

气冷微堆核测系统布置研究及其在堆芯监测中的应用

张成龙 袁媛 刘国明 张鹏 肖会文 董建华 管婧宇 贺楷 易璇
(中国核电工程有限公司 北京 100840)

摘要 气冷微堆受限于紧凑布置及堆内高温运行环境,仅能布置少量堆外探测器用于堆芯监测。提出耦合中子源和堆外探测器的微堆核测系统布置方案,并通过物理实验模拟验证该方案的可行性。研究表明,微堆无源启动要求堆内临时探测器和堆外源量程探测器的中子灵敏度不低于 290 cm^2 和 980 cm^2 ,而耦合较低源强启动中子源、较低灵敏度堆外涂硼中子管、 γ 补偿电离室的有源核测系统更适宜移动式微堆的长寿期、无人化智能运营;中子源需布置在活性区才能使裂变中子占比大于95%,堆外探测器通过增加铀和聚乙烯套筒测量高能中子以提高堆芯监测准确性。首次临界实验的外推临界装载量与理论值一致,单棒外推临界棒位仅偏差-2 cm, k_{eff} 偏差在 6×10^{-4} 以内;探测器刻度实验的功率水平和轴向功率偏移绝对偏差在0.2%和0.4%以内。研究结果为气冷微堆堆芯监测提供参考。

关键词 气冷微堆, 无源启动, 有源核测系统布置, 首次临界实验, 堆外探测器刻度实验

中图分类号 TL424

CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.250164

Configuration of nuclear detecting system for gas-cooled micro reactor and its application in core monitoring

ZHANG Chenglong YUAN Yuan LIU Guoming ZHANG Peng XIAO Huiwen
DONG Jianhua GUAN Jingyu HE Kai YI Xuan
(China Nuclear Power Engineering Co., Ltd, Beijing 100840, China)

Abstract [Background] The gas-cooled micro reactor is one of advanced reactor types that can be used as movable intelligent micro nuclear power sources. The nuclear detecting has been a main challenge for its deployment due to the compact layout and the harsh service environment inside the core, hence only a small number of ex-core detectors can be deployed for core monitoring. [Purpose] This study aims to explore the design method of the nuclear detecting system for gas-cooled micro reactor and apply it to core monitoring. [Methods] Firstly, a three-dimensional integrated reactor model which incorporated the core, ex-core structures, and detectors was built using reactor Monte Carlo code (RMC). By referring to relevant standards, an arrangement method for the nuclear detecting system of micro reactor was developed. Then, design methodologies were proposed for neutron count rate, detector sensitivity, measured neutron component, and detector range. The feasibility of startup without an external

中核集团集中研发项目(气冷微堆型号研发)

第一作者: 张成龙, 男, 1993年出生, 2019年于核工业第二研究设计院获硕士学位, 研究领域为微堆堆芯设计、反应堆物理

通信作者: 刘国明, E-mail: liugma@cnpe.cc

收稿日期: 2025-04-17, 修回日期: 2025-07-29

Supported by CNNC (China National Nuclear Corporation) Centralized R&D Project (Gas-cooled Micro Reactor Model Development)

First author: ZHANG Chenglong, male, born in 1993, graduated from Nuclear Industry Second Research Design Institute with a master's degree in 2019, focusing on micro reactor core design and reactor physics

Corresponding author: LIU Guoming, E-mail: liugma@cnpe.cc

Received date: 2025-04-17, revised date: 2025-07-29

neutron source for the micro reactor was analyzed, along with the layout scheme of the system with external source. Finally, the validity of these approaches was then verified through computational simulations of the first criticality experiment and the ex-core detector calibration experiment. **[Results]** The results show that it is feasible to startup without external neutron sources if ^3He detectors with thermal neutron sensitivities of no less than 290 cm^2 and 980 cm^2 are used as in-core temporary detector and ex-core source range detector. The requirements for scenarios with long-time operation and few personnel on duty can be met by the detecting system including an Am-Be neutron source with strength as low as possible, ex-core boron coated neutron counting tubes with low sensitivity, ex-core gamma compensation ionization chambers with wide range. The Am-Be neutron source can only be arranged at the front of active core to ensure that the proportion of fission neutrons meets the requirement. By installing cadmium and polyethylene sleeve structures outside ex-core detectors to monitor high-energy neutrons, more accurate nuclear measurement signals can be obtained. Simulation results of the first critical experiment indicate that the number of extrapolated critical fuel assembly columns is consistent with the theoretical value, and the deviation of extrapolated critical position for a single control rod is only -2 cm , and the deviation of k_{eff} is within 6×10^{-4} . Simulation of ex-core detector calibration experiment show that the absolute deviation of the power level and the axial power offset are within 0.2% and 0.4% . **[Conclusions]** The configuration of nuclear detecting system is reasonable and feasible. Simulation results of this study can provide guidance for core monitoring of various advanced micro reactors, and promote the development of movable intelligent micro nuclear power source products.

Key words Gas-cooled micro reactor, Startup without external neutron sources, Layout of nuclear detecting system with external neutron source, First critical experiment, Ex-core detector calibration experiment

微堆智慧能源系统是未来核能应用的新趋势^[1-2],气冷微堆是主流堆型之一。由于采用棱柱式高温气冷热中子堆技术,气冷微堆具有优越的固有安全性^[3]。该堆型设计紧凑、系统极简、部署灵活,可为偏远地区、深海、太空等应用场景提供可靠的电、热能源供应,但复杂的部署场景对微堆提出更高的智能控制、无人或少人值守、远程监测的要求。而微堆受限于堆芯体积和高温等恶劣的堆内服役环境,难以在堆芯和反射层内布置探测器,因此,仅依靠少量堆外探测器实现堆芯核监测,是其研发的重大挑战。

商用堆型的核测系统布置已相当成熟,但新型微堆的相关研究起步较晚。堆内探测器主要用于堆芯通量图测量和校准堆外探测器,二代及“二代+”压水堆^[4]在活性区内布置移动式裂变室,而三代压水堆和紧凑型小堆一般采用固定式自给能探测器;新型微堆一般不在活性区内布置探测器而是尽可能布置在反射层内,例如日本 HTTR (High-Temperature Engineering Test Reactor) 棱柱式高温气冷堆^[5]将电流型裂变室布置在永久反射层而将启堆用的脉冲型裂变室、 BF_3 计数管、 γ 补偿电离室放置在可替换反射层组件内,黄国庆等^[6]将钍基熔盐堆的 ^3He 启动探测器放置在石墨反射层中并通过多层管道和氩气冷却来降低其工作温度,张鹏展等^[7]将新型热管快中子堆的带聚乙烯套筒 BF_3 启动探测器布置在堆芯上方以满足外推临界实验要求。堆外探测器主要用于

