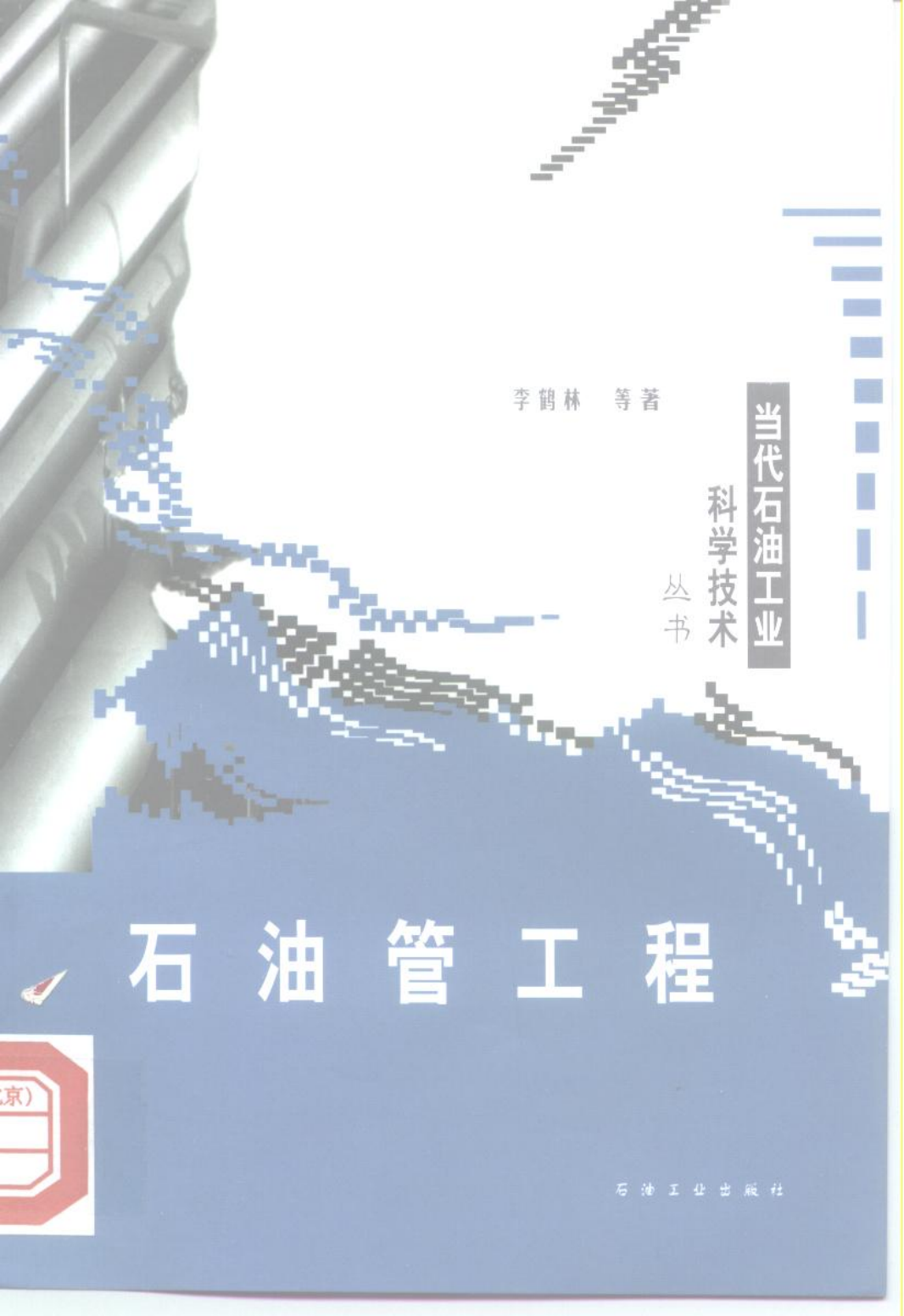




李鹤林 等著

当代石油工业

科学技术

丛书

石油管工程



石油工业出版社

内 容 提 要

“石油管工程”致力于研究不同服役条件下石油管的失效规律、机理及克服失效的途径。本书概述了石油管在石油工业中的地位,分析了石油管服役条件和失效模式,提出了“石油管工程”的技术领域,论述了石油管的力学行为、石油管的环境行为、石油管失效的预测预防等“石油管工程”的三个技术领域及其内在联系。读者通过本书可了解“石油管工程”的内涵,以及“石油管工程”对保障石油管服役的安全可靠性、杜绝恶性事故、延长使用寿命、提高石油工业整体效益的作用和意义。

本书资料翔实,文图并茂。可供各级领导干部、广大石油工作者和大专院校师生阅读、参考。

图书在版编目(CIP)数据

石油管工程/李鹤林等著.

北京:石油工业出版社,1999.9

(当代石油工业科学技术丛书)

ISBN 7-5021-2771-2

I. 石…

II. 李…

III. 石油工程—石油管道

IV. TE973

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第43421号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里一区一号楼)

石油工业出版社印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168毫米 32开本 4 $\frac{3}{4}$ 印张 105千字 印1—5600

1999年9月北京第1版 1999年9月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-2771-2/TE·2174

定价:10.00元

