

巨浪冲蚀威胁下的海底管道仿生草防护技术

李俊杰, 侯志民, 田培胜

(中石化海洋石油工程有限公司 上海物探分公司, 上海 201208)

摘要: 仿生草防护技术是一种通过降低海底管道附近水流的流速, 促进沉积物颗粒在海底管道附近进行沉降淤积以防止冲刷发展的防护技术。波生流是近岸地区的重要水动力现象, 直接影响海岸地貌演变与输沙过程。通过多组物理模型试验模拟了波浪作用于不同底质条件下仿生草对海底管道冲刷的防护作用以及不同的仿生草布设方式对其防护效果的影响, 并对其作用机理进行了初步的分析研究。结合仿生草在平湖海管中的实际应用, 证明了仿生草对悬空管道的防护效果明显。波浪在近岸区可能产生较强底流, 仿生草技术通过阻尼作用对于砂质海床具有明显的防冲刷效果, 但对于粉质海床效果略差, 这是由于底质不同造成的。仿生草布设方式对其防护效果至关重要, 主要是海底管道两侧的仿生草发挥了防护作用。建议根据具体情况将仿生草技术结合传统方法进行作业实施, 以取得更好的效果。

关键词: 仿生草; 海底管道; 冲刷防护

中图分类号: P756.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-3682(2017)04-0037-07

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2017.04.005

海底管道是海洋油气生产系统中一个不可缺少的重要组成部分, 有着安全性高、连续性好、运输量大等显著优点, 广泛应用于海洋油气运输中。据统计, 从 1985 年我国第一条海底输油管道建成后的二十多年里, 在我国海域累计铺设海底管道已达 60 多条, 总长度超过 3 000 km^[1]。

海底油气管道的安全状况直接影响着海洋油气开发的发展, 尤其是在环保意识日益加强的今天, 相关部门和企业都加强了对海管状态的检测以及危险海管的防护。而我国海底管道的现状也不容乐观。胜利油田埕岛海域已铺设的 61 根海底输油管道中, 仅 5 根未出现悬空现象, 管道悬空高度平均值为 1.33 m, 最大值为 2.5 m; 平均悬空长度为 15.1 m, 最大为 30.0 m; 悬空长度大于等于 20.0 m 的为 18 根, 大于等于 10.0 m 的有 38 根^[2]。东海平湖油气田海底管道于 2000-10, 2000-11 先后两处海管发生疲劳断裂, 根据历年海管检测和探摸回填情况, 发现该管道冲刷悬空现象呈逐年增加的趋势。国内外的一些调查研究表明, 波浪、海流造成的冲刷悬空是引起海底管道事故的主要原因之一。海底管道悬空段的存在会降低海底管道的承载能力, 缩短管道使用寿命, 增加管道运行风险, 所以采用有效的冲刷防护技术以保证海底管道的稳定性是很有必要的。

目前常用的海底管道冲刷防护技术以抛石、沙袋填充、打桩、土工布等为主, 这些技术方法主要是通过增加海底管道附近海床或管道支撑基础的抗冲刷强度来达到减弱冲刷的目的, 经过实践检验, 取得了很好的效果。但另一方面, 这些技术方法共同的缺点就是实施工程庞大, 消耗巨大, 成本较高, 且很容易出现“二次冲刷”的问题。因此, 根据“堵不如疏”的思路, 一些学者和技术人员开始研究通过降低海管附近流速的方法来应对海底冲刷。仿生草技术就是在这种指导思想下发展起来的一种技术。

1 仿生草技术原理

仿生草技术于 19 世纪 80 年代中期在英国开发研制成功, 并首先应用于海底管道的无沟铺设。1984 年

收稿日期: 2017-08-09

作者简介: 李俊杰(1983-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海洋地质、海洋工程方面研究。E-mail: lijunjie@sopgc.com

(李 燕 编辑)

