

深层泥页岩井壁失稳机理与预测模型研究进展

程万¹, 孙家应², 尹德战², 蒋国盛^{*1}

(1. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074; 2. 安徽省煤田地质局第一勘探队, 安徽 淮南 232052)

摘要: 深层油气资源开发已成为国家油气发展的重要战略, 泥页岩井段井壁失稳是制约深层油气资源安全高效开采的技术“瓶颈”。本文在分析深层泥页岩井壁失稳的力学机理和化学机理基础上, 着重论述考虑泥页岩水化作用、弱结构面、各向异性 and 多场耦合的井壁稳定性预测模型的研究进展和发展趋势。钻井液密度不合理是井壁力学失稳的主要原因, 泥页岩水化作用是井壁化学失稳的主要原因; 在井壁流-固-化-热四场耦合作用下, 考虑弱结构面、各向异性对泥浆安全密度窗口的影响, 是目前研究深层泥页岩井壁稳定性的主要趋势和方法。

关键词: 井壁稳定; 坍塌压力; 破裂压力; 钻井液; 泥页岩

中图分类号: P634; TE25 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)10-0021-08

Research status of the wellbore failure mechanism and predicting model in deep mudstone and shale

CHENG Wan¹, SUN Jiaying², YIN Dezhan², JIANG Guosheng^{*1}

(1. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

2. First Exploration Team of Anhui Provincial Bureau of Coal Geology, Huainan Anhui 232052, China)

Abstract: The exploitation of deep oil and gas resources has become an important strategy of national oil and gas development, and borehole instability in mudstone and shale formations is the technical bottleneck restricting the safe and efficient development of deep oil and gas resources. This paper analyzes the mechanical and chemical mechanisms of deep mudstone shale borehole failure with the focus on the research status and development trend of wellbore stability prediction models for shale hydration, weak structural plane, anisotropy and multi-field coupling. Improper mud density is the major cause for mechanical wellbore failure, while mudstone and shale hydrations are the major causes for chemical wellbore failure. Investigation of the effects of the weak plane and anisotropy on the safe density window of drilling mud is the major method to study the wellbore stability in deep mud and shale formations under the action of the fluid-solid-chemical-thermal coupling behavior on the wellbore.

Key words: wellbore stability; collapse pressure; breakdown pressure; drilling mud; mudstone shale

0 引言

我国对石油天然气资源的需求量日益增加, 2020年原油对外依存度预计超过70%, 天然气预计超过40%^[1], 国家能源安全受到严重威胁。随着浅

层油气资源的逐渐枯竭, 深层油气资源开发已成为国家油气发展的重要战略。由于深层油气地质和钻井条件复杂, 井壁极易出现失稳破坏的现象。井壁失稳问题一般发生在页岩、煤岩、盐岩、非胶结或

收稿日期: 2021-03-23; 修回日期: 2021-08-23 DOI: 10.12143/j.ztgc.2021.10.003

基金项目: 安徽省煤田地质局重点科技攻关项目“两淮矿区地面定向多分支水平井高效钻进技术体系研究”(编号: 皖煤地科2020-2)

作者简介: 程万, 男, 汉族, 1987年生, 副研究员, 硕士生导师, 地质工程专业, 博士, 长期从事非常规油气藏井壁稳定、水力压裂方面的研究工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, chengwancup@163.com。

通信作者: 蒋国盛, 男, 汉族, 1965年生, 地质工程科技部国际合作基地主任, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 博士, 长期从事非常规地质能源勘探与开发领域的教学和科研工作, 湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号, jianggs65@sina.vip.com。

引用格式: 程万, 孙家应, 尹德战, 等. 深层泥页岩井壁失稳机理与预测模型研究进展[J]. 钻探工程, 2021, 48(10): 21-28.

CHENG Wan, SUN Jiaying, YIN Dezhan, et al. Research status of the wellbore failure mechanism and predicting model in deep mudstone and shale[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(10): 21-28.

弱胶结的岩石及其它破碎性的岩石等地层^[2]。从已有的钻井工程实践来看,井壁失稳主要发生在泥页岩井段。

在钻井过程中泥页岩地层发生失稳破坏,主要表现为井眼缩径(见图1a)、坍塌(见图1b)、扩大(见图1c)和破裂(如图1d)等,轻则造成钻井周期延误,重则导致井眼报废,造成巨大的经济损失。泥页岩地层井壁失稳是制约深层油气资源安全高效开发的

技术“瓶颈”。由于地应力、地层岩石力学参数、岩石与泥浆相互作用和钻井作业等因素,井壁出现失稳问题是钻井工程中所遇到的复杂难题,迄今还没有研究出可以彻底解决这个难题的高效方法。国内外的专家在井壁失稳力学和化学机理、井壁稳定性预测模型方面做了大量的研究工作,笔者对此进行梳理,并着重论述多场耦合的井壁稳定性预测模型的研究进展和发展趋势。

