

引用格式: 徐永, 陈立超, 杨补旺, 等. 致密砂岩裂缝时空演化特征规律[J]. 世界石油工业, 2024, 31(5): 73-82.

XU Y, CHEN L C, YANG B W, et al. Temporal and spatial evolution characteristics of tight sandstone fractures[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(5): 73-82.

致密砂岩裂缝时空演化特征规律

徐永¹, 陈立超², 杨补旺³, 王生维⁴

(1. 内蒙古国土资源勘查开发有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2. 内蒙古工业大学资源与环境工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051; 3. 内蒙古自治区测绘地理信息中心, 内蒙古 呼和浩特 010041; 4. 中国地质大学(武汉)资源学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 摸清层理对致密砂岩断裂规律的影响, 对于客观评价致密油气储层压裂裂缝延展规律具有实际意义。对不同层理方向上致密砂岩半圆弯曲试样(SCB)开展三点弯加载, 借助数字图像相关技术(DIC)对试样表面位移、应变演化和裂纹扩展进行记录, 得到砂岩裂纹扩展演化情况。研究表明: 加载位移载荷曲线显示致密砂岩断裂裂缝发展包括缺陷压缩、弹性压缩、破裂失效、快速断裂、缓慢破裂这5个阶段, 整体上致密砂岩塑性较为显著; 致密砂岩在层理角0°、90°时横向位移最大, 表明裂缝开度大, 岩石断裂为纯张型断裂形式, 对于深部致密油气储层高导流压裂有利; 在层理角45°时位移最小而x轴方向应变最大, 表明试样为剪切断裂, 裂缝两侧岩石基质变形严重, 制约基质孔隙油气流体进入压裂裂缝。试验发现, 层理组影响裂缝延展方位, 随着层理夹角的增大, 裂缝偏斜角先增大后减小, 层理角45°时裂缝与最大载荷方向夹角最大。

关键词: 致密砂岩; 层理方向; 裂缝延展规律; 数字图像相关; 位移场; 断口形貌; 压裂意义

中图分类号: TE32; TU45

文献标识码: A

文章编号: 1006-0030(2024)05-0073-010 DOI: 10.20114/j.issn.1006-0030.20240116001

Temporal and spatial evolution characteristics of tight sandstone fractures

XU Yong¹, CHEN Lichao², YANG Buwang³, WANG Shengwei⁴

(1. Inner Mongolia Land Resources Exploration and Development CO. LTD., Hohhot, Inner Mongolia 010020, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China; 3. Inner Mongolia Surveying, Mapping and Geographic Information Center, Hohhot, Inner Mongolia 010041, China; 4. School of Earth Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Finding out the influence of bedding on fracture law of tight sandstone is of practical significance for objective evaluation of fracture law of tight oil and gas reservoir. In this paper, three-point bending loading is carried out on tight sandstone SCB samples in different bedding directions, and digital image correlation (DIC) technology is used to record the surface displacement, strain evolution and crack growth of the samples, so as to obtain the crack growth evolution of sandstone. The research shows that the development of fracture of tight sandstone includes five stages: defect compression, elastic compression, failure failure, rapid fracture and slow fracture. On the whole, the plasticity of tight sandstone is significant. The transverse displacement of tight sandstone is maximum when the bedding orientation is 0° and 90°, which indicates that the fracture opening is large and the fracture is pure tension fracture form, which is favorable for the high diversion fracturing of deep tight oil and gas reservoir. At bedding Angle of 45°, the displacement is the smallest and the strain is the largest in the X-axis direction, indicating that the sample is shear fracture, and the rock matrix on both sides of the fracture is seriously deformed, which restricts the flow

收稿日期: 2024-01-16 修回日期: 2024-03-28

基金项目: 内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目“深部低透气性坚硬煤体瓦斯灾变防控关键技术研发”(2023YFSH0005); 内蒙古自治区自然科学基金项目“冲击荷载下碳纳米管增韧固井水泥裂缝形成与演化机理研究”(2023MS05018); 内蒙古科技创新引导奖励资金项目“海拉尔盆地深部煤层气资源赋存特征与开发关键技术研究”(2022CXYP003); 中央引导地方科技发展资金项目“甘肃省窑街矿区煤层气地面抽采关键技术研发及应用”(23ZYQA319); 煤与煤层气共采国家重点实验室开放基金“煤层气固井水泥冲击断裂机理与增韧技术”(2022KF17)

第一作者: 徐永(1965—), 男, 高级工程师, 从事区域地质调查和矿产勘查工作。E-mail: 13947102703@163.com

通信作者: 陈立超(1985—), 男, 博士, 副教授, 从事非常规油气储层压裂岩石力学试验技术研究。

E-mail: chenlichao@163.com

of oil and gas fluid into the matrix pores. It is found that the bedding fabric affects the crack extension orientation, and the fracture deflection Angle increases first and then decreases with the increase of the bedding angle. The angle between the fracture and the maximum load direction is the largest when the bedding angle is 45° . The characteristics of dynamic evolution law of fracture of tight sandstone are of practical significance to the evaluation and design of fracturing stimulation effect of tight sandstone reservoirs.

Keywords: tight sandstone; bedding orientation; fracture propagation law; digital image correlation; displacement field; fracture morphology; fracturing stimulation significance

0 引言

致密油气是当前重要的一类非常规油气资源,中国陆续开展了陆相盆地致密油气攻关和勘探实践,相继在鄂尔多斯、松辽、准噶尔等多个盆地获得发现,尤其是鄂尔多斯盆地中生界三叠系延长组长7段发现工业化油流。由于致密油具有源储一体、储层渗透性极低(渗透率 $<0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)等特征^[1-2],常规开发技术难以动用。因此,其开发需水平井体积压裂技术营造人工油气藏,实现资源效益开发^[3]。摸清致密储层岩石断裂裂缝延展规律及微观机理,尤其是查明细微观尺度岩石断裂裂缝与组构关系对于优化体积压裂方案、评价储层压裂效果具有实际意义。

砂岩储层压裂改造对压裂裂缝时空演化规律及其监测手段需求高,由于深部致密储层压裂中裂缝的延展过程难以直接观测,目前常用的裂缝监测手段主要包括微震法、广域电磁及支撑剂导电法监测、裂缝矿井解剖观测等^[4-7]。总体而言,目前针对储层岩石的断裂裂缝的时空演化规律和过程分析的方法有限,储层压裂裂缝延展精确评价理论和技术优化受到很大的制约。尤其是储层沉积岩层大部分发育层理构造,通过研究层理构造导致的压裂裂缝延展时空演化规律的差异性,为致密砂岩储层压裂理论深化和技术优化提供试验研究参考。

