

# 慢化剂氢化锆与氢化钇参数对TOPAZ-II反应堆功率分布的影响研究

陈 卓<sup>1,2,3</sup>, 刘 磊<sup>4</sup>, 周 杰<sup>1,2,3</sup>, 潘镜淇<sup>5</sup>, 栾秀春<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>哈尔滨工程大学黑龙江省核动力装置性能与设备重点实验室, 黑龙江 哈尔滨

<sup>2</sup>哈尔滨工程大学核安全与先进核能技术工信部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨

<sup>3</sup>哈尔滨工程大学核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 黑龙江 哈尔滨

<sup>4</sup>中国原子能科学研究院核工程设计研究所, 北京

<sup>5</sup>哈尔滨理工大学计算机科学与技术学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2024年7月5日; 录用日期: 2024年7月15日; 发布日期: 2024年10月28日

## 摘要

TOPAZ-II反应堆是使用固体金属氢化物为慢化剂的微型空间堆, 常用的慢化剂材料是氢化锆。近年来, 由于金属钇的制造成本降低, 氢化钇逐渐成为TOPAZ-II反应堆慢化剂材料的新选择。使用MCNP程序对TOPAZ-II反应堆进行功率分布计算, 分别研究氢化锆和氢化钇在不同条件下对反应堆功率的影响。计算结果表明: 改变金属氢化物慢化剂的氢含量和温度参数时, 堆芯径向功率峰因子的变化趋势决定了功率不均匀系数的变化趋势; 慢化剂的氢含量和温度参数的改变会导致堆芯热中子分布发生变化, 进而影响反应堆功率分布, 低能热中子占中子群份额越高, 堆芯径向功率峰因子越小; 慢化剂周围的CO<sub>2</sub>气体环境导致氢损失速率较小, 对反应堆功率分布的影响很小; 两种慢化剂呈正温度效应, 氢化钇的温度系数比氢化锆的温度系数小, 且以氢化钇为慢化剂的反应堆 $k_{\text{eff}}$ 更高。

## 关键词

氢化锆, 氢化钇, 功率分布, 空间堆, MCNP

# Study on the Effects of Zirconium Hydride and Yttrium Hydride Parameters on TOPAZ-II Reactor Power Distribution

Zhuo Chen<sup>1,2,3</sup>, Lei Liu<sup>4</sup>, Jie Zhou<sup>1,2,3</sup>, Jingqi Pan<sup>5</sup>, Xiuchun Luan<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Nuclear Power System & Equipment, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang

\*通讯作者。

文章引用: 陈卓, 刘磊, 周杰, 潘镜淇, 栾秀春. 慢化剂氢化锆与氢化钇参数对TOPAZ-II反应堆功率分布的影响研究[J]. 核科学与技术, 2024, 12(4): 304-315. DOI: 10.12677/nst.2024.124030

<sup>2</sup>Key Laboratory of Nuclear Safety and Advanced Nuclear Energy Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang

<sup>3</sup>National Defense Key Laboratory of Nuclear Safety and Simulation Technology, Harbin Engineering University, Harbin Heilongjiang

<sup>4</sup>Department of Nuclear Engineering Design, China Institute of Atomic Energy, Beijing

<sup>5</sup>College of Computer Science and Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin Heilongjiang

Received: Jul. 5<sup>th</sup>, 2024; accepted: Jul. 15<sup>th</sup>, 2024; published: Oct. 28<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The TOPAZ-II reactor is a micro-space reactor that uses solid metal hydride as the moderator, with zirconium hydride being the commonly used moderator material. In recent years, the reduced manufacturing cost of yttrium has led to yttrium hydride gradually becoming a new choice of moderator material for the TOPAZ-II reactor. The MCNP program was used to calculate the power distribution of the TOPAZ-II reactor and research the influence of zirconium hydride and yttrium hydride on the reactor power under different conditions. The calculation results show that the trend of the variation in radial power peak factor determines the trend of the variation in power inhomogeneous coefficient when changing the hydrogen content and temperature parameters of the metal hydride moderator. Changes in hydrogen content and temperature parameters of the moderator can cause changes in the thermal neutron distribution in the core, thereby affecting the reactor power distribution. The higher the proportion of low-energy thermal neutrons in the neutron group, the smaller the radial power peak factor in reaction core. The CO<sub>2</sub> gas environment surrounding the moderator causes a lower rate of hydrogen loss, resulting in minimal impact on the reactor power distribution. Both moderators exhibit positive temperature effects, with the temperature coefficient of hydrogenated yttrium being smaller than that of hydrogenated zirconium, and the  $k_{\text{eff}}$  of the reactor with hydrogenated yttrium as the moderator is higher.

## Keywords

Zirconium Hydride, Yttrium Hydride, Power Distribution, Space Reactor, MCNP

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

TOPAZ-II 是前苏联(俄罗斯)在 1969~1989 年设计、建造和测试的单节热离子空间反应堆动力系统, 反应堆使用钠钾合金作为冷却剂, 以固体金属氢化物作为慢化剂, 目前常用的慢化剂材料为氢化锆(ZrH<sub>x</sub>) 和氢化钇(YH<sub>x</sub>) [1]。TOPAZ-II 采用热离子转换技术将反应堆内产生的裂变能转换为电能。空间堆的工作温度高, 且结构紧凑、堆芯体积较小, 对慢化剂材料的要求较高, 常见的水和石墨等慢化剂材料就不再适用于空间堆。因此, 金属氢化物就被选用为空间堆的慢化剂材料。TOPAZ-II 早期选用的慢化剂材料是氢化锆, 氢化锆具有较低的热中子吸收截面和较高的中子慢化能力等优点。相较于氢化锆, 氢化钇具有较低的平衡氢分压, 在高温下(>1100 K)能保持较高的氢浓度, 有更优良的热稳定性, 在高温热中子反应堆中更具有优势[2]。在空间堆发展初期, 高纯度的金属钇的成本约为金属锆的 30 倍, 造价昂贵, 所以并没有被广泛使用。近年来, 由于制作成本的下降, 氢化钇逐渐成为各类微型反应堆慢化剂的更

佳选择。2019 年, 氢化钇在美国能源部(DOE)的各种计划下被开发作为微反应堆和小型模块化反应堆的慢化剂[3]。

在实际反应堆工程中经常用“功率峰因子”来表征反应堆内功率分布的不均匀性, 其定义可简单表述为反应堆内功率密度的最大值和平均值的比值, 分为轴向功率峰因子和径向功率峰因子, 两者之积定义为反应堆的功率不均匀系数[4]。反应堆功率峰因子的大小与反应堆内的局部功率分布变化程度有关, 功率峰因子越大, 表示反应堆内的功率分布越不均匀。功率峰因子的大小对反应堆的运行安全性和稳定性具有重要影响。过大的功率峰因子可能导致局部的超功率, 造成燃料棒的过热, 进一步引发燃料棒损坏和核燃料泄漏等严重事故。因此, 在设计和运行反应堆时需要合理控制功率峰因子, 确保反应堆内部的功率分布均匀, 降低事故风险。本文使用蒙特卡罗粒子输运程序 MCNP 计算慢化剂氢化锆和氢化钇在不同氢含量和不同温度下 TOPAZ-II 的热功率分布, 研究金属氢化物慢化剂的参数对 TOPAZ-II 反应堆功率分布的影响。在计算中考虑了慢化剂的氢损失效应, 通过氢损失预测模型计算慢化剂剩余的氢含量, 研究氢损失对 TOPAZ-II 反应堆功率分布的影响。

