

基于云平台的管道腐蚀远程在线监测系统

吴文强¹, 伍剑波¹, 张目超¹, 许钊源¹, 何莎², 王仕强², 骆吉庆²

(1. 四川大学 机械工程学院, 成都 610065;

2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司安全环保质量监督检测研究院, 广汉 618300)

摘要: 为实现油气井口装置管道腐蚀情况的远程在线监测, 针对压电超声耦合、传感器安装、信号传输存储分析等关键问题, 提出了基于云平台的管道腐蚀远程在线监测方法。研发了可进行液-固转变的干耦合剂, 保证了良好的耦合效果。针对管道结构与长程监测需求, 研究了压电传感网络布点、定位与固定方法。针对复数信号传输、存储、分析等问题, 提出了基于云平台的 B/S (浏览器/服务器) 架构。最后结合现场实际工况, 开发出了多通道管道腐蚀在线远程监测系统。现场近 1 a 的户外测试表明, 该系统稳定可靠, 各项指标均满足管道腐蚀监测需求, 为油气井口装置的安全生产奠定了智能运维基础。

关键词: 管道腐蚀; 在线监测; 云平台; 干耦合

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2021)03-0049-04

Cloud platform-based online remote monitoring system of pipeline corrosion

WU Wenqiang¹, WU Jianbo¹, ZHANG Muchao¹, XU Zhaoyuan¹, HE Sha², WANG Shiqiang², LUO Jiqing²

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Safety Environment Quality Surveillance and Inspection Research Institute of CNPC Chuanqing Drilling & Exploration Corporation, Guanghan 618300, China)

Abstract: In order to realize the on-line monitoring of pipeline corrosion of oil and gas wellhead equipment, aiming at the key problems such as piezoelectric ultrasonic coupling, sensor installation, signal transmission and storage analysis, a cloud platform-based online monitoring system of pipeline corrosion is proposed. A new kind of couplant is developed for liquid-solid transformation, ensuring the good coupling effect. Then, the method of optimal node, positioning and fixation of sensor is studied. Besides, a B/S (Browser/Server) architecture based on cloud platform is proposed to storage and analyze the corrosion data. Finally, a multi-channel monitoring system of pipeline corrosion is developed. After nearly one year's outdoor test, the results prove that the system is stable and reliable, and all indicators meet the requirements of pipeline corrosion monitoring, laying a foundation for intelligent operation and maintenance of oil and gas wellhead equipment.

Key words: pipeline corrosion; online monitoring; cloud platform; dry coupling

油气井口装置包含大量连接站内设备设施的管道, 其压力变化大、规格样式多、结构复杂, 并担负着高温、高压、易燃、易爆和有毒介质的输送任务, 在油

气站中扮演着重要角色^[1]。随着服役时间的增长, 其管壁因受流体冲刷、电化学腐蚀、化学腐蚀等作用, 会逐步产生管壁减薄、腐蚀、裂纹等缺陷^[2-3], 一旦发生泄漏失效, 轻则影响生产进度并带来经济损失, 重则会造成重大安全生产事故。

目前, 主要通过人工检测方式对油气井口装置的管道腐蚀状况进行定期检测, 此方式无法及时掌握检测间隔期间井口装置的实际腐蚀状况, 并且当管道进行高危的压裂作业时, 将无法采用人工方式进行检测。此外, 腐蚀刮片也是常用的管道腐蚀

收稿日期: 2020-10-20

基金项目: 四川省科技计划项目资助 (2021YFGD039, 2018JY0393, 2020YFG0099)

作者简介: 吴文强 (1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无损检测仪器与系统

通信作者: 伍剑波, wujianbo@scu.edu.cn

监测手段,但其实时性低且无法准确获得关键危险点的腐蚀情况^[4]。因此,亟需对相关管道的腐蚀在线检测开展技术研究,找到一种实时在线的井口装置易损部位腐蚀监测与智能预警方法。

