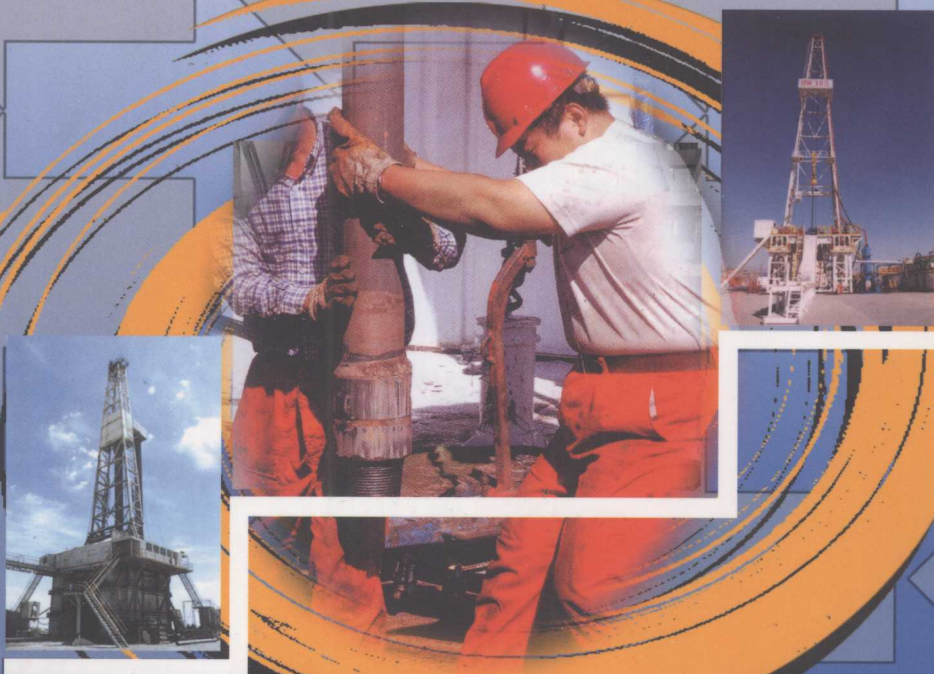


中国石油天然气集团公司

钻井工程重点实验室学术论文集 (2004)

钻井基础理论与研究与 前沿技术开发新进展

苏义脑 徐鸣雨 主编



石油工业出版社
PETROLEUM INDUSTRY PRESS

中国石油天然气集团公司钻井工程重点实验室
学术论文集 (2004)

钻井基础理论与前沿技术 开发新进展

苏义脑 徐鸣雨 主编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书汇集了中国石油工程学会钻井工作部基础理论学组暨中国石油天然气集团公司钻井工程重点实验室联合举办召开的“钻井基础理论与前沿技术开发新进展学术研讨会”中的多篇优秀论文,总结了近几年我国油气钻井基础理论研究和前沿技术开发方面的进展和成果,这些先进技术和成果为今后钻井技术的可持续发展提供了可靠的保证。

本书可供石油钻井专业的工程技术人员、管理人员及大专院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

钻井基础理论与前沿技术开发新进展/苏义脑,徐鸣雨主编.
北京:石油工业出版社,2005.6
ISBN 7-5021-5070-6

- I. 钻…
- II. ①苏… ②徐…
- III. ①油气钻井-理论
②油气钻井-技术
- IV. TE2

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第053887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.cn
总 机:(010) 64262233 发行部:(010) 64210392
经 销:全国新华书店
印 刷:石油工业出版社印刷厂印刷

2005年6月第1版 2005年6月第1次印刷
787×1092毫米 开本:1/16 印张:14
字数:357千字 印数:1—1000册

定价:42.00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

前 言

2004年9月20—22日,中国石油工程学会钻井工作部钻井基础理论学组和中国石油天然气集团公司钻井工程重点实验室在大连联合举办了“钻井基础理论研究的前沿技术开发新进展学术研讨会”。参加本次会议的有来自中国石油天然气集团公司、中国石油化工集团公司、中国海洋石油总公司等三大集团公司、国土资源部、石油高校和相关院校的5名中国工程院院士和60余名专家,包括钻井基础理论学组的成员、钻井工程重点实验室学术委员会的部分成员和研究人员、部分特邀专家和入选论文的作者。

在紧张的三天会期中,与会的5名中国工程院院士和5名特邀专家,向大会作了重要的专题报告;20余名论文作者宣读了学术与技术论文;此后与会代表进行了热烈的讨论,认真总结近几年来我国油气钻井基础理论研究和前沿技术开发方面的进展和成果,交流经验,分析现状,找出问题与差距,并对今后如何开展好这一工作提出建议,为谋取进一步的发展献计献策。

