side wall	对称 Symmetry	—
湍流耗散率 Turbulence dissipation rate / $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$	入口 Entrance	固定值 Fixed value	2.0
	出口 Exit	零梯度 Zero gradient	—
	侧壁 Side wall	对称 Symmetry	—
速度 Velocity / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	入口 Entrance	固定值 Fixed value	(0,0,3.0)
	出口 Exit	零梯度 Zero gradient	—
	侧壁 Side wall	对称 Symmetry	—

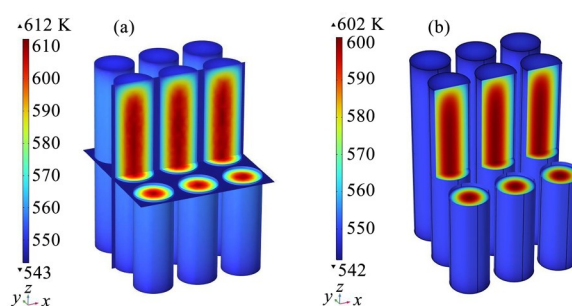


图6 燃料棒的温度场计算结果(彩图见网络版) (a) CFD方法, (b) 单通道方法

Fig.6 Calculation results of temperature field for fuel rod (color online) (a) CFD method, (b) Single channel method

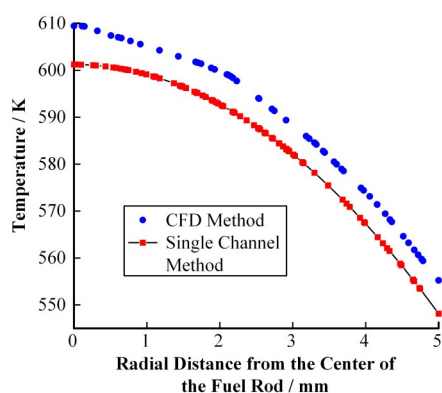


图7 燃料棒径向温度场计算结果对比(彩图见网络版)

Fig.7 Comparison of calculation results of radial temperature fields of fuel rod (color online)

的计算成本(不足CFD计算耗时的1%)实现与CFD方法高度一致的温度场预测(偏差小于2%)。

随后对单通道九棒束模型进行了氢扩散计算。

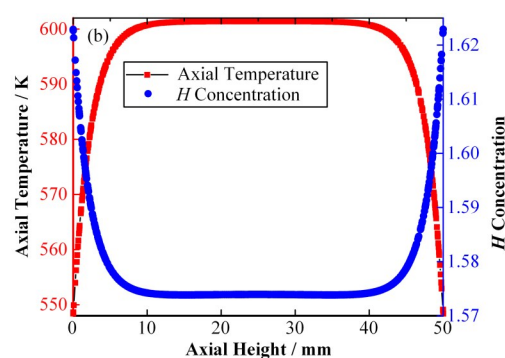
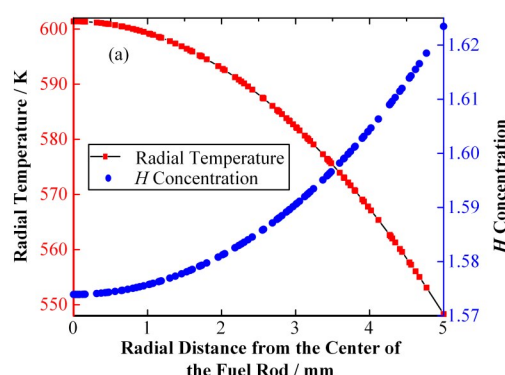


图8 燃料表面温度场和H/Zr(单通道方法计算结果)(彩图见网络版) (a) 径向温度场, (b) 轴向温度场

Fig.8 Surface temperature field and H/Zr of Fuel rod (calculation results of single channel method) (color online)

(a) Radial temperature field, (b) Axial temperature field

3 XAPR 西安脉冲堆

3.1 XAPR模型介绍

在验证完氢扩散模型和单通道模型的准确性后,开展了对于西安脉冲堆的研究计算。本文基于多物理耦合平台COMSOL,采用RMC蒙特卡罗模型、单通道一维流体流动传热模型和三维固体导热

