

长输油气管道焊缝内裂纹无损检测方法研究

梁 暖 (国家管网集团广东运维中心 广东 广州 510660)

摘 要: 长输油管道长期处于较为恶劣的工作环境中, 导致长输油气管道焊缝内裂纹出现的概率增加, 在管道内异常运输物质的干扰下, 使得对裂纹检测的难度增大, 为此提出长输油气管道焊缝内裂纹无损检测方法。利用 Lamb 波对管道进行扫描, 获取管道导波数据, 并将其划分为纵向导波、扭转导波以及弯曲导波, 并分析导波的模态, 计算出模态的对称性, 将非对称模态下异常强度大于 1 的位置判定为裂纹, 并计算出其对应的位置信息, 实现长输油气管道焊缝内裂纹无损检测。测试结果表明, 设计方法可以实现对管道焊缝内裂纹的准确检测, 误差不超过 0.01mm, 检测结果具有可靠性。

关键词: 长输油气管道; 焊缝; 裂纹; Lamb 波; 导波数据; 模态

0 引言

能源运输在经济发展中发挥着至关重要的作用, 考虑到管道输送在成本方面所表现出的一定优势^[1]。近些年来, 长输油气管道建设成为了能源运输的主要发展方向, 大大降低了运输过程中的安全风险^[2]。在此背景下, 以油气管道为基础的运输体系日益成熟, 并且在石油化工及天然气运输中逐渐占据重要位置^[3]。但是值得关注的是, 无论受使用年限的影响, 抑或是管道所属环境条件变化的影响, 管道内部和外部出现腐蚀等情况都是极有可能发生的^[4]。在定期的检测中, 主要就是对这类问题进行识别, 并结合识别结果采取相应的修复措施^[5]。而修复最主要的手段就是焊接, 其不仅可以实现对大面积异常管道的换新处理, 同时也是加固原有管道连接的重要手段^[6]。焊接质量最主要的评价指标之一就是焊缝内是否存在裂纹, 对其的检测也是确保管道安全性的关键内容之一^[7]。

基于此, 本文提出长输油气管道焊缝内裂纹无损检测方法, 并通过试验测试对设计方法的有效性进行实际验证。通过本文的研究, 以为长输油气管道的安全检测工作提供有价值的帮助, 保证油气运输的安全性。

1 管道导波信息获取

本文对长输油气管道焊缝状态信息的获取是利用超声波实现的。首先利用超声波对待检测的管道进行检测, 当声波在管道钢材、焊接材料以及焊缝裂纹中传播时, 会在不同介质之间不断地发生折射和反射^[8], 并且这种折射和反射都是在介质的上下边界发生的, 这就意味着接收到的信号波会在纵波与横波之间出现波形转换的情况, 此时形成的波也就是管道的导波^[9]。根据导波数据, 以及波形显示出的能量衰弱情况, 即可实现对焊接裂缝的检测。

在获取导波时, 本文使用兰姆波 (Lamb 波) 作为基础波, 首先将超声波约束在管道内部, 并确定超声波在整个管道厚度范围内传播是以完全一致的初始频率进行的, 这样就是得超声波在管道内所有质点上的振动结

果都是按照相同的传播方向发散的, 并且与管道的水平界面保持平行。此时磁铁对应产生静态磁场是与管道的折射磁场保持水平。假设 Lamb 波的波长为 λ , 经超声传感器折形后管道导出的导线间距为 D , EMAT 传感器对导波的脱离距离为 d , 那么水平方向上管道的静态偏置磁场为 B 。在此基础上, 利用换能器对采集到的管道涡流信息计算转换, 可以得到:

$$\delta = \frac{l}{D} \lambda (d \exp B) \quad (1)$$

其中, δ 表示管道的涡流信息, λ 表示转换系数。通过式 (1) 可以看出, 换能器的转换系数直接关系到涡流信息的范围, 又由于 Lamb 波激励电流的方向与管道磁场的方向会受到平行洛伦兹力的综合影响, 因此会在一定程度上弱化管道导波强度, 为此本文将换能器的运行功率设置为 80%。此时管道磁场方向受到的影响可以在管道内部折射作用下得以最大限度保留。那么则有转换系数无限趋近于 1, 式 (1) 可以表示为:

$$\delta = \frac{l}{D} (d \exp B) \quad (2)$$

此时对应的管道导波数据信息可以表示为:

$$\varphi = \nabla \delta \quad (3)$$

其中, φ 表示管道导波数据信息。

通过这样的方式, 就可以得到最接近真实情况的管道导波结果, 将其作为焊缝裂纹检测的依据。

1.1 管道导波模态分析

在得到管道的导波信息后, 需要对导波的模态进行分析, 为此本文首先将管道导波信息进行初步划分为纵向导波、扭转导波以及弯曲导波。

假设上文得到的管道导波数据信息的周向阶数为 n , 那么当 $n=0$ 时, 管道的导波是以轴对称的形式存在的, 这就意味着管道的状态信息完全一致, 当 $n=1, 2, 3, \dots, i$ 时, 管道的导波是以非轴对称的形式存在的, 这就意味着管道的状态信息不完全一致。以此为基础, 分析管道的导波的模态对于焊缝裂纹的检测具有重要价值。假设采集

