

自然循环铅铋反应堆的堆芯功率最大化方法研究

肖英杰^{1,2} 彭梁兴^{1,2} 赵鹏程^{1,2} 李琼^{1,2} 罗湾¹ 于涛^{1,2}

1(南华大学 核科学技术学院 衡阳 421001)

2(南华大学 湖南省数字化反应堆工程技术研究中心 衡阳 421001)

摘要 为了提高自然循环铅铋反应堆的固有安全性和经济性,以南华大学自主设计的反应堆(Small PActive Long-life LBE-cooled fast Reactor, SPALLER-100)为研究对象,探索其堆芯可输出的最大功率。在满足运输尺寸、材料耐久性、堆芯长时间运行的稳定性以及事故工况下的安全性等条件下,提出了5种稳态安全限制和2种事故安全限制。研究将稳态安全限制处理为多目标复杂多维非线性约束的优化问题,基于拉丁超立方抽样和克里金代理模型搭建了中子学最大功率计算平台;同时,考虑自然循环能力,分别计算不同堆芯高度下的中子学最大功率和自然循环功率,最终获得了满足中子学与热工的最大功率设计方案。基于设计方案与事故安全限制,采用准静态反应性平衡方法,开展了失热阱、超功率和入口冷却剂温度过冷等事故的全寿期安全分析。研究结果表明:堆芯功率由原100 MW提升到120 MW左右,中子学最大功率平台具有一定的准确性,且最大功率方案符合安全、经济的要求。研究结果为其他类型的自然循环反应堆的输出功率最大化设计提供参考思路。

关键词 铅铋反应堆, 中子学最大功率, 自然循环, 准静态反应性平衡方法

中图分类号 TL33

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.090604

Determination of the maximum core power of natural circulation lead - bismuth reactors

XIAO Yingjie^{1,2} PENG Liangxing^{1,2} ZHAO Pengcheng^{1,2} LI Qiong^{1,2} LUO Wan¹ YU Tao^{1,2}

1(School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

2(Virtual Simulation Experiment Teaching Center on Nuclear Energy and Technology, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract [Background] Because of the excellent properties of lead-based materials as reactor coolants, lead-based fast reactors have become a key type of fourth-generation advanced nuclear energy systems. A small passive long-life Lead - bismuth -cooled fast Reactor (SPALLER) is designed by the University of South China for profound research. [Purpose] This study aims to improve the inherent safety and cost-effectiveness of lead - bismuth-cooled fast reactors, and determine the maximum core power of this kind of reactor. [Methods] Firstly, the SPALLER was taken as research object, and five steady-state limitations and two accident limitations were proposed to meet the

国家自然科学基金(No.U21B2059)、国防科工局核能开发科研项目(cosSYST等热工水力计算分析软件的自主研发与示范应用)、湖南省研究生科研创新项目(No.CX20220994)、湖南省大学生创新创业训练计划项目(No.S202210555131)资助

第一作者: 肖英杰, 男, 2000年出生, 2021年毕业于南华大学, 现为硕士研究生, 研究领域为反应堆热工水力与事故分析

通信作者: 赵鹏程, E-mail: zhaopengcheng1030@163.com

收稿日期: 2022-08-23, 修回日期: 2023-02-03

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.U21B2059), Nuclear Energy Development Research Project of State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense (Independent development and demonstration application of thermal hydraulic calculation and analysis software such as cosSYST), Hunan Province Postgraduate Research and Innovation Project (No.CX20220994), Hunan Province College Students Innovation and Entrepreneurship Training Program (No.S202210555131)

First author: XIAO Yingjie, male, born in 2000, graduated from University of South China in 2021, master student, focusing on thermal hydraulics and accident analysis of nuclear reactor

Corresponding author: ZHAO Pengcheng, E-mail: zhaopengcheng1030@163.com

Received date: 2022-08-23, revised date: 2023-02-03

transportation size, material durability, and long-term operational stability of the reactor core and ensure safety under accident conditions. Then, a neutronics maximum power calculation platform was built through Latin hypercube sampling and a Kriging proxy model whilst the steady-state limitations were considered as multi-objective optimization problems with complex multidimensional nonlinear constraints. Meanwhile, the neutronics maximum power and natural circulation power of SPALLER-100 at different core heights were calculated by taking the natural circulation ability of SPALLER-100 into account. Finally, a design scheme was obtained to meet the requirements of neutronic and thermal-hydraulic assessments of this reactor while producing maximum power. Consequently, during the full life-cycle of SPALLER-100, a safety analysis of three typical accident scenarios (loss of heat sink, transient over power, and coolant inlet temperature undercooling) was performed using a quasi-static reactivity balance approach. **[Results]** The results show that the maximum core power can be increased from 100 MW to 120 MW, and the neutronics maximum power calculation platform has high accuracy with safe and economical maximum power scheme. **[Conclusions]** This study can provide reference for other types of natural circulation reactors to maximize power output.

