

井控管汇完整性检测技术发展综述

魏攀 阚凯 郭士尉 吴志强 高阳 路晓峰

长城钻探工程公司井下作业公司, 中国·辽宁 盘锦 124000

摘要: 在钻井作业过程中, 井控管汇是应急处置井筒内压力不平衡, 保障井口安全的关键装备之一, 其在作业中不可避免的受到酸性介质的腐蚀以及高速多相流体的冲蚀影响。为此, 本文整理了井控管汇检测技术的发展历史, 比较了超声、漏磁、磁记忆等主流技术在管汇检测应用中的技术优缺点和发展路径。研究表明无损检测技术在应用到井场管汇完整性管理领域中, 主要存在以下问题: (1) 检测——监测转换研究不足, 难以实现长期稳定的监测需要; (2) 现场操作环境恶劣, 检测技术环境适应性提升改进研究不足; 管汇完整性检测技术未来发展方向应重点关注检测技术向监测方案的转变, 解决现场环境对检测技术方案的影响, 提升技术易用性。

关键词: 井控管汇; 检测技术; 磁记忆; 超声波; 完整性

Comprehensive Review of Well Control Manifold Integrity Monitoring and Detection Technology Development

Wei Pan, Kan Kai, Guo Shiwei, Wu Zhiqiang, Gao Yang, Lu Xiaofeng

GWDC DOWNHOLE SERVICE COMPANY, China Liaoning Panjin 124000

Abstract: During drilling operations, well control manifolds are critical components for managing downhole pressure imbalances and ensuring wellhead safety. However, they are inevitably subjected to corrosion from acidic media and erosion from high-speed multiphase flows. This paper reviews the development history of inspection and monitoring technologies for well control manifolds, comparing the technical pros, cons, and development paths of mainstream methods such as ultrasonic, magnetic flux leakage (MFL), and magnetic memory testing (MMT). Research findings indicate that the application of non-destructive testing (NDT) in the integrity management of wellsite manifolds faces two primary challenges: (1) insufficient research on the transition from "inspection" to "monitoring," making it difficult to meet long-term stable monitoring needs; and (2) limited improvements in the environmental adaptability of these technologies under harsh field conditions. Future development should focus on shifting from inspection techniques toward integrated monitoring solutions, mitigating environmental impacts on these systems, and enhancing technological usability.

Keywords: Well control manifold; Inspection and monitoring technology; Magnetic memory; Ultrasonic; Integrity

0 引言

随着现代钻井作业向着深层深地进发, 井控管汇等井口设备也在面临逐步增高的超高压环境。同时伴随着腐蚀性气液混合物的输送, 压井管汇内壁极易被冲蚀造成壁厚减薄甚至发生刺漏、爆裂导致严重的生产事故并造成较大的经济损失, 对生产人员的生命安全造成巨大威胁。尤其是一系列重大的海上和陆地井喷事故(如墨西哥湾的井喷事故)更促使全球监管机构和行业组织加强规范。

早期检测井控管汇性能状况依靠试压法, 即通过水压或气压试验, 检验管汇的承压能力和密封性。这种方法无法实时监测在役管汇的损伤状态, 难以确保压井管汇使用的安全性^[1]。同时试压法无法检测出内部缺陷且精度较低比较依赖人员经验。随着工业的需求与科学理论的进步, 以漏磁、超声、射线为代表的常规无损检测技术被应用到

井控管汇完整性管理中, 并得到持续发展以保障在役井控管汇的安全。近年来, 中国石油大学(北京)樊建春团队将金属磁记忆检测运用在井控管汇现场检测上, 为井控管汇检测提出了新的思路^[2]。

对比井控管汇完整性检测技术的应用现状, 本文主要围绕现场应用效果较好的磁记忆、超声和漏磁检测技术, 研究了井控管汇检测技术的现状及发展趋势。

1 井控压井管汇检测技术发展现状

1.1 井控压井管汇金属磁记忆检测技术发展现状

金属磁记忆检测方法对于管道早期损伤具有独特的敏感性具有低功耗、高灵敏度、非接触、无磁化和对管道清管次数要求低等优点。其主要原理是通过对试件自有漏磁场信息的检测与分析对其是否存在应力集中及缺陷进行评价进而避免由于意外疲劳损伤而引发的恶性事故^[3]。

