

高压天然气管道泄漏及事故危害规律研究

刘文峰

国家管网集团北京管道有限公司 北京 100000

摘要：高压天然气管道是城镇燃气输送系统的核心载体，复杂地下服役环境极易诱发管道结构损伤与气体泄漏问题，隐患演变会引发多重安全事故。本文系统梳理高压输气管道的结构构造与运行特征，逐层剖析管道本体、外部环境、附属构件引发泄漏的内在成因，阐释泄漏缺陷的萌生与扩展全过程。探究泄漏气体扩散、燃爆升级及次生灾害的演化特征，区分不同泄漏工况对应的危害差异，结合现场运维实际搭建隐患排查、动态监测与前置防护体系，有效提升高压燃气管道的安全运行水平。

关键词：高压天然气管道；管道泄漏；演化机制；危害规律；风险防控

引言：高压天然气管道承担长距离、大流量的燃气输送任务，运行状态直接关联区域供气稳定性与公共安全。管道长期埋地服役，持续承受内部高压气流冲刷与外部地质、温湿度条件的综合作用，结构性能会出现持续性衰减。各类细微损伤逐步累积，极易诱发介质泄漏并衍生燃爆、坍塌等危险工况。掌握管道泄漏形成机理与灾害发展特点，搭建科学的管控与防护体系，能够有效规避管道安全隐患，维持燃气输配系统平稳运转。

1 高压天然气管道系统结构与运行特性

1.1 高压天然气管道整体构造组成

高压天然气输气管道以高强度钢制管材作为主体承载结构，构建密闭完整的气体输送通道。管网体系由主干管线和分支管线组合构成，承担长距离气源输送与区域供气的基础功能。管材选用专用承压碳钢材质，整体壁厚均匀、结构强度充足，可抵御高压气流冲击与地表土层荷载作用。管线多采用埋地敷设方式，依照现场地形完成平顺铺设，各管段有序衔接形成完整输气链路。土层包裹的敷设方式能够削弱外界外力干扰，减少直接撞击、刮蹭带来的结构损伤，维持管道输送全程的密闭状态与结构完整性^[1]。

1.2 管道关键附属构件结构特征

高压输气管道配备多种专用附属构件，配合主体管线完成稳定供气作业。截断阀门布置在管线分段位置，控制管路通断状态，方便开展分段检修与工况调节作业。调压构件可以平稳管路内部气压，缓解气流波动对管体结构的冲击影响。伸缩补偿构件设置柔性形变结构，应对环境温度变化带来的管体伸缩变化，抵消温度

应力对管道接口的破坏。各类密封管件填充管段衔接缝隙，封堵潜在漏气通道。所有配套构件均采用高压适配设计，结构紧凑、承压能力强，能够适应复杂地下输送环境。

1.3 高压管道介质输送运行机制

高压天然气依靠管路两端压力差值实现定向输送。气源端保持较高压力水平，供气终端压力相对更低，压力梯度推动天然气沿固定管路单向流动。密闭管道内壁约束气体扩散范围，保证介质集中在预设通道内输送。气流保持持续流动状态，管路内部压力处于动态平衡状态。调压构件持续制衡管路压力波动，抑制压力突变引发的结构损伤。稳定的压力调控方式，保障输气作业持续平稳开展，满足长距离、不间断的供气需求。

1.4 高压输气管道长期运行属性

高压输气管道长期处于密闭承压的服役状态，结构状态会随运行时间产生持续性变化。管壁反复承受内部气压与外部覆土压力，金属结构会产生渐进式疲劳损伤。地下潮湿土壤会对管道外壁形成缓慢腐蚀，天然气内部微量杂质会对管道内壁形成持续性冲刷。外界温度、地质沉降等环境因素，会改变管道整体应力分布，造成结构性能缓慢衰减。各类损伤问题具备缓慢累积、不易察觉的特点，会逐步影响管道整体运行稳定性。

2 高压天然气管道泄漏诱因与演化机制

2.1 管道本体结构损伤致漏成因

高压天然气管道长期承受内部高压气流冲刷与外部土层压力挤压，管材结构会持续产生不可逆损伤。管道加工焊接阶段残留的微裂纹、焊渣空隙等原始缺陷，会

在长期承压工况下持续扩张延展。管壁金属材质在反复交变荷载作用下产生疲劳老化,壁厚出现不均匀减薄现象,结构承载性能持续下降。天然气介质内部含有的微量硫化物与固体颗粒,会持续打磨、侵蚀管道内壁,形成点状蚀坑与条状磨损痕迹。各类细微结构缺陷不断累积,会在管壁形成透气缝隙^[2]。承压极限不足的管段会出现介质渗透问题,逐步发展为持续性泄漏故障,破坏管道密闭输送条件。

