引用格式：王华，罗文琴，钟广浩，等．多岩性力学试验及其对深部煤层气开发的启示——以鄂尔多斯盆地东缘为例[J]. 油气藏评价与开发，XXXX，XX(XX)：
Wang Hua, Luo Wenqin, Zhong Guanghao, et al. Multi-lithology mechanical test and its enlightenment to the development of deep coalbed methane: taking the eastern Ordos Basin as an example[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, XXXX, XX(XX):
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.20260254

多岩性力学试验及其对深部煤层气开发的启示
——以鄂尔多斯盆地东缘为例

王 华[1,2]，罗文琴[1,2]，钟广浩[1,2]，王一妃[1,2]，陈红飞[1,2]，李得路[3,4,5]
（1.中国石油长庆油田公司勘探开发研究院，陕西 西安 710018；2.低渗透油气勘探开发国家工程实验室，陕西 西安 710018；
3.西安科技大学地质与环境学院，陕西 西安 710054；4.陕西省煤炭绿色开发地质保障重点实验室，陕西 西安 710054；
5.西安科技大学煤炭绿色开采地质研究院，陕西 西安 710054）

摘要：鄂尔多斯盆地东缘本溪组—太原组发育煤、砂岩、泥岩、灰岩多岩性互层结构，不同岩性力学性质的显著差异是制约深部煤层气压裂改造的核心地质因素。本文以鄂尔多斯盆地东缘本溪组—太原组含煤岩系为研究对象，系统采集四种岩性样品，开展三轴压缩、巴西劈裂及断裂韧度试验，获取杨氏模量、泊松比、抗压强度、抗拉强度及断裂韧度等关键力学参数，并从裂缝穿层扩展、支撑剂嵌入与导流能力、井壁稳定性及可压裂性评价四个维度，系统阐述力学差异对深部煤层气开发的工程启示。研究结果表明：①通过对鄂尔多斯盆地东缘本溪组—太原组多岩性含煤岩系开展系统的多方法力学参数对比研究，揭示了四种岩性力学参数的显著分异规律。②基于实测力学参数，从压裂模式、支撑剂嵌入和井壁稳定性3个方面，提出了深部煤层气在压裂过程中采用层内缝网最大化以改造煤储层，煤层内小粒径高强度支撑剂配合阶梯式加砂的优化注入方案以及在钻井过程中使用低密度钻井液平衡地层压力并维持井壁稳定。③构建了融合弹性脆性指数（BIE）、综合可压指数（CFI）及多参数加权指数（FI）的三级可压裂性评价体系，突破了传统单一脆性指数的局限性。本研究为鄂尔多斯盆地深部煤层气储层压裂选层、工艺优化及井壁稳定性提供定量化科学依据。

关键词：鄂尔多斯盆地；煤系地层；本溪组；太原组；深部煤层气；力学性质；三轴力学试验；可压裂性
中图分类号：TE122　　**文献标识码**：A

Multi-lithology mechanical test and its enlightenment to the development of deep coalbed methane: taking the eastern Ordos Basin as an example

Wang Hua[1,2], Luo Wenqin[1,2], Zhong Guanghao[1,2], Wang Yifei[1,2], Chen Hongfei[1,2], Li Delu[3,4,5]

(1. Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 2. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an, Shaanxi 710018, China; 3. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 4. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Geological Guarantee for Coal Green Development, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 5. Institute of Coal Green Mining Geology, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: The Benxi-Taiyuan Formation in the eastern margin of the Ordos Basin has developed a multi-lithologic interbedded structure of coal, sandstone, mudstone and limestone. The significant differences in the mechanical properties of different lithologies are the core geological factors that restrict the fracturing of deep coalbed methane. In this paper, the Benxi Formation and Taiyuan Formation coal-bearing rock series in the eastern margin of the Ordos Basin are taken as the research object, and four lithologic samples are systematically collected. Triaxial compression, Brazilian splitting and fracture toughness tests are carried out to obtain Young's modulus, Poisson's ratio, compressive strength, tensile strength and fracture toughness. The key mechanical parameters such as toughness, and from the four dimensions of fracture layer expansion, proppant embedding and conductivity, wellbore stability and fracturing evaluation, the engineering

收稿日期：2026-09-14。
第一作者简介：王华（1969—），男，高级工程师，主要从事天然气开发地质及水平井开发等研究．。地址：陕西省西安市未央区凤城四路中国石油长庆油田公司勘探开发研究院，邮政编码：710018。E-mail：wh3-cq@petrochina.com.cn
通信作者简介：李得路（1988—），男，博士，副教授，主要从事沉积矿产的勘探与开发方面研究工作。地址：陕西省西安市雁塔中路58号西安科技大学地质与环境学院，邮政编码：710054。E-mail：lidelu322@126.com
基金项目：新型油气勘探开发国家科技重大专项（2025ZD1404203）；中国石油长庆油田分公司科技项目（2026D3JS02）；国家自然科学基金青年科学基金项目（42102196）。

enlightenment of mechanical differences on deep coalbed methane development is systematically expounded. The results show that: (1) A systematic comparative study of multi-method mechanical parameters of multi-lithologic coal-bearing rock series in Benxi-Taiyuan Formation in the eastern margin of Ordos Basin reveals the significant differentiation law of four lithological mechanical parameters. (2) Based on the measured mechanical parameters, from the three aspects of fracturing mode, proppant embedment and wellbore stability, it is proposed that the deep coal-bed methane is used to maximize the intra-layer fracture network during the fracturing process to transform the coal-rock reservoir, and the small-size high-strength proppant in the coal-rock layer is combined with the stepped sanding. Optimized injection plan and use low-density drilling fluid to balance formation pressure and maintain wellbore stability during drilling. (3) A three-level fracability evaluation system integrating elastic brittleness index (BIE), comprehensive compressibility index (CFI) and multi-parameter weighted index (FI) is constructed, which breaks through the limitations of traditional single brittleness index. This study provides a quantitative scientific basis for fracturing layer selection, process optimization and wellbore stability of deep coalbed methane reservoirs in Ordos Basin.

