

# 石油天然气长输管道的泄漏原因及检测方法研究

王高斌（胜利油田分公司河口采油厂，山东 东营 257200）

**摘要：**石油天然气长输管道是能源输送的基础设施，安全运行会直接关系到能源供应的稳定性和经济社会的可持续发展。管道泄漏既会造成资源浪费以及经济损失，又可能引发环境污染。鉴于此，本文系统地分析了石油天然气长输管道的泄漏原因，在检测方法上结合直接检测与间接检测技术，详细阐述直接检测方法的应用原理。同时，对比间接检测的技术特点，提出融合多个技术进行检测的策略，为管道泄漏的精准定位提供技术支持。

**关键词：**石油天然气；长输管道；泄漏原因；检测方法

中图分类号：TE88

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）012-0154-03

## Research on the causes and detection methods of oil and natural gas long-distance pipelines

Wang Gaobin(Shengli Oilfield Branch Hekou Oil Production Plant, Shandong Dongying 257200, China)

**Abstract:** The long-term oil and natural gas pipeline is the infrastructure for energy transmission, and its safe operation will be directly related to the stability of energy supply and the sustainable development of the economy and society. Pipeline leakage can not only cause resource waste and economic losses, but also cause environmental pollution. In view of this, this paper systematically analyzes the leakage causes of oil and natural gas long-distance pipelines, and combines direct detection and indirect detection techniques to elaborate on the application principle of the direct detection method. At the same time, comparing the technical characteristics of indirect detection, a strategy of integrating multiple technologies for detection is proposed to provide technical support for the precise positioning of pipeline leakage.

**Keywords:** oil and gas; long-term pipeline; leakage cause; detection method

为加强管道安全管理，国家能源局于2021年发布了《油气管道完整性管理规范》（GB 32167-2021），明确提出“管道运营企业应建立完善的泄漏检测与预警系统，采用先进技术手段，确保管道运行安全”。这个政策为管道泄漏检测技术的研发提供明确指导，同时也对技术精度提出更高要求。在此背景下，深入研究管道泄漏原因及检测方法，对于提升管道安全管理水平具有重要意义。

### 1 石油天然气长输管道的泄漏原因

#### 1.1 管道质量有问题

在设计与制造阶段，材料选择、管件加工及连接工艺的缺陷可能会为管道运行埋下隐患。低质量材料在长期承受高压和复杂环境作用时，易发生疲劳损伤或脆性断裂。由于焊接工艺的不完善，气孔、裂纹、未焊透等缺陷在压力波动下会慢慢扩展，最终形成泄漏点。此外，管道防腐涂层质量不达标或施工不规范，将会加速局部腐蚀，进一步削弱管道结构强度。管道质量有缺陷不但会增加泄漏风险，而且还显著缩短管道的使用寿命，对能源输送安全构成严重威胁。

与此同时，管道制造过程中的质量控制不严格，会使材料内部存在轻微问题，这些问题在运行过程中将会逐渐扩展，然后引发宏观裂纹。管道连接处的密封性能不足，也可能在高压环境下发生泄漏。管道材料的力学性能不达标：抗拉强度、屈服强度及韧性不

足，可能导致管道在复杂应力作用下发生断裂。管道热处理不当或冷加工过度，可能使材料内部产生残余应力，进而引发应力腐蚀开裂。

#### 1.2 阴极保护失效

阴极保护是防止管道腐蚀的一个关键技术手段，如果失效的话会加快管道腐蚀。阴极保护系统利用施加外部电流或牺牲阳极，使管道表面形成电化学保护层，从而抑制腐蚀反应。但是，保护电位不足、阳极材料消耗殆尽或外部电流干扰这些因素都会让阴极保护失效。如果失效，管道就会暴露于腐蚀性环境中，硫化氢、二氧化碳及水分等介质将与金属发生化学反应，形成局部腐蚀坑或裂纹。应力腐蚀开裂在阴极保护失效的情况下尤为突出，管道在拉应力以及腐蚀介质的共同作用下，迅速形成贯穿性缺陷，最终出现泄漏现象。

此外，阴极保护系统的设计不合理，会让保护电位分布不均匀，局部区域保护不足，进而出现腐蚀的情况。阴极保护系统的维护不及时，可能导致阳极材料消耗殆尽或外部电流中断，使管道失去保护。外部电流干扰，如杂散电流或雷电冲击，会对阴极保护系统的正常运行产生显著影响。杂散电流通常来源于附近的电气化铁路、高压输电线路或其他工业设施，这些电流会借助土壤或管道涂层缺陷进入管道系统，干扰阴极保护电位的稳定性。雷电冲击则会在极端天气

条件下产生瞬时高电压，直接破坏阴极保护设备或改变管道的电化学状态。这些干扰因素使得阴极保护系统无法维持稳定的保护电位，管道表面难以形成有效的电化学保护层，腐蚀反应因此加速。

