

多层包扎尿素合成塔声发射检验与复验技术探讨

宋明大^{1,2} 王威强¹ 曹怀祥² 赵亚凡³

(1 山东大学机械工程学院, 山东济南 250061) (2 山东省特种设备检验研究院, 山东济南 250013)

(3 山东建筑工程学院数理系, 山东济南 250014)

摘要: 通过对实际运行状态下尿素合成塔有限元模拟分析, 指出深环焊缝内部焊趾处存在很高的应力集中, 是整个塔体最脆弱的部位。现场声发射检测结果表明, 深环焊缝内部焊趾处是声发射信号源的集中部位, 与有限元分析结果一致。通过对声发射源各种复验技术进行分析, 指出 TOFD 超声成像技术能够精确测定缺陷的几何尺寸和埋藏位置, 是目前多层板深环焊缝埋藏缺陷的最佳复验方法。

关键词: 声发射; 多层包扎; 尿素合成塔; 有限元分析; 深环焊缝

0 前言

尿素合成塔是尿素合成装置的核心设备, 自 1964 年我国首次从荷兰引进的水溶液全循环法尿素装置起, 目前国内已有数百套各种不同工艺的尿素装置在运行, 除少数采用进口的尿素合成塔外, 绝大部分都采用了国内制造的尿素合成塔, 而国内制造的尿素合成塔 90% 以上采用的是多层包扎的结构。多层包扎结构由于改善了单层结构在截面方向的受力状况, 被普遍认为是一种非常安全的结构形式而被广泛采用。40 年来, 国产尿素合成塔已经为国家化肥工业安全运行, 尤其是保证农业连年稳产高产作出了重大贡献[1]。然而, 尿素合成塔自身存在的一些问题还时有发生, 1992 年在美国路易斯安娜州发生了一起尿素合成塔爆炸事故, 引起了人们的高度重视[2]。随后在 1995 年和 2005 年分别在河北迁安和山东平阴又发生过两次灾难性的爆炸事故, 造成了重大人员伤亡和财产损失[3, 4]。非常巧合的是, 三次尿素合成塔爆炸事故均从环焊缝部位开裂, 然后造成整个设备的爆炸, 这说明深环焊缝可能是尿素合成塔最为脆弱的部位。本文对尿素合成塔受力状况进行了分析, 并对两台尿素合成塔进行了现场验证检验, 并对声发射检测结果的复验技术进行了探讨。

1 有限元分析

利用 ANSYS 有限元分析软件模拟实际运行条件进行了整体有限元分析, 结果表明深环焊缝盲板层和内筒间隙的焊趾部位存在很大的应力集中, 其应力值远远超过尿素合成塔材料的屈服强度(图 1、2)。由于深环焊缝是多道焊缝且焊后不进行整体热处理, 仅依靠外层焊接余热对内层焊缝进行热处理, 焊接残余应力较大, 使深环焊缝成为尿素合成塔最脆弱的部位。目前国内普遍采用盲板层和内衬之间通蒸汽的方法进行检漏, 而盲板层的环焊缝仅为点焊或间断焊结构, 尿素合成塔运行过程中检漏蒸汽会进入盲板层和内筒的间隙。在尿素合成塔内部 188℃ 的反应温度下, 1.3MPa 的检漏蒸汽在盲板层和内筒的间隙中以液态存在, 在检漏蒸汽出口管以下会长期形成积液, 造成碱性成分的聚集, 在很高集中应力下长期运行会产生应力腐蚀开裂。

2 声发射检测

由于尿素合成塔多层包扎的结构特殊性, 常规检验方法只能对其内外表面进行检验, 很难检测到深环焊缝的内部缺陷。利用声发射技术可以对活性缺陷进行定位, 并可对声发射源的严重程度进行评价。在进行声发射检测之前, 将深环焊缝的对应部位打磨平整, 放置声发射传感器并耦合良好(如图 3 所示)。在检测的过程中, 对深环焊缝和内部层板上的声发射信号, 由于层板间隙的隔声作用, 不会沿图 3 虚线所示的路径传播, 而会沿实线所示的路径传播, 这样会在声发射平面定位图中出现层板埋藏缺陷的定位

