

中国西部地区油气管道水工保护效果分析及优化

方玉晨, 黄超, 尚玉杰, 赵彦波, 徐东霞, 孙建科

国家管网集团工程技术创新有限公司, 天津

收稿日期: 2025年7月17日; 录用日期: 2025年9月16日; 发布日期: 2025年9月28日

摘要

水工保护作为保障油气管道全生命周期安全稳定运行的核心要素, 对维持管道工程长期可靠性具有重要意义。为切实提升水工保护设计的合理性, 本研究采用通过实际调研, 评估湿陷性黄土地区及戈壁地区油气管道水工保护措施的耐久性表现。并重点针对挡墙/锚索格构 + 护坡 + 排水沟水保措施、坡底挡墙 + 截水墙 + 排水渠水保措施、高短陡坡浇筑水保措施、黄土塬/台地排水沟水保措施及大型河流开挖穿越水保措施等典型防护方案的水保措施, 进行预期设计效果与实际运行效果的对比分析, 并据此推荐出不同工况下合理的设计方案, 为后期管道安全设计及决策提供了有效的技术依据。

关键词

湿陷性黄土, 戈壁, 水工保护, 调研, “截-排-疏”一体化设计

Analysis and Optimization of Hydraulic Protection Effects for Oil and Gas Pipelines in Western China

Yuchen Fang, Chao Huang, Yujie Shang, Yanbo Zhao, Dongxia Xu, Jianke Sun

Pipe China Engineering Technology Innovation Co., Ltd., Tianjin

Received: Jul. 17th, 2025; accepted: Sep. 16th, 2025; published: Sep. 28th, 2025

Abstract

Hydraulic protection, as a core element to ensure the safe and stable operation of oil and gas pipelines throughout their lifecycle, is of great significance for maintaining the long-term reliability of pipeline projects. To effectively improve the rationality of hydraulic protection design, this study

文章引用: 方玉晨, 黄超, 尚玉杰, 赵彦波, 徐东霞, 孙建科. 中国西部地区油气管道水工保护效果分析及优化[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(3): 547-555. DOI: 10.12677/jogt.2025.473060

evaluates the durability performance of hydraulic protection measures for oil and gas pipelines in collapsible loess areas and gobi regions through field investigations. It focuses on comparative analysis of the expected design effects and actual operation effects of typical protection schemes, including retaining wall/cable anchor lattice + slope protection + drainage ditch soil and water conservation measures, bottom retaining wall + cutoff wall + drainage channel soil and water conservation measures, high-short steep slope casting soil and water conservation measures, loess tableland/platform drainage ditch soil and water conservation measures, and large river excavation crossing soil and water conservation measures. Based on this, reasonable design schemes under different working conditions are recommended, providing an effective technical basis for subsequent pipeline safety design and decision-making.

Keywords

Collapsible Loess, Gobi Desert, Hydraulic Protection, Investigation and Research, Integrated Design of "Interception-Drainage-Hydrophobicity"

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

自 1958 年新疆克拉玛依油田至独山子炼油厂 147.2 km 的首条油气长输管道建成以来, 水工保护贯穿油气管道设计、施工及运营全生命周期, 油气管道高压易燃易爆、埋深较浅、管道壁厚较薄, 决定了水工保护不利对管道的危害有其特殊性, 有时小规模的自然动力作用也可能造成重大灾难[1]。然而, 已实施的水工保护设计与施工能否达到预期效果, 方案是否充分发挥防护功能, 仍需系统性验证。基于此, 亟需对已建成并运营的油气管道开展调研分析, 总结实践经验, 为后续水工保护设计提供科学指导与优化路径。

2. 调研方法

本次调研聚焦中国西部甘肃、青海境内油气管道, 该区域以黄土、湿陷性黄土、戈壁、山区、高原地貌为主, 地形复杂且生态脆弱:

1) 湿陷性的黄土含有大量的以粗粉粒为核心的多孔隙架构[2], 管道易受雨水冲刷导致悬空;

