

# 10 MW 多功能池式研究堆控制棒方案设计

韩 鹏, 陈晓亮\*, 张振洋, 朱珈辰, 金 晓  
(中国原子能科学研究院 反应堆工程技术研究所, 北京 102413)

**摘要:** 本文以 10 MW 多功能池式研究堆为研究对象。针对低功率、少燃料组件数目、反中子阱型的堆芯设计特点, 探究了不同形式的控制棒及其布置对棒自身价值和堆芯的影响, 在兼顾反应堆运行安全、孔道中子注量率、功率峰因子和后续燃料管理方式等方面下, 最终确定采用叉形控制棒形式, 通过研究叉形控制棒内中子注量率和线功率密度等参数分析其使用安全。结果表明: 采用叉形控制棒的堆芯方案, 最大满功率运行天数较低, 燃料组件功率分布平坦, 总功率峰因子 $<1.5$ , 相较其他方案, 在全寿期内, 堆内孔道平均热中子注量率更高; 从控制棒安全性能考虑, 叉形控制棒的内侧控制板最大温度也远低于其温度限值。本文结果可为 10 MW 多功能池式研究堆控制棒设计方案提供参考。

**关键词:** 多功能池式研究堆; 堆芯设计; 控制棒

中图分类号: TL32

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2025)05-1094-11

doi: 10.7538/yzk.2024.youxian.0659

## Design and Research of Control Rod Scheme for 10 MW Multifunctional Pool-type Research Reactor

HAN Peng, CHEN Xiaoliang\*, ZHANG Zhenyang, ZHU Jiachen, JIN Xiao

(Department of Reactor Engineering Technology, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** Swimming pool-type reactors have typical advantages such as simple system, high inherent safety, powerful irradiation application function, moderate core size, diverse irradiation channels, and simple operation and maintenance. Among them, Class II research reactors have low operating costs and can carry out various low-temperature irradiation tests. Their performance indicators are sufficient to meet the needs of fuel and material testing, production of various medical isotopes, and large-size single crystal silicon doping. They are an indispensable part of my country's research reactors to achieve high, medium and low power matching. In order to meet the future needs of new reactor fuels, material tests and various neutron applications in my country, an overall design scheme for a new 10 MW multifunctional pool-type research reactor was proposed. At the same time, application facilities such as boron neutron capture therapy (BNCT), large-size single crystal silicon neutron transmutation doping (NTD) channels, horizontal channels and hot columns were set up in the reactor pool area to realize multifunctional neutron application capabilities. Aiming at the core design characteristics of low power, small number of fuel assemblies and anti-neutron well type, the influence of three different forms of

收稿日期: 2024-09-14; 修回日期: 2024-10-21

基金项目: 中国原子能科学研究院院长基金

\* 通信作者: 陈晓亮

control rods and their arrangements on the value of the rods themselves and the core was explored. Taking into account the safety of reactor operation, channel neutron fluence rate, power peak factor and subsequent fuel management methods, the forked control rod form was finally determined. The neutron fluence rate and linear power density in the forked control rod were analyzed to ensure its safety in use. The results show that for each core scheme using forked control rods, the maximum full-power operation days are lower, but the power distribution of the fuel assembly is flat, and the total power peak factor is  $<1.5$ . Compared with other schemes, the average thermal neutron fluence rate in the core channels is higher throughout the life cycle. Considering the safety performance of the control rods, the maximum temperature of the inner control plate is also far below its temperature limit. By comparing three types of control rods, this paper reveals the typical characteristics of three mature control rod schemes suitable for compact cores and plate-shaped fuel assemblies, and proposes a design scheme for a control system for a 10 MW multifunctional pool-type research reactor using forked control rods, which makes the reactor power peak factor lower and the channel neutron fluence rate higher, ensuring stable and safe operation of the core and ensuring that the research reactor has efficient irradiation capability.

**Key words:** multifunctional pool-type research reactor; reactor core design; control rod

游泳池式反应堆具有系统简单、固有安全性高、辐照应用功能强大、中子能谱较硬、堆芯大小适中、辐照孔道多样、运行维护简单等典型优势,其中1~10 MW的Ⅱ类研究堆运行成本低,可开展各类低温辐照试验,其性能指标足以满足燃料及材料考验、各类医用同位素生产、大尺寸单晶硅掺杂和硼中子俘获治疗(BNCT)等方面的需求,是我国研究堆实现高、中、低功率匹配不可或缺的一部分。

随着全球高密度低富集度燃料(如 $U_3Si_2$ 、 $UMo$ )的发展和各类传热性能好的燃料元件结构设计(如渐开线、平板状、曲板状、环形)的提出,未来小堆无需更多的燃料组件便可具备足量的剩余反应性和较高的中子注量率,这对堆芯内部功率展平和后续燃料管理方式均提出了较高要求。为拓展研究堆的应用场景,提高研究堆的多功能应用特性,目前全球先进池式研究堆的建设普遍采用结构紧凑、栅距小的反中子阱型堆芯设计,这对堆芯内部控制棒的形状和布置也做了一定限制。中国先进研究堆(CARR)<sup>[1]</sup>选用 $U_3Si_2$ -Al板状燃料,采用4个材料为Hf的跟随体控制棒进行堆芯反应性控制。荷兰HOR反应堆<sup>[2]</sup>采用板状控制棒,并将板状控制棒布置于堆芯内部4个燃料组件中央位置。智利RECH-1反应堆<sup>[3]</sup>和美国UMLRR反应堆<sup>[4]</sup>则将4~6个板状控制棒布置于

堆芯燃料组件之间的水隙中。巴西IEA-R1反应堆<sup>[5]</sup>、阿尔及利亚NUR反应堆<sup>[6]</sup>和印度Apsara-U反应堆<sup>[7]</sup>均采用叉形控制棒作为反应堆主要控制系统。

本文以10 MW多功能池式研究堆为研究对象,基于蒙特卡罗软件对跟随体控制棒、叉形控制棒和板状控制棒这3种典型控制棒形式进行研究分析,获得适用于低功率、板状燃料组件、反中子阱型堆芯的控制棒形式和布置,从而提高10 MW多功能池式研究堆的中子注量率和运行安全性,为我国新型材料研发和核能科学发展提供一个安全可靠、功能强大的科研平台。

