



中国石油天然气集团公司

井下作业工程技术 交流论文集

(2009)



中国石油天然气集团公司工程技术分公司 编

内 容 提 要

本书共收集了 57 篇井下作业工程技术交流会议论文。内容涵盖试油测试工艺、完井液、储层评价、排液等试油测试技术,压裂酸化工艺、压裂液体系等压裂酸化技术,侧钻、取套换套、套损诊断、打通道、套管补贴、带压作业等修井技术,基本代表了“十一五”以来中国石油天然气集团公司井下作业最新研究成果及新技术、新工艺,具有较高的实用价值。

本书可供井下作业工程技术人员、管理人员参考使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国石油天然气集团公司井下作业工程技术交流会议论文集 (2009) / 中国石油天然气集团公司工程技术分公司编.

北京:石油工业出版社,2009.6

ISBN 978-7-5021-7208-4

I. 中...

II. 中...

III. 井下作业 (油气田) - 文集

IV. TE358-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 092145 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

编辑部: (010) 64523579 发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 中国石油报社印刷厂

2009 年 6 月第 1 版 2009 年 6 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 32.25

字数: 820 千字

定价: 98.00 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

本书编委会

主 编：杨庆理

副主编：秦文贵 万尚贤

编 委：李静群 徐成才 孙玉玺 胡守林

冉金成 周 丰 孙 虎 张 平

张 冕 何昀宾 陈显进 荣光迪

王志明 张士江 纪 鹏 曾久长

姚小祥 李克庆 王多伟 秦世勇

刘中军 徐志俊

前 言

井下作业工程技术是石油天然气勘探开发工程技术服务的重要组成部分，在油气发现、提高油气采收率、保证油气产量等方面发挥了极其重要的作用。随着高温高压等高难度油气藏和低压低渗等低品位油气藏的勘探开发的逐年增多，其重要性愈加突出。

井下作业工程技术内容较多，涉及试油、测试、压裂、酸化、修井作业、特种作业等方面。近年来，井下作业工程技术服务紧密围绕油气勘探开发的需求，积极开展技术攻关和新技术推广，在超深井、高温高压井的试油测试及完井、水平井等特殊工艺井的分段压裂改造、修井等方面形成了一些特色技术，同时，在低渗透油气改造技术等方面也得到快速发展。2009年6月，中国石油天然气集团公司工程技术分公司在西安召开“井下作业工程技术交流会”，本书收录了这次会议的《海外高温高压井试油测试工艺技术》、《长庆气田不动管柱分层压裂改造工艺技术》、《塔里木油田 HTHP 气井完井（修井）及改造技术》等论文共计 57 篇。这些论文基本代表了近年来井下作业的新研究成果及新工艺、新技术，具有一定的学术水平和实用价值。

本书的编写工作得到了中国石油天然气集团公司川庆钻探公司及其他相关单位的大力支持，石油工业出版社为本书的及时出版付出了许多辛勤的劳动，在此一并表示衷心的感谢！

由于编者水平有限、出版时间紧，书中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

编者

2009 年 6 月

目 录

第一部分 试油测试技术

海外高温高压井试油测试工艺技术	徐成才 刘从军 彭贤强等 (3)
滩海丛式井试油测试工艺技术	张世林 (12)
高含硫化氢气井测试技术	李守民 刘万里 蒲海斌等 (20)
油管泵稠油试油工艺	彭梓东 徐克彬 张连朋等 (27)
大庆油田深层耐高温压井液技术	张广华 (31)
吐哈油田牛东火山岩储层测试评价技术	赵 华 黄中会 王多伟等 (39)
高温高压含硫化氢及出砂油气井试油测试技术	王祖文 刘中军 李玉军等 (48)
超高压高温含硫气井试油测试技术在龙 17 井中的应用	张明友 项培军 庞东晓 (55)
高凝油层试油配套技术在大民屯凹陷油气勘探中的应用	赵 鑫 檀德库 (63)
多项流量计测试技术	刘万里 高会杰 刘海志 (71)
钢丝试井技术	王 超 (77)
凝析气井单相高压物性取样技术	王德友 彭贤强 殷世江等 (85)

