

# 压水堆核电站实心燃料堆芯向环形燃料堆芯过渡方案研究

潘翠杰, 夏兆东\*, 朱庆福

中国原子能科学研究院, 北京  
Email: \*xiazhaodong@ciae.ac.cn

收稿日期: 2021年3月22日; 录用日期: 2021年4月11日; 发布日期: 2021年4月25日

## 摘要

为深入研究环形燃料和实心燃料混合装载的问题, 论证在大型商用压水堆核电站应用环形燃料可行性, 采用堆芯燃料管理程序包CMS对秦山二期2号机组堆芯开展堆芯燃料管理计算, 设计一个由秦山二期2号机组实心燃料堆芯逐步向全堆芯装载环形燃料过渡的堆芯换料方案, 计算分析各循环的循环长度、焓升因子、热点因子和慢化剂温度系数等堆芯物理参数, 计算结果表明各循环堆芯物理参数均满足设计要求, 可见压水堆核电站实心燃料堆芯是可以过渡到环形燃料堆芯。

## 关键词

环形燃料, 燃料管理, 混合堆芯

# Study on Transition from Solid Fuel Core to Annular Fuel Core in PWR Nuclear Power Plant

Cuijie Pan, Zhaodong Xia\*, Qingfu Zhu

China Institute of Atomic Energy, Beijing  
Email: \*xiazhaodong@ciae.ac.cn

Received: Mar. 22<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Apr. 11<sup>th</sup>, 2021; published: Apr. 25<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In order to study the mixed loading of annular fuel and solid fuel in depth and demonstrate the

\*通讯作者。

文章引用: 潘翠杰, 夏兆东, 朱庆福. 压水堆核电站实心燃料堆芯向环形燃料堆芯过渡方案研究[J]. 核科学与技术, 2021, 9(2): 73-82. DOI: 10.12677/nst.2021.92009

feasibility of using annular fuel in large commercial pressurized water reactor nuclear power plant, core fuel management is calculated for the long period reactor core of unit 2 of Qinshan Phase II by the core fuel management package CMS. A core refueling plan is designed to transition from unit 2 of Qinshan Phase II solid fuel core to full-core annular fuel loading. The core physical parameters such as cycle length, hot channel factor, hot spot factor and moderator temperature coefficient of each cycle are calculated and analyzed. The calculation results show that the physical parameters of each cycle core meet the design requirements, and it can be seen that the solid fuel core of PWR nuclear power station can be transitioned to the annular fuel core.

## Keywords

Annular Fuel, Fuel Management, Mixed Core

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

环形燃料元件是一种新型结构的燃料元件，与实心燃料相比，环形燃料元件的优势在于两侧换热，能够把热量迅速导出，有效降低燃料包壳温度、热流密度和燃料温度，减少放射性气体在燃料包壳中的释放量，能够在保持或增进现有反应堆安全性能的前提下，提高核电厂功率密度[1]。由于环形燃料具有良好的经济性和安全性，国际上核发达国家投入了相应的研究力量，积极开展环形燃料的相关研究，其中美国麻省理工大学联合西屋、法马通、加拿大 AECL 等公司合作开展了一个新型环形燃料元件研究计划-NERI 计划(Nuclear Energy Research Initiative)，该研究开展了环形燃料总体概念设计、热工水力设计、安全分析研究、堆芯物理计算和燃料管理研究、环形燃料元件制造工艺以及经济性研究、燃料元件性能分析程序开发和辐照试验设计与研究等方面；另外，韩国 KAERI 也开展了环形燃料的相关研究并且设计了第三代环形燃料反应堆 OPR-1000 [2] [3]。我国中国原子能科学研究院从 2009 年至今一直致力于环形燃料的研究，开展了环形燃料物理、热工、安全、结构和经济性等一系列的研究，目前处于工程应用阶段的研究[4]。

为了推进环形燃料在商用压水堆的应用，中国原子能科学研究院开展了环形燃料先导组件在商用压水堆辐照考验的可行性研究，并计划在福清核电进行环形燃料先导组件辐照考验。为进一步研究环形燃料和实心燃料混合装载的问题，论证商用压水堆核电站反应堆实心燃料堆芯过渡到环形燃料堆芯的可行性，文章采用堆芯燃料管理程序包 CMS (CASMO5, CMSLINK5 和 SIMULATE5)对秦山二期 2 号机组长周期(18 个月换料周期)堆芯开展堆芯燃料管理计算，设计一个由秦山二期 2 号机组长周期实心燃料堆芯逐步向全环形燃料堆芯过渡的堆芯换料方案，并分析研究各循环的循环长度、临界硼浓度、焓升因子、热点因子、反应性系数和燃料温度等堆芯物理参数。

