

天然气管线泄露与安全预防

赵雪阳

西南油气田华油集团华天兴能燃气公司, 四川 成都

收稿日期: 2026年6月30日; 录用日期: 2026年8月10日; 发布日期: 2026年8月21日

摘 要

天然气长输管道施工和长期的运行过程中, 由于管线中硫化氢和水汽的腐蚀, 土壤中的酸碱介质对管线的腐蚀, 连接管道的法兰损坏, 阀门损坏, 螺纹损坏, 由于地面施工, 地下孔洞古墓等造成的沉降, 掺氢等因素造成管道漏气, 引起火灾或者安全隐患, 本文分析了管道运行可能出现的故障以及解决问题的方法, 并介绍了目前管道泄露的检测方法, 对管道安全运行有重要的指导意义。

关键词

天然气, 腐蚀, 管道泄漏, 爆炸, 泄漏检测, 光纤检测

Natural-Gas Pipeline Leakage and Safety Prevention

Xueyang Zhao

Huatian Xingneng Gas Company, Huayou Group, PetroChina Southwest Oil & Gas Field Company, Chengdu Sichuan

Received: June 30, 2026; accepted: August 10, 2026; published: August 21, 2026

Abstract

Long-distance natural gas transmission pipelines are prone to gas leakage during construction and long-term operation. Leakage causes including internal corrosion induced by hydrogen sulfide and water vapor, corrosion from acid and alkaline soil media, damage to flanges, valves and threaded connections, ground construction, ground settlement arising from underground cavities and ancient tombs, and hydrogen blending. Such leaks may trigger fires and major safety hazards. This paper analyzes typical operational faults of pipelines and corresponding disposal measures, summarizes mainstream pipeline leakage detection technologies, and provides important theoretical guidance for the safe operation of natural gas pipelines.

Keywords

Natural Gas, Corrosion, Pipeline Leakage, Explosion, Leak Detection, Optical Fiber Monitoring

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 绪论

在进行天然气长输管道施工与设计的过程中,大部分管道处于地下埋设,而部分管道处于地上铺设,无论是在地上还是在地下,如果施工设计过程中存在着一定的缺陷,都会导致天然气长输管道在运行使用过程中出现安全隐患。近年来,由于管道泄漏,造成城市火灾频发,据统计,2022年全国发生燃气事故802起,造成66人死亡、487人受伤;发生天然气事故270起,死亡18人,受伤89人[1],给国家和人民生命财产造成重大的损失。

石油天然气管道泄漏有火灾爆炸、环境污染、毒害等严重后果。轻烃泄漏后,因管道内外压差,释放管内轻烃介质,气烃扩散至大气后当遇明火且浓度达到爆炸极限,因此对天然气管道的泄露和检测必须得到足够的重视。

2. 管道泄漏机理与原因分类

天然气管道长期的运行,造成泄漏的原因比较多[2][3],经总结主要有一下的原因:

(1) 管道腐蚀, (2) 法兰泄漏, (3) 阀门泄露, (4) 螺纹泄露, (5) 由于地面施工导致的管道损坏, (6) 地面沉降导致的管道损坏, (7) 掺氢导致管道氢脆引起泄漏, (8) 人为破坏导致管道泄漏。

许多天然气站场由于不能采取合理的泄漏防护措施与泄漏检测技术,或是当出现微小泄漏时不能及时有效地予以处理,会导致泄漏的不断扩大而造成重大环境污染,设备损坏与火灾事故发生。针对天然气输送以及站场特点,在常规防泄漏技术的基础上提出改进措施或采用更加科学实用的防泄漏新技术而彻底杜绝站场泄漏事故的发生。

2.1. 天然气管道腐蚀造成的泄露

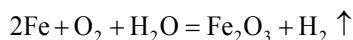
原因分析

由管道腐蚀引起的天然气泄漏的原因有很多: (1) 由于管输天然气中的硫化氢与水作用形成氢腐蚀; (2) 土壤中酸碱介质对管线的长时间腐蚀作用导致管壁穿孔而引起泄漏; (3) 管道自身的老化造成的泄露; (4) 管道拉伸力的共同作用下会产生应力断裂而泄漏。

例如在铺设过程中管道自身质量存在缺陷,导致长期使用防腐层受到一定程度的破坏,同时管道的阴极保护失去作用以及管道连接处焊接出现质量问题等等,这些因素都会导致长输管道在安全运行使用过程中受到极大程度的影响。

