

引用格式: 欧阳勇, 谢文敏, 丁吉平, 等. 钻井液作用下割理发育煤岩失稳机理研究[J]. 油气藏评价与开发, 2025, 15(2): 284-291.

OUYANG Yong, XIE Wenmin, DING Jiping, et al. Study on the destabilization mechanism of coal rock with cleats due to drilling fluid[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(2): 284-291.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.02.013

钻井液作用下割理发育煤岩失稳机理研究

欧阳勇^{1,2}, 谢文敏³, 丁吉平⁴, 冯福平⁵, 王鹤远⁵, 杨冬临⁵, 马驰⁴, 吕海川⁴

(1. 中国石油长庆油田公司油气工艺研究院, 陕西 西安 710018; 2. 低渗透油气田勘探开发国家工程实验室, 陕西 西安 710018; 3. 中国石油长庆油田公司工程技术管理部, 陕西 西安 710018; 4. 中国石油集团工程研究院有限公司, 北京 100097; 5. 东北石油大学提高油气采收率教育部重点实验室, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 煤岩割理裂缝的发育导致其强度较低, 钻井过程中钻井液的作用将会进一步增加井壁失稳的风险。采用室内实验、理论分析与数值模拟相结合的方法, 揭示了钻井液作用下割理发育煤岩失稳机理: ①煤岩黏土矿物主要由不易水化的高岭石组成, 无易水化的蒙脱石存在且伊蒙混层的占比不高, 因此水化膨胀(平均值为0.35%)和滚动分散性能(平均值为89.64%)较弱, 煤岩失稳机制以力学作用为主。②垂直交错的面割理和端割理为钻井液侵入煤岩地层提供了流动通道, 面割理的尺寸普遍大于端割理, 因此, 面割理更容易发生钻井液侵入造成井壁失稳。③钻井液侵入割理缝会导致井周地层压力上升, 径向应力降低, 增加井壁失稳的风险, 其中对于高渗透率的面割理和穿过井眼的交叉割理, 钻井液侵入更深, 产生的井壁失稳风险更加严重。④割理缝的特征也会影响钻井液对煤岩割理的侵入深度。宽度更大、密度更高的割理缝中, 钻井液侵入更深, 并在井壁附近产生更高的压力, 从而提高了井壁失稳的可能性。因此, 应根据实际地层割理缝的尺寸大小设计钻井液随钻封堵粒子, 且控制钻井液密度在合理的范围内, 从而减少钻井液侵入引起井壁失稳情况的发生。研究提供了深入理解钻井液作用下割理发育煤岩失稳机理的新视角, 为割理发育煤岩井壁稳定性分析提供了理论指导。

关键词: 钻井液; 面割理; 端割理; 煤岩; 失稳机理

中图分类号: TE21

文献标识码: A

Study on the destabilization mechanism of coal rock with cleats due to drilling fluid

OUYANG Yong^{1,2}, XIE Wenmin³, DING Jiping⁴, FENG Fuping⁵, WANG Heyuan⁵, YANG Donglin⁵, MA Chi⁴, LYU Haichuan⁴

(1. Oil and Gas Technology Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 2. National Engineering Laboratory for Exploration and development of Low Permeability Oil and Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 3. Engineering Technology Management Department, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 4. CNPC Engineering Technology R&D Company Limited, Beijing 100097, China; 5. Key Laboratory of Enhanced Oil and Gas Recovery, Ministry of Education, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: The development of cleat fractures in coal rocks leads to reduced strength, and the influence of drilling fluids during drilling further escalates the risk of borehole instability. By combining laboratory experiments, theoretical analysis, and numerical simulations, this study elucidates the mechanisms of instability in clefted coal rocks under the influence of drilling fluids: (1) the clay minerals in the coal rock are predominantly composed of kaolinite, which is resistant to hydration, with little to no montmorillonite present, and a low proportion of illite/smectite(I/S) mixed layers. Consequently, both hydration expansion (averaging 0.35%) and rolling dispersion (averaging 89.64%) are minimal, indicating the instability of coal rocks is primarily driven by mechanical factors. (2) Vertically intersecting face and end cleats create flow channels that allow drilling fluid to intrude into the coal strata. Since the dimensions of face cleats are generally larger than those of end cleats, face cleats are more susceptible to fluid intrusion, leading to borehole instability. (3) The intrusion of drilling fluid into the cleat fractures leads to an increase in formation pressure around the well and a reduction in radial stress, thereby raising the risk of borehole instability. Notably, for high-permeability face cleats and cross-cutting cleats that intersect the boreholes, deeper fluid intrusion further elevates formation pressure and diminishes radial stress, exacerbating the risk of instability. (4) Additionally, the characteristics of the cleats

收稿日期: 2024-04-18。

第一作者简介: 欧阳勇(1977—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事页岩油、致密气及煤层气等非常规油气藏钻井完井新技术研究与推广工作。地址: 陕西省西安市未央区明光路长庆油田油气工艺研究院, 邮政编码: 710018。E-mail: oyy_cq@petrochina.com.cn

通信作者简介: 丁吉平(1991—), 男, 博士, 工程师, 从事油气井工程、油气井岩石力学工作。地址: 北京市昌平区黄河街5号院1号楼, 邮政编码: 102200。E-mail: dingjipingjason@163.com

基金项目: 中国石油集团课题“深层煤岩气钻采工程技术研究及科技示范”(CPET202316); 中国石油集团课题“深地煤岩气成藏理论与效益开发技术研究”(2023ZZ17); 中国石油集团课题“深层煤岩多尺度井壁失稳风险预测研究”(2023DQ03-15)。

also affect the depth to which drilling fluid intrudes into the coal strata. In cleats with greater widths and higher densities, the drilling fluid penetrates deeper and generates higher pressures near the borehole wall, thereby increasing the likelihood of instability. Therefore, plugging particles should be added into the drilling fluid according to the size of the cleats and the density of the drilling fluid should be maintained within a reasonable range, in order to minimize borehole instability caused by fluid intrusion. The study provides a new perspective to understand the instability mechanism of cleats under the action of drilling fluid, and provides theoretical guidance for the analysis of coal rock wall stability.

