

涡流 X-probe 探头的试验及应用

郭 韵, 曹 刚

(国核电站运行服务技术有限公司, 上海, 200233)

摘 要: 探头是阵列涡流检测的关键部件, 介绍了一种新型的内穿过式涡流阵列探头——X-probe。分析了 X-probe 探头的工作原理, 并通过试验研究, 归纳了 X-probe 探头检测的不同类型缺陷信号特征、支撑下缺陷响应以及伤深与相位的关系。并介绍了 X-probe 探头在核电厂凝汽器传热管涡流检查的应用情况。试验结果表明, X-probe 探头能够获取缺陷轮廓并依据 AF 和 CF 通道的幅值分辨出缺陷方向。现场应用证实 X-probe 探头具有良好的管板区缺陷检出能力, 能很好地检测分辨并测量周向复合缺陷的伤深。

关键词: 涡流阵列探头; X-probe; 涡流检测

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)06-0014-04

Experimental Research and Application of ECT X-probe

GUO Yun, CAO Gang

(State Nuclear Power Plant Service Company, Shanghai 200233, China)

Abstract: Probe is critical component of Eddy Current Array technique, so a new kind of eddy current internal array ECT probe named X-probe is introduced in this thesis. The X-probe's operation principle is analyzed. Its defects signal characteristic, signal response in TSP and relationship of defect depth & signal phase are studied through the experiments. Finally, application of X-probe in eddy current testing of NNP condenser heat-exchange tube is introduced. Experiment results show that X-probe can achieve defect profile and distinguish defect direction by AF and CF channel signal voltage. Field application proves that X-probe has good detection ability within TTS zone tube and can well distinguish complex defects and measure defects depth.

Key words: ECT array probe; X-probe; Eddy current testing

涡流探头是一种基于电磁感应的非接触式传感器, 由于其非接触、无需耦合剂以及响应速度快等优点, 在金属材料的无损检测领域应用广泛。常规涡流探头一般由一组或两组线圈组成, 检测线圈面积越大, 检查覆盖面积越大, 检测速度越快, 但是检测灵敏度也越低, 缺陷的分辨率也越低, 检测效率与检测灵敏度之间存在着矛盾。涡流阵列 (Eddy Current Arrays) 技术是近 20 年发展的一项新的涡流检测技术, 通过涡流检测线圈结构的特殊设计, 并借助于涡流仪和配套计算机强大的分析、计算及处理功能, 实现对材料和零件的快速、有效地检测, 检查覆

盖面积大, 检测效率和检测灵敏度高。

核电厂换热器传热管传统上采用涡流 Bobbin 探头进行探伤, Bobbin 探头检测速度快但无法确定缺陷的形状和周向位置, 周向缺陷检测灵敏度较低, 且在传热管管板区域由于端部效应存在检测“盲区”。近年来, 国外发展了涡流阵列技术, 研制出一种内穿过式涡流阵列探头, 获得了较高的检测速度以及灵敏度和分辨力。最初, 这种内穿过阵列探头仅仅只有一周的阵列线圈, 国外称该探头为 CXB (Circ X + Bobbin), 该线圈对于轴向缺陷存在轴向缺陷检出能力不足的局限性^[1]。X-probe 是一种新型涡流阵列探头, 是目前最先进的内穿过式涡流阵列探头, 由多组收发线圈构成, 能够实现以 30 in/s 以上的速度检查传热管, 并将检测结果以三维彩色显示。笔者通过试验分析了 X-probe 的探伤方法, 并将 X-probe 探头应用于核电厂凝汽器传热管管板

收稿日期: 2013-10-18

基金项目: 凝汽器传热管管板区涡流检测技术研究资助项目 (GHYX-NB-1001)

作者简介: 郭韵 (1983—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事核电站涡流检测技术研究和服务工作。

区域的检查,取得了很好的检测效果。阐述了 X-probe 的基本原理、参数配置、信号特征以及缺陷深度测量方法,并介绍该探头应用于核电厂凝汽器传热管检测的情况。

1 X-probe 探头原理

1.1 阵列线圈工作原理

阵列探头是由许多发射/接收式的点线圈构成的,收发线圈的检测原理如图 1 所示。

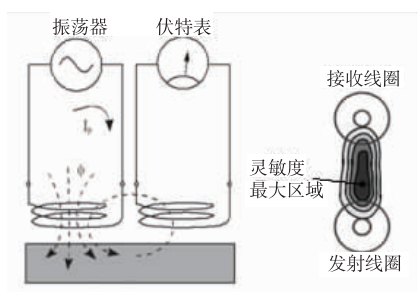


图 1 收发线圈的检测原理

收发线圈的特点是:①信号的相位与频率和缺陷深度有关。②信号的幅值与线圈感应区的缺陷金属流失量有关。③发射和接收线圈之间连线靠近发射线圈处为最大灵敏度,如图 1 所示。④检测具有方向性。

