

核电站蒸汽发生器传热管的降质及其无损检测技术

丁训慎

(核动力运行研究所, 武汉 430074)

摘 要: 蒸汽发生器传热管的无损检测对核电站的安全和经济运行十分重要。采用轴向探头的涡流检验技术可快速、有效地对早期蒸汽发生器的降质进行检验和缺陷尺寸的测量。但是, 近年来蒸汽发生器出现了新的降质形式, 需要采用多种检测技术, 对不同降质的损坏采用不同的检测工具。用涡流和超声技术来检测缺陷有其局限性, 并且有些方法对缺陷尺寸的检测能力极为有限, 有时需要通过取管金相检验来对比确定。

关键词: 核电站; 蒸汽发生器; 降质; 涡流检验; 超声检验

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2008)01-0030-04

Degradation and Nondestructive Testing Techniques of the Steam Generator Tubes in Nuclear Power Station

DING Xun-Shen

(Research Institute of Nuclear Power Operation, Wuhan 430074, China)

Abstract: Nondestructive testing of the steam generator tubes was critical to the safe and economical operation of nuclear power stations. Eddy current testing using bobbin coil probes was fast and effective in detecting and sizing the degradation that took place in early steam generators. However, new forms of degradation had appeared in recent years that required development of more sophisticated inspection technology. Different damages of the degradation required different inspection tools. The eddy current testing and ultrasonic testing had some limitations in detecting degradation damage. The sizing capabilities for these inspection methods were particularly limited. In some cases, the uncertainties in sizing of the defects were determined by comparing with metallographic examinations of pulled tubes.

Keywords: Nuclear power station; Steam generator; Degradation; Eddy current testing; Ultrasonic testing

一座典型的压水堆核电站通常有 2~4 台蒸汽发生器, 每台蒸汽发生器传热管总面积大约为 2 500~12 000 m²。涡流检验由于扫查速度快、灵敏度高, 并且无需直接接触检验材料, 非常适合于检查表面面积大的薄壁管子。但是, 蒸汽发生器传热管的涡流检验面临两大困难, 对降质的检验很难获得可靠结果。其一是蒸汽发生器传热管老化过程中降质形式越来越多, 也越来越难以察觉; 其二是二次侧结

构设计的复杂性和管子外壁上沉积物的增加, 会产生屏蔽检测结果的信号。在过去的 30 年中, 蒸汽发生器传热管相继发生了耗蚀、凹痕、一次侧应力腐蚀、晶间腐蚀、二次侧应力腐蚀、点蚀、高周疲劳和微振磨损等。这些降质机理所引起的破损形式复杂而多样。耗蚀引起管壁变薄而带来较大的变形, 应力腐蚀和点蚀的缺陷体积较小, 凹痕会使管子横截面严重变形。裂纹有浅有深, 可从内壁、外壁甚至内外壁同时产生。通常裂纹以轴向或周向发展, 有时同时发现这两种裂纹, 甚至还有其它形式的裂纹。如果点蚀过密, 则会妨碍涡流检验信号。

蒸汽发生器二次侧的结构设计会给涡流检测带

收稿日期: 2006-07-31

作者简介: 丁训慎(1936—), 男, 教授级高工, 主要从事核电站蒸汽发生器的设计、研究和在役检查工作, 发表论文 150 余篇, 曾获部级科技成果奖二等奖 2 项, 三等奖 3 项, 申报国家专利技术 2 项。

来困难,包括管径和壁厚不断变化的胀管过渡区、管子横截面呈椭圆的 U 形弯管区、不同高度上的支撑结构、U 形弯管区的防振条以及预热器内的管子隔板等。另外,支撑板与管子的环形间隙、胀管过渡区与 U 形弯管区(特别是前几排 U 形弯管)的冷加工、管板上的泥渣和管壁上的污垢也会影响涡流检验。因为泥渣中含有氧化铁,具有铁磁性和磁导率,如果泥渣中含有铜,则会产生强涡流信号屏蔽检测信号。

1 一次侧应力腐蚀

1.1 产生机理、位置及特征

一次侧应力腐蚀(PWSCC)在传热管为合金 600 的蒸汽发生器里出现,是一种晶间腐蚀破裂。需要下列 3 个条件:① 腐蚀环境(高温水)。② 高的残余拉应力和工作应力(接近于屈服强度)。③ 敏感的管子微观结构。一次侧的水温是导致 PWSCC 的主要因素。管子在制造和装配时产生的残余拉应力,运行中的工作应力和热应力也起重要作用。一般只有在管子应力最高的区域,即最里面几排管子的 U 形弯头、胀管过渡区和凹痕区里才发生。到达屈服强度或接近屈服强度时可导致敏感材料的快速腐蚀。

