

压力容器无损检测 ——漏磁检测技术

李光海, 刘时风

沈功田

(清华大学 机械工程系, 北京 100084)

(中国特种设备检测研究中心, 北京 100013)

摘要: 简要介绍了漏磁检测技术的原理及其应用, 概述了当前国内外的漏磁检测技术和仪器的发展现状以及在压力容器检验中的应用, 分析了影响漏磁检测灵敏度的主要因素。

关键词: 压力容器; 漏磁检测; 缺陷; 灵敏度

中图分类号: TG115.28

文献标识码: A

文章编号: 1000-6656(2004)12-0638-05

NONDESTRUCTIVE TESTING OF PRESSURE VESSELS: MAGNETIC FLUX LEAKAGE TESTING TECHNIQUE

LI Guang-hai, LIU Shi-feng

(Mechanical Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

SHEN Gong-tian

(China Special Equipment Inspection and Research Center, Beijing 100013, China)

Abstract The principle and application field of magnetic flux leakage(MFL) were introduced. The progresses of MFL technique, instrument and application in pressure vessel testing were reviewed. Some reasons affect the MFL testing sensitivity were analyzed.

Keywords: Pressure vessel; Magnetic flux leakage testing; Defect; Sensitivity

1 概述

磁粉检测是压力容器检验过程中十分重要的无损检测方法, 应用十分广泛。但在磁粉检测过程中, 如磁悬液的施加、磁痕的辨认等步骤通常都是靠人工完成。随着技术的进步, 人们越来越注重压力容器检测过程的自动化。这不仅可以降低检测工作的劳动强度, 还可提高检测结果的可靠性, 减少人为因素的影响。

漏磁检测方法是新开展的一项自动化程度较高的磁学检测技术, 其原理为: 铁磁材料被磁化后, 其表面和近表面缺陷在材料表面形成漏磁场, 通过检测漏磁场来发现缺陷。从这个意义上讲, 压力容器检测中常用的磁粉检测技术也是一种漏磁检测, 但习惯上人们把用传感器测量漏磁通的方法称为漏磁检测, 而把用磁粉检测漏磁通的方法称为磁粉检测,

且将它们并列为两种检测方法^[1]。

磁粉检测只能发现表面和近表面裂纹缺陷, 而且检测时需要表面打磨, 仅适合压力容器停产的检测; 漏磁检测除能发现表面和近表面裂纹的缺陷外, 还可从外部发现压力容器内部的腐蚀坑等缺陷, 而且不需要对压力容器表面进行打磨处理, 适用于压力容器在线检测。而压力容器在线检测是目前压力容器用户最急需的方法, 它可以减少不必要的停车, 降低检验成本。另外, 漏磁检测还能对缺陷深度和长度等进行定量。虽然目前在压力容器检测中, 漏磁检测技术的应用较少, 但它具有磁粉检测所不具备的优点, 所以其应用前景非常广阔。本文将对漏磁检测技术的原理、仪器及应用进行综述且与磁粉检测作了比较。

2 漏磁检测的原理及特点

利用励磁源对被检工件进行局部磁化, 若被测工件表面光滑, 内部没有缺陷, 磁通将全部通过被测

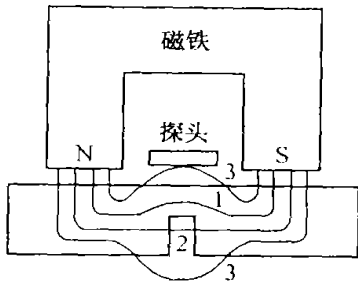


图1 漏磁检测原理图

工件;若材料表面或近表面存在缺陷时,会导致缺陷处及其附近区域磁导率降低,磁阻增加,从而使缺陷附近的磁场发生畸变(图1),此时磁通的形式分为三部分,即①大部分磁通在工件内部绕过缺陷。②少部分磁通穿过缺陷。③还有部分磁通离开工件的上、下表面经空气绕过缺陷^[2]。第3部分即为漏磁通,可通过传感器检测到。对检测到的漏磁信号进行去噪、分析和显示,就可以建立漏磁场和缺陷的量化关系,达到无损检测和评价的目的。

