

ICS 75.200

CCS E 16



T

团 体 标 准

T/CSPSTC XXX—202X

海底管道水平定向钻设计规范

Specification for submarine pipeline horizontal directional

drilling design

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国科技产业化促进会 发布

目 次

前言	II
引言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语、定义和缩略语	1
4 总体要求	3
5 工程勘察	4
6 海底管道水平定向钻设计	10
7 场地布置	22
8 施工技术要求	25
9 焊接与检验	26
10 管线调试	27
参 考 文 献	28

前 言

本文件按照GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国石油天然气管道工程有限公司提出。

本文件由中国科技产业化促进会归口。

本文件起草单位：XXX。

本文件主要起草人：XXX。

引 言

为规范海底管道工程水平定向钻设计工作，保证设计质量，落实国家现行的有关方针政策，统一技术要求，在结合现行国内外海底管道水平定向钻工程建设实践的基础上，编制组广泛征求意见，对海底管道水平定向钻工程设计进行了深入对标与研究，并参考了国内外先进技术和经验，起草本文件。

海底管道水平定向钻设计规范

1 范围

本文件提出了海底管道水平定向钻的总体要求，规定了工程勘察、设计方法、场地布置、施工技术、焊接与检验、管线调试的要求。

本文件适用于海底油气管道采用海对海水平定向钻或陆海水平定向钻技术的工程设计，对于输送其他流体的工程，当采用海底管道水平定向钻技术时，可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

- GB 12319 中国海图图式
- GB/T 12763.2 海洋调查规范 第2部分：海洋水文观测
- GB/T 12763.3 海洋调查规范 第3部分：海洋气象观测
- GB/T 20257.1 国家基本比例尺地图图式 第1部分：1:500 1:1 000 1:2 000地形图图式
- GB/T 35988 石油天然气工业海底管道阴极保护
- GB 50021 岩土工程勘察规范
- GB 50424 油气输送管道穿越工程施工规范
- GB 55017 工程勘察通用规范
- SY/T 6968 油气输送管道工程水平定向钻穿越设计规范
- SY/T 7060 海底管道稳定性设计
- SY/T 10030 海上固定平台规划、设计和建造的推荐作法 工作应力设计法
- SY/T 10037—2018 海底管道系统
- DNVGL-RP-F115 海底管道预投产（Pre-commissioning of submarine pipelines）

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

陆海定向钻 land-to-sea horizontal directional drilling

入土点和出土点一侧位于陆地上，另一侧位于海上的海底管道水平定向钻工程。

3.1.2

海对海定向钻 sea-to-sea horizontal directional drilling

入土点和出土点均位于海上的海底管道水平定向钻工程。

3.1.3

入土点 entry point

导向孔的起点。

3.1.4

出土点 exit point

导向孔的终点。

3.1.5

入土角 entry angle

入土点钻杆与水平面的夹角。

3.1.6

出土角 exit angle

出土点钻杆与水平面的夹角。

3.1.7

穿越段 crossing section

入土点至出土点间的范围。

3.1.8

过渡段 transition section

海上入（出）土点至与海底管道一般段连接点间的范围。

3.1.9

海底管道一般段 general section of offshore pipeline

在整条海底管道中，除定向钻段外的剩余部分，海底管道一般段与定向钻过渡段相连。

3.1.10

海上支持船/平台 offshore support barge/platform

用于支持水平定向钻施工的搭载钻机的船舶（通常为驳船）或海上平台。

3.1.11

设计工况 design case

指特征化的不同荷载类别。

注：考虑可能影响管道的所有荷载和强制位移。对于每个考虑的截面或系统的部分以及分析的每种可能失效模式，考虑所有可能同时作用的相关荷载组合。设计中至少考虑以下设计工况：安装、压试验、运行。

3.1.12

局部屈曲 local buckling

由横截面的变形引起的，屈曲形式限制在较小长度范围内的管道屈曲。

3.1.13

特征抗力 characteristic resistance

用于确定设计强度的结构强度参考值。

3.1.14

腐蚀裕量 corrosion allowance

为补偿在运行过程中，因内、外腐蚀导致的管壁变薄而增加的管道壁厚。

3.1.15

岩石质量指标 rock quality designation

用直径为75 mm的金刚石钻头和双层岩芯管在岩石中钻进，连续取芯，回次钻进所取岩芯中，长度大于10 cm的岩芯段长度之和与该回次进尺的比值。

注：以百分数表示。

3.1.16

近岸段 inshore section

岸线至水深20 m的路由海区。

3.1.17

浅海段 shallow sea section

水深20 m~1000 m的路由海区。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

CT: 层析成像方法 (Computed Tomography)。

DNV: 挪威船级社 (Det Norske Veritas)。

RQD: 岩石质量指标 (Rock Quality Designation)。

ERW: 电阻焊 (Electric Resistance Welding)。

HFW: 高频焊 (High Frequency Welding)。

JCO: 焊管的成型工艺，按照J-C-0型成型。

JCOE: 焊管的成型工艺，按照J-C-0型成型并扩径 (Expanded)。

TRB: 三滚轴弯曲 (Three Roll Bending)。

UO: 焊管的成型工艺，按照U-0型成型。

UOE: 焊管的成型工艺，按照U-0型成型并扩径 (Expanded)。

4 总体要求

4.1 设计原则

4.1.1 海底管道水平定向钻设计应依据工程勘察资料，并在技术、经济、安全、环境等方面进行多方案比选。

4.1.2 海底管道水平定向钻的设计寿命应不小于主体管线设计寿命。在设计使用年限内，海底管道水平定向钻应具有足够的可靠度。

4.1.3 海底管道水平定向钻应按照免维护的原则进行设计。

4.1.4 海底管道水平定向钻应符合堤防、海事、港航、环保、渔业等相关部门的规划。

4.1.5 穿越海堤时，应依据地质参数和堤坝结构等条件采取有效措施控制堤坝和地面的沉陷，防止穿越处发生管涌。陆上入（出）土点与大堤坡脚的间距宜大于 50 m，且应满足防洪评价及主管部门要求。

4.1.6 海底管道水平定向钻应贯彻国家有关的技术经济政策，积极慎重地采用新技术、新材料、新设备、新工艺。

4.2 穿越位置选择

4.2.1 穿越位置

4.2.1.1 穿越位置应符合海底管道路由总体走向。海底管道路由局部走向应按照拟选穿越位置进行调整。

4.2.1.2 穿越管段宜与海岸线、海堤、航道、管缆等正交，如果需要斜交，交角不宜小于 30°。

4.2.1.3 海上出、入土点宜避开波浪、海流较强的位置，且宜避开冲刷地段。海上出、入土点与航道、水下管缆至少应保持 100 m 的间距。

4.2.1.4 穿越位置选择宜避开下列区域：

- a) 岸坡区岩土松软、不良地质作用发育且对穿越工程稳定性有直接危害或潜在威胁的地段；
- b) 存在活动断裂或大型地层断裂带的海域；
- c) 水生物保护区、环境保护区及文物保护区等敏感区；
- d) 穿越段内岩溶、塌陷和其他不良地质作用发育区域；
- e) 存在高压线、微波站、直流接地极的区域；
- f) 海上经济开发活跃区、军事区、倾废区、锚地等。

4.2.2 穿越轴线

4.2.2.1 海底管道水平定向钻穿越轴线符合下列要求：

- a) 与大堤、港口、码头、水下建筑物或引水建筑物等之间的垂向净距不宜小于 10 m；
- b) 与桥梁墩台、冲刷坑外边缘的净距不宜小于 10 m，且应不影响桥梁墩台安全；
- c) 与海域隧道的净距不宜小于 30 m；
- d) 穿越航道和锚地时，管道埋深应考虑抛锚深度，管顶高程应采用抛锚保护计算得出埋深。若无法计算，管顶高程不宜小于管道设计使用年限内规划航道底高程以下 6 m 且不宜小于管径的 10 倍；
- e) 两条定向钻管道并行穿越时，水平净距不宜小于 10 m；
- f) 穿越已建管缆时，穿越管段与已建管缆的垂向净距不宜小于 10 m；
- g) 穿越有冲刷地段时，穿越管段埋深应不小于最大可能冲刷深度以下 6 m。

4.2.2.2 应优先选择地质均匀区域布置穿越轴线。

5 工程勘察

5.1 通用要求

5.1.1 勘察仪器设备的技术指标应满足勘察项目的要求，应在检定、校准证书有效期内使用，并处于正常工作状态。勘察技术人员应取得由合法资质机构颁发的与勘察项目相符的上岗资质证书，能胜任岗位工作。

5.1.2 采用几种地球物理勘察方法同步作业时，应统一定位时间和测线、测点编号。因故测量中断或同一测线分次作业，则要按照同一方法进行补测，并重叠 3 个定位点以上。

5.1.3 钻探应采用回转岩心钻进方法，如果遇到卵石、碎石、漂石和块石等地层时可选用振动回转方式钻进。对于岩层钻探应采用双层岩心管，并提供岩石质量指标（RQD），岩心采取率应满足表1要求。

表1 岩心采取率

地层	黏性土、完整岩层	较完整岩层	破碎岩层、构造破碎带、砂土、碎石土
岩心采取率 %	≥90	≥80	≥65

5.1.4 钻探工作结束后，应对钻孔进行封孔。

5.2 工程地球物理勘探

5.2.1 工程地球物理勘察包括水深测量、侧扫声呐探测、地层剖面探测、地震探测和磁法探测，其中磁法探测可根据需要进行。

5.2.2 测量基准应符合下列规定。

- a) 海域段水深测量和陆上段工程测绘应采用同一坐标系统和高程系统。
- b) 平面坐标系统应采用“2000 国家大地坐标系（CGCS2000）”，根据工程需要可以采用其他平面坐标系统，但应与 CGCS2000 建立转换关系。
- c) 高程应采用“1985 国家高程基准”，在远离大陆的岛、礁，其高程基准可采用当地平均海平面。
- d) 深度基准面应采用“理论最低潮面”，根据工程需要采用其他基准面的，宜给出所采用的基准面与理论最低潮面以及“1985 国家高程基准”的关系。远离大陆的岛、礁，深度基准面可采用当地平均海平面。

