

文章编号: 1007-4627(2012)04-0384-04

水下干式储存取样的乏燃料破损检测技术

苏容波, 夏文友, 吴中义, 涂俊

(中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621999)

摘要: 介绍了通用的乏燃料破损检测方法, 分析了已有的乏燃料破损检测技术存在的缺陷, 针对其缺陷以及根据自身的需求设计了新的乏燃料破损检测工艺与工作流程, 并介绍了检测样品的测量及样品与乏燃料包壳状态的判断依据。实际应用结果表明: 该技术可以在水下实现一次对一批乏燃料进行逐个取样, 每个样品对应一盒确定的乏燃料, 检测效率高; 该采样系统对乏燃料的操作在水下进行, 现场辐射防护容易满足。

关键词: 乏燃料; 破损检测; 辐射防护

中图分类号: TL751 **文献标志码:** A

1 引言

乏燃料元件在外运送贮前, 基本都在反应堆内运行了很多年, 因长期受冷却液腐蚀、操作过程中的机械作用或发热膨胀等因素影响, 乏燃料外包壳可能发生形变, 情况严重的可能存在破损点或裂缝, 存在着裂变材料和裂变产物泄露的可能性。若不做检查与处理, 直接外运送贮则会污染运输容器和贮存水池。我国乏燃料运输容器和乏燃料贮存水池使用规定, 不接收破损乏燃料的运输和贮存, 以免造成大范围污染扩散。因此在乏燃料外运送贮中, 对乏燃料破损检测是一个必要的步骤, 需对检验出有破损的乏燃料元件进行密封处理。

乏燃料破损检测方法是成熟的, 国际上通用的方法是对乏燃料进行气体采样, 再对采集的样品进行定性分析, 通过分析样品中是否含有 ^{85}Kr 来判断与之对应的乏燃料包壳情况。目前, 国内已有相关单位设计了相应的工艺成功地完成乏燃料破损检测(排除法)^[1], 其采用的技术手段如下: 将吊篮和运输容器置于池水内, 将4盒(或8盒)乏燃料在水下装入吊篮, 然后将吊篮装入运输容器, 再将运输容器提出堆池进行封盖、充气排水干燥及气密性检查; 放置一段时间(7d)后对运输容器进行气体采样, 然后对样品进行定性分析。若样品不含 ^{85}Kr , 说明4盒(或8盒)乏燃料包壳都未破损; 若样品含有 ^{85}Kr , 说明4盒(或8盒)乏燃料包壳有破损产生,

则需要将运输容器返入堆池内, 在水下取出一半后重复以上步骤, 逐个分析排除, 最终确定每个乏燃料包壳的情况。但是在某项具体任务中, 排除法的工艺存在缺陷, 主要原因如下: (1)该任务必须在较短的规定时间内完成; (2)排除法中用运输容器(约20 t)进行气体收集, 现场吊车(5 t能力)需更换或改造后才能进行乏燃料破损检测, 另外部分操作在水池外进行, 现场剂量高, 也需对现场进行相应的改造, 时间不允许; (3)运输容器需外单位提供, 需协调, 时间也不允许; (4)排除法一次取样若检测出有破损而无法确定具体哪个破损, 需反复操作才能确定, 若破损情况远超常规, 则相当耗时。若仍采用排除法进行乏燃料破损检测, 则存在不能按时完成的风险, 因此需要设计采用新的乏燃料破损检测技术。

2 水下干式储存破损检测技术的内容

新技术的设计主要包括如下内容: 采样装置设计; 工作流程设计; 测量分析流程设计。

3 采样装置设计

3.1 采样装置设计遵循的基本原则与解决方法

针对排除法的缺陷, 在设计采样装置时, 主要遵循如下两点基本原则: (1)辐射安全, 确保现场工

作人员和周围环境的辐射安全；(2)测量结果对象明确，检测效率高。对应的解决方法涉及如下几个方面：(1)辐射安全，取样过程中针对乏燃料的操作设计在水下进行；(2)判断准确，根据乏燃料的尺寸设计相应的气体收集器，每个收集器在应用时只装入一盒乏燃料，每个样品对应一明确的乏燃料；(3)效率高，将多个气体收集器并联组成一个收集系统，根据堆水池的尺寸设计多套收集系统同时使

