

# 移动式微型裂变电离室中子探测器研制与核特性测试

言 杰 温中伟 何 遥 刘百力 胡永宏 王 玫 韩子杰 钱达志

(中国工程物理研究院 核物理与化学研究所 绵阳 621900)

**摘要** 微型裂变电离室是一种反应堆上广泛使用的堆芯中子探测器。国内 CPR1000 核电机组的堆芯中子注量率测量系统采用移动式微型裂变电离室作为中子探头,在反应堆运行过程中测量反应堆中子通量,提供堆芯中子通量分布图,是核电站重要的安全仪控设备。对标现役国外产品的服役条件和技术指标要求,研制了一款移动式微型裂变电离室中子探测器,并参照国家标准 GB/T 7164-2022 和行业标准 NB/T 20215-2013,对探测器的核特性进行了测试。测试结果表明:其核特性与国外产品相当,有望实现该反应堆安全产品的“国产替代”。

**关键词** CPR1000, 移动式堆芯探测系统, 微型裂变电离室, 中子注量率

中图分类号 TL811, TL816+.3

DOI: 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.030402

## Development and nuclear characteristic testing of a mobile miniature fission ionization chamber neutron detector

YAN Jie WEN Zhongwei HE Yao LIU Baili HU Yonghong WANG Mei  
HAN Zijie QIAN Dazhi

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract** [Background] The miniature fission ionization chamber is a widely used neutron detector for the in-core neutron flux monitoring of a nuclear reactor. Typically, the in-core neutron flux rate measurement system of a domestic CPR1000 nuclear power unit adopts a mobile miniature fission ionization chamber as the neutron probe to measure the neutron flux of the reactor and provide an in-core neutron flux distribution map during the operation. Therefore, it is an important piece of safety and control equipment for nuclear power plants. [Purpose] This study aims to develop a mobile miniature fission ionization chamber neutron detector according to the service conditions and technical requirements of current foreign products. [Methods] The nuclear properties of self-made fission ionization chamber neutron detector was developed strictly following the national standard GB/T 7164-2022 and the industry standard NB/T 20215-2013. The gamma sensitivity was tested and compared with a reference commercial fission detector using a  $^{60}\text{Co}$  gamma source. The thermal neutron detection characteristic, including the length and slope of plateau, the thermal neutron sensitivity and linearity were tested in one test channel of the China Mianyang Research Reactor (CMRR) with neutron flux from  $1 \times 10^9 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  to  $4 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . [Results & Conclusions] The test results indicate that "domestic substitution" of this in-core safety product can be achieved, and the nuclear characteristics of self-developed prototypes are comparable to those of foreign products.

**Key words** CPR1000, Mobile in-core detection system, Miniature fission ionization chamber, Neutron flux

第一作者: 言杰, 男, 1982 年出生, 2010 年于中国科学技术大学获博士学位, 研究领域为核辐射探测技术、中子管及其应用技术等

通信作者: 钱达志, E-mail: [qdz1968@vip.sina.com](mailto:qdz1968@vip.sina.com)

收稿日期: 2022-11-02, 修回日期: 2023-02-09

First author: YAN Jie, male, born in 1982, graduated from University of Science and Technology of China with a doctoral degree in 2010, focusing on nuclear radiation detection technology, neutron tube and its applications, etc.

Corresponding author: QIAN Dazhi, E-mail: [qdz1968@vip.sina.com](mailto:qdz1968@vip.sina.com)

Received date: 2022-11-02, revised date: 2023-02-09

CPR1000 核电机组是以从法国引进的百万千瓦级核电机组为基础,结合技术改进形成的中国大型商用压水堆技术方案<sup>[1]</sup>。CPR1000 机组的堆芯中子注量率测量系统用于测量核反应堆堆芯中子注量,以判断反应堆运行状况,是反应堆安全运行的重要保障。堆芯中子注量率测量系统的核心部件是一个移动式微型裂变电离室中子探测器,是测量中子的核心传感器。目前,国内在役的 CPR1000 机组的堆芯中子注量率测量系统全部采用国外公司的移动式微型裂变电离室中子探测器产品,国内尚无同类产品可供选择,这些“卡脖子”的进口设备已经在很大程度上影响了我国核电仪控设备自主化的开展。

