

引用格式:王现中,王仁超.复杂山区煤矿采空区油气管道稳定性监测与数值分析[J].山地学报,2022,40(3):411-420.

Wang Xianzhong, WANG Renchao. In-situ monitoring and numerical analysis of oil and gas pipelines in coal seam goaf located in mountainous terrain [J]. Mountain Research, 2022, 40(3):411-420.

复杂山区煤矿采空区油气管道稳定性监测与数值分析

王现中¹,王仁超^{2*}

(1. 国家石油天然气管网集团有限公司华南分公司,广州 510620; 2. 电子科技大学 计算机科学与工程学院,成都 611731)

摘要:煤矿采空区引起地表沉降和塌陷,威胁采空区上方油气管道的安全。采用数值模拟方法可以分析煤矿或油气采空区不同工况条件下油气管道的力学性状,采用管道附着式传感器可以监测管道应力状态,但两类方法并未开展耦合分析,无法通过实时分析管道自身与周围土体共同作用下的形变与应力,反演管道完整性与岩土围压环境,也无法实现对油气长输管道运行状态动态监测与管理。本文采用原位监测与数值模拟相结合的方法,对遵义双田煤矿采空区上方的成品油管道开展了管道本体稳定性研究。结果表明:在监测周期内,监测区域孔隙水压随着降雨量的增加而增大,但变化幅度较小;纵向位移整体呈增大趋势,但最大相对位移仅 1.5 mm,地面沉降较小。基于原位监测进行数值模拟,得到的模拟结果与监测数据变化趋势相同,且模拟位移与监测位移变化范围相近,表明模拟结果较为准确。通过模拟结果分析,发现管道所受应力远小于临界值,推断管道处于稳定状态。但若煤矿处于开采状态,随着开采范围的增加,监测区域管道的轴向应力和剪应力急剧增大,当开挖范围超过 40 m 时,管道将处于失稳状态,极易发生破坏。本研究采用原位观测校核数值模拟结果的方法分析管道稳定性,基于该方法可指导穿越采空区油气管道的评估和预警工作。

关键词:油气管道;原位监测;数值模拟;煤矿采空区

中图分类号: TH822

文献标志码: A

中国油气长输管道敷设量与日俱增,面临着艰巨的地质灾害防治问题。据统计^[1],中国油气管道总里程在 2021 年累计达到 1.5×10^5 km。基于安全考量,尽管油气管道的敷设已尽可能绕避基础设施和人群密集的山城镇,但不得不穿越一些地质灾害风险区。在煤矿采空区,因为地表沉降和塌陷造成管道受损事件已经多有报道^[2-5]。例如,2009 年 8 月,测得山西阳城段(高峪煤矿区)管道最大沉降量为 1.885 m,管道轴向拉应力已经超过设计允许值,已对浅层管道安全构成严重威胁^[6];2018 年 1

月 19 日,由于漳西村煤矿采空区沉降,长子县一长治县长输管线管道拉裂,导致长治市减少日供气量 3.2×10^5 m³,造成 400 余万元直接经济损失;2020 年山西省因采煤形成 6.3×10^9 m³ 的采空区,引发的地表沉陷面积达 2.978×10^3 km²,严重威胁区域内的油气管道正常运营^[7]。

复杂山区油气管线走线设计要求对油气管道沿线的地质灾害进行勘察^[8-10],针对灾害风险提出预防措施^[11-12]。同时,一些新技术也应用在油气管线病害的超前检测与风险管控上。例如,采用无人机

收稿日期 (Received date): 2022-04-29; **改回日期** (Accepted date): 2022-06-22

基金项目 (Foundation item): 四川省科技计划重点研发项目(2022YFS0586); 广东省重点领域研发计划项目(2019B111102001)。[Key Research and Development Program of Sichuan Province of China (2022YFS0586); Guangdong Key Area Research and Development Project (2019B111102001)]

作者简介 (Biography): 王现中(1978-),男,高级工程师,主要研究方向:成品油管道运营与管理工作。[WANG Xianzhong (1978-), male, senior engineer, research on operation and management of refined oil pipeline] E-mail: wangxz03@pipechina.com.cn

*** 通讯作者** (Corresponding author): 王仁超(1989-),男,湖南湘潭人,博士,主要研究方向:山地灾害综合防治技术。[WANG Renchao (1989-), male, born in Xiangtan, Hunan province, Ph. D., research on integrated prevention and control of mountain disasters] E-mail: SupermanWang@uestc.edu.cn

巡线拍摄探查地表异常^[13-15]、利用超声导波探查管道缺陷^[16]、基于 GIS 和管道评价指标进行管道易损性评价^[17]等。这类管道监测可以快速收集管道本体的应力应变变化等实时信息^[18-19]。

采用数值模拟方法可以确定采空区不同工况条件下油气管道的力学性状^[20-22]。例如：蒋宏业^[23]等建立了采空塌陷区埋地输气管道的有限元计算模型，分析了不同管径、壁厚和内压影响下管道的变形和受力规律，并确定了最大变形和最大受力位置。郑大海^[24]等运用 ABAQUS 软件建立了有限元计算模型，分析了采空区地表沉陷对埋地输气管道位移量的影响。梁晓斌^[25]等建立了采空区悬空管道的有限元仿真计算模型，通过双失效判据确定不同悬空长度管道所处的风险等级。数值模拟可以定量评价管道受力及变形状况，并通过阈值设定进行管道安全预警，确保管道安全^[26-28]，但由于模型边界条件往往与真实情况有差异，导致数值模拟结果的可靠性存疑。

传统的力学分析和静态评估均无法实现对长输油气管道运行状态动态监测与管理。油气管道因其本身处于土体围压、灾害附加应力、管内油气动压力变化、管内外温度应力等多因素耦合作用，管道工况的力学性状极其复杂，虽然管道表面附着式原位监测可以保证监测数据的实时性及真实性^[29]，但无法通过实时分析管道自身与周围土体共同作用下的形变与应力，反演管道完整性与岩土围压环境。

对地质灾害隐患区域及人为因素影响地区的油气管道进行稳定性分析与防治，可以保证油气管道的安全。本文实施煤矿采空区上层土体监测，结合原位观测数据与管道数值模拟的方法，对