到的导波信息模数为 m ，则有 $m=\{1,2,3\}$ ，分别对应导波的纵向模态、扭转模态以及弯曲模态。

当 $m=1$ 时，表明管道的导波信息只有一种模态，管道内质点受交变压应力的作用出现伸缩变形，当焊缝中存在裂缝时，质点的形式则变为至少两种，即焊缝填充物和裂纹中的空气，对应的导波疏密分布也会呈现出明显的差异性，而对这种模态的判断方式可以表示为：

$$\eta = \varphi \frac{\partial A}{\partial t} \quad (4)$$

其中， η 表示导波疏密差异分布， A 表示 φ 对应的管道面积， t 表示 φ 传导的时间差。以此为基础，通过判断 η 值的大小即可实现对管道导波模态的判断。鉴于 Lamb 波在空气中的折射效率和正常管道表面的折射速率差异，本文将 0.5 作为判定模态的标准，当 $\eta < 0.5$ 时，判定其导波为纵向模态，当 $0.5 < \eta < 1$ 时，判定其为扭转模态，当 $\eta > 1$ 时，判定其为弯曲模态。

当 $m=2$ 时，表明管道的导波信息有两种模态，同样采用式 (3) 对其进行分析，此时的判定标准值为 0.25，当 $\eta < 0.25$ 时，判定其导波同时存在纵向模态和扭转模态，当 $0.25 < \eta < 0.5$ 时，判定同时存在扭转模态和弯曲模态，当 $\eta > 0.5$ 时，判定同时存在弯曲模态和纵向模态的综合。当 $m=3$ 时，则表明上述三种模态同时存在，此时的判定标准值为 0.075，当 $\eta < 0.075$ 时，则判定导波中三种模态同时存在，否则则不成立。

通过这样的方式，完成对长输油气管道导波模态的分析判断，将其作为检测依据，对焊缝裂纹进行检测。

1.2 焊缝裂纹检测

根据上述的方式对管道的模态信息作出判断后，结合不同的模态结果，对可以实现对于焊缝裂纹的判断。当模态是以对称形式存在时，则表明管道的状态是均匀分布的，而当模态是以非对称的形式存在时，则表明管道的状态分布不均匀，对该类数据进行分析，判断其对应的质点是否因空气引起的。其中，对模态分布情况的计算方式可以表示为：

$$C = \sqrt{\frac{\kappa + 2\eta}{\rho}} \quad (5)$$

其中， C 表示模态分布情况， k 表示 Lamb 强度， ρ 表示 Lamb 波的密度，由于 k 的值与 Lamb 波的属性值直接相关，其计算方式为：

$$\kappa = \frac{(1-\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (6)$$

其中， ν 表示 Lamb 波的泊松比次数， E 表示 Lamb 波的弹性模量。当 C 的输出结果为奇数时，则表明模态为非对称状态，当 C 的输出结果为偶数时，表明模态为对称模态。此时对非对称模态管道导波数据信息 φ 进行计算，判断非对称导波是否是由裂纹引起的，可以表

示为：

$$Z = \frac{\bar{\varphi}}{(\max \varphi - \min \varphi)} \quad (7)$$

其中， Z 表示导波数据信息的异常强度，结合裂纹的属性，当 Z 值大于 1 时，判断该异常是由裂纹引起的，此时其所对应的异常位置即为裂纹的位置信息。其中关于长度和宽度可以是直接通过异常导波的出现实际以及 Lamb 波的扫描速度进行判断，对于裂纹深度的计算，主要通过计算 Z 的值实现的：

$$L = \sqrt{\frac{Z}{v}} \sqrt{\frac{1}{2+2v}} \quad (8)$$

其中， L 表示裂纹的深度信息。

通过这样的方式，完成对长输油气管道焊缝裂纹的检测。

2 试验测试

2.1 试验准备

为了对本文所设计的长输油气管道焊缝内裂纹无损检测方法的应用效果进行分析，进行了试验测试，利用 PAFG3021100 可编程函数发生器作为测试环境的搭建基础，其可以实现对汉宁窗函数的调制，以此调整脉冲信号的频率，以此为基础，本文选择 10 个周期的汉宁窗函数作为测试目标。不仅如此，为了更加直观地观察测试结果，采用 LDGS32500 示波器作为测试结果的显示装置，如图 1 所示。



图 1 示波器装置

图 1 所示，其自带的存储功能可能实现对多个测试数据的同位展示，提高了实验测试的全面性和综合性。考虑到部分微小裂纹检测输出的结果难以精准呈现，在测试环境中增加了前置放大器，其增益为 40dB，因此设置信号分离器，以此提高测试信号的幅值和信噪比，确保可以实现对微小结果的独立分析。在此过程中利用 MATLAB 软件对测试结果进行处理，应用的测试装备包括传感器、碳钢管道焊接材料为 PZT-5200 材质的管道、游标卡尺。

