

页岩断层摩擦滑动引发套管变形的概率

黄锐^{1,2}, 张丰收^{1,2}, 陈朝伟³, 安孟可⁴, 沈贤达^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;

3. 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 4. 香港理工大学 土木与环境工程系, 香港 100872)

摘要: 以四川盆地长宁区块 N 平台为研究对象, 开展页岩断层泥在高温高压条件下的剪切实验, 旨在揭示页岩断层的摩擦力学特性, 并结合定量风险分析(QRA)方法, 评估多因素耦合作用下断层的滑动趋势。实验结果显示, 页岩断层的摩擦系数介于 0.50~0.75 之间, 且随着黏土矿物含量的增加, 摩擦系数呈下降趋势, 同时表现出显著的位移弱化特征。QRA 结果表明, 在注入流体诱发的孔隙压力扰动达到 15 MPa 时, 与套管变形井段相交断层的滑动概率超过 64%。断层滑动概率随摩擦系数降低和孔隙压力扰动增大而显著上升。因此, 建议压裂施工应尽量规避黏土矿物含量高于 30% 的断层(对应摩擦系数 < 0.6), 或通过控制压裂施工压力(孔隙压力扰动 < 10 MPa)降低断层滑动风险, 从而有效预防套管变形。

关键词: 页岩气; 套管变形; 断层滑动; 摩擦实验; 滑动概率分析

中图分类号: TE258; P313.1

文献标志码: A

with the increase of clay content and exhibits a progressive weakening trend with shear displacement. QRA results reveal that under a pore pressure perturbation of 15 MPa induced by hydraulic fracturing, the minimum fault slip probability reaches 64%. The fault slip probability increases significantly with the decrease of friction coefficient and the increase of pore pressure perturbation. To mitigate the risk of casing deformation, hydraulic fracturing operations should avoid faults with clay content exceeding 30% (friction coefficient < 0.6) or maintain the injection pressure such that the pore pressure perturbation remains below 10 MPa, thereby reducing the likelihood of fault slippage.

Keywords: shale gas; casing deformation; fault slip; friction experiments; slip probability analysis

Probabilities of Shale Fault Friction and Slip on Inducing Casing Deformation

HUANG Rui^{1,2}, ZHANG Fengshou^{1,2}, CHEN Zhaowei³, AN Mengke⁴, SHEN Xianda^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. CNPC Engineering Technology R&D Co., Ltd., Beijing 102206; 4. Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 100872, China)

Abstract: Taking the N Pad in the Changning Block as a case study, friction experiments were conducted on shale fault gouges to investigate the frictional behavior of shale faults, followed by quantitative risk assessment (QRA) to evaluate the potential for fault slip. The experimental results indicate that friction coefficients of shale faults range from 0.50 to 0.75. The friction coefficient decreases

自 2009 年起, 对四川盆地内的长宁-威远国家级页岩气示范区大规模开发页岩气, 主要采用水平井与水力压裂技术。然而, 在开发过程中, 超过 30% 的水平井出现了套管变形问题^[1-3]。套管变形频发不仅导致压裂段数减少、单井产量下降, 还损害了井筒完整性, 进而严重制约页岩气的高效开发^[4-7]。

页岩气开发中的套管变形具有以下特征: ①水力压裂前通井作业顺利, 但在压裂施工后出现桥塞无法下入的现象, 表明水力压裂是诱发套管变形的关键工程因素^[8]; ②套管变形形态多呈 S 型剪切形貌, 与地层岩块发生错动的力学特征相符^[9]。四川盆地地质构造较为复杂, 发育有大量断层和裂缝等不连续地质体^[10]。在大规模水力压裂过程中, 大量流体注入易引发天然断层或裂缝带的再激活^[11], 主要机理在于: 压裂液渗入井周已有的断裂带, 导致断裂带内孔隙流体压力升高, 进而降低断层面的有效

收稿日期: 2025-04-15

基金项目: 国家自然科学基金(42320104003, 42077247, 42477168)

第一作者: 黄锐, 博士生, 主要研究方向为非常规油气储层岩石力学。E-mail: huangrui0512@tongji.edu.cn

通信作者: 沈贤达, 教授, 工学博士, 主要研究方向为多场多尺度岩体力学。E-mail: xshen@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

正应力,促使断层发生滑移^[12];当滑移的断层与水平井井筒相交时,套管将承受来自断层的剪切作用,从而导致变形。

对于地层深部发育的成熟断层,断层泥是断层带地质材料中力学性质最为薄弱的部分,其力学性能直接控制着断层的整体摩擦强度与摩擦稳定性^[13]。大量研究表明,断层泥能够改变断层滑动过程中断层面的接触状态,进而影响断层的摩擦行为与剪切变形特性^[14-15]。因此,有必要开展在高温高压原位地层条件下的页岩断层剪切实验,以揭示其在流体注入环境下的摩擦特性,为防治水力压裂诱发的套管变形问题提供理论依据。在减缓套管变形方面,众多学者基于现场数据分析发现,发生严重套管变形的井段多集中于构造裂缝发育区,建议未来井眼轨迹设计应尽量规避地下局部构造发育区域^[16]。此外,三维非线性有限元模型被广泛用于穿越滑移断层的套管力学响应模拟。结果表明,减小套管与断层之间的接触角,或采用低弹性模量水泥甚至不进行固井处理,可显著降低套管变形程度^[17]。三维离散元模拟结果进一步显示,降低压裂排量可有效控制断层滑移量,而减少总注入液量则有助于抑制流体诱发地震的震级^[11]。

针对套管变形的防控问题,学者们已提出了优化井眼轨迹、降低压裂排量以及采用低弹性模量水泥等一系列技术措施。然而,目前仍缺乏在流体注入等多因素耦合作用下断层滑动趋势的系统研究,断层滑动的主控因素尚不明确,亟需进一步揭示断层滑动的影响机制与作用规律。

1 流体注入诱发页岩断层滑移与套管变形的相关性

以四川盆地页岩气开发区N平台为实例,对现场数据开展分析,以明确该平台套管变形与断层滑移的相关性。N平台的三口水平井在水力压裂施工期间发生了较为严重的套管变形问题,基于下桥塞受阻的情况可以确定套管变形的位。N平台的套管变形情况统计如表1和图1所示。在水力压裂施工期间累计引发5处套管变形,套管变形位置在图1中用圆圈表示。

蚂蚁体是一种地震反演属性体,在地震地质勘探领域,蚂蚁体属性被普遍应用于断裂等不连续地质体的快速识别,利用地震蚂蚁体属性可以较为精确地识别分布在井周的中小尺度断层^[18-19]。在该平