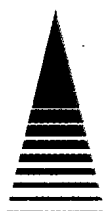
第二部分 压裂酸化技术

长庆气田不动管柱分层压裂改造工艺技术研究	张 强 黄智勇 苏敏文等 (93)
连续混配压裂工艺技术研究	李静群 孙 虎 苏金柱等 (107)
大庆油田同井同层裂缝转向重复压裂技术	王庆文 (121)
大庆油田薄互储层细分控制压裂技术	汪玉梅 (127)
吉林油田低渗透水平井机械分段压裂技术研究项目进展及 下步攻关方向	张应安 许建国 叶勤友 (137)
大庆油田水平井压裂、修井配套工艺技术	杨 光 艾教银 (149)
西柳 10 断块水平井压裂技术研究与应用	王杏尊 胡书宝 李向齐 (158)
吐哈油田水平井压裂工艺技术现状与评价	吕芬敏 何先俊 石 磊等 (171)
压裂防砂技术研究与应用	赵永凯 (176)
水平井酸化工艺技术	王疆宁 孟丽华 塔耀晶等 (182)
侧钻小井眼井及套变井压裂工艺技术研究与应用	安耀清 金建国 董玉玲等 (188)
玉门青西油田深井复杂岩性储层酸化技术研究与应用 ...	方万军 肖志明 杨谨敏等 (197)
欧利坨油田大型压裂技术与现场应用	张子明 何妮娟 王江宽 (211)
深层变质岩储层压裂改造技术研究	张子明 杨生文 朱龙超等 (215)

中生界致密砂岩储层压裂技术	张子明 吴志俊 徐 乐	(220)
非均质油藏暂堵酸化工艺技术研究及应用	李长忠 张宁利 田育红等	(224)
安塞油田特低渗油藏重复压裂技术现状与研究方向	申 坤 张 昊 郭 亮等	(236)
压裂油气藏产能及施工参数岭回归预测分析方法	朱炬辉 陈明忠	(242)
酸压裂停泵压力分析模型和解释方法研究	任 勇 叶登胜	(247)
苏里格复杂气藏改造技术	潘新伟 郑维师 李养池等	(253)
低分子环保型压裂液体系的研究开发与推广应用	汪义发 杜 彪 赵国兴等	(259)

第三部分 修井工艺技术

塔里木油田 HTHP 气井完井(修井)及改造技术	周理志 彭建云 白晓飞等	(281)
小井眼侧钻技术在大港油田的发展与应用	张高峰 张康卫 赵海军等	(299)
侧钻井配套技术在冀东油田的应用	王廷瑞 丁文正 曹 生	(309)
深井小井眼硬质地层侧钻技术	赵忠祥 秦文革 李玉军等	(317)
大庆油田取换套、侧钻修井工艺技术	艾教银	(321)
一类侧钻井眼轨道设计问题的解析解	杨 龙 鲁 港	(339)
新工具在大修侧钻工艺技术中的应用	李宪国 谭昭信 徐志俊等	(344)
辽河油田水平井修井技术浅析	董 军 王志明 张 军	(357)
冀东油田水平井大修技术	张玉楼 张士江 赵恩军等	(370)
辽河油田水平井磨铣打捞技术研究与应用	白冬青 李文东 袁 楠	(383)
水平井连续冲砂除砂技术研究	宋彦武 刘秀平 蒋晓波等	(391)
MID-K 测井及十六臂测井在青海油田套损诊断中的应用 ...	莫尚贤 李立人 李永贵等	(398)
套变井通道修复技术在吐哈油田的应用	朱辉明 卢红杰 马云瑞	(408)
实体膨胀管技术的研究与应用	李益良 李 涛	(414)
打通道技术及膨胀管补贴技术的现场应用	薛培强 李永贵 王俊明等	(422)
新疆油田膨胀管补贴技术研究及应用	张丽萍 秦文革 荆江录等	(430)
不压井带压作业技术	严玉中 阚 凯 姜初隽	(435)
陇东油田注水井带压作业技术研究与应用	马国良 樊红旗 王小娟等	(439)
吉林油田带压作业技术发展及应用效果	杨贵兴 荣光迪 赵文彬等	(449)
油田套损井化学堵漏工艺技术研究及现场应用	李长忠 田育红 岑学文	(457)
长庆油田小井眼井修井技术研究与应用	李旭梅 马占国 白小佩等	(473)
四川“三高”安全隐患井治理封闭技术	冉金成 张 平 黄 洪等	(482)
辽河油田防砂工艺技术	王宝权	(487)
气体采油技术应用研究	田 华 于兰春	(500)



第一部分



试油测试技术

海外高温高压井试油测试工艺技术

徐成才 刘从军 彭贤强 张兴辉

(中国石油长城钻探工程有限公司)

摘 要 中国石油长城钻探工程有限公司海外作业面临不同复杂地质情况和作业环境的挑战,高温高压井试油测试就是其中之一。本文从生产套管保护、泥浆性能优化、井下管柱设计、地面流程系统配套及关键作业点控制五个方面阐释了高温高压井试油测试设计及施工过程中工艺的技术,并强调了高温高压井测试活动中关键活动关键任务、HAZOP 分析、SOP 标准作业程序等系统管理程序的重要性。经过在海外服务过程中的发展及应用,该技术对保障现场安全顺利作业、帮助甲方实现高难井投资价值及开拓巩固海外市场具有重要意义。

