

# 压水堆核电厂燃料组件破损诊断和原因分析

刘晶晶 郑海洋 曹萌

辽宁红沿河核电有限公司

[摘要] 本文叙述了压水堆核电厂燃料破损诊断方法, 详细阐述了燃料棒破损的原因和机理, 并介绍了破损燃料的常用检查方法。

[关键词] 燃料组件; 破损; 检查

[DOI] 10.12252/j.issn.2096-627X.2021.10.2065

## 0 引言

燃料组件是核电站反应堆堆芯最主要的组成部分之一, 既是核电站生产电能的热源, 也是核电站产生核辐射的放射源。在反应堆运行过程中, 燃料组件中燃料棒的包壳是核电站防止放射性物质外漏的第一道屏障, 如果燃料包壳发生破损, 那么组件中的裂变产物将会释放到一回路的冷却剂中, 给运行安全带来较大的影响。对燃料组件破损分析是核电厂需要关注和研究的课题之一, 以确保核电站的安全、稳定、经济运行。

## 1 燃料破损诊断方法

### 1.1 WANO燃料可靠性指标

燃料可靠性指标 (FRI, fuel reliability index) 是根据冷却剂中裂变产物的放射性活度计算出来的。

FRI的计算公式如下:

$$FRI = \left[ \frac{(A_{131})_N - k(A_{134})_N}{(A_{131})_N} \right] \times \left[ \frac{Ln}{LHGR} \times (100/P_o) \right]^{1.5}$$

式中: FRI: 经过悬浮物贡献和功率水平的修正, 并对公共净化因子和线功率进行归一化处理后的稳态一回路的冷却剂<sup>131</sup>I的平均活度;  $(A_{131})_N$ 、 $(A_{134})_N$ : 归一化到公共净化因子的稳态冷却剂中<sup>131</sup>I、<sup>134</sup>I的平均活度, 单位为Bg/g或 $\mu$ Ci/g; k: 残留修正系数 (常数0.0318), 是基于30%铀和70%钚的残留物质而得到的; Ln: 用于归一化基准的线功率 (常数18.0kW/m或5.5kW/ft); LHGR: 机组在100%堆功率下的平均线功率 (kW/m或kW/ft);  $P_o$ : 与该指标相关的活度数据测量时的平均堆功率 (%)。

在FRI的计算中, 为了避免机组升降功率对放化水平的影响, 保证FRI计算的准确性, 碘的活度要取机组稳态运行时的数据, 即功率在85%平台以上运行三天以上, 且功率变化不超过 $\pm 5\%$ FP的数据才有意义。

根据WANO的经验, 对于大多数没有燃料缺陷的压水堆, FRI的活度一般低于19Bq/g, 如果FRI的活度大于19Bq/g, 那

么堆芯中很有可能存在燃料破损, 但不能仅凭FRI来决定堆芯中是否一定发生了燃料破损, 因为有可能是前次循环燃料破损沾污或溅附铀的影响, 因此还要结合其他方式来判断燃料包壳完整性。

### 1.2 一回路的放化数据分析

由于裂变产物中的惰性气体具有很高的迁移性和挥发性, 惰性气体能够快速穿越燃料芯块与包壳的间隙经由燃料棒的破口到达主回路冷却剂中。裂变产物活度的突增是堆芯发生燃料破损的判别手段, 尤其是对于惰性气体中的<sup>133</sup>Xe, 其半衰期相对较长, 且裂变份额大, 所以稳定工况下如果冷却剂系统中<sup>133</sup>Xe活度持续升高数个量级, 则表明燃料组件存在破损泄漏。而I、Cs, 却因为通过缺陷从包壳内扩散到冷却剂中, 只有当冷却剂通过破口进入而与芯块接触时才被水流带出到冷却剂中。挥发性不高的裂变产物 (如Ba, La或超铀元素Np, Cm, Am) 即使扩散到了燃料芯块的边缘也难以释放出来, 如果在冷却剂中测得它们的存在, 说明燃料破口尺寸已足够大且较为严重。

另外, 在稳定的运行工况下, 根据裂变产物半衰期不同的特点, 燃料未破损时, 来自包壳表面的沾污铀裂变产生的长短寿命放射性核素释放率有一个比值; 如果燃料破损时, 因裂变产物扩散进入芯块包壳间隙, 随后从间隙中经破口进入冷却剂中, 导致破口处裂变产物释放延时, 此延时导致短寿命核素损失大于长寿命核素。所以, 通过计算长短寿命核素比值是否发生显著变化, 是判断燃料破损的另一种方法。经验值如下:

<sup>133</sup>Xe/<sup>135</sup>Xe: 比值升高, 表明燃料破损, 许多机组经验数据表明, 破损时的比值大于0.9;

<sup>131</sup>I/<sup>133</sup>I: 比值增加大于0.25, 表明燃料破损;

<sup>133</sup>Xe/<sup>138</sup>Xe: 比值增加大于1, 表明燃料破损。

在判断了燃料组件是否破损后, 还可以根据冷却剂中的Cs来判断破损燃料组件的燃耗。<sup>137</sup>Cs的活度与组件燃耗成正

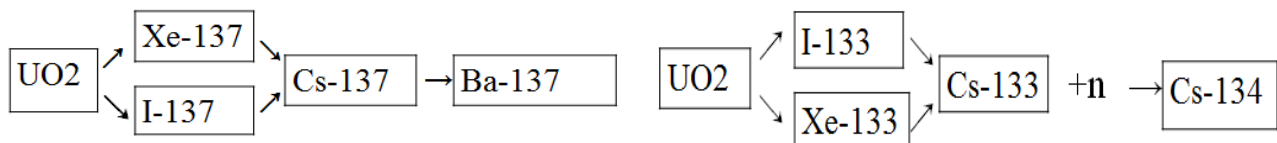


图1 <sup>134</sup>Cs和<sup>137</sup>Cs的反应链

比,  $^{134}\text{Cs}$ 的活度与组件燃耗的平方成正比。图1是 $^{137}\text{Cs}$ 与 $^{134}\text{Cs}$ 的反应链。

因此, 可以根据 $^{137}\text{Cs}$ 与 $^{134}\text{Cs}$ 的比值来估算破损燃料组件的燃耗, 以大致区分破损燃料组件的类别。 $^{137}\text{Cs}$ 与 $^{134}\text{Cs}$ 的比值与燃料组件燃耗的对应关系见图2:

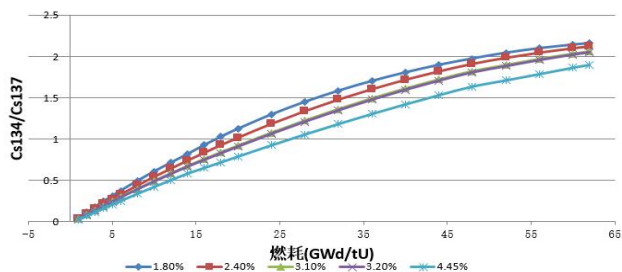


图2  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 比值与燃耗的关系曲线

在稳定的运行工况下很难测量到从破损燃料组件中释放出来的Cs, 因此通常根据功率变化时的 $^{134}\text{Cs}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 的峰值来估算破损燃料组件的燃耗。需要注意的是, 利用 $^{134}\text{Cs}$ 和 $^{137}\text{Cs}$ 比值估计燃耗的方法有局限性, 若不同燃耗的两组组件发生破损, 则只能计算出它们的平均燃耗, 所以只有单一的燃料棒破损, 上述方法的评估结果才会相对准确。

## 2 燃料棒破损原因及机理

燃料棒破损的原因可分为几类: 制造缺陷、氢化、PCI (芯块包壳相互作用)、格架与燃料棒之间的振动磨蚀、腐蚀结垢、磨损等。

### 2.1 制造缺陷

在燃料组件制造期间的缺陷主要包括焊接缺陷、密封缺陷、化学杂质、表面或材料杂质、材料弯曲或变形、不当搬运造成的零部件损坏、芯块缺陷等。

与燃料棒破损相关的制造缺陷最常见的是组件组装过程中的锆屑, 组装燃料组件时, 将燃料棒机械拉入骨架的格架栅元中由于摩擦力的作用会产生丝状、粒状的锆屑, 当这些锆屑夹在格架钢凸或弹簧与燃料棒之间时, 因其振动会造成对包壳外表面的磨蚀。

另外, 制造缺陷中较常见的是燃料棒的焊接缺陷, 燃料棒在加工过程中如果焊接工艺控制不当, 就有可能在端塞的环焊缝或堵孔焊点中产生焊接缺陷, 这种焊接缺陷在燃料组件堆内运行时扩展成裂纹或穿孔缺陷导致燃料棒破损泄漏。

