◀油气田开发工程▶

油气井下泄漏定位方法研究现状及发展趋势*

胡科铭[1] 孙秉才[2] 樊建春[1] 陈 倩[1] 付 阳[1]
（1. 中国石油大学（北京）安全与海洋工程学院 2. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司）

胡科铭，孙秉才，樊建春，等. 油气井下泄漏定位方法研究现状及发展趋势[J]. 石油机械，2026，54（10）：79-89.

Hu Keming，Sun Bingcai，Fan Jianchun，et al. Current status and development trend of downhole leakage localization methods for oil/gas wells[J]. China Petroleum Machinery，2026，54（10）：79-89.

摘要：由于油气生产环境复杂，油套管长期面临高压、腐蚀和冲蚀等不利因素，易引发腐蚀穿孔，从而导致泄漏，引发重大安全事故。目前部分油气井由注水井转为注CO_2井，受管柱结构和内部环境变化的影响，出现腐蚀泄漏的概率大大提高。为此，围绕油套管的泄漏识别定位问题，调研了油套管泄漏识别定位技术现状，对比分析其优缺点和检测方法适用性，重点关注泄漏识别、泄漏点定位及多漏点检测等关键技术和方法，主要包括现有井下检测手段、地面检测技术和基于算法的泄漏定位技术。传统井下测井技术虽检测精度高，已取得一定效果，但大都需要动管柱作业，操作风险大且成本较高；地面检测技术可在不停产情况下进行泄漏检测，操作风险小且成本低，但目前现有的声波检测技术主要集中在液面以上的泄漏点定位，液面以下的泄漏由于信号衰减较大，传播路径跨介质，导致检测难度较高；对于基于算法的漏点定位技术，研究方法已从依赖明确物理模型的传统信号处理算法向机器学习与多源信息融合方向发展，突破单一方法的局限，提升定位精度。未来的研究可通过深化多源信息融合与智能化诊断提升泄漏监测系统的精确度和时效性，创新声波检测技术以提高液面以下漏点的识别定位能力。研究结果可为进一步推进多漏点检测和早期智能预警系统的发展提供理论依据。

关键词：油气井；井下泄漏；泄漏检测；泄漏识别；泄漏定位；研究现状
中图分类号：TE983 **文献标识码：**A DOI：10. 12473/CPM. 202507092

Current Status and Development Trend of Downhole Leakage Localization Methods for Oil/Gas Wells

Hu Keming[1] Sun Bingcai[2] Fan Jianchun[1] Chen Qian[1] Fu Yang[1]
（1. *College of Safety and Ocean Engineering*, *China University of Petroleum*（*Beijing*）; 2. *CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology*）

Abstract: Due to the complex environment of oil/gas production, casing and tubing are long-term exposed to adverse factors such as high pressure, corrosion, and erosion, which readily cause corrosion perforation, leading to leakage and major safety accidents. At present, some oil/gas wells have been converted from water injection wells to CO_2 injection wells, making them more probably to be prone to corrosion leakage due to changes in string configuration and internal environment. This paper reviews the current status of casing/tubing leakage identification and localization technologies, and compares their advantages and disadvantages, together with the applicabil-

* 基金项目：中国石油天然气集团科技项目“复杂油气钻采重大风险演化机理与安全智能运维方法”（2023DJ6508）。

© Editorial Office of *China Petroleum Machinery*. OA under CC BY-NC-ND 4.0

ity of detection methods. Key technologies and methods, especially for leakage identification, leak point localization, and multi-leak-point detection, are investigated, and these mainly include existing downhole detection methods, surface detection techniques, and algorithm-based leakage localization technologies. Although traditional downhole logging techniques offer high detection accuracy and have achieved certain results, most of them need to operate while the pipe string is moving, which involves high operational risks and costs. Surface detection techniques can work without production shutdown, with relatively low operational risks and costs; however, existing acoustic detection techniques mainly target leak points above the liquid level, but fail to capture leakages below the liquid level, which feature significant signal attenuation and cross-media propagation paths. The algorithm-based leak-point localization technologies have evolved from traditional signal processing algorithms relying on explicit physical models toward machine learning and multi-source information fusion, breaking through the limitations of single methods and improving localization accuracy. Future research should focus on advanced multi-source information fusion and intelligent diagnosis to enhance the accuracy and timeliness of leakage monitoring systems, and on innovative acoustic detection technologies to improve the capability of identifying and localizing leak points below the liquid level. The findings provide a theoretical basis for further advancing multi-leak-point detection and early intelligent warning systems.

Keywords: oil/gas well; downhole leakage; leakage detection; leakage identification; leakage localization; current status

0　引　言

在石油开采过程中，复杂的地质条件与井下恶劣工况会导致油套管、螺纹连接等关键部位因腐蚀、老化或应力而损坏，进而引发油套管泄漏。油套管泄漏不仅会造成巨大的经济损失，更是诱发井喷、失控等安全事故，以及油气污染物进入地下水环境的主要因素。因此，及早进行泄漏识别定位、降低补救成本、挽救经济损失就显得尤为重要。

本研究围绕油套管的泄漏识别定位问题，调研了油套管泄漏识别定位方法的现状，主要包括井下检测手段、地面检测技术及算法3大类，对比了常用检测方法的有效性及地面检测技术的便捷性，分析了已有研究的缺陷及该研究领域的未来发展，旨在为相关研究提供参考。

井下检测技术（如温度测井、噪声测井、超声波检测等）是将测井仪器下放到井筒中探测，根据管柱缺陷或流体流动异常特征确定泄漏位置。地面检测技术主要有环空带压检测法、声波检测法[1]和示踪剂检测法。樊建春团队在声波测井领域以高精度声波定位技术实现井下单点、多点精确定位[2-4]。有学者利用氦气示踪剂和CO_2作为示踪剂在陆上、海上油田成功应用。在信号处理与算法方面，传统方法（小波变换、自适应噪声消除等）依赖物理模型与数学计算，而机器学习（卷积神经网络、支持向量机等）通过数据驱动挖掘规律，鉴于单一方法的局限性，两者融合将成为技术趋势。目前融合层级包括数据集融合、特征级融合和决策级融合[5-6]。

1　油气井下泄漏定位方法研究现状

采油过程中，受多种因素（如油套管材质、地表温度、底层酸化侵蚀及地应力等）的影响，长期使用的油套管容易出现穿孔漏失现象（见图1）。管柱泄漏是气井环空带压的主要原因，准确判断油套管泄漏途径及原因、找到泄漏点位置，是科学制定环空带压治理措施的关键。