近年来,针对砂岩材料断裂裂缝延展规律的问题,有学者通过单轴压缩试验,结合声发射技术与数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术,对砂岩试样(以下简称试样)断裂裂缝发展过程进行全程实时监测,利用核密度估计方程对试样裂缝类型进行划分^[8-11]。围绕砂岩、花岗岩等岩石材料断裂裂缝演化过程和断裂破坏机制研究,目前国内外学者利用数字散斑技术开展岩石材料裂缝精确监测^[12-15]。张科等^[16-19]采用DIC方法配合单轴压缩3D打印试样进行非接触式全场变形表面过程的

变形场实时演化,研究不同层理方向的岩石微裂缝起裂时间、空间位置和扩展规律及其破裂机制。夏开文等^[20-25]借助DIC技术观测和分析高速冲击压缩下的试样的变形和破裂演化过程,研究孔洞形状对岩石力学特性和断裂损伤演化规律的影响。Pan等^[26-27]利用DIC技术研究了岩石断裂过程能量演化规律。Zuo等^[28-29]利用DIC技术研究单轴压缩状态下试样破坏的全过程,得到了煤岩试样变形破坏过程中表面位移场的演化特征。Dong等^[30]采用改进研究了混凝土断裂的力学特征和细观机制。

根据上述研究进展发现,目前针对岩石材料断裂过程分析主要建立在理论分析基础上,对储层深部压裂裂缝的延展时空演化规律指导性不强。本文以鄂尔多斯盆地致密砂岩为对象,利用三点弯曲加载半圆弯曲试样,结合DIC技术,获得不同层理方位致密砂岩断裂裂缝延展规律,重点查明裂缝延展规律,明晰致密砂岩裂缝扩展的微观机制,筛选致密砂岩裂缝扩展主控因素,以为致密油气储层体积压裂裂缝延展机理分析及裂缝延展效果评价提供试验参考。

1 三点弯加载数字图像相关监测试验

1.1 致密砂岩三点弯断裂及散斑试样制备

在不同层理方向致密砂岩半圆弯曲(Semi-Circular Bend, SCB)试样制备程序为 0° 、 30° 、 45° 、 60° 及 90° 沿圆盘直口。

试样加工完成后,在其表面喷涂一层均匀、厚度适中的白漆。待白漆完全风干,在白漆表面喷涂用于数字散斑分析的黑点,以便获取试验过程中试样表面的变形信息。本实验利用白色亚光喷漆作为底色,黑色亚光喷漆喷涂散斑,散斑随机分布。单个散斑尺寸大于3个像素,整体散斑面积与底色面积接近1:1。当目标为曲面并且存在离面位移时,其工作原理和操作方法详见参考文献[14-17]。

1.2 数字图像相关监测系统

数字图像相关（DIC）技术是一种非接触式光学量测方法，通过追踪所拍摄目标表面散斑的变化，得到目标的形状、变形和运动。针对岩石材料三点弯断裂加载实验，采用内蒙古工业大学力学实验中心的Correlated Solutions Vic-3D型数字散斑测量仪，测试前首先使用校正板开展散斑校正，板上均匀排列点阵，点与点间隔10 mm。校正时使用相机的全像素采集校正板图像，校正残差标准误差小于0.01像素。图像为256像素×256像素，一个像素实际代表0.23 mm×0.23 mm。根据DIC算法的精度阈值（0.05像素），实际测得变形的精度可满足本次实验需求。

1.3 三点弯曲断裂加载试验

本次三点弯曲加载试验在内蒙古工业大学力学实验中心试验机完成（见图1），试验中下部支

撑滚轴跨度 $2S$ 为80 mm，为保障材料断裂韧度参数测试准确，加载全程位移速率控制在0.05 mm/min，保障载荷稳定缓慢施压，以获得试样材料的静态断裂韧性参数，载荷随着位移增大而递增至极限载荷，试样破坏后，载荷降至100 N以下结束试验。

试验过程中，随着加载位移的增大，载荷 P 以恒定加载速率增加直至达到极限载荷（ $P_{\max}$ ），利用极限载荷 $P_{\max}$ 可计算致密砂岩试样材料的I型断裂韧度 K_{IC} [17-19]为

$$K_{IC} = Y' \frac{P_{\max} \sqrt{\pi a}}{2RB} \quad (1)$$

$$Y' = -1.297 + 9.516(S/R) - [0.47 + 16.457(S/R)]\beta + [1.071 + 34.401(S/R)]\beta^2 \quad (2)$$

式中： $\beta = a/R$ ； R 、 B 分别为试样半径和厚度； a 为试样长度； S 为加载过程中下部支撑滚轴的轴距； Y' 为用有限元法导出的临界无量纲应力强度因子（SIF） [18]。



(a) 砂岩SCB试样尺寸特征

(b) 砂岩试样层理方位

(c) 三点弯加载-数字图像相关试验系统

图1 致密砂岩SCB试样三点弯加载及数字散斑监测实验系统

Fig.1 Test layout of three-point loading and DIC monitoring for tight sandstone SCB samples

2 试验结果分析

2.1 致密砂岩三点弯加载下位移载荷关系

不同层理方位致密砂岩试样加载过程中轴向载荷随位移变化的趋势相似，试样载荷—位移曲线分为5个阶段（见图2）：① 缺陷压缩阶段。加载初期载荷压缩作用下试样内部天然裂隙、层理等不连续面挤压闭合，试样逐步压实，随着加载位移增加轴向载荷增大的斜率逐渐升高，表明试样压实程度加剧，岩石的密度和模量相应增大。② 弹性压缩阶段。在载荷压缩作用下，页岩试样岩石骨架开始承担外部载荷的压缩作用，随加载位移增大轴向载荷线性

升高，载荷—位移关系曲线为斜率稳定的线段，在该阶段页岩试样内部储备了大量的弹性能。③ 破裂失效阶段。当试样切口端部应力强度因子大于岩石起裂断裂韧度时，岩石起裂失去承载性能。④ 快速断裂阶段。当试样切口端部应力强度因子大于岩石失稳断裂韧度时，试样断裂速率快，发生脆断。⑤ 缓慢破裂阶段。随着试样断裂裂缝缓慢延展，试样断裂方式由脆性断裂过渡为韧性断裂，三点弯加载下岩石材料断裂速度减慢。半圆弯曲试样断裂后期，由于试样两侧翘起，形成应力拱效应，一定程度抵抗了轴向载荷对试样的压缩作用。因此，该阶段呈现出位移快速增加而载荷变化不大的规律。