2.2 试验方案

将选用 40 碳钢管道距离激励端 2.0m 实施焊接，考虑

到实际长输管道的指标,本文选用钢管的厚度为4.50mm,外径大小为60.0mm,长度为4.5m。在实施焊接时,焊缝余高设置为3.5mm,焊缝宽度设置为6.5mm。实施的具体焊接工艺为:首先在焊接前将管口设计为I型的坡口构造,并对管道待焊接位置进行打磨,直至显现出金属原本的色泽,焊接两端之间的对口宽度为1.5mm,再使用AWST93150钨极氩弧焊机在高频引弧状态下对其进行焊接处理,其中管道对口之间的填充材料为ATIGJ350钨极棒,直径大小为0.5mm,AWST93150工作时接通的电源为直流电源,电流大小为85A,电压为12V,充入的保护气体为10.0L/min。

为了最大限度保证管道焊口内外壁之间的平整性,焊接时内壁设有0.40mm的错边。将焊接完成的管道作为裂纹构件的基础材料,设置周向裂纹缺陷,对应的截面缺损率分别为2.0%、8.0%、10.0%、13.0%和15.0%。焊缝中间位置的裂纹深度设置为3.0mm,焊缝侧边位置的裂纹深度设置为2.0mm,宽度均为1mm,并利用实验准备部分的装置实现对设置数据进行确认和校正。

2.3 测试结果

在上述基础上,分别采用文献[8]和文献[9]方法对上述裂纹进行检测,其结果如表1所示。

表1 管道焊接裂纹无损检测结果/mm

编号	位置	尺寸(长,宽,高)	文献[8]方法	文献[9]方法	本文方法
1	中间	(23,3,1)	(24,3,1)	(22,3,1)	(23,3,1)
2	中间	(32,3,1)	(30,3,1)	(31,3,1)	(32,3,1)
3	中间	(46,3,1)	(44,3,1)	(45,3,1)	(46,3,1)
4	侧边	(50,3,1)	(50,3,2)	(50,3,2)	(50,3,1)
5	侧边	(35,3,2)	(34,3,1)	(34,3,2)	(35,3,2)

从表1中可以看出,对比三种检测方法,文献[8]方法对于裂纹检测的误差相对较大,最大值为2mm,且在长度和高度上均出现了误差,文献[9]方法的检测结果虽与文献[8]方法相比有一定程度的提升,但是对于裂纹的检测精度还存在一定的不足,最大误差为1mm。本文设计检测方法的结果与实际结果保持一致,表明其

可以实现对裂纹准确检测,且不会受到截面缺损情况的影响。这是由于本文提出方法在对裂纹进行检测时,充分考虑了管道的材质对裂纹发展属性的影响,提升了检测精度。

3 结束语

长输油气管道的稳定性是确保能源清洁和安全运输的重要保障,在定期的检测维修中,焊接是最主要的缺陷修复方式,而焊接最容易出现的问题之一就是裂纹,其作为一种具有发展特征属性的问题,如果不能及时发现,将会造成不可估量的后果。因此本文提出长输油气管道焊缝内裂纹无损检测方法,以此实现了对焊缝裂纹的有效检测。通过本文的研究,以期为相关焊接裂缝安全检测工作的顺利开展提供有价值的参考,最大程度地保障油气运输安全,为我国经济又好又快发展奠定坚实的基础。

参考文献:

- [1] 刘欣,孙旭,张燕明,等.基于有限元的高温再热蒸汽管道焊缝应力优化分析[J].电站系统工程,2021,37(01):1-5+9.
- [2] 张晓峰,严宇,周炜璐,等.核电细晶铁素体钢管道焊缝相控阵超声检测与传统射线检测的技术等效性[J].无损检测,2021,43(03):21-26.
- [3] 许伟.加氢裂化装置TP347管道焊缝裂纹成因分析及返修措施[J].工程技术研究,2021,6(03):190-191.
- [4] 李虎昌,李靖龙,王海峰,等.海底管线用高频焊管焊缝常见缺陷及超声波检测辨识方法[J].焊管,2021,44(02):57-59+65.
- [5] 李亮,黄磊,刘陇,等.X80M钢螺旋埋弧焊管自动焊对接环焊缝出现裂纹的原因[J].机械工程材料,2021,45(11):68-75.
- [6] 毛国均,柴军辉,张子健,等.基于X射线计算机辅助成像技术的带料管道焊缝检测[J].无损检测,2020,42(04):36-41+45.
- [7] 王学林,李慧羽,李宗建,等.基于TOFD的管道焊缝无损检测技术研究[J].油气田地面工程,2020,39(06):78-82.
- [8] 杨烈.关于某炼化一体化项目渣油加氢脱硫装置TP321管道焊缝裂纹问题的初步研究[J].石化技术,2020,27(08):43-44+249.
- [9] 武琳玉,梁伟,沙奇林.油气站场典型设备的焊缝缺陷检测与识别方法[J].中国安全科学学报,2020,30(11):108-113.

作者简介:

梁暖(1987-),男,民族:汉,籍贯:广东省高州市人,职称:技术员,学历:本科,学位:学士,研究方向:管道完整性管理和管道腐蚀防腐。