

纹层状泥灰质陆相页岩压裂裂缝扩展机理研究

张子麟^{1,2}, 曹嫣缤², 周广清³, 张濂源², 黄波²

¹东北大学资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳

²中国石化胜利油田分公司石油工程技术研究院, 山东 东营

³中国石化胜利油田分公司, 山东 东营

收稿日期: 2022年3月24日; 录用日期: 2022年4月13日; 发布日期: 2022年4月22日

摘要

纹层状岩心水平层理呈现密度大, 胶结强度小的特点, 在水力压裂过程中, 弱胶结层理容易“捕获”压裂裂缝, 使其沿层理面扩展, 从而增大裂缝带宽, 但会限制裂缝在缝高方向上扩展。裂缝相对简单时, 压力曲线呈现出较为平稳的形态。在裂缝相对复杂时, 压力曲线表现出较为明显的波动, 水平应力差越小, 声发射事件数增加, 剪切裂缝占比增加, 裂缝相对更复杂。

关键词

陆相页岩, 声发射, 矩张量反演, 泥灰质纹层, 水力压裂

Investigation on the Hydraulic Fracture Propagation Mechanism of Lime-Clay Lamina in Continental Shale

Zilin Zhang^{1,2}, Yanbin Cao², Guangqing Zhou³, Liaoyuan Zhang², Bo Huang²

¹School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang Liaoning

²Research Institute of Petroleum Engineering Technology, Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying Shandong

³Shengli Oilfield Branch Company, SINOPEC, Dongying Shandong

Received: Mar. 24th, 2022; accepted: Apr. 13th, 2022; published: Apr. 22nd, 2022

Abstract

The horizontal bedding of the lamellar cores has the characteristics of high density and low cementation strength. In the process of hydraulic fracturing, weakly cemented bedding is easy to

文章引用: 张子麟, 曹嫣缤, 周广清, 张濂源, 黄波. 纹层状泥灰质陆相页岩压裂裂缝扩展机理研究[J]. 土木工程, 2022, 11(4): 550-558. DOI: 10.12677/hjce.2022.114060

“capture” the fracturing fracture, so that it expands along the bedding plane, thereby increasing the fracture bandwidth. But it will limit the crack propagation in the direction of the fracture height. When the fracture is relatively simple, the pressure curve shows a relatively stable shape. When the fractures are relatively complex, the pressure curve shows obvious fluctuations. The smaller the horizontal stress difference is, the more acoustic emission events are. The proportion of shear fractures increases and the fractures are relatively more complex.

Keywords

Continental Shale, Acoustic Emission, Moment Tensor Inversion, Lime-Clay Lamina, Hydraulic Fracturing

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

济阳坳陷陆相页岩，有利岩相组合以纹层状泥质灰岩为主，夹灰质泥岩。未来区块开发拟以水平井开发为主，前期导眼井及钻屑显示，岩性主要是深灰色灰质泥岩与灰褐色钙质油泥岩。储层主要位于 Es2、Es3 和 Es4 段。脆性矿物以碳酸盐为主，沙三下、沙四纯上脆性矿物含量普遍 > 60%，白云石含量以沙三下 3、沙四纯上 2~3 相对较高。

页岩各向异性明显[1] [2] [3]，破坏模式受应力差异系数影响较大。Zja [4]等人采用声发射和示踪剂进行实验室的厚夹层试样水力压裂，从能量角度分析了泵压曲线与声发射信号。陈勉[5]等通过页岩矿物分析，发现压裂时岩石的脆性增高，造缝能力加强，外荷载作用下更易产生多分支、转向型裂缝。许丹[6]等人研究了工艺管与页岩纹层呈不同角度时，水力裂缝扩展模式及压裂效果对各影响因素的敏感程度。赵立强、Dong [7] [8] [9]等人分析了裂隙尖端诱导应力引发水力裂缝逼近、剪切、穿过或转向等行为。近年来，国内众多学者[10] [11] [12] [13] [14]也指出，页岩储层的物理各向异性所导致的力学参数及脆性差异，对压裂区块选取及压裂参数优化都有重要影响。任岚[15] [16] [17] [18]等人用数值模拟的方法对压裂参数进行优化，指出储层改造体积(SRV, stimulated reservoir volume)与压裂后油气产量呈显著的正相关。

