

# 地貌形态对海底管线稳定性影响的研究

栾振东, 范奉鑫, 李成钢, 陈长安, 张捷扬

(中国科学院 海洋地质与环境重点实验室, 山东 青岛 266071)

**摘要:**以东方 1-1 平台海底管线路由区为例, 多次对该路由区多波束测深、旁扫声纳、浅地层剖面、土质、海流及海底过程的原位监测调查数据和收集的波浪、海流等相关资料进行分析, 得出, 在水动力条件的作用下, 海底会产生沉积物的侵蚀、搬运和沉积等过程, 这些过程对海底地貌有重要的改造作用, 会对管线稳定性具有重大影响。提出管线铺设需预先了解水下环境的动力条件的规律, 识别沿拟定管线路由区可能存在的海床运动和波流冲刷的地质灾害, 找到地貌形态对海底管线稳定性影响的原因。进而提出根据不同情况的解决对策, 有效地减少地貌形态对海底管线稳定性影响。

**关键词:**海底管线; 海洋地质灾害; 海底地形; 海底地貌

**中图分类号:** P641.7   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1000-3096(2007)12-0053-06

海底管线作为一种输送工具, 具有连续、快捷、输送量大等诸多优点, 已成为海上油气田开发中油气传输的主要方式<sup>[1]</sup>。在海底管线应用迅猛发展的过程中, 海底管线的安全问题始终为人们所关注<sup>[2]</sup>。过去几十年中, 在世界范围内, 由于对管线路由区的海底原始地质地貌了解不清, 发生过大量管线损毁事件。海底管线一旦出现问题, 带来的经济损失更是无法估计, 因此海底管线的稳定性问题引起了世界各国的普遍关注, 许多学者都开始致力于海底管线工程的研究<sup>[3,4]</sup>。

沿琼西南东方 1-1 平台海底管线路由区, 可能存在各种各样的自然环境、人为灾害(可能受到波浪、海流、潮汐、腐蚀等作用, 又可能面临船锚、平台或船舶掉落物、渔网等撞击拖挂危险), 这些自然环境和人为灾害对海底管线具有潜在危害, 会给海底管线带来毁灭性破坏<sup>[5,6]</sup>。作者以东方 1-1 平台海底管线路由区为例, 着重论述了对于海底管线稳定性有灾害作用的沉积过程和地貌特征, 分析了通过水动力条件的作用, 海底会产生沉积物的侵蚀、搬运和沉积等过程, 这些过程对海底地貌有重要的改造作用, 会对管线稳定性具有重大影响。提出管线铺设需预先了解水下环境的动力条件的规律, 识别沿拟定管线路由区可能存在的海床运动和波流冲刷的地质灾害, 找到地貌形态对海底管线稳定性影响的原因。针对不同情况提出解决对策, 探讨了以有效地减轻地貌形态对海底管线稳定性影响的工程施工方法。

## 1 地貌形态对海底管线稳定性影响的原因分析

正在演化的海底地貌形态, 不仅取决于局部的地质背景和底质特性, 还受到上覆水体动力学因素的强烈影响。水下环境的动力条件是改造海底地貌非常重要的因素, 因为在水动力条件作用下, 海底会产生沉积物的侵蚀、搬运和沉积等过程。这些海底地貌形态的演化过程对管线稳定性具有重大影响。

引起海底地貌变化、从而对管线稳定性形成潜在危害的主要沉积过程和地貌特征可归结为三类: (1) 斜坡崩塌; (2) 底形加积与迁移; (3) 海底侵蚀。

近年来随着海洋石油开发向远海发展, 长输海底管线数量不断增加。长输海底管线较短输海底管线在理论上存在更大的失效概率, 只有采取积极有效的预防措施, 才能保证海底管线在役期间的安全运行<sup>[7]</sup>。了解海底管线失效原因对防止海底管线失效有重要意义, 只有对海底管线失效原因有充分的认识