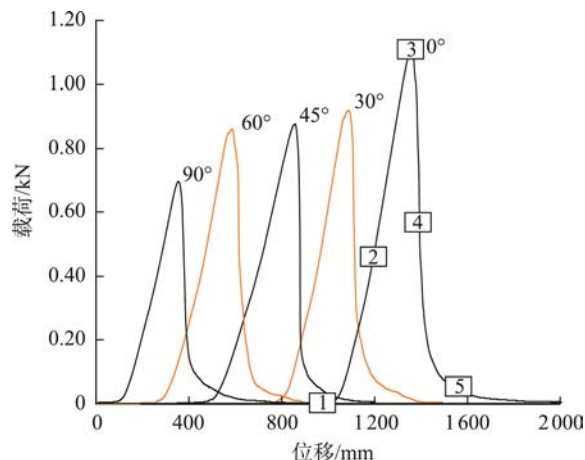


图2 不同层理方向致密砂岩三点弯加载位移—载荷曲线
Fig.2 Displacement-load curves of tight sandstone under three-point loading in different bedding directions

2.2 致密砂岩三点弯加载下位移场演化特征

不同层理方向的致密砂岩SCB试样三点弯断裂过程经过散斑图像处理, 不同加载阶段轴向(x 方向)位移场演化云图呈现不同的特征(见图3)。

2.2.1 试样孔隙压缩阶段

加载初期, 对应加载曲线图2的缺陷压缩阶段,

加载持续时间450 s, 虽然本阶段载荷较小, 但由于致密砂岩内部存在大量矿物颗粒间孔隙, 三点弯加载过程中该部分缺陷首先压实, 在位移分布云图上显示存在的局部变形, 试样呈现随机分布的变形集中区域, 未出现明显的变形场分区和对称分布特征。

2.2.2 试样弹性变形阶段

随着轴向载荷的增大, 试样在横向的位移变形区域增大, 主要分布在切口左侧区域, 呈片状分布, 对应加载曲线的2段, 从横向变形分布云图可以看出, 切口端部区域变形量较大, 出现应力集中区。而在其他部位出现多个点状形变区, 整体上不同层理方位试样的变形不均匀, 认为由于致密砂岩存在大量缺陷及层理等组构导致岩石普遍具有各质异性、各向异性、非均一性的属性, 外载下岩石不同部位变形响应差异大; 同时与试样在制备过程中制样精度有关。总体而言, 本次试验发现试样在轴向压缩下, 试样应力集中区主要在切口部位, 表明岩石天然裂缝面对材料后期破损具有决定性作用。

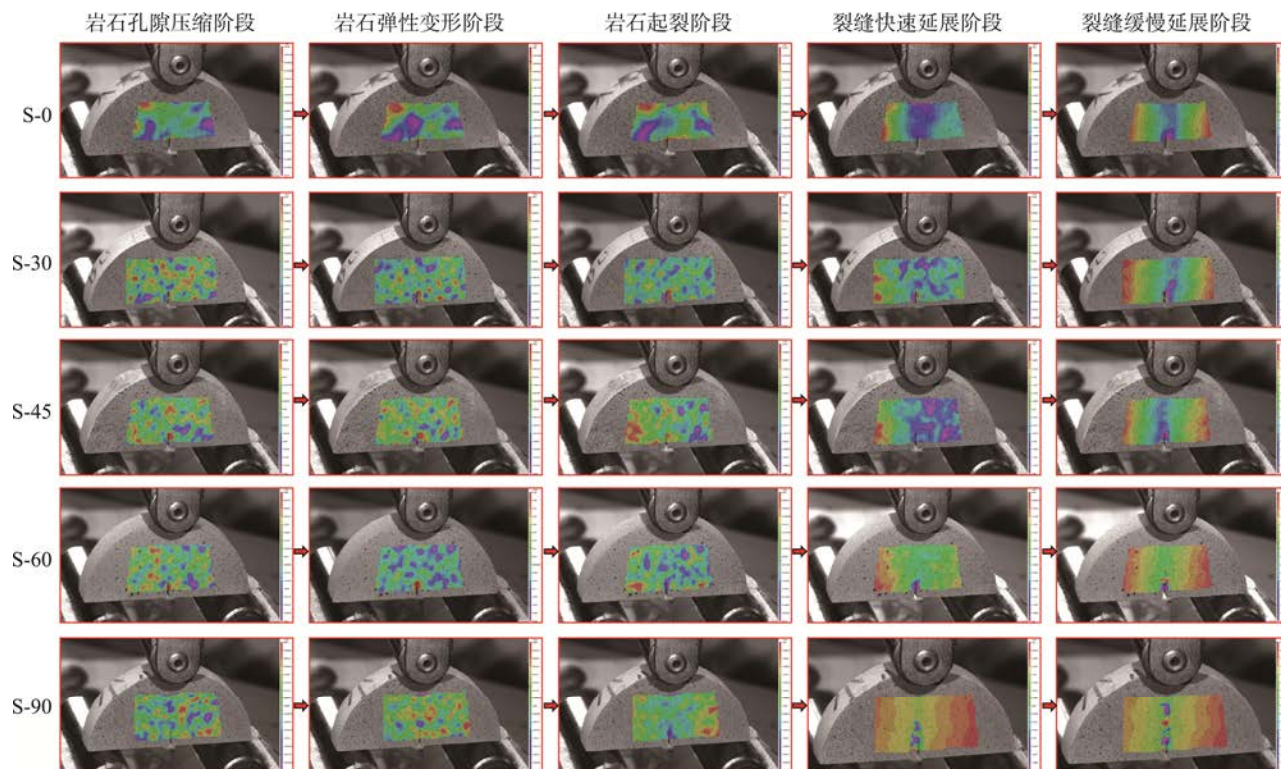


图3 不同层理方向致密砂岩SCB试样断裂过程位移场演化特征
Fig.3 Evolution of displacement field during fracture of tight sandstone SCB samples with different bedding directions

