

管道泄漏模拟与智能化监测技术研究

周 乐 (中海福建天然气有限责任公司, 福建 莆田 351100)

摘 要: 在能源输送与工业生产中, 管道安全至关重要。管道泄漏会引发严重后果。本文先深入研究管道泄漏机理, 剖析其主要类型、特点、流体力学特性及影响因素; 分析基于数学模型、CFD 的泄漏模拟方法、泄漏实验模拟; 探讨智能化监测技术的应用, 如大数据分析、机器学习、无人机巡检、GIS 与数字孪生技术融合等。这些研究为保障管道安全运行提供理论支撑助力及时发现与处理泄漏问题, 对于提升管道系统管理水平意义重大。

关键词: 管道泄漏; 泄漏机理; 模拟方法; 智能化监测

中图分类号: TE973.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 013-0134-03

Research on pipeline leakage simulation and intelligent monitoring technology

Zhou Le (China Shipping Fujian Natural Gas Co., LTD, Putian Fujian 351100, China)

Abstract: In the energy transmission and industrial production, pipeline safety is very important. Leaking pipes can have serious consequences. In this paper, the mechanism of pipeline leakage is studied deeply, and its main types, characteristics, hydrodynamic characteristics and influencing factors are analyzed. Analysis of leakage simulation method based on mathematical model, CFD, leakage experiment simulation; Discuss the application of intelligent monitoring technology, such as big data analysis, machine learning, drone inspection, GIS and digital twin technology integration. These studies provide theoretical support to ensure the safe operation of pipelines, timely detection and treatment of leakage problems, and are of great significance to improve the management level of pipeline system.

Key words: pipeline leakage; Leakage mechanism; Simulation method; Intelligent monitoring

管道作为能源输送与工业生产的关键基础设施, 其安全运行至关重要。管道泄漏不仅可能导致资源浪费, 还会引发环境污染、安全事故等严重后果。随着科技发展对管道泄漏的研究从机理剖析深入到模拟与监测技术创新的领域。本文将系统阐述管道泄漏机理、模拟方法及智能化监测技术旨在为保障管道安全提供有力支撑。

1 管道泄漏机理及影响因素

1.1 管道泄漏的主要类型与特点

管道泄漏呈现多种类型各具独特特征, 腐蚀泄漏是常见类型, 因管道长期暴露于输送介质与外界环境中, 历经化学与电化学腐蚀管壁逐渐变薄直至穿孔泄漏。其腐蚀进程具有隐蔽性初期泄漏微弱, 随着腐蚀加剧泄漏量逐步上升。机械损伤泄漏源于外力侵袭, 如施工碰撞、重物挤压等致使管道破损, 这类泄漏突发且泄漏量大易引发严重安全事故。应力开裂泄漏则因管道内部压力、温度变化及材料固有应力等因素, 致使管道萌生裂纹并不断扩展最终泄漏, 在泄漏前可能出现微小裂纹等前期征兆一旦泄漏发展迅猛。

1.2 泄漏的流体力学特性分析

当管道发生泄漏流体自泄漏口涌出, 其流动状态复杂多变。依据伯努利方程在泄漏进程中, 流体的压力能、动能和势能相互转换。在泄漏口周边, 流体流

速急剧攀升压力快速下降。泄漏流体还会形成射流, 射流的形态、射程等与泄漏口尺寸、管道内压力及流体性质紧密相关。对于低粘性流体, 射流呈细长状射程较远; 而高粘性流体的射流则较为分散, 射程相对较短。探究这些流体力学特性, 有助于精准模拟泄漏过程为泄漏监测与控制筑牢理论根基。

1.3 影响管道泄漏的主要因素 (见表 1)

