

超临界水混合堆快谱区组件物理-热工性能分析

严 勇, 刘晓晶, 程 旭

(上海交通大学 核科学与工程学院, 上海 200240)

摘要:提出超临界水混合堆快谱区多层燃料组件设计方案。用 MCNP 与 STAFAS 程序对多层燃料组件进行初步的中子物理与热工水力性能分析,同时对组件结构参数(栅距与棒径比 P/D)进行敏感性研究。结果表明:快谱多层燃料组件设计不仅能够实现核燃料的增殖,且可获得较大的负冷却剂温度反应性系数与燃料温度反应性系数;减小 P/D 均可提高燃料的转换比,但较小 P/D 会导致核热点因子增大。适当调整组件裂变区燃料富集度可有效改善组件裂变区轴向功率不均匀性,降低核热点因子。

关键词:超临界水堆;快谱;多层燃料组件

中图分类号:TL311

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2009)06-0533-05

Neutron-Kinetics/Thermal-Hydraulics Performance Analysis of Fast Zone Assembly in Supercritical Water Reactor Mixed Core

YAN Yong, LIU Xiao-jing, CHENG Xu

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

Abstract: This paper proposes a multi-layer design of fuel assemblies for the fast zone of the SCWR (supercritical water reactor) mixed core. Both neutron-physical and thermal-hydraulic behavior of the multi-layer fuel assembly were analyzed using the MCNP code and the sub-channel analysis code STAFAS, respectively. Besides, the sensitivity analyses of some parameters such as pitch-to-diameter were investigated. The results show that with the proposed multi-layer structure, the fast zone of the mixed core has breeding capability and gets a negative void reactivity coefficient of coolant; a smaller pitch-to-diameter leads to a higher conversion ratio, however, it also results in a higher nuclear spots factor. It is possible to adjust Pu enrichment for improving axial power uniformity effectively and decreasing nuclear spot factor in seed fuel assembly.

Key words: supercritical water reactor; fast spectrum; multi-layer fuel assembly

超临界水堆作为第4代先进核能反应堆之一,具有较高的热效率、较强的经济竞争性等优点,

逐渐引起国际上许多国家和地区的广泛兴趣。现有超临界水堆堆芯设计局限于单一热谱

设计或快谱设计^[1-2],而这两种堆芯设计方案存在各自的缺陷:热谱堆可利用低富集燃料,但燃料利用率较低,且堆内流道复杂,给流动传热带来了一系列问题;快谱堆组件结构相对简单,燃料利用率较高,功率密度较大,但由于堆内水装量少,在发生失水事故时,对安全系统提出更高的要求。为弥补两种堆芯的不足,提出一种融合热谱与快谱堆芯的新型临界水冷混合堆设计,能够有效解决现有堆芯设计存在的问题。

目前,混合堆快谱区组件还处于初步研究阶段。基于以往超临界水混合谱堆芯设计^[3],本工作提出混合堆堆芯快谱区多层燃料组件设计方案,通过轴向设置再生区与增殖区以改善快谱区燃料组件性能。

1 新型多层燃料组件设计

本工作研究的超临界水混合堆快谱区组件结构同热谱区组件一致,均采用四边形结构,组件由组件盒、燃料棒与冷却剂通道组成,燃料棒以17×17形式紧密地排列于组件盒中(图1)。组件燃料棒轴向分为等高度的9层,每层高0.5 m。组件轴向上再生区和裂变区交替布置,以提高易裂变材料转换比,同时获得负的冷却剂空泡反应性系数。具体设计参数列于表1。冷却剂从热谱区流出经混合直接流入快谱区,快谱区组件入口温度约为395℃,在拟临界点之上,大幅降低了水铀质量比,提高中子能谱的硬度。

