

深部含层理弱面储层井壁失稳力学研究进展

王柏辉¹, 赵龙飞¹, 尹武兵², 刘世畅¹, 辛俊杰¹, 朱玉锋¹

(1. 中国石油集团西部钻探工程有限公司工程技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 中国石油集团西部钻探工程有限公司吐哈钻井公司, 新疆 鄯善 838200)

摘要: 深部储层油气藏资源储量丰富, 由于复杂的地质因素、工程因素制约着深部油气藏安全高效开采。井壁失稳导致的卡钻、井塌、井漏等一系列问题给钻井工程造成巨大损失。本文在分析井壁失稳力学机理上, 着重论述力学及其多场耦合下对井壁失稳影响机制, 最后提出促进深部含层理弱面钻井理论技术的建议。研究发现: 层理弱面发育、高温高压环境、地层倾角改变、岩石水化作用等因素是导致岩石力学强度弱化、深部储层井壁失稳的主要影响因素。不同倾角下的岩石力学强度存在巨大差异, 含层理弱面岩石更容易发生水化膨胀, 需合理优化钻井工程参数以及钻井液密度。本文较为系统地对井壁岩石力学及相关方面的研究进行了归纳, 可深入了解深部储层井壁稳定性力学影响机制, 为实际生产与工程实际提供参考。

关键词: 井壁稳定性; 层理弱面; 力学特性; 井壁失稳; 深部油气藏

中图分类号: TE21; P634.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)01-0004-12

Research progress on wellbore instability mechanics in weak side of deep stratified reservoirs

WANG Bohui¹, ZHAO Longfei¹, YIN Wubing², LIU Shichang¹, XIN Junjie¹, ZHU Yufeng¹

(1. *Engineering Technology Research Institute of CNPC Xibu Drilling Engineering Co., Ltd., Urumqi Xinjiang 830046, China*; 2. *Tuha Drilling Company of CNPC Xibu Drilling Engineering Co., Ltd., Shanshan Xinjiang 838200, China*)

Abstract: Deep reservoirs with abundant oil and gas resources are difficult to exploit safely and efficiently due to complex geological conditions and engineering factors. The problems of stuck drilling, well collapse, and well leakage caused by unstable wellbore walls have led to huge losses to drilling engineering. Therefore, this paper analyzes the mechanical mechanism of unstable wellbore walls and focuses on the influence mechanism of mechanics and multi-field coupling on unstable wellbore walls. Finally, it proposes suggestions for promoting the theoretical and technical development of drilling in weak side of deep stratified formations. The study found that the development of weak side, high temperature and high pressure environment, changes in rock layer inclination, and hydration of rocks are the main factors that weaken the mechanical strength of rocks and cause instability of the wellbore walls in deep reservoirs. The mechanical strength of rocks under different inclinations is significantly different, and the weak side of stratified rocks is more likely to swell due to hydration, which requires the rational optimization of drilling engineering parameters and drilling fluid density. This paper systematically summarizes the research on the rock mechanics and related aspects, deeply understands the mechanical influence mechanism of wellbore wall stability in deep reservoirs, and provides reference for actual production and engineering practice.

Key words: wall stability; weak bedding surface; mechanical properties; well wall instability; deep oil and gas reservoirs

0 引言

近年来, 我国油气钻探逐渐向深层超深层发

展, 截止2023年, 塔里木盆地已完钻160口深井、超深井, 顺北油气田超深井已超过50口, 四川盆地钻

收稿日期: 2024-06-16; 修回日期: 2024-07-24 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.01.002

第一作者: 王柏辉, 女, 汉族, 1996年生, 工程师, 油气井专业, 主要从事钻井提速类研究工作, 新疆乌鲁木齐市, 963068584@qq.com。

引用格式: 王柏辉, 赵龙飞, 尹武兵, 等. 深部含层理弱面储层井壁失稳力学研究进展[J]. 钻探工程, 2025, 52(1): 4-15.

WANG Bohui, ZHAO Longfei, YIN Wubing, et al. Research progress on wellbore instability mechanics in weak side of deep stratified reservoirs[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 4-15.

井垂深超过6000 m的井有142口,油气资源潜力巨大^[1]。深部地层的地质环境复杂,天然裂缝发育、地层岩性差异化较大、岩石层理弱面堆叠等多因素相互作用造成钻井事故频发,井壁垮塌、缩径、漏失、卡钻及钻井液污染地下储层等井下复杂严重制约钻井工程提质增效^[2]。对于深部井壁失稳问题,国内外学者主要从井壁失稳评价与控制技术等方面开展研究,而对于深部层理弱面储层井壁失稳的力学机理尚不明确。因此,开展深部含层理弱面井壁理论研究对深部油气层开采具有重要意义^[3]。

目前我国已经形成较为完整的深部地层钻完井技术,但仍存在许多工程地质难题,尤其是在深井,超深井钻井过程中的井壁失稳问题,导致钻井风险增高,钻井成本剧增。为此,笔者总结了我国深部储层钻井工程中井壁失稳机理以及影响因素,分析地层中井壁失稳时力学、化学及多场耦合作用机制,总结井壁失稳研究理论与技术发展,提出促进深部储层钻井技术控制井壁失稳的具体措施。

1 深部地层井壁失稳机理分析

在井眼开钻前,地下岩石处于应力平衡状态,岩石本体强度与岩石内部结构共同支撑井壁的稳定性与承压性。如图1所示,钻井液经过井口注入进钻柱中,在钻头处经过水头损失后流入环空和地层,在经过固井和浅层环空后流出,此时处于地层深处的岩石变得不稳定,井筒内部处于动态平衡,井内钻井液液柱压力若不能完全平衡地层应力,则导致井眼处岩石应力重新分布,会发生井塌、井漏等井下复杂,对钻井工程提速增效造成影响^[4]。所以目前出现了大量有关于确定地层不垮塌、不压漏的地质工程技术与钻井液密度窗口的研究,为之后确定井壁结构稳定性与井深结构设计优化提供依据。

根据井壁失稳事故统计可以得出^[5-7],在钻井过程中出现的复杂事故都是由于原本的应力平衡突然被打破,岩石的压实作用导致附近局部孔隙压力变化异常,地层中孔隙中的流体受到压力无法正常排出,井筒附近会出现异常高压或异常低压,失稳风险较大。

从岩石力学的角度来讲,在地层中井壁岩石失稳的机理主要包括以下几种:

(1)地层内部岩石特性各向异性;在每一个方向上岩石物理力学性质不同,不同方向上的水平主

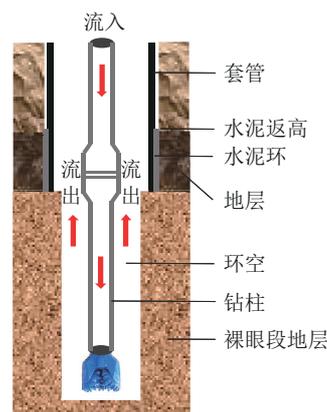


图1 井筒几何模型

Fig.1 Wellbore geometric model

应力大小相差悬殊,在弱结构面处,岩石力学强度较低,因此防止井壁坍塌的钻井液密度的下限值需要更高,防止井漏的安全钻井液密度的上限相应下降,导致钻井液密度安全窗口变窄。

