

文章编号:1673-0062(2011)03-001-04

包壳材料对 SCMR 堆芯物理参数的影响研究

单冬勇¹, 于涛^{1*}, 谢金森¹, 钱金栋¹, 李庆², 夏榜样²

(1. 南华大学核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 640041)

摘要:建立混合能谱超临界水冷堆(SCMR: Super-Critical Water-cooled Mixed-Reactor)堆芯物理模型;计算了不同包壳材料时,堆芯有效增殖系数、剩余反应性、缓发中子有效份额和空泡反应性等堆芯参数,并对计算结果进行了分析比较.结果表明:从反应堆物理设计的角度考虑 T-91 钢作为包壳材料,具有较好的物理响应特性,为混合能谱超临界水冷堆的设计提供了理论基础.

关键词:混合能谱超临界水冷堆;包壳材料;堆芯物理参数

中图分类号:TL341 **文献标识码:**A

A Study of the Impact of Cladding Materials on SCMR Neutronics Parameters

SHAN Dong-yong¹, YU Tao^{1*}, XIE Jin-sen¹, QIAN Jin-dong¹, LI Qing², XIA Bang-yang²

(1. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu, Sichuan 640041, China)

Abstract: Core physics model of SCMR (Super-Critical Water-cooled Mixed-Reactor) is constructed in this paper. The SCMR neutronics parameters, such as the effective multiplication factor, effective delayed neutron fraction and void reactivity, are calculated for different cladding materials by MCNP code. The results show that, when the cladding material is T-91 steel, the neutronics parameters of the SCMR are more reasonable. And it provides a theoretical basis for the SCMR design.

key words: SCMR; cladding material; neutronics parameters

超临界水堆作为第四代新型核能系统中唯一的先进水冷堆,具有在经济性、工程技术延续性以及可持续性上的诸多综合优势,是大功率压水堆技术发

展的必然趋势;是国家核电技术路线进一步发展的自然选择;也是清洁能源科学和技术领域的基础研究在国际竞争与合作中重要的前沿和热点之一^[1].

收稿日期:2011-08-30

基金项目:国家级重点实验室基金资助项目

作者简介:单冬勇(1985-),男,湖南衡阳人,南华大学核科学技术学院硕士研究生.主要研究方向:核反应堆.*通讯作者.

要实现第四代核电厂的成功开发和建造,首先要考虑的问题是反应堆堆芯及堆外结构材料的性能和可靠性. 对于第四代反应堆中应用的结构材料,应经受比当前核电厂更高的温度和中子剂量,还要面对更苛刻的腐蚀环境. 目前的候选结构

材料包括了各种氧化物弥散型强化钢、铁素体/马氏体钢、奥氏体不锈钢、镍基合金、陶瓷材料等^[2]. 几种候选包壳材料在物理性能方面都有各自的优缺点,现把这几种材料的优缺点列于表 1.

表 1 候选包壳材料物理性能的比较
Table 1 Comparison of the packet material

材料种类	所属类型	优点	缺点
Ni-718	镍基合金	镍基合金一直被用于高温环境,具有良好的抗蠕变断裂性能和高温强度	受到中子辐照时会产生辐照脆化、肿胀和相的不稳定性
T-91 ^[3]	铁素体/马氏体钢	中子辐照后活性会迅速降低,的抗辐照空洞生长性能和很好的抗高温蠕变变形的能力	长时高温蠕变断裂性能以及在 400℃ 左右的辐照脆化问题
316-LN	奥氏体不锈钢	奥氏体不锈钢的高温蠕变性能好,同时还具有较好的耐腐蚀抗氧化能力.	受到中等剂量的中子辐照时就容易出现较大的空洞肿胀,热导率较低
12YWT	氧化物弥散型强化钢	较好的高温性能、抗辐照肿胀性能和抗辐照脆化的性能.	暂无
SiC	非金属材料	不确定	不确定

本文把这几种候选材料作为混合能谱超临界水冷堆 (Super-Critical Water-cooled Mixed-Reactor, 简称 SCMR, 下同) 堆芯的包壳材料,从反应堆物理的角度,研究它们对 SCMR 堆芯物理参数的影响,希望能为今后 SCMR 的工程应用提供有益的基础.

1 SCMR 堆芯物理模型

本文以文献[4]中的参数为基础,构建一个 SCMR 堆芯物理模型,如图 1 所示.

