

核电厂蒸发器水压试验管板加热工艺的研究与应用

程钢, 叶金梁, 冉威, 刘伯欢, 詹震宇

中广核核电运营有限公司, 广东 深圳 518000

摘 要 : 本文主要介绍了一种新型蒸发器水压试验管板加热工艺的研究与应用情况, 首先结合规范的符合性分析和 SG 加热的 ANSYS 仿真建模计算开展了可行性论证, 然后对传统和改进加热工艺方案进行了评估, 并就新型加热工艺及产品开展了调研, 工艺测试, 设计研发和大修现场应用, 最后对应用效果进行了总结, 并拓展提出辅助加热工艺的应用前景。

关 键 词 : 核电厂; 蒸发器管板; 加热工艺; 水压试验

Research and Application of Heating Process of Evaporator in Nuclear Power Plant

Cheng Gang, Ye Jinliang, Ran Wei, Liu Bohuan, Zhan Zhenyu

CGN Nuclear Power Operation Co., Ltd. Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract : It mainly introduces the research and application of a new type tube plate heating process of Steam Generator hydrostatic test, firstly combined with the compliance analysis of the specification and the ANSYS simulation modeling calculation of SG heating, the feasibility evaluation is carried out, then the traditional and improved heating process schemes are evaluated, and the new heating process and products are investigated, process tested, designed and developed and overhauled field application, and finally the application effect is summarized, and the application prospect of auxiliary heating process is expanded.

Keywords : nuclear power plants; SG tube sheet; heating process; hydrostatic test

核电厂蒸发器(简称 SG)二次侧水压试验是《压水堆核岛机械部件在役检查规则》^[1](简称 RSE-M 规范)检查项, 为了保持足够大的安全余量防止脆性破裂, 要求试验温度应高于第一次试验水温和 SG 管板 $RT_{NDT}+30^{\circ}\text{C}$ 。由于传统的蒸发器充排加热^[2]或循环加热工艺在试验充水前或升降压期间不能提供加热功能, 因此在考虑了整个试验升降压期间温降裕度条件下一般在升压前将 SG 加热至 43°C ^[3]及以上。为提高试验质量, 安全和工期水平, 本文主要对一种可以贯穿于整个试验的加热新工艺即管板辅助加热工艺的研究与应用情况进行阐述。

一、工艺可行性论证

针对传统 SG 加热工艺不能在充水前或升降压期间加热的技术瓶颈, 笔者提出了在试验充水加热前在 SG 管板外壁区域布置辅助加热系统^[4], 以不超过 150°C 进行水压试验加热最厚部位蒸发器管板的提前预热, 可实现在充水前, 原循环加热时和升降压全过程对 SG 管板进行加热, 预计单台 SG 水压试验加热时间可以缩短 5H 以上, 并消除试验升降压期间试验温度低于规范要求的风险。

鉴于蒸汽发生器属于核电厂关键主设备, 为避免新工艺应用对于设备安全和设计功能造成影响, 开展工艺可靠性论证如下:

(一) 规范和程序符合性分析

1) 压水堆核岛机械设备设计和建造规则^[5](RCC-M 规范):

RCC-M 材料篇《零件采购技术规范-压水堆蒸汽发生器管板用的 18MND5 Mn-Ni-Mo 的合金钢锻件》描述 SG 材料牌号为 18MND5。查询 RCC-M 焊接篇《对热处理总的要求》, 要求铬钢和铬钼钢预热温度在 150°C 和 300°C 之间, 除铬钢和铬钼钢之外低合金钢建议最低预热温度为 125°C 。因此使用 150°C 加热设备在 SG 管板部位进行辅助加热仅达到了预热范畴^[6]。

2) RSE-M 规范

规范附录 8.1 纠正性维修方法 I《无热处理焊接维修的可选方法》规定采用氩弧焊焊接预热温度至少应为 150°C , 其他遵循 RCC-M S7520 和 S7522 章节要求。辅助加热工艺温度仅达到焊接预热温度要求, 且实施加热时无焊接操作。