Keywords: Ordos Basin; coal measure strata; Benxi Formation; Taiyuan Formation; deep coalbed methane; mechanical property; triaxial mechanics test; fracability

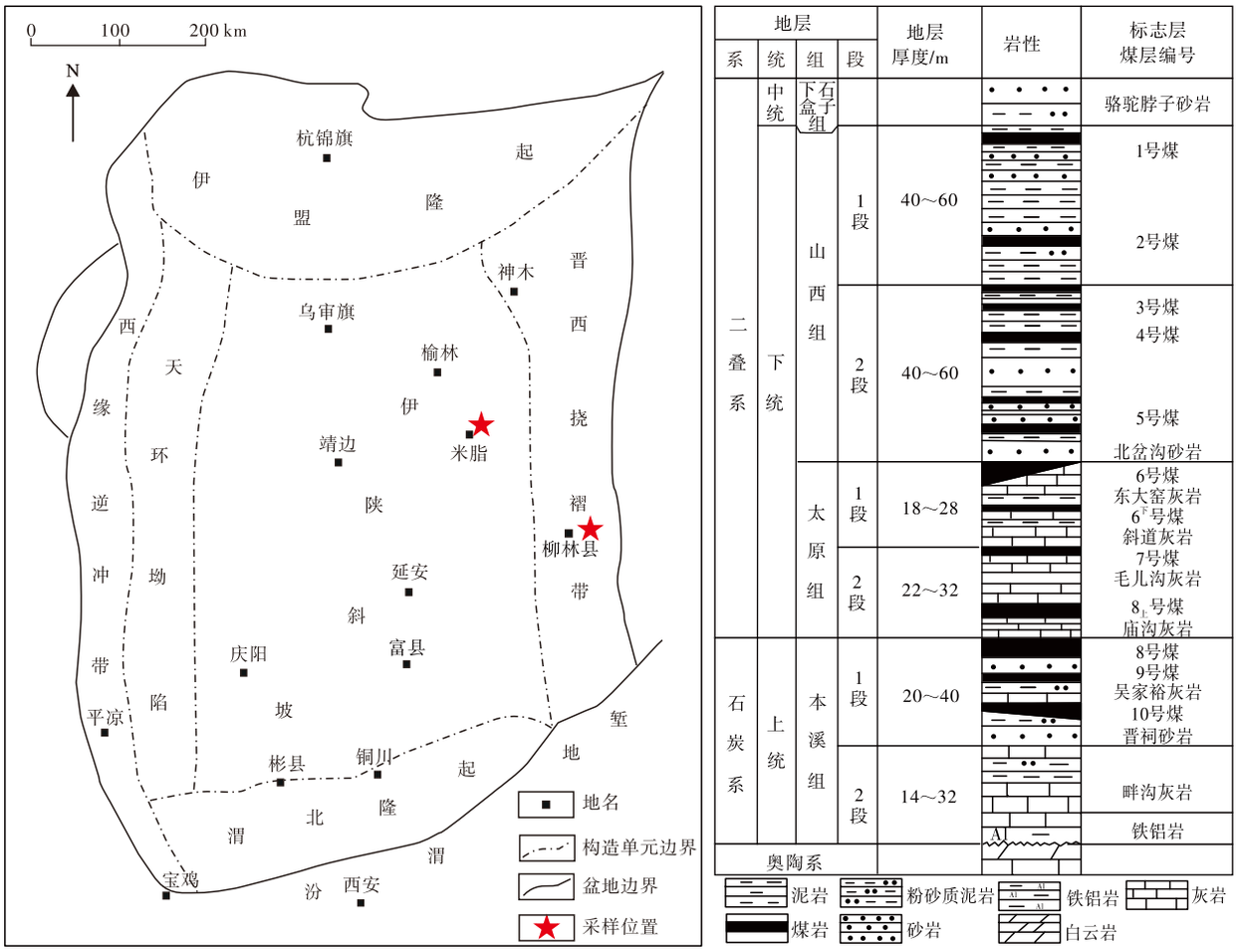
深部煤层气是指赋存于深部煤岩储层中的天然气资源,其赋存形式多样,包括以游离态赋存于煤岩孔隙-裂隙中的游离气、以吸附态附着于煤基质表面的吸附气、以溶解态存在于煤层水中的水溶气,以及由外部烃源岩生成后运移至深部煤层中聚集成藏的外源气,具有自生自储与外源补给并存、连续分布、多相态共存等特征[1-2]。近年来,鄂尔多斯盆地大宁—吉县、神木、佳县等区块深部煤层气勘探开发的不断突破,提升了我国深部煤层气资源规模和开发前景[3]。深部煤层气已成为继页岩气、致密砂岩气之后非常规天然气领域的重要资源,对保障我国能源安全具有重要的战略意义[4]。鄂尔多斯盆地石炭系本溪组不同岩性间的力学性质差异显著,直接影响水力压裂裂缝的穿层扩展能力、支撑剂嵌入程度、井壁稳定性及储层可压裂性,进而制约深部煤层气的高效开发[5-6]。因此,系统分析煤及其顶底板围岩的力学参数,对深部煤层气的勘探和开发具有重要的理论与工程意义。

目前,国内外学者针对煤及围岩力学特性开展了大量研究[7-8]。深部不同岩性间显著的力学性质差异,是影响深部煤层气勘探与储层压裂改造的主要因素之一[9]。付海峰等[10]指出,水力压裂过程中,层理面胶结能力是水力裂缝垂向延伸的决定性因素。裂缝的穿层扩展能力主要取决于裂纹尖端的应力强度、缝内净压力、地应力以及岩石的力学性质差异共同制约[11]。针对支撑剂嵌入与导流能力问题,前人构建裂缝导流能力模型,发现支撑剂嵌入越深,虽会使裂缝宽度相应增大,但裂缝长度缩短,进而导致导流能力下降,不利于深部煤层气的高效开发[12]。辛佳博[13]通过分析地层岩性、地应力分布、钻井液性能并建立井筒—地层—水力学耦合模型,提高了井壁失稳风险的精准预测。在可压裂性评价方面,部分学者基于脆性指数、断裂韧度等单一参数出发,对储层可压裂性进行了初步评价[14]。然而,现有研究普遍聚焦于单一岩性或单一试验方法,缺乏对多岩性、多方法的系统对比与分析[15-16]。上述研究为深部煤层气的勘探和开发提供了重要基础,但对于鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气而言,仍缺乏系统性的力学参数测试与对比研究。如何将力学参数测试成果与压裂裂缝扩展、支撑剂嵌入与导流能力、井壁稳定性和压裂工程设计等实际问题相关联,并进行深入研究,仍是当前亟待解决的关键科学问题。

