

文章编号：0258-0926(2015)01-0173-04; doi:10.13832/j.jnpe.2015.01.0173

不同固体慢化剂对“花”型快谱超临界水冷堆中子学性能的影响分析

于 涛¹, 李志峰¹, 彭红花², 谢金森¹

1. 南华大学核科学技术学院, 湖南衡阳, 421001; 2. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海, 201800

摘要: 不同于一般采用氢化锆作固体慢化剂的反应堆, 快谱超临界水冷堆工作在严酷的高温高压条件下, 高氢平衡压以及停开堆造成的热冲击都会导致氢化锆中氢的大量损失, 事故工况下甚至会引发氢的无控释放。本文通过分析对比多种材料的有效增殖系数、转换比、慢化剂温度反应性、燃料 Doppler 反应性、空泡反应性等参数的变化, 发现氧化铍、碳化硅是中子学综合性能相对较好的“花”型快谱超临界水冷堆固体慢化剂材料, 并且对燃料 Doppler 反应性系数影响不大。

关键词: 快谱超临界水冷堆; 氢化锆; 固体慢化剂; 燃料 Doppler 系数

中图分类号: TL329 **文献标志码**: A

Study on Neutronics Performance of Flower Shape Advanced Supercritical Water Cooled Fast Reactor with Different Solid Moderators

Yu Tao¹, Li Zhifeng¹, Peng Honghua², Xie Jinsen¹

1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan, 421001, China

2. Shanghai Institute of Applied Physics, Shanghai, 201800, China

Abstract: The supercritical water cooled fast reactors worked at such harsh condition with high temperature and high pressure, huge hydrogen balance pressure and thermal shock can result in a great loss of hydrogen. The released hydrogen would be out of control under accident situations. K_{eff} , conversion ratio, moderator temperature effect, Doppler effect and void effect of different material such as $\text{ZrH}_{1.7}$, Be, BeO, C and SiC are discussed. BeO and SiC hold better integrated performance among these materials. Besides, moderators have less effect on the Doppler effect of fuel.

Key words: Supercritical water-cooled fast reactor, $\text{ZrH}_{1.7}$, Solid moderator, Doppler coefficient

0 前 言

在大型快中子增殖堆空泡反应性系数的研究中, Oka 与 Mori 等人^[1-2]分别报道了使用固体慢化剂氢化锆 ($\text{ZrH}_{1.7}$) 获得了负的空泡反应性的方案。但是, 使用氢化锆作为固体慢化剂的快谱超临界水冷堆工作在严酷的高温高压条件下, 巨大的氢平衡压会造成氢的大量损失, 影响固体慢化

剂的中子慢化效率^[3], 大大地增加了实现负的空泡反应性的难度。另外, 增殖组件内的固体慢化剂温度往往高于其使用限值 ($550\text{ }^{\circ}\text{C}$)^[4], 正常工况释氢难以避免; 一旦发生事故, 超高温以及巨大的温度梯度, 使得氢化锆慢化剂即便在具备合适的涂层条件下也无法阻止氢的大量渗透, 而导致更为严重的事故后果。因此, 本研究尝试使用

收稿日期: 2014-01-13; 修回日期: 2014-04-25

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助 (91126018/A050504); 湖南省教育厅项目 (12JC0333)

作者简介: 于 涛 (1972—), 男, 教授, 现从事反应堆物理和中子治疗技术研究

其他慢化材料替代氢化锆作为快谱超临界水冷堆中的固体慢化剂。

1 “花”型快谱超临界水冷堆蒙特卡罗粒子输运计算模型

M. Mori 等人对“辐射”型、“散射”型及“花”型 3 种堆型进行了比较分析,得出“花”型非均匀布置堆芯以其较大的功率输出和绝对值更大的空泡负反应性成为这 3 种堆型中最合理的快谱超临界水冷堆型^[2]。

氢化锆因其具有很强的中子慢化能力,常被用作超临界水冷堆的固体慢化材料,典型的结构布置是使用固体慢化剂 $ZrH_{1.7}$ 包裹增殖组件或者在增殖组件内嵌 $ZrH_{1.7}$ (见图 1),以期获得负的空泡反应性。本文以改进后的“花”型堆芯为基础,分析固体慢化剂材料对增殖系数、转换比、空泡反应性、固体慢化剂温度反应性系数、燃料 Doppler 反应性系数等物理参数的影响,以期获得综合性能最为理想的固体慢化剂。

