



核科学与工程

小型氦氙冷却移动式反应堆堆芯设计优化分析*

刘欣悦, 管超然, 邓蛟龙, 柴翔, 何东豪, 刘晓晶

(上海交通大学核科学与工程学院, 上海 200240)

摘要: 小型移动式核反应堆电源能为偏远地区、事故应急等场景提供所需的电能和热能, 而堆芯的轻量化和小型化是小型移动式核反应堆电源的设计重点。由此, 基于前期概念设计, 本研究提出了一个高可靠、长寿命的小型氦氙冷却固体核反应堆堆芯设计及其反应性控制方案。首先, 在综合考虑反应堆寿命以及热工安全设计等限制条件的基础上, 使用蒙特卡罗程序 OpenMC 进行了堆芯几何优化分析, 得到了堆芯质量最小化的设计方案。其次, 分析了含可燃毒物的布置优化方案, 通过在堆芯靠近反射层附近的燃料棒中添加 2% 质量分数的可燃毒物 Gd_2O_3 , 寿期初径向功率峰因子从 2.22 降低至 1.43。最后, 基于分层分块滑移反射层的反应性与功率控制方法, 提出了反应性线性控制方案, 该方案还可以保证事故情况下的反应堆安全。相关结果可为小型移动式核反应堆电源的堆芯设计及反应性控制提供参考。

关键词: 氦氙冷却反应堆; 堆芯设计优化; 滑移反射层; 功率展平; 反应性控制

中图分类号: TL32 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202335.230253

Optimal core design analysis for a small mobile helium-xenon cooled solid reactor

Liu Xinyue, Guan Chaoran, Deng Jiaolong, Chai Xiang, He Donghao, Liu Xiaojing

(School of Nuclear Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Due to electricity needs of scenarios such as remote areas and emergency situations, mobile nuclear power sources with high reliability and long life are needed. A conceptual design scheme of a small mobile helium-xenon cooled solid reactor has been proposed in previous work. This study aims to obtain a lightweight and compact core design and improve the design scheme of sliding reflector segments for reliable reactivity control. Firstly, under the design constraints of reactor life and thermal safety, the core geometry optimization analysis was performed using OpenMC, and a design scheme to obtain minimal mass of core was achieved. Secondly, the study analyzed the influence of burnable poison on power distribution and by adding a 2% mass fraction of Gd_2O_3 to the fuel rods near the reflector region, the radial power factor was reduced from 2.22 to 1.43 at the beginning of life. Finally, by partitioning the sliding reflector, a linear introduction of reactivity was achieved, and it can also ensure the reactor safety in case of accidents. This study provides a certain reference for the design of small gas-cooled solid reactor.

Key words: helium xenon cooled reactor, optimal core design, sliding reflector, power flattening, reactivity control

小型移动式核反应堆电源由独立的发电系统组成, 可以在紧急情况下提供长时间、高功率的应急电源供应。因此具有适用性强、可运输、自我调节等特点的陆上移动式核反应堆电源, 在未来具有巨大的应用前景。目前, 在 MW 级核电源的研发中, 美国国家航空航天局 (NASA) 于 2004 年发起了普罗米修斯项目^[1-2], 该项目通过分析质量、体积、方案可行性、成本、时间周期等设计指标, 认为气冷堆搭配布雷顿循环为移动式核电源的最佳技术选择。郭凯伦等^[3]则通过对比分析了氦气、氮气、二氧化碳和氙气四种工质及其混合物对闭式布雷顿循环的影响,

* 收稿日期: 2023-08-06; 修订日期: 2023-10-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFB1901900); 国家自然科学基金项目 (12275175); 上海市工业强基计划项目 (GYQJ-2018-2-02); 上海市启明星计划项目 (21QA1404200); 中核集团“领创科研”项目

联系方式: 刘欣悦, xinyueliu@sjtu.edu.cn。

通信作者: 柴翔, xiangchai@sjtu.edu.cn。

认为氦氙混合气体是最合适的工质。氦氙混合气体在兼顾热效率的同时可满足对系统紧凑型的要求^[4-5]。

在小型气冷固体反应堆堆芯设计方面, Meng T 等^[6]对普罗米修斯项目提出的氦氙冷却的空间堆进行了堆芯中子物理方面的初步分析,研究了侧面反射层厚度对通量的影响; Li Z 等^[7]提出了集成气冷堆(Integrated Gas-Cooled Reactor, IGCR-200)的概念设计,并基于此进行了热工和中子物理两方面的分析,该堆采用氦氙冷却反应堆结合闭式布雷顿循环的技术路线,并通过旋转鼓来进行反应性控制。在小型核反应堆堆芯反应性控制方面, Buden^[8]在空间核反应堆(Space Power-100, SP-100)上使用反射层滑块和三个堆内安全棒相结合的反应性控制方式;空间热离子反应堆(SPACE-R)^[9]设计使用旋转控制鼓,通过调整个数与吸收层厚度得到了最佳反应性控制方式;由于反应性线性引入特性与反射层驱动机构的响应特性密切相关,非线性反应性引入可能会增加控制系统设计的复杂性和挑战,因此, Li J 等^[10]比较了旋转控制鼓和滑移反射层这两种反应性控制方案的反应性引入表现,认为滑移反射层引入的反应性线性度比旋转控制鼓引入的更好。

为了满足小型移动式核反应堆电源陆上移动的需求,即将核电源容纳在一个标准集装箱中并利用汽车进行运输,考虑到运输的成本及集装箱尺寸的限制,轻量化、小型化的堆芯设计优化十分必要。由此,本研究针对小型氦氙冷却移动式固体核反应堆电源(SIMONS)概念设计方案^[11],开展堆芯设计优化研究,提出了轻量化、小型化的堆芯设计方案及反应性线性控制方案,对于确保反应堆安全性及反应堆控制可靠性具有重要意义。