收稿日期: 2007-02-14; 修回日期: 2007-09-08

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-212); 中国科学院重大科学问题研究项目(H42032602)  
作者简介: 栾振东(1976-), 男, 山东青岛人, 助理研究员, 硕士, 从事海洋地质灾害与防护研究, 电话: 0532-82898530, E-mail: luan @ms. qdio. ac. cn

才有可能找到解决海底管线失效问题的有效方法。

东方 1-1 平台路由区位于南海北部湾内陆架近岸带,海底主要为钙质沙沉积,该区为中国著名的强潮流区,沉积速率较低,伴有侵蚀现象发生,海底地貌类型为内陆架侵蚀平原,总体呈自东向西倾斜的趋势(图 1)。全覆盖的多波束测深及旁扫声纳资料显示,管线路由区广阔的海底上分布着大小不等的沙波沙脊地貌,这是本海区最主要的地貌特征。沙波沙脊之间为相对平坦的海底区,潮流沙脊脊线为南北

走向,这与调查区的主潮流方向相一致,沙波波峰走向与沙脊脊线走向垂直,从微观上分析,除裸露的海底管线外,测区海底除了成片分布的沙波之外也有零星沙波波体分布,个别地点还有海底锚拖痕和海底人工抛弃物等零星出现的一些人工地貌;该路由区内既有自然因素存在,也有人工因素存在。但所有人工地貌体目前不会对该海底管线的安全造成危害。

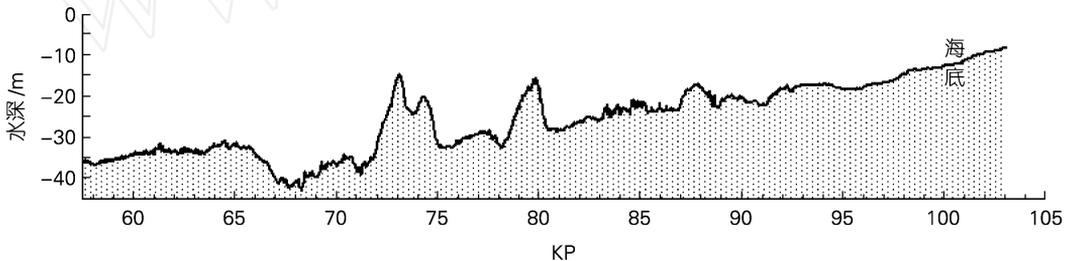


图 1 沿东方 1-1 海底管线海底地形剖面

Fig. 1 Topographic profile along DF1-1 pipeline route

通过分析调查数据发现,管线路由区的 40 m 水深以浅水域,存在活动的沙波、沙脊、冲刷沟垄,海底表层沉淀物以松散砂为主,部分地区为黏性土。20 ~ 40 m 水深带地形起伏变化大。10 m 水深以浅区域,地形平均坡度 2.4‰。在 40 ~ 70 m 深水区域,海底表层沉积物以软黏土为主,地形平均坡度 0.5‰。多次调查数据显示,海底水动力对管线的赋存状态影响最大,活动砂体的冲淤变化受大风浪及底流控制。在沙波沙脊区一次大的风暴激流过程,可以造成沙波长距离的移动,也可以夷平小规模沙波,使管线震动下沉、悬空迁移、变小甚至消失,但也可能形成新的悬空段;在沙波沙脊不发育的区段,特别是近岸浅水区,水动力冲蚀软弱海底形成冲刷沟槽,也造成管线产生新的悬空段。从多波束记录数据处理结果看,测区范围内海底局部起伏明显,这是因本区潮流活动强烈,造成潮流沙脊和海底沙波发育而形成的特殊海底地形,其中 KP65 ~ KP95 之间有南北向谷脊相间地形,为潮流沙脊发育区,潮流沙脊形成明显的正地形区,而沙脊之间为谷状负地形区<sup>[4]</sup>。

