

引用格式:丁然,张峰,王勇,等.准中深层砂岩脆性及其对岩石破裂模式的影响规律[J].油气地质与采收率,2024,31(3):54-62.

DING Ran, ZHANG Feng, WANG Yong, et al. Brittleness of deep sandstone in central Junggar Basin and its influence on fracture modes of rocks[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2024, 31(3): 54-62.

## 准中深层砂岩脆性及其对岩石破裂模式的影响规律

丁然<sup>1</sup>,张峰<sup>1</sup>,王勇<sup>2</sup>,李晓倩<sup>1</sup>,林柏华<sup>1</sup>

(1.中国石化胜利油田分公司石油工程技术研究院,山东东营257000;

2.中国石化胜利油田分公司西部油气勘探项目部,山东东营257000)

**摘要:**致密砂岩储层由于埋深大,受机械压实、溶蚀、交代等成岩作用的强烈影响,岩性特征十分复杂。随着油气资源勘探开发不断向深部储层发展,深层高地应力、高围压对储层脆塑性的影响严重左右了水力压裂效果和油气资源产量。准中深层致密砂岩油藏储量丰富,但由于储层埋深大、物性差且围压异常高,同时对其原位地质力学岩心脆性变化规律认识受限,使得传统油气开采手段无法满足生产需求。为此,结合物理实验和数值模拟技术,开展准中深层岩心的岩石力学特征、脆塑性转化、破裂模式及声发射特征差异性研究。结果表明:随着围压增加,岩石从脆性破坏逐渐过渡为塑性破坏,且破裂模式由劈裂破坏向剪切破坏转变,砂岩脆性减弱;基于能量平衡方法和归一化处理的6种脆性指数所反映的砂岩脆性总体上呈下降趋势,但不同脆性指数的数值范围以及与脆性的相关性各异。不同脆性数值岩心模型的三轴压缩实验表明:当脆性矿物含量较低时,岩石呈现单斜面剪切破坏;随着脆性矿物含量增加,岩石破裂表现为多破裂面复合破坏模式。岩石破裂过程的声发射特征与其脆性存在相关性,主要呈现群震型、前震-主震-后震型和主震型3种模式。

**关键词:**深层砂岩;高地应力;脆性;破裂模式;声发射特征

文章编号:1009-9603(2024)03-0054-09

DOI:10.13673/j.pgre.202305028

中图分类号:TE357.1

文献标识码:A

## Brittleness of deep sandstone in central Junggar Basin and its influence on fracture modes of rocks

DING Ran<sup>1</sup>, ZHANG Feng<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>2</sup>, LI Xiaoqian<sup>1</sup>, LIN Baihua<sup>1</sup>

(1. Petroleum Engineering Technology Research Institute of Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China; 2. Western Oil and Gas Exploration Project Department, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

**Abstract:** The tight sandstone reservoirs are deeply buried and strongly influenced by diagenetic processes such as mechanical compaction, dissolution, and metasomatism. Therefore, their lithological characteristics are complex. As the exploration and development of oil and gas resources go towards deeper reservoirs, the high ground stress and high confining pressure in deep layers have a significant impact on the brittleness and plasticity of reservoirs, which affects the hydraulic fracturing effect and oil and gas production. The deep tight sandstone reservoir in central Junggar Basin has abundant reserves. However, traditional oil and gas extraction methods fail to meet production needs due to the deep burial depth, poor physical properties, and abnormally high confining pressure of the reservoir, as well as limited understanding of the brittleness variation law of its in-situ geomechanical core. To this end, through physical experiments and numerical simulation techniques, this paper studies the differences in rock mechanics characteristics, brittleness and plasticity transformation, fracture modes, and acoustic emission characteristics of deep rock cores in the central

收稿日期:2023-05-30。

作者简介:丁然(1990—),男,江苏丰县人,副研究员,硕士,从事非常规储层改造技术研究工作。E-mail:dingran\_4028@sina.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“区域注浆承压底板劈裂损伤机理及浆液扩散半径识别方法研究”(52204089)和“注浆裂隙岩体冻融侵蚀及渗透性演化机理研究”(52374082)。

Junggar Basin. The results show that as the confining pressure increases, the rock transitions from brittle failure to plastic failure, and the fracture mode changes from splitting failure to shear failure, weakening the brittleness of sandstone. The overall degree of sandstone brittleness reflected by the six brittleness indices based on the energy balance method and normalization treatment decreases, but the numerical ranges of different brittleness indices and their correlation with brittleness vary. The triaxial compression test experiments of core models with different brittle values show that when the content of brittle minerals is low, the rock exhibits single oblique shear failure. As the content of brittle minerals increases, rock exhibits a composite failure mode with multiple fracture surfaces. There is a correlation between the acoustic emission characteristics during rock fracture and its brittleness, involving three modes: swarm type, foreshock - main shock - aftershock type, and main shock type.

