

双排棒组件超临界水堆堆芯方案设计

杨珏¹, 张勇¹, 赵传奇², 单建强², 王飞¹, 曹良志²

(1. 中科华核电技术研究院, 518026, 广东深圳; 2. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 结合国际上多种超临界水堆堆芯设计方案的优点, 提出了一种新的压力容器式低泄漏堆芯设计方案, 其特点是, 堆芯中采用了双排棒正方形闭式燃料组件和三区低泄漏换料. 双排棒燃料组件由两排燃料棒包围一个慢化剂水棒构成, 可以使得慢化均匀; 三区低泄漏换料可以大大延长堆芯寿期, 降低压力容器快中子注量. 通过堆芯三维物理热工耦合计算发现, 该方案寿期内的最大包壳温度(MCST)为 684 °C, 堆芯寿期为 300 个有效满功率天, 且功率分布平坦. 在此基础上, 对所有组件进行了更为保守的子通道热工水力计算, 得出 MCST 为 685.3 °C, 进一步表明所提堆芯设计方案在物理热工方面是可行的.

关键词: 超临界水堆; 双排棒组件; 低泄漏堆芯; 热工水力分析

中图分类号: TL421 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)09-0078-05

Concept Design of Supercritical Water Cooled Reactor Core with Double-Row-Rod Assemblies

YANG Jue¹, ZHANG Yong¹, ZHAO Chuanqi², SHAN Jianqiang², WANG Fei¹, CAO Liangzhi²

(1. China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen, Guangdong 518026, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new pressure-vessel type supercritical water cooled reactor (SCWR) core concept was proposed by combining merits of several SCWR core designs in the world. This core design employs a new type of closed assembly with double-row fuel rods in square geometry and a three-batch low-leakage refueling scheme. The assembly consists of two rows of fuel rods and a moderator rod, which causes the moderation more uniform. The three-batch low leakage refueling scheme obviously increases the cycle length and reduces the neutron fluence on the pressure vessel. Three-dimensional neutronics/thermohydraulics coupling calculation shows that the maximum cladding surface temperature (MCST) is 684 °C, the cycle life is 300 effective full power days and the power distribution is flat. Then the more conservative sub-channel analysis was performed for all fuel assemblies. The MCST was evaluated to be 685.3 °C, showing that the core design is feasible.

Keywords: supercritical water cooled reactor; double-row-rod assembly; low leakage reactor core; thermal-hydraulic analysis

超临界水冷反应堆(SCWR)是第四代核能系统国际论坛(GIF)推荐的 6 种四代堆中唯一的水冷堆, 它继承了沸水堆、压水堆和超临界火电的技术,

具有出口温度高、热效率高、系统简单等优势.

世界各核能发达国家和地区都对 SCWR 开展了大量的研发工作, 相继提出了多种 SCWR 组件和

收稿日期: 2012-02-28. 作者简介: 杨珏(1976—), 男, 博士, 高级工程师. 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2009AA050705).

网络出版时间: 2012-06-19

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.T.20120619.2223.002.html>

堆芯方案,例如日本东京大学的热中子和快中子谱堆芯方案 Super LWR^[1]和 SCFR^[2],欧盟的 HPLWR 方案^[3],韩国原子能研究院 KAERI 的采用氢化锆固体慢化剂燃料组件方案^[4],加拿大 AECL 的 CANDU-SCWR 方案^[5],刘晓晶等的混合谱堆芯方案^[6].

本文在研究这些 SCWR 方案的基础上,提出了一种新的压力容器式低泄漏 SCWR 堆芯方案,并进行了堆芯物理热工耦合计算分析和子通道热工水力计算分析.

1 双排棒组件和堆芯技术方案

1.1 燃料组件方案

由于 SCWR 运行在高温高压环境下,所以包壳材料选用了 316 不锈钢(高铬高镍奥氏体不锈钢).燃料棒外径 8 mm,包壳厚度 0.5 mm.燃料组件采用双排棒且为正方形闭式结构,如图 1 所示.每个组件入口处设置了不同尺寸的开口,以进行流量分配.组件中由水棒实现中子慢化.水棒为 3×3 排列,燃料棒在水棒周围呈双排正方形排列,每个组件包含 180 根燃料棒.控制棒导向管置于组件水棒之中,在运行过程中反应堆由 B₄C 控制棒控制反应性.组件中布置有钎棒,以展平组件径向功率分布.