1 堆芯方案与设计目标

1.1 SIMONS 堆芯基准方案

SIMONS 为上海交通大学提出的适用于陆上移动场景的 MW 级核反应堆电源方案,其堆芯额定热功率为 20 MW,堆内重复排列基本单元如图 1 所示。前期研究^[11]利用二维组件模型对比分析了在不同组件模型下燃料材料、富集度、燃料到冷却剂通道的间距与燃料直径之比、慢化剂材料及反射层材料对堆芯质量、寿期及其他中子物理特性的影响。堆芯基准方案基本参数如表 1 所示。

堆芯采用富集度为 19.75% 的 UC 作为燃料,以氦氙混合气体为冷却剂,其冷却剂包壳使用 Mo-TZM,以上材料均嵌入石墨基体中。为了实现堆芯紧凑化并减少结构材料的使用,堆芯采用一体化结构,不使用组件盒,堆内重复单元密铺于堆芯活性区,每根燃料棒由六个冷却剂通道所包围,仅冷却剂通道加承压包壳以隔离石墨基体和冷却剂。

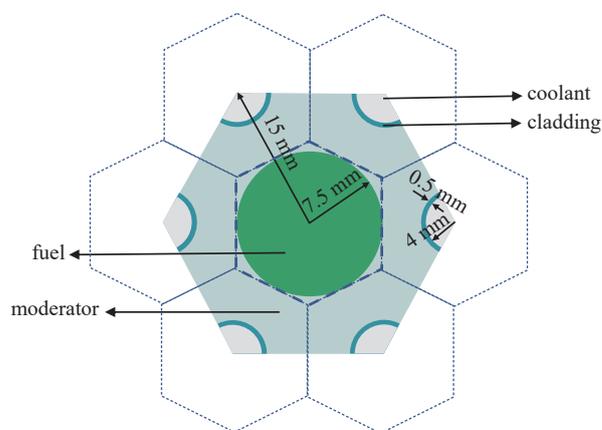


Fig. 1 Basic unit of the core

图 1 堆内重复排列基本单元

表 1 堆芯基准方案基本参数

Table 1 Basic parameters of the core

fuel	coolant	cladding	moderator	reflector	²³⁵ U enrichment/%	fuel diameter/cm	pitch-diameter ratio	coolant channel diameter/cm	cladding thickness/cm
UC	helium-xenon mixture	Mo-TZM	graphite	Be	19.75	1.5	1	0.8	0.05

1.2 堆芯设计目标与限制

本研究的目的是完善优化 SIMONS 堆芯设计,使其能够在紧急情况下提供长期、可靠的供电。通过将兆瓦级核电源容纳在标准集装箱里并由卡车运输,可以降低生产成本并实现快速部署。限于标准集装箱的尺寸与容积,堆芯轻量化、小型化为堆芯优化设计的主要目标。

在反应堆系统能量转换系统方面,整个系统需要提供 8 MW 的电力输出,布雷顿系统循环目标效率约为 40%,因此堆芯热功率为 20 MW;在堆芯寿命方面,在不换料的情况下,反应堆寿期应达 3 300 天(指等效满功率天),以满足应用场景长期的能源需求;在热工安全方面,包裹着冷却剂通道的 Mo-TZM 包壳需要承受氦氙气体的压力,为了不超过包壳材料的屈服强度,包壳表面最高温度不能超过 1 400 K^[12]。

计算分析均基于开源蒙特卡罗程序 OpenMC 开展,OpenMC 在高保真建模、临界计算、功率分布预测及燃耗分析等方面具有准确性与可靠性^[13]。计算模拟每一代为 100 万粒子,设置 200 个非活跃代和 200 个活跃代,有效增殖

系数(k_{eff})计算误差在 10×10^{-5} 左右。

2 堆芯设计优化分析

在考虑堆芯热工安全限制时,当堆芯中容纳的冷却剂通道数量少或者长度较短,会导致铝合金包壳温度超过设计限值。研究根据能量守恒计算出冷却剂主流温度的轴向分布,即

$$t_{b,z} = t_{\text{in}} + \frac{\int_0^z q_l dz}{\dot{m}c_p} \quad (1)$$

式中: $t_{b,z}$ 为在轴向位置 z 处的主流温度, t_{in} 为冷却剂入口温度, q_l 为冷却剂通道的线功率密度, \dot{m} 、 c_p 分别为冷却剂的质量流量与定压比热容。结合其他材料的热阻得到各材料轴向温度分布,并以此建立单通道模型^[14]。为了确保氦氙气体的压力不超过包壳材料的屈服强度,包壳表面允许工作温度应低于 1 400 K。

另一方面,如果冷却剂通道数量较少但是长度较长会导致堆芯压降过高,从而显著影响布雷顿循环热效率。从兼顾核电源系统的循环效率的目标出发,通过对系统闭式布雷顿循环中各部件热力学过程进行数学建模^[4,15],同时给定回路各主要部件的压损及主要设计参数,可得到布雷顿循环效率为 40% 下的设计压降限值为 51.7 kPa。

通过综合考虑燃料包壳表面温度分布限制和堆芯压降限制这两个设计要求,可得氦氙堆堆芯尺寸的设计区间如图 2 所示。

图 2 中实线根据堆芯压降限制得到。其下方区域表示在给定堆芯高度下,由于堆芯半径较低,容纳的冷却剂通道较少,通道内工质流速较快,相应的堆芯压降超过了布雷顿循环效率达 40% 的允许设计压降限值,堆芯高度上升 1 倍,满足压降限值的堆芯半径相应上升约 0.21 倍。虚线则是根据 Mo-TZM 包壳温度限值计算得到。其下方区域标识在给定的堆芯高度下,由于冷却剂通道较少,燃料线功率密度较高,包壳表面允许工作温度无法满足堆芯内最高温度低于 1 400 K 的热工要求,当堆芯高度从 1 m 下降到 0.5 m 时,满足温度限值的堆芯半径最小值从 0.165 m 上升到 0.53 m。

