



复杂地层井壁稳定 评价新技术

闫传梁 赵 凯◇著



中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

复杂地层井壁稳定评价新技术

闫传梁 赵 凯◇著

中国石化出版社

内 容 提 要

20 世纪以前,我国开发的主力油层集中在陆地浅层,且多处于开发初期,地质条件相对简单,井壁稳定评价技术主要针对的是陆地、浅层、常温常压、结构较为完整且处于开采初期的地层。进入 21 世纪以来,油气资源的开发逐渐向深海、深层、非常规及老油田深度挖潜进军,地质地层条件及所处的环境更加复杂,给井壁稳定的精确评价提出了更大挑战。本书针对上述问题,结合近年来的研究成果,逐一系统地介绍了井壁稳定评价的新技术,主要包括高温高压地层井壁稳定评价技术、深水钻井井壁稳定评价技术、天然气水合物储层井壁稳定评价技术、压力衰竭储层井壁稳定评价技术和页岩气储层井壁稳定评价技术,以期为此类地层的安全、高效钻井提供理论参考。

本书可供从事油气钻采方面的研究人员、工程技术人员及相关院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂地层井壁稳定评价新技术 / 闫传梁, 赵凯著.
—北京: 中国石化出版社, 2018. 7
ISBN 978-7-5114-4955-9

I. ①复… II. ①闫… ②赵… III. ①井壁—稳定性—评价
IV. ①TD26

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 156604 号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市朝阳区吉市口路9号
邮编:100020 电话:(010)59964500
发行部电话:(010)59964526
<http://www.sinopec-press.com>
E-mail:press@sinopec.com
北京柏力行彩印有限公司印刷
全国各地新华书店经销

*

787×1092 毫米 16 开本 9 印张 206 千字
2018 年 7 月第 1 版 2018 年 7 月第 1 次印刷
定价:40.00 元

20世纪以前,我国开发的主力油层集中在陆地浅层,且多处于开发初期,地质条件相对简单,井壁稳定评价技术主要针对的是陆地、浅层、常温常压、结构较为完整且处于开采初期的地层。进入21世纪以来,随着常规油气资源的大幅开采,全球油气资源的供求矛盾日益突出,深海、深层油气资源的有效开发、老油田的深度挖潜以及非常规油气资源的有效开发是解决能源供求矛盾的重要手段。但是,由于深海和深层特殊的环境条件、储层长期注采的人为干预以及水合物、页岩气储层本身特殊的理化性质,使得当前钻井过程中经常发生严重的井壁失稳问题,严重制约了油气资源勘探开发的进程。

井壁失稳造成的井眼坍塌、缩径、卡钻和漏失等井下复杂情况,会严重影响钻井安全,延长钻井周期,增加钻井成本,并给后续测井、固井及完井作业带来困难,严重时甚至造成井眼报废。进行井壁稳定研究的目的是为了保证在钻井过程中井壁不发生失稳,保证钻井安全,降低钻井成本。随着油气勘探开发领域的不断扩展,钻井工程中钻遇的地层类型越来越多,地层环境越来越复杂,对于一些特殊复杂地层,传统的井壁稳定分析模型已经不再适用,需要针对不同地层的特点开展系统、深入的研究,来建立新的井壁稳定分析方法,为有效解决钻井工程中的井壁失稳问题提供科学依据,为实现优质、安全、高效和低成本钻井提供技术支持。

本书共分6章,主要介绍近年来我国在钻井工程中遇到的一些新的复杂地层的井壁稳定问题。第1章简单回顾了井壁稳定研究的发展历程与现状,分析了井壁失稳的主导因素。第2章主要介绍了高温高压地层井壁稳定评价技术。由于高压的存在,这类地层安全泥浆密度窗口普遍较窄,同时在钻井液循环过程中,钻井液从下部高温地层带走热量,使下部地层得到冷却,上部地层被加热,从而在井壁围岩中产生附加热应力。这一部分从温度变化引起的地层强度及井周应力变化入手,分析了温度效应对不同岩性地层坍塌压力和破裂压力的影响。第3章主要介绍了深水钻井井壁稳定评价技术。由于深水区域上覆岩层相当一部分由海水所替代,上覆岩层压力与陆地上相比偏低,趋向于显出较低的破裂压力,特别是深水浅部地层欠压实且弱固结,进一步使破裂压力梯度降

低。这一部分利用“超孔隙压力”理论分析了深水浅部弱固结地层在进入塑性状态后的井眼缩径规律及井壁破裂机理。第4章主要介绍了天然气水合物储层井壁稳定评价技术。天然气水合物的生成条件为高压低温，因此主要分布在深水浅层沉积物中及大陆地区永久冻土带，钻探过程中由于温度、压力以及相平衡关系变化引起的水合物分解会弱化地层强度，增大孔隙压力，导致井壁坍塌。这一部分实验研究了含水合物地层的强度特征，并利用多场耦合理论分析了钻井过程中的水合物分解特征及井壁稳定变化规律。第5章主要介绍了压力衰竭储层井壁稳定评价技术。我国大部分油气田都已进入开发中后期，随着流体被逐渐采出，储层压力会发生不同程度的衰竭，衰竭储层段及附近地层井壁稳定会发生显著变化，多套压力体系共存，钻井过程中压差卡钻、井壁坍塌和钻井液漏失等风险明显增加。这一部分分析了压力衰竭对储层及盖层井周应力和井壁稳定性的影响，提出了基于适度坍塌的井壁稳定设计新理念。第6章主要介绍了页岩气储层井壁稳定评价技术。页岩气储层泥质发育，且含有丰富的层理构造，各向异性特征显著，使其井壁稳定性与普通的均质地层存在很大差异，这一部分对钻井液对页岩基质和层理面强度的影响分别进行了研究，并结合各向异性地层的井周应力分布，分析了页岩气储层坍塌压力随井眼钻开时间的变化规律。

