

# 核电厂一回路水压试验实施策略优化后风险分析

## Risk Analysis after the Implementation Strategy Optimization of Primary Hydrostatic Test in Nuclear Power Plants

程钢 刘伯欢 曹光辉 汪缔洪 桑建军

Gang Cheng Bohuan Liu Guanghui Cao Dihong Wang Jianjun Sang

中广核核电运营有限公司 中国·广东深圳 518124

China Nuclear Power Operations Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518124, China

**摘要:** 论文主要针对年度系统泄漏试验替代定期系统水压试验后的风险进行研究,通过策略变更后风险分析流程及方法梳理,开展了实施策略优化后一回路压力边界影响区域的风险评价,包括对压力容器区域影响、一回路冷却剂主管道区域影响与 RCP 相连系统第二道隔离阀区域影响等三个方面的评价分析,得出了水压试验策略优化后风险增量处于风险 III 区,即可接受的结论。

**Abstract:** This paper mainly focuses on the risk of annual system leakage testing replacing periodic system water pressure testing. By sorting out the risk analysis process and methods after strategy changes, a risk assessment of the area affected by the pressure boundary of the primary circuit after implementing strategy optimization was carried out, the evaluation analysis includes three aspects: the impact on the pressure vessel area, the impact on the primary coolant main pipeline area, and the impact on the second isolation valve area of the RCP connected system, it is concluded that the risk increment after optimizing the water pressure test strategy is in risk zone III, which is acceptable.

**关键词:** 一回路; 水压试验; 策略优化; 风险分析

**Keywords:** primary circuit; hydrostatic test; strategy optimization; risk analysis

**课题项目:** 核电站一回路水压试验实施策略优化研究与应用。

**DOI:** 10.12346/etr.v5i12.8911

## 1 概述

压水堆核电机组在役一回路系统压力试验实施的策略因执行规范不同而存在差异,对比《压水堆核电站核岛机械设备在役检查规则》(RSE-M 规范)和《核电厂部件在役检查规则》(ASME 第 XI 卷),其主要差别是:RSE-M 规范要求首轮大修和寿期内每次十年大修实施一回路水压试验(试验压力为 1.2 倍设计压力),ASME 第 XI 卷要求每轮大修实施系统压力试验,一般选择机组上行阶段系统泄漏试验(试验压力为运行压力)方式进行。

2020 年以来,中国核电行业开展了参照 ASME 规范实施水压试验实施策略优化工作,初步研究成果表明:综合断

裂力学分析结果及在役检查能力现状,在适当调整核电厂在役检查项目的条件下,运行核电厂反应堆冷却剂系统采用每次换料大修期间的系统泄漏试验代替定期系统水压试验,可以保证反应堆冷却剂系统压力边界完整性。论文针对某压水堆核电站机组进行一回路水压试验策略优化后的风险进行分析,为电厂决策提供有效支撑。

