

隧道内埋地燃气管道泄漏事故原因分析及对策研究

庄伟波

中国市政工程华北设计研究总院有限公司第十设计研究院 天津 300074

摘 要: 随着我国城镇化进程的加快及基础设施建设的推进,地下燃气管道作为城市能源的重要组成部分,其安全运行对居民生活质量及公共安全具有重要意义。近年来,我国地下燃气管道泄漏事故频发,给周边环境及居民安全带来严重威胁。因此对隧道埋地燃气管道泄漏事故原因进行深入分析,提出有效的预防措施,是当前迫切需要解决的问题。本文通过分析隧道内埋地燃气管道泄漏事故的原因,提出相应的解决对策,旨在降低地下燃气管道泄漏事故的发生,保证城市燃气安全稳定。

关键词: 隧道;埋地燃气管道;泄漏事故;原因及对策

隧道埋地燃气管道泄漏事故是由多种因素共同造成的,涉及到管道材质、施工质量、外部环境和管理和维护等诸多因素。从材质上看,由于长期埋置在地下,受土、电化学等多因素影响,易发生老化磨损,导致泄漏风险增大。另外施工质量也是一个不容忽视的因素,如果管线焊接质量差,密封不严,或施工时没有严格按照规范要求进行操作,就会为以后的泄漏埋下隐患。从外部环境来看,温、湿、振等特殊环境会对管线产生不利影响,而外力作用(如第三方施工损伤、车辆碾压等)会直接威胁到管线的安全性。为此应从多方面采取综合措施,才能有效地防止管道泄漏,保证城市燃气安全稳定运行。

一、隧道内埋地燃气管道泄漏事故原因分析

(一) 管道材料腐蚀与疲劳失效

管道材料的腐蚀和疲劳破坏是引起埋地燃气管道泄漏的主要原因,腐蚀分为内腐蚀与外腐蚀两大类,气体中含有的水分、硫化氢等杂质会与管壁发生化学反应,使管壁变薄。外腐蚀主要由土壤中的水分、酸碱物质和微生物作用等因素引起,特别是土壤中的酸性环境会加快管壁的腐蚀速度。疲劳破坏主要发生在弯头和三通等应力集中部位,这些部位长期承受交变应力,极易产生疲劳裂纹,造成泄漏。另外管道材料老化还会降低其耐腐蚀、耐疲劳性能,进而增加泄漏风险。

(二) 焊接工艺缺陷与焊缝质量失控

焊接过程缺陷和焊接质量失控也是泄漏事故发生的重要原因,焊接时如操作不当,极易产生气孔,夹渣,未焊透等缺陷。这些缺陷不仅降低了焊缝的强度,也降

低了焊缝的密封性能,同时也给泄漏埋下了隐患。例如,气孔使焊缝致密度下降,气体可从微细孔中漏出;夹杂物的存在使焊缝形成薄弱点,易受应力而产生裂纹。另外,焊接后的无损检测也是十分重要的,若检测方法不当,或检验人员操作不当,则可能造成焊缝缺陷的漏检。因此要防止泄漏,必须严格控制焊接工艺,加强焊接质量检测。

(三) 第三方施工破坏与机械损伤

第三方施工造成的破坏是造成地下燃气管道渗漏的主要原因之一,在施工隧道、道路施工或周围建筑物时,有可能因施工机械而造成燃气管道的意外损坏。如挖土机、推土机等重型机械,如果不知道地下天然气管线的具体位置,就有可能挖开或碾压管线,导致管线断裂。另外在埋地较浅、管线周围土体松动等情况下,振动会引起管线的机械损坏。为减少此类事故的发生,应在施工前对地下管道进行详细调查,并采取有效的保护措施,如设置警示标志,安装管线保护装置等。

(四) 地质沉降与隧道结构变形

地质沉降和结构变形是影响埋地燃气管道安全运行的重要因素,地质沉降会给管线带来额外的压力,特别是在沉降不均的情况下,管线可能发生弯曲、拉伸或压缩变形,这种变形将破坏管线的密封性能,造成泄漏。另外隧道结构变形对管线也有一定的影响,例如隧道衬砌的破裂和变形,可能会对管线造成机械损坏。软土地区、地震多发区等地质条件复杂的地区,存在着较高的地质沉降及隧道结构变形风险。因此在管线设计阶段,应充分考虑管线的地质情况,采取适当的保护措施,如