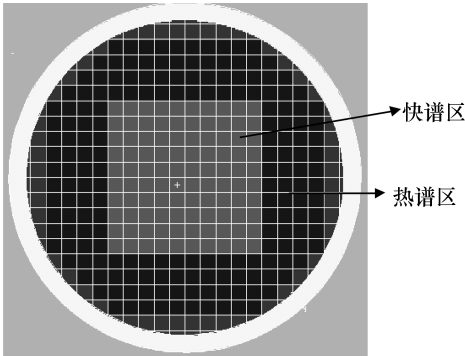


图 1 SCMR 堆芯燃料组件布置图
Fig.1 Scheme of the SCMR core

内区为快谱区,有 100 个组件,主要是为了增殖;外区为热谱区,有 184 个组件,主要是为了产能;最外层用 20 cm 厚的水反射层包围.

图 2 为快、热区燃料组件. 热谱区燃料棒共分

三层,分别是富集度为 5%、6%、7% 的 UO_2 燃料;热谱区从上到下密度分别设为 0.7、0.45、0.2 g/cm^3 ,如图 2a 所示. 快谱区燃料棒共分九层,裂变层和再生层交替布置,其中增殖层是富集度为 0.7% 的 UO_2 ;裂变层是 MOX 燃料,其中 PuO_2 的质量分数为 15%, UO_2 的富集度为 5%、质量分数为 85%;快谱区从下到上密度分别设为 0.2、0.15、0.1 g/cm^3 ,如图 2b 所示.

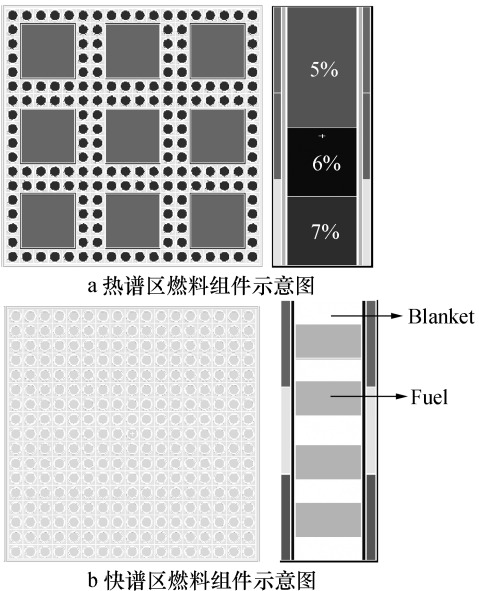


图 2 混合能谱超临界水堆慢谱、快谱燃料组件示意图

Fig.2 Fuel assembly structures of the thermal zone and the fast zone

2 结果与分析

本文着重计算了不同包壳材料对剩余反应性、缓发中子份额和空泡反应性系数等对 SCMR 等堆芯物理参数的影响,并开展比较研究.

2.1 不同包壳材料对剩余反应性的影响

剩余反应性是时间和温度的函数,一般初始剩余反应性越大,堆芯寿期越长,发出同等能量所需的核燃料数量越少.选用的包壳材料应具有较小的中子吸收截面,使堆芯具有较大的初始剩余反应性.

如图 2a 所示,热谱区组件是 18 × 18 的布置,有 9 个慢化剂水棒,180 根燃料棒;如图 2b 所示,快谱区燃料组件为 17 × 17 的布置,共 289 根燃料棒.在这个堆芯设计中,没有添加任何控制物质,通过 MCNP 程序计算了这几种候选包壳材料在 SCMR 中作包壳时,堆芯的有效增殖系数,再由反应性公式:

$$\rho = \frac{K_{\text{eff}} - 1}{K_{\text{eff}}} \tag{1}$$

计算出它们的初始剩余反应性 ρ_{ex} ,如表 2 所示.从表 2 可以看出,SiC 作为包壳材料,堆芯的初始剩余反应性是最大的,T-91 钢次之,12YWT 钢作包壳材料的初始剩余反应性最小.

表 2 剩余反应性的比较^[5]

Table 2 Comparison of excess reactivity			
材料种类	所属类型	有效增殖系数	初始剩余反应性/pcm
Ni-718	镍基合金	1.150 48	13 080
T-91	铁素体/马氏体钢	1.223 45	18 264
316-LN	奥氏体不锈钢	1.204 91	17 006
12YWT	氧化物弥散型强化钢	1.103 81	9 405
SiC	非金属材料	1.378 29	27 446

2.2 不同包壳材料对缓发中子份额的影响

缓发中子占总裂变中子的份额很小,但对反应堆的可控性至关重要.一般来说缓发中子份额越大,核反应堆越容易控制.