在机械胀管过渡区的 PWSCC 多为轴向裂纹,偶尔在轴向裂纹之间出现短的周向裂纹。在 U 形弯管区 PWSCC 通常为轴向裂纹,并限制在最里面几排管子直段至 U 形管的过渡区内,有时能检测到非轴向裂纹。在凹痕区里,轴向和周向裂纹都会发生。对于轴向 PWSCC 而言,当裂纹尺寸未达到临界裂纹尺寸以前,一般会出现泄漏。而对周向裂纹,由于裂纹扩展情况不清楚,只要发现就要堵管或加装衬管。

1.2 一次侧应力腐蚀的检测

胀管过渡区内的轴向裂纹只有当呈现多条近乎穿壁状态时轴向探头才能探测到,这是由于 PWSCC 裂纹的信噪比较低。管子椭圆、胀管过渡、滚轧胀管以及凹痕等产生的噪声强信号会屏蔽 PWSCC 裂纹的弱信号。当裂纹信号大到可被检测时,该裂纹已发展到穿壁程度。U 形弯管区的轴向裂纹只有当裂纹数量超过一定限值或裂纹较长时轴向探头才能探测到,并且要用旋转扁平探头(RPC)来复检。旋转扁平探头对轴向 PWSCC 裂纹长度的测量精确度为 $\pm 1.5\text{ mm}$ 。

胀管过渡区内周向裂纹深度超过 50%壁厚时,用旋转扁平探头来检测,但该区内的任何变形可能屏蔽 PWSCC 裂纹,应采用分辨几何变化与内壁裂纹的探头来检测(如阵列探头、多个扁平线圈的发射-接收探头 Cecco-3 和 Cecco-5 及旋转超声探头)。

对周向裂纹用旋转扁平探头与取管金相检测来对比,发现旋转扁平探头检测时会低估周向裂纹的弧长。涡流检验对形状复杂裂纹的检测水平较低。在比利时的一座核电站里,胀管过渡区内有大量轴向裂纹并带有短的周向裂纹,结果旋转扁平探头未能检测到周向裂纹,要采用旋转超声探头来检测。

2 晶间腐蚀

2.1 产生机理、位置及特征

晶间腐蚀(IGA)是沿管子表面晶粒边界出现的均匀或比较均匀的腐蚀。在二次侧的泥渣堆和缝隙里发生的沸腾会使不挥发杂质浓缩,在管壁上积聚腐蚀性杂质。IGA 经常是 IGSCC(晶间应力腐蚀)的先兆,即在早期管壁上发生比较均匀的腐蚀(管壁减薄),发展到一定阶段后应力增加(管壁减薄所致),这样会加速生成裂纹(IGSCC),所以常常发现 IGA 伴随着 IGSCC。IGA 主要发生在二次侧管板部分胀管的热侧缝隙区、胀管过渡区和管子与支撑板间的缝隙区。

2.2 晶间腐蚀的检测

晶间腐蚀会导致管材的导电性和导磁性发生缓慢而渐进的变化,差分轴向探头对材料的导电性和导磁性的细微变化不敏感,所以要用绝对轴向探头对晶间腐蚀进行检测,但很难对管子的破损定性。 8×1 阵列探头可对局部深的 IGA 定性,也可对 IGA 的周向区域进行预测。所以,绝对轴向探头发现任何 IGA 的迹象时应复验,以确认是否存在 IGA 并准确确定其深度。另外,如旋转扁平探头或超声探头对轴向和周向裂纹十分敏感,但对几何形状或磁性间断不敏感,因而不能检测晶间腐蚀。

3 二次侧应力腐蚀

3.1 产生机理、位置及特征

二次侧应力腐蚀(ODSCC)需要 3 个条件,即拉应力、材料的敏感性和腐蚀环境(高温水并含有腐蚀性杂质)。多数 ODSCC 裂纹呈轴向,但在胀管过渡区和凹痕区里也观察到周向裂纹。在较高拉应力下 ODSCC 发展非常迅速。ODSCC 的腐蚀形态包括

