

海底柔性管道的安装及应用

张立彬（中海油能源发展股份有限公司采办共享中心，天津 300452）

摘要：柔性软管具有弹性高、抗腐蚀性强、抗疲劳性高等优势，适用于多类极端环境如台风、海流、强风暴潮等。近年来我国的海洋石油资源和天然气资源开发不断发展，海底柔性管道作为连接海底能源和水上浮体的“生命线”，在能源开发和燃气运输中极其重要。尽管海底柔性管道在施工、安装以及应用方面较为简单，但实践中依旧存在一系列问题。本文主要分析海底柔性管道的安装以及应用途径，以期能为进一步提高海底管道建设水平，促进能源开发与利用提供有效参考。

关键词：海底能源；柔性管道；安装；应用

0 引言

柔性管道是具有较高实用性的柔性材料，它常用于各种场景下的海洋开发工程。其优点包括能有效适应各类海底地形、抵抗较高外界干扰与腐蚀、布置简单和重复使用等。目前，国内已有多家企业路端研发和部署海洋柔性软管，并投入多个海底能源挖掘应用中，在实践的过程中不断完善生产工艺，优化管道安装技术，大大降低了柔性管道对安装技术、成本的依赖性，为柔性管道在我国海洋油气开发领域的应用做出了贡献。然而，在深海铺设柔性管道时存在一系列难以预料的风险，如管道变形、结构断裂以及受压超限等。为了确保柔性管道有效发挥其应用价值，本文主要分析海底柔性管道的基本结构和安装原理，在此基础上总结其安装应用方式，从而进一步提高海底能源开发效率。

1 海底柔性管道的基本结构

柔性管道属于复合管道，主要由各类金属物、聚合物组成。由于柔性管道具有抵抗极强的外部压力、自身材质强度高、不易受污染腐蚀、兼容性强等特征，因此其应用较为广泛。柔性管道的零部件组成包括骨架层、内压防水层、耐压增强层、耐磨增强层、牵引增强层、中间涂层和外部保护层等，不同生产工艺下选择的柔性管道不同。其中非黏结性柔性管主要由多个具有独立功能的软管组成，但各个功能区能在一定程度上进行位移，能满足多种复杂海底应用环境^[1]；而黏结性柔性管的功能层相互粘连，且需要硫化处理以防止各个功能层出现位移，因此主要用于较短的管道跨接以及管道漂浮等。

2 海底柔性管道的基本安装原理

海底柔性管道的安装方式包括滚筒、卷盘、垂直三大类。根据安装时软管铺设装置和下水方法可以将

滚筒、卷盘安装归类为水平铺设，与垂直铺设相对应。而滚筒、卷盘安装方式的区别在于滚筒安装的软管位于滚筒中，卷盘安装的软管位于卷盘上。水平铺设的原理是利用水平张紧器、导向弧板等装备，通过铺设船的铺设点下水进行安装，垂直铺设的原理是利用借助托辊、导向弧板等装置，由垂直敷设系统控制下水，利用系统的定位确定下水位置，并从铺设船的内月池或者舷侧处入水。无论是水平铺设还是垂直铺设，其安装都可以分为首末端铺设、直线铺设、拐弯铺设三类，具体如下：第一，首末端铺设。首末端铺设的场景分为靠近水上建筑物如平台和储油船与不靠近水上建筑物两种。在选择工作船只和设置起重机参数前，应充分考虑建筑物对铺设实践的影响，在后续安装计划与敲定安装细节时针对性明确安装方案。在计算分析首末端铺设路径时，首先寻找海底的固定安装点位，根据实际市场条件选择配重块或滑轮。此外，首端铺设时，为了避免出现管体受挤压或剧烈变形，应在首端接头下沉时跟进下沉情况，及时进行相应调整^[2]。第二，直线铺设。直线铺设前，应明确需铺设管道的构造。一般管道构造分为具有中间接头的管道和无中间接头管道两大类。其中，具有中间接头的管道是指所铺设管道中存在以焊接、法兰连接、快速接头等方式相连的结构，和无中间接头的管道相比，该类管道对施工过程中的海洋环境要求较高，需要安装技术人员具有更高的专业素养。这是因为具有中间接头的管道在触及海底或海床时，极易受力产生弯折，同时和焊接相比，通过快速接头和法兰进行连接的管道具有更高的变形和弯折风险。现阶段，为了防止焊接管道出现问题，不少施工方选择在焊接位置安装保护罩或保护阳极，以此提高管道铺设效率。第三，甩弯铺设。这一铺设方式主要用于绕过海底的不利地形环境、消