考虑组件径向结构的对称性,本工作中取1/4组件进行分析,如图1所示。

2 组件结果分析

多层燃料组件各层水与燃料中重金属元素

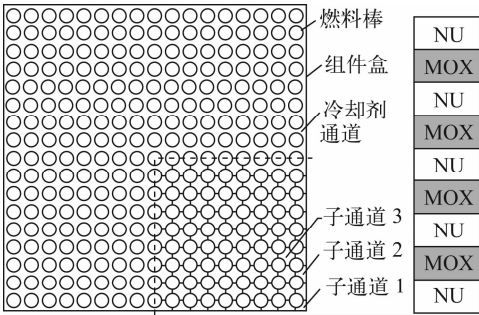


图1 快谱区多层燃料组件示意图

质量比(m_w/m_f)从组件下端至上端依次为0.016 2、0.019 9、0.012 2、0.016 8、0.009 4、0.014 9、0.008 4、0.013 6、0.007 6。以往的研究表明,超临界水快谱区堆芯燃料转换比取决于氢原子数与重金属原子数之比^[4],即水与重金属质量比。堆芯中水与重金属质量比值越小,燃料转换比就越大。在本工作设计中,组件采用较为紧密的燃料棒布置,水与重金属质量比平均值约为0.017 1。由于组件冷却剂密度沿轴向不断发生变化,随着组件高度的增加,裂变区与再生区的 m_w/m_f 值分别逐渐减小。

表1 组件设计参数

参数说明	设计值
冷却剂进口/出口温度(℃)	395/510
组件高度/边长(m)	4.5/161.2
燃料棒内/外径(mm)	7.0/8.0
栅距与棒径比(P/D)	1.15
组件壁厚度(mm)	2.0
裂变区燃料/富集度	MOX/20%
增殖区燃料	天然铀

图2、3示出各裂变层中子能谱和轴向功率分布。从图2、3可知,组件内高能中子份额远大于热中子份额,中子平均能量较高,有利于提高燃料的增殖性能。组件裂变区均具有较大的中子通量,而从裂变区泄露到再生区的部分中子被再生区燃料俘获,导致再生区中子通量相

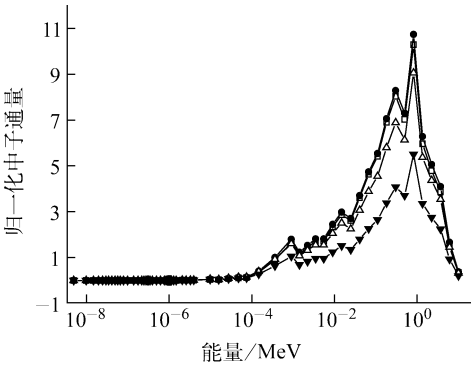


图2 裂变层内中子能谱分布

Fig.2 Neutron spectra in seed layers

▼——MOX-1;△——MOX-2;
●——MOX-3;□——MOX-4

Fig.1 Scheme of fast multi-layer fuel assembly

对较小,因此再生区功率较低。组件第3层裂变区中子通量比其他裂变区中子通量都要大(图2),燃料裂变产生热量较多,故该层裂变区存在较大的功率峰值。

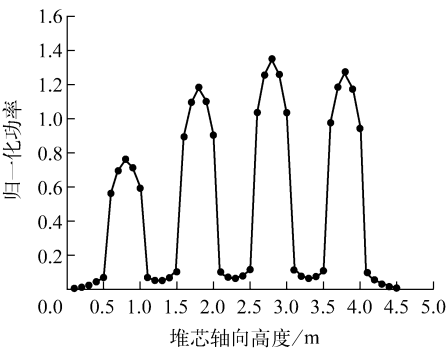


图3 组件轴向功率分布
Fig. 3 Axial power distribution of assembly

表2列出组件相关计算结果。组件中燃料的转换比超过1.0,达到了1.088。由于裂变区的高度较小(0.5 m),增强了裂变区中子的泄露,组件获得负的冷却剂空泡反应性系数;另一方面也减小了组件的无限介质增殖因数,无限介质增殖因数 K_{∞} 为1.067。为描述组件内功率分布的不均匀性,定义核热点因子为:

$$F_q^N = q_{\max}/q \tag{1}$$

式中: $q_{\max}$ 为混合堆快谱区最大热流密度,kW/m²; q 为裂变区平均热流密度,kW/m²。在本工作多层燃料组件中,核热点因子为1.352。

表2 组件相关计算结果				
Table 2 Results related to assembly				
K_{∞}	转换比	核热点因子	冷却剂空泡反馈系数/K ⁻¹	燃料温度反馈系数/K ⁻¹
1.067	1.089	1.352	-2.41×10 ⁻⁵	-0.74×10 ⁻⁵