Key words Lead - bismuth-cooled reactor, Neutronics maximum power, Natural circulation, Quasi-static reactivity balance approach

在提高核能安全性、经济性和防止核扩散能力的方面,小型模块化反应堆具有良好的发展前景^[1];而自然循环铅基快堆具有固有安全性突出、工程可行性强等独特优势,能实现多种应用且可持续发展,是第四代核能系统的重要发展方向之一^[2-3]。为适应未来核能的发展,小型长寿命自然循环铅铋反应堆作为一种安全、经济的核电新堆型,同时兼顾长寿命、小型化和自然循环等优点。

其中,长寿命技术要求堆芯寿期足够长,结构材料能要长时间耐受辐照,以降低换料和维护成本。小型化技术有利于反应堆灵活布置和运输,因此要求堆芯燃料装载量少,堆芯尺寸小,还要符合国家道路运输^[4]等规定。自然循环技术能使堆芯温度分布趋向均匀,有效避免了燃料元件和堆芯结构发生过热甚至烧毁事故。而对铅铋反应堆而言,铅铋合金(Lead-Bismuth Eutectic, LEB)的化学性质稳定,热传导性能强,同时有利于自然循环。

为了实现以上目标,进一步提高反应堆的安全性和经济性,本研究以南华大学刘紫静等^[5]设计的反应堆(Small PAssive Long-life LEB-cooled fast Reactor, SPALLER-100)为分析对象,探索自然循环铅铋反应堆可输出的最大功率。首先,本研究分析了自然循环下的铅铋反应堆的各种安全限制,包括稳态限制与事故限制;然后,以此搭建了中子学最大功率计算平台,并综合考虑反应堆中子学和热工性能得到最大功率设计方案;最后,基于准静态反应性平衡方法^[6](Quasi-Static Reactivity Balance, QSRB)开展该方案的全寿期事故安全分析。

1 SPALLER-100 安全限值

为了探索铅铋反应堆功率最大化方法,首先必须保证反应堆运行过程中的安全性。除应满足基本设计限制外,还需符合在稳态和事故工况下与安全性相关的准则,如运输尺寸、材料耐久性、堆芯长时间运行的稳定性等。因此,本节主要包括稳态限制与事故限制。

1.1 稳态限制

SPALLER-100^[5]作为南华大学自主设计的长寿命小型自然循环铅基快堆,热功率为100 MWt,运行温度为320~480 °C,换料周期为20 a。PuN-ThN作为活性区燃料,其活性区高度为1.5 m。包壳材料使用铁素体/马氏体钢HT-9,屏蔽材料则采用B₄C,冷却剂经研究^[7]确定为LBE。如图1所示,SPALLER-100堆芯分内区(Pu质量分数为20.5%)和外区(Pu质量分数为30.8%)进行布置。

本文在参考原有堆芯的设计基础^[5]上提出以下

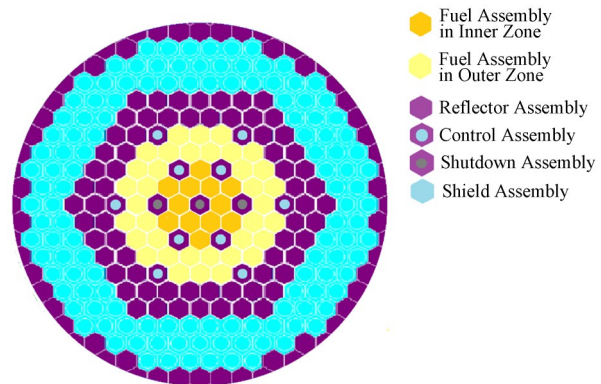


图1 SPALLER-100堆芯X-Y截面图
Fig.1 X-Y cross-section of core for SPALLER-100

稳态安全限值:1)基于输运限制^[3]和小型化的设计,堆芯活性区等效直径和高度<2.5 m;2)依据保守原则,包壳最高温度在正常工况下 $T_{cs}<550\text{ }^{\circ}\text{C}$,瞬态事故下 $T_{ct}<650\text{ }^{\circ}\text{C}$;3)考虑到LBE对材料的腐蚀,流速<2.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ^[8];4)包壳材料HT-9运行20 a受到的辐照限制为200 dpa^[9];5)SPALLER的有效缓发中子份额 β 约 3×10^{-3} ,而为保证停堆深度和安全性,限制反应性波动和初始剩余反应性不超过 2.4×10^{-2} ,即8\$以内。

随着反应堆的运行,包壳材料受到的中子注量会不断累加,原则上不能超过辐照限制。如图2所示,快中子注量与有效满功率运行年份呈拟合线性关系,而且比功率越大,中子累积注量越大。当整个寿期内所累积的中子注量接近上限值 $4.0\times 10^{23}\text{ cm}^{-2}$ (200 dpa)时,比功率约 $19.4\text{ W}\cdot\text{gHM}^{-1}$ 。

