 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i8.11455

Safety Protection Strategies for Pipeline Routes Under the Influence of Geological Disasters

Jiacheng Zhao Ruoqi Wang Shaobo Liu

Hebei Oil and Gas Transmission Branch of National Pipeline Network Group Beijing Pipeline Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050035, China

Abstract

Pipeline networks constitute critical infrastructure for energy transmission, urban supply, and regional industrial operations. They frequently traverse complex terrains including mountains, river valleys, hills, gullies, mining subsidence areas, and weak geological formations, making them highly susceptible to geological hazards such as landslides, rockfalls, debris flows, ground subsidence, water erosion, and freeze-thaw deformation. When these hazards affect the pipeline itself, its support structures, or surrounding soil, they may lead to issues such as suspension, displacement, bending deformation, weld cracking, leakage, or even rupture accidents. This paper analyzes safety risks associated with pipeline networks under geological hazard conditions and proposes protective strategies covering disaster identification, route protection, monitoring and early warning, operation and maintenance management, and emergency response, aiming to enhance the operational safety of pipeline systems.

Keywords

geological hazards; pipeline routes; safety protection; monitoring and early warning; risk management

地质灾害影响下管道线路安全防护策略

赵嘉程 王若琪 刘少博

国家管网集团北京管道有限公司河北输油气分公司，中国·河北 石家庄 050035

摘 要

管道线路在能源输送、城市供给、区域产业运行里属于重要的基础设施。它常常跨越山地、河谷、丘陵、冲沟、采空区还有软弱地层等复杂区域，很容易受到滑坡、崩塌、泥石流、地面塌陷、水毁冲刷、冻融变形等地质灾害的影响。要是地质灾害作用于管道本体、支护结构或者周边土体，就有可能造成管道悬空、位移、弯曲变形、焊缝开裂、泄漏甚至出现断裂事故。本文针对地质灾害影响之下的管道线路安全风险展开分析，从灾害识别、线路防护、监测预警、运维管理、应急处置等方面提出防护策略，目的是提高管道线路的安全运行水平。

关键词

地质灾害；管道线路；安全防护；监测预警；风险管控

1 引言

伴随油气管道、供水管道、化工输送管线、市政综合管网建设规模持续增大，管道线路穿越的区域越来越复杂，地质灾害对运行安全产生的影响越来越显著。管道工程具备线路长、埋深变化较大、沿线环境差异比较明显等特性，局部地质条件发生变化有可能借助土体位移、坡体失稳、水流冲刷、基础沉降传导至管道结构。传统的巡检方式大多侧重于外观检查与故障处置，对灾害孕育过程的识别不够充分。进行地质灾害条件下管道线路安全防护策略的研究，对于保障能源供应、降低环境风险、维护公共安全具备实际意义。

【作者简介】赵嘉程（1986–），男，中国河北固安人，本科，工程师，从事管道管理研究。

2 地质灾害对管道线路安全的影响机理

2.1 坡体失稳对管道结构形成附加载荷

在山区管道线路所面临的诸多风险当中，滑坡、崩塌、边坡蠕变是比较典型的。当管道穿越斜坡或者坡脚区域之时，坡体发生变形会改变周边土体的约束状况，致使管道承受额外的拉伸、压缩、弯曲、剪切作用。倘若滑动面穿过管道的埋设层位，土体的整体位移有可能带动管道产生横向偏移或者纵向拉伸，情形严重之时会造成焊缝应力集中、防腐层破损。边坡的缓慢蠕变具有隐蔽性特点，在短期内不一定会出现明显的裂缝，然而经过长时间的积累后会使得管道变形持续增加。在地质构造复杂、降雨集中、人类开挖扰动比较明显的区域，坡体失稳的风险更容易被放大，防护设计务必要关注坡体稳定性与管道受力之间的耦合关系。

2.2 水毁冲刷削弱管道基础稳定性

河流冲刷、沟道下切、山洪漫流、泥石流冲击，这些情况都会直接对管道穿越段的安全构成威胁。当管道在河谷、冲沟、浅埋段、岸坡转折处运行的时候，要是出现强降雨，就有可能导致地表径流集中起来，进而把覆盖土层冲走，使得管道外露、悬空，或者让管道的支撑条件发生突变。河床下切同样会改变穿越段的埋深，降低管道的抗浮和抗冲能力。泥石流会携带大量的块石、泥砂、漂浮物，其冲击力较大，破坏速度较快，有可能对护坡、锚固构件、标志桩造成破坏。水毁灾害常常具有突发性和季节性，要是巡检不够及时，哪怕是轻微的冲刷，在多次洪水的作用下，也可能演变成较大的隐患。所以，沿线的水文条件、排水通道的变化，应该被纳入长期安全评价当中。