普及石油科技知识
不断提高职工素质

王涛



当代石油工业科学技术丛书

编辑委员会

主 任：石宝珩

副 主 任：蒋其圪 傅诚德

委 员：张家茂 程希荣 林长海 齐敬思

常务秘书：齐敬思

秘 书：张卫国 杨静芬 何 莉 谭忠心

序

21 世纪是一个知识经济的时代。科学技术特别是高新技术，在这个时代中将起着积极促进社会发展的作用，并改变和建立一些新的机制和观念。一些国际新动向表明，一个国家，一个民族，如果没有强大的经济基础和综合国力，在国际事务中就要处于极为不利的被动局面。因此，实施科教兴国，加速科技进步，促进经济发展是我国的基本国策。

中共中央总书记江泽民同志多次指出，发展社会生产力的决定性因素是人的因素，特别是各级领导干部的科学文化素质。因此，普及高新技术知识及先进的科学管理方法，反对伪科学、假科学是一项带有战略意义的任务。为此，石油集团公司有关部门经过两年多策划组织，邀请多位专家撰写的一套含多学科高新科技知识及管理方法的大型科普丛书《当代石油工业科学技术丛书》和广大读者见面了，这是我国石油发展史上的一件大好事，对提高广大石油职工素质和加快科技进步必将起到巨大促进作用。我作为一名石油科技工作者，投身祖国石油工业 50 多年的老兵，感到由衷地高兴！并衷心表示热烈的祝贺！

科技普及中有提高，提高科技中有普及。从建国初期开始，石油工业历任老部长、老领导都有重视科技普及工作的良好传统，不同历史时期出版的不同层次的各类科普读物培养和教育了几代人，起到了良好的社会效果。当今世界科技突飞猛进，石油工业发展所涉及的专业领域越来越多。在这种新形势下，这套丛书尤显珍贵。特值此，向这套大型丛书的策划者、组织者、撰写者以及出版发行单位的同志们致以崇高的敬意，他们的眼光和魄力值得钦佩，这套丛书将一定能够起到桥梁作用，促进科技成果转化为现实生产力。长江后浪推前浪，科技飞涛吼新韵。我热诚

