

基于 MAPOD 的异形结构焊缝 超声检测可靠性

马君鹏¹, 李晓红², 李夕强¹, 张俊², 杨贤彪¹, 刘叙笔¹, 丁杰³

(1. 江苏方天电力技术有限公司, 南京 211102; 2. 武汉大学无损检测中心, 武汉 430072;
3. 上海材料研究所, 上海 200437)

摘要:针对电站锅炉及压力管道中带台阶的异形结构焊缝超声检测工艺设计及其有效性缺乏评价的问题, 基于超声检测数值模型和检出率模型(Model assisted probability of detection, MAPOD), 构建了不同 K 值传感器检出率的分析与评价方法。利用该方法对主蒸汽管道带台阶的异形结构焊缝常用检测工艺进行分析。结果表明, 现有以 K_1 和 K_2 探头为组合的检测工艺存在较大的未覆盖区域, 当壁厚为 89 mm 时, 对应未覆盖区域深度为 12 mm; 异形结构焊缝中台阶的存在对位于焊缝上部的缺陷回波存在较大影响, 未熔合缺陷自身高度必须大于 5 mm, 才能保证检出率达到 90%。

关键词:异形结构焊缝; MAPOD; 检出率

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)12-0060-05

Model Based Reliability of the Ultrasonic Test of the Weld of Irregular Structure

MA Jun-peng¹, LI Xiao-hong², LI Xi-qiang¹, ZHANG Jun², YANG Xian-biao¹, LIU Xu-bi¹, DING Jie³

(1. Jiangsu Frontier Electric Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Wuhan University NDT Research Center, Wuhan 430072, China;

3. Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China)

Abstract: A Model assisted probability of detection (MAPOD) method used for reliability analysis of the ultrasonic testing procedure with different angle beam probes for the weld of step-like irregular structure in the power unit is developed based on the ultrasonic numerical model and POD model. The proposed method is used to analyze the conventional inspection procedure of main steam pipe with steps and the result shows that there is an uncovered zone by the composition of K_1 and K_2 probes. The depth of the uncovered zone is 12 mm when the thickness of pipeline is 89 mm. The echo of defect on the top of weld is influenced by the steps of the weld of irregular structures, and the size of the lack of fusion must be greater than 5 mm to guarantee the 90% of POD.

Keywords: The irregular structure of weld; MAPOD; Probability of detection

目前在役压力管道中, 因制造和现场安装原因存在许多带台阶的异形结构焊缝, 如图 1 所示。

现场在役检测时, 此类异形结构焊缝不能满足现行检测标准(如 DL/T 802-2002、JB/T 4730.3-2005 等)检测面探头移动区域等要求, 无法按现



图 1 带台阶异形结构焊缝宏观形貌

收稿日期: 2014-06-11

作者简介: 马君鹏(1979—), 男, 工学学士, 高级工程师, 无损检测专业主管, 主要从事电力行业金属部件的无损检测研究工作。

行标准要求正常实施常规超声波检测,进而影响该类焊缝超声波检测的实施以及检测结果的可靠性。有必要针对异形结构焊缝超声检测的可靠性进行评价,提出有效的检测工艺,保证缺陷检出率。

无损检测可靠性是指在给定的检测条件和工艺下,能够检测出某一尺寸范围内缺陷的可能性,最早由美国航空航天局(NASA)提出并应用于飞行器设计和制造检测^[1]。美国机械工程协会(ASME)要求,按部件的重要度分三个严格等级对检验系统进行验证,重要部件要进行中级或高级验证,即必须通过检出率(Probability of detection, POD)分析来保证检测系统的可靠性^[2]。国外研究机构已将检出率分析应用到航空航天^[3]、核电^[4]、海洋工程^[5]等领域。但是,基于概率统计思想的POD分析需要大量的试验数据,且对缺陷数量、尺寸分布等有严格要求^[6]。