5.2.3 水深、地形测图范围应符合下列规定。

- a) 测图宽度宜为穿越轴线两侧各 500 m 的范围，陆上段部分测图宽度可缩小至穿越轴线两侧宽度各 150 m~200 m。海上支持船/平台的测图范围，应在支持船/平台位置及其四周的一定范围内，根据水深情况选择为 1000 m×1000 m~2000 m×2000 m。
- b) 测图长度宜为穿越范围（含过渡段）两侧沿轴线各外延 200 m。
- c) 采用整体回拖时，宜进行回拖场地测量。测量长度不宜小于回拖预制管道长度，海上回拖场地测量宽度宜为回拖管道轴线两侧各 200 m，陆上回拖场地测量宽度宜为回拖管道轴线两侧各 50 m。

5.2.4 测图比例尺应符合下列规定。

- a) 当穿越长度<1500m时，地形图比例尺宜取 1:1000。当穿越长度≥1500m时，地形图比例尺宜取 1:2000。
- b) 纵断面图横向比例尺与地形图相同，纵向比例尺根据地形起伏大小可选 1:500、1:200 或 1:100。

5.2.5 控制点测量应符合下列规定：

- a) 控制点的平面位置精度应达到 GPS-E 等级要求，高程精度应达到四等水准要求；
- b) 控制点和穿越的主断面应埋设固定桩；
- c) 在穿越点附近应布设不少于 3 个控制点，应尽量保证控制点间互相通视；
- d) 控制点应设于最高潮位线以上，点位应便于寻找、保存和引测。

5.2.6 单波束水深测量应符合下列规定。

- a) 深度测量中误差：水深 20 m 以浅不大于 0.2 m，20 m 以深不大于水深的 1%。
- b) 重合点（图上 1 mm 以内）深度不符值限差：水深 20 m 以浅不大于 0.4 m；20 m 以深不大于水深的 2%，超限点数不应超过参加比对总点数的 15%。

- c) 当动态吃水变化大于 5 cm 时, 应进行动态吃水改正。
 - d) 测深线偏离超过设计测线间距的 50%, 或漏测超过图上 5 mm 时应进行补测或重测。
- 5.2.7 多波束水深测量应符合下列规定。
- a) 深度测量中误差: 水深 20 m 以浅不大于 0.2 m, 20 m 以深不大于水深的 1%;
 - b) 重合点 (图上 1 mm 以内) 深度不符值限差: 水深 20 m 以浅不大于 0.4 m; 20 m 以深不大于水深的 2%, 超限点数不应超过参加对比总点数的 15%;
 - c) 测深与定位时间延迟中误差应不大于 0.1 s。每次变更导航定位系统需重新测试导航延时;
 - d) 测量区域内应 100% 的多波束测量覆盖, 相邻主测线间应保证 20% 的重复覆盖率;
 - e) 应进行声速改正, 声速剖面测量的时间密度不小于每天一次。
- 5.2.8 除按照一般要求测绘外, 还应测绘海底管道水平定向钻两端的线路走向、埋地管道和线缆、海上人工浮标等。
- 5.2.9 海域图式符号应按照 GB 12319 的相关规定执行, 陆域图式符号应按照 GB/T 20257.1 的相关规定执行。
- 5.2.10 侧扫声呐、地层剖面和磁力探测的范围同水深、地形测图范围。对于陆海定向钻工程, 探测范围受仪器操作水深限制的, 宜覆盖管道穿越深度不小于 5 m 的近岸海域范围。
- 5.2.11 物探主测线应沿穿越轴线以及平行穿越轴线两侧布设, 间距满足相邻测线数据的拼接、重复覆盖要求, 检测线应垂直于主测线, 其间距不大于主测线间距的 10 倍。
- 5.2.12 对于水深较浅、地层剖面难以实施的海域, 可采用电法、地震法探测基岩起伏及不良构造发育情况; 陆海定向钻可采用陆上、海上物探结合的方法; 主测线沿穿越轴线布置, 辅助测线沿两侧勘探线布置, 为查明异常地质体、不良构造, 可沿垂直地质体长轴走向或构造走向布置测线。
- 5.2.13 海上支持船/平台的调查测线, 以 50 m×50 m~100 m×100 m 的间距按网格布置。根据需要, 如采用二维数字地震调查, 测线以 100 m×100 m 的间距按网格布置。
- 5.2.14 根据需要, 可沿穿越轴线和勘探线布置高精度地震勘探测线, 调查穿越深度内的基岩起伏和连续性、不良构造、不良海洋地质等发育情况。
- 5.2.15 侧扫声呐探测应取得路由范围海底裸露基岩、大漂石、砾石、沙波、沉船、管道、人为设施等障碍物。
- 5.2.16 地层剖面探测应获得海床面以下不小于 30 m 深度内的声学地层剖面记录。
- 5.2.17 磁力仪探测应探测并标明路由区已建光 (电) 缆、管道、爆炸物等含铁磁性物体的位置。
- 5.2.18 侧扫声呐探测应符合下列规定:
- a) 结合水深测量、底质采样等有关资料, 侧扫声呐探测应识别和确定底质类型及分布、海底灾害地质因素、海底目标物的位置、形状、大小和分布范围;
 - b) 侧扫声呐系统应能分辨海底 1 m³ 大小的物体, 应具有航速校正和倾斜距校正等功能, 同时应能够进行模拟与数字记录;
 - c) 在路由勘察走廊带内应 100% 覆盖, 相邻测线扫描应保证 100% 的重复覆盖率, 当水深小于 10 m 可适当降低重复覆盖率;
 - d) 拖鱼距海底的高度应控制在扫描量的 10%~20%, 当测区水深较浅或海底起伏较大时, 拖鱼距海底的高度可适当增大。
- 5.2.19 地层剖面探测应符合下列规定。
- a) 根据需要同时进行浅地层剖面探测和中地层剖面探测, 以获得海底面以下不小于 30 m 深度内的声学地层剖面记录。
 - b) 浅地层剖面探测地层分辨率应优于 0.2 m, 中地层剖面探测地层分辨率应优于 1 m。
 - c) 记录剖面应图像清晰, 没有强噪声干扰和图像模糊、间断等现象。
 - d) 地层剖面图, 其垂直与水平比例应合理; 图面内容包括地形剖面线、地层界面、岩性、灾害地质要素、主要地物标志、取样站位、钻孔位置及其柱状图和测试结果等。

- e) 浅部地质特征图，图面内容主要包括重要地层层次的厚度等值线或顶面埋深等值线、重要的地形地貌及浅部地质现象、灾害地质因素、地物标志、海底取样站位和钻孔位置及测试结果等；浅部地质特征图内容较少时可与海底面状况图合编。

5.2.20 磁法探测应符合下列规定。

- a) 磁法探测应查明路由区海底已建电缆、管道、沉船和其他磁性物体的位置和分布。
- b) 应识别路由区非海底磁性物体造成的磁场异常干扰。
- c) 对于探测到的海底已建电缆、管道等线性磁性物体，测线应与根据历史资料确定的探测目标的延伸方向垂直。每个目标的测线数应不少于 3 条，间距应不大于 200 m，测线长度应不小于 500 m，相邻测线的走航探测方向应相反。
- d) 对于探测到的海底非线状磁性物体，测线应在探测目标周围成网格布置，每个目标的测线数应不小于 4 条，间距和侧向长度应依据探测目标的大小等确定。

5.3 岩土工程勘察

5.3.1 海底管道水平定向钻穿越的岩土工程勘察应查明穿越段范围内的岩土工程条件，并对拟选穿越段的工程地质、水文地质、腐蚀性环境和海洋规划符合性做出评价，提供设计所需的岩土工程勘察资料。

5.3.2 海底管道水平定向钻工程的岩土工程勘察工作应符合 GB 50021 和 GB 55017。岩土工程勘察阶段应符合下列规定：

- a) 可行性研究勘察应满足选址和可行性研究设计要求；
- b) 初步勘察应满足初步设计要求；
- c) 详细勘察应满足施工图设计要求；
- d) 地质条件复杂或有特殊要求的工程，宜进行施工勘察；
- e) 初步设计阶段宜进行一次详细勘察，施工图设计阶段应复核前期勘察成果，必要时可进行补充勘察；
- f) 根据项目需要可合并勘察阶段。

5.3.3 可行性研究勘察范围应与测量范围一致。

5.3.4 可行性研究勘察应满足选定穿越位置和拟定穿越比选方案的要求，对于工程地质条件复杂区域，可布置钻探和工程物探工作。

5.3.5 初步勘察范围应与测量范围一致。

5.3.6 初步勘察应满足拟定穿越比选方案的要求，初步勘察阶段宜搜集以下有关资料：

- a) 区域地质图、构造图、工程地质图、地质剖面图等地质资料；
- b) 海图、海岸侵蚀、海床冲淤等水文地质资料；
- c) 路由区的海洋开发、生态保护的规划资料。

5.3.7 初步勘察阶段的勘探线和勘探点布设应满足下列要求：

- a) 应平行拟定穿越轴线一侧 15 m~30 m 布置一条勘探线。多管平行敷设的穿越工程，应平行拟定穿越轴线外侧 15 m~30 m 各布置一条勘探线，两条勘探线上的钻孔应交错布置；
- b) 钻孔间距或在任何一条穿越轴线上的钻孔垂直投影间距，对于陆海定向钻工程宜为 100 m~500 m，对于海对海定向钻工程宜为 500 m~1000 m。钻孔数量应不少于 3 个，对于陆海定向钻工程，陆上段钻孔应不少于 1 个，海上穿越段钻孔应不少于 2 个；
- c) 应根据工程地球物理勘探成果，对孔位布设做适当调整，在地形坡度较陡、底质变化复杂或灾害地质分布区应加密钻孔；
- d) 对于海上支持平台，应在平台中心位置布置 1 个钻孔。

