



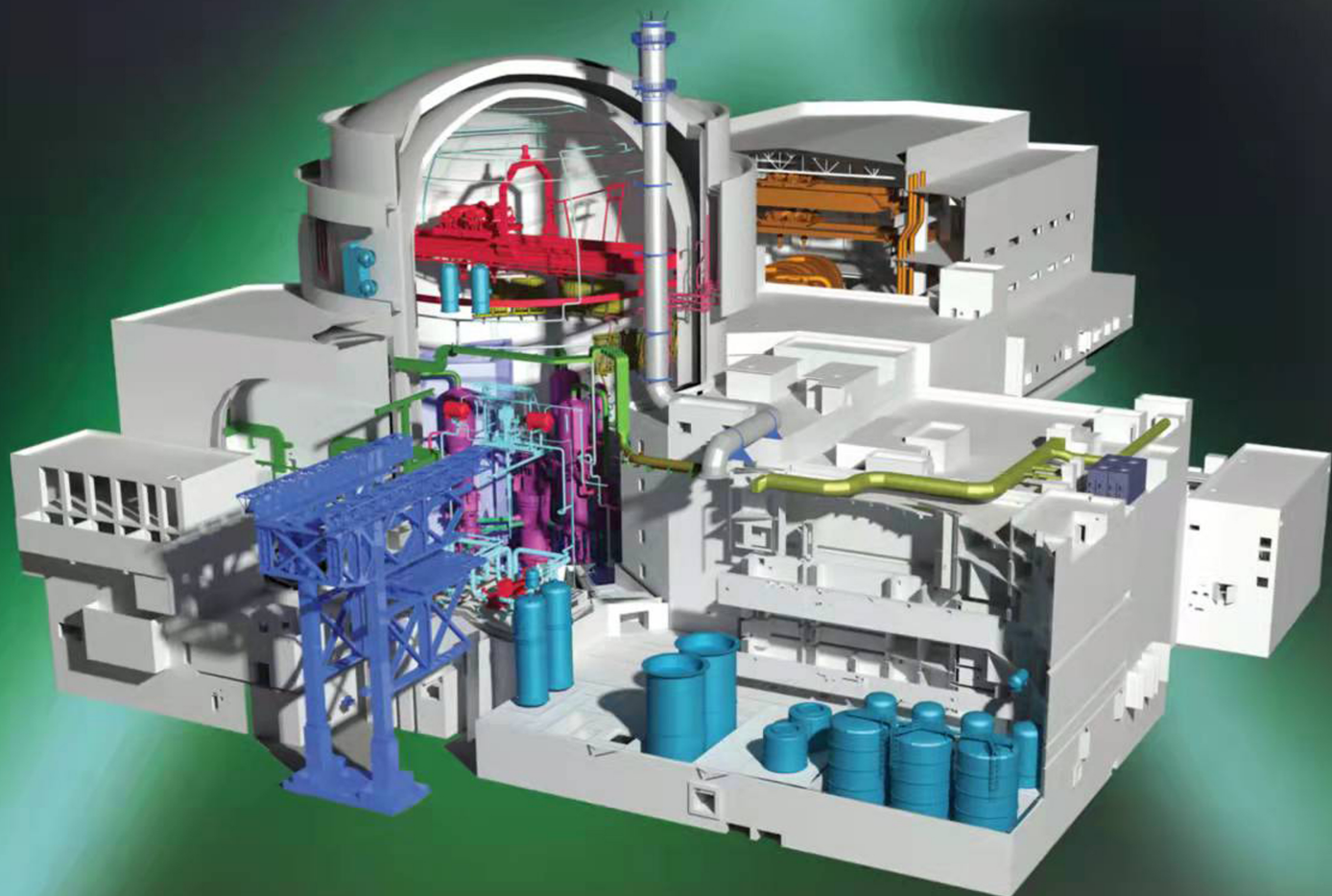
ISSN 1000-6931
CN 11-2044/TL

原子能科学技术

ATOMIC ENERGY SCIENCE AND TECHNOLOGY

核电厂设计上实现实际消除论证方法研究
邢继, 魏玮, 刘静, 喻新利

NO. 1 2022
第56卷



ISSN 1000-6931



中国原子能科学研究院 主办
中国核工业集团有限公司 主管

目 次

封面文章

核电厂设计上实现实际消除论证方法研究 邢 继, 魏 玮, 刘 静, 喻新利(1)

化学

气体采样滤膜中铀含量的激光诱导击穿光谱分析方法研究 王祥丽, 王燕伶, 高智星, 程毅梅, 司 宇(9)