在所有的管道腐蚀中,以硫化氢的腐蚀最为严重,其原理如下:

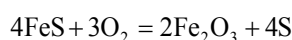
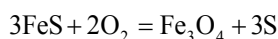
(1) 氧和水的存在会对管线造成很大的腐蚀,尤其在应力比较集中的部位容易造成管线的破损,这种腐蚀性危害非常大,由于时间的延长,氧和水的存在是造成管道内部腐蚀的主要原因之一。钢管中含有铁元素,它与水和氧发生化学作用,最后生成三氧化二铁,并放出氢气,造成管道内部腐蚀[4][5]。



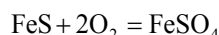
减少水的措施：做好施工期的管理工作和投产时的清管工作。投产时，对管道进行干燥处理；做好运行期的脱水和脱氧工作。

(2) 硫和细菌引起的腐蚀

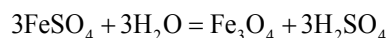
天然气中含有硫化氢等硫化物，在运输时和管道反应，生成硫化铁，并在管内活化剂(氧气)的作用下，产生腐蚀，其反应如下：



管道中还有一种细菌存在，这种细菌叫硫酸盐还原菌，它一般附着于管线的内表面，利用硫酸盐类进行繁殖。管道硫酸盐的生成反应式如下：



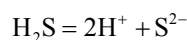
上式中的硫酸盐在还原菌的作用下，生成物四氧化三铁，反应如下：



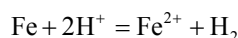
(3) 氢离子引起的腐蚀

从地下开采出来的石油天然气都存在一定的硫化氢，尽管在油气输送过程中除去硫化氢气体，但是由于不能完全除干净，少量的硫化氢仍然存在于天然气中，其产生腐蚀管道的机理如下：

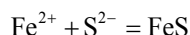
天然气中所含的硫化氢遇水形成氢硫酸，其离子形式如下：



铁和氢离子发生氧化还原反应，形成 Fe^{2+} 以及 H_2 分子：



铁离子和硫离子反应，生成硫化亚铁：



这种硫化铁沉积物在管壁上形成一层钝化膜，然而，该钝化膜通常不够致密，无法有效阻止进一步的腐蚀反应，导致腐蚀继续进行。内壁腐蚀不仅表现在均匀腐蚀，也常常表现为局部腐蚀，尤其是在管道的弯曲部位、接头处以及低流速区域，这些区域更容易形成腐蚀物的堆积。这种管道内壁表面的不规则性和沉积物的附着，容易形成应力集中点，最终导致管道失效。

氢原子的体积很小，在一定的压力下向钢中扩散。氢原子聚集于非金属夹杂物和气孔中。在存留处，氢原子变为氢分子，体积增大 20 多倍，体积增大的过程中，存留处压力急剧增大，如果该压力超过金属开裂应力时，造成裂纹扩展，在内侧形成平行于金属表面的裂纹。同时，氢原子与钢中不稳定的碳化物起反应生成甲烷，造成钢局部脱碳，使钢材变松变脆，最后形成漏洞。

2.2. 法兰泄露

造成法兰泄露的原因

石油天然气管道通过螺栓垫片把管道连接在一起，使其根据工艺需要进行拆卸，但是，长期使用导致出现石油天然气泄漏的情况。

(1) 由于脉冲流、工艺设计不合理，减振措施不到位或外界因素造成管道振动，致使螺栓松动，造成泄漏。(2) 密封垫片压紧力不足，法兰结合面粗糙，安装密封垫出现偏装，螺栓松紧不一，两法兰中心线偏移。(3) 密封垫片长期使用，产生塑性变形、回弹力下降以及垫片材料老化等造成泄漏。(4) 螺栓由于

热胀冷缩等原因造成的伸长及变形,在季节交替时的泄漏主要是由这种故障引起的。(5) 天然气腐蚀,造成泄漏,垫片和法兰不能很好的耦合而泄漏。(6) 管道变形或沉降造成法兰泄漏。

2.3. 阀门泄露

阀门泄露原因

长输天然气管道阀门泄漏是管道安全运行的关键风险点,其成因涉及材料、设计、操作及环境等多方面的因素,同时阀门由于受到天然气的压力、温度、振动、腐蚀、冲刷等影响,导致管道在生产使用中发生泄露,一般发生在填料密封处,焊接连接处,丝扣连接处及阀体上的薄弱部位。

