

一体化小型压水堆关键设备维修可达性探讨

陈雯, 江虹, 尹芹

中国广核集团有限公司苏州热工研究院, 广东深圳, 518028

摘要: 一体化小型压水堆设备布置紧凑, 空间狭小, 维修可达性一直是设计、运维阶段人们关注的重点和难点, 但业内没有定性的方法来有效地评价维修可达性。可维修性优的产品在保证可靠性的同时, 还能保证维修所需资源(时间、人力、物力、费用等)达到最低限度, 在保证维修安全的前提下, 保证维修经济的最优化。文中基于小型压水堆一体化的设计特点, 分析关键设备的维修需求, 提出维修可达性的评价指标。

关键词: 一体化; 小型堆; 维修可达性

中图分类号: TL413 **文献标志码:** A

Maintenance Accessibility for Key Equipments in Integrated Small Pressurized Water Reactors

Chen Wen, Jiang Hong, Yin Qin

CGN/Suzhou Thermal Power Research Institute, ShenZhen, Guangdong, 518028, China

Abstract: Integrated small pressurized water reactors are with compact layout of equipment and with narrow space, and its maintenance accessibility has always been a challenge in the design and operation period. But there is no qualitative method for the effective evaluation of the maintenance accessibility. Products with good maintainability not only ensure the reliability, but also ensure the minimum maintenance required resources (such as time, manpower, material and costs), and thus ensure the optimized maintenance economy under the premise of safe maintenance. Based on the design features of the integrated small pressurized water reactors, this paper analyzes the key equipment maintenance requirements, and presents the maintenance accessibility evaluation index.

Key words: Integrated, Small reactors, Maintenance accessibility

0 引言

小型堆是在传统压水堆基础上发展起来的新概念设计, 在技术和经济上特别适用于中小规模核电站, 具有固有安全性好、自然循环能力高、系统简单、布置紧凑等特点。由于一体化的设计布局特点, 设备布置紧凑, 空间狭小, 维修实施难, 又由于目前国际上可供参考的运维经验有限, 国内尚无专门的法律法规监管, 所以针对小型堆设备的可维修性一直是研发一体化小型堆关注的重点。

1 一体化设计维修需求

一体化小型堆采用模块化布置, 采用全非能

动安全系统, 具有长换料周期、机组可用率高、应用灵活等主要特点。一体化小型堆具体设计参数详见表 1。

1.1 一体化小型堆压力容器设计维修需求

一体化小型堆压力容器(PV)采用一体化结构, 其尺寸比大型压水堆 PV 小, 但结构形式与大型压水堆相同, 且其设计参数和运行参数基本相同(表 2), 所以, PV 的维修/在役检查需求可以参考二代/三代大型压水堆的经验(表 3)。

1.2 小型堆直流蒸汽发生器设计维修需求

一体化小型堆采用螺旋管式直流蒸汽发生器(OTSG), 热循环效率高, 能产生过热蒸汽。设计上与大型堆不同, 采用模块化设计, 便于在传

表 1 一体化小型堆主要设计指标
Table 1 Main Design Index of Small Reactors

内容	设计指标
设计寿命/a	60
换料周期/月	30
堆芯热功率/MWt	200
净电功率/MWe	60
设计可用率/%	95
电厂效率/%	~30
堆芯损坏频率(CDF)/(堆·年) ⁻¹	<1.0×10 ⁻⁷
放射性早期大量释放频率(LERF)/(堆·年) ⁻¹	<1.0×10 ⁻⁸
非计划自动停堆次数/次·年 ⁻¹	<1
建造周期/月	36
职业照射剂量/Sv·(堆·年) ⁻¹	<0.5

表 2 PV 参数对比
Table 2 Comparison of Pressure Vessel Design Index

内容	小型堆指标	大型堆指标(CPR1000)
堆芯段筒体内径/mm	2200	3989
总高/mm	7200(不含上下管座)	13208(包含顶盖上部管座和堆内测量管座)
设计温度/	343.3	343
设计压力/MPa	17.23	17.23
运行压力/MPa	15.5	15.5
堆芯段筒体最小壁厚/mm	110	200