Keywords: drilling fluid; face cleat; end cleat; coal rock; destabilization mechanism

作为新兴的非常规能源,深层煤岩气凭借巨大的资源储量已成为能源产业更新换代的关注焦点^[1-2]。煤岩自身的割理裂缝发育导致其强度较低且具有显著的非连续性,这使得钻井过程中,钻井液极易沿割理缝侵入井周围岩层,导致井周应力变化,进而出现掉块卡钻、坍塌失稳等复杂问题^[3-5]。因此,深入分析钻井液作用下割理发育煤岩的失稳机理对安全高效地开发煤层气资源具有至关重要的意义。

一些学者通过分析煤岩矿物组成,发现煤岩中含有丰富的黏土矿物,认为煤岩吸水造成的黏土矿物水化膨胀是导致井壁失稳的重要原因^[6-10],因此提出使用有机盐钻井液。有机盐钻井液的使用能够通过形成氢键、减少滤液交换和提高处理剂的高温性能等方式增强井壁稳定性^[11-15]。另一部分学者从微观结构入手,利用CT测试和扫描电镜等技术分析煤岩的微观形态,认为煤岩中割理和微裂缝的发育形成了流体流动的通道,钻井液侵入这些连通裂缝是井壁失稳的主要原因^[16-18]。还有研究学者通过对浸泡前后的煤岩岩样进行抗拉和抗压强度测试,发现钻井液浸泡后煤岩的力学性能显著下降,因此得出结论:力学因素是煤岩井壁失稳的主要原因^[19-23]。

尽管现有研究采用了不同的方法探讨了煤岩的井壁稳定性,但仍存在一些问题有待解决:首先,现有研究未能完整解释钻井液作用下割理发育煤岩失稳机理,未能明确指出主控因素,即煤岩失稳机制是力学失稳还是力学与化学的共同作用引起;其次,对钻井液侵入割理缝的规律认识不足,因而无法准确分析钻井液侵入引起的煤岩失稳。通过煤岩的理化性能实验揭示了割理发育煤岩失稳的主控因素,并分析了钻井液侵入割理缝的规律。进一步通过基于割理缝特征的钻井液侵入数值模拟,对钻井液作用下的割理发育煤岩失稳机理进行了研究,为实施割理发育煤岩井壁稳定性控制技术提供了理论依据。

1 煤岩理化性能分析

研究样品来自鄂尔多斯盆地东部米脂—绥德区块深层煤层,首先进行了水化性能测定实验,评估现场取样的煤岩在钻井液中的黏土膨胀率和滚动回收率。然后通过这些实验,分析了煤岩的水化性能,实验结果展示见图1。

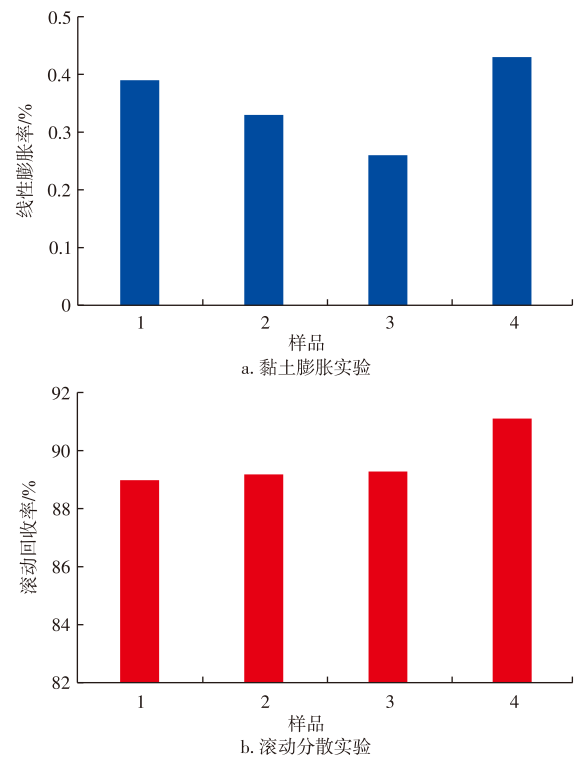


图1 煤岩水化性能实验结果

Fig. 1 Experimental results of coal rock hydration performance

图1的实验结果显示:在钻井液作用下,煤岩的线性膨胀率介于0.26%~0.43%,平均值为0.35%;滚动回收率介于88.98%~91.10%,平均值为89.64%。这表明在钻井液影响下,煤岩的膨胀率和分散率较低,水化程度不严重。接着通过X射线衍射(XRD)实验测试了煤岩的全岩及黏土矿物成分,探究水化性能较弱的原因,实验结果见表1、表2。

表1的全岩矿物分析表明:该地区煤岩平均含有43.12%的方解石和21.67%的石英,并且部分岩屑富含白云石和菱铁矿。该地区煤岩的黏土矿物含量相对较低,介于7.6%~8.8%,平均值为8.3%。根据表2的黏土矿物测定结果:该地区煤岩的主要黏土矿物为高岭石,其含量介于29%~73%,平均值为62.3%,其次是伊蒙混层、绿泥石和伊利石。由于该地区黏土矿物含量较少,主要由不易水化膨胀的高岭石组成,且伊蒙混层的占比不高,平均值为13.7%,说明该地区煤岩的水化性能较弱,与水化性能测试实验结果相吻合。这表明该地区煤岩的化学