设置柔性接头，使用具有较大变形能力的管线材料。同时对隧道及管道进行定期监测，及时发现和处理隐患，对防止泄漏具有重要意义。

二、解决隧道内埋地燃气管道泄漏事故的对策

（一）基于智能感知的泄漏预警系统构建

对隧道内埋地燃气管道进行安全管理，预防和及时发现泄漏是非常重要的。为构建高效智能化的泄漏预警体系，需要将多参量融合的智能监控及风险预测模型与实际应用紧密结合。

多参数融合监测是实现管道泄漏早期预警的前提，利用光纤光栅传感网络，可同时监测管道的应变、温度及振动。在具体实施过程中，通过引进高精度、长期稳定的光纤光栅传感器，其应变监测精度达到 $1\mu\epsilon$ 、温度测量精度优于 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、振动检测灵敏度优于 0.1 g 。在管线节点、弯头、易受力部位等关键部位，合理配置传感器，形成全方位监控网络。在传感器布置及优化中，需要根据管线布置及地质情况进行传感器布设，在保证各检测点能够准确反映管线状况的前提下，避免冗余和盲区。并利用遗传算法等优化算法，确定传感器的最优数目及位置，使监控效果达到最大。之后构建稳定可靠的数据采集系统，保证传感器数据能及时准确地传送到数据中心，可采用工业级通信协议及加密技术，保证数据的安全稳定传输。为满足实时监控要求，设定数据采集频率，如每秒1次。此外还可引进人工智能风险预测模型，以LSTM神经网络为基础，将历史监测数据（应变、温度、振动等）、材料、服役年限等静态信息输入到模型中，对模型进行训练，识别出泄漏前的异常模式。对泄漏概率进行动态评价，当发生概率超出预定阈值（例如0.8）时，触发报警机制。为直观地显示监控参数和警报标准，可参考表1：

表1 监测参数和预警阈值

监测参数	精度/范围	预警阈值
应变	$1\mu\epsilon$	大于 $500\mu\epsilon$
温度	$\pm 0.5^\circ\text{C}$	大于 50°C
震动	0.1 g	大于 0.5 g

由此可见，基于智能传感的管道渗漏预警系统，可实现对地下燃气管道泄漏的早期预警，为应急处置和事故处置争取宝贵的时间，有效保障公众安全。

（二）全生命周期管道完整性管理

隧道埋地燃气管道发生泄漏事故，不仅对公众安全构成威胁，而且可能引起环境灾难。以风险评估和预防

维修理念为基础，以管道全寿命周期为主线，综合运用技术和管理手段，保证管道在全寿命周期内的安全可控。高精度无损检测技术可以实现管道缺陷的早期检测，动态预测模型可以对管道的全寿命风险进行预警，同时国际标准的实施也为管道的安全管理提供了法律和技术保障。

在具体实施过程中，可引进推广相控阵（PAUT）和电磁超声（EMAT）技术，以取代传统超声探测（UT）。采用电子扫描控制声束偏转的方法，可实现多个角度和深度的探测，使缺陷的检出率提高到99%（传统的UT是85%）；电磁超声技术利用电磁耦合原理，在高温高压条件下工作，不需要耦合剂，可用于管道内、外壁的无损检测。而且还应制定《隧道内埋地燃气管道无损检测技术规范》，对检查次数、检查方法和验收标准作出规定，要求检测频率不能低于1次/5年，对高风险地区，监测频次应提高到两年一次。同时为实现腐蚀速率的动态预测，可基于COMSOL多物理场仿真软件，构建管线腐蚀-应力耦合模型，并结合现场实测数据，对管线腐蚀速率进行动态预测。该模型通过考虑多种因素的影响，如土壤侵蚀、管线材料和运行压力等，预测误差在10%以内。参数设置腐蚀挂片尺寸50毫米×25毫米×2毫米，材料和管道一样，埋深覆盖整个管道断面，每季度收集一次挂片数据，并将其输入模型中用于参数标定。此外，在具体实施中需严格遵守API 1160《管道完整性管理系统》的要求，每隔5年对管道进行一次全面的内检，对管道的几何形变、腐蚀缺陷、裂纹等进行全面的内检。检验完成后，编写《管道完整性评估报告》，对缺陷的类型、部位、大小和剩余寿命进行了详细的说明。这份报告必须经过第三方机构的审核，才能作为管道维修和维修的依据。

