

# 深井超深井钻井新技术 研究与应用

◆ 马开华 刘修善 主编

中国石化出版社

## 内 容 提 要

深层油气资源的勘探开发是实现我国油气资源战略的主要途径。本书围绕复杂地质条件下深井超深井钻井的关键技术,汇集了这一领域的最新研究与应用成果,分为钻井工艺技术、钻井液技术、固井工艺与工具三部分内容。主要包括:钻井地质环境因素描述技术、深井超深井优化设计技术、盐膏层钻井技术、深井水平井钻井技术、欠平衡钻井技术、旋转冲击钻井技术、深井优快钻井技术、井壁稳定技术、油气层保护技术、钻井固井一体化工作液技术、高压油气井防气窜固井技术、高强低密度固井技术、脉冲振动固井工艺技术以及系列固井工具的开发及应用。理论联系实际,新颖实用,是国内深井超深井钻井技术的研究现状和水平的一个缩影。

本书可供从事石油钻井的研究人员和现场工程技术人员阅读,也可供高等院校相关专业的青年教师、研究生和高年级学生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

深井超深井钻井新技术研究与应用/马开华,  
刘修善主编.

—北京:中国石化出版社,2005(2006.5重印)

ISBN 7-80164-855-2

I. 深… II. ①马… ②刘… III. ①深井-油气钻井-  
新技术-研究 ②超深井-油气钻井-新技术-研究  
IV. TE245

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 107587 号

### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

北京精美实华图文制作中心排版

河北天普润印刷厂印刷

全国各地新华书店经销

\*

787×1092 毫米 16 开本 27.75 印张 690 千字

2005 年 10 月第 1 版 2006 年 5 月第 1 版第 2 次印刷

定价:86.00 元

# 前 言

石油天然气作为一种战略资源,对国家经济安全有着举足轻重的影响,对国民经济的可持续发展起着重要作用。随着中国经济的迅速发展,对石油的需求量越来越大,迫切需要实现油气勘探开发的重大突破。

我国的石油可采资源量预计为 150 亿吨。截止到 2003 年底,累计探明可采储量为 65 亿吨,可采石油资源的探明程度为 43%。塔里木、准噶尔、柴达木、吐哈四个盆地是我国油气资源的主要接替区,其资源量的 73% 埋藏在深层。为了实现我国的油气资源战略和发展目标,油气勘探开发必须向深层继续发展。为此,中国石油化工股份有限公司在塔河油田部署了 8000m 的亚洲第一深井——塔深 1 井,在胜利油田部署了 7000m 的我国东部最深井——胜科 1 井,这两口深探井已分别于 2005 年 4 月 18 日和 3 月 14 日开钻。超深地层的油气资源勘探开发是机遇与挑战并存,如果超深井勘探成果取得突破,将对我国的能源供给和能源战略产生重大影响。

自 1938 年美国钻成第一口 4573m 的深井以来,深井钻井已经走过了 67 年的发展历程。前苏联于 1989 年钻成了 12262m 的世界最深井 CT-3(SG-3),1991 年侧钻至 12869m。但是,美国是世界上深井钻井历史最长、工作量最大(累计占全球 85% 以上)、技术水平最高的国家。到 20 世纪 90 年代初期,美国井深为 5100~5200m 的深井,平均单井钻头用量为 22 只,单只钻头的平均进尺为 232.05m,平均钻井周期为 45~55d。而截至到 1995 年,我国平均井深为 5254m 的深井,平均单井钻头用量为 32.93 只,单只钻头的平均进尺为 106.78m,平均钻井周期为 150~170d。这些主要的钻井技术指标大约相差 1 倍。尽管近 10 年来,我国的深井钻井技术发展很快,但是与世界先进水平相比仍有较大的差距。

石油天然气富集于沉积盆地,由于经过多次板块构造碰撞、大型多旋回迭加、多期构造运动改造,这些复合型盆地中普遍存在着巨厚泥页岩、复合盐膏层、山前应力集中区、异常压力区、异常温度区、多压力体系区、地层破碎区、易漏失区、高陡构造带等,使得深井钻井面临高温高压、井眼失稳、地层坚硬、岩性变化大、地层

压力难于准确预测和检测等典型的技术难题。这些复杂的地质条件严重地制约了钻井速度,使得钻井成本居高不下,有时甚至达不到预期的钻探目的,影响了油气勘探与开发的进程。

多年来,中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院德州石油钻井研究所针对深井超深井钻井中亟待解决的关键技术展开科研攻关,形成了复杂地质条件下深井超深井钻井的一系列特色技术。主要包括:钻井地质环境因素描述技术、深井超深井优化设计技术、盐膏层钻井技术、深井水平井钻井技术、欠平衡钻井技术、旋转冲击钻井技术、深井优快钻井技术、井壁稳定技术、油气层保护技术、钻井固井一体化工作液技术、高压油气井防气窜固井技术、高强低密度固井技术、脉冲振动固井工艺技术,系列固井工具研发与应用技术,并建成了全国最大的固井工具研发中心。在庆祝德州石油钻井研究所建所40周年之际,我们将这些主要的研究成果汇集成册,旨在进一步推动深井超深井钻井新技术的研究与应用,实现深井超深井的安全、优质、快速钻井,以满足深层油气勘探开发的迫切需求。

本书共分三部分内容,钻井工艺技术由侯绪田、朱德武、陶兴华审稿,钻井液技术由郭才轩、宋明全审稿,固井工艺技术由丁士东、王文立、周仕明审稿,固井工具由姜向东、马兰荣审稿。陈会年、刘文臣进行了文稿整理。全书由马开华、刘修善统稿。