## 1 10 MW多功能池式研究堆总体方案

10 MW多功能池式研究堆为池式结构,反中子阱型紧凑堆芯,采用与CARR相同的板状燃料组件,于堆芯布置若干用于进行材料、燃料辐照考验和同位素生产的垂直孔道,堆水池内布置用于大尺寸单晶硅掺杂的中子嬗变掺杂(NTD)孔道、BNCT、热柱和水平孔道等,如图1所示,堆芯采用轻水自上而下流动进行冷却。研究堆堆芯布置如图2所示,堆芯主要设计参数如表1所列。堆芯包含12组板状燃料组件,组件数目较少,后续燃料管理方式有限,通过展平功率分布,不仅可以提高反应堆运行安全性,同时也可提供更多样的

燃料管理方案。由于堆芯栅距为 77.2 mm, 导致控制棒无法于燃料组件间有限的水隙中进行布置, 为此本文基于蒙特卡罗软件针对该堆芯进行控制棒的设计及布置方案研究。

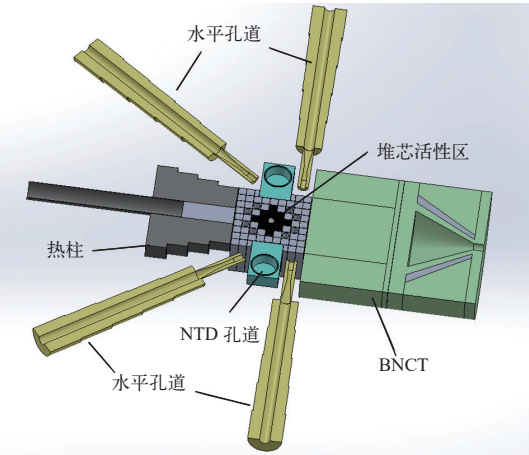


图1 10 MW 多功能池式研究堆总体布置截面图  
Fig. 1 Schematic diagram of overall layout of 10 MW multifunctional pool-type research reactor

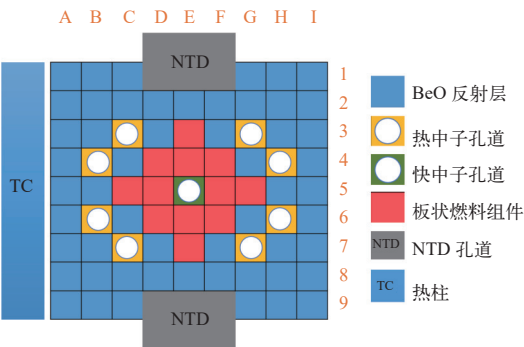


图2 堆芯布置示意图  
Fig. 2 Reactor core layout diagram

2 3 种控制棒形式

10 MW 多功能池式研究堆采用紧凑型堆芯设计, 堆芯体积小, 燃料组件数目和栅距有限<sup>[8]</sup>, 为保证较高的中子注量率, 对控制棒的形状和布置方式提出了较高要求。研究堆在每一个换料周期内会根据不同运行任务进行频繁的反应堆启动、运行、实验、停闭等工作, 因此控制棒在活性区插入/拔出的频率很高, 这对控制棒的热稳定性能、抗辐照性能和使用寿命均提出更为苛刻的要求。

基于核安全法规中对研究堆停堆系统的基本规定, 在结合该 10 MW 堆芯设计特性前提下, 经过充分调研国内外堆反应性控制系统, 对控制棒

表 1 堆芯主要设计参数  
Table 1 Main design parameter of reactor core

| 设计参数                    | 设计值                                |
|-------------------------|------------------------------------|
| 反应堆功率, MW               | 10                                 |
| 水池高度, m                 | 9                                  |
| 活性区高度, cm               | 60                                 |
| 循环周期, EFPD              | 40~50                              |
| 燃料芯块材料                  | U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> -Al |
| 燃料包壳材料                  | Al-6061                            |
| 反射层材料                   | BeO                                |
| <sup>235</sup> U 富集度, % | 19.75                              |
| 燃料密度, g/cm <sup>3</sup> | 4.3                                |
| 栅距, mm                  | 77.2                               |
| 燃料芯块尺寸, cm              | 6.16×0.06×60                       |
| 燃料包壳尺寸, cm              | 6.26×0.136×69                      |
| 燃料组件尺寸, cm              | 7.62×7.62×149                      |
| 燃料组件数目                  | 12                                 |

的设计和布置设置了以下约束准则: 1) 控制棒应具有足够的反应性控制能力, 满足“卡棒准则”, 即在冷态工况下寿期内最大价值 1 组控制棒发生卡棒, 堆芯有效增殖因数小于等于 0.99; 2) 控制棒总价值应足够满足两套停堆系统的设计裕量; 3) 堆芯燃料组件数目有限, 尽可能使用同种燃料组件以方便进行燃料管理提高卸料燃耗; 4) 控制棒布置合理, 使得堆芯功率密度分布均匀性较好; 5) 在满足反应性控制需求前提下, 尽可能减少控制棒数量, 简化堆反应性控制系统<sup>[9-10]</sup>。

其中需首先满足“卡棒准则”和两套停堆系统的基本法规要求; 其次, 为方便后续燃料管理并提高反应堆运行安全性, 设置了 3、4 两个准则; 最后, 针对控制棒在堆芯内体积受限, 可能导致控制棒布置数量增加的问题, 且为避免多种燃料组件的使用, 在满足上述前 4 个准则前提下, 提出了准则 5, 并希望尽可能减少堆内控制棒数量以简化堆反应性控制系统。

本文基于跟随体控制棒、叉形控制棒和板状控制棒 3 种控制棒形式进行了堆内性能分析。跟随体控制棒如图 3 所示, 为中空框式正方形铅吸收体, 吸收体中间包含不锈钢环管, 起到固定作用, 防止铅板变形, 其他部分充满轻水, 在其外围为方形的铝合金制控制棒导管, 下端与跟随体燃

