

油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助

复杂油气藏开发丛书

复杂油气藏钻井 理论与应用

付建红 杨迎新 等 著



科学出版社

油气藏地质及开发工程国家重点实验室资助

复杂油气藏开发丛书

复杂油气藏钻井理论与应用

付建红 杨迎新 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍复杂油气藏钻井的相关基本理论和应用成果。全书有 6 章, 包括绪论、复杂地层工程地质力学研究、特殊结构井钻井技术、复杂难钻地层高效破岩技术、井下随钻测量技术基础理论及其应用、复杂地层井筒压力控制技术。

本书涉及的内容主要是钻井工程安全高效的钻井新技术, 书中提出的钻井理念及方法可为相关专业高等学校及研究院的教学提供参考, 也可在现场油气井钻井工程师提供参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

复杂油气藏钻井理论与应用/付建红, 杨迎新等著. —北京: 科学出版社, 2017.3
(复杂油气藏开发丛书)

ISBN 978-7-03-042923-0

I. ①复… II. ①付… III. ①复杂地层-地层油气藏-油气钻井-研究
IV. ①TE2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 309712 号

责任编辑: 张 展 刘 琳 / 责任校对: 韩雨舟

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张: 17.75

字数: 420 000

定价: 180.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

丛书编写委员会

主 编：赵金洲

编 委：罗平亚 周守为 杜志敏

张烈辉 郭建春 孟英峰

陈 平 施太和 郭 肖

丛 书 序

石油和天然气是社会经济发展的重要基础和主要动力，油气供应安全事关我国实现“两个一百年”奋斗目标和中华民族伟大复兴中国梦的全局。但我国油气资源约束日益加剧，供需矛盾日益突出，对外依存度越来越高，原油对外依存度已达到 60.6%，天然气对外依存度已达 32.7%，油气安全形势越来越严峻，已对国家经济社会发展形成了严重制约。

为此，《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》对油气工业科技进步和持续发展提出了重大需求和战略目标，将“复杂油气地质资源勘探开发利用”列为位于 11 个重点领域之首的能源领域的优先主题，部署了我国科技发展重中之重的 16 个重大专项之一《大型油气田及煤层气开发》。

国家《能源发展“十一五”规划》指出要优先发展复杂地质条件油气资源勘探开发、海洋油气资源勘探开发和煤层气开发等技术，重点储备天然气水合物钻井和安全开采技术。国家《能源发展“十二五”规划》指出要突破关键勘探开发技术，着力突破煤层气、页岩气等非常规油气资源开发技术瓶颈，达到或超过世界先进水平。

这些重大需求和战略目标都属于复杂油气藏勘探与开发的范畴，是国内外油气田勘探开发工程界未能很好解决的重大技术难题，也是世界油气科学技术研究的前沿。

油气藏地质与开发工程国家重点实验室是我国油气工业上游领域的第一个国家重点实验室，也是我国最先一批国家重点实验室之一。实验室一直致力于建立复杂油气藏勘探开发理论及技术体系，以引领油气勘探开发学科发展、促进油气勘探开发科技进步、支撑油气工业持续发展为主要目标，以我国特别是西部复杂常规油气藏、海洋深水以及页岩气、煤层气、天然气水合物等非常规油气资源为对象，以“发现油气藏、认识油气藏、开发油气藏、保护油气藏、改造油气藏”为主线，油气并举、海陆结合、气为特色，瞄准勘探开发科学前沿，开展应用基础研究，向基础研究和技术创新两头延伸，解决油气勘探开发领域关键科学和技术问题，为提高我国油气勘探开发技术的核心竞争力和推动油气工业持续发展作出了重大贡献。

近十年来，实验室紧紧围绕上述重大需求和战略目标，掌握学科发展方向，熟知阻碍油气勘探开发的重大技术难题，凝炼出其中基础科学问题，开展基础和应用基础研究，取得理论创新成果，在此基础上与三大国家石油公司密切合作承担国家重大科研和重大工程任务，产生新方法，研发新材料、新产品，建立新工艺，形成新的核心关键技术，以解决重大工程技术难题为抓手，促进油气勘探开发科学进步和技术发展。在基本覆盖石油与天然气勘探开发学科前沿研究领域的主要内容以及油气工业长远发展急需解决的主要问题的含油气盆地动力学及油气成藏理论、油气储层地质学、复杂油气藏地球物理

勘探理论与方法、复杂油气藏开发理论与方法、复杂油气藏钻完井基础理论与关键技术、复杂油气藏增产改造及提高采收率基础理论与关键技术以及深海天然气水合物开发理论及关键技术等方面形成了鲜明特色和优势,持续产生了一批有重大影响的研究成果和重大关键技术并实现工业化应用,取得了显著经济和社会效益。

