

超深井连续油管 测试技术

庞德新 主编



石油工业出版社

TE973.6
3

超深井连续油管测试技术

庞德新 主编

GD 02071030

石油工业出版社

内 容 提 要

本书系统介绍了连续油管测试工具、工艺及操作规范。全书分别介绍了超深井测试技术及现状问题、超深井连续油管选择、超深井测试井控技术、超深井连续油管测试关键装备、超深井连续油管测试方案、超深井连续油管测试工艺、作业过程风险识别及原因分析和相关规范。

本书可供石油工程相关领域工程技术人员和研究人员参考阅读，也可作为相关专业院校师生参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

超深井连续油管测试技术/庞德新主编.
北京:石油工业出版社,2015.11
ISBN 978-7-5183-0770-8

- I. 超…
- II. 庞…
- III. 超深井-石油管道-管道检测
- IV. TE973.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 141795 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
编辑部:(010) 64523537
图书营销中心:(010) 64523633
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

2015年11月第1版 2015年11月第1次印刷
787×1092毫米 开本:1/16 印张:14
字数:355千字

定价:68.00元
(如出现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)
版权所有,翻印必究

前 言

井下测试技术是了解地层岩性、物性的主要手段，准确地掌握地层信息对油气田的勘探开发具有重要的指导意义。当前勘探开发的深度不断加大，井下高温、高压、高腐蚀问题越来越突出，尤其在斜井、水平井、带压井的测试中，常规的测试管柱组合和管柱强度已不能满足其测试要求，随着连续油管技术的发展，其配套的测试技术成为了解这类复杂地层的关键措施。该技术是将测试电缆穿入连续油管中，采用连续油管地面测试设备，依靠连续油管自身的刚度和韧性将井下测试仪器送入目的井段进行测试作业。

连续油管测试技术的优点主要表现为3个方面：（1）在带压或有液体流动的情况下可以实现斜井、水平井的长距离传输测试；（2）能较好地保护测试电缆或钢丝；（3）测试效率高。由于目前没有系统的书籍供专业技术人员进行参考，严重制约了勘探开发的进程，新疆油田公司工程技术公司（技术服务公司）在多年连续油管作业中积累了大量的经验，本书是在大量的现场实例和数值模拟的基础上编写而成，对连续油管测试技术的推广具有重要的指导意义。

本书主要针对以下9个方面开展优选研究以及设计研发：（1）连续油管装备优选；（2）电缆优选；（3）测试工具优选；（4）井口防喷装置设计研发；（5）注入头支撑架设计研发；（6）其他测试传输介质的可行性分析；（7）测试方案研究；（8）连续油管材质选择及力学分析；（9）注氮平衡工艺研究。

本书由塔里木油田公司油气工程技术研究院和新疆油田公司工程技术公司共同组织编写完成。第一章由张福祥、庞德新编写，第二章由周理志、王健编写，第三章由郭新维、张宝编写，第四章由杨文新、侯启太编写，第五章由赵签、谢俊峰编写，第六章由曾努、吴警宇编写，第七章由王建刚、景洪涛编写，第八章由彭建云、宋文文编写。本书由张福祥、庞德新主审，刘建勋审定。

在编写过程中，刘建勋、张福祥提出很多宝贵意见，对本书的完成提供了帮助。

由于编者的水平有限，本书定有许多不当之处，敬请读者批评指正。

目 录

1 超深井测试技术现状及问题	(1)
1.1 超深井测试技术现状	(1)
1.2 连续油管在超深井测试中的应用现状	(1)
1.2.1 连续油管测试技术简介	(1)
1.2.2 连续油管测试技术发展现状及趋势	(2)
1.3 需要解决的问题	(3)
1.3.1 管材质的选择及力学分析、防腐	(3)
1.3.2 井控装置及技术的完善	(4)
1.3.3 工具装备的配套	(4)
1.3.4 各类技术规范规范、完善	(4)
2 超深井连续油管选择	(5)
2.1 连续油管受力分析	(5)
2.1.1 连续油管动力学分析模型	(7)
2.1.2 工程案例分析	(19)
2.1.3 连续油管极限承载能力研究	(41)
2.1.4 结论	(65)
2.2 连续油管的初步选择	(66)
2.2.1 复合材质的连续油管	(66)
2.2.2 低碳微合金连续油管	(67)
2.2.3 不锈钢材质的连续油管	(67)
2.2.4 连续油管性能分析	(67)
2.3 连续油管防腐研究	(68)
2.3.1 腐蚀指标	(69)
2.3.2 腐蚀试验	(69)
2.3.3 腐蚀结论	(73)
2.4 选择方案确定	(73)
3 超深井测试井控技术	(74)
3.1 超深井(高温高压气井)井筒压力温度分布规律	(74)
3.2 井口防喷及地面降压	(74)
3.2.1 现场准备	(75)
3.2.2 防喷系统测试	(75)