## 2 风险分析流程

水压试验策略优化的风险分析主要包括识别优化前后差异,结合最终安全分析报告(FSAR)开展影响分析,梳理概率安全评价(PSA)始发事件类发生频率,确定受影响区

**【作者简介】**程钢(1985-),男,中国湖北孝感人,本科,高级工程师,从事核电站水压试验和在役检查技术创新与研究。

域发生破裂的频率，确定策略优化后的风险是否可以接受等步骤，实施流程及方法见图 1。

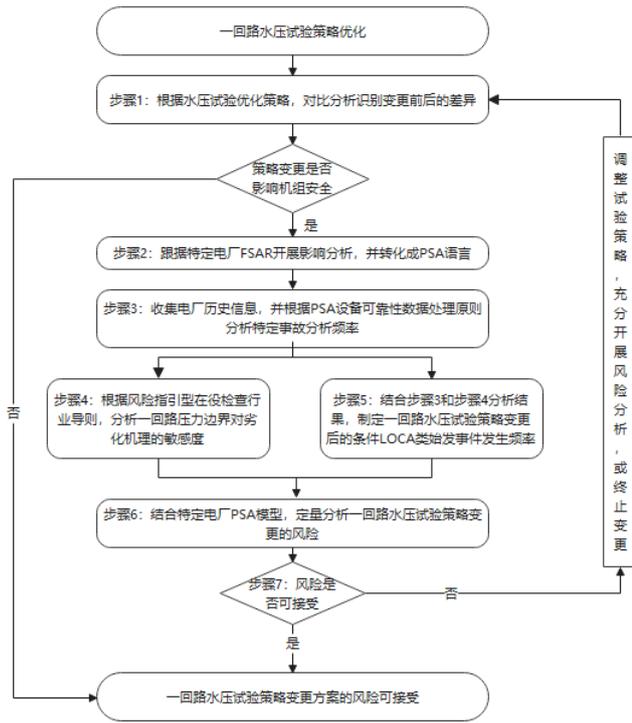


图 1 一回路水压试验策略优化后风险分析实施方法

### 3 风险分析内容

#### 3.1 水压试验策略优化后风险指标梳理

核安全监管部于 2011 年 4 月发布的核安全译文《概率风险评价用于特定电厂执照申请基准变更的风险指引型决策方法》(NNSA-0147)<sup>[1]</sup>是一个纲领性的风险指引型管理导则,适用于所有的特定核电厂许可证基准(Licensing Basis, LB)的变更。针对“保证风险增加量很小”的原则给出了一般性的风险可接受准则,风险通过堆芯损坏频率(CDF)和早期放射性释放频率(LERF)增量来表征,并根据 CDF 和 LERF 增量分为三个风险区,具体见图 2。

①风险区域 I。

总 CDF 大于  $1.0E \times 10^{-4}$  每堆年,  $\Delta CDF$  大于  $1.0E \times 10^{-5}$  每堆年,通常该类变更将不会被批准,对于此类变更,更应该将注意力关注在降低风险水平而不是增加风险。

②风险区域 II。

总 CDF 小于  $1.0E \times 10^{-4}$  每堆年,但  $\Delta CDF$  位于  $1.0E \times 10^{-6}$  每堆年至  $1.0E \times 10^{-5}$  每堆年之间,此类变更只有在充分说明风险合理可控,并已采取针对性的风险控制措施时,变更才被允许。

③风险区域 III。

例如,  $\Delta CDF$  小于  $1.0E \times 10^{-6}$  每堆年,则无论是否计算了总 CDF,都会考虑该变更。

对于 LERF,可接受准则与 CDF 相似,相应的指标比 CDF 小一个量级。

#### 3.2 一回路压力边界变化影响分析

RSE-M 规范规定,一回路水压试验压力边界包括 RPV 及其顶盖、热电耦耐压套管、控制棒驱动机构的耐压套管、一回路主管道、SG 一次侧、主泵的泵壳、稳压器及其波动管线、PZR 安全阀管线,名义内径大于 25mm 的辅助系统及其相关的阀门和附件;回路的旁通管线,PZR 的喷淋管线,连接 RCP 到辅助系统直到第二个隔离机构的管线,名义内径小于 25mm 辅助系统及其相关的阀门和附件直到第一个隔离机构的管线。

ASME 第 XI 卷 IWB-5222 章节要求年度大修系统泄漏试验期间承压边界对应于反应堆冷却剂边界,包括正常运行堆运行启动要求设置的所有阀门,在接近每个检查间隔末时,承压边界应扩大到系统边界内所有的 1 级设备。

对比以上可知泄漏试验和水压试验边界基本一致。

#### 3.3 水压试验策略优化后风险评价

风险分析采用该机组 PSA 模型,一回路水压试验策略优化风险定量分析主要以功率工况内部事件一级模型和功率工况内部事件简化二级模型为主,对于火灾、水淹、地震和其他外部灾害风险分析则以定性分析方式进行<sup>[2]</sup>。功率工况内部事件一级模型和功率工况内部事件简化二级模型分别简述如下。

