

厚壁压力容器声发射技术声源定位误差分析

刘富君, 胡东明, 丁守宝, 孔 帅, 郭小联

(浙江省特种设备检验研究院, 杭州 310020)

摘 要: 声发射技术(AE)已经被广泛应用到压力容器、压力管道等检验中。声源定位在整个声发射检验与评定结果过程中起重要作用, 目前这方面的研究热点是如何提高定位精度。声发射技术通常采用时差定位法来检测压力容器和压力管道的缺陷, 通过检测声波到达不同传感器的时间来确定声源位置。对于厚壁压力容器来说, 若声源位于容器的内表面或内部, 显然容器壁厚会对声源的精确定位产生一定的影响。针对此问题, 详细推导并得出厚壁压力容器中声发射检测的定位误差的解析解, 分析和讨论了声源定位误差的变化规律。分析结果表明, 定位误差的试验值和理论分析符合良好, 计算数据与试验值之间的最大误差为 7.12%。当容器壁厚小于 600 mm 的情况下, 建议实际声发射检测中对声源位置 200 mm 以内区域采用其他常规无损检测方法进行复验以确定实际声源位置。

关键词: 声发射检测; 厚壁压力容器; 缺陷定位; 定位误差

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2009)11-0842-05

Sound Source Location Error Analysis of Acoustic Emission Technique for Thick-Wall Pressure Vessel

LIU Fu-Jun, HU Dong-Ming, DING Shou-Bao, KONG Shuai, GUO Xiao-Lian

(Zhejiang provincial Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Acoustic emission(AE) technique has been widely applied to pressure vessel and piping inspection. Sound source location analysis plays an important role in the whole AE inspection and evaluation process, how to improve the location precision to an extent is the research focus all over the world. For AE sound source location of pressure vessel and piping, the arrival-time difference location method is mainly used, i. e. compute arrival-time difference which sound source signals arrive at different sensors to determine the sound source location. If an active sound source is on the internal surface or in the wall not on the external surface of thick-wall pressure vessels, the location error obviously exists because of the wall thickness influence. Aiming at the problem, the sound source error for thick-wall pressure vessels is deduced in detail, the sound source location error formulas are founded and the change law of location error with the wall thickness is analyzed and discussed too. The results indicate that the location errors in the experiment are both in good agreement with those in theory with a maximum relative error of 7.12%. Furthermore, when the thickness is less than 600 mm, it is proposed that about 200 mm radius area around the source location should be rechecked by normal nondestructive testing methods to determine the actual source location by AE inspection.

Keywords: Acoustic emission; Thick-wall pressure vessel; Flaw location; Location error

收稿日期: 2009-08-01

作者简介: 刘富君(1976—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事压力容器及压力管道方面设计理论、结构强度、安全监控、数值模拟、风险评估及无损检验检测等方面的研究。

声发射(AE)是指材料或结构受外力或内力作用下产生变形或断裂, 以弹性波形式释放出应变能的现象。大多数材料变形和断裂时均伴有声发射^[1-4]。声发射技术利用耦合在材料表面上的压电

陶瓷探头将材料内声发射源产生的弹性波转变为电信号,并用仪器将这些电信号放大和处理使之特征化,并予以显示和记录,从而获得材料内声发射源的特性参数,进而通过分析获知材料内部的缺陷情况。声发射技术是一种动态无损检测技术,它相对于常规的无损检测技术,具有动态检验、检测不受材料限制、灵敏度高、可对大型构件实行整体检测等优点,因此从上世纪五十年代开始,已被广泛应用于石油化工工业、电力工业、材料试验、航天和航空工业等领域^[5-8]。

声发射源定位是进行声发射检测与评定的一项重要工作和指标,其准确程度反映了声源检测位置与实际出现的活动缺陷位置的吻合程度^[9-11]。目前,定位方法主要有区域定位法、时差定位法(也称为点定位法)两大类。其中,区域定位法是根据声发射信号的传感器个数和相对时差时序来判定声发射源所处的区域,是一种快速、简便而粗略的定位方法。在该方法中,声源的检测位置就是首先接收到该声源信号的传感器的位置。所以,某一传感器附件区域内的所有声源的检测位置都相同,与声源的实际位置没有一一对应关系。区域定位法具有传感器安装灵活、检测范围大及检测结果可靠等特点,但声源的位置仅表示为一区域,具有一定的不确定性。