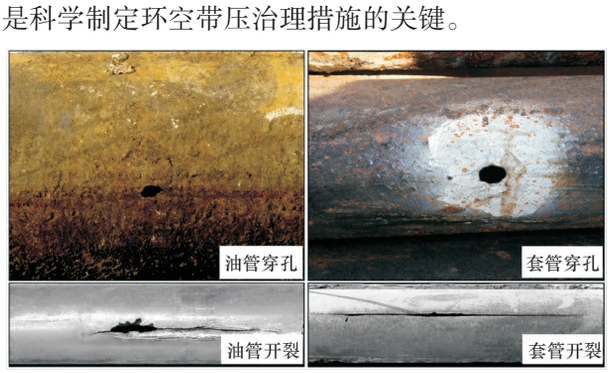


图1　油套管损伤

Fig. 1　Casing and tubing damages

1.1　井下检测技术

井下检测是一种传统、直接的检测方式，通过将传感器置于井中，检测沿油套管方向的温度、压力、噪声和流量曲线，解释数据曲线异常识别

出泄漏位置，该方法往往借助生产测井手段进行，主要有以下几种方法。

1.1.1　温度测井

油管发生泄漏时，油套管内的温度分布会受到影响，导致井筒温度分布异常，通过分析温度梯度变化和测井曲线特征实现泄漏点定位，如图2a所示。

早期研究基于稳态生产井稳定温度场假设，定义温度曲线上的异常点为漏点，后续研究转向精确反演，通过融合多参数数据量化异常信号进行定位[7]。近年研究向实时化与智能化发展，利用光纤监测与微芯片温压传感技术对高温井及超临界CO_2等复杂工况进行检测，弥补了传统方法在极端环境下感知不足的短板[8-9]。

温度测井在流速稳定的气井和温差明显的井况下定位精度更高。由于温度场变化范围广，该方法难以发现小泄漏，所以常常与其他找漏方式联合使用。

1.1.2　噪声测井

噪声测井技术通过解析泄漏引发的流体动力噪声特征实现泄漏定位，分析噪声频谱特性及其空间分布，反演泄漏源位置，适用于气井大泄漏量场景，如图2b所示。

早期研究聚焦噪声信号产生机制与频域特征提取，通过频谱分析识别来源。例如，通过建立噪声特征库验证定点测量的可行性[10]，将该技术扩展到了注水井的窜槽检测[11]。近年的研究趋向多手段协同发展，如将噪声计（NST）与温度计、流量计组合使用[12]，形成噪声定位为主、多参数验证为辅的模式，显著提升了诊断的可靠性。

噪声测井的最大优势在于高灵敏度，适合高压气井或大流量泄漏的快速排查，但因抗干扰性差，无法精准识别小泄漏量工况，对瞬态泄漏或间歇性渗漏的适应性不足。

1.1.3　温度、噪声组合测井

温度测井与噪声测井的技术融合可以提升泄漏定位精度，先用温度测井确定泄漏区域，然后用噪声测井进行小范围点测，确定泄漏部位。

早期研究确立了井温与流量测井组合的基础框架，验证了其对不同泄漏量的检测能力[13]。随后，组合测井发展为多参数融合，例如，引入噪声辅助流量测井高精度定位[14]，加入电磁探伤解析更复杂的泄漏路径[15]，引入示踪剂和氧活化水流技术提升技术实用性[16]。

采用生产测井组合找漏技术可显著提升定位精度，适合工况复杂、对定位精度要求高的高产井。由于温度变化具有滞后性，而噪声是瞬时的，导致数据难以同步对齐，且当前主流的单点式噪声探头探测范围有限，也限制了应用范围。

1.1.4　MIT & MTT组合测井

将多臂成像测井仪（MIT）与磁壁厚测井仪（MTT）组合使用，只需要下1次井就可以得到井斜、相对方位、套管的三维成像图，能够直观呈现井下套管的变形、腐蚀、穿孔状况[17]。两者组合使用可以充分发挥优势，有效弥补各自的缺陷。测井示意图见图2d。

早期研究侧重验证两者的互补性，不仅验证了这种组合在检测点蚀、裂缝和均匀腐蚀方面的准确性[18]，在复杂工况井中也成功应用该技术，实现了套管内壁腐蚀分层识别与结垢空间分布重构[19]。

这种融合技术的机理优势在于双维度互补，适用于关键部位的套管腐蚀与变形诊断。由于设备维护成本高，在低产井、浅层井的普及度不高。同时，MIT对非接触式表面缺陷敏感度不足，MTT对非对称腐蚀的壁厚计算也存在较大误差。

1.1.5　超声测井

超声测井技术通过捕获泄漏流体产生的高频超声波实现泄漏源的精准定位。超声波信号在声源附近存在，信号强度高且衰减快，因此定位误差很小，通过分析曲线上泄漏噪声信号的位置，可精确识别井下泄漏位置。

国际上已经做到通过优化声波穿透算法探测毫米级微小裂缝。国内研究近年发展迅速：运用计算流体力学建立先进的传播模型[20]，研发被动式超声波检测系统，利用衰减特性实现漏点精确定位（见图2c[21]），并成功应用于高温高压含硫气井等复杂环境。此外，超声成像技术也被樊建春课题组成功应用于特殊螺纹油管密封面和油套管接头的检测[22-23]。

超声测井优势为高分辨率和抗干扰能力强。由于超声波在不同介质中传导差异大，环空多相流、泡沫会导致声波衰减模型失准、定位偏移。且该技术硬件依赖性高，高性能超声传感器与信号处理模块长期依赖进口，国内自主研发工具[24]在高温高压井中稳定性不足。

