

文章编号: 0258-0926(2014)S2-0044-04; doi: 10.13832/j. jnpe. 2014. S2. 0044

# 径向倒料式长寿期钠冷快堆方案研究

李志鹏, 郑友琦\*, 曹良志

西安交通大学, 西安, 710049

**摘要:** 提出了一种长寿期钠冷快堆的堆芯换料设计。基于增殖焚烧的燃耗策略, 通过定期径向倒料, 堆芯在不换料的情况下能够维持较长时间的临界, 进而实现反应堆的长寿期设计。在本次方案设计中, 采用一次通过的燃料循环方式, 以 U-Zr 合金作为燃料材料, 有利于防止核扩散; 采用非均匀的布料方案, 有利于内增殖组件的增殖以及展平堆芯功率分布; 采用内收敛的径向倒料方式, 有利于增殖组件的增殖与焚烧, 提高堆芯寿命。初步计算结果表明, 这种倒料策略是可行的。反应堆可以通过堆内倒料, 实现 38 年不换料的运行, 并且卸出的增殖组件可以用作下一个新堆芯的驱动组件, 使新堆芯达到临界。堆芯关键参数都在现有长寿期快堆概念设计的可接受范围内。

**关键词:** 快堆; 长寿期; 径向倒料

**中图分类号:** TL363 **文献标志码:** A

## Study on Long-Life Sodium Cooled Fast Reactor Concept with Radial Shuffling

Li Zhipeng, Zheng Youqi\*, Cao Liangzhi

School of Nuclear Science and Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China

**Abstract:** This paper proposes a core shuffling design for a long-life sodium cooled fast reactor. Based on the breed and burn strategy and by means of radial shuffling, the reactor can sustain critical for a long time without refueling. In this design concept, one-through fuel cycle is adopted for nuclear non-proliferation, heterogeneous core is considered to flatten the local power peak and to enhance the in-core breeding, inward-convergent shuffling is employed to extend the core life. Preliminary calculations had proved that the shuffling scheme is feasible. The core life can reach over 38 years and the discharged breed assemblies can be used as the driver fuel in another reactor. The key parameters of the core are within the acceptable range in current fast reactor designs.

**Key words:** Fast reactor, Long life operation, Radial shuffling

## 0 引言

20 世纪 50 年代, Feinberg 首次提出了增殖与焚烧的概念, 即增殖组件直接在堆芯内进行焚烧。利用增殖与焚烧燃耗策略, 反应堆可以大幅度提高铀资源的利用率, 并且不需要复杂的燃料化学后处理等过程, 节约了成本<sup>[1-4]</sup>。基于该燃耗策略, 本文提出了一种长寿期钠冷快堆的概念设计。采

用非均匀布料方案, 通过定期径向倒料, 实现堆芯 38 a 不换料运行。堆芯卸出的增殖组件可以用于新堆芯的驱动组件, 使得新堆芯达到临界。

## 1 堆芯设计

### 1.1 计算工具

本文使用行波堆燃料管理软件包 FMTWR 进

收稿日期: 2014-10-19; 修回日期: 2014-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(11105104); 长江学者与创新团队基金(IRT1280)

作者简介: 李志鹏(1991—), 男, 博士研究生, 现主要从事快中子反应堆研究

\*通讯作者: 郑友琦, Email: yqzheng@mail.xjtu.edu.cn

行分析计算,程序包采用 JENDL3.3 核数据库。将基于碰撞概率方法的 SRAC 程序产生的组件少群均匀化参数提供给细网差分程序 CITATION 进行全堆芯扩散计算。SRAC 程序是日本原子能院开发的组件计算程序,可以计算多种典型几何。

