



中国石油大学(北京)学术专著系列

# 井壁稳定力学

金衍 陈勉 著



科学出版社

中国石油大学(北京)学术专著系列

# 井壁稳定力学

金 衍 陈 勉 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书从岩石力学的基本理论着手,系统地阐述了不同地层性质(如各向同性、各向异性)、不同变形特性(弹性、塑性、流变)和不同岩性的井壁围岩稳定力学的基本理论、基本原理,侧重介绍井壁围岩失稳的原因与力学模型,分析了井壁围岩失稳的影响因素,可为油气井井筒安全提供理论和技术支撑。

本书可供高等院校、石油相关企业油气井工程、油气田开发工程、测井工程等专业师生、科技人员参考应用。

### 图书在版编目(CIP)数据

井壁稳定力学 / 金衍, 陈勉著. —北京: 科学出版社, 2012

(中国石油大学(北京)学术专著系列)

ISBN 978-7-03-033529-6

I. ①井… II. ①金…②陈… III. ①井壁-围岩稳定性-岩石力学  
IV. ①TD325

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 022907 号

责任编辑: 杨 震 周 强 房 阳 / 责任校对: 刘小梅

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 王 浩

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>

北京佳信达版艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2012 年 3 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2012 年 3 月第一次印刷 印张: 14 1/4

字数: 285 000

定价: 60.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

## 丛 书 序

大学是以追求和传播真理为目的,并为社会文明进步和人类素质提高产生重要影响力和推动力的教育机构和学术组织。1953年,为适应国民经济和石油工业发展需求,北京石油学院在清华大学石油系并吸收北京大学、天津大学等院校力量的基础上创立,成为新中国第一所石油高等院校。1960年成为全国重点大学。历经1969年迁校山东改称华东石油学院,1981年又在北京办学,数次搬迁,几易其名。在半个多世纪的历史征程中,几代石大人秉承追求真理、实事求是的科学精神,在曲折中奋进,在奋进中实现了一次次跨越。目前,学校已成为石油特色鲜明,以工为主,多学科协调发展的“211工程”建设的全国重点大学。2006年12月,学校进入“国家优势学科创新平台”高校行列。

学校在发展历程中,有着深厚的学术记忆。学术记忆是一种历史的责任,也是人类科学技术发展的坐标。许多专家学者把智慧的涓涓细流,汇聚到人类学术发展的历史长河之中。据学校的史料记载:1953年建校之初,在专业课中有90%的课程采用前苏联等国的教材和学术研究成果。广大教师不断消化吸收国外先进技术,并深入石油厂矿进行学术探索。到1956年,编辑整理出学术研究成果和教学用书65种。1956年4月,北京石油学院第一次科学报告会成功召开,活跃了全院的学术气氛。1957~1966年,由于受到全国形势的影响,学校的学术研究在曲折中前进。然而许多教师继续深入石油生产第一线,进行技术革新和科学研究。到1964年,学院的科研物质条件逐渐改善,学术研究成果以及译著得到出版。党的十一届三中全会之后,科学研究被提到应有的中心位置,学术交流活动的日趋活跃,同时社会科学研究成果也在逐年增多。1986年起,学校设立科研基金,学术探索的氛围更加浓厚。学校始终以国家战略需求为使命,进入“十一五”之后,学校科学研究继续走“产学研相结合”的道路,尤其重视基础和应用基础研究。“十五”以来学校的科研实力和学术水平明显提高,成为石油与石化工业的应用基础理论研究和超前储备技术研究以及科技信息和学术交流的主要基地。

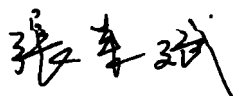
在追溯学校学术记忆的过程中,我们感受到了石大学者的学术风采。石大学者不但传道授业解惑,而且以人类进步和民族复兴为己任,做经世济时、关乎国家发展的大学问,写心存天下、裨益民生的大文章。在半个多世纪的发展历程中,石大学者历经磨难、不言放弃,发扬了石油人“实事求是、艰苦奋斗”的优良作风,创造了不凡的学术成就。