5.3.8 初步勘察阶段，钻孔深度应根据设计要求确定，当无设计要求时应满足下列要求：

- a) 对于陆海定向钻工程，一般性钻孔深度宜为海床最低点以下 30 m~50 m，控制性钻孔深度宜为 50 m~80 m。对于海对海定向钻工程，一般性钻孔深度宜为海床最低点以下 20 m~30 m，控制性钻孔深度宜为 30 m~50 m。
- b) 控制性钻孔数量不宜少于钻孔总数的 1/3~1/5，且不应少于 2 个。对于陆海定向钻工程，陆上段及海域段至少应各有 1 个控制性钻孔；
- c) 对于海上支持平台，钻孔深度宜为 40 m~80 m；
- d) 对抗震设防烈度大于或等于 6 度的区域，勘探孔深度应满足场地和地基地震效应分析评价的要求。

5.3.9 应根据初步勘察成果布置详细勘察方案，结合工程物探成果，提出地质解释成果，进一步确定穿越断面地层的分部范围和连续性。符合勘察方案布置要求的初步勘察成果宜加以利用。

5.3.10 详细勘察阶段的勘探线、勘探点布设和深度应满足下列要求：

- a) 应平行拟定穿越轴线两侧 15 m~30 m 各布置一条勘探线。多管平行敷设的穿越工程，应平行拟定穿越轴线外侧 15 m~30 m 各布置一条勘探线，两条勘探线上的钻孔应交错布置。并行间距大于或等于 60 m 的并行管道，可在两管之间布置一条勘探线，多条勘探线上的钻孔应交错布置；
- b) 钻孔间距或在任何一条穿越轴线上的钻孔垂直投影间距，对于陆海定向钻工程宜为 30 m~100 m，对于海对海定向钻工程宜为 100 m~500 m；
- c) 应根据初步勘察、工程地球物理勘探成果，对孔位布设做适当调整，在地形坡度较陡、底质变化复杂或灾害地质分布区应加密钻孔；
- d) 钻孔深度不应少于设计穿越深度以下 5 m~10 m。如开展一次性详细勘察，勘察过程中宜加强与设计沟通，及时提供过程勘察成果资料，并根据穿越曲线设计及时调整孔深。
- e) 对于海上支持平台，钻孔数量应根据工程地球物理勘察资料 and 平台基础类型确定。每一平台的钻孔数量一般不少于 2 个钻孔、1 个静力触探测试孔。桩基固定平台的设计孔深应为入土桩长加上桩基影响带的宽度（一般按 10 倍的桩径考虑），且不宜小于 90 m；重力式基础平台的设计孔深应大于平台底座的最大宽度，且不小于 30 m；筒形基础平台的设计孔深应为设计筒型基础入泥深度加上 1.5 倍筒型基础直径的深度，且应不小于 30 m。

5.3.11 详细勘察采取岩土试样和进行原位测试的勘探点数量，宜占勘探点总数的 1/2~2/3；采取试样或进行原位测试的竖向间距应根据地层结构、地基土的均匀性和工程特点确定，每一主要土层的试样或原位测试数据不应少于 6 件（组）；对于陆海定向钻工程，应至少采取海水和陆上地下水试样各 1 组，对于海对海定向钻工程，应至少采取海水 2 组。

5.3.12 对于穿越岸线、堤防等设施，因障碍物分布难以进行物探、钻探的区域，宜加强地质调查，采用跨孔 CT 等新技术、新方法，辅助查明穿越段的地质条件，并对穿越风险做出提示。

5.3.13 对于地质条件复杂或有特殊要求的海底管道水平定向钻工程可进行施工勘察，施工勘察内容及深度应依据实际工程施工需要确定。

5.3.14 勘探钻孔试样的试验项目应根据岩土性质确定，应包含但不限于下列内容：

- a) 黏性土：液限、塑限、比重、天然含水率、天然表观密度、孔隙比、黏聚力、内摩擦角；
- b) 粉土：颗粒分析、液限、塑限、比重、天然含水率、天然表观密度、孔隙比、黏聚力、内摩擦角；
- c) 砂土/碎石土：颗粒分析、休止角；
- d) 岩石：单轴抗压强度；
- e) 水分析：pH 值、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、侵蚀性 CO_2 、游离 CO_2 、 NH_4^+ 、 OH^- 、总矿化度；
- f) 土化学分析：pH 值、氧化还原电位、电阻率、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 、 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 及易溶盐总量。

5.3.15 海底管道水平定向钻工程的岩土工程分析和成果报告，应至少包含以下内容：

- a) 地形地貌：地貌单元、地表植被、海床形态、海床特征等。
- b) 气象条件：气候类型、气象特点、气温、蒸发量、降水量、降水集中的月份、风力、风向等。
- c) 区域地质：区域性地层、地质构造及断裂带分布、性质等。
- d) 穿越断面的地质构成特征及岩土物理力学性质。
- e) 岩土参数：密度、孔隙比、密实度（标准贯入锤击数）、含水量、液限、塑限、液性指数、塑性指数、颗粒分析（粒径及含量）、休止角、内摩擦角、黏聚力、渗透系数、地基承载力，岩石的天然和饱和单轴极限抗压强度、弹性模量、泊松比、RQD 值等；对于支持水平定向钻施工的固定式海上平台，提供基桩侧阻力和端阻力、单桩竖向和水平承载力等。
- f) 评价灾害地质因素（如冲刷沟、浅层气、海底塌陷、滑坡、浊流、基岩、古河谷、活动沙波、泥底辟、盐底辟、软土夹层等），对海底管道水平定向钻工程的影响，并提出相应的工程措施或对策建议。
- g) 场地土、水的腐蚀性评价。
- h) 场地地震效应分析评价：设计地震动峰值加速度及其分组、场地土类型、建筑场地类别、液化土层及其液化等级等。
- i) 从岩土工程条件出发，对水平定向钻方案进行适宜性分析，并给出穿越方案推荐建议。
- j) 施工条件及设计施工中应注意的问题。
- k) 海洋规划与开发情况，包括：
 - 1) 渔业：包括路由区渔船数量、捕捞方式、捕捞作业季节、休渔区、休渔期、浅海和滩涂养殖区等；
 - 2) 矿产资源开发：包括海洋油气田和砂矿区等的分布、资源开发规划与开采现状、海上平台和输油气管道的位置等；
 - 3) 交通运输：包括主要航线及船只类型（所用锚型）、密度、航道疏浚及抛泥等；
 - 4) 通信：海底光缆；
 - 5) 电力：海底输电电缆；
 - 6) 水利：海堤及围海、填海工程或规划等；
 - 7) 市政：输水管道、排污管道等；
 - 8) 海洋自然保护区：各种海洋自然保护区分布状况；
 - 9) 海底人为废弃物：如沉船、集装箱、锚等；
 - 10) 其他：如旅游区、倾废区、科学研究试验区、军事活动区等。

5.4 海洋水文与气象调查

5.4.1 海洋环境观测的技术要求应按照 GB/T 12763.2 和 GB/T 12763.3 的相关规定执行。

5.4.2 波浪参数至少应满足以下要求：

- a) 收集路由区波浪资料，给出全年中较好和较差的海况期；
- b) 获取多年、各月、各向波浪出现频率、最大波高、平均波高及相应周期；
- c) 获取重现期为 1 年、10 年、100 年的最大波高、有效波高及相应周期和波向；
- d) 推荐适用的波谱。

5.4.3 潮汐参数至少应满足以下要求。

- a) 分析路由区的潮汐性质。
- b) 获取当地平均海平面、平均高潮位、平均低潮位、最高潮位、最低潮位。最高潮位应包括天文潮和风暴增水。最低潮位宜根据天文潮和可能的风暴减水估计。
- c) 获取各类潮水位关系图，基面与各潮面关系包括 1985 年国家高程基准、当地平均海平面、理论高潮面和理论最低潮面等。

d) 获取重现期为 1 年、10 年、100 年的最高和最低潮位。

5.4.4 海流参数至少应满足以下要求。

a) 获取路由区的表、中、底三层的海流流速和流向。表层为海面以下 1 m~3 m, 底层位置应在海底以上 1 m。对于水深超过 40 m 的海域, 给出海流剖面。流速应包括潮流、风引起的流、风暴增水流、密度流和其他可能的海流现象。对于近岸路由区给出由于波浪破碎产生的沿岸流。

b) 获取重现期为 1 年、10 年、100 年的表、中、底层最大流速和流向。如果管线路由水深相差较大, 给出沿路由分段的海流流速和流向。

5.4.5 水温及泥温参数至少应满足以下要求:

a) 水温观测与海流观测同时进行, 获取表、中、底三层的历年最高、最低及平均水温;

b) 获取海床以下 1 m、2 m 和 3 m 的历年最高、最低及平均泥温。

5.4.6 海洋气象参数至少应满足以下要求:

a) 获取路由区的气象要素, 指出全年中较好和较差的气候窗口;

b) 获取累年各月各向风频率、平均风速和最大风速(海面以上 10 m 处)及累年各月大风日节数。给出重现期 1 年、10 年、100 年的 3 s、1 min、10 min、1 h 的最大风速;

c) 获取累年各月极端高温、最低及平均气温;

d) 获取累年各月平均雾日;

e) 获取累年各月最大、最小和平均相对湿度;

f) 获取其他可能影响工程建设的极端天气情况, 如台风、寒潮等。

5.4.7 当选用固定式平台作为海上定向钻施工场地时, 平台场址勘察测量应至少获取以下气象水文资料:

a) 重现期分别为 1 年、10 年、25 年、50 年和 100 年的有效波高、最大波高、有效波周期、平均跨零周期、波谱峰值周期;

