

引用格式:王跃鹏,孙正财,刘向君,等.煤层割理结构及其对井壁稳定的影响研究[J].油气藏评价与开发,2020,10(4):45-52.

WANG Y P, SUN Z C, LIU X J, et al. Study on cleat structure and its influence on wellbore stability in coal seams[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(4): 45-52.

DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2020.04.007

煤层割理结构及其对井壁稳定的影响研究

王跃鹏,孙正财,刘向君,梁利喜

(西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500)

摘要:为了阐明地应力非均质性和割理角度对煤层井壁稳定的影响,参考某地区基础物性、煤岩力学参数、割理宏观结构及地应力状态,基于离散元数值模拟手段并结合最大位移和归一化塑性区域半径两种评价方法综合评价分析了地应力非均质性和割理角度对煤层井壁稳定的影响。数值模拟研究结果显示,在各向同性地应力条件下,割理角度对煤岩井壁稳定性的影响不大,随着地应力非均质性增大,割理角度对煤岩井壁稳定性的影响逐渐明显。随着割理角度的增加,井周最大位移有先增加后减小趋势。随着地应力非均质性的增加,由割理角度的变化产生的井周塑性区域半径各向异性越明显。因此在地应力差异较大的煤岩地层,不可忽视割理角度对井壁稳定的影响。研究成果可为研究区煤层直井及水平井的钻井方案设计提供参考。

关键词:煤层;井壁稳定;地应力;非均质性;割理角度

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Study on cleat structure and its influence on wellbore stability in coal seams

WANG Yuepeng, SUN Zhengcai, LIU Xiangjun, LIANG Lixi

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: In order to illustrate the influences of the in-situ stress heterogeneity and cleat angle on wellbore stability of coal seam, the following researches have been done. The basic physical properties, mechanical parameters, macro and micro structure of cleats and in-situ stress states of coal and rock in an area have been acquired. Based on the discrete element numerical simulation method, comprehensive evaluation and analysis of the in-situ stress heterogeneity and cleat angles on wellbore stability in coal seam has been conducted by two kinds of evaluation method i.e. the maximal displacement and normalized the plastic area radius. The results of the numerical simulation show that under the condition of isotropic in-situ stress, cleat angle has little influence on the borehole stability. With the increases of the heterogeneity of in-situ stress, the influence of cleat angle on borehole stability is becoming more and more obvious. The maximum displacement around the well increases first and then decreases with the increase of the cleat angle from 0° to 90°. Meanwhile, with the increase of in-situ stress heterogeneity, the anisotropy of the radius of the circumferential plastic area caused by the change of cleat angle becomes more obvious. Therefore, the influence of cleat angle on wellbore stability should not be ignored in coal and rock strata with great difference in in-situ stress. The research results can provide reference for the drilling plan design of vertical and horizontal wells of coal seam in the study area.

Key words: coal seams, borehole stability, in-situ stress, heterogeneity, cleat angle

收稿日期:2019-08-13。

第一作者简介:王跃鹏(1991—),男,在读博士研究生,主要从事非常规油气井壁稳定与水力压裂等相关研究。通讯地址:四川省成都市新都区西南石油大学,邮政编码:610500。E-mail:wangyuepeng91@126.com

通讯作者:刘向君(1969—),女,博士,教授,主要从事岩石力学及岩石物理、井壁稳定等方面的教学与研究工作。通讯地址:四川省成都市新都区西南石油大学,邮政编码:610500。E-mail:13880093092@163.com

基金项目:国家科技重大专项“复杂结构煤层改造地质力学环境特征及精细描述”(2016ZX05044-004-001);国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05051)。

煤层气是一种自生自储的非常规天然气,资源潜力巨大,已引起了业内的广泛关注^[1]。在钻井过程中,煤层井壁失稳不仅会影响钻井安全,导致起下钻困难、卡钻事故、降低钻井效率等,而且会给取心作业的安全和质量带来威胁,给后期储层改造带来一定的困难。由于煤岩自身割理发育使得煤岩基质连续性差和非均质性程度高,传统连续介质力学井壁稳定模型已不再适用于煤层这种破碎性地层^[2-3],必须进行相应有针对性的研究。

煤岩井壁失稳现有的主要力学研究方法包括基于连续性介质力学方法和基于非连续性介质方法。申瑞臣等^[4]认为解决非连续性问题最常用的方法为采用拟合方法(如Hoek-Brown公式)、断裂力学或离散元方法。刘向君等^[5]基于连续介质力学理论,分析了岩石软弱面产状、摩擦系数2个方面对井壁稳定性的影响。GENTZIS^[6]基于FLAC软件分析了煤层水平井在欠平衡钻井和过平衡钻井条件下的井壁稳定性。屈平等^[7](2009)用应力强度因子描述了裂纹的受力集中程度,提出了可以定量判断节理煤层直井或水平井井壁是否稳定的节理煤层井壁稳定评价模型。非连续介质方法解析法研究煤层中具有代表性的为陈勉^[2]等基于非连续性介质力学方法建立的可以预测煤层坍塌压力的离散构元模型。离散元数值模拟方法被认为更加适合模拟煤岩行为,可解决力学分析方法无法定量描述割理产状对煤层井壁稳定的影响的问题^[8]。李嗣贵、孙正财、尹虎等^[9-11]依次利用离散元方法分析了煤层井周应力状态、裂缝张开情况、裂缝方向,井眼尺寸、井眼密度以及煤层气井注入气体增压过程流体在面割理和端割理方向的运移引起的煤层井壁失稳问题。屈平等^[12](2011)基于三维离散元软件(3DEC)分析井底压力、割理密度等因素对煤层水平井井壁稳定的影响。

