

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

复杂油气藏欠平衡钻井 理论与实践

孟英峰 李 皋 等 著



科学出版社

复杂油气藏开发丛书

复杂油气藏欠平衡钻井理论与实践

孟英峰 李 皋 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍复杂油气藏欠平衡钻井技术相关的基本理论和最新研究成果,包括针对三大复杂油气藏形成的欠平衡钻井储层保护基础,欠平衡钻井提速基础理论,欠平衡钻井井壁稳定基础理论,欠平衡钻井多相流理论,欠平衡钻井的完井方法和技术,欠平衡钻井技术的装备、工具与仪器,以及复杂油气藏欠平衡钻井的典型应用范例,复杂油气藏欠平衡钻井技术潜力与应用前景的展望。本书对欠平衡钻井在复杂油气藏勘探开发中的应用实践具有重要的指导意义。

本书可作为油气勘探钻井、开发、地质、地热开发、能源储存、二氧化碳地质封存等相关专业本科生和研究生的教学参考书,亦可为有关科研和工程设计人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂油气藏欠平衡钻井理论与实践/孟英峰等著—北京:科学出版社, 2016.8

(复杂油气藏开发丛书)

ISBN 978-7-03-042919-3

I. ①复… II. ①孟… III. ①复杂地层—油气钻井—研究 IV. ①TE2

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第309796号

责任编辑:杨 岭 刘 琳/责任校对:韩雨舟

责任印制:余少力/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

*

2016年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016年8月第一次印刷 印张:23

字数:540 000

定价:268.00 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，也是我国最第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

随着油气资源勘探开发的深入, 深层致密油气、海相碳酸盐岩油气、页岩油气、煤层气等复杂油气资源已成为主要的勘探开发对象, 这些复杂油气藏在钻完井过程中普遍面临井漏、井塌等复杂事故频繁发生、机械钻速低、储层损害严重、井控风险大等技术难题。实践和理论研究表明, 欠平衡钻井系列技术能够有效地保护储层、提高机械钻速、减少由于过高井筒压力引发的井下复杂情况, 已成为复杂油气藏勘探开发工程技术领域的一项主流钻井技术。

围绕复杂油气藏欠平衡钻井相关的应用基础理论和最新研究成果, 本书较为系统地阐述了欠平衡钻井的发展、工程分类及风险评价, 复杂油气藏欠平衡钻井储层保护基础, 欠平衡钻井提速基础理论, 欠平衡钻井井壁稳定性基础理论, 欠平衡钻井多相流基础理论, 欠平衡钻井的完井方法和技术, 欠平衡钻井的装备、工具与仪器, 我国复杂油气藏的典型欠平衡钻井实践, 以及在欠平衡钻井基础上衍生发展的控压钻井技术, 并对欠平衡钻井系列技术的发展趋势进行了展望。

参与本书撰写的主要人员与任务分工为: 第 1、9、10 章由孟英峰独立撰写, 第 2 章由李皋、孟英峰、练章华撰写, 第 3 章由石祥超、孟英峰撰写, 第 4 章由刘厚彬、孟英峰、李皋撰写, 第 5 章由魏纳、孟英峰、李皋撰写, 第 6 章由孟英峰、万里平、邓虎、李皋撰写, 第 7 章由孟英峰、李皋、邓虎、唐贵、王延民、梁红军撰写, 第 8 章由孟英峰、李皋撰写, 孟英峰、石祥超负责全书的统稿和审校。

团队的其他老师和博士、硕士研究生参与了大量的研究工作和著作撰写、图文编校整理, 特别包括下列同志: 杨谋、李永杰、林铁军、蒋俊、孙爱生、孙万通、孔斌、简旭、文科、曾辉、胡强、楚恒智、杨旭、龙俊西、方强等。

特别感谢川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院塔里木油田分公司, 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