1997年Dubov教授首次提出了金属磁记忆检测法,并说明采用金属磁记忆方法诊断设备时,可以使用IMNM-1F型磁强计对受检部件表面的应力集中区进行测量^[4];2002年Kuleev Vladimir和Dubov教授考虑弯曲钢管中的弹性应力分布,对无缺陷钢管表面法向杂散磁场分量进行了计算,得出了所产生的杂散磁场的节线分布^[5];2013年Dubov和Kolokolnikov, Sergey教授提出金属磁记忆法可以应用在钢管及焊接接头样件损伤发展在线监测中,在实验上证实了可通过金属磁记忆参数评估设备寿命^[6]。

中国在1999年10月于广东汕头召开第七届全国无损检测学术年会暨国际学术研讨会;同年,东北电力科学研究院从俄罗斯动力诊断公司购置了TSC-1M-4型金属磁记忆应力检测仪,在电站锅炉管道中开始了中国首例金属磁记忆检测^[7];天津大学的李午申、邸新杰等人率先将金属磁记忆方法用于油气管道焊接裂纹的检测,利用小波分析技术,开发了磁记忆信号特征分析系统,初步实现了焊接裂纹的定量化检测^[8];清华大学的李路明、黄松龄等人观测了不同应力状态下的磁畴运动规律,探讨了利用地磁场检测表面缺陷的可行性问题^[9];中国石油大学(北京)的孙秉才、樊建春利用实验室自主研发的高压管汇冲蚀磨损试验机及磁记忆在线检测装置,开展了高压管汇材料30CrMo的冲蚀磨损磁记忆在线检测试验研究,能够较好地识别高压管汇材料的冲蚀磨损状态^[10];实验装置如图1^[11]。

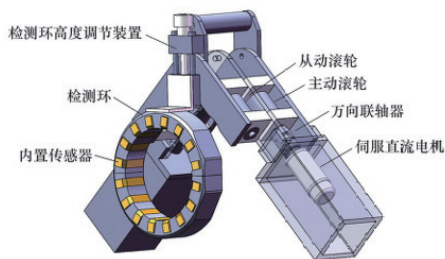


图1 装置原理图

1.2 节流压井管汇漏磁检测技术发展现状

漏磁检测是由磁粉检测演变而来针对高磁性铁磁性材料如钢管、钢棒的一种无损检测技术。其原理是有缺陷的铁磁性材料在被施加磁场时磁力线会在缺陷处露出,通过磁敏传感器可以对其进行检测。

1974年Rogers, Weldon M.提出一种名为LINALOG的无损检测工具已研发成功,该工具可随管内介质流动通过管道,用于检测点蚀、氢鼓包或应力腐蚀裂纹^[12]。1981年Holm, William K.通过一对内置环形磁极在管壁内产生纵向磁场,当管壁厚度减薄时,部分磁通会通过空气路径

从管壁“泄漏”出去形成可被检测的漏磁场^[13,14]。1983年Atherton, D.L.提出了一种从钢管外壁(远侧)异常处获取强漏磁信号的两步检测法,这些由外壁腐蚀形成的应力阴影所引发的近侧残余磁场异常,最终可通过检测设备被有效识别^[15]。1987年Atherton, D.L.又通过对漏磁异常信号有限元计算得出,腐蚀坑获得的信号可能需要磁导率发生高达两倍的变化才能有效观测^[16]。Li, Yong、Wilson, John等人提出三维磁场测量方法,特别适用于几何形态不规则的缺陷检测^[17]。Shen, Y.等人采用卷积神经网络,基于漏磁信号预测钢制管道腐蚀缺陷的尺寸与位置。利用数值生成的漏磁信号训练并验证CNN模型对腐蚀缺陷尺寸与位置的预测能力^[18]。

