

压水堆燃料的检测、修复和重组

邓浚猷 赵希卷 叶晓丽 赵 红 张恩海 高衍刚 刘应林

(北京核工程研究设计院 北京 100840)

摘 要 概要说明了压水堆辐照燃料的检测、修复和重组工作的原理和工序, 啜吸技术的原理和发展. 最后着重描述了在线啜吸检测装置的研制.

关键词 燃料破损检测 啜吸检测 套筒内啜吸

分类号 TL352.27

1 前言

目前, 压水堆燃料组件的制造质量和运行的可靠性虽然已达到了很高的水平^[1], 燃料破损概率尽管很低, 甚至许多堆芯燃料在循环周期内有时完全没有燃料破损, 但总还是不可能完全杜绝的. 为了及时鉴别破损燃料组件并将其隔离, 以避免误将破损燃料再装入堆芯而污染堆芯和冷却剂, 也为了避免破损的乏燃料组件混入贮水池而污染池水和后处理厂, 就必须对燃料组件进行破损检测.

2 破损的燃料及检验顺序

在反应堆运行期间, 如果燃料棒出现裂纹, 冷却剂会经裂纹渗入包壳, 直至包壳内外压力平衡为止. 在燃料棒自由体积内积累的裂变气体便经包壳的裂纹扩散出来, 同时水和水蒸气进入燃料棒并与裂变产物发生反应, 形成的易挥发化合物以与裂变气体相似的方式释放, 而形成的其它可溶解化合物则随冷却剂带出. 冷却剂中裂变产物活性随活性核素经燃料包壳裂纹释放、自身的衰变以及冷却剂净化系统的去除而达到平衡的.

反应堆运行时, 冷却剂中裂变产物(常用测量¹³¹I、¹³³I、¹³⁴I、¹³³Xe、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs、惰性气体总量、¹³¹I 当量的方法)的活度和不同裂变产物核素活度的比可用于显示燃料包壳的

破损. 冷却剂活性可通过从回路系统单独取样测量或在回路系统管道适当位置进行连续在线测量.

如果发生燃料组件破损, 可用不同位置的控制棒组件的运动使反应堆功率在局部发生变化, 并观察它对冷却剂系统中裂变产物活性或不同裂变产物核素活度比的影响来判断破损的燃料组件在堆芯中的位置.

在运行过程的冷却剂取样检测中, 若发现有燃料破损征兆, 就要在反应堆停堆换料的大修过程中进行啜吸检测. 先是快速定性检测, 然后进行定量检测, 以判定破损的大小. 进一步的检测是判定有破损的燃料组件中的有破损的燃料棒. 这种检测是采用超声技术, 将探头分别插入燃料棒束之间的各个间隙中, 从超声回波可探测出燃料棒包壳内有存水(冷却剂渗入)的燃料棒.

如果有必要还可以对破损的燃料棒用涡流技术进行破损定位, 然后进行修补. 燃料破损检测总的顺序可概括为:

(1) 反应堆运行时, 监测冷却剂回路中裂变产物的活性, 破损燃料组件在堆芯中的定位, 控制棒的运动和活性监测.

(2) 换料时或换料后, 用啜吸(Sipping)判定破损的燃料组件(部分或全堆).

(3) 在燃料组件内判定破损的燃料棒, 进行超声检验.

(4) 单个燃料棒拔出后，进行涡流检测。

3 啜吸检测技术

啜吸技术用于反应堆换料时或换料后鉴定燃料组件的严密性。把被检测的燃料组件隔离，提高燃料组件的内压(加热)或降低燃料组件的外压以加快破损的燃料棒内的可溶性裂变产物或裂变气体经破损的燃料包壳逸出到围绕燃料组件的水或空气中，然后从流动的水或空气中取样或连续进行活性检测，探测裂变产物的存在，以鉴别破损的燃料组件。啜吸技术可按检测方式、装置设置的地点和检测介质分为在线与离线、装卸料机内与水池边及干与湿等类型。

在线啜吸是将流动的介质引入测量室内，直接连续测量 γ 或 β 活性。

离线啜吸是在手套箱内对流动的介质取样，送到放化实验室进行分析。

装卸料机内啜吸是用装卸料机套筒做隔离体的啜吸。

池边啜吸是用设置在燃料贮水池边的专用啜吸室做隔离体的啜吸。

干啜吸是用气体做介质，检测裂变气体之存在的啜吸。

湿啜吸是用水做介质，检测可溶性裂变产物之存在的啜吸。

啜吸技术始于 60 年代，过去一般采用的是设置在燃料水池边的啜吸检测系统，这种系统一般较复杂、检测耗时，检测一束燃料组件要半小时以上。为了快速、方便地进行检测，现已开始了堆上的在线检测系统，在装卸料机进行操作的同时，用套筒做隔离体，对燃料组件做逐束过筛检测，及时避免破损燃料组件的污染扩大。