## 2. TOPAZ-II 反应堆结构模型

TOPAZ-II 反应堆的堆芯是由固态金属氢化物慢化剂和 37 根热离子燃料元件组成, 其中 1 根热离子燃料元件位于堆芯中心, 其余的 36 根热离子燃料元件以中心燃料元件为圆心, 呈圆环状分为 3 圈排布。每个热离子燃料元件中心装有环状二氧化铀燃料, 燃料两端分布有氧化铍反射层, 在燃料芯块和芯块端反射层外部, 由内向外依次是发射极、发射极涂层、铯气腔、接收极、接收极绝缘层、氦气腔、不锈钢内管套、钠钾合金冷却剂和不锈钢外管套。TOPAZ-II 使用的二氧化铀燃料中  $^{235}\text{U}$  富集度为 96%, 环状燃料芯的中心空洞的作用是在空间堆运行期间向太空排放裂变气体。

堆芯外部由端部铍反射层、侧铍反射层和 12 个转鼓组成。12 个转鼓呈环形均匀分布在侧铍反射层内部, 每个转鼓由铍柱和瓦片状碳化硼吸收体组成。通过旋转转鼓, 调整碳化硼吸收体的位置, 改变转鼓的中子吸收率, 就可以调节反应堆的反应性。

根据 TOPAZ-II 反应堆的尺寸和各组件材料[5][6], 使用 MCNP 程序进行建模, 其计算模型如图 1 所示。

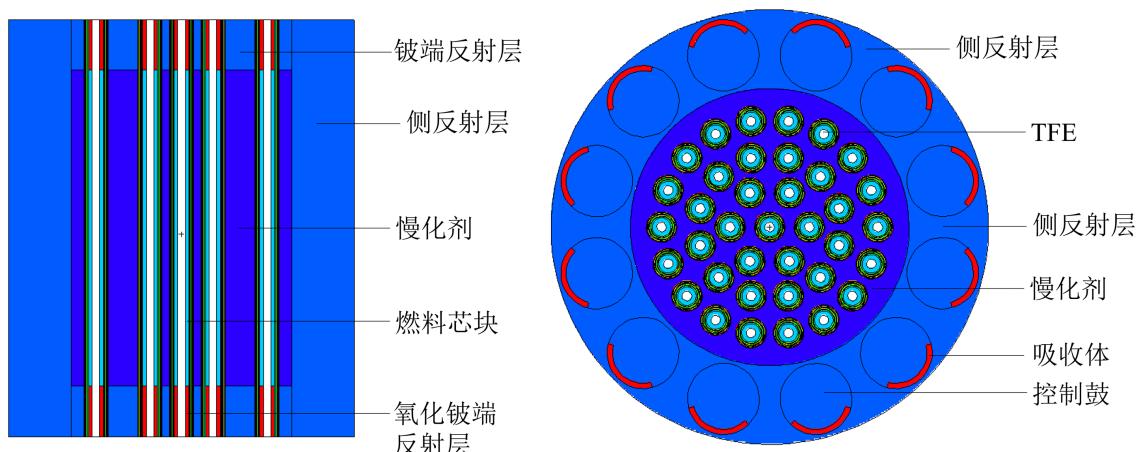


Figure 1. Scheme diagram of TOPAZ-II reactor core structure  
图 1. TOPAZ-II 反应堆堆芯结构示意图

## 3. MCNP 计算方法

彭红花等通过分析对比认为 F4:n + F4:p 卡或 F6:np 卡能够真实反映裂变瞬发能的沉积分布, 是计算

核反应堆能量沉积的最佳统计卡[7]。将网格记数卡 Fmesh4:n 和 Fmesh4:p 与反应乘子卡 Fm 联用，在 Fm 反应表中添加对应的反应号，统计堆芯的能量沉积分布[8]。根据反应堆的额定功率、材料原子密度等确定 Fm 卡中的比例因子，计算堆芯的功率分布[9]。在计算中设定 TOPAZ-II 反应堆的热功率  $P = 115 \text{ kW}$  [5]。径向粗网格大小为  $260 \text{ mm} \times 260 \text{ mm}$ ，细网格分辨率为  $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ ，轴向粗网格高度为堆芯高度  $375 \text{ mm}$ ，细网格高度为堆芯高度的  $1/20$ 。

在 MCNP 中进行临界计算和堆芯功率分布计算时， $S(\alpha, \beta)$  模型对计算结果的影响显著，使用  $S(\alpha, \beta)$  模型处理热中子散射问题能得到更好的效果[10]。因此，在计算中利用  $S(\alpha, \beta)$  模型替代自由气体模型来处理慢化剂对热中子散射截面的影响。计算所使用的核数据来源于 ENDF/B-VIII.0 评价库。在所有计算中，调整 12 个转鼓的方向，使所有碳化硼吸收体均位于最外侧位置。将以  $\text{YH}_x$  作为慢化剂的 TOPAZ-II 反应堆记为 1 号反应堆，以  $\text{ZrH}_x$  作为慢化剂的 TOPAZ-II 反应堆记为 2 号反应堆。

## 4. 堆芯功率分布计算结果

### 4.1. 慢化剂氢含量的变化

在金属氢化物慢化剂材料中，氢原子起慢化中子的作用，改变金属氢化物中氢原子的含量，慢化剂的中子慢化能力也会发生变化，从而影响反应堆功率分布。MCNP 的计算结果如图 2~4 所示。

从图 2 和图 3 的数据可以看出，当两种金属氢化物中的氢含量上升时，TOPAZ-II 堆芯的轴向功率峰因子呈逐渐上升趋势，径向功率峰因子呈逐渐下降趋势。两种慢化剂在相同的氢含量下，1 号反应堆的轴向功率峰因子低于 2 号反应堆，径向功率峰因子高于 2 号反应堆。图 4 显示，TOPAZ-II 反应堆的功率不均匀系数随着慢化剂氢含量的升高而逐渐降低。1 号反应堆的功率不均匀系数呈阶梯式下降趋势，2 号反应堆的功率不均匀系数则呈均匀下降趋势，且在相同的氢含量下，1 号反应堆的功率不均匀系数要高于 2 号反应堆。