堆芯总功率的连续实时监测^[8],并向控制和保护系统提供核测信号,通过源量程、中间量程、功率量程探测器的搭接^[9],满足从装料、启堆到满功率运行的监测需求。中子源方面,为避免启动监测盲区,压水堆一般会布置一次中子源、二次中子源,CPR1000 (China Pressurized Reactor) 机组^[10]开展了激活的二次中子源替代一次中子源的工程实践,田湾核电站3号机组等 VVER (Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor) 堆型也已有无源启动工程实践^[11],而新型微堆一般仅布置启动中子源,并正在研究无源启动^[12]的可行性。

本文针对移动式反应堆堆芯核监测问题,采用蒙特卡罗方法构建精准的三维堆芯、堆外结构和堆外探测器一体化模型,提出仅依靠少量堆外探测器的微堆核测系统布置方法,研究气冷微堆无源启动的可行性及有源核测系统布置方案,并通过首次临界及堆外探测器刻度实验模拟验证其可行性,为气冷微堆型号研发提供技术支持。

1 设计方法

国内尚无专门针对微堆核测系统布置的法规标准,可参考相关标准^[13-14]构建气冷微堆核测系统布置方法,以提供装料、停堆、启堆直至功率运行工况下的反应堆状态信息,建立堆芯监测平台。

蒙特卡罗方法在固定源模式下求解中子输运方程,中子源强 Q 、脉冲型探测器灵敏度 S (计数率/热

中子注量率)与计数率限值 N 之间的关系如下:

$$Q\varphi S(1-\omega) \geq N \quad (1)$$

式中: φ 为单位源强下探测器灵敏区热中子注量率; ω 为考虑的工程不确定性因子,取20%。源强 Q 在无源启动时由新燃料的 ^{238}U 自发裂变和 (α, n) 衰变决定,在有源启动时由启动中子源源强决定。计数率限值 N 在不同工况下要求不同,装料时第一组燃料组件列入堆即刻要求中子计数率不低于 0.5 s^{-1} ,满装载堆芯完全停堆时计数率至少 2 s^{-1} ,堆芯约1%次临界度时计数率至少 10 s^{-1} 。

因此,脉冲型探测器灵敏度 S 要求如式(2)所示:

$$S \geq \max_i \left(\frac{N_i}{Q_i \varphi_i (1-\omega)} \right) \quad (2)$$

式中: i 为此脉冲型探测器需满足的工况序号。

在有源启动时,部分被测中子是由启动中子源直接产生而非堆芯裂变产生,而微堆可能更为明显。因此,要求被测中子满足式(3)关系:

$$\frac{\varphi_t - \varphi_F}{\varphi_t} \geq 95\% \quad (3)$$

式中: φ_t 、 φ_F 为堆芯 k_{eff} 约0.99时探测器灵敏区处总的热中子注量率和非裂变产生的热中子注量率。

不同工况下微堆中子注量率一般有10多个等级的变化,一般需要源量程脉冲型探测器、功率量程电流型探测器或其他探测器搭配实现堆芯监测功能,不同类型探测器的中子测量范围要求如下:

$$\begin{cases} \frac{\Psi_{\text{Psup}}}{\Psi_{\text{PFP}}} > 2 \\ \frac{\Psi_{\text{tsup}}}{\Psi_{\text{tFP}}} > 10 \cdot \frac{\Psi_{\text{Pinf}}}{\Psi_{\text{PFP}}} \\ \frac{\Psi_{\text{tinf}}}{\Psi_{\text{tFP}}} \ll \text{多普勒发热点} \end{cases} \quad (4)$$

式中: Ψ_{tinf} 、 Ψ_{tsup} 、 Ψ_{Pinf} 、 Ψ_{Psup} 为源量程、功率量程探测器中子测量范围的下限、上限; Ψ_{tFP} 、 Ψ_{PFP} 为满功率运行工况下源量程、功率量程探测器灵敏区热中子注量率。进而满足微堆从启堆到200% FP(满功率, Full Power, FP)超功率工况的完全覆盖及量程搭接的要求。

2 微堆模型

气冷微堆卧式活性区由相同结构的六棱柱燃料组件在径向分区、轴向分层布置而成,图1为反应堆模型示意图。30个燃料组件列在径向上依次排布,每列轴向布置有3层组件。燃料采用 UO_2 核芯的陶瓷颗粒燃料弥散在基体中形成的圆柱芯块,堆芯慢化剂和反射层均为石墨材料,反应性控制由分离型含钐可燃毒物棒和位于侧反射层的6组第一套控制棒、位于堆芯中心的1组第二套控制棒实现。堆外布置有含硼碳砖、压力容器、屏蔽保温层等结构。表1是堆芯模型主要参数。

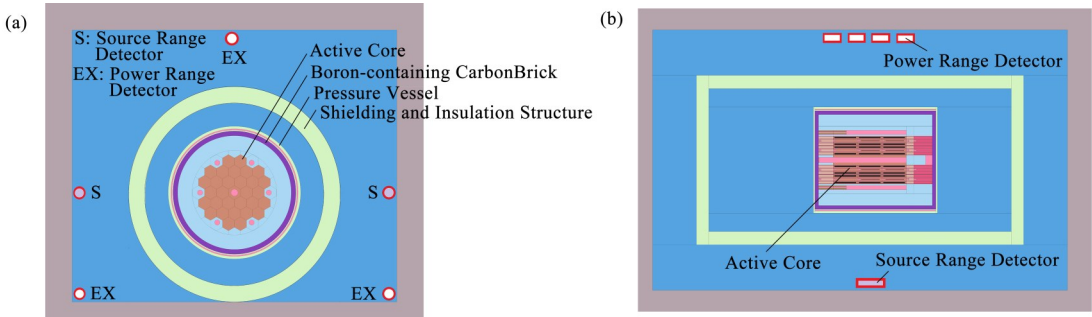


图1 反应堆模型径向(a)和轴向(b)布置(彩图见网络版)
Fig.1 Radial (a) and axial (b) layouts of reactor model (color online)

