

文章编号: 0258-0926(2014)S2-0041-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2014.S2.0041

# 基于一次通过式和闭式燃料循环的 快堆堆芯概念设计研究

郑友琦, 吴宏春

西安交通大学核科学与技术学院, 西安, 710049

**摘要:** 分别针对一次通过式和闭式燃料循环提出了 2 种钠冷快堆概念设计, 2 种堆芯均采用金属燃料以达到更优的增殖性能。首先, 设计了高增殖比的快堆堆芯, 该方案增殖比可达到 1.4, 倍增时间约 11 a。提出了用于长寿期运行的快堆堆芯, 该方案利用倒料的方式实现堆内增殖-燃烧, 达到 38 a 的不换料运行。在此基础上, 比较了两种基于不同策略快堆设计的差异, 从堆芯参数、资源利用率和经济性等角度对不同理念的快堆设计进行了初步的分析。

**关键词:** 快堆; 一次通过式燃料循环; 闭式燃料循环; 金属燃料  
**中图分类号:** TP29 **文献标志码:** A

## Conceptual Design of Fast Reactors Based on Once-Through and Closed Fuel Cycles

Zheng Youqi, Wu Hongchun

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

**Abstract:** Fast reactor is important for the sustainable development of nuclear energy due to its good breeding ability. In this paper, two conceptual designs of fast reactor using metal fuels are proposed, respectively, based on the once-through and closed fuel cycle. For the case of the closed fuel cycle, the reactor is designed to reach the breeding ratio of 1.4 with the double time of 11 years. Meanwhile, the case of once-through fuel cycle is designed to operate with long cycle. The in-core breeding and burn is realized by using the fuel shuffling for 38 years. Based on the two cases, the differences of designing fast reactor for different fuel cycle are compared in the view of core physical parameters, resource use ratio and economics.

**Key words:** Fast reactor, Once-through fuel cycle, Closed fuel cycle, Metal fuel

### 0 前言

快中子反应堆以其优越的燃料增殖性能, 将现有压水堆中 1% 左右的铀资源利用率提高数十倍, 可以有效解决燃料可持续发展的问题。

传统的快中子增殖堆采用铀-钚循环, 利用  $^{238}\text{U}$  增殖产生  $^{239}\text{Pu}$ , 并通过后处理回收用于制造新的燃料, 即实现闭式燃料循环, 如欧洲提出的大型快堆 ESFR<sup>[1]</sup>、俄罗斯提出的 BN-1200<sup>[2]</sup>、印度提出的电功率 1000 MW 大型增殖快堆<sup>[3]</sup>等。

近年来, 一些国家提出采用一次通过式的方式发展快中子反应堆, 即基于一次通过式燃料循

环来降低成本和防止核扩散, 如小型快堆 4S<sup>[4]</sup>和 ACR-100<sup>[5]</sup>、超长寿命快堆 ULFR<sup>[6]</sup>以及行波堆 CANDLE<sup>[7]</sup>和 TP-1<sup>[8]</sup>等。

本文基于 2 种不同的燃料循环技术路线开展快堆概念设计研究, 探索不同技术路线的特点, 为未来我国快堆设计提供参考。

### 1 基于闭式燃料循环的高增殖比快堆堆芯方案

该方案参考目前快堆中最常见的池式钠冷堆芯, 装载铀钚锆 (U-Pu-Zr) 合金燃料, 设置上气

收稿日期: 2014-08-26; 修回日期: 2014-10-23

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

作者简介: 郑友琦 (1984—), 男, 副教授, 现主要从事核反应堆物理方向研究

腔容纳裂变气体,并设计上下增殖区。

堆内装载 3 种不同富集度的燃料组件作为点火组件,铀质量分数分别为 16.3%、18.4% 和 22.8%,采用压水堆后处理的乏燃料作为增殖区组件的燃料。点火区装载 324 盒组件,增殖区装载 175 盒组件,分别布置内、外增殖区,如图 1 所示。点火组件采用 4 批换料,增殖组件采用 1 批换料以提高增殖比。换料周期为 240 d。通过计算,该方案可达到的增殖比为 1.4,对应的易裂变核素倍增时间约为 11 a。

