

A Summary of the Stabilizing Method of the Suspended Section for River Crossing Pipeline

Zhipeng Ren^{1*}, Fei Teng², Mingtao Li¹, Hao Feng³

¹International Branch of China Petroleum Pipeline Engineering Co, Ltd., Langfang Hebei

²Petrochina Oil & Gas Pipeline Control Center, Beijing

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

Email: *604935728@qq.com

Received: Aug. 5th, 2020; accepted: Sep. 3rd, 2020; published: Sep. 15th, 2020

Abstract

With the development of China oil and gas pipeline network construction, the construction volume of long-distance oil and gas pipelines is getting larger, but at the same time, the long-distance pipelines crossing special lot such as rivers are increasing with the construction period, and due to natural erosion or human factors the degree of damage is increasing day by day, and the failure of the suspended section of the pipeline is the main factor. In this paper, based on the study of the limit state mechanism of the river crossing pipeline section, considering the three failure modes of yield failure, vibration failure and fatigue failure, this paper proposes the suspended section for the influencing factors, such as the length of the suspended section, the height of the suspended section, the velocity of the surrounding water flow, and the elastic modulus of the soil exposed pipe stabilization method, considering the applicability and economy of each method, puts forward the decision of stabilization of river crossing pipeline suspended section, and puts forward a variety of methods for joint implementation and pipeline monitoring and testing recommendations to provide theory and technical support of safe maintenance for river crossing pipeline suspended section in different situations.

Keywords

River Crossing, Pipeline Hanging, Stable Pipe Method

*通信作者。

河流穿越管道悬空段稳管方法综述

任志鹏^{1*}, 滕 飞², 李明涛¹, 冯 浩³

¹中国石油管道局工程有限公司国际事业部, 河北 廊坊

²中国石油北京油气调控中心, 北京

³中国石油天然气管道工程有限公司, 河北 廊坊

Email: *604935728@qq.com

收稿日期: 2020年8月5日; 录用日期: 2020年9月3日; 发布日期: 2020年9月15日

摘 要

随着我国油气管网建设的发展, 油气长输管道建设体量越来越大, 但与此同时, 穿越河流等特殊地段的长输管道随着建成年限的不断增加, 由于自然冲刷或者人为因素的影响损坏程度日益增大, 管道裸露悬空段失效是其主要因素。本文基于河流穿越管道段极限状态机理研究, 考虑屈服破坏、振动破坏、疲劳破坏三种失效形式, 提出针对悬空段长度、悬空段高度、周围水流速度、土体弹性模量等影响因素的悬空段稳管方法, 考虑各方法适用性与经济性提出河流穿越管道悬空段稳管决策, 并提出多种方法联合实施及管道监测建议, 为不同情境下河流穿越管道悬空段的安全维护提供理论与技术支持。

关键词

河流穿越, 管道悬空, 稳管方法

Copyright © 2020 by author(s), Yangtze University 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

随着我国长距离输油气管道建设的蓬勃发展, 长输管道不可避免地需要穿越河流等特殊地段, 河流穿越管道在运行过程中, 由于水流冲刷及人工活动等原因, 可能出现裸露的悬空段, 悬空段在波和流的往复作用下可能发生断裂失效, 造成巨大的经济损失[1] [2] [3] [4] [5]。因此, 对河流穿越管道悬空段极限状态机理进行研究, 总结悬空段露管稳管决策, 对于河流穿越管道的安全运行具有重要意义。

