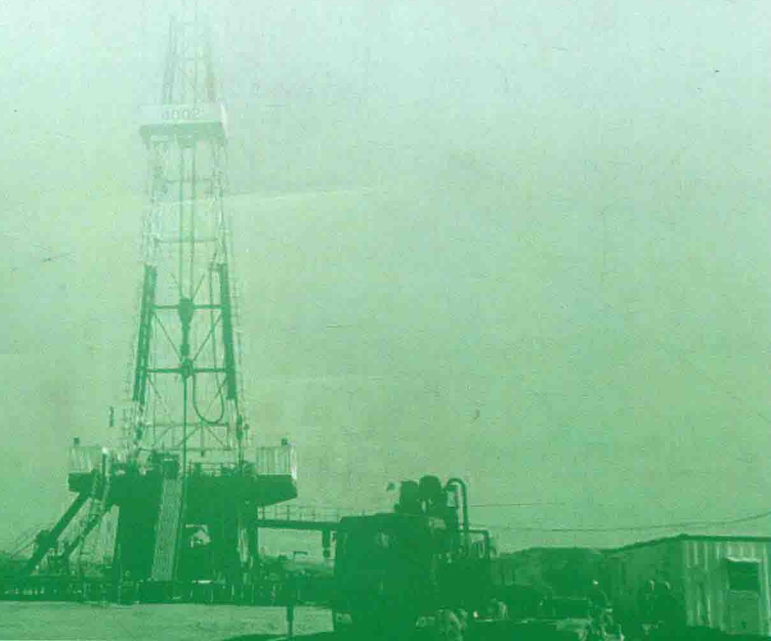


煤层气 钻井技术与创新实践

MEICENGQI ZUANJING JISHU
YU CHUANGXIN SHIJIAN

■ 郝明慧 著

中国石油大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS



煤层气钻井技术与创新实践

郝明慧 著

图书在版编目(CIP)数据

煤层气钻井技术与创新实践 / 郝明慧著. —东营:
中国石油大学出版社, 2016. 3
ISBN 978-7-5636-5149-8

I. ①煤… II. ①郝… III. ①煤层—地下气化煤气—
钻井工程 IV. ①P618.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 042896 号

书 名: 煤层气钻井技术与创新实践

作 者: 郝明慧

责任编辑: 韩 斌(电话 0532—86983559)

封面设计: 赵志勇

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: hanbin2007@126.com

印 刷 者: 沂南县汶凤印刷有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86983560)

开 本: 185 mm×260 mm 印张: 18.25 字数: 441 千字

版 次: 2016 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

印 数: 1—500 册

定 价: 50.00 元

煤层气,俗称“瓦斯”,其主要成分为高纯度甲烷,在煤炭开采生产过程中,作为一种危险的有害气体,被排放到大气环境中。它既具有易燃、易爆性,严重危及广大煤矿职工的生命财产安全,又具有很强的温室效应,影响气候、污染环境。同时,煤层气作为近二十年在世界上崛起的一种新型能源,它具有独特的优势,是优化一次能源结构的重要组成部分,是优质的能源和基础化工原料,其资源总量与常规天然气相当。

煤层气资源的开发利用,将会为社会创造巨额财富。我国具有丰富的煤层气资源,其开发潜力巨大。按照目前我国石油天然气资源发现率(10%)计算,31.46 万亿立方米的煤层气资源可获得 3 万亿立方米的天然气。中国海洋石油总公司作为一家勇挑重任的能源央企,结合总公司领导“二次跨越”产业发展的总体思路,我们将开发煤层气、致密气等非常规能源作为“加快发展”的产业。

开发煤层气、形成煤层气产业将对国民经济发展起到巨大的推动作用。开发煤层气是一项庞大的系统工程,建设一个煤层气生产基地将带动道路、管道、钢铁、水泥、化工、电力、生活服务等相关产业的发展,增加就业机会,促进当地经济的发展。更为重要的是,发展煤层气产业对于保护资源、实现煤炭产业深加工及可持续发展、减少温室气体排放、改善大气环境质量、调整产业结构、加快煤化工产业规模化发展、培育新的经济增长点都具有十分重要的现实意义和深远的战略意义。

