

海底管线冲刷悬空及其抑制技术研究综述

杨少鹏, 拾兵

(中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 海底管线作为海洋工程的重要组成部分, 其安全性受到广泛关注。本文简单回顾了国内外学者通过物理实验、理论分析与数值模拟等方法研究海底管线冲刷悬空及防护问题的成果, 并对工程中应用较广泛的防护方法的优缺点进行了简单对比, 为该领域的进一步研究提供参考。

关键词: 海底管线; 冲刷; 涡激振动; 悬空防护

中图分类号: P756

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2018)03-0121-10

DOI: 10.11759/hyxx20170616001

随着科技发展, 人们对海洋开发的手段日益丰富, 各种海洋结构物应运而生, 如各种海洋平台等浮式结构物, 潜水器等, 这些海洋结构物在人们加深对海洋认识的过程中发挥了重大作用, 推进了对海洋的探索。但现阶段大部分结构物主要是针对海洋石油及天然气的开采而研发的, 故如何将开采出的天然气及石油运输到陆地上成为了人们思考的问题。针对此问题海底管线的概念应运而生。由于海底管线运输方便, 快捷且能连续工作, 因此逐渐被海洋工程界认为是最好的石油运输装备, 但海洋环境十分恶劣和复杂, 且人们对海洋的开发逐渐转向深海, 随着开发范围的不断扩大, 海底管线的应用面临着巨大的挑战。

自 1954 年世界上第一条海底管线在墨西哥湾投入生产以来, 世界各国因管线损坏已发的事故已达数百起。根据对墨西哥湾近 20 年管线事故的统计, 发现管线冲刷是造成事故的主要原因。我国也对管线的冲刷做了相应的统计, 例如对埕岛油田 61 条管线的调查发现, 仅有 5 条管线未发生悬空, 而其余管线的悬空平均高度值为 1.33 m, 最大为 2.5 m; 从悬空长度来统计, 平均悬空长度为 15.1 m, 最大 30 m^[1]。如此大范围的悬空现象, 使得管线悬空治理问题迫在眉睫。总体来说, 管线事故主要是由于其周围流场、压力场发生变化, 进而引起管线下发生冲刷, 造成管线悬空, 在水动力作用下发生涡机振动从而造成管线的断裂。

目前, 为防止管线发生冲刷悬空, 一般采用机械挖沟将管线人为的埋入海床内, 以减少海流或波浪对管线的影响, 但此方法增加了施工难度和预算; 且在实际应用中发现, 由于管线所处的海洋环境较

复杂, 在波浪、海流、海床三者耦合的作用下, 掩埋的管线也会发生冲刷, 不能完全达到防护的目的。因此开展新的管线防护方法的研究, 将对保护海底管线安全运营和海上油气的开发具有重要的应用价值。除此之外, 如何在对海洋环境不造成破坏的前提下, 降低工程造价, 减少维修费用及维修工作也是需要考虑的问题。总之, 对海底管线的认知和研究在很大程度上决定了对海洋石油和天然气的开采运输能力。

1 研究现状

由于海底管线应用较广泛, 国内外学者针对管线冲刷问题已进行了大量的研究, 其中国外学者的研究起步较早, 方法多样, 成果较丰富。在 20 世纪 60 年代, Herbich 等^[2]对管线的稳定性问题进行了研究, 推导出了在海流作用下, 管线下冲刷坑深度的经验公式。在 20 世纪 80 年代末期, Mao^[3], Chiew^[4], Sumer 等^[5]对管线冲刷的起动, 发展, 形成, 稳定等情况进行了充分的研究分析, 提出了众多的冲刷理论。

对管线的冲刷及其水动力研究涉及多学科, 如流体力学、泥沙输移、海洋工程结构等, 而冲刷引起的悬空问题是造成管线失事的最主要因素, 管线悬

收稿日期: 2017-06-16; 修回日期: 2017-08-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279189)海底管线的冲刷极限与动力调整

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 51279189, Scouring limit and dynamic adjustment of submarine pipelines]

作者简介: 杨少鹏(1990-)男, 山东烟台人, 博士研究生, 主要从事海底管线冲刷与防护研究, E-mail: yangshaopeng612@163.com; 拾兵, 通信作者, 教授, 主要从事河流、河口、海岸动力学及工程应用及海底管线冲刷与防护技术研究, E-mail: sediment@ouc.edu.cn

空的危害主要表现在横向失稳、诱发涡激振动降低管道的疲劳寿命、意外撞击破坏概率增加^[6-7]，故对悬空管线的防护在一定程度上决定了管线的使用期限。因此，国内外众多学者从不同角度对该类问题进行了广泛和深入的研究，研究的方法主要分为两种：一种是数值模拟，该方法能对冲刷细节进行分析，并能对管线周围的流场及冲刷坑变化进行实时监测；另一种是物理模型试验，该方法不仅能对管线进行宏观的分析，也能对数值模拟结果进行验证。具体研究现状概述如下。

1.1 理论分析

由于冲刷问题涉及的因素较多，故现阶段理论研究主要集中在泥沙起动时的临界情况、不同因素对泥沙起动的影响、泥沙起动时管线周围水动力及

其压力场的分布、冲刷坑的变化过程、以及冲刷达到平衡时冲刷坑深度及其角度等几个方面，且理论分析大部分是建立在局部二维基础上，少数的冲刷理论分析建立在三维空间内，即考虑冲刷坑沿管轴方向的变化。

Myrhaug 等^[8]在 Sumer 研究的基础上研究了随机波作用下管线局部冲刷坑的深度和宽度及桩周围冲刷坑的深度公式。

Sumer^[9]对冲刷细节进行了研究，认为管线冲刷初始阶段的管涌现象可分为两个阶段：第一阶段，当来流作用大约 85 s 后，海床内水体渗透力开始大于颗粒浮重，沙土表面开始隆起；2 第二阶段，大约 5 s 后便会发生水、沙土混合物涌出的现象即管涌，如图 1 所示。