(1) 阀体本体缺陷与老化:阀门在制造过程中可能存在铸造缺陷、材料不导表或工艺不合格等问题,导致阀体内部存在微裂纹或疏松;长期运行后,阀体因天然气组分的辐射或介质冲刷而壁厚减薄,引发泄漏。

(2) 密封结构失效:阀门的密封部位(如法兰连接,填料孔、注脂嘴)因长期受温度、压力变化影响,出现密封垫片老化、塑料变形或压紧力不足,填料磨损或注脂嘴单向阀失效也会导致密封失效。

(3) 操作维护不能:开关阀门时操作力度过大,频率过高或未规范执行,会加速阀门部件磨损;检修维护不及时,未定期更换填料,紧固螺栓或进行防腐处理,导致隐患积累,尤其在季节交替时热胀冷缩效应家具泄漏风险。

(4) 外部环境与应力影响:管道沿线地质活动(如地震、沉降)或外部机械振动可能引起阀门连接处应力集中,导致螺栓松动或焊缝开裂;腐蚀环境,如土壤潮湿、酸碱物质会加速金属部件老化。

(5) 设计缺陷:阀门选型压力等级不匹配,安装时与法兰中心线偏移或螺栓松紧不匀,形成局部用力集中;施工前对焊缝未进行无损检测,可能遗留裂纹。

2.4. 螺纹泄露

螺纹泄露原因

天然气输气站场仪器仪表通常通过二阀组与输气管道采用 API 锥管螺纹进行连接。API 锥管螺纹的啮合螺纹间存在一定间隙,园螺纹主要在啮合螺纹齿顶和齿底形成螺纹型通道,偏梯形螺纹主要在啮合螺纹导向面间,以及螺纹齿顶和齿底之间存在螺纹通道,因而影响了螺纹的密封性。

2.5. 由于地面施工导致的管道损坏

由于石油天然气管管理一般在几百公里或上千公里,有时穿过一些交通要道或者建筑工地,由于施工挖掘造成管线的破损,造成天然气泄漏,这几年由一些特定的工程施工或建筑施工导致天然气管道泄漏的例子很多。一般天然气管线沿途有许多地面标识,但由于施工方责任心不强,或者疏忽,施工挖掘造成管道破损漏气[6]。施工机械在道路施工中,各类施工机械如挖掘机,装载机压路机等频繁作业会产生强烈的振动,这种振动通过地面传递,可能会导致管道的固定支架松动,管道与支架之间的连接部位出现缝隙,进而影响管导在运行过程中产生位移,长期的振动还可能使管道焊接处出现微裂纹,随着时间的推移,裂纹逐渐扩展,导致管道强度降低,增加燃气泄漏的风险。

2.6. 地面沉降影响

施工过程中土方开挖,填方等作业过程,容易引起周围地面的沉积,有的管线通过耕地,在浇灌庄稼时,出现管道下部被流水掏空,有的管道经过一些地下孔洞,大型古墓上部,可能会出现管线下部空虚,如果燃气管道所处的区域发生地面沉积,管道发生变形,当沉降不均匀时,管道会受到拉伸或挤压,可能或导致管道接口处密封失效,燃气泄露。由洪水、地震或滑坡等自然行为引起的事故导致地面沉降

还可能使管道局部埋深变浅，增加管道受到外力破坏的可能性。

2.7. 管道掺氢面临的安全风险

现在随着氢能源的发展，为了节省成本，利用天然气管道掺氢进行输送，而在用户端掺氢天然气能加快燃烧速度，提高燃烧效率，使燃烧更加充分，但是，氢气可能渗透并聚集在管道钢中，引发氢脆现象，导致材料韧性下降和脆性开裂，尤其在高压、高掺氢比或高强度管线钢条件下风险加剧；此外，掺氢后管道内可能出现气体分层现象，即氢气因密度小上浮、甲烷下沉，造成浓度分布不均，影响输送均匀性，尤其在停输或低流速工况下更显著。

2.8. 人为破坏油气管道造成的油气泄漏

在上世纪八十年代以后，各地私人炼油厂拔地而起，一些不法分子将黑手伸向输油管道，他们在油气管道经过的农田，利用一定的技术，在管道上打眼偷油，导致管道泄漏，造成管线压力波动，造成油气燃烧风险和环境污染，给国家造成一定的财产损失。