海底沙波常见于潮流作用较强的内陆架海域,是一种脊线与潮流流向垂直的微地貌形态。海底沙波可以在沉积物充足、流速达到 0.6 ~ 1.0 m/s 的海底形成。海洋地质学界曾使用过若干个术语来描述这类形态,例如大沙波(波长 > 30 m)、小沙波(波长 6 ~ 30 m)、大波痕(波长 0.6 ~ 6 m)等。作者为了简便起

见,将这类地貌统一称之为海底沙波。海底沙波是调查区内最显著的自然地貌特征,从多波束和旁扫声纳调查资料看,沙波广泛分布于 KP58.75 ~ KP93.5 之间,这表明该段海域潮流流速大,动力活动强烈。相应水深范围为 36 ~ 17.5 m。沙波分布区之间,也伴随着部分平坦海地区。在不同的路段,沙波的具体表现形式又有所不同。沙波波峰线呈近东西走向,局部地区又有所变化。有的成片分布,有的零星出现,有的沙波分布非常有规律,而有的沙波规律性不明显。KP58.75 ~ KP63.5 之间的沙波分布非常有规律,为一列近东西走向,平行排列的波峰、波谷相间的地貌形态,沙波波长为数 10 m 至 150 m 之间,波高约 1 ~ 2 m。该海域管线沿沙波脊线走向延伸,从调查结果看,管线大部分位于波谷之中,这种管线走向对管线安全是有利的。但是,该段沙波密集,在强潮流或风暴、台风等引起的强海流条件下,海底沙波极易发生流动,有可能造成管线反复埋藏、裸露和悬空,从而危及管线安全。另外, KP78 ~ KP80 段也存在平行分布的沙波区,与 KP58.75 ~ KP63.5 之间的沙波相比,沙波密度要小一些,但波长更长、波高更高。KP67 ~ KP72、KP83 ~ KP85.5、KP87 ~ KP89 三段管线路由区沙波大面积成片出现,其形状不规则,波长、波高变化较大,波高最大可达数米。由于上述三段沙波分布不够规则,其变化也会相应更加复杂,同时它们又都位于潮流沙脊分布区,是对海管严重的威胁。

还有一些沙波零星存在于海底,如 KP64 ~ KP65, KP73.5 ~ KP74.25, KP76 ~ KP78, KP81.5 ~ KP82, KP85 ~ KP87 以及 KP91 ~ KP93 之间,这些路段大型海底沙波零星地分布于海底之上,沙波个体波高、波长均较大,但横向延伸距离较短。这些沙波还有个共同特点,即其形状大都为较规则的新月形,类似于陆地沙漠中的新月形沙丘。

中国科学院海洋研究所曾经根据海底沙波迁移速度和空间平均的沉积物搬运率及沙波形态的关系计算了本海域的沙波迁移速率,结果显示管线经过区的沙波迁移速率为 1 ~ 50 m/a,相应的迁移一个波长需要的时间为 0.4 ~ 7 a。该结果表明该海域海底沙波活动强烈,这对管线安全非常不利。

在一定的流场和沉积物供应条件下,潮流沙脊可与海底沙波相伴生或单独生成。此类地貌形态的规模大于海底沙波,其高度可达 20 m 以上,两脊之间相距 10 km 左右。因潮流沙脊的脊线几乎平行于潮流流向,故称之为纵向底形。潮流沙脊形成的流速

条件为 0.7 ~ 1.3 m/s<sup>[8]</sup>。海底沙波和潮流沙脊在空间分布上常呈现重复性,即可以形成一系列的沙波或沙脊。据沉积动力学研究的初步结果,这种周期性的分布与潮流流场特征(如潮流长短轴之比、主流流速、主流不稳定性等)和海底沉积物平面分布的非均匀性有关。海底沙波与潮流沙脊的存在是海底处于活动和演变状态的标志,往往给海洋工程带来一系列的问题<sup>[9]</sup>。

