

文章编号: 1007-4627(2014)04-0543-07

径向和轴向倒料行波堆概念设计研究

郑美银^{1, 2}, 田文喜^{1, 2}, 初晓^{1, 2}, 张大林^{1, 2}, 苏光辉^{1, 2}, 秋穗正^{1, 2}, 黄灏³

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049;
2. 西安交通大学核科学与技术学院, 西安 710049;
3. 中科华核电技术研究院有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 给出了径向和轴向倒料行波堆堆芯的详细设计, 通过燃耗计算软件 MCORE 对两种堆芯进行了分析计算。对于轴向行波堆, 得到了稳定的核子密度分布和功率分布, 并模拟出增殖-燃耗波。稳态时, k_{eff} 为 1.065, 波速约为 5.0 cm/a, 燃耗深度达到 400.0 MWD/kg-HM。对于径向倒料行波堆, 采用由外向内的倒料方案, 经过一定倒料周期后功率分布趋于稳定。研究发现, 渐进稳态 k_{eff} 随倒料周期的增加呈抛物线变化, 燃耗深度随倒料周期的增加线性增大。以最低功率峰为依据, 确定倒料周期 450 d 为最佳倒料周期。此时, 渐进稳态 k_{eff} 为 1.020, 平均燃耗达到 156.0 MWD/kg-HM。

关键词: 行波堆; 堆芯设计; 燃耗计算

中图分类号: O571 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.31.04.543

1 引言

行波堆 (Traveling Wave Reactor, TWR) 是一种可实现自持增殖和燃烧的新概念反应堆, 其在核燃料利用率上比现有压水堆和快堆有明显的优势。目前的研究表明, TWR 的燃耗深度可达 40% 左右, 可使用天然铀或压水堆乏燃料, 其乏燃料无需后处理。正是由于这些优点, 行波堆得到了广泛的关注和研究。

1996 年, Teller 等^[1]提出一种能自持反应的堆芯概念, 点火区使用富集 ^{235}U 或 ^{239}Pu , 增殖区使用天然铀。点火区通过外中子源辐照后, 堆芯内能形成轴向移动的增殖-燃烧波。Van Dam^[2]、Seifritz^[3] 和 Chen 等^[4]对该概念进行了理论分析。Sekimoto 等^[5]提出了 CANDLE 燃耗策略, 通过数值模拟发现燃耗可达 40% 左右。但这种轴向行波堆存在很多缺陷: 堆芯功率峰因子大、堆芯高度高、大量裂变气体的释放、包壳长期辐照脆化以及燃料的辐照肿胀等。

Terra Power (泰拉能源) 公司提出一种新概念行波堆。在该堆中, 增殖-燃烧波不沿轴向移动, 燃料沿堆芯径向从内向外或从外向内移动, 从而在堆芯径

向上形成稳定的增殖-燃烧波。这种设计概念可使用成熟的倒料技术, 燃料在堆芯停留的时间减少, 材料的辐照和肿胀效应减小。Chen 等^[6]和 Zhang 等^[7]分别从理论和数值上对这种径向倒料概念进行了研究。Cheng 等^[6]的研究发现, 由外向内的倒料策略比由内向外的倒料策略燃料利用率高。Zhang 等^[7]基于欧洲钠冷快堆的研究发现, 渐进 k_{eff} 随倒料周期呈抛物线变化。

本文内容安排如下: 第 2 节为轴向和径向倒料行波堆设计, 包括堆芯布置、燃料组件和燃料元件设计等; 第 3 节采用燃耗计算程序 MCORE 开展分析计算的结果; 第 4 节为本文的总结及后续工作展望。

2 轴向和径向倒料堆芯设计

本文首先进行 2000 MWt 轴向行波堆堆芯设计, 验证轴向增殖-燃烧波。进而进行 2000 MWt 径向倒料行波堆堆芯设计, 并验证径向倒料的可行性。

2.1 轴向堆芯设计

轴向堆芯分为点火区和增殖区。点火区采

收稿日期: 2014-01-22; 修改日期: 2014-05-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(91126009, 11125522)

作者简介: 郑美银(1987-), 男, 四川绵阳人, 在读博士生, 主要从事反应堆热工水力与安全研究;

