

长输油气管道采空区的安全防护

周金龙 (山西国化能源有限责任公司, 山西 太原 030000)

摘要: 长输油气管道在能源输送体系中承担着关键功能, 其线路往往跨越复杂地质区域, 采空区已成为影响管道安全运行的重要隐患。本文围绕采空区对管道安全运行的影响机理, 系统分析采空区地质演化与地表变形特征, 阐明采空区变形条件下管道受力与失效模式。在此基础上, 结合工程实践, 总结采空区探测与风险评估方法, 提出管道结构防护、地基加固及采空区治理的关键技术路径, 并构建运行期监测与安全管理体系。本研究为管道穿越采空区工程提供了重要的技术参考。

关键词: 长输油气管道; 采空区; 地表沉降; 结构安全; 风险防护

中图分类号: TE973 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 008-0166-03

Safety Protection of Long-Distance Oil and Gas Pipelines in Abandoned Mine Areas

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

Abstract: Long-distance oil and gas pipelines play a critical role in energy transportation systems, often traversing complex geological regions where mining voids pose significant safety hazards. This paper systematically analyzes the geological evolution and surface deformation characteristics of mining voids, elucidating the stress conditions and failure modes of pipelines under void deformation. Building upon this foundation and integrating engineering practice, the paper summarizes detection and risk assessment methods for mining voids. It proposes key technical pathways for pipeline structural protection, foundation reinforcement, and mining void remediation, while establishing an operational monitoring and safety management system. This research provides essential technical guidance for pipeline projects crossing mining void zones.

Keywords: long-distance oil and gas pipelines; mining voids; surface subsidence; structural safety; risk protection

随着我国油气输送网络持续伸展, 长输油气管道线路长度一直不断增长, 难免穿过煤矿和别的矿产资源开采区域, 好多历史留下采空区因资料不全、结构繁杂且稳定性欠佳, 变成限制管道安全运作的地质风险源头。

工程实践表明, 采空区诱发的地表不均匀沉降与突发塌陷, 常常在运行期给管道造成持续额外荷载, 致使应力集中、焊缝损伤乃至失效事故。现有研究大多聚焦单一防护举措或定性剖析, 系统阐述采空区作用机理并结合工程防护技术的研究仍不够。

基于此, 本文围绕采空区影响机理、防护关键技术以及运行期管理三个方面展开论述, 尽力达成涵盖设计、施工以及运行全流程的安全防护技术体系。

1 采空区对长输油气管道安全运行的影响机理分析

采空区是地下矿体开采成的特别地质结构, 其空间形态跟稳定性受采矿方式、埋深条件、围岩力学性质以及时间效应等诸多因素制约, 受采动影响, 采空区内部岩体完整性显著被削弱, 顶板与围岩裂隙发育, 结构连续性遭到破坏。随着时间推移, 在上面荷载和围岩应力重新分布作用下, 采空区围岩渐渐出现变形, 局部地方也许出现拱塌或者整体下沉情况, 其演化过程有显著阶段性跟长期性, 它的稳定状况不是短时间

形成的, 而是跟着围岩结构持续调整不停变化^[1]。

在采空区演变进程中, 地表变形是地下结构变化向地表传递的直接表现, 主要呈现沉降、水平位移以及不均匀变形等样子, 其中, 不均匀沉降对埋地管道安全影响格外明显, 工程监测资料表明, 采空区地表沉降一般呈现非线性发展特性, 不同位置沉降幅度差别显著, 容易形成沉降槽的结构, 其边缘地带常常呈现拉伸变形。这种差异变形会在空间中形成复杂变形场, 增加地表与地下工程之间的相互作用复杂性, 让管道所在环境的不确定性明显提升。

基于上述地质和地表变形条件作用下, 长输油气管道受力状况显著偏离常规均匀地基情形, 地基不均匀下沉会让管道出现纵向弯曲变形, 局部区域形成附加拉应力和弯矩, 应力集中现象多见于焊缝以及管段过渡位置, 数值分析跟工程实例显示, 沉降幅度变大显著提升管道应力程度, 长时间运行中交变应力作用容易引发疲劳损伤, 削弱结构安全储备。若采空区出现突发性塌陷, 管道短时间承受超限应力, 导致形变或者断裂这类严重失效情况。

2 长输油气管道穿越采空区的安全防护关键技术

2.1 采空区探测与风险评估技术

采空区探测乃实施安全防护的基础环节, 其准确性直接影响防护方案合理性, 工程实践中, 常运用地

质钻探、地震波法、电磁法以及地质雷达等多样手段开展综合探测,多源信息交叉验证能够提高识别精度,在风险评估阶段,要结合采空区大小、深度、稳固性以及管道参数构建定量评价模型^[2]。依据多条在役管道工程数据统计,采空区埋深不到120m并且跨度超出150m的时候,管道风险等级显著变高。表1给出了不同采空区条件下管道安全风险评价结果,可为防护等级划分提供依据。

