

基于声发射技术的蒸汽发生器 传热管点腐蚀研究

侯素霞, 罗积军, 张清华, 徐 军

(第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

摘要: 蒸汽发生器传热管的腐蚀是影响核动力装置安全运行的重要问题之一, 传热管的腐蚀以点腐蚀的危害最为常见。利用声发射仪器, 对蒸汽发生器传热管进行腐蚀实验时的信号进行采集和分析, 并对腐蚀点进行了准确定位。实验结果表明, 传热管的点腐蚀经历 3 个阶段: 发展期、平稳期和迅速发展期。声发射技术能比其它任何无损检测方法更早地发现传热管腐蚀损伤, 可对蒸汽发生器的安全和运行情况进行在线实时监测, 具有重要的意义。

关键词: 蒸汽发生器; 点腐蚀; 声发射技术

中图分类号: TG174.4; TL353

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2010)-03-0315-05

Analysis Corrosion Dots of Steam Generator Tubes Based on Acoustic Emission Technique

HOU Su-xia, LUO Ji-jun, ZHANG Qing-hua, XU Jun

(The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: The corrosion inspection of steam generator tubes is an important problem which ensures the security of the nuclear plants. The most conventional corrosion of the tubes are corrosion dots. Based on the principle of acoustic emission technique, acoustic emission signals about tubes of steam generator gathered by instrument were analyzed, and the corrosion dots in the tubes were located accurately. The results show that corrosion dots of heat transfer tube are through three phases: Development period, stable period and rapid development period. Acoustic emission technique can be found earlier corrosion damage than any other non-destructive testing methods. The real-time inspection on the work of steam generator was achieved, according to which the corrosion dots can be judged timely.

Key words: steam generator; corrosion dot; acoustic emission technique

蒸汽发生器作为核动力装置的关键设备之一, 既是一、二回路的枢纽, 又是分隔一、二次侧

介质的屏障, 对于整个核动力系统的安全运行有着十分重要的作用。蒸汽发生器传热管管壁

上的点腐蚀作为应力的集中源,通常是应力腐蚀等局部腐蚀的先导。在交变应力作用下,点腐蚀会形成疲劳裂纹并扩展而引起破裂,由于管壁破裂而引起的泄漏会使核电站强迫停堆。据报道,国外压水堆核动力装置的非计划停堆次数中约 25% 是因蒸汽发生器出现故障而造成的^[1],而蒸汽发生器的传热管是事故多发区域。截止 2005 年 12 月,世界上有 35 座核电站蒸汽发生器由于传热管点腐蚀而堵管,还有几座核电站出现严重的腐蚀,包括高丽 1 号机组(因点腐蚀而使 804 根管子被堵,1 578 根管子因各种降质而衬管)和磨石 2 号机组(在原蒸汽发生器上因点腐蚀而使 1 655 根管子被堵,5 164 根管子因各种降质而衬管)^[2],每根传热管通道断裂均可能造成放射性物质泄漏及核动力装置的长期封闭。因此,世界各国均把改进和研究蒸汽发生器技术作为完善核动力装置技术的重要问题,尤其是在役蒸汽发生器工作时传热管的点腐蚀监测技术问题更需进一步研究。

蒸汽发生器工作在高温下,其部件机械强度较低,而热膨胀却很大,容易引起点腐蚀问题。传热管管壁点腐蚀很难被探测到,它外观隐蔽,但破坏性极大,若任其发展,会导致金属穿孔直到整个结构被破坏。因此,对传热管腐蚀初期的点腐蚀监测的研究越来越受到人们的重视。在众多的无损检测技术中,声发射(AE)技术具有在线、动态及快速、经济的特点,既保证了设备的安全使用,又可为维修决策提供依据,有效地降低了维修费用^[3]。