使用 MCNP 中的 F4 卡对反应堆燃料芯块内的中子注量率进行统计，计数结果经过 Fm 卡上的源强数进行转换，统计结果如图 5 所示。从图 5 的统计结果可以看出，中子能谱在能量低于  $1 \text{ eV}$  的区间内变化十分明显，燃料芯块内的热中子注量率随着慢化剂中氢含量的增加而升高。

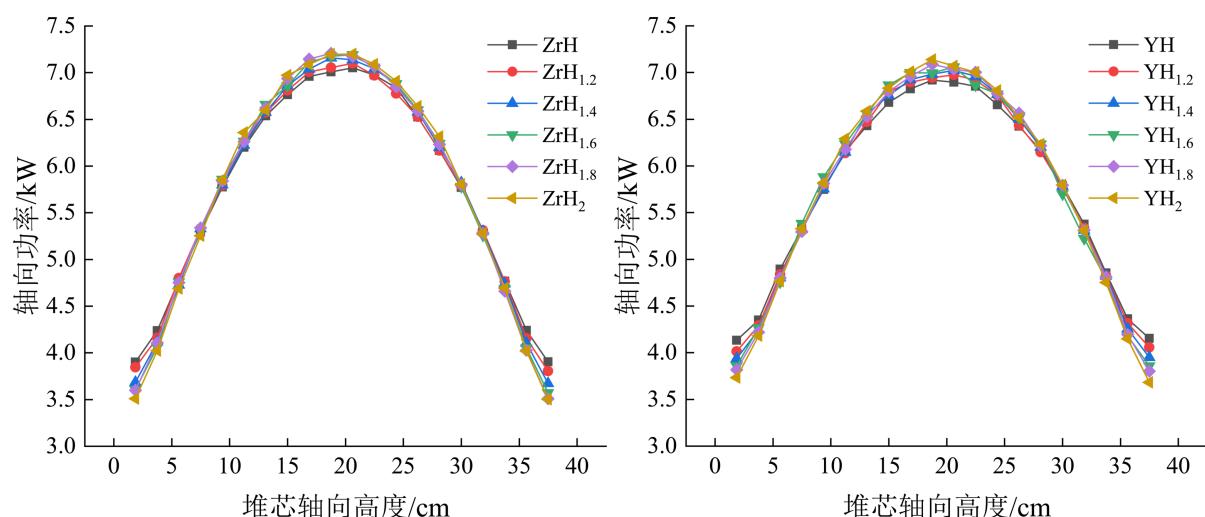
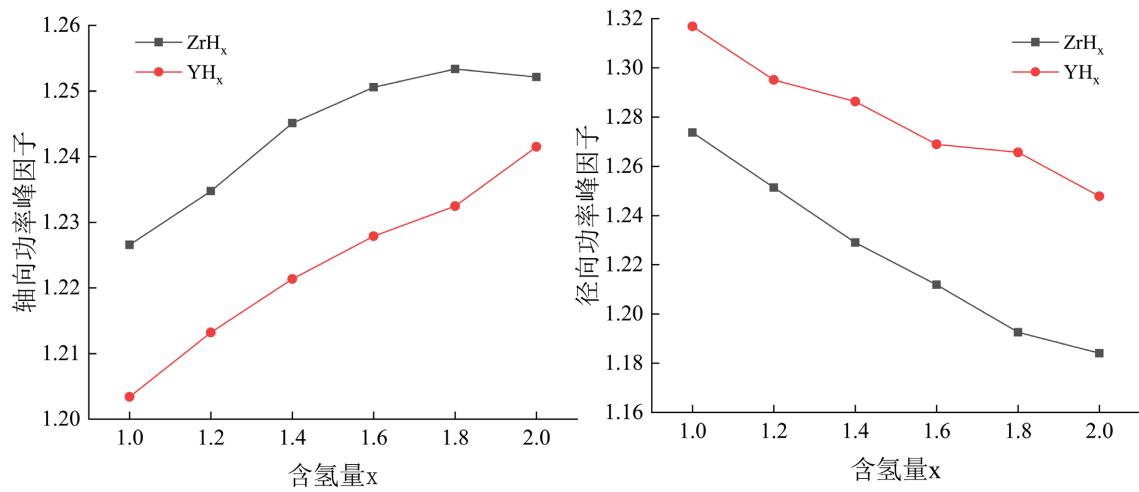
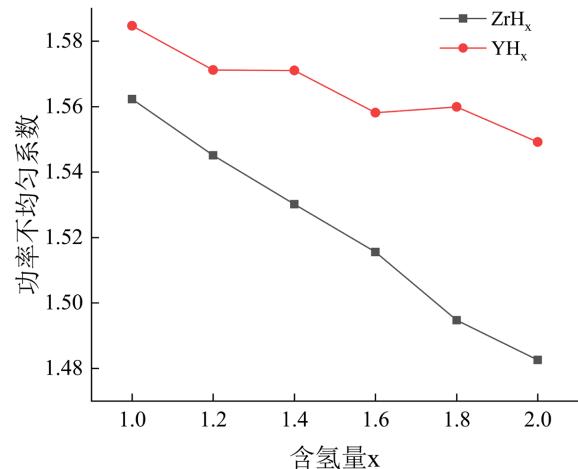


Figure 2. Axial power distribution of reactor core in different hydrogen contents of moderator

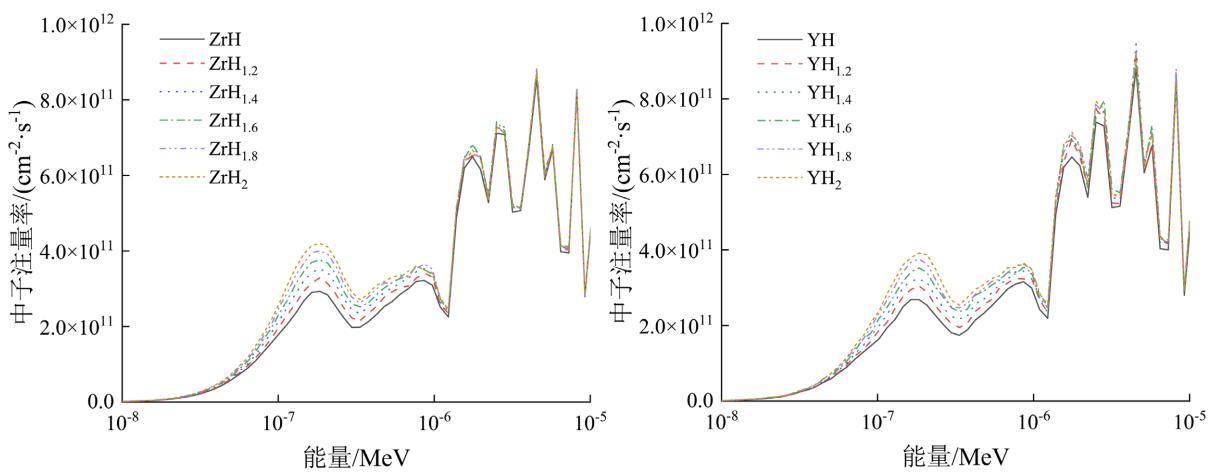
图 2. 慢化剂不同氢含量下的堆芯轴向功率分布



**Figure 3.** Power peak factor of reactor core in different hydrogen contents of moderator  
**图3.** 慢化剂不同氢含量下的堆芯功率峰值因子



**Figure 4.** Power inhomogeneous coefficient of reactor core in different hydrogen contents of moderator  
**图4.** 慢化剂不同氢含量下的堆芯功率不均匀系数