3. 泄漏预防与控制技术

3.1. 针对管道腐蚀采用的阴极保护技术

对于新建的输气站，采用牺牲阳极系统与柔性阳极系统，具有对站外管道干扰少、电流分布均匀、管道间电流干扰与屏蔽少等优点；对于老站场采用深井阳极系统，具有开挖工作量小、便于施工等优点。改造传统的接地系统，将传统接地系统改造为以锌合金阳极集中接地为主的形式。

牺牲阳极由电位较负的金属材料制成，例如镁锌等金属，当它与被保护的管道连接时，自身发生溶解，从而抑制了管道的腐蚀，故称牺牲阳极。牺牲阳极保护原理图见图 1。线路连接中是将电位较负的金属或者还原性较强的金属作为保护极，与被保护的管道相连构成原电池，管道成为电池的阴极，还原性较强的金属将作为阳极，这个过程实际上发生氧化还原反应，电流从阳极流向被保护的金属管道，电位较负的金属作为阳极受到腐蚀，天然气管道因而避免了被腐蚀得到了保护，因这种方法牺牲了阳极保护了阴极，就叫做牺牲阳极保护法。牺牲阳极是利用不同金属的电位差异，为受保护的管道提供电子，使被保护的金属处于电子过剩的状态，使金属表面各点电位处于同一电位值，从而金属表面不再有电位差，所以电子不再流动或者减少流动，从而达到减缓腐蚀的目的。

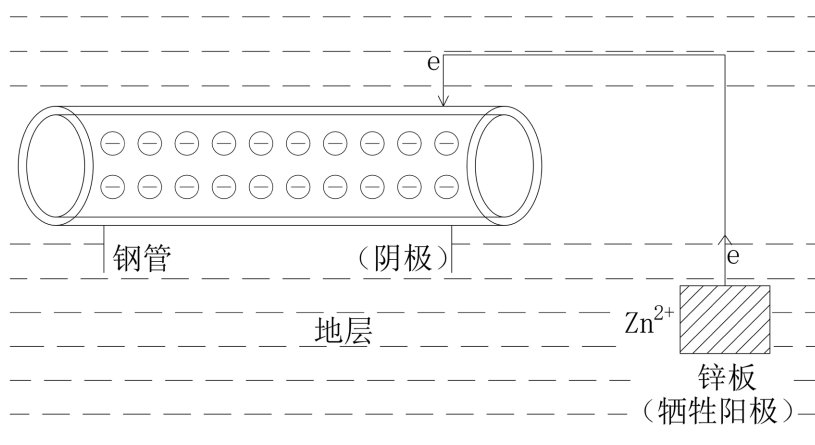


Figure 1. Principle of sacrificial anode protection

图 1. 牺牲阳极保护原理

3.2. 法兰泄露处理措施

发现法兰泄漏后,应进行检查与评估,确认损坏类型,从法兰变形,螺栓腐蚀,垫片失效等方面入手,排查法兰的锈蚀、应力松弛或者安装不当等引起的原因。

(1) 对于轻微的泄漏,一般采用放空和降压的方式,待管道压力降到很小时,重新拧紧螺钉固定,如果放空,可能会造成原油浪费,同时增加安全事故隐患。(2) 如果拧紧螺钉后仍有泄露发生,则关闭泄露阀门,更换新垫片,最好选用缠绕式金属垫片、金属圆环垫片或金属八角垫片替代,包金属及缠绕丝垫片不应有径向划痕、松散、翘曲等缺陷。(3) 对于不能停输的法兰,则采用法兰堵漏技术进行处理。采用带压堵漏技术先要设计并制造适用的密封卡具并安装在法兰泄露部位,再利用机械方法通过专用的密封工具向泄漏处注入适量的密封剂。密封剂在注入压力作用下填满堵漏卡具空隙,当其固化后便达到密封效果。(4) 对于因腐蚀造成的耦合面泄漏,根据损坏情况进行采取措施,更换同类型的符合工况的垫片,使用力矩扳手均匀地紧固螺栓,清洁或研磨封面,处理螺栓锈蚀,喷刷防腐材料或更换损坏的部件,对严重锈蚀管道进行更换改造。