本书由中国石油大学(华东)石油工程学院闫传梁和西安石油大学石油工程学院赵凯合著而成。自2008年起笔者就从事井壁稳定力学方面的研究，本书的主要内容即为笔者十年来研究成果的总结。在本书的撰写过程中得到了中国石油大学(北京)邓金根教授和中国石油大学(华东)程远方教授的悉心指导和无私帮助，为本书成稿提供了重要材料，在此向他们表示感谢。本书的出版得到了国家自然科学基金项目(51704311、51604225)、教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT_14R58)、国家973项目(2015CB251201)、青岛海洋科学与技术国家实验室开放基金以及中海油各类项目的支持。此外，本书还参考了多位专家学者的研究成果，由于篇幅有限，不能一一列举，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在一些不妥之处，敬请读者批评指正。

| | |
|--------------------------------|--------|
| 第1章 概述 | (1) |
| 1.1 井壁不稳定的原因和危害 | (1) |
| 1.2 井壁不稳定的主导作用 | (3) |
| 参考文献 | (11) |
| 第2章 高温高压地层井壁稳定评价技术 | (14) |
| 2.1 地层孔隙压力预测 | (14) |
| 2.2 钻井过程中的井筒温度变化 | (25) |
| 2.3 温度变化对地层性质的影响 | (29) |
| 2.4 地层温度变化对井壁稳定性影响 | (31) |
| 2.5 高温高压井实例分析 | (41) |
| 参考文献 | (41) |
| 第3章 深水钻井井壁稳定评价技术 | (45) |
| 3.1 深水钻井井壁稳定特点 | (46) |
| 3.2 深水地层上覆岩层压力预测 | (49) |
| 3.3 深水浅层安全泥浆密度窗口计算模型 | (51) |
| 3.4 深水深层井壁稳定计算模型 | (61) |
| 参考文献 | (62) |
| 第4章 天然气水合物储层井壁稳定评价技术 | (66) |
| 4.1 天然气水合物生成条件 | (67) |
| 4.2 含天然气水合物地层强度 | (67) |
| 4.3 天然气水合物储层井壁稳定多场耦合数学模型 | (70) |
| 4.4 天然气水合物储层井壁稳定变化规律 | (73) |
| 参考文献 | (78) |

| | |
|-----------------------------------|---------|
| 第 5 章 压力衰竭储层井壁稳定评价技术 | (81) |
| 5.1 各向同性储层压力衰竭对井壁稳定的影响 | (81) |
| 5.2 断块油气藏开采对破裂压力的影响规律 | (87) |
| 5.3 衰竭储层上部盖层段适度坍塌定量评价 | (92) |
| 5.4 各向异性储层压力衰竭对破裂压力的影响 | (102) |
| 5.5 高温超低压储层井壁稳定性变化规律 | (106) |
| 参考文献 | (109) |
| 第 6 章 页岩气储层井壁稳定评价技术 | (113) |
| 6.1 泥页岩分类 | (114) |
| 6.2 页岩气储层组构特征 | (116) |
| 6.3 页岩气储层水敏特征 | (119) |
| 6.4 页岩气储层变形破坏特征 | (120) |
| 6.5 钻井液侵入对页岩气储层力学特性的影响 | (124) |
| 6.6 页岩气储层井壁稳定评价 | (128) |
| 参考文献 | (135) |

第1章 概述

钻井工程是油气勘探开发过程中必不可少的重要环节之一，随着常规油气资源的大幅开采，全球油气资源的供求矛盾日益突出，油气勘探开发的地层越来越深、越来越复杂，钻井的难度也越来越大，使得钻井科技工作者在成本、环保及技术等各方面面临更大的挑战和技术难题，其中钻井工程中包含的关键技术主要有井壁稳定技术、井眼轨迹控制技术、钻头高效破岩与洗井技术和油气储层保护技术四项。

井壁稳定是指在油气钻井过程中通过钻井液液柱压力、钻井液性能和钻井工艺三方面的协同作用来平衡地层的原地应力，保证井眼在完井作业之前不缩径、不坍塌、不破裂。进行井壁稳定研究的目的是为了保证在钻井过程中井壁不发生失稳，保证钻井安全，降低钻井成本。据统计，钻井成本在油气勘探开发总成本中所占的比例高达50%~80%，全世界每年由于井壁失稳问题造成的损失约占钻井总成本的10%，超过60亿美元，损失的时间占所有非钻进时间的40%以上。此外，井壁失稳不但使钻井成本大幅增加，同时还会影响测井、固井质量，给后续的完井作业带来困难。

由于钻遇地层75%以上为泥页岩，以往的井壁稳定研究主要针对泥页岩地层。但随着油气勘探开发领域的不断扩展，钻井工程中钻遇的地层类型越来越多，地层环境越来越复杂，对于一些特殊地层，传统的井壁稳定分析方法已经不再适用，需要针对不同地层的特点来建立相应的井壁稳定分析模型。