胜利油田前期针对陆相页岩油储层的先导性试验显示：泥 - 灰段施工压力波动明显、各段加砂量差异大。该问题可能源于：1) 对泥 - 灰岩含量对富集层理纹层页岩岩心关键力学参数认识不足；2) 受纹层结构影响，压裂裂缝空间扩展形貌不明确。基于该施工问题及潜在成因，笔者针对胜利油田 4 口陆相页岩油井的岩心，利用 X 射线衍射(XRD, X-ray diffraction evaluations)技术测取了灰质和泥质矿物含量，并进行了纹层状岩心关键力学参数的测试分析，最后结合物模实验和声发射(AE, acoustic emission)及矩张量反演技术，分析了不同应力差下的纹层状泥灰试样压裂裂缝扩展规律，期望为济阳坳陷陆相页岩油勘探开发的选井选层及可压性评价提供理论参考。

2. 岩心岩石力学参数分析

本文分析的陆相页岩岩心分别取自胜利油田 X1 井-4221 m, X2 井-3653.1 m (纯上 2), X3 井-3678 m (沙三下), X4 井-3054.2 m。利用 XRD 技术，对上述 4 口井典型岩心进行了矿物含量测试，特征峰 d 的拾取，如图 1 所示。对照 2θ - d 转换表，查找各峰值点 d 值对应矿物，确定矿物成分含量，得出全岩矿物分析结

果, 进而可计算出各岩心泥灰质含量, 如表 1 所示。

其中灰质主要成分为白云石, 方解石等碳酸盐类物质, 泥质主要成分为黏土, 少量石英, 钾长石, 斜长石等。如果灰质含量高, 脆性强, 现场施工中易压开, 利于形成复杂缝; 泥质含量高, 塑性强, 不易压开, 形成缝相对较单一。可以看出, 灰质含量可达到 50%~80%, 各岩心矿物含量差异性较大, 因此仅凭矿物含量并不能全面界定岩心或储层的脆性和可压性, 需要结合力学参数进一步分析。