当堆芯半径与高度尺寸位于图 2 中区域④时,即可同时满足堆芯设计压降限值和包壳表面温度限值要求。

根据表 1 堆芯材料信息,对堆芯重复单元进行蒙特卡模拟,基于几何曲率和材料曲率在临界时的相等关系可以得到临界半径。为了实现 3 300 天的寿期要求,在裸堆外布置一定厚度的反射层来提供足够的初始剩余反应性。随着燃耗的加深,²³⁵U 不断被消耗,对于给定富集度的反应堆而言,反应性近似为燃料燃耗深度(BU)的线性函数^[16],具体为

$$\rho = \rho_0 - \alpha BU \quad (2)$$

式中: α 为反应性变化与燃耗深度的斜率, ρ_0 和 ρ 分别表示堆芯初始反应性和在一定燃耗深度 BU 下堆芯剩余反应性。燃耗深度又可表示为

$$BU = \int_0^T P dt / W_U \quad (3)$$

在给定堆芯功率 P 以及堆芯设计寿期 T 的情况下,调整裸堆的尺寸参数可以改变燃料质量 W_U ,同时调整反射层厚度还会影响堆芯的初始反应性 ρ_0 。

因此,在给定燃料质量的情况下即给定某一堆芯高度与半径的尺寸组合时,可以保守估计堆芯在该燃料质量下要满足 3 300 天所需要的最低初始反应性值。由于堆芯重量与堆芯半径的平方成正比,优先考虑减少堆芯径向尺寸。类似的,通过降低堆芯活性区高度和调整轴向反射层厚度,可以获得满足寿期要求的最低初始反应性,以确定该高度下满足条件的最小轴向反射层厚度。相关计算结果如图 3 所示,相对于没有轴向反射层的情况,当堆芯高度为 104 cm,轴向反射层厚度为 5 cm 时,堆芯质量减少了 0.28 t,达到了堆芯质量最小值 4.49 t。

基于以上分析,为了满足堆芯轻量化的设计目标,最终的堆芯几何参数如表 2 所示,此时包壳温度为 1 273 K,堆芯压降为 38.1 kPa,不超过设计限制。

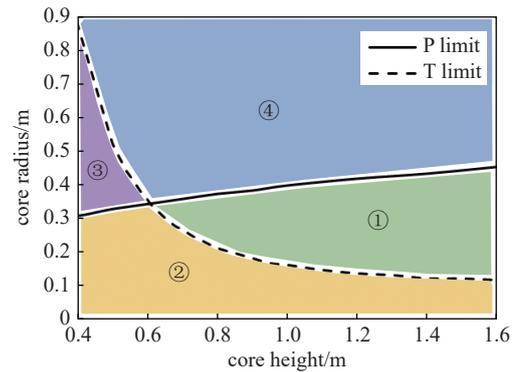


Fig. 2 Design range of core size under P and T limits

图 2 堆芯尺寸设计区间

取堆芯十二分之一进行径向功率分布分析,得结果如图4所示。堆芯靠近反射层处的相对功率较大,这是因为反射层材料 Be 对 neutron 具有较好的慢化作用,导致靠近反射层处热中子份额较大。堆芯寿期初(BOL)径向功率峰因子值为 2.22,不利于堆芯热工安全,必须对堆芯进行功率展平。

同时,考虑到反应堆控制安全,本研究主要考虑在燃料棒内添加一定比例的可燃毒物(BP)Gd₂O₃[17,18]。对较长寿期气冷堆而言,¹⁵⁵Gd、¹⁵⁷Gd 的吸收截面较大,可有效控制剩余反应性,此外,合理的分区布置还可以有效优化功率分布[19]。研究通过调整 Gd₂O₃ 掺比和布置方式来实现功率展平,图5为主要考虑的三种布置方式。

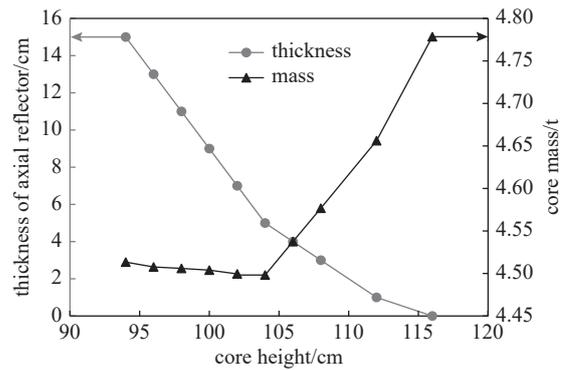


Fig. 3 Core mass under different axial parameters
图 3 不同堆芯高度下的轴向反射层厚度与堆芯质量

表 2 堆芯几何参数

Table 2 Geometry parameters of core

core radius/cm	core height/cm	radial reflector thickness/cm	axial reflector thickness/cm
44	104	16	5