2) 地质灾害频发, 主要的地质灾害有滑坡、崩塌、地面沉降、河道穿越失稳、水工保护失效等威胁管道安全[3]-[5], 尤其是黄土地区, 相对于砂土同等滑坡位移, 管道在黄土的位移要大于砂土, 位移变形更大, 管道更危险[6];

3) 昼夜温差大、冻融循环频繁, 易造成水工保护设施开裂破损。针对上述难题, 水工保护多采用柔性材料与工艺, 以增强设施适应性与稳定性。

本次调研选取 39 个典型点位, 系统分析不同地质、地形、地貌条件下水工保护效果, 深入剖析各区域特点, 提出优化方案, 并明确后续设计需重点关注的关键环节, 为提升区域油气管道水工保护水平提供科学依据。

3. 调研成果分析

本次调研选取了挡墙/锚索格构 + 护坡 + 排水沟、坡底挡墙 + 截水墙 + 排水渠、陡坡浇筑、台地

排水沟、大型河流开挖穿越水保方案共 5 处水工保护典型案例，系统梳理以往项目中水工保护方案的设计思路与技术参数，结合工程运营期监测数据开展效果评估。通过分析柔性材料应用中的成功经验与现存问题，针对性提出优化改进方案，并总结形成后续设计阶段需重点关注的技术要点与风险控制措施。

3.1. 挡墙/锚索格构 + 护坡 + 排水沟

挡墙 + 护坡 + 排水沟为较短陡坡常采用的水工保护方式，根据本次调研，以图 1 所示为例，黄土陡坎地区广泛应用的水工措施包含干砌石挡墙、浆砌石护坡及坡面纵向排水沟等结构。其中，干砌石挡墙充分利用施工过程中的石块，通过自身重力有效抵御土体侧向压力，防止边坡发生滑坡、坍塌等失稳现象，从而维持地形地貌的稳定性；浆砌石护坡则通过加固土体表面，形成防护屏障，抵御雨水的冲刷与侵蚀；坡面纵向排水沟系统旨在构建完善的排水网络，排除坡体积水，避免因土壤含水量饱和导致抗剪强度降低，进而保障坡体稳定。

然而，实际调研中发现，该水工措施存在部分缺陷。坡面纵向排水沟因汇水能力不足，难以满足极端降雨条件下的排水需求，导致排水沟结构遭受损毁，进而引发坡面水毁。以图 1 所示为例，2022 年强降雨致使左侧排水沟因汇水量过大而冲毁，进而造成周边坡面大面积损毁约 60%。

为提升水土保持效果，建议在设计阶段优化排水系统：于坡顶增设截排水沟，有效拦截并引排坡顶径流，减少坡面汇水量；在坡面增设横向排水沟，与纵向排水沟形成立体排水网络，分片截排坡面水流、提高排水效率，降低因积水引发的坡面损毁风险，从而实现黄土陡坎地区的有效水土保持。



Figure 1. On-site effect diagram of dry stone retaining wall at slope foot + mortar stone slope protection + longitudinal drainage ditch on slope surface in loess steep slope area

图 1. 黄土陡坎地区坡脚干砌石挡墙 + 浆砌石护坡 + 坡面纵向排水沟现场效果图

图 2 所示工程采用了较为系统的水保护体系，涵盖锚索格构防护工程、混凝土护坡、顶部及两侧截排水渠 + 两级防冲墙及过水面结构。该方案通过锚索格构增强坡体锚固力，混凝土护坡抵御坡面冲刷，截排水渠疏导地表径流，防冲墙降低水流侵蚀，形成了综合性防护架构。

但现场调研结果显示，该防护体系存在隐患。纵向排水渠底部因长期受集中径流冲刷，结构完整性遭到严重破坏，其损毁状态已对锚索格构及混凝土护坡的基础稳定性产生不利影响；右侧排水沟存在衔接设计缺陷，致使最下层混凝土护坡处水流无法按设计路径汇入排水沟，水流漫溢现象加剧了局部坡面的冲刷破坏，进而威胁到整个防护工程的结构安全。