**Key words:** deep sandstone; high ground stress; brittleness; fracture mode; acoustic emission characteristics

随着油气勘探开发范围的不断延伸,深层、超深层储层逐渐成为油气资源增储上产的重要领域<sup>[1-3]</sup>。在深层、超深层地应力条件下,储层岩体的力学响应表现出由脆性到塑性转化的特征<sup>[4-6]</sup>。脆性是反映岩石破裂特征的综合参数<sup>[7-9]</sup>,脆性指数已广泛应用于各类岩石工程<sup>[10-12]</sup>,在油气开发领域常作为评价岩体能否形成复杂裂缝的重要指标。目前岩石脆性并无统一定义和评价标准,中外研究者对脆性的理解存在差异<sup>[13-14]</sup>。EVANS等将材料破坏时变形小于1%定义为脆性,1%~5%为脆性-延性过渡,大于5%为延性<sup>[15]</sup>。TARASOV等认为脆性是在自身天然非均质性和外在特定加载条件下材料弹性能积累,并在峰后破坏过程中表现出自我维持宏观破坏的能力<sup>[16]</sup>。根据相关学者对脆性的定义,目前存在数十种脆性指数<sup>[17]</sup>,按照评价参数的来源可分为能量平衡<sup>[16]</sup>、矿物组分<sup>[18]</sup>、岩石力学参数<sup>[19]</sup>、应力-应变特征<sup>[20]</sup>和硬度<sup>[21]</sup>等。上述定义出自不同学科或不同角度,但未考虑微观破裂机制和综合力学特性。MUNOZ等认为岩石的损伤破裂在本质上是由能量的积累、转换、耗散和释放等驱动的,岩石的脆性特征对岩石的损伤破裂会造成影响,因此应力-应变曲线所反映的能量演化特征可以用来表征岩石的脆性<sup>[22]</sup>。KIVI等指出峰前阶段累积弹性能的比例和峰后阶段耗散能的释放速率与岩石脆性密切相关<sup>[23]</sup>。CHEN等使用损伤演化率定义了脆性指数<sup>[24]</sup>。分析完整的应力-应变曲线所反映的能量平衡和损伤演化过程,有助于深入了解岩石变形和破坏机制,并建立合理的脆性指数。目前基于应力-应变曲线的储层脆性评价模型被认为是较为准确和合理的,因此近年来得到了广泛关注和迅速发展<sup>[22-23]</sup>。

准中深层致密砂岩油藏储量丰富,主要分布于征沙村、永进和莫西庄等油田。研究区深度差异较大,但以6 500~7 800 m为主,储层具有埋深大、物性差、异常高压、敏感性强、自然产能低等特点。深

层油藏压裂普遍面临裂缝净压力小、压力窗口有限的难题,导致传统油气开采手段无法满足生产需求,其原因之一是对准中深层砂岩原位地质力学条件下的岩石脆塑性转化规律认识不清。为此,笔者基于准中深层砂岩的岩石力学特征,尝试浅析其脆塑性转化规律,以期为岩石力学参数评价和深部砂岩脆性特征分析提供依据,并对现场压裂改造的优化设计提供指导。

## 1 岩石力学特征

### 1.1 实验样品及装置

实验用岩心取自新疆准噶尔盆地中部油区准中1区块X1井5 225~5 229 m和X2井4 254~4 270 m及4 291~4 296 m井段。用于三轴压缩实验的圆柱岩心直径为25 mm,高度为50 mm,若样品高度不足时尽量接近50 mm。采用仪器为Rockman岩石力学三轴实验仪(图1),包括常规轴向加载系统、流变轴向加载系统和围压加载系统,能够完成复杂路径下的单轴、三轴、剪切和流变实验,轴压为0~1 200 kN,围压为0~100 MPa。

### 1.2 实验结果分析

从不同砂岩应力-应变曲线及破裂模式(图2)可以看出,灰砂岩三轴压缩实验过程中岩心经历了压密阶段、弹性阶段、塑性阶段3个阶段,而三轴压



图1 Rockman岩石力学三轴实验仪

Fig.1 Rockman triaxial tester for rock mechanics

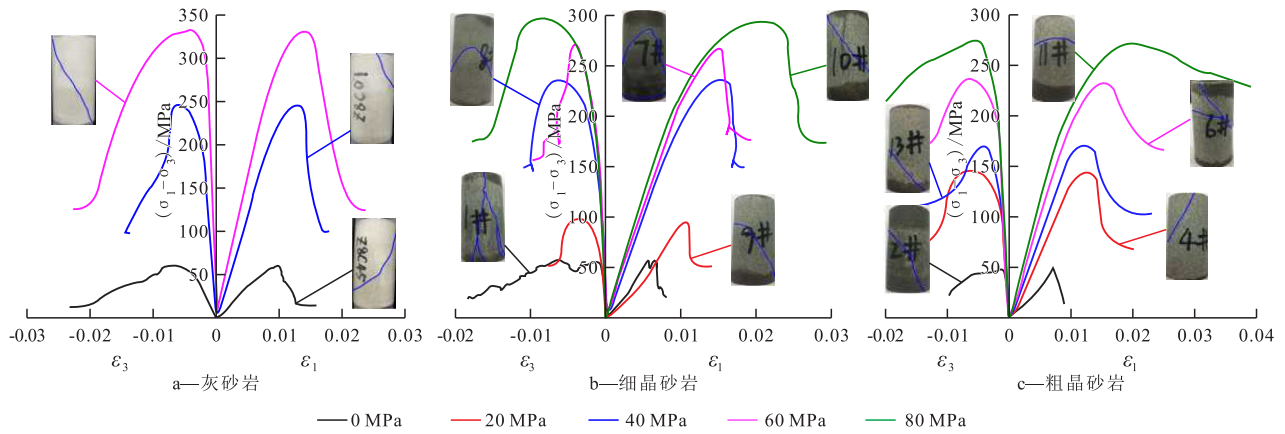


图2 不同砂岩应力-应变曲线及破裂模式

Fig.2 Stress-strain curves and fracture modes of different sandstones

缩条件下压密阶段不明显,岩心破裂模式以剪切破坏为主;随着围压增大,峰前应力-应变曲线斜率逐步增大,但破坏前的塑性阶段也更加显著,围压增大使得峰后应力跌落速率更为缓慢,表明灰砂岩塑性随着围压增大而增大(图2a)。细晶砂岩单轴压缩条件下岩心破裂模式以劈裂破坏为主,主要由贯穿整个岩心的高角度劈裂裂纹和一条斜向剪切裂纹导致,局部产生多条伴生裂纹,表现出强脆性特征;随着围压增大,破裂模式转为单斜面剪切破坏,说明脆性变弱(图2b)。粗晶砂岩整体上呈现斜面剪切破坏,单轴压缩条件下仍为单斜面剪切破坏,说明其脆性比细晶砂岩弱;随着围压增大,岩心应力-应变曲线呈现峰前屈服阶段显著、峰后应力跌落速率缓慢的特征,破裂模式由劈裂破坏向剪切破坏转变,脆性减弱(图2c)。