①内部事件一级 PSA。

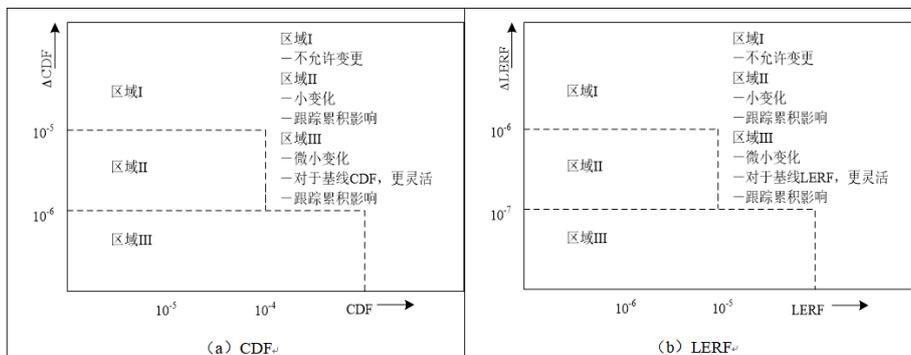


图 2 NNSA-0147 关于 CDF/LERF 的风险可接受准则

一级 PSA 模型先后经历了 IAEA 同行评审、中国同行评审、国家核安全局评审等多次评审，模型经中国同行评审认为满足同行评估技术导则的要求。

②功率工况内部事件简化二级 PSA。

二级 PSA 模型与内部事件一级 PSA 模型结合成为能同时评价 CDF 和 LERF 的一体化模型，在计算时考虑一级模型的升级。

3.3.1 策略优化后风险影响梳理

一回路水压试验验证的是一回路压力边界潜在的缺陷，此类缺陷还未导致一回路泄漏，无法通过机组的日常监测发现，但随着机组运行时间的延长存在发生泄漏的可能。通常此类情况从 PSA 分析角度可分为影响 LOCA 类始发事件发生频率和与安全相关系统的接口管道泄漏影响安全系统功能实现两类。

根据一回路水压试验边界范围可将一回路水压试验边界分为三类区域分析策略变更的风险变化情况：

①压力容器区域：压力容器如果发生裂纹或破裂将导致压力容器泄漏始发事件。

②主管道区域：主管道发生裂纹或破裂将发生一回路 LOCA 始发事件。

③辅助系统管道区域：与安全相关系统的接口管道发生裂纹或破裂将影响安全系统功能，重点分析与 RCP 系统相连第二道隔离阀。

3.3.2 对压力容器区域的影响

由于除压力容器堆芯筒体外，压力边界内部件性能受中子辐照的影响可以忽略，查询该电站断裂力学计算分析结果：

①根据 ASME 标准第 III 卷附录 G 和 RSE-M 规范（1997+2000 补遗）附录 5，计算了堆芯筒体段在 1/4 壁厚和 20mm 壁厚的缺陷时，压力容器 T-RT<sub>NDT</sub>（内表面）=50℃和 30℃时的临界压力分别为 23.166MPa 和 27.11MPa，远高于当前 FSAR 事故分析中可能出现的最高压力事故。

②根据 ASME 标准第 XI 卷附录 A 计算 KI 的方法和

RSE-M 规范（1997+2000 补遗）附录 5 的方法，计算了 T-RT<sub>NDT</sub>（内表面）=50℃时，运行压力和 1.2 倍水压试验对应的临界缺陷为 140.08mm 和 69.65mm，及计算了 T-RT<sub>NDT</sub>（内表面）=30℃时的临界缺陷为 98.5mm 和 48.25mm。

可认为压力容器筒体上 1/4 壁厚的假想深度缺陷，需要 1.50 倍运行压力试验才开裂。查询机组压力容器历史检查报告和运行记录，未发现相关的超标缺陷记录，并且策略优化后十年内将参照 ASME XI 卷增加一次 RPV 接管内圆角超声检查和顶盖贯穿件在役检查，因此认为策略优化对压力容器区域的风险是可忽略的。

3.3.3 对一回路冷却剂主管道区域的影响

①定性影响分析。

一回路水压试验策略优化通过机组上行泄漏试验代替一回路水压试验来验证一回路的完整性。两者验证的一回路主回路边界相同，但是验证的压力水平不同。一回路冷却剂系统设计压力为 17.23MPa，并设置三组稳压器安全阀组保护一回路。三组安全阀开启阀开启压力整定值分别为 166+1bar、170+1bar、172+1bar，一回路压力低于设计基准压力时，一回路压力边界完整性是有保障的。