研究区管道开展了稳定性分析及开采临界阈值研究。基于实测降雨量、上层土体孔隙水压和地表位移等数据对所建立的数值模型进行修正校核，实时动态评估管道的稳定性，并设置开采范围分析步反算煤矿开采范围的临界阈值。研究结果对穿越采空区油气管道的稳定性评估及煤矿开采指导具有重要意义。

1 研究背景

1.1 研究区概况

本研究涉及管段为华南成品油管网贵阳—重庆段管道，位于贵州遵义市桐梓县楚米镇的双田煤矿（28°12′25.90″ N, 106°51′34.54″ E），煤矿煤层平均厚度约 3 m，由南到北煤层厚度先减少后增加，其中管道穿越北部煤层厚度最大，为 6 m，埋深约 40 m。根据《管道地质灾害识别与评估技术》GPIMS/00/FC007—2005（A）^[30]可知，由于采深 H 与煤层总采厚 M 之比 $H/M < 20$ ，且 $H < 100 \sim 150$ m，表明该区域地表发生塌陷或裂缝的可能性较大，应重点关注。现场地质调查结果显示，第一次穿越段地层为二叠纪下统茅口组（P1m），岩性为灰岩及白云岩，海拔 1100 ~ 1200 m，土层力学参数如表 1 所示。管道与煤矿共穿越两次，第一次穿越 1171 m，第二次穿越 656 m，合计 1827 m。本文选取第一次穿越段为研究对象（图 1）。

1.2 管道概况

根据输油钢管管材技术要求执行标准《石油天然气工业管线输送系统用钢管》（GB/T 9711—2017）^[31]和《输油管道工程设计规范》（GB 50253—2014）^[32]，选取材质 L415M 管道作为模拟管道（表 2）。

表 1 土体力学参数表

Tab. 1 Mechanics parameters of soil

土体	弹性模量/MPa	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	土体天然重度/(kN · m ⁻³)	饱和渗透系数/(m · d ⁻¹)	饱和含水率	泊松比
粉质黏土	9	20	24	18.0	0.008	0.500	0.350
黏土	12	30	32	22.0	0.001	0.400	0.300
砂质泥岩	420	260	25	20.7	—	—	0.260
煤矿	400	240	28	12.5	—	—	0.240
细砂岩	680	570	23	21.3	—	—	0.230

注：由于该地区降雨量较小，仅对浅层地层产生影响，故仅分析了粉质黏土与黏土层的渗流。

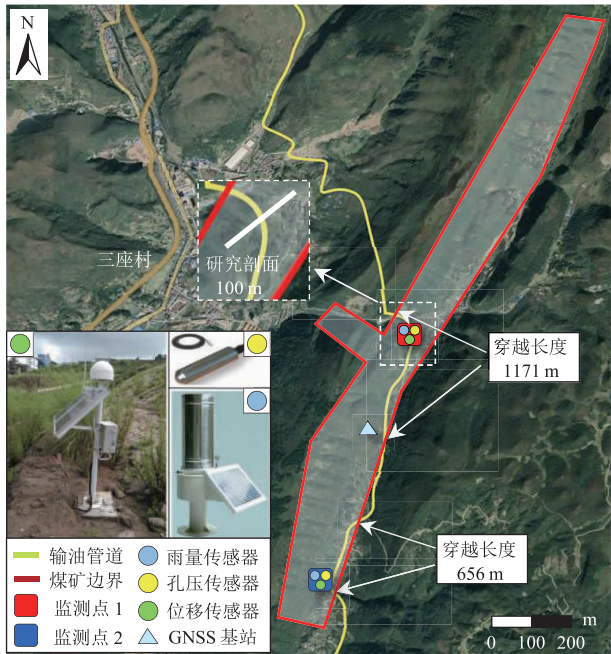


图 1 监测仪器布设位置图

Fig. 1 Layout of monitoring instruments

表 2 管道规格参数表

Tab. 2 Pipe specification parameters

参数名称	数值
泊松比	0.3
弹性模量/MPa	2.1×10^5
管道外径/mm	408.0
壁厚/mm	10.3
输管压力/MPa	9.5
管道承受最大剪应力/MPa	186.0
管道承受最大拉应力/MPa	249.0

2 研究方法

本研究将原位监测与数值模拟方法结合运用(图 2),其中监测的原位数据包括降雨量、孔隙水压力、地表位移。降雨量由雨量传感器获得,可间接反

映由地表水渗入地下形成的孔隙水变化;孔隙水压力由孔隙水压传感器测得,用于评估有效应力;地表位移(主要为沉降)由位移传感器测得。原位监测数据作为数值模拟的输入,不仅可以计算评估管道的稳定性,并反算失稳阈值,还可用于判断计算模型的准确性。

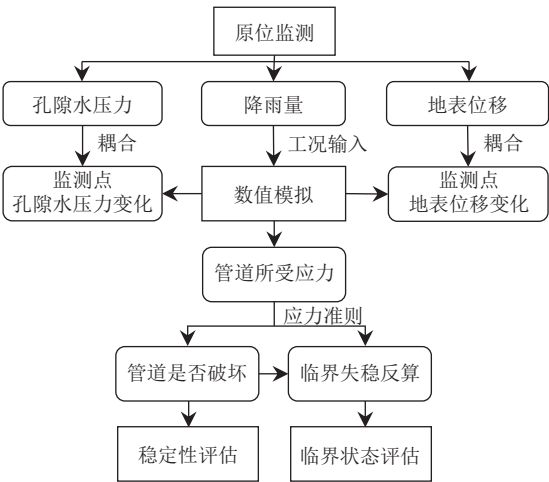


图 2 流程图

Fig. 2 Flow chart

2.1 原位监测

通过布设雨量传感器、孔压传感器及位移传感器获取相应现场数据(表 3)。其中雨量和孔压传感器每 5 min 采集一次数据,位移传感器每 10 min 采集一次数据;孔压传感器埋深均为 1 m,监测点间隔为 2.5 km。由于矿区周围地势较低,不利于获取卫星信号,故 GNSS 基准站安置于两监测点之间约中点位置处(距监测点 1 约 1.2 km),且地势较高,利于获取卫星信号,从而保证监测数据的稳定传输。