上述学者基于不同的研究方法研究了煤层井壁稳定,认为在各向异性应力储层中,煤层更容易产生破裂和坍塌,当面割理与井眼走向平行时,井壁最不稳定。但考虑地应力和割理角度对煤层井壁稳定影响的系统研究较少,现有的研究已知煤层地应力对井壁稳定的影响较大,割理角度的影响亦不容忽视。鉴于此,从力学角度出发,分别采用最大位移和归一化塑性区域半径2种评价方法,结合研究区煤岩基础物性、宏观结构、力学强度参数和地应力状态并借助通用离散元方法,研究了煤岩力学井壁稳定

性影响因素,分析了煤岩力学井壁失稳机理。研究成果不仅为钻井过程中预测煤层井壁稳定提供重要的参考依据,而且对安全钻井和高效开发煤层气资源具有重要意义。

1 煤岩割理结构

煤岩是具有双重孔隙介质的岩石,煤岩割理类型和分布特征对其力学性质和基础物性影响较大,同时割理分布特征也是导致煤岩力学特性各向异性的内在原因之一。

1.1 煤岩的宏观结构

使用HKGP-3型致密岩心气体渗透率孔隙度测定仪测得研究区煤岩的孔隙度范围值为0.02%~18.10%,平均孔隙度为6.85%,渗透率范围区间为 $(0.0003 \sim 0.06) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均渗透率为 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。煤岩岩样具有大于0.1 mm可用肉眼观察的宏观裂隙,通过宏观观察和标记的方法对研究区煤岩割理密度进行测定。

煤体结构以原生结构为主,表面层状结构明显,可见镜煤条带。部分岩样裂隙发育,面割理和端割理裂隙特征较明显,近似相互垂直发育,同时又垂直于煤层层面,其中面割理延伸较长,端割理随机分布在面割理之间。可以观察到在出现镜煤条带的位置割理密度较大,面割理大致平行连续分布整个煤块,面割理之间距离较小,通过宏观观察和统计得出面割理密度为(19~28)条/10 cm,端割理密度为(17~27)条/10 cm。

1.2 煤岩的微观结构

利用型号为Quanta450的扫描电镜对煤岩微观结构作进一步分析,可以直观地发现煤岩具有较高的割理、裂隙发育程度(图1),观察到较多的面割理和端割理,面割理和端割理近似垂直发育,连通性较好,面割理延伸长度比端割理长,且清晰观察到面割理的宽度也比端割理大。随着放大倍数增加,割理特征更加明显,在高放大倍数下观察到面割理宽度约为1~10 μm ,端割理宽度约为0.4~5 μm 。

2 离散单元法基本原理

离散元法是专门分析非连续性介质问题的有效

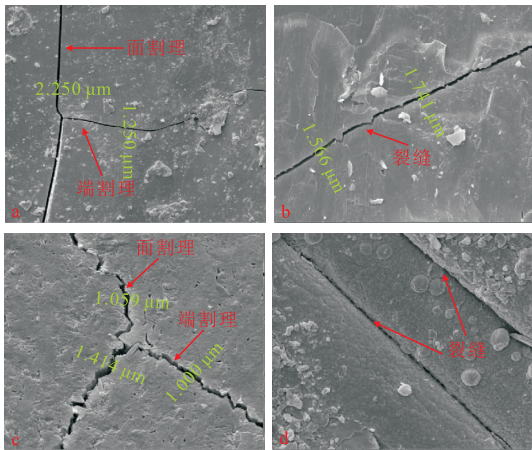


图1 煤岩割理形态扫描电镜
Fig.1 SEM of cleat morphology

数值模拟方法^[13],将所研究的岩体看成是由断层、节理、裂隙等弱结构面切割成的刚性或者可变形性块体,块体与块体之间通过边界接触力相互联系,允许岩块平移、转动和变形,而节理面可被压缩、分离或滑动。

采用在刚性块体之间设置不同种类弹簧和阻尼的方法来反映材料的应力一位移关系,直至平衡。由牛顿第二定律得到各个块体的加速度,然后对时间进行积分,算出所研究块体的速度、位移,最终得出块体的变形量,块体在位移矢量方向发生调整时,又会更新接触面上的力和力矩,直到所有块体达到平衡状态或某种状态。

每一时间步的速度方程:

$$\mu_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \mu_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \left(\frac{\sum F_i^t}{m} + g_i \right) \Delta t \quad (1)$$

$$\theta^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = \theta^{(t-\frac{\Delta t}{2})} - \left(\frac{\sum M^t}{I} \right) \Delta t \quad (2)$$

式(1)一式(2)中: μ_i 为速度分量, m/s; t 为时间, s; Δt 为时间增量, s; $\sum F_i$ 为作用力, N; m 为块体在形心处质量, kg; g_i 为重力分量, m/s²; θ 为块体的角速度, rad/s; $\sum M$ 是总力矩, N·m; I 为惯性矩, m⁴。