3.2.3	防喷系统的安装	(76)
3.2.4	接头拉力和压力测试	(76)
3.2.5	注入头安装	(76)
3.2.6	井口试压	(76)
3.2.7	防喷系统的拆卸	(77)
3.3	井筒压力平衡	(77)
3.4	实施过程与控制	(78)
3.4.1	井口防喷系统的选择	(78)
3.4.2	井口防喷装置安装的过程与控制	(79)
3.4.3	防喷系统测试的过程与控制	(80)
3.4.4	防喷系统安装的过程与控制	(80)
3.4.5	接头拉力和压力测试的过程与控制	(80)
3.4.6	井口试压的过程与控制	(80)
3.4.7	井筒压力平衡的过程与控制	(81)
3.4.8	管线连接的过程与控制	(81)
3.4.9	注氮试压的过程与控制	(81)
3.4.10	泄压放喷的过程与控制	(84)
3.4.11	拆卸管线的过程与控制	(84)
4	超深井连续油管测试关键装备	(85)
4.1	内变径连续油管及测试电缆	(85)
4.1.1	超深井测试作业连续油管及测试电缆基本要求	(85)
4.1.2	内变径连续油管优化方案	(85)
4.1.3	电缆选型	(88)
4.1.4	电缆可靠性评价	(89)
4.2	测试滚筒	(90)
4.3	注入头塔式支撑架	(90)
4.3.1	概述	(90)
4.3.2	注入头支撑架调研	(91)
4.3.3	支撑架结构选择	(94)
4.3.4	塔式支撑架设计	(95)
4.3.5	塔式支撑架的校核计算	(99)
4.3.6	分析结果及评价	(103)
4.4	其他关键设备	(106)
4.4.1	连续油管的注入头	(106)
4.4.2	液压管线	(107)
4.4.3	连续油管检测装置	(107)

4.5	测试工具	(108)
4.5.1	测试环境对测试工具的基本要求	(108)
4.5.2	常规测试工具存在的问题	(108)
4.5.3	项目主要研究内容	(108)
5	超深井连续油管测试方案	(114)
5.1	连续油管总体测试方案设计	(114)
5.1.1	国内外气井监测工艺现状和发展方向	(114)
5.1.2	国内外永置式压力监测系统调研成果	(114)
5.1.3	气藏压力动态监测项目设计优化体系	(120)
5.2	超深井连续油管测试方案	(122)
5.2.1	测试仪器组合	(122)
5.2.2	测试仪器的地面连接、调试	(122)
5.2.3	数据采集	(122)
5.2.4	静压测试	(123)
5.2.5	流压测试	(123)
5.2.6	压力恢复测试	(123)
5.2.7	地面拆卸	(124)
6	超深井连续油管测试工艺	(125)
6.1	测试工艺优选	(125)
6.1.1	高产能气井测试动态的“异常”性	(125)
6.1.2	异常原因分析与对策	(129)
6.2	试气方式优选	(131)
6.2.1	产能测试方式	(131)
6.2.2	供给半径对产能分析的影响	(135)
6.2.3	推荐测试方式	(143)
6.3	工作制度设计	(143)
6.3.1	井身结构及气井基础参数	(143)
6.3.2	合理测试产量分析	(144)
6.3.3	测试工作制度设计	(148)
7	作业过程风险识别及原因分析	(151)
7.1	连续油管超深井测试作业风险识别	(151)
7.2	连续油管超深井测试作业的重要风险因素识别	(155)
7.3	连续油管超深井测试作业的重要风险因素原因分析	(156)
7.3.1	连续油管破裂原因分析	(156)
7.3.2	连续油管挤毁原因分析	(162)
7.3.3	连续油管弯折和断脱原因分析	(164)