表 1 管道泄漏类型及影响因素

泄漏类型	主要特点	影响因素
腐蚀泄漏	管壁变薄, 逐渐穿孔	介质腐蚀性、管道材质、环境
机械损伤泄漏	受外力破坏, 突发性强	施工撞击、重物挤压
应力开裂泄漏	裂纹扩展, 泄漏加剧	压力波动、温度变化
流体特性	低粘性流体射程远, 高粘性射程短	泄漏口大小、管道压力
外部环境影响	可能加速腐蚀或直接损坏管道	土壤性质、自然灾害

管道自身材质对于泄漏影响重大, 存在不同材质管道在耐腐蚀性、强度等性能上的显著差异, 其中耐腐蚀性强的材质可有效降低泄漏风险; 输送介质性质同样关键, 具有腐蚀性、高压、高温特性的介质会加速管道老化与损坏; 再者管道运行时压力与温度的波动也会对其产生不良影响, 过高压力易致管道破裂, 大幅温度变化则会引发热应力致裂纹; 外界环境因素

亦不容忽视，有土壤酸碱度、含水量以及微生物等对埋地管道造成腐蚀，还有地震、洪水等自然灾害可能直接损毁管道引发泄漏事故。

2 管道泄漏模拟方法

2.1 基于数学模型的泄漏模拟

基于数学模型的泄漏模拟，借助对物理定律的数学抽象构建方程体系以精准刻画管道泄漏进程。此方法以质量、动量与能量守恒定律为基石，通过联立偏微分方程，求解管道内流体在泄漏期间压力、流速等关键参数随时间与空间的动态演变。在实际运用中依据管道、流体以及泄漏口的具体参数作为输入，如管径、壁厚、流体密度、粘度、泄漏口尺寸与位置等，能够计算出泄漏发生后管道内部压力的分布状态为泄漏监测和应急处置提供理论支撑。

2.2 基于计算流体力学（CFD）的泄漏模拟

CFD 方法运用数值计算手段求解流体力学控制方程，能以直观的方式展现泄漏流体的复杂流动现象。该方法充分考量管道的几何构型、泄漏口的形状特征以及流体与周围环境间的相互作用等多元因素。具体操作时借助专业 CFD 软件构建管道及周边环境的三维模型，对模型进行精细网格划分，准确设定流体物理性质、管道内压力以及泄漏口边界条件等参数。模拟输出结果能够清晰呈现流体泄漏后的扩散轨迹、浓度分布等详细信息，为制定科学合理的应急决策提供重要依据。

2.3 泄漏实验模拟及试验台架研究

表 2 管道泄漏模拟方法对比简表

模拟方法	主要特点	优点	适用场景
数学模型模拟	通过数学方程描述泄漏过程	理论精确、计算速度快	适用于泄漏监测与应急分析
CFD（计算流体力学）模拟	采用数值计算展现流体泄漏行为	直观可视化、考虑环境因素	适用于泄漏扩散预测与流动分析
实验模拟与试验台架研究	真实搭建管道泄漏实验系统	结果直观、数据可靠	适用于验证模拟方法、优化监测技术

泄漏实验模拟在实验室环境下，搭建与实际管道高度相似的试验台架通过人为制造可控泄漏场景，深入探究泄漏特性并验证模拟方法的可靠性。试验台架一般涵盖管道系统、流体供应系统、泄漏模拟装置以及完备的监测系统。在实验进程中利用压力传感器、流量传感器以及气体浓度检测仪等精密设备，实时采集管道内压力、流量以及泄漏流体浓度的变化数据。通过开展大量不同工况的实验，归纳总结出泄漏量与管道内压力、泄漏口大小等因素的内在关联规律。将

实验获取的数据与数学模型、CFD 模拟结果进行对比分析，进一步完善和优化模拟方法为实际管道泄漏监测技术的研发奠定坚实的实验基础。

3 智能化监测技术的应用与发展

3.1 基于大数据分析的智能泄漏监测

基于大数据分析的智能泄漏监测是通过汇聚海量的管道运行数据，这些数据涵盖了管道压力、流量、温度等多维度的历史记录和实时监测数值。借助先进的数据挖掘技术从繁杂的数据中提取有价值的信息，并运用机器学习算法构建精准的管道运行状态模型。该模型能够敏锐地捕捉到数据的异常波动，一旦数据偏离正常运行的模式，便可快速判断管道是否发生泄漏，为管道安全运行提供早期预警。

