

重水堆电站堆芯中子通量钚探测器出堆异常的典型故障分析及处理

于群利

(中核核电运行管理有限公司 浙江 嘉兴 314300)

摘要: 每台 CANDU-6 重水堆机组有 102 根堆芯中子通量钚探测器, 垂直安装于反应堆堆芯, 用于探测堆芯中子通量。由于钚探测器受运行环境的影响, 其探头测量元器件及接头长期使用会产生一定程度的老化和损伤。按照钚探测器的预防性维修要求, 钚探测器更换周期为 10 年, 以及时消除钚探测器故障隐患, 确保钚探测器始终处于良好的状态且稳定运行。但是, 钚探测器在出堆过程中, 曾出现过因整套气动控制系统部件故障导致无法正常出堆的现象。本文通过分析钚探测器出堆异常的几种典型故障, 从故障表象进行分析, 确定故障的原因及处理方法, 以指导钚探测器出堆异常的现场检修。

关键词: 钚探测器; 出堆异常; 原因分析; 处理

1 概述

CANDU-6 重水堆机组堆芯中子通量钚探测器用于探测堆芯中子通量, 在堆芯运行 10 年之后, 具有很高放射性, 在出堆过程中的最高接触剂量率超过 1.7Sv/h, 装有钚探测器颗粒的储存罐屏蔽容器最高接触剂量率也达到 8mSv/h, 现场更换时反应堆厂房内所有大修工作均需暂定, 人员离开反应堆厂房。

钚探测器出堆过程中现场剂量很高, 为减少钚探测器出堆工作人员接受的剂量, 钚探测器的出堆工作人员远程操作一套气动控制系统, 其安装于钚探测器组件上方, 长度为 8 ~ 12m。人员手动操作气动控制系统, 将钚探测器顶部穿过屏蔽基座, 装入切割工具模块中的橡胶滚轮上, 人员远程操作控制盘台, 带动橡胶滚轮转动, 将钚探测器从反应堆中拉出, 传送到切割腔室^[1]。腔室内的切割器将钚探测器切割成 0.125 ~ 0.15mm 的小颗粒, 真空系统将小颗粒吸入储存罐中。同时, 摄像装置将钚探测器出堆的实时情况传送到显示装置上, 在屏蔽容器入口管上的颗粒麦克风组件实时显示钚探测器小颗粒被吸入储存罐的运输情况, 在切割工具附近安装剂量计, 远程实时显示钚探测器出堆过程中切割工具附近的剂量率。

2 故障类型简要介绍

在使用该套气动控制系统执行钚探测器出堆任务

时, 多次出现因气动控制系统部件故障导致钚探测器出堆异常的现象。本文总结了使用过程中的几类典型的气动控制系统故障导致钚探测器出堆异常的现象。

整套气动控制系统工作的核心工艺是将钚探测器切割成小颗粒并将小颗粒吸入至储存罐内, 所以本文对这两项工艺对应的工具在使用期间的典型故障进行分析, 故障主要表现为以下三类: 第一类, 切割器组件无法切割, 但钚探测器仍被传送到切割腔室; 第二类, 切割器组件仍在转动, 但钚探测器无法被传送到切割腔室; 第三类, 真空系统故障, 钚探测器无法被吸入至储存罐中。

3 故障分析及处理

本文系统化地分析以上三类典型故障的原因, 并制定故障处理方案。

3.1 第一类故障原因分析及处理

3.1.1 故障现象描述

钚探测器在出堆切割过程中, 通过显示装置发现钚探测器无法被切割成颗粒, 而橡胶滚轮仍在转动并带动钚探测器向切割腔室内传送^[1]。此时气动控制系统其他部件也有异常显示, 包括: 显示装置显示钚探测器在切割腔室内堆积, 颗粒麦克风组件显示在屏蔽容器入口管上无钚探测器颗粒流动, 剂量计显示切割工具附近的剂量率异常等。