本文以鄂尔多斯盆地东缘本溪组—太原组含煤岩系为研究对象,系统采集四种岩性样品,开展三轴压缩、巴西劈裂及断裂韧度试验,获取力学参数,并从裂缝穿层扩展、支撑剂嵌入、井壁稳定及可压裂性评价4个方面,阐述力学差异对深部煤层气开发工程参数优化的启示,进而为深部煤层气的压裂选层与工艺优化提供科学依据。

1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地是中国第二大沉积盆地,深部煤层气勘探开发的重点区域[17]。盆地划分为伊盟隆起、伊陕斜坡、天环坳陷、晋西挠褶带、渭北隆起和西缘逆冲带6个构造单元(图1a)。盆地东缘构造处于伊陕斜坡与晋西挠褶带的过渡区,整体为向西倾的单斜构造,地层倾角平缓,断裂相对不发育,构造简单[18-19]。盆地上古生界自下而上发育上石炭统本溪组、二叠系下统太原组和山西组含煤地层,沉积环境由海陆交互相转为陆相。太原组主要发育6号、6号下部、7号、8号上部煤层,分布于山西组底部的北岔沟砂岩和太原组底部的庙沟灰岩之间。本溪组主要发育8号、9号、10号煤层,其中,8号煤层位于本溪组吴家裕灰岩之上,太原组庙沟灰岩之下[20]。本溪组底部是畔沟灰岩和铁铝岩,覆盖在马家沟组顶部不整合面之上(图1b)。本溪组8号煤层具有厚度大、分布稳定的特点,厚度介于5~12 m,平均埋深超过2 000 m,是研究区深部煤层气勘探开发潜力最大的煤层[21]。



a. 鄂尔多斯盆地构造单元划分及采样位置　　b. 地层综合柱状图

图1　鄂尔多斯盆地构造单元划分、采样位置及地层综合柱状图（据文献[22]修改）

Fig. 1　Division of tectonic units, sampling location, and comprehensive stratigraphic colunm of Ordos Basin (modified according to reference[22])

2　样品采集与试验方法

2.1　样品采集与制备

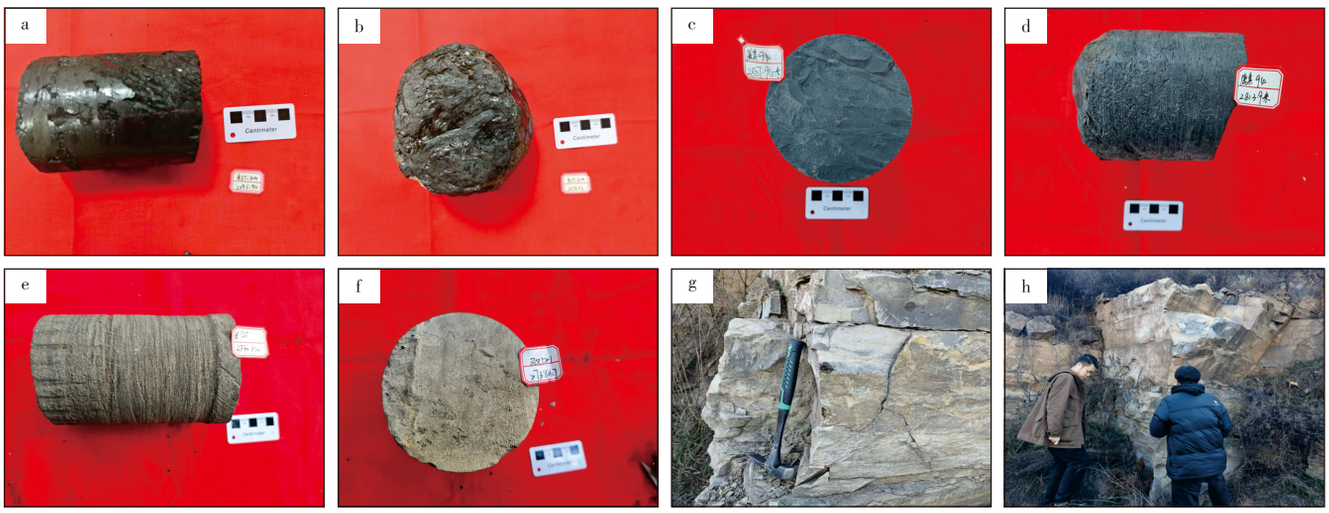
试验样品采自鄂尔多斯盆地东缘本溪组8号煤及其顶底板砂岩、泥岩的钻井岩芯和山西省柳林县太原组野外露头灰岩（图2），共58组样品。根据我国岩石力学试验规程和国际岩石力学学会（ISRM）规定的标准，将试样进行切割[23-24]。三轴压缩实验将样品切割成尺寸为25 mm×50 mm的小圆柱，样品端面磨平0.02 mm；样品端面垂直于样品轴，误差在0.001弧度内。巴西劈裂试验将试样加工成直径50 mm、厚度25 mm的巴西圆盘试样。断裂韧度试验将试样加工成直径50 mm、厚度25 mm、卡槽长度18 mm、宽度1 mm且符合Ⅰ型断裂韧度CSTBD规格的直切槽圆盘试样。

2.2　试验方法

三轴岩石压缩试验采用伺服控制常规三轴实验系统（RTX-1 000），将符合国家质量监督检验检疫总局标准《工程岩体试验方法标准》（GB/T 50266—2013）规定的试样置于高压釜内，通过液压油施加恒定围压并由压机液缸施加轴向载荷直至破坏，获取应力—应变曲线及破坏时的体积应变和围压值，测得杨氏模量、泊松比、抗压强度等参数。

巴西劈裂试验遵循ISRM标准，采用WHY-300/10微机控制压力试验机，该机由油泵液压加载系统和计算机控制系统（TestWorld软件）组成，主空间测试力为300 kN、副空间为10 kN，力控分辨率为5×10^5，相对误差不大于1%。通过加载获取岩石全应力—应变曲线，并利用巴西劈裂法间接测定抗拉强度，分析岩石在单轴压缩与拉伸状态下的变形破坏机制。