3) 运行技术规范^[7]: 蒸发器运行条件下温度: $291.4\sim 310^{\circ}\text{C}$

(设计温度 316°C)

作者简介: 程钢(1985.06-), 男, 汉族, 湖北孝感人, 中广核核电运营有限公司, 高级工程师, 本科, 研究方向: 核电站水压试验和在役检查技术创新与研究。

综上所述,辅助加热工艺控温在150℃内,低于设计温度,略低于焊接前的预热温度,同时因为没有达到焊后热处理范畴,升降温速率不会对材料产生影响,因此辅助加热不会对主设备性能产生影响。

(二) ANSYS仿真计算评估

利用 ANSYS有限元分析软件模拟蒸汽发生器管板^[9]加热试验,对模型结构的热传导、热应力、热形变和热损伤进行了计算分析。

1) 加热能力计算分析:

图1为筒体-管板模型热稳态计算后的温度云图,加热温度设置150℃,可观察到加热带热量向筒体周围壁面和管板逐渐扩散,达到热稳态后,距离加热带边缘约80cm的筒体区域达到最低温度22℃。管板外围与加热带接触,温度最高,由于热传导、辐射换热、对流换热效应,管板温度沿着指向圆心方向逐渐降低,得到管板下表面中心温度为61.47℃,即理想状态下,管板中心温度趋于该温度。

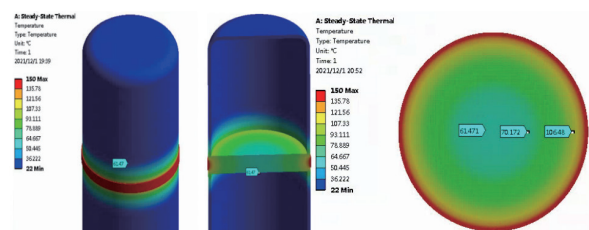


图1. 筒体-管板模型热稳态温度云图

2) 加热应力计算分析

管板加热过程中,由于各点的温度分布不均匀,会产生一定的热应力。利用 Static Structural 静态结构模块来分析模型受到的热应力,以稳态的温度载荷作为边界条件,加载仿真计算后可得到模型各处的热应力。

从热应力计算模型中可以观测到,最大热应力分布在加热带区域,可达到139Mpa,筒壁靠近管板上下表面的区域相对其他区域的热应力低,因为该区域的热传导途径包括了筒壁和管板,温度梯度变化较小。同时发现从管板外径到圆心的热应力变化规律为先减小、后增大,管板中心点的热应力约为33Mpa,热应力远小于下 SG 管板材料力学性能。

3) 加热疲劳损伤计算分析

管板加热过程中,应力集中区域容易发生热疲劳破坏。用 Ansys Workbench 有限元分析软件 Fatigue Tool 模块进行疲劳仿真,探究加热对模型造成的热损伤,评估模型的寿命。假设 10^{12} 次为模型的无限寿命,建模计算数据显示大部分区域处于无限寿命。最小寿命为96155次,发生在加热区域上,因该区域的温度最高,对应热应力与热形变最高。根据曼纳 (Miner) 线性累计损伤理论,每次加热试验对蒸发器的损伤度 D 表示为: $D=1/N_{min}=1/96155=1.03 \times 10^{-5}$ 。

结果显示150℃以内加热试验对蒸发器的损伤微乎其微。

基于以上规范技术要求梳理, ANSYS 建模计算分析和设计方综合评估反馈,采用 SG 管板外表面150℃预热的方式将 SG 缓慢提升至要求温度,对设备结构完整性没有影响。

