

黔西南地区煤系地层井壁稳定技术探讨

郝海洋¹, 李 勇², 宋继伟³, 王 虎², 李 勇², 代云鹏¹

(1.贵州省地质矿产勘查开发局 115 地质大队, 贵州 清镇 551400; 2. 贵州地质工程勘察设计院, 贵州 贵阳 550008;
3. 贵州省地质矿产勘查开发局 112 地质大队, 贵州 安顺 561000)

摘要:井壁稳定性问题对黔西南地区煤系气的勘探开发效果至关重要。对泥页岩和煤岩井壁失稳的机理进行了分析, 从化学、力学和化学与力学耦合等方面, 探讨了煤泥互层段井壁失稳的对策。结合黔西南地区煤系地层煤层气井的实例, 分析了井壁失稳对井径大小及岩心采取率的影响, 发现煤泥互层段的井径扩大率较大而相应的岩心采取率较小。尽可能准确地预测探井的地层压力、选用合理的钻井液体系和密度、采用合理的钻井工艺有助于维持黔西南地区煤系地层井壁稳定。

关键词:黔西南地区; 煤系地层; 煤层气井; 井壁稳定性; 地层压力; 井径扩大率; 钻井液体系

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2019)07-0008-06

Wellbore stabilization techniques in coal-bearing formation in Southwestern Guizhou

HAO Haiyang¹, LI Yong², SONG Jiwei³, WANG Hu², LI Yong², DAI Yunpeng¹

(1. Geological Team 115, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of
Guizhou Province, Qingzhen Guizhou 551400, China;

2. Guizhou Geological Engineering Investigation Design and Research Institute, Guiyang Guizhou 550008, China;

3. Geological Team 112, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of
Guizhou Province, Anshun Guizhou 561000, China)

Abstract: Maintaining wellbore stability in unconventional gas wells is much important to the exploration and production of natural gas in coal-bearing formation in the southwestern region of Guizhou Province. This paper investigates the wellbore failure mechanism in coal and mud shale formation, and finds out that the two kinds of wellbore failure mechanisms are essentially different. In addition, solutions for wellbore instability are investigated in terms of chemistry, mechanics and mechanics coupled with chemistry. Influence of wellbore instability on well-radius variations and core recovery is analyzed in the context of a CBM well in Zhina Coalfield, leading to the finding that wellbore enlargement is greater with lower core recovery over the coal-mudstone section. Predicting accurately the formation pressures of exploration wells, optimizing the drilling fluid system and density, and choosing the right drilling techniques contribute to CBM wellbore stability in the southwestern region of Guizhou Province.

Key words: Southwestern region of Guizhou Province; coal-bearing formation; CBM well; wellbore stability; formation pressure; wellbore enlargement rate; drilling fluid system

0 引言

贵州富含煤矿资源, 其煤层气储量丰富, 具有重

要的勘探开发价值^[1]。随着贵州省煤层气资源勘探
开发的开展, 提高煤系地层井壁稳定性已成亟待解

收稿日期: 2018-10-29; 修回日期: 2019-05-15 DOI: 10.12143/j.tkgc.2019.07.002

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目“多分支定向井钻进技术在贵州省煤系地层‘三气共采’中的研究及应用”(编号: 黔科合支撑[2018]2195); 贵州省地矿局地质科学研究项目“贵州省煤层气井套管-地层一体化胶结防水罩技术研究”(编号: 黔地矿科合[2018]26)

作者简介: 郝海洋, 男, 汉族, 1990 年生, 项目经理, 工程师, 石油与天然气工程专业, 硕士, 从事钻完井技术研究及钻探项目管理工作, 贵州省清镇市北门桥 115 地质大队, haiyanghao2016@126.com。

引用格式: 郝海洋, 李勇, 宋继伟, 等. 黔西南地区煤系地层井壁稳定技术探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(7): 8-13, 33.

HAO Haiyang, LI Yong, SONG Jiwei, et al. Wellbore stabilization techniques in coal-bearing formation in Southwestern Guizhou[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(7): 8-13, 33.