1950年, Morison 等人为了研究波浪流组合以及相关动力响应, 提出研究有关小直径构件所受波浪力的 Morison 方程, 从此管道悬空段极限状态机理研究便基于该方程进行展开[6]。研究发现河流穿越管道的悬空长度是决定管道是否发生失效破坏的关键因素[7] [8] [9] [10], 李亮亮等研究结果说明管道悬跨安全长度判定条件: 悬跨段不发生振动破坏、不发生疲劳破坏且不发生屈服破坏[11]。詹婷雯等学者针对河流穿越管道灾害问题, 结合理论模型与有限元模拟方法对洪水作用下的管道应力应变情况进行分析, 综合数值法以及有限元法对河流管道稳定性进行研究[12] [13] [14] [15]。巴建彬等学者从治理的可行性、可靠性、治理成本以及避免二次悬跨等多角度综合考虑悬空管道安全问题[16] [17] [18] [19] [20]。

本文基于河流穿越管道悬空段极限状态机理研究, 针对不同影响因素提出悬空段露管稳管方法, 考

考虑屈服破坏、振动破坏、疲劳破坏三种破坏形式，对各稳管方法进行可行性与可靠性分析，考虑各方法适用性与经济性提出河流穿越管道悬空段稳管决策，并提出多种方法联合实施及管道检测建议，为不同情境下河流穿越管道悬空段的安全维护提供理论与技术支持。

2. 管道悬空段极限状态机理

河流穿越管道悬空段破坏形式包括屈服破坏、振动破坏、疲劳破坏。

2.1. 屈服破坏机理

河流穿越管道悬空段所受静力荷载主要包括管道自重、输送油气重量、输送内压、防腐保温层及其附件重量、绕流阻力等，动力荷载主要来源于波和流的往复作用产生的绕流升力、脉动拖曳力等。当悬空段所受到的有效应力 σ_e 超过管材的许用应力 $[\sigma]$ ，或管道应变超过管道允许最大形变量时，悬空段将发生屈服破坏，按照 von-Mises 应力条件有：

$$f_n \geq nf_s \quad (1)$$

2.2. 振动破坏机理

当稳恒水流横向流河流穿越经管道悬空段时，将在管道的背水侧出现漩涡泄放，若漩涡泄放的频率与悬空段的自振频率相同或相近时，可能导致悬空段出现“频率锁定”的共振现象，即悬空段的振动响应出现大振幅，控制漩涡发放过程中悬空段与流体之间的相互作用，由于流体的粘性特征及管道与流体之间的复杂相互作用，悬空段发生剧烈耦合振动，导致悬空段发生振动破坏，如图 1 所示为涡流引起的管道振动示意图。

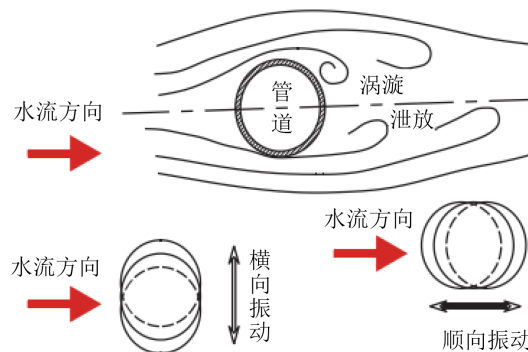


Figure 1. Schematic diagram of vibration caused by pipeline vortex

图 1. 管道涡流引起振动示意图

当悬空段发生振动破坏时，管道及周围流体呈现如下特点：

- 1) 管后漩涡泄放的强度增大，“涡激”的规律性增强；
- 2) 管道所受的升力和拖曳力都明显增大，可达管道不发生共振时的 4~5 倍；
- 3) 发生“频率锁定”现象，即当悬空段的涡激振动频率接近其自振频率时，管道与流体的耦合振动会驱使漩涡泄放频率在一个较大的范围内固定在管道自振频率附近，而不按其本身的涡激振动频率泄放，类似于被“锁定”在自振频率上。

当悬空段的涡激振动频率 f_s 与其自振频率 f_n 满足关系式(2)时，认为可以有效避免悬空段发生共振现象，即：

$$\sigma_{Mises} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \leq [\sigma] = \phi \sigma_s \quad (2)$$

