

超声波在圆柱形工件中的波型变化

王宇凡¹, 崔省安², 李瑞君², 高兵³, 王建利⁴

(1. 西安向阳航天材料股份有限公司, 西安 710025; 2. 兵器工业西北压力容器检测站, 西安 710043;
3. 西安航天动力机械厂, 西安 710025; 4. 西安泵阀总厂有限公司, 西安 710025)

摘要: 超声波直探头接触法手工检测圆柱形工件曲面时, 其声场特征与平面接触工件时有着极大的不同。由于超声波直探头与工件呈线性接触, 导致其声场变化, 使截面内充满超声场, 产生的波型有纵波、横波及沿圆柱表面传播的表面波。根据该声场的特点, 结合柱面反射的特殊情况, 导致一次底波后产生了不同类型的变型波。通过对三次底波前的变型波的计算和分析, 了解了主要变型波的性质和意义, 提供了工件内部综合的超声波信息, 有助于对圆柱形工件内部质量的评价。

关键词: 超声波; 圆柱形工件; 超声场变化; 波型分析

中图分类号: TG115.28 文献标志码: B 文章编号: 1000-6656(2014)07-0093-03

The Change of Ultrasonic Wave in the Cylindrical Workpiece

WANG Yu-fan¹, CUI Sheng-an², LI Rui-jun², GAO Bing³, WANG Jian-li⁴

(1. Xi'an Sunward Aerospace Material Co., Ltd., Xi'an 710025, China;
2. Northwest Pressure Vessel Testing Station of Weapons Industry, Xi'an 710043, China;
3. Xi'an Aerospace Power Machine Factory, Xi'an 710025, China;
4. Xi'an Pump Valve Factory Co., Ltd., Xi'an 710025, China)

Abstract: When the ultrasonic beam is used to detect the cylindrical workpiece by manual method, the ultrasonic field characteristics is very different from plane contact workpiece. The ultrasonic field changes because the ultrasonic probe is linearly contacted with the workpiece, leading to a large number of variation waves within its cross section. The waves include the longitudinal wave, transverse wave and wave propagating along the surface of the cylindrical surface wave. In this paper, by calculating and analyzing variation waves before the three bottom wave, the character and significance of the main variation waves can be well understood, thus providing more information for the integrated ultrasonic waves and helping to evaluate the internal quality of cylindrical workpiece.

Keywords: Ultrasonics; Cylindrical workpiece; Ultrasonic field's variation; Wave analysis

超声波直探头检测平面工件时, 发射的声场以纵波为主, 在近场区(N)之后以半扩散角(θ_0)向外辐射的主声束, 在声源附近主声束旁, 存在大量的副瓣至近场区, 副瓣以横波为主, 能量较低, 存在干涉现象, 衰减较快, 对于接触平面工件以主声束进行超声检测时, 副瓣影响不大。当直探头放置在圆柱形工件曲面上检测时, 探头晶片与工件呈线状接

触, 超声波进入工件后的声场与平面接触时截然不同。

笔者分析了直探头在圆柱形工件中的声场变化和波型变化, 通过观察一次底波与三次底波间的波型变化, 有助于检测圆柱形工件, 如轴类、棒材的内部质量。

1 声场的变化

1.1 超声波在平面接触工件时的声场

超声波在平面接触工件时, 其波源附近由于波的干涉而出现一系列声压极大值和极小值的区域,

收稿日期: 2013-11-18

作者简介: 王宇凡(1993—), 男, 主要从事无损检测技术工作。

称为近场区,近场区内主声束旁有很多副瓣,比较复杂。约在 1.64 倍近场区之后,主声束以一定的角度向外扩散,声源辐射的纵波声场的第一零值发射角称为半扩散角(θ_0)。其声场变化如图 1 所示。