**Figure 5.** Fuel spectra in different hydrogen contents of moderator  
**图5.** 慢化剂不同氢含量下的燃料能谱

## 4.2. 慢化剂温度的变化

根据 4.1 节中数据的分析结果, 将慢化剂材料分别设为  $\text{ZrH}_2$  和  $\text{YH}_2$ 。由于氢化钇具有更高的热稳定性, 在 1200 K 高温以上仍能保持较高的氢浓度, 使用 MCNP 分别计算  $\text{ZrH}_2$  在 300~1200 K 和  $\text{YH}_2$  在 300~1600 K 的温度范围内 TOPAZ-II 反应堆燃料元件的轴向功率分布, 计算结果如图 6 所示。图 7 和图 8 是两种材料在不同温度下的堆芯功率参数。由图 6 和图 7 数据可知, 慢化剂  $\text{ZrH}_2$  温度在 300~1200 K 范围内时, 堆芯轴向功率峰因子呈振荡变化, 且变化幅度较小、变化不明显; 径向功率峰因子随温度的升高呈阶梯式上升趋势, 在 800~1200 K 范围内达到较高值。慢化剂  $\text{YH}_2$  温度在 300~500 K 范围内时, 堆芯轴向功率峰因子随温度的升高呈大幅度上升趋势, 在 500~1400 K 温度范围内轴向功率峰因子随温度的升高呈阶梯式下降趋势, 在 1600 K 时有所升高; 径向功率峰因子随慢化剂温度的升高整体呈上升趋势, 但在 700~1400 K 温度范围内时, 径向功率峰因子保持平稳、变化幅度很小。在相同的慢化剂温度下, 1 号反应堆的轴向功率峰因子低于 2 号反应堆, 径向功率峰因子和功率不均匀系数要高于 2 号反应堆。当慢

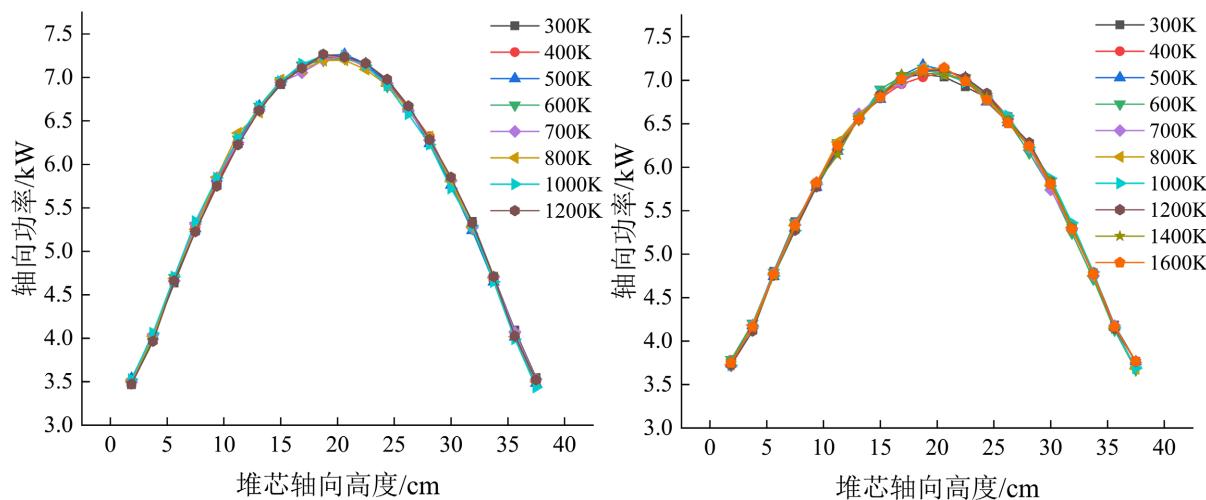


Figure 6. Axial power distribution of reactor core in different temperatures of moderator

图 6. 慢化剂不同温度下的堆芯轴向功率分布

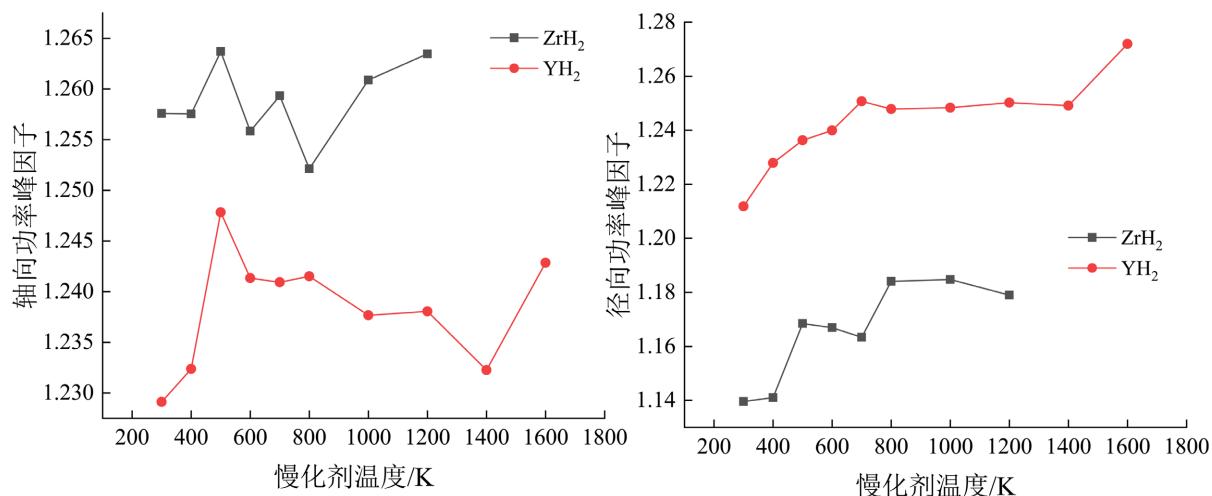


Figure 7. Power peak factor of reactor core in different temperatures of moderator