我们组织编写的复杂油气藏开发丛书包括《页岩气藏缝网压裂数值模拟》、《复杂油气藏储层改造基础理论与技术》、《页岩气渗流机理及数值模拟》、《复杂油气藏随钻测井与地质导向》、《复杂油气藏相态理论与应用》、《特殊油气藏井筒完整性与安全》、《复杂油气藏渗流理论与应用》、《复杂油气藏钻井理论与应用》、《复杂油气藏固井液技术研究与应用》、《复杂油气藏欠平衡钻井理论与实践》、《复杂油藏化学驱提高采收率》等 11 本专著,综合反映了油气藏地质及开发工程国家重点实验室在油气开发方面的部分研究成果。希望这套丛书能为从事相关研究的科技人员提供有价值的参考资料,为提高我国复杂油气藏开发水平发挥应有的作用。

丛书涉及研究方向多、内容广,尽管作者们精心策划和编写、力求完美,但由于水平所限,难免有遗漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

国家《能源发展战略行动计划(2014—2020 年)》将稳步提高国内石油产量和大力发展天然气列为主要任务,迫切需要稳定东部老油田产量、实现西部增储上产、加快海洋石油开发、大力支持低品位资源开发、加快常规天然气勘探开发、重点突破页岩气和煤层气开发、加大天然气水合物勘探开发技术攻关力度并推进试采工程。国家《能源技术革命创新行动计划(2016—2030 年)》将非常规油气和深层、深海油气开发技术创新列为重点任务,提出要深入开展页岩油气地质理论及勘探技术、油气藏工程、水平井钻完井、压裂改造技术研究并自主研发钻完井关键装备与材料,完善煤层气勘探开发技术体系,实现页岩油气、煤层气等非常规油气的高效开发;突破天然气水合物勘探开发基础理论和关键技术,开展先导钻探和试采试验;掌握深—超深层油气勘探开发关键技术,勘探开发埋深突破 8000 m 领域,形成 6000~7000 m 有效开发成熟技术体系,勘探开发技术水平总体达到国际领先;全面提升深海油气钻采工程技术水平及装备自主建造能力,实现 3000 m、4000 m 超深水油气田的自主开发。近日颁布的《国家创新驱动发展战略纲要》将开发深海深地等复杂条件下的油气矿产资源勘探开采技术、开展页岩气等非常规油气勘探开发综合技术示范列为重点战略任务,提出继续加快实施已部署的国家油气科技重大专项。

这些都是油气藏地质及开发工程国家重点实验室的使命和责任,实验室已经和正在加快研究攻关,今后我们将陆续把相关重要研究成果整理成书,奉献给广大读者。



2016 年 1 月

前 言

随着石油勘探开发技术的进步,致密油、致密气、页岩油气、煤层气、深部高温高压高含硫等复杂油气藏已成为主要的勘探开发对象。复杂深层油气藏的钻井完井技术面临的技术挑战包括压力层序多、井壁失稳、机械钻速慢、单井产量低、井控风险大、钻井参数选择难以适应安全快速钻井的需要等。其中页岩地层井壁稳定技术、用于开发页岩油气、致密油气的长水平位移水平井钻井技术、开发超深层油气的侧钻水平井钻井技术、高温高压气井的非常规井控技术、有利于提高钻速的 PDC 钻头个性化设计技术、井下工程参数的测量和控制技术均是近年来油气井工程领域研究的重点和难点。

针对复杂油气藏安全高效勘探开发的关键钻井工程技术难点,本书较为系统地阐述了近年来复杂油气藏钻井相关应用基础理论和最新研究成果。围绕复杂工程地质力学问题,开展了深部砂泥岩地层岩石力学、盐膏层岩石力学、页岩气储层岩石力学研究,确定了复杂地质环境条件下的安全钻井液密度窗口,提出了稳定井壁的工艺技术措施;针对复杂深层侧钻井及长位移水平井技术难点,系统阐述了侧钻井、水平井钻井过程中的轨迹优化、钻柱优化、轨迹控制及井眼净化问题;为提高难钻地层机械钻速,提出了 PDC 钻头个性化设计方法,研究、开发了多种针对不同岩石特点的 PDC 钻头,并取得了较好的提速效果;针对高温高压气井特殊工况,提出了非常规井控工艺技术;为提高钻井工程决策的科学性,开发了多种井下工程参数测量工具。

参与本书撰写的主要人员与任务分工为:第 1、3 章由付建红撰写,第 2 章由夏宏泉、陈平、马天寿、张杰撰写,第 4 章由杨迎新撰写,第 5 章由陈平、马天寿撰写,第 6 章由付建红、张智、郭昭学撰写,付建红、陈平负责全书的统稿和审校。

团队的石晓兵、范祥宇、况雨春、陈炼、任海涛、张德荣、包泽军等老师和冯剑、苏昱、黄奎林、张春亮、牛世伟、刘茂森、张强、李彬等博士、硕士研究生参与了研究工作和著作撰写、图文编校整理工作,对他们的辛勤劳动表示衷心感谢。