总控制方程:

$$m\mu' + \alpha m\mu' = \Delta F \quad (3)$$

式中: m 为块体在形心处质量, kg; μ 是为位移增量, m; α 为阻尼系数; ΔF 为力增量, N^[14]。

离散元表示岩体的节理为形成于两个块体边缘的接触面。该接触决定了接触的类型和最大的间隙。两个相互连接的块体间的相互作用可以由法线上的刚度,切线上的刚度和内摩擦角表示^[13]。由弹

簧的变形判定在接触面发育的力的大小,可转换为法向力 F_n 和剪切力 ΔF_s 。

物理方程包括:

$$F_n = K_n \delta_n \quad (4)$$

$$\Delta F_s = K_s \delta_s \quad (5)$$

式(4)一式(5)中: F_n 为法向力, N; K_n 为法向刚度系数, MPa·m; δ_n 为单元之间叠合尺度, m; ΔF_s 为剪切力增量, N; K_s 为剪切刚度系数, MPa·m; δ_s 为单元之间相对位移, m。

式(4)和式(5)只能表示在弹性条件下,在塑性条件时需要考虑岩体破坏条件,即在塑性剪切破坏的情况需要在每次计算(迭代)时都要检查剪切力。由 Mohr-Coulomb 准则可以得出每个块体接触点最大切向应力:

$$|\tau_s| = C + \sigma_n \tan \varphi \quad (6)$$

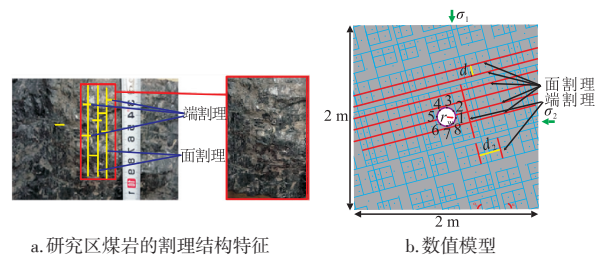
式中: $|\tau_s|$ 为切向应力, MPa; C 为块体内聚力, MPa; σ_n 为法向应力, MPa; φ 为内摩擦角, °。

3 数值模型的建立

为了尽可能模拟地层的实际情况,将模型中割理的迹长、隙宽作为随机变量以满足割理在地层中的随机分布。根据研究区煤岩的割理结构特征建立煤层井眼模型^[15](图2),模型尺寸为 2 m×2 m,井眼直径为 215.9 mm,面割理的角度为 α_1 ,两条面割理间的距离为 d_1 ,端割理的角度为 α_2 ,两条端割理间的距离为 d_2 。计算时将煤岩基质作为块体,用可变形块体来模拟,本构方程选用摩尔-库伦模型,由于割理面为不连续面,本构方程选用摩尔-库伦节理模型^[16]。

模型中煤岩力学参数通过研究区煤岩力学实验获得^[17-18],具体参数如表1所示。

据研究区煤层气藏(深度约为 800 m)的统计数据显示,垂向地应力 σ_v 约为 20 MPa(压力梯度为 2.55 MPa/100 m),水平主应力和深度之间存在很好的统计



a. 研究区煤岩的割理结构特征

b. 数值模型

图2 煤层井眼模型

Fig.2 Wellbore model of vertical wells in coal seams

表1 煤岩力学强度参数

Table 1 Mechanical strength parameters of coal and rock

模拟参数	煤岩	面割理	端割理
密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.36×10^3		
体积模量 K / MPa	5.11×10^3		
剪切模量 G / MPa	2.36×10^3		
内聚力 C / MPa	7	0	0
内摩擦角 $\phi / (^\circ)$	29.63	26.00	26.00
抗拉强度 σ / MPa	2.0	0	0
法向刚度 MPa		2.0×10^4	2.0×10^4
切向刚度 MPa		1.0×10^4	1.0×10^4

关系,水平最大主应力 σ_H 为(1.59~2.42) MPa/100 m,水平最小主应力 σ_h 为(1.55~2.25) MPa/100 m,无论是钻直井还是水平井,井段截面的井壁稳定问题可以等效为二维平面应变问题,根据该地区测得的应力可知, σ_H/σ_h 、 σ_v/σ_H 或 σ_v/σ_h 的范围均在1.0~2.0间,在数值模拟计算时仅考虑地应力比值大小。为研究地应力非均质性和割理角度对煤层井壁稳定的影响,分别考虑 σ_1/σ_2 比值为1、1.5、2三种情况;割理角度 α_1 、 α_2 分别为15°和285°、30°和300°、45°和315°、60°和330°、75°和345°、90°和360°六种情况;割理均匀分布, d_1 、 d_2 分别为0.06 m、0.08 m,井筒压力设为0 MPa,模拟煤岩欠平衡钻井。

4 煤层井壁稳定性分析

在钻煤层气井时,井周应力超过煤岩割理抗拉强度或抗剪切强度时井壁将发生失稳现象,这是由于对于割理发育的煤层,地应力等因素会造成割理面的重新张开,会随着割理面发生应力释放,造成割理面发生剪切滑移使煤岩井壁剥落,因此可以根据井周剪切位移大小判断井壁是否稳定^[9]。在数值模拟计算中,选择井周8个点(图2b)来记录监测煤层气井模型中块体的位移变化情况。在模型结束时,每个观察点都用来绘制钻孔剖面上的位移,使用最大位移和归一化的塑形区域半径2种方式来研究煤层气井的井壁稳定性。

