

海底管道 力学

Submarine Pipeline Mechanics

梁 政 张 杰 张 瀚 编著



科学出版社

海底管道力学

梁 政 张 杰 张 瀚 编著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书内容涉及海底管道发展现状,管道力学中的基本理论方法,海底管道设计、强度及稳定性分析,拖拽法、“S”型、“J”型铺设力学,海底管道极限冲刷长度、流固耦合振动计算,管道热屈曲理论分析方法,坠落物冲击、抛锚作业、拖网作业等对海底管道的机械损伤分析,海底滑坡、地震作用下的管道力学等。

本书可为海洋油气管道的设计、铺设、评价、维修及防护工程等提供理论基础,可作为海洋工程、油气储运工程、过程装备与控制工程、机械工程等专业的本科生和研究生教材,亦可供海洋油气管道设计制造、安全评价和运营管理等领域的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

海底管道力学 / 梁政, 张杰, 张瀚编著. —北京: 科学出版社, 2018.5

ISBN 978-7-03-056909-7

I. ①海… II. ①梁… ②张… ③张… III. ①海底-水下管道-管道工程-工程力学-研究 IV. ①U173.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 049623 号

责任编辑: 罗 莉 / 责任校对: 彭 映
责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 5 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 5 月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 276 000

定价: 79.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

我国幅员辽阔,海岸线绵延数万千米,海域面积广阔,蕴藏着极其丰富的海洋能源及矿产资源。党的十八大作出“建设海洋强国”和“创新驱动发展”的战略部署,十九大报告再次提出“加快建设海洋强国”。海洋能源勘探、开采、运输、装备制造等相关工程都进入了前所未有的高速发展期。

作为海洋工程设备的“生命线”,海底管道因其安全、高效、稳定、经济、便捷等优点被广泛应用于海上油气生产活动的各个环节。自1954年世界上第一条海底管道建成后,各国大力发展海底管道。但是复杂多变的海洋环境,使得海底管道面临恶劣的运营环境。海底管道不仅受到腐蚀、冲刷、海床运动等环境因素的影响,还因人类活动的威胁,其发生失效、损毁、泄漏事故的概率大大增加。一旦海底管道发生泄漏,不仅会造成巨大经济损失,还将引发灾难性的生态破坏。因此保障海底管道的安全性、提高其可靠性是海洋油气开发的重要环节。而海底管道力学的研究是解决所有问题的核心和关键环节,可为海洋油气管道的设计、铺设、操作、运营、失效分析、安全评价、维修、防护等提供理论依据和参考。

本书大部分内容为作者的理论研究成果,同时编辑了国内外关于海底管道力学的部分研究成果。本书共分为8章:第1章为绪论,包括海底管道特点、建设现状、管材发展现状及管道铺设方法;第2章为海底管道力学基础理论,包括海洋水动力学、弹性地基梁、纵横弯曲弹性基础梁、加权残数法等管道力学计算常用的基本理论;第3章为海底管道设计的基本内容,包括海底管道承受载荷、基本设计规范、强度分析、稳定性分析;第4章为海底管道铺设力学,包括海底管道拖拽铺管法中的浮运力学、下沉铺设力学及“S”型、“J”型铺设力学;第5章为海底管道振动分析,包括海底管道涡激振动分析、极限冲刷长度计算、流-固耦合分析、疲劳分析等;第6章为海底管道热屈曲分析,包括刚性海床和柔性海床上的垂向、侧向热屈曲理论及相关判别方法;第7章为海底管道机械损伤分析,包括坠落物冲击、抛锚作业、拖网作业等对海底管道的机械损伤分析;第8章为海床灾害下的管道力学,包括海底滑坡、海底地震波、断层运动作用下的管道力学分析以及抗震措施等。

由于作者学识有限,书中难免会有不完善的地方,恳请读者批评指正,以期推动我国油气管道力学基础理论研究的深入和发展。感谢西南石油大学“油气装备设计与研究”团队的各位老师、研究生在本书成稿过程中提供的帮助;感谢“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0802100)、深地科学与工程教育部重点实验室(四川大学)开放基金(EES201604)对本书出版的支持。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 海底管道特点及分类	2
1.2.1 海底管道特点	2
1.2.2 海底管道分类	3
1.3 海底管道发展现状	4
1.3.1 海底管道建设现状	4
1.3.2 海底管道材料发展现状	5
1.3.3 海底管道铺设方法及应用现状	6
参考文献	8
第 2 章 海底管道力学基础理论	9
2.1 海洋水动力理论	9
2.1.1 波浪的作用	9
2.1.2 海流的作用	16
2.2 弹性地基梁理论	17
2.2.1 弹性地基梁的特点	17
2.2.2 弹性地基模型分类	18
2.2.3 弹性地基梁求解方法	19
2.3 纵横弯曲弹性基础梁理论	19
2.3.1 轴向力为拉力	20
2.3.2 轴向力为压力	25
2.4 加权残数法理论	29
2.4.1 基本概念	29
2.4.2 基本方法	30
2.4.3 试函数选择	31
参考文献	32
第 3 章 海底管道设计基本方法	33
3.1 海底管道载荷	33
3.1.1 载荷效应系数与载荷组合	33
3.1.2 功能载荷	34
3.1.3 特征载荷效应	34
3.1.4 环境载荷	34
3.1.5 建造载荷	35