2.2.3 试样岩石起裂阶段

在轴向压缩下,试样表面位移变形逐渐呈水平方向对称式分布特征。从其变形场分布云图看出,试样下部加载端变形较大,向上部横向位移逐渐减小,尤其在切口端部应力集中效应增强,此时岩石断裂。

2.2.4 试样裂缝快速延展阶段

该阶段随着试样断裂,出现明显的位移变形。从试样加载过程中横向变形场演化分布可看出,此时在轴向载荷持续作用下,裂缝快速延展,试样表面变形区域的右上部出现明显的横向变形集中,最终在变形集中带的分界区域出现裂纹扩展,也说明岩石在单轴压缩过程中的破坏主要是由拉应力引起横向变形集中而产生的局部剪切破坏。

2.2.5 试样裂缝缓慢延展阶段

该阶段随着试样裂缝延展,由于岩石裂缝端部粘滞效应,断裂速率减缓,表明试样已经形成裂缝格局,不同层理方位试样裂缝延展方向不同,导致试样表面变形规律有所差异,总体上围绕裂缝两侧对称分布。因此,利用岩石横向位移场变形特征能够准确表征裂缝延展特征。

2.3 致密砂岩三点弯加载下应变场演化特征

加载过程中,不同层理方向的致密砂岩SCB试样三点弯断裂过程x轴方向应变场演化分布情况如图4所示。试样剪切应变场演化特征与加载中应力曲线、岩石断裂特征参数存在一定的对应关系,结合加载曲线和剪切应变场的分布演化特征,将加载过程分为5个阶段:① 岩石孔隙压缩阶段。对应试样加载初期即加载曲线的1段,采用位移控制加载时,低载荷下试样即产生明显变形,此阶段表现为岩石内孔隙压密和试样不均匀加载产生的应变局部化集中,应变场局部化区域随机分布。其中层理倾角为 0° 、 30° 时,在试样切口出现应力集中区。② 岩石弹性变形阶段。载荷呈线性加载阶段,此时剪切应变场呈现出分区规律性,试样表面最大主应变的方向呈水平方向对称分布。③ 岩石断裂阶段。对于接近峰值载荷点,此时在试样表面出现明显的应变集中条带,试样表面右上部区域剪切应变场呈现一个与轴向斜切的应变局部集中条带,随着加载继续进行,条带逐渐“细化”并“加深”,岩石表面产出明显的宏观裂隙。④ 裂缝快速延展阶段。对应峰值点以后阶段,试样裂隙逐步扩展失稳

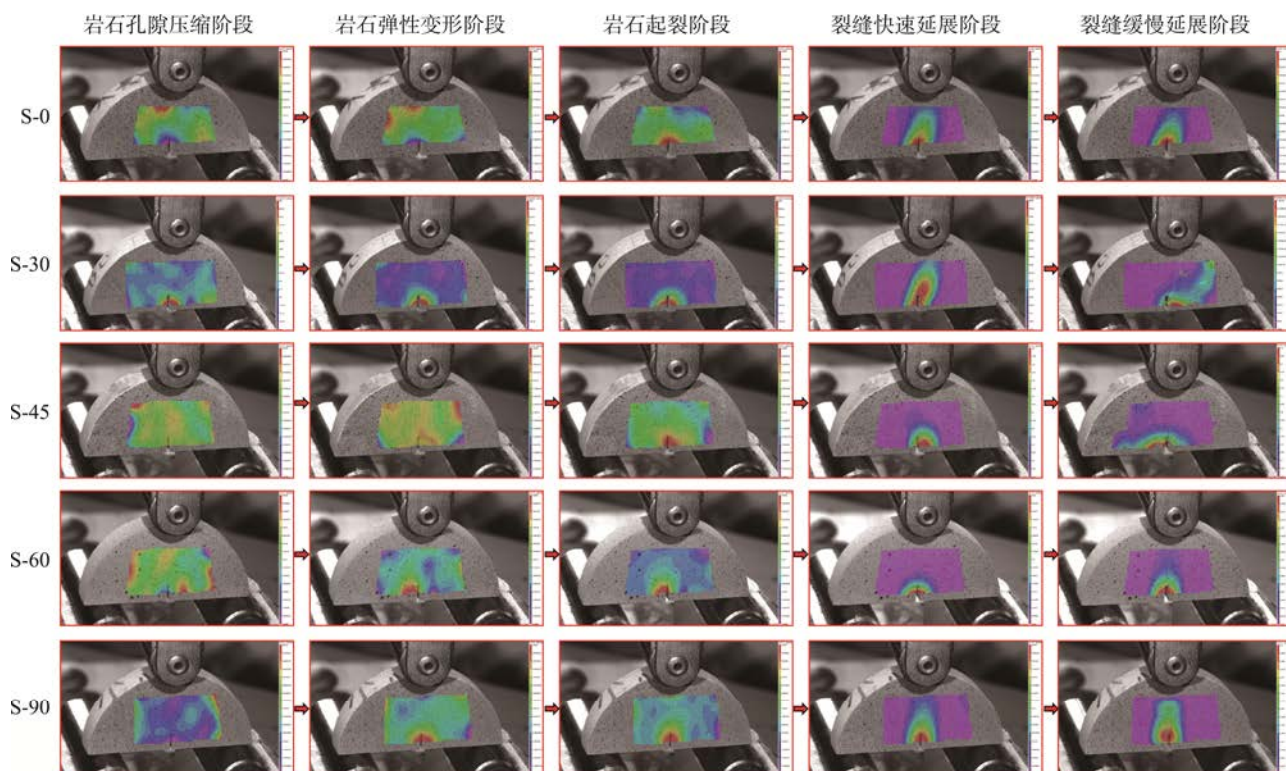


图4 不同层理方向致密砂岩SCB试样断裂过程X轴应变场演化特征

Fig.4 Evolution of x-axis strain field in fracture process of tight sandstone SCB samples with different bedding directions

破坏, 出现明显的破裂区域, 应变场主要集中在试样破裂区域两侧, 破裂区域应变集中程度急剧增大, 表明试样在快速破坏。⑤ 裂缝缓慢延展阶段。对应加载位移载荷曲线的第5阶段, 试样裂隙逐步扩展失稳破坏, 随着断裂裂缝的不断延展, 应变场不断扩张, 指示裂缝前缘推进方向。整体上该阶段x轴上应力场分布特征与上一阶段差别不大, 试样破坏稳定。