特别感谢中国石化西北分公司工程技术研究院、中国石化西南分公司工程技术研究院、中海油研究总院,以及中国石油、中国石化各油田及研究机构的大力支持和帮助。

由于著者水平的限制,书中难免存在疏漏和不足之处,敬请读者批评指正。

著 者

2017 年 2 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 复杂油气藏类型	1
1.2 复杂油气藏钻井技术现状	3
1.3 复杂油气藏钻井面临的主要技术难题	7
第 2 章 复杂地层工程地质力学研究	9
2.1 深部砂泥岩地层岩石力学特征	9
2.1.1 深部砂泥岩地层的岩石力学参数和地应力实验研究	9
2.1.2 横波时差曲线提取或构建	16
2.1.3 岩石力学参数的测井计算方法及实例	16
2.1.4 BD 地区井壁力学稳定性分析	20
2.2 盐膏层地层岩石力学特征	27
2.2.1 盐层塑性蠕变特征及规律分析	27
2.2.2 盐岩位移的黏弹性解	29
2.2.3 盐岩岩石力学参数反演分析	30
2.2.4 确定合理钻井液密度和安全钻井时间	32
2.2.5 现场应用	34
2.3 页岩气储层水平井井壁稳定力化耦合评价方法	35
2.3.1 井周围岩应力分布模型	35
2.3.2 井壁稳定性判别模型	40
2.3.3 实例分析	43
参考文献	55
第 3 章 特殊结构井钻井技术	57
3.1 特殊结构井钻井工程优化设计	57
3.1.1 特殊结构井井眼轨迹设计	57
3.1.2 特殊结构井钻柱优化设计	63
3.2 特殊结构井轨迹控制	72
3.2.1 特殊结构井轨迹控制模型的建立	72
3.2.2 特殊结构井轨迹控制影响因素分析	77
3.3 深井套管开窗工艺技术	82
3.3.1 斜向器开窗技术	82
3.3.2 段铣器开窗技术	86

3.3.3 斜向器开窗和段铣开窗技术比较	89
3.4 随钻扩眼技术	90
3.4.1 随钻扩眼钻柱动力学模拟理论模型的建立	91
3.4.2 随钻扩眼钻柱动力学影响因素分析	95
3.4.3 随钻扩眼效果影响因素分析	100
3.4.4 随钻扩眼技术现场试验	103
3.5 小井眼流体力学与井眼净化	104
3.5.1 超深井小井眼水力学模型	104
3.5.2 环空流速分布特征及压力梯度影响因素分析	107
3.5.3 试验井水力参数对比分析	109
3.5.4 井眼净化	110
参考文献	114
第4章 复杂难钻地层高效破岩技术	115
4.1 复杂难钻地层钻头个性化设计技术	116
4.1.1 复杂难钻地层岩石可钻性测试	116
4.1.2 复杂难钻地层钻头失效分析	122
4.1.3 PDC 钻头的个性化设计原理	125
4.2 高效钻头新技术、新思想	133
4.2.1 PDC-牙轮复合钻头	133
4.2.2 微心钻头	153
4.2.3 交叉刮切 PDC 钻头	159
4.2.4 旋转齿 PDC 钻头	161
4.2.5 锥齿钻头	164
4.3 个性化 PDC 钻头开发与应用	166
4.3.1 CK 系列 PDC 钻头开发与应用	166
4.3.2 内镶二级齿 PDC 钻头开发与应用	168
4.3.3 椭圆 PDC 齿钻头开发与应用	171
4.4 辅助破岩工具	174
4.4.1 扭转冲击器	174
4.4.2 钻柱延伸工具	177
参考文献	182
第5章 井下随钻测量技术基础理论及其应用	184
5.1 随钻地层压力测试基础理论	184
5.1.1 随钻地层压力测试原理	184
5.1.2 随钻地层压力测试压力响应特征	186
5.1.3 随钻地层压力测试模拟实验	198
5.2 随钻压力和温度测试技术及应用	203

5.2.1	随钻环空压力及温度监测装置	203
5.2.2	随钻压力温度测试原理及标定	205
5.2.3	基于 PTWD 的井眼工况评价技术	212
5.2.4	现场试验	214
5.3	井下钻压扭矩测试技术及应用	217
5.3.1	井下钻压、扭矩测试仪器结构设计	218
5.3.2	井下钻压、扭矩测试原理	218
5.3.3	测量仪电气系统及标定	221
5.3.4	井下工程参数测量仪应用	223
5.4	井下微流量随钻测试与控制技术	229
5.4.1	井下微流量控制钻井系统	229
5.4.2	井下微流量测量装置及其测量原理	231
5.4.3	环空流量与压差计算理论模型	234
5.4.4	井下环空流量的流体动力学模拟	237
5.4.5	井下微流量测量装置现场试验	239
	参考文献	242
第 6 章	复杂地层井筒压力控制技术	244
6.1	高温高压高产井非常规井控技术	244
6.2	改进动力压井法	248
6.2.1	压力平衡过程环空压力场模型	248
6.2.2	挤入过程压力模型	250
6.2.3	压井参数设计	253
6.2.4	改进动力压井法压井程序	256
6.3	非常规压井方法实例计算分析	256
6.4	井喷失控后复杂地形含硫天然气扩散机理	261
6.4.1	常见扩散模型及其特点	261
6.4.2	基本扩散模型的建立	264
6.4.3	特定条件下模型的解	265
6.4.4	模型数值计算方法研究	267
6.4.5	计算实例	272
	参考文献	274