3.1.6 偶然载荷	35
3.1.7 其他载荷	35
3.2 海底管道设计	36
3.2.1 管道设计规范	36
3.2.2 管壁厚度设计	36
3.2.3 管材等级选择	36
3.2.4 环向应力设计	37
3.2.5 等效应力设计	37
3.2.6 静水压溃设计	37
3.3 海底管道强度	38
3.3.1 内外压作用下的管壁应力	39
3.3.2 温度变化引起的管壁应力	41
3.3.3 管材强度校核	43
3.4 海底管道稳定性	44
3.4.1 海底管道稳定性条件	44
3.4.2 保持海底管道稳定性措施	45
3.4.3 海底管道埋设深度	45
3.4.4 海底管道锚固	47
参考文献	47
第4章 海底管道铺设力学	48
4.1 海洋管道直接漂浮拖运分析	48
4.1.1 模型建立	48
4.1.2 理论分析	50
4.1.3 算例分析	52
4.2 多浮筒海洋管道拖运分析	54
4.2.1 模型建立	54
4.2.2 理论分析	58
4.2.3 算例分析	60
4.3 海洋管道漂浮铺设充水下沉分析	63
4.3.1 模型建立	63
4.3.2 理论分析	64
4.3.3 非线性方程组求解	74
4.3.4 管道强度计算	74
4.3.5 算例分析	75
4.4 海底管道“J”型铺设力学	76
4.4.1 模型建立	76
4.4.2 理论分析	77
4.4.3 算例分析	83

4.5 海底管道“S”型与“J”型铺设力学对比分析	83
4.5.1 模型建立	84
4.5.2 理论分析	84
4.5.3 计算方法	87
4.5.4 算例分析	88
参考文献	89
第5章 海底管道振动分析	90
5.1 涡激振动基本原理	90
5.1.1 旋涡的形成	90
5.1.2 涡激振动	91
5.2 涡激振动控制参数	91
5.2.1 流体参数	91
5.2.2 结构参数	92
5.2.3 流固耦合参数	92
5.3 海底管道极限冲刷长度	93
5.3.1 管道自振频率计算	93
5.3.2 管道极限冲刷长度确定	98
5.3.3 应用举例	101
5.4 轴向力作用下海底管道极限冲刷长度	103
5.4.1 模型建立	103
5.4.2 理论分析	104
5.4.3 应用举例	109
5.5 海底输油管道耦合振动分析	111
5.5.1 流-固耦合弯曲振动方程	111
5.5.2 液-固耦合弯曲振动的频率方程	113
5.5.3 管道极限冲刷长度确定	116
5.6 充液不满海底管道耦合振动分析	116
5.6.1 流-固耦合弯曲振动微分方程	117
5.6.2 海底管道自振频率	122
5.6.3 管道的极限冲刷长度	126
5.7 海底管道振动与疲劳分析	127
5.7.1 悬跨管道涡激振动动力响应分析	127
5.7.2 悬跨管道疲劳可靠性分析	128
参考文献	132
第6章 海底管道热屈曲分析	133
6.1 刚性海床上海底管道热屈曲	133
6.1.1 刚性海床上管道垂向热屈曲	133
6.1.2 刚性海床上管道侧向热屈曲	136

6.2 刚性海床上外力触发管道热屈曲	137
6.2.1 刚性海床集中力触发管道垂向热屈曲	137
6.2.2 刚性海床集中力触发管道侧向热屈曲	139
6.3 柔软海床上海底管道垂向热屈曲	140
6.3.1 模型建立	140
6.3.2 理论推导	141
6.4 最小屈曲间距判别方法	145
6.4.1 轴向力判别法	145
6.4.2 滑动距离判断法	146
参考文献	146
第7章 海底管道机械损伤分析	148
7.1 坠落物冲击海底管道	148
7.1.1 能量法	148
7.1.2 经验公式法	150
7.2 抛锚作业冲击海底管道	151
7.2.1 理论分析	151
7.2.2 实验研究	155
7.2.3 锚击概率	155
7.3 拖网作业对海底管道影响	157
7.3.1 拖网作业特点	157
7.3.2 理论分析	157
参考文献	160
第8章 海床灾害下海底管道力学	162
8.1 海底滑坡对管道影响	162
8.1.1 滑坡区管道力学模型	163
8.1.2 管道各段控制方程	164
8.1.3 计算结果分析	165
8.2 海床断层运动对管道影响	166
8.2.1 理论解析方法	166
8.2.2 试验方法	172
8.2.3 数值仿真	172
8.3 地震波作用下管道应力与应变	175
8.3.1 地震时地基土体变形	175
8.3.2 地震时管道应力	177
8.4 海底管道抗震设计与措施	178
8.4.1 海底管道抗震设计	178
8.4.2 海底管道抗震措施	178
参考文献	178

