

基于声场计算的管道曲率对焊缝二次波检测的影响

张益成, 李晓红, 丁 辉

(武汉大学 动力与机械学院, 武汉 430072)

摘 要: 超声检测小径管焊缝时的缺陷定量与内壁曲率的关系鲜有研究。基于声场计算模型, 研究了斜探头发射声束经不同曲率的小径管内壁反射后的散射声场, 并以此计算出焊缝中点状、条状和球状三种不同反射体的回波信号。与 DL-1 试块 DAC 曲线作对比, 得出了小径管内壁曲率对焊缝二次波检测的影响规律, 为小径管二次波或多次波反射法检测评定缺陷的大小提供了理论依据。

关键词: 超声波检测; 声场计算; 小径管; 二次波; DAC 曲线

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2011)01-0005-04

Effect of Tube Curvature Concerning Second Wave Detection Based on Calculation of Ultrasonic Filed

ZHANG Yi-Cheng, LI Xiao-Hong, DING Hui

(College of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

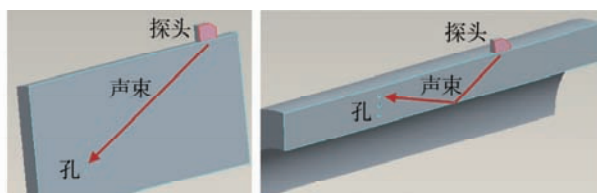
Abstract: The connection between the curvature of tube and the sizing of the defect in small diameter tube, detected by ultrasonic, was little concerned about. Based on the sound field calculation model, scattering ultrasonic field of the beam coming from the probe and reflected by the different tube curvature wall was studied, and then different regular reflector echo signals were calculated, and the comparison of the echo computed and DAC from DL-1 sample was analyzed, the regulation of connection was found, which could support the defect sizing with second-wave reflection methods.

Keywords: Ultrasonic testing; Ultrasonic field calculation; Small diameter tube; Second wave; DAC curve

用超声波对中厚壁管焊缝进行检测, 已被认为是一种行之有效的检测方法, 但对于小径管焊缝检测存在一定的困难, 尤其体现在缺陷的定量方面。图 1(a) 和 (b) 显示了相同声程的条件下, 一次波检

测过程中声波直接由反射体返回; 二次波检测过程中声波经过了管内壁两次散射, 不同管内壁曲率对声束的散射将导致反射体回波信号的不同。

国内外已开发多种仿真系统作为超声检测过程分析研究的重要手段^[1-3], 较好地解决了实验研究当中只能以有限种类的规则反射体做回波信号分析, 无法制作出其他种类的反射体(如球孔)的困难。笔者采用文献[4]建立的超声检测计算分析系统 UT-CAS, 进行声场和缺陷的回波计算。



(a) 一次波检测

(b) 二次波检测

图 1 一次波与二次波检测示意图图

1 计算模型与声场计算

1.1 UT-CAS 计算模型

UT-CAS 的声场计算模型是基于瑞利积分和 pencil 法建立的, 计算时需要考虑如何将发射源与计算区域分别离散, 并求解出相应的声束路径; 分别

收稿日期: 2010-04-06

作者简介: 张益成(1984—), 男, 博士研究生, 从事无损检测仿真研究。

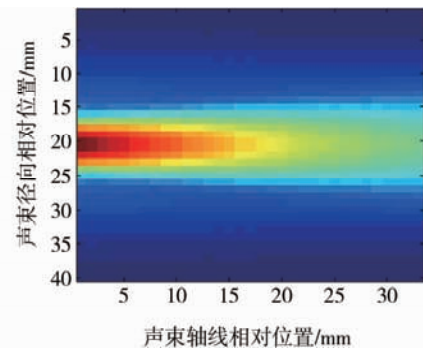
计算各源点与计算点间的幅值、相位的变化,通过叠加所有源点的声压得到最终的声压分布。

声束在圆柱曲界面的反射声场计算时,反射路径的求解是关键。笔者采用二分法求解反射路径。根据 pencil 法的计算要求,路径求解问题可以转化为以下问题:假设半径为 r 的圆柱体轴线与空间坐标系中的 y 轴重合,已知源点坐标为 (x_1, y_1, z_1) 和计算点坐标为 (x_2, y_2, z_2) ,求解曲界面上反射点 (x_3, y_3, z_3) 。在各向同性介质中,入射声束向量、反射声束向量及反射点上的法向量共面。因此对应任一个 y 值,都有且只有唯一点能满足共面的要求,即是在 y_1, y_2 之间的每一个 y 值都只对应一个点,使得三个向量共面。同时斯涅尔定律还要求入射角与反射角相等,因此可以采用二分法不断逼近唯一的反射点。

