

# 反应堆燃料组件解体技术研究

刘晓松，李文钰

中国核动力研究设计院，成都，610213

**摘要：**充分考虑反应堆燃料组件结构特点，提出了一种先翻转、再拆卸下管座、最后拔取燃料棒的解体工艺，并设计了与解体工艺相对应的专用工具。采用集成化的思路，使所有设备均布局在投影面积仅为 1.2 m<sup>2</sup> 的面积以内，既满足了现场安装条件的限制，又保护了乏燃料水池已有设备。采用该技术顺利完成了水下 6 m 处反应堆燃料组件的解体工作。

**关键词：**反应堆燃料组件；翻转；解体；拔取燃料棒

**中图分类号：**TL384 **文献标志码：**A

## Investigation and Application of Reactor Fuel Assembly Dismantling Technology

Liu Xiaosong, Li Wenyu

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

**Abstract:** By analyzing the reactor fuel assembly structure, a fuel assembly dismantling process is obtained, which includes overturning, removing the tube socket and finally extracting the fuel rods. This process can be adapted for narrow space and is simple for operation and safe. To accomplish those operation, an appropriate tool with the projected area less than 1.2 m<sup>2</sup> had been developed by an integrated design approach. It meets the requirement of on-site condition and is good for preserving these existing devices. Through this study and application, the reactor fuel assembly has been disintegrated based on this technique under water in the depth of 6 m.

**Key words:** Reactor fuel Assembly, Overturning, Disassembling, Extractor fuel rods

### 0 前 言

燃料组件是反应堆安全相关的基本部件，是包容放射性物质的第一道安全屏障。如果燃料组件发生破损，必须查明燃料组件破损的原因，而首要条件则为对该燃料组件进行解体。

燃料组件解体，在世界范围可查询的例证都很少，国内仅在秦山一期核电厂燃料组件上进行过燃料棒的更换操作<sup>[1]</sup>。由于本文研究的解体组件与一般核电厂的反应堆燃料组件相比，棒间距

更密、燃料棒长径比更大，所以目前的成熟技术无法直接用于本文研究的反应堆燃料组件的解体作业<sup>[2-4]</sup>。本文研发了一套反应堆燃料组件水下解体工艺，同时研制了相应的专用工具及监控系统，最终顺利实现该燃料组件的解体。

### 1 总体工艺研究

#### 1.1 解体工艺设计

本文研究的是一种棒束型反应堆燃料组件，

由多根燃料棒和骨架结构（含导向管、格架和上下管座）组成，燃料棒通过骨架结构形成一个稳固的长方体燃料组件，结构型式见图 1。

由图 1 可见，要拆出燃料棒，必须先将燃料组件上管座或下管座拆开。通过对燃料组件结构分析，确定从下管座实施燃料棒的分离。燃料组件解体总体工艺流程如图 2 所示。

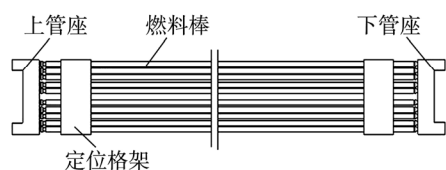


图 1 燃料组件结构示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Fuel Assembly

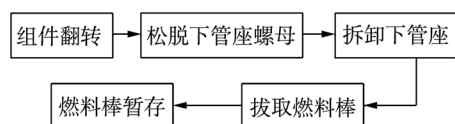


图 2 燃料组件解体工艺

Fig. 2 Dismantling Processing for Fuel Assembly

1.1.1 组件翻转 要使燃料组件安全的翻转，必须设计相应的翻转容器在组件翻转过程中进行保护。容器具有密封功能，确保组件翻转过程中，造成燃料组件破损的异物不会遗失。容器设计时还需考虑组件在翻转过程、操作过程中的安全性，即要求对组件定位可靠，适当压紧。

1.1.2 松脱下管座螺母 将燃料组件放入对燃料组件遮挡较少而定位更加精确的解体支架内进行裙边螺母松脱。相应装置必须考虑在松脱螺母过程中的扭矩不能传递到燃料棒上，所以解体支架必须对上管座进行精确定位。在精确定位后，通过螺母松脱专用工具进行下管座螺母松脱。

1.1.3 拆卸下管座 用专用工具将下管座提出解体支架放入专门的存放容器，再将拆卸螺母时的用于下管座定位的带导向功能的导向套取走。使下端塞露出解体支架，便于燃料棒拔取操作。

1.1.4 拔取燃料棒 燃料棒拔取是组件解体最为核心的工作。设计新型的抓取工具进行抓取。抓取工具定位必须准确，且具备精确微调功能。整个燃料棒拔取过程拉拔力需严格控制在安全范

