

文章编号: 0258-0926(2015)02-0089-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2015.02.0089

M310 型核电厂在役检查的改进和优化

王 臣, 孙海涛, 高 晨, 邓 冬

环境保护部核与辐射安全中心, 北京, 100082

摘要: 核电厂在役检查是核电厂机械设备安全运行的重要保证手段之一。本文结合国内核电厂在役检查的经验反馈, 对 RSE-M 规范中某些技术条款的合理性进行探讨, 介绍风险指引型在役检查方法的应用, 并为我国 M310 型压水堆核电厂在役检查的优化提供建议。

关键词: 在役检查; 经验反馈; RSE-M 规范; 优化; 风险指引型

中图分类号: TL38⁺6 **文献标志码:** A

Improvement and Optimization for In-service Inspection of M310 Nuclear Power Station

Wang Chen, Sun Haitao, Gao Chen, Deng Dong

Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing, 100082, China

Abstract: In-service inspection (ISI) is an important method to ensure the safety of the mechanical equipments in nuclear power stations. According to the in-service inspection experience feedback from the domestic nuclear power stations, the reasonableness of some provisions in the RSE-M code are discussed and the applications of risk-informed in-service inspection (RI-ISI) are introduced, and the advices for the optimization of the ISI of the domestic M310 nuclear power stations are proposed.

Key words: In-service inspection, Experience feedback, RSE-M code, Optimization, Risk-informed

0 引 言

为保证核电厂的安全运行, 必须对核电厂安全重要相关机械设备的材料性能和结构完整性进行定期检查, 即核电厂在役检查。

我国 M310 型核电机组的在役检查目前遵照核安全导则 HAD103/07 和法国在役检查规范 RSE-M (1997 版+2000 补遗) 执行。HAD103/07 参照国际原子能机构 (IAEA) 相关导则编写, 对核电厂在役检查的范围、检查结果的评价、检查技术等作了指导性说明; RSE-M 规范是基于法国核电实践, 对检查对象、检查周期和检查方法的规定十分详尽, 具有很好的可操作性。

本文结合我国 M310 型机组在役检查的多年实践和审评经验, 对 RSE-M 规范中的个别技术条

款进行探讨, 同时总结国内核电机组在役检查活动中的实践经验, 介绍风险指引型在役检查 (RI-ISI) 在核电厂在役检查上的应用。

1 在役检查方法的优化

RSE-M 规范中针对检验项目规定的检验方法不一定是最有效、最合理的技术手段。例如对于铁磁性 (碳钢) 材料, 磁粉检查能够探测出表面或近表面缺陷, 检查速度较快且污染较轻; 而渗透检查只能探测出表面开口缺陷, 检查速度较慢且污染较重^[1]。RSE-M 规范仅规定蒸汽发生器 (SG) 锥体下部环焊缝和主泵法兰螺栓采用磁粉检查, 其他设备的表面检查基本都采用渗透检查。

根据工程实践, 体积检查方法中射线检查和

超声检查对不同类型缺陷的敏感程度不同。超声检查对平面型缺陷（如裂纹、未熔合等）具有较高的检出率，能对缺陷定位定量；而射线检查对体积型缺陷（如气孔、夹渣等）具有较高的检出率，但对壁厚方向尺寸较小的缺陷检出效果较差，无法确定缺陷深度位置，且需要建立辐射防护区域^[2]。对于在役检查，重点关注的是危害性缺陷或扩展性导致缺陷，而该类缺陷一般为平面型缺陷。但 RSE-M 规范对多数管道环焊缝只要求进行射线检查。目前国内在役检查承包商在相关实践经验基础上，结合检查方法特性对在役检查方法进行了优化分析^[3]。

1.1 表面检查

表面检查方法可从 3 个方面进行优化，包括：

以荧光磁粉检查替代常规普通磁粉检查；以荧光渗透检查替代常规渗透检查；以磁粉检查替代渗透检查。

1.1.1 荧光磁粉/渗透检查 荧光磁粉检查/渗透检查的检验灵敏度明显高于常规磁粉检查/渗透检查；但荧光剂成本稍高，需配置紫外线灯和建立暗室环境。由于 RSE-M 规范中未明确规定采用荧光法还是常规法，目前实际应用中基本都采用的常规法，荧光法全面替代常规法需要一定过程。建议可先对重要主设备如反应堆压力容器（RPV）、SG、稳压器和主管道上需进行表面检查的部位实施荧光法检查。