夏天,英国率先在北海的一条裸露海底管线周围铺设仿生草,一年半后对这条管线进行勘察,发现这条管线已经重新被沉积物完全覆盖,成为世界上运用仿生草技术成功的第一例^[3]。1996年,英国农业渔业部、美国农业牧渔工程局等官方机构批准了仿生草技术的应用,认为其是对海洋植物和鱼类没有任何负面影响的环保技术^[4]。在国外,此项技术已经成熟,经过大力推广,在河床防冲刷和海底结构物防冲刷领域已经发挥出显著作用,是国际上普遍采用的比较理想的冲刷控制措施^[5]。

在我国,焦如义于1997年首先提出了可以在国内应用仿生草技术来处理海底悬跨管线的思路,分析了仿生草技术的应用范围和优点,认为仿生草技术在我国具有广阔的发展前景^[3]。吕明春^[6]分析了传统的海底管线治理方法所存在的弊端,认为仿生草技术具有很明显的优势。刘锦昆等^[4,7-9]对埕岛海域的仿生草治理效果研究表明,仿生草可以降低水流流速、减缓海床冲刷,对海底管线保护效果显著。梁富浩等^[10]认为采用抛填沙袋与铺设仿生草相结合的办法可以起到永久性的防冲刷效果。

仿生草技术是通过安装基垫和特殊设计的海底锚固装置,将仿生海草锚固在悬空管道段或需控制冲刷发展管道段附近的海床,这些仿生海草是采用新型高分子材料加工而成,具有耐海水浸泡、抗长期冲刷的特点。当海水流经仿生草设施时,由于受其黏滞阻尼作用影响,流速降低,水流冲刷能力减弱,冲刷强度降低;另一方面,流速降低导致水流中携带搬运的部分沉积物不断沉积下来,加强了管道附近海床强度,这也是英国北海管道无沟铺设成功实施的原因。通过上述两方面防冲促淤机理的联合作用,达到控制海管附近海床冲刷的目的^[10](图1)。

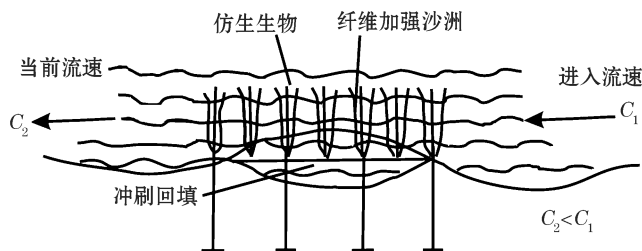


图1 仿生草技术原理示意图

Fig.1 A sketch diagram showing the principle of bionic grass technology

2 物理模型试验

波生流是近岸区一种重要的水动力现象,直接影响着海岸地形地貌的演变。随波浪入射方向与地形的不同,波生流会呈现出不同的形态。当波浪斜向入射时,会形成指向下游的沿岸流;当波浪正向入射时,平面形成增减水,并且在破波带内形成底部离岸流;此外当沿岸地形不均匀时,波浪折射会导致裂流结构。而实际上在近岸区,几种波生流结构往往会叠加在一起,构成复杂的螺旋型近岸流体系^[11]。

本文通过物理模型,模拟强波浪作用下在砂质、粉质海床上铺设管道附近使用仿生草防护技术的情况,以研究探讨在巨浪冲蚀条件下仿生草技术的防护效果。考虑海床底质因素,未对泥质海床进行试验。

试验水槽(图2)长62.0 m、宽1.5 m、高1.1 m,有效工作水深0.70 m。试验用水为生活用自来水。水槽底部为混凝土结构,槽体采用钢架结构,两个边壁镶嵌有20 mm厚的玻璃便于观测。水槽的造波系统为推板式造波机,由电液伺服计算机自动控制系统来控制造波,可以生成周期0.6~3.5 s的规则波和长峰随机波。造波机的后部设有消能网,以消除直立壁面对波浪的反射。在水槽末端设置消能滩,滩上布设有消能网、袋装块石等消浪措施。试验中通过步进式地形测量仪获取地形数据(图3)。



图 2 试验水槽

Fig.2 The experimental tank for the physical model tests



图 3 步进式地形测量仪

Fig.3 A step-type topographic instrument

试验中,将 1.5 m 长管道模型放置在试验区中央部位,并加以固定。在管道中央约 10 cm、管道前后 10 cm 的范围,布置“仿生草”,如图 4 所示,以避免边壁效应的影响。