为消除上述隐患，提出以下优化建议：首先，针对损毁的纵向排水渠，需对渠底及周边土体进行分

层夯实处理, 增强基础承载能力与抗冲刷性能, 并重新修建排水渠, 优化渠底结构设计, 采用高强度混凝土或增设防冲刷护面; 其次, 在横向排水沟系统优化中, 应严格把控各排水单元的衔接精度, 通过设置标准化接口、措施, 确保排水网络的连贯性, 从而提升整体排水效能, 保障水保工程长期稳定运行。

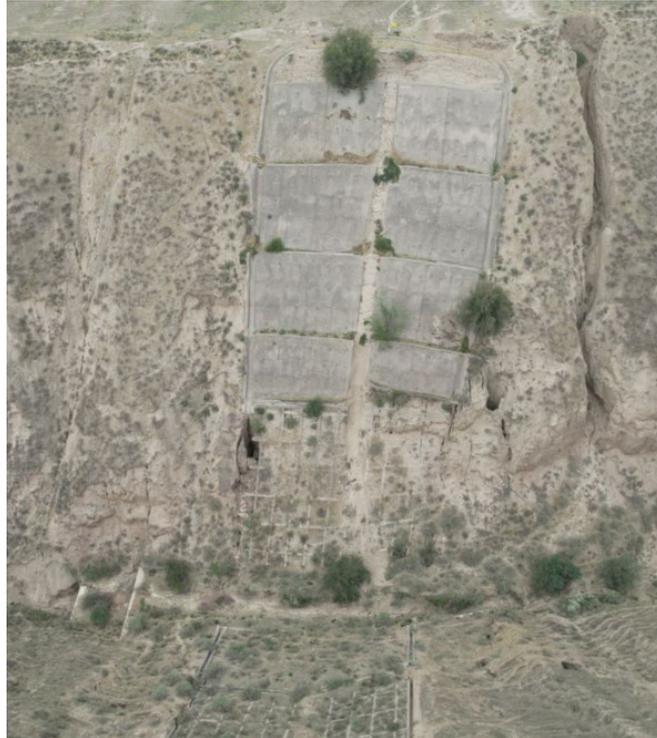


Figure 2. On-site effect diagram of anchor cable lattice protection + concrete slope protection + intercepting and drainage ditches set on both sides and top

图 2. 锚索格构防护 + 混凝土护坡 + 两侧及顶部设置截排水渠现场效果图

3.2. 坡底挡墙 + 截水墙 + 排水渠

在高长陡坡区域, 坡底挡墙、爬坡截水墙(必要时增设挡墙)与排水渠的组合, 是当前应用最为广泛的水工保护措施, 也是黄土冲沟地区管道开挖敷设的优选方案。该措施通过构建立体防护体系, 有效拦截坡面径流、稳固坡体结构, 对保障管道安全运行具有显著成效。

然而, 现场调研数据显示, 针对长距离高陡边坡, 经长期运营后, 现有水工保护体系逐渐暴露出防护效能下降的问题。以图 3 所示工程为例, 项目采用三道浆砌石挡墙、两道混凝土挡墙, 配套设置排水渠与截水墙, 但当前浆砌石挡墙已全部被坡体覆盖, 第一道混凝土挡墙亦被完全掩埋, 第二道混凝土挡墙覆盖面积达 85%。尽管现阶段尚未出现滑坡险情, 但随着坡体结构持续弱化, 若遭遇极端气象条件或地质活动, 极有可能诱发滑坡等地质灾害, 对管道安全运行构成重大威胁。目前建设单位采取的“问题发生后停输降压”应急处置方案, 仅能降低灾害发生时的次生风险, 无法从根本上消除隐患。

为有效防范地质灾害对管道的潜在威胁, 提出以下优化建议: 其一, 针对地质灾害高发、坡体破碎的山体, 优先采用定向钻等非开挖敷设技术, 从源头上规避开挖施工对坡体稳定性的破坏, 降低地质灾害发生概率; 其二, 若受工程条件限制无法采用非开挖方式, 需完善边坡安全监测体系, 在关键部位增设滑坡监测设备, 实现坡体位移、含水率等数据的实时动态监测; 同时, 合理加密截水墙布设密度, 增强坡体径流拦截能力, 优化排水系统效能, 并补充水土保持措施, 如铺设草地, 根据赵珊研究发现草地