本书系统介绍了煤层气钻井工艺技术,对煤层气地层的岩石力学性质评价及其地层压力设计进行了系统阐述,并从工艺及参数优化、钻头选型、高效钻井液配制、装备与工具优化、施工组织管理等方面入手,详细论述了煤层气钻井工

艺技术的基本特点及基本原理。同时利用钻井工艺、岩石力学、钻井液化学等理论,结合现场试验对煤层气施工工艺参数优选和钻具组合优选进行了介绍。

本书可作为煤层气钻完井技术人员、现场施工人员进行煤层气钻完井工程设计及现场施工的参考书,也可作为石油院校相关专业的教学参考用书。

郝明慧

2015 年 11 月

我国天然气需求量增速位于世界前列,预计到2020年,中国需求量将实现年攀升10%,达到3 140亿立方米。作为清洁能源,天然气将在中国的能源转型中扮演重要角色,而中国面临的节能减排需求将拉动亚洲乃至世界天然气市场需求量增长,天然气的黄金时代即将来临。煤层气、致密气等非常规气藏正在成为当前储量增长的主体,而非常规气藏的勘探开发也将成为我国能源转型和可持续发展的重要战略方向。

煤层气作为非常规气藏的重要组成部分,存在钻井时效低、漏失处理慢、井眼轨迹控制技术欠缺、钻井施工经验不足等难点。到目前为止,我国非常规气藏的勘探开发工作还处于研究和探索试验阶段,没有形成系统完善的钻井技术体系,加之产业政策失衡和经济性不佳,对非常规气藏的开发起到了制约作用。对于煤层气而言,煤岩具有特殊的物理力学性质,钻井方式、工艺技术、钻井液、完井方式均与常规油气钻采明显不同,传统经验及钻采方式无法满足复杂结构井钻进煤层的需要。在探索新技术、新工艺的过程中,井壁失稳、煤层损害、完井效果差等难题一直困扰着煤层气的高效勘探开发。煤层气的开采急需进行深入细致的研究与探索,尽快突破地质认识与工艺技术瓶颈,早日实现规模、高效开发。作者基于以上问题,围绕煤层气的钻井工艺技术及已经取得实际成果的现场工艺实践,撰写了本书。书中对煤层气地层的岩石力学性质评价、地层压力设计、钻头选型、高效钻井液配制、工艺及参数优化、施工组织管理等方面进行了系统介绍,对钻井工程技术人员具有很好的指导作用和现实意义。

本书编写过程中,得到了中国海洋石油总公司中联公司张春阳副总经理、中海油能源发展股份有限公司杨立平副总经理、中国石油大学(北京)杨进教授的

大力帮助与支持。本书的出版也得益于中国石油大学出版社工作人员的艰辛劳动,在此一并致以诚挚的谢意。在编写过程中,作者参阅了大量国内外文献、著作和业界相关标准,书中的行业动态及部分野外露头图片源于中国非常规油气网站。书中部分章节得到中海油能源发展股份有限公司工程技术公司及山西清洁能源公司领导和工程师们的大力支持,谨向给予大力支持的单位和个人致以最衷心的感谢。

在本书的编写过程中,终因知识水平所限,疏漏与错误之处在所难免,恳切欢迎广大读者批评指正。

作 者

2015 年 11 月

第 1 章 绪论	1
第 2 章 煤层气地层岩石力学性质评价	3
2.1 三个地层压力剖面研究	3
2.1.1 地层孔隙压力剖面设计	3
2.1.2 坍塌压力和破裂压力剖面设计	5
2.2 室内岩石力学参数测试分析	17
2.2.1 硬度试验	17
2.2.2 三轴应力试验	24
2.3 水平井安全钻井液密度窗口的确定	32
2.4 钻头与地层适应性综合分析	37
2.5 地层抗钻力学参数分布规律研究	42
2.5.1 岩心试验	42
2.5.2 煤层气地层抗钻特性参数预测模型的建立	43
第 3 章 钻井工艺及钻井参数优化研究	47
3.1 目标区块已钻井的钻井地质资料统计分析	47
3.1.1 TS90-02D1 井地质资料统计	47
3.1.2 TS90-02D2 井地质资料统计	49
3.1.3 TS80-04 井地质资料统计	50
3.1.4 TS29-1D 井地质资料统计	51
3.1.5 TS29-2D 井地质资料统计	53
3.1.6 TS29-3D 井地质资料统计	54
3.1.7 TS90-02 井地质资料统计	56
3.2 易斜地层的钻具组合分析	57
3.2.1 SN015 水平井钻具分析	58
3.2.2 TS29-XD 井钻具组合分析	63