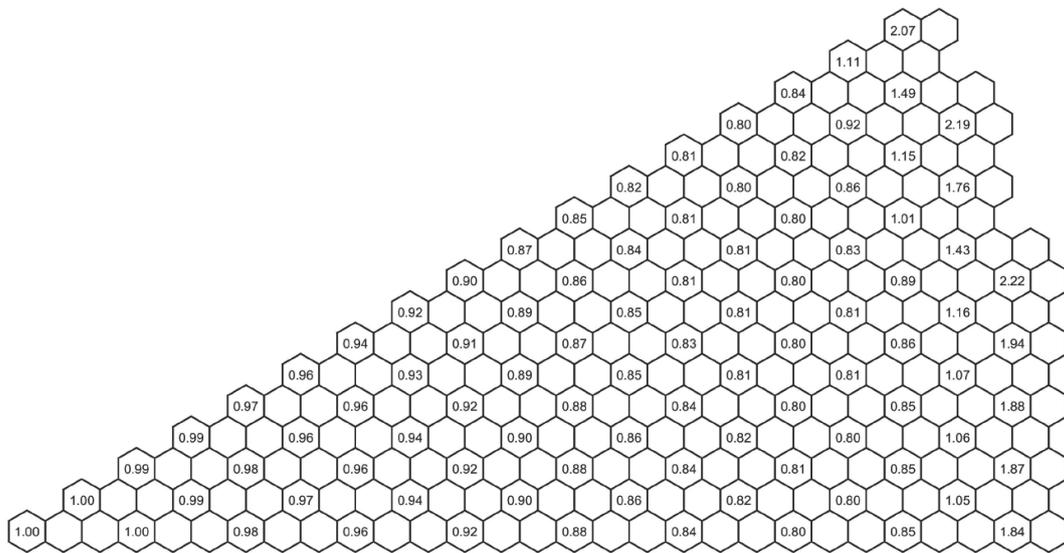


Fig. 4 Normalized radial power distribution of original design

图 4 堆芯初始设计径向功率分布

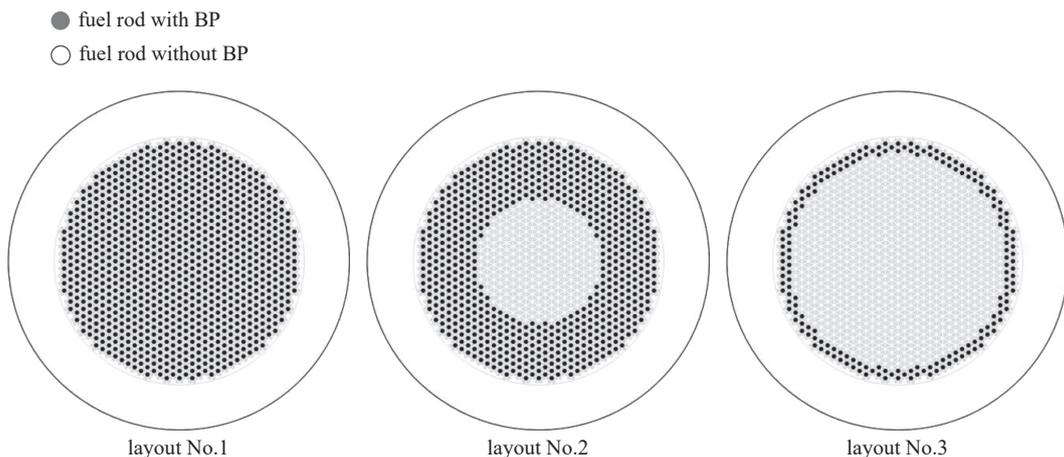


Fig. 5 Layouts of BP in fuel rods

图 5 在燃料棒中掺 Gd₂O₃ 的三种布置方式

表3表示了不同 Gd_2O_3 掺入位置、不同 Gd_2O_3 质量份额对 k_{eff} 和径向功率峰因子的影响规律。在进行物理计算时,假设燃料及石墨基体的温度为固定900 K,包壳温度为固定1 200 K。计算结果表明,相比其他方式,靠近反射层的燃料棒中掺入可燃毒物对功率展平更有效;掺入较多可燃毒物会显著降低堆芯初始 k_{eff} ,反应堆无法临界且不能实现寿期要求。

表3 可燃毒物的不同布置方式对功率分布影响

Table 3 Power distribution upon three BP layouts

layout	mass fraction/%	k_{eff}	radial power peak factor at BOL
no BP	—	1.086 70	2.22
No.1	0.1	1.071 70	2.07
	0.5	1.043 15	1.79
	1.0	1.023 81	1.64
	2.0	0.995 50	1.50
	3.0	0.973 69	1.43
	No.2	0.1	1.072 14
0.5		1.046 82	1.78
1.0		1.020 90	1.62
2.0		1.008 04	1.45
3.0		0.992 83	1.36
No.3		0.1	1.074 12
	0.5	1.052 42	1.76
	1.0	1.039 82	1.61
	2.0	1.027 11	1.43
	3.0	1.020 72	1.33

当可燃毒物质量掺比为2%时,相应的三种布置方式下径向功率峰因子在整个寿期内的变化情况如图6所示,对于没有可燃毒物的堆芯,随着燃耗加深,径向功率峰因子逐渐减小至1.81;当掺入一定可燃毒物,随着毒物的消耗,堆芯功率峰因子先上升后下降。图7为不同可燃毒物布置方式对燃耗深度以及堆芯寿期的影响,当掺入一定的可燃毒物,其 k_{eff} 随燃耗深度先增高后降低,有效控制了堆芯剩余反应性。在没有可燃毒物的情况下,堆芯燃耗深度最高达 $36.7 MW \cdot d \cdot kg^{-1}$,可燃毒物的掺入使得热中子利用率下降,在寿期末时 k_{eff} 与燃耗深度也会降低。第一种布置方式下的堆芯始终处于次临界状态,而布置方式二下的堆芯最高燃耗深度仅为 $20.4 MW \cdot d \cdot kg^{-1}$ 。相比无毒物下堆芯寿期,布置方式三下的堆芯寿期达3 500天,寿期缩短了700天,而第二种布置方式下堆芯寿期缩短了1 700天。为了确保可燃毒物的掺入不会对寿期产生过大反应性惩罚,在燃料棒内掺入2%质量分数的 Gd_2O_3 并以布置三的方式排布于堆芯内,此时初始 k_{eff} 为1.027 11,寿期内最大 k_{eff} 为1.031 13,相对较小的 k_{eff} 的变化,有利于后续使用滑移反射层进行反应性控制。寿期初径向功率峰因子值为1.43,寿期内最大功率峰因子为1.81。