由于漏磁检测是用磁传感器检测缺陷,相对于磁粉、渗透等方法,有以下优点^[1]:

(1) 易于实现自动化 漏磁检测方法是由传感器获取信号,然后由软件判断有无缺陷,因此非常适合于组成自动检测系统。实际工业生产中,漏磁检测被大量应用于钢坯、钢棒、钢管的自动化检测。

(2) 较高的检测可靠性 漏磁检测一般采用计算机自动进行缺陷的判断和报警,减少了人为因素的影响。

(3) 可实现缺陷的初步定量 缺陷的漏磁信号与缺陷形状尺寸具有一定的对应关系,从而可实现对缺陷的初步量化,这个量化不仅可实现缺陷的有无判断,还可对缺陷的危害程度进行初步评价。

(4) 高效能、无污染 采用传感器获取信号,检测速度快且无任何污染。

漏磁检测的缺点除了跟磁粉检测相似外,还由于检测传感器不可能象磁粉一样紧贴被检测表面,不可避免地存在一定的提离值,从而降低了检测灵敏度;另一方面,由于采用传感器检测漏磁场,不适合检测形状复杂的试件。

3 漏磁检测的应用

漏磁检测技术越来越多地应用到各种场合下的铁磁性材料的缺陷检测,国内应用较多的有以下几

个方向。

3.1 储罐底板的检测

储罐是油库、港口和石油化工存储液体原料的重要设备之一。罐底板位于储罐的最底层,上表面接触含水的存储介质,下表面与罐基础接触,是储罐腐蚀的主要区域,因此罐底板腐蚀状态定期检测显得特别重要^[3]。漏磁检测技术能对整个储罐底板腐蚀状况作出评价,且检测效率高、劳动强度低。目前国内已有多家检测单位购买了国外多通道储罐底板腐蚀扫查器,国内也有一些高校和无损检测仪器厂商开发了此类漏磁检测装置。当底板涂层厚度 $\leq 6\text{mm}$ 时,这些仪器可以发现10%板厚的腐蚀坑。

3.2 管材、棒材的检测

钢管和钢棒在出厂时或使用前,需要按一定要求进行无损探伤。对这种结构简单的工件进行大批量自动检测,漏磁检测是最主要的方法之一。检测的缺陷包括裂纹、折叠、冷隔、疏松、夹杂和气孔等,其检测精度能够测出深度 $\geq 0.3\text{mm}$ 的自然缺陷。

3.3 长输和埋地管道的检测

漏磁检测技术被广泛地应用于长输管道、炼油厂、城市埋地管网和海底管线的腐蚀点和焊接缺陷的检测。其检测速度可达 $50\text{m}/\text{min}$,并能够检出深度为5%钢管壁厚的缺陷^[4]。

3.4 钢丝绳的检测

在游乐场、索道、矿山、建筑等很多场合,钢丝绳是最主要的承载及传送工具,它的质量对安全具有重要意义。在钢丝绳的无损检测中,漏磁检测方法是唯一在实际中应用的方法,通过检测断丝产生的漏磁场,可以发现钢丝绳表面和内部的断丝、磨损及较长长度的腐蚀情况^[5]。据波兰Zawada公司介绍,其MD120B钢丝绳探伤仪能精确测出钢丝绳横截面积0.05%的变化。