硫化钴共沉淀法分析核电厂周边海水中去钾总 β 活度

..... 吴连生, 贺 毅, 孙雪峰, 黄彦君, 李 远, 刘 涛, 曾 帆, 陈超峰, 上官志洪, 杨子谦(15)

反应堆物理与核材料

双重非均匀子群参数制作研究 黄 冬, 袁 媛, 张 乾, 李 颂, 梁越超(22)

快堆控制棒组件非均匀效应修正方法研究 宋英韵, 胡 赟, 张 崇, 单浩栋, 贾晓淳(31)

强非均匀 Pin-by-pin 历史效应处理技术研究 王思成, 曹良志, 李云召, 吴宏春, 杨杰伟(39)

压水堆堆芯 Pin-by-pin 均匀化计算中非均匀泄漏修正模型研究 张 斌, 李云召, 吴宏春(46)

连续能量核数据敏感性分析及其在 AP1000 中的应用 黄金龙, 曹良志, 贺清明, 李 捷, 沈 炜(53)

基于 TMSR-PNS 装置 0.008~0.1 eV 能区 Th 的全截面测量

..... 胡继峰, 王小鹤, 姜 炳, 韩建龙, 陈金根, 蔡翔舟(61)

基于改进缺陷因子方法的 FCM 燃料有效多群截面计算方法研究 易思宇, 刘宙宇, 尹 文(68)

临界实验装置水位外推达临界方法优化研究 陈善发, 陈晓亮, 徐健平, 章秩烽, 赵阶成, 陈效先(80)

基于 GPU 并行的二维时空子动力学 MOC 程序开发及验证 邹 航, 梁 亮, 张 乾, 宋佩涛, 赵 强(87)

基于 SARAX/DAKOTA 的快堆设计多目标优化框架开发与验证 李晓琪, 郑友琦, 杜夏楠, 王永平(96)

基于第一性原理的氢化锆热散射律计算分析 祖铁军, 汤勇强, 曹良志, 吴宏春(106)

长寿期压水堆板状燃料组件可燃毒物选型研究 徐士坤, 于 涛, 谢金森, 李满仓, 王连杰(113)

环形燃料反应堆通量密度分布测量 张 庚, 刘 锋, 夏兆东, 朱庆福, 章秩烽(121)

CFETR 水冷陶瓷增殖剂包层模块产氚率实验验证

..... 祝庆军, 陈舞辉, 鲍 杰, 赵子甲, 杜 华, 黄 凯, 刘松林(127)

中国聚变工程试验堆包层的核热耦合效应研究 戴 涛, 曹良志, 贺清明, 吴宏春(136)

基于蒙特卡罗均匀化理论与有限体积方法的溶液系统临界事故分析方法

..... 孙 旭, 周 琦, 余慧莺, 朱庆福, 夏兆东, 宁 通, 马晓笛(146)

压水堆核电站冷却剂碘同位素活度比值¹³¹I/¹³³I与燃料完整性关系研究.....
..... 付鹏涛,卢圣波,梁 杉,杨晓环,徐皓皓,周文忠,韩 嵩(153)

SiC 辐照损伤对耐高温氧化性能的影响..... 宋 杰,廖 庆,李炳生,冯棕楷,杨俊源(159)

钨中氦泡融合条件的分子动力学模拟研究..... 徐 阳,杨章灿(168)

高温退火温度对 ODS-316L 钢微观组织的影响..... 杨新异,朱高凡,赵彦云,黄群英(177)

Beremin 模型预测尺寸效应对 A508-3 钢断裂韧性的影响..... 周恒晖,钟巍华,宁广胜,林 虎,杨 文(186)

期刊基本参数: CN 11-2044/TL* 1959 * m * A4 * 192 * zh * P * ¥50.00 * 1200 * 24 * 2022-01

本期责任编辑 汤晓浩 王调霞 王宝金 侯翠梅 张秀平 韩翠娥 骆淑莉

CONTENTS

COVER PAPER

Study of Demonstration Method of Practical Elimination for Nuclear Power Plant
 XING Ji, WEI Wei, LIU Jing, YU Xinli(1)

CHEMISTRY

Quantitative Analysis of Uranium in Gas Sampling Filter by Laser-induced Breakdown Spectroscopy
 WANG Xiangli, WANG Yanling, GAO Zhixing, CHENG Yimei, SI Yu(9)

Determination of Gross Beta Activity Excluding ⁴⁰K in Seawater Around Nuclear Power Plant by Cobalt Sulfide
 Coprecipitation Method WU Liansheng, HE Yi, SUN Xuefeng,
 HUANG Yanjun, LI Yuan, LIU Tao, ZENG Fan, CHEN Chaofeng, SHANGGUAN Zhihong, YANG Ziqian(15)

