

第三方活动频繁海域海管隐患预防性维修治理技术对比

黄建虾（中海油能源发展装备技术有限公司设施优化升级技术服务中心，天津 300450）

摘要：由于往来船舶数量增多，海底管网与水上交通、生产（渔业，采砂区等）等第三方活动影响区域交叉频繁，近年不时发生船舶落、走锚等导致的管缆被拖曳折断、偏离管沟等问题。如不加以预防治理，事故频率及风险将逐年递增。本文重点对柔性垫技术和碎石回填技术在防锚击、防冲刷模拟验证中的防护效果进行了对比，给出了在第三方活动频繁海域海管隐患预防性维修推荐的治理方案，为今后研究和选取第三方活动频繁海域海管隐患预防性维修治理技术提供参考。

关键词：第三方活动；海管隐患治理；柔性垫技术；碎石回填技术；防锚击；防冲刷

1 海管风险隐患影响因素

基于海底管道完整性管理规范 DNV RP F116 中对海管风险因素的分类方法，引起海管隐患产生的主要风险因素分为六类，包括第三方活动破坏风险、腐蚀/冲刷损坏风险、设计建造安装偏差风险、结构风险、误操作风险和自然灾害风险。其中第三方活动破坏主要是指水下设施所处位置存在各类海上人为活动，导致会经受到锚击、锚拖、渔民打捞作业等第三方活动的破坏。中海油对所属 262 条，共计 56868 公里年的海底管道进行了管道故障统计，形成了失效数据库。据中海油海底管道故障统计，因第三方活动破坏导致的海管泄漏占比达到了 33.33%，仅次于因管道内腐蚀造成的管道泄漏占比。

研究第三方活动频繁海域海管隐患预防性维修治理技术对于防止海管故障发生、确保海上安全施工具有重要意义。

2 由第三方活动引起的海管风险隐患

2.1 海管裸露

海底环境复杂多变，受洋流的影响，海床泥沙会受到冲刷进而造成海底管道大面积裸露。第三方外力干扰也会导致海管裸露现象产生。位于航道区、渔业区的海底管道，来往船舶密集，渔网和锚挂对浅埋管线拖曳造成管线偏移、局部裸露；采砂区采砂后管线所在海床发生局部沉降，造成局部裸露现象^[1]。裸露部分的出现不仅改变了海底管道所承受的载荷形式和应力状态，还会给它们的运行带来安全隐患：裸露管段存在被锚挂导致管线发生外部损伤或管线偏移的风险；裸露管段存在重物掉落导致管线外部损伤的风险；裸露管段由于受到海流冲刷进一步发展为悬空状态。

2.2 海管悬空

海底管道埋设状态受到周围海床环境的影响，海

床环境状态稳定对于保持海管安全运行具有重要意义。海床演变趋势不但受潮汐潮流、热带气旋、波浪等因素影响，还会受到周边海洋开发活动的影响，引起海底管道悬空形成的主要海洋开发活动有采砂区作业、近海工程建设等。过度的海洋开发会加速海床地形演变，引起海床局部发生沉降，进一步形成沙坑地形，而沙坑对海管附近海床的直接冲刷随沙坑半径越大对管道悬空影响越大。悬空管段存在被锚挂导致管线发生外部损伤的风险^[1]；悬空超标管段在重力条件下使得悬空端部应力过大造成破坏；悬空超标管段存在发生涡激振动造成应力疲劳导致管段断裂的风险。

2.3 锚击、拖锚风险

随着近海航运的快速发展，经过航道区、锚地区铺设的海底管道越来越多。船舶起抛锚作业时，可能会对海底管道造成管道碰撞、刮蹭，从而引起管道凹陷、刺穿等^[2]。船舶舾装数取决于船体尺寸，也是船舶受风流作用力的主要因素，因此其用于决定船锚、锚链和系船缆的参数和选型，锚泊设备及锚大小的配置需要根据舾装数大小进行配备^[3]。实际的锚在抛锚后，由于需要使锚产生一定的抓力，因此除了贯穿量外，还需考虑船舶将锚抛下后微速倒车拖拉锚而导致锚爪深入泥土的深度；另一方面，也需要考虑船舶走锚前阶段，由于锚链拉扯锚杆，而使锚爪旋转啮入泥土的深度。

3 抵御第三方破坏的海管隐患治理技术

3.1 碎石回填技术

碎石回填技术是在悬空管段位置上下部位抛填石块，做到既不被冲刷移动，又有良好的反滤作用^[1]。

具体工程中通常利用不同粒径的石料构建双层石被，下层使用粒径小的碎石（砾石，通常直降小于 50mm），密集的碎石可有效形成密封过滤层，泥砂

不会透过但可透水,上层使用粒径大的石块形成保护层,重量大不易被冲走,块石的重量由环境条件计算得出,且保护下层碎石不会松散。

碎石回填防护技术的特点:①石料坚固抗腐蚀性好,可形成永久防护;②如选料和施工得当则密封过滤性好,既防漏砂又可透水;③石块之间有空隙,具有吸能作用,抗锚击、锚挂效果好。