E-mail: zmyinjy@stu.xjtu.edu.cn

http://www.npr.ac.cn

用 15.0% 的富集铀，增殖区采用天然铀。点火区高度为 600.0 mm，增殖区高度为 2 400.0 mm，堆芯活性区高度为 3 000.0 mm。堆芯总共有 186 个燃料组

件，13 个控制棒组件；外围包含约两层 144 个反射层组件。堆芯的总体布置和轴向划分如图 1 所示，堆芯总体参数如表 1 所列。

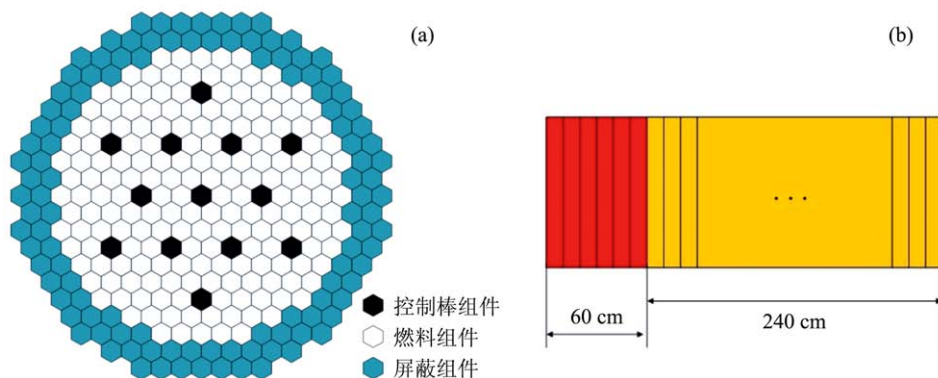


图 1 (在线彩图) 轴向堆芯布置和轴向示意图

表 1 轴向堆芯总体参数

参数	数值
功率/MW	2 000
燃料类型	金属铀
冷却剂	钠
活性区高度/mm	3 000.0
点火区高度/mm	600.0
增殖区高度/mm	2 400.0
点火区富集度/%	15.0
增殖区富集度/%	0.72
燃料体积份额/%	53.05
冷却剂体积份额/%	33.45
结构材料体积份额/%	13.50

表 3 燃料元件主要参数

参数	数值
燃料元件总高度/mm	4 550
包壳外径/mm	12.2
包壳内径/mm	11.8
燃料元件间距/mm	14.4
燃料芯块外径/mm	11.5
燃料芯块内径/mm	1.5
活性区高度/mm	3 000

轴向堆芯燃料组件和燃料元件的主要参数分别如表 2 和表 3 所列。燃料元件活性区高度为 3 000.0 mm，上反射层高度为 150.0 mm，下反射层高度为 300.0 mm。燃料元件上下部设有气腔容纳裂变气体。

表 2 燃料组件主要参数

参数	数值
燃料组件内对边距/mm	161.0
燃料组件外对边距/mm	166.0
燃料组件间距/mm	168.0
组件盒壁厚/mm	2.5
组件间隙/mm	2.0
单位组件内燃料元件数	127
燃料组件总高度/mm	6 700

2.2 径向堆芯设计

径向倒料堆芯总热功率为 2 000 MW，采用天然铀金属作为新鲜燃料。堆芯的总体布置和燃料组件分组如图 2 所示，总体设计参数如表 4 所列。堆芯包括 270 盒燃料组件，19 盒控制和停堆组件，约三层反射层组件。

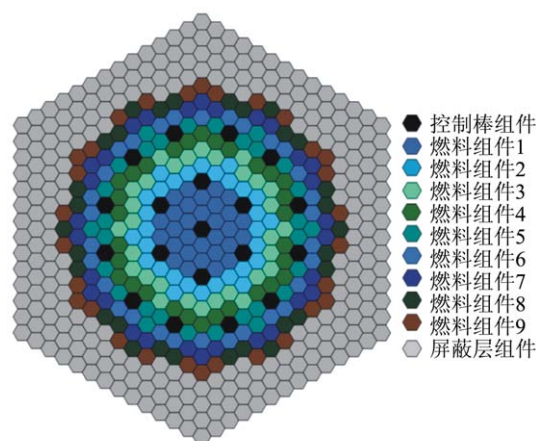


图 2 (在线彩图) 径向倒料堆芯总体布置和燃料组件分组

表 4 径向倒料堆芯总体参数

参数	数值
功率/MW	2 000
燃料组件数	270
控制和停堆组件	19
堆芯活性区高度/mm	1 000.0
燃料类型	天然铀金属
燃料密度/%	95.0
冷却剂	钠
燃料体积份额/%	56.30
冷却剂体积份额/%	21.07
结构材料体积份额/%	22.63

