

燃气管道泄漏爆炸风险评估及防控策略研究

张 旭 (济南港华环通市政工程有限公司, 山东 济南 250000)

摘 要: 随着城市化进程以前所未有的速度推进,燃气管道作为城市生命线工程中至关重要的一环,其安全运行状况与公共安全、社会稳定之间的联系愈发紧密。国内外大量燃气事故的统计数据显示,燃气泄漏爆炸事故时有发生,造成了严重的人员伤亡与财产损失。燃气泄漏爆炸现象有着复杂的物理化学特性,可燃气体从管道泄漏后,会在周围环境中扩散,一旦与空气混合达到爆炸极限,遇到火源便会引发剧烈爆炸。

在此基础上,为有效防控风险,提出了一系列针对性强的策略。基于物联网的智能监测系统,可实时感知管道运行参数,实现泄漏的早期预警;管道完整性管理技术,从设计、施工到运行维护全生命周期,保障管道结构与功能完整性;应急响应机制优化,通过完善预案、强化演练等措施,提升事故发生时的应对能力。研究成果能够为燃气企业的风险管控工作提供坚实的理论依据与有力的技术支撑,助力燃气行业安全、稳定发展。

关键词: 燃气管道; 泄漏爆炸; 风险评估; 层次分析法; 防控策略

中图分类号: X933.6

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 026-0154-03

Research on risk assessment and prevention and control strategies of gas pipeline leakage and explosion

Zhang Xu (Jinan Ganghua Huantong Municipal Engineering Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: With the unprecedented acceleration of urbanization, gas pipelines, as a vital component of urban lifeline engineering, have an increasingly close connection with public safety and social stability. Statistics from numerous gas accidents at home and abroad show that gas leakage and explosion incidents occur frequently, causing severe casualties and property losses. The phenomenon of gas leakage and explosion involves complex physicochemical properties: when flammable gas leaks from pipelines, it diffuses into the surrounding environment; once mixed with air within the explosive limits and encountering an ignition source, it triggers violent explosions.

To effectively prevent and control risks, a series of targeted strategies are proposed. An IoT-based intelligent monitoring system can real-time sense pipeline operation parameters and achieve early leak warnings. Pipeline integrity management technology ensures the structural and functional integrity of pipelines throughout their lifecycle, from design and construction to operation and maintenance. Optimized emergency response mechanisms enhance incident-handling capabilities through improved contingency plans and intensified drills. The research results provide a solid theoretical foundation and robust technical support for risk management in gas enterprises, contributing to the safe and stable development of the gas industry.

Keywords: gas pipelines; leakage and explosion; risk assessment; Analytic Hierarchy Process (AHP); preventive and control strategies

燃气作为清洁高效的能源,在我国能源消费结构中的占比已达 10% 以上。截至 2023 年底,全国燃气管道总里程超过 120 万 km,广泛分布于城市的各个角落,为居民生活、工业生产等诸多领域提供动力支撑。然而,随着燃气使用规模的不断扩大,管道泄漏爆炸事故却频频闯入大众视野。如 2021 年大连普兰店区“9·10”燃气爆炸事故,剧烈的爆炸瞬间摧毁了周边建筑,造成 8 人死亡、5 人重伤,给当地社区带来难以磨灭的伤痛,也为燃气安全管理敲响了警钟。因此,开展燃气管道泄漏爆炸风险评估及防控策略研究,刻不容缓,具有极为重要的现实意义。

燃气管道泄漏爆炸事故具有突发性、连锁性和高危害性等特点。天然气主要成分为甲烷,其化学性质活泼,爆炸极限为 5%-15% (体积浓度)。在复杂的

城市地下管网环境中,一旦管道出现破损,燃气便会悄无声息地泄漏,与周围空气逐渐混合。当泄漏气体在有限空间内积聚,浓度达到爆炸极限时,哪怕是极微小的点火源,如电器开关产生的电火花、金属摩擦产生的火星等,都可瞬间引发爆炸。爆炸产生的冲击波超压可达 0.3MPa 以上,相当于每平方厘米承受 30 公斤以上的压力,如此强大的冲击力,足以推倒坚固的墙壁、掀翻房屋的屋顶,对周边建筑物和人员造成毁灭性打击。

1 燃气泄漏爆炸风险评估体系构建

1.1 风险因素识别

通过故障树分析 (FTA), 确定燃气泄漏爆炸的主要风险因素包括:

管道本体因素: 在管道本体范畴内, 腐蚀缺陷和

焊接缺陷是影响管道安全的关键要素。腐蚀缺陷中外腐蚀占比高达 62%，外腐蚀通常由管道所处的土壤、大气等外部环境引发，会持续侵蚀管道外壁，削弱管道结构强度。焊接缺陷方面，依据 API 521-2014 标准，焊接过程中产生的未焊透、气孔、夹渣等问题，都可能在管道承受内部压力时成为应力集中点，进而引发管道破裂。

环境因素：地质沉降对燃气管道安全威胁不容小觑。当管道所处区域发生地质沉降，且年沉降量 $> 30\text{mm}$ 时，风险将显著增加。沉降会使管道产生拉伸、弯曲变形，严重时直接导致管道破裂，引发燃气泄漏，极大地提升了爆炸风险。

