

核反应堆流量旁通板拆除策略及专用工装设计

陆少威, 戚宏昶, 范伟丰, 聂文哲, 何子健

(中核核电运行管理有限公司, 浙江 嘉兴 314300)

摘要: 随着核反应堆机组的持续运行, 堆内构件等一回路设备部件逐渐老化, 关键重要设备可靠性降低, 需对设备进行维修作业。由于核技术的特殊性, 反应堆一旦启用, 堆内构件等一回路设备具有高放射性, 必须使用特殊的维修策略及专用工装进行维修处理。本文针对压水堆核电站现场, 通过风险分析制定高放射性环境下的维修策略, 设计并制作水下远距离操作专用工装, 并成功应用于核电维修现场。堆内构件流量旁通板拆除工作的成功实施验证了本文维修策略的合理性及专用工装的可靠性, 为核电站高放射性环境下的维修技术提供了经验和借鉴。

关键词: 高放射性环境; 维修策略; 水下远距离操作; 专用工装

中图分类号: TL387

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2021)S1-0358-06

doi: 10. 7538/yzk. 2021. zhuankan. 0131

Design of Special Tool and Removal Strategy of Flow By-pass Plate of Reactor Inner Component

LU Shaowei, QI Hongcang, FAN Weifeng, NIE Wenzhe, HE Zijian

(CNNP Nuclear Power Operations Management Co., Ltd., Jiaxing 314300, China)

Abstract: With the continuous operation of nuclear reactor, primary equipment and components such as internal components of the reactor gradually aging, and the reliability of key important equipment decreases, so it is necessary to replace or repair the relevant parts of the equipment. Due to the particularity of nuclear technology, once the reactor is activated, the equipment of the reactor internal components is highly radioactive, and special maintenance strategies and tools must be used for maintenance treatment. In this paper, combining with the pressurized water reactor nuclear power plant maintenance site, through systematic and comprehensive risk analysis for high radioactive environment maintenance strategy, special tools for underwater long-distance operation were designed and manufactured, which was successfully applied to the nuclear power maintenance site. The successful removal of the flow by-pass plate of the reactor component verifies the rationality of this maintenance strategy and the reliability of the special tools for underwater long-distance operation, which provides experience and reference for the maintenance technology of nuclear power plant in high radioactive environment.

Key words: high radioactive environment; maintenance strategy; underwater long-distance operation; special tool

由于核的特殊性,核燃料可控链式裂变反应一旦启用将产生大量裂变产物,反应堆堆内构件、一回路管道/设备、腐蚀产物等受中子辐照形成活化产物,具有高放射性^[1-2]。随着机组持续运行,反应堆压力容器高温、高压、振动、水流冲击工况下的堆内构件等零部件逐渐老化往往突发设备故障,可能造成设备损坏、非计划停机停堆或机组提前退役等严重后果。

苛刻恶劣的高放射性环境下的维修技术属于核电站特种维修技术领域,需采用独特的技术、工具、管理和作业完成对象的修复检修工作。特种维修过程中一旦出现异常,需迅速组建维修力量(人员组织、工艺设计、设备研制、工具调试、模拟实验等),在严密的设计指导下,采用系列特有装备来完成特定对象的修复并使其符合原有设计标准。

国内某核电机组采用 M310 堆型设计的二代加百万级压水堆机组,每个机组的反应堆压力容器上部堆内构件上设计安装 61 组控制棒驱动轴,首个燃料循环运行期间因堆芯功率设计要求只需使用 57 组控制棒驱动轴,其余 4 个未安装驱动轴的上部对内构件导向套筒组件上安装了 4 块流量旁通板。在机组首次换料大修中,需拆除这 4 块流量旁通板并安装新驱动轴。该项目是 M310 百万级核电机组在首个燃料循环后继续运行的必要条件之一。