本次调查的管线路由区穿越大型海底潮流沙脊区,从图 1 沿管线经过海底绘制的地形剖面图可以看出 KP65 ~ KP95 之间,是一段脊谷相间的地貌区,这是中国著名的潮流沙脊分布区之一。这些潮流沙脊大小不一,起伏幅度从几米到二十米之间,其中 KP68 ~ KP75 之间的潮流沙脊与潮流冲刷槽之间高度差达到 25 m(图 2)。潮流沙脊上普遍有面积沙波存在,甚至沙脊之间的潮流冲刷槽中也充满了大量沙波。

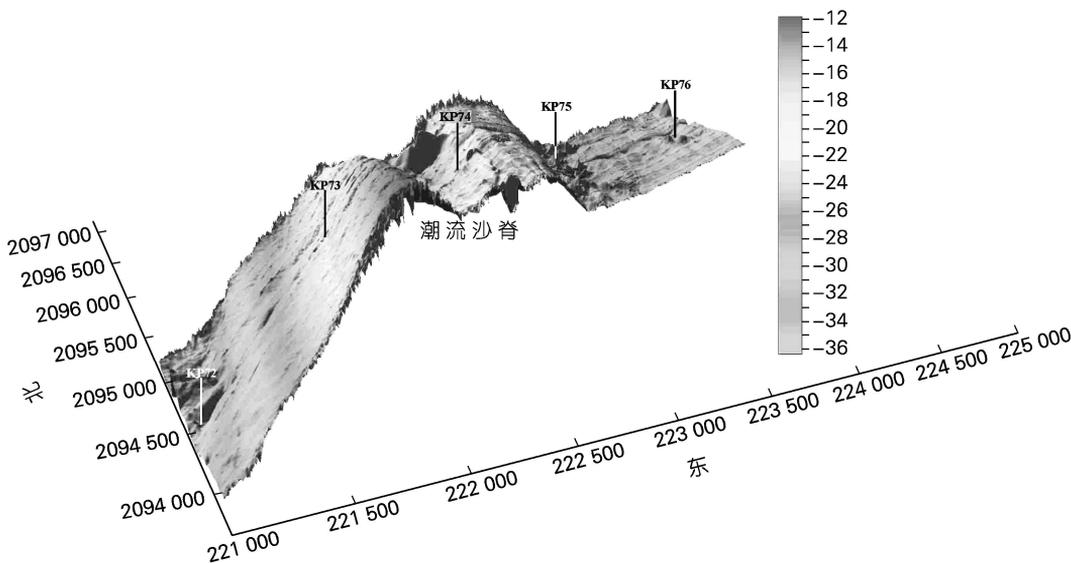


图 2 重点区域三维地形图

Fig. 2 3-D topographic map of the key area

根据 1996 年中国科学院海洋研究所对该海域进行的沉积动力学研究可知,该区潮流沙脊虽然发育,但迁移速度缓慢,因此潮流沙脊本身不会对海底管线构成严重危害,但是潮流沙脊与潮流冲刷槽海底上的大量沙波在强海流的作用下变化迅速,从而给海底构筑物带来危害,沙波的横向迁移会造成以海底为依托的海底管线的悬空,如果处理不及时会有致命的破坏作用。

本区平坦海底主要有两处(图 3),分别位于管线调查区的东西两端。一处是 KP95 以浅的近岸段,一处是 KP58.75 以深的海域。此外沙波沙脊之间也分布有部分面积较小的平坦海底。在平坦海底区,海底管线往往直接平躺于海底表面之上,既没有被掩埋,也很少出现悬空的情况,说明海底平坦区海底冲刷和沉积速率都较小,这种路段对海底管线安全是有利的。