2.2 外部环境作用引发泄漏机理

敷设环境的各类外界因素持续干预管道结构状态,是泄漏问题产生的重要诱因。地下土壤存在酸碱差异,会对钢制管道外壁产生电化学腐蚀,慢慢蚕食金属结构基体,弱化管理整体强度。地质土层出现沉降、滑移或隆起变化时,管线会承受拉伸、扭曲、挤压等复杂外力,造成管体形变开裂。四季温度交替变化让管材产生热胀冷缩,管道接口位置集中堆积应力,引发接缝松动、开裂问题。地面堆载、周边土方开挖、地下水浸泡等外界干扰,都会破坏管道结构完整性,催生不同程度的泄漏隐患。

2.3 管线附属构件失效泄漏成因

阀门、补偿器、密封垫片等附属构件是管网密封承压的薄弱点,构件失效会直接引发泄漏问题。阀门内部密封部件长期接触高压介质,材质会出现硬化、老化、开裂等损耗问题,密封密闭性能大幅衰减。伸缩补偿构件频繁完成形变调节,结构韧性逐步降低,对接缝隙会出现松动、渗漏问题。各类橡胶、金属密封垫片长期处于高压、潮湿工况,弹性性能逐步衰退,密封压紧度持续下降。构件衔接位置的密封屏障失效后,高压天然气会从缝隙位置外溢,成为管网泄漏故障的高发点。

2.4 天然气管道泄漏萌生与扩展过程

管道泄漏的形成存在循序渐进的发展过程,隐患演变具备明显的阶段性特征。损伤初期仅存在微观裂纹、细小蚀点等隐蔽缺陷,管道依旧保持正常输送状态,不会出现明显漏气现象。长期压力冲击与环境侵蚀会持续扩大缺陷尺寸,微观破损发展为肉眼可见的细小孔洞与缝隙。介质从破损点位缓慢渗透,形成轻微渗漏状态。高速流动的气流持续冲刷破损位置,不断拓宽漏洞口径与破损面积。局部渗漏会逐步转化为持续性喷气泄漏,破损区域沿管壁横向、纵向持续延展。小型破损最终演变为结构性开裂,造成大量天然气外泄,彻底打乱管道正常输送工况。

3 高压天然气管道事故危害演化规律

3.1 泄漏介质扩散传播变化特征

高压天然气发生泄漏后,高压介质会快速冲破破损点位向外扩散。高压气流初始喷射速度较快,气体在管道出口形成集中喷射状态,短距离内保持高密度聚集形态。气态天然气密度低于空气,会在浮力作用下向上方及周边空间蔓延。开阔区域内气体扩散范围持续拓宽,浓度随扩散距离增加逐步降低。密闭或半密闭空间会阻碍气体散逸,大量天然气在低洼、封堵区域堆积,形成高浓度气团^[3]。外界气流、地形遮挡、地表植被都会改变气体扩散路径,让扩散范围呈现不规则分布状态,持续积累可燃气体浓度,为后续危险工况提供基础条件。

3.2 泄漏衍生燃烧爆炸危害演变规律

泄漏天然气接触火源后会触发链式危险反应。零散低浓度气体遇明火会产生瞬时燃烧现象,火焰沿气团蔓延方向持续推进。气团浓度达到可燃区间时,燃烧强度会大幅提升,形成稳定持续的喷射火焰。受限空间内部气体大量堆积,燃烧过程会快速提升内部温度与压力,超出空间承压极限后就会发生爆炸。爆炸产生的冲击波会向四周辐射,冲击周边构筑物与设备设施。燃烧产生的高温会持续灼烧周边介质与构件,扩大危险影响范围。危险反应会从单纯气体燃烧逐步升级为爆燃、爆轰,危险等级随气团聚集量持续升级。

3.3 管道泄漏诱发次生灾害发展特征

天然气泄漏引发的初始事故会持续衍生各类次生灾害。持续燃烧产生的高温能够引燃周边植被、建筑材料、工业物料,引发连片火灾险情。爆炸冲击波会损毁周边管线、支护结构、地面设施,造成局部结构坍塌、设备损毁。高温烟气与燃烧产物会污染周边空气环境,夹杂的颗粒物与有害成分滞留空中。事故造成的结构破坏会破坏原有排水、供气、通行体系,引发区域功能瘫痪。破损管道持续泄出的气体会反复堆积,形成重复燃爆风险,拉长事故影响周期,扩大灾害覆盖范围。

3.4 不同泄漏状态下危害扩散差异特征

泄漏孔径、泄漏压力的不同,会让灾害扩散呈现明显区别。微小缝隙泄漏的气体溢出速度平缓,扩散过程缓慢,危险区域形成周期更长,初期隐蔽性更强。中大孔径破损会造成高压喷射式泄漏,气体扩散速度快,短时间内即可形成大范围可燃区域。高压工况下泄漏流量更大,气团聚集速度更快,燃爆触发概率与破坏强度更高。低压缓慢泄漏多以局部燃烧、轻度污染为主,高压集中泄漏易触发强冲击爆炸与连片灾害。泄漏状态直接决定灾害形成速度、破坏强度与蔓延范围,构成差异化