时差定位法根据声同一声发射源所发出的声发射信号经波速、传感器间距等参数的测量和算法运算,通过它们的几何关系列出方程并进行求解确定声源的精确位置,是一种精确而复杂的定位方法。时差定位法分为线定位和面定位两大类,其中,面定位又分为三角形定位和矩形定位等,平面三角形定位法是目前压力容器声发射检测中常用的声源定位方法^[12-17]。

近年来,壁厚 100 mm 以上且有高温、高压要求的大厚度压力容器已越来越多地被应用到工业生产中,其壁厚最厚已达 350 mm。对于这一类特厚焊缝,采用声发射技术进行缺陷定位时,定位误差会随着缺陷壁厚(内表面缺陷)或缺陷深度的增加而变大。因此,为提高厚壁压力容器采用声发射技术检测的定位精度,笔者将根据多年来对声发射技术理论及实验研究成果、现场压力容器声发射检测的经验,对厚壁压力容器声发射检测中的声源定位问题进行探讨,主要针对三角形平面定位法对定位误差进行分析。

1 基于平面三角形定位法的缺陷定位误差理论分析

1.1 平面三角形定位原理

图 1 是采用平面三角形定位法的检测原理示意图,图中, A、B 和 C 点为传感器位置, O 点为内部缺陷 O_i 点在装置外表面的投影,缺陷的实际位置 O_i 点与其在试件表面的投影 O 点的关系如图 2 所示^[1]。

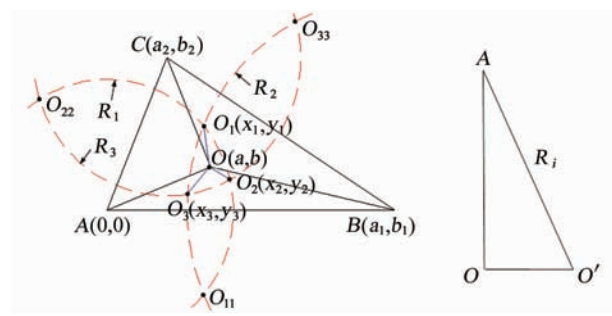


图 1 三角形定位法示意图

图 2 传感器与实际缺陷点及其在表面投影示意图

要对声发射源的定位误差进行分析,则 A、B、C 和 O 四点的坐标须为已知条件,实际缺陷 O_i 点到达传感器 A、B 和 C 的实际距离分别 R_1 、 R_2 和 R_3 ,通过传感器测量后在厚壁外表面的定位分别为 O_1 、 O_2 和 O_3 点(其中 O_{11} 、 O_{22} 和 O_{33} 为无效点),则声发射技术检测得到的缺陷定位点与缺陷实际位置的误差分别为 OO_1 、 OO_2 和 OO_3 ,定义三个定位误差分别为: $\delta_1 = OO_1$, $\delta_2 = OO_2$, $\delta_3 = OO_3$ 。同时,对 R_1 、 R_2 和 R_3 作出如下定义: $R_1 = \sqrt{OA^2 + t^2}$, $R_2 = \sqrt{OB^2 + t^2}$, $R_3 = \sqrt{OC^2 + t^2}$ 。

1.2 声发射源定位误差的解析解

由几何原理,对于 O_1 、 O_2 和 O_3 点,由圆弧相交,分别有方程组:

$$\begin{cases} x_1^2 + y_1^2 = R_1^2 \\ (x_1 - a_1)^2 + (y_1 - b_1)^2 = R_2^2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_2^2 + y_2^2 = R_1^2 \\ (x_2 - a_2)^2 + (y_2 - b_2)^2 = R_3^2 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} (x_3 - a_1)^2 + (y_3 - b_1)^2 = R_2^2 \\ (x_3 - a_2)^2 + (y_3 - b_2)^2 = R_3^2 \end{cases} \quad (3)$$