图 2 是收发线圈的方向灵敏度特性示意图,由左至右轴向线圈检测灵敏度逐渐下降,而周向线圈检测灵敏度则逐渐增大。可以看出当缺陷方向与收发线圈连线的夹角为 0° 时,幅值最大。

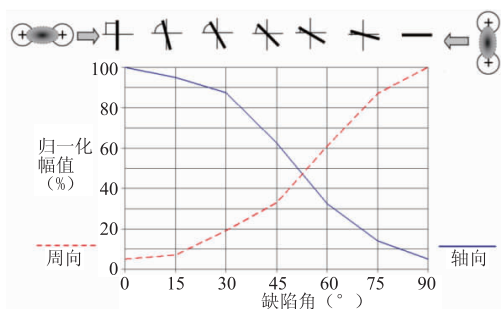


图 2 收发线圈方向灵敏度特性

1.2 X-probe 探头工作原理

X-probe 探头由 2 圈阵列线圈以及一个 Bobbin 线圈构成。探头工作时,在每一个时隙中,有一个线圈 T1 作为激发线圈,三个线圈(R1、R2 和 R3)作为接收线圈,T1 和 R1、R2 线圈构成轴向检测单元,T1 和 R3 线圈构成周向检测单元。经过多个时隙,

整个探头的线圈依次工作,完成 360° 的检测。工作原理如图 3 所示。

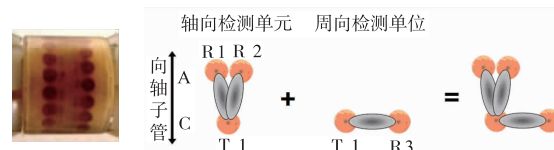


图 3 X-probe 探头检测线圈工作原理

以 19 个激励线圈的 X-probe 为例,在 19 个时隙中,分别激发 3 个接收线圈,如果工作频率为 4 个,则产生 12 个通道,总共产生 $19 \times 12 = 228$ 个通道。可以看出,X-probe 比 CXB 多了轴向检测单元,从而做到同时兼顾周向缺陷和轴向缺陷的检测。

2 试验分析

核电厂凝汽器传热管中内壁磨损类缺陷较多,试验重点分析了内壁缺陷。传热管样管尺寸为 $\phi 25.4 \times 0.5$ mm 或 $\phi 25.4 \times 0.7$ mm,缺陷为内壁为 20% 深槽 (6×2 mm)、内壁 40% 深槽 (6×1.5 mm)、内壁 60% 深槽 (6×1 mm) 以及内壁 80% 深 (6×1 mm) 轴向/周向槽,试验频率为 600 kHz (用于壁厚 0.5 mm 传热管)、500 kHz (用于壁厚 0.7 mm 传热管)、200 kHz 以及 100 kHz。

2.1 X-probe 探头参数标定方法

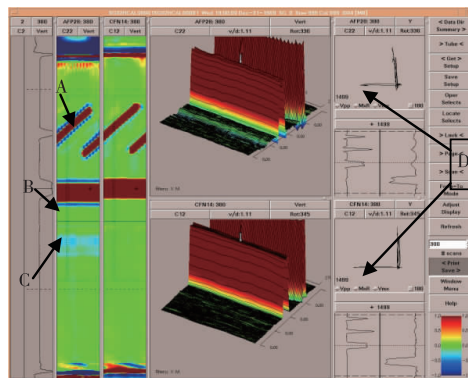


图 4 X-probe 标定样管信号

如图 4 所示,X-probe 采用以下方法标定各个通道:①将各通道胀管信号调至水平;②用螺旋槽信号检查通道配置是否正确;③用外壁 30% 深环槽设置信号的幅值。

