

# 在役大型储罐壁板无损检测技术

杨 鹏, 黄松岭, 赵 伟

(清华大学 电机系 电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**综述了应用于在役大型储罐壁板检测的主要无损检测方法,包括声发射法、超声法和磁粉法等常规方法,以及漏磁法、射线法、红外法和磁记忆法等。介绍了各种方法的工程应用情况。通过分析比较各方法的优缺点可知,综合应用多种无损检测方法来对在役大型储罐壁板进行全面检测是保障罐壁质量的有效手段。

**关键词:**储罐壁板; 声发射检测; 超声检测; 磁粉检测; 无损检测

中图分类号: TG115.28

文献标志码:A

文章编号:1000-6656(2009)05-0377-04

## Nondestructive Testing Techniques for the Wall of Tank in Service

YANG Peng, HUANG Song-Ling, ZHAO Wei

(State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Nondestructive testing(NDT) techniques used in the wall of tank in service were reviewed including ultrasonic, radiographic, magnetic particle, acoustic emission, infrared, magnetic flux leakage and magnetic memory techniques. The applications of these methods were also introduced. By analyzing the advantages and disadvantages of these methods, the authors suggested that diverse NDT methods should be combined to accomplish full inspection for the wall of tank in service.

**Keywords:** Tank wall; Acoustic emission testing; Ultrasonic testing; Magnetic particle testing; Nondestructive testing

石油、化工行业中,储罐是储装原油、成品油、石化产品和各种原料的重要工具。储罐一旦发生问题,将会造成严重的经济损失和环境污染,甚至酿成严重的生产事故,直接危害人的生命安全。为保证储罐的安全运行,许多国家都制定了相应的行业标准或国家标准,如美国石油学会制定的标准《油罐检验、修理、改建和翻新》(API 653—2001),中国石油天然气管道局发布的行业标准《立式圆筒形钢制焊接原油罐修理规程》(SY/T 5921—2000),其中都规定,储罐壁板的检测是储罐检测中的一项必需内容。

对储罐壁板的检测,主要包括原材料、制造过程中以及在役储罐的检测。笔者综述了应用于在役大型储罐壁板的各种无损检测方法和工程实用技术。

---

收稿日期:2008-07-08

作者简介:杨 鹏(1983—),男,硕士研究生,主要从事储罐底板和壁板检测技术研究。

## 1 在役储罐壁板检测的任务

储罐在运行过程中,由于受到介质、压力和温度等因素的影响,会产生腐蚀、冲蚀、应力腐蚀开裂、疲劳开裂及材料劣化等缺陷。

腐蚀缺陷、焊缝处应力腐蚀开裂和疲劳开裂是储罐壁板最常见的几种缺陷。其中,腐蚀缺陷多发生在储罐外表面,对于保温油罐,集中在保温层容易进水的部位,例如抗风加强圈与罐壁连接处<sup>[1]</sup>、罐底板与罐壁相交处、梯子和平台等的支脚处以及人孔和进出管线周围。腐蚀程度既有一般的锈蚀区,也有由多个点蚀形成的片状腐蚀区。腐蚀原因基本是化学腐蚀和电化学腐蚀<sup>[2]</sup>。对于油罐的内表面,最可能发生腐蚀的地方,是在油气交界面附近。另外,压力容器由于封头和接管等结构不连续性、焊缝内残余应力、容器的支撑、受压元件的加工制作残余应力和材料内部结构不连续等原因,不可避免地存在

应力集中,这些应力集中部位在介质、温度和压力的共同作用下容易产生应力腐蚀开裂、疲劳损伤和诱发裂纹<sup>[3]</sup>。

在役储罐壁板检测的任务,就是发现存在于壁板中的各种缺陷,从而对储罐的运行状态进行安全评估,进而指导进一步的维修。

## 2 在役储罐壁板无损检测方法

根据在役储罐壁板检测的要求,在众多的无损检测方法中,声发射法、磁粉法、超声法、漏磁法、射线法、磁记忆法以及红外法等都可被用于储罐壁板的检测,但各自都存在一定的局限性。下面将分别对各种方法进行介绍和讨论。

