在役管道和管状工件探伤技术及应用概况

姚红星[1,3] 蔡桂喜[4] 冯玮[2] 丁建东[3]
(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 北京大学力学与工程科学系, 北京 100871;
3. 中国石油天然气股份有限公司华北油田分公司采油工艺研究院, 河北任丘 062552;
4. 中国科学院金属研究所, 辽宁沈阳 110016)

摘 要: 管道和管状工件在运行过程中产生的缺陷主要是腐蚀坑和纵向裂纹。介绍用于管道和管状工件的各种探伤方法的原理、应用及其优点和缺点。特别介绍了用于在役管道和管状工件内部扫查的管道探伤设备介入式管道探伤器 Pig、带电缆的 Pig 以及内插式探头探伤与测厚方法。

关键词: 管道; 管状工件; 探伤技术
中图分类号: TG115.28 **文献标识码**: A **文章编号**: 1671-4423 (2004) 01-06-05

1 前言

从日常生活到工、农业生产, 管道几乎无处不在。一旦管道发生事故, 正常的生产和生活就要受到影响, 甚至造成环境污染或者爆炸等严重后果。此外, 有很多设备上有管状工件, 例如锅炉管、热交换器管、蒸发器管、石油裂解炉管等, 这些管状工件也和管道一样, 其安全性需要保证。

管道探伤分为管道对接环焊缝探伤和管体探伤。环焊缝探伤可以采用射线探伤和超声探伤。管体缺陷可以从管道外部进行检测, 也可以从管道内部进行检测。管道探伤针对的缺陷主要有两种: 一是腐蚀坑, 尤其是内壁的腐蚀坑; 二是纵向裂纹, 裂纹发生在内壁的可能性大, 管壁越厚越不容易发生在外壁。本文介绍用于管道和管状工件的各种探伤方法的原理和应用以及这些方法的优点和缺点。

2 在役管道对接焊缝(环焊缝)探伤技术

对于整个管道而言, 环焊缝所占的比例很小, 但是环焊缝是管道的薄弱环节, 所以无论是新建管线还是在役管线, 首先要考虑环焊缝探伤。除了焊缝之外, 热影响区也必须和焊缝一样进行探伤, 也就是说焊缝探伤必须包括热影响区。

2.1 管道环焊缝的射线探伤

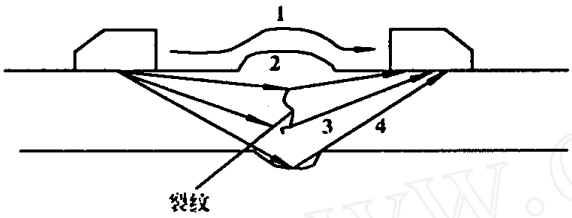
对于新管道, 环焊缝一般都要做射线探伤[1,2]。对于在役管道的维修检验, 业主也常常要求射线探伤。实际上射线探伤对于维修检验价值不大, 因为射线探伤在管道安装时已经做过, 而管道服役过程中产生的缺陷主要是纵向裂纹和腐蚀坑, 射线探伤对于裂纹不够灵敏, 对于小口径管采用双壁双投影, 对裂纹更加不灵敏。焊道上的腐蚀坑的影像容易与焊缝表面上的凹坑的影像混淆, 不易识别。由于一般的焊缝射线照片焊缝之外包括热影响区部分的黑度很大, 导致热影响区的腐蚀坑的影像不容易识别。故管道维修过程中环焊缝的探伤应尽可能采用超声探伤, 一般情况下不必做射线探伤。

2.2 管道环焊缝的超声探伤

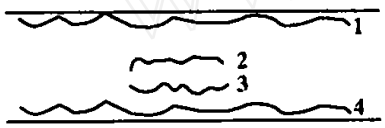
2.2.1 焊缝的纵向缺陷(相对于管子而言是横向缺陷)的检测。焊缝超声探伤[3,4]的困难之一是焊缝表面凹凸不平产生的干扰波和缺陷回波不易区分。小口径管一般壁厚比较小, 来自焊缝表面的干扰更加严重。为此辽宁省无损检测学会组织专家开发了一种专用的小口径管焊缝超声探伤专用探头, 使用这种探头来自焊缝表面的干扰波的幅度比较小。区分干扰波的方法是从焊缝的两侧进行探伤检验。从不同侧面探测时, 如果只有一侧有回波, 或者从不同侧面探测得到的回波幅度相差很大, 这样的回波基本上是干扰波而不是伤波。反之, 从两侧探伤得到的回波都比较大, 二者相差不大, 基本上是伤波。大口径管一般壁厚比较厚, 以相控阵技术为基础的管道环焊缝超声自动探伤专用设备, 探伤效果很好。辽宁电力科学研究院和辽河石油公司北方管道检测公司购买了加拿大R&D Tech 公司制造的这种设备。由于