在中国石油化工股份有限公司科技发展和石油勘探开发研究院的大力支持下,德州石油钻井研究所形成了复杂地质条件下深井超深井钻井关键技术研究的核心技术,在此对多年来支持本所发展的上级主管部门和领导表示衷心的感谢。由于作者水平有限,加之时间仓促,书中的错误和疏漏之处肯定难免,恳请同行专家批评指正。

# 目 录

## 第一篇 钻井工艺技术

提高西部深探井钻井成功率新技术·····	曾义金	侯绪田	王文立(3)
深层盐膏岩蠕变物性研究及其在钻井中的应用·····	曾义金	王文立	石秉忠(13)
用反演法求取盐膏层钻井液密度图谱及确定钻井液安全钻井密度·····		侯绪田	(19)
旋转导向钻井的轨道设计与轨迹监测方法·····		刘修善	(23)
导向钻具几何造斜率的研究及应用·····		刘修善	(29)
提高深井钻井速度的有效技术方法·····		陶兴华	(35)
液动射流式冲击器的工作特性分析·····		陶兴华	(42)
岩石破碎比功试验研究·····	李国华	陶兴华	(48)
旋冲钻井参数对破岩效率的影响研究·····	李国华	鲍洪志	陶兴华(57)
西部新区地层压力预检测技术·····	张传进	鲍洪志	(64)
准噶尔盆地地应力求取及应用研究·····	鲍洪志	张传进	杨顺辉等(72)
地应力方向研究新方法——磁组构法·····		朱德武	(80)
库1井钻井实践及认识·····	侯绪田	李江	曾义金(86)
塔北地区碳酸盐岩储层欠平衡压力钻井技术·····		曾义金	(97)
碳酸盐岩储层欠平衡钻井技术难点与对策·····		侯绪田	(102)
欠平衡钻井井底压力自动控制技术·····		侯绪田	(107)
多相流井筒压力分布规律探讨·····		侯绪田	(111)
非常规井身结构设计方案研究·····		杨顺辉	(117)
塔里木盆地深井井身结构设计分析与建议·····		陈天成	(123)
我国钻井工程标准体系建设研究·····	朱德武	江山红	周仕明等(129)
气井当前产能计算新方法·····		朱德武	(138)
四步法高压增注新技术应用研究·····	朱德武	刘文臣	谈士海等(142)

## 第二篇 钻井液技术

实用欠平衡钻井钻井液技术·····		郭才轩	(149)
塔北奥陶系可控状态下的边漏边钻工艺技术·····	江山红	郭才轩	谭春勤(155)
欠平衡钻井NW无固相充气钻井液的研究·····		石秉忠	(159)
深井短半径侧钻水平井与欠平衡钻进钻井液技术·····	刘贵传	何伟国	江山红(166)
乳化柴油钻井液在天然气井欠平衡钻井中的应用·····	宋明全	江山红	侯绪田(170)
适用于超深井测试的高性能完井液·····		江山红	肖超(176)
长裸眼定向井的钻井液技术·····		石秉忠	(180)

复合金属离子聚磺混油钻井液体系的研究与应用·····	石秉忠(185)
深探井保护油气层钻井液完井液技术探讨·····	石秉忠(189)
塔河油田深井超深井钻井液技术·····	宋明全 王悦坚 江山红(195)
PB-1型多功能屏蔽暂堵剂的研究与应用·····	郭才轩 刘四海(199)
泥页岩抑制剂乙基葡糖苷的研制·····	赵素丽 肖超 宋明全(203)
烷基糖苷钻井液的室内研究·····	赵素丽 王治法 常连玉(207)
新型成膜防塌剂 MFT-1 的研究·····	金军斌 王治法 石秉忠等(211)
多功能高效废水处理剂 XFAC 的研制与评价·····	蔡利山 宋佰习 乔学华(215)
塔河油田三叠系石炭系井眼失稳机理及控制技术·····	宋明全 金军斌 刘贵传等(220)
硅酸盐钻井液体系室内研究·····	肖超 徐江 谭春勤(226)
塔河油田上部地层缩径原因及对策·····	宋明全 郭才轩 徐江等(233)
塔河油田盐膏层钻井承压堵漏技术·····	郭才轩 刘贵传 肖超(237)
塔河油田深井盐膏层钻井液技术与应用·····	江山红 刘贵传 孟庆生(242)
石油钻井环境保护技术综述·····	蔡利山 刘四海 郭才轩(248)
钻井工程硫化氢污染的预防与处理·····	蔡利山 宋明全(254)
石油钻井废弃物环境污染特征的分析与评价·····	蔡利山(263)