7.4	风险预判、应急处置和预防措施	(166)
7.4.1	风险预判	(166)
7.4.2	应急处置	(167)
7.4.3	预防措施	(167)
8	规范	(168)
8.1	防喷系统安装及操作规范	(168)
8.1.1	范围	(168)
8.1.2	相关岗位及职责	(168)
8.1.3	引用的相关标准及技术文件	(168)
8.1.4	防喷系统的安装及拆卸	(168)
8.1.5	注意事项	(172)
8.2	井口支架安装及操作规范	(174)
8.2.1	范围	(174)
8.2.2	相关岗位及职责	(174)
8.2.3	引用的相关标准及技术文件	(174)
8.2.4	井口支架的安装及拆卸	(174)
8.2.5	注意事项	(175)
8.3	入井仪器的检测、安装调试操作规范	(175)
8.3.1	范围	(175)
8.3.2	工具串展开的方法	(176)
8.3.3	防喷管展开法基本操作程序	(176)
8.3.4	工具展开法基本操作程序	(176)
8.3.5	安全展开系统基本操作程序	(177)
8.3.6	带压井展开作业的安全注意事项	(179)
8.4	连续油管车操作规范	(179)
8.4.1	范围	(179)
8.4.2	相关岗位及职责	(179)
8.4.3	设备技术参数	(179)
8.4.4	出车前的检查及准备工作	(181)
8.4.5	操作	(182)
8.4.6	冬季行车注意事项	(186)
8.4.7	特殊情况的处理	(186)
8.4.8	维护和保养	(187)
8.4.9	应急施工预案	(189)
8.5	连续油管高温作业操作规范	(195)
8.5.1	范围	(195)

8.5.2	井内高温的原因及带来的主要问题	(195)
8.5.3	高温作业主要需要考虑的问题	(196)
8.5.4	注意事项	(196)
8.6	连续油管高压作业操作规范	(196)
8.6.1	范围	(196)
8.6.2	连续油管高压作业施工规范	(196)
8.6.3	连续油管高压作业的安全问题和风险消减	(200)
8.7	注氮平衡操作规范	(202)
8.7.1	相关参数资料要求	(202)
8.7.2	管线连接	(202)
8.7.3	注氮试压	(203)
8.7.4	跟踪调整注气压力	(203)
8.7.5	泄压放喷	(205)
8.7.6	拆卸管线	(205)
8.7.7	注氮平衡流程图	(206)
8.8	连续油管上提下放操作规范	(206)
8.8.1	连续油管下放	(207)
8.8.2	连续油管上提	(208)
参考文献		(211)
附录一 苏格拉底程序需要的环境数据		(212)
附录二 连续油管穿电缆工艺		(213)

1 超深井测试技术现状及问题

现阶段超深井一般是指井深超过 6000m 的井。随着石油工业勘探开发工作的深入，井下情况越来越复杂，浅井、中深井所用的常规测试管柱组合和管柱强度已不能满足超深井高温高压条件下的测试要求，严重影响了深部油气藏的及时发现和准确评价。国内超深井主要集中在塔里木油田，具有地层压力大、温度高的特点，此外还通常伴随有高浓度的硫化氢、二氧化碳等腐蚀性气体，给测试作业带来了许多技术难题。

1.1 超深井测试技术现状

由于超深井从钻井设计、钻井、测井、测试、试采都与普通井有很大区别，为此国际高温高压井协会以定期或不定期的方式召开研讨会，交流研讨高温高压超深井的钻井、测井、测试及试采技术。在超深井管柱力学分析方面，国外也开展了许多卓有成效的工作，已经历了从二维到三维、从静态到动态、从局部到整体、从解析解到数值解等一系列的发展过程。自 1962 年 Lubinski 等人发表了著名的“封隔器管柱螺旋弯曲”理论以来，引起不少研究学者的兴趣和管柱设计人员的关注，特别是经过 Hammerlindl 等人的努力，提出了引起封隔器管柱受力和长度变化的 4 种基本效应，即活塞效应、螺旋弯曲效应、鼓胀效应和温度效应并给出了相应的计算公式，但其公式过于简化，仅对浅井有一定的精度，不能满足超深井复杂条件下的需要。

1.2 连续油管在超深井测试中的应用现状

1.2.1 连续油管测试技术简介

连续油管测试技术是将测试电缆穿入连续油管中，采用连续油管地面测试设备，依靠连续油管自身的刚度和韧性将井下测试仪器送入目的井段进行测试的作业方式。连续油管在测试领域应用的优点主要体现在以下几方面：