学术事业的发展有如长江大河,前浪后浪,滔滔不绝,又如薪火传承,代代相继,火焰愈盛。后人做学问,总要了解前人已经做过的工作,继承前人的成就和经验,在此基础上继续前进。为了更好地反映学校科研与学术水平,凸显石油科技特色,弘扬科学精神,积淀学术财富,学校从2007年开始,建立“中国石油大学(北京)学术专著出版基金”,专款资助教师们以科学研究成果为基础的优秀学术专著的出版,形成《中国石油大学(北京)学术专著系列》丛书。受学校资助出版的每一部专著,均经过初审评议、校外同行评议、校学术委员会评审等程序,确保所出版专著的学术水平和学术价值。学术专著的出版覆盖学校所有的研究领域。可以说,学术专著的出版为科学研究的先行者提供了积淀、总结科学发现的平台,也为科学研究的后来者提供了传承科学成果和学术思想的重要文字载体。

石大一代代优秀的专家学者,在人类学术事业发展尤其是石油石化科学技术的发展中确立了一个个坐标,并且在不断产生着引领学术前沿的新军,他们形成了一道道亮丽的风景线。“莫道桑榆晚,为霞尚满天”。我们期待着更多优秀的学术著作,在园丁们灯下伏案或电脑键盘的敲击声中诞生,展现在我们眼前的一定是石大寥廓辽远、星光灿烂的学术天地。

祝愿这套专著系列伴随新世纪的脚步,不断迈向新的高度!

中国石油大学(北京)校长



2008年3月31日

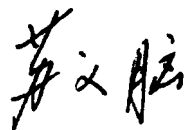
## 序

井壁稳定是指石油钻井形成的井眼在钻井过程中保持规则的尺寸与形状,是事关钻井安全、优质的核心技术。深层钻井过程中最大限度地维持井壁稳定是石油工业一直追求的目标,也是国际石油工程界极富挑战性的难题。

近年我国发现的特大型油气田,如塔里木、川东北等均处于大于 4500m 的深层,地质储量占 60%以上。我国油气剩余地质资源量中深层油气资源占 40%左右。我国海外油气合作区,也多在深层。深层地质复杂,高地应力、高地层压力、高温,井壁围岩失稳是导致深井井下工程事故、钻井成本巨大的重要原因。井壁围岩的恶性失稳屡屡发生,严重制约了勘探开发的进程。因此,国内外对井壁稳定理论、方法和技术非常重视。

近二十年来金衍与陈勉教授的研究团队在国家自然科学基金、霍英东基金、国家“863”项目和中国石油、中国石化、中国海油科研项目的连续支持下,一直从事井壁稳定应用研究,《井壁稳定力学》就是在这些科研工作的基础上撰写而成的。书中以钻井工程为背景,研究井壁围岩力学失稳机理以及钻井液密度确定方法,反映了作者在井壁稳定力学方面理论研究与应用实践的新成果,例如,各向异性井壁围岩破坏理论、盐膏层钻井液密度确定方法、井壁围岩稳定力学化学耦合时效理论、井壁稳定的物理模拟技术等。

我认为,《井壁稳定力学》在理论和应用上都有独到和创新之处,具有科学意义和实用价值,对于需要研究或了解井壁稳定力学及其石油工程应用的读者无疑是一本很好的参考书。我期望这本书的出版能对这一学科领域的发展起到促进作用。



2011年10月于北京

## 前 言

近年来国内外在井壁稳定力学方面的研究已有了很大的发展,井壁稳定力学在石油工程中的应用越来越广泛,但目前系统阐述这些新发展的合适的教材与参考书却十分缺乏。本书旨在使读者在学习过岩石力学的基础上,能掌握井壁失稳的基本力学理论及在钻井工程中的应用。

本书从岩石力学的基本理论着手,阐述了不同地层性质(如各向同性、各向异性)、不同变形特性(弹性、塑性、流变)和不同岩性的井壁围岩稳定的力学理论,侧重介绍井壁围岩失稳的原因与力学模型。

