

乏燃料组件非破坏性测量的叉形探测器

董明理 佟伯庭 张崇海 金惠民 孟伯年 吕 钊

(中国原子能科学研究院放射化学研究所, 北京, 102413)

采用总 γ 和无源中子测量方法建立了叉形探测器。叉形探测器可用于后处理和贮存工厂中 PWR 和 BWR 型的乏燃料组件的燃耗、冷却时间、总铀和总裂变物质含量的测定。

关键词 乏燃料组件 叉形探测器 裂变室

中图分类号 TL 816

1 测量原理

乏燃料组件能够放出 γ 射线和中子。 γ 射线主要来自裂变产物, 冷却几个月后, 具有 γ 射线的主要裂变产物有 ^{95}Zr 、 ^{95}Nb 、 ^{106}Ru 、 ^{106}Rh 、 ^{137}Cs 、 ^{134}Cs 、 ^{144}Ce 、 ^{144}Pr 和 ^{154}Eu 。 ^{137}Cs 和 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 都正比于燃耗, 可用于测量燃耗, 还可以用于测量冷却时间。总 γ 的响应与燃耗的比与冷却时间存在着幂指数关系, 可用于测量冷却时间。中子放射性主要来自偶原子量的铀的同位素、 ^{242}Cm 和 ^{244}Cm 。中子计数率与燃耗存在着幂指数关系, 可用于测量燃耗, 随着燃耗的增加, 铀的中子贡献迅速增大, 当燃耗(以金属铀计)大于 25 GW d/t, 冷却时间大于 3 a 时, ^{244}Cm 的中子贡献大于 90%。 ^{244}Cm 的中子计数率与燃耗、总铀含量和总裂变物质含量存在着幂指数关系, 可用于测量燃耗、总铀含量和总裂变物质含量^[1-4]。

2 叉形探测器

叉形探测器包括: 探测体、中子探测器、总 γ 探测器和电子学系统。

2.1 探测体

探测体是 1 个 U 型的不锈钢密封防水体(图 1), 它有 2 个圆柱形的臂, 每个臂中含有 1 个裂变室和 1 个电离室。裂变室包以高密度的聚乙烯, 其厚度足以使组件发射的中子慢化到热中子通量的极大值, 大大提高了裂变室的中子灵敏度, 既缩短了测量时间, 又增加了统计计数精度。电离室带有铅准直器, 当测量燃耗的轴向分布时, 改善了轴向空间分辨率。2 个圆柱形的臂接到 1 个背部盒子上, 盒子中装有 2 个裂变室的前置放大器。前置放大器周围有由铅、聚乙烯和镉片组成的屏蔽层以防止强 γ 射线和中子的辐照损伤, 使前置放大器能在很强的辐照场中

董明理: 男, 56 岁, 核保障研究专业, 副研究员

收稿日期: 1997-07-23 收到修改稿日期: 1997-08-25



图 1 叉形探测器

Fig 1 Fork Detector

长期正常的工作。

2.2 中子探测器

叉形探测器的中子探测器采用²³⁵U 裂变室, 直径 25.4 mm, 灵敏长度 130 mm, 中子灵敏物质 93 % 浓缩度的²³⁵U, 其总量 150 mg, 中子灵敏度 0.24 nV^{-1} 。每个臂中有 1 个裂变室, 每个裂变室连接到 1 个 AM PTEK 前置放大器上, 它们的信号引出线连到格软得 (GRAND3) 电子学系统。

2 个裂变室具有匹配的中子灵敏度, 对两裂变室中间同一中子源, 灵敏度的差别小于 2 %, 这就减小了因组件在两探测器间的横向位置的差别所引起的测量误差。

图 2 中, 上面曲线为用²⁵²Cf 中子源测量的中子脉冲高度分布谱, 下面曲线为无中子源时测量的 α 的本底谱。通常甄别器的阈放置在 α 计数率为零的位置, 裂变室测量的是能量高于甄别阈的中子的积分计数。

中子计数率与高压的函数关系, 在高压 100—800 V 显示出—段坪曲线。在坪曲线内, 裂变室的效率对高压的变化是相当不灵敏的。裂变室的高压一般选在 200 V, 由 GRAND3 提供。