## 2. 方案论证说明和有关设计参数的选取

### 2.1. 设计依据和基本假设条件

压水堆核电站实心燃料堆芯向环形燃料堆芯过渡方案研究以秦山二期 2 号机组反应堆为研究对象。秦山二期 2 号机组反应堆前 10 循环采用的都是年换料的燃料管理策略，从第 11 循环开始采用长循环的燃料管理策略，因年换料过渡到长周期换料时堆芯性能参数扰动较大，为避免由年换料过渡到长周期换

料对实心燃料堆芯向环形燃料堆芯过渡方案带来的影响，从秦山二期 2 号机组长周期平衡循环堆芯开始向环形燃料堆芯过渡。为获得秦山二期 2 号机组长周期平衡循环堆芯，开展秦山二期 2 号机组长周期燃料管理，秦山二期 2 号机组长周期平衡循环堆芯装载图为图 1 所示。

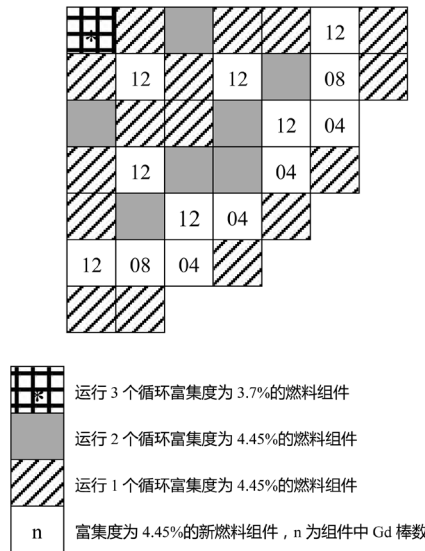


Figure 1. Balanced cycle core loading diagram  
图 1. 平衡循环堆芯装载图

秦山二期 2 号机组长周期平衡循环实心燃料堆芯向环形燃料堆芯过渡的要求及假设条件如下：

- 1) 反应堆的主要参数不变；
- 2) 从秦山二期 2 号机组长周期平衡循环实心燃料堆芯向环形燃料堆芯过渡；
- 3) 本方案设计论证采用如下限值：焓升因子  $F_{\Delta H} \leq 1.65$ ，热点因子  $F_Q \leq 2.45$ ，慢化剂温度系数  $\leq 0$  pcm/°C，循环长度 18 个月，堆芯保持 1/4 旋转对称性[5] [6]。

参照秦山二期 2 号机组 AFA-3G 组件进行环形燃料组件设计，环形燃料组件的排布方式为  $13 \times 13$ ，组件中有 8 个导向管和一个测量管，燃料组件对边距与秦山二期燃料组件一致，环形燃料组件截面图如图 2 所示。环形燃料采用二氧化铀芯块，密度与秦山二期燃料芯块一致。

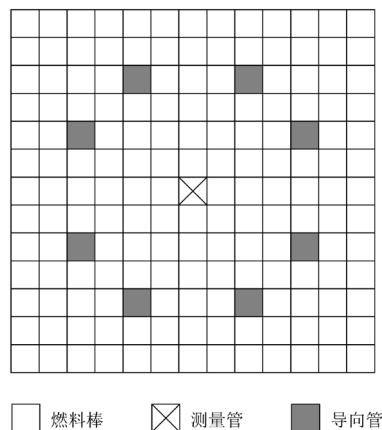


Figure 2. Annular fuel assembly section  
图 2. 环形燃料组件截面图

## 2.2. 堆芯换料方案的确定

秦山二期 2 号机组长周期平衡循环实心燃料堆芯向环形燃料堆芯过渡时堆芯装载模式沿用秦山二期长周期换料方式，换料方式为 IN-OUT 低泄漏装载模式，即大部分新环形燃料组件布置在堆芯内区，但如果新环形燃料组件全部布置在堆芯内区，引起的功率峰难以展平到安全限值内，因此在堆芯最外围且离压力容器最远位置布置一些新环形燃料组件，既展平了功率峰、保证了安全性，又较大程度地维护了燃料的利用率[7] [8]。