- (1) 连续油管具有足够的强度，可以在斜井、水平井和带压井中长距离传输测试工具。
- (2) 在很好地控制速度和深度的情况下，可以进行各个方向的连续测试作业。
- (3) 可以保护好连续油管管柱中的测试电缆。
- (4) 可以在带压或有液体流动的情况下作业，并维持压力恒定，降低井喷风险。
- (5) 可以刚性地推动长的工作管柱，使其通过可能会阻碍钢丝绳测试工具通过的狗腿或障碍点。
- (6) 可以在作业过程中的任何时候进行液体循环（当测试作业允许的时候）。
- (7) 可以对带压井进行稳定的压力控制。
- (8) 在高产井生产测试过程中，有能力抵抗流体的冲击，可将测试工具控制在特定

位置。

(9) 作业时可以对井底情况进行实时的测量。

(10) 具有较快的运行速度。

1.2.2 连续油管测试技术发展现状及趋势

1968年,第一台连续油管测试装备就已经投入使用,由于前期连续油管本身的缺陷,导致这项技术发展缓慢。近年来随着连续油管制造技术的不断发展,连续油管的强度、塑性、抗腐蚀性得到了进一步提高,连续油管测试技术在国内外油田的应用范围不断扩大。

1.2.2.1 国内发展现状

在国内,连续油管测试工艺多用于大斜度井和水平井生产测试,据检索,目前国内连续油管测试成功用于现场的测试深度为4300m,水平段小于等于500m,防喷器总成额定工作压力为35MPa。

1.2.2.2 国外发展现状

国际上连续油管测试的主要服务类型包括以下几方面:

(1) 生产井测试:多用于大斜度井和水平井,测井作业的水平段长度逐年增加,工作量逐年增大。

(2) 沉降测井:利用连续油管沉降测井可以有效减少测试偏差。

(3) 套管井测试:进行该项作业以证实或识别油层特性或完井情况。

(4) 裸眼测试:在下套管或衬管之前进行该项作业以评价地层情况,目前的作业成功率很低。

(5) 注水泥评价、中子测井和相量测井。

(6) 特殊情况的应用:这些服务包括井下成像技术、电磁打捞和应用井下地震技术测定井下震源扫描频率^[1]。

1.2.2.3 连续油管测试技术发展趋势

连续油管测试技术特色使它成为水平井测试作业的首选方法。目前解决水平井测试的方法主要有三种:第一种方法是利用钻修机通过钻杆或油管将测试仪器传输到测试目的深度,并利用钻井液循环动力将水平井电缆对接工具与测试仪器组合,该方法成本高、下入缓慢、工作量大、劳动强度高、时间长、效率低。第二种方法是利用爬行器将测试仪器输送到测试目的井段进行测试,该方法成功率低、成本高,风险大。第三种方法是连续油管测试,它是解决水平井测试作业最经济、安全、有效的方法,是最具有发展前途的生产测试技术。目前中国石油每年的水平井完井数量都在600口以上,因此,连续油管在水平井测试方面的发展具有广泛前景。

1.2.2.4 连续油管在超深井测试中的应用

目前国内尚无连续油管在超深井测试中成功应用的先例。据了解美国国民油井、哈里伯顿、贝克休斯、斯伦贝谢、BJ等多家国外公司目前也没有进行过超深井连续油管测试作业。

超深井测试作业难度高、风险大,但由于利用连续油管带压测试工艺对超深气井进行测试具有以下突出的优势:

(1) 有助于获得准确的产层参数,进行准确的气井产能预测。

(2) 能够在水平井中实现动态检测。

(3) 可以利用连续油管作为电缆及测试工具的传输设备的连续油管测试工艺,实现在

高压、高温井底油层段的测试作业。

因此连续油管测试工艺在超深井测试领域将会有很好的发展前景，为油气田的经济合理开发及利用起到重要的保障作用，也为连续油管在水平井测试方面的发展提供良好的技术支持。

1.3 需要解决的问题

1.3.1 管材质的选择及力学分析、防腐

在深度 6000m 以上垂深的超深井作业时，连续油管的材质性能接近安全极限，连续油管测试工艺的关键技术问题大量存在，而且贯穿整个工艺过程的各个环节，极限工况使连续油管的受力、变形、寿命、腐蚀达到或接近其承载上限，如图 1-1 所示：连续油管极限受力点均在井口上下部位，一旦出现问题，会造成井喷失控的灾难性后果，极限受力点的安全系数（余量）必须准确确定。