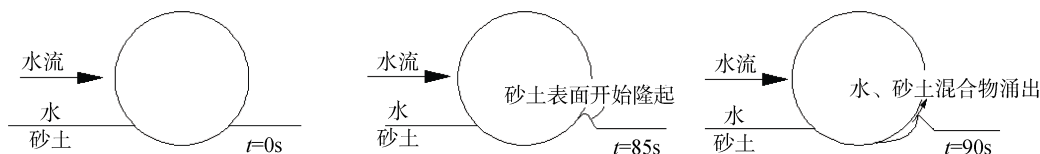


图 1 管涌过程图

Fig. 1 Sketch of piping process

在此基础上，Sumer 给出了冲刷起动的判别标准以及半经验公式

$$\frac{u^2}{gD(1-n)(s-1)} \geq f\left(\frac{e}{D}\right) \quad (1)$$

式中， g 为重力加速度； D 为管径； n 为泥沙的孔隙率； s 为泥沙和水的相对比重； e 为管线的埋深深度； u 为管线上游的行近流速。

潘冬子等^[10]通过理论分析，把波浪作用下管线下的冲刷坑的演变分为 5 个不同的阶段，同时研究分析得出了 KC 数 k 和管线的相对埋置深度对平衡冲刷深度的影响，如公式(2)所示。

$$\frac{S}{D} = 0.1 \frac{0.1k^{0.6}}{\cosh(2e/D-1)} \quad (1 < k < 25) \quad (2)$$

式中， S 为管线冲刷坑的平衡深度。

Zang 等^[11]对管线下泥沙颗粒进行平衡受力分析，得出了恒定流作用下，管线下泥沙发生起动时的临界条件公式，如公式(3)所示。

$$\left[\frac{U^2}{gD(1-n)(s-1)} \right]_{cr} \geq \frac{\gamma}{\lambda_A \Delta C_{P0}} \quad (3)$$

波浪作用下的泥沙起动公式如公式(4)所示。

$$\frac{U^2}{gD(1-n)(s-1)} \geq \frac{\gamma}{\lambda_A \Delta C_P} [1 - \exp(-0.018k^{1.5})] \quad (4)$$

式中， U 为临界流速； ΔC_P 为管线前后的压力差系数； λ_A 为相关系数； γ 为管道与海床接触角。

韩艳^[12]从管线冲刷的基本理论入手，推导出冲刷平衡时，管线下泥沙冲刷时两侧的临界压力梯度公式，如公式(5)所示。以及管线冲刷起动的临界流速 u_{0c} ，如公式(6)所示。

$$\Delta P_\varepsilon = \frac{2g(s-1)}{\lambda_A u_\infty^2} \alpha D \quad (5)$$

$$u_{0c}^2 = \frac{2g(s-1)D}{\lambda_A \lambda (1-m)} \quad (6)$$

式中， m 为与雷诺数(Re)相关的参数； u_∞ 为水流入流速度，此时流速并未受到管线的干扰； α 为管道与床面相交点的切面与水平沙床面之间的角度(弧度制)， λ 为平均压力梯度系数， λ_A 为压力梯度校准系数。

基于韩艳的研究，杨立鹏^[13]得出了波浪作用下，海床发生冲刷时的临界波高，如公式(7)所示，以及波浪作用下，冲刷起动的临界压力差，如公式(8)所示。

$$H_c = \frac{D}{\lg k} \frac{5(s-1) - 3C_D w^2 / 4gd_{50}}{\lambda_A} \alpha - 2.7 \quad (7)$$

$$\Delta P_{\varepsilon} = \frac{\rho g(s-1) - 3C_D \rho w^2 / d_{50}}{2\lambda_A} \alpha D \quad (8)$$

式中, w 为颗粒的沉降速度; C_D 为拖曳力系数; d_{50} 为泥沙中值粒径。

随着人们对管线的研究和认识的不断提高, 只针对二维冲刷的研究已经不能满足管线研究的需求。在早期研究中, 由于受研究手段和理论不成熟等因素的限制, 只是提出了三维冲刷这一概念。Berneti 等^[14]提出了一个三维冲刷理论模型。韩艳在前人的基础上对管线的三维冲刷进行了较为详细的叙述。管线在冲刷过程中, 下方冲刷坑逐渐增大, 管线悬跨段在冲刷过程中, 上游出现驻留漩涡, 悬跨段下方出现高速水流, 下游出现尾流漩涡, 在肩跨处的泥沙, 同时受到水流冲刷, 当该处泥沙受力无法达到平衡时, 泥沙继续随水流运输, 从而导致冲刷坑沿管线轴向不断扩展。Sumer 等^[15]指出在三维冲刷过程中, 随着悬空长度逐渐加大, 管线下沉, 更多的管线重量分摊在肩坑位置, 当床面提供的支撑力不足以抵消管线自重时, 跨肩处的泥沙落入管线下方形形成回填。Wu 等^[16]针对管线的三维冲刷问题提出了床面剪切应力理论。冲刷在三维空间扩展时, 都是从管涌现象开始发展, 随着管涌的形成, 管线下方泥沙迅速被水流带走, 冲刷坑在很短的时间内由极小的范围内向四周扩散, 而床面切应力对海床的作用是造成管线冲刷的主要原因。张靖^[17]分析了波与流方向变化对海底管道冲刷演变的影响。其应用了三维冲刷的原理, 考虑不同来流角度和不同方向波浪对管线冲刷的影响, 以及斜向波浪情况下埋深、KC 数等对管线受力的影响, 并针对冲刷情况进行了物理模型试验, 建立了冲刷坑深度的计算公式。

迄今为止国内外学者通过建立各种管线理论模型, 从基本要素出发, 逐渐将各个影响因素加入管线的冲刷研究中, 完善了对冲刷问题的研究。但在分析过程中, 不同的泥沙粒径、水流流速、水深、管径、波流耦合等因素所适用的理论也不同, 还需具体问题具体分析。就目前从理论角度上分析, 还仍无法对各个因素都充分考虑, 只能采取合理的简化方式进行分析 and 预测, 从冲刷问题的本质进行讨论, 究其主要影响因素, 寻找冲刷的一般规律。相比物理模型和数值分析而言, 理论分析较为简单, 耗时少, 但因舍弃了过多的因素也造成了分析不全面等问题。