## 2.3. 新环形燃料组件 U-235 富集度的确定

由于相同燃料富集度下，环形燃料组件燃料释放的能量要比实心燃料的少且秦山二期 2 号机组长周期平衡循环堆芯向环形燃料堆芯过渡时堆芯换料沿用秦山二期 2 号机组长周期换料方式，即每批换料量与秦山二期 2 号机组一样，因此在由实心燃料堆芯过渡到环形燃料堆芯时，环形燃料组件的富集度与实心燃料相比需要提高。秦山二期 2 号机组长周期采用的是富集度为 4.45% 的换料燃料组件，为了保证 18 个月的循环长度，经过计算分析秦山二期 2 号机组长周期平衡循环堆芯向全堆装载环形燃料过渡时采用富集度为 5.45% 的环形燃料组件。

## 2.4. 可燃毒物的选择及其含量的确定

堆芯过渡时，燃料富集度由 4.45% 增加到 5.45%，且堆芯内区布置了高富集度的新环形燃料组件，引

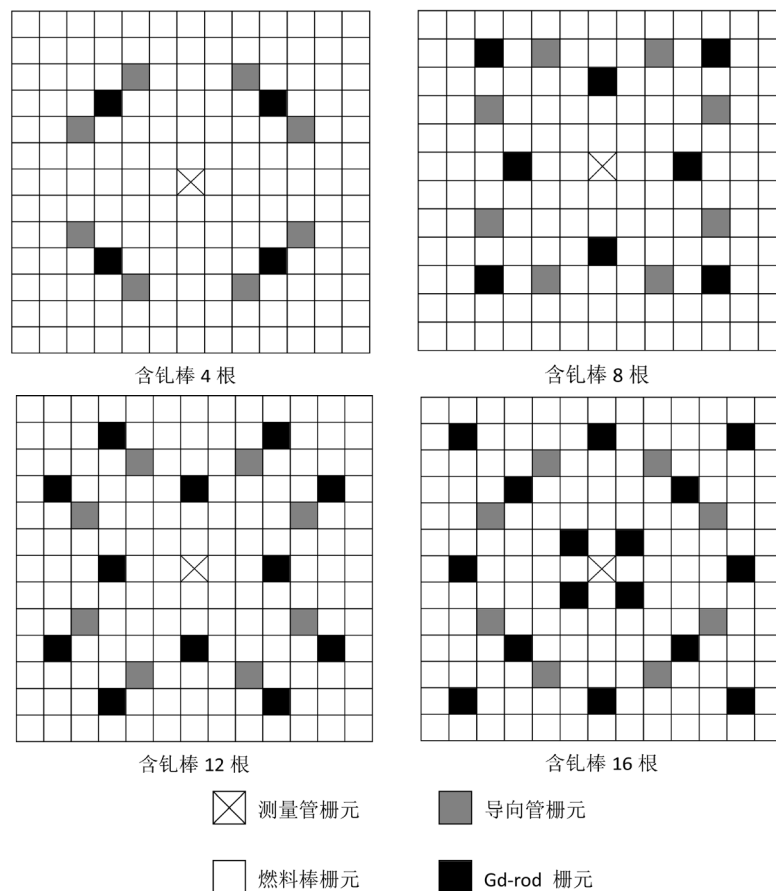


Figure 3. Distribution of gadolinium rods in annular fuel assemblies  
图 3. 钆棒在环形燃料组件中的分布图

起了较大的功率峰,为了展平堆芯径向功率峰,需采用含钆燃料棒。钆元素是天然存在的热中子吸收能力最强的元素,它不仅能适应于大反应控制要求,而且堆芯寿期末残余量少,有利于充分利用燃料,延长堆芯寿期。因此,适量配置可燃毒物,在降低功率峰的同时,也不至于更多影响燃料的利用率。同时考虑到生产、组装燃料的复杂性,过渡时采用较少种类的含钆组件[9]。在实心燃料堆芯过渡到环形燃料堆芯时,含钆燃料棒中的 $Gd_2O_3$ 与 $UO_2$ 均匀弥散在芯块中, $Gd_2O_3$ 的质量分数为8%,U-235富集度为3.1%。根据含钆燃料棒在组件中的数量又分为4、8、12、16根等。图3为含钆燃料棒在环形燃料组件中的分布图(分别为含钆燃料棒4、8、12和16根)。