本工作对蒸汽发生器传热管进行腐蚀实验时的 AE 信号进行采集和分析,利用 AE 技术对蒸汽发生器传热管进行实时监测。

1 AE 检测技术

1.1 原理

AE 是指物体在受到形变或外界作用时,因迅速释放(弹性)能量而产生瞬态应力波的一种物理现象^[3]。利用神经网络、小波包分析等工具对 AE 信号检测和分析成为一种检测材料内部结构变化的有效手段,这就形成了 AE 检测技术。图 1 为 AE 检测系统工作原理图。

由图 1 可知,耦合在零件表面的宽带传感

器将材料内部的 AE 源(材料内部缺陷处,如腐蚀裂纹、屈服和塑性变形处、夹渣物的断裂和脱开处)产生的弹性波转变为电信号,将信号经过放大和处理,使之特性化,从而获得材料内部 AE 源的特征参数,通过对探测到的 AE 信号的特征参数进行处理和分析,得到被探测材料和结构内 AE 源的大量信息。AE 检测的目的是发现 AE 源的位置及其发展过程。与超声、涡流等其它常规无损检测方法相比,AE 具有能动态监测和覆盖面积大的优势。

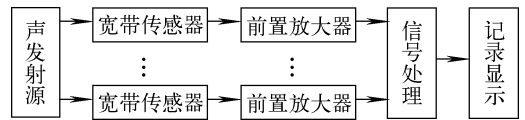


图 1 AE 检测系统工作原理图

Fig. 1 Basic principle of AE technique

1.2 AE 信号特征参数

AE 信号分为连续信号和突发信号,其特征提取电路将超过阈值信号测量为 AE 信号的特征参数,连续信号参数包括振铃计数、平均信号电平和有效值电压等;突发信号参数包括波击(事件)计数、振铃计数、幅度、能量计数、上升时间、持续时间和时差等。常用突发信号特征参数如图 2 所示^[4]。利用神经网络和小波分析对这些特征参数进行分析,可准确判断材料内部腐蚀和缺陷的产生及形成过程。

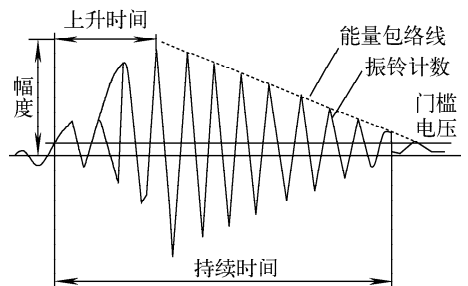


图 2 声发射信号参数

Fig. 2 AE signal parameters

如果仪器接收的 AE 信号是一随机信号, Harris 认为^[5],从传感器输出的 AE 信号是由有阻尼的余弦波组成,其频率大致相当于传感器的谐振频率,如图 3 所示。传感器输出信号电压可表示为:

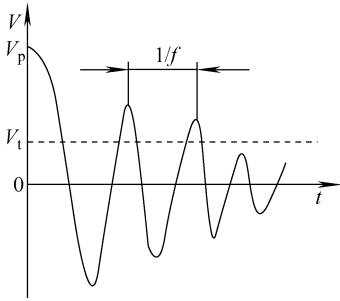


图3 AE信号衰减波形

Fig. 3 Decay wave of simplified AE signal

$$V = V_p e^{-\alpha t} \cos 2\pi f t \quad (1)$$

式中: V 为瞬时电压; V_p 为峰值电压; α 为衰减系数; t 为时间; f 为信号频率(相当于传感器的谐振频率)。

设阈值电压为 V_t , 由式(1)可得:

$$V_t = V_p e^{-\frac{\alpha n}{f} \cos((2\pi f) \frac{n}{f})} = V_p e^{-\frac{\alpha n}{f}} \quad (2)$$

即 1 个事件的振铃计数可表示为:

$$n = \frac{f}{\alpha} \ln \frac{V_p}{V_t} \quad (3)$$

可见, 1 个事件的振铃计数 n 与衰减系数 α 、工作频率 f 、信号峰值电压 V_p 和阈值电压 V_t 有关。根据材料在腐蚀过程中发出的 AE 信号, 实际上是将单个点腐蚀事件与 AE 事件联系起来, 从而达到识别、监测点腐蚀过程的目的。这种计数方法既适用于突发信号, 也适用于连续信号, 因此在 AE 检测中得到广泛应用。