2.2 数值模拟

本文采用 Geostudio 软件开展数值模拟,基于 SIGMA/W 模块与 SEEP/W 模块建立采空区油气管道模型。

表 3 监测仪器参数表

Tab. 3 Parameter of monitoring instruments

监测仪器	作用	分辨率/mm	精度	测量范围
雨量传感器	监测降雨量	0.20	$\leq \pm 3\%$	$0.01 \sim 4.00 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
孔隙水压传感器	监测孔隙水压力	1.00	1 cm	0 ~ 3 MPa
位移传感器	监测地表垂向位移	0.10	0.15%	0 ~ 9 m

2.2.1 渗流理论

利用 SEEP/W 模块的瞬态分析对土体进行渗流分析,均质各向同性饱和-非饱和渗流微分方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h_p}{\partial y} \right) + Q = m_w \gamma_w \frac{\lambda \partial h_p}{\partial t} \quad (1)$$

式中, k_x 和 k_y 分别为 x 、 y 方向的渗透系数 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); h_p 为压力水头 (m); Q 为边界流量 ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); m_w 为水土特征曲线的斜率; γ_w 为水的容重 ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$); t 为时间 (s)。

2.2.2 管土耦合

油气管道对周围土体运动比较敏感,管道发生变形或破坏基本上是由于与周围土体的相互作用所致。采用土弹簧模型,将土体与管道之间的耦合作用看作由若干等效弹性弹簧连接(图 3)。本研究采用二维模拟,故模型将埋地管道划分为平面梁单元体,并在其每个结点上分别作用 2 个方向的土弹簧,用来模拟土体对管道的轴向、切向作用,管道悬空段可简化为两端固定的悬臂梁。

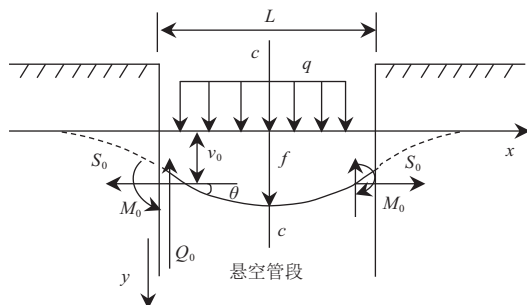


图 3 悬空管段受力示意图

Fig. 3 Force diagram of suspended pipe section

3 研究结果

3.1 原位监测结果分析

3.1.1 降雨量分析

监测点 2021 年 10 月份降雨主要集中在 7 日、10 日、14—16 日、19—22 日、28—31 日。其中,7 日、10 日和 21 日的日降雨量达到了 19.8 、 20.2 和 $11.4 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 属于中雨; 剩余日降雨量均小于 $10 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$, 属于小雨(图 4)。

3.1.2 孔隙水压分析

由图 5 可知,10 月 1—3 日并未降雨而监测点孔隙水压却增大,其原因是 9 月末发生了降雨,地表水逐渐渗流而下,导致孔隙水压不断增加,而 10 月

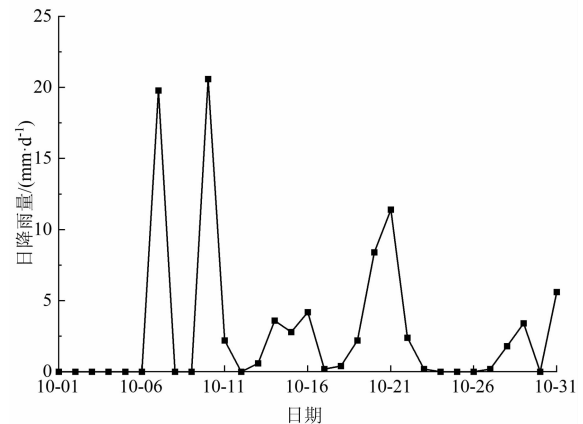


图 4 监测日降雨量图

Fig. 4 Monitoring daily rainfall

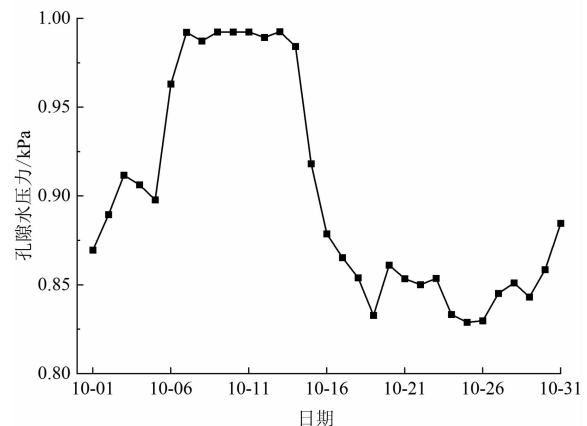


图 5 监测孔隙水压变化图

Fig. 5 Monitoring pore water pressure

3—5 日渗流量低于蒸发量,引起孔隙水压的降低。自 10 月 6 日起,随着降雨增加,地表水下渗到土体内部,导致孔隙水压增加至 0.99 kPa 。虽然 8 日和 9 日并未降雨,但由于 7 日的强降雨,雨水大量渗入土体,结合气象数据可知 8 日和 9 日为阴天,温度较低,土中水蒸发较慢,导致监测点孔隙水基本未变化,因此孔隙水压仅有较小波动;而 10 日又发生强降雨,但监测点处土体仍处于饱和状态,孔隙水压因此保持不变,之后随着天气转晴,温度升高,再加上降雨量较少,导致土中水大量蒸发,孔隙水压从 13 日的 0.99 kPa 降低至 19 日的 0.83 kPa 。后续天气转阴温度较低,且随着 20 日、21 日、27 日、28 日、31 日的降雨,孔压发生小幅度增长,而未降雨天气孔压则随着降低,整体与降雨成正比关系。