针对上述管道腐蚀监测需求,国内外开展了大量的研究工作。万正军等^[5-6]利用电位矩阵法(FSM)对管道局部典型范围的腐蚀情况进行了有效检测,但该方法需要通过焊接的方式在管道上布置探针,结构复杂,成本较高,而且焊接操作在油气井场具有一定的危险性。艾默生公司针对化工企业高温管道的腐蚀监测需求,研发了基于电磁超声换能器(EMAT)的点式腐蚀监测系统。但 EMAT 相比于压电式超声换能器存在换能效率低、接收信号能量弱、辐射模式宽、回波分辨率低、大功率激发使线圈发热等问题^[7]。康宜华等^[8]针对 EMAT 测厚中大功率脉冲电源和高灵敏度放大器设计困难的问题,提出了使用压电超声仪来完成电磁超声测厚功能的方法,然而,针对非高温管道的大量布点监测需求,电磁超声监测因其高成本而无法实际使用要求。

压电超声测厚法因其稳定可靠、成本低,在管道腐蚀监测方面具有巨大潜力^[9]。笔者提出了使用一种可以进行液-固转变的耐候材料作为耦合剂的压电超声干耦合方法,同时利用温度传感器对管道表面温度进行在线监测,以消除不同温度下管道声速变化对腐蚀监测造成的影响。在此基础上,结合物联网技术、云平台技术等,开发了基于云平台的管道腐蚀在线监测系统,并通过现场应用验证了其具有较强的实用性与较高的推广价值。

1 基于云平台的管道腐蚀在线监测方案

针对管道腐蚀远程监测中的壁厚传感、多通道采集、无线传输、数据存储与分析等关键问题,结合井口装置腐蚀机理与监测实际需求,提出了基于干耦合压电传感的多通道腐蚀在线监测方法,以获取井口装置易腐蚀点多个部位的腐蚀数据,并通过信号处理系统与物联网通信系统接入云平台,进行数据存储与分析。油气钻采装备冲刷腐蚀在线监测系统框图如图 1 所示。

1.1 液-固转变耦合压电传感方法

由于流失和挥发问题,常规液体耦合剂不适用于管道腐蚀监测。另外一方面,针对弧形管道,尤其是小曲率管道,探头与管壁之间的耦合更为困难,因

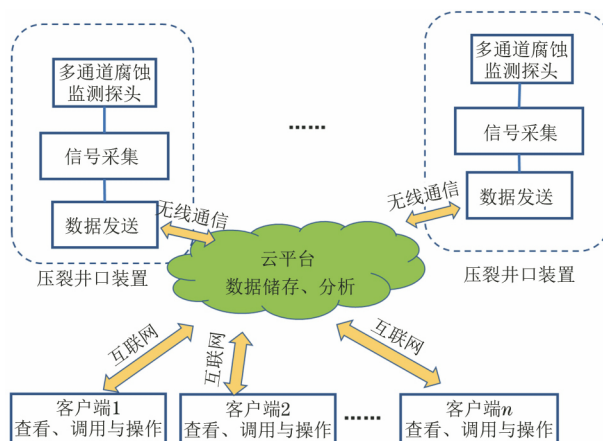


图 1 油气钻采装备冲刷腐蚀在线监测系统框图

此,需要研究一种易安装,不流失的干耦合方法。最佳的耦合剂是安装时为液态,可保证小曲率管道的耦合效果,安装完成后耦合剂变为固态,实现不流失不挥发。同时,耦合剂还需保证在一定的高低温极端环境中声特性却不发生变化。

针对上述需求,研发了一种可进行液-固转变的耐候材料,作为干耦合剂。干耦合剂材料以聚二甲基硅氧烷为主要原料,辅以交联剂、填料、增塑剂、偶联剂、催化剂等混合而成,在室温下与空气中的水蒸气发生反应,达到固化的效果。该干耦合剂材料具有安装施工前为糊状半液态,施工后转化成固态的特点,可轻易地排除耦合间隙的空气,且无需较大的耦合压紧力,同时可耐户外自然老化。