按照预先安排,本次会议进行了优秀论文的评选并颁发证书。现将部分特邀专家的报告和论文汇集出版,以期在更广的范围内进行交流。

中国工程院院士 苏义脑
2004年11月于北京

目 录

关于钻井钻探工程可持续发展的几点设想	刘广志 (1)
油井管发展动向及若干热点问题	李鹤林 (5)
新型正脉冲随钻测量系统 CGMWD 研制与现场实验	
... 苏义脑 张 海 盛利民 王家进 李献录 张 维 李 童 王 俊 吕海川 (18)	
地质导向钻井技术概况及其在我国的研究进展	苏义脑 (23)
NBLOG-1 型随钻近钻头地质/工程参数测量短节的研制与现场实验	
..... 苏义脑 盛利民 窦修荣 邓 乐 李 林 (35)	
钻井完井新技术在海上油田的应用	姜 伟 (46)
侧钻井小井眼合理的环空间隙研究	刘乃震 王廷瑞 刘孝良 刘崇建 (53)
底部钻具组合运动状态及钻进趋势评价方法研究 ... 管志川 史玉才 夏 焱 马广军 (61)	
高温高压储层安全泥浆密度窗口确定技术	蔚宝华 邓金根 王炳印 曲从锋 (69)
高压水射流理论及其在石油工程中应用研究进展	李根生 沈忠厚 (75)
霍布金森水泥石动态力学性能与射孔验窜检测评价试验装置	
..... 莫继春 李 杨 卢东红 赵永会 (81)	
江汉油田欠平衡压力钻井技术研究与应用	谢国明 (89)
利用敏感井底钻具振动传递地面信息的方法	周 静 傅鑫生 (97)
可循环微泡沫钻井液研究与应用	张振华 (102)
辽河油田热采井套损防治新技术	余 雷 薄 岷 (108)
辽河马古 1 井的欠平衡钻井技术	易发新 李春吉 吴 爽 (115)
气体钻井配套技术的研究与应用	吴仕荣 陈 刚 孟英峰 陈力力 (121)
欠平衡钻井合理压差的确定技术及在新疆油田的应用	
..... 邓金根 蔚宝华 李维轩 徐显广 (137)	
热采井预压固井技术	李子丰 (141)
泥页岩井壁应力的力学化学耦合计算模式及数值求解方法	
..... 邓金根 蔚宝华 王炳印 王利华 (146)	
水力脉冲诱发井下振动钻井技术研究进展	倪红坚 韩来聚 王瑞和 (151)
我国套管柱强度设计需要解决的几个重要问题	韩志勇 (156)
套管钻井用 J55 钢级套管与地层岩石磨损的试验研究	
..... 宋生印 杨 龙 林 凯 韩新利 (163)	
新型微膨胀防窜水泥浆研究应用	徐学军 刘宏梁 代礼杨 (169)
西江油田大位移井井壁稳定性评估	邓金根 蔚宝华 邹灵战 王利华 陈胜宏 (176)
新疆油田新型 MTC	张兴国 许树谦 李跃明 柳 健 (182)
淹没条件下超高压水射流破岩实验研究	徐依吉 冯云春 赵付国 (188)
注气欠平衡钻水平井的新技术	刘绘新 孟英峰 (195)
钻井信息传输及管理系统	张宁生 杨健龙 (199)

钻井液封堵原理与封堵实验研究 蒲晓林 张孝华 (206)

钻井液性能调整有助于提高胶结测井评价质量
..... 郭小阳 李早元 杨远光 孙勤亮 李志斌 尹伟 (214)

关于钻井钻探工程可持续发展的几点设想

刘广志

(中国工程院院士)

1999年我国科技部提出“上天，入地，下海，登极”的八字科技发展方针。这八字方针不仅对我国今后科学技术发展方向和努力目标指明了方向，而且对20世纪末21世纪初科学技术发展的总趋势做了一个非常完美的概括。

相信大家意识到：在“上天，入地，下海，登极”的科学技术活动中，钻井工程已扮演了不可或缺的角色。例如：在美国登月飞行中，动用了美国长年公司的微型金刚石钻机(Longyear Diamond Micro-drill)，钻了钻孔，换取了月球的岩心样。不久前美国登上火星的火星车上，也配备了遥控的火星钻机以采取火星岩样。我国武汉地质大学地质工程系的鄢泰宁教授也参加了我国将来登月飞行的钻探机设计，并提出了初步设计方案。

近40多年来，一个研究地球深部奥秘的热潮席卷全球。海洋科学深井钻探揭示的深部地球和海洋与生态秘密，诸如火山爆发机制，深部成矿理论的验证，以及板块理论的研究，全球气候变化机制，数字地球等等，使经典地质学已经逐渐形成为地球科学，远远扩大了地质学的领域，而且衍生出一些新学科和交叉学科。

再简述一下“登极”。22年前美国、芬兰、德国、挪威等国的科学家们，实施了GRIP(Green-land Research on Ice Program)，即在北极海边缘的格陵兰实施伟大的冰层钻探计划，企图从陈年的深厚冰层里取得气候变化的历史信息。钻探工作从1990年开始执行，到1992年7月2日，该项目负责人贡德斯罗普宣布钻井工作完成，取得了3029m的纯净冰心，冰心采取率高达95%以上，贯穿了20万年的冰盖，到达基底岩层。这套冰心里记录着气候变化的痕迹，为科学家们提供了全球气候变化的直观资料，他们重建了20万年来全球气候变化史和环境史的模型。自上而下分析出：1986年苏联切尔诺贝利核电站爆炸飘散出来的核微尘；1952年美国第一次氢弹爆炸的核微粒；1815年印度尼西亚坦波拉火山爆发的火山灰；以及公元79年意大利维苏威火山爆发的微粒；冰心里还保存着许许多多的冰气泡，其中还保存着许多极小的水生生物肢体等。科学家们得到这些信息如获至宝，从而对全球气候变化的历程有了深层明确的认识。

此前，南极冰心钻探起于1930年，最深钻孔达2545m。当时因为知识和信息的局限，深入研究的机会和领域远不如这次丰富。近70年来这些成果和信息一直得到发达国家的大气物理学家、气候学家、冰川学家、生态环境学家以及地球科学家的深切关注，就连中国南极科考队，近年来也配备了小型钻机，在南极钻取了一些冰心供研究气候变化，但这是远远不够的。

国外科学家们面对这许多闻所未闻、见所未见的新知识和新信息资料，真如欣逢科学盛世。当然最大的收获还是促进了地球科学事业的飞速进步。

那么取得这些地球深部鲜为人知的信息是谁做出的贡献呢？毫无疑问是“钻井钻探工程”。

我们非常高兴的是，自从宋健同志担任中国工程院院长之初，他就主张把以往称之为工程技术学科的各门学科，诸如“钻井工程”等，统统称为“中国工程科学”。这是邓小平同志指出“科学技术是第一生产力，科学家是劳动阶层成员一部分”的英明论断的引申和重要决策。