雨后平均含水量为雨前的 1.57 倍，抗剪强度下降 8.76% [7]，可进一步提升坡体整体稳定性，确保管道全生命周期安全运行。



Figure 3. On-site effect diagram of slope bottom retaining wall + cut-off wall + drainage ditch
图 3. 坡底挡墙 + 截水墙 + 排水渠现场效果图

3.3. 陡坡浇筑

在图 4 所示工程案例中，基于场地以岩石层为主的地质条件，水保措施采用三道混凝土挡墙作为主要防护结构，因岩石透水性较弱，未设置排水沟；同时，为确保管线稳定性，采用整体浇筑方式将管线嵌入山体。考虑到坡体陡峭，若采用浆砌石护面，其自重可能对坡面产生过大附加荷载，引发整体失稳风险，故未设置浆砌石护坡。该方案在一定程度上兼顾了地质特性与工程安全需求。

然而，工程实践表明，现有防护体系存在缺陷。因挡墙及截水墙布设数量不足，难以有效约束山体破碎区域，导致坡面岩体在风化、降雨等因素作用下破碎程度加剧，存在潜在崩塌风险。这种状况不仅影响区域水土保持效果，更对管线长期安全运行构成威胁。

针对此类问题，提出系统性优化策略：其一，优先推荐采用定向钻或单边定向钻等非开挖技术，最大限度减少对原坡面的扰动，从源头上规避因开挖施工引发的地质灾害风险；其二，若受工程条件限制无法采用非开挖技术，需重新评估并优化挡墙与截水墙设计方案，适当增加其布设密度与结构强度。同时，采用灰土或水泥土夯填技术对开挖区域进行回填处理，通过增强土体密实度与整体性，效果会更好。

3.4. 台地排水沟

在黄土塬、台地等地形区域，为实现水流集中导流，降低水流漫滩对管沟上方覆土的冲刷风险，工程中普遍采用排水沟作为水工保护措施。该措施通过规范水流路径，减少坡面水流对覆土的侵蚀，从而保障管道设施的稳定性。

然而，实际调研结果显示，已实施的排水沟工程与设计预期存在显著偏差。由于目前大部分黄土地区植被覆盖率低，无法减少直接撞击土壤的降雨量，无法对土壤的稳定性参数和渗透参数产生积极影响，进而降低了土体的抗剪强度 [8] [9]，因此，部分排水沟不仅未能发挥保护作用，反而加剧了管道周边土体流失问题。以图 5 所示工程为例，排水沟下方土体因长期受水流冲刷，70%的排水沟已出现严重掏空现

象，对管道安全构成直接威胁。分析其原因，主要在于排水系统设计未能有效引导坡面径流，致使水流对排水沟基础及周边土体产生持续侵蚀。



Figure 4. On-site effect diagram of slope bottom retaining wall + steep slope pouring
图 4. 坡底挡墙 + 陡坡浇筑现场效果图

针对上述问题，提出以下优化方案：一是在排水沟上游末端设置多条引水渠，主动引导山坡径流集中汇入排水沟，有效缩短水流汇入路径，降低因水流分散形成落水洞的风险；二是合理降低排水沟高程，确保沟道具有足够的纵向坡度，提升排水效率，减少水流在沟内的滞留时间，从而增强排水沟的整体抗冲刷能力，切实保障管沟及管道设施的安全稳定。



Figure 5. On-site effect diagram of some drainage ditches in loess tableland and loess platform area
图 5. 黄土塬及黄土台地部分排水沟现场效果图

3.5. 大型河流开挖穿越水保方案

在大型河流穿越工程中，非开挖穿越技术因对河道生态扰动小、施工风险可控，成为首选方案。然而，受地质条件、工程可行性等因素限制，当必须采用开挖穿越方式时，水保措施的设计需充分考虑水