续表 6

参数	数值
包壳内径/mm	9.97
燃料元件间距/mm	12.98
燃料芯块外径/mm	9.67
燃料芯块内径/mm	2.47
活性区高度/mm	1 000

燃料组件和燃料元件设计参数如表 5 和表 6 所列。上反射层高度为 150 mm, 下反射层高度为 300 mm。燃料元件上下部设有气腔容纳裂变气体。

表 5 燃料组件主要参数

参数	数值
燃料组件内对边距/mm	194.8
燃料组件外对边距/mm	203.8
燃料组件间距/mm	208.3
组件盒壁厚/mm	4.5
组件间隙/mm	4.5
单位组件内燃料元件数	271
燃料组件总高度/mm	4 900

表 6 燃料元件主要参数

参数	数值
燃料元件总高度/mm	2 550
包壳外径/mm	11.0

3 计算结果

3.1 轴向堆芯计算结果

轴向倒料堆芯采用一维模型进行计算。堆芯轴向划分如图 1(b) 所示, 活性区沿轴向被划分为 30 个控制体, 每个控制体的长度为 100.0 mm。

根据堆芯的结构设计及燃料的布置方案, 很容易判断, 经过一定的燃耗步以后, 堆芯会趋于一个稳态。此时, k_{eff} 会达到稳定, 功率分布、中子通量分布以及各核素的分布会以固定的形状沿堆芯轴向移动。经计算, 功率分布和中子通量分布如图 3 所示, ^{238}U 和 ^{239}Pu 核子密度分布如图 4 所示, k_{eff} 随时间的变化以及增殖-燃烧波如图 5 所示, 燃耗深度随时间的变化如图 6 所示。

由图 3 可见, 经过约 20 a, 堆芯达到稳态, 堆芯功率和中子通量分布稳定, 并以固定的分布沿堆芯轴向从点火区向增殖区移动, 通过线性拟合, 移动速度约为 5.0 cm/a。图 4 给出了堆芯主要可裂变物质和易裂变物质的核子密度分布。由该图可见, 各主要核素在达到稳定以后, 均以固定的分布沿堆芯轴向移动, 移动速度相同。