### 2.1 声发射法

声发射技术始于 20 世纪 60 年代,已被广泛应用在压力容器检测和结构的完整性评价方面。声发射是指材料局部因能量的快速释放而发出瞬态弹性波的现象。声发射检测方法在许多方面不同于其它常规无损检测方法,其优点主要表现为<sup>[4]</sup>:① 声发射是一种被动检测方法,探测到的能量来自被测物本身,无需无损检测仪器提供。② 声发射检测方法对于裂纹缺陷较为敏感,能探测到在应力作用下裂纹缺陷的活动情况,且稳定的缺陷不产生声发射信号。③ 在一次试验过程中,声发射检测能够整体探测和评价整个结构中缺陷的状态。④ 对于在役压力容器的定期检验,声发射检测方法可以缩短检验的停产时间或无需停产。⑤ 对于压力容器的耐压试验,声发射检测方法可以预防未知缺陷引起的灾难性失效。

在实际生产中,常应用声发射方法对储罐进行在线检测。将频率为 100~400 kHz 的声发射传感器布置在储罐壁板上,采用菱形布点法<sup>[5]</sup>或三角布点法<sup>[6]</sup>来确定声发射源的位置,根据声发射信号的特征参数和波形来判断储罐壁板上的活动缺陷和泄漏。另外,将频率为 30~60 kHz 的低频传感器等距离布置在罐底板边缘,采用圆周上的任意三个探头进行定位,同样根据声发射信号的特征参数和波形来检测罐底板腐蚀的严重程度和泄漏。为了进行在线声发射检测,应提前一段时间把储罐内储存介质的液位降下来,在进行检测时再把介质液位升上去,分别在 85%,95% 和 100% 液位进行保压,用声发射仪全程采集声发射数据,分析升压和保压过程中采集到的声发射信号,对罐壁和罐底是否存在泄

漏、潜在泄漏或腐蚀损伤作出判断,并确定其位置。通过对罐壁或罐顶的声发射源部位进行超声波测厚,最终对储罐的完整性作出综合评价,确定开罐检测的时间<sup>[7]</sup>。

声发射检测法无需外加激励源,探头无需在罐壁上移动,能够完整检测整个储罐的动态缺陷,这是其它方法无可取代的优点。但该方法无法检出腐蚀缺陷,因此需要其它无损检测方法来补充。

### 2.2 磁粉法

磁粉检测法对铁磁性材料表面缺陷有很高的检测灵敏度、准确性和可靠性,是较为常用且经济方便的常规无损检测方法之一。

对于在役的压力容器,典型的磁粉检测方法有<sup>[8]</sup>:针对焊缝采用磁轭或交叉磁轭法磁化,水基磁悬液湿法检测;针对焊缝层间采用磁轭或触头法磁化,干粉法检测;针对高强钢、裂纹敏感材料和可能发生应力腐蚀裂纹的工件采用荧光磁粉法检测等。

对于储罐壁板检测而言,磁粉法能够准确检出焊缝表面及近表面缺陷,且检测结果直观。但由于需要打磨储罐防腐层,以及需要架设脚手架,因此并不是理想的检测方法。

虽然存在诸多缺点,磁粉检测法还是凭借其可靠性、直观性和经济性,在目前的检测工程中占有重要的位置,主要应用于罐壁焊缝的缺陷检测。

目前,用于磁粉检测法的磁化设备已经实现了便携化,也有厂家在研制自动化的磁粉检测设备。但无论如何,其破坏防腐层的弱点是致命的。大量的打磨一方面增加了压力容器停产检验的时间、费用和劳动强度,另一方面也减小了压力容器焊缝部位壳体的壁厚,破坏了容器表面抗腐蚀的保护膜。因此,随着其它对罐壁无损害的检测方法自动化水平的提高,此方法在未来的在役储罐壁板无损检测工程中将逐步被淘汰。