1.1.2 磁粉检查和渗透检查 这两种常规的表面检查方法都有各自的工艺特性。根据工业实践，一般认为检查铁素体钢，磁粉检查的检查效果比渗透检查的检查效果好，对同一缺陷磁粉检查的检出率高于渗透检查，磁粉检查较渗透检查可以检测出近表面非开口的缺陷，且待检工件的表面状况对使用渗透检查的影响比使用磁粉检查的影响大^[4]。在 AP1000 的设备焊接技术规格书中，设计方也优先推荐采用磁粉检查对根部焊道、背面清根和最终焊道进行表面检查。当然，磁粉检查无法检查非铁磁性材料如奥氏体不锈钢设备，且对受检对象的几何形状有一定要求。因此建议对铁磁性材料且几何形状不复杂的检查对象，可考虑用磁粉检查替代渗透检查。

1.2 体积检查

体积检查方法可从超声检查替代射线检查这方面进行优化。我国 M310 型机组的一回路主管

道基本都为奥氏体不锈钢铸件，由于奥氏体不锈钢铸件的材质晶粒粗大，对超声波有强烈的散射作用，大大影响超声检查的检查有效性，因此 RSE-M 规范对一回路主管道的大部分环焊缝不要求做超声检查；例如只对 SG 安全端与主管道焊缝要求射线检查和渗透检查、RPV 安全端与主管道焊缝要求射线检查和超声检查、其他一回路主管道环焊缝只要求在水压试验期间进行目视检查。随着超声检查的技术水平不断提升（如自动超声检查系统和尖端衍射法等新技术的引入），目前宁德、红沿河核电厂的机组的一回路主管道窄间隙自动焊后，除执行 RCC-M 规范要求的射线检查外，同时尝试采取超声检查对主管道环焊缝进行验收。在超声检查对奥氏体不锈钢铸件的检查有效性经过实践验证后，可考虑在机组寿期末段对一回路主管道上疲劳使用系数较高的环焊缝进行超声检查。

对于主给水系统（ARE）/主蒸汽管道系统（VVP）等二回路碳钢管道环焊缝，RSE-M 规范只要求进行射线检查。由于超声检查对役致缺陷即裂纹类缺陷的检查效果好于射线检查，建议在机组寿期末段对此类焊缝进行抽样超声检查。

考虑到超声检查对裂纹类缺陷的检出率高于射线检查，目前国内 AP1000 型机组和 EPR 型机组等第三代先进型压水堆核电厂在制定电厂在役检查大纲时，对需进行体积检查的在役检查项目（包括压力容器筒体焊缝、一二回路管道环焊缝）都优先选取进行超声检查。

2 在役检查项目的优化

RSE-M 规范附录 3.1 详细规定了检查项目，该附录综合了法国多个机组的实践经验。随着我国 M310 型机组多堆年的经验反馈，逐渐发现有些设备状况稳定良好但规范要求进行大量检查项目，但有些设备经常出现质量劣化情况，规范却未要求进行在役检查。

国内外核电行业提出 RI-ISI 这一概念，利用概率安全分析（PSA）识别出风险重要的管道，将资源集中在最具风险的管道上，以达到既可保证核电安全性也能大大降低核电厂成本的目标。

2.1 经验反馈项目

2.1.1 堆芯仪表指套管的涡流检查 RSE-M 规

范只要求对堆芯中子注量率仪表系统的中子测量套管与下封头的焊缝、中子测量套管与仪表导管的焊缝、仪表导管与隔离阀焊缝进行目视检查。但根据国外经验反馈：堆芯测量指套管在役期间存在壁厚减薄的现象。例如秦山第二核电厂 600 MW 机组的 RPV 有 38 根指套管（外径 8.6 mm、壁厚 1.7 mm），每 2 次大修对一台机组的指套管进行一次 100% 涡流检查，仅 1 号机组就已发现多根指套管上存在壁厚减薄的情况。由此可见，在役检查项目中增加对堆芯测量指套管的涡流检查是值得考虑的。

2.1.2 安全注入系统（RIS）和余热排出系统（RRA）管道的体积检查 国内外运行经验表明：基于热疲劳的 Farley-Tihange 现象频繁出现在余热排热交换器下游冷热水混合区，以及与主冷却剂管道直接相连的 RIS 和 RRA 管道焊缝或母材中^[5]。经过筛选，RRA 热交换器出口管道、RIS 连接主管道的支管出现热疲劳失效的风险较大；但 RSE-M 规范只要求对核一级辅助管道实施目视检查，并未要求开展针对疲劳失效的在役检查。