劣化不严重,井壁失稳主要由力学因素引起。

$$p_c = \frac{2\sigma}{r} \cos\theta \quad (1)$$

2 钻井液侵入煤岩割理缝规律分析

式中: p_c 为毛管力,单位MPa; σ 为界面张力,单位mN/m; r 为毛管半径,单位m; θ 为润湿接触角,单位($^\circ$)。

2.1 煤岩成分分析和润湿性测定

割理缝渗透率计算公式如下:

$$k_f = \frac{\varphi_f b^2}{12} \quad (2)$$

煤岩的无机物和有机物复杂结合,导致其表面极具非均质性,且大部分对水表现出难以润湿的性质^[24]。煤岩元素分析结果表明:煤岩的主要成分是碳和氧,这2种元素的总占比超过95%,说明煤岩含有较高比例的有机质,因此亲水性较低。进一步的润湿性测定显示:煤岩的润湿角介于 $93.72^\circ \sim 103.32^\circ$,表明其水润湿较差。结果显示煤岩的润湿特性为疏水性。因此,当使用水基钻井液进行钻进时,煤岩割理缝的毛管力为负值,阻止了钻井液对割理缝的侵入。

式中: k_f 为割理缝渗透率,单位 $10^{-3} \mu\text{m}^2$; φ_f 为割理缝孔隙度,%; b 为割理缝尺寸,单位 μm 。

井底压差也是影响钻井液侵入割理缝的重要因素,在研究区块深度2 000 m的煤岩地层,地层压力约为27 MPa。假定液柱压力为30 MPa,计算井底压差为3 MPa,可以得出不同割理缝尺寸下钻井液侵入的驱动力,如图3所示。

2.2 钻井液侵入煤岩割理缝驱动力分析

由图3可见,水基钻井液侵入时,小尺寸割理缝产生的毛管力大于井底压差,导致总驱动力合力为负,钻井液无法侵入割理缝。随着割理缝尺寸增大,毛管力减小,驱动力合力转为正值,钻井液在井底压差为主要推动力的作用下侵入割理缝。针对研究煤岩,割理缝尺寸对毛管力影响不大,但因割理缝尺寸越大,其渗透率越高。因此,大尺寸割理缝更易于钻井液侵入,导致更严重的坍塌失稳。相较之下,面割理的尺寸普遍大于端割理,因此面割理更容易发生钻井液侵入失稳。

利用场发射扫描电镜对煤岩微观结构进行扫描,可以直观地观测煤岩割理、裂隙的发育程度,扫描结果如图2所示。

由图2扫描电镜结果可见:该地区割理及裂隙发育程度较高,割理密度较大。面割理密度介于1.0~1.2条/cm,宽度主要分布介于1~10 μm 。而端割理的密度介于0.6~0.8条/cm,宽度大致介于0.5~5.0 μm ^[1]。这些面割理和端割理以垂直交错的方式相互连接,形成了网状结构,为钻井液侵入煤岩地层提供了流动通道。

3 基于割理缝特征的钻井液侵入引起井周煤岩失稳数值模拟

另外,对研究区块煤岩岩心和钻井液样品进行了参数测量,以便计算驱动力。测得现场水基钻井液的表面张力约为28.1 mN/m;煤岩孔隙度主要集中在5%~8%,平均值约为6.1%。结合电镜测试和润湿性测定结果,可以计算割理缝产生的毛管力和割理缝渗透率,毛管力计算公式如下:

煤岩基质的孔隙、面割理和端割理尺寸差异导致其渗透率不同,进而影响钻井液侵入引起煤岩井壁失稳程度。利用达西定律和裂隙流理论,构建了1个以割理特征为基础的钻井液侵入引起井周煤岩失稳数值模拟模

表1 煤岩全岩矿物测定结果

Table 1 Analysis results of whole rock mineral of coal rock

煤岩编号	矿物含量/%													
	方解石	白云石	硬石膏	菱镁矿	菱铁矿	钾长石	石英	斜长石	角闪石	无水芒硝	食盐	方沸石	碳钠铝石	黏土矿物
1	33.30	0	0.1	0	0	0	40.60	0	0	17.20	0	0	0	8.80
2	68.20	0	0	2.5	0	9.50	11.50	0	0	0	0	0	0	8.30
3	65.20	0	0	0	0	0	22.90	0	0	0	3.30	0	0	8.60
4	71.70	11.80	0	0	0	0	8.90	0	0	0	0	0	0	7.60
5	3.70	52.90	0	0	34.60	0	0	0	0	0	0	0	0	8.80
6	33.50	0	0	9	0	0	41.30	0	7.50	0	0	0	0	8.70
7	36.50	0	0	0	0	12.80	42.50	0	0	0	0	0	0	8.20
8	0.80	0	0	0	19.20	0	36.10	0.20	0	2.00	0	0.20	33.60	7.90
9	63.10	0	6.20	0	5.70	0	0.40	0	17.00	0	0	0	0	7.60
10	55.20	0	0	0	0	0	12.50	0	24.20	0	0	0	0	8.10
平均	43.12	6.47	0.63	1.15	5.95	2.23	21.67	0.02	4.87	1.92	0.33	0.02	3.36	8.26

表2 煤岩黏土矿物测定结果

Table 2 Analysis results of clay mineral of coal rock

样品 编号	黏土矿物含量/%				伊蒙混层比	
	伊利石	高岭石	绿泥石	伊蒙混层	蒙皂石	伊利石
1	10.0	29.0	22.0	39.0	15	85
2	15.0	73.0	0	12.0	15	85
3	7.0	59.0	19.0	15.0	15	85
4	9.0	73.0	13.0	5.0	15	85
5	17.0	46.0	15.0	22.0	15	85
6	10.0	66.0	10.0	14.0	15	85
7	9.0	71.0	12.0	8.0	15	85
8	12.0	68.0	19.0	1.0	15	85
9	6.0	73.0	0.0	21.0	15	85
10	18.0	65.0	17.0	0	15	85
平均	11.3	62.3	12.7	13.7	15	85