(2)地层倾角的改变;储层在受到沉积环境与地质运动时岩石发生整体运移,岩石层理发生倾斜。地层倾角的大小直接影响油气运移的路径与速度,导致油气更易沿倾角大的方向运移,在钻进时,钻头更易沿着倾角方向前进,使狗腿度增大,井筒周围应力改变。

(3)井筒内部压力失衡;从岩石力学角度来讲,由于钻井液液柱压力无法平衡地层压力,使得井壁周围应力大于自身应力,内部岩石应力超过极限应力发生剪切破坏,脆性地层发生剪切破坏会产生坍塌掉块等现象,对于塑性地层会产生缩径现象,目前井壁坍塌的判断依据主要根据摩尔-库伦准则。

工程因素导致的井壁失稳往往影响较大,如图2所示,当钻井液液柱压力无法平衡地层压力时,会出现不同程度的井壁损伤。

初始阶段,钻井液液柱压力较低,井壁附近岩体处于压应力的状态,随着液柱压力的不断升高,周向应力减小并随着液柱压力达到一定程度变为负值,此时岩石由压应力转变为拉伸应力。当拉伸应力增至岩石的极限抗拉强度时,井壁处发生岩石出现裂缝,进而引发井漏,这种破裂现象一般在有效周向应力最微弱的区域,也就是最大水平主应力方向上。

在钻井中,使井壁稳定的前提就是建立一个合适的安全窗口值,使钻井液液柱压力在高于地层压

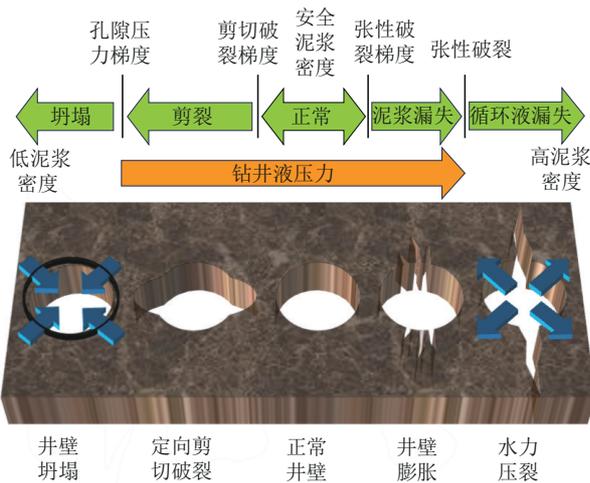


图2 不同钻井液重力对井壁稳定性的影响^[8]

Fig.2 The impact of different drilling fluid density on wellbore stability

力的同时,同时要低于地层破裂压力^[8]。

钻井液液柱密度减小,井壁周围岩石受到的应力超过岩石本身应力强度,地层原有应力状态被打破,脆性地层引起井眼垮塌,这是影响井壁坍塌的主要因素,影响井壁坍塌的其它因素还包含岩体物理力学性质、上覆岩层压力、地层应力、地层渗透率等。

而井眼缩径主要存在于层理性泥页岩这种弹塑性地层,这类地层由于岩石的吸水性,其岩石力学性质发生变化,弹性模量降低,泊松比增大,岩石力学强度降低。

地层破裂通常是由于钻井过程中钻井液密度增加引起的,井壁岩体所承受的周向应力超过其固有的抗拉伸强度极限。当储层存在层理弱面时,弱面间存在的裂缝会在井周压应力的作用下开始发育,导致井壁周围裂缝沿着地层开始逐步发展,随着应力的增大逐步改变井眼形状直至裂缝扩展达到稳定状态。

在岩石破坏时,岩石承受的最大剪应力要大于岩石的自身粘聚力(G)和作用于剪切面上的内聚力($f\sigma$)之和。其关系要满足:

$$\tau \geq G + f\sigma \quad (1)$$

式中: G ——岩石粘聚力,MPa; f ——岩石的内摩擦系数; σ ——正应力,MPa。

在钻井中由于地质因素引发的井壁失稳是无法避免的,在深部油气储层中,有70%的地层处于泥页岩层段^[9]。在泥页岩层段必须考虑泥页岩的亲

水效应,当地层大量出现流体时,泥页岩的水化反应会导致井筒失稳,井筒内的流体进入岩层,使得井壁处的岩石发生吸水膨胀,导致附近的孔隙压力升高,自身的力学强度下降,井筒周围应力状态发生改变。

在深部地层常伴随着高温、高压的地质环境,其地质结构特征复杂,各个层位储层性质不同,包含层理弱面、地层倾角、地层断裂带、褶皱带、天然裂缝等。加以不合理的井深结构设计,材料设计与工程施工,无法在复杂地层中实施有效性评价,因此需要有针对性地对地质资料,储层性质进行研究。

近些年来,学者们发现在地层钻进工况所出现的问题中不仅与岩石的力学特性变化与化学反应有关,地层中多种多场耦合机制对井壁失稳机制存在较大影响^[10]。例如孔隙结构、渗透率、体积应力、溶质运移等因素。因此合理描述井壁岩石物理力学特性、深部地层高温高压复杂环境以及准确判定各因素相关的力学机制成为解决井壁失稳的关键性方法^[11]。

2 深部含层理地层特性研究

2.1 深部地层物理特性研究

岩石的物理力学特性是指岩石在自然条件或外部应力作用下,其内部结构和组成因素相互作用表现出来的物理力学行为,这些特性能够准确描述岩石稳定性、强度,变形能力以及对外力作用的相应方式^[12]。

深部地层的岩石的孔隙结构与渗透率等性质与浅部地层岩石产生较大差异,利用实验手段能够较为准确的测定井壁附近岩石力学性质,常见的物理实验方法主要有水力压裂法,声发射、CT扫描、差应变法以及FMI测井成像,这些实验手段可较为简便获取地应力等物理参数。

学者们在实验室设计出模拟地层高温高压条件下测试岩石物理性质与声学实验装置,以此来测定高温高压环境对岩石力学性质的影响。耿建华等^[13]利用实验手段研发能达到高温(200℃)高压(200 MPa)岩石超声测量系统,并且发现岩石的纵横波速度以及体积模量与剪切模量会随着温度的升高出现不同程度的下降。谢玉洪等^[14]利用自主研制的FC-40型岩石物性参数测试系统发现了高

温高压下岩石热膨胀会对孔隙度与渗透率产生较大影响。如表1所示。

表1 围压为50 MPa时渗透率降幅
Table 1 The decrease in permeability when the confining pressure is 50MPa

地层	温度/°C	$K_0/(10^{-3}\mu\text{m}^2)$	K降幅/%
莺歌海组	150	105.34	17.48
莺歌海组	151	822.77	16.22
黄流组	168	412.42	8.61
黄流组	161	571.67	8.62
三亚组	168	795.32	20.08
陵水组	151	914.35	11.94
陵水组	169	758.36	19.17
崖城组	168	822.77	19.13

但是目前的实验室技术无法满足真实的地层条件,例如高温状态下测试系统的耐高温性不足,测量精度下降,测试实验设备成本过高等,这些都限制了对深部地层岩石储层物理力学特性的认识^[15]。