2.4 致密砂岩断裂裂缝延展规律及破坏特征

致密砂岩试样三点弯加载下断裂模式主要有纯张型断裂和拉张-剪切断裂。5种类型试样的断裂破坏宏观特征如图5所示。由图5可知, 致密砂岩试样随着层理倾角增大, 裂缝延展方向与轴向加载方位夹角 θ 先增大后减小, 在层理角为45°时, 夹角

最大为17°, 岩石断裂裂缝的走向和应力方位角 β 较大, 裂缝的受控性最差, 层理角30°、60°时, 裂缝走向与轴向载荷夹角约10°。层理倾角在0°和90°时, 为垂向断裂裂缝。

本次试验得知, 致密砂岩断裂形式为纯张型裂缝以及剪切型裂缝, 致密砂岩在准静态加载下断裂形式相对简单, 较难形成复杂裂缝网形式, 主要与试样材料塑性相对较强、刚度低有关, 岩石基质断裂难度低但很难形成高效的体积破碎, 对于动用致密砂岩基质中的油气资源不利, 需要采取增脆、改质等技术手段提升致密砂岩的脆性^[31], 达到提升致密砂岩储层基质压裂的改造效果, 而层理方位对致密砂岩材料断裂裂缝发育及应变、位移变形态演化规律均有关键影响。

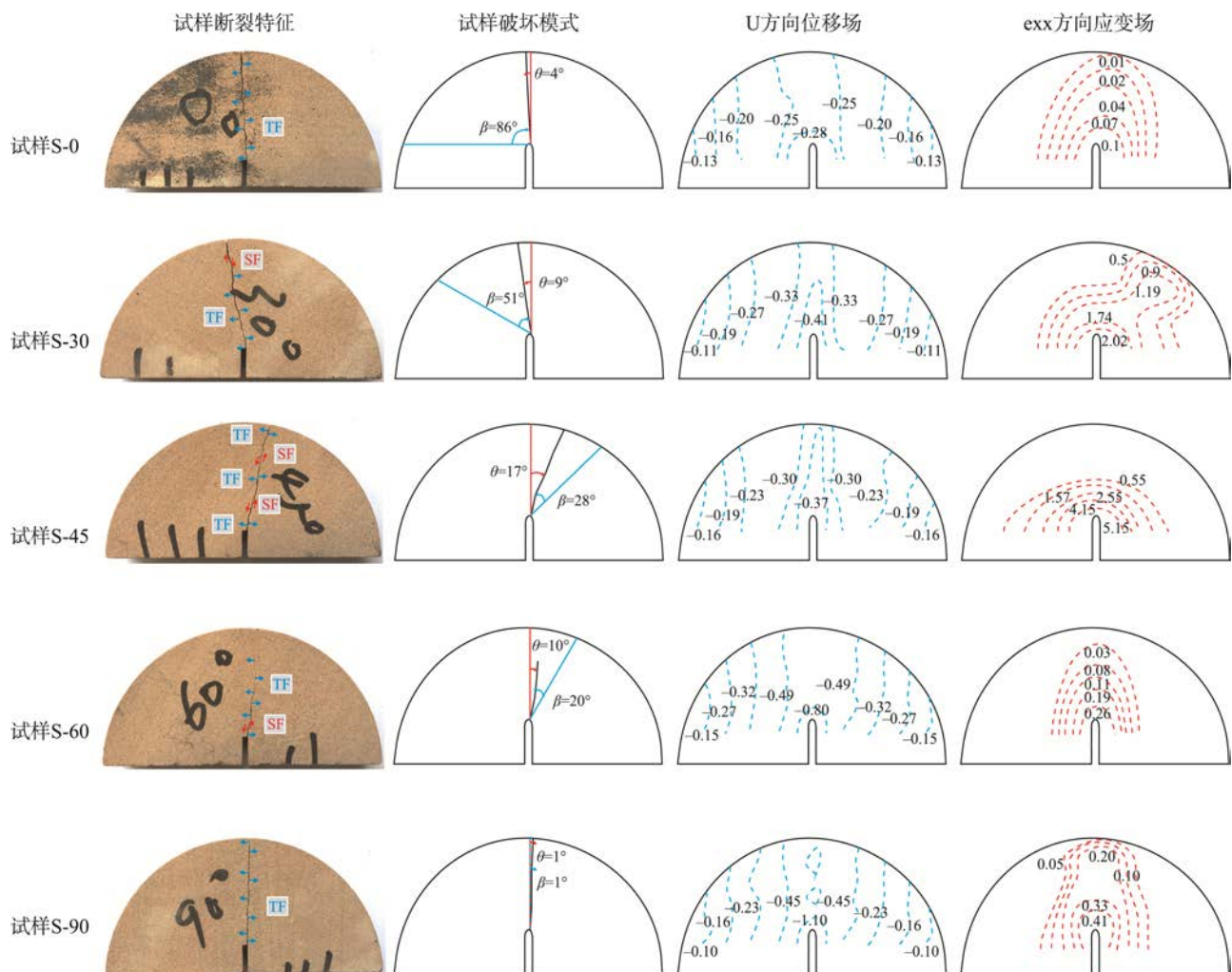


图5 不同层理方位致密砂岩断裂破坏模式及位移场、应变场特征

Fig.5 Failure modes, displacement field and strain field characteristics of tight sandstone in different bedding directions

致密砂岩断裂过程中x轴方向位移场特征显示不同层理方位致密砂岩断裂裂缝走向及开度差异显著(见图6)。三点弯加载条件下试样断裂裂缝形成后,随着层理倾角的增大,位移先增大后减小,整体随着层理角度增加位移增大,表明岩石断裂裂缝的张开度同样先增大后减小,认为当层理角度为45°时,致密砂岩断裂方式为剪切断裂,裂缝开度受垂向载荷挤压作用影响,而在其他相遇角度上裂缝开度基本不受垂向载荷影响,主要受层理面构造的影响。

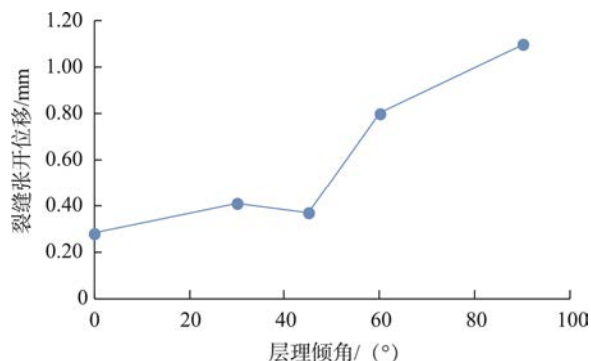


图6 层理倾角对致密砂岩裂缝张开位移的影响

Fig.6 Influence of bedding angle on crack opening displacement in tight sandstone

