



NANHAI DONGBU HAIYU
HAISHANG YOUQITIAN SHESHI
FUSHI YU FANGHU YINGYONG JISHU

南海东部海域 海上油气田设施 腐蚀与防护应用技术

乐 钻 主编



石油工业出版社

013042029

TE985
01

南海东部海域海上油气田 设施腐蚀与防护应用技术

乐 钻 主编



石油工业出版社



北航

C1651064

TE 985
01

内 容 提 要

南海东部海域油气田自 20 世纪 90 年代初开发以来,相继投产了 21 个油气田,实现油气产量连续 16 年超千万立方米。在海上设施的实际运维过程中,成功应用先进技术解决各种腐蚀难题,在腐蚀防护上积累了诸多经验教训。本书分上、下篇共 11 章,从设施腐蚀特点、检测与评价手段及防护措施等方面,结合油气田具体实施案例,介绍了南海东部海域海上油气田设施腐蚀与防护应用技术。

本书可作为从事海上油气田腐蚀与防护工作相关技术人员的参考书,也可作为防腐技术和防护材料研究人员的参考材料。

图书在版编目(CIP)数据

南海东部海域海上油气田设施腐蚀与防护应用技术/乐钻主编.

北京:石油工业出版社,2013.4

ISBN 978-7-5021-9178-8

I. 南…

II. 乐…

III. 南海-海上油气田-油气田开发-机械设备-防腐

IV. TE985

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 161266 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www. petropub. com. cn

发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2013 年 4 月第 1 版 2013 年 4 月第 1 次印刷

889×1194 毫米 开本:1/16 印张:28.25

字数:808 千字

定价:168.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《南海东部海域海上油气田设施腐蚀与防护应用技术》

编 委 会

主 编：乐 钻

副主编：许庆华 邓晓辉

成 员：（按姓氏笔画排序）

王树祥	刘宗昭	李 伟	李 锋	邱大庆
陈捷俊	胡 涛	靳 权	董建畅	谭四周
魏丛达				

编写人：	闫化云	徐应波	张在孝	吴志伟	何素娟
	张曼杰	刘殿宇	张逸群	李 平	陆忠韩
	邹信波	陈颂阳	邓卫东	高 奇	徐小虎
	文 婕	潘 坚	吴奇霖	陈三君	薛 刚
	史克勇	陈如江	谢日彬	杨浩波	徐飞艇
	宣承安	苏建新	卢谅才	陈宏程	刘百臣
	陈圣乾	金 曦	林世明	赵大伟	兰 旭
	涂 强	王晓东			

统稿人：邓晓辉 闫化云 张在孝

前 言

据统计,我国石油石化行业每年因腐蚀造成的损失约占行业总产值的6%。而海上油气生产是最受腐蚀问题困扰的产业之一,并且随着海上油气田开发生产年限的增加,含水率不断上升,部分油气田不断发现伴生高浓度的二氧化碳和硫化氢,油田的腐蚀问题更加突出。具体到中国海洋石油总公司所运营的近百座海上设施(浮式储油轮、石油平台、单点系泊、油轮及半潜式平台锚链、海底管线等)而言,遇到腐蚀方面的问题越来越多,尤其是近五年来因海管、立管腐蚀等方面问题带来的停产及重大安全风险,不仅影响了国家战略能源的供给,还让海洋石油工业本身蒙受了巨大的经济损失。随着“海上大庆”的建成,如何保证现有海上设施长期安全有效地运营,成为摆在海洋石油工作者面前的一道技术难题,尤其是中国海洋石油工业进入重要的“二次跨越”阶段,只有采取强有力的措施保证好“海上钢铁巨人”安全平稳运转,国家能源及经济可持续发展才有保障。

海洋环境腐蚀与防护研究主要是研究钢铁材料在海洋环境中发生的一系列化学和电化学反应而劣化的自然现象,其目的就是有效地防止腐蚀,降低腐蚀损失,提高钢铁设施的使用效能。基于对腐蚀所造成的危害及损失的智库研究结果表明,如果防护措施到位,至少每年可以避免行业总产值25%~30%的经济损失。南海东部海域海上设施的腐蚀与防护有其自身的特点,流花11-1油田半潜式钻采平台及锚泊系统、适应大排量泵耐冲蚀的特殊材质井下完井管串、水下井口的腐蚀与防治、采气平台不锈钢管材焊缝内腐蚀、管内流动介质的特殊性(含二氧化碳和硫化氢且矿化度高)及高龄设施偏多等,这些都是有别于其他海域的明显特征。因此有必要专门针对南海东部海域石油开采及集输特点进行腐蚀与防治研究方面的系统梳理,分析本海域腐蚀产生的原因、特点及带来的危害,并列举已发生腐蚀失效方面鲜活的案例,对防腐成功的经验加以吸收并应用到后续新油田的开发方案设计中,对防腐失效的教训加以总结,避免走弯路,对整个海洋石油工业的长治久安,确保油气田产量,降低开采成本将起到积极作用。