1.2 物理试验研究

理论研究的发展, 为物理试验研究提供了一定

的基础。早期研究技术等条件有限, 而物理试验操作简便, 能够直观分析, 因此物理试验发展较早。学者们对冲刷悬空影响因素的试验研究主要分三个阶段: 第一阶段: 单向流作用下管线冲刷; 第二阶段: 波浪作用下管线冲刷; 第三阶段: 波流耦合作用下管线的冲刷。物理试验主要从水动力、冲刷扩展速度、涡激振动、管线下沉自埋等几个方面进行了研究。人们对于海底管线局部冲刷的物理试验研究最早也是从二维局部冲刷开始的。

马良等^[18]对波流作用下部分埋置管线的水动力进行研究, 发现不同埋置深度的管线的水动力系数均与 KC 数相关。系数均值随 KC 数增大而减小, 最后趋于稳定。当埋置深度为 $0.5D$ 时, 拖曳力系数比不埋深时降低 15%, 当埋入深度为 $0.5D$ 时, 拖曳力系数降低 60%~70%。惯性力系数也相应的减少。

Sumer 等^[19]通过对冲刷扩展进行分析, 发现冲刷开始后不仅沿着水流方向继续冲刷, 也会沿着管轴方向扩展。Sumer 等^[20]通过研究发现管线悬空长度的扩展率受坑肩上游侧漩涡影响。Wu 等^[21]对单向流作用下三维冲刷扩展速度的影响因素进行研究, 发现管线相对埋深、相对水深的增加会减小冲刷扩展的速度, 而弗汝德数 F_r 和希尔兹数 θ 对冲刷扩展速度起促进作用, 而在清水冲刷条件下, 希尔兹数对冲刷扩展速度的影响较少。

Gao 等^[22]对涡激振动下海床的冲刷状态进行试验研究, 发现当冲刷开始后, 管线的振幅开始变大, 频率逐渐减少, 最终振动和冲刷达到平衡状态; 冲刷不仅影响管线的振幅, 还影响管线的频率, 不论是管线固定与否, 管线的冲刷深度都会随着管线与床面间隙的增加而减少, 在间隙比为定值时, 振动管线比固定管线能引起更为严重的冲刷。沙勇等^[23]对管线悬跨后的涡激振动进行了研究, 发现当约化速度小于 3 时, 管线的振动强度随着约化速度的增加而增加, 但当此速度在接近 2 时, 管线的悬跨高度对管线的振动有重要的影响。当悬跨高度为 $0.4D$ 时, 管线自身振动频率对涡激振动的影响较大; 当悬跨高度大于 $0.4D$ 时, 管线振动主要由涡旋的释放频率控制。余建星等^[24]对不同流速, 不同管道下, 漩涡发放的频率变化情况进行研究, 发现可由约化速度控制管线的振动。李小超等^[25]探讨了悬跨管线发生涡激振动的试验方法, 给出了恒定流、波浪单独作用以及波流耦合下研究管线振动的设计思路, 试验主要针对管线由一阶共振向二阶共振模态过渡时在过渡

范围内管线的振动特征。陈博文等^[26]对管线允许的最大悬空长度进行了研究,结果表明有无支撑对管线最大允许跨长有很大的影响,固端约束条件下的最大允许悬跨长度比简支约束下的长度大。Zang 等^[27]研究了子母管线涡激振动的强度,通过对时间平均的涡量强度分析,发现近床面的子母管线涡激振动的涡流形状与两管线的间隙比和小管管径与大管管径的比值两个因素有关。潘盼等^[28]采用流固耦合方法,对子母管结构进行涡激振动研究,并与相同管线在自由悬跨状态下振动特性进行比较。结果显示,受母管影响,子母管中由涡街效应产生的升力振幅随时间变化不一致,而单根管线升力幅值稳定;子母管中产生的拖曳力比单根管线高 65%,振动幅度变大且管线尾流中湍动能分布具有随机性,整根管线的水动力分布不均;将管线升力与垂直水流方向的振幅进行对比,发现升力是导致管线垂直方向振动的主要原因,且在水流阻力和涡激升力共同作用下子母管会产生较大的位移和应变,因此对于子母管线应采取措施进一步调整子母管之间的间距和剩余张力来减缓管线的疲劳程度。

韩艳等^[29], Lipeng Yang 等^[30-32]通过假定冲刷坑流速分布服从指数分布,进而得到靠近床面的摩阻流速,然后应用泥沙起动临界条件,最终得到了单向流作用下的冲刷平衡深度的经验公式;并对管线底部安装橡胶板的冲刷与防护效果进行了系统试验研究,得到了不同来流条件下管线冲刷的临界压差和临界防护板长度。Cheng 等^[33]将流场和海床相耦合,研究了下沉管线下冲刷的状况,发现当管线在冲刷坑中下降 50% D ~60% D 时,冲刷坑的状态基本不再变化,且冲刷坑的平衡冲刷状态取决于管线下沉速度。Draper 等^[34]研究了大管径($D=196$ mm)管线发生悬跨后,在水流单独作用下,不同管线下沉速度对冲刷坑深度和宽度的影响。结果发现,冲刷坑深度和宽度都会随着管线的下沉而适当增加,而管线下沉速度越快,冲刷坑深度和宽度变化越小。Draper 还研究了管线接触冲刷坑底部后,柔性管和刚性管对管线自埋深度的影响,发现柔性管的自埋程度小于刚性管线的自埋深度。Zhao 等^[35]在前人基础上对水流作用下并联管线的冲刷坑进行了研究,发现并联管线之间的间隙比在 0.5 D ~5 D 时,并联管线的冲刷坑深度和宽度比单一管线的冲刷坑深度和宽度都要大,在间隙比为 0.25 D 时冲刷达到最大值,并联管线下游冲刷比单一管线的冲刷大 50%以上,当间隙