当层理角度大于60°时,层理控制裂缝开度的效应非常明显。不同层理方位上致密砂岩应变场特征显示,层理方位对致密砂岩断裂应变演化具有显著影响,当致密砂岩试样为纯张性断裂时,试样x轴方向上应变场范围小,仅局限在试样切口两侧较窄范围内,表明试样断裂中主要为切口两侧形变,对较远部位材料的影响不大。而当层理角度为45°时,由图5可知,试样在横向应变很大,且辐射到切口很远位置,表明该层理方向试样三点弯加载下发生剪切断裂破坏,试样的应变影响区域很大,应变场分布特征能客观反映材料的断裂方式,对于分析岩石断裂机制具有重要参考意义。

因此,在储层压裂中,当压裂裂缝与层理等组构角度为45°时,极易形成剪切断裂破坏,一方面相对张性断裂裂缝宽度相对较窄;另一方面压裂裂缝两侧储层岩石的变形大,可能会形成岩石渗透性的变化,影响砂岩基质中油气流体进入压裂裂缝的效率。而在其他相遇角度上,储层压裂裂缝两侧岩石变形小,压裂裂缝扩展中基本不会影响两侧岩石的孔渗性。因此,层理和压裂裂缝的空间关系是致密储层油气渗流效率及产出能力的重要约束条件。

3 分析与认识

3.1 致密砂岩三点弯加载断裂微观机理分析

图7为不同层理方位致密砂岩三点弯加载条件下断裂微观形貌特征,由图7(a)、图7(e)可知,层理倾角为0°和90°时,断口形貌显示致密砂岩成岩矿物发生穿晶断裂,致密砂岩断裂为纯张型断裂,受到拉张应力(红色箭头)作用材料失效断裂,基本上没有剪切应力作用参与,裂缝延展与最大载荷方向基本平行。同时断裂过程中DIC监测结果显示,该方位致密砂岩断裂裂缝部位的横向位移最大,表明裂缝宽度大,有利于提升储层岩石主干压裂裂缝的导流能力。而材料断裂应变方面,该方位试样断裂裂缝两侧应变仅局限在裂缝两侧条带,远端材料应变很小,表明该方位致密砂岩断裂形式为张性断裂。

由图7(b)、图7(d)可知,层理方位为30°及60°时,致密砂岩断口颗粒部分被切穿,还保留了部分原始矿物的晶面,表明该方向上致密砂岩断裂形式为张性断裂和剪切断裂的混合形式,致密砂岩在准静态加载下断裂同时受拉张应力和剪切应力(蓝色箭头)的共同作用,裂缝方位与最大载荷(最大主应力)存在一定的夹角。DIC监测显示该方位试样裂缝两侧的位移场较小,表明裂缝开度较小;与此对应的是,该方位上试样断裂引起的横向应力范围较大,说明岩石断裂对两侧基质的影响很大。

如图7(c)所示,层理方位为45°时,致密砂岩试样断口形貌显示出矿物颗粒断裂和部分晶面的保留,推断试样的断裂形式为穿晶断裂和沿晶断裂混合型,受拉应力和层理剪切应力共同作用,试样断裂裂缝延展方位严重偏离最大载荷方向,压裂断裂引起的裂缝两侧岩石横向应变最强烈,对裂缝两侧岩石基质存在较强附加改造效应。

3.2 致密砂岩断裂过程规律对储层压裂启示意义

层理倾角为0°和90°时,致密砂岩断裂为纯张型断裂,试样断口矿物颗粒发生穿晶断裂形成新生裂缝面,极大消耗外界断裂能。断裂裂缝主要沿最大载荷方向延展,裂缝受控性较好,材料断裂裂缝两侧岩石基质的应变小,表明该方位致密砂岩断裂形式主要为张性断裂。压裂裂缝两侧岩石基质受横向挤压变形程度弱,储层压裂对缝面两侧岩石基质的压缩伤害效应微弱。

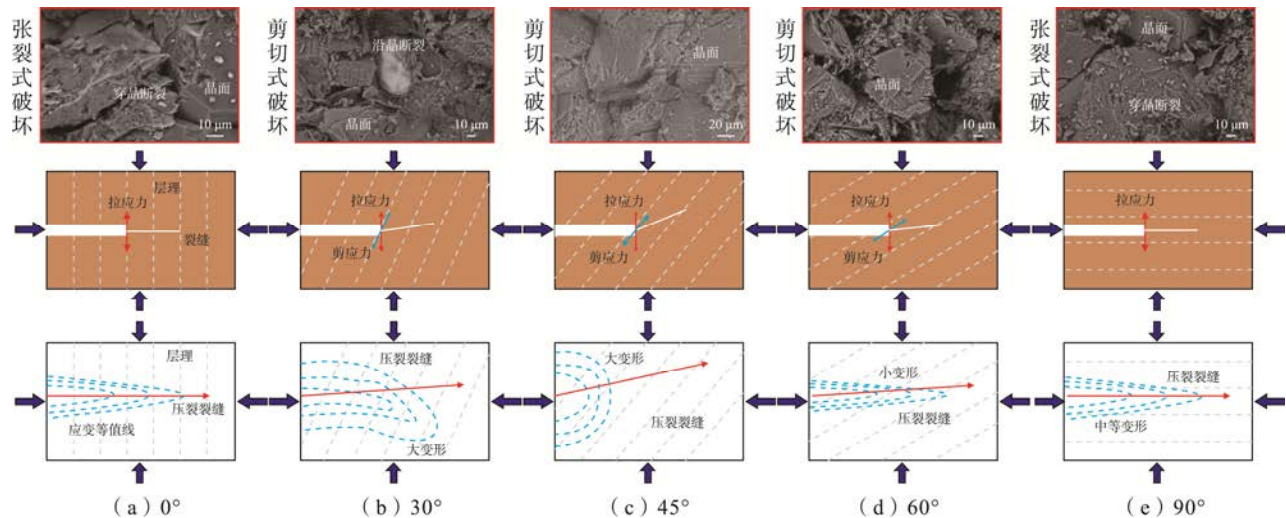


图7 不同层理方向致密砂岩断裂微观形貌与断裂力学模式及裂缝侧变形特征

Fig.7 Fracture micromorphology and mechanics model and fracture side deformation characteristics of tight sandstone in different bedding directions

