

# 压力容器氢致开裂超声相控阵检测

富 阳

(广东省中山市特种压力容器检验所, 中山 528400)

**摘 要:**在临氢及湿硫化氢环境下运行的压力容器,可能会产生氢鼓泡(HB)和氢致开裂(HIC),初期 HB 有时鼓包不明显,易被漏检。利用超声相控阵,可以检测大量氢致开裂。给出了相控阵检测具体参数,包括仪器、探头、试块、灵敏度、扫描深度、显示延迟、水平图像中心、发射脉冲宽度、重复频率、发射电压、扫描类型、扫描波形、焦点深度、角度、孔径等具体仪器设置。

**关键词:**压力容器;氢致开裂;超声相控阵;无损检测

中图分类号: TG115. 28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2013)06-0023-03

## Ultrasonic Phased Array Inspection on Pressure Vessel HIC

FU Yang

(Zhongshan Special Equipment Inspection Institute, Zhongshan 528400, China)

**Abstract:** HIC or HB appears in some pressure vessels in hydrogen or wet hydrogen sulfide environment. HIC or HB is not easy to be found, but HIC or HB can be found by ultrasonic phased array. Specific system settings such as system, probe, test block, sensitivity, scan depth, display delay, horizontal image center, transmit pulse width, PRF, transmit voltage, scan type, scan waveform, focus depth, angle and aperture has be introduced.

**Keywords:** Pressure vessel; HIC; Ultrasonic; Phased array; Nondestructive test

在临氢以及湿硫化氢环境下运行的压力容器,可能会产生氢鼓泡(HB)或氢致开裂(HIC),见图1。HB、HIC通常使压力容器钢板内部开裂,初期开裂常常平行于钢板表面,然后在应力和腐蚀介质的作用下会不断扩展。HB、HIC可以出现在钢板各个厚度方向,但以钢板中部偏内壁位置较多见,向



图1 氢致开裂

表面鼓起时形成HB。由于钢材内氢气、甲烷等气体的聚集,造成钢材发生与表面平行的HIC,有时HIC呈阶梯状分布,开裂处表面鼓起则表现为HB。HB一般可通过宏观检验发现,但初期HB有时鼓包不明显,易被漏检。

压力容器检验员利用常规技术检验时,通常采用目视或超声波测厚检测。由于超声波测厚对缺陷定性欠缺的局限性,很多HB或HIC易被误认为夹层。夹层通常被认为是较安全的缺陷,如果将HB或HIC误检为夹层可能造成安全事故,夹层为压力容器投用前的制造缺陷,HB或HIC为使用过程中产生的裂纹类缺陷。与表面平行或夹角角度较小的夹层,一般不易扩展,对这类夹层的限制是比较宽松的。如果将与表面平行或夹角较小的HB或HIC,误检为夹层,检验结果很可能是允许运行,那么随着氢分子聚集,压力升高,开裂处大多将会扩展,表面隆起形成明显而危险的HB或HIC。而且,有时相临的不同层面的HB或HIC会相互连接,更加削弱液化石油气储罐的承压能力,并可能产生更危险的

收稿日期: 2012-06-26

作者简介: 富 阳(1971—),男,高工,主要从事特种设备的检验。

硫化物应力腐蚀开裂(SSCC)。在下一检验周期内,当 HB 或 HIC 扩展到一定程度,承压能力不足时,会造成压力容器失效,甚至会大量介质泄露。如果发生硫化氢或液化石油气大量泄露的事故,会危及周围环境及人员生命安全。笔者利用超声相控阵来检测大量氢致开裂。经解剖验证了超声相控阵检测氢致开裂的准确性。

## 1 超声相控阵检测

超声相控阵经过近几年的发展,已在不少领域成功应用。超声相控阵探头有多个阵元,即探头内有多个压电晶片,每个阵元是独立控制的,按照一定的顺序和时差分别激发压电晶片后,每个压电晶片产生的脉冲波在空间上相互叠加,叠加部位能力得到提高,检测效果大幅度提升,有利于将缺陷成像显示。

超声相控阵仪器可以对缺陷成像,缺陷信号在图像中被明确显示。超声相控阵检测方法可以与传统的超声波技术结合,利用超声相控阵仪器的 A 超功能,辅助超声相控阵检测方法,可以在短时间内实现快速检测。