比超过 0.25 D 后,管线上游漩涡的脱落对管线下游冲刷的影响逐渐减弱。

杨立鹏^[13]通过物理试验对波浪作用下管线安装刚性和柔性导流板后的床面冲刷情况进行了研究。为验证室内物理试验所得结果的合理性,进行了野外现场观测试验。通过现场观测结果发现管线顶部安装刚性导流板可加速海床的冲刷,增加了冲刷坑的深度和范围,能引起更大的管线悬空。管线底部安装柔性导流板后,当导流板长度位于临界范围内时($L=0.7D$)可加速床面冲刷,增加冲刷深度并逐渐实现管线自埋;当导流板长度大于临界长度时,柔性导流板可减少床面冲刷,对管线起到防护作用,从而减少管线的悬空长度与宽度。其现场观测试验结果与室内试验数据基本吻合。

上述学者们通过物理试验对管线冲刷悬空进行了详细的研究,能充分对管线冲刷理论和后续的数值模拟进行验证,得出了比较可靠的结论,但也受研究手段的限制较大,对冲刷细节观察难度大,且易受测量仪器的影响。

1.3 数值模拟

针对物理试验的不足,数值模拟逐渐得到应用。数值模拟作为一种研究方法,对场地和仪器依赖性小,故一些学者通过数学模型对海底管线冲刷悬空进行分析研究。

Taylor 等^[36]对立管建立了相关模型,解释了自身重力和轴向阻力的关系,为海底管线的弯曲提供了可靠性解释,对海底管线的治理具有重要意义。Larsen 等^[37]研究了冲刷坑的形态对悬空管线应力的影响,指出对海底管线悬空段应力分析时应考虑流体-管道-泥沙之间的耦合作用。Cheng 等^[38]运用 Navier-Stokes 方程和 Smagorinsky 次网格模型模拟了管线下沉过程中冲刷的发展变化,发现管线下沉速度的降低而逐渐增加,当下沉速度足够小时,冲刷坑深度能达到 1 D 以上。Paul Barrette^[39]对北极地区浅海海底管线的防护问题进行了研究,并对未来的研究方向进行了预测,为浅海海底管线的悬空治理提供了借鉴。朱彤等^[40]对地震和波流作用下海底悬跨管线的动态响应特征进行研究,发现在浅海海域,波浪及水深变化对悬跨管线的动态反应影响不明显,管线的悬跨长度是管线动态响应的主要影响因素;悬跨管线在地震与波流共同作用下的反应与波流作用下的应变基本无差别;在波浪力作

用下,空载时管线的应变小于满载时的应变。

管线悬跨后引起的涡激振动也是数值模拟的重中之重。徐万海等^[41]将悬跨管线简化为 Euler-Bernoulli 梁,对非对称边界管线涡激振动特性的影响进行研究,结果表明:管线振动的最大响应幅值的变化受非对称边界条件影响不大;约束条件越强,越难激发模态,响应频率越高。高明^[42]对于单跨及多跨悬振动特性进行了研究,发现无论是单跨还是多跨,管线的最大变形及最大应力发生部位并不固定,需因情况而具体分析;悬跨长度及边界土体对单跨管线的初始变形特性影响较大,跨度越大、土体弹性模量及黏聚力越小,影响越明显,而管线的自振频率随跨度的增大而逐渐减小,随土体刚度的增大及管线埋深的增加而逐渐增大,动态响应呈周期性变化,跨度越大、土体弹性力学参数越小、海流流速越大,管线变形及应力变化越明显。多跨时随着跨间支撑土体长度的增加,相邻悬跨之间的相互作用强度逐渐减弱;相邻跨跨度越接近,相互作用越明显;土体黏聚力越大,相邻跨约束作用越强。Liang 等^[43]建立了管线振动情况下二维冲刷模型,研究表明,当振动频率较小时,管线冲刷坑深度受振动频率和振幅影响较大;当振动频率较大时,振幅是影响冲刷深度的主要因素。安振武等^[44]对悬跨段管线进行了受力分析,推导出管线振动的微分方程,进而得到管线动力特性方程,求得了悬跨管线的自振频率。肖荣鸽^[45]用流固耦合对悬跨管线的外流速度、悬跨长度、管线壁厚以及内流等因素对管线振动特性的影响进行研究,结果表明,约化速度处于 3.26~8 时,管线系统有明显的锁定现象,管线具有较大的横向位移;随着管跨长度的增大,管线的无量纲振幅增大,而管线涡激振动的频率受管线壁厚的增大影响较少,但振幅逐渐减小;空载管线约化速度约为 6.517 时其振幅最大,当管线内有流体时,约化速度约为 7.966 时振幅最大;输流管道的涡激振动振幅小于空载管道的振动振幅。ZaibinLin 等^[46]利用有限元法对波浪作用下管线不同铺设方式的海床动力响应与管线稳定性进行了研究。对于台风及大风浪对海底管线的影响,目前主要是限于实际观测分析且成果较少,董志华等^[47]对经历两次台风后的东方 1-1 油气管线进行了后期监测,发现台风使海底出现了冲蚀凹坑和沟槽,当凹坑和沟槽出现在管线所处的海底时,会造成新的悬跨。Wen-Chien 等^[48]对台中-桃园水下管线经历 50 年一遇台风后管线的冲刷情况进行监测,

发现在最大波高为 9.1 m 情况下,冲刷深度最深达 1.18 m,管线悬跨长度也增加,严重影响了管线的安全。Drago 等^[49]采用波浪和海流的 6 a 长时间序列和 26 a 长重构时间序列,对海洋环境随机变化对管线涡激振动疲劳累积的影响进行分析,发现尽管强风暴中的悬跨会在本次风暴中消失,持续时间短,但悬跨跨径最大,所受水动力荷载最大,因而导致了决定性的疲劳损伤;而在相对温和环境中,如季节性波浪环境中,悬跨持续时间较长,但跨径和所受水动力荷载均较小,并不会造成显著的疲劳损伤。

数值模拟作为一种研究方法,对场地与仪器的依赖性较小,因此应用越来越广泛。使用数值模拟可对流、波浪、波流耦合等多种工况下的冲刷进行模拟。缺点是对电脑的配置和理论完善程度依赖性较大,使用起来仍具有一定的限制,还需进一步完善。