3.1.3 沉降位移分析

对监测区域水平位移(与地表平行)和垂向位

移(与地表垂直)进行了监测,结果发现变化幅度最大为垂向位移,故这里选取监测的垂向位移进行分析。以10月1日的垂向位移为基准值,监测期内累计产生1.6 mm的垂直位移,数值较小,处于误差范围内。由图6可见,监测位移整体呈现上升的趋势,这是由于孔隙水压增大,导致有效应力减小,土体间孔隙增大,从而引起监测点土体垂向位移的增长。而14—18日孔隙水压急剧降低,导致土体有效应力增大,监测点土体垂向位移降低。整体上与监测孔隙水压数据变化相符,一定程度上验证了监测结果的准确性。

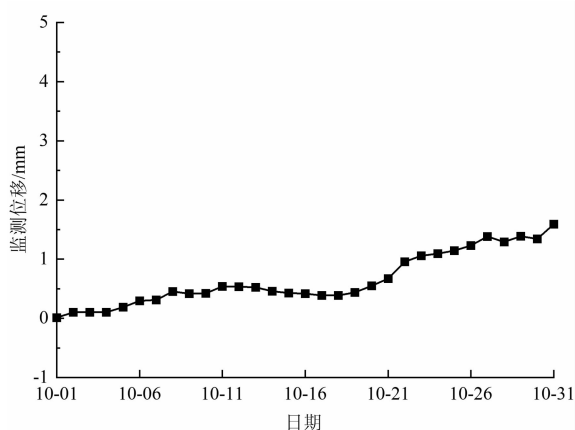


图6 监测沉降位移图

Fig. 6 Monitoring displacement

3.2 数值模拟结果分析

3.2.1 模型建立

由于实际工程中,现场地表呈现凹凸不平、不规则等特征,为便于分析计算,在模拟过程中对其进行了简化,化曲为直,边坡模型周界均以直线表示(图7)。研究区土层由上往下依次为粉质黏土层、黏土层、砂质泥岩层、煤层和细砂岩层。由于降雨仅对浅地层有影响,故下方四层以2 m为单元划分有限元网格,顶层粉质黏土层则以0.5 m为单元精细化网格,网格采用四边形和三角形结合的方式进行划分。该剖面经划分后,共得出3958个节点,3811个单元。 AB 边界固定 x 和 y 方向的位移, BC 、 AD 边界固定 x 方向的位移, CD 边界设置降雨工况,上方粉质黏土层的圆环为管道,弹性模量为 2.1×10^5 MPa,管径为408 mm,壁厚为10.3 mm,最大剪应力和最大拉应力分别为186 MPa、249 MPa。

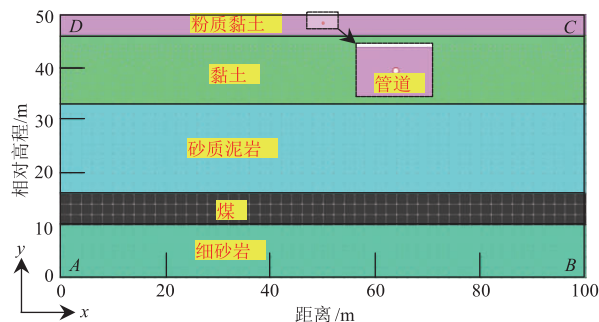


图7 模型网格划分及边界条件

Fig. 7 Model mesh and boundary conditions

3.2.2 模型评估结果准确性分析

由于孔隙水压力变化和位移变化均较小,考虑到现场监测仪器存在波动误差和系统误差,本文以实际孔隙水压的变化趋势及位移的变化范围作为校核标准,对研究区域管道的数值模拟准确性进行研究。

(1) 模型孔隙水压的变化趋势

以10月降雨量作为工况输入,进行SIGMA/W模块下的“原位”模拟,提取模拟结果与监测结果进行对比分析(图8),可知10月1—5日由于未降雨,且粉质黏土的渗流系数较小,导致渗流量极低,孔隙水压保持在 -49 kPa附近轻微波动;6日开始降雨且雨量较大,大量地表水渗入土体导致孔隙水压力由 -48.95 kPa增长到 -46.27 kPa,后续随着土体水分蒸发和少量降雨使得孔隙水压小幅度波动。虽然原位监测和数值模拟得到的孔隙水压力数值差距较大,但各自的变化范围相对较小,分别为3.2 kPa和0.16 kPa。监测和模拟结果的标准差分别为0.95 kPa和0.06 kPa,且基于各自的波动范围的标准差分别为0.29和0.38,较为接近,可近似忽略。此外由图8也可观察出两组数据的变化趋势相似,由此可见模拟结果能较为准确地反应了土体中真实的渗流情况,在一定程度上证明了此模拟结果的准确性。

(2) 模型沉降位移变化趋势

提取研究区域内模拟位移与监测位移进行对比分析(图9),可见降雨来临前监测区域基本未发生沉降;当降雨时,浅层土体的含水率变化明显,土体吸水膨胀导致位移出现轻微的回弹,产生向上的毫米量级的微小位移,然后监测位移与模拟位移均小幅度增大,最终累计产生1.6 mm监测

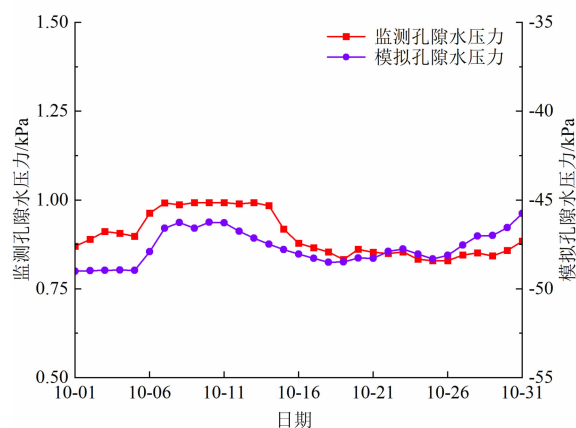


图 8 孔隙水压变化对比图

Fig. 8 Comparison diagram of pore water pressure change

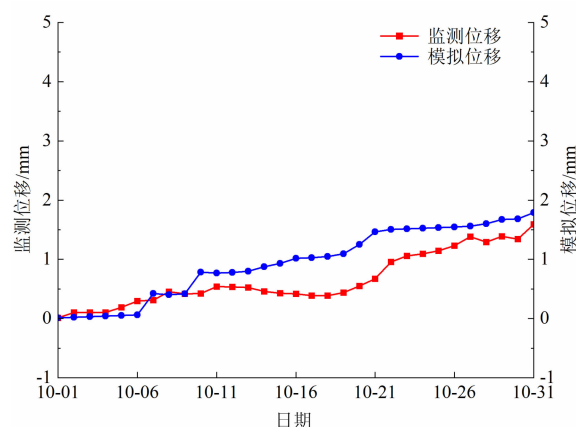


图 9 位移变化对比图

Fig. 9 Comparison diagram of displacement

位移,且模拟结果为累计 1.8 mm 的模拟位移,仅有 0.2 mm 的微小误差,同时两者之间的整体变化趋势相同,变化范围也相同,进一步证明了数值模拟结果的准确性。

