

华龙一号核电机组冷态功能试验过程风险及控制措施

Risk and Control Measures During Cold State Function Test of Hualong No. 1 Nuclear Power Unit

程进 黄继荣 刘鹏辉

Jin Cheng Jirong Huang Penghui Liu

中广核惠州核电有限公司 中国·广东 惠州 516000

CGN Huizhou Nuclear Power Co., Ltd., Huizhou, Guangdong, 516000, China

摘要: 冷态功能试验(以下简称CFT)是在核岛一回路主辅系统安装完成后,对反应堆冷却剂系统和相关辅助系统的高压部分进行静态水压试验。论文通过对冷态功能试验过程的风险分析,采取相应的控制措施,为后续华龙一号项目冷态功能试验相关系统设备故障排查和工期优化提供理论支持。

Abstract: Cold function test (hereinafter referred to as the CFT) is in the nuclear primary circuit advocate complementary system after the installation is completed, the reactor coolant system and related auxiliary system of high pressure parts on static hydraulic pressure test. Paper based on the risk analysis of cold function test process, take corresponding control measures, for subsequent Hualong No.1 project cold function test related system equipment troubleshooting and time limit for a project optimization to provide theoretical support.

关键词: 冷态功能试验; 一回路水压试验边界; 升压; 降压

Keywords: cold functional test; one-circuit water pressure test boundary; boost; pressure reduction

DOI: 10.12346/peti.v3i4.6422

1 引言

CFT主要目的是执行一回路水压试验,最高压力为223bar.g(1.3倍设计压力)。此外,在CFT期间还需进行一回路泄漏测量试验、主泵的首次启动和相关试验、相关核辅助系统的冷态功能试验及役前检查。为了顺利完成冷态功能试验,全面地验证一回路主系统的安装质量,必须对试验所涉及的水源、冷源、水质、压力源、电源、热源六大控制做好充分准备。

2 冷试实施

2.1 冷试准备

确保反应堆冷却剂系统(以下简称RCP)、安全注入系统(以下简称RIS)、化学容积控制系统(以下简称RCV)、应急硼化系统(以下简称RBS)、反应堆硼和水补给系统(以下简称REA)、冷却剂贮存和处理系统(以下简称TEP)、核岛排气和疏水系统(以下简称RPE)、

设备冷却水系统/重要厂用水系统(以下简称RRI/SEC)等8个主要系统可用^[1]。

确保水源,即除盐水分系统(以下简称SED)可用;气源,即仪表用压缩空气分配系统(以下简称SAR)、氮气分配系统(以下简称SGN)可用。

确保冷试期间需两路独立的电源可用,即电源系统需满足以下条件之一:

- ①主变和辅变可用;
- ②主变和B列10kV应急柴油发电机(以下简称LHQ)可用;
- ③辅变和B列10kV应急柴油发电机可用。

2.2 冷试技术控制标准

2.2.1 冷试期间一回路温度范围

一回路水压试验温度不低于压力容器的脆性转变温度RTNDT+30℃;根据GB/T 28548—2012《核电厂主回路水压试验技术导则》,一回路水压试验温度不低于材料的脆性

【作者简介】程进(1987-),男,中国广东惠州人,本科,工程师,从事电厂调试启动主线计划和商运后的电厂运营计划研究。

转变温度 RTNDT+33℃。

为进一步降低材料的脆性断裂风险，在满足上述规定的基础上，冷试期间要求 RIS/RHR 隔离后的一回路温度维持在 35℃ 以上。

为降低人员烫伤风险，一回路温度也不能太高，通常要求主设备外表面温度不超过 70℃。

2.2.2 冷试期间一回路 $\Delta P/\Delta T$ 和一回路泄漏率

①一回路温度变化速率的限值见表 1。

表 1 一回路温度变化速率

参数	限值	
	一回路温度 $\leq 70^\circ\text{C}$	一回路温度 $> 70^\circ\text{C}$
升温速率	40℃/h	
降温速率	-20℃/h	-56℃/h