式中 f_n ——悬空段的自振频率, Hz;

f_s ——悬空段的涡激振动频率, Hz;

n ——关系常数, 一般认为 $n \in [0.7, 1.3]$ 时“频率锁定”现象有可能发生。

2.3. 疲劳破坏机理

水流在河流穿越管道悬空段的周围出现绕流作用, 导致悬空段受到绕流阻力及绕流升力的作用, 其中绕流升力的方向及大小均呈周期性变化, 是典型的周期性交变载荷, 是引起悬空段疲劳破坏的主要原因。在绕流升力的往复作用下, 悬空段可能在其所受有效应力并未达到许用应力时就会产生局部疲劳裂纹, 随着裂纹的逐渐扩展管道可能发生突然断裂失效, 即疲劳破坏。由于疲劳裂纹的形成及扩展极具隐蔽性, 而疲劳断裂又具有瞬发性, 因此疲劳破坏可能造成较为严重的失效后果, 需要采取必要的措施加以预防。

在计算管道的疲劳寿命时, 各国船级社规范中通常采用英国健康与安全执行委员会(HSE)提出的 S-N 曲线进行估算, S-N 曲线如图 2。

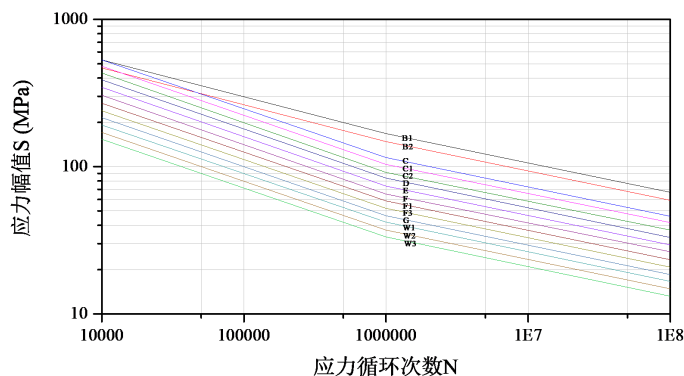


Figure 2. S-N curve of pipe
图 2. 管材的 S-N 曲线

因此, 防止河流穿越管道悬空段发生疲劳失效的安全判定条件为

$$\sigma_{Mises} \leq S \quad (3)$$

有在考虑屈服破坏、振动破坏和疲劳破坏三种破坏形式时管道均能满足安全条件的情况下, 才能判定管道安全, 因此本文分别提出河流穿越管道悬空段稳管方法, 对各稳管方法进行对比分析, 为不同情境下的河流穿越管道悬空段极限状态稳管方法提供参考。

3. 河流穿越管道悬空段稳管方法总结概述

3.1. 改变悬空长度的稳管方法

当管道悬空长度增大时, 管道应变发生变化, 为避免管道因变形过大而发生失效, 可以考虑采取桩结构支撑来减小悬空段长度, 如图 3 所示。

桩结构支撑是指在河流穿越管道悬空段交替设置一个或者多个支撑桩, 向上托着管道, 限制管道位移, 减小管道振幅, 从而达到治理悬空段的效果。优点: 施工简单, 施工工期短, 不需停产, 治理可靠

性高。缺点：对悬空段下方土体无促淤作用，不能防止冲刷范围扩大，可能出现二次悬空；采用桩结构支撑方法相当于将单跨管道变为双跨甚至多跨管道，对于不等跨管道，随着两跨悬空长度差距的增大，较长跨一侧的应变迅速增大，可能导致管道因变形过大而发生失效；对小管径且悬空段较长的河流穿越管道投资较高。

如果对河流穿越管道悬空段采用桩结构支撑来改变管道的悬空长度，在一段悬跨内要安放一个或多个支撑桩，设置的数量及支撑装置的轴向宽度应该综合考虑河床地形、管道屈服强度、共振情况、疲劳循环次数以及投资成本进行评估后确定。