误差,但最大约为 100mm 左右,基本不影响对声发射结果的判断。图 4 和图 5 是运行 12 年和 14 年的尿素合成塔声发射检测结果。从图中可以看出,在深环焊缝部位存在较集中的声发射源。从声发射源的定位相对于焊缝的偏离程度基本可以判断声源靠近尿素合成塔深环焊缝的内表面,与有限元计算的结果相吻合。

我国首先利用声发射技术对多层包扎容器的检验和评价进行了有益的尝试^[5-7],对声发射检验的结果和声发射特征进行了分类,并对声发射检测结果进行了表面探伤复验。但对于多层包扎压力容器声发射检测以后内部埋藏缺陷的复验技术讨论较少。由于目前我国法规体系的限制,单从声发射检测结果不能确定压力容器安全状况等级,必须对声发射源部位进行复验,确定其性质和几何尺寸以后,才能给出下一次检验周期。

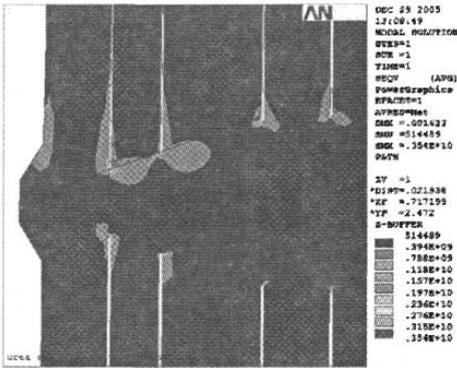


图 1 运行状态下焊缝部位应力云图

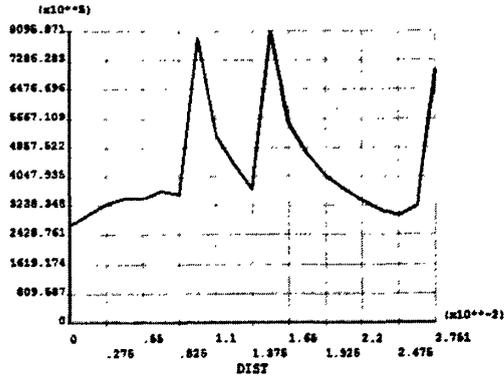


图 2 运行状态下焊缝综合应力分布

3 声发射源的复验

由于尿素合成塔筒体的多层包扎结构使得深环焊缝的埋藏缺陷的复验非常困难。目前最常应用的是 γ 射线探伤和脉冲式超声波探伤。由于现场操作不便和劳动保护要求的日益提高射线探伤的应用越来越处于次要地位。随着超声波检测设备的更新和检测技术的发展,超声波探伤已经从脉冲反射式检测技术发展超声成像检测技术,无论从检测精度还是成像技术都有了长足发展,在西方发达国家已经成为替代射线探伤的检测技术,并发布了相应的检测标准。

3.1 脉冲反射式超声波复验

国内外曾经有过利用超声波对深环焊缝埋藏缺陷的报道^[3,8]。但所进行的工作都停留在实验室阶段。都是在焊缝结构、缺陷分布及尺寸和层板相对位置已知的情况下进行的。在现场实际超声波检测时,并不知道多层板的深环焊缝结构。而且,从多层包扎尿素合成塔深环焊缝受力状态的有限元分析结果和声发射检测结果来看,裂纹将首先从盲板层及内筒的间隙与深环焊缝的相交部位萌生和扩展。该部位位于深环焊缝大“U”形坡口的底端与“V”形坡口相交的部位且焊接结构复杂,其结构取决于焊接过程中的焊接参数和操作状况,是一个结构未知的区域。如果将焊缝磨平采用 k1 探头垂直深环焊缝进行扫查,只能进行表面和近表面缺陷扫查,最大扫查面积如图 6 中阴影所示。深环焊缝真正可能出现裂纹的部位将会被漏检。如果沿环焊缝部位进行周向扫查,对于层板之间存在错层、层板间隙有熔渣等情况,极有可能引起误判,而且焊趾部位沿焊缝扩展的周向裂纹很难与层板间隙区别,很可能会造成漏检,这可能是

