

文章编号: 0258-0926(2018)03-0045-03; doi:10.13832/j.jnpe.2018.03.0045

研究堆破损乏燃料元件快速排查技术研究

樊一军, 贾昊鹏, 唐 杨, 王小兵, 李成业

中国核动力研究设计院, 成都, 610041

摘要: 研究堆燃料元件在安全转移至乏燃料贮存水池前, 需对其进行破损检测。目前的检测方法耗时长, 难以对具体的破损对象快速判定。本文提出一种破损乏燃料元件快速排查法, 该方法能在短期内实现对破损乏燃料筛查, 提高后续待运乏燃料破损检测通过率。

关键词: 研究堆; 乏燃料; 快速排查

中图分类号: TL341 **文献标志码:** A

A Rapid Method for Detecting Damaged Fuel in Research Reactors

Fan Yijun, Jia Haopeng, Tang Yang, Wang Xiaobing, Li Chengye

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

Abstract: The spent fuel element in the research reactor needs to be tested before it was safely transferred to the spent fuel storage tank. The current testing method is time-consuming and difficult to judge the specific damaged object quickly. In this paper, a rapid method for detecting damaged fuel elements is proposed, which can realize the screening of spent fuel in advance and improve the throughput rate of spent fuel.

Key words: Research reactor, Spent fuel, Rapid detection

0 引言

研究堆运行期间, 将陆续产生大量的乏燃料元件, 这些乏燃料元件在离堆存放一定期限后, 需分批安全转移至后处理厂乏燃料贮存水池贮存待后处理。根据我国乏燃料元件运输容器和后处理厂乏燃料元件贮存水池的使用有关要求, 在运输前需对乏燃料元件进行检测以确认无破损。

1 乏燃料破损检测方法

研究堆燃料元件长期在反应堆内运行, 在燃料元件内部产生了大量的放射性裂变产物。在裂变产物中, ^{85}Kr 是惰性气体, 半衰期为 10.7 a, 沸点 (在 1 个大气压下) 为 -153.2 。 ^{85}Kr 主要存在于燃料元件的 UO_2 芯块及气腔中, 在包壳完

整的燃料元件中, ^{85}Kr 将包容在包壳中, 不向外释放; 在乏燃料元件破损时会缓慢向燃料元件以外的空间释放。 ^{85}Kr 在常温下难收集, 在 -155 低温液化, 易于取样测量。国内外通用方法是将乏燃料元件置于密闭容器中抽样检测, 根据样品测量结果中是否含 ^{85}Kr 进行判断^[1]。

我国对研究堆乏燃料元件破损检测方法为: 一次性将多盒乏燃料元件装入专用吊篮吊入运输容器密封, 静止一段时间 (6~7 d)。将加入活性炭的捕集器与 ^{85}Kr 检漏捕集系统连接。根据 ^{85}Kr 放射性气体特性, 选用液氮 (在一个大气压下, 沸点为 -196) 将其液化并被活性炭吸附。利用专用啜吸装置进行抽取采样, 将样品用高纯锗 γ 谱仪进行测量分析, 根据样品的测量结果中是否

含 ^{85}Kr ，进而判断燃料元件是否破损。

2 破损乏燃料快速排查技术

2.1 技术需求

乏燃料元件批量外运时破损检测是利用运输容器作为密闭载体，一次检测对象是多盒乏燃料元件，在封闭静置 6~7 d 时间后，进行取样、测量。故完成一个运输容器乏燃料元件破损检测周期较长，若在检测过程中出现有乏燃料元件破损现象时，现有检测方法无法对具体的破损对象快速判定。需要将运输容器返入保存水池，将乏燃料元件全部取出，逐根按原检测方法进行测量，存在反复辨别过程。重复操作将长期占用运输容器、反应堆厂房内有限操作场所等资源，加大了作业人员受照剂量，大幅延长乏燃料元件装罐准备周期，影响运输实施计划；严重时可能导致任务失败，需重新申办外运许可，造成资源、经济上的浪费。针对批量外运的乏燃料元件，有必要建立一种能快速排查出破损乏燃料元件的方法，通过对密闭环境中的乏燃料元件加热处理，加快破损元件中 ^{85}Kr 释放，大幅缩短 ^{85}Kr 静置取样周期，实现提前筛查、排除存在破损的乏燃料元件，以保证了后续待运乏燃料破损检测一次通过率，实现运输任务按计划实施。

2.2 快速排查检测工艺

快速排查检测工艺主要由 ^{85}Kr 水下吸取系统、 ^{85}Kr 捕集系统检漏捕集、 ^{85}Kr 分析测量系统构成（图 1）。检测系统应具备密闭容器独立、取样独立、静止时间短、检测周期短等功能特点。

