

蒸汽发生器传热管腐蚀监测技术研究

侯素霞^{1,2}, 赵福宇¹, 罗积军², 郜云¹

(1. 西安交通大学 多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049; 2. 第二炮兵工程学院 物理室, 陕西 西安 710025)

摘要: 蒸汽发生器传热管的腐蚀监测是保障核动力装置安全运行的重要问题之一。在对声发射技术原理进行介绍的基础上, 采集和分析利用声发射仪对传热管进行加压实验时的声发射信号。实验结果表明: 在传热管上形成微小直径穿孔性管壁腐蚀点, 这种点蚀形成后, 腐蚀先是向深处发展, 形成尖端腐蚀, 然后再向两侧延伸, 逐渐形成裂纹, 随着裂纹的进一步发展便形成泄漏事故; 利用声发射仪对蒸汽发生器的传热管工作过程进行实时监控, 可实时判断传热管材料的应力腐蚀情况, 操作人员可根据声发射信号强度及其变化控制核动力装置的运行情况。

关键词: 蒸汽发生器; 核动力装置; 腐蚀

中图分类号: TG172.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2009)04-0334-05

Analysis on Corrosion Inspection of Steam Generator Heat Transfer Tubes

HOU Su-xia^{1,2}, ZHAO Fu-yu¹, LUO Ji-jun², TAI Yun¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Section of Physics, The Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: The corrosion inspection on heat transfer tubes of steam generator is an important problem which ensures the security of the nuclear plants. Based on the principle of acoustic emission (AE) technique, acoustic emission signals about tubes of steam generator gathered by instrument were analyzed. The results show that corrosion dots come into being for tubes of steam generator, and the corrosion dots develop deeply to form tip corrosion which extends to become crack gradually, which causes serious leaking accident. The real-time inspection on the work of steam generator was achieved, according to which the stress corrosion can be judged timely. So the operator can control the nuclear plants according to intensity of acoustic emission signals.

Key words: steam generator; nuclear plants; corrosion

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

有着十分重要的保障作用。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, 而蒸汽发生

器内部的传热管是事故多发区域^[1]。截至1995年12月,有13座核电站蒸汽发生器因传热管腐蚀而堵管,少数核电站有16%的腐蚀管将要穿壁或穿透管壁,还有几座核电站出现严重的腐蚀,包括印第安角3号机组(在原蒸汽发生器上因点腐蚀而使1 290根管被堵,3 606根管装上衬管)^[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,世界各国均将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环节,尤其是在役蒸汽发生器工作时传热管的腐蚀监测技术更需进一步研究。

本工作针对这一问题提出一新方法,根据传热管管壁材料在损坏过程中发出的声发射信号,对传热管的腐蚀情况进行状态监测,以确保蒸汽发生器的安全运行。

1 声发射技术简介

1.1 声发射技术原理

固体材料受力时,其内部的缺陷或材料微观结构的不均匀性会引起应力集中,促使其塑性变形加大或引发裂纹的形成与扩展,这时会以这些缺陷为中心通过瞬态弹性波的形式迅速向外界释放能量。这种现象称声发射(AE)。利用神经网络、小波包分析等工具对声发射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,这便形成了声发射检测技术,其基本原理示于图1。

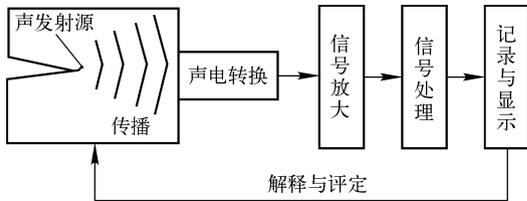


图1 声发射技术基本原理

Fig.1 Basic principle of AE technique

由图1可知,先用耦合在零件表面的压电陶瓷探头将材料内声发射源(如裂纹、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,然后加以放大和处理,使之特性化,从而获得材料内声发射源的特征参数,并记录与显示。通过分析这些特征参数,可得出