希望把这种科普形式坚持下去，将有数量更多、质量更高的科普丛书问世，源源不断地提供给广大石油工作者。

田在艺

1999年6月1日

前 言

石油工业是大量使用石油管的工业。我国每年消耗石油管 120 多万吨,耗资达 100 亿元。过去,石油管应用方面的技术问题未引起足够重视,钻柱、套管柱、油管柱及油气输送管线恶性事故频繁。1981 年,原石油部成立了石油专用管试验研究中心,其主要任务之一是进行石油管重大事故的失效分析,每年完成钻具和油、套管失效分析 50~60 项。随着石油工业技术的发展,不断出现石油管应用方面急需解决的一些深层次问题,首要的是深入研究石油管的服役行为及相应的失效机理。石油管的服役条件,主要是载荷和环境两个方面。石油管的服役行为包括力学行为、环境行为及两者的复合。1988 年初,石油专用管试验研究中心划为石油部直属科研机构(后更名为中国石油天然气总公司石油管材研究所),即在原有的失效分析及预防等研究室的基础上,增加了管柱与管线力学研究室和腐蚀与防护研究室,集中开展石油管力学行为、环境行为及失效机理的研究。几年后,又增加了安全评价研究室,专门从事石油管的适用性评价、风险管理的基础研究。10 年来的实践,使石油管的应用基础研究形成了石油管的力学行为、石油管的环境行为、石油管失效的诊断及预测预防三个领域,并成为有机的整体,我们将其概括为“石油管工程”。

“石油管工程”致力于研究不同服役条件下石油管的失效规律、机理及克服失效的途径。其最终目的是提高石油管服役的安全可靠性,延长使用寿命,最大限度避免或减少失效事故,提高石油工业的整体效益。

国外油公司很重视管柱与管线力学、腐蚀与防护、失效分析及预测预防、适用性评价和风险管理等领域的应用基础研究,具

有相当的深度和广度。在技术交流中，许多国外学者对于我们的工作，特别对我们把这些领域作为有机整体，提出了“石油管工程”的新概念，表示赞赏。

“石油管工程”作为一门新兴学科，是石油管材研究所经过18年的探索逐步形成的，并且它将不断得到发展完善。多年来，我们一直计划出版一部专著，介绍“石油管工程”的全貌。这次有幸列为“当代石油工业科学技术丛书”之一推出，深感荣幸。由于水平所限，错误和不妥之处难免，请批评指正。

本书由李鹤林提出总体思路和框架，拟订出详细提纲，并执笔前言和第一章。第二章和第三章分别由赵克枫、史交齐、霍春勇、王新虎、林凯、杨勇和赵国仙、严密林、白真权等写出初稿或提供素材，由李鹤林修改、补充或改写而成。第四章由张平生执笔。张平生、冯耀荣、路民旭、韩勇、李平全校阅了全文或部分章节并提出宝贵意见。刘亚旭协助整理大部分文稿及担负编、校工作。本书全文经李鹤林审定。本书实际上是集体智慧的结晶。

作 者

1999年8月16日

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 石油管及其在石油工业中的地位	(1)
第二节 石油管服役条件和失效模式	(6)
第三节 “石油管工程”的提出及主要技术领域	(15)
参考文献	(17)
第二章 石油管的力学行为	(19)
第一节 钻柱的振动与疲劳	(19)
第二节 复合载荷下油、套管柱的密封完整性和结构完整性	(30)
第三节 套管的挤毁	(41)
第四节 油气输送管的断裂、疲劳与止裂	(48)
参考文献	(63)
第三章 石油管的环境行为	(66)
第一节 硫化物应力腐蚀与氢致开裂	(66)
第二节 井下高温高压环境中的 CO_2 腐蚀	(75)
第三节 多相流冲刷腐蚀	(83)
第四节 土壤腐蚀	(89)
参考文献	(98)
第四章 石油管失效的预测预防	(100)
第一节 适用性评价	(100)
第二节 风险管理	(110)
参考文献	(124)

第一章 概 论

第一节 石油管及其在石油工业中的地位

一、石油管概述

石油管包括油井管和油气输送管两大类。服役时，油井管由专用螺纹连接成数千米长的管柱，包括钻柱、套管柱、油管柱。钻柱由方钻杆、钻杆、钻铤、转换接头等组成，是钻井的重要工具和手段。典型的钻柱组合如图 1-1 所示。套管柱下入钻成井眼，用于防止地层流体流动及地层挤毁。油管柱下入生产套管柱内，构成井下油气层与地面的通道，控制原油和天然气的流动。套管柱、油管柱在油井中的位置如图 1-2 所示。油气输送钢管由螺纹连接或焊接成管线，用于石油天然气高效长距离输送。

