东方 1-1 海管悬跨分布特征及治理效果分析

黄明泉1,2,3、徐景平2、栾振东4、刘 猛2、李学成3、刘 彬3

(1. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 南方科技大学, 广东 深圳 518055; 3. 中海辉固地学服务 (深圳)有限公司, 广东 深圳 518067; 4. 中国科学院海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘要:海底管道对海上油气田安全生产有着非常重要的作用,对东方 1-1 海管进行了连续 6 年的无人有缆遥控水下机器人(remote operated vehicle, ROV)调查,根据调查数据,分析了海管悬跨的分布特征以及变化情况,按海管悬跨严重程度进行了风险等级分区。结果表明在受水动力影响最大的深水平坦区海管悬跨分布密集,并有逐年加剧趋势,安全风险较大。并对悬跨形成机理和极限悬跨长度进行了分析和阐述。介绍了沙袋支撑和局部抛石填埋悬跨治理方法的原理和优缺点,对比分析了治理效果情况、认为局部抛石治理方法效果优于沙袋治理。

关键词: 海底管线; ROV; 悬跨; 治理中图分类号: P756.2 文献标识码: A

DOI: 10.11759/hykx20200617002

海底管道因输送连续性好、效率高的优点,成为海上油气田油气输送的重要设施。自从 1954 年美国在墨西哥湾铺设第一条海底管道以来,全世界铺设的海底管线达十几万公里[1]。1985 年,中日合作开发的我国第一条海底管道黄河三角洲埕北油田海底管道建成投产[2]。30 多年来,随着我国海洋油气资源的不断开发,我国已经在渤海、东海和南海陆续建成大量海底管道,目前中国海油共铺设了 400 多条海管,累计长度已超过7000 km^[3],其中南海荔湾气田海管水深已到达 1 500 m。

但海底管道所处水下环境复杂恶劣,常常因腐蚀、波流冲刷、海床运动和第三方活动等因素影响海管安全运行[1]。一旦发生管道事故,不仅影响正常油气田生产,还会造成海洋环境污染,并影响管道用户的国民经济生活,造成经济、环境和社会影响。因此,石油公司必须定期对海底管道进行全方位的调查、检测和评估,以确保其安全运行。

本文研究的东方 1-1 海管位于我国著名的强潮流区,又穿越了海底地形复杂的沙波沙脊区,多年来悬跨情况较为严重。自从 2003 年投产以来,中国海洋大学和中国科学院海洋研究所进行了多次调查和研究。从 2008 年开始,特别是从 2013 年至今,中海辉固地学服务(深圳)有限公司每年都利用无人有缆遥控水下机器人(remote operated vehicle, ROV)对其进行调查和悬跨处理。基于多年的 ROV 实际调查资料,在广泛收集前人大量资料的基础上,本文对东方 1-1 海管的环境情况

进行了阐述,对海管多年悬跨变化情况进行了对比分析,并进一步对近几年悬跨治理情况和效果进行了分析。

文章编号: 1000-3096(2021)03-0077-11

1 研究区概况

1.1 概况

东方 1-1 气田是我国最大的已投产浅水自营气田,它位于南海北部湾莺歌海盆地,距海南东方市约 110 km (如图 1),水深约 72 m。目前已建海上生产设施包括中心平台 D(CEPD)、井口平台 A、B、E、F 和相关海底管道。

本文研究的是从中心平台到岸上东方富岛终端站(LTE)的22英寸外输管线(长约105 km, 管道参数见表 1), 铺设在水深 0~72 m 的范围内, 大致呈NNE-SSW 走向。管线路由水深变化大, 水动力差异较大, 再加上台风的影响, 使得海底地形变化较为剧烈。从浅到深跨越水下岸坡区、现代潮流区和陆架平原区。管线路由区水下能见度较低。

1.2 地形地貌

北部湾湾内海底地形平坦,自西北向东南倾斜,倾斜度为 2°左右,水深一般为 20~60 m,平均深度为 38 m,近湾口处局部水深增到 100 m,属于浅海半封闭性大陆海域^[4]。

收稿日期: 2020-06-17; 修回日期: 2020-11-10

基金项目: 国家自然科学基金国际合作项目(41720104001)

[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41720104001] 作者简介:黄明泉(1983—),男,工程师,在读博士,主要从事海洋地质、ROV 调查、海洋测绘相关技术的研究工作,E-mail: huangmq@cosl-fugro.com

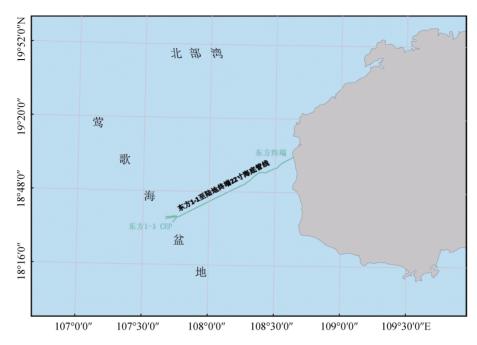


图 1 东方 1-1 海管位置示意图

Fig. 1 Map of DF 1-1 pipeline location

表 1 海管设计参数 Tab. 1 Parameters of the DF1-1 pipeline

设计寿命/a	钢管材质	管道长度/km	涉及压/MPa	钢管外径/mm	钢管内径/mm	钢管壁厚/mm	混凝土配重层/mm
30	API 5L-X65	105	8.1	558.8	533.4	12.7	80~100