作者自1994年起开始涉及井壁稳定力学研究,2001年后在中国石油大学的石油工程、地质勘探、测井及物理专业的本科生、硕士研究生和博士研究生讲授的“岩石力学”课程中涉及大篇幅的井壁稳定力学内容。在讲义的基础上,作者进行了全面的修订,力图进一步加强基本概念及理论知识的阐述,体现学科的科学性、系统性和内容的先进性,恰当掌握内容的深度和广度。

本书由金衍、陈勉、侯冰、卢运虎、邱康、帅起伟、袁建波、张峰、杨恒林编写,由金衍、陈勉统稿。美国亚利桑那州立大学陈康平教授提出不少宝贵意见,在此深表感谢。

井壁稳定力学近年来发展十分迅速,但作为一门理论,尚嫌不够系统和完善,仍需要做大量的理论研究和试验分析工作。可以说,它还是一个等待继续开拓的新领域。因此,作者愿通过本书与岩石力学和石油工程界的同行学者们共同探讨研究,以期使我国在岩石力学及石油工程应用方面取得更大、更多的成绩,为振兴石油工业作出贡献。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者指正。

金 衍 陈 勉

2011年10月于北京昌平

# 目 录

丛书序

序

前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 井壁稳定力学的定义 .....	1
1.2 井壁稳定力学的研究现状 .....	2
1.2.1 地层的失稳机理与控制方法 .....	2
1.2.2 地层失稳的影响因素 .....	4
1.2.3 地层失稳的研究方法 .....	6
1.3 发展趋势 .....	8
1.3.1 井壁稳定力学机理 .....	8
1.3.2 井壁稳定预测 .....	9
<b>第 2 章 井壁围岩弹性状态的应力分布</b> .....	10
2.1 非渗透井壁的井周围岩弹性应力 .....	10
2.1.1 主地应力在井坐标系中的转换 .....	10
2.1.2 井壁应力状态的弹性解 .....	11
2.1.3 直井井壁应力状态 .....	14
2.2 渗透井壁的井周围岩弹性应力(不考虑时间效应) .....	14
2.2.1 本构方程 .....	15
2.2.2 井壁周围应力 .....	16
2.2.3 径向流的井壁周围应力 .....	18
<b>第 3 章 各向同性线弹性地层的井壁稳定力学问题</b> .....	20
3.1 基本概念 .....	20
3.1.1 坍塌压力 .....	20
3.1.2 破裂压力 .....	21
3.2 直井壁坍塌与破裂 .....	21
3.3 斜井壁坍塌与破裂 .....	24
3.3.1 坍塌压力和破裂压力模型 .....	24
3.3.2 坍塌和破裂的影响因素 .....	27



3.3.3	井壁渗透性的影响 .....	29
3.3.4	地层强度的影响 .....	29
3.3.5	地应力 $\sigma_H/\sigma_h$ 的影响 .....	31
3.4	温度对井壁失稳的影响 .....	32
3.4.1	井筒温度场变化引起的坍塌压力变化 .....	32
3.4.2	一维两相流条件下井筒压力场 .....	32
3.4.3	井筒温度压力变化的实例分析 .....	34
<b>第4章</b>	<b>各向异性线弹性的井壁稳定力学问题</b> .....	<b>36</b>
4.1	井壁围岩各向异性与变形 .....	36
4.1.1	弹性模量(各向异性比)对井壁应力的影响 .....	44
4.1.2	水平地应力比对井壁应力的影响 .....	46
4.1.3	井眼稳定性分析 .....	47
4.2	井壁围岩强度各向异性与破坏 .....	52
4.2.1	弱面的破坏条件 .....	52
4.2.2	直井的破坏 .....	54
4.2.3	水平井的破坏 .....	58
4.2.4	斜井的破坏 .....	63
<b>第5章</b>	<b>井壁稳定力学的塑性问题</b> .....	<b>67</b>
5.1	井周应力的理想弹塑性解 .....	68
5.2	岩石软化问题 .....	73
5.2.1	软泥岩的应力-应变曲线 .....	73
5.2.2	应变软化问题求解方法 .....	78
5.3	井壁围岩力学参数变化对其稳定性的影响 .....	85
<b>第6章</b>	<b>井壁稳定力学与化学耦合问题</b> .....	<b>91</b>
6.1	泥页岩的矿物组成及结构特点 .....	91
6.2	水在泥页岩中的传输机理 .....	98
6.2.1	半透膜渗透压理论 .....	98
6.2.2	“总压力”理论 .....	98
6.3	泥页岩水化膨胀的强度特性 .....	100
6.3.1	泥页岩中水活度的测定 .....	100
6.3.2	不同压差、活度差条件下泥页岩强度的测定 .....	101
6.3.3	地层强度动态变化模型 .....	101
6.4	基于线弹性理论的水化泥页岩井壁稳定分析 .....	104
6.4.1	水化泥页岩线性本构方程及参数确定 .....	104