关键词 高温高压井 试油测试 HAZOP 分析

一、前言

目前石油勘探开发越来越面向更远、更深或者更浅的、地质条件更加复杂的地层,这不仅是对油气田勘探开发技术提出的挑战,试油测试技术也不例外。长城钻探公司测试公司 2001 年从国内市场转入国际市场后,面临着海外各地区不同项目中复杂的地质情况,由此发展了一系列针对不同对象在不同作业环境下进行的测试技术,高温高压井试油测试技术就是其中之一。高温高压井的测试施工既要达到取全取准地层资料的要求,同时又要做好套管保护、工具保护、正常开关井、地面安全流动控制的工作,难度和复杂性都比正常测试作业高出很多。

对于高温高压井,不同的公司、组织或者国家给出了不同的定义标准,其中 Halliburton 把井底压力大于 10000psi、井底温度大于 150℃的井定义为高温高压井;把井底压力大于 15000psi,井底温度大于 175℃的井定义为超高温高压井;把井底压力大于 20000psi,井底温度大于 200℃的井定义为特高温高压井。国际石油技术服务公司制造了 17500psi、205℃工具、耐温达 200℃以上的橡胶件材料、为深海服务的 15000psi 水下安全系统、适用于高温高压环境的射孔器材;25000psi、210℃高温高压电子压力计;大处理量常规三相分离器、整合除砂器及多相流量计和多相流取样装置的三相分离器、多相流量计、提高原油处理效率的洁净燃烧系统;SRS 单相取样器(15000psi、200℃)、现场在线分析系统 PVT Express、完整 PVT 分析实验室(25000psi、250℃)、井下流体分析 DFA 系统;专门的试油设计分析软件、井上实时检测及数据传输系统、高温高压模拟试验系统、高温高压井 HAZOP 分析等方面的成果。

虽然在海外作业服务过程中与国外技术服务公司存在设备、技术以及管理上的差距,但是测试公司在国际伊朗、国内塔里木克拉-201 井等高温高压井上积累了宝贵经验。在学习和借鉴国内测试成功经验的基础上,经过多年的努力,测试公司发展了一整套适合高温高压井海外测试服务的技术和经验,并在伊朗、巴基斯坦等国际项目上取得成功。这对于测试公司在海外市场获得甲方认可、打造品牌效应、扩大市场容量具有积极重要的意义。