根据应力-应变曲线计算得出准中1区块不同砂岩的基本力学参数(表1)。总体上,在高围压条件下,砂岩的三轴抗压强度较高,且随着围压增大,其抗压强度和残余强度显著增大。

## 2 砂岩脆性特征分析

### 2.1 脆性指数表征

随着围压增大,岩石从脆性破坏逐渐向塑性流动过渡,破坏前的应变也逐渐增大。围压对不同类型岩石的变形影响虽然程度不同,但影响的总趋势却是一致的,其本质是反映地应力随储层深度增加而带来的力学效应。从准中1区块X1井基于动态弹性参数的砂岩脆性指数(图3)可以看出,储层深度为5 330~5 380 m时,脆性指数下降约6%,这对

表1 准中1区块不同砂岩基本力学参数

Table1 Basic mechanical parameters of different sandstones in Block 1 of central Junggar Basin

样品编号	岩性	围压/MPa	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	抗压强度/MPa	残余强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
1	灰砂岩	0	2.24	60.3	17.8	7.1	0.163	20.7	36.5
2		30	2.23	216.7	82.7	23.7	0.171		
3		40	2.34	244.1	101.6	26.0	0.207		
4		60	2.27	334.4	127.9	33.3	0.223		
5	细晶砂岩	0	2.26	57.2	19.4	12.6	0.149	23.6	31.3
6		20	2.38	96.2	51.3	18.2	0.178		
7		40	2.44	240.7	149.5	24.7	0.208		
8		60	2.41	269.8	156.5	28.6	0.217		
9	粗晶砂岩	80	2.29	296.5	173.8	31.5	0.259	20.1	34.2
10		0	2.39	49.1	14.8	10.6	0.137		
11		20	2.34	144.2	68.8	19.6	0.151		
12		40	2.40	171.4	102.5	24.1	0.191		
13	粗晶砂岩	60	2.37	234.1	168.1	26.9	0.255	20.1	34.2
14		80	2.42	273.6	228.6	30.8	0.309		

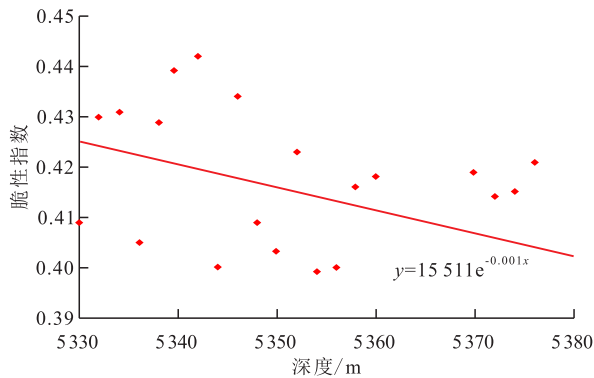


图3 准中1区块X1井基于动态弹性参数的砂岩脆性指数  
Fig.3 Brittleness index of sandstone based on dynamic elastic parameters in Well X1 in Block 1 of central Junggar Basin

压裂效果势必具有重要影响。

基于静态岩石力学参数分析灰砂岩和细晶砂岩的脆性指数。由于计算脆性指数的方法繁多,选取了具有代表性且基于能量平衡方法的  $BI_1^{[25]}$ ,  $BI_2^{[26]}$ ,  $BI_3^{[27]}$ ,  $BI_4^{[28]}$ ,  $BI_5^{[29]}$ 等5种脆性指数进行对比分析。

岩石损伤破裂过程由于受其脆性的影响,能量演化特征可由应力-应变曲线反映。岩石损伤破裂过程中特征点的应力应变及其所对应的应变能水平是决定岩石脆性的基本要素。通过综合分析应力-应变曲线的峰前和峰后的能量演化特征可评估脆性。脆性是岩石在其应力达到峰前所储存的大量弹性能,在峰后短时间内迅速释放的内在表征参数。因此,脆性指数的定义需综合考虑峰前和峰后阶段的能量耗散特征,才能使评价结果更为合理。MUNOZ等指出定义岩石脆性时峰前和峰后阶段的能量耗散特征不应单独考虑,而应视为一个整体<sup>[22]</sup>。峰前阶段积累的弹性能越多,且峰后阶段释放的弹性能越多,维持破坏所需的额外能越少,则岩石脆性越强。因此,结合岩石峰前阶段储存弹性能的能力和峰后阶段自我维持完全破坏的能力评价其脆性。脆性岩石通常表现出以下特征:①峰前阶段储存弹性能的能力强,耗散能占比小,损伤较小。②岩石破裂更多地依赖于峰前弹性能的释放,而非额外能的补充。③峰后弹性能释放得更快更彻底,损伤程度迅速加大。基于上述能量耗散过程分析,提出新的脆性指数,其表达式为:

$$BI_N = BI_{pre} \times BI_{post} \quad (1)$$

其中:

$$BI_{pre} = \frac{dW_{et}}{dW_p + dW_r} \quad (2)$$

$$BI_{post} = \frac{dW_{et} - dW_{er}}{dW_r} \quad (3)$$

$$dW_{et} = \frac{1}{2E} \sigma_f^2 \quad (4)$$

$$dW_{er} = \frac{1}{2E} \sigma_r^2 \quad (5)$$

$$dW_p = dW_t - dW_{et} = \int_0^{\epsilon_r} \sigma d\epsilon - \frac{1}{2E} \sigma_f^2 \quad (6)$$

$$dW_r = dW_{et} - dW_a - dW_{er} = \frac{1}{2E} (\sigma_f^2 - \sigma_r^2) + \int_{\epsilon_r}^{\epsilon_t} \sigma d\epsilon \quad (7)$$