模型耦合的建模方法,开展了西安脉冲反应堆在2 MW 稳态运行工况下的多物理耦合分析。

XAPR的稳态堆芯布局如图9所示。堆芯由分布在9个圆上的共211个通道组成,中心水腔占据中心,控制棒占据6个通道。在堆芯内,有99个通道被标准燃料元件占据,2个通道被指定用于温度测量燃料元件。额外的核心部件包括石墨元件、稳态控

制棒、脉冲控制棒、中子源元件、吸收器元件和其他相关成分。值得注意的是,图9中表示为C10和D2的两个测温燃料元件用于监测稳态和脉冲操作功率峰值处的堆芯温度。测温燃料元件采用与标准燃料元件相同的燃料结构。

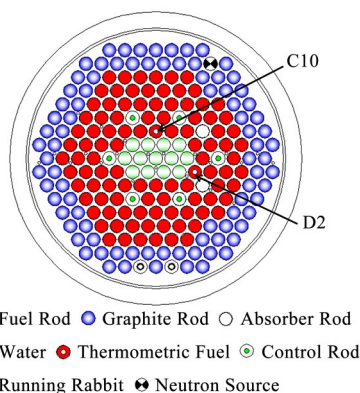


图9 XAPR 核心布局(彩图见网络版)
Fig.9 Layout of XAPR core (color online)

XAPR的标准燃料元件如图10所示。燃料元件使用 $\text{UZrH}_{1.6}$ 作为燃料,中心的锆棒起到固定支撑作用。在燃料元件和包壳中填充有压力为0.1 MPa的氢气。这种氢气填充除了有助于部件密封检查之外,还增强了燃料芯块和包壳之间的热传导性能^[6]。燃料元件的基本参数详见表4,在XAPR计算中涉及

物理性质如表5所示。

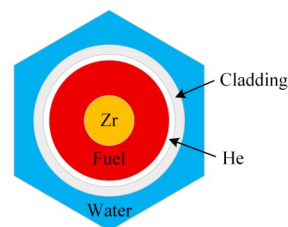


图10 XAPR 燃料组件示意图(彩图见网络版)
Fig.10 Schematic of XAPR fuel assembly (color online)

表4 XAPR 燃料元件基本参数
Table 4 Basic parameters of XAPR fuel elements

参数 Parameter	值 Value
锆棒半径 Zirconium rod radius / m	0.023
燃料棒半径 Fuel rod radius / m	0.180 5
包壳内径 Inner diameter of cladding / m	0.181
包壳外径 Outer diameter of cladding / m	0.186
节距 Pitch / m	0.43

根据上述模型,在COMSOL中对XAPR的燃料棒部分进行建模。采用自由四面体网格,大小“较细化”对模型进行网格划分如图11所示,完整网格包括19 217 912个域单元、6 125 542个边界单元和317 457个边单元。同时,对于功率载入采用“径向三圈、轴向十层”的划分方法^[15],每根燃料棒分为30个部分,共计3 030个区域。

表5 XAPR 燃料元件基本特性
Table 5 Basic characteristics of XAPR fuel elements

参数 Parameter	值 Value
质量流量 Mass flow rate / $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	12.13
密度	锆棒 Zr rod 6 440
Density / $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	燃料棒 Fuel rod 6 179.2
	包壳 Cladding 7 900
	水 Water $264.756+6.472\ 82T-0.017\ 88T^2+1.478\times 10^{-5}T^3$
热导率	锆棒 Zr rod $7.51+0.020\ 9T-1.45\times 10^{-5}T^2+7.67\times 10^{-9}T^3$
Thermal conductivity / $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	燃料棒 Fuel rod $17.584\ 56+7.494\ 37\times 10^{-3}T$
	包壳 Cladding $10.775\ 6+1.455\times 10^{-2}T$
	水 Water $-1\ 109.13+11.4T+0.023\ 77T^2-1.62\times 10^{-5}T^3$



图11 XAPR 燃料棒传热模拟的网格划分
Fig.11 Grid division for XAPR fuel rod heat transfer simulation