国内对于漏磁技术的研究发展也比较迅速。黄作英等采用三维有限元法分析漏磁信号,探讨了针对静磁场漏磁问题的广义势函数表述方法^[19]。冯健等建立了系统的数学模型并基于有限元理论计算了管道漏磁检测中空间各点的磁通密度^[20]。高一鸣、樊俊伟等人提出了一种基于平面线圈的交流漏磁检测方法。该系统能有效检测压裂管汇内壁的轴向裂纹和周向裂纹^[21]。Jinhai Liu、Zhitao Wen开发了一种可部署于工业现场的在线管道漏磁焊缝缺陷检测方法,在相近计算成本下,LRNet模型将检测准确率提升约10%,显著提升了其在工业个人计算机上的部署可行性^[22]。

1.3 超声检测发展现状

超声检测(UT)可分为主动检测和被动检测两类。主动检测即由超声探头发射超声波,通常称为超声无损检测技术;在被动检测技术中,超声波是被测试件受载荷时自发而出的,有时又称为声发射技术(AE)^[23]。超声波检测法的基本原理是通过激发电子装置使之产生超声波,利用被检测材料及材料中缺陷的声学差异,根据观察反射波信号的反射情况及穿透时间来确定被检测材料中的缺陷^[24]。如图2所示。

1997年Alleyne, D.N.和Cawley, P.在钢质管道中,L(0,2)兰姆波模式成功实现了近50米的传播,同时还开发了一种能实现L(0,2)模式单向传播的激励与接收系统^[25];Rose, Johnathon L.和Zhao, XL提出一种新的弯曲模态调谐技术,通过放大缺陷信号并提升信噪比来实现弯头区域缺陷检测^[26];Murayama, Riichi等人开发一种基于电磁超声换能器的超声检测机器人,该设备无需耦合介质即可实现对管道环向部位的检测^[27];Kim, J等人提出一种多级自适应噪声消除方法,用于增强超声信号中的缺陷检测能力,整体基于自适应最小均方误差滤波器^[28];Wei, L.等人提出一

表1 三种检测技术对比表

检测维度	金属磁记忆检测	漏磁检测	超声检测
操作便捷性	支持实时在线、非接触测量；设备轻便灵活。	非接触式、检测速度快；可穿透非磁性包覆层。	通常需要耦合剂或特定接触。
准备工作	无需表面预处理，无需额外磁化源。	需要外部磁化，但可穿透层作业。	表面平整度要求较高。
几何适应性	较强，设备轻便。	在弯头、三通等几何不连续区域有磁化盲区。	形状不规则或小尺寸工件检测难度大。
缺陷敏感度	对应力集中引起的早期损伤敏感。	对轴向裂纹等细微损伤敏感度有限。	对内部缺陷、深度定位非常敏感。
能否监测	现场应用仍处于检测阶段	局限于检测	现场应用仍处于检测阶段
核心优势	早期损伤诊断能力强；操作最为灵活，不依赖外加磁场。	全覆盖检测，速度快；擅长体积型缺陷（如减薄）量化。	穿透力极强（厚件检测）；定位非常精准，灵敏度高。

种基于部分小波变换的微弱超声信号识别方法。可有效去除噪声干扰部分，仅保留与超声回波相关的信号成分^[29]。Michael J.Quarry 和 Joseph L.Rose 通过线性阵列梳状换能器实现了多模态检测方案，利用所激发出的 L(0,3) 模态导波成功地检测出了管道 3×3 排列的焊孔^[30]。

中国于 1989 年首次从德国进口一台超声波检测装置，孟涛、何仁洋根据油田作业情况说明了导波技术对于检测压力管汇腐蚀的有效性^[31]；齐瑞才就单一检测模态的选择通过分析说明了管道的周向裂纹、轴向裂纹以及点蚀缺陷对缺陷回波所产生的影响^[32]。

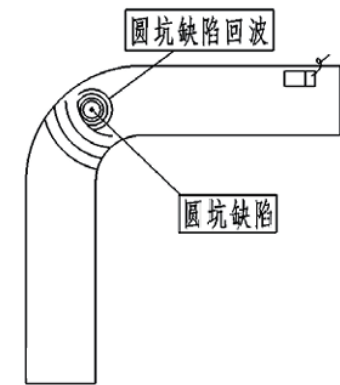


图2 超声波遇管汇缺陷时的传播图^[24]