研究区海底地形变化不一致,总体变化趋势是自东方 1-1 平台向岸边地形变化从小到大。其中基本以 KP57(KP 指离中心平台的距离,单位为 km)为界,其西侧海管路由区海底起伏平缓,东侧因受海底沙波沙脊的影响海底地形变化较大。KP57-KP89 段为

地形变化最复杂的潮流沙脊分布区。

根据海底地形和地貌特征,可将管道路由划分为三个区(图 2): 浅水冲蚀区(登陆点-KP89)、沙波沙脊区(KP89-KP57)和深水平坦区(KP57-CEP平台)^[5]。

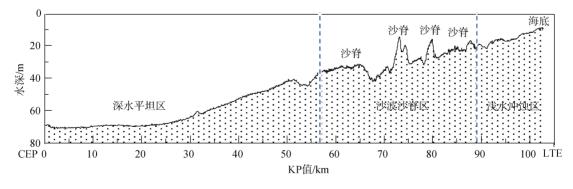


图 2 东方 1-1 海管地形剖面及分区示意图(据文献[5]修改)

Fig. 2 Map of seabed topography along the pipeline route^[5]

1.2.1 深水平坦区(CEP 平台-KP57 段)

该区海底表面较平坦, 水深为 40~72 m, 海底地 形总趋势为自东向西倾斜, 坡度约 1.08‰。该段属于 海底地形由相对平缓到复杂变化的过渡段。该区海底表面相对平滑,存在残留隆起和麻坑。麻坑大面积的分布,是本区海底奇特的地表类型之一。

1.2.2 沙波沙脊区(KP57-KP89)

该区水深为 20~40 m, 地形变化剧烈, 是东方 1-1 海管最复杂的地区。因潮流沙脊分布造成一系列 近南北向平行排列的脊、谷相间的地形特征, 大都呈 NS 走向或呈 NW-SE 走向, 共 4~5 列。海底地势在 总体自东向西倾斜的基础上, 伴随着较大的因潮流 沙脊造成的海底起伏, 起伏幅度达到 10 m 以上, 其中 KP72-KP75 之间, 起伏幅度达到 20 m^[6]。

1.2.3 浅水冲蚀区(KP89-登陆点)

该区水深小于 20 m, 海底地形表现为自岸边向海倾斜的简单趋势, 属于近岸水下岸坡区, 地形平均坡度 1‰~2.4‰, 海底以侵蚀为主, 海岸侵蚀严重, 岸边侵蚀陡坎发育。

1.3 表层沉积物及工程地质环境

刘乐军等研究了本区工程地质和灾害地质特征, 根据取样和室内测试分析,研究区表层沉积物(≤3 m) 主要为砂质沉积物,有砾砂、中砂、粉砂、粉质黏土、 粉土和淤泥等,均属全新世浅海相松散沉积物^[6]。

阎军等根据现场 19 个表层沉积物样品分析, 沉积物具有良好分选, 累积曲线和粒度组分显示较粗粒沉积物(砂质沉积物)粒度范围很窄, 具有突出的单峰, 累积曲线很陡^[7-8]。

根据研究区地形地貌特征、表层沉积物的物理和力学性质、海洋水动力环境和海底不稳定性等研究情况,研究区表层沉积物、工程地质环境和灾害地质特征分区描述如下^[2]。

表 2 研究区表层沉积物类型及工程地质环境(据文献[2]修改)
Tab. 2 Seabed sediment types and geological environments along the pipeline route (From Xu Jishang^[2])

	•		8 /
区域	水深	沉积物类型	工程地质环境及主要灾害地质类型
浅水区 (KP89-登陆点)	<20 m	粘质粉砂、松沙为主;局部为软塑粉土或黏土;其 下为密实砂、粉土、黏土;活动沙厚<2 m	表层以侵蚀为主
沙波沙脊区 (KP57-KP89)	20~40 m	以松散砂为主, 其次松散粉砂、砾砂、粉土。 局部为淤泥、砂质黏土、粉质黏土、粘质粉砂。其 下为较密实的砂土、粉土、砂质黏土和粉质黏土。 表层活动砂土厚度<4 m	
深水区 (CEP 平台-KP57)	40~72 m	表层 1~4 m 以软塑淤泥、软塑淤泥质黏土、软塑 粉质黏土、粘质粉土为主; 其下为可塑黏土、硬塑 粘土、粉土和砂土	表层沉积物属海相黏土, 比重轻, 不排水强度 3~12 kPa。承载力低, 只有 30~50 kPa, 软土厚度 1~5 m。有浅层气溢出