3.2 敏感性分析

氢扩散行为敏感性分析是研究西安脉冲堆铀-氢化锆燃料性能的重要环节。本研究通过建立西安脉冲堆燃料棒单棒模型,考察了输运热 Q 对氢再分布过程的影响机制。在COMSOL中,保持燃料棒标准尺寸(轴向长度39 cm,半径1.805 cm)和燃料棒功率不变,综合了多个实验研究数据来确定 Q 的合理取值范围。基于Sommer^[23]的经典实验结果,选取基准值 $Q=5.3\ \text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$;考虑到Huang等^[7]的研究表

明,氢分布对 Q 值的敏感性较低,在约30%的变化范围内对氢分布影响有限,因此选取下限值 $Q=3.7\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$;同时参考Merten等^[24]提出的理论模型,补充考察了 $Q=2.1\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 的情况。

计算结果如图12所示,输运热 Q 的取值对氢再分布行为具有显著影响。当 Q 从 $2.1\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 增至 $5.3\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 时,稳态工况下H/Zr的差值由0.44扩大

至1.17,且达到稳态所需时间从5 730 d减少至5 490 d。这一现象证实Soret效应强度与 Q 呈正相关性,较高的输运热会显著增强温度梯度驱动的氢迁移。具体而言,较大的 Q 值意味着氢原子对温度梯度更加敏感,在相同温度场条件下会产生更强的热扩散通量,从而导致更显著的氢再分布和更快的稳态建立过程。

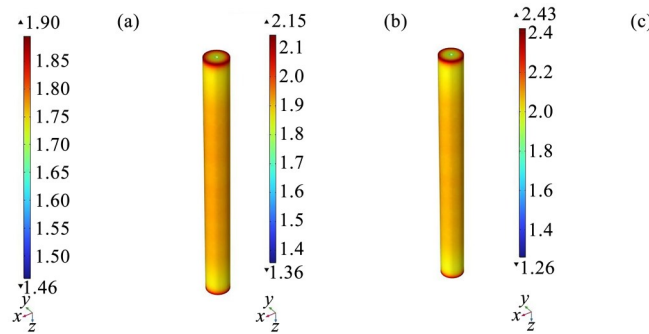


图12 XAPR单燃料棒的氢再分布场(彩图见网络版) (a) $Q=2.1\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, (b) $Q=3.7\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, (c) $Q=5.3\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$
Fig.12 Hydrogen redistribution field of XAPR single fuel rod (color online)
(a) $Q=2.1\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, (b) $Q=3.7\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$, (c) $Q=5.3\text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$

3.3 收敛性分析

为实现XAPR的多物理场耦合分析,本研究在获取了热工水力和氢扩散计算得到的温度场及H/Zr分布数据后,将堆芯区域划分为3 030个独立单元,并将各单元内的温度与H/Zr逐区更新至RMC输入卡中的材料属性中重新计算。在中子学计算中,每代使用500 000个粒子,设定100代作为非活跃代以消除初始源分布影响,500代作为活跃代用于统计收敛。燃料棒热传导计算的相对误差容限设为 1×10^{-8} ,耦合迭代的相对误差为 1×10^{-4} 。

如表6所示,收敛性分析结果表明,首次耦合迭代后, k_{eff} 由初始值1.013 817下降至1.001 202,反映出整体耦合过程对反应性具有明显的负反馈作用。进一步分析,仅考虑温度反馈时, k_{eff} 由1.013 817降至1.001 379,反应性变化为 $-1\,243.8\times 10^{-5}$;而在温度场基础上进一步引入氢再分布效应后, k_{eff} 仅由1.001 379降低至1.001 202,反应性变化为 -17.7×10^{-5} 。通过该结果可以看出,温度反馈和氢再分布均

会对反应性有负反馈作用,但氢再分布对反应性的直接影响远低于温度反馈,表明在当前工况下,温度是中子学性能变化的主要驱动因素。同时燃料的最高温度变化也较为有限,与初始均匀分布假设下的结果相比,氢再分布后的物理场分布形态整体接近,最高温度偏差约为3.1%,最大H/Zr浓度偏差约为1.5%。这说明材料核截面参数变化不显著。图13展示了耦合迭代过程中 k_{eff} 与燃料棒最高温度随迭代次数的变化。数值结果表明, k_{eff} 的相对变化率从第1次迭代的1.245%减少至第2次的0.049%和第3次的0.020%;同时,温度场的相对变化率也从初始的3.10%迅速下降至后续迭代的0.686%和0.230%。这一收敛特性与Jiang等^[5]针对XAPR在2 MW稳态工况下的研究结论一致,即系统物理量在首次迭代后已趋于稳定。鉴于COMSOL全场瞬态模拟具有较高的计算负荷,且后续迭代对物理场的影响几乎可忽略,可以认为耦合计算经一次迭代后已达到工程收敛标准。

