

引用格式:柳智超,赖枫鹏,窦亮彬,等.鄂尔多斯盆地长7段页岩储层岩石力学特征及裂缝导流能力研究[J].油气藏评价与开发,2026,16(2):458-468.

LIU Zhichao, LAI Fengpeng, DOU Liangbin, et al. Study on rock mechanics characteristics and fracture conductivity of shale reservoirs in Chang 7 member of Ordos Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2026, 16(2): 458-468.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024454

鄂尔多斯盆地长7段页岩储层岩石力学特征及 裂缝导流能力研究

柳智超¹, 赖枫鹏^{1,2}, 窦亮彬³, 张琳琳^{1,4}

(1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083; 2. 非常规天然气能源地质评价与开发工程北京市重点实验室, 北京 100083; 3. 西安石油大学石油工程学院, 陕西 西安 710065; 4. 中国石油长庆油田分公司物资供应处, 陕西 西安 710016)

摘要:页岩油作为非常规油气资源,已成为全球能源开采的热点。然而,页岩油储层具有低孔低渗的特点,传统开采技术难以实现高效产出,需采用水力压裂技术进行开发。页岩岩石力学特征显著影响压裂效果。通过岩石力学实验和X射线衍射全岩心实验,对比分析了鄂尔多斯盆地长7段页理型、纹层型和夹层型3种不同类型页岩的弹性模量、泊松比等力学参数及地应力变化,明确了不同类型页岩的力学性质与储层特征,并建立了矿物成分与岩石力学特征的关联性。同时,通过支撑剂导流能力实验和嵌入实验,揭示了压裂裂缝导流能力的变化规律,为支撑剂选择提供指导。结果表明:①夹层型页岩弹性模量大、泊松比小,易于造缝;页理型和纹层型页岩地应力梯度大,裂缝扩展难度较高。②岩石中刚性矿物含量越高,弹性模量越大、泊松比越小;脆性矿物含量越高,脆性指数越大。相较于纹层型和页理型页岩,夹层型页岩性质硬脆,压裂时更易产生裂缝且能有效保持裂缝张开。③基于夹层型页岩的力学性质,其支撑剂嵌入深度最小,导流能力最强,有利于流体流动。根据支撑剂选择实验,建议低围压下采用10~20目石英砂作为支撑剂,支撑剂填充密度宜为14 kg/m²。

关键词:鄂尔多斯盆地;页岩油;岩石力学参数;三轴压缩实验;嵌入实验;导流能力

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Study on rock mechanics characteristics and fracture conductivity of shale reservoirs in Chang 7 member of Ordos Basin

LIU Zhichao¹, LAI Fengpeng^{1,2}, DOU Liangbin³, ZHANG Linlin^{1,4}

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Beijing Key Laboratory of Unconventional Natural Gas Geology Evaluation and Development Engineering, Beijing 100083, China; 3. College of Petroleum Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065, China; 4. Supplies Department, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710016, China)

Abstract: Shale oil, as an unconventional oil and gas resource, has become a global hotspot for energy extraction. However, shale oil reservoirs are characterized by low porosity and low permeability, making it difficult for traditional extraction technologies to achieve efficient production, and hydraulic fracturing technology is required for development. The mechanical characteristics of shale significantly influence the fracturing effectiveness. Through rock mechanics experiments and X-ray diffraction whole-rock analysis, the mechanical parameters, such as elastic modulus, Poisson's ratio, and in-situ stress variations of three different types of shale (laminated, bedded, and interbedded) in the Chang 7 Member of the Ordos Basin, were compared and analyzed, clarifying the mechanical properties and reservoir characteristics of different shale types and establishing the relationship between mineral composition and rock mechanical characteristics. Additionally, the variation patterns of fracture conductivity were revealed through proppant conductivity experiments and embedding experiments, providing guidance for proppant selection. The results showed that: (1) interbedded shale had a high elastic modulus and a small Poisson's ratio, making it easy to create fractures, while laminated and bedded shales had higher in-situ stress gradients, making fracture propagation more difficult. (2) The higher the content of rigid minerals in the rock, the larger the elastic modulus and the smaller the Poisson's ratio. The

收稿日期:2025-02-07。

第一作者简介:柳智超(2001—),女,在读博士研究生,主要从事非常规油气开发研究。地址:北京市海淀区学院路29号,邮政编码:100083。E-mail:2162801465@qq.com

通信作者简介:赖枫鹏(1981—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究油气田开发理论与方法、非常规油气开发方法与技术、碳封存与利用协同优化及监测。地址:北京市海淀区学院路29号,邮政编码:100083。E-mail:aifengpeng@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目“页岩油藏CO₂复合压裂渗吸-渗流机理及排采制度优化研究”(52174037)。

higher the content of brittle minerals, the larger the brittleness index. Compared with bedded and laminated shales, interbedded shale was hard and brittle, making it easier to generate fractures and effectively maintain fracture opening during fracturing. (3) Based on the mechanical properties of interbedded shale, it had the smallest proppant embedment depth and the highest conductivity, which facilitated fluid flow. According to the proppant selection experiments, it is recommended to use 10–20 mesh quartz sand as the proppant under low confining pressure, with a proppant packing density of 14 kg/m².

Keywords: Ordos Basin; shale oil; rock mechanics parameters; triaxial compression experiment; embedding experiments; conductivity

页岩油是赋存于页岩层系中的有机质,通常以吸附态或游离态形式存在^[1],作为非常规油气的重要接替能源,其开发对保障能源安全具有重要意义。页岩油储层具有低孔低渗特性,需通过水力压裂技术进行储层改造以实现经济产能,而水力压裂效果受岩石力学参数的影响很大。中国陆相页岩的沉积环境多样,导致岩石类型复杂、储层非均质性强,形成类型多样的储集层^[2-4]。不同类型页岩储集层的岩石力学性质存在一定的差异,这就需要正确评价不同类型页岩的岩石力学性质。因此,开展不同类型页岩的岩石力学特征分析及其对压裂效果影响的研究,对提升页岩油开发效率具有重要意义。

关于岩石力学特征的研究,目前国内外主要采用室内实验与理论计算相结合的方法。室内实验测定岩石力学参数主要包括常规单轴抗拉试验^[5-7]、抗压试验^[8-11]、压缩试验^[12-14]、岩体弱面直剪试验^[15-17]及三轴压缩试验^[18-21]等;理论计算则通常基于测井资料间接获取岩石力学参数。页岩主要由黏土矿物、石英、长石和碳酸盐等矿物和微孔隙组成^[22-23],有学者认为页岩中这些矿物所形成的黏结作用会对岩石的弹性模量、泊松比等岩石力学参数产生一定的影响。研究表明,岩石力学参数与岩石脆性指数存在相关性,脆性指数可表示弹性模量和泊松比的二元函数^[24-25]。一般而言,脆性指数越大,对应的弹性模量越高、泊松比越低,压裂过程中越容易形成复杂的裂缝网络^[26-28]。

除了岩石力学性质对水力压裂的影响外,压裂施工过程中,裂缝中支撑剂的支撑效果对人工裂缝的导流能力具有直接影响。ZHANG等^[29]通过室内实验研究了不同压力条件下支撑剂的导流能力变化规律,发现随着闭合压力升高,导流能力呈下降趋势。COOKE^[30]指出,在低黏度压裂液中,支撑剂易沉积于裂缝底部;而在高黏度压裂液中,支撑剂更易被带入裂缝内部。WEAVER等^[31]发现支撑剂嵌入深度与闭合压力成正比。WARPINSKI等^[32]则认为小粒径支撑剂运移距离大,而大粒径支撑剂运移距离小。