②一回路压力变化速率的限值为：-4bar/min~+4bar/min；

③一回路泄漏率：总泄漏率 $\leq 230\text{L/h}$ ，不可识别的泄漏量 $\leq 50\text{L/h}$ 。

3 试验过程风险及控制措施

3.1 充水至半管水位过程

从 VCT 容积控制箱取水，启动 RCV 上充泵充水至半管水位，停泵，在 RHR 模式启动 RIS A&B 列；投运 LP 下泄，启动两台 RCV 上充泵，执行低压减压站功能试验。

风险点：电缆端接及润滑油导致的火灾、转动设备造成的机械伤害、轴承润滑不足及电机异常等造成的设备损坏。

针对该风险的预防措施：

①试验前打开泵的电机端子罩进行检查，确认接线正确牢固；

②检查泵体油路润滑系统，观察管线有无泄漏现象，地面有无油迹；

③ RCV 泵启动前确认油位正常，RIS、RCV 泵最小流量管线投用；

④启泵前进行电机绝缘值测量；

⑤在冷试相关各泵房配备干粉灭火器；

⑥启动前确认系统在线正确；

⑦泵送电前确认无自动启动信号；

⑧泵启动前预先进行充水排气，防止发生气蚀^[2]。

3.2 RCP 在抽真空状态下充

RCP 在抽真空状态下充水。执行真空泵试验、抽真空期间余热排出泵接入模式下余热排出泵的运行、半管水位功能试验及环路水位测量试验。最终一回路充水至 PZR 稳压器满水并停运真空泵，执行严重事故泄压阀可开启性验证试验。