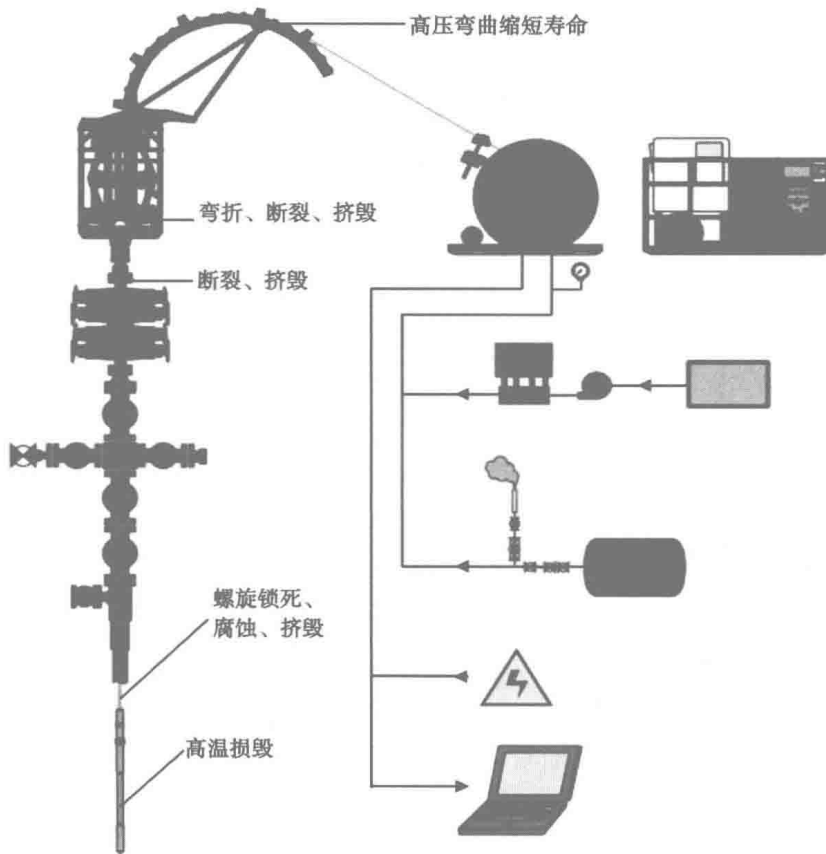


图 1-1 连续油管作业风险点

简单的计算分析，无法满足计算精度要求，出于安全考虑必须将所有的关键技术问题明确，再开展详细的安全可行性分析论证：

(1) 连续油管刚入井时井内高压气体对连续油管形成很大的上顶力，此外密封系统及管壁还会对连续油管产生较大摩擦力，连续油管入井时的受力状态需要详细分析论证。

(2) 入井后连续油管将承受很大的外压，连续油管井口段承受的压差过大可能导致挤毁发生，而未入井连续油管在内压过高时可能导致爆裂或弯曲爆裂发生，所以需要连续油管设计合理的平衡内压以满足安全作业要求。

(3) 连续油管入井后会形成正弦、螺旋弯曲，导致摩擦力增大、螺旋锁死现象发生，使连续油管无法下入井测试深度。

(4) 能够生产在超深井高温、高压条件下仍能正常工作的入井测试仪器和连接工具的生产厂家非常少，在极端工况下长时间测试，仪器的安全及数据准确度均需要咨询厂家和论证。

(5) 连续油管在开井测试时将受气井流体的冲蚀和化学腐蚀等因素影响，连续油管材料极限强度会降低，连续油管腐蚀速度和使用时间等的相关机理和对应关系都需要详细分析研究^[2]。

(6) 连续油管提下一趟要产生 6 次弯曲，连续油管在极高内压下提下会发生加速疲劳损坏，产生裂纹和破裂。

1.3.2 井控装置及技术的完善

井口防喷装置是连续油管带压测试作业的主要组成部分之一，用于在起下油管时隔离井筒压力。超深井测试环境复杂，整个测试过程中的安全风险都很高，井口防喷装置一旦失效将会导致灾难性的后果。井口防喷装置压力等级、综合作业能力及配套方案的确定是保障测试工艺顺利实施的重要手段，是超深井连续油管测试项目成功与否的关键。