4.1 最大位移

KARATELA等^[4]在研究地应力比值和裂缝方向对井壁稳定性影响时提出了一种评价井壁稳定性的方法,认为最大位移井眼尺寸总变化10%以内井壁是稳定的。根据此次模拟结果得到不同地应力比值条件下不同割理角度的井周煤岩位移(图3)。对应

的最大井周位移随割理角度变化及井周位移随井周角的变化见图4。

将记录的井周8个点的位移根据式(7)估算出井眼尺寸总的变化。计算得知井周总位移变化为0.024 5 m,结合KARATELA提出的评价井壁稳定性的方法得知最大位移在0.002 45 m以内煤层井壁是稳定的,因此在评价煤层井壁稳定性时将最大位移为0.002 45 m作为判断井壁是否稳定的一个最佳值,即认为井壁最大位移大于0.002 45 m时,井壁失稳。

$$\text{相对位移} = \frac{\text{最大位移}}{\text{井径}} \quad (7)$$

图4a为在不同地应力比值时最大位移随着割理角度 α_1 的变化,图4b和图4d分别为 σ_1/σ_2 比值为1、1.5、2情况下的井周位移大小变化。李光泉^[20]在井壁稳定性影响研究中指出,井眼对地应力 σ_1/σ_2 的大小很敏感。结合图3和图4a可知,随着地应力差异性增大,不同割理角度下井周最大位移变化幅度变大,煤层的井壁越容易失稳,但不同割理角度的增加幅度不同。当割理角度 α_1 在30°~60°时,井周位移增大最为明显。

由图4b知,煤层在各向同性地应力($\sigma_1/\sigma_2=1$)条件下,井周位移随割理角度的变化不大,井周最大位移为0.000 9 m,小于0.002 45 m,井壁处于最稳定的状态。说明在各向同性地应力条件下,割理角度对煤岩井壁稳定影响不大。

由图4c、图4d可知,随着地应力非均质性增大,井周位移随割理角度的变化越明显,差异性增大,割理角度对井壁稳定性的影响逐渐明显,井周煤岩位移最大的地方不一定平行于最大主应力方向。当 $\sigma_1/\sigma_2=1.5$ 时,随着割理角度 α_1 从15°增大至45°,井周煤岩位移明显增大,随着割理角度 α_1 从45°增大至90°,井周煤岩位移又开始缓慢减小,在割理角度 α_1 为90°时,井周位移变化很小。当 $\sigma_1/\sigma_2=2$ 时,井周煤岩位移随着割理角度的变化规律和上述相同,只是地应力差异越大时,井周煤岩位移随着割理角度的变化也越明显。在地应力 $\sigma_1/\sigma_2=2$,割理角度 α_1 为45°时,最大位移0.003 6 m为最大,井壁相对最不稳定;当割理角度 α_1 进一步增大时,井周最大位移有减小的趋势,秦启荣等^[21]在裂缝对井壁稳定的影响研究中得出相似结论,裂缝倾角越大,裂缝对井壁稳定性的影响程度减小;当割理角度 α_1 为90°时,即面割理垂直于最小主应力,平行最大主应力时,井周最大