在编委会的总体安排下,本书由乐钻负责策划、进行总体构思和设计,担任主编;许庆华、邓晓辉进行全书的审核和修订,担任副主编。具体分工为:前言及第一章由邹信波、胡涛、高奇等编写,乐钻审定;第二章由闫化云、张在孝、陈颂阳、徐小虎等编写,邓晓辉审定;第三章由乐钻、董建畅、陈圣乾、薛刚、林世明、邓卫东、文婕、赵大伟等编写,刘宗昭、闫化云审定;第四章由邓晓辉、闫化云、吴志伟、金曦、王晓东负责编写,许庆华、胡涛审定;第五章由许庆华、刘宗昭、靳权、潘坚、陈三君等编写,魏丛达、董建畅审定;第六章由乐钻、张逸群、李伟、苏建新等负责编写,李锋、闫化云审定;第七章由魏丛达、许庆华、陆忠韩、杨浩

波、涂强等编写,谭四周、靳权审定;第八章由徐应波、邱大庆、何素娟、宣承安、陈宏程等编写,王树祥审定;第九章由李锋、谭四周、陈捷俊、李平、谢日彬、吴奇霖、兰旭等编写,李伟、闫化云审定;第十章由闫化云、史克勇、陈如江、张曼杰等负责编写,陈捷俊审定;第十一章由王树祥、卢谅才、刘殿宇、徐飞艇、刘百臣等负责编写,邱大庆审定;全书由邓晓辉、闫化云、张在孝统稿。本书在编写过程中得到了中国海洋石油公司内部及社会上的众多同行专家的鼓励和支持,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,本书难免存在不足之处,恳请广大读者不吝赐教,提出宝贵意见,以便在今后的修订中加以改进和完善。

目 录

第一章 南海东部海域海上油气田开采及腐蚀防护现状	(1)
第一节 南海东部海域海上油气田概述	(1)
第二节 腐蚀现状与面临的挑战	(2)
第三节 防腐技术的应用	(4)
第四节 腐蚀防护管理策略	(6)
第二章 南海东部海域海上油气田的腐蚀特点	(7)
第一节 海水和海洋环境	(7)
第二节 腐蚀的基本过程及影响因素	(11)
第三节 多种腐蚀形态的存在	(17)
第四节 海生物对腐蚀的影响及防污方法	(29)
第三章 主要的腐蚀防护技术	(32)
第一节 防护涂层	(32)
第二节 阴极保护	(40)
第三节 防腐用化学药剂	(61)
第四节 耐蚀材料	(82)
第五节 调整生产工艺防腐	(88)
第六节 保温层下腐蚀(CUI)检测	(92)
第四章 主要的腐蚀监测技术	(95)
第一节 腐蚀监测技术的发展及应用	(95)
第二节 腐蚀监测技术	(95)
第三节 腐蚀监/检测点与取样点设置	(109)
第四节 常见腐蚀监/检测设备类型选择	(110)
第五节 常见探针谱图分析	(118)
第六节 导管架阴极保护监测系统(CPMS)	(120)
第五章 无损检测技术	(124)
第一节 概述	(124)
第二节 一般目视检测(GVI)	(124)
第三节 近观目视检测(CVI)	(125)
第四节 超声波探伤及测厚法	(125)
第五节 流程管道射线探伤法	(126)
第六节 内窥镜检测法	(127)
第七节 导波检测技术	(128)
第八节 FMD 检测技术	(134)
第九节 水下杆件磁粉检测法	(136)
第十节 水下杆件 ACFM 检测法	(137)
第十一节 智能球(智能检测器)内检测	(138)
第十二节 海底管道阴极保护检查	(142)

第六章 惠州油田群	(144)
第一节 惠州油田群概述	(144)
第二节 腐蚀防护策略	(148)
第三节 缓蚀剂评价	(148)
第四节 海底管道腐蚀失效分析	(159)
第五节 海底管道快速堵漏技术	(166)
第六节 NDT 技术应用	(172)
第七章 陆丰油田群	(180)
第一节 陆丰油田群概述	(180)
第二节 腐蚀防护策略	(181)
第三节 井下管柱腐蚀失效分析与优化	(181)
第四节 陆丰 13-2WHP 导管架外加电流阴极保护系统应用	(201)
第五节 平台涂装作业程序与管理优化	(221)
第八章 西江油田群	(226)
第一节 西江油田群概述	(226)
第二节 腐蚀防护策略	(228)
第三节 高温大排量油井设备防腐技术	(230)
第四节 导管架阴极保护监测系统(CPMS)	(235)
第五节 海底管道腐蚀防护	(238)
第九章 流花油田群	(286)
第一节 流花油田群概述	(286)
第二节 腐蚀防护策略	(289)
第三节 水下设施腐蚀失效分析、腐蚀控制与寿命评估	(290)
第四节 换热器结垢治理	(301)
第五节 高含硫化氢油田腐蚀监测与防护	(317)
第六节 输油柔性软管防腐技术	(341)
第十章 番禺油田群	(346)
第一节 番禺油田群概述	(346)
第二节 腐蚀防护策略	(348)
第三节 导波技术应用	(348)
第四节 油井管柱的腐蚀失效分析与防腐对策研究	(350)
第五节 二氧化碳腐蚀防护技术	(366)
第六节 海底管道腐蚀防护	(381)
第十一章 番禺 30-1 气田	(405)
第一节 番禺 30-1 气田概述	(405)
第二节 腐蚀防护策略	(409)
第三节 气井气嘴阀芯脱落分析	(409)
第四节 近岸段海底管道外部防护技术	(410)
第五节 长距离天然气海底管道清管技术	(416)
第六节 FSM 系统检测	(423)
第七节 近岸段海底管道泄漏修复技术	(430)
参考文献	(440)