针对现有研究的不足,本研究聚焦鄂尔多斯盆地长7段页岩储层,系统开展页理型、纹层型和夹层型^[33-34]3种不同类型页岩的对比分析。通过岩石力学实验,测定并对比弹性模量、泊松比、最小水平主应力及岩石脆性指数等关键参数;结合X射线衍射实验与压裂相关室内实

验,深入解析矿物组成对岩石力学参数的影响机制,揭示不同类型页岩压裂裂缝导流能力的动态变化规律,最终建立岩石力学参数与裂缝导流能力的定量关联模型。研究成果可为页岩储层可压性评价、支撑剂优选及高效开发提供理论依据与实践指导。

1 研究区域及实验方法

1.1 研究区样品概况

鄂尔多斯盆地长7段沉积期处于湖盆发育鼎盛阶段,主要发育夹层型、纹层型及页理型3种类型页岩。夹层型页岩油储层由暗色厚层泥页岩与薄层碳酸盐岩或粉砂岩互层构成,泥页岩生成的烃类通过侧向运移聚集于相邻碳酸盐岩或粉砂岩中,形成富含页岩油的层段^[35],以长7₁、长7₂亚段为主,长7₃亚段局部发育;纹层型页岩油储集层岩相以半深湖—深湖厚层泥页岩、夹薄层粉—细砂岩为主,集中分布于长7₃亚段;页理型页岩发育有明显的页理结构且富含有机质,其砂体发育程度较低,主要赋存于长7₃亚段底部区域^[36]。

实验样品采自鄂尔多斯盆地长7层段(图1),其中夹层型页岩取自陕北志丹G62区块,其特征主要表现为厚层段泥岩和细粉砂岩互层发育,对取芯层段岩心盒内砂岩和泥岩厚度统计发现,泥岩段厚度较薄,介于0.20~0.60 m,泥

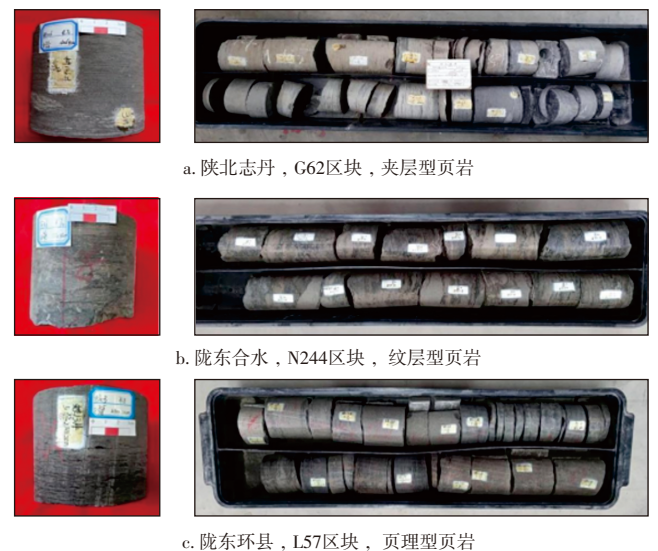


图1 鄂尔多斯盆地长7层段不同类型页岩

Fig. 1 Different types of shale in Chang 7 member of Ordos Basin

岩段在观察岩心盒长度范围内占比介于11.11%~33.35%。纹层型页岩取自陇东合水N244区块,以泥页岩中层页理缝发育为主,页理缝密度最高可达81条/m,页理缝宽度介于0.1~0.5 mm,页理缝长度介于1.0~9.6 cm。页理型页岩取自陇东地区L57区块,以厚层状泥页岩发育为主,岩心盒范围内少见粉砂岩等其他岩性。

1.2 实验方法

1.2.1 岩石力学实验

岩石三轴压缩实验依据中华人民共和国地质矿产行业标准《岩石物理力学性质试验规程第20部分:岩石三轴压缩强度试验》(DZ/T 0276.20—2015)^[37]来测定页岩的泊松比和弹性模量,采用 $\phi 2.5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ 圆柱体岩样,并针对页岩样品力学特性,将加载速率设为0.02 mm/min以更真实地模拟页岩的实际加载条件。实验的仪器如图2所示,具体实验步骤为:①对三轴室内的液压油加热,通过热传导将温度传递至岩样,模拟地下温度环境;②通过液压系统,对实验岩样在横向上施加5、10、15、20 MPa的围压;③逐步增加轴向载荷,通过与岩样直接接触的传感器实时监测应力-应变关系曲线,并记录数据,最终提取杨氏模量、泊松比等静态岩石力学特性参数。

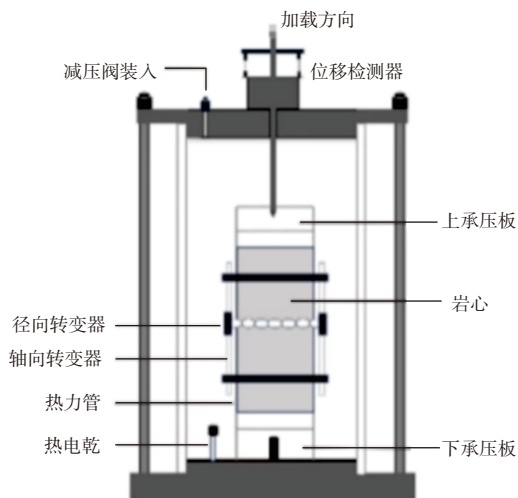


图2 三轴压缩仪器示意图^[20]

Fig. 2 Schematic diagram of triaxial compression instrument^[20]

1.2.2 X射线衍射全岩分析实验

岩石的矿物组分分析是确定岩石物理力学性质的关键手段之一。通过X射线衍射(XRD)实验,可获取不同区块页岩的矿物组成数据,进而揭示矿物组成与岩石力学参数的内在关联。实验原理基于布拉格衍射定律:当单色X射线照射至晶体时,由于晶体内部晶胞由原子按规则周期排列构成,且原子间距与入射X射线波长相近,不

同原子散射的X射线会产生相干干涉,在特定方向形成强衍射峰。衍射线在空间的分布方位及强度,由物质组成、分子内成键方式、晶型结构及构象等微观特性共同决定。

实验采用了YST-I型X射线衍射仪,具体操作步骤为:①向振动样品池中装入样品;②利用具有特定波长的X射线穿透岩层中的矿物晶体;③在记录装置上显示出所测样品的XRD图谱;④在软件参数设定好的情况下,将所得图谱与囊括了常用岩石样品矿物的标准图谱进行对比,若二者特征峰的出峰角度、峰的强度等衍射信息相一致,则表明样品中的这种矿物与该标准矿物相同,从而对矿物的所属种类和岩层性质进行鉴定。

1.2.3 压裂相关室内实验

压裂实验包括支撑剂导流能力实验和支撑剂嵌入实验,前者用于筛选不同工况下的最优支撑剂类型,后者则研究闭合压力与支撑剂填充密度对嵌入深度的定量影响。

支撑剂导流能力实验通过气体渗流流量间接表征裂缝渗透率。实验时,将适量支撑剂均匀铺设在缠有铜网的岩心表面,确保单层分布并计算铺砂质量浓度,随后采用岩心加压法开展实验。具体步骤如下:

1) 将岩心放置在下承压板上,准备进行加载。

2) 使用送油阀缓慢加压,当主动指针转到1.5 T或1 kN时,调节定值器旋钮,使浮子指示至流量计刻度的最高值。

3) 当指针加至规定吨数时,记录流量数值 Q 和对应的压力 p 。

4) 测量闭合压力分别为10、20、30、40、50 MPa,铺设量为6、8、10、12、14 kg/m²时的情况,记录相应的压力和流量数值,并应用达西公式进行计算。

支撑剂嵌入实验通过测量支撑剂嵌入深度,定量反映不同类型页岩导流能力的差异。实验步骤如下:

1) 采用线切割的方式,从露头岩心钻取直径2.54 cm、高度2.5~3.0 cm的圆柱体样品,将2块页岩样品叠置并稳固放置在加载系统中央。

2) 利用GCTSRTR-500实验平台的单轴/三轴压缩测试模块开展实验,将支撑剂均匀铺设在2块页岩样品之间。

3) 在闭合应力分别为10、20、30、40和50 MPa条件下,记录相应的应力、位移等参数。

经过支撑剂嵌入实验,试件端面在实验后变得光滑,表面可清晰观察到支撑剂嵌入痕迹(图3)。通过分析轴向位移与页岩弹性模量的关系,可计算不同闭合应力下支撑剂的嵌入量,进而评估页岩导流能力的差异。

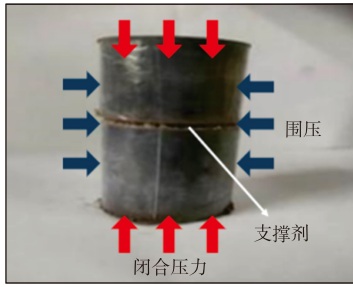


图3 支撑剂嵌入页岩

Fig. 3 Proppant embedded in shale

$$\alpha E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (1)$$

$$v_s = \frac{\Delta\varepsilon_2}{\Delta\varepsilon_1} \quad (2)$$

式中: α 为修正系数; E_s 为岩样的弹性模量,单位GPa; $\Delta\sigma$ 为轴向应力增量,单位MPa; $\Delta\varepsilon$ 为应变增量; v_s 为岩样的泊松比; $\Delta\varepsilon_2$ 为轴向应变增量; $\Delta\varepsilon_1$ 为径向应变增量。

根据实验与计算结果可知,研究区不同类型页岩的岩石力学参数存在显著差异。泊松比体现了岩石在受力时破裂的能力,弹性模量表示岩石在破裂后支撑裂缝的能力^[38]。如表1所示,夹层型页岩的弹性模量较大,页理型和纹层型页岩的泊松比较大,所以夹层型页岩易产生压裂缝。

国内外多名学者利用岩石力学参数对地应力进行表征,鄂尔多斯盆地储层处于正常压实状态,因此,采用黄荣樽等^[39]提出的地应力计算模型:

$$\sigma_h = \left(\frac{\nu}{1-\nu} + \gamma \right) (\sigma_v - \alpha p_p) + \alpha p_p \quad (3)$$

$$\sigma_H = \left(\frac{\nu}{1-\nu} + \beta \right) (\sigma_v - \alpha p_p) + \alpha p_p \quad (4)$$

2 岩石力学特征评价

2.1 岩石力学参数及地应力计算

通过三轴岩石力学实验得到不同类型页岩的应力-应变曲线,如图4所示。

根据应力-应变曲线,通过以下的表达式可以确定岩样的弹性模量及泊松比^[37]:

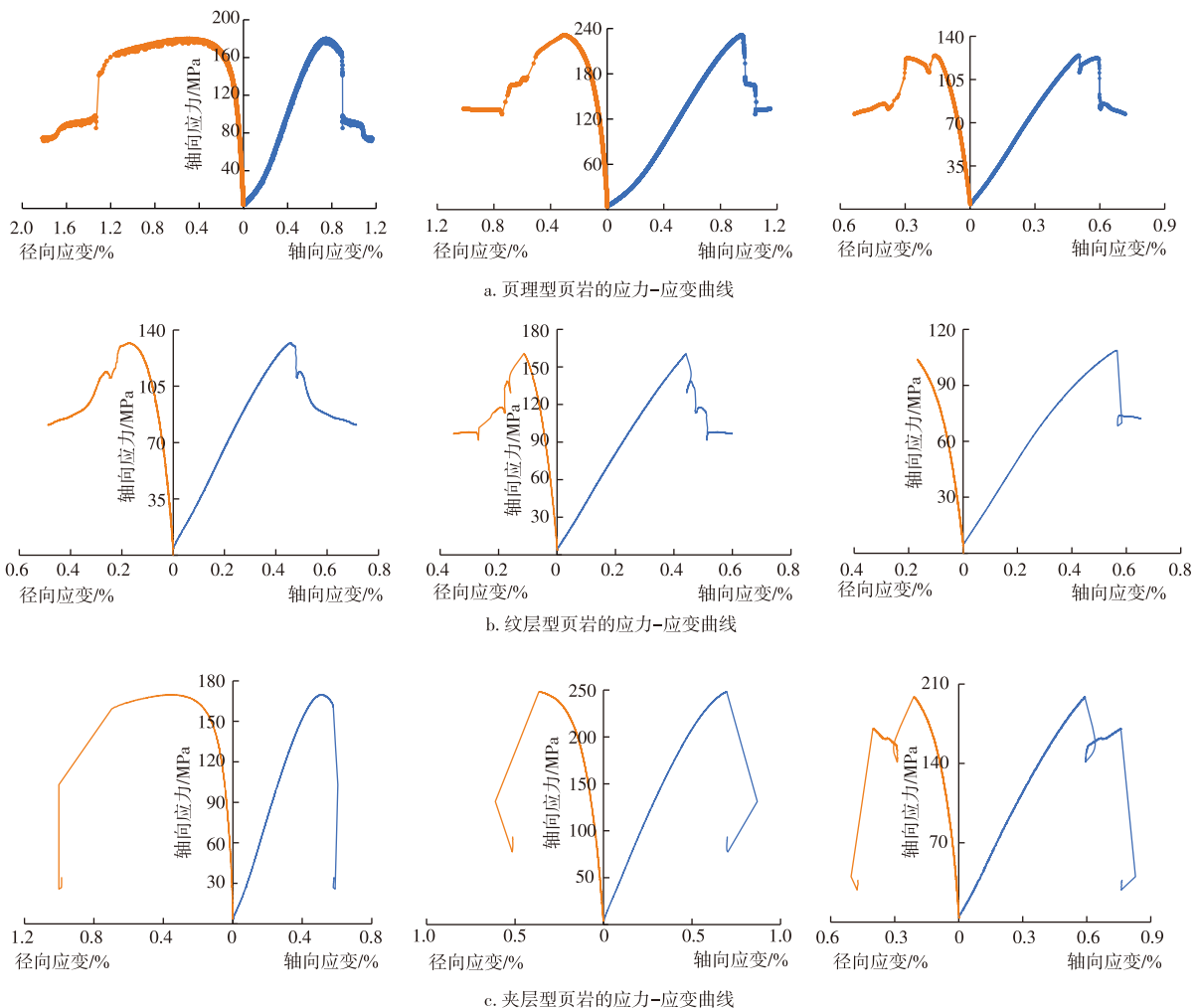


图4 不同类型页岩的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of different types of shale

