

煤层气储层伤害和井壁失稳分析 及钻井液技术研究现状

严亮亮¹, 牟宗阳^{2*}, 刘 晓², 闫 平³, 朱少龙⁴, 安玉秀¹

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 山东省煤田地质局第三勘探队, 山东 泰安 271000; 3. 华北油田第一采油厂, 河北 任丘 062552; 4. 渤海钻探工程有限公司井下作业分公司, 河北 任丘 062552)

摘要:煤层气储层独特的“三低特性”和双重孔隙结构,使其在钻井过程中极易遭受应力敏感、水敏及固相侵入等不可逆伤害,并面临严峻的井壁失稳风险。本文系统分析了煤岩特殊的物理化学性质及其对钻井液的特定要求,深入阐述了钻井液对储层的损害机理及对井壁稳定性的影响。重点综述了煤层气钻井液技术的研究进展:针对储层保护,形成了低密度钻井液、强抑制-封堵体系、低固相/无固相钻井液及可降解钻井液等核心技术;针对井壁稳定,发展了基于多元协同抑制和高效封堵的防塌钻井液体系。文章总结了当前技术面临的挑战,并指出未来应加强地质适配性、智能响应型钻井液、高效环保材料等研究,为优化煤层气钻井液技术、提升开发效益提供参考。

关键词:煤层气;储层保护;井壁稳定;钻井液

中图分类号:P634.6;TE254 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2026)02-0025-10

Analysis of coalbed methane reservoir damage and wellbore instability and research status of drilling fluid technology

YAN Liangliang¹, MU Zongyang^{2*}, LIU Xiao², YAN Ping³, ZHU Shaolong⁴, AN Yuxiu¹

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. The Third Exploration Team of Shandong Coalfield Geologic Bureau, Tai'an Shandong 271000, China; 3. Petro China Huabei Oil Field Company, Renqiu Hebei 062552, China; 4. Downhole Services Company, BHDC, Renqiu Hebei 062552, China)

Abstract: Due to the unique “three-low characteristics” and dual-pore structure of coalbed methane (CBM) reservoirs, they are extremely prone to irreversible damage such as stress sensitivity, water sensitivity, and solid-phase invasion during drilling, and face severe risks of wellbore instability. This paper systematically analyzes the special physical and chemical properties of coal rocks and their specific requirements for drilling fluids, and deeply expounds the damage mechanism of drilling fluids on reservoirs and their impact on wellbore stability. The research progress in CBM drilling fluid technology is mainly reviewed: for reservoir protection, core technologies such as low-density drilling fluids, strong inhibition-plugging systems, low-solids/no-solids drilling fluids, and degradable drilling fluids have been formed; for wellbore stability, anti-collapse drilling fluid systems based on multi-component synergistic inhibition and high-efficiency plugging have been developed. The paper summarizes the current technical challenges and points out that future research should focus on geological adaptability, intelligent-responsive drilling fluids, high-efficiency environmental protection materials, etc., to provide a reference for optimizing CBM drilling fluid technology and improving development benefits.

Key words: coalbed methane; reservoir protection; wellbore stability; drilling fluid

收稿日期:2025-06-13; 修回日期:2025-07-30 DOI:10.12143/j.ztgc.2026.02.003

基金项目:地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(编号:2024ZD100090X)

第一作者:严亮亮,男,汉族,1998年生,博士研究生,地质资源与地质工程专业,研究方向为钻井液与完井液、井壁稳定技术等,北京市海淀区学院路29号,yanliangliang2022@163.com。

通信作者:牟宗阳,男,汉族,1986年生,工程师,地质学专业,主要从事地质勘查、地质找矿、钻探工程、地质调查等方面工作,山东省泰安市泰山区乐园街17号,584844449@qq.com。

引用格式:严亮亮,牟宗阳,刘晓,等.煤层气储层伤害和井壁失稳分析及钻井液技术研究现状[J].钻探工程,2026,53(2):25-34.

YAN Liangliang, MU Zongyang, LIU Xiao, et al. Analysis of coalbed methane reservoir damage and wellbore instability and research status of drilling fluid technology[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(2): 25-34.

0 引言

煤层气作为非常规天然气资源,在全球能源结构转型中扮演着重要角色。我国煤层气资源储量位居世界第三,达36.8万亿 m^3 ,但其开发利用率却不足15%^[1-3]。储层损害问题是制约煤层气经济高效开发的关键瓶颈。煤层气储层既是烃源岩又是储集岩,具有“三低特性”(低储层压力、低孔隙度、低渗透率)和“双重孔隙结构”(基质孔隙+割理裂隙)^[4-6]。这种特殊结构使钻井液与储层的相互作用极为复杂,常规钻井液技术难以满足工程需求。

钻井液作为首先接触煤储层的工程流体,其性能直接影响钻井安全、储层保护效果和最终采收率。不合适的钻井液可导致极为严重的煤层渗透率损伤,特别是在水平井和大位移井成为主流的今天,钻井液技术更是面临井壁稳定、储层保护与工程安全的“三重挑战”^[7-9]。煤层气钻井液技术已从最初的“清水钻进”阶段,发展到针对不同煤阶、不同井型的定制化技术体系。这一演变历程体现了行业对煤储层认识的深化:从单纯追求低密度防漏,到综合考虑抑制性、封堵性、润滑性及环境兼容性的多维平衡。目前煤层气钻井液体系可分为储层保护钻井液体系和防塌钻井液体系两大类^[10-12],但仍面临诸多挑战。地质条件复杂多变要求钻井液的设计必须具有高度的灵活性和适应性。

本文围绕储层特性与钻井液对储层渗透率及井壁稳定性的影响展开系统论述,为煤层气高效开发提供理论支撑和技术解决方案。

1 储层损害及井壁失稳分析

1.1 煤岩的特殊物理化学性质

煤岩是一种由多环芳香烃有机质与黏土矿物、碳酸盐岩等无机矿物组成的混合物,其有机部分通过亚甲基键、醚键和环烷键相互连接,形成高度复杂的化学结构。这种组成特点赋予了煤岩三大关键特性:强吸附性、低机械强度和显著的各向异性。

中国主要煤储层的地质特征进一步增加了开发难度。如沁水盆地中东部煤层,孔隙度仅2.4%~4.1%,渗透率普遍 $<1 \times 10^{-15} \text{m}^2$,黏土矿物含量高达12.9%^[13-15]。新疆阜康矿区则发育厚层、多煤层、大倾角碎软煤层,井壁失稳风险高^[16-17]。这决定了钻井液设计必须考虑维持井壁力学稳定、减少流体侵入损害、保持裂隙网络导流能力三大核心问题。