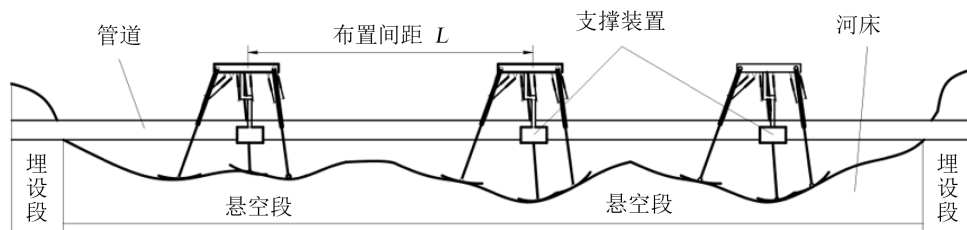


Figure 3. Structure diagram of pile structure support method

图 3. 桩结构支撑方法简明结构图

3.2. 改变河床土体弹性模量的稳管方法

当河床土体弹性模量较大时，土体更加“密实”，土壤更加不容易流失，可以更好地对河流穿越管道悬空段的出现进行预防。该稳管方法目前主要包括箱涵、U形槽、硬覆盖、石笼、河底硬化等常见方法，如图 4 所示。

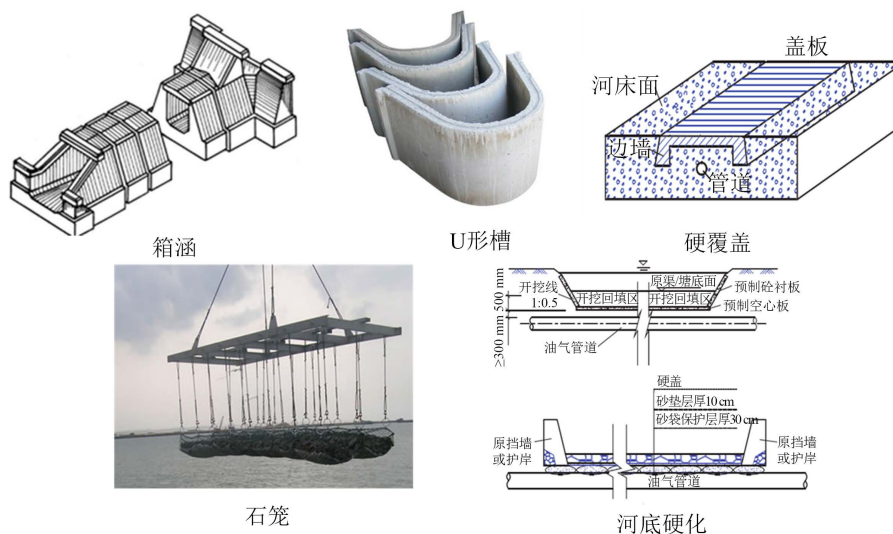


Figure 4. Diagram of method for changing elastic modulus of riverbed soil

图 4. 改变河床土体弹性模量方法图

1) 箱涵

优点：箱涵结构采用钢筋混凝土浇筑，可靠性高，能够有效地防止河流穿越管道悬空段的出现。缺点：施工时需进行开挖作业，工序繁琐复杂，施工工期较长，且成本较高。箱涵结构适用于山区河流沟谷，易发山洪、泥石流的河沟道，可以在枯水期进行施工，用于对悬空段的预防，但不适用于汛期对悬

空段的抢险工作。

2) U形槽

优点：结构材料采用预制，可靠性较高，治理针对性强，能够在一定程度上防止管道上方土壤流失。缺点：施工时需要开挖河床土壤，施工步骤复杂，构件预制成本较高。U型槽适用于平原及山区小河沟对河流穿越管道悬空段的预防，可以在枯水期进行施工，不适用于山洪频发、水流量和流速较大的河沟，不适用于汛期对悬空段的抢险工作。