表6 首次迭代参数对比
Table 6 Comparison of Iterative parameters for the first iteration

参数 Parameter	初始值 Initial value	迭代值 Iterative value	偏差 Deviation
k_{eff}	1.013 817	1.001 202	$1\,261.5\times 10^{-5}$
Temperature- k_{eff}	1.013 817	1.001 379	$1\,243.8\times 10^{-5}$
Hydrogen- k_{eff}	1.001 379	1.001 202	17.7×10^{-5}
燃料棒最高温度 Max temperature of fuel rod / K	903	875	3.1%
最大H/Zr Max H/Zr	1.99	1.96	1.5%

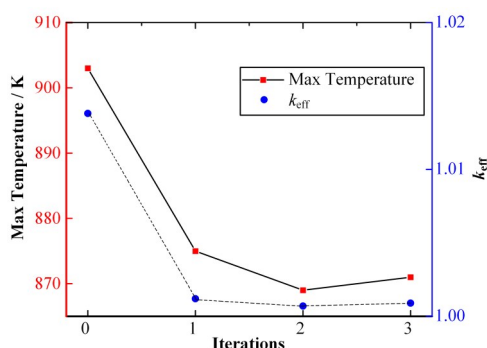

 图13 燃料棒最高温度和 k_{eff} 随迭代次数的变化(彩图见网络版)

 Fig.13 Variations of the maximum temperature of fuel rods and k_{eff} with iteration numbers (color online)

3.4 计算结果

图14展示了2 MW稳态运行条件下的堆芯功率参数分布。从计算结果可以发现,中央水腔周围的一圈燃料元件功率密度较高,主要是由于中央水腔对中子的慢化作用导致的。由于空间自屏效应,整体功率呈现单根燃料棒径向由内向外增高,轴向从中间向两端降低,堆芯整体由内向外降低的趋势。

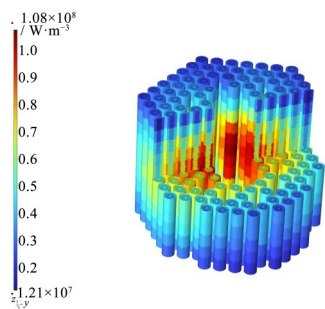


图14 XAPR功率密度分布(彩图见网络版)

Fig.14 Power density distribution of XAPR (color online)

图15展示了XAPR Z=0处径向温度场,图16展示了堆芯燃料棒内的整体温度分布,而图17显示了测温燃料元件C10的温度分布。将C10的温度分布与实验值进行对比来验证模型的准确性。表7中所述的测点位置如下:#1、#2和#3为燃料温度测点,位于C10燃料棒的径向中心位置。其中#2测点位于C10燃料棒的轴向中心,#1和#3距离#2各上下2.5 cm。计算显示,C10测温燃料元件内的最高温度达到799.3 K,与测量值的偏差约为1.2%。

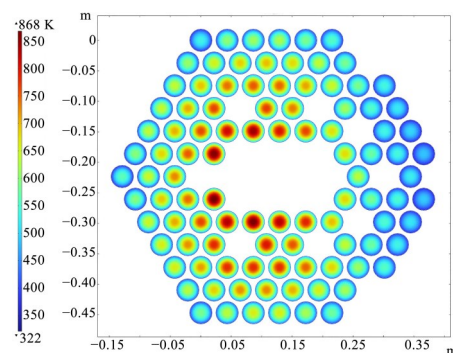


图15 XAPR Z=0处径向温度场(彩图见网络版)

Fig.15 Radial temperature field of XAPR at Z=0 (color online)

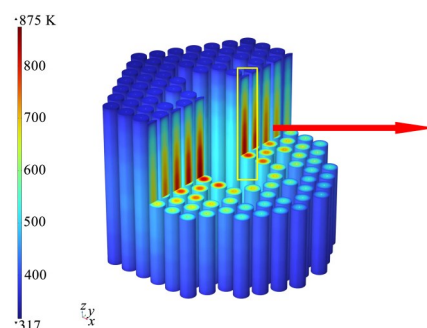


图16 XAPR的温度场分布(彩图见网络版)