1.1 井壁不稳定的原因和危害

钻井之前，深埋地下的岩层受到上覆岩层压力、最大水平地应力、最小水平地应力和孔隙压力的作用，处于平衡状态。井眼打开后，井内的岩石被取走，井壁岩石失去了原有的支撑，取而代之的是钻井液液柱压力，在这种新条件下，井眼围岩应力将产生重新分布，使井壁附近产生很高的应力集中，如果岩石强度不够大，就会出现井壁不稳定现象。通过调整钻井液密度大小，可以改变井眼围岩的应力状态，达到稳定井壁的目的。

如果钻井液密度过低，井壁应力将超过岩石的抗剪强度而产生剪切破坏（表现为井眼坍塌扩径或屈服缩径），此时的临界井眼液柱压力定义为坍塌压力；如果钻井液密度过高，井壁上将产生拉伸应力，当拉伸应力达到岩石的抗拉强度时，将产生拉伸破坏（形成裂缝



导致井漏), 此时的临界井眼液柱压力定义为破裂压力。剪切破坏又分为两种类型: 一种是脆性破坏, 导致井径扩大, 这会给固井、测井等后续施工带来困难。这种破坏通常发生在硬脆性地层中, 但对于弱胶结砂岩地层由于冲蚀作用也可能出现井眼扩大现象。另一种是缩径, 发生在软泥岩、砂岩、盐岩等地层, 钻井液密度过低, 井壁应力会超过岩石的屈服极限, 产生缩径。一些灰岩地层在深部也可能再现这种现象。在工程上遇到缩径现象时, 要通过划眼等手段进行处理, 否则容易出现卡钻现象。拉伸破坏产生水力压裂, 会导致井漏, 井漏会降低井内压力, 严重时会造成井喷。图 1-1 给出了各种岩性地层井眼失稳破坏几何形态的示意图。

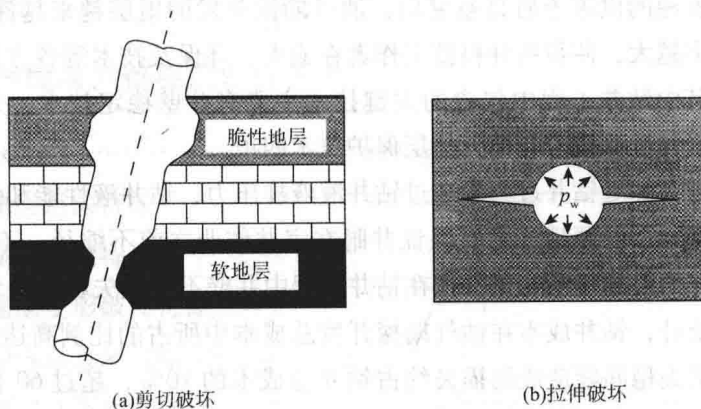


图 1-1 各种岩性地层井眼失稳破坏几何形态示意图

从实质上讲, 井壁稳定与否最终都表现在井眼围岩的应力状态与岩石破坏强度的对比上。如果井壁应力超过岩石强度包络线, 井壁就要发生破坏, 否则井壁就是稳定的。但是影响井眼围岩应力状态和破坏的因素很多, 使问题变得非常复杂。概括起来影响因素可分为四大类: ①地质力学因素: 原地应力状态、地层孔隙压力、原地温度、地质构造特征等。这些因素是不可改变的, 只能准确地认识它们。②岩石的综合性质: 岩石的强度、变形特征、孔隙度、含水量、黏土含量、矿物组成和压实情况等。③钻井液的综合性质、化学组成、连续相的性质、内部相的组成和类型、与连续相有关的处理剂类型、钻井液对地层强度降低程度指数、钻井液体系的维护等, 特别是对于泥页岩和泥质胶结的砂岩, 钻井液对它们的物理力学性质的影响非常大。④其他工程因素: 包括打开井眼时间、裸眼长度、井身剖面参数(井深、井斜角、方位角)、压力激动和抽吸等。这些因素和参数之间相互作用、相互影响, 使井壁稳定问题变得非常复杂。

目前, 要准确确定各因素的影响规律还有困难, 这主要是由于如下原因: ①直接观察井壁的方法很少, 很难确切了解井下几千米深处到底发生了什么; ②钻遇岩石的力学性质在很大的范围内变化; ③原地应力状态很难准确确定; ④钻井液与地层之间的物理化学作用非常复杂, 因此井眼稳定问题是一个世界级的难题。

目前, 研究井壁稳定的方法主要有两种: 一是钻井液化学研究, 二是岩石力学研



究。从钻井液化学方面研究井壁稳定由来已久,主要研究泥页岩水化膨胀的机理,寻找抑制泥页岩水化膨胀的化学添加剂和钻井液体系,最大限度地减少钻井液对地层的负面影响,使井壁保持稳定。岩石力学研究主要包括原地应力状态的确定、岩石力学性质的测定、井眼围岩应力分析和稳定性分析,最终确定保持井眼稳定的合理钻井液密度。

对这种复杂问题的研究应避免两种倾向,一种是不可知论,认为问题过于复杂而放弃研究。另一种是过于理论化的研究,模型过于复杂很难确定有关参数。目前,比较可行的办法是将钻井液化学和岩石力学耦合起来,尽可能多地收集井眼情况资料(如井眼何时以何种方式出现复杂情况),尽可能准确地估测岩石的力学性能,确定起主要作用的参数有哪些。和钻井工程技术人员一起试验和分析井壁稳定问题,建立基于实例分析评价和理论模拟相结合的方法,对解决钻井过程中地层稳定问题相当有用。