设置完毕结构信号向下,缺陷信号向上。在配置时,根据频率以及轴向(AF)或周向(CF)接收通道,将通道进行分组,通过软件统一配置,每一组的配置参数一致。图 4 中 A 为螺旋槽;B 为外壁槽;C 为胀管;D 为胀管信号。

2.2 X-probe 探头的信号特征

2.2.1 缺陷方向对于信号的影响

经过 2.1 节参数配置后,所有的 AF 通道和 CF 通道都缺陷信号向上,噪声信号水平,如图 5 所示(一个圆形缺陷信号)。

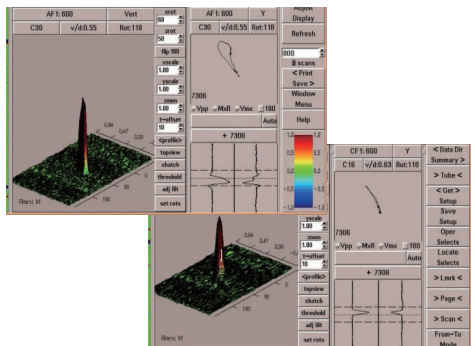


图 5 圆形缺陷(φ1.7 mm 通孔)信号

从图 5 可以发现圆形缺陷的信号特征:(1)圆形缺陷 CF 通道和 AF 通道幅值相近,相位相近;(2)对于圆形缺陷,CF 通道信号较窄并规则,AF 通道信号较宽并变形。

使用 X-probe 探头检测周向缺陷信号如图 6 所示。

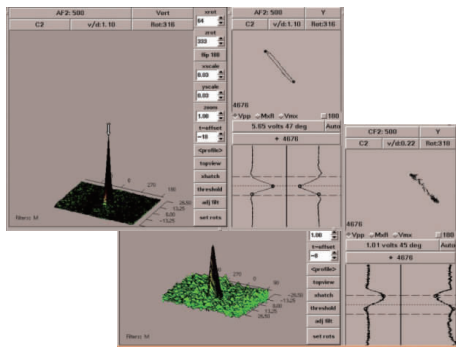


图 6 周向缺陷(6×1 mm 60%壁厚深)信号

从图 6 可以发现周向缺陷的信号特征:(1)CF 通道信号幅值远大于 AF 通道;(2)CF 通道信号较窄并规则,而 AF 通道信号较宽并严重变形。

使用 X-probe 探头检测轴向缺陷信号如图 7 所示。

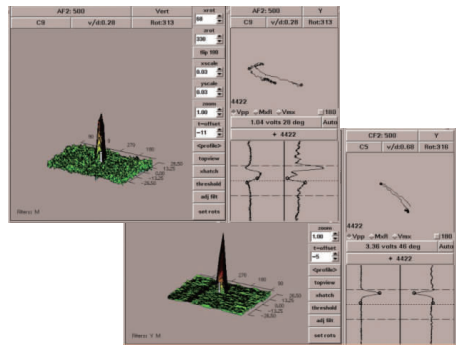


图 7 轴向缺陷(1×6 mm 60%壁厚深)信号

从图 7 可以发现轴向缺陷的信号特征:① AF 通道信号幅值远大于周向 CF 通道,相位接近;② CF 通道和 AF 通道信号均较宽并规则。

对周向缺陷信号 AF 通道产生不规则的原因做一个初步分析:缺陷穿过周向涡流场时距离较短,信号响应时间短,所以受到探头晃动影响较小;缺陷穿过轴向涡流时距离较长,信号响应时间长,所以受到探头晃动影响较大。正是由于这个原因,同样的缺陷轴向检测通道信号要更长,更容易变形。

缺陷经不同方向检测线圈两种情况如图 8 所示。

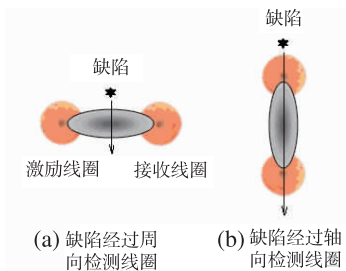


图 8 缺陷经过不同方向检测线圈

综上所述,X-probe 探头信号响应与缺陷方向的关系可以归纳为:①周向缺陷 CF 通道灵敏度较高,轴向缺陷 AF 通道灵敏度较高,圆形缺陷 AF 和 CF 灵敏度近似,故 AF 通道应用于检查轴向缺陷,CF 通道应用于检查周向缺陷,这与 1.2 节 X-probe 探头原理分析完全一致。②轴向检测通道信号更容易受到探头晃动的影响而产生变形。