### 2.2 氢化

锆和氢在运行温度达到 $820^{\circ}\text{C}$ 后会发​​生锆水反应并产生氢气, 锆和氢进一步反应生成氧化锆, 由于氧化物的密度远远低于锆合金, 使包壳膨胀并产生应力。引起燃料棒破损的氢脆主要起始于燃料包壳的内壁, 根据氢的来源不同, 分为一次氢化和二次氢化。一次氢化是由燃料包壳内的残余水份和有机杂质辐射分解产生的氢以及锆水氧化反应生成的氢局部

浓集并与锆反应生成氢化物, 使包壳脆化。二次氢化则是在燃料棒包壳破损后, 冷却剂从破口进入到燃料棒内, 与锆反应产生氢气, 进而通过氢化反应生成氧化锆。二次氢化同样可使包壳脆化开裂, 产生新的破损。由于冷却剂进入燃料棒内后汽化, 会向燃料棒上部扩散, 因此二次氢化破损往往出现在燃料棒上部温度较高的部位。

### 2.3 PCI

PCI就是燃料芯块与包壳相互作用导致燃料棒包壳应力腐蚀开裂。反应堆在运行过程中, 由于 $\text{UO}_2$ 芯块热导率小, 芯块中心温度比周边高很多, 端部效应使芯块端面部分的径向变形比中间严重, 使芯块成“扯铃状”, 随着燃耗加深, 一回路大幅过压 (相对于棒内部压力而言) 促使包壳蠕变, 当芯块端面部分与包壳接触时, 芯块与包壳相互作用会形成环脊, 环脊处存在较大的应力应变 (图3)。这种应力应变在功率瞬时态时最容易产生。另外由于制造缺陷, 如果有芯块碎片卡在芯块和包壳之间也会产生同样的效应。

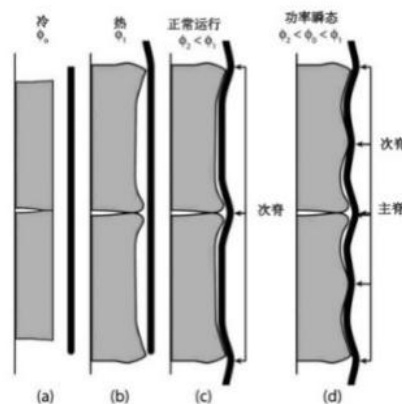


图3 PCI随着运行的变化

PCI往往发生在功率跃增过程、燃耗比较深的燃料组件上。燃耗深的芯块膨胀相对大, 功率跃增时芯块膨胀加剧, 就会对包壳产生很大的应力, 导致包壳破损。

### 2.4 格架与燃料棒之间的振动磨蚀 (GTRF)

近年来的运行经验表明, 格架和燃料棒之间的振动磨蚀及外来异物与燃料棒的磨蚀是燃料棒破损的主要原因。在运行过程中, 冷却剂从燃料组件下管座进入, 通过燃料棒之间的冷却通道经定位格架从上管座流出。冷却剂的流动会使燃料棒产生振动。格架弹簧受辐照影响会产生松弛, 定位格架的夹持力逐渐减小, 引起燃料棒振动加大。振动使燃料棒与定位格架之间产生摩擦, 导致包壳磨损。

格架-燃料棒振动磨蚀 (GTRF) 是早期燃料破损的主要原因之一, 压水堆核电站燃料组件泄漏事故有70%是由GTRF导致的。后续在燃料组件设计中通过增加中间搅混格架, 并对定位格架进行了改进, 使GTRF导致的燃料破损事件大大减少。

### 2.5 异物磨蚀

金属异物在冷却剂的带动下通过下管座流水孔进入燃料组件的棒间隙中,在水流的不断冲刷下与燃料棒不断发生摩擦、碰撞,导致燃料棒磨损。金属异物可能来源于燃料组件制造过程中的锆屑、堆内松动部件、堆内部件损伤产生的金属碎片以及系统设备检修或调试过程中引入的金属异物等。较大的金属异物不容易通过下管座流水孔,因此不会对燃料组件造成危害。较小的金属异物通过下管座流水孔后,由于靠近下管座的第一层格架的阻挡作用,大部分卡塞在下管座与第一层格架之间,因此异物对燃料组件的磨损往往发生在燃料棒的下部。

异物是目前燃料棒破损的主要原因,因此核电厂以及燃料组件制造过程中应关注防异物的管理和控制。

### 2.6 腐蚀与结垢

燃料棒包壳通常在高温、高压下与冷却剂反应产生均匀的氧化腐蚀。在设计燃料组件运行限值内,这种均匀的氧化腐蚀不会导致燃料包壳破损。但运行过程中的功率分布异常、局部热流密度过高、一回路氧含量超标等会加速氧化,燃料燃耗过深则会导致燃料棒包壳的过度氧化,导致包壳破损。