Fig.16 Distribution of temperature field of XAPR (color online)

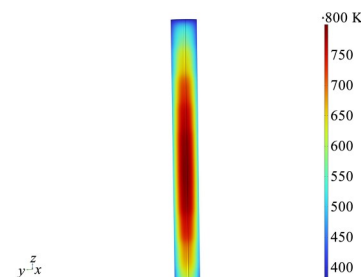


图17 C10燃料棒的温度分布(彩图见网络版)

Fig.17 Temperature distribution of C10 fuel rod (color online)

图18展示了COMSOL在计算一维流体轴向温度时不同冷却剂通道的轴向温度分布,这里的Tcoolant1到Tcoolant10展示的是C10燃料棒这一排的10根燃料棒的冷却剂温度。对比图15可以看出,冷却剂温度从左至右逐渐增大,直至第五根达到最高,与燃料棒温度对应,随后逐步减小,符合功率分布趋势。

表7 实验值与计算值对比
Table 7 Comparison of experimental and Calculated values

测点 Measurement point	实验值 Experimental value / K	计算值 Calculated value / K	偏差 Deviation / K
#1	809	799.3	9.7
#2	795	797.5	2.5
#3	795	792.4	2.6

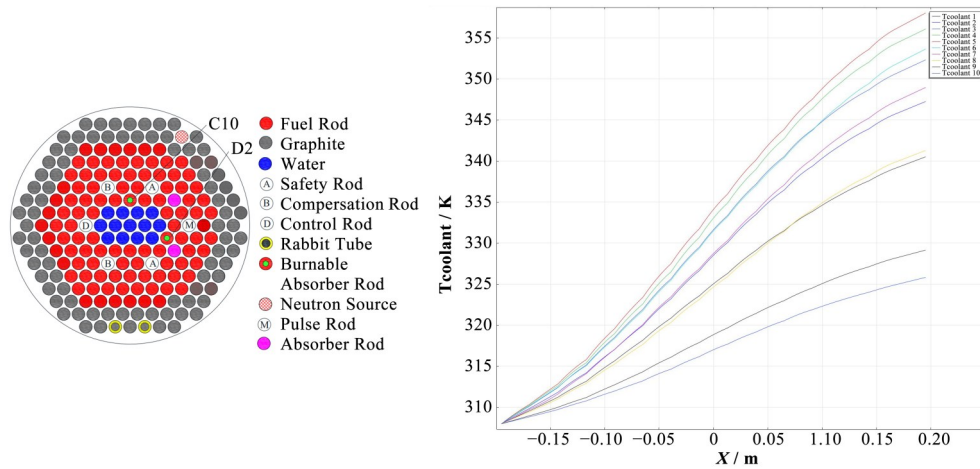


图18 不同冷却剂通道的轴向温度分布(彩图见网络版)
Fig.18 Axial temperature distribution of different coolant channels (color online)

图19展示了XAPR Z=0处径向氢再分布场,图20展示了堆芯燃料棒不同计算时间的氢再分布场,

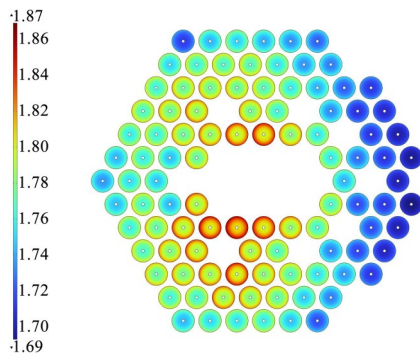


图19 XAPR Z=0处径向氢再分布场(彩图见网络版)
Fig.19 Radial hydrogen redistribution field of XAPR at Z=0 (color online)