1.1.6　其他传统井下测井方法

流量测井找漏是通过流量测井仪器获取井下流量异常变化点作为泄漏位置[25]，适用于显著泄漏工况检测。分布式光纤传感技术能同时获取时

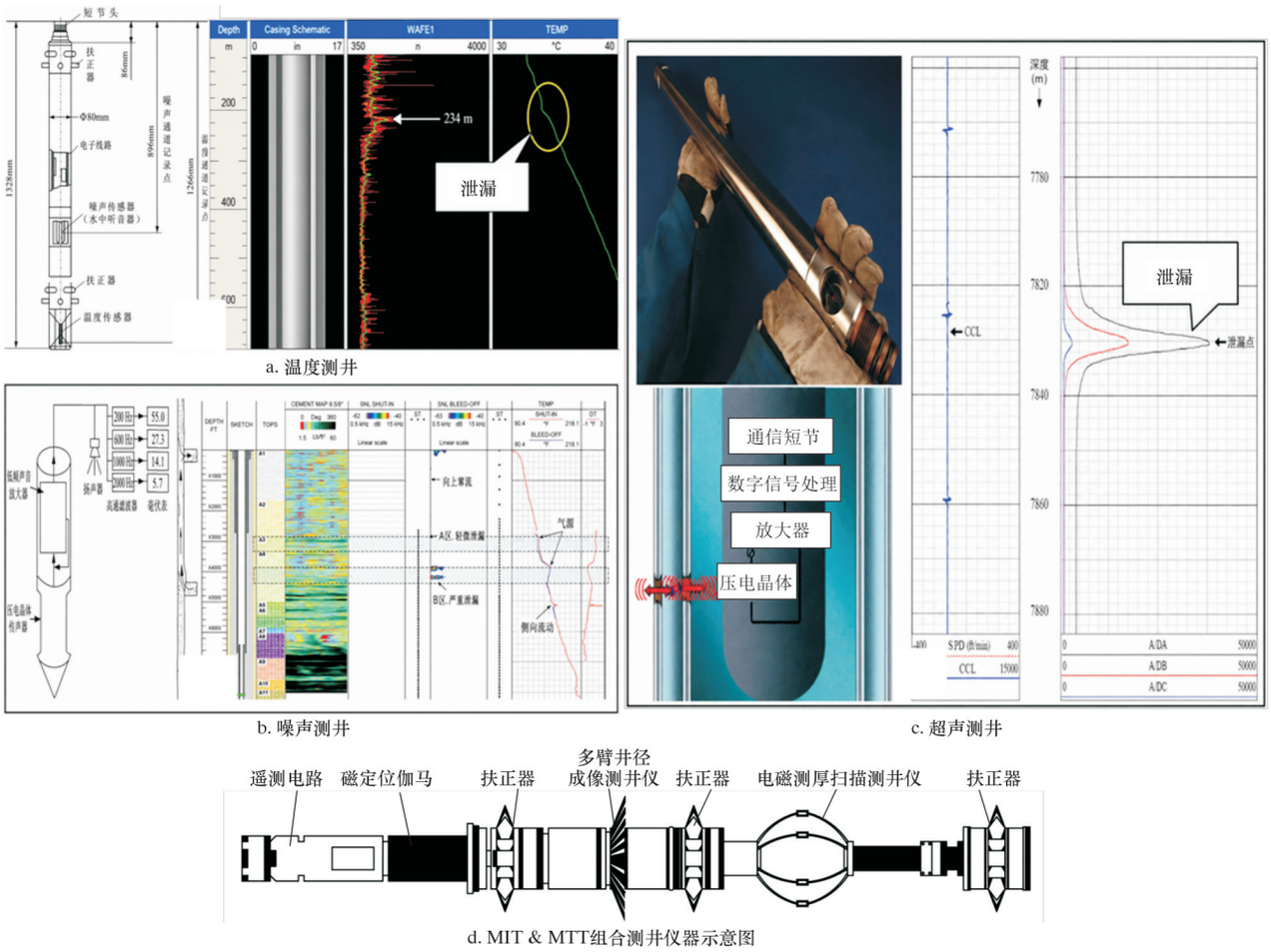


图 2　多种测井技术示意图

Fig. 2　Various logging techniques

间、空间分布信息，将光纤传感器阵列下入油管中检测，其检测的信号为管柱漏失时产生的异常温度梯度和噪声[26]。此外还有“马尾巴”测井找漏、螺旋式测井找漏等原理上可行的方法。这些方法在实践时受限多，实用性低，但是在条件允许的情况下可以用于验证漏失的存在。

目前国际上井下测井的研究核心已转向分布式光纤传感（DTS/DAS）的深度应用，通过在全井筒部署光纤，实时监测温度、压力和声场的动态变化。相比之下，传统井下检测方法依靠电缆下入传感器，需要等到环空憋压或产量下降后才能进行检测，易错过瞬时或间歇性泄漏，而新兴技术则通过构建声-温-压多场耦合模型，模拟流体在复杂管柱间的动态过程，实现全井筒、全时段的在线监测和早期预警。

上述常用的检测方法及其有效性如表 1 所示。不同检测方法和技术针对井筒的不同泄漏场景具有不同的有效性。

1.2　地面检测技术

井下测井找漏虽然检测精度高，取得了一定效果，但大都需要动管柱作业，将仪器下放到油管中进行检测，操作成本高、风险大，采用时往往环空带压已经非常严重，不可避免地带来了一定经济损失和作业风险。因此针对地面泄漏检测技术开展研究更符合发展的规律。

1.2.1　压力检测

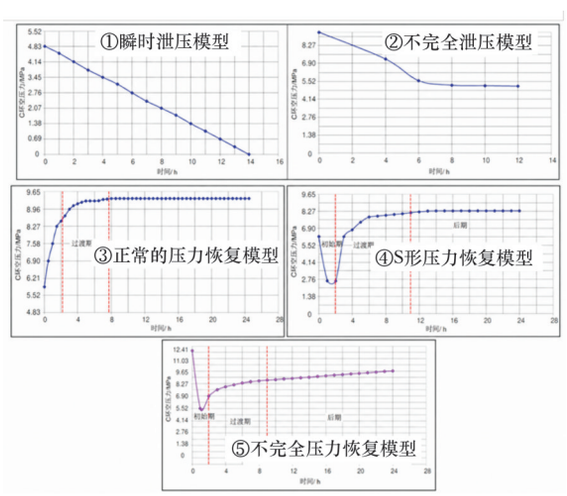
随着对环空带压研究的不断深入，井下泄漏检测领域衍生了新方向。Wojtanowicz AK 团队和 Milanovic D 通过监测环空压力泄放/恢复曲线，统计了 5 种典型的压力曲线（2 种泄压曲线和 3 种压力恢复曲线），如图 3a 所示。并指出非正常的压力恢复往往预示着井下存在泄漏源[27]，特别是在泄压时，相邻环空若发生明显压力波动，则说明环空之间存在连通。国内许多学者在研究中也得出了相同的结论[28]。

国内学者曹立虎等[29]通过获取油套环空压力剖面判断液位与漏点位置，Zhang 等[30]则进一步探究了多点泄漏的压力变化特征（见图 3b），发现多漏点会导致压力平衡更快，但最终的压力值通常受最浅漏点控制。