1.2.1 误差 δ_1

O_1 点的方程展开如下:

$$x_1^2 + y_1^2 = R_1^2 \quad (4)$$

$$x_1^2 + y_1^2 - 2a_1x_1 - 2b_1y_1 + a_1^2 + b_1^2 = R_2^2 \quad (5)$$

式(4),(5)相减得:

$$2a_1x_1 + 2b_1y_1 = R_1^2 - R_2^2 + (a_1^2 + b_1^2) \quad (6)$$

令: $m = R_1^2 - R_2^2 + (a_1^2 + b_1^2) = R_1^2 - R_2^2 + AB^2$, 则有:

$$y_1 = \frac{m - 2a_1x_1}{2b_1} \quad (7)$$

将式(7)代入式(4),得:

$$4(a_1^2 + b_1^2)x_1^2 - 4a_1mx_1 + m^2 - 4b_1^2R_1^2 = 0 \quad (8)$$

解方程,得:

$$x_1 = \frac{4a_1m \pm \sqrt{(4a_1m)^2 - 16(a_1^2 + b_1^2)(m^2 - 4b_1^2R_1^2)}}{8(a_1^2 + b_1^2)} \quad (9)$$

对照图 1,最终 O_1 点的坐标为:

$$x_1 = \frac{a_1m - \sqrt{(a_1m)^2 - AB^2(m^2 - 4b_1^2R_1^2)}}{2AB^2} \quad (10)$$

$$y_1 = \frac{m - 2a_1x_1}{2b_1} = \frac{m}{2b_1} - \frac{a_1}{b_1} \cdot \frac{a_1m - \sqrt{(a_1m)^2 - AB^2(m^2 - 4b_1^2R_1^2)}}{2AB^2} \quad (11)$$

获得 O_1 点的坐标后,误差 δ_1 为:

$$\delta_1 = \sqrt{(x_1 - a)^2 + (y_1 - b)^2} \quad (12)$$

1.2.2 误差 δ_2

O_2 点的方程展开如下:

$$\begin{cases} x_2^2 + y_2^2 = R_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 - 2a_2x_2 - 2b_2y_2 + a_2^2 + b_2^2 = R_3^2 \end{cases} \quad (13)$$

对照式(4),(5),可以看出两组方程表达形式一样,只是参数不同,为此,参考 O_1 点坐标求解过程,

令: $n = R_1^2 - R_3^2 + (a_2^2 + b_2^2) = R_1^2 - R_3^2 + AC^2$, 则 O_2 点的坐标分别如下:

$$x_2 = \frac{a_2n + \sqrt{(a_2n)^2 - AC^2(n^2 - 4b_2^2R_1^2)}}{2AC^2} \quad (15)$$

$$y_2 = \frac{n - 2a_2x_2}{2b_2} = \frac{n}{2b_2} - \frac{a_2}{b_2} \cdot \frac{a_2n + \sqrt{(a_2n)^2 - AC^2(n^2 - 4b_2^2R_1^2)}}{2AC^2} \quad (16)$$

获得 O_2 点的坐标后,误差 δ_2 为:

$$\delta_2 = \sqrt{(x_2 - a)^2 + (y_2 - b)^2} \quad (17)$$

1.2.3 误差 δ_3

对于 O_3 点,由式方程组(3)可知,直接求解非常困难,为方便求解,需进行坐标变换,将原点移至 B 点,则 A, B, C 和 O 点的新坐标分别如图 3 中所示,并令:

$$\begin{cases} x_{3B} = x_3 - a_1, & y_{3B} = y_3 - b_1 \\ a_{2B} = a_2 - a_1, & b_{2B} = b_2 - b_1 \end{cases} \quad (18)$$

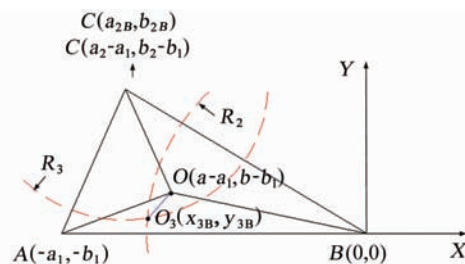


图 3 坐标变换后传感器 B、C 检测的缺陷定位示意图

坐标变换后,方程组(3)可改写为:

$$\begin{cases} x_{3B}^2 + y_{3B}^2 = R_2^2 \\ (x_{3B} - a_{2B})^2 + (y_{3B} - b_{2B})^2 = R_3^2 \end{cases} \quad (19)$$

展开如下:

$$\begin{cases} x_{3B}^2 + y_{3B}^2 = R_2^2 \\ x_{3B}^2 + y_{3B}^2 - 2a_{2B}x_{3B} - 2b_{2B}y_{3B} + a_{2B}^2 + b_{2B}^2 = R_3^2 \end{cases} \quad (20)$$