图3为含层理弱面岩体力学强度各向异性特征变化曲线,在图中 β 为层理弱面法线方向与最大水平主应力 σ_1 之间的夹角,对于存在弱层理面的岩石如页岩,岩石峰值强度随着层理面倾角的变化而变化,其变化的趋势为图3(b)所展现形式,随着层理面的改变,岩石的物理力学参数如抗压抗拉强度,渗透率,弹性模量,泊松比等参数发生相应改变,岩石最容易发生破坏的位置为 $\beta=45^\circ\pm\varphi/2$ 位置处(φ 为岩石内摩擦角)。

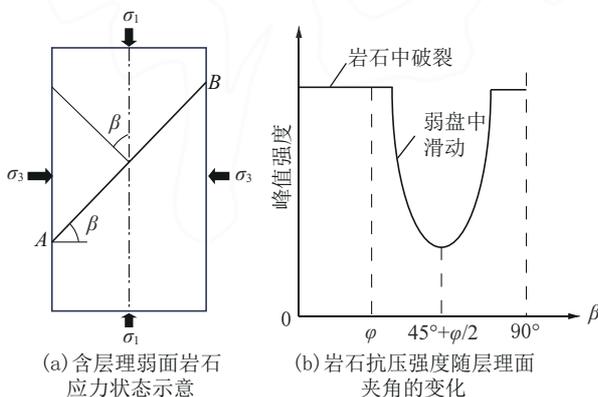


图3 含弱面层理岩石破裂变化

Fig.3 Fracture change in weak side of stratified rock

2.2 深部地层力学特性研究

在早期的岩石力学实验中,无法做到实时下的岩石加载测试,一般是将岩石进行升温之后冷却到室温再进行加载,这样的力学实验通常包括单轴压缩实验、真三轴压缩试验等。然而岩石在高温下的热损伤与在高温后的热损伤性质是不一样的,所以在进行力学试验所获得的数据无法准确反应储层中岩石的力学特性。

随着实验手段与技术的进步,学者们已经具备能够开展高温实时下的岩石力学及井壁稳定实验的条件。

Bradley^[16]在1979年从弹性力学角度解释了大位移井的井壁稳定应力分布状态,将井壁受力状态看做是无限大平板中带圆孔的问题求解(如图4),并得到井眼周围应力分布,在基于井壁应力集中的基础上利用Biot弹性多孔介质的应力-应变关系推导出井壁破裂压力模型,见式(2):

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta} &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left(1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left(1 + 3 \frac{r_0^4}{r^4} \right) \\ &\quad \cos 2\theta - \frac{r_0^2}{r^2} p - \alpha p_p \\ \sigma_r &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \left(1 - \frac{r_0^2}{r^2} \right) + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left(1 - 4 \frac{r_0^2}{r^2} + 3 \frac{r_0^4}{r^4} \right) \\ &\quad \cos 2\theta + \frac{r_0^2}{r^2} p - \alpha p \\ \tau_{r\theta} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \left(1 + 2 \frac{r_0^2}{r^2} - 3 \frac{r_0^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \end{aligned} \quad (2)$$

式中: σ_r 、 σ_{θ} 、 $\tau_{r\theta}$ ——分别为径向应力、切向应力以及切应力,MPa; r_0 ——井眼半径,m; p ——井筒内液柱压力,MPa; α ——Biot系数; p_p ——地层孔隙压力,MPa; σ_1 ——最大主应力,MPa; σ_2 ——中间主应力,MPa。

Abousleiman等^[17]将储层视作横观各向同性孔隙弹性材料,忽略钻井液对井壁的影响,除了时间对储层应力和孔隙压力有着较大影响外,材料的各向异性系数对计算应力场也起着重要作用。

也有学者综合考虑地应力,液柱压力,软弱面夹层等因素,预测含软弱面井眼周围应力分布以及井壁连续失稳过程,钻井液在井壁中与岩石发生水化反应,地层中的流体与钻井液发生物质交换产生半透膜效应^[18]。

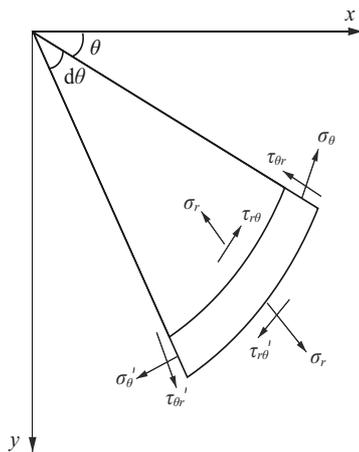
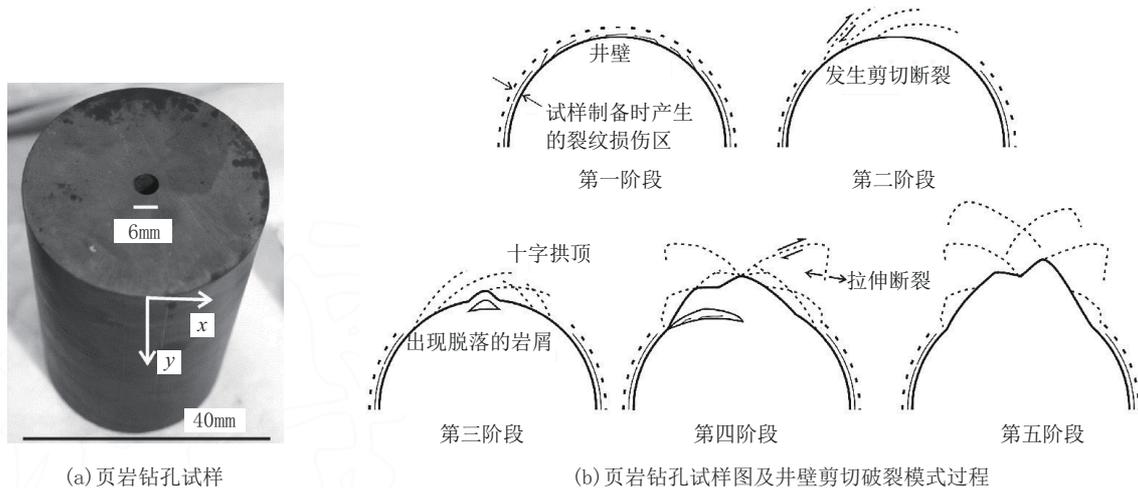


图4 井筒受力分析

Fig.4 Wellbore stress analysis

Meier等^[19]对posidonia页岩进行静水压力试验,探究不同井眼尺寸页岩在静水载荷下对井壁破坏特性,并总结了在不同三轴压力试验条件下页岩井壁的破坏规律。如图5所示,在初始预应力状态下,岩石本身会存在些许微裂缝,这些微裂缝发展方向近似与井壁平行,当岩石破裂达到第二阶段时,裂缝靠近井壁并逐渐向岩石内部扩展,第三阶段裂缝逐渐增多并形成交叉裂缝时,会导致部分井壁发生坍塌,致使井眼扩大;在第四阶段由于局部应力的扰动,岩石裂纹尖端不断产生新的剪切裂缝,形成一些张拉性裂缝;随着裂缝的扩展,井壁中逐渐产生大量碎屑,岩石内部裂缝形成较大规模,井壁逐渐不规则。