用，提高工作效率。

3.2 取样系统工艺设计

参考排除法的工艺，将系统设计为 3 部分：水下气体收集装置、充气装置和样品捕集装置。通过快装接头将气体收集装置与充气装置或样品捕集装置连接。通过阀门控制实现充气排水、干燥以及在水下对乏燃料进行逐个取样。样品采集工艺见图 1。

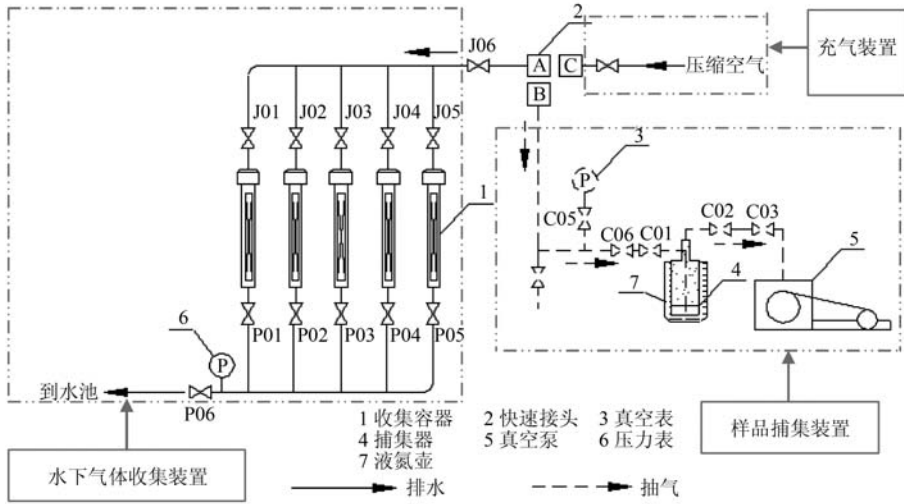


图 1 样品采集工艺

3.3 水下气体收集装置设计

水下气体收集装置的主要功能如下：(1)在堆池内建立一个与水隔离的空间，干式储存乏燃料；(2)收集从乏燃料内释放出来的气态物质。水下气

体收集装置由水下气体收集容器、进气与排水管线、管道、阀门和支撑架等组成，能同时或分别排水和抽气，材质全部为不锈钢。结构示意图见图 2。

3.4 样品捕集装置设计

⁸⁵Kr 捕集装置主要由真空泵、阀门、液氮瓶、捕集器(内充活性炭)和快装接口通过橡胶软管连接组成，结构示意图见图 3。

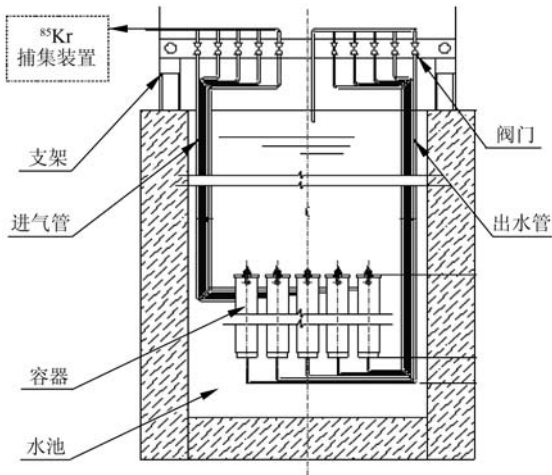


图 2 水下气体收集装置示意图

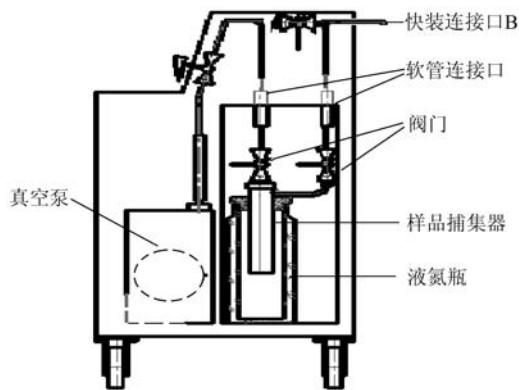


图 3 样品捕集装置结构图

4 取样流程设计

气态裂变产物采集主要过程如下：在水下将乏燃料封装于气体收集容器内，对容器进行充气排水、干燥和密封，然后静置 7 d 进行气体收集，再对密闭容器进行气体捕集，样品采集完成后将乏燃料返回贮存架。

5 检测判断

5.1 判断依据

对于判断样品是否含有某放射性核素的测量，一般是先看其 γ 能谱图是否有明显的属于该核素的特征峰，若无则再利用仪器的探测限来判断样品中是否含有该核素。探测限是由该核素感兴趣区内单位时间的平均本底计数值、测量时间和探测效率计算出的。因该工作只是作定性分析，因此可用单位时间内的计数值来判断有无。