煤储层独特的“双重孔隙结构”是理解其易损性的核心。基质微孔(纳米—微米级)主导气体吸附和存储,割理裂隙(微米—毫米级)主导渗流通道,这种结构决定了其对物理应力扰动(压缩裂隙)和化学流体侵入(堵塞孔喉/水化弱化)都极为敏感。“三低特性”与富含水敏性黏土矿物的有机-无机复合本质,共同构成了煤层气钻井过程中储层伤害与井壁失稳高发的内在基础。

1.2 钻井液对储层的损害机理

煤层气储层损害主要发生在钻井液侵入储层的过程中,可归纳为两类相互关联的损害机制。

1.2.1 敏感性伤害

1.2.1.1 应力敏感性伤害

煤层气储层的物理性质决定其割理发育的特征,有效应力增加会压缩裂隙网络^[18]。煤岩应力敏感性伤害的核心机理在于其割理系统的高敏感度与低恢复性。割理主导渗流,流体的渗流能力大部分都依赖于割理开度,微小的开度变化即可引起渗透率的骤变;煤基质硬度低,裂隙面在有效应力增大时易发生嵌入破碎和滑移错位,导致应力卸载后开度无法完全恢复,形成不可逆损害。此外,应力变化还可能扰动吸附气解吸/吸附平衡,引发基质收缩/膨胀,该效应常滞后于应力变化并与裂隙变形耦合,进一步加剧渗透率响应的非线性和复杂性。钻井液液柱压力波动、起下钻引起的压力激动是诱发井下应力扰动的直接工程因素。

Palmer等^[19]针对圣胡安盆地煤样的应力敏感性,建立了应力与渗透率的动态变化模型。研究表明,随着钻井过程中应力的增大,煤层气储层渗透率有不同程度的降低,且应力释放后,渗透率只能部分恢复,对储层损害较大。杨胜来等^[20]通过实验数据说明煤层岩心对应力相当敏感,随有效围压升高,渗透率下降的平均速度是砂岩的5~7倍(见图1);当围压为10 MPa时,渗透率降低到初始值的20%~30%,当有效围压降到原始值时,渗透率只能恢复到原始值的50%~80%,对储层渗透率危害十分明显。这些研究为理解煤层气储层在工程扰动下的固有脆弱性提供了关键依据,并强有力地论证了控制钻井液密度、避免过大压力波动对保护储层渗透率的重要性。但这些基于室内岩心实验的研究成果在复杂原位地应力环境和长期生产扰动下的适用性,仍需结合现场数据进行更深入的验证。

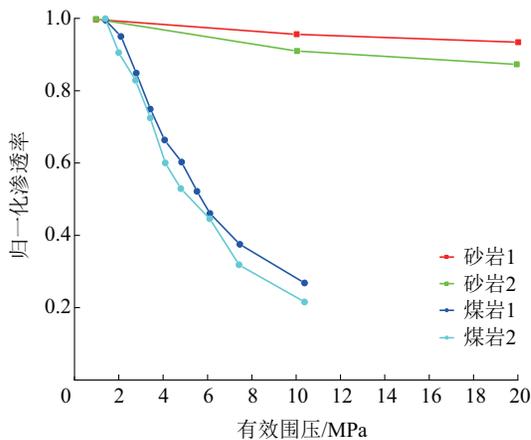
图1 煤层与砂岩岩心应力敏感性比较^[20]

Fig.1 Comparison of stress sensitivity between coal seam and sandstone core

1.2.1.2 速敏及水敏伤害

水敏/速敏伤害的核心是流体-矿物-孔隙/裂隙的微观物理化学链式反应。钻井液滤液在压差和煤岩毛细吸力(源自纳微米级孔和有机质表面)的共同作用下侵入裂隙网络和连通孔隙,当其接触到水敏性的黏土矿物时会诱发晶格膨胀或微粒分散迁移。因此,速敏及水敏的伤害程度受煤本身的成分影响较大。在发育较成熟、杂质含量较少的高阶煤中,由于煤表面的疏水性,水相流体在孔隙网络中流动并不会引起水敏和速敏伤害。而成熟度不足且非均质性强的煤岩中含有大量泥岩,与钻井液接触后黏土矿物发生水化膨胀,从而降低储层渗透率,形成水敏损害^[21-23]。另一方面,一些黏土矿物在遇水后虽不会发生膨胀,但在流体的作用下会发生水化分散,分散出的细小颗粒随着流体的迁移堵塞孔隙通道,导致渗透率进一步下降^[24-25]。因此,对储层煤岩的黏土矿物种类及其含量研究也是钻井液设计的重要一环。同时,水敏性矿物与外来流体发生水化也是井壁失稳的主要原因。

1.2.2 固相侵入对储层的损害

有害固相包括钻井液中的聚合物、刚性颗粒,以及在钻进过程中产生的煤屑和煤粉。固相侵入是颗粒在多孔介质中的运移-滞留-堵塞过程,其严重性由颗粒-裂隙/孔喉尺寸耦合关系所决定。从物理堵塞层级上可分为外部堵塞和深层侵入,粒径较大的颗粒(膨润土、钻屑)会在井壁处快速堆积,而纳微米级别的细颗粒会随着滤液渗入煤体甚至基质连通孔隙网络中,当粒径大于孔喉尺寸时发生

堵塞。从侵入动力学角度分析,颗粒进入煤岩内部的主要动力来自于压差的驱动力和流体的拖曳力,二者共同作用下颗粒会克服与煤表面的相互作用力、重力及惯性力等,在复杂的裂隙/孔隙网络中运移。Huang等^[26]对沁水盆地赵庄区块的研究表明,颗粒越小,侵入越深,对煤岩的渗透率伤害越大,且少量的颗粒就能造成较大的伤害。同时,在煤层气钻井液中,仅控制总固相含量(如低/无固相体系)是不够的,必须同步精细调控固相粒径分布。

此外,在钻进过程钻井液流体带来的外部颗粒侵入和水敏及速敏造成的原生颗粒运移往往不会单独发生,而是共同作用,如图2所示。

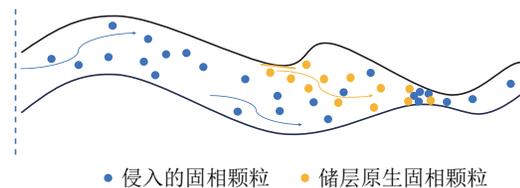


图2 固相侵入与原生颗粒运移耦合示意

Fig.2 The coupling diagram of solid phase invasion and primary particle migration