6.4.2	井周水化围岩的应力计算	106
6.4.3	地层临界坍塌时间的确定	107
6.5	基于热孔隙弹性理论的水化泥页岩井壁稳定分析	109
6.5.1	热孔隙弹性基本定律	109
6.5.2	热孔隙弹性孔隙压力分布	110
6.5.3	井壁破坏准则	114
6.5.4	影响因素分析	115
6.6	基于弹塑性理论的水化泥页岩井壁稳定分析	117
6.6.1	弹塑性增量方程	117
6.6.2	泥页岩膨胀变形的本构方程	118
6.6.3	井周应力场的简化模型	120
6.6.4	井壁动态失稳模型	123
6.6.5	水敏性膨胀地层坍塌压力变化规律	123
<b>第7章</b>	<b>多孔介质的井壁稳定力学问题</b>	<b>127</b>
7.1	流固耦合力学理论	127
7.1.1	岩石有效应力原理	128
7.1.2	岩石固体骨架变形控制方程	129
7.1.3	流体流动控制方程(渗流场方程)	131
7.2	多孔介质的井壁稳定	132
7.2.1	坐标变换	133
7.2.2	问题描述	134
7.2.3	问题求解	137
7.2.4	示范算例	140
<b>第8章</b>	<b>盐膏岩蠕变问题</b>	<b>143</b>
8.1	盐膏层成因、分布及特征	143
8.1.1	盐膏层成因	143
8.1.2	盐膏层分布	145
8.1.3	盐膏层特征	148
8.1.4	盐膏层岩石理化性质	162
8.2	盐岩的蠕变机理	168
8.3	盐膏层井壁稳定机理	172
8.3.1	盐膏层井眼失稳特征	172
8.3.2	盐膏层井壁失稳原因	176
8.3.3	维持盐岩不同缩径率所需的安全钻井液密度下限(饱和盐水)	180

---

8.3.4 维持盐岩不同缩径率所需的安全钻井液密度下限(欠饱和盐水)的要求 .....	181
8.4 基于盐岩损伤的深部盐层钻井液密度设计方法 .....	183
8.4.1 盐岩损伤扩容特征 .....	183
8.4.2 深部盐层钻井液密度确定模型 .....	187
8.4.3 设计实例 .....	187
<b>参考文献</b> .....	<b>189</b>

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 井壁稳定力学的定义

井壁稳定是钻井过程中通过钻井液密度、钻井液体系和钻井工艺三者的协同来确保井眼不坍塌、不破裂、不缩径。

井壁失稳主要是指钻井过程中井壁坍塌、井眼缩径和地层破裂。从力学上看,其主要失稳机理为井壁围岩张性破裂和剪切破坏。井壁稳定问题是钻井过程中经常遇到的复杂问题。根据哈里伯顿公司的最新统计,全球每年花在井壁稳定问题上的开支不低于 60 亿美元。

井壁失稳问题的原因很多,包括天然和人为因素两个方面。

在天然因素方面:有地质构造类型和原始地应力,地层的岩性和产状,黏土矿物的类型,弱面的存在及其倾角,层面的胶结情况,地层强度,裂隙节理的发育,孔隙度,渗透率及孔隙中流体压力等。