第1章 绪 论

1.1 概 述

随着世界经济的快速发展,能源短缺已成为各个国家亟待解决的重要问题。常规陆上石化能源供给量已无法满足各行业与日俱增的需求量。从20世纪40年代末期起,拥有海洋领土的国家就陆续开始着手海洋油气资源的勘探与开发,力求通过探索海洋能源开发新模式以缓解由社会经济发展造成的能源供需矛盾。我国幅员辽阔,海岸线绵延数万公里,海域面积广阔,蕴藏着极其丰富的海洋能源及矿产资源。

近年来,我国加大了对海洋油气的勘探力度,现已探明海洋天然气储量达 $15.79 \times 10^{12} \text{m}^3$,占全国天然气资源总量的29%,其中近海三级天然气地质储量达到 $1.7534 \times 10^{12} \text{m}^3$;海洋石油资源量达 $1.074 \times 10^{10} \text{t}$,占全国石油资源总量的22.9%。因此,合理地开发利用海洋油气资源直接关系到我国经济的安全、稳定发展。随着国家对海洋能源工程支持力度的增大,海洋能源勘探、开采、运输、装备制造等相关工程都进入了前所未有的高速发展期。

经过几十年的发展,我国已研发出诸如海洋钻井平台、水下采油树、深水起重铺管船、人工岛、地震勘探船、水下集输系统等一系列系统化、智能化的海洋工程装备,为全面开发海洋油气资源奠定了坚实的基础。

近浅海油气集输主要采用两种方式:单点系泊系统+浮式生产储油轮+穿梭油轮,生产平台+海底集输管道+中心平台+海底长输管道。深海油气集输均采用水下生产系统(主要包括生产井口、集输管道、油气处理装置等),油气外输主要采用海底长输管道将油气输至陆地接收终端。

显然,海底管道因其安全、高效、稳定、经济、便捷等优点被广泛应用于海上油气生产活动的各个环节,海底管道不仅连通了海上油气田开采、集输、长输等生产环节,而且将海上油气生产系统与陆上油气生产系统连为一体,实现了海陆油气的无缝对接。

海底管道按照输送介质可分为海底输油管道、海底输气管道、海底油气混输管道、海底输水管道等。自1954年世界上第一条海底管道建成后,各国大力发展海底管道建设。据不完全统计,半个多世纪以来国内外已建成总长度超过10万千米的海底管道并投入使用。

跨地中海管道(Trans-Mediterranean Pipeline)于1983年开始运行,最大水深610m。1996年建成投产的马格里布—欧洲输气管道(Maghreb-Europe Gas Pipeline)部分管段穿越地中海直布罗陀海峡,最大水深400m。Greenstream管道于2004年建成投产,自利比亚穿越地中海到意大利格拉海岸,全长510km,最大水深1127m。2011年建成投产的Medgaz海底输气管道长约210km,最大水深2160m,年输气量达80亿 m^3 。

国内海底管道建设起步于20世纪70年代,1973年黄岛铺设了我国第一条海底管道,由于当时技术限制,管道长度仅为500m。1992年,我国建成投产了第一条长距离油气混

输海底管道——锦州 20-2 气田海底管道。迄今为止，我国海域建成的海底管道已超过 4000km。

海洋环境复杂多变，海底管道须面对比陆地更恶劣的运行环境。海底管道不仅受腐蚀、波流冲刷、海床运动等环境因素影响，而且还易受到人类活动造成的威胁，发生失效、损毁、泄漏等安全事故的概率大大增加。此外，由于海底管道所处环境特殊，一旦发生安全事故，污染物扩散范围远大于陆上管道，这不仅将造成巨大的经济损失，而且可能引发灾难性的生态破坏。