### 第三篇 固井工艺及工具

国内外固井技术现状及发展趋势·····	丁士东(273)
国内外防气窜固井技术·····	丁士东(279)
利用修正 SPN 值预测环空气窜·····	周仕明 丁士东(286)
固井后环空气窜预测新方法·····	丁士东(290)
LDAM 低密度防气窜水泥浆体系的研究与应用·····	马开华 姜向东 刘伟(297)
新型预胶联防气窜剂及其应用·····	周仕明 张克坚 王其春(303)
优质高强低密度水泥体系的设计与应用·····	周仕明(307)
新的 API 注水泥温度及其应用方法·····	马开华 桑来玉 丁士东(313)
西部地区复杂深井固井技术·····	周仕明 丁士东 桑来玉(317)
塔河油田紊流、塞流复合顶替固井技术·····	丁士东(325)
塔河油田深井水平井固井技术·····	丁士东 唐世春 田平等(330)
塔河油田石炭系盐层固井工艺技术·····	周仕明 郑建翔 韩卫华(336)
提高鄂尔多斯南部固井质量技术研究·····	赵艳 桑来玉 郇钢等(346)
矿渣 MTC 固化物力学性能研究·····	王文立(351)
用矿渣 MTC 技术解决复杂井固井技术问题·····	宋明全 王文立 马开华(357)
矿渣 MTC 固井技术在马东深层的应用研究·····	杨红歧 黄树明 林志辉等(365)
油井水泥降水剂现状与室内评价·····	桑来玉 黄李荣 张红卫(369)
油井水泥膨胀剂室内检测与评价·····	桑来玉 丁士东 赵艳等(376)
柠檬酸对油井水泥的作用初探·····	韩卫华 周仕明 杨红歧等(382)
高温强度稳定剂对水泥强度发展影响规律的室内研究·····	桑来玉(385)
分解机基本原理及其在油气固井中的应用·····	韦代延(390)

国外深井尾管悬挂器技术研究新进展·····	马开华 朱德武 马兰荣	(394)
国内特殊尾管悬挂器研制现状与发展趋势·····	马开华 马兰荣 姜向东等	(400)
液压机械双作用尾管悬挂器的研制与应用·····	马兰荣 张 燕	(406)
大尺寸重负荷尾管悬挂器的研制与应用·····	陈武君 马开华	(410)
小尺寸液压尾管悬挂器的研制与应用·····	马兰荣	(416)
高压油气井尾管回接固井新技术·····	马开华 马兰荣 陈武君	(420)
用于大斜度井、水平井的新型双级固井工具 ·····	吴姬昊 邢世奇 马认琦	(424)
水力加压工具中限位指示装置的研究·····	吴姬昊 金潮苏	(427)
石油工程用丢手机构的分析与研究·····	吴姬昊	(430)

# 第一篇 钻井工艺技术





# 提高西部深探井钻井成功率新技术

曾义金 侯绪田 王文立

**摘要** 随着西部新区勘探工作的突破,西部勘探开发的步伐将进一步加快,其勘探目标将进一步向广度和深度推进,地层的复杂性和不可确定性因素越来越多,在这些复杂情况下保证钻井成功率的关键是应用先进的钻井技术、制定合理的钻井设计。本文对近年来在西部勘探开发中综合运用钻前钻井资料求取、地层压力预测、盐膏层钻井技术、欠平衡钻井技术等多种新技术方法和技术创新进行综述。从而进一步认识提高西部深探井钻井速度,降低钻井成本的技术方法,为进一步提高钻井速度,降低钻井成本,提高油气层发现概率提供技术保障。

**关键词** 探井 深井 欠平衡钻井 盐膏层 西部地区

## 1 概述

石油钻井工程作为实现勘探目标的重要手段,其钻井成功率直接影响勘探开发的步伐。先进的钻井技术、合理的钻井设计是保证钻井成功率的关键。如何在诸多未知的因素下完成比较切实的新区勘探井的钻井工程设计,以正确指导施工人员选择合理的井身结构、钻井参数、钻井液参数;如何处理钻井过程中可能出现的诸如高陡构造、巨厚盐膏层、异常压力地层等钻井复杂问题,以避免钻井事故的发生、缩短钻井周期;如何在勘探井中运用新技术新方法及时发现、保护油气层以便准确地评价地层避免重复勘探与投资。这些都是新区勘探中必须加以考虑和解决的问题。西部新区是中国石化重要的油气资源接替区,随着勘探目标进一步向广度和深度推进,会遇到各种复杂钻井问题。为此,应综合运用钻前钻井资料求取、地层压力预测、盐膏层钻井技术、欠平衡钻井技术等多种新技术方法,以提高钻井速度,降低钻井成本,提高油气层发现概率。

## 2 用地球物理资料求取地层基础参数技术

### 2.1 基础数据求取方法

基础参数的求取是建立在地层纵、横波速度与岩石参数相关性基础上的,因此利用地球物理资料提取地层的纵、横波速度是问题的关键。

#### 2.1.1 求取地层横波速度

利用测井信息计算地层岩石力学参数和进行地层压力系统预测,首先要用到地层的弹性参数。地层的纵、横波速度及密度信息则是计算地层弹性参数的基础。通常可从长源距声波全波列测井资料获取横波速度信息。目前,一般采用补偿井眼声波测井方法,因而在无法从井下直接测量获取横波速度信息时,如何用常规测井资料求取横波速度是急需解决的实际问题。

根据纵波速度  $v_p$  估算横波速度  $v_s$  的方法,多是以经验统计为依据的,其精度及适用性

受到一定限制。为此,提出一种精度较高的求取横波速度的新方法——散射模型法,  $v_s = f(v_p, \rho, V_{Cl})$ , 其中,  $\rho$  为复合介质密度,  $V_{Cl}$  为泥质含量。