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

这种设备比较昂贵, 普遍应用困难很大。参照上述设备的原理, 在常规的斜探头手工检测的基础上, 增加衍射波时差法* (TOFD 法, Time of Flight Diffraction) 或者串列探头法(Tandem Probes), 对于探测裂纹会更有利。图 1 是 TOFD 法示意图, 图 2 是串列探头法示意图。



(a) TOFD 法超声波路径



(b) TOFD 法 B 扫描显示

图 1　TOFD 法示意图

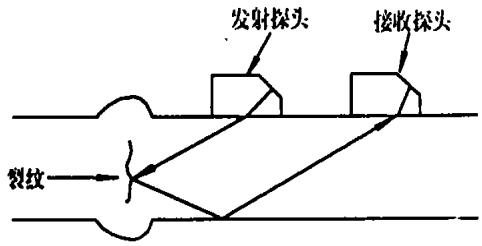


图 2　串列探头法示意图

2 2 2　焊缝横向缺陷(相对于管子而言是纵向缺陷) 的探测。我国焊缝探伤标准 GB 11345—89 规定, 对于平板对接焊缝, 用斜平行扫查法和平行扫查法检测横向缺陷。采用平行扫查法需要把焊缝表面磨平。对于管道环焊缝, 斜平行扫查是很困难的。对于小口径管道, 由于焊缝宽度小, 较严重的裂纹会延伸到热影响区, 可以在热影响区做平行扫查。对于大口径厚壁管道, 只有把焊缝打磨平, 才有可能做平行扫查检测横向缺陷。

3　在役管道和管状工件外部扫查探伤法

对于在役管道, 从管外表面扫查实现自动化比较困难, 所以通常采用手动扫查, 效率比较低。与此相反, 从在役管道内表面扫查则便于实现自动化, 因为管道本身可以作为探头扫查运动的轨道, 因而从管道的内表面扫查的在役管道探伤设备, 绝大多数是自动扫查高效率的设备。少数情况下也采用手动扫查, 效率也明显地高于管外扫查。

本节讨论从管外扫查的在役管道探伤方法, 全部是手动扫查的方法。其中除了超声横波法比较成熟之外, 其它方法都是最近几年开发的, 远场涡流法已经取得了明显地应用效果, 漏磁法的实用价值还需要进一步验证, 超声导波法的优点是可以带着保温层进行检验, 缺点是探伤灵敏度低。

3 1　超声横波法

管道和管状工件的横波探伤[6]与一般的焊缝横波探伤原理上完全相同, 不同的是管道的超声横波探伤重点是检查内表面的腐蚀坑和纵向裂纹。使用的是普通的便携式超声波探伤仪。探头则必须根据管径和壁厚专门设计制作, 探头设计的好坏直接影响探伤效果, 对于口径比较小的管道, 表面回波幅度高, 影响缺陷信号的观测, 采用收发分离的双晶探头(T/R 探头) 效果比较好。这种方法的优点是探伤灵敏度高, 对裂纹和腐蚀坑都比较灵敏。缺点是探伤速度太慢, 在设备大修的有限期间内很难完成大批量的管道检验。进行这样的检验容易被忽视的一个问题是, 只注意记录和评价幅度高的回波, 而忽视了对大量幅度低的回波的记录和评价。应当把这些低幅度的噪声背景与新管的噪声背景加以比较, 从中对腐蚀的严重程度做出评价, 还可以用超声测厚来确定管内壁的腐蚀程度。

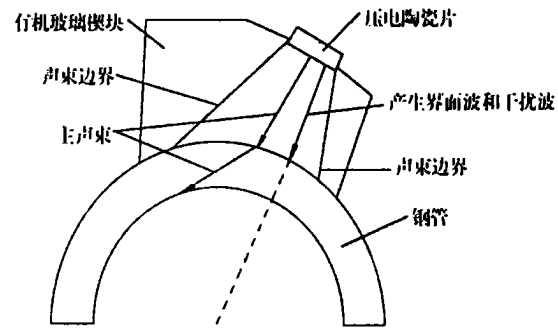


图 3　小口径管超声横波探伤产生表面回波的原理

3 2　超声导波法[6]