对照式(4),(5),可以看出两组方程表达形式一样,只是参数不同,为此,同样参考 O_1 点坐标求解过程,令: $k = R_2^2 - R_3^2 + (a_{2B}^2 + b_{2B}^2) = R_2^2 - R_3^2 + BC^2$, 可以得到 O_3 点的坐标为:

$$x_{3B} = \frac{a_{2B}k - \sqrt{(a_{2B}k)^2 - BC^2(k^2 - 4b_{2B}^2R_2^2)}}{2BC^2} \quad (22)$$

$$y_{3B} = \frac{k - 2a_{2B}x_{3B}}{2b_{2B}} = \frac{k}{2b_{2B}} - \frac{a_{2B}}{b_{2B}} \cdot \frac{a_{2B}k - \sqrt{(a_{2B}k)^2 - BC^2(k^2 - 4b_{2B}^2R_2^2)}}{2BC^2} \quad (23)$$

获得 O_3 点的坐标后,误差 δ_3 为:

$$\delta_3 = \sqrt{(x_{3B} + a_1 - a)^2 + (y_{3B} + b_1 - b)^2} \quad (24)$$

2 声发射试验与数值计算

2.1 试验准备

为验证理论分析及误差解析解的准确性,我们做了不同厚度壁板的声发射试验。声发射系统由型号为 R31-AST 的传感器和美国 PAC 公司的 DiSP-56 声发射工作站。声发射检测的准备工作主要包括检测系统通道一致性检查、电缆的连通性检查以及传感器、前置放大器的性能检查^[6]。系统各部件的性能参数如下:共振频率为 150 Hz,峰值灵敏度为 65 dB,门槛电平为 45 dB,前置放大器增益为 40 dB,频率带宽为 100~400 KHz。

2.2 试验原理

试验样板及其上布置点的示意图如图 4 所示,样板材料是碳钢,使用直径 0.5 mm, HB 硬度的活

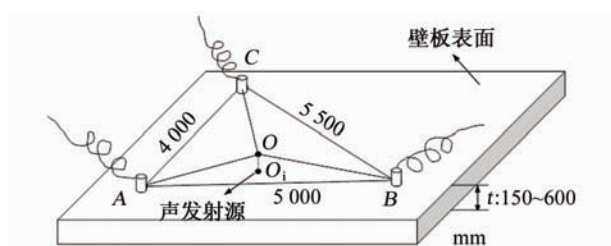


图4 试验样板及其上传感器布置示意图

动铅笔芯在 O_i 处进行断铅试验,图中 O 点是声发射源 O_i 点在试验样品表面的投影,其发出信号将被置于 A, B 和 C 三处的传感器检测到。

如图4中所示,样板上布置传感器的三角形边长分别是4 000,5 500和5 000 mm,试验时我们取样板厚度分别为150,200,250,300,400和600 mm。通过采用Autocad绘图软件, OA, OB 和 OC 的距离如图5中所示, B, C 和 O 点的纵横坐标分别为 $a_1=4\ 986.69, b_1=364.53; a_2=791.24, b_2=3\ 920.69; a=2\ 000, b=1\ 000$ 。其中,坐标变换之后, C 点的坐标为 $a_{2B}=-4\ 195.45, b_{2B}=3\ 556.16$ 。由于一般容器的壁厚均 <600 mm,因此我们在试验时,样板的壁厚最大做到600 mm。

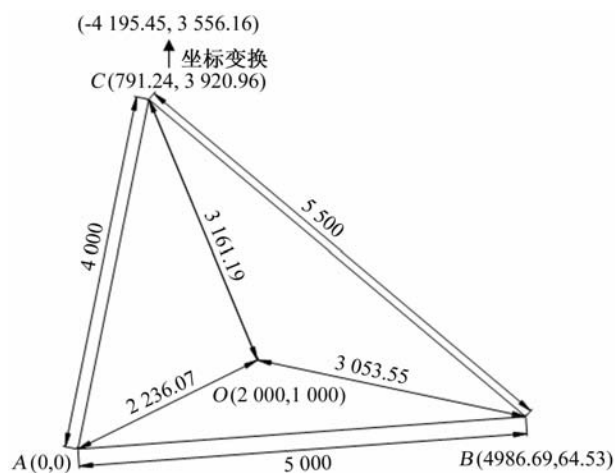


图5 传感器和缺陷的坐标示意图

2.3 试验得到的和计算结果

为对试验测试结果和解析计算结果进行对比分析,分别采用试验测试和数值计算的方法获得缺陷的定位误差值;同时,为方便对两种不同的误差值进行比较,对两者之间的相对误差作出如下定义:

$$\Delta_1 = \frac{\delta_{1-C} - \delta_{1-T}}{\delta_{1-T}} \times 100\% \quad (25)$$

$$\Delta_2 = \frac{\delta_{2-C} - \delta_{2-T}}{\delta_{2-T}} \times 100\% \quad (26)$$

$$\Delta_3 = \frac{\delta_{3-C} - \delta_{3-T}}{\delta_{3-T}} \times 100\% \quad (27)$$