表1 堆芯模型主要参数
Table 1 Main parameters of core model

参数 Parameters	数值 Values
热功率 Thermal power / MW	5
燃料富集度 Fuel enrichment / %	19.75
功率密度 Power density / $\text{MW}\cdot\text{m}^{-3}$	3.5
寿期 Lifetime / a	>3
换料方式 Refueling scheme	全堆芯换料 Full-core refueling

中子探测器布置两类,均位于堆外。第1类为源量程探测器,用于监测堆芯首次启动及停堆后再

启动时中子注量率等;第2类为功率量程探测器,布置有3个通道,每个通道轴向有4组探测器,用于监测堆芯功率水平、指导运行控制、提供保护信号等。

3 无源启动核测

若微堆核测系统没有外部中子源,即微堆无源启动,不仅节省源采购成本,避免源运输、贮存、管理等问题,还将进一步提高微堆的部署灵活性,其关键是新燃料中 ^{238}U 自发裂变和 (α, n) 衰变天然产生的中子源可以满足启堆的中子计数率要求。

利用点燃耗衰变程序 Origen-S 可计算出中子源强及能谱。气冷微堆全堆 UO_2 装载量约 140 kg, 源强约 $1.80 \times 10^3 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$, 图2是中子源能谱分布。

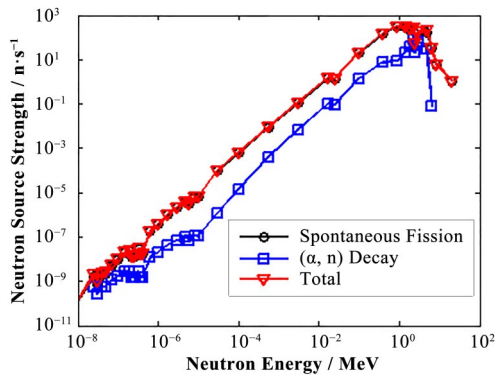


图2 自发裂变及衰变中子源能谱(彩图见网络版)

Fig.2 Energy spectrum of neutron generated by spontaneous fission and decay (color online)

为建立装料及启堆的堆芯监测平台,利用蒙特卡罗程序 RMC (Reactor Monte Carlo Code)^[15] 建立精细的三维堆芯及堆外结构模型,图3是装载1组燃

料组件列及堆内临时探测器位置示意图,启堆前满装载及堆外探测器布置如图2所示。根据式(2),计算结果如表2所示。由于热中子难以穿透堆外结构到达堆外探测器位置,且含硼碳砖对热中子吸收明显,因此堆外探测器设置有聚乙烯套筒,以提高探测效率。

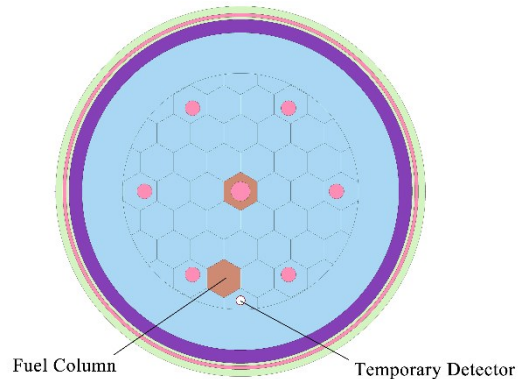


图3 装载1组燃料组件列及堆内临时探测器位置示意图(彩图见网络版)

Fig.3 Diagram of loading of one fuel assembly column and location of in-core temporary detector (color online)

表2 无外源时装料及启堆工况下探测器灵敏度要求

Table 2 Sensitivity requirements for detectors under loading and startup conditions without external neutron sources

工况 Conditions	装载1组燃料组件列 Loading 1 fuel column	启堆前满装载 Full loading before startup
源强 Source strength / $\text{n} \cdot \text{s}^{-1}$	60	1 800
计数率要求 Counting requirement / s^{-1}	≥ 0.5	≥ 2
探测器布置 Layout of detector	堆内临时探测器 In-core temporary detector	堆外源量程探测器 Ex-core source range detector
热中子注量率 Thermal neutron flux / $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	2.16×10^{-3} (52%) ^①	2.55×10^{-3} (67%)
灵敏度要求 Sensitivity requirement / cm^2	≥ 290	≥ 980

注:① 2.16×10^{-3} (52%)表示热中子注量率 $2.16 \times 10^{-3} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 0.625 eV 以下热中子占比 52%

Note: ① “ 2.16×10^{-3} (52%)” indicates that the thermal neutron flux is $2.16 \times 10^{-3} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, with thermal neutrons below 0.625 eV accounting for 52% of the total neutron population

由表2 计算结果可知,气冷微堆无源启动要求堆内临时探测器、堆外源量程探测的灵敏度不低于 290 cm^2 、 980 cm^2 ,需选用高灵敏 ^3He 正比计数管。

4 有源核测

无源启动对探测器灵敏度要求很高,且 ^3He 探测器辐照寿命短。利用低源强启动中子源来降低探测器灵敏度要求,可选择耐 γ 辐照能力更强、寿命更长的探测器类型,以提高微堆长寿命、无人或少人值守的性能。

4.1 中子源布置

核反应堆常用铀源和镅铍源。铀源中子发射率高,但半衰期仅 2.65 a。镅铍源半衰期长达 432 a, 中子输出率稳定、伴生 γ 射线低,是更合适的选择。

镅铍源中子平均能量为 4.3 MeV。根据式(3),表3是中子源布置在前反射层后端、径向中心位置时,不同能谱下 1% 次临界度时被测中子由裂变产生的比例。可知,由于石墨慢化能力较弱,随着源中子能量增加,更多源中子从反射层泄漏后直接被探测器捕获,裂变中子占比明显减小。较高的源中子能量对中子源位置提出更高的布置要求。

侧反射层、前反射层(冷却剂入口端)温度低、空间充裕,表4是镅铍源在典型点位下 1% 次临界度时被测中子由裂变产生的比例,可知,均难以满足 95% 的比例要求。因此,需将中子源布置在堆芯活性区。