该项目属于高放射性环境下水下特种维修作业,所使用的工器具需根据现场环境进行特殊设计及制造。在国外,美国西屋、法国 AREVA 等公司具备实施该项目的能力和专用工装设计能力,但对中方技术保密。据目前所知,他们尚未研发针对本项目特定维修对象的维修工艺和专用工装。在国内,中广核旗下的同类型电站已进行过该项目的现场实施,但使用的单个工器具功能较为单一、可靠性较低,维修工艺相对复杂、维修耗时较长。

本文针对压水堆核电站现场,通过风险分析制定高放射性环境下的维修策略,设计并制作水下远距离操作专用工装用于核电维修现场。

1 流量旁通板拆除策略的设计

1.1 现场工况分析

机组运行期间,核反应堆上部堆内构件位

于反应堆压力容器内部;机组换料大修期间,需将上部堆内构件吊运至换料水池上部堆内构件存放架上。流量旁通板如图 1 所示。流量旁通板通过两颗内六角螺栓固定在上部堆内构件的导向筒组件上,内六角螺栓通过点焊在流量旁通板上的胀紧式防松帽锁紧固定。经过 1 个换料大修的运行,反应堆堆内构件、流量旁通板和内六角螺栓均带有高放射性。

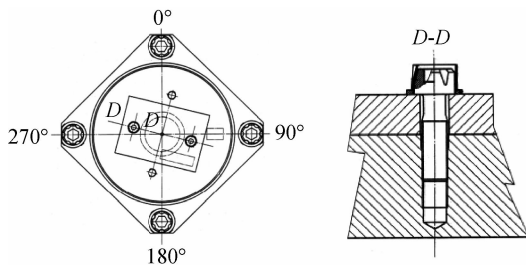


图 1 流量旁通板示意图

Fig. 1 Scheme of flow by-pass plate

1.2 维修策略设计

由于流量旁通板位于上部堆内构件导向筒组件正上方,现场作业位置可在反应堆堆芯或上部堆内构件存放架上实施。如果在堆芯区域实施,一方面存在异物进入堆芯的风险,另一方面电站无法进入低水位维修状态直接影响整个换料大修的工期。考虑到核安全性和电厂经济效益,该项工作计划在上部堆内构件就位于存放架进行实施。考虑到该项工作作为电站核岛次主线,维修过程中若出现异常极可能影响大修工期,所以项目组需设计可靠、轻便、高效的专用工装,制定全面可行的维修工艺及异常工况下的应急预案。

流量旁通板的辐射水平经测量、分析、评估可通过硼酸水进行辐射屏蔽,项目组拟利用装卸料机作为维修操作平台,此时作业人员距离维修部位约 8 m,维修人员站在操作平台上通过专用工具、水下视频系统、水下照明系统进行水下远距离维修活动。由于反应堆堆内构件的维修质量直接关系到机组核安全,所以所有水下维修活动必须全程处于可视、可控范围。

1) 前期准备

高放射性环境下的特种维修作业需在严密的设计指导下进行,现场施工前须进行充分的

风险分析及讨论,编写必要的技术文件、设计制作专用工装、准备相应的应急预案等^[3],具体如下。

(1) 制定完善的维修工艺,根据现场维修工况、技术要求、设计文件、检修条件等,开发用于指导现场维修工作的维修方法或工艺流程;(2) 编写详细的现场维修规程,根据设备维修工艺、技术指标等要求,指导现场维修活动的开展;(3) 编写维修应急预案,根据现场工况及维修实施过程中可能出现的异常工况,编写应急处理流程及处理方案;(4) 专用工装的设计、加工、模拟试验,设计、制造满足现场维修实施的专用工装及应急设备,通过模拟试验,验证其可靠性、可行性及有效性;(5) 完成应急设备的组装、调试,根据维修应急预案,完成应急设备的组装、调试等工作,将设备置于热备用状态;(6) 完成辅助系统的准备工作,如架设水下视频系统、安装水下照明系统等。