决的工程技术难题。然而黔西南地区煤系地层煤层纵向呈“多而薄”分布,常出现煤泥互层的层段^[2],为煤层气井钻井施工中维持井壁稳定和和保护储层带来了施工难题。钻井过程中,煤系地层井壁失稳易造成井壁垮塌、漏失、卡钻及储层伤害等井下复杂情况和事故,严重制约了煤层气勘探开发的效果^[3-5]。为此,笔者结合油气井及煤层气井的井壁稳定性研究成果,探讨了黔西南地区煤系地层煤层气井壁稳定的技术,以期为该地区煤层气勘探开发井壁稳定技术的研究与应用提供借鉴。

1 煤系地层井壁失稳机理分析

钻井过程中井壁稳定问题包括:由于岩石的剪切破坏或塑性流动引起的井壁坍塌或缩径和由于岩石的拉伸破裂导致的地层破裂或压裂两种类型^[6]。当地层被钻开后,井筒内钻井液的液柱压力取代了所钻岩层对井壁的支撑,打破了原有地层应力的平衡,引起井壁围岩应力的重新分布。如果井壁围岩所受应力超过其自身的强度,即会引发井壁失稳。在钻井过程中维持储层段井壁稳定性和保护储层在某种程度上似乎是两个矛盾的目标。前者希望在井壁上形成薄而韧的泥饼;后者则希望钻井液具有“零滤失”特性,避免钻井液中的任何组分对储层造成伤害。

泥页岩中富含粘土矿物,钻井液滤液的渗入将导致页岩的水化作用。一方面,在泥页岩层段井壁周围产生膨胀压,导致该层段井壁坍塌压力增加;另一方面,增强地层的塑性,从而降低泥页岩的力学强度,使井壁的破裂压力降低^[7]。两方面的综合作用,导致泥页岩段钻井液密度窗口变窄,增加该井段的钻井难度。此外,存在于页岩中层理弱面的剪切或拉伸破坏也会导致井壁失稳^[8]。

煤岩地层与泥页岩地层的井壁失稳机理存在本质上的不同,但又有相似之处^[4]。对于煤层来说,煤岩一般不含或少含粘土矿物,煤岩机械强度低、裂隙发育、弹性模量小、泊松比高^[9-11],使之比其它地层更易受压缩和破碎。当钻井液的液柱压力与地层压力间存在压差时,钻井液的渗滤会改变近井壁的孔隙压力,使近井壁周围地层的压力逐渐与钻井液的液柱压力相等,从而影响煤岩中裂隙的扩展与煤岩井壁的稳定。钻井液中固相颗粒向煤岩裂隙中的填充会对进一步加大裂隙尖端的应力集中,从而加剧

井壁煤岩的不稳定程度,甚至造成井壁周围煤岩的坍塌。

此外,煤岩和泥页岩的渗透率较低,钻遇煤泥互层段时,在井壁上不能形成质量好的泥皮,致使井壁附近岩石孔隙被钻井液的滤液充填,若为水基钻井液,会引起泥页岩的水化膨胀,煤泥互层段井壁骨架体积的轻微变化将引起孔隙压力增加,导致其固有有效应力降低,加剧泥页岩井壁的不稳定程度。与此同时,由于泥页岩的水化引起的膨胀压力,会对煤岩产生推挤作用,这将加剧煤岩井壁的不稳定程度。煤泥互层井段,泥页岩和煤岩互为格挡,任何一方的井壁失稳都不利于其上下部分井壁的稳定^[5]。

因此,对黔西南地区煤系地层井壁稳定技术的研究,应充分考虑该区域地层的特点,尤其应关注煤层群中多而薄的煤层与泥页岩层井段的井壁稳定性研究。在优化钻井工艺、钻井液的密度及配方设计时,既要考虑裂隙发育、机械强度低的煤层,又要兼顾薄煤层顶、底板的泥岩页岩水化膨胀等不利于井壁稳定的问题,提出较为合理的保护井壁稳定的钻井液体系和钻井施工方案。