中子源组件的金属包壳难以承受过高的温度,从活性区前端(冷却剂入口端)、堆芯中心组件布置中子源孔道。图4是镅铍中子源在不同活性区轴向

表3 不同中子源能谱下所测的裂变中子占比
Table 3 Proportion of fission neutron detected under different neutron source energy spectra

能谱 Energy spectra	裂变中子占比 Proportion of fission neutron / %
中子能量 Neutron energy 0.1 MeV	99.9
中子能量 Neutron energy 2 MeV	93.6
镅铍源能谱 Energy spectrum of Am-Be source	81.4

深度下1%次临界度时所测的裂变中子占比变化曲线。当深度为15 cm时,裂变中子占比为95.8%。CFD(Computational Fluid Dynamics)软件计算结果表明,该处堆芯温度约550 ℃。

4.2 探测器结构

堆外探测器受堆外结构影响显著,表5是不同位置处各能群中子注量率计算结果。

由表5可知:

- 1)含硼碳砖大幅降低了压力容器外侧的热中子注量率,仅 $1.6\times10^7\text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,占比0.02%,不利于探测器灵敏区直接与热中子发生反应。
- 2)离堆芯更远的探测器处热中子注量率比压力容器外侧更高,这是由于堆外结构的散射使得热中

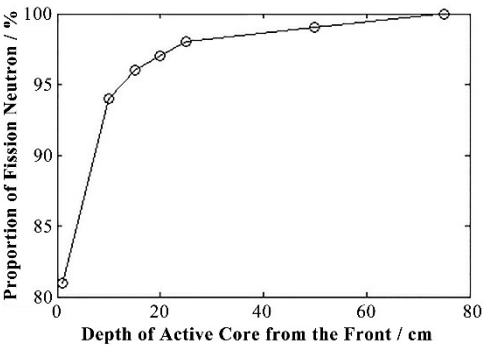


图4 不同活性区轴向深度下所测的裂变中子占比
Fig.4 Proportion of fission neutron detected under different axial depths of active core

子注量率增高。相比于热中子,能量较高的中能中子和快中子从堆芯裂变后,到达探测器前未经过多的核反应,是监测堆芯更准确的信号。



图5 探测器及套筒示意图
Fig.5 Diagram of detector and sleeve structure

- 3)在探测器外设置0.05 cm厚度镉和3 cm厚度聚乙烯套筒^[16],可以减少热中子的干扰且较大程度地保留中能中子和快中子的响应。探测器灵敏区热

表4 不同中子源点位下所测的裂变中子占比
Table 4 Proportion of fission neutron detected under different neutron source positions

序号 Serial numbers	径向位置 Radial positions	轴向位置 Axial positions	裂变中子占比 Proportion of fission neutron / %
1	侧反射层外侧 Outer region of side reflector	侧反射层前端 Front of side reflector	64.0
2	侧反射层外侧 Outer region of side reflector	侧反射层中心 Middle of side reflector	79.9
3	侧反射层内侧 Inner region of side reflector	侧反射层中心 Middle of side reflector	91.3
4	前反射层中心 Center of front reflector	前反射层后端 Rear region of front reflector	81.4

表5 不同位置处中子注量率($\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
Table 5 Neutron flux at different positions ($\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

能群 Energy groups	压力容器外侧 Outside of pressure vessel	无套筒源量程探测器处 Source range detector without sleeve	有套筒源量程探测器处 Source range detector with sleeve
热中子 Thermal neutron (<0.625 eV)	1.6×10^7 (0.02%) ^①	1.1×10^9 (15%)	4.4×10^9 (68%)
中能中子 Moderate neutron (0.625~0.1 MeV)	5.4×10^{10}	3.9×10^9	1.9×10^9
快中子 Fast neutron (0.1~1 MeV)	3.0×10^{10}	2.1×10^9	2.4×10^8
快中子 Fast neutron (>1 MeV)	7.3×10^9	5.7×10^7	1.7×10^7
全能群 All energy neutron	9.0×10^{10}	7.2×10^9	6.5×10^9

注: ① 1.6×10^7 (0.02%)表示热中子注量率 $1.6\times10^7\text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,占全能群中子比例为0.02%
Note: ① “ 1.6×10^7 (0.02%)” indicates that the thermal neutron flux is $1.6\times10^7\text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, with thermal neutrons below 0.625 eV accounting for 0.02% of the total neutron population

中子注量率增加为 $4.4 \times 10^9 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 占比 68%, 提高了探测器效率, 降低了对灵敏度的要求。图 5 是探测器及套筒示意图。

4.3 探测器选型

源量程探测器为脉冲型中子正比计数管, 有涂硼型、 BF_3 型、 ^3He 型等。 BF_3 型坪区长, 但耐 γ 辐照能力较差, 燃烧寿命最短, 需专门的辐射防护措施^[9]。 ^3He 型灵敏度极高, 但耐 γ 辐照能力最差, 燃烧寿

命^[12]约 $1.0 \times 10^{15} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$, 若无人及时维护或更换, 也难以长时间工作。涂硼型虽然灵敏度相对低, 但甄别 γ 干扰和抗辐照能力最强, 燃烧寿命最长, 更适宜长寿期、无人值守的应用需求。

源量程探测器位于堆本体外, 避免了苛刻的尺寸、温度要求, 其关键参数是灵敏度及量程。根据公式 1 和 2, 当镅铍源源强 $5 \times 10^6 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 表 6 是不同工况下源量程探测器灵敏度要求计算结果。

表 6 不同工况下源量程探测器灵敏度要求
Table 6 Sensitivity requirements for source range detector under different conditions

工况 Conditions	计数率要求 Counting requirement / s^{-1}	灵敏度要求 Sensitivity requirement / cm^2
工况 1: 装载 1 组燃料组件列 Condition 1: loading 1 fuel column	≥ 0.5	≥ 6.2
工况 2: 满装载, 完全停堆 Condition 2: full loading and shutdown	≥ 2	≥ 5.4
工况 3: 满装载, 堆芯 $k_{\text{eff}} \approx 0.99$ Condition 3: full loading and $k_{\text{eff}} \approx 0.99$	≥ 10	≥ 3.9