为解决工件和缺陷制作成本高和制作困难的问题,美国爱荷华大学提出基于模型的POD分析思想(model assisted POD, MAPOD),研究利用数值模型代替无损检测试验来获得可靠性分析所需试验数据^[7]。国内外在超声检测数值模拟的理论研究较多,并已开发出较成熟的超声仿真软件,如CIVA和UT-CAS^[8-9]。笔者将基于超声检测的数值模型和可靠性统计模型,进行电站锅炉异形结构焊缝超声检测的可靠性分析,为该类焊缝的超声检测提供科学指导和依据。

1 基于 MAPOD 的可靠性分析理论和方法

MAPOD可靠性分析方法可以分为三大步骤:①生成随机参数。根据超声检测参数的随机误差和分布,利用统计计算方法建立随机数生成模型,生成随机参数。②超声检测数值模拟。将生成的检测参数代入超声检测计算模型,计算得到一组回波数据。③计算检出率曲线。选取一定的检测阈值对回波数据进行评定,以评定结果作为样本带入概率统计模型,计算出检出率曲线,进行可靠性分析。如图2所示。

1.1 随机参数生成模型

从影响因素的统计学特征看,现场超声检测可靠性的因素有两大类:应用参数和人员环境。前者包括探头参数、缺陷参数等,服从正态分布;后者包括耦合条件等,服从瑞利分布。随机参数的生成可

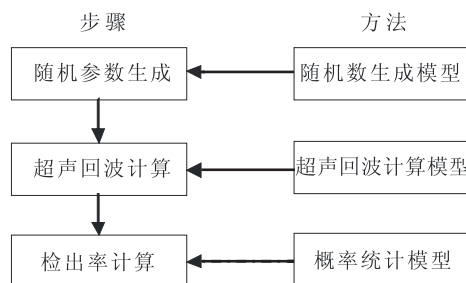


图2 可靠性分析步骤

以结合参数的分布模型和筛选—合成法得到。图3(a)为缺陷长度中心值为20 mm,标准差为5 mm的分布曲线,图3(b)为耦合因子为0.8时的耦合系数分布图。

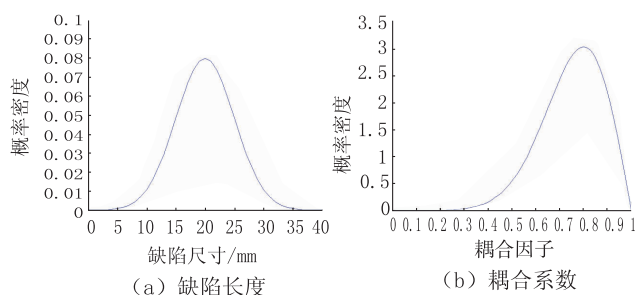


图3 影响因素的统计分布

1.2 超声检测数值模型

超声检测数值模型可以基于解析法、数值法和半解析法构建。由于可靠性分析所需缺陷回波数据量较大,为兼顾计算精度和效率,选用半解析法构建超声检出数值模型^[10]。超声回波计算根据发射声场、回波声场与缺陷散射声场分步建立。探头发射声场的计算思想是将探头离散成点源,独立计算每个点源产生的声场,然后在探头面积上积分,得到探头发射场;缺陷散射声场依据互易原则得到^[10],即波从缺陷传播到探头的响应与其从探头传播到缺陷的响应相同。综合考虑和缺陷离散点衍射回波叠加,缺陷回波的表达式为:

$$\Phi^{\text{diff}}(r, t) = \int_{\text{defect}} B(M) q_e(M) q_r(M) S(t) - \Delta T(M) - \Delta T'(M) dS_D \quad (1)$$

式中: $q_e(M)$ 和 $q_r(M)$ 分别为发射和接收过程的振幅衰减, $T'(M)$ 为声束从缺陷点 M 到探头的传播时间。 $B(M)$ 为散射系数,其求解是基于基尔霍夫近似(Kirchhoff)的高频近似模型。

超声检测数值模型不仅为缺陷的检出率计算

提供原始数据,同时也可以作为检测工艺覆盖分析的有效手段。

1.3 检出率模型

根据超声检测中缺陷尺寸与信号响应的对数线性关系,缺陷检出率 POD 可以用累计正态分布式计算^[11]:

POD(a) = Φ { [ln(a) - ln(a_dec) - β_0] / [σ_δ / β_1] } (2)

式中:a 为缺陷尺寸,a_dec 为信号阈值,统计参数 β_0、β_1 和 σ_δ 由极大似然法计算^[11]。

利用式(2)计算得到在特定检测工艺下缺陷检出率与缺陷尺寸的关系曲线,通过设定临界尺寸检出要求,即可判定所选工艺是否达到要求检出率。

2 异形结构焊缝检测参数

国内某电厂 1 000 MW 机组主蒸汽管道,存在如图 4 所示异形结构焊缝。焊缝附近管径为 φ546 mm,内径为 φ368 mm,斜台处壁厚为 89 mm,扫查面处壁厚为 97 mm,外壁距离焊缝中心 50 mm 处存在 45°斜台,斜台高度 4 mm,内壁距离焊缝中心 40 mm 处存在 15°斜台。材质为 P92 钢,横波声速为 3 280 m/s,纵波声速为 6 000 m/s,常采用 K_1 和 K_2 探头组合检测,探头晶片尺寸为 13 mm×13 mm,中心频率为 2.5 MHz。

在焊口附近设置如图 4 所示的 1~3# 缺陷,计算不同状况下的缺陷回波信号差别,分析斜台对检测结果的影响。缺陷 1 为焊缝根部未焊透,其高度为 2 mm,长度为 5 mm;缺陷 2 为焊缝下半部分的热影响区裂纹,其长度与高度均为 5 mm,裂纹中心距离检测面 75.5 mm,距离焊缝中心为 12 mm;缺陷 3 为焊缝上部坡口的未熔合,其长度与高度均为 5 mm,未熔合中心距离检测面 45 mm,距离焊缝中心为 18 mm,如表 1 所示。

表 1 焊口附近设置的三种典型缺陷

缺陷编号	缺陷名称	高度/mm	沿焊缝长度/mm	缺陷位置	距离焊缝表面深度/mm	距离焊缝中心/mm	与水平方向所成夹角
1	未焊透	2	5	焊缝根部	88	1	90°
2	裂纹	5	5	热影响区	75.5	12	70°
3	未熔合	5	5	上部坡口	45	18	80°

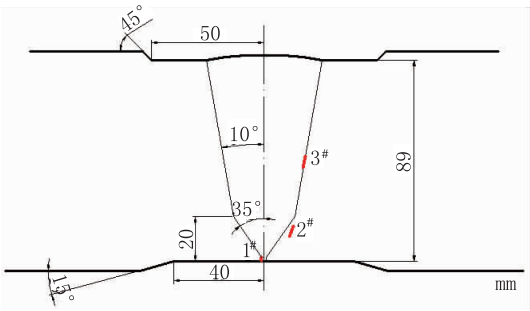


图 4 异形结构焊缝缺陷示意图

3 结果与讨论

3.1 声场覆盖分析

分别将 K_1、K_2 探头的发射声场叠加于主蒸汽管道焊口图形中,可以方便准确的得出声束覆盖区域,如图 5 所示。当 K_1 探头入射点距离外壁斜台 41.9 mm 时,声束轴线指向焊缝根部,如图 5(a);将探头移向与外壁斜台边缘重合,可以看到声束不受斜台影响,声束轴线与焊缝中心线交点距离底面 27.9 mm,如图 5(b)所示。K_1 探头入射点在距离焊缝中心线 12~41.9 mm 的范围内移动时,可覆盖焊缝根部以上 27.9 mm 的范围。

为了尽可能减少缺陷漏检和避免重复扫查,将 K_2 探头的扫查范围设置为从焊缝覆盖深度 27.9 mm 开始,如图 5(c)所示,K_2 探头入射点需距离外壁斜台边缘 86.2 mm;将探头逐渐移向焊缝中心,直至探头入射点距离外壁斜台边缘 18.5 mm,可保证探头发射声场不受斜台影响,此时声束轴线可覆盖至 59.1 mm。因此,结合 K_1 探头,可保证焊缝根部以上 59.12 mm 范围的主声线覆盖,且不受斜台的影响。