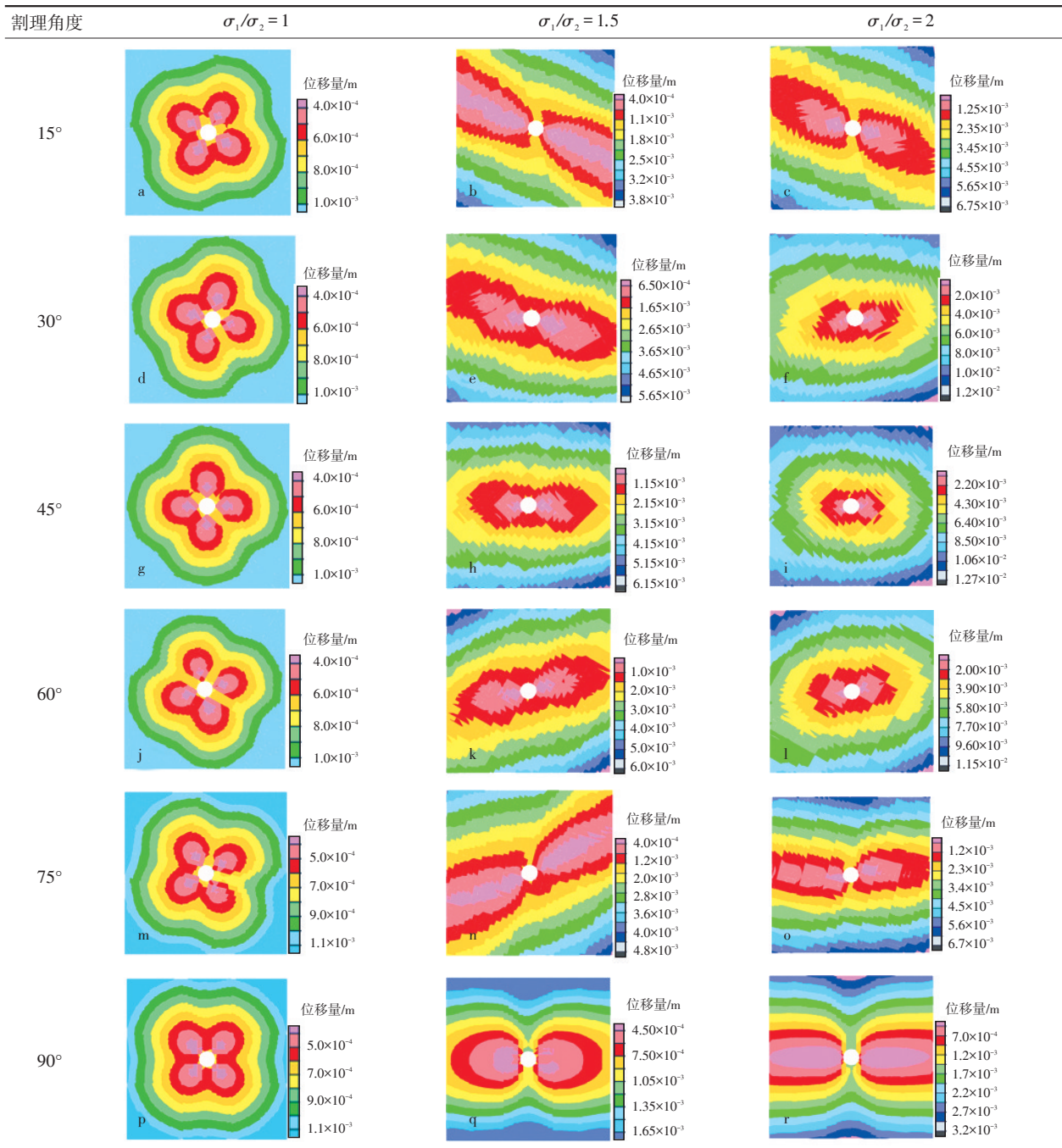


图3 不同割理角度下井周煤岩位移

Fig. 3 Displacement nephograms of coal and rock around under different cleat angle

位移最小。这是因为此时相互垂直的割理面在地应力作用下相互滑动的可能性较小,限制了井周煤岩块体的移动,从而井壁相对保持稳定。

此外,在各向同性地应力条件下,割理角度 α_1 为 30° 时,井周最大位移最大,在各向异性地应力条件下,割理角度 α_1 为 30° 或 45° 时,井周最大位移最大。这充分说明割理角度 α_1 为 30° 或 45° 时,割理面在地应力作用下相互滑动的趋势较大。

4.2 归一化塑性区域半径 (R/r_w)

SALEHI^[22]等通过井眼弹塑性模型结合 FLAC3D 软件分析了在欠平衡钻井时井眼力学稳定性,其在分析过程中利用归一化塑性区域半径来评价井壁稳定。如图5所示,当钻井时井周应力重新分布后在井周会产生平均半径为 R 的屈服区域。归一化塑性区域半径定义为井周平均屈服区域半径 R 与井眼半径