2.2.2 伤深与相位关系

采用频率 500 kHz 对钛管样管不同伤深的内壁缺陷检测,CF 与 AF 通道相位与伤深关系如表 1、表 2 所示。

从表 1 与表 2 中可以看出,对于内壁缺陷,X-probe 探头的相位与伤深存在线性关系,可利用该特性制作相位判伤曲线,进行缺陷的深度测量。

表 1 CF 通道相位与伤深关系

人工缺陷(周向)	CF 相位(°)
内壁深 20%(6×2 mm)	17
内壁深 40%(6×1.5 mm)	29
内壁深 60%(6×1 mm)	46
内壁深 80%(6×1 mm)	57

表 2 AF 通道相位与伤深关系

人工缺陷(轴向)	AF 相位(°)
内壁深 20%(2×6 mm)	13
内壁深 40%(1.5×6 mm)	24
内壁深 60%(1×6 mm)	47
内壁深 80%(1×6 mm)	59

2.2.3 支撑部位缺陷信号响应

在 500 kHz 频率或 600 kHz 频率下,分别对套上支撑以及未套支撑的尺寸为 6×1 mm 深 80% 周向内壁槽的进行检测,结果图 9 所示。

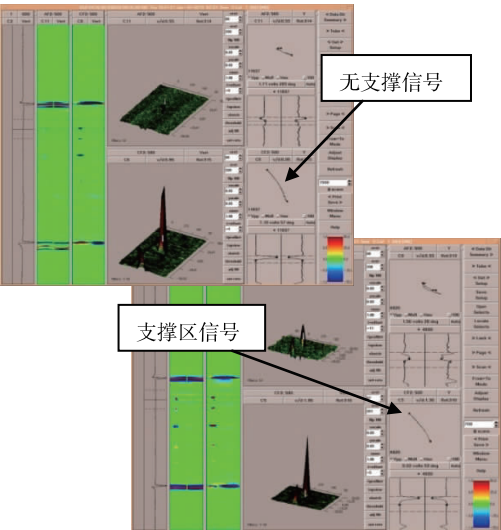


图 9 有/无支撑 500 kHz 通道信号对比

对于 6×1 mm 的 80% 深内壁槽,在无支撑的情况下,信号 7.1 V、57°。在套支撑的情况下,信号 9.1 V、53°,两者相位相差较小(4°),据表 1 估算支撑对伤深的测量影响小于 10%。

采用 100 kHz(低频)的检测频率对于同一缺陷进行检测,支撑可见,未掩盖缺陷,如图 10 所示。

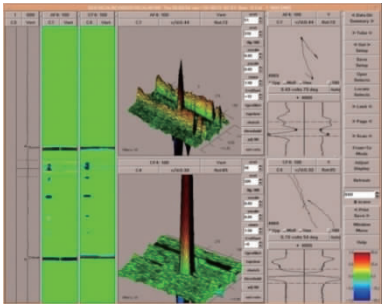


图 10 带支撑 100 kHz 通道信号

从上述结果可以判断:X-probe 探头能够发现

支撑位置的缺陷,尤其是较高频率下,缺陷几乎不受支撑的影响。

3 现场应用

3.1 管板区缺陷检测

在某次大修中,对某电厂凝汽器的部分管子使用 X-probe 探头进行检测,取得了良好的效果,对于整个传热管各个区域(包括管板区)的缺陷均能够发现,很好地弥补了 Bobbin 探头的“盲区”。下面选择部分管子的信号图进行说明。

某管子在管板区的缺陷 X-probe 检测信号截图如图 11 所示。

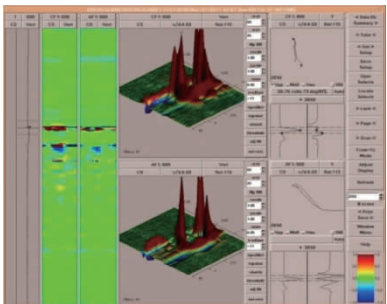


图 11 管子管板区周向贯穿缺陷

在管板 ST 位置,由于 Bobbin 探头会受到很大的干扰,容易漏检缺陷,即便能够发现缺陷,也无法准确判伤,一般称之为检测“盲区”。如图 11 所示,采用 X-probe 探头能够清楚地显示该区域的缺陷,并且能依据缺陷的相位判定伤深。