如果要分辨某样品中放射性物质产生的计数与仪器本底计数的把握程度达到某个置信水平，那么待测样品所含的放射性物质计数的期望值就要比本底计数的期望值高出一定的量值，即是净计数的期望值要大于该量值，该量值就是放射性活度测量的最小可判断计数^[1]。

假定在设定的时间 t 内 ^{85}Kr 感兴趣区内本底计数为 N_b ，则在置信度为 95% 的情况下单次测量谱仪的最小可判断计数^[1-4]为

$$L_D = 4.66 \sqrt{N_b}。$$

在时间 t 内测得 ^{85}Kr 感兴趣区内总计数为 N_1 ，若净计数 $N = (N_1 - N_b)$ 小于谱仪的计数可判断限 L_D ，则说明样品中不含有 ^{85}Kr 或是样品中 ^{85}Kr 的含量低于谱仪最小可探测限，被取样的乏燃料组件的包壳未破损；若净计数 $N = (N_1 - N_b)$ 大于计数可探测限 L_D ，则说明可探测到样品中的 ^{85}Kr ，样品中含有 ^{85}Kr ，被取样的乏燃料组件包壳存在破损。

5.2 样品测量流程

乏燃料组件破损检测样品测量流程见图 4。其中， N 代表样品所含的放射性物质在 ^{85}Kr 感兴趣区测量时间 t (如 0.5 h) 内产生的净计数， L_D 代表在置信度为 95% 的情况下谱仪在 ^{85}Kr 感兴趣区测量时间 t (如 0.5 h) 内的最小可探测计数。

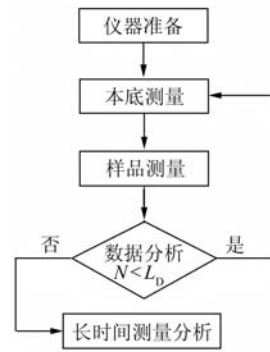


图 4 破损检测样品测量流程图

5.3 本底值确定

选择仪器和装有活性炭的空捕集器本底为测量本底值。在进行样品测量时，若样品含 ^{85}Kr ，则谱仪既能获取 ^{85}Kr 的 513.99 keV 特征能峰，又能获取 511 keV 的正电子湮灭峰，这两个能峰有部分叠加 (若仪器分辨率不高则更加明显)，因此本底值的获得采用双峰识别扣除，见图 5。