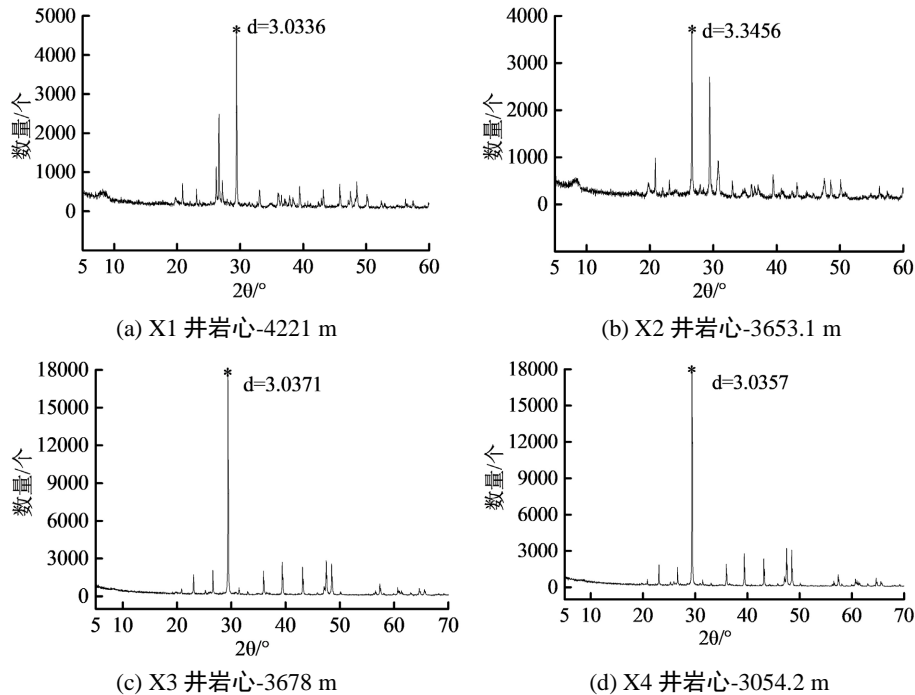


Figure 1. XRD mineral content characteristic value d of cores from 4 wells

图 1. 4 口井岩心 XRD 矿物含量特征值 d

Table 1. Mineral content analysis of the cores from 4 wells

表 1. 4 口井岩心矿物含量分析

井号	取芯位置	成分含量/%									
		石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	铁白云石	黄铁矿	硬石膏	粘土总量	菱铁矿
X1	4221.0 m	9.1	0.0	0.7	0.0	68.2	0.0	1.5	0.3	1.2	19.1
X2	3653.1 m (纯上 2)	23.5	0.1	1.5	30.7	0.0	0.0	4.0	1.1	17.6	21.4
X3	3678.0 m (沙三下)	7.2	0.0	0.2	86.0	0.0	0.9	1.6	0.0	3.9	0.3
X4	3054.2 m	7.3	0.0	0.3	85.8	1.6	0.0	2.7	0.0	2.3	0.0

在实验室将上述页岩岩心加工成直径 25 mm, 高度 25 mm 的圆柱试样, 并定制剪切实验夹具。将岩心放在岩石力学试验机上进行剪切实验测试。在夹具上方施加 0.002 kN/s 的荷载, 直至岩心发生剪切破坏, 期间监测加载曲线并记录峰值荷载。剪切强度参数粘聚力和内摩擦角的结果汇总至表 2。

岩心从夹具中取出, 岩心剪切破裂模式表现为, 在发生剪切破坏的同时, 层理面受扰动发生破坏, 因此岩心呈现沿多个层理断裂的碎屑状。由此可看出, 页岩岩心层理面非常发育, 且胶结强度较低, 层理容易受岩心剪切扰动而发生张拉破裂。密集(layer)及其较低的胶结强度可能导致限制水力裂缝纵向扩展, 而促进裂缝开启层理面沿水平方向扩展, 形成带宽较大、缝高较小的缝网形态。

表 2 是页岩岩心剪切实验结果,页岩岩心粘聚力在 24 MPa~35 MPa 之间,内摩擦角在 20°~31°之间。岩心粘聚力是可压性的一个负向指标,粘聚力越大,越难压裂形成大规模有效裂缝,储层可压性越差;而内摩擦角是反映岩心脆性的正向指标,内摩擦角大反映岩心多为高脆性。单从剪切强度参数看,虽然总体上这些页岩岩心剪切强度参数有所差异,但整体上属于中等脆性。

Table 2. Shear test results of shale core

表 2. 页岩岩心剪切实验结果

编号	井号	埋深/m	剪切角/°	峰值荷载/kN	粘聚力/MPa	内摩擦角/°
1	X4	3054.2	45	27.5		
2	X4	3054.2	60	19.6	25.6	20.3
3	X4	3054.2	75	13.9		
4	X4	3063.5	45	34.5		
5	X4	3063.5	60	23.5	27.8	24.7
6	X4	3063.5	75	15.2		
7	X2	3653.1	45	35.8		
8	X2	3653.1	60	27.4	24.1	31.0
9	X2	3653.1	75	12.2		
10	X3	3678.0	45	37.1		
11	X3	3678.0	60	29.8	28.8	27.9
12	X3	3678.0	75	14.8		
13	X1	4221.0	45	44.3		
14	X1	4221.0	60	30.8	34.4	26.1
15	X1	4221.0	75	18.5		
16	X3	3678.5	45	34.9		
17	X3	3678.5	60	23.6	24.6	28.4
18	X3	3678.5	75	13.2		