### 1.3 人为原因

操作人员的技术水平与责任意识，在管道运行安全中起着决定性作用。压力调节失误、阀门操作错误或设备维护滞后，会使管道承受超压或局部应力集中，诱发泄漏问题。第三方破坏行为，非法打孔盗油或机械施工中的意外损伤，直接会威胁管道的结构完整性。此外，管道附属设施法兰、阀门及连接件在安装过程中出现偏差，或密封性能不足，会在运行中慢慢暴露为薄弱环节，增加泄漏风险。

### 1.4 自然灾害的原因

自然灾害是管道泄漏的一项外部诱因，具有不可预测性以及破坏性的特点。地质灾害地震、滑坡还有泥石流，会对管道造成直接的机械损伤，表现为断裂、变形或位移。在洪水、冻土融化以及高温干旱这种极端气候条件下，也会对管道及其支撑结构产生显著影响，削弱其稳定性。地震波传播过程中引发的土壤液化或位移，会使管道承受额外的应力，进而形成裂纹或接头失效，以及气候变化加剧了极端天气事件的频率与强度，进一步恶化管道的运行环境。

洪水冲刷会使管道暴露或悬空，冻土融化会导致地基沉降，高温干旱则可能加速材料老化，这些自然因素的综合作用，使得管道在运行中面临更大的风险。自然灾害的突发性与破坏性，对管道的维护提出更高要求，需要采取更具前瞻性的防护措施，加强管道材料的抗灾性能以及建立实时监测与预警系统，以降低泄漏发生的概率。

## 2 石油天然气长输管道的检测方法

### 2.1 直接检测

#### 2.1.1 人工巡检法

人工巡检法这是一种传统且基础的管道泄漏检测方式，主要依靠巡检人员的目视观察或者基础设备辅助来完成。巡检人员定期沿管道线路进行巡查，经过观察管道周围植被异常、土壤湿润或油气气味的环境变化，初步判断是否存在泄漏。辅助设备包括可燃气体检测仪、红外测温仪等，用于检测泄漏气体的浓度或管道表面温度异常。人工巡检法的优势在于灵活性高，能够及时发现明显的泄漏迹象，尤其适用于地形复杂或技术设备难以覆盖的区域。但是这个方法受限于巡检人员的经验还有责任心，检测效率精度都比较低，难以应对隐蔽性较强的泄漏问题。

此外，恶劣天气或复杂地形可能增加巡检难度，

影响检测效果。实施人工巡检法需要建立完善的巡检制度和培训体系，保证巡检人员具备专业的知识技能。

#### 2.1.2 示踪剂检漏法

示踪剂检漏法是要向管道内注入特定化学示踪剂，利用其扩散特性检测泄漏点。示踪剂一般选择易检测且与管道介质相容的物质，像荧光染料或放射性同位素。注入后，示踪剂随介质流动，在泄漏点处逸出并扩散至周围环境。布置在管道沿线的检测设备或采样分析，可以定位示踪剂浓度异常的区域，然后确定出泄漏的位置。

这个方法的灵敏度和准确性比较高，适合用于小流量泄漏的检测。然而，选择示踪剂以及注入量需要精确控制，以避免对管道介质与环境造成污染。此外，示踪剂的扩散速度与检测设备的布置密度直接影响检测效果，成本较高且操作复杂。

#### 2.1.3 光纤检漏法

##### 2.1.3.1 分布式光纤测温技术

分布式光纤测温技术是一种基于光信号分析的泄漏检测手段，它主要的核心原理依托于光纤的光热效应与光时域反射（OTDR）技术。光脉冲在光纤中传输时，会产生瑞利散射还有拉曼散射的现象，其中拉曼散射光的强度与温度变化密切相关。经过采集并分析光纤沿线返回的拉曼散射光信号，系统能够精确绘制管道不同位置的温度分布图谱。

在实际应用中，光纤通常沿管道外壁或内部紧密敷设，使管道表面能够充分接触。与此同时，当管道发生泄漏时，油气介质与外界环境接触会引发热交换，使泄漏点附近的温度发生显著变化。液态石油泄漏时，蒸发吸热会使局部温度下降，而高压气体泄漏则因快速膨胀引起温度骤降。

##### 2.1.3.2 光纤传感综合检测技术

光纤传感检测技术不能局限在温度监测，还可结合应变、振动等多参数数据，提升泄漏检测的可靠性。分布式光纤应变检测利用光纤在外界压力或形变作用下产生的微应变信号，识别管道因泄漏引起的机械结构变化。泄漏发生时，泄漏介质的冲击或压力释放会使管道壁发生微小形变，附着在管道上的光纤随之产生应变。这种应变会改变光纤中传输光信号的相位或波长特性，解调这些变化即可精确定位泄漏点。光纤光栅技术在光纤中刻写周期性折射率变化的结构，能够高灵敏度检测温度、应变等物理量。光纤布拉格光栅（FBG）将环境温度或应变变化转化为光波长的偏移，解调波长信息即可判断泄漏位置，而且多参数融合的检测方式有效区分环境干扰与真实泄漏信号，在温差较小的环境中，结合应变数据可减少误报现象。