REACTOR PHYSICS AND NUCLEAR MATERIAL

Study on Development of Double Heterogeneous Subgroup Parameters
 HUANG Dong, YUAN Yuan, ZHANG Qian, LI Song, LIANG Yuechao(22)

Study on Heterogeneous Effect Correction Methods of Control Rod Assembly in Fast Reactor
 SONG Yingyun, HU Yun, ZHANG Chong, SHAN Haodong, JIA Xiaochun(31)

History Effect Treatment in Strongly Heterogeneous Pin-by-pin Calculation
 WANG Sicheng, CAO Liangzhi, LI Yunzhao, WU Hongchun, YANG Jiewei(39)

Heterogeneous Leakage Model for PWR Pin-by-pin Homogenization Calculation
 ZHANG Bin, LI Yunzhao, WU Hongchun(46)

Sensitivity Analysis of Continuous-energy Nuclear Data and Its Application in AP1000
 HUANG Jinlong, CAO Liangzhi, HE Qingming, LI Jie, SHEN Wei(53)

Measurement of Neutron Total Cross Section of Th in 0.008-0.1 eV at TMSR-PNS
 HU Jifeng, WANG Xiaohe, JIANG Bing, HAN Jianlong, CHEN Jingen, CAI Xiangzhou(61)

Advanced Disadvantage Factor Method for Homogenized Effective Cross Section Calculation in FCM fuel
 YI Siyu, LIU Zhouyu, YIN Wen(68)

Study on Optimization of Method of Extrapolating Water Level to Criticality in Critical Experimental Device
 ... CHEN Shanfa, CHEN Xiaoliang, XU Jianping, ZHANG Zhifeng, ZHAO Jiecheng, CHEN Xiaoxian(80)

Development and Verification of 2D Kinetic MOC Code Based on GPU
 ZOU Hang, LIANG Liang, ZHANG Qian, SONG Peitao, ZHAO Qiang(87)

Research on Multi-objective Optimization of Fast Reactor and Development of SARAX/DAKOTA Optimal Frame
 LI Xiaoqi, ZHENG Youqi, DU Xianan, WANG Yongping(96)

Calculation and Analysis of Thermal Scattering Law of Zirconium Hydride Based on First-principles Calculation
 ZU Tiejun, TANG Yongqiang, CAO Liangzhi, WU Hongchun(106)

Burnable Poison Selection of Plate Fuel Assembly for Long-life Pressurized Water Reactor
 XU Shikun, YU Tao, XIE Jinsen, LI Mancang, WANG Lianjie(113)

| | |
|--|--|
| Flux Density Distribution Measurement in Annular Fuel Reactor | |
| | ZHANG Geng, LIU Feng, XIA Zhaodong, ZHU Qingfu, ZHANG Zhifeng(121) |
| Experimental Verification of Tritium Production Rate in CFETR Water Cooled Ceramic Breeder Blanket Mock up | |
| | ZHU Qingjun, CHEN Wuhui, BAO Jie, ZHAO Zijia, DU Hua, HUANG Kai, LIU Songlin(127) |
| Research on Neutronics/Thermal-hydraulics Coupling Effect of CFETR Blanket | |
| | DAI Tao, CAO Liangzhi, HE Qingming, WU Hongchun(136) |
| Critical Accident Analysis Method of Solution System Based on Monte Carlo Homogenization Theory and Finite Volume Method | |
| | SUN Xu, ZHOU Qi, YU Huiying, ZHU Qingfu, XIA Zhaodong, NING Tong, MA Xiaodi(146) |
| Research of Relationship Between Fuel Reliability and Iodine Isotope Activity Ratio $^{131}\text{I}/^{133}\text{I}$ in PWR Primary Coolant | |
| | FU Pengtao, LU Shengbo, LIANG Shan, YANG Xiaohuan, XU Jiehao, ZHOU Wenzhong, HAN Song(153) |
| Effect of SiC Radiation Damage on High Temperature Oxidation Resistance | |
| | SONG Jie, LIAO Qing, LI Bingsheng, FENG Zongkai, YANG Junyuan(159) |
| Molecular Dynamics Study of Helium Bubble Coalescence in Tungsten | |
| | XU Yang, YANG Zhangcan(168) |
| Effect of High Annealing Temperature on Microstructure of ODS-316L Steel | |
| | YANG Xinyi, ZHU Gaofan, ZHAO Yanyun, HUANG Qunying(177) |
| Size Effect on Fracture Toughness of A508-3 Steel Predicted by Using Beremin Model | |
| | ZHOU Henghui, ZHONG Weihua, NING Guangsheng, LIN Hu, YANG Wen(186) |
| Editors TANG Xiaohao, WANG Tiaoxia, WANG Baojin, HOU Cuimei, ZHANG Xiuping, HAN Cuie, LUO Shuli | |