2 泥页岩与煤岩段井壁失稳对策

国家“十三五”规划做出推进黔西滇东川南煤层气开发工业示范区的战略调整^[12],以及煤系地层的“三气”合探/合采,要求采用的钻井液能同时解决煤层、页岩和致密砂岩地层的井壁稳定问题。近年来针对泥页岩地层井壁失稳的机理与对策研究主要集中在化学、力学和化学与力学耦合等方面,而煤岩井壁的失稳机理与对策研究主要集中在化学、力学和工程钻进技术等方面。虽然将解决泥页岩与煤岩井壁失稳的对策归为以下几种,但能同时解决二者井壁失稳的技术仍是亟待解决的工程难题。

2.1 化学方法

2.1.1 钻井液体系性能与地层理化特性相匹配

钻井过程中,钻遇的地层中泥页岩水化的发生是造成井壁失稳的重要原因之一。钻井液的物理化学性质对泥页岩井壁稳定性起着至关重要的作用^[13]。泥页岩地层中所含粘土矿物如蒙脱石、伊利石、绿泥石、高岭石、无序或者有序伊蒙混层的阳离子交换容量、含量与膨胀性能、分散性能,对维持自身稳定性亦有着重要的影响。研究表明 pH 值 >10 的钻井液会对石英、蒙脱石造成严重的侵蚀作用,促

进泥页岩的水化作用,降低井壁围岩的力学强度^[14],且高pH值不利于泥岩页对K⁺的固定。此外,钻井过程中,客观存在的井内温压条件也将影响泥页岩的水化过程。

钻遇煤岩地层,钻井液滤液对煤层渗透率的损害似乎大于固相侵入造成的损害^[15]。而偏碱性的钻井液滤液与酸性煤层水中的某些离子反应而生成沉淀,造成裂隙封堵^[16],造成的“水楔作用”引发井壁失稳。煤层中含有的少量粘土矿物,引发的粘土水化,导致煤层局部强度下降,造成的“推挤作用”不利于井壁的稳定。

2.1.2 化学强化稳定井壁

目前研究报道的主要增强泥页岩井壁稳定性的化学剂有Al³⁺、K⁺、Ca²⁺、硅酸根离子、纳米材料、聚合物、有机季铵盐化合物、沥青类产品等。Al³⁺的作用机理是生成的氢氧化铝逐渐转为晶体形态并变成页岩的一部分,起到稳固泥页岩的作用;K⁺与不同种类的泥页岩存在离子置换和/或晶格固定两种作用,若是后者则存在“K收缩作用”,K⁺可进入蒙脱土结构中的两个氧六角环中央,会限制蒙脱土晶层的膨胀,从而阻碍蒙脱土的分散;Ca²⁺与K⁺的作用机理不同,Ca²⁺水化离子半径较大,主要通过阻碍水分子进入泥页岩颗粒间而阻碍其水化;硅酸根离子可以在泥页岩表面形成薄膜,且硅酸根的硅醇基和粘土矿物的硅醇基缩合形成稳定的—O—Si—O—化学键,有利于控制泥岩页的水化;纳米材料可以填充泥页岩的微孔隙或微裂缝、甚至可以在页岩表面形成憎水层^[17];聚合物诸如PHPA和PVP稳定页岩作用机理是“吸附—架桥—絮凝”(通常称为“包被”作用)阻止页岩的分散;有机季铵盐中的NH₄⁺的水化能甚至低于K⁺,且有机基团能对粘土颗粒形成“包被”,从而稳定泥页岩井壁;沥青类产品主要为封堵地层的裂缝、层理,在泥页岩表面形成一道屏障,维持泥页岩的稳定。上述不同化学剂的作用机理均会起到减轻页岩微裂缝中孔隙压力传递的作用,从而达到稳定井壁的目的。此外,在钻井液中添加合适的纳米材料也能起到稳定井壁的作用。