(a) 页岩钻孔试样

(b) 页岩钻孔试样图及井壁剪切破裂模式过程

图5 页岩钻孔试样图及井壁剪切破裂模式过程

Fig.5 Shale sample and wellbore shear fracture mode process

井筒温度对于井壁坍塌破坏具有一定的影响因素,过高的温度产生的热应力对地层孔隙压力影响较大,曹文科等^[20]考虑了钻井液在井筒内部的热交换作用,结合破坏准则以及拉伸破坏准则,认为较低的钻井液温度产生的热应力能有一定程度上抑制井壁坍塌,但在井壁附近更易诱导裂缝产生。

杨前雄等^[21]将温度参数引入地层破裂压力模型中,综合分析了地层应力,温度以及井壁应力集中等因素对于地层破裂压力的影响,结果发现温度对于地层破裂压力的影响不容忽视。对于处在高温高压下的地层破裂压力,井壁温度与井壁渗透能力都在变化,温度与渗透率的升高都会使破裂压力降低,使得井壁坍塌更加严重^[22]。

$$p_t = \frac{3\sigma_h - \sigma_H + S_t + \frac{E\alpha_m}{3[1-\nu]}[T_w - T_0] - [\alpha\delta + [1-\delta]\left[\frac{\alpha[1-2\nu]}{1-\nu} - f\right]]p_p}{1 - [1-\delta]\left[\frac{\alpha[1-2\nu]}{1-\nu} - f - \alpha\right]} \quad (3)$$

式中: p_t ——地层破裂压力; σ_H 、 σ_h 、 σ_v ——水平最大地应力、水平最小地应力、上覆地应力,MPa; S_t ——岩石的抗拉强度,MPa; α_m ——岩石体积热膨胀系数; α ——岩石的有效应力系数; f ——孔隙度; ν ——岩石的泊松比; δ ——渗透系数; E ——岩石弹性模量; T_w ——钻井液温度,℃; T_0 ——地层初始温度,℃。

从式(3)中可以得到,在井筒内温度升高后,井筒附近环向应力增大,产生较大的拉应力,井壁破裂风险增加。相反降低井筒内温度,井筒内部压应力减小,会减小井壁坍塌风险。

在高温条件下,层理性地层中存在的天然裂缝也会增加井壁失稳的可能性,钻井液沿着裂缝或层理面进行渗流从而改变井壁附近岩石应力分布,降低井壁处岩石力学强度。安康^[23]针对裂缝型碳酸盐储层开展了模拟真实环境下的高压三轴力学强度实验。研究发现地层温度的升高,岩石内部颗粒结合更紧密,岩石粘聚力增加,内摩擦角逐渐减小。在高温高应力状态下,岩石由弹-脆性向塑-延性发展。

Gentzis等^[24]利用真三轴应力测试来获取储层

的地质力学性能并利用地质强度指数 GSI 来评价水平井眼稳定性,储层孔隙压力与渗透率呈强相关,孔隙压力的增加会导致储层裂隙打开,井壁更容易失稳,而采用较小的井筒直径会减小地层损伤。

除温度和压力外,层理弱面的倾向角与倾斜角对井壁坍塌会产生不同的作用,如图6所示;倾斜角决定了井壁附近岩体是否沿着层理面破坏,倾向角决定岩体发生剪切破坏的程度,对于深部储层而言,井壁附近坍塌程度的大小是由基质破坏以及弱面破坏程度共同决定的^[25],对于存在层理弱面的岩体不能简单的用最小水平主应力判定井壁是否稳定,还需依据倾向角方位,井眼轨迹与层理面法向夹角综合判定。

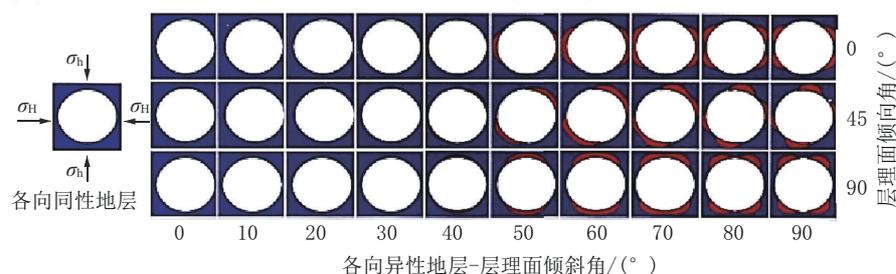


图6 不同倾斜角-倾向角对井壁稳定性影响^[25]

Fig.6 Impact of different dipping angle and dipping direction angles on wellbore stability

金衍等^[26]发现弱面地层的存在会使井壁处发生失稳,地层倾角的增大致使井壁不稳定性出现先增大后减小的趋势。岩石在承受应力过程中更容易在层理面处发生剪切破坏,且层理弱面的倾角与密度对井壁稳定性会产生较大影响,其中水平裂缝的存在是导致失稳风险增加的原因之一^[27]。

考虑层理弱面产状、强度弱化、地层倾角等因素对井壁稳定性影响程度,高温高压环地质环境下,层理弱面发生失稳首先会沿着倾斜角方向进行坍塌,最后随着坍塌区域的深度和宽度的增加,引发岩石基质的破坏,因此对于含层理弱面的地层来说,在钻进过程中需要减小井眼轨迹与弱面之间的夹角^[28]。

2.3 层理弱面岩石力学本构方程

在以往的含层理弱面岩石储层井壁稳定性问题中,假定岩石为横观各向同性介质,则选用强度准则时可选用单一弱面强度理论。但是计算出来的结果与实际出现较大差异,在之后研究中,

逐渐出现了通过实验数据或理论分析来修正单一弱面强度理论。

对于含有层理弱面、天然裂缝的地层,可以采用弱面准则来评价地层中含层理弱面对井壁稳定性的影响。Jaeger^[29]在1960年提出了单一弱面强度理论来阐述含软弱面夹层岩石破坏判定条件。如图3和图7所示,在岩体中存在一组弱面AB,在AB面最大水平主应力存在一个夹角 β ,依照摩尔应力圆与库伦准则,即可判定含软弱面夹层岩体发生剪切破坏所需的最大应力。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c_w + \sigma_3 \tan \varphi_w)}{(1 - \tan \varphi_w \cot \beta) \sin 2\beta} \quad (\beta_1 \leq \beta \leq \beta_2) \quad (4)$$

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{2(c_0 + \sigma_3 \tan \varphi_0)}{(1 - \tan \varphi_0 \cot \beta_0) \sin 2\beta_0} \quad (\beta < \beta_1, \beta > \beta_2) \quad (5)$$

式中; σ_1 ——最大主应力,MPa; σ_3 ——最小主应力,MPa; c_w ——岩石层理面的粘聚力,MPa; c_0 ——岩

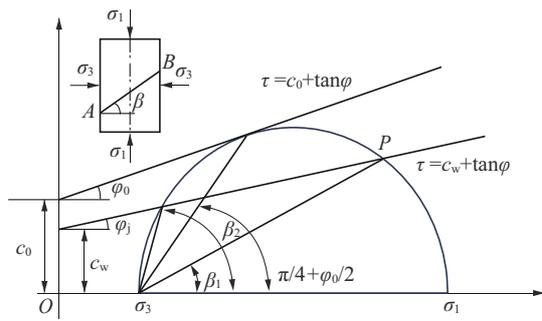


图7 岩样弱面力学强度分析

Fig.7 Mechanical strength analysis of weak surface of rock sample

石本体的粘聚力,MPa; φ_w ——岩石层理面的内摩擦角, ($^\circ$); φ_0 ——岩石本体的内摩擦角, ($^\circ$); β ——层理面法线与最大主应力夹角, ($^\circ$); β_0 ——岩石本体破坏面与最大主应力之间的夹角, ($^\circ$); 一般取值为 $\beta_0 = \pi/4 + \varphi_0$ 。