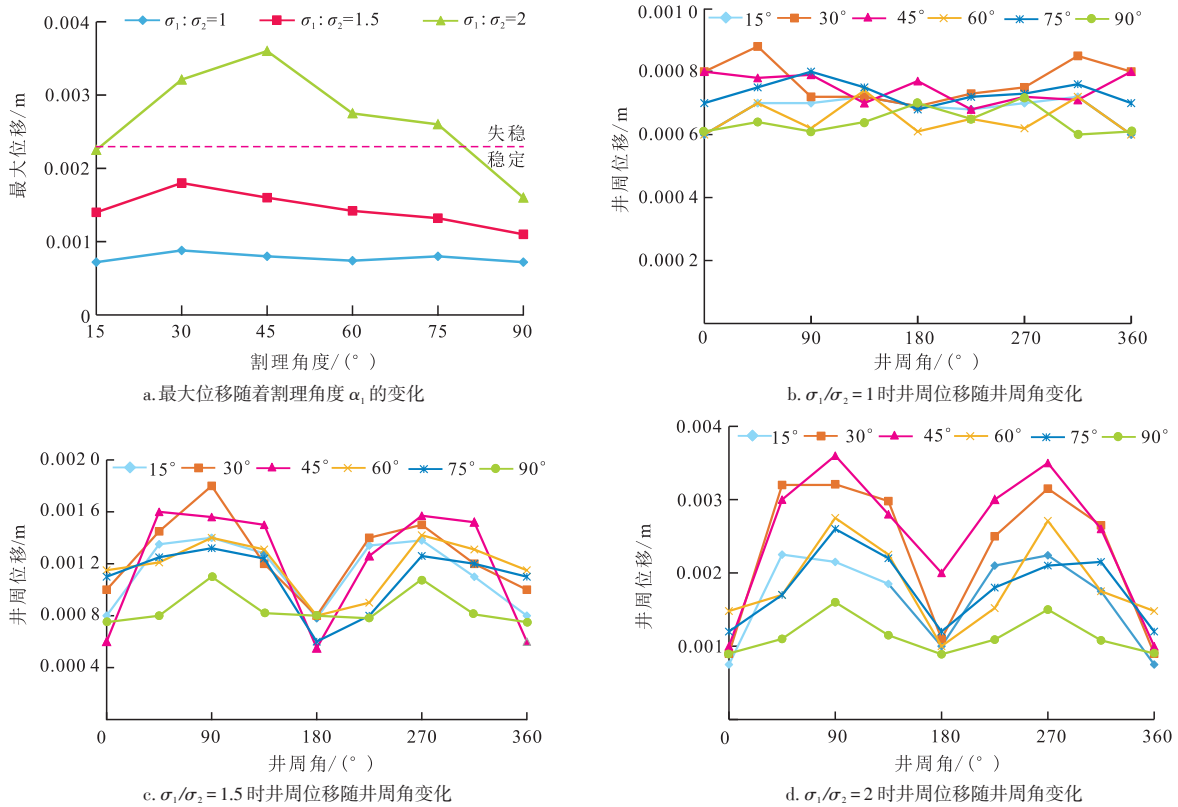


图4 井周位移变化分析

Fig. 4 Analysis of well circumference displacement

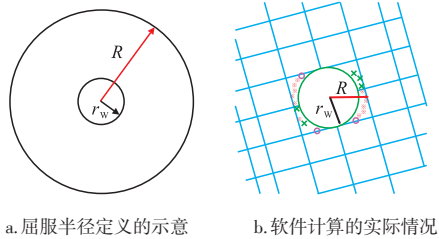


图5 平均屈服区域半径

Fig. 5 Average yield area radius

比值(R/r_w)。此外KARATELA等^[14]和HAWKES^[23]分别在评价煤层水平井井壁和非连续裂缝性地层井壁稳定性时也采用了塑性区域半径评价方法。

文中在评价煤岩井壁稳定时认为井眼周围归一化塑性区域半径(R/r_w)小于1.25时煤岩井壁稳定。图5b中红色小圆圈表示已经破坏的块体单元,绿色叉号表示已经进入塑性屈服区域的块体单元,红色叉号表示已经达到塑性屈服极限的块体单元。

图6为地应力 σ_1/σ_2 比值为1、1.5、2时,分析对应的模拟结果所得到的井眼周围归一化塑性区域半径随割理角度的变化。

由图6可知,随着地应力比值 σ_1/σ_2 增加,煤岩井周归一化塑性区域半径增大,当 $\sigma_1/\sigma_2=2$ 时,煤岩井周归一化塑性区域半径远大于 σ_1/σ_2 为1.5和1的状

况,井壁相对最不稳定。这种变化趋势和井周最大位移随着地应力比值变化一致。井周归一化塑性区域半径在各向同性地应力及较低的地应力非均质性条件下(σ_1/σ_2 在1.5下),随着割理角度的变化分为2种状态:割理角度小于 30° 时,归一化塑性区域半径基本重合;割理角度大于 30° 时, $\sigma_1/\sigma_2=1.5$ 的归一化塑性区域半径大于 $\sigma_1/\sigma_2=1$ 时。说明割理角度对井周塑性区域半径影响,受到地应力非均质性的影响,应力非均质性越大,井周塑性区域半径由割理角度影响产生的各向异性越明显。

割理角度 $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ 时在不同地应力非均质性下所对应的煤岩井周塑性屈服区域见图7。

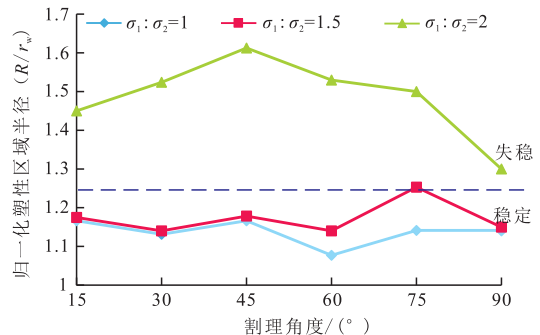


图6 不同割理角度下归一化塑性区域半径

Fig. 6 Normalized yield area radius at different cleat angle

由图7可知,割理角度一定时,随着地应力非均质性的增加,煤岩井周塑性区域范围增大,井壁相对越不稳定,且井周出现塑性区域的位置主要集中在割理面处。当 $\sigma_1/\sigma_2=1$ 时,割理角度对井周塑性屈服区域半径影响不大。当 $\sigma_1/\sigma_2=2$ 时,井周塑性屈服区域半径变化较大,割理角度对井周塑性屈服区域半径影响主要受地应力非均质性的影响。随着割理角度 α_1 从 15° 增大至 45° 时,井周煤岩归一化塑性区域半径增大,随着割理角度 α_1 从 45° 增大至 90° 时,井周煤岩归一化塑性区域半径开始缓慢减小,在3种地应力条件下,割理角度 α_1 在 90° 时,井周煤岩归一化塑性区域半径最小,井壁保持相对稳定。