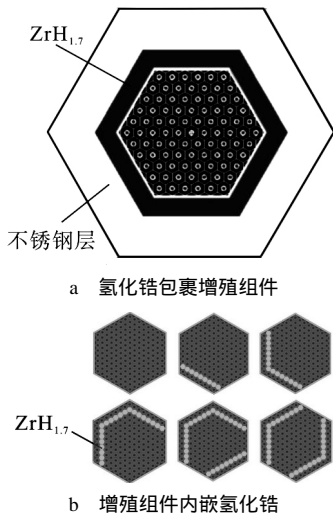


图 1 固体慢化剂氢化锆的 2 种布置方式
Fig. 1 Two Arrangement Ways of $ZrH_{1.7}$

为了准确计算温度反应性系数等参数,使用程序 MCNP5 为中子输运计算工具,并调用快谱超临界水冷堆多温度点连续能量截面库 ASCFR1.0/MC^[5]。

堆芯采用驱动区(点火区)组件和增殖区组件分区布置的方式(图 2),共分为 9 区。第 1、3、5、7 区为点火区;第 2、4、6、8 为内嵌有固体慢化剂的增殖区;第 9 区为水反射层。反应堆

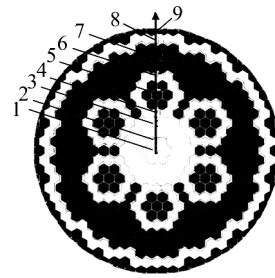


图 2 “花”型快谱堆芯点火与增殖组件分区布置示意图
Fig. 2 Arrangement of Seed and Blanket Assemblies in Core

运行压力为 25 MPa,热功率约为 3800 MW,冷却剂入口、出口温度分别为 280 和 523,堆芯活性区高度为 3.8 m,等效直径为 3.6 m。

点火与增殖组件参数列于表 1。增殖组件采用图 1b 所示的内嵌固体慢化剂的方式,点火与增殖组件结构如图 3 所示。

表 1 组件参数
Table 1 Parameter of Assembly

点火组件	参数	增殖组件	参数
燃料成分	MOX	水棒直径/mm	4.00
密度/ $g \cdot cm^{-3}$	10.5	栅距比	2.875
燃料棒直径/mm	8.9	燃料棒包壳材料	Inconel718
包壳厚度/mm	0.54	内包壳厚度/mm	0.26
包壳材料	Inconel718	外包壳厚度/mm	0.63
栅距比	1.15	增殖材料	0.3 wt % ^{235}U
氢气层间距/mm	0.02	密度/ $g \cdot cm^{-3}$	10.0
单个点火组件内燃料棒数量	169	组件包壳材料	SS304
组件包壳材料	Inconel718	包壳厚度/mm	1
包壳厚度/mm	1	组件个数	150
组件个数	270	—	—

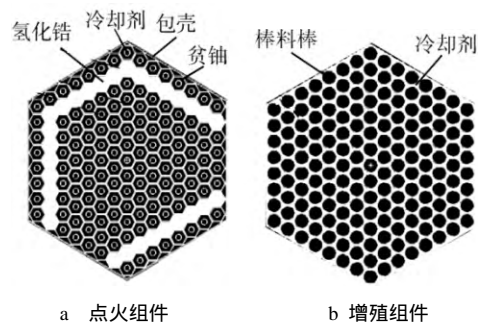


图 3 “花”型快谱堆芯点火组件与增殖组件剖面图
Fig. 3 Surfaces of Seed Assembly and Blanket Assembly

2 计算结果

2.1 增殖系数

在有效增殖系数 (k_{eff}) 的计算过程中,所有

核素都调用连续能量截面数据库 ASCFR1.0/MC 中常温 (293.16K) 下的截面库, 计算过程中只改变固体慢化剂的种类, 计算条件不变。控制棒全在堆外时不同固体慢化剂对应的 k_{eff} 列于表 2。由表 2 可知, Be、BeO、C、SiC 作为固体慢化剂时全堆的 k_{eff} 非常接近且均大于以 $\text{ZrH}_{1.7}$ 作为固体慢化剂时的 k_{eff} ; 这是 $\text{ZrH}_{1.7}$ 的热中子俘获截面大于其他几种固体慢化剂的缘故。

2.2 转换比

在铀-钚循环的快谱超临界水系统中, 转换比 (CR) 通常定义为每消耗一个易裂变材料原子所产生的新易裂变材料的原子数。快中子能够将 ^{238}U 通过一个 (n, γ) 反应和 2 个 β 反应转换为可裂变材料 ^{239}Pu 。寿期初不同慢化剂对应的转换比见表 2。可以看出: 使用不同慢化剂的快谱系统都获得了比较大的转换比; 氢化锆对应的转换比小于其他几种固体慢化剂对应的转换比, 原因是含氢慢化剂软化能谱程度最大, 从而导致了较低的转换比。