表1 N平台套管变形

Tab.1 Casing deformation of the N Pad

编号	井号	套管变形位置/m
1	N-1	3 910
2	N-2	3 399
3	N-2	3 039
4	N-3	3 610
5	N-3	3 303

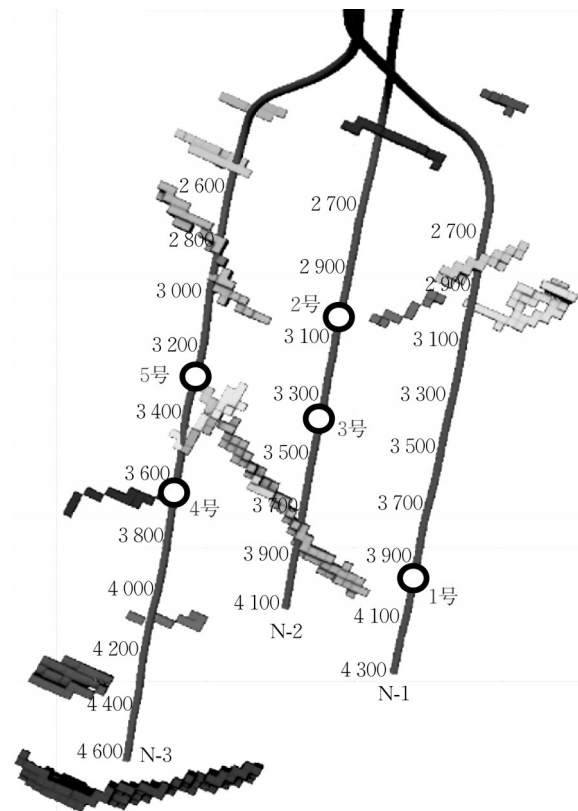


图1 N平台蚂蚁体裂缝带与套管变形

Fig.1 Ant-tracking fracture zones and casing deformation of the N Pad

台上开展蚂蚁体追踪来刻画井周断层,识别的蚂蚁体裂缝带见图1(矩形线条为识别的蚂蚁体裂缝带,3条长直线为井眼轨迹)。基于识别的井周断层与套管变形位置可以初步分析套管变形与断层的相关性。从图1可以看到,该平台的套管变形点共有5处,其中与蚂蚁体裂缝带直接相交的套管变形点有2处(N-3井中4号和5号套管变形点),另有2处位于蚂蚁体裂缝带附近(N-2井中2号套管变形点和N-1井中1号套管变形点)。可见,水力压裂流体注入期间发生的套管变形与井周发育的断层等裂缝带具有一定的相关性。

水力压裂高压流体注入引起的天然裂缝带开合与滑移均会导致地层能量的释放并产生地震波,其中断层滑移所产生的剪切波信号通常具有更高的矩

震级与信噪比^[20-22],更易被微地震监测所捕捉到,因此利用微地震监测数据可进一步对该平台的断层激活信息进行分析。在N平台上基于微地震信号识别出的典型断层激活信息见图2,圆点表示压裂激活的微地震信号,信号球体的大小表示震级。以图2右侧图为例,显示的信号为N-2井第2~7段多段压裂产生的微地震信号。可以看到,多段压裂产生的微地震信号均偏离在井筒右侧,汇聚形成条带状。同时,激活的天然裂缝带上均分布震级较大的剪切波信号,且这些激活裂缝带的走向与水力裂缝走向明显不一致,故可排除水力裂缝的干扰。综上,在水力压裂过程中井周隐伏的断层在流体注入的作用下产生了剪切滑动。

在该平台N-3井上开展了多臂井径测井,以该井3 610 m处的套管变形形状数据为例,测试结果见图3。从井径曲线可以看到,该处套管的变形范围在

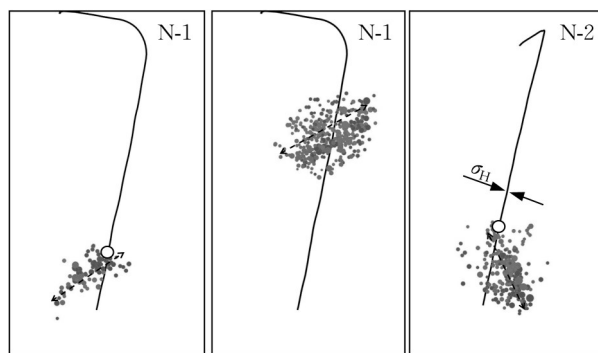


图2 在N平台上基于微地震信号识别的断层激活信息
Fig.2 Fault activation identified by the N Pad based on microseismic events

5 m左右,具有典型的局部变形特征,且呈现S形剪切变形,这与断层上下2盘相对错动的剪切特征一致,可进一步说明套管变形与断层滑移两者之间的紧密相关性。

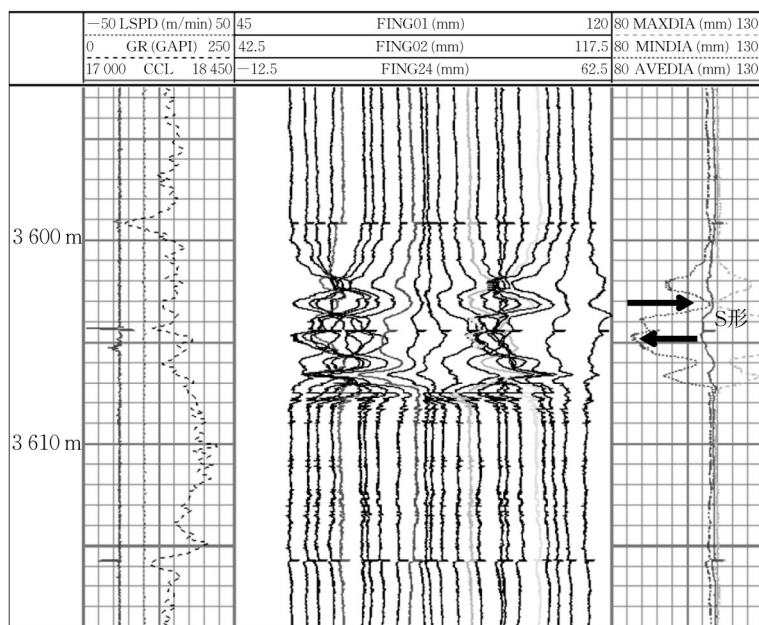


图3 N-3井套管变形形状分析
Fig.3 Casing deformation shape analysis of N-3

2 页岩断层泥高温高压剪切实验及摩擦特性分析

成熟断层的摩擦滑动主要受断层泥摩擦力学性能的控制。因此,了解页岩断层泥在原位地层高温高压条件下的摩擦力学特性,对于理解流体注入下断层的摩擦滑动行为至关重要。库仑摩擦定律被广泛用来描述深部断层的剪切破坏行为^[12]。在库仑摩