## 1.2 组件设计参数

燃料组件与控制棒组件与现有的钠冷快堆组件类似(图1),采用六角形栅格布置。燃料类型为高密度的铀锆合金。该燃料具有能谱硬、密度高的特点,不仅可以增加堆芯增殖性能,而且还可以提高燃料的装载量,适合用作长寿期快堆的燃料。本文中,驱动组件采用11.5%富集度的U-5%Zr合金燃料,增殖组件采用贫铀燃料。组件的结构材料采用辐照性能好,肿胀小的HT-9钢。组件燃料采用中孔式设计,可以有效处理裂变气体。堆芯活性区高度设置为2 m,以保证燃料的装载量,提高堆芯寿期。为了减小燃料包壳的机械作用及化学作用,燃料与包壳间留有一定的间隙。为了增强燃料与包壳间的传热,在间隙中填充钠。考虑到钠隙与中孔的设计,驱动组件与增殖组件的燃料有效密度分别为68%与76%。燃料组件的详细设计参数见表1。

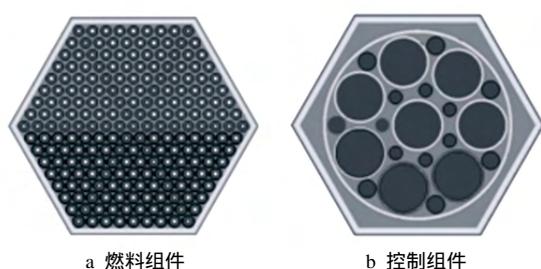


图1 组件结构示意图

Fig. 1 Layout of Assemblies

控制组件中共有内外7个不锈钢棒以及8个吸收棒<sup>[5]</sup>。吸收棒的吸收材料采用90%富集度的B<sub>4</sub>C。

## 1.3 堆芯布置方案

堆芯采用非均匀的径向布料方案,不仅增加了增殖组件与驱动组件的接触,同时提高了增殖性能,降低堆芯中心区域的局部功率峰。

堆芯中共有114个屏蔽组件,432个驱动组件,432个外增殖组件以及48个内增殖组件。燃料组件的数目设计需要考虑两方面因素:堆芯的最大卸料燃耗不能超过设计限值,这决定了堆

表1 燃料组件设计参数

Table 1 Design Parameter of Assemblies

参数名称	驱动组件	增殖组件	
燃料棒个数	217	217	
组件间隙/cm	4	4	
组件对边距/cm	171.42	171.42	
结构材料	HT-9	HT-9	
燃料材料	U-5%Zr	U-5%Zr	
燃料密度/g·cm <sup>-3</sup>	17.29	17.29	
有效密度/%	68	76	
栅距比(P/D)	1.1	1.1	
包壳厚度/mm	0.5	0.5	
活性区长度/cm	200	250	
上/下增殖区长度/cm	25/25	—	
间隙材料	钠	钠	
燃料棒直径/mm	10	10	
燃料富集度/%	11.5	0.25	
体积份额/%	燃料	36.1	40.3
	钠隙	17.0	12.8
	冷却剂	23.9	23.9
	结构材料	23.0	23.0

芯最小燃料装载量;根据中子剩余理论<sup>[6]</sup>,如果要利用卸出的增殖组件用作下一个堆芯的驱动组件,引燃新堆,增殖组件需要达到最小的燃耗,这决定了反应堆最大的燃料装载量。

综合考虑以上2个因素,最终确定燃料组件的数目。参考泰拉一号(TP-1)堆芯设计<sup>[7]</sup>,燃料区分为内外2个区域,内区为产生功率的区域,外区为燃料储备区域。为了防止通过倒料放入外区的驱动组件燃耗进一步加深,在外区放置48个固定吸收组件,以降低该区域的注量率水平。剩余反应性由内区37个控制组件控制。堆芯热功率为2500 MW,电功率为1000 MW。

## 1.4 倒料方案

为了限制驱动组件的最大卸料燃耗以及增加外区增殖组件的增殖,有必要采用堆内径向倒料策略<sup>[8]</sup>。为了方便描述,对1/6堆芯的组件进行分组,每4个组件为1组,共38组。每1组的4个组件距离堆芯中心具有相近的距离,因此,这4个组件的燃耗也相近。对每组组件所在的位置进行编号。在2a的倒料周期中,燃料组件按组进行移动。在一次倒料步中,外区的增殖组件移至内增殖区,内增殖区组件移至堆芯焚烧区域,位于焚烧区域的组件依次向堆芯中心移动,位于堆芯中心的组件则放入外增殖区(图2)。