石油管不属一般的冶金产品，而是在无缝管、棒材或板材的基础上经过深加工（压力加工、焊接、机加工、热处理、表面处理等）的特殊冶金产品，实际上已属于机械产品范畴。为满足使用要求，除对化学成分、冶金质量、力学性能、残余应力等有严格要求外，对制成品的外径、内径、壁厚、圆度、直度及螺纹参数、密封性能和结构完整性都有很严格的要求。

世界上大多数国家的石油管采用美国石油学会（API）标准，其中套管和油管采用 API SPEC 5CT，钻杆管体采用 API SPEC 5D，钻杆接头、钻柱转换接头、方钻杆、钻铤等采用 API SPEC 7，油气输送管采用 API SPEC 5L。近年来，国际标准化组织（ISO）正在把 API 标准转化为 ISO 标准，在转化过程中采纳了一些油公司的企业标准，使某些石油管标准更趋完善和合理。例如，1999 年 6 月公布的 ISO/WD 11961（草案）把 API SPEC 5D 和 SPEC 7 中的有关内容合并，成为一部完整的钻杆标

准；1996 年发布的 ISO 3183 标准对油气输送管技术条件的规定比 API SPEC 5L 更加明确，更为适用。

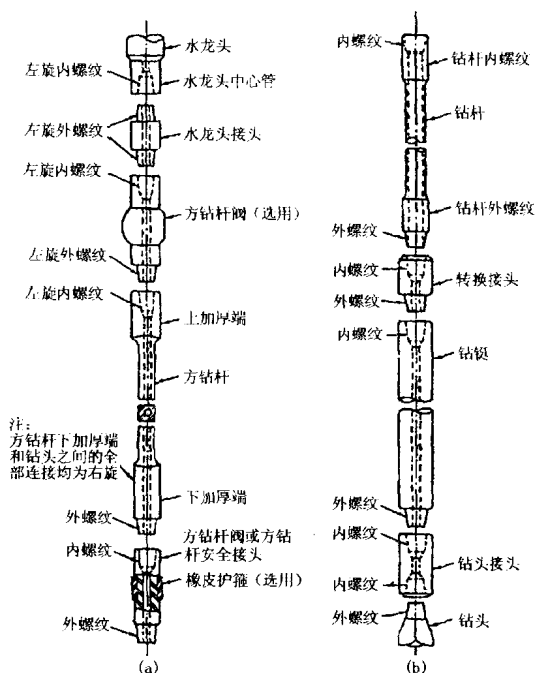


图 1-1 典型的钻柱组合

列于 API SPEC 5D 和 ISO/WD 11961 (草案) 的钻杆按管体强度级别依次有 E75、X95、G105、S135 等 4 个钢级 (E、X、G、S 后的数字为标准规定的管体材料的最低屈服强度，千磅/吋²)。列于 API SEPC 5CT 的套管和油管分为 4 组、17 个钢级。第 1 组 4 个钢级：H40、J55、K55、N80；第 2 组 8 个钢级：L80-1、L80-9Cr、L80-13Cr、C90-1、C90-2、C95、T95-1、T95-2；第 3 组 1 个钢级：P110；第 4 组 4 个钢级：Q125-1、Q125-2、Q125-3、Q125-4。除 L80-9Cr、L80-13Cr、C90-1、C90-2、T95-1、T95-2 计 6 个钢级限定使用

