

基于低频超声检测技术的长输管道腐蚀检测

王 兵¹ 巴烈电² 孙 都¹ 李羽可³

(1. 中钢武汉安全环保研究院股份有限公司, 湖北 武汉 430080)

(2. 大冶特殊钢有限公司, 湖北 黄石 435000)

(3. 武汉中科创新技术股份有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 常见的管道磁致伸缩导波检测过程中主要依靠检测人员进行手工的线圈绑紧及励磁等操作, 镍钴合金带在固定和拆卸过程中十分容易断裂, 而带状线圈则容易被磨损破坏。本文设计的卡环式电磁导波探头能够实现电磁导波探头装置一体化, 操作流程简易化的优点。同时通过实验还证明了卡环式电磁导波探头能够有效抑制导波的多模态效应, 提供单一纯净的低频 T (0,1) 模态扭转导波。

关键词: 低频导波; 卡环式探头; 管道检测; 电磁导波

长输管道是我国油气资源运输调配的重要环节。近年来, 随着管道运营时间增长, 因腐蚀、老化、裂纹、自然泄漏等原因导致的微小泄漏事件逐渐成为管道安全检测领域的主要问题。对长输管道进行无损检测可以及时发现管道泄漏, 监控管道质量。

长输管道动辄数十数百公里, 面对如此繁重的管道检测任务, 逐段人工接触检测十分费时费力。因此, 在实际的检测作业中, 通常采取抽检等方式进行长输管道的质量控制。这不利于实现长输管道在役安全运行的全面保护。低频导波检测技术是一种单点设置探头就可实现长距离检测的无损检测技术, 因此在将该技术应用至长输管道现场时, 探头的研究设计与实施工装就至关重要。

1 超声导波检测原理

波导, 是用来定向引导超声波的结构。可以指在其端点间传递超声波的任何线性结构。常见的波导包括各种形状的空心金属波导管等, 金属管道就是一个典型的波导结构。金属管道将被传输的超声波完全限制在金属管内, 能够大大降低能量传输过程中的损耗。

当一种具有超声频率的弹性波在管道 (波导体) 平行于边界传播时, 纵波和横波不能独立存在, 这时就会产生一种特殊的波动, 这种波动与介质的截面尺寸有关, 称为导波。在管道的整个圆周和管壁厚度都充斥着导波并沿着管道轴向方向传播, 当缺陷在径向截面上具有一定的面积时, 导波会在缺陷处返回一定比例的反射信号, 根据反射信号来识别和判断缺陷。

导波在管道中传播时, 由于本身的特性使得其沿

传播路径的衰减很小, 所以可以克服人工逐点逐段检测方法的缺点, 实现长距离、大范围的管道无损检测。并且导波也可以在充液、带包覆层的管道中传播, 使得检测长输管道的费用大大降低。当检测频率降低, 超声导波的能量提高, 有效检测距离将大大增加, 因此低频导波的这种显著优势尤其适用于长输管道的无损检测需求。

2 磁致伸缩换能器

导波换能器是实施低频导波检测技术的关键装备。根据工作原理, 导波换能器可以归为压电式、电磁超声式 (EMAT) 等几种类型, 如图 1 所示。其中, 电磁超声换能器主要依靠三种作用机理: 洛伦兹力机理、磁化力机理和磁致伸缩机理。磁致伸缩机理是基于铁磁性材料在外加磁场的作用下产生机械形变从而在管道类波导中产生超声波的原理制作而成。

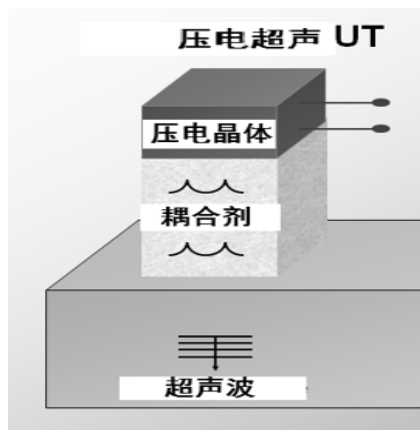


图 1 压电超声探头原理

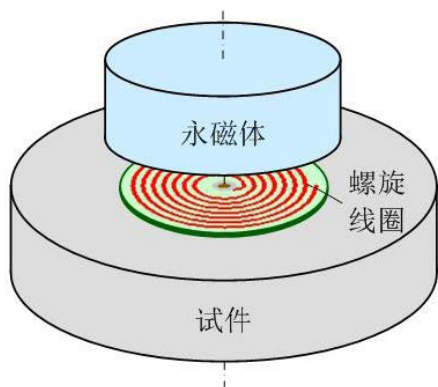


图2 电磁超声探头原理

电磁超声换能器主要由三部分组成：提供偏置磁场的磁体、产生脉冲磁场的线圈、具有磁致伸缩效应的带材或被测试件，如图2所示。其中，常见带材如镍钴合金带的剩磁感应强度提供了沿管道周向的偏置磁场，当线圈施加脉冲激励时，多簇线圈的每一簇产生动态磁场，动态磁场与静态偏置磁场共同作用，产生周期性合成磁场，在该合成磁场作用下，镍钴合金带的磁畴单元发生形变，引起镍钴合金带材料的伸缩形变，从而产生超声波。电磁超声换能器的显著特点是不需要耦合剂作为声波传递的媒介，这大大降低了检测现场恶劣环境如：高温、低温、防腐涂层等工况对超声导波检测实施的负面影响。