虽然文献[6]的研究表明: 使用氢化锆作为固体慢化剂情况下, 通过改变“花”型快谱超临界水堆中点火与增殖组件的栅径比、优化 MOX 燃料设计、不同富集度燃料分区分层布置亦可获得较大的增殖比^[6]; 但不排除使用其他固体慢化剂连同适当的堆芯调整方法, 也有可能实现燃料的增殖。

2.3 固体慢化剂温度反应性

在固体慢化剂温度效应的计算中, 固体慢化剂材料分别调用 ASCFR1.0/MC 中 293.16、1000 K 温度下的截面库, 其他材料温度都设为常温 (293.16 K), 且固定不变。因为正常运行时固体慢化剂均为固态, 计算其温度效应时不考虑密度变化, 只改变温度相关截面库以及相应的热化截面数据, 分别计算出 293.16、1000 K 温度下的有效增殖系数(假设氢化锆能在 1000 K 温度下保持其完整性)。设温度 293.16、1000 K 对应的有效增殖系数为 k_1 、 k_2 , 则该温度区间[293.16 K, 1000 K]的温度反应性系数 ∂_r^M 由式 (1) 得到:

$$\partial_r^M = \frac{k_2 - k_1}{k_2 k_1 (1000 - 293.16)} \quad (1)$$

在此温度区间的固体慢化剂温度反应性系数列于表 2。可以看出: $\text{ZrH}_{1.7}$ 由于“声子效应”^[7]的缘故, ∂_r^M 比其他几种固体慢化剂大, 其值虽为

正, 但仍远小于燃料负的 Doppler 反应性系数 (图 4)。

表 2 慢化剂及其对应的中子学参数
Table 2 Neutronics Parameter of Moderator

慢化剂材料	k_{eff}	转换比	$\partial_r^M / 10^{-7} \text{ }^{-1}$
$\text{ZrH}_{1.7}$	1.03054±0.00012	0.939	61.5
Be	1.04130±0.00011	0.977	-4.17
BeO	1.04235±0.00011	0.975	1.04
C	1.04446±0.00011	0.972	0.648
SiC	1.04531±0.00012	0.969	-1.30

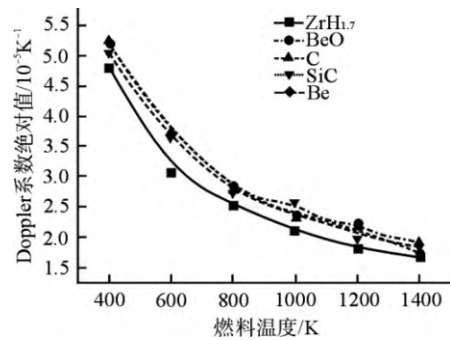


图 4 “花”型快谱堆芯燃料 Doppler 反应性系数绝对值随温度的变化曲线

Fig. 4 Absolute Value of Doppler Coefficient vs Different Temperatures

2.4 燃料 Doppler 反应性系数

在快中子核反应堆中, Doppler 效应是由于裂变和寄生吸收截面中许多紧密排列的高能共振的温度展宽引起的。在快谱超临界水冷堆燃料 Doppler 反应性系数的计算过程中, 只改变燃料所涉及核素的截面库。设温度 T_1 、 T_2 对应的有效增殖系数为 K_1 、 K_2 , 则该温度区间的温度反应性系数 ∂_r^F 由式 (2) 得出:

$$\partial_r^F = \frac{K_2 - K_1}{(K_2 \times K_1)(T_2 - T_1)} \quad (2)$$

计算结果表明, “花”型快谱超临界水冷堆具备较大的负 Doppler 效应, 达到了 -10^{-5} ^{-1} 数量级。将 Doppler 系数全部取相反数, 此时全为正值, 如图 4 所示。5 种固体慢化剂对应的堆芯燃料 Doppler 系数变化趋势一致, 当温度升高时, Doppler 效应所引起温度系数的绝对值趋于减小, Doppler 系数的绝对值随温度的变化曲线大致按 cT^{-1} 变化, c 为常数。这与理论预测相符^[8]。