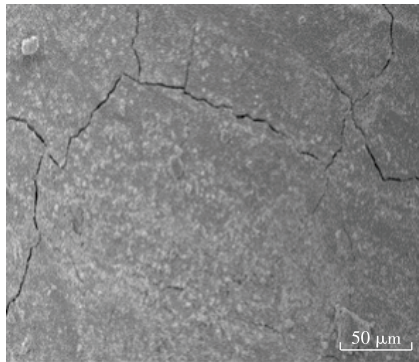


图2 煤岩割理扫描电镜观测结果

Fig. 2 Scanning electron microscope observations of coal rock cleats

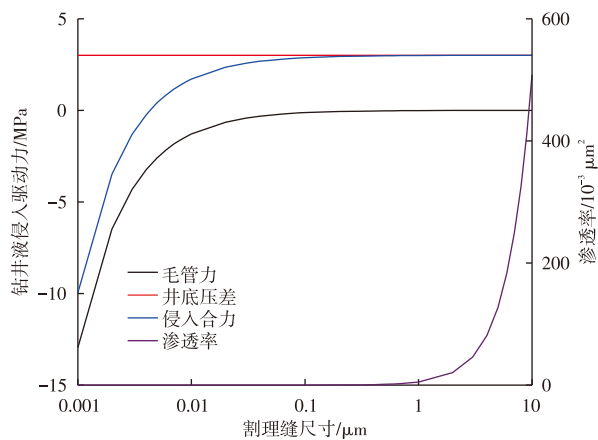


图3 不同割理缝尺寸下钻井液侵入的驱动力

Fig. 3 Driving force of drilling fluid intrusion at different cleats seam sizes

型,并对煤岩侵入割理缝引起井周煤岩失稳的过程和结果进行了分析和研究。

3.1 理论模型

建立的钻井液侵入引起井周煤岩失稳模型是渗流模型,其中既包括基质也包括裂隙中的钻井液流动。在裂

隙中,水流表现为单相层流,而在基质中,钻井液的流动遵循达西定律。在模拟过程中,不考虑岩石体和裂隙的变形。根据这些假设分别导出了基质和裂隙渗流场的控制方程^[25]。

基质渗流场方程为:

$$u = -\frac{\kappa}{\mu} \nabla p \quad (3)$$

式中: u 为流速,单位m/s; κ 为多孔介质的渗透率,单位 m^2 ; μ 为流体的动力黏度,单位 $mPa \cdot s$; p 为压力,单位Pa。

控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \varepsilon + \nabla \rho \mu = Q_m \quad (4)$$

式中: t 为流体流动时间,单位s; ρ 为流体密度,单位 kg/m^3 ; ε 为多孔介质的孔隙率,%; Q_m 为质量源,单位 $kg/(m^3 \cdot s)$ 。

裂隙体积流量数学表达式为:

$$q_f = -\frac{\kappa_f}{\mu} d_f \nabla_T p \quad (5)$$

式中: q_f 为裂隙单位长度上的流体体积流量,单位 m^2/s ; κ_f 为裂缝渗透率,单位 m^2 ; d_f 为裂隙开展宽度,单位m; ∇_T 为对裂隙切平面的梯度算子; p 为压力,单位Pa。

由式(5)裂隙中单位长度上的体积流量(q_f),得到裂隙中的流速(u)如式(6)所示。

$$u = \frac{q_f}{d_f} \quad (6)$$

结合材料属性,式(5)和整个裂隙横截面上的连续性方程,得到压力方程如式(7)所示。

$$d_f \frac{\partial}{\partial t} \varepsilon_f \rho + \nabla_T \rho q_f = d_f Q_m \quad (7)$$

式中: ε_f 为裂隙孔隙率,单位 m^2 ; Q_m 为质量源,单位 $kg/(m^3 \cdot s)$ 。由于裂隙开展宽度可以沿裂隙变化,因此出现在方程两边。

储水模型的控制方程和流体基体属性模型的控制方程表达式如下:

$$\rho S_f d_f \frac{\partial p}{\partial t} - \nabla_T \rho q_f = d_f Q_m \quad (8)$$

式中: S_f 为裂隙的储存系数,1/Pa。

3.2 模型建立

研究使用有限元软件求解了基于割理缝特征的钻井液侵入引起井周煤岩失稳的模型。图4展示了几何模型及其网格划分,模型中正方形地层的宽度为0.5 m,中心井眼的半径为0.1 m。假定水平方向割理为面割理,竖直方向割理为端割理。基于此模型对不同割理缝产状下钻井液侵入情况进行了分析。

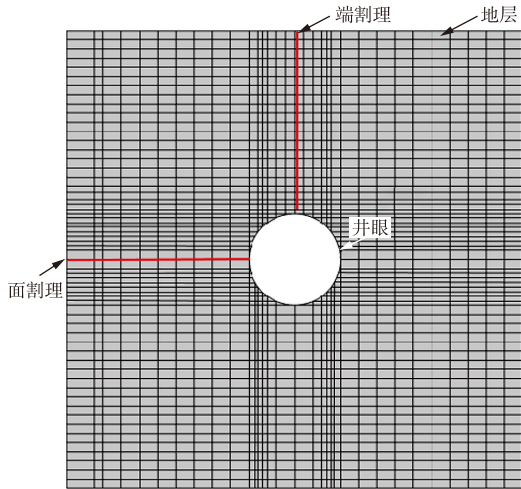


图4 钻井液侵入井周煤岩几何模型及其网格划分

Fig. 4 Geometrical model and meshing of drilling fluid intrusion into peri-well coal rock