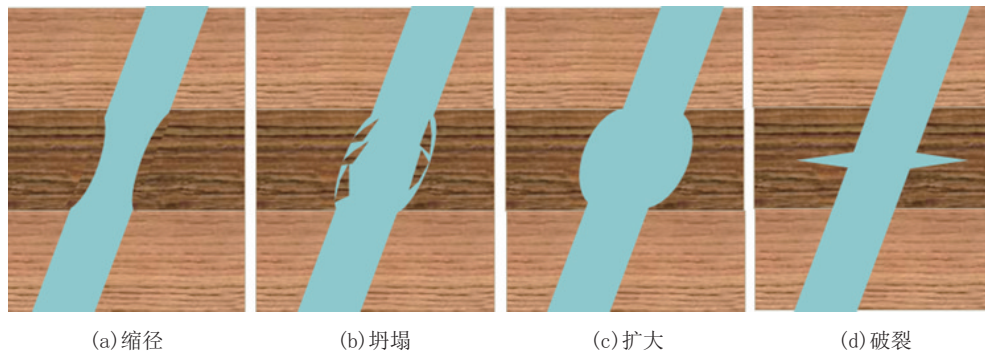


图1 井壁失稳现象

Fig.1 Types of wellbore failure

1 泥页岩井壁失稳机理

1.1 力学失稳机理

地层被钻开前仅受到原始地应力的作用,地层被钻开后钻井液液柱压力与原始地应力同时作用在井壁围岩上,井壁围岩应力场因而发生重新分布。钻井液侵入到井壁围岩,或地层流体侵入到井眼内均会引起井壁围岩孔隙压力重新分布,进而影响有效应力重新分布,导致井壁围岩发生变形。泥页岩井壁围岩失稳机制包括围岩塑性流动或大变形、沿弱结构面(层理、节理、裂缝等)的剪切滑动,及钻井液密度不能平衡地应力所引起的井壁破裂和坍塌^[3]。井眼形成后,钻井液密度产生的静液柱压力对井壁起到一定的支撑作用,合理的钻井液密度能够有效地维护井壁稳定,预防井涌、井壁坍塌及井漏等井下事故发生。从岩石力学的角度上讲,井壁破坏类型一般分为剪切破坏和拉伸破坏。一般井壁坍塌属于剪切破坏,井壁破裂属于拉伸破坏。常用于判断井壁剪切破坏的力学强度准则有很多,例如Mohr-Coulomb准则、Mogi-Coulomb准则、Hoek-Brown准则、Drucker-Plager准则等^[4-5]。判断井壁拉伸破坏主要是采用围岩抗拉强度与拉应力的比

较。当钻井液密度过低时,井眼失去支撑而发生坍塌掉块,此时,钻井液密度临界值称为井壁坍塌压力当量密度;当钻井液密度过高时,井筒可能会发生井壁破裂,此时,钻井液密度临界值称为井壁破裂压力当量密度。通常在实际钻井过程中,在保证井筒不发生溢流前提下,钻井液密度通常略高于井壁坍塌压力当量密度,低于井壁破裂压力当量密度。钻井液安全密度窗口用公式表达如下:

$$\{\rho_p, \rho_c\} < \rho_m < \rho_f \quad (1)$$

式中: ρ_p ——地层原始孔隙压力当量密度; ρ_c ——井壁坍塌压力当量密度; ρ_m ——钻井液密度; ρ_f ——井壁破裂压力当量密度。

泥页岩可以认为是一种多孔的弹塑性介质,孔隙弹塑性力学可以较为准确地表达泥页岩的应变与应力本构关系^[4]。泥页岩作为一种层理发育的沉积岩,其层理面法向方向的力学参数与平行于层理面不同,大多表现为横观各向同性特征,对井壁坍塌区域有一定程度的影响。层理面、节理面和裂缝面的胶结性比泥页岩本体要低,较易优先发生剪切滑动^[5]。

1.2 化学失稳机理

当地层被钻开后,井筒中的钻井液经过与地层

流体之间的孔隙压力差、温度差、化学势差和地层毛细管力的驱动作用, 进入近井壁地层。随着井壁裸露时间增长, 钻井液与地层矿物质接触后发生化学反应。泥页岩地层中粘土矿物主要包括高岭石、绿泥石、蒙脱石和伊利石等。泥页岩中粘土质矿物易水化膨胀, 在钻井液的浸泡下出现弹性模量、力学强度等参数降低, 最终弱化了井壁围岩的胶结性, 降低了井壁围岩的强度, 导致井壁支撑能力减弱, 加剧了井眼垮塌的现象^[6]。泥页岩水化作用的本质是粘土矿物吸附结合水而发生膨胀(图2)。水化作用的强弱与页岩矿物组分、粘土矿物含量、地层水的活度、埋藏深度、阳离子交换容量、阳离子种类等因素有关^[7]。