表1 不同页岩岩石力学参数

Table 1 Rock mechanics parameters of different types of shale

页岩类型	井号	深度/m	围压/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(g/cm ³)	质量/g
页理型	L287	2030.5	20	30.523	0.285	2.4108	51.63
		2037.8	10	23.435	0.208	2.4671	61.24
	L18	1720.5	20	31.513	0.255	2.6142	64.90
		1720.6	20	21.602	0.272	2.5857	63.46
纹层型	M138	2323.2	20	31.836	0.263	2.5405	60.34
		2324.5	20	32.775	0.196	2.5685	60.39
		2325.8	10	24.514	0.255	2.5278	59.46
	L226	2162.3	10	25.199	0.231	2.5348	60.18
		2163.4	20	26.681	0.272	2.5362	56.66
		2163.2	20	28.626	0.231	2.5592	60.61
夹层型	Q146	1646.9	15	37.920	0.213	2.6237	65.11
		1646.8	15	24.445	0.202	2.6237	65.96
	G84	2005.3	20	42.216	0.224	2.6396	62.19
		2005.6	20	36.658	0.237	2.6412	61.82

式中: ν 为泊松比; γ 为水平最小地应对应的构造应力系数; β 为水平最大地应对应的构造应力系数; σ_v 为上覆地层应力,单位MPa; α 为 B_{iot} 有效应力系数; σ_h 、 σ_H 分别为最大、最

小水平主地应力,单位MPa; p_p 为地层压力,单位MPa。

有效应力系数表达式:

$$\alpha = \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \quad (5)$$

最大、最小水平主地应力梯度表达式如下:

$$\Delta\sigma_H = \left(\frac{\sigma_H}{H} \right) \times 100 \quad (6)$$

$$\Delta\sigma_h = \left(\frac{\sigma_h}{H} \right) \times 100 \quad (7)$$

式中: H 为地层深度,单位m。

通过上面的公式计算可以得到不同类型页岩水平地应力以及最大、最小水平主地应力梯度(表2)。3种类型页岩相比之下,页理型和纹层型页岩的地应力、地应力梯度和围压均偏大;由于最小水平地应力梯度越小,岩石越易压裂,因此夹层型页岩易于造缝。研究表明:在其他条件不变的情况下,随着地应力的增加,水力压裂就会越困难^[40];同时,随着围压上升,压裂裂缝宽度会下降,渗流阻力持续增大,渗流量相应下降^[41],裂缝扩展难度随之增大。因此,相较于夹层型页岩,页理型和纹层型页岩起裂和裂缝扩展难度大,压后导流能力小。

表2 不同页岩水平地应力结果

Table 2 Horizontal in-situ stress results of different shales

页岩类型	深度范围/m	井号	围压均值/MPa	最小水平地应力均值/MPa	最大水平地应力均值/MPa	最小水平地应力梯度均值/(MPa/hm)	最大水平地应力梯度均值/(MPa/hm)
页理型	2 000.000~2 099.900	L287	22.348	36.009	39.352	1.757	1.920
	1 700.120~1 799.990	L18	18.979	25.641	31.889	1.465	1.794
纹层型	2 033.035~2 399.910	M138	24.872	40.532	43.124	1.725	1.835
	2 100.100~2 199.970	L226	23.286	37.614	41.113	1.749	1.912
夹层型	1 600.000~1 699.880	Q146	15.515	26.511	31.013	1.607	1.879
	2 000.000~2 099.870	G84	15.613	29.274	35.961	1.428	1.754

2.2 矿物成分等因素对岩石力学特性的影响

根据X射线衍射实验结果,页理型页岩由石英、长石(钾长石、斜长石)、碳酸盐(方解石、白云石、菱铁矿)、黄铁矿和黏土矿物(伊利石、绿泥石和伊蒙混层)构成,矿物含量由高到低依次为石英、黏土矿物、长石、碳酸盐、黄铁矿,其平均值依次为39.93%、31.52%、19.80%、8.03%、0.72%;纹层型页岩组成矿物含量由高到低为石英、黏土矿物、长石、碳酸盐、黄铁矿,其平均值依次为49.40%、21.28%、19.77%、9.50%、0.05%;夹层型页岩组成矿物含量由高到低依次为石英、长石、黏土矿物、碳酸盐,其平均值依次为40.45%、28.48%、17.99%、13.08%。

刚性矿物主要包括石英、长石等,其含量越高,岩石抗压实作用越强^[42],在压裂后裂缝保持张开的能力越好。

脆性矿物主要包括黄铁矿、碳酸盐等,其含量越高、岩石的脆性越强,容易形成裂缝。从图5可知,夹层型页岩的脆性矿物和刚性矿物含量高于纹层型和页理型页岩;因此,夹层型页岩压裂易产生裂缝,且裂缝保持张开的能力更好。

页岩矿物组成含量对弹性模量和泊松比的影响分别如图6和图7所示,对于不同类型的页岩,刚性矿物和脆性矿物的含量越多,弹性模量数值越大、泊松比数值越小。RICKMAN等^[43]认为弹性模量越大、泊松比越小,脆性越强,相应岩石的可压性越强,越有利于缝网的延伸。从图6a和图7a折线图趋势可看出,夹层型的刚性矿物和脆性矿物含量最高,其弹性模量最大、泊松比最小,因此具有最优的可压性,造缝能力突出,开采效率显著高于其他类型页岩。