擦定律中,断层的摩擦系数与流体注入引起的孔隙压力超压是决定断层在流体注入下能否产生滑动的2个关键参数。库仑破坏函数计算式为

$$F_{\text{CFE}} = \tau - \mu(\sigma_n - p_f) \quad (1)$$

式中: τ 为断层面上的剪应力,大小由其所处原位地应力条件所决定; μ 为断层摩擦系数; σ_n 为断层面上的正应力; p_f 为孔隙流体压力。当流体注入引起的孔隙压力 p_f 增大或断层摩擦系数 μ 减小,使得 F_{CFE} 值大于零时,断层面上的剪应力超过阻滑应力,断层产

生滑动。

2.1 龙马溪组页岩的矿物组分

龙马溪组是四川盆地页岩气开发的主要层系。采集并选取龙马溪组层系的4个页岩样品,样品及编号见图4。对采集的样品进行X射线衍射矿物成分分析。结果显示,龙马溪组页岩的矿物组分具有明显的多变性,其矿物成分主要在层状硅酸盐矿物(即黏土矿物,主要为伊利石、绿泥石)、架状硅酸盐矿物(石英、长石)和碳酸盐矿物(方解石、白云石)三者之间分布(见表2)。这种多变的矿物组成可能给页岩断层摩擦系数带来显著影响,因此有必要开展室内实验来揭示页岩断层的摩擦强度与矿物组分之间的内在联系。

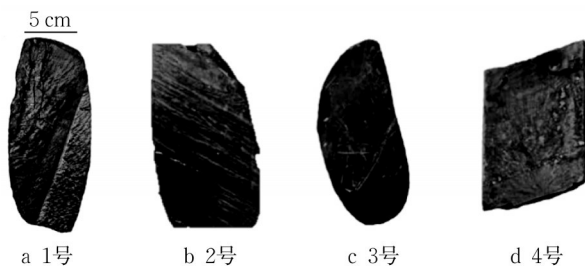


图4 龙马溪组页岩样品

Fig.4 Shale samples from Longmaxi Formation

表2 龙马溪组页岩矿物组分分布

Tab.2 Distribution of mineral compositions in Longmaxi shale

样品编号	层状硅酸盐矿物含量/%	架状硅酸盐矿物含量/%	碳酸盐矿物含量/%
1	7	14	76
2	31	34	33
3	19	55	23
4	39	50	9

2.2 页岩断层泥高温高压剪切实验

原位高温高压条件下的断层泥摩擦实验在位于中国地震局地质研究所的高温高压气体介质三轴剪切设备^[23]上开展。该设备采用惰性气体(氩气)施加围压,可施加的最高围压可达300 MPa,最高孔隙流体压力可达200 MPa,最高温度可达600 °C。设备内部结构见图5。页岩断层泥的厚度控制在1 mm左右,并将其夹在2个半圆柱状断层围岩块之间,断层围岩块沿着与轴线呈35°的方向切开,上侧半圆柱断层围岩块中间钻孔,用来施加孔隙流体压力。在去除表面杂质后,所有页岩样品被磨碎并用200目的筛网进行过筛,使得最终样品粒径<75 μm,用以模拟断层泥^[23]。

共开展4组高温高压页岩断层泥剪切实验,所

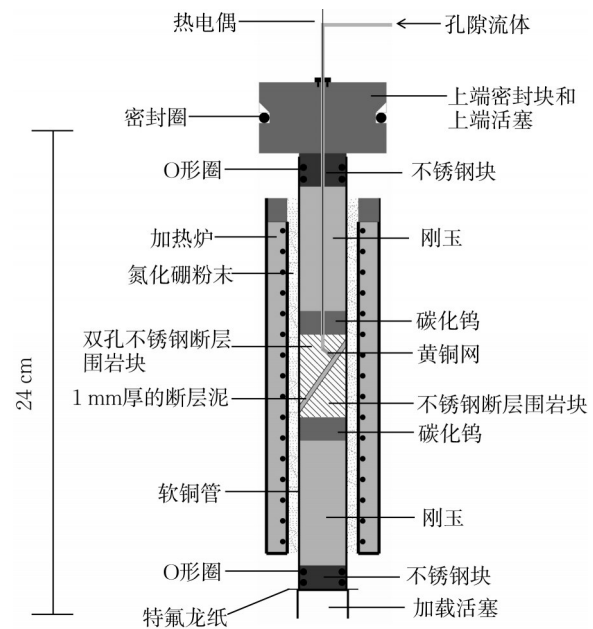


图5 高温高压气体介质三轴剪切设备示意

Fig.5 Schematic diagram of gas-confined high temperature and pressure triaxial-shear apparatus

有实验均在恒定围压 $\sigma_c=60$ MPa、 $p_f=30$ MPa和温度 $T=150$ °C条件下开展,目的是研究龙马溪组页岩断层泥样品的原位摩擦特性以及与矿物组分之间的关系。实验中所采用的围压、孔隙流体压力和温度符合四川盆地长宁地区龙马溪组地层原位条件^[8]。

每组剪切实验开始后,所有断层泥在剪切速率 $1 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下剪切,当断层达到接近稳定摩擦状态时(摩擦曲线走平),剪切速率在 0.1 和 $1.0 \mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间进行变换,以获取不同剪切速率下的摩擦系数。龙马溪组4种页岩样品的摩擦曲线见图6。在约1.0 mm的剪切位移处,大部分断层泥都已达到稳定摩擦状态,之后呈现微弱的随位移强化(见图6a)或随位移弱化行为(见图6d)。通过观察摩擦强度随位移的变化趋势可以对滑移强化与滑移弱化特征进行界定。当断层泥摩擦强度随着位移的增加而逐渐增强时,这种特征被称为滑移强化,反之被称为滑移弱化。滑移强化行为通常是指剪切压实引起断层泥颗粒破碎,进而导致的颗粒间摩擦接触面积增大^[24]。然而,黏土含量较高的4号断层泥呈现出滑移弱化行为,这说明黏土矿物含量在控制断层摩擦行为中起到了关键作用。推测原因可能是:当断层泥中黏土矿物含量超过一定比例时,在剪切过程中黏土矿物会形成相互连通的局部剪切带^[25],从而表现出随滑移逐渐弱化的特征(见图6d)。