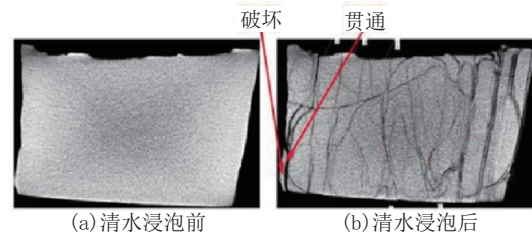
(a) 清水浸泡前 (b) 清水浸泡后

图2 水化分散的硬脆性泥页岩^[8]

Fig.2 Hydration of hard brittle shale

油基钻井液可以较好解决钻井过程中泥页岩水化的问题, 但其成本高、污染大, 实际生产现场更多的是使用经特殊处理的水基钻井液。水基钻井液对泥页岩井壁稳定性影响研究, 目前主要是针对钻井液密度、抑制性、流变性、封堵性和活度。汪伟^[9]研究钻井液流变性对硬脆性泥页岩井周微裂缝中孔隙压力和岩石强度的影响规律, 发现钻井液粘度越大, 井周微裂缝中孔隙压力增长幅度和压力传递距离都越小。钻井液屈服值对井周微裂缝中孔隙压力和压力传递距离的影响较小, 浸泡后的泥页岩强度降低幅度较低。张雅楠^[8]证实硬脆性泥页岩中微裂缝扩展是引起井壁破坏的主要原因(图3), 他研究了多种封堵剂和压差对硬脆性泥页岩微裂缝的封堵效果的影响规律, 揭示了封堵剂在裂缝中的封堵机理和封堵位置对井壁稳定性的影响机理。强抑制性钻井液能很好地缓解粘土矿物水化作用, 延长井壁稳定时间^[10]。张龙^[11]研究了泥页岩中4种主要粘土矿物的亲水特性, 发现蒙脱石的吸附结合水的能力最强。他还研究了抑制剂对蒙脱石水化分散膨胀与晶

层间距的影响规律, 定量地描述了钻井液抑制剂对泥页岩的水化作用。钻井液活度^[12]能够反映钻井液的抑制性能, 不同活度的钻井液在宏观上使页岩强度发生差异性变化, 微观上影响页岩内部结构。



(a) 清水浸泡前 (b) 清水浸泡后

图3 硬脆性泥页岩泡水前后比较

Fig.3 Comparisons of hard brittle shale before and after soaking in the water

1.3 小结

泥页岩水化作用可以归结到钻井液对井壁泥页岩力学性能参数及井壁周围应力的改变。“力学-化学”耦合的泥页岩井壁稳定性研究的主要内容, 其核心是如何定量研究水化作用引起的力学效应, 并应用于计算井壁应力场^[13]。

2 泥页岩井壁稳定性预测模型

由于沉积成岩作用, 泥页岩通常具有明显的层理与裂缝发育、各向异性、水化特征, 裸露的井壁又处于温度场、应力场、渗流场、化学场等多个物理场耦合作用。针对泥页岩特征和多场耦合作用, 国内外相关文献报道了大量的井壁稳定性预测模型。

2.1 考虑粘土水化的井壁稳定模型

在水基钻井液浸泡下, 泥页岩粘土矿物水化作用明显。Chenevert^[14]和Yew等^[15]发现岩石在钻井液浸泡下会发生水化膨胀, 并建立了泥页岩水化模型。他们采用膨胀应变来确定膨胀程度, 且认为在钻井液浸泡下泥页岩岩石力学参数是随含水量变化的, 通过实验得到了岩石弹性参数变化规律。黄荣樽等^[16]在Yew等^[15]的基础上, 修正了围岩岩石变化及膨胀程度规律, 得出了泥页岩岩石力学参数(包括弹性模量、泊松比、粘聚力和内摩擦角等)与含水量的关系。Hale等^[17]首次建立了考虑化学势的孔隙压力模型, 并得到了孔隙压力随浸泡时间的变化规律。王正良等^[18]研究了硬脆性泥页岩吸水裂纹扩展特征, 发现含水量的微小变化会诱发泥页岩稳定性的较大变化, 认为控制钻井液的滤失量是保证井