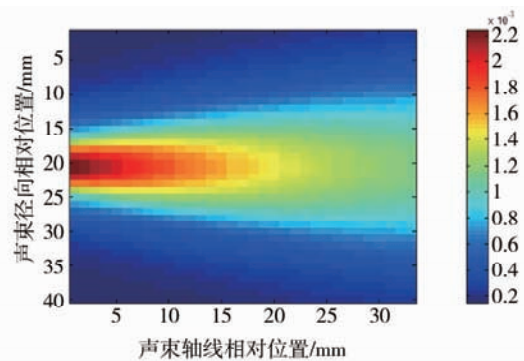
UT-CAS 对于不同种类的缺陷采用不同的近似处理,根据实际检测,本文计算用到的是裂纹回波模型。该模型适用于裂纹类缺陷和体积类缺陷(不含夹杂),采用基尔霍夫近似(Kirchhoff)^[5]的高频近似,忽略了表示沿缺陷表面传播的瑞利波的二次衍射项,从而以衍射系数的形式给出散射场远场振幅和入射场的关系。

1.2 管内壁反射声场的计算与分析

发射声场的计算作为回波信号计算的第一步是有必要的,对于管道焊缝的二次波反射法检测,声束在管道内壁反射后的声场计算则是关键。用斜探头分别检测钢板和三种不同尺寸的管道,分别计算声束在钢板底面和各管道内壁的反射声场,并作对比分析。检测所采用的斜探头参数均为:晶片尺寸 $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$,入射角 70° ,中心频率 5 MHz 。钢板与管道的材质均为铁素体钢,其中钢板厚度为 10 mm ,1,2 和 3 号管道的内径依次为 $\phi 40, 60$ 和 80 mm ,管道壁厚均为 10 mm 。钢板底面的反射声



(a) 钢板底面反射声场

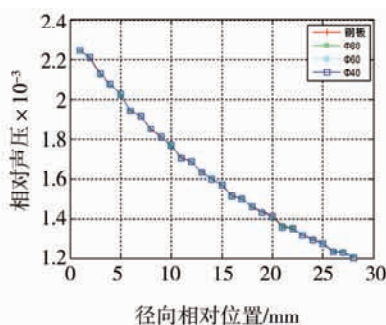


(b) 1 号管内壁反射声场

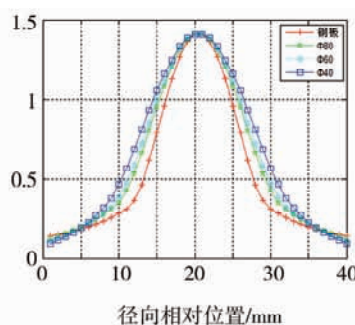
图 2 二次波反射声场

场和 1 号管道内壁反射声场如图 2 所示。其中横坐标表示声束轴线的相对位置,0 值点为声束在界面上反射点;纵坐标表示声束的径向位置,声束轴线处于 20 mm 处。由图 2 可见,管道内壁的反射声束有明显的散射,这是因为反射点偏离轴线,使得单一声束的传播距离增加。

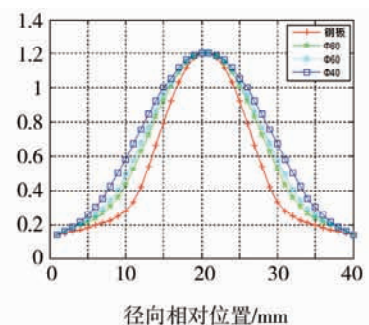
比较各反射声场的轴向声压和径向声压,结果见图 3。图 3(a)可见,四条曲线几乎重合,说明反射面的曲率对轴线声压的影响极小。图 3(b)与(c)的对比结果可知:距离反射点近的区域,轴线附近声压大且趋于一致;而远离反射点的区域,声压迅速下



(a) 轴线声压



(b) 距小径管内壁反射点
20 mm 处的径向声压



(c) 距小径管内壁反射点
30 mm 处的径向声压

图 3 反射声压分布对比图

降,且声压随曲率和距离的增加而发散增大。图 3(b)中距轴线 3 mm 处差值为 0.5 dB;距轴线 8 mm 处差值达 5.5 dB;图 3(c)中距轴线 3 mm 处差值为 0.3 dB;距轴线 8 mm 处差值为 3.8 dB,距轴线 10 mm 处差值达 6.6 dB。