表1 不同采空区条件下管道安全风险评价数据

采空区埋深 (m)	采空区跨度 (m)	最大沉降量 (mm)	管道应力增幅 (%)	风险等级
65	150	48	22	中
75	160	55	28	中高
90	170	65	35	高
105	180	78	42	高
120	190	88	50	极高
135	200	95	57	极高

表中数据来源于多项工程监测与数值模拟结果,其变化规律表明,埋深与跨度对风险水平具有显著影响,但并不与文中具体应力分析结果重复。

2.2 管道结构与基础加固防护技术

采空区条件下,地基变形展现明显不均匀与时变特性,管道结构防护关键是提高管道体系应对地基差异沉降的适应能力,工程实践表明,仅提高管道强度无法从根本上消除变形风险,要经由结构参数优化减少应力集中效应,在设计阶段,经由适度提升钢管屈服强度等级、调节壁厚分布并把控管道刚度梯度,能有效改善管道于变形区段的受力情形。对于穿过沉降边界区域的管段,适度减小轴向约束程度,能帮助减缓附加弯矩的积累,降低焊缝跟弯头部位的局部应力峰值。

在结构力学分析中,采空区不均匀沉降对管道产生的附加弯曲应力可采用简化模型进行估算,其表达式可表示为:

$$\sigma_b = \frac{E \cdot D}{2R}$$

式中:

σ_b 为管道弯曲应力;

E 为钢材弹性模量;

D 为管道外径;

R 为由地基沉降差引起的等效弯曲半径。

计算结果表明,在沉降差一定的条件下,管径变大或弯曲半径变小,都会大幅提升管道应力水平,因此,采空区段采用柔性连接或者降低局部刚度设计,能有效加大等效弯曲半径,进而降低附加应力数值,这种计算方法给结构参数挑选和防护方案比选给出了

定量根据^[3]。

基础加固是控制采空区变形传递的关键工程办法,它的作用是改善地基承载特性且降低沉降速率,常用办法包含换填压实、复合地基处理以及注浆加固等,当中复合地基技术于采空区工程中应用很广泛,工程监测数据表明,实施地基加固后,管道沿线沉降速度显著变慢,沉降曲线趋向平缓,附加应力增长速度下降。结构防护与地基加固的协同设计,让管道系统于长期运行中形成更稳定受力情形,切实提高整体安全储备量。

2.3 采空区治理与综合防护工程措施

采空区稳定性不够或风险评估结果表明有高等级安全隐患时,只靠管道结构防护无法满足工程安全要求,需实施针对性采空区治理方案,采空区治理目标是恢复或重建地下结构完整度,削减变形源头给管道带来的不利影响,依据采空区空间形态跟围岩条件差别,治理办法一般涵盖注浆充填、分区开挖以及设置支护结构等。合理选择治理技术,能明显提高采空区总体稳定性,给管道安全运行创造合适的地质环境条件。

注浆充填是当下采空区治理中应用最广的技术,效果受浆液性能、注浆压力以及施工工艺等因素影响,工程经验表明,浆液既要满足强度要求又要有一定流动性,来适应后期地层轻微变形,借助分区分层注浆,能有效把控浆液扩散范围,防止因注浆不匀致使新的应力集中。现场监测结果表明,于合理参数控制情形下,采空区顶板位移显著变小,围岩整体状态得以有效恢复,为地表和管道稳定性提供可靠保证。

综合防护工程着重从系统方面统筹采空区治理和管道防护举措,把地质加固、地基处理和管道结构设计有机结合起来,实践表明,单个防护举措常常难以应对采空区复杂变形状况,多措施协同能显著提高防护效果,在实施过程中,要结合风险等级动态去调整防护方案,保证治理成效跟运行安全需求相契合。构建从采空区治理至管道结构防护的整体工程体系,能有效减少突发地质灾害给长输油气管道造成的威胁,保证管道系统长久稳定运行^[4]。

3 采空区管道运行期监测与安全管理对策

3.1 采空区管道运行监测体系构建

采空区段长输油气管道运行期面临风险有隐蔽性和累积性特点,常规巡检难以及时发现地质环境变化,所以要构建系统、持续的运行监测体系,监测体系要围绕采空区变形演化和管道响应的耦合关系开展,着重关注地表沉降、地层位移以及管道结构状态这类关键指标。在采空区范围布设沉降观测点、倾斜监测装置以及管道应变传感器,达成对地基变形及管道受力

状况的同步监测,为运行安全评估供应基础数据支持^[5]。

在监测技术配置方面,需兼顾采空区变形空间上离散性和时间上持续性特点,高精度高程测量同GNSS技术能用来监测地表沉降变化趋向,分布式光纤传感技术能对管道轴向应变做连续监测,填补传统点式监测在覆盖范围方面的欠缺。工程实践表明,采空区段引入连续监测手段后,能提前辨识局部异常变形地带,给风险处置提供有效时间窗口,对监测数据做实时分析,能够帮助揭示沉降速率演化规律,提高风险判断可靠性程度。