### 2.1.2 求取岩石的泊松比和杨氏模量参数

岩石力学参数一般是在实验室静态条件下,通过对岩心的实际测试而得出的,然而室内测定的岩石力学参数难以全面反映不均质地层岩石性质的变化规律,不能建立岩石力学参数变化的连续剖面,因此对现场应用有一定的限制。而测井资料可连续地反映地层变化规律和岩石的各种特性,克服了室内试验求取岩石力学参数的不足。但由于钻开地层反映的是大应变长时间静态应力状态,地层受力状态分析与计算模式均是在静力分析基础上建立起来的,采用的应是静态弹性参数,而现有测井资料得到的弹性参数为动态参数。研究发现,岩石动静弹性参数反映的岩石应力状态不同,二者之间存在明显的差别。因此,须将测井资料中获得的动态弹性参数转换成静态弹性参数。

### 2.1.3 求取岩石可钻性

试验与研究表明,测井资料可较好地体现岩石的物理机械力学特性,地层的横波时差反映了地层的剪切变形特性,地层的纵波时差反映了地层的拉伸和压缩变形特性及强度特性,而地层的岩石可钻性则反映的是岩石的抗钻头冲击与剪切破坏的能力,因此岩石的纵横波时差必然能反映出岩石的可钻性特征。

### 2.1.4 求取其他钻井基础数据

钻井基础数据是指钻井过程中反映地层和钻头固有特性的参数。通常钻井基础数据在反映钻井客观规律的钻井数学模式中体现,不同的钻井数学模式其钻井基础数据的表现形式和物理意义也不尽相同,因此选用现场常用的钻井数学模式——修正的杨格模式,进行钻井基础数据求取研究。

修正的杨格模式中,除可控因素钻井参数和已知的参(系)数外,还有8个待确定的参(系)数。6个地层参数(门限钻压、水功率转换系数、转速指数、压差指数、可钻性系数、研磨性系数),2个中间参数(钻头牙齿磨损影响系数、钻头轴承工作系数)。

纵波时差、横波时差、泥质含量、单轴抗压强度、抗拉强度、岩石可钻性级值和钻头类型系数为反映钻井基础数据的主要因素(变量),这些变量除钻头类型系数外可全部从测井资料中直接测取或由测井资料分析处理转换得出。

## 2.2 应用及问题分析

利用地球物理资料求取地层基础参数,进行钻井工程设计,对提高探井或评价井钻井设计的科学性具有重要意义。利用收集到的电测资料,系统求取了柴窝堡地区的三个压力剖面、岩石可钻性等基础数据,完成了达1井钻井工程设计,施工实践表明,该钻井工程设计具有一定的科学性,能较好地满足柴窝堡地区复杂地层的施工需要。

目前,由于种种原因,钻井工程设计者不能取得某地区的地球物理资料,使用处理结果进行设计。尽管能收集到“邻井”资料,但由于距离较远(探井更是如此),可借鉴性不大。如果能充分利用地震或电测资料资源,利用处理结果指导设计,无疑会大大提高探井钻井工程设计的科学性。

## 3 地层压力求取及井身结构设计

### 3.1 地层压力求取

求取地层压力主要是测定上覆岩层压力、地层孔隙压力、地层坍塌压力和地层破裂压

力。这些是井身结构设计和钻井液密度设计时的重要基础数据，是科学化钻井工程设计的重要组成部分。在此以地震资料为主简单介绍地层压力的预测方法。

### 3.1.1 地震速度预测地层压力原理

地震波在地层介质中的传播速度与地层的岩性、岩层的压实程度、岩层的埋藏深度以及岩层的地质时代等因素有关，一般情况下，地震波的传播速度随地层的埋藏深度的加大而增加。地震波在地层介质中的传播速度与岩层埋藏深度、岩石沉积时代和岩石密度有正比关系，与岩石孔隙度变化成反比关系，这些特性与常规声波测井的规律性一致，因此，地震波进行地层压力预测的理论是可行的。

地震层速度预测地层压力常用图解法和公式法两大类。对于图解法，准确的压力预测必须保证所用的正常压实趋势线是真实的，因为它是图解法的基础。对于埋深较大的地层，正确的正常压力趋势线显得更为重要，由于小的偏差，将引起较大的压力评价误差。如何建立正常的压力趋势线，除经验外，别无它法。对于公式法，由于其不依赖正常压实趋势线，应用起来较为方便，特别是对新探区更为适用，但其精度受控于研究工区的实际情况与经验假设条件的符合程度。

### 3.1.2 用地球物理资料预测上覆岩层压力

根据上覆岩层压力的定义，可导出利用测井资料计算上覆岩层压力的计算式为：

$$p_d = 0.009806(\rho \times H_0 + \int_{H_0}^H \rho_b dH) \quad (1)$$

式中， $p_d$ 为目的点的上覆岩层压力，MPa； $\rho$ 为井段顶界至井口的地层密度平均值， $g/cm^3$ ； $\rho_b$ 为地层体积密度， $g/cm^3$ ； $H_0$ 为顶界深度，m； $H$ 为目的点的深度值，m。

### 3.1.3 用地球物理资料预测地层孔隙压力

在正常地层压力下，根据压实规律，泥岩声波时差随井深增加而减小，形成正常压实趋势，在半对数坐标系下，井深与声波时差呈线性关系，形成正常压实趋势线。当地层中具有异常孔隙压力时，岩石孔隙度增大，岩石体积密度降低，声波时差也随之增大而偏离正常压力地层的时差趋势线，根据声波时差偏离正常压实趋势线的程度，即可定量预测地层孔隙压力变化。