2015 年 12 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 欠平衡钻井技术发展概述	1
1.1.1 过平衡钻井技术的起源与发展	1
1.1.2 欠平衡钻井技术的起源与发展	2
1.1.3 我国欠平衡钻井技术的发展	5
1.2 欠平衡钻井系列技术的工程分类及风险评价	9
1.2.1 欠平衡钻井系列技术的工程分类	9
1.2.2 欠平衡钻井系列技术的分类与风险评价	12
1.2.3 欠平衡钻井系列技术的选用	14
参考文献	15
第2章 复杂油气藏欠平衡钻井储层保护基础	17
2.1 孔隙型储层钻完井储层损害	17
2.1.1 孔隙型储层地质特征	17
2.1.2 孔隙型储层损害机理及评价	25
2.2 裂缝型储层钻完井储层损害	37
2.2.1 裂缝型储层地质特征	37
2.2.2 裂缝型储层损害机理及评价	44
2.3 漏失型储层钻完井储层损害	58
2.3.1 漏失型储层地质特征	58
2.3.2 漏失型储层损害机理及评价	67
2.4 复杂油气藏欠平衡钻井储层保护评价流程	79
2.4.1 复杂储层欠平衡钻完井决策基本思路	79
2.4.2 复杂储层欠平衡钻完井评价流程	81
参考文献	87
第3章 欠平衡钻井提速基础理论	88
3.1 欠平衡钻井井底岩石力学与破岩特征分析	88
3.1.1 欠平衡钻井对井底岩石力学性质的影响	88
3.1.2 欠平衡钻井井底牙齿侵入裂纹扩展机制	94
3.2 欠平衡钻井井底应力场特征分析	97
3.2.1 孔隙压力对不同钻井方式下井底应力场的影响	97
3.2.2 不同原地应力条件下井底应力场分析	99
3.3 欠平衡钻井提速潜力评价方法	101
3.3.1 欠平衡对井底岩石可钻性的影响	101

3.3.2 欠平衡钻井提速潜力评价模型	103
参考文献	107
第4章 欠平衡钻井井壁稳定基础理论	108
4.1 欠平衡钻井岩石力学特性	108
4.1.1 欠平衡钻井岩石力学基础理论	108
4.1.2 欠平衡钻井岩石力学参数实验评价方法	114
4.2 欠平衡钻井井壁岩石水化效应及评价方法	117
4.2.1 井壁岩石水化效应理论	118
4.2.2 井壁岩石水化效应机理研究	119
4.2.3 岩石水化效应实验评价方法	130
4.3 欠平衡钻井井周地应力评价方法	135
4.3.1 地应力大小评价方法	135
4.3.2 欠平衡钻井井眼周围应力场评价方法	142
4.4 欠平衡钻井井壁稳定判断准则及评价方法	149
4.4.1 井壁稳定性判断准则	149
4.4.2 井壁稳定性评价方法	152
参考文献	153
第5章 欠平衡钻井多相流基础理论	155
5.1 液基欠平衡钻井井筒多相流基本理论	155
5.1.1 井筒多相流基本概念	155
5.1.2 井筒气液两相流动流态划分标准	157
5.1.3 井筒气液两相流动特征参数预测	159
5.2 气体欠平衡钻井井筒多相流动理论	162
5.2.1 气固两相流动理论	162
5.2.2 气体钻直井、水平井临界携岩理论	164
5.3 气液固多相流动实验评价方法	170
5.3.1 多功能大型气体钻井多相流动实验台架简介	170
5.3.2 气体钻井水平井筒环空携岩动态及井眼净化流动模拟实验	173
5.3.3 气体钻井垂直环空携岩动态流动模拟实验	175
5.3.4 欠平衡钻井水平井筒环空携岩动态及井眼净化流动模拟实验	178
5.3.5 欠平衡钻井垂直环空携岩动态流动模拟实验	183
5.4 欠平衡钻井压力控制方法	185
5.4.1 液基欠平衡钻井压力控制及施工参数优化方法	185
5.4.2 气体钻井压力控制及施工参数优化方法	199
参考文献	206
第6章 欠平衡钻井的完井方法和技术	208
6.1 欠平衡完井技术概述	208
6.2 欠平衡钻井的完井原则	211