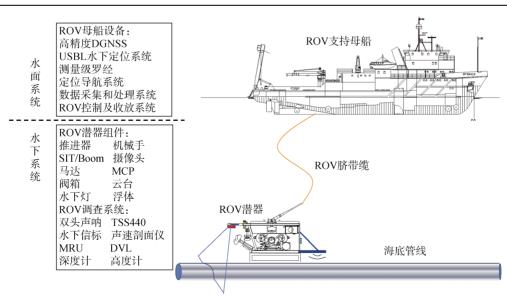


图 3 ROV 海底管道查技术示意图

Fig. 3 Schematic of integrated ROV pipeline survey techniques

1.4 水动力情况

研究区水动力以潮流为主,波浪作用较弱,常受热带风暴和台风的影响。

中国科学院海洋研究所 2006 年 8 月开始在研究区进行了原位监测,多普勒流速仪(ADCP)获得了海表面至离底 3.7 m 处的流速剖面,采集了 11.5 个大潮周期的波浪、潮流数据。结果表明,研究区为正规日潮,测量点大潮潮差 2.7 m,小潮潮差 0.5 m。本区域最大的分潮是 O₁ 和 K₁,其次为 M₂ 和 S₂。距底 10 m 处测量点位的最大流速可达 1.15 m/s,平均流速为 0.45 m/s,最大流速出现在涨潮期。不同层流场不一样,近底层的流向多为 NNE 方向和 SSW 方向,涨潮为偏北向流,落潮为偏南向和南偏西方向流,为往复流运动形式。而中层流向则多为 E 和 W 方向,且中层

流速比底层流速大。涨潮和落潮期在研究区有不同的流速分布和不同的潮流通道。这是造成研究区地 貌差异的主要因素^[8]。

2 ROV海底管道调查技术

使用 ROV 进行海底管线调查就是利用 ROV 以及其搭载的调查设备在 ROV 作业母船的支持下完成对海底管线的状况调查和检测(如图 3)。在进行调查作业时, ROV 在水下就位于海底管线的上方, 并以一定的速度前进, 调查船在水上进行跟踪, 调查数据通过 ROV 的脐带缆传输到调查船进行数据采集、记录和处理。海管调查中通常使用工作型 ROV, 调查船为动力定位 ROV 支持船。使用 ROV 和 DP 船以及导航、调查设备进行海底管线外部调查已经成为成熟和标准化的作业模式, 并被广泛采用。

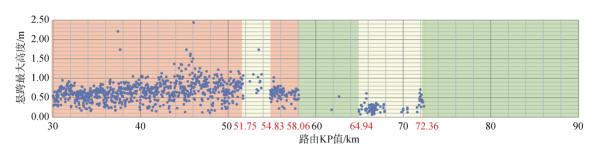


图 4 KP30-KP90 区间海管悬跨最大高度散点图 Fig. 4 Highest height of each free span between KP30-KP90

调查的主要内容有:管线位置、管线剖面、管线 悬跨、埋深、阳极电位等数据,以及海管涂层、节点、 异物、损伤等情况^[9]。

其中海管悬跨状态调查主要用ROV搭载多波束剖面声呐(Delta-T等)进行。Delta-T是先进的高速、高分辨率多波束声呐系统,设计用于进行海底地形调查以获取简单可靠精确数据,频率为260 kHz,分辨率精度达到量程的0.2%,波束最低120,最高达到480 波束。它的多接收器声纳系统设计可以提供高速成像,不会给ROV飞行速度带来限制。声呐产生的图像可以达到显示器分辨率,速度高于20帧/秒,具有成像和测量功能。

Delta-T 多波東剖面仪与传统的 Dual Head Seaking Profiler 相比,它能更直观立体地展现海管的在位状态。在海管悬跨调查作业中,使用 ROV 搭载 Delta-T 并结合高精度高度深度计,能精确量化海管与海床的相对位置关系,并能三维立体展示管线的在位状态,通过专业的数据后处理能得到精确的

海管悬跨数据。同时,还具有不限制 ROV 飞行速度的优势。

3 悬跨分布及变化特征

自 2008 年开始连续多年采用 ROV 技术对东方 1-1 海管路由地形变化较大的 KP30-KP90 深水部分进行了调查,从 2013 年以后基本上每年调查一次并进行超限悬跨的治理,目前已连续进行 6 次的 ROV 调查,具体见表 3。

表 3 ROV 调查情况表 Tab. 3 ROV survey activities for the pipeline

作业时间 调查范围

2013-06/07 KP 40-KP 90

2014-06/08 KP 30.5-KP 65

2015-04 KP 30-KP 90

2017-06/07 KP 40-KP 60

2017-11 KP 40-KP 78

2019-05/06 KP 30-KP 90

利用以上6年的调查数据对海管悬跨情况进行全面的分析对比,主要对相同区间内多年的悬跨数量、悬跨长度、平均最大悬跨高度和长度、悬跨最大高度、最长悬跨长度的特征和多年变化进行分析讨论。

根据 2019 年的调查结果, KP30-KP90 段海管悬跨段最高悬跨高度统计如图 4。按照悬跨发育规模(密集度、长度、高度)和变化情况,根据严重程度和风险等级,将悬跨最严重的区域划为红色区域,中等严重程度的部分划为黄色区域,基本没有悬跨的部分划为绿色区域。