基于以上的物理结果,本工作利用子通道分析程序 STAFAS^[5]对组件子通道稳态热工水力进行初步分析,进一步了解多层燃料组件的性能(各子通道位置如图1所示)。图4示出组件热工参数分布。组件在结构设计上能够有效平衡子通道不均匀性^[6],使各子通道间冷却剂焓值分布相近,故组件出口各通道冷却剂温度非均匀性较小,子通道间冷却剂最大温差约

为10℃。同时,多层组件轴向功率的多峰值分布,使燃料棒功率在轴向上得到一定的展平,大幅降低了燃料包壳的温度(图4b)。

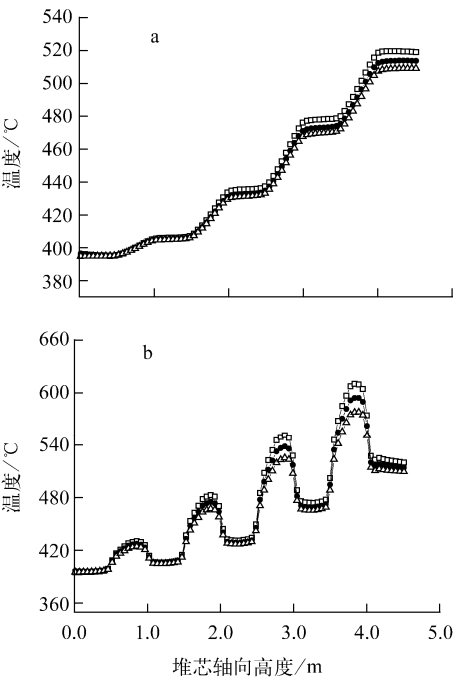


图4 子通道中的冷却剂温度(a)和燃料棒包壳温度(b)
Fig. 4 Coolant temperature (a) and cladding temperature (b) in sub-channels
□——子通道1;●——子通道2;△——子通道3

3 参数研究

3.1 栅距与棒径比的敏感性分析

在 P/D 敏感性分析中,组件棒径设定为8 mm。图5示出组件 P/D 对组件轴向功率分布影响。组件采用较大 P/D 或采用较小 P/D 均会增加裂变区功率分布的不均匀性,其中, P/D 为1.1时,组件轴向裂变区功率的不均匀性表现得更为强烈。而在 P/D 值为1.15时,组件各层裂变区功率差异相对较小。

表3列出组件在不同 P/D 下的计算结果。随着 P/D 不断增大,组件内冷却剂流量增大,组件内冷却剂与重金属燃料的质量比随之增大,从而使燃料的转化比降低,同时冷却剂对中子的吸收增强,引起组件的无限增殖因数减小。当 P/D 为1.2时,组件具有较小的核热点因子,而 P/D 为1.1时,由于轴向裂变区功率分布不均匀性增强,组件热核点因子最高。

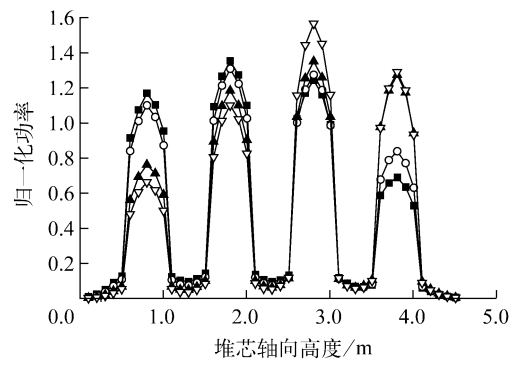


图 5 P/D 对轴向功率的影响

Fig. 5 Effect of P/D on axial power

■—— $P/D=1.27$;○—— $P/D=1.20$;
▲—— $P/D=1.15$;▽—— $P/D=1.10$

表 3 P/D 对计算结果的影响

Table 3 Effect of P/D on results

P/D	K_{∞}	转换比	核热点因子	10^5 冷却剂 空泡反馈 系数/ K^{-1}	10^5 燃料 温度反馈 系数/ K^{-1}
1.10	1.087	1.089	1.585	-3.20	-0.99
1.15	1.067	1.088	1.352	-2.41	-0.74
1.20	1.048	1.084	1.316	-3.71	-1.22
1.27	1.029	1.052	1.362	-2.91	-0.13