由于不同脆性指数的数值范围以及与脆性的相关性各不相同,需对各脆性指数进行归一化处理。

将  $BI_N$ ,  $BI_1$ ,  $BI_3$  和  $BI_4$  等负相关指标进行归一化处理,其表达式为:

$$BI = \frac{BI - BI_{min}}{BI_{max} - BI_{min}} \quad (8)$$

将  $BI_2$  和  $BI_5$  等正相关指标进行归一化处理,其表达式为:

$$BI = \frac{BI_{max} - BI}{BI_{max} - BI_{min}} \quad (9)$$

由三轴压缩条件下基于静态岩石力学参数的岩心脆性指数(表2)可以看出,脆性指数  $BI_2$  和  $BI_3$  均大于1,而其他脆性指数均为0~1。随着围压增大,砂岩脆性指数呈现规律性变化。

## 2.2 不同砂岩的脆性特征

从表2可以看出,6种脆性指数所反映的砂岩脆性随着围压增大呈下降趋势,表明6种脆性指数对不同围压下砂岩的脆性评价均适用。当围压从0 MPa增至60 MPa时,灰砂岩、细晶砂岩的脆性指数  $BI_N$  分别从0.452,0.567降至0.168,0.285。从能量角度而言,随着围压增大,灰砂岩在峰前阶段储存弹性能和峰后阶段消耗弹性能的能力减弱(图4a),导致峰前耗散能占比增大,峰后弹性能释放程度减小,因此脆性降低。从图4b可以看出,脆性指数  $BI_2$ — $BI_5$  和  $BI_N$  均显示细晶砂岩的脆性随着围压增

表2 基于静态岩石力学参数的岩心脆性指数

Table2 Brittleness index of rock cores based on static rock mechanics parameters

岩性	$\sigma_3$ /MPa	$BI_1$	$BI_2$	$BI_3$	$BI_4$	$BI_5$	$BI_N$
灰砂岩	0	0.724	1.377	0.652	0.722	1.536	0.452
	30	0.680	1.354	0.616	0.750	1.548	0.363
	40	0.607	1.405	0.547	0.692	1.715	0.275
	60	0.550	1.595	0.466	0.541	2.166	0.168
细晶砂岩	0	0.891	1.312	0.764	0.936	1.355	0.567
	20	0.788	1.452	0.566	0.924	1.637	0.452
	40	0.654	1.415	0.436	0.883	1.909	0.305
	60	0.586	1.493	0.432	0.872	1.998	0.285
	80	0.430	1.512	0.334	0.625	2.532	0.135



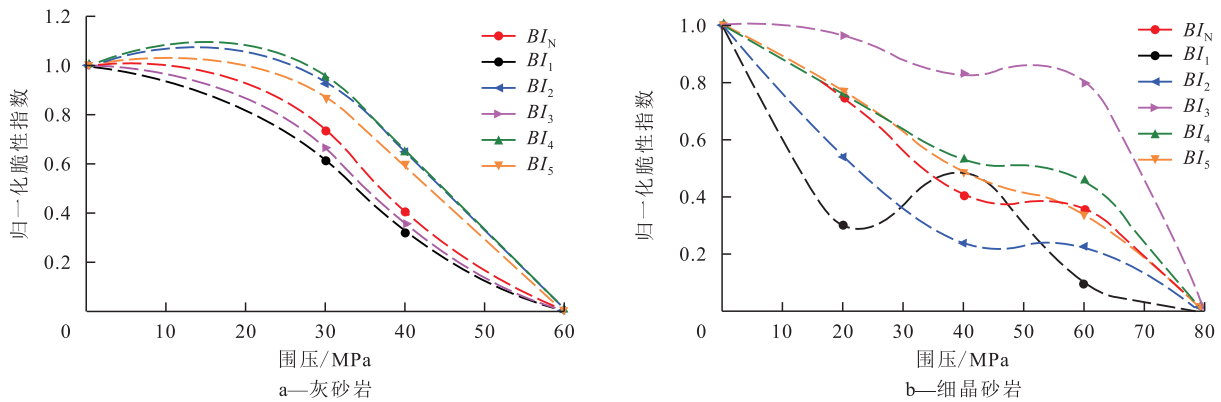


图4 准中1区块不同砂岩归一化脆性指数与围压的关系

Fig.4 Relationship between normalized brittleness index and confining pressure of different sandstones in in Block 1 of central Junggar Basin

大而降低,与实验结果所显示的岩心破裂特征相吻合。脆性指数 $BI_1$ 对20 MPa围压下的细晶砂岩脆性程度评价明显偏低,原因是 $BI_1$ 仅考虑了峰前阶段的脆性特征,忽略了峰后阶段脆性对整体脆性指数的影响,说明综合考虑峰前和峰后阶段的能量演化特征能够提高脆性评价的合理性。对6种脆性指数的归一化处理便于从数值上直接对比判断岩石脆性的相对程度。在围压为40和60 MPa下,细晶砂岩的脆性指数 $BI_2$ 、 $BI_3$ 、 $BI_4$ 和 $BI_N$ 的应力-应变曲线形态相似,说明2种压力下的砂岩脆性较为接近,而脆性指数 $BI_1$ 和 $BI_5$ 未能体现这一特征,说明二者在该条件下的适用性较差。

从图4可以看出,以归一化脆性指数0.4为界限,当围压为30~40 MPa时,岩心即进入低脆性区间,但不同岩性表现出一定差异,且脆性指数与围压呈非线性关系。不同岩性对围压表现出不同的敏感性,当围压较低时,灰砂岩的脆性对围压并不敏感,超过30 MPa后,其脆性指数急剧下降。