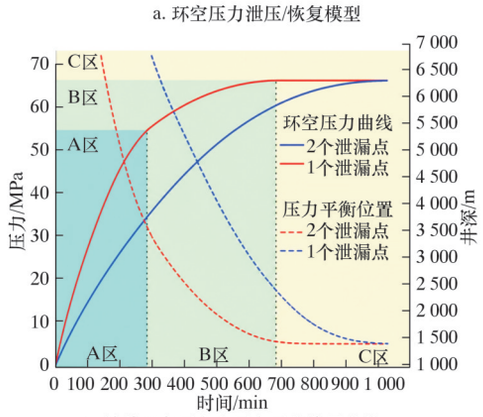
表 1　井下漏点检测技术

Table 1　Downhole leak-point detection techniques

检测方法	物理机理	优势	局限性	适用场景
温度测井	焦耳-汤姆孙效应导致的局部热扰动	技术成熟，非接触检测，成本较低	信号易受地层传热、流体相态变化等因素干扰，	温差明显的生产井、老井体检
噪声测井	流体激发的宽频声波信号	对流体流动噪声敏感，响应速度快	噪声大时易误报，小流量识别难度高	高压气井、大流量泄漏排查
温度-噪声组合测井	异质信号互补验证	覆盖从微漏到大漏的全量程	对深度匹配和信号同步要求高	复杂泄漏特征判定
电磁探伤测井	机械探针扫描 + 电磁感应	三维成像直观，定量计算壁厚损失	维护成本高，弯曲井段数据容易变形	关键部位的腐蚀与变形诊断
流量测井	质量守恒与流速测量	定量结果直观，可精确判断泄漏点	须接触流体，对稠油或高含气井应用效果差	确定大流量泄漏的精确层位、堵漏前验证
超声测井	泄漏产生的高频声脉冲	精度不受机械杂声干扰	在多相流或泡沫中声波衰减极快	微小渗漏、深层油气井检测
分布式光纤测井	瑞利散射全线感知	全井筒、全天候监测，时空高度同步	初始投资高，数据量巨大，光纤损坏后难以修复	储气库、长寿命高产井的在线监控预警
“马尾巴”测井	物理封隔+流量对比	隔离验证效果好，适合大段筛查	作业周期长、效率低	漏点位置的大范围初筛



a. 环空压力泄压/恢复模型



b. 持续环空压力和压力平衡位置曲线

图 3　井下泄漏不同压力曲线

Fig. 3　Different pressure curves of downhole leakages

在此基础上，地面诊断技术从单一压力监测向多参数耦合分析发展。例如，融合组分分析与保护液位置监测漏点[31]，引入贝叶斯推理减少测量误差和地层波动带来的不确定性，从而预测油管泄漏位置[32]。丁昕炜等[33]的瞬态压力梯度法和 Al-Hajri 等[34]的井地关联模型都体现出从单一信号解析到多模态协同诊断的发展趋势。

地面压力诊断适合用于海上气井或不具备测井条件的环空带压井。然而，压力诊断仍有以下局限性：一是环空保护液的液面监测在高温高压环境下检测误差大，二是现有的压差-概率模型对于单漏点判断精度较高。一旦遇到非典型的多点微泄漏，识别效率将会降低。

1.2.2　声波检测

泄漏声波检测技术在地面管道中发展较为成熟，其机理是检测流体与管壁相互作用产生声波信号[35]。与地面管道不同，油气井下从油管泄漏孔喷射出的射流在环空内不能完全自由发展，针对这一特性，刘迪等[2]建立了环空声波传播模型，利用自相关分析识别泄漏位置，后又引入支持向量机算法对泄漏进行智能识别，准确率达 97.5%，识别效果如图 4a 所示。此类方法识别速度快，精度高，但尚未形成泄漏动态识别[3-4]。

声波检测研究从理论试验向工程应用发展，樊建春团队建立多漏点定位算法，并搭建全尺寸试验台进行验证，如图 4b 所示[4, 36]。杨周团队[37]研发了集成化的地面监测系统应用于海上平台，如图 4c 所示。为进一步探究含 CO_2 井及液面下泄漏，樊建春团队[38-40]进一步研究相关声学特性的传播机理和多物理场特征（见图 4d），揭示泄漏参数对冲击生波频谱信号的影响。未来研究可侧重于更有效地融合温度、压力和声学信号进行泄漏预警。

当前研究能快速初步定位泄漏段，其核心优势在于响应速度快且无需停产，适用于海上油气井的日常自动排查。然而，声波传播模型多基于

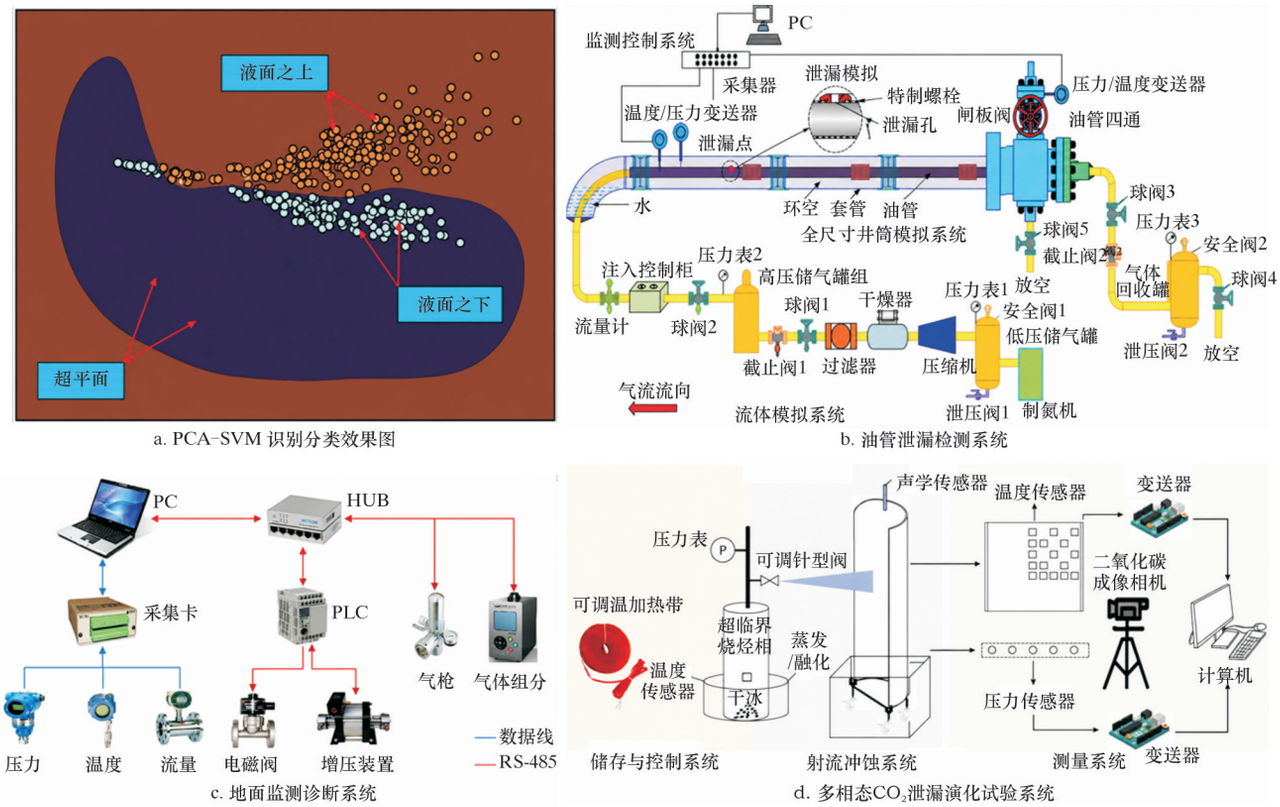


图 4　声波检测技术展示

Fig. 4　Acoustic detection techniques

均匀介质假设，在井下多相流态、管壁结垢等复杂声阻抗突变场景下定位误差大，且现有声波检测泄漏信号多基于液位上泄漏位置的确定，对液位下漏点定位的研究尚不完备。目前樊建春团队仍致力于攻克液位下漏点精准定位技术。