3.3 管道受力状态分析

管道在天然工况下的稳定是开采工作进行的前提,本监测及模拟区域的煤矿当前处于暂停开采状态,通过对管道进行提前监测和稳定性分析,可为后续的开采过程提供参考。经孔隙水压力与沉降位移校核后,基于该数值模型对管道天然工况下的轴向应力与剪应力进行数值模拟,得到管道在各种影响因素作用下的受力状态,提取管道所受应力进行分析。管道截面划分为 8 个单元点,由图 10 可知,在降雨作用下,管道的轴向应力和剪应力均呈现小幅增长趋势。轴向应力最大正值位于 1 号和 5 号点,最大负值位于 3 号和 7 号点,所受最大轴向应力为

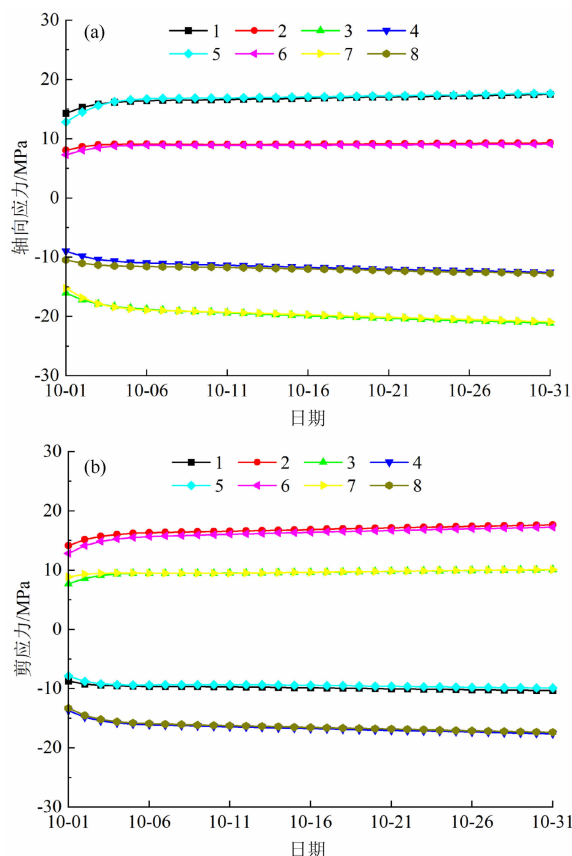


图 10 管道应力图:(a)轴向应力;(b)剪应力

Fig. 10 Pipeline stress: (a) axial stress; (b) shear stress

-21.2 MPa;剪应力最大正值位于 2 号和 6 号点,最大负值位于 4 号和 8 号点,所受最大剪应力为 -17.5 MPa。最大轴向应力和最大剪应力的绝对值均远小 249 MPa 和 186 MPa,故判断管道处于稳定状态,可进行后续的开采工作。

3.4 开采范围临界阈值

根据现场煤矿开采路径调查,采用阶段空场法开采煤矿,从纵断面开挖至监测区域,然后从 40 m 处向两边开采。因此,以煤矿采空区采空范围为工况开展临界阈值计算。初始先开采 10 m 宽的区域作为第一分析步,然后以左右各开挖 3 m 为一个分析步,共设置 9 个分析步(图 11)。对油气管道所受的应力进行模拟,得到开采过程管道所受应力变化如图 12 所示。由图可看出开采前期管道所受的轴向应力和剪应力变化较小,虽然整个开采过程剪应力均小于最大剪应力,但开采至第 4 分析步后轴向应力和剪应力开始急剧增大,并在第 7 分析步时达到管道承受的最大拉应力,管道发生破坏。因此确定煤矿的开采范围临界阈值为 40 m。

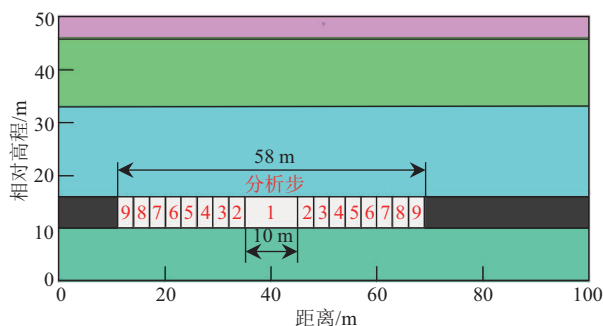


图 11 分析步示意图

Fig. 11 Schematic diagram of analysis steps

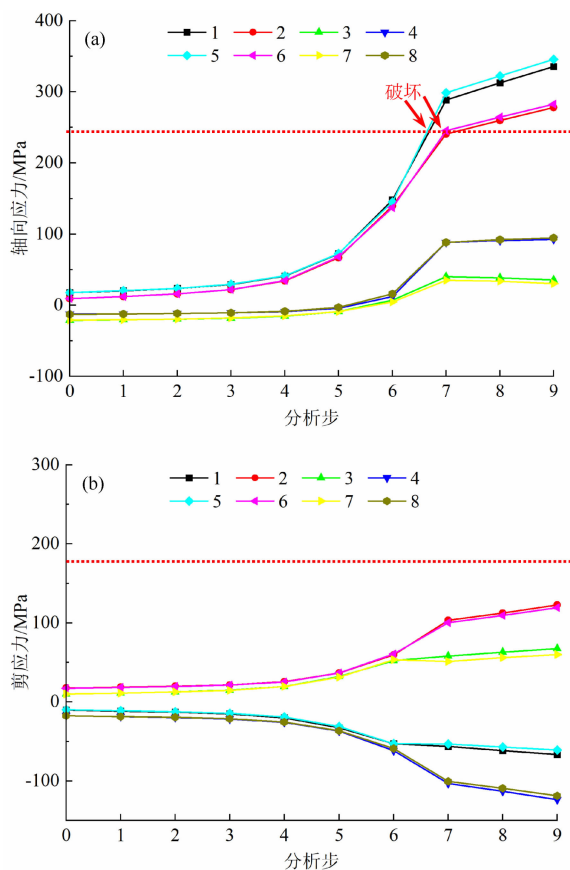


图 12 管道应力随开采范围变化图:

(a) 轴向应力; (b) 剪应力

Fig. 12 Variation diagram of pipeline stress with mining area:

(a) axial stress; (b) shear stress

4 讨论

本文在管道与煤矿采空区布设监测仪器以获取真实的监测数据,通过监测的雨量为工况输入,以孔隙水压和位移校准数值模拟结果,能够保证模拟结果的准确性,基于模拟结果进行稳定性评估,可有

效避免煤矿开采对管道带来的失效破坏。本研究适用于大部分山区管道的稳定性分析,但不适用于地形极其复杂且信号差的区域,因为这样会限制监测仪器的布设和数据的实时传输。

通常对于采空区或管道的监测预警与稳定性分析主要以汛期为准,但由于相关部门于 2021 年 11 月开始进行该煤矿的开采工作,需要对采空区上方管道进行应急监测,对管道进行短时间内的稳定性分析,故这里监测期仅为 10 月。虽然通过监测的降雨量信息可知 10 月份雨量跟汛期相比较少,基于此对管道的稳定性进行分析,得出的结论与汛期相比的确偏于安全。但 10 月份降雨天数有近 20 d,其中 3 d 为中雨天气,雨量数据较为充足。且监测数据显示孔压的变化呈现先增大后减小的趋势,其中 7—14 日的孔隙水压在最大值附近波动,与雨量数据中 7 日和 10 日的强降雨密切相关。而 15 日后孔隙水压开始逐渐减小,是由于降雨减少,地表水渗流量小于蒸发量。同时监测位移数据一致呈现小幅度缓慢增长的趋势,推测前期由于强降雨,导致松散土体结构受到一定破坏,使得孔隙即使被雨水填满后体积仍小于之前,故引起小幅度沉降;而后期由于蒸发量大于渗流量,孔隙水压降低,土体有效应力增大,导致土体继续发生沉降,由此证明监测数据较为可靠。因此,基于 10 月份雨量工况进行管道稳定性分析,在一定程度上仍可有效指导管道防灾减灾的工作。后续的研究将以足够的监测数据进行研究分析,以提升分析结果的准确性和可靠性。

通过本研究可知,在煤矿开采前期对管道的影响较小,但超过某个阈值后就可能导致管道受力过大而受损破坏。为了维护采空区管道的正常运作,可考虑本研究方法进行稳定性分析,通过布设监测仪器来监测管道,并以根据监测数据和数值模拟结果尝试设定预警阈值,超过该阈值则表示管道极有可能受损或损坏,需派遣当地工作人员进行现场确认。同时涉及到煤矿开采工作时,可按照开采模式以本研究方法为参考进行模拟,得到一个较为可靠的开采范围阈值,以降低开采风险。

5 结论

本文基于原位监测数据耦合数值模拟结果开展

了煤矿采空区管道的稳定性研究,并反算了管道失稳时煤矿开采范围临界阈值,主要结论如下:

(1)监测区域孔隙水压随着降雨量的增加而增大,但变化幅度较小;除纵向位移外,其他方向位移均较小,随着监测时间的增加,纵向位移整体呈增大趋势,但最大相对位移仅 1.6 mm,地面沉降变化不明显。

(2)原位监测和数值模拟得到的孔隙水压力数值变化趋势相似;得到的位移数据不仅变化趋势相同,且变化范围接近。因此,可将原位监测孔隙水压变化趋势和位移变化范围作为数值模拟校核标准。

(3)在降雨作用下,监测区域管道的轴向应力和剪应力均呈现小幅增长趋势,但在监测周期内最大轴向应力和最大剪应力均远小于 249 MPa 和 186 MPa,管道处于稳定状态。

(4)根据模拟结果,若煤矿处于开采状态,随着开挖范围的增加,监测区域管道的轴向应力和剪应力急剧增大,当开挖范围超过 40 m 时,管道将处于失稳状态,极易发生破坏。

参考文献 (References)