超声相控阵线扫,即线形扫查、线型扫查等,是最适合氢腐蚀的扫查方式,笔者研究了 128 晶片的线阵探头,成像效果优于 96 晶片的线阵探头。

## 2 检测参数

以下以某炼油厂 115 装置 E207 换热器为例,给出相控阵检测具体参数。

相控阵仪器应具有产品质量合格证检测,设备应具有超声波发射、接收、数据自动采集和记录、显示功能。检测设备包括仪器、探头、扫查装置和附件。相控阵仪器为国产的,型号为 SIUI CTS-602,分析软件为 CTS 相控阵上位机软件。

标准试块为 CSK-III A,利用  $\phi 1 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$  平底孔设置灵敏度。对比试块为自制试块(图 2),试块采用与工件声学性能相同的材料制成,其厚度与压力容器壁厚匹配,外形尺寸能代表工件的特征和满足扫查装置的扫查要求。由于本压力容器曲率半径较大,所以可采用平面对比试块。试块设置 12 个标准反射体,即不同深度的  $\phi 2 \text{ mm}$  平底孔,其深度覆盖所有检测范围,对比试块的剖面图见图 3。

检测灵敏度一般采用标准试块在检测前设置,并使用对比试块校验。检测发现缺陷以后,采用对



图 2 对比试块照片(开孔在上)

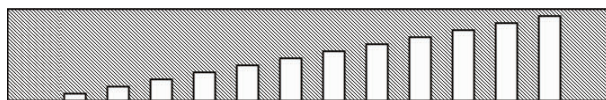


图 3 对比试块剖面图(开孔在下)

比试块上的标准反射体调整灵敏度,将反射信号波幅设置为满屏高的 50%,并注意晶粒噪声不高于满屏高的 5%。另外,对比试块与被检试件表面粗糙度一致,表面补偿为 0 dB。

探头选择时,为了扩大扫查范围。使用的探头为 128 阵元的线阵探头,频率 5 MHz;楔块厚度与压力容器壁厚匹配,使所有壁厚成像都在楔块界面波之间,楔块声速 2 337 m/s,楔块角度  $0^\circ$ 。

扫查方式可以采用手动扫查、半自动扫查、自动扫查,笔者采用手动扫查。仪器设置方面,扫描深度应与压力容器壁厚匹配,本案例为 100 mm;材料类型为低碳钢;横波声速为 3 230 m/s;纵波声速为 5 900 m/s;显示延迟为 0.0 mm;水平图像中心为 0;发射脉冲宽度 200 ns;重复频率 800 Hz;发射电压 100 V;扫描类型为线性扫查;扫描波形为纵波;焦点深度为 15 mm;角度为  $0^\circ$ ;同时激发晶片数为 32 个;比例为 1.0,声程 100 mm,聚焦深度 25 mm。

图 4 是某炼油厂 115 装置 E207 换热器的 E(P)

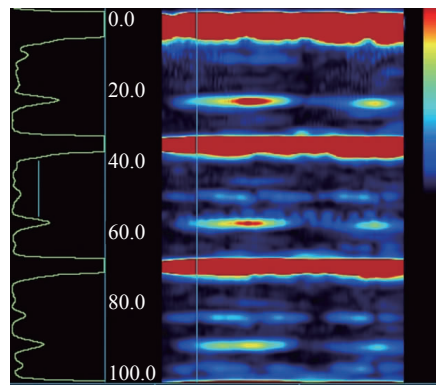


图 4 E(P)扫描图像

扫描图像显示。图像左侧为 A 显示,右侧为 B 显示。A 显示中横坐标为波幅,纵坐标为声程,右侧信号代表高波幅,左侧信号代表低波幅;B 显示中横坐标为沿工件表面方向的距离,纵坐标为声程,最右侧为颜色与波幅的对照,红色信号代表高波幅,蓝色信号代表低波幅。探头在外表面检测,通过 A 显示或 B 显示可以看出,缺陷为钢板内部缺陷,在厚度方向,位于近内表面约三分之一位置。

增加编码器后,也可以使用 B, C, D 扫描,一般使用 C 扫描图像显示。通过 C 显示可以看出缺陷沿工件表面方向的尺寸,根据缺陷的横坐标读数可以得到探头移动距离,根据纵坐标读数可以得到缺陷在另一垂直方向的尺寸。

具体仪器设置如下:扫描模式为编码器,检测前应对位置传感器进行校准。校准方式是使扫查装置移动一定距离时检测设备所显示的位移与实际位移误差小于 1%;扫查增量指扫查过程中扫描信号间的采样间隔,检测时应根据扫查增量采集信号,扫查增量设置与压力容器厚度有关,检测时扫查增量为 0.26 mm;起始深度与结束深度应与压力容器壁厚匹配。