经过前后6次调查,发现很多悬空从无到有,悬

跨呈逐年加长、变高趋势。有些连续悬跨间的支撑点被冲蚀消失后悬跨长度迅速增大。为了更好地同等条件下对比分析海管悬跨变化情况,本文将海管分成三段分别进行分析探讨: KP30-KP40, KP40-KP60 和 KP60-KP90。

3.1 KP30-KP40 管段悬跨特征

该段海管密集连续发育大量悬跨,平均悬跨最 大高度 0.6 m,平均悬跨长度达到 16.66 m,悬跨长度 集中在 20 m以下。悬跨数量和长度都在不断地增加 (如表 4),是悬跨较为严重的区域。

表 4 2014—2019 年悬跨统计分析表(KP30-KP40 段)

Tab. 4 Span characteristics and statistics derived from 2014-2019 survey data between KP30-KP40

时间/a	悬跨总	悬跨长	悬跨数		悬路	- 最长悬跨/m	是京县路/m			
ну јеј/а	长度/m	度比例	量(pcs)	>40 m	40~30 m	30~20 m	20~10 m	<10 m	- 取以心的/III	取问心巧/III
2014	4 446	44%	359	3	10	56	121	169	41.68	2.15
2015	5 309	53%	389	4	22	59	126	178	41.99	1.90
2019	6 498	65%	390	5	26	104	146	109	49.47	2.21

3.2 KP40-KP60 管段悬跨特征

在 KP40-KP60 之间总的悬跨长度、数量、占比情况如表 5。2013 年总悬跨长度超过 5 公里, 2019 年已经接近 9 公里(见图 5a),占比为 26%~44%。悬跨数量从 2013 年 310 个至 2019 年增至 521 个(如图 5b)。悬跨长度大部分集中在 10~30 m 之间,占

70%左右,其中 20~30 m 和 10~20 m 的数量基本相当(如图 5c)。超过 40 m 的超长悬跨约占 3%。长度超过 20 m 的悬跨约占 60%,在每年进行治理的情况下,每年的增幅约 15%(如图 5d),且每年以 10%的速度呈明显的逐年上升趋势。平均长度和高度也是逐步增大。

表 5 2013-2019 年悬跨统计分析表(KP40-KP60 段)

Tab. 5 Span characteristics and statistics derived from 2013—2019 survey data between KP40-KP60

时间	悬跨总长	悬跨总数	每公里悬	悬跨长度	重要悬跨数增加	平均长	平均最	最大长	最大最
미기미	度/m	量/pcs	跨数/pcs	比例	比例(>20 m)	度/m	高/m	度/m	高/m
2013-06	5 248	310	15.50	26%	_	16.93	0.63	48.60	1.90
2014-06	6 688	430	21.50	33%	15%	15.54	0.57	46.49	1.62
2015-04	7 729	457	22.85	39%	20%	16.91	0.69	47.38	1.86
2017-06	8 651	501	25.05	43%	14%	17.34	0.63	50.31	2.66
2017-11	8 655	546	27.30	43%	-4%	15.85	0.76	42.19	2.17
2019-05	8 874	521	26.05	44%	13%	19.30	0.71	51.76	2.44

其中在 KP40-KP51.75 之间,海管处于断断续续的悬跨状态,最深的悬跨在 KP46.057-KP46.072,2019 年悬跨最大悬空高度达到 2.44 m。最长的悬跨达到 51.76 m。该段是整条海管悬跨最严重、变化最大且最危险的管段。KP51.75-KP54.83 之间的 3 km地形变化较大,为进入沙波沙脊区前的一段沟谷区,海管为半掩埋状态,2013 年调查显示仅有 2 处悬空,直到 2019 年增加了 3 处,该段海管悬跨情况较好。

向陆地方向至 KP58.06 之间发育一些悬跨, 之后至 KP64.94 段几乎没有悬跨。

3.3 KP60-KP90 管段悬跨特征

该区间海管基本处于半掩埋状态, 仅在 KP65-KP72.36 之间发育一些微型的冲坑, 大部分长度小于 10 m, 没有大型及成片的悬空。有几处小段的海管处于掩埋状态。该管段悬跨风险较低。

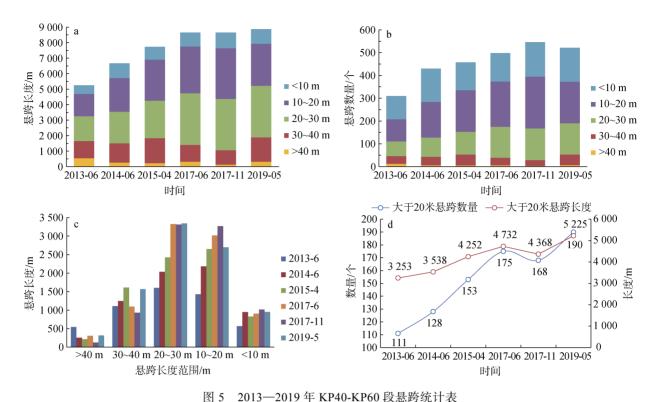


Fig. 5 Histograms and graphs of free spans derived from 2013—2019 survey data between KP40-KP60