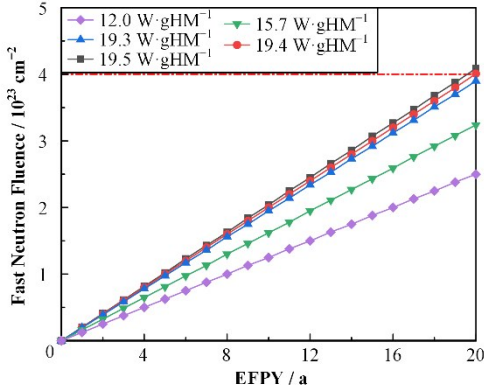


图2 快中子注量与有效满功率运行年份的关系
Fig.2 Relationship between fast neutron flux versus effective full power years (EFPY)

1.2 事故限制

美国Wade等^[6]根据反应堆在发生任何事故并经历足够长的时间后,均能通过自身调节再次达到总反应性 ρ 为0的平衡状态,提出可适用于事故分析的准静态反应性平衡方程:

$$\sum \Delta\rho = (P-1)A + \left(\frac{P}{F}-1\right)B + \delta T_{in}C = 0 \quad (1)$$

$$\delta T_{out} = \delta T_{in} + \left(\frac{P}{F}-1\right)\Delta T \quad (2)$$

式中: P 为归一化功率; F 为归一化流量; A 为反应性功率系数,cents; B 为反应性功率/流量系数,cents; C 为反应性入口温度系数,cents $\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$; δT_{in} 为冷却剂入口温度变化, $^{\circ}\text{C}$ 。

$$A = (\alpha_D + \alpha_A)\Delta T_{FC} \quad (3)$$

$$B = (\alpha_D + \alpha_A + \alpha_C + 2\alpha_R)\Delta T/2 \quad (4)$$

$$C = \alpha_D + \alpha_A + \alpha_R + \alpha_C \quad (5)$$

式中: α_D 为燃料多普勒系数; α_A 为堆芯轴向膨胀反

应性系数; α_C 为冷却剂密度反应性系数; α_R 为堆芯径向膨胀反应性系数,单位均为cents $\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$; ΔT_{FC} 为燃料平均温度与冷却剂平均温度之差, $^{\circ}\text{C}$; ΔT 为标准冷却剂温升,即正常工况冷却剂温升中引入修正因子 P/F 。

根据Boussinesq假设及能量守恒,稳态自然循环的回路流量 F 与功率 P 存在如下关系式^[10]:

$$F = \left(\frac{2\beta g \rho_c^2 A^2 \Delta L P}{C_p R}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

式中: β 为热膨胀系数, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; g 为重力加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; ρ_c 为流体密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; A 为流通面积, m^2 ; ΔL 为热源与热阱的高度差,m; C_p 为定压比热容, $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$; R 为系统阻力系数。因此, F 与 P 理论上满足 $F \sim P^{1/3}$ 。

SPALLER-100是自然循环反应堆,无冷却剂泵,仅依靠自然循环提供驱动力,故本文选择了如下可能发生的无保护事故工况进行QSRB分析:失热阱事故(Unprotected Loss Of Heat Sink,ULOHS)、超功率事故(Unprotected Transient Over Power,UTOP)、冷却剂入口温度过冷事故(Unprotected Coolant Inlet Temperature undercooling,UCIT)等。

1.2.1 失热阱事故

ULOHS事故的衰变热功率取决于燃料燃耗。根据反应堆停堆后衰变热近似计算,保守假设在长时间过渡后堆芯功率由衰变减少到正常运行功率的7%。若考虑反应堆余热的影响,由式(1)和(2)得出冷却剂出口温度变化 δT_{out} :

$$\delta T_{out} = \frac{0.93A + 0.83B}{C} - 0.83\Delta T \quad (7)$$

1.2.2 超功率事故

在UTOP事故中,假设一组拥有最大价值的控制棒失控抽出,反应堆堆芯引入额外的正反应性 $\Delta\rho_{TOP}$,堆芯功率增加了正常运行功率的10%,导致冷却剂平均温度上升,此时联立式(1)和式(2)可知冷却剂出口温度变化 δT_{out} :

$$\delta T_{out} = \frac{-\Delta\rho_{TOP} - 0.1A - 0.07B}{C} + 0.07\Delta T \quad (8)$$

1.2.3 冷却剂入口温度过冷事故

在UCIT事故下,一回路冷却剂入口温度下降,由此带来的正反应性将通过提升堆芯功率进行补偿,长时间过渡后无外部反应性引入。在这种情况下,假设主冷却剂流量最终维持在额定水平($F=1$),求解式(1)和(2)得冷却剂出口温度变化 δT_{out} :

$$\delta T_{out} = \delta T_{in} - \frac{\delta T_{in} C \Delta T}{A + B} \quad (9)$$

因此,针对SPALLER-100在上述3种事故工况下,提出两点事故安全限值:

1)为保证反应堆的固有安全性,要求事故下 A 、 B 、 C 和 α_D 、 α_A 、 α_R 、 α_C 、 α_V 等反应性参数均为负值;

2)通过假设冷却剂管道表面温升约等于堆芯冷却剂出口温度温升,要求事故下冷却剂的出口温度不得超过包壳温度限值: $T_{out} + \delta T_{out} < T_{cl}$ 。

2 堆芯功率最大化

对于某一反应堆来说,考虑到运行寿期、材料寿命、一回路系统自然循环能力等因素,堆芯输出功率将存在一个最大限值。因此,反应堆的最大输出功率是一个多目标复杂多维非线性约束优化问题,以下分别从中子学和自然循环方面探索堆芯最大功率方案。

2.1 中子学最大功率

2.1.1 中子学最大功率计算平台开发

为了解决常规蒙特卡罗程序的模拟计算量过大、耗时太长等问题,开发了中子学最大功率计算平台。如图3所示,详细说明了平台的开发设计思路。中子学最大功率计算平台以Python语言为基础,调用蒙特卡罗程序RMC^[11]计算。实际上,由于燃料质量分数和堆芯高度都对燃料装载量存在影响,进而影响到堆芯的中子学功率,而且反应性波动越小越有利于反应堆运行期间的安全控制。参考稳态限制作为依据,平台输入燃料质量分数(以内区和外区为限)、堆芯高度和比功率为抽样变量,令反应性波动、初始剩余反应性为约束。根据拉丁超立方抽样^[12]产生的初始样本点进行计算,并将计算结果用于训练克里金代理模型^[13]。

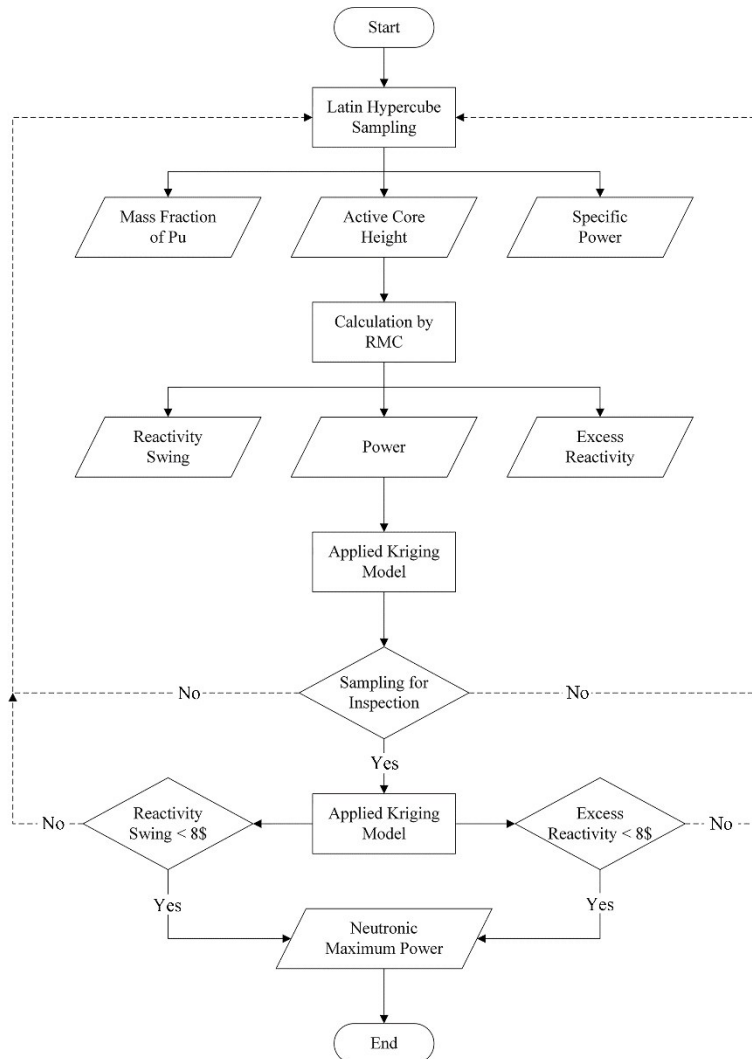


图3 中子学最大功率计算平台流程图

Fig.3 Flowchart of the neutronics maximum power calculation platform

2.1.2 平台预测与验证

基于大量训练集(1 200组)构建的克里金预测

模型,即中子学功率计算平台。如图4所示,对于不同的比功率,随燃料质量分数增加,反应性波动预测

值都存在某个最小值(对应的质量分数视为最佳质量分数)。为检验平台预测值的准确性,通过拉丁超立方抽样随机产生20个样本点,将平台分别针对反应性波动、初始剩余反应性和中子学功率的预测结果与RMC的计算结果进行对比分析。