实际应用中，先裁剪比管道周长略短的磁致伸缩带材，如图2所示通过永磁体进行预磁化，然后沿周向绕在钢管上并通过环氧树脂与钢管粘结，偏置磁场方向是沿着钢管周向分布，扁平电缆通过接插件的跳线设计形成螺旋管式的线圈，当线圈中加载交变电流后根据电磁感应原理，在轴向方向会有交变磁场，这个交变磁场与磁致伸缩带材的周向磁场相互垂直，根据威德曼效应就在磁致伸缩带材表面产生面内剪切振动，整个管道中激发出 $T(0, 1)$ 模态扭转导波。

管道的 $T(0, 1)$ 模态具有在很宽频范围内频散小、管道截面位移分布均匀（意味着对截面上不同位置的损伤如内伤和外伤具有较一致的灵敏度）且受管道内部流体压力和速度等影响小的特点，因此 $T(0, 1)$ 模态成为普通管道导波检测的首选模态，基于压电和磁致伸缩原理都开发了相应的换能器，相比压电式换能器，磁致伸缩式换能器采用敏感带材 360° 全圆周覆盖管道，因此激发的 $T(0, 1)$ 模态较为纯净，信噪比高，而且可灵活适应各种不同管径、可用于密排管道等空间狭窄的场合、且具有结构简单、耐用性好、性价比高、高温性能好及可用于长期监测等优点，在

管道的 $T(0, 1)$ 模态导波检测中获得了广泛应用。

3 卡环式电磁导波探头

在电磁波超声波检测行业，一般对管材进行导波检测的步骤包括以下几个：首先将镍钴合金带环绕在待检管道上，用胶带进行固定，然后用磁铁对镍钴合金带进行环绕加磁处理；其次将带状线圈环绕在已经固定的镍钴合金带上并保证两个线圈环绕方向的一致性，将带状线圈绑紧后用胶布牢牢地固定住，不让线圈松动。这种方法要求检测人员每次都需要根据管道的直径进行镍钴合金带和带状线圈的尺寸选择并且依靠人工进行绑紧的操作。需要注意的是，镍钴合金带在固定和拆卸过程中十分容易断裂，而带状线圈则容易被磨损破坏。因此，如何实现电磁导波探头一体化装置，简化其操作流程，是目前采用磁致伸缩换能器进行电磁导波检测中急需解决的一个问题。

为了能够在长输管道现场更加快速、方便的使用磁致伸缩换能器激发 $T(0, 1)$ 模态导波进行检测，本文设计了一种卡环式电磁导波探头，如图3所示。卡环式电磁导波探头由镍钴合金带、排线、排针插头、排线插座、磁铁固定块、磁铁、防水胶圈、上壳体、下壳体、上卡环、下卡环、卡环螺丝、固定螺丝、线缆插头组成。

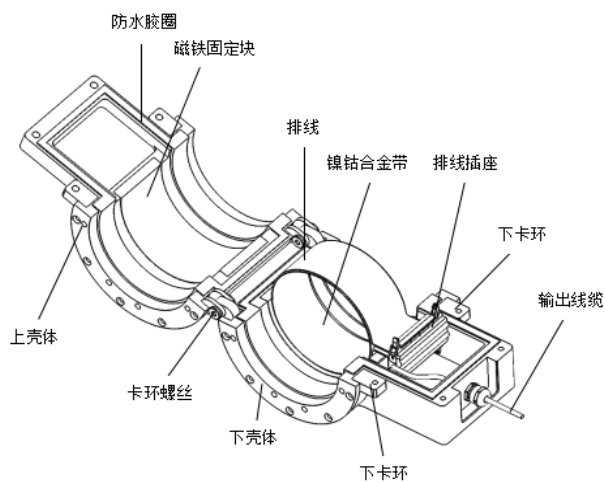


图3 卡环式电磁导波探头检测装置正面立体视图

其中，镍钴合金带与检测装置分离，直接用胶水粘接到被检测管道上一圈，是实现检测的主要载体，表面被排线覆盖一圈。排线环绕镍钴合金带一圈，排线首尾两端固定有排针插头，排针插头可以与排线插座上的羊角插座连接，从而将排线首尾连接，让排线形成回路。

磁铁固定块有2组，上下壳体各安装一组，用于

安装矩形磁铁, 磁铁固定块内有磁铁安装槽, 安装槽以一定角度圆周排列, 管道越大排列越多, 安装槽内可以放置 2 只磁铁, 2 只磁铁的 N 极和 S 极反向放入并固定。所有磁铁安装槽内 2 只磁铁排列方向一致。磁铁为饱和充磁钕铁硼磁铁, 磁铁有多组, 管道越大, 磁铁数量越多, 以一定角度圆周安放排列在磁铁固定块中。这种磁铁的环绕设置能够保证各向一致的励磁效果, 使得检测过程中信噪比提高, 检测导波模式单一纯净, 提升检测效果。