2.3 地面沉降与塌陷引发管道不均匀变形

采空区、岩溶区、软土地基、地下水位变化明显区域，这些地方容易出现地面沉降、塌陷、不均匀变形的情况。当管道铺设在这类地段时，地基承载条件不稳定，局部沉降会致使管道跨距增大并且引起应力重新分布。要是沉降差超出管道允许变形范围，就有可能造成接口松动、焊缝出现裂纹、防腐层开裂、附属设施损坏。岩溶塌陷具有空间不确定性，在地表塌坑形成之前，常常很难通过常规目视巡查发觉。城市建设、矿山开采、地下水抽取、大型工程施工等也会改变地层平衡，让既有管道面临新的变形风险。地面变形类灾害防控需结合地质勘查、沉降监测、线路适应性评估来综合判断。

3 管道线路地质灾害风险识别难点

3.1 灾害孕育过程具有隐蔽性

不少地质灾害在发生之前会经历较长的孕育时期，只是在早期的时候，迹象不太显著。像边坡出现裂缝、地表有微小的变形、沟道冲刷程度加深、地下水渗流情况发生变化等现象，在巡检过程中，有可能会被错当成普通的环境改变。管道一般都是埋在地下的，外部地质发生变化和管道本体受力情况并不会同步呈现出来，防腐层受到损伤、焊缝处应力集中、产生微小位移这些状况，很难直接被观察到。要是仅仅依靠人工进行巡线，很容易遗漏坡体后缘裂缝、保坎变形、河岸被淘刷、浅层出现滑移等早期风险。灾害识别需要从“发现事故”转变为“发现趋势”，借助地形变化、植被出现异常、排水不通畅、周边工程受到扰动等信息，来判断隐患的发展状态。

3.2 沿线环境差异增加评价复杂性

管道线路的跨度较大，沿着路线有可能穿越不同的地貌单元、工程地质条件。在同一条线路当中，会存在山区边坡，还有河流穿越区域、农田软土地段、城市建成区域、采矿影响区域。不同灾害类型的作用机制不一样，防护重点也有差别。在山区要重点关注坡体的稳定性、泥石流沟，河谷地段需重视冲刷现象和岸坡塌落情况，采空区则要分析地表的移动规律。部分区域还受到道路施工、采石取土、农田灌溉、建筑开挖等影响，进而使得原有的地质环境不断发生变化。风险评价要是采用统一标准，很容易忽视局部的高风险点。管道安全管理应当建立起分区分级的思路，将地质条件、灾害历史、管道参数、周边活动纳入综合研判的范畴。

3.3 资料不足影响风险判断精度

管道建设、运行的周期比较长，其中部分早期线路在地质勘察、竣工资料、隐患治理还有维修记录这些方面存在不完整的情况。随着沿线开发活动不断增多，原来的地质条件或许已经发生了改变，然而资料更新比较滞后，使得风险判断依据不够充足。某些隐患点尽管曾经进行过治理，可是支挡结构、排水设施、护坡工程的运行状态缺乏持续记录，从而难以对防护效果作出评估。对于多单位共用通道或者交叉穿越区域，管线位置、埋深、保护范围等信息不明确，同样会对后续治理造成影响。完善基础资料，属于进行灾害识别、制定防护方案的重要前提条件，要形成涵盖勘察、设计、施工、运维和监测数据的一体化档案。

4 地质灾害影响下管道线路安全防护措施

4.1 优化选线与工程地质勘察

管道线路防护工作需在规划选线阶段就提前进行。选线之际要尽可能避开大型滑坡体、泥石流沟口、活动断裂影响区域、采空塌陷区、强冲刷河段，要是确实必须穿越这些区域，那就得进行专项地质勘察、稳定性评价。勘察工作不能仅仅满足于一般埋设条件的判断，还得弄清楚地层结构、地下水活动状况、坡体稳定状态、历史灾害分布情况、人类工程扰动情况。对于高风险地段，可以通过调整线路走向、加大穿越深度、采用定向钻穿越、设置柔性连接或者优化埋设方式来降低灾害带来的影响。科学选线能够减小后期治理的难度，还能够从源头降低管道长期运行时存在的风险。

4.2 加强边坡防护与水毁治理

面临滑坡、崩塌、水毁风险时需结合地形条件采取工程防护措施。在边坡地段能够设置挡墙、抗滑桩、锚杆框架等，同时还要做好截排水沟、坡面防护、植被恢复工作，以此提高坡体稳定性并减少雨水渗入。处于沟谷和河流穿越段要完善护岸、护底、导流、消能设施，以此防止洪水冲刷管道覆土。对于已经出现管道悬空、外露或者埋深不足的部位需要及时回填加固、增设保护套管亦或是采取压重措施。排水系统维护非常关键，堵塞的截水沟和失效的泄洪通道有可能诱发新的灾害。防护工程应注重长期运行效果，防止一次治理后缺乏维护再次失效。