在人为因素方面:有钻井液的性能(失水、黏度、密度),钻井液和泥页岩化学作用的强弱(水化膨胀),井眼周围钻井液侵入带的深度和范围,井眼裸露的时间,钻井液的环空返速对井壁的冲刷作用,循环波动压力和起下钻的抽吸压力,井眼轨迹的形状,钻柱对井壁的摩擦和碰撞等。

钻井过程中的井壁失稳是一个普遍性难题,受到各国科研人员的高度重视。由于受石油钻井工程发展历史的影响,长期以来,研究的重点多集中于化学防塌方面。在这方面,钻井液工作者进行了大量行之有效的工作,从化学的角度出发研制抑制泥页岩水化、膨胀和实现离子活度平衡的新型钻井液处理剂和配方,使井壁失稳现象大幅度减少,但是仍然解决不了水化程度弱、强度低的泥页岩、强地应力条件的山前构造、弱面地层和井斜及井斜方位引起的井壁失稳难题。可见,解决井壁失稳仅通过使用优质钻井液是不够的,还需进行井壁稳定力学研究。

井壁稳定力学研究应从三个方面入手:井壁围岩岩石力学特征、地应力和井壁稳定力学模型研究。岩石力学特征是基础,地应力是井壁失稳的根本诱因,合理的井壁稳定力学模型是解决井壁失稳的有效途径。结合三个方面研究,掌握地应力状态和地层力学参数,采用合理的力学模型,获得能控制井壁失稳的钻井液密度范围,再配合使用优质钻井液,才能最大程度确保井壁稳定。

## 1.2 井壁稳定力学的研究现状

在过去几十年里,有关井壁稳定的研究主要在地层的失稳机理、控制方法、影响因素和研究方法等方面取得了显著进展。这些研究深化了对井壁围岩地质特征、力学特性和工程性质的认识,从而增强了利用围岩和改造围岩的工程能力,促进井壁稳定力学机理和控制方法的发展。

### 1.2.1 地层的失稳机理与控制方法

#### 1.2.1.1 敏感性页岩地层

在井眼钻开之前,地层岩石所受的地应力处于平衡状态。当井眼形成后,被钻掉的那部分岩石应力转移至井壁围岩,钻井液为井壁提供支撑作用,应力重新分布。这样就有可能发生岩石所受的剪应力大于岩石本身的强度而发生井壁失稳(应力诱导)。页岩中存在层理面,井壁失稳可由层理弱面的剪切或拉伸破坏造成。此外,由于页岩的低渗透性,在钻井过程中,岩石骨架的体积变化将引起孔隙压力增加,导致有效应力降低,使井壁更不稳定,提高钻井液密度可避免井壁失稳,但是,过分地提高钻井液密度,地层将会被压裂或(被动)剪切破坏。此外,若地层岩石有预先存在的裂缝,如煤,钻井液滤液在过平衡条件下渗入裂缝,将造成地层沿裂缝破坏,其破坏特征是块状崩塌物。综上所述,对力学稳定性起决定作用的因素是:地应力的大小和方位、材料的孔隙弹性和强度物性、层理面、天然裂缝、井眼轨迹、诱发孔隙压力和钻井液液柱压力。此外,页岩的稳定性具有时间效应,这是由于页岩的细颗粒特性、低渗透性,但多属孔隙型,并由地层水所饱和。

研究发现页岩稳定的机理包括孔隙压力扩散、塑性、各向异性、毛细管效应、渗透性和物理化学交互作用。提高井壁稳定的四个技术途径为:钻井液类型、钻井液密度、钻井液流变性和水力参数、钻井实践。