### 3 岩石破裂特征

#### 3.1 矿物组分特征

采用X射线衍射仪对准中1区块不同砂岩矿物组分进行分析,由图5可以看出,不同深度的砂岩矿物组成存在显著差异,石英、斜长石和黏土矿物是砂岩基质的主要矿物组分,其中石英含量为19.48%~40.12%,平均为32.6%;斜长石含量为26.53%~48.21%,平均为33.76%;黏土矿物含量为5.16%~27.7%,平均为15.98%。黏土矿物主要由伊利石、高岭石、绿泥石和伊/蒙间层组成,其中绿泥石含量最高,平均为33.5%;伊/蒙间层次之,平均含量为33%;高岭石平均含量为7.0%。由上可知,不同砂岩的脆

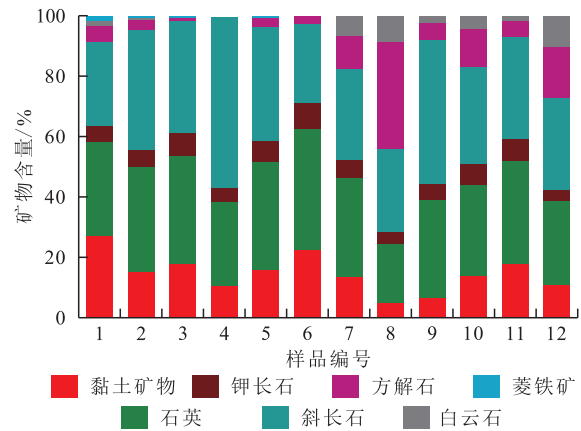


图5 准中1区块不同砂岩矿物组分特征

Fig.5 Characteristics of mineral components of different sandstones in Block 1 of central Junggar Basin

性矿物组分平均含量为82.34%,说明各岩石矿物组分的脆性较强。在深层条件下储层压裂改造的效果不理想,主要是因为深层的高地应力、高围压导致的岩石脆性较差。

#### 3.2 细观力学参数标定

利用数值模拟方法分析脆性对岩心破裂特征的影响。建立圆柱体数值岩心模型(图6a),其直径为25 mm,高度为50 mm,尺寸与物理岩心相同,划分为502 400个有限元网格,并采用加载速率为0.002 mm/步的位移加载方式开展单轴压缩数值模拟,直至数值岩心完全破裂,之后输出岩心破裂模式和应力-应变曲线等信息。从物理岩心和数值岩心的破裂模式及应力-应变曲线(图6)可以看出,物理岩心与数值岩心的破裂模式和应力-应变曲线均比较吻合,由此获取砂岩基质的细观力学参数。

#### 3.3 岩石脆性对破裂模式和声发射特征的影响

##### 3.3.1 破裂模式

为了探究岩石脆性对破裂模式和声发射特征的影响,采用RFPA3D-HF建立脆性矿物含量分别

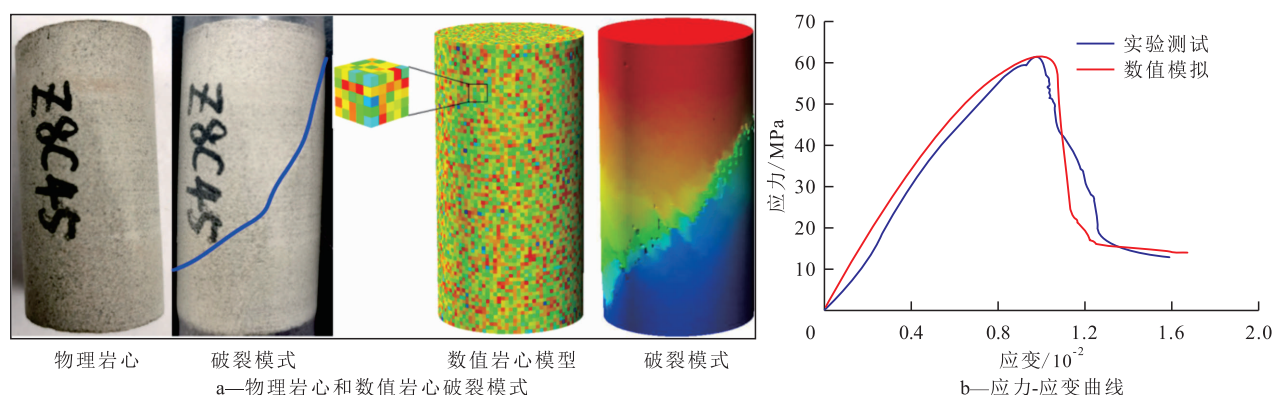


图6 物理岩心和数值岩心破裂模式及应力-应变曲线对比

Fig.6 Comparison of fracture modes and stress-strain curves between physical core and numerical core

为0%,20%,50%,80%和100%等5个数值岩心模型并开展单轴压缩数值实验。假设砂岩岩心仅由脆性矿物和延性矿物组成,且所有矿物具有相同的细观力学参数,并均在岩心内部随机分布。5个数值岩心模型尺寸、网格划分和加载条件与图6a中的数值岩心模型一致。根据脆性矿物和延性矿物的力学特性,数值岩心模型细观力学参数如表3所示。

从不同脆性矿物含量数值岩心的应力-应变曲线及破裂模式(图7)可以看出,随着脆性矿物含量降低,岩心的弹性模量降低,峰值应变和残余强度增加,应力-应变曲线呈现明显的塑性特征,岩心脆性降低,塑性增加,这与岩石脆性评估的理论分析和实验结果一致。当脆性矿物含量较低时,岩石呈现单斜面剪切破坏;随着脆性矿物含量增加,岩石