当 K_2 探头入射点距离焊缝边缘 18.5 mm,在焊缝中心线上以步进为 1 mm 设置不同深度 φ3 mm×40 mm 的长横孔,获得的缺陷回波动态变化曲线如图 5(e)所示。由图可见,当孔距离焊缝根部 59.2 mm 时,位于声束轴线上,此时缺陷回波最高,当缺陷处于距离焊缝根部 70.2 mm 时,缺陷回波降低 9.4 dB。若按照 DL/T 802-2002 标准,此时的缺陷处于定量线附近(φ3 mm×40—10 dB)。当缺陷回波高度为 φ3 mm×40—16 dB 时,即缺陷处于距离焊缝根部为 77 mm 时,此时缺陷处于评定线,可认为焊缝根部以上距离超过 77 mm 的缺陷均位于不可检区域,即在 K_1 和 K_2 组合工艺下,可认为深度 12 mm 以上部位的缺陷均位于不可检区域。

3.2 缺陷回波分析

图 6 为所设置三种缺陷在有无外壁斜台情况下的回波动态曲线,无斜台情况为将斜台处母材补满。焊缝根部未焊透和热影响区裂纹在有无外壁斜台情况下的曲线一致,说明斜台对此两类缺陷不产生任何影响。图 6(c)为未熔合在两种不同状态下的回波动态曲线对比。由图可见,当探头入射点至外壁斜台边缘距离超过 23 mm 时,斜台对缺陷回波不产生影响,而当探头继续靠近外壁斜台边缘时,斜台开始逐步影响缺陷信号,并当探头置于斜台边缘处,由探头激发的声束完全被斜台遮挡,而无法获得缺陷回波信号。若以 $\phi 3 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的长横孔为基准,计算根部未焊透的最高缺陷回波为

$\phi 3 \text{ mm} \times 40 - 6.4 \text{ dB}$,位于波幅 II 区;热影响区裂纹的最高缺陷回波 $\phi 3 \text{ mm} \times 40 + 3.8 \text{ dB}$,位于波幅 III 区;存在斜台时未熔合的最高缺陷回波 $\phi 3 \text{ mm} \times 40 - 12.9 \text{ dB}$,位于波幅 I 区。

3.3 缺陷检出率分析

在进行检出率计算时,以焊缝底面处 $\phi 3 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的长横孔的回波声压作为阈值,缺陷尺寸(高度)变化均为 1~10 mm,缺陷取向误差范围为 $\pm 5^\circ$,探头位置为误差范围为 $\pm 2 \text{ mm}$ 。对焊缝根部未焊透,即使最小高度尺寸 1 mm,计算得到回波相对幅值为 9×10^{-10} ,大于横孔回波 5.1×10^{-10} ,因此认为该阈值条件下的根部未焊透检出率可达 100%。