β_1, β_2 可由式(6)确定:

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_1 = \frac{\varphi_w}{2} + \frac{1}{2} \arcsin \frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c_w \cot \varphi_w) \sin \varphi_w}{\sigma_1 - \sigma_3} \\ \beta_2 = \frac{\pi}{2} + \frac{\varphi_w}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \frac{(\sigma_1 + \sigma_3 + 2c_w \cot \varphi_w) \sin \varphi_w}{\sigma_1 - \sigma_3} \end{array} \right. \quad (6)$$

该模型中层理面与岩石均满足不同粘聚力与内摩擦角的摩尔-库伦准则,最大主应力与最小主应力差值较大时,井壁越容易发生坍塌,通过受力分析可发现,最大主应力为井筒周围周向应力,最小主应力为径向应力。所以在最小水平主应力方向最容易发生井壁坍塌失稳。若井壁处岩石沿着层理面进行破坏时,则可依照式(2)进行判定,此时井壁处围岩沿着层理面发生滑移^[30]。若条件不满足,则可依照式(4)、(5)进行判定,岩石将沿着角度 $\pi/4 + \varphi_0/2$ 破坏(如图7),井壁围岩强度受到本体强度的影响更容易发生滑移垮塌,进而影响到井壁稳定性。

Li等^[31]在1985年将单一弱面强度理论进行改进,提出非线性岩石强度准则,见式(7)。岩石各向异性与围压对于岩石强度的影响是不可忽略的,岩石在不同围压下,各向异性产生的影响呈不同程度增加。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_3 \beta_i \left((1 - \alpha) \frac{\sigma_{c\beta}}{\sigma_3} \right)^{\alpha_i} \quad (7)$$

式中: α_i, β_i ——岩石的本身强度, $\alpha_i = 2/3, \beta_i = 1.3(\sigma_{c\beta}/\sigma_i)^{1/3}$; $\sigma_{c\beta}$ ——岩石无侧限压力时抗压强度,MPa; $\alpha = 1 - \sigma_{ia}/\sigma_{ia}$; σ_{ia} ——岩石在完整围压为 a 下视为峰值应力,MPa; σ_{ia} ——各向异性岩石在相同围压条件下的峰值应力,MPa。

由于参量较多,只能运用在不同倾角各向异性岩石上,且围压不能为零,在各向同性岩石中无法使用,具有较大局限性。

为了使模型具有普遍性,Rafai^[32]将Ramamurthy模型进行修正,结合实验数据能够在不同岩石强度范围内进行使用:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \frac{A\alpha + B\sigma_3/\sigma_{c\beta}}{A + \sigma_3/\sigma_{c\beta}} \quad (8)$$

式中: A, B ——需要选取不同内聚力参数的岩石进行不同围压下的压缩试验来确定。

该模型能够考虑岩石强度随倾角变化,将各向异性随围压变化这一特性加入模型中,更为准确地表征井壁处岩石的破坏特征。

对于多组弱面的岩体,其力学破坏模式与单组弱面破坏的模式不同,单一弱面只能对单组弱面进行表征,其岩石强度大小是依据弱面的软弱强度以及弱面法向与最大水平主应力之间的角度。而在多组弱面中,其力学强度为各个弱面强度的叠加。地层中会存在多组弱面共同对岩石造成功学弱化。

梁川等^[33]采用了摩尔-库伦弱面准则(式7)对西南部地区页岩井壁进行稳定性分析,但是忽略了两个假设,一是最小和最大主应力为线性关系。二是假定中间主应力对岩石强度没有影响。

若地层中存在弱层理面,则岩石力学强度出现明显的各向异性,其作用在层理面上的法向应力 σ_n 与剪切应力 τ_n 可表示为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_n = \frac{1}{2} (\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \cos 2\beta \\ \tau_n = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \beta \end{array} \right. \quad (9)$$

式中: β ——弱面层理法向与最大主应力方向之间夹角, ($^\circ$)。

贾利春等^[34]基于统一强度的弱面理论下对页岩气水平井的井壁状态进行分析,并对摩尔-库伦强度准则进行概括修正,研究指出了弱面的倾角在

0°和180°时井壁更容易沿着弱面倾角进行破坏。当岩体沿着弱面方向发生滑动剪切破坏时,弱面的强度模型为:

$$\tau_i = c_i + \tan \varphi_i \cdot \sigma_i \quad (10)$$

式中: τ_i 、 σ_i ——第*i*组弱面的切向应力和正应力,MPa; c_i ——第*i*组弱面的内聚力,MPa; φ_i ——第*i*组弱面的内摩擦角,(°)。

在实际工程中,考虑多组弱面时,井壁稳定性将受到弱面产状以及倾角的控制,即使地层处于正断层、逆断层、走滑断层时,平行弱面倾角进行施工相较于直井会更加安全^[35],从以上研究中可以发现,层理弱面的存在对岩石滑动剪切破坏特征具有显著性改变,依照弱面准则可以准确的对井壁稳定性进行评价,明确失稳机制,可以制定合理施工措施。

3 多场耦合井壁稳定性研究

3.1 力学-化学研究理论

有学者认为,井筒内部的钻井液压力、组成成分占比与井壁之间的物化反应也是造成井壁失稳的重要因素^[36]。钻井液在井筒内部与地层发生物理化学反应,如化学离子交换、水化作用、正压差作用、化学渗透作用等都会对井壁产生较大影响。尤其是对含层理弱面储层中具备复杂的物理力学性质的岩石,其钻井液的影响较大,当钻井液沿着层理面以及连通孔隙与裂缝深入到地层,其液柱压力由于钻井液的渗透而改变井壁周围应力分布,其次周围岩石基质由于含水量的升高,造成岩石应力弱化,其中包括钻井液滤液中的自由水由于压差作用影响泥页岩的孔隙结构、渗透率和力学性质,导致岩石的粘聚力与内摩擦角降低,岩石力学强度下降。

后来人们逐渐意识到钻井液与亲水性矿物发生水化反应也是导致井壁失稳的主要影响因素之一,逐渐延伸出力学-化学双向耦合研究,其中包括三个方面,第一是水化作用产生的膨胀应力,岩石在水分子作用下发生化学反应,导致岩石体积膨胀;第二是岩石吸水后产生的力学强度的变化,水分子渗透到岩石内部,改变了岩石内部结构与力学性质,进而影响岩石强度和力学特性;随着岩石内部含水量的增加,岩石层理面间的粘聚力、内摩擦角逐渐减小,从而导致井壁处的岩石破坏强度曲线

沿着弱面夹角处逐渐变宽。第三是由化学渗透作用引起的岩石内部孔隙压力变化而产生的附加应力,附加应力作用后导致岩石内部产生额外的应力,进而影响岩石强度和变形特性^[37]。