第一章 南海东部海域海上油气田开采及腐蚀防护现状

第一节 南海东部海域海上油气田概述

南海东部海域位于珠江口盆地,是中国海洋石油总公司直属管辖的中国近海四个油气区之一,北依广东省大陆和港澳地区,西以东经 $113^{\circ}10'$ 为界,南至九段线,东至巴士海峡,矿区面积 $15.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。珠江口盆地位于中国南海的北部,是广东省大陆以南、海南岛和台湾岛之间的近海大陆架到陆坡区的一个大型沉积盆地。南北宽约 300km,东西长 800 ~ 1000km,盆地面积约 $17.5 \times 10^4 \text{ km}^2$,水深数十米甚至超过千米,总的趋势是由北向南和东南方向加深。

为了适应国民经济发展的需要,1973 年,燃料化学工业部成立了南海石油勘探筹备处并开始珠江口盆地的石油勘探。特别是在 20 世纪 80 年代,随着国家的对外开放,南海东部珠江口盆地的油气勘探开发进入了一个崭新的对外合作时期。从那时起,中外双方的石油科技工作者在该盆地进行了卓有成效的工作。20 世纪 80 年代中后期,南海珠江口盆地进入油气储量快速增长时期,相继发现了惠州 21-1、惠州 26-1、西江 24-3、西江 30-2、西江 24-1、陆丰 22-1、陆丰 13-1 等一批大小不等的海相砂岩油田。并于 1990 年 9 月 13 日建成投产了南海东部珠江口盆地第一个油田——惠州 21-1 油田。从此,南海东部珠江口盆地的原油产量节节攀升,至 1996 年,南海东部珠江口盆地原油产量年首次突破 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3$,达到 $1370.1 \times 10^4 \text{ m}^3$,占当年我国海上原油产量的 80%,成为继大庆油田、胜利油田、辽河油田之后的我国第四大产油区。从 1996 年至 2012 年,南海东部珠江口盆地原油产量连续 17 年保持在 $1000 \times 10^4 \text{ m}^3$ 油当量以上,创造了我国油田开发史上高速高效、高产稳产的一个奇迹,为中国的石油工业和海洋石油事业谱写了令人自豪的光辉篇章。

中国南海东部海域有其显著的气候特点,地处低纬,属热带和亚热带气候。全年最低气温为 15.9°C ,出现在 12 月份,最高气温为 39.2°C ,出现在 8 月份。月平均最低气温出现在 12 月份,为 21.0°C ,7 月份月平均气温最高,为 32.3°C 。冬半年(平均 10 月—次年 3 月)为东北季风时期,受寒潮侵袭,前期较干冷,多晴天,后期多低温阴雨天气。夏半年(平均 5 月—8 月)为西南季风时期,台风活动频繁,高温,高湿,多暴雨。春秋为过渡季节,比较短促。南海的气候造成海上设施的外腐蚀比较严重,对南海海上设施的外防腐工作提出了非常大的挑战。

南海东部油田所在海域水深最少在 100m 左右,最深达 330m(如陆丰 22-1),且自然条件恶劣,每年 6 月—10 月主要是热带风暴和台风活动期,约 10 ~ 20 个台风活动,一般影响油田生产作业的台风有 6 ~ 10 个;每年的 11 月至第二年的 3 月是季风季节,该季节以偏北风为主。在不同季节海流的变换也比较大,潮汐变化明显,特别是在南海的深水海域内波流较多,这些气候条件对南海海上设施的水下部分防腐造成不利影响。

南海东部海域的油品性质,可分为三种类型:一种是低密度、低黏度、低硫、高含蜡、高凝固点、高镍/钒比的石蜡基原油;另一种是高密度、高黏度、低硫、低含蜡、低凝固点的生物降解原油;第三种是介于上述两者之间的混合原油。三种原油的含盐量都比较高,同时生产水的矿化度也比较高,平均在 $28000 \sim 32000 \text{ mg/l}$,其中 NaCl 和 KCl 的质量浓度占总矿化度的 90% 以上,并且水中 SO_4^{2-} 的含量比较低。高矿化度的生产水对生产处理系统和海管造成严重腐蚀。在南海东部海域的各油田中二氧化碳的含量比较高,生产系统容易结垢,因此生产处理系统的垢下腐蚀也比较严重。

针对南海东部海域的气候特点和油品性质,无论是合作的老油田还是自营的新油田自设计之日起

就对腐蚀问题给予了高度关注。油田建设阶段,深圳分公司与设计 and 建造部门积极配合,将腐蚀管理的经验总结融入到油田设计建造中;油田投产后,通过定期优化腐蚀控制策略,有效控制油气田的各种腐蚀,降低腐蚀造成的停产隐患,提高生产时率,降低维修成本,为保障安全生产和高产稳产立下了汗马功劳。

