



基于 β - γ 符合法测量的在线啜吸检测装置的研制

曾 勇, 谷明非

Development of Online Sipping Detection Device Based on β - γ Coincidence Method

Zeng Yong and Gu Mingfei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2023.03.0180>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

智能化核电厂燃料包壳破损在线监测装置研制

Development of Intelligent On-Line Monitoring Device for Fuel Cladding Defect in Nuclear Power Plants

核动力工程. 2020, 41(6): 162-166

定位格架外观自动检测装置研制

Development of Automatic Inspection Device for Appearance of Spacer Grid

核动力工程. 2021, 42(S2): 33-36

研究堆破损乏燃料元件快速排查技术研究

A Rapid Method for Detecting Damaged Fuel in Research Reactors

核动力工程. 2018, 39(3): 45-47

一种基于电荷信号的远程在线自检单元的设计与应用

Design and Application of a Remote Online Self-Checking Unit Based on Charge Signal

核动力工程. 2020, 41(2): 207-213

核动力装置在线操纵危害性分析方法研究

Study of Online Operation Hazard Analysis Method of Nuclear Power Plant

核动力工程. 2021, 42(S2): 136-139

基于局部离群因子和神经网络模型的设备状态在线监测方法研究

Study on Online Monitoring of Equipment Condition Based on Local Outlier Factor and Artificial Neural Networks Model

核动力工程. 2021, 42(3): 160-166



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2023)03-0180-05; DOI:10.13832/j.jnpe.2023.03.0180

基于 β - γ 符合法测量的在线啜吸检测装置的研制

曾 勇^{1,2}, 谷明非³

1. 中国核动力研究设计院, 成都, 610213; 2. 成都中核海川核技术有限公司, 成都, 610041;
3. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610213

摘要: 反应堆运行期间燃料包壳时常会发生破损, 当燃料组件发生破损后, 核电厂通常会在换料过程中使用在线啜吸装置对每个燃料组件进行啜吸试验, 通过裂变产物分析确定被测组件是否发生破损, 然而受核岛内过强的辐射环境干扰影响, 传统单一 β 或单 γ 粒子检测设备的检测结果时有误判或漏判发生。本文设计了一种基于 β - γ 符合法测量技术的在线啜吸检测装置, 装置含有 β 和 γ 粒子探测器, 并构建了 β - γ 符合检测通道, 融合了现有 β 、 γ 破损判断技术, 同时增加了基于 β - γ 符合判断的结果。相关应用结果表明: 在核岛内较强辐射干扰下, 本系统符合测量本底计数率可达到 0.04 s^{-1} , 装置对 ^{133}Xe 最小可探测活度 (MDA) 达 23.7 Bq , 检测灵敏度优于单一 β 粒子或 γ 粒子检测模式; 3 种判断模式的应用大幅提升了破损判断结果的可靠性。该装置可以替代现有单一粒子检测模式的在线啜吸检测装置应用于核电厂开展相关检测工作。

关键词: 组件破损; 符合法; 在线啜吸检测; 最小可探测活度 (MDA)

中图分类号: TL81 **文献标志码:** A

Development of Online Sipping Detection Device Based on β - γ Coincidence Method

Zeng Yong^{1,2}, Gu Mingfei³

1. Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China; 2. Chengdu Zhonghe Haichuan Nuclear Technology Co., Ltd., Chengdu, 610041, China; 3. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: The fuel cladding tubes damage often occurs during the operation of the reactor. When a fuel assembly is damaged, the power plant usually performs a sipping test on each fuel assembly using an online sipping device during the re-fueling process, and determines whether the tested assembly is damaged. However, due to the influence of the strong radiation in the island, misjudgment and missed judgment may occur in the detection results by detecting single β or γ particle. In this paper, an online-sipping detection device based on β - γ coincidence measurement technology is designed, which contains β and γ particle detectors, and a β - γ coincidence detection channel. It combines existing β and γ damage judgment technologies and adds the results based on β - γ coincidence judgments. The results of the applications show that the device background counting rate can reach 0.04 s^{-1} and the Minimum Detectable Activity (MDA) of ^{133}Xe can reach 23.7 Bq under the environmental radiation in the nuclear island. The detection sensitivity is better than that of a single β or γ particle detection mode. The application of the three judgment modes significantly enhances the reliability of damage determination results. This device can replace the existing online sipping detection device of single particle detection mode and be applied to the nuclear power site to carry out relevant detection work.