2000~2012 年，国内海底管道泄漏事故统计见表 1-1。

表 1-1 2000 ~ 2012 年我国海底管道泄漏事故统计

时间	海域	事故概况
2000 年	东海	波流冲刷导致平湖油气田岱山段管道疲劳断裂
2001 年	渤海	渤西油田天然气管道因锚拖拉导致泄漏
2003 年	渤海	悬空导致埕岛油田海底注水管道泄漏
2004 年	南海	番禺油田海底管道腐蚀泄漏
2005 年	渤海	不法分子打孔盗油导致埕岛油田海底管道泄漏
2007 年	南海	涠洲原油管道腐蚀泄漏
2007 年	南海	船舶施工导致东方油田海底天然气管道泄漏起火
2008 年	渤海	船舶起锚导致渤西油田外输天然气管道泄漏
2008 年	南海	台风导致惠州油田海底管道损伤泄漏
2009 年	渤海	埕岛油田海底管道因冲刷悬空导致泄漏
2009 年	渤海	海底输油管道因外力拖拽导致破裂渗漏
2010 年	大连湾	油轮卸油时输油管线发生闪爆导致原油起火和原油入海
2011 年	辽东湾	海底混输管道因船舶起锚作业导致泄漏
2011 年	珠海	挖沙作业导致横琴天然气处理终端海底天然气管道泄漏
2011 年	渤海	海底地层断裂带在采油压力之下突然裂开导致油田溢油
2012 年	东海	海底输油管道遭受台风影响并发生断裂

因此，保障海底管道的安全性、提高其可靠性是海洋油气开发的重要环节。海底管道的基本理论研究是解决所有相关问题的核心和关键，特别是不同工况下的管道力学行为研究，对海洋油气管道的设计、铺设、操作、运营、失效分析、安全评价等均具有重要的理论意义和工程应用价值。

1.2 海底管道特点及分类

1.2.1 海底管道特点

优点：可以连续输送，受环境制约小，输送能力强、效率高；海洋管道铺设工期短，投产快，管理方便，操作费用低。

缺点：由于处于海底，检查与维修困难；受潮流的影响较大，对处于潮差或波浪带的管段/立管，可能遭受海中漂浮物和船舶撞击或抛锚破坏。

1.2.2 海底管道分类

按管道横截面结构分类：单壁管；管中管（pipe-in-pipe, PIP）；集束管。

按管道输送介质分类：海底输油管道；海底输气管道；海底输水管道；油气混输管道。

按管道工作范围分类：出油管道——连接井口与平台；油（气）集输管道——用于输送、汇集；油气外输管道——用于平台与陆上处理终端之间；装卸管道——用于平台与装油设施之间。

1. 单壁管

单壁管（图 1-1）一般用于长距离输送的单层保温钢管。海洋管道的钢管一般为以下三种：无缝钢管、电阻焊直缝钢管、直缝焊接钢管。对于所用钢材的物理、化学等特性，参考相关规范。

2. 管中管（PIP）

管中管（图 1-2）的外管为整个系统提供有效的机械保护，而内管作为油气等流体的通道；在内外管之间填充绝热材料，而有些新型的管中管结构会在内管与绝热材料之间设置主动加热线，以满足管内油气资源能够保持良好的流动性；内外管之间一定距离间安装扶正器。

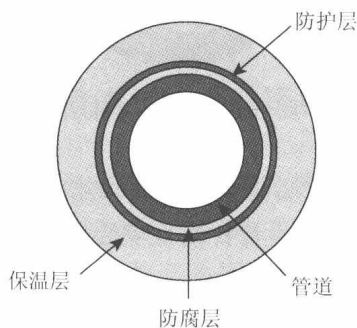


图 1-1 单壁管

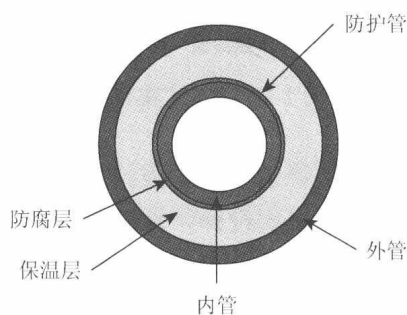


图 1-2 管中管

深水 PIP 的关键技术主要包括：

（1）保温材料选择。

深水：保温性能要求高，材料厚度大，多选气凝胶。

浅水：保温材料多选聚氨酯泡沫，以降低成本。

（2）热膨胀设计。

约束条件下由于温度与压力作用，PIP 易发生膨胀屈曲，其分析需要综合考虑内外管与管土的相互作用。

(3) 侧向屈曲。

由于受较大的轴向力作用, PIP 发生侧向屈曲失效, 深水环境下还需注意崩裂、断裂、疲劳、局部弯曲这几种失效的耦合。

(4) 管道的铺设。

在铺设过程中会发生过大的纵向屈曲, 需要严控施工参数, 防止事故发生。

3. 集束管

海底集束管系统由承载管、护套管、油气水输送管道以及电缆等组成。一般分为两类, 即开放式与封闭式。

开放式集束管(图 1-3): 将单独的管(含电缆)用卡(夹)具或绳索固定成一体, 防止相互窜动。优点: 工艺简单, 成本低廉。缺点: 输油输气管直接暴露在海水中, 易遭破坏, 易污染环境。