3.2.3 TS90-02 井钻具组合分析	68
3.3 防斜快打技术及措施研究	69
3.3.1 防斜快打工艺技术	70
3.3.2 推荐防斜技术及措施	73
3.3.3 认识与建议	74
3.4 煤层气井钻井工艺优化设计	75
3.4.1 煤层气井钻井的特殊性	75
3.4.2 煤层气井钻井工艺优化设计	76
3.5 钻井参数优化研究	79
3.5.1 钻进参数对钻速的影响	80
3.5.2 参数配合和优化	84
3.6 钻井复杂情况统计分析	87
3.7 钻井时效分析	89
3.7.1 正确划分钻井时效	89
3.7.2 钻井时效分析	90
第4章 钻头使用情况分析 & 类型优选	100
4.1 前期调研	100
4.1.1 SN015-5H 井	100
4.1.2 CLU-02H 井	114
4.2 钻头推荐	118
4.2.1 12.25 in 井段总结及推荐	118
4.2.2 9.5 in 和 8.5 in 井段总结及推荐	118
4.2.3 推荐钻头的特点和水力分析	119
4.3 目标区块钻头使用效果	120
4.3.1 目标区块井 CLY-67 井简介	120
4.3.2 目标区块井 CLY-67 井地质情况	120
4.3.3 8.5 in STS615HD 钻头在目标区块 CLY-67 井使用情况	120
4.3.4 结论	126
第5章 环保高效钻井液研究	127
5.1 钻井液提高机械钻速的原理	127
5.1.1 钻井液性能对 ROP 的影响	127
5.1.2 钻井液提速原理	131
5.2 沁水盆地已钻井分析与难钻地层性能测试	132
5.2.1 沁水盆地地层岩性剖面	132
5.2.2 已钻井情况分析	132
5.2.3 难钻地层理化性能测试	145
5.2.4 小结	149

5.3 钻井液絮凝能力研究	149
5.3.1 试验方法	150
5.3.2 试验结果与讨论	151
5.3.3 小结	174
5.4 钻井液渗透性研究	174
5.4.1 岩心空气渗透率测定	175
5.4.2 岩心吸水速度测定	176
5.4.3 小结	181
5.5 钻井液防泥包性研究	181
5.5.1 防泥包剂筛选	182
5.5.2 JFC 加量对黏附量的影响	185
5.5.3 小结	185
5.6 钻井液抑制性研究	185
5.6.1 防膨性试验方法	185
5.6.2 试验结果	186
5.6.3 结果分析	200
5.7 提速钻井液体系性能评价	200
5.7.1 渗透剂与絮凝剂的配伍性研究	200
5.7.2 提速钻井液体系	201
5.7.3 小结	208
5.8 钻井液防堵漏技术研究	208
5.8.1 井漏	208
5.8.2 堵漏与防漏	209
5.8.3 渗透性漏失及堵漏	213
5.8.4 裂缝型漏失及堵漏	216
5.8.5 堵漏材料优选试验	222
5.8.6 小结	228
5.9 结论与认识	228
第 6 章 煤层气钻井装备及工具优化	230
6.1 地面装备调研及优化	230
6.1.1 煤层气钻井技术发展趋势及要求	230
6.1.2 国内外煤层气撬装钻机调研	231
6.1.3 煤层气钻机优化	242
6.2 井下工具设备调研及优化	244
第 7 章 煤层气钻井施工组织管理优化	251
7.1 现场钻井施工组织管理程序优化	251
7.1.1 作业安全管理	251