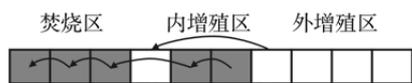


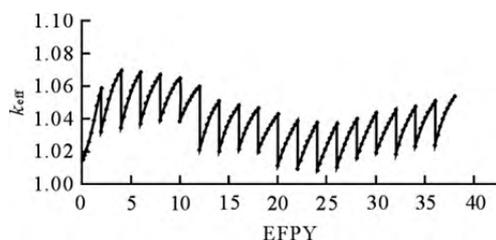
图2 径向倒料示意图

Fig. 2 Sketch Map of Shuffling Strategy

## 2 计算结果分析

### 2.1 初始堆芯结果分析

采用周期为 2 年的倒料策略，反应堆可以在不换料的情况下维持 38 a 的临界。堆芯  $k_{\text{eff}}$  在整个寿期内的变化见图 3。通过这种堆内径向倒料策略，增殖组件首先放置于堆芯中心高注量率区域，进行充分增殖，然后放置于燃烧区域，实现了增殖即时燃烧的燃耗策略。堆芯具有较高的增殖比，保证了燃料的后备反应性，使得反应堆不换料就能维持长时间的临界。

图3 堆芯  $k_{\text{eff}}$  变化Fig. 3 Change of  $k_{\text{eff}}$  in Whole Life  
EFPY——等效满功率年

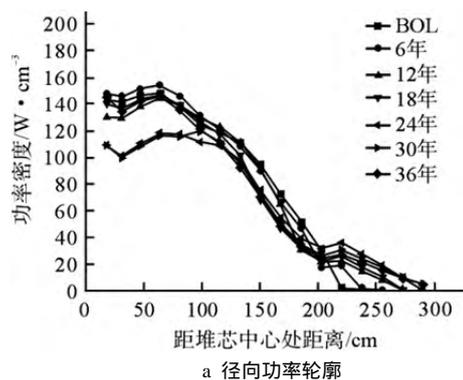
堆芯功率主要产生于燃烧区域，寿期初堆芯外区基本不贡献功率。到寿期末，从内区倒出的富集组件堆积在堆芯外围，导致外区产生小幅的功率。图 4 为径向与轴向上的功率轮廓图。

从图 4 可以看出，功率分布形状在整个寿期内基本保持不变，为热工的设计提供了便利。堆芯最大线功率密度在整个寿期内最大值为 37 kW/m，小于设计限值 45 kW/m。

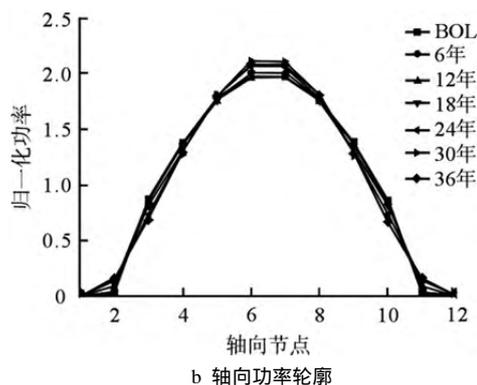
经过 38 a 的满功率运行后，堆芯内多数增殖组件燃耗较浅，并未充分燃烧，如果直接当作废料处理非常浪费。事实上这些组件对于下一个新堆芯将是理想的点火组件，通过这种堆内径向倒料策略可以实现燃料的循环利用。经过 18 个倒料步，所有的驱动组件全部放置在堆芯外区，驱动组件的最大卸料燃耗为 171.7 GW·d/t(U)，平均卸料燃耗约为 140 GW·d/t(U)。