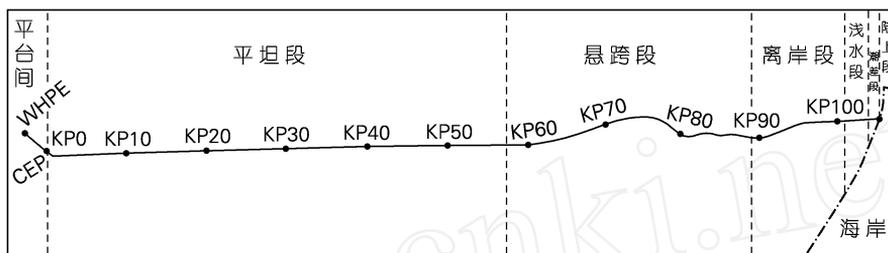


图3 东方 1-1 管线示意

Fig. 3 Sketch map of DF1-1 pipeline

从海底管线仪剖面图和回声测深剖面图上发现,在出露于海底的管线南侧,多处存在一条深浅不一的侵蚀浅沟,因侵蚀浅沟很浅(基本在 1 m 以内),从旁扫声纳剖面上不易分辨出来,但在旁扫声纳图像记录上,管线北侧形成的阴影普遍大于管线南侧,这种

现象间接证明了干线两侧埋深不一致,管线西南侧出露程度普遍强于东北侧,说明了西南侧可能存在海沟。另外,管线仪剖面上较清晰地反映了管线南侧多处侵蚀沟(图 4)的存在。这种侵蚀浅沟的存在会造成管线的悬空,因此也应该引起重视。

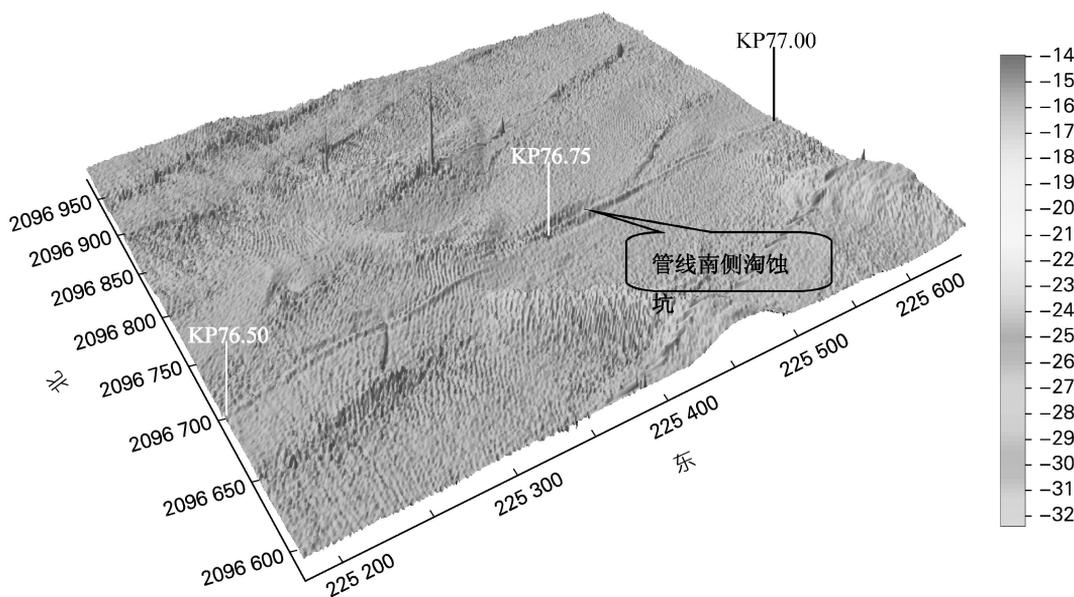


图4 侵蚀沟示意

Fig. 4 Scouring ditch along the pipeline

在旁扫声纳图像上表现为零星出现的强反射物体。其数量较少,尺寸也较小,这些物体可能是生产活动中遗落于水底的金属物件。这些海底抛弃物不会对管线构成危害。这次调查发现的抛弃物出现点比过去调查时发现得要少,可能以前发现的部分抛弃物已经被海流冲走或已经被海底泥沙掩埋。这种现象不会对管线构成任何危害。