二、海外高温高压井试油测试的难点及挑战

分析测试公司在海外的高温高压井试油测试工作，在作业设计及施工技术、作业运作环境两个主要方面有以下难点及挑战。

(1) 套管高承压。表现在高比重的压井液增加了套管的内挤压力，威胁套管的安全；超高压地层增加了套管的外挤压力，威胁套管的安全。

(2) 测试完井液的选择。表现在重泥浆易沉降，埋卡管柱；重泥浆传压性较差，影响工具操作；轻泥浆易气侵井涌，井控难度大。

(3) 井下工具及射孔器材的高温高压载荷。表现在井下工具的选择及操作；井下工具的密封件、液压油等材料的选择；井下管柱及射孔器材的选择。

(4) 地面设备高承压。表现在地面设备选择及操作控制；水化物导致地面设备或井下管柱堵塞；地面放喷及燃烧难度增大。

(5) 施工工艺难度大。表现在压井设备要求高；压井工艺风险大；高温高压的破坏能量对人身安全、环境、社区的影响大。

(6) 服务模式的局限。表现在被动接受给定的井筒条件，没有前期钻完井方案介入的优势。

(7) 项目运作的局限。表现在资源支持、物流运输的难度大，难以实现最佳的资源组合；同时面对强大竞争对手的压力。

三、高温高压井试油测试的技术解决方案

针对以上试油测试面对的主要矛盾，从油层套管保护、测试完井液优化、井下管柱及工具选择、地面流程及设备选择、关键施工工艺控制等五个方面提出技术解决方案。

1. 油层套管保护

套管完整是顺利完成试油各项作业、后期油气井完井及生产的必要条件，高温高压井套管损坏后难以修复，易造成井漏、井涌，甚至导致油气井报废，危害极大，必须注意保护。

1) 考虑因素

(1) 地质因素。包括异常压力地层/膏岩层的外载、泥岩层吸水膨胀、温度变化的附加载荷、地层出砂、 H_2S 腐蚀性介质等。

(2) 前期工程因素。包括套管性能（螺纹密封）、固井质量、钻井期间套管的磨损、射孔冲击及局部应力集中、套管鞋的位置等。

(3) 后期工程因素。包括操作测试工具在环空施加额外压力、压井液比重及性能发生改变、流动时间过长、非均匀载荷的影响等。

2) 套管安全评估

(1) 预测地层压力温度及地层产能作为安全性评价基础。

(2) 依据 API 标准，必要时采用第三强度或第四强度理论校核。

(3) 依据管内掏空情况及水泥面分级情况计算有效外挤力。

(4) 依据管柱失效与最危险工况计算有效内压力。

(5) 依据温度因素及固井状况计算有效轴向力。

(6) 考虑射孔段应力集中系数、套管磨损、套管缺陷后的套管当量强度的计算。

3) 工艺措施

- (1) 降低环空压力操作层次。
- (2) 优化泥浆比重。
- (3) 确定合理封隔器坐封位置。
- (4) 出砂压差及合理测试时间控制。

2. 测试完井液优化

测试完井液是控制地层压力、保护油气层、实施井下管柱作业最重要的条件。

1) 考虑因素

- (1) 比重。要求能够平衡地层压力、对抗套管外挤压力、满足封隔器承压要求、满足替液压井作业的安全要求、提供足够压力操作窗口。
- (2) 悬浮性。要求耐温变性能、稳定性好, 不产生沉淀。
- (3) 压力传导性。要求操作压力传导及时, 以便操作井下工具和 TCP 点火头。
- (4) 经济性。要求安全而又经济适用。

2) 完井液选择

国际上 HPHT 井压井液的发展序列包括重泥浆、轻泥浆、金属盐、海水, 建议陆地上的 HPHT 井选用盐水。

3. 井下管柱及工具选择

一般来说高温高压管柱结构越简单越好, 但结合地质与工程目的可以稍微复杂, 在此设计并配套应用了针对高温高压井的试油测试工艺管柱四套。

1) 超高温高压井测试管柱

(1) 管柱结构 (从下到上): 导向引鞋+射孔枪+点火头+永久式封隔器+RD 安全循环阀+RD 循环阀+伸缩接头。

(2) 工艺原理: 封隔器插入坐封, 射孔实现开井, 然后打开安全循环阀实现井下一次性关井及阀上部压井循环, 循环阀作为备用。

(3) 工艺特点: 结构简单, 尽可能的取得地层资料, 可以由测试转为生产, 适用于超高温高压井。

2) 高温高压井测试管柱

(1) 管柱结构 (从下到上): 导向引鞋+射孔枪+点火头+RTTS 封隔器+安全接头+震击器+液压旁通阀+LPR-N 阀+RD 安全循环阀+RD 循环阀+伸缩接头+井下安全阀。

(2) 工艺原理: 井筒负压射孔, 控制井下主阀实现多次开关井, 最后打开循环阀实现压井循环。

(3) 工艺特点: 标准管柱, N 阀、OMINI 阀、RD 安全循环阀井下三重切断, 保证井下安全。可以实施井下 PVT 取样, 可以取全取准地层资料, 适用于一般高温高压井。

3) 长尾管高温高压气井测试及挤压井管柱

(1) 管柱结构 (从下到上): 导向引鞋+射孔枪+点火头+双筛管+RTTS 封隔器+RD 循环阀+安全接头+震击器+液压旁通阀+LPR-N 阀+RD 安全循环阀+RD 循环阀+伸缩接头+井下安全阀。

(2) 工艺原理: 井筒负压射孔, 控制井下主阀实现多次开关井, 先打开循环阀实现压井循环, 再将循环阀下及封隔器下环空产出流体正挤入地层, 最后再起钻。紧急情况下可以打

开封隔器上循环阀实现压井。

(3) 工艺特点：针对长尾管段可能压不干净的情况，消除剩余有毒气体伤害，同时可以实现常规试油测试的目的，适用于高温高压高含硫化氢气井。

4) 高温高压井测试及酸化管柱

(1) 管柱结构（从下到上）：导向引鞋+射孔枪+点火头+RTTS 封隔器+安全接头+震击器+液压旁通阀+LPR-N 阀+排样阀+OMNI 多次循环阀+RD 安全循环阀+RD 循环阀+伸缩接头+井下安全阀。

(2) 工艺原理：打开井下主阀，井筒负压射孔实现开井测试，注酸作业后可以打开 OMNI 阀实现上部临时性循环替液，然后再次开井实现酸化后再测试，最后打开循环阀进行压井作业。