3) 硬覆盖

优点：结构材料可靠性较高，通过盖板和边墙能够有效阻止水流对管道周围土体的冲刷作用，防止管道悬空段的出现。缺点：施工时需开挖河床，施工周期较长，施工过程缓慢。硬覆盖适用于平原及山区小河沟对河流穿越管道悬空段的预防，不适用于山洪频发、水流量和流速较大的河沟，可以在枯水期进行施工，不适用于汛期对悬空段的抢险工作。

4) 石笼

优点：石笼为柔性结构，成型随意，且允许一定的不均匀沉降，抗冲击能力强，入水能保持完整，缝隙间可以进水和出水，石笼周围杂草泥沙随水流蓄入，安全、持久、环保。缺点：铁丝易腐蚀、断丝漏包，影响结构稳定；在管道施工阶段，由于石笼中的石料表面尖锐，且水流冲刷石块对管道造成冲击，易对管道外防腐层造成破坏，影响管道防腐层的防腐蚀作用，管道易发生腐蚀；石笼结构相当于在河道中建造了一道浅坝，迫使向两边分流的水流冲刷两侧土体，并且由于有效过水断面的减小，管道周围水流速度增大，促使河床进一步冲刷下切。石笼稳管适用于易发一般性洪水，山洪、泥石流规模较小的河沟道，属于临时性防护结构，可用于洪峰过境时的抢险工作，但不适用于长期使用，待汛期过后需采取有效措施对悬空段进行进一步治理。

5) 河底硬化

优点：结构材料采用混凝土预制，可靠性较高，能够在一定程度上缩短工期，能够有效防止水流对管道上方土体的冲刷作用，防止悬空段的出现。缺点：施工时需开挖河道，施工过程较为复杂，工期较长。河底硬化适用于平原及山区小河沟对河流穿越管道悬空段的预防，可以在枯水期进行施工，不适用于山洪频发、水流量流速较大的河沟，不适用于汛期对悬空段的抢险工作。

综上所述，改变河床土体弹性模量的稳管方法的主要目的在于防止河流穿越管道上方或管道周围的水土流失，因此可以考虑采用箱涵、U型槽、硬覆盖、河底硬化等方式来防止悬空段的出现，在悬空段出现后，可以考虑采用石笼进行抢险，以提高管道自振频率、降低管道涡激振动频率，但随着周围土体弹性模量的增大，悬空段受到的应力会有所增大，因此应综合考虑管道的应力和涡激振动频率对石笼的规格、数量、放置位置进行评估。

3.3. 改变管道周围水流速度的稳管方法

随着河水水流速度的增大，管道涡激振动频率、最大 Mises 应力、最大应变均随之受到影响，导致管道容易出现屈服破坏、振动破坏及疲劳破坏等失效形式。因此，采取有效措施降低管道周围水流速度，对于汛期河流穿越管道悬空段的安全治理具有重要意义。

1) 丁字坝

丁字坝是一段呈“丁”字形的堤坝，如图 5 所示，当河流穿越管道悬空段处于水流冲刷集中区时，丁字坝通过改变水流方向来减缓水流对悬空段的冲刷作用，从而降低悬空段应力和涡激振动频率，同时减轻岸堤近旁淤积，减小水流对局部岸堤的作用力，防护管道安全。

优点：通过改变水流方向减轻悬空段受到的水流冲刷，能够有效地防止悬空段失效。缺点：施工周

期较长, 只能对特定位置的悬空段起到保护作用, 当出现新的悬空段时, 又需修筑新的丁字坝, 不能一劳永逸。丁字坝适用于侧向侵蚀强烈的河沟, 不适用于易发山洪、泥石流的河沟道。