二、工艺设计与应用测试

针对 SG 水压试验技术特点,课题组对传统加热方案进行了全面分析和研讨,对增加辅助加热工艺后的整体试验方案进行了推演,进一步确认了工艺可执行性。另结合管板部位的加热需求,详细勘察了加热系统的应用场景,分析了加热设备在运输方式、转运路径、使用空间、安装时长等方面存在诸多制约,设备的轻量化和使用便捷性决定了整套系统工程应用能否成功。

(一) 工艺方案设计

传统试验方案^[9]是将试验装置的循环加热设备连接至蒸发器二次侧系统,取 ASG001BA 水约30m³进行 SG 二次侧小循环加热,由约20℃加热至43℃,其中 SG 管板厚度最大最后到达目标温度,然后取 ASG001BA 水充满 SG 二次侧进行升降压试验。

本次改进方案是研制外部加热装置布置在 SG 的管板等区域,进行 SG 加热直至测温点达到目标温度,然后充水至 SG 满水后进行升降压试验。

以加热时间1天简要估算3台 SG 加热的外部装置功率要求如下:

$$c_{\text{金}} = 0.46 \times 10^3 \text{ J} / (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$m_{\text{SG}} = 329500 \text{ kg}, m_{\text{管道}}, \text{忽略不计估算为 } 0$$

$$Q_{\text{金}} = K \cdot W = K \cdot P \cdot t = c_{\text{金}} \cdot (3m_{\text{SG}} + m_{\text{管道}}) \cdot (43 - 20)$$

$$\text{假设有效加热吸热系数 } K=0.8, t=24 \times 3600 \text{ s}$$

$$\text{计算得出: } P_{\text{加热器 (功率)}} = 151.3 \text{ KW}$$

后经加热产品供应商针对技术要求和工件尺寸展开热工^[10]计算,3台蒸发器管板一天内由20℃加热至43℃需要约180kw功率,与估算结论基本一致。

(二) 加热产品调研与比较

课题组首先调研了中频感应加热方案,其具有加热效率高和设备可靠性高的优点,但是整套设备需要就近配置感应电源,重量较重和规格较大,不便于现场转运和安装,随后了解到工业管道硅胶加热技术,其采用磁吸式内置加热丝的硅胶隔热产品,转运便携安装简单,其缺点是加热功率密度低,两套产品各有优缺点,因此定制两套简易产品在 SG 模拟体上进行了加热对比试验,主要差异如下:

1) 运输便利性,中频感应加热方案需要中间感应电源,不便于核岛内转运;

2) 使用可靠性,硅胶加热片方案偶尔因接触不好自动触发停止加热保护;

3) 安装效率方面,感应加热带较重需3人配合,硅胶加热片较轻可1人操作;

4) 加热时间方面,前者加热密度大效率高仅需9.5H,后者热量损失大,需要19.5H。

综合核岛内工具运输便利和设备安装剂量控制要求,以及硅胶加热片贴合可以改进原因,课题组选择了硅胶加热片方案。

(三) 硅胶加热产品开发与应用

1) 加热终端设计

每台蒸发器管板所在高度筒壁外表面,有4根 APG 系统支

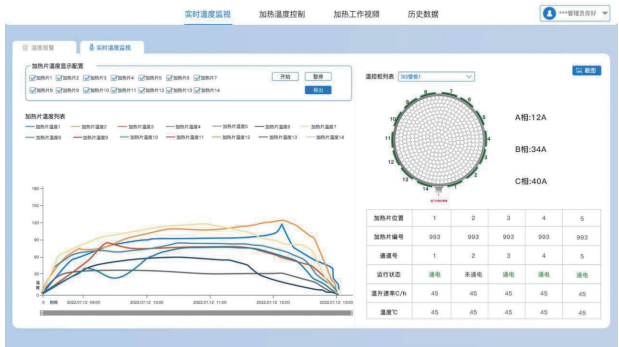
管把管板外圆周分隔成两长两短的4段间隔，长间隔和短间隔尺寸分别约为287cm和215cm，APG支管中心基本与管板上沿平齐，因此加热片要全部覆盖管板所在高度就需要避开管件所在位置。基于降低安装难度，设计全部加热片的规格统一，尺寸为675*600mm，数量为14块，对应外圆周的4段间隔分成4组，第一组和第三组由3块加热片构成，第二组和第四组由4块加热片构成。