层理方位为 30° 及 60° 时,致密砂岩断裂形式为张性断裂和剪切断裂的混合形式,裂缝延展同时受应力和岩石组构的影响,裂缝方向预测难度大。对压裂裂缝延展机制分析及效果评价造成困难。该方向上致密砂岩断裂裂缝两侧位移场较小,裂缝开度小,不利于深层非常规储层裂缝的高导流能力建设。而且材料断裂引起横向大变形,会严重影响裂缝两侧岩石基质的孔渗性及应力集中程度,会影响裂缝两侧基质中油气进入压裂裂缝的渗流效率,没有形成整体性的增渗改造。

层理方位为 45° 时,致密砂岩试样断裂裂缝延展方位偏离最大载荷方向角度最大,DIC监测显示此时材料断裂引起的横向位移场最小,表明裂缝宽度窄,不利于压裂裂缝高导流能力形成;裂缝两侧岩石横向应变强烈,压裂过程对裂缝两侧岩石基质的存在严重的压实、储层伤害效应,形成压裂裂缝两侧的低渗透率区带。

部致密油气储层维持裂缝高导流能力有利;而层理角度为 45° 时,横向位移最小,裂缝两侧位移呈带状沿裂缝对称分布,裂缝张开度不理想,制约基质中油气进入裂缝效率。

(3) 数字散斑技术监测结果显示,层理角度为 0° 及 90° 时,试样为纯张型断裂;层理角度为 45° 时,致密砂岩为剪切断裂,随层理角度增大致密砂岩试样断裂裂缝偏斜角先增大后减小,试样断裂裂缝发展中横向位移沿裂缝对称带状分布,x轴上应变场主要围绕裂缝边缘分布。

(4) 层理角度为 45° 时,致密砂岩裂缝延展受到应力和岩石组构的影响,裂缝方向预测难度大,该方向上致密砂岩断裂裂缝两侧位移场较小,裂缝开度小,不利于深层非常规储层裂缝的高导流能力建设。且剪切作用在主干压裂裂缝两侧形成低渗透率伤害区,影响基质油气进入压裂裂缝的效率,未能形成整体增渗改造。

4 结论

(1) 根据不同层理方位致密砂岩SCB试样开展三点弯曲加载位移载荷曲线显示,试样断裂裂缝发展主要包括缺陷压缩、弹性压缩、破裂失效、快速断裂、缓慢破裂这5个阶段,试样断裂后载荷缓慢卸荷指示本次试验的致密砂岩塑性显著。

(2) 数字散斑技术得出层理角度为 0° 、 90° 时,致密砂岩断裂裂缝横向位移大、裂缝开度大,x轴应变分布显示该方位致密砂岩变形量最小,对于深

参考文献:

- [1] 邹才能,朱如凯,白斌,等.致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战[J].矿物岩石地球化学通报,2015,34(1): 3-17. ZOU C N, ZHU R K, BAI B, et al. Significance, geologic characteristics, resource potential and future challenges of tight oil and shale oil[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1): 3-17.
- [2] 付金华,牛小兵,谈卫东,等.鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩油地质特征及勘探开发进展[J].中国石油勘探,2019,24(5): 601-614.

- FU J H, NIU X B, DAN W D, et al. The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang7 member of Mesozoic Yanchang formation, Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 601-614.
- [3] 李传亮, 朱苏阳. 体积压裂分支裂缝的产生条件分析[J]. *天然气勘探与开发*, 2021, 44(01): 71-75.
- LI C L, ZHU S Y. Analysis on the forming conditions of branching fractures in volume fracturing[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2021, 44(1): 71-75.
- [4] 雷群, 翁定为, 才博, 等. 中国石油勘探压裂技术进展、关键问题及对策[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(5): 15-27.
- LEI Q, WENG D W, CAI B, et al. Progress, key challenges and countermeasures of reservoir stimulation technology of PetroChina[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(5): 15-27.
- [5] 蒋廷学, 卞晓冰, 孙川翔, 等. 深层页岩气地质工程一体化体积压裂关键技术及应用[J]. *地球科学*, 2023, 48(1): 1-13.
- JIANG T X, BIAN X B, SUN C X, et al. Key technologies in geology-engineering integration volumetric fracturing for deep shale gas wells[J]. *Earth Science*, 2023, 48(1): 1-13.
- [6] 蒋廷学, 周珺, 廖璐璐. 国内外智能压裂技术现状及发展趋势[J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(3): 1-9.
- JIANG T X, ZHOU J, LIAO L L. Development status and future trends of intelligent fracturing technologies[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(3): 1-9.
- [7] 李强, 尹成, 王俊力, 等. 基于天然裂缝破坏行为的页岩储层压裂微地震事件预测[J]. *石油物探*, 2018, 57(6): 878-883.
- LI Q, YIN C, WANG J L, et al. Prediction of microseismic events in a fractured shale reservoir based on natural fracture failure behavior[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2018, 57(6): 878-883.
- [8] CASELLE C, UMILI G, BONETTO S, et al. Application of DIC analysis method to the study of failure initiation in gypsum rocks[J]. *Géotechnique Letters*, 2019, 9(1): 35-45.
- [9] HAO J W, QIAO L, LI Z J, et al. Study on the fracture behavior of prefabricated fissures granite based on DIC and laser scanning techniques[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2021, 44(5): 1372-1390.
- [10] WU H, ZHAO G Y, LIANG W Z, et al. Experimental investigation on fracture evolution in sandstone containing an intersecting hole under compression using DIC technique[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019: 1-12.
- [11] PAN J L, WU X, GUO Q, et al. Uniaxial experimental study of the deformation behavior and energy evolution of conjugate jointed rock based on AE and DIC methods[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020: 1-16.
- [12] NIE Y J, SU H J, YU L Y, et al. Bonding fracture and deformation behaviors of sandstone-concrete interface subjected to different temperatures under three-point bending[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, 23(4): 1-13.
- [13] XU Y, LIU J Y, YOU Z M, et al. Dynamic mode I fracture properties of saturated white sandstone under ambient sub-zero temperatures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 277: 108987.
- [14] LIU X H, ZHANG K, LIU W L, et al. Influence of weak inclusions on the cracking behavior of a jointed rock mass containing an opening: insights from DIC-based approaches[J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2022, 22(4).
- [15] WANG H C, ZHAO J, LI J, et al. Fracturing and AE characteristics of matrix-inclusion rock types under dynamic Brazilian testing[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022, 157: 105164.
- [16] 张科, 齐飞飞, 陈宇龙. 基于3D打印和DIC技术的裂隙网络模型变形破裂特征及填充物影响效应[J]. *岩土力学*, 2020, 41(8): 2555-2563.
- ZHANG K, QI F F, CHEN Y L. Deformation and fracture characteristics of fracture network model and influence of filling based on 3D printing and DIC technologies[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(8): 2555-2563.
- [17] 杨振, 元宪寅, 冯梦瑶, 等. 基于声发射和DIC特征的层状复合岩石力学损伤试验及模型研究[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(4): 119-126, 133.
- YANG Z, QI X Y, FENG M Y, et al. Mechanical damage test and model study of layered composite rock based on acoustic emission and DIC characteristics[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2019, 40(4): 119-126, 133.
- [18] 邢灏喆, 王明洋, 范鹏贤, 等. 基于高速3D-DIC技术的砂岩动力特性粒径效应研究[J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(11): 46-57.
- XING H Z, WANG M Y, FAN P X, et al. Grain-size effect on dynamic behavior of sandstone based on high-speed 3D-DIC technique[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(11): 46-57.
- [19] LI D Y, ZHU Q Q, ZHOU Z L, et al. Fracture analysis of marble specimens with a hole under uniaxial compression by digital image correlation[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, 183: 109-124.
- [20] 夏开文, 徐颖, 姚伟, 等. 静态预应力条件作用下岩板动态破坏行为试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2017, 36(5): 1122-1132.
- XIA K W, XU Y, YAO W, et al. Experimental study of dynamic fracture behavior of brittle rock plate under static pre-loading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2017, 36(5): 1122-1132.
- [21] GAO G, YAO W, XIA K, et al. Investigation of the rate dependence of fracture propagation in rocks using digital image correlation (DIC) method[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, 138: 146-155.