第二节 腐蚀现状与面临的挑战

一、设施设备老化

南海东部海域部分油田已经连续生产了近 20 年,部分设施已经超过设计使用年限,超期服役,出现设施设备老化、部分结构管线腐蚀严重的情况,但油田仍然有良好的产能。为了提高采收率,延长油田寿命,需要采用各种新技术对平台进行重新评估和延寿,统计数据见表 1-1。

表 1-1 延寿设施统计表

序号	设施名称	设计寿命	备注
1	惠州 21-1 平台	10 年	1990 年服役,第二次延寿
2	惠州 26-1 平台	10 年	1991 年服役,第二次延寿
3	胜利号、发现号、盛开号	10 年	20 世纪 70 年代老船改造
4	陆丰 13-1 平台	12 年	1993 年服役,第一次延寿
5	西江 24-3 平台	20 年	1994 年服役,正在进行延寿评估
6	西江 30-2 平台	20 年	1995 年服役,正在进行延寿评估

二、冲刷腐蚀严重

南海东部海域部分海上油气田边底水活跃,随着生产年限增加,产液量大幅攀升,例如:西江 24-3/30-2 平台,最大产液量由 2004 年的 $9.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提高到 2005 年以后的超过 $14.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;陆丰 13-1 平台先后经过多次生产水处理设施扩容改造,高峰产液量超过 $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;番禺 4-2/5-1 油田通过增加 2 套水处理系统,处理量由最初的 $1.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 增加到 $5.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。油田开发含水量上升,导致海上生产设施油气水处理系统流速加快,冲刷腐蚀隐患加剧。

深圳分公司经过多年的努力,逐渐摸索出采用内涂层、增加壁厚以及降低流速等多种减缓腐蚀的控制措施,已成功在现场应用。

三、井液高温高盐

南海东部海域是中国海洋石油总公司所属国内四个海域中井液流体温度最高的海域,除流花、惠州 26-1 等少数油田外,其他油田井液温度大多在 90°C 以上,例如:陆丰 13-1 油田井液温度超过 100°C ,在高温条件下,缓蚀剂效果下降。

南海东部海域油田生产水的矿化度比较高,平均在 $28000 \sim 32000 \text{ mg/l}$,其中 NaCl 和 KCl 的质量浓度占总矿化度的 90% 以上。

四、单井产量高

南海东部海域大部分油田单井产液量高,例如西江 30-2 油田单井产液最高达到 $4286 \text{ m}^3/\text{d}$,高流速对井下设施和油管冲蚀严重。

陆丰油田群、番禺油田群以及西江油田群在腐蚀失效分析的基础上,通过优化管柱材质,增加

管柱直径和加入缓蚀剂等措施有效地减缓了油管腐蚀穿孔问题,但是对于套管的腐蚀评价还处于起步阶段。

以2012年9月的生产参数为例,南海东部海域日产液量超过 3000m^3 的单井有14口(表1-2), $2000\sim 3000\text{m}^3$ 的72口, $1000\sim 2000\text{m}^3$ 的68口。

表1-2 南海东部海域日产液量超过 3000m^3 的单井统计表

序号	井号	日产液(m^3)	井口温度($^{\circ}\text{C}$)	含水率(%)
1	XJ30-2-B8	3375	87.8	98.0
2	XJ30-2-B25	3286	92.2	97.6
3	XJ30-2-B29	3286	76.1	97.8
4	PY5-1-A03H	3241	99.0	95.3
5	XJ30-2-B30	3234	85.6	97.3
6	XJ30-2-B15ST4	3179	93.3	96.1
7	PY4-2-A14H	3177	85.7	93.6
8	PY4-2-A06H	3174	94.7	96.5
9	PY4-2-A05H	3164	89.1	92.7
10	PY4-2-A03H	3155	91.0	96.9
11	XJ30-2-B20ST2	3131	98.9	98.2
12	XJ30-2-B17ST2	3119	82.2	97.8
13	PY5-1-A06H	3101	96.0	91.7
14	XJ30-2-B21ST3	3009	82.2	98.2

五、外腐蚀环境恶劣

南海东部海域气温高、湿度大,海上油气田的设施、部分管线和油气水处理设备的外表面常年处于“盐与水膜”浸泡环境中,现场涂装施工难度大,施工质量难以保证;使用一段时间后,涂层附着力明显降低,导致涂层剥离脱落,一般来说,甲板管线外涂层平均寿命周期为2~3年;同时,海水温度高,海生物繁殖旺盛,接触海水的设施容易发生海生物附着情况,损害相关设施,妨碍生产设施正常运行。另外,南海东部海域海上油气田受到极端恶劣天气的影响,台风和洋流会造成平台局部损伤。南海东部海域导管架水下结构、浪花飞溅区腐蚀严重,部分杆件发生漏水,桩腿壁厚减薄,海生物附着严重。生产井隔水管、海底管道、立管内腐蚀加剧,点蚀引发腐蚀穿孔风险加大。

六、水下生产设施多

采用水下井口生产系统的平台有流花11-1、惠州32-5、惠州26-1N等,这些设施一旦发生腐蚀穿孔,不仅严重影响生产,而且对所处海洋环境也是一个巨大的威胁。例如,流花油田水下生产管汇的腐蚀穿孔对生产产生了很大影响,同时也造成维修费用的增加。