2) 现场准备工作

现场维修前的准备工作必须严格按照维修规程进行准备,具体如下:(1) 堆内构件应处于堆芯或堆内构件存放架上;(2) 现场操作平台的移动范围需满足现场维修需求;(3) 反应堆厂房环吊可用;(4) 换料水池水位满足堆内构件的辐射屏蔽需求;(5) 专用工具需完成组装、调试工作;(6) 专用工具需在现场就位,如废物容器等应放置在指定的位置;(7) 辅助系统应现场就位,如水下照明系统应保证水下维修部位的光照强度、水下视频系统应保证所有水下操作均在可视、可控范围内;(8) 应急措施所需的设备已现场就位,如水下加工设备^[4]、水下异物打捞工具等。

3) 现场维修步骤

根据流量旁通板的安装特点,制定以下拆除步骤:(1) 螺栓防松破坏专用工装(专用工装一)在水下远距离精确定位;(2) 螺栓防松破坏专用工装(专用工装一)进行螺栓防松结构破坏操作,若操作成功则进入下一步骤,否则利用水下电火花加工技术去除螺栓防松结构;(3) 螺栓旋拧专用工装(专用工装二)在水下远距离精确定位;(4) 螺栓旋拧专用工装(专用工装二)进行螺栓旋拧操作,若操作成功则进入下一步骤,否则利用水下电火花加工技术去除螺栓结

构;(5) 螺栓夹持/转运工装(专用工装三)在水下远距离精确定位;(6) 螺栓夹持/转运工装(专用工装三)进行螺栓的夹持、转运操作,若操作成功则进入下一步骤,否则利用水下吸尘、异物打捞等设备进行螺栓的夹持、转运工作;(7) 将螺栓转运至废物容器或者指定区域;(8) 流量旁通板夹持/专用工装(专用工装四)在水下远距离精确定位;(9) 流量旁通板夹持/转移专用工装(专用工装四)夹持流量旁通板并将其转运至废物容器或指定区域,若操作成功则进入下一步,否则采用异物打捞设备进行流量旁通板的夹持、转运工作;(10) 将拆除的零部件及放射性废物根据核电站放射性废物管理要求进行转运贮存;(11) 上述维修步骤完成后,利用水下照明系统、水下视频系统等设备对维修质量进行视频检查,并确认维修过程无设备损坏、无异物产生等情况。

该类维修通常具有时间紧、维修复杂且作业难度大等特点,若专用工装集成多种功能,可提高工作效率、缩短作业时间。通过对上述维修步骤涉及的专用工装分析优化,项目组决定开发一体化螺栓拆除专用工装,涵盖专用工装一、二、三的所有功能,即同一工装可实现水下精确定位、防松结构破坏、螺栓旋拧/转运等功能。

根据上述维修策略的设计,制定以下维修工艺流程,如图2所示。

2 流量旁通板拆除专用工装

根据上述维修策略,需开发两类专用工装:一类为多功能一体化螺栓拆除专用工装,集成实现水下精确定位、防松结构破坏、螺栓旋拧/转运等功能;另一类为流量旁通板夹持/转运专用工装。

2.1 多功能一体化螺栓拆除专用工装^[5]

1) 专用工装需具备的功能/条件

根据上述现场工况分析,结合维修策略,多功能一体化螺栓拆除专用工装需具备以下功能/条件:(1) 具备耐高辐照能力;(2) 满足在 ≥ 8 m水深的环境下实现工具的所有功能/动作;(3) 可实现远距离水下精确定位;(4) 具备胀紧式防松远距离破坏能力;(5) 可实现远距离螺栓旋拧/拆除功能;(6) 可实现远距离螺栓