3.2 自由段缺陷检测

某管自由段区域缺陷 X-probe 检测信号截图如图 12 所示。

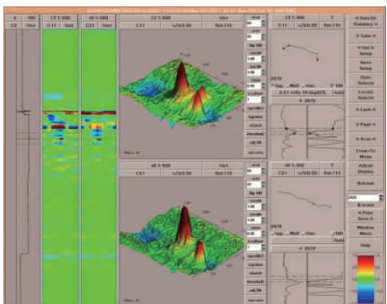


图 12 自由段点状缺陷(25%减薄)

自由段区域缺陷一般 Bobbin 探头均能够发现,但对于复合缺陷,伤深测量一般误差较大。如图 12 所示,采用 X-probe 可以分辨出复合缺陷中各个小

(下转第 18 页)

第 13 届无损检测新技术交流会论文集写作要求

论文模板

A4 纸,页面设置:页边距,上下 3 cm,左右 2 cm。

文章内容顺序:中文题目,中文作者,中文单位,中文摘要,中文关键词,正文,参考文献,第一页左下角作者信息(基金项目、第一作者信息、通讯联系人 E-mail)。

全文一律为单倍行距,单栏排版。

字号要求:

中文题目 2 号黑体,空一行(5 号)

中文作者 5 号宋体(其中通讯联系人左上角用 * 标注)

中文单位 小 5 号宋体,空一行(5 号)

中文摘要 小 5 号宋体

中文关键词 小 5 号宋体

中图分类号 小 5 号 Time New Roman

正文中一级标题 4 号仿宋

二级标题 5 号黑体

三级标题 5 号仿宋

正文 5 号宋体

作者信息 小 5 号宋体

参考文献 小 5 号宋体

图表标题 小 5 号宋体

表格里的字 6 号宋体

摘要模板

A4 纸,页面设置:页边距,上下 3 cm,左右 2 cm。

文章内容顺序:中文题目,中文作者,中文单位,中文摘要,中文关键词

全文一律为单倍行距,单栏排版。

字号要求:

中文题目 2 号黑体,空一行(5 号)

中文作者 5 号宋体(其中通讯联系人左上角用 * 标注)

中文单位 小 5 号宋体,空一行(5 号)

中文摘要 小 5 号宋体

中文关键词 小 5 号宋体

(上接第 17 页)

缺陷。采用相位伤深曲线,逐个测量,很好地决绝了 Bobbin 探头的这个问题,提高了检测精度。

4 结论

X-probe 作为一种新型内穿过式阵列探头,其具有以下显著的特点:

(1)检测结果彩色 2D 和 3D 成像,能够获知缺陷形状轮廓。

(2)依据 2.2.1 节,X-probe 对于周向缺陷采用 CF 通道进行检测和判伤,对于轴向缺陷采用 AF 通道进行检测和判伤,对于圆形缺陷 CF 通道和 AF 通道信号幅值和相位均相近,利用线圈对于缺陷方向的响应特性也可以判断缺陷的方向。

(3)依据 2.2.2 节,X-probe 缺陷深度与相位角具有良好的线性关系,便于建立相位-伤深曲线并进行伤深的测量。

(4)依据 2.2.3 节,X-probe 能够检出支撑和管板区位置的缺陷并进行判伤,弥补了传统 Bobbin 探

头在管板区的检测“盲区”。

(5)依据 3 节,X-probe 探头在管板区具有良好检测效果,弥补了 Bobbin 探头的检测“盲区”和复合缺陷测量误差较大的问题。

X-probe 探头的优势在于具有较高的检测速度以及点探头的检测灵敏度,目前难以推广的原因是因为 X-probe 探头制造技术被国外所垄断造成价格过高。随着国内涡流探头制造水平的提升,将自主研发和生产这种类型的探头,国内已在这方面做了很多研究工作,但主要是平面式阵列探头。^[2]管材产品检测采用涡流阵列探头以及相应的涡流数据分析技术将成为不久以后涡流检测应用的发展方向。

参考文献:

- [1] 谢圣华,师绍猛,曹刚. 凝汽器传热管管板区涡流检测盲区试验[J]. 无损检测,2010(12):958-960.
- [2] 徐可北. 涡流阵列检测技术[J]. 冶金分析,2004(24):645-647.