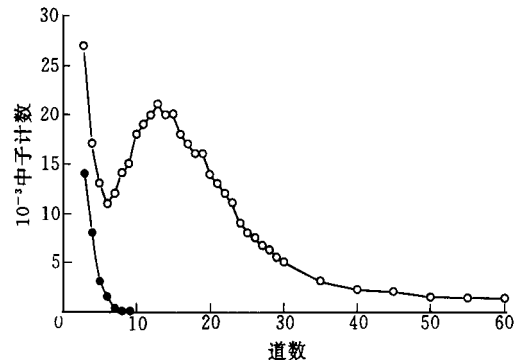


图 2 裂变室的中子脉冲谱

Fig 2 Neutron pulse spectrum of fission chamber
—中子; — α 射线

2.3 γ 探测器

γ 探测器是电流电离室,它测量总 γ 射线所引起的离子电流,主要响应 ^{137}Cs 和 ^{134}Cs 及其他贡献较小的裂变产物的 γ 射线。冷却几年以后,主要的贡献是 ^{137}Cs 。

电离室直径 16 mm,灵敏长度 85.9 mm, γ 灵敏度 $6.2 \times 10^{-8} \text{ A} \cdot \text{kg} \cdot \text{h}/\text{C}$,线性范围 $2.58 \times 10^{-3} \sim 2.58 \text{ C}/\text{kg} \cdot \text{h}$ 。电离室放入 10 mm 厚的铅准直器内,准直器开孔 10 mm,用于测量乏燃料组件产生的 γ 射线的轴向分布。基于与裂变室相同的考虑,两电离室具有相匹配的 γ 响应,在 $2.58 \times 10^{-3} \sim 2.58 \text{ C}/\text{kg} \cdot \text{h}$ γ 剂量范围内,两电离室的 γ 响应平均差别 2%。

电离室的负高压由 GRAND3 提供,两个电离室的信号通过电缆分别引入 GRAND3,由 GRAND3 测量电离室的输出电流。

2.4 电子学系统

(1) 一般描述

叉形探测器用 GRAND3 电子学系统(图 1)。GRAND3 提供 2 个裂变室的高压 0—1300 V 和两电离室的高压 0—1300 V,它可以为前置放大器提供+12 V 的电源和自己用的电源。

GRAND3 可以交流供电,内部的 AC/DC 转换器将交流变成直流。为了避免来自动力电源的噪声干扰,它备有充电器和充电电池,电池充满电后,可供工作 1 d。

GRAND3 将 1 套自动测量和数据处理的程序固化在只读存储器(EPROM)中。

GRAND3 带有键盘、液晶显示和打印机。通过键盘控制测量、显示和打印。GRAND3 带有微机接口,可通过微机控制 GRAND3。微机还可用于一些数据修正因子的计算和数据的光滑拟合。

(2) 中子测量道

GRAND3 具有 2 个中子测量道,每个道包括放大器、甄别器、计数器和定时器。需要特别描述的是甄别器的阈的设置,甄别器可分别工作在下阈和上、下阈构成的窗方式。只有幅度高于下阈或在窗宽内的脉冲才能通过甄别器,因此适当的阈值设置可以甄别掉噪声和 α 的脉冲,最佳的下阈设置应略高于噪声水平和 α 的脉冲,保证记录的都是中子脉冲。下阈过高会降低中子探测器的效率。

(3) γ 测量道

GRAND3 具有 2 个 γ 测量道,测量 γ 射线在电离室中产生的电流。每道都有电流放大器,12 个增益选择使电流的测量范围从 10^{-14} A 到 10^{-4} A 。GRAND3 可以自动地选择最合适的电流测量范围。在自动工作状态下,GRAND3 可以连续不断地自动调整放大器的放大倍数,使电离室产生的电流最佳匹配于电流的测量。

(4) 误差计算

GRAND3 能计算中子计数率和它的统计误差。

GRAND3 测量的 γ 计数正比于电离室的电流,也就是正比于 γ 射线的通量,它是测量时间为 0.5 ms,连续测量 16 次的平均值。给出的误差是 16 次测量的标准误差,或者模拟数字变换的最小有效读数的一半值。

(5) 前置放大器

在探测体中含有 2 个电荷灵敏前置放大器,GRAND3 提供的高压通过前置放大器滤波后加到裂变室上。裂变室的输出信号送入各自的前置放大器放大后送入 GRAND3。