无缝钢管外，其余钢级除使用无缝管外还可使用电阻焊或电感应焊接方法生产的直缝焊管（EW）。列于 API SPEC 5L 的油气输送管有 A25、A、B、X42、X46、X52、X56、X60、X65、X70、X80 共 11 个钢级，按生产工艺不同分为无缝钢管、电阻焊钢管、埋弧焊钢管等 8 种，但主要使用的是无缝钢管、直缝高频电阻焊管（Electric Resistance Welding，简称为 ERW）、直缝埋弧焊管（Longitudinally Submerged Arc Welding，简写 LSAW）、螺旋缝埋弧焊管（Spirally Submerged Arc Welding，简写为 SSAW）等 4 种。其中 LSAW 按成型方式又分为 UO（UOE）、RB（RBE）、JCO（JCOE）等。由于无缝钢管直径的限制，在主干线上一般只采用 LSAW（主要为 UOE）、ERW 和 SSAW 等 3 种钢管。

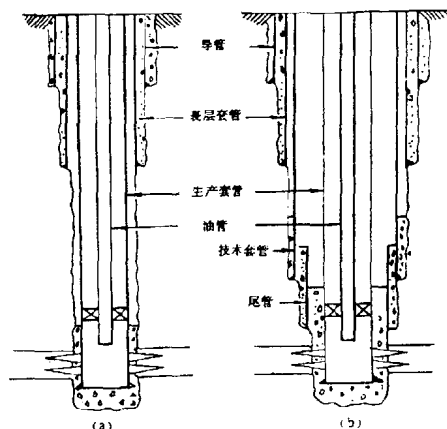


图 1-2 套管与油管在油井中的位置

(a) 正常压力井；(b) 异常压力井

尽管 API 的标准化工作不断发展和进步，但它毕竟是用户和制造厂商的妥协产物。迄今为止，大多数用户订购石油管时，在采用 API 标准的同时，还要附加一些补充技术条件。而且用户实际使用的油井管，有相当数量（约 30%）是非 API 钢级。这些非 API 钢级是制造厂为满足用户的特殊要求而开发出来的。

国外主要石油管生产厂均有自己的非 API 钢级系列。例如新日铁的 ND-150D、ND-165D 超高强度钻杆，美国 Grant Prideco 的 XD-105 酸性环境用钻杆、S-135TTM 高韧性钻杆（-20℃ 时 CVN 为 98.9J）及刚推出的高抗扭和超高抗扭钻杆。在套管和油管方面，住友金属的 SM 系列最具代表性，共分 5 组，计 23 个钢级。其中 SM-G 组为一般深井用，5 个钢级，最高为 SM-155G，主要技术要求是屈服强度和夏比冲击功，必要时测定 K_{ISCT} 值；SM-T 和 TT 组为高抗挤套管，7 个钢级，应进行挤毁试验；SM-S 组为含硫井用，5 个钢级，应进行硫化物应力腐蚀（SSCC）试验；SM-SS 组为严重含硫井用，3 个钢级，应进行 SSCC 试验和氢致开裂试验（HIC）；SM-L 组为低温用，3 个钢级，应进行低温夏比冲击试验并测定断口形貌转化温度（FATT）。上述 SM-S 和 SM-SS 钢级能有效地防止硫化物应力腐蚀开裂，但不能防止 H_2S 和 CO_2 的一般腐蚀，因此在使用这些钢级时还应同时使用缓蚀剂。在某些严酷条件下，无法使用缓蚀剂或缓蚀剂效果不好，于是又开发了新 SM 系列高合金钢级和镍—铬基、镍基合金系列，包括 CO_2 腐蚀井用的 SM-9Cr~SM-13Cr 共 7 个钢级； CO_2 —低 H_2S 腐蚀井用的 SM-22Cr~SM-25Cr 共 6 个钢级； $CO_2-H_2S-Cl^-$ 腐蚀井用高铬镍合金 5 个钢级； $CO_2-H_2S-Cl^-$ 重腐蚀井用高镍—铬合金及镍基合金系列，15 个钢级。此外还有钛合金和复合管系列。住友金属的非 API 套管和油管共 108 个钢级，是 API 钢级的 6 倍。油气输送管的非 API 系列，主要是区别了输送天然气的管线与输油管线技术条件的差异，以及寒冷地区用和含酸性介质（ H_2S 、 CO_2 等）输送管线的特殊要求。