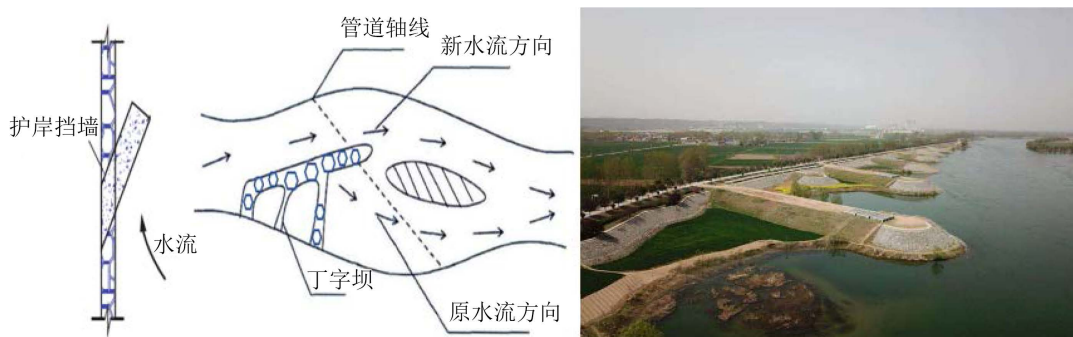


Figure 5. Structure diagram of Tingba
图 5. 丁字坝简明结构图

2) 浮帘式降流促淤装置

浮帘式降流促淤装置(如图 6 所示)通过重梁安装在管道悬空段上游, 水流速度在流经浮帘时有所减小, 使得水中携带的泥沙在悬空段附近沉积, 从而通过截留的泥沙来填覆悬空段下方的冲刷坑来实现对悬空段的治理。

优点: 该装置在降低水流速度的同时促进了泥沙的淤积, 具有施工工期短, 能够实现主动淤积泥沙治理悬空段的目的, 值得进行不断改进和推广。缺点: 预制件成本较高。

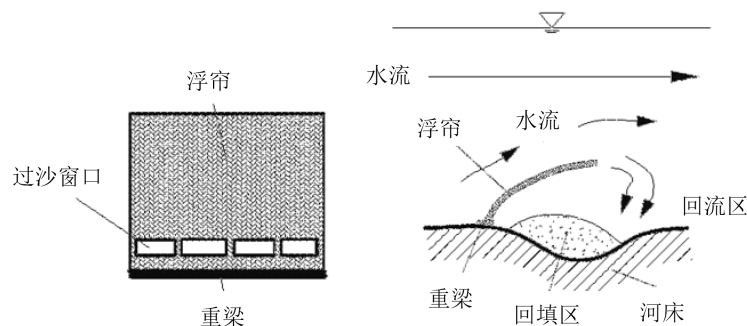


Figure 6. Structure diagram of floating curtain type downflow and silt accelerating device
图 6. 浮帘式降流促淤装置简明结构图

3) 安装扰流器

为了减小水流涡激振动引起的河流穿越管道悬空段振动频率及振动幅度, 可以考虑采用扰流器等抑制涡激振动的措施。常见的各式扰流器简明结构如图 7 所示。

鱼鳍式导流板(如图 8 所示)优点: 能够通过改变管道绕流实现管道自埋, 有效治理管道悬空。缺点: 安装的导流板需要预制并在铺设前与管道进行连接, 增大了安装阶段的焊接难度; 导流板与管道连接处可能出现电化学腐蚀; 导流板的自埋作用受水流方向影响, 若水流与导流板方向平行, 则不能实现管道的自埋, 因此在安装时需要注意导流板的安装方向; 当河床的泥沙特性沿管线不均匀时, 由于涡流的冲刷速度不同可能造成管道局部二次悬空。鱼鳍式导流板主要适用于砂质河床, 不适用于以粘土和砾石为主的河床, 而且要求河水流速达到一定量值。