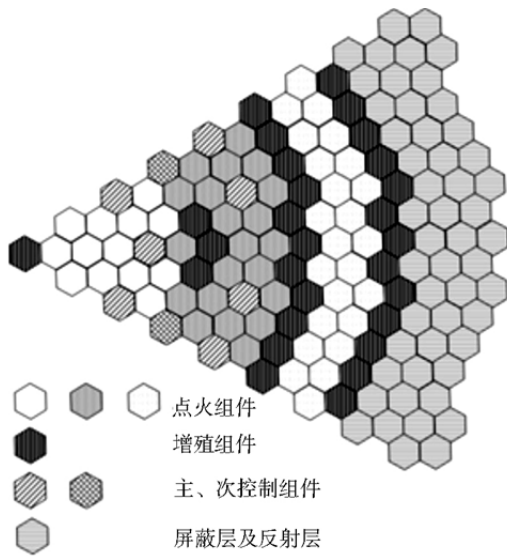


图1 高增殖比快堆堆芯布置示意图

Fig. 1 Layout of Core with High Breeding Ratio

## 2 基于一次通过式燃料循环快堆堆芯方案

该方案仍以金属燃料作为点火和增殖燃料,全堆分为燃烧区和内、外增殖区。点火组件的燃料成分采用铀锆合金(U-5%Zr),富集度为 11.5%,布置于燃烧区。增殖材料直接采用贫铀,布置于内、外增殖区。为满足长期不换料运行的需要,堆内需装载足够的裂变材料,因此在燃料棒设计上取消了上气腔而改用中孔容纳裂变气体,从而增大了活性区高度。这一设计在不显著增大压力容器尺寸的条件下燃料装载量大大提高。

燃烧区共装载 432 个富集铀组件,外增殖区装载 432 个贫铀组件,内增殖区装载 48 个贫铀组件。堆内布置 37 个控制组件,同时在外增殖区布置 48 个固定的吸收体组件以抑制增殖区功率。堆芯布置如图 2 所示。

所有组件按照 2 a 的倒料周期进行堆内倒料,

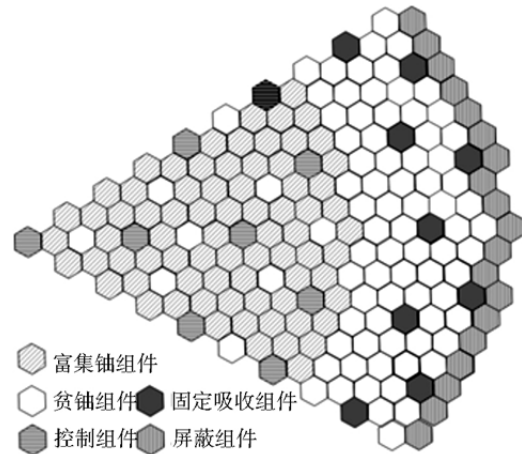


图2 基于一次通过式燃料循环的快堆堆芯布置示意图  
Fig. 2 Layout of Core Based on Once-through Fuel Cycle

图3给出了堆芯的倒料示意图。富集组件向内倒料,燃烧较深的组件批次倒换至外增殖区。外增殖区组件向内倒料至一定程度后移至内增殖区再倒入燃烧区。经过 19 次倒料,全部点火组件被倒至堆芯外围,达到换料要求,进而堆芯可以实现 38 a 不换料的运行。

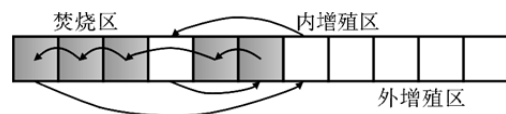


图3 堆内倒料策略示意图

Fig. 3 Strategy of In-Core Fuel Shuffling

## 3 方案比较

本文采用 2 种不同的快堆设计思路,分别提出了基于闭式燃料循环的高增殖比快堆方案和基于一次通过式燃料循环的长寿命快堆方案。表 1 给出了 2 种设计的参数比较。

在经济性上看,一次通过式循环使用铀锆合金,直接从天然铀富集获取燃料,省略了铀燃料的回收和制造,有利于大大降低燃料的成本(参考氧化物燃料的数据,铀燃料的燃料成本约为铀-钚燃料的 1/10)。因此,尽管功率密度较小,堆芯的经济性却能够得到提升。此外,直接采用铀燃料也降低了核扩散的风险。

从堆芯的性能参数看,采用一次通过式燃料循环设计的堆芯剩余反应性更大,控制要求也更高,但同时,一次通过式循环能够达到的卸料燃料消耗深度也更大。从增殖比的角度看,一次通过式循环的增殖比小于闭式燃料循环设计,一方面受