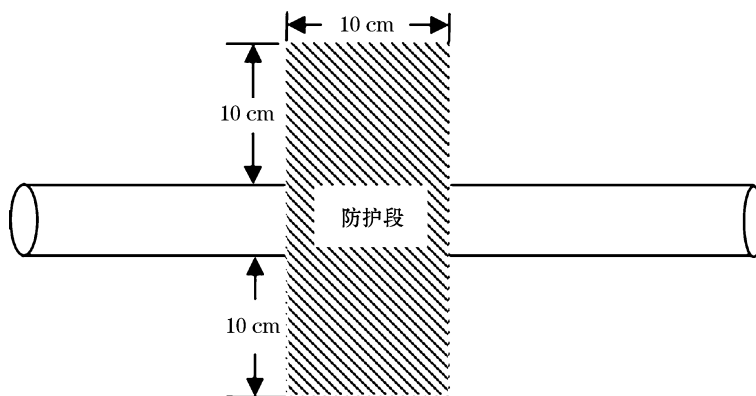


图 4 “仿生草”铺设示意图

Fig.4 A sketch map of the bionic grass layout

2.1 试验步骤

- 1) 将制备好的模型土样抹平, 并将管道模型固定并将仿生草模型布置好, 加水至试验水深 50 cm;
- 2) 在管道轴线中点位置, 沿垂直管道轴线方向布置测点, 测量管道附近原始地形;
- 3) 启动造波装置, 产生波列, 波浪作用一定时间后, 造波机停止工作, 等待水面趋于稳定、水体基本清澈后, 测量管道附近地形, 比较波浪作用前后地形变化;
- 4) 一组试验结束后, 放干水槽中的水, 取出管道, 换成新的模型土样后, 重新将土样抹平, 固定管道, 按照上述步骤进行下组试验。

2.2 试验结果

2.2.1 砂质海床

砂质海床设计的土样粒径约为 0.2 mm, 放置管道后, 按照设计波浪要素造波, 波浪连续作用约 40 min。测得试验前后管道附近地形变化见图 5。

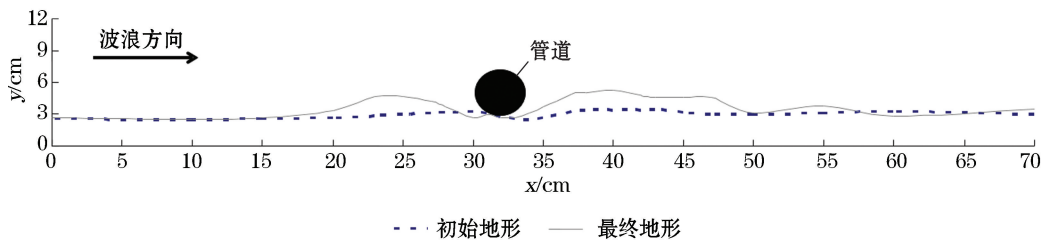


图 5 砂质海床波浪作用下管道地形变化

Fig.5 The topographic change along the pipeline on sandy seabed under wave action

从图 5 可以看出, 经过 40 min 的波浪作用后, 不但在管道底部没有冲刷, 而且在管道前后形成了 2 个沙丘。这说明, 布设“仿生草”以后, 不但有效防止了管道下部的海床冲刷, 而且在管道前后形成两处淤积点。在管道附近的促淤效应, 使得海管有从裸露向掩埋发展的趋势, 进一步保障了海底管道的稳定性, 防止管道发生位移。

2.2.2 粉质海床

粉质海床设计的土样粒径约为 0.03 mm, 放置管道后, 按照设计波浪要素造波, 波浪连续作用约 47 min, 测得试验前后管道附近地形变化如图 6。

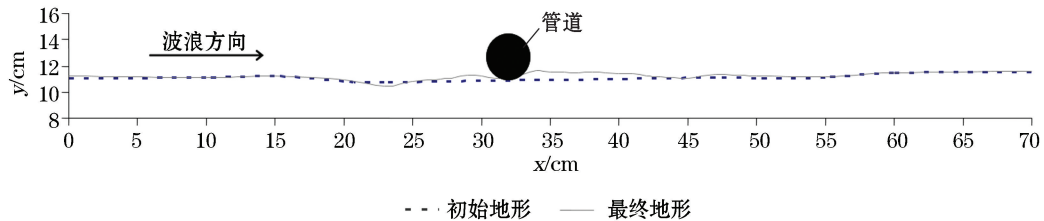


图 6 粉质海床波浪作用下管道地形变化

Fig.6 The topographic change along the pipeline on silty seabed under wave action