3.1.2 故障原因分析及处理

钚探测器出堆切割过程是人员手动将钚探测器从反应堆中抽出,将顶部固定环剪切后,装入切割工具模块中的橡胶滚轮上。人员通过操作台操作整套气动控制系统,橡胶滚轮将钚探测器传送至切割腔室,同时切割器组件将钚探测器切割成小颗粒,显示装置实时显示钚探测器出堆过程。钚探测器在出堆过程中,显示装置显示钚探测器无法被切割成颗粒,而在切割腔室内堆积,说明切割器组件存在异常,但钚探测器传送过程无异常。此时需保证气动控制系统主气源继续供气,真空泵持续供气,断开切割工具气源,切割器组件和橡胶滚轮停止工作,通过剂量计判断是否可以近距离处理故障。

若钚探测器还未被切割至高剂量区域,人员可以接近工具进行故障处理,则其故障原因分析及处理如下:

(1) 将钚探测器装入橡胶滚轮时,钚探测器弯曲。钚探测器装入橡胶滚轮前,需手动将钚探测器顶部固定环剪切后安装至橡胶滚轮处,橡胶滚轮转动将钚探测器竖直传送至切割腔室,与切割工具模块的横轴套垂直的切割刀头高速旋转,将钚探测器切割成小颗粒。钚探测器在剪切位置发生弯曲时,在传送到切割腔室时仍会弯曲变形,切割器刀头无法对钚探测器实施切割,显示装置会显示切割器组件无法切割,而钚探测器仍被传送到切割腔室。

处理方法:解体切割工具模块,将切割器组件从模块中移除,拆除橡胶滚轮,将钚探测器从模块中取出,将弯曲的部分切除,检查确认切割腔室各部件无磨损,并重新组装切割工具模块。维修规程中已明确规定,将钚探测器固定环切割后,需将顶部调整至竖直状态后装入橡胶滚轮。经实际工作验证,此工艺可以避免钚探测器在切割过程中出现弯曲变形。

(2) 切割器刀头刀刃有破损或断裂。钚探测器在出堆切割过程中,因刀头多次使用,存在刀刃疲劳破损或断裂的情况,此时刀头无法实现切割功能,但橡胶滚轮功能不受影响,仍能继续将钚探测器传送到切割腔室,在切割腔室堆积。

处理方法:解体切割器组件,检查确认切割腔室各部件无磨损,更换新的刀头,并将切割器组件重新回装至切割工具模块上。为确保切割器刀头使用的可靠性,在每完成12根钚探测器切割后,更换刀头,

这样可以避免刀头在使用过程中的疲劳破损。从实际工作应用来看,刀头定期更换可以避免其在使用过程中的疲劳破损。

(3) 钚探测器在出堆过程中,切割器组件突然移位。切割器组件与切割工具模块的连接方式为销连接,若连接不牢靠,钚探测器在出堆过程中,气动控制系统震动会导致切割器组件移位。切割器刀头偏离原位置,无法切割钚探测器,但橡胶滚轮仍能将钚探测器传送到切割腔室,在切割腔室内堆积^[2]。

处理方法:将切割器组件从切割工具模块上拆除,检查确认切割腔室各部件无磨损,并将切割器组件重新定位、安装至切割工具模块上。同时,为避免后续工作中钚探测器在出堆过程中切割器组件突然移位,维修规程中已明确规定,切割器组件在安装至切割工具模块上后,需检查确认切割器组件定位牢靠,同时对销子的状态进行他检确认。经实际工作验证,该维修方法可以避免钚探测器出堆过程中切割器组件突然移位。

若钚探测器已被切割至高剂量区域,人员无法接近工具进行故障处理,则直接打开切割器和橡胶滚轮转动气源,使切割器和橡胶滚轮继续转动,将钚探测器完全卷入切割腔室内。人员快速将切割工具模块从气动控制系统上拆除存放,更换备用切割工具模块,继续开展钚探测器出堆工作。