断裂韧度试验采用ISRM标准的直切槽式CSTBD圆盘试件，遵循国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会标准《煤和岩石物理力学性质测定方法》（GB/T 23561—2024）。试验在WHY-300/10微机控制压力试验机上开展，通过载荷—位移曲线及裂纹扩展路径计算Ⅰ



注：a和b为本溪组煤样；c和d为本溪组泥岩；e和f为本溪组砂岩；g和h为太原组野外灰岩。

图2　鄂尔多斯盆地东缘典型样品照片

Fig. 2　Typical sample photos of eastern Ordos Basin

型断裂韧度KI，为水力压裂裂缝模拟及储层改造提供关键参数。

3　试验结果

3.1　三轴压缩试验

三轴压缩试验设定围压为25 MPa，以模拟本溪组8号煤约2 000 m埋深对应的原始有效应力条件（地层压力系数介于1.0～1.2，对应孔隙压力介于20～24 MPa），测定岩石的杨氏模量、泊松比及抗压强度，为深部煤储层可压裂性、支撑剂嵌入及井壁稳定性评价提供力学参数[25]。试验包含煤4块、砂岩5块、泥岩3块及灰岩5块。鉴于部分岩性样品数量有限，为反映参数离散程度，补充计算各力学参数的标准差（SD）来确定变异系数（CV），为更全面地表征不同岩性力学性质的分布特征。按照中国行业标准《水利水电工程岩石试验规程》（SL/T 264—2021）的计算公式[26]，计算轴向破坏应力：

$$\sigma_1 = p_{max}/A \tag{1}$$

式中：σ_1为轴向破坏应力，单位MPa；p_{max}为岩石试件最大破坏载荷，单位kN；A为试件受压面积，单位mm^2。

杨氏模量和泊松比计算方法为：

$$E = (\sigma_1 - \sigma_3)/\varepsilon_h \tag{2}$$

$$\mu = \varepsilon_d/\varepsilon_h \tag{3}$$

式中：E为岩石杨氏模量，单位GPa；μ为岩石泊松比；σ_1-σ_3为试件最大主应力差的50%，单位MPa；ε_h为轴向压缩应变；ε_d为对应的径向压缩应变。

三轴压缩试验结果显示：煤杨氏模量值介于2.38～5.10 GPa，平均值3.89 GPa，远低于砂岩、泥岩及灰岩（图3a）。煤泊松比值最高（图3b），介于0.237～0.313，平均值0.273，反映其侧向膨胀显著、塑性变形能力强。砂岩泊松比最低，平均值0.163；灰岩与泥岩居中，平均值分别为0.172和0.186。其中灰岩TY-3样品泊松比达0.252，与其高杨氏模量36.05 GPa组合，呈现显著塑性特征。抗压强度方面，煤均值67.93 MPa，灰岩的抗压强度最高（图3c），均值256.10 MPa，砂岩均值211.90 MPa，泥岩均值175.66 MPa（表1）。煤杨氏模量变异系数（CV）为28.8%，离散程度最高，反映煤内部发育割理、微裂隙等多尺度结构，具较强的非均质性；砂岩、灰岩和泥岩杨氏

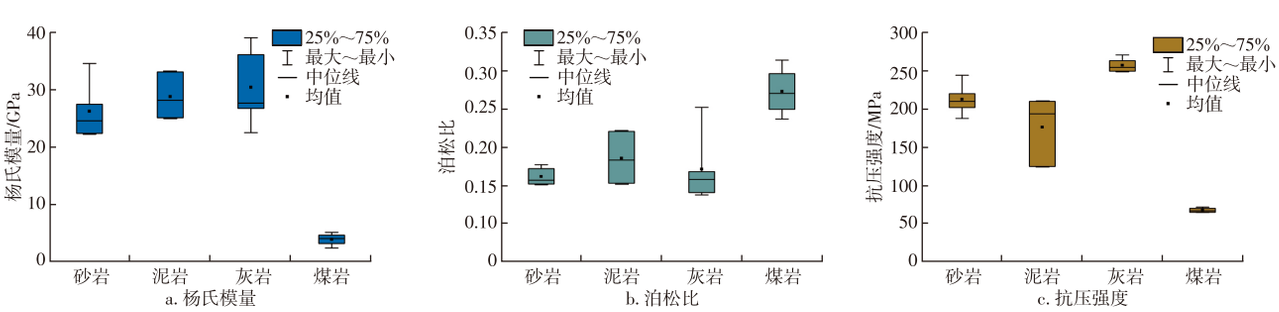


图3　鄂尔多斯盆地东缘试样三轴压缩试验参数箱形图

Fig. 3　Box plot of triaxial compression test parameters of eastern Ordos Basin

表1　鄂尔多斯盆地东缘试样三轴压缩试验结果

Table 1　Triaxial compression test results of eastern Ordos Basin samples

井号	深度/m	样品编号	岩性	杨氏模量/GPa	泊松比	抗压强度/MPa
S151	2 460.40	S151-1	砂岩	22.35	0.158	187.06
MZ166	2 348.20	MZ-166-1	砂岩	27.41	0.178	219.08
S151	2 460.30	S151-2	砂岩	24.54	0.153	201.13
MZ166	2 348.40	MZ-166-2	砂岩	34.53	0.173	243.01
S151	2 459.30	S151-3	砂岩	22.19	0.152	209.21
MZ23	2 594.80	MZ-23-1	泥岩	28.12	0.154	209.13
Q94	2 815.25	Q94-1	泥岩	25.07	0.221	124.81
MZ23	2 594.00	MZ-23-2	泥岩	33.04	0.184	193.04
野外露头		TY-1	灰岩	39.01	0.159	269.44
		TY-2	灰岩	27.63	0.139	253.20
		TY-3	灰岩	36.05	0.252	248.30
		TY-4	灰岩	26.70	0.169	247.44
		TY-5	灰岩	22.49	0.142	261.90
S46-44YH	2 739.60	YH-6	煤	5.10	0.313	68.85
S46-44YH	2 739.52	YH-5	煤	4.14	0.237	72.04
S46-44YH	2 739.41	YH-4	煤	3.95	0.278	64.97
S46-44YH	2 739.83	YH-8	煤	2.38	0.262	65.67

模量CV分别为19.8%、23.3%和14.0%;煤泊松比CV为11.7%,离散程度中等,反映煤内部有机质骨架刚度较大;砂岩、灰岩和泥岩抗压强度CV分别为7.3%、26.9%和18.0%;煤抗压强度CV为4.8%,离散程度较低,砂岩、灰岩和泥岩抗压强度CV分别为9.0%、4.0%和19.6%。