材料内部缺陷的有关情况。

1.2 声发射信号特征参数

特征提取电路将超过门槛信号测量为几个AE信号特征参数。连续信号参数包括:振铃计数、平均信号电平 and 有效值电压;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。常用突发信号特性参数示于图2。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裂纹和缺陷的产生及形成过程。

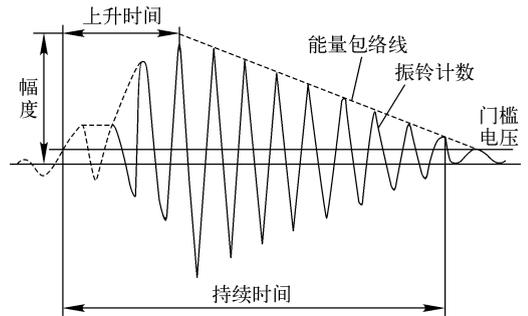


图2 声发射信号参数

Fig.2 AE signal parameters

1.3 声发射源的区域定位

对特征参数进行分析时,重要的是准确判断AE源(材料内部缺陷处)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边区域发生的AE波。周边区域是指围绕1个传感器的区域,而来自该区的声发射波首先被该传感器接收。区域定位即是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,粗略确定AE源所处的区域。当仅考虑首次到达波击信号时,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3。

2 蒸汽发生器传热管声发射状态监测技术应用

2.1 蒸汽发生器平行通道的声发射检测设备

蒸汽发生器和中间换热器内部构件采用奥氏体不锈钢(321型或316型),中间换热器传

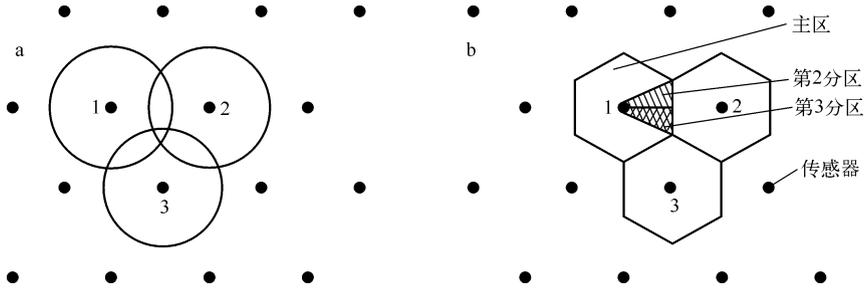


图3 声发射源区域定位图

Fig. 3 Scheme of AE source regional location

a——圆形区域定位法;b——六边形区域定位法

热管和热头采用 Inconel617, 设计温度约 $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[2]。因工作在高温下的部件机械强度很低, 而热膨胀却很大, 所以, 蒸汽发生器中传热管的流动不稳定性所带来的热应力腐蚀问题不容忽视。蒸汽发生器的 AE 检测设备包括传感器、电缆、前置放大器、滤波器等。蒸汽发生器平行通道声发射监测装置示于图 4。由图 4 可看出, 传感器采用的是频率范围为 $100\sim 1\ 000\text{ kHz}$ 的宽频带传感器。传感器表面涂有耦合剂紧密固定在平行通道外侧。相邻传感器的间距为 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应尽可能大, 一般为 $60\sim 85\text{ dB}$, 滤波器采用 $100\sim 350\text{ kHz}$ 的带通滤波器。

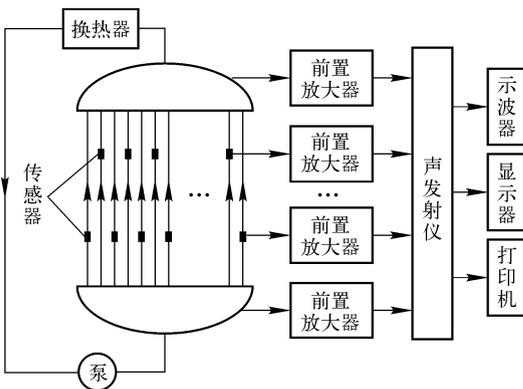


图4 蒸汽发生器平行通道声发射监测装置

Fig. 4 AE monitoring device
of steam generator parallel channel

2.2 实验及数据分析

根据 1972 年 2 月某核动力系统蒸汽发生

器发生泄漏事故后的实验数据分析, 发现对蒸汽发生器威胁最大的是不锈钢构件上的应力腐蚀导致的开裂。一级汽水分离器以下的大部分不锈钢结构件均不同程度出现了裂纹, 尤其以管束最为严重^[2]。