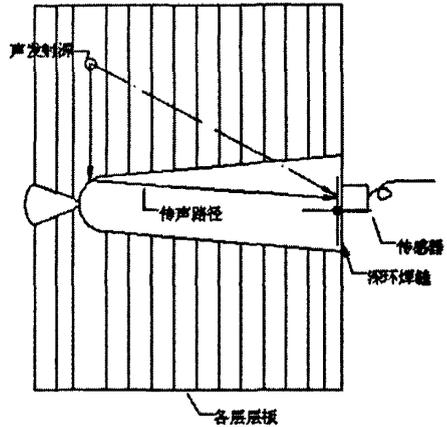


图 3 多层包扎容器声发射信号传播原理图

脉冲反射式超声波探伤技术没有发展起来的原因。

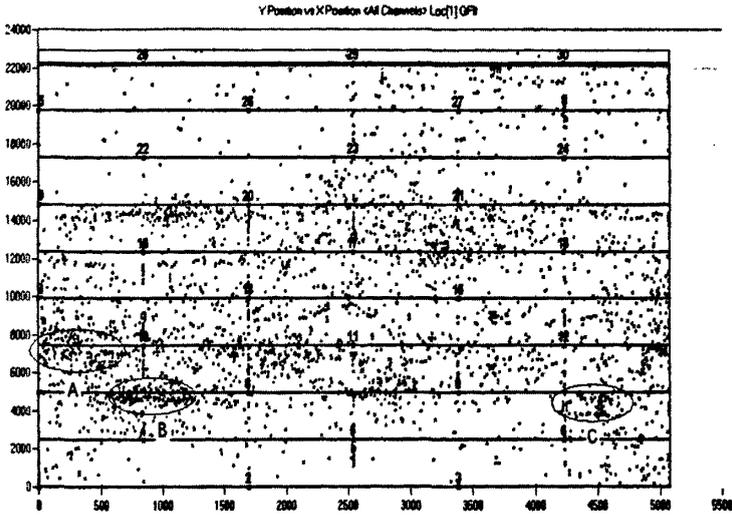


图 4 运行 12 年的尿素合成塔声发射检测结果

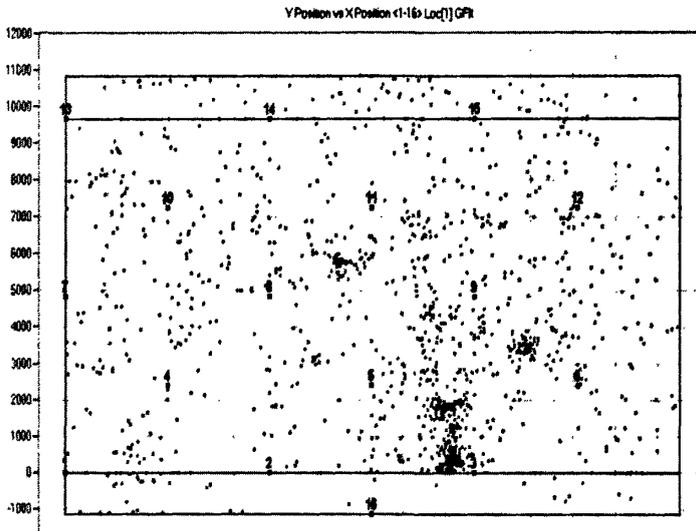


图 5 运行 14 年的尿素合成塔声发射检测结果

3.2 γ 射线探伤复验

多层包扎尿素合成塔将 γ 射线作为深环焊缝部位缺陷的验收手段具有一定的片面性。众所周知，γ 射线成像的前提条件是裂纹等面积性缺陷的法线与射线的方向垂直，如果裂纹面与射线的方向相互垂直，将不能检测到裂纹^[9]。裂纹的三个主要参数是角度 θ 、尺寸 t 和开度 w (见图 7)，裂纹与照相技术之间存在如下关系式^[10]：