由互易原则可知:反射体上的声压分布决定了最终探头接收到回波信号的大小,因此轴线附近小缺陷的回波信号受曲率影响较小,而大尺寸(尤其是长条状)缺陷的回波信号受曲率影响较大。

2 不同规则反射体回波信号的对比分析

检测的小径管外径为 48 mm,内径为 20 mm;根据电力系统标准^[6],选用斜探头晶片尺寸为 6 mm × 6 mm,入射角为 70°,中心频率为 5 MHz。小径管中设置三种不同的规则反射体:长横孔 $\phi 1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,孔轴线垂直于管材轴线,孔的形状有两种:其一为直孔,如图 4(a)所示,其二为弯孔,孔轴线同心于管横截面,如图 4(b)所示,阴影区为管材横截面,空白区为孔的横截面;短横孔为 $\phi 1 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$;球孔为 $\phi 3 \text{ mm}$ 。仪器的扫描速度按水平调整;二次波检测过程中以规则反射体最大回波信号与 DAC 曲线(DL-1 试块各孔回波,相当于一次波检测)作对比。



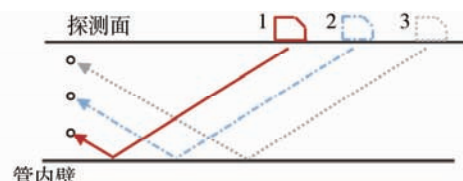
(a) 第一种类型的长横孔 (b) 第二种类型的长横孔

图 4 两种分布形式的长横孔

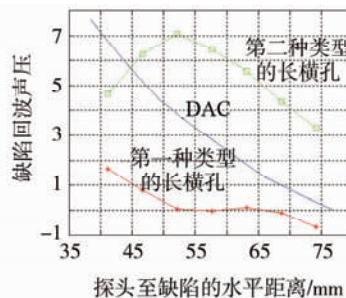
2.1 长横孔的回波信号

假设小径管中分别埋藏了 7 个与管道轴线垂直的第一种类型的长横孔($\phi 1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$),孔中心点距探测面为 1~13 mm,间隔为 2 mm,利用 UT-CAS 计算模型,计算二次波检测时的各孔最大回波声压,得到的计算结果如图 5(b)所示,图中的 DAC 曲线由一次波检测 DL-1 试块中标准孔的最大回波信号绘制所得。由此可知,在相同声程条件下,长横孔的二次回波声压小于 DL-1 试块中孔的回波声压(即一次回波声压),且差值随探头至缺陷距离的减小而增大,最大差值达 5.2 dB。这一现象恰好验证了图 3(b)与(c)所给出的计算结果。

另假设小径管中分别埋藏了 7 个与管道轴线垂直的第二种类型的长横孔($\phi 1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$),孔的



(a) 二次波检测示意图



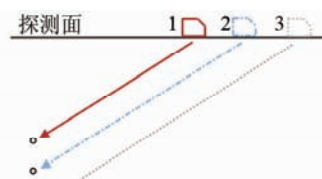
(b) 结果对比

图 5 长横孔回波声压与 DAC 曲线的对比

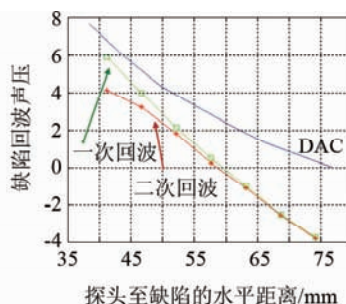
位置与第一种相同,图 5(b)的计算结果显示出:在相同声程条件下,第二种长横孔的二次回波声压大于第一种长横孔的二次回波声压,其中最大差值达 7 dB;这是长横孔的弯曲对声束聚焦产生的影响。

2.2 短横孔的回波信号

假设小径管中分别埋藏了 7 个与管道轴线相互垂直的短横孔($\phi 1 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$),孔的埋藏位置与长横孔相同,对其进行二次波检测;为了与一次波检测进行对比,又假设在图 6(a)试块中埋藏相同的短横孔,探测面的曲率半径为 24 mm,孔中心距离检测面 15~27 mm,间距 2 mm。利用 UT-CAS 计算



(a) 一次波检测



(b) 结果对比

图 6 短横孔回波声压与 DAC 曲线的对比

模型个计算短横孔的最大回波声压,计算结果如图6(b)所示:同深度的短横孔一次回波与二次回波声压相近,最大差值也仅为1.9 dB,这是声束轴线附近反射体的回波信号受管内壁曲率影响较小导致的;在相同声程条件下,短横孔的二次回波声压小于DL-1试块中孔的回波声压,且差值随探头至缺陷距离的增大而增大,其中最大差值达4.2 dB。