实验采用德国 Vallon 公司生产的 AESM 声发射仪。采用单管压泵试验 4 根奥氏体不锈钢管, 并将管子进行编号。其中, 预制几处腐蚀进行实验(表 1)。对蒸汽发生器的传热管平行通道而言, 由于流动不稳定性而使材料产生热应力腐蚀过程初期为点蚀, 点蚀是一种在蒸汽发生器传热管上产生的微小直径穿孔性管壁腐蚀点, 其原因是在该处形成了局部腐蚀电池^[3]。它的危害性不仅在于点蚀本身会造成穿孔性降质, 更重要的是点蚀是应力腐蚀等局部腐蚀的先导, 严重的甚至会引起核电站的强迫停堆。这种点蚀随热应力的集中又会形成裂纹, 因此, 将平行通道的 AE 源(材料损坏部分)分为点蚀、裂纹的产生和生长区域两种情况进行了实验。从表 1 可知, 利用声发射仪进行观察, 发现有 4 处直线状裂纹, 另有 10 处点蚀, 腐蚀位置精确确定。经酸洗后显微镜观察发现 2 号管的点蚀数出现误差, 其余各管数据准确。经分析, 2 号管误测的一处点蚀距加压泵较近, 阈值 26 dB (考虑背景噪声, 一般不低于 26 dB) 略低, 根据实际情况调整至 32 dB 后, 实验结果准确率达到 100% 。所以, 利用声发射仪对蒸汽发生器的运行状态进行实时监测, 可将传热管的热应力腐蚀位置和发展程度进行综合判断, 确保核动力装置的安全运行。

表 1 实验结果比较
Table 1 Experiment results comparison

管子编号	实验前预制	声发射仪观察结果	酸洗后观察结果	准确率/%
1	1个点蚀,1个裂纹	3个点蚀,1个裂纹;位置确定,报警	3个点蚀,1个裂纹	100
2	1个裂纹	3个点蚀,2个裂纹;位置确定,报警	2个点蚀,2个裂纹	85
3	1个点蚀	1个点蚀,1个裂纹;位置确定,报警	1个点蚀,1个裂纹	100
4	无裂纹和点蚀	3个点蚀,无裂纹;位置确定,报警	3个点蚀,无裂纹	100

选取 2 号管为研究对象,腐蚀情况示于图 5。图 5 中裂纹 4 不是预先制造的腐蚀,所以,利用声发射仪可对裂纹 4 产生过程,包括点蚀的形成和裂纹生长过程所发出的声发射信号进行连续实时观察。图 6 为波击经历图。波击经历是单位时间内声发射仪接收到超过门槛值的 AE 信号,每一次信号对应于图 7、8 和 9 的幅度、振铃计数和能量。从图 6~8 可观察到整个应力产生裂纹过程中 AE 信号参数的变化过程。可看出,在热应力集中区域初期,有很强的 AE 信号,此时形成点蚀,随着点蚀的形成,材料的部分应力得到释放,此时,出现相对稳定但较弱的 AE 信号,但随热疲劳的进一步深化和扩展,积聚的应力使材料点蚀处逐渐产生裂纹,并发出更为强烈的 AE 信号,当强度达到一定数值,在材料可能被穿透之前声发射仪确定腐蚀位置并发出报警信号,操作人员根据报警信号,及时地停产检修或更换设备,可以预防核动力装置事故发生。