$$(\sin\theta)_{\max} = \frac{3w}{2\Delta X} - \frac{U_r}{t}$$

其中：

ΔX ——最小的阶梯厚度变化

U_r ——总的有效不清晰度

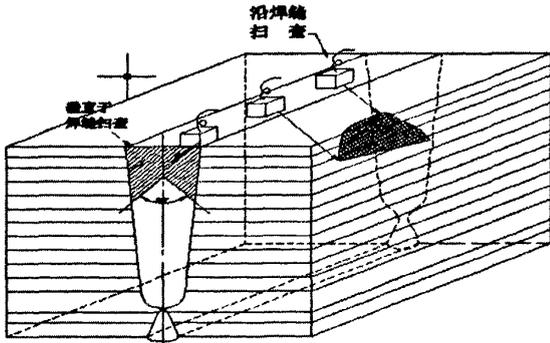


图6 多层板深环焊缝脉冲反射式超声波检验原理图

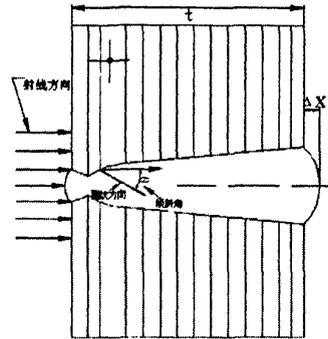


图7 裂纹与照相技术之间关系图

由上式可以清晰地看出，对于总厚度在 110mm 的尿素合成塔，如果最小的阶梯厚度变化为焊缝余高 4mm，裂纹宽度为 0.02mm，且忽略不清晰度的影响，射线与裂纹之间的倾斜角 θ 不到 1 度，可见是非常小的。根据有限元分析结果，如果尿素合成塔沿主应力方向首先开裂，裂纹面的方向与 γ 射线之间的夹角将大于 30 度（见图 8）。 γ 射线透射角度稍有偏差将很难检出环焊缝部位存在的缺陷。因此，必须考虑采用灵敏度更高的检测手段，以降低检测风险。

Yukihiko Terada 等人对多层包扎结构在实验室进行过射线探伤研究，发现对确定存在的缺陷，必须从三个不同角度进行照射才能得到比较精确的结果^[11]。考虑到人员的防护要求和现场实际情况，这种条件实现起来存在很大难度。而且，从我们现场在某公司外表面发现的 17 处裂纹进行的 γ 射线中心透照探伤结果来看，在同样拍摄条件下，只有 2 条严重外表面裂纹得到了清晰的底片，可见成像率很低。只有在层板部位出现集中声发射源时，才考虑利用 γ 射线作为复验手段。

3.3 超声相控阵成像复验

超声相控阵探头有多片压电晶片，通过计算机控制顺序激发每一片晶片，在探头下方可以形成一定角度的扫查波束，从而确定层板、缺陷的相对位置关系，将层板和缺陷的信号区分开来，容易实现缺陷的成像显示（见图 9）。超声相控阵可以检查深环焊缝中的埋藏缺陷，深环焊缝部位层板的错层、埋藏缺陷能够清晰的显示（见图 10）。超声相控阵成像的缺点是需要磨平环焊缝，不能确定缺陷的性质，很难确定周向缺陷的几何尺寸。另外，在相控阵探头与试块接触面以下，存在较大的盲区，影响缺陷的成像显示。