第三方破坏是导致燃气管道泄漏的首要原因，主要表现为机械挖掘损伤、违规占压等。例如，2020 年深圳“8·29”燃气爆炸事故中，施工单位未按规定进行探测即盲目开挖，直接导致管道破裂。

1.2 风险评估方法

本研究采用风险矩阵法并结合层次分析法（AHP）开展定量评估工作。在具体操作过程中，借助专家打分法来精确定各风险因素的权重。经过严谨的计算与分析，结果清晰地表明，第三方破坏（权重达 0.42）成为燃气管道的最主要风险源。其原因在于，城市建设活动频繁，施工单位在作业时若对地下燃气管道分布情况掌握不足，极易因机械挖掘等作业对管道造成直接损伤。

紧随其后的是腐蚀缺陷（权重 0.28），燃气管道长期埋于地下，受土壤酸碱度、湿度以及杂散电流等多种因素影响，管道外壁易发生腐蚀；同时，输送介质中的杂质也可能引发管道内壁腐蚀，削弱管道强度。焊接质量（权重 0.15）也是不可忽视的风险因素，焊接过程中的未焊透、气孔、夹渣等缺陷，会在管道运行过程中因承受压力而逐渐扩展，降低管道的密封性与安全性。

模糊综合评价法将管道运行状态细致地划分为五个等级：安全（0-0.2）、较安全（0.2-0.4）、一般（0.4-0.6）、较危险（0.6-0.8）、危险（0.8-1.0）。为了更直观地呈现评估效果，以某城市一段长达 20 km 的老旧管道作为实例展开深入分析。经全面的数据收集与复杂的模型运算，评估结果显示，该老旧管道中有 40% 处于较危险等级。

这部分的管道由于长时间服役，腐蚀情况加剧，部分接口处密封性下降，面临着较高的泄漏风险，急需立即采取修复措施，否则一旦发生燃气泄漏，极有可能引发爆炸等严重安全事故，对周边居民生命财产安全构成巨大威胁。

2 燃气泄漏爆炸防控策略

2.1 智能监测技术

开发基于光纤光栅传感器的分布式监测系统，是保障燃气管道安全的一大创举。该系统凭借其卓越性能，能够实时检测管道应力变化，精度可达 $\pm 0.01\%$ FS，近乎严苛的精准度为捕捉管道细微状况提供了有力支撑。同时，结合先进的机器学习算法，在预测泄漏位置方面表现出色，误差控制在 $< 2\text{m}$ 的极小范围内。目前，该系统已在上海浦东展开试点应用，成果斐然，成功将泄漏预警响应时间大幅缩短至 30 秒内，极大提升了应对泄漏风险的及时性。

物联网技术的深度应用，更是为燃气管道监测带来质的飞跃，实现了管道运行数据的实时采集与深度分析。具体而言，在管道沿线科学合理部署压力、温度、流量等多种传感器，如同为管道安插了众多敏锐的“触角”，全方位感知管道运行状态。并且，借助 GIS 地理信息系统强大的空间分析与可视化能力，构建起三维可视化监测平台。该平台如同一个直观的“管道运行指挥中心”，一旦某段管道压力骤降超过预先设定的阈值，系统便会迅速自动触发报警机制，同时精准定位泄漏点，为后续抢修工作争取宝贵时间，将泄漏危害遏制在萌芽状态。

2.2 管道完整性管理（PIM）

遵循 ASME B31.8S - 2014 标准，采用智能内检测技术（ILI）对燃气管道进行全面检测，每 5 年开展一次系统性排查。ILI 技术借助高精度传感器，能够深入管道内部，精准识别管道壁的腐蚀、变形以及裂纹等潜在缺陷，生成详细且直观的管道“健康”状况报告，为后续维护决策提供可靠依据。

在腐蚀防护领域，某燃气公司积极探索创新，对阴极保护系统实施全面升级。通过优化阴极保护站布局、更换高性能阳极材料以及引入智能监控与调控装置，成功将管道平均腐蚀速率从 $0.15\text{mm}/\text{年}$ 显著降至 $0.03\text{mm}/\text{年}$ 。这一举措大幅延缓了管道腐蚀进程，有效延长了管道使用寿命，极大地提升了燃气输送的安全性与稳定性。

针对检测过程中发现的裂纹缺陷，该公司采用焊接修复与复合材料补强相结合的综合性技术方案。在焊接修复环节，运用先进的自动化焊接设备与特种焊接工艺，由经验丰富的专业焊工操作，确保焊缝质量达到高标准，实现对裂纹的有效封堵。随后，采用高性能复合材料对修复部位进行补强，利用复合材料的高强度、耐腐蚀以及良好的柔韧性等特性，进一步增强管道修复区域的承压能力与抗腐蚀性能，严格确保修复后管道的承压能力完全符合设计标准，保障燃气