因此，一回路水压试验策略优化后，只需关注事故工况过程中一回路压力会超过一回路设计基准压力之上的事故工况即可<sup>[3]</sup>。为了建立相关事故的发生频率，可通过群厂经验反馈系统梳理类似机组历史运行事件，并根据《中国核电厂设备可靠性数据报告》中规定的数据处理原则制定相关事故的发生频率，并转化成对应的 PSA 始发事件类发生频率，见表 1。

②分析假设。

假设所述事故发生后，一回路压力超过一回路设计基准压力值时，如果一回路管道部分存在相关的缺陷，则可能导致出现一回路裂纹或管道破口，从而导致 LOCA 事件发生。相关的缺陷诱因可能有管道制造和运行阶段因存在劣化机理而逐步发展而形成，其中前者部分与机组运行时间无关；后者则随着机组运行时间积累而逐步发展扩大。对于前者，

表 1 受影响事故发生频率

| 事故名称                 | PSA 始发事件        | PSA 始发事件类 | 始发事件发生频率 / 堆年 | 合计 / 堆年  |
|----------------------|-----------------|-----------|---------------|----------|
| 汽轮机跳闸                | 导致一回路温度上升的二回路瞬态 | ST2A      | 2.62E-02      | 5.59E-02 |
| 电站辅助设备非应急交流电源丧失      | 丧失厂外电           | ST1A      | 4.79E-03      |          |
| 正常给水流量丧失             | 主给水丧失           | SW1A      | 2.07E-02      |          |
| 主给水系统管道破裂            | 给水管道大破口事故       | WL1A      | 1.10E-04      |          |
|                      | 给水管道小破口事故       | WS1A      | 1.09E-03      |          |
| 反应堆冷却剂强迫流量全部丧失       | 其他瞬态            | PT1A      | 3.06E-03      |          |
| 主泵卡轴事故               |                 |           |               |          |
| 功率运行下失控提棒事故          |                 |           |               |          |
| 丧失正常给水—ATWT          | 未能紧急停堆的预期瞬变     | ATWT      | 4.41E-07      |          |
| 电站辅助设备丧失非应急交流电源—ATWT |                 |           |               |          |

该机组已经开展了役前水压试验、第一次十年水压试验和相关的在役检查,查询这些检查记录,并未发现一回路主冷却剂系统存在相关的缺陷记录,因此认为一回路水压试验策略优化对这部分可能存在的原始缺陷的影响可以忽略。对于后者,则主要受劣化机理影响,并随着运行时间的积累,缺陷可能发展而逐渐变严重。对于这一部分的影响,可通过风险指引型在役检查劣化机理分析准则进行分析。

### ③管道劣化机理判断准则。

EPRI 的研究报告给出管道劣化机理主要关注热疲劳 (TF)、应力腐蚀开裂 (SCC)、局部腐蚀 (LC) 和流动敏感性 (FS) 四类劣化机理。由某种降质机理引起的管道破裂频率与该降质机理类别的关系可根据不同的劣化机理将管道破裂可能性分为高、中和低三种情况。一般而言,如果在管段上未发现已知的降质机理,则该管段破裂可能划分为类别“低”;而当某管段上发现一种或多种降质机理时,管段破裂可能性明显变高。具体的管段破裂可能性与已知的降质机理之间的关系见表 2。

表 2 管段破裂可能性类别表

| 管段破裂可能性 | 预期的泄漏状况 | 管段可能遭受的降质机理  | 破裂频率 (焊缝年) |
|---------|---------|--|------------|
| 高       | 大       | FAC  | 1.0E-04    |
| 中       | 小       | TF、SCC (IGSCC、TGSCC、ECSCC、PWSCC)、LC (MIC、PIT、CC)、E-C | 1.0E-05    |
| 低       | 无       | 不存在已知的降质机理   | 1.0E-06    |