### 2.3 超声检测法

超声检测是用普通的脉冲反射法操作,通过在噪声波和干扰波的背景上出现意外的回波来检测出缺陷的过程。它具有检测对象范围广、检测深度大、缺陷定位准确、检测灵敏度高、成本低、使用方便、速度快,对人体无害及便于现场使用等优点。因此,超声无损检测技术是国内外应用最广泛,使用频率最高且发展较快的一种无损检测技术<sup>[9]</sup>。

压力容器超声检测主要采用的规范和标准有《压力容器安全技术监察规程》(1999 年)、《在用压

力容器检验规程》(1990年)和JB/T 4730—2005《承压设备无损检测》,相关技术要求详见各标准和规范。

利用超声测厚法,可以检测出储罐壁板上的平面状腐蚀缺陷<sup>[10]</sup>。通常测厚法的灵敏度约为0.1~0.2 mm,对于腐蚀缺陷的检测已经足够灵敏。也可进一步利用超声扫描成像技术,提高测厚法的检测性能<sup>[11]</sup>。

焊缝中缺陷分为点状、线状、体积状和平面状缺陷,对于焊缝处的裂纹缺陷的超声检测,需要使用双直探头或斜探头,对于不同的焊缝,又有不同的选择要求。对于缺陷尺寸测定,原来我国主要采用端点衍射回波法、端部最大回波法和6 dB法<sup>[12]</sup>,这些方法在缺陷高度测量方面都存在着一些困难。20世纪70年代,国外提出了焊缝的超声衍射时差法(TOFD),它依赖超声波与缺陷端部的相互作用而产生的衍射波<sup>[13]</sup>,通过测量衍射波信号时间差就可以对缺陷测高。TOFD设备中的仪器可以用于进行A扫描、B扫描(焊缝横断面显示)或D扫描(焊缝纵断面显示)。带有的扫查器可使两探头入射点间距保持固定,始终对准,并通过光路或磁性编码器向超声检测仪提供探头位置信息,以产生与位置相关的B扫描或D扫描图像。该方法对缺陷的测深和定高比常规回波幅度法准确可靠<sup>[14]</sup>。

超声检测法检测速度快,但对缺陷的准确识别存在困难。对平面型缺陷检测灵敏度高,但对点状、线状和体积状缺陷容易漏检或者误检。即便是TOFD法,也较难测出倾斜度和弯曲度较大的缺陷,对一些不严重的缺陷(如点状缺陷)有混淆成裂纹类严重缺陷的可能<sup>[9]</sup>。超声检测法的检测精度受到壁板表面光滑程度的直接影响,有时候需要对表面进行打磨。

#### 2.4 漏磁检测法

漏磁检测主要用于检测压力容器壳体可能出现的点腐蚀状态。采用超声波测厚很难发现点腐蚀的分布,采用超声直探头检测又需对表面进行打磨。漏磁检测技术可用于表面带油漆层情况下的罐壁缺陷检测,而且从外部可测出内部存在的腐蚀坑大小和深度。鉴于上述特点,漏磁检测很适合于储罐运行状态下的在线检测。

漏磁检测法已经成为储罐底板的开罐检测中较为普及的一种方法,也已经有不少的自动化检测设备实现了底板除焊缝外区域的全面扫查。但此方法尚未被用于储罐壁板的检测。笔者认为,主要是因

为储罐壁板缺陷多位于焊缝处,焊缝表面一般比较粗糙,增大了探头的偏离值,使得检测灵敏度较低。另外,粗糙的表面也在检测信号中引入了难以处理的噪声。当然,携带漏磁检测装置的爬行器可以实现大型储罐壁板除焊缝外区域的快速、自动扫查,可对设备的整体安全性进行无损评价,仍然具有较好的应用前景。