表3 数值岩心模型细观力学参数

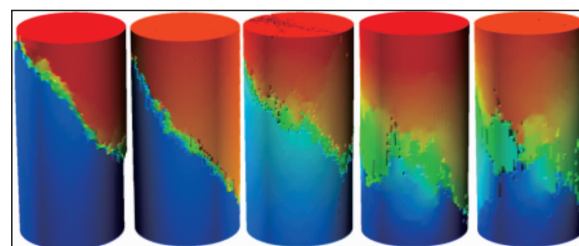
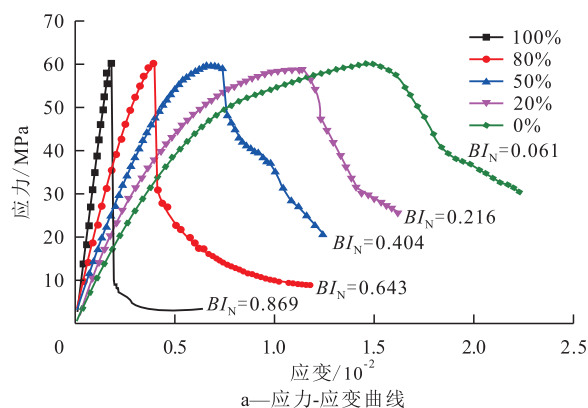
Table 3 Microscopic mechanical parameters of numerical core model

矿物类型	弹性模量/ GPa	单轴抗压 强度/MPa	均质度系数	压拉比	内摩擦角/ (°)	泊松比	残余强度 系数	极限拉应变 系数	极限压应变 系数
脆性矿物	45	250	1.85	20	38	0.11	0.02	5	100
延性矿物	11	250	1.85	20	30	0.28	0.3	5	100

破裂表现为多破裂面复合破坏模式。分析认为,应力加载初期容易在矿物颗粒尖端和边缘处出现应力集中,裂缝趋向于在这些部位的附近区域成核至开裂,随着应力不断加载,裂缝不断延伸和拓展且相邻裂缝末端应力场叠加,由此发生交汇,最终形成较为密集的裂缝网络。高脆性矿物含量的岩石内部应力集中现象越普遍,裂缝开裂点越密集。

### 3.3.2 声发射特征

从不同脆性矿物含量数值岩心的声发射特征及应力-应变曲线(图8)可以看出,岩石破裂过程的声发射模拟与其脆性存在相关性,即随着岩石脆性增强,声发射事件集中度变高。当脆性矿物含量为0%时,加载全过程均有一定数量的声发射事件产生,声发射事件数无明显峰值和低谷,呈现群震型模式;当脆性矿物含量增至20%时,加载初期声发射事件较少,轴向应力达到峰值时声发射事件数也增至峰值,峰后阶段声发射事件数随应力跌落而缓慢下降,岩石破裂全过程声发射模式呈现前震-主震-后震型;当脆性矿物含量为50%时,声发射模式也为前震-主震-后震型,但峰值前后的声发射事件



图片从左到右脆性矿物含量依次为0%, 20%, 50%, 80%, 100%  
b—破裂模式

图7 不同脆性矿物含量数值岩心单轴压缩实验  
Fig.7 Uniaxial compression test of numerical cores with different brittle mineral contents

数集中度更高;当脆性矿物含量分别增至80%和100%时,加载初期仅有少量声发射事件出现,轴向应力达到峰值时声发射事件数呈突然陡增,说明岩石结构性破裂突然发生,而峰后阶段几乎无声发射事件产生,说明脆性岩石在峰前阶段出现少量损伤或损伤不明显,加载至峰值强度时突然发生彻底破裂,释放大量声发射信号,此时声发射事件集中度显著增高,声发射模式为主震型。在相同加载条件下,低脆性岩石声发射模式为群震型,中等脆性岩石为前震-主震-后震型,高脆性岩石为主震型。

### 4 结论

砂岩单轴/三轴压缩实验表明岩石破裂模式以剪切破坏为主。岩石抗压强度参数与围压成正比

关,破裂模式由劈裂破坏向剪切破坏转变。砂岩塑性与围压成正比,砂岩岩心应力-应变曲线呈现峰前曲线斜率逐步增大,但破坏前的峰前屈服阶段也更加显著,峰后应力跌落更为缓慢。砂岩脆性指数随围压增大总体呈下降趋势,脆性指数与围压呈非线性关系,不同岩性对围压的敏感性不同。当砂岩脆性矿物平均含量为82.34%时,脆性较强,但超深层条件下储层压裂效果欠佳,其原因为高地应力、高围压导致岩石脆性较差。脆性岩石在外荷载作用下容易发生瞬时剧烈破坏,伴随弹性能突然释放,并呈现多破裂面复合破坏模式;而延性岩石通常表现为渐进式破坏,其内部能量耗散缓慢且破裂面单一。相同加载条件下,低脆性岩石声发射模式为群震型,中等脆性岩石为前震-主震-后震型,高脆性岩石为主震型。