1.3 钻井液对井壁稳定性的影响

井壁稳定是煤层气钻井过程中的一个极为复杂的问题,钻井液的化学性质、密度、黏度和滤失性都会对井壁稳定性产生影响^[27]。

1.3.1 物理作用

物理失稳的核心是近井壁应力集中与孔隙压力扰动的耦合作用。其中,钻井液的液柱压力是影响井下应力状态的最直接因素:井眼钻开破坏原地应力平衡,井周产生极高的周向应力和径向应力梯度,依靠钻井液的液柱压力平衡地应力,较高或较低的液柱压力会导致井壁断裂或崩塌。因此,要保证井壁稳定首先要做的就是确定精准的钻井液安全密度窗口。此外,煤层本身割理发育,使得煤层渗透率相对较高,钻井液滤液的侵入显著改变近井带的孔隙压力场,进而扰动有效应力场。因此,在钻进过程中煤层表现出较强的孔隙弹性效应,过高的液柱压力会极大地影响井壁附近的孔隙压力,从而导致井壁失稳^[28-29]。煤层弱面的存在也对井壁的稳定产生较大影响。弱面是煤体天然的薄弱带,当主应力方向不利时易沿其发生滑动破坏。起下钻、开停泵引起的压力波动引起的冲击荷载也会加速

煤体的损伤。总体来说,煤岩的低强度、低模量、割理切割导致的非连续性使其对上述过程极其敏感,常规砂泥岩模型常低估其风险。

1.3.2 化学作用

化学失稳的核心是水化作用引发的煤岩本体强度与结构完整性劣化。如前所述,发育不成熟的煤层夹杂大量的黏土矿物,钻井液的滤液会导致黏土矿物水化分散或膨胀,破坏岩石内部原有的胶结造成井壁坍塌掉块^[30-31]。膨胀性黏土吸水产生的层间膨胀应力会劈裂和挤压周围煤基质及微裂隙,水化分散崩解性黏土在遇水后会致胶结脆弱的煤体或泥岩夹层散裂成碎块剥落。此过程具有显著的时间依赖性,停钻期风险最高。此外,水进入煤层可作为润滑剂显著降低弱面的内摩擦角,也会溶解或削弱煤中的胶结物质,降低煤体的黏聚力。有研究表明,煤岩的含水率和煤体强度有很强的关联,如图3所示,含水率从0%增加到2.885%,其单轴抗压强度降低65.82%^[32]。

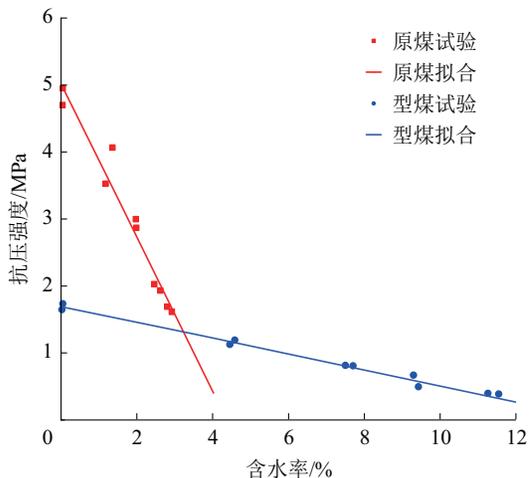


图3 含水率与单轴抗压强度的拟合曲线^[32]

Fig.3 Fitting curve of water content and uniaxial compressive strength

综上所述,钻井液在煤层气钻井中的作用不可或缺,其设计和优化要综合考虑地质条件、钻井技术要求。通过不断的技术创新和实验研究,开发更合适特定地质条件的钻井液体系,以提高煤层气的开采效率和经济效益。

2 煤层气钻井液的研究进展

针对煤层气储层伤害及井壁失稳的问题,煤层

气领域钻井液主要有储层保护钻井液体系和防塌钻井液体系两大类。由于煤层气储层具有低孔隙度、低渗透率以及裂缝发育但分布不均等特点,储层容易受到不可逆的伤害。因此,储层保护钻井液主要是降低钻井液中的固相含量,或者是利用可降解材料保护储层;防塌钻井液体系主要是利用各种封堵剂,减少滤液进入煤层,降低煤层坍塌的可能。

2.1 煤层气井储层保护钻井液体系

2.1.1 针对储层敏感性伤害的钻井液技术

根据上述分析,在钻井过程中应力敏感和水敏是主要的敏感性损害类型,可通过增强钻井液的封堵、抑制性能及调节钻井液密度等方式解决。由此,一系列低密度钻井液体系及强抑制封堵体系被提出。储层保护钻井液体系汇总见表1。

2.1.1.1 低密度钻井液体系

钻遇低压、易漏失地层时低密度钻井液体系可以发挥较大作用。王宏伟等^[33]以MAN104为抑制剂,MAN101与NPAN为降滤失剂,用SMP-1、SPNH、阳离子乳化沥青改善滤饼质量,提出了低密度的聚磺钻井液体系并成功应用于新疆额敏县和煤1井。该体系通过优化处理剂组合,在维持必要性能的同时有效降低了密度,为解决低压煤层的漏失问题提供了一种实用方案。左景栾等^[34]通过中空玻璃微球密度降低剂对钻井液性能影响评价,研发出中空玻璃微球低密度钻井液体系,有效防止液体对煤储层的污染,利于后续的煤层气开采,但其微球材料的机械强度及成本是需要考虑的因素。

2.1.1.2 强抑制封堵体系

增强钻井液抑制性能的处理剂主要有无机盐类抑制剂、胺类抑制剂及聚合物类抑制剂。无机盐类抑制剂是通过离子交换来阻止水分子进入,胺类抑制剂在吸附后会压缩黏土晶层使水分子脱离并防止其二次进入,聚合物类抑制剂主要通过吸附包被等作用形成保护膜达到抑制作用。黄维安等^[35]以沁水盆地煤岩为研究对象,在基于对煤岩的岩性分析基础上进行室内实验,优选出了表面润湿性改善剂SD-905和水敏性抑制剂SMYZ-2,并设计出适合沁水盆地煤层气钻井且能有效抑制钻井液对煤储层敏感性伤害的钻井液配方。该研究紧密结合区域煤岩特性(如高黏土含量)进行配方优化,体现了地质适配性的重要性,其效果在室内实验中得到了验证。