#### 2.5 射线检测法

X射线检测方法在现场主要用于板厚较小的压力容器对接焊缝内部埋藏缺陷的检测,因为薄板采用超声检测有一定难度。另外,射线检测也常用于在役压力容器检验中对超声检测发现缺陷的复验,以进一步确定缺陷的性质,为缺陷返修提供依据。

X射线实时成像法(RTR)能实时或近实时地显示被检工件内部和表面缺陷的性质、大小、位置和分布等信息,因而能在线、动态地评价被检工件质量。与传统胶片法相比,RTR法具有省时、省料和省电等优点<sup>[15]</sup>。

射线检测法对工件缺陷的检测具有较高的精度,且能较好地反映缺陷各种信息。但由于其检测设备及检测工艺复杂,检测成本高,通常只用于其它检测方法找出缺陷后,用其进行进一步复查。

中国石化集团管道储运公司研制出了对储罐壁板对接焊缝进行X射线无损检测的储罐爬行器<sup>[16]</sup>。它通过爬车的水平运动及爬车上小车的垂直运动,载着X射线机在罐壁上作水平及垂直运动,实现对罐壁上指定焊缝的射线检测<sup>[17]</sup>。

#### 2.6 磁记忆法

磁记忆检测方法用于发现压力容器存在的高应力集中部位,这些部位容易产生应力腐蚀开裂和疲劳损伤。金属磁记忆检测的原理,是利用铁磁工件在受载工作过程中应力和变形区域内产生状态不可逆变化,在该区域内发生具有磁致伸缩性质的磁畴组织定向的和不可逆的重新取向,这种磁状态的不可逆变化在工作载荷消除后不仅会保留,还与最大作用应力有关。

通常采用磁记忆检测仪器对压力容器焊缝进行快速扫查,以发现焊缝上存在的应力集中部位,然后对这些部位采用磁粉检测、超声检测、硬度测试或金相分析,以发现可能存在的表面裂纹、内部裂纹或材料微观损伤<sup>[18]</sup>。

储罐罐壁的高应力集中部位是其运行过程中影响安全的薄弱部位,这是因为一方面高应力集中的

表 1 应用于大型储罐壁板检测的各种无损检测方法比较

检测方法	适用缺陷	优点	缺点
声发射检测法	动态缺陷	能检测整体动态缺陷,无需外加激励源,无需扫查装置	不能检测腐蚀缺陷,不能识别缺陷细节
磁粉检测法	表面缺陷	直观、经济	需要打磨防腐层,需要架设脚手架
超声检测法	表面与内部缺陷	无需打磨表面,对平面型缺陷灵敏度高	点状和线状缺陷灵敏度低,类型识别困难
漏磁检测法	正面、背面点状腐蚀缺陷	对罐壁表面清洁度要求低,无需打磨,扫查速度快	不适于检测焊缝缺陷
射线检测法	内部缺陷	直观,体积型缺陷检测灵敏度高	设备及检测工艺复杂
磁记忆法	应力集中区域	扫查速度快	无法实现缺陷检测和识别
红外热成像法	应力集中区域	扫查速度快	无法实现缺陷检测和识别

产生往往是由于壁厚减薄、氢鼓包和各种焊接缺陷导致材料受力截面积的减少而引起的;另一方面,罐壁上的高应力集中部位,在介质腐蚀环境的作用下极易产生氢腐蚀开裂和应力腐蚀开裂,而且处于高应力部位的各种焊接缺陷在周期疲劳载荷的作用下更易开裂与扩展。在储罐壁板在线检测时,一般无法采用超声、射线、磁粉和表面渗透等常规无损检测方法对其焊缝进行 100% 或大比例的抽查,因此寻找一种快速、高效和非接触的无损检测方法来发现压力容器的高应力集中部位,然后对这些部位进行重点探伤,这是提高储罐壁板在线检测效率的有效途径之一。