还应指出的是：中国工程院里已经有了洪伯潜、顾心怿、曾恒一、刘广志、沈忠厚、苏义脑、罗平亚等七位从事各种不同钻井工程的院士，这是对我们全行业的充分肯定和鼓舞。

(1) 钻井工程是一门工程科学，有其自己的基础理论和各种各样丰富的实践，它的应用范围还在日益扩展。

(2) 钻井工程的工作是日夜兼程的，是长年工作在旷野荒郊的一个特殊工种，具有工程科学界最能吃苦耐劳的队伍。随着国民经济的和平崛起，它的功能还在与时俱进、不断创新。

(3) 钻井工程的不同分支行业，理应团结起来，发挥各自的优势，建立论坛机制，交流经验，不定期的共商祖国重大建设项目，发挥全行业的集体智慧和力量。

一、参加大洋综合钻探计划 (IODP)

由日本海洋科学技术中心 (JAMSTEC) 提出的大洋综合钻探计划，是在美国大洋钻探计划 (ODP) 完成后提出的，它立即得到美国的支持并参加了具体工作。日本负责制造带有全方位动力定位系统、隔水管系统等先进设备的巨型钻探船，该船已经建成，目前正在装备先进的物理、化学、生物等化验测试仪器、海底钻探设备以及长期海底观测、监测设备等。船长 210m，配有潜水 10000m 的深潜器，钻探水深 2500~4000m。与过去的钻探船不同的是，配有从井底到钻井船平台的隔水管系统 (简称隔水管系)，使钻井液从井底一直能循环回钻井平台，能将钻井过程中释放出来的气体，由钻井液携带至船面上来收集，以免造成海水汽化而产生海难事故。配备这套设备显然是为了解决钻探与开发天然气水合物的难题。此外，还配备了全方位动力定位系统 (DPS)。这条船是当今世界上第一支功能最全、最先进的钻探船。

IODP 的主要科研内容包括：地球、大洋、人类生存环境的有关问题。

(1) 研究地壳与上地幔流体流动深度及其物理、化学、生物过程，弄清岩石圈与大洋之间物质与热交换，逐渐予以量化。

(2) 研究全球气候变化，了解环境变化的动力学机制，探索未来气候变化趋势。通过从地心到地面的动力学，研究固体地球的卷吸、板块活动，及其对环境、生物圈的影响，预测全球气候变化。

(3) 期望取得至今未获得的上地幔和地幔的卷流样品。

(4) 寻找深海地震震源带，即动力带 (Dynamic Zone) 的确切位置。动力带是海岛国家深源地震的震源带。

目前已有 12 个国家参加 IODP 计划，我国于 2004 年初宣布参加。由中国科学院和同济大学主办，地质部门仅有青岛、广州两个海洋所各 1 名地质人员参加。我认为：IODP 是一次为我国培养地质、海洋、海上深钻井，勘探开发天然气水合物，以及化验、测试等全方位先进青年人才的大好机会，希望再争取更多的青年科技人员参与其中。

二、筹划开发属于我国专属经济区的海底固体矿产资源

处于西北太平洋水深 6000m 的固体矿产结核，其丰度极高，又都是锰、钴、铜、镍等稀有矿种。资源量达 9.7 亿 t，国土资源部广州海洋地质所已经勘探了 15 万 km² (西北太平

洋西经 138°~158°、北纬 7°~15°洋的矿产储量),我国已按合同将其中一半开采面积于 1999 年交还给联合国。其他 7.5 万 km² 是属于我国的专署经济区,相当于渤海面积那么大,许可由我国优先开采。估计开采至少 11 年,即可收回成本,经济效益极高。我国已有全套海上采矿方法和工艺,还测绘了海底地形图和矿产分布图。中国科学院研制的用于水深 6000m 的无缆自制机器人,为我国尽快开采这些矿产资源提供了技术保证和条件。

三、共同研究我国开采天然气水合物的钻井设备和工艺

我国南海、东海等海域,经广州海洋地质调查局的勘察,天然气水合物储量极为丰富。天然气水合物是甲烷和水的一种结晶物质,点火即燃,又叫可燃冰,1m³的可燃冰,可释放出 164m³甲烷和 0.8m³的水,它是世界上最宝贵的并可替代石油天然气的清洁性能源。但它的钻探开采技术十分复杂,至今没有哪个国家具备这种钻探开采技术。贸然在海上钻探、开采海底天然气水合物,一旦气体外溢,混入海水,将使海水汽化,造成海啸、海底滑坡、钻探船翻倾等重大事故。因此,在国际上尚无成功经验可借鉴的情况下,不能贸然试采,最好由石油与地质钻井部门合作,先制定开采策略。

第一步:借修建青藏铁路之机,沿途又极为缺乏能源,尽先在沿途永冻层中,借鉴地面开采石油的经验,先试钻井、试开采,用地面开采石油天然气的经验,足以应付一切可能发生的故事。