平板中的兰姆波是导波中的一种, 这里所说的导波是在管壁中传播的导波。管壁中传播的导波共有 3 个系列。L 系列为压缩膨胀波(Longitudinal),

* 编者注: 详见本刊 2002 年第 3 期第 3 页

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

T 系列为扭转波(Torsional), F 系列为弯曲波(Flexural)。导波具有共振的性质,所以振动能量大、传播距离远,能在较远的距离内探测缺陷,探测距离能达到 15m～50m,从而大大加快了探伤的速度。除此之外,还能带着保温层进行检验(只需取下放探处的保温层),从而大大减少了取下保温层的数量和地下管线的挖开数量。这种方法的灵敏度虽然不高,但由于优点突出,仍然是一种很有实用价值的探伤方法。目前研究开发工作仍在大力进行。

3.3 远场涡流法和漏磁法

一般的涡流探伤频率都在 1 kHz 以上。对于在役的钢管,由于相对磁导率 $\mu_r \geq 1$,同时又不便于施加饱和磁化。在这样的情况下,频率在 1 kHz 以上的涡流在钢管壁中的渗透深度很小,只能检测表面缺陷。降低频率可以增加渗透深度,但是励磁频率太低使得接收信号的灵敏度明显降低导致探伤灵敏度大幅度降低。总之,用一般的涡流方法在钢管的外壁扫查,在不加饱和磁化的条件下,不可能检测出内部缺陷和内壁缺陷。

远场涡流法不仅弥补了上述缺点,而且还具有提离效应小、探伤灵敏度和伤所在的深度无关(即对内伤和外壁伤具有同样的探伤灵敏度)、不需要饱和磁化等优点。远场涡流的缺点是对壁厚减薄比较灵敏,对裂纹不够灵敏。此方法使用的是内插式探头,也就是从管的内表面扫查[6]。由于设备结构上的原因,并非所有的管件或管道都可以使用内插式探头从管的内表面扫查。为了扩大远场涡流法的应用范围,美国 IOWA 州立大学W. Lord 教授和他领导的科研人员研究了将远场涡流法用于厚板探伤[7]。在此基础上R&D Tech 和 Russell NDT System 等公司分别开发了在管外扫查的远场涡流钢管探伤设备。辽宁电力科学研究院引进了一台该设备,并且取得了比较好的使用效果。

用漏磁法从外表面对钢管进行探伤,不但用于冶金工业的钢管生产线上对新钢管进行检验,还大量用于石油工业对旧油管和套管等进行检验[8]。用漏磁法对在役管道或管件进行检验时,通常是从钢管内表面扫查[9,10,11]。上述检验所用设备都是大规模多通道的自动探伤设备。最近国内开发了一种从钢管外表面扫查的手动便携式钢管漏磁探伤设备[12],该设备的使用效果还需要在今后的使用过程中考察。

4 在役管道和管状工件内部扫查探伤方法

在各种在役管道及管状工件探伤方法中,从内表面进行扫查的方式占有主导地位。只有在管道没有开口可供探伤器进入管内,或者管道上拐弯太多、转弯半径太小从而使得探伤装置无法通过的情况下才选择从外表面扫查的检验方式。

从管道内表面扫查的管道探伤设备分 3 种类型:第一类通称为 pig,适合大口径长输管道探伤,探伤时无需停产;第二类叫做带电缆的 pig,适合中等口径的管道探伤,探伤时管道必须停产;第三类是内插式探头单通道涡流、远场涡流和超声探伤测厚设备,这类设备适合小口径管道探伤,特别是锅炉管和热交换器管等。

4.1 介入式管道探伤器 pig

pig 是一种大型的管道探伤专用设备。从管道上游的一个开口处将 pig 送入管内,pig 在管内流体的压力作用之下向下游移动,在移动过程中对管壁进行扫查,并把检验所取得的数据(主要是伤信号幅度和伤位置数据)存储在专用的数据存储计算机内。pig 向下游移动到达下一个开口时,将 pig 从管内取出,读出存储下来的数据,就可以得出检测的结果和结论。pig 本身作为一个整体全部进入管道,它的组成部分有:探头列阵和多通道探伤仪、里程测量信号和伤位置信号产生与采集装置、数据存储专用计算机、电池箱等。pig 每次运行可检测管线 50 km 以上[9,11]。

pig 采用的探伤方法有 3 种:漏磁探伤、超声测厚探伤、超声横波探伤。

漏磁探伤 pig 的主要优点是不需要耦合介质,对管壁清蜡要求不高,设备价格比较便宜。缺点是判断性差,发现缺陷需要用其它探伤方法验证。对于地下管线需要挖开土层用超声波探伤验证。这种 pig 可检查腐蚀坑和横向裂纹。