耗多余软管长度、方软管拉抽等工作中。在进行甩弯铺设时，必须准确计算出所需甩弯铺设的半径，以确保甩弯作业能有效达到目标点，保证铺设质量。

3 海底柔性管道的安装方法

3.1 拖曳管道安装法

拖曳管道安装法可以分为水面拖曳、离底拖曳、控制深度拖曳和海床拖曳四大类。当海绵处于风平浪静时，可在海洋表面布置水平浮在水面的浮体结构，并在浮体结构上搭载管段，使其能顺着洋流、风向等外部环境的影响扩大铺设范围。离底拖曳法是指在固定的管段中按照一定间距将浮筒固定在管段中，并且将管段固定在具有一定高度的位置处，从而降低外部环境如风浪、洋流的运动对安装结果的影响。离地拖曳法虽然能适应大多数场景下的海洋柔性管道铺设，但具体操作起来难度较大，对技术人员的专业水平要求较高。控制深度拖曳是指将待铺设的管道下沉到一定深度的海水处，从而降低来自海面风浪的影响，较为安全简单。海床拖曳是指直接在海床上按照既定路线拖拽，在进行海床拖曳之前，技术人员必须提前精确确定拖拽线路，避免拖拽终点和预期相偏离^[3]。

3.2 铺设船安装法

铺设船安装法指在搭载专门铺设管道的铺设船上安装铺设装置，通过大量铺设装置辅助完成海底柔性管道安装。现阶段，铺设船安装法主要应用于距离较长、距离岸边较远的作业场景。同时，这一铺设法铺设灵活、高效、便捷，是当前主流的海底柔性管道安装方法。按照铺设时使用的装备以及铺设方法进行分类，可以将铺设船安装法细分为水平式安装、垂直式安装和卷管式安装三大类。

3.3 水平式安装法

水平式安装法主要适用于在浅水区域的海底安装和铺设，具有安装简单、经济性强、铺设效率高等优势。在当前较为常用。在应用水平式安装法时，应分析铺设环境对管道带来的张力大小，若张力在20KN以内，则应用低张力安装策略，当张力大于20KN，则应采用高张力铺设方法，按照实际铺设需要安装具有一定作用的辅助张紧器。

3.4 垂直式安装法

当海底管道的水平安装无法满足安装质量要求，出现管道上部将承受相当大的弯曲和压缩等问题后，则可以使用垂直式安装法。垂直式安装法比水平安装法的安装结构复杂得多。在进行垂直式安装前，应将铺设管道绕过月池上的安装架，并通过安装架上的井

架以及张紧器，使需要铺设的管道以垂直的状态进入海水中，进而维持良好的管道受力模式，避免其在进入海水之前就受到挤压，出现弯曲等问题。值得注意的是，在应用垂直式安装法时，必须尽可能避免管道稳定性受影响，避免铺设路径偏离或铺设过程中管道受力过大等问题。

3.5 卷管式安装法

卷管式安装法是指将待铺设的管线安装在铺管船上，并形成大型管道盘绕管线。在铺设时，将管线拉直并持续进行铺设在海底。卷管式安装法早在20世纪末就已经出现并推广，经过多年的完善与补充，这一铺设方法逐渐呈现出更加高效、科学的铺设状态，且其应用范围也在逐渐扩大。在具体应用中，卷管式铺设方法的铺设经济性强、铺设耗时较短、铺设风险性不高且铺设进度可连续，具有较高应用价值。但同时，在使用卷管式安装法时也应注意，为防止塑料管变形，在卷曲和拉直时卷管时力度应当适中；在铺设前应提前布置好沿岸基质，方便支撑管线铺设；在铺设过程中，管线的长度以及管线直径受到与其相连的卷筒限制，因此在使用前要核对好管线是否超限^[4]。

4 海底柔性管道的应用

4.1 管道整理

管道整理是指当柔性管道完成生产并合格出厂后，将管道与滚筒或储存仓相连的过程。在该环节，工作人员首先应将柔性管道从制造商原本的包装或生产线中逐渐迁出，并利用张紧器将管线沿着预定的管道（电缆）路线放置在滚筒或储存仓中。在这一操作过程中，管线弯曲表面会因外部环境变化、挤压等空间压缩出现严重的管线弯曲、变形扭曲和耦合荷载等，甚至还会引起管线电缆故障，因此，在管道整理的过程中，必须安排相关工作人员密切关注关键整理环节，尤其是管线的弯曲情况、半径、扭转状况。

4.2 铺设准备

在铺设开始前，需要将管道从滚筒或储存仓内取出并展开，再利用运输设备如起重机运输至铺设船上，并将其与定位器对齐，完成后放入张紧器中。用张紧器的钳子将管道张紧，然后从月池将其抛入大海。海上平台的柔性管缆起始段需要使用设备将其抽拉上来，并将其传送到对应的吊机、缆绳等装置中，完成抽拉任务。若此时管线的首端和末端所连接系统为水下生产系统，则应在铺设后，利用水下机器人进行操作。