第二步:用石油钻井经验从滨海地区施工海边大位移水平定向井,用滨海钻井完井工艺,可能要安全的多。

第三步:积累了地面、滨海陆地完井、开采经验,才能试采海上的丰富天然气水合物资源。

分三步走的技术策略,是循序渐进的可靠和稳妥的方法。与此同时应该积极研制有关专用钻探开采天然气水合物的设备和工具与成套工艺。

四、派出一定钻井力量勘探开发非生物源油气,扩大我国寻找油气资源新领域

非生物源油气的存在,将为人类带来另一种全新洁净能源的希望。

非生物源油气的假说已经在世界上争论了四五十年了,终于被 1982 年在前苏联摩尔曼斯克克拉半岛钻进的 CG-3 大陆科学钻探超深井(11262m)所证实。前苏联于 1988 年在莫斯科召开的第四届国际大陆科学钻探会议上公布了这一惊人的发现,即该超深井钻到井底压强为 11 500MPa 时井下压力为 3000MPa 的情况下,发现了“不该出现的碳氢化合物”(原苏联地质部部长 Y. A. 克兹洛夫斯基语)。这一信息传出后,令世界科技界大为震惊。特别是缺乏油气资源的瑞典代表立即返回瑞典,由瑞典电力公司投资在该国北部的大陨石坑(直径 40km,出露地表岩石是结晶岩)定下孔位,命名 Gravberg No. 1 Well,设计井深 9000m,钻到 6500m 时终止,在前寒武纪岩层中取得原油 85 桶(约 13t),经化验,其物理化学性质指标与一般石油相同。此后,瑞典又钻了 Gravberg No. 2 Well,详情没有再发表。

前苏联为了进一步证实这一生油理论和实践的巨大发现,1985 年又在第聂泊—彼得洛夫斯克盆地布了三口深探井(分别为 6904m、7057m、7502m),验证了发现。先后在 12 个钻探区找到 2×10⁸t 油储量(含少量来自于上古生界的原油)。经测试,油里含有大量金属微粒, Ni/V 值也增高,并力求在化验过程中寻找微生物和细菌,结果不存在生物指示因子,而且有大量 He 存在,是随碳氢化合物烃类、CO₂、氮等与深部流体一起从上地幔裂隙带上来的,这批石油的生成主要来自非生物源物质类。

非生物源石油与天然气(Abiogenetic Oil and Gas)从理论变成现实,历经 50 多年,终

于从假说变成事实，令我们深思。更重要的是它给人类带来一个非常振奋人心的信息，即地球深部蕴藏的油气，将为人类提供永不枯竭的洁净能源，带来无比光明的前景。

如有怀疑，敬请参考前苏联科学院 H. A. 库德良采夫教授著作《石油无机起源说》（赵霞飞译，1958 年，科学出版社）。

参 考 文 献

探矿工程研究所编 . 1995. 刘广志论科学钻探 . 北京：地质出版社

刘广志 . 2003. 关于逐步开展四大地球科学工程的建议 . 北京：地质出版社

刘广志 . 2000. 非生物源石油天然气的存在是人类用之不竭的洁净能源 . 中国工程科学，
2 (5)

油井管发展动向及若干热点问题

李鹤林

(中国石油天然气集团公司管材研究所)

摘 要: 本文在分析油井管服役条件和失效模式的基础上, 指出油井管的根本问题是钢级和螺纹连接问题。分别评述了油井管钢级和螺纹连接的发展动向, 讨论了高强度油井管的强韧性匹配以及膨胀管技术、连续管技术及抗 CO₂ 腐蚀油井管等热点问题。

关键词: 油井管 服役条件 失效 发展动向

油井管包括钻杆、方钻杆、钻铤及套管、油管等。服役时, 油井管由专用螺纹连接成数千米的管柱, 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。套管柱下入钻成井眼, 用以防止地层流体流动及地层挤毁井眼。油管柱下入套管柱内, 构成井下油气层与地面的通道。

我国每年仅钻柱断裂掉井事故就达 1000 起左右。钻柱新裂失效有时会导致井毁人亡。套管的寿命决定油井的寿命, 油井的寿命又决定了油田寿命。油井管的安全可靠性和使用寿命对石油工业关系极为重大。

一、油井管服役条件与失效模式

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。

1. 钻柱

钻柱服役时, 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, 钻柱承受轴向拉应力, 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。在正常钻井过程, 下部钻柱承受轴向压力。钻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的共同作用下, 钻柱发生弯曲。弯曲的钻柱在钻井过程旋转便产生了交变应力。在井眼偏斜、方位变化大的情况下, 钻柱承受的交变应力很大。除受拉、压、弯、扭载荷外, 钻柱还承受强烈的振动 (包括纵振、扭振、横振等)。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、温度、井下压力也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如下。

(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), 钻杆管体的弯曲及扭曲。

(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。

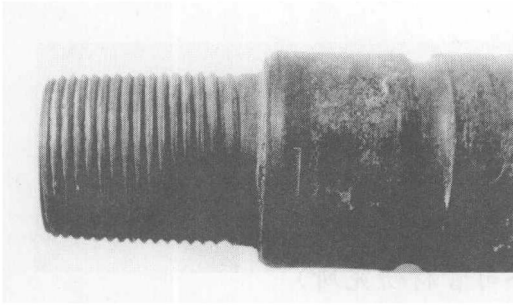


图1 钻杆接头螺纹部分过量变形

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2）及蹩钻时钻杆管体折断（图3）。

② 低应力脆断：油井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4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的宏观断口形貌。

③ 应力腐蚀破裂：在含硫油气井作业时，

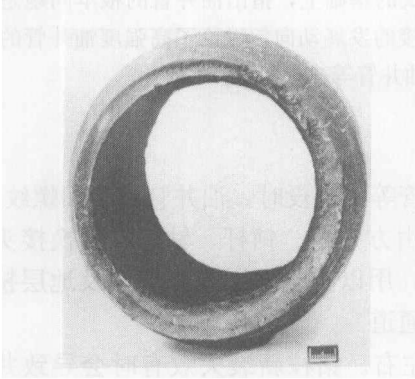


图2 钻杆过载断裂
(断于焊缝热影响区)