三轴压缩试验下所有样品的应力—应变曲线均呈现压密、弹性、屈服、破坏四阶段演化特征,反映了岩石力学响应的统一机制。灰岩与砂岩峰值强度高、屈服阶段短,属典型脆性岩石(图4—图5);泥岩强度中等、屈服阶段较长且峰后渐降,呈弹塑性过渡特征(图6);煤则强度极

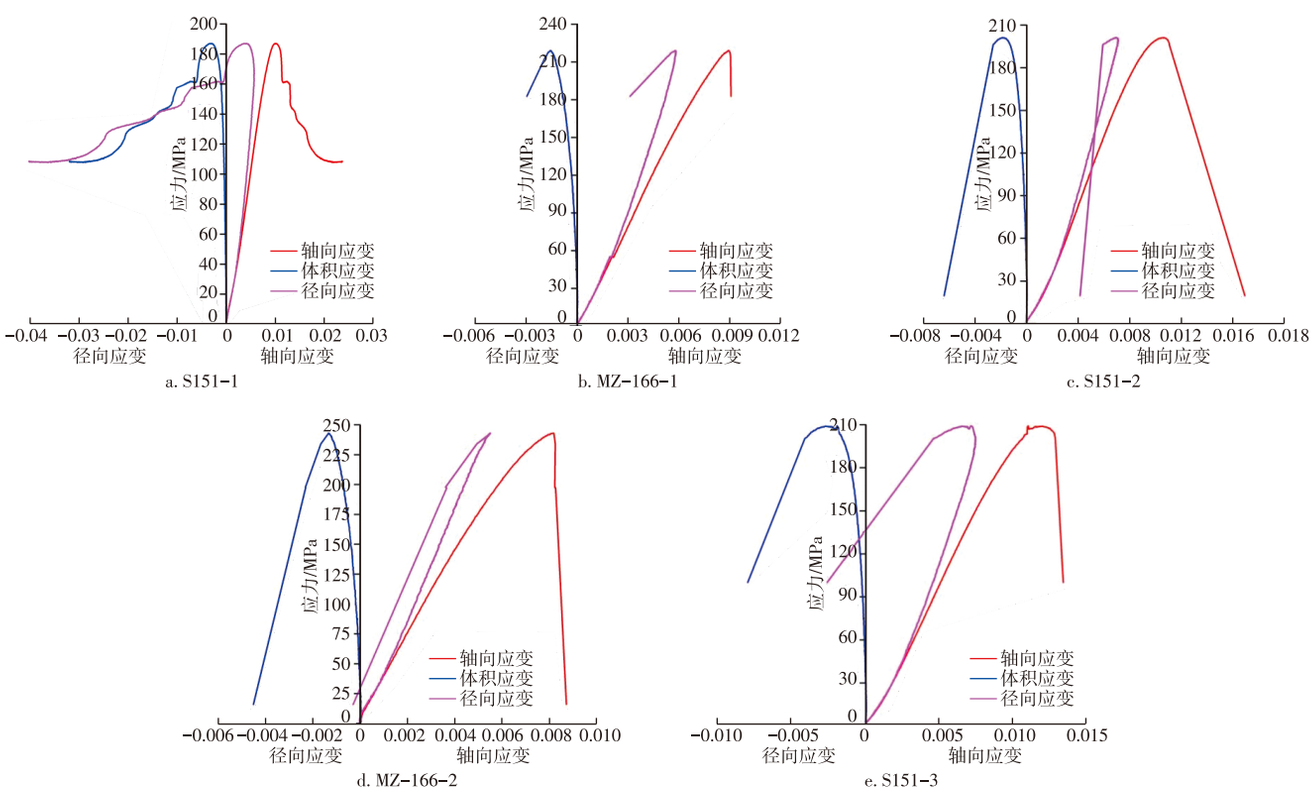


图4　鄂尔多斯盆地东缘砂岩三轴压缩试验应力—应变曲线

Fig. 4　Stress-strain curve of sandstone triaxial compression test in eastern Ordos Basin