料组件相接,当铪控制棒提出堆芯时,跟随体燃料组件随之进入堆芯。叉形控制棒如图4所示,1组叉形控制棒包含两个控制板,在每个控制板内侧相邻位置设置铝板替换1个燃料板,防止控制板在插/拔过程中划伤燃料板,采用叉形控制棒的每个燃料组件包含17个燃料板,堆正常运行期间两个控制板之间相互锁死,通过控制棒上端提梁实现控制板的下插和提升,在换料期间1组叉形控制棒的两个控制板可以解锁,用于进行堆的换料操作。板状控制棒如图5所示,内部为 $B_4C$ 等吸收体材料,外包不锈钢或铝等金属材料。板状控制棒一般布置于堆芯内水隙中。

跟随体控制棒在插/拔过程中,下方的燃料组

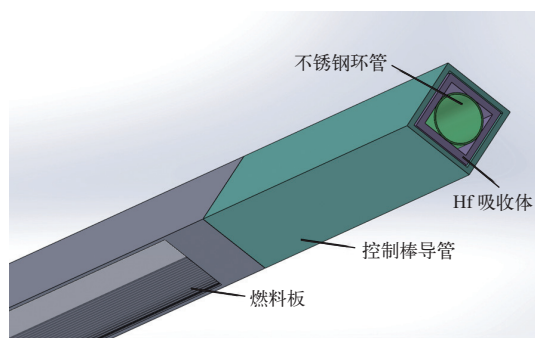


图3 跟随体控制棒结构

Fig. 3 Following body control rod structure

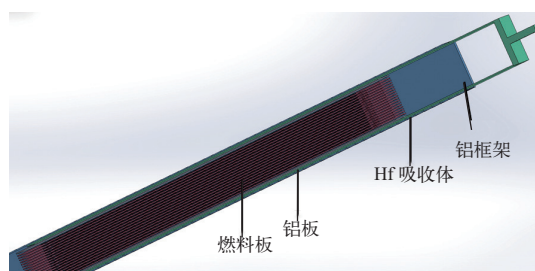


图4 叉形控制棒结构

Fig. 4 Forked control rod structure

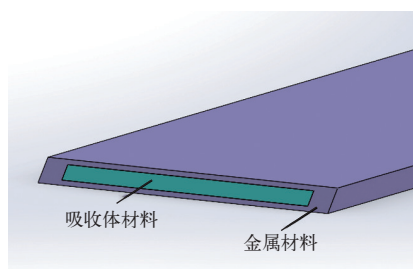


图5 板状控制棒结构

Fig. 5 Plate control rod structure

件跟随控制棒一起移动,所以跟随体控制棒的棒价值较大,能够补偿更多的剩余反应性,有利于延长循环周期,但跟随体控制棒的微分价值过大导致对应燃料组件的轴向功率峰因子较大,不利于反应堆的功率展平。相反,叉形控制棒两个控制板价值较低,两个单板作用于燃料组件时,不会导致该燃料组件产生较大的轴向功率峰因子,同时叉形控制棒的两个控制板之间相距7 cm左右,两个控制板之间的干涉作用使得单组叉形控制棒总价值大于两个单板价值之和,插/拔时两个控制板一起运动,使得整个控制棒具备足量的棒价值,而且叉形控制棒的两个控制板可以同时作用于多个燃料组件,有利于径向功率展平。相较叉形控制棒在换料期间频繁的断开及锁死操作,板状控制棒的换料操作更简单,相较跟随体控制棒也具有更好的功率展平能力。

目前跟随体控制棒在CARR等高功率密度的堆型下得到应用,叉形控制棒在TRR、Apsara、RA-6、RP-10等1~10 MW堆型下得到应用较多,板状控制棒在OPAL、HOR、RECH-1堆等5~20 MW堆型下得到应用较多。针对小功率、低功率密度的池式研究堆,采用国内技术比较成熟的跟随体控制棒或采用更适用于功率展平的叉形控制棒,抑或是采用换料方式更加简单的板状控制棒,是本文后续需要分析研究的内容。

在控制棒材料选取方面,由于Hf具有良好的耐腐蚀性能、抗辐照性能、机械加工性能和热稳定性能,且Hf热中子和超热中子吸收截面均较大,其吸收中子后的子体还能有效地再吸收中子,具有较长的使用寿命,也是目前唯一可以直接与冷却剂接触而不需要包壳的控制棒材料<sup>[11-12]</sup>,所以本文主要采用Hf作为堆内使用频率最高的补偿棒的优先考虑材料。

### 3 物理计算分析

#### 3.1 多种控制棒布置方案

针对上述3种控制棒形式,在考虑尽量展平堆芯功率分布的前提下,设置了4种不同控制棒布置方案,如图6所示。由于堆芯采用反中子阱型设计,堆内最大热中子注量率出现于反射层区域,综合考虑外围BNCT、热柱、水平孔道和NTD孔道的中子注量要求和工程因素,4种方案热中



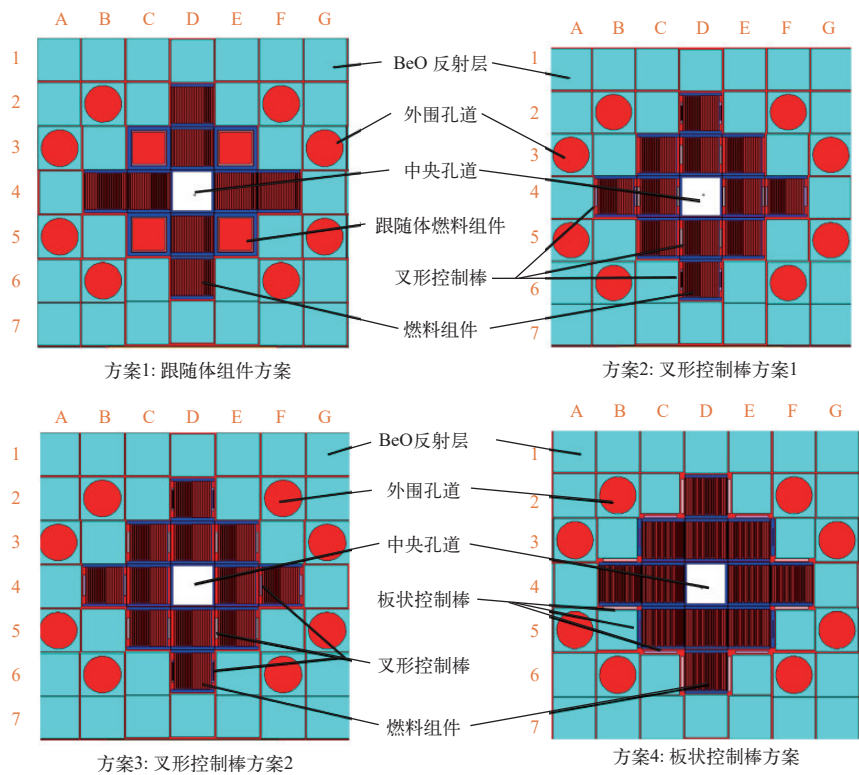


图6 4种控制棒布置方案图

Fig. 6 Diagram of four types of control rod schemes

子辐照孔道设定位置相同。4种方案控制棒布置位置和材料如表2所列,方案1采用跟随体组件形式用于堆芯反应性控制,紧急停堆时B3和F5位置BeO块下降,安全棒插入堆芯。方案2和方案3均采用叉形控制棒方案。方案4为实现堆芯内