封闭式集束管(图 1-4): 将多根油气水输送管道、加热管和电缆等汇集在一根大口径的运送管(承载管)内, 形成保护。优点: 有效避免输油管的泄漏, 减轻对海域的污染。缺点: 工艺复杂, 需要综合考虑油气田的产能和集输要求。

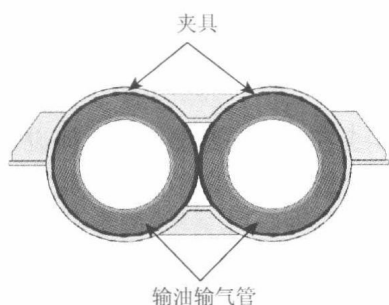


图 1-3 开放式集束管

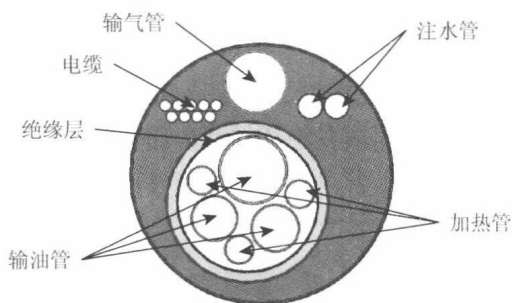


图 1-4 封闭式集束管

海底集束管道设计要点: 海底集束管道输油设计; 海底集束管道整体结构设计; 保温和加热设计; 垫块设计; 隔舱壁设计; 拖头设计; 脐带缆设计; 海底集束管道跨越设计; 压载链设计; 海底集束管道附属物设计。

海底集束管道的关键技术在于: 路由的选择, 选择合理的铺设路由, 经济性与安全性; 材料的选择, 材料范围很广, 从低碳钢到特种钢(双向不锈钢, 如铬 13); 管束壁厚的确定, 需综合考虑环向压力、外部静水压力、局部屈曲、海地稳定性、安装应力、制造公差等因素; 管束热绝缘设计; 管束的构型设计。

1.3 海底管道发展现状

1.3.1 海底管道建设现状

随着社会的发展、世界各国对能源需求的增加, 海洋油气田作为巨大的能源产库, 已

经成为全球瞩目的焦点。由于海洋油气田处于非常特殊的环境之中,其勘探开发的技术要求比陆地油气开采更高,随着技术的日益成熟,人类开采的区域也由近岸、浅海逐渐向远海、深海发展。当今世界已有多个国家从事海洋油气资源的勘探开发,其中著名的海上大油气区有墨西哥湾、波斯湾、北海和加利福尼亚湾等。

海底油气输送管道是指最高水位时,位于海面以下的那部分管道,直径一般为 20cm 至 1m,是海上油气田开发中油气输送的主要方式,也称为海洋油气生产系统中的“生命线”。1954 年, Brown&Root 公司在美国墨西哥湾铺设了世界上第一条海底管道。半个多世纪里,世界各国铺设的海底管道总长度已达十几万千米。

随着水深不断增加,输送压力不断提高,各国正在不断创造新纪录:

(1) 铺设水深。2014 年完工的从阿尔及利亚延伸至撒丁岛的地中海水下 Galsi 管道创造了 2824m 的新水深纪录。

(2) 管道长度。2004~2007 年,在挪威和英国之间铺设的 Lan-geled 天然气管道的长度达到 1173km,成为世界上最长的海底管道。

(3) 钢管壁厚。俄罗斯和欧洲之间穿越波罗的海的输气管道(nord streamproject),使用了 X70 钢管,管径 1219mm,最大壁厚达到 41.0mm,是目前海底管道工程中应用的最大壁厚钢管。

我国从 1985 年建成第一条海底输油管道开始,2012 年完工的南海—荔湾输气管道工程项目,开创了我国 1500m 作业水深的管道工程纪录。在管道长度方面,从海南岛近海某气田至香港的一条直径为 711mm 的海底输气管道长达 800km,是我国目前最长的一条海底管道。在钢管壁厚方面,南海—荔湾输气管道工程项目中的 X70 钢管的最大壁厚为 31.8mm。作为中石化上游油气勘探企业,胜利油田先后建成了 170 多条海底管线,总长度超过 360km,并且铺设海底电缆 82 条共 201km。

1.3.2 海底管道材料发展现状

现在开采的海洋油气大部分是通过海底油气管道输送,一旦海底油气输送管道工作/作业中出现因管道断裂或其他事故引起的油气输送效率降低或更严重的油气泄漏、污染海洋及自然环境等事件,将严重影响到经济发展和环境保护。