### 3 检测过程

在对压力容器检测时,须考虑温度影响。应确保在规定的温度范围内进行检测。若温度过低或过高,需采取有效措施避免,若无法避免,应评价其对检测结果的影响。检测校准与实际检测间的温差应控制在 20℃ 之内。采用常规探头和耦合剂时,压力容器的表面温度范围为 0~50℃。超出该温度范围,可采用特殊探头或耦合剂,但应在使用温度下的对比试块上进行校准和验证。采用有效且适用于在用压力容器的介质作为超声耦合剂,主要考虑选用的耦合剂在一定的温度范围内能保证稳定可靠的检测。实际检测采用的耦合剂应与检测校准时的耦合剂相同。

探头移动区域应清除铁屑、油垢及其他杂质,检测表面应平整,表面粗糙度  $R_a$  值应不高于  $6.3\ \mu\text{m}$ ,便于探头的扫查。本例中,对比试块与被检试件表面粗糙度一致,  $R_a$  值都为  $6.3\ \mu\text{m}$  左右。在检测前,确定和标记检测区域,对根据检测区域和探头设置确定的扫查路径在压力容器上予以标记,标记内容包括扫查起始点和扫查方向,同时应在压力容器上画出一条参考线,以确保探头的运动轨迹。对已发

现缺陷部位进行复检或已确定的重点部位,检测区域可减小至相应部位,并重新标记。

检测前采用对比试块进行深度校准,校准扫描时基与深度的对应关系。深度校准应保证深度测量误差不大于压力容器厚度的 1% 或 0.5 mm,取较大值。

扫查时应确保探头的运动轨迹与拟扫查路径间的误差不超过 10 mm。压力容器氢致开裂检测是较大范围的母材检测,所以应分段进行扫查,且各段扫查区的重叠范围至少为 20 mm。扫查过程中应密切注意波幅状况。若发现界面波降低明显、材料晶粒噪声变化或怀疑耦合不好时,应重新扫查该段区域。

在检测结束或检测过程中检测设备开停机或更换部件时,应进行检测系统复核。由于初始设置和校准时采用对比试块,所以在复核时应采用同一试块,若复核时发现初始设置和校准的参数偏离,应修正或重新检测。

检测时从容器外表面进行检测。检测时一般对重点部位进行 100% 体积检测,发现异常时对整个容器 100% 体积检测。

### 4 检测结果

利用超声相控阵,检测到大量氢致开裂。氢致开裂超声相控阵检测时,扫描线的回波参差不齐,起伏不规则,有时在较大范围内起伏。相控阵检测时使用多种扫描方法,可以确定氢致开裂范围、深度、数量等变化情况。

经超声相控阵检测,发现很多 HIC 而未见 HB, HIC 无开裂张角或张角很小,宏观上钢板无异常,宏观检验时不能被发现,也不易通过射线、磁粉、渗透检测等发现,在超声波检测时易被误认为是夹层,认为不影响定级,但是解剖后确认不少缺陷为 HIC。

### 5 结论

对所有可能发生 HB 或 HIC 的压力容器,应在制造该容器前检测原材料,使用含未超标缺陷原材料。由于钢中 MnS 等杂质易于聚集氢,所以宜选用低硫钢材。如果原材料含未超标缺陷,如 I 级钢板的小缺陷,应对缺陷进行准确记录。以后通过对新生缺陷或这些制造缺陷的检测,可以判断缺陷扩展情况,发现新生 HB 或 HIC。

当检测人员发现压力容器存在缺陷时,检验人员不但要依据现有规程、标准检验,而且要深入研

(下转第 31 页)



确定缺陷的位置。

笔者选取了尺寸为 700 mm×600 mm×20 mm 的 6016 号铝板作为检测对象,采用线切割技术在铝板表面制备了一系列的表面裂纹型的人工缺陷,实验中给出了对裂纹尺寸为 60 mm×1 mm×1 mm 的检测结果。