## 2.1.4 智能清管器(PIG)检漏法

智能清管器(PIG)检漏法是一种基于管内检测的高精度技术,专门用于石油天然气长输管道的泄漏检测与状态评估。清管器在管道内部随介质流动,搭载多种高灵敏度传感器,超声波探头、漏磁检测单元以及激光扫描仪,采集管道壁厚、腐蚀程度、几何变形这几项关键数据。

在石油天然气长输管道中,清管器从发射端进入管道,随油气介质流动。超声波传感器向管壁发射高频声波,经接收反射信号分析管壁厚度变化,识别因腐蚀或机械损伤导致的壁厚减薄区域。漏磁检测单元利用磁场变化原理,捕捉管道表面的裂纹或缺陷,尤其对微小裂缝具有较高的检测灵敏度,之后激光扫描仪则使用高精度光学测量,记录管道内壁的几何变形情况。

当清管器经过泄漏区域时,泄漏介质的流动或压力变化会引发管道内壁的异常振动或温度波动,传感器实时记录这些信号并传输至数据分析系统,然后分析信号的时间、频率及强度特征,精确定位泄漏点并评估泄漏程度。

## 2.2 间接检测

### 2.2.1 体积或物质平衡法

体积或物质平衡法根据质量守恒原理,可以对比管道入口与出口的流量或物质总量差异,然后判断泄漏是否发生。在石油天然气长输管道中,入口与出口的流量在正常运行状态下应保持平衡,利用高精度流量计实时监测两端数据,结合介质密度、温度、压力等参数进行修正计算,能够提高检测精度。在石油天然气长输管道中,体积或物质平衡法的具体检测过程如下:在管道入口和出口处安装高精度流量计,实时监测油气的流量数据。

同时,采集介质的密度、温度还有压力的参数,用于修正流量计算,消除因工况变化引起的误差。系统会对比入口流量与出口流量,若两者差异超过设定阈值,则判定可能存在泄漏。物质平衡法在此基础上,进一步分析介质成分的变化,使用气相色谱仪检测油气组分浓度的差异,判断泄漏的具体位置。

### 2.2.2 压力梯度法

在石油天然气长输管道中,沿管道布置多个高精度压力传感器,实时提取压力数据并传输至中央控制系统,随后分析压力数据的变化趋势,识别异常波动并定位泄漏点。具体检测过程中,压力传感器的布置密度与数据采集频率是关键。高密度布置的传感器能够捕捉更细微的压力变化,而高频数据能保证检测的实时性。

当泄漏发生时,泄漏点附近的压力下降会在传感器数据中形成明显特征,结合管道长度与波速计算,系统能够精确计算出泄漏位置。压力梯度法对大流量泄漏的响应速度较快,特别适合长距离管道的连续监测。然而,小流量泄漏或缓慢泄漏引起的压力变化较为微弱,可能很难让传感器及时捕捉。

## 2.2.3 负压波泄漏检测法

负压波泄漏检测法按照压力波传播特性,利用泄漏发生时产生的负压波信号来进行定位。在石油天然气长输管道中,泄漏点附近的压力会突然下降,形成负压波并向管道两端传播。沿管道布置高灵敏度压力传感器,实时捕捉负压波的到达时间与强度变化,结合波速计算能够精确定位泄漏点。

在具体检测过程中,压力传感器以一定间距安装在管道沿线,参考相关的压力数据并传输至中央控制系统。如果发生泄漏,泄漏点附近的压力骤降产生负压波,传感器捕捉到这一信号后记录其到达时间与强度。系统需要分析负压波的传播时间差与波速,计算出泄漏点的具体位置。

高密度布置的传感器能够提高定位精度,而高效的信号处理算法可以提高检测的实时性。但是管道运行工况的复杂性与外部环境干扰可能影响负压波的传播特性,增加检测的难度,所以为提高检测效果,需结合其他方法进行综合验证。

## 3 结束语

石油天然气长输管道的泄漏问题涉及多方面的复杂因素,从管道材质缺陷到外部环境干扰,从人为操作失误到自然灾害的不可抗力,都会对管道安全构成潜在威胁。针对这些挑战,先进的检测技术为泄漏的精准定位与实时预警提供有力支持。未来,随着智能化技术与大数据分析的深入发展,管道泄漏检测将朝着更高精度的方向迈进,为能源输送安全提供更加坚实的保障。

## 参考文献:

- [1] 娄文龙.石油天然气长输管道的泄漏原因及检测方法探析[J].大众标准化,2022,(21):183-185.
- [2] 梁鲲鹏.石油天然气长输管道泄漏检测及定位方法[J].化学工程与装备,2022,(02):132-133.
- [3] 黎键.石油天然气长输管道的泄漏检测以及定位技术措施[J].石化技术,2021,28(09):105-106.

## 作者简介:

王高斌(1983-),男,汉族,本科,助理工程师,就职于胜利油田分公司河口采油厂,研究方向:石油工程。