由表 6 可知, 源量程探测器灵敏度不低于 6.2 cm^2 。其功率测量范围 $10^{-9}\% \text{FP} \sim 10^{-3}\% \text{FP}$ ^[9], 对应热中子注量率为 $4.4 \times 10^{-2} \sim 4.4 \times 10^4 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。典型地, 可选择 ZJ1520 型涂硼中子计数管, 表 7 是其主要参数。

表 7 ZJ1520 型涂硼中子计数管主要性能指标
Table 7 Main performance indicators of ZJ1520 neutron counter tube

参量 Parameters	数值 Values
灵敏度 Sensitivity / cm^2	8
中子辐照寿命 Useful life of detector / $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2}$	1.0×10^{18}
中子测量范围 Measurement range of detector / $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$1.2 \times 10^{-2} \sim 2.0 \times 10^5$

功率量程探测器为电流型, 有涂硼电离室、 γ 补偿电离室、裂变室等。裂变室以 ^{235}U 等裂变核素作为中子敏感材料, 反应能大, 产生的信号强, 但灵敏材料涂层很薄, 中子探测效率很低^[17]。电离室对 γ 也有响应, 尤其是停堆后再启动工况, 中子衰减快而 γ 衰减慢, 较强的 γ 射线产生明显干扰。因此, γ 补偿电离室更为合适。

根据式(4), 功率量程探测器功率测量范围至少为 $10^{-4}\% \text{FP} \sim 200\% \text{FP}$, 对应热中子注量率 $2.7 \times 10^3 \sim 5.5 \times 10^9 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。典型地, 可选择 DL129 型 γ 补偿电离室, 表 8 是其主要参数。

表 8 DL129 型 γ 补偿电离室主要性能指标
Table 8 Main performance indicators of DL129 γ -compensated ionization chamber

参量 Parameters	数值 Values
灵敏度 Sensitivity / ($\text{A} \cdot \text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	3.0×10^{-14}
中子辐照寿命 Useful life of detector / $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2}$	1.0×10^{18}
中子测量范围 Measurement range of detector / $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	$5.0 \times 10^2 \sim 1.4 \times 10^{10}$

5 堆芯监测应用

5.1 首次临界模拟

临界实验原理是中子计数率倒数外推方法^[18], 次临界堆芯的中子总数 N_n 趋于稳定值, 即式(5), 式中 S_0 为中子源源强, l 为中子代时间。

$$N_n = \frac{S_0 l}{1 - k_{\text{eff}}} \quad (5)$$

由式(5)可知, 越接近临界, 中子数 N_n 就越大。通过拟合中子计数率倒数 $1/N$ 随燃料装载量的变化曲线, 可估算出临界装载量, 该曲线即为外推曲线。

当 $k_{\text{eff}}=0$ 时, $N_0=S_0 l$, 得到式(6)。根据装载核燃料后的计数率 N , 可得到 k_{eff} 估算值。

$$k_{\text{eff}} = 1 - \frac{N_0}{N} \quad (6)$$

气冷微堆在常温、空气氛围下、控制棒完全提出、中子源及探测器到位后, 按从下向上、从左向右的顺序依次将临时石墨块替换为燃料组件列(轴向 3 个组件整体为 1 列)的方式装料, 图 6 是装载顺序

示意图。

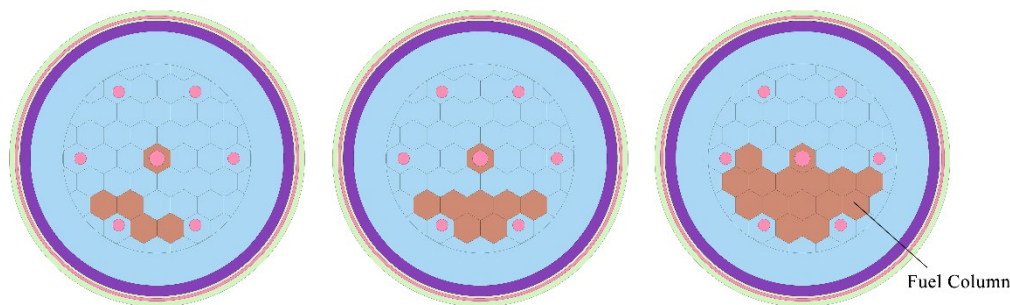


图6 燃料装载顺序示意图(彩图见网络版)
Fig.6 Diagram of fuel assembly column loading sequence (color online)

临界实验计算模拟包括：

1)理论临界装载量为14组燃料组件列,按照“1/3加料原则”(计数率较高时可按“1/2加料原则”),逐步装料,直至外推临界装载量与当前装载量相差少于1个燃料组件列。图7是装料外推曲线及 k_{eff} 估算值。并粗略刻度出控制棒价值(图6左下方控制棒)

相当于3.9列燃料组件。

2)插入经刻度的1组控制棒后,继续装载1组燃料组件列。根据理论临界棒位130 cm和临界外推方法,逐步提升棒位,直至外推临界棒位与当前棒位的差值或次临界度小于设定值。图8是首次临界单根控制棒外推曲线及 k_{eff} 估算值。

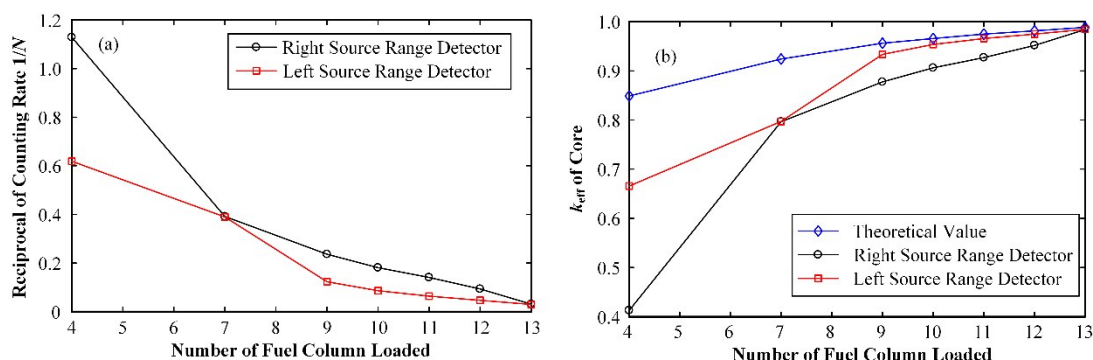


图7 首次临界装料时1/N外推曲线(a)及 k_{eff} 估算值(b)(彩图见网络版)
Fig.7 1/N extrapolation curve (a) and k_{eff} estimation value (b) for loading at the first critical experiment (color online)

