

风沙区采用土工格室与土工网保护管道的实践与建议

刘复合^{1,2}, 程 磊¹, 米冠宇³, 何 柳^{4*}, 徐东霞⁵, 张 函¹, 方玉晨⁵

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中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊

⁴中国资源循环集团设备资产有限责任公司, 天津

⁵国家管网集团技术创新有限公司, 天津

收稿日期: 2025年11月9日; 录用日期: 2025年11月30日; 发布日期: 2025年12月17日

摘要

本研究以风沙地区的油气管道防风固沙保护为切入点, 依托西部管道管辖的新疆地区的管道工程, 通过土工格室和土工网的现场利用, 解决了干旱沙漠地区防沙固沙资源有限等问题。从土工格室、土工网沙障影响因素展开分析, 在雅满苏压气站沙山风蚀和试验段治理和民勤县沙漠治理两个案例中利用了土工格室和土工网沙障; 最后, 对应用中存在的问题进行总结分析, 并对指标性能和安装要求提出了建议。

关键词

油气管道, 防风固沙, 土工格室, 土工网

Practice and Recommendations for Pipeline Protection Using Geogcells and Geonets in Wind-Sand Areas

Fuhe Liu^{1,2}, Lei Chen¹, Guanyu Mi³, Liu He^{4*}, Dongxia Xu⁵, Han Zhang¹, Yuchen Fang⁵

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

²Xinjiang Key Laboratory of Safe Transportation for Multi-Medium Pipelines, Urumqi Xinjiang

³China Petroleum Pipeline Engineering Co., Ltd., Langfang Hebei

⁴China Resources Recycling Group Equipment & Asset Co., Ltd., Tianjin

⁵PipeChina Engineering Technology Innovation Co., Ltd., Tianjin

*通讯作者。

文章引用: 刘复合, 程磊, 米冠宇, 何柳, 徐东霞, 张函, 方玉晨. 风沙区采用土工格室与土工网保护管道的实践与建议[J]. 土木工程, 2025, 14(12): 2925-2932. DOI: 10.12677/hjce.2025.1412314

Abstract

This study takes the wind prevention and sand fixation protection of oil and gas pipelines in wind-sand areas as the starting point. Relying on the pipeline projects in the Xinjiang region under the jurisdiction of Western Pipeline, it addresses issues such as limited resources for wind and sand prevention in arid desert areas through the on-site application of geocells and geonets. Starting with an analysis of the influencing factors of geocell and geonet sand barriers, the study applies these sand barriers in two cases: the wind erosion control at the sand dunes of YaMansu Compressor Station and the management of the test section, as well as the desert governance in Minqin County. Finally, it summarizes and analyzes the problems existing in the application, and puts forward suggestions on index performance and installation requirements.

Keywords

Oil and Gas Pipeline, Wind Prevention and Sand Fixation, Geocells, Geonets

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. 前言

我国风沙地区普遍采用草方格沙障及栽砌卵石护坡固沙[1]，但由于草方格使用寿命短，栽砌卵石护坡需定期清沙，每年都需要投入大量的维修费用及劳动力。植物防风固沙措施易受自然条件(如降水量、地层含水量等)限制[2]。在干旱沙漠、沙丘分布区，用草方格沙障与固沙植物相结合能起到良好的防护边坡效果，但干旱风沙区生物资源极为有限。随着人们对环境保护和生态平衡的重视，新的替代生物材料的设计与应用尤为迫切，土工合成材料在河道生态护坡等治理[3]和风沙地区路基防护工程中已经有所应用[4]，但在沿风沙地区敷设的油气长输管道保护中的应用仍为空白，本文在长输油气管道风沙治理工程建设中引入了土工格室和土工网进行防沙固沙的应用，为行业提供了参考。