第1章 绪 论

1.1 复杂油气藏类型

随着钻井技术的进步,全球范围内复杂油气藏的勘探开发不断获得重大突破,致密油、致密气、页岩气和高温高压高含硫气藏等成为复杂油气藏发展的重点领域。钻井技术的发展与突破,使得复杂油气藏的产量在中国陆上油气产量中所占的比例稳步增长。未来以页岩气、致密气为主的复杂油气藏产量将占我国油气总产量的30%~40%,具有非常好的勘探开发前景。

1. 致密油藏 (Tight Oil Reservoir)

致密油藏主要是指与生油岩层系互层共生或紧邻的致密砂岩储集层中聚集的石油资源。虽然储集层物性较差,但源储一体或紧邻,含油条件好,储量大。

致密油开发最初起源于北美地区,美国是目前致密油资源开发最成功的国家,其主要致密油区带为巴肯、伊格福特、奈厄布拉勒、尤蒂卡、沃夫坎等,其中北达科他州的巴肯和南得克萨斯州的伊格福特目前已投入大规模开发,成为美国致密油的主产区。据美国能源信息署(EIA)的统计,2011年11月,美国致密油产量接近 $90 \times 10^4 \text{ bbl/d}$,其中约84%来自巴肯和伊格福特页岩区。到2015年3月,美国能源署所统计的美国的致密油产量达到 $489 \times 10^4 \text{ bbl/d}$ 。即便是处于低油价时代,2016年6月仍能保持 $410 \times 10^4 \text{ bbl/d}$ 的产量,巴肯和伊格福特页岩区仍是产量增长的主力。

我国自20世纪60年代起,相继在松辽、渤海湾、柴达木、吐哈、酒西、江汉、南襄、苏北及四川盆地发现了致密油资源,分布较广泛,经过多年的勘探开发表明,我国致密油有效勘探面积为 $18 \times 10^4 \text{ km}^2$,地质勘探总资源量为 $74 \times 10^8 \sim 80 \times 10^8 \text{ t}$,有效可采资源量为 $13 \times 10^8 \sim 14 \times 10^8 \text{ t}$ 。在我国的鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、四川盆地、松辽盆地、渤海湾盆地等地致密油已开始尝试工业化生产,这些地区的工业化生产为我国致密油的勘探开发提供了技术先导试验和借鉴,起到了较好的技术引领作用。

2. 致密气藏 (Tight Gas Reservoir)

致密气藏一般指渗透率小于0.1md的砂岩地层天然气藏,具有储层致密、低孔、渗透性差等特点,单井产量低,致密气藏岩性主要为砂岩,还包括致密盐酸盐岩和火成岩、变质岩等。

根据美国联邦地质调查局研究结果,全球范围内致密气资源量大约有 $210 \times 10^{12} \text{ m}^3$,目前致密气主产区主要位于美国和加拿大。美国于20世纪70年代对致密气藏进行了初步的勘探研究,到1980年,致密气产量占美国天然气总产量不足2%,到2011年,美国致密气年产量达到 $1690 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占天然气总产量的26%。加拿大致密气产区主要位于其

西部的阿尔伯达盆地,至1976年钻成第一口工业致密气井,加拿大致密气地质储量达到 $42.5 \times 10^{12} \text{m}^3$,其中,艾尔姆沃斯和霍德利两大致密气田可采储量就达到 $6780 \times 10^8 \text{m}^3$,仅艾尔姆沃斯致密气田,2008年年产量已达到 $88 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

我国早在1971年就在四川盆地发现了致密气田,但早期均以低渗气藏进行开发,直到20世纪90年代中期,致密气藏才开始进入快速发展阶段。2011年年底,我国已累计探明致密气地质储量 $3.3 \times 10^{12} \text{m}^3$ 左右,约占全国天然气总探明储量的39%;2011年致密气产量约 $256 \times 10^8 \text{m}^3$,约占全国天然气总产量的1/4。截至2015年,我国致密气产量达到 $500 \times 10^8 \text{m}^3$,预计2020年将达到 $800 \times 10^8 \text{m}^3$ 。致密气已经成为我国天然气增储上产的主要领域,在天然气工业发展中占有非常重要的地位。

3. 煤层气 (Coalbed Methane Reservoir)

煤层气指储存在煤层中以吸附在煤基质颗粒表面为主,部分游离于煤孔隙中或溶解于煤层水中的天然气,是煤层本身自生自储式气藏。

目前世界范围内的煤层气资源量约为 $256.3 \times 10^{12} \text{m}^3$,超过常规天然气探明储量的两倍,主要分布在北美、俄罗斯及中国等国家。20世纪80年代初美国开始试验应用常规油气井开采煤层气并获得突破性进展。美国煤层气资源量 $21.38 \times 10^{12} \text{m}^3$ ^①,2004年,美国煤层气年产量达到 $500 \times 10^8 \text{m}^3$ 。近10年,美国煤层气保持稳定产量为 $550 \times 10^8 \sim 556 \times 10^8 \text{m}^3$,约占美国天然气总产量的10%。