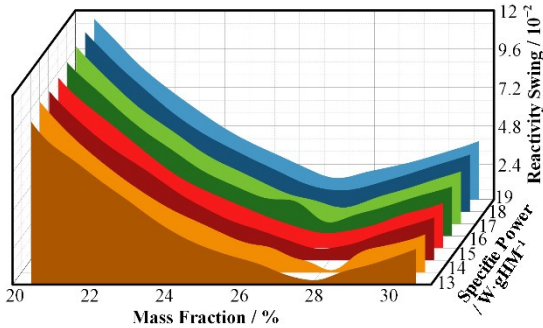


图4 反应性波动、比功率和质量分数的关系图
Fig.4 Relationship diagram of reactivity swing, specific power and mass fraction

由图5和图6可知,平台预测值与RMC计算值普遍吻合较好。其中,反应性波动和初始剩余反应性与RMC结果的最大绝对误差为 3.67×10^{-3} ,功率与RMC结果的最大绝对误差为5.4 MW,并且可通过增加训练集进一步提高精度。因此,可认为所开发的功率计算平台具有一定的准确度。

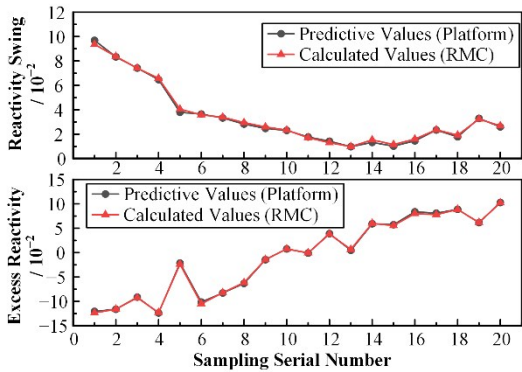


图5 反应性波动与初始剩余反应性的结果验证
Fig.5 Result verification of reactivity swing and initial excess reactivity

2.1.3 中子学最大功率计算

基于中子学功率计算平台,寻找不同高度下,满足反应性波动和剩余反应性限制在8\$内的最大功率,输出结果。由图7可知,随着堆芯活性区高度增加,实际燃料装载量不断增加,其中子学输出功率不断增大,故反应堆输出的中子学最大功率与高度呈线性关系。

2.2 自然循环功率

SPALLER-100反应堆的自然循环过程与结构布置如图8所示。对于自然循环来说,是指没有泵

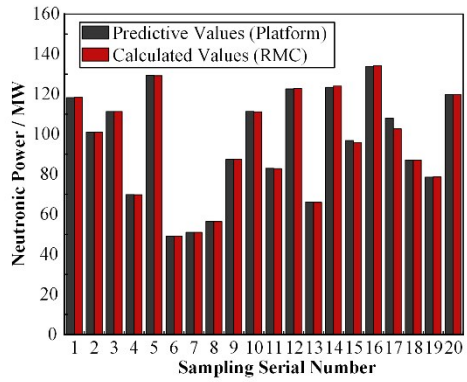


图6 中子学功率的结果验证
Fig.6 Result verification of neutronics power

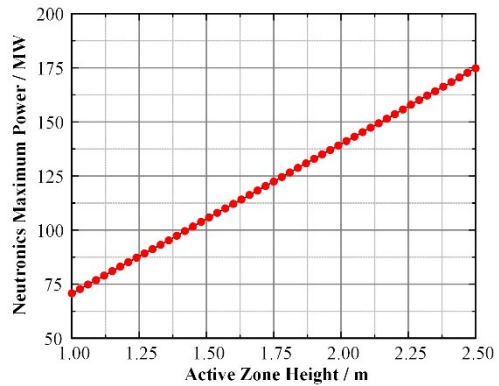


图7 SPALLER-100不同堆芯活性区高度下的中子学最大功率

Fig.7 Neutronics maximum power of the SPALLER-100 at different heights of core active zone

提供驱动力进行的循环流动,依靠密度差和高度差产生驱动力以带出堆芯功率。由于回路压降主要来自于堆芯和换热器,为简化计算,本文只考虑堆芯和换热器的摩擦压降与局部压降。

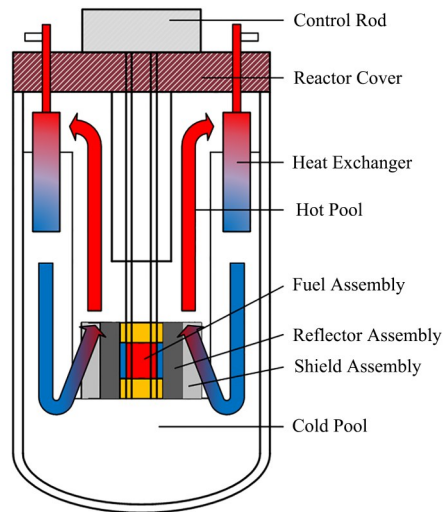


图8 SPALLER-100反应堆结构布置图
Fig.8 Reactor structure layout of SPALLER-100

2.2.1 自然循环理论推导

为了在概念设计水平上开发功率最大化方法, 还需满足一回路自然循环原理。在自然循环反应堆稳态运行中, 浮升力与阻力达到平衡, 自然循环驱动力应等于一回路系统中的总压降。理论的基本假设条件包括: 1) 忽略轴向和径向的热量传递; 2) 浮升力项满足 Boussinesq 假设; 3) 不考虑系统自身散热和空间压力变化做功等作用。因此, 下式展示了浮升力(左侧)和阻力(右侧)之间的基本关系^[14]:

$$\rho_c g \beta H \Delta T_c = \sum \frac{1}{2} \rho_c V_i^2 \left(k_i + f_i \frac{l_i}{d_i} \right) \quad (10)$$