3 数据获取与处理

3.1 乏燃料组件的测量和数据获取与处理

探测体、电离室和裂变室组成了叉形探测器的叉形探头,叉形探头固定在水下近8m深处的水池壁上,所有电缆通过密闭防水不锈钢管引出水面,然后接到测量室,电缆引出的信号在测量室内进行测量、在线处理、显示和记录。

储存水池中的组件由吊车吊起并移动到叉形探头导向筒中心的正上方。

自动化软件控制整个测量过程:自动化软件可预先设置与测量有关的各种参数,包括控制吊车、使组件通过导筒、控制开始和停止测量的组件位置、同时启动总 γ 和中子的测量及停止、1次测量的持续时间、2次测量间组件的变化距离。每次测量结束后,数据编号,在线处理,自动计盘和复位。然后,微机给出控制信号进行下一个位置测量。当测量完整个组件2个侧面后,吊车将组件吊出导筒,并将组件旋转90°,进行另外2个侧面的测量。测量结束后,吊车将组件放回原位置。

3.2 总 γ 测量的数据获取和处理

数据获取和处理软件将对组件测得的四个面,各对应轴向位置四个面的总 γ 电流相加,获得带本底电流的总 γ 电流的轴向分布,用数据拟合光滑软件拟合,找出活性区和平本底区,扣除本底后,对四个面求其平均值,获得的电流轴向分布作为燃料的轴向分布,并求出整个组件的电流平均值 S_0 。分别求出从活性区端点算起50cm活性区内上、下端8个面上各自的电流平均值,扣除本底,找出其最小值作为 $S_r(50\text{ cm})$ 。利用下面公式(1)计算出冷却时间 $T_c(d)$ 。

$$S_r/BU = c \cdot (T_c)^d \quad (1)$$

其中:BU为组件的平均燃料(以金属铀计)(GW d/t), c 和 d 是通过用1组精确知道特性参数和辐照历史的1组参考组件对测量系统进行刻度获得的拟合系数。

利用下面公式(2)计算端部燃料 BU_{ext} :

$$BU_{\text{ext}} = \frac{S_r(50\text{ cm})}{S_r} \cdot BU \quad (2)$$

3.3 无源中子测量的数据获取和处理^[4]

象总 γ 数据处理那样,用数据获取和处理软件获得的中子计数率的轴向分布计算出燃料的轴向分布,并求出整个组件的平均计数率 $N_m(s^{-1})$ 。为了求得燃料值、总铀含量、总铀减去 ^{239}Pu 的含量和总裂变物质的含量分别与 ^{244}Cm 中子计数率的关系, N_m 必须进行修正,即将其归一到辐照的终止时刻和扣除 ^{244}Cm 以外的超铀元素自发裂变和 (α, n) 反应产生的中子贡献:

$$N = F_1 \cdot F_2 \cdot N_m \quad (3)$$

其中: $F_1 = e^{\lambda \cdot T_c}$, $F_2 = N_t / N$, λ , T_c 分别为 ^{244}Cm 的放射性衰变常数和组件的冷却时间, N_t , N 分别为 ^{244}Cm 的中子计数率和总的中子计数率, F_2 修正因子由软件计算出,平均燃料(以金属铀计)BU(GW d/t)由下式算出:

$$N = \alpha \cdot (BU)^\beta \quad (4)$$

总铀的含量 m (kg),由下式算出:

$$N = e \cdot m^f \quad (5)$$

其中: α , β 和 e , f 是用1组精确知道特性参数和辐照历史的参考组件对测量系统分别进行刻度获得的拟合系数。

总钚减去²³⁹Pu 以及总裂变物质的含量可用类似于求总钚含量的方法求出。

4 叉形探测器系统的刻度^[1-2]

用核电厂 1 组典型的乏燃料组件进行系统刻度,其燃耗(以金属铀计)范围 10—50 GW d/t,带有精确的特性参数。要求有典型的运行功率和辐照历史,并且有详细跟踪记录,能给出准确的²³⁵U 的初始浓度、燃耗和冷却时间的申报值。