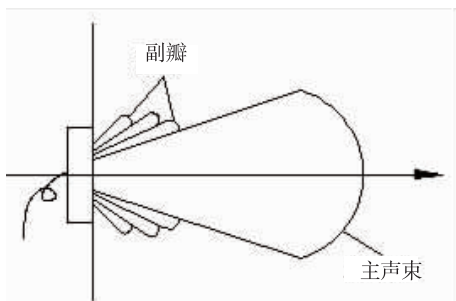


图1 平面接触工件时声源辐射的声场特征

1.2 声源接触曲面工件时的声场变化

当直探头探测圆柱形工件时,探头仅与圆柱面曲面的一个很窄的矩形区域接触,接触宽度甚至远小于波长,从而在圆柱的截面内发生强烈的侧向辐射。

由矩形源声场的坐标系数可知^[1], a (或 b)为声源中心点至边缘尺寸,故对于一边长分别为 $2a$ 和 $2b$ 的矩形波源,由半扩散角公式 $\theta_0 = \arcsin \frac{\lambda}{2} \approx 57 \frac{\lambda}{2b}$ 或 $\theta_0 = \arcsin \frac{\lambda}{2a} \approx 57 \frac{\lambda}{2a}$ 可知^[1-2],半扩散角(θ_0)的大小取决于声源尺寸($2a$ 或 $2b$)与波长(λ)的比值;当声源尺寸很小,即 $\lambda/2a$ 或 $\lambda/2b$ 远小于1时,指向性变差,半扩散角(θ_0)趋近 90° ;由公式 $N \approx \frac{D^2}{4\lambda} = \frac{F_s}{\pi\lambda}$ 可知^[1,3],由于声源面积(F_s)减小,其近场长度(N)变小;其波阵面近似于球形,并在声场的侧向产生显著的横波和表面波,如图2所示。

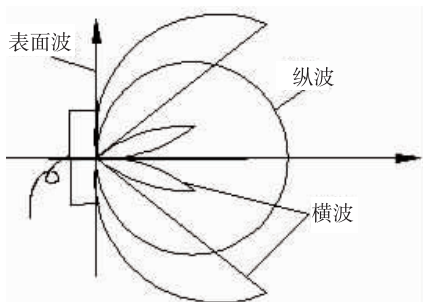


图2 小声源辐射的声场特征

2 波型分析

由于三次底波后的变形波型复杂,且无任何使用意义,故笔者只针对三次底波前的波型予以分析。

试验采用 CST-3 型超声波探伤仪,2.5P14Z 型

直探头,由于标准试块材质均匀,晶粒度高,内部杂质少,故选用直径为 $\phi 70$ mm 的 CS-1 型标准试块进行测试。当检测灵敏度设定为 $\phi 70$ mm 棒 1/2 轴心处 $\phi 2$ mm 当量时,荧光屏显示波形如图3所示。

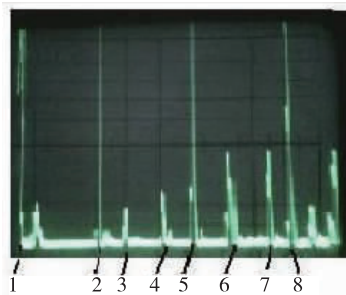


图3 圆柱形工件超声检测的波形图

波1为始脉冲。波2、波5、波8分别为纵波的第一次、第二次、第三次底波反射。

波3为扩散纵波经圆柱面反射两次后返回探头,形成等边三角形反射路径($L \rightarrow L \rightarrow L$)的迟到波。构成这种反射条件的扩散声束与探头声束轴线夹角为 30° ,其声程为:

$$X_3 = \frac{3}{2} \cdot d \cos 30^\circ \approx 1.3 d \quad (1)$$

即这种等边三角形反射路径声程(X_3)为一次底波声程(d)的1.3倍。如图4所示。

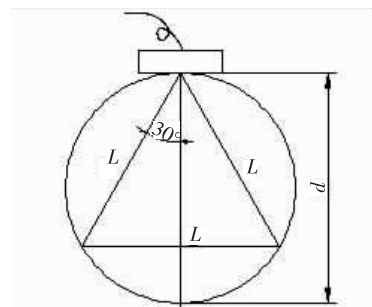


图4 ($L \rightarrow L \rightarrow L$)等边三角形反射路径

波4为纵波扩散波束在圆柱面发生波型转换成横波,再次转换成纵波,被探头接收,形成等腰三角形反射路径($L \rightarrow T \rightarrow L$)的变型波,如图5所示。

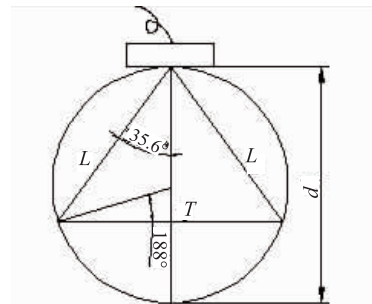


图5 ($L \rightarrow T \rightarrow L$)等腰三角形反射路径

$$\text{其声程为: } X_4 = d \cos \alpha_L + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_L}{C_S} d \cos \alpha_S \quad (2)$$

由于 $\alpha_S = 90^\circ - 2\alpha_L$ 和反射定律得

$$\frac{\sin \alpha_L}{\sin \alpha_S} = \frac{\sin C_L}{\sin 2\alpha_S} = \frac{C_L}{C_S} \quad (3)$$