### 3. 换料堆芯描述

在确保满足上述要求的前提下,通过多方案的计算分析,选择较优的装载方案。秦山二期2号机组长周期平衡循环实心燃料堆芯向环形燃料堆芯过渡时经过3次换料使秦山二期2号机组反应堆堆芯全部装载环形燃料,到第4个循环到达平衡。在换料时运行过两个循环的燃料组件再入堆的选取原则是挑选能耗浅、反应性大的已辐照燃料组件。其中过渡过程中第1次换52盒富集度为5.45%的环形燃料组件,第2次、第3次和第4次装入48盒富集度为5.45%环形燃料组件,表1为实心燃料堆芯向环形燃料堆芯过时环形燃料组件数目汇总。图4为过渡的第1循环堆芯装载图,图5为第4循环堆芯装载图。表2为实心燃料堆芯向环形燃料堆芯过渡时主要燃料管理计算结果。

Table 1. Annular fuel assembly number summary

表 1. 环形燃料组件数目汇总

参数名称	第1循环混合堆芯	第2循环混合堆芯	第3循环环形堆芯	第4循环环形堆芯
换料组件的载钆燃料棒类型	0/8/12/16	0/4/8/12/16	0/4/8/12/16	0/4/8/12/16
换料组件数, 盒	8/16/20/8	8/8/8/20/4	8/8/8/20/4	8/8/8/20/4

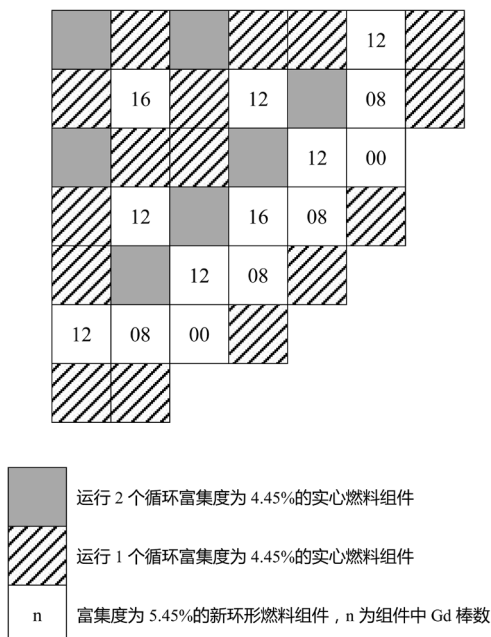


Figure 4. Core reloading pattern of cycle 1

图 4. 第 1 循环堆芯装载图

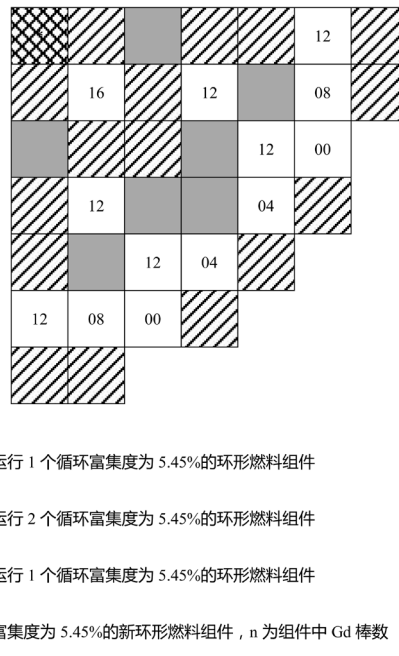


Figure 5. Core reloading pattern of cycle 4  
图 5. 第 4 循环堆芯装载图

Table 2. Core fuel management calculation results  
表 2. 堆芯燃料管理计算结果

参数名称	第 1 循环混合堆芯	第 2 循环混合堆芯	第 3 循环环形堆芯	第 4 循环环形堆芯
焓升因子	1.388	1.394	1.406	1.406
热点因子	1.993	1.990	1.941	1.867
慢化剂温度系数, pcm/°C	-9.33	-10.14	-10.65	-11.02
循环长度, EFPD	509	485	498	495
循环燃耗, MWd/tU	18,770	18,876	19,939	19,820

由表 2 可见, 该过渡方案焓升因子最大为 1.406, 满足小于 1.65 的设计准则; 热点因子最大为 1.993, 满足小于 2.45 的设计准则; 慢化剂温度系数最大为 -9.33 pcm/°C, 满足负温度系数的设计准则; 循环长度逐渐稳定并最终实现 18 个月的长周期换料的换料要求(≥480 EFPD); 因此该过渡方案是可行的。