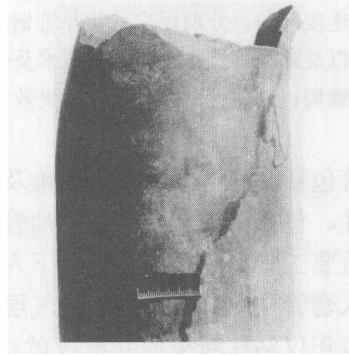


图3 钻杆过载断裂
(断于管体)

硬度高于 HRC22 的钻柱构件，易发生硫化物应力腐蚀开裂。高强度钻杆长时间与某些介质（如盐酸）接触也可能发生应力腐蚀破裂，如图5所示。

④ 疲劳和腐蚀疲劳断裂：一般发生在钻杆接头、钻铤和转换接头螺纹部位，以及钻杆管体内加厚过渡区等截面变化区域或因表面损伤形成的应力集中区。图6为发生在钻铤螺纹根部的疲劳断裂。腐蚀疲劳是交变载荷和钻井液等腐蚀介质联合作用的结果。图7为钻杆内加厚过渡区的腐蚀疲劳失效。疲劳和腐蚀疲劳约占钻柱失效事故的80%左右。

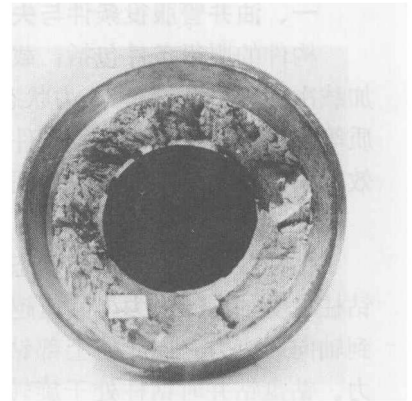


图4 钻铤低应力脆断

(3) 表面损伤。主要有腐蚀、磨损和机械损伤三类。

① 腐蚀：包括均匀腐蚀（如钻具表面锈蚀）、点蚀（多发生在钻杆内表面，如图8所示）、缝隙腐蚀（如钻杆表面皱折处的钻井液腐蚀）。

② 磨损：包括粘着磨损（如钻具螺纹粘扣）、磨料磨损（如井壁对钻柱的磨损）、冲刷磨损（如钻井液对钻柱内外表面及螺纹连接部分的冲蚀损伤）。

③ 机械损伤：如表面碰伤、大钳咬痕等。

2. 套管柱

套管柱在建井、完井和油气生产过程长期承受载荷和环境的作用。载荷方面，套管柱承受轴向载荷及外挤力、内压力三种外载。某些情况下，也承受弯、扭。环境方面，套管柱承

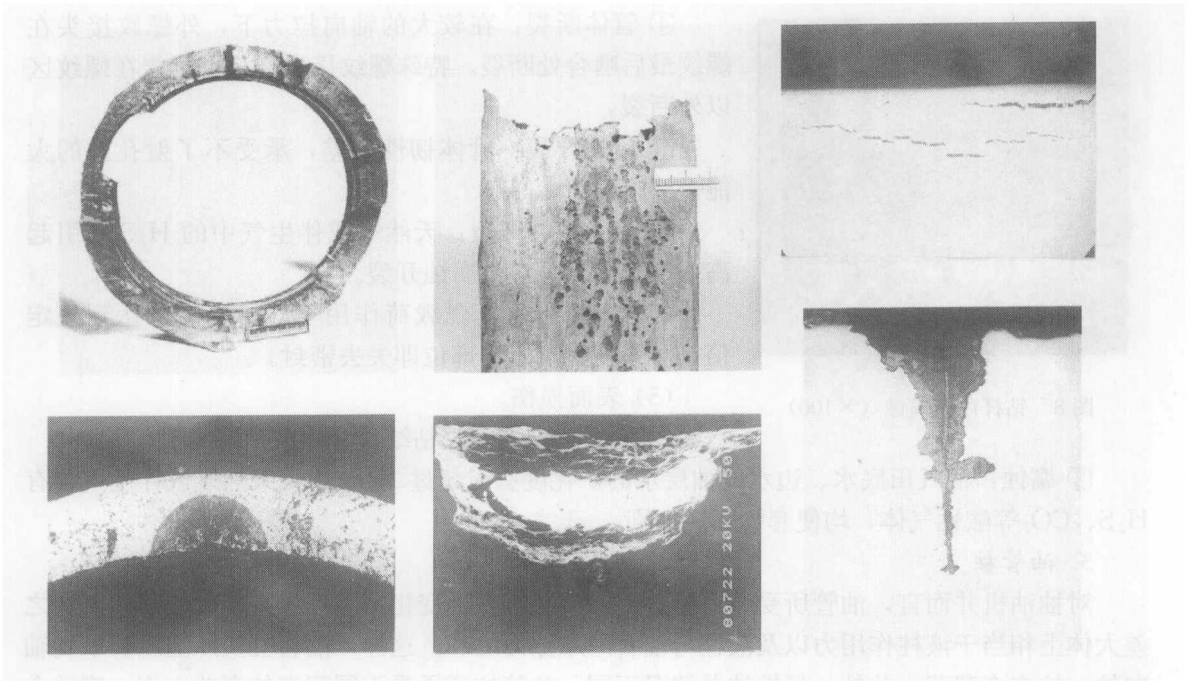


图5 钻杆应力腐蚀开裂

受油、气及地下水中腐蚀介质（如 H_2S 、 CO_2 、 Cl^- 、 $[O]$ 及 H_2O 等）的侵蚀和温度的影响。采用射孔方法完井的生产套管柱，需承受射孔弹的大能量高温瞬时冲击载荷。