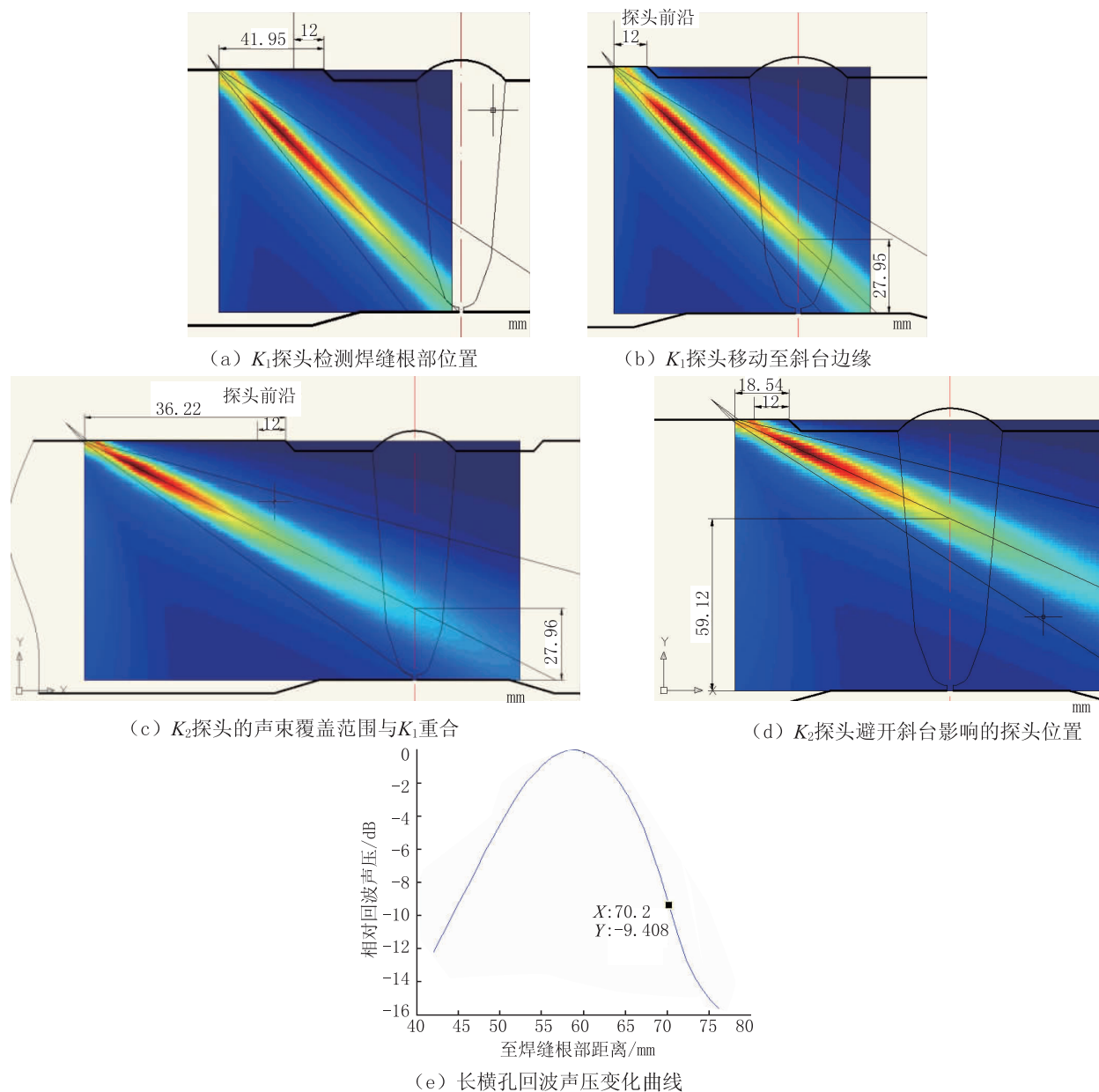


图 5 探头扫描覆盖区域

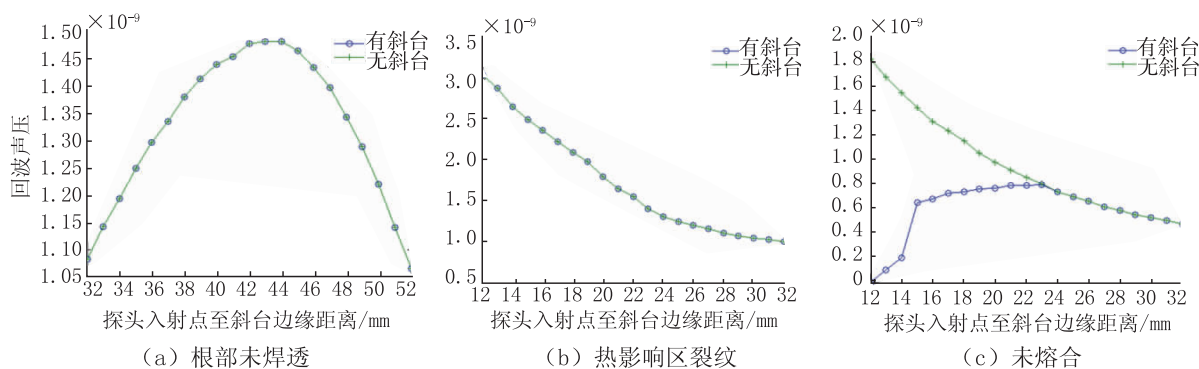


图6 缺陷回波对比

3.4 缺陷检出率分析

在进行检出率计算时,以焊缝底面处 $\phi 3 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 的长横孔的回波声压作为阈值,缺陷尺寸(高度)变化均为 $1 \sim 10 \text{ mm}$,缺陷取向误差范围为 $\pm 5^\circ$,探头位置为误差范围为 $\pm 2 \text{ mm}$ 。对焊缝根部未焊透,即使最小高度尺寸 1 mm ,计算得到回波相对幅值为 9×10^{-10} ,大于横孔回波 5.1×10^{-10} ,因此认为该阈值条件下的根部未焊透检出率可达 100% 。

对于所设置焊缝下半部热影响区裂纹,当尺寸为 10 mm 时,计算得到回波声压小于标准孔,因此认为该阈值条件下的裂纹检出率为 0 ,这是由于 K_1 探头的发射声束很难与缺陷形成有效的检测角。 K_2 探头检测该裂纹的 P_{OD} 曲线如图 7(a) 所示,可以看到,对于高度 1 mm 缺陷,检出率超过 97% 。

对于所设置焊缝上部坡口的未熔合,采用 K_1 探头无法覆盖,采用 K_2 探头进行检测的检出率曲线如图 7(b) 所示,可以看到,当缺陷高度为 5 mm 时,检出率达到 90% 。这主要是受到外壁斜台的影响,若无斜台, K_2 探头具有更大的移动范围,可以完全检测该类缺陷。

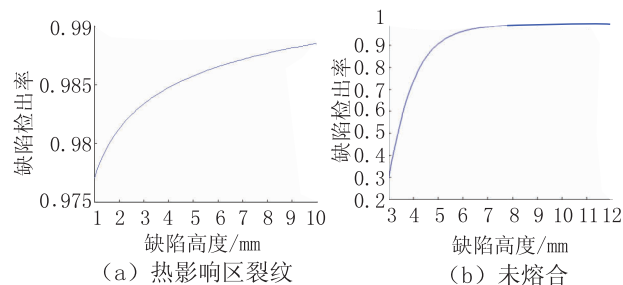


图7 缺陷检出率曲线

4 结论

(1) 基于随机参数生成模型、超声检测数值模型和检出率计算模型,可构建用于评价电站锅炉带

台阶异形结构焊缝超声波检测可靠性评价方法。

(2) 对国内带台阶异形结构焊缝常用 K_1 和 K_2 探头组合检测工艺进行声束覆盖分析,发现该组合工艺存在较大声束未覆盖区域,焊缝厚度为 89 mm 时,未覆盖区域为表面以下 12 mm 深度。

(3) 对未焊透、焊缝下部热影响区裂纹和焊缝上部未熔合的检出率分析发现,斜台对焊缝上部缺陷回波存在较大影响,当未熔合自身高度大于 5 mm 时,才能保证缺陷检出率达到 90% 。

参考文献:

- [1] GEORGE A GEORGIU. Probability of detection (POD) curves: Derivation, application and limitations[R]. Health and Safety Executive, 2006.
- [2] ASME code. Nondestructive Examination 第 V 卷[S].
- [3] RUMMEL WD, MATZKANIN GA. Nondestructive evaluation (NDE) capabilities data book. 3rd ed[M]. Austin Texas: Texas Research Institute; 1997.
- [4] LEE JB, PARK JH, KIM HD. Evaluation of ECT reliability for axial ODSCC in steam generator tubes [J]. Int J Press Vessels Piping 2010, (87): 46-51.
- [5] SPIES M, RIEDER H. Synthetic aperture focusing of ultrasonic inspection data to enhance the probability of detection of defects in strongly attenuating materials[J]. NDT&E Int 2010 (43): 425-431.
- [6] JOCHEN H. Hurz Reliability considerations of NDT by probability of detection (POD) determination using ultrasound phased array[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 5: 609-617.
- [7] LAYSON B, MADISON E, NAKAGAWA N. Laboratory pod data acquisition from inner layer cracks in simulated airframe structures[C]. Review of Quantitative Nondestructive Evaluation, American Institute of Physics, 2009(28): 1840-1847.