b) 重现期分别为 1 年、10 年、25 年、50 年和 100 年的 1 h 平均风速、10 min 平均风速、1 min 平均风速、3 s 平均风速;

c) 重现期分别为 1 年、10 年、25 年、50 年和 100 年的表层流速、中层流速、底层流速;

d) 考虑方向的波浪、风和海流的联合概率值;

e) 重现期分别为 1 年、10 年、25 年、50 年和 100 年的单层冰厚及抗压强度, 重叠冰厚及抗压强度;

f) 平台场址的海生物分布情况, 包括不同高程处的海生物厚度及平均值, 不同高程处的海生物饱和密度及平均值;

g) 平台场址的地震烈度、地震加速度和地震反应谱等。

6 海底管道水平定向钻设计

6.1 穿越曲线设计

6.1.1 出、入土点选择

6.1.1.1 宜将主钻机布置在陆上, 当陆上无钻机布设场地时, 可将主钻机布设在海上。

6.1.1.2 出、入土点的选择应满足下列要求:

a) 陆上出、入土点附近应有足够布设钻机、泥浆池和材料堆放的场地;

b) 陆上出、入土点宜避开电力线、钢桥、埋地管线等影响穿越控向精度的建(构)筑物;

c) 陆上出、入土点宜避开滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害发育地段;

d) 出、入土点选择应结合穿越地层情况确定。

6.1.2 穿越地层选择

6.1.2.1 海底管道水平定向钻宜穿越以下地层：硬质或较软黏土层、淤泥质黏土层、粉土层、粉细砂层、中砂层、较完整且天然单轴抗压强度小于 80 MPa 的岩石层、大于 2 mm 以上颗粒含量小于 30% 的砾砂层。

6.1.2.2 海底管道水平定向钻可穿越以下地层：流塑状黏土、松散状砂土、粗砂层、大于 2 mm 以上颗粒含量介于 30%~50% 之间但胶结较好的砾砂层、天然单轴抗压强度大于 80 MPa 岩石层。

6.1.2.3 海底管道水平定向钻不应长距离穿越以下地层：卵石层，破碎硬质岩石层、砾石层、大于 2 mm 以上介于颗粒含量 30%~50% 之间但胶结差的砾砂层。

6.1.2.4 穿越曲线宜避开地层岩性差异较大的交界面。

6.1.2.5 过渡段管道埋深应满足与之相连的海底管道一般段的埋深要求。

6.1.3 出、入土角选择

6.1.3.1 陆上入土角的范围宜为 $8^{\circ} \sim 20^{\circ}$ ，陆上出土角的范围宜为 $4^{\circ} \sim 12^{\circ}$ 。

6.1.3.2 海上入土角和出土角的范围宜按表 2 取值。穿越管径较大时，海上入土角和出土角宜适当减小。当海上不设过渡段时，角度可适当增大。

表2 海底管道定向钻海上角度推荐表

穿越管道管径 mm	海上入土角	海上出土角
<500	$4^{\circ} \sim 8^{\circ}$	$3^{\circ} \sim 8^{\circ}$
500~1000	$4^{\circ} \sim 6^{\circ}$	$3^{\circ} \sim 6^{\circ}$
>1000	$2^{\circ} \sim 4^{\circ}$	$2^{\circ} \sim 4^{\circ}$

6.1.3.3 海上出、入土角的选取应考虑过渡段挖沟的难易程度。应依据地形，海上出、入土角角度，穿越段与过渡段之间的纵向弹性敷设曲率半径以及过渡段管顶埋深要求等信息，确定所需的最大挖沟深度。挖沟深度不宜过大，应具备可实施性。

6.1.4 曲率半径计算

6.1.4.1 海底管道水平定向钻弹性敷设段曲率半径不宜小于 $1500D$ ，且不应小于 $1200D$ （ D 为钢管直径）。

6.1.4.2 当水平定向钻含有空间曲线段时，应按式（1）计算曲率半径。

$$R_c = \sqrt{\frac{R_h^2 R_v^2}{R_h^2 + R_v^2}} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

R_c ——复合曲线的曲率半径，单位为米（m）；

R_h ——平面曲线的曲率半径，单位为米（m）；

R_v ——竖向曲线的曲率半径，单位为米（m）。

6.1.5 穿越长度

6.1.5.1 陆海定向钻的穿越长度不宜超过 7 km。

6.1.5.2 海对海定向钻的穿越长度不宜超过 4 km。

6.1.5.3 穿越长度超过 2 km 时宜采用对穿工艺。

6.1.6 过渡段长度设计

6.1.6.1 过渡段长度应大于图 1 所示的 L_m ， L_m 为海上出、入土点至海面的直线段长度。

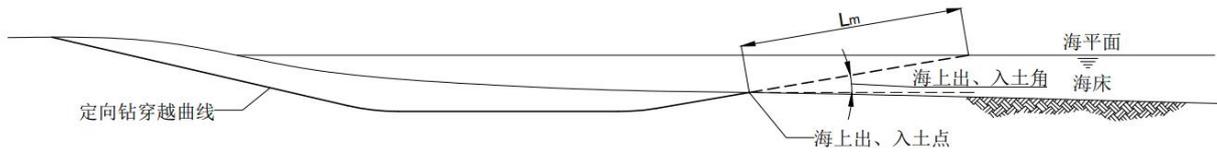


图1 过渡段最小长度 L_m 示意图

6.1.6.2 过渡段长度应考虑回拖方式、与海底管道一般段的连接方式等综合确定，并应考虑一定的裕量。

6.2 管道结构设计

6.2.1 通用要求

6.2.1.1 管道材料宜按 GB/T 9711 的要求选取。

6.2.1.2 海底管道水平定向钻应力校核至少应包括管道承压破裂、外压压溃、扩展屈曲以及组合荷载局部屈曲校核。

6.2.1.3 管道壁厚比大于 45 时，还应增加校核管道弹性屈曲失效，分析中应考虑环焊缝、环焊缝错边及点荷载的不利影响。

6.2.2 设计系数选取

6.2.2.1 海底管道水平定向钻的设计系数建议按表 3 选取。

表3 管道设计系数

系数	符号	运行工况		水压试验工况		安装工况		运行+地震工况
		组合a	组合b	组合a	组合b	组合a	组合b	-
安全等级抗力系数（承压）	$\gamma_{SC,PC}$	1.308		1.046		1.046		1.308
安全等级抗力系数（其他）	$\gamma_{SC,LB}$	1.26		1.04		1.04		1.26
材料抵抗系数	γ_m	1.15		1.15		1.15		1.15
材料强度系数	α_U	0.96		1.00		0.96		0.96
功能荷载分项系数	γ_F	1.2	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1
环境荷载分项系数	γ_E	0.7	1.3	0.7	1.3	0.7	1.3	1
条件荷载分项系数	γ_C	1.0	1.0	0.93	0.93	0.80	0.80	1
系统压力试验系数	α_{spt}	1.251		1		1		-
工厂压力试验系数	α_{mpt}	1.05		1.03		1.03		-

注：组合 a 为系统校核，组合 b 为局部校核。

6.2.2.2 在进行组合荷载校核时，安装工况、水压试验工况和运行工况均应校核两种荷载分项系数组合，见表 3 中的组合 a 和组合 b。

6.2.2.3 钢管最大制造系数应按表 4 选取。

表4 最大制造系数

制管形式		无缝管	UO, JCO, TRB, ERW, HFW	UOE和JCOE
最大制造系数	α_{fab}	1.00	0.93	0.85

6.2.3 管道壁厚设计

6.2.3.1 应进行承压破裂、外压压溃、扩展屈曲计算，得出满足要求的最小壁厚。

6.2.3.2 计算时应采用两种不同的特征壁厚： t_1 和 t_2 ，参见表5。

表5 特征壁厚的选取

特征壁厚	运行前期 ¹	运行阶段 ²
t_1	$t - t_{fab}$	$t - t_{fab} - t_{corr}$
t_2	t	$t - t_{corr}$

注1：运行前期包含安装工况和水压试验工况，通常腐蚀可忽略不计。如果存在腐蚀，应按照运行阶段的要求减去腐蚀裕量。
注2：运行阶段存在腐蚀时。
 t ——钢管设计壁厚，即钢管公称壁厚，单位为毫米（mm）。
 t_{fab} ——管道壁厚的制造误差，单位为毫米（mm）。
 t_{corr} ——管道壁厚腐蚀裕量，单位为毫米（mm）。

6.2.3.3 承压破裂

承压破裂计算时应考虑试压工况和操作工况，如式（2）～式（4）所示。

$$p_{li} - p_e \leq \min \left\{ \frac{p_b(t_1)}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}}; \frac{p_{li}}{\alpha_{spt}} - p_e; \frac{p_{mpt} \cdot \alpha_U}{\alpha_{mpt}} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$p_{li} - p_e \leq \min \left\{ \frac{p_b(t_1)}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}}, p_{mpt} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$p_{mpt} = \frac{2t}{D-t} \cdot \min[0.96SMYS, 0.84SMTS] \dots\dots\dots (4)$$