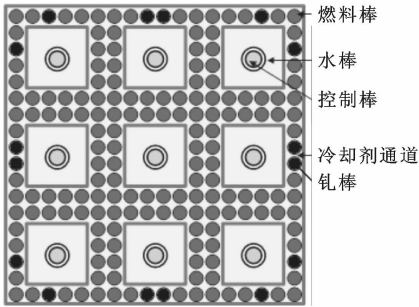


图 1 双排棒组件方案

组件盒壁和水棒壁材料均采用不锈钢,并为三明治夹层,夹层为蜂窝状结构,在蜂窝空隙中填充 ZrO₂ 绝热材料.壁盒转角处填充强化了肋片,以提高转角的支撑能力.

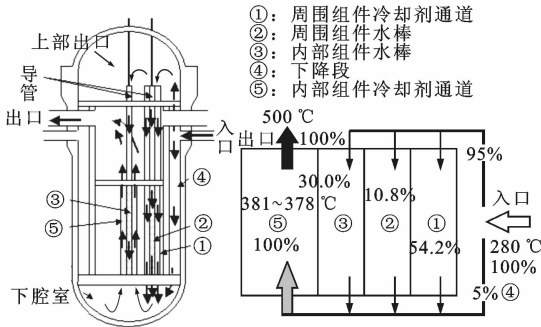
为使组件轴向功率分布更为均匀,燃料棒沿轴向分为 3 层,即从上到下富集度分别为 6.6%、7.0%、6.6%,每层的高度分别为 0.84、1.68、1.68 m.组件计算采用碰撞概率法.经过反复调节燃料棒尺寸、栅距、水棒和组件盒壁厚度等参数,最终确定的组件参数如表 1 所示.

表 1 双排棒燃料组件参数

名称	数值
燃料棒数	180
燃料棒栅距/mm	9.44
正方形水棒边长/mm	36.32
正方形组件边长/mm	175.36
水棒壁厚/mm	2
组件盒壁厚/mm	2
轴向燃料富集度/%	6.6,7.0,6.6
Gd ₂ O ₃ 质量分数/%	3
钎棒数	16

1.2 堆芯方案

堆芯冷却剂流动采用双流程方式,如图 2 所示.冷却剂从压力容器入口流入,其中一部分向下流动,经过堆芯围板与压力容器间的环形下降段流入下腔室,另一部分进入压力容器后向上流动,流入上腔室.所有组件水棒和堆芯周围组件的冷却剂经通道向下流入堆芯下腔室,所有流入下腔室的冷却剂经混合后自下而上流入堆芯中心区域的组件通道,并从组件上部出口流出,最终从压力容器出口流出.



百分比为冷却剂分配比
图 2 堆芯冷却剂流动方式

堆芯包括 241 个燃料组件,中间为冷却剂向上流组件,周围区域为冷却剂向下流组件,如图 3 所示.

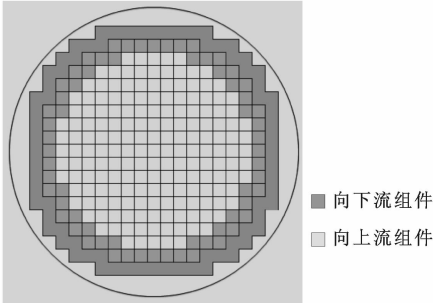


图 3 堆芯径向布置

堆芯方案的主要参数如表 2 所示,其中最大包壳外表面温度 MCST(T_{MCST})的设计限值为 700 ℃.为提高燃料利用率,堆芯采用低泄漏 3 批换料

方案,每 1 批中有 80 个组件,另有 1 个第 4 循环组件位于堆芯中心.

表 2 堆芯参数	
名称	值
热功率/MW	2 283
电功率/MW	1 000
热效率/%	43.8
工作压力/MPa	25
进/出口的平均温度/℃	280/500
组件数	241
组件中心距/cm	17.736
组件高度/cm	420
$T_{\text{MCST}}/^\circ\text{C}$	700

2 堆芯物理热工耦合计算分析

2.1 计算方法

超临界水沿轴向流过堆芯,密度变化剧烈,需要进行堆芯三维物理和热工水力耦合计算.堆芯物理计算基于 107 群的 JENDL 数据库,组件参数计算采用碰撞概率方法,堆芯计算利用三维细网差分扩散程序 CITATION,同时考虑冷却剂温度、慢化剂温度、功率及燃料的反馈.堆芯热工水力计算中首先对单通道分析方法与物理计算进行耦合,然后利用子通道对所有组件进行详细计算,最后给出 MCST 分析结果.