6.2.1 欠平衡钻井完井的第一原则	211
6.2.2 欠平衡钻井完井的第二原则	211
6.2.3 欠平衡钻井完井的第三原则	212
6.3 全过程欠平衡钻完井技术	213
6.3.1 不压井作业的全过程欠平衡钻完井技术	213
6.3.2 连续管钻机的全过程欠平衡钻完井技术	216
6.3.3 全过程欠平衡钻完井技术的应用范例	216
6.4 套管阀的欠平衡钻完井技术	217
6.4.1 套管阀的结构与控制	217
6.4.2 井下套管阀的钻进与起下钻	218
6.4.3 井下套管阀的完井	218
6.4.4 带测压功能的井下套管阀	219
6.4.5 机械式开关的井下套管阀	220
6.5 冻胶阀的欠平衡钻完井技术	220
6.5.1 冻胶阀的组成及性能	220
6.5.2 冻胶阀全过程欠平衡钻井工艺技术	221
6.6 欠平衡钻井的其他完井技术	223
6.6.1 裸眼完井	223
6.6.2 筛管完井	224
6.6.3 实体带眼管完井技术	225
6.6.4 非透式可膨胀筛管完井技术	226
6.6.5 特殊完井液完井	226
6.6.6 低密度水泥浆固井与负压射孔的套管射孔完井	227
6.6.7 欠平衡的钻杆完井	228
6.6.8 控压固井	229
参考文献	229
第7章 欠平衡钻井的装备、工具与仪器	231
7.1 井口装备与地面装置	231
7.1.1 注入设备	231
7.1.2 旋转防喷器	236
7.1.3 节流管汇与回压控制装置	243
7.1.4 不压井起下钻装置	245
7.1.5 气液固分离装置	246
7.1.6 点火装置	253
7.1.7 燃爆监测装置	254
7.2 井下工具与测量仪器	258
7.2.1 旋塞阀	258
7.2.2 止回阀	260

7.2.3 旁通阀	265
7.2.4 井下测量工具	266
7.2.5 欠平衡测井	269
7.2.6 空气锤与冲击钻头	270
参考文献	272
第8章 复杂油气藏欠平衡钻井实践	273
8.1 储层液基欠平衡钻井实践	273
8.1.1 大港千米桥缝洞型储层实践	273
8.1.2 四川邛西致密砂岩气实践	274
8.1.3 哈萨克斯坦肯吉亚高压油藏实践	276
8.2 非储层井段欠平衡钻井提速实践	277
8.2.1 伊朗空气泡沫钻井提速实践	277
8.2.2 玉门隆9井实践	280
8.2.3 七里北101井实践	284
8.2.4 龙岗气体钻井提速技术实践	289
8.2.5 松辽盆地深层气体钻井提速技术实践	291
8.2.6 大北6井、大北204井实践	292
8.2.7 元坝161井、元陆9井实践	296
8.3 产层气体钻井的应用实践	297
8.3.1 长庆油田陕242井天然气钻井实践	297
8.3.2 四川地区白浅111H井水平井钻井实践	301
8.3.3 塔里木地区氮气钻井实践——迪西1井	302
8.3.4 川西地区大邑1井	304
参考文献	306
第9章 控压钻井	307
9.1 控压钻井的起源、定义与原理	307
9.1.1 钻井的操作窗口与安全窗口	307
9.1.2 控压钻井的起源	308
9.1.3 控压钻井的原理	309
9.1.4 控压钻井的种类	310
9.2 控压钻井的工具与装备	312
9.2.1 保证井控安全的工具与装备	312
9.2.2 缩小钻井操作窗口的技术与装备	313
9.2.3 “自适应追踪安全窗口走钢丝”的技术与装备	316
9.2.4 控压钻井相关的其他工具	322
9.3 欠平衡控压钻井——由储层欠平衡钻井产生的控压钻井	324
9.3.1 储层欠平衡钻井向控压钻井的过渡	324
9.3.2 储层欠平衡钻井的窄窗口概念	325

9.3.3 欠平衡控压钻井	326
9.4 精细控压钻井	332
9.5 储层段精细控压钻井实践	333
9.5.1 塔中地区应用实践	333
9.5.2 冀东油田南堡 23—平 2009 井实践	336
9.5.3 渤海湾盆地牛东 102 井实践	337
参考文献	339
第 10 章 复杂油气藏欠平衡钻井技术展望	340
参考文献	351

第 1 章 绪 论

1.1 欠平衡钻井技术发展概述

1.1.1 过平衡钻井技术的起源与发展

石油工业的钻井技术起源于美国,它一方面是由于人类开采石油的需要,另一方面得益于第一次工业革命的蒸汽机发明。1859 年,美国 Drake,首次采用蒸汽机驱动顿钻,在 Western Hemisphere 钻成井深为 21m 的油井。到 1900 年前后,在美国的很多个油田,顿钻钻了很多口油井,那时顿钻被称为“标准钻井方法”^[1]。在早期的顿钻过程中,破岩与清岩是分别进行的:缆绳带动井下钻头上下运动、冲击破碎地层,破碎的岩屑堆积在钻头内,一段时间后起出钻头捞出岩屑;在早期的顿钻过程中,井筒内充满静止、不循环的清水,井口敞开(uncapped)^[2]。此时井内液柱压力与地层孔隙压力处于自然状态:如果地层孔隙压力低于井内液柱压力,油气就不会喷出;如果地层孔隙压力高于井内液柱压力,油气就会喷出。但当时绝大部分油层的孔隙压力梯度是高于或略高于清水密度的,而且人们希望看到油气喷出,称这种喷出为“Notable Gusher”,即“不喷就没有发现”。在顿钻时期,井内液柱压力与地层孔隙压力的关系是“欠平衡状态”。因此,“钻开油气层和油气流出”是同时的。