其中：

$$p_e = (\rho_{sea} \cdot g \cdot h_{sea} + \rho_b \cdot g \cdot H_b) \times 10^{-6} \dots\dots\dots (5)$$

$$p_{li} = p_{inc} + \rho_{cont} \cdot g \cdot (h_{ref} - h_l) \times 10^{-6} \dots\dots\dots (6)$$

$$p_{li} = p_t + \rho_t \cdot g \cdot (h_{ref} - h_l) \times 10^{-6} \dots\dots\dots (7)$$

$$p_{li} = 1.25 p_d \dots\dots\dots (8)$$

承压抗力应按式（9）计算：

$$p_b = \frac{2t}{D-t} \cdot f_{cb} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \dots\dots\dots (9)$$

$$f_y = (SMYS - f_{y,temp}) \cdot \alpha_U \dots\dots\dots (10)$$

$$f_u = (SMTS - f_{u,temp}) \cdot \alpha_U \dots\dots\dots (11)$$

$$f_{cb} = \min\left[f_y, \frac{f_u}{1.15}\right] \dots\dots\dots (12)$$

式中：

- p_{li} ——局部偶然压力，单位为兆帕（MPa）；
- p_e ——外部压力，单位为兆帕（MPa）；
- p_b ——破裂压力，单位为兆帕（MPa）；
- p_d ——设计压力，单位为兆帕（MPa）；
- α_U ——材料强度因子；
- γ_m ——材料抗力系数；
- γ_{SC} ——安全等级抗力系数；
- p_{lt} ——局部（系统）试验压力，单位为兆帕（MPa）；
- p_{mpt} ——工厂试验压力，单位为兆帕（MPa）；
- α_{spt} ——系统压力试验系数；
- α_{mpt} ——工厂压力试验系数；
- p_{inc} ——在参考点的偶然参考压力，单位为兆帕（MPa）；
- ρ_{cont} ——管道内输送介质密度，单位为千克每立方米（ kg/m^3 ）；
- ρ_{sea} ——海水密度，单位为千克每立方米（ kg/m^3 ）；
- ρ_b ——管道上覆土的饱和密度，单位为千克每立方米（ kg/m^3 ）；
- g ——重力加速度，单位为米每二次方秒（ m/s^2 ）；
- h_{sea} ——设计水位，单位为米（m）；
- H_b ——海底泥面至管道中心的距离，单位为米（m）；
- h_{ref} ——参考点高程（向上为正），单位为米（m），如无相关数据，通常取0；
- h_l ——局部压力点高程（向上为正），单位为米（m）；
- p_t ——在参考点系统测试压力，单位为兆帕（MPa）；
- ρ_t ——管道内试压介质密度，单位为千克每立方米（ kg/m^3 ）；
- p_d ——设计压力，单位为兆帕（MPa）；
- D ——钢管直径，单位为毫米（mm）；
- D_s ——管道外径，单位为毫米（mm）；
- $SMYS$ ——规定的最小屈服强度，单位为兆帕（MPa）；
- $SMTS$ ——规定的最小拉伸强度，单位为兆帕（MPa）；
- $f_{y,temp}$ ——温度对材料的屈服强度造成的减小值，单位为兆帕（MPa），参见图2；
- $f_{u,temp}$ ——温度对材料的抗拉强度造成的减小值，单位为兆帕（MPa）；
- f_y ——设计屈服强度，单位为兆帕（MPa），参见表 6；
- f_u ——设计抗拉强度，单位为兆帕（MPa），参见表 6；
- f_{cb} ——取 f_y 和 $f_u/1.5$ 的最小值，单位为兆帕（MPa）。

表6 特征材料强度

特征材料强度	取值
设计屈服强度	$f_y = (SMYS - f_{y,temp}) \cdot \alpha_U$
设计拉伸强度	$f_u = (SMTS - f_{u,temp}) \cdot \alpha_U$ ¹
注：如无其他可参考数据， $f_{u,temp}$ 取值应与 $f_{y,temp}$ 一致。	

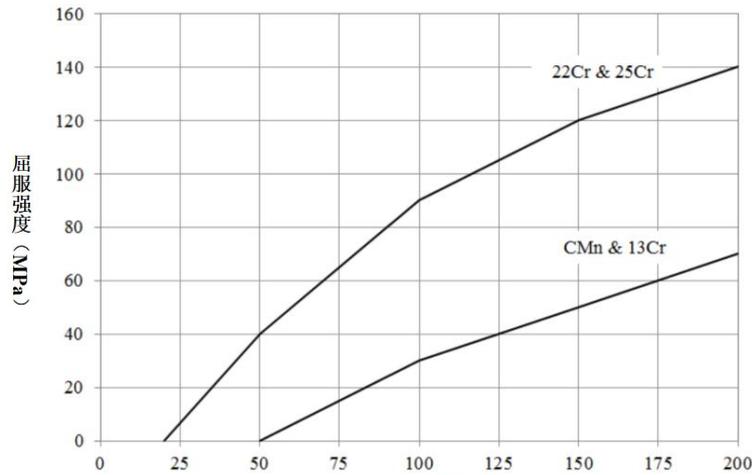


图2 屈服强度随温度(°C)变化曲线 (最低值 $(f_{y,temp})$)

6.2.3.4 外压压溃

海底管道水平定向钻管道任意位置的管道外压应满足：

$$p_e - p_{\min} \leq \frac{p_c(t_1)}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC, LB}} \quad (13)$$

$$(p_c - p_{el}) \cdot (p_c^2 - p_p^2) = p_c \cdot p_{el} \cdot p_p \cdot f_0 \cdot \frac{D}{t_1} \quad (14)$$

$$p_{el} = \frac{2 \cdot E \cdot \left(\frac{t_1}{D}\right)^3}{1 - \nu^2} \quad (15)$$

$$p_p = f_y \cdot \alpha_{fab} \cdot \frac{2t_1}{D} \quad (16)$$

式中：

p_{\min} ——管道最小内压，单位为兆帕（MPa），对已铺设的管道通常取0；

p_c ——外压压溃的特征抗力，单位为兆帕（MPa）；

p_{el} ——弹性破裂压力，单位为兆帕（MPa）；

p_p ——塑性破裂压力，单位为兆帕（MPa）；

f_0 ——椭圆度；

ν ——泊松比；

α_{fab} ——最大制造系数。

6.2.3.5 用于系统压溃的外压应取最大的设计水位和埋深组合计算出的外压。

6.2.3.6 扩展屈曲特征抗力应满足：

$$p_e - p_{\min} \leq \frac{p_{pr}(t_2)}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC, LB}} \quad (17)$$

$$p_{pr} = 35 \cdot f_y \cdot \alpha_{fab} \left(\frac{t_2}{D}\right)^{2.5} \quad (18)$$

式 (17) 和式 (18) 仅适用于 $15 < D/t_2 < 45$ 的情况。

式中：

p_{pr} ——扩展压力抗力，单位为兆帕 (MPa)。

6.2.3.7 用于扩展屈曲的外压应根据连通器原理，选择定向钻最大高程差以及泥浆动密度计算出的外压。

6.2.4 稳定性设计

6.2.4.1 海底管道水平定向钻应能在各计算工况中保持在位稳定，运行工况下管道在位稳定性校核时应考虑管道内腐蚀引起的管道重量减小。

6.2.4.2 稳定性设计应包含管道在横向和垂向的在位稳定性校核，稳定性设计应确定使管道保持在位稳定所需的混凝土配重层厚度。

6.2.4.3 海上过渡段管道在海水中的重量应满足下列准则：

$$\gamma_w \cdot \frac{b}{w_s + b} \leq 1.00 \dots\dots\dots (19)$$

式中：

γ_w ——安全系数，取值应不小于1.1；

w_s ——管道有效重量，单位为牛 (N)；

b ——管道浮力，单位为牛 (N)。

6.2.4.4 海上过渡段管道放置在海床上时宜校核其下沉的可能性，埋设后宜校核其下沉或上浮的可能性。下沉时宜考虑管道中的最大介质密度，而上浮宜考虑管道中的最小介质密度。如有必要，可依据 SY/T 7611 计算管道在土壤中的沉降深度。

6.2.4.5 穿越段管道在泥浆中的有效重量不宜超过 ± 2 kN/m。

6.2.4.6 如果管道承受波浪和海流荷载，应按 SY/T 7060 的规定进行横向稳定性校核。

6.2.4.7 应依据在位稳定性计算、定向钻扩孔能力以及施工工序等因素合理选取混凝土配重层厚度。除海上预制向陆上回拖的情况外，海上过渡段和穿越段管道应采用相同的混凝土配重层厚度。