### 3.1.4 用地球物理资料预测地层坍塌压力

分析岩石力学稳定时，假定泥页岩的渗透率非常小、钻井液性能优良，基本上与泥页岩不发生渗透流动，根据库仑-摩尔强度准则，可得岩石坍塌压力。

### 3.1.5 用地球物理资料预测地层破裂压力

地层破裂压力的求取模式选用下面公式：

$$p_f = \zeta_1 \times E_s / (1 - \mu_s) - 2\zeta_2 \times E_s / (1 + \mu_s) + 2\mu_s(p_d - \alpha p_p) / (1 - \mu_s) + \alpha p_p + S_t \quad (2)$$

式中， $\zeta_1$ 、 $\zeta_2$ 为构造应力系数； $E_s$ 为杨氏模量，MPa； $\mu_s$ 为波松比； $p_d$ 为上覆岩层压力，MPa； $p_p$ 为孔隙压力，MPa； $\alpha$ 为毕奥特系数； $S_t$ 为抗拉强度，MPa。

该模式中， $E_s$ 和 $\mu_s$ 表示现今地下应力状态下的数值。模式中不仅考虑了岩层泊松比的作用，同时也包含了弹性牛量的影响。模式中大部分基础数据都可以从测井资料中直接求取，利用测井资料可以求取连续的地层破裂压力剖面。

## 3.2 井身结构设计

塔河油田优快钻井的井身结构设计浆套管程序：一开， $\phi 660.5\text{mm}$ 钻头钻深 50m， $\phi 508.0\text{mm}$ 套管下深 49m；二开， $\phi 444.5(311.1)\text{mm}$ 钻头钻深 1200m， $\phi 339.7\text{mm}$ 套管下深

500~1200m; 三开,  $\phi 215.9(241.0)$ mm 钻头钻深 5500m,  $\phi 177.8$ mm 套管下深 5498m; 四开,  $\phi 149.2$ mm 钻头钻深 5700m,  $\phi 127.0$ mm 套管下深 5700m。

## 4 新型优质钻井液技术

### 4.1 复杂地层甲酸盐钻井液

#### 4.1.1 性能特点与性能指标

甲酸盐溶液不需任何固体加重材料就能获得较高的密度, 密度在  $1.0 \sim 2.37\text{g/cm}^3$  之间可调, 且其水溶液在高密度时仍能保持很低的粘度; 同时, 甲酸盐的页岩抑制能力强, 可明显促进钻井过程中的井壁稳定, 减少井下事故的发生。此外甲酸盐对金属的腐蚀性明显低于卤化物, 对橡胶件的影响也不大, 无毒、无刺激作用且易生物降解, 满足日益严格的环保法规规定。应用甲酸盐可避免或降低两种常见的油气层损害, 一是不需固相加重材料, 可避免或减轻固相侵入地层引起的地层伤害, 二是避免二价阳离子沉淀, 从而提高勘探开发技术经济效益。其主要技术特点与性能指标如下:

1) 甲酸钾的抑制能力较强, 强于相同浓度的 KCl、KAc、NaAc、NaCl。

2) 与相同浓度的无机盐比较, 甲酸钾提升 Zeta 电位幅度大。 $\xi$  电位越高, 粘土颗粒间的斥力越小, 对泥页岩而言, 就是越不易于膨胀、分散、水化。

3) 同摩尔浓度的甲酸钾溶液提高泥岩膜效率能力高于氯化钾溶液, 可降低钻井液水活度, 发挥化学位差诱导反渗透作用, 使地层水流向井眼内(降低孔隙压力, 避免水化作用且提高泥岩强度), 进而促进井壁稳定。

4) 可以减少和完全替代固相加重材料, 如石灰石粉、重晶石粉等, 可避免或减轻固相侵入地层引起的地层伤害。

5) 甲酸盐水溶液抑制油气通道泥质胶结物的能力强, 同时可以避免二价阳离子沉淀, 具有很强的保护油气层的功效。

6) 密度  $1.0 \sim 2.37\text{g/cm}^3$ , 表观粘度  $26\text{mPa}\cdot\text{s}$ , 塑性粘度  $16\text{mPa}\cdot\text{s}$ , 动切力  $8\text{Pa}$ , API 滤失  $9\text{mL}$ , Zeta 电位  $26.4\text{mV}$ , 页岩回收率  $96\%$ , 页岩膨胀率  $1.8\text{mm}$ , 抗温大于  $150^\circ\text{C}$ , 抗盐可达  $5\%$ , 抗钙可达  $0.5\%$ , 抗钻屑污染可达  $10\%$ , 渗透率恢复率  $88\%$ 。

从甲酸盐钻井完井液上述特点看, 该钻井完井液体系特别适合打开储层和用作完井阶段的完井液, 有利于油气层的保护和防止完井后完井液中的高价盐对油层套管和油管的腐蚀。

#### 4.1.2 现场应用

库 1 井侧钻后试油采用  $\phi 177.8$ mm 套管内座封隔器测试侧钻裸眼段, 座封位置  $6250\text{m}$ , 测试时下部钻井液采用甲酸盐钻井液。套管与测试油管的环空内, 上部  $0 \sim 3000\text{m}$  采用  $1.70\text{g/cm}^3$  的欠饱和盐水泥浆; 中部  $3050 \sim 3250\text{m}$  采用自行研制的相对密度  $1.45\text{g/cm}^3$ 、粘度为  $96\text{s}$  的高粘甲酸盐钻井完井液稠垫相隔; 下部  $3200 \sim 6250\text{m}$  采用相对密度  $1.45\text{g/cm}^3$ 、粘度为  $65 \sim 70\text{s}$  甲酸盐钻井完井液。在经历了  $25\text{d}$  井下  $165^\circ\text{C}$  高温作用后, 反循环钻井液完井液一次成功解封, 安全顺利提出测试油管。