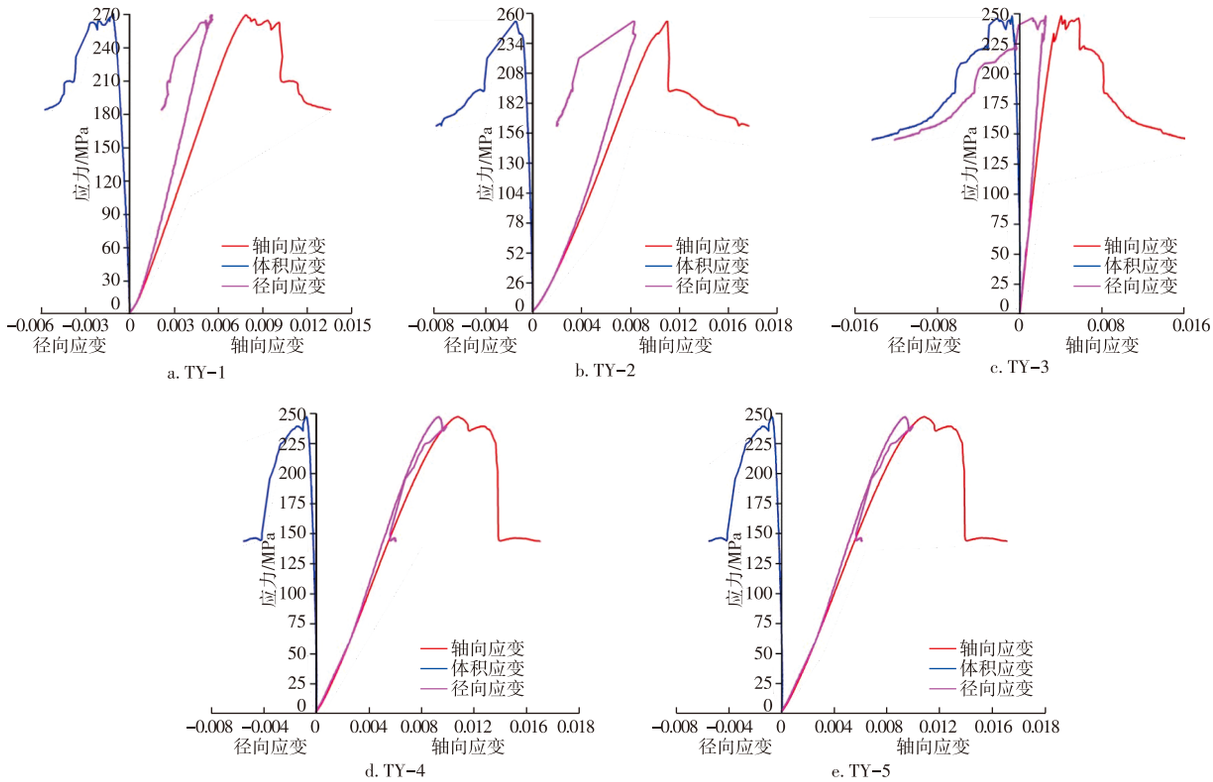


图5 鄂尔多斯盆地东缘灰岩三轴压缩试验应力—应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve of limestone triaxial compression test in eastern Ordos Basin

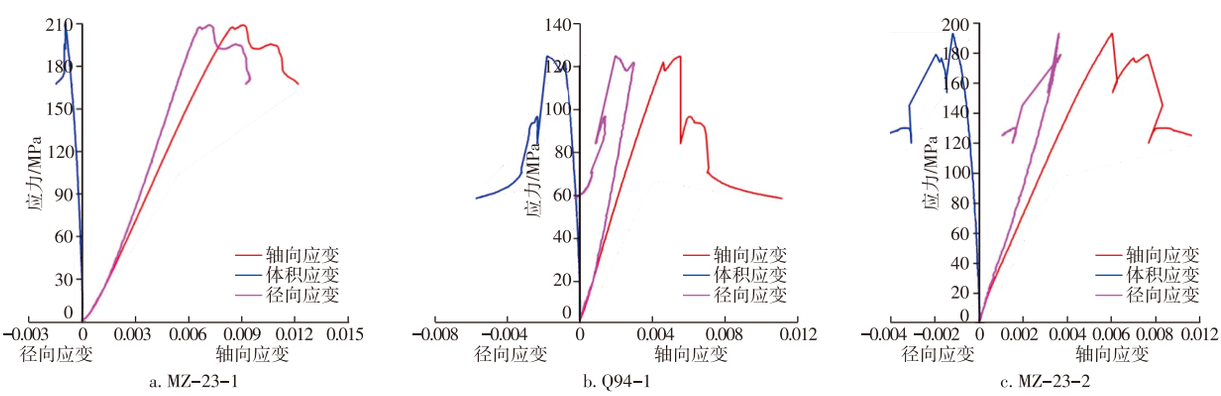


图6 鄂尔多斯盆地东缘泥岩三轴压缩试验应力—应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curve of mudstone triaxial compression test in eastern Ordos Basin

低、峰值应变大、峰后平缓，表现为显著延性（图7）。灰岩与砂岩表现为高强脆性断裂，泥岩呈弹塑性过渡，而煤以低模量、高泊松比及大峰值应变为特征的延性变形为主，其峰值应变可达灰岩的3～8倍。上述差异表明岩性从根本上控制了岩石的力学行为，对压裂设计与井壁稳定具有重要工程意义。

3.2 巴西劈裂试验

巴西劈裂是测定岩石抗拉强度的有效方法，本研究采用直径50 mm、厚度25 mm的巴西圆盘试样，加载速率为0.1 mm/min，试验样品包含煤5块、泥岩2块、砂岩6块以及灰岩5块。试验结果看出（表2）：砂岩的线载荷最大，煤的线载荷最小。抗拉强度计算公式为[27]：

$$\sigma_t = 2P/(\pi DL) \tag{4}$$

式中：P为岩石试件最大破坏载荷，单位kN；D为试件直径，单位mm；L为试件厚度，单位mm；σ_t为抗拉强度，单位MPa。

如图8所示，煤的抗拉强度最低，介于0.34～0.75 MPa，平均为0.49 MPa；砂岩的抗拉强度值介于4.76～12.86 MPa，平均为8.28 MPa；泥岩抗拉强度值介于1.13～3.00 MPa，平均为2.07 MPa；灰岩抗拉强度值介于3.68～6.54 MPa，平均为5.27 MPa。煤抗拉强度CV为33.8%，离散程度较高，泥岩CV高达63.8%（仅2块样品，代表性有限），砂岩CV为34.2%，灰岩CV为21.4%。