到 1900 年后,随着油井深度的增加,美国开始采用旋转钻代替顿钻。旋转钻利用旋转的空心钻杆驱动刮刀钻头破碎地层,利用泵通过空心钻杆和环形空间循环清水,循环的清水将岩屑带出,破岩与清岩同时进行^[3]。1909 年,Howard 发明并成功应用牙轮钻头^[4]。1914 年,Hamill Brothers 首次在钻井液池中加入黏土,并用牛在钻井液池中踩踏搅拌,产生钻井液钻井,不但携岩效果更好,而且井壁稳定问题有了明显好转^[5]。但此时井内液柱压力与地层孔隙压力的平衡关系仍处于自然状态,人们仍然希望通过油气喷出发现油气并获得产量。

在 1900~1920 年,很多口井由于井喷过于猛烈而难以控制,喷出的油柱造成了严重的环境问题和油气浪费,许多井由于油气喷出时着火爆炸而造成严重事故,人们开始考虑控制井喷^[6]。1914 年,Knapp 发明了下套管、注水泥的完井技术^[7]。1919 年,James 发明了防喷器,后来又由 Herber Alen 发展为高压防喷器,由 Cameron 完善、制造,并于 1924 年实现市场化^[8]。1929 年,George 发明了加重钻井液,并很快被接受为普遍性技术措施^[9]。

究竟何时产生了液柱压力与孔隙压力平衡的概念,尚需仔细考证,目前可见较早的证据是 Hertel 在 1930 年提出了“液柱压力应该高于储层压力”的概念^[10]。结合加重钻井液和井口防喷器的应用,过平衡钻井技术(Overbalanced Drilling, OBD)和井控技术(Well Control)开始得到普遍接受和推广^[11]。大量的井控压力平衡的理论文章在 20 世纪 50~70 年代出现,井控装备和工具也趋于完善。再加上由 Baker 等发明了一系列套管、封隔器、

注水泥和射孔的完井技术,过平衡钻井技术趋于完善,即在钻井过程中保持钻井液液柱压力始终高于储层压力,防止油气进入井内,确保井控安全^[12]。钻穿储层后,如果是裸眼完井则通过降压方法使油气喷出;如果是套管完井则通过射孔再次沟通产层。显然,过平衡钻完井技术中“钻开油气层与油气流出”对应着先后两个独立的过程。

在过平衡钻井过程中,钻井液液柱压力高于储层压力。因此,在这个正压差的作用下钻井液会被压入储层,进入储层的钻井液会对储层造成伤害。正压差越大、作用时间越长,地层伤害越严重。最早出现储层伤害影响油井产能的叙述应该是 1925 年,那时称过平衡钻井造成的伤害为“产层泥糊”^[13];据说在 20 世纪 30 年代就出现了“Formation Damage”术语^[14],说明人们很早就认识到储层伤害的存在。到 50 年代,随着钻井深度的增加,储层伤害的严重性越发突出,开始出现越来越多的储层伤害方面的学术、技术研究论文。到 70 年代,储层保护的概念和技术普遍受到重视,国际石油工程师协会(Society of Petroleum Engineering, SPE)于 1974 年召开了第一届储层保护国际学术会议,自此每两年召开一次专门的储层保护国际学术会议。在 20 世纪 70 年代,过平衡钻井配套的储层保护技术迅速形成并得到推广应用,这也是当时石油技术的最重要成就之一。过平衡钻井配套的储层保护技术的出现,有力地保障了过平衡钻井技术的持续广泛应用。可以说,自 1900 年旋转钻井产生至 20 世纪末的近百年间,过平衡钻井方法是唯一被石油钻井界接受并采用的钻井方法。