分别是660 d、5 850 d和6 150 d。在扩散初期660 d时,由于燃料棒中心区域径向与轴向的温度梯度大,驱动氢迅速从中部向表面及两端扩散;与此同时,表面区域径向与轴向的温度梯度较小,其自身的再分布尚未充分进行。因此,在燃料表面观测到氢浓度呈“中间高、两端低”的过渡特征。随着时间增加,燃料棒表面温度梯度下的扩散作用逐渐显著,至5 850 d时氢浓度分布已接近稳态,最高与最低H/Zr比分别为1.96和1.46。在稳态下,径向上氢浓度由燃料中心向表面逐渐升高,轴向上由中部向两端逐渐升高,整体符合“温度高-氢浓度低、温度低-氢浓度高”的分布规律。该结果体现了氢在温度梯度驱动下随时间的迁移与平衡过程,验证了本文模型对氢再分布非稳态至稳态模拟的可靠性。

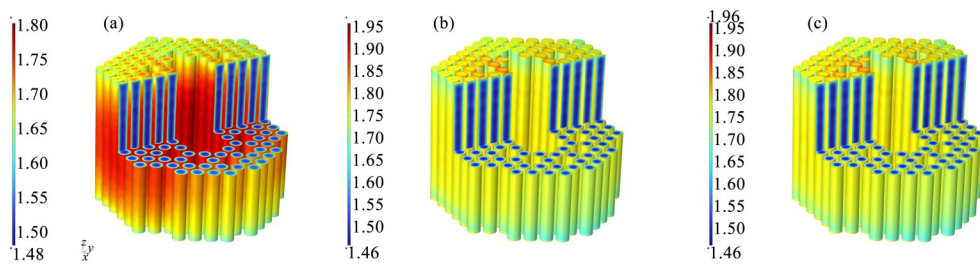


图20 XAPR的氢再分布场(彩图见网络版) (a) 660 d, (b) 5 850 d, (c) 6 150 d
Fig.20 Hydrogen redistribution field of XAPR (color online) (a) 660 d, (b) 5 850 d, (c) 6 150 d

4 结语

本文基于RMC蒙特卡罗中子输运模拟与COMSOL多物理场仿真,研究了XAPR的稳态功率分布、温度分布及氢再分布问题。研究表明,氢在氢化锆中的扩散行为受温度场及浓度场协同调控,其再分布过程会改变局部氢浓度,进而影响中子学性能和热工水力特性。本文开发平台的氢再分布模拟结果与文献数据吻合良好,这不仅验证了计算模型

的可靠性,也充分证明了其在工程实践中良好的适用性。需要指出的是,对于XAPR这类通常进行一至两小时满功率脉冲运行的反应堆,由于运行时间短暂,实际运行中不太可能观测到显著的氢再分布现象,该现象主要发生在长时间持续满功率运行的工况下。

值得进一步研究的是,本研究建立的氢再分布模型与分析方法,可拓展应用于评估铀氢锆燃料在

动力堆运行条件下的长期性能。参考陈炳德等^[25]对铀氢锆动力堆可行性的研究,该类型燃料在保持良好中子学特性与安全性能的同时,其在长期高功率运行下的氢迁移行为将成为影响堆芯寿命与安全的关键因素之一。后续工作可基于本文开发的模拟平台,针对动力堆典型工况开展燃耗周期内的氢再分布演化模拟,并结合实验验证,深入分析氢行为对燃料的影响机制。

因此,本研究揭示的氢再分布规律及其影响,主要为理解XAPR在极端或长期运行场景下的氢再分布现象以及氢再分布对中子学及热工水力的影响,为理解该堆型在长期运行中的燃料行为提供了理论工具,所构建的多物理场耦合分析框架也可扩展应用于评估铀氢锆燃料在动力堆运行条件下的性能演化,为同类堆型的燃料设计与安全评估提供方法支撑与数据依据。

作者贡献声明 邹璟杰负责研究的实施、数据采集及论文初稿的撰写;王立鹏负责研究的概念化、方法论设计,并获取经费支持;曹璐负责数据的整理与统计分析;胡田亮负责提供关键的实验材料与数据;姜夺玉负责研究理论与方法的指导与验证;赵萌与陈立新共同负责对文章知识内容进行批判性审阅。