断层泥的滑移强化与滑移弱化特征可能会对断层在流体注入下的激活特征产生显著影响。例如,滑移强化的断层泥在滑移过程中会逐渐增加滑动阻力,从而使断层在滑移过程中具有自愈合特征,导致滑移逐渐趋向于稳定并最终停止。具有滑移弱化特征的断层泥则会在滑移过程中不断弱化自身强度,

显著增加在流体注入下的再活化可能性,并在滑移过程中滑移速度越滑越快,使得整体滑动呈现不稳定特征。因此,在施工过程中,应对黏土矿物含量较高且较易呈现滑移弱化特征的断层加以防控,以防止断层再激活并引发套管变形。

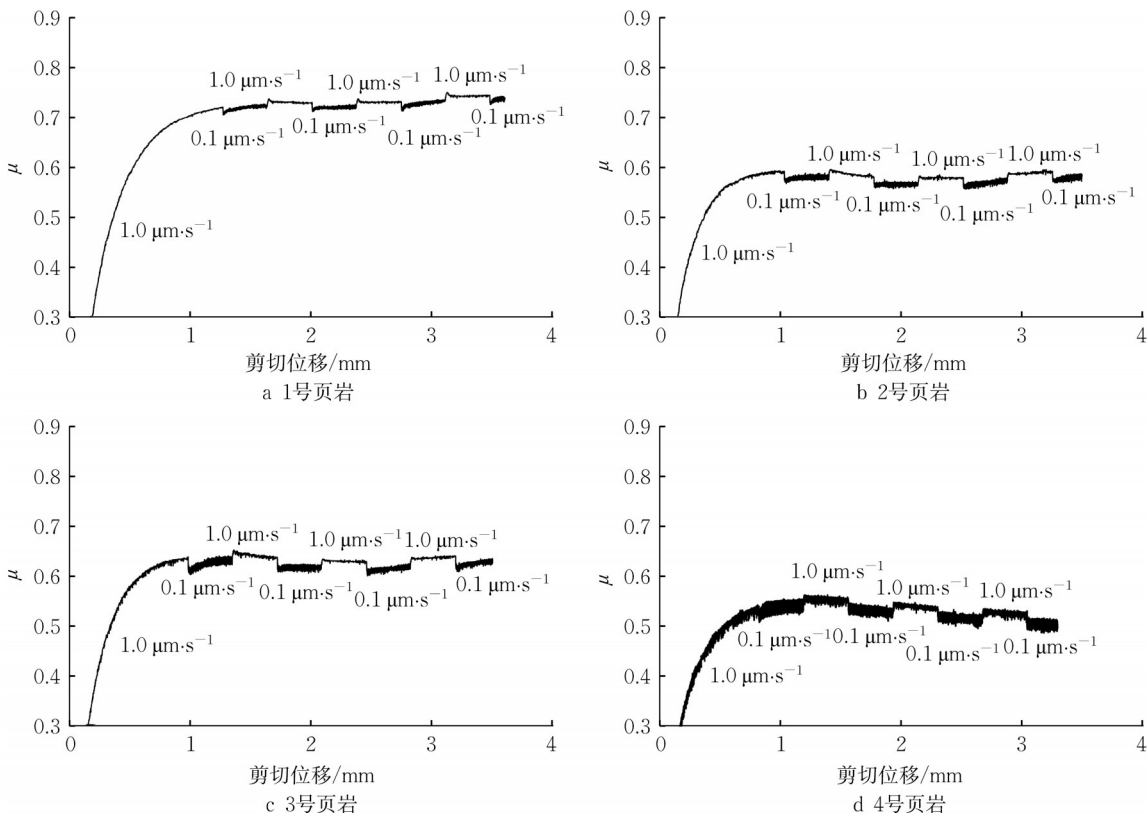


图6 页岩断层摩擦系数-位移曲线

Fig.6 Friction coefficient-displacement curves for shale fault gouges

2.3 页岩断层的摩擦系数与矿物组分的关系

针对页岩断层摩擦系数受矿物组分的影响规律,绘制了断层摩擦系数与矿物成分(黏土矿物含量)之间的关系,如图7所示。实验结果显示,页岩断层摩擦系数主要处在0.50~0.75的范围内,且摩擦系数具有显著的矿物成分依赖性,表现为随着黏土矿物含量的增加,页岩断层摩擦系数呈现明显降低的趋势。黏土矿物又被称为层状硅酸盐矿物,由于其在结构上是层状构造,因此在摩擦滑动中承受更小的滑动阻力。相比于页岩中常见的架状硅酸盐矿物与碳酸盐矿物,层状硅酸盐矿物具有更低的摩擦系数。以上分析结果表明,黏土矿物含量对页岩断层的摩擦强度以及随位移的演化规律具有显著影响,黏土矿物含量越高,页岩断层摩擦系数越低,并表现出明显的随滑移逐渐弱化的趋势,这对于理解

并控制页岩断层在流体注入下的再激活具有重要的意义。

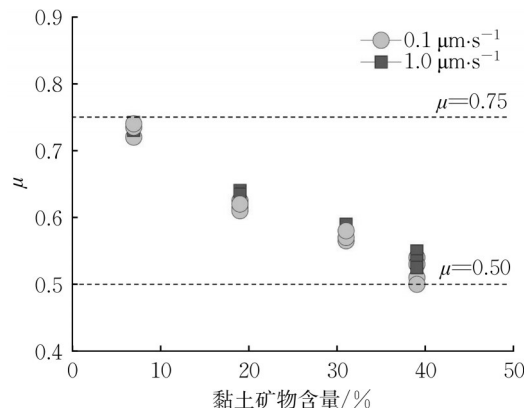


图7 龙马溪组页岩断层摩擦系数与黏土矿物含量的关系
Fig.7 Relation between friction coefficient of Longmaxi shale and clay content