另外,海底管道的腐蚀管理也成为南海东部海域海上油气田水下设施腐蚀防护的重中之重,目前海底管道长623.6km,其中还包括基盘、软管等配套设施,维护难度大。各个油田都根据自身特点,制定了有针对性的海底管道腐蚀管理策略。

流花油田和惠州油田群在水下设施的腐蚀控制、腐蚀状况评估等方面积累了丰富的经验,为即将投入生产的荔湾3-1深水气田开发打下了坚实的基础。

七、井下腐蚀问题突出

海底地层条件复杂,井身结构复杂,利用大位移井开发时易导致出砂、磨损,另外, CO_2 、 H_2S 等腐蚀

介质的影响,使得井下腐蚀加剧,番禺油田群 A3 井井下油管曾经由于高 CO_2 、高 H_2S 和高流速等影响发生严重油管腐蚀。特殊的海洋环境决定了南海东部海域部分小油田依托现有平台采用大位移井进行开发,井下油管套管腐蚀防护问题突出。目前,在南海东部海域已有惠州 25-4 油田、番禺 11-6 油田、番禺 30-1 气田、西江 24-1 区块、流花 11-1 第 3 井区等油气田采用了大位移井开发模式。未来 10 年内仅南海东部海域就有 30 多个类似构造等待开发。因此,生产井井下油套管的腐蚀检测与腐蚀防护将成为南海东部海域海上油气田腐蚀防护的重要课题。

八、海上设施 H_2S 和 CO_2 腐蚀

目前,南海东部海域海上油气田均不同程度地面临 H_2S 和 CO_2 的腐蚀问题,已经造成了某些平台设施与管道腐蚀穿孔,海底管道失效,严重影响了油气田的正常生产。部分油气田的 H_2S 和 CO_2 含量如表 1-3 所示。

表 1-3 南海东部海域部分油气田 H_2S 和 CO_2 含量统计表

油田	部 位	CO_2		H_2S	
		含量(%)	分压(MPa)	含量(mg/l)	分压(kPa)
惠州油田群	HZ19-2 至 FPSO 海底管道	30	0.45	40	0.06
陆丰油田群	LF13-1-4 井	60	井下 15/井口 1.5	0	0
西江油田群	西江 30-2 至 FPSO 海底管道	12	0.094	小于 15	小于 0.012
流花油田群	生产分离器	5	0.028	35000	20
番禺油田群	番禺 4-2 至 FPSO 海底管道	30	0.45	200	0.03
番禺 30-1 气田	番禺 30-1 至终端处理厂	4	0.6	0	0

第三节 防腐技术的应用

一、腐蚀监测检测技术

南海东部海域海上油气田在应对内外环境腐蚀时,采用了世界上现有先进腐蚀监测检测技术,应用的技术列于表 1-4 中。

表 1-4 南海东部海域海上油气田应用腐蚀监测检测技术统计表

序号	腐蚀监测检测技术	油田	应用效果
1	腐蚀挂片与电阻探针(ER)	全部油气田	效果良好,能够及时检测内腐蚀变化
2	线性极化电阻(LPR)	全部油田	效果良好,应用于水相
3	Microcor 技术	全部油气田	效果较好
4	场指纹监测技术(FSM)	番禺 30-1 气田	应用良好
5	旁路式内腐蚀检测系统	番禺油田群、西江油田群、陆丰油田群	应用良好,但出现上部探针被冲刷折断
6	冲刷探针	番禺油田群	能够指示系统出砂量,但波动较大
7	铁离子、SRB 等	全部油田	方便,能及时指导缓蚀剂和杀菌剂的现场应用
8	目视检查(GVI 和 CVI)	全部油田	方便有效

续表

序号	腐蚀监测检测技术	油田	应用效果
9	射线、磁粉以及渗透等	全部油田	经典方法,方便有效
10	超声波测厚	全部油田	经典方法,方便有效
11	导波	全部油田	较新技术,均匀腐蚀有效,但对点蚀效果不佳
12	内窥镜检测	西江油田群与惠州油田群	方便有效,但对垢下发生的腐蚀无法判断
13	智能球检测技术	番禺油田群	整体评价,效果良好,可检测漏点的位置
14	海底管道非接触电位检测	西江油田群	准确检测海底管道电位分布以及电流大小,分析牺牲阳极消耗量
15	导管架阴极保护效果检测(CPMS)	西江油田群、番禺油田群、番禺 30-1 气田、陆丰油田群和惠州油田群	检测导管架阴极保护系统有效性,并确定 ROV 水下检测的重点部位

二、腐蚀防护技术

南海东部海域海上油气田在应对内外环境腐蚀时,使用了各种防腐技术,包括化学药剂防腐、涂层防腐、阴极保护以及选用耐蚀合金等;另外,针对腐蚀泄漏的管道,有针对性开发了堵漏工具,并建立了堵漏程序。各种腐蚀防护技术的应用见表 1-5。