参考文献

- Li X Y, Liu X J, Chai X, *et al.* Multi-physics coupling simulation of small mobile nuclear reactor with finite element-based models[J]. *Computer Physics Communications*, 2023, **293**: 108900.
- Zhang J D, Li T, Shen Z R, *et al.* Investigations of multiphysics models on a megawatt-level heat pipe nuclear reactor based on high-fidelity approaches[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2024, **198**(5): 1097–1121.
- 郭树伟, 陈珍平, 江新标, 等. 反射中子对金属快中子脉冲堆特性参数的影响研究[J]. *核技术*, 2024, **47**(6): 060602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.060602. GUO Shuwei, CHEN Zhenping, JIANG Xinbiao, *et al.* Effect of reflected neutrons for fast pulsed reactor characteristics with metallic nuclear fuel[J]. *Nuclear Techniques*, 2024, **47**(6): 060602. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.060602.
- Li R, Cao J, Wang L, *et al.* Neutronic/thermal-hydraulic coupling analysis of Xi'an pulsed reactor based on RMC and COBRA-TF[C]//International Conference on Nuclear Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2021, **85277**: V004T14A059.
- 王立鹏, 曹璐, 陈立新, 等. 微型反应堆高速撞击下核临界安全的初步分析[J]. *核技术*, 2024, **47**(8): 080605. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.080605. WANG Lipeng, CAO Lu, CHEN Lixin, *et al.* Preliminary analysis of nuclear criticality safety of micro-reactor under high-speed impact[J]. *Nuclear Techniques*, 2024, **47**(8): 080605. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2024.hjs.47.080605.
- Jiang D, Xu P, Hu T, *et al.* Coupled Monte Carlo and thermal-hydraulics modeling for the three-dimensional steady-state analysis of the Xi'an pulsed reactor[J]. *Energies*, 2023, **16**(16): 6046.
- Huangs J, Tsuchiya B, Konashi K, *et al.* Estimation of hydrogen redistribution in zirconium hydride under temperature gradient[J]. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2000, **37**(10): 887 – 892. DOI: 10.1080/18811248.2000.9714969.
- Yu F F, Xiang X, Zu X T, *et al.* Hydrogen diffusion in zirconium hydrides from on-the-fly machine learning molecular dynamics[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, **56**: 1057 – 1066. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.12.241.
- Yamanaka S, Yoshioka K, Uno M, *et al.* Thermal and mechanical properties of zirconium hydride[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 1999, **293**: 23 – 29. DOI: 10.1016/S0925-8388(99)00389-8.
- 胡田亮, 姜夺玉, 张信一, 等. 基于MOOSE平台的西安脉冲反应堆多物理耦合计算研究[J]. *核动力工程*, 2024, **45**(3): 14 – 19. DOI: 10.13832/j.jnpe.2024.03.0014. HU Tianliang, JIANG Duoyu, ZHANG Xinyi, *et al.* Study on multi-physics coupling calculation of Xi'an pulsed reactor based on MOOSE platform[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2024, **45**(3): 14 – 19. DOI: 10.13832/j.jnpe.2024.03.0014.
- 胡田亮, 姜夺玉, 李达, 等. 快谱小堆堆芯三维瞬态核-热-力耦合计算方法研究[J]. *原子能科学技术*, 2023, **57**(7): 1347 – 1354. DOI: 10.7538/yzk.2022.youxian.0777. HU Tianliang, JIANG Duoyu, LI Da, *et al.* Research on three-dimensional coupled neutronics thermo-mechanics model for dynamics analysis of fast-spectrum micro-reactor[J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2023, **57**(7): 1347 – 1354. DOI: 10.7538/yzk.2022.youxian.0777.
- Wang K, Li Z, She D, *et al.* Progress on RMC: a Monte Carlo neutron transport code for reactor analysis[C]//International Conference on Mathematics and