收稿日期: 2022-06-24; 修回日期: 2022-08-17

作者简介: 曾 勇 (1975—), 男, 硕士研究生, 现主要从事核技术应用方面的研究, E-mail: 437523894@qq.com

Key words: Damaged fuel assembly, Coincidence method, Online sipping detection, Minimum detectable activity (MDA)

0 引言

反应堆中的核燃料元件包壳可能因各种原因导致破损。为了快速检测出破损组件，核电厂通常在停堆换料过程中，通过在线啜吸被测组件释放的特征核素（主要是 ^{133}Xe ），检测其发射的 γ 或者 β 射线的放射性水平，进而分析判断燃料组件是否发生破损。

目前，在线啜吸检测装置测量技术主要有筒内啜吸和镜式啜吸2种技术类型^[1]。筒内啜吸以检测裂变气体 ^{133}Xe 衰变产生的81 keV γ 射线为主，镜式啜吸以检测 ^{133}Xe 和 ^{85}Kr 发射的 β 射线为主，然后根据测得的放射性活度大小与本底比值（即啜吸因子 f ）大小给出组件破损的判断结果^[2]。在实际工作中，由于在线啜吸装置安装在换料机上，测量过程中的本底剂量远远高于自然环境本底，而传统单一粒子的射线测量方法高度依赖探测器本身的本底控制能力和设备对外界辐射防护的能力，使得设备探测下限大打折扣，常出现漏判、误判等现象。为进一步提升在线啜吸检测装置的探测下限，减少漏判、误判现象，开展新型在线啜吸检测装置的研制显得愈加重要。

本文介绍了一种基于 β - γ 符合法测量技术的在线啜吸检测装置。该装置设置了 β 探测器和 γ 探测器，可以同时探测 ^{133}Xe 发射的 β 和 γ 射线；另外，利用被测核素 ^{133}Xe 衰变时 β 和 γ 射线的级联衰变关系，装置还设置了 β - γ 符合测量通道。

1 检测原理与方法

符合法测量是指利用事件之间内在因果关系通过电路甄选符合事件的方法，例如，一个原子核级联衰变时接连放射出 β 射线和 γ 射线，则 β 和 γ 便是一对符合事件。 β - γ 符合法测量核素活度是级联衰变放射性活度测量的主要方法，被认为是放射性活度测量最准确的方法之一^[3]。

在线啜吸检查主要利用燃料元件在换料过程中随着组件上升，燃料元件包壳内外的压差发生变化，通过探测破损包壳逃逸的裂变产物进行放射性分析以确定被检组件是否破损。裂变产物主要包括惰性气体、卤素、碲、碱金属（Rb, Cs）、

碱土金属（Sr、Ba）、惰性金属（Ru、Rh、Pd、Mo、Tc）和稀土及锕系元素，其中惰性气体、卤素和碱金属最易向外迁移。相比于卤素和碱金属，惰性气体不溶于水，易收集，可以利用相关同位素衰变特性进行测量，其中 ^{133}Xe 半衰期适中、产额大，常被当作最佳测量对象。

以筒内啜吸检测装置为例，装置通过设置一条通往啜吸套筒底部的注气回路，将压缩气体从啜吸套筒底部注入到上升中的燃料组件，利用注入气体将可能的泄露气体快速带到套筒顶部，同时设置一条置于套筒顶部的吸气回路，将注入气体啜吸到测量回路完成放射性检测。 ^{133}Xe 核素在发射出最大能量为346 keV的 β 射线时会瞬发81 keV的 γ 射线，通过检测 ^{133}Xe 衰变的 β 或 γ 射线来实现 ^{133}Xe 的活度测量。根据放射性测量结果按以下原则给出组件是否破损的判断结果：

$$f = \frac{{}^{133}\text{Xe}\text{计数率}}{\text{本底计数率} (10\text{组无破损燃料平均测量值})} \quad (1)$$

式中， $f \leq 1.3$ 时无破损； $1.3 < f \leq 3$ 时为可疑破损； $f > 3$ 时破损。从式（1）中还可以看出， f 是一个相对测量值，降低本底计数率或提升 ^{133}Xe 计数率都可以改善 f 品质。在一般测量中，本底计数率和 ^{133}Xe 计数率均受探测效率的影响，提高或降低探测效率均会同步影响本底计数率和 ^{133}Xe 计数率。