储层保护技术是一项庞大的系统工程,是多工艺多学科的组合技术,其中与过平衡钻井直接相关的是“钻开储层过程中的保护技术”。过平衡钻井钻开储层的保护技术有两大体系:一是无伤害的工作液,即不怕在正压差下工作液侵入,因为侵入的工作液无害;二是防止工作液侵入,即暂时堵塞技术。早在 20 世纪 50 年代人们就发现了侵入的钻井液颗粒会堵塞储层喉道、会迅速降低储层的渗透率,实验室评价发现:固相颗粒最深的深入深度可达 12in^①^[15]。1973 年, Abrams 首次提出^[16]:利用正压差下侵入液体可以携带颗粒并堵塞孔道的特点,在钻井液中加入浓度为 5%、直径为喉道直径 1/3 的颗粒,在正压差作用下会在井壁内表面迅速形成厚度小于 1in 的低渗透堵塞带,该堵塞带能防止钻井液的进一步侵入、有效地保护储层。该观点和技术被美国钻井界迅速接受并广泛使用。在 20 世纪 80 年代,罗平亚院士将上述架桥堵塞技术加以提高和完善,形成了“可溶性架桥粒子、填充粒子、润湿反转的变形封堵粒子,三种粒子合理级配并配合合理工艺参数”的屏蔽暂堵技术,可以在井壁内表面更加迅速地形成更薄的、渗透率为零的屏蔽带,更好地保护储层^[17]。屏蔽暂堵技术自 20 世纪 90 年代起就成为我国石油钻井界保护储层的主导技术。

1.1.2 欠平衡钻井技术的起源与发展

最早在文献中提出“平衡钻井”“过平衡钻井”“欠平衡钻井”学术术语的应该是 Bingham。他在研究钻井液液柱压力对钻速的影响时发现:过平衡钻井钻速低,欠平衡钻井钻速高;综合考虑提高钻速和井控安全,建议平衡钻井是最佳选择^[18]。文献上最早

① 1in=2.54cm, 英寸。

提到压力控制中欠平衡概念的应该是 Grace^[19]。实际上,直至 20 世纪 90 年代初,欠平衡钻井只是作为一个描述钻井中井下压力的某种状态的学术术语而存在,并不是一项具体技术。

在 20 世纪 50 年代的美国,人们出于提高钻速、克服井漏等方面的考虑,发明了空气钻井、泡沫钻井、充气钻井等利用空气降低钻井液密度的技术,被称为气体钻井、含气流体钻井或气基流体钻井。由此国际钻井承包商协会(International Association of Drilling Contractors, IADC)的钻井液体系也形成了水基、油基、气基三大类。由于所用气体为空气,存在钻遇含油气地层时井下燃爆的危险,故当时的气体或气基流体钻井在应用对象上限于不含油气的地层、在应用目的上限于非储层的工程。在 20 世纪 90 年代以前,气体或气基流体钻井在美国所占的比例约为 12%^[20],在苏联为 5%^[21]。尽管当时也有人称此类气体或气基流体钻井为“欠平衡钻井”或“负压钻井”,但实际上这并非真正意义上的欠平衡钻井,因为非储层地层没有可动流体,尽管液柱压力低于地层孔隙压力,但并未构成欠平衡的流动状态。

进入 20 世纪 80 年代后,在美国随着复杂油气资源勘探开发难度的不断增加,使得过平衡钻井、尤其是过平衡钻井配套的储层保护技术越来越难以满足保护复杂油气储层的技术需要,逐渐产生了以提高勘探中的发现率、提高开发中的单井产能为目的以及在储层钻井中降低钻井液密度的技术需求。真正工业意义用于储层的欠平衡钻井技术(Underbalanced Drilling, UBD)起源于 20 世纪 90 年代初,主要有三个不同需求类型的发源地。

第一,美国的 Austin Chalk 油田^[22],这是典型的高压高产缝洞型储层,井深 4000~5000m,储层压力系数在 1.6 以上。从 20 世纪 80 年代开始,先采用过平衡钻直井开发,发现直井钻遇高角度裂缝的概率太低;进而采用钻水平井技术,但由于过平衡钻水平井钻遇缝洞带面临着严重的井漏问题,井漏不但带来严重的储层伤害,同时也限制了水平井段在储层内的延伸。到 20 世纪 80 年代末、90 年代初出现了液柱压力低于储层压力的水基钻井液欠平衡钻开储层(多为水平井)的技术,由此消除了过平衡钻井钻开缝洞型储层时的严重井漏问题,进入储层的水平井井段长度大大增加,完井的单井产能大大增加,这种技术组合与泥浆帽钻井一起迅速成为 Austin Chalk 油田的标准开发技术,当时称为“Flow Drilling”或“Unadrbalanced Flow Drilling”。可见,美国 Austin Chalk 油田的难题孕育了应用于高压油气层的液体欠平衡钻井技术的产生。