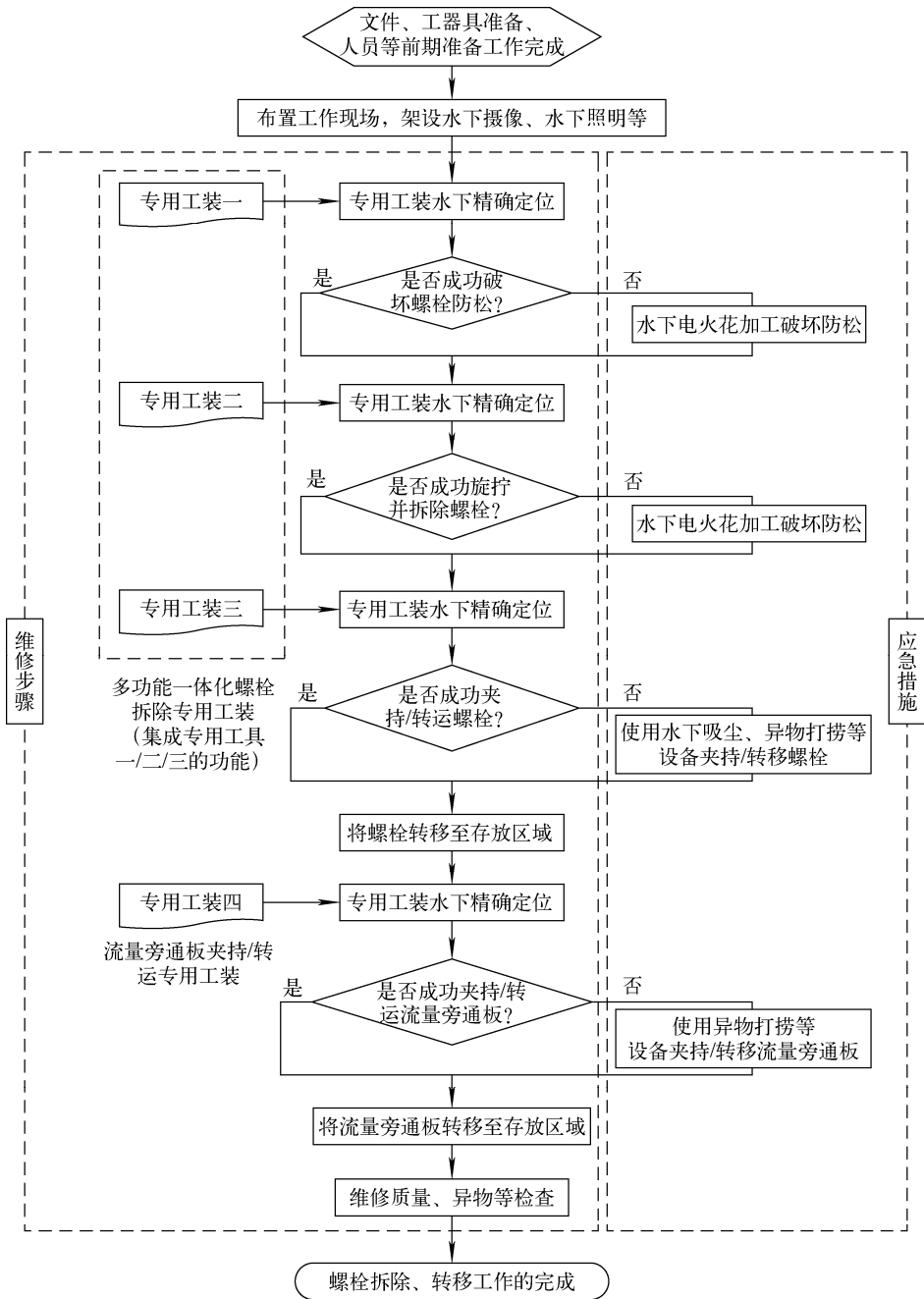


图2 维修工艺流程图

Fig. 2 Flow chart of maintenance process

夹持功能；(7) 可实现远距离螺栓脱开功能。

2) 专用工装设计

专用工装需具备耐高辐照能力，且满足在 ≥ 8 m 水深的实现所有功能/动作，所以专用工装需考虑利用机械结构实现水下功能动作。图3为多功能一体化螺栓拆除专用工装示意图。