表 3 一体化小型堆 PV 维修/在役检查需求
Table 3 Pressure Vessel Maintenance/ Inspection Service Requirements for Integrated Small Reactors

被检部件	维修/在役检查内容	维修窗口
法兰面/螺栓孔	目视检查	RCD
大盖/上法兰/下法兰	外部腐蚀检查	RCD
上部构件	全面检查	RCD
测量定位系统	反应堆堆内构件测量定位系统的检查、维护	RCD
内部堆焊层/法兰/螺栓孔等	超声和视频目视检查	RCD
环焊缝/管嘴焊缝	超声检查	RCD
内部堆焊层贯穿件与顶盖的焊缝	(视频)目视检测	RCD
控制棒驱动机构密封壳焊缝	(视频)目视检查 超声或涡流检测(环缝)	RCD
指套管	涡流/目视检查	RCD
测量定位系统	反应堆堆内构件测量定位系统的检查、维护	RCD

注：RCD—反应堆完全卸料模式

热管破裂时进行分组隔离和检漏^[1]。OTSG 为非传统的管板+U 形管(直管)结构,主要由封头、

筒体、螺旋换热单元、导流套筒组件及给水组件等构成。

在二/三代大型堆的维修经验基础上,结合小堆设备的特点,OTSG 相关维修/在役检查项目如表 4 所示。

表 4 OTSG 维修/在役检查需求
Table 4 OTSG Maintenance/Inspection Requirements

被检部件	维修/在役检查内容	维修窗口	备注
二次侧外部	目视检查 VT	MCS	适用
二次侧管板	泥渣冲洗前后清洁度检查	RCD	不适用
二次侧上部内部构件及焊缝	目视检查 VT	RCD	适用
整体一、二次侧	氦气查漏	RCD	适用(传热管氦检可代替 ET)
管侧	水压试验 HT	RCD	不适用
传热管	涡流探伤 ET(包括 2C25%传热管抽检和 6C100%全检)	RCD	不适用

注：MCS—反应堆维修停堆模式

1.3 小型堆稳压器设计维修需求

小型堆的稳压器与 PV 上封头是一体的。借鉴西屋公司小型堆 IRIS 稳压器设计,通过倒帽形结构将稳压器饱和水与反应堆一回路水分隔开。稳压方式为内置式自稳压。由于小型堆稳压器与大型堆设计差异较大,故其相关维修项目需要专题讨论。

1.4 小型堆主冷却剂泵设计维修需求

小型堆主泵采用屏蔽泵,主要包括水力部件(如不锈钢铸造或锻造泵体、叶轮等)、屏蔽套、石墨径向轴承、石墨双向推力轴承、带动飞轮和鼠笼感应异步屏蔽电机等。第三代核电 AP1000 主泵也采用屏蔽泵,可以借鉴^[2]。

对于 AP1000 主冷却剂泵,西屋公司表示在 60 a 设计寿命期内没有拆卸主泵以及维修的计划,但同时提出 60 a 设计寿命不能看作主泵的实际使用寿命。然而,主泵失效案例和制造/试验过程中暴露的问题,加上没有可参考的运行经验,需要考虑主泵在实际运行过程中存在维修的必要性。

2 维修可达性及评价指标

2.1 维修可达性

维修可达性是维修时接近产品不同组成单元

的难易程度,也就是接近维修部位的难易程度。维修可达性是维修定性要求中最重要的因素之一,直接影响到装备维修性的好坏。这个定义中的可达性不仅仅局限于到达故障部位,还包括能够进行维修操作的能力和可视性。因此,本文所指可达性是指维修产品时,能看到/摸到产品的不同组成部分并能操作维修工具的相对难易程度。

