

TIANRANQIJING YOUGUANZHU
PILAO SHOUMING YUCE

天然气井油管柱 疲劳寿命预测

黄 桢 李鹭光 胡桂川◎编著



重庆大学出版社
<http://www.cqup.com.cn>

天然气井油管柱 疲劳寿命预测

黄 楨 李鹭光 胡桂川 编著

重庆大学出版社

内 容 提 要

全书共分为9章,系统论述与介绍了天然气井管柱系统疲劳寿命预测这一领域的各个方面。本书介绍了油管柱在井筒内腐蚀研究,基于最大蚀坑深度的管柱腐蚀损伤研究,砂粒在井筒内举升运动研究,冲蚀磨损的影响因素和机理研究,油管柱刚、强度分析,天然气诱发油管柱振动的机理,油管柱固有特性分析,油管柱动力学响应分析。内容囊括了作者及同事多年的研究成果,也涵盖了国内外相关研究的最新进展。

本书可作为石油工程、油气井工程领域的工程技术人员、研究人员、本科生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

天然气井油管柱疲劳寿命预测/黄桢,李鹭光,胡桂川编著. —重庆:重庆大学出版社,2012.7
ISBN 978-7-5624-6783-0

I. ①天… II. ①黄… ②李… ③胡… III. ①气井—油管柱—寿命—预测 IV. ①TE931

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 124044 号

天然气井油管柱疲劳寿命预测

黄 桢 李鹭光 胡桂川 编著

策划主编:曾显跃

责任编辑:李定群 刘 真 版式设计:曾显跃

责任校对:邹 忌 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路21号

邮编:401331

电话:(023) 88617183 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (营销中心)

全国新华书店经销

重庆升光电力印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:15.75 字数:393千

2012年7月第1版 2012年7月第1次印刷

ISBN 978-7-5624-6783-0 定价:38.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

井下管柱在油气井和油气田勘探开发中的作用,不论是在功能上还是在费用上都占据着举足轻重的地位。特别是随着油气井进入中后期开发阶段,井下管柱功能逐年降低,而井下工况越来越复杂,从而导致管柱损坏日益增多,管柱损坏机理更加复杂。油气(水)井井下管柱的大量损坏,大大削弱了油气田稳产的基础,已经给我国乃至世界油气生产带来了十分严重的损失,从而成为制约包括我国在内世界上多个油气田持续发展的一大重要因素。

在天然气开采过程中,由于流体在管柱系统内流动非常复杂,流体在管柱各段的组成、压力、温度都不相同。因此,油管柱在各个区域的破坏是什么因素占主导因素,值得进行深入研究。通过对修井过程中管柱系统形貌进行分析,发现诱发油管柱破坏的主要因素主要有以下共同之处:

- ①腐蚀性介质对井下管柱的腐蚀破坏;
- ②流体在管柱系统内流动过程中,对管柱系统的冲蚀破坏;
- ③流体在管柱系统内流动过程中诱发管柱的振动;
- ④管柱自身的重量,对管柱的应力;
- ⑤以上几项的综合作用。

为了对井下管柱的剩余疲劳寿命进行精确预测,必须对诱发管柱的损伤机理进行全面的理论研究、实验研究,结合生产现场气井管柱系统的破坏与流体成分、地层压力、温度、产量等因素。本书从以下6个方面对天然气井管柱的破坏机理进行了研究:

(1) 流体对管柱的腐蚀破坏机理研究

通过开展理论、实验研究,获取流体中的 CO_2 、 H_2S 、 O_2 、 Cl^- 等对管柱系统的腐蚀机理,建立了酸性气体对管柱的腐蚀模型。

(2) 提出基于最大蚀坑深度的管柱腐蚀损伤模型

根据管柱腐蚀形貌的统计特征,提出基于最大蚀坑深度的管柱腐蚀损伤模型。建立了不同形貌参数下腐蚀总体积和最大蚀坑深度的数据库,通过数值分析获得腐蚀总体积和最大蚀坑深度之间的相互关系。利用有限元分析方法,对管柱系统应

力集中系数进行预测,可以对管道内腐蚀状态做出更精确的评估,为管柱系统安全评估提供更为详尽的依据。

(3) 天然气井筒内气砂两相流研究

全面总结固体颗粒在流体中沉降以及气固两相流动理论的基础之上,针对天然气井筒中高压、高温气流携带固体颗粒举升进行力学分析,建立了井筒气流携砂的力学模型,可针对气井不同的压力、温度、偏差因子等条件,确定气井携砂生产的最小临界流量。

(4) 流体在管柱系统内多相湍流流动及对管柱系统冲蚀破坏研究

通过开展流体自地层进入管柱系统到进入井口装置整个过程中的多相湍流流动研究,利用理论、数值模拟研究流体对管柱系统的作用力沿管柱的变化规律,流体在各个不同区域的压力场、速度场、温度场的分布,定量、定性地探索流体中颗粒的流动、流体对管柱系统的冲蚀,流体在通过两根油管间的接箍“J”环区存在涡流对管柱破坏的影响。

(5) 油管柱刚、强度数值模拟

利用管柱系统的结构特点,利用有限元分析理论,采样接触分析的方法,研究流体在管柱系统流动过程中非线性载荷的作用下油管柱系统任意区域、任意位置的应力、变形及其分布规律,探索在腐蚀环境下管柱系统的刚、强度变化规律及其破坏机理。