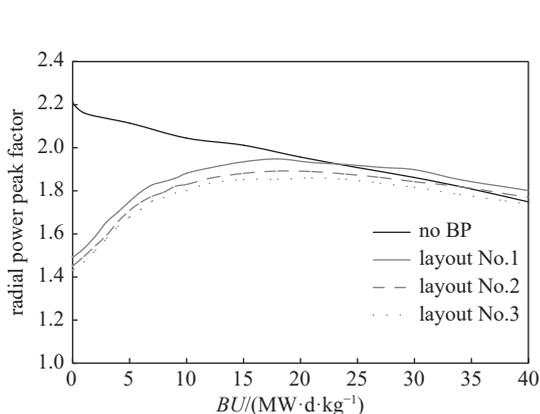


Fig. 6 Variation of radial power distribution upon three BP layouts

图6 可燃毒物的不同布置方式对寿期内径向功率峰因子的影响

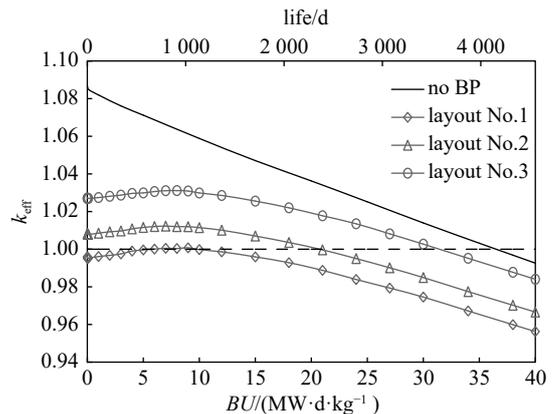


Fig. 7 Variation of burnup upon three BP layouts

图7 可燃毒物的不同布置方式对燃耗深度的影响

3 优化后堆芯中子物理特性分析

最终的堆芯优化设计方案如图8所示,表4为相应的堆芯方案设计参数。在轴向反射层上进行打孔以便冷却剂通过,在靠近反射层处的燃料棒内掺入质量分数为2%的Gd₂O₃以展平功率分布。堆芯总共包括955根燃料棒和1910个冷却剂通道,堆芯总质量为4.49 t,其中燃料总质量为2.39 t。堆芯寿命为3500天,满足寿期设计要求,寿期末燃耗深度达30.69 MW·d·kg⁻¹,反应堆寿期初末的径向功率分布如图9所示。

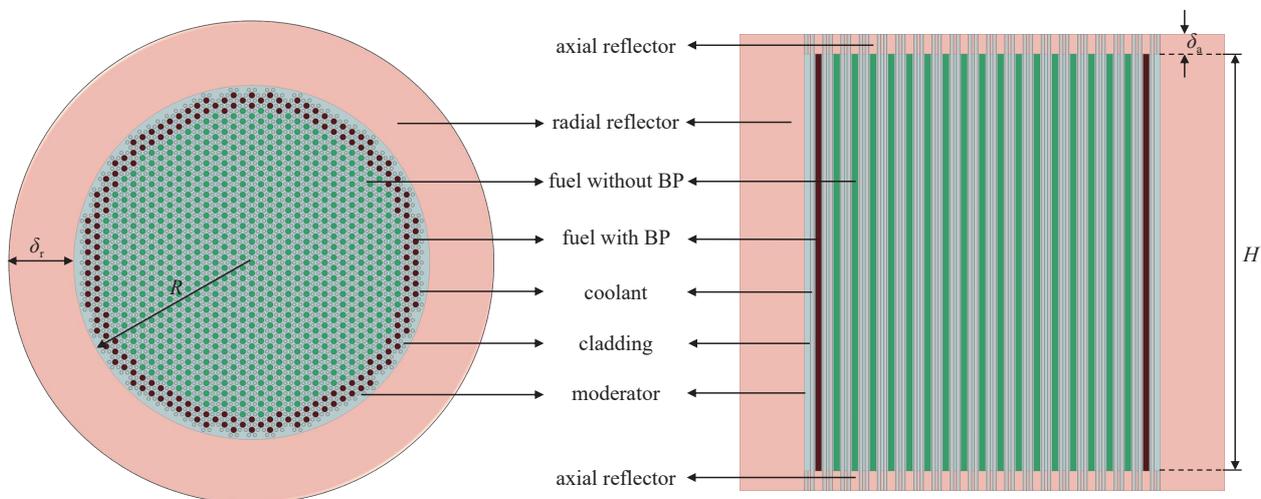


Fig. 8 Optimal design scheme of the core

图8 堆芯设计优化方案

表4 堆芯优化方案参数

Table 4 Parameters of the optimal core

power/MW	life/d	number of fuel rods	number of fuel rods with BP	mass of fuel without BP/t	mass of fuel with BP/t	core mass/t
20	3 500	955	186	1.93	0.46	4.49