预防措施:建议用户定期检查管道环境。

3.3. 阀门泄露处理措施

(1) 阀门泄漏主要是阀体泄露,是由于在生产过程中铸铁缺陷引起的,以及腐蚀和冲刷造成泄露,这种泄露要更换阀体。(2) 填料泄露,阀门阀杆采用填料密封结构处填料老化、磨损导致的泄露,通过更换填料来解决。(3) 单向阀失效造成注脂嘴泄露,在压力不高时注入密封脂来解决。

3.4. 螺纹泄露处理措施

对于 API 螺纹,通常使用铅油麻丝、聚四氟乙烯胶带等密封材料进行密封,但由于铅油麻丝固化后易挥发,聚四氟乙烯胶带无法完全紧密填充等原因,仍然无法彻底解决螺纹泄漏的问题。一般采用以下措施:(1) 采用具有弹性密封环结构的螺纹连接,(2) 对于主干线连接的地方,采用焊接方式代替螺纹连接。

3.5. 地面施工导致的管道损坏的处理措施

采取的措施:比较大项目在施工前,要和燃气公司进行沟通,以确定管道的位置、走向管径和埋深等信息,施工前必须取得燃气公司的《地下管线分布图》,遵循先探后挖的原则,对于狭窄区域采用人工深挖,对已经引起的缺陷,需要对燃气管道周围的土体进行加固处理,通过注浆等方式,提高土体的密实度和承载能力,防止道路施工引起的土体沉积对燃气管道造成拉伸或挤压破坏,注浆材料的选择要根据土体性质和工程要求进行科学确定,确定效果的持久性和稳定性。

3.6. 地面沉降导致管道损坏的处理措施

采取的措施:一旦发现由于土方开挖导致地面沉降,进行灌浆加固处理,或者改变管线走向[7],避开空虚部位。

3.7. 天然气管道掺氢导致漏气采取的措施

氢原子尺寸极小,渗入钢材晶格内部,在焊缝、缺陷、应力集中处聚集,降低钢材韧性,慢慢产生裂纹,对于老的管线,(1) 限制掺氢比例,使掺氢体积占比在 5%~10%;(2) 天然气里掺入极少量一氧化碳,它吸附在钢管内壁,阻碍氢气分子分解成氢原子渗入钢材内部;(3) 对管线进行定期探伤;对于新管线,内壁喷涂阻氢涂层(工程重点研究方向),喷涂 Al_2O_3 、 ZrO_2 、 TiO_2 陶瓷涂层、有机-纳米复合涂层,在钢

管内壁形成致密屏障,阻挡氢原子渗入基体,同时还可以抑制硫化氢腐蚀[8]。

3.8. 人为破坏油气管道造成的油气泄漏的整改措施

随着法治宣传和普及,以及公安机关的雷霆打击,这类情况现在很少出现,输油公司提高管理对策,管道有专人每天巡查,每人管理一段,不留死角,确保管道的安全运行,杜绝任何人为的破坏。

4. 泄漏检测与定位技术评述

4.1. 管道泄漏检测方法

据燃气泄漏检测原理,现有的城市燃气管道检漏方法可分为直接检测法和间接检测法。所谓直接检测法就是根据泄漏的介质,具体来说就是泄漏的气体来检测的方法,根据泄漏引起的管道流量、压力等输送条件的变化和泄漏引起的声、光、电等变化来检测的方法。

4.1.1. 直接检测法

(1) 火焰电离检测法

基本工作原理:在有电场存在的情况下,烃类(气态)在纯氢火焰灼烧下产生带电碳离子,带电碳离子被收集到一个电极板上并计数,当碳离子的数量超过预置值时,则表明周围空气中存在超过了警戒浓度的可燃气体,检测器即报警。

(2) 可燃气体检测法

基本工作原理:通过扩散作用从空气中取样,利用催化氧化原理产生一种与可燃气体浓度成正比的信号,一旦可燃气体浓度超过爆炸下限的 20%,继电器驱动信号便传送到远方控制板上的报警器并报警。