式中: H 为循环高度, m; ΔT_c 为堆芯冷却剂温升, °C; V_i 、 k_i 、 f_i 、 l_i 、 d_i 分别表示第 i 个区域的冷却剂流速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、形阻系数、摩擦系数、流经长度 (m) 和水力直径 (m), 角标 $i=1$ 和 2 分别代表堆芯和换热器区域。

自然循环功率则由式(11)表示:

$$P_{\text{core}} = W C_p \Delta T_c = \rho_c A_i V_i C_p \Delta T_c \quad (11)$$

式中: P_{core} 为自然循环功率, W; W 为冷却剂质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; A_i 表示第 i 个区域的冷却剂流通面积, m^2 。

2.2.2 自然循环功率计算

根据式(10)和(11)可导出关于堆芯自然循环功率的函数关系式:

$$2 C_p^2 \rho_c^2 g \beta \frac{\Delta T_c^3}{P_{\text{core}}^2} = \sum \frac{1}{H \cdot A_i^2} \left(f_i \frac{l_i}{d_i} + k_i \right) \quad (12)$$

由式(12)计算自然循环功率。图9显示了自然循环功率与活性区高度之间的函数关系。

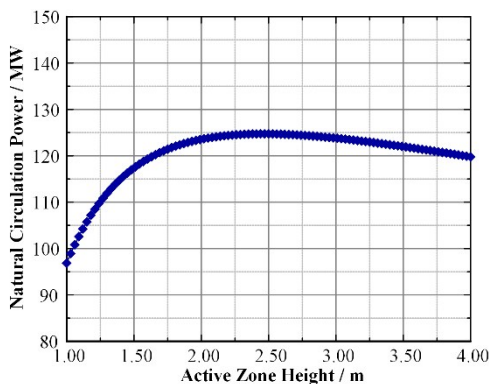


图9 SPALLER-100不同堆芯活性区高度下的自然循环功率

Fig.9 Natural circulation power of SPALLER-100 at different heights of core active zone

由于堆芯是主要压降来源部分, 所以堆芯活性区高度对总压降的影响较大。当活性区高度增加, 堆芯压降会不断增大, 而栅径比也随之增加。而栅径比的增加将导致系统总压降减小, 故自然循环功率与堆芯高度之间是呈非线性关系。考虑到中子学

最大功率与堆芯高度呈线性关系, 因此堆芯高度和栅径比决定了堆芯功率最大化的临界点。

2.3 堆芯最大功率方案

反应堆堆芯实际所能带出的最大功率是由自然循环功率决定的。由图10可知, 对于中子学最大功率线(斜线), 考虑了输运限制、材料辐照限制、反应性限制等影响, 而对于自然循环功率线(曲线), 考虑了腐蚀限制和温度限制等影响。中子学最大功率和自然循环功率在相同堆芯高度下存在着一个最大功率点, 如果继续增加堆芯高度, 虽然对中子学功率影响明显, 但对自然循环功率提升较小, 并大大增加了反应堆运行的经济成本。

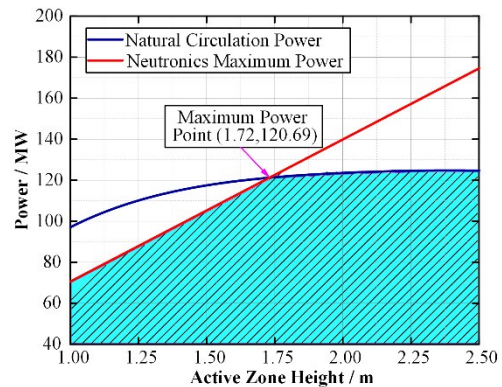


图10 SPALLER-100不同堆芯活性区高度下的最大功率
Fig.10 Maximum power of the SPALLER-100 at different heights of core active zone

表1 堆芯最大功率方案主要参数

Table 1 Main parameters of core maximum power scheme

设计参数 Design parameter	原设计值 Original design value	新设计值 New design value
功率 Power / MWt	100.00	120.69
换料周期 Refueling cycle / a	20	20
Pu 质量分数 Mass fraction of Pu / %	20.5 & 30.8	27.0
循环高度 Circulation height / m	4	4
活性区高度 Active zone height / m	1.50	1.72
栅径比 Pitch-to-diameter ratio	1.70	1.91
比功率 Specific power / $\text{W} \cdot \text{gHM}^{-1}$	18.26	19.20