衡量在线啜吸检测装置探测能力的一个重要指标是最小可探测活度（MDA）或最小可探测比活度（MDC），拥有更低的MDA或MDC可以降低设备漏判、误判的几率。在 β - γ 符合测量法中的MDA和MDC定义式分别为^[4]：

$$\text{MDA} = \frac{2.71 + 4.65 \sqrt{N_b}}{t \varepsilon_{\beta\gamma} p_{\beta} p_{\gamma}} \cdot \frac{\lambda t}{1 - e^{-\lambda t}} \quad (2)$$

$$\text{MDC} = \text{MDA}/V \quad (3)$$

式中， N_b 为本底计数； t 为测量时间； $\varepsilon_{\beta\gamma}$ 为符合探测效率； p_{β} 为 β 射线发射几率； p_{γ} 为 γ 射线发射几率； λ 为衰变常数； V 为取样体积。

在放射性测量中，任何待测放射性核素之外的原因引起的计数，都可以看作本底。环境中的本底多来自宇宙射线、环境辐射以及电子学噪声

贡献,一般不具有关联性。相较于单一 β 或 γ 粒子测量方法, β - γ 符合测量法只有当 β 检测通道和 γ 检测通道输出信号在时间、幅度等信息上有关联时,才会有信号输出。因此, β - γ 符合道测量本底计数会比 β 测量道和 γ 测量道各自本底计数小,符合法常被作为降低测量本底重要措施的使用^[5]。通过式(2)可知,本底计数率的降低将有利于装置MDA的改善。

2 装置设计

2.1 结构设计

在线啜吸检测装置为一体式柜式结构,如图1所示。上层安装了计算机数据采集与分析系统(包括计算机、核电子学系统、信号I/O系统)、柜体中部放置了核数据采集系统进行信号处理、下层安装了气体采样测量的气体系统和放射性测量系统(包括气体回路系统、屏蔽铅室、气体采样室、 γ 探测器、 β 探测器等)。柜体上面正中位置设置了一个吊孔,用于设备吊装。气体回路系统将从燃料组件上啜吸来的气体源源不断的送入放射性测量系统,放射性测量系统由 β

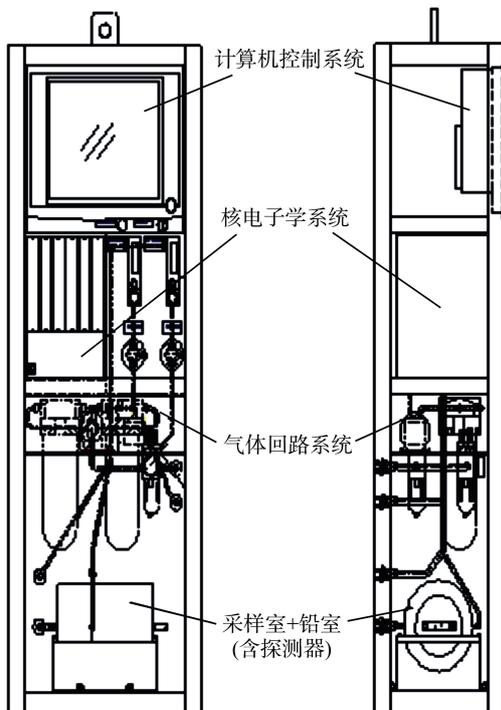


图1 装置结构图

Fig. 1 Structure Diagram of Device

和 γ 探测器组成, β 和 γ 探测器将采集到的 β 和 γ 信号输送到核数据采集系统进行信号处理,最终通过计算机系统在线分析并给出判断结果。

2.2 气体回路系统设计

气体回路系统原理图如图2所示,主要包括注气回路和啜吸回路2个回路。注气回路由流量计、调压阀、针阀、快速接头等构成;啜吸回路由气水分离器、换向阀、干燥器、真空泵、流量计、采样室(安装在铅室内)、快速接头等构成,这样的结构形式可完全适应原有换料机上在线啜吸检测装置的接口。

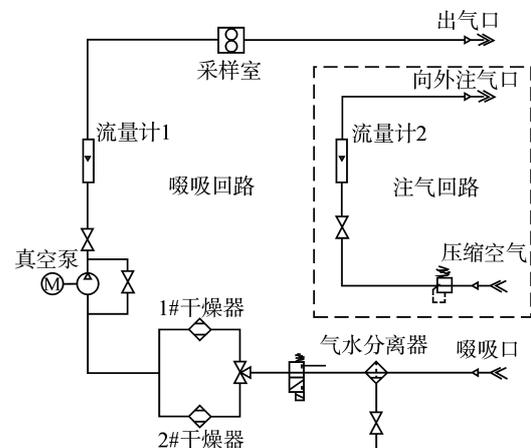


图2 在线啜吸装置气体回路系统原理图

Fig. 2 Schematic Diagram of the Air Circuit of Online Sipping Device

2.3 放射性测量系统设计

放射性测量系统包括 β 粒子探测回路和 γ 粒子探测回路以及 β - γ 符合分析回路,由 β 探测器和 γ 探测器组成的探测器组件安装在啜吸回路气体采样室两侧,测量原理图如图3所示。