在上述外在服役条件下，套管柱的主要失效模式为：

(1) 挤毁。地层中的油、气、水压力及地层岩石侧压力所形成的外挤力使套管柱管体部分失稳，包括弹性失稳和塑性失稳。

(2) 滑脱。螺纹连接部分在外力作用下，外螺纹接头从接箍内脱开。

(3) 破裂。

① 管体爆裂：套管柱承受地层流体（油、气、水）的压

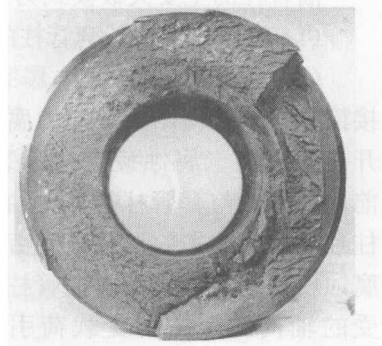


图6 钻铤疲劳断裂

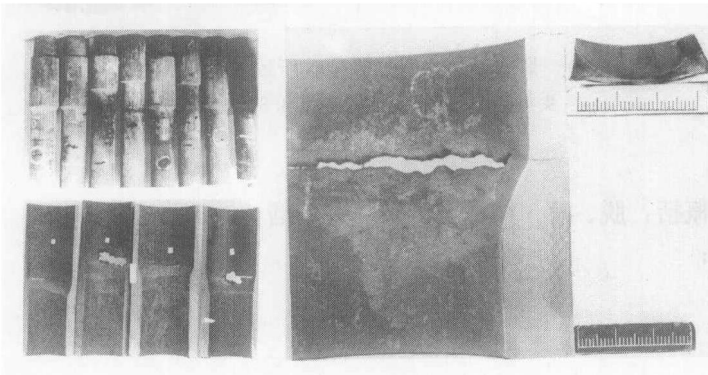


图7 钻杆内加厚过渡区腐蚀疲劳失效

力及特殊作业（压裂酸化、挤水泥等）时所施加的压力超过管体承压极限所致。

② 管体错断：在不均匀外挤力作用下，套管柱管体局部承受较大的剪切力，使管体横向断开。

③ 接箍纵裂：套管柱内压力较大而接箍比较薄弱或上扣扭矩过大所致。

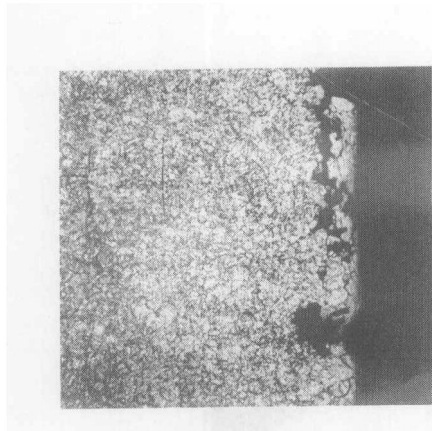


图8 钻杆内壁腐蚀(×100)

② 腐蚀：油气田底水、边水或油层水的矿化度有时超过 30mg/L，天然气或伴生气含有 H₂S、CO₂ 等酸性气体，均使套管腐蚀加剧。

3. 油管柱

对抽油机井而言，油管所受载荷随着上、下冲程发生变化，下冲程高于上冲程。两者之差大体上相当于液柱作用力以及液柱与油管间摩擦力之和。这样，油管柱实际上主要承受轴向拉—拉交变载荷。此外，根据油井情况不同，油管柱还承受不同程度的弯曲应力。腐蚀介质也是油管柱的重要服役条件。

油管柱的主要失效模式为：

(1) 滑脱：类似于套管柱的滑脱。

(2) 破裂：包括管体爆裂、接箍纵裂、管体断裂、应力腐蚀开裂和疲劳（腐蚀疲劳）断裂。前 4 种失效与套管柱类似。油管柱独具特色的失效形式是疲劳或腐蚀疲劳断裂，它是由油管柱承受的轴向拉—拉交变载荷引起的。