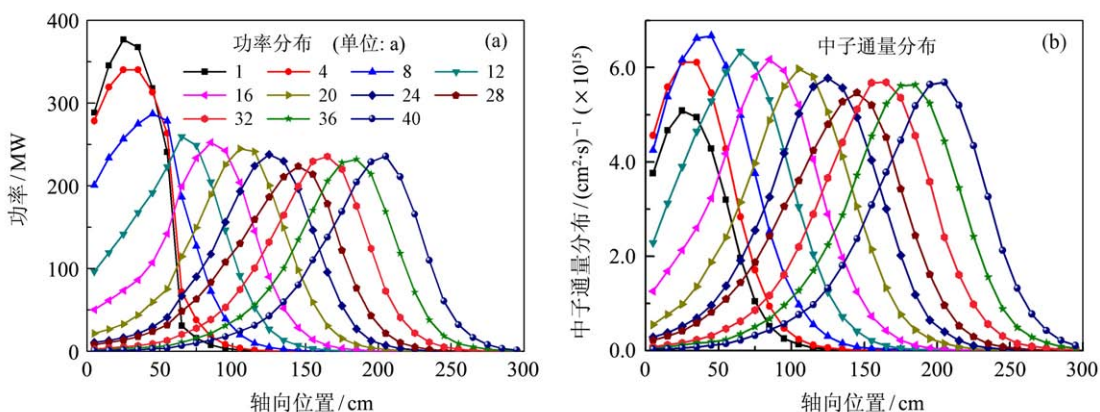


图 3 (在线彩图) 轴向堆芯功率和中子通量分布

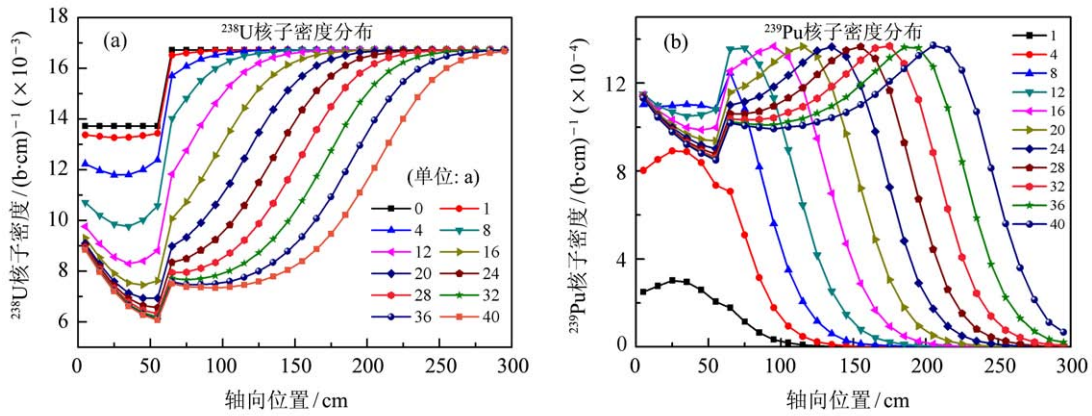


图 4 (在线彩图) 轴向堆芯主要核子密度的变化

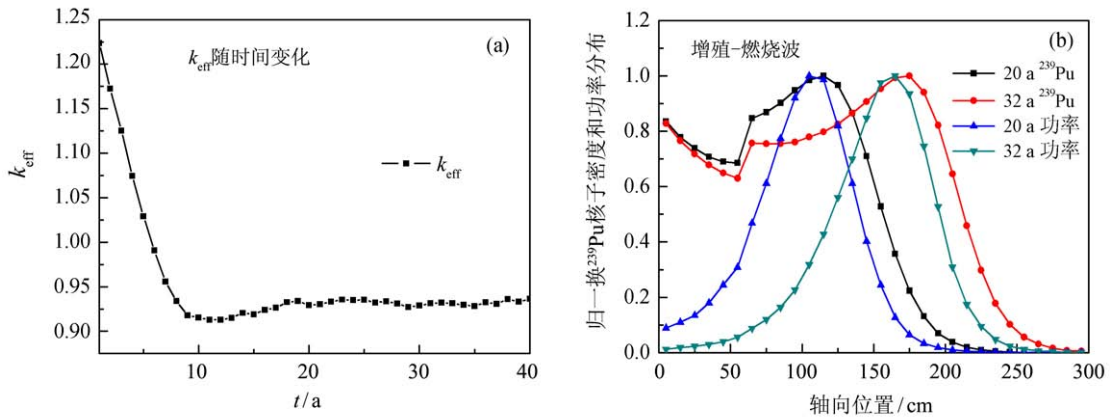


图 5 (在线彩图) 轴向堆芯 k_{eff} 随着时间的变化以及增殖-燃烧波

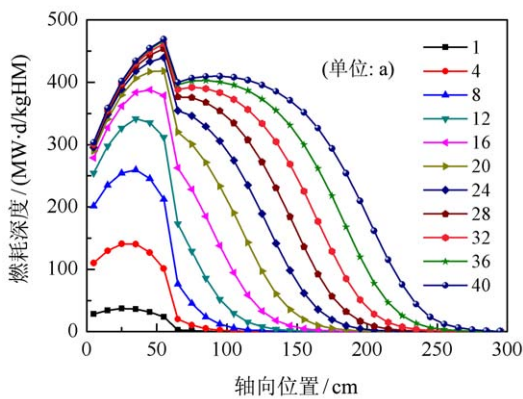


图 6 (在线彩图) 轴向堆芯燃耗深度随着时间的变化

由图 5(a) 可见, k_{eff} 在寿期初由于中子在左端面大量泄漏而降低, 之后随着 ^{238}U 不断转换为 ^{239}Pu 而逐步达到稳定, 稳定后的 k_{eff} 约为 1.065。MCORE 软件不能直接模拟增殖-燃烧波, 本文以 ^{239}Pu 相对核子密度代表增殖波, 以相对功率分布代表燃烧波, 模拟出增殖-燃烧波, 如图 5(b) 所示。由该图可见, 增殖波在前, 燃烧波在后, 相距约 25.0