表 1-5 南海东部海域油气田应用的腐蚀防护技术统计表

序号	腐蚀防护技术	油田	应用效果
1	化学药剂:缓蚀剂、防垢剂和杀菌剂等	全部油气田	建立了完备的评价程序,应用效果显著
2	阴极保护	全部油气田	对于海底管道、导管架以及容器的防腐效果良好
3	耐蚀合金	全部油气田	主要应用在隐患较大,且腐蚀很难控制的部位,效果显著
4	防腐涂层	全部油气田	总体效果良好,但受环境影响较大,涂料寿命较短
5	其他:如降低流速、脱除腐蚀性气体等	番禺油田群和惠州油田群等	方便有效,但需要现场具备实施条件

三、腐蚀泄漏补救技术

南海东部海域油气田在发生腐蚀泄漏后,需要及时对其进行临时封堵,根据泄漏部位的腐蚀情况,确定是否更换。海上油气田应用的堵漏技术包括:

- 1) 焊接补丁;
- 2) 专用涂料(铁水泥)封堵;
- 3) 固定卡子加密封垫封堵;
- 4) 专用堵漏夹具;
- 5) 针对水下设施和海底管道设计的专用封堵工具。

目前,南海东部海域海上油气田已经成功应用了临时补漏技术解决了海上油气田的穿孔问题,确保了正常生产和环境安全。但是该类技术只是短期内抑制腐蚀泄漏,且部分水下堵漏工具都是针对现场情况设计定制加工,具有专一性。

第四节 腐蚀防护管理策略

南海东部海域各个海上油气田针对自身面对的腐蚀环境,制定了腐蚀控制的重点目标及有针对性的防腐策略。所有油气田都设有专门的机构对油气田腐蚀进行管理,对腐蚀现状进行评估,并且建立了专门的数据库管理系统,保存相关资料,记录各项防腐工作的展开情况。

定期召开腐蚀风险评估会议,对油气田腐蚀状况进行评估分析,评估腐蚀检测以及腐蚀控制的有效性,制定腐蚀管理计划。

防腐策略总纲如图 1-1 所示。

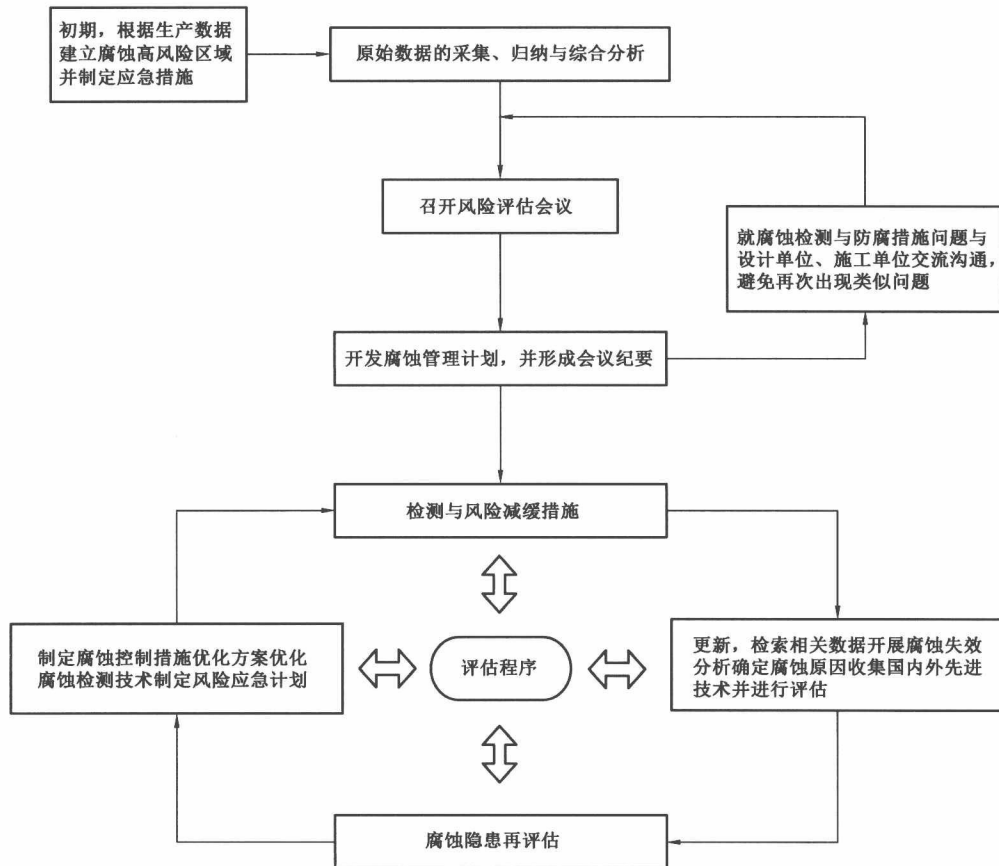


图 1-1 南海东部海域海上油气田防腐策略总纲

第二章 南海东部海域海上油气田的腐蚀特点

第一节 海水和海洋环境

南海东部海域的油气田位于珠江口东南 120km 以外的海域,海水和海洋环境是南海东部海域海上设施的主要外部腐蚀环境,因此南海东部海域油气田一直重视海水和海洋环境腐蚀的机理研究,并致力于海洋腐蚀环境的治理。