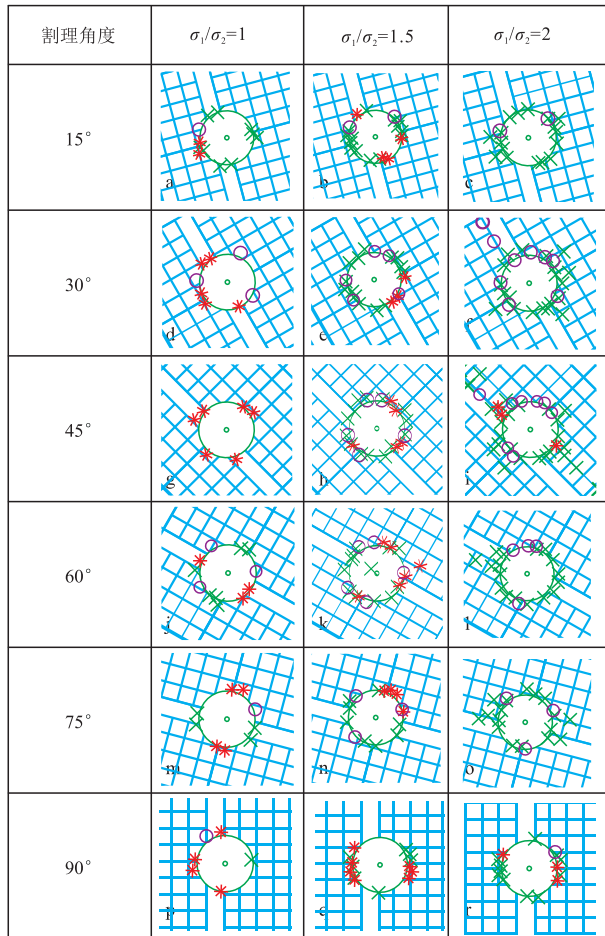


图7 不同割理角度下井壁塑性屈服区域

Fig. 7 Yield area at borehole wall with different cleat angles

5 结论

1) 研究区的煤岩表面层状结构明显。在镜煤条带出现的地方,割理密度增加。面割理和端割理裂隙特征较明显,近似垂直发育,连通性较好。

2) 在各向同性地应力下,井周最大位移和井周

塑性变化区域半径变化都较小。随着地应力非均质性增大,不同割理角度下井周最大位移变化幅度增大,井周塑性区域半径由割理角度影响产生的各向异性更明显,煤层井壁更易失稳,但不同割理角度的增加幅度存在差异。因此割理角度 α_1 对井周最大位移和井周塑性区域半径的影响,受到地应力非均质性的影响。

3) 若研究区内某煤层气井测得水平最大主应力和水平最小主应力差值较小,则割理角度对直井井壁稳定的影响较小,可按连续性介质进行研究分析。若测得水平最大主应力和水平最小主应力的比值较大,如大于1.5,则地应力非均质性作用下使得割理角度对煤岩直井井壁稳定影响极大,割理角度 α_1 在 $30^\circ \sim 45^\circ$ 时,井周煤岩块体易剪切滑落,导致井壁失稳,此种情况下不适合使用直井开采。可通过调整钻井设计案例,优化井眼轨迹,保持井壁相对稳定。同理,在确定水平井走向,达到沟通割理,获取煤层气通道的同时也需考虑割理角度的影响。

参考文献

- [1] 侯连浪,刘向君,梁利喜,等.割理对煤岩加载过程能量演化特征影响数值模拟[J].煤炭学报,2020,45(3):1061-1069.
HOU L L, LIU X J, LIANG L L, et al. Numerical simulation of effect of cleats on energy evolution of coal and rock in loading process[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 1061-1069.
- [2] 陈勉,赵海峰,金衍,等.非连续介质力学模型预测煤层井眼稳定性[J].石油学报,2013,34(1):145-150.
CHEN M, ZHAO H F, JIN Y, et al. A discontinuous medium mechanical model for the sidewall stability prediction of coal beds[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 145-150.
- [3] 刘洪林,王红岩,张建博.煤储层割理评价方法[J].天然气工业,2000,20(4):27-29.
LIU H L, WANG H Y, ZHANG J B. Evaluation method of cleats in coal reservoir bed[J]. Natural Gas Industry, 2000, 20(4): 27-29.
- [4] 申瑞臣,屈平,杨恒林.煤层井壁稳定技术研究进展与发展趋势[J].石油钻探技术,2010,38(3):1-7.
SHEN R C, QU P, YANG H L. Advancement and development of coal bed wellbore stability technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(3): 1-7.
- [5] 刘向君,叶仲斌,陈一健.岩石弱面结构对井壁稳定性的影响[J].天然气工业,2002,22(2):41-42.
LIU X J, YE Z B, CHEN Y J. Influence of rock weak plane texture on sidewall stability[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(2): 41-42.
- [6] GENTZIS T. A stability analysis of two horizontal CBM wells in the deep Mannville coals, Alberta Basin, Canada. Energy Sources Part A: Recovery Utilization & Environmental Effects[J]. Energy Sources, 2011, 33(24): 2281-2290.
- [7] 屈平,申瑞臣,杨恒林,等.节理煤层井壁稳定性的评价模型[J].石油学报,2009,30(3):455-459.
QU P, SHEN R C, YANG H L, et al. Evaluation model of wellbore stability in coal seam[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(3): 455-459.
- [8] JING L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003, 40(3): 283-353.