壁稳定的关键措施之一。金衍等^[19]利用水化模型模拟了坍塌压力随时间的变化规律。温航等^[20]研究了钻井液活度-岩石膨胀率、岩石活度-吸水量的关系,建立了同时考虑层理产状和层理水化的坍塌压力模型。王磊^[21]研究了水化作用对泥页岩宏观力学性质变化及力学特征的影响规律。孟英峰等^[22]测试了不同工作液环境下龙马溪组页岩水化膨胀性能及力学性能动态变化规律,考虑井眼轨迹、完井后井底力学边界条件,建立了龙马溪组页岩水平段裸眼完井井壁稳定模型,评估裸眼完井的可行性。张世锋等^[23]参考流动-扩散耦合模型,计算了钻井液抑制-封堵-渗透联合作用下的泥页岩安全密度窗口,分析了钻井液封堵性和抑制性对安全密度窗口的影响。提高钻井液封堵性,能够减缓泥页岩井壁孔隙压力传递速度;钻井液抑制性对水化作用强烈的泥页岩井壁坍塌压力具有显著作用;提高钻井液封堵-抑制性能,可以降低坍塌压力和提高破裂压力,从而拓宽安全密度窗口和延长坍塌周期。刘洋洋^[24]建立泥页岩地层结合水与含水量关系模型,再研究结合水对岩石力学参数及坍塌压力的影响。

2.2 考虑弱结构面的井壁稳定模型

泥页岩地层中通常发育着层理、节理和天然裂缝,这些结构面具有较页岩本体更弱的胶结性。金衍等^[25]给出了考虑地层中存在一组弱结构面的坍塌压力计算方法,研究表明考虑弱结构面的影响后坍塌压力大幅增加。刘向君等^[26]定量分析了岩石弱结构面对直井和斜井井壁岩石力学性能的影响。马天寿等^[27-28]建立了层理性页岩水平井井壁稳定模型,定量分析了层理产状、井斜方位(图4)对水平井坍塌压力和剪切失稳区域的影响。刘志远等^[29]基于裂缝产状、水化作用对弱面摩擦强度影响,建立了多组弱面的水平井裸眼井壁垮塌量计算模型^[30]。邓媛等^[31]考虑了水化作用对岩石本体和层理面的强度弱化效应,建立了力-化耦合作用下层理性页岩水平井井壁坍塌压力模型,并研究了水化应变、层理面产状和钻井时间等因素对坍塌压力的影响规律。陈平等^[32]基于斜井井壁应力场和井壁失稳岩石破坏模式,获得维持井壁稳定的钻井液安全密度窗口、安全和危险井眼方位。

2.3 考虑页岩各向异性的井壁稳定模型

泥页岩地层的力学性质通常具有各向异性特征。Lekhnitskii^[33]推导了各向异性板中孔边应力场

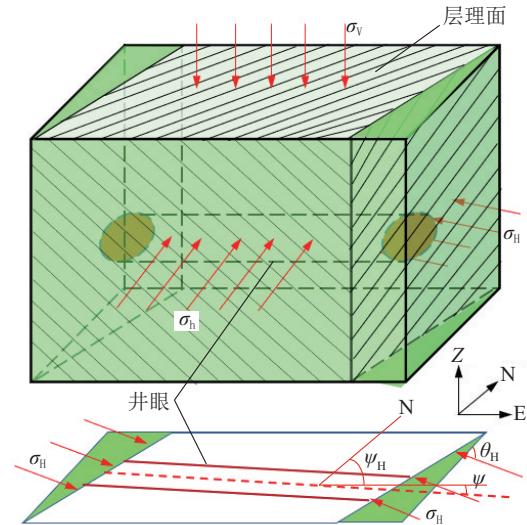


图4 层状页岩与水平井井壁应力坐标关系^[28]

Fig.4 Coordinate relationship between horizontal wellbore stress and laminar shale

解析解。Aadnoy^[34]在Lekhnitskii^[33]的基础上,建立了钻井过程中横观各向同性地层中的井壁应力场模型。Cheng^[35]研究了各向异性地层中材料参数之间的关系。Abousleiman等^[36]在Cheng^[35]的基础上,推导出了横观各向同性地层斜井的井周应力场及孔隙压力场解析解。Lee等^[37]推导了定向井各空间坐标系之间的转换关系,计算了各向异性井壁坍塌区域。卢运虎等^[38]研究了横观各向同性地层的井壁应力场,建立了斜井地层井壁稳定模型。洪国斌等^[39]实验研究页岩各向异性强度和变形参数(图5),结合斜井状态下的井周应力模型建立了大斜度井地层破裂压力模型。曹文科等^[40]和Liu等^[41]获得了岩石各向异性导致的页岩弹性参数变化对井周围岩应力分布影响的规律,并对井壁稳定性进行了评估。

2.4 考虑多场耦合作用的井壁稳定模型

Heidug等^[42]考虑了溶质和溶剂的双扩散,认为页岩是非理想半透膜,但是其控制方程是非线性的,无法得到井周应力场和孔隙压力场的解析解。Ghassemi等^[43]在Heidug等^[42]的基础上,给出了线性力-化耦合本构关系,并获得了井周应力解析解。Oort^[44]认为钻井液与泥页岩之间的相互作用包括温度梯度、水动力学压差梯度、电势梯度、化学势梯度。据此,Ekbote等^[45]建立了流-固-化-热多场耦合的井壁应力场模型,但并未应用于评价井壁稳定