2. 土工格室、土工网沙障影响因素分析

2.1. 土工格室

土工格室是由强化的 HDPE 片材料经高强力焊接而形成的一种三维网状格室结构，使其在受到外力作用时能够形成稳定的整体，对填充材料(如土壤、沙石等)起到有效的侧向限制作用。根据普朗特尔理论和泰勒理论，土工格室通过沿滑移线的剪切力和移动主动、过渡、被动三个区域的力，决定了地基的承载能力，从而提高了松散填料的刚度和强度。在沙漠地区，土工格室结构会降低风速，减小风沙动能，从而减少风沙移动和堆积。土工格室材料无污染，可多次重复利用，以减少对自然资源的破坏和浪费。土工格室的施工速度快、成本低廉。

2.2. 土工网

土工网通过其独特的网状结构，对风沙流起到了物理阻挡作用，土工网的阻挡降低了风速，削弱了风沙动能，从而减少了风沙的移动和堆积。土工网增加地表粗糙度，阻碍风沙，网状结构能为沙粒提供

附着点，有助于沙粒的沉积和固定。土工网与土壤紧密结合，形成稳定整体，提高土壤抗风蚀能力。土工网可以遮挡部分阳光，减少地表水分的蒸发，保持土壤湿度，网状结构为植被根系提供良好的生长空间，有助于植被的扎根和生长。土工网材料成本较低，易于施工和维护，土工网的使用寿命长。

2.3. 材料特性和结构参数

土工材料的强度直接影响其加固效果，高强度材料能更好地抵抗风蚀、水蚀等自然侵蚀作用，保持沙障的稳定性；材料应具有良好的耐老化、耐腐蚀性能，以确保沙障能在恶劣环境中长期使用；网格尺寸的大小会影响土工格室对填充材料的约束能力。尺寸较小的网格能提供更强的约束，减少沙土流失。

随着土工格室、土工网高度的增加，其承载能力增强，能更好地分散地基荷载。但过高的土工格室可能增加施工难度和成本；合理的间距设置能够确保土工格室、土工网沙障的整体稳定性和防护效果。间距过大可能导致沙土流失，间距过小则可能增加不必要的材料消耗和施工难度；埋置深度会影响土工格室、土工网的承载能力和稳定性。过浅的埋置可能导致土工格室易受外力破坏，而过深的埋置则可能增加施工难度和成本。

2.4. 环境因素和施工质量

在沙漠地区，风力是影响土工格室、土工网沙障稳定性的关键因素，强风可能导致沙土流失，削弱沙障的防护效果；降雨可能导致土工格室、土工网内填充材料的流失或变形，从而影响沙障的稳定性；地形地貌的复杂性会影响土工格室、土工网沙障的施工难度和稳定性，在陡峭或不平整的地形上施工可能需要额外的加固措施。

填充材料的质量和选择对土工格室、土工网沙障的稳定性至关重要，应选择适宜的沙土或碎石等材料进行填充，以确保沙障的承载能力和稳定性；施工方法的选择和执行情况也会影响土工格室、土工网沙障的效果，应确保施工方法符合设计要求，施工过程中的质量控制得到严格执行。

3. 应用案例

3.1. 雅满苏压气站沙山风蚀和试验段治理

雅满苏压气站沙山管段穿越哈顺沙漠约5 km，该管段地形起伏多变，风沙活动异常强烈，沙丘移动迅速，严重影响输气管道的安全运行，并阻碍巡检伴行道路的通行。

风蚀防治工程分布在丘间地，共计6处，详见图1。按照由西向东的方向分别编号为风蚀防治1~6区，风蚀防治采用统一防护范围宽度80 m设置，防护范围长度根据原防护工程木桩沙袋范围确定，由原防护工程木桩沙袋边缘向两端各延伸15 m。