海水是腐蚀性电解质,南海海域的盐度在 3.3% ~ 3.8% 之间,平均电导率为 $4 \times 10^{-2} \Omega/\text{cm}$,pH 值一般为 8.1 ~ 8.3,其组成极为复杂,几乎含有地壳中所有的元素。

海水中含有大量的无机物和有机物。除了氯化物以外,海水还含有经常处于饱和状态的碳酸盐以及大量的镁、钙离子,在施加阴极保护过程中,它们在金属表面可生成保护性的覆盖层。海水中的微量组分也会影响腐蚀,其中某些有机、无机分子能和金属形成配合物,这些配合物直接影响着金属的溶解和腐蚀产物的性质。

同时,海水中还溶有大气所包含的各种气体成分,如氮气、氧气、二氧化碳和污染性气体等。海水的含氧量是影响海水腐蚀的重要因素,对于碳钢等常用金属材料来说,海水的含氧量越高,金属的腐蚀速率也越大。由于经常不断的风浪搅动和剧烈的自然对流,在表层几十米深度以内充气良好,海水表层几乎被氧气所饱和,常温下溶解氧的平均值约 8mg/l。由于海水的中性特征以及高溶氧量,决定了绝大多数金属和合金在海水中的腐蚀都是氧去极化过程。海上油气田的海水冷却系统、消防系统以及以海水为水源的注水系统等都面临同样的问题。

海水中溶有碳酸盐等盐类,具有一定的缓冲作用,所以海水的 pH 值相当稳定;但是如果在换热过程中,由于碳酸盐分解, CO_2 气体溢出,极容易导致海水在换热器中结垢。

在南海东部海域海水的温度范围为 3 ~ 35℃,热带浅水区的表层水温还可能更高些。海水温度变化平缓,季节内的温度波动通常小于 10℃。

南海东部海域的海流比较大,因此对油田水下设施形成一定的冲击作用和冲蚀作用,这也是腐蚀的影响因素。对于碳钢等在海水中难以钝化的金属材料,海水流速的增加将加速氧的输运及其腐蚀过程。在海水中能钝化的金属则不然,有一定流速的海水能促进钛、铬镍合金、铜镍合金或高铬不锈钢的钝化而提高其耐蚀性。当海水流速很高时,金属在变径、未钝化焊缝等部位的腐蚀急剧增加。此时已不仅是介质的腐蚀作用,而且有介质的摩擦冲击等机械力的作用,因此产生磨损腐蚀、冲击腐蚀、流体诱导腐蚀(FILC)和空泡腐蚀等。

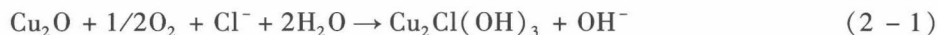
总之,影响海水腐蚀的环境因素有溶解气体、无机物及有机物,温度、pH、流速和海生物等。

海水腐蚀的电化学过程具有下列特征:

1) 海水中的氯离子等卤素离子能阻碍和破坏金属的钝化,使得阳极过程较易进行。

氯离子的破坏作用有:① 破坏氧化膜和钝化膜。氯离子对氧化膜具有渗透破坏作用,对奥氏体不锈钢的钝化膜具有较强的破坏作用;② 吸附作用。氯离子比某些钝化剂更容易吸附,从而阻碍了钝化过程;③ 电场效应。氯离子在金属表面或在薄钝化膜上吸附,形成强电场,使金属离子易于溶出;④ 形成配合物。氯离子与金属可生成氯的络合物,加速金属溶解。以上这些作用都能减少阳极极化阻滞,造成海水对金属的强腐蚀性。据此,一些耐大气腐蚀的低合金钢在海水中耐蚀性并不好,甚至不锈钢在海水中也常因钝态的局部破坏而遭受严重孔蚀、缝隙腐蚀等局部腐蚀。只有极少数易钝化金属,如钛、锆、

铌、钽和哈氏合金等,才能在海水中保持钝态。另外在高速流动的海水中,金属材料容易发生冲击腐蚀和空泡腐蚀。下面是 Cu—Ni 合金未完全钝化焊缝在海水中的腐蚀行为:



2) 在海水 pH 条件下,海水腐蚀的主要阴极去极化剂是氧,阴极过程中氧的扩散是腐蚀反应的控制性步骤。溶解氧的还原反应在 Cu、Ag、Ni 等金属上比较容易进行,其次是 Fe 和 Cr,在 Sn、Al、Zn 上因过电位较大,反应较困难。因此,Cu、Ag、Ni 等金属在溶氧量低的情况下是较稳定的金属,而在溶氧量高和流速大的情况下腐蚀速度相应的增大。在含有 H_2S 或者 S^{2-} 的污染海水中,还会发生硫化氢的阴极去极化作用。Cu、Ni 金属是易受硫化氢腐蚀的金属(如海水系统海水滞留区等死水不流动部位), Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 等高价重金属离子也可促进阴极反应。由 $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$ 的反应而析出的铜,能沉积在铁、铝等金属表面成为有效的阴极。所以海水中如含有 0.1mg/l 以上浓度的 Cu^{2+} ,就不宜使用铝合金,该类问题容易出现使用电解铜铝装置防海生物的海水系统中。