表1 储层保护钻井液体系汇总

Table 1 Summary of reservoir protection drilling fluid system

体系类型	核心技术/材料	作用机理	主要优势	应用
低密度钻井液	中空玻璃微球、MAN系列处理剂	降低液柱压力→减少应力敏感损害和漏失风险	密度可控(可小于1.0 g/cm ³),减轻储层压差伤害	新疆额敏县和煤1井;低压易漏地层
强抑制-封堵体系	胺类抑制剂、纳米材料、刚性/柔性封堵剂、表面润湿改善剂	抑制黏土水化膨胀+纳米级封堵微裂隙→阻隔滤液侵入,缓解水敏/应力敏感	双重保护(储层+井壁)	沁水盆地高黏土含量煤层;松软地层
绒囊钻井液	自组装、解堵绒囊结构	低密度+自适应封堵地层→形成压力隔离带	高效封堵、自动解堵,适用于低压裂缝性储层	煤层气水平井防漏堵漏
低固相钻井液	无机盐、聚合物、暂堵剂	降低固相含量→减少颗粒堵塞孔隙	密度低、黏度低,快速形成泥饼削弱滤液侵入	辽宁阜新煤层气参数井及试验井
无固相钻井液	聚合物、表面活性剂、低分子絮凝剂	近零固相→最大限度降低固相损害;强抑制性维持井壁稳定	pH接近7,防止水锁效应,储层伤害最小化	辽河盆地小龙湾地区;沁水盆地水平井
可降解钻井液	生物酶(如SEB)、稀盐酸、可降解聚合物	完井后酶降解聚合物/酸溶矿物→清除堵塞残留物	环保兼容性好,残渣少,人为可控降解	松软煤层;环保敏感区

封堵材料的粒径与结构形态对其性能起决定性作用,科学选择粒径是实现井壁可靠封堵的前提条件。目前钻井液的封堵模式主要有两种:一是刚性封堵,即利用具有刚性特征且粒径分布多元的材料,通过填充、架桥等物理作用,将其嵌入地层裂缝或漏失通道,物理阻断流体漏失路径;二是柔性封堵,借助材料的形变自适应地渗入并填充漏失通道,形成具备弹性特征的封堵层^[36-37]。应力敏感性的实质是围压与孔隙压力等应力环境改变所引发的煤层渗流结构劣化,无论是刚性封堵还是柔性封堵,均能通过目标地层建立压力隔离带,有效缓冲孔隙压力波动对煤层的影响,进而抑制应力敏感导致的储层损害。此外,钻井液的封堵能力可通过阻隔滤液侵入地层,从根源上避免岩层因水化膨胀引发水敏损害及井壁失稳。蔡记华等^[38]在研究钻井液用纳米材料暂堵剂的基础上,提出一种将纳米材料添加至微泡沫钻井液体系的新思路。纳米材料的高表面积和尺寸效应使其能有效封堵煤岩的微小孔隙和割理,显著降低滤失,减轻水敏损害。然而,纳米材料在复杂钻井液体系中的稳定性和分散性,以及大规模应用的成本效益,仍是需要面临的挑战。郑力会等^[39]通过室内研究对绒囊钻井液体系进行评价,研制出一种低密度(0.85 g/cm³)高效封堵稳定体系,可全面封堵地层,很好地控制滤失量,保护煤层气储层,完井后可自动解堵。在此

基础上杨雨成^[40]对绒囊钻井液体系的流变性能进行了进一步分析,认为影响绒囊煤层气钻井液流变性的关键因素有密度、温度、压力和剪切速率。针对这些因素进一步分析,并优选建立不同条件下的流变模式,确定一定条件下的绒囊煤层气钻井液符合赫-巴模式。综合来看,绒囊体系在低压易漏储层展现出良好潜力,但现场维护要求较高,在复杂地层条件下的性能表现需要进一步验证。

2.1.2 针对储层固相伤害的钻井液技术

钻井液中的刚性颗粒及聚合物等组分对储层渗透率影响很大,针对这些问题的主要方法是降低钻井液固相含量或使用可降解材料等,陆续开发出低固相、无固相钻井液体系及可降解钻井液体系。

2.1.2.1 低固相钻井液体系

低固相体系有密度低、黏度低等特点,大大减小了钻井液液柱压力对地层的影响,且能在井下快速形成泥饼,降低钻井液的侵入。常规的低固相钻井液就是在清水中加入少量膨润土,但这样会带来严重的储层固相颗粒污染。包贵全^[41]利用无机盐、聚合物和暂堵剂组成的低固相双聚钻井液应用于辽宁阜新煤层气参数井及试验井,辅以储层保护技术,取得了良好效果。该体系抑制性和封堵性弱于高固相体系,在易塌地层应用受限。

2.1.2.2 无固相钻井液体系

岳前升等^[42]在清水中加入无机盐、防垢剂、表

面活性剂和低分子量絮凝剂等处理剂,在无固相颗粒的同时最大限度保护了储层。张振华^[43]针对辽河盆地小龙湾地区煤层气井,采用无膨润土聚合物钻完井液体系,在煤层气储层钻进中取得了很好的效果。该体系不含膨润土,可防止固相损害,强抑制性保持井壁稳定,低滤失量,pH接近7,滤液有降低固液表面张力的能力,这些特性可防止水锁效应或内外流体不相容而损害储层。无固相体系能最大限度降低钻井液对储层的伤害,但其依赖高效聚合物,抗污染能力(如钻屑侵入)和高温稳定性不足,成本通常较高,需结合煤层地质条件综合评估。

2.1.2.3 可降解钻井液体系

1993年,Shell等^[44]在钻井液中引入生物酶,分析了常用钻井液处理剂的生物降解性,证明生物酶降解钻井液聚合物的可行性,其专一降解特性为减少聚合物残留伤害提供了新思路。O'Driscoll等^[45]利用SEB(Special Enzyme Breaker)降解钻井液中的淀粉类聚合物,证明特定的酶能有效消除聚合物的损害。由于酶的专一性,不会对井眼稳定性产生影响。相比于酸解或氧化剂类降解,生物酶能形成多次清除的效果。对岩心流动模拟实验结果表明,生物酶对滤饼的降解效果在酸洗前更好。

蔡记华等^[46]针对松软地层研制出一种兼有保持井壁稳定和保护储层双重优点的可降解煤层气钻井液。该体系中生物酶具有较快的破胶速度和较彻底的破胶效果,稀盐酸可以有效清除聚合物和