1.3 AE 源的区域定位

对特征参数进行分析时, 重要的是准确判断 AE 源的位置, 定位方法有多种, 较常用的是区域定位法。由于传播衰减的影响, 每个传感器主要接收其周围区域发生的 AE 波。区域是指围绕 1 个传感器的区域, 而来自该区的 AE 波首先被该传感器接收。区域定位, 按传感器监视各区域的方式或按声发射波到达各传感器的次序, 确定 AE 源所处的区域。当仅考虑首次到达的波击信号时, 可提供波源所处的主区域, 而该区域以首次接受传感器与临近传感器间的中点连线为界。当考虑第 2 次或第 3 次到达波击信号时, 可进一步确定主区中的第 2 或第 3 分区。常用的区域定位原理示于图 4。

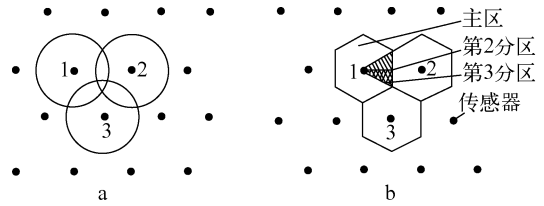


图4 AE源区域定位图

Fig. 4 Scheme of AE source regional location

a——圆形区域定位法; b——六边形区域定位法

2 蒸汽发生器传热管状态监测实验

2.1 实验装置

研究对象为某船用蒸汽发生器的两根传热管。该蒸汽发生器和中间换热器内部构件采用奥氏体不锈钢(321型), 中间换热器传热管采用合金 600(成份列于表 1), 设计温度约 900 °C, 两管管长均为 1.3 m。实验仪器采用德国 Vallon 公司生产的 ASM-4 型声发射仪。其检测设备包括传感器、电缆、前置放大器、滤波器等, 装置如图 5 所示。图 5 中传感器采用的是频率范围为 100~1 000 kHz 的宽频带传感器。表面涂有耦合剂(凡士林)的传感器利用夹子紧密固定在平行通道外侧。相邻传感器沿管子轴向间距为 6 m, 每个传感器均通过电缆与前置放大器相连, 用于信号的传输, 电缆长度为 1.5 m, 前置放大器的动态范围为 40~85 dB, 频带宽度可在 50 kHz~2 MHz 范围内, 在通频带内增益的变动量不超过 3 dB。滤波器采用 100~350 kHz 的带通滤波器。

表 1 试样合金 600 的主要化学成份

Table 1 Main chemical compositions of alloy 600 sample

| 元素 | 含量/% | 元素 | 含量/% |
|----|------|----|------|
| Ni | 44.5 | Fe | 3.0 |
| Cr | 24.8 | Mn | 1.0 |
| Co | 13.2 | Si | 1.0 |
| Mo | 9.5 | Cu | 0.5 |
| Al | 1.4 | Ti | 0.6 |
| C | 0.1 | | |