第二,加拿大的 Weyburn 油田^[23],这是开发中后期储层压力严重衰竭的典型老油田,井深 2000m 左右,孔隙型砂岩,虽然油层压力系数已经降低到 0.6~0.7,但采出程度并不高。尝试采用钻水平井、分枝井等 MRC(Maximum Reservoir Contact)井技术扩大泄流面积以提高采收率,但效果很差。分析原因发现:储层压力太低,采用常规水基钻井液钻井造成过大正压差,使得整个井筒钻井液侵入太深、形成了整个井筒的严重伤害,因固相堵塞带太深太实而无法通过降压反排或酸洗解堵予以消除。如果采用水平段套管固井,然后深穿射孔射穿伤害带,则产气通道仅为射开孔眼,泄流面积仍然太小。可见解决问题的根本出路在于“将钻井液密度降低至 $0.6\sim 0.7\text{g/cm}^3$ ”,决定采用充气钻井液降低密度。由于是储层钻井,故所充气体不能是空气。因此,采用了液氮蒸发气,当时称为闭环钻井(Closed

Loop Drilling)。示范井效果极佳,水基钻井液充氮气的欠平衡钻水平井技术立即成为该油田的标准开发技术,直到现场膜分离制氮技术出现后,替代了液氮蒸发气技术。可见,加拿大 Weyburn 油田的难题孕育了应用于低压油气层的充气欠平衡钻井技术的产生。

第三,在美国的致密气、煤层气的开发中^[24],由于该类储层具有较大比表面积和超低初始含水饱和度,故该类储层对水基钻井液有强烈的吸水能力,再加上储层的致密超低渗特点,对由吸水造成的水相圈闭伤害非常敏感,水基钻井液,甚至无伤害水基钻井液都会对储层造成致命的伤害。因此,人们尝试使用气体钻水平井、多分支井钻开储层,以减轻或消除水基钻井液对储层的伤害。同时针对致密气和煤层气的低产、低效、低丰度的特点,大量采用气体钻井提高钻速、降低成本、缩短周期。虽然气体钻井技术最终并未成为煤层气、致密气勘探开发的主导技术(煤层气的主导技术是排水采气技术体系,致密气的主导技术是压裂改造技术体系),但这毕竟催生了气体钻井由非储层走向储层的转变;氮气替代空气的膜分离制氮技术,催生了气体钻井由直井向水平井和分枝井的转变;电磁随钻测量和气动井下动力钻具,使 20 世纪 50 年代在非储层钻直井、以提速增效治漏为目的的空气钻井发展为以勘探开发为目的、在储层钻水平井的气体钻井技术。

自此,欠平衡钻井不再仅仅是一个学术名词,而是发展成了实实在在的技术,并开始北美受到高度重视。1993 年起北美开始了每两年一届的国际欠平衡钻井技术研讨会。国际钻井承包商组织 IADC 于 1997 年正式成立了 IADC 欠平衡钻井委员会(IADC Underbalanced Operation Committee)。IADC UBO 委员会首次公布了欠平衡钻井技术的定义,即欠平衡钻井是指在钻进过程中使钻井液作用在井底的压力低于储层压力(如果钻井液密度不够低,则向钻井液中混气以降低密度),使储层流体在钻进过程中有控制地流出井口。可见,IADC UBO 委员会的这个定义实际上是储层欠平衡钻井(Reservoir Underbalanced Drilling, RUBD)的定义。欠平衡钻井技术开始成为在全世界流行的新技术而迅速推广,如图 1.1 所示^[25]。之后,欠平衡钻井技术继续发展,随着装备、工具、技术的完善,欠平衡钻井的技术效益明显增加,如图 1.2 所示^[25]。