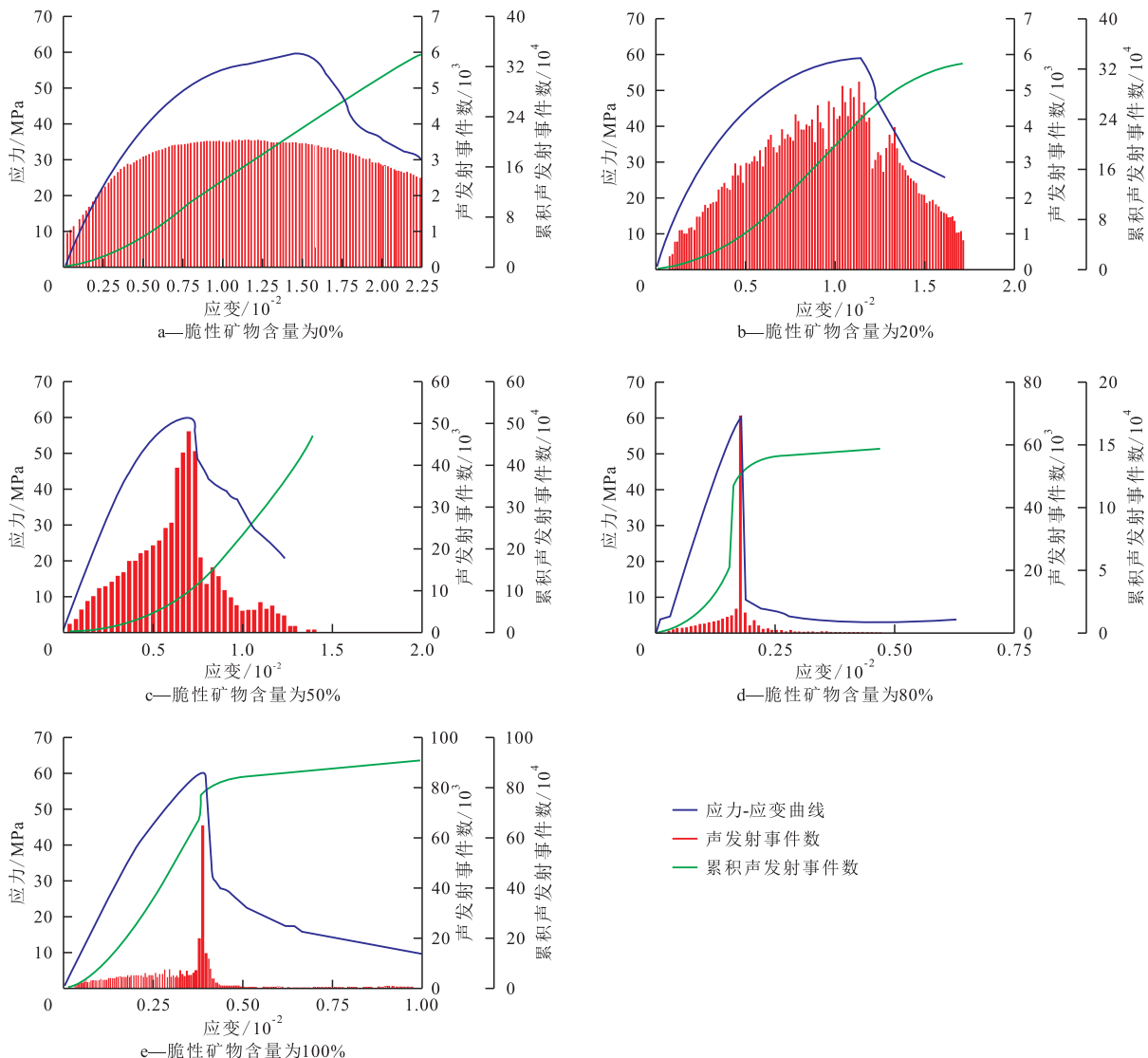


图8 不同脆性矿物含量数值岩心的声发射特征及应力-应变曲线

Fig.8 Acoustic emission characteristics and stress-strain curves of numerical cores with different brittleness mineral contents

## 符号解释

$BI$  —— 脆性指数;  
 $BI_1, BI_2, BI_3, BI_4, BI_5$  —— 5种脆性指数;  
 $BI_N$  —— 本文提出的脆性指数;  
 $BI_{post}$  —— 峰后脆性指数;  
 $BI_{pre}$  —— 峰前脆性指数;  
 $E$  —— 弹性模量, MPa;  
 $W_a$  —— 额外能, J;  
 $W_{cr}$  —— 残余弹性能, J;  
 $W_{et}$  —— 峰前弹性能, J;  
 $W_p$  —— 峰前耗散能, J;  
 $W_r$  —— 峰后断裂能, J;  
 $W_t$  —— 峰前输入能, J;  
 $\epsilon$  —— 应变;  
 $\epsilon_1$  —— 最大主应变;  
 $\epsilon_3$  —— 最小主应变;  
 $\epsilon_f$  —— 峰值应变;  
 $\epsilon_r$  —— 残余应变;  
 $\sigma$  —— 应力, MPa;  
 $\sigma_1$  —— 最大主应力, MPa;  
 $\sigma_3$  —— 最小主应力, MPa;  
 $\sigma_f$  —— 峰值应力, MPa;  
 $\sigma_r$  —— 残余应力, MPa。