将岩心加工成直径 25 mm,高度 12.5 mm 标准圆柱体试样,进一步采用巴西劈裂法测试岩层层理的抗拉强度。由于钻取岩心数量有限,本节对 3 组页岩岩心开展巴西劈裂试验,测试页岩层理的胶结强度。3 组岩心分别为 X2 井(埋深 3653.1 m)、X3 井(埋深 3678.0 m)、X4 井(埋深 3054.2 m)。实验过程中保持加载方向与层理方向严格平行,监测岩心破裂时的峰值荷载并计算纹层层理的张拉强度,由图可看出,3 组岩心均沿层理发生张拉破坏。

巴西劈裂试验测试后的页岩岩心均呈现出多个破裂面,说明多数层理的胶结强度较低。在水力压裂过程中,弱胶结层理容易“捕获”压裂裂缝,使其沿层理面扩展,从而增大裂缝带宽,限制裂缝在缝高方向上扩展。如果需要水力裂缝在纵向上有效沟通油层范围,建议采用大排量高粘液等施工措施促进缝高扩展。

表 3 是页岩岩心巴西劈裂试验结果的统计数据,整体上页岩岩心的层理胶结强度较弱,层理张拉强度不足 2 MPa。岩心水平层理呈现密度大,胶结强度小的特点,在水力压裂裂缝扩展模拟及施工工艺参数优化过程中须予以充分考虑。

Table 3. Brazilian splitting test results of shale core
表 3. 页岩岩心巴西劈裂试验结果

编号	井号	埋深/m	峰值荷载/kN	层理张拉强度/MPa	平均张拉强度
1	X4	3054.2	0.84	1.71	1.93
2	X4	3054.2	1.08	2.20	
3	X4	3054.2	0.92	1.87	
4	X3	3678.0	0.48	0.98	0.97
5	X3	3678.0	0.36	0.73	
6	X3	3678.0	0.54	1.10	
7	X2	3653.1	0.78	1.59	1.76
8	X2	3653.1	0.94	1.92	
9	X2	3653.1	0.86	1.76	

3. 相似材料纹层状泥质灰岩相岩心水力压裂裂缝实验分析

由于很难采集到原位深地层的大尺寸岩心，所以本文采用相似材料来进行分析。采用 32.5 硅酸盐水泥，20~40 目石英砂，325 目高岭土进行人工试件配比实验，经多次适配，当其中灰质层的质量配比为 2:2:1，泥质层的质量配比为 1:1:3，泥质、灰质层都加入总质量 15%~20% 的水及 1% 的消泡剂。和料中需要底部用振动台，上部用振动器进行组合去泡。浇筑模型尺寸为 300 × 300 × 300 mm 的立方体纹层试样，并预埋单簇射孔压裂管，如图 2 所示。

声发射技术是一种脆性材料无损检测技术，在水力压裂实验中具有广泛的应用。岩石在三轴加载过程中，由于损伤破坏产生较多裂纹，而此过程伴随着能量的转化，部分能量转化为声波，通过采用声发射试验系统采集这些信息，并比较同时刻触发的探头信息，可以帮助我们进一步了解试样损伤，裂纹起裂以及扩展过程。通过有效的声发射事件定位点及波形分析，计算出初动振幅。再通过矩张量反演分析出具体的张、拉、剪切破坏模式。本文针对每个试样的压裂试验过程都进行了声发射监测，声发射探头布设，如图 3 所示，左下角为原点(0,0,0)，坐标点分别为(200,200,300)，(100,100,300)，(200,0,200)，(100,0,100)，(200,100,0)，(100,200,0)，(200,100,300)，(100,200,300)，单位 mm。