- [1] 高鹏. 2021 年中国油气管道建设新进展[J]. 国际石油经济, 2022, **30**(3): 12 - 19. [GAO Peng. New progress in China's oil and gas pipeline construction in 2021 [J]. International Petroleum Economics, 2022, **30**(3): 12 - 19]
- [2] GIRGIN S, KRAUSMANN E. Historical analysis of U. S. onshore hazardous liquid pipeline accidents triggered by natural hazards [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, **40**: 578 - 590. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.02.008
- [3] 杜彩霞, 郭文朋, 申倬伟, 等. 煤矿采空区输气管道沉降防治技术研究[J]. 能源技术与管理, 2022, **47**(3): 8 - 9 + 98. [DU Caixia, GUO Wenpeng, SHEN Zhuowei, et al. Research on prevention and control technology of gas pipeline settlement in goaf of coal mine [J]. Energy Technology and Management, 2022, **47**(3): 8 - 9 + 98] DOI: 10.3969/j.issn.1672-9943.2022.03.003
- [4] 石悦, 李朝, 郭文朋. 山西煤矿采空区天然气管道隐患治理探索与实践[J]. 油气田地面工程, 2020, **39**(10): 38 - 42. [SHI Yue, LI Chao, GUO Wenpeng. Exploration and practice of hidden danger control of natural gas pipeline in mined-out area of Shanxi province [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2020, **39**(10): 38 - 42] DOI: 10.3969/j.issn.1006-6896.2020.10.008
- [5] 任建东, 王文, 董森, 等. 开采沉陷区埋地管道变形及力学特征分析[J]. 中国安全科学学报, 2020, **30**(10): 82 - 89. [REN Jiandong, WANG Wen, DONG Miao, et al. Analysis of deformation and mechanical characteristics of buried pipeline in mining subsidence areas [J]. China Safety Science Journal, 2020, **30**(10): 82 - 89] DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2020.10.012
- [6] 赵潇. 采空沉陷区埋地管道应力变形分析及远程监测[D]. 成都: 西南石油大学, 2015. [ZHAO Xiao. Stress and deformation analysis and remote monitoring of buried pipeline in goaf subsidence area [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015]
- [7] 荆和平. 山西煤矿采空区地层特征及勘察方法[J]. 地质灾害与环境保护, 2015, **26**(1): 52 - 56. [JING Heping. Stratigraphic features and investigation methods of mine goafs in Shanxi [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2015, **26**(1): 52 - 56] DOI: 10.3969/j.issn.1006-4362.2015.01.010
- [8] WANG Yuzhou, ZHOU Liangcheng. Spatial distribution and mechanism of geological hazards along the oil pipeline planned in western China [J]. Engineering Geology, 1999, **51**(3): 195 - 201. DOI: 10.1016/S0013-7952(98)00036-2
- [9] 赵应奎. 西气东输工程管道线路地质灾害及其防治对策[J]. 天然气与石油, 2002, **20**(1): 44 - 48. [ZHAO Yingkui. The geological hazards and preventing and controlling measures in the West-to-East Gas pipeline [J]. Natural Gas and Oil, 2002, **20**(1): 44 - 48] DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2002.01.014
- [10] 李云燕, 赵万民. 西南山地城市雨洪灾害防治多尺度空间规划研究——基于水文视角[J]. 山地学报, 2017, **35**(2): 212 - 220. [LI Yunyan, ZHAO Wanmin. On the space planning of urban flood control on a multi-scale basis in the southwest mountain cities of China: Based on hydrological perspective [J]. Mountain Research, 2017, **35**(2): 212 - 220] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000214
- [11] 王仁超, 孔纪名, 崔云. 西南山区长输油气管道坡面泥石流成灾特征与防治——以云南昆明水节高位置决型泥石流为例[J]. 山地学报, 2018, **36**(5): 813 - 820. [WANG Renchao, KONG Jiming, CUI Yun. Characteristics and countermeasures of slope debris flow in Kunming of Yunnan province of China [J]. Mountain Research, 2018, **36**(5): 813 - 820] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000377
- [12] 郭守德, 王强, 林影, 等. 中缅油气管道沿线地质灾害分析与防治[J]. 油气储运, 2019, **38**(9): 1059 - 1064. [GUO Shoude, WANG Qiang, LIN Ying, et al. Analysis and prevention of geological hazards along the China-Myanmar oil and gas pipeline [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2019, **38**(9): 1059 - 1064] DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2019.09.015
- [13] 喻言家, 雍歧卫. 无人机油气管道巡线系统发展现状及建议[J]. 天然气与石油, 2017, **35**(2): 22 - 25. [YU Yanjia, YONG Qiwei. Development status and suggestions of UAV oil and gas pipeline patrol system [J]. Natural Gas and Oil, 2017, **35**(2): 22 - 25] DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2017.02.005
- [14] 郝晓平, 黄晓雯, 高志刚, 等. 无人机技术在油气管道巡护中