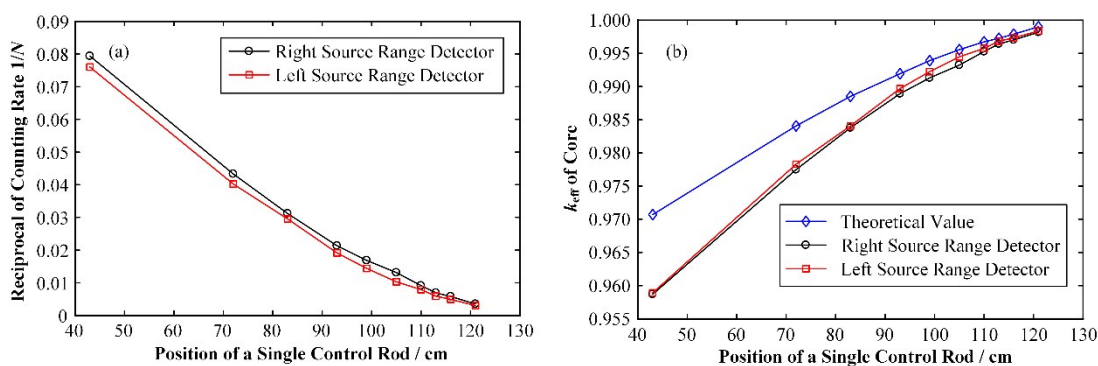


图8 首次临界单根控制棒提棒时1/N外推曲线(a)及 k_{eff} 估算值(b)(彩图见网络版)
Fig.8 1/N extrapolation curve (a) and k_{eff} estimation value (b) for lifting a control rod at the first critical experiment (color online)

由图7、8可知：

1)外推的1/N曲线整体呈凹曲线趋势,更加安全。

2)外推临界装载量为14组燃料组件列,与理论结果一致;在装载14列组件时,外推临界棒位128 cm,与理论值仅相差-2 cm。

3)装料外推时,由两个堆外量程探测器计数率得到的 k_{eff} 估算值相差较大,这是受到装载顺序的影响。在次临界度较深时, k_{eff} 估算值与理论值相差较大,这是由于式(6)给出的估算值,与中子源的中子价值相关;而理论值作为堆芯的集总参数,与中子源无关^[19]。

4)当逼近临界时, k_{eff} 估算值逐渐趋于理论值,最后一步提棒外推时, k_{eff} 估算值分别为0.998 39和0.998 65,与理论值0.998 97(标准差 5×10^{-5})偏差在 6×10^{-4} 以内,证明了外推临界方法在气冷微堆上的可行性和核测系统布置的合理性。

5.2 堆外探测器刻度模拟

堆外功率量程探测器刻度^[20]实验可避免能耗、功率分布^[21]等引起的功率水平 P 和轴向功率偏移 AO 的监测偏差。

前部和后部堆芯的功率 P_H 、 P_B 如下式:

$$P_H(m) = K_H(m) \cdot I_H(m) \quad (7)$$

$$P_B(m) = K_B(m) \cdot I_B(m) \quad (8)$$

式中: m 表示不同探测器通道,以图2右下方探测器通道为例开展分析。 K_H 、 K_B 为功率修正系数, I_H 表示堆芯前部电流,由轴向前部2个 γ 补偿电离室电流值得到;同理, I_B 表示堆芯后部电流。

轴向功率偏移 AO 如下式:

$$AO_{\text{ex}} = \frac{I_H - I_B}{I_H + I_B} \quad (9)$$

$$AO_{\text{in}} = \frac{P_H - P_B}{P_H + P_B} \quad (10)$$

式中: AO_{ex} 由堆外功率量程探测器信号决定; AO_{in} 由堆内功率分布决定,可由核设计软件理论计算或微堆在线监测的功率重构方法^[22-23]获得。

基于最小二乘法,用 AO_{ex} 监测 AO_{in} ,如式(11)所示, a 和 b 为待定系数。引入参数 k ,则刻度因子 K_H 、 K_B 如式(13)、(14)所示。

$$AO_{\text{ex}} = a + b \cdot AO_{\text{in}} \quad (11)$$

$$k = \frac{I_H + I_B}{P} \quad (12)$$

$$K_H = \frac{1}{k(1 + a/100)} \quad (13)$$

$$K_B = \frac{1}{k(1 - a/100)} \quad (14)$$

表9、式(15)是实验模拟的计算结果,刻度因子 K_H 、 K_B 分别为6 069.30和6 073.48。

$$AO_{\text{ex}} = 0.034 50 + 0.365 99 AO_{\text{in}}, R^2 = 0.976 02 \quad (15)$$

表9 堆外功率量程探测器刻度实验计算结果
Table 9 Result of calibration experiment for ex-core detector with power range

FP理论值 FP theoretical value / %	AO_{in} 理论值 AO_{in} theoretical value / %	$I_H / \times 10^{-6}$ A	$I_B / \times 10^{-6}$ A	$AO_{\text{ex}} / \%$	FP刻度值 FP calculated value / %	AO_{in} 刻度值 AO_{in} calculated value / %
10	-3.03	8.41	8.01	2.42	9.97	-2.81
20	-2.62	16.8	16.0	2.48	19.92	-2.64
30	-2.42	25.3	24.1	2.58	30.00	-2.38
40	-2.03	33.9	32.1	2.78	40.10	-1.83
50	-1.62	42.4	40.1	2.77	50.07	-1.85
60	-1.06	50.9	48.0	2.96	60.01	-1.35
70	-0.50	59.7	55.9	3.24	70.19	-0.58
80	-0.21	68.1	63.6	3.39	79.97	-0.15
90	0.12	76.6	71.4	3.52	89.87	0.18
100	0.66	85.5	79.6	3.57	100.20	0.33
120	1.38	103	94.7	4.10	119.93	1.77

由表9可知,轴向功率偏移 AO_{in} 和功率水平 FP 刻度值的绝对偏差分别在0.4%、0.2%以内,精度较高。因此,堆外功率量程探测器刻度实验在气冷微堆上是可行的,核测系统布置是合理的。