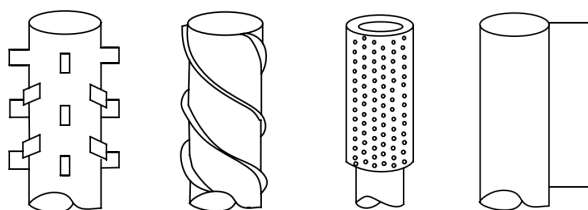


Figure 7. Structure diagram of spoiler

图 7. 扰流器简明结构图



Figure 8. Physical picture of fin-type deflector

图 8. 鱼鳍式导流板实物图

4) 仿生水草法

仿生水草通过吸收波能以达到消波作用，通过降低水流速度以减少波浪流动力对悬空段的冲刷，同时通过促进水流中所挟泥沙的沉降以实现固沙促淤。“人工草”实物图如图 9 所示。

优点：从生态角度看，仿生水草法不会影响悬空段周围动植物的生长环境，对于深水及浅水水域均适用，且在治理悬空段冲刷问题的同时不会发生二次悬跨的现象，治理可靠，一劳永逸。缺点：仿生水草法不适合悬空高度比较大的情况，建立纤维加强沙洲的施工工程量较大，专业技术要求高，处理工期比较长，一次性投资较高。仿生水草法适用于枯水期对河流穿越管道悬空段的治理和预防，不适用于汛期抢险。



Figure 9. Physical picture of "Artificial grass"

图 9. “人工草”实物图

3.4. 改变管道悬空高度的稳管方法

管道在刚刚出现悬空的阶段更容易发生共振破坏，随着管道悬空高度的逐渐增大，管道最大 Mises 应力、最大应变均有所增大，表明随着悬空段的发展，管道更容易发生屈服破坏。因此，在管道运行过

程中应注意对河流穿越段的监测，以便于及时对悬空段进行发现和治理；当悬空段出现后，应采取有效措施，以避免管道发生屈服及振动破坏。

1) 抛填砂袋法

抛填砂袋法是在悬空段底部堆置砂袋来降低管道悬空高度的结构支撑方法，施工时在悬空管道及其周围一定范围内抛填重量约 60 kg、装有一定比例粗砂和水泥的砂袋，由潜水员在抛填过程中对砂袋进行整理。

优点：施工工艺简单，便于实施，保护范围广，可以在管道不停产的情况下作业。缺点：可靠性较差，在较多不确定因素的影响下，抛填的砂袋可能再次被冲刷淘走而造成管道二次悬空；不适宜用于支撑悬空高度较大的管段，如果管道悬空高度超过 1 m，则砂袋堆容易倒塌。

2) 灌浆袋法

灌浆袋法是一种通过结构支撑治理河流穿越管道悬空段的方法，施工时首先由潜水员或机械设备预先在悬空段下方设置灌浆袋支撑模壳，然后向其中注入泥浆而成型，通过向上支撑悬空管道以缩小悬空高度，从而实现悬空段的治理。其实物图如图 10 所示。

优点：与其他方法相比，灌浆袋法较为经济实用，尤其是在大型作业母船无法作业的浅水区域，其优势更为突出；在施工过程中不会砸坏管道，且对管道尺寸没有具体要求。缺点：灌浆袋法要求潜水员或机械设备在放置灌浆袋支撑模壳位置需准确。灌浆袋法主要适用于管道悬空高度比较小的区域。



Figure 10. Physical picture of grouting bag method

图 10. 灌浆袋法实物图

综合以上多种稳管方法，对于河流穿越管道，可以采用箱涵或硬覆盖的方式对悬空段进行预防；可以采用灌浆袋法在汛期对悬空段进行抢险，桩结构支撑法、石笼亦可以用于汛期抢险，但在使用前需基于安全性与经济性对方案的实施进行综合评估；浮帘式降流促淤装置和仿生水草法既可以用于汛期抢险，也可以用于汛期过后对悬空段的治理。在实际应用中，可以考虑多种稳管方案的联合使用，例如将灌浆袋法与仿生水草法联合使用，在实现快速抢险的同时有利于后续降流促淤，从而实现悬空段的有效治理。