为了打破国外在相关核心安全设备上的技术垄断,中国工程物理研究院核物理与化学研究所联合国内相关使用单位,针对 CPR1000 核电机组堆芯中子注量率测量系统的服役条件,对标在用的国外产品技术指标,设计并研制了一款移动式微型裂变室中子探测器。在原理样机研制阶段,利用钴源和加速器中子源对微型裂变室中子探测器(置于聚乙烯慢化体内)进行了初步的功能性测试和验证<sup>[2]</sup>。本文主要介绍参照国家标准 GB/T 7164-2022<sup>[3]</sup>和行业标准 NB/T 20215-2013<sup>[4]</sup>,利用  $\gamma$  源装置、中国绵阳研究堆(China Mianyang Research Reactor, CMRR)中子源对工程样机的  $\gamma$  灵敏度、中子灵敏度等核特性进行了全面测试。测试结果表明:自主研发探测器的核特性达到了设计指标要求,与目前使用的国外已有产品性能相当,可供相应堆型的堆芯中子注

量率测量系统选择,有利于实现自主可控。

## 1 移动式微型裂变室研制

受反应堆堆芯几何空间的限制,用于反应堆堆芯中子注量监测的中子探头是一种毫米尺度的微型裂变电离室<sup>[5]</sup>。为达到 CPR1000 机组的堆芯中子注量率测量系统对移动式微型裂变室中子探测器的使用要求,需严格对标现役产品的工作模式、外形结构、几何尺寸、电气接口等工程约束条件的前提下,实现其各项核特性指标,其主要设计参数要求为:直径 4.7 mm,长度 66 mm,活性区长度 27 mm,电流模式、测量范围  $10^{10} \sim 1.4 \times 10^{14} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,热中子灵敏度  $10^{-17} \text{ A} \cdot \text{n}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\gamma$  感应度小于  $2 \times 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{Gy}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

从 20 世纪 50 年代开始,根据不同的应用需求,国内外已对裂变电离室探测器开展了大量的设计<sup>[6-8]</sup>、制造<sup>[9]</sup>和测试<sup>[10]</sup>等工作。本工作在微型裂变电离室的几何结构、外形尺寸等机械特性强约束条件下,参考 Filliatre<sup>[11]</sup>、Chabod<sup>[12]</sup>、de Izarra<sup>[13]</sup> 等工作,利用开源的 Monte Carlo 模拟程序 Geant4<sup>[14]</sup>(模拟裂变物理过程)与 Garfield++<sup>[15]</sup>(模拟电离及感应信号产生的过程)建立了电流模式下的裂变电离室物理模型,对电离室中涉及的主要物理过程进行了模拟仿真与分析,并根据主要的核特性指标要求,如测量范围、热中子灵敏度等,完成了微型裂变电离室的总体设计,如图 1 所示。

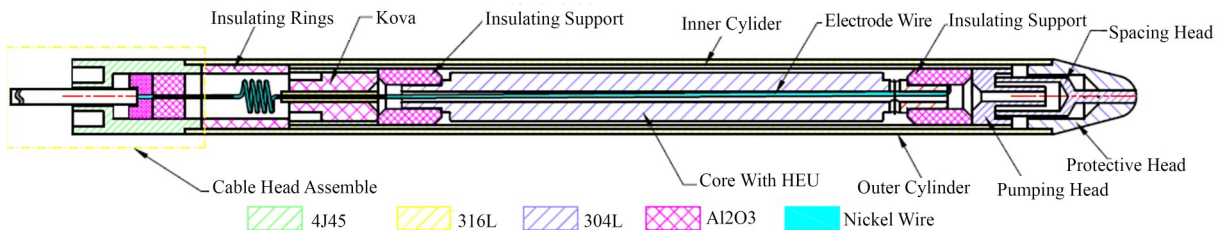


图 1 微型裂变电离室结构设计图  
Fig.1 Structural design of the miniature-fission ionization chamber