目前普遍的做法是采用双相钢,以保证管线钢的强度和良好的塑性。采用双相钢的高应变管线钢,最早由日本 NKK 钢铁株式会社提出,并在 NKK 福山工厂成功试制 X65 钢。国外已公开的大应变管线钢有日本 JFE 钢铁株式会社(前 NKK 钢铁株式会社与川崎制铁合并)开发的 HIPER 和新日本制铁株式会社的 TOUGH-ACE。欧洲钢管公司也宣称开发了 X100 级别的大变形管线钢管,并用于 North Central Corridor 管线。我国在 2011 年中缅油气管道工程项目中首次进行了 X70 抗大变形管线钢管的工业化试制。国内生产的 X70 抗大变形钢管产品性能稳定,各项指标满足相关标准要求。2012 年,国产 X80 抗大变形管线钢管也在中亚 D 线陆上管线中成功应用。

海底管道处在海洋冷水环境中,承受一定水深的静压力。由于海水温度比较低,在管输过程中,若不采取特殊措施,管道中的混输介质以及一些含蜡/含胶质的高凝点、高黏

度原油会随着温度的降低而析出分子量较高和分子量较低的组分,造成输送介质黏度的进一步增大,从而影响输送介质的流动性。在高压长距离输送天然气条件下,使得天然气水合物以似松散冰的固态形状析出,严重时将导致管道堵塞等,引发生产事故。

因此,需对海底管线进行有效的保温处理,以保证管线的正常运行。目前海底管道中所用的保温材料主要有聚氨酯类保温材料、环氧树脂类保温材料。

1.3.3 海底管道铺设方法及应用现状

目前,在世界各地已经成功铺设了无数条各种类型、各种管径的海底管道,总长度已达十几万千米。管道输送油气由于具有连续、安全、运输量大的特点,已经成为油气资源输送的主要方式之一。海底管道铺设技术历来受到重视,国内外学者提出了多种理论和方法,促进了海底管道建设的发展。根据国内外的铺管工程实际,海底管道主要的铺管方法包括拖拽铺管法和铺管船法。

1. 拖拽铺管法

拖拽铺管法包括以下几种方法:水面拖行、水面下拖行、近底拖行和海底拖行。所有拖拽方法的管道组装均一样,在陆地组装场或在浅水避风水域中的铺管船上完成;在管道组装完成之后,即可以进行拖行铺设。

水面拖行采用浮箱等使管段漂浮在水面,水面拖行铺设管道的主要缺点是容易受到水面情况的影响,影响海上交通和需要考虑管子的沉放等。

近底拖行是近水面拖行技术的一种改进,需要一条主拖船和一条牵制拖船。浮箱按规定的间距系在管段上,每个浮箱上还需要悬挂一段铁链。在拖行时,铁链升离海床,利用它的重量和浮力平衡而将管道保持在离海床预定的设计高度处。这种铺设方法的主要优点是拖行的动力要求较低,减少了坏天气的不利影响。

海底拖行是利用拖船的牵引力直接在海床拖行管段至指定位置。拖行路线设计在底拖法中占有十分重要的位置,它影响到按磨损条件所做的涂层设计、拖行期内的稳定性、拖船的大小以及所拖管道的最佳长度。这种方法不需要牵制拖船,受天气的影响最小;但底拖法对拖船的功率要求较高,管道涂装层有损坏的危险,管道有可能在海底被障碍物绊住。

2. 铺管船法

铺管船法是利用安装在铺管船上的系列专用的铺管设备进行海底管道铺设的方法,深水铺管主要采用这种方法。根据海底管道在铺设过程中呈现的空间形态又可分为“J”型铺管法和“S”型铺管法。尽管“J”型铺管法可以铺设到很深的水深,但是由于“S”型铺管法铺设效率高、铺设水深适用范围广,在海底管道铺设施工中,“S”型铺设法已成为深水海底管道铺设的首选方法。

1) “S”型铺管船法

“S”型铺管船法是目前铺设海底管道最常用的方法,这种铺设船一般需要安排一艘或

多艘起抛锚拖轮来支持铺管作业。在开始作业前,需要将一个锚定位在海床上,然后将锚缆引过托管架并系到第一根管子的端部,管道在托管架的支撑下,自然地弯曲成“S”型曲线。一般可分成两个区段:

拱弯区,一般是从驳船甲板上的张紧装置开始,沿托管向下延伸到管道开始脱离托管架支撑的抬升点为止的一段区域(抬升点一般就是管道弯曲状态时的拐点)。

垂弯区,从拐点到海床着地点的一段区域。

管道在垂弯区段的曲率通过沿生产线放置的张紧器产生的后拖力来控制,管道在拱弯区段的曲率和弯曲应力一般依靠合适的滑道支撑和托管架的曲率来控制。目前,托管架已从最初应用于浅水的直线型设计发展成适用于深水中的曲线形、多节和铰接式的托管架。