3.5 铁轨及车轮的检测

漏磁技术可用于检测火车铁轨和车轮长期运行而产生的高频疲劳裂纹,还可以通过磁特性的测量来确定铁轨、车轮和轮轴的疲劳状态。

4 国内外漏磁检测技术现状

在漏磁检测技术方面,国内外的研究工作主要有①缺陷漏磁场理论模型及其数值表征。②漏磁场信号与缺陷特征之间的对应关系。③漏磁检测仪器的研制。

4.1 国内外理论研究

漏磁场的理论研究是从1966年开始, Zatsptin 和 Scherbinin 以试件表面裂纹缺陷周围磁场产生磁荷这一角度, 将无限长裂纹看作磁偶极子模型^[6]。此后人们作了大量的研究, 主要是研究缺陷形状参数与漏磁场之间的对应关系^[7], 主要有基于磁偶极子模型的解析法和求解麦克斯韦方程的数值方法。其中用磁偶极子模型的研究获得成功, 对人们最开始认识缺陷漏磁场起了很大的作用^[3]。由于以磁偶极子模型为基础的解析法存在一定的局限性, 人们开始尝试用数值解的方法进行漏磁场分析。在数值计算方面, Lord 和 Hwang 采用有限元方法, 首次将材料内部磁场强度和磁导率与漏磁场的幅值联系起来, 并指出对于非线性和复杂形状缺陷漏磁场问题, 数值计算求解是唯一可行的方法^[3]。他们还研究了不同形状不同倾角缺陷以及裂纹深度和宽度对漏磁场的影响。Förster^[8]用实验方法重复了 Lord 和 Hwang 的上述研究内容, 修正了 Lord 和 Hwang 关于裂纹宽度影响缺陷漏磁场的结论。Atherton^[9]在管道检测中针对特定检测装置研究了磁场分布和缺陷的漏磁场, 并且得出了管道检测中缺陷漏磁场信号与缺陷大小的关系。

在国内理论研究方面, 仲维畅^[10]用磁偶极子模型研究了有限长、无限长磁偶极子的漏磁场分布, 阐述了缺陷处漏磁场的特点。清华大学在漏磁量化方面作了深入的研究^[6, 11]。杨理践等^[12]采用了 Ansys 软件对管道漏磁场进行了二维和三维静态分析。胡险峰^[13]在分析铁磁材料磁化状态的时候引入了有效磁导率和平均磁导率的概念。解源、康宜华等^[14]在管道和钢丝绳的漏磁场研究中也取得很多理论和工程应用上的成果。徐章遂等^[15]人建立了飞机大梁螺栓孔内裂纹漏磁场模型, 并通过现代频谱分析, 导出了漏磁信号与裂纹的几何尺寸间的定量关系, 为螺栓孔裂纹的定量检测打下了基础。

4.2 国内外应用及仪器研究

1933年 Zuschlug 首先提出应用磁敏传感器测量漏磁通的想法, 但直到1947年由 Hastings 设计了一套完整的漏磁检测系统后, 漏磁检测才得到普遍承认。

从20世纪50年代, 西德的 Förster 研究所研制出一系列漏磁探伤装置, 用于焊缝、钢管和棒材的探伤。美国的 Tuboscope 公司先后又研制出了 Amalog 和 Sonoscope 两种漏磁探伤装置, 主要用于石油无缝钢管的探伤。漏磁探伤法的检测结果具有较好的定量性、客观性和可记录性, 不仅适用于钢棒

和钢管的成品检验, 也适用于粗糙表面的钢坯等中间产品的探伤, 但是一般情况下漏磁探伤只适用于形状规则的工件。英国 Silver Wing 公司也推出了多种储罐和管道漏磁扫查系统, 如 FLOORMAP 2000 储罐底板检验系统, 通过便携式计算机将所有检测到的数据以图形方式直观地显示出来, 它能检测下底板的深为40%罐板厚的人工缺陷(圆锥形孔洞或弧坑), 也可发现6mm厚的平板上大约深为20%罐板厚的腐蚀。

国内对漏磁检测技术的应用和仪器研究发展很快。合肥工业大学何辅云等人利用漏磁检测技术对石油管道进行高速检测, 将实际现场检测到的图形曲线和缺陷类型模板比较, 就能对管道内外壁缺陷进行识别^[16]。华中科技大学针对钢丝绳无损检测仪器中的一些算法进行探讨, 从一些信号的处理中提取了缺陷特征^[14]。清华大学研制了管道漏磁扫描仪, 通过信号处理技术, 实现管道的高效、可靠以及精确的检测^[17]。