单条或数条主裂纹,裂纹的扩展都沿着晶间发展,主要发生在部分胀管的热侧缝隙区、泥渣堆区和管子与支撑板间缝隙区。通常,缝隙区和直管段的 ODSCC 裂纹呈轴向发展。

3.2 二次侧应力腐蚀的检测

对轴向裂纹使用多频轴向探头能减小管壁上杂质(如铜)、管板和支撑板等的影响,增强对深的轴向裂纹($>40\%$ 壁厚)的检测能力,并用旋转扁平探头来复验可疑部位。但取管金相检验发现并不是所有裂纹($>40\%$ 壁厚)都能检测出来,于是开发了支撑板区轴向 ODSCC/IGA 修理标准,其以轴向探头的电压为基础来代替以 40% 壁厚深度。

对胀管过渡区和支撑板区的周向裂纹使用旋转扁平探头进行检测时会低估弧长并很难对深度进行准确的测量。通过比较相应的取管金相检验,裂纹实际弧长大约为 270° ,而涡流测量的相应弧长为 90° 。对旋转扁平探头进行改进,采用 Cecco-5 探头检测,可使弧长测量值的精确度达 $\pm 37^\circ \sim 45^\circ$ 。

对支撑板凹痕区的周向裂纹使用旋转扁平探头,裂纹检测范围大约为 50% 壁厚、 50° 弧长,或 100% 壁厚、 23° 弧长。

最近国际上有的研究机构正在开展测量周向裂纹深度的研究。使用旋转十字点状(Plus Point)探头(该探头对轴向和周向裂纹都十分灵敏),通过取管金相检验来确认测量深度。某些核电站使用超声检验胀管过渡区的周向裂纹,包括几条被孔桥隔开的连续小裂纹,通过取管金相分析得到了确认。

4 点蚀

4.1 产生机理、位置及特征

点蚀是一种在传热管上产生点坑的局部腐蚀,其形成原因可能是在管内交变应力下的氧化物保护层发生破裂,氧化层脱落,管子表面上形成点坑。点蚀是最具有侵蚀性的腐蚀形式,常导致管壁穿孔而泄漏。

点蚀通常发生在管板冷侧泥渣堆里,管板顶部和第 1 块支撑板之间,在热侧有时也会发现一些点蚀。点坑在泥渣堆顶部或附近形成,其底部带有腐蚀产物,例如氧化铬、硫化物和金属铜等。

4.2 点蚀的检测

涡流方法很难对沉淀铜的点蚀进行检测和定性。点蚀由于尺寸小并含有高导电性腐蚀产物铜,涡流对铜比对点蚀反应更大,因此检测深度的准确

性受到极大影响。一般采用双频(100 和 600 kHz)多参数涡流探头来抑制铜的影响。

加拿大安大略水电公司已经开发出旋转超声检测系统,用于测量传热管 Monel 400 点蚀深度。使用高频超声(25 MHz)来准确测量点蚀深度,以水作为耦合剂,其误差不超过 $\pm 2\%$ 管壁厚度,与取管金相检验结果吻合较好。

5 耗蚀

5.1 产生机理、位置及特征

耗蚀是由于传热管外壁产生均匀腐蚀而使管壁减薄。在第一批压水堆核电站里,蒸汽发生器传热材料为合金 600,二次侧水化学处理使用磷酸钠来保证 pH 值,以避免二回路碳钢部件的腐蚀。由于磷酸钠水解而生成磷酸可在缝隙内积聚,与管材合金相互作用而生成钠-镍磷酸盐化合物,造成这些区域内传热管的耗蚀。耗蚀的主要特征为:

(1) 被腐蚀的金属表面很光滑,并露出基体金属,在被减薄的管壁附近,附着管材成份 Ni, Cr 等的磷酸盐。

(2) 被腐蚀的金属表面无裂纹。

(3) 被腐蚀处无残余应力。

耗蚀不是应力腐蚀,也不是由于摩擦等造成的机械减薄。通常发生在管板上泥渣堆积区。

5.2 耗蚀的检测

当传热管壁厚减薄超过 $10\% \sim 20\%$ 时,轴向探头不仅可以检出耗蚀还可以测量其尺寸。

6 凹痕

6.1 产生机理、位置及特征

凹痕是由于碳钢支撑板腐蚀产物在管子与支撑板间隙内积聚而使管子发生塑性变形。这些腐蚀性氧化铁体积比腐蚀金属基体要大得多,它们挤压管子,并使管子与支撑板变形。管子的变形呈非对称性,其结果是管壁出现非均匀应力。凹痕会造成支撑板的损坏,甚至使管壁的拉伸应力达到屈服强度以上,可能诱发一次侧或二次侧应力腐蚀破坏。