2 管线防护措施优缺点对比

在管线得到广泛应用后,海底管线的防护技术也引起了人们的关注。通过对管线冲刷机理进行了解后,众多学者开始对管线的防护问题进行研究。经过多年研究,总体来说对于管线悬空的防护主要包括铺设前的防治悬空措施和出现悬空后的治理措施。针对不同海况,需要不同的防护措施来保证管线的安全运营。管线的基本防护一般分为两种:刚性材料防护和柔性材料防护。而针对悬空段防护措施主要从四个方面出发^[50]:增加海底泥沙的临界起动流速,如抛碎石、抛沙袋覆盖防护;降低水流对管线的冲刷速度,如:仿生水草覆盖法,通过水草阻流作用促进泥沙的淤积;减少管线的悬空长度,如:水下支撑法,包括混凝土砂袋支撑、水下支撑桩固定等;增大管线的适应冲刷能力,如:海底挠性软管代替钢管、管线裸露后进行重新挖沟埋设。

2.1 刚性材料防护方法

胡洪勤^[51]对埕岛油田海底管线的冲刷问题提出了工程治理办法。首先确定管线是否发生共振,若出现共振,则采用支撑桩法进行加固。

王怡等^[52]根据弗劳德数 F_r 相等原理,采用缩放法对悬空管线采用抛石防护进行研究,可得出流体对抛石的冲刷机理、抛石防护的薄弱位置以及抛石防护的极限抗流速度等结论,为抛石治理管线悬空提供试验依据。

邵怀海^[53]分析了埕岛油田管线泄漏的原因,提出了管线悬跨长度的临界公式,并提出了管线悬空

段加支墩时管线的悬跨长度公式, 如公式(9)所示。

$$L_c = \frac{\overline{CD} \overline{E}}{S_l V M} \quad (9)$$

式中, L_c 为临界悬跨长度; 在两端简支时 $C=1.75$; E 为管子刚度; M 为管线的总体质量(包括管重及附加质量); S_l 为斯托哈尔数; D 为管径; V 为海水流速。

王召堂^[54]对南堡海底管线存在的一系列问题进行了研究, 并提出了抛石护坡、碎石覆盖和后挖沟填埋的措施, 为海底管线的安全运营提供了保障。

李春雨^[55]对南堡油田人工岛之间的管线悬空的原因进行研究, 并计算出允许的最大悬空长度, 通过计算得出管线有多段悬空长度超出允许范围, 结合该结果提出了有效治理方案。

杨立鹏等^[8]研究了波浪作用下导流板对管线下沉自埋的影响。该阻流板能加速管线下方的局部冲刷, 结合导流板产生的动力促使管线下沉自埋, 得到了不同条件下管线冲刷的临压差和临界防护板长度。赵恩金等^[56]采用数值模拟研究了冲刷坑形成后管线自埋前导流板对管线涡激振动的影响, 发现安装导流板后, 管线的升力系数均值为负值, 随着导流板高度与管径之比(h/D)的增加, 升力系数幅值逐渐减少, 在 h/D 为 0.375 时, 基本达到最小值, 且管

线合力向下, 有利于管线的自埋。在(h/D)为 0.25 时, 发生了涡激振动中的“准周期拍击现象”, 而拖曳力随着导流板高度的增加而增加, 管线受到的横向作用力增加, 其对管线的强度要求增加。

2.2 柔性材料防护方法

柔性防护主要是指采用人工草, 人工网垫等装置增加水阻力, 降低水流流速, 减缓管线的冲刷。

王琮等^[57]针对管线冲刷问题提出了“人工草”仿生防护措施, 并对防护效果进行了试验研究, 发现该技术可有效解决冲刷引起的管线悬空问题。初新杰^[58]在人工草的基础上通过试验提出了管线淘空仿生防护技术, 对解决胜利油田粉土地基保护问题有重要意义。崔华^[59]对埕岛油田悬空管线采用仿生草进行防护研究, 发现仿生草防护促淤效果明显, 且治理效果受管线走向和潮流方向的影响, 与潮流方向一致或与潮流方向夹角较小($<40^\circ$)的海底管线, 治理效果良好。喻国良^[60]发明了一种新型的浮帘式促淤装置, 该装置能够减缓水流流速, 当携带泥沙的水流通过沙窗口时流速降低, 泥沙在重力作用下便可沉积, 从而将管道覆盖。

为研究简便, 现将现实应用中较广泛的各方案的优缺点进行对比, 列表如表 1 所示。

表 1 各方案优缺点对比

Tab. 1 The comparison of the advantages and disadvantages of each program

治理方案	优点	缺点
挖沟法	水力喷射结合声呐检测是最有效的管线埋设方式, 渤海湾管线后挖沟均采用此种方案。	准确度难控制, 海底底流易引起沟土回填, 沟槽宽度需大于管径宽度, 作业量大, 管线铺设完成后还需沟槽回填。
土工布法	施工简单, 不影响生产。	土工布不具备促淤作用, 长期冲刷下土工布被破坏几率大, 管线具有再次发生悬空的可能。
抛砂袋结合混凝土块覆盖	施工及取材简单, 便于实施, 不影响生产, 也无需进行防腐处理, 保护范围广, 对同一平台周围的管线均可产生保护。	可靠性不高, 砂袋有再次被冲刷淘走发生二次悬空的可能, 发生悬空后, 混凝土块可能对管线产生不利影响。
水下短桩支撑	施工简单, 便于实施, 不影响生产, 桩打入海床中深度较深, 可靠性高。	保护范围较小, 每根短桩只能对单一管线的一定距离起防护作用, 且钢管桩需要进行防腐处理, 对小口径管线, 短桩数量较多, 防腐较困难, 且有可能进一步加大管线悬空长度。
挠性软管跨接	施工简便, 挠性立管结构简单, 可作为管线的膨胀补偿装置, 能抵抗疲劳破坏, 且可回收再利用。	管线需停止运营, 软管抵御意外风险能力较弱, 对于注水管线或外在结构物压在输油管道上的情况此方案较难实施。
抛填砂袋结合水草覆盖	不需停产, 安装施工灵活, 从冲刷根源出发, 变被动为主动, 具有促淤效果, 对海洋生物和环境不产生任何影响, 符合环保要求, 在含沙量较高的海域, 能较好防止二次冲刷。	水下作业量大, 海上施工受气候影响大, 悬空较大管线回填量较大。