部的紧凑,将板状控制棒设置于堆芯外围,所有控制棒将整个燃料组件区域包围,各外围控制棒之间相互独立,单棒价值较小,有利于堆功率调节,相较叉形控制棒方案,在堆芯换料期间棒的操作更加简便。

表2 不同方案控制棒位置和材料

Table 2 Control rod position and material for different schemes

| 方案 | 棒形状   | 补偿棒位置/材料          | 调节棒位置/材料                  | 安全棒位置/材料                               |
|----|-------|-------------------|---------------------------|--|
| 1  | 跟随体形式 | E3、C5/Hf          | C3、E5/不锈钢                 | B3、F5/B <sub>4</sub> C                 |
| 2  | 叉形控制棒 | D3、C4、E4、D5/Hf    | B4、F4/不锈钢                 | D2、D6/B <sub>4</sub> C                 |
| 3  | 叉形控制棒 | C3、E3、C5、E5/Hf    | B4、F4/不锈钢                 | D2、D6/B <sub>4</sub> C                 |
| 4  | 板状控制棒 | D2、D6、B4、F4 双侧/Hf | C3、C5 左侧;<br>E3、E5 右侧/不锈钢 | C3、E3 上侧;<br>C5、E5 下侧/B <sub>4</sub> C |

在堆芯设计阶段,主要关心控制棒的价值及其对反应堆的影响,在控制棒的物理设计计算过程中,重点关注控制棒的热负荷、中子能谱、积分中子注量率等,用以确保控制棒的使用寿命。由于控制棒中含有强吸收体材料,造成该区域中子注量率随空间急剧变化,中子注量率角分布各向异性非常严重,因此要求采用更加严格的物理计

算方法。本文基于蒙特卡罗软件进行物理分析计算<sup>[13]</sup>,并采用 ENDF/B-VII 数据库,通过设定权窗降低计算误差,将径向功率峰因子和轴向功率峰因子的相对误差控制在 0.6%,总功率峰因子计算相对误差为 1.2%,快中子注量率相对误差为 0.8%,热中子注量率相对误差为 2%,线功率密度计算相对误差为 1.2%。

3.2 控制棒价值

在上述控制棒设计约束准则要求下,需设计两套停堆系统以确保研究堆运行的安全性<sup>[14-16]</sup>。在控制棒形式和布置设计阶段,控制上述4种方案第1套停堆深度和停堆裕度相同,以探究不同控制棒形式和布置对反应堆的影响,从而选择最佳控制棒方案。

4种方案初装料的初始剩余反应性、停堆裕度、安全棒价值和补偿棒价值如表3所列。由表3可见,采用方案1的满功率运行天数最长(110 EFPD),方案2、3均为60 EFPD,方案4为75 EFPD。采用方案2、3相较方案1、4,堆芯内部少了48个燃料板,所以其剩余反应性和满功率运

行天数均较低。方案1和方案4初装料相同,但方案1的初始剩余反应性大于方案4,这一方面是因为方案1在反应堆运行期间,补偿棒插入堆芯内部,棒内部的轻水提高了紧凑型欠慢化堆芯的慢化效果,另一方面是因为方案4的安全棒布置在反射层区域,堆运行期间安全棒抽出堆芯,相较于方案1的BeO反射层,方案4水反射层对 neutron 反射效果较差,亦导致其较方案1初始剩余反应性较低。方案1采用跟随体形式的补偿棒,棒价值较大,有利于补偿堆芯的燃耗反应性,方案3控制棒位置更接近热中子注量率较高的堆芯反射层区域,所以方案3的补偿棒和安全棒价值均大于方案2。

表3 不同方案反应堆物理特性  
Table 3 Physical characteristic of reactor of different schemes

| 方案 | 初始剩余反应性/pcm  | 第1套停堆深度/pcm  | 停堆裕度/pcm     | 安全棒价值/pcm   | 补偿棒价值/pcm    | 最大运行时间/<br>EFPD |
|----|--------------|--------------|--------------|-------------|--------------|-----------------|
| 1  | 13 223.8(36) | -2 774.6(35) | -6 778.9(36) | 602.6(24)   | 11 247.5(24) | 110             |
| 2  | 9 517.0(36)  | -2 780.2(35) | -6 793.1(36) | 2 674.0(24) | 2 838.9(24)  | 60              |
| 3  | 9 459.7(36)  | -2 772.8(35) | -6 754.7(36) | 2 801.1(24) | 3 154.8(24)  | 60              |
| 4  | 10 495.3(36) | -2 794.0(35) | -6 777.8(36) | 1 096.1(24) | 1 829.5(24)  | 75              |