- [9] 李嗣贵, 邓金根, 李明志. 节理破碎地层井壁稳定的离散元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(21): 2139-2143.
LI S G, DENG J R, LI M Z. Discrete element analysis on wellbore stability in jointed formation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(21): 2139-2143.
- [10] 孙正财, 刘向君, 梁利喜, 等. 煤层气井割理煤岩井壁稳定性影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(4): 117-122.
SUN Z C, LIU X J, LIANG L X, et al. Analysis on impact factors of borehole wall stability of coalbed methane well[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(4): 117-122.
- [11] 尹虎, 李黔, 郭亮, 等. 离散单元法评价煤层井壁稳定性[J]. 天然气工业, 2012, 32(11): 59-63.
YIN H, LI Q, GUO L, et al. Evaluation of wellbore stability in coal seams by use of the universal discrete element code (UDEC) method[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(11): 59-63.
- [12] 屈平, 申瑞臣, 付利, 等. 三维离散元在煤层水平井井壁稳定性中的应用[J]. 石油学报, 2011, 32(1): 153-157.
QU P, SHEN R C, FU L, et al. Application of the 3D discrete element method in the wellbore stability of coal-bed horizontal wells[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 153-157.
- [13] CUNDALL P A. The measurement and analysis of accelerations in rock slopes[D]. London: University of London, 1971.
- [14] KARATELA E, TAHERI A, XU C, et al. Study on effect of in-situ stress ratio and discontinuities orientation on borehole stability in heavily fractured rocks using discrete element method[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 139: 94-103.
- [15] 孙正财. 煤岩力学井壁失稳机理研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2018.
SUN Z C. Study on mechanism of mechanical borehole wall instability in coal rock[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018.
- [16] Itasca Consulting Group Inc. UDEC(Universal Distinct Element Code) users manual, version 3. 0[M]. Minneapolis: Itasca Consulting Group, 1996.
- [17] 邢纪波, 俞良群, 张瑞丰, 等. 离散单元法的计算参数和求解方法选择[J]. 计算力学学报, 1999, 16(1): 47-51.
XING J B, YU L Q, ZHANG R F, et al. Determination of calculating parameters and solution methods of discrete element method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 1999, 16(1): 47-51.
- [18] 朱焕春, PATRICK A, 钟辉亚. 节理岩体数值计算方法及其应用(二): 工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 89-96.
ZHU H C, PATRICK A, ZHONG H Y. Numerical modeling methods and application in jointed rock mass, part 2: application in engineering practice[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 89-96.
- [19] BRACE W F, BYERLEE J D. Recent experimental studies of brittle fracture of rocks[C]// paper ARMA-66-0058 presented at the 8th U. S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 15-17 September 1966, Minneapolis, Minnesota, USA.
- [20] 李光泉. 深部地质环境对井壁稳定性的影响[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(1): 103-107.
LI G Q. The impact of geological environment on wellhole stability[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2012, 34(1): 103-107.
- [21] 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 Q R, DENG H. Influence of rock fractures on mechanical stability of well- wall[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(4): 167-170.
- [22] SALEHI S, HARELAND G, NYGAARD R. Numerical simulations of wellbore stability in under-balanced-drilling wells[J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2010, 72(3-4): 229-235.
- [23] HAWKES C. Assessing the mechanical stability of horizontal boreholes in coal[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(7): 797-813.

(编辑 常燕)

(上接第44页)

- ZHANG T, GUO J C, LIU W. CFD Simulation of Proppant Transportation and Settling in Water Fracture Treatments[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2014, 36(1): 74-82.
- [18] 温庆志, 高金剑, 刘华, 等. 滑溜水携砂性能动态实验[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(2): 97-100.
WEN Q Z, GAO J J, LIU H, et al. Dynamic experiment on slick- water prop- carrying capacity[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(2): 97-100.
- [19] 田守增, 盛茂, 刘习雄. 近封隔器环空支撑剂沉降运移规律试验研究[J]. 石油机械, 2018, 46(8): 86-91.
TIAN S Y, SHENG M, LIU X X. Experimental study on settlement and migration law of proppant in annulus near packer[J]. China Petroleum Machinery, 2018, 46(8): 86-91.
- [20] 刘俊辰, 彭欢, 高新平, 等. 体积压裂支撑剂缝内沉降规律实验研究[J]. 钻采工艺, 2019, 26(5): 39-42.
LIU J C, PENG H, GAO X P, et al. Experimental study on proppant settlement regularity in fracture during volume fracturing[J]. Drilling & Production Technology, 2019, 26(5): 39-42.
- [21] 马立华, 袁旭, 冯建设. 支撑剂沉降铺置规律机理及方法浅析[J]. 石化技术, 2019, 26(2): 219.
MA L H, YUAN X, FENG J S. Analysis of mechanism and method of proppant settlement and placement[J]. Petrochemical Industry Technology, 2019, 26(2): 219.
- [22] 侯腾飞, 张士诚, 马新仿, 等. 支撑剂沉降规律对页岩气压裂水平井产能的影响[J]. 石油钻采工艺, 2017, 39(5): 638-645.
HOU T F, ZHANG S C, MA X F, et al. Effect of proppant settlement laws on the productivity of shale- gas horizontal wells after the fracturing[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2017, 39(5): 638-645.
- [23] 张林强. 支撑剂在滑溜水中沉降规律探讨[J]. 当代化工, 2017, 46(4): 711-714.
ZHANG L Q. Discussion on the sedimentation law of proppant in slippery water[J]. Contemporary Chemical Industry, 2017, 46(4): 711-714.
- [24] 万红碧, 李天柱. 压裂裂缝内支撑剂沉降及运移规律研究现状与展望[J]. 当代化工, 2019, 48(8): 1775-1778.
WAN H B, LI T Z. Research status and prospect of deposition and migration of propellant in shale pneumatic fracture[J]. Contemporary Chemical Industry, 2019, 48(8): 1775-1778.
- [25] 王欣. 支撑剂在裂缝中沉降的影响因素分析[J]. 石化技术, 2017, 24(3): 292.
WANG X. Analysis of factors affecting the settlement of proppant in fractures[J]. Petrochemical Industry Technology, 2017, 24(3): 292.
- [26] JEFFREY R G, BRYNES R P, LYNCH P J, et al. An analysis of hydraulic fracture and mineback data for a treatment in the German creek coal seam[C]// paper SPE-24362-MS presented at the SPE Rocky Mountain Regional Meeting, 18-21 May, Casper, Wyoming, USA.

(编辑 常燕)