3.2 第二类故障原因分析及处理

3.2.1 故障现象描述

钚探测器在出堆切割过程中,通过显示装置发现切割器组件的刀头仍在转动,但钚探测器无法被传送到切割腔室。此时气动控制系统其他部件也会有相应的异常显示,包括:显示装置显示钚探测器无法继续被切割,橡胶滚轮停止转动,颗粒麦克风组件显示在屏蔽容器入口管上无钚探测器颗粒流动,剂量计显示切割工具附近的剂量率异常等。

3.2.2 故障原因分析及处理

钚探测器在出堆过程中,显示装置显示切割器组件仍在转动,但钚探测器无法被传送到切割腔室,说明切割器组件无异常,橡胶滚轮传送钚探测器至切割腔室的过程存在异常,此时需保证气动控制系统主气源继续供气,真空泵持续供气,断开切割工具气源,切割器组件和橡胶滚轮停止工作。其故障原因分析及处理如下:

(1) 反应堆厂房厂用压空用户数量太多,会导

致气源被分散, 气动控制系统主气源压力不能满足切割装置动作的使用要求。橡胶滚轮将钚探测器传送到切割腔室, 依靠主动轮和从动轮之间的摩擦力, 若主源压力低于 700kPa, 则橡胶滚轮无法正常转动, 也无法将钚探测器传送到切割腔室。

处理方法: 为确保钚探测器出堆的用气量, 需在工作期间减少反应堆厂房厂用压空的用户数量, 优化工作时间。将钚探测器出堆的工作时间安排在其他工作组修整期间, 比如吃饭期间, 这样就可以减少反应堆厂房厂用压空的用户数量, 同时可以降低人员清场的工作压力。经实际工作验证, 该检修方法是有效的。

(2) 橡胶滚轮的主动轮或从动轮存在磨损。橡胶滚轮将钚探测器传送到切割腔室, 依靠主动轮和从动轮之间的摩擦力。橡胶滚轮在使用过程中存在磨损, 会导致滚轮间的摩擦力不足, 无法传送钚探测器。

处理方法: 解体切割工具模块, 更换橡胶滚轮。同时, 为避免钚探测器在出堆过程中因橡胶滚轮间的摩擦力不足导致钚探测器出堆异常, 在每完成 12 根钚探测器切割后, 对橡胶滚轮进行更换, 以保证橡胶滚轮在使用期间的可靠性。经实际工作验证, 定期更换橡胶滚轮的方法可以有效地避免橡胶滚轮故障。

3.3 第三类故障原因分析及处理

3.3.1 故障现象描述

钚探测器被切割成小颗粒后, 通过真空系统将颗粒吸至储存罐中。真空系统由屏蔽容器入口管、屏蔽容器出口管和真空泵组成。钚探测器在出堆过程中, 真空系统故障后, 通过控制操作台发现切割腔室内的真空度逐渐降低至 0 或真空度突然消失^[2]。气动控制系统其他部件也会有相应的异常显示, 包括: 显示装置显示钚探测器颗粒在切割腔室内堆积, 颗粒麦克风组件显示屏蔽容器入口管上钚探测器颗粒流动减小或停止, 剂量计显示切割工具附近的剂量率异常。

3.3.2 故障原因分析及处理

真空系统中的真空泵、屏蔽容器入口管、屏蔽容器出口管等部件存在异常, 都会导致真空系统故障, 钚探测器颗粒无法被吸入至储存罐中。此时需保证气动控制系统主气源继续供气, 真空泵持续供气, 断开切割工具气源, 切割器组件和橡胶滚轮停止工作。其故障原因分析及处理如下:

(1) 真空泵故障。真空泵中的滤膜破损会导

致真空系统被破坏, 切割腔室真空度低于 30Torr (1Torr=133.3224Pa), 钚探测器颗粒无法被吸入至储存罐中。

处理方法: 解体真空泵, 检查滤膜等易损部件, 若有破损则进行更换。在打开真空泵气源时, 需对切割腔室真空度进行检查确认, 真空度高于 30Torr, 才可开展钚探测器切割工作, 若真空度不足, 则需检查真空泵是否存在故障。