6.2.4.8 如果采用混凝土配重层，其厚度不应小于 40 mm。混凝土配重层的规格应符合 SY/T 10037 的要求。

6.2.5 回拖力计算

6.2.5.1 海底管道水平定向钻其在回拖过程中的分段如图 3 所示。

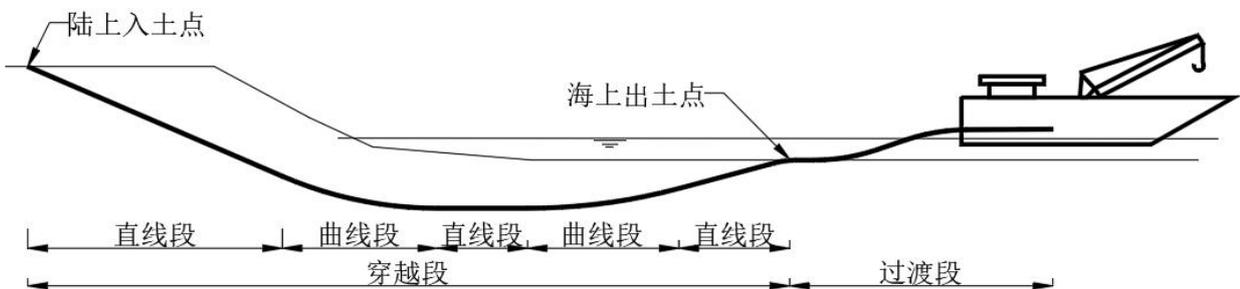


图3 海底管道水平定向钻穿越轴线分段示意图

6.2.5.2 直线段回拖力应按式 (20) ~ 式 (22) 计算。

$$T_L = |F_f| + F_h \pm W_p L_{str} \sin \beta \dots\dots\dots (20)$$

$$F_f = \mu_h W_p L_{str} \cos \beta \dots\dots\dots (21)$$

$$F_h = \pi D_s L_{str} \mu_{mud} \dots\dots\dots (22)$$

式中：

T_L ——直线段回拖力，单位为千牛（kN）；

F_f ——孔道内摩擦阻力，单位为千牛（kN）；

μ_h ——管道与孔壁的摩擦系数；

W_p ——考虑钻泥浆浮力后管道单位长度的净重，单位为千牛每米（kN/m）；

β ——管道倾角，单位为度（°）；

F_h ——孔内泥浆阻力，单位为千牛（kN）；

μ_{mud} ——流体阻力系数，单位为千帕（kPa）；

L_{str} ——直管段长度，单位为米（m）。

6.2.5.3 曲线段回拖力由式（23）～式（25）计算。

$$T_C = 2|F_f| + F_h \pm W_p L_{arc} \sin \beta \dots\dots\dots (23)$$

$$F_f = \mu_h W_p L_{arc} \cos \beta \dots\dots\dots (24)$$

$$F_h = \pi D_s L_{arc} \mu_{mud} \dots\dots\dots (25)$$

式中：

T_C ——曲线段回拖力，单位为千牛（kN）；

L_{arc} ——管道弧线长度，单位为米（m）。

6.2.5.4 过渡段回拖力应按照式（26）～式（30）计算。

$$T_T = F_T + F_{fs} + F_0 \dots\dots\dots (26)$$

$$F_T = \frac{1}{2} K_g C_f \rho_{sea} V^2 A_{ws} \dots\dots\dots (27)$$

$$F_{fs} = W_s \mu_s \dots\dots\dots (28)$$

$$C_f = \frac{0.075}{(\lg R_e - 2)^2} \dots\dots\dots (29)$$

$$R_e = \frac{VD_s}{\nu_m} \dots\dots\dots (30)$$

式中：

F ——过渡段拖拉登陆所需要的拖拉力，单位为千牛（kN）；

F_T ——海水阻力，单位为千牛（kN）；

F_{fs} ——海洋管道与海床的摩擦力，单位为千牛（kN）；

F_0 ——预设后拽力，单位为千牛（kN）；

K_g ——安全系数，取 1.25；

C_f ——海水阻力系数；

R_e ——雷诺数；

ν_m ——运动黏度，单位为平方米每秒（ m^2/s ）；

ρ_{sea} ——海水密度，单位为千克每立方米（ kg/m^3 ）；

V ——管道与海流之间的相对速度：包括拖管速度和海水流速，海水流速包括波激水质点速度和恒定海流速度两部分，单位为米每秒（m/s）；

A_{ws} ——管段的湿表面积，单位为平方米（m²）；

μ_s ——海底管道与海床的摩擦系数。

6.2.5.5 总回拖力由式（31）计算。

$$T_{tot} = \sum T_s \dots\dots\dots (31)$$

式中：

T_s ——各段回拖力，单位为千牛（kN）；

T_{tot} ——总回拖力，单位为千牛（kN）。

6.2.6 管道应力校核

6.2.6.1 端帽效应引起的应变应按式（32）计算。

$$\varepsilon_E = \frac{(p_i - p_e)D}{4tE} \dots\dots\dots (32)$$

式中：

ε_E ——端帽效应引起的应变；

E ——弹性模量，单位为兆帕（MPa）。

6.2.6.2 泊松效应引起的应变应按式（33）计算。

$$\varepsilon_V = -\nu \left[\frac{p_i(D - 2t) - p_e D}{2tE} \right] \dots\dots\dots (33)$$

式中：

ε_V ——泊松效应引起的应变。

6.2.6.3 操作工况或试压工况与安装工况的温度差导致的管道应变应按式（34）计算。

$$\varepsilon_T = \alpha(T_i - T_{ai}) \dots\dots\dots (34)$$

式中：

ε_T ——温差引起的轴向应变；

T_i ——管道设计温度，单位为摄氏度（℃）；

T_{ai} ——管道安装工况温度，单位为摄氏度（℃）；

α ——线膨胀系数，单位为每摄氏度（1/℃）。

6.2.6.4 在校核地震的工况下，应考虑地震引起的轴向应变；在安装工况下，应考虑回拖引起的轴向应变。

6.2.6.5 对于由温度差产生的管道应变，应通过计算管道在最高及最低运行温度下的温差应变，选择使管道应变最大的方向进行组合。

6.2.6.6 热膨胀作用下管道的总应变应取为上述各应变的总和：

$$\varepsilon_{TOT} = \varepsilon_E + \varepsilon_V + \varepsilon_T \dots\dots\dots (35)$$

6.2.6.7 管道所受轴向力应按式（36）计算。

$$F_H = \varepsilon_{TOT} A_s E \dots\dots\dots (36)$$

式中:

A_s ——钢管截面积, 单位为平方米 (m^2)。

6.2.6.8 组合荷载计算应校核以下工况下管道所受荷载:

- a) 安装工况;
- b) 试压工况;
- c) 运行工况;
- d) 运行工况+地震。

6.2.6.9 管道的截面弯矩:

$$M_0 = \frac{EI}{R} \dots\dots\dots (37)$$

式中:

M_0 ——管道因曲率半径引起的弯曲力矩, 单位为牛·米 ($N \cdot m$);

I ——钢管截面惯性矩, 单位为四次方米 (m^4);

R ——管道敷设曲率半径, 单位为米 (m)。

6.2.6.10 管道组合荷载应满足:

- a) 当 $15 \leq \frac{D}{t_2} \leq 45, p_i > p_e, \frac{|S_{sd}|}{S_p} < 0.4$ 时,

$$\left\{ \gamma_m \gamma_{sc} \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c M_p(t_2)} + \left[\gamma_m \gamma_{sc} \frac{S_{sd}(p_i)}{\alpha_c S_p(t_2)} \right]^2 \right\}^2 + \left[\gamma_p \frac{p_i - p_e}{\alpha_c p_b(t_2)} \right]^2 \leq 1 \dots\dots\dots (38)$$

$$M_{sd} = M_F \gamma_F \gamma_C + M_E \gamma_E + M_A \gamma_A \gamma_C + M_I \gamma_I \gamma_C \dots\dots\dots (39)$$

$$M_p(t) = f_y (D - t)^2 t \dots\dots\dots (40)$$

$$S_{sd} = S_F \gamma_F \gamma_C + S_E \gamma_E + S_A \gamma_A \gamma_C + S_I \gamma_I \gamma_C \dots\dots\dots (41)$$

$$S_p(t) = f_y \pi (D - t) t \dots\dots\dots (42)$$

$$\alpha_c = (1 - \beta) + \beta \frac{f_u}{f_y} \dots\dots\dots (43)$$

$$\gamma_p = \begin{cases} 1 - \beta & \frac{p_i - p_e}{p_b} < \frac{2}{3} \\ 1 - 3\beta \left(1 - \frac{p_i - p_e}{p_b} \right) & \frac{p_i - p_e}{p_b} \geq \frac{2}{3} \end{cases} \dots\dots\dots (44)$$

$$\beta = \frac{60 - \frac{D}{t_2}}{90} \dots\dots\dots (45)$$

式中：

- M_{sd} ——设计弯矩，单位为牛·米 (N·m)；
- M_F ——功能弯矩，即 M_0 ，单位为牛·米 (N·m)；
- M_E ——环境弯矩，单位为牛·米 (N·m)；
- M_A ——偶然弯矩，单位为牛·米 (N·m)；
- M_I ——干涉弯矩，单位为牛·米 (N·m)；
- S_F ——功能轴向力，即热膨胀考虑的总轴向应变 ε_{TOT} 对应的轴向力，单位为牛 (N)；
- S_E ——环境轴向力，单位为牛 (N)；
- S_A ——偶然轴向力，考虑地震的工况取地震轴向力，单位为牛 (N)；
- S_I ——干涉轴向力，单位为牛 (N)；
- M_p ——塑性弯矩抗力，单位为牛·米 (N·m)；
- S_{sd} ——设计有效轴向力，单位为牛 (N)；
- S_p ——塑性轴向力抗力，单位为牛 (N)；
- γ_p ——组合荷载压力系数；
- α_c ——流变应力参数；
- γ_C ——条件荷载分项系数，见表 3；
- γ_F ——功能荷载分项系数，见表 3；
- γ_E ——环境荷载分项系数，见表 3。

b) 当 $15 \leq \frac{D}{t_2} \leq 45$ ， $p_{\min} < p_e$ ， $\frac{|S_{sd}|}{S_p} < 0.4$ 时，

$$\left\{ \gamma_m \gamma_{sc} \frac{|M_{sd}|}{\alpha_c M_p(t_2)} + \left[\gamma_m \gamma_{sc} \frac{S_{sd}(p_i)}{\alpha_c S_p(t_2)} \right]^2 \right\}^2 + \left[\gamma_m \gamma_{sc} \frac{p_e - p_{\min}}{\alpha_c p_c(t_2)} \right]^2 \leq 1 \dots\dots\dots (46)$$

6.2.7 抗震设计

6.2.7.1 地震波在管道中传播引起的轴向应力，可通过式 (47) 进行近似计算。

$$\varepsilon_a = \frac{V_g}{\alpha_{cs} C_s} \dots\dots\dots (47)$$

式中：

- ε_a ——地震引起的轴向应变；
- V_g ——地震峰值地表速度，单位为米每秒 (m/s)；
- C_s ——场地土层等效剪切波速，单位为米每秒 (m/s)；
- α_{cs} ——场地土层等效剪切波速系数。

6.2.7.2 地震引起的轴向应变不应大于管-土界面处摩擦产生的轴向应变，应满足：

$$\varepsilon_a \leq \frac{T_u \lambda}{4A_s E} \dots\dots\dots (48)$$

$$T_u = \pi D \tau c + \pi D H_b \gamma \frac{-1+k_0}{2} \tan \delta \dots\dots\dots (49)$$