(6) 油管柱的动力学响应研究

流体在管柱内流动是一个非线性的瞬态流动,将会诱发管柱振动。利用流体对管柱流动压力的变化开展管柱的动力学响应研究,分析管柱任意位置的响应速度、加速度、应力的变化规律,探索瞬态流动对管柱疲劳寿命的影响规律。

长期以来,作者及其研究团队潜心于天然气井井下管柱的剩余疲劳寿命预测研究,一直高度关注天然气井管柱的破坏情况。通过对生产现场管柱的破坏情况进行总结分析并开展破坏机理的理论研究,深入探索天然气井管柱的疲劳寿命预测,较早或同步地与国内外同行进行着同样的理论和工程科学与技术问题的研究,积累了很多相关的研究成果,并运用于工程实践。本书较系统地介绍了井下管柱破坏的机理、破坏规律、数值模拟等方面,望能对油气井井下管柱疲劳寿命预测及相关领域研究人员具有一定参考价值。由于作者水平有限,书中的一些观点难免有错误和不妥之处,欢迎读者批评指出,在此表示感谢!



2012年5月

目 录

第 1 章	油管柱系统剩余寿命预测	1
1.1	复杂井况下管柱系统承载性能研究	2
1.2	管柱系统的可靠性研究	3
1.3	管柱系统的风险评估研究	4
1.4	管柱系统的寿命预测与在役管柱系统监测技术	5
1.5	油管柱疲劳寿命预测研究方法研究	6
第 2 章	油管柱在井筒内腐蚀研究	9
2.1	金属腐蚀的基本原理	9
2.2	金属腐蚀的基本形态	10
2.3	影响金属腐蚀的因素	10
2.4	天然气井腐蚀介质分析	12
2.5	CO ₂ 腐蚀机理研究	13
2.6	H ₂ S 腐蚀对管柱强度的影响	21
第 3 章	基于最大蚀坑深度的管柱腐蚀损伤研究	26
3.1	概述	26
3.2	现有腐蚀模型	27
3.3	考虑点蚀的管道内壁腐蚀模型	28
3.4	模型计算数据库及数据分析	33
3.5	管道腐蚀损伤等级评价方法	38
3.6	腐蚀缺陷管道剩余强度评价方法	44
3.7	管道内壁腐蚀损伤等级评价方法	55
3.8	小结	58
第 4 章	砂粒在井筒内举升运动研究	59
4.1	概述	59
4.2	影响气井出砂的因素	60
4.3	固体颗粒在流体中沉降问题的研究	62
4.4	气流携带固体颗粒举升运动	64
4.5	固体颗粒在气流中的受力	66
4.6	气井携砂力学模型	74
4.7	井筒内气流携液滴举升运动	75
4.8	小结	80

第 5 章 冲蚀磨损的影响因素和机理研究	81
5.1 引言	81
5.2 冲蚀角对试样的影响	82
5.3 冲蚀物速度对试样的影响	83
5.4 冲蚀物颗粒尺寸对试样的影响	84
5.5 冲蚀磨损的机理研究	84
5.6 冲蚀磨损的理论模型	87
5.7 冲蚀磨损的数值计算模型	91
第 6 章 油管柱刚、强度分析	93
6.1 油管柱刚、强度分析理论及研究内容	93
6.2 有限元法分析过程	94
6.3 弹、塑性有限元分析	96
6.4 接触界面方程	101
6.5 油管柱接触的有限元分析	107
6.6 油管柱有限元分析	110
第 7 章 天然气诱发油管柱振动的机理	141
7.1 天然气在油管柱内的流动分析	141
7.2 天然气在油管柱内流动的运动方程	147
7.3 天然气在油管柱内流动的旋涡分析	152
7.4 天然气在油管柱内流动对油管柱的激振分析	158
7.5 相关天然气物性参数的确定	168
7.6 油管采气工况时,天然气在管柱系统内流动的流场分析	171
7.7 套管采气工况时流场分析	179
第 8 章 油管柱振动固有特性分析	186
8.1 油管柱特征值计算方法	187
8.2 油管的振动固有特性计算	199
8.3 天然气产量与油管柱振动特性的关系	208
8.4 小结	210
第 9 章 油管柱动力响应分析	212
9.1 油管柱结构动力响应分析	214
9.2 油管柱非线性结构动力响应分析	219
9.3 油管柱的动力响应分析	227
9.4 小结	240
参考文献	242

第 1 章

油管柱系统剩余寿命预测

管柱系统在油气井和油气田开发中扮演着非常重要的角色,不论是在功能上还是在建井费用上都占据着举足轻重的地位。随着国内外多数油田已进入中后期开发阶段,管柱系统的性能逐年降低,而井下工况越来越复杂,从而导致管柱系统损坏日益增多,管柱系统损坏性质越发严重。油(水)气井管柱系统的大量损坏,大大削弱了油气田稳产的基础,已经给我国乃至世界油气生产带来了十分严重的损失,从而成为制约包括我国在内世界上多个油气田持续稳步发展的一大重要因素。近年来,我国油(水)气井管柱系统损坏呈现两大特点:一是损坏数量日益增多,二是管柱系统寿命日趋缩短。尤为重要的是,随着石油、天然气勘探开发难度的不断加大以及我国在石油、天然气勘探开发力度上的不断加大,钻采工况条件日益复杂。其中,深井、超深井、水平井、大位移水平井、多台阶水平井等是具有代表性的典型复杂井况,如这些井下的高温、高压、地质构造复杂、井身结构复杂等。上述因素又必然造成钻井和采油采气、开发作业程序的复杂化、措施的多样化,并由此引起一系列深层次的问题,如复杂的钻井程序对井下管柱系统、固井作业质量的影响,油田开发的深入及大量开发措施的采用(如高压注水、压裂、大型酸化、热采等),对管柱系统柱及周围地层的影响(如管柱系统热应力、腐蚀、异常内外高压,地层岩石膨胀、蠕变和滑移形成的异常地应力及非均匀性,油层出砂空洞造成的管柱系统柱轴向失稳等)。