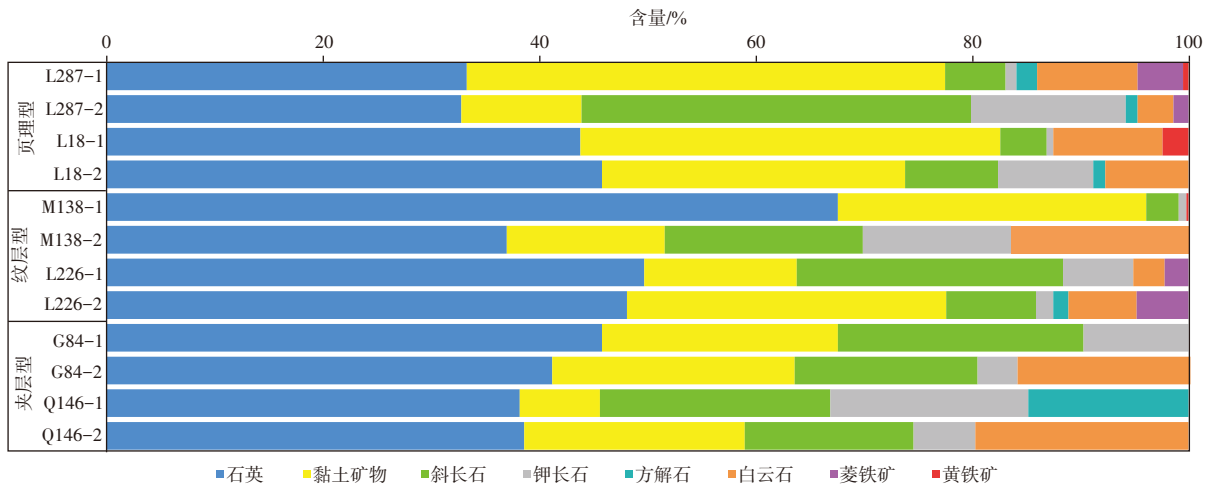


图5 X射线衍射全岩分析

Fig. 5 X-ray diffraction whole-rock analysis

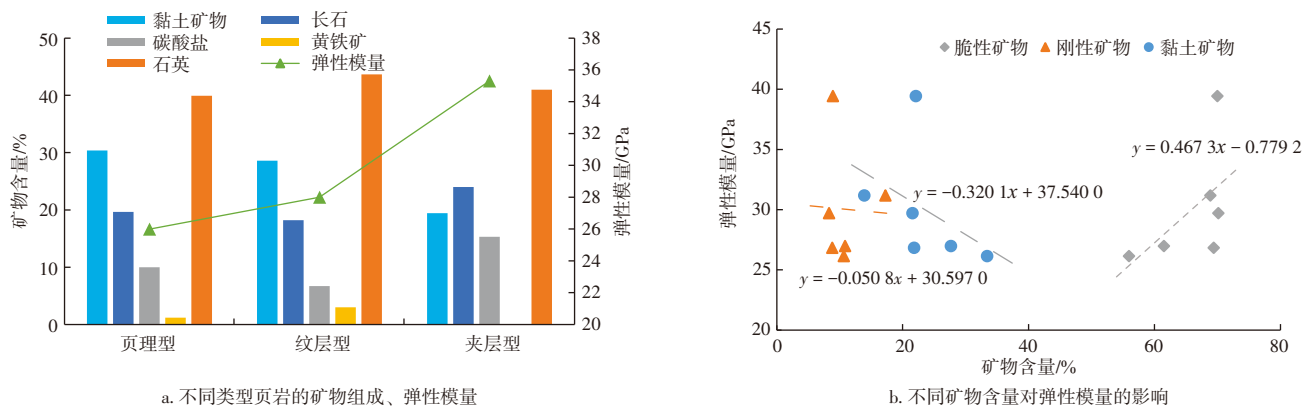


图6 页岩矿物含量对弹性模量的影响

Fig. 6 Influence of shale mineral content on elastic modulus

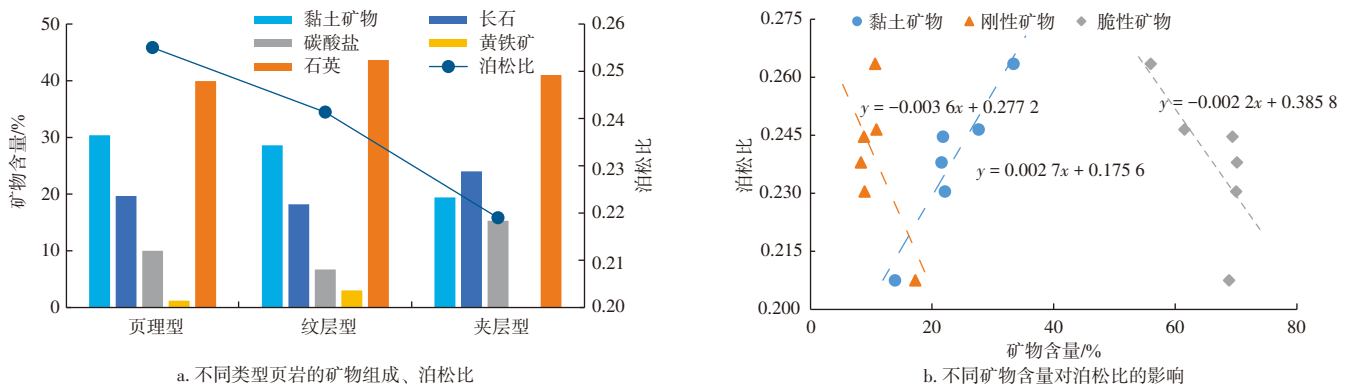


图7 页岩矿物含量对泊松比的影响

Fig. 7 Influence of shale mineral content on Poisson's ratio

3 裂缝导流能力分析

水力压裂页岩储层的主要目的在于形成具备高导流能力的人工裂缝。而裂缝导流能力的维持情况,直接受到支撑剂能否有效支撑的影响。研究通过开展支撑剂导流能力实验,对支撑剂进行优选;同时,依据支撑剂嵌入

实验,探究不同类型页岩的岩石力学参数对裂缝导流能力的影响。

RICKMAN等^[43]脆性指数作为评估页岩脆性的常用手段已被广泛应用,李庆辉等^[28]通过对比中国黑色页岩与北美页岩的杨氏模量与泊松比数据,证实了中国页岩同样展现出RICKMAN所述的脆性特征变化,因此,选择0.5作为权重系数,通过以下公式来计算页岩储层的脆性

指数:

$$B_{rit} = 0.5 \frac{(E - E_{min})}{E_{max} - E_{min}} + 0.5 \frac{(\mu_{max} - \mu)}{\mu_{max} - \mu_{min}} \quad (8)$$

式中: B_{rit} 为脆性指数; E 为归一化弹性模量,单位GPa; μ 为归一化泊松比; E_{min} , E_{max} 分别为为最小弹性模量、最大弹性模量,单位GPa; μ_{max} , μ_{min} 分别为最大泊松比、最小泊松比。

通过上面的公式计算可以得到不同类型页岩的脆性指数(表3)。

以页岩脆性指数的平均值作为分析对比基准,可直观得出一下结论:最高,地层可压性最优,对压裂作业的

表3 不同类型页岩脆性指数分析

Table 3 Analysis of brittleness index of different types of shale

测试类型	页岩类型	最大值	最小值	均值
脆性指数 B_{rit}	夹层型	0.852	0.041	0.646
	纹层型	0.796	0.038	0.581
	页理型	0.774	0.041	0.504

反应灵敏,能够迅速形成复杂的网状裂缝,进而提高页岩油气的采收效率;页理型页岩脆性指数最低,压裂时仅产生简单的双翼型裂缝^[44-45]。根据支撑剂导流能力实验数据(表4),在20、25、30 MPa闭合压力下,随着填充密度增加,各类支撑剂导流能力均呈上升趋势。

表4 支撑剂导流能力测试结果统计

Table 4 Statistics of proppant conductivity test results

闭合压力/MPa	支撑剂类型	导流能力/($\mu\text{m}^2 \cdot \text{cm}$)				
		铺砂质量浓度 6 kg/m ²	铺砂质量浓度 8 kg/m ²	铺砂质量浓度 10 kg/m ²	铺砂质量浓度 12 kg/m ²	铺砂质量浓度 14 kg/m ²
20	10/20目石英砂	180	220	180	330	380
	20/40目石英砂	80	150	140	160	165
	40/70目石英砂	24	31	37	40	50
	20/40目陶粒	180	270	300	320	400
25	10/20目石英砂	100	150	210	230	270
	20/40目石英砂	70	90	100	140	140
	40/70目石英砂	18	24	27	32	40
	20/40目陶粒	150	250	270	300	370
30	10/20目石英砂	80	110	140	160	180
	20/40目石英砂	60	80	90	120	110
	40/70目石英砂	15	20	24	27	32
	20/40目陶粒	150	230	260	290	350