3 N 平台页岩断层滑动概率分析

基于前述现场数据得到的蚂蚁体裂缝带与微地震断层模型,结合室内实验测得的页岩断层摩擦系数与现场测试的地应力数据,利用库仑摩擦滑动准则与定量风险分析(QRA)对流体注入下断层滑动概率进行分析。在QRA中,通过从输入的概率密度分布函数中随机抽样生成模型来进行迭代运算,从而将参数的不确定性传播到整个模型,并将结果汇总输出^[26]。本文中,QRA断层滑动概率的计算过程为:对地质力学建模过程中相关地质参数的不确定性范围进行随机抽样,在库仑摩擦准则约束下生成可以描述断层滑移所需孔隙压力扰动值 Δp 分布的地质力学滑动概率模型,然后基于该孔隙压力扰动值分布得出由流体注入引起的孔隙压力扰动值的滑动概率函数,最后结合给定条件下的孔隙压力扰动值和滑动概率模型即可对断层滑动概率进行评价,分析流程如图8所示。

3.1 原位地应力模型与断层模型

在进行地质力学概率分析之前需要建立页岩储层原位地应力与地层孔隙压力模型,而地应力参数与孔隙流体压力可以基于现场的测井以及测试数据进行约束。根据密度测井数据可以获取垂直应力 σ_v 的范围,对密度数据积分可以获取连续的垂直应力剖面,据此得到在龙马溪组2 500~2 600 m垂深范围内,垂直应力梯度的中心值约为0.025 4 MPa·m⁻¹,

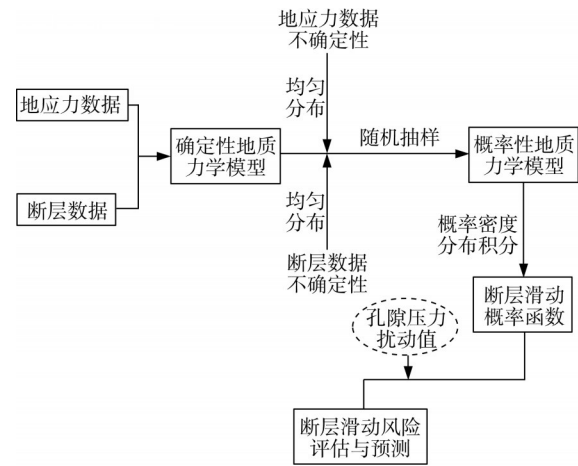


图 8 QRA 断层滑动风险概率分析流程

Fig.8 Procedure of QRA fault slip risk analysis

偏差为0.000 5 MPa·m⁻¹。基于邻井在龙马溪组获得的压裂测试数据对最小水平地应力 σ_{h1} 和地层孔隙压力进行估算,得到龙马溪组最小水平地应力梯度的中心值约为0.018 6 MPa·m⁻¹,偏差为0.000 5 MPa·m⁻¹,地层孔隙压力梯度的中心值约为0.009 6 MPa·m⁻¹,偏差为0.002 1 MPa·m⁻¹。最大水平地应力方向是通过邻井直井的成像测井资料所获取,观测到的连续井壁崩落显示方向在104°~114°范围内。最大水平地应力 σ_{h1} 是基于观测到的井壁崩落外加岩石抗压强度与最小水平地应力大小范围进行约束的,获得最大水平地应力梯度的中心值约为0.033 9 MPa·m⁻¹,偏差为0.001 4 MPa·m⁻¹。基于测试数据建立的地质力学参数不确定性模型见表3。

表 3 地质力学不确定性模型

Tab.3 Geomechanical uncertainty model

项目	σ_{H1} 梯度/(MPa·m ⁻¹)	σ_{h1} 梯度/(MPa·m ⁻¹)	σ_v 梯度/(MPa·m ⁻¹)	σ_{H1} 方向/(°)	μ	ρ_f 梯度/(MPa·m ⁻¹)
高	0.035 3	0.019 1	0.025 9	~114	0.750	0.011 7
中	0.033 9	0.018 6	0.025 4	109	0.625	0.009 6
低	0.032 5	0.018 1	0.024 9	~104	0.500	0.007 5
偏差	0.001 4	0.000 5	0.000 5	5	0.125	0.002 1

在蚂蚁体裂缝带模型的基础上,补充微地震信号所识别的激活断层,按走向不同对断层进行解释,共解释断层22条,建立如图9所示的断层模型。其中,17号和22号断层是基于微地震识别的断层(对应图2)。断层尺度在100~500 m范围内分布,断层走向主要集中在60°~150°范围内。

3.2 地质力学概率分析

以图10中17号断层为例,17号断层的地质力学输入参数分布如图10所示。图10a为垂直应力梯度大小分布,两端对应如表2所示的地质力学参数不

确定性范围,该结果是在均匀分布样本^[26]上通过上千次随机抽样生成的。基于库仑摩擦准则对这些输入参数进行约束,可以得到如图10g所示的17号断层发生滑动所需要的孔隙压力扰动值分布。可见,该断层的孔隙压力扰动值分布在8~18 MPa范围内占比较高。值得注意的是,该分布描述的是断层发生滑动所需的最低孔隙压力扰动值条件,即当孔隙压力扰动值逐渐增大至8~18 MPa时,该断层就具备了较大发生滑动的可能性,且这种可能性会随着孔隙压力扰动值的增大而增大。

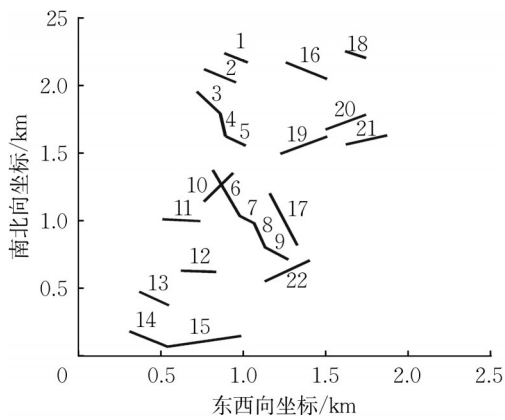


图9 N平台断层模型

Fig.9 Fault model of the N Pad

对图10中17号断层的孔隙压力扰动值分布进行积分,可得到如图11所示的累积分布函数曲线,

该曲线给出了17号断层滑动概率 P 随孔隙压力扰动值增加而变化的趋势。利用现场停泵压力与地层孔隙压力之差大致确定水力压裂施工后孔隙压力扰动范围,压裂停泵压力是水力压裂施工结束后的井底流体压力值大小,该值可以直接反映连通人工与天然裂缝网络中流体压力的变化特征。以N-2井为例,该井从井根到井趾一共发生了16次压裂,统计该井所有压裂段的压裂停泵压力与井周地层孔隙压力的差值,如图12所示。由现场数据可知,该平台水力压裂诱发的孔隙压力扰动值约取为15 MPa。在此压力扰动下,该断层发生滑动的概率约为64%,说明17号断层在水力压裂注入流体的影响下具备了较大发生滑动的可能性,这与现场微地震数据显示的断层激活信息结果一致(见图2右侧图),验证了模型的正确性。