式中: C_L 为钢中纵波声速; C_S 为钢中横波声速。

对于钢中可求得 $\alpha_L = 35.6^\circ$, $\alpha_S = 18.8^\circ$

$$\text{则 } X_4 = 18.8^\circ \approx 1.67 d \quad (4)$$

即这种等腰三角形变型波的反射路径声程 (X_4) 为一次底波后声程 (d) 的 1.67 倍。

波 3 及波 4 常被称为三角波。

波 6 为横波扩散声束在圆柱面反射两次后返回探头, 形成等边三角形反射路径 ($T \rightarrow T \rightarrow T$) 的迟到波。这种反射条件的扩散声束与探头声束轴线夹角为 30° , 其声程为:

$$X_6 = \frac{3}{2} d \times \cos \alpha_L \times \frac{C_L}{C_S} = \frac{3}{2} d \times \cos 30^\circ \approx 2.37 d \quad (5)$$

波 7 为纵波等边三角形的 2 次反射路径, 其声程为:

$$X_7 = \frac{6}{2} d \times \cos 30^\circ \approx 2.6 d \quad (6)$$

其反射路径如图 4 所示。

图 3 为 $\phi 70$ mm 棒轴心处 $\phi 2$ mm 检测灵敏度时的探伤波形, 如将其灵敏度提高 12 dB 时, 可发现一部分由于波型转换损耗及能量较低时, 平时不可见的变型波出现, 如图 6 所示。

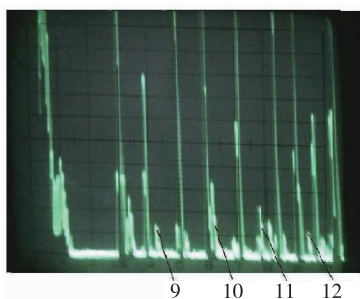


图 6 高灵敏度检测时的超声波形图

波 9 为纵波以小角度入射, 在底面经波型转换后其横波被探头接收后的混合直达迟到波, 其声程为:

$$X_9 = \frac{1}{2} d + \frac{1}{2} \times \frac{C_L}{C_S} \times d \approx 1.41 d \quad (7)$$

波 10 为横波扩散波束, 以 22° 入射角, 在圆柱面发生波型转换成纵波, 再次转换成横波后被探头接收 ($T \rightarrow L \rightarrow T$) 等腰三角形变型波, 如图 7 所示。

$$X_{10} = d \cdot \cos \alpha_S \times \frac{C_L}{C_S} + \frac{1}{2} \times d \cdot \cos \alpha_L \approx 2.06 d \quad (8)$$

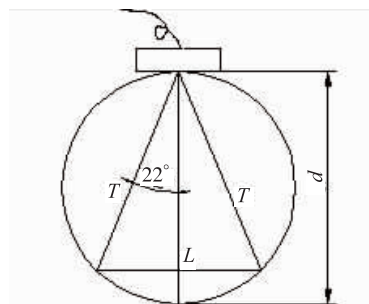


图 7 ($T \rightarrow L \rightarrow T$) 等腰三角形反射路径

波 11 为纵波以 18° 入射经五星回路反射五次后被探头接收的迟到波, 其反射路径如图 8 所示。其声程为:

$$X_{11} = \frac{5}{2} \times d \times \cos \alpha_L \approx 2.38 d \quad (9)$$

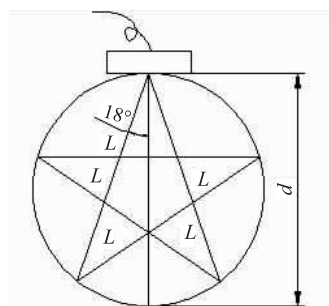


图 8 五星回路反射路径

波 12 为声源发射的表面波沿圆柱面绕行一周后被探头接收, 其位置紧靠三次底波之后, 其声程为:

$$X_{12} = \frac{1}{2} \times d \times \pi \times \frac{C_L}{C_R} \approx 3.1 d \quad (10)$$

其余变型波如四边形、五边形等回波, 由于其落在三次底波之后, 或由于波型转换导致能量极低且无任何参考价值, 故不再讨论。

3 应用意义

(1) 纵波三角回波的反射路径构成完整的回路且无波型转换及损失, 且对于工件表面粗糙度和耦合差异的反应比单纯的一次底波反应迟钝, 其稳定性优于底波, 故可用一次三角波作为探伤灵敏度调整后的跟踪及校验。

(2) 由于底波波幅很高, 在正常检测过程中无法观察其下降程度, 故可用变型波作为仪器的跟踪波进行操作, 当操作不当、探头接触不良、手工把持不稳时可及时调整。

(3) 由于柱面的聚焦作用, 在工件一、二次底波之间会产生 W 形路径的聚焦反射, 有助于发现较小

(下转第 99 页)