总的来说,“S”型铺设法的特点是:管道在浮式装置上使用单或双接头进行装配;需要一个长达100m的托管架,可以是单一的刚性部件,或者2个/3个铰接部件。水深越大,需要的张力越大,托管架越长,管道丧失稳定性的概率越大,施工风险越高;典型铺设速度约3.5km/d。

目前,世界上最大的“S”型铺管船是Allseas公司的Solitaire铺管船;在墨西哥湾的MC920工程,Solitaire铺管船把8英寸^①和10英寸管道铺设到水下2750m。我国海洋石油工程股份有限公司建造的HYSY201是国内第一艘真正意义上的深水铺管船,其铺设水深纪录是2013年在中国南海荔湾3-1项目深水段作业中,将78.9km的6英寸海底管道铺设在1405m水深处。

2) “J”型铺管船法

深水海底管线安装的一种重要方法就是“J”型铺管法,即管线以接近垂直的形态离开铺管船,沿垂弯段向下,直至铺入海底。由于管线整体形态呈“J”型而得名,被认为是深水 and 超深水铺管的最适用方法,近年来应用“J”型铺管的工程实例也越来越多。

“J”型铺管船法是从20世纪80年代以来,为了适应铺管水深的不断增加而发展起来的一种铺管船法。这种铺管法实质上是张力铺管法的一种,在铺设过程中借助于调节托管架的倾角和管道承受的张力以改善管道的受力状态,达到安全作业的目的。“J”型铺管船法主要有两种形式,一种是钻井船“J”形铺管法,另一种是带斜型滑道的“J”型铺管法。“J”型铺管法主要应用于深海区域的管道铺设,已经得到广泛的应用。

“J”型铺管船法的特点:管道焊接在浮式装置上进行,但由于通常只有一个焊接站,焊接速度慢;管道脱离角度非常接近垂直,所以张力较小;主要用于深水;不需要船尾托管架;因为所有操作都在垂直方向完成,稳定性是一个难题;典型铺设速度是1~1.5km/d。

Saipem7000半潜式铺管船,是世界上最大的半潜式塔吊浮动作业平台,特点是起重量大,且具有双起重吊臂的独特结构。Saipem7000安装有目前世界上最大的“J”形管道铺设塔吊,配备有先进的动力定位设施;能够在水深超过1980m的海域安装直径102~810mm的管道。该船原为一动力定位作业船,在此基础上改进了动力定位系统和发电机系统,同时还增加了两套推进器系统,作业船总推力达1607kN。

目前,国际上应用成熟的“J”型铺管工艺大致有两种:Saipem7000铺管船所采用的双管段(在铺管塔上同时有2根管段在进行操作)张紧器铺管;DCV Balder、SaiBOS FDS

① 1英寸≈2.54厘米。

等铺管船采用的单管段 J-lay collar 铺管。由于大部分铺管船都以后者为主体铺管形式，且尽管具体实现形式以及一些细节问题有所差异，但是“J”型铺管法的基本原理是一样的。

3) “S”型铺管船法与“J”型铺管法对比

目前，海底管道的铺管技术逐渐成熟，越来越多的管道铺设方法已经在实际中得到应用，上述两种典型海底管道铺管船铺设方法的对比如表 1-2 所示。

表 1-2 “S”型与“J”型铺管对比表

铺管船类型	“S”型	“J”型
适用水深	0~3000m	500~3000m
是否需要张紧器	是	否
管道下水辅助装置	托管架	发射塔
焊接站数量	3~4	1
铺设速度	3~5km/d	1~1.5km/d
优点	技术成熟，对深水 and 浅水都适用；铺设速度较快；采用水平方向多个焊接站组对，铺管效率高	技术相对成熟，特别适用于特殊深水情况的作业；张力较小；不需要船尾托管架
缺点	需使用托管架和张紧器，深水铺设时其力学性能较难保证；对铺管船的动力性能要求较高	仅一个焊接站，铺管速度慢，效率低；主要适用于深水；对铺管船垂向稳定性要求高

通过上表的比较可以看出：“S”型铺管法具有较长的工程应用历史，其技术最为成熟；“J”型铺管法则在特定环境下深水铺设时有良好的表现，有时甚至是唯一可行的方法。通常情况下，对于长距离管道的铺设而言，由于所涉及的海域较广、环境复杂，不能只用单一的铺设法，往往会综合使用多种铺管方法，这时需要论证经济性和可行性。

参 考 文 献

陈晨, 陈社鹏, 谷风涛, 2015. 海底管道修复技术及我国的发展状况[J]. 化工装备技术, 36 (5): 59-63.