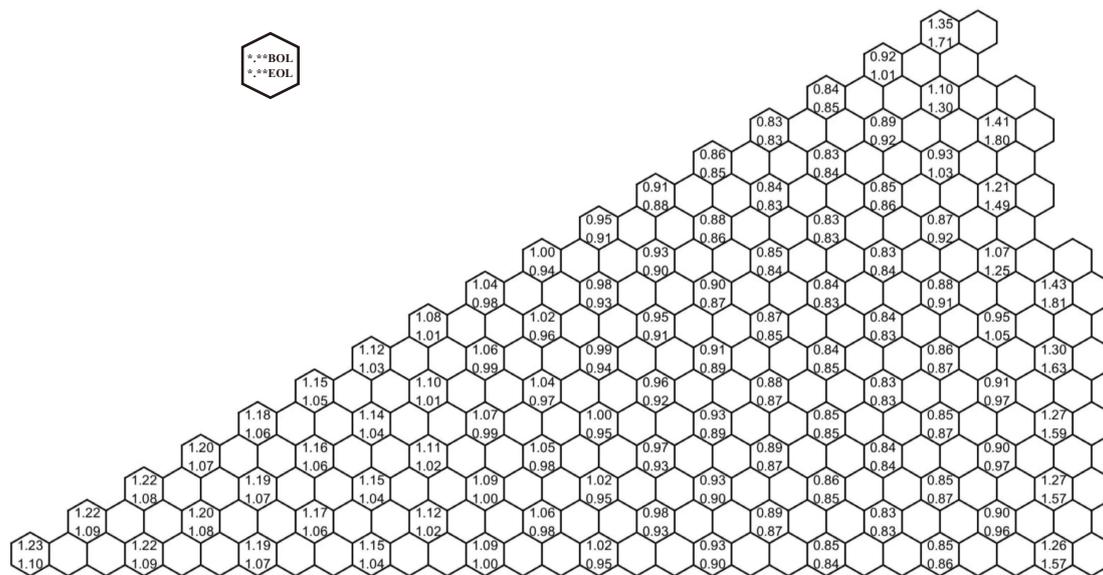


Fig. 9 Normalized power distribution at beginning of lifetime (BOL) and end of lifetime (EOL)

图9 寿期初末径向功率分布

SIMONS 反应堆采用滑移反射层的方式控制反应性,如图10所示,将堆芯径向反射层在径向上分为三层。其中第一层反射层最靠近堆芯活性区,单个滑块移动引入的反应性变化最大,第二层反射层的设置可以配合第一层共同实现更加细化和线性化的反应性控制,使得控制系统调节更加简单。同时,为了保证堆芯不至于完全裸露,设置了固定的第三层反射层。在堆芯运行时,该设置可以避免反射层的抽拉对堆内其他结构、材料造成过大的辐照损伤。同时,在反应堆发生严重事故时,最外层反射层还可以被抽离堆芯,引入额外的负反应性。在正常运行情况

下,最外层反射层应当固定不动,因此,其余反射层滑块抽离堆芯时,反应堆应处于次临界状态。

同时,为了实现控制的准确性,每一层反射层可以被等分成多个反射块,但滑块数太多会使其微分价值过小而不利于反应堆快速进行反应性控制。因此,本研究中,第一层及第二层反射层在周向上等分为四个反射层滑块,见图10。在反应堆正常运行过程中,反射层滑块通常按顺序被抽出插入,为了保证功率分布尽量平整,在抽出第一块反射层滑块后,第二个抽出的滑块位于第一块滑块的对角方向上,图10中的B1~B8为滑块抽出顺序。

图11为单个滑块在反应堆内的抽拉示意图。轴向反射层在控制过程中固定不动,径向反射层滑块则等分为上下两个部分,当滑块抽出时,上下两部分反射层滑块向堆芯两端运动,堆芯中央裸露区域增大,中子泄漏增多,进而抑制堆芯在寿期初的过剩反应性。随着反应堆的运行,燃料逐渐消耗,反应性降低,反射层滑块逐渐闭合,维持堆芯临界。

径向反射层在周向上共分为三层,每一层的厚度情况如表5所示。在图8所示的堆芯设计下,按照滑块抽出顺序,依次计算每一个反射层滑块的价值,对于不同反射层厚度组合可得到如图12所示的结果。随着反射层滑块逐渐被移出,反应性逐渐降低,第三层厚度越小,滑块抽出所引入的总负反应性越大。

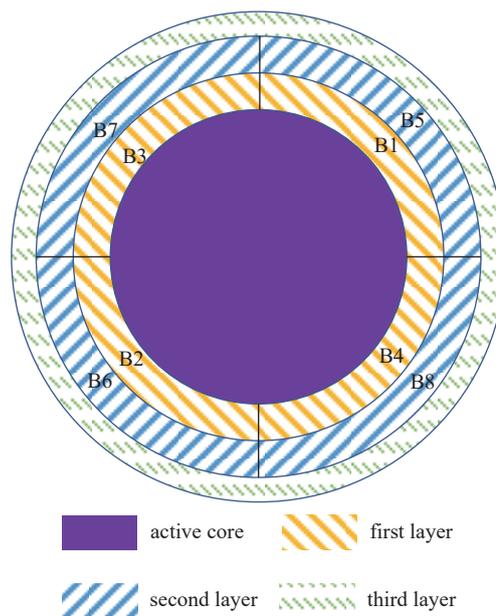


Fig. 10 Schematic illustration of sliding reflector segments

图10 反射层分层分块示意图

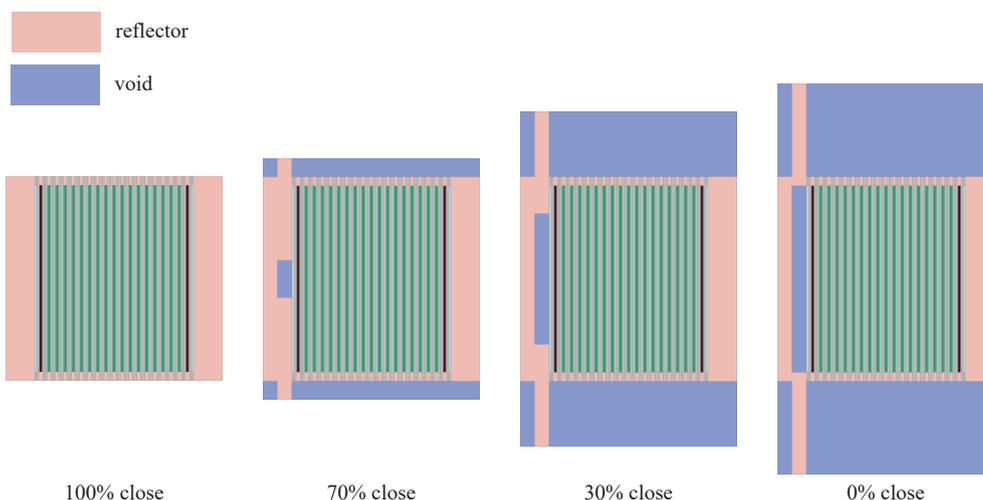


Fig. 11 Control scheme of single slider

图11 单个滑块抽拉示意图

表5 径向反射层各层厚度组合

Table 5 Different choices for subdividing the radial reflector

layering choice	reflector thickness/cm		
	first layer	second layer	third layer
case 1	5	4	7
case 2	6	3	7
case 3	4	4	8
case 4	5	3	8
case 5	3	4	9
case 6	4	3	9