模拟采用的材料模型为流体基体属性模型,其中流体指的是钻井液,基体则是多孔岩石。割理渗透率基于割理宽度计算获得,流体和基体的材料参数都通过表达式定义,模型参数如下:基体孔隙度为0.08%,基体渗透率为 $0.003 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,面割理宽度分别为1、5、10 μm ,端割理宽度为2.5 μm ,地层压力为27 MPa,液柱压力为30 MPa,钻井液黏度为20 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

3.3 模拟结果及分析

3.3.1 割理缝位置对钻井液侵入引起井周煤岩失稳的影响

面割理和端割理垂直交错,形成网状结构,影响钻井液的侵入情况。根据面割理与端割理交汇情况,选择不同位置处的割理来研究割理缝位置对钻井液侵入引起井周煤岩失稳的影响,选择依据见图5。

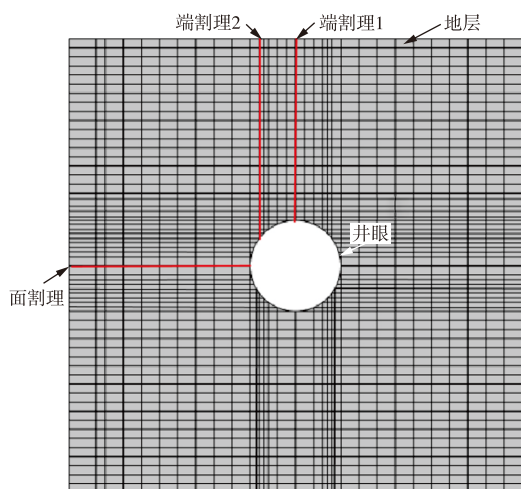


图5 割理缝选取标准

Fig. 5 Criteria for selection of cleat seam

如图5所示,端割理1所交汇面割理不穿过井眼,因此钻井液沿此侵入主要取决于缝宽和侵入驱动力;而端割理2的部分交汇面割理与井眼相交,使其侵入情况也受到交汇面割理的影响。面割理宽度为10 μm ,密度为1.0条/cm;端割理宽度为2.5 μm ,密度为0.6条/cm。

图6展示了模拟10 h后钻井液对井周煤岩压力分布的影响。如图6所示,面割理因宽度较大而具有更高的渗透率,导致钻井液沿面割理的侵入深度更深。面割理和端割理相互垂直交错,造成不同位置的割理缝侵入情况有所差异。

图7展示了钻井液沿割理缝侵入煤岩地层的过程,井壁上压力为原始液柱压力,随着钻井液侵入深度的增加,压力逐渐降低,直到恢复为原始地层压力。比较不同位置的端割理侵入情况,端割理2与4条穿过井眼的面割理交汇,导致在侵入深度分别为0.43、1.21、1.58 cm处的压力显著升高;端割理1没有受到面割理影响,其侵入深

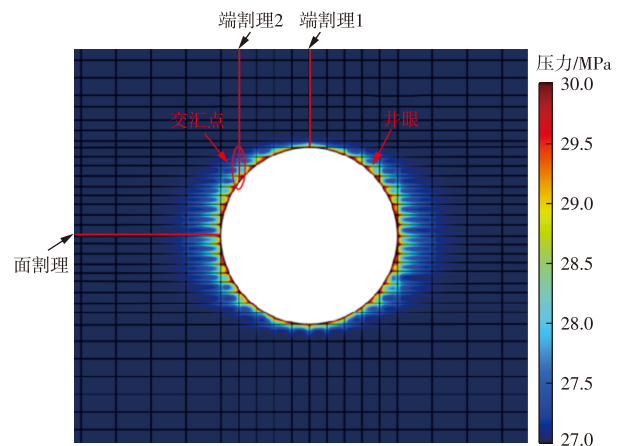


图6 钻井液侵入井周煤岩压力分布云图

Fig. 6 Cloud diagram of pressure distribution of coal rock around drilling fluid intrusion wells

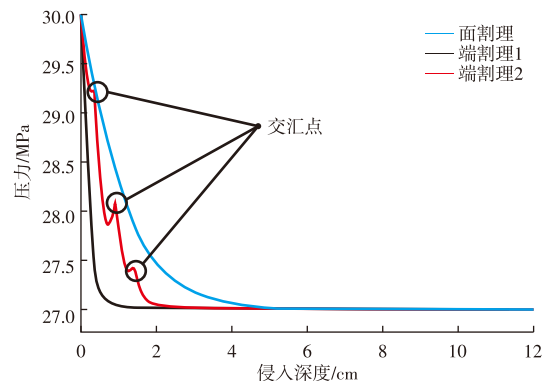


图7 不同位置割理钻井液侵入时压力随侵入深度分布

Fig. 7 Pressure distribution with intrusion depth during drilling fluid intrusion at different locations of cleats

度在达到 1.19 cm 处压力恢复到地层压力,而端割理 2 多次与穿过井眼的面割理交汇,面割理为其再次提供了压力,所以侵入深度达到 2.34 cm 恢复到地层压力。在比较端割理和面割理中钻井液侵入情况时,相同侵入深度下,面割理中的侵入压力明显高于端割理,这是由于面割理的宽度更大,渗透率更高,使得钻井液在面割理中侵入更深,压力也更大。

钻井液侵入割理缝会导致井周地层压力上升,径向应力降低,增加了井眼失稳的风险。其中面割理的高渗透率意味着其侵入深度更深,压力增加更显著,钻井液侵入引起井壁失稳的风险更大。此外,穿过井眼的割理相交也可能增加流体压力侵入,割理交汇点的压力明显升高,进一步加剧了井壁失稳的危险。