cm。图 6 和图 4(a) 相比可见, 燃耗深度分布的变化与 ^{238}U 核子密度分布的变化正好相反。随着燃烧的进行, 燃耗深度沿堆芯轴向移动, 燃烧波经过的堆芯区域燃耗深度不再变化。堆芯稳定后的平均燃耗达到 400.0 MWD/kg-HM。如此高的燃耗是行波堆的特点, 也给堆芯材料性能带来严峻挑战。

3.2 径向倒料堆芯计算结果

为模拟径向倒料策略, 燃料组件被划分为 9 组, 每组 30 个燃料组件, 大致沿堆芯径向等距分布。Chen^[6] 通过理论研究得到, 由外向内的倒料策略比由内向外的倒料策略燃料利用率更高。因此, 本文直接采用由外向内的倒料策略。

倒料过程如下, 燃耗深度最深的乏燃料组件从堆芯最内侧移出堆芯, 外围临近的燃料组件依次倒入内侧, 堆芯最外侧加入新燃料组件。计算时, 选取 1/6 堆芯为计算区域, 黑色为控制和停堆组件, 如图 7 所示。计算过程中假定控制棒全部提出。

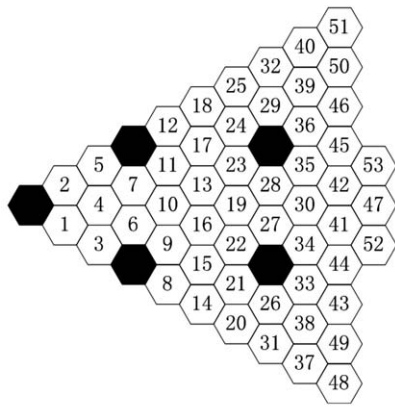


图 7 (在线彩图) 径向倒料堆芯计算区域编号

当堆芯结构、反应堆功率、燃料分区和新燃料组分确定以后, 堆芯的渐进稳态只取决于倒料周期。本文选取 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500 d 倒料周期

进行计算。渐进稳态 k_{eff} 和燃耗深度随倒料周期的变化如图 8 所示。渐进稳态 k_{eff} 随倒料周期的增加呈抛物线变化, 燃耗深度随倒料周期线性增加。这一特点表明, 可以通过倒料周期来调节乏燃料的燃耗深度, 使得结构材料满足要求。

计算发现, 随着倒料周期的增加, 功率峰逐渐从堆芯内侧向堆芯外侧移动, 这和堆芯的倒料策略是相对应的。当倒料周期较短时, 由 ^{238}U 转换的 ^{239}Pu 在经过多步倒料将要移出堆芯时才开始裂变, 因此功率峰靠近堆芯内侧; 当倒料周期较长时, 由 ^{238}U 转换的 ^{239}Pu 在经过少步倒料步之后就裂变, 因此功率峰靠近堆芯外侧。倒料周期 250 和 450 d 的功率分布如图 9 所示。为降低功率峰因子, 本文认为倒料周期 450 d 的设计为最优设计。此时, 渐进稳态 k_{eff} 为 1.020, 燃耗深度约为 156.0 MWD/kg-HM。