因此,复杂工况井的日益增多与井下工况的日益复杂化,将成为导致国内油气田目前乃至今后管柱系统损坏数量增多、管柱系统寿命缩短的主要原因。复杂井况下管柱系统的安全与可靠性直接影响油气田的稳定与可持续发展,已经成为关系到油气田稳定、高效生产的关键问题之一。

由于复杂井况下管柱系统所承受的载荷极其复杂,影响管柱系统安全与可靠性的因素繁多。如何全面考虑上述复杂井况,系统地研究复杂井况对管柱系统性能的影响,在设计时尽可能充分地考虑各种复杂情况,为合理设计、选择管柱系统提供依据,这对于预防或减少管柱系统在服役期内发生损坏具有重要意义。

另外,由于传统管柱系统设计的基本理论和方法对井下复杂工况考虑不足,且多以各种因素的名义值(如管柱系统壁厚)或最大值(如轴向力)等固定值作为计算管柱系统承载性能和安全性的重要依据,而对井下复杂工况的多因素随机性欠缺考虑甚至未予以考虑。这些随机性主要体现在如下几方面:其一,主要通过试验手段获得的管柱系统属性参数(如几何尺寸、

管材力学性能等)存在着诸多的不确定因素,在很大程度上是一个随机值;其二,管柱系统承受的各种载荷存在随机性,如各种内外压力、轴向力、地震载荷等在数值上往往表现为非恒定值,而且具有很大的随机性;其三,管柱系统承受的各种载荷不仅仅为非恒定值,而且诱发管柱系统各种载荷的因素同样具有相当的随机性,这种随机性导致了管柱系统设计时对管柱系统各种载荷确定的困难。如地震载荷,在管柱系统服役期内是否发生地震存在一定的随机性,再如油田后期生产的各种作业措施诱发的管柱系统载荷(高压注水、压裂等将引起管柱系统承受很高的内压,酸化将引起管柱系统腐蚀,热采将引起管柱系统承受温度载荷等),在油田开发后期,需不需要采取作业措施,采取何种措施,尽管在建井时有所考虑,但最终的结果如何,则具有一定的随机性。上述各种因素的随机性将导致管柱系统承载性能的不确定性,并最终影响管柱系统的安全与可靠性。科学地分析管柱系统强度和载荷的分布规律,建立、完善管柱系统的可靠性计算分析模型是评价管柱系统安全性、提高管柱系统可靠性的重要途径。

再者,随着 HSE 管理体系在国内外石油天然气工业中得到普遍的认可和推广,安全与健康、环境已经成为国内外各大石油公司强制实施的行业标准。鉴于管柱系统在油气井和油气田开发中的重要作用,以及影响管柱系统安全与可靠的各种因素不确定性的现实,并考虑到国内针对管柱系统损坏研究主要停留在“以修为主、预防为辅”的阶段,而在管柱系统安全性能评价、寿命预测与损坏预防方面未形成一套有效的理论、方法和技术的实际情况下,系统地开展管柱系统的风险评估和寿命预测工作,同时加强在役管柱系统的状态监测,对于在役管柱系统的安全与可靠性分析评估工作具有十分重要和必要的意义。

针对管柱系统工作条件的复杂性和系统载荷的随机性,为了提高油(气)井的安全稳定运行,国内外研究人员对影响管柱系统的安全、稳定运行开展了大量的研究工作,主要研究领域包括从实验、数值分析、现场统计资料分析等进行了分析、研究,获得了一些具有指导性的成果。下面对其进行阐述。

1.1 复杂井况下管柱系统承载性能研究

目前,国内外针对复杂井况下管柱系统承载性能方面的研究工作已经开展得比较广泛,且已经取得了一定的成果,其中主要包括管柱系统损坏原因分析及防治措施和管柱系统设计方法研究等。

在管柱系统损坏机理和防治技术研究方面,国外已作了大量的研究工作,揭示了造成管柱系统损坏的地质因素和工程因素,提出了一些行之有效的防治方法,如苏联学者曾针对管柱系统柱的变形原因、非均匀载荷对管柱系统变形的影响等进行了较为系统的研究。在热采井套损研究方面,美国、德国和日本等进行了大量的理论和试验研究,并成功研制了满足相应要求的管柱系统。

我国一些开发较早的油田(如大庆、吉林、玉门、华北、辽河等)都曾结合各自油田的自身特点,开展了管柱系统损坏机理和防治技术研究,取得了一些相应的研究成果。如自 20 世纪 80 年代中期开始,大庆油田针对油田高压注水阶段和大压差转抽降压阶段油水井管柱系统非正常成片损坏的状况,开展了管柱系统损坏机理和防治技术研究,揭示了高压注水油田在高压注水阶段和大压差转抽降压阶段管柱系统连片损坏的内在规律,得出了关于“非油层注水,形