以上主要概述了泥页岩井壁稳定化学方法,由于煤岩和泥页岩亲水性的差异,设计煤系地层钻井液时,应充分考虑钻井液在泥页岩和煤岩面的差异。因此,煤系地层钻井液应具有低滤失造壁性、泥页岩的化学抑制性、煤储层割理的封堵保护性。

2.2 力学方法

2.2.1 确定钻井液密度

根据力学因素稳定井壁机理,依据地层孔隙压力、坍塌压力、破裂压力和地应力来确定合理的钻井液密度,用以保持井壁的压力平衡。当井壁围岩受到的应力大于井壁岩石承受力时,即会发生井壁失稳。井壁坍塌的钻井液密度窗口计算公式如下^[18]。

(1)对于直井,井壁发生破裂时对应的钻井液密度为:

$$\rho_f = \frac{(3\sigma_h - \sigma_H - \alpha P_p + S_t) \times 100}{H} \quad (1)$$

式中: ρ_f ——破裂压力对应的钻井液密度, g/cm³; σ_H 、 σ_h ——分别为水平最大、最小主应力, MPa; α ——有效应力系数,无量纲; P_p ——地层孔隙压力, MPa; H ——井深, m; $S_t = \cos\varphi / (6 - 6\sin\varphi)$ 为岩石抗拉强度, MPa; φ ——内摩擦角, (°)。

(2)地层坍塌压力所对应的钻井液密度计算模型为:

$$\rho_m = \frac{\eta(3\sigma_h - \sigma_H) - 2CK + \alpha P_p(K^2 - 1)}{(K^2 + \eta)H} \quad (2)$$

式中: ρ_m ——坍塌压力对应的钻井液密度, g/cm³; η ——应力线性修正系数,无量纲; C ——岩石粘聚力, MPa; $K = \arctg(\pi/4 - \varphi/2)$ 。

由上述钻井液的密度窗口计算公式可以看出,单从力学角度,井壁围岩的坍塌压力和破裂压力不仅与地层的原应力大小相关,还与井壁岩石的构造应力和岩石本身的力学强度密切相关。即便同一煤层,煤层的硬度不同也会使钻井液的密度窗口不同^[19]。而煤系地层,尤其是煤泥互层段,确定合理的钻井液密度尤为困难和重要。

2.2.2 优化井眼轨迹设计

井眼轨迹对定向井的井壁稳定性有显著影响^[3]。一般情况下,水平井的井眼轨迹平行于最小水平地应力方向,利于减小井周垂向上的主应力差,使井壁应力集中程度降到最小。对于煤岩段地层,由于煤层割理发育,当垂直面割理钻进时,面割理对井壁稳定的影响远远大于端割理^[20]。因此,针对煤系地层井眼轨迹的设计,应充分考虑地应力方向和地层的岩性。

2.3 化学与力学耦合方法

研究表明:井内钻井液及温压条件下,井壁围岩吸水形成水化带,其径向深度取决于地层和钻井液

的特性,以及井内温压条件和二者的作用时间;井壁上的泥页岩吸水量会很快达到饱和值,使井壁围岩变成“三变”材料——变含水、变模量和变强度;水化作用将极大地降低泥页岩的杨氏模量、增大泥页岩的泊松比及降低泥页岩的粘聚强度^[21]。

刘玉石^[22]应用固体力学并考虑了泥页岩水化压力,结合实验获得了实验条件下泥页岩的水化压力约 4.5 MPa,得出在计算坍塌压力时钻井液的密度应提高 4%~8%才能达到防塌效果的结论。此外,屈平等^[23]利用经典断裂力学理论建立了煤岩井壁失稳的判据,指出节理煤层钻井液密度窗口的上、下临界值为拉剪破坏压力和压剪破坏压力,在单纯考虑力学因素而获得的安全窗口内提高了下限、降低了上限,使钻井液的密度窗口更加接近地层压力,安全可靠。严俊涛等^[24]给出了 Hoek-Brown 准则下破碎地层坍塌压力当量密度计算公式,并据此计算出吐哈盆地 K-2 井煤泥互层段合理的坍塌钻井液当量密度:

$$\rho_m = \eta' \{ [m\sigma_c / 2 \cdot (3\sigma_{h1} - \sigma_{h2}) - (m^2 / 16 + s)\sigma_c^2]^{0.5} + \sigma_{h2} - 3\sigma_{h1} + m\sigma_c / 4 \} / 2 \times (100 / H) \quad (3)$$