在20、25、30 MPa闭合压力条件下,不同类型支撑剂的导流能力随填充密度的变化规律,如图8—图10所示。随着支撑剂填充密度和粒径的增加,导流能力呈增大趋势。在20 MPa闭合压力下,20/40目石英砂和40/70目石英砂导流能力较低,而10/20目石英砂与20/40目陶粒导流能力接近;在25 MPa和30 MPa闭合压力下,20/40目陶粒导流能力显著高于10/20目石英砂、20/40目石英砂和40/70目石英砂(图8—图10)。考虑到支撑剂材料的成本问题,研究区低围压环境可采用10/20目石英砂作为支撑剂,并推荐填充密度为14 kg/m²。实际应用中需结合储层地质条件,动态优化支撑剂类型、粒径及填充密度。此外,可通过引入微地震监测与声发射监测等实时技术,精准评估压裂效果,为压裂工艺的动态调整提供数据支撑。

通过支撑剂嵌入实验,研究了闭合压力与支撑剂填充密度对嵌入深度的影响规律,实验结果如图11和图12所示。实验表明:当闭合压力升高或支撑剂填充密度降

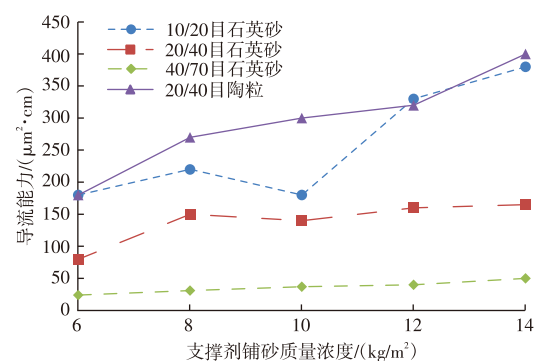


图8 20 MPa闭合压力下不同支撑剂导流能力

Fig. 8 Conductivity of different proppants under 20 MPa closure pressure

低时,支撑剂嵌入深度显著增大;在相同闭合压力或填充密度条件下,夹层型页岩的嵌入深度最小,导流能力最强。深入分析发现,这一现象与夹层型页岩的高弹性模量、低泊松比特性密切相关,其力学性质有利于降低支撑剂嵌入效应;而页理型和纹层型页岩因存在较大的地应

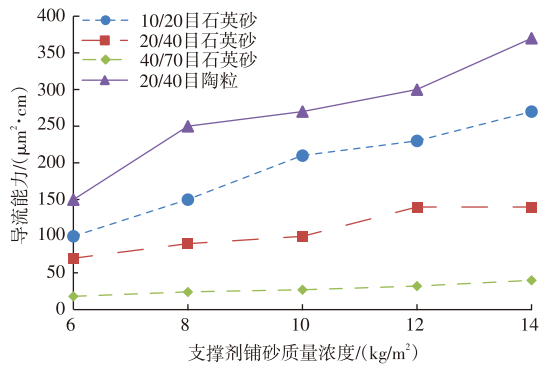


图9 25 MPa 闭合压力下不同支撑剂导流能力

Fig. 9 Conductivity of different proppants under 25 MPa closure pressure

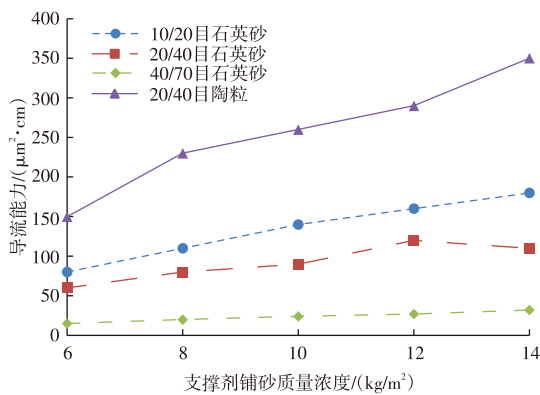


图10 30 MPa 闭合压力下不同支撑剂导流能力

Fig. 10 Conductivity of different proppants under 30 MPa closure pressure

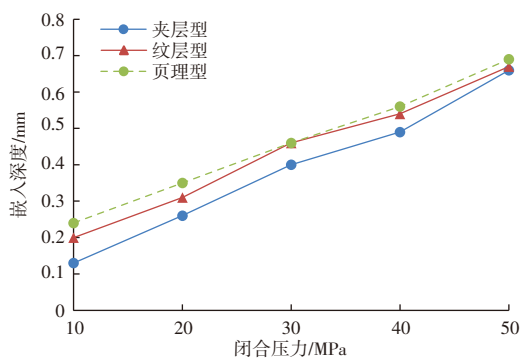


图11 闭合压力对嵌入的深度影响

Fig. 11 Influence of closure pressure on embedding depth

力梯度及较高的地应力与围压,导致裂缝扩展阻力显著增加,从而加剧了支撑剂嵌入深度。

此外,岩石中的脆性矿物含量与脆性指数、刚性矿物含量与弹性模量均呈显著正相关关系,这一规律进一步揭示了夹层型页岩在压裂过程中形成复杂裂缝网络的优势。结合鄂尔多斯盆地长7段的地质背景分析,夹层型页岩形成于半深湖—深湖相沉积环境,沉积速率较低且成岩压实作用较强,导致刚性矿物含量显著提升、孔隙率显著降低,进而表现出硬脆的力学特性。

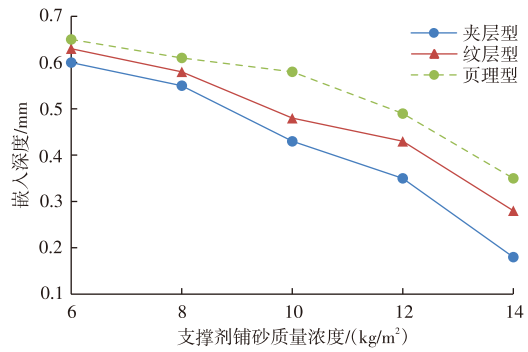


图12 支撑剂铺砂质量浓度对嵌入深度的影响

Fig. 12 Influence of proppant packing density on embedding depth

4 结论

1) 基于三轴岩石力学实验结果,夹层型页岩呈现出泊松比相对较小、弹性模量相对较大的力学特征,这种特性使其在压裂过程中更易于形成有效裂缝;而页理型和纹层型页岩因存在较大的地应力梯度,且地应力与围压水平相对偏高,导致裂缝扩展阻力显著增加。

2) 与纹层型和页理型页岩相比,夹层型页岩的脆性指数较高,且刚性矿物与脆性矿物含量更为丰富。这表明夹层型页岩具有硬脆性,在压裂过程中能迅速形成复杂网状裂缝,并保持裂缝张开状态的能力较强。

3) 页岩压裂后,裂缝的导流能力会随支撑剂填充密度及粒径增大而提升。综合考虑成本因素,在低围压条件下,建议选用10~20目石英砂作为支撑剂,并采用14 kg/m²的填充密度。实际应用中需结合储层条件动态调整参数。实验表明,夹层型页岩的支撑剂嵌入深度最小、导流能力最强,这主要归因于其较大的弹性模量、较小的泊松比及较高的脆性指数。

4) 现场施工中,裂缝导流能力受多种因素综合影响。若资料充足,可进一步纳入更多变量分析。建议将有利压裂段设在低应力、高脆性、可压性好的夹层型页岩油储层区域。鉴于中国页岩储层埋藏深且地质条件复杂,其他区块在借鉴经验时需结合当地地质特征和工程技术水平进行优化调整。

参考文献

- [1] 贾承造,王祖纲,姜林,等. 中国页岩油勘探开发研究进展与科学技术问题[J]. 世界石油工业, 2024, 31(4): 1-11.
JIA Chengzhao, WANG Zugang, JIANG Lin, et al. Progress and key scientific and technological problems of shale oil exploration and development in China[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(4): 1-11.
- [2] 葛云锦,贺永红,许璟,等. 鄂尔多斯盆地长7泥岩生-储-排油特征及演化模式[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(2):