4.3 提升管道本体抗灾适应能力

在地质灾害容易发生的区域，管道本身需要拥有一定的变形适应能力、安全冗余。在设计阶段的时候，可以依据地质风险等级来挑选恰当的钢级、壁厚、防腐层、焊接工艺，

以此提高管道的抗拉、抗弯、抗疲劳性能。当穿越滑坡边界、沉降差异区、冲刷地段时，可以采用加强段、柔性连接、套管保护还有应力释放设计，进而降低地层变形传递到管道本身所产生的破坏作用。在运行阶段要定期进行内检测、应力检测、防腐层检测、阴极保护评价，及时找出管壁减薄、变形、裂纹、涂层破损等情况。管道本体防护与外部地质治理相结合，才能够形成相对完整的安全屏障。

5 监测预警与运行管理策略

5.1 构建多源监测预警体系

地质灾害防控的重点在于尽早识别风险变化，仅靠单一巡查或者事后处置难以适时把握灾害演化进程。在滑坡、崩塌、泥石流、采空沉陷、河流冲刷等重点隐患区域，要依据管道埋设状况、周边地貌特点，布置地表位移监测、裂缝计、倾斜仪、雨量计、地下水位监测、管道应变监测、视频监控设备，建立起连续的感知网络。无人机巡查、卫星遥感、三维激光扫描、物联网传感技术，能够用来辅助识别地表变形、植被扰动、沟道淤积、边坡失稳的迹象。监测数据还需要和降雨强度、河流水位、施工扰动、历史灾害记录、地质条件进行综合分析，确立分级预警阈值。预警模式建设不能只看重设备数量，还要重视数据精度、传输稳定性、研判机制、响应闭环，让监测成果切实转化为管道安全决策的依据。

5.2 完善巡检维护和隐患闭环治理

管道线路地质灾害防控不能仅仅依靠临时性排查措施，而是要建立起一种涵盖日常巡检、专项排查、汛期检查、灾后复查的综合性维护机制。在汛期来临之前，需要着重对河流穿越段、冲沟发育区域、边坡地段、护坡工程、截排水设施、水毁容易发生的部位展开检查工作。当遭遇强降雨、地震、采矿扰动、大型施工或者河道改造等情况之后，应当及时组织专项巡查行动，以此来判定外部环境发生的变化对于管道安全所产生的影响。巡检人员需要特别留意标志桩倾斜、地表出现裂缝、沉陷变形、护坡开裂、排水不通畅、沟道出现淤积、管道外露等各类异常现象，并且要对位置、影像资料、变化趋势进行规范记录。一旦发现隐患，应当依据风险等级来制定相应的治理措施，明确责任主体、整改的时间限定、复核要求、跟踪周期。治理工作不能仅仅停留在临时覆盖、简单回填或者表面修补这样的方面，而是要对灾害形成的原因进行分析，采取诸如排水疏导、边坡加固、沟道清淤、管道保护、地貌恢复等具有针对性的措施。

5.3 健全应急响应与协同联动机制

地质灾害具备突发性、链式扩散特性，一旦对管道线路产生影响，便有可能引发泄漏、停输、环境污染、公共安全方面的风险。管道企业需要依据滑坡、泥石流、崩塌、洪水冲刷、地面沉降等不同的灾害类型，去制定差异化的应急预案，要明确预警接收、研判会商、停输降压、现场警戒、抢险处置、环境保护、舆情应对、信息报送等流程。针对人口密集区、重要河流、水源保护区、交通干线、高后果区附近的管道，应该提高应急准备等级，提前配备抢险物资、通信设备、警戒设施、应急队伍。管道企业还一定要与自然资源、应急管理、交通运输、水利、气象、生态环境、属地政府建立联动机制，共享灾害预警、施工活动、道路通行、抢险资源等信息。借助定期演练、桌面推演、典型案例复盘，能够提高人员的风险判断能力、现场协同效率，降低灾害事件扩大化的风险。

6 结语

地质灾害给管道线路安全带来的影响具备复杂性、隐蔽性、动态性等特点，它有可能借助坡体失稳、水毁冲刷、地面沉降等情况直接作用于管道，同时也有可能因长期环境变化而诱发结构损伤。要想提高管道线路安全防护水准，就得将风险识别、工程治理、管道本体强化、监测预警、应急管理贯穿于整个生命周期。实际操作过程中应当秉持分区分级管控的思路，针对高风险地段展开重点勘察、重点防护、重点监测。通过完善资料档案、强化巡检维护、落实隐患闭环治理等措施，可以有效降低地质灾害所引发的管道事故风险，保障管道系统安全、稳定且连续地运行。

参考文献

[1] 李普.矿井瓦斯抽采管道安全防护装置控制系统设计[J].矿业装备,2021,(3):250-251.

[2] 周方勤,天然气管道及站场本质安全检测与评价技术研究.四川省,中国石油西南油气田分公司安全环保与技术监督研究院,2011-05-22.

[3] 邓清禄,忠县—武汉输气管道地质灾害风险识别与防治系统研究.湖北省,中国地质大学,2006-04-01.

[4] 李水平.西气东输管道沿线环境地质灾害风险性评价研究[D].西南交通大学,2008.

[5] 张东阳,郭天伟,王仕龙,等.超高压交流输电线路对埋地油气管道电磁干扰分析及防护措施[J].电瓷避雷器,2026,(1):10-20+27.