注: a: 悬跨长度变化图; b: 悬跨数量变化图; c: 不同区间悬跨长度直方图; d: 大于 20 m 悬跨的数量和长度

4 悬跨原因分析和安全评估

管道的冲刷现象是由多因素造成的,涉及流体力学、土力学、泥沙动力学等学科的相关知识,到现在国际上没有成熟的理论和体系能够完全解释冲刷现象的机理^[10]。Choi 研究发现,可能引起海底管道悬空的因素有海底地形起伏和海底地形的改变,海底地形起伏是管道铺设之初就已经存在的问题,而海底地形的改变是指由于海底沙波移动或局部冲刷所引起的地形变化,两种因素引起的管道悬空对管道的危害和处理措施均存在很大差异,判断海底管道悬跨的成因,并区分两种因素的主次,对于海底管道的安全防护具有重要意义^[11]。依据管道周围海床的冲刷特征,可将冲刷现象分为管侧冲刷和管下冲刷两种类型,在海南岛西部岸外海域,海底地形改变是海管冲刷的主要因素,该两种冲刷现象分别是由潮流和台风造成的。

东方 1-1 海管沙波沙脊区海底地形复杂,沙波的移动和沙脊间冲刷沟槽都可以造成海底管线悬跨的出现,但是同时沙波的移动可以使得管线自行下沉,从悬跨机理和实测资料推断,海底管线逐渐被埋藏,表明该区的海底地形变化对管线的安全发挥积极作用^[5],沙波迁移对海管安全的影响已经成为次要因素。

而深水平坦区自管道建成以来,除了在初期悬 跨发育较少, 在 2006 年至今悬跨数量和规模与日俱 增。凸起于海底的管线会造成附近流场变化、局部地 形差异、沉积物差异, 甚至管线外形的差异, 均会在 局部形成有利于水流淘蚀管线周围沉积物的小流场, 进而形成冲蚀坑, 随后在管束流和微孔效应共同作 用下,管线下方流速增大,冲蚀坑的规模和深度持续 扩大[5]。深水平坦区处于相对稳定的弱淤积环境, 底 质以粘土和粉砂质黏土为主, 在管线建成后两侧出现 沉积物粗化和水深加大现象, 管线下发育大量冲蚀坑, 严重威胁着管线安全。现有研究认为这主要受常态下 强水动力和台风天气造成海底强扰动影响, 并且深海 平坦区泥沙补充不足, 加剧了海底悬跨的威胁。深水 平坦区底层最大流速可达 91.1 cm/s^[5, 12], 并基于前人 研究结果得出底床剪切应力范围为 0.2~1.9 N/m², 是 可以导致深水平坦区段的泥沙发生再悬浮的。常态 水动力既能导致管道自埋减缓管下冲刷, 又能为管 涌创造条件加速管下冲刷, 在 DF1-1 管道建成前期 (2006 年以前)以前者为主,而在后期以促进管下冲 刷为主(2006年之后,现阶段尤为如此),使得在台风 经过时积累足够的管涌所需条件,导致管下冲刷现 象,造成海管悬跨[2,13]。

2013—2019 年调查发现最大悬跨长度可达 51.76 m. 目超过 30 m 的悬跨段已接近十分之一, 并且呈增长 趋势, 这远远超过徐继尚等计算的极限海管悬跨长 度, 即常态水动力下极限悬跨长度为 30 m, 百年重 现期台风极限悬跨长度为 20 m^[2]。2013—2019 年间北 部湾临近海域热带风暴近 20 个, 其中强热带风暴接 近一半, 风速可达 28 m/s, 出现台风近 10 次, 其中 3 次 为超强台风(如海燕、威马逊和莎莉嘉), 最大风速可 达 52 m/s(数据来自深圳台风网)。参照美国矿业管理 局(MMS)台风风速及台风所致表层流速来统计[14], 2013—2019 年间导致的最大表层流速可达 2~3 m/s。 结合 Soulsby 经验公式计算近底流速: $U_c=(1/h)^{1/7}U_h$, 其中h为测流位置距地高度,U。为近底流速,U。为在 h 处的流速^[15], 计算的底层流速为 1.1~1.8~m/s, 对照 徐继尚等不同水动力条件与管道极限悬跨长度的关 系[2], 发现在低管道安全系数 1.7 的条件下本文计算 流速对应的极限跨长为30~40 m。这与实测数据较为 吻合, 表明现在深水区管道已经处于相对低的安全 状态下, 且实测中存在的极少部分大于 40 m 的悬跨 推断已经接近临界值、应当在今后进行重点治理。

管跨的出现改变了海底管道所承受的载荷形式和应力状态,当海流流经悬跨管道时,常伴随着周期性的漩涡发放,这种漩涡泄放现象会使悬跨管道在顺流方向及横流方向上发生振动,即涡激振动^[16]。涡流对管跨的作用力主要有举升力、拖曳力和惯性力。同时海流力和波浪力的交变载荷引起管跨的周期振动,是决定海底管道使用寿命、引发管道疲劳失效的主要原因。因此,对超限或者严重的悬跨进行定期治理显得尤为重要。