碳酸盐岩类矿物带来的伤害,甚至提高煤层气渗透率。其降解性能人为可控,适用于煤矿井下作业。蒋官澄等^[47]针对煤层气地层特点,通过大量实验,研制和优选出适于煤层气钻井的可降解无固相聚膜清洁钻井液体系。该钻井液体系无膨润土,处理剂可降解,可返排,残渣含量低,煤层损害小,同时具有优良的流变性和造壁性,现场使用和维护简单,成本低。总体来看,可降解钻井液体系的核心优势在于环保性和储层保护,是煤层气绿色开发的重要选择。但酶降解技术的效果受温度、pH、酶浓度及底物类型(聚合物种类)限制,降解速度和能力在不同条件下差异大,对非目标聚合物或地层矿物的伤害评估不足,且需配套针对性的性能调控技术(如添加降解抑制剂)以平衡环保与施工需求。

2.2 防塌钻井液体系

20世纪50年代开始,注意到空气钻进能很好地维持井壁稳定,研究者开始认识到煤层气井壁失稳不仅是力学问题,可能与煤岩的矿物成分对外来流体的敏感性有关。为避免水敏矿物水化膨胀,解决井壁稳定的思路主要集中在新的钻井液体系或者钻井液处理剂上。防塌钻井液体系见表2。

Baltoiu等^[48]在煤层气井井壁稳定的研究基础上,研制出新型防塌钻井液体系,显著降低地层滤失量的同时有效维持了井壁稳定。其应用效果表明,针对煤层特性优化钻井液的封堵防漏性能是防塌的关键之一。Gentzis^[49]在研究煤岩理化性质的

表2 防塌钻井液体系汇总

Table 2 Anti-sloughing drilling fluid system summary

体系类型	核心技术/材料	作用机理	主要优势	应用
多元协同防塌体系	高效包被抑制剂、封堵防塌剂、活度平衡剂	抑制黏土水化+封堵微裂缝+调节化学势平衡→增强井壁力学完整性	降低井径扩大率(<10%),防塌效果持久	碎软煤层、大倾角复杂地层
强封堵性防塌体系	封堵剂 CRPA(苯乙烯-甲基丙烯酸丁酯共聚物)	快速封堵微裂隙→形成致密滤饼,缓冲孔隙压力波动	适配煤岩孔缝特征,增强胶结作用	延长气田山西组煤层
聚合物成膜防塌体系	高分子聚合物(增加表观黏度)	井壁成膜→阻隔流体渗入地层	操作简单,成本较低	沁水盆地水平井
泡沫水泥浆加固体系	泡沫水泥浆	旋喷注入→机械加固松软煤层	增强煤体强度,防止坍塌	松软煤层随钻护壁
低密度防塌体系	低密度固相、HV-CMC(调控流变性,增加润滑)	严控固相含量+优化润滑性→增强护壁性能	降低渗漏与坍塌风险,适配低压低渗储层	沁水盆地郑庄区块15号煤层;新疆尼勒克地区深部煤层

基础上,遴选了几种封堵剂用于煤层气井壁稳定钻井液中,形成的滤饼具有较强的抗漏失能力,可有效防止井壁失稳。该研究侧重于通过优选封堵剂构建强韧滤饼增强井壁,其成果为筛选适用于煤层的封堵材料提供了依据。

胡广强^[50]提出了采用磺化沥青作为封堵剂,用封堵微裂缝的方法防止煤层坍塌,通过模拟煤层微裂缝的新型评价方法来评价封堵效果。研究表明,磺化沥青不但能在井壁形成致密坚韧的黏糊状泥饼,防止钻井液滤液侵入,同时由于磺化沥青软化后能被挤入煤层的微裂缝和割理中,其离子与煤层产生胶结作用,增强了煤层的强度。但其研究主要基于特定煤样和实验条件,磺化沥青的软化点、胶结效果在不同煤阶和温度下的普适性有待验证。黄维安等^[51]依据“多元协同”防塌原理,研选出了高效包被抑制剂、封堵防塌剂和活度平衡剂,构建了泥页岩地层防塌钻井液体系QSFT,系统应对水化、封堵、化学位多层次问题,但体系中多元处理剂配伍性及长期化学稳定性仍需关注,其在极破碎或大段纯煤层中的有效性有待更多现场检验。岳前升等^[52]提出通过添加高分子聚合物提高钻井液的表现黏度,并通过在井壁上成膜防止钻井液或外来流体渗入地层。该技术思路直接有效,但在破碎严重煤层中的成膜完整性和持久性存在挑战。王建龙^[53]针对延长气田山西组煤层微裂隙发育、破碎、胶结性差、易垮塌等特征,制备了“模拟岩心”,建立煤岩封堵评价方法,以苯乙烯、甲基丙烯酸丁酯、烯丙基三甲基氯化铵为单体合成了一种封堵剂CRPA,并优选其他封堵剂,最终构建了适合延长气田山西组煤层的强封堵型防塌钻井液体系。其系统性研究路径(地质问题-评价方法-材料研发-体系构建)具有示范意义,但其建立的评价方法对钻井动态条件下封堵层稳定性的模拟尚有局限。李子硕等^[54]针对松软煤层机械强度低等难题,研发了一种泡沫水泥浆,在钻进过程中通过旋喷的方式将其注入到松软煤层中进行加固防塌。该研究为松软煤层的随钻护壁和瓦斯抽采提供了借鉴,但其有效性还需进一步的现场检验。简阔等^[55]针对沁水盆地低压低渗煤层气储层特性,构建了以低密度固相为核心的聚合物钻井液体系,通过严控固相含量增强护壁性能,结合HV-CMC优化润滑性与防卡能力,显著降低了渗漏与坍塌风险。该体系在郑庄

区块15号煤层钻进中应用效果突出。王虎等^[56]基于新疆尼勒克地区深部煤系地层井壁坍塌掉块问题,通过优化钻井液参数,辅以高黏洗井携岩与爆炸松扣等应急处置措施,成功解决长裸眼段塌陷埋钻难题。其“力学平衡设计+工程应急处置”的技术思路对深部煤层气安全钻进具有重要参考价值。

3 结论

梳理了煤层气钻井液技术研究进展,聚焦于储层保护和井壁稳定两大核心难题,得出以下结论:

(1)煤层气储层独特的低孔、低渗、割理发育、易坍塌特性以及复杂的有机-无机组成,决定了其钻井液必须兼顾低密度、强抑制性、强封堵性、低固相/可降解性。

(2)钻井液对煤层气储层的主要损害机制包括应力敏感损害、水敏损害(黏土矿物水化膨胀/分散堵塞孔喉)和固相侵入损害(聚合物、刚性颗粒、煤粉堵塞孔缝)。井壁失稳主要由钻井液液柱压力失配(诱发力学坍塌)和滤液化学作用(水化削弱煤岩强度、破坏胶结)共同导致。

(3)煤层气钻井液技术已形成两大体系,储层保护钻井液体系核心技术包括低密度钻井液以降低压差,强抑制-封堵体系以阻隔滤液、缓解应力敏感和水敏,低/无固相及可降解钻井液以最大限度减少固相堵塞和化学残留。防塌钻井液体系核心在于多元协同作用,通过高效包被抑制剂抑制黏土水化,优选高效封堵剂快速封堵微裂缝、形成致密滤饼、增强井壁完整性,并辅以活度平衡等技术。

4 展望

综观当前煤层气钻井液技术研究与实践,为应对复杂地质条件下高效开发与环境保护的双重挑战,未来研究需聚焦于以下具有突破潜力的方向:

(1)智能响应型钻井液技术。开发对井下环境(温度、压力、流体化学性质、剪切作用)具有刺激-响应能力的智能功能材料及调控机制,构建具备自感知、自判断、自调节特性的钻井液体系。此类技术将极大提升钻井液应对井下动态变化的自适应能力,优化储层保护与井壁稳定效果,是实现钻井过程智能化、精准化调控的关键路径。

(2)地质适配性的深度挖掘与精准应用。深化水-力-化多场耦合作用下,特别是复杂构造区(如

大倾角、碎软煤层)和高应力环境下的井壁失稳微观机理研究。建立融合关键地质与工程参数的精细化模型,并发展井下原位/随钻快速识别技术,推动钻井液设计从“经验型”向“数据驱动、地质适配”的精准化方向跃升,实现“一井一策”甚至“一段一策”的优化配置。

(3)绿色高效钻井液材料与体系的创新发展。绿色高效钻井液材料及体系的研发,核心在于:突破高效纳微米级封堵材料在煤岩多尺度孔隙-裂隙网络中的作用机制瓶颈,提升对复杂渗流通道的快速、有效封堵能力;开发高效可控的靶向降解技术(如新型生物酶/破胶剂),实现钻井液残留物(尤其聚合物)的更彻底清除,显著提高储层渗透率恢复率;持续研发基于可再生资源的低毒、易生物降解、高性能环保处理剂,构建环境足迹更小的绿色钻井液体系,支撑行业可持续发展。

参考文献(References):

- [1] 白杨,王路一,李翔,等.煤层气储层保护钻井液技术研究进展[J].天然气工业,2024,44(10):182-194.
BAI Yang, WANG Luyi, LI Xiang, et al. Research progress of drilling fluid technology for CBM reservoir protection[J]. Natural Gas Industry, 2024,44(10):182-194.
- [2] 邹才能,杨智,黄土鹏,等.煤系天然气的资源类型、形成分布与发展前景[J].石油勘探与开发,2019,46(3):433-442.
ZOU Caineng, YANG Zhi, HUANG Shipeng, et al. Resource types, formation, distribution and prospects of coal-measure gas[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(3): 433-442.
- [3] 黄中伟,李国富,杨睿月,等.我国煤层气开发技术现状与发展趋势[J].煤炭学报,2022,47(9):3212-3238.
HUANG Zhongwei, LI Guofu, YANG Ruiyue, et al. Review and development trends of coalbed methane exploitation technology in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3212-3238.
- [4] 王博洋,秦勇,申建,等.我国低煤阶煤系煤层气地质研究综述[J].煤炭科学技术,2017,45(1):170-179.
WANG Boyang, QIN Yong, SHEN Jian, et al. Summarization of geological study on low rank coalbed methane in China[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(1):170-179.
- [5] 叶建平,陆小霞.我国煤层气产业发展现状和技术进展[J].煤炭科学技术,2016,44(1):24-28,46.
YE Jianping, LU Xiaoxia. Development status and technical progress of China coalbed methane industry[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(1):24-28,46.
- [6] 蔚远江,杨起,刘大锰,等.我国煤层气储层研究现状及发展趋势[J].地质科技情报,2001,20(1):56-60.
YU Yuanjiang, YANG Qi, LIU Dameng, et al. A review on studies of coalbed methane reservoirs in China[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2001, 20(1):56-60.
- [7] Shi J Q, Pan Z J, Durucan S. Analytical models for coal permeability changes during coalbed methane recovery: model comparison and performance evaluation[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 136:17-24.
- [8] 曾雯婷,葛腾泽,王倩,等.深层煤层气全生命周期一体化排采工艺探索——以大宁-吉县区块为例[J].煤田地质与勘探,2022,50(9):78-85.
ZENG Wenting, GE Tengze, WANG Qian, et al. Exploration of integrated technology for deep coalbed methane drainage in full life cycle: a case study of Daning-Jixian Block[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(9):78-85.
- [9] 秦勇,申建,史锐.中国煤层气大产业建设战略价值与战略选择[J].煤炭学报,2022,47(1):371-387.
QIN Yong, SHEN Jian, SHI Rui. Strategic value and choice on construction of large CMG industry in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1):371-387.
- [10] 于文强,杨书港,张林鹏,等.深层煤层气防塌钻井液优化研究[J].云南化工,2024,51(6):67-70.
YU Wenqiang, YANG Shugang, ZHANG Linpeng, et al. Optimization study of anti-collapse drilling fluid for deep coalbed methane[J]. Yunnan Chemical Technology, 2024, 51(6): 67-70.
- [11] 张仰强.适合煤层气储层的低伤害环保型钻井液体系[J].当代化工,2024,53(10):2386-2390.
ZHANG Yangqiang. Low-damage environment-friendly drilling fluid system suitable for coalbed methane reservoirs[J]. Contemporary Chemical Industry, 2024, 53(10):2386-2390.
- [12] 卢国军,刘彬,王力,等.中国煤层气储层伤害分析及钻井液储层保护研究现状[J].煤田地质与勘探,2016,44(2):121-126.
LU Guojun, LIU Bin, WANG Li, et al. Analysis of CBM reservoir damage and status of research on reservoir protection with drilling fluids in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(2):121-126.
- [13] 朱苏阳,孟尚志,彭小龙,等.煤岩润湿性对煤层气赋存的影响机理[J].油气藏评价与开发,2022,12(4):580-588,595.
ZHU Suyang, MENG Shangzhi, PENG Xiaolong, et al. Mechanism of coal wettability on storage state of undersaturated CBM reservoirs[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4):580-588,595.
- [14] 申鹏磊,吕帅锋,白建平,等.沁水盆地深部煤层气开发井完井技术进展[J].煤炭科学技术,2025,53(2):255-265.
SHEN Penglei, LV Shuaifeng, BAI Jianping, et al. Progress in completion technology of deep coalbed methane development wells in Qinshui Basin[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(2):255-265.
- [15] 李勇,徐立富,张守仁,等.深煤层含气系统差异及开发对策[J].煤炭学报,2023,48(2):900-917.
LI Yong, XU Lifu, ZHANG Shouren, et al. Gas bearing system difference in deep coal seams and corresponded development strategy[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(2): 900-917.
- [16] 黄陆波,王丙乾,黄建明,等.高倾角烧变岩对新疆阜康矿区煤层气影响[J].中国煤层气,2023,20(4):24-26.
HUANG Lubo, WANG Bingqian, HUANG Jianming, et al.