干耦合材料合适的声特性阻抗是保证超声波能够有效进入管道的基础。声波在压电晶片-耦合剂-管道 3 层介质中的传播模型如图 2 所示,设耦合层厚度为 d ,对于单频入射超声波,声强透射系数 T 的计算公式可表示为

$$T = 4 \left[2 + \left(\frac{Z_3}{Z_1} + \frac{Z_1}{Z_3} \right) \cos^2 \left(\frac{2\pi d}{\lambda_2} \right) + \left(\frac{Z_2^2}{Z_1 Z_3} + \frac{Z_1 Z_3}{Z_2^2} \right) \sin^2 \left(\frac{2\pi d}{\lambda_2} \right) \right] \quad (1)$$

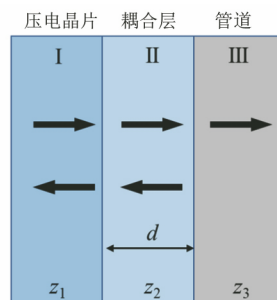


图 2 声波在压电晶片-耦合剂-管道 3 层介质中的传播模型

式中: λ_2 为单频超声波在介质(II)中的波长; Z_1 、 Z_2 、 Z_3 分别为压电晶片、耦合层、被测工件的声特性阻抗。其中,复合材料压电晶片 $Z_1 = 3.3 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,被测钢管 $Z_3 = 46 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

为消除耦合层对测厚数值和精度的影响,回波-回波的超声测厚模式比较适合管道壁厚的检测。理想透射系数 $T \approx 0.25$,根据式(1),计算得到干耦合材料声特性阻抗 Z_2 接近 Z_1 。因此,在研制干耦合材料时,可以以压电晶片声特性阻抗为参考。另外,当 d 远小于波长的时候, d 越小声强损失越小。经试验对比,笔者所使用的耐候干耦合剂与传统耦合剂甘油的耦合效果相当。在数字式超声测厚仪超声波接收电路增益固定为 16.5 dB 的条件下,使用干耦合剂的超声回波脉冲幅值稍低于采用传统耦合剂甘油的超声回波脉冲幅值,信噪比良好,使用不同耦合剂的数字式测厚仪波形显示如图 3 所示。

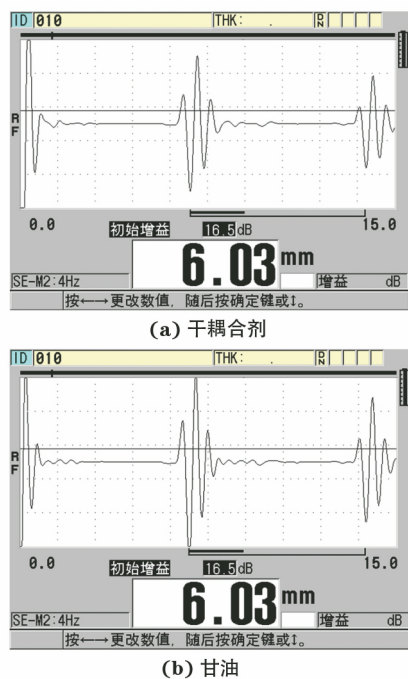


图 3 使用不同耦合剂的超声测厚仪波形显示

1.2 传感网络布局与传感器安装方法

探头安装状态是决定声波是否能够有效进入管道的关键。传感器安装的 3 个关键如下所述。(1) 布点选取。只有获得最易腐蚀的布点位置,才能够全面获得管道的健康状态。针对此问题,一般通过有限元仿真法获得在不同流体速度、颗粒含量、颗粒直径、管道结构等条件下的管道腐蚀速率与关键位置,同时结合实际管道腐蚀检测的工程经验,获得整个装置的最佳布置点。(2) 传感器定位。只有精确的传感器定位,才能使超声波传播路径适应小管道、90°弯管外