环形燃料反应堆通量密度分布测量

张庚, 刘锋, 夏兆东, 朱庆福*, 章秩烽

(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: 相对中子通量密度分布是反应堆的重要物理参数之一, 测量环形燃料零功率反应堆堆芯相对中子通量密度分布对了解环形燃料堆芯反应堆物理特性及开展安全分析具有指导意义。本文在环形燃料堆芯多边形装载下, 采用箔活化法对辐照后燃料元件外表面不同位置金箔的 γ 活度进行测量, 得到不同位置燃料元件轴向、径向的相对中子通量密度分布, 并将测量值与蒙特卡罗理论计算值进行比对。结果表明: 实验测量值与理论计算值最大相对偏差在 12% 以内, 相对中子通量密度分布测量结果符合实验设计预期, 现有蒙特卡罗分析手段可较好地分析堆内元件轴向通量密度分布情况。本文结果可为环形燃料的工程化应用提供重要的数据支撑。

关键词: 环形燃料; 中子通量密度分布; 活化法

中图分类号: TL375

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2022)01-0121-06

doi: 10.7538/yzk.2021.youxian.0254

Flux Density Distribution Measurement in Annular Fuel Reactor

ZHANG Geng, LIU Feng, XIA Zhaodong, ZHU Qingfu*, ZHANG Zhifeng

(Division of Reactor Engineering Technology Research,

China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

Abstract: The relative neutron flux density distribution is one of the essential physical parameters of the reactor. Measuring the relative neutron flux density distribution of the annular fuel zero-power reactor core has guiding significance for understanding the physical characteristics of the annular fuel core reactor and conducting safety analysis. In this paper, the γ activity of the gold foil at different positions on the outer surface of the fuel cell after irradiation was measured by foil activation method under polygonal loading of annular fuel core. The axial and radial relative neutron flux density distributions of fuel cell at different positions were obtained, and the measured values were compared with the values calculated by Monte Carlo theory. The results show that the maximum relative deviation between experimental measurement and theoretical calculation is within 12%. The measurement results of relative neutron flux density distribution are in line with the measure design expectations. The existing Monte Carlo analysis methods can better analyze the axial flux density distribution of the components in the reactor. This study provides essential data support for the engineering application of annular fuel.

Key words: annular fuel; neutron flux density distribution; activation method

相对中子通量密度分布是反应堆的重要物理参数之一,对反应堆物理特性及开展安全分析具有指导意义。环形燃料可大幅度提高燃料元件的传热效率,降低燃料芯块温度,能显著提升反应堆的安全性和经济性,已成为压水堆先进燃料组件的重要发展趋势之一。环形燃料栅元没有在堆内实际应用的先例,国内外均没有环形燃料堆芯物理实验数据,测量环形燃料反应堆中子通量密度的空间分布,可为中子物理实验、照射实验、同位素生产提供依据,通过测定相对中子通量密度分布了解堆芯热点、导出的物理参数等可为反应堆设计或运行提供数据^[1-4]。

在环形燃料零功率反应堆上开展了环形燃料堆芯物理临界实验。为模拟环形先导组件入传统实心燃料组件压水堆的工况,采用环形与实心燃料混合装载模式,完成对最小临界装载的多边形装载系列堆芯装载方案的临界实验,相对中子通量密度分布是反应堆临界实验中的重要组成部分。本文选取金作为探测箔布置在不同元件外表面,通过箔活化法测量环形燃料零功率反应堆轴向和径向的相对中子通量密度分布,并与蒙特卡罗分析程序计算值进行对比分析。本文结果可为环形燃料堆芯的物理计算程序验证、环形燃料先导组件入堆考验及环形燃料反应堆堆芯设计提供参考数据。

1 实验方法选择及原理

环形燃料零功率反应堆堆芯比较紧凑,栅格稠密,采用箔活化法测量不受栅格大小的限制,较采用其他方法更有优势。活化箔片所占的空间较小,可放置在紧密栅格内进行测量,对于中子场的扰动小且位置分辨率高^[5-8]。因此,选择箔活化法测量环形燃料零功率反应堆的相对中子通量密度分布。