此时的堆芯初始剩余反应性为 2656×10^{-5} , 如图 12 中虚线所示。当第一层厚度为 6 cm 时, 移除四个滑块即可达到目标反应性, 而当第三层厚度大于 9 cm 时, 则至少需要 7 个滑块抽出才能使得堆芯处于次临界状态。当第一层与第二层厚度分别为 4 cm 和 3 cm 时, 移动六个滑块就可以实现反应性控制, 且此时滑块所引入的反应性变化随抽出的滑块个数趋近线性关系。线性的反应性引入可以更简单可靠地控制功率输出, 因此, 径向反射层按第六种情况进行划分。

当最外层到最里层的厚度分别为 9 cm、3 cm 和 4 cm 时, 堆芯内反射层滑块按顺序抽出后功率峰因子的变化情况如图 13 所示, 其中 (a) 为径向功率峰因子值变化, 随着所有滑块被完全抽出, 径向功率峰因子从 1.3 升至 1.48。而轴向功率峰因子值则随着抽出的滑块总数变小, 从 1.39 降低至 1.17, 如图 13(b) 所示。

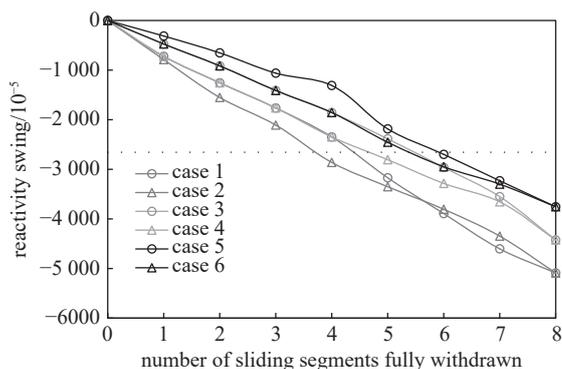
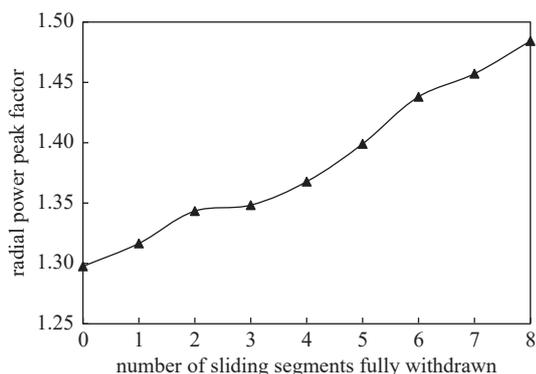
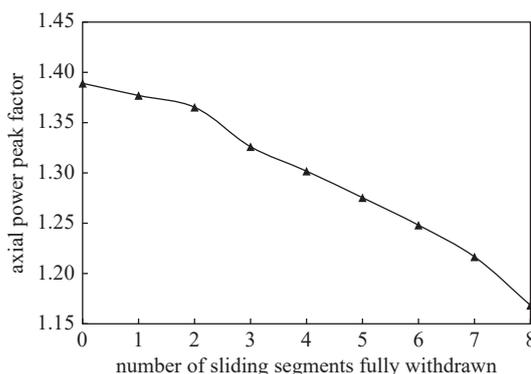


Fig. 12 Reactivity swing for different layered sliders

图 12 不同分层组合滑块价值



(a) radial



(b) axial

Fig. 13 Power peak factor versus number of sliding segments fully withdrawn

图 13 功率峰因子随抽出滑块数变化

不同闭合程度下的单个滑块的积分价值如图 14 所示。滑块在闭合程度为 90%~100% 时, 滑块微分价值最大, 此时中子泄漏较小。

为了保证反应堆的安全性, 事故情况下仍需要具有一定停堆裕度。核反应堆电源在运输时往往处于停堆状态, 需要将滑块抽走以保证堆芯次临界。研究考虑了反射层滑块卡在堆芯外不能抽出的事故情况, 结果如表 6 所示。正常运行时固定不动的最外层反射层在紧急情况下被抽离可以确保堆芯具有足够的停堆深度, 即使在最外层反射层不抽走的情况下也可以保证最内层单个滑块卡住时的反应堆安全。

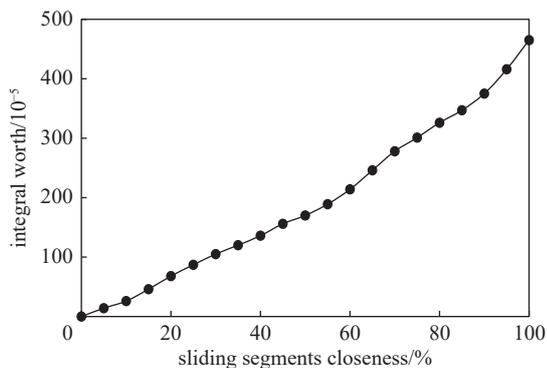


Fig. 14 Integral worth of single slider under different closeness

图 14 单个滑块在不同闭合程度下的积分价值

表 6 卡块事故分析

Table 6 Accident analysis of stuck sliders

state of outmost layer	location of stuck slider	shutdown margin/ 10^{-5}
fixed	B1	635
	B1、B2	66
	B5	895
	B5、B6	305
withdrawn	B1	6913
	B1、B2	5693
	B5	7123
	B5、B6	6146