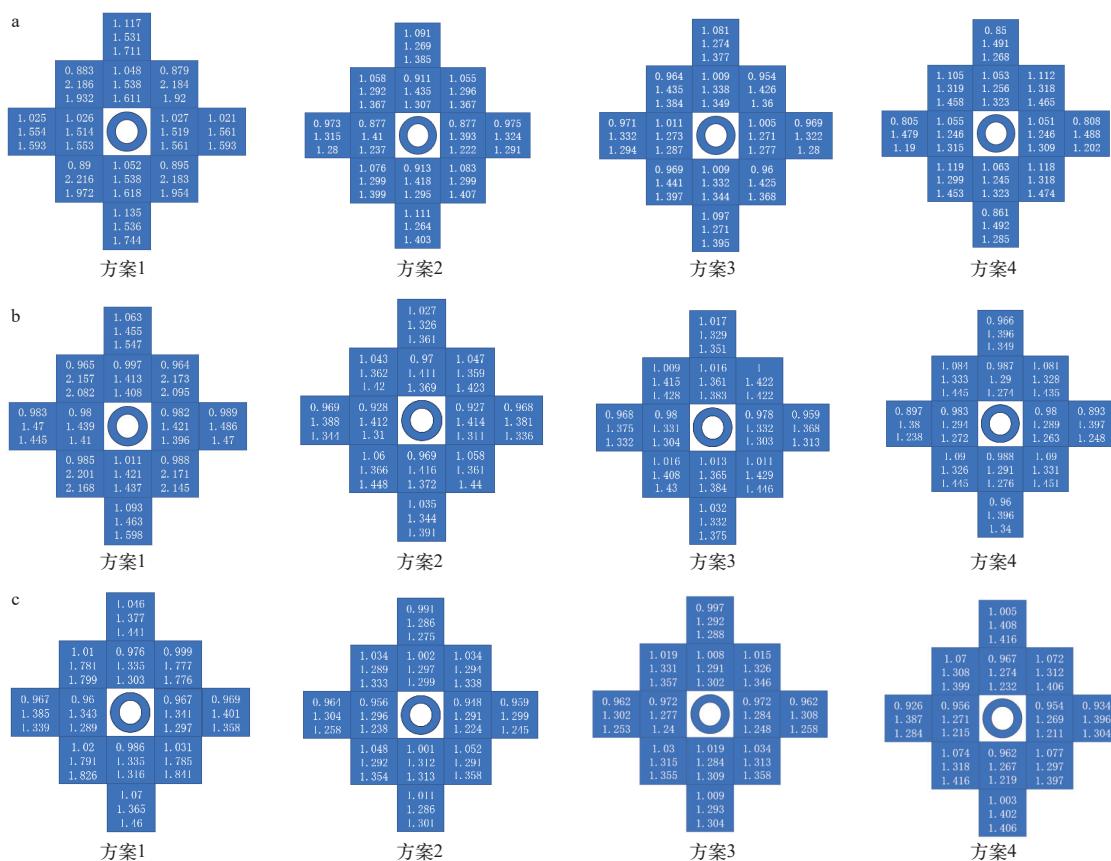
注:括号内为误差

从方便后续堆换料管理方面考虑,方案1由于采用两种燃料组件形式,导致其换料方式有限,而方案2、3、4均采用同种燃料组件,后续换料方案更加多样,有利于提高堆芯平均卸料燃耗,同时方案2、3均采用叉形控制棒,在反应堆运行期间,可以仅通过调节叉形控制棒位置而不更换燃料组件位置实现展平堆芯功率分布,提供了更多样且灵活的堆内组件功率展平方式,同时有利于后续开展控制棒的各种置换策略优化研究,进一步提高控制棒的使用寿命<sup>[17]</sup>。

3.3 功率峰因子

上述4种方案初装料状态下寿期初、中、末期的燃料组件功率峰因子如图7所示,随着燃耗的加深,各方案的径向功率峰因子均逐渐变小,堆内各组件功率分布逐渐展平。方案1的跟随体控制棒在反应堆运行过程中,当铅控制棒插入/拔出堆芯时,跟随体燃料组件随之离开/进入堆芯,此时整个跟随体燃料组件对堆芯引入反应性为控制

棒自身引入负/正反应性和燃料组件引入负/正反应性之和,所以跟随体控制棒整体价值较大,全寿期其轴向功率峰因子最大,总功率峰因子也最大,为2.168<sup>[18]</sup>。方案2和方案3的轴向功率峰因子均出现于控制棒所在燃料组件位置,但在寿期初和寿期中,方案3的径向功率峰因子和总功率峰因子均小于方案2,这是因为整个堆芯为反中子阱型,靠近反射层位置的燃料组件内热中子注量率最大,组件功率也最大,方案3将叉形补偿棒布置于组件功率最大的位于堆芯四角的燃料组件,使得方案3的径向功率峰因子和总功率峰因子与方案2相比小,但在寿期末,由于燃料组件内<sup>235</sup>U核子密度的降低,控制棒的影响逐渐减弱,方案2和方案3功率峰因子相差不大,全寿期内对应功率峰因子均<1.5,最大为1.448。方案4径向功率峰因子出现于堆芯四角组件,一方面是因为反中子阱型的堆芯设计基础及板状补偿棒的布置位置影响,另一方面是由于安全棒的拔出使对应位置填



图中3行数字从上到下依次为径向功率峰因子、轴向功率峰因子和总功率峰因子

a——寿期初; b——寿期中; c——寿期末

图7 寿期初、寿期中、寿期末4种方案的功率峰因子

Fig. 7 Power peak factor of four schemes at beginning, middle and end of life

充水,且靠近BeO反射层,轻水促进了中子的慢化,同时BeO反射层将慢化后的中子反射,使得四角的燃料组件功率最大,但全寿期内其功率峰因子均 $<1.5$ 。从反应堆运行安全方面考虑,采用叉形控制棒和板状控制棒的方案较优。

### 3.4 孔道中子注量率

4种方案堆内中央孔道快中子注量率轴向分布随寿期的变化如图8所示。在寿期初,方案1由于轴向功率峰因子较大,所以其最大快中子注量率也最大。方案1孔道内部平均快中子注量率相较其余3种方案最小,这是因为方案1采用跟随体控制棒,孔道内快中子注量率取决于周围 $^{235}\text{U}$ 核子密度,而跟随体控制棒插入堆芯时,控制棒下方的燃料组件离开堆芯,导致堆芯内孔道附近燃料装载变少,进而使得方案1中央孔道快中子注量率较其他方案低。方案2~4堆芯控制棒布置位置逐步远离堆芯中央孔道,所以中央孔道快中子注量率依次增大。随着堆运行寿期推进,

方案1轴向功率分布不断展平,最大快中子注量率不断减小,在寿期末相较于其他3种方案优势已不明显。在寿期中、末期,方案2~4的中央孔道快中子注量率已差别不大,这同样是由于燃料组件内 $^{235}\text{U}$ 核子密度的不断减小对孔道快中子注量率起主要影响作用,而控制棒位置对孔道中子注量影响逐渐变小。从快中子注量率角度考虑,方案2、3最佳。