管道安全、稳定运行。

2.3 应急响应机制优化

制定分级预警机制，将风险等级划分为黄色（Ⅲ级）、橙色（Ⅱ级）、红色（Ⅰ级）。当监测系统检测到燃气浓度超过爆炸下限的 20% 时，触发黄色预警；超过 50% 时触发橙色预警；达到爆炸下限 80% 时触发红色预警。

应急预案需包含泄漏处置、人员疏散、医疗救援等环节。建议每季度开展一次应急演练，重点模拟第三方破坏导致的突发泄漏场景。例如，北京燃气集团通过 VR 模拟演练，将应急响应时间从 45 分钟缩短至 18 分钟。

3 案例分析

以 2021 年大连燃气爆炸事故为典型案例，深入调查结果显示：此次严重事故的根源在于第三方施工过程中，由于施工人员操作不当挖断了燃气管道。燃气管道被破坏后，大量燃气迅速泄漏，并在周边的密闭空间内持续聚集。经专业测算，此次爆炸的威力惊人，爆炸当量约达到 2 t TNT，造成了极为严重的人员伤亡和财产损失。

在防控方面，此次事故暴露出明显缺陷。相关区域并未安装智能监测设备，致使燃气泄漏初期未能及时察觉。当泄漏情况最终被发现时，应急响应也出现了严重延迟，足足推迟了 27 分钟，这使得泄漏的燃气有更多时间积聚，极大地增加了爆炸的风险和危害程度。

针对此类问题，应急管理部于 2022 年提出了一系列科学合理的改进措施。其一，在燃气管道系统中加装超声波流量计，该设备具有高精度的测量性能，精度可达 $\pm 0.5\%$ ，能够实时、精准地监测燃气流量变化，一旦出现异常即可快速察觉泄漏迹象。其二，建立起完善的分级预警机制，根据泄漏风险程度划分不同等级，针对各等级制定相应的应急处理流程，确保在不同情况下都能迅速、有效地做出反应。

事故发生后，该区域积极开展整改工作。首先，对受损的燃气管道进行全面更换，选用抗腐蚀性能更为强劲的 X80 钢材。这种材质不仅能有效抵御各类腐蚀因素，延长管道使用寿命，还能在一定程度上降低因管道腐蚀导致泄漏的风险。其次，安装智能监测终端，该终端具备先进的传感技术，可实现燃气泄漏自动报警功能。更为重要的是，它能够与阀门实现联动，一旦检测到泄漏，可立即自动关闭相关阀门，及时阻断燃气泄漏源，极大地提高了应对泄漏事故的及时性和有效性。此外，为避免类似第三方施工挖断管道的事故再次发生，对施工单位开展了全面、深入的

安全培训，着重强调燃气管道保护的重要性及相关操作规范。同时，建立起管道保护“双确认”制度，要求施工前施工单位与燃气管理部门双方对管道位置、走向等关键信息进行确认，施工过程中也需多次复核，以此强化对燃气管道的保护力度，从源头上减少因施工引发的燃气泄漏事故。

4 结论与建议

研究表明，智能监测技术可有效降低泄漏爆炸风险，但需注意以下问题：

机器学习模型需要周期性地对训练数据进行更新，以确保其预测精度不断提升。通过持续纳入新的燃气管道运行数据、环境参数变化以及已发生的泄漏事件记录等，模型能够捕捉到更多潜在风险因素，优化内部算法，从而更精准地对燃气管道泄漏爆炸风险作出预测。

建议：依据《城镇燃气管理条例》修订版的相关规定，着力构建区域燃气安全信息共享平台。该平台将深度整合燃气企业的运营数据、监管部门的监测数据以及相关单位的辅助数据。通过先进的信息技术手段，实现燃气设施分布情况的精准呈现、运行状态的实时监控以及维护记录的动态更新。平台以直观、清晰的界面，为各参与方提供全面且精准的决策依据，无论是燃气企业规划管网布局，还是监管部门制定检查计划，都能从中获取关键信息，助力科学决策，提升燃气安全管理整体效能。

同时，加强公众安全用气教育被视为保障燃气安全的重要一环。可通过社区宣传讲座的形式，邀请燃气专家深入社区，面对面为居民讲解燃气安全知识，现场演示正确的用气操作方法；在学校安全课程中融入燃气安全内容，从青少年抓起，培养正确的用气习惯；借助媒体公益广告的广泛传播力，在电视、网络等多平台投放，向大众普及常见故障识别与应对方法，如燃气器具出现异常声响、火焰颜色异常等情况的处理方式，以及泄漏应急处理步骤，包括发现泄漏后的正确关闭阀门顺序、如何迅速开窗通风、禁止使用明火与电器等要点。通过这些多样化的教育途径，切实提升公众安全意识，从源头上有效降低因人为误操作引发的燃气安全风险。

参考文献：

- [1] 中国城市燃气协会. 2023 年中国城市燃气行业发展报告 [R]. 北京：中国建筑工业出版社，2024.
- [2] 李明，王强. 基于光纤传感的燃气管道监测技术研究 [J]. 中国安全科学学报，2023，33(5):123-128.
- [3] 应急管理部. 2021 年生产安全事故统计分析报告 [R]. 北京：应急管理出版社，2022.