该裂变电离室采用高浓铀( $^{235}\text{U}$ 丰度 $>90\%$ )作为中子灵敏材料,高浓铀作为氧化物的形式均匀镀在中心芯体电极上,镀层质量厚度约  $0.23 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,总量约  $400 \mu\text{g}$ 。通过计算分析,在热中子总注量为  $1.5 \times 10^{20} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$  的工况下,该裂变室内的  $^{235}\text{U}$  裂变材料核数消耗量不超过 8.8%,核特性不会恶化超过 10%,可满足在 1 500 个测量循环中的使用要求。

裂变电离室外层为两个密封的外壳,形成两层充气间隙,内层用于充入工作气体(95%氩气+5%氮气),气压约为 150 kPa,充气间隙约 0.35 mm;外层

用于充入氮气保护气,有利于减缓老化。内筒和芯体之间施加一定的工作电压,探测器通过氧化铝陶瓷和可阀贯穿件进行电气绝缘和充放气处理。探测器外壳为不锈钢材料,一端通过夹封抽气管并利用激光焊烧实现气体密封;一端设计一个电缆封头组件,焊接至特制的总长约 32 m 的铠装驱动电缆,驱动电缆内部穿有矿物绝缘电缆,用于施加探测器的工作电压以及电流信号的传输。制作的移动式微型裂变电离室自研样机如图 2 所示,从室温到最高  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ ,镀铀芯体无掉粉脱落,裂变电离室的高温绝

缘电阻均大于 100 MΩ, 满足耐 350 °C 的工作温度需求。



图2 移动式微型裂变室自研样机实物图  
Fig.2 Snapshot of prototype for the mobile miniature-fission ionization chamber

## 2 核特性测试

### 2.1 $\gamma$ 感应度测试

$\gamma$  感应度测试的方法和条件按照 NB/T 20215-2013 中 6.2.3 的规定<sup>[3]</sup>, 利用式(1)计算出  $\gamma$  感应度  $S_{nw}$ :

$$S_{nw} = (I_1 - I_0) / X \quad (1)$$

式中:  $I_1$  为输出电流;  $I_0$  为本底输出电流;  $X$  为  $^{60}\text{Co}$  源强度。

该项测试在中国科学院上海应用物理研究所的  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  源完成, 该  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  源为点源, 将 4 支可移动微型裂变室(中间一只为国外对比产品, 周围三只为自

研样机) 并排置于距源 29 cm 处, 如图 3 所示, 经过事先标定, 该测量点的  $\gamma$  强度为  $1.1 \times 10^4 \text{ Gy} \cdot \text{h}^{-1}$ 。裂变室后端的铠装驱动电缆在辐射场内约 10 m。

在  $\gamma$  源未开启的情况下, 给裂变室施加 150 V 电压, 测量并记录本底电流值  $I_0$ 。开启  $\gamma$  源, 施加 150 V 高压, 测试输出电流  $I_1$ 。根据式(1)得到裂变室的  $\gamma$  感应度  $S_{nw}$  测试结果。为和国外产品的性能相比较, 将三支自研样机与国外产品放置在一起依次进行测试, 测试结果如表 1 所示。可以看到, 自研样机的本底电流值好于国外产品, 但在  $\gamma$  场下的  $\gamma$  电流值和  $\gamma$  感应度均比国外产品偏高。初步分析本底电流的差异主要是选用的绝缘环、陶瓷可阀、陶瓷支撑等绝缘元件的个体差异以及装配差异带来的绝缘电阻不同(1~10 TΩ), 而  $\gamma$  电流值的差异主要是选用的裂变室结构材料和驱动电缆材料以及制作工艺的差异, 比如自研裂变室选用的 304L、316L 不锈钢微量元素(钴等)含量高于国外同标号材料。该裂变室探测器工作于电流模式, 中子注量率测量范围为  $10^{10} \sim 1.4 \times 10^{14} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 对标的国外产品要求  $\gamma$  感应度小于  $2 \times 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{Gy}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ , 测试的自研样机虽达到了设计要求, 不影响使用, 但工程裕量不足, 后续的样机研制需进一步优化材料和制作工艺。



图3  $\gamma$  感应度测试实验布置示意图  
Fig.3 Experimental setup for the gamma sensitivity test