在我国各大油田的长期勘探开发过程中井壁不稳定问题一直比较突出。如环渤海湾地区主要表现为馆陶、明化镇组泥页岩地层的水化膨胀,造成缩径卡钻事故;东营底、沙河街、孔店组泥页岩地层的削落掉块,造成井径扩大、坍塌卡钻,电测质量低下、固井不合格等工程问题或事故;一些特殊岩性,如生物灰岩、裂隙性玄武岩、软弱砂岩也会出现井塌、井漏等井下复杂情况,这些事故严重拖延了钻井周期,明显增加了钻井成本,并给后续工作带来了不利影响,有时甚至使整个井眼报废。

1.2 井壁不稳定的主导因素

关于井壁稳定性问题,其研究历史路径是从纯力学研究到泥浆化学研究,到力学与化学耦合研究,再到力学、化学、热力学、电学的多场耦合研究。其中,纯力学研究过程中经过了弹性力学时期,弹塑性力学时期,再后来发展到了多孔弹塑性力学阶段。力学研究主要从岩石力学、流-固耦合的角度研究井壁失稳机理及对策,化学研究主要从泥页岩水化的角度入手。20世纪70年代以前,这两方面研究各自独立进行;70年代到90年代,这两方面逐渐结合起来,但只是处在实验研究层次;直至90年代后期,将力学因素与化学因素耦合起来进行井壁稳定性研究,才开始进入定量化数学描述的阶段。

1.2.1 纯力学作用

纯力学坍塌一般认为地层中的软地层或弱面在深部高应力作用下呈闭合状态或弱面沿切向分布、与井眼不连通,岩石基质渗透率极低,且地层中无膨胀性黏土矿物,分析中不考虑钻井液渗流和化学作用的影响,根据破坏机制的不同,主要分为剪切破坏机制、拉伸剥落机制、剪切滑移机制和应力损伤机制。



1.2.1.1 剪切破坏机制

(1) 各向同性地层。

最早的井壁稳定研究主要基于各向同性线弹性假设,认为井壁坍塌是由于井壁岩石所受应力超过其本身的强度,使其发生剪切破坏而造成的井径扩大现象。研究中应用莫尔-库仑破坏准则判断脆性地层中的井眼何处发生了破坏,并指出井周岩石交叉的剪切破坏产生“猫耳”,最终形成稳定的椭圆形状。根据此理论,后来的许多学者利用井眼坍塌形状的信息对地应力等信息进行反演,并利用反演信息对井壁稳定进行实时预测。

(2) 各向异性地层。

对于含单一层理弱面的地层,其强度和变形表现出显著的各向异性特征。早在1965年,M. E. Chenevert就通过实验研究了层状沉积岩力学性质的各向异性。采用三轴实验装置,在0~82.7MPa的围压下,平行层理面取心高于垂直层理面方向取心测定的弹性模量,当岩心轴线与层理面的夹角在 20° ~ 30° 时,岩心强度与垂直层理面取心测定的强度相比降低了40%。

对于此类地层的井壁稳定分析,目前的分析模型主要分为两类:一类是仅考虑其强度各向异性特征,采用单一弱面剪切破坏准则评价井壁失稳情况;另一类则综合考虑泥页岩强度和变形的各向异性,假设地层为横观各向同性介质,并结合广义三维各向异性破坏准则评价地层剪切破坏引起的井壁坍塌。根据理论与实践的研究发现,这类地层钻进大斜度井问题尤为突出,存在最佳钻入角(井眼方向与层理面夹角),现场应尽量沿强度较高的方向钻进。且由于弱面的存在,某些情况下井眼坍塌会形成“四猫耳”,不再是简单的椭圆形井眼。

1.2.1.2 拉伸剥落机制

上述利用剪切破坏准则进行井壁稳定分析的方法仅能反映岩石的宏观破坏特征,无法有效地反映脆性岩石裂缝扩展贯通导致失稳的渐进过程。针对此问题,Gennanovich(1994)采用裂缝-井筒耦合模型作为井周岩石受压缩应力时产生拉伸剥落的基本微观机理。研究认为,脆性页岩的井壁坍塌是由于在井周周向压缩应力作用下页岩层中的天然裂缝沿切向发生不稳定扩展,使得井周岩石发生拉伸剥落造成的。研究采用断裂力学的方法分析页岩中裂缝的扩展,认为裂缝扩展是与井筒发生耦合作用的结果。根据此模型可知,拉伸破坏是由于裂缝不断扩展而发生的,而这些裂缝来源于泥页岩中的天然裂缝,并且这些裂缝在最大压应力方向上扩展。在低于岩石极限强度应力下,尤其是在没有围压的情况下,拉伸破坏就开始了。众多的室内实验观测结果表明,在单轴压缩的条件下,拉伸破坏的确导致了岩石破碎的发生。拉伸破裂适用于靠近井壁处出现连续剥落而使井眼发生破坏这一微观力学模型。井眼发生拉伸破坏受围压的抑制作用很强,除了围压极小的情况外,在其他各种条件下,剪切破坏比拉伸破坏更有可能发生。因此,拉伸破裂或破碎很有可能只是在靠近井眼自由表面处发生。后来,有许多学者采用断裂力学的方法分析井周脆性岩石由于裂缝扩展导致坍塌失稳的机理。