1.2.3　示踪剂检测

示踪剂法是检测管道、压力容器泄漏的常用方法。该方法是向待测系统注入示踪剂，在外壁进行检测，若有示踪剂被检出，说明该处存在泄漏缺陷。图 5 为示踪剂检测原理图。

早在 20 世纪 50 年代，示踪剂就被用来分析地层的连通性，后应用于泄漏检测。Kohl J 等人率先验证了放射性示踪剂在套管找漏中的效果；随后，Shnaib 等[41]通过向环空内注入 CO_2 示踪剂并从油管检测，以监测井下气举阀的状态；刘迪等[2]通过试验验证了利用氮气示踪剂识别油管漏点的可行性。

示踪剂检测的核心优势在于高灵敏度和极强的确定性，只要检出了示踪成分，就能确认泄漏的存在。由于示踪剂需要时间运移到检测点，无法做到像声波那样瞬时定位，且部分放射性示踪剂可能造成地层污染，所以，该方法适用于复杂多层完井、微小渗漏点的验证和需要明确流体迁移路径的工况。国际上研究核心突破传统压力曲

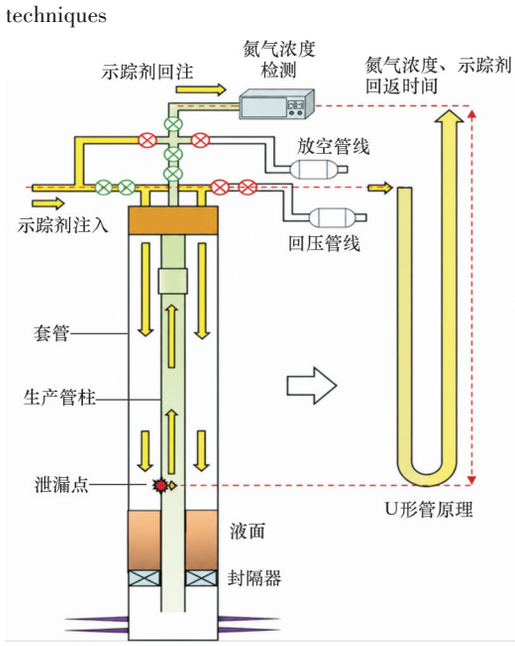


图 5　示踪剂检测原理图

Fig. 5　Schematic diagram of tracer detection

线分析框架，将流体力学定律植入算法，实现从单一压力、声波信号波动诊断向多相流环境下泄漏孔径、位置同步反演的跨越。现有声波检测技术依靠硬件进行滤波、降噪，通过计算分析确定漏点，新兴研究方向致力于实现自适应泄漏识别与定位。目前示踪剂检测技术仅能判断是否泄漏，

难以定位漏点并量化泄漏量，未来发展可结合纳米失踪技术与压力实时反演，构建三维可视化泄漏路径实现精准识别定位。

上述常用的地面诊断检测方法及其有效性如表2所示。不同检测技术针对井下的不同泄漏场景具有不同适用性。

表2　地面泄漏检测技术

Table 2　Surface leakage detection techniques

测井方法	物理机理	优势	局限性	适用场景
压力检测	流体动力学引起的压力脉动或压差变化	技术成熟，可实现实时在线监测，评估泄漏严重性	易受背景噪声干扰，定位精度随距离增加而衰减	环空带压(SCP)的日常监测与基础泄漏预警
声波检测	泄漏产生高频声信号	灵敏度极高，能够捕捉微小早期泄漏，定位速度快	复杂介质中衰减快，无法进行液位以下泄漏点定位	井口密封段、井下等高风险区域的精密监测及查漏
示踪剂检测	向系统注入特定化学物质，捕捉浓度梯度	定位精度极高，无误报风险，可检测极微量渗漏	无法实时监测，操作流程复杂，具有滞后性	新井投产前的严密性验收、疑难泄漏点定位

1.3　基于算法的泄漏定位技术

在井筒泄漏检测定位领域，研究方法已从传统信号处理算法向机器学习与多源信息融合方向发展，形成“信号特征解析-数据驱动建模-多模态协同”的发展路径。

1.3.1　传统信号处理与机器学习方法

基于物理信号特征的传统算法仍是泄漏定位的重要基础。传统算法核心在于建立声-弹-流多场耦合的物理模型。通过优化时延，如改进干涉系统和滤波等技术提升精度，或结合信号处理与成像技术提高定位精度的鲁棒性[42-43]。此类方法的共性在于依赖信号传播机理建模，但易受复杂工况下噪声干扰与传播路径异质性影响，适用于井筒结构简单、环境噪声稳定的中浅层油气井精确定位。

随着数据驱动技术的发展，研究重心转向利用数据关联性解决复杂非线性问题。研究已通过多种机器学习模型验证了压力、流量等参数与泄漏深度的映射关系[44]。后续通过引入优化算法与模糊评估框架、构建融合多物理参数的深度学习模型提升动态泄漏分析的鲁棒性[45-46]。

现有机器学习方法普遍存在模型泛化能力不足、可解释性弱及依赖高质量标注数据等问题，仅适用于参数耦合严重的复杂多相流井及长期生产动态监测。

1.3.2　多源信息融合技术

为克服单一传感信号不确定性，研究从单一检测向数据、特征、决策3级融合演进。多源信息融合算法通过整合来自不同传感器或数据源的互补信息，显著提升井下漏点定位的精度，融合层级主要涵盖数据级、特征级与决策级，国内外多个研究团队在此领域取得了代表性进展。刘国登[5]通过融合管道直径、压力、泄漏孔径等多维数据，利用参数间强相关性弥补单一信号的突发性干扰；焦田田[6]利用D-S证据理论和改进神经网络构建多层级评估框架判断定位准确率；特征级融合层面，刘明哲和赵江采用最优融合算法提高准确度。

多源信息融合技术的核心优势在于利用物理量的内在关联降低单一传感器的误报率，提升复杂工况下泄漏定位的精度，但复杂阻抗适应性差、物理约束缺失、边缘资源受限仍是关键难题。该技术适用于高风险、无人值守或多相流耦合严重的生产井环境。