Yew等^[38]研究了吸附水对井壁周围应力的影响,泥页岩中的粘土矿物在接触到水后发生膨胀,致使岩石力学强度降低,加剧了井壁坍塌的风险,粘土矿物的水化过程可分为表面水化与渗透水化两种机制,导致内部自由水与结构水大量吸附在粘土矿物中,吸附过程由扩散方程控制:

$$\frac{C}{r} \times \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial W}{\partial r} \right) = \frac{\partial W}{\partial t} \quad (11)$$

式中: C ——材料的吸附常数; r ——材料吸收水的半径,m; W ——含水量,%; t ——时间,h;

Wen等^[39]在考虑储层结构特征的情况下对硬脆性页岩井壁稳定性进行了化学-力学耦合模拟,模型能够根据层理弱面所能承受的水化程度准确预测坍塌压力。邓金根等^[40]将泥页岩视作线弹性体并建立了均布力载荷下的泥页岩应力分布计算模型,研究发现泥页岩在水化过程中会发生膨胀应变,这种变化会使井壁发生周期性坍塌,随着水化时间的增长,泥页岩的坍塌压力也会增大。

国内外大量学者还开展包括泥页岩吸附水扩散参数计算、泥页岩水化反应劣化后强度分析等^[41]。但都是建立在特定条件下开展的实验室研究,在深层地质条件下,在高温高压环境中弱面间井壁表现出来的稳定性问题更加明显,无法用单一的力学-化学模型进行分析,以至于无法合理的评价深部地层稳定性。

3.2 多场耦合评价井壁稳定性

在深部地层中,由于特殊的赋存环境,油气资源会存在几个显著特征:(1)在地质运动和岩石沉积的作用下,深部地层中的岩石表现出各向异性,在垂直层理面与水平层理面表现出的力学性质完全不同;(2)在深部地层中,地层温度较高,在钻进过程中,不同位置处的温度差异较大,温度应力会造成井壁周围存在应力差,扰乱周围应力场;(3)由于深部储层较为致密,岩石渗透率较低,在钻进时岩石内部流体运移会出现局部区域异常高压。

处在深部储层的岩石岩性复杂,其内部孔隙裂缝存在,弱面结构发育形成强各向异性特性,在进行钻进时,井壁处力学性质变得极为复杂,钻进过

程中地层将受到多种物理场的耦合作用影响,如温度场、应力场、渗流场、化学场等导致深部含层理弱地层评价变得更为复杂。如图8所示,深部地层中,岩石不但受地应力影响,热膨胀应力、化学反应以及孔隙水压力共同作用于岩石变形机制^[42]。

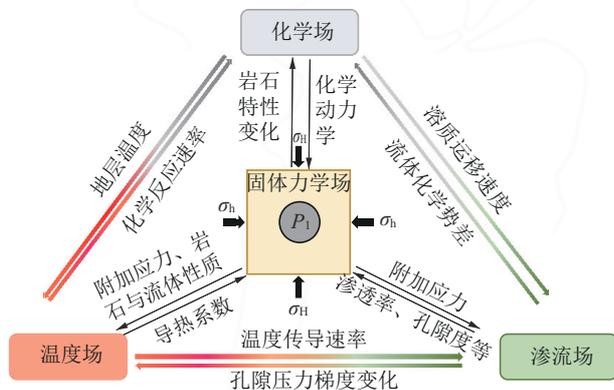


图8 多场耦合关系^[42]

Fig.8 Multi-field coupling relationship diagram

由于深部含层理弱面地层的强非均质性和复杂性,考虑多场耦合状态下的井壁失稳模型研究较少,学者们针对储层的关键性影响因素构建了热-流-固耦合模型,能够较好的评价地层稳定性。张亚云等^[43]将岩石的弱面效应与力化耦合作用相结合,建立了顺北破碎性地层井壁失稳的模型。Tang等^[44]在研究高温高压井筒中井壁稳定影响因素时,指出钻井液在循环时发生的热效应会改变井壁附近处的应力状态,使井壁附近应力重新分布。Wang等^[45]利用孔隙热弹性理论探究热-流体和多孔介质相互作用对井壁周围岩石应力分布规律。张健^[46]利用杜哈梅原理将温度变量加入到了应力场当中,建立了变温条件下热-流-固的井壁稳定模型,探究了7000 m特深地区井壁稳定性的影响因素并进行相应评价。

Gomar等^[47]将井壁岩石视作线弹性,用各向同性材料构建了传导加热与对流加热双耦合瞬态热孔弹性数值模型,求解钻进时地层热效应与流体压力对于井眼产生的影响,在钻进过程中径向应力的减弱使井眼岩石出现扩展性坍塌且随时间增加井眼周围应力重新分布。

在只考虑地层孔隙压力和温度的前提下,还可以将地层平面视作均值平面进行扩散,基于平面应变的理论求解井壁稳定性模型,可以将上述问题分

解成孔隙弹性狭义平面应变问题、弹性压缩问题以及反平面剪切问题,分别将这3种问题进行求解,之后将结果进行叠加,由此可以得到热-流-固耦合模型的解析解。目前深部储层井壁稳定还局限在特定案例,导致无法普遍应用。

通过综合分析这些因素,可以形成较为全面的井壁稳定计算分析方法,以更准确地评估井壁力学性质,同时需要综合考虑地应力、孔隙压力、地层特征,如倾角、倾向、层理面发育程度以及井眼轨迹等多种因素。通过综合分析这些因素,可以制定全面考虑多场耦合的井壁稳定计算方法。

随着国内外常规及非常规油气储层的大力开发,页岩以及油页岩这种强非均质性及含层理弱面岩石更容易出现井壁失稳问题,但多场耦合并不能完全模拟出地层层理弱面对井壁的影响,因此,在深刻认识复杂油气岩石力学的基础上,应加强高温高压条件下对复杂地层应力和地层压力的基础理论研究,形成有效的井壁稳定性评价。

4 措施

塔里木油田FY302-X井,构造位置处于塔里木盆地北部坳陷阿满过渡带,是一口以奥陶系一间房组为目的层的定向采油井,垂深接近8491 m,造斜段925 m,靶区井斜角69.48°,方位角210.61°,在四开钻进至7791.4 m时发生井漏,岩性特征为泥晶颗粒灰岩,漏失钻井液密度为1.22 g/cm³,共漏失钻井液57.30 m³,损失时间31 h,在较深井段堵漏成本高,耗时长,若深部地层出现井壁失稳现象,则需从工程与地质上提前做好防井壁失稳措施:

(1)优化钻井工程参数。深部油气储层埋藏深,地质因素复杂,特别是在存在弱面和天然裂缝的地区,会增加钻井的复杂性和风险。优化钻具组合与施工参数,减少钻具在井壁处的接触,防止机械干扰对井壁产生不必要的损伤,通过控制排量泵压,合理控制钻井液在环空中的上返速度,防止停泵过快造成岩屑堆积出现井壁坍塌等事故堵塞环空。

(2)优化钻井液性能参数。对钻井液的密度与粘度进行实时调整,提高钻井液的抗高温高压性能。维持井壁稳定,确定合适的钻井液密度窗口。既要高于孔隙压力和地层坍塌压力,又要低于地层破裂压力。在选择合适的钻井液粘度以提高携岩

