

长输高压天然气管道采空区治理

周金龙 (山西国化能源有限责任公司, 山西 太原 030000)

摘要: 长输高压天然气管道作为关键的能源运输通道, 承载着保障能源供应的重要职责。然而, 由于地质环境的复杂性, 采空区的出现对管道的安全运行构成了严重威胁。因此, 本文从燃气行业的角度探讨了长输高压天然气管道采空区的治理技术及方法, 涵盖了地质勘查与风险评估、注浆加固技术、智能化监测与数据分析技术等方面的内容, 并就安全性、风险管理提出了应对措施。通过治理采空区, 可以有效延长管道的使用寿命, 提升安全性, 最终促进经济效益的提高。

关键词: 长输高压天然气管道; 采空区; 治理技术; 风险管理; 效果评估

中图分类号: TU973 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 008-0139-03

Treatment of goaf in long-distance high-pressure natural gas pipeline

Zhou Jinlong (Shanxi Guohua Energy Co., Ltd., Taiyuan Shanxi 030000, China)

Abstract: As critical energy transportation corridors, long-distance high-pressure natural gas pipelines bear the vital responsibility of ensuring energy supply. However, due to complex geological conditions, the emergence of subsidence zones poses a serious threat to pipeline operational safety. Therefore, this paper explores management techniques and methods for subsidence zones in long-distance high-pressure natural gas pipelines from the perspective of the gas industry. It covers aspects such as geological exploration and risk assessment, grouting reinforcement technology, intelligent monitoring and data analysis technology, and proposes countermeasures regarding safety and risk management. By managing subsidence zones, the service life of pipelines can be effectively extended, safety enhanced, and ultimately economic benefits improved.

Keywords: long-distance high-pressure natural gas pipelines; subsidence zones; remediation technologies; risk management; effectiveness evaluation

随着全球能源需求持续增长, 长输高压天然气管道作为关键能源传输通道, 起着极其关键的作用。然而, 因天然气管道埋设地质环境复杂, 采空区形成给管道安全运行带来极大挑战, 采空区不仅影响管道稳定性, 还可能引发火灾甚至爆炸事故, 危害周边环境和公众安全。

针对这一问题, 治理采空区成为确保天然气管道安全稳定运行的迫切需要, 本文主要探讨采空区治理的技术办法、风险估量及管理举措, 期望给天然气管道长期稳定运作提供理论根据和实践指引。

1 长输高压天然气管道采空区治理的重要性

1.1 保障管道安全稳定运行

长输高压天然气管道运输时承受巨大压力和外界环境的作用, 采空区存在致使管道稳定性受到威胁, 若采空区没及时治理, 致使管道出现沉降、变形或者破裂, 引发气体泄漏事故, 将带来严重安全隐患及事故, 为避免这种情况, 及时治理采空区显得特别重要。经过采空区治理, 能有效降低管道沉降和位移, 提升管道整体稳固性, 保证天然气运送过程安全^[1]。

1.2 保护环境与公众安全

采空区治理不仅利于提高管道安全性, 对保护环境和公众安全意义更为重要, 天然气管道如出现破裂

或者泄漏的情况, 极易引发火灾甚至爆炸事故, 给生态环境以及人类健康带去严重危害, 通过治理采空区, 减少管道故障出现, 能有效防止气体泄漏等环境污染情况出现, 保障公共安全。

1.3 提高管道使用寿命与经济效益

治理采空区能延长天然气管道使用期限, 降低维护与修复成本, 在没有治理采空区的情形下, 管道形变等隐患会导致管道停输检修, 增加运行成本; 而治理后, 管道稳定性获得保证, 降低故障出现频率, 进而减少运营和维护的花费, 长远来看, 治理采空区能明显提高天然气管道经济效益, 给能源企业带去更高投资回报。

2 长输高压天然气管道采空区治理技术及方法

2.1 地质勘查与风险评估技术

而对天然气管道下伏采空区施工管控而言, 地质探测以及风险识别方法是主要内容。运用地质探测技术, 可以清晰的掌握长输高压天然气管道沿途地层结构、地下空洞以及采空区深浅、大小等状况。基于天然气行业, 准确识别出天然气管道沿线地质风险十分重要。尤其是在大规模天然气输送时, 如果有潜在风险, 则会造成严重损失^[2]。

常用物探技术主要包括地质雷达、勘探打孔取样、

电磁波探测等手段。地质雷达可对管线周边是否存在潜在采空区域进行识别,勘探打孔取样能准确查明地下土壤密度及其特性。综合采取以上手段有助于分析地下洞体的大致状况及其对管体造成影响的程度。

为了进一步进行风险评估,可使用如下公式来评估采空区的风险因子 R :

$$R = \sum_{i=1}^n (W_i \cdot V_i)$$

其中:

W_i 为第 i 项地质参数(例如:土质的承载能力、塌陷坑的深度等等)所占的比重;

V_i 为此项因素的具体测试结果。

对塌陷区域风险系数 R 的确定可以帮助我们进一步了解管道周围的危险程度,为采取下一步防治措施做好准备。

2.2 注浆与加固技术在治理中的应用

面对长距离高压天然气管道采空区的治理,灌浆加固法主要用于填埋地下坑洞和加强地基,尤其是针对天然气管道在建设、运行中需要承受较大应力的管道,其周边土壤要有足够大的支撑力度。而一旦发现采空区存在后,它的支撑度不够将会极大影响管道结构的安全系数,从而使管道出现下沉甚至破裂等情况,继而引发了泄露之类的问题^[9]。

注浆施工是利用高压将水泥浆、化学泥浆、高分子注浆材料通过钻孔等方式压入地下裂隙中,以达到填充采空区的效果,并增强地下土壤的支撑力。就天然气领域而言,常见的注浆工艺包括水泥浆灌注技术和高分子注浆技术,其中水泥浆适用于相对稳定的土壤,高分子注浆材料适用于强膨胀性的潮湿土壤。

注浆量的计算对于治理效果至关重要。通过以下公式可以确定所需的注浆量 Q :

$$Q = \frac{A \cdot h \cdot \Delta\sigma}{\eta}$$

其中:

A 为注浆区域的面积;

h 为注浆深度;

$\Delta\sigma$ 为土壤承载力的增量;

η 为注浆材料的注入效率。

维护天然气管线的过程中准确测量注浆量可以保证注浆工作的效果在此基础上最大程度提高土体支护能力;根据不同的注浆浆液,施工人员可以通过土质条件、塌陷区域性质调整注浆措施从而使管线能够在复杂环境下安全地工作。

2.3 智能化监测与数据分析技术支持

智能化监测与数据分析技术是长输高压天然气管道采空区防治坚强有力保障。传感器,无人机,卫星遥感等智能化监测日趋完善,智能监测成为现代化管道管理的基础组成部分。针对天然气领域来说,管线安全监测就是对管线沉降量、形变量及其附近的土壤移动情况进行监测。应用这些技术手段可以提前感知到采空区的变化情况,进而调整相应的防治策略。

智能化检测技术就是通过实时监测管道的沉降信息和周围环境的变化信息来进行风险预警。通过以下公式来描述管道的沉降变化 $\Delta h(t)$ 和土壤变形速率 $v(t)$ 的关系:

$$\Delta h(t) = \int_0^t v(t) dt$$

其中:

$\Delta h(t)$ 为时间 t 内的管道沉降量;

$v(t)$ 为沉降速率。

在天然气管道的长期运行中,这种实时监测能够及时发现潜在的风险点,确保管道始终处于安全运行状态。

以卫星影像结合无人机进行,能够大面积和获取高清地质图象,再借助于大数据分析技术可以对其分析,并给采空区的安全评价、恢复效果评估等提供依据。基于数据分析以及智能模型算法可以实现管道长期稳定性的发展走向预测,从而进一步完善治理措施,智能化监控既可增加治理工作的时效性,同时也能提高其准确性。

3 长输高压天然气管道采空区治理的安全性与风险管理

3.1 采空区治理中的安全隐患与风险评估

长输高压天然气管道运营阶段,采空区对管道稳定性和安全性造成极大威胁。天然气管道一般承载大量高压气体,因此土壤结构不稳定,会给管道造成严重影响。采空区会引发管道运行期间出现沉降、变形甚至破裂,引发气体泄漏、火灾等灾难性后果,做好采空区治理是长输高压天然气管道安全运行的关键支撑。

采空区治理环节的部分潜在安全隐患,在天然气行业表现最明显。实施注浆操作阶段,未精准控制注入的浆液,或可渗入地下水层,进而影响周边环境与居民生活。天然气管道周边土壤,或因注浆时的压力变化受影响,局部地质结构变动可能造成管道受力不均,最终引发管道沉降或变形,增加气体泄漏概率。这类隐患一旦爆发,或引发重大事故,将造成惨重人员伤亡与财产损失。

表 1 天然气管道采空区治理中的潜在安全隐患与风险评估

风险类型	潜在隐患描述	风险评估方法	行业内影响因素
地下水污染	注浆过程中浆液渗入地下水层, 可能污染水源	地质勘探与水质监测技术	影响天然气输送和生态安全
土壤不均匀加固	注浆不均可能导致土壤不稳定, 增加管道沉降风险	地质雷达与压力测试	管道稳定性直接影响气体输送
管道沉降与变形	采空区导致管道沉降、变形, 引发气体泄漏	沉降监测与管道位置变化监控	影响管道安全与运输效率
气体泄漏	采空区引发管道破裂、泄漏	气体泄漏探测与实时监测	泄漏风险对周围环境与人员安全威胁
环境污染	泄漏导致生态污染	环境影响评估与污染模拟	长期污染对社会责任与公众信任的影响