结垢腐蚀往往与冷却剂的水化学控制不当直接相关,冷却剂中的杂质吸附或沉积在燃料棒包壳形成垢层,垢层会使燃料棒的传热效率降低,导致局部热应力,从而使包壳破损。

## 3 破损燃料检查方法

对于压水堆核电站,破损燃料的检查方法一般有吸漏检查、水下外观检查、超声检查、热室检查等方法。

### 3.1 吸漏检查

吸漏检查是利用吸吸试验装置,对燃料组件完整性进行检查,一般分为在线吸漏和离线吸漏。

在线吸漏检查装置安装在装卸料机上。卸料时,燃料组件从堆芯提升到装卸料机内,如果组件有破损,提升过程中产生的压差会促使裂变气体释放。通过吸吸装卸料机的气空间的气体样品,分析样品中的 $^{133}\text{Xe}$ 的 $\gamma$ 峰值比活度,可判断燃料组件是否存在破损。在线吸漏试验是反应堆在卸料的同时,对燃料组件进行漏损与否的定性吸漏试验,其优点是卸料同步进行,每组耗时约3-5min左右,基本不占用大修主线时间。

离线吸漏检查装置设置在乏燃料水池边,检查取样时燃料组件放置在吸吸盒中,通过加热或真空吸吸促使放射性裂变产物加速释放,吸取吸吸盒中的水样进行放射性核素分析比较,判断燃料组件是否存在破损。相对于在线吸漏试验,离线吸漏试验可以对水样中的多个核素进行检测分析和综合判断,因此准确性较高。

在反应堆运行过程中,通过燃料破损的诊断方法如果发

现堆芯有燃料破损,则在大修卸料过程中先进行在线吸漏检查破损组件或疑似破损组件,然后卸料完成后再对疑似破损组件进行离线吸漏检查,以进一步确认破损组件。

### 3.2 外观检查

对破损组件的外观检查主要是在水下进行的,通过水下视频检查可以直观了解燃料组件整体结构的完整性。水下视频检查主要检查上下管座、格架损伤情况、外围燃料棒的表面状况等。水下视频检查还可以测量燃料组件和燃料棒的辐照生长和变形情况。对破损棒通过拔棒设备拔出后,还可使用水下外观检查对破损棒的表面进行检查、观察破口的形貌、位置,以便查找燃料破损的原因。

### 3.3 超声检查

对于破损的燃料组件,为了找出破损的单棒,分析破损原因,还要对组件中的燃料棒进行逐一检查。借助水下视频检查可以对燃料组件的外围燃料棒进行观察,但对内部的棒无法看到,需要通过超声检查进一步确认。超声检查是利用燃料棒破损后,水会进入到燃料棒内部,内部有水的燃料棒探测到的超声信号不同于正常棒,所以可以通过超声波探测信号的显示,来甄别出破损的单棒。超声检查使用超薄压电晶片作探头,可以进入到燃料棒的间隙进行检测,因此不需要解体燃料组件,而且超声检查可以通过计算机处理,方便快捷。但从其检查原理来看,破损的燃料棒包壳内必须有水进入,才能通过超声检查发现,如果没有水进入到包壳内则超声检查无法检测出破损的燃料棒。所以,对于微小的闭合性包壳缺陷,超声检查可能会漏检。

### 3.4 热室检查

热室检查是将破损燃料棒从燃料组件中拔出后,到高放射性试验和操作的屏蔽小室,通过对燃料棒进行完整检查以及切割、解体,进一步检查外观尺寸、 $\gamma$ 谱扫描燃料棒轴向相对燃耗、分析材料的金相、包壳氢含量、SEM(扫描电镜)观察和能谱分析等项目,通过热室检查能够分析出燃料棒破损的根本原因。

## 4 结论

(1) 燃料破损诊断方法主要有WANO燃料可靠性指标FRI计算和放化数据的趋势和活度比值等;

(2) 燃料破损的原因主要有制造缺陷、氢化、PCI(芯块包壳相互作用)、格架与燃料棒之间的振动磨蚀、腐蚀结垢、磨蚀等。

(3) 燃料破损的检查方法主要有吸漏、外观以及超声、热试等检查方法。

### 参考文献

[1] 核电工程与技术——薛新才,燃料组件破损分析与监督管理[J].核电工程与技术,2011年第1期:25-41.

[2] WANO管理指标手册