（三）隧道-管道协同防护结构设计

基于结构力学和材料学原理的隧道-管道协同防护结构设计，可通过采用柔性连接吸收隧道形变应力、冗余设计提高可靠性、防腐涂层增强延长管道使用寿命、结构健康监测实现实时预警。这一设计考虑了隧道与管线的相互作用，建立了一套全方位、多层次的安全防护系统。

在具体实施过程中，柔性连接方面，为保证管道在沉降变形过程中能有效地吸收应力，降低泄漏风险，需满足轴向补偿不少于50 mm的要求。同时在增加备用管线（N+1余度）时，需保证备用管线与主干管线的切换方式灵活可靠，且备用管线也要满足安全供气要求。而

且为保证涂层与基体牢固结合，有效隔离腐蚀性介质，实现涂层厚度3 mm以上、剥离强度>15 N/mm。阴极保护系统需要保持-850 mV~-1200 mV的电位范围，并对其定期进行检测和调节，以保证保护效果的持续有效。此外还应注意结构健康监测智能升级，MEMS倾斜仪的安装要求在0.001°的分辨率下，才能准确监测隧道结构的微小变形。在此基础上，构建传感器与管线应力调节系统联动机制，实现管线变形异常时自动调节管线应力，防止泄漏事故发生。为充分展示相关的技术参数，可参考表2：

表2 隧道-管道协同防护结构设计的相关技术参数

技术类别	关键参数	技术标准
柔性连接	波纹管补偿器轴向补偿量	≥ 50mm
防腐层强化	SPUA 涂层厚度	≥ 3mm
剥离强度	>15N/mm	-
阴极保护电位	-850mV~-1200mV vs CSE	-
结构健康监测	MEMS 倾角传感器分辨率	0.001°

(四) 智慧化应急响应与修复技术

将应急响应和应急处置技术相结合，是解决隧道埋地燃气管道泄漏事故应急处置效率和安全保障的关键。构建数字孪生应急预案推演系统，将BIM（BIM）与GIS深度融合，可实现地下燃气管网三维可视化管理，并对各类泄漏情景进行动态模拟。通过对泄漏孔尺寸、管内压强等参数的分析，准确计算瓦斯扩散路径和浓度分布，对可能发生的爆炸危险区进行评估，为应急决策提供科学依据。

在具体实施过程中，非开挖快速修补技术是其中的核心内容。通过引进紫外光固化内衬修复技术（CIPP），即将涂有光固化树脂的软管插入破损管线，然后用紫外灯照射，使其快速固化于管道内壁，形成一层牢固的内衬。该技术可显著缩短传统修补时间至8小时，且固化

后内衬材料承载力可达到原设计压力1.6倍，可保证大修管线结构的安全性和长期运行可靠性。此外，机器人协同操作进一步提高了应急响应的智能性。装备高精度激光甲烷探测器（灵敏度可达1 ppm）的巡检机器人，实现复杂环境下自主航行，实时监控泄漏点并准确定位。该机器人具备高压下（耐压≥4 MPa）快速封堵气体的能力，可有效控制气体泄漏，为后续安全维护创造条件。这些措施的实施不仅能大幅提升应急响应速度和处置效率，还能大大降低运行风险，为保障城市燃气安全提供技术支持。

结束语

综上所述，造成隧道埋地燃气管道泄漏事故的原因是多方面的，应采取多种预防措施。通过构建智能感知的泄漏预警系统，引进全生命周期管道完整性管理、强化隧道-管道协同防护结构设计等措施，可有效减少事故发生，保证城市燃气安全稳定。未来，随着技术水平的不断提高和管理水平的不断提高，相信隧道埋地燃气管道的安全性将会得到更好地保证，从而为城市的可持续发展做出贡献。

参考文献

- [1] 龚思璠，王庆云，彭皓，张驰，陈萍，欧阳珺.隧道内埋地燃气管道泄漏事故原因分析及对策研究[J].中国设备工程，2024，（15）：181-183.
- [2] 向鹏成，张子薇，李卉，贾富源.城市地下燃气管道泄漏事故致因因素系统分析[J].中国安全科学学报，2023，33（12）：140-147.
- [3] 张智贤，胡晓晓，张博，李跃飞，郭兰兰.综合管廊内燃气管道泄漏事故现场应急处置方案与决策分析[J].科技和产业，2023，23（02）：239-246.