(3) 工艺特点：可以实现射孔+测试+酸化+（排液+）测试联作作业，提高测试效率，消除地层污染，适用于地层物性较差井筒污染较重的高温高压井。

5) 井下管柱安全评估

测试管柱的可控性、健全性是测试作业成功的基础。

(1) 考虑因素。

①轴向力分布影响效应。包括温度效应、膨胀效应、活塞效应、屈曲效应、流动效应、摩擦效应等。

②作业阶段。包括管柱下入、开井流动、关井恢复、测后压井等阶段的不同受力状况。

③重点是螺旋弯曲对管柱永久变形、封隔器坐封的影响。

(2) 测试管柱安全评估。

①井筒压力温度分布预测。

②轴向应力校核及管柱屈曲分析。

③考虑管柱屈曲、活塞效应及水力锚特点进行封隔器坐封分析。

④可进行多级油管优化设计，含硫化氢井要考虑井筒温度变化的影响。

(3) 工艺措施。

①起下钻平稳，防止产生大的纵向冲击动载。

②注意螺纹选择和上扣扭矩，防止螺纹粘扣或脱落，对于硫化氢井采用 VAM、PH-6、3SB 等气密封性扣，采用专用液压钳。

③尽量不用短油管以减少应力集中。

④橡胶件选择。HPHT 封隔器胶筒一般采用 Viton 和 Aflas 的组合，O 形圈材质一般采用 Fluorcarbon 以及 Aflas。

⑤对于射孔弹选择。从效果、耐温、时效来综合考虑，高温高压井中 HNS、HTX 火工品较优。

4. 地面流程及设备选择

地面流程是高温高压流体与地面环境、社区和人员直接接触的最重要一环，必须兼具井口控制、分离计量、安全监控等功能。

1) 常规高温高压井地面系统

(1) 井口控制流程。

①主流程，包括控制头主阀+流动翼阀+地面安全阀+油嘴管汇。

②放喷流程, 包括地面安全阀+油嘴管汇+燃烧器。

③安全释放流程, 包括 MSR+燃烧器、分离器安全释放阀+燃烧器。

(2) 分离计量流程。

①油气水分离, 包括井口+油嘴管汇+分离器+油气水出口管线。

②气产量计量, 包括分离器气出口管线+孔板流量计+燃烧器。

③油产量计量, 包括分离器油出口管线+涡轮流量计+缓冲罐+计量罐+燃烧器。

④水产量计量, 包括分离器油出口管线+涡轮流量计+计量罐。

⑤自动数据采集系统, 在油嘴管汇、分离器、计量罐等处实时采集和监测压力、温度及产量, 并能及时发出压力异常、温度异常、液位异常报警信号。

(3) 安全监控流程。

①井场视频实时监控及远程传输, 井场安装摄像头、LEAP-NET 系统、Bgan 系统。

②ESD 监控系统, 实现至少 4 点远程控制, 发现危险多点切断。

(4) 洁净燃烧系统。

①多种点火方式, 包括液化气传送点火、点火枪、电子自动点火。

②辅助燃烧系统, 采用柴油、液化气助燃、24h 长明火。

③燃烧坑设置, 考虑季风变化可设垂直方向两个燃烧坑。

2) 高含硫化氢高温高压气井地面系统

(1) 全封闭流程。

①一般包括三相分离器+缓冲罐+带排气通道密闭计量罐+传输泵+自动点火装置等。

②现场防护系统, 包括正压呼吸器、便携式硫化氢报警仪、风向监测、大排量风扇等。

(2) 安全监控流程。

H₂S 监控报警系统, 包括 H₂S 井场监控仪、硫化氢测管检测。

3) 高压大产量气井地面系统

(1) 双翼测试流程。

一般包括高压双翼采气树+双流程+双向燃烧池, 主要目的为高产分流或一用一倍。

(2) 井口控制组合流程。

①一级油嘴管汇, 通常情况采用一级油嘴节流。

②一级油嘴管汇并联, 有效油嘴尺寸根据双油嘴尺寸折算。

③多级油嘴管汇串联, 目的是为了降低下游流程压力, 同时降低水合物生成的风险; 大油嘴时采用第一级临界节流, 小油嘴时采用第二级或者第三级临界节流。

(3) 水合物预防控制流程。

①水合物生成预测, 包括密度曲线法、节流曲线法、经验公式法、气固相平衡计算法。

②换热量及化学剂注入量计算, 包括抑制水合物生成热量需求及蒸汽换热器换热计算。

③加热控制流程, 包括第一级油嘴管汇+蒸汽换热器+第二级油嘴管汇+蒸汽换热器。

④化学剂注入流程, 包括化学注入泵+数据头+油嘴管汇。

⑤多级油嘴管汇控制, 通过油嘴大小组组合分级降压、降温。

5. 关键施工工艺控制

1) 生产压差控制

(1) 采用较重环空压井液。

封隔器正向压差

$$\Delta p_1 = p_{\text{环空}} - p_{\text{流动}} < 30 \sim 35 \text{MPa}$$

$$p_{\text{环空}} = p_{\text{泥浆柱}} + p_{\text{操作}}$$

$$p_{\text{流动}} = p_{\text{井口}} + p_{\text{流体压力}} + p_{\text{摩阻}}$$

即

$$p_{\text{井口}} > p_{\text{泥浆柱}} + p_{\text{操作}} - p_{\text{流体压力}} - p_{\text{摩阻}} - (30 \sim 35 \text{MPa})$$