式中: $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ 是定位误差计算值与试验值之间的相对误差; $\delta_{1-C}, \delta_{2-C}, \delta_{3-C}$ 是通过解析计算获得的定位误差值; $\delta_{1-T}, \delta_{2-T}, \delta_{3-T}$ 是通过试验获得的定位误差值。

试验测试误差、解析计算得到的误差及两者之间的相对误差结果如表2所示:

从表2中所有数据可以看出,通过解析解计算获得的结果与试验测试得到的结果还是比较吻合的,两者之间的相对误差在10%以内,表明解析计算结果具有较好的准确度。同时可以看出,在图4和5所示的试验条件下,误差 OO_1 最大,且当样板壁厚达到600 mm时,误差 OO_1 已经接近200 mm,因此当壁厚厚度小于600 mm时,获得的定位误差需在200 mm的范围进行复检。

3 轨迹分析

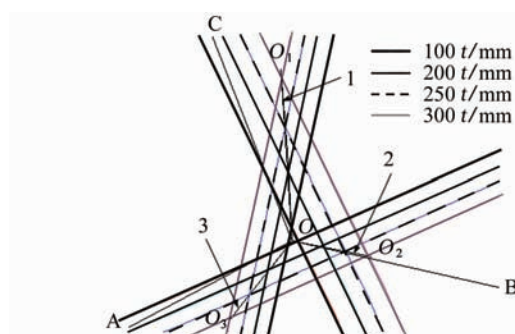
3.1 各个误差点的移动轨迹

为进一步分析定位误差的变化情况,采用CAD软件绘制在不同 t 值下对上述三个误差点的移动轨迹。具体如图6所示,其中黑色曲线分别为直线 OA, OB, OC ,中心点为 O ;曲线1,2,3分别为 O_1, O_2, O_3 点的移动轨迹。

从图6中可以看出,在不同的 t 值情况下, O_1 ,

表1 试验误差与计算误差

t /mm	OO_1			OO_2			OO_3		
	δ_{1-C}/mm	δ_{1-T}/mm	$\Delta_1/\%$	δ_{2-C}/mm	δ_{2-T}/mm	$\Delta_2/\%$	δ_{3-C}/mm	δ_{3-T}/mm	$\Delta_3/\%$
150	14.06	13.2	6.85	6.02	6.4	-5.94	8.29	7.7	6.83
200	24.62	23.1	6.81	12.06	11.0	9.54	12.62	13.5	-6.46
250	38.57	36.0	7.12	18.57	17.6	5.27	22.06	21.1	4.55
300	54.78	51.3	6.78	27.03	25.3	6.67	32.54	30.8	5.65
400	92.34	89.3	3.41	47.58	44.8	6.21	51.47	54.3	5.21
600	186.16	190.2	-2.12	103.94	99.3	4.67	124.31	119.5	4.03

1—O₁ 点的轨迹 2—O₂ 点的轨迹 3—O₃ 点的轨迹图6 O₁, O₂ 和 O₃ 的定位轨迹

O₂, O₃ 点沿着直线轨迹在移动。多次绘图结果表明,即使有轻微的偏差,也是由 t 代入计算 R_1, R_2, R_3 时导致的误差所致。

3.2 各误差与 t 的关系曲线

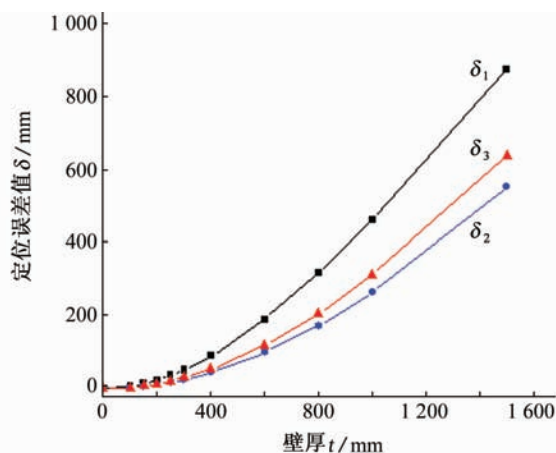
为进一步分析壁厚 t 和定位误差大小之间的关系,不同 t 下通过解析解计算得到的 3 个误差值如表 3 所示,由于是采用解析解进行计算,因此 t 的范围可以取得较宽,笔者选择的范围是 100 ~ 1 500 mm。