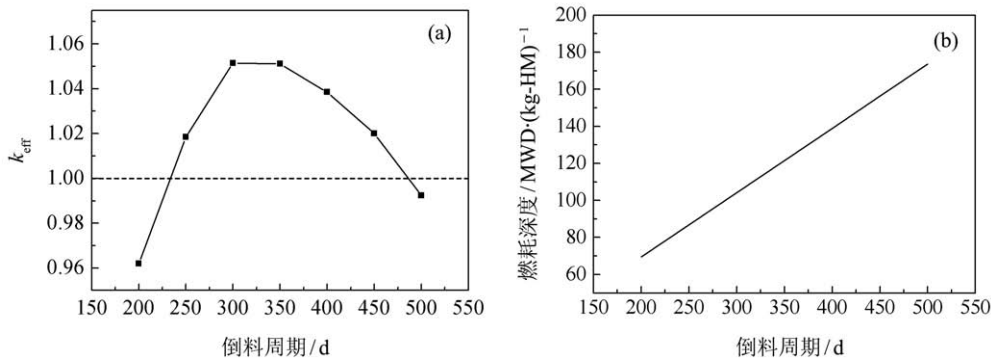


图 8 (在线彩图) 渐进 k_{eff} 和燃耗深度随倒料周期的变化

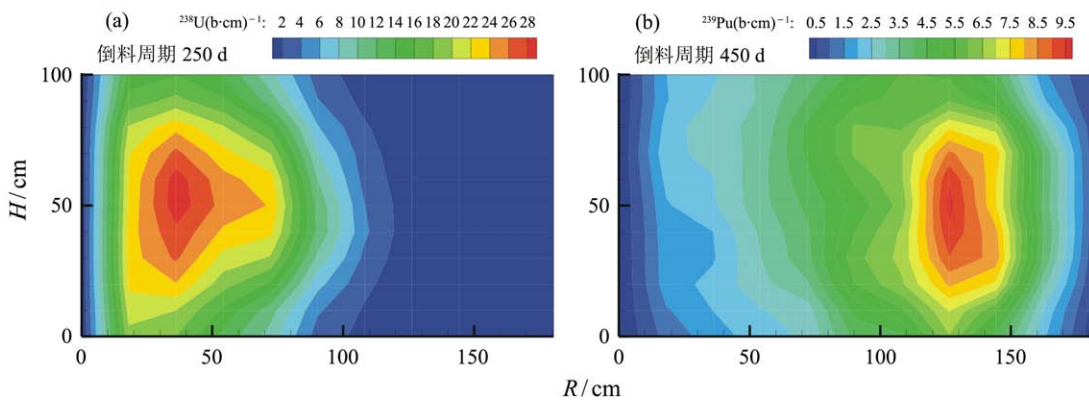


图 9 (在线彩图) 倒料周期 250 和 450 d 功率分布

倒料周期为 450 d 时的 ^{238}U 和 ^{239}Pu 沿堆芯径向的分布如图 10 所示。由图 10(a) 可见, ^{238}U 由堆芯外侧向堆芯内侧单调减少, 这主要是因为 ^{238}U 随着燃

烧的进行大部分已经转换为 ^{239}Pu 。由于堆芯中心区域中子通量密度更高, 增殖效应更强, 使得堆芯中心区域的 ^{238}U 比堆芯上下边界区域下降得更快。由