#### 1.2.1.2 裂缝性地层

L. N. Germanovich 认为原来就存在的裂缝在井周压应力集中作用下开始发育,与边界的相互作用使裂缝不稳定发展,最后使薄层岩石发生挠曲而分离出来。初始的破坏稍稍移动了井眼边界,促使下一条裂缝扩展。重复上述过程直至井眼形状的改变足以制止裂缝扩展的不稳定状态,这就是破坏的最终程度。原来存在的裂缝尺寸越小,破坏程度就越大。这提示我们在所讨论的破坏机理占优势的情况下,较少微裂缝岩体预期的破坏较大。其优点在于从岩石断裂力学角度出发,提出裂缝性地层的井眼坍塌力学模型,从理论上来说是一种新的突破。但对于工程

实际来说,由于地层的预裂缝几何状态及井眼打开后裂缝的变化等无法准确估计,再则裂缝性岩石的力学参数从室内实验技术和测井解释都难以获得,所以从工程上说,特别对于裂缝性地层应从统计的观点出发来获得可靠的结果。

李鹭光认为破碎性高陡地层井壁失稳的机理可以概括为如下九种方式:

(1) 力学不稳定是高倾角破碎地层井壁失稳的根本原因,关键因素是地层倾角的大小、岩体破碎程度及外来流体侵入的程度。

(2) 地层倾角越大,地层所受构造作用越强,两个水平主应力的大小和方向都呈现出非稳定场的特征,而且大小相差悬殊。两个水平主应力差值越大,所受的剪切应力亦越大,井壁极易沿着弱结构面破坏,使维持井壁稳定的最小钻井液密度增加(即安全钻井液密度下限提高),从而使安全钻井液密度窗口变窄。

(3) 地层裂缝越发育,破碎程度越大,岩体间胶结弱,弱结构面强度低(抗张、抗剪强度均低)。维持井壁稳定的坍塌压力大,安全钻井液密度下限增高,地层越破碎地层破裂压力越低,安全钻井液密度上限随之降低,安全钻井液密度窗口继续变窄。

(4) 对裂缝发育且断层多的破碎性地层,当地层倾角大到一定程度时,由于安全钻井液密度下限逐渐升高,上限又逐渐降低,安全钻井液密度范围逐渐缩小,上限和下限将趋于重合,此时,理论上已不存在安全钻井液密度。如果不采取有效的防塌措施,井壁失稳将无可避免。

(5) 高倾角破碎地层,因其具有“碎、松、陡”等特点,其临界冲蚀指数低,井壁抗钻井液冲蚀的能力差,易出现“冲蚀失稳”。同时,对井内压力波动敏感,在起下钻和开泵等过程中易出现“波动失稳”。

(6) 达西滤失造成的“水力连通作用”引发井壁失稳。

(7) 润湿造成的“毛细管扩张作用”引发井壁失稳。

(8) 缝间充填物水化造成的“水楔作用”引发井壁失稳。

(9) 破碎体本身水化膨胀造成的“推挤作用”引发井壁失稳。

### 1.2.1.3 流变地层(软泥岩、盐膏岩)

软泥岩、盐膏岩地层在强地应力的作用下,发生蠕变流动,导致井眼缩径卡钻。导致软泥岩、盐膏岩层钻井事故的原因有以下两个方面:从力学角度看,软泥岩、盐膏岩具有较强的流动性,高温使其流动性更加明显。在地下井眼钻开之后,原地应力场的平衡遭到破坏,次生应力场的作用使软泥岩、盐膏岩地层向着井眼方向流动,直到出现新的平衡状态,这种沿径向的流动使井眼直径减小,造成缩径,这是盐岩层中卡钻的主要原因;从物理学角度看,盐岩易溶于水,对于大段软泥岩、盐膏岩来说,盐岩的溶解则导致井壁坍塌(较大块的砂、泥岩等脱离井壁),从而加大卡钻的可能性。