2.5 堆芯空泡反应性

当冷却剂发生空泡时, 点火区的快裂变反应率与中子泄漏均增加, 如果将固体慢化剂布置在

中子泄漏方向, 泄漏快中子经过慢化后进入增殖区, 平均中子能量降低导致该区内 ^{238}U 的阈裂变反应率降低, 同时由于 ^{239}Pu 的俘获裂变比增大, 以上 2 种因素使得在空泡条件下的中子消失率增大, 因此实现了负的空泡反应性。由图 5 可知, 使用不同固体慢化剂材料时, 堆芯都获得了预期的负的空泡反应性。其中, $\text{ZrH}_{1.7}$ 作为固体慢化剂时引入的负反应性较少, 当空泡份额较大时增殖系数曲线上扬。因此可以认为改进“花”型快谱超临界水冷堆使用 $\text{ZrH}_{1.7}$ 作为固体慢化剂不如其他 4 种材料理想。

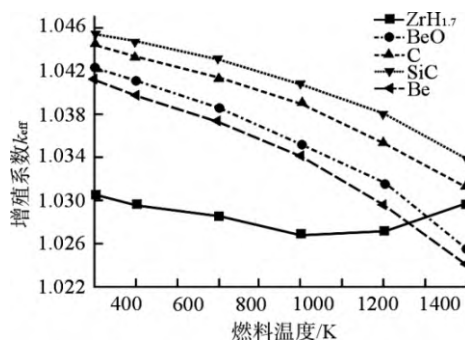


图 5 使用不同慢化剂材料时的堆芯空泡反应性

Fig. 5 Void Effect of the Core with Different Moderators

3 结论

通过分析使用 5 种不同慢化剂材料时, 改进“花”型快谱超临界水冷堆物理参数的变化情况, 发现铍、氧化铍、石墨、碳化硅等材料相对于氢化锆对应的堆芯有更大的增殖系数、更高的增殖比、更小的慢化剂温度系数、更负的空泡反应性。最重要的是: 其他 4 种材料都不存在氢化锆释氢的问题。氧化铍相比于金属铍, 其中子慢化能力和热中子吸收能力相当, 但氧化铍的熔点更高(高达 2550 °C), 化学性质更稳定, 且耐热性能与导热性能良好; 相比于石墨, 碳化硅作为超临界水

冷堆包壳候选材料之一, 其化学性质稳定、导热系数高、热膨胀系数小, 避免了类似于氢化锆在热冲击中会出现裂纹的现象。因此, 氧化铍和碳化硅相对于其他 3 种材料更适合作为“花”型快谱超临界水冷堆的固体慢化剂材料。

在燃料 Doppler 反应性系数的分析中, 发现“花”型快谱超临界水冷堆具备较大的负 Doppler 效应, 达到了 -10^{-5} ^{-1} 的数量级, 它的负值对制止功率的快速漂移起着重要作用。固体慢化剂材料对 Doppler 系数变化规律影响较小, 当温度升高时, Doppler 效应所引起温度系数的绝对值趋于减小, Doppler 系数的绝对值大致按 cT^{-1} 变化。

参考文献:

- [1] Jaewoon Yoo, Yuki Ishiwatari, Yoshiaki Oka, et al. Conceptual design of compact supercritical water-cooled fast reactor with thermal hydraulic coupling[J]. Annals of Nuclear Energy, 2006, 33:945-956.
- [2] Magnus Mori, Werner Maschek, Andrei Rineiski. Heterogeneous cores for improved safety performance A case study: The supercritical water fast reactor[J]. Nuclear Engineering and Design, 2006, 236:1573-1579.
- [3] 张华锋, 杨启法, 王振东, 等. 氢化锆高温抗氢渗透涂层研究[J]. 原子能科学技术, 2005, 39: 83-87.
- [4] 尹昌耕. 高效慢化材料氢化锆的研制[J]. 中国核科技报告, 2005, 1: 98-105.
- [5] 李志峰, 于涛, 谢金森. ASCFR1.0/MC 的研制及其在 ASCFR 固体慢化剂温度效应计算中的初步应用[J]. 核动力工程, 2013, 34(6):18-23.
- [6] 彭红花, 于涛, 谢金森, 等. 改进 Flower 型超临界水冷快堆初步增殖研究[J]. 核技术, 2012, 35(4): 309-314.
- [7] 江新标, 陈伟, 陈达, 等. 氢化锆中氢的散射律和散射矩阵研究[J]. 原子能科学技术, 1999, 33(2):156-161.
- [8] 黄祖洽. 核反应堆动力学基础[M]. 第二版北京: 北京大学出版社, 2007.

(责任编辑: 王中强)