表1  $\gamma$  感应度测试结果  
Table 1 Test results of the gamma sensitivity

探测器 Detector	本底电流值 Background current value $I_0 / 10^{-9} \text{ A}$	$\gamma$ 电流实测值 Measured gamma current $I_1 / 10^{-8} \text{ A}$	$\gamma$ 感应度实测值 Measured gamma sensitivity $S_{nw} / 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{Gy}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$
国外产品 Foreign products	2.83	1.92	1.49
自研样机 #1	2.30	2.42	1.99
Self-developed prototype #2	1.30	2.24	1.92
#3	0.193	2.19	1.97



## 2.2 研究堆中子源测试

对热中子的相关核特性测试在 CMRR 的干孔道上进行,如图 4 所示,挑选了编号为 2021030002 和 2021030003 的两支自研微型裂变电离室样机,分别从反应堆堆顶两个孔道放进反应堆堆芯测量位置。

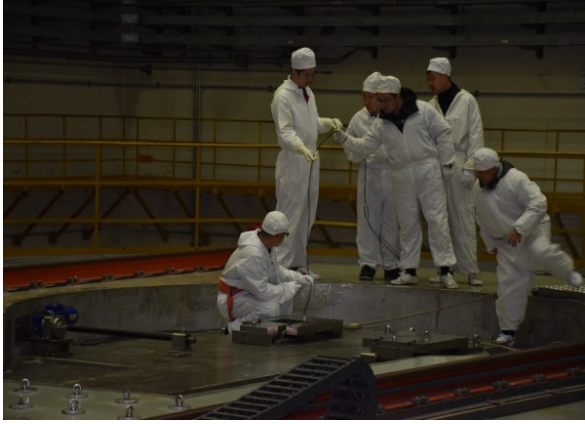


图 4 微型裂变电离室探测器入堆测试现场  
Fig.4 In-core test site for the miniature-fission ionization chamber

根据行业标准 BG/T 7164-2022,反应堆堆芯用微型裂变电离室探测器的中子灵敏度特指热中子灵敏度,探测器测量点距离堆顶约 9 m,测量点中子注量率范围为  $1 \times 10^9 \sim 4 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其中热中子大于 95%,其余为超热中子,中子能谱满足测试要求。在测试过程中,通过反应堆的功率调节提供试验要求的中子注量率,孔道内中子注量率采用活化法进行标定,标定结果如表 2 所示。

反应堆堆顶距离测试间约 20 m,探测器信号电缆自堆顶送至测试间,经过电磁干扰屏蔽箱后接入静电计(Keithley 6517B),静电计为探测器提供工作高压,同时输出测试电流数值。

### 2.2.1 坪长、坪斜和灵敏度测试

根据行业标准 NB/T 20215-2013 的“6.2.4 坪长、坪斜的测试和推荐工作电压的确定”“6.2.5 灵敏度的标定”以及国标 GB/T 7164-2022 的“6.3.3.1 坪特性测试”“6.3.3.2 中子灵敏度的测试”的具体要求,在对应中子注量率分别为  $1 \times 10^9 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  两个运行功率状态下进行实验测试和数据处理分析。

在不开启反应堆的情况下,给探测器施加 150 V 电压,采集电流信号并记录,此电流值即为探测器的本底信号;开启反应堆,待中子注量率稳定约 10 min 后,给探测器施加电压,电压值从 50 V 开始,以一定的步进值增加至 195 V,测出堆芯微型裂变室中子探测器的平均输出电流随外加电压变化的曲线。图 5 为自研探测器样机 2# 和 3# 在热中子注量率  $1 \times 10^9 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  台阶下的典型坪特性曲线,计算获得的坪长  $U_L$ 、坪斜  $P_s$  和推荐工作电压  $U$  结果见表 3。