4.3 标准现状

漏磁检测在自动检测方面优势明显。国际上已制定了 ISO 9598《无缝和焊接铁磁性压力钢管横向缺陷的全圆周磁传感器和漏磁探伤》和 ISO 9402《无缝和焊接铁磁性压力钢管纵向缺陷的全圆周磁传感器和漏磁探伤》两项标准。欧洲标准化委员会也有两项漏磁检测标准, 即 EN 10246/4: 1999《无缝铁磁性钢管的自动全圆周磁传感器和漏磁检测》, 用以检测横向缺陷; EN 10246/5: 1999《无缝和焊接(埋弧焊除外)铁磁性钢管的自动全圆周磁传感器和漏磁检测》, 用以检测纵向缺陷。美国方面有 ASTM E570—1997《铁磁性钢管制品漏磁检验实施方法》和 API 对铁磁性材料检验的一些要求。

1991年5月我国制订了第一部漏磁检测的标准 GB/T 12606—1990《钢管及圆钢棒的漏磁探伤方法》, 规定了铁磁性钢管、圆钢棒表面缺陷的漏磁探伤方法。适用范围为外径 $\phi 12 \sim 510\text{mm}$ 、壁厚为50mm以下的钢管及圆钢棒。在1998年又进行了标准的修订。在1999年颁布了 GB/T 12606—1999《钢管漏磁检验方法。在行业标准方面》, 1995年12月颁布了石油天然气行业标准 SY 6186—1996《钢质管道管体腐蚀损伤评价方法》。但在压力容器检测方面, 国内外都还没有标准明确提出采用漏磁检测方法。

5 漏磁检测仪器

5.1 磁化方式

在原理上,漏磁检测和磁粉检测基本相同,但是由于拾取漏磁场的传感器由微小的磁粉变为磁敏器件,使得漏磁检测相对于磁粉探伤又有很大的不同,例如磁化方式直流磁化(包括永磁体磁化)和交流磁化是两种基本的磁化方式。

当磁化场为直流场时,漏磁场是一个不随时间变化的量,当检测的灵敏度足够时,总能检测到漏磁场的存在,而且从理论上讲重复性较好。直流磁化对电流源的要求较高,激励电流一般为几安培至上百安培,电气设备相对复杂。随着新型高性能稀土永磁材料的出现,人们开始应用稀土永磁材料设计出重量轻、体积小的励磁机构,但另一方面,其磁化强度不可调,并且移动不便。

当磁化场是交变场时,检测的结果和时间有关,由于缺陷存在的不确定性,使得传感器检测到缺陷的时间是随机的,这就使得对于同样的缺陷,在磁化周期内不同的时间检测得到的结果不相同。这时采用交流 50 Hz 作为磁化电流不但无法得到缺陷的完整信息,更严重的是使得检测的可靠性变差。所以对于漏磁检测来说,为了充分采集到缺陷的信号及其频谱,交流磁化的频率一般为 1kHz 以上^[18]。

5.2 传感器选择

当前的漏磁检测仪器中,漏磁场检测所用的传感器主要是霍尔器件。其优点是有较宽的响应频带,测量范围大、体积小,对压力容器中缺陷产生的非均匀漏磁场的测量很合适。温度性能稳定,有利于设备的现场检测。近年来随着半导体技术的发展,霍尔器件的灵敏度也大大提高,使漏磁检测的可靠性和检出力也显著提高。

5.3 通道设计

通常采用多通道设计,增加检测传感器的数量,扩大检测区域,以提高检测效率。

5.4 漏磁信号处理

在漏磁检测中,被检表面的粗糙不平、仪器移动时的振动、工频噪声、空间电磁噪声、电路噪声等都不可能地干扰检测结果。漏磁检测仪一般都要求采取信号处理手段去除这些噪声的干扰,以获取真实原始漏磁信号的信息。通常使用的方法有差动放大、数字滤波、谱分析和小波分析等。