1.2.1.3 剪切滑移机制

Elf Aquitaine 公司的地质学家 Maury (1996) 在研究法国南部的气田套管破损机理时发现, 在钻井过程中当泥浆液柱压力足以使地层中和井眼交叉的天然裂缝重新张开时, 沿裂缝面分布的应力释放, 将产生一个较小的但具有潜在危害的井眼错动, 即沿裂缝面的剪切位移, 是裂缝性地层井壁失稳的主要原因。

Younessi 等 (2010) 通过对裂缝的滑移势进行研究, 进一步阐明了裂缝性地层的井壁失稳机理。Younessi 等认为, Mohr-Coulomb 准则是一种较为常用的破坏准则, 但是由于裂缝性地层破坏的复杂性, 该方法只能进行简单的分析, 无法真实地反映该类地层的破坏机理。裂缝性地层的破坏除了剪切破坏和拉伸破坏外, 沿裂缝的滑移也是一种重要的破坏形式。基于此, 提出了裂缝性地层的滑移势指标 (FSPI) 用于评价裂缝性地层的稳定性, 认为该类地层的失稳破坏是裂缝性质、原地应力和工程活动相互影响、共同作用的结果。

1.2.1.4 应力损伤机制

损伤是指在环境或外载的作用下工程材料中各种非设计缺陷的产生和发展。损伤力学认为, 材料在受到外界因素作用时会因为内部微裂纹等缺陷的产生和扩展而发生劣化, 且这种劣化是不可逆的, 材料的破坏就是这种劣化发展和累积的过程, 当材料的劣化累积到一定程度时就会产生宏观裂纹, 发生破坏。由于硬脆性地层内部微裂缝发育, 采用传统的方法无法描述其复杂的微观结构特征, 损伤力学建立了岩石微观结构和宏观表现的关系, 可表述脆性页岩微裂缝扩展连通导致井壁失稳的渐进过程。将损伤力学理论应用在井壁稳定分析中, 最早是由著名学者 Dusseault 完成的, Dusseault 基于损伤力学的基本概念分析了石油钻井和生产过程中应力损伤对井周地层的影响, 分析了井眼钻开后井周硬脆性泥页岩地层微观结构、应力场和渗透压力随时间的演变过程。他指出, 损伤会增大近井地带的渗透率, 造成泥岩地层钻井过程的井壁失稳, 但在低渗储层中损伤可能对油田生产有利。

刘玉石等 (1998) 应用损伤力学理论, 从岩体的变形能出发, 建立了节理裂隙岩体的弹性损伤 - 断裂力学模型, 来研究硬脆性地层井壁稳定性问题。节理裂隙岩体的特点是岩体内存在大量的节理裂隙, 且节理裂隙多成组分布, 引入等效弹性 - 损伤柔度本构方程, 采用有限元法计算井眼周围的应力场。研究表明, 节理裂隙的存在使有效承载面减少, 井壁围岩切向应力增加, 因此维持井壁稳定的泥浆密度要较无损伤时高。由于较高的泥浆液柱压力会加速页岩水化和把泥浆压入裂缝, 不利于井壁稳定, 因此需要改善泥浆的性能, 既要较好地抑制页岩水化, 又要有较强的封堵裂缝的能力, 保证高泥浆密度下硬脆性地层的井壁稳定性。

1.2.2 水敏性地层的多场耦合作用

井眼钻开后, 在水力压差和化学势差的作用下, 如果水进入地层, 则引起地层孔隙压力升高以及泥页岩水化膨胀, 孔隙压力升高使得有效应力降低, 而水化使得泥页岩强度降低, 从而加剧泥页岩地层中井眼失稳。另外, 钻井泥浆和地层之间的温度差, 引起孔隙流



体和岩石基体体积的变化而产生附加的温度应力。井眼稳定不再单纯是一个力学平衡问题，而是多物理场耦合作用的结果。

由于井壁失稳多发生在泥页岩地层，含有大量的黏土矿物，易发生水化，因此力学与化学的作用在失稳过程中尤为重要，大部分关于井壁稳定的研究也是集中在这两个方面，尤其是力学与化学的耦合作用。井壁稳定力学-化学耦合作用的主要研究内容是钻井液与泥页岩作用后所产生的水化应力和孔隙压力的变化，井壁泥页岩的吸水状况及其对围岩应力分布、弹性模量和强度参数的影响。对泥页岩井壁稳定性的力学-化学耦合研究主要有以下几种分析方法：总吸附水量相关法、等效孔隙压力法、总水势的增量弹性理论等。

在 20 世纪 90 年代，井壁稳定力学-化学耦合的研究仍然局限于在考虑化学作用的情况下，分析含水量对力学参数的影响。严格地说，这一时期的研究只能算是简单考虑化学作用的影响，而不能称为力学-化学耦合。直到 21 世纪初期，Yu Chen 和 Chenevert 等通过不可逆传递过程的“流”与“力”的耦合，将水力-电化学耦合起来。至此，真正多场耦合的数学模型开始建立。在最近几年，多场耦合并壁稳定研究均是以此方法为基础，进行横向扩展，即由力学-化学耦合向力学、化学、电势、热力等多场耦合方向发展，如 Ghassemi 提出的线性化学-孔隙-热弹性耦合的井壁稳定模型。