因此, 基于众多限制因素的安全性与经济性方面的综合考虑, 通过本研究确定的 SPALLER-100 最大功率约 120.69 MW, 比功率为 $19.20 \text{ W} \cdot \text{gHM}^{-1}$, 对应的堆芯高度约 1.72 m。根据图4中反应性波动、

比功率和质量分数等三者之间关系,最佳燃料质量分数可近似认为在27%左右。SPALLER-100的堆芯最大功率方案主要设计参数见表1,可利用准静态反应性平衡方法开展ULOHS、UTOP和UCIT等全寿期的事故安全分析。

3 准静态事故安全分析

根据堆芯最大功率方案,基于RMC分别计算在寿期初(Beginning Of Life, BOL)、寿期中(Middle Of Life, MOL)和寿期末(End Of Life, EOL)的相关反应性系数。由表2可知,除 α_D 、 α_A 、 α_R 和 α_C 均小于

0,而且系数A、B和C也都小于0;此外,空泡系数 α_v 都满足为负值。

事故发生后,堆芯依靠自身的反应性反馈达到准静态时的相对功率及冷却剂出口温度的温升。如表3所述的ULOHS、UTOP、UCIT事故中,UTOP事故(引入反应性约1%)发生在BOL时的冷却剂出口温升最高(81.62 °C),但低于事故工况下的包壳最高温度限值与出口温度之差(170 °C)($\delta T_{out} < T_{ct} - T_{out}$)。综上所述,以上反应性的相关参数和事故工况下的出口温升均满足事故限制,进一步证明了SPALLER-100最大功率方案的安全性。

表2 最大功率下SPALLER-100的相关反应性系数
Table 2 Reactivity correlation coefficient of SPALLER-100 under maximum power

反应性参数 Reactivity parameters	BOL	MOL	EOL
$\alpha_D / \text{cents} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	-0.429 0	-0.555 0	-0.497 3
$\alpha_C / \text{cents} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	-0.614 1	-0.763 1	-0.692 7
$\alpha_A / \text{cents} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	-0.063 1	-0.070 9	-0.060 1
$\alpha_R / \text{cents} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	-0.016 5	-0.010 1	-0.006 3
$\alpha_v / (\text{cents} / 1\%)$	-30.14	-34.37	-31.32
A / cents	-167.02	-212.43	-189.18
B / cents	-91.14	-112.74	-101.02
C / cents $\cdot ^\circ\text{C}^{-1}$	-1.12	-1.40	-1.26

表3 最大功率下SPALLER-100的事故安全分析
Table 3 Accident safety analysis of SPALLER-100 under maximum power

事故 Accident scenarios	参数 Parameters	BOL	MOL	EOL
ULOHS	相对功率 Relative power	0.07	0.07	0.07
	$\delta T_{out} / ^\circ\text{C}$	72.93	75.28	73.97
UTOP	相对功率 Relative power	1.10	1.10	1.10
	$\delta T_{out} / ^\circ\text{C}$	81.62	63.57	71.73
UCIT	相对功率 Relative power	1.40	1.40	1.40
	$\delta T_{out} / ^\circ\text{C}$	7.59	8.62	8.54

4 结语

本研究为探索反应堆可输出的最大功率,选用SPALLER-100反应堆为研究对象。以提高反应堆固有安全性与经济性为目标,基于诸多安全限制,同时考虑其中子学最大功率和自然循环能力,最终获得了满足物理与热工的最大功率设计方案,并为其其他类型的自然循环反应堆堆芯功率最大化提供参考,可得出如下结论:

1)通过克里金代理模型,搭建了中子学最大功率计算平台以代替传统蒙特卡罗程序计算,在保证准确性的基础上,减少了实际计算量。

2)基于稳态限制和事故限制,SPALLER由原方案的100 MWt提升到最大功率方案的120.69 MWt

(超过20%),提高了SPALLER-100的经济性。

3)依据准静态反应性平衡方法开展了ULOHS、UTOP和UCIT等事故安全分析,结果表明,最大功率方案具有良好的热工安全性能。

作者贡献声明 肖英杰负责起草文章,分析/解释数据;彭梁兴负责采集数据;赵鹏程负责对文章的知识性内容作批评性审阅;李琼负责调研整理文献;罗湾负责统计分析;于涛负责行政、技术或材料支持。

参考文献

- 袁显宝,曹良志,吴宏春. 铅铋冷却剂燃料小型模块化快中子反应堆堆芯物理特性分析[J]. 核技术, 2017, 40(10): 100603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.