3.2 砂袋回填技术

施工用料水泥及沙子在陆地混合装袋。水泥及沙子按 1:3 的比例充分混合搅拌,在陆上装入编织袋,注意装袋时砂袋不装满或过少,过满会造成在投沙过程中沙袋破坏,过少会造成砂袋的浪费并且在水下不稳定,每袋装沙量 30~60kg 为宜^[4]。装砂后袋口要扎结牢固,袋口折叠后扎紧。砂袋装船后,要用帆布遮盖以防止日晒雨淋造成损坏。

技术特点:①优点:施工速度快、效率高,造价相对较低,原材料来源广泛;②缺点:使用该方法治理,大量抛投,覆盖裸露悬空区域,虽然可以在短时间内解决当前悬空裸露问题,但出现悬跨裸露的区域本身的冲刷作用既较为明显,且地貌复杂,不能够给予砂袋堆砌体保护,由于砂袋单重较小,外部无砂袋流失、整体形状坍塌阻止措施,导致相对稳定性较弱。虽单次投入较低,但长期累计,从费用、人员、精力上的长期循环投入很大。

3.3 水泥压块技术

水泥压块由钢筋混凝土棒(通常截面为六角形)或块(一般由六角形混凝土单元组成)。^[1]这种保护方法主要用在管缆的平台段用来稳定海管、防止平台小型坠物以及管线的补救性处理(机械保护、管线加固等),不适用高风险区管线悬空裸露的治理。

技术特点:①优点:造价对比护垫相对较低,具有压载效果和稳定管道的作用;②缺点:压块作为以往新铺设管线压载防护使用的常用产品,其应用历史具有很长的时间,但其适用性具有一定的局限性,这主要决定于该产品的特性—水泥块绳索连接,受限绳索本身的寿命,绳索、混凝土块的强度在长期运行后有所下降,不能再承受较大的撞击、拖曳。一旦出现落锚,可能会出现压块碎裂,绳索断裂等问题,失去大部分的保护作用。在实际施工治理中,虽应用较为广泛,但对于拖锚、落锚的防护效果相对较弱。

3.4 柔性护垫技术

柔性保护垫采用特制土工布包裹,内部填充改性

灌浆料、微膨胀剂、抗离析剂等,具有良好的防冲击、抗压载、防冲刷、支撑等性能,并且具有较强的柔性、环境亲和性好、易于安装和施工等特点。海底管线的裸露将面临来自上部坠物的撞击破坏、下部水流冲刷破坏等风险,保护垫压载技术保证海底管线能够长期有效的运行,并达到防撞、压重、防冲刷、支撑(岩石基床铺底)等目的。

4 抵御第三方破坏的海管隐患治理技术防护效果对比

以南海某近海海底管道为例开展治理防护效果对比,该海区存在强径流、波浪较强、台风多发的特点,对海管冲刷影响明显。海管区域周边存在挖沙作业,增加了管道裸露、悬空的隐患。同时海管登录段位于河道内,来往船舶密集,各类船舶抛、拖锚所带来的风险较大。基于上述隐患风险分析,对海管进行防冲刷、防锚击治理效果校核,通过模拟结果来对比验证不同治理方案在抵御第三方破坏海管隐患中的适用性和可行性。

4.1 防冲刷效果对比

依据现场的海底管道及海床地形勘测结果,本次冲刷模拟选取了管道裸露半埋和管道悬空两种工况。针对每种工况,分别建立柔性护垫覆盖处理模型和碎石回填模型,利用 FLOW-3D 中的泥沙冲刷模型模拟真实物理冲刷过程,根据冲刷模拟结果来验证不同处理方案的效果。

本次模拟需要使用海床模型、碎石模型、管道模型以及柔性垫模型,所有的模型均使用 Solidworks 软件建立并导入 Flow3D 软件中。管道直径为 0.508m,柔性护垫尺寸为 6m×2m×0.25m。对建立的冲刷模型进行初始化,设定水深与水压模式,建立流体流动区域,加载设定好的海水参数,其余参数按照已有的勘测结果设置。将碎石、管道与防护垫的属性设置为 Solid,将海床模型的属性设置为 Packed sediment,这样 FLOW-3D 可以利用泥沙冲刷模型描述悬移质和推移质在射流过程中的运动状态,能够较好模拟冲刷过程中的真实物理现象。

4.1.1 管道裸露半埋工况防冲刷效果对比

基于路由勘测结果建立的管道裸露半埋工况状态下的碎石回填模型和柔性垫防护模型,依据软件冲刷模拟结果显示,在管道前方海床受到的冲刷作用很小,而管道后方的冲刷作用则很大,这是因为管道所处的海床部分是凸起的,水流流向海床突起部分时被抬升,