β 探测器采用大面积离子注入型钝化硅(PIPS)探测器以获得更优的探测效率和环境适应能力;硅光电倍增管(SiPM)碘化钠(NaI) γ 探测器可以在兼顾探测效率的情况下大幅减少探测器的外形尺寸;数字化多道分析系统的使用可使81 keV全能峰的测量数据更加准确。

2.4 软件设计

图4展示了 β - γ 符合法测量的在线啜吸检测装置主界面。其软件功能主要是用于实现对在线啜吸装置的 β 探测器、 γ 探测器以及 β - γ 符合分析回路输出的放射性信号、注气/吸气气体流量

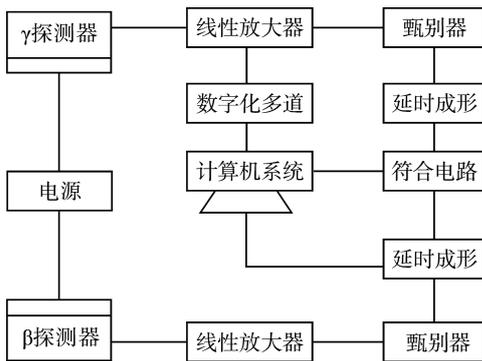


图3 在线啜吸装置测量原理图

Fig. 3 Schematic Diagram of Measurement of Online Sipping Device

采集、系统 DI/O 采集，同时对卸料过程中的实时核数据计数率水平进行连续记录和分析，并在测量时间到达后给出定性判断结果。当燃料组件检测结果为正常时，点亮装置的指示灯，提醒操作人员可以继续后续的卸料操作；当燃料组件检测结果为异常时，发出声响报警，提醒操作人员进行人工干预。

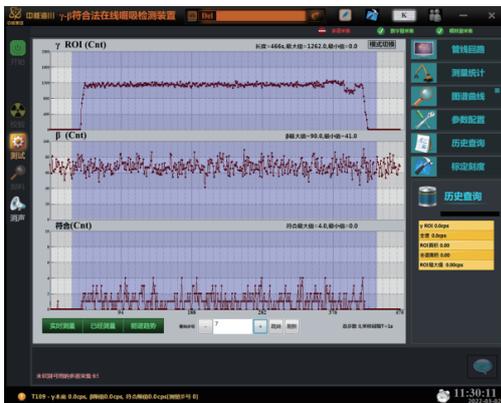


图4 装置主界面

Fig. 4 Main Interface of Device

3 样机试验

在线啜吸装置主要性能指标包括气体回路注气与啜吸能力测试、辐射测量系统状态调试、系统探测下限测试及通用信号测试 4 部分。

3.1 气体回路试验

对于注气回路，注气压力在 0.7 MPa 下，要求注气流量为 250 L/h 左右。通过调整调压阀使注气能力满足设计要求并达到预定值。对于抽气回路，要求抽气流量为 450 L/h。启动真空泵，调节针阀使抽气流量达到预定值。

3.2 探测器性能调试

在实验室环境下，性能调试以 4.0×10^5 Bq 的 ^{133}Ba γ 源和 7.0×10^3 Bq 的 ^{60}Co β 源作为试验条件。

3.2.1 γ 测量道 SiPM-NaI γ 探测器使用 5 V 低压直流电源，接通电源、连接线性放大器和数字多道系统进行能谱测量，使 81 keV 的 γ 射线中心道位于 100 道左右进行能量刻度，按照 ± 1.25 倍全能峰的半高宽 (FWHM) 原则确定 81 keV 感兴趣区 (ROI) 宽度。

3.2.2 β 测量道 PIPS 半导体探测器工作电压一般为 100 V 的直流电压，过高的工作电压使得漏电流变大，本底计数呈指数增长；电压过低则不能正常工作，调节线性放大器的放大倍数和甄别器的上下阈值，使 β 回路计数率在 50 s^{-1} 。

3.2.3 β - γ 符合道 将 β 触发信号送入符合电路的 A 道，将 1.17 MeV 的 γ 粒子触发输出信号送入符合电路的 B 道以测试符合道的功能，调整延时电路参数，使符合计数输出最大。

3.3 探测下限测试

在实验室环境下，以 300 s 为测试周期，每秒 1 次的采样频率进行本底测量，不同测量方法下测得的 N_b 结果及对应 MDA 计算结果如表 1 所示。

表 1 不同探测方法下 N_b 测量结果及 MDA 计算结果对比
Tab. 1 Comparison of N_b and MDA Results under Different Detection Methods