磁记忆检测技术和下文所述的红外热成像检测技术是进行快速扫查的两种实用技术,两种技术都有一些实用化的设备,并且国内也有较多应用<sup>[3,17]</sup>。

## 2.7 红外热成像法

红外热成像可实时测量显示物体表面的温度分布,是红外测温技术的重大发展。目前,红外热成像技术主要应用于高温压力容器热传导的在线检测和对常温压力容器的高应力集中部位检测。对常温压力容器高应力集中部位的检测,可以及早发现早期疲劳损伤,这样既可以诊断压力容器运行的状态,也可以给出停产后压力容器的重点检修部位。

## 2.8 不同检测方法的比较

表 1 示出了可以应用于大型储罐壁板缺陷检测的各种无损检测方法的特点。

从检测速度上看,声发射检测法速度最快,并且能够一次性完成储罐的整体检测;磁记忆法和红外热成像法能够完成局部区域的快速扫查,速度次之;超声检测法、漏磁检测法、射线检测法和磁粉检测法都是针对点区域的检测,速度较慢,其中,磁粉法需要打磨表面,速度最慢。

从可检测缺陷类型上看,磁粉检测法能够准确

检测出所有的表面缺陷,超声检测法能够检测表面及内部的平面型缺陷,漏磁检测法能够检测出正面、背面腐蚀缺陷,射线检测法对内部体积型缺陷灵敏度较高,而声发射检测法、磁记忆检测法和红外热成像法均不能识别缺陷的类型。

根据在役大型储罐壁板缺陷的特点,考虑壁板检测的特殊性,需综合应用多种无损检测方法来对储罐壁板进行全面检测。最常见的是先通过声发射法对储罐整体进行评价,然后再利用超声检测法、磁粉检测法、射线检测法等对可疑区域进行进一步检测和识别。随着罐壁爬行器检测性能的提高和普及应用,储罐壁板的无损检测也将逐渐抛弃现有的架设脚手架的人工检测方法,走向自动检测,从而大大提高检测效率。

## 参考文献:

- [1] 陈颖锋.立式储油罐罐壁漏油原因分析与修复[J].石油化工安全技术,2001,(1):3—5.
- [2] 张明化.油罐罐壁腐蚀原因分析与对策[J].天然气与石油,2004,22(2):32—33.
- [3] 李光海,刘时风,沈功田.压力容器无损检测——磁记忆检测技术[J].无损检测,2004,26(11):570—574.
- [4] 沈功田,李金海.压力容器无损检测——声发射检测技术[J].无损检测,2004,26(9):457—563.
- [5] 同长虹.声发射诊断在压力容器在线检测中的应用[J].石油化工设备,2005,34(2):47—49.
- [6] 梁润华,林都.声发射技术在压力容器安全运行中的应用[J].中北大学学报,2006,27(1):34—36.
- [7] 王勇,沈功田,李邦宪,等.压力容器无损检测——大型常压储罐的无损检测技术[J].无损检测,2005,27(9):487—490.
- [8] 姚力,胡学知,范吕慧.压力容器无损检测——磁粉法检测技术[J].无损检测,2004,26(6):302—306.
- [9] 郭建章,张选利,宗殿瑞.国内压力容器无损检测技术

(下转第 401 页)

砂纸打磨。但是,反复校验后仍然是灵敏度试片单向显示有问题。最后把左侧小车换到右侧后,原左侧小车的灵敏度显示合格。由此基本上可以断定问题出现在原左侧小车上。

经过仔细检查,发现原左侧小车传动箱体的通电路径存在问题。从图2中可以看到对工件采用的是直接通电的方式。通电路径中利用螺丝铆住钢板传导,钢板之间(包括螺丝和钢板之间)长时间与探伤时渗入的磁悬液接触,导致板材和螺丝被氧化。探伤时被磁悬液喷湿的这些部位在充磁的瞬间电阻值增大,整个外部通路可以视为一个导体,磁化开始的瞬间,直接穿过工件的电流立即接近到最大值,磁粉探伤机电流表显示正常,但电流快速升高的同时整个回路的电阻值迅速增加,磁化电流迅速减小,造成“虚电”现象,由此造成在实际磁化时间极短时很难形成磁痕<sup>[1]</sup>。