图 7. 慢化剂不同温度下的堆芯功率峰值因子

化剂  $\text{YH}_2$  的温度在 400~1400 K 范围内时, 1 号反应堆的功率不均匀系数较为稳定, 慢化剂温度升高引起的功率不均匀系数变化幅度很小, 在其他温度区间则使功率不均匀系数有较大幅度的上升。随着慢化剂  $\text{ZrH}_2$  温度的升高, 2 号反应堆的功率不均匀系数整体呈上升趋势。在慢化剂温度相同时, 1 号堆的功率不均匀系数总是高于 2 号堆。

使用 MCNP 统计慢化剂处于各种温度下的燃料能谱, 结果如图 9 所示。从图 9 中的数据对比可以发现, 随着慢化剂温度的升高, 燃料芯块内的热中子注量率的峰值与峰的位置都发生了变化。慢化剂  $\text{ZrH}_2$  和  $\text{YH}_2$  的温度在 300~800 K 范围内时, 燃料芯块内的热中子注量率整体升高, 同时热中子能谱中的第一个峰逐渐向右移动, 即中子能量逐渐升高。慢化剂  $\text{ZrH}_2$  和  $\text{YH}_2$  的温度在 800~1200 K 范围内时, 热中子能谱中的第二个峰开始逐渐向左移动, 即中子能量逐渐降低。当  $\text{YH}_2$  的温度超过 1200 K 时, 热中子能谱中的两个峰相互靠近, 第一个峰的形状已经不再明显, 第二个峰的峰值有十分明显的升高。整体上, 慢化剂温度升高时, 中子向高能量区间集中, 导致中子能谱硬化。根据解家春等[11]对 TOPAZ-II 反应堆慢

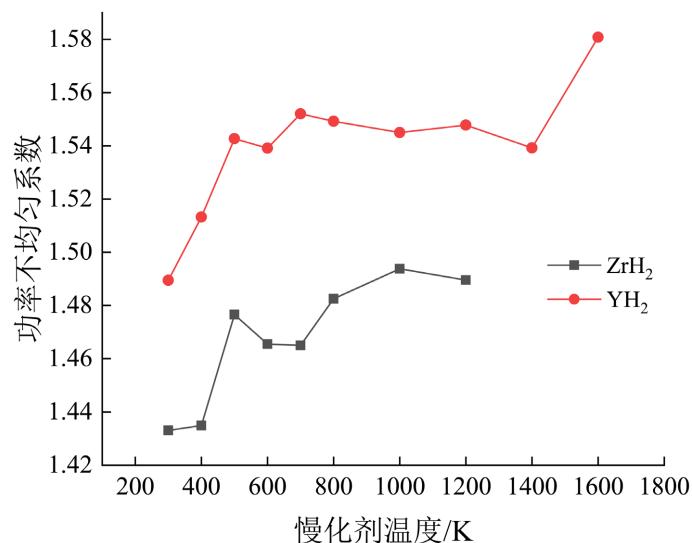


Figure 8. Power inhomogeneous coefficient of reactor core in different temperatures of moderator  
图 8. 慢化剂不同温度下的堆芯功率不均匀系数

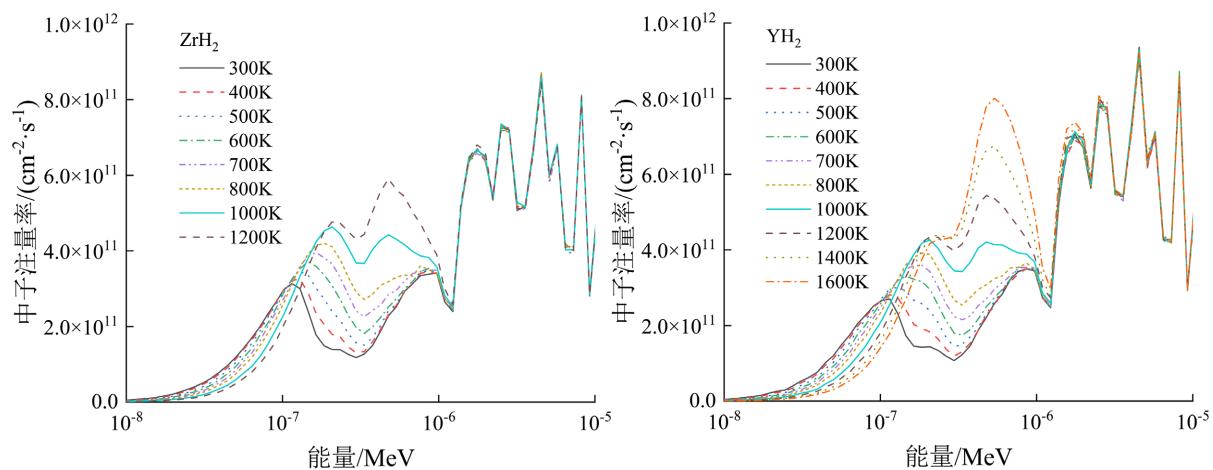


Figure 9. Fuel spectra in different temperatures of moderator  
图 9. 慢化剂不同温度下的燃料能谱

化剂温度效应的研究,慢化剂温度升高后,慢化剂等区域的中子吸收减少,燃料的中子吸收增加,裂变反应率增加,中子产生率也随之增加,而堆芯的中子消失率增加较小,从而导致堆芯反应性增加。从图6~8中的数据可知,慢化剂温度升高,导致进入燃料芯块的热中子能量分布发生变化,这会导致核反应堆中不同部位的中子通量和能量分布出现差异,进而影响反应堆的功率分布均匀性。

### 4.3. 慢化剂氢损失

空间反应堆在服役时,慢化剂长时间处于高温中,在这种条件下 $\text{ZrH}_x$ 和 $\text{YH}_x$ 中的氢并不稳定。随着空间反应堆运行时间的增加, $\text{ZrH}_x$ 和 $\text{YH}_x$ 中的氢会以 $\text{H}_2$ 的形式缓慢地释放到外界,慢化剂中氢的浓度逐渐降低。氢损失会影响慢化剂的性能,可能会导致空间反应堆功率分布变化和 $k_{\text{eff}}$ 下降,甚至停堆。图10展示了两种金属氢化物内氢原子的密度随温度变化的趋势[12]。从图10可以看出,当慢化剂的工作温度超过500°C时, $\text{ZrH}_x$ 开始快速失氢,工作温度超过800°C时,氢的损失率进一步上升。虽然 $\text{YH}_x$ 在温度低于900°C时氢损失率高于 $\text{ZrH}_x$ ,但是 $\text{YH}_x$ 在300°C~900°C范围内氢损失率一直保持不变,在900°C~1100°C范围内氢损失率仅有小幅度变化,含氢量仍然保持稳定。