本文通过 MCNP 程序的计算,算出不同包壳材料在有缓发中子时的有效增殖系数 K_{eff} ,并设为 K_{yes} ;而同样的情况,无缓发中子时的 K_{eff} ,设为 K_{no} .

由公式(2)计算出缓发中子有效份额^[6] β_{eff} ,如表 3 所示.

$$\beta_{\text{eff}} = \frac{K_{\text{yes}} - K_{\text{no}}}{K_{\text{yes}} K_{\text{no}}} \tag{2}$$

(说明: K_{yes} 表示有缓发中子的有效增殖系数, K_{no} 表示没有缓发中子的有效增殖系数.)

从表 3 可以看出 T-91 钢作为包壳材料,堆芯的缓发中子有效份额是最大的,其次是 316-LN 钢,SiC 的最小.

表 3 缓发中子份额的比较

Table 3 Comparison of delayed neutron fraction				
材料种类	所属类型	K_{yes}	K_{no}	缓发中子份额/%
Ni-718	镍基合金	1.150 48	1.143 15	0.557
T-91	铁素体/马氏体钢	1.223 45	1.214 53	0.600
316-LN	奥氏体不锈钢	1.204 91	1.196 40	0.590
SiC	非金属材料	1.378 29	1.369 10	0.487

2.3 不同包壳材料对空泡反应性系数的影响

反应性变化的负反馈效应,能使核反应堆具有内在的稳定性.对于超临界水冷堆而言,空泡反应性系数是堆芯设计的一个非常重要参数,一般来说,空泡反应性系数越负,堆芯更安全.本文计算了堆芯在不同空泡份额下的反应性的变化,公式如下:

$$\Delta\rho = \frac{k'_{\text{eff}} - 1}{k'_{\text{eff}}} - \frac{k^0_{\text{eff}} - 1}{k^0_{\text{eff}}} \tag{3}$$

其中, k'_{eff} 与 k^0_{eff} 分别为不同空泡份额时与未发生空泡时的有效增殖系数.

从图 3 可以看出,Ni-718、T-91 钢、316-LN 钢都具有负的空泡反应性.相对来说,T-91 钢具有更负的空泡反应性.并且从经济性方面考虑,T-91 钢是这三种材料中最便宜的.所以经综合考虑,选择 T-91 钢做包壳材料.

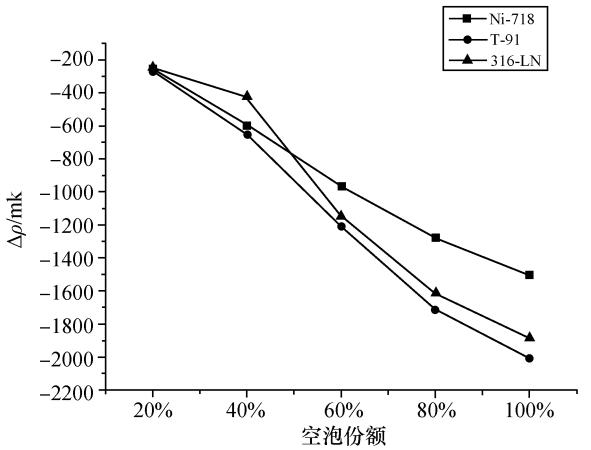


图 3 空泡反应性的比较

Fig.3 Comparison of void reactivity

3 结 论

包壳材料的选择对于 SCMR 堆芯物理参数有较大影响,本文针对几种 SCMR 包壳候选材料开展物理参数影响研究,结果表明 T-91 钢作为包壳材料能使堆芯物理参数合理,且在材料制造和成本方面,都有很大的优势.

参考文献:

- [1] 陆道纲,彭常宏.超临界水冷堆述评[J].原子能科学与技术,2009,43(8):743-749.
- [2] Murty K L,Charit I.第IV代核反应堆的结构材料:挑

战与机遇[J].国外核动力,2009(3):26-32.

- [3] 胡加学,刘国权,胡本芙,等.一种 SCWR 包壳材料管用 9% ~ 12% Cr 低活性 F/M 组织及析出相研究[J].材料研究学报,2010,24(3):259-265.
- [4] 程旭,刘晓晶.混合谱超临界水冷堆堆芯设计[J].核科学与工程,2009,29(1):43-49.
- [5] 余纲林,王侃.小型长寿命核能系统燃料物理性能的研究[J].核动力工程,2007,28(4):5-8.
- [6] Jonah S A,Liaw J R,Matos J E. Monte Carlo simulation of core physics parameters of the Nigeria Research Reactor-1 (NIRR-1)[J]. Annals of Nuclear Energy,2007,34(12):953-957.