2.2 组件计算结果

图 4 为组件物理计算得到的无限增值因子 K_{inf} 随燃耗的变化.计算时水棒密度的平均值为 0.7 g/cm^3 ,冷却剂密度的平均值为 0.3 g/cm^3 ,U-235 富集度为 6.7% .从图 4 可以看出,组件的最大燃耗可达 $35\text{ GW}\cdot\text{d/t}$.

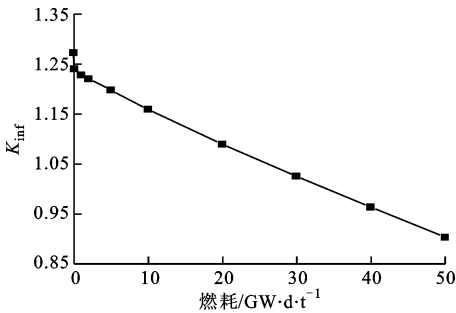


图 4 组件无限增值因子随燃耗的变化

2.3 堆芯计算结果

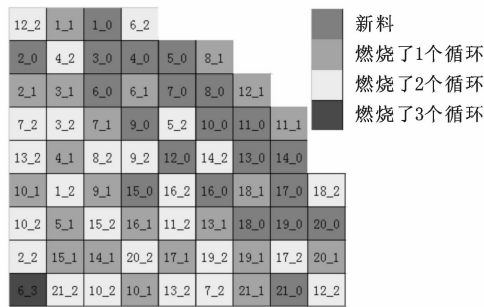
平衡循环堆芯计算结果如表 3 所示.从表 3 可

以看出,组件平均卸料燃耗为 $35.0\text{ GW}\cdot\text{d/t}$,最大卸料燃耗为 $42.0\text{ GW}\cdot\text{d/t}$,冷却剂空泡反应率为负.通过单通道热工水力计算分析,得到寿期内最大包壳温度为 $684\text{ }^\circ\text{C}$.

经过优化计算获得 1/4 堆芯的换料方案,如图 5 所示.具体换料方法:以燃料编号是 1 的组件为例,新料在 1-0 位置,燃烧了 1 个循环后换到 1-1 位置,燃烧了 2 个循环后 1-1 位置换到 1-2 位置,燃烧了 3 个循环后 1-2 位置燃料卸出堆芯.

表 3 堆芯计算结果		
K_{eff}	寿期初	1.041 5
	寿期末	1.007 4
$\eta/\%$	寿期初	-2.89
	寿期末	-3.74
$S_{\text{m}}/10^{-5}$	寿期初	1 509
	寿期末	4 698
$h/\text{GW}\cdot\text{d}\cdot\text{t}^{-1}$		350
$h_{\text{max}}/\text{GW}\cdot\text{d}\cdot\text{t}^{-1}$		42.0
$\rho/\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$		12.58
$\rho_{\text{max}}/\text{kW}\cdot\text{m}^{-1}$		32.5
$T_{\text{MCST}}/^\circ\text{C}$		684
$T_{\text{c-out}}/^\circ\text{C}$		500

注: K_{eff} 为有效增值因子; h 为组件平均卸料燃耗深度; h_{max} 为组件最大卸料燃耗深度; ρ 为燃料棒平均线功率密度; ρ_{max} 为燃料棒最大线功率密度; η 为堆芯冷却剂空泡反应率; $T_{\text{c-out}}$ 为冷却剂平均出口温度; S_{m} 为停堆裕量,即最大价值控制棒卡棒时反应堆达到的次临界度.



下划线左边数字表示燃料编号;下划线右边数字表示循环数

图 5 堆芯换料方案

受超临界水自身特点的影响,堆芯控制需采用无硼控制.在运行过程中,为了对堆芯进行反应性控制和径向功率峰展平,控制棒的需求量增多.图 6 为平衡循环寿期初 1/4 堆芯控制棒位置.在轴向上控制棒共有 49 步,图 6 中数字表示控制棒底端距离堆芯活性区底部的步数,如坐标为 $x=4,y=6(4,6)$ 位置的控制棒步数为 12.堆芯整个寿期控制棒方案如表 4 所示.