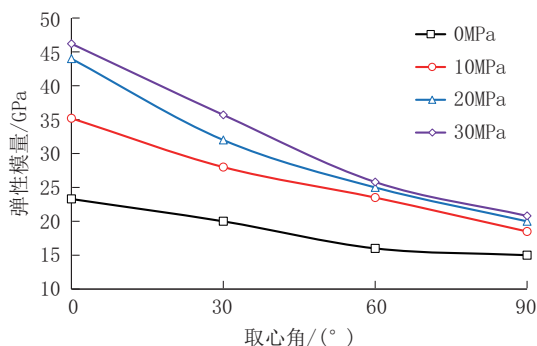
图5 页岩弹性模量与取心角的关系^[39]

Fig.5 Relationship between the coring angle and the elastic modulus of shale

性。Gao等^[46]将Ekbote等^[45]模型应用于页岩井壁稳定性,但未考虑页岩水化作用。高佳佳^[47]将基于单重孔隙介质变形的Biot型本构关系推广至描述双重介质的本构关系,建立了等温条件下双重化学-孔隙弹性本构方程,揭示了化学活性裂缝性页岩地层的井壁稳定规律。

周俊^[48]在地层岩石横观各向同性的基础上,考虑地层温度变化所产生的热效应及井筒和地层流体压力差造成的渗流效应,将热应力考虑进孔隙弹性变形中。彭程^[49]推导出的考虑溶质和溶剂双重扩散的力-化耦合模型,并把化学势写成溶质质量分数的线性函数,而得到力-化耦合多孔弹性本构方程,从而推导出孔隙压力和井周应力的解析解。肖志强等^[50]分析了硬脆性泥页岩微观结构和力学特性,在综合研究泥页岩吸水扩散、强度弱化、压力传递以及固体应变之间相互耦合作用,探讨了井壁渐进破坏过程。Cheng等^[4]和张宇等^[51]在Ekbote等^[45]模型的基础上,考虑了页岩基质和层理随着钻井液浸泡时间的水化作用,构建了流-固-化-热四场全耦合的井壁稳定力学模型,并预测了任意井斜方位下的井壁坍塌压力(图6)。王书婷等^[52]对比分析孔隙弹性模型和双孔介质孔隙弹性模型,发现孔隙弹性模型能揭示井壁失稳延迟现象和井壁内部起裂现象;双孔介质孔隙弹性模型所需参数繁多,不适合于现场实际应用。

2.5 井壁稳定预测模型发展趋势

针对泥页岩地层弱面结构、各向异性、水化作用等主要因素,考虑流-固-化-热多场耦合作用,构建泥页岩地层井壁应力本构模型,计算井壁围岩应力场。结合钻井过程中泥页岩地层实际发生的井壁破

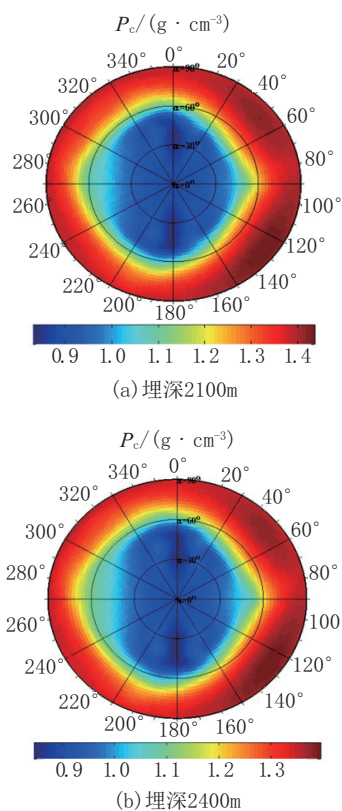
图6 泌阳凹陷陆相页岩坍塌压力随井斜方位的分布^[4]

Fig.6 Collapse pressure distribution versus the deviation and azimuth angles in continental shale in Biyang Sag

坏机理,选择或构建合适的力学强度准则,计算井壁坍塌压力和破裂压力,预测井壁破坏区域或方向;根据地层力学参数随钻井液浸泡时间的动态变化规律,预测井壁失稳周期;评价钻井液各项性能指标与井壁坍塌压力、破裂压力、坍塌周期的关系,从而优化设计钻井液性能指标。结合实际的井壁稳定情况,修改和完善井壁稳定性预测模型。

3 结论与认识

(1) 钻井液密度不合理而失去对井壁有效支撑是井壁力学失稳的主要原因,泥页岩水化作用而引起的井壁围岩强度弱化是井壁化学失稳的主要原因。“力学-化学”耦合的泥页岩井壁稳定性研究的核心是如何定量研究水化作用引起的力学效应,并应用于井壁应力场中。