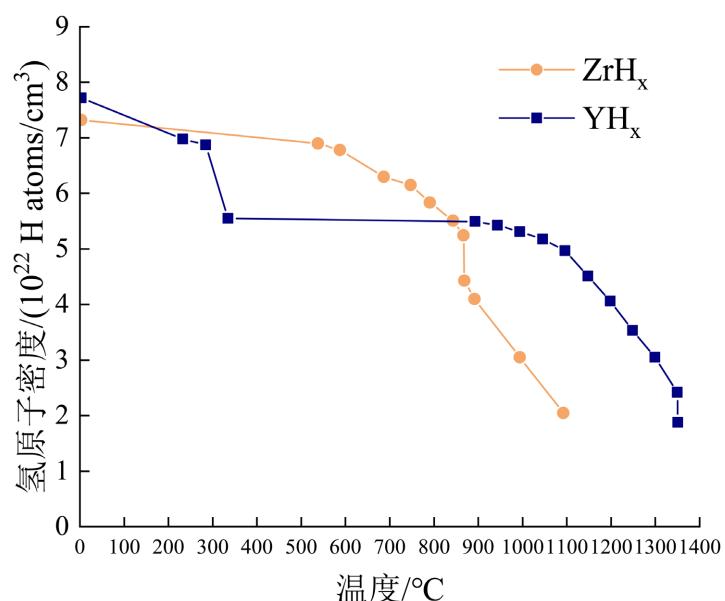


Figure 10. Temperature function of hydrogen atomic density in zirconium and yttrium [12]  
图 10. 氢原子密度在锆和钇中的温度函数[12]

在TOPAZ-II反应堆中,金属氢化物慢化剂与热离子燃料元件之间存在由 $\text{CO}_2$ 和 $\text{He}$ 组成的混合气腔。在 $\text{CO}_2$ 环境中, $\text{ZrH}_x$ 和 $\text{YH}_x$ 会在表面与 $\text{CO}_2$ 反应生成 $\text{ZrO}_2$ 和 $\text{Y}_2\text{O}_3$ 氧化膜,这层氧化膜具有良好的阻氢渗透性能,可以有效地延长金属氢化物慢化剂的使用寿命。Qi等[13]和王智辉[14]通过气相色谱仪对 $\text{ZrH}_x$ 和 $\text{YH}_x$ 的氢损失现象进行了深入研究,建立了 $\text{ZrH}_x$ 和 $\text{YH}_x$ 在600°C(873 K)的工作温度下和 $\text{CO}_2 + \text{He}$ 气氛中氢损失速率的预测模型,分别得到了 $\text{ZrH}_x$ 和 $\text{YH}_x$ 氢损失速率与工作时间的关系:

$$V_{a_1} = 7.961 \times 10^{-7} \times (t - 49165.3)^{-0.5} \quad (1)$$

$$V_{a_2} = 1.396 \times 10^{-6} \times (t - 71005.680)^{-0.5} \quad (2)$$

其中, $V_{a_1}$ 和 $V_{a_2}$ 分别为 $\text{ZrH}_x$ 和 $\text{YH}_x$ 的氢损失速率,单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; $t$ 是反应堆工作时间,单位为s。

在这个氢损失预测模型中,忽略了 $\text{ZrH}_x$ 和 $\text{YH}_x$ 与 $\text{CO}_2$ 反应生成的CO对测量结果的影响,给出的氢

损失速率是最保守的计算结果。根据式(1)和式(2)可以计算出 TOPAZ-II 反应堆在运行一段时间后慢化剂材料的氢损失, 如图 11 所示。根据图 11 中的数据显示, 在 873 K 的温度下, 反应堆内的金属慢化剂  $\text{ZrH}_x$  和  $\text{YH}_x$  在 12 年后的最终氢损失率分别为 3.54% 和 8.03%, 与图 10 描述的情况相符。根据 4.1 节中图 3 和图 4 的数据可知, 慢化剂中氢含量下降确实会导致反应堆功率不均匀系数上升, 引起反应堆内的功率分布发生变化, 但是慢化剂氢损失在 12 年内引起的氢含量变化十分有限, 不会导致功率不均匀系数发生大幅度变化, 对 TOPAZ-II 反应堆功率分布的影响很小。

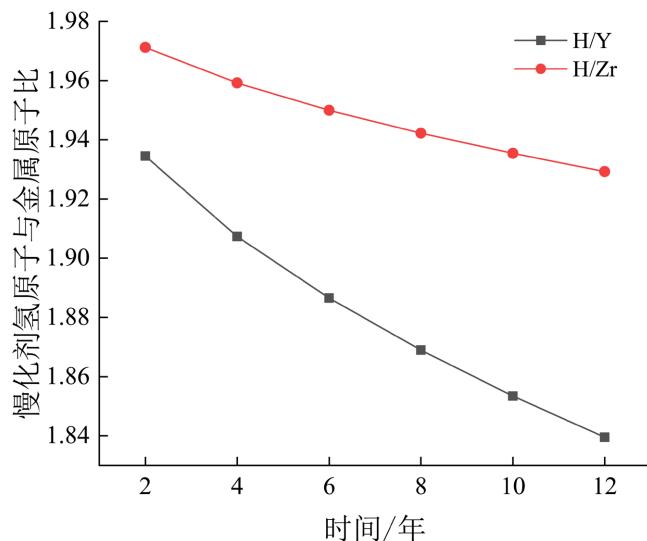


Figure 11. Hydrogen loss in the moderator

图 11. 慢化剂氢损失

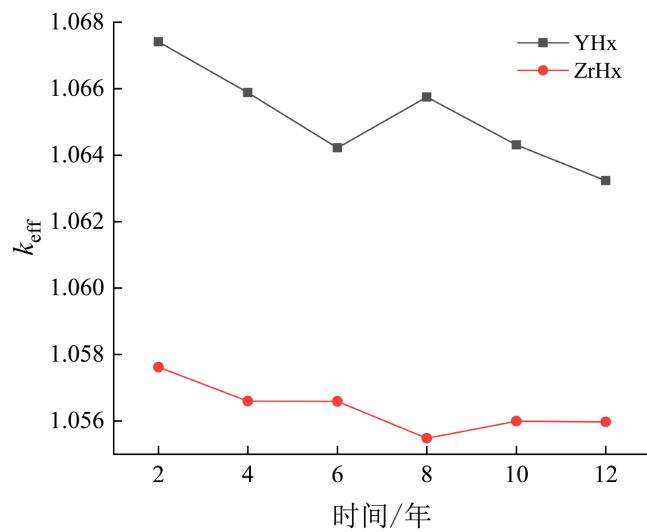


Figure 12. Effect of hydrogen loss in the moderator on the  $k_{\text{eff}}$  of the reactor

图 12. 慢化剂氢损失对反应堆  $k_{\text{eff}}$  的影响

图 12 是使用 MCNP 根据图 11 中金属氢化物慢化剂在同时间节点下的氢损失数据计算的 TOPAZ-II 反应堆有效增殖系数的变化。图 12 显示, 在 12 年内反应堆的有效增殖系数随时间变化整体呈下降趋势, 但是慢化剂的氢损失并没有导致有效增殖系数大幅下降, 不会导致反应堆停堆。