箔活化法测量中子通量密度分布的原理是将1组活化截面已知的金箔放入到待测的中子场中进行照射,取出后放在高纯锗探测器内进行活度测量,其金活化探测箔的 γ 积分计数

C_{Au} 与中子通量密度 $\Phi(E)$ 有如下关系:

$$\frac{C_{Au}}{I_{\gamma}\epsilon K(1-\tau)} = \int_0^{\infty} \int_0^{t_0} N_{Au} \Phi(E) \sigma_{Au}(E) e^{-\lambda_{Au}t} dt dE (1 - e^{-\lambda_{Au}t_1}) e^{-\lambda_{Au}t_2} \quad (1)$$

其中: I_{γ} 为自屏 γ 修正; ϵ 为不同能量的探测效率; K 为相应能量的占比; τ 为系统死时间; $\sigma_{Au}(E)$ 为金探测箔的中子活化反应截面; N_{Au} 为金探测箔的原子数; λ_{Au} 为金探测箔激活后的衰变常量; t_0 为辐照时间; t_1 为持续测量时间; t_2 为辐照出堆后至开始测量之间的时间间隔; t 为时间。

从式(1)可看出,对于同样的金箔,在堆内进行1次辐照,所有金箔辐照时间 t_0 相同;在测量活度过程中, I_{γ} 、 ϵ 、 K 均相同;如果考虑堆内不同位置能谱也相同,即:

$$\int_0^{\infty} N_{Au} \Phi(E) \sigma_{Au}(E) dE = \Phi_0 N_{Au} \int_0^{\infty} \chi(E) \sigma_{Au}(E) dE \quad (2)$$

则式(1)可写为:

$$a\Phi_0 = \frac{C e^{\lambda_{Au}t_2}}{N_{Au}(1 - e^{-\lambda_{Au}t_1})} \quad (3)$$

其中: Φ_0 为总中子通量密度绝对值; $\chi(E)$ 为归一化的待测中子能谱; C 为特征 γ 射线积分计数率; a 为常数。

因此只需在实验前称出每一片金活化箔的质量,辐照后测量其积分计数率 C ,记录下 t_1 、 t_2 ,即可求得相对中子通量密度 $a\Phi_0$ 。

2 环形燃料零功率反应堆

环形燃料零功率反应堆位于中国原子能科学研究院铀棒栅临界实验装置堆厅,是一座以轻水为慢化剂和反射层、以控制棒进行反应性控制的立式小型临界装置。本次实验堆芯栅格为23.6 mm的方形栅格,燃料元件采用²³⁵U富集度为4.95%的环形燃料元件与²³⁵U富集度为3%的实心燃料元件混装,共装载环形燃料元件96根,实心燃料元件172根,占位元件128根,堆芯布置方案示于图1。堆芯净堆装载呈1/8旋转对称。采用了多边形堆芯装载方案,多边

形堆芯装载方案为环形燃料零功率反应堆的最小临界质量装载方案^[9-12]。

将每一片金探测箔编号并进行质量称量,根据具体实验情况进行选择并入堆辐照测量。

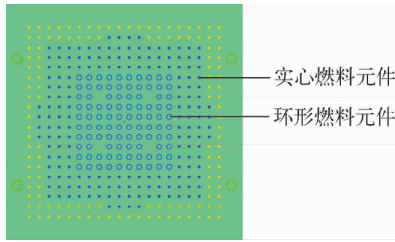


图1 环形燃料零功率反应堆临界装载方案
Fig. 1 Critical loading scheme of annular fuel zero-power reactor

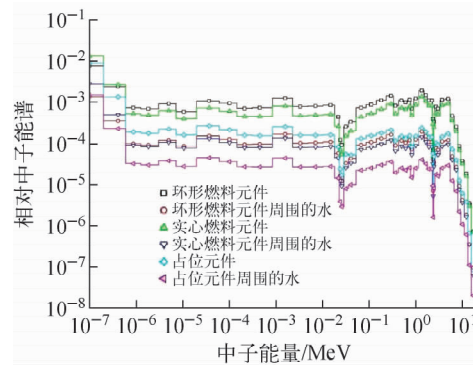


图2 环形燃料零功率反应堆中子能谱计算结果
Fig. 2 Calculation result of neutron energy spectrum of annular fuel zero-power reactor