- Influence of high-dip metamorphic rocks on coalbed methane in fukang mining area of Xinjiang [J]. *China Coalbed Methane*, 2023, 20(4): 24-26.
- [17] 尹晓敏. 新疆阜康矿区四工河区块煤储层敏感性分析[J]. 当代化工研究, 2024(8): 56-58.
YIN Xiaomin. Sensitivity analysis of block coal reservoir in the west sigonghe district of Fukang Mining Area, Xinjiang [J]. *Modern Chemical Research*, 2024(8): 56-58.
- [18] 孙粉锦, 杨焦生, 王玫珠, 等. 不同煤阶煤应力敏感特征及其控制机理[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(9): 51-58.
SUN Fenjin, YANG Jiaosheng, WANG Meizhu, et al. Stress sensitivity characteristics and control mechanism of different coal rank reservoirs [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(9): 51-58.
- [19] Palmer I, Mansoori J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: a new model [J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 1998, 1(6): 539-544.
- [20] 杨胜来, 杨思松, 高旺来. 应力敏感及液锁对煤层气储层伤害程度实验研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(3): 90-92.
YANG Shenglai, YANG Sisong, GAO Wanglai. Experimental study of damage of stress and liquid sensitivities to coal-bed gas reservoir [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(3): 90-92.
- [21] Molaei A, Waters K E. Aphron applications: a review of recent and current research [J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2015, 216: 36-54.
- [22] 邓拓. 煤层气储层水平井钻井过程中储层伤害机理[J]. 石化技术, 2024, 31(6): 263-265.
DENG Tuo. Mechanism of reservoir damage during horizontal well drilling in coalbed methane reservoirs [J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2024, 31(6): 263-265.
- [23] 胡友林, 代杰. 钻井过程中煤层气储层损害机理研究[J]. 煤矿安全, 2014, 45(4): 5-8, 12.
HU Youlin, DAI Jie. Research on coalbed methane reservoir damage mechanism during drilling [J]. *Safety in Coal Mines*, 2014, 45(4): 5-8, 12.
- [24] 鲜保安, 张龙, 哈尔恒·吐尔松, 等. 煤层气储层伤害机理与水平井双层管柱筛管完井技术[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(9): 122-129.
XIAN Baoan, ZHANG Long, HAERHENG Tuersong, et al. Damage mechanism of CBM reservoirs and double-layered screen pipes in the horizontal well completion [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(9): 122-129.
- [25] 姚征. 煤层气开发中固相微粒的成因机理与防治措施研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
YAO Zheng. Study on genetic mechanisms and control measures of solid fines in coalbed methane development [D]. Beijing: China University of Mining & Technology (Beijing), 2016.
- [26] Huang W, Lei M, Qiu Z, et al. Damage mechanism and protection measures of a coalbed methane reservoir in the Zhengzhuang block [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2015, 26: 683-694.
- [27] 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.
- [28] 丁宁宁, 马天捧, 姚雷, 等. 粉煤地层绳索取心钻进孔壁坍塌分析及处理[J]. 钻探工程, 2024, 51(2): 127-132.
DING Ningning, MA Tianpeng, YAO Lei, et al. Analysis and treatment of hole wall collapse of wire-line core drilling in pulverized coal strata [J]. *Drilling Engineering*, 2024, 51(2): 127-132.
- [29] 邢林庄, 周泽南, 刘可成, 等. 流固耦合下破碎性煤系地层坍塌规律研究[J]. 钻采工艺, 2024, 47(5): 24-32.
XING Linzhuang, ZHOU Zenan, LIU Kecheng, et al. Study on the collapse law of fractured coal strata under Fluid-Solid coupling [J]. *Drilling & Production Technology*, 2024, 47(5): 24-32.
- [30] 陈书雅, 宋继伟, 石彦平, 等. 煤系“三气”共采条件下的井壁稳定钻井液技术[J]. 钻井液与完井液, 2018, 35(4): 39-45.
CHEN Shuya, SONG Jiwei, SHI Yanping, et al. Drilling fluid technology for stabilizing borehole in coproduction of "three gases" in coal measures [J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2018, 35(4): 39-45.
- [31] 严俊涛, 孟英峰, 李皋, 等. 泥煤互层段井壁稳定分析新方法[J]. 钻采工艺, 2012, 35(4): 19-21.
YAN Juntao, MENG Yingfeng, LI Gao, et al. New method for borehole stability analysis of alternating layer of shale and coal [J]. *Drilling & Production Technology*, 2012, 35(4): 19-21.
- [32] 王凯, 蒋一峰, 徐超. 不同含水率煤体单轴压缩力学特性及损伤统计模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1070-1079.
WANG Kai, JIANG Yifeng, XU Chao. Mechanical properties and statistical damage model of coal with different moisture contents under uniaxial compression [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(5): 1070-1079.
- [33] 王宏伟, 李玉良. 和煤1井煤层气井钻井液技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(1): 25-26, 30.
WANG Hongwei, LI Yuliang. Drilling fluid technology for coal-bed methane well [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2009, 36(1): 25-26, 30.
- [34] 左景梁, 孙晗森, 周卫东, 等. 适用于煤层气开采的低密度钻井液技术研究与应用[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 815-819.
ZUO Jingliang, SUN Hansen, ZHOU Weidong, et al. Study and application of light weight drilling fluid applied to coalbed methane development [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(5): 815-819.
- [35] 黄维安, 邱正松, 王彦祺, 等. 煤层气储层损害机理与保护钻井液的研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(10): 1717-1721.
HUANG Weian, QIU Zhengsong, WANG Yanqi, et al. Study on damage mechanism and protection drilling fluid for coalbed methane [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(10): 1717-1721.
- [36] 李天乐, 庞少聪, 赵洛, 等. 近十年纳微米堵漏剂研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(7): 2107-2111.
LI Tianle, PANG Shaocong, ZHAO Luo, et al. Research progress of nano-micron plugging agent in recent ten years [J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(7): 2107-2111.