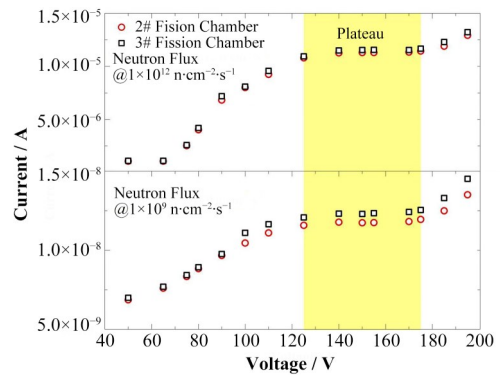


图 5 典型热中子注量率下的探测器坪特性曲线  
Fig.5 Detector plateau curve under a typical neutron flux

表 2 反应堆功率台阶标定结果  
Table 2 Calibration results for the reactor power step

序号 Index	注量率台阶 Neutron flux steps / $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	预计热功率 Estimated thermal power / kW	运行核功率 Operation nuclear power / kW	标定注量率台阶 Calibration steps of neutron flux / $\text{n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
1	$1 \times 10^9$	4.87	5	$1.08 \times 10^9$
2	$1 \times 10^{10}$	49.3	5	$9.73 \times 10^9$
3	$1 \times 10^{11}$	49.3	50	$1.11 \times 10^{11}$
4	$5 \times 10^{11}$	246	250	$5.65 \times 10^{11}$
5	$1 \times 10^{12}$	493	500	$1.13 \times 10^{12}$
6	$5 \times 10^{12}$	2 460	2 500	$5.67 \times 10^{12}$
7	$1 \times 10^{13}$	4 930	5 000	$1.13 \times 10^{13}$
8	$2 \times 10^{13}$	9 860	10 000	$2.15 \times 10^{13}$
9	$3.5 \times 10^{13}$	19 000	20 000	$3.74 \times 10^{13}$

表3 反应堆中子源下探测器样机坪斜测试  
Table 3 Slope test for the prototype detector under a reactor neutron source

探测器样机 Detector prototype 探测器参数 Detector characteristic	中子注量率 Neutron flux $1 \times 10^9 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$		中子注量率 Neutron flux $1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$	
	#2	#3	#2	#3
$U_{1,1} / \text{V}$	175	175	175	175
$U_{0,9} / \text{V}$	125	125	125	125
$U_L$ 坪长 Plateau length	50	50	50	50
$U / \text{V}$	142	142	142	142
$P_s$ 坪斜实测值 Measured plateau slope / (%/100 V)	8%/100 V	7%/100 V	6%/100 V	6%/100 V
$P_s$ 坪斜要求值 Required plateau slope / (%/100 V)	<20%/100 V	<20%/100 V	<20%/100 V	<20%/100 V

注:  $U_L$  为坪长, V;  $P_s$  为坪斜, 每 100 V 的百分数 (%/100 V);  $U$  为推荐工作电压, V;  $U_{0,9}$  为坪始端电压即输出电流为  $I_{0,9}$  时所加的电压, V;  $U_{1,1}$  为坪终端电压即输出电流为  $I_{1,1}$  时所加的电压, V

Notes:  $U_L$  is plateau length, V;  $P_s$  is plateau slope percentage per 100 V (%/100 V);  $U$  is recommended operating voltage, V;  $U_{0,9}$  is the voltage of beginning plateau, i.e the applied voltage when the output current is  $I_{0,9}$ , V;  $U_{1,1}$  is the voltage of ending plateau, i.e the applied voltage when the output current is  $I_{1,1}$ , V

中子灵敏度测试采用中子活化法, 调节反应堆运行功率至对应探测器中子注量率中间量程  $\phi_D$  (约  $1 \times 10^{12} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的运行状态, 探测器工作于推荐工作电压 150 V 条件下, 记录探测器样机的输出电流  $I_D$ , 通过计算获得两个自研样机的灵敏度  $S_{D,n} = I_D / \phi_D$ 。测试结果表明, 两个自研样机的中子灵敏度均在  $1 \times 10^{-17} \pm 15\%$  范围以内, 与理论设计结果一致, 满足使用的技术指标要求。