(2) 采用较轻环空压井液。

封隔器反向压差

$$\Delta p_2 = p_{\text{流动}} - p_{\text{环空}} < 30 \sim 35 \text{MPa}$$

即

$$p_{\text{井口}} < p_{\text{泥浆柱}} + p_{\text{操作}} - p_{\text{流体压力}} - p_{\text{摩阻}} + (30 \sim 35 \text{MPa})$$

(3) 生产压差。

$$\Delta p_3 = p_{\text{地层}} - p_{\text{流动}} < 20 \sim 25 \text{MPa}$$

即

$$p_{\text{井口}} > p_{\text{地层}} - p_{\text{流体压力}} - p_{\text{摩阻}} - (20 \sim 25 \text{MPa})$$

2) 液垫排出与井口压力控制

根据排出液垫体积来控制井口压力。

$$p_{\text{井底}} = p_{\text{环空}} - \Delta p_{\text{封隔器}}$$

$$p_{\text{井口}} = p_{\text{井底}} - (p_{\text{油管液柱}} + p_{\text{油管气柱}})$$

$$= p_{\text{环空}} - \Delta p_{\text{封隔器}} - p_{\text{油管液柱}} - p_{\text{油管气柱}}$$

假设：放喷过程中保持 $\Delta p_{\text{封隔器}}$ 不超过 40MPa，则需保持

$$p_{\text{井口}} > p_{\text{环空}} - 40 - p_{\text{油管液柱}} - p_{\text{油管气柱}}$$

$p_{\text{油管液柱}}$ 减小， $p_{\text{油管气柱}}$ 增大，随着放喷逐渐增加，水垫出完井口压力达到最大。

3) 测后压井工艺

(1) 将测试工具下至接近测试层，防止测试后留下“气口袋”。

(2) 长尾管压井大循环压井起钻前注意是否气侵，进出口密度差不超过 0.02。

(3) 考虑可能的解封后井底漏失，井场准备适当低比重泥浆。

四、高温高压井测试的 HAZOP 分析

国外油田服务公司在进行高温高压井测试时一般进行 HAZOP 分析，即风险与操作性分析 HAZOP。其主要内容是找出在高温高压测试过程中关键工艺参数可能出现的偏差，分析原因及可能导致的后果，制定预防措施及处理办法，并在实施中予以检查。

此外 HAZOP 与关键活动关键任务见图 1、SOP 标准作业程序、个人岗位应知应会以及

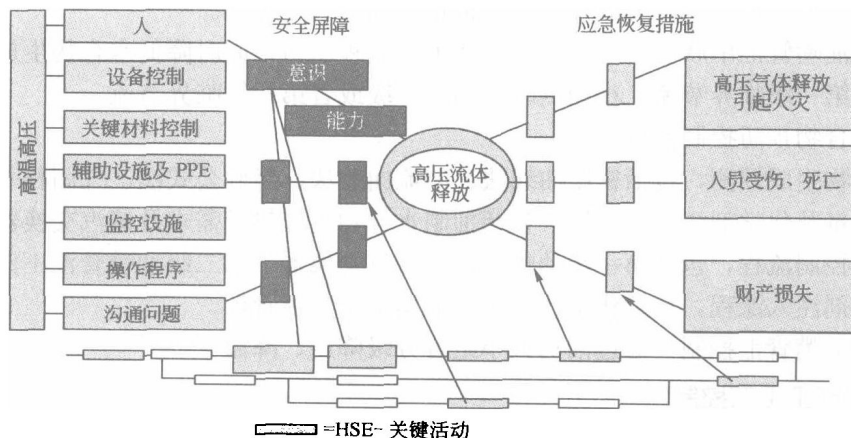


图 1 关键活动关键任务

单晶计划书结合在一起，从技术管理总方案、作业流程标准化、过程落实、岗位落实、单井具体实施方案不同层面上实施，成为一套完整的高温高压井作业管理控制体系。

五、现场应用情况

历年来测试公司参与施工的高压井主要在伊朗、巴基斯坦、中国等，共计超过 80 层次。其中最高井底温度 206℃、最高井底压力 129MPa、最高井口流动压力 74MPa。有代表性的在海外服务的井例有伊朗 80174 项目的 HOSSEIN-2 井（2004 年，井底压力 10696psi，油层温度 156℃，H₂S 含量 2000ppm）、MANSOORI-57 井（2005 年，井口温度 109.5℃，井口压力 10130psi，H₂S 含量 2500ppm）以及 85124 项目的 ABETYMOOR-32 井（2007 年，地层压力 127000psi，地层温度 125℃）等。本文以其中对市场影响较大的 AHWAZ-307 井为例，具体介绍高温高压井试油测试工艺过程及效果。