能力时应加强钻井液的封堵性,减少钻井液对井壁的侵入量,防止钻井液漏失。

(3)加强井筒质量监测。井筒失效具有多种类型,井壁冲刷、井壁破裂、井底漏失和岩石滑动,每种类型都需要针对性的进行稳定性分析,因此需要定期监测井壁稳定性指标,如井壁形态、泥浆密度等,通过井筒监测及时调整钻井工艺。

(4)提高封堵材料的抗高温高压性能。在深部储层中,由于地质结构复杂,在弱层理面地层、盐间储层、水敏性地层等复杂地层易发生井漏层段,使用高强度承压封堵材料提高堵漏成功率。同时加强新型封堵材料的研制,解决深部储层中堵漏材料性能失效,力学性能不稳定等问题。

5 结论

(1)深部层理性泥页岩储层各向异性特征明显,地质条件较为复杂,层理弱面间力学强度低,泥页岩倾向于沿层理产生塑性断裂,极易发生井壁失稳。

(2)在层理面储层中,低角度倾角有利于井壁稳定性,倾角越大,井壁失稳风险越高,井壁稳定性最优情况出现在地层倾角与最大水平主应力垂直时,其他倾角下的井壁会产生不同程度的失稳现象。

(3)在进行深部储层钻井时,需要综合考虑多个因素,层理弱面方向,储层力学强度,理化性能,钻井液化学因素影响。准确的井壁稳定性分析可以防止钻孔冲刷、破裂、坍塌;是减小钻井时间和成本的关键。稳定的井壁能够确保钻井作业的顺利进行,避免不必要的问题和损失。

(4)深层高温高压条件下,地质构造复杂,地质力学参数不清晰。应持续完善深部地层多场耦合力学理论,通过计算机软件建立多场耦合模型,正确评价工程地质一体化,使井壁稳定性的预测精度得到进一步提升。

参考文献(References):

[1] 何登发,贾承造,赵文智,等.中国超深层油气勘探领域研究进展与关键问题[J].石油勘探与开发,2023,50(6):1162-1172.
HE Dengfa, JIA Chengzao, ZHAO Wenzhi, et al. Research progress and key issues of ultra-deep oil and gas exploration in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(6):1162-1172.

[2] 邓虎,孟英峰.泥页岩稳定性的化学与力学耦合研究综述[J].石油勘探与开发,2003,30(1):109-111.
DENG Hu, MENG Yingfeng. A discussion on shale stability coupling with mechanics and chemistry[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003,30(1):109-111.

[3] 邓虎,孟英峰.泥页岩稳定性的化学与力学耦合研究综述[J].石油勘探与开发,2003,30(1):109-111.
DENG Hu, MENG Yingfeng. A discussion on shale stability coupling with mechanics and chemistry[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003,30(1):109-111.

[4] 张建国.气体钻井井壁稳定性问题研究[J].化学工程与装备,2008(4):51-54.
ZHANG Jianguo. Research on the stability of gas drilling wellbore[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2008(4):51-54.

[5] 刘占魁,田林海,吴波,等.沙湾凹陷西斜坡砂砾岩地层井壁失稳机理及复杂处理[J].西部探矿工程,2021,33(6):51-53.
LIU Zhankui, TIAN Linhai, WU Bo, et al. Mechanism and complex treatment of wellbore instability in sandstone and gravel formations on the western slope of Shawan Depression [J]. West-China Exploration Engineering, 2021,33(6):51-53.

[6] 金军斌,欧彪,张杜杰,等.深部裂缝性碳酸盐岩储层井壁稳定技术研究现状及展望[J].长江大学学报(自然科学版),2021,18(6):47-54.
JIN Junbin, OU Biao, ZHANG Dujie, et al. Research status and prospect of borehole stability technology in deep fractured carbonate reservoirs [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2021,18(6):47-54.

[7] 范宇,王佳珺,刘厚彬,等.泸州区块全井段地层力学性能及井壁稳定性[J].科学技术与工程,2020,20(16):6433-6439.
FAN Yu, WANG Jiajun, LIU Houbin, et al. Formation mechanical properties and wellbore stability of the whole well section in Luzhou block [J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(16):6433-6439.

[8] Zhang J C. Borehole stability analysis accounting for anisotropies in drilling to weak bedding planes [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2013,60:160-170.

[9] 贾爱林,闫海军,唐海发,等.中国深层、超深层气藏开发关键技术对策建议[J].天然气工业,2024,44(1):119-127.
JIA Ailin, YAN Haijun, TANG Haifa, et al. Key technologies and countermeasures for deep and ultra-deep gas reservoir development in China [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44 (1) : 119-127.

[10] 冯晟,宋峙潮,王沛,等.基于岩石力学参数的渤海油田A区块井壁稳定研究[J].化学工程与装备,2023(5):144-146.
FENG Sheng, SONG Shichao, WANG Pei, et al. Research on wellbore stability in block A of bohai oilfield based on rock mechanics parameters [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2023(5):144-146.

[11] 赵文彬.塔河油田托普台区块提速技术研究及应用[D].青岛:中国石油大学(华东),2018.
ZHAO Wenbin. Research and application of drilling technology in the Tuo Putai block of Tahe oilfield [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.

[12] 邓虎,贾利春.四川盆地深井超深井钻井关键技术与展望[J].天然气工业,2022,42(12):82-94.