关于井壁稳定的力学-化学耦合研究，具有代表性的是邱正松等（2007）提出的“多元协同”井壁稳定理论。认为在泥页岩地层中钻井，一旦水化，孔隙压力无法迅速传递出去，势必造成孔隙压力增加及钻井液液柱有效支撑应力下降，这是井壁失稳的首要原因。因此，加强封固及阻缓孔隙压力传递是提高井下液柱压力对井壁有效力学支撑作用的前提，有效应力支撑是井壁力学稳定的必要条件，增强抑制、化学位活度平衡是防治泥页岩（存在不完全半透膜效应）井壁失稳的有效手段，这四者缺一不可，从而形成了“物化封固井壁阻缓压力传递-加强抑制水化-化学位活度平衡-合理密度的有效应力支撑”的“多元协同”稳定井壁理论。

井眼钻开后，应力场、渗流场、化学场与温度场四者的耦合作用对井壁稳定性至关重要，也是目前研究的重点。对于不同的地层来讲，对井壁稳定起主导作用的可能是四者中的某一种或某几种，并不是所有地层的井壁失稳都是由这四种作用的变化共同主导的。

对于均质地层来说，多场耦合的井壁稳定分析技术已经较为成熟，目前井壁稳定研究的重点是研究并预测具有显著的“结构性”或者说“易开裂”地层的井壁稳定性，这些地层一般具有较强的硬脆性特征，并发育有丰富的层理、裂缝等复杂结构。尤其是近年来，随着油气资源战略向深层油气资源和非常规能源开发转移，硬脆性地层的井壁稳定问题逐渐成为井壁稳定研究的热点和难点。

1.2.3 硬脆性地层的渗流-应力耦合作用

对于高孔、高渗地层或裂缝、层理等结构性较强的地层，其井壁失稳主要受渗流-应力耦合作用控制。高孔、高渗地层的井壁稳定计算相对简单，本部分主要介绍硬脆性地层



渗流-应力耦合作用下井壁失稳的机理及分析方法。渗流-应力耦合作用下的井壁失稳机理认为层理、裂缝是硬脆性地层的高渗通道, 钻井过程中钻井液易沿层理、裂缝渗流, 渗流过程是渗流场和应力场相互耦合作用的结果, 即裂缝的渗透性取决于裂缝的变形与位移, 同时又影响裂缝内的流体流动。研究认为, 大部分硬脆性地层基质和裂缝充填物中均不含活性黏土矿物, 可忽略化学作用的影响, 虽无化学作用影响, 但是由于钻井液沿层理、裂缝侵入, 一方面导致裂缝面上的有效正应力下降, 另一方面产生润滑作用, 同样会造成地层强度降低, 诱发失稳。

目前, 渗流-应力耦合并壁稳定研究主要集中在钻井液侵入裂缝的驱动作用、泥浆及其滤液侵入裂缝后地层强度的弱化机制和井壁稳定理论计算模型三个方面。根据裂缝存在形式的不同, 井壁稳定计算模型主要可分为单一裂缝、两组正交裂缝、多组随机裂缝和双重孔隙介质四大类。采用的方法主要包括离散元、有限元和边界元等多种数值计算方法。

1.2.3.1 钻井液侵入弱面的驱动作用

井眼钻开后, 钻井液与井周泥页岩接触, 在各种物理化学作用下发生物质交换, 导致钻井液侵入裂缝和基质内部。M. E. Chenevert (1970) 通过室内实验发现泥页岩与钻井液接触后会发生吸水现象, 泥页岩含水量增加导致地层强度性质发生变化, 从而影响井壁稳定性, Chenevert 认为泥页岩吸水是由于其与环境之间存在湿度差引起的。

Fonseca (1998) 认为即使地层孔隙压力与钻井液液柱压力相等, 钻井过程中也会出现流体进出地层的现象, 影响井壁稳定性, 通过研究发现, 这种现象的发生主要是由于地层水活度和钻井液水活度的不同造成的。

E. Van Oort (2003) 总结和发展的泥页岩与钻井液之间的物理化学作用对井壁稳定性的影响机理, 他认为泥页岩与钻井液之间发生物质交换主要是由水动力学压差梯度、化学势梯度、电势能梯度和温度梯度四种作用共同驱动的。

石秉忠 (2012) 通过 CT 成像技术研究了硬脆性泥页岩自吸水后裂缝的扩展贯通规律以及岩石破坏过程。研究发现, 硬脆性泥页岩中的微裂缝在毛细管作用下自吸水使得裂缝扩展连通是造成硬脆性泥页岩井壁失稳的主要原因之一。

毛细管作用与介质润湿特性有关, 卢运虎 (2012) 建立了介质润湿特性控制的裂缝扩展模型, 提出了基于润湿理论的页岩井壁稳定评价方法。研究结果表明, 页岩地层钻井时水基钻井液应减小钻井液界面张力和增大钻井液与岩石的润湿角; 油基钻井液应减小钻井液界面张力和润湿角, 从而强化井壁围岩强度、防止页岩井壁发生垮塌。

1.2.3.2 钻井液侵入对力学性质的影响

早期钻井液对地层力学性质的影响研究主要集中于水敏性黏土矿物与钻井液的化学反应对泥页岩本身强度的影响。对于不含强水敏性黏土矿物的硬脆性地层而言, 其浸泡在钻井液中的强度弱化程度主要与钻井液类型和其本身裂缝的粗糙程度有关。WAN 等 (1998) 通过直剪实验测试了不同性质 (光滑与粗糙) 裂缝面强度随不同类型钻井液浸泡时间的变化规律。研究结果表明, 蒸馏水、油基泥浆和胶质化学泥浆对光滑裂缝面的内摩擦角没有