我国煤层气总资源量 $36.8 \times 10^{12} \text{m}^3$,位居世界第三,其中,煤层气资源量大于 $1 \times 10^{12} \text{m}^3$ 的盆地8个,合计 $28 \times 10^{12} \text{m}^3$,占全国煤层气总资源量的76%,主要分布于中西部地区,以山西、陕西和内蒙古等省份为主。2006年以来我国煤层气勘探实现了规模开发。截至2010年,在鄂尔多斯、沁水、渤海湾3个盆地累计探明煤层气地质储量 $2734 \times 10^8 \text{m}^3$,发现了沁南、鄂东等煤层气田;煤层气累计钻井4722余口,其中,直井4576口、水平井(主要为多分支水平井)146口。截至2015年,我国煤层气产量达 $44.25 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

4. 页岩气藏 (Shale Gas Reservoir)

页岩气藏一般是指渗透率小于0.001md,赋存于富有机质泥页岩及其夹层中,以吸附或游离状态为主要存在方式的非常规天然气。

2014年2月,EIA对全球41个国家137套页岩气资源进行了评价,并预测全球页岩气技术可采资源量为 $206.88 \times 10^{12} \text{m}^3$,主要分布在北美、中亚和中国、中东和北非等地区。美国页岩气勘探开发的迅速发展阶段始于2000年左右,形成了巴奈特、费耶特维尔、伍德福德、海恩斯维尔、马塞勒斯、伊格福特等页岩气主产区。根据EIA 2012年的数据,美国页岩气产量高达 $2653 \times 10^8 \text{m}^3$,到2015年,美国页岩气产量达到了 $13651 \times 10^8 \text{m}^3$,占美国天然气总产量的50%,预计到2040年将增长到 $28835 \times 10^8 \text{m}^3$ 。页岩气的大规模开发使美国改变了原引进 $5000 \times 10^4 \text{t LNG}$ 的计划,改变了天然气供给格局。美国页岩气开发取得成功后,加拿大、阿根廷、欧洲各国以及中国等开始重视页岩气资源的勘探开发并开展了大量工作。

^① 数据来源: <http://www.51report.com/free/3007750.html>。

我国于 2004 年开始页岩气相关勘探工作,目前还处于勘探开发初期。截至 2015 年,我国页岩气可采资源量约为 $31 \times 10^{12} \text{m}^3$,页岩气产量达到 $44.71 \times 10^8 \text{m}^3$ 。目前已形成涪陵、长宁、威远和延长四大页岩气产区,年产能超过 $60 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

5. 高温高压高含硫气藏 (High Temperature-High Pressure-High Sulfur Content Gas Reservoir)

高温高压高含硫气藏一般指地层压力大于 70MPa、储层温度大于 150°C 、 H_2S 含量超过 2%或 $30\text{g}/\text{m}^3$ 的气藏,该类气藏埋藏深度往往超过 4000m,一般具有产量较高的工业气流。

高温高压高含硫气藏主要分布于美国、俄罗斯等国,其中俄罗斯阿斯特拉罕高含硫凝析气田储层达到 $3.8 \times 10^{12} \sim 4.2 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。我国的高温高压高含硫气藏主要分布在四川盆地,盆地内现已探明的高含硫天然气储量超过 $9000 \times 10^8 \text{m}^3$,占全国同类天然气储量的比例超过 90%。该类气藏在工程作业中往往容易引发生产事故,如著名的“12·23”事故,中石油川东北气矿突然发生井喷事故,富含硫化氢的气体喷涌而出,导致在短时间内发生大面积灾害。又如清溪 1 井事故,该井四开钻进至井深 4285.38m 时发生溢流,经过初期两次压井和三次抢险压井,封井取得成功。高温高压高含硫气藏虽然储量巨大,但其三高特性非常容易带来高昂的开发成本并容易引发安全事故。

1.2 复杂油气藏钻井技术现状

我国自“八五”开始,钻井工程技术研究在岩石力学与井壁稳定、特殊工艺井钻井工艺、PDC 钻头技术、井下工程参数测量与控制以及高温高压高产气井井控技术等方面取得了显著进展。

1. 岩石力学与井壁稳定

岩石力学参数方面,可以根据地质资料、岩心实验、测井资料和矿场地应力测试对井周岩石力学参数进行测试和分析,对单井地应力大小及方位进行测量和分析。针对煤岩和页岩地层层理性力学特征,发展了考虑井眼轨迹和层理面各向异性岩石力学模型;针对高温高压高含硫的裂缝性气藏,发展了考虑不同地层倾角下多场耦合的裂缝性岩石井壁失稳模型。