式中: σ_c ——完整岩石的单轴抗压强度; σ_{h1} 、 σ_{h2} ——井壁最大、最小水平主应力; m ——岩体的破碎系数, s ——节理化系数,均为无量纲试验常数; η' ——破碎岩体坍塌当量密度修正系数。

因此,煤系地层的钻井液密度窗口计算时,应充分考虑泥页岩的遇水水化性质和煤岩的裂隙发育性质,综合分析泥页岩井段的钻井液密度窗口和煤岩井段的钻井液密度窗口,得出煤系地层钻井液合理的密度窗口为:

$$[\max(\rho_{sm}, \rho_{cm}), \min(\rho_{sf}, \rho_{cf})] \quad (4)$$

式中: ρ_{sm} 、 ρ_{sf} ——分别为泥页岩层的坍塌压力和破裂压力,MPa; ρ_{cm} 、 ρ_{cf} ——分别为泥页岩层的坍塌压

力和破裂压力,MPa。

综上所述,煤系地层井壁稳定性问题归根结底是力学和化学耦合作用的问题。此外,优化井身结构设计、封固不稳定井段,改善工艺操作、减少动力载荷作用,亦对维持井壁稳定性有利。

3 案例分析

案例一:贵州省晴隆县北部煤矿含煤地层主要为二叠系上统龙潭组,有约 560 m 厚的煤系地层,主要由粘土岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩、煤层及少量泥质灰岩薄层组成。在进入煤系地层后,由于该矿区煤系地层厚度较大,煤层较多,易垮塌孔段多。据报道该区 ZK1310 钻孔在钻井施工中,发生 2 起钻井事故,井内煤层段井壁垮塌严重^[25]。分析事故原因,主要为煤系地层较厚,煤泥互层段井壁稳定难以有效维持。

案例二:以贵州省织纳煤田某煤层气井为例,分析井壁稳定的重要性。贵州织纳煤田是“中一薄煤层群”的典型煤田之一。该井是一口探井,井身为二开结构:表层钻至 25 m;一开钻至 141 m,为该区 6 号煤层顶部 30 m;二开钻至 396 m,为该区 32 号煤层底部。钻遇煤层后全程取心,因此接下来将从井径扩大率和岩心采取率两方面,讨论地层岩性特征、钻井液性能对井壁稳定性的影响。

由图 1 中煤层气井测井曲线与地层综合分析结果可知,在井深 190~350 m 间,该井地层主要由砂岩、泥岩及煤岩组成,砂岩和泥页岩在剖面上占主导地位,井壁失稳主要发生在煤泥互层段。含煤层段呈现出“糖葫芦”或“大肚子”形状,且施工过程中钻遇煤层时上返岩屑中出现大颗粒煤块,说明在煤层段井壁发生严重失稳现象。同时可以发现,煤层处井径扩大严重,而顶、底板井径扩大略弱。该井在钻