治理方案	优点	缺点
水下桩与仿生水草结合	施工相对简单,不影响生产,可靠性高,对管线悬空长度进一步发展影响不大。	保护范围相对较小,水下作业量大,海上施工易受气候等因素影响。
土工布结合混凝土连锁排	可提高覆盖层抗冲刷能力,且具有一定的促淤作用,整体性好,能较好适应床面变形,施工简单,施工质量易控制,适用于大面积的裸露管线和连续悬跨管线的安全防护。	服役中后期悬空段的极限承载能力、管线在位挖沟掩埋风险评价、铺设工艺在现阶段研究较少,还需进一步研究。

3 结论

随着海底管线在海洋工程中的广泛应用,越来越多的学者开始关注海底管线冲刷悬空和如何抑制悬空的问题,他们通过理论分析、数值模拟和物理试验等方法对无粘性泥沙条件下管线冲刷悬空问题进行了大量研究,取得了丰富的研究成果。但也存在一定的不足,具体结论如下:

(1) 国内外学者通过建立各种管线理论模型,从基本要素出发,逐渐将各个影响因素加入管线的冲刷研究中,完善了对冲刷问题的理论研究,但至今仍尚未找到普遍适用的理论,对于具体问题还需具体分析。且目前从理论角度上分析,还仍无法对各个影响因素都充分考虑,只能采取合理的简化方式进行分析 and 预测,从冲刷问题的本质进行讨论,究其主要影响因素,寻找冲刷的一般规律。相对于物理试验和数值模拟,理论分析较为简单,耗时少,但因舍弃了过多的因素也造成了分析不全面等问题。

(2) 通过物理试验手段能够对管线冲刷悬空问题进行详细的研究,能充分对管线冲刷理论和后续的数值模拟进行验证,得出比较可靠的结论,但也易受研究手段和测量仪器等外界因素的影响,对冲刷细节观察难度较大。针对三维空间内的冲刷悬空问题研究尚不足,且对黏性泥沙、粉沙等条件下管线冲刷的研究较少,还需进一步对此问题进行研究。

(3) 数值模拟对场地与仪器的依赖性较小,应用越来越广泛。使用数值模拟可以对流、波浪、波流耦合等多种工况下的冲刷进行模拟,但对电脑配置和理论完善程度依赖性较大,使用起来仍有一定的限制,还需进一步完善。

尽管专家学者对防护问题进行了多方面探讨,但目前仍未找到最有效的防护方法,各防护方法均存在一定的缺陷。如覆盖法、支撑法等在实际应用中具有一定的防护效果,但因水下抛石,混凝土支柱等固态物质的存在,易引起管线的二次冲刷。挖沟

等人为埋入法工作量大且施工工期较长。刚性防护虽简便但易诱发管线发生涡机振动及下游床面冲刷,且在淤泥质海床和礁石性海床中均无法使用。柔性材料防护的方法,目前还处于研究开发阶段,尚未成熟。因此对复杂海底环境下的管线冲刷悬空防护问题还需进一步深入研究,以保障管线能够安全运营。

参考文献:

- [1] 王希华. 环境因素及人为因素对海底管线寿命的影响[J]. 石油化工建设, 2008, 30(4): 55-75.
Wang Xihua. The influence of environment factor and the artificial factor upon the bottom of sea pipeline life span[J]. Petroleum and Chemical .Construction, 2008, 30(4): 55-75.
- [2] John B Herbich. Engineering Scour around pipelines, piles and seawalls[J]. Handbook coastal and ocean engineering, 1991, 2 : 45-79.
- [3] Mao Y. The interaction between a pipeline and an erodible bed[D]. Denmark: Technical University of Denmark, 1987.
- [4] Chiew Y M. Mechanics of local scour around submarine pipelines[J]. Journal of Hydraulic Engineering. 1990, 116(4): 515-529.
- [5] Sumer B M, Fredsoe J. Onset of scour below a pipeline exposed to waves[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering. 1991, 1(3): 189-194.
- [6] 摩塞尼. 海底管道设计分析及方法[M]. 许正名, 译. 北京: 海洋出版社, 1984, 7: 172-180.
Mossoni. Design analysis and method of submarine pipeline[M]. Beijing: Ocean Press, 1984, 7: 172-180.
- [7] 李军, 王洪彬, 李燕. 影响海底管道寿命的主要因素及防范建议[J]. 石油工程建设, 2007, 33(2): 35-38.
Li Jun, Wang Hongbin, Li Yan. Main Factors Influencing Marine Pipeline Service Life and Proposal of Countermeasures[J]. Petroleum Engineering Construction, 2007, 33(2): 35-38.
- [8] Dag Myrhaug, Havard Rue. Scour below pipelines and vertical piles in random waves[J]. Coastal Engineering, 2003, 48: 227-242.