2.3 球孔的回波信号

假设小径管中分别埋藏5个 $\phi 3$ mm的球孔,孔中心点距探测面为3~11 mm,间隔2 mm,对其进行二次波检测;为与一次波检测对比,与图6(a)的试块尺寸相同,球孔中心距离检测面17~25 mm,间距2 mm,利用UT-CAS计算模型计算球孔的最大回波声压,计算结果如图7所示:同深度球孔的一次回波与二次回波声压相近,最大差值仅为0.1 dB,这同样是声束轴线附近反射体的回波信号受管内壁曲率影响较小导致的;在相同声程条件下,球孔一次回波声压小于DL-1试块中横孔回波声压,且差值随探头至缺陷距离的增大而增大,最大值达3.3 dB。

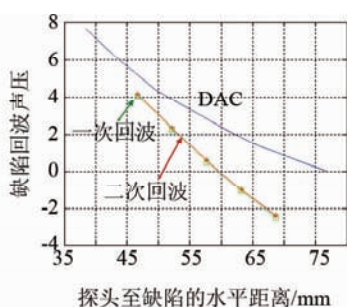


图7 球孔回波声压与DAC曲线的对比

从以上仿真计算的结果及对比,结合实际小径管焊缝二次波检测,可以知道:

(1)小径管内壁曲率对点状缺陷影响小,而对

(上接第4页)

钢管磁化状态处于图6所示的I区,涡流效应占主导地位;当电流值增加至约3A时,内外壁缺陷信号的相位重叠,无法分辨缺陷种类,此时钢管磁化状态处于图6所示的II区,漏磁效应占主导地位。另外,大量的实验以及实践经验表明:当钢管磁化至饱和和磁化强度的60%~70%时,涡流探伤效果最佳。

4 结语

在钢管涡流探伤中,由于管道磁饱和过程的引入,会在实际的检测过程中出现缺陷信号在阻抗平

面图上相位无法分辨的问题。实质上,这是由于漏磁效应的作用强于涡流效应的原因。为了更好地进行钢管的涡流探伤,就要避免钢管处于过饱和和磁化状态,这对于缺陷的检出至关重要。以上研究内容也可以看成是对GB/T 7735—2004《钢管涡流探伤检验方法》标准的补充说明。

条状缺陷影响大。

(2)小径管内壁曲率对焊缝根部条状缺陷的影响较大,而对焊缝表面的条状缺陷的影响较小。

3 结语

(3)小径管内壁曲率对焊缝根部点状缺陷的影响较小,而对焊缝表面的点状缺陷的影响较大。

将UT-CAS声场计算模型应用于小径管焊缝二次波检测。计算结果发现,小径管内壁曲率对不同形状和埋藏深度的缺陷检测结果均存在影响,其中点状缺陷的影响较小,条状缺陷的影响较大,其中两种长条状缺陷的回波声压差值最大达7 dB,因此实际小径管焊缝的二次波检测必须考虑管材曲率对回波信号的影响。

参考文献:

- [1] Calmon P. Recent development in NDT simulation [C]. WCU2003, Paris, 2003:443—446.
- [2] Wirdelius H. The application of mathematical modeling of ultrasonic NDT in the qualification process[J]. ECNDT, 1998, 13(11):1—4.
- [3] Michael Garton. Refining automated ultrasonic inspections with simulation models[EB/OL]. 1997-10/2007-06-08. <http://www.ndt.net/article/garton/garton.htm>.
- [4] 丁辉,张俊,等. 超声检测声场计算模型的建立与仿真软件的开发应用[J]. 无损检测, 2009, 31(8):614—618.
- [5] Lhemery A. Impulse response method to predict echo responses from defects in solids, Part1, Theory[J]. J. Acoust. Soc. Am, 1995, 98(4):2197—2208.
- [6] DLT 820—2002 管道焊接接头超声波检验技术规程[S].

面图上相位无法分辨的问题。实质上,这是由于漏磁效应的作用强于涡流效应的原因。为了更好地进行钢管的涡流探伤,就要避免钢管处于过饱和和磁化状态,这对于缺陷的检出至关重要。以上研究内容也可以看成是对GB/T 7735—2004《钢管涡流探伤检验方法》标准的补充说明。

参考文献:

- [1] 任吉林,林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京:科学出版社, 2008.
- [2] 雷银照. 电磁场[M]. 北京:高等教育出版社, 2008.
- [3] GB/T 7735—2004 钢管涡流探伤检验方法[S].