

西北地区油气管道水工保护设计提升

余文昌^{1,2}, 徐 乔³, 谢 萍^{1,2}, 刘 鑫⁴, 陈 巍³, 马 驰³

¹国家管网集团西部管道有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐

²新疆多介质管道安全输送重点实验室, 新疆 乌鲁木齐

³国家管网集团工程技术创新有限公司, 天津

⁴中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊

收稿日期: 2025年9月21日; 录用日期: 2025年10月21日; 发布日期: 2025年10月29日

摘 要

油气长输管道在建设和运营过程中面临显著的水土保持与生态保护挑战。西北地区干旱少雨、风沙活动频繁、土壤结构疏松、植被覆盖度低, 管沟开挖工程极易破坏原有地表结构与植被层, 在降雨、融雪或地表径流冲刷作用下, 管道上方覆土易发生流失, 进而危及管道安全。传统的浆砌石、混凝土、水泥土等水工保护和水土保持型式在生态恢复和环境保护方面存在一定不足, 本文通过对西北地区管道水毁情况调研, 对管道的水工保护方案稳定性、维修维护需求进行分析, 提出以下提升措施建议: 格宾石笼与土工布复合护底结构, 可有效防止石笼与被保护的土方之间的接触流失, 提高防护结构稳定性; 土工格室笼适用于有水环境边坡, 土工格栅笼适用于无水环境边坡; 改进型HDPE土工格室通过其独特的网格结构, 能有效固定沙土, 防止风沙侵蚀。

关键词

水工保护, 需求分析, 设计提升

Enhancement of Hydraulic Protection Design for Oil and Gas Pipelines in Northwest China

Wenchang Yu^{1,2}, Qiao Xu³, Ping Xie^{1,2}, Xin Liu⁴, Wei Chen³, Chi Ma³

¹PipeChina West Pipeline Innovation Co., Ltd., Urumqi Xinjiang

²Xinjiang Key Laboratory of Multi-Medium Pipeline Safety Transportation, Urumqi Xinjiang

³PipeChina Engineering Technology Innovation Co., Ltd., Tianjin

⁴China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei

Received: September 21, 2025; accepted: October 21, 2025; published: October 29, 2025

文章引用: 余文昌, 徐乔, 谢萍, 刘鑫, 陈巍, 马驰. 西北地区油气管道水工保护设计提升[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(10): 1475-1482. DOI: 10.12677/aep.2025.1510162

Abstract

Long-distance oil and gas pipelines face significant challenges in soil and water conservation as well as ecological protection during their construction and operation phases. The northwest region of China is characterized by arid conditions with scarce rainfall, frequent wind-sand activities, loose soil structure, and low vegetation coverage. Trench excavation works for pipelines are highly likely to damage the original surface structure and vegetation layer. Under the scouring effect of rainfall, snowmelt, or surface runoff, the overlying soil above the pipelines is prone to loss, which in turn endangers the safety of the pipelines. Traditional hydraulic protection and soil-water conservation types such as mortar masonry, concrete, and cement-soil have certain shortcomings in terms of ecological restoration and environmental protection. Based on an investigation into pipeline water damage incidents in the northwest region, this paper analyzes the stability of pipeline hydraulic protection schemes and their maintenance requirements, and proposes the following improvement measures and suggestions: The composite bottom protection structure of gabion cages and geotextiles can effectively prevent contact loss between gabion cages and the protected soil, thereby enhancing the stability of the protective structure; Geocell cages are suitable for slopes in water-containing environments, while geogrid cages are applicable to slopes in water-free environments; the improved HDPE geocells, with their unique grid structure, can effectively fix sand and soil and prevent wind-sand erosion.

Keywords

Hydraulic Protection, Demand Analysis, Design Enhancement

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

西北地区作为我国油气资源开发的核心区域，是“西气东输”、“西油东送”等国家能源战略通道的关键途经地，该地区管道多穿越黄土高原沟壑区、戈壁荒漠区、山前冲洪积扇及内陆河沿岸。黄土地区土壤常处于松散状态，边坡坡度常可达到 30° 以上[1]，管沟开挖后，原本脆弱的边坡土体抗侵蚀能力急剧下降，在夏季短时强降雨引发黄土力学效应导致强度和稳定性的降低[2]，达一定阈值时将引起黄土滑坡、土洞与沟道溯源侵蚀，导致管顶覆土快速流失[3]；而戈壁荒漠区土壤颗粒粗、黏聚力差，工后土质松散，暴雨洪水常造成管道水毁[4]。