天然气行业着重要求对治理环节可能出现的安全隐患做严格评估, 采用现代地质勘探技术, 诸如地质雷达、钻探取样这类手段, 能对采空区具体位置、土壤密度及地下水位等做细致分析, 为后续治理工作输送精准数据支持。实施全维度风险评估, 工程师可量化治理流程中的潜在风险, 制定科学的治理方案, 把事故发生概率降到最低, 维持管道稳定性保障天然气安全输送^[4]。详情如表 1 所示。

3.2 风险管控措施与应急预案设计

推进采空区治理阶段, 聚焦安全隐患, 需构建健全的风险管控措施和应急预案, 除提前评估治理步骤可能出现的潜在隐患外, 构建实时监控系统并出台应急响应机制, 可在事故发生第一时间采取行动, 把事故造成的损失降到最低, 实时监控系统可依靠安装传感器、温度监测设备以及气体泄漏检测仪, 全方位管控管道及周边环境的变动。数据采集系统可实时反馈管道沉降、变形等状态, 依靠自动化系统启动预警, 依托高效监控系统, 可为应急决策供给科学数据支撑, 守住治理工作安全底线^[5-7]。

设计应急预案要覆盖各类可能的突发状况, 出现气体泄漏、土壤沉降等紧急事件, 应制定具体应急响应程序, 配齐必备应急设备, 诸如气体泄漏检测仪、应急止泄阀这类装置, 还需定期实施应急演练, 保障相关人员处置突发事件的快速响应能力, 制定应急预案要模拟每种突发事件, 保证事故发生时, 各项应急响应可迅捷高效启动, 削减事故造成的损失, 维护人民群众和环境安全。

3.3 行业标准与政策对治理工作的支持与引导

长距离高压输气管道采空区治理不仅需要技术支持还需要政策法规的支持, 在这一方面还需要国家以及相关主管部门出台相应的细则法规政策以供其治理过程中提供相关的技术指标, 人力资源储备及安全保障等。而政策导向能推动技术创新, 加快治理措施的实施步伐, 国家能源局发布的《天然气管道建设与运营管理规定》提出明确规定, 长距离管线建设要做好详细的地质钻探及调查评估, 严格把好工程质量关。

相关行业标准例如《天然气管道技术规范》, 对注浆与强化方法进行详细规定, 保证采空区治理工作的规范化标准化实施。

政府部门可以在行业培训及资质部分, 同企业共同进行专业人才培养, 保证从业者具备必需的技术知识以及应对突发事件的能力, 在政府相关政策和行业标准的支持下, 可以确保对采空区整治过程依照规范体系进行, 进而加强了整治工作的效率和安全水平。

4 结论

长距离高压天然气管道采空区治理是保证其安全平稳输送的重要措施。借助地质调查、注浆加固、智能监测等各种技术措施, 可以有效地避免采空区对管道造成危害, 保证其长期正常运行, 同时合理有效的安全管理以及相关政策的支持为其综合治理保驾护航。相信在科学技术的发展下, 未来的采空区治理会越来越准确快速, 为天然气的管道顺利运输保驾护航, 促进能源行业健康发展。

参考文献:

- [1] 牛婷. 高压天然气管道输送过程中的能耗分析与节能优化策略 [J]. 中国储运, 2025, (11): 95-96.
- [2] 王明涛. 高压天然气长输管道的安全运行管理 [C]//《煤气与热力》杂志社有限公司. 中国燃气运营与安全研讨会 (第十三届) 论文集 (下册). 山东港华燃气集团有限公司; 2024: 417-423.
- [3] 杨明圆, 朱宏. 大口径高压天然气长输管道分段水压试验优化策略 [J]. 化工管理, 2023, (35): 161-164.
- [4] 钟林雄, 周炎裕, 孔淑颖, 等. 长输高压天然气管道高后果区的识别及风险管理策略分析 [J]. 当代化工研究, 2022, (21): 11-13.
- [5] 刘亮, 姜晗, 陆美彤, 等. 高压长输天然气管道站场管线全地上敷设的应力分析 [J]. 油气田地面工程, 2020, 39(08): 43-48.
- [6] 陈海攀, 张林源, 何萧. 长输高压天然气管道高后果区的风险识别与管理 [J]. 化工管理, 2020, (11): 78-79.
- [7] 高嵩, 王茂廷. 高压天然气管道泄漏及事故危害规律研究 [J]. 当代化工, 2017, 46(01): 82-85.