影响,但是对粗糙裂缝面内摩擦角影响较大,随着浸泡时间的增加,粗糙裂缝面的内摩擦角显著减小,由于这三种泥浆只对粗糙裂缝面有影响,因此钻井液可能只对裂缝内的粗糙体有影响,钻井液对该类硬脆性地层强度影响的机理主要可归结为润滑和粗糙体退化。

1.2.3.3 井壁稳定理论研究模型

(1) 单一径向裂缝。

P. J. McLellan 等(1996)研究了加拿大 Northeastern British Columbia 山前构造硬脆性泥页岩地层的井壁稳定性问题。通过对层理裂缝发育泥页岩岩心的 X 射线衍射分析表明,岩心的主要成分为石英(47%),同时还含有少量的斜长石、白云石和菱铁矿,黏土矿物则主要以伊利石为主,同时含有少量的高岭石和绿泥石,不含有活性黏土矿物。但是,通过观察岩心的微观结构发现,该岩心层理裂缝发育,呈现显著的非连续特性,弱面间距在 0.01~0.40m,平均间距 0.11m,由于岩心的层理裂缝发育,即使不存在活性黏土矿物,岩石基体和弱面的强度也会随着时间的推移而降低。

P. J. McLellan 等假设地层中存在一组优势弱面,且弱面沿径向分布,与井眼连通。考虑弱面强度弱化及各向异性的影响,假设弱面的黏聚力和内摩擦角分别为 0.1MPa 和 25°,采用 3D 边界元模型,根据非线性 Hoek - Brown 破坏准则对含单一弱面地层的井壁稳定性进行了数值模拟,其结果与超声波成像数据取得了较好的一致性。研究认为,对于裂缝地层而言,钻井液密度过低或过高都容易引发井壁失稳:当钻井液密度过低时,井周应力超过地层强度,引起坍塌;钻井液密度过高,则可能在裂缝性地层中无法形成有效滤饼,压力沿层理面或裂缝面传递,裂开的泥页岩沿弱面剥落,最终井眼周围地层的强度和硬度随时间降低,造成进一步坍塌。通过对现场实例、室内实验以及数值模拟结果等进行分析发现,泥浆及其滤液沿微裂缝和层理面的渗流是引起井下复杂的根本原因。

(2) 两组正交裂缝。

F. J. Stantarelli 等(1992)对现场井壁失稳最为严重井段的泥页岩岩心分析发现,该井段地层岩心裂缝发育,且存在两组裂缝,平均间距为 2.5cm×4cm,裂缝或微孔隙或被石英和方解石填充,几乎不含膨胀性黏土矿物,井壁失稳的化学因素可以忽略。通过观察岩心可以清晰地发现钻井液沿裂缝侵入的痕迹,但岩石基体几乎不可渗透,应用 UDEC 离散元程序研究了该类地层的井壁稳定问题。

该模型假设井周地层被一组间距为 2.5cm×4cm 的正交裂缝分割,克服了有限元、边界元和有限差分等方法只能模拟小变形和非贯穿缝的缺陷,可定量计入岩石基体和裂缝的变形行为以及流体通过裂缝流动的影响。但是,该模型只能模拟二维情况,且只能反映井壁失稳初期的情况,对于模拟真实条件下 3D 裂缝性地层的井壁失稳尚有一段距离。

通过数值模拟研究结果可知,在泥浆密度较小情况下,井周应力集中造成径向裂缝闭合,切向裂缝张开,有效防止钻井液沿裂缝的渗流,保持井壁稳定,反之,泥浆密度较高,径向裂缝张开,钻井液沿正交裂缝流动,裂缝中压力变大,岩体变得松散,容易受循环的钻井液冲蚀和底部钻具组合扰动的影响,加剧井壁失稳。因此,对于裂缝性地层,提



高钻井液密度反而对维持井壁稳定起到反作用,而降低钻井液滤失以及增大钻井液黏度能够起到稳定井壁的作用,另外通过建立泥饼,提高钻井液的有效封堵,也有利于维持该类地层的井壁稳定。

(3) 多组随机裂缝。

Xing Zhang 等(1999)假设地层中的裂缝分别为随机龟裂裂缝和两组排列裂缝,通过 UDEC 离散元方法建立了裂缝性岩体井壁稳定数值计算模型。模型中考虑了裂缝性岩体的弹塑性变形。

Xing Zhang 等认为,裂缝岩体的变形是由岩石基体的变形和平行、垂直于裂缝的变形共同组成的。破坏准则上,岩块采用弹塑性莫尔-库仑准则进行分析,裂缝采用弹塑性库仑滑动准则进行分析。模型中将裂缝作为岩块之间的边界条件,完全耦合岩体的力学与水力学行为,即裂缝渗透性取决于变形与位移,同时又影响流体压力。对于裂缝岩体的流动规律根据其接触关系采用两种模型,对于点接触(点对点、点线接触)和线-线接触分别采用不同的渗流模型,且裂缝张开度是无正应力作用下裂缝张开度和正应力作用下裂缝位移的函数。

多组裂缝地层井壁稳定性分析的另一种方法是以多弱面地层剪切破坏准则为基础,建立含多组弱面结构泥页岩的井壁稳定分析模型,以此来分析弱面产状、数量及相对位置等因素对坍塌压力的影响规律。