本次调查中,多波束调查完成之后,遭遇了调查海域 33 年来最严重的台风过程,这无疑对海底管线的埋藏状态造成了很大的影响。分析一个台风周期前后的调查资料结果发现海底地貌发生了一定程度

的变化。其中海底管线的悬空情况较台风经过之前明显加剧,台风袭击前多波束调查资料显示,海底管线悬空情况并不严重,台风袭击后的管线仪剖面测量资料结果显示,海底管线有 50 余处发生悬空。综合调查资料分析,发现管线悬空情况几乎全部出现在沙波分布区,尤其是当管线穿越相邻波峰时更容易造成管线悬空。海底管线埋藏和悬空情况均发生于海底沙波发育区,这是海底沙波的活动性所决定的。

迁移中的沙丘会使海底地貌快速演化,对于穿过活动沙丘区的管线存在的潜在危险有:(1)造成海底管线悬空,其跨距长度取决于沙丘波长;(2)沙丘背

流面的强烈湍动造成管线振动;(3)沙丘塌陷。通过对 Messina 海峡边缘露出地表的古沙丘的沉积学研究,已证实了这个过程的存在,它与目前该海峡正在迁移的沙丘很类似。沙丘的塌陷可由地震触发,并产生块体流,如液化流和/或浊流。该过程也已得到了证实。1908 年 Messina 海峡发生地震之后,该区发生了电缆断裂事件。电缆断裂发生在沙丘区,而不是基岩区。

## 2 减少地貌形态对海底管线稳定性影响的对策

开展管线路由调查工作,主要的调查项目有:多波束测深/地形资料的采集(海底剖面)、旁扫声纳(海底绘图)、浅地层剖面仪(海底埋藏特征)、土质调查,为识别沿拟定管线路由区可能存在的海床运动和波浪冲刷的地质灾害,必须收集波浪、海面和海面以下的海流等一些相关资料。

多波束测深为近年来发展起来的,用于测量水深和获取计划管线路由的径向和纵向深度剖面。与以往所用单波束回声测深相比,具有全覆盖、高效率、高精度等特点,目前已成为管线路由调查中必不可少的手段之一。旁扫声纳仪从位于海底之上的换能器中发射出宽带的超声脉冲信号,这些脉冲从海底之上的物体或沉降/加积结构上反射回来,反射信号被同一个换能器接收并连续记录在调查船上的图像记录纸上。通过研究反射信号的强度和记录在图纸上的声学图像,就可以从地质/地貌学角度评估声纳反射,并得到关于凹陷、障碍物、岩石露头、沙波和泥流等特征的信息。依赖于连续反射剖面技术的浅地层剖面仪可以给出关于海底以下的地质和构成的资料。拖拽的换能器发射的声学信号碰到声学界面,一部分信号就会反射回来,并被水听器探测到。剖面中出现的大量的声学反射界面,可说明沉积物地质学性质的变化,这种变化通过声学速度变化表现出来<sup>[1]</sup>。于是,通过与野外取得的土柱样品相对比,就可以将海底反射界面之间的沉积物类型和土力学性质进行评估。沉积物取样的目的是弄清管线路由区的沉积物性质和确定土质稳定性,上部地层承载力,周期性波浪荷载引起的土壤强度衰减、海底对管线运动和荷载的阻力。通常用于沉积物研究的设备和方法包括:表层取样器(抓斗取样器、抓泥取样器等)、柱状取样器(重力柱状取样器、活塞重力取样器、钻探取样器、振动柱状取样器等)、贯入度仪等。一般管线保护研究中所需了解的沉积物性质包括:土壤分类和粒度分布、黏性(Atterberg 极限)、渗透性、质量密度、湿度、未扰动(黏土质土)和扰动(扰动土)剪切强度(灵敏度)。在海底沉积物和海底地貌特征调查研究中,水下闭合回路电视系统(CCTV)检测和由地貌学家做直接的现场观测(载人潜水器/一种球型潜水系统)是极为重要的,尤其对于识别侵蚀和加积特征