(2) 水基钻井液对泥页岩井壁稳定性影响研究目前主要是针对钻井液密度、抑制性、封堵性、活度和流变性,目的是拓宽钻井液安全密度窗口,延长井壁的坍塌周期。

(3)针对钻井过程中泥页岩地层实际发生的井壁破坏机理,在流-固-化-热四场耦合的井壁应力场基础上,考虑泥页岩弱结构面、水化作用、材料各向异性对井壁钻井液安全密度窗口的影响,是目前研究深层泥页岩井壁稳定性的主要趋势和方法。结合实际的井壁稳定情况,修改和完善井壁稳定性预测模型。

参考文献(References):

- [1] 贾承造, 庞雄奇, 姜福杰. 中国油气资源研究现状与发展方向[J]. 石油科学通报, 2016, 1(1): 2-23.
JIA Chengzao, PANG Xiongqi, JIANG Fujie. Research status and development directions of hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Science Bulletin, 2016, 1(1): 2-23.
- [2] 金衍, 陈勉. 井壁稳定力学[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
JIN Yan, CHEN Mian. Mechanics of Wellbore Stability[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [3] 陈勉, 金衍, 卢运虎. 页岩气开发: 岩石力学的机遇与挑战[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2017, 47(11): 114601.
CHEN Mian, JIN Yan, LU Yunhu. Shale gas development: Opportunities and challenges for rock mechanics[J]. Sci Sin-Phys Mech Astron, 2017, 47(11): 114601.
- [4] Cheng W, Jiang G, Li X, et al. A porochemothermoelastic coupling model for continental shale wellbore stability and a case analysis[J]. J Pet Sci Eng, 2019, 182: 106265.
- [5] 陈勉, 金衍, 张广清. 石油工程岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
CHEN Mian, JIN Yan, ZHANG Guangqing. Rock Mechanics Related to Petroleum Engineering[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [6] 樊鹏飞. WY-CN 龙马溪组页岩水平井井壁坍塌失稳机理研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
FAN Pengfei. Wellbore instability mechanism of horizontal well in shales in WY-CN Longmaxi formation[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [7] 邱正松, 李健鹰. 硬脆性页岩坍塌机理的实验研究[J]. 钻井液与完井液, 1989, 6(2): 26-32.
QIU Zhengsong, LI Jianying. Experimental study of caving mechanism of hard and brittle shale[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 1989, 6(2): 26-32.
- [8] 张雅楠. 钻井液封堵性能对硬脆性泥页岩井壁稳定的影响[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
ZHANG Ya'nan. The impact of drilling fluid plugging performance on well bore stability of hard brittle shale[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [9] 汪伟. 钻井液流变性对硬脆性泥页岩井壁稳定性的影响[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
WANG Wei. Effect of drilling fluid rheological properties on the hard brittle shale stability[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [10] 杨建民, 刘伟, 熊小伟, 等. 页岩气井环保型抑制水基钻井液体系研究与应用[J]. 钻采工艺, 2020, 43(2): 107-110.
YANG Jianmin, LIU Wei, XIONG Xiaowei, et al. Research and application of environmentally friendly and strongly inhibited water-based drilling fluid system for shale gas wells[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(2): 107-110.
- [11] 张龙. 抑制剂对粘土矿物结合水的影响研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
ZHANG Long. Effect of inhibitor on the clay-mineral bounding water[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [12] 温航, 陈勉, 金衍, 等. 钻井液活度对硬脆性页岩破坏机理的实验研究[J]. 石油钻采工艺, 2014, 36(1): 57-59.
WENG Hang, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Experimental research on brittle shale failure caused by drilling fluid activity[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2014, 36(1): 57-59.
- [13] 曹文科. 力学-化学-热耦合作用对各向异性页岩井壁稳定性影响规律研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
CAO Wenke. Study of mechanical-chemical-thermal coupling effect on wellbore stability in anisotropic shale formation[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [14] Chenevert M E. Adsorption pressure of argillaceous rocks [C]//11th Symposium on Rock Mechanics. Berkeley, California, 1969: 16-19.
- [15] Yew C H, Chenevert M E, Wang C L. Wellbore stress distribution produced by moisture adsorption[J]. SPE Drilling Engineering, 1990, 5(4): 311-316.
- [16] 黄荣樽, 陈勉, 邓金根, 等. 泥页岩井壁稳定力学与化学的耦合研究[J]. 钻井液与完井液, 1995, 12(3): 15-22.
HUANG Rongzun, CHEN Mian, DENG Jingen, et al. Study on shale stability of wellbore by mechanics coupling with chemistry method[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 1995, 12(3): 15-22.
- [17] Hale A H, Mody F K. The influence of chemical potential on wellbore stability[J]. SPE Drilling & Completion, 1993, 8(3): 207-216.
- [18] 王正良, 余跃惠, 李淑廉, 等. 含水量对硬脆性泥页岩稳定性的影响[J]. 钻井液与完井液, 1995, 12(6): 7-9.
WANG Zhengliang, SHE Yuehui, LI Shulian, et al. Effect of moisture content on the stability of fragile shale [J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 1995, 12(6): 7-9.
- [19] 金衍, 陈勉. 水敏性泥页岩地层临界坍塌时间的确定方法[J]. 石油钻探技术, 2004, 3(2): 11-14.
JIN Yan, CHEN Mian. A method for determining the critical time of wellbore instability at water-sensitive shale formations [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2004, 3(2): 11-14.
- [20] 温航, 陈勉, 金衍, 等. 硬脆性泥页岩斜井段井壁稳定性力耦合研究[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(6): 748-754.