为控制西北地区管道沿线水土流失、保障管道稳定运行，常采取坡面防护、冲刷防护和支挡防护等结构管道。然而，传统浆砌石、混凝土等刚性防护形式在该地区适应性不足，在植被重建和地表修复方面效果有限。已建水工结构运维成本高、耐久性面临风蚀与冻融等挑战，部分工程呈现高投入、低效率的运行状态。有必要针对西北地区特殊自然条件，系统总结现有工程经验与教训，提出更适应干旱、风沙和高寒环境的水工保护改进措施与生态化技术路径。

2. 文献综述

西北地区传统水工保护设计在西北地区面临严峻挑战，主要体现在以下几个方面：① 灾害类型的特殊性与复合性。在黄土高原区，管道面临的不仅是常规的水流冲刷，更关键的是工程扰动对黄土湿陷性

的影响,导致的抵御水流冲击能力更低,水土流失情况更为严重[5]。在冲沟发育区,季节性洪水具有“历时短、强度大、破坏力强”的特点,极易导致管道悬空甚至断裂。② 气候变化的加剧影响。全球气候变化导致西北地区极端降水事件频率和强度增加,使得原有的水文计算参数和防洪标准可能不再适用。设计重现期的降雨可能更频繁地发生,对水工保护结构造成了“超负荷”考验。③ 随着国家对工程建设和环境保护要求的日益提高,不仅要确保管道长期安全平稳运行,还要保证生态环境恢复效果,工程建设要在保证工程安全的前提下,减少对脆弱生态环境的扰动,实现水工保护与生态修复的协同[6]。

针对上述挑战,近年来研究与实践在多个层面取得了显著进展,设计提升主要体现结构设计 with 材料的创新,相比于刚性结构,柔性防护结构体系如生态袋、新型 W 型平衡压袋、尼龙网、土工格室(栅)、格宾网 + 土工布等柔性结构具有良好的适应变形能力和透水性,能有效消能并促进植被恢复,在冲刷防护和边坡稳定中应用日益广泛[6]。

3. 调研内容

课题采用现场调研方式,对新疆、甘肃、青海三省区境内的 16 条不同时期建设的管道的水工保护措施现状进行调研分析。

3.1. 河沟道水毁

该处为小型河流穿越段,原设计采用浆砌石挡墙结合混凝土防冲墙作为水工保护措施,于 2022 年汛期期间被洪水冲毁。2023 年对此实施了修复工程,于原结构基础上增设石笼护底,形成浆砌石挡墙 + 混凝土防冲墙 + 石笼护底的复合防护体系。现场调研发现,目前岸边浆砌石挡墙仍持续承受水流冲刷作用,且底部石笼护底已出现局部损坏迹象,见图 1。若汛期遭遇较大流量冲刷,石笼防护体系存在进一步失稳的风险,可能导致防冲墙基础掏空、结构失稳甚至倒塌。



Figure 1. The destroyed retaining wall and the anti-scour wall at small river broke through
图 1. 小型河流穿越挡墙及防冲墙被冲毁

3.2. 山谷河沟敷设段

该段管道沿山谷敷设,原设计采用石笼护面、防冲(截水)墙、格宾石笼护底、消能墩、配重及混凝土浇筑护底等综合水工防护措施。据现场反馈,2011 年至 2019 年间,该区域多次遭遇降雨引发的洪水,导致谷内多处管段覆土受冲蚀,出现管道裸露、防腐层损坏及光缆屡次冲断等问题。为彻底治理隐患,2020

年实施了泥石流专项防治工程，共修建挡土墙 19 处，并在下游辅以铅丝石笼防护。目前整体结构基本稳定，仅石笼局部存在轻微掏蚀，见图 2。

初步分析表明，灾害主要成因包括：山谷段局部狭窄曲折，洪水汇流迅速、冲击力强；同时，部分区段采用的混凝土护底结构在一定程度上抬高了水流流速，加剧了冲刷作用。



Figure 2. Local slight scouring occurred in the gabion at the section laid along the valley gully
图 2. 山谷河沟敷设段石笼局部发生轻微掏蚀

3.3. 黄土湿陷段

该处为河流穿越，设计水工防护措施包括：两级护坡(第一级为拱形格构护坡，第二级为混凝土预制块护岸，结构尺寸长约 7.5 m、宽约 30 m、高约 6 m)及河道内石笼护底(长约 70 m，宽约 1.5 m)。现场调查表明，该穿越处为常流河，汛期流速约 2.5 m/s，流量约 20 m³/s。东岸因受农田灌溉影响，地表径流及水体下渗导致拱形格构与混凝土预制块护岸发生断裂，见图 3，往年需连年维修。近期通过在坡顶增设拦水埂等整治措施，水工结构目前总体处于稳定状态。初步分析认为，灌溉水引发的坡面冲刷与渗流作用是造成防护结构损坏的主要原因。



Figure 3. Fracture occurred in the arch lattice and precast concrete block revetment in the collapsible loess section
图 3. 湿陷黄土地区拱形格构与混凝土预制块护岸发生断裂