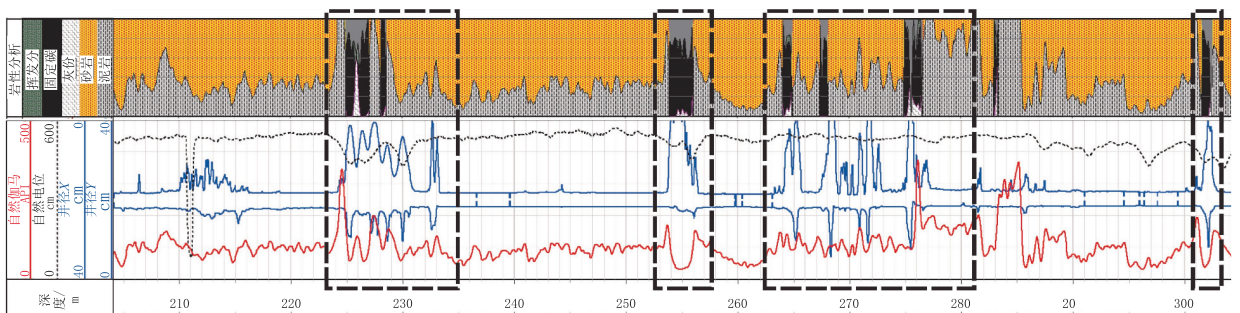


图 1 织纳煤田某煤层气井测井曲线与地层综合分析

Fig.1 Comprehensive analysis of logging curves and formation of a coalbed methane well in Zhina Coalfield

遇煤层前采用清水钻进,进入220 m以深后,采用无固相抑制性钻井液体系(KCl + K-PAM),在尽可能保护储层的前提下,以期改善煤层附近泥页岩由于其水敏性而导致井壁出现“三低”结果的井壁不稳定情况。

图2给出了该煤层气井的井径、井径扩大率、岩心采取率随井深变化的曲线。结合图1中的地层岩心剖面可以发现:煤层段的井径扩大率较大,最大可达72.3%,岩心获取率较低,最低仅为40.7%;非煤层段的井径扩大率较小,基本在2.0%以内,且岩心

采取率基本95.2%以上。取心施工过程中,采用无固相钻井液体系, $\rho=1.05\text{ g/cm}^3$,粘度30 s,滤失量15 mL。根据非煤层段岩心采取率,可认为无固相抑制性钻井液体系起到了弱化泥页岩水化膨胀的作用。然而,在煤泥互层段,施工过程中上返岩屑中仍然有煤块存在,而265~268 m段取心率最低只有40.7%,从图1测井曲线看出264~276 m煤泥互层段井径成“糖葫芦”状,说明即便钻井液拥有泥页岩水化抑制性,煤泥互层段维持井壁稳定难度仍然极大。