反射层区域设置有8个辐照孔道,其中内环4个孔道热中子注量率相近,外环4个孔道热中子注量率相近,如图9、10所示。随着寿期的推进,控制棒不断提出堆芯,4种方案所有孔道内中子注量率峰值位置也不断向上移动,但方案1反射层内8个孔道中子注量率峰值逐渐降低,而方案2~4反射层内8个孔道热中子注量率峰值先升高后降低,这是因为方案1跟随体控制棒随着控制棒的提出,燃料组件进入堆芯,堆内轻水减少,中子慢化效果减弱,而方案2~4随着控制棒的提

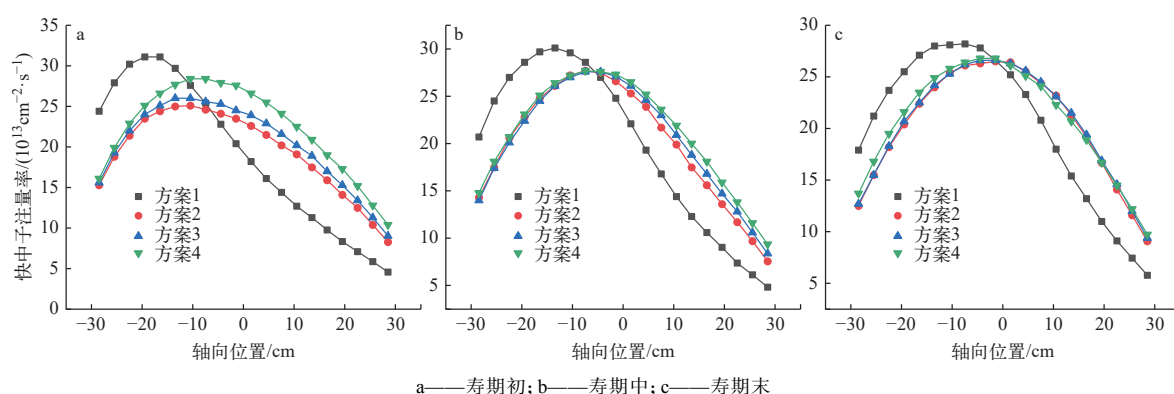


图 8 不同方案中央孔道快中子注量率轴向分布

Fig. 8 Axial distribution of fast neutron fluence rate in central channel of different schemes

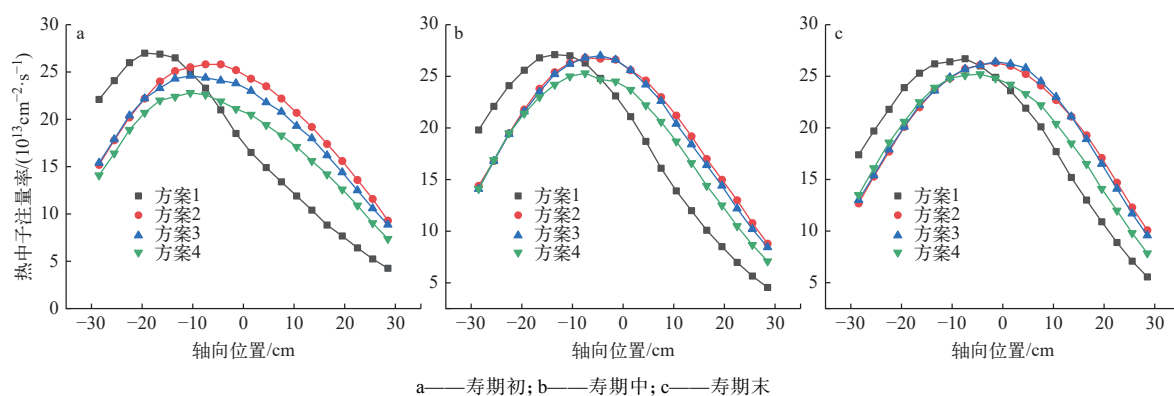


图 9 不同方案外内环孔道热中子注量率轴向分布

Fig. 9 Axial distribution of thermal neutron fluence rate in peripheral inner ring channel of different schemes

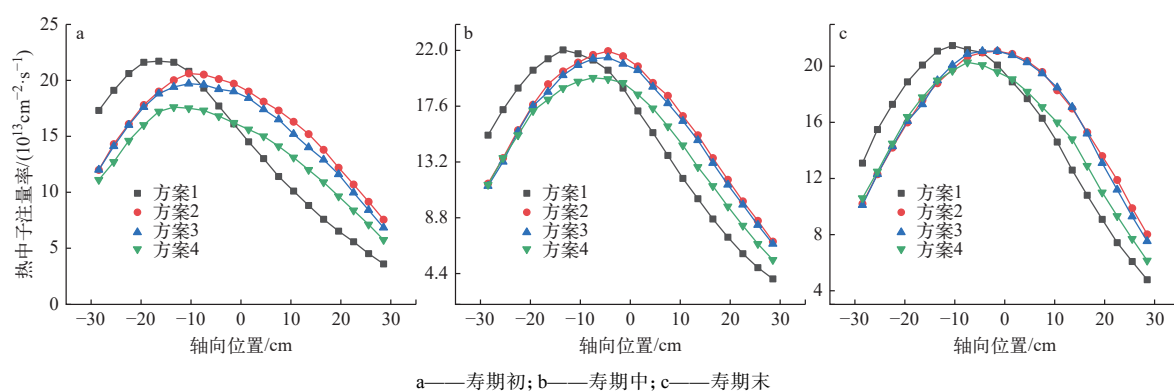


图 10 不同方案外环孔道热中子注量率轴向分布

Fig. 10 Axial distribution of thermal neutron fluence rate in peripheral outer ring channel of different schemes

出, 原来的控制棒位置填充轻水, 中子慢化效果增强, 部分组件轴向功率峰因子变大, 进而通过孔道内热中子注量率峰值的变化体现出来。在寿期初, 由于跟随体控制棒的轴向功率峰因子较大, 其对外围孔道内轴向热中子注量率影响仍较大, 最大热中子注量率仍对应方案 1, 方案 2 补偿棒布置位置相较方案 3 远离热中子辐照孔道, 所以在寿