7.1.2	QHSE 管理	255
7.1.3	管理组织机构与职责	259
7.2	钻井材料组织与准备	262
7.3	人员激励措施研究	263
7.3.1	质量责任制	263
7.3.2	成本管理制度	263
7.3.3	岗位练兵责任制	264
7.3.4	考核奖惩制度	265
7.3.5	团队建设制度	267
7.4	现场应对紧急情况预案及程序	267
7.4.1	应急预案的目的与原则	267
7.4.2	应急组织机构及职责	267
7.4.3	应急程序	269
7.4.4	各类事故或险情应急计划	269
7.4.5	应急物资配备	275
参考文献		278

绪 论

2011年,我国油气的对外依存度高达56.3%,如何保障能源安全、拓展新的能源版图,牵动着人们的神经。作为一家勇挑重任的能源央企,中海油在这场能源安全“保卫战”中,结合“二次跨越”产业发展的总体思路,将开发煤层气、致密气等非常规能源作为“加快发展”的产业。本项目是中海油进军陆地非常规气藏的重要标志,但由于海上钻井技术与陆地钻井技术的差异性,无法照搬海上模式解决非常规气藏开发的技术难题。

为实现非常规气藏开发的提速增效,达到“能源、安全、环境”三重效益兼顾的效果,中海油组织国内知名科研院所及相关单位,系统开展了非常规气藏钻井提速相关领域关键技术的研究,从理论研究和工程技术上开展科技攻关,着重解决以下钻井技术难题:(1) 钻机性能参数选择困难;(2) 地层软硬交错,坍塌缩径严重,钻进时效低,钻头磨损严重;(3) 上部地层裂缝发育,砂泥岩互层,煤层分布广,地层漏失严重;(4) 地层软硬交错,倾角变化大,井眼轨迹控制难;(5) 非常规气藏钻井装备不完善,施工经验缺乏,工作效率低下。

历经多年技术攻关,我公司已取得了较丰硕的成果,突破了煤层气钻井的五大关键技术,简述如下:

(1) 钻机设备配置优化技术。该技术综合考虑了井深、井场条件、钻机提升能力、泵排量、作业费用等因素,建立了钻机设备配置优选理论模型,优化推荐了煤层气直井选用 ZJ20 钻机、U 形井选用 ZJ30 钻机、致密气区块选用 ZJ40 钻机。利用钻机设备配置优化技术,实现了对钻机作业能力和经济效益的综合评价,使煤层气单井综合成本节约 20 万元,致密气单井综合成本节约 60 万元,大幅降低了钻井作业费用。

(2) 高效钻头设计及钻井参数优化技术。该技术根据地层岩性分析和钻井工艺特点,优化设计了适合不同井况的高效 PDC 钻头,实现了 1 口井只用 1 只钻头、1 只钻头能够钻完 3 口井;通过对不同层位钻井参数的优化,有效延长了钻头寿命,提高机械钻速达 40% 以上。

(3) 钻井防漏堵漏技术。该技术采用室内试验和理论研究相结合的方式,研制了适合不同区块、不同地层的堵漏材料和配方;针对裂缝型和孔隙型漏失地层,研制了 7 套堵漏配方,地层承压能力提高 8 MPa 以上,能够快速控制不同程度的裂缝型、渗透型漏失,封堵成功率 100%。

(4) 复杂结构井眼轨迹精确控制技术。该技术综合考虑了地层特性、井型、钻具组合等因素,形成了适合 $\times \times$ 镇煤层气开发的连通井配套技术,克服了地质资料不精细、地层倾角变化大造成的井眼轨迹难以精确控制的难题;针对水平井,优选 E-MWD 和马达钻具组合;

针对“U形”井等复杂连通井,优选近钻头电磁测距法;根据不同煤层的地质特性,研发了无固相钻井液。通过配套控制技术,使煤层气水平段长度超过 1 000 m,储层钻遇率超过 90%,两井连通成功率达到 100%,高效实现了井眼轨迹的精确控制。

(5) 钻井提速增效优化技术。该技术通过钻井设备优选,学习曲线分析,优化现场钻井施工组织管理程序,形成了适合××镇煤层气、临兴致密气的钻井提速增效配套技术,有效提高了物资和设备的利用效率,最大限度地减小了非生产时间,提高了作业时效,使煤层气钻井周期缩短了 18.36 d,致密气钻井周期缩短 14.79 d,同比钻井费用平均降低 30%以上。