图 10(b) 可见, ^{239}Pu 由堆芯外侧逐渐增加, 随后由于其自身的裂变而降低。同样, 由于堆芯中心区域中

子通量密度更高, 使得堆芯中心区域的 ^{239}Pu 比上下边界区域的消耗更快。

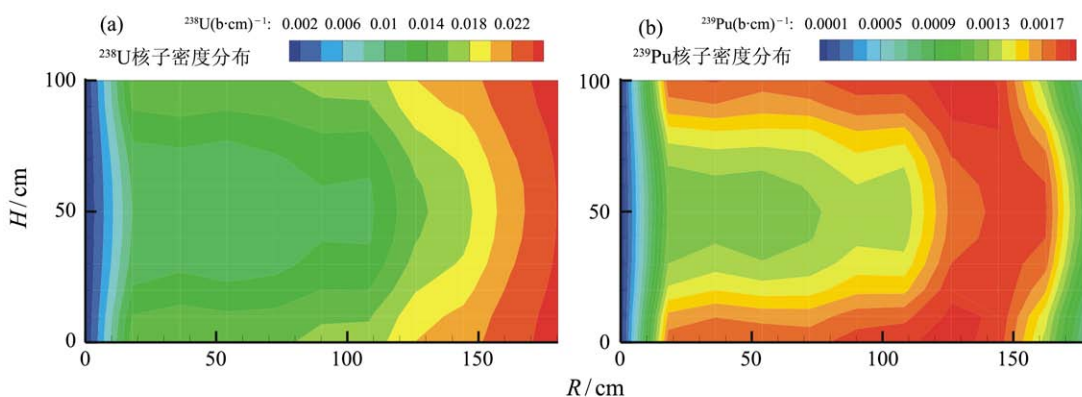


图 10 (在线彩图) ^{238}U 和 ^{239}Pu 沿堆芯径向分布 (a) ^{238}U 核子密度分布 (b) ^{239}Pu 核子密度分布

4 总结与展望

本文设计了 2000 MWt 轴向和径向倒料钠冷行波堆堆芯, 并采用自主开发的燃耗计算程序 MCORE 对其进行了分析计算。对于轴向堆芯, 得到了稳定的功率分布、中子通量分布和核子密度分布。稳态条件下, k_{eff} 为 1.065, 波速约为 5.0 cm/a, 燃耗深度达到 400.0 MWD/kg-HM。径向倒料堆芯采用由外向内的倒料策略, 以倒料周期 450 d 为最优设计, 得到了稳定的径向功率和核子密度分布, 渐进稳态 k_{eff} 为 1.020, 平均燃耗达到 156.0 MWD/kg-HM。计算发现, 渐进稳态 k_{eff} 随倒料周期的增加呈抛物线变化, 燃耗深度随倒料周期线性增大。这表明可以通过倒料周期调节堆芯燃耗, 从而降低对堆芯材料的要求。由于轴向行波堆固有的一些缺陷, 燃耗深度更深, 给材料带来的挑战更大, 本研究后续将着重开展径向倒料行波堆研究, 特别是径向倒料策略的优化, 基于行波堆的次锕系核素和长寿命裂变产物的嬗变,

以及行波堆系统的安全分析。

参考文献:

- [1] TELLER E, ISHIKAWA M, WOOD L. Completely Automated Nuclear Reactors for Long-Term Operation[C]// Proc of ICECES'96. Obninsk, Russia, 1996.
- [2] Van D H. Annals of Nuclear Energy, 2000, **27**(16): 1505.
- [3] SEIFRITZ W. Kerntechnik, 2000, **65**: 5.
- [4] CHEN X N, KIEFHABER E, ZHANG D L. Energy Conversion and Management, 2012, **59**: 40.
- [5] SEKIMOTO H, RYU K, YOSHIMURA Y. Nuclear Science and Technology, 2001, **139**: 306.
- [6] CHEN X N, ZHANG D L, MASCHKEK W. Theoretical modeling of radial standing wave reactor[C]// Proc of ICENES'15. San Francisco, 2011.
- [7] ZHANG D L, CHEN X N, FLAD M. Energy Conversion and Management, 2013, **72**: 12.
- [8] ZHENG M Y, TIAN W X, SU G H. Annals of Nuclear Energy, 2014, **63**: 491.

Design of Radial and Axial Fuel Shuffling TWR

ZHENG Meiyin^{1, 2, 1)}, TIAN Wenxi^{1, 2}, CHU Xiao^{1, 2}, ZHANG Dalin^{1, 2},
SU Guanghui^{1, 2}, QIU Suizheng^{1, 2}, HUANG Hao³

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Abstract: Radial and axial fuel shuffling Traveling Wave Reactor (TWR) core were designed in detail, and burn-up calculation code MCOE was used to perform calculation and analysis. For the axial core, stable nuclide densities and power distribution were obtained, and the breeding-burning wave was simulated. For steady state, k_{eff} is 1.065, the drift speed is about 5.0 cm/a, and the burn-up is up to 400.0 MWD/kg-HM. For the 8 radial core, the fuel is shuffled from outside in, and the power distribution becomes stable after several shuffling steps. The results show that, asymptotic k_{eff} parabolically varies with the shuffling period, while the burn-up increases linearly with the shuffling period. To reduce the power peak, shuffling period 450 d is recognized as the best design. Asymptotic k_{eff} is 1.020, and the average burn-up is up to 156.0 MWD/kg-HM.

Key words: TWR; core design; burn-up calculation

Received date: 20 Jan. 2014; **Revised date:** 8 May 2014

Foundation item: National Science Foundation of China (91126009, 11125522)

1) E-mail: zmyinjy@stu.xjtu.edu.cn.

<http://www.npr.ac.cn>