### 2.2.2 线性度测试

同样, 将探测器放置在反应堆堆芯测量孔道中, 给探测器施加推荐工作电压 150 V 并保持不变, 通过改变反应堆运行功率, 获得不同的中子注量率, 记录在不同中子注量率下的电流实测值  $I_p$ 。如图 6 所示, 记录了两支探测器样机在对应中子注量率从  $1 \times 10^{11} \sim 3.74 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  范围内的电流测试情况 (图中为任意单位)。可以看到, 在 CMRR 提供的中子注量率范围内, 测试的两支探测器保持良好的工作线性度, 实测值与拟合后计算所得理论值的线性度偏差不超过  $\pm 3\%$ , 满足设计要求。同时, 两支探测器的一致性良好, 未完全重合主要是由两支探测器中心芯体上镀的高浓铀总量不同引起, 这也与两支探测器的灵敏度测试结果相符合。由于 CMRR 堆适合该探测器测试的孔道所能提供的最高中子注量率不超过  $4 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 因此, 无法通过本次测试获得探测器在该工作电压下的最大输出电流, 即线性测量范围上限。

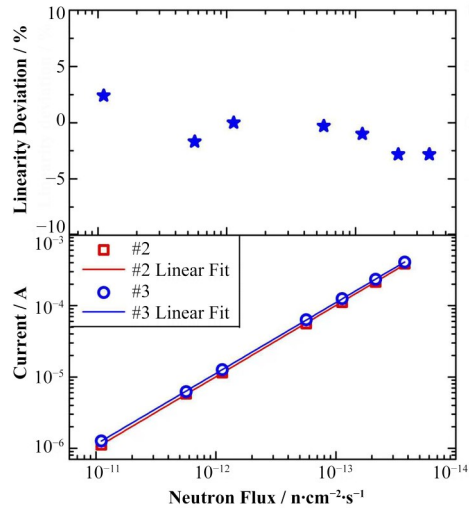


图6 探测器线性度测试结果  
Fig.6 Experimental results of linearity test for the prototype detectors

## 3 结语

针对国内 CPR1000 机组堆芯中子注量率测量系统的服役工况和技术指标需求, 设计并研制了一款移动式微型裂变电离室中子探测器。利用钴源装置提供的  $\gamma$  源和 CMRR 研究堆堆芯特定孔道内提供的从  $1 \times 10^9 \sim 4 \times 10^{13} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的热中子, 对自研的移动式微型裂变电离室中子探测器的  $\gamma$  灵敏度、中子灵敏度、线性度等核性能进行全面的测试。测试结果表明: 在满足现有工程边界条件下, 项目团队完全独立掌握了微型裂变室总体设计和关键工艺技术, 自研的移动式微型裂变电离室中子探测器的核特性达到国外同类产品的性能指标要求, 且一致性好, 可以实现对国外产品的“原位替代”。

**致谢** 感谢中国科学院上海应用物理研究所钴源装置和中国工程物理研究院核物理与化学研究所CMRR堆的运行团队在测试方案制定、安全分析、试验准备以及测试过程中提供的技术指导和现场帮助。

**作者贡献声明** 言杰：负责样机总体设计及论文撰写；温中伟：负责样机研制及样机测试；何遥：负责裂变芯体的工艺设计及样件研制；刘百力：负责样机焊接工艺设计及样机焊接；胡永宏：负责样机工程图纸设计和装配方案设计；王玫、韩子杰：负责样机的元器件准备、装配和检验；钱达志：对样机研制及入堆考核测试试验进行技术指导，对论文进行审查和总体把握。