泥页岩井壁失稳是钻井工程中经常遇到的复杂问题之一,泥页岩井壁稳定研究主要体现在三个方面:井壁稳定力学方法、钻井液化学影响研究和力学-化学耦合研究。井壁稳定力学方法是从岩石力学角度出发,采用弹性力学、塑性力学、弹塑性力学等力学方法研究井壁稳定性,弹性力学是最常用的方法之一,其主要过程:根据地质资料、岩心实验、测井资料和矿场地应力测试确定地应力剖面,建立井周应力分布模型,并采用适当的岩石强度准则(如 Mohr-Coulomb 准则、Drucker-Prager 准则和 Hoek-Brown 准则等)进行井壁稳定性判别,进一步研究井壁稳定性规律。钻井液化学影响研究的重点是页岩与钻井液发生的物理化学作用,其结果侧重于钻井液性能评价,其目的是通过评价

找到稳定井壁的钻井液体系。力学-化学耦合研究的重点是物理化学联合作用下泥页岩的水化膨胀特性、弹性特性、强度特性、自由水扩散规律、孔隙压力传递规律等方面,研究目的是通过试验确定钻井液对泥页岩化学作用产生的力学效应,并将该力学效应引入到井壁稳定力学评价模型中,目前,真正能够用于定量计算的理论方法只有三种:热弹性比拟法、水分子自由能热动力学理论法和非平衡热动力学理论法。稳定井壁常常需要具备三个要素:即合理的钻井液密度、足够的钻井液抑制性和足够的钻井液封堵能力,但是,三要素的合理范围仍然无法确定,其主要原因是缺乏用于准确测量和评价其性能的手段和方法,也就无法建立坍塌压力与力学化学耦合间的定量关系,因此,现场只能依靠经验进行调整。

2. 特殊工艺井钻井技术

特殊工艺井钻井技术主要包括定向井、侧钻井、水平井、多分支井、丛式井及“井工厂”等特殊工艺钻井配套工艺技术。经过“八五”到“十二五”长时间的研究、应用与发展,特殊工艺井钻井技术已经成为开发复杂油气藏最有效的手段,主要体现在井眼稳定分析、井眼轨迹与井身结构优化设计、钻柱摩阻扭矩分析及钻柱结构优化设计、偏心环空流体力学分析与井眼净化、“井工厂”钻井技术等相关配套工艺技术的进步上。

国内超深水平井主要集中在水平位移较大的海上油田或滩海油田的大位移水平井和垂深较大的超深水平井。大位移水平井垂深较浅,水平位移大,主要技术问题是降低摩阻扭矩和保持井眼净化。大位移水平井通常采用合成基钻井液降低摩阻扭矩,采用井下闭环钻井工具控制井眼轨迹,同时通过监测井底压力、摩阻、扭矩、泵压、排量等钻井参数判断井下工况是否正常。对于类似于塔河油田和元坝气田的垂深较大的超深水平井,技术挑战主要出现在下部小井眼的钻井及完井问题,如小井眼条件下的管柱结构优化及环空压力监测问题、高温对井下测量及控制工具的影响问题、高温小间隙偏心环空固井问题。国内在应对超深水平井下部小井眼钻井及完井技术方面仍面临较大挑战。

从 20 世纪末开始,国内已完成不少超深水平井施工案例,主要分布在塔里木盆地和四川盆地,其垂深大都达到了世界级。2002 年的 TK636 井完钻井深 6001.76m,水平段长 244.09m,水平位移 510.20m。2006 年以来,普光气田完成了多口超深水平井,其中普光 204-2H 井井深为 7010m,垂深为 5942.18m,井底水平位移为 1628.10m,水平段长 453m。2009 年,中古 162-1H 井完钻井深 6780m,最大井斜 86.72°,最大水平位移 731.72m,水平段长 456m,创造了当时中石油超深水平井纪录。2010 年,中石化塔河油田完成了两口井深超过 7000m 的超深水平井。其中 TH12302CH 井深 7047m,垂深 6359m,水平位移 892.72m,水平段长度 726.11m; TH12513CH 井深 7099m,垂深 6592.98m,水平位移 1384.51m,水平段长度 291.88m。2010 年 8 月,塔河油田 TP111 井完钻井深 7426m,垂深 6735.52m,造斜点位置为 6625m,水平段长 610m。2009 年,中石化集团公司在元坝部署的 103H 井和 121H 井设计井深分别为 7861m 和 8158m,垂深分别为 6847m 和 7280m,完钻后将是世界垂深最深的两口水平井。至 2011 年 1 月,元坝 103H 的实钻井深 7729.8m,最大垂深 6761.5m,水平位移 1133m,水平井段长 689m。该井是国内已完钻最深水平井,也是有资料可查的世界上最深的水平井。2010 年 5 月开钻的哈 901H 井设计井深 7120m,

是塔里木油田最深的超深水平井。

特殊工艺井井眼轨迹及井身结构已经从常规二维的长、中、短半径水平井发展到三维定向井、侧钻水平井、大位移水平井、超深超短半径水平井、多分支井、丛式井以及“井工厂”技术等多种复杂结构的水平井钻井技术。钻柱摩阻扭矩分析及钻柱结构优化方面,从过去的微分方程解析法发展到有限元方法,从单一的钻柱结构发展到适用于不同钻井工况的可调整钻柱结构,并发展出水力加压器、水力振荡器等降摩减阻配套井下工具。井眼净化方面,从经验模型逐步过渡到通过模拟偏心环空速度场和压力场,进而通过环空岩屑力学分析,预测出保证井眼净化的最小环空返速和最小排量。