2) 就地控制柜研制

根据单台蒸发器管板加热片数量，并考虑裕量，定制满足通道数量的就地控制柜，尽量降低柜体尺寸和重量。设计16通道的控制柜，尺寸约为600*400*500mm，重量约为25kg。就地控制柜面板可显示各通道加热片当前温度，可设置控制各通道的加热温度，并能通过通讯线缆连接工作站，在工作中进行远程监控。

3) 远程控制软件设计

为提高升级系统的稳定性、安全性、扩展性和适应能力，软件体系采用三层结构（Three Ties）的设计思想，深度挖掘和释放软件设计的能力和对复杂系统的适应性。软件详细设计功能包括控制，查询，监视和预警功能。其中控制包括加热启停和温度梯度控制，查询包括历史数据和报告查询，监视包括温度和视频监控，预警则包括超温提醒和火灾预警，详细界面设计如图2所示。



> 图2. 辅助加热工艺远程控制软件界面

三、现场应用与总结

考虑到加热系统安装位置包括 SG 管板周围一圈，课题组提前对现场应用相关干涉工作进行了分析，需避开蒸发器二次侧 ITV 视频检查，开关手眼孔和一次侧传热管涡流检查工作，最终采取加热温度不高于130℃在试验前和过程中进行管板金属加热。

应用效果方面，项目不受 SG 维修和役检试验进度实现灵活启停加热工作，整体项目节约工期20余小时，为蒸发器一二侧维修役检工作时间窗口减轻了负担，同时提高蒸发器二次侧水压试验期间设备的质量和水平。

应用前景方面，鉴于新型加热工艺现场应用监测数据分析，管板辅助加热工艺可以在24H内实现蒸发器管板加热达到原目标温度即43℃以上，后续可考虑：1) 将管板辅助加热联合 SG 充水加热方案制定为后续主要加热方案，以减少岛内安装 TSD 和布置循环软管的工作；2) 将试验加热目标温度由43℃降低至40℃及以下，以优化整体项目试验工期和减少辅助加热系统投用频率。

整体而言，辅助加热工艺的研究与应用对 SG 二次侧水压试验的工期优化、质量管理和安全控制方面有着重要的意义。

参考文献

[1] 法国压水堆核电厂核岛机械设备在役检查规则：RSE-M.FRANCE：AFCEN，1997（2000）14-15。
[2] 杨伟. 蒸汽发生器二次侧水压试验 [J]. 大亚湾核电，2001（2）：22-24。
[3] 付平，胡培峰，聂学青，等. 大亚湾核电蒸汽发生器二次侧在役水压试验 [J]. 东方电气评论，2003,(01):34-36。
[4] 程钢 王东 张涛 等，蒸汽发生器二次侧水压试验工期研究和工艺创新；中小企业管理与科技；2019年第08期 145-146
[5] 压水堆核岛机械设备设计和建造规则：RCC-M.FRANCE：AFCEN，2002。
[6] 丁训慎. 压水堆核电站蒸汽发生器的制造 [J]. 品牌与标准化，2011.24：51。
[7] 阳江核电厂1、2号机组运行技术规范. 12版. 阳江核电有限公司，2021：20。
[8] 蒸发器总图：PYX4430S000ENPF44DD [Z]. A版. 阳江核电有限公司，2009：1。
[9] 刘伯欢 程钢 陆自立，等. 核电厂蒸发器二次侧水压试验的工艺改进和装置研发；电力设备；2018年第13期 128-130。
[10] 李岳林. 工程热力学与传热学 [M]. 北京：人民交通出版社，2007：150-151。