油井管柱是由专用螺纹将单根油井管连接而成。油气输送管线也可用螺纹连接，但一般多采用焊接连接。管柱在不同井段要长时间承受拉伸、压缩、弯曲、内压、外压和热循环等复合应力的作用，螺纹连接部位是最薄弱的环节。油管和套管的失效事故，80% 左右发生在螺纹连接处。因此，油井管的螺纹主要应具

备两个特性：(1) 结构完整性，就是螺纹啮合后应具备足够的连接强度，不致于在外力的作用下使结构受到破坏；(2) 密封完整性，就是要能保证含有数以百计螺纹连接接头的管柱在各种不同受力状态下承受内外压差（一般为几百个大气压）的长期作用而不泄漏。螺纹连接强度和密封性能是油井管极为重要的两个技术指标。API SPEC 5CT 规定套管和油管采用短圆螺纹、长圆螺纹、偏梯形螺纹等连接型式。上述连接型式采用的圆螺纹和偏梯形螺纹在保障管柱的结构完整性和密封完整性方面都存在的问题。例如圆螺纹管柱，其螺纹连接部位只能承受相当于管体强度 60%~80% 的拉伸载荷；偏梯形螺纹的密封性较低，水密封使用压力一般不超过 28MPa，气密封压力有时接近于零。而且，API 圆螺纹和偏梯形螺纹都是借助于 API 螺纹脂来实现密封，一般只能在 95℃ 以下的温度有效使用。而近 30 年来，油、气钻探环境日益苛刻，油井深度、井底压力和温度日益增高，迫使人们开发了特殊螺纹（Premium Connection）。目前，国外已有 30 多家著名的油井管制造厂开发 100 多种享有专利权的特殊螺纹扣型。例如法国 Vallaurec 的 VAM，美国 Hydril 的 SEAL-LOCK，日本住友金属的 TM，新日铁的 NS-CC，NKK 的 NK3SB，川崎制铁的 FOX，等等。在国外，特殊螺纹油井管的使用量已占全部油井管用量的 30% 左右。

二、石油管的重要地位

石油工业是大量使用石油管的工业。石油管在石油工业中占有很重要的地位：

(1) 石油管用量大、花钱多，节约开支、降低成本的潜力巨大。

油井管的消耗量可按每年钻井进尺量推算。根据我国具体情况，大体上每钻进 1m 需要油井管 62kg，其中套管 48kg、油管 10kg、钻杆 3kg、钻铤 0.5kg。近年来，我国每年消耗油井管约 90 万吨。油气输送管年需求量波动较大，平均每年 30 万吨。大致上，我国石油工业每年消耗石油管约 120 万吨，耗资达 100 亿

元人民币。

(2) 石油管的力学和环境行为对石油工业采用先进工艺和增产增效有着重要的影响。

在石油工业的勘探、开发、储运过程中,采用先进的工艺方案、增产措施都受到石油管的力学和环境行为的严重制约。提高钻速是强化钻井、降低成本的关键措施。但长期以来,钻井设计和施工作业顾及钻柱的强度和寿命,致使提高钻速的措施严重受限。国内新建的输送管,由于受所用钢管强度限制,输送压力不高,输送效率低,并且中间加压泵站多,投资大。早期管线的输送压力为 $3.9 \sim 4.6\text{MPa}$,近年来大多数管线也仅提高到 6.4MPa ,泵站间距约为 60km 。而发达国家输送管线压力可达 $8 \sim 12\text{MPa}$,泵站间距 $80 \sim 100\text{km}$,输送效率、用钢量、泵站投资等综合经济效益指标大大优于国内。