### 4.2 盐膏层欠饱和盐水聚磺钻井液

#### 4.2.1 性能特点与技术指标

该钻井液体系由磺化处理剂、聚合醇、硅酸盐等组成, 具有很好的护壁、固壁和防止水敏性泥页岩坍塌能力。以磺化处理剂、高分子以及聚合醇协同作用封堵地层微裂隙, 无机盐

降低钻井液滤液活度，阻止压力传递，硅酸盐与地层作用提高了页岩膜效率，从而达到防塌护壁的目的。其稳定井眼的能力仅次于油基钻井液。可直接往钻井液中加入可溶性盐，抑制粘土矿物水化膨胀、分散，适用于软泥岩地层、深层层理发育地层、膏盐层、砂岩、灰岩地层钻进。

主要性能指标为塑性粘度  $20 \sim 25 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ，动切力  $4 \sim 8 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ，表观粘度  $24 \sim 28 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ，滤失  $5 \sim 7 \text{ mL}$ ，漏斗粘度  $38 \sim 50 \text{ s}$ ，抗温可达到  $130^\circ\text{C}$  以上，抗盐可达  $5\%$  以上，抗钙可达  $0.5\%$ ，抗坂土污染达  $5\%$  左右，回收率  $97\%$ 。

#### 4.2.2 设计特点

该钻井液体系根据盐膏层上部地层裸眼承压能力，采用适当钻井液密度来平衡地层压力，防止地层的塑性变形；根据盐层蠕变情况，采用适当含盐量，通过调节钻井液含盐量，既能随时溶解蠕变到井内层的塑性盐层，避免阻卡，又能防止地层盐过度溶解造成井径扩大乃至泥页岩框架坍塌等复杂情况。

#### 4.2.3 应用实例

S105 井位于塔河油田外围地区，钻遇地质条件比较复杂，特别是石炭系的膏盐层，埋藏深、厚度大、盐层纯而集中，极易发生“缩、溶、胀、塌”。在该井施工前，该地区曾经施工过 3 口探井，均因地层复杂而未钻达设计井深，其中：由美国麦克巴钻井液公司承包钻井液服务的乡 1 井因  $\phi 177.8 \text{ mm}$  尾管被挤坏变形，直径被压变为  $\phi 139.0 \text{ mm}$ 。后采用不同尺寸胀管器进行套管胀扩，均未成功，被迫进行  $\phi 244.5 \text{ mm}$  套管内的开窗侧钻。1992 年 12 月 12 日下钻于 5214m 二叠-石炭系底部泥岩层遇阻，划眼至 5220m 卡死。多次处理无效后，用反扣钻杆及爆炸松扣方式倒出盐层顶部以上钻具，再次侧钻。第二次侧钻钻至 5144.06m 钻遇井下落鱼，侧钻失败，最后该井以事故完井而未达到设计井深；S10 井在上部井段出现大段泥岩缩径，在下部井段钻遇盐层后，钻井液性能急剧变坏，失水增大，粘切急剧上升，泥饼增厚，流变性能变差，粘滞系数增大，后发生了一系列诸如卡钻，井漏等复杂情况，被迫提前完钻，同样 S98 井也未钻达设计井深。

S105 井采用密度  $1.65 \sim 1.70 \text{ g/cm}^3$  的欠饱和盐水聚磺钻井液，顺利钻达 6245m，是目前该地区最深的一口井。钻井过程中钻井液的 MBT 值控制在于  $25 \sim 35 \text{ mg/L}$ ，保持含盐量达到  $\text{Cl}^- (16.5 \sim 17.5) \times 10^4 \text{ mg/L}$ 。同时加入  $0.5\% \sim 1\%$  润滑剂和  $0.1\% \sim 0.2\%$  盐结晶抑制剂 NTA-2。欠饱和盐水泥浆转换一次成功，用时仅 3d，盐膏层钻进过程顺利，无阻卡现象，三次电测均一次到底，下套管、固井顺利。

#### 4.3 防扩径聚合醇聚磺屏蔽防塌钻井液

西部新探区的地层岩性、结构及完整性、油气水的分布、地层压力大小等不是很清楚。因此，在安全顺利钻达设计井深、取全取准地质资料、及时发现油气资源的前提下尽可能减少钻井液成本尤为重要。聚合醇聚磺屏蔽防塌钻井液技术为实现这一目标提供了技术支撑。

##### 4.3.1 聚合醇的作用机理

1) 粘结成膜，提高地层强度。聚合醇主链上全部是碳原子，侧链上大多数是羟基，其分子质量在  $(5 \sim 12) \times 10^4$  之间，主要靠大量羟基的吸附交联，粘结成膜，并吸附在井壁上，使井壁地层强度提高，从而起封固稳定井壁的作用。

2) 堵塞页岩孔隙和微裂缝，阻止滤液进入地层，同时减少压力穿透。

3) 聚合醇有降低水的表面张力的作用。1% 聚合醇水溶液在  $25^\circ\text{C}$  时与空气的界面张力为  $50 \times 10^{-3} \text{ N/m}$ ，其适当的表面活性使得活性分子易集中到钻井液与井壁的交界面，逐步在井