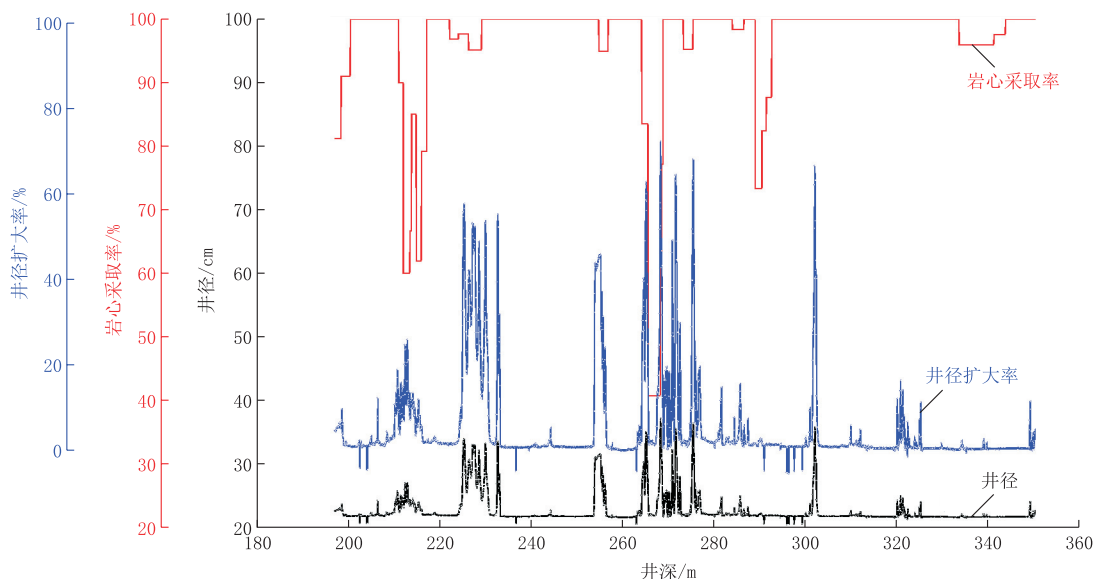


图2 井径、井径扩大率及岩心采取率曲线

Fig.2 Hole diameter, hole diameter enlargement rate, and core recovery curves

煤系地层井壁失稳机理,泥页岩失稳机理表现为力学—化学耦合失稳,而煤岩侧重表现为力学失稳;在泥煤互层段,煤岩段井壁的稳定性是关键因素,泥页岩段井壁的稳定性起控制作用^[24]。从图2中井径扩大率可以看出,煤岩段井径扩大率超过其临近泥页岩段。其原因与煤岩本身的性质密切相关,此外还与水化膨胀后的泥页岩的推挤作用有关,后者会加剧节理与裂隙发育的煤岩段井壁的失稳程度,甚至导致煤岩掉块和坍塌^[5]。同时,煤泥互层段的泥页岩也存在失稳的潜在可能,二者相互影响,致使保护煤系地层井壁稳定更加复杂。这就是为何非煤层段井径扩大率较小、岩心采取率较大,而煤泥互层段非煤层段的井径扩大率大、岩心采取率低的原因。

实现煤层气井井壁稳定性,除了井身结构设计合理、钻井液体系与地层匹配,煤泥互层地层坍塌压

力的准确计算也至关重要。钻遇煤层时,钻压、钻井液排量和钻具震动的控制对维持煤层气井井壁稳定也十分重要。钻前对地层压力与地层物性进行较准确的预判,将对提高黔西南地区煤系地层井壁稳定性大有裨益。

4 结论与认识

(1)泥页岩的井壁稳定性和煤岩的井壁稳定性问题存在本质上的区别。针对黔西南地区煤系地层井壁稳定性技术,不能只考虑对煤层的保护而忽略对泥页岩层段的井壁失稳问题,尤其在煤泥互层段,应同时考虑对泥页岩和煤岩井壁的保护。

(2)解决黔西南煤系地层煤层气井井壁失稳难题,要兼顾化学和力学两个方面的研究,得出两种因素耦合后的合理钻井液密度窗口。在可能的条件下,钻井液要能可修复地封堵煤层段煤裂隙并与煤

岩表面润湿性相匹配,又能起到抑制泥页岩段粘土矿物水化的作用。

(3)基于物探资料,对拟钻地层的岩性及地层压力剖面进行合理预测,对探井井壁稳定性具有重要的工程意义。明确地应力方位与大小、优选钻井液类型及其密度、优化钻井液流变性并优选钻进水力参数、采用合理的钻井工程技术措施,可以最大程度地维持煤系地层的井壁稳定。

参考文献(References):