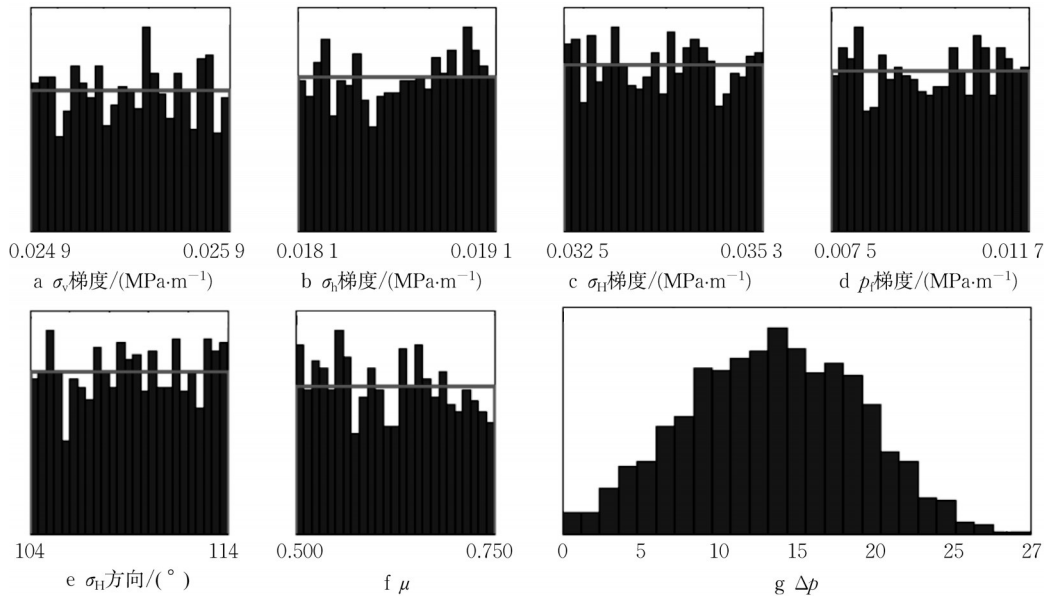


图10 17号断层地质力学参数不确定性分布直方图

Fig.10 Probabilistic distributions of geomechanical uncertainties of fault 17

3.3 断层滑动风险分析结果

图13所示为N平台所有断层在孔隙压力扰动值15 MPa条件下的断层滑动概率分布。按不同滑动概率可定义高风险($P \geq 0.7$)、中风险($0.7 > P > 0.3$)和低风险($P \leq 0.3$)3个类别。可以看到,与套管变形井段相交的6、11、17、19、22号断层均为中高风险滑动断层;与之相反,4号与10号断层为低滑动概率断层,其相交井段未发生套管变形。值得注意的是,12号与20号断层虽为与井相交的高风险断层,但没有引发套管变形,推测断层可能处在不同深度,未与井眼轨迹直接相交。因此,基于整个区域分

析结果可证明,在水力压裂施工期间出现的套管变形,其主控因素正是由流体注入引起的断层滑动,滑动断层与井眼轨迹相交对套管产生剪切作用,从而导致套管变形。基于QRA结果,可以对流体注入条件下断层发生滑动的风险等级进行判别,这为优化未来井眼轨迹部署以避免高风险滑动断层提供了依据,同时也为开展压裂参数优化以减缓套管变形找准了目标。

4 断层滑动参数敏感性分析

如前文所述,断层摩擦系数与流体注入引起的

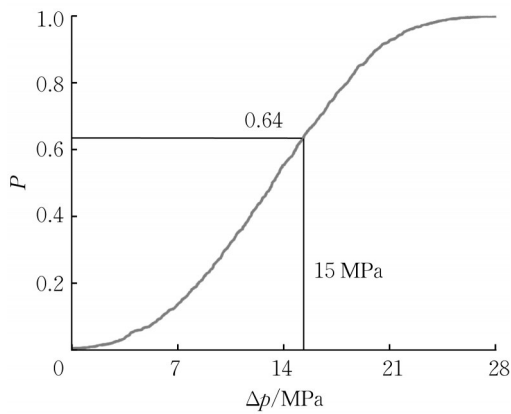


图 11 17号断层滑动概率曲线

Fig.11 Slip probability curve of fault 17

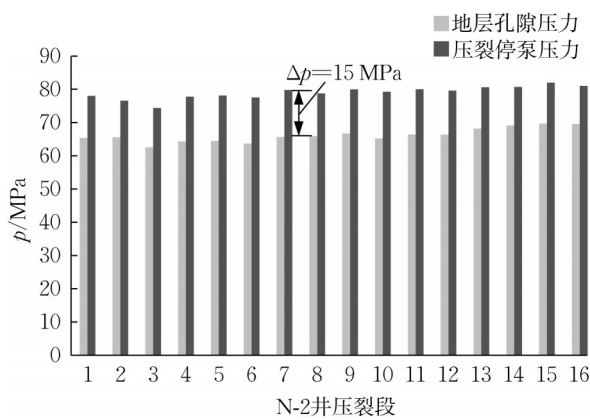


图 12 N-2井压裂停泵压力与地层孔隙压力

Fig.12 Shutting pressure and pore pressure of N-2

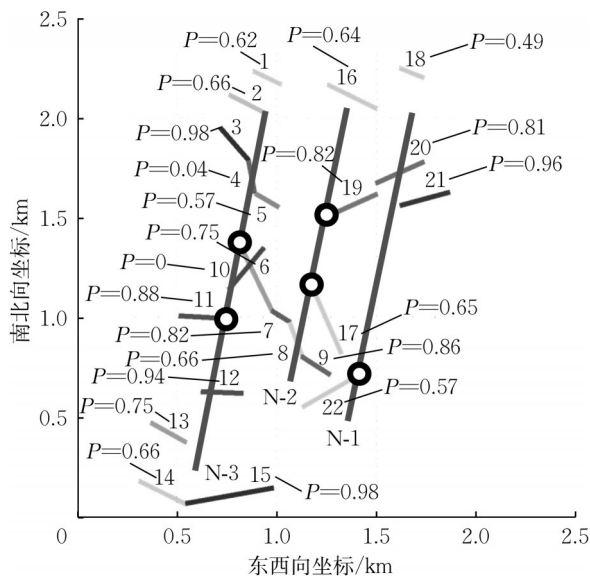


图 13 N平台断层滑动风险结果

Fig.13 Results of fault slip risks in the N pad

孔隙压力扰动值是决定断层在流体注入下能否产生滑动的2个关键参数。选取与套管变形井段直接相

交的6、11、17、19、22号共计5条断层,开展在不同断层摩擦系数与孔隙压力扰动值影响下的断层滑动概率变化趋势敏感性分析,为现场优化钻井与压裂施工以减缓套管变形提供参考。