100603.
YUAN Xianbao, CAO Liangzhi, WU Hongchun. Physical characteristics of small modular Pb-Bi cooled reactor with nitride nuclear fuel[J]. Nuclear Techniques, 2017, **40**(10): 100603. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.100603](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2017.hjs.40.100603).
- 2 Chen H L, Chen Z, Chen C, *et al.* Conceptual design of a small modular natural circulation lead cooled fast reactor SNCLFR-100[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, **41**(17): 7158 - 7168. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2016.01.101](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.101).
- 3 吴宜灿. 铅基反应堆研究进展与应用前景[J]. 现代物理知识, 2018, **30**(4): 35 - 39. DOI: [10.13405/j.cnki.xdwz.2018.04.009](https://doi.org/10.13405/j.cnki.xdwz.2018.04.009).
WU Yican. Research progress and application prospect of lead-based reactor[J]. Modern Physics, 2018, **30**(4): 35 - 39. DOI: [10.13405/j.cnki.xdwz.2018.04.009](https://doi.org/10.13405/j.cnki.xdwz.2018.04.009).
- 4 耿磊. 国标《道路车辆外廓尺寸、轴荷及质量限值》的说明[J]. 交通标准化, 2004, **32**(8): 10 - 16. DOI: [10.3869/j.issn.1002-4786.2004.08.003](https://doi.org/10.3869/j.issn.1002-4786.2004.08.003).
GENG Lei. An illustration for standard of P.R.C. 《Limits of dimensions, axle load and masses for road vehicles》[J]. Limits of Dimensions, Axle Load and Masses for Road Vehicles, 2004, **32**(8): 10 - 16. DOI: [10.3869/j.issn.1002-4786.2004.08.003](https://doi.org/10.3869/j.issn.1002-4786.2004.08.003).
- 5 刘紫静, 赵鹏程, 张斌, 等. 超长寿命小型自然循环铅铋快堆堆芯概念设计研究[J]. 原子能科学技术, 2020, **54**(7): 1254 - 1265. DOI: [10.7538/yzk.2019.youxian.0720](https://doi.org/10.7538/yzk.2019.youxian.0720).
LIU Zijing, ZHAO Pengcheng, ZHANG Bin, *et al.* Research on core concept design of ultra-long life small natural circulation lead-based fast reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2020, **54**(7): 1254 - 1265. DOI: [10.7538/yzk.2019.youxian.0720](https://doi.org/10.7538/yzk.2019.youxian.0720).
- 6 Wade D C, Chang Y I. The integral fast reactor concept: physics of operation and safety[J]. Nuclear Science and Engineering, 1988, **100**(4): 507 - 524. DOI: [10.13182/nse88-2](https://doi.org/10.13182/nse88-2).
- 7 余清远, 肖豪, 刘紫静, 等. 一种适用于小型长寿命自然循环铅基快堆的冷却剂研究[J]. 核技术, 2022, **45**(3): 030601. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.030601](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.030601).
YU Qingyuan, XIAO Hao, LIU Zijing, *et al.* A coolant suitable for small long life natural circulation lead-based fast reactor[J]. Nuclear Techniques, 2022, **45**(3): 030601. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.030601](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2022.hjs.45.030601).
- 8 Hong S G, Kim J H, You W. A neutronic design study of lead-bismuth-cooled small and safe ultra-long-life cores [J]. Annals of Nuclear Energy, 2015, **85**: 58 - 67. DOI: [10.1016/j.anucene.2015.04.032](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.04.032).
- 9 Cheon J S, Lee C B, Lee B O, *et al.* Sodium fast reactor evaluation: core materials[J]. Journal of Nuclear Materials, 2009, **392**(2): 324 - 330. DOI: [10.1016/j.jnucmat.2009.03.021](https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2009.03.021).
- 10 Duffey R B, Surssock J P. Natural circulation phenomena relevant to small breaks and transients[J]. Nuclear Engineering and Design, 1987, **102**(2): 115 - 128. DOI: [10.1016/0029-5493\(87\)90244-5](https://doi.org/10.1016/0029-5493(87)90244-5).
- 11 Jia C L, Jian L J, Guo X Y, *et al.* Development of an improved direct kinetic simulation capability in RMC code[J]. Annals of Nuclear Energy, 2022, **173**: 109110. DOI: [10.1016/j.anucene.2022.109110](https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109110).
- 12 李俊芳, 张步涵. 基于进化算法改进拉丁超立方抽样的概率潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2011, **31**(25): 90 - 96. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.2011.25.012](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2011.25.012).
LI Junfang, ZHANG Buhan. Probabilistic load flow based on improved Latin hypercube sampling with evolutionary algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, **31**(25): 90 - 96. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.2011.25.012](https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.2011.25.012).
- 13 Li Q, Liu Z J, Xiao Y J, *et al.* An intelligent optimization method for preliminary design of lead-bismuth reactor core based on kriging surrogate model[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, **10**: 849229. DOI: [10.3389/fenrg.2022.849229](https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.849229).
- 14 吴磊. 一体化自然循环反应堆一回路自然循环及稳压特性研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
WU Lei. Study on natural circulation and voltage stabilization characteristics of primary circuit of integrated natural circulation reactor[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.