3.4. 风沙沙山管段

该处原有混凝土防风固沙工程损毁严重，见图 4，已于 2023 年改建为草方格固沙体系进行治理，见图 5。鉴于该区地处沙漠环境，需通过持续改善区域生态环境，从根本上消除因风蚀与沙埋对管道安全构成的潜在威胁。



Figure 4. The destroyed concrete windproof and sand-fixing project
图 4. 混凝土防风固沙工程损毁



Figure 5. Straw checkerboard sand fixation
图 5. 草方格固沙

4. 结果与分析

共调研 98 处水工保护措施，水工保护措施失效主要为河沟道水毁和台田地水毁，共 78 处，大部分管道均涉及河沟道水毁。98 处水毁中 32 处设置了水工保护，66 处未设置水工保护。已建水工保护和未设置水工保护设施的情况如下：已建水工保护设施情况，位于河沟道内、山区横坡敷设的管道，26 处修建护岸、过水路面、防冲墙保护管道；对于黄土区台田地，6 处修建挡土墙、排水渠保护管道。29 处按暴雨 20 年一遇开展设计，其余 3 处排水渠、挡墙未明确防洪设计规模。未设置水工保护设施有 42 处位于黄土区台田地，实施水工保护措施影响农民种植，采取抢险或治早治小措施治理；其余 24 处排查期间地表完好、管道上方覆土未流失，未优先考虑水工保护措施。水毁灾害类型分布情况详见表 1。

Table 1. Distribution of types of flood-damaged disasters

表 1. 水毁灾害类型分布情况

序号	管道名称	河沟道水毁	坡面水毁	台田地水毁	黄土湿陷	小计
1	白银支线	8	0	1	0	9
2	独乌原油	1	1	0	0	2
3	甘南支线	6	0	0	0	6
4	甘西南	0	2	2	0	4

续表

5	兰定支线	2	1	16	2	21
6	蓝银线	0	0	1	0	1
7	两兰支线	0	0	0	1	1
8	刘化支线	5	0	0	1	6
9	轮吐线	6	1	0	0	7
10	涩宁兰复线	5	4	0	3	12
11	涩宁兰一线	1	1	1	3	6
12	双兰线	2	0	5	0	7
13	西二线	1	0	0	0	1
14	西三线	1	0	0	0	1
15	西一线	1	0	0	0	1
16	永登支线	1	0	12	0	13
合计		40	10	38	10	98

通过对调研管段水工保护措施的稳定性和维修维护需求进行分析，初步提出以下提升建议：

- (1) 针对河沟道水毁段：部分浆砌石结构仍具备适用性，但应加强施工质量控制；可逐步推广使用格宾石笼、土工格栅加筋素土夯填或土工格栅笼装细土等替代方案。过水面结构建议采用格宾石笼或土工格栅笼进行防护。
- (2) 针对山谷沟道敷设段：宜采用格宾石笼护底结构，并于石笼底部铺设土工布反滤层；局部冲刷严重区段可考虑采用柔性配重块等改良措施进行加强防护。
- (3) 针对黄土湿陷段：推荐采用生态袋排水沟、塑料排水槽、土工布反滤层等结构，并可在坡面或坡中设置生态袋堡坎，以增强边坡稳定性并改善排水条件。
- (4) 针对风沙沙山管段：结合试验段治理效果，对现有高强度聚乙烯塑料土工格室、尼龙固沙网等措施进行优化与改进，以提升其防风固沙性能及工程耐久性。

5. 讨论

针对目前管道水工保护和生态恢复措施不能有效适应管道沿线各种环境工况要求的问题，从现有水工保护方案提升需求以及管道水工保护材料和生态恢复措施多样性选择的需要出发，开展管道水工保护新型材料、结构形式和新型生态型的恢复措施研究迫在眉睫。随着土工合成材料等新材料的技术、经济性能不断提升，使其在管道水工保护和生态恢复中推广应用成为可能，可对传统的混凝土、浆砌石类水工保护工程进行补充和完善，实现管道水工保护和生态恢复技术上和应用上的突破，有力保障管道安全运行。

5.1. 河道护底

本次调研共发现 40 处河沟道水毁，河道混凝土防冲墙、混凝土护底措施水毁较为常见。可采用格宾石笼护底与土工布反滤的复核结构，格宾石笼能够充分发挥结构的柔性，当周边填土发生变化时，为适应新的基础状态能够充分利用自身柔性与耐磨性进行一定调整，从而避免坍塌的出现。格宾石笼填充材料之间存在一定孔隙且外围属于网状结构，可以实现水体的自由排泄，具有较强透水性，创造适宜的环境条件，有利于提高河岸生物多样性。同时格宾石笼铺设土工布反滤层，可避免石笼底部河床物质的接