上述检测方法及其有效性如表3所示，不同算法适用于不同的工况。

表3　基于算法的泄漏定位技术

Table 3　Algorithm-based leakage localization techniques

算　法	物理机理	优势	局限性	适用场景
传统信号处理	解析信号传播的时延、衰减、频散等特征反演泄漏源	物理意义明确，算法成熟，计算高效	依赖强建模假设，抗干扰能力弱	井筒结构简单、环境稳定的中浅层油气井定位
深度学习	归纳成数据拟合驱动的模式识别或回归问题	能实现动态分析和预测，物理模型依赖度低	泛化能力不足，依赖大量高质量标注数据	复杂多相流井，需要长期生产动态监测场景
多源信息融合	互补整合数据、特征和决策层	信息互补，定位精度和决策置信度高	系统复杂，计算量大	高风险井、无人值守平台及多相流注入井

2　油气井下泄漏定位方法展望

为满足安全高效管理和降本增效的现实需求，油气井下泄漏定位技术向在线监测和智能化决策发展创新，近年来井下泄漏定位技术的发展趋势主要有以下4个方向。

2.1　数据间接推断到直接捕捉

传统技术依靠压力变化趋势分析、温度异常等间接手段进行处理推断，得出的结果多解性强，

且精度有限。在此基础上，声波检测技术取得较大突破。基于分布式光纤声波传感和高性能压电传感器的技术，能够直接捕捉到由泄漏流体产生的特定声波/振动信号，从而实现更直接的泄漏识别和定位。中国石油大学团队研发的系统实现0.5 mm微漏孔的识别，且定位误差小于0.3 m[47]。

2.2　单点测量到全井筒系统感知

传统点测仪器只能获取某个深度位置的数据，不管是下井检测技术的温度测井和噪声测井，还是地面检测技术的压力测井和声波测井，本质上都是依赖离散时间点的定点数据采集，难以连续获取全井筒数据。随着分布式光纤传感技术发展，将一根光纤作为连续的传感器就获得整个井筒的温压数据，对井筒进行全生命周期监测。这项技术也已在油田的泄漏诊断中成功应用。

2.3　从单一参数到多源数据融合

单一传感器检测各有优势和局限性，且依赖单一传感器的参数进行判断可靠性不高，将多种数据结合起来，或融合多决策方法进行定位，能显著提高泄漏诊断的置信度和精度[6]。如温度、噪声组合测井和MIT & MTT组合测井就是早期数据融合的体现，未来系统将不局限于双参数融合，而是集成声、温、压、流量、示踪剂甚至电磁、光学等多物理量，并利用人工智能算法进行数据、特征、决策层级进行深度融合，实现信息互补，提高泄漏精度和可靠性。

2.4　从事后检测到智能化预警

许多检测本质上还是泄漏后的诊断和定位，属于被动式检测，结合实时监测数据和算法驱动在线诊断，将深度学习算法与多源信息融合诊断嵌入数据处理过程，达到自动识别泄漏信号、判断泄漏位置，甚至反演泄漏孔径、量化泄漏速率的目的，实现在线监测预警和自动化诊断决策。

3　总结及发展建议

3.1　总结

油气井下泄漏定位技术体系已形成井下-地面-算法三维协同框架，技术发展呈现从单一参数检测到多模态融合再到智能化决策的发展过程，核心逻辑在于通过物理机理与数据驱动的交叉融合，破解复杂工况下的检测难题。在不同学者的研究下，技术体系日趋完善，仍存在以下共性瓶颈：①环境适应性不足，温度/噪声测井受多相流、管壁腐蚀等复杂声/热阻抗干扰；②超声测井对跨液面泄漏、泡沫段塞场景的传播模型精度低；③机器学习模型缺乏物理约束，极端工况下易失效；④受硬件与成本限制，MIT & MTT、超声传感器依赖进口，高温高压稳定性不足，多传感器融合方案硬件成本高，浅井应用性价比低；⑤存在实时性与精度矛盾，多源数据时空配准算法复杂度高，边缘计算资源需求大，示踪剂检测周期长，动态泄漏响应滞后；⑥实验室模拟难以复现井下真实环境（如地应力、多相流耦合效应）。

3.2　发展建议

未来井下泄漏定位技术建议从技术研发和硬件设施完善2个大方面出发，聚焦智能化、实时化、高精度、自动化4个目标。

（1）建立智能化与自动化计算模型，现有的检测技术多针对单一稳定介质，可研发耐高温光纤声波传感、MEMS超声阵列技术，提升跨介质、跨液位信号捕获能力。针对CCUS井、高温高压井及含H_2S井，可研制基于专门的耐酸蚀（H_2S/CO_2腐蚀）光纤对介质相变进行监测；开发MEMS超声-温度融合阵列，集成热电偶与压电超声单元同步监测泄漏声波与局部温降（如CO_2泄漏相变致冷效应）。

（2）多物理场耦合建模，融合热力学、流体力学与材料力学，构建井下多相流-泄漏耦合模型；采用PINN增强数据驱动模型的机理可解释性与泛化能力。对于CCUS井、高温高压井及含H_2S井，可通过多相流-泄漏耦合仿真进行研究。

（3）搭建多模态动态融合计算与集成化的多源数据融合框架，动态分配传感器权重（如卡尔曼滤波+注意力机制）；集成井下-地面传感网络，结合数字孪生技术实现可视化泄漏演化与风险预警。

参　考　文　献

[1] 万志国，张志泰，刘君林，等. 油套管泄漏地面检测技术现状与展望[J]. 非常规油气，2025，12（2）：1-10.
Wan Zhiguo，Zhang Zhitai，Liu Junlin，et al. Current status and development of ground detection techniques for oil casing leaks[J]. Unconventional Oil & Gas，2025，12（2）：1-10.

[2] 刘迪，樊建春，刘书杰，等. 基于ACF-AMDF的气井环空液面回波特征提取方法[J]. 中国安全生产科学技术，2018，14（9）：63-68.
Liu Di，Fan Jianchun，Liu Shujie，et al. Method of extracting echo characteristics of annular liquid level in

gas well based on ACF-AMDF[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(9): 63-68.

[3] Yang Yunpeng, Fan Jianchun, Liu Di, et al. Monitoring and diagnosis system of downhole tubing leakage [M/OL]. Netherlands: IOS Press, 2021: 676-687. https://ebooks.iospress.nl/doi/10.3233/FAIA210300.

[4] 刘迪，樊建春，刘书杰，等. 气井井下油管多点泄漏定位实验研究[J]. 中国安全生产科学技术，2018，14(5)：144-149.
Liu Di, Fan Jianchun, Liu Shujie, et al. Experimental study on locating multi-point leakage for downhole tubing in gas wells[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(5): 144-149.

[5] 刘国登. 基于多源数据的管道泄漏识别方法研究[D]. 北京：北方工业大学，2025.
Liu Guodeng. Research on pipeline leakage identification method based on multi-source data[D]. Beijing: North China University of Technology, 2025.