### ④ RCP 主管道环路劣化机理分析。

将大、中、小 LOCA 条件始发事件发生频率带入机组 PSA 模型相应的 LOCA 类始发事件树中,可获得策略变更后的风险分析结果见表 3。

表 3 水压试验策略变更的风险

| LOCA 类型 | 风险变化            |                  | 风险准则         |               |
|---------|-----------------|------------------|--------------|---------------|
|         | $\Delta$ CDF/堆年 | $\Delta$ LERF/堆年 | $\Delta$ CDF | $\Delta$ LERF |
| 大破口失水事故 | 2.43E-08        | 1.97E-10         | < 1.0E-06    | < 1.0E-07     |
| 中破口失水事故 | 2.74E-08        | 2.38E-10         |              |               |
| 小破口失水事故 | 1.74E-08        | 2.79E-10         |              |               |
| 合计      | 6.91E-08        | 7.13E-10         |              |               |

根据 NNSA-0147 规定可知,即使在保守分析情况下,一回路水压试验策略变更后导致的风险增量处于风险 III 区,风险增量较小可接受。此外,需要注意的是,在论证分析过程中,取劣化机理的单条焊缝最大发生频率进行分析;并且根据一回路水压试验变更策略,电厂也会开展十年一次的主管道环焊缝超声检查,如果发现缺陷将及时处理以保障主回路系统安全可靠运行。因此可预期策略优化后对一回路主冷

却剂系统的风险影响将更小。

### ⑤其他风险源分析。

通过定性评估方法评价策略变更后其他风险包括以下内容:

内部灾害影响分析:优化后不影响内部火灾点火源和水淹源,并且水淹或火灾发生后不会导致事故梳理统计的超设计基准压力始发事件,事故后续发展并不会导致一回路压力增长到稳压器安全阀开启压力平台的情况,其对一回路发生裂纹的预防能力可以被一回路泄漏试验所代替。

地震影响分析:策略优化后不涉及对其设计抵抗地震性能的变更。

其他外部灾害影响分析:策略优化后不会引入新的外部灾害,也不会增加现有外部灾害的发生频率。

综述策略优化后既不会引入新的灾害,也不会影响上述灾害的发生频率,此外,由于内部、外部灾害的 PSA 模型都是在内部事件一级 PSA 模型基础上建立,结合前文对内部事件一级 PSA 模型的定量分析结果可预期:机组一回路水压试验策略优化后对内、外部灾害的事故影响较小,对堆芯风险的影响较小可以接受。

### 3.3.4 与 RCP 相连系统第二道隔离阀

在机组功率运行期间,与 RCP 相连系统在第一道隔离阀和第二道隔离阀之间管段在年度大修后上行时无法被泄漏试验所验证,但是这些第一道隔离阀与第二道隔离阀之间的管段和第二道阀门在存在劣化机理并叠加第一道阀门发生内漏时,才可能导致潜在一回路泄漏始发事件。根据机组 PSA 设备可靠性数据采集报告可知:阀门发生内漏的概率为 1.0E-5 量级,并且即使保守假设所有的区域因劣化机理而破裂的频率为 1.0E-04 量级时,与 RCP 相连系统第二道隔离阀区域发生的潜在 LOCA 无法缓解,其堆芯损伤频率也在 1.0E-11/堆 × 年量级。因此其风险是较小,可接受的。

## 4 结论

该机组一回路水压试验策略优化后,对安全的影响主要有影响 LOCA 类始发事件发生频率和与安全相关系统的接口管道泄漏影响安全系统功能实现两类。风险分析结果显示,两类风险分析结果均满足 NNSA-0147 规定,风险增量处于风险 III 区,风险增量较小可接受。

## 参考文献

- [1] 核安全译文. NNSA-0147 概率风险评价用于特定电厂许可证基础变更的风险指引决策方法[S].2011.12.
- [2] NRC RG 1.200 An approach for Determining the Technical Adequacy of Probabilistic risk Assessment Results for Risk-informed Activities[Z].Rev.1, 2007-1-1.
- [3] 某电站机组(功率工况)概率安全评价报告第4章 始发事件确定和分组.版本A[Z].2014.