成水体以及水体扩大蔓延是管柱系统损坏并加剧的主要原因”的结论,首次提出了“侵水域”“位移性载荷”、管柱系统承受“多载荷组合”等一系列新概念,并根据对管柱系统损害机理的认识,提出了高压注水油田防治管柱系统非正常损坏的8项措施。近年来,辽河油田针对稠油热采井管柱系统损坏投入使用的耐高温厚壁管柱系统完井技术,有效地遏制了热采井管柱系统损坏的速度,取得了明显的成效。

目前,针对管柱系统损坏原因的探讨,国内外有关学者的认识也趋于一致,归纳起来主要包括如下因素:地质因素、工程技术因素和腐蚀因素等。其中,地质因素主要包括泥岩膨胀、盐岩蠕变、地震、断层、地层滑移、地层出砂、永冻层解冻和再冻结等,构成的管柱系统载荷主要有(非)均匀外挤压力、轴向力、横向错断力等;工程技术因素包括管柱系统设计强度设计是否合理、井眼质量、固井质量(管柱系统居中程度、水泥返高、水泥胶结效果等)、管柱系统质量(丝扣密封性能、裂纹、磨损)和生产因素(射孔对管柱系统的损伤、高压注水、压裂、热采、酸化等)等,腐蚀因素主要包括电化学腐蚀、化学腐蚀、细菌腐蚀和氢脆等。同时,上述有关的研究人员也针对其中的一种或多种因素对管柱系统的影响机理和规律进行了探讨。尽管人们对管柱系统损坏原因有了比较全面的认识,国内外在有关管柱系统损坏的机理研究方面也取得了一定的进展,但是将各种复杂因素全面考虑,系统、深入地研究管柱系统在复杂井况下承载性能的理论尚不多见。在管柱系统设计方法研究方面,世界上通用的管柱系统设计标准有美国的API和苏联的ГОСТ标准,而国内普遍沿用API 5C3设计管柱系统。上述管柱系统设计的基本理论和方法主要以钻、完井施工条件为主要工况,并初步考虑了塑性岩石地层对管柱系统施加载荷的因素。20世纪90年代初期,随着管柱系统损坏机理研究的深入和计算机技术的飞速发展,特别是有限元等数值算法和交互式图形技术的快速发展,一些学者把影响管柱系统损坏的其他复杂因素考虑在内,并结合岩石力学、弹塑性力学建立起各自的管柱系统损坏数学模型,再将这些模型通过一定的关系组合起来,利用计算机技术,形成了专门的管柱系统设计方法,建立了管柱系统设计和破坏的计算机仿真模型。上述模型均认识到了管柱系统承受载荷的复杂性以及传统设计方法的不足,大多在一定意义上采用了多轴应力设计和校核方法。但这些模型一般是针对某一类问题(如热采、注水、水平井弯曲等)提出的,在某方面具有一定的应用价值,但同样没有将各种复杂因素全面考虑,建立起较为系统的复杂井况下管柱系统设计方法。

1.2 管柱系统的可靠性研究

管柱系统可靠性研究是在可靠性理论在其他行业得到广泛应用,管柱系统的安全性能研究方法亟须改进的情况下提出来的。自20世纪20年代起,国际上就已经开展了结构可靠性基本理论的研究,并逐步扩展到结构分析和设计的各个方面,包括我国在内,研究成果已应用于结构设计规范,促进了结构设计基本理论的发展。尤其是随着产品的复杂性和工作条件的严酷性日益增大,人们对产品的可靠性要求日益提高,可靠性工程技术和管柱系统管理已经逐步推广应用到许多工业部门。但是开展可靠性工作的困难所在是数据少,取得数据的周期长、费用高。美国、英国、苏联等国家在管柱系统可靠性评估预测上做了一些工作。国内外在石油装备(如井口装置、各种泵类、防喷器、钻头等)的可靠性分析上有许多较为成功的应用实例。美国等

发达国家已经将可靠性设计(或概率设计)的方法引入了管柱系统设计中。尽管无法代替常规设计,但在越来越多的场合(特别是重要性、安全性要求较高的场合)开展了管柱系统的可靠性设计研究。由于目前我国现场技术人员对可靠性数据收集不全等原因,对在实际使用中的管柱系统可靠性还未进行较为系统的分析研究。张效羽等曾在文献“油水井管柱系统变形损坏的模糊评价”中采用模糊数学理论建立起了管柱系统变形损坏原因与变形结果之间的模糊联系,可以说是国内探讨管柱系统可靠性研究较早的论述。王国荣曾对管柱系统的随机可靠性设计进行过探讨,并采用故障树建立了管柱系统失效模型,但由于计算复杂,工作量大,仅进行了管柱系统失效的定性分析。