(2) 屏蔽容器入口管或出口管异常。屏蔽容器入口管和出口管与屏蔽容器连接后的密封方式为密封圈密封, 若未安装到位或有弯折破损, 则会导致真空系统被破坏, 真空系统故障, 钚探测器颗粒无法被吸入至储存罐中。

处理方法: 若接头未安装到位, 则将屏蔽容器入口管和出口管接头从屏蔽容器内拔出, 检查密封圈有无破损, 若有破损则更换新的密封圈, 并重新安装接头至屏蔽容器上。入口管和出口管与屏蔽容器连接到位后, 需将接头上锁, 这也是对接头是否安装到位进行验证。经实际工作验证, 该方法是有用的。若屏蔽容器入口管和出口管有弯折破损, 则需进行更换。为确保入口管和出口管在使用期间的可靠性, 在每完成 12 根钚探测器后更换入口管, 在每完成 36 根钚探测器后更换出口管。经过实际工作验证, 定期更换入口管和出口管的检修方法是有效的。

(3) 观察窗玻璃的弹性垫片安装位置有误。弹性垫片应安装在观察窗玻璃与切割工具模块之间, 若安装在观察窗固定螺钉与观察窗玻璃之间, 会导致观察窗与切割工具模块紧密贴合, 切割腔室与外界无法形成压差, 导致切割腔室真空度无法满足超过 30Torr 的使用要求, 钚探测器颗粒无法被完全吸入至储存罐中。

处理方法: 将观察窗从切割工具模块上拆除, 重新调整弹性垫片的位置。已在维修规程中明确规定弹性垫片的安装方法, 且在安装时使用防人因失误工具进行他检确认。经实际工作验证, 该方法是有用的。

4 结语

本文总结了 3 类典型气动控制系统故障导致钚探测器出堆异常的现象, 并系统分析了故障原因及处理方法, 如表 1 所示。根据上文的分析, 在钚探测器出堆过程中气动控制系统故障发生后, 可以快速、准确地对气动控制系统故障原因进行定位, 并对故

表 1 钷探测器出堆异常的典型故障原因分析及处理方法对照表

典型故障现象	原因分析	处理方法
切割器组件无法切割，但钷探测器仍被传送至切割腔室	手动将钷探测器装入橡胶滚轮时，钷探测器弯曲，未调直	切除钷探测器弯曲部分，重新执行切割工具模块检查和钷探测器装入橡胶滚轮
	切割器组件的刀头刀刃有破损或断裂	解体切割器组件并更换刀头
	切割器组件突然移位	移除切割器组件并重新安装
切割器组件仍在转动，但钷探测器无法被传送至切割腔室	主气源压力不足	钷探测器出堆期间，减少厂用压空用户数量
	橡胶滚轮有磨损或摩擦力下降	解体切割工具模块并更换橡胶滚轮
真空系统故障，钷探测器颗粒无法被吸入至储存罐中	真空泵故障	解体真空泵，更换有破损部件
	屏蔽容器入口管或出口管未安装到位	检查并重新安装入口管和出口管，并确认能够上锁
	观察窗弹性垫片安装位置有误	重新调整弹性垫片的位置
	屏蔽容器入口管或出口管有破损或弯折	更换有缺陷的管段

障部件进行检修，故障定位时间明显降低，降低了大修期间因钷探测器出堆异常导致反应堆厂房检修时间延长的风险。

参考文献：

[1] 毕光文，汤春桃，杨波．钷自给能探测器中子响应计算方

法[J]．核技术，2017，40(06)：93-98.
[2] 汤仲鸣，李树成，胡铸萱．γ 辐射对堆芯自给能探测器探测性能影响研究[J]．核电子学与探测技术，2017，37(04)：355-358.

作者简介：于群利（1992.10-），男，汉族，山东威海人，本科，工程师，研究方向：电站机械设备。