在突起后形成涡流,容易卷起泥沙,因此冲刷效果较为明显。在采用防护垫进行管道冲刷防护时,管道周围的海床几乎没有受到冲刷,只在防护垫铺设范围之外有明显的冲刷,说明起到了很好的防护作用。而碎石回填处理的效果明显要差很多,由于碎石之间具有空隙,泥沙很容易从空隙中流失,在管道后方碎石下方的泥沙冲刷现象严重。因此可以看出,对于半埋裸露管道来说,防护垫具有更好的防冲刷效果。

4.1.2 管道悬空工况防冲刷效果对比

基于路由勘测结果建立的管道悬空工况状态下的碎石回填模型和柔性垫防护模型,经过软件计算后得出的冲刷模拟结果。冲刷最严重的位置发生在海床地形的下降区域,即管道的下方和后方,这也是因为地形导致的涡流卷起大量泥沙导致的。在碎石回填模型中,管道及碎石下方的海床受到严重冲刷,泥沙从碎石的缝隙中流失,管道悬空现象更加严重。而在柔性垫防护模型中,在安装防护垫后,管道附近的冲刷现象大大减弱,说明在管道悬空状态下防护垫具有比单纯采用碎石回填具有更好的防冲刷效果。

4.2 防锚击效果对比

海底环境复杂多变,受洋流的影响,海床泥沙会受到冲刷造成海底管道大面积裸露,裸露部分的出现不仅改变了海底管道所承受的载荷形式和应力状态,还会给它们的运行带来安全隐患。

为对比验证柔性垫覆盖方案在防锚击破坏中的作用,采用非线性有限元软件 ABAQUS 进行相关计算分析。ABAQUS 进行分析的步骤一般包括以下三步:前处理、分析计算以及后处理。在本次落锚模拟计算校核中选用规格为 $2 \times 6 \times 0.25\text{m}$ 的柔性防护垫,柔性防护垫密度为 2000kg/m^3 ,弹性模量为 2000MPa 。通过 AIS 系统对该地区过往船只数量及类型进行统计,结合规范和调研数据建立船舶与锚设备重量的对应关系,本次模拟选用该海域占比最多的 2.0t 霍尔锚作为建模对象。

4.2.1 模型参数选取

在本项目管道稳定性的校核中,主要进行的是无柔性垫覆盖防护和有柔性垫覆盖防护锚击过程动态模拟,在模拟过程中要考虑落锚的动能以及管道的变形,根据工程实际和计算需要,确定分析过程中各部件的几何参数,并建立相应的几何模型。因此将此次评估过程所用到的落锚单元、土壤单元、防护垫单元以及土壤全部设置为三维可变形实体单元;针对落锚、管

道,要考虑钢材的密度、弹性模量、泊松比以及描述钢材弹塑性性能的应力-应变曲线;对于土壤,要考虑材料的密度、弹性模量、泊松比以及塑性本构关系,本次模拟塑性本构关系全部采用摩尔-库仑模型。根据 DNV-RP-F107 计算得到船锚的触底速度为 7.85m/s 。

4.2.2 模型计算结果

经过有限元软件模拟得出海管在无防护和有防护两种状态下的锚击损伤情况对比,由模拟结果得出管道在无防护和有防护的情况下,其最大 Mises 应力分别为 230.3MPa 和 64.45MPa ,最大应力管道撞击中心和管道边界处,管道撞击中心顶点处应力分别约为 192.4MPa 和 6.106MPa ;管道撞击中心处管道的直径分别变化了 0.52mm 、 0.18mm 。由此可见,柔性垫对海底管道起到了很好的防落锚冲击的保护。在第三方活动频繁或其他海管易受到锚击破坏的海域,推荐使用柔性垫铺设技术作为预防性维修治理手段。

5 结论

综上所述,本文对第三方活动频繁海域需警惕的海管隐患风险及其成因进行了总结和分析,同时论述了工程当中用于抵御第三方活动引起的海管隐患的治理技术及其主要特点。重点对柔性垫技术和碎石回填技术在防锚击、防冲刷模拟验证中的防护效果进行了对比,给出了在第三方活动频繁海域海管隐患预防性维修推荐的治理方案:结合碎石回填技术和柔性垫技术在抵御第三方活动引起的海管隐患的模拟验证结果及各自的优势和缺点,在第三方活动频繁海域或海管受冲刷严重区域推荐使用柔性垫和碎石回填结合的治理防护方案。本论文可以为今后研究和选取第三方活动频繁海域海管隐患预防性维修治理技术提供参考。

参考文献:

- [1] 张传旭,王海锋,刘亮等.渤海油田海底管道裸露和悬空疲劳治理技术对比[J].中国石油和化工标准与质量,2022(9):185-187.
- [2] 刘宇.基于 AIS 数据的船舶抛锚和渔船拖网作业对海底管道的碰撞频率分析[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2021.
- [3] 郭彤.海底电缆受船舶锚害风险研究[D].天津:天津大学,2013.
- [4] 詹燕红,倪剑.辽东作业区海底管道悬空处理技术探讨[J].中文科技期刊数据库自然科学,能源科学,2018(5):189-192.