- [9] Sumer B M, Truelsen C, Sichmann T, et al. Onset of scour below pipelines and self-burial[J]. Coastal Engineering. 2001, 42(4): 313-335.
- [10] 潘冬子, 王立忠, 潘存鸿, 等. 推进波作用下海底管线周围局部冲刷试验研究[J]. 海洋工程, 2007, 25(4): 27-32.
Pan Dongzi, Wang Lizhong, Pan Cunhong, et al. Local scour around pipeline due to progressive wave[J]. The ocean engineering. 2007, 25(4): 27-32.
- [11] Zang Z, Cheng L, Zhao M, et al. A numerical model for onset of scour below offshore pipelines[J]. Coastal Engineering. 2009, 56(4): 458-466.
- [12] 韩艳. 海底管线的冲刷与导流防护技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
Han Yan. Study on the erosion and protecting technique for submarine pipeline[D]. Qingdao: Ocean university of China, 2010.
- [13] 杨立鹏. 波浪作用下的海底管线冲刷与防护技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
Yang Lipeng. Study on the scour and protection technology for submarine pipeline under wave condition[D]. Qingdao: Ocean university of China, 2012.
- [14] Bernetti R, Bruschi R, Valentini V. Pipelines placed on erodible seabeds[C]. Proceedings of 9th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Houston, 1990, 5: 155-164.
- [15] Sumer B M, Fredsoe J. Onset of scour below a pipeline exposed to waves[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering. 1991, 1(3): 189-194.
- [16] Wu Y S, Chiew Y M. Mechanics of pipeline scour propagation in the spanwise direction[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. 2015, 141(4): 2-7.
- [17] 张靖. 波与流方向变化对海底管道冲刷演变的影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2016.
Zhang Jing. Study on the effect of different angles of current and wave on the scour evolution for submarine pipeline[D]. Qingdao: Ocean university of China, 2016.
- [18] 马良, 张日向. 海底部分埋设管道在波流作用下水动力效应的实验研究[J]. 中国海上油气(工程), 1998, 10(4): 33-40.
Ma Liang, Zhang Rixiang. Experimental Research on Hydrodynamic Force Effects for Partially Buried Pipeline Under Wave and Current Actions[J]. China Offshore Oil and Gas (Engineering), 1998, 10(4): 33-40.
- [19] Sumer B M, Truelsen C. Onset of scour below pipelines and self-burial[J]. Coastal Engineering. 2001, 42(4): 313-335.
- [20] Sumer B M, Fredsoe J. The mechanics of scour in the marine environment[M]. Singapore: World Scientific, 2002: 157-175.
- [21] Wu Y S, Chiew Y M. Three-Dimensional Scour at Submarine Pipelines[J]. Journal of Hydraulic Engineering-ASCE, 2012, 138(9): 788-795.
- [22] Gao F P, Yang B, Wu Y X, et al. Steady current induced seabed scour around a vibrating pipeline[J]. Applied Ocean Research, 2006, 28(5): 291-298.
- [23] 沙勇, 王永学, 王国玉, 等. 悬跨海底管线涡激振动试验研究[J]. 工程力学. 2009, 26(7): 222-226.
Sha Yong, Wang Yongxue, Wang Guoyu, et al. Experimental study on vortex induced vibration of suspended submarine pipeline[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(7): 222-226.
- [24] 余建星, 孙凡, 傅明炆, 等. 海底管线涡激振动响应动力特性[J]. 天津大学学报, 2009, 42(1): 1-5.
Yu Jianxing, Sun Fan, Fu Mingyang, et al. Dynamic Characteristics of Vortex-Induced Vibration of Submarine Pipeline[J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(1): 1-5.
- [25] 李小超, 王永学, 李广伟. 海底悬跨管线涡激振动实验方法探讨[J]. 实验力学, 2010, 25(4): 467-489.
Li Xiaochao, Wang Yongxue, Li Guangwei. A Review of Experimental Methods for Investigation on VIV of Submarine Pipeline Span[J]. Journal of Experimental Mechanics. 2010, 25(4): 467-489.
- [26] 陈博文, 孙丽. 海底管道最大允许悬跨长度计算[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 9: 291-293.
Chen Bowen, Sun Li. Calculation of maximum allowable span length of submarine pipeline[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 9: 291-293.
- [27] Zang ZP, Gao FP, Cui JS. Physical modeling and swirling strength analysis of vortex shedding from near-bed piggyback pipelines[J]. Applied Ocean Research, 2013, 40: 50-59.
- [28] 潘盼, 蔡炳余, 谭爱林. 子母管结构中海缆涡激振动特性研究[J]. 海洋工程, 2015, 33(6): 45-51.
Pan Pan, Cai Bingyu, Tan Ailin. Research on vortex induced vibration of cable in piggy-back configuration[J]. The Ocean Engineering, 2015, 33(6): 45-51.
- [29] 韩艳, 拾兵. 导流板对海底管线防护功能的试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(2): 100-106.
Han Yan, Shi Bing. Experimental Study on the Function of Spoilers in Protecting Submarine Pipeline[J]. Journal of Sichuan University (Engineer Science Edition), 2010, 42(2): 100-106.
- [30] Lipeng Yang, Yakun Guo, Bing Shi. Study of scour around submarine pipeline with a rubber plate or rigid spoiler in wave conditions[J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 2012, 138(6): 484-490.
- [31] Lipeng Yang, Bing Shi, Yakun Guo. Calculation and