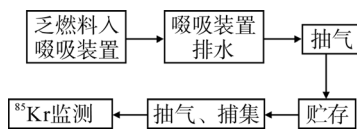


图 1 破损元件快速排查检测工艺流程图

Fig.1 Rapid Detecting Process for Damaged Fuel

2.3 ^{85}Kr 水下吸取系统

根据研究堆乏燃料元件的结构尺寸设计专用的 ^{85}Kr 检漏捕集系统。系统主要由水下吸取装置、 ^{85}Kr 转移回路组成。其中水下吸取装置由多个独立的水下吸取容器、进气、排水管线、管道、阀门、支撑架及加热系统构成。每个独立水下吸取

容器仅放置 1 盒乏燃料元件，静止密封时间约为 24 h。在乏燃料元件静置周期内，通过调节加热系统对吸取容器进行升温，将其加热至 80 ± 5 ，保温 2 h。加速破损乏燃料元件中 ^{85}Kr 的释放速率，以保证在较短时间内获取到足够的 ^{85}Kr 气体，通过分别控制阀门组对各吸取容器气体逐一取样、标识待检测。

2.4 ^{85}Kr 捕集系统

^{85}Kr 捕集系统由真空泵、真空表、捕集器、液氮壶、阀门、真空橡胶管、快速接头等构成。在捕集 ^{85}Kr 气体前，完成对装有活性炭的捕集器及回路进行气密性检查。在液氮冷却捕集器冷阱达到温度平衡后与 ^{85}Kr 检漏捕集系统连接，实现对装有乏燃料元件的水下吸取容器抽气采样。为提高取样效率及排除干扰，通过设置快速接头实现快速取样，取样后吹扫回路气体并清除回路残留物。

2.5 ^{85}Kr 测量分析系统

^{85}Kr 测量分析系统选用 HPGe γ 谱仪测量系统，系统组成包括铅屏蔽室、92X-II SPECTRUM MASTER 多道分析器、GEM15P-PLUS HPGe 探测器、Gammavision 32 谱收集分析软件、数据收集贮存系统。HPGe γ 谱仪系统示意图见图 2。

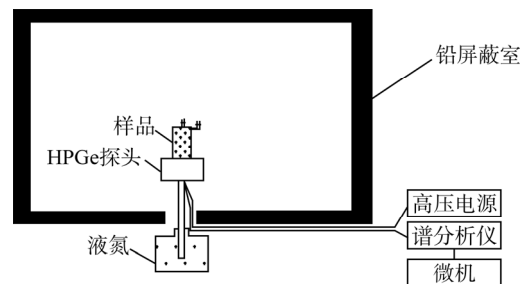


图 2 HPGe 谱仪测量系统

Fig.2 HPGe Spectrometer Measuring System

为了确保检测结果的准确性，在测量样品前，用 ^{85}Kr 标准源对谱仪进行能量刻度和效率校准。再用 γ 谱仪对捕集器 ^{85}Kr 样品进行检测，获取 γ 谱，并对 γ 谱进行测量、分析。若测量结果低于探测限值，则说明元件无破损。若发现样品谱中有 ^{85}Kr 的特征峰时，对样品进行复测。并根据测量的数据和仪器的效率推算 ^{85}Kr 的含量^[2]。

3 对比验证

3.1 破损乏燃料元件测量验证

为验证破损乏燃料元件快速排查方法的可信度,优化乏燃料元件密封静置时间,选取2组已确认破损且破损程度不一样的乏燃料元件样品在不同静置时间下进行抽气采样,并将采集到的样品用HPGe γ 谱仪测量。各样品在啜吸装置内静置24 h与后续再延长不同的静置时间后相比,均检测出 ^{85}Kr 特征峰,且测量结果趋于一致。测量结果表明,设定静置时间24 h的取样测量结果是可信的。

3.2 工程应用验证

采用破损乏燃料元件快速排查技术对某研究堆待运乏燃料进行批量化测量,168盒乏燃料元件全部合格。按照运输方案,分组装入运输容器(每组7盒),在静置规定周期(7 d)后,进行 ^{85}Kr 捕集,采集24个样品,按相同的分析测量程序完成测量及分析。检测结果表明,所有样品

均未检测出 ^{85}Kr 特征峰,符合运输条件。

4 结束语

通过实际验证,采用破损乏燃料元件快速排查方法能快速、准确地辨别出已破损乏燃料元件,大大降低了乏燃料元件装入运输容器后检测发现破损的机率,有效保证乏燃料运输按计划实施。该检测方法已应用到核电厂乏燃料元件的快速检测中。

参考文献:

- [1] 苏容波. 水下干式储存取样的乏燃料破损检测技术[J]. 原子核物理评论, 2012, 29(4): 384-387.
- [2] 黄乃明. 低水放射性测量中的探测限及计算[J]. 辐射防护通讯, 2004, 24(2): 25-32.

(责任编辑:孙 凯)