#### 4.4. 慢化剂材料

图 13 是在第 4.2 节中记录的  $\text{ZrH}_x$  和  $\text{YH}_x$  温度每升高 100 K 的慢化剂温度系数, 根据图中数据可知, TOPAZ-II 反应堆呈现出正的慢化剂温度效应。解家春等[11]和时运达等[15]对 TOPAZ-II 慢化剂正温度效应的研究表明, 慢化剂温度升高后, 燃料的热中子利用系数增加, 导致反应性上升, 形成了正的慢化剂温度效应。慢化剂正温度效应是 TOPAZ-II 反应堆的一个特征, 这种现象除了与 TOPAZ-II 反应堆选用固体慢化剂和高浓缩铀燃料有关外, 还与其燃料棒的非均匀布置方式有关, 通过重新设计燃料元件排布方式, 可以削弱堆芯不均匀性, 减小慢化剂的正温度效应[11]。图 13 数据显示, 两种慢化剂材料的温度系数变化趋势大致相同,  $\text{YH}_x$  的温度系数略低于  $\text{ZrH}_x$ , 这表明慢化剂  $\text{YH}_x$  的温度变化引起的反应性变化幅度更小, 更有利于反应堆安全。

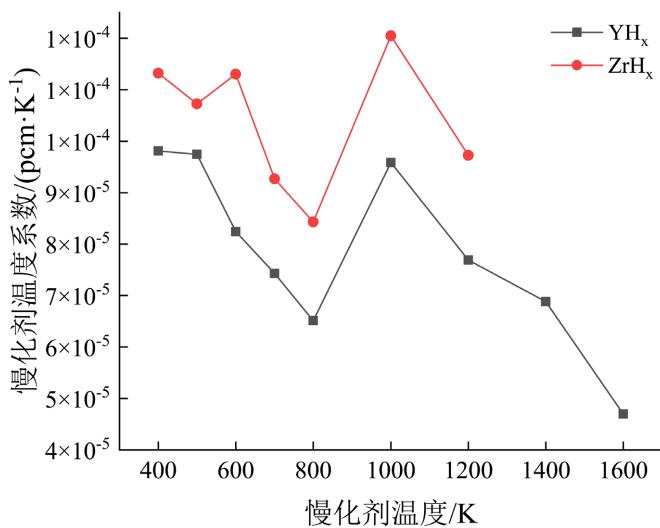


Figure 13. Temperature coefficient of  $\text{ZrH}_x$  and  $\text{YH}_x$   
图 13.  $\text{ZrH}_x$  和  $\text{YH}_x$  的温度系数

在 4.1 节和 4.2 节的各项计算中发现, 在改变慢化剂氢含量和温度条件时, TOPAZ-II 反应堆的功率不均匀系数主要受径向功率峰因子的影响, 其变化趋势与径向功率峰因子的变化趋势基本一致。联合图 5 和图 9 中的燃料能谱数据, 可以发现堆芯的径向功率峰因子与热中子群份额有关联, 热中子在中子群中所占的份额越高, 堆芯径向功率峰因子越小。刘黎丽在研究 SPACE-R 空间电堆径向功率分布优化方案时, 通过将慢化剂分区使用不同含氢量的慢化剂材料, 使外圈热离子燃料元件得到更多的有效热中子, 从而展平径向功率分布[16]。因此, 慢化剂氢含量变化导致堆芯功率不均匀系数发生变化的根本原因是, 氢含量变化改变了慢化剂对中子的慢化能力, 使堆芯内热中子群份额发生改变, 进而影响了 TOPAZ-II 反应堆的径向功率峰因子和功率不均匀系数。慢化剂温度变化对堆芯功率分布的影响较为复杂, 温度变化不仅会影响氢对中子的慢化能力, 同时也会影响金属原子对热中子的吸收能力, 这将导致热中子的能谱变化十分复杂。由于不同能量的中子对释热的贡献不同, 即中子价值不同, 能量较低的中子的价值大于能量较高的中子, 所以反应堆功率密度分布与热群中子注量率分布关系密切[17]。根据图 9 显示的内容, 虽然慢化剂温度升高时, 热中子能谱的峰值一直在上升, 但是峰的位置也在发生变化, 这将导致热中子群中处于较低能量区间的中子份额减少, 使堆芯径向功率峰因子变大。

此外, 两种慢化剂材料在相同的氢含量和温度条件下对反应堆的功率影响有所不同, 以  $\text{YH}_x$  为慢化剂的 1 号反应堆的功率不均匀系数总是高于以  $\text{ZrH}_x$  为慢化剂的 2 号反应堆。图 14 是使用 MCNP 统计的

$\text{ZrH}_2$  和  $\text{YH}_2$  温度为 800 K 时, TOPAZ-II 反应堆的燃料能谱。由图 14 可见, 在中子能量低于 1 eV 的区间内, 2 号反应堆燃料芯块内的中子注量率较高, 这是因为锆的热中子吸收截面要比钇的热中子吸收截面小。在中子能量高于 1 eV 的区间内, 1 号反应堆燃料芯块内的中子注量率更高。MCNP 的输出文件中统计了反应堆中三个中子能量区间内( $<0.625 \text{ eV}$ 、 $0.625\text{--}100 \text{ keV}$ 、 $>100 \text{ keV}$ )的中子引发裂变反应的占比, 对比两组反应堆的输出文件可以发现, 1 号反应堆中三个能量区间的中子引发的裂变反应占比分别为 46.71%、39.61%、14.22%, 2 号反应堆中三个能量区间的中子引发的裂变反应占比分别为 49.68%、36.97%、13.35%。显然, 2 号反应堆由低能中子引发的裂变反应占比要高于 1 号反应堆。由以上分析可知, 两种金属氢化物慢化剂在相同条件下对 TOPAZ-II 反应堆功率分布的影响差别取决于金属原子对热中子的吸收能力。