式中：

T_u ——土壤作用在管道上的单位长度阻力，单位为牛每米 (N/m)；

λ ——土壤表面地震波波长，单位为米 (m)；

τ ——黏结系数；

c ——回填土黏聚力，单位为千帕 (kPa)；

$\bar{\gamma}$ ——回填土有效重度，单位为千牛每立方米 (kN/m³)；

k_0 ——静止状态土压力系数；

δ ——管道与土壤内摩擦角，单位为度 (°)。

6.3 腐蚀与防护

6.3.1 一般规定

6.3.1.1 定向钻在钻孔和回拖过程中应采取适当的措施，确保成孔质量良好，并采取适宜的发送方式、必要的降浮措施等，以减小防腐层可能的损伤。

6.3.1.2 应根据穿越层地质条件采取相应的管道防腐层、防护层类型及结构。

6.3.1.3 水平定向钻管道施工完成后，与两侧线路管连通前，具备条件时，宜按 SY/T 7368 的规定进行防腐层完整性评价。

6.3.2 防腐及防护层设计

6.3.2.1 水平定向钻穿越段管道防腐层应耐海水、微生物侵蚀，宜采用三层聚烯烃类等材料，等级应为加强级，并满足 GB/T 23257 的要求。

6.3.2.2 当穿越碎石土、砾砂、中粗砂、破碎岩体以及单轴饱和抗压强度大于 15 MPa 的岩体时，管道防腐层为三层聚乙烯时宜设置防护层。

6.3.2.3 海底管道水平定向钻穿越段管道防护层，宜采用环氧、光敏等玻璃钢等材料或增加混凝土配重层。海对海水平定向钻穿越段管道宜采用混凝土配重层作为防护层。

6.3.2.4 穿越段管道防腐层补口应根据管体防腐层类型结构和地质条件进行选择，防腐层补口结构宜参照 SY/T 7368 的规定选用。

6.3.2.5 当管道带混凝土配重层穿越时，管道外防腐层宜采用与线路段海底管道相同的外防腐层和防腐补口，且聚氨酯泡沫成型后、管道穿越前宜摘除外护钢板。

6.3.3 阴极保护设计

6.3.3.1 水平定向钻穿越段管道应进行阴极保护，穿越段管道纳入永久阴极保护系统前应采取临时阴极保护措施。

6.3.3.2 水平定向钻穿越段阴极保护宜与海上主体段管道保持一致，采用牺牲阳极法，牺牲阳极类型、数量及安装位置等应满足 GB/T 35988 的要求。

6.3.3.3 当采用镯式阳极时，水平定向钻穿越段和海上过渡段管道宜通过铜导线与牺牲阳极连接，焊点牢固可靠，密封防腐良好。

6.3.3.4 水平定向钻穿越段与陆上主体管道间应设置电绝缘，并根据绝缘设施安装位置选用绝缘接头或绝缘法兰。

6.3.3.5 陆上端应设置必要的阴极保护检测装置。

7 场地布置

7.1 通用要求

- 7.1.1 海底管道水平定向钻穿越场地的选取应符合相关部门的要求，临时用地和用海应征得上方或相关部门的同意。
- 7.1.2 水平定向钻穿越场地的布置应能保证施工期间符合环保要求。
- 7.1.3 陆上穿越场地选择时宜利用已有地面设施，如已建道路等。
- 7.1.4 海上可采用海上支持船或平台作为海上钻机场地，此时需考虑海上支持船或平台在波浪、海流等环境荷载以及水平钻机力作用下的稳定性，设计时应尽量降低回拖力。
- 7.1.5 海上场地宜尽量避免占用海洋功能区，与功能区保持安全间距。如占用不可避免，应征得上方相关部门的同意。施工过程中对周边功能区的影响应符合该功能区的环保要求。

7.2 陆上场地

- 7.2.1 陆上入土场地宜为 80 m×80 m，最小不宜小于 40 m×40 m。
- 7.2.2 当陆上出、入土点地面高程低于最高潮位时，施工前应对陆上场地进行垫高处理，处理后的场地高程应不低于最高潮位，场地处理范围应满足钻机布置要求。
- 7.2.3 陆上入土场地两侧施工便道应满足设备材料进场要求，宽度不宜小于 4 m，弯道的转弯半径不宜小于 18 m，并应与公路平缓接通。
- 7.2.4 陆上组对焊接时，回拖场地所需长度应不小于水平定向钻管道水平长度再加 20 m，宽度宜按表 7 取值。

表7 回拖场地作业带宽度

序号	管径 <i>D</i> mm	作业带宽度 m
1	$D \leq 200$	12
2	$200 < D \leq 500$	16
3	$500 < D \leq 700$	18
4	$700 < D \leq 800$	20
5	$800 < D \leq 900$	22
6	$900 < D \leq 1000$	24
7	$1000 < D \leq 1422$	30

- 7.2.5 若因陆上回拖场地限制管段不能直线布置，可采用弹性敷设或管段多接一布置。
- 7.2.6 当陆上穿越部分有 6.1.2.3 所述地层时，可采取套管隔离、地质改良、开挖换填等措施处理后进行穿越。
- 7.2.7 采用套管隔离时，套管安装最大允许长度宜按式（50）～式（51）估算。

$$L_{ca} \leq \frac{1}{\pi D_{ca} f_k} \left(\frac{F_r}{1.3} - N_f \right) \dots\dots\dots (50)$$

$$N_f = \pi D_c t_c R_r \dots\dots\dots (51)$$

式中：

F_r ——夯管锤能提供的最大夯进力，单位为千牛（kN）；

D_{ca} ——套管外径，单位为米（m）；

L_{ca} ——套管安装最大允许长度，单位为米（m）；

f_k ——每延米套管外壁与土的平均摩阻力，单位为千帕（kPa）。应根据勘察报告提供的数据取值，如果地质报告未提供可靠数据，可按表 8 取值；如果施工过程中采用了触变泥浆减阻技术或其他技术措施时， f_k 应取 0.7 的折减系数；

N_f ——套管的迎面阻力，单位为千牛（kN）；

t_c ——套管切削环厚度，单位为米（m）；

D_c ——套管切削环外径，单位为米（m）；

R_r ——切削环端阻力，取地基土的极限承载力，单位为千帕（kPa）。

表8 每延米摩阻力标准值 f_k

单位为千帕

土层类别	f_k
流塑状态黏性土	10~15
可塑、软塑状态黏性土	10~25
硬塑状态黏性土	25~50
砂性土	12~25
砂砾石	15~20
卵石	18~30

7.2.8 采用套管隔离时，钢套管内径宜大于最后一级扩孔直径 300 mm。

7.2.9 采用套管隔离时，钢套管壁厚宜按式（52）初算。计算后，应结合施工方法和设备对钢套管进行强度和稳定性验算，若不能满足强度和稳定性验算要求，应增加钢管壁厚或采取其他技术措施。钢套管切削环应加强。

$$t_{ca} = \frac{1000F_r}{\varphi_1 \pi D_{ca} K} \dots\dots\dots (52)$$

式中：

t_{ca} ——套管初选壁厚，单位为毫米（mm）；

φ_1 ——钢管稳定系数，一般取0.36，当套管经过地层均匀时，可取0.45；

K ——钢管标准规定的最小屈服强度，单位为兆帕（MPa）。

7.2.10 采用开挖方法处理不利地层时，开挖完成后宜换填或设置隔离套管。

7.2.11 采用注浆加固处理不利地层时加固断面不宜小于 7 m×7 m，轴向加固长度宜伸入地质较好地层。

7.2.12 海底管道回拖就位后，管道与套管之间的端部环形空间应采用止水材料进行填充。

7.3 海上场地

7.3.1 海上支持船或平台的甲板应具有足够的空间，以满足钻机、泥浆罐、发电机、钻具放置区、操作间等的布置需求，甲板空间不足时可考虑增加辅助驳船。

7.3.2 海上支持船宜采用 6 锚及以上的多点锚泊方式，在钻杆提供给海上支持船的力的反方向布置的锚缆可适当增加长度。应通过系泊分析确定海上支持船锚泊方案是否可靠。

7.3.3 在海上支持船的系泊分析中应全面考虑可能的工况，包括：潮位的变化、全方向的风、波浪和海流条件、钻杆对海上支持船可能造成的最大拉力、推力以及其他施工措施对海上支持船的荷载。

7.3.4 驳船一般采用锚链或钢丝绳锚泊，锚泊张力的安全系数可按式（53）计算。

$$F = P_B / T_{\max} \dots\dots\dots (53)$$

式中：

P_B ——锚链或钢丝绳的最小额定破断荷载，单位为千牛（kN）；

T_{max} ——系泊分析得出的最大锚泊张力，单位为千牛（kN）；

7.3.5 系泊分析采用准静力分析法时，锚链或钢丝绳张力的安全系数应不小于 2.00；采用动力分析法时，安全系数应不小于 1.67。

7.3.6 锚端所承受的最大水平荷载可按式（54）计算。

$$P = T_{max} - Wh - fLW \dots\dots\dots (54)$$

式中：

P ——锚端承受的最大水平荷载，单位为千牛（kN）；

W ——锚链或钢丝绳单位长度水中重量，单位为千牛每米（kN/m）；

h ——水深，单位为米（m）；

f ——锚链或钢丝绳与海底间的摩擦系数，取决于锚泊点实际海底状况。当无确切数据供使用时，可按表9选取；

L ——锚链或钢丝绳与海底的接触长度，单位为米（m）。

表9 锚链及钢丝绳摩擦系数

项目	静摩擦系数	动摩擦系数
锚链	1.0	0.70
钢丝绳	0.6	0.25

7.3.7 锚端承载力的安全系数应不小于表 10 中规定的数值。

表10 锚端承载力安全系数

项目	安全系数
大抓力锚	1.5
吸力锚/重力锚（横向）	1.6
吸力锚/重力锚（轴向）	2.0

7.3.8 海上支持船的最大水平位移应满足定向钻设备的使用要求。

7.3.9 定向钻施工平台通常选为桩基固定式平台。平台主体采用钢结构形式，桩基础应根据场地地质实际情况选用钢管桩或混凝土灌注桩。

7.3.10 平台的甲板高程应在潮汐与波浪最不利组合情况下的最大波峰高程以上，再加上至少 1.5 m 的空气间隙，以保证甲板上设备的安全。

7.3.11 平台结构应具有足够的强度，以承受结构自重、钻机拖拉力和各种环境荷载的作用。桩基础应具有足够的刚度和强度，以免产生过大的变形或破坏。

7.3.12 平台结构校核应全面考虑所有可能的工况，包括操作和极端工况下的风、波浪、海流、潮位、海生物等。桩基础校核应考虑压桩和拔桩两种工况，且应进行桩基极限承载力校核。