- Computational Methods Applied to Nuclear Science and Engineering (M&C 2011). Rio de Janeiro, Brazil, 2011.
- 13 徐兵兵, 徐坤, 叶民友, 等. CFETR 集成设计平台的核热耦合模块开发[J]. 核技术, 2018, **41**(1): 010601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.010601.
XU Bingbing, XU Kun, YE Minyou, *et al.* Neutronics-thermal hydraulics coupling module for CFETR integration design platform[J]. Nuclear Techniques, 2018, **41**(1): 010601. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2018.hjs.41.010601.
 - 14 Cheng Y, Roberts J A. A study of reactivity biases and their dependence on spatial discretization in depleted TRIGA fuel[J]. Annals of Nuclear Energy, 2017, **108**: 126 – 131. DOI: 10.1016/j.anucene.2017.04.030.
 - 15 王立鹏, 张信一, 江新标, 等. 西安脉冲堆燃料元件精细燃耗分布的蒙特卡罗方法研究[J]. 原子能科学技术, 2018, **52**(10): 1756 – 1761. DOI: 10.7538/yzk.2018.youxian.0028.
WANG Lipeng, ZHANG Xinyi, JIANG Xinbiao, *et al.* Study on hyperfine burnup distribution Monte Carlo of fuel in Xi'an pulsed reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, **52**(10): 1756 – 1761. DOI: 10.7538/yzk.2018.youxian.0028.
 - 16 Wang K, Liu Z Y, An N, *et al.* The Reactor Monte Carlo code RMC: the state-of-the-art technologies, advancements, applications, and next[J]. EPJ Nuclear Sciences & Technologies, 2024, **10**: 24. DOI: 10.1051/epjn/2024021.
 - 17 张良, 袁建新, 赵巍, 等. 西安脉冲反应堆在非脉冲瞬态工况下的动态特性研究[J]. 核动力工程, 2020, **41**(5): 1 – 7. DOI: 10.13832/j.jnpe.2020.05.0001.
ZHANG Liang, YUAN Jianxin, ZHAO Wei, *et al.* Study on dynamic characteristics of Xi'an pulsed reactor under non-pulse transient condition[J]. Nuclear Power Engineering, 2020, **41**(5): 1 – 7. DOI: 10.13832/j.jnpe.2020.05.0001.
 - 18 姜海鹏. 基于单通道模型的堆芯物理-热工耦合研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
JIANG Haipeng. Physical-thermal coupling of reactor core based on single channel model[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
 - 19 Hu T L, Jiang D Y, Zhang X Y, *et al.* Steady-state analysis of Xi'an Pulse Reactor based on the multi-physics coupling method[J]. Annals of Nuclear Energy, 2025, **211**: 110922. DOI: 10.1016/j.anucene.2024.110922.
 - 20 王立鹏, 邹璟杰, 赵若修, 等. 面向微型堆多物理耦合的 MCNP 连续型热中子截面在线产生技术[J]. 强激光与粒子束, 2025, **37**(10): 106020. DOI: 10.11884/HPLPB202537.250254.
WANG Lipeng, ZOU Jingjie, ZHAO Ruoxiu, *et al.* Technology on the on-the-fly generation of continuous thermal neutron scattering cross-sections in MCNP for microreactor multi-physics coupling[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2025, **37**(10): 106020. DOI: 10.11884/HPLPB202537.250254.
 - 21 刘峻岭, 王立鹏, 江新标, 等. 氢化钪热中子散射截面制作[J]. 现代应用物理, 2025, **16**(4): 88 – 96. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.202410008.
LIU Junling, WANG Lipeng, JIANG Xinbiao, *et al.* Generation of thermal neutron scattering cross sections for yttrium hydride[J]. Modern Applied Physics, 2025, **16**(4): 88 – 96. DOI: 10.12061/j.issn.2095-6223.202410008.
 - 22 Mehta V K, Armstrong J, Rao D V, *et al.* Capturing multiphysics effects in hydride moderated microreactors using MARM[J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, **172**: 109067. DOI: 10.1016/j.anucene.2022.109067.
 - 23 Sommer A W, Dennison W F. Thermal diffusion of hydrogen in nonstoichiometric zirconium-dihydride[M]. Atomics International, 1960.
 - 24 Merten U, Bokros J C, Guggisberg D G, *et al.* Thermal migration of hydrogen in zirconium-uranium-hydrogen alloys[J]. Journal of Nuclear Materials, 1963, **10**(3): 201 – 208. DOI: 10.1016/0022-3115(63)90055-2.
 - 25 陈炳德, 王连杰, 应诗浩, 等. 铀氢化锆元件小型动力堆应用可行性分析[J]. 核动力工程, 2009, **30**(3): 56 – 61.
CHEN Bingde, WANG Lianjie, YING Shihao, *et al.* Feasibility analysis for application of compact power reactor fuelled with uranium zirconium hydride[J]. Nuclear Power Engineering, 2009, **30**(3): 56 – 61.