## 4. 换料方案主要物理参数分析

### 4.1. 反应性系数

表 3 为寿期初热态零功率(BOL-HZP)状态下反应性系数。由表 3 可以看出, 对于慢化剂温度系数, 环形燃料堆芯小于混合堆芯小于实心燃料堆芯; 对于多普勒温度系数, 混合堆芯、环形燃料堆芯与实心燃料堆芯相差不大, 其中混合堆芯和环形堆芯均比实心燃料堆芯略负; 对于功率系数, 混合堆芯最小, 这是因为功率效应主要由温度效应和多普勒效应贡献, 与实心燃料堆芯相比, 混合堆芯功率系数更小的主要原因在于混合堆芯的慢化剂温度系数比实心燃料堆芯小, 而与环形燃料堆芯相比, 混合堆芯功率系数更小的主要原因在于功率变化引起的燃料温度的变化混合堆芯大于环形燃料堆芯, 其中功率变化 1%, 混合堆芯燃料温度变化 1.83°C, 而环形堆芯变化 1.03°C。



**Table 3.** Reactivity coefficient at BOL-HZP (Critical boron concentration)**表 3.** 寿期初热态零功率(BOL-HZP)状态下反应性系数(临界硼浓度)

参数名称	过渡前 实心堆芯	第 1 循环 混合堆芯	第 2 循环 混合堆芯	第 3 循环 环形堆芯	第 4 循环 环形堆芯
慢化剂温度系数 pcm/°C	-0.61	-9.33	-10.14	-10.65	-11.02
多普勒系数 pcm/°C	-3.33	-3.47	-3.53	-3.65	-3.67
功率系数 pcm/%	-13.84	-17.51	-21.55	-15.65	-12.86

压水堆核电站运行中,反应性主要由控制溶解在冷却剂水中的硼酸浓度实现。硼是一种极好的热中子吸收材料,它对热中子利用系数影响很大,所以对慢化剂温度系数影响很大。由于过渡方案各循环寿期初热态零功率下硼浓度均不同,为了进一步分析过渡方案的慢化剂温度系数,计算分析各循环不同硼浓度下的慢化剂温度系数,计算结果如表 4 所示,可见在任何硼浓度下,环形燃料堆芯慢化剂温度系数均小于混合堆芯的小于实心燃料堆芯。由于负的慢化剂温度系数使反应堆具有自稳性,可见环形燃料堆芯比实心燃料堆芯自稳性更高。

**Table 4.** Reactivity coefficient at BOL-HZP**表 4.** 寿期初热态零功率(BOL-HZP)状态下反应性系数

慢化剂温度系数 pcm/°C	过渡前 实心堆芯	第 1 循环 混合堆芯	第 2 循环 混合堆芯	第 3 循环 环形堆芯	第 4 循环 环形堆芯
2000 ppm	-3.68	-7.93	-10.97	-13.08	-13.03
1500 ppm	-12.44	-15.98	-18.95	-20.56	-20.63
1000 ppm	-21.44	-24.28	-26.98	-28.62	-28.53
500 ppm	-30.69	-32.92	-35.18	-36.36	-36.41
10 ppm	-39.98	-41.6	-43.54	-44.33	-44.44

## 4.2. 燃料温度

表 5 为寿期初热态满功率下堆芯燃料平均温度和燃料中心温度。从表 5 可见,对于混合堆芯无论是最大燃料中心温度、最大燃料平均温度还是两者之差,环形燃料组件的均比实心燃料低,其最大燃料中心温度环形燃料组件比实心燃料低 440°C,最大燃料平均温度环形燃料组件比实心燃料低 165°C,最大燃料中心温度与最大燃料平均温度之差环形燃料组件比实心燃料低 275°C;环形堆芯最大燃料中心温度、最大燃料平均温度和两者之差均比实心燃料堆芯低,其中最大燃料中心温度低 497°C,最大燃料平均温度低 248°C,最大燃料中心温度与最大燃料平均温度之差低 249°C;混合堆芯实心燃料组件最大燃料平均温度和最大燃料中心温度比实心堆芯低,环形燃料组件最大燃料平均温度和最大燃料中心温度比环形堆芯高,这是环形燃料与实心燃料相互影响的结果。由上可见,环形燃料传热效果比实心燃料好,环形燃料的燃料温度及燃料中心温度比实心燃料低,有很大的安全裕量。