7.3.13 平台所有杆件、桩段的名义应力校核以及平台所有节点的冲剪应力校核应满足 SY/T 10030 的要求。

7.3.14 平台结构的最大水平位移应满足结构和设备的使用要求。

7.3.15 入土点在海上的水平定向钻工程应在海上设置用于泥浆回收和支撑钻杆的钢套管。钢套管可采用支撑架支撑，支撑架宜使用钢结构支架，通过桩基础固定在海床上。支架间距应根据钢套管尺寸、平台高度、定向钻入土角度等综合确定。

7.3.16 海上支撑架及其桩基础的结构强度要求与平台结构强度的要求保持一致，参考 7.3.13。

7.3.17 定向钻施工平台和海上支撑架在施工结束后应及时拆除。

8 施工技术要求

8.1 导向孔

8.1.1 导向孔钻进应按设计的轨迹参数控制。导向员应及时将测量数据与设计轨迹的数据比较，引导司钻钻孔，将偏差值控制在要求的范围内。

8.1.2 导向孔实际曲线与设计穿越曲线的偏差应不大于 1%，且偏差应符合表 11 规定。

表11 导向孔允许偏差

单位为米

导向孔曲线		出土点	
横向偏差	上下偏差	横向偏差	纵向偏差
±5	+1~-2	±5	+9~-3

8.1.3 导向孔钻进过程中遇到突然的振动、卡钻应立即停钻，查明原因并解决问题后方可继续施工。

8.2 扩孔

8.2.1 扩孔应根据穿越管道的管径、长度、地质条件等选择扩孔器类型。

8.2.2 最终扩孔直径应根据管径、长度、地质条件和钻具能力确定。一般情况下，最小扩孔直径与穿越管径的关系应符合表 12 的规定。

表12 最小扩孔直径与穿越管径关系表

穿越管段的直径 mm	最小扩孔直径
<300	管径+100mm
300~700	1.5倍管径
>700	管径+300mm

注：如果穿越管道的直径小于 400 mm，在钻机能力许可的情况下，可直接扩孔回拖。

8.2.3 扩孔宜采取分级、多次扩孔的方式进行；在地层条件及辅助设备允许的情况下，可减少扩孔级次。相邻两级的扩孔级差宜控制在 100 mm~300 mm。

8.2.4 扩孔过程中出现长时间停钻时，应尽量使孔洞内泥浆流动，防止悬浮颗粒下沉堆积。

8.2.5 扩孔过程中，如发现扭矩、拉力较大，可采取洗孔作业；应在洗孔结束后，再进行扩孔；扩孔结束后，如发现扭矩、拉力仍较大，可再进行洗孔作业。

8.2.6 对于岩石地层，扩孔后宜进行洗孔作业，对于有凸台或曲线不符合要求的扩孔应进行修孔作业。

8.3 回拖

8.3.1 带混凝土配重层的海底管道在回拖前，宜对混凝土表面进行打磨处理，降低表面粗糙度。

8.3.2 管道回拖阶段，若组焊管道从陆上入洞，回拖管道入洞竖向曲线的曲率半径应经计算确定且不宜小于 800D，回拖管道入洞竖向曲线的最小曲率半径宜按式（55）计算。

$$R_p = 134 \times \frac{D}{K} \dots\dots\dots (55)$$

式中：

R_p ——回拖管道入洞曲线最小曲率半径，单位为米（m）；

8.3.3 回拖应连续作业，分段预制管道时每次二接一停留时间不宜超过 4 h，对于停留过长时间的钻孔，应维持泥浆在孔内的空间流动，钻杆也应低速旋转。

8.3.4 回拖过程中，最大回拖力不应超过钻机允许的最大回拖力。当回拖过程中出现回拖异常情况时，应停止回拖并采取应急方案。

8.3.5 海底管道水平定向钻机回拖力宜按 6.2.5 中回拖力计算值的 1.5 倍~3 倍选择。

8.4 泥浆

8.4.1 泥浆配方应根据地质条件，在泥浆实验室试配并确定。

8.4.2 应根据地质情况和钻进工艺，调整泥浆配方和泥浆性能。

8.4.3 在施工过程中，泥浆应尽量回收、处理和循环使用。

8.4.4 宜采用环保泥浆。

8.4.5 泥浆性能应符合 GB 50424 和 SY/T 6968 的要求。

8.5 海上作业

8.5.1 海上支持船锚位布置应根据锚泊分析结果确定，并核实在建议的锚位处、在作业期间锚位布置应具有所要求的能力。

8.5.2 施工船舶的锚泊设备不宜与海底管缆或水下结构相接触，锚应与海底管缆或水下结构保持安全距离。

8.5.3 应确定海上支持船与其他建筑物和非抛锚区的安全距离，并应考虑在紧急情况下离开现场的可能性。

8.5.4 海上支持船的锚泊定位系统应具有足够的冗余度或后备系统，以保证部分锚失效时不危及钻具或管道安全。

8.5.5 平台的海上施工作业应保证平台结构强度不受影响。对于影响结构强度的作业方式和方法，应进行强度复核计算和分析。

9 焊接与检验

9.1 焊接

9.1.1 海底管道水平定向钻焊接应按 SY/T 10037 的有关规定执行。本文件中所述焊接仅针对管线管对接焊缝，其他结构（如海上支持平台等）的焊接应参照相应标准执行。

9.1.2 焊接前应进行焊接工艺评定，明确管道焊接所采用的所有焊接工艺，依据评定通过的焊接工艺编制焊接工艺规程。

9.2 无损检测

9.2.1 海上焊接的普通环焊缝应进行 100% 全自动超声波检测。

9.2.2 陆上焊接的普通环焊缝宜采用 100% 射线检测和 100% 超声检测，或采用 100% 全自动超声波检测。

9.2.3 除 9.2.1 和 9.2.2 的规定外，关键位置（通常包括金口、定向钻与海底管道一般段连接处、定向钻多接一分段连接处等位置）还应补充 100% 磁粉或液体渗透检测。

9.2.4 无损检测的检测方法及验收标准应按 SY/T 10037—2018 中附录 D 和附录 E 的有关规定执行。

9.2.5 应依据返修焊接程序进行焊缝修复。局部焊缝修复长度不应小于 50 mm，不允许对同一位置进行两次以上的返修。返修处应采用和原焊缝相同的方法进行无损检测。

10 管线调试

10.1 清管、测径与试压

10.1.1 海底管道水平定向钻管段清管、测径与试压应符合 SY/T 10037 的相关规定。

10.1.2 试压前后均应进行清管和测径。清管次数不宜小于 2 次，以开口端不再排出杂物为合格；测径宜采用铝制测径板，直径为穿越管段钢管内径的 92%，测径板通过管段后未出现变形和褶皱为合格。

10.1.3 当海底管道水平定向钻管段在陆上预制时，宜在回拖前进行一次水压试验，试验压力应不小于 1.155 倍设计压力，持续稳压时间不小于 24 h，在稳压时间内压降不大于 1% 设计压力为合格。

10.1.4 海底管道水平定向钻管段回拖完成后，宜单独进行一次清管和测径，并与海底管道一般段连接后进行水压试验，试验压力应不小于 1.155 倍设计压力，持续稳压时间不小于 24 h，在稳压时间内压降不大于 1% 设计压力为合格。

10.1.5 水压试验时，穿越管段任何一点的试验压力与水头压力之和产生的环向应力不应大于钢管的最小屈服强度的 90%。

10.1.6 试压介质应采用无腐蚀的洁净水或经过处理的海水。试压时环境温度不宜低于 5℃，当环境温度低于 5℃ 时，应采取防冻措施。

10.2 脱水、干燥与惰化

10.2.1 海底管道水平定向钻管段脱水、干燥与置换应符合 DNVGL-RP-F115 的相关规定。

10.2.2 水压试验结束后应对管道进行脱水。

10.2.3 对于输气管道，脱水后应对管道进行干燥。宜采用真空干燥或利用干燥空气进行对流干燥，验收标准应满足以下要求：

- a) 采用真空干燥时，露点应不高于 -20℃，对应饱和蒸汽压为 0.103 kPa，管道内残余水量应不高于 0.9 g/m³；
- b) 利用干燥空气进行对流干燥时，入口处露点应不高于 -40℃，入口处和出口处露点的差值应小于 7℃。

10.2.4 正式投运前应使用氮气对整条定向钻管道进行吹扫。氮气可由液氮蒸发产生，也可由膜分离法生成。如果使用膜分离法生成氮气，最终含氧量应不高于 5%。如果氮气由液氮蒸发生成，其纯度应高于 99.99%。

10.2.5 如果需封存管道，可以采用抽真空或利用低压氮气置换管道内空气，应满足以下要求：

- a) 采用抽真空时，管道内绝对压强应不高于 0.1 kPa；
- b) 采用低压氮气置换时，应持续监测露点值并确保其低于限值，直至管道内绝对压强达到 0.11~0.15MPa。

参 考 文 献

- [1] GB/T 9711 石油天然气工业 管线输送系统用钢管
 - [2] GB/T 17501 海洋工程地形测量规范
 - [3] GB/T 17502 海底电缆管道路由勘察规范
 - [4] GB/T 23257 埋地钢质管道聚乙烯防腐层
 - [5] GB 50423 油气输送管道穿越工程设计规范
 - [6] SY/T 4109 石油天然气钢质管道无损检测
 - [7] SY/T 7368 穿越管道防腐层技术规范
-