[6] 焦田田. 多源信息融合的油套管泄漏诊断方法研究[D]. 北京：中国石油大学（北京），2020.
Jiao Tiantian. Research on tubing and casing leak diagnosis method based on multi-source information fusion[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020.

[7] Aslanyan I, Wilson M, Al-Shammakhy A, et al. Evaluating injection performance with high-precision temperature logging and numerical temperature modelling [C]//The SPE Reservoir Characterization and Simulation Conference and Exhibition, 2013: SPE-166007-MS.

[8] 任利华，陈德飞，潘昭才，等. 超深高温油气井永久式光纤监测新技术及应用[J]. 石油机械，2019，47(3)：75-80.
Ren Lihua, Chen Defei, Pan Zhaocai, et al. Field application of permanent fiber monitoring for ultra-deep high temperature oil and gas well[J]. China Petroleum Machinery, 2019, 47(3): 75-80.

[9] 封猛，宋志同，牛占山，等. 基于微芯片监测连续管气举全井筒温压的研究[J]. 石油机械，2025，53(增刊1)：34-39.
Feng Meng, Song Zhitong, Niu Zhanshan, et al. Microchip-based full wellbore temperature and pressure monitoring during coiled tubing gas lift[J]. China Petroleum Machinery, 2025, 53(S1): 34-39.

[10] 田延妮，戴家才，陈猛，等. 频谱噪声测井技术及应用[J]. 石油管材与仪器，2020，6(2)：64-68.
Tian Yanni, Dai Jiacai, Chen Meng, et al. Spectral noise logging technology and application[J]. Petroleum Instruments, 2020, 6(2): 64-68.

[11] 邱金权，张洪，雷刚，等. 噪声频谱测井在注水井中的应用[J]. 测井技术，2017，41(5)：601-605.
Qiu Jinquan, Zhang Hong, Lei Gang, et al. Application of spectrum noise logging in water injection well [J]. Well Logging Technology, 2017, 41(5): 601-605.

[12] 武雯. 噪声频谱测井与其他测井技术在气井找漏找窜中的组合应用[J]. 石油管材与仪器，2022，8(4)：62-66.
Wu Wen. Combined application of NST and other logging techniques in detecting leakage and channeling of gas well[J]. Petroleum Instruments, 2022, 8(4): 62-66.

[13] 郑友志，佘朝毅，刘伟，等. 井温、噪声组合找漏测井在龙岗气井中的应用[J]. 测井技术，2010，34(1)：60-63.
Zheng Youzhi, She Chaoyi, Liu Wei, et al. The application of combined temperature and noise logging data to leakage location for Longgang gas well[J]. Well Logging Technology, 2010, 34(1): 60-63.

[14] 万禧煌，任大明，许明亮，等. 生产油管找漏技术在海上油田的应用研究[J]. 石化技术，2020，27(3)：111-112.
Wan Xihuang, Ren Daming, Xu Mingliang, et al. Research and application of offshore oil field in production tubing leak detection technology[J]. Petrochemical Industry Technology, 2020, 27(3): 111-112.

[15] 黄伟明，李国庆，马文海，等. 环空带压井漏点检测技术在深层气田的应用[J]. 石油化工高等学校学报，2019，32(4)：21-25.
Huang Weiming, Li Guoqing, Ma Wenhai, et al. Application of leak detection technology for sustained casing pressure well in deep gas field[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2019, 32(4): 21-25.

[16] 吴悦，罗九明，朱义清，等. 多组合找漏找窜测井技术在河南油田的应用[J]. 石油地质与工程，2019，33(2)：105-107.
Wu Yue, Luo Jiuming, Zhu Yiqing, et al. Application of well logging technology by multi-combination leakage and channeling detection in Henan oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2019, 33(2): 105-107.

[17] 刘辉. 多臂井径与电磁测厚组合测井在长庆油田套损检测中的应用[J]. 石油管材与仪器，2022，8(3)：81-84.
Liu Hui. Application of multi-arm diameter and electromagnetic thickness measure-ment tool combination logging of casing inspection in Changqing oilfield [J]. Petroleum Instruments, 2022, 8(3): 81-84.

[18] Yang Quanan, Tang Zewei. Practice and understand-

ing of service condition monitoring for down-hole string in oil-gas wells[J]. Procedia Engineering, 2012, 27: 1609-1617.

[19] 张德辉. MIT & MTT组合测井技术在黑帝庙储气库建库前井筒评价中的应用[J]. 测井技术, 2022, 46(3): 352-355.
Zhang Dehui. Application of MIT & MTT combination logging technology in wellbore evaluation before the construction of Heidimiao gas storage[J]. Well Logging Technology, 2022, 46(3): 352-355.

[20] Li Jingcui, Wan Jifang, Wang Tingting, et al. Leakage simulation and acoustic characteristics based on acoustic logging by ultrasonic detection[J]. Advances in Geo-Energy Research, 2022, 6(3): 181-191.

[21] 朱达江, 李玉飞, 卞维娣, 等. 超声波成像法在多层环空井下漏点检测技术中的应用[J]. 测井技术, 2021, 45(2): 201-206.
Zhu Dajiang, Li Yufei, Bian Weidi, et al. Application of ultrasonic imaging technology in multi-annuli downhole leakage detection[J]. Well Logging Technology, 2021, 45(2): 201-206.

[22] 田春萌, 樊建春, 胡瑾秋, 等. 特殊螺纹油管密封面相控阵超声图像特征分析[J]. 石油机械, 2024, 52(6): 123-129.
Tian Chunmeng, Fan Jianchun, Hu Jinqiu, et al. Phased array ultrasonic image characteristic analysis of premium tubing sealing surface[J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52(6): 123-129.

[23] 韩婷, 樊建春, 黄宝鑫, 等. 特殊螺纹油管密封性能超声检测方法研究[J]. 石油机械, 2021, 49(4): 144-150.
Han Ting, Fan Jianchun, Huang Baoxin, et al. Ultrasonic detection method for sealing performance of special thread tubing[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(4): 144-150.

[24] 刘子平, 屈玲, 姚梦麟. 油气井井筒泄漏超声波检测技术及应用[J]. 测井技术, 2018, 42(4): 453-459.
Liu Ziping, Qu Ling, Yao Menglin. Application and technology of ultrasonic inspection and measurement for well leak detection[J]. Well Logging Technology, 2018, 42(4): 453-459.

[25] 陆国琛, 秦丙林, 田天, 等. 气井井筒临界携垢流量计算与分析[J]. 石油机械, 2023, 51(10): 107-112.
Lu Guochen, Qin Binglin, Tian Tian, et al. Calculation and analysis of critical scale carrying flow rate in gas wells[J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(10): 107-112.