(下转第 72 页)

基体与纤维,纤维束与纤维束间出现微观分离,信号在传播过程中因这些分离及材料特性的改变而导致更大的能量损失,相比于试验前,引起信号幅值更大的下降。

2.4 容器中不同介质对声发射信号衰减特征的影响

声发射波产生后,在传播过程中会向相邻介质“泄露”而造成波的幅值下降,产生衰减。容器中水介质和空气介质对声发射波的衰减特征影响如图5所示。从图5中可以看出,水介质时信号的衰减程度小于空气介质状态,但差别不大,以本次试验为例,两种状态相同距离条件下,最大信号幅值差别约为8 dB,且两种状态下检测不到信号的距离相同。

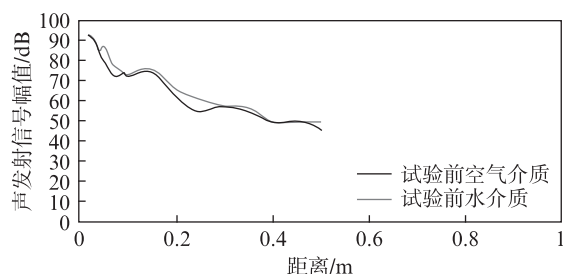


图5 复合材料容器不同介质的幅值衰减特征对比

3 结论

复合材料由于各项异性特征,导致材料表面三个典型方向上的声发射衰减信号特征存在差异,顺

纤维方向衰减最少、垂直纤维方向次之、45°纤维方向衰减最大。

碳纤维复合材料三个方向上的衰减均小于F-12纤维,也就是说碳纤维产品的检测距离大于F-12纤维产品,约为F-12产品检测距离的2倍。F12纤维复合材料容器比碳纤维复合材料容器衰减大,可能基于材料特性和结构因素。

产品受载历史影响幅值衰减特性,进而影响检测距离及探头间距的选取。声发射检测前需要明确产品的受载历史,以便于对检测到的信号进行全面分析。

容器中介质对信号幅值衰减存在影响,但从试验结果可以看出,这种影响并不显著,因而有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 杨明纬. 声发射检测[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 张虹,靳世久,孙立瑛. 不同管道特征对声发射信号幅值的衰减特征影响[J]. 管道技术与设备,2005(3):13-14.
- [3] 周伟,田晓,张婷. 风电叶片玻璃钢复合材料声发射衰减与源定位[J]. 河北大学学报,2012,32(1):100-104.
- [4] 王瑞恩,张万岭,沈功田,等. 压力容器用工业纯钛板材声发射衰减特性[J]. 无损检测,2012(2):17-19.
- [10] LHEMERY A, CALMON P, CHATILLON S. Modelling of ultrasonic fields radiated by contact transducer in a component of irregular surface[J]. Ultrasonics,2002(40), 231-236.
- [11] 张俊,丁辉,李明. 核电站关键部件在役检查可靠性分析[J]. 核动力工程,2011,32(4):58-61.
- [8] 涂春磊,邹建华,强天鹏,等. 对接焊缝相控阵超声检测可靠性的CIVA仿真与试验[J]. 无损检测,2013,35(11):22-26.
- [9] 丁辉,张俊,张益成,等. 超声检测声场计算模型的建立与仿真软件的开发[J]. 无损检测,2009,31(8):614-618.
- [4] BIDA GV, NICHIPURUK A P. Coercive force measurements in nondestructive testing[J]. Russian Journal of Nondestructive Testing,2000,36(10):707-727.
- [5] 吴志明,骆万发,沈桂平. 磁滞回线测量仪的设计[J]. 物理实验,2009,29(6):20-21.
- [6] 刘正平,程蔚. 软磁材料磁滞回线在线监测系统[J]. 电测与仪表,2010,47(536):16-19.