4.1 断层摩擦系数对滑动概率的影响

图 14 所示为断层摩擦系数对断层滑动概率的敏感性分析结果。以 22 号断层为例,当断层摩擦系数处在最高时($\mu=0.7$),滑动概率为 0.25,随着断层摩擦系数下降至 0.6 和 0.5,断层滑动概率分别显著提高至 0.60 和 0.91。可见,随着断层摩擦系数的下降,断层滑动风险显著升高。同时,当断层摩擦系数低至 0.6 时,大部分断层滑动概率均高于 0.70(高风险滑动断层)。这表明,在现今地应力条件下,摩擦系数低于 0.6 的断层可能是引发套管变形的主体。值得注意的是,断层摩擦系数主要受控于断层的黏土矿物含量,摩擦实验结果表明,黏土矿物含量越高则页岩断层摩擦系数越低(见图 7),因此压裂施工时应当尽量避免黏土矿物含量 > 30% 的断层(对应图 7 中 $\mu < 0.60$),以防引发套管变形。

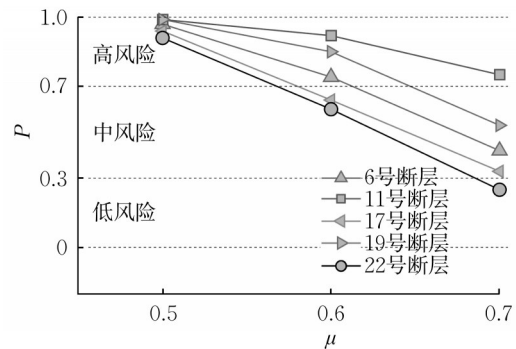


图 14 断层摩擦系数对断层滑动概率的影响

Fig.14 Effect of friction coefficient on slip probability

4.2 孔隙压力扰动值对滑动概率的影响

图 15 所示为孔隙压力扰动值对断层滑动概率的敏感性分析结果。以 22 号断层为例,当孔隙压力扰动值为最低时($\Delta p=10$ MPa),滑动概率为 0.22,随着孔隙压力扰动值逐渐升高至 15、20 MPa,断层滑动概率分别提高至 0.60 和 0.87。可见,随着孔隙压力扰动值的增大,断层滑动风险逐步升高。同时,当孔隙压力扰动值 ≥ 15 MPa 时,大部分断层滑动概率均高于 0.70。这表明,在现今压裂施工条件下($\Delta p=15$ MPa),大部分断层均易在流体注入影响下产生滑动。在水力压裂过程中,孔隙压力扰动值的

变化受到压裂施工压力的直接影响,因此当压裂施工井段附近有滑动风险较高的断层穿过时,通过控制施工压力来限制流体注入诱发的孔隙压力扰动($\Delta p < 10$ MPa),使易滑断层的滑动风险得到降低,这可能对防止套管变形起到较大作用。

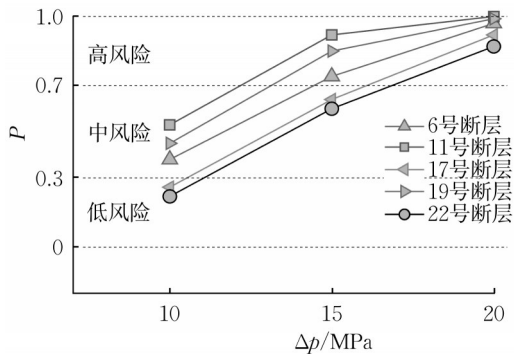


图15 孔隙压力扰动值对断层滑动概率的影响

Fig.15 Effects of pore pressure perturbation on slip probability

5 结论

(1)页岩断层泥高温高压剪切实验结果表明,在龙马溪组页岩地层原位温压条件下,页岩断层摩擦系数处于0.50~0.75范围内,其变化主要受控于断层泥中黏土矿物含量的高低。黏土矿物含量越高,页岩断层摩擦强度越低,并表现出明显的滑移弱化趋势。

(2)QRA结果显示,在流体注入诱发的孔隙压力扰动值为15 MPa的情况下,穿过套管变形井段的断层滑动概率达64%以上,证明断层滑动正是诱发套管变形的主要因素之一。该方法为优化井眼轨迹以避免高风险滑动断层提供了依据,同时也为开展压裂参数优化以减缓套管变形找准了目标。

(3)断层滑动参数敏感性分析表明,随着断层摩擦系数的降低与孔隙压力扰动值的升高,断层滑动概率均会显著提高。因此,压裂施工应当尽量避免黏土矿物含量>30%的断层($\mu < 0.60$),或通过调节施工压力来控制孔隙流体压力的变化($\Delta p < 10$ MPa),从而降低断层发生滑动的概率,以防止套管变形。

作者贡献声明:

黄锐:提出想法,开展研究和调查,撰写论文。

张丰收:提供监督和指导,修订论文。

陈朝伟:提供现场数据,修订论文。

安孟可:协助开展实验,修订论文。

沈贤达:制定研究目标,提供监督和指导,修订论文。

参考文献(References):