6 结语

针对气冷微堆仅依靠少量堆外探测器实现堆芯监测的研发挑战,本文提出了一种微堆核测系统布置方法和方案,并通过物理实验模拟验证其可行性。结论如下:

1)气冷微堆无源启动具有可行性。新燃料

的 ^{238}U 自发裂变和 (α, n) 衰变可产生 $1.80 \times 10^3 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$ 的源强,通过布置灵敏度不低于290、980 cm^2 的 ^3He 正比计数管作为堆内临时探测器和堆外源量程探测器,可建立装料、启堆的堆芯监测平台。

2)通过低源强启动中子源、低灵敏度堆外源量程探测器、宽量程堆外功率量程探测器耦合设计的有源核测系统,更适宜微堆长寿期、无人值守的堆芯监测应用需求。铈铍中子源布置在活性区前端15 cm深度,源强 $5 \times 10^6 \text{ n} \cdot \text{s}^{-1}$;源量程探测器选择灵敏度6.2 cm^2 以上的涂硼正比计数管;功率量程探测器选择 γ 补偿电离室。为提高核测信号准确性,在探

测器外设置镅和聚乙烯套筒,以测量受堆外结构干扰较小的中能中子和快中子。

3)通过外推临界方法和堆外源量程探测器,首次临界装载量外推值与理论值一致,外推临界棒位与理论值仅相差-2 cm,接近临界时 k_{eff} 偏差在 6×10^{-4} 以内。通过堆外功率量程探测器刻度模拟,功率水平FP和AO的最大绝对偏差在0.2%和0.4%以内。验证了核测系统布置方案在堆芯监测中应用的可行性。

本文提出的微堆核测系统布置,考虑了紧凑型堆芯设计和智能运行的场景需求,可为不同堆型的微堆堆芯监测研究提供参考。基于微堆核测系统提供的少量堆外核测信号,通过主成分分析方法^[22]或高阶谐波展开方法^[23]等降阶模型,可实现微堆堆内功率分布的重构和监测,为微堆堆芯在线监测研究提供技术支持。

作者贡献声明 张成龙负责微堆核测系统布置方法设计,起草文章;袁媛负责首次临界和堆外探测器刻度物理实验计算模拟;刘国明负责论文整体设计,整体上对文章做批评性审阅;张鹏负责数据分析,整体上对文章做批评性审阅;肖会文负责探测器选型及布置分析;董建华负责中子源和探测器布置位置的温度场计算,从热工专业角度对文章做批评性审阅;管婧宇负责中子源选型及布置分析;贺楷负责从结构专业角度对文章做批评性审阅,行政、技术支持;易璇负责从反应堆物理专业角度对文章做批评性审阅,技术支持。

参考文献

- 林继铭,田瑞峰,李凤臣,等. 液态重金属反应堆工程关键技术研究综述[J]. 核技术, 2025, **48**(7): 070004. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.250141. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.250141.
LIN Jiming, TIAN Ruifeng, LI Fengchen, *et al.* Review of key engineering technologies for liquid heavy metal cooled reactors[J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(7): 070004. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.250141. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.250141.
- 陈广亮,陶文铨,蔡德昌,等. 四代堆热工水力CFD应用的综合分析[J]. 核技术, 2025, **48**(7): 070003. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.250179. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.250179.
CHEN Guangliang, TAO Wenquan, CAI Dechang, *et al.* Comprehensive analysis of CFD application in thermal-hydraulic of Generation IV reactors[J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(7): 070003. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.250179. CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.250179.
- 李志容,陈立强,徐校飞,等. 模块式高温气冷堆的固有安全特性[J]. 核安全, 2013, **12**(3): 1 - 4. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2013.03.011.
LI Zhirong, CHEN Liqiang, XU Xiaofei, *et al.* Inherent safety features of the modular HTGR[J]. Nuclear Safety, 2013, **12**(3): 1 - 4. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2013.03.011.
- 陈彦发,李袁鹏,徐东,等. 压水堆堆芯中子通量监测系统对比研究[J]. 仪器仪表用户, 2023, **30**(9): 91 - 94, 14.
CHEN Yanfa, LI Yuanpeng, XU Dong, *et al.* Comparative study on core neutron flux monitoring system of pressurized water reactor[J]. Instrumentation, 2023, **30**(9): 91 - 94, 14.
- Bess J D, Fujimoto N, Dolphin B H, *et al.* Evaluation of the start-up core physics tests at Japan's high temperature engineering test reactor (fully-loaded core) [R]. U. S. A: Idaho National Laboratory, 2010. DOI: 10.2172/974753.
- 黄国庆,严慧娟,赖伟,等. TMSR物理启动测量系统设计[J]. 仪器仪表用户, 2019, **26**(12): 80 - 82, 67. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2019.12.020.
HUANG Guoqing, YAN Huijuan, LAI Wei, *et al.* Design of physical startup instrumentation system for TMSR[J]. Instrumentation, 2019, **26**(12): 80 - 82, 67. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2019.12.020.
- 张鹏展,杨历军,肖启冬,等. 新型热管堆装料及外推临界实验技术研究[J]. 原子能科学技术, 2024, **58**(10): 2173 - 2179. DOI: 10.7538/yzk.2023.youxian.0838.
ZHANG Pengzhan, YANG Lijun, XIAO Qidong, *et al.* Experimental study on charging and extrapolation criticality of new heat pipe reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, **58**(10): 2173 - 2179. DOI: 10.7538/yzk.2023.youxian.0838.
- Kim Y B, Vista F P, Chong K T. Study on analog-based ex-core neutron flux monitoring systems of Korean nuclear power plants for digitization[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2021, **53**(7): 2237 - 2250. DOI: 10.1016/j.net.2021.01.018.
- 李彪,张杰. 反应堆堆外核测系统探测器选型分析[J]. 核电子学与探测技术, 2016, **36**(2): 232 - 236. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.02.028.
LI Biao, ZHANG Jie. The selection analysis of reactor ex-core nuclear instrumentation system detector[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2016, **36**(2): 232 - 236. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2016.02.028.