3. PDC 钻头技术

无论采用何种井身结构或钻井工艺,钻头都是决定钻速的核心因素。自 2000 年以来,由于 PDC 钻头技术的快速发展和推广应用,钻井速度有了大幅提升,PDC 钻头已经超越牙轮钻头成为最大且最重要的钻头品种。然而,随着特殊工艺井钻井工艺技术在深层、深水、非常规油气勘探开发领域的逐步发展,复杂难钻地层(特别是在深层)破岩效率低的问题仍然十分突出,对钻井效率的进一步提升形成了严重制约。

与牙轮钻头不同,金刚石钻头的刮切破岩机理使其对地层性质等钻井条件的变化十分敏感,必须针对性地开展科学的个性化设计才能达到好的钻进效果。然而,尽管我国的金金刚石钻头制造企业已达上百家,但大多数金刚石钻头企业的产品开发模式仍是模仿设计,技术创新能力明显不足,西南石油大学钻头研究室研究开发成功了以“PDC 钻头数字实验室软件”为核心的 PDC 钻头个性化设计技术,已经在一些企业的钻头新产品开发中获得了成功应用。

围绕钻井提速降本的迫切需求,近年来国内外钻头技术发展较快,主要体现在以下几方面:其一,聚晶金刚石复合片性能进步明显,特别是脱钴技术显著提升了复合片的耐磨能力(特别是耐热磨损能力),不仅提升了 PDC 钻头的性能,而且对 PDC 钻头地层适应范围的拓展起到了重要作用;其二,各种复合切削结构钻头设计理念和新技术不断涌现,如以 PDC-牙轮复合钻头为代表的静态切削结构和运动切削结构相复合的新技术、PDC-孕镶复合钻头新技术、串行布齿 PDC 钻头新技术(表镶 PDC 齿与内镶 PDC 齿相复合)等,为复杂难钻地层的高效破岩提供了有效的技术手段;其三,辅助破岩工具与钻头相结合,形成了一些卓有成效的钻井提速新技术,代表性工具包括扭转冲击器和定向井、水平井钻柱延伸工具。这些新的技术进步为复杂结构井钻井效率的提升发挥了重要作用。

4. 井下工程参数测量与控制

井下工程参数测量的主要数据包括定向参数、钻井工程参数和地层参数。定向参数主要包括井斜、方位、工具面角等涉及井眼轨迹的参数,是定向井、水平井、大位移井等复杂结构井轨迹控制的关键基础参数,目前完全能够通过电子单点测斜仪、电子多点测斜仪、常规随钻测量(MWD)系统等进行测量,这类工具的基础理论与技术在国内外已经非常成熟。钻井工程参数主要包括井筒压力、钻井液体积流量、温度、钻压、扭矩、弯矩、转

速、振动、冲击等涉及钻井工程安全控制的参数,这些参数的测量通常需要在下部钻具组合中安装特殊的测量仪器,之所以将这类测量仪器制作成专门的测量短节,是因为可以将这些特殊的测量仪器与 MWD 系统连接,实现数据的实时上传,不需要再配备单独的数据上传工具和系统,部分油田服务公司将测量传感器安装于 MWD 测量探管内部;测量井筒压力和温度等参数可以采用随钻压力测量仪器(PWD),测量钻压、扭矩、弯矩等工程参数可以采用工程参数测量仪器,测量转速、振动、冲击等动力学参数可以采用专门的振动、冲击测量仪器,目前国外油田技术服务公司已经成功研制出一系列性能较好的测量工具,而国内在井下工程参数测量领域的研究起步较晚,尚未形成系统、成熟的测量工具系列,仅仅开展了基础理论的研究和工具的预研发;此外,受限于现有 MWD 系统的数据上传速率,钻井工程参数的实时传输难度仍然较大。地层参数的测量通常被称为随钻测井(LWD),可以说 LWD 源自于常规的电缆测井,所以, LWD 测量的项目基本上可以包括全部的常规测井项目,如自然伽马、中子密度、孔隙度、电阻率、声波井径、电阻率成像、超声井下电视、核磁共振、地层压力等,但 LWD 工具研发难度却远高于常规电缆测井,因为要将原本实心的测量仪器布置在钻铤尺寸工具内部狭小的空间内,而且要保证该工具具有足够的工作强度,还需要克服钻井过程中遇到的高温、高压、剧烈振动和冲击等复杂环境; LWD 测量工具的研发将井眼轨迹控制从几何导向发展成为以实时调整地质目标的地质导向技术;目前国外油田技术服务公司已经成功研制出一系列性能较好的 LWD 测量工具,而国内在该领域的研究起步较晚,尚未形成系统、成熟的测量工具系列,研发的工具稳定性较差、可靠性不高、测量精度较低。