2.2 维修可达性评价指标

若设备部件可见、可接触、容易达到维修部位,同时具有为检查、修理或更换所需要的空间,并且不需要多少拆装、搬动,维修人员在正常姿态下就能操作,称为维修可达性好。

基于二代大型压水堆 CPR1000 的维修经验,维修活动的可达性评价指标可分为:接触(实体)可达性、可视性和操作空间。

(1) 接触(实体)可达性:指维修人员在维修过程中到达待维修部件的性能。零部件应在不拆卸其他零件的情况下能直接接触到;故障率高、更换时间长的零部件,应放在可达性好的部位;对于大的、重的零部件,布局时应考虑尽可能放置在开口部分的近旁。

(2) 可视性:维修部位在维修人员视线可以达到的范围内,使维修人员能方便地进行维修。如:在拆下盖板时,要能以正常的视角看到所有零部件;装配零部件时,要使零部件上的附件都能看得清而不受其他零部件遮蔽,也不受维修人员的手和工具遮蔽等。

(3) 操作空间:指被拆装零部件或相应工具的操作活动空间大小,以及是否与装备结构发生干涉等。如:扳手至少有 60 度的转动空间才可以完成相应的维修任务。

维修可达性的评价指标确定:首先应根据安全性和可靠性要求确定待维修部件及维修方式、维修内容,建立维修需求清单;然后根据维修需求,确定所需要的维修条件(包括运输通道条件、场地布置条件、辐射防护条件、人员操作条件、维修工具条件等),从而对设计方案提出接触可达性、可视性、操作空间的指标要求。

3 一体化小型堆关键设备维修可达性

3.1 关键设备维修/在役检查可达性评价

依据小型堆核电站关键设备的维修需求,根据 CPR1000 机组的维修/在役检查经验,通过判

断可达性评价指标(接触可达性、可视性、操作空间)来评价维修可达性水平(表 5、表 6),为新型小型堆一体化设计提出设计要求,提供设计依据。表 5、表 6 中“Y”表示设计时需要满足的可达性指标,“N”表示设计时可以不考虑的可达性指标。

对于现有设计不能满足可达性指标时,可以从以下几个方面优化设计:

(1) 接触可达性:对于接触可达性不满足的维修项目,应考虑使用特殊仪器工具抵达维修部位,或考虑在机组换料大修时设备吊出的可能性。尽量安排在特定的维修平台或人员可以接触到的地方进行检修活动。设计时应考虑使用特殊仪器所需的场地空间和操作空间;若需要吊出设备,则需考虑设备吊耳等的设置。

(2) 可视性:对于可视性不满足的维修项目,与接触可达性类似。

(3) 操作空间:对于操作空间不满足的维修项目,首先应考虑设备吊出的可能性;对于不可吊出的设备,应优化压力容器内空间布局。设计时应充分考虑设备拆装/放置、工具使用/拖运、人员操作、所需的空间和通道^[3]。

对于 PV 的维修/在役检查可达性需求,需要满足人员可达性、人员可视性和维修操作空间的要求,由于 PV 的维修/在役检查都是在大修期间一回路排空水的 RCD 模式下进行,故这些条件都能满足。

对于 OTSG,由于其传热管为螺旋管,螺旋半径小,设备涡流探头无法通过,故大堆传热管泄漏检查(如传热管涡流检查 ET)不满足操作空间的要求,不可实施。又由于其为螺旋管,管内介质为主给水和过热蒸汽,壳侧流动一回路冷却剂,一、二次侧为全压设计,所以,二次侧管板的清洁度检查和管侧水压试验等项目不适用,需要专题讨论。

3.2 主冷却剂泵维修可达性评价

屏蔽式主冷却泵的维修可达性主要在于部件拆卸、吊装与运输过程的可行性。主冷却泵可拆卸部件现场拆卸过程包括:主冷却泵疏水、附属设备移除、外部热交换器移除、可拆卸部件从泵壳移除、水力部件屏蔽、核岛内吊装、厂内翻转与运输。主泵疏水包括外部热交换器一次侧、二次侧疏水以及转子腔和定子夹套换热器疏水。附