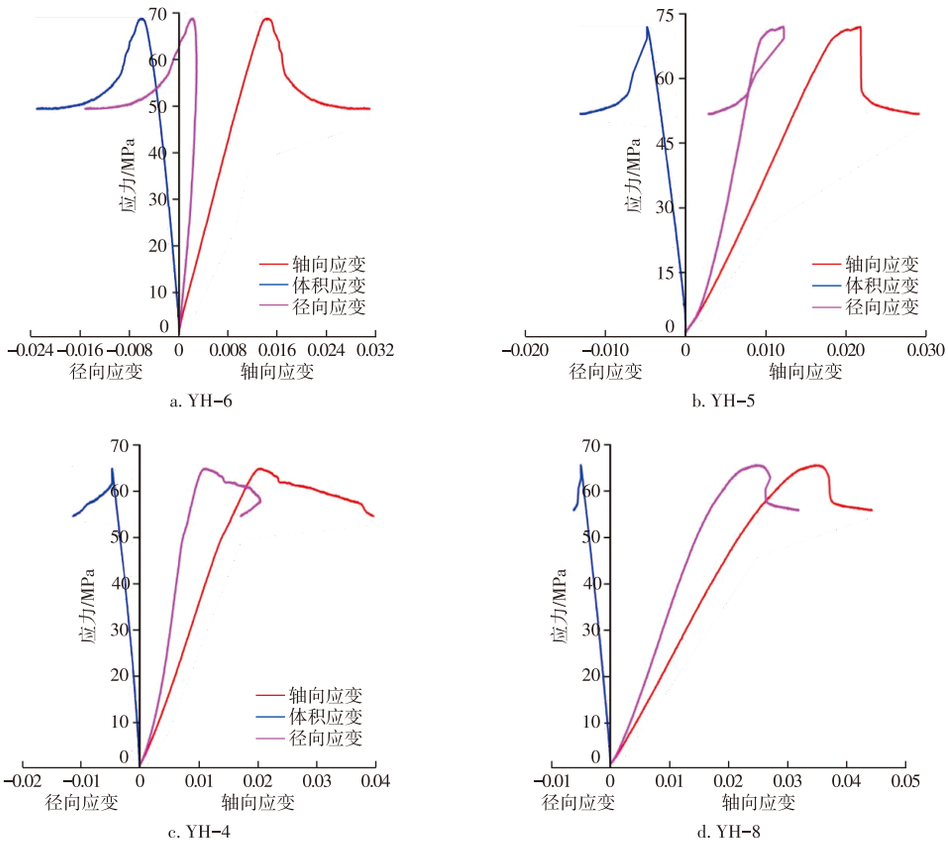


图7　鄂尔多斯盆地东缘煤三轴压缩试验应力应变曲线

Fig. 7　Stress-strain curve of coal rock triaxial compression test in eastern Ordos Basin

表2　鄂尔多斯盆地东缘试样巴西劈裂试验力学结果

Table 2　Mechanical results of Brazilian splitting test of eastern Ordos Basin

井号	深度/m	样品编号	岩性	线载荷/kN	抗拉强度/MPa
野外露头		TY-1	灰岩	10.01	5.10
		TY-2	灰岩	7.23	3.68
		TY-3	灰岩	9.79	4.99
		TY-4	灰岩	11.90	6.06
		TY-5	灰岩	12.85	6.54
S46-44YH	2 739.10	YH-1	煤	0.77	0.39
S46-44YH	2 739.22	YH-2	煤	0.66	0.34
M37-6	2 576.16	M37-6M-3	煤	0.82	0.42
M37-6	2 578.54	M37-6M-2	煤	1.48	0.75
M37-10	2 295.84	M37-10M-3	煤	1.11	0.57
L133	3 893.40	L133-1	泥岩	2.22	1.13
L133	3 893.50	L133-2	泥岩	5.89	3.00
M151	2 461.10	M151-2	砂岩	9.34	4.76
M151	2 460.80	M151-3	砂岩	17.72	9.02
M151	2 461.30	M151-5	砂岩	12.22	6.22
M166	2 460.90	M166-1	砂岩	25.26	12.86
S121	2 340.60	S121-1	砂岩	18.48	9.41
S121	2 785.00	S121-2	砂岩	14.59	7.43

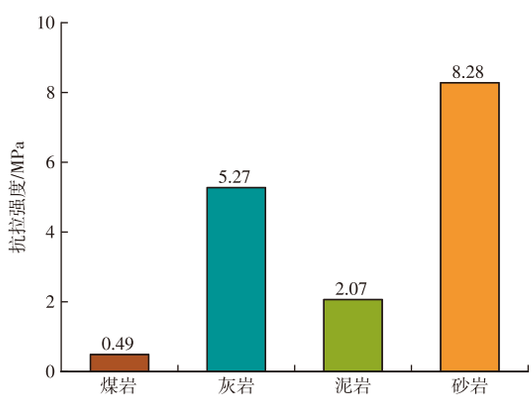


图8　鄂尔多斯盆地东缘试样抗拉强度参数对比

Fig. 8　Comparison of tensile strength parameters of samples in eastern Ordos Basin

鄂尔多斯盆地本溪组煤、泥岩、砂岩及太原组灰岩的应力—应变曲线均呈现出初始压密、线弹性、屈服和峰后软化四个典型演化阶段。其中,煤曲线非线性特征显著,压密段长且峰后平缓,表现为延性破坏(图9a);泥岩曲线兼具弹塑性特征,屈服段长度介于煤与砂岩/灰岩之间,呈中等延展程度(图9b);砂岩与灰岩线弹性段斜率大,屈服段极短,峰值点尖锐且峰后载荷骤降,呈现明显的脆性断裂特征(图9c—图9d)。整体而言,砂岩、灰岩抗拉强度高、脆性破坏特征显著,泥岩呈弹塑性过渡特征,煤抗拉强度极低、延性破坏明显。