3.3.2 割理宽度对钻井液侵入引起井周煤岩失稳的影响

面割理密度为 1.0 条/cm;端割理宽度为 2.5 μm ,密度为 0.6 条/cm。图 8 展示了模拟 10 h 后面割理缝宽度分别为 1、5、10 μm 条件下钻井液侵入对井周煤岩压力分布的影响。在其他参数不变的情况下,割理宽度越大,其渗透率也越高,导致面割理的径向侵入深度随割理宽度的增加而扩大。

图 9 展示了钻井液侵入不同宽度的面割理时,压力如何随侵入深度变化。随着钻井液侵入深度增加,压力从初始液柱压力逐渐降至原始地层压力。1 μm 宽的割理缝中压力下降最快,侵入深度到达 0.98 cm 时已降至原始地层压力;而在 10 μm 宽的割理缝中,压力下降更为平缓,显示钻井液侵入更深。压力降幅随割理缝宽度增加而减少,且在更远的侵入深度上维持较高水平,这意味着宽割理缝能向更远距离传递较大压力,这可能导致更大的井壁失稳风险。

3.3.3 割理密度对钻井液侵入引起井周煤岩失稳的影响

面割理宽度为 10 μm ;端割理宽度为 2.5 μm ,密度为 0.6 条/cm。图 10 展示了模拟 10 h 后面割理密度分别为 1.0、1.1、1.2 条/cm 条件下钻井液侵入对井周煤岩压力分布的影响。在其他参数不变的情况下,面割理的径向侵入深度随割理密度的增加而增大。

图 11 展示了在不同面割理密度下,地层压力随侵入深度的变化情况。当面割理密度为 1.0 条/cm 时下降最快,在侵入深度到达 6.36 cm 时已降至原始地层压力;面割理密度增至 1.2 条/cm 时,压力下降趋势变得平缓,表明钻井液侵入更深。随着割理密度的增大,缝间距减小,割理缝内压力由于受到邻近割理缝压力的扰动显著增

大,使得压力能够向更远处传递,可能提高井壁失稳的风险。

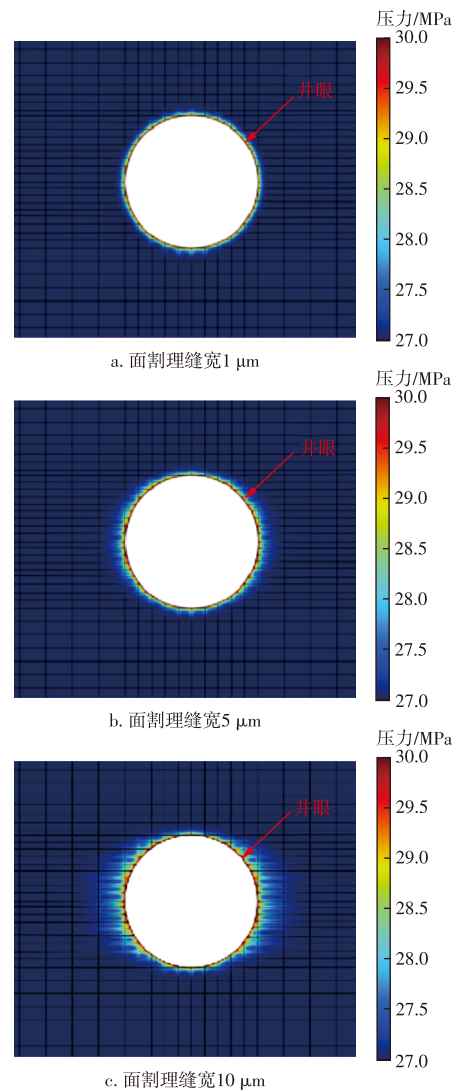


图 8 不同面割理缝宽下钻井液侵入压力分布

Fig. 8 Distribution of drilling fluid intrusion pressure for different face cleat seam widths

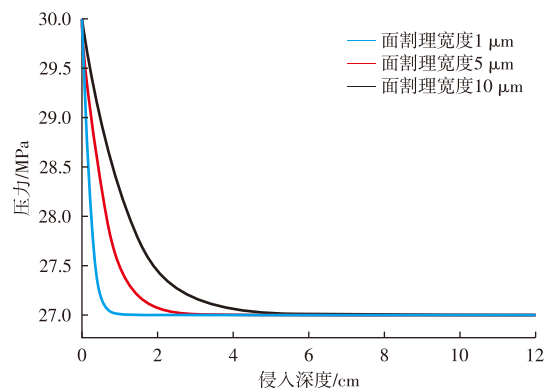


图 9 不同割理缝宽度下钻井液侵入时压力随侵入深度分布

Fig. 9 Pressure distribution with intrusion depth during drilling fluid intrusion at different cleat widths

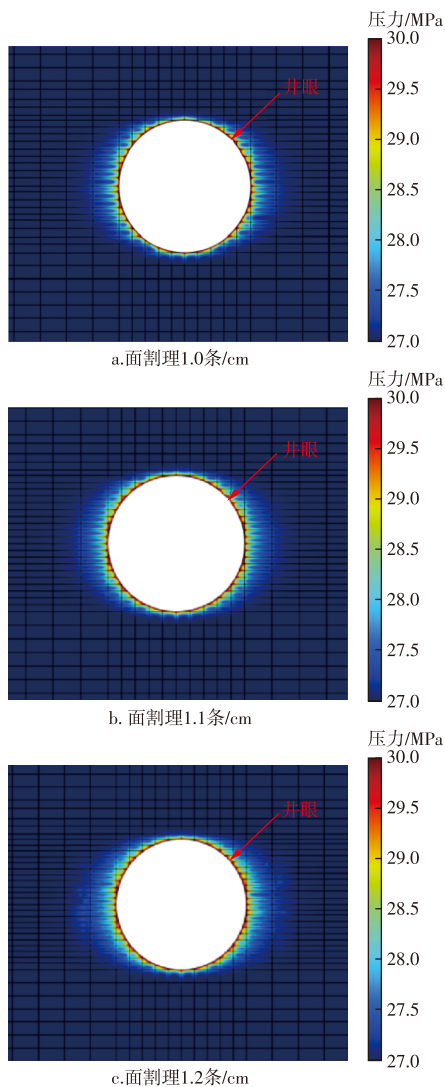


图10 不同面割理密度下钻井液侵入压力分布

Fig. 10 Distribution of drilling fluid intrusion pressure for different face cleat densities