壁上沉积或吸附而形成封固层,从而有利于稳定井壁,同时可使井壁的润滑性得到改善。

上述三种机理相辅相成,共同起作用。适当的表面活性对吸附的速度和强度有增进作用,醇的紧密吸附和硅形成的三维网络凝胶结构又是聚合醇在岩石表面成膜护壁的微观机理。

#### 4.3.2 现场应用

塔河油田 TK634 井是一口长裸眼井,二开 796.5 ~ 5546m,裸眼井段长达 4749m。4500m 以上地层,地层压力当量密度在 1.04 ~ 1.16g/cm<sup>3</sup> 范围,地层渗透性好,泥岩地层水敏性强,遇水易膨胀缩径;4500m 以下地层压力当量密度 1.16 ~ 1.28g/cm<sup>3</sup> 范围,地层坍塌压力高,泥岩地层层理发育,遇水易分散掉块引起扩径。通过 TK634 井钻井实践,4500 ~ 5546m 井段地层扩径较小,三叠系平均扩大率为 5.82%、石炭系扩大率为 5.43%,而相距约 300m 远的邻井 S80 井石炭系的井径扩大率达 32%。钻井中井内掉块少,岩屑不混杂,井眼稳定,4500m 以后起下钻无阻卡,达到防扩径的目标。同时油气层保护效果明显,与邻井 S80 井相比,该井在三叠系石炭系新发现 2 层油气,钻井中 S80 井钻井液槽面无显示,而 TK634 井钻井中油气显示好。

## 5 优质固井技术

### 5.1 高强低密度固井技术

应用颗粒级配原理优化体系中水泥与低密度充填材料之间的粒度分布关系,使不同材料之间的堆积比例达到最大,减少材料颗粒之间的空隙,从而降低水灰比,提高水泥体系的整体性能,大大提高低密度水泥强度,甚至与常规密度水泥相当,彻底改变了随密度降低,水泥石强度降低这一规律。高强低密度水泥浆密度范围在 1.24 ~ 1.50g/cm<sup>3</sup>,密度 1.24g/cm<sup>3</sup> 的水泥石,50℃、24h 强度达到 14MPa,75℃、24h 强度超过 16MPa;密度 1.29 g/cm<sup>3</sup> 的水泥石,50℃、24h 强度达到 14MPa,75℃、24h 强度超过 17MPa。水泥体系稳定性好,自由水为 0。水泥浆液态向固态过渡时间短,早期强度高,有利于提高固井质量。

在松南浅层气井、鄂尔多斯大牛地地区低压低渗油气藏、胜利油田稠油热采井,塔河油田长封固段深井(封固段最长超过 4000m)推广应用 50 井次以上,固井效果明显好于常规低密度水泥,固井质量合格率 100%,优质率 85% 以上。

### 5.2 小井眼固井技术

小井眼井由于井眼小、环空窄、循环摩阻大、水泥环薄、顶替效率低等,给固井作业带来难度,因此对水泥浆性能及施工工艺提出更高要求。小井眼固井主要侧重于水泥浆体系性能和施工工艺两方面。

#### 5.2.1 水泥浆体系的性能要求

选择性能优异的水泥浆体系是保证小井眼固井质量的关键。良好的流变性能可以降低流动摩阻,减少注水泥压力,提高顶替效率和固井质量。通过对小井眼顶替过程中液体流动理论的研究表明,当  $n$  值在 0.5 左右, $k$  值在 0.5 ~ 2Pa·s<sup>n</sup> 之间时,最有利于提高小井眼的环空顶替效率。水泥浆要有好的沉降稳定性和零自由水。据文献报道,垂直养护的水泥柱(20cm)上下的密度差小于 0.08g/cm<sup>3</sup> 时,水泥浆的沉降稳定性好。水泥浆 API 失水要小,防止由于水泥浆失水变稠形成“桥堵”,造成憋泵等事故。水泥浆凝固后有足够的强度、韧性和微膨胀特性,可以有效密封油气水层,并承受后续作业过程中产生的冲击载荷。针对小井眼固井研制开发的由降失水剂、膨胀剂、分散剂和缓凝剂组成的低密度和常规密度水泥浆体

系，具有流变性好、失水小、沉降稳定性好、稠化过渡时间短(一般在 20min 以内)、强度发展快、强度高、微膨胀等特点。

### 5.2.2 提高小井眼固井质量的措施

1) 保证井身质量、保持套管居中是提高注水泥顶替效率的主要因素。一般套管偏心度要求 33% 以下，而小井眼要求更为严格，应在 15% 以下。采用扶正力强的双弓弹性套管扶正器，提高套管居中度，保证水泥环均匀。

2) 根据地层状况合理优化水泥浆流变参数，减少水泥浆的流动阻力。钻井液的触变性对水泥浆的顶替效率影响明显，在固井时尽量减小钻井液 10min 的静切力，控制在 2Pa 以下。

3) 重视流变学设计。合理使用冲洗液和隔离液，利用冲洗液或隔离液达到紊流顶替，采用低速紊流前置液顶替工艺，提高顶替效率，降低摩阻。

在松南地区浅层气井封固  $\phi 114.3\text{mm}$  油层套管，塔河油田封固奥陶系  $\phi 127.0\text{mm}$  油层尾管，固井优质率 80% 以上，已推广应用 200 多口井。

## 6 探井欠平衡钻井技术

能防止井液滤液和固相进入储集层，因而能够最大限度地去发现和保护中、低压油藏，以获取比常规过压钻井高得多的经济效益。另外，欠平衡钻井还可以克服液柱的压持效应，提高破岩效率，解放钻速，缩短建井周期，减少钻井液对储集层的浸泡时间，避免大量钻井液漏失而降低了钻井成本。因此，全国各大油田都在研究推广该项技术。