- 37-44.
- GE Yunjin, HE Yonghong, XU Jing, et al. Source-reservoir-oil characteristics and evolution model of Chang 7 shale in Ordos Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48(2): 37-44.
- [3] 何鑫, 陈世加, 胡琮, 等. 陆相页岩层系岩性组合模式及其对原油差异性富集的控制作用: 以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段为例[J]. 现代地质, 2024, 38(5): 1325-1337.
- HE Xin, CHEN Shijia, HU Cong, et al. Lithological combination model of the continental shale series and its controls on differential crude oil enrichment: A case study of the Chang 7 Member of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin [J]. Geoscience, 2024, 38(5): 1325-1337.
- [4] 王广利, 李阳阳, 王一帆, 等. 鄂尔多斯盆地南缘长7烃源岩地球化学特征与沉积环境[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(1): 91-103.
- WANG Guangli, LI Yangyang, WANG Yifan, et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of Chang 7 source rocks, Southern Ordos Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2024, 48(1): 91-103.
- [5] 汪志璇. 砂砾岩储层可压性评价: 以玛湖凹陷百口泉组为例[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2020.
- WANG Zhixuan. Evaluating the fracability of glutenite reservoirs: A case study of the Baikouquan Formation in the Mahu Sag [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2020.
- [6] 冯永超, 李大雷. 涇河油田页岩油储层井壁失稳机理研究[J]. 石油地质与工程, 2024, 38(1): 122-126.
- FENG Yongchao, LI Dalei. Wellbore instability mechanism of shale oil reservoir in Jinghe Oilfield [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2024, 38(1): 122-126.
- [7] 杨琦, 孙洁, 贾昱昕, 等. 鄂尔多斯盆地南部长8储层岩石力学实验研究[J]. 石油地质与工程, 2017, 31(4): 100-103.
- YANG Qi, SUN Jie, JIA Yuxin, et al. Experimental study on rock mechanics of Chang 8 reservoir in southern Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2017, 31(4): 100-103.
- [8] 谭现锋, 张强, 战启帅, 等. 干热岩储层高温条件下岩石力学特性研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(4): 110-117.
- TAN Xianfeng, ZHANG Qiang, ZHAN Qishuai, et al. Study on rock mechanical properties of hot-dry rock reservoir under high temperature [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4): 110-117.
- [9] 刘创新, 高红艳, 秦德文, 等. 地应力-岩石力学分析在东海低渗透致密砂岩气藏水平井压裂中的应用[J]. 世界石油工业, 2024, 31(3): 78-89.
- LIU Chuangxin, GAO Hongyan, QIN Dewen, et al. In-situ stress and rock mechanics analysis in the application of hydraulic fracturing for horizontal wells in the low-permeability and tight sandstone gas reservoirs of the East China Sea [J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(3): 78-89.
- [10] 刘登元. X区块须家河组致密砂岩岩石力学特性与裂缝扩展特征[J]. 石油地质与工程, 2024, 38(1): 20-27.
- LIU Dengyuan. Rock mechanical properties and fracture propagation characteristics of tight sandstone in Xujiahe Formation of X block [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2024, 38(1): 20-27.
- [11] 刘浩童, 刘玉栋, 段晓苗, 等. 页岩稳定剂氧化石墨烯的研制与评价[J]. 断块油气田, 2021, 28(6): 765-768, 791.
- LIU Haotong, LIU Yudong, DUAN Xiaomiao, et al. Research and evaluation of graphene oxide as shale stabilizer [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(6): 765-768, 791.
- [12] 王爱民, 王发明, 贺文卿, 等. 济阳拗陷油页岩力学性能特征实验[J]. 特种油气藏, 2023, 30(5): 144-150.
- WANG Aimin, WANG Faming, HE Wenqing, et al. Experimental on mechanical properties characteristics of oil shale in Jiyang depression [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2023, 30(5): 144-150.
- [13] 李凯, 乔卫民, 贺丽峰. 不同分层数量的煤系地层岩石单轴压缩试验分析[J]. 煤, 2023, 32(11): 76-80.
- LI Kai, QIAO Weimin, HE Lifeng. Analysis of rock uniaxial compression test in coal measures with different number of layers [J]. Coal, 2023, 32(11): 76-80.
- [14] 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.
- AI Chi, QIU Dezhi, ZHANG Jun, et al. Measurements of mechanical parameters and brittleness anisotropy of shale [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2017, 24(5): 647-651.
- [15] 房定旺. 岩体弱面及岩石锯断面直剪试验的微机实践[J]. 金属矿山, 1988(8): 21-25.
- FANG Dingwang. Microcomputer practice of direct shear test of weak rock surface and rock saw section [J]. Metal Mine, 1988(8): 21-25.
- [16] 李银平, 蒋卫东, 刘江, 等. 湖北云应盐矿深部层状盐岩直剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(9): 1767-1772.
- LI Yinping, JIANG Weidong, LIU Jiang, et al. Direct shear tests for layered salt rocks of yunying salt mine in Hubei province [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(9): 1767-1772.
- [17] 张志飞, 唐为民, 贾洪彪. 不同粗糙度断续节理岩体直剪试验的颗粒流模拟[J]. 长江科学院院报, 2020, 37(12): 126-132.
- ZHANG Zhifei, TANG Weimin, JIA Hongbiao. Particle flow simulation of direct shear test on rock mass containing discontinuous joints with different roughness coefficients [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020, 37(12): 126-132.
- [18] 兰恒星, 陈俊辉, 伍宇明. 三轴压缩试验前后含气页岩微纳尺度裂隙空间分布特征研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 24-35.
- LAN Hengxing, CHEN Junhui, WU Yuming. Spatial characterization of micro- and nanoscale microcracks in gas shale before and after triaxial compression test [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(1): 24-35.
- [19] 任颖惠, 韩进. 真三轴条件下延安蟠龙地区致密砂岩力学特性试验[J]. 石油地质与工程, 2024, 38(2): 8-12.
- REN Yinghui, HAN Jin. Mechanical properties of tight sandstone in Yan'an Panlong area under true triaxial conditions [J]. Petroleum Geology & Engineering, 2024, 38(2): 8-12.
- [20] 张文, 刘向君, 梁利喜, 等. 高温下页岩三轴压缩实验及井壁稳定研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(1): 62-70.
- ZHANG Wen, LIU Xiangjun, LIANG Lixi, et al. Triaxial compression experiment and wellbore stability study of shale under high temperature [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(1): 62-70.
- [21] 陈军斌, 李育, 马焕焕, 等. 考虑裂缝影响的页岩三轴压缩实验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(26): 10778-10782.