侧、三通等结构。(3) 传感器固定。管道腐蚀监测系统需要长期工作,而井口装置在流体作用下会产生震动,压裂井口装置震动更为严重,因此需要对传感器进行固定,避免传感器松动导致耦合不良。

冲刷腐蚀一般在弯管外侧、变径、三通等位置较为严重,文章的侧重点在于提供一种腐蚀监测方法,对上述位置进行监测,管道冲刷腐蚀严重位置如图 4 所示。在传感器定位方面,提出了一种基于磁吸附定位并结合钢扎带固定的传感器安装方法(见图 5)。在设计过程中,需要实现传感器的小型化与轻量化,以满足狭窄空间的安装需求。另外,该方式不需要进行焊接即可固定,保证了油气站场的安全。

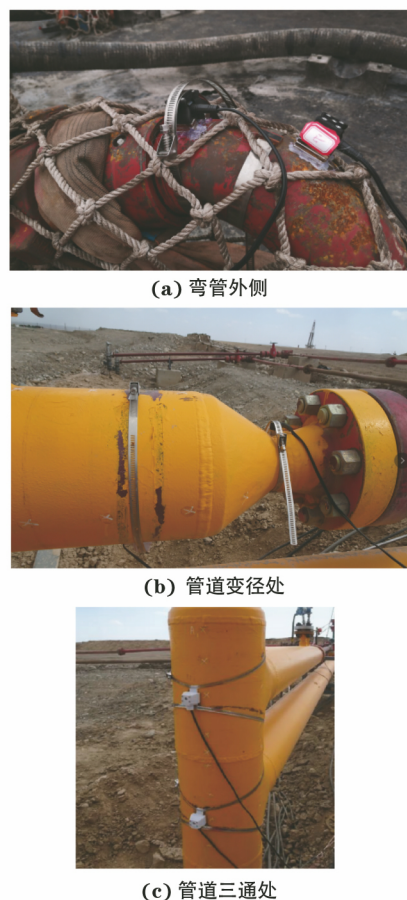


图 4 管道冲刷腐蚀严重位置



图 5 干耦合超声监测探头安装现场

1.3 基于云平台的数据处理与显示方法

系统采用 B/S(浏览器/服务器)架构方式监测数据,利用运营商所搭建的 4G 网络传输至云端,经过数据处理与分析后存储在云平台数据库中。客户可通过网页浏览监测数据并进行互操作。具体来说,就是在云服务器中部署后台软件,对波形脉冲数据进行特征识别并计算厚度,最后将计算得到的厚度转发至客户端网页,供用户随时随地查看壁厚数据。后台软件兼顾壁厚寿命预测功能,可结合历史壁厚数据估算腐蚀速率,并预测管道的剩余寿命,为安全生产作业做出合理的指导;同时,每个通道设定报警阈值,当低于某个安全预设数值时,系统会自动报警并通知用户及时前往现场查验;用户还可根据需要通过客户端网页远程修改现场超声设备的唤醒周期、增益、激励脉宽等参数,以应对壁厚减薄对波形的影响。

2 现场测试

综合上述关键技术,开发了一种基于云平台的管道腐蚀监测系统,具体指标包括:通道数(不大于 80 个);采集频率(最高 $1 \text{次} \cdot \text{h}^{-1}$);工作温度($-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$);壁厚动态监测精度(0.1 mm);壁厚显示分辨率(0.01 mm);软件功能(实时壁厚、腐蚀速率、预警功能、剩余寿命预测等);通信方式(4G 网络);供电方式(电池);探头安装方式(磁吸附、钢扎带等多种形式);适应范围(不同管径、壁厚与形状的井口装置)。