- 10 何洋, 胡汝平, 邓平超, 等. CPR1000 机组首循环堆芯二次中子源替代一次中子源启动的工程实践[J]. 核科学与工程, 2023, **43**(3): 553 – 560. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2023.03.011.
HE Yang, HU Ruping, DENG Pingjiu, *et al.* Engineering practice in the start up of the secondary neutron source in the first cycle of CPR1000 nuclear power plant in place of the primary neutron source[J]. Nuclear Science and Engineering, 2023, **43**(3): 553 – 560. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0918.2023.03.011.
- 11 杨晓强, 叶刘锁, 李载鹏, 等. 田湾核电站 3 号机组反应堆首次无源启动[J]. 核安全, 2018, **17**(5): 7 – 13. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2018.05.002.
YANG Xiaoqiang, YE Liusuo, LI Zaipeng, *et al.* The first physical start-up without external neutron source of tianwan nuclear power station Unit 3[J]. Nuclear Safety, 2018, **17**(5): 7 – 13. DOI: 10.16432/j.cnki.1672-5360.2018.05.002.
- 12 蒋天植, 李彪, 张芸, 等. 核电厂无源启动中子探测器选型与试验研究[J]. 核动力工程, 2022, **43**(3): 139 – 143. DOI: 10.13832/j.jnpe.2022.03.0139.
JIANG Tianzhi, LI Biao, ZHANG Yun, *et al.* Selection and experimental research of the passive start-up neutron detector in nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineering, 2022, **43**(3): 139 – 143. DOI: 10.13832/j.jnpe.2022.03.0139.
- 13 国家技术监督局. GB/T 12789.1-1991. 核反应堆仪表准则第一部分: 一般原则[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991. The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Criteria for nuclear reactor instrumentation--Part 1: General principles. GB/T 12789.1-1991[S]. Beijing: Standards Press of China, 1991.
- 14 国家能源局. RK 压水堆核电站反应堆首次装料试验: NB/T 20434—2017[S]. 北京: 原子能出版社, 2017. National Energy Bureau of the People's Republic of China. Initial loading test for pressurized water reactor of nuclear power plant: NB/T 20434—2017[S]. Beijing: Atomic Press, 2017.
- 15 清华大学反应堆工程计算分析实验室. 国产蒙特卡罗临界程序 RMC 用户手册 (V3.5.1)[R]. 北京: 清华大学, 2021: 9–234.
Reactor Engineering Analysis Laboratory of Tsinghua University. User manual for RMC (Reactor Monte Carlo Code) Version 3.5.1[R]. Beijing: Tsinghua University, 2021: 9–234.
- 16 徐小宁, 刘国. AP1000 核电站核仪表系统信号侧设计改进[J]. 仪器仪表用户, 2014, **21**(5): 51 – 54. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2014.05.015.
XU Xiaoning, LIU Guo. Improvements of signal side of NIS of AP1000 NPPs[J]. Electronic Instrumentation Customers, 2014, **21**(5): 51 – 54. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1041.2014.05.015.
- 17 赵江滨, 何高魁, 刘洋, 等. 裂变电离室中子探测效率与灵敏度 MC 模拟[J]. 核电子学与探测技术, 2022, **42**(1): 89–93. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2022.01.015.
ZHAO Jiangbin, HE Gaokui, LIU Yang, *et al.* MC simulation of neutron detection efficiency and sensitivity of fission chamber[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2022, **42**(1): 89 – 93. DOI: 10.3969/j.issn.0258-0934.2022.01.015.
- 18 史永谦. 核反应堆中子学实验技术[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2011: 46 – 64.
SHI Yongqian. Experimental technology of neutron science in nuclear reactor[M]. Beijing: China Atomic Energy Press, 2011: 46 – 64.
- 19 史永谦, 朱庆福, 夏普, 等. 反应堆物理实验中的源倍增法研究[J]. 核科学与工程, 2005, **25**(1): 14 – 19, 13. DOI: 10.3321/j.issn:0258-0918.2005.01.002.
SHI Yongqian, ZHU Qingfu, XIA Pu, *et al.* Neutron source multiplication method research in reactor physics experiment[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2005, **25**(1): 14 – 19, 13. DOI: 10.3321/j.issn:0258-0918.2005.01.002.
- 20 付元光, 邓力, 李刚, 等. 基于 JMCT 的堆外核仪表系统刻度系数计算[J]. 原子能科学技术, 2018, **52**(10): 1780–1785. DOI: 10.7538/yzk.2017.youxian.0767.
FU Yuanguang, DENG Li, LI Gang, *et al.* Calculation of calibration coefficient of RPN based on JMCT[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, **52**(10): 1780 – 1785. DOI: 10.7538/yzk.2017.youxian.0767.
- 21 张方园, 朱贵凤, 邹杨, 等. 基于 SiC 包覆燃料颗粒的微型反应堆全寿期内的功率分布展平研究[J]. 核技术, 2025, **48**(9): 090603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240305.CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240305.
ZHANG Fangyuan, ZHU Guifeng, ZOU Yang, *et al.* Analysis and flattening of power distribution during the whole life of the micro reactor based on SiC coated fuel particle[J]. Nuclear Techniques, 2025, **48**(9): 090603. DOI: 10.11889/j.0253-3219.2025.hjs.48.240305.CSTR: 32193.14.hjs.CN31-1342/TL.2025.48.240305.
- 22 张成龙, 周梦飞, 张鹏, 等. 基于 PCA 的气冷微型堆堆芯

在线监测方法研究[J]. 原子能科学技术, 2024, **58**(7): 1467–1477. DOI: 10.7538/yzk.2023.youxian.0832.

ZHANG Chenglong, ZHOU Mengfei, ZHANG Peng, *et al.* Research on on-line monitoring method of gas-cooled micro-reactor core based on PCA[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, **58**(7): 1467–1477. DOI: 10.7538/yzk.2023.youxian.0832.

23 申鹏飞, 张鹏, 周梦飞, 等. 基于裂变矩阵的谐波计算及其在气冷微堆功率监测中的应用[J]. 原子能科学技术, 2024, **58**(7): 1459–1466. DOI: 10.7538/yzk.2023.youxian.0835.

SHEN Pengfei, ZHANG Peng, ZHOU Mengfei, *et al.* Harmonic calculation based on fission matrix and its application in power monitoring of gas-cooled micro reactor[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2024, **58**(7): 1459–1466. DOI: 10.7538/yzk.2023.youxian.0835.