围内，以免拉拔力超出安全值而将燃料元件拉断，采用了一套完整的拉拔力测量控制和采集系统对拉拔过程进行实时监控。

1.1.5 燃料棒暂存 按核材料管制条例及其实施细则要求，每 1 根燃料棒拔出后必须保证其可区分性。由于该燃料棒本身无标识，所以在贮存该燃料棒时需考虑确保燃料棒的可追溯性。

## 1.2 操作系统总体设计

解体实施地点为某乏燃料水池，该水池为  $9\text{ m} \times 3\text{ m} \times 9\text{ m}$ （长 $\times$ 宽 $\times$ 深）的水池。为利用上部水体空间，在乏燃料水池适当深度搭建满足水下所需的操作平台，操作平台设计成吊篮式结构，其通过横梁挂在水池两边的混凝土平台上，由底板、吊架及横梁组成。为了实现狭小区域安装和安全操作的目的，按照操作对象的不同采用两套系统来实现该解体工艺，即燃料组件水下操作系统和燃料棒操作系统。

## 2 燃料组件水下操作系统

组件移动、定位操作的装置和工具统称为燃料组件水下操作系统。主要包括燃料组件抓取工具、翻转容器及翻转支架、解体支架、组件定位操作平台、裙边螺母松脱工具、下管座抓取工具及水下操作平台。

按工艺流程，结合现场操作位置处只能提供长  $2\text{ m}$ 、宽  $1.2\text{ m}$  的狭小安装空间的客观条件，必须采用集成化设计，在较小空间内集成大量设备来实现工艺确定的各种功能。按安装位置情况，确定所有设备集成后上部尺寸不超过  $7\text{ m}$ （高） $\times 5\text{ m}$ （长） $\times 2\text{ m}$ （宽），下部尺寸不超过  $7\text{ m}$ （高） $\times 1.2\text{ m}$ （长） $\times 2\text{ m}$ （宽）。采用 UG 等三维建模软件，分别建立相关零部件的模型，并在软件中进行装配和功能验证，确定相互之间无干涉后，最终确定了各个设备的相对安装位置，如图 3 所示。

### 2.1 燃料组件抓取工具

燃料组件抓取工具结构牢固并带有固有安全性，采取了高强度材料和机械限位锁紧，确保燃料组件抓取过程中抓取工作的安全可靠。

### 2.2 翻转容器

翻转容器由筒体、上下盖、翻转轴及其他配

套零件组成。实现燃料组件的安全翻转。

### 2.3 解体支架

解体支架是燃料组件解体时组件的包容装置，在拆除下管座时防止组件扭转，在拔取燃料棒时防止组件移动。同时考虑了对燃料组件进入时的喇叭口导向并抵消在进行松脱下管座裙边螺母时的扭矩，确保了扭矩不会传递到燃料棒上。

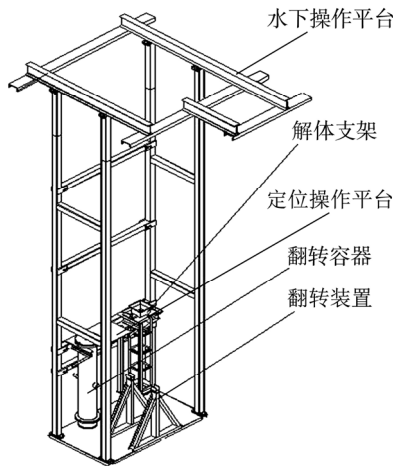


图3 燃料组件操作系统

Fig. 3 Handling System for Fuel Assembly

### 2.4 组件定位操作平台

组件定位操作平台对翻转容器、解体支架的安放提供定位，进而对燃料组件进入翻转容器、提出翻转容器、进入解体支架、组件拆除下管座、拔取组件燃料棒等工步进行定位，其本身的精度直接决定燃料组件操作和燃料棒操作的可靠性和精度。

### 2.5 螺母松脱工具

螺母松脱工具为水下远距离操作工具，用来拆卸燃料组件下管座裙边螺母。为了保证在螺母松脱后螺母不掉落，在工具螺母套筒处设置了弹簧卡片，使其能对螺母施加一定的压力，保证螺母不掉落，同时设计专用的螺母存放器，在螺母松脱后将螺母移至螺母存放器上的螺杆上旋紧，然后拉出松脱工具。