1.3 管柱系统的风险评估研究

目前,国内外在管柱系统风险评估与寿命预测方面所开展的研究工作均相对缺乏,在相关刊物发表的有关管柱系统风险评估与寿命预测的文章或报告也很少。但仅就风险评估的理论和应用本身来说,国内外均开展得比较广泛。风险评估是一门具有较强应用价值的新兴学科,它通过对风险的辨识和估计,对工程系统风险做出综合评估,从而找出减少工程风险的资金投入和改善管理的方案。狭义的风险评估区别于风险分析,仅指对系统风险做出评价,而风险分析则指对风险进行辨识和估计。目前,除了进行概念理解时对二者加以区分之外,一般不再区分。同样的术语包括风险评价、安全评价、安全分析、安全评估等,均是指通过对风险的辨识和估计,对工程系统风险做出综合评估。风险分析与评价最初起源于20世纪30年代的美国保险业,随着工业过程日趋大型化和复杂化,尤其是化学工业的发展,生产中的火灾、爆炸和毒气泄漏等重大事故不断发生,事故预防和安全风险分析日益受到重视。全面的风险评估研究始于20世纪60年代,1964年美国的道化学公司首先开创了化工生产危险度安全评价方法,提出火灾爆炸指数法后,世界各地都竞相研制,进一步推动了这项技术的发展,并在此基础上又提出了一些不同的风险分析与评价方法;英国帝国化学公司在吸收了道化学公司评价方法的优点后,于1976年提出了蒙德评价法;日本劳动省也提出了“六阶段评价法”;苏联提出了化工过程危险评价法等。这些方法均为指数法,至今仍在发展之中。20世纪60年代后期,随着航空、航天、核工业等高技术领域的发展,以概率风险评估为代表的系统安全分析评价技术得到了迅速的发展;英国在20世纪60年代中期就建立了故障数据库和可靠性服务中心来开展概率风险研究工作;1975年美国正式发表了商用核电站轻水反应的风险分析报告。此后,这类风险分析技术在许多工业发达国家的许多项目得到了广泛的应用,并推出了一系列以概率论为基础的其他安全评估方法。随后,风险评估技术在发达工业国家中诸如化学工业、环境保护、航天工程、医疗卫生、交通运输、经济等众多的领域得以推广和应用。到1980年,美国风险分析协会(The Society for Risk Analysis, SRA)的成立成为风险评估历史上的一个里程碑。尤其是在1986年苏联切尔诺贝利核电站发生爆炸事故以后,安全风险分析与评价技术更是得到了各国的普遍重视,从而推动了这项技术的进一步发展。目前,风险评估技术已经应用于政治、经济、社会、文化教育、交通、能源、军事、医疗卫生等各个领域,其理论方法也在不断发展和完善,从简单的安全检查表,到事故树、事件树,再到道化学公司指数法,一直到目前的模糊综合评价分析法等。

我国于20世纪80年代初期开始安全风险与评价研究工作。化工、冶金、机电、航空、交通等行业陆续开始在企业中实施安全风险分析与评价工作。1988年,原机械电子工业部颁布《机械工厂安全评价标准》,该标准在机械行业100多家工厂进行了应用,取得良好的效果;1990年,贵州省冶金防护研究所联合完成了《工业企业安全性评价——全面安全管理的事故隐患评价法》;1992年,化工部制订了《工厂危险程度分级方法》;1995年,劳动部、北京理工大学完成《易燃、易爆、有重大危险源的安全评价技术》。与此同时,我国另一些科研院所、企业也相继开展了安全风险分析研究工作。北方交通大学、东北大学、武汉环科院、鞍山钢铁公司等提出了一些有价值的的风险评价理论及方法,如指数法、模糊综合评判法、概率法、安全检查表等;计算机数据库、安全控制论等也得到了应用。目前,我国对安全风险分析的研究方兴未艾,科研院所及有关企业都在进行深层次的探讨研究,以便更准确地对本领域的系统进行定性、定量安全风险分析与评价。尽管风险评估已经在石油天然气工业中得到了一定程度的应用,尤其是在海洋平台、海底管线、输油管线等方面。随着HSE管理体系在国内外石油天然气工业中得到普遍的认可和推广,各大石油公司也已经建立了基于HSE的钻井作业风险管理体系,并对固井质量提出了具体要求,其中对管柱系统的要求为“在长期的生产过程中不断,不裂,不变形,丝扣处不渗不漏”,但对管柱系统安全性能的风险评估,尤其是定量评估仍处于探索阶段。

1.4 管柱系统的寿命预测与在役管柱系统监测技术

准确预测、有效延长设备和产品可靠性寿命的技术在诸如压力容器、海洋平台、动力机械等行业已经形成了成熟的技术规范,并且得到了成功的应用。而石油管柱系统在按照传统的理论方法设计完井后,按照目前的技术,一般都无法准确预测在后续开发过程中管柱系统的可靠性寿命,因而导致不同油田的套损井平均寿命存在较大差异。在中石油公司“九五”导向项目中,西南石油学院与华北石油管理局合作完成了“套管寿命预测”的研究报告。在该报告中,选用外推法,提出了构造内油、水井管柱系统寿命的预测方法。报告中提到,该管柱系统寿命预测中的关键是地应力对管柱系统的影响,即主要考虑了地应力,对其他因素考虑较少。研究人员在寿命预测方法的基础上,采用故障树割集和概率理论,建立了管柱系统可靠性寿命预测方法。尽管其量化计算较为繁琐,但毕竟开辟了对存在不确定因素的井下管柱系统进行判断或预测的新途径。此外,张效羽等曾采用模糊数学理论建立起了管柱系统变形损坏原因与变形结果之间的联系,可以利用生产现场的已知条件对管柱系统变形情况进行判断,也为管柱系统寿命预测提供了一条途径。作为有效掌握在役管柱系统安全状况的有效手段,在役管柱系统监测技术是随着各种测井技术的发展而发展起来的,该技术对于油田各种管柱系统保护措施采用、在役管柱系统寿命的延长具有重要作用。目前,包括大庆油田、胜利油田、中原油田、江汉油田和江苏油田等在内的国内各大油田以及相关的研究单位均开展了在役管柱系统的监测技术研究,通过多种技术手段(如声发射、超声波成像、鹰眼电视、各种井径测量仪、磁重量法,以及各种传感器等)用于监测在役管柱系统的腐蚀、径向变形、裂纹、孔洞等损坏情况。目前,各种监测技术和仪器已经在在役管柱系统监测中发挥作用。