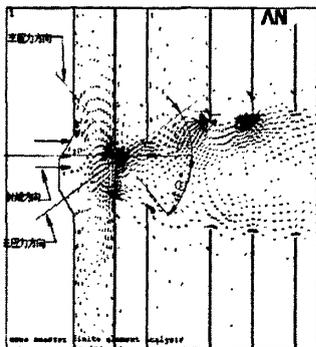


图8 尿素合成塔主应力方向与射线方向关系图

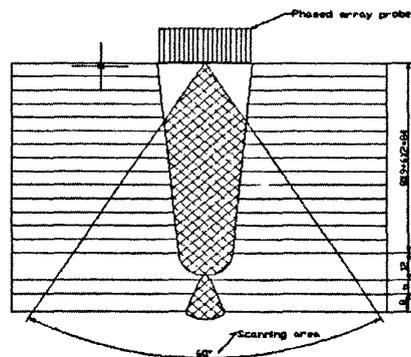


图9 超声相控阵环焊缝检测原理图

3.4 TOFD 超声成像复验

TOFD 超声成像技术（Time of Flight Diffraction Technology）是由英国（现在的 AEA 科技公司）首先开发出来的。目前，TOFD 技术的应用领域已经渗透到石油化工和其他工业领域^[12]。TOFD 超声成像检测的灵敏度明显高于脉冲回波式的检测方法（见图 11）。

超声波的衍射与所有物理波动一样，是一个普通的声学现象，其的传播规律符合物质波动原理。TOFD超声成像技术采用一只探头发送超声波，另一只探头接收超声波的方式。超声波在物体内部传播时，遇到材料内部缺陷时，由于超声波在缺陷的声速与正常材料中的声速不同，会在两者界面处发生反射和折射，在缺陷的尖端还会发生衍射现象，并被TOFD接收探头检测到。如果被检设备中没有缺陷，接收探头只会接收到表面波和底面回波，若存在缺陷会在表面波和底波之间接收到缺陷尖端产生的衍射纵波，从而可以测定缺陷的尺寸和所埋藏的深度（见图12）。图像上部一条线是上表面横波，下面一条线是底面回波，中间的图形即是缺陷衍射波型。检测时TOFD探头通常采用对称布置在焊缝两侧。采用倾斜楔块以产生纵波，因为纵波声速快，首先到达接收探头，不会引起结果解释的混乱。