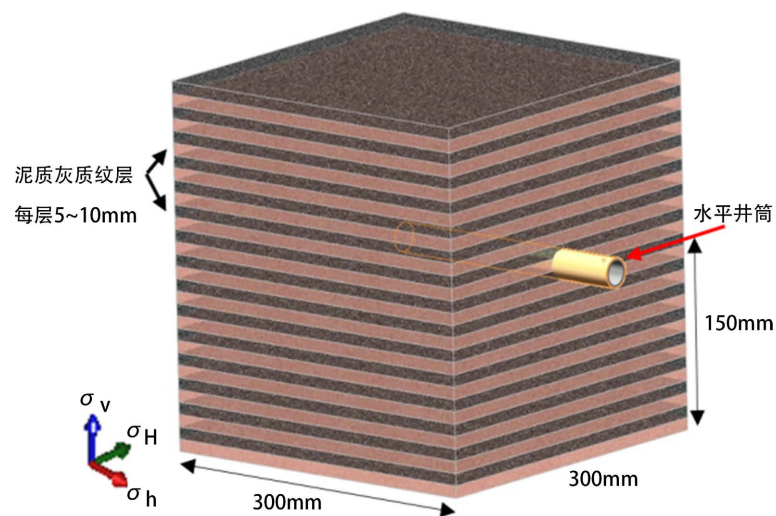


Figure 2. Laminate sample
图 2. 纹层试样

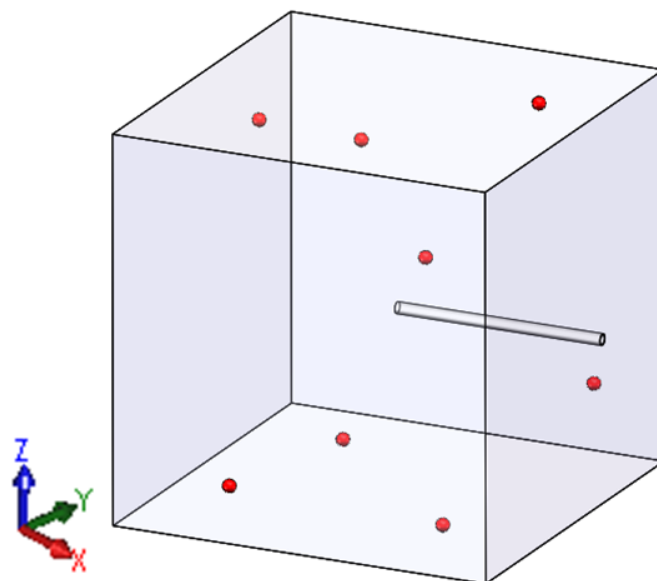


Figure 3. Acoustic emission detection point layout
图 3. 声发射探点布置

实验过程中设置三轴围压，分别为垂向应力 σ_v ，最大水平主应力 σ_H ，最小水平主应力 σ_h ，a 组围压为 10-8-2 MPa，b 组分别为 10-6-2 MPa，c 组为 10-4-2 MPa。压裂液是含有品红示踪剂的水，排量为 10 mL/min，直到压力值无明显变化停泵。压裂后声发射监测结果经矩张量反演，如图 4 所示。图中蓝色圆点表征剪切破坏，红色圆点表征拉伸破坏，绿色圆点表征混合型破坏。随着水平应力差的减小，声发射事件增多，试样破裂模式变得更复杂，而且除了表观的裂缝复杂性，也体现了裂缝的不同破裂模式上：随着水平应力差的增加，剪切破裂比例明显减小。将压裂过程中的声发射事件点所包络的体积视为改造体积 SRV，应力差-SRV-剪切破裂数的关系，如图 5 所示。

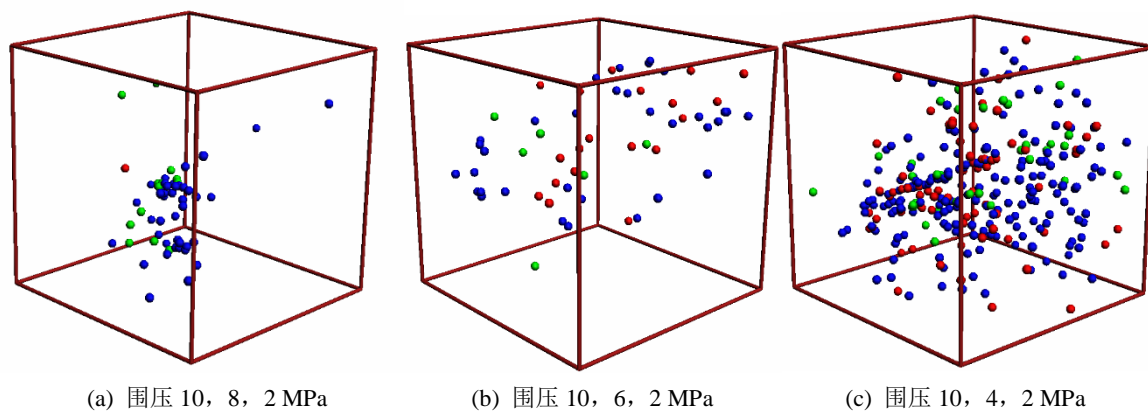


Figure 4. Inversion of acoustic emission moment tensor of cracks under different stress differences
图 4. 不同应力差情况下的裂缝声发射矩张量反演