从图 6 看出, 经过 47 min 的波浪作用后, 管道附近未发生明显冲刷现象, 在管道前后有 0~1 cm 厚度的淤积。这说明仿生草在粉质海床上也有一定的防冲促淤作用, 但效果不及砂质海床明显。

2.3 “仿生草”布设位置与防护效果

设计一组试验将“仿生草”集中布设在管道上方,管道前后不布设“仿生草”。将管道平铺在整理好的砂质海床上,固定好,加水至设计水深 50 cm,然后按照设计的波浪要素造波,作用 45 min 后停止造波,测得试验前后管道附近地形变化见图 7。

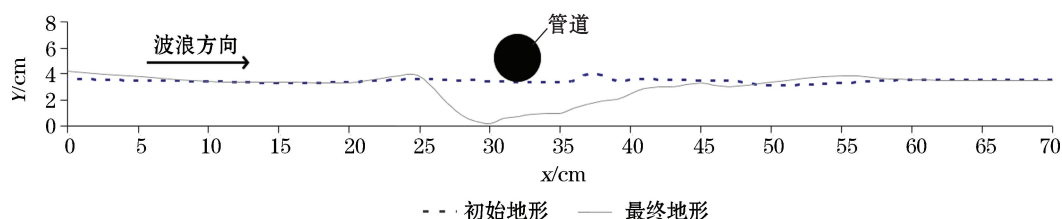


图 7 管道附近地形变化

Fig.7 The topographic change around the pipeline

管道正下方冲刷深度约为 3.8 cm,但在试验条件(水深、波浪要素、底床、作用时间等)完全相同、未布设“仿生草”的情况下,测得的管道正下方的冲刷深度约为 2.3 cm。也就是说上述“仿生草”布设方式,不仅不能促淤防冲,反而会加剧管道附近的冲刷。推测造成这种现象的原因是管道上方的“仿生草”密集,形成类似水坝的作用,使得流经管道上部的水流受到阻挡,向下产生涡流,同时管道下方的水体受到压缩,其流速将会增大,掏蚀管道底部海床。

3 仿生草技术的应用

自 2005 年以来,东海平湖海管某区域在历次检测中都发现有较多悬空段存在,经过多次回填处理后效果仍不理想。经探摸及检测,选择一段回填沙包体相对完整且坡度相对较缓的海管区域,有利于仿生草的铺设施工,并于 2011-06-07 完成了铺设。

仿生草铺设前后各 2 次合计 4 次检测结果对比显示(图 8):区域内未铺设仿生草的区段,虽然每年进行两次回填处理,但每次检测中都发现回填沙包有不同程度的损毁,且存在较多悬空海管,沙包顶部水深变化明显;铺设仿生草的区段在仿生草铺设前的两次检测(2010-10,2011-05)显示,回填沙包顶部水深起伏较大,沙包损毁较为明显,而在铺设仿生草后回填沙包顶部水深无较大幅度起伏,基本处于稳定状态。

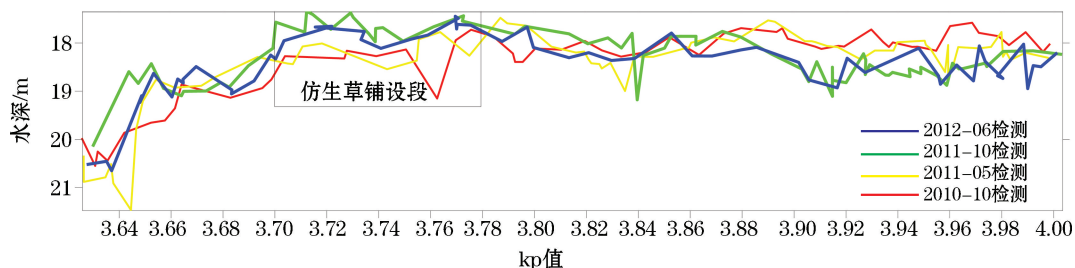


图 8 东冲沟区段仿生草铺设前后各两次水深对比图

Fig.8 Water depth contrast diagram before and after the installation of bionic grass in the eastern gully area