1.3.3 工具装备的配套

常规测试工具耐压 100MPa，耐温 150℃，如在超深井进行测试主要存在以下问题：

(1) 因工具承压能力不足，在高压下被挤毁，导致井内高压气体窜入连续油管内，发生井喷的风险。

(2) 测试工具工作可靠性变差、传输信号的漂移，造成测试数据失真。

(3) 测试工具的有效作业时间短，无法满足测试作业要求。

1.3.4 各类技术规范规范、完善

由于连续油管超深井测试仍处于探索阶段，作业流程复杂，施工过程中存在的风险较大，为确保测试作业安全顺利进行，必须对从搬迁作业、井场设备摆放、防喷系统安装、注入头支撑架安装、入井仪器的检测安装、连续油管设备的安装及操作、放喷系统的安装及操作、压井系统的安装及操作、连续油管内注氮（注水）平衡系统的安装及操作、连续油管提下及测试操作、特殊复杂工况应急处置等整个作业流程中的各个环节进行规范、完善。

2 超深井连续油管选择

连续油管的合理选择是超深井测试的关键环节，超深井作业时连续油管受力情况复杂，同时井内通常富含硫化氢、二氧化碳等腐蚀性气体，为此超深井连续油管的选择应从连续油管模拟入井受力情况分析、连续油管材质的选择及连续油管防腐等几方面开展研究，研究的边界条件如下：

- 井口压力：80~100MPa；
- 井底压力：90~140MPa；
- 井口温度：70~80℃；
- 井底温度：120~180℃；
- CO₂ 浓度：0.77%。

2.1 连续油管受力分析

由于国内超深井主要集中在塔里木油田，因此本书根据塔里木某超深井实际井筒数据资料，合理选定工况，进行连续油管模拟入井受力情况分析、连续油管的材质选择、连续油管防腐研究及选择方案确定。

实际井筒的井身结构如图 2-1 所示。

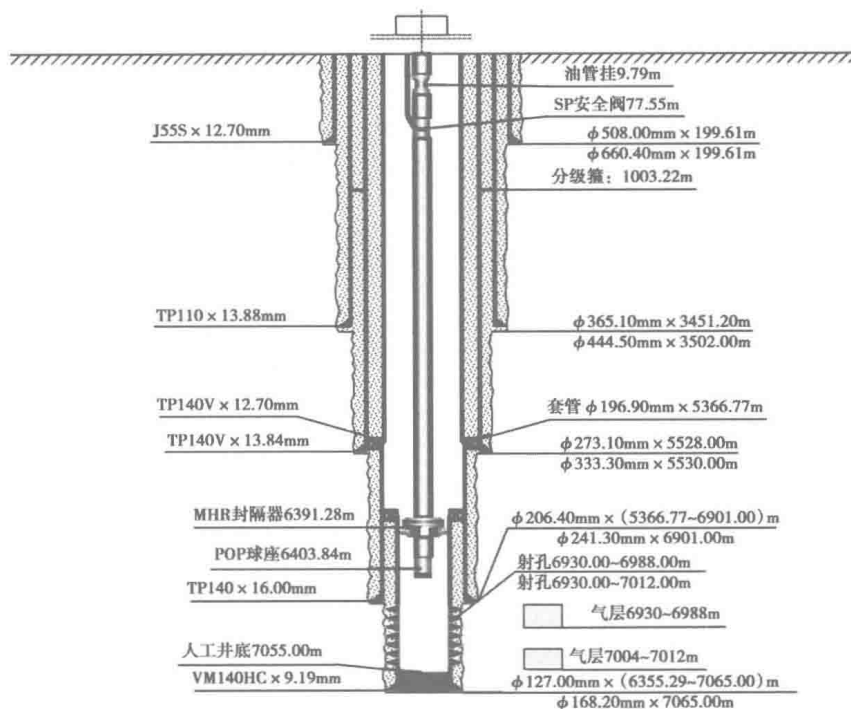


图 2-1 井身结构图

井斜、生产管柱结构数据见表 2-1。

表 2-1 生产管柱结构表

序号	名称	外径 (mm)	内径 (mm)	长度 (m)	深度 (m)
1	油管挂	273.00	76.00	9.79	9.79
2	变扣接头	128.00	69.86	0.50	10.29
3	超级 13Cr110 油管	88.90	74.22	66.26	76.55
4	上短节	103.33	67.05	0.50	77.05
5	安全阀	148.84	65.08	0.50	77.55
6	下短节	103.33	67.05	0.50	78.05
7	超级 13Cr110 油管	88.90	74.22	6260.95	6339.00
8	3 $\frac{1}{8}$ in 转 2 $\frac{7}{8}$ in 变扣接头	103.00	61.00	0.50	6339.50
9	超级 13Cr110 油管	73.02	62.00	51.78	6391.28
10	密封接头	84.00	60.70	0.50	6391.78
11	MHR 封隔器	100.58	48.51	1.79	6393.57
12	延伸管	99.88	61.44	2.00	6395.57
13	超级 13Cr110 油管	73.02	62.00	7.77	6403.34
14	POP 球座	95.00	61.55	0.50	6403.84