超声检查对裂纹类缺陷检测灵敏度高、定位准确，被广泛应用于国内外 Farley-Tihange 热疲劳裂纹类缺陷的检出与确认。目前红沿河、宁德核电厂已将以上管道纳入到在役检查范围内，并对母材实施超声检查、对焊缝实施射线检查。建议国内所有 M310 型核电厂结合自身机组布置特点确定监督范围，制定出合理可行的在役检查计划。

2.2 SG 涡流检查优化

2.2.1 长旋转探头（STL）检查 SG 传热管作为一、二回路的隔离边界，RSE-M 规范要求对其执行涡流检查，具体检查要求见表 1。

胀管过渡区的 STL 检查目的主要是为了探测应力腐蚀裂纹。国内 M310 型机组的 SG 的传热管材质都是 Inconel 690 材质，具有良好的抗应力腐蚀的性能，目前国内外机组还未出现 690 材质传热管发生应力腐蚀开裂的运行案例。同时，除大亚湾核电站 1、2 号机组 SG 采用的是机械胀管外，国内其他 M310 机组都已采用液压胀管；相比于机械胀管工艺，液压胀管具有胀接应力均匀、工作效率高的优点，且后续运行阶段产生缺陷的机率较小。因此，RSE-M 规范要求 10 年内对所有传热管的胀管过渡区进行 STL 检查的规定是否

合理值得探讨。根据国外经验，目前尚无核电厂按 RSE-M97（2000 修订）规范要求实施如此大量的 STL 检查。对于 690 材质传热管的胀管过渡区，法国电力公司（EDF）的检查方案是在先导 SG（DAMPIERRE 1 号机组的 1 号 SG）上实施热侧泥渣区的 STL 检查，当发现异常后扩大至其余机组。

表 1 RSE-M 规范对 SG 传热管的检查要求
Table 1 Inspection Requirements of SG Tubes in RSE-M

检查时机	检查要求
役前检查	所有 SG 所有传热管 100% 涡流检查
第一次全面在役检查	所有 SG 外围两排 100%+次外围 50% 涡流检查
部分在役检查	至少抽取 1 台 SG 外围两排 100%+次外围 50%+12.5% 进行涡流检查
后续全面在役检查	所有 SG 传热管 100% 涡流检查+所有胀管过渡区进行长旋转探头检查 +全面氦检漏

注：相比于 RSE-M90 版，RSE-M97（2000 修订）版新增要求在每 10 年内对所有传热管的胀管过渡区进行 STL 的检查

在不增加核安全风险的前提下，国内机组是否可参考 EDF 的经验，基于自身机组状况制定相应的抽检方案是值得考虑的。

2.2.2 美国电力研究院（EPRI）关于 SG 传热管的检查策略 目前美国压水堆核电厂和我国 AP1000 型核电厂 SG 传热管的在役检查基本遵照 EPRI 技术文件“Steam Generator Management Program: Pressurized Water Reactor Steam Generator Examination Guidelines, Revision 7”执行。该导则关于 SG 传热管的检查要求如下：役前检查和第一次换料大修期间都对每台 SG 所有传热管进行涡流检查；后续在役检查期间连续 144、108、72 和 60 个有效满功率月内完成每台 SG 所有传热管的涡流检查；距周期中最近的停堆换料结束后，完成每台 SG 至少 50% 传热管的检查，且任何 SG 不允许运行超过 72 个有效满功率月或者 3 次换料停堆（两者取时间较短者）而不进行检查^[6]。

相比于 RSE-M 规范，该导则没有要求每次换料大修时都对 SG 传热管进行涡流检查，也没有明确要求对胀管过渡区进行 STL 检查，但随着机组运行时间增加，其要求对传热管的检查频率也逐渐提高。M310 型核电厂 SG 传热管的检查计划能否参考该导则值得进一步深入探讨。

2.3 风险指引型在役检查

随着 PSA 在美国核电站的深入应用，形成了

风险指引型安全管理理念和方法。并且美国核管会（NRC）针对在役检查出台了管理导则 RG1.178-“An Approach for Plant-specific, Risk-Informed Decision Making: In-service Inspection of Piping”以规范和指导 RI-ISI 的应用。目前美国已有多座核电厂采用了 RI-ISI 方法。RI-ISI 主要有 2 种方法：由 EPRI 制定的方法，即 EPRI-TR-112657；由西屋业主集团（WOG）制定的方法，即 WCAP-14572。NRC 对这 2 种方法都予以认可。从使用情况看，使用 EPRI 方法进行优化的核电厂最多，约占 75%。我国核安全监管机构也在大力推动 PSA 的应用，大亚湾核电站已开展 RI-ISI 的应用试点研究。