杜利楠, 姜映芃, 2013. 我国海洋工程装备制造制造业的发展对策研究[J]. 海洋开发与管理, 30 (3): 1-6.

方娜, 陈国明, 朱红卫, 等, 2014. 海底管道泄漏事故统计分析[J]. 油气储运, 33 (1): 99-103.

高志涛, 代志双, 宋平娜, 等, 2015. 海洋输油管道保温技术研究进展[J]. 江苏船舶, 32 (1): 25-27.

侯祥麟, 2005. 中国可持续发展油气资源战略研究报告[R]. 中国工程院.

黄钰, 包佳, 2017. 深水海底管道铺设发展综述[J]. 海洋工程装备与技术, 4 (5): 281-286.

李志刚, 王琮, 何宁, 2010. 深水海底管道铺设技术研究进展[C]//中国造船工程学会 2009 年优秀学术论文集.

李志刚, 2012. 深水海底管道铺设技术[M]. 北京: 机械工业出版社.

梁政, 张杰, 韩传军, 2016. 地质灾害下油气管道力学[M]. 北京: 科学出版社.

王海涛, 池强, 李鹤林, 等, 2014. 海底油气输送管道材料开发和应用现状[J]. 焊管, 37 (8): 25-29.

张明, 2013. 海洋油气管道现状及新技术的研发[J]. 科技传播, 5 (7): 39-40.

中国石油管道公司, 2010. 世界管道概览 2009[M]. 北京: 石油工业出版社: 376-406.

Heerema E P, Allseas Group S A, 2005. Recent achievements and present trends in deepwater pipe-lay systems[C]//OTC 17627.

第2章 海底管道力学基础理论

2.1 海洋水动力理论

2.1.1 波浪的作用

考虑波浪对海底管道的作用时，可以根据不同的水深将管道划分为三个区段（有的海底管道只处于其中一个或两个或三个区段），如图 2-1 所示。

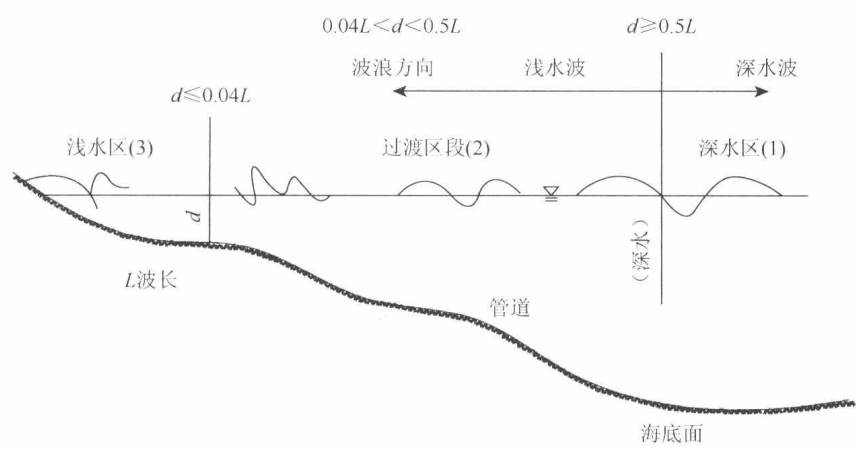


图 2-1 海底管道跨越区段的划分

（1）深水区段： $d \geq 0.5L$ 。在该区段的海底（地形、地质等）实际上不再影响波浪的形状和尺度。

（2）过渡区段： $0.5L > d > 0.04L$ 。在该区段内波浪由深水区向浅水区过渡，深水的三向波在海底水深等因素影响下向两向波过渡，有时波浪会出现破碎。

（3）浅水区段： $d \leq 0.04L$ 。在该区段内波浪在水深、地形的影响下变化剧烈，波浪向岸边推进时出现多次破碎/最终破碎，并在岸坡附近形成上爬的击岸水流。

对处于深水区的海底管道，由于深水波的特性，一般不考虑波浪对海底管道的作用。当水深大于 50m 时，波浪对海底管道的作用已经很小，大多数管道依靠其自身重量可以在海底保持稳定。而处于深水区范围以外的管段，则应考虑波浪对海底管道的作用。

海浪对海底（水平）管道的作用力包括垂直力（浮托力或上举力） P_L 和水平力 P_H 两部分。其中，水平力 P_H 由阻力 P_D 和惯性力 P_I 两项组成。

关于波浪力 P_L 和 P_H 的计算，通常将海底管道视为海底面上的水平圆管，而海底管道的立管部分视作直立圆柱；由于管道的几何尺度比较小，可认为管道的存在不改变流场。