(1) 静止状态下连续油管承载分析。

静止状态为连续油管压入到测试位置后、未进行上提作业时的状态。此时连续油管的最大承载单元为井口段，由于受到超深井井筒温度、连续油管的内外压差和轴向拉力的综合作用，因此有必要对该段连续油管进行参数敏感性分析，即改变不同参数后分析其工作应力，从而获得不同参数对连续油管工作安全性的影响规律。对该状态下受载最大处的连续油管单元的分析是后续进行压入安全性与上提安全性分析的基础，这三种状态下连续油管安全性的综合分析构成了整个连续油管工程适用性评价体系：

①考察该状态下直井和曲井中连续油管的工作应力，并给出特定工作位置处连续油管工作安全裕度。

②考察受载最大处的连续油管单元，分析温度场对连续油管轴向伸缩及工作应力的影响。

③考察受载最大处的连续油管单元，分析内外压差对连续油管轴向伸缩及工作应力的影响。

④对极限载荷下受载最大处的连续油管单元进行抗外压能力、抗内压能力分析。

(2) 上提状态下连续油管承载分析。

为分析上提状态下连续油管的承载能力，首先要确定该状态下的受载最大位置，并确定它的具体载荷条件，然后重点针对该段进行相应的安全性分析。利用直井、曲井中连续油管的动态力学分析求解出整个连续油管的应力分布，以及获得了轴向力、弯矩、剪切力及接触压力等参数的分布情况，从而确定受力最大点；利用对受载最大处连续油管单元的参数敏感性分析，评估各参数对其安全性的影响：

①考察该状态下直井和曲井中连续油管的轴力、弯矩、剪切力及连续油管与井筒接触压力。

②考察该状态下直井和曲井中连续油管的工作应力，并给出相应工况的连续油管工作安全裕度。

③分析该状态下直井和曲井中连续油管的弯曲状态，判断出是否出现正弦屈曲或者螺旋屈曲，并计算出连续油管沿其轴线方向的伸缩量。

④考察受载最大处的连续油管单元，分析温度场对连续油管轴向伸缩及工作应力的影响。

⑤考察受载最大处的连续油管单元，分析外压差对连续油管轴向伸缩及工作应力的影响。

⑥对极限载荷下受载最大处的连续油管单元进行抗外压能力、抗内压能力分析。

(3) 压入状态下连续油管承载分析。

压入状态下连续油管的承载分析包括压入可行性分析和连续油管安全性评价。压入可行性分析是研究连续油管在超深直井、曲井中在受超高温、超高压等因素的影响是否能压入到相应深度的研究。因此，压入状态下连续油管的承载分析是超深井测试用连续油管工程适用性评价的关键步骤，是提出连续油管压入工艺与措施的有效方法。