表 5 PV 维修项目可达性评价指标要求
Table 5 Requirements on Evaluation Index for PV Maintenance Accessibility

被检部件	维修/在役检查	需可达区域	维修窗口	接触可达	可视性	操作空间	评价
法兰面/螺栓孔	目视检查	法兰上表面	RCD	N	Y	N	
大盖/上法兰/下法兰	外部腐蚀检查	顶盖外部	RCD	Y	Y	Y	
上部构件	全面检查	外部	RCD	Y	Y	Y	
测量定位系统	反应堆堆内构件测量定位系统的检查、维护	内部	RCD	Y	Y	Y	
内部堆焊层/法兰/螺栓孔等	超声和视频目视检查	内部	RCD	Y	Y	Y	
环焊缝/管嘴焊缝	超声检查	内部	RCD	Y	Y	Y	
内部堆焊层贯穿件与顶盖的焊缝	(视频)目视检测	内部	RCD	Y	Y	Y	
控制棒驱动机构密封壳焊缝	(视频)目视检查超声或涡流检测(环缝)	外部	RCD	Y	Y	Y	
指套管	涡流/目视检查	外部	RCD	Y	Y	Y	

表 6 OTSG 维修项目可达性评价指标要求
Table 6 Requirements on Evaluation Index for OTSG Maintenance Accessibility

被检部件	维修/在役检查	需可达区域	维修窗口	接触可达	可视性	操作空间	评价
二次侧外部	目视检查 VT	外部	MCS	N	Y	N	
二次侧管板	泥渣冲洗前后清洁度检查	二次侧内部	RCD	Y	Y	N	×
二次侧上部内部构件及焊缝	目视检查 VT	二次侧内部	RCD	N	Y	N	
整体一、二次侧	氦气查漏	外部内部充氦	RCD	Y	N	N	
管侧	水压试验	管侧	RCD	Y	N	Y	×
传热管	涡流探伤 ET	传热管内部	RCD	Y	N	Y	×

属设备包括电机接线盒的电缆和密封圈，测量仪表连接线以及定子电阻温度探测器（RTD），轴承水 RTD 等各种监测装置。外部热交换器需要拆除连接管道和热交换器。从泵壳中拆除可拆卸部件过程包括拆除主螺栓和螺母及密封环切割等，拆除后通过安装小车进行吊装运输^[4]。

小型堆反应堆厂房设计上应预留检修通道，并对吊装运输进行初步规划，设计中需考虑主泵可拆卸部件从泵壳中移除，水力部件带铅块屏蔽、吊运，在反应堆厂房内的翻转路径以及安全壳中运输路径等，使主泵拆运吊装运输具有可行性。

4 结束语

从一体化的设计特点出发，在充分借鉴大型堆维修/在役检查经验基础上，分析一体化小型堆关键设备的维修/在役检查需求；建立维修可达性

评价指标，为设备维修可达性分析、评价提供手段和方法；对维修需求进行评价优化，指导系统和布置专业设计，并提供解决途径，从而尽可能地保证设备具有良好的维修性，减小设备维修保障难度，对后续小型堆研究具有借鉴意义。

参考文献：

- [1] 李满昌, 唐传宝. 一体化压水堆发展前景[J]. 核动力工程, 1998, 19(4): 83-87.
- [2] 林诚格. 非能动安全先进压水堆核电技术[M]. 北京: 原子能出版社, 2008.
- [3] 顾培文, 方立凯, 曹克美, 等. 核电厂设备可达性研究方案探讨[J]. 核科学与技术, 2014, 2: 35-39.
- [4] 乔彦龙, 梁军, 王兆希, 等. AP1000 屏蔽式主泵维修可行性分析[J]. 核科学与技术, 2014, (2): 40-44.

(责任编辑: 孙 凯)