我们参考了国外同类装置，研制了用于秦山核电二期工程的在线啜吸检测装置，与装卸料机相配进行燃料组件的破损检测^[1]。

4 在线啜吸检测装置的研制*

4.1 装置的工作原理

在装卸料机抓钩把燃料组件从堆芯提升到套筒上端位置的过程中，燃料组件所受外压降低，如燃料棒有破损，则加速了裂变气体 ^{85}Kr 和 ^{133}Xe 向外泄漏。从套筒底部注气口注入的压缩空气就会把漏出的裂变气体带走，一起上浮出水面，然后通过设置在固定套筒上部水面以上的抽气口把夹带裂变气体的空气抽至计量罐。抽气是用真空发生器产生的负压来进行的。计量罐用不锈钢制，在与探测器相对应的部位用薄铝盖，以减少 γ 衰减。

啜吸检测中只所以采用 γ 活度测量系统测量 ^{133}Xe 活度，首先是由于气体向冷却剂的逃逸系数比其它水溶性核素高近一个数量级，其次 ^{85}Kr 的 γ 份额很少，再者探测 β 活度也较困难。探测器包括 NaI 闪烁体和光电倍增管。每次检测前要用 γ 标准源 (^{133}Ba 固体源，它与 ^{133}Xe 有同一个能量为 81 keV 的 γ 峰且半衰期较长) 对 γ 活度测量系统进行检查。 γ 标准源平时放于贮存位置。

为了降低测量本底，计量罐和探测器均置于铅室内，铅室还有内衬以屏蔽铅内诱发的 X 荧光。

由于 ^{133}Xe 的半衰期较短， γ 检测需在停堆后数日内进行。 γ 探测的信号经放大器和单道分析器至计数率表。一个线性计数率表指示能量为 81 keV 的 ^{133}Xe γ 峰值计数率，对数率表可在线性率表超量程时继续指示。另一个线性计数率指示高于某一低阈的 ^{133}Xe 积分计数率。

用啜吸因子 f 来标识检测的燃料组件的破损情况。啜吸因子为 ^{133}Xe γ 计数率与本底计数率之比，可定义为

$$f = \frac{^{133}\text{Xe} \text{ 计数率}}{\text{本底计数率}(10 \text{ 束无破损燃料平均值})}$$

* 国家重点科技项目(攻关)计划(项目号 85 - 213 - 01 - 07)资助，获国家“八五”科技攻关重大科技成果奖。

如果, $f < 1.5$, 则表示无破损; $1.5 < f < 3$ 表示有破损可疑; $f > 3$ 表示有破损.

对于有破损可疑和有破损的情况应作进一步的定量检测和个别处理.

4.2 装置的功能

这套在线啜吸检测装置能在燃料组件停留于装卸料机套筒上端位置2分钟时间内,

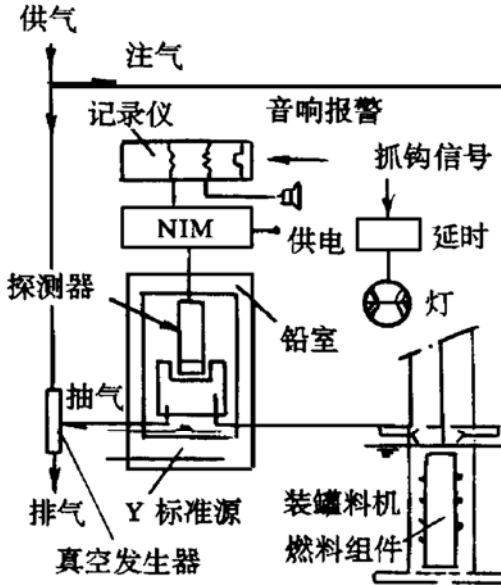


图 1 在线啜吸检测装置原理图

经探测破损燃料棒漏出的¹³³Xe的 γ 活度, 对燃料组件是否有破损做定性检测. 检测历时2分钟后有灯光信号通知操纵员. 例如, ¹³³Xe的 γ 活度超过设定值时, 则有音响报警, 记录仪连续记录¹³³Xe的 γ 峰值计数率变化、积分计数率变化和装卸料机抓钩抓住燃料组件到达上端位置的情况, 装置的基本工作原理如图1所示.

4.3 装置的结构及关键参数

全套装置布置在一个控制柜内, 分为上、下两个箱体. 气体系统(图2)和 γ 活度探测单元(铅室及其中的计量罐、探测器和 γ 标准源见图3)布置在下箱体内, γ 活度测量通道(NIM型核仪器插件)、记录仪、供电和信号系统(图4)、报警系统布置在上箱体内.

气体系统包括供气管线、注气管线、抽气管线和清洗管线. γ 活度测量通道包括探测器、放大器、单道分析器和计数率表^[2].