**Table 5.** Fuel average temperature and fuel centerline temperature at BOL-HZP**表 5.** 寿期初热态满功率下堆芯燃料平均温度和燃料中心温度

参数	实心堆芯	混合堆芯		环形堆芯
		实心燃料	实心燃料	
最大燃料平均温度, °C	677	600	435	429
最大燃料中心温度, °C	945	894	454	448

为进一步环形燃料传热效果, 保持过渡堆芯装载方案、反应堆冷却剂流量及堆芯入口温度不变, 提高反应堆功率, 计算堆芯燃料温度, 计算结果如表 6 所示。由表可见, 无论是混合堆芯还是环形堆芯, 提升相同的功率下, 环形燃料中心温度比实心燃料增加的少, 当提升功率到 200% 时, 环形燃料堆芯燃料中心温度为 617℃, 较提升前增加 169℃, 实心燃料堆芯燃料中心温度为 1573℃, 较提升前增加 788℃。所以, 在大幅度提升功率后, 环形燃料仍有较低的中心温度。

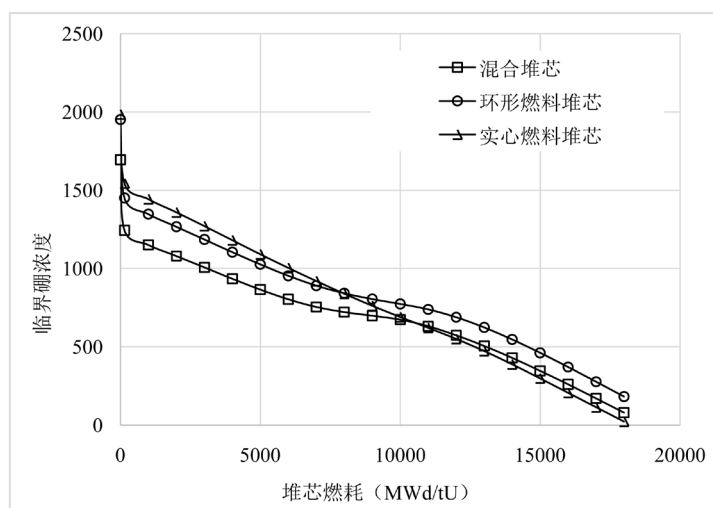
**Table 6.** Fuel centerline temperature at beginning of life

**表 6.** 寿期初堆芯燃料中心温度

功率水平	实心堆芯	混合堆芯		环形堆芯
		实心燃料	实心燃料	
100%	945	894	454	448
120%	1091	1039	484	479
140%	1239	1206	513	511
160%	1391	1388	542	546
180%	1516	1496	573	581
200%	1573	1540	605	617

#### 4.3. 临界硼浓度

图 6 为临界硼浓度随堆芯燃耗的变化, 由图 6 可知, 实心燃料堆芯、混合堆芯及环形燃料堆芯的临界硼浓度均随堆芯燃耗的不断加深而逐渐减少, 但变化速率均不相同, 这是由于堆芯内含钷可燃毒物不同引起的。其中实心燃料堆芯更接近线性变化, 这是因为毒物释放的反应性基本被燃耗消耗的反应性抵消。



**Figure 6.** Variation of critical boron concentration with core burnup

**图 6.** 临界硼浓度随堆芯燃耗的变化

#### 4.4. 堆芯轴向功率分布

图 7 为寿期初堆芯轴向相对功率, 图 8 为寿期末堆芯轴向相对功率, 由图 7、图 8 可见, 随着燃耗加深, 堆芯的轴向功率分布变得愈加平坦, 环形堆芯轴向功率分布与实心燃料堆芯趋势比较接近。