1. 工程概况

AHWAZ-307 井是伊朗国家石油公司（NIOC）勘探局所属的一口重点探井，该井于 2005 年 7 月开钻，2006 年 3 月完井，完钻井深 5158m，共有 5 个测试层，第一层测试是 286m 裸眼井段，其他为 7in 套管井段，钻井过程中曾有大量泥浆漏失，油基泥浆比重为 131pcf（2.08g/cm³）以上，15000psi 的井口控制防喷系统，高钢级的抗内挤、抗外压套管，其中 20in 表层套管下到 2000 多米（见图 2）。前期该地区两口井作业失败的历史及社区环境产生的高难度的井控使得 NIOC 勘探一直对这一地层的钻井和测试作业保持非常谨慎的态度。基于上述原因，NIOC 勘探称之为“中东第一井”。

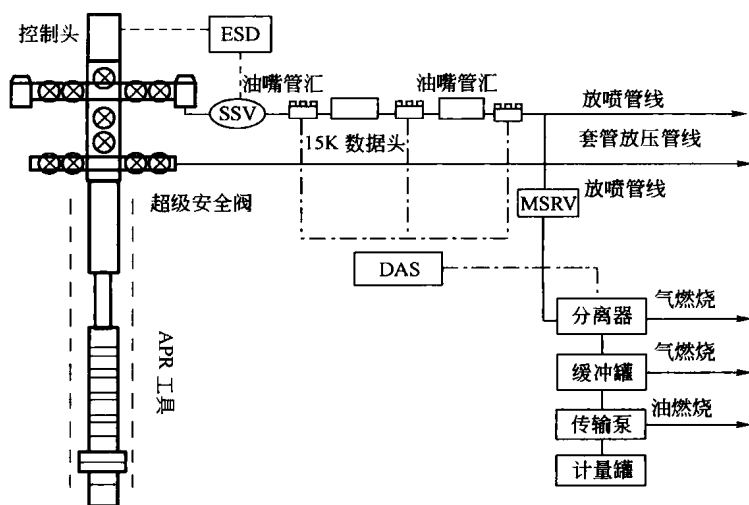


图 2 AHWAZ-307 井测试系统

2. 测试作业概况

测试时间：2006 年 3 月 3 日至 2006 年 6 月 17 日。

1) 设备准备及连接

(1) 地面设备。

①上游采用工作压力为 15000psi 的设备。

②下游采用油气处理量处于世界领先的 Halliburton 分离器。

③配备紧急关闭系统及数据采集系统，在分离器入口处设置 Hi - pressure pilot（开启压力设置在 1200psi），在分离器和数据采集房设置 ESD Station。

④分离器与油嘴管汇之间连接一条放喷管线。

⑤油嘴管汇下游直管全部选用加厚 3in 管线，尽量避免使用带有螺纹的管线。

⑥严格按照 Sop 标准作业程序对地面设备进行试压。

(2) 井下 DST 设备。

①5in DST 工具全部采用进口高温橡胶件。

②测试阀和多次循环阀的氮气每次都要充到 7300psi 以上。

③使用超级安全阀。

④测试人员 24h 轮流值班，下钻过程中严格监视扭矩表、下钻速度以及液垫的灌入程序，严格执行测试管柱试压标准。

2) 施工设计的确定

根据 NIOC 勘探的初步施工方案，压井泥浆比重为 128pcf，坐封后循环降低泥浆比重。项目认为此方案的高环空压力将对套管极限受力强度以及封隔器密封性的形成挑战，同时替换泥浆会由于封隔器大压差造成解封困难、刺漏问题及高井口操作压力带来的井口防喷控制的极大风险。在与甲方多次交流后甲方最终取消了原测试计划，而采纳了我们提出的降低泥浆比重，不再替换泥浆，直接完成测试的施工方案。事实证明这种施工方案降低了测试风险，保证了测试作业的成功率。此外公司内部经过 10 多次会议讨论，做出管柱应力分析、井口压力控制以及设备试压程序。