根据 EPRI 方法（EPRI-TR-112657），RI-ISI 应用的主要步骤^[7]见图 1。

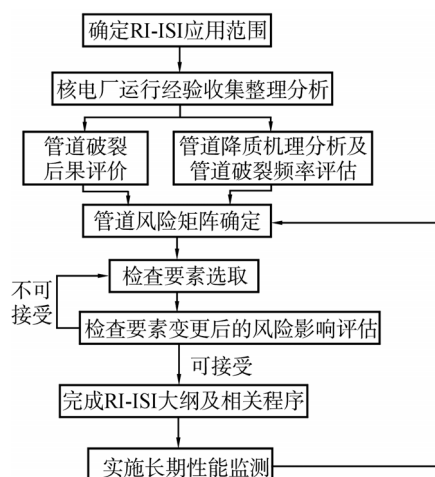


图 1 RI-ISI 方法应用流程

Fig. 1 Process of Using RI-ISI Approach

应用 RI-ISI 的关键在于进行管道降质机理分析和破裂后果评价，从而确定管道风险矩阵和检查要素选取。虽然 EPRI-TR-112657 提供了降质机理判定准则，但建议结合电厂自身运行经验和业内经验反馈对降质机理进行深入分析，确保筛选出失效概率较高的管道。

通过 RI-ISI 方法，可以优化在役检查的检查数量、检查方法和检查周期等，在保证核电厂安全水平的前提下降低检查成本和检查人员受到的照射剂量。随着我国 RI-ISI 的试点应用项目的研究深入，该方法将会在我国核电厂在役检查领域得到广泛的应用。

3 总结

本文结合我国 M310 型机组的在役检查实践经验对 RSE-M 规范的某些技术条款是否合理进行了探讨，并根据经验反馈，介绍了风险指引型在役检查的应用，并为我国 M310 型核电站在役检查的优化提供了以下建议：

(1) 对碳钢或低合金钢部件进行表面检查时，可考虑用磁粉检查替代规范要求的渗透检查。

(2) 对于主一、二回路管道环焊缝的在役检查，可考虑在核电厂寿期后半段抽取部分焊缝进行超声检查。

(3) 对于 SG 传热管的涡流检查，可结合机组自身运行经验考虑选取易出现缺陷的硬质泥渣区做长旋转探头抽样检查，待检查发现异常后再扩大到所有传热管。同时检查计划可参考 EPRI 相关导则通过安全分析进行优化。

(4) 基于国内外经验反馈，建议在役检查项目中增加堆芯测量指套管的涡流检查、RIS 和 RRA 系统热疲劳敏感管段的体积检查。

(5) 加强对风险指引型在役检查的应用研究，在进行降质机理分析时，不仅仅局限于 EPRI 提供的降质机理判定准则，还应考虑机组自身运行经验和业内经验反馈对降质机理进行深入分析。

参考文献:

- [1] 魏鹏宇. 铁磁性容器的渗透与磁粉检测方法比较[J]. 无损检测, 2009, 31(5): 415-416.
- [2] 张栋梁. 射线检测、全自动和手动超声检测对缺陷检出的比较[J]. 无损检测, 2006, 28(9): 502-503.
- [3] 谢杰, 李平, 彭志珍. CPR1000 压水堆核电站在役检查用无损检测方法的优化[C]. 2011 年中国电机工程学会年会论文集, 贵州, 2011.
- [4] 聂小武, 鲁世强, 王克鲁. 铸锻件磁粉与渗透检测工艺的选择[J]. 铸造, 2006, 55(4): 387-389.
- [5] 操丰, 王建军, 丁有元. 核辅助管道 Farley-Tihange 现象机理分析及对策研究[J]. 中国核电, 2011, 4(4): 300-305.
- [6] EPRI. Pressurized water reactor steam generator examination guidelines [R]. 1013706 Rev.7. December 2006.
- [7] EPRI. Revised risk-informed in-service inspection evaluation procedure[R]. TR112657 Rev. B-A. December 1999.

(责任编辑: 张明军)