期初方案 2 孔道内热中子注量率高于方案 3。从寿期中开始, 4 种方案的最大热中子注量率已相差不大, 且方案 2、3 孔道内热中子注量率随轴向位置分布相同。方案 4 由于控制棒均靠近反射层区域, 其对孔道内热中子注量影响最大, 在整个寿期内方案 4 外围孔道平均热中子注量率也最小, 方案 2、3 孔道内平均热中子注量率最大。外围热



中子孔道数目较多,为提高堆热中子综合应用能力,方案2、3最佳。

3.5 控制棒安全性能

上述4种控制棒布置方案中,由于堆芯内部燃料组件数目较少,采用跟随体控制棒形式,会导致堆芯功率分布均匀性较差,同时考虑到孔道内中子注量率和堆燃料管理,拟采用叉形控制棒形式作为堆芯控制系统以控制堆芯反应性。

针对采用叉形控制棒的方案2、3,计算获得了补偿板和调节板内部最大中子注量率,如表4所列,补偿棒中Hf板和调节棒中不锈钢板均未超出设计基准的辐照变形和寿命等问题。为保守考虑,计算了初装料状态下方案2、3内部补偿板和调节板两侧轴向热负荷,如图11所示,热负荷最大的补偿板和调节板轴向温度分布如图12所示,补偿板最大线功率密度为235 W/cm,对应最高温

表4 不同方案控制板内最大中子注量率  
Table 4 Maximum neutron fluence rate inside control board for different schemes

| 方案       | 中子注量率/(cm <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> ) |                           |                           |
|----------|--|---------------------------|---------------------------|
|          | <0.625 eV                                  | 0.625 eV~0.1 MeV          | >0.1 MeV                  |
| 方案2, 补偿板 | 2.472 54×10 <sup>13</sup>                  | 9.487 43×10 <sup>13</sup> | 1.154 99×10 <sup>14</sup> |
| 方案2, 调节板 | 7.168 64×10 <sup>13</sup>                  | 9.031 33×10 <sup>13</sup> | 1.022 95×10 <sup>14</sup> |
| 方案3, 补偿板 | 2.644 71×10 <sup>13</sup>                  | 9.554 50×10 <sup>13</sup> | 1.151 32×10 <sup>14</sup> |
| 方案3, 调节板 | 7.043 52×10 <sup>13</sup>                  | 9.805 17×10 <sup>13</sup> | 1.092 55×10 <sup>14</sup> |

度为68.4℃,较Hf板在反应堆内可正常运行承受温度350℃相距很远,具备足量的温度裕度为281.6℃。同时不锈钢调节板最大线功率密度为28.7 W/cm,对应最高温度为41.2℃,在后续反应堆运行过程中也不会面临超过材料温度限值(700℃)的问题,并保证有658.8℃的温度裕度[19]。

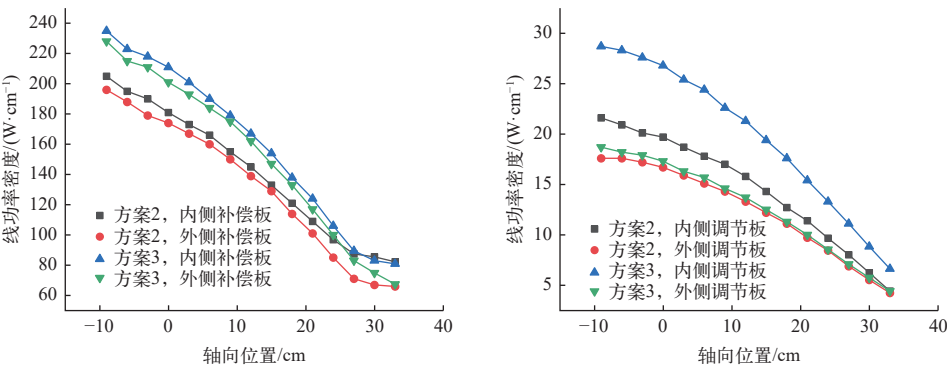


图11 不同方案对应两侧补偿板和调节板线功率密度轴向分布  
Fig. 11 Different schemes correspond to axial distribution of line power density of compensation board and adjustment board on both sides

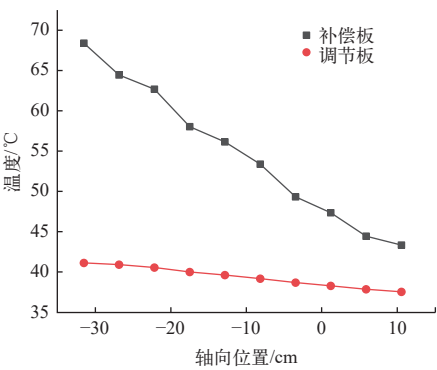


图12 叉形控制棒内最大线功率密度对应补偿板和调节板的温度  
Fig. 12 Maximum linear power density in forked control rod corresponds to temperature of compensation board and adjustment board

4 结论

目前,全球先进池式研究堆的建设普遍采用结构紧凑、栅距小的反中子阱型堆芯设计,这对堆芯内部控制棒的形状和布置进行了一定限制。因此,本文针对3种典型控制棒形式,从棒价值、功率峰因子、孔道中子注量率和控制棒自身安全性能等方面进行研究分析,得到的主要结论如下。

- 1) 跟随体补偿棒棒价值大,在堆运行期间可补偿较大的反应性,堆最大运行满功率天数最多,为110 EFPD,板状控制棒和叉形控制棒的单棒价值较低,堆芯初始剩余反应性最低,最大运行时间分别为75 EFPD和60 EFPD。
- 2) 采用跟随体控制棒的堆芯方案在反应堆运

行过程中,当铪控制棒插入/拔出堆芯时,跟随体燃料组件随之离开/进入堆芯,此时整个跟随体燃料组件对堆芯引入反应性为控制棒自身引入负/正反应性和燃料组件引入负/正反应性之和,所以跟随体控制棒整体价值较大,全寿期内,功率峰因子最大为2.168。板状控制棒和叉形控制棒方案在堆运行过程中,当棒插入/拔出堆芯时,对应位置分别排出/填充轻水,轴向功率峰因子先增大后减小,但全寿期内对应功率峰因子均 $<1.5$ ,且叉形控制棒方案功率峰因子最小,对应最大功率峰因子为1.448。