### 2.2 后续堆芯结果分析

上一个堆芯的 432 个富集铀组件和燃耗较深



a 径向功率轮廓



b 轴向功率轮廓

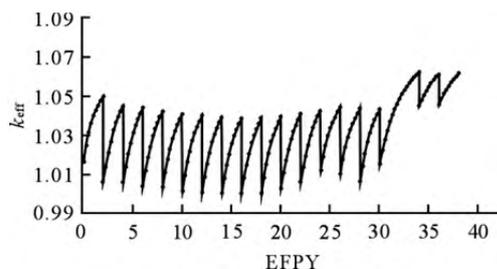
图4 不同燃耗下的功率轮廓图

Fig. 4 Power Profiles at Different Burnup  
BOL——寿期初

的 24 个增殖组件将会被当作废料处理，而剩余的 456 个增殖组件用作后续堆芯（以下简称新堆芯）的点火组件。将上一个堆芯寿期末位于 2~20 位置的组件放入新堆芯的 1~19 号位置，剩下的半数组件则由贫铀燃料填充。

新堆芯中位于 1~5 号位置的组件燃耗较深，为避免其燃耗大幅度增加，在径向倒料时，从堆芯中心区域卸出的点火组件将首先放置于堆芯的最外围。

新堆芯  $k_{\text{eff}}$  在整个寿期内的变化见图 5。值得注意的是堆芯后 3 个倒料周期反应性出现了上升。这是由于第 16 步倒料将位于 23 号位置的组

图5 新堆芯  $k_{\text{eff}}$  的变化Fig. 5 Change of  $k_{\text{eff}}$  in Succeeding Core

件放入内增殖区进行增殖，而这些组件靠近焚烧区域，经过 34 a 的满功率运行，其本身增殖较为充分，因而第 16 步倒料没有使反应性下降。驱动组件的平均卸料燃耗约为 186 GW·d/t(U)，最大卸料燃耗为 203 GW·d/t(U)。

结果表明，新堆芯同样可以维持 38 a 的临界。利用从新堆芯卸出的组件用作下一个堆芯的点火组件，就可以达到直接焚烧贫铀的燃料循环策略。

### 3 结束语

本文基于增殖与焚烧的燃耗策略，提出了一种长寿期钠冷快堆堆芯换料方案设计。计算结果表明，该方案可以省略反应堆燃料后处理环节，大幅提高燃料利用率。此外，进一步的研究表明，堆芯卸出的增殖组件具有足够的剩余反应性，可以作为点火组件用于一座完全相同的反应堆运行，从而实现燃料的持续使用。

参考文献：

[1] Kim T K, Taiwo T A. Fuel cycle analysis of once-through nuclear systems[R]. ANLFCRD-308, U.S.:

Department of Energy, 2010.

- [2] Ueda N, Kinoshita I, Minato A, et al. Sodium cooled small fast long-life reactor “4S”[J]. Progress in Nuclear Energy, 2005, 47(1): 222-230.
- [3] Kim T K, Taiwo T A. Feasibility study of ultra-long life fast reactor core concept[C]. Proceedings of PHYSOR. Pittsburgh: American Nuclear Society, 2010.
- [4] TerraPower L L C. Traveling-wave reactors: a truly sustainable and full-scale resource for global energy needs[C]. San Diego: Proceeding of ICAPP 2010, 2010.
- [5] Kim Y I, Hill R, Grimm K, et al. BN-600 full MOX core benchmark analysis[C]. Proceedings of PHYSOR, 2004.
- [6] Petroski R C, Forget B. General analysis of breed-and-burn reactors and limited-separations fuel cycles[R]. Center for Advanced Nuclear Energy Systems. Advanced Nuclear Power Program, Massachusetts Hom Bridge City: Massachusetts Institute of Technology, 2011.
- [7] TerraPower L L C. Conceptual design of a 500 mwe traveling wave demonstration reactor plant[C]. Nice, France: Proceeding of ICAPP, 2011.
- [8] 陈其昌, 司胜义. 增殖燃烧一体化快堆插花堆芯布置与倒料方案研究[J]. 核电工程与技术, 2011, 4: 5-12.

(责任编辑：孙 凯)