风险点：真空泵、RIS 泵及 RCP 泵的设备损坏。

针对该风险的预防措施：

①真空泵启动前确认真空泵密封水箱水位满足要求，出口换热器临时冷却水可用，阀门在线正确；

② RIS 泵在运行中持续监视泵入口压力以及流量，同时对泵组振动加强监视，若遇异常及时停泵并查找原因。

3.3 一回路升压至 1.5bar.g

一回路升压至 1.5bar.g，进行静排气以及压力保护装置预试验；升压至 10bar.g，进行冷态水压试验期间的上充流量调节阀试验。

风险点：一回路由开口转闭口，压力突增。

针对该风险的预防措施：

①现场关闭最后一道排气阀前，主控确认上充下泄基本调节平衡；

②现场与主控热线沟通，缓慢关闭阀门，主控室关注压力波动情况。

3.4 一回路升压至 24.5bar.g

升压至 24.5bar.g 进行含气量计算。

风险点 1：升压速率超限制 4bar/min。

针对该风险的预防措施：

①优先利用低压减压站自动进行升压，并实时监视压力梯度，若自动控制不可用，根据流量平衡手动调节低压下泄；

②调节阀在进行调节时，使用脉冲操作，且考虑流量的滞后性；

③首次升压时，由于含气量较大，存在初始升压速度慢的情况。

风险点 2：排气造成的一回路压力波动。

针对该风险的预防措施：

①现场进行排气前首先与 SSE 联系，得到确认后再接操作；

②操作过程中严禁对阀门进行快速开关。

风险点 3：含气量不合格。

针对该风险的预防措施：

①冷试期间执行抽真空操作，尽可能降低一回路含气量；

②做好对压力容器顶部、主泵轴封、稳压器顶部的排气；

③若上述操作完成后，含气量仍无法满足要求，进行点动主泵动排气。

3.5 24.5bar.g 压力平台

24.5bar.g 压力平台，低压减压站切换到高压减压站，进行上充流量调节阀试验、轴封注入流量试验、上充泵切换运行试验，执行压力边界检查和泄漏率测量。

风险点 1：试验期间一回路压力波动。

针对该风险的预防措施：

①针对低压与高压减压站切换造成的压力波动，需在切换过程中缓慢操作；

②针对上充流量阀或高压减压站试验中造成的压力波动，试验过程中若出现阀门不收敛，应及时切换为手动控制。

风险点 2：泄漏率偏大。

针对该风险的预防措施：

①需对冷试测漏边界进行全面检查，以核实是否有明显的漏点；

②排除明显漏点后,仍出现泄漏超标,需对RPE地坑、IRWST液位进行检查,并对边界阀门进行紧固。

3.6 升压至 39bar.g 过程

停运主泵,隔离RIS/RHR,之后升压至39bar.g,执行轴封回流试验。

风险点1:轴封回流切换不成功及回流压力调节阀不具备调节能力。

针对该风险的预防措施:

①升压过程中持续监视一回路压力,在到达切换压力时,确认阀门能自动切换,若不能则进行手动切换;

②轴封回流压力调节阀不具备调节功能时,进行手动调节,并在一回路升压过程中持续监视轴封回流流量,以做实时调节。

风险点2:RIS隔离后,水压试验边界外压力异常升高。

针对该风险的预防措施:

①对可能的泄漏点隔离边界阀、安注箱液位上涨、安全阀进行逐一排查查找泄漏点;

②打开排水管线对异常升压系统泄压后,将一回路降压至安全状态,对问题设备进行检修。

风险点3:下泄异常隔离或上充异常开启导致的压力波动。

针对下泄异常隔离风险的预防措施:

①试验前做好临时控制变更,将下泄自动隔离信号闭锁,防止出现下泄误隔离信号。

②如果低、高压减压站之一故障关,可以临时切换到另一个阀门,稳定一回路压力。必要时将上充流量调节阀打到手动模式,手动控制(停止)上充和(减小)轴封流量,防止一回路超压。

针对上充异常开启风险的预防措施为:

①上充流量调节阀正常位于手动模式控制上充流量,异常开启后如果手动也无法操作,则通过增大下泄流量达到平衡上充流量的目的。

②稳定一回路压力后处理异常情况。

风险点4:一回路异常快速泄压导致的压力波动。

针对该风险的预防措施:

①试验前通过在线检查、挂牌上锁、操作监护、明星自检等措施,防止误操作人因事件的发生;

②如果上充没有故障,手动增大上充流量和轴封流量,补充泄漏流量,如果有需要启动第二台上充泵;

③如果是低、高压减压站之一异常全开,则切到正常列;

④如果上充泵故障而备用列启动不成功导致失去上充流量,则可以迅速关闭下泄减少泄漏,排除故障重新启动上充泵^[3]。

3.7 升压至 165bar.g

风险点1:调节上充流量过程中导致压力梯度过大。

针对该风险的预防措施:

①增大轴封注入流量和减少上充流量时需缓慢操作;

②落实监护制,防止误操作。

风险点2:隔离仪表导致部分参数失去监视。

针对该风险的预防措施:

①确认下泄压力仪表隔离对于下泄控制阀无影响(阀门为手动控制);

②安排专人定时计算压力梯度,防止升压大于4bar/min。

3.8 升压至 171.3~175bar.g

启动应急硼酸泵,RCV泵切换至RBS泵。

风险点:RCV泵和RBS泵切换过程中压力波动。

针对该风险的预防措施:

①切换前首先确认上充泵总流量和RBS泵流量匹配;

②启动RBS泵前确认RBS系统在线正确;

③启动RBS泵切换压力源时,可通过微开HP减压站,引入小的压降梯度,减少切换带来的波动;

④由171.3bar.g继续缓慢升压,调节上充流量阀门开度,使流量保持在20t/h左右,轴封注入流量保持在5.4t/h左右。

3.9 升压至 223bar.g

依靠应急硼酸泵升压至223bar.g并维持该压力,进行设备检查、焊缝目视检查及役前检查。

风险点1:RCV泵长期小流量运行导致容控箱温度升高。

针对该风险的预防措施:

①升压前通知相关检查人员就位,防止到达试验平台再等人的情况;

②试验过程中可适当提高升压梯度,但不能超过4bar/min的限值;

③通过容控箱换水控制容控箱温度。

风险点2:RCV下泄异常隔离导致压力波动。

针对该风险的预防措施:

①试验前做好临时控制变更,将下泄自动隔离信号闭锁,防止出现下泄误隔离信号;

②现场挂好锁和提示牌,一人操作一人监护做好防误操作措施;

③下泄阀门设为手动脉冲操作,防止手动快速关闭;

④原则上固定RCV6114/7112VP-开度,仅使用下泄调节一回路压力;

⑤必要时停运RBS泵,稳定一回路压力。

风险点3:一回路异常快速泄压。

针对该风险的预防措施:

①对于下泄阀门异常全开导致的泄压,将RCV1314VP-手动设置为RCV1324VP-在165bar.g时的开度以防止快速泄压;

②对于由于RBS泵故障停运导致的快速泄压,压力保护装置逻辑会关闭下泄流量调节阀,从而稳定一回路压力,在排查原因后再次启动RBS泵。

风险点4:RBS泵拒动导致的超压。

针对该风险的预防措施:

① 10bar.g 平台前进行压力保护预试验, 保证 RBS 泵能正常动作;

② 一回路压力接近 223bar.g 缓慢升压, 尽量避免高压力报警触发及停运定值触发;

③ 如果 RBS 泵无法停运, 首先通过调节下泄控制一回路压力, 若下泄故障, 在到达高 3 定值时, 会开启下泄 RCV1315/1511VP- 进行泄压;

④ RBS2220PO- 在电气盘上需配备手动打闸停运的操作装置^[4]。

3.10 降压排水过程

风险点 1: 降压至 171.3bar.g, RBS 泵和 RCV 泵切换过程中压力波动。

针对该风险的预防措施:

① 在一回路压力接近 RCV 泵小流量切换值时, 可稍微调大 HP 减压站, 减少 RCV 泵小流量三通阀瞬间打开造成的压力波动;

② 当 RCV 泵开始有流量进入上充管线时, 停运应急硼酸泵, 切泵完成。

风险点 2: 一回路降压速率太快。

风险点 3: 一回路降压至 27bar.g 平台, 该过程中降至 154bar.g 恢复仪表, 确认安注启动信号已经通过临时控制变更闭锁, 一回路压力降至 32bar.g 时确认主泵轴封回流切至

RPE 系统, 降至 27bar.g 时连接 RIS/RHR, 生效脆性断裂保护 OAF。

风险点 4: RIS/RHR 连接及 RIS/RCV 的低压下泄连接, 该过程中连接 RIS 的 A 列或 B 列, 将高压减压站切换至低压减压站, 可能会使得高低压减压站切换导致压力波动。

4 结语

论文主要针对三代核电华龙一号机组冷态功能试验的试验内容及实施、试验过程风险及控制措施进行了详细的讲解, 通过对不同压力平台各系统设备在功能试验过程中可能出现的人员、设备风险展开分析, 方便华龙一号机组在后续故障处理中针对重点做到有的放矢, 提前采取对应防护措施, 同时为冷试工期优化提供理论支持, 为中国三代华龙一号机组高质量投产贡献绵薄之力。

参考文献

- [1] 李靖.HPR1000融合版系统与设备中级运行[M].2版.惠州:惠州报业集团,2021.
- [2] 邢继.华龙一号能动与非能动相结合的先进压水堆核电厂[M].北京:中国原子能出版社,2016.
- [3] 翁忆祖,邵朝忠.防城港核电项目的质量管理研究[J].机电信息,2019(36):2.
- [4] 张旭.核电厂调试质量管理研究探讨[J].工程建设与设计,2016(11X):3.