4.3 铺设实施

当管道进入水中后，铺设船应结合管线铺设情况

确定船速,以保证管线铺设效率。在铺设过程中首先应注意保持船速和管线下水速度的一致性,保证管线与铺设船边缘的距离,避免出现管线堆积、扭转、混乱等问题。其次,软管本身的尺寸、大小等与管线受到的拉力、接触位置和曲率之间存在一定联系,因此需要把握好关键参数,避免管线安装时受环境影响。最后,管线的铺设过程中还会受到外部环境干扰,如风浪、洋流、气候等,因此,还应针对不同外部环境制定对应管理预案,确保在符合设计要求的海洋条件下正常安装管线。

4.4 完成铺设

当管线完全下放至目标点后,就完成了柔性管缆的铺设。此时,应做好末端的接头的下放收尾工作。若柔性管道仅为小型结构,则可以直接沿着原有铺设路径下放,若柔性管道搭配使用了水下终端,则需要利用吊机和绞车等设备,将电缆的脐带缆从张进设备和定位设备中引导取出,并逐渐放入水中。为了避免脐带缆受损伤或遭破坏,必须严格计算脐带缆的通行路线,保证其畅通性。此外,在完成柔性管缆的安装后,还应安排专门的潜水员在水下进行回接,针对一般的柔性管道,可使用专门的法兰连接装备进行连接;针对脐带缆,则需要通过终端、飞线等将其连接至水下采油体系、电潜水泵等装置中。

4.5 柔性管道后续管理

维护柔性管道需要花费大量时间和精力,并且柔性管道一旦发生故障,极有可能为海洋环境、海洋工程等带来毁灭性影响。因此,相关项目负责人必须制定具有较高灵活性、全面性的管道管理方案,营造安全、稳定、高效的运行环境。在具体实践中,维护柔性管道需引进全生命周期观念,包括实用性检测、运行过程监督、应用效果测试等,同时根据内外部环境变化以及应用中发展的问题不断更新计划,确保其科学性。具体内容如下:

4.5.1 实用性检测

通常情况下,柔性管道会使用水下机器人对管道进行实用性检测,并根据检测结果不断丰富水下机器人的功能,推动升级,使其能在特殊的限制环境下正常使用。常见的水下机器人检测手段包括水下机器人近距离视觉检测、遥控水下摄像机检测、攀缘近距离视觉检测、甲板层近距离观察的那个。

4.5.2 运行过程监督

在柔性管道后续跟进维护中,必须严格按照相关要求密切监督管道运行过程,并根据监督结果进行问

题排除和纠正。以管道环的测试为例,由于发生冲水事故并对海洋平台体系带来一定影响,因此需要反复做测试,并为相关工作人员提供参考。又比如当发现外层保护套受损、排气后、阀门被破坏等问题,则可以制定轮回测试来了解柔性管道使用过程,并预测其未来发展趋势。目前常见的柔性管道监督测试手段包括在完成管道安装、维修和优化后的二次压力检测;进行循环压力测试以确定外层保护层和流体的成分;进行环腔气体抽样了解柔性管道的压力状况;观察分析管道多个地方存在的变形风险;详细检查长期与其他杂物如油品等在一起的零部件状况以分析其使用寿命消耗情况;分析管道内的二氧化碳、二氧化硫等以了解管道内的流体液体情况。

4.5.3 应用效果测试

因公效果测试主要通过一系列指标完成,包括使用中的管道压力、温度、流量等。首先通过对管道管径压力测试,能检测管道首尾两端的压力变化情况以及变化规律;通过测量管道的管径温度,以掌握管道的温度变化规律;对周边环境进行通风以及流动压力的测试,监测管道流量以判断管道是否处于正常工作状况;从中挖掘出关于压降的数据,分析管径的流量。通过对应用效果的测试,能确保管道在安装后能及时、高效参与工作,实现自身应用价值。

5 结束语

综上所述,柔性管道在海洋能源开发中十分常见,具有较高应用价值。研究海底柔性管道的安装及应用,能协调好柔性管道与周边环境如海底、海水之间的关系,有效配合其他海洋平台模块包括铺设装置、铺管船等,具有较高应用价值。本文主要从海底柔性管道的基本概念、安装原理、安装过程、安装应用等四个方面进行研究分析,为进一步提高我国海底柔性管道的灵活性具有重要意义。

参考文献:

- [1] 张晨晨,王健,金锋,等.海底柔性软管修复技术[J].中国水运(下半月),2022(8):107-109.
- [2] 宋昊政,张杨,罗洁,等.水下柔性软管垂直焊接铺设工艺的应用[J].中国新技术新产品,2023(4):67-69.
- [3] 王凯,张熠,喻西崇,等.海洋油气柔性软管环空状态检测研究及应用[J].中国海上油气,2022,34(1):155-160.
- [4] 叶永彪,方霖,石锦坤,等.较深水柔性软管垂直铺设安装模拟[J].中国海洋平台,2022,37(1):95-100.