3 实验方案

3.1 探测箔

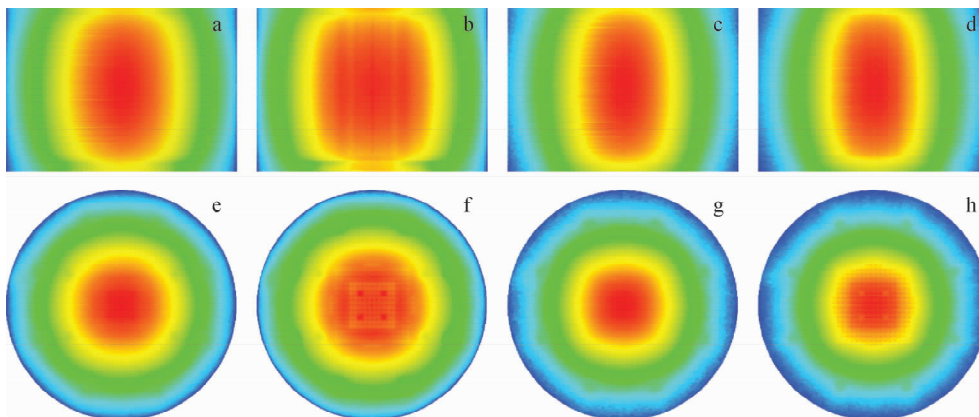
根据能谱分析计算结果(图2),堆芯为典型热谱反应堆,引发裂变的中子有93.73%是热中子,因此选择在热谱有较大截面的Au作为活化片材料。此外,金制作简单,操作方便,有利于保证测量精度。金的衰变方式有3种,其中能量为0.412 MeV的 γ 射线的分支比为0.99,当把探测仪器的阈值(光电峰的半宽度)放在410 keV处进行测量时,可使本底降低60%~80%,适宜用高纯锗 γ 谱仪进行相对测量^[5]。

对金进行压延加工,滚轧成金箔,切割成5 mm×5 mm×0.02 mm的方形金探测箔若干。

3.2 测点定位

基于蒙特卡罗程序进行全堆精细模拟,计算全堆中子通量密度分布,作为选取堆芯辐照金箔布置位置的依据。根据通量密度分布分析计算结果(图3),以分别涵盖环形燃料元件与实心燃料元件的通量密度高、中、低位置为原则选取探测箔布置位置。

由于堆芯采用环形燃料元件与实心燃料元件混合装载,径向分别选取处于1/8对角线上具有代表性位置的3根实心燃料元件与4根环形燃料元件,由栅格板左下角开始计数元件孔



第1行为xz方向,第2行为xy方向
a, e——全能量区间,0~20 MeV; b, f——热中子,0~1 eV;
c, g——超热中子,1 eV~0.1 MeV; d, h——快中子,0.1 MeV~20 MeV

图3 环形燃料堆芯中子通量密度分布

Fig. 3 Neutron flux density distribution in annular fuel core

位,对应位置为[10,10](A)、[8,10](B)、[6,10](C)、[6,6](D)的环形燃料元件,位置[4,10](E)、[2,10](F)、[4,6](G)的实心燃料元件。7根待测元件轴向以每10cm为一测点,

每根元件轴向8个测点,轴向共56个测点。径向位于燃料元件的外表面,方向统一朝向堆芯中心。测点布置图示于图4,其中A点为靠堆芯中心方向。



图4 1/8堆芯测点布置

Fig. 4 Layout of measuring point for octant core

3.3 相对中子通量密度分布测量

用胶带将活化片(金片)固定于待测元件外壳的指定位置,然后将外表面含有活化片的燃料元件布置在堆芯待测位置,将反应堆运行至功率探测器电流 0.3×10^{-7} A 对应的功率水平,中子辐照 120 min 后正常停堆,拆解取出活化片,通过高纯锗 γ 谱仪对金箔的 γ 活度进行测量,根据式(3)得到堆芯不同位置处的相对中