4.1.2. 间接检测法

(1) 压力分析法

管道在正常运行时,其压力值呈现连续变化的稳定状态。当管道发生泄漏时,泄漏点由于物质损失发生压力骤降,破坏了原有的稳态,因此管道开始向新的稳定状态过渡。在此过程中产生了一种沿管道以声速传播的扩张波,这种扩张波会引起管道沿线各点的压力变化,并将失稳的瞬态向前传播。在管道沿线设点检测压力,采用统计的方法分析检测值,提取出数据变化曲线,并与管道处于正常运行状态时的曲线作比较。如果现行状态曲线脱离其特有形式,则表明有泄漏发生[9]。

一般在管道压力极限状态即停输及升压时用此种方法,常用于新建管线、天然气转换或大修期间。当管线压力稳定后,管线的任何泄露都将使管线压力持续下降,可据此确定管道有无泄漏。

(2) 流量检测法

依赖于“流进必须等于流出”这一原则,其范围从简单地计算管线的进出流量到采用先进模拟技术的在线系统,这些系统包括用动态模型计算管线容积的变化。

(3) 土壤电参数检测法

根据管道泄漏点必然有漏铁的事实,漏铁会引起管道周围土壤电参数的变化,采用雷达系统(发射器和接收器)可通过检测土壤电参数准确定位地下管道的泄漏。该方法的主要优点在于检测定位准确性高,但仅仅为一种辅助方法,因为管道的防腐层漏电点不一定为泄漏点,因此,必须与其他燃气管道直接检测方法结合进行。

(4) 声学检漏法

当管道因腐蚀或破坏发生泄漏时,将产生频率大于 20 kHz 的振荡,这一频率在超声波范围内,可由相应的传感器检测到[10]。检测器通过记录信号强度对泄漏源进行精确定位。

(5) 分布式光纤检测法

分布式光纤检测法是一种高精度、长距离传输的实时监测技术。油气资源储运大多是在地下埋藏,规模大、结构复杂,综合分析油气管道储运技术特点,选用分布光纤传感技术,一旦管道出现泄漏,则会干扰光纤声波传递,光纤直径和长度折射率指标随之改变。同时,工作人员收集分析传感光线变化数据,即可获取管道震动信号,对信号数据处理后可精准定位管道泄漏位置。

(6) 漏磁检测法

漏磁检测法是一种用于金属管道缺陷检测的技术,通过捕捉管壁缺陷引发的一种检测技术。

5. 结论与展望

管道的安全运行牵动着国家和居民的日常生活,通过长期的天然气管道安装和安全设计以及管道运行中存在的问题研究,分析了管道运行中可能存在的天然气泄漏的原因以及处理措施,最后给出了管道泄漏的检测方法,对天然气安全运行有重大的指导意义。

建立科学的事故管理机制,对于预防管道事故、改进管理方式、提高安全水平都具有非常重要的作用。天然气管道存在的泄漏事件,会带来较为严重的后果,因此,应当重视长输天然气管道安全运行管理,采取科学有效措施加大管理力度,切实维护长输天然气管道的安全状态,推动天然气行业的稳步向前发展。

参考文献

- [1] 中国城市燃气协会安全管理工作委员会. 2022 年全国燃气爆炸事故分析报告[EB/OL]. 2023-02. <https://max.book118.com/html/2023/0626/8116110063005104.shtm>, 2023-06-26.
- [2] 狄彦, 帅健, 王晓霖, 等. 油气管道事故原因分析及分类方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(7): 109-115.
- [3] 王钰滔, 等. 国内外输气管道事故研究综述[J]. 化工设备与管道, 2022, 59(4): 1-7.
- [4] 王芳芳. 晋北地区含硫气田长输管道腐蚀规律与防腐技术对策[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学(北京), 2024.
- [5] 探究天然气长输管道安全运行与管理措施[J]. 科学管理, 2019(7): 1-4.
- [6] 梁永宽, 杨馥铭, 尹哲祺, 等. 油气管道事故统计与风险分析[J]. 油气储运, 2017, 36(4): 472-476.
- [7] 王蓉. 城镇超高压天然气管道的选线[J]. 煤气与热力, 2005, 25(9): 30-33.
- [8] 徐海峰. 开放空间掺氢天然气高压管道小孔喷射泄漏特性分析[J]. 石油化工高等学校学报, 2025, 38(4): 1-8.
- [9] 闫荣喜. 基于深度学习的管道泄漏检测及定位技术研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2025.
- [10] 吴猛猛, 董秀臣, 赵德耀, 等. 基于声发射的管路阀门内漏检测技术研究综述[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(6): 105-113.