1.5 油管柱疲劳寿命预测研究方法研究

油管在油气井和油气田开发中扮演十分重要的角色,不论是在功能上还是在建井费用上都占据着举足轻重的地位。随着国内外多数油气田已进入中后期开发阶段,油管性能逐年降低,而井下工况越来越复杂,从而导致油管损坏日益增多,管损性质愈发严重。油(水)气井油管的大量损坏,大大削弱了油气田稳产的基础,已经给我国乃至世界油气生产带来了十分严重的损失,从而成为制约包括我国在内世界上多个油气田持续稳定发展的一大重要因素。

油管柱的失效分析就是研究油管柱潜在的或显在的失效机理、失效的发生概率以及相应的影响因素,即是对油管柱的失效模式、失效机理和原因的分析。目前国内外尚无一套完善的理论和方法来对其进行分析,这是因为油管柱在工作过程中,在腐蚀性介质中工作,天然气通过油管柱时诱发油管柱振动,油管柱的塑性变形,在变载荷作用下的变应力等综合因素使油管柱发生腐蚀疲劳破坏。因此,进行油管柱失效分析技术研究的难度非常大。

影响油管柱失效的主要因素包括:内外腐蚀、运行管理、塑性变形、振动、管道缺陷等因素。长期以来国内外对腐蚀引起的管道失效作了大量的研究工作,提出了以介质含水量、含盐量、pH 值、电阻率等单项或多项指标评价介质的腐蚀性。对于管道内腐蚀而言,国内外都是通过实验对一些主要的因素进行模拟实验,寻求内腐蚀因素对管道内腐蚀的影响。同时由于腐蚀原因而导致管道应力腐蚀裂纹,国外通过物理模型和数学模型的建立对管道失效的产生因素进行分析。由于管道失效并非单一因素造成,近年来,加拿大运用金相分析的方法研究出由于管材、焊接质量等造成管道失效,从而使引起管道失效的因素逐步细化。

目前,各国对含缺陷管道失效的评定方法主要有:

①数值计算法。采用有限元法分析计算,常用于科学研究,应用于工程上还有一定的局限性。

②基于断裂力学理论的评定方法。这类评定方法主要是根据弹性断裂力学或弹性断裂力学的分析方法,对含缺陷管道的裂纹起裂和塑性破坏失效进行定量的分析描述,方法有多种,如 GE/EPRI 法、PARIS/TADA 法、LBBNRC 法,该方法比数值计算简单。

③工程评定法。它是从简单的材料力学和塑性力学出发,在大量实验的基础上总结出工程上计算管道极限承载能力的简便公式。这种评定方法考虑了脆性断裂失效、塑性失稳失效,还考虑了弹塑性裂纹。

西方国家特别重视在役管道的腐蚀及剩余强度方面的研究。20 世纪 60 年代末 70 年代初,美国德克萨斯州东部运输公司和 AGA 的管道管理委员会提出了一项被称为 B31G 的准则,用于评价腐蚀管道的剩余强度。该准则只能处理单一腐蚀缺陷并评价结果比较保守,针对这种情况,ARCO 阿拉斯加股份公司研究了一种评价腐蚀管道的方法,该方法对 B31G 进行了改进和扩充,可用于大面积金属损失、焊缝腐蚀、不连续点蚀群的剩余强度评价。

国外对管道的腐蚀寿命研究十分重视,开发了预测管道寿命的模型,主要从疲劳寿命模型和管材性能衰减寿命模型两个方面进行研究。国内在管道剩余强度评价、剩余寿命评估方面的研究尚处于起步阶段。国内学者对腐蚀管线的剩余寿命进行分析时,主要通过先确定裂纹尖端的应力强度因子,然后采用 Paris 公式计算裂纹的疲劳扩展寿命;有的通过试验对 SSAW、

ERW、UOE 3种焊管的疲劳裂纹内扩展特性进行了研究,确定了3种焊管各区的疲劳裂纹扩展速率的 Paris 方程表达式 ΔK 的变化范围,试验结果表明 SSAW 焊管表现出较低的疲劳裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 。

高温、高压及高产气井管柱系统的强度问题是安全生产迫切期望解决的关键问题之一。仅仅通过传统单一模式的管柱强度评价模式或腐蚀实验分析,难以弄清管柱系统的腐蚀现象及其破坏规律、科学分析其所损坏失效的机理、找到避免再次失效的根源、预防事故的有效方法和技术。作者领导的课题组多年来在现场测试数据和物理试验的基础上,将高温、高压及高产作为管柱系统力学行为的外载情况,并与地层流体腐蚀因素耦合,研究在复杂外载作用下,在腐蚀环境中服役的管柱系统强度失效的原因和机理及其影响因素和相互作用关系,将物理模拟和理论模型研究有机地结合,拟采用固体力学、流体力学、空气动力学、化学腐蚀、材料腐蚀分析的原理和方法,采用冲刷腐蚀的流体力学数值模拟计算、管柱系统的流体动力学内部流场特征模拟、管柱系统管材腐蚀的模拟实验及微观腐蚀机理分析等研究方法、手段和技术,开展对天然气井油管柱系统的腐蚀疲劳寿命预测研究。