例如某跨国能源公司旗下拥有庞大的输油管道网络，管道纵横交错绵延数万公里。为了保障管道的安全运行该公司构建了大数据分析平台，首先收集旗下所有管道过去十年间的运行数据，数据量高达数 PB。接着利用专业的数据清洗工具，去除数据中的噪声和错误值对数据进行标准化预处理。随后采用聚类分析算法，将正常运行状态下的数据聚为一类，以此为基准。再运用神经网络算法，对预处理后的数据进行深度训练构建出高度灵敏的管道泄漏监测模型。该模型投入使用后，在一次日常监测中实时数据显示某段位于偏远地区的管道压力出现了极其细微的下降趋势，流量也有轻微波动这些变化通过传统监测手段几乎难以察觉。但大数据监测模型迅速捕捉到这一异常，经过快速分析判断及时发出泄漏预警。维修人员迅速响应，赶赴现场后发现管道因长期受到土壤中微量腐蚀性物质的侵蚀，管壁出现一个微小的穿孔正缓慢泄漏原油。由于预警及时，成功避免原油大量泄漏对周边环境造成的严重污染以及巨额的经济损失。

3.2 机器学习与人工智能在管道故障检测中的应用

机器学习算法在管道故障检测领域发挥着关键作用，以支持向量机（SVM）、决策树等为代表的机器学习算法，通过收集大量包含泄漏故障以及诸如堵塞、阀门故障等其他常见管道故障的数据样本对模型进行反复训练。在训练过程中模型不断学习不同故障类型对应的特征，从而具备准确识别各类管道故障的能力。而人工智能中的深度学习技术，如卷积神经网络（CNN），在处理管道泄漏图像和视频数据方面展现出独特优势。它能够对安装在管道沿线的摄像头采集到的图像进行智能分析，快速检测出管道表面的异常情况及时发现潜在的泄漏风险。

某大型城市的供水管道系统规模庞大，为了保障城市居民的用水安全引入了基于机器学习的管道故障

检测系统。该城市的供水管道数据中心收集了近五年内各种管道故障案例的数据,包括不同位置、不同材质管道发生泄漏、堵塞等故障时的压力、流量、水质等参数变化情况,以及对应的维修记录和故障类型标注,形成一个丰富的数据样本库。利用这些数据采用 SVM 算法进行训练,将管道压力、流量、水质酸碱度、电导率等多种参数作为输入特征。经过长达数月的训练和优化,模型对管道泄漏故障的识别准确率稳定在 95% 以上。在实际应用中,一次深夜时段位于城市郊区的一段供水管道附近的压力传感器和流量传感器数据出现异常波动。机器学习故障检测模型迅速对这些数据进行分析,准确判断出该区域发生了管道泄漏故障。维修人员在接到警报后,迅速携带专业设备赶赴现场。经过排查发现是由于附近施工不慎挖破了供水管道。由于检测及时维修人员迅速采取措施进行抢修,在短时间内恢复了该区域的正常供水极大减少对居民生活的影响。

3.3 无人机巡检与机器人检测技术

凭借高效、灵活特点的无人机巡检在管道监测工作中占据重要地位,搭载高清摄像头、高精度气体传感器等专业设备的无人机能按预设航线对长距离管道快速巡查,于山区、沼泽等地形复杂、人工难以到达区域优势尽显的它可实时拍摄管道外观图像且通过无线传输将图像与采集到的数据迅速回传至地面控制中心以及及时发现管道表面腐蚀、变形或泄漏迹象,而可深入管道内部的管道检测机器人携带超声检测传感器、漏磁检测传感器等多种先进检测装置能对管道进行全方位、细致检测以获取管壁厚度变化、腐蚀情况等关键信息。