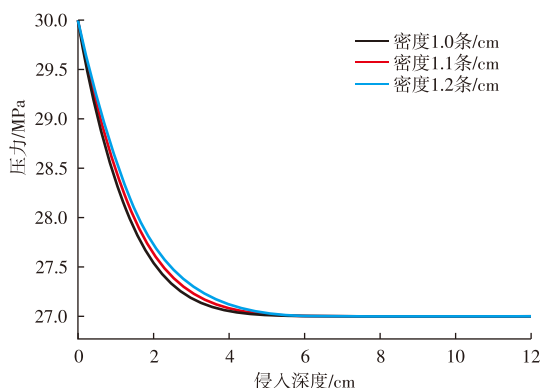


图11 不同割理缝密度下钻井液侵入时压力随侵入深度分布

Fig. 11 Pressure distribution with intrusion depth during drilling fluid intrusion at different cleat densities

4 结论

1) 煤岩黏土矿物中无蒙脱石存在,伊蒙混层含量较

低,水化膨胀及滚动分散性能较弱,由此判定煤岩失稳机制以力学作用为主。

2) 面割理和端割理以垂直交错的方式相互连接形成网状结构,为钻井液侵入煤岩地层提供了流动通道,面割理的尺寸普遍大于端割理,相比之下钻井液更容易侵入面割理。因此,可通过优化钻井方位与割理缝的相对位置,增加割理发育煤岩的井壁稳定性。

3) 钻井液侵入割理缝会导致井周压力上升,径向应力降低,增加了井壁失稳的风险。尤其是高渗透率的面割理和穿过井眼的交叉割理,导致更深的侵入和更大的压力上升,造成更加严重的井壁失稳风险。

4) 割理缝的特征显著影响钻井液对煤岩的侵入深度。在宽度更大和密度更高的割理缝中,钻井液侵入更深,并在井壁附近产生更高的压力,从而提高了井壁失稳的可能性。因此,应根据实际地层割理缝的尺寸大小设计封堵粒子,减少钻井液侵入引起井壁失稳情况的发生。由于提高钻井液密度会导致钻井液在割理中侵入更深,增加井眼失稳的风险,因此,如何通过控制钻井液密度增强井壁稳定性将是后续研究的内容。

参考文献

- 唐淑玲,汤达祯,杨焦生,等. 鄂尔多斯盆地大宁—吉县区块深部煤储层孔隙结构特征及储气潜力[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1854-1866.
TANG Shuling, TANG Dazhen, YANG Jiaosheng, et al. Pore structure characteristics and gas storage potential of deep coal reservoirs in Daning-Jixian block of Ordos Basin[J]. Journal of Petroleum, 2023, 44(11): 1854-1866.
- 李颖涛. WW盆地煤层气井岩石力学参数及井壁稳定性研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
LI Yingtao. Research on rock mechanical parameters and well wall stability of coalbed methane wells in WW basin[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2017.
- 王在明,陈金霞,沈圆圆,等. JN1H井煤岩气长水平段钻井井壁稳定技术[J]. 钻井液与完井液, 2023, 40(3): 356-362.
WANG Zaiming, CHEN Jinxia, SHEN Yuanyuan, et al. Borehole wall stabilization technology for drilling the long horizontal section coal rock gas well JN1H[J]. Drilling and Completion Fluids, 2023, 40(3): 356-362.
- 康毅力,陈奕廷. 深部煤岩钻井过程中井壁失稳机理分析[D]. 成都: 西南石油大学, 2012.
KANG Yili, CHEN Yiting. Mechanism analysis of well wall instability during deep coal rock drilling[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2012.
- 金军斌,张杜杰,李大奇,等. 顺北油气田深部破碎性地层井壁失稳机理及对策研究[J]. 钻采工艺, 2023, 46(1): 42-49.
JIN Junbin, ZHANG Dujie, LI Daqi, et al. Study on the wellbore instability mechanisms and drilling fluid countermeasures of deep fractured formation in Shunbei oil and gas field[J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46(1): 42-49.
- 李宁,郑何光,卢俊安,等. 库车北部构造侏罗系煤层井壁稳定对