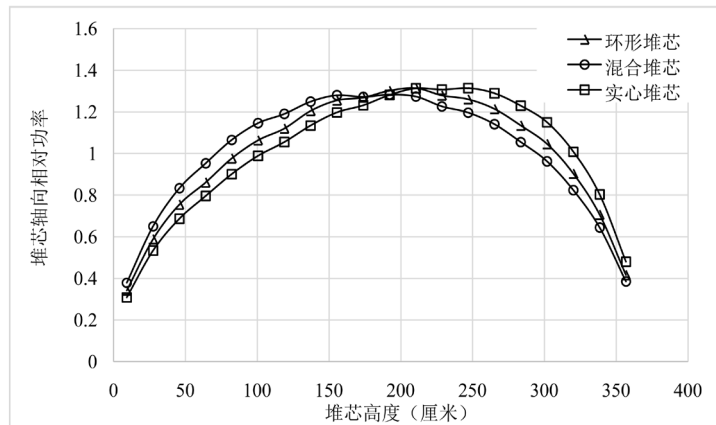


Figure 7. Distribution of axial relative power at beginning of life

图 7. 寿期初堆芯轴向相对功率

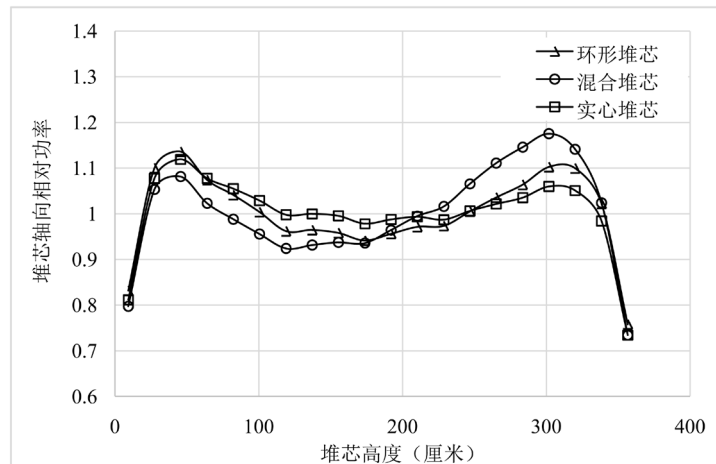


Figure 8. Distribution of axial relative power at end of life

图 8. 寿期末堆芯轴向相对功率

## 5. 结论

文章设计了一个由秦山二期 2 号机组实心燃料堆芯逐步向环形燃料堆芯过渡的堆芯换料方案，计算了各循环焔升因子、热点因子、慢化剂温度系数及循环长度等关键堆芯物理参数且各循环关键堆芯物理参数均满足设计要求，可见设计的过渡方案是可行的。

另外，对比分析了环形燃料堆芯、混合堆芯及实心燃料堆芯的反应性系数、燃料温度、临界硼浓度和轴向功率分布等物理参数，得出以下结论：1) 环形燃料堆芯和混合堆芯慢化剂温度系数均比实心燃料堆芯更负，可见环形燃料堆芯比实心燃料堆芯自稳性更高；2) 环形燃料堆芯的燃料中心温度、燃料平均温度及两者之差均比实心燃料堆芯低，可见环形燃料传热性能好，有很大的安全裕量；3) 在大幅度提升功率后，环形燃料堆芯仍有较低的中心温度，可见在压水堆中应用环形燃料，能在保持或增进现有反应堆安全性能的前提下，提高压水堆的功率密度。

## 参考文献

- [1] 代启东, 夏兆东, 朱庆福. 百万千瓦级环形燃料堆芯设计[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(12): 2205-2211.
- [2] Kazimi, M.S., *et al.* (2006) High Performance Fuel Design for Next Generation PWRs: Final Report. US: Massachu-

setts Institute of Technology.

- [3] Beccherle, J. (2007) Feasibility and Economics of Existing PWR Transition to a Higher Power Core Using Annular Fuel. Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- [4] 季松涛, 何晓军, 张爱民, 等. 压水堆核电站采用环形燃料元件可行性研究[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(10): 1232-1236.
- [5] 姚红, 高鑫, 孙幸光, 等. 秦山二期长循环燃料管理方案研究[J]. 原子能科学技术, 2015, 49(12): 2217-2221.
- [6] 李旭东, 李庆, 咸春宇, 等. 秦山核电二期工程长燃耗堆芯可行性方案论证[J]. 核动力工程, 1999, 20(5): 289-300.
- [7] 谢仲生, 吴宏春, 张少泓. 核反应堆物理分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- [8] 肖岷. 压水堆核电站燃料管理燃料制造与燃料运行[M]. 北京: 原子能出版社, 2008.
- [9] 谢仲生. 压水堆核电厂堆芯燃料管理计算优化[M]. 北京: 原子能出版社, 2001.