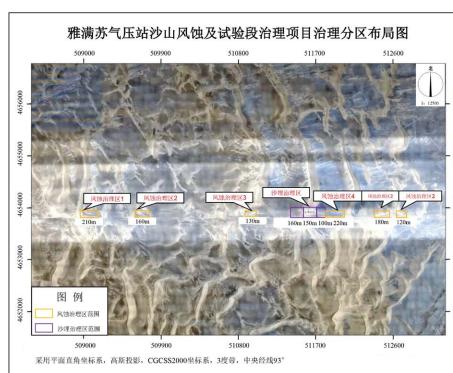


Figure 1. Distribution map of prevention and control projects

图1. 防治工程分布图

风蚀防沙体系设置两种布局结构(图 2~3), 一种是固沙模式, 一种是输 - 固模式。

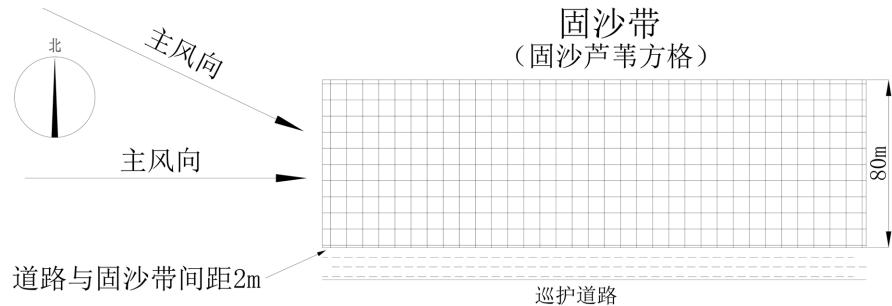


Figure 2. Schematic diagram of sand-fixation structure layout for wind erosion sand prevention system
图 2. 风蚀防沙体系固沙结构布局示意图

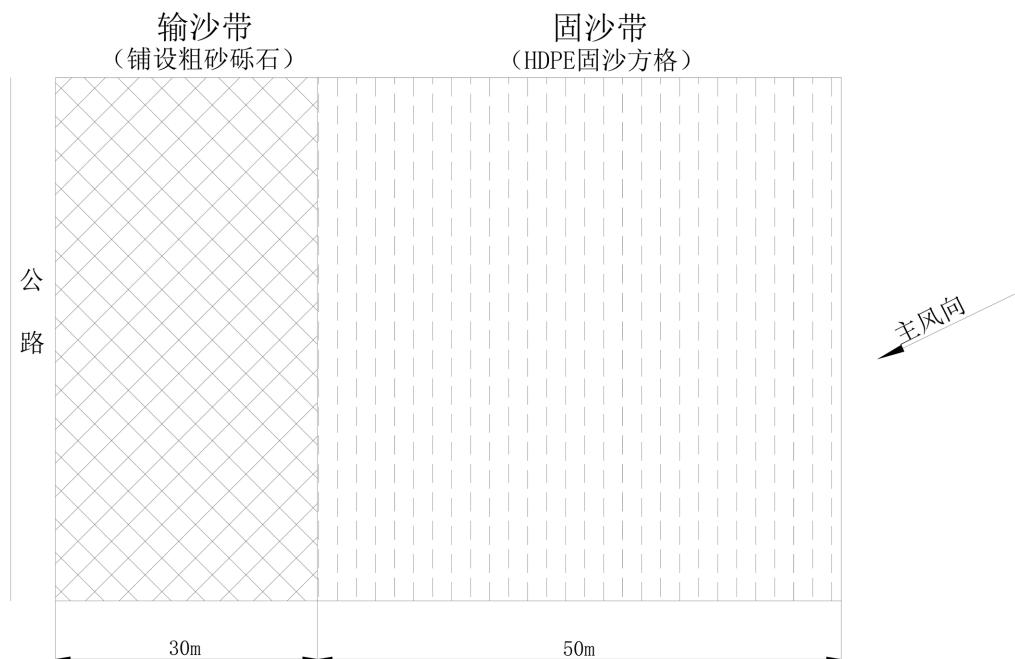


Figure 3. Schematic diagram of transportation-fixation structure layout for wind erosion sand prevention system
图 3. 风蚀防沙体系输 - 固结构布局示意图

3.1.1. 固沙带建设

机械固沙措施常用草方格, 新疆芦苇丰富, 运输方便, 芦苇草方格是新疆风沙区广泛使用的固沙措施。高密度聚乙烯(HDPE)是一种新型的固沙材料, 具有熔融指数较小、分子分布较窄, 耐候性抗腐蚀性好、环保性强、施工方便、使用寿命长、治沙固沙效果明显的特性。高密度聚乙烯土工格室采用 HDPE 高密度聚乙烯塑料制作而成, 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, 其柔性结构体系具有整体强度高、刚度大、抗腐蚀、耐老化等优良的特性。采用固沙方格, 规格为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。固沙带宽度为 50~80 m, 工程施工时, 巡护道路与固沙带间保留 2 m 的间距。