图 6 干耦合超声监测系统工作现场

干耦合超声监测系统工作现场如图 6 所示,将设计的干耦合管道腐蚀监测系统安装在某平台进行试验。将超声激励与采集系统、控制系统、通信模块与电源等放入防爆配电箱内,并连接工装探头与同轴电缆线,通过防爆挠性管引入防爆配电箱内。被测管道外径分别为 76,134,146 mm。根据现场工人的维护经验,将探头布置在采气树出口阀门法

兰连接处,采集频率为 $1 \text{次} \cdot \text{d}^{-1}$,在数据非采集期间设备将处于待机状态,以提高电池寿命。

管道腐蚀监测结果如图 7 所示,截取的是其中 3 个布点处近 3 个月的数据,其中布点 1 厚度由最初的 28.39 mm 减薄到 27.32 mm,布点 2 厚度由 30.63 mm 减薄到 29.96 mm,布点 3 厚度由 37.88 mm 减薄到 37.36 mm。经过现场手持测厚仪验证和数据校验,系统监测结果在误差范围之内。目前管道腐蚀监测系统工作稳定,传感器各项指标均满足要求,干耦合剂性能稳定。值得注意的是,高低温环境对腐蚀检测精度有一定的影响,需要通过测温或者采用标定板的方式进行消除。探头安装过程极为重要,当管道表面存在涂层或表面纹路时,需先进行清理,再布置探头,否则会影响信号强度与信噪比。

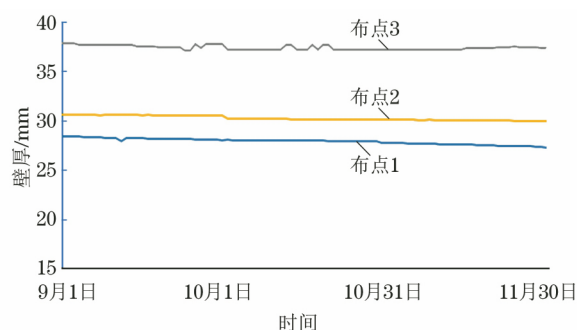


图 7 管道腐蚀监测结果

3 结论

(1) 使用液-固转变耦合剂可保证长期稳定、清洁的耦合效果,使压电传感器在耦合条件苛刻的环境下依然能够可靠地工作,为长期在线监测提供了思路。

(2) 基于物联网与云平台的 B/S 监测系统架构,可为用户提供一种便捷、可靠、灵活的监测数据管理与分析应用方案。

(3) 由于液-固转变耦合剂性能的限制,系统的服役温度应为 $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,笔者将针对更高温度的监测需求,开展高温压电传感的研究工作。

参考文献:

- [1] 金驶,王定亚.井口装置技术研究及发展建议[J].石油矿场机械,2014,43(1):14-16.
- [2] 张宝,王仕强,彭建云,等.在役高压井口装置检测技术应用[J].北京石油化工学院学报,2018,26(4):46-50.
- [3] 曾莉.管道弯管段冲刷腐蚀机理与流体动力学特征[D].武汉:华中科技大学,2017.

(下转第 61 页)

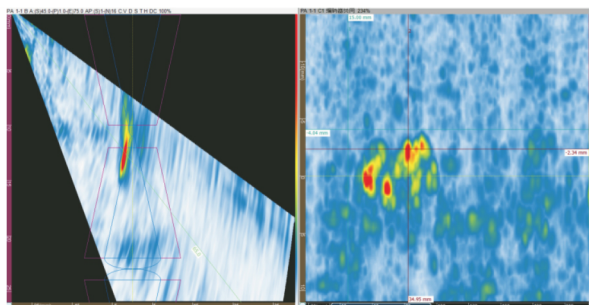


图 17 $\phi 70\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 小径管曲面阵列根部裂纹型缺陷成像