子通量密度分布。

4 结果与讨论

轴向、径向相对中子通量密度测量结果分别列于表1、2。采用堆芯轴向、径向通量密度最高区 γ 在 A 点的计数 3 323 作为归一化点。

使用蒙特卡罗程序进行全堆精细模拟,选取堆芯辐照样品布置位置进行计数,统计探测

表1 轴向相对中子通量密度测量值分布

Table 1 Distribution of measured value of axial relative neutron flux density

| 测点编号 | 相对中子通量密度 | | | | | | |
|------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | A | B | C | D | E | F | G |
| 1 | 0.299 3 | 0.282 8 | 0.227 6 | 0.175 4 | 0.203 9 | 0.115 6 | 0.095 8 |
| 2 | 0.585 9 | 0.547 1 | 0.459 5 | 0.351 8 | 0.474 9 | 0.290 6 | 0.249 3 |
| 3 | 0.851 9 | 0.792 6 | 0.665 0 | 0.515 8 | 0.683 0 | 0.395 0 | 0.343 2 |
| 4 | 1.006 7 | 0.928 3 | 0.758 3 | 0.604 5 | 0.799 9 | 0.473 6 | 0.409 0 |
| 5 | 0.993 3 | 0.936 9 | 0.775 6 | 0.609 5 | 0.784 8 | 0.477 9 | 0.405 7 |
| 6 | 0.838 8 | 0.787 4 | 0.644 5 | 0.520 9 | 0.674 1 | 0.428 9 | 0.343 5 |
| 7 | 0.559 4 | 0.529 6 | 0.435 1 | 0.351 2 | 0.454 6 | 0.286 5 | 0.240 0 |
| 8 | 0.238 6 | 0.228 7 | 0.172 4 | 0.138 9 | 0.129 6 | 0.098 4 | 0.075 6 |

箔对应位置处金箔的 (n, γ) 计数响应。相对中子通量密度测量值与计算值的比较示于图5、6。结果表明,在环形与实心核燃料混合装载的环形燃料零功率反应堆中,环形燃料元件通量密度分布形状与实心燃料近似。距离堆芯中央通量密度分布最高处的元件A与B理论与测量值符合最好。现有蒙特卡罗分析手段可较好

地分析堆内环形及实心燃料元件外表面通量密度分布情况,理论值与测量值的最大相对偏差在12%以内,推测可能的原因是对于通量密度分布边缘的小概率抽样事件问题,计算的统计方差相对较大。通量密度分布测量结果符合实验设计预期。

表2 径向相对中子通量密度测量值分布
Table 2 Distribution of measured value of radial relative neutron flux density

| 测点 | 相对中子通量密度 | 测点 | 相对中子通量密度 |
|----|----------|----|----------|
| A | 1.000 0 | E | 0.792 3 |
| B | 0.932 6 | F | 0.475 8 |
| C | 0.767 0 | G | 0.407 4 |
| D | 0.607 0 | | |

注:取轴向中平面处

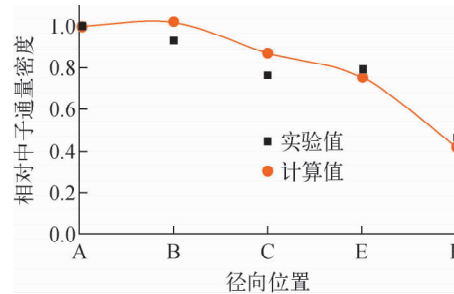
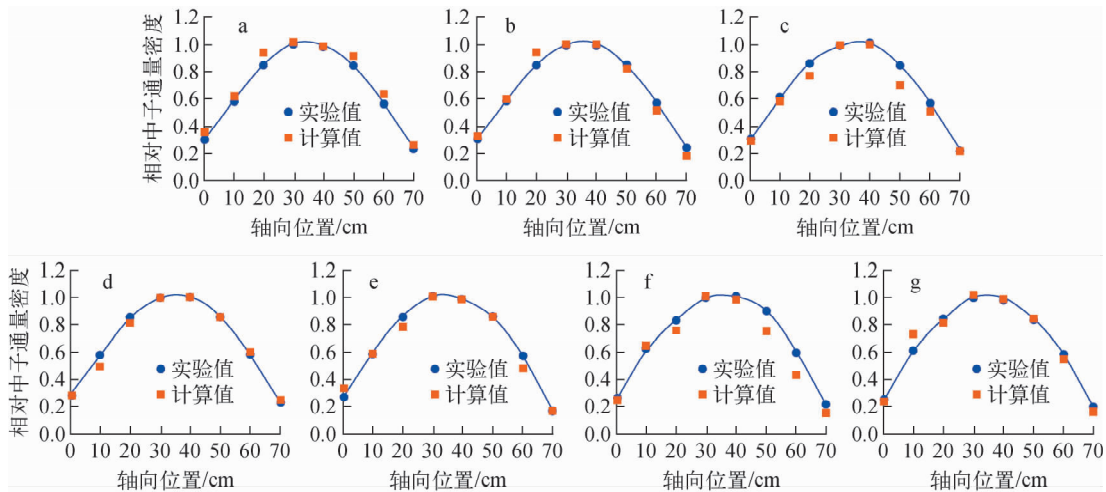


图5 径向相对通量密度计算值与测量值比较

Fig. 5 Comparison of calculated and experimental values of radial relative neutron flux density



a——位置[10,10],环形燃料;b——位置[8,10],环形燃料;c——位置[6,10],环形燃料;d——位置[6,6],环形燃料;e——位置[4,10],实心燃料;f——位置[2,10],实心燃料;g——位置[4,6],实心燃料