专用工装主要由主体、外套、专用头部、螺栓

脱开废物容器4部分组成，工具主要材料为不锈钢。专用工装主体设计与长杆工具头部匹配的接口，通过快速锁定销将使主体和长杆连接在一起，长杆长度根据现场实际需求进行调整。

专用工装外套采用不锈钢材料，其上部径向方向通过定位螺钉安装在外套上，可实现在主体轴向方向上的移动，补偿螺栓在旋拧过程中的位移量。

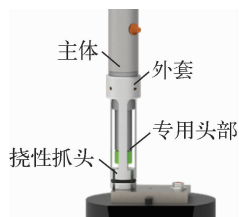


图3 多功能一体化螺栓拆除专用工装

Fig. 3 Multi-function integrated bolt dismantling special tool

外套下部设计挠性抓手,用于抓取螺栓。挠性抓手外部开有环槽,环槽内安装耐辐照 O 型圈补偿挠性抓手的夹持力,增加抓手和螺栓之间的夹持力,确保螺栓的可靠抓取、夹持。挠性抓手下部设计有导向结构,可实现远距离水下精确定位的功能。

专用工装头部固定在主体上可根据现场需求进行更换,其头部进行倒角设计,便于专用头部在水下实现螺栓的定位导向功能。

图4为暂存拆卸下来的高放射性废物容器,用于配合多功能一体化螺栓拆除专用工具,实现螺栓的脱开及废物暂存。废物容器由容器主体、挡板、扭转弹簧、销等组成。废物容器的两块挡板通过销安装在废物容器上,两块挡板之间的距离略小于螺栓头部直径。在扭转弹簧和限位作用下,挡板正常情况下保持水平状态;当专用工装将螺栓头部插入废物容器两块挡板中间,下插力大于扭转弹簧力则挡板向下翻转。此时上提专用工装,在挡板的夹持力作用下,螺栓与专用工装脱开并落入废物容器中。图5为高放射性废物在废物容器中脱开的操作示意图。螺栓脱开废物容器在现场维修作业开展前,需提前放置于换料水池中。

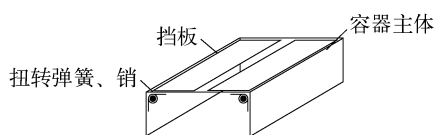


图4 废物容器示意图

Fig. 4 Scheme of waste container

2.2 流量旁通板夹持/转运专用工装^[6]

1) 专用工装需具备的功能/条件

根据上述现场工况结合维修策略,流量旁

通板夹持/转运专用工装需具备以下功能/条件:(1) 具备耐高辐照能力;(2) 满足在 ≥ 8 m 水深的环境下实现工具的所有功能/动作;(3) 可实现远距离水下精确定位;(4) 可实现流量旁通板远距离夹持的功能;(5) 可实现流量旁通板远距离转运的功能;(6) 可实现流量旁通板远距离脱开的功能。

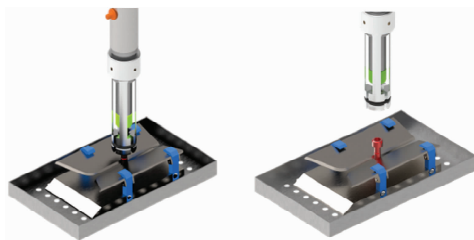


图5 操作示意图

Fig. 5 Scheme of operation

2) 专用工装设计

专用工装需具备耐高辐照能力,且满足在 ≥ 8 m 水深的环境下实现所有功能/动作,所以专用工装考虑利用气缸结合机械结构实现水下功能/动作。

图6为夹持/转运专用工装示意图,主要由底板、气缸、导向块、抓爪、连接柄5部分组成,主要材料为不锈钢。专用工装的连接柄设计和长杆工具头部相匹配的接口,通过快速锁定销将连接柄和长杆连接在一起,长杆的长度根据现场实际需求调整。