6 压力容器的漏磁检测

6.1 原材料检验

漏磁检测技术应用于压力容器还不很普遍。应用较多的是管材的检测,包括大批量换热器的换热

管质量的自动检测,以及压力容器板材、棒材、铸件及锻件的质量检测。这些压力容器的原材料和零部件一般批量较大,结构相对简单、规则,易于实现漏磁的自动检测。主要检测的缺陷包括裂纹、折叠、冷隔、疏松、夹杂、气孔和点蚀等。

6.2 在用压力容器的漏磁检测

对于压力容器焊缝的漏磁检测报道较少,研究较多的是应用于在线检测。在设备不停车的情况下,运用容器外壁的漏磁检测技术,去分析容器内壁的缺陷情况,尤其是检测内表面的腐蚀情况。此外,还可用于无人孔设备停车检验时无法进行内检的缺陷检测。目前对于无法进行内部检验的设备除采用内窥镜观察外,没有很好的检验手段,况且由于内表面介质的覆盖等原因可能无法对内表面的状态进行有效观察。漏磁检测技术为我们提供了一种快速有效的检测手段,它可用于表面带油漆层情况下的扫描检测,而且从外部可测出内壁存在的腐蚀坑大小和深度,从而降低了停车和打磨的检验成本,同时也减轻了检验的劳动强度。

为了能够通过外壁的漏磁检测,判断出内壁面的缺陷,在励磁方式上通常采用直流方式或永磁体方式作为磁化源。为使结构紧凑、减小整个系统功耗,选用矫顽力高、最大磁能积大的稀土永磁材料作磁化源的仪器较多。采用永磁材料无需外接电源,这也给现场检验带来了很大的方便。

在线漏磁检测可全面了解压力容器的内表面状态和缺陷的分布情况,对重点设备和重要部件的漏磁检测结果,可存档作为以后检查的参照依据,以预测设备壁厚减薄的速率,确保设备能安全地运行到下一个检验周期。

压力容器的焊缝表面一般比较粗糙,漏磁检测的传感器与检测表面又不可避免存在一定的提高距离,而且目前漏磁检测的灵敏度比磁粉检测低,所以对压力容器中裂纹类缺陷的检出率还有待进一步研究。

7 影响漏磁检测灵敏度的因素

(1) 磁化场 磁化场的强弱对缺陷漏磁场影响很大。由于磁化场决定了工件的磁化程度,从而影响到漏磁场的大小。当磁化强度较低时,漏磁场偏小,且增加缓慢;当磁感应强度达到饱和值的 80% 左右时,漏磁场不仅幅值较大,而且随着磁化场的增加会迅速增大。

(2) 缺陷方向、位置、深度和尺寸的影响 缺陷的方向对漏磁检测的精度影响很大,当缺陷主平面

与磁化场方向垂直时,产生的漏磁场最强。缺陷在容器壁中的位置对漏磁场的影响通常认为是:同样的缺陷位于表面时漏磁场最大,且随着埋藏深度增大而逐渐减小,当埋藏深度足够大时,漏磁场将趋于零。缺陷的大小对漏磁场影响很大,当宽度相同,深度不同时,漏磁场随着缺陷深度的增加而增大,在一定范围内两者近似成直线关系。缺陷宽度对漏磁场的影响并非单调变化,在缺陷宽度很小时,随宽度的增大漏磁场有增加的趋势,但当宽度较大时,宽度增大,漏磁场反而缓慢下降^[1,3]。

(3) 表面涂层的影响 压力容器表面的油漆等涂层的厚度对检测的灵敏度影响非常大,随着涂层厚度的增加,检测灵敏度急剧下降。从目前的仪器性能来看,当涂层厚度 $>6\text{mm}$ 时,已经无法获得有效的缺陷识别信号了。