3) 跟随体控制棒堆芯方案其轴向功率峰因子最大,因而具备孔道内最大中子注量率,但随燃料的加深,由于燃料组件内 $^{235}\text{U}$ 核子密度的不断减小对孔道快中子注量率起主要影响作用,所以各个堆芯方案最大中子注量率差距逐渐缩小,且从孔道中子注量率总和考虑,叉形控制棒方案优势明显。

4) 采用叉形控制棒的堆芯方案,补偿棒和调节棒对应的内侧控制板的最大温度相较其温度限值很远,温度裕度分别为 $281.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $658.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

本文在兼顾堆运行安全性、孔道内中子注量率、后续燃料管理方案基础上确定了针对板状燃料、小功率、少燃料组件数目的反中子阱型池式堆堆芯采用叉形控制棒用于堆反应性控制的方案,为后续10 MW多功能池式研究堆控制系统总体方案设计提供了很好的基础。

#### 参考文献:

- [1] 冉怀昌,朱吉印,甄建霄,等. CARR 寿期对控制棒价值的影响研究[J]. *核科学与工程*, 2021, 41(2): 236-240.  
RAN Huaichang, ZHU Jiyin, ZHEN Jianxiao, et al. Study on the influence of cycle-life on the control rod worth of China Advanced Research Reactor[J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2021, 41(2): 236-240(in Chinese).
- [2] de LEEGE P F A, GIBBUS H P M, REITSMA F. Reactivity effects of a research reactor (HOR) during the transition of a HEU to LEU core[C]//PHYSOR 2002. [S. l.]: [s. n.], 2002.
- [3] MOLINA F, AGUILERA P, ROMERO-BARRIENTOS J, et al. Energy distribution of the neutron flux measurements at the chilean reactor RECH-1 using multi-foil neutron activation and the expectation maximization unfolding algorithm[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2017, 129: 28-34.
- [4] DIM O U, AGHARA S K. Modeling and evaluation of fissile material utilization of the UMLRR using Monte Carlo MCNP6 code[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2019, 130: 365-376.
- [5] HAINOUN A, DOVAL A, UMBEHAUN P, et al. International benchmark study of advanced thermal hydraulic safety analysis codes against measurements on IEA-R1 research reactor[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 280: 233-250.
- [6] MEFTAH B, ZIDI T, BOUSBIA-SALAH A. Neutron flux optimization in irradiation channels at NUR research reactor[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2006, 33(14/15): 1164-1175.
- [7] SINGH T, PANDEY P, MAZUMDAR T, et al. Physics design of 2 MW upgraded Apsara research reactor[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2013, 60: 141-156.
- [8] 肖诗刚. 紧凑堆芯核设计中若干问题的讨论[C]//中国核学会第七届反应堆数值计算与粒子输运学术交流会. [出版地不详]: [出版者不详], 1998.
- [9] 卢迪, 王连杰, 夏榜样, 等. CSR150 反应性控制研究[J]. *核动力工程*, 2023, 44(增刊 1): 95-100.  
LU Di, WANG Lianjie, XIA Bangyang, et al. Study on reactivity control of CSR150[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2023, 44(Suppl.1): 95-100(in Chinese).
- [10] 夏榜样, 杨平, 王连杰, 等. 超临界水冷堆 CSR1000 反应性控制方法研究[J]. *核动力工程*, 2013, 34(1): 26-30.  
XIA Bangyang, YANG Ping, WANG Lianjie, et al. Study on reactivity control method for supercritical water-cooled reactor CSR1000[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2013, 34(1): 26-30(in Chinese).
- [11] 黄洪文, 叶林, 钱达志, 等. 新型铪控制棒的研制[J]. *核动力工程*, 2008, 29(3): 48-51.  
HUANG Hongwen, YE Lin, QIAN Dazhi, et al. Development and manufacture of new-style hafnium control rod[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2008, 29(3): 48-51(in Chinese).
- [12] 倪东洋, 刘琨, 魏彦琴. 铪替代银-铟-镉合金控制棒价值分析[J]. *核动力工程*, 2020, 41(1): 194-198.  
NI Dongyang, LIU Kun, WEI Yanqin. Analysis of control rod worth of hafnium instead of silver-indium-cadmium alloy[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2020, 41(1): 194-198(in Chinese).
- [13] 孙志勇, 沈峰, 吕征, 等. CARR 控制棒物理设计计算[J]. *核动力工程*, 2006, 27(增刊 2): 41-44.  
SUN Zhiyong, SHEN Feng, LYU Zheng, et al. Physical design and calculation of CARR control rod[J]. *Nuclear*

- Power Engineering, 2006, 27(Suppl.2): 41-44(in Chinese).
- [14] 王连杰, 魏彦琴, 黄世恩, 等. 机械控制棒结合硼注入系统作为第二套停堆系统的堆芯: CN103474098A[P]. 2013-12-25.
- [15] 王连杰, 魏彦琴, 黄世恩, 等. 采用机械控制棒作为第二套停堆系统的堆芯: 中国, CN103474100A[P]. 2013-12-25.
- [16] 柯国土, 陈会强, 韩海芬, 等. 一种用于研究堆第二停堆系统的注硼系统: CN104616707A[P]. 2015-05-13.
- [17] 李长征, 林少芳, 曹进, 等. 控制棒组件置换策略优化研究[J]. 核动力工程, 2020, 41(1): 54-58.  
LI Changzheng, LIN Shaofang, CAO Jin, et al. Optimization of shuffling strategy for rod cluster control assemblies[J]. Nuclear Power Engineering, 2020, 41(1): 54-58(in Chinese).
- [18] 康旭忠, 朱贵凤, 邹杨, 等. 小型模块化熔盐堆控制棒布置的物理分析[J]. 核动力工程, 2018, 39(5): 9-14.  
KANG Xuzhong, ZHU Guifeng, ZOU Yang, et al. Physical analysis of control rods arrangement in core of a small modular molten salt reactor[J]. Nuclear Power Engineering, 2018, 39(5): 9-14(in Chinese).
- [19] MYKOLA P, LAVRINENKO S D, VYUGOV P N. Pure metals for nuclear power[J]. Problems of Atomic Science and Technology, 2014, 92: 72-82.