设两探头间距为 $2S$ ，超声波发射探头发出的超声波在缺陷端部D点由相互作用产生的衍射波到达接收探头的时间为 T ，则有：

$$CT = 2 \times (d_1^2 + s^2)^{\frac{1}{2}}$$

式中：C——超声波束；

d_1 、 d_2 ——试件表面至缺陷端点的深度

故已知三参数C、T、S，即可求出缺陷端部离表面的深度

$$d_1 = \frac{1}{2} \times (C^2 T^2 - 4S^2)^{\frac{1}{2}}$$

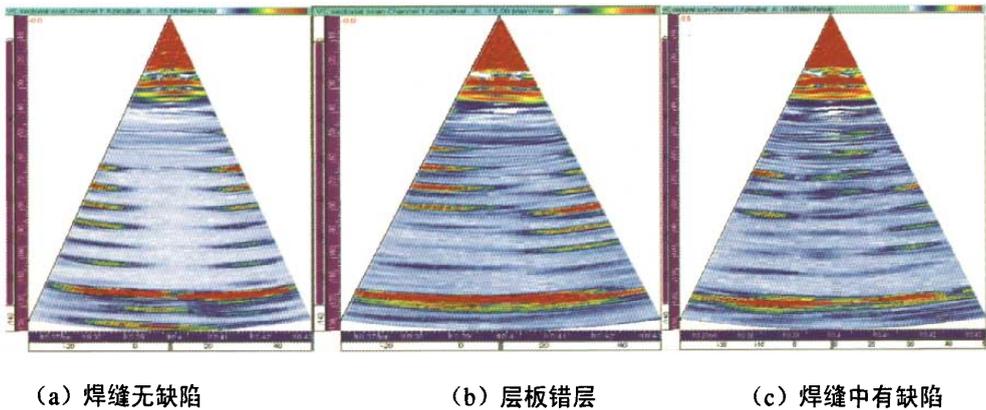


图 10 深环焊缝超声相控阵成像结果

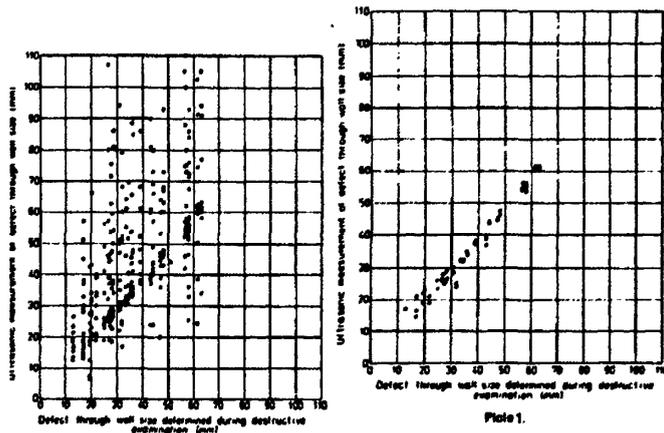


图 11 脉冲反射式超声检测结果（左）与 TOFD 超声成像检测结果（右）对比

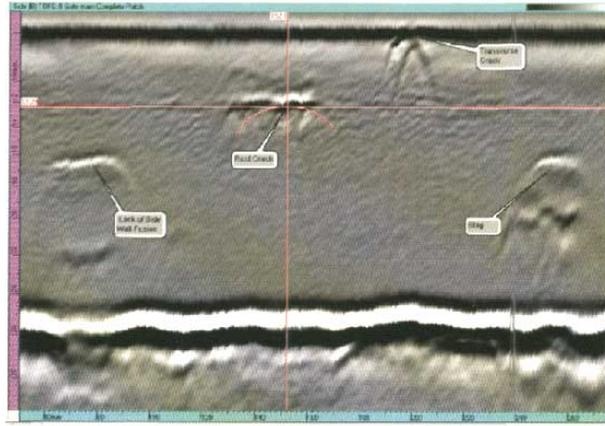


图 12 显示上表面死区、下表面死区及四个标示缺陷的典型 TOFD 图像

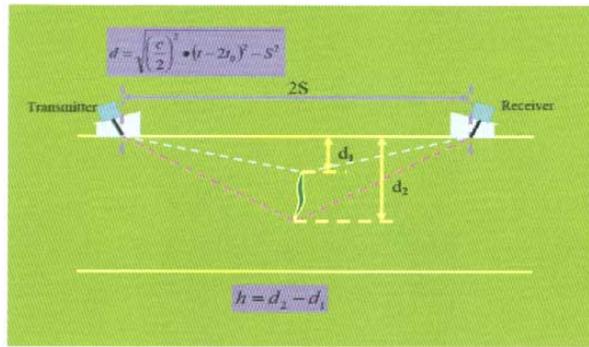


图 13 TOFD 检测结果计算示意图

超声 TOFD 技术虽然在单层厚壁容器上得到了广泛的应用，但在多层板深环焊缝的检测中未见报道，这因为 TOFD 通常垂直于焊缝对单层容器进行检测，而多层板对超声波的反射作用限制了它在多层板中的应用。但是，根据 TOFD 检测的原理可知，接收探头接收的是从缺陷尖端传来的衍射波而不是反射波，而衍射波是一种球面波，它将从缺陷尖端向各个方向传播。将深环焊缝磨平后，将发射探头和接收探头沿环焊缝放置，使其沿着环焊缝移动，进行平行 D 扫查，深环焊缝中的缺陷顶端的衍射波将沿着深环焊缝传播，同样也能被放置在深环焊缝上的接收探头检测出。同时，深环焊缝中的缺陷尺寸，各层板之间的相对位置由于层板间隙的成像也可清晰地显示出来（见图 14、15）。