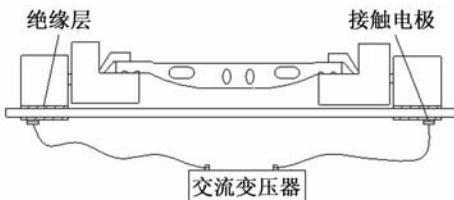


图2 小车通电示意图

### 3 解决的方法

上述故障非常值得注意,因为只要整个导电回路存在非一次成型通过接触导电的接口,就有可能

(上接第380页)

- 的现状[J]. 青岛化工学院学报, 2000, 21(4): 370—372.
- [10] Simmonds K E, Mignogna R B, Batra N K. Ultrasonic method for monitoring corrosion damage in petroleum metal storage tanks using spectral tracking [A]. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation: V19. AIP Conference Proceedings, V509, 2000: 1809—1816.
- [11] 王保军, 腾永平, 吴迪, 等. 罐壁超声成像测厚系统的设计[J]. 无损检测, 2005, 27(7): 402—404.
- [12] 潘荣宝, 范宇, 张保中, 等. 压力容器无损检测——超声检测技术(I)[J]. 无损检测, 2004, 26(4): 188—192.
- [13] 李衍. 超声衍射时差法检测和定量技术——焊缝超声检测最新欧洲标准介绍[J]. 无损检测, 2004, 26(1): 47—53.
- [14] 潘荣宝, 范宇, 张保中, 等. 压力容器无损检测——超声检测技术(II)[J]. 无损检测, 2004, 26(5): 244—248.
- [15] 李衍. 压力容器无损检测——射线检测技术(II)[J]. 无损检测, 2004, 26(3): 132—138.
- [16] 薛正林, 韩烨, 胡明清. 大型储罐罐壁爬行器研制及应用[J]. 石油化工设备, 2006, 35(3): 55—57.
- [17] 沈功田, 张万岭. 压力容器无损检测——红外热成像检测技术[J]. 无损检测, 2004, 26(10): 523—528.
- [18] 沈功田, 张万玲. 压力容器无损检测技术综述[J]. 无损检测, 2004, 26(1): 37—40.

在校验甚至是探伤过程中出现探伤灵敏度达不到要求的问题,而且这种状况可能是零星随机的。一般的设备上难免有接触导电的接口,对于需要直接通电法检测的零部件,这种接口更无法避免,而以如铸造表面等导电可靠性较差的部位接触通电的电极,这种情况发生的概率会更高。为此提出以下几种可能的解决方案:

(1) 在日常维护中,特别是在设备定期的修理时,仔细对通电回路中的各种接头以及电极进行保养。探伤时应注意观察维护,保证电极处于最佳的工作状态。

(2) 调试过程中笔者曾发现接触不良的小车通电磁化时,电流表迅速偏转到最大值马上就回落下来。而通过录像确认,正常情况下磁化电流在峰值停留时间接近2 s。所以探伤人员在对电流最大值进行确认的同时,也要注意最大电流持续时间的细微变化。

(3) 加入强电流实际通电时间监测报警电路,以防“虚电”现象的发生。

(4) 在工件表面的延伸部位的区域放置类似试片/试块的综合灵敏度监测装置。但是实施时须注意试片/块和被检部位的一致性,试片磁痕显示对磁化电流的敏感性等。

### 参考文献:

- [1] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] ...
- [3] ...
- [4] ...
- [5] ...
- [6] ...
- [7] ...
- [8] ...
- [9] ...
- [10] ...
- [11] ...
- [12] ...
- [13] ...
- [14] ...
- [15] ...
- [16] ...
- [17] ...
- [18] ...