图 6 示出 P/D 对组件热通道(子通道 1)内冷却剂温度、包壳表面温度分布的影响。在组件 P/D 较大时,热通道内冷却剂质量流密度较小,引起组件子通道内冷却剂温度剧烈变化的同时,削弱了冷却剂与燃料棒包壳的热量传递,导致燃料棒包壳表面具有较高温峰值。随着 P/D 增大,热通道间冷却剂出口温差逐渐增加,最大温差为 125℃。由图 6b 可知, P/D 为 1.20 和 1.27 时,包壳表面温度均超过设计准则规定的 650℃ 极限值。

3.2 富集度对组件性能影响

为减小组件上端裂变区功率峰值,应降低组件核热点因子。本工作改变组件裂变区铀富集度,其前提是保持组件裂变区整体铀的富集度不变^[7],富集度改变后各裂变层铀富集度从下端至上端依次为 20.1%、19.95%、19.95%、20%。

图 7 示出裂变区铀富集度改变前后组件轴向功率分布。为降低第 3 层裂变区功率峰,同时提高第 1 层裂变区功率峰,新的轴向富集度增加了最底层裂变区铀的富集度,而减少

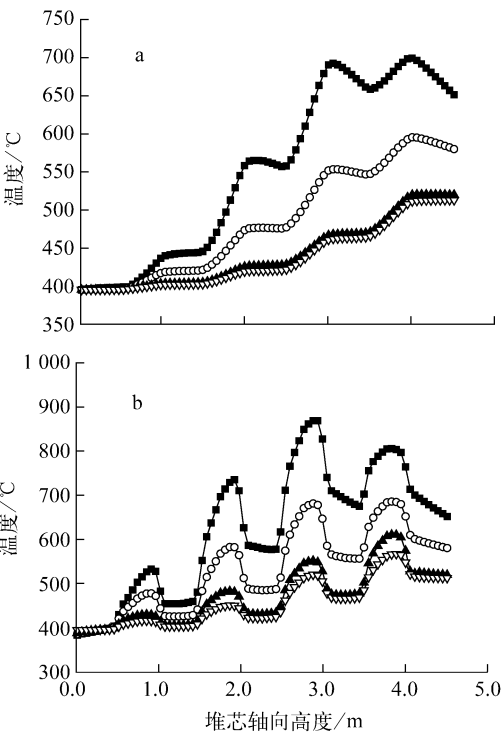


图 6 冷却剂(a)和包壳表面(b)温度分布

Fig. 6 Coolant temperature (a) and cladding temperature (b) distribution

■—— $P/D=1.27$;○—— $P/D=1.20$;
▲—— $P/D=1.15$;▽—— $P/D=1.10$

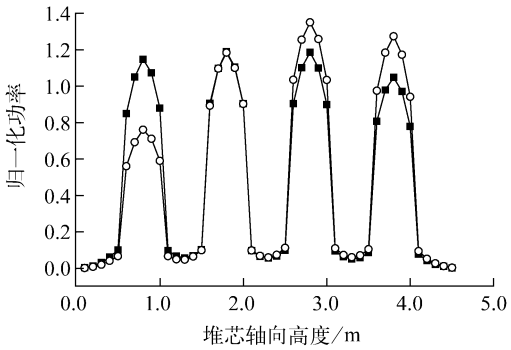


图 7 组件轴向功率分布

Fig. 7 Axial power distribution of assembly

■——新富集度;○——参考值

两中间段裂变层铀的富集度。从图 7 可知,富集度改变后的组件最底层功率增加,而第 3 层裂变区功率减小,使组件轴向裂变区功率峰降低,各裂变层功率分布不均匀性较小。

表 4 列出不同富集度组件的计算结果。新富集度组件核热点因子较参考模型减小了 10.95%,在组件整体裂变区富集度不变情况

下,不同富集度组件计算得到无限增殖因数基本相同,对燃料的增殖性能几乎没有影响。当堆芯内产生空泡时,由于底层裂变区钚的富集度增加,裂变产生的中子增多,因此,负的组件冷却剂空泡反馈系数有所减小。

表 4 富集度对计算结果的影响

Table 4 Effect of Pu enrichment on results

组件	K_{∞}	转换比	核热点因子	10^5 冷却剂空泡反馈系数/ K^{-1}	10^5 燃料温度反馈系数/ K^{-1}
参考模型	1.067	1.088	1.352	-2.41	-0.74
新富集度	1.066	1.084	1.204	-1.90	-1.12