- 的应用[J]. 油气储运, 2019, **38**(8): 955 – 960. [HAO Xiaoping, HUANG Xiaowen, GAO Zhigang, et al. Application of unmanned aerial vehicle technology in patrolling oil/gas pipelines [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2019, **38**(8): 955 – 960] DOI: 10.6047/j.issn.1000 – 8241.2019.08.018
- [15] YAN Yan, MA Shuyue, YIN Shuyao, et al. Detection and numerical simulation of potential hazard in oil pipeline areas based on UAV surveys [J]. Frontiers in Earth Science, 2021, **9**: 665478. DOI: 10.3389/feart.2021.665478
- [16] 卫小龙, 杜国锋, 袁洪强, 等. 超声导波在管道缺陷成像中的发展与挑战[J]. 科学技术与工程, 2021, **21**(10): 3861 – 3867. [WEI Xiaolong, DU Guofeng, YUAN Hongqiang, et al. Development and challenge of ultrasonic guided waves in pipeline defect imaging [J]. Science Technology and Engineering, 2021, **21**(10): 3861 – 3867] DOI: 10.3969/j.issn.1671 – 1815.2021.10.001
- [17] 熊俊楠, 曹依帆, 孙铭, 等. 基于 GIS 和熵权法的滑坡作用下的长输油气管道易损性评价[J]. 山地学报, 2020, **38**(5): 717 – 725. [XIONG Junnan, CAO Yifan, SUN Ming, et al. Vulnerability evaluation of long-distance oil and gas pipelines under landslide actions based on GIS and entropy weight method [J]. Mountain Research, 2020, **38**(5): 717 – 725] DOI: 10.16089/j.cnki.1008 – 2786.000549
- [18] 孙健, 马廷霞. 煤矿采空区管道监测方法的应用[J]. 管道技术与设备, 2012(3): 19 – 21. [SUN Jian, MA Tingxia. Application of pipeline monitoring method to goafs [J]. Pipeline Technology and Equipment, 2012(3): 19 – 21] DOI: 10.3969/j.issn.1004 – 9614.2012.03.008
- [19] 李华章, 何文刚, 罗伟, 等. 天然气管道穿越煤矿采空区变形监测技术应用[J]. 山西建筑, 2021, **47**(15): 69 – 71. [LI Huazhang, HE Wengang, LUO Wei, et al. Application of deformation monitoring technology for natural gas pipeline crossing goaf of coal mine [J]. Shanxi Architecture, 2021, **47**(15): 69 – 71] DOI: 10.13719/j.cnki.1009 – 6825.2021.15.026
- [20] 吴张中, 郝建斌, 谭东杰, 等. 采空塌陷区管土相互作用特征分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010, **21**(3): 77 – 81. [WU Zhangzhong, HAO Jianbin, TAN Dongjie, et al. Characteristics of pipe-soil interaction in mining collapse areas [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, **21**(3): 77 – 81] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003 – 8035.2010.03.026
- [21] 白俊磊. 海底管道坠物碰撞损伤数值模拟分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013. [BAI Junlei. Numerical simulation and analysis of collision damage of submarine pipeline [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013]
- [22] 黄文, 谢锐, 陈小华. 落石冲击载荷下埋地油气管道力学分析[J]. 石油机械, 2019, **47**(9): 138 – 144. [HUANG Wen, XIE Rui, CHEN Xiaohua. Mechanical analysis of buried oil and gas pipeline under rock fall impact [J]. China Petroleum Machinery, 2019, **47**(9): 138 – 144] DOI: 10.16082/j.cnki.issn.1001 – 4578.2019.09.021
- [23] 蒋宏业, 王惠, 徐涛龙. 采空塌陷区埋地输气管道的变形及受力分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, **12**(2): 45 – 51. [JIANG Hongye, WANG Hui, XU Taolong. Analysis on deformation and stress of buried gas pipeline in mined-out subsidence area [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, **12**(2): 45 – 51] DOI: 10.11731/j.issn.1673 – 193x.2016.02.008
- [24] 郑大海, 毛建, 赵冬野, 等. 地下采矿对埋地输气管道变形影响分析[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2016, **35**(3): 313 – 316. [ZHENG Dahai, MAO Jian, ZHAO Dongye, et al. Analysis of influence of underground mining on deformation of underground gas pipeline [J]. Journal of Chengdu University (Natural Science), 2016, **35**(3): 313 – 316]
- [25] 梁晓斌, 梁伟, 邓克飞, 等. 采空区悬空天然气管道应力与应变模拟[J]. 油气储运, 2019, **38**(2): 145 – 150. [LIANG Xiaobin, LIANG Wei, DENG Kefei, et al. Simulation on the stress and strain of suspended gas pipelines in goafs [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2019, **38**(2): 145 – 150] DOI: 10.6047/j.issn.1000 – 8241.2019.02.004
- [26] 王海兰, 马廷霞, 徐洪敏, 等. X80 输气管线悬空状态下的安全评价[J]. 科学技术与工程, 2014, **14**(34): 174 – 179 + 189. [WANG Hailan, MA Tingxia, XU Hongmin, et al. Safety evaluation of X80 gas transmission suspended pipelines [J]. Science Technology and Engineering, 2014, **14**(34): 174 – 179 + 189] DOI: 10.3969/j.issn.1671 – 1815.2014.34.033
- [27] 吴韶艳, 文宝萍. 采空区埋地油气管道变形数值模拟分析[J]. 安全与环境学报, 2014, **14**(4): 87 – 91. [WU Shaoyan, WEN Baoping. Analysis of a numerical simulation on the deformation of inlaid pipeline in the mining-over areas [J]. Journal of Safety and Environment, 2014, **14**(4): 87 – 91] DOI: 10.13637/j.issn.1009 – 6094.2014.04.021
- [28] 张宏, 刘啸奔. 地质灾害作用下油气管道设计应变计算模型[J]. 油气储运, 2017, **36**(1): 91 – 97. [ZHANG Hong, LIU Xiaoben. Design strain calculation model for oil and gas pipelines subject to geological hazards [J]. Oil and Gas Storage and Transportation, 2017, **36**(1): 91 – 97] DOI: 10.6047/j.issn.1000 – 8241.2017.01.012
- [29] 李平. 埋地油气管道地质灾害监测系统研究与应用[J]. 科技创新与应用, 2022, **12**(2): 168 – 170. [LI Ping. Research and application of geological hazard monitoring system for buried oil and gas pipeline [J]. Technology Innovation and Application, 2022, **12**(2): 168 – 170] DOI: 10.19981/j.CN23 – 1581/G3.2022.02.047
- [30] 中国石油天然气股份有限公司. 管道地质灾害识别与评估技术: GPIMS/00/FC007—2005(A)[S]. 2005.
- [31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 石油天然气工业管线输送系统用钢管: GB/T

9711—2017 [S]. 2017-05-12.

监督检验检疫总局. 输油管道工程设计规范: GB 50253—

[32] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量

2014. 2014-06-23.

In-Situ Monitoring and Numerical Analysis of Oil and Gas Pipelines in Coal Seam Goaf Located in Mountainous Terrain

WANG Xianzhong¹, WANG Renchao^{2*}

(1. South China Company of PipeChina, Guangzhou 510620, China; 2. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Ground subsidence and collapse quite occurs in coal mine goaf, threatening the safety of oil-gas pipelines above the goaf. Although numerical simulation can be used to analyze the bearing behavior of oil-gas pipes under different loading cases in mined-out areas, and sensors attached to pipes are applicable to detect pipe stress state, there was not joint analysis available which combined the two methods. It was not advisable to estimate the integrity of oil-gas pipelines by analyzing the strain and stress of oil-gas pipe without inclusive of ambient geo-environment, such as overloading soil pressure, and further it also cannot realize the dynamic monitoring and management of the operation of long-distance oil-gas pipelines. In this paper, the stability of the oil-gas pipeline above the goaf of Shuangtian Coal Mine, Zunyi county, China was estimated by combining in-situ monitoring and numerical simulation. Results shows: (1) Within a monitoring cycle, the observed values of pore water pressure increased with the increase of rainfall, but their variation ranges were small; The longitudinal displacement tended to increase as a whole, with the maximum relative displacement only 1.5 mm, a small settlement. (2) The numerical simulation based on in-situ monitoring found a consistent change trend as compared with observation, for instance, the simulated displacement of ground subsidence similar to those from in-situ monitoring, suggesting that the simulation was reliable. (3) By simulation, it found that the stresses on a pipeline were far low than its critical value, referring to the pipelines in stable state; However, in case the coal mine was in the mining state, the axial stress and shear stress of the detected pipelines increased sharply with the increase of mining range; Once the excavation range exceeds 40 m, the pipeline came up to an unstable state and prone to damage. This study uses the method of checking numerical simulation with in-situ observations to analyze pipeline stability, which can guide the assessment and early warning of oil and gas pipelines crossing goaf.

Key words: oil-gas pipeline; in situ monitoring; numerical simulation; goaf of coal mine