超声测厚 pig 的优点是判断性好,发现缺陷可直接处理,不需要其它探伤方法验证。缺点是需要耦合介质,检验输油管线可以用管内的原油作为耦合剂,检验气管线则需要专门注入一段煤油或其它液体作为耦合剂。其它缺点是管壁清蜡要求高,价格比较贵。这种设备能测壁厚,能检验腐蚀坑,但不能检验裂纹。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

超声横波探伤 pig 是专门为探测气管线纵向裂纹而开发的, 探测纵向裂纹有比较高的灵敏度。缺点是价格昂贵, 管道内表面清蜡要求高, 要注入一段液体作为耦合剂。

目前国内已经进口了几台漏磁探伤 pig, 还有自行研制的漏磁探伤 pig 大约 2～3 台, 初步满足了国内长输管道探伤的需要。但是 pig 的水平还需要提高, 一是管道原设计的发射和接收装置只考虑了清管(蜡)器, 未考虑 pig, 所以发射和接收器长度不够, 需要加长; 二是检验费用 1 万元/公里(国外是 1 万美元/公里), 用户觉得负担过重; 三是这些设备的探测线圈大、通道数少, 在国际上属于老一代产品, 性能指标偏低。国内也进口了一台超声测厚 pig, 由于清蜡要求太高而无法投入使用。随着西气东输管线的开通和运行, 气管线纵向裂纹的检验问题也会逐渐提到日程上来。图 4 是漏磁 pig 的实物照片。

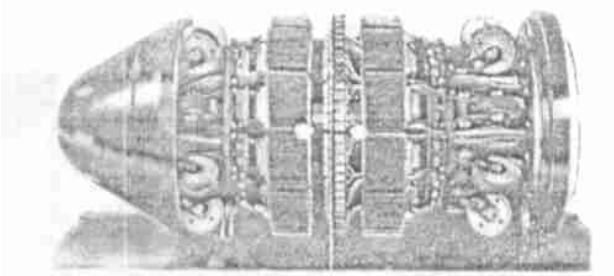


图 4　漏磁 pig 实物照片

三种 pig 有一个共同的缺点, 那就是没有管径通用性, 即每台 pig 只能检验一种口径的管线, 要检验其它口径的管线就必须再有一台相应直径的 pig。

4.2　带电缆的 pig (Cable Operated Pig)

带电缆的 pig 在构成和原理上与不带电缆的 pig 完全相同, 区别在于带电缆的 pig 在工作时只是探头列阵(有时探头上还带有前置放大器)进入管内, 探伤仪、计算机、电源等部分都不进入管内, 探头与探伤仪之间用电缆联接。进行检验时管道必须停止工作, 探头从管道上的一个开口放进管内(图 5), 用压缩空气把探头推送到能够检测的极限距离上(一般为 1 公里, 最远可达 10 公里), 然后用细钢丝绳和电动滚筒把探头匀速拉回。在探头回撤的过程中完成扫查, 伤信号和伤位置信号被计算机实时显示并存储在计算机里[10]。

目前带电缆的 pig 只有超声测厚和漏磁探伤两种, 后者应用较多, 适用的管径一般小于∅273 mm。国内目前还没有带电缆的 pig, 也没有使用过这种 pig。

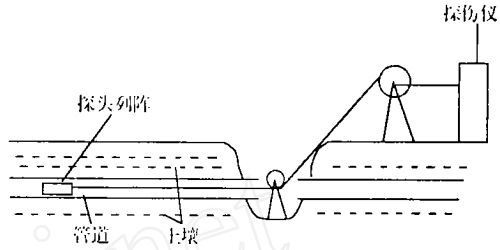


图 5　带电缆的 pig 工作方式示意图

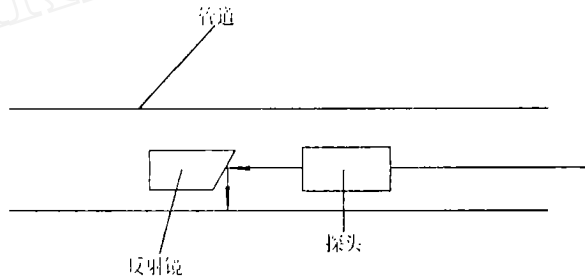


图 6　内插式探头管壁厚度超声测量示意图

4.3　内插式探头探伤与测厚方法

内插式探头涡流探伤方法适用于非铁磁性的热交换器管或者管道的探伤[13]。远场涡流方法用于锅炉管和热交换器管等钢管的探伤和用钢管铺设的管道探伤[6]。内插式探头管道超声探伤和超声测厚对上述管件和管道都适用[14]。图 6 是内插式探头管道超声测厚示意图, 在探头之前要有一个 45 转角反射镜把声束反射到管壁上, 在扫查过程中反射镜要不停地旋转, 这样才能对整个圆周进行扫查。进行这种检测, 管内必须注水做耦合介质, 可以用水流来推动反射镜的旋转。