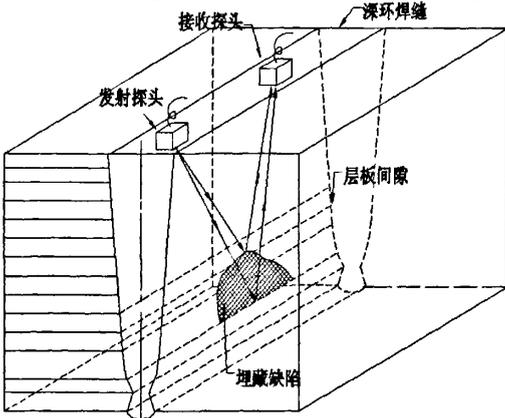


图 14 多层包壳容器深环焊缝 TOFD 检测原理

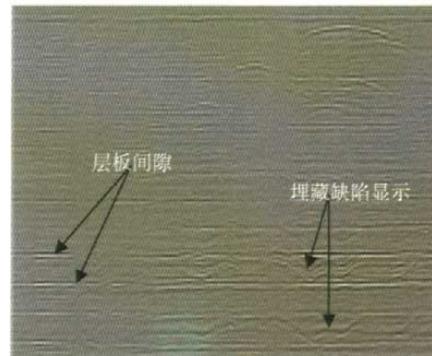


图 15 多层包壳容器深环焊缝 TOFD 检测结果

对声发射检测结果利用 TOFD 进行复验, 确定缺陷的几何尺寸, 以及在深环焊缝中的埋藏位置, 按照 TSG《压力容器定期检验规则》的要求确定安全状况等级, 按照规程给出下次检验周期或计算出含缺陷情况下的使用寿命。

4 结论

1) 有限元分析表明, 尿素合成塔深环焊缝焊趾部位存在很大的应力集中, 是尿素合成塔最脆弱的部位, 该部位在检漏介质的作用下容易出现应力腐蚀裂纹。

2) 声发射技术能够有效的检测出多层包扎尿素合成塔深环焊缝焊趾部位的埋藏缺陷, 与有限元计算的结果相一致。可根据声发射源的位置判断出埋藏缺陷的相对位置。

3) 通过分析表明, 对尿素合成塔进行声发射检测后, 利用 TOFD 超声成像技术能精确测定深环焊缝声发射源部位缺陷的几何尺寸和埋藏位置。这两种检测方法的结合是针对尿素合成塔深环焊缝埋藏缺陷的最佳搭配。

参考文献

- [1] 刘佑义. 有关尿素合成塔设计的几个问题, 尿素合成塔安全使用工作会议论文, 2006 年 1 月, 河北迁安.
- [2] OSHRC Docket No. 93-0628, Occupational Safety And Health Review Commission, United States of America , P10.
- [3] 程晓阳, 康纪黔. 多层包扎式容器环焊缝超声波探伤试验研究, 无损检测, Vol. 24, No. 3, Mar, 2002, P110-113
- [4] Chen Xianxi, Wang Weiqiang, Zhu Yanyong, et al. Failure Analysis Report of Urea Reactor Of Pingyin Luxi Chemical Industry No3 Fertilizer Plant Co. Ltd., Apr-July, 2005.
- [5] 戴光, 李伟, 徐彦廷等. 多层包扎式尿素合成塔的声发射检测与评定, 压力容器, V18, N03, 2001, P75-77
- [6] 沈功田, 万耀光, 刘时风等. 多层包扎压力容器的声发射检验和安全评定, 无损检测, Vol19, No. 3, March 1997, P67-70
- [7] 蒋士良. 多层包扎高压氢气储罐的声发射检测技术研究, 压力容器, V17, N05, 2000, P11-14
- [8] L. B. Berezovskii, A. A. Dmitriev, Ultrasonic inspection of weld seams in multilayer strip-wound pressure vessels, Chemical and Petroleum Engineering (Historical Archive), Volume 2, Issue 7, Jul 1966, Pages 457 - 458
- [9] James Schaffer, Ashok Saxena etc., The science and design of engineering materials, McGraw-Hill Companies, 2003: 759-765.
- [10] R.W. Nicolas, Developments In Pressure Vessel Technology- 2 Inspection And Testing ,Applied Science Published Ltd, 1979, P25
- [11] Yukihiro Terada etc. nondestructive examination of circumferential welds in thick wall layered pressure vessels, the 5th nondestructive examination international conference ,1977, P605-721
- [12] Ichiro Komura , Taiji Hirasawa , Satoshi Nagai etc. Crack detection and sizing technique by ultrasonic and electromagnetic methods, Nuclear Engineering and Design 206 (2001) P351-362