### 2.6 下管座抓取工具

燃料组件下管座抓取工具为水下远距离操作工具，只用来抓取燃料组件下管座，采用卡扣抓取，机械销钉锁紧结构，确保下管座抓取安全。

### 2.7 水下操作平台

所有设备安装在水池吊装孔处，采用集成化安装有效解决场地问题，集成化安装基础即为水下操作平台。操作平台位于水下6 m深处，有效保证了辐射防护安全。

## 3 燃料棒操作系统

燃料棒操作系统主要负责燃料棒水下操作，完成燃料棒拔取、转移暂存工作，主要包括拔棒装置、定位器、暂存装置及拉拔力测量装置。

### 3.1 拔棒装置

拔棒装置是燃料棒操作系统中较为关键的设备，直接完成燃料棒拔取工作。拔棒工具采用叉口抓取，卡片防脱的抓取方式对燃料棒进行抓取。该方法可保证在缺口叉入下端塞脖颈处后无掉落风险。通过结构设计，保证拉拔时拉力和燃料棒轴线处于同一直线；拉出燃料棒后，可将燃料棒全部收入导向管内进行运输，保证了运输过程中的安全。

### 3.2 拔棒装置定位器

拔棒装置定位器是拔棒装置抓取燃料组件芯棒的专用高精度对中机构，可实现水平方向 $XY$ 轴的定位。拔棒装置定位器通过转动滚珠丝杆副的手柄，控制工作台在 $X$ 轴方向移动，通过转动单坐标工作台手柄，控制定位板在 $Y$ 方向的移动，从而实现拔棒装置与燃料组件芯棒的对中。

### 3.3 燃料棒暂存

为了确保每一根燃料棒均能被准确区分，通过专用的暂存方法实现，即采用标识贮存位置的方式进行逐一标示的方法。标示方法采用先到组、再到桶、后到根的办法进行。每组采用 $4 \times 7$ 的暂存架对燃料棒进行分组存放，共可放置28个暂存桶。最终实现了任意1根燃料棒的精确定位。保证了燃料棒的可追溯性。

### 3.4 拉拔力测量与控制装置

拉拔力测量与控制装置，由提供提升力的电动葫芦、采集力的重量传感器、后端处理的二次仪表、采集拉拔力及实时绘制拉拔力曲线的计算机软件和控制电路组成。实现了0.5 s采集1个数据，实时绘制拉拔力曲线，超过拉力限值

自动停止拉拔等功能，确保了燃料棒拉拔过程中的安全。

#### 4 应用效果

在燃料组件解体技术研究的基础上，进行了各设备及专用工具设计和制造。为了验证设备是否满足燃料组件解体所需要的各项功能，对整个解体设备进行了大量的试验，包括设备单体试验和综合模拟试验。模拟试验搭建了尺寸和乏燃料水池一致的安装位置，设备安装完成后，严格按照解体工艺流程进行了燃料组件的翻转、移位、下管座拆卸、燃料棒拔取和暂存等作业，先后拔取模拟燃料棒 100 多根，并按试验情况对设备进行了完善。

在设备完成了各项模拟试验后，运抵乏燃料水池进行安装和使用，同时进行燃料组件的解体作业。组件在翻转和转移、下管座拆卸过程中均无任何异常，各个工器具及设备的功能可靠，具有较高的可操作性；拔棒装置能准确抓取燃料棒下端塞，拔棒装置定位器能平稳驱动拔棒装置使其与燃料棒对中并锁紧。整个操作过程无异常，安全可靠地完成了燃料棒的拔取作业，为查找元件破损原因提供了前提条件。

#### 5 结论

提出的翻转、拆卸管座螺母、拔取燃料棒的组件解体工艺是可行和安全的。通过该工艺的应用，解决了在狭小空间和水下远距离操作的条件下，以燃料棒间距密、燃料棒直径小为特点的燃料组件解体的技术难题。本工艺采用套管保护和拉拔力保护等多种安全措施有效保证了燃料棒安全；采用的远距离水下操作方式有效保证了操作人员的辐射防护安全；本工艺具有效率高、可操作性强、适应范围广等特点，可以推广应用于其他采用棒束型燃料组件的解体作业。

#### 参考文献：

- [1] 沈秋平, 陈志清, 徐道平, 等. 燃料组件修复装置的设计[J]. 核技术, 2010, 33(2): 148-151.
- [2] 郝艳仲. 水下机器人运动稳定性研究[D]. 杭州: 浙江大学硕士论文, 2006.
- [3] 陈济东. 大亚湾核电站系统及运行[M]. 北京: 原子能出版社, 1994
- [4] 丁捷, 朱丽兵. 燃料棒更换装置的三维建模和运动仿真[J]. 核技术, 2010, 33(2): 4-13.

(责任编辑: 刘 君)