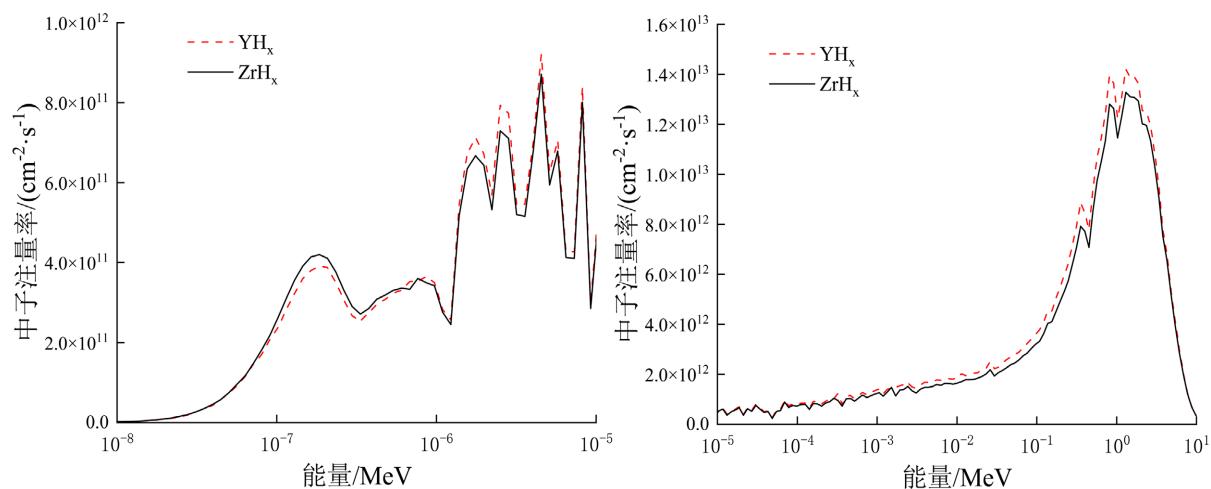


Figure 14. Fuel spectra of reactor core

图 14. 堆芯燃料能谱

## 5. 总结

文章使用 MCNP 模拟程序建立了 TOPAZ-II 反应堆模型, 计算了  $\text{ZrH}_x$  和  $\text{YH}_x$  两种金属氢化物作为慢化剂时反应堆的功率分布, 探究了慢化剂的氢含量、温度和氢损失三个方面对反应堆功率分布的影响, 对比了两种材料之间的差异。通过计算对比发现, 在改变慢化剂氢含量和温度条件时, TOPAZ-II 反应堆的功率不均匀系数主要受径向功率峰因子的影响, 其变化趋势与径向功率峰因子的变化趋势基本一致。通过分析不同慢化剂条件下的堆芯燃料中子能谱发现, TOPAZ-II 反应堆的径向功率峰因子与热中子群份额有关联, 低能热中子在中子群中所占的份额越高, 堆芯径向功率峰因子越小, 功率不均匀系数越小。即慢化剂的氢含量和温度参数通过影响堆芯内的低能热中子群分布, 进而影响堆芯径向功率峰因子和功率不均匀系数。氢化锆和氢化钇两种慢化剂材料对 TOPAZ-II 反应堆功率分布的影响也体现在两种金属原子对热中子的吸收能力上。通过两种材料的氢损失速率预测公式分析发现, 由于 TOPAZ-II 反应堆的慢化剂处于  $\text{CO}_2$  气体环境中, 表面生成的氧化膜使慢化剂的氢损失速率处于较低水平, 不会对反应堆功率分布和有效增殖系数造成显著影响。在 TOPAZ-II 反应堆中, 两种慢化剂材料呈正温度效应, 但相较于  $\text{ZrH}_x$ , 慢化剂  $\text{YH}_x$  的温度系数较低, 反应堆的有效增殖系数较高。

本文在对 TOPAZ-II 反应堆功率分布影响因素进行研究时, 只考虑了慢化剂材料参数的变化对功率分布的影响, 与反应堆实际工况相比具有一定的局限性。未来可围绕反应堆组件温度、冷却剂材料及温度变化等影响因素展开进一步研究。

## 参考文献

- [1] Voss, S.S. (1994) TOPAZ II System Description. Los Alamos National Lab.
- [2] Chapman, C.W., Ramic, K., Hu, X., *et al.* (2020) Thermal Neutron Scattering Evaluation of Yttrium Hydride (FY2020 Progress). Oak Ridge National Lab (ORNL).
- [3] Hu, X., Schappel, D., Silva, C.M. and Terrani, K.A. (2020) Fabrication of Yttrium Hydride for High-Temperature Moderator Application. *Journal of Nuclear Materials*, **539**, Article ID: 152335. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152335>
- [4] 谢仲生, 曹良志, 张少泓. 核反应堆物理分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2020: 86, 222.
- [5] El-Genk, M.S., Paramonov, D.V., Xue, H., Oglolbin, B.G. and Shumov, D.P. (1995) A Topaz-II Bimodal Design Assessment Study and System Analysis. *AIP Conference Proceedings*, **324**, 827-836. <https://doi.org/10.1063/1.47122>
- [6] El-Genk, M.S. and Xue, H. (1992) Transient and Steady-State Analyses of an Electrically Heated Topaz-II Thermionic Fuel Element. *27th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, San Diego, 3-7 August 1992, SAE Technical Paper 929239. <https://doi.org/10.4271/929239>
- [7] 彭红花, 严睿, 朱贵凤, 等. MCNP5 在固态燃料熔盐堆功率分布计算的应用[J]. 强激光与粒子束, 2018, 30(1): 138-143.
- [8] Kulesza, J.A., Terry, R., *et al.* (2022) MCNP® Code Version 6.3.0 Theory & User Manual. LA-UR-22-30006, Los Alamos National Laboratory.
- [9] Snoj, L. and Ravnik, M. (2006) Calculation of Power Density with MCNP in TRIGA Reactor. *International Conference Nuclear Energy for New Europe*, Portorož, 18-21 September 2006, 109.1-109.6.
- [10] 王武, 夏虹, 李伟, 等. 基于 MCNP 的反应堆建模方法[J]. 应用科技, 2021, 48(4): 92-97.
- [11] 解家春, 赵守智, 贾宝山, 等. TOPAZ-II 反应堆慢化剂温度效应分析[J]. 原子能科学技术, 2011, 45(1): 48-53.
- [12] Mehta, V.K., Cooper, M.W.D., Wilkerson, R.B., Kotlyar, D., Rao, D.V. and Vogel, S.C. (2021) Evaluation of Yttrium Hydride ( $\delta$ -Yh<sub>2-x</sub>) Thermal Neutron Scattering Laws and Thermophysical Properties. *Nuclear Science and Engineering*, **195**, 563-577. <https://doi.org/10.1080/00295639.2020.1851632>
- [13] Qi, S., Ma, Z., Yan, G., Wang, Z. and Wang, L. (2021) Hydrogen Permeation Rate of Coating Zirconium Hydride Moderator—A Prediction Model. *International Journal of Energy Research*, **45**, 14710-14719. <https://doi.org/10.1002/er.6748>
- [14] 王智辉. 铀锆合金氢化物成分设计与吸氢性能研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2021.
- [15] 时运达, 孙征, 杨睿, 等. TOPAZ-II 反应堆慢化剂正温度效应研究[J]. 原子能科学技术, 2023, 57(3): 583-590.
- [16] 刘黎丽. SPACE-R 反应堆径向功率分布优化方案研究[J]. 科技创新导报, 2015(35): 176-178.
- [17] 孙征. TOPAZ-II 的三维中子注量率和功率密度分布计算[C]//第十一届反应堆数值计算和粒子输运学术会议暨 2006 年反应堆物理会议论文集. 2006: 308-315.