## 参考文献

- [ 1 ] 雷群, 胥云, 杨战伟, 等. 超深油气储集层改造技术进展与发展方向[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 193-201.  
 LEI Qun, XU Yun, YANG Zhanwei, et al. Progress and development direction of stimulation techniques for ultra-deep oil and gas reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 193-201.
- [ 2 ] 关晓东, 郭磊. 深层—超深层油气成藏研究新进展及展望[J]. 石油实验地质, 2023, 45(2): 203-209.  
 GUAN Xiaodong, GUO Lei. New progress and prospect of oil and gas accumulation research in deep to ultra-deep strata[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(2): 203-209.
- [ 3 ] 姚军, 黄朝琴, 刘文政, 等. 深层油气藏开发中的关键力学问题[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48(4): 5-31.  
 YAO Jun, HUANG Chaoqin, LIU Wenzheng, et al. Key mechanical problems in the development of deep oil and gas reservoirs [J]. Chinese Science: Physics, Mechanics, Astronomy, 2018, 48(4): 5-31.
- [ 4 ] 曹东升, 曾联波, 吕文雅, 等. 非常规油气储层脆性评价与预测方法研究进展[J]. 石油科学通报, 2021, 6(1): 31-45.  
 CAO Dongsheng, ZENG Lianbo, LÜ Wenya, et al. Progress in brittleness evaluation and prediction methods in unconventional reservoirs [J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(1): 31-45.
- [ 5 ] 赵宁, 王亮, 张磊, 等. 基于粒径分类的致密砂岩力学特性及破坏特征研究——以鄂尔多斯盆地二叠系下石盒子组为例[J]. 石油实验地质, 2022, 44(4): 720-729.  
 ZHAO Ning, WANG Liang, ZHANG Lei, et al. Mechanical properties and fracturing characteristics of tight sandstones based on granularity classification: a case study of Permian Lower Shihezi Formation, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(4): 720-729.
- [ 6 ] 徐珂, 张辉, 刘新宇, 等. 库车坳陷深层裂缝性储层现今地应力特征及其对天然气勘探开发的指导意义[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(2): 34-45.  
 XU Ke, ZHANG Hui, LIU Xinyu, et al. Current in-situ stress characteristics of deep fractured reservoirs in Kuqa Depression and its guiding significance to natural gas exploration and development [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(2): 34-45.
- [ 7 ] 徐火龙, 赵迪斐. 深层页岩储层脆性评价及综合脆性指标评价优化路径研究——以Z-3井五峰组—龙马溪组为例[J]. 非常规油气, 2023, 10(1): 84-92.  
 XU Huolong, ZHAO Difei. Research on brittleness evaluation of deep shale reservoirs and optimization approach of comprehensive brittleness index evaluation: A case study of Wufeng-Longmaxi Formation from well Z-3[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(1): 84-92.
- [ 8 ] 魏源, 赵迪斐, 焦伟伟, 等. 渝西地区五峰组—龙马溪组深层页岩储层力学脆性的非均质性特征——以Z-3井为例[J]. 非常规油气, 2021, 8(1): 67-76.  
 WEI Yuan, ZHAO Difei, JIAO Weiwei, et al. Heterogeneity of mechanical brittleness in Wufeng-Longmaxi shale reservoirs in western Chongqing area: Using well Z-3 as an example[J]. Unconventional Oil & Gas, 2021, 8(1): 67-76.
- [ 9 ] 刘震, 张军华, 于正军, 等. 非常规储层脆性研究进展及展望[J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(6): 1 499-1 507.  
 LIU Zhen, ZHANG Junhua, YU Zhengjun, et al. Research progress and prospects of unconventional reservoir brittleness[J]. Petroleum Geophysical Exploration, 2023, 58(6): 1 499-1 507.
- [ 10 ] HAJIABDOLMAJID V, KAISER P. Brittleness of rock and stability assessment in hard rock tunneling [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18(1): 35-48.
- [ 11 ] SINGH S. Brittleness and the mechanical winning of coal [J]. Mining Science Technology, 1986, 3(3): 173-180.
- [ 12 ] YAGIZ S. Assessment of brittleness using rock strength and density with punch penetration test [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(1): 66-74.
- [ 13 ] MENG Fanzhen, WONG L N Y, ZHOU Hui. Rock brittleness indices and their applications to different fields of rock engineering: A review [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2021, 13(1): 221-247.
- [ 14 ] ZHANG Decheng, RANJITH P G, PERERA M S A. The brittleness indices used in rock mechanics and their application in shale hydraulic fracturing: A review [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 143: 158-170.
- [ 15 ] EVANS B, FREDRICH J T, WONG T F. The brittle-ductile transition in rocks: recent experimental and theoretical progress [J]. American Geophysical Union, 2013, 56: 1-20.
- [ 16 ] TARASOV B, POTVIN Y. Universal criteria for rock brittleness



- estimation under triaxial compression [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2013, 59: 57-69.
- [17] 李志超. 低渗储层水力裂缝扩展特征的数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- LI Zhichao. Numerical simulation study on hydraulic fracture propagation characteristics of low permeability reservoirs [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [18] WANG F P, GALE J F. Screening criteria for shale-gas systems [J]. *Gulf Coast Association of Geological Transactions*, 2009, 59: 779-793.
- [19] MARTIN C D. Brittle failure of rock materials: test results and constitutive models [J]. *Revue Canadienne De Géotechnique*, 1995, 33(2): 378-378.
- [20] MENG F, ZHOU H, ZHANG C, et al. Evaluation methodology of brittleness of rock based on post-peak stress-strain curves [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2015, 48 (5) : 1 787-1 805.
- [21] RYBACKI E, MEIER T, DRESEN G. What controls the mechanical properties of shale rocks? -Part II: brittleness [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 144(1): 39-58.
- [22] MUNOZ H, TAHERI A, CHANDA E K. Fracture energy-based brittleness index development and brittleness quantification by pre-peak strength parameters in rock triaxial compression [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49: 4 587-4 606.
- [23] KIVI I R, AMERI M, MOLLADAVOODI H. Shale brittleness evaluation based on energy balance analysis of stress-strain curves [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 167: 1-19.
- [24] CHEN Z, HE C, MA G, et al. Energy damage evolution mechanism of rock and its application to brittleness evaluation [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2019, 52(4): 1 265-1 274.
- [25] HUCKA V, DAS B. Brittleness determination of rocks by different methods [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1974, 17(10): 389-392.
- [26] AI C, ZHANG J, LI Y W. Estimation criteria for rock brittleness based on energy analysis during the rupturing process [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49: 4 681-4 698.
- [27] KIVI IR, AMERI M, MOLLADAVOODI H. Shale brittleness evaluation based on energy balance analysis of stress-strain curves [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2018, 167: 1-19.
- [28] MUNOZ H, TAHERI A, CHANDA E K. Fracture energy-based brittleness index development and brittleness quantification by pre-peak strength parameters in rock triaxial compression [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49: 4 587-4 606.
- [29] TARASOV B, POTVIN Y. Universal criteria for rock brittleness estimation under triaxial compression [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 2013, 59: 57-69.

编辑 何青芳