表 4 堆芯控制棒方案

x,y	控制棒步数										
	$D_{\text{EFPD}}=0$	$D_{\text{EFPD}}=2$	$D_{\text{EFPD}}=5$	$D_{\text{EFPD}}=30$	$D_{\text{EFPD}}=70$	$D_{\text{EFPD}}=110$	$D_{\text{EFPD}}=150$	$D_{\text{EFPD}}=190$	$D_{\text{EFPD}}=230$	$D_{\text{EFPD}}=270$	$D_{\text{EFPD}}=300$
2, 9	29	29	29	29	31	33	35	39	41	43	45
1, 8	29	29	29	29	31	33	35	39	41	43	45
3, 7	29	29	29	29	31	33	35	39	41	43	45
5, 7	25	27	27	29	31	35	37	39	41	43	45
3, 5	25	27	27	29	31	35	37	39	41	43	45
7, 7	31	31	31	31	33	35	37	39	41	43	45
3, 3	31	31	31	31	33	35	37	39	41	43	45
4, 6	33	33	33	35	37	39	41	41	41	41	41
1, 6	31	31	31	31	33	35	37	39	41	43	43
4, 9	31	31	31	31	33	35	37	39	41	43	43

注: D_{EFPD} 表示有效满功率天数.

堆芯径向最大功率峰因子为 1.34,轴向最大功率峰因子为 1.618,均出现在寿期初,如图 7、图 8 所示.从图中可以看出,径向功率分布比较平缓,轴向功率峰值略大,寿期初该峰值位于组件底部,在循环过程中会逐步上移,寿期末该峰值位于组件顶部.

堆芯冷却剂出口温度最大值为 530℃,出现在寿期初,如图 9 所示.堆芯周围区域冷却剂向下流组件(见图 3)温度较低,向上流组件温度较高.

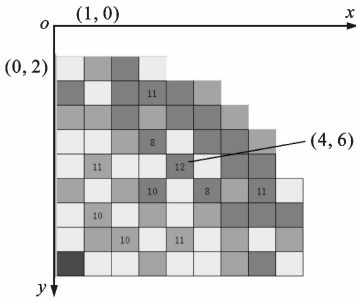


图 6 平衡循环寿期初控制棒位置

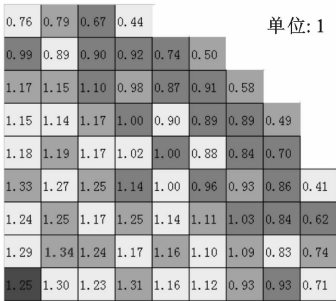


图 7 寿期初堆芯相对径向功率分布

寿期内,MCST 出现在寿期末,为 684℃,低于 MCST 限值 700℃.从图 10 中可以看出,中间冷却剂向上流组件的包壳外表面温度分布相对均匀,外围组件的包壳外表面温度较低.这是由于外围组件

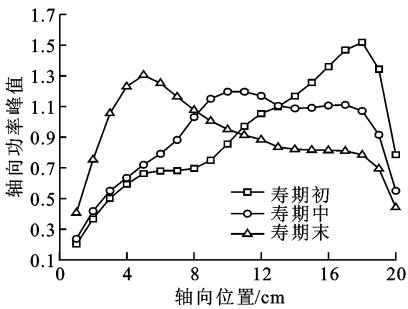


图 8 堆芯相对轴向功率分布



图 9 寿期初堆芯冷却剂出口温度分布

为冷却剂向下流组件,冷却剂平均温度较低的缘故.

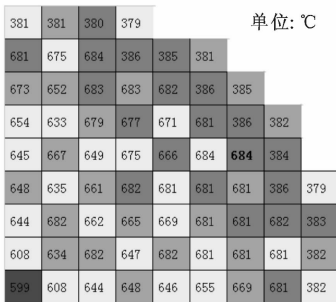


图 10 寿期末燃料包壳外表面温度分布

3 子通道计算分析

图 11 为双排组件子通道划分及燃料棒和子通道的编号。组件划分为 280 个子通道,共有 180 根燃料棒,9 个水棒,子通道按照形状和边界条件的差别共分为 5 种类型:角通道 SC-1、边通道 SC-2、水棒边通道 SC-3、水棒角通道 SC-4 和一般通道 SC-5。