- experiment on scour depth for submarine pipeline with a spoiler[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 55: 191-198.
- [32] Lipeng Yang, Bing Shi, Yakun Guo. Scour protection of submarine pipelines using rubber plates underneath the pipes[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 84: 176-182.
- [33] Liang Cheng, FangJun Li. Modelling of Local Scour Below A Sagging Pipeline[J]. *Coastal Engineering Journal*, 2011: 45(2): 189-210.
- [34] Draper S, An H, Cheng L, et al. Stability of subsea pipelines during large storms[J]. *Phil Trans R Soc A*, 2015, 373: 2033.
- [35] Zhao M, Vaidya S. Local scour around two pipelines in tandem in steady current[J]. *Coastal Engineering*, 2015, 98: 1-15.
- [36] Taylor N, Gan A B. Refined modeling for the vertical buckling of submarine pipelines[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 1987, 7(1): 55-74.
- [37] Larsen CM, KoushanK, Passano E. Frequency and Time Domain Analysis of Vortex Induced Vibrations for Free Span Pipelines[C]. *Proceedings of the ASME 21th international conference on ocean, offshore and arctic engineering*, Trondheim. 2002, 6: 484-490.
- [38] Cheng L, Li F. Modeling of local scour below a sagging pipeline[J]. *Coastal Engineering*, 2003, 45(2): 189-210.
- [39] Barrette P. Offshore pipeline protection against seabed gouging by ice An overview[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, 6(7): 3-20.
- [40] 朱彤, 张敬花. 地震和波流作用下海底悬跨管线模型实验研究[J]. *实验力学*, 2014, 29(3): 326-323.
Zhu Tong, Zhang Jinghua. Model Experimental Research on the Spanning Submarine Pipelines Subjected to Combined Actions of Wave, Current and Earthquake[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2014, 29(3): 326-323.
- [41] 徐万海, 谢武德. 非对称管-土边界的海底悬跨管道涡激振动特性[J]. *地震工程学报*, 2014, 36(4): 773-777.
Xu Wanhai, Xie Wude. Vortex-induced Vibrations of a Free-span Submarine Pipeline under Asymmetric Pipe-soil Boundary Conditions[J]. *China Earthquake Engineering Journal*. 2014, 36(4): 773-777.
- [42] 高明. 管土相互作用条件下海底悬跨管线振动特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
Gao Ming. Study on vibration characteristics of free spanning submarine pipeline under the condition of pipe soil interaction[D]. Hangzhou: Zhe Jiang University, 2015.
- [43] Liang D F, Li T J, Xiao Y. Simulation of scour around a vibrating pipe in steady currents[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 142(2): 04015049.
- [44] 安振武, 穆顷. 海底管道悬跨段振动特性及允许悬空长度研究[J]. *船海工程*, 2016, 45(1): 137-141.
- An Zhenwu, Mu Qing. The Vibration Characteristics and Allowable Span Length of Free Span Submarine Pipeline[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2016, 45(1): 137-141.
- [45] 肖荣鸽, 魏炳乾. 海底管道悬跨段振动特性研究[J]. *自然灾害学报*, 2016, 25(1): 130-136.
Xiao Rongge, Wei Bingqian. Research on vibration characteristics of suspended spanning section of submarine pipeline[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2016, 25(1): 130-136.
- [46] Zaibin Lin, Yakun Guo, Nick Rey. An integrated numerical model for wave-soil-pipeline interactions[J]. *Coastal Engineering*, 2016, 108: 25-35.
- [47] 董志华, 曹立华, 薛荣俊. 台风对北部湾南部海底地形地貌及海底管线的影响[J]. *海洋技术*, 2004, 23(2): 24-28.
Dong Zhihua, Cao Linhua, Xue Rongjun. The Influence on Topography and Relief in South Gulf Beibuand Suspending of Pipe Caused by Typhoon[J]. *Ocean Technology*, 2004, 23: (2)24-28.
- [48] Wen-Chien Tseng, Lien-Kwei Chien. Stability assessment for the undersea gas pipeline[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2010, 18(6): 809-818.
- [49] Drago M, Mattioli M. Insights on the design of free-spanning pipelines[J]. *Philosophical Transactions series A, Mathematical, physical, and Engineering Sciences*, 2015, 373(2033): 1-22.
- [50] 付春丽. 冀东油田 NP1-3D/NP1-1D 海底管道悬空治理[J]. *石油工程建设*, 2011, S1: 80-83.
Fun Chunli. Research on Submarine Pipeline Free Spanning Control of NP1-3D/NP1-1D in Jidong Oilfield[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2011, S1: 80-83.
- [51] 胡洪勤. 埕岛油田海底管道冲刷及工程治理[J]. *海洋科学*, 2005, 29(6): 13-16.
Hu Hongqin. Anti-scouring Engineering for submarine pipeline in marine Chengdao oil field[J]. *Marine sciences*, 2005, 29(6): 13-16.
- [52] 王怡, 李俊. 局部抛石法治理海底管道悬空的试验研究[J]. *油气储运*, 2016, 35(7): 784-787.
Wang Yi, Li Jun. Experiment study on the local rock dumping methods for submarine pipeline spans[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2016, 35(7): 784-787.
- [53] 邵怀海. 海底管线加固技术的改进[J]. *中国海洋平台*, 2004, 19(3): 53-54.
Shao Huaihai. The influence to design of pipe reinforce. *China offshore Platform*, 2004, 19(3): 53-54.
- [54] 王召堂. 南堡油田海底管线勘测及问题管段治理[J]. *石油工程建设*, 2012, 38(6): 21-25.
Wang Zhaotang. Submarine Pipeline Survey and Troubled Pipeline Section Treatment in Nanpu Oilfield[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2012, 38(6): 21-25.

- [55] 李春雨. 南堡油田人工岛海底管线悬空分析及治理[J]. 内江科技, 2012, 1(1): 118-119.
Li Chunyu. Analysis and control of the submarine pipeline in the Nanpu oil Island[J]. Nei Jiang Science & Technology, 2012, 1(1): 118-119.
- [56] 赵恩金, 拾兵. 导流板对海底管线涡激振动的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(3): 320-325.
Zhao Enjin, Shi Bing. Influence of reflectors on vortex-induced vibration of subsea pipelines[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(3): 320-325.
- [57] 王琮, 赵冬岩, 王凤云. 海底管线安全防护技术试验研究[J]. 中国造船, 2009, 50: 273-279.
Wang Cong, Zhao Dongyan, Wang Fengyan. Experimental study on safety protection technique for submarine pipeline[J]. Ship Building of China, 2009, 50: 273-279.
- [58] 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.
Chu Xinjie. Test study on bionic technology of anti-scouring protection for submarine pipelines[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2011, 7: 19-21.
- [59] 崔华, 曹立华. 埕岛海域平台周围悬跨海底管线仿水草治理效果研究[J]. 海岸工程, 2015, 34(3): 77-86.
Cui Hua, Cao Lihua. Study on the effect of Bionic Grass Treatment for the suspended Span of Submarine Pipeline Around the oil Platforms in the Chengdao Sea Area[J]. Coastal Engineering, 2015, 34(3): 77-86.
- [60] 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.
Yu Guoliang, Chen Qinqin, Li Yanhong. Status and tendency of development of scour-prevention technique for submarine pipeline[J]. Water Resources of Hydropower Engineering, 2007, 38(11): 30-33.

Research Overview of Submarine Pipeline Suspension Process and Protection Technology

YANG Shao-peng, SHI Bing

(Engineering College, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Received: Aug. 25, 2017

Key words: submarine pipeline; scour; vortex-induced vibration; suspended protection

Abstract: As an important aspect of marine engineering, the safety of submarine pipelines is attracting widespread attention. In this review, we briefly summarize the published studies on pipeline scour, suspension, and protection that have been performed using the research methods of physical experimentation, theoretical analysis, and numerical simulation. We also compare widely used engineering protection methods and provide references for further study of submarine pipeline operation and maintenance.

(本文编辑: 李晓燕)