- DENG Hu, JIA Lichun. Key technologies for drilling deep and ultra-deep wells in the Sichuan Basin: Current status, challenges and prospects [J]. *Natural Gas Industry*, 2022, 42 (12): 82-94.
- [13] 耿建华, 赵峦, 麻纪强, 等. 超深碳酸盐岩油气储层岩石弹性性质高温高压超声实验研究[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(9): 3959-3974.
- GENG Jianhua, ZHAO Luanxiao, MA Jiqiang, et al. High-temperature and high-pressure ultrasonic experimental studies on elastic properties of ultra-deep carbonate reservoir rocks [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(9): 3959-3974.
- [14] 谢玉洪, 单钰铭, 李绪深, 等. 温度、压力对莺-琼盆地储层岩石物性影响的实验研究[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2015(2): 218-224.
- XIE Yuhong, SHAN Yuming, LI Xushen, et al. Experimental study on effects of temperature and stress on properties of reservoir rocks in Yinggehai and Qiongdongnan basin, South China Sea [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2015(2): 218-224.
- [15] 杨现禹, 蔡记华, 蒋国盛, 等. 维持页岩井壁稳定的物理封堵模拟和化学抑制实验研究[J]. *钻探工程*, 2021, 48(4): 37-46.
- YANG Xianyu, CAI Jihua, JIANG Guosheng, et al. Physical plugging simulation and chemical inhibition experiment for wellbore stability in shale [J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(4): 37-46.
- [16] Bradley W B. Failure of inclined boreholes [J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 1979, 101(4): 232-239.
- [17] Abousleiman Y, Cui L. Poroelastic solutions in transversely isotropic media for wellbore and cylinder [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1998, 35(34/35): 4905-4929.
- [18] 邓燕. 大位移井水力压裂裂缝起裂机理研究及应用[D]. 成都: 西南石油大学, 2003.
- DENG Yan. Research and application of fracture initiation mechanism in hydraulic fracturing of large displacement wells [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2003.
- [19] Meier T, Rybacki E, Reinicke A, et al. Influence of borehole diameter on the formation of borehole breakouts in black shale [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 62: 74-85.
- [20] 曹文科, 邓金根, 谭强, 等. 深水钻井热交换作用下的井壁稳定性分析[J]. *中国安全生产科学技术*, 2017, 13(6): 53-57.
- CAO Wenke, DENG Jingen, TAN Qiang, et al. Analysis on stability of borehole under the effect of heat exchange in deep-water drilling [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2017, 13(6): 53-57.
- [21] 杨前雄, 熊伟, 高树生. 考虑温度时碳酸盐岩地层破裂压力的确定[J]. *石油钻探技术*, 2007, 35(3): 12-14.
- YANG Qianxiong, XIONG Wei, GAO Shusheng. Determination of carbonate formation fracture pressure considering formation temperature [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2007, 35(3): 12-14.
- [22] 邓金根, 刘杨, 蔚宝华, 等. 高温高压地层破裂压力预测方法[J]. *石油钻探技术*, 2009, 37(5): 43-46.
- DENG Jingen, LIU Yang, YU Baohua, et al. Formation fracture pressure prediction method in high temperature and high pressure formations [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2009, 37(5): 43-46.
- [23] 安康. 超深层碳酸盐岩力学实验及井壁坍塌压力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- AN Kang. Mechanical experiment of ultra-deep carbonate rock and research on collapse pressure of well [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2021.
- [24] Gentzis T, Deisman N, Chalaturnyk R J. A method to predict geomechanical properties and model well stability in horizontal boreholes [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 78(2): 149-160.
- [25] 曹文科, 邓金根, 蔚宝华, 等. 页岩层理弱面对井壁坍塌影响分析[J]. *中国海上油气*, 2017, 29(2): 114-122.
- CAO Wenke, DENG Jingen, YU Baohua, et al. Analysis on the influence of bedding shale weak planes on borehole caving [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2017, 29(2): 114-122.
- [26] 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.
- [27] 秦启荣, 邓辉. 裂缝对石油井壁力学稳定性影响[J]. *西南石油大学学报*, 2007, 29(4): 167-170.
- QIN Qirong, DENG Hui. Influence of rock fractures on mechanical stability of Well-Wall [J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2007, 29(4): 167-170.
- [28] 马天寿, 陈平. 页岩层理对水平井井壁稳定的影响[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2014, 36(5): 97-104.
- MA Tianshou, CHEN Ping. Influence of shale bedding plane on wellbore stability for horizontal wells [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2014, 36(5): 97-104.
- [29] Jaeger J C. Shear failure of anisotropic rocks [J]. *Geological Magazine*, 1960, 97(1): 65-72.
- [30] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- CAI Meifeng. *Rock Mechanics and Engineering* [M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [31] Li C G, Li C H, Zhao R, et al. A strength criterion for rocks [J]. *Mechanics of Materials*, 2021, 154: 103721.
- [32] Rafiai H. New empirical polyaxial criterion for rock strength [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(6): 922-931.
- [33] 梁川, 陈勉, 赵飞, 等. 裂缝性层状富有机质页岩储层大位移井井壁稳定研究[J]. *钻采工艺*, 2015, 38(2): 31-35.
- LIANG Chuan, CHEN Mian, ZHAO Fei, et al. Study on wellbore stability of high displacement wells in fractured layered organic rich shale reservoirs [J]. *Drilling & Production Technology*, 2015, 38(2): 31-35.
- [34] 贾利春, 陈杨, 余晟. 基于统一强度理论的水平井井壁稳定性分析[J]. *断块油气田*, 2018, 25(5): 639-643.
- JIA Lichun, CHEN Yang, YU Sheng. Analysis of wellbore stability for horizontal wells based on unified strength theory [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2018, 25(5): 639-643.
- [35] 谭现锋, 张强, 战启帅, 等. 干热岩储层高温条件下岩石力学特

- 性研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(4):110-117.
TAN Xianfeng, ZHANG Qiang, ZHAN Qishuai, et al. Study on rock mechanical properties of hot-dry rock reservoir under high temperature [J]. *Drilling Engineering*, 2023, 50 (4) : 110-117.
- [36] 陈金霞,周岩,朱宽亮,等.冀东油田东营组硬脆性泥页岩井壁稳定性分析[J].科学技术与工程,2018,18(20):109-115.
CHEN Jinxia, ZHOU Yan, ZHU Kuanliang, et al. The analyses on wellbore stability in hard brittle shale in Dongying formation of Jidong oilfield [J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(20):109-115.
- [37] Liu X J, Zeng W, Liang L X, et al. Wellbore stability analysis for horizontal wells in shale formations [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 31:1-8.
- [38] Yew C H, Chenevert M E, Wang C L, et al. Wellbore stress distribution produced by moisture adsorption [J]. *SPE Drilling Engineering*, 1990, 5(4):311-316.
- [39] Wen H, Chen M, Jin Y, et al. A chemo-mechanical coupling model of deviated borehole stability in hard brittle shale [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(6):817-823.
- [40] 邓金根,郭东旭,周建良,等.泥页岩井壁应力的力学-化学耦合计算模式及数值求解方法[J].岩石力学与工程学报,2003, 22(S1):2250-2253.
DENG Jingen, GUO Dongxu, ZHOU Jianliang, et al. Mechanics-chemistry coupling calculation model of borehole stress in shale formation and its numerical solving method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22 (S1):2250-2253.
- [41] 杨现禹,蔡记华,蒋国盛,等.钻井液水活度对页岩井壁稳定性影响的实验研究——以秀山龙马溪组页岩为例[J].钻探工程,2022,49(3):1-12.
YANG Xianyu, CAI Jihua, JIANG Guosheng, et al. Experimental study on the effect of water activity of drilling fluid on shale wellbore stability—Taking Xiushan Longmaxi shale as an example [J]. *Drilling Engineering*, 2022, 49(3):1-12.
- [42] 范翔宇,蒙承,张千贵,等.超深地层井壁失稳理论与控制技术研究进展[J].天然气工业,2024,44(1):159-176.
FAN Xiangyu, MENG Cheng, ZHANG Qiangui, et al. Research progress in the evaluation theory and control technology of wellbore instability in ultra-deep strata [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(1):159-176.
- [43] 张亚云,李大奇,高书阳,等.顺北油气田奥陶系破碎性地层井壁失稳影响因素分析[J].断块油气田,2022,29(2):256-260.
ZHANG Yayun, LI Daqi, GAO Shuyang, et al. Analysis on influencing factors of wellbore instability of Ordovician fractured formation in Shunbei Oil and Gas Field [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2022, 29(2):256-260.
- [44] Tang L, Luo P Y. The effect of the thermal stress on wellbore stability [C]//Paper presented at the SPE India Oil and Gas Conference and Exhibition. New Delhi, India, 1998: SPE-39505-MS.
- [45] Wang Y L, Dusseault M B. A coupled conductive-convective thermo-poroelastic solution and implications for wellbore stability [J]. *Journal of Petroleum Science & Engineering*, 2003, 38 (3/4):187-198.
- [46] 张健.超深裂缝性地层井壁失稳机理研究[D].北京:中国石油大学(北京),2020.
ZHANG Jian. Study on the mechanism of wellbore instability in ultra-deep fractured formation [D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2020.
- [47] Gomar M, Goodarznia I, Shadizadeh S R. Transient thermo-poroelastic finite element analysis of borehole breakouts [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2014, 71:418-428.

(编辑 王文)