芦苇草方格扎设: 测量放线划出沙障布设位置线, 将截好的碾压芦苇沿线路均匀铺设, 使芦苇段的中点与线路重合; 用平头锹沿线路方向踩踏芦苇, 使其插入土中, 深约 15 cm, 芦苇秆两端翘起, 直立在沙面上; 用铁锹壅沙埋掩沙障基部, 并用脚踩实, 外露高度约 20 cm。

HDPE 固沙网格扎设：固沙网材质为 HDPE，孔隙度 30%~40%，网高 20 cm。固沙网固定桩为 PE 材质，要求每个固定桩至少应固定两条固沙网，固定桩下部有桩尖。固沙网连接顺序呈“弓”字形。先确定各条固沙网的布设位置，按照 1 m 间距插固定桩；拉开固沙网与固沙带边缘行首端点的固定桩连接；顺次与同行的其他固定桩连接，直至该行的末端点；与相邻行从末端点到首端点顺次连接，再与下一行首端点到末端点顺次连接；相邻固沙单元布设顺序类似。为了保证固沙网稳定，与首末端点桩连接须用 22# 铁丝上下各加固，40 cm 长度的固定桩与加粗加长的固定桩使用比例为 9:1，确保 HDPE 固沙网稳固。

高强度聚乙烯土工格室：高强度聚乙烯土工格室施工简便，将产品直接平铺后，用产品自带的角铁固定桩固定即可。

3.1.2. 输沙带建设

输沙带地形平坦，地表具有极强的抗风蚀能力。输沙带采用机械平整地形，与现有道路边坡有机结合，形成适于输沙的横断面形式，还需采用砾石增强地表抗风蚀能力。土工格室固沙和土工网固沙效果如图 4~5 所示。



Figure 4. Sand fixation with Geocells
图 4. 土工格室固沙



Figure 5. Sand fixation with Geonets
图 5. 土工网固沙

3.2. 民勤县沙漠治理

沙区地下水位和沙丘土壤含水率已经难以承载足够大盖度(能实现防风固沙)的植被的生长，因此机械

沙障是防治风沙危害的主要措施之一。在巴丹吉林沙漠南缘的民勤治沙综合实验站对照传统采用的麦草沙障、粘土沙障，对塑料方格沙障的防风固沙效果进行了试验研究，对其推广应用前景进行了探索和分析。

塑料方格沙障由塑料网和固定桩两部分组成，塑料网以高密度聚乙烯(HDPE)为主要原料，添加稳定剂，配以紫外线吸收剂、抗氧化剂及其纳米材料，采用双层编链、边孔衬入技术编织而成。风洞模拟试验表明，塑料方格沙障孔隙度为30%~45%，属于透风构型沙障，可在沙漠地区恶劣自然环境下使用10年以上，可以回收利用。塑料网高20 cm，方格规格为1 m×1 m，四角有固定网孔，固定桩常用塑料或竹片制作。为降低成本在西北地区可用材料充足的树枝替代，固定桩长度一般为40~50 cm，一端做一深槽，另一端削尖。

沙障布设前要根据当地气象资料和沙丘、沙纹形态，确定布设地主风向。按沙障方格走向同主风向垂直的原则进行布设，布设时由于每次有一角已经固定，布设要求每一方格的3边同相邻方格的3边平行或垂直。相邻方格交界处，两层边网重叠并交联固定在固定桩上后，用锤子砸入地下20~30 cm，从而将1 m×1 m塑料网牢牢固定在沙面上。长度为n，宽度为m的布设区域需要的插杆数N，随m、n不断增加，即沙障布设面积越大，单个方格的所需插杆数就越接近1个。

$$N = \frac{(n+1)(m+1)}{m \times n} = 1 + \frac{1}{m} + \frac{1}{n} + \frac{1}{m \times n}$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty, m \rightarrow \infty} \sum \frac{(n+1)(m+1)}{m \times n} = 1$$