5 悬跨治理效果

对海底管道悬跨采取防护措施主要从四方面出发: (1) 增加海底土壤颗粒的抗冲刷能力; (2) 降低波浪、海流对海底管道的冲刷速度; (3) 减少海底管道悬空长度; (4) 增大海底管道适应冲刷的能力^[17]。

针对以上四个方面通常有以下几种治理方法: (1) 沙袋、钢筋笼、水泥灌浆、水下短桩等支撑管道; (2) 回填被掏空的海床; (3) 在管道上压载保护性沉床(混凝土连锁排); (4) 固定管道; (5) 促淤保护措施,如人工海草、人工网垫、阻流板等。也可采用复合方法来治理海管悬跨^[18]。

关于海底管线安全性维护的问题,目前国际上没有一种通用的方案可以解决全部问题,在不同的

海底管线路由区,需要结合前期的调查结果,针对不同的海底地形地貌、水动力条件、海床稳定性等,对不同的海底管线提出不同的治理和维护方案。

目前在中国海油采用比较多的方法主要是沙袋支撑和局部抛石填埋法。这两种方法的优点有:对材料要求低、施工简单、投资少、无需停产,并且保护范围较广。缺点是方法促淤作用有限,堆砌不好时材料可能受水动力影响流失,影响可靠性。该方法适用于悬空不太高(小于 1.5 m)的悬跨治理。

1) 沙袋支撑法

堆砌的沙包紧密地顶住悬跨海底管线的底部(如图 6、图 8)。沙包的填充材料使用水泥和沙子混合物,沙子和水泥按比例混合。该方法是最简单、也最节约开支的方法。但如果管段悬空太高,沙袋容易倒塌,不宜用该方法。



图 6 沙袋支撑法剖面示意图

Fig. 6 Schematic of free-span rectification by sand bagging

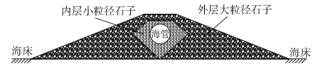


图 7 抛石填埋法剖面示意图

Fig. 7 Schematic of free-span rectification by gravel dumping





图 8 沙袋支撑和抛石填埋悬跨治理实例

Fig. 8 Photographs of actual free-span rectification results by sandbagging (left) and gravel dumping (right) methods

2) 抛石填埋法

采用不同尺寸的石子分装至特制袋中,外层为大粒径石子(稳定石堆),内层为小粒径石子(防渗与滑落支撑),粒径需要根据水动力参数进行设计计算,并确保下放时冲击力小于管道抗冲击强度^[19]。石子通过作业船舶吊机及ROV辅助操作释放至悬空海管

段(如图 7、图 8)。可以沿全部悬空段抛放,也可以在管线悬空段选择几个点进行抛放,形成砾石堆以保护管线。

从 2013 年开始, 我们利用 ROV 进行沙包支撑和 抛石填埋的方法对东方 1-1 海管多处风险较高的悬跨 进行了治理(如图 9), 主要集中在 KP44.5-KP51.75 间

的悬跨最严重管段。为了更好地跟踪这些治理点的效果和变化情况,在治理后每年对各治理点情况进行调查(表 6)。调查发现,2013—2018年共计60个沙袋治理点有9处失效和4处效果较差(近1/4),其他均有效支撑,而2016—2018年共计10处抛石处理点均有效,其中7处支撑长度增大,但覆盖厚度下降(图10)。

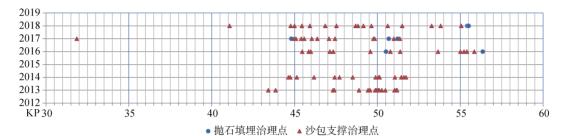


图 9 悬跨治理点分布图

Fig. 9 Locations of free-span rectifications

表 6 各治理点情况表

Fig. 6 Conditions of existing free-span rectifications

时间	位置	治理方式	数量	失效情况	变化趋势
2013-07	KP43.41-KP51.19	沙袋支撑	16	有 5 处失效, 4 处效果较差, 其余有效	部分治理点位置在悬跨起始点 附近,未起到较好效果
2014-07	KP44.63-KP51.72	沙袋支撑	14	有 3 处失效, 1 处单侧失效, 其余有效	6 处出现沙袋底部冲刷加剧,两侧悬空高度增大
2016-05	KP45.46-KP55.85	沙袋支撑	13	有效	侧总至同及垣入
2017-06	KP31.86-KP51.36	沙袋支撑	13	有效	N/A
2018-06	KP41.08-KP55.06	沙袋支撑	16	有效	N/A
2016-05	KP50.519-KP56.356	抛石填埋	2	有效	支撑长度明显扩大,两侧悬跨高 度减小,覆盖厚度下降
2017-06	KP44.805, KP50.685, KP51.222	抛石填埋	3	有效	淤积范围略微缩少
2018-06	KP55.4-KP 55.5	抛石填埋	5	有效	支撑长度略有增加,两侧悬跨高 度减小,覆盖厚度下降