### 3 结果与讨论

图 3 给出了前置放大器输出的缺陷信号,可以

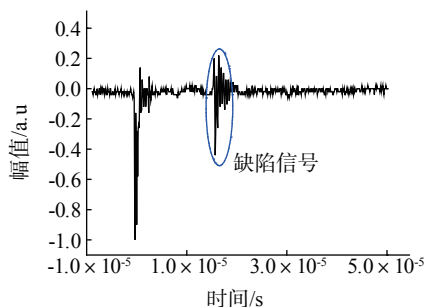


图 3 前置放大器输出的缺陷超声信号

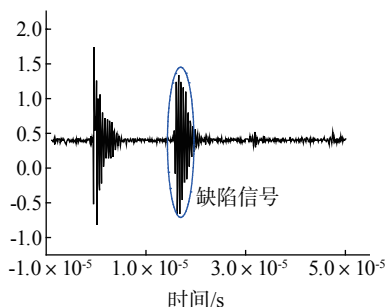


图 4 高通模拟滤波器输出的超声信号

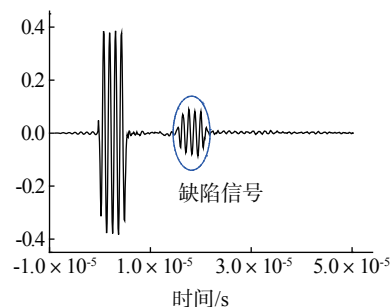


图 5 LMS 数字滤波器输出的超声信号

测时提高缺陷信号信噪比的功能,但是同时也发现滤掉了有用信号中的高频成分,这对于金属材料性能表征时所用的频域分析方法会产生一定的影响,这可能是由于实际测量过程中环境复杂、噪声类型很多,如电噪声以及激光器引起的热噪声,导致了 LMS 算法中参考信号的选择存在一定的缺陷,因此建立多个参考信号是进一步提高算法有效性与可靠性的一个重要手段。

### 4 结论

采用 LMS 算法的自适应滤波技术,可以有效地抑制激光-电磁超声检测过程中的噪声信号。所用的 LMS 算法简便,滤波器系数相对较少,利用 Matlab 软件即可实现,信号处理速度较快,未来研究中结合 FPGA(Field-Programmable Gate Array)即可在硬件实现激光-电磁超声检测信号的自适应滤波,为该技术的实际应用奠定了基础。

(上接第 25 页)

究,使用超声相控阵等先进检测方法,及时发现 HB, HIC 等缺陷。

#### 参考文献:

[1] 富阳. 氢致开裂误检及对规程和标准的商榷[J]. 石油

发现该信号含有相对严重的噪声信号。图 4 给出了前置放大器输出的缺陷信号经过高通模拟滤波器的滤波结果,发现部分低频噪声在一定程度上被抑制了。图 5 给出前置放大器输出的缺陷信号经过 LMS 数字滤波信号处理的结果,可以发现低频及高频噪声已基本被抑制,其中,  $\mu=0.07$ , 迭代次数为 8 192 次。

从以上的信号处理结果可以发现,采用 LMS 自适应滤波技术能够有效地抑制激光-电磁超声检测过程中的噪声信号,较好地实现金属材料无损检

#### 参考文献:

- [1] MIRKO S, VALENTINA C, SIVIA C, et al. Pre-processing of data coming from a laser-EMAT system for non-destructive testing of steel slabs [J]. ISA Transactions, 2012, 51(1): 181—188.
- [2] 赵扬, 刘伟, 郭锐, 等. 激光-电磁超声技术的检测原理与应用[J]. 无损检测, 2012, 34(3): 59—63.
- [3] 林善明, 孙海华, 金纪东, 等. 模糊自适应滤波器在电磁超声检测中的研究[J]. 计算机工程与设计, 2011, 32(3): 1123—1129.
- [4] 戴立新, 彭建平, 杨凯, 等. 电磁超声系统强噪声干扰抑制算法研究[J]. 铁道学报, 2011, 33(3): 35—39.
- [5] 刘镇清, 项延训. 自适应滤波在超声无损检测中的应用[J]. 无损检测, 2001, 23(9): 398—410.
- [6] 周忠辉, 王永纲, 黄大骏. LMS 自适应滤波数字峰值估计方法研究[J]. 核电子学与探测技术, 2010, 30(3): 349—353.
- [7] 化工设备, 2010, 39(4): 48—51.
- [8] 胡新忠. 超声波测厚仪快速测定及评定压力容器本体钢板夹层的缺陷[J]. 无损探伤, 2004, 28(6): 41—42.
- [9] 林莉, 杨平华, 张东辉, 等. 厚壁铸造奥氏体不锈钢管道焊缝超声相控阵检测技术概述[J]. 机械工程学报, 2012, 48(4): 12—15.