4. 结论

本文在管道悬空段极限状态机理研究的基础上，对河流穿越管道悬空段稳管方法进行总结调研，取得如下成果：

1) 针对悬空长度、土体弹性模量、周围水流速度、悬空高度等不同影响因素，考虑三种破坏形式对河流穿越管道悬空段稳管方法进行可行性与可靠性分析；

2) 考虑适用性及经济性, 对各稳管方法的优缺点进行分析, 为不同情境下悬空段的稳管治理提供决策参考。

参考文献

- [1] 丁建林. 我国油气管道技术和发展趋势[J]. 油气储运, 2003, 22(9): 22-25.
- [2] 唐兴华, 王颖. 油气管道的河流穿越技术进展[J]. 煤化工, 2009, 36(3): 53-56.
- [3] 钟红文. 靖西天然气长输管道水害及综合治理措施[J]. 天然气技术, 2007, 23(1): 81-85.
- [4] 帅建. 美国油气管道事故及其启示[J]. 油气储运, 2010, 34(11): 806-809.
- [5] Michael, P., Rodolfo, R., Gabriel, M., et al. (2006) Geohazard Risk Management for the Nor Andino Gas Pipeline. 2006 *International Pipeline Conference, ASME, Calgary*, 989-997.
- [6] Morison, J.R., Johnson, J.W. and Schaaf, S.A. (1950) The Force Exerted by Surface Waves on Piles. *Journal of Petroleum Technology*, 2, 149-154. <https://doi.org/10.2118/950149-G>
- [7] 李亮亮, 邓清禄, 余伟等. 长输油气管道河沟段水毁危害特征与防护结构[J]. 油气储运, 2012, 31(12): 945-949.
- [8] 刘小晖, 张满银, 王得楷, 等. 河沟谷区管道敷设方式和地质灾害的关系探析[J]. 地质灾害与环境保护, 2014, 25(2): 92-95.
- [9] 孙志忠, 张满银, 谢荣, 等. 长输管道河沟道水毁危害探析[J]. 防灾科技学院学报, 2015, 17(3): 56-61.
- [10] 张力佳, 王鸿, 郭君, 等. 兰成管道石亭江穿越管段水毁事故原因[J]. 油气储运, 2015, 34(12): 1351-1354.
- [11] 李亮亮, 朱洁, 韩冰. 穿越河流管道悬跨安全长度判定[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(2): 86-90.
- [12] 詹婷雯. 洪水作用下马惠宁穿越管道的应力分析[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [13] 张鹏, 崔立伟, 等. 地表冲沟条件下悬空管道的力学模型与延寿分析[J]. 天然气工业, 2014, 34(34): 142-148.
- [14] 刘颖, 陈敬东, 刘长林, 周建. 河流穿越管段最大允许悬空段长度计算[J]. 管道技术与设备, 2015(2): 16-18.
- [15] 向敏, 刁洪涛, 张子涛, 王清惠, 杨毅. 水下穿越油气管道水流冲击作用下强度安全研究[J]. 工业安全与环保, 2017, 43(5): 66-68.
- [16] 巴建彬. 海底管道悬空成因及防治措施[J]. 中国新技术新产品, 2013(2): 64-65.
- [17] 赵益民, 胡光海, 董立峰, 等. 埕岛油田海底管道悬空治理和检测[J]. 海岸工程, 2012, 31(2): 14-20.
- [18] 冷志, 叶宏平, 范景涛, 等. 海底管道悬空处理工艺[C]//第十三届中国科协年会海洋工程装备发展论坛暨 2011 年海洋工程学术年会. 天津: 中国造船工程学会, 2011: 219-223.
- [19] 李成钢, 张敬安, 郑辉, 等. 海底管道悬跨维护技术研究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2013(7): 112-113.
- [20] 王忆非, 亓发庆, 徐国强, 等. 海底管道裸露与悬跨维护方法研究[J]. 海岸工程, 2014, 33(1): 37-42.