流消能问题，以降低水流冲刷对工程结构及河道生态的影响，常见的河沟道水工防护措施主要有修建浆砌石或石笼护岸、上游修建齿墙、下游修建防冲墙、上方修建过水面等[10]，尤其是浆砌石过水面、防冲墙或挡墙因取材方便，成本低得到广泛应用，但在极端条件下这种结构材料暴露出的一些结构性问题的缺点，如石材内部存在裂缝、水泥砂浆配合比不当、抗渗性差、抗风化能力差等，在极端降雨时损坏通常及其严重[11]-[13]。

以图 6 所示工程为例，该项目采用上下游各一道防冲墙、防冲墙间钢筋混凝土过水面及防冲墙下游石笼护坦的水保方案。但在实际运行中，遭遇强水流冲击时，因消能设计不足，部分地段防冲墙被冲断，钢筋混凝土过水面近 40%出现严重掏蚀塌陷，对穿越管道安全构成重大威胁。图 7 所示的修复方案采用修补防冲墙、混凝土过水面结合三阶石笼护坦的方式，并在河道中部原防冲墙下游实施加固措施，采用钢筋混凝土墩、梁、板结构体系。但该方案抗冲刷性能较弱，在水流冲击下，仍有 40%混凝土板被冲走，残存混凝土板改变水流路径，反而加剧了对原防冲墙底部的掏蚀作用，且仍未能有效解决高流量工况下的水流冲击问题。



Figure 6. On-site effect diagram of anti-scour wall + reinforced concrete overflow surface between anti-scour walls + gabion apron downstream of anti-scour wall

图 6. 防冲墙 + 防冲墙间钢筋混凝土过水面 + 防冲墙下游石笼护坦现场效果图



Figure 7. On-site effect diagram of anti-scour wall + concrete overflow surface + three-stage gabion apron

图 7. 防冲墙 + 混凝土过水面 + 三阶石笼护坦现场效果图

对比之下，图 8 所示工程采用混凝土防冲墙、下游混凝土护坦与 0.5 m^3 消力墩相结合的方案，通过消力墩对水流进行有效消能，改变水流形态，降低冲刷力。经多年工程实践及多次洪水考验，该方案在

抵御水流冲刷、保障工程结构安全方面表现优异，验证了科学消能设计对大型河流穿越工程水保措施的关键作用。由此可见，在开挖穿越工程中，防冲墙应采用连续布设形式，避免因结构隔断形成水流冲刷薄弱点；同时，需强化消能设计，合理配置消力墩、护坦等设施，构建完善的水流消能防护体系，从而实现工程安全与河道生态保护的双重目标。



Figure 8. On-site effect diagram of concrete anti-scour wall + concrete apron downstream of the anti-scour wall + stilling pier
图 8. 混凝土防冲墙 + 防冲墙下游混凝土护坦 + 消力墩现场效果图

4. 中国西部地区长输管道水工保护建议

在既往水工保护项目实践中，柔性材料及工艺的应用显著提升了设施对复杂环境的适应能力[14]-[17]。针对冻融循环及地形沉降等地质作用，柔性生态袋边坡防护体系能够展现出良好的形变协调性能，且由于其价格的经济性、对环境的友好性，在各类工程建设中发挥了重要价值[18]，且在湿陷性黄土及戈壁区域，柔性防护结构凭借其独特的变形缓冲机制，较传统刚性结构更能抵御落水洞侵蚀与地基掏空风险，对管道悬空等隐患形成有效防护屏障。

然而，材料特性决定其应用存在局限性。由于自身刚性不足，柔性防护结构在长期服役过程中易出现显著位移变形，极端工况下甚至引发局部坍塌；同时，材料老化问题也对其耐久性构成挑战，直接影响工程结构的使用寿命。

- 1) 水工保护应从“截 - 排 - 疏”一体化网络进行考虑；
- 2) 截水墙效果对实现黄土陡坎地区水工保护作用极其明显，有工程措施截水墙的年径流量和年土壤侵蚀量分别是无截水墙的 61%和 33% [19]；
- 3) 在较短陡坡段敷设，灰土/水泥土夯填 + 截水墙效果较刚性混凝土浇筑更好，尤其湿陷性黄土地区；
- 4) 对于大型河流开挖穿越，应考虑极端天气大洪水流量下的消能措施；
- 5) 对于大型水工保护及水土保持工程(如图 3)，应进行必要的监测措施，并遵循：① 监测点具有代表性；② 点位数量全面性，必要时增设监测点位及监测内容；③ 对于水土流失严重区域，监测结果精确度要高[20] [21]。

基金项目

国家管网集团西部管道有限责任公司科技项目(XG-JCGL-CX-KJXX-01-JL-03)。

参考文献

- [1] 刘传正. 论线状工程地质灾害预防应对问题[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(5): 1-4.