这套装置的3个关键调试参数为: 注气压力下的流量、抽气工作压力下的流量和 γ 活度测量系统的灵敏度(用 γ 标准源试验时

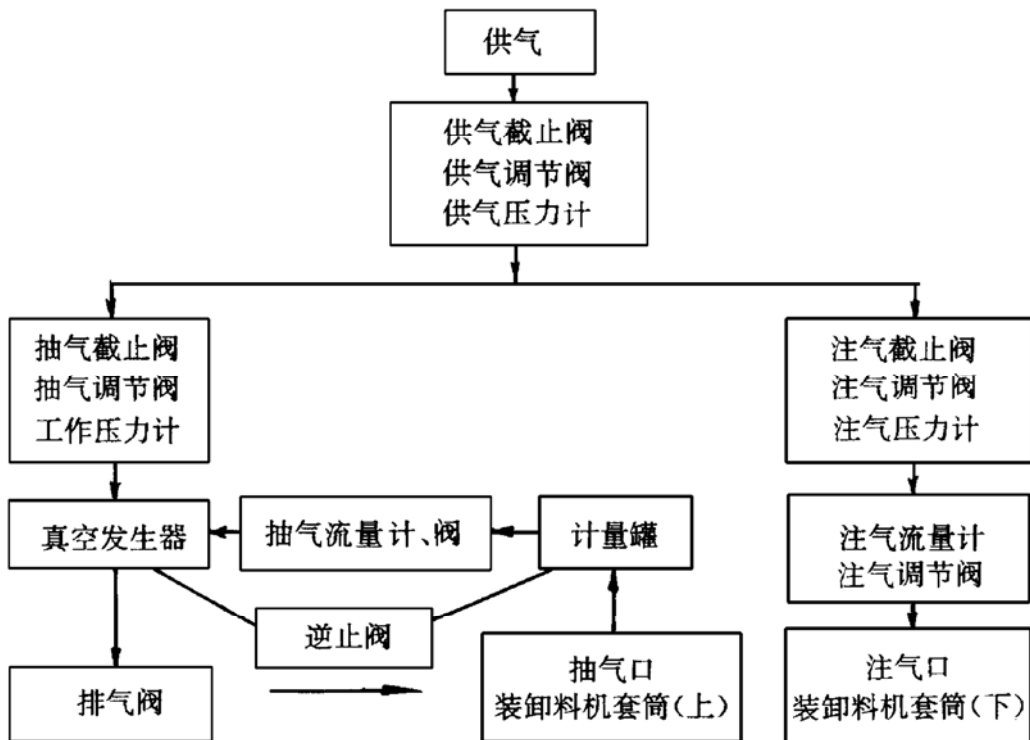


图 2 供气系统

仪表的 γ 计数率)。本装置的关键技术为： γ 活度测量系统的灵敏度、气体系统的气密性、抽气能力和整套装置的性能调试。

4.4 γ 活度测量系统的调试

γ 活度测量系统线路如图 3 所示。

(1) 调试 A 测量通道

调试单道分析器 A：选择合适的道宽，绘制计数率(cps)——阈值曲线，确定相当于 81 keV 能量的 γ 峰时的阈值。

调整道宽和阈值使 γ 峰值计数率接近预定数值，使 A 测量通道有预定的灵敏度。

(2) 调试 B 测量通道

调单道分析器 B：将道宽调至最大，选择合适的低阈值使 γ 积分计数率为预定数值，使 B 测量通道有预定的灵敏度。

(3) 测量 A、B 通道的本底计数率

将标准 γ 源置于贮存位置，用定标器测

量本底计数率。测得 A 通道为 0.16 cps，B 通道为 2.98 cps

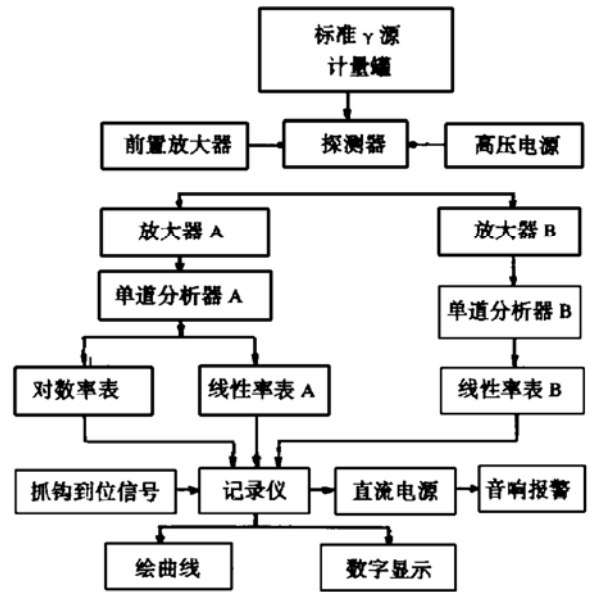


图 3 γ 活度测量系统

(4) 设定 γ 峰值计数率的报警值

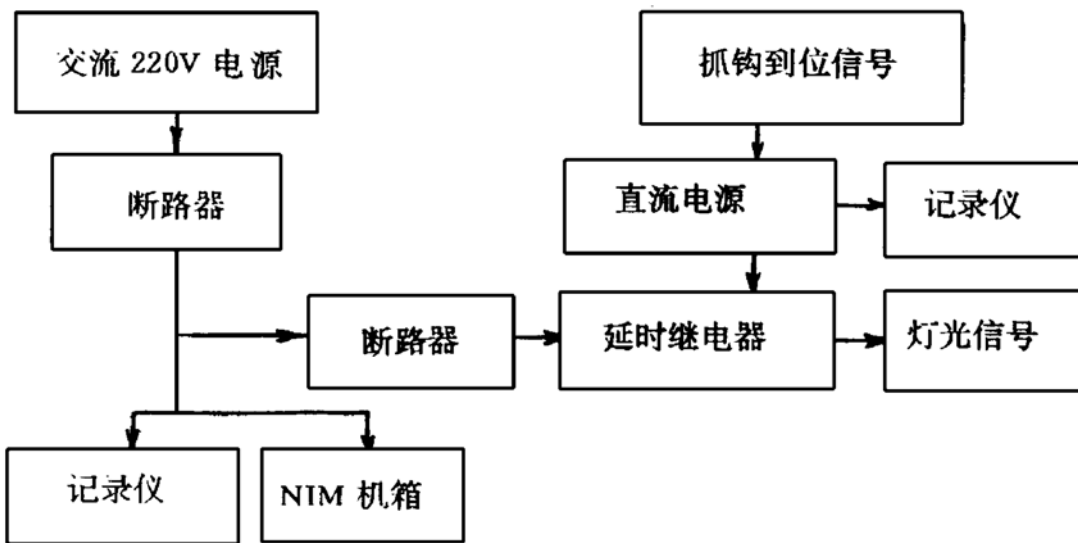


图 4 供电和信号系统

5 结论

本文阐述了压水堆辐照燃料的检测、修复和重组等服务工作的原理和工序以及开发状况。研制的在线啜吸检测装置具有国外同类装置的功能，并在记录仪的数字显示和贮源机构等方面有所改进，填补了国内这一方面的空白。本装置可与秦山二期核电站的装

卸料机相配，在装卸料操作的同时可快速地进行燃料破损的定性检测。另外，也可用于其它反应堆的燃料检测。在装卸料操作的同时，可快速进行燃料破损检测。不延长停堆时间，能及时鉴别破损燃料并加以隔离，对核电站的安全性和经济性具有重大意义^[3]。

致谢 参加研究工作的还有刘宁、张汉、宋若、李永源、赵平军、周关镛、徐玉明、肖

木生、邵立达、范刚、左民等。研制工作还得到了龙尚翼、周永立、乔恒春、周嘉椿、贾凡祥、陈学忠、杨广利、孙玉珍、张勋伟等人的指导，李小川(大亚湾核电站)、P Chanton

(IAEA)等人的帮助，以及黄乃章、林茂才(北京核仪器厂)、刘保罗、黄启华(防化研究院)等的大力协作，在此一并表示谢意。

参 考 文 献

- 1 IAEA. Guidebook on Non-destructive Examination of Water Reactor Fuel. Technical Reports Series No. 322, IAEA, Vienna, 1991
- 2 Bordy M, Parrat D. On-line Sipping System, Poolside Inspection, Repair and Reconstitution of of Light Water Reactor Fuel. IAEA-TECDOC-692 IAEA, Vienna 1992, 15~18
- 3 Deng Junxian, Zhao Xijuan, Ye Xiaoli *et al.* The Research and Development of the In-mast Sipping Test Device, Poolside Inspection, Repair and Reconstitution of Light Water Reactor Fuel. IAEA-TECDOC-1050 IAEA, Vienna 1998, 117~121

Inspection, Reparation and Reconstitution of PWR

Deng Junxian Zhao Xijuan Ye Xiaoli Zhao Hong Zhang Enhai
Gao Yangang Liu Yinglin
(*Beijing Institute of Nuclear Engineering, Beijing 100840*)

Abstract The principle and procedure of inspection, reparation and reconstitution of PWR irradiated fuel and the principle and development of sipping technique are briefly introduced. A sipping device on-line designed by ourself is described.

Key words fuel leak detection sipping test sipping in mast

Classifying number TL352.27

(上接第 103 页)

and material science is reviewed and the perspectives with high energy radioactive ion beams are discussed.

Key words radioactive isotope radioactive ion beam solid state physics material science

Classifying number O483