图6 不同位置堆芯轴向相对通量密度计算值与测量值对比

Fig. 6 Comparison of calculated and experimental values of axial relative neutron flux density at different positions

5 总结

中子通量密度分布测量对了解环形燃料堆芯反应堆物理特性、开展安全分析及设计方法验证具有指导意义。本文测量了环形燃料零功率反应堆堆芯相对中子通量密度分布,并与蒙特卡罗理论计算值进行分析比较,测量值与计算值的最大相对偏差在12%以内。中子通量

密度实验测量值可用于环形燃料反应堆的核设计与理论程序验证。本文结果可为环形燃料的工程应用顺利开展提供实验数据支撑。

参考文献:

[1] 季松涛,何晓军,张爱民,等. 压水堆核电站采用环形燃料元件可行性研究[J]. 原子能科学技术,

《原子能科学技术》征稿简则

- 1) 文稿务求论点明确,文字简练,数据可靠。
- 2) 文题简明(20个汉字以内);中英文摘要须包括题目、作者姓名、作者单位、城市名、省名和邮政编码,并应写成叙述性文摘(含有研究目的、方法、结果和结论),英文摘要不少于400个实词且不必与中文摘要全部对应;关键词3~8个。
- 3) 文稿应采用阿拉伯数字进行分级编号。引言不编号,也不写“引言”字样。
- 4) 基金项目名称及项目编号、通信作者需在首页以页下注形式写明。
- 5) 文稿中外文字母、符号须分清大、小写;上下角的字母、数码和符号等位置的高低应区别明显。
- 6) 文稿中的数据不能同时以图和表表述,只能选择其一;采用法定计量单位,物理量用法定量符号表示;在图和表中用量与单位的比值表示数值,即量与单位之间用除号“/”相隔,如 E/keV 。
- 7) 参考文献(超过15个)须按《文后参考文献著录规则》著录。著录项目和格式见本刊网站。
- 8) 欢迎从本刊网站投稿,网址 <http://www.aest.org.cn>。
- 9) 来稿时必须同时提供作者单位(学术委员会或业务部门)对文稿内容的学术性、真实性,作者署名是否准确以及内容有无保密问题的审查证明。审查证明格式见本刊网站。
- 10) 收稿后本刊立即向作者发送收稿通知单;若待审处理时间超过4个月不予回复,作者可改投他刊;退修稿逾期半年不修回者,本刊即作自动退稿处理;录用稿一经排版,作者要求撤稿需部分补偿编辑部经济损失。
- 11) 来稿一经刊登,本刊将按规定酌致稿酬,并赠每位作者当期《原子能科学技术》1册。本刊已纳入《中国学术期刊(光盘版)》、《方正 Apabi 电子期刊》、《中文科技期刊数据库》、《CEPS 中文电子期刊服务》、《书生数字期刊》和入网“万方数据——数字化期刊群”,本刊所付稿酬包含上述6项报酬。
- 12) 请勿一稿多投。

原子能科学技术

(月刊 1959年创刊)

2022年1月 第56卷第1期

ATOMIC ENERGY SCIENCE AND TECHNOLOGY

(Monthly Started in 1959)

Vol. 56 No. 1 Jan. 2022

主管:中国核工业集团有限公司

主办:中国原子能科学研究院

出版:《原子能科学技术》编辑部

(北京市275-65信箱,邮编102413)

电话:(010) 69358024, 69357285

E-mail: yznkxjs7285@ciae.ac.cn

<http://www.aest.org.cn>

主编:薛小刚

印刷:中鑫顺诚(北京)印刷科技有限公司

国内发行:全国各地邮局

邮发刊号:82-161

国外发行:中国国际图书贸易总公司

(北京市399信箱,邮政编码100044)

发行代号:BM 4130

Responsible Institution: China National Nuclear Corporation

Sponsored by China Institute of Atomic Energy

Published by Editorial Board of Atomic Energy Science and Technology

(P. O. Box 275-65, Beijing 102413, China)

Tel: 8610-69358024, 69357285

E-mail: yznkxjs7285@ciae.ac.cn

<http://www.aest.org.cn>

Editor in Chief: XUE Xiaogang

Printed by Beijing Zhongxin Shuncheng Printing Science and Technology Co., Ltd.

Distributed Inland by Local Post Offices

Postal Issue No. 82-161

Distributed Abroad by China International Book Trading Corporation

(P. O. Box 399, Beijing 100044, China)

Issue No. BM 4130

中国标准连续出版物号:ISSN 1000-6931
CN 11-2044/TL

2022年1月20日出版

定价:50.00元