该研究成果已在山西煤层气藏成功应用了 100 余口井,直接经济效益 5.78 亿元,间接经济效益超过 20 亿元,实现了非常规气藏的高效勘探开发,应用前景十分广阔!该成果获得发明专利 12 件,实用新型专利 8 件,计算机软件著作权 4 项,发表论文 31 篇。

第2章

煤层气地层岩石力学性质评价

2.1 三个地层压力剖面研究

2.1.1 地层孔隙压力剖面设计

2.1.1.1 地层孔隙压力计算

地层孔隙压力是指地层孔隙中流体所具有的压力。在某些特殊地质环境中,经常遇到地层孔隙压力高于或低于静液压力的情况,称为异常地层孔隙压力。

地层孔隙压力在油气勘探、钻井工程、油气开发及油藏工程中占有极其重要的基础地位。就钻井工程而言,地层孔隙压力是近平衡压力钻井的依据,对于设计套管程序、合理确定及选用钻井液密度、减少油层污染和解放油气层等方面都具有很高的经济价值和科学意义。

地层孔隙压力评价的方法很多,其中利用测井资料评价是被广泛应用的方法之一。在岩性和地层水变化不大的地层剖面中,正常压实地层随着地层深度的增加,上覆岩层载荷增加,泥页岩的压实程度增大,导致地层孔隙度减小,岩石密度增大。泥页岩的压实程度直接反映地层孔隙压力的变化。在本研究中,选用资料来源最广、经济方便的声波时差法对地层孔隙压力进行预测研究。

1. 声波时差法的原理

声波测井测量的是弹性波在地层中的传播时间。声波时差主要反映岩性、压实程度和孔隙度。除了含气层的声波时差显示高值或出现周波跳跃外,它受井径、温度及地层水矿化度变化的影响比其他测井方法小得多,所以用它评价和计算地层孔隙压力比较有效。

对岩性已知,地层水性质变化不大的地质剖面,声波时差与孔隙度之间成正比关系。在正常压实的地层中可导出相似公式:

$$\Delta t = \Delta t_0 e^{cH}$$

将上式变换可得:

$$\log \Delta t = AH + B$$

式中, Δt ——深度为 H 处的地层声波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$;

Δt_0 ——深度为 0 处的地层声波时差, $\mu\text{s}/\text{ft}$;

H ——地层深度, m ;

A 、 B 、 c 为系数,其中: $A < 0$, $c < 0$ 。

该式即为压实地层声波时差正常趋势线公式,从式中可以看出: $\log \Delta t$ 与 H 成线性关系,斜率是 $A(A < 0)$,在半对数曲线上,正常压实地层 Δt 的数值随深度增加呈线性减少。如出现异常高压, Δt 散点会明显偏离正常趋势线。

2. 声波时差正常趋势线的建立

声波时差的读值首先要选取较纯的泥页岩层段,既不要选取缩径段的泥页岩声波时差值,也不要选取井径过大处的泥页岩声波时差值。因为在缩径井段声波时差值偏高,井径过大处声波时差值失真。

为了分析煤层气地层声波时差变化的规律,分别绘制声波时差样本散点图,并对其进行对比分析。针对每口井抛去异常点,利用正常压实地层泥页岩声波时差点进行回归,把各井回归得到的趋势线方程进行平均,得到一个正常趋势线。

3. 地层孔隙压力计算

经过处理得到地层声波时差资料,采用 Eaton 法进行地层压力计算。

Eaton 法地层压力计算模型如下:

$$G_p = G_{op} - (G_{op} - \rho_w)(\Delta t_n / \Delta t)^n$$

式中, G_p ——井深 H 处的地层孔隙压力梯度的当量密度, g/cm^3 ;

G_{op} ——井深 H 处的上覆岩层压力梯度的当量密度, g/cm^3 ;

ρ_w ——井深 H 处的地层水密度, g/cm^3 ;

Δt_n ——井深 H 处正常压实时的声波时差值, $\mu\text{s}/\text{ft}$;

Δt ——井深 H 处的实测声波时差值, $\mu\text{s}/\text{ft}$;

n ——Eaton 指数。

结合声波时差测井值,根据上式,试算分析,得到了适合于煤层气的 Eaton 指数,取地层水密度 $\rho_w = 1.03 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。