触冲刷,进而淘蚀河床、护底不均匀沉降。

5.2. 边坡防护

针对边坡水毁问题可采用土工格室(格栅)防护。土工格室与土工格栅石笼护坡结构均具有优异的力学性能与生态效益。土工格室材料具备高强度、耐腐蚀、抗老化及良好韧性,能有效抵抗水流冲蚀与温度变化;其独特结构可减缓水流、消能散流,并增强对土体的附着效果。格室内回填适宜植物生长的土壤,能促进坡面植被恢复,进一步提升抗冲刷能力,兼具水土保持与生态修复双重意义。土工格栅石笼护坡则兼具整体性与柔性,适应坡面变形能力强,不易断裂;其粗糙表面利于泥沙淤积和植物生长,且具备较高抗拉强度,能有效抵御自然灾害与恶劣气候影响。两种结构均表现出良好的透水(或隔水)特性,施工简便,仅需填石密封,无需特殊技术;同时,它们均可卷装运输,有效节约成本,并支持现场灵活裁剪,整体造价显著低于传统混凝土护坡,具有显著的经济与环境效益。

5.3. 风沙防护

参照工程沙山风蚀段治理经验,可采用高密度聚乙烯土工格室进行防护,见图6。高密度聚乙烯土工格室采用HDPE制作而成,外观呈三维立体蜂窝状结构,是护坡、绿化、加固用土工材料产品。采用该种材料组成的柔性结构体系具有整体强度高、刚度大、抗腐蚀、耐老化等优良特性。与其它土工材料构成的结构层相比回弹模量和变形模量可提高一倍以上。由于高分子材料的稳定化学特性,产品可耐酸、耐碱,适应于不同的土质环境,经过热老化试验,折算其老化寿命为50年。

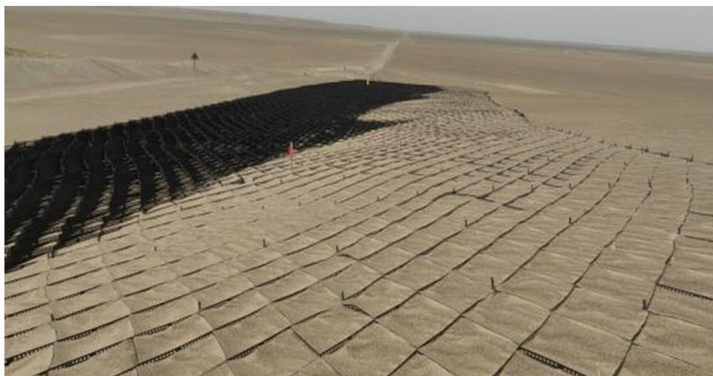


Figure 6. Wind and sand control using high-density polyethylene geocells
图6. 高密度聚乙烯土工格室进行风沙治理

6. 结论

本文通过对西北地区水工保护措施现状调研,分析水毁发生原因,总结工程经验教训,提出改进对策及措施,得出如下结论:

- (1) 护底采用格宾石笼护底与土工布反滤结合,可提高护底的稳定性,还通过土工布的反滤功能,防止土壤流失,能有效保护河床和渠道,防止冲刷和侵蚀。
- (2) 根据现场水文条件,选择不同的材料和结构在边坡土工格室笼(有水)与土工格栅笼(无水)差异化应用。土工格室笼适用于有水环境,能有效防止水土流失,增强边坡的稳定性;而土工格栅笼适用于无水环境,通过增强地基的承载力,防止地基变形。
- (3) 风沙防护中创新应用改进型HDPE土工格室,通过其独特的网格结构,有效固定沙土,防止风沙侵蚀。

致 谢

本文调研得到国家管网集团西部管道有限责任公司科研项目(XG-JCGL-CX-KJXX-01-JL-03)基金项目的大力支持,感谢国家管网集团西部管道有限责任公司科研项目为本次调研提供的经费保障。

基金项目

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

参考文献

- [1] 侯泽青. 油气管道工程黄土边坡敷设段水土保持措施设计——以古浪-河口天然气联络管道工程为例[J]. 中国水土保持, 2025(9): 76-8.
- [2] 徐张建, 林在贯, 张茂省. 中国黄土与黄土滑坡[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(7): 1297-1312.
- [3] 王家政, 辛鹏, 曹生鸿, 等. 降雨诱发黄土滑坡-泥流的规律及阈值曲线研究[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 102-106.
- [4] 任国志. 戈壁荒漠区洪水灾害对输气管道的影响分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2015, 51(6): 43-44.
- [5] 连江涛. 油气管道湿陷性黄土的水工保护设计[J]. 石油工程, 2019, 45(12): 24-25.
- [6] 李腾飞, 徐东霞, 朱州, 等. 柔性复合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.