充分利用现场实际的腐蚀现象、腐蚀产物,进行系统的收集、整理,进行腐蚀产物或腐蚀碎片进行拼凑和历史分析,分析总结其腐蚀特征,得到有用的数据和信息,研究其腐蚀规律;将现场真实的腐蚀产物数据与室内模拟实验相结合,对比分析和研究,并分析腐蚀产物的原子结构,寻找腐蚀机理及防腐控制依据。

以部分物理试验和现场实际测试结果、现场资料为基础,结合计算机模拟技术,提出并建立“三高”腐蚀性气井安全因素分析模型,仿真模拟气井管柱系统的强度特征及变化规律也是本研究领域的发展方向。

用非线性有限元方法模型模拟管柱系统腐蚀后的强度特征及剩余强度分布规律,并将这种理论计算分析的结果与室内材料强度实验的结果进行对照,相互补充和完善。图 1.1 为作者领导的项目组开展油管柱疲劳寿命预测研究的技术路线图。

开展油管柱疲劳寿命预测研究的关键是寻找油管柱疲劳破坏的机理和影响油管柱疲劳破坏的关键因素。本书从管柱系统的腐蚀、流体在管柱系统内流动诱发管柱系统振动、流体在管柱系统内流动对管柱系统的冲蚀、管柱系统动力学响应等方面对管柱系统的疲劳破坏进行全面分析。

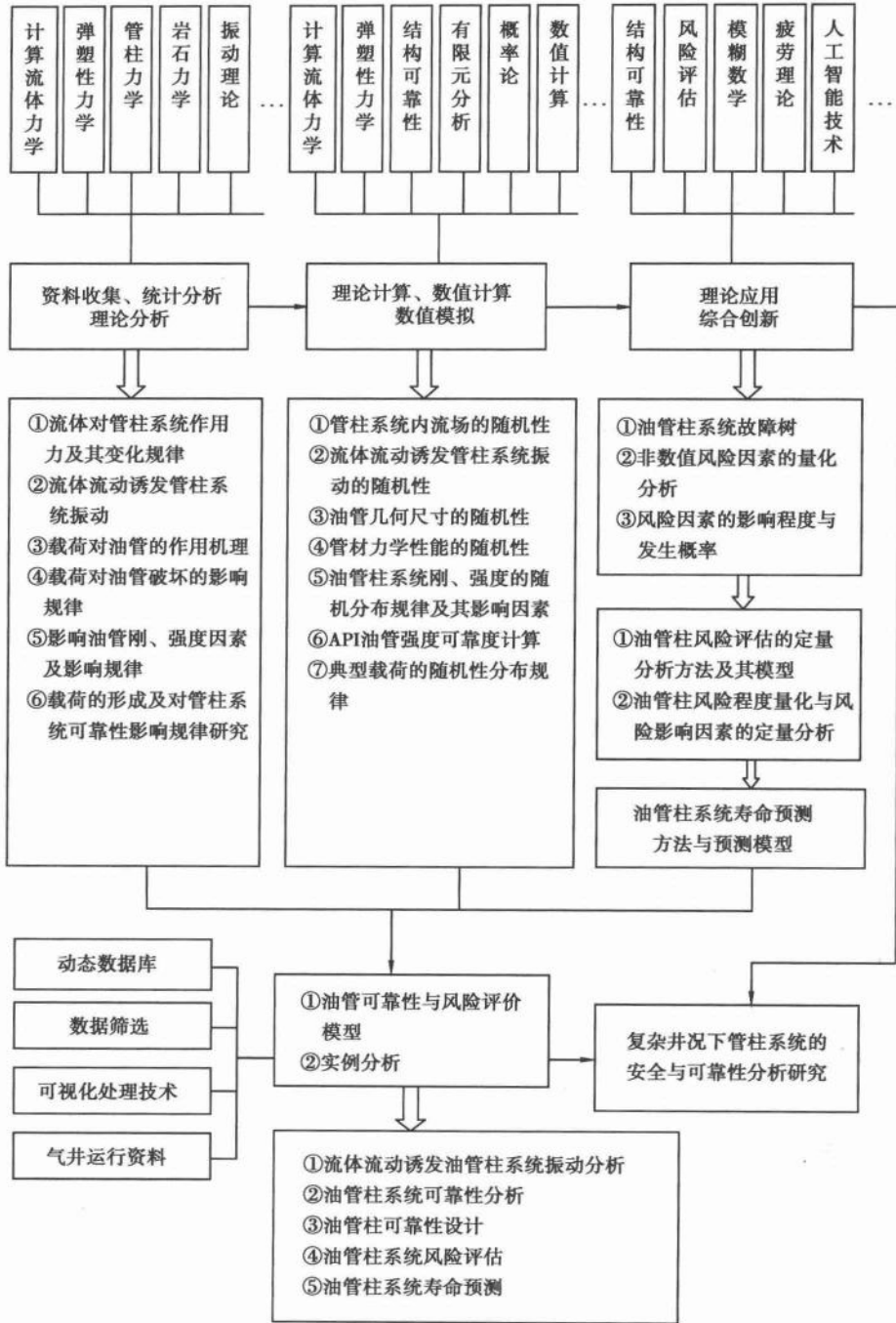


图 1.1 油管柱寿命预测技术路线

第 2 章

油管柱在井筒内腐蚀研究

金属材料在现代工农业生产中占有极其重要的地位。不仅在机械制造、交通运输、国防等各个部门都需要大量金属材料,而且在人们日常生活用品中也离不开金属材料。金属材料不仅具有优良的使用性能(包括材料的物理、化学和力学性能),而且还具有良好的工艺性能(包括铸造性能、压力加工性能、焊接性能、热处理性能、切削加工性能)。由此可见,金属材料是最重要的工程材料。但随着使用时间的推移,金属材料制品都有一个可使用寿命,在使用过程中,金属将受到程度不同的直接和间接的损坏。通常将常见金属损坏的形式归纳为腐蚀、断裂和磨损。