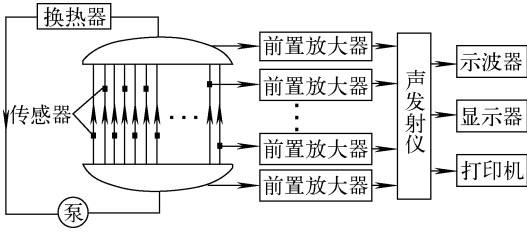


图5 蒸汽发生器平行通道的AE监测装置图

Fig. 5 AE monitoring device of steam generator parallel channel AE signal

2.2 实验及数据分析

蒸汽发生器在设计时,假设二次侧介质中不存在氧化剂时,预期传热管不会产生点腐蚀。但点腐蚀的实验研究表明^[3],当存在氧化剂(如铜)、氯离子、硫酸盐和硅酸盐时,合金600会产生点腐蚀现象。作为用于点腐蚀浸泡实验的溶液首先要求其中含有侵蚀性的阴离子(如氯离子),以使钝化膜局部活化;此外还应含有促进点腐蚀稳定发展的氧化剂,以其高氧化还原电位促使材料发生点腐蚀。选取10% CuCl₂和3.5% NaCl(pH=3)作为实验所用腐蚀溶液。将两根编号后的传热管分别浸泡在腐蚀溶液中,采集腐蚀过程的AE信号进行分析研究。将1#管浸泡在10% CuCl₂溶液中,2#管浸泡在3.5% NaCl(pH=3)溶液中。图6标出单位时间内AE撞击数和能量(图中, Eu为能量单位)随实验时间的变化情况。

从图6可看出,点腐蚀过程中,AE信号的一个重要特征是,AE撞击数和能量随时间的变化均逐渐增加,然后再减少,且经过一定时间后,趋于稳定,说明此时的腐蚀速率在变慢,又经过一段时间后,出现强烈的AE信号。这说

明传热管点腐蚀大致经历以下3个阶段:1)发展期,此阶段点腐蚀AE信号增加很快,点腐蚀初期发展迅速,形成局部电池;2)平稳期,随着应力的释放,AE信号变少,腐蚀速率变慢,但腐蚀仍在发展;3)迅速发展期,此阶段点腐蚀的AE信号迅速增加,此时腐蚀面积增加的并不快,但腐蚀深度迅速增加,如不采取有效措施,点腐蚀产生的孔洞将穿透材料,将导致管壁泄漏等一些事故。如采取早期预防措施(如清洗等),使腐蚀不致太严重,控制在第2阶段(平稳期),使传热管处于正常状态。实验表明,使用AE技术实施点腐蚀损伤的早期监测并及时采取措施,可大幅延长传热管的使用寿命。两管腐蚀过程的AE信号有着相似的结果,说明实验结果具有重复性。

振铃计数与幅度的关系示于图7。从图7可见,传热管点腐蚀的另一个重要特征是,当试件浸在腐蚀液中浸泡一定时间后,才有明显的声发射信号产生。因此,可利用声发射信号起始点确定产生早期腐蚀(或腐蚀萌生)的时间。两管约经20 h才会产生较明显的声发射信号。这一结果表明,AE产生的过程与点腐蚀的重要特征非常吻合:点腐蚀仅在一定的条件下,即当阳极极化电位高于点腐蚀成核临界电位时才会发生。这一结果还表明,声发射技术能比其它任何无损检测方法更早地发现传热管腐蚀损伤。

利用AE技术,还可准确判断点腐蚀部位,结果示于图8。1#管的点腐蚀部位分别为0.15、0.32、1.02和1.28 m,2#管的点腐蚀部位分别为0.25、0.52、1.02和1.23 m。这说明在同样条件下,在传热管两端点腐蚀容易发生。