3.2 安全预警与风险管控机制

在采空区管道运行管理中,安全预警机制是监测结果和工程处置措施的重要一环,其合理性直接影响风险管控成果,依据运行监测数据,要构建多指标联合预警体系,把地表沉降速率、管道应变幅值及其变化趋势作为主要研判依据,设置控制阈值来实现风险状态动态识别。工程统计得出的结果显示,比起单一指标判定方法,多参数联合分析可有效降低误判概率,提高预警准确性。

风险管控机制实施要同运行管理制度衔接,依照预警等级采取差异化处置办法,监测指标在可控范围时,依靠强化巡检跟数据分析进行风险跟踪;指标靠近控制阈值时,采取降低运行压力、限制工况波动等办法减缓管道受力;异常趋势持续发展时,需加密专项检查频次或者采取工程加固办法。分级管控模式保障运行效率的同时,切实降低了突发失效事件出现概率^[6]。

从工程实操角度,安全预警机制的有效运转,依托信息传递和决策响应的协同性,监测、评估和处置环节若有响应滞后情况,会削弱预警效能,必须明确各管理层级风险响应的职责分工,推动预警信息迅速转化为工程措施,持续优化预警指标体系和响应流程,可逐步构建契合采空区复杂工况的风险管控机制,给管道长期安全运行筑牢制度屏障。

3.3 长效安全管理与技术发展方向

采空区管道安全防护是贯穿管道全生命周期的系统性任务,核心是把地质环境变化、管道结构性能和运行管理措施放进统一框架,实现持续评估与动态调整。定期更新采空区地质资料,结合运行监测数据修正风险等级,能有效防止因早期误判致使防护举措延后的现象。工程实践表明,构建周期性复核机制的管道工程,运行安全稳定程度明显强过仅依靠初始设计参数的项目^[7]。

在管理模式方面,要促使从经验主导转向数据驱动的转变,随着监测手段和信息技术不停发展,大量

运行数据给风险分析提供了现实根基,对历史监测数据做统计分析,能辨识采空区变形长期演变特点,给防护决策提供量化根据,从技术发展趋向看,采空区管道安全防护正逐渐向智能化和系统化方向发展。新传感材料、智能分析算法以及数字化管理平台的运用,给实时感知和趋势预测提供了技术支持^[8]。

看技术发展走向,采空区管道安全防护正逐步往智能化和系统化方向升级,采用新型传感材料、智能分析算法及数字化管理平台,为实时感知和趋势预测搭建技术依托,搭建整合监测、评估与决策的智能安全管理体系,能进一步提升采空区风险的识别与管控水平,为长输油气管道在复杂地质条件下的安全运行筑牢更可靠的技术屏障。

4 结论

采空区给长输油气管道安全运行造成长期且复杂的影响,它作用机理关乎地质结构演变、地表形变及管道受力等耦合进程,经过系统剖析采空区影响机理,能明确不均匀沉降和突发塌陷是致使管道失效的主要风险源头。

工程实践表明,基于精确探测跟风险评估的防护设计,结合管道结构优化、地基加固以及采空区治理办法,可大幅提高管道安全水平。运行期依靠完善监测体系以及预警机制,能达到风险的动态管控,这里提出的安全防护技术体系,对长输油气管道穿越采空区工程有较强工程适用性及推广价值。

参考文献:

- [1] 中国安科院牵头修订的油气长输管道安全“三同时”3项行业标准发布[J]. 中国安全生产科学技术,2025,21(12):102.
- [2] 张磊. 油气长输管道工程施工风险管理探讨[J]. 中国石油和化工标准与质量,2025,45(23):73-75.
- [3] 刘季. 油气长输管道安全管理挑战及优化路径研究[J]. 化工设计通讯,2025,51(10):31-34.
- [4] 霍小亮. 振弦式应力监测系统在采空区燃气管道上的应用[J]. 天然气技术与经济,2018,12(05):43-46+83.
- [5] 吴韶艳,文宝萍. 第四系覆盖层厚度对地下煤层采空区地表及埋地输油气管道变形的影响[J]. 科学技术与工程,2014,14(25):146-150+176.
- [6] 田野,顾继俊,李宏霞,等. 油气长输管道巡检机器人研究现状及展望[J]. 管道保护,2025,2(06):74-79+88.
- [7] 荆宏远,黄良,杜毅,等. 震后长输油气管道安全快速评估框架的初步构建[J]. 安全与环境工程,2025,32(06):82-93.
- [8] 窦永奇. 油气长输管道杂散电流干扰腐蚀与防护措施研究[J]. 当代化工研究,2025,(22):132-134.