仿生草铺设后,分别于 2011 年、2012 年对该区域潜水进行过 4 次探摸检查,结果显示仿生草铺设段的

海底管道掩埋状态均较好,未发现较大裸露以及悬空海管,泥沙淤积厚度达到 0.2~0.6 m,顶部也淤积了少量浮泥。

4 结 论

悬空是影响海底管道安全的重要因素,而波生流是影响海岸地貌演变与输沙过程的重要水动力现象,巨浪可能在近岸区形成较强底流,对海底管道形成冲刷侵蚀。根据对仿生草技术的试验研究以及工程实践,本文认为该技术对于巨浪冲刷下海底管道防护是卓有成效的。海底管道附近海床冲刷的根本原因是水流流速超过了沉积物颗粒的起动流速,沉积物颗粒发生悬浮、运移。仿生草技术通过阻尼作用,降低附近水流流速,减弱水流搬运能力,起到对管道冲刷的防护作用。

1) 仿生草技术对海底管道冲刷有很好的防护作用,这点通过该技术在平湖海管中的实际应用也得到了进一步证实。尤其是对于砂质海床效果更为显著,不仅防止管道下方海床受到冲刷,由于流速降低,还使得悬浮在水体中的颗粒在管道附近沉积下来,保护管道免受冲刷,防止管道发生位移,极大增强了管道稳定性。对于粉质海床也有一定的效果,但由于粉土颗粒更细,同时由于黏胶颗粒的物理化学作用,孔隙中薄膜水的联结,具有比砂土高的结构强度,所以对流速变化反应没有那么敏感。

2) 仿生草的布设方式对其防冲促淤效果有着重要的影响。根据试验结果来看,发挥作用的主要是布设在管道两侧的仿生草,两侧的仿生草将有效地降低了流经海管的水流流速。如果将仿生草密集布设于管道上方,不仅不能保护底床,反而会加剧底床冲刷,这是由于水流受到管道上方仿生草阻挡在其前方形成涡流,加剧了管道前冲刷的强度。

3) 理论上讲,采用仿生草技术后,海底管道将不会再出现悬空,已有悬空也会得到缓解。但由于海域环境、底质条件、施工能力、作业成本等因素,仍应根据具体情况,结合沙包充填等传统方法,针对悬空海管采取措施。

参考文献(References):