2.1.1.2 地层孔隙压力剖面计算

利用测井资料,分别计算出山西煤层气井 TS90 井等 5 口井的地层孔隙压力当量密度随井深的变化曲线,从中可直观地看出地层孔隙压力当量密度纵向变化规律。

2.1.1.3 地层孔隙压力分布规律

石千峰组地层:地层孔隙压力梯度当量密度一般在 $0.78 \sim 0.81 \text{ g}/\text{cm}^3$ 之间变化,属于正常静水压力系统。

上石盒子组地层:地层孔隙压力梯度当量密度一般在 $0.781 \sim 0.84 \text{ g}/\text{cm}^3$ 之间变化,属于正常静水压力系统。

下石盒子组地层:地层孔隙压力梯度当量密度一般在 $0.781 \sim 0.84 \text{ g}/\text{cm}^3$ 之间变化,属于正常静水压力系统。

山西组地层:地层孔隙压力梯度当量密度一般在 $0.79 \sim 0.86 \text{ g}/\text{cm}^3$ 之间变化,属于正常静水压力系统。

总体来看,山西煤层气沙河街组地层孔隙压力梯度当量密度一般在 $0.78 \sim 0.86 \text{ g}/\text{cm}^3$ 之间变化,属于正常静水压力系统。但 CLU-02v 井在石千峰组下部及上石盒子组上部地层孔隙压力梯度当量密度在 $0.69 \sim 0.81 \text{ g}/\text{cm}^3$ 之间变化,压力有轻微异常变化。CLU-02v 井在上石盒子组上端地层孔隙压力梯度当量密度在 $0.71 \sim 0.82 \text{ g}/\text{cm}^3$ 之间变化,恢复为该井正常静水压力系统。

2.1.2 坍塌压力和破裂压力剖面设计

2.1.2.1 井壁应力分析

钻井过程中确定合适的钻井液密度是为了保持井壁稳定,确保钻井安全施工和井身质量。井壁稳定问题包括钻井过程中的井壁坍塌或缩径(由于岩石的剪切破坏或塑性流动)和地层破裂或压裂(由于岩石的拉伸破裂)两种基本类型,其定量的研究集中于确定地层不坍塌(不缩径)、不压漏的钻井液密度范围,以便为井身结构设计及钻井液合理密度的确定提供依据。基于此目的,有必要确定防止井壁坍塌和破裂的合理钻井液密度。影响井壁稳定的因素主要有地应力、井壁的应力分布、地层的力学性质及钻井液的性能等。

众所周知,处于地层深处的岩石受到上覆地层压力、水平向地应力及地层孔隙压力的作用。在井眼钻开前,地下岩层处于应力平衡状态。井眼钻开后,井内钻井液柱压力取代了所钻岩层原先对井壁的支撑,破坏了地层原有的应力平衡,引起井眼周围应力重新分布。

1. 井壁围岩中的应力

通常井壁岩石所受的应力状态可用径向应力 σ_r 、周向应力 σ_θ 、垂直应力 σ_z 及剪切应力 $T_{\theta k}$ 来表示。对于垂直井, $T_{\theta k}=0$, 此时应力状态可简化为 $\{\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z\}$ 。对于岩石产生剪切破坏的情况,一般 $\sigma_\theta > \sigma_z > \sigma_r$ (本研究取压应力为正号), 即 σ_z 为中间应力。在研究井眼稳定时,可以不考虑上覆压力 σ_z 的影响,而把它简化为平面应变问题来分析。

根据线性弹性理论,在井壁为不可渗透的情况下,可求得井眼计算模型中距井轴 r 处的有效应力为:

$$\begin{cases} \sigma'_r = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 - \frac{r_i^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 - 4\frac{r_i^2}{r^2} + 3\frac{r_i^4}{r^4}\right) \cos 2\theta + \frac{r_i^2}{r^2} p_i - \alpha p_p \\ \sigma'_\theta = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{r_i^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 + 3\frac{r_i^4}{r^4}\right) \cos 2\theta - \frac{r_i^2}{r^2} p_i - \alpha p_p \\ \sigma'_z = \sigma_v - \mu \left[2(\sigma_H - \sigma_h) \frac{r_i^2}{r^2} \cos 2\theta\right] - \alpha p_p \\ \tau_{r\theta} = \frac{\sigma_H - \sigma_h}{2} \left(1 - 3\frac{r_i^4}{r^4} + 2\frac{r_i^2}{r^2}\right) \sin 2\theta \end{cases}$$