对应的压裂曲线如图 6 所示，可以看出，随着水平应力差的减少，破裂压力存在多个峰值，裂缝相对更复杂，压力曲线表现出较为明显的波动，其内因是裂缝不断重复“起裂-受阻-转向-再起裂-受阻-转向”这个扩展过程，水力裂缝沿泥灰纹层界面扩展一定距离时可再次转向，继续沿水平最大主应力方向扩展。小的台阶式波动是由于压裂液穿过纹层造成的。在灰质层中，渗透率相对较高，随着压裂

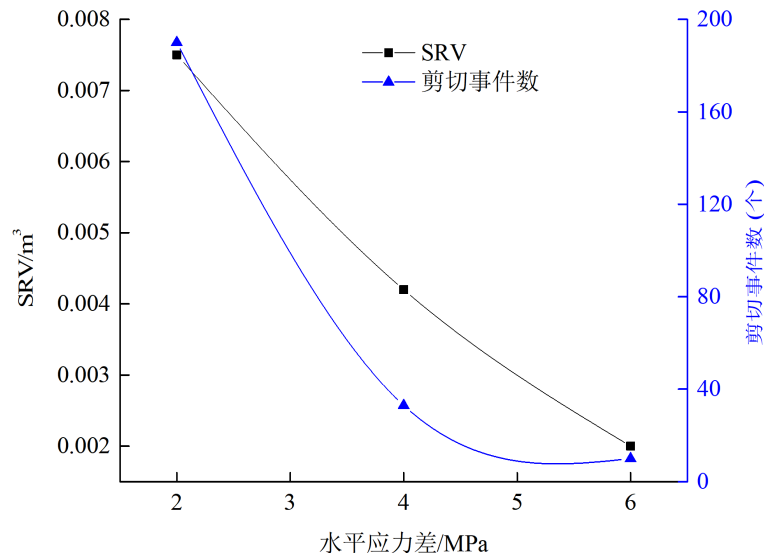


Figure 5. The relationship between stress difference-SRV-shear rupture numbers
图 5. 应力差-SRV-剪切破裂数的关系

液的注入，压力逐渐升高，再次达到穿层所需压力，会再次扩展。压裂曲线中，表现为中段会升高一点，再下降。从压裂到最后停泵时间可以看出，随着水平应力差减小，产生复杂裂隙时，扩展过程所需时间有明显下降，应力释放更加迅速。从图 7 的模型压后切片也可以看出，示踪剂品红在裂隙发育区有明显扩散，经裂隙重构，裂隙形态表现为多组平行裂隙，遇到泥灰交界的异质处会发生偏转。这些室内试验可观测的裂隙扩展模式，即是现场施工中不同泥灰段施工压力波动明显、各段加砂量差异大的内因。