- WEN Hang, CHEN Mian, JIN Yan, et al. A chemo-mechanical coupling model of deviated borehole stability in hard brittle shale [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(6): 748-754.
- [21] 王磊. 页岩水化损伤规律及井壁稳定性研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
- WANG Lei. Study on the shale hydration damage and borehole stability [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [22] 孟英峰, 刘厚彬, 余安然, 等. 深层脆性页岩水平井裸眼完井井壁稳定性研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(6): 51-59.
- MENG Yingfeng, LIU Houbin, YU Anran, et al. Borehole completion stability of deep brittle shale horizontal wells [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2019, 41(6): 51-59.
- [23] 张世锋, 汪海阔, 邱正松, 等. 泥页岩井壁流-固-化耦合安全密度窗口计算方法[J]. *石油勘探与开发*, 2019, 46(6): 1197-1205.
- ZHANF Shifeng, WANG Haige, QIU Zhengsong, et al. Calculation of safe drilling mud density window for shale formation by considering chemo-poro-mechanical coupling effect [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(6): 1197-1205.
- [24] 刘洋洋. 泥页岩井壁稳定力-化耦合及其钻井液封堵性研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
- LIU Yangyang. Study on the chemical-mechanical modeling of wellbore stability in shale and its plugging performance of drilling fluid [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [25] 金衍, 陈勉, 陈治喜, 等. 弱面地层的直井井壁稳定力学模型[J]. *钻采工艺*, 1999, 22(3): 13-14.
- JIN Yan, CHEN Mian, CHEN Zhixi, et al. Mechanics model of sidewall stability of straight wells drilled through weakly consolidated formations [J]. *Drilling & Production Technology*, 1999, 22(3): 13-14.
- [26] 刘向君, 叶仲斌, 陈一健. 岩石弱面结构对井壁稳定性的影响[J]. *天然气工业*, 2002, 22(2): 41-42.
- LIU Xiangjun, YE Zhongbin, CHEN Yijiang. Influence of rock weak plane texture on sidewall stability [J]. *Natural Gas Industry*, 2002, 22(2): 41-42.
- [27] 马天寿, 陈平. 层理页岩水平井井周剪切失稳区域预测方法[J]. *石油钻探技术*, 2014, 42(5): 26-36.
- MA Tianshou, CHEN Ping. Prediction method of shear instability region around the borehole for horizontal wells in bedding shale [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(5): 26-36.
- [28] 马天寿, 陈平. 层理性页岩水平井井壁稳定性分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(4): 1375-1383.
- MA Tianshou, CHEN Ping. Analysis of wellbore stability for horizontal wells in stratification shale [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(4): 1375-1383.
- [29] 刘志远, 陈勉, 金衍, 等. 裂缝性储层裸眼井壁失稳影响因素分析[J]. *石油钻采工艺*, 2013, 35(2): 39-43.
- LIU Zhiyuan, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Analysis on wellbore stability of open hole in fractured formation [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2013, 35(2): 39-43.
- [30] 刘志远, 陈勉, 金衍, 等. 多弱面地层水平井裸眼井壁垮塌量计算模型[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 102-107.
- LIU Zhiyuan, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Calculation model for bore-hole collapse volume of a horizontal openhole in multiple-weak-plane formation [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 102-107.
- [31] 邓媛, 何世明, 邓祥华, 等. 力化耦合作用下的层理性页岩气水平井井壁失稳研究[J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(1): 26-33.
- DENG Yuan, HE Shiming, DENG Xianghua, et al. Study on wellbore instability of bedded shale gas horizontal wells under chemo-mechanical coupling [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(1): 26-33.
- [32] 陈平, 马天寿, 范翔宇. 基于井壁稳定分析的井眼轨迹优化方法[J]. *天然气工业*, 2015, 35(10): 84-92.
- CHEN Ping, MA Tianshou, FAN Xiangyu. Well path optimization based on wellbore stability analysis [J]. *Natural Gas Industry*, 2015, 35(10): 84-92.
- [33] Lekhnitskii SG. *Theory of An Anisotropic Elastic Body* [M]. Moscow: Mir Publisher, 1981.
- [34] Aadnoy BS. *Continuum mechanics analysis of the stability of inclined boreholes in anisotropic rock formations* [D]. Trondheim: University of Trondheim, 1987.
- [35] Cheng H D. Material coefficients of anisotropic poroelasticity [J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 1997, 34: 199-205.
- [36] Abousleiman Y, Cheng HD. Poroelastic solutions in transversely isotropic media for wellbore and cylinder [J]. *Int J Solids Structure*, 1998, 35: 4905-4929.
- [37] Lee H, Ong SH, Azeemuddin M. A wellbore stability model for formations with anisotropic rock strengths [J]. *J Pet Sci Eng*, 2012, 96: 109-119.
- [38] 卢运虎, 陈勉, 袁建波, 等. 各向异性地层中斜井井壁失稳机理[J]. *石油学报*, 2013, 34(3): 563-568.
- LU Yunhu, CHEN Mian, YUAN Jianbo, et al. Borehole instability mechanism of a deviated well in anisotropic formations [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(3): 563-568.
- [39] 洪国斌, 陈勉, 卢运虎, 等. 川南深层页岩各向异性特征及对破裂压力的影响[J]. *石油钻探技术*, 2018, 46(3): 78-85.
- HONG Guobin, CHEN Mian, LU Yunhu, et al. Study on the anisotropy characteristics of deep shale in the southern Sichuan basin and their impacts on fracturing pressure [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2018, 46(3): 78-85.