①考察该状态下直井和曲井中连续油管的轴力、弯矩、剪力及连续油管与井筒接触压力。

②考察该状态下直井和曲井中连续油管的工作应力，并给出相应工况的连续油管工作安全裕度。

③分析该状态下直井和曲井中连续油管的弯曲状态，判断出是否出现正弦屈曲或者螺旋屈曲。

④临界下压力和临界下压速度分析。

⑤考察受载最大处的连续油管单元，分析温度场对连续油管轴向伸缩及工作应力的影响。

⑥考察受载最大处的连续油管单元，分析外压差对连续油管轴向伸缩及工作应力的影响。

⑦对极限载荷下受载最大处的连续油管单元进行抗外压能力、抗内压能力分析。

⑧初始压入时，屈曲状态的判断及极限屈曲长度确定。

(4) 基于地面的最大注氮能力和注氮压力计算，推荐出注氮压力数值。

注氮压力与连续油管的压入性密切相关，且能够平衡管外超高压的挤毁作用，因此应该综合考虑两者，在不超过地面最大注氮能力的前提下提出最优的注氮压力数值。

(5) 连续油管疲劳寿命评价。

根据前述分析计算结果和该型连续管的 $N-S$ 寿命曲线以及甲方提供的剩余疲劳度样例，确定本案例使用后的剩余疲劳度。

$N-S$ 寿命曲线及其与剩余疲劳度的对应关系（计算疲劳度时假设后继案例与本次案例一致）。

2.1.1 连续油管动力学分析模型

在连续油管下入过程中受到管柱本身重力及管柱与井壁摩擦力的综合作用，管柱在受压时由初始的近似直线状态变为曲线状态，这就是管柱的屈曲。

连续油管下井过程中可能产生纵向弯曲变形和损坏：连续油管入井时为克服阻力要在地面对油管施加一定的轴向压力，当连续油管的首尾两端承受压力负荷时，其状况是一根无横向支撑的细长杆；压力超过临界负荷时，将造成油管的纵向屈曲，连续油管首先变成在单一

平面内波距不等的正弦波形，随着轴向压力的增加，正弦波形失稳，最后变成螺旋形。连续油管弯曲成螺旋形，引起附加的径向接触力，使管子与井壁的摩擦力增加，轴向力越大其摩擦力越大，在该点就形成了恶性循环，增加的任何附加力都将由于该点的摩擦而损失殆尽，连续油管在井内锁定，也就是所谓的螺旋锁定现象。

下面介绍基于能量法建立连续油管—油管系统动力学模型。

连续油管—油管系统动力学模型是进行连续油管动力学特性分析的基础。利用能量法可建立连续油管—油管系统的纵横扭耦合动力学模型。

根据能量法哈密顿原理 (Hamilton principle) 建立整个连续油管—油管系统的动力学方程，并将连续油管单元与井筒的摩擦、屈曲对摩擦阻的增益等分别处理成不确定边界、准随机边界、动态边界，考虑内外压对连续油管力学参数的影响，从而很好地把各个主要因素合理地融为一体，利用非线性有限元软件的显式模块进行方程求解与结果输出，可研究连续油管—油管系统动力学特性，并直观展示出相关问题背后的规律。

采用弹簧—质量—阻尼系统 (S—M—C 模式) 对连续油管系统模型进行研究，即通过利用有限元的思想，将不同井段连续油管简化为多自由度系统来分析。采用该模式能够较方便地考虑井筒边界、上下端边界条件。

综合考虑连续油管—油管系统力学模型的理论基础，通过认真分析井身结构、边界条件及载荷情况，基于研究建模的特点，采用以下假设条件：整个连续油管系统为均质空间弹性梁；连续油管的几何尺寸、材料性质分段为常数；悬挂系统假设为一个刚度为 Kh 的弹簧。

(1) 连续油管—油管系统动力学模型建立。

哈密顿原理：哈密顿原理规定在质点 (质点系、连续系统) 的运动中，它的动能、势能和作用在它上面的非有势力对它所做的功应满足式 (2-1)：

$$\delta \int_{\Delta t} (T - V) + \int_{\Delta t} \delta W = 0 \quad (2-1)$$

式中 W ——非有势力所做的功；

δ ——变分算子；

T, V ——分别表示系统的总动能和总势能， $(T-V)$ 为拉格朗日函数 (L)。

对于一个连续系统， T, V 和 W 可由定义在直角坐标系中的描述连续油管运动的位移变量 $u(z, x, y, t)$ 和转角变量 $\theta(z, x, y, t)$ 来表示。运用有限元方法，连续油管的几何模型可以看作较多短柱单元的集合体，模型中连续变量由所有单个柱单元的以内插值替换的节点变量 U_i 代替。将其代入式 (2-1)，展开得出由各部分组成的综合结果：

$$\int_{\Delta t} \left[-\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial U_i} \right) + \frac{\partial L}{\partial U_i} + F_i \right] \delta U_i = 0 \quad (2-2)$$

这里 F_i 是广义非有势力 (Generalized forces)。因为变量 δU_i 是任意的，式 (2-2) 也可以写成：

$$-\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial U_i} \right) + \frac{\partial L}{\partial U_i} + F_i = 0 \quad (2-3)$$

式 (2-3) 被称为拉格朗日方程，进一步展开则成为：

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial U_i} \right) - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial V}{\partial U_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial U_i} + \frac{\partial V}{\partial U_i} = F_i \quad (2-4)$$