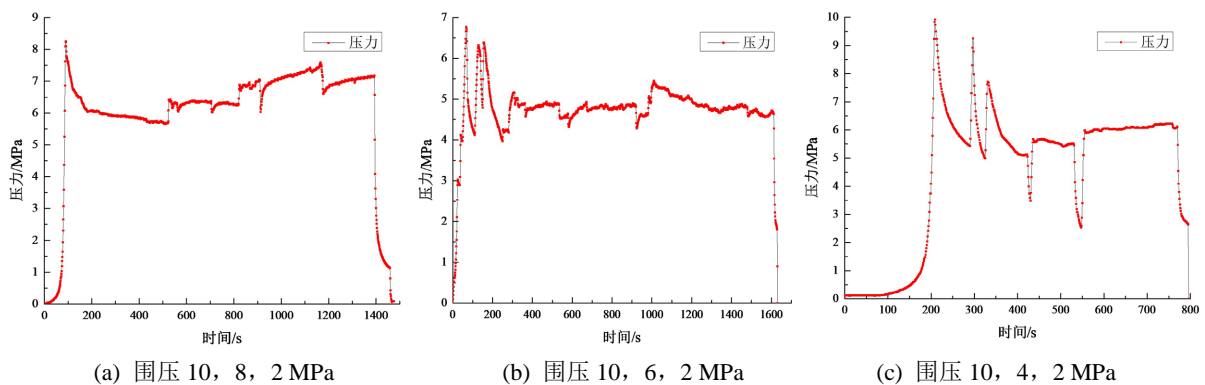


Figure 6. Hydraulic fracturing pump pressure curve under different stress differences
图 6. 不同应力差下的水力压裂泵压曲线

4. 认识与结论

1) 纹层状泥质灰岩相各岩心的灰质矿物含量差异性较大，岩心粘聚力在 24 MPa~35 MPa 之间，内摩擦角在 20°~31°之间。虽然岩心剪切强度参数有所差异，但整体上属中等脆性。

2) 整体上页岩岩心的层理胶结强度较弱，层理张拉强度不足 2 MPa。岩心水平层理呈现密度大，胶结强度小的特点，在压裂过程中，弱胶结层理容易“捕获”压裂裂隙，为使压裂裂隙在纵向上有效沟通更大油层范围，可采用大排量高粘液等施工措施促进缝高扩展。