5. 高温高压高产气井井控技术

复杂地层高温高压高产气井钻井过程中井下溢流等复杂情况频发,井喷失控风险较大。我国川东北地区、塔里木盆地属于典型的高温高压高产区块,地质条件复杂,储层埋深均大于 4500m,井控安全问题较为突出。1995 年,川东钻探公司所钻的渡 1 井,发生强烈井喷,造成钻机损坏,直接经济损失 1000 多万元;2001 年,塔里木油田迪那 2 井钻遇超高压油气层发生井喷失控,直接经济损失 8000 多万元;2003 年,罗家 16H 井发生特大井喷失控事故,造成 243 人死亡,直接经济损失 9000 多万元。

合理有效的井筒压力控制技术是确保高温高压高产气井安全高效生产的关键。现有压井方法可分为常规压井法和非常规压井法两类。常规压井法也称为井底常压法,即保持井底压力不变,通过循环排出井内气侵钻井液,重建井内压力平衡。目前,常用的常规压井法主要包括司钻法和工程师法。在高温高压高产气井中如果溢流发现及时,且钻柱位于井底或离井底不远的情况下,可采用常规压井法进行压井。非常规压井法是指发生井喷或井喷失控以后不具备常规压井方法所要求的条件时进行的压井作业,以及一些特殊情况下,为在井内建立液柱,恢复和重新控制地层压力所采用的压井方法。高温高压高产气井中常用的非常规压井方法主要包括动力压井法、平衡点法和直推法。一旦发生井内喷空的情况,需要快速建立井内压力系统平衡,如果此时钻柱在井底或离井底不远,可以采用动力压井法或平衡点法压井;如果井内无钻具不能进行循环压井,此时可采用直推法压井。

1.3 复杂油气藏钻井面临的主要技术难题

复杂油气藏开发需要采用特殊的钻井工艺技术,如页岩和煤层的井壁稳定问题、致密油、致密气、页岩气开发的“井工厂”钻井技术、复杂深层的提高钻速技术、高温高压高含硫气藏的非常规井控技术。常规的钻井技术难以满足复杂油气藏高效低成本的开发,在复杂油气藏勘探和开发过程中面临很多钻井技术的挑战,如煤层气藏储层煤岩表现出强应力敏感性、页岩储层页岩表现出强水敏性、高温高压高含硫气藏空井压井等。

我国在复杂油气藏钻井工艺技术上仍然面临一系列技术难题,主要表现为:钻遇地层地质力学环境复杂、钻柱失稳及破坏、深井超深井机械钻速慢、高温高压高产气井井控技术复杂以及钻井工程参数的测量与控制难度大等。

1. 地质力学环境复杂

复杂油气藏钻井过程中,常常会存在喷漏同存、井壁失稳严重、套管挤毁等问题。在复杂油气藏钻井过程中,一方面,需要尽可能地增大井眼在储层中的延伸距离和控制范围,在同一长裸眼井段,往往需要穿越多套不同压力系统。特别是高含硫裂缝性气藏在纵向上具有多个压力系统,且存在局部高压,再加上安全钻井液密度窗口窄,往往容易出现喷漏同存的井下复杂情况,钻井风险极大。另一方面,煤岩气藏、页岩气藏储层层理发育,产状多变,煤岩和页岩均表现出强非均质性、强水敏性,同时致密砂岩、页岩和煤岩存在应力敏感的特点,再加上地应力状态复杂,非常容易发生漏失和坍塌等井壁失稳问题;在深井超深井钻井过程中,盐岩层蠕变和较大的倾角产生了严重的应力集中问题,常常导致钻井过程中井眼缩径和卡钻。

2. 超深水平井复杂结构及复杂载荷导致的轨迹优化设计与轨迹控制面临挑战

越来越多的复杂油气藏在开发过程中采用如水平井、侧钻井、分支井、三维丛式水平井等特殊结构井进行开发,由于井眼轨迹和井身结构复杂、全井钻柱长度增加以及高温高压高含硫等因素的影响,超深水平井的结构和载荷变得越来越复杂,超深水平井的井眼轨迹设计、钻柱结构设计、下部钻具组合的设计需要新的理论支持。复杂的轨迹类型、复杂的钻柱结构以及变差的钻井液润滑性能使钻柱轴向摩阻增大;复杂的井眼轨迹和钻柱结构会造成钻柱的纵向振动、横向振动和涡动行为变得更为复杂,并伴随有钻柱与井壁或套管的接触碰撞。钻柱在井下的复杂力学环境使得钻柱失稳、疲劳破坏以及磨损的可能性大大增加。此外,当钻柱处于高温高压高含硫环境下,钻柱更易受到腐蚀和冲蚀,从而发生破坏。基于此,在复杂油气藏钻井过程中,需要合理地优化井眼轨迹、井身结构和钻柱结构,采用特殊的井下工具降低钻柱摩阻扭矩、控制有害振动、减小钻柱和套管磨损,同时优化钻柱结构和钻井参数,防止钻柱失效。

3. 机械钻速慢

当钻入深部地层,地层应力情况变得复杂,且地层研磨性变强、可钻性变差,钻头的