2 井控管汇完整性检测技术发展方向

金属磁记忆、漏磁、超声检测三种检测技术皆有其独特的技术优势及尚待解决的关键问题，相关技术优缺点对比如表 1 所示。

从表 1 的对比可以发现：（1）三种技术的发展现状均停留在检测技术阶段，难以满足在役井控管汇完整性管理对实时监测的需求。为了适应在役井控管汇监测的需要，超声检测技术应向阵列式或相控阵技术方向发展，重点研究低成本、大面积超声阵列及其融合后处理技术；而金属磁记忆传感器的低成本优势使得其阵列化监测布置在实现难度上优于超声检测技术，应重点研究阵列化磁记忆监测数据的成像融合技术及其与缺陷参数对应关系的物理解释。

（2）三种技术在现场环境适应性上存在区别，目前金属磁记忆技术由于磁传感探头的芯片化设计，其现场环境适应性最好；对于超声检测技术应重点研究降低耦合剂、表面洁净度等现场环境因素要求的技术方案，才能更好地跨越实验室研究到现场应用的壁垒。综上所述，现阶段磁记忆在监测适用性方面优点更突出，且具有无需停产、无需清理表面、无需耦合的优势，是目前解决井控管汇完整性监测需求的最具潜力的技术方案；而超声检测技术突破环境适用性和成本限制后，是磁记忆检测技术方案具有挑战性的替代方案。这两种技术方案都是井控管汇完整性监测的主要发展方向。

3 结语

本文简述了三种针对井控管汇监测的无损检测技术的发现以及这三种技术近几十年来的发展创新。未来对于井控管汇的监测方面研究着重点在于检测向监测的转变，这就需要使当前已有的无损检测技术能够突破原来单一小范围检测的局限，向全面监测实时监测发展甚至能够提前预测缺陷产生方向发展。研究表明，金属磁记忆和超声技术都是未来井控管汇监测的重要研究方向，而金属磁记忆因其操作简便、无需耦合剂和表面清洁等优势是未来较有潜力的技术方案。

参考文献：

[1] 孙秉才，樊建春，温东等. 高压管汇冲蚀磨损磁记忆检测试验研究[J]. 石油机械，2014,42(06):65-68.

[2] 宋生奎，官敬，才建等. 油气管道内检测技术研究进展[J]. 石油工程建设，2005,(02):10-14+2.

[3] 张兰，张来斌，樊建春等. 基于磁记忆方法的油气管道内检测试验研究[J]. 石油机械，2010,38(05):1-4+103.

[4] Dubov, A.A. A study of metal properties using the method of magnetic memory. Met Sci Heat Treat 39, 401 - 405 (1997).

[5] Kuleev, V.G., Dubov, A.A., Lopatin, V.V. Nodal

Lines of Normal Components of Scattered Fields on Surfaces of Boiler Pipelines with Arbitrary Positions of Flawed Areas with Respect to External Magnetic Field Perpendicular to Their Axes. *Russian Journal of Nondestructive Testing* 38, 1 - 9 (2002).

[6] Dubov, A., Kolokolnikov, S. The metal magnetic memory method application for online monitoring of damage development in steel pipes and welded joints specimens. *Weld World* 57, 123 - 136 (2013).

[7] 任吉林, 林俊明, 任文坚等. 金属磁记忆检测技术研究现状与发展前景[J]. *无损检测*, 2012,34(04):3-11.

[8] 邱新杰, 李午申. 油气管道焊接裂纹金属磁记忆定量分析系统[J]. *电焊机*, 2008,(09):94-96.

[9] 黄松岭, 李路明, 汪来富等. 用金属磁记忆方法检测测应力分布[J]. *无损检测*, 2002,(05):212-214.

[10] 孙秉才, 樊建春, 温东等. 高压管汇冲蚀磨损磁记忆检测试验研究[J]. *石油机械*, 2014,42(06):65-68.

[11] 蒋浩, 张来斌, 樊建春. 基于磁记忆检测方法的便携式钻杆检测设备[J]. *石油机械*, 2025,53(01):119-124.

[12] Rogers, W. M. (1974). NEW NDT METHODS FOR IN-PLACE INSPECTION OF PIPELINES. 471 - 479.