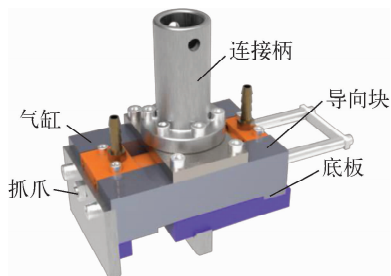


图6 夹持/转运专用工装

Fig. 6 Special tool for holding/transferring

抓爪通过两根导向杆固定在导向块上,导向杆两端有限位设计可实现抓爪在导向杆轴向方向的定行程直线运动。抓爪夹持面进行滚花处理,从而增加夹持摩擦力。抓爪下端面设计

有导向结构,可实现远距离水下精确定位。

气缸上下缸体通过两根气管与气源连接,利用两位五通阀可实现气缸芯杆的前后动作。气缸芯杆与抓爪可靠相连,从而带动抓爪实现物项的夹持、脱开功能。专用工装可通过维修平台的移动实现水下物项的转运功能。

3 流量旁通板拆除策略可行性及专用工装可靠性验证

为保证现场维修工作的顺利开展,项目组在车间模拟维修现场操作环境,对流量旁通板拆除流程进行干式试验,通过数十次试验验证了流量旁通板拆除策略的可行性及合理性,同时积累了维修人员使用专用工装在水下远距离操作的经验。

专用工装的可靠性直接决定了维修工作的成功与否。项目组通过对专用工装挠性抓头的加工材料/后处理工艺、O型圈尺寸/硬度、驱动气压等方面进行了不同参数的分组测试,通过测试对比得出最佳的参数组合。通过数十次的现场试验,验证了专用工装的可靠性和高效性。

4 堆内构件流量旁通板拆除策略及专用工装应用

维修人员完成维修前的现场准备布置、工器具准备、人员安排等工作后,根据维修规程开展堆内构件流量旁通板拆除工作,整个维修过程安全、顺利、可控、高效,未启动应急预案,图7为现场实施情况。本文描述的核反应堆堆内构件流量旁通板水下远距离拆除策略及专用工装均已成功应用于在役电站。现场专用工装各功能正常,施工工艺满足现场需求,现场实施工作效率高、维修效果令人满意。

5 结论

本文以 M310 堆型压水堆核电机组维修实

际需求出发,通过对维修工况、设备结构的分析、评估,制定相应的维修工艺,设计一系列专用工装及设备。流量旁通板拆除策略经过现场应用,验证了策略的有效性、可实施性和合理性。堆内构件流量旁通板拆除专用工装具备高放射性环境水下远距离精确定位、防松破坏、螺栓拆除、螺栓夹持/转移、流量旁通板夹持/转移的功能,具有结构简单、操作便捷、可靠性高等优点。该项目的成功设计与应用解决了核电站实际维修需求,为核电站高放射性环境下的维修技术提供了经验和借鉴。



图7 现场实施情况

Fig. 7 Field implementation

参考文献:

- [1] 马明泽. CP300 核电厂一回路系统/设备及运行[M]. 北京:原子能出版社,2011.
- [2] 广东核电培训中心. 900 MW 压水堆核电站系统与设备[M]. 北京:原子能出版社,2007.
- [3] 何少华. 压水堆核电厂反应堆堆内构件水下维修技术条件[S]. 北京:中国核工业集团公司,2017.
- [4] 刘宇,张生芳. 微细/常规电火花加工中的相关理论与技术研究[M]. 北京:科学出版社,2020.
- [5] 范伟丰,陆少威,何家欢,等. 一种远距离螺栓拆除和自动抓取工具及配套废物容器:中国,ZL201921926381.0[P]. 2021-01-05.
- [6] 朱彩军,陆少威,戚宏昶,等. 一种用于高放射性环境水下远距离定位抓取更换工具:中国,ZL201721815018.2[P]. 2018-10-23.