表 2 不同 t 值下的缺陷定位误差解析值

t/mm	误差 δ_1/mm	误差 δ_2/mm	误差 δ_3/mm
100	5.85	2.83	3.46
150	14.06	6.02	8.29
200	24.62	12.06	12.62
250	38.57	18.57	22.06
300	54.78	27.03	32.54
400	92.34	47.58	51.47
600	186.16	103.94	124.31
800	316.85	173.05	206.49
1 000	461.91	263.92	312.02
1 500	873.35	551.86	637.33

依据表 3,三个定位误差值在不同 t 下的曲线如图 7 所示,从表 3 和图 7 可以看出,三个误差随 t 变化的曲线趋势相同,都随着 t 的增加而斜率逐渐增大。另外,从图中也可以看出,当 $t > 600$ mm 后,误差值会显著变大,譬如壁厚为 1 000 mm 时,定位误差值最大达到约 462 mm,由此表明在此壁厚情况下,采用该定位方法获得的缺陷定位误差已经较大。

图中的 3 个误差都可以用一条多次曲线来拟合,其 3 次曲线的拟和结果分别如式(28)~(30)所

图7 三个定位误差随 t 的变化曲线

示,在所述的实例中,只需将 t 值带入,即可获得相应的三个定位误差值。

$$\delta_1 = -0.6978 + 0.006622t + 6.039 \times 10^{-4}t^2 - 1.4662 \times 10^{-7}t^3 \quad (28)$$

$$\delta_2 = 0.20675 - 0.0057t + 3.0967 \times 10^{-4}t^2 - 4.0453 \times 10^{-8}t^3 \quad (29)$$

$$\delta_3 = 0.18305 - 0.00679t + 3.8017 \times 10^{-4}t^2 - 6.1638 \times 10^{-8}t^3 \quad (30)$$

4 结论

声发射技术是一种动态的无损检测技术,在压力容器的缺陷检测中具有独到的优势,然而,随着压力容器厚度的增大,缺陷定位误差的问题逐渐凸显。本文从理论上推导了厚壁压力容器采用声发射进行缺陷定位的定位误差解析表达式,并将其与试验测试结果进行对比,讨论了容器壁厚增大情况下定位误差的变化规律。通过将试验结果和理论分析结果对比可知,将参数代入解析表达式并进行求解获得的定位误差值与试验测试值吻合良好,两者之间的最大误差为 7.12%,表明解析解具有较好的准确性;同时,由于一般厚壁压力容器的厚度 < 600 mm,因此在采用声发射技术进行缺陷定位时,建议对声源位置 200 mm 以内区域采用其他常规无损检测方法进行复验以确定实际声源位置。

参考文献:

- [1] 袁振明,马羽宽,何泽云. 声发射技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1995.
- [2] 龚斌,齐辉,马春华,等. 一种声发射源的新型平面定位方法研究[J]. 声学技术,2006,25(2):107-109.

(下转第 850 页)

用点式旋转探头,但检测成本较高,速度也慢一些。此外还可能存在一些无规则的电磁异常点等干扰,则要求检测人员有丰富的实践经验来判断。

对于电厂常采用外径 16 mm 的铁磁性钢管,由于铁磁性材料存在严重的磁干扰信号,很难对干扰信号判断,目前一般钢管厂常采用的“磁饱和”技术,使被检测的铁磁性材料磁化到饱和状态,磁导率 μ 约等于 1,然而对于在役的钢管采用常规的磁化方法有很大的困难,因此提出了采用“远场”涡流技术可有效减少磁干扰,但是同时也带来另一麻烦,检测的灵敏度相对较底。