人们已经认识到,金属材料很少是由于单纯机械因素(如拉、压、冲击、疲劳、断裂和磨损等)或其他物理因素(如热能、光能等)引起破坏的,绝大多数金属材料的破坏都与其周围环境的腐蚀因素有关。因此,金属的腐蚀问题已成为当今工程领域不可忽略的课题。

2.1 金属腐蚀的基本原理

通常把金属腐蚀定义为金属与周围环境介质之间发生化学和电化学反应而引起的变质和破坏。碳钢在大气中生锈、在海水中钢质船壳的锈蚀,在土壤中地下输油钢质管线的穿孔,火力发电站中锅炉的损坏以及轧钢过程中氧化铁皮的生成,金属机械和装置与强腐蚀性介质(酸、碱和盐)接触而导致损坏等等都是最常见的腐蚀现象。显而易见,金属要发生腐蚀需要外部环境,在金属表面或界面,发生化学或电化学反应,使金属转化为氧化(离子)状态。

从热力学的观点出发,除了极少数贵金属外,一般金属发生腐蚀都是一个自发过程。因为金属矿石中的金属元素处于热力学稳定的氧化状态,在冶金过程中,人工提供的大量的能量使氧化状态的金属元素被还原为金属材料。在大气、海水、土壤等自然环境或者石油以及其他一些液态酸性化工产品环境等腐蚀性环境的作用下,金属材料表面上自然发生的氧化反应使处于热力学不稳定状态的金属元素重新回复到热力学状态稳定的氧化状态。所以,由于金属材料中金属元素的热力学不稳定性,金属材料在腐蚀性环境的作用下,伴随着能量的释放,使金属腐蚀成为一个自然而且是必然发生的过程。

2.2 金属腐蚀的基本形态

金属在腐蚀性电解质溶液中的腐蚀是最为常见的腐蚀现象,在海水、淡水、土壤、化工生产介质中使用的金属设备或构筑物无不受到腐蚀的侵袭。

在水溶液中发生的腐蚀反应有下列特征:

①金属和电解质溶液之间存在荷电界面(金属表面可能无膜,也可能部分或全部被膜或腐蚀产物覆盖)。

②正电荷由金属向溶液转移,与此同时,金属被氧化至较高的价态。

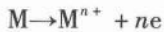
③正电荷由金属向溶液转移时,溶液中的氧化性物质被还原至较低的价态。

④电荷通过溶液和受腐蚀的金属完成转移过程。

由此可见,腐蚀是一种电化学反应。在反应过程中,金属本身就是反应物,被氧化至较高的价态(失去电子),而存在于溶液中的其他反应物,即电子的受体,被还原至较低的价态(获得电子),这就是腐蚀电化学原理的概括。

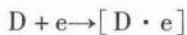
根据电化学腐蚀理论,可以把腐蚀过程看作是由下列3个环节组成的:

①阳极过程:在阳极区,金属离子进入电解质中同时将相应的电子残留在金属材料与电解质环境的界面上。



②残留电子从阳极区经过电子导体迁移至阴极区。

③阴极过程:电解质环境中的去极化剂(D)获得从阳极区迁移而至的电子。



这3个环节是相互联系,缺一不可的。如果其中任何一个环节停止进行,则整个腐蚀过程也就停止。电化学腐蚀过程如图2.1所示。

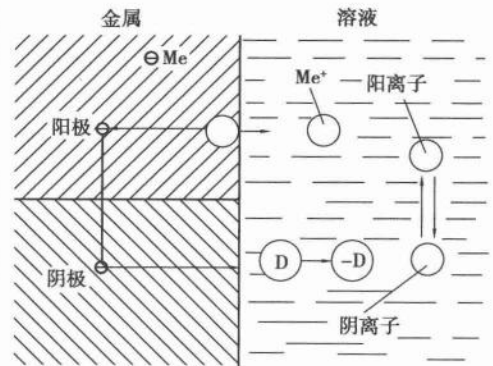


图 2.1 电化学腐蚀过程

2.3 影响金属腐蚀的因素

影响金属腐蚀的因素大体上可以分为内在因素和外在因素两方面:内在因素是金属材料本身的问题;外在因素是指金属所处的环境介质对腐蚀的影响。金属的腐蚀速度虽然由腐蚀电池的电极过程所决定,但是各种内在的和外界的因素又直接地或间接地影响电极过程的进行。归纳起来,有以下一些主要影响因素:

(1) 合金成分的影响

单相合金的腐蚀速度与合金的含量之间有一种特殊的规律。如果一种金属的化学稳定性很低,另一种稳定性很高的金属与它形成固溶体时,其耐蚀性能能够提高,但是耐蚀性并不随