- CHEN Junbin, LI Yu, MA Huanhuan, et al. Experimental study on the three-axis compression of shale considering the influence of the crack[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(26): 10778–10782.
- [22] 张梦雅, 李严严, 左通, 等. 鄂尔多斯盆地南部长7段富有机质页岩微观结构特征[J]. *世界石油工业*, 2024, 31(6): 38–45.
- ZHANG Mengya, LI Yanyan, ZUO Tong, et al. Microstructural characterization of organic-rich shale in Ordos Yanchang Formation [J]. *World Petroleum Industry*, 2024, 31(6): 38–45.
- [23] 曹峰, 李龙, 余小龙, 等. 水化作用下硬脆性泥页岩理化性能与力学特性实验研究[J]. *重庆科技大学学报(自然科学版)*, 2025, 27(2): 21–29.
- CAO Feng, LI Long, YU Xiaolong, et al. An experimental study of the physic-chemical properties of hard and brittle shale under hydration[J]. *Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2025, 27(2): 21–29.
- [24] 赵金洲, 任岚, 胡永全. 页岩储层压裂缝成网延伸的受控因素分析[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(1): 1–9.
- ZHAO Jinzhou, REN Lan, HU Yongquan. Controlling factors of hydraulic fractures extending into network in shale formations[J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2013, 35(1): 1–9.
- [25] 张学平, 刘友权, 张鹏飞, 等. 大川中沙溪庙致密砂岩储层支撑裂缝导流能力的影响因素[J]. *石油与天然气化工*, 2024, 53(3): 92–97.
- ZHANG Xueping, LIU Youquan, ZHANG Pengfei, et al. Influencing factors of the fracture conductivity of propped cracks in the Shaximiao tight sandstone reservoir in central Sichuan.[J]. *Chemical Engineering of Oil & Gas*, 2024, 53(3): 92–97.
- [26] 张宜. 页岩气储层脆性评价方法研究现状[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2019, 46(7): 51–56.
- ZHANG Yi. Research status of shale gas reservoir brittleness evaluation method[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019, 46(7): 51–56.
- [27] 赖富强, 冷寒冰, 龚大建, 等. 综合矿物组分和弹性力学参数的页岩脆性评价方法[J]. *断块油气田*, 2019, 26(2): 168–171, 186.
- LAI Fuqiang, LENG Hanbing, GONG Dajian, et al. Evaluation of shale brittleness based on mineral compositions and elastic mechanics parameters[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2019, 26(2): 168–171, 186.
- [28] 李庆辉, 陈勉, 金衍, 等. 页岩气储层岩石力学特性及脆性评价[J]. *石油钻探技术*, 2012, 40(4): 17–22.
- LI Qinghui, CHEN Mian, JIN Yan, et al. Rock mechanical properties and brittleness evaluation of shale gas reservoir[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2012, 40(4): 17–22.
- [29] ZHANG J, KAMENOV A, ZHU D, et al. Laboratory measurement of hydraulic fracture conductivities in the Barnett shale[C]//SPE Hydraulic fracturing technology conference. SPE, 2013: D021S005R006.
- [30] COOKE C E Jr. Conductivity of fracture proppants in multiple layers [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1973, 25(9): 1101–1107.
- [31] WEAVER J D, NGUYEN P D, PARKER M A, et al. Sustaining fracture conductivity[C]//SPE European formation damage conference. SPE, 2005: SPE-94666-MS.
- [32] WARPINSKI N R, MAYERHOFER M J, VINCENT M C, et al. Stimulating unconventional reservoirs: Maximizing network growth while optimizing fracture conductivity[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2009, 48(10): 39–51.
- [33] 付金华, 赵会涛, 董国栋, 等. 鄂尔多斯盆地新领域油气勘探发现与前景展望[J]. *天然气地球科学*, 2023, 34(8): 1289–1304.
- FU Jinhua, ZHAO Huitao, DONG Guodong, et al. Discovery and prospect of oil and gas exploration in new areas of Ordos Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2023, 34(8): 1289–1304.
- [34] 付金华, 牛小兵, 淡卫东, 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 Jinhua, NIU Xiaobing, DAN Weidong, 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.
- [35] 杨璞, 路俊刚, 代林锋, 等. 鄂尔多斯盆地合水地区长7段源储结构及其致密油差异富集模式[J]. *世界石油工业*, 2025, 32(3): 55–67.
- YANG Pu, LU Jungang, DAI Linfeng, et al. Source-reservoir structure and its control on differential enrichment patterns of tight oil in the Chang 7 member of the Heshui area, Ordos Basin[J]. *World Petroleum Industry*, 2025, 32(3): 55–67.
- [36] 付金华, 王龙, 陈修, 等. 鄂尔多斯盆地长7页岩油勘探开发新进展及前景展望[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(5): 1–14.
- FU Jinhua, WANG Long, CHEN Xiu, et al. Progress and prospects of shale oil exploration and development in the seventh member of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(5): 1–14.
- [37] 国土资源部. 岩石物理力学性质试验规程第20部分: 岩石三轴压缩强度试验: DZ/T 0276.20—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Regulation for testing the physical and mechanical properties of rock: Part 20: Test for determining the strength of rock in triaxial compression: DZ/T 0276.20—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.
- [38] 文韬. 岩石矿物对岩石脆性指数的影响[D]. 大庆: 东北石油大学, 2020.
- WEN Tao. Effects of rock mineral composition on rock mechanical properties[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2020.
- [39] 黄荣樽, 庄锦江. 一种新的地层破裂压力预测方法[J]. *石油钻采工艺*, 1986, 8(3): 1–14.
- HUANG Rongzun, ZHUANG Jinjiang. A new prediction method of formation fracture pressure[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 1986, 8(3): 1–14.
- [40] 王珂, 韩伟, 王刚, 等. 地应力对水力压裂效果的影响[J]. *煤炭技术*, 2017, 36(12): 130–132.
- WANG Ke, HAN Wei, WANG Gang, et al. Effect of in situ stress to hydraulic fracturing[J]. *Coal Technology*, 2017, 36(12): 130–132.
- [41] 张庆. 高水压和围压温度耦合作用下压裂裂隙渗流特性研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2021.
- ZHANG Qing. Study on seepage characteristics of fractures under the coupling of high water pressure and confining pressure temperature[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2021.
- [42] 范存辉, 郝挺, 刘勇, 等. 川南泸州地区龙马溪组一段有机质页岩

- 裂缝发育特征及有利区评价[J]. 石油实验地质, 2025, 47(6): 1282-1294.
- FAN Cunhui, HAO Ting, LIU Yong, et al. Development characteristics and favorable area evaluation of organic-rich shale fractures in first member of Longmaxi Formation, Luzhou area, southern Sichuan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2025, 47(6): 1282-1294.
- [43] RICKMAN R, MULLEN M, PETRE E, et al. A practical use of shale petrophysics for stimulation design optimization: All shale plays are not clones of the Barnett shale[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Richardson: Society of Petroleum Engineers, 2008: SPE-115258-MS.
- [44] 丛平, 闫建平, 井翠, 等. 页岩气储层可压裂性级别测井评价及展布特征: 以川南X地区五峰组—龙马溪组为例[J]. 岩性油气藏, 2021, 33(3): 177-188.
- CONG Ping, YAN Jianping, JING Cui, et al. Logging evaluation and distribution characteristics of fracturing grade in shale gas reservoir: A case study from Wufeng Formation and Longmaxi Formation in X area, southern Sichuan Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2021, 33(3): 177-188.
- [45] 王冠民, 祝新怡, 刘海, 等. 沉积微相在致密砂岩可压裂性分析中的应用: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延长组7段为例[J]. 地质力学学报, 2024, 30(6): 893-905.
- WANG Guanmin, ZHU Xinyi, LIU Hai, et al. The application of sedimentary microfacies on the fracability of tight sandstone reservoir in Chang 7 member of Longdong area in the Ordos Basin[J]. Journal of Geomechanics, 2024, 30(6): 893-905

(编辑 徐佩)