- [2] 连江涛. 油气管道湿陷性黄土的水工保护设计[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(12): 24-25.
- [3] 康春景, 高轩, 何旭麒. 湿陷性黄土地区长输管道工程地质灾害分析及管控[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(3): 119-121.
- [4] 王卫民, 张文伟. 黄土地区长输管道地质灾害分析及治理[J]. 油气储运, 2018, 20(4): 28-31.
- [5] 范原博, 夏琳, 林昆. 湿陷性黄土地区输油管道的防护措施[J]. 油气田环境保护, 2016, 5(22): 73-77.
- [6] 修林冉, 王子, 张明程, 等. 基于滑坡区域的不同土质埋地输气管道安全评价[J]. 油气田地面工程, 2022, 41(1): 59-70.
- [7] 赵珊, 许阳光, 郭文召, 等. 黄土塬区不同土地利用类型下土壤抗剪强度对强降雨的响应[J]. 农业工程学报, 2025, 41(4): 108-115.
- [8] 戴靖沛, 黄建坤, 陈丽华, 等. 基于均匀化理论的根土复合体三维本构关系[J]. 农业工程学报, 2022, 38(13): 76-83.
- [9] Zheng, B.F., Wang, D., Chen, Y.X., *et al.* (2024) The Impact of Vegetation Types on Soil Hydrological and Mechanical Properties in the Hilly Regions of Southern China: A Comparative Analysis. *Water*, **16**, Article 350. <https://doi.org/10.3390/w16020350>
- [10] 张成信, 魏龙飞, 唐尧, 等. 泰青威天然气管道临胸段水毁灾害分布特征与风险评价[J]. 中国地质调查, 2021, 8(5): 108-114.
- [11] 雷宏峰, 吴夏, 罗鹏. 极端天气条件下管道顺沟敷设段山洪泥石流防护提升[J]. 管道保护, 2025, 2(2): 43-50.
- [12] 董绍华. 中国油气管道完整性管理 20 年回顾与发展建议[J]. 油气储运, 2020, 39(3): 241-261.
- [13] 庞春强, 庞正. 山区小流域山洪综合防治能力提升技术探索——以天台县为例[J]. 浙江水利科技, 2023, 51(4): 96-99.
- [14] 杨波. 聚酯袋水工保护形式在江西天然气管网项目中的应用[J]. 化工管理, 2020(16): 178-180.
- [15] 贾春磊. 生态袋措施在海西天然气管网二期管道工程中的应用[J]. 内蒙古水利, 2019(1): 63-64.
- [16] 张伟. 生态袋结构在管道水工保护工程中的应用[J]. 福建建材, 2017(10): 58-60.
- [17] 林铭玉. 生态袋防护措施在山区长输管道水工保护中的应用[J]. 油气田地面工程, 2018, 37(1): 86-88.
- [18] 李腾飞, 徐东霞, 朱州, 等. 柔性复核水工保护材料在油气管道水工保护中的适用性研究[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(13): 83-87.
- [19] 王孝兵, 赵杰, 田文杰, 等. 油气管道工程坡面工程措施和植物措施水土流失防控效应[J]. 中国水土保持, 2025(5): 63-65.
- [20] 赵永军, 姜德文, 袁普金. 线状工程建设项目的水土保持监测——以西气东输项目为例[J]. 水土保持研究, 2025(6): 71-75.
- [21] 赵彦波, 尚玉杰, 王鸿, 等. 广东地区油气管道水工保护与水土保持调研成果及建议[J]. 石油天然气学报, 2025, 47(1): 90-97.