备有标准的²⁵²Cf 中子源和标准的¹³⁷Cs γ 源。

首先对 2 个标准源进行测量,对整个叉形探测器系统进行检验。求出在该实验的几何条件和其他实验条件下的中子计数率和 γ 计数率,作为将来同类组件测量的归一值。

对参考组件的中子和 γ 测量的过程,数据的获取和处理,各种修正等都与上述有关描述相同。将每种刻度测量的数据,根据对应的公式,用数据拟合光滑软件进行拟合,求出各种拟合系数。

5 叉形探测器要求的必备条件

5.1 机械要求

要有智能化变频调速吊车,可用微机控制三维空间移动。另设有垂直方向的标示,可以核对组件在叉形探测头中的位置,要求垂直定位精度达 ± 5 mm。

5.2 对参考组件和被测量组件的要求

对刻度用的参考组件、标准中子和 γ 源与上节要求相同。

对被测量的组件的要求:带有识别标识,给出初始²³⁵U 浓缩度,辐照历史,并给出燃耗和冷却时间的申报值。

6 误差分析

在满足上节要求的条件下,对初始²³⁵U 浓缩度为 1.8%—5.7%,燃耗(以金属铀计)10—50 GW d/t,冷却时间 1—15 a 的 PWR 和 BWR 型的组件测量的误差为燃耗 $< \pm 5\%$,总钚含量 $< \pm 17\%$,总可裂变物质 $< \pm 16\%$,冷却时间 $< \pm 10\%$ 。

7 小结

叉形探测器采用了总 γ 和无源中子测量方法,该方法的特点是非破坏性的、简单、迅速、稳定可靠和无干扰乏燃料组件的操作,能获得贮存于水池中乏燃料组件的燃耗、冷却时间、可裂变物质的含量等参数。其测量的不确定度能满足核保障和根据燃耗信用对乏燃料组件的更有效的运输、贮存和后处理的要求,而且理论的计算和世界广泛范围的测量,证明叉形探测器是对乏燃料组件测量的 1 种很好的系统。

参 考 文 献

1 Carchon R, Bragard R, Walrave C, et al Fork Detector Measurements on LRW Spent Fuel: ISSN 0392-3029 1994

2 Adachi T, Nakahara Y, Kohno N, et al Comparison of Calculated Values With Measured Values on the

Amount of TRU and FP N uclides Accumulated in Gadolinium Bearing PWR Spent Fuels J Nucl Sci Technol, 1994, 31(10): 1119

- 3 Philips JR, Bosler GE, Halbig JK, et al Nondestructive Measurement of Spent Fuel Assemblies at the Tokai Reprocessing and Storage Facility: LA-8076-MS. 1979
- 4 董明理, 金惠民 乏燃料组件非破坏性分析总体设计报告. 中国原子能科学研究院资料. 1995

A FORK DETECTOR FOR NONDESTRUCTIVE MEASUREMENTS OF SPENT FUEL ASSEMBLIES

Dong Mingli Tong Boting Zhang Chonghai
Jin Huimin Meng Bainian Lü Zhao

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-48, Beijing, 102413)

ABSTRACT

A fork detector has been constructed by making use of gross gamma and passive neutron methods. The detector can be used to determine the burnup, cooling time and the contents of whole plutonium and whole fission material in spent fuel assemblies of the PWR and BWR types at a reprocessing and storage facility.

Key words Spent fuel assembly Fork detector Fission chamber

离子交换与溶剂萃取(第13卷)

Ion Exchange and Solvent Extraction

编著:Marinsky, Jacob A.。1997年Marcel Dekker 出版公司出版。

本卷指出了混合萃取剂从水介质中萃取二价金属盐的过程;讨论了采用酸基耦合萃取剂的酸的萃取;探讨了超分子化学对萃取有机化合物的潜在用途;考察了液-液两相萃取系统;演示了聚合树脂浸透法;介绍了溶剂浸透法树脂的物理化学特性,并论述了碱金属离子的选择性萃取。本卷共分混合溶液离子交换的盐萃取、酸基耦合萃取剂的酸萃取、用于溶剂萃取和有机化合物薄膜迁移的络合、金属离子分离的新技术、溶剂浸透树脂的固-液萃取进展和碱金属离子溶剂萃取原理。

摘自中国原子能科学研究院《科技信息》