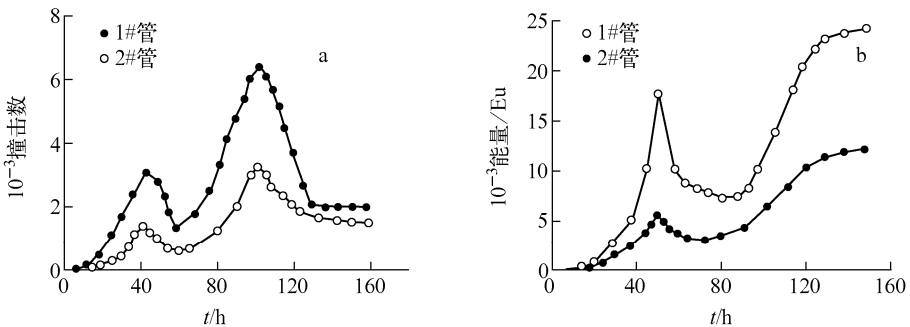


图6 撞击数(a)和能量(b)随时间的变化

Fig. 6 Hits (a) and energy (b) vs. time

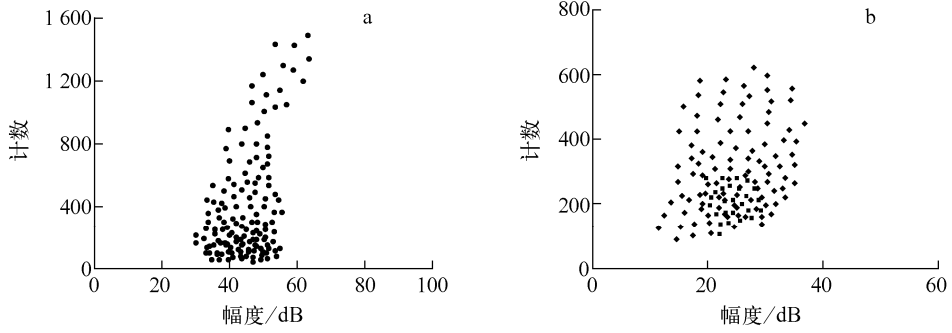


图7 1#管(a)和2#管(b)振铃计数与幅度的关系
Fig.7 Counts vs. amplitude of tube No.1 (a) and No.2 (b)

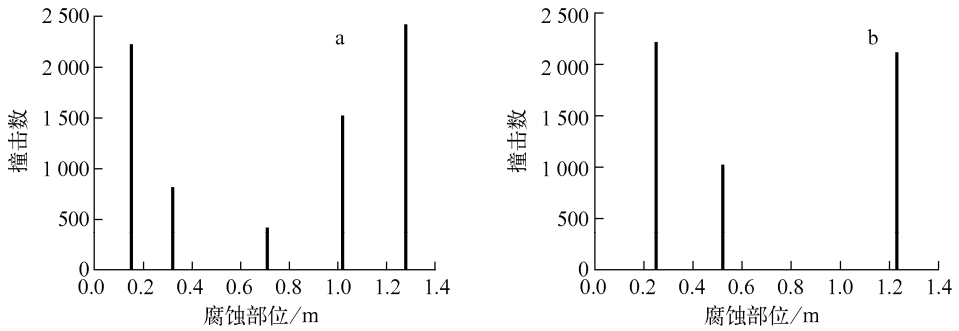


图8 1#管(a)和2#管(b)腐蚀点的定位
Fig.8 Location of corrosion dots for tube No.1 (a) and No.2 (b)

3 结论

本工作利用 AE 检测技术对蒸汽发生器的传热管点腐蚀问题进行研究,得出传热管点腐蚀的发展规律,并对腐蚀部位进行准确定位。实验结果表明,利用 AE 检测技术可对蒸汽发生器的安全和运行情况进行在线实时监测,具有重要意义。但对蒸汽发生器传热管泄漏时发出的特殊 AE 信号还需进一步深入研究。

参考文献:

[1] 丁训慎. 核电站蒸汽发生器传热管的点腐蚀及其防护[J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(7): 364-366.
DING Xunshen. Pitting and its protection of steam generator tubes in nuclear power plants [J]. Corrosion & Protection, 2007, 28(7): 364-

366(in Chinese).
[2] 丁训慎. 核电厂蒸汽发生器的 EDTA 化学清洗 [J]. 清洗世界, 2009, 25(3): 15-18.
DING Xunshen. EDTA chemical cleaning of NPP steam generator [J]. Cleaning World, 2009, 25 (3): 15-18(in Chinese).
[3] 李金桂, 吴再思. 防腐蚀表面工程技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 444.
[4] GORMAN Z R. Source location in thin plates using cross-correlation [J]. JASA, 1991, 90(5): 2 551-2 556.
[5] JI H J, YOUNG C K. The effete of tube rupture location on the consequences of multiple steam generator tube rupture event [J]. Annals of Nuclear Energy, 2002, 29(3): 1 809-1 826.