以上 3 种方法国内只用过涡流法对核电站的热交换器进行过检验。其它两种方法从未使用过。事实上国内管道和管状工件很少进行全面的探伤检验, 只抽检很小一部分, 或者只检验环焊缝及其热影响区。

5　结束语

为了保障管道和管状工件的安全运行, 用现有的探伤技术进行检验是必要的。管道和管状工件的探伤技术近年来已经有了较大的发展, 为保障管道和管状工件的安全运行发挥了重要的作用。但是, 目前管道和管状工件探伤技术还有很多不足之处, 和实际需要相比有很大的差距。因此, 管道探伤技术的

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

研究开发工作十分活跃,是当前探伤学科的一大热点。

目前国内管道及管状工件探伤检验与国际先进水平相比,在技术上和管理上都有比较大的差距。即便是在国内和其它设备的探伤检验相比,例如压力容器的探伤检验,管道和管状工件探伤的技术水平和管理水平也都是比较低的。随着我国经济的发展,管道和管状工件的探伤必然会得到相应的发展,逐步提高,接近和达到世界先进水平。

参考文献:

[1] 刘德镇等. 现代射线检测技术. 北京: 中国标准出版社, 1999

[2] GB 3323-87 钢熔化焊对接接头射线照相和质量分级

[3] 胡建恺, 张谦琳. 超声检测原理和方法. 合肥: 中国科技大学出版社, 1993

[4] GB 11345-89 钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果分级

[5] J. L. Rose, Ultrasonic Guided Waves: An introduction to the technical focus issue. J. of Materials Evaluation, 2003, 61(1)

[6] 杨世维. 涡流无损检测. 沈阳: 辽宁教育音像出版社, 1998

[7] Y. S. Sun et. al. A novel remote field eddy current technique for inspection of thick-walled aluminum plates. J. of Material Evaluation, 1998, 56(1): 94～97

[8] GB/T 12606-90 钢管及圆钢棒的漏磁探伤方法

[9] J. N. H. Tiratsoo. Pipeline Pigging Technology, Gulf Publishing Co. Hoastion, Longdon, Paris, Zurich, Tokyo, 1992

[10] E. J. Sperling, Downhole Corrosion Inspection of 2 7/8 and 3 1/2 Inch Production Tubing Using Magnetic Flux Leakage, Society of Petroleum Engineers, SPE Report 30682, 1995, 285～288

[11] 杨理践等. 智能化管道漏磁检测装置的研究. 无损检测, 2002, 24(3): 100～102

[12] 李路明, 杨海青等. 便携式管道漏磁检测系统. 无损检测, 2003, 25(4): 181～183

[13] S. P. Sullivan. Simultaneous absolute and differential operation of eddy current bobbin probes for heat exchanger tube inspection, J. of Material Evaluation, 2000, 58(5): 634～638

[14] J. Krautkramer and H. Krautkramor, Ultrasonic Non-destructive Testing, Springer-Verlag Berlin, Herdelberg New York, 1977

焊缝评片口诀

周 林

宁夏石嘴山发电厂金属室

评片人员应注意,适用标准要熟记。
观片像质放在先,所有标记要齐全。
识别伪像第二件,仔细区分也不难。
气孔图像最易看,圆形浓黑边缘淡。
非金点状夹渣物,形状不定有棱边。
夹珠通常很少见,白色底上有黑边。
咬边成线或成点,似断似续常出现。
这种缺陷很好评,位置就在熔合线。
未熔合的深度浅,射线照相难发现。
位置就在熔合线,线状一面呈直线。
未焊透是大缺陷,影像大都呈直线。
间隙过小钝边厚,位置就在缝中间。
内凹就在仰焊面,间隙太大是关键。
横裂纵裂最危险,纵向裂纹最常见。
有的直线有的弯,中间稍宽两端尖。
裂纹未熔不允许,若要发现评Ⅳ级。
单面出现未焊透,应以长深来区分。
未熔条渣区分难,评定二者细心看。
夹渣评定测长短,不能评为Ⅰ级片。
一直线上条渣组,测量间距是关键。
缺陷评级按板厚,缺陷数量按条款。
气孔条渣在一起,孔渣各自先评级。
级别之和再减一,成为最终评定级。
评片综合技能高,标准规范最重要。
定性定量和评级,最终结论不能少。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net