3.2.6 扫描区域以外的裂纹相关显示

如果裂纹位置在扫描区域外,随着扫描位置距离裂纹越来越远,图谱信号逐渐减弱,Butterfly 图逐渐减小,如图 12 所示。可通过平行扫描的方式对检测出的疑似裂纹进行检验。

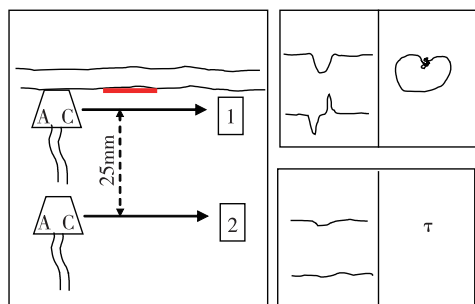


图 12 扫描区域外的裂纹相关显示

4 缺陷判定的流程

ACFM 检测完成后需对显示信号进行评估,应能从相关干扰信号中辨别出裂纹信号显示。ACFM 图像能够形成焊缝裂纹缺陷和其他干扰因素的特征图像,对非相关显示的鉴别是有必要的。根据上述的分析,编制出一个简单的工艺流程(如图 13)对如何判定缺陷有益,以用于实际检测时帮助识别缺陷。

5 结论

(1) ACFM 技术采用以时间为基轴的 B_x 、 B_z 轨迹曲线及用极坐标表示 B_x 、 B_z 相对关系的蝴蝶



(上接第 95 页)

的缺陷,以及由于始脉冲占宽导致的一次底波前被探头盲区即始脉冲占宽所掩盖的缺陷。

(4) 当工件表面存在较严重的纵向表面缺陷时,当探头沿圆柱面周向移动时,有时可见表面波随探头的移动同步快速游动,其缺陷处即为表面波与仪器探头零点重合处。

4 结论

圆柱形工件由于探头与工件呈线性接触,导致超声波进入工件后声场变化,使截面内充满超声场,波型有纵波、横波及沿圆柱表面传播的表面波。如果是薄板曲面时,若入射角波型、材质、频率及板厚等满足条件时,也可产生沿曲面薄板传播的板波。

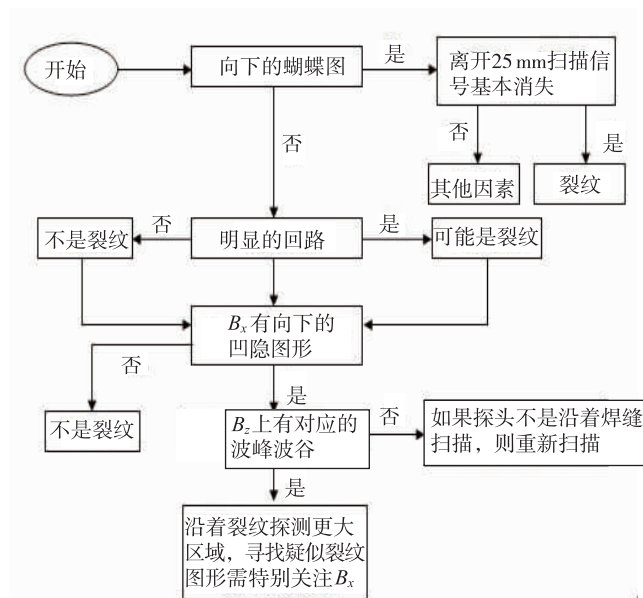


图 13 缺陷判别的工艺流程

图显示,所以可以通过磁场曲线结合蝴蝶图的特征有效地进行缺陷识别分析。

(2) ACFM 图像能够形成焊缝裂纹缺陷和其他干扰因素的特征图像。图谱分析应正确地鉴别出非相关显示。分析相关显示的 B_x 、 B_z 波幅应包含典型的由裂纹引起的变化信息,并出现蝴蝶图。

(3) 通过 ACFM 的缺陷判别流程有助于正确识别缺陷。

参考文献:

- [1] 胡书辉. 裂纹的交流电磁场检测与反演研究[D]. 天津:天津大学,2004.

由于声场的特点,结合柱面反射的特殊情况,故在一次底波后产生了不同类型的变型波,通过对三次底波前变型波的分析 and 观察,提供了更全面的评价工件内部的综合的超声波信息,有助于对圆柱形工件内部质量的深层次评价。

参考文献:

- [1] 郑晖,林树青. 超声检测[M]. 北京:中国劳动社会保障出版社,2008:57-63.
- [2] 肖暮霏. 超声探头发射声束特性的计算[J]. 无损检测, 1999,13(1):5-7.
- [3] 王建利. 确定探伤灵敏度用坐标图及其应用[C]. 陕西省第八届 NDT 年会论文集,2002(5):120-123.