- [40] 曹文科, 邓金根, 蔚宝华, 等. 弹性参数各向异性对页岩井周应力的影响[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2016, 31(5): 27-35.
CAO Wenke, DENG Jingen, YU Baohua, et al. Effect of anisotropy of elastic parameters of shale formation on stress distribution around wellbore[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2016, 31(5): 27-35.
- [41] Liu M, Jin Y, Lu Y, et al. A wellbore stability model for a deviated well in a transversely isotropic formation considering poroelastic effects[J]. Rock Mech Roch Eng, 2016, 49(9): 3671-3686
- [42] Heidug WK, Wong SW. Hydration swelling of water-absorbing rocks: A constitutive model[J]. Int J Numer Anal Methods Geomech, 1996, 20: 403-430.
- [43] Ghassemi A, Diek A. Linear chemo-poroelasticity for swelling shales: Theory and application[J]. J Pet Sci Eng, 2003, 38: 123-135.
- [44] Oort EV. On the physical and chemical stability of shales[J]. J Pet Sci Eng, 2003, 38: 213-235.
- [45] Ekbote S, Abousleiman Y. Porochemothermoelastic solution for an inclined borehole in a transversely isotropic formation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131(5): 522-533.
- [46] Gao J, Deng J, Lan K, et al. A porothermoelastic solution for the inclined borehole in a transversely isotropic medium subjected to thermal osmosis and thermal filtration effects[J]. Geothermics, 2017(67): 114-134.
- [47] 高佳佳. 双孔双渗页岩地层井壁稳定机理研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
GAO Jiajia. The research on the mechanism of wellbore stability in shale formation with dual-porosity and dual-permeability [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [48] 周俊. 横观各向同性层理地层热孔弹性井壁稳定研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
ZHOU Jun. Research on wellbore stability in a transversely isotropic formation considering thermo-poroelastic effects [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- [49] 彭程. 页岩水化下的井壁稳定分析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
PENG Cheng. The borehole stability in shales after hydration [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [50] 肖志强, 贾善坡, 亓宪寅, 等. 流-固-化耦合条件下硬脆性泥页岩井壁渐进破坏效应探讨[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(10): 2464-2480.
XIAO Zhiqiang, JIA Shanpo, Qi Xianyin, et al. Hydraulic-mechanical-chemical coupling evaluation for progressive failure of hard brittle shale wellbore[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(10): 2464-2480.
- [51] 张宇, 赵林, 王炳红, 等. 流-固-化-热耦合的陆相页岩井壁稳定力学模型及应用[J]. 特种油气藏, 2019, 26(3): 163-168.
ZHANG Yu, ZHAO Lin, WANG Binghong, et al. Fluid-solid-chemical-thermal coupling mechanical model of wellbore stability for continental shale and its application[J]. Special Oil Gas Reservoirs, 2019, 26(3): 163-168.
- [52] 王书婷, 张景富, 刘鹏飞. 页岩地层井壁稳定多模型对比[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(2): 166-174.
WANG Shuting, ZHANG Jingfu, LIU Pengfei. Multi-model comparison of the borehole stability in shale formations[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(2): 166-174.

(编辑 李艺)