- [1] 易同生.贵州省煤层气资源评价[R].贵阳:贵州省煤田地质局,1996.
YI Tongsheng. Evaluation of coalbed methane resources in Guizhou Province[R]. Guiyang Guizhou: Coal Mine Exploration of Guizhou Province, 1996.
- [2] 黄文,徐宏杰,张孟江,等.贵州省织纳煤田煤层特征及煤层气资源潜力[J].天然气工业,2013,33(8):25-30.
HUANG Wen, XU Hongjie, ZHANG Mengjiang, et al. Characteristics and CBM potentials of coal seams in the Zhina Coalfield, Guizhou[J]. Natural Gas Industry, 2013,33(8):25-30.
- [3] 张元清,孟庆伟,颜廷福,等.松软煤系地层深孔绳索取心钻探实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(11):38-40,45.
ZHANG Yuanqing, MENG Qingwei, YAN Tingfu, et al. Practice of wire-line coring drilling in soft coal measure strata[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015,42(11):38-40,45.
- [4] 于成凤,金新,曹建明.贵州大湾煤矿复杂地层井下定向钻进施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(3):24-27.
YU Chengfeng, JIN Xin, CAO Jianming. Downhole directional drilling construction technology in complex formation of Dawan Coal Mine in Guizhou[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(3):24-27.
- [5] 唐洪明,康毅力,梁大川.煤系地层中泥页岩特性及其对煤层井壁稳定性的控制作用[M]//徐同台,崔茂荣,王允良,等.钻井工程井壁稳定新技术.北京:石油工业出版社,1999.
TANG Hongming, KANG Yili, LIANG Dachuan. Characteristics of shale in coal-bearing formation and its function in control of the well bore stability in coal seams[M]//XU Tongtai, CUI Maorong, WANG Yunliang, et al. New wellbore stabilization technology in drilling engineering. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999.
- [6] 徐同台.井壁稳定技术研究现状及发展方向[J].钻井液与完井液,1997(4):38-45.
XU Tongtai. On wellbore stability technology[J]. Drilling Fluid and Completion Fluid, 1997(4):38-45.
- [7] Pan, Z., L.D. Connell, M. Camilleri, et al. Effects of matrix moisture on gas diffusion and flow in coal[J]. Fuel, 2010,89(11):3207-3217.
- [8] 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 stability of straight wells drilled through weak lyconsslidated formations [J]. Drilling & Production Technology, 1999, 22(3):13-14.
- [9] 王群.东胜气田井壁稳定技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(1):39-43.
WANG Qun. Research on borehole stability technology in Dongsheng Gas Field[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(1):39-43.
- [10] 李勇,郝海洋,畅利民,等.贵州省织纳煤田煤层气井固井难点分析[J].中国煤层气,2018,15(2):3-7.
LI Yong, HAO Haiyang, CAHNG Limin, et al. Analysis of challenges in CBM well cementing of Zhina Coalfield in Guizhou Province[J]. China Coalbed Methane, 2018,15(2):3-7.
- [11] 黄维安,邱正松,杨力,等.煤层气钻井井壁失稳机理及防塌钻井液技术[J].煤田地质与勘探,2013(2):37-41.
HUANG Weian, QIU Zhengsong, YANG Li, et al. Instability mechanism of sidewall and anti-sloughing drilling fluid technique for coalbed methane well drilling[J]. Coal Geology & Exploration, 2013(2):37-41.
- [12] 国家能源局.煤层气(煤矿瓦斯)开发利用“十三五”规划[R].2016.
National Energy Administration. The 13th five-year plan for the development and utilization of coalbed methane (coal mine gas)[R]. 2016.
- [13] Oort, E.V., A.H. Hale, F.K. Mody, et al. Critical parameters in modeling the chemical aspects of borehole stability in shales and in designing improved water-based shale drilling fluids[J]. Journal of Petroleum Technology, 1994:171-186.
- [14] 俞杨烽,康毅力,游利军,等.碱液侵蚀:一种泥页岩井壁失稳新机理[J].石油学报,2013,34(5):983-988.
YU Yangfeng, KANG Yili, YOU Lijun, et al. Alkali corrosion: a new mechanism of shale borehole instability[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013,34(5):983-988.
- [15] 李得新,首照兵,杨刚.川南煤田古叙矿区大村勘查区复杂地层钻探施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(09):44-48.
LI Dexin, SHOU Zhaobing, YANG Gang. Construction technology in complex formation of Dacun exploration area in Guxu Mining Area of South Sichuan Coal Field[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(9):44-48.
- [16] 谢国毅,刘虎,毛志新.贵州岩溶地区煤层气钻井关键技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(5):46-49.
XIE Guoyi, LIU Hu, MAO Zhixin. Key coalbed methane drilling technology in Guizhou karst area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(5):46-49.
- [17] Taraghikhah S, Mohammadi M K, Nowtaraki K T. Multi-functional nanoadditive in water based drilling fluid for improving shale stability[C]. International Petroleum Technology Conference, 2015.