根据治理效果可初步认为抛石治理优于沙袋治理。但在治理作业效率方面,沙袋支撑法时效比抛石支撑法高出很多,在施工成本上沙袋支撑法有较大优势。沙袋和抛石均能有效抑制管线两侧漩涡和管涌的产生,减少海底泥沙的侵蚀,但由于二者体积差异,海底泥沙缓慢侵蚀过程中,沙袋无法及时抑制附近泥沙的侵蚀出现的凹坑,直至达到临界深度导致沙袋堆积体倒塌,造成效果变差甚至二次悬跨,并且现今海底管道悬跨高度不断增大,也容易造成沙袋容易倒塌;而抛石可以及时抑制周围泥沙侵蚀,当侵蚀造成凹坑出现,石子即会填充凹坑阻止进一步侵蚀,实际观测中覆盖厚度下降、支撑长度增加便

是由此造成的。建议在沙袋治理法失效的地方综合 成本考虑采用沙袋支撑结合仿生水草覆盖法或者抛 石支撑法等方法。

6 结论与建议

本文根据海南东方 1-1 海底管线的六次 ROV 实际调查资料对比,分析了该海管 KP30-KP90 之间的悬跨分布和变化特征,以及治理效果情况:

(1) 利用 ROV 海管调查技术进行海底管道调查数据连续性好,能及时地跟踪和分析海管悬跨变化,建议持续积累可对比性的 ROV 调查数据以进行科学评估和安全防护指导。

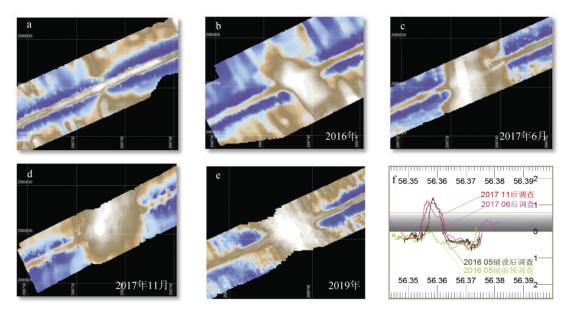


图 10 KP56.356 处抛石治理变化情况

Fig. 10 Changes in the seabed topography after free-span rectification at KP 56.356

注: a: 抛石前调查(2016年); b: 抛石后调查(2016年); c: 抛石后调查(2017年6月); d: 抛石后调查(2017年11月); e: 抛石后调查(2019年); f: 治理点地形变化剖面图

- (2) 常态强水动力前期利于管道下沉掩埋,后期管涌发育积累,受频繁台风影响,底层流速增强可达 1.8 m/s,造成管下冲刷现象,造成海管悬跨。且深海平坦区泥沙补充不足,加剧了海底悬跨的威胁。而海底沙波对海管安全的影响已经成为次要因素,海管沙波沙脊区悬跨风险较小。
- (3) 对东方 1-1 海底管道的 ROV 调查结果显示, 已有数百个管道悬跨, 严重威胁着管道的安全运营。 在 KP30-KP60 之间海管悬跨数量、平均长度和高度 均不断扩加, 最严重的地方集中在 KP44-KP51.75 管 段。需要继续密切调查, 及时掌握悬跨变化情况并评 估海管安全状态。
- (4) 通过跟踪调查管道悬跨治理效果发现,使 用抛石填埋法治理效果要优于沙袋支撑法,这主要 是因为石子体积小及时滚动覆盖海底凹坑从而抑制 底床侵蚀,但成本也相对增加。目前治理主要集中在 KP44.5-KP55.5 段之间,在 KP30-KP44.5 段治理较少, 需要加强。

参考文献:

[1] 金伟良, 张恩勇, 邵建文, 等. 海底管道失效原因分析及其对策[J]. 科技通报, 2004, 20(6): 529-533. Jin Weiliang, Zhang Enyong, Shao Jianwen, et al. Cause analysis and countermeasure for submarine pipeline

- failure[J]. Bulletin of Science and Technology, 2004, 20(6): 529-533.
- [2] 徐继尚. 黏性海床管道冲刷、自埋和安全评估[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.

 Xu Jishang. Local scour, self-bury and safety assessment of a submarine pipeline in cohesive soils[D].
- [3] 王红红, 刘国恒. 中国海油海底管道事故统计及分析[J]. 中国海上油气, 2017, 29(5): 157-160. Wang Honghong, Liu Guoheng. Statistics and analysis of subsea pipeline accidents of CNOOC[J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(5): 157-160.

Qingdao: Ocean University of China, 2008.

- [4] 奉仰崇. 面对北部湾的思考: 关于环北部湾海岸的 开发与保护[J]. 海洋开发与管理, 1999, 16(2): 14-17.
- [5] 高伟. 海南东方岸外陆架底形变化特征及对海底管线状态的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008. Gao Wei. The subsea bed forms evolution characteristic on continental shelf and the effect to the seafloor pipeline condition off Dongfang, Hainan Island[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008.
- [6] 刘乐军, 李培英, 杜军, 等. 莺歌海油气资源开发区 工程地质和灾害地质特征[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(4): 455-464. Liu Lejun, Li Peiying, Du Jun, et al. Characteristics of
 - Liu Lejun, Li Peiying, Du Jun, et al. Characteristics of marine engineering geology and hazardous geology in the Yinggehai oil and gas resource development area[J]. Advances in Marine Science. 2004, 22(4): 455-464.
- [7] 阎军, 范奉鑫, 陈长安, 等. 东方 1-1 气田海底输气管