测试条件	β 测量道	γ 测量道	β - γ 符合道
测量时间/s	300		
自然 N_b	151	24	2
MDA/Bq	30.3	7.2	14.6

从表 1 中可以看出， β - γ 符合道在 3 种测量方法中拥有最低的自然 N_b ；在自然环境下， β - γ 符合道 MDA 在 3 种测量方法中处于适中地位。

3.4 通用信号测试

通过信号模拟器模拟换料过程中的到位信号，并将该信号输送到给装置信号输入端，测试装置自动分析及记录功能、超限报警输出功能、灯光指示等功能，使装置相关功能满足现场系统的要求。

3.5 与现有装置的比较

表 2 列举了大亚湾核电站筒内啜吸装置^[6]在线啜吸系统、三门核电厂 AP1000 镜式啜

吸^[7]装置 PIPS 在线啜吸系统以及本系统在自然本底条件下 MDA 的计算结果。可以看出,在自然本底条件下,本装置在取样体积小于筒内啜吸装置三分之二的条件下,可以获得与之相当的 MDC,减少了对样品取样量的需求,也节省了装置安装空间需求;相比镜式啜吸 MDC 则有一个数量级的提升。

表 2 不同装置 MDA 结果对比

Tab. 2 Comparison of MDA Results of Different Devices

测试装置	筒内啜吸装置	镜式啜吸装置	本文符合测量装置		
			β测量道	γ测量道	β-γ符合道
自然 n_b/s^{-1}	0.8	50	50.3	0.8	0.007
采样体积/L	2	0.06	0.63		
MDA/Bq	20.0	35.1	30.3	7.2	14.6
MDC/(Bq·L ⁻¹)	10	585	48	11.4	23.2

在实际使用中,由于核岛内辐射的影响,γ测量道本底计数受到影响最大,β测量道次之,β-γ符合道的计数变化再次之,表 3 为本装置在某核电机组测量的现场本底计数率(n_b')数据及对应 MDA 等计算结果。

从表 3 中 MDA 的计算结果可以看出,在核岛内复杂的环境辐射干扰影响下,β-γ符合道比单一的β测量道或γ测量道的 MDA 更佳。

4 结论

相对于目前采用单一射线检测手段的在线啜吸检测装置,本装置通过设置β探测器和γ探测器,同时对特征核素¹³³Xe衰变释放的β和γ射线进行全过程测量,改善了对特征核素¹³³Xe破损释放信息记录的完整性,增强了测量结果数据的可信度。β-γ符合法分析测量技术的应用,降低

表 3 本装置在某现场本底计数率 n_b' 测量结果及 MDA 计算值Tab. 3 Comparison of Background Counting Rate n_b' and MDA Results of the Device in Field

测量指标	测量方式		
	β测量道	γ测量道	β-γ符合道
某现场 n_b'/s^{-1}	121.5	22.5	0.04
MDA/Bq	43.0	33.5	23.7
MDC/(Bq·L ⁻¹)	68.3	53.2	37.6

了核岛内辐射环境对装置本底计数的干扰,使装置可以获得优于单一测量法更高的探测灵敏度。这 3 种测量方式也提供了相对独立的多样破损判断手段,进一步改善了燃料元件破损判断的准确性,减少漏判、误判几率。装置虽然完成了符合原理的基本性能验证,但在提高符合效率方面还需进一步研究。

参考文献:

- [1] 李颖,尹绪雨.啜吸探测技术在燃料检查中的应用[J].核电子学与探测技术,2012,32(5):523-527.
- [2] 邓凌献,赵希卷,叶晓丽,等.在线啜吸检测装置的研制[J].核动力工程,1999,20(1):63-66.
- [3] 李谋,代义华,倪建忠.符合法原理及其在活度测量中的应用[J].原子能科学技术,2008,42(3):223-226.
- [4] 贾怀茂,王世联,王军,等.β-γ符合法测量放射性氙同位素记忆效应研究[J].原子能科学技术,2010,44(2):201-205.
- [5] 吴治华,齐卉荃,沈能学,等.原子核物理实验方法[M].第三版.北京:中国原子能出版社,1997:345-351.
- [6] 大亚湾核电站.大亚湾核电站装卸料机在线啜吸装置运行维修手册[Z].1994.
- [7] 三门核电站.API1000燃料破损在线啜吸系统操作程序[Z].2021.

(责任编辑:梁超)