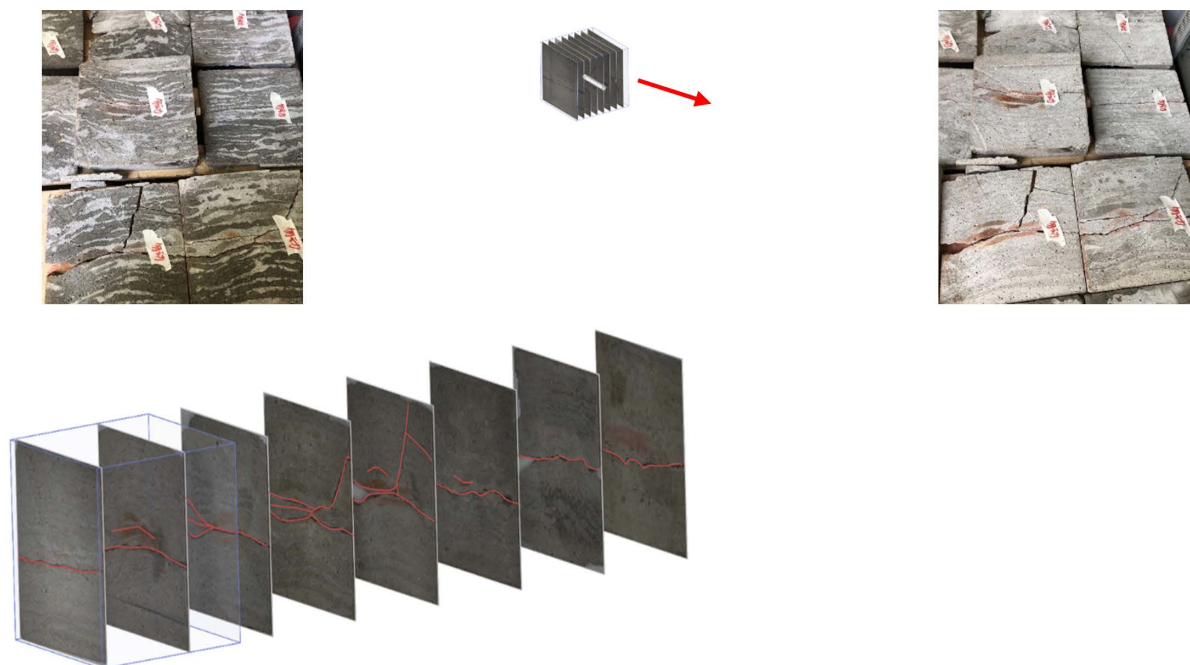


Figure 7. Sample sectioning and crack reconstruction
图 7. 试样切片及裂缝重构

3) 相似材料纹层状泥灰岩相岩心水力真三轴压裂实验结果可以认识到, 在裂缝相对简单时, 压力曲线呈现出较为平稳的形态; 在裂缝相对复杂时, 压力曲线表现出较为明显的波动。水平应力差越小, 声发射事件数增加, 剪切型裂缝占比增加, 裂缝相对更复杂。

基金项目

中国石油化工股份有限公司技术开发项目(P20069-6)。

参考文献

- [1] 洪国斌, 陈勉, 卢运虎, 等. 川南深层页岩各向异性特征及对破裂压力的影响[J]. 石油钻探技术, 2018, 48(3): 78-85
- [2] 衡帅, 杨春和, 张保平, 等. 页岩各向异性特征的试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 609-616.
- [3] 刘雅利, 刘鹏. 陆相富有机质泥页岩中夹层特征及其作用——以济阳坳陷为例[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(5): 1-9. <https://doi.org/10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2019.05.001>
- [4] Zja, B., Qlab, C., Qha, B., *et al.* (2020) Acoustic Emission Characteristics in Hydraulic Fracturing of Stratified Rocks: A Laboratory Study. *Powder Technology*, **371**, 267-276. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.050>
- [5] 陈勉, 金衍. 基于岩心分析的页岩气压裂工艺参数优选[J]. 石油钻探技术, 2012(4): 7-12.
- [6] 许丹, 胡瑞林, 高玮, 等. 页岩纹层结构对水力裂缝扩展规律的影响[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(4): 523-528.
- [7] 赵立强, 刘飞, 王佩珊, 等. 复杂水力裂缝网络延伸规律研究进展[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 562-569.
- [8] Dong, Y., Tian, W., Li, P., *et al.* (2021) Numerical Investigation of Complex Hydraulic Fracture Network in Naturally Fractured Reservoirs Based on the XFEM. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, **96**, Article ID: 104272. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104272>
- [9] 陈天宇, 冯夏庭, 张希巍, 等. 黑色页岩力学特性及各向异性特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(9): 1772-1779.
- [10] 艾池, 仇德智, 张军, 等. 页岩力学参数测试及脆性各向异性研究[J]. 断块油气田, 2017, 24(5): 647-651.
- [11] 夏宏泉, 梁景瑞, 文晓峰. 基于 CQ 指标的长庆油田长 6-长 8 段致密油储层划分标准研究[J]. 石油钻探技术,

- 2020, 48(3): 114-119.
- [12] 王敏生, 光新军, 耿黎东. 页岩油高效开发钻井完井关键技术及发展方向[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(5): 1-10.
- [13] 张伯虎, 马浩斌, 田小鹏, 等. 层状页岩力学参数的各向异性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(S2): 634-638.
- [14] Thomsen, L. (2013) On the Use of Isotropic Parameters to Understand Anisotropic Shale Behavior. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 320-324. <https://doi.org/10.1190/segam2013-1080.1>
- [15] 任岚, 林然, 赵金洲, 等. 基于最优 SRV 的页岩气水平井压裂簇间距优化设计[J]. 天然气工业, 2017, 37(4): 69-79.
- [16] Li, L.C., Tang, C., Li, G., *et al.* (2012) Numerical Simulation of 3D Hydraulic Fracturing Based on an Improved Flow-Stress-Damage Model and a Parallel FEM Technique. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **45**, 801-818. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0252-z>
- [17] 刘欢, 尹俊禄, 王博涛. 水平井体积压裂簇间距优化方法[J]. 天然气勘探与开发, 2017, 40(2): 6.
- [18] Miyoshi, T., Elmo, D. and Rogers, S. (2018) Influence of Data Analysis When Exploiting DFN Model Representation in the Application of Rock Mass Classification Systems. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, **10**, 1046-1062. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.003>