研究报告 REPORTS

- 线检测调查与评价[R]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2006.
- Yan Jun, Fan Fengxin, Chen Chang'an, et al. The investigation and evaluation of subsea gas pipeline in Dongfang 1-1 gas field[R]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [8] 马小川. 海南岛西南海域海底沙波沙脊形成演化及 其工程意义[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2013. Ma Xiaochuan. Formation, evolution and engineering significance of submarine sand waves and sand ridges, southeast of Hainan Island[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [9] 黄明泉. 水下机器人 ROV 在海底管线检测中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2012, 28(2): 52-57.

 Huang Mingquan. The application of remotely operated vehicle in subsea pipeline inspection[J]. Marine Geology Frontiers, 2012, 28(2): 52-57.
- [10] 韩峰, 段梦兰, 王德国, 等. 春晓气田群海底管线冲刷机理分析及其影响因素研究[C]//第十五届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 北京: 海洋出版社, 2011: 320-324.
- [11] Choi H S. Free spanning analysis of offshore pipelines[J]. Journal of Ocean Engineering, 2000, 28(10): 1325-1338.
- [12] 王伟伟, 范奉鑫, 李成钢, 等. 海南岛西南海底沙波 活动及底床冲淤变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(4): 23-28.
 - Wang Weiwei, Fan Fengxin, Li Chenggang, et al. Activity of submarine sand waves and seafloor erosion and deposition in the sea area to the west of Hainan Island[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2007, 27(4): 23-28.
- [13] 徐继尚,李广雪,曹立华,等.海底管道综合探测技术及东方 1-1 管道不稳定因素[J].海洋地质与第四纪地质,2009,29(5):43-50.
 - Xu Jishang, Li Guangxue, Cao Lihua, et al. Integrated

- submarine pipeline investigation techniques and DF 1-1 pipeline unsafety factor analysis[J]. Marine Geology & Quaternary Geology. 2009, 29(5): 43-50.
- [14] Vince C. Hindcast data on winds, waves and currents in northern Gulf of Mexico in hurricanes Katrina and Rita[R]. USA: Minerals Management Service, 2006, 1-26.
- [15] Soulsby R. Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications[M]. London: Thomas Telford Publications, 1997.
- [16] 安振武,穆顷,张洪才. 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, Zhang Hongcai. The vibration characteristics and allowable span length of free span submarine pipeline[J]. Ship and Ocean Engineering, 2016, 45(1): 137-141.
- [17] 刘锦昆. 浅海海底管道悬空段防护技术研究及应用[D]. 青岛: 中国石油大学, 2014.
 Liu Jinkun. Research and application on protection technology of shallow water subsea span pipeline[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.
- [18] 庄丽华, 阎军, 李成钢. 海底管道悬空防护与治理措施浅谈[J]. 海洋科学, 2016, 40(11): 65-73.

 Zhuang Lihua, Yan Jun, Li Chenggang. Discussion on measures taken to protect submarine pipelines from hanging[J]. Marine Sciences, 2016, 40(11): 65-73.
- [19] 孙青, 余承龙, 冯晓伟. 局部抛石用于深水海底管道悬跨治理研究与应用[J]. 石油工程建设, 2016, 42(2): 14-19. Sun Qing, Yu Chenglong, Feng Xiaowei. Research and application of local rock dumping for treating free span of deepwater pipeline[J]. Petroleum Engineering Construction, 2016, 42(2): 14-19.
- [20] Jun Y L, Jasmin M, Remo C, et al. Predicting scour beneath subsea pipelines from existing small free span depths under steady currents[J]. Journal of Ocean Engineering and Science, 2017, 2(2): 61-75.

Analysis of DF1-1 subsea pipeline free-span distribution characteristics and rectification effects

HUANG Ming-quan^{1, 2, 3}, XU Jing-ping², LUAN Zhen-dong⁴, LIU Meng², LI Xue-cheng³, LIU Bin³

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China; 3. China Offshore Fugro GeoSolutions (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518067, China; 4. Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Jun. 17, 2020

Key words: subsea pipeline; ROV; freespan; rectification

Abstract: Subsea pipelines play an essential role in the safety of offshore oil and gas fields. Remotely operated vehicle (ROV) surveys of the Dongfang 1-1 subsea pipeline have been routinely conducted for more than six years. Based on the several years ROV survey data, the distribution characteristics and changes in the pipeline free spans were analyzed, and pipeline was partitioned according to the severity and risk levels of its free spans. The analysis results show that in deep water areas where the influence of hydrodynamic forces is greatest, free spans are densely distributed and there is an annual increasing trend of high safety risk. The mechanism and maximum length of the free span are analyzed and calculated. Based on the ROV survey data, we also introduce the principles, advantages, and disadvantages of free-span rectification by sandbagging and partial gravel dumping and analyze their free-span correction and rectification effects. The results indicate that the effect of partial gravel dumping is better than that of sandbagging.

(本文编辑: 杨 悦)