以及识别露头和大漂砾,更要做这类观测。近年来发展起来的海底过程的原位监测技术为我们提供了一种有效的研究手段。

为了将地貌形态对海底管线稳定性影响的潜在危险降低到最低程度,首先要在调查中识别出环境灾害,然后采取相应措施来保护管线不受这些灾害的危害<sup>[9]</sup>。保护方法有在管线之下的海底进行挖壕掩埋、锚固管线、加厚混凝土护壁、安装管线支撑、安装负荷垫/保护垫、倾放砾石、加固管线等。

目前国际上处理管线裸露问题的常用方法有以下几种(包括处理悬空管线的方法):(1)沙袋。可以使用沙袋支撑悬空的管线。在 50 m 以内的水深范围内,沙袋法是最简单、最经济的方法。但在北海油田使用的经验表明,传统的沙袋,对于预防管线机械损伤,其保护效果有限。而在海湾沿海地区使用沙/水泥的混合物来代替沙,取得了很好的效果。(2)灌浆(支撑)。此方法要由潜水员来完成。用可变形的聚丙烯材料制成一个个分隔的袋子,潜水员将之固定在管线下,从海面的工作船上通过连接管向袋子内注入水泥浆,使袋子涨大,直到抵达管线,从而起到支撑作用。(3)自升式支架(机械支撑)。一种动态支撑方法,可以降低管线悬空段的长度。利用可伸缩的支腿,可使该系统适合高低不平的海底。系统具有液压起重器和压缩空气圆桶,达到支持管线的目的,使管线具有最佳结构和应力状态。(4)抛放砾石(回填)。广泛应用于处理管线悬空问题。可以沿全部悬空段抛放,也可以在管线悬空段选择几个点抛放砾石,形成砾石堆以保护管线。砾石回填也可以同管线钢质支架联合使用。工程上回填的一个重要因素是确定正确的混合物和回填材料的粒度。必须保证在可能出现的各种海况条件下,回填材料不会发生位移。(5)灌浆(保护)。用于灌浆支持的纤维袋也可以制作成鞍囊,将其放在管线之上,达到保护管线的目的。(6)沥青沉床。在较深的水中,更适合用沥青沉床来保护管线暴露段。如果悬空段较长而悬空高度较低,则在管线可承受的应力范围内,利用沥青沉床给管线加压力,使之贴近海底。沥青沉床也可以与其他方法一起使用。(7)混凝土沉床。大量钢筋混凝土柱通过聚丙烯材料连接起来,构成混凝土沉床。这种方法特别适用于管线的补救性处理(修复加重护壁、机械保护、管线加固等)和预防侵蚀。(8)混凝土鞍。可代替沉床给管线提供重力护壁,并保护管线免受局部机械损伤。这些混凝土鞍适于修复加重护壁和防止局部侵蚀。混凝土鞍方法可给管线提供良好的机械保护;潜水员或遥控设备可以很容易地进行安装。(9)锚固系统。在管线的关键地区,例如登陆点附近或靠近平台处,有必要将管线锚固于海底,以消除管线的横向和纵向移动。(10)人工海草垫。本方法用于克服抛放砾石和使用沉床这两种最常用的侵蚀保护技术的不足之处。抛放砾石,在一定条件下,