### 6.1 新区勘探使用欠平衡钻井工艺的必要性

常规的钻井方法已经越来越难以适应日趋复杂困难的勘探任务。勘探成本的逐年提高，最主要原因是勘探成功率的降低。越来越复杂的地质条件和储层条件使得探井钻成难，钻成后发现油气层的能力差。因此，需要提高对复杂地层的钻探能力，提高勘探精度，保证及时、准确、无遗漏地发现油气层。

目前的油气勘探开发已经从整装大油田、高压和常规压力、中高渗均质砂岩等良好勘探开发条件，转移到了复杂中小油田、断块油田、薄油层、低压低渗低产能、老油气田改造、复杂储层条件、非常规油气藏等恶劣的勘探开发条件，勘探钻井都遇到许多前所未有的困难。

勘探井常规钻井技术常遇到两大难题。一是打了井产油气太少，二是打了井不见油气显示，导致勘探开发低效甚至失败。钻井、完井过程中的储层伤害是其中原因之一，这种伤害对低渗透储层的影响更大。低渗透储层具有如下特征：

- 1) 基质低渗、特低渗，存在微裂缝。
- 2) 低渗储层吸水造成的伤害最严重。
- 3) 非达西渗流规律造成启动渗流压差。
- 4) 特殊的孔喉结构导致储层易伤害。
- 5) 粘土矿物与其他充填矿物是造成伤害的重要因素。
- 6) 双储双渗空间的伤害。
- 7) 低储层压力造成严重伤害。

因此，在易污染地层使用欠平衡钻井技术避免或减少储层伤害，以提高勘探命中率是十分必要的。



## 6.2 利用欠平衡钻井技术提高油气发现概率

几年来,欠平衡钻井工艺技术在我国得到了迅速发展,随着应用的不断深化,该项技术正逐步向探井领域发展。受国外欠平衡理论的影响,一直认为该技术仅能在地层比较清楚的生产井中才可使用,因为探井中许多不确定因数可能会引起多种钻井事故。但是,过平衡钻井在探井勘探中错过或推迟油气田发现的实例已数不胜数,不能正确地评价地层造成一次次重复性勘探,浪费了大量的人力及物力。因此,能真实展露地层原貌的欠平衡技术无疑是一个巨大的诱惑,在国内很多油田开始把这项技术运用到勘探井中。

在探井中使用欠平衡钻井工艺的最大技术障碍是井眼稳定性问题,如何在保证井眼稳定的前提下,尽量降低钻井液密度,以利于油气层的发现是探井欠平衡钻井工艺成功的关键。另外,不太准确的地层压力数据也为钻进负压值的设计与控制带来问题。

对探井井眼稳定性的预测与实践有一个循环渐进的过程。通过观察钻井过程中扭矩、泵压、岩屑等现象的变化可以推断井眼的稳定性情况。同样,对地层压力的大小认识也是一个随钻研究,逐步认识的过程。随钻DC指数压力检测及其他压力检测新技术在钻井中的应用,可以取得较新的压力数据。另外,利用地球物理资料求取地层基础参数技术对最近一次的电测资料进行分析处理,可以取得井眼坍塌压力剖面 and 地层压力剖面。使用这些数据和井眼稳定性数据对欠平衡作业的有关参数进行及时调整,在保证安全的前提下尽量调低井底压差,以有利于油气的发现。

## 6.3 应用实例

中1井是塔里木盆地卡塔克区块的一口初探井,为发现和保护油气储层,使用密度 $1.01\text{g/cm}^3$ 的无固相钻井液,在 $\phi 149\text{mm}$ 井眼四开井段5201~5581m实施了欠平衡压力钻井。在5362~5388m处钻遇26m厚油气层,立压为14~20MPa,控制套压0~2MPa,火焰高2~8m,每次起下钻,循环均有后效,油气上窜速度维持40m/h左右。该井的应用表明欠平衡钻井技术有利于发现和保护油气层,特别是低压油气层。

# 7 盐膏层钻井关键技术

深部地层盐膏层钻井是钻井工程重大技术难题之一,由于盐膏层岩石性能的特殊性,盐膏层钻井完井复杂情况和井下事故形态可用“溶、缩、塌、胀、漏、卡、喷、损”八个字来描述。特别是当钻开井眼后盐膏层蠕动,常造成井眼失稳、卡钻、固井后挤毁套管等事故,给钻井带来重大经济损失。而盐膏层蠕动压力计算、盐膏层钻井雍密度谱的绘制是解决上述问题的关键。

## 7.1 深层盐膏层蠕变压力三维计算

根据蠕变方程,采用美国Itasca咨询公司显式有限差分法编制的FLAC<sup>3D</sup>软件,对蠕动压力进行了三维计算。计算了不同深度、不同水泥环厚度、不同盐膏层厚度、不同温度和不同地层倾角条件下的蠕动压力变化规律。并得出如下结论:

- 1) 水泥环厚度对套管初始应力状态有影响,但不显著。
- 2) 盐膏岩蠕动初期,盐膏层厚度对套管受力状态有比较明显的影响,但随着时间的延续,不同厚度盐膏层下,套管受力状态趋于一致且等于上覆岩层压力。
- 3) 同一盐膏层蠕变特性下,温度对套管受力状态的影响十分显著,温度越高,套管在盐岩蠕变初期承受的蠕动压力越高,随着时间的延续,套管径向应力和垂向应力趋向一致,但周向应力趋向一致的速度比较缓慢。