- [37] 赵洪波,单文军,朱迪斯,等. 裂缝性地层漏失机理及堵漏材料新进展[J]. 油田化学, 2021, 38(4): 740-746.
ZHAO Hongbo, SHAN Wenjun, ZHU Disi, et al. Advance of fractured formation lost circulation mechanism and lost circulation materials in oil and gas wells [J]. Oilfield Chemistry, 2021, 38(4): 740-746.
- [38] 蔡记华,袁野,王济君,等. 纳米材料稳定的微泡沫钻井液降低煤层气储层伤害的实验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9): 1640-1645.
CAI Jihua, YUAN Ye, WANG Jijun, et al. Experimental research on decreasing coalbed methane formation damage using micro-foam mud stabilized by nanoparticles [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(9): 1640-1645.
- [39] 郑力会,孔令琛,曹园,等. 绒囊工作液防漏堵漏机理[J]. 科学通报, 2010, 55(15): 1520-1528.
ZHENG Lihui, KONG Lingchen, CAO Yuan, et al. The mechanism for fuzzy-ball working fluids for controlling and killing lost circulation [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15): 1520-1528.
- [40] 杨雨成. 绒囊煤层气钻井液的流变性研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
YANG Yucheng. The study on the rheology of fuzzy ball's CBM drilling fluid [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2017.
- [41] 包贵全. 煤层气钻井工程中几个重点技术问题的探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(12): 4-8.
BAO Guiquan. Study on some focal technical problems of drilling engineering for coal bed methane [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2007, 34(12): 4-8.
- [42] 岳前升,陈军,邹来方,等. 沁水盆地基于储层保护的煤层气水平井钻井液的研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(S2): 416-419.
YUE Qiansheng, CHEN Jun, ZOU Laifang, et al. Research on coalbed methane drilling fluid for horizontal well based on coal reservoir protection in Qinshui Basin [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S2): 416-419.
- [43] 张振华. 辽河盆地小龙湾地区煤层气井钻井液技术探讨[J]. 特种油气藏, 2005, 12(5): 68-71.
ZHANG Zhenhua. Discussion on drilling fluid for coal-bed gas well of Xiaolongwan area in Liaohe Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2005, 12(5): 68-71.
- [44] Shell F J, Hitzman D O. Enzymatic decomposition of drilling mud: A; US 5126051 [P]. 1992-06-30.
- [45] O'Driscoll K P, Amin N M, Tantawi I Y. New treatment of removal of mud-polymer damage in multilateral wells drilled using starch-based fluids [C]//IADC/SPE Drilling Conference. Dallas: IADC/SPE Drilling Conference, 1998: SPE-39380-MS.
- [46] 蔡记华,刘浩,陈宇,等. 煤层气水平井可降解钻井液体系研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1683-1688.
CAI Jihua, LIU Hao, CHEN Yu, et al. Study on degradable drilling fluid system for coalbed methane horizontal drilling [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1683-1688.
- [47] 蒋官澄,高德利. 煤层气专用可降解聚膜清洁钻井液新技术与工业化应用[Z]. 北京市, 中国石油大学, 2017-03-21.
JIANG Guancheng, GAO Deli. New technology and industrial application of degradable polymer membrane clean drilling fluid for coalbed methane [Z]. Beijing, China University of Petroleum, 2017-03-21.
- [48] Baltoiu L V, Warren B K, Natras T A. State-of-the-art in coalbed methane drilling fluids [J]. SPE Drilling & Completion, 2008, 23(3): 250-257.
- [49] Gentzis T. Stability analysis of a horizontal coalbed methane well in the rocky mountain front ranges of southeast British Columbia, Canada [J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 77(3/4): 328-337.
- [50] 胡广强. 大曲率段煤层坍塌机理及防塌钻井液技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2011.
HU Guangqiang. Study on collapse mechanism of coal seam in large curvature section and anti-collapse drilling fluid technology [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2011.
- [51] 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, 41(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, 41(2): 37-41.
- [52] 岳前升,马玄,陈军,等. 沁水盆地煤层气水平井井壁垮塌机理及钻井液对策研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2014, 11(32): 73-76, 4.
YUE Qiansheng, MA Xuan, CHEN Jun, et al. Instability mechanism of borehole and drilling fluid technical countermeasures for coalbed methane horizontal well in qinshui basin [J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2014, 11(32): 73-76, 4.
- [53] 王建龙. 延长气田煤层井壁失稳机理及钻井液技术研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2019.
WANG Jianlong. Study on wellbore instability mechanism and drilling fluid technology of coal seam in Yanchang gas field [D]. Chengdu: Southwest petroleum university, 2019.
- [54] 李子硕,薛曼,李智,等. 松软煤层加固用泡沫水泥浆的实验研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(3): 130-138.
LI Zishuo, XUE Man, LI Zhi, et al. Experimental study of foamed cement slurry for soft coal seam reinforcement [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3): 130-138.
- [55] 简阔,马斌,许晓晨,等. 低压低渗煤层气多分支水平井开发关键技术研究——以沁水盆地郑庄区块15号煤层为例[J]. 钻探工程, 2023, 50(6): 99-106.
JIAN Kuo, MA Bin, XU Xiaochen, et al. Research on key technologies for developing multi-branched horizontal of CBM wells in low pressure and low permeability coal reservoirs [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(6): 99-106.
- [56] 王虎,胡永,朱迪斯. 新疆尼勒克地区煤层气井钻井复杂处理技术——以HDCS-2井为例[J]. 钻探工程, 2025, 52(2): 20-27.
WANG Hu, HU Yong, ZHU Disi. Complex processing technology for coalbed methane wells in Nileke area, Xinjiang: taking well HDCS-2 as an example [J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2): 20-27.