子通道计算采用 ATHAS 程序^[7],组件径向和轴向功率分布由堆芯物理计算给出,摩擦和传热关系式分别选用 Biasius 关系式和 Bishop 关系式。

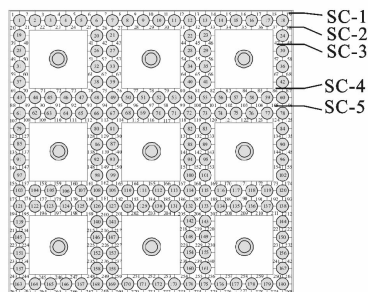


图 11 双排组件子通道划分

通过对堆芯 MCST 所在的组件进行子通道分析,得出了该组件典型子通道的冷却剂温度和包壳外表面温度沿轴向的变化。图 12 为堆芯 MCST 组件在燃耗末期(寿期末)典型子通道对应燃料棒包壳外表面温度沿轴向的变化。

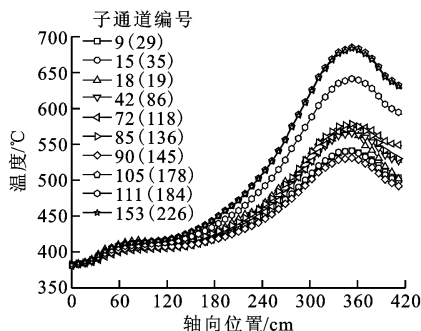


图 12 寿期末包壳外表面温度沿轴向的变化

各子通道对应包壳外表面温度沿轴向的变化与寿期末轴向功率分布相一致。由于寿期末功率因子峰值位于组件顶部,所以组件顶部的包壳外表面温度会出现峰值,随之轴向功率下降,包壳外表面温度下降。MCST 发生在第 105 根燃料棒和对应 178 号子通道,为 685.3 °C,也是整个燃耗过程中的最高值,但低于组件 MCST 设计限值 700 °C。子通道分

析结果显示,最高包壳温度大于单通道分析结果,这是由于子通道分析中考虑了组件内单棒的功率,而单通道分析中的热通道采用的是功率重构前的最大网格功率,比重构后的最大单棒功率低,因此子通道分析结果更为保守。

4 结论

本文提出了一种新的 SCWR 组件和堆芯设计方案,开展了堆芯物理热工耦合计算分析和子通道热工水力计算分析,研究结果如下。

(1)双排棒燃料组件 SCWR 和压力容器式低泄漏堆芯方案合理可行,可以实现堆芯 3 批年度换料。

(2)堆芯物理和热工水力耦合计算得出,堆芯进出口温度、冷却剂流量等参数满足设计目标,寿期内堆芯 MCST 为 684 °C,满足 MCST 热工水力设计准则的要求,同时堆芯具有较大的负冷却剂空泡反应性。

(3)子通道热工水力分析结果显示,寿期内 MCST 为 685.3 °C,比单通道分析结果高 1.3 °C。子通道分析结果较为保守,满足 MCST 热工水力设计准则的要求。

参考文献:

- [1] OKA Y, KOSHIZUKA S. Design concept of once-through cycle supercritical pressure light water cooled reactors [C]//Proceedings of Supercritical Cooled Reactors. Tokyo, Japan: University of Tokyo, 2000:1-22.
- [2] CAO L, OKA Y, ISHIWATARI Y, et al. Fuel, core design and subchannel analysis of a super fast reactor [J]. J Nucl Sci Technol, 2008, 45(2):138-148.
- [3] SCHULENBERG T, STARFLINGER J, MARSAULT P, et al. European supercritical water cooled reactor [J]. Nucl Eng Des, 2011, 241(9):3503-3513.
- [4] BAE Y, JANG J, KIM H, et al. Research activities on a supercritical pressure water reactor in Korea [J]. Nucl Eng Technol, 2007, 39(4):273-286.
- [5] DUFFEY R, SUR B. Towards a sustainable future using pressure tube reactor technology [J]. Energy Procedia, 2011, 7:286-292.
- [6] 刘晓晶. 混合能谱超临界水冷堆堆芯热工与物理性能的研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2010.
- [7] 李昌莹. 超临界水堆子通道分析 [D]. 西安:西安交通大学, 2008.

(编辑 苗凌)