(3) 泄漏：类似于套管柱的泄漏。

(4) 表面损伤：油管柱的腐蚀和螺纹粘结等表面损伤失效与套管柱相似。图 9 为油管 CO₂ 腐蚀情况。

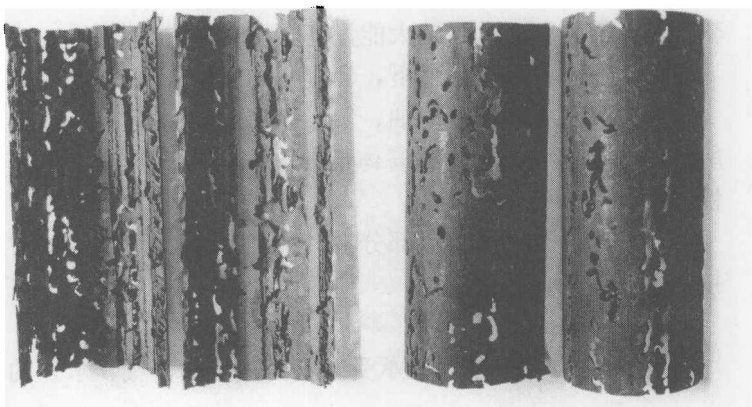


图9 某油田某井因二氧化碳所致的油管腐蚀
失重率 63%，平均腐蚀速度 4.84mm/年

油井管的失效模式可用八个字概括：脱、漏、粘、挤、破、裂、磨、蚀。

脱——管体螺纹从接箍内滑脱；

漏——螺纹连接处失去密封；

粘——螺纹粘结；

挤——管体挤毁；

破——管体受内压爆破；

④ 管体断裂：在较大的轴向拉力下，外螺纹接头在螺纹最后啮合处断裂。特殊螺纹接头套管也可能在螺纹区以外断裂。

⑤ 射孔开裂：管体韧性较差，承受不了射孔弹的大能量冲击载荷。

⑥ 应力腐蚀开裂：天然气或伴生气中的 H₂S 易引起高强度套管发生应力腐蚀开裂。

(4) 泄漏。在复合载荷作用下，内压尚未达到规定值，套管柱螺纹连接部位即失去密封。

(5) 表面损伤。

① 磨损：例如螺纹粘结及管体被钻柱磨损。

裂——拉断、错断、纵裂、射孔开裂以及疲劳、应力腐蚀开裂等；
磨——如套管与钻柱相互磨损；
蚀——腐蚀及应力腐蚀。

从油井管自身分析，上述失效模式归根结底是两方面因素起作用，即材料因素和结构因素。材料因素包括材料的成分、组织、性能及冶金质量，集中体现在钢级上；结构因素是指油井管的几何形状和尺寸，主要体现在螺纹连接上。因此，油井管的根本问题是钢级和螺纹连接问题。

二、油井管的钢级

1. 钻柱构件

1) API 钢级

列于 API SPEC 5D 的钻杆管体钢级有 E75、X95、G105、S135。API SPEC 7 规定了钻杆接头、钻柱转换接头和钻铤的技术条件。ISO11961 将钻杆管体和钻杆接头合二为一，形成了真正的钻杆标准。API 近期也将有相应调整。API SPEC 7 对钻杆接头、钻柱转换接头和钻铤的材料和化学成分未作明确规定。实际上，钻杆接头和小规格钻柱转换接头一般采用 AISI 4140H（德国采用 36CrNiMo4），钻铤及尺寸较大的转换接头采用改型的 4145H。无磁钻铤采用 Cr-Ni 奥氏体钢及铍青铜。国内已用 Cr-Mn-N 奥氏体钢试制成功无磁钻铤。

2) 非 API 钢级

为了满足严酷服役条件，减少钻杆失效事故，油公司与钻杆制造厂商研制了一系列非 API 钢级，包括：超高强度钻杆，如新日铁的 ND-150D、ND-165D，V&M 的 MW-V-170 等；高韧性钻杆，如 Grant 的 S135™ 高韧性钻杆，-20℃时，CVN≥98.9J；限制屈服强度钻杆，如 V&M 的 MW-CE-75 和 MW-CX-95，适用于酸性环境油气井；强酸性环境用钻杆，如 V&M 的 MW-CS-95，Grant 的 XD-105 等。

2. 套管和油管

1) API 钢级

API SPEC 5CT 将套管和油管分为 4 组、18 个钢级。其中，第 1 组包括 H40、J55、K55、M65、N80 共 5 个钢级；第 2 组包括 L80、L80-9Cr、L80-13Cr、C90-1、C90-2、C95、T95-1、T95-2 共 8 个钢级；第 3 组仅 1 个钢级，即 P110；第 4 组包括 Q125-1、Q125-2、Q125-3、Q125-4 共 4 个钢级。

2) 非 API 钢级

为了尽可能减少油套管失效事故，满足不同服役条件的需求，用户实际使用的油套管约 40% 是非 API 钢级。

(1) 用于深井、超深井的超高强度油套管。

代表性牌号如 V&M 公司的 VM-140、VM-150、VM-155，住友的 SM-140G、SM-150G、SM-155G，NKK 的 NK-140、NKV-150，川崎的 KO-140V、KO-150V，上海宝钢的 BG140、BG150，天钢 TP125、TP140、TP150 等。

(2) 用于寒冷地区的低温高韧性油套管。

典型牌号如住友的 SM-95L~110L、SM-110LL，V&M 公司的 VM-55LT~125LT，NKK 的 NKCT-110~125，川崎的 KO-95L~125L，上海宝钢的 BG80L~125L。

(3) 高抗挤套管。

典型牌号如住友的 SM-80~110TT、SM-95TT~125TT，V&M 公司的 VM80HC~

140HC, NKK 的 NKHC-125、NKHC-140, 川崎的 KO-95CTYS、KO-110T, 上海宝钢的 BG80T~125T, 天钢的 TP80T、TP110T~140TT。其中, TP110TT、TP125TT、TP130TT、TP140TT 还可以生产非 API 规格(超厚)超级抗挤套管, 其抗挤强度可达同钢级、同内径 API 规格套管的 2~4 倍。

(4) 抗 H₂S 应力腐蚀的油套管。

典型牌号如住友的 SM-80S~95S、SM-C100、SM-C110、SM-80SS~100SS, V&M 公司的 VM-90S、VM-95S、VM-80SS~110SS, NKK 的 NKAC-110SS, 川崎的 KO-110SS, 上海宝钢的 BG80S、BG95S、BG80SS、BG95SS, 天钢的 TP80S(S)、TP90S(S)、TP95S(S)、TP110S。

(5) 同时兼顾抗硫和高抗挤性能的油套管。

代表性牌号如 V&M 的 VM-90HCS、VM-95HCS、VM-80HCSS~110HCSS, 川崎的 KO-95TS 和住友的 SM-95TS。

(6) 耐 CO₂ 腐蚀的油套管。

典型牌号如住友的 SM13CR-80~95、SM13CRS-80~110、SM13CRM-80~110, NKK 的 NKCR13S 等。上海宝钢和天钢都开发了含 Cr1%~3% 经济型钢级。

(7) 耐 CO₂ + 低 H₂S 腐蚀的油套管。

典型牌号如住友的 SM22CR-65~140、SM25CR-75~140、SM25CRW-80~140。

(8) 耐 CO₂ + H₂S + Cl⁻ 腐蚀的油套管。

典型牌号如住友的 SM2035-110、125, SM2535-110~130, SM2242-110、125, SM2550-110~140, SM2050-110~140, SM2060-110~155, SMC276-110~150。