以大亚湾核电站的 2 号冷凝器为例,采用多频远场涡流检测技术对其列管进行探伤和测厚检查。其中检测 20 行 36 列管的结果如图 10 所示。

图 10 中 S1 为检测通道 1, S2 为检测通道 2,检测频率副频为主频的 1/2,通道 1 和通道 2 混频得到通道 M1 的结果,上图在 M1 通道显示的是混频的效果。

在征求厂方意见之后决定当场拔管验证。在测定的位置用放大镜看到两条极细的纵向裂纹,后经金相照片显示,裂纹深度已达 40%,由外壁向内壁发展。及时对缺陷管进行了修复,保证了设备的正

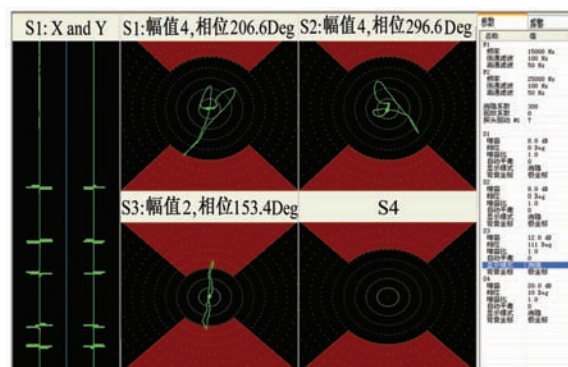


图 10 20 行 36 列管检测结果阻抗图

常运行。

6 结论

通过实践验证智能全数字式多频远场涡流检测仪 IDEA-ET/RFT 能有效的一次通过管道便可测出壁内、外表面的裂纹、凹坑、腐蚀、减薄及管壁材料的内部缺陷,并有在计算机控制下的自动检测、数字显示、灵敏度高和性能稳定等优点。因此,特别适用于核能、电力、石化、航天、航空等部门在役铜、钛、铝、锆等各种管道、金属零部件的探伤和壁厚测量以及各种铁磁性管道的探伤、分析和评价。

(上接第 846 页)

- [3] 徐彦廷,孙茂成,李伟,等. 声源定位问题研究及误差分析[J]. 无损检测,1999,21(5):199-202.
- [4] 金钟山,刘时风,耿荣生,等. 曲面和三维结构的声发射定位方法[J]. 无损检测,2002,24(5):205-211.
- [5] 胡昌洋,杨钢锋,黄振峰,等. 声发射技术及其在检测中的应用[J]. 计量与测试技术,2008,35(6):1-3.
- [6] 张红,易涛,顾全,等. 声发射检测在球罐检验中的应用[J]. 无损探伤,2006,30(6):11-12.
- [7] Nivesrangsan P, Cochrane C, Steel J A, et al. AE mapping of engines for spatially located time series [C]// In The 25th European Conference on AE Testing. Prague:[s. n.],2002.
- [8] Holford K M, Carter D C. Acoustic emission source location[J]. Key Eng Mater,1999(12):162-171.
- [9] Steven M, Ziola S M, Gorman M R. Source location in thin plates using cross-correlation[J]. Acoust Soc Am,1991,90(5):2551-2556.
- [10] 姚力,赖德明. 声发射源定位不确定度的计算[J]. 无损检测,2002,24(11):461-463.
- [11] Hamstad M A, O'Gallagher A, Gary J. A wavelet transform applied to acoustic emission signals. Part

- 1: source identification[J]. Acoust Emiss,2002(20):39-59.
- [12] Maji A K, Satpathi D, Kratochvil T. Acoustic emission source location using Lamb wave modes[J]. Eng Mech,1997,123(2):154-161.
- [13] Toyama N, Koo J H, Oishi R, et al. Two dimensional AE source location with two sensors in thin CFRP plates[J]. Mater Sci Lett,2001,20(19):1823-1825.
- [14] Tobias A. Acoustic emission source location in two dimensions by an array of three sensors[J]. Nondestr Test,1976(91):9-12.
- [15] Asty M. Acoustic emission source location on a spherical or plane surface[J]. NDT Internat,1978,11(5):223-226.
- [16] Barat P, Kalyanasundaram P, Baldev Raj. Acoustic emission source location on a cylindrical surface[J]. NDT&E Internat,1993,26(6):295-297.
- [17] Yoon Dong-Jin, Kim Young H, Kwon Oh-Yang. New algorithm for acoustic emission source location in cylindrical structure[J]. Acoust Emiss,1992,9(4):237-242.