- [1] 金亦秋,赵群,牟易升,等.泸州地区深层页岩气水平井套管成因机理探讨[J].天然气工业,2024,44(2):99.
JIN Yiqiu, ZHAO Qun, MOU Yisheng, *et al.* Discussion on formation mechanism of casing deformation in horizontal wells in deep shale gas of Luzhou area [J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(2): 99.
- [2] 闫建平,来思侯,郭伟,等.页岩气井地质工程套管变形类型及影响因素研究进展[J].岩性油气藏,2024,36(5):1.
YAN Jianping, LAI Siyu, GUO Wei, *et al.* Research progress on casing deformation types and influencing factors in geological engineering of shale gas wells [J]. Lithologic Reservoirs, 2024, 36(5): 1.
- [3] 张鑫,李军,张慧,等.威荣区块深层页岩气井套管变形失效分析[J].钻采工艺,2021,44(1):23.
ZHANG Xin, LI Jun, ZHANG Hui, *et al.* Analysis on casing deformation failure in deep shale gas wells in Weirong shale gas clay [J]. Drilling & Production Technology, 2021, 44(1): 23.
- [4] 高德利,刘奎,王宴滨,等.页岩气井井筒完整性失效力学机理与设计控制技术若干研究进展[J].石油学报,2022,43(12):1798.
GAO Deli, LIU Kui, WANG Yanbin, *et al.* Some research advances in the failure mechanism and design & control technologies of shale gas well integrity [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(12): 1798.
- [5] 郭建春,路千里,何佑伟.页岩气压裂的几个关键问题与探索[J].天然气工业,2022,42(8):148.
GUO Jianchun, LU Qianli, HE Youwei. Key issues and explorations in shale gas fracturing [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(8): 148.
- [6] 陈朝伟,宋毅,青春,等.四川长宁页岩气水平井压裂套管变形实例分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(2):513.
CHEN Zhaowei, SONG Yi, QING Chun, *et al.* A case study on casing deformation of horizontal well during hydraulic fracturing in Sichuan Changning [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 513.
- [7] 李泉,李泽,李红涛,等.页岩膨胀对威荣地区套管变形的影响机理研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(6):2007.
LI Gao, LI Ze, LI Hongtao, *et al.* Study on the mechanism of shale expansion on casing deformation in Weirong filed [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(6): 2007.
- [8] 陈朝伟,石林,项德贵.长宁-威远页岩气示范区套管变形机理及对策[J].天然气工业,2016,36(11):70.
CHEN Zhaowei, SHI Lin, XIANG Degui. Mechanism of casing deformation in the Changning-Weiyuan National Shale Gas Project Demonstration Area and countermeasures [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(11): 70.
- [9] 陈朝伟,房超,朱勇,等.四川页岩气井套管变形特征及受力

- 模式[J]. 石油机械, 2020, 48(2): 126.
- CHEN Zhaowei, FANG Chao, ZHU Yong, *et al.* Deformation characteristics and stress modes of casings for shale gas wells in Sichuan [J]. *China Petroleum Machinery*, 2020, 48(2): 126.
- [10] 朱华, 杨光, 苑保国, 等. 四川盆地常规天然气地质条件、资源潜力及勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(10): 97.
- ZHU Hua, YANG Guang, YUAN Baoguo, *et al.* Geologic conditions, resource potential and exploration direction of conventional gas in Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(10): 97.
- [11] ZHANG Fengshou, YIN Zirui, CHEN Zhaowei, *et al.* Fault reactivation and induced seismicity during multistage hydraulic fracturing: microseismic analysis and geomechanical modeling [J]. *SPE Journal*, 2020, 25(2): 692.
- [12] ZOBACK M. 储层地质力学[M]. 石林, 陈朝伟, 刘玉石, 译. 北京: 石油工业出版社, 2011.
- ZOBACK M. Reservoir geomechanics [M]. SHI Lin, CHEN Zhaowei, LIU Yushi, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [13] VROLIJK P, PLUIJM B. Clay gouge [J]. *Journal of Structural Geology*, 1999, 21: 1039.
- [14] HOLDSWORTH E. Weak faults-rotten cores [J]. *Science*, 2004, 303(5655): 181.
- [15] HAINES S, PLUIJM B. Patterns of mineral transformation in clay gouge, with low-angle normal fault rocks in the western USA [J]. *Journal of Structural Geology*, 2012, 43(7): 2.
- [16] 李留伟, 王高成, 练章华, 等. 页岩气水平井生产套管变形机理及工程应对方案: 以昭通国家级页岩气示范区黄金坝区块为例[J]. 天然气工业, 2017, 37(11): 91.
- LI Liuwei, WANG Gaocheng, LIAN Zhanghua, *et al.* Deformation mechanism of horizontal shale gas well production casing and its engineering solution: a case study on the Huangjinba Block of the Zhaotong National Shale Gas Demonstration Zone [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(11): 91.
- [17] YIN Fei, HAN Lihong, YANG Shangyu, *et al.* Casing deformation from fracture slip in hydraulic fracturing [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 166: 235.
- [18] 张希晨, 韩瑞冬, 杜长江, 等. 高精度智能断层预测技术及应用[J]. 石油地球物理勘探, 2024, 59(4): 837.
- ZHANG Xichen, HAN Ruidong, DU Changjiang, *et al.* High-precision fault prediction technologies and applications [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2024, 59(4): 837.
- [19] 许胜利, 孙玉红, 王彬, 等. 井-震结合下的断裂破碎带规模识别与应用[J]. 石油地质与工程, 2024, 38(4): 17.
- XU Shengli, SUN Yuhong, WANG Bin, *et al.* A identification and application of the faulted-fractured zone scale under combination of well and seismic [J]. *Petroleum Geology and Engineering*, 2024, 38(4): 17.
- [20] SHAWN M. Microseismic imaging of hydraulic fracturing: improved engineering of unconventional shale reservoirs [M]. Tarsa: Society of Exploration Geophysicists, 2014.
- [21] 陈朝伟, 张浩哲, 周小金, 等. 四川长宁页岩气套管变形井微地震特征分析[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(6): 1286.
- CHEN Zhaowei, ZHANG Haozhe, ZHOU Xiaojin, *et al.* Microseismic characteristics of shale gas wells with casing deformation in Changning, Sichuan [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2021, 56(6): 1286.
- [22] 赵超峰, 王海波, 郭伟, 等. 页岩气压裂微地震监测技术及其在四川盆地威远地区X平台的应用[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(5): 2089.
- ZHAO Chaofeng, WANG Haibo, GUO Wei, *et al.* Microseismic monitoring technology of shale gas pressure fracture: a case study from X platform in Weiyuan area of Sichuan Basin [J]. *Progress in Geophysics*, 2022, 37(5): 2089.
- [23] 何昌荣, VERBERNE B, SPIERS C. 龙门山断裂带沉积岩和天然断层泥的摩擦滑动性质与启示[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 113.
- HE Changrong, VERBERNE B, SPIERS C. Frictional properties of sedimentary rocks and natural fault gouge from Longmenshan fault zone and their implications [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(1): 113.
- [24] SCHOLZ C. The mechanics of earthquakes and faulting [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
- [25] GIORGETTI C, CARPENTER B, COLLETTINI C. Frictional behavior of talc-calcite mixtures [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2015, 120(9): 6614.
- [26] WALSH F, ZOBACK M. Probabilistic assessment of potential fault slip related to injection-induced earthquakes: application to north-central Oklahoma, USA [J]. *Geology*, 2016, 44(12): 991.