### 参考文献

- 1 中国广东核电集团有限公司. 中国改进型压水堆核电站CPR1000简介[J]. 现代电力, 2006, **23**(5): 36 - 38. DOI: [10.19725/j.cnki.1007-2322.2006.05.006](https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2006.05.006).  
China Guangdong Nuclear Power Group Co., Ltd. Brief introduction of CPR1000 in China improved PWR nuclear power plant[J]. Modern Electric Power, 2006, **23**(5): 36 - 38. DOI: [10.19725/j.cnki.1007-2322.2006.05.006](https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2006.05.006).
- 2 柴生正, 黎宏块, 李崇剑, 等. 压水堆微型裂变室中子探测器的设计验证[J]. 仪器仪表用户, 2021, **28**(12): 30 - 34.  
CHAI Shengzheng, LI Hongkuai, LI Chongjian, *et al.* Design verification of neutron detector for PWR micro fission chamber[J]. Instrumentation, 2021, **28**(12): 30 - 34.
- 3 邓鹏, 李彪, 刘素志, 等. 用于核反应堆的辐射探测器特性及测试方法: BG/T 7164-2022[S]. 国家市场监督管理总局/国家标准化管理委员会, 2022.  
DENG Peng, LI Biao, LIU Suzhi, *et al.* Characteristics and test methods of radiation detectors for nuclear reactors: BG/T 7164 - 2022[S]. State Administration for Market Regulation/Standardization Administration, 2022.
- 4 付梦来, 姚秋果. 压水堆核电厂用于堆芯中子注量率测量的可移动式微型裂变室型式试验: NB/T 20215-2013 [S]. 国家能源局, 2013.  
FU Menglai, YAO Qiuguo. Type test of movable micro-fission chamber for pressurized water reactor nuclear power plants in-core neutron flux measurement: NB/T 20215-2013[S]. National Energy Administration, 2013.
- 5 Harrer J M, Beckerley J G. Nuclear power reactor instrumentation systems handbook[M]. Volume 1, Oak Ridge Tennessee: USAEC Technical Information, 1973: 42 - 49.
- 6 Abson W, Salmon P G, Pyrah S. The design, performance and use of fission counters[J]. Proceedings of the IEE - Part B: Radio and Electronic Engineering, 1958, **105**(22): 349 - 356. DOI: [10.1049/pi-b-1.1958.0306](https://doi.org/10.1049/pi-b-1.1958.0306).
- 7 Jammes C, Filliatre P, Geslot B, *et al.* Research activities in fission chamber modeling in support of the nuclear energy industry[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, **57**(6): 3678 - 3682. DOI: [10.1109/TNS.2010.2075939](https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2075939).
- 8 Wu Z P, Jiang X B, Zhang W S, *et al.* Monte Carlo simulation of neutron sensitivity of microfission chamber in neutron flux measurement[J]. Nuclear Science and Techniques, 2022, **33**(6): 78. DOI: [10.1007/s41365-022-01062-6](https://doi.org/10.1007/s41365-022-01062-6).
- 9 Geslot B, Berhouet F, Oriol L, *et al.* Development and manufacturing of special fission chambers for in-core measurement requirements in nuclear reactors[C]//2009 1st International Conference on Advancements in Nuclear Instrumentation, Measurement Methods and their Applications. June 7-10, 2009, Marseille, France. IEEE, 2010: 1 - 4. DOI: [10.1109/ANIMMA.2009.5503816](https://doi.org/10.1109/ANIMMA.2009.5503816).
- 10 Blandin C, Breaud S, Vermeeren L, *et al.* Development of new sub-miniature fission chambers: modelling and experimental tests[J]. Progress in Nuclear Energy, 2003, **43**(1 - 4): 349 - 355. DOI: [10.1016/S0149-1970\(03\)00044-1](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(03)00044-1).
- 11 Filliatre P, Jammes C, Geslot B, *et al.* A Monte Carlo simulation of the fission chambers neutron-induced pulse shape using the GARFIELD suite[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2012, **678**(21): 139 - 147. DOI: [10.1016/j.nima.2012.03.020](https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.03.020).
- 12 Chabod S, Fioni G, Letourneau A, *et al.* Modelling of fission chambers in current mode—analytical approach [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2006, **566**(2): 633 - 653. DOI: [10.1016/j.nima.2006.06.067](https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.06.067).
- 13 de Izarra G. COSICAF, a fission chamber simulation tool for academic purposes[J]. EPJ Nuclear Sciences & Technologies, 2020, **6**: 49. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjn/2020011>.
- 14 Agostinelli S, Allison J, Amako K. GEANT4 - a

- simulation toolkit[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003, **338**: 250 - 303. DOI: [10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8).
- 15 Pfeiffer D, De Keukeleere L, Azevedo C, *et al.* Interfacing Geant4, Garfield++ and Degrad for the simulation of gaseous detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, **935**: 121 - 134. DOI: [10.1016/j.nima.2019.04.110](https://doi.org/10.1016/j.nima.2019.04.110).