表 1 2种快堆堆芯的参数比较  
Table 1 Parameter Comparison of Two Different Fast Reactors

堆芯参数	闭式循环设计	一次通过式循环设计
堆芯电功率/MW	600	1000
堆芯平均功率密度/ $W \cdot cm^{-3}$	215	43
堆芯易裂变核素装载量/t	1.80/0.13 (点火/增殖区)	17.48
堆芯燃料总装载量/t	23.6/18.9 (点火/增殖区)	363.09
堆芯等效直径/cm	241	600
堆芯高度/活性区高度/cm	315/105	300/200
燃料形式(点火区/增殖区)	U-Pu-Zr/PWR 乏燃料	U-Zr/U-Zr
燃料富集度/%	16.3/18.4/22.8	11.5/贫铀
换料周期	240 满功率天	38 满功率年, 每2a 一次倒料
平均卸料燃耗/ $GW \cdot d \cdot t^{-1}(U)$	56.3/2.6 (点火/增殖区)	140
寿期平均增殖比	1.41	1.22
多普勒常数(BOL/EOL) <sup>*</sup>	-0.0040/-0.0041	-0.0068/-0.0046
冷却剂空泡反应性(BOL/EOL)/\$	4.39/5.06	3.80/16.39
堆芯缓发中子份额(BOL/EOL)	0.00443/0.00433	0.00725/0.00382
<sup>238</sup> U的转换量/ $g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	$2.33 \times 10^{-5}$	$2.73 \times 10^{-5}$
<sup>238</sup> U的转换率/ $(kW \cdot h)^{-1}$	$3.59 \times 10^{-15}$	$4.55 \times 10^{-13}$
天然铀的需求量/ $g \cdot (kW \cdot h)^{-1}$	—	0.01

注：BOL为寿期初；EOL为寿期末

堆芯剩余反应性控制的限制，另一方面也由燃料循环本身的特点决定。

从堆芯的安全参数看，无论一次通过式设计还是闭式设计，其燃料的反应性反馈绝对值基本相当，但是一次通过式循环堆芯在寿后期，由于堆内核素成分的显著变化，使得堆芯缓发中子份额大大降低，堆芯空泡反应性等也随着恶化，这是一次通过式循环设计中一个具有挑战性的问题。

从资源利用率看，一次通过式设计中每单位发电量下装入堆内的<sup>238</sup>U的转换量更大，但由于入堆的贫铀量也大，其转换率略低于采用闭式设计的堆芯。对于一次通过式燃料循环设计，每单位发电量的天然铀消耗量远远小于当前基于同样

循环方式的压水堆，以本文的方案为例约提高6倍。因此，尽管一次通过式循环设计无法达到闭式设计的高增殖比，限制了其燃料利用率的进一步提高，但仍能显著提高铀资源利用率。

#### 4 结束语

本文通过设计2种基于一次通过式燃料循环和闭式燃料循环的快堆方案，比较了不同燃料循环下快堆参数的差异。从核设计本身，一次通过式和闭式设计下堆芯性能并无本质区别，其差别主要在反应性控制需求方面。经济性上，基于一次通过式循环的设计理论上具有更低的燃料成本。从资源利用率上，闭式循环配合后处理回收应具有更高的资源利用率，但采用一次通过式的快堆相比压水堆仍大大提高了铀的利用率。

#### 参考文献：

- [1] Blanchet D, ESFR 'Working Horses' Core Concept Definition [R]. FP7 EURATOM ESFR Project, SP2.1.2.D1, 2009.
- [2] Cochran T B, Feiveson H A, Patterson W, et al. Fast breeder reactor programs: History and status [R]. International Panel on Fissile Materials Research Report, 1647, 2010.
- [3] Sathiyasheela T, Riyas A, Mohanakrishnan P. Comparative study of unprotected loss of flow accident analysis of 1000 MWe and 500 MWe Fast Breeder Reactor Metal (FBR-M) cores and their inherent safety [J]. Annals of Nuclear Energy, 2011, 38: 1065-1073.
- [4] Tsuboi Y, Kasuga S, Sakashita Y H. Development of the 4S and Related Technologies (1): Plant System Overview And Current Status, Proceedings of ICAPP '09 [C]. Tokyo, Japan, May 10-14, 2009.
- [5] Wade D C, Walters L. ARC-100: A Sustainable, Modular Nuclear Plant for Emerging Markets [C]. Proceeding of ICAPP'10, San Diego, CA, USA, June 13-17, 2010.
- [6] Kim T K, Taiwo T A. Feasibility Study of Ultra-Long Life Fast Reactor Core Concept [C]. Proceedings of PHYSOR 2010 – Advances in Reactor Physics to Power the Nuclear Renaissance Pittsburgh, Pennsylvania, USA, May 9-14, 2010.
- [7] Sekimoto H, Ryu K. Introduction of MOTTO Cycle to CANDLER Fast Reactor [C]. Proceedings of PHYSOR 2010-Advances in Reactor Physics to Power the Nuclear Renaissance Pittsburgh, Pennsylvania, USA, May 9-14, 2010.
- [8] Ellis T, Petroski R, Hejzlar P, et al. Traveling-Wave Reactors: A Truly Sustainable and Full-Scale Resource for Global Energy Needs [C]. Proceedings of ICAPP '10 San Diego, CA, USA, June 13-17, 2010.

(责任编辑：杨洁蕾)