塑料方格沙障由高密度聚乙烯材料人工合成，同麦草方格沙障、粘土沙障相比，不计维护费用下一次投入成本达到3900元/hm²，远高于麦草方格沙障和粘土沙障，但年际成本仅为390元/(a·hm²)，低于麦草方格沙障，高于粘土沙障。详见表1。

Table 1. The input cost budget for plastic square sand barriers
表 1. 塑料方格沙障的投入成本预算

沙障类型	材料费 (元/hm ²)	每1 hm ² 用工数	用工费用 (元/hm ²)	合计 (元/hm ²)	使用年限(a)	年际成本 元/(a·hm ²)
塑料方格沙障	3000	45	900	3900	10	390
1 m×1 m麦草方 格沙障	2100~2400	45	900	3000~3300	4~5	600~660
粘土沙障2 m间距	0	125	2500	2500	10	250
粘土沙障3 m间距	0	85	1650	1650	7~8	206~236

4. 存在问题及建议

现场调研治沙措施主要采用芦苇草方格、高强度聚乙烯土工格室、固沙网及砾石输沙带。参照雅满苏压气站沙山风蚀和试验段治理经验，可采用高密度聚乙烯土工格室进行防护，但聚乙烯土工格室和固沙网均出现不同程度的损毁，初步原因分析：现场风力较大，高强度聚乙烯塑料土工格室、固沙网固定不牢、相互连接作业面较大，受风力影响出现连片拔起，失去固沙作用。因此，提出以下改进建议：