上卡环, 下卡环分别有 2 只, 起到加强支撑装置作用, 上卡环安装在上壳体两端, 下卡环安装在下壳体两端。上下卡环尾端通过卡环螺丝固定, 且能旋转, 将整个装置合成一个圆形。上下卡环头部分别加工成通孔和螺纹孔, 可以通过固定螺丝拉紧上下卡环, 从而将装置压紧固定在管道上。因此能够快速地将磁致伸缩换能器快速安装到待测管道上。

排线插座输出线缆连接仪器以后, 使排线形成回路, 仪器管道圆周激发交变电流, 在圆周磁体作用下产生交变磁场; 镍钴合金带良好的磁致伸缩性能, 在交变磁场作用下, 产生振动, 形成所需超声波, 进行超声检测。

4 实验验证

为了验证上述设计的卡环式电磁导波探头的检测效果, 本文将对一个管径 63mm, 壁厚 3.5mm 管长 8300mm 的薄壁长输管道进行检测, 长输管道含有距离检测端头分别为 2000mm、4000mm、6500mm 的三个缺陷, 三个缺陷都采用通孔的形式获取 9% 的截面损失率。检测结果如表 1 所示, 图 4、图 5 为检测结果对比。

表 1 两种形式探头的检测结果 单位: mm

缺陷距离	常规探头			卡环式探头		
	检测值	误差	波幅高度 (%)	检测值	误差	波幅高度 (%)
2000	2027	27	65	1989	11	80
4000	4031	31	51	3973	27	65
6500	6543	43	43	6443	57	57
8300	8250	50	50	8369	69	69

图 4、图 5 中蓝色 B 闸门所显示的波形信号为管道的端头信号, 红色 A 闸门所显示的波形信号为距离检测端 6500mm 的缺陷信号。图 4 中三个红色方框所显示的波形为导波在传播过程中由于多模态效应所产

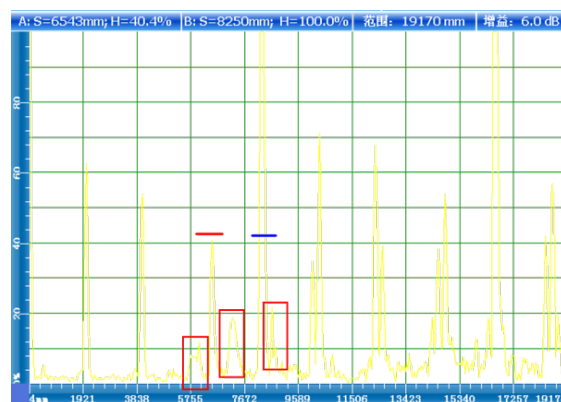


图 4 一般电磁导波探头检测结果

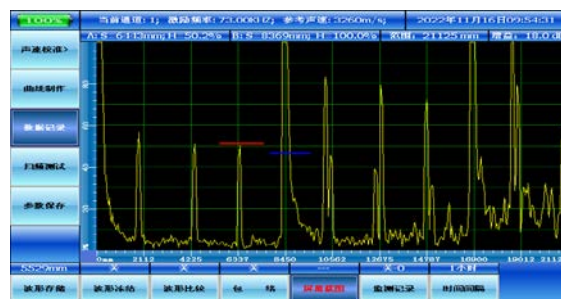


图 5 卡环式电磁导波探头检测结果

生的多个模式波, 非检测用 T (0,1) 模式扭转导波。这些信号的产生会导致目标检测模式导波的信号幅度下降, 信噪比低, 严重的还将淹没缺陷信号, 导致漏检。采用卡环式电磁导波探头对同一个工件进行检测后的结果如图 5 所示, 图 5 中各个缺陷及管道端部信号幅值较高, 波形单一纯净。这说明卡环式电磁导波探头能够有效抑制导波的多模态效应, 提供单一纯净的 T (0,1) 模式扭转导波。

参考文献:

- [1] 霍宇森. 超声导波传播的半解析有限元分析 [D]. 北京交通大学, 2015.
- [2] 隋忠学, 郝竹筠. 火力发电厂在役凝汽器管超声导波检验的可行性 [J]. 吉林电力, 2012(3):6-8.
- [3] 胡剑虹. 基于超声导波的钢轨轨底无损检测关键技术 [D]. 浙江大学, 2014.
- [4] 崔晓静, 邹尊强, 管红立等. 铁镍材料磁致伸缩换能器的结构设计及优化 [J]. 电工电气, 2016(11):21-24.
- [5] 郝煜朝. 基于电磁超声导波的管道微裂纹检测 [D]. 河北工业大学, 2021.

第一作者简介:

王兵 (1970.10.5-), 男, 土家族, 湖南省湘潭市, 本科, 正高级工程师, 主要从事民用 / 工业建构筑物可靠性检测鉴定工作。