图 8 示出热通道(子通道 1)内冷却剂、燃料棒包壳温度分布。对于新的富集度组件,在冷却剂流经组件各层裂变区时,由于各裂变区功率分布较为一致,冷却剂在每层裂变区段焔升基本相同。新富集度组件裂变区功率峰的减小,使燃料棒包壳表面最高温度比参考组件包壳最高温度降低了 30 ℃。

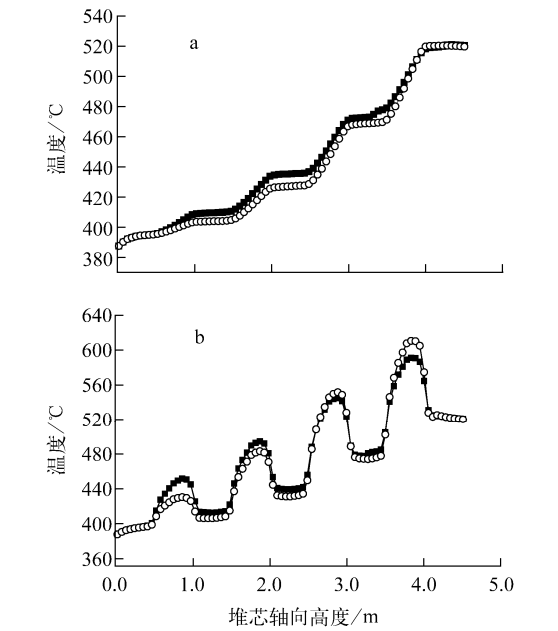


图 8 燃料富集度对冷却剂(a)、燃料棒包壳(b)温度的影响

Fig. 8 Effect of fuel enrichment on coolant temperature (a) and cladding temperature (b)

■——新富集度;○——参考值

4 小结

- 1) 燃料组件轴向裂变区与再生区交替布置,在实现了快谱区燃料的增殖的同时,能够保证较负的冷却剂空泡反应性系数与燃料温度反应性系数,且能够较好地保持包壳完整性。
 - 2) 增大组件棒径或减小 P/D 均有利于提高燃料的转换比。但棒径较大会削弱堆芯固有安全性,增大包壳表面温度峰值;较小 P/D 虽获得较好的固有安全性,但会导致核热点因子增大。初步研究表明:在 D 为 8 mm、 P/D 为 1.15 时可取得较好的中子物理与热工水力性能。
 - 3) 通过适当调整组件裂变区燃料富集度,可有效改善组件裂变区轴向功率不均匀性,降低组件核热点因子,且可减小燃料棒包壳表面温度峰值。
- 初步多层燃料组件性能分析为今后超临界水混合堆快谱区组件设计提供参考模型。

参考文献:

[1] OKA Y. Review of high temperature water and steam cooled reactor concepts[C]// Proc of SCR-2000. Tokyo: [s. n.], 2000.

[2] YOO J, ISHIWATARI Y, OKA Y, et al. Conceptual design of compact supercritical water-cooled fast reactor with thermal hydraulic coupling[J]. Ann Nucl Energy, 2006, 33: 945-956.

[3] CHENG X, LIU X J, YANG Y H. A mixed core for supercritical water-cooled reactors[J]. Nucl Eng Technol, 2008, 40(1): 1-10.

[4] ISHIWATARI Y, OKA Y, KOSHIZUKA S. Breeding ratio analysis of a fast reactor cooled by supercritical light water[J]. J Nucl Sci Technol, 2001, 38(9): 703-710.

[5] CHENG X, SCHULENBERG T, BITTER-MANN D. Design analysis of core assemblies for supercritical pressure conditions[J]. Nucl Eng Des, 2003, 23: 279-294.

[6] YOO J, OKA Y, ISHIWATARI Y, et al. Sub-channel analysis of supercritical light water-cooled fast reactor assembly[J]. Nucl Eng Des, 2006, 237: 1 096-1 105.

[7] MORI M, MASCHEK W. Heterogeneous cores for improved safety performance a case study: The supercritical water fast reactor[J]. Nucl Eng Des, 2006, 236: 1 573-1 579.