(4) 检测速度的影响 在检测过程中应尽量保持匀速进行,速度的不同会造成漏磁信号形状上的不同,但一般不至于造成误判。突然加速或减速运动,由于电磁感应的作用会带来涡流噪声。

(5) 容器焊缝表面粗糙度的影响 表面粗糙度的不同使传感器与被检表面的脱离值发生动态变化,从而影响了检测灵敏度的一致性。另外还会引起系统的振动而带来噪声。所以要求压力容器的被检表面尽量光滑平整。

(6) 氧化皮及铁锈的影响 表面的氧化皮、铁锈等杂物,可能在检测过程中产生伪信号,在检测过程中应及时确认或复检。

8 结语

现在国内外都制定了漏磁检测管道缺陷的相关标准,在储罐底板的腐蚀监测以及钢丝绳的断丝无损检测方面也在工程中得到了实际的应用,但针对压力容器检测的标准还处于空白阶段,国内针对压力容器所做的现场漏磁检测工作也非常有限。另外,在漏磁检测的灵敏度、对危险性缺陷的检出率等方面,还需要进行大量的试验验证。但随着磁检测传感器技术、励磁技术以及信号处理技术的进步,漏磁检测灵敏度将会大大提高,对缺陷的宽度和深度定量检测精度也会大大提高。

当前各种检测爬行器越来越多地应用到压力容器的检验中,携带漏磁检测装置的爬行器可以实现大型压力容器的快速、自动扫描,并可对设备的整体

安全性进行无损评价,漏磁检测技术在压力容器检验中将会发挥更大的作用;从而有很好的应用前景。

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,2002.483—495.
- [2] 陈礼娟,何辅云,徐明亮.小波变换在漏磁检测中的应用研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2002,25(5):708—710.
- [3] 王亚东.钢管漏磁检测技术研究[D].大庆:大庆石油学院,2004.
- [4] Teitsma A. Pipeline inspection by intelligent high resolution and conventional magnetic flux leakage pigs [A]. Proceedings of the International Conference on Pipeline Reliability[C]. Calgary, Alberta: 1992.
- [5] 康宜华,武新军,杨叔子.磁性无损检测技术中的信号处理技术[J].无损检测,2000,22(6):255.
- [6] 李路明.提高漏磁检测量化精度的研究[D].北京:清华大学,1996.
- [7] Dwards CE, Palmer SB. The magnetic leakage field of surface breaking cracks[J]. J Phys D: Apply Phys 1986, 19(4): 657—673.
- [8] Foerster F. New findings in the field of nondestructive magnetic leakage field inspection [J]. NDT international 1986, 19(1): 3—14.
- [9] Atherton D, Hauge C. Line pressure stress affects MFL signals[J]. Oil Gas J 1996, 18(3): 92—99.
- [10] 仲维畅.磁偶极子与磁粉探伤——磁粉探伤原理之一[J].无损检测,1990,12(3):66—70.
- [11] 李路明,郑鹏,黄松岭,等.表面裂纹宽度对漏磁场Y分量的影响[J].清华大学学报,1999,39(2):43.
- [12] 杨理践,葛岷,高松巍.漏磁法管道在线计算机检测系统[J].沈阳工业大学学报,1999,21(3):227—229.
- [13] 胡险峰.漏磁通检测中铁磁材料的磁化状态[J].无损检测,2001,23(4):139—143.
- [14] 解源,康宜华.漏磁探伤及其信号处理[J].工业仪表与自动化装置,1999,12(4):52—53.
- [15] 徐章遂,靳英卫,张政保,等.基于漏磁检测的螺栓孔裂纹定量检测方法[J].无损检测,2003,23(6):237.
- [16] 何辅云.钢管三维漏磁检测系统的再研究[J].无损检测,2000,22(2):68—70.
- [17] 李路明,杨海青,黄松岭,等.便携式管道漏磁检测系统[J].无损检测,2003,25(4):181—183.
- [18] 李路明,黄松岭,施克仁.漏磁检测的交直流磁化问题[J].清华大学学报(自然科学版),2002,42(2):154.