(4) 双重孔隙介质。

Jincai Zhang 等(2003)将裂缝性地层等效成双重孔隙介质,并编制了有限元程序,研究了裂缝性地层井壁稳定性问题。在双重孔隙模型中,裂缝性岩体被认为是由随机分布的裂缝分割而成的许多多孔岩块,因此,在裂缝岩体中,裂缝体系和基质体系具有明显不同的孔隙度和渗透率。总体的流体流动主要在基质周围的高渗透率、低孔隙度的裂缝体系中进行。在双重孔隙介质模型中,基质与裂缝中的变形和流体流动是完全耦合的,可建立双重孔隙公式,采用有限元方法对耦合方程进行求解。

V. Nguyen 等(2004)也采用双重孔隙多孔介质力学方法研究裂缝性地层中的井壁稳定问题。他们认为,裂缝性地层具有高度的不均一性,裂缝是一种低孔、高渗的通道,传统的单一孔隙方法无法模拟裂缝性地层中流体流动与变形等复杂的关系。模型中假设岩石基质和裂缝都是均质、各向同性介质,裂缝性地层的变形受有效应力控制,但与单一孔隙不同,裂缝地层有两个不同的孔隙压力场,因此具有两个不同的有效应力。

1.2.4 硬脆性地层的渗流-应力-化学耦合作用

现场取心后测试发现,部分硬脆性地层基质或裂缝充填物中含有活性黏土矿物,此时,若泥浆及其滤液侵入裂缝,会与地层及裂隙填充物发生化学作用,其井壁失稳主要受“渗流-应力-化学”耦合作用控制。目前的研究主要通过实验和数值模拟手段,以两组裂缝和双重孔隙介质井壁稳定数值分析模型为基础,研究渗流-应力-化学耦合作用下硬

脆性地层井壁失稳机理。

(1) 两组正交裂缝。

X. Chen 等 (2003) 应用离散元 (UDEC) 程序研究了二维情况下, 井壁渗流对裂缝性地层井壁稳定性的影响, 其建立的模型与 Santarelli 等建立的模型相似。X. Chen 等认为, 对于裂缝性岩体, 泥浆及其滤液侵入裂缝, 一方面可能与地层及裂隙填充物发生化学作用, 另一方面可能对裂缝起到润滑作用, 两方面共同作用造成裂缝内摩擦角减小, 井周地层更容易沿裂缝面发生破坏, 恶化井壁稳定。该模型假设裂缝性岩体的变形是由两方面组成的, 一方面是岩体的变形, 另一方面是平行于和垂直于裂缝的变形, 岩石基体为坚硬可变形介质。

X. Chen 等的研究表明, 孔隙压力和裂缝的传导率受裂缝变形的影响, 反过来, 裂缝的变形受裂缝中孔隙压力的影响, 同时, 通过自定义的函数确定裂缝内摩擦角随渗流的变化。对于裂缝中钻井液及滤液的流动, X. Chen 等认为, 应同时定量计入力学变形和孔隙压力传递。对于给定的时间, 裂缝中钻井液及滤液的侵入程度由其流动速率控制, 假设其符合平板间黏性流体层流流动。

钻井液渗流对裂缝内摩擦角的影响程度由泥浆类型和裂缝填充物的性质决定, 由于未获得研究区域的实验测试数据, X. Chen 等假设裂缝内摩擦角降低幅度分别为不同的值, 分析其对井壁稳定性的影响。

(2) 双重孔隙介质。

Nguyen 等 (2009) 利用双重孔隙模型研究了化学活性裂缝性泥页岩的井壁稳定性, 计算中综合考虑了时间相关性、基质孔隙度和渗透率、裂缝孔隙度和渗透率及化学效应的影响。通过在 Arabian Gulf 的钻井实践表明, 在钻进化学活性裂缝性地层时, 往往发生与时间相关的井壁失稳问题。该类地层不仅存在宏观层理面而且有大量自然存在的微观裂缝赋存其中。裂缝的存在不仅造成地层强度弱化, 而且还为低渗透岩石提供了高渗透率的流动通道。

由于化学活性裂缝性泥页岩很难取得常规岩石力学实验所需要的岩心, Nguyen 等应用 Oklahoma 大学新设计的一种室内岩石力学性能测试装置 Inclined Direct Shear Testing Device (IDSTD) 进行实验研究。与常规装置要求的标准岩心为 $\phi 25\text{mm} \times 50\text{mm}$ 或 $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ 不同, 该装置可对小岩样进行测试, 而且还可将岩心与不同的钻井液接触, 测试不同循环时间下活性裂缝性泥页岩强度参数随时间的变化规律。

对于耦合化学作用影响的时间相关的双重孔隙、双重渗透率模型, 即双重孔隙 - 化学 - 弹性模型, 裂缝的存在对井壁稳定有较大影响。岩体中存在的裂缝, 一方面造成岩石强度弱化, 另一方面成为流体流动和扩散的主要通道。据估计, 68m^3 的岩石中大约有 500×10^4 个微裂缝, 由于其数量巨大, 无法在计算中精确计入, 因此双重孔隙模型中忽略单个裂缝的长度和宽度, 而由次生孔隙连续介质取代, 岩石基质和裂缝作为独立的两个系统, 每个系统中流体的流动均符合达西定律, 由于多孔介质中的达西流雷诺数较小, 不需