#### 1.2.1.4 强度各向异性地层

由于大多数沉积岩是各向异性的,所以在钻井工程中研究各向异性对强度的影响是非常重要的。对于大倾角地层的平面各向异性,尤为重要是弱面,即地层中有一组低强度的薄弱面,在较小的钻井液柱压力下先于岩石本体破坏,常常引起人们意料之外的钻井复杂情况。从微观结构上看,岩石是非均质的和各向异性的,一方面是由于岩石的成因,如颗粒大小不同有优势指向,具有不同胶结物,有层理等;另一方面是由于构造应力历史产生的,在变形过程中产生了裂缝、节理,但是若在所有方向上都视为各向异性,则材料的弹性常数太多,所以宏观上把岩石看作弹性参数在同一层面各个方向上均相同,它们只在其垂直方向上有差别,即横观各向同性。对于井壁稳定性力学分析,最重要的是要考虑弱面的影响。目前对弱面模型的研究局限于弱面的走向与最小水平地应力方向一致这一特殊情况。

### 1.2.2 地层失稳的影响因素

#### 1.2.2.1 构造地应力的影响

水平构造地应力的各向异性对坍塌压力和破裂压力有着显著的影响,水平地应力比值越大,坍塌压力和破裂压力的差值就越小,即安全钻井液密度窗口越窄,井壁失稳风险越大,当水平地应力比值达到一定程度时,坍塌压力和破裂压力几乎相等,甚至出现“负压力窗口”,导致无法安全钻进,由此可见,井壁的力学失稳主要诱因是强地应力的非均匀性。

#### 1.2.2.2 井眼轨迹的影响

井斜角和井斜方位角对斜井的井壁稳定性有着显著的影响。国内外大多采用孔隙弹性理论,考虑钻井液的渗流效应,建立了大斜度井的井壁稳定力学模型。模型考虑了地应力的非均匀性、孔隙压力和井眼几何形状的影响,得出如下斜井稳定的一般性结论:

上覆压力为中间主应力时,随着井斜角的增大,破裂压力值将增加,而坍塌压力值将减小,安全钻井液密度窗口变大。这说明,在同样条件下,井斜角越大,钻井越安全,换句话说,只要直井是安全的,斜井和水平井也安全。

上覆压力为最大主应力时,随着井斜方位角的增大,破裂压力值将增大,坍塌压力值将减小,这说明,朝着最小地应力方向钻井较为安全,而最大地应力方位一般不利于钻井。随着井斜角的增大,破裂压力值增大,而坍塌压力值虽有局部减小但总体是增大的。这说明,如果钻井液密度对直井不安全,则对斜井和水平井也不一定安全。

大位移井的井眼方位要视三个主地应力状态而定,当垂向主地应力大于水平最大地应力且差值不大,或水平最大地应力为最大地应力时,最佳的井眼方位在水平最小地应力方向或近水平最小地应力方位,此时钻井所要求的钻井液密度最低。但是,当垂向地应力比水平最大地应力大得多时,最佳井眼方位要具体分析。

### 1.2.2.3 钻井液造壁性的影响

钻井液的造壁性对井壁稳定有着显著的影响。不同的钻井液性能在井壁上形成的泥饼性能差别显著,钻井液滤液在井壁上的渗透能力也不同,从而导致钻井液液柱压力的扩散程度不一样,钻井液液柱压力的扩散程度越好,井壁稳定性越差,当井壁完全渗透时,井壁稳定性最差。根据计算,渗透系数为零时,井壁不渗透,井段井壁稳定性最高;渗透系数为1时,井壁全渗透,井段井壁稳定性最低,此时,坍塌压力接近或超过破裂压力,几乎不可能进行钻井作业。因此,钻井时要求钻井液具有良好的造壁性能,在井壁形成薄而韧的泥饼。

### 1.2.2.4 地层强度的影响

地层强度包括地层的黏聚力、内摩擦角和抗拉强度,地层强度增大,坍塌压力降低,破裂压力增大,安全钻井液密度范围扩大,井壁稳定性就提高,钻井也越安全。尤其要提出的是,地层强度对浅井井壁稳定性有着显著的影响,如果浅部地层强度太低,就要求大幅度提高钻井液密度来满足井壁稳定。