4 结 论

本文主要对 SIMONS 堆芯及其反应性控制方式进行了设计和优化。研究首先在满足反应堆寿期和热功率要

求的情况下, 考虑热工安全及系统循环效率等限制条件, 对堆芯几何尺寸进行了优化。同时, 通过在堆芯靠近反射层处的燃料棒内掺入 2% 质量份额的可燃毒物 Gd_2O_3 , 将径向功率因子由 2.22 降低至 1.43, 保证了反应堆安全性进而提出了满足轻量化和小型化要求的堆芯优化设计方案。SIMONS 利用分层分块的滑动反射层进行反应性控制, 通过对反射层进行合理的分层和分块组合实现了反应性线性化控制的效果。本研究结果为优化 SIMONS 设计提供了一定参考, 所提出的基于分层分块滑动反射层的方法可以为小型反应堆反应性线性控制方案提供参考。后续研究将进一步优化堆芯结构设计, 同时考虑通过调整外围燃料棒富集度来进一步展平功率分布。

致 谢 感谢上海交通大学先进核能系统实验室 (INSL) 的老师们及同门们给予的指导和帮助。

参考文献:

- [1] Wollman M J, Zika M J. Prometheus project reactor module final report, for naval reactors information[R]. West Mifflin: Knolls Atomic Power Lab., 2006.
- [2] Ashcroft J, Eshelman C. Summary of NR program Prometheus efforts[J]. AIP Conference Proceedings, 2007, 880(1): 497-521.
- [3] 郭凯伦, 王成龙, 秋穗正, 等. 兆瓦级核电推进系统布雷顿循环热电转换特性分析[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(1): 16-23. (Guo Kailun, Wang Chenglong, Qiu Suizheng, et al. Analysis on thermoelectric conversion characteristic of Brayton cycle in megawatt-class nuclear electric propulsion system[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(1): 16-23)
- [4] El-Genk M S, Tournier J M. Noble-gas binary mixtures for closed-Brayton-cycle space reactor power systems[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(4): 863-873.
- [5] Zhou Biao, Ji Yu, Sun Jun, et al. Nusselt number correlation for turbulent heat transfer of helium-xenon gas mixtures[J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2021, 32: 128.
- [6] Meng Tao, Tan Sichao, He Yuhao, et al. Preliminary design considerations of He-Xe mixture cooled space nuclear reactor[C]//Proceedings of the 26th International Conference on Nuclear Engineering. 2018: V009T16A012.
- [7] Li Zeguang, Sun Jun, Liu Malin, et al. Design of a hundred-kilowatt level integrated gas-cooled space nuclear reactor for deep space application[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2020, 361: 110569.
- [8] Buden D. Summary of space nuclear reactor power systems, 1983--1992[R]. Idaho Falls: Idaho National Engineering Lab., 1993.
- [9] Rhee H S, Wetch J R, Gunther N, et al. Space-R thermionic space nuclear power system with single cell incore thermionic fuel elements[J]. AIP Conference Proceedings, 1992, 246(1): 120-129.
- [10] Li Jian, Zhou Qin, Xia Yan, et al. Study on reactivity control strategies for the thermoelectric integrated space nuclear reactor[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2020, 145: 107607.
- [11] Guan Chaoran, Chai Xiang, Zhang Tengfei, et al. Preliminary lightweight core design analysis of a micro-transportable gas-cooled thermal reactor[J]. *International Journal of Energy Research*, 2022, 46(12): 17416-17428.
- [12] El-Genk M S, Tournier J M. A review of refractory metal alloys and mechanically alloyed-oxide dispersion strengthened steels for space nuclear power systems[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2005, 340(1): 93-112.
- [13] 沈芷睿, 孙启政, 何东豪, 等. 基于 BEAVRS 基准题高保真建模的 OpenMC 程序和 NECP-X 程序的对比验证[J]. 核技术, 2022, 45: 010602. (Shen Zhirui, Sun Qizheng, He Donghao, et al. Comparison and verification of NECP-X and OpenMC using high-fidelity BEAVRS benchmark models[J]. Nuclear Techniques, 2022, 45: 010602)
- [14] 于平安, 朱瑞安, 喻真焯, 等. 核反应堆热工分析[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2002. (Yu Ping'an, Zhu Ruian, Yu Zhenwan, et al. Thermal analysis of nuclear reactor[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2002)
- [15] 沈维道, 郑佩芝, 蒋淡安. 工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983. (Shen Weidao, Zheng Peizhi, Jiang Danan. Engineering thermodynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 1983)
- [16] Driscoll M J, Downar T J, Pilat E E. The linear reactivity model for nuclear fuel management[M]. La Grange Park: American Nuclear Society, 1990.
- [17] 刘思佳, 朱贵凤, 严睿, 等. 小型模块化氟盐冷却高温堆可燃毒物布置方案[J]. 核技术, 2020, 43: 050602. (Liu Sijia, Zhu Guifeng, Yan Rui, et al. Placement scheme of burnable poisons in a small modular fluoride-cooled high temperature reactor[J]. Nuclear Techniques, 2020, 43: 050602)
- [18] Hossain T, Sahadath H, Nabila U M. Neutronic and fuel cycle performance of VVER-1000 for dual cooled annular fuel with coated burnable poison[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2022, 145: 104139.
- [19] 张成龙, 袁媛, 堵树宏, 等. 气冷微型堆可燃毒物研究[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34: 026010. (Zhang Chenglong, Yuan Yuan, Du Shuhong, et al. Research on burnable poison in micro gas-cooled reactor[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34: 026010)