- [22] XING H Z, ZHANG Q B, RUAN D, et al. Full-field measurement and fracture characterisations of rocks under dynamic loads using high-speed three-dimensional digital image correlation[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 113: 61-72.
- [23] YANG H T, LIN H, WANG Y X, et al. Investigation of the correlation between crack propagation process and the peak strength for the specimen containing a single pre-existing flaw made of rock-like material[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021, 21: 68.
- [24] DONG P, WU B B, XIA K W, et al. Fracture modes of single-flawed rock-like material plates subjected to dynamic compression[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(9): 1-13.
- [25] NATHAN D, MORTEZA N, BENOÎT V, et al. On the link between fracture toughness, tensile strength, and fracture process zone in anisotropic rocks[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 201: 56-79.
- [26] PAN J L, WU X, GUO Q F, et al. Uniaxial experimental study of the deformation behavior and energy evolution of conjugate jointed rock based on AE and DIC Methods[J]. Advances in Civil Engineering, 2020. 8850250.
- [27] ZHANG H, FATICK N, PRATHMESH N P, et al. Analyzing the validity of brazilian testing using digital image correlation and numerical simulation techniques[J]. Energies, 2020, 13(6): 1-18.
- [28] ZUO J P, YAO M H, LI Y J, et al. Investigation on fracture toughness and micro-deformation field of SCB sandstone including different inclination angles cracks[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 208: 27-37.
- [29] 陈立超, 王生维, 张典坤. 层理方位对致密砂岩断裂行为影响及其压裂意义[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增刊2): 689-695.
- CHEN L C, WANG S W, ZHANG D K. Influence of bedding orientation on fracture behavior of tight sandstone and its significance in fracturing[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S2): 689-695.
- [30] DONG W, WU Z M, ZHOU X M, et al. An experimental study on crack propagation at rock-concrete interface using digital image correlation technique[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 171: 50-63.
- [31] 陈立超, 吕帅锋, 张典坤. 致密砂岩I型断裂行为的温度效应研究[J]. 矿业科学学报, 2022, 7(6): 700-709.
- CHEN L C, LYU S F, ZHANG D K. Temperature effect on mode I fracture behavior of tight sandstone[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2022, 7(6): 700-709.

(编辑: 许静 曹梦迪)

(上接第72页)

- [14] BEZAATPOUR J, FATEHIFAR E, RASOULZADEH A. CFD investigation of natural gas leakage and propagation from buried pipeline for anisotropic and partially saturated multilayer soil[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 123940.
- [15] WANG J, YAN Y T, LI J M. Numerical simulation of methane spreading in porous media after leaking from an underground pipe[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2021, 31(1): 367-390.
- [16] DENG Y J, HOU H, FANG L C, et al. Numerical simulation on the dispersion of natural gas releases from a buried pipeline[J]. Heat Transfer Engineering, 2018, 39(7/8): 687-699.
- [17] LIU C W, LIAO Y H, LIANG J, et al. Quantifying methane release and dispersion estimations for buried natural gas pipeline leakages[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 146: 552-563.
- [18] LU L, ZHANG X X, YAN Y T, et al. Theoretical analysis of natural-gas leakage in urban medium-pressure pipelines[J]. Journal of Environment and Human, 2014, 1(2): 71-86.
- [19] BU F X, LIU Y, LIU Y B, et al. Leakage diffusion characteristics and harmful boundary analysis of buried natural gas pipeline under multiple working conditions[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 94: 104047.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市工程管线综合规划规范: GB 50289—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code of urban engineering pipeline comprehensive planning: GB 50289-2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [21] 邵杰, 李晓花, 郭振江, 等. 不同湍流模型在管道流动数值模拟中的适用性研究[J]. 化工设备与管道, 2016, 53(4): 66-71.
- SHAO J, LI X H, GUO Z J, et al. Research of applicability of several turbulence models in numerical simulation for flow in pipeline[J]. Process Equipment & Piping, 2016, 53(4): 66-71.
- [22] 肖榕. 直埋燃气管道在土壤中泄漏扩散模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- XIAO R. Simulation study on leakage and diffusion of buried gas pipeline in soil[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [23] HUANG L J, PEI S F, WANG Y, et al. Assessment of flammability and explosion risks of natural gas-air mixtures at high pressure and high temperature[J]. Fuel, 2019, 247: 47-56.

(编辑: 董怀民 王克楠)