(9) 热采用油套管。

如上海宝钢开发的 BG-D60、BG-D80, 天钢的 TP65H、TP90H~120TH。

(10) 高压储气井套管。

如天钢开发的 TP80CQJ、TP110CQJ。

3) ERW 油套管及其钢级

油管和套管除采用无缝钢管外, 还采用高频电阻焊管(ERW)。ERW 焊管的原材料(板卷)系低碳微合金化钢经 TMCP 轧制而成, 具有良好的强韧性。ERW 焊管尺寸精度高、表面质量好, 价格也比较便宜。ERW 油管管的用量已占全部油管管的 50% 左右。ERW 油管管除 API 钢级外, 也有一系列非 API 钢级。例如日本住友的 SM-E 系列, 新日铁的 NT-E 系列及美国 LONG STAR 的 LS 系列。其中 SM-E 系列包括普通和深井用的 GE 组、高抗挤套管 TE 组、含硫井用的 SE 组、高抗挤和含硫井用的 TSE 组、低温井用的 LE 组。

国外水平较高的 ERW 油井管生产厂商是美国的 LONG STAR、新日铁名古屋制铁所、住友金属和歌山制铁所。LONG STAR 水平最高, 能生产 Q125、LS125、LS140 钢级 ERW 套管(整体调质)。新日铁和住友金属的 ERW 油井管最高钢级分别为 NT95HE 和 SM95TSE。LONG STAR 在制管过程, 焊管经热张力减径, 实现无缝化。我国从 20 世纪 80 年代末开始从日本进口 ERW 套管和油管。国产 ERW 油套管刚刚起步, 不仅数量少(约占 10%), 而且质量上与国外也有差距。中外合资宝鸡住金钢管公司的 ERW 套管基本达到了日本 ERW 套管的水平。

三、油井管柱螺纹连接

钻柱螺纹连接除 API 的 NC 型螺纹外, V&M 公司开发了 VAM EIS、VAM TAURUS

钻具特殊螺纹, Grant T. F. W 开发了一种 SST 型螺纹, 可显著降低外螺纹根部应力集中。

套管柱和油管柱是由专用螺纹将单根套管和油管连接而成。管柱在不同井段要长时间承受拉伸、压缩、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。据 API 报导, 套管 86% 的失效事故发生在螺纹连接处。

油井管的螺纹应具有两个特性: ①结构完整性, 就是螺纹啮合后具备足够的连接强度, 不至于在外力作用下使结构受到损坏; 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是油套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、偏梯形螺纹等连接形式。上述连接形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, 密封压力一般不超过 28MPa。图 10 所示为 API 螺纹形式及泄漏通道。

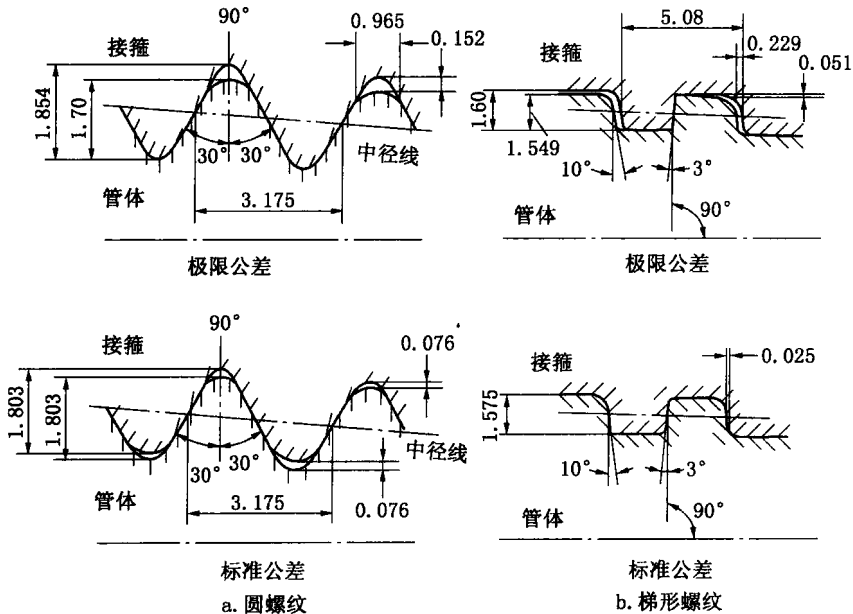


图 10 API 螺纹形式及泄漏通道

近 30 年来, 油气钻探环境日益苛刻, 油气井深度、井底压力和温度日益增高, 迫使人们开发了特殊螺纹。特殊螺纹接头不再单纯依靠螺纹过盈配合及螺纹脂的封堵作用实现密封, 普遍增加了主密封结构, 即由光滑的金属表面过盈配合而实现密封, 有的同时设计有弹性密封结构, 从而实现了多级密封 (金属、弹性、螺纹、台肩等), 其气密封压力可达管体内屈服压力。图 11 为 NK3SB 密封结构示意图。特殊螺纹接头大多采用改进型偏梯形、钩形、楔形螺纹, 并增大锥度、优化应力分布, 使螺纹连接部位与管体等强度增大。

目前, 国外已有 30 多家著名的油井管厂商开发了 100 多种享有专利权的特殊螺纹扣型。例如 V&M 公司的 VAM, 美国 Hydril 的 SEALLOCK, 新日铁的 NSCC, NKK 的 3SB, 川崎的 FOX, 住友金属的 TM 等。20 世纪 80 年代末开始, 我国各油田使用了 NSCC、