3) 现场施工

第一层测试开井以后油嘴一直保持在 $\frac{2}{64}$ in 以下，很快井口压力上升到 9000psi。在油嘴为 $\frac{1}{64}$ in 时，井口压力稳定在 8684psi 左右，气产量为 5.15mmscf/d，油产量为 1584bbl/d；在油嘴加大到 $\frac{2}{64}$ in 时，井口压力稳定在 6538psi 左右，气产量为 10.32mmscf/d，油产量为 3185bbl/d。出于安全方面的考虑，现场测试工程师建议不再加大油嘴求产，同时由于井口关井压力过高，采用井下关井。在这放喷求产过程中我们的设备总体来说经受住了考验。

第四层是一重油层，原油密度 (0.999g/cm^3)、粘度之大，井口温度之高等都是我们以往作业中所没遇到过的。第四层测试作业的顺利完成，再一次向甲方展示了我们 CNLC 在伊朗高温、高压、高产、硫化氢井测试作业中的能力和水平。

第五层测试，压井泥浆密度增加到了 130pcf，封隔器上下压差随时都有可能突破极限，造成封隔器失封，特别是在下连续油管过程中，测试阀关闭有可能切断连续油管，造成非常严重的后果。作业过程中注意严格控制井口压力，保持压差不会突破极限，确保测试顺利进行。

4) HAZOP 分析及 QHSE 管理

严格的 QHSE 管理是测试作业过程中规避风险，保证人员设备安全，取得良好资料的基础。同时整体安全管理活动要求全员参与并进行认真的应急演练。针对该井特点，经过小组讨论形成了针对工具入井、坐封射孔、开井测试、关井恢复、压井循环、起钻等不同阶段的压力、温度、悬重、硫化氢等关键因素的 HAZOP 分析表（见表 1），作业现场严格按照标准指导予以实施。

表 1 HAZOP 分析表

工艺参数	偏 差	可能的原因	可能导致的后果	安 全 措 施	推荐做法	备注
压力	油管压力太高	试压	设备损坏	确保所有高压设备在基地进行了适当的压力实验和认可	迅速关闭泵阀	
		测试阀开启	测试阀失效	入井前检查安全销的情况	更换工具	
	环空压力太高	试压	损坏井下工具的破裂盘,造成工具的误动作	环空试验压力不超过破裂盘设定压力的 90%	迅速关闭泵阀	
吨位	管柱吨位过高	封隔器中途坐封	工具损坏	预先保养和检查;要求打好背钳; 规定下钻速度和遇阻情况下的加压范围	及时上提管柱	
	管柱吨位过低	套管内壁有杂物	工具损坏	预先通井检查	及时上提管柱,进行验证	
		管柱有落井	测试无法进行	提供工具或管柱上扣扭矩	进行验证,否则起钻	

3. 作业成果

- (1) 安全实现井口长时间流动压力在 8870psi。
- (2) 地面流体温度高达 113.4℃时,测试作业连续 15h 顺利进行。
- (3) 在原油密度达 0.999g/cm³ 和高粘度的条件下顺利求产累计 6 天。
- (4) 在 0.5in 油嘴下原油产量为 6883bbl/d。
- (5) 实现井口压力瞬时达到 10500psi,井底压力达到 18300psi 的安全作业。
- (6) 实现泥浆比重 131pcf 下的顺利测试。
- (7) 实现所有工具设备一次性试压成功、一次性开关成功。
- (8) 实现井底生产压差 9840psi 的正常作业。

六、结论与建议

(1) 高温高压井测试是一项系统工程,涉及地质、工程、社区等方面,必须考虑套管许可承载能力、压井液密度、管柱结构功能及承压、合理地面压力控制等方面的内容,在各种有限条件下选择相对较优的油套管压力操作窗口。

(2) HAZOP 分析对控制高温高压井作业风险至关重要,应作为惯例推广。建立风险识别、预防及应对措施、实施措施等标准文件,将 HSE 风险控制措施落实到每一个环节。

(3) 高温高压井测试技术是一个测试公司核心竞争能力的一部分,具有良好的经济效益和市场影响力,特殊井况下成功的测试服务能够克服海外市场技术进入门槛、展示服务能力并赢得甲方的认可。同时高温高压井测试技术也是使油田测试技术不断发展的动力之一。

(4) 高温高压井测试技术具有广阔的推广前景。除了现有作业区域包括伊朗 NIOC 勘探项目、乌兹别克斯坦 SRG 项目、巴基斯坦 Petronas 测试项目外,潜在作业区域还包括苏丹 15 区海上项目、马来西亚 Calgary 海上项目。此外世界上的高温高压井主要分布在美国墨西哥湾、北海、加拿大东海岸、玻利维亚及委内瑞拉、澳大利亚、独联体环里海、中国西北及西南等国家和地区。