3) 海水腐蚀的电阻性阻滞作用很小,异种金属的接触能造成显著的腐蚀效应,即电偶腐蚀,该类问题在海上油气田消防水系统以及海水系统非常显著。海水具有良好导电性,与大气及土壤腐蚀相比较,在海水、海泥中不同金属接触所构成的腐蚀宏电池,其作用将更强烈,影响范围更远。

在实际的海洋环境中,金属和海水介质的接触情况不同,金属的腐蚀行为也有所差别。按照浸入海水的深度不同通常是将海洋环境分为海洋大气区、飞溅区、潮差区、全浸区和海泥区。

海洋大气区的腐蚀遵循大气腐蚀的规律。在飞溅区金属表面常被充气海水所润湿,并受海水飞溅冲击,腐蚀最为严重,该处的保护涂层也会较快地脱落破坏。在南海东部海上油气田,生产井隔水管套、导管架等部位腐蚀都属于该类问题,目前针对浪花飞溅区的腐蚀主要采用包覆技术进行解决。潮差区的条件介于飞溅区和全浸区之间,在该区域内小块试片的腐蚀行为和钢桩等长尺试样的腐蚀情况有很大差别。长尺试样处于水线以下的全浸部分和水线以上的潮差区构成了氧浓差电池,潮差区部分供氧较充分,为阴极区,其腐蚀速率因受到水线以下供氧不充分的阳极区保护作用而降低。然而小试样就得不到这样的保护效应,故其腐蚀率要高得多。全浸区的情况随水深而不同。在浅水地带的氧含量通常近于饱和,生物活性也很大,水温又较高,腐蚀一般较严重。海泥区的介质条件较复杂,还常有厌氧性微生物存在。但总的来说,钢在海泥区的腐蚀较全浸区略为缓慢。

金属材料在海水中耐蚀性的比较见表 2-1^[1]。各种材料在海水中的腐蚀性能有明显差别(表 2-2),其中耐蚀性最好的是钛合金和镍铬钼合金(Hastelloy),而铸铁和碳钢的耐蚀性相当差。

表 2-1 金属材料的耐海水腐蚀性能

合 金	全浸区腐蚀速率 (mm/a)		潮差区腐蚀速率 (mm/a)		抗冲击腐蚀性能
	平均	最大	平均	最大	
低碳钢(无氧化皮)	0.12	0.4	0.3	0.5	劣
低碳钢(有氧化皮)	0.09	0.9	0.2	1	劣
普通铸铁	0.15	—	0.4	—	劣
铜(冷轧)	0.04	0.08	0.02	0.18	不好
顿巴黄铜(10% Zn)	0.04	0.05	0.03	—	不好
黄铜(70Cu-30Zn)	0.05	—	—	—	满意

续表

合 金	全浸区腐蚀速率 (mm/a)		潮差区腐蚀速率 (mm/a)		抗冲击腐蚀性能
	平均	最大	平均	最大	
黄铜(22Zn-2Al-0.02As)	0.02	0.18	—	—	良好
黄铜(20Zn-1Sn-0.02As)	0.04	—	—	—	满意
黄铜(60Cu-40Zn)	0.06	脱 Zn	0.02	脱 Zn	良好
青铜(5% Sn, 0.1P)	0.03	0.1	—	—	良好
Al 青铜(7% Al, 2% Si)	0.03	0.08	0.01	0.05	良好
铜镍合金(70Cu-30Ni)	0.008	0.03	0.05	0.3	0.15% Fe, 良好
					0.45% Fe, 优秀
镍	0.02	0.1	0.4	—	良好
蒙乃尔(65Ni-31Cu-1Fe)	0.03	0.2	0.5	0.25	良好
Inconel(80Ni-13Cr)	0.005	0.1	—	—	良好
Hastalloy(53Ni-19Mo-17Cr)	0.001	0.001	—	—	优秀
Cr13 钢	—	0.28	—	—	满意
Cr17 钢	—	0.2	—	—	满意
Cr18Ni9 钢	—	0.18	—	—	良好
Cr28-Ni20 钢	—	0.02	—	—	良好
Zn(99.5% Zn)	0.028	0.03	—	—	良好
钛	0.00	0.00	0.00	0.00	优秀

表 2-2 其他金属及合金在海洋环境中的腐蚀及主要用途

金属或合金	海洋大气腐蚀		海水腐蚀		主要用途
	典型速度 (mm/a)	类型	典型速度 (mm/a)	类型	
锌	0.0006 ~ 0.0016	G	0.02 ~ 0.05	P	钢铁镀层, 牺牲阳极
高纯镁	0.025	P	0.25	P	牺牲阳极
工业镁	0.025	P	严重		
锡	0.0025	G	0.013 ~ 0.08	P、C	
铅	0.0004 ~ 0.0025	G	0.008 ~ 0.015	G	海底通讯电缆保护套
金	不腐蚀		不腐蚀		保护电接点, 保护磁膜片
银			0.15	G	用于电子、电气设备
铂	不腐蚀		不腐蚀		外加电流阳极及其镀层
铌	不腐蚀		不腐蚀		外加电流阳极
钽	不腐蚀		不腐蚀		外加电流阳极

注: G—均匀腐蚀, P—点蚀, C—缝隙腐蚀。

金属材料在海洋中的腐蚀速率见表 2-3。