的危害演化趋势。

4 高压天然气管道泄漏防控与风险管控

4.1 管道运行隐患排查技术体系

高压天然气管道长效安全运行,依托系统化的隐患排查技术体系作为支撑。整套排查模式围绕管体结构、附属构件、运行环境三大核心维度开展落地作业。针对埋地钢制管道,采用无损检测技术排查管壁腐蚀、壁厚减薄、内部裂纹等隐蔽性缺陷,精准定位管材结构薄弱点。针对阀门、补偿器、密封接头等易损构件,开展逐项拆解检查与外观核验,排查老化松动、密封失效、结构形变等常见问题。对管线敷设区域开展全域环境排查,掌握土层腐蚀特性、地质沉降变化、周边施工活动等外界影响因素^[4]。分层分类建立隐患识别标准,区分轻微隐患、一般隐患与重大隐患,对应匹配差异化的排查频次与处置方式,搭建覆盖全管线、全周期的排查框架,从源头捕捉各类潜在泄漏风险。

4.2 管道泄漏前置预防管控举措

前置预防聚焦风险源头治理,从运行管控、设备养护、现场管理多个维度阻断泄漏萌生条件。规范管道日常运行工况管控,稳定管路输送压力,严控压力波动幅度,减少交变载荷对管体结构的疲劳损伤。落实常态化设备养护工作,定期更换老化密封配件,对阀门、补偿构件开展润滑维护与性能调试,维持附属构件稳定工作状态。强化管线沿线场地管理,管控管线上及周边施工活动,杜绝机械挖掘、土方堆载对管线造成外力损伤。针对老旧管段、高腐蚀区域、地质不稳定地段,提升巡检与养护频次,提前介入处理轻微腐蚀、管壁减薄、接口松动等早期问题,避免微小缺陷持续发展为泄漏故障。

4.3 泄漏隐患动态监测治理手段

动态监测能够实时捕捉管道运行状态变化,实现隐患早发现、早处置。依托管线布设的传感设备,实时采集管路压力、介质流量、温度等运行参数,捕捉参数异常波动带来的风险信号。参数出现异常偏移时,快速锁定对应管段位置,开展现场核查作业,甄别渗漏、堵塞、构件失效等问题。搭配人工巡检模式,定期核查管线地表状态、警示设施完好度,观察管线周边是否出现植被枯萎、地表冒泡、异味扩散等泄漏表象。对排查发

现的隐患点位建立专项治理台账,明确处置方式与整改时限,完成修复后开展二次核验,保证隐患彻底清零,杜绝隐患滞留引发的后续安全问题。

4.4 管道安全防护体系完善策略

完善管道安全防护体系,能够全方位提升高压输气管线的抗风险能力。优化管道本体防护措施,对裸露、腐蚀严重的管段重新做防腐涂层处理,修补破损防护层,隔绝土壤与水汽对钢材的侵蚀。升级管线隔离防护设施,规整管线警示标识、防护围挡,提升外界人员与施工队伍的管线保护意识。健全分级管控机制,细化日常巡检、专项排查、故障处置的作业流程,明确岗位作业权责,规范现场操作行为。结合管线服役年限与运行工况,动态更新防护重点区域,针对性强化老旧管段、高危地段的防护力度^[5]。持续优化设备配套配置,更新老旧监测与防护装置,提升整套管网的安全运行稳定性,筑牢高压天然气管道长效运行的安全屏障。

结束语

高压天然气管道泄漏存在明显的阶段性演变特征,不同诱因催生的破损缺陷,会展现出差异化的灾害扩散与升级趋势。各类泄漏隐患的形成与发展存在可循规律,燃爆灾害及次生风险的扩散强度,与泄漏孔径、运行压力、环境条件密切相关。落实常态化隐患排查、动态监测与前置防控手段,持续完善管道安全防护体系,可有效抑制泄漏隐患滋生蔓延,为高压燃气管道安全运维提供可靠保障。

参考文献

- [1] 赵延平. 高压天然气管道泄漏及事故危害规律研究[J]. 石化技术,2026,33(2):93-95.
- [2] 陈利琼, 赵奎, 许铎, 等. 山区高压埋地天然气管道泄漏扩散的三维模型及危害边界[J]. 科学技术与工程,2025,25(1):165-175.
- [3] 孙文祥, 汪坤, 朱海. 高压天然气储运管道泄漏定量风险评估研究[J]. 非常规油气,2022,9(2):132-139.
- [4] 王莉莉, 胡芳问, 王启利, 等. 高压天然气管道喷射火危害研究[J]. 火灾科学,2025,34(1):30-39.
- [5] 荆琦, 严爽, 范子瑜, 等. 高压大口径天然气管道泄漏事故动态情景推演及后果评估[J]. 西安科技大学学报,2026,46(3):598-610.