### 1.2.2.5 垮塌几何形态的影响

随着钻井设备、定向井控制系统和钻井液体系技术的进步,以及对油藏特征掌握程度的加深,大斜度井、水平井钻井的数量日益增加。在常规地应力( $\sigma_v > \sigma_H > \sigma_h$ )的情况下不断碰到井壁失稳和出砂问题。通常水平井设计的指导原则是井眼方位平行于最小水平地应力,这样有助于减小井眼轴向与垂向的主应力差,井周的应力集中程度达到最小。上述指导原则是基于努力降低井眼压力来维持零坍塌(zero breakout)。

井壁稳定研究表明:稳定的垮塌井眼是由应力转移造成的,应力集中从裸眼垮塌起始端转至垮塌区域的顶端,并产生准静水压力状态。因此,垮塌后的井眼应该比圆形井眼稳定。近年来利用垮塌后的几何形态来增强隧道稳定性的实验研究表明,在相同的地应力条件下,垮塌后的几何形态比圆形具有更高的开挖强度。但在某些地层,井壁垮塌后相邻地层的强度有弱化趋势,在这种情况下,较低的钻井液密度反而加剧了井壁失稳。



### 1.2.2.6 钻柱振动的影响

井眼的稳定性(井眼扩大)与钻柱的振动有明显的联系,高强度地层(如火成岩井壁)失稳的原因是钻柱振动过于剧烈,钻柱撞井壁,在井壁处形成裂缝,从而导致钻井液侵入,引起井壁岩块剥落。

利用能量法对由钻柱振动产生的失稳进行定性分析,对井壁的撞击力利用牛顿第二定律计算,再根据动量守恒,可估算出钻柱将多少动能传递给井壁岩石,使井壁岩石内能显著增加,促使裂缝的发育。解决的方法:利用“非侵入型”钻井液,封堵裂缝,阻止钻井液侵入,从而降低井壁失稳,同时最大限度地减少钻柱振动。

## 1.2.3 地层失稳的研究方法

### 1.2.3.1 弹塑性力学理论方法

井壁围岩材料受井周应力作用以后产生变形,从变形开始到失稳破坏一般要经历两个阶段,即弹性变形阶段和塑性变形阶段。利用弹塑性力学理论,研究井壁围岩受到外界应力、温度变化及边界约束变动等作用时,井壁围岩弹塑性变形、破坏和应力状态的方法叫做井壁失稳弹塑性力学理论方法。

井壁围岩弹塑性变形受控于井周应力状态和围岩材料性质。井周应力状态的形成与变化取决于原始三维地应力状态、井内和地层流体的压力差、岩石的物理化学性质、井眼的几何形状及完善程度;同时,井周应力的变化反作用于岩石材料本身,导致岩石力学性质、材料屈服和破坏模式发生变化。根据井壁围岩材料特性的不同,有的弹性阶段较明显,如硬脆性泥页岩、低强度砂岩,往往弹性阶段后紧跟着就破坏。有的则弹性阶段很不明显,变形一开始就伴随着塑性变形,弹塑性变形总是耦合产生,如软泥岩和盐膏岩。大部分都呈现明显的弹性变形阶段和塑性变形阶段,如膨胀性泥岩。此外,采用适合地层围岩特性的本构关系和井壁稳定力学模型也是弹塑性力学研究方法的重点。

对于脆性泥页岩、低强度砂岩,一般采用线弹性模型,而对于易发生塑性变形的软泥岩、盐膏岩地层,目前国内外学者就岩石塑性本构关系模型进行了详细深入的研究,有理想塑性模型、硬化模型和软化模型等各种不同理论,还有考虑岩石的弹性参数随塑性变形变化的弹塑性耦合模型以及岩石塑性理论的非联合流动法则弹塑性模型等。它们各有一定的优点和不足。若把这些计算模型应用于井眼稳定计算,这些模型都需要通过实验确定许多重要的参数,而且实验的工作量是十分巨大的,这也给实际应用带来许多不便。一般来讲,计算模型越简单,所需实验确定的参数越少,应用也越方便,另一方面也不能精确描述岩石的弹塑性变形规律;计算模型越复杂,所需实验确定的参数也越多,应用也不方便,但是能够精确描述岩