凹痕主要发生在碳钢支撑板、管板间隙以及泥渣堆中。

6.2 凹痕的检测

采用多频/多参数轴向探头检验凹痕并测量尺寸。将多种频率测得的涡流信号综合起来,区分有用或无用参数,来进行凹痕的检测。其中,较低频率

可增强对支撑板和外壁沉积物的检测灵敏度,较高频率能增强对内壁变化的检测灵敏度。

采用由 8 个互不接触并相隔 45° 的扁平式线圈组合在一起的阵列探头,用于对凹痕尺寸进行精确测量,直径精确到 $\pm 0.02\text{ mm}$ 。还可采用超声检测凹痕尺寸,通过测量探头中轴线相对管壁的位移来决定管子径向轮廓。

7 高周疲劳

7.1 产生机理、位置及特征

高周疲劳是在周期载荷下出现的一种降质过程,由于 U 形弯管区里的流体振动和不恰当的防振条布置等因素造成的。管子高的残余应力、缺陷(微振磨损或微裂纹)、杂质浓度等都会降低管材的疲劳强度。微振磨损区对高周疲劳非常敏感,只要较低的应力(低于无微振磨损的疲劳强度)就会在管壁上出现疲劳裂纹。如果发生交变应力,会引起裂纹的发展和扩大。疲劳裂纹始于应力集中区域。

最容易发生高周疲劳的地方为 U 形弯管区和管板上表面进口区,此处流速高并横向冲刷管束。裂纹往往为周向裂纹。

7.2 高周疲劳的检测

高周疲劳裂纹的产生非常慢,但发展非常快,采用涡流探头很难检测。这是因为与微振磨损或耗蚀所产生的强信号相比,高周疲劳裂纹是弱信号。另外,由于存在防振条或支撑板,也使检查裂纹发生困难。采用 8×1 阵列探头在 400 和 600 kHz 频率下工作,能消除几何结构产生的影响,提高裂纹检测的可靠性和尺寸测量的准确性。三菱重工已用旋转扁平探头来检测周向疲劳裂纹。运用端部衍射技术的超声检验也可以探测高周疲劳裂纹。

8 微振磨损和机械磨损

8.1 产生机理、位置及特征

传热管的振动会引起与防振条或支撑板的碰撞或切向滑动,导致管子的局部磨损。这种管子与防振条或支撑板之间的振动,并且振幅较小的表面间磨擦的过程称为微振磨损。遗忘在蒸汽发生器内的外来物与相邻管子磨擦会造成机械磨损。

在 U 形弯管的防振条处以及预热器挡板处会发现微振磨损。外来物引起的机械磨损仅限于管板上的周边管子。微振磨损的形状由支撑结构的接触区决定,其长度为防振条的厚度。机械磨损的形状是未知的。

8.2 微振磨损和机械磨损的检测

由合金 600 或 690 制成的防振条通常镀了铬,另外微振磨损可以在管子外壁的一侧或两侧,因此测量磨损深度比较难。一般采用双频涡流检测系统对微振磨损定性,该系统通过校准可减小防振条的几何影响。然后用 8×1 阵列探头进一步确认磨损深度和几何特征。

采用轴向探头较易检测外来物产生的机械磨损,但受损区域的尺寸测量的准确度较低,这是因为磨损形状是不可预知的。

9 结束语

国内核电站蒸汽发生器传热管的役前和在役检查一般采用轴向探头涡流检验,还可使用旋转扁平探头,该探头可给出比轴向探头更详细的缺陷类别、尺寸和方向等信息,但检验速度较慢,一般用于对缺陷进行定性定量分析和对管子复杂区域进行补充检查,以发现轴向探头可能漏检的缺陷。为了蒸汽发生器的安全可靠运行,无损检测工作者还需要了解各种降质机理和有效的无损检测技术,以便为各种降质进行检测和定性。

参考文献:

- [1] MacDonald P E, Shah V N. Steam generator tube defect detection reliability and sizing accuracy [R]. NUREG/CR-6365:204.
- [2] John Douglas. Solutions for steam generators [J]. EPRI Journal, 1995, (5/6): 28.
- [3] Dobbeni D. NDT techniques for nuclear component [C]. Brussels: Belgatom 2nd International Conference, 1995.
- [4] 丁训慎. 核电站蒸汽发生器传热管的腐蚀与防护[J]. 腐蚀与防护, 2000, 21(1): 15.
- [5] 丁训慎. 核电站蒸汽发生器降质预防和在役检查[J]. 核科学与工程, 1999, 19(3): 193.

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告