(3) 石油管失效损失巨大,其安全可靠性和使用寿命对石油工业关系重大。

石油管工况条件恶劣。例如油管柱和套管柱通常要承受几百甚至上千大气压的内压或外压,几百吨的拉伸载荷,还有温度及严酷的腐蚀介质的作用。1985年以前,我国每年仅钻柱断裂掉井事故即达 1000 起左右。据国际钻井承包商协会(IADC)统计,每起钻柱断裂事故平均直接损失为 10.6 万美元。钻柱和套管柱损坏有时会导致油井报废。我国西部油田一口油井的成本达几千万元人民币。套管的寿命直接决定油井寿命,油井的寿命又决定了油田寿命。油气输送管的事故多是灾难性的。例如 1989 年发生在前苏联乌拉尔山地区的一次天然气输送干线泄漏引爆,导致 300 多人死亡,800 多人受伤。石油管的安全可靠性、使用寿命和经济性对石油工业关系重大。

第二节 石油管服役条件和失效模式

构件的服役条件包括:载荷的性质(静载荷、冲击载荷、交

变载荷、局部压入载荷等), 加载次序 (载荷谱), 应力状态 (拉、压、弯、扭、剪切及其复合), 以及工作温度和接触介质等。构件在特定的服役条件下发生变形、断裂、表面损伤等而失去原有功能的现象称为失效。失效模式是指失效的表现形式, 一般可理解为失效的类型。

钻柱、套管柱、油管柱和油气输送管线的服役条件和失效模式有较大的差别, 现分述如下。

一、钻柱

钻柱作业时, 其工作状态可大致归纳为起下钻和正常钻进两种。起下钻时, 由于自重, 钻柱承受轴向拉力, 其值越接近井口越大。因井眼内钻井液浮力的作用, 下部一段钻柱受到轴向压应力, 同时使上部钻柱的拉伸应力减小。在正常钻进过程中, 下部钻柱承受轴向压力。转盘钻井时, 钻柱处于旋转状态, 承受扭矩和离心力。在轴向压力和离心力共同作用下, 钻柱发生弯曲。弯曲的钻柱在钻井过程旋转便产生了交变弯曲应力。在井眼偏斜、方位变化大的情况下, 钻柱承受的交变弯曲应力很大。

除承受拉、压、弯、扭载荷外, 钻柱还承受强烈的振动 (包括纵振、扭振、横振)。同时, 钻柱内壁受高压、高速钻井液的冲刷, 外壁受套管或井壁的摩擦。起下钻作业中的猛提猛刹, 产生较大的冲击载荷, 容易使钻柱瞬时超载。此外, 腐蚀介质、温度、井下压力等也都是不可忽视的服役条件。

在上述外在服役条件下, 钻柱的主要失效模式为:

(1) 过量变形。是由于工作应力超过材料的屈服强度所致。如钻杆接头螺纹部分的变形伸长 (图 1-3), 钻杆管体的弯曲及扭曲 (图 1-4)。

(2) 断裂。包括过载断裂、低应力脆断、应力腐蚀破裂、疲劳和腐蚀疲劳断裂等。在钻柱失效事故中, 断裂失效比例最大, 危害也较严重。

① 过载断裂: 工作应力超过材料的抗拉强度所致。如遇卡提升时钻杆薄弱环节 (如焊缝热影响区) 的断裂 (图 1-5) 及



图 1-3 钻杆接头螺纹部分过量变形，
伸长 20.7mm



图 1-4 钻杆弯曲和扭曲



图 1-5 钻杆过载断裂
(断于焊缝热影响区)

整钻时钻杆管体折断 (图 1-6)。

② 低应力脆断：石油管表面或内部存在缺陷或组织不良，在较低应力下脆性断裂。

图 1-7 为钻铤材料韧—脆转化温度高于工作温度而导致的低应力脆断宏观断口形貌。

③ 应力腐蚀破裂：在含硫油气井作业时，硬度高于 HRC22