美国于 2004 年由储层欠平衡钻井派生出了以钻进安全为目的的控压钻井技术(Managed Pressure Drilling, MPD)。

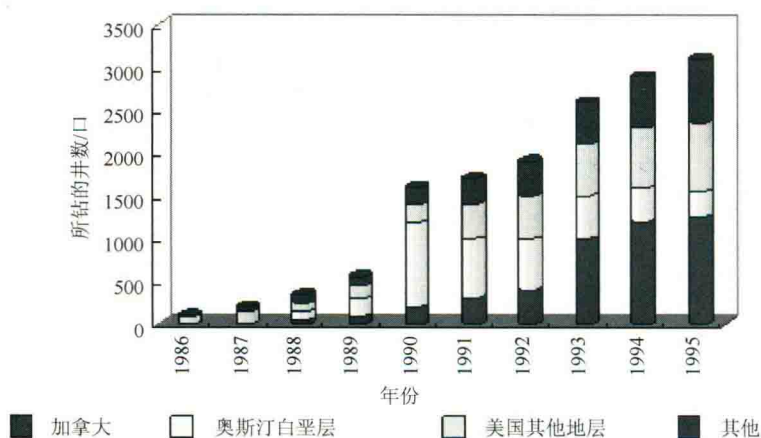


图 1.1 欠平衡钻井施工井数的增加图

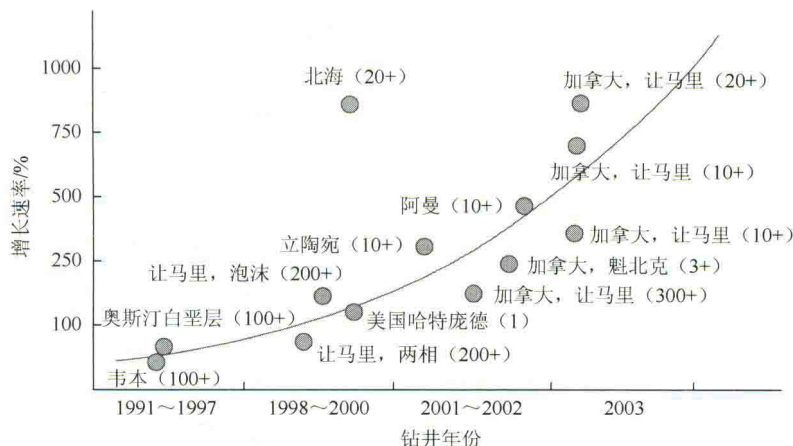


图 1.2 欠平衡钻井技术效益的改善图

至此,在这个技术领域有了三个明显的发展阶段和三项具体技术,这三项技术之间既有区别又有联系。其区别体现在:每项技术有不同的驱动力、不同的应用目的、不同的应用对象;其联系体现在:共同的装备、工具、理论、概念。美国 Weatherford 公司对这三个阶段、三项技术进行了如下的概括^[25]。

(1) 20 世纪 50 年代的以空气为气相流体的气基流体钻井,以提速增效防漏治漏为目的的并针对非储层的空气钻井、雾化钻井、泡沫钻井和充气液钻井,称为提速增效钻井(PD)。

(2) 20 世纪 90 年代的储层欠平衡钻井,既包括了用于高压油气层的液体欠平衡钻井,也包括用于低压油气层的充气欠平衡钻井。其应用对象是储层,应用目的是提高勘探效益或提高开发产能,称为储层欠平衡钻井。

(3) 2004 年出现的以钻进安全为目的的控压钻井,一般情况下,其应用目标为高压油气层,钻井液为纯液体。

如何将上述三项技术统一起来,目前国际上尚无一致认识,美国 Weatherford 公司将这三个部分总结成为一个“三分天下”的轮子,如图 1.3 所示,整个大轮子包括的称为“欠平衡伞”(Underbalanced Umbrella)^[25]。Don M. Hannegan 称其为“Family of Controlled Pressure Drilling”,理由是它们都共同拥有一套“密闭的可加压泥浆循环系统”(a closed and pressurized mud return system)。但是,显然气体钻井的井口旋转头只用于“密封”而不用用于“加压”,因此包括在“密闭的可加压”中不太合适,故“Family of Controlled Pressure Drilling”的归纳并不准确,究竟整个技术体系叫什么合适,目前尚无统一定论,或许称为“欠平衡钻井系列技术”更为妥当。

1.1.3 我国欠平衡钻井技术的发展

1. 我国欠平衡钻井技术的早期尝试

我国应该是世界上最早尝试欠平衡钻井技术的国家之一。早在 20 世纪 60 年代中期,在四川盆地人们就认识到了过平衡正压差对裂缝型气藏的严重伤害,试用了清水边喷边钻