某大型石油天然气化工企业在其位于山区的输油气管道监测中,采用了无人机巡检技术。该企业的输油管道绵延数十公里穿越多个山区地段,以往依靠人工巡检,会耗费大量人力和时间,且由于地形复杂,部分区域难以到达存在巡检死角。引入无人机巡检后制定详细的巡检方案。无人机配备 4K 高清摄像头和高灵敏度可燃气体传感器,按照每周一次的频率沿着预设航线对管道进行巡检。在一次巡检过程中无人机拍摄的图像显示,一段位于山谷中的管道表面出现了明显的变色和轻微变形迹象。无人机立即将这一异常图像传输回地面控制中心,技术人员通过分析图像,初步判断管道可能存在腐蚀问题。随后安排专业维修人员携带专业检测设备赶赴现场。经检测发现该段管道因长期受到山区潮湿空气和雨水的侵蚀,部分管壁已经变薄存在泄漏风险。由于无人机巡检及时发现问题,维修人员迅速制定维修方案,修复该段管道,避免可能发生的泄漏事故。

3.4 GIS 与数字孪生技术在管道监测中的融合

地理信息系统 (GIS) 以直观的地图形式展示管道的地理位置、走向以及周边环境信息,为管道管理提供了宏观的空间视角。数字孪生技术则通过构建与实际管道系统高度一致的虚拟模型,能够实时反映管道的运行状态,包括管道内流体的流动情况、压力变化等。当两者深度融合后可实现对管道的全方位、可视化监测,为管道的安全管理和应急决策提供强大支持。

某沿海城市的天然气管道系统为了提升管理水平和安全性,引入 GIS 与数字孪生技术融合的监测平台。该城市的天然气管道覆盖整个市区,连接着众多的居民小区、商业用户和工业企业。首先利用高精度测绘技术对城市内所有天然气管道进行详细测绘,将管道的位置、管径、材质等信息精确录入 GIS 系统,在 GIS 地图上清晰标注出每条管道的走向和分布情况。同时基于管道的物理参数和运行数据,构建数字孪生模型。该模型能够根据实时监测的管道压力、流量、温度等数据,动态模拟天然气在管道内的流动状态。在一次台风来袭期间城市部分区域遭受强风暴雨袭击,监测平台借助 GIS 地图发现位于海边的一段天然气管道周边有地面沉降迹象,同时数字孪生模型显示该段管道内压力出现异常波动,平台迅速分析判断其可能存在泄漏风险,应急指挥中心依据平台所提供信息立即启动应急预案,通过 GIS 地图快速确定受影响区域及周边居民分布情况并组织居民疏散,另外,根据数字孪生模型模拟的泄漏影响范围安排专业维修人员携带抢修设备赶赴现场,经紧张抢修成功修复受损管道避免天然气泄漏引发安全事故,保障了城市天然气正常供应及居民生命财产安全。

4 结语

本文系统阐述了管道泄漏的机理,明确各类泄漏类型的特点及影响因素,通过多种模拟方法为泄漏监测提供了理论模型,并展示了智能化监测技术在实际应用中的显著成效。这些研究成果为管道安全运行提供了有力保障。展望未来随着科技的不断进步,管道泄漏模拟与监测技术将持续创新为能源输送及相关行业的可持续发展筑牢根基。

参考文献:

- [1] 王坤. 基于智能化技术的燃气管道泄漏监测与定位系统研究 [J]. 2024(13):358-360.
- [2] 谢成, 李舒丹. 智能化输油管道泄漏监测技术研究 [J]. 中国科技纵横, 2020(03):2.
- [3] 王正, 冉隆毅, 夏洪永, 等. 物联网技术在管网泄漏监测系统的应用研究 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2020(03):6.