多层包扎尿素合成塔声发射检验与复验技术探讨

作者: 宋明大, 王威强, 曹怀祥, 赵亚凡

作者单位: 宋明大(山东大学机械工程学院, 山东济南, 250061); 山东省特种设备检验研究院, 山东济南, 250013), 王威强(山东大学机械工程学院, 山东济南, 250061), 曹怀祥(山东省特种设备检验研究院, 山东济南, 250013), 赵亚凡(山东建筑工程学院数理系, 山东济南, 250014)

相似文献(7条)

1. 期刊论文 洪作友, 黄振海 声发射技术在多层包扎容器检测中的应用探讨 -无损探伤2008, 32(6)

针对多层包扎容器结构特点,对声发射技术在多层包扎容器检测中应注意的问题进行了探讨.提出对于多层包扎容器,其多层卷板节中活性缺陷的检测不应采用时差三角形定位方法,而应在环焊缝上线形布置传感器,以保证传感器收到的信号真实地反映源的强度和活度;而在整体锻造的封头上推荐采用时差三角形定位方法,并对其原因进行了详细分析,同时对信号的处理问题也给出了建议.

2. 期刊论文 宋明大, 王威强, 李梦丽, 徐书根, SONG Ming-da, WANG Wei-qiang, LI Meng-li, XU Shu-gen 多层包扎尿素合成塔无损评价方法 -山东大学学报(工学版)2007, 37(4)

利用声发射技术对一台多层包扎尿素合成塔进行了检测和整体性状况评价,并用超声相控阵成像方法对声发射集中定位源进行了复验.试验结果表明,声发射能够有效检出深环焊缝中存在的活性缺陷,超声相控阵技术能实现活性埋藏缺陷的精确定位和测量.采用以声发射技术为主,结合超声相控阵技术的无损检测方法能够实现带有深环焊缝的多层包扎容器的无损评价.

3. 期刊论文 姜秀海, 杨熙, Jiang Xiuhai, Yang Xi 多层包扎式尿素合成塔的声发射局部检测与评定 -化工设备与管道2008, 45(2)

采用声发射技术对多层包扎式尿素合成塔进行了局部检测,并用常规无损检测方法进行了复验验证.结果表明,声发射是一种很好的检测多层包扎式压力容器的无损检测方法.

4. 期刊论文 姜秀海, 杨熙 多层包扎式尿素合成塔的声发射局部检测与评定 -石油和化工设备2008, 11(1)

采用声发射技术对多层包扎式尿素合成塔进行了局部检测,并用常规无损检测方法进行了复验验证.结果表明,声发射是一种很好的检测多层包扎式压力容器的无损检测方法.

5. 期刊论文 姜秀海, 杨熙 多层包扎式尿素合成塔的声发射局部检测与评定 -无损探伤2007, 31(6)

采用声发射技术对多层包扎式尿素合成塔进行了局部检测,并用常规无损检测方法进行了验证.结果表明,声发射是一种很好的检测多层包扎式压力容器的无损检测方法.

6. 期刊论文 朱信钊, ZHU Xin-zhao 电厂制氢站氢气罐的在线声发射检验及评定 -广东电力2008, 21(9)

介绍了采用声发射无损检测技术对制氢站6台多层包扎式氢气储罐在带氢介质下升压进行在线检验和安全评定的方法.试验说明应用声发射技术可以在不停运的情况下对无法进行内部检验的在用容器进行检验,保证了容器的安全使用,并为声发射检验技术在电力系统的推广应用提供了成功的经验和依据.

7. 会议论文 朱信钊 电厂制氢站氢气罐的在线声发射检验及评定 2008

介绍了采用声发射无损检测技术对制氢站6台多层包扎式氢气储罐在带氢介质下升压进行在线检验和安全评定的方法.试验说明应用声发射技术可以在不停运的情况下对无法进行内部检验的在用容器进行检验,保证了容器的安全使用,并为声发射检验技术在电力系统的推广应用提供了成功的经验和依据.

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Conference_6310553.aspx

下载时间: 2010年5月27日