式中, $\sigma'_r, \sigma'_\theta, \sigma'_z$ 和 $\tau_{r\theta}$ —— 分别为径向、切向、垂向的有效正应力和剪应力;

σ_v —— 上覆压力;

σ_H, σ_h —— 两个水平向的主地应力;

p_p —— 地层孔隙压力;

p_i —— 井眼中的液柱压力;

r_i —— 井眼半径;

α —— 有效应力系数;

θ —— 地层与井筒轴线的夹角;

μ —— 岩石的泊松比。

2. 井壁上的应力

在井壁上,有 $r = r_i$, 则上式可简化为:

$$\begin{cases} \sigma'_r = p_i - \alpha p_p \\ \sigma'_\theta = -p_i + \sigma_H(1 - 2\cos 2\theta) + \sigma_h(1 + 2\cos 2\theta) - \alpha p_p \\ \sigma'_z = \sigma_v - 2\mu(\sigma_H - \sigma_h)\cos 2\theta - \alpha p_p \\ \tau_{r\theta} = 0 \end{cases}$$

需要指出的是:在上式的推导过程中,假设了井壁围岩是线弹性体,实际上泥页岩的弹性模量与围压有关,一般随围压的增大而增大。研究表明,弹性模量与围压的变化可用下式来表示,可见井壁岩石是非线性弹性体。

$$E = E_0 \sigma_3^n$$

式中, σ_3 ——围压;

E ——弹性模量;

E_0, n ——与岩石有关的常数,可通过对试验数据进行曲线回归得到。

Guenot、Santarelli 等人做真三轴试验所得结果表明,用线弹性理论计算出的保持井壁稳定所需的钻井液密度值与实际值相比偏大。因此,为了取得更合理的结果,必须考虑围岩弹性模量变化对井壁应力的影响,即应根据非线性岩石特性对应力的影响进行修正。

Santarelli 对在均匀水平地应力作用下的弹性模量与围压相关时的井壁应力进行了计算,把井内壁的径向应力 σ_r 视为最小应力,据此得出:

$$E = E_0 \sigma_r^n$$

经过推导得到修正后的井壁围岩应力 σ_r 和 σ_θ 的表达式为:

$$\begin{cases} \sigma_r = \sigma_{Hh} \left\{ \left[\left(\frac{p_i}{\sigma_{Hh}} \right)^{1-n} - 1 \right] + 1 \right\}^{\frac{1}{1-n}} \\ \sigma_\theta = M\sigma_r - \frac{N}{1-n} \sigma_r^n \times \sigma_{Hh}^{1-n} \end{cases}$$

式中, $N = \frac{1}{1-\mu} [(2\mu-1)(1-n)-1]$;

$$M = \frac{\mu(1-n)-1}{(1-n)(1-\mu)};$$

μ ——岩石的泊松比;

σ_{Hh} ——远场均匀地应力。

对于非均匀地应力的情况,在考虑了弹性模量随围压变化时,无法求得井壁围岩应力分布的解析式,这里用均匀地应力情况下求得的围岩应力降低系数来对非均匀地应力的井壁稳定进行修正。

在均匀地应力下:

$$\sigma_\theta^* = 2\sigma_{Hh} - p_i \quad (\text{线弹性解})$$

$$\sigma_\theta = \frac{\mu(1-n)-1}{(1-n)(1-\mu)} p_i - \frac{(2\mu-1)(1-n)}{(1-\mu)(1-n)} p_i^n \sigma_{Hh}^{1-n} \quad (\text{非线性弹性解})$$

取 $\sigma_{Hh} = \frac{\sigma_H + \sigma_h}{2}$, $n = 0.1$ (推荐经验数据), 即求得应力降低系数:

$$\eta = \frac{\sigma_\theta}{\sigma_\theta^*}$$