- 策研究[J].西南石油大学学报(自然科学版),2021,43(4):26-34.
LI Ning, ZHENG Huguang, LU Jun'an, et al. A study on stabilization strategy of Jurassic coal strata in Northern Kuiche structural belt[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2021, 43(4): 26-34.
- [7] 范胜,蒋官澄,易浩,等.抗高温封堵固壁防塌水基钻井液研究与应用[J].钻采工艺,2023,46(2):146-152.
FAN Sheng, JIANG Guancheng, YI Hao, et al. Research and application of high-temperature plugging anti-sloughing water-based drilling fluids for wellbore strengthening[J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46(2): 146-152.
- [8] 邱春阳,周建民,朱福军,等.聚胺钙盐润滑防塌钻井液在胜利单18区块的应用[J].天然气勘探与开发,2023,46(2):58-64.
QIU Chunyang, ZHOU Jianmin, ZHU Fujun, et al. Polyamine calcium salt drilling fluid with lubricating and anti-collapse functions and its application to Shan 18 block, Shengli oilfield[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2023, 46(2): 58-64.
- [9] 秦涛,孙金波,王伟,等.准噶尔盆地中部永进油田超深井井壁稳定钻井液技术[J].天然气勘探与开发,2024,47(5):86-94.
QIN Tao, SUN Jinbo, WANG Wei, et al. Drilling-fluid technologies for borehole stability in ultra-deep wells, Yongjin oilfield, central Junggar Basin[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2024, 47(5): 86-94.
- [10] 刘涛,张杰,于建立,等.海上环保型抗高温防塌钻井液体系研究与应用[J].钻采工艺,2023,46(5):173-177.
LIU Tao, ZHANG Jie, YU Jianli, et al. Research and application of offshore environment-friendly high-temperature and anti-collapse drilling fluid system[J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46(5): 173-177.
- [11] 张建武.煤矿用超细硫铝酸盐水泥基注浆材料研究[D].焦作:河南理工大学,2023.
ZHANG Jianwu. Research on ultrafine sulfoaluminate cement-based grouting material for coal mine[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2023.
- [12] 李恒.库车北部侏罗系煤系地层失稳机理及防塌钻井液技术研究[D].成都:西南石油大学,2019.
LI Heng. Study on coal failure mechanism and drilling fluid technology for Jurassic formation in the northern Kuqa[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2019.
- [13] 邱春阳,马勇,李萍,等.聚胺复合盐润滑防塌钻井液在樊斜166大位移井的应用[J].天然气勘探与开发,2024,47(3):63-69.
QIU Chunyang, MA Yong, LI Ping, et al. Polyamine composite-salt drilling fluid with lubrication and anti-collapse performance and its application to extended-reach Fanxie-166 well[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2024, 47(3): 63-69.
- [14] 李成,李伟,张文哲,等.延长油田陆相页岩气复杂地层水基钻井液优化及应用[J].非常规油气,2023,10(1):130-138.
LI Cheng, LI Wei, ZHANG Wenzhe, et al. Optimization and application of water-based drilling fluid for complex formation of continental shale gas in Yanchang Oilfield[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(1): 130-138.
- [15] 王维,韩金良,亓宗凯,等.临汾区块煤系地层泥页岩防塌钻井液技术研究[J].非常规油气,2023,10(2):107-114.
WANG Wei, HAN Jinliang, QI Zongkai, et al. Study on anti-sloughing drilling fluid technology of shale in coal measure strata in Linfen Block[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(2): 107-114.
- [16] 阎荣辉,王京光,何旺,等.鄂尔多斯盆地深层煤岩气井储层坍塌及伤害主控因素研究[J].钻采工艺,2023,46(6):8-13.
YAN Ronghui, WANG Jingguang, HE Wang, et al. Study on the main controlling factors of reservoir collapse and damage in deep coal gas wells in Ordos Basin[J]. Drilling and Production Technology, 2023, 46(6): 8-13.
- [17] 孙晗森,王成文.固井水泥浆对裂缝割理发育型煤层气储层的伤害机理[J].天然气工业,2018,38(9):82-87.
SUN Hansen, WANG Chengwen. Damage mechanism of cement slurry to CBM reservoirs with developed fractures and cleats: A case study from eastern Yunnan and western Guizhou in China[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(9): 82-87.
- [18] 王超,王睿,张军义,等.储层缝洞耦合下的井筒压力及气侵模拟研究[J].钻采工艺,2023,46(3):49-54.
WANG Chao, WANG Rui, ZHANG Junyi, et al. Wellbore pressure and gas invasion simulation by coupling wellbore and fracture-vuggy formation[J]. Drilling & Production Technology, 2023, 46(3): 49-54.
- [19] 张光福,汤明,何世明,等.煤系地层坍塌压力预测与井眼轨迹优化[J].石油钻采工艺,2019,41(4):405-411.
ZHANG Guangfu, TANG Ming, HE Shiming, et al. Collapse pressure prediction and borehole trajectory optimization for coal measure strata [J]. Oil Drilling Process, 2019, 41(4): 405-411.
- [20] 袁涛.贵州织金阿弓向斜煤层气区块排采井煤储层井壁失稳机理研究[D].贵阳:贵州大学,2023.
YUAN Tao. Study on the mechanism of coal reservoir wall instability in row mining wells of a-bow inclined coalbed methane block in Zhijin, Guizhou[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.
- [21] GENTZIS T, DEISMAN N, CHALATURNYK R J. Effect of drilling fluids on coal permeability: Impact on horizontal wellbore stability[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 78(10): 177-191.
- [22] 屈平,申瑞臣.煤层气钻井井壁稳定机理及钻井液密度窗口的确定[J].天然气工业,2010,30(10):64-68.
QU Ping, SHEN Ruichen. Mechanism of wellbore stability and determination of drilling fluid density window in coalbed methane drilling[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(10): 64-68.
- [23] 王成文,郑飞,孙晗森,等.改善煤岩润湿性的强化煤层固井胶结技术[J].天然气工业,2017,37(7):83-88.
WANG Chengwen, ZHENG Fei, SUN Hansen, et al. Bonding-strengthening technology in coalbed cementing through wettability improvement[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(7): 83-88.
- [24] 刘广建.裂缝煤岩力学特性与冲击失稳宏观机制研究[D].徐州:中国矿业大学,2018.
LIU Guangjian. Research on mechanical properties and impact instability macro and fine-scale mechanisms of fractured coal rock [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [25] 周汉国,郭建春,李静,等.裂隙特征对岩石渗流特性的影响规律研究[J].地质力学学报,2017,23(4):531-539.
ZHOU Hanguo, GUO Jianchun, LI Jing, et al. A study on the influence rule of the fracture characteristics on rock seepage characteristics[J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(4): 531-539.

(编辑 黄颖)