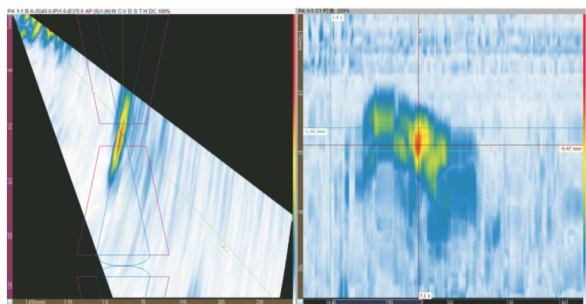


图 18 $\phi 70\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 小径管平面阵列根部裂纹型缺陷成像

4.2 当量对比

不同换能器对相同缺陷的当量如表 2 所示。

表 2 不同换能器对相同缺陷的当量

小径管 直径/mm	平面阵列 缺陷当量	曲面阵列 缺陷当量	缺陷性质
51	SL+1.72 dB	SL+10.3 dB	气孔
57	SL+3.97 dB	SL+9.05 dB	夹钨
60	SL+5.93 dB	SL+11.32 dB	夹渣
70	SL+5.58 dB	SL+8.48 dB	根部裂纹

由缺陷的相控阵成像对比,可以明显地看出曲面阵列对缺陷的成像有较高的信噪比,图像干净,缺陷边缘清晰,而平面阵列缺陷成像信噪比较低,缺陷

边缘模糊,成像效果较差,会对缺陷性质的判断产生不良影响。

由不同换能器检测出的相同缺陷的当量对比可知,相同的灵敏度下,平面阵列对小径管缺陷检出的当量较低,会影响缺陷性质判断,对质量等级的评定产生影响,甚至产生误判。

平面阵列换能器检测曲面工件,缺陷检出率很低,通过提高增益的方法提高检测灵敏度时,噪声信号很大,会影响检测分析。曲面阵列检测曲面工件,虽然楔块曲率不能与小径管曲率相同,但是由于耦合面大大增大,加上晶片的自聚焦效应,灵敏度很高,能有效地检出小径管中的缺陷。

5 结论

分析了平面阵列与曲面阵列对缺陷的成像机制,并进行了成像效果对比试验,得出以下结论。

(1) 采用曲面阵列检测曲面工件,具有良好的耦合效果和自聚焦效应,检测灵敏度较高,有更高的检出率和更好的检测效果。

(2) 采用平面阵列检测曲面工件,为提高检测灵敏度和缺陷检出率,应对灵敏度进行补偿,补偿的大小应大于 6 dB。

参考文献:

- [1] 李刚.超声相控阵检测扇形扫描成像研究[D].西安:西安科技大学,2019.
- [2] 王雪,薛岩,周广言,等.管道环焊缝的相控阵超声检测[J].无损检测,2020,42(5):75-78.
- [3] 彭小冲,费跃农.相控阵超声接收动态聚焦算法及其物理实现[J].应用声学,2014,33(5):453-46.
- [4] 田国良,侯金刚,蔚道祥,等.相控阵超声检测扇形扫描的两种成像方式比较[J].无损检测,2019,41(12):57-60.

(上接第 52 页)

- [4] 纪大伟.管道内壁腐蚀监测技术研究[D].大连:大连理工大学,2010.
- [5] 万正军,甘芳吉,罗航,等.基于电位矩阵法的金属管道腐蚀剩余厚度监测研究[J].四川大学学报(工程科学版),2013,45(4):97-102.
- [6] 万正军,廖俊必,王裕康,等.基于电位阵列的金属管道坑蚀监测研究[J].仪器仪表学报,2011,32(1):19-25.

- [7] MIRKHANI K,CHAGGARES C,MASTERSON C,et al. Optimal design of EMAT transmitters[J].NDT&E International, 2004, 37(3): 181-193.
- [8] 康宜华,涂军,杨芸,等.一种简便的电磁超声测厚实现方法探究[J].自动化仪表,2012,33(10):83-86.
- [9] 刘姚瑶.井口高压管汇超声测厚方法与系统[D].武汉:华中科技大学,2013.