(1) 土工格室：1) 提升固定；2) 尽量小单元布置；3) 改造造型，下半部连着(带孔)，上半部梳子齿状。土工格室造型设计如图6。

(2) 固沙网：1) 加大开孔；2) 缩小格室尺寸；3) 缩小格室的单元；4) 可以改进为沙障。并提出一种用于风沙区油气管道防护的土工格室设计方法。

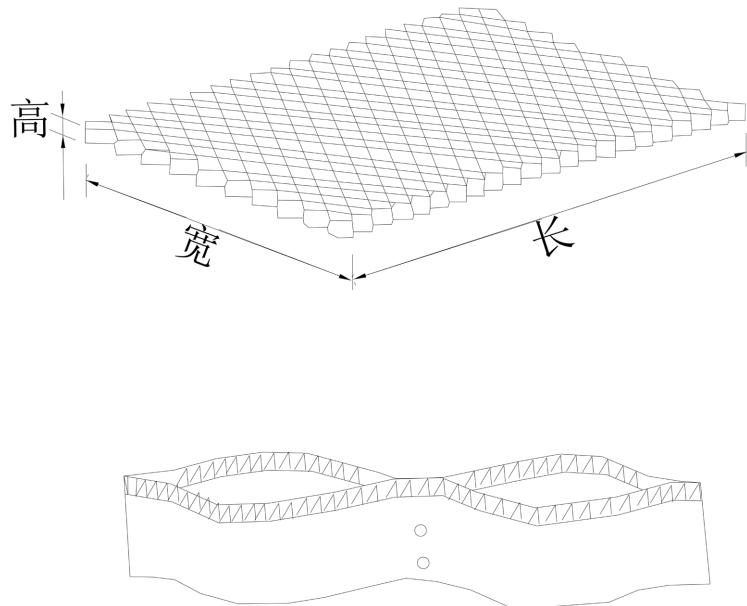


Figure 6. Design drawing of geocell shape
图 6. 格室造型设计图

指标性能要求及安装应满足以下要求：

- (1) 土工格室采用 HDPE 高密度聚乙烯塑料制作，外观呈三维立体蜂窝状结构，整体强度高、刚度大、抗腐蚀、耐老化，回弹模量和变形模量高。
- (2) 化学特性稳定，可耐酸、耐碱，适应于不同的土质环境。
- (3) 应考虑紫外线影响，土工格室材料室内紫外线辐射强度为 550 W/m^2 照射 150 h 的抗拉强度保持率应 $>80\%$ 。
- (4) 土工网沙障应将沙障设置于管道道路主风向侧。沙障宜采用打桩悬挂土工网形式，土工网宽度宜为 60~100 cm，悬挂高度宜为 40~80 cm，土工网底部应埋入沙土中不少于 10 cm。
- (5) 土工方格沙障应将土工方格设置于迎风坡下部或迎风坡前腹沙地。土工方格可利用高 10 cm、15 cm 或 20 cm 的抗老化土工合成材料网片，在流动沙面上就地安装，规格可为 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 、 $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 或 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 。 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 方格宜用于迎风坡下部， $1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 、 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 方格宜用于迎风坡前腹沙地。
- (6) 为提高施工现场应用的固定稳定性，可采用钩形铆桩或钢杆等固定材料固定土工格室，将格室牢固地固定在地基上，铆桩长度应根据格室高度和地基条件确定，一般应为格室高度的 2 倍加 30 cm，且不应小于 500 mm，以增大固定土工格室的锚固力；同时需尽量小单元布置，格室高度 $\geq 200 \text{ mm}$ ，厚度 $\geq 1.1 \text{ mm}$ ，单组格室展开后的长度和宽度 $\leq 500 \text{ mm}$ ；格室造型设计下半部封闭，上半部呈大小孔洞状，以减小风阻。
- (7) 风沙固沙用土工格室和土工网材料性能要求应满足表 2 的要求。

Table 2. Performance requirements for geocells and geonets used in sandstorm sand fixation
表 2. 风沙固沙用土工格室和土工网材料性能要求

纵、横向极限抗拉强度(kN/m)	纵、横向梯形撕破强度(N)	老化残留强度	低温脆化温度(℃)
≥ 8.0	≥ 120	室内紫外线辐射强度为 550 W/m^2 照射 150 h 的抗拉强度保持率应 $>80\%$	$\leq K-2.0$

5. 讨论

新型格状沙障(土工网、土工格室)一次铺设造价稍高于草方格沙障固沙带[5]，但其寿命周期长，且在遭受严重风蚀或沙埋时，可以采用人工方法扦插或提升，使其继续发挥防风固沙效益；新型格状沙障(土工网、土工格室)适用于各种风沙灾害区段，且对施工时段没有严格要求；新型格状沙障(土工网、土工格室)阻沙率高于草方格沙障，且适用地形多于草方格沙障。

新型格状沙障(土工网、土工格室)主要采用土工合成材料制作而成。土工合成材料承载能力强，且具有良好的耐老化、耐腐蚀性能，因此寿命周期长，适用地形多，且对施工时段无严格要求。

6. 未来与展望

对于文章提出的新型土工格室设计，下一步将进行简化的理论模型计算、流体力学(CFD)数值模拟或小尺寸风洞试验，分析新型土工格室与传统格室在风场、压力分布和剪切力等方面的差异。

对于文章提出的土工格室和土工网材料性能要求，下一步将结合现场环境条件(如极限风速、紫外线强度)和观察到的破坏模式进行力学计算和论证，说明文章提出的土工格室和土工网材料性能要求可以保证结构安全。

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] 苏欣. 新疆风沙区建设项目人工沙障治理措施探析[J]. 水土保持应用技术, 2013(3): 12-13.
- [2] 潘伯荣, 李崇舜, 刘文江. 新疆的沙漠与风沙灾害治理[C]//中国治沙暨沙业学会. 西部大开发, 建设绿色家园学术研讨会论文集. 中国科学院新疆生物土壤沙漠研究所, 2001: 93-98.
- [3] 李果, 张茂雪, 朱殿芳, 等. 我国土工合成材料河道生态护坡研究及应用进展[J]. 水利科学与寒区工程, 2024, 7(3): 21-26.
- [4] 申玉兰, 李成, 吴利. 土工合成材料在风沙地区路基防护工程中的应用[J]. 路基工程, 1999(2): 64-67.
- [5] 王文舒, 甘晓雪, 张斌武, 等. 不同材料沙障的防风固沙效果与成本效益分析[J]. 北京农学院学报, 2025, 40(1): 5-12.