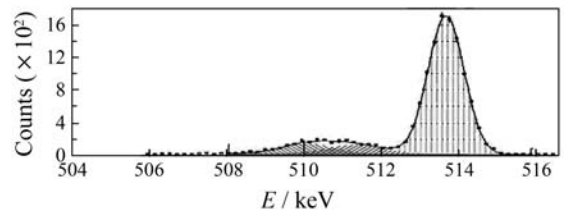


图 5 峰叠加示意图

用标准的 ^{85}Kr 源设置 ^{85}Kr 全能峰感兴趣区，直接读取数据 0.5 h 平均本底值为 17 Counts，对应 $L_D = 19$ ；利用双峰识别扣除技术后 0.5 h 平均本底值为 6 Counts，对应 $L_D = 11$ 。显然，利用双峰识别扣除技术可以获得较低的本底值，对应的最小可判断计数值小，判断的结果相对更准确。

6 结论

在我国西南某反应堆乏燃料外运送贮中，采用新设计的取样工艺对乏燃料进行破损检测，并记录了相关数据，且在乏燃料吊装装罐过程中 (采用排除法对乏燃料进行破损检测的取样步骤与乏燃料吊装装罐的步骤大致一样) 记录了相关数据。两组数据相比，新设计的取样工艺具有如下优点：

(1) 高效

可实现在水下对一批 (具体数据依据堆内空间

而定)乏燃料进行逐个取样,每个测量样品对应一个明确的乏燃料,一次取样和测量分析就可判断其包壳情况,提高了工作效率。

(2) 现场辐射剂量率低

利用该技术进行乏燃料破损检测时,现场剂量率监测数据中绝大部分在 $0.2\sim 0.5\ \mu\text{Sv/h}$ 之间(现场不作业剂量率约 $0.2\ \mu\text{Sv/h}$),有个别数据在 $1.0\sim 2.0\ \mu\text{Sv/h}$ 之间(密封前需多种方法确认乏燃料编号,其中包括人眼识别。因腐蚀等原因,有些乏燃料标识难确认,因此提升高度增大,造成现场操作平台周围剂量率高于本底水平),易于防护。

实际测量表明,乏燃料水下干式储存破损检测技术是可行的,并且若有其它型号(指乏燃料的外型尺寸,已退役或即将退役的研究型反应堆的乏燃料有棒状和板状的,本工作针对的是棒状乏燃料)的乏燃料需要确定包壳是否破损,该技术可供参考,检测者只需要根据自身的需要、乏燃料组件尺

寸和堆水池尺寸等因素对取样系统的尺寸进行更改,就可以实现乏燃料破损检测。

参考文献(References):

- [1] SU Rongbo, HUANG Xianguo, TU Jun, *et al.* Radiation Protection, 2010, **30**(6): 379(in Chinese).
(苏容波,黄宪果,涂俊,等.辐射防护,2010,**30**(6):379.)
- [2] HUANG Naiming. Radiation Protection Bulletin, 2004, **24**(2): 25(in Chinese).
(黄乃明.辐射防护通讯,2004,**24**(2):25.)
- [3] YE Depei. Measurement Uncertainty[M]. Beijing: Defense Industry Press, 1996: 30(in Chinese).
(叶德培.测量不确定度[M].北京:国防工业出版社,1996:30.)
- [4] LI Deping, HU Fengquan. Radiation Protection, 1994, **14**(1): 303(in Chinese).
(李德平,胡逢全.辐射防护,1994,**14**(1):303.)

Technics of Sampling Gas by Storing in a Dry Container under Reactor Pool for Damage Detection of Spent Fuel

SU Rong-bo¹⁾, XIA Wen-you, WU Zhong-yi, TU Jun

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

Abstract: In the present article, several previous methods for damage detection of spent fuel assembly, as well as the existing limitations of these methods are reviewed. A new sampling system, including the working procedure and operating schedule, was developed in order to meet the practical demands and to solve the disadvantages mentioned. The measurement method for sampling and the criterion practical results provided evidence that, in this system, each operating process could successfully achieve a sample for a single certain spent fuel assembly with high precision. Moreover, all the operations were carried out under water, which made the radiation protection much easier.

Key words: spent fuel; damage detection; radiation protection