因石头发生沉降而需要进一步的维护和控制;水下沉床边缘处仍会发生侵蚀,并造成缓慢沉降,从而要潜水员或遥控设备进行处理。本方法的依据是,借助海草,可以将沙丘和流沙固定下来。按照此原理,在海底发生移动的地方,将人造海草缝合到沉床之上,这样可降低管线附近局部流速和湍流强度,从而不但减弱了侵蚀,也使得沙在人工海草间沉积下来,最终可形成一条管线的保护堤。

### 3 结论

通过东方 1-1 平台海底管线路由区的调查资料着重论述了对于海底管线稳定性有灾害作用的沉积过程和地貌特征,分析了通过水动力条件的作用,海底会产生沉积物的侵蚀、搬运和沉积等过程,这些过程对海底地貌有重要的改造作用,会对管线稳定性具有重大影响。提出管线铺设需预先了解水下环境的动力条件的规律,识别沿拟定管线路由区可能存在的海床运动和波流冲刷的地质灾害,找到地貌形态对海底管线稳定性影响的原因。针对不同情况提出解决对策,探讨了以有效地减轻地貌形态对海底管线稳定性影响的工程施工方法。不同的方法,适用于不同的情况。实际上,许多情况下必须几种方法联合使用,才能有效地减少地貌形态对海底管线稳定性影响。

### 参考文献:

- [1] 金伟良, 张恩勇, 邵剑文. 海底管道失效原因及其对策[J]. 科技通报, 2004, 20(6): 529-531.
- [2] Choi H S. Free spanning analysis of offshore pipelines [J]. *Ocean Engineering*, 2001, 28: 1 325-1 338.
- [3] Palmer A C, King R A. Subsea pipeline engineering [M]. Tulsa, Okla: Penn Well, 2004.
- [4] Paton M, Mayer L. Interactive 3D tools for pipeline route planning [A]. OCEANS' 97 MTS/ IEEE . OCEANS97 MTS/ IEEE Conference Proceedings [C]. USA: MTS/ IEEE, 1997.
- [5] 中国科学院海洋研究所. 茂名 30 万吨级单点系泊码头海底管线检测与评价(1~4 次)资料解释报告[R]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2006.
- [6] 中国科学院海洋研究所. 东方 1-1 海底管线检测与评价资料解释报告[R]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2005.
- [7] 任世炎. 水动力条件分析在海洋工程勘察中的应用[J]. 中国造船, 2005, 4: 6/z1.
- [8] Michael Z L, Wright L D, Carl L A. Predicting ripple roughness and sand resuspension under combined flows in a shoreface environment [J]. *Marine Geology*, 1996, 130(1-2): 139-161.
- [9] 孟凡生, 徐爱民, 李军, 等. 滩海海底管线悬空问题治理对策[J]. 中国海洋平台, 2006, 21(1): 52-55.

## The effect of seabed features on the stability of offshore pipeline

LUAN Zhen-dong, FAN Feng-xin, LI Cheng-gang, CHEN Chang-an, ZHANG Jie-yang

(Key Laboratory of Marine Geology and Environment, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Received: Feb. 14, 2007

Key words: offshore pipeline; marine geohazard; submarine terrain; submarine geomorphology

**Abstract:** In this paper taking the DF1-1 Gas Field submarine pipeline route as an example, based on the multi-beam sounding, side scan sonar and Sub-bottom profile surveys, seabed sediment analysis, current measurement and in-situ monitoring result of seabed process, together with the collected data including wave and current, the scouring, transportation and sedimentation processes of seabed sediment under hydrodynamic conditions along the DF1-1 pipeline route are discussed in this paper. These processes can rebuild seabed geomorphology greatly and have an important influence on pipeline stability as a result. Based on the above analysis, it is strongly recommended that before pipeline laying, submarine hydrodynamic pattern along the pipeline route must be studied and seabed features affecting pipeline stability should be identified. In the end, some solutions under different situations are provided to reduce the adverse influences of the hazardous features on seabed pipeline stability.

(本文编辑:刘珊珊)