- [1] YU G L, CHEN Q Q, LI Y H. Status and tendency of development of scour-prevention technique for submarine pipeline[J]. Water Resources and Hydropower, 2007, 38(11): 30-33. 喻国良, 陈琴琴, 李艳红. 海底管道防冲刷保护技术的发展现状与趋势[J]. 水利水电技术, 2007, 38(11): 30-33.
- [2] PAN X G. Cause of suspending seabed pipeline and ways of prevention[J]. China Ship Survey, 2005(10): 68-69. 潘学光. 海底管道悬空成因及防治[J]. 中国船检, 2005(10): 68-69.
- [3] JIAO R Y. Technology and application to firm underwater pipeline by fiber reinforced mats[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 1997, 16(11): 15-19. 焦如义. 水下管道“人工草”固定技术及应用[J]. 油气储运, 1997, 16(11): 15-19.
- [4] WEN S P, WU M, WANG X G. Exploration of controlling submarine hanging pipe in Chengdao oilfield[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2008(7): 17-20. 文世鹏, 吴敏, 王西岗. 埕岛油田海底管线悬空治理探索[J]. 石油工业技术监督, 2008(7): 17-20.
- [5] LIANG F H, ZHANG Y T, ZHUANG Y F, et al. Scour prevention of East China Sea oil & gas export pipeline on the base of bionic scour-prevention technique[J]. China Offshore Platform, 2011, 26(4): 24-28. 梁富浩, 张印桐, 庄亚锋, 等. 基于仿生技术防治平湖油气田外输海底管道冲刷的探讨[J]. 中国海洋平台, 2011, 26(4): 24-28.
- [6] LV M C. Discussion about the hanging technology of submarine pipelines and its application in Shengli Chengdao oilfield[J]. Safety Technique, 2008, 8(3): 20-22. 吕明春. 胜利埕岛油田海底管线防悬空技术探讨与应用[J]. 安全技术, 2008, 8(3): 20-22.
- [7] LIU J K, ZHANG Z F. Application of bionic scour prevention system in Chengdao offshore oilfield[J]. China Offshore Platform, 2008, 23(6): 36-68. 刘锦昆, 张宗峰. 仿生防冲刷系统在埕岛油田中的应用[J]. 中国海洋平台, 2008, 23(6): 36-68.
- [8] ZHUANG L H, YAN J, FAN F X, et al. Study of artificial seaweeds in hanging segment of submarine pipelines in Maoming single point mooring dock for 30×10^4 t oil unloading[J]. The Ocean Engineering, 2010, 28(2): 76-81. 庄丽华, 阎军, 范奉鑫, 等. 茂名 30 万吨级单点码头输油海管悬空段人工海草试验研究[J]. 海洋工程, 2010, 28(2): 76-81.
- [9] CUI H, CAO L H, CHEN Y L, et al. Study on the effect of bionic grass treatment for the suspended span of submarine pipelines around

the oil platforms in the Chengdao sea area[J]. *Coastal Engineering*, 2015, 34(3): 77-86. 崔华, 曹立华, 陈义兰, 等. 埕岛海域平台周围悬跨海底管线仿生草治理效果研究[J]. *海岸工程*, 2015, 34(3): 77-86.

- [10] CHU X J. Test study on bionic technology of anti-scouring protection for subsea pipelines[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2011(7): 19-21. 初新杰. 海底管线淘空仿生防护技术试验研究[J]. *装备制造技术*, 2011(7): 19-21.
- [11] XIE M X, ZHANG W. 3D numerical modeling of nearshore wave-induced currents[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(3): 391-399. 解鸣晓, 张玮. 近岸波生流运动三维数值模拟及验证[J]. *水科学进展*, 2011, 22(3): 391-399.

Bionic Grass Protection Technology for Submarine Pipelines Under the Threat of Huge Wave Erosion

LI Jun-jie, HOU Zhi-min, TIAN Pei-sheng

(Shanghai Geophysical Branch, Sinopec Offshore Oilfield Services Company, Shanghai 201208, China)

Abstract: The bionic grass protection technology is a kind of technology that is used to prevent the development of scour through reducing the speed of water flows and then promoting the deposition of sediment particles around the submarine pipelines. Wave-induced current is an important hydrodynamic phenomenon in the coastal waters and can directly influence the coastal geomorphic evolution and the sediment transport process. Under the conditions that wave acts on different seabed substrates, the protective effect of bionic grass on submarine pipeline scour and the influence of different layout of bionic grass on the protective effect are simulated through multiple sets of physical model tests. Also, the mechanisms of the actions are studied preliminarily. Combining with the practical application of bionic grass technology in the Pinghu oil field, the protective effect of the bionic grass on the suspended submarine pipelines is proved to be obvious. However, it is argued that the waves in the coastal waters may produce stronger bottom currents so that the scour-prevention effect of the bionic grass on the submarine pipelines by damping could be better in the sandy seabed areas than in the silty seabed areas, reflecting that the scour-prevention effect of the bionic grass is related to the seabed substrates. The layout of bionic grass plays also an important role to the scour-prevention effect of the bionic grass. It has been found that the bionic grass which is laid on both sides of the submarine pipeline plays the role of protection. It is therefore suggested that in order to obtain better protective effect, the bionic grass technology should be operated in combination with the traditional methods in accordance with specific conditions.

Key words: bionic grass; submarine pipeline; scour-prevention

Received: August 9, 2017