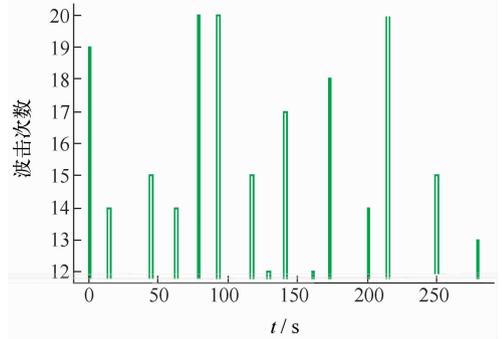


图 6 波击经历图

Fig. 6 Relation of wave hit and time

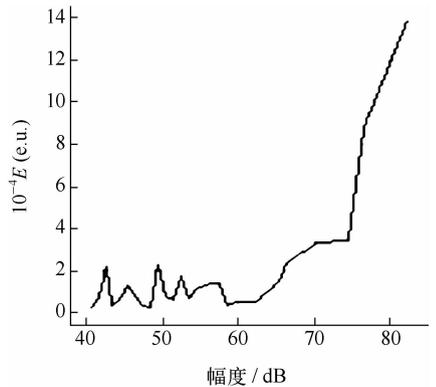


图 7 能量幅度图

Fig. 7 Relation of energy and amplitude

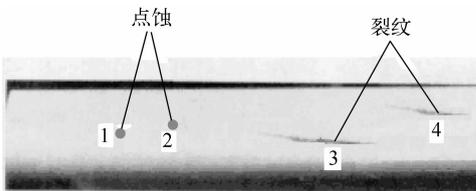


图 5 2 号管腐蚀放大图

Fig. 5 The 2nd tube corrosion enlargement map

通过对 4 根管子的实验结果进行分析,发现:1) 点蚀形成后,腐蚀的发展先是向深处发展,形成尖端腐蚀,然后再向两侧延伸,逐渐形成裂纹;2) 所有裂纹均呈纵向(平行于管子长度方向)发展,但也常看到与纵向成约 30° 角的斜纵向裂纹。这些纵向裂纹或斜纵向裂纹通常

是单生的、分散的、取向相同的。实验结果和实际过程一致^[4]。

3 结论

本文提出一种新的研究方法,即利用声发射检测技术对蒸汽发生器的传热管热应力腐蚀所造成管壁材料损坏问题进行研究。利用该方法进行实验研究后,得出传热管材料的点蚀和裂纹的发展规律,并对蒸汽发生器传热管的严重腐蚀处进行准确定位和报警。因此,利用

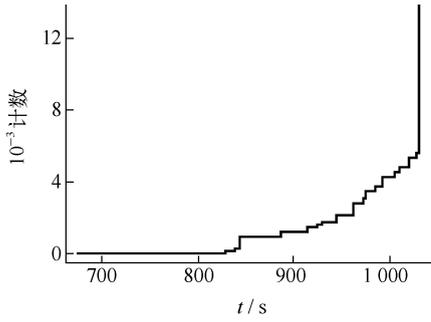


图8 振铃计数经历图

Fig. 8 Relation of ringing count and time

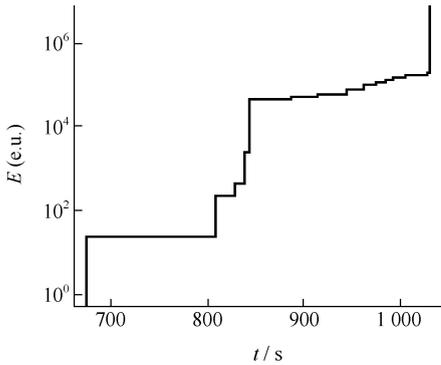


图9 能量经历图

Fig. 9 Relation of energy and time

声发射检测技术可对蒸汽发生器平行通道的安全和运行情况进行实时监测。但对蒸汽发生器的传热管泄漏时发出的特殊声发射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): 15-18.
DING Xunshen. Corrosion and protection of nuclear power plant steam generator tubes [J]. Corrosion & Protection, 2000, 21(1): 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] LEE D H, LEE J Y. Evaluating foreign object damage in steam generator tubes [J]. NEI, 2002, I: 32-35.