[26] 陈宝, 白松涛, 刘文强, 等. 光纤测井技术应用现状与发展展望[J]. 世界石油工业, 2025, 32(6): 11-23.
Chen Bao, Bai Songtao, Liu Wenqiang, et al. Application status and development prospects of fiber optic logging technology[J]. World Petroleum Industry, 2025, 32(6): 11-23.

[27] Milanovic D, Smith L. A case history of sustainable annulus pressure in Sour wells-prevention[C]//The SPE High Pressure/High Temperature Sour Well Design Applied Technology Workshop, 2005: SPE-97597-MS.

[28] 夏翔. 气井环空带压在线监测方法研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2024.
Xia Xiang. Study on online monitoring methods for sustained annulus pressure in gas wells[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2024.

[29] 曹立虎, 孙金声, 张波. 超深气井油套环空泄漏起压机理与规律分析[J]. 石油机械, 2024, 52(11): 91-98.
Cao Lihu, Sun Jinsheng, Zhang Bo. Mechanism and pattern of pressure generation in tubing-casing annulus due to leakage of tubing string in ultradeep gas wells[J]. China Petroleum Machinery, 2024, 52(11): 91-98.

[30] Zhang Bo, Xu Zhixiong, Lu Nu, et al. Characteristics of sustained annular pressure and fluid distribution in high pressure and high temperature gas wells considering multiple leakage of tubing string[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 196: 108083.

[31] Zhang Ximing, Fan Jianchun, Yang Zhou, et al. Research on ground monitoring diagnosis of sustained casing pressure for offshore gas well[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(6): 129-135.

[32] Wu Shengnan, Zhang Laibin, Fan Jianchun, et al. Prediction analysis of downhole tubing leakage location for offshore gas production wells[J]. Measurement, 2018, 127: 546-553.

[33] 丁昕炜, 胡泽, 葛亮, 等. 基于压力传感器阵列的智能井水平段油管泄漏定位技术研究[J]. 仪表技术与传感器, 2016, (3): 79-82.
Ding Xinwei, Hu Ze, Ge Liang, et al. Research on tubing leak location technology of horizontal well based on pressure sensor array in intelligent well[J]. Instrument Technique and Sensor, 2016, (3): 79-82.

[34] Al-Hajri N, Hassan A, Mahmoud M. An integrated approach for predicting the downhole leaks utilizing surface measurements[J]. Arabian Journal for Science and

Engineering，2023，48（7）：9429-9438.

[35] 叶迎春，张来斌，王金江. 输气管道泄漏声源特性及其变化规律[J]. 天然气工业，2016，36（8）：124-131.
Ye Yingchun，Zhang Laibin，Wang Jinjiang. Characteristics and variation rules of acoustic source of gas pipeline leaks[J]. Natural Gas Industry，2016，36（8）：124-131.

[36] 刘迪，樊建春，梁政伟，等. 气井井下油管泄漏地面声波检测试验研究[J]. 中国安全科学学报，2017，27（2）：121-126.
Liu Di，Fan Jianchun，Liang Zhengwei，et al. Experimental study on ground detection of gas well down-hole tubing leak based on acoustic method[J]. China Safety Science Journal，2017，27（2）：121-126.

[37] 杨周，樊建春，张喜明，等. 环空带压气井地面监测诊断系统研究[J]. 石油机械，2016，44（1）：75-78.
Yang Zhou，Fan Jianchun，Zhang Ximing，et al. The ground monitoring and diagnosis system for the pressurized annulus gas well[J]. China Petroleum Machinery，2016，44（1）：75-78.

[38] 房奕霖，樊建春，杨云朋，等. 气井环空液面下泄漏声场模拟[J]. 石油机械，2024，52（6）：64-69.
Fang Yilin，Fan Jianchun，Yang Yunpeng，et al. Simulation on sound field of leakage below fluid level in annulus of gas well[J]. China Petroleum Machinery，2024，52（6）：64-69.

[39] 陈倩，樊建春，张来斌，等. 超临界CO_2井筒泄漏相变多物理场特征研究[J]. 石油机械，2025，53（3）：59-67.
Chen Qian，Fan Jianchun，Zhang Laibin，et al. Multi-physical field phase changes after supercritical CO_2 leakage in wellbore[J]. China Petroleum Machinery，2025，53（3）：59-67.

[40] Chen Qian，Zhang Laibin，Fan Jianchun，et al. Numerical and experimental study of CO_2 jet impingement on curved surfaces with different phases[J]. Process Safety and Environmental Protection，2025，198：107157.

[41] Shnaib F，Nadar M S，Sreekumar M P，et al. Successful application of CO_2 tracer technology for surveillance of gas lifted wells[C]//SPE International Production and Operations Conference and Exhibition，2010：SPE-133268-MS.

[42] 谢晓贤，薛生，郑晓亮，等. 基于改进MFO优化空间谱的埋地管道泄漏定位[J]. 振动与冲击，2024，43（17）：278-288，312.
Xie Xiaoxian，Xue Sheng，Zheng Xiaoliang，et al. Leakage localization of buried pipeline based on improved MFO optimized spatial spectrum[J]. Journal of Vibration and Shock，2024，43（17）：278-288，312.

[43] 李伟. 基于IEEMD-IGCC算法的管道泄漏点定位技术研究[J]. 油气田地面工程，2024，43（6）：73-79.
Li Wei. Research on pipeline leakage point positioning technology based on IEEMD-IGCC al-gorithm[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering，2024，43（6）：73-79.

[44] Harati S，Rezaei G S，Rahman M A，et al. Performance analysis of various machine learning algorithms for CO_2 leak prediction and characterization in geo-sequestration injection wells[J]. Process Safety and Environmental Protection，2024，183：99-110.

[45] Wu Juntao，Liu Wei，Li Jiaqi，et al. Artificial neural network prediction of wellbore stability in offshore shallow formations[J]. Geoenergy Science and Engineering，2024，243：213322.

[46] Baek S，Bacon D H，Huerta N J. Enabling site-specific well leakage risk estimation during geologic carbon sequestration using a modular deep-learning-based wellbore leakage model[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control，2023，126：103903.

[47] Fang Yilin，Fan Jianchun，Yang Yunpeng，et al. A diagnosis and monitoring system with a multi-scale channel and spatial attention mechanism on residual structures for tubing leakage detection[J]. Process Safety and Environmental Protection，2025，201：107474.

第一作者简介：胡科铭，女，生于2001年，2023年毕业于郑州航空工业管理学院，现为在读博士研究生，研究方向为安全检测与智能诊断。地址：（102249）北京市昌平区。email：hkm0103@163.com。

通信作者：樊建春，教授。email：fjc688@126.com。

修改回稿日期：2026-07-20

（本文编辑　南丽华）