[13] Holm, W. K. (1981). MAGNETIC INSTRUMENTATION PIG HELPS NGPL INSPECT PIPELINES FOR POTENTIAL LEAKS. *Oil and Gas Journal*, 79(22), 123 - 124, 126, 128.

[14] Holm, W. K. (1980). PIPELINE INSPECTION BY MAGNETIC INSTRUMENTATION PIG. *IEEE Conference Record of Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*.

[15] Atherton, D. L. (1983). STRESS-SHADOW MAGNETIC INSPECTION TECHNIQUE FOR FAR-SIDE ANOMALIES IN STEEL PIPE. *NDT International*, 16(3), 145 - 149.

[16] Atherton, D. L., Czura, W. (1987). FINITE ELEMENT CALCULATIONS ON THE EFFECTS OF PERMEABILITY VARIATION ON MAGNETIC FLUX LEAKAGE SIGNALS. *NDT International*, 20(4), 239 - 241.

[17] Li, Y., Wilson, J., Tian, G. Y. (2007). Experiment and simulation study of 3D magnetic field sensing for magnetic flux leakage defect characterisation. *NDT and E International*, 40(2), 179 - 184.

[18] Shen, Y., Zhou, W. (2024). Development of a convolutional neural network model to predict the size and location of corrosion defects on pipelines based on magnetic flux leakage signals. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 207.

[19] Zuoying, H., Peiwen, Q., Liang, C. (2006). 3D FEM analysis in magnetic flux leakage method. *NDT and E International*, 39(1), 61 - 66.

[20] Feng, J., Zhang, J., Lu, S., et al. (2013). Three-axis magnetic flux leakage in-line inspection simulation based on finite-element analysis. *Chinese Physics B*, 22(1), 6.

[21] 高一鸣, 樊俊伟, 康宜华等. 压裂管汇交流漏磁内检测方法 with 系统[J]. *仪表技术与传感器*, 2025,(06):54-61.

[22] J. Liu, Z. Wen, X. Shen, F. et al. "Online Pipeline Weld Defect Detection for Magnetic Flux Leakage Inspection System via Lightweight Rotated Network," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 72, no. 7, pp. 7573-7584, July 2025.

[23] 宋生奎, 官敬, 才建等. 油气管道内检测技术研究进展[J]. *石油工程建设*, 2005,(02):10-14+2.

[24] 张永虎. 高压管汇冲蚀缺陷的超声波检测[D]. 西安石油大学, 2015.

[25] Alleyne, D. N., Cawley, P. (1997). Long range propagation of lamb waves in chemical plant pipework. *Materials Evaluation*, 55(4), 504 - 508.

[26] Rose, J. L., Zhao, X. (2001). Flexural Mode Tuning for Pipe Elbow Testing. *Materials Evaluation*, 59(5), 621 - 624.

[27] Murayama, R., Akizuki, Y. (2022). Study of magnetic pole materials for static magnetic field and dynamic magnetic field that compose an electromagnetic acoustic transducer for Lamb waves using the magnetostriction effect. *Sensors and Actuators A: Physical*, 333.

[28] Kim, J., Udpa, L., Udpa, S. (2001). Multi-stage adaptive noise cancellation for ultrasonic NDE. *NDT and E International*, 34(5), 319 - 328.

[29] Wei, L., Liang, C. (2009). Ultrasonic flaw detection using partial wavelet in offshore pipeline non-destructive evaluation. *Journal of Instrumentation*, 4(12).

[30] Quarry, M. J., Rose, J. L. (1999). Multimode guided wave inspection of piping using comb transducers. *Materials Evaluation*, 57(10), 1089 - 1090.

[31] 孟涛, 何仁洋, 肖勇等. 超声导波技术在压力管道腐蚀检测的应用研究[J]. 管道技术与设备, 2010,(06):42-44.

[32] 齐瑞才. 压力管道无损检测的超声导波法[D]. 大连理工大学, 2006.

作者简介: 魏攀(1983.04.12), 男, 中国江苏省沛县人, 本科, 高级工程师, 供职于长城钻探工程公司井下作业公司, 从事油气田开发。