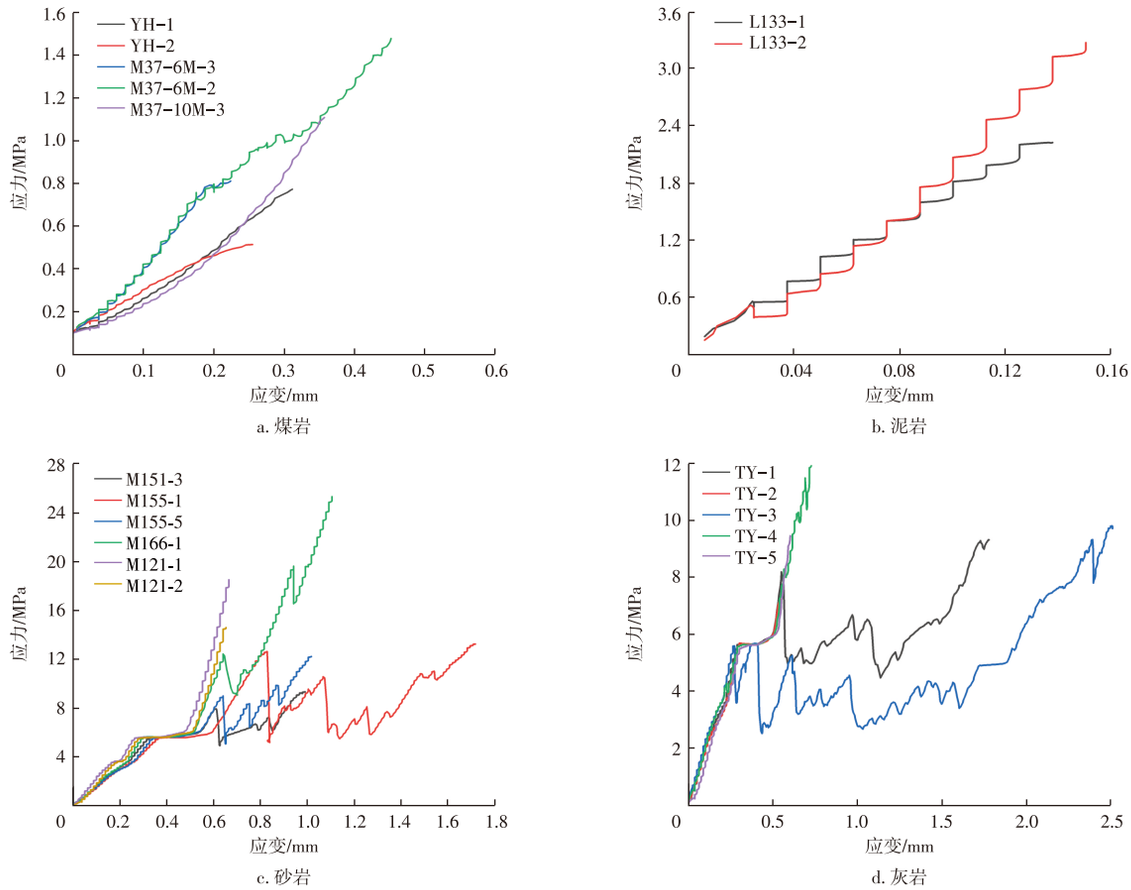


图9 鄂尔多斯盆地东缘不同岩性试样巴西劈裂应力—应变曲线

Fig. 9 Brazilian splitting stress-strain curve of samples from eastern Ordos Basin

3.3 断裂韧度试验

断裂韧度是评价岩石抵抗裂纹起裂与扩展能力的关键力学参数[28-29]，为表征研究区不同岩性的断裂力学行为，本研究采用直裂纹巴西圆盘(CSTBD)试样开展I型断裂韧度测试，试验涵盖煤10块、灰岩3块、泥岩6块及砂岩4块，试验结果见表3。通过公式(5)来计算岩石的I型断裂韧度K_I[30]，如下：

$$K_I = \frac{P\sqrt{a}}{\sqrt{\pi}\,RL} N_I \tag{5}$$

式中：a为裂缝半长，单位mm；R为圆盘半径，单位mm；L为圆盘厚度，单位mm；N_I为由裂纹方向、裂纹和试件尺寸决定的无量纲系数。

如图10所示，煤的断裂韧度最低，分布在0.019 5～0.070 6 MPa·m$^{1/2}$，平均值0.036 8 MPa·m$^{1/2}$；砂岩的断裂韧度最高，分布在0.357 3～0.584 6 MPa·m$^{1/2}$，平均值为0.496 8 MPa·m$^{1/2}$；泥岩的断裂韧度值介于0.049 1～0.222 2 MPa·m$^{1/2}$，平均值为0.121 3 MPa·m$^{1/2}$；灰岩的断裂韧度值介于0.375 7～0.492 4 MPa·m$^{1/2}$，平均值为0.453 2 MPa·m$^{1/2}$(表3)。煤断裂韧度为40.5%，离散程度较大，反映煤内部发育割理、微裂隙等多尺度结构，具较强的非均质性。泥岩CV为62.1%，砂岩CV为21.7%，灰岩CV为14.8 %。

由图11可知：鄂尔多斯盆地本溪组煤、砂岩、泥岩及太原组灰岩四类岩性的断裂韧度应力—应变曲线在阶段划分上具有共性，均可识别出初始压密、线弹性、屈服及峰后4个阶段，但不同岩性在各阶段的变形特征差异显著。其中，煤线弹性段斜率极低，屈服段平缓延伸，峰后缓慢下降，表现为延性断裂模式，且峰值载荷最小，其内

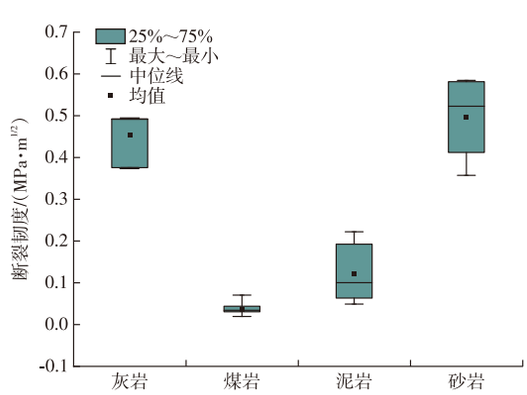


图10 鄂尔多斯盆地东缘试样断裂韧度参数箱形图

Fig. 10 Boxplot of fracture toughness parameters of samples in eastern Ordos Basin

表3　鄂尔多斯盆地东缘试样断裂韧度试验力学结果

Table 3　Mechanical results of fracture toughness test of samples in eastern Ordos Basin

井号	深度/m	样品编号	岩性	线载荷/KN	断裂韧度/(MPa·m$^{1/2}$)
野外露头		TY-1-2	灰岩	3.67	0.375 7
		TY-1-3	灰岩	4.80	0.491 4
		TY-1-4	灰岩	4.81	0.492 4
M63	2 468.58	M63-2	煤	0.34	0.034 8
S46-44YH	2 739.78	YH-3-2	煤	0.33	0.033 8
S46-44YH	2 739.32	YH-3-1	煤	0.20	0.020 5
S46-44YH	2 739.46	YH-3-4	煤	0.30	0.030 7
S46-44YH	2 739.62	YH-3-3	煤	0.19	0.019 5
M37-6	2 576.06	M37-6M-1-3	煤	0.37	0.037 9
M37-6	2 578.44	M37-6M-1-2	煤	0.43	0.044 0
M37-6	2 578.64	M37-6M-1-1	煤	0.69	0.070 6
M37-10	2 295.94	M37-10M-1-3	煤	0.30	0.030 7
M37-10	2 303.26	M37-10M-1-1	煤	0.44	0.045 0
M125	2 594.60	M125-1-3	泥岩	1.88	0.192 5
M125	2 595.20	M125-1-4	泥岩	2.17	0.222 2
M166	2 343.20	M166-1-1	泥岩	0.63	0.064 5
M166	2 343.40	M166-1-2	泥岩	1.33	0.136 2
M166	2 343.50	M166-1-3	泥岩	0.62	0.063 5
M166	2 343.60	M166-1-4	泥岩	0.48	0.049 1
M23	2 505.80	M23-1-1	砂岩	4.56	0.466 9
M166	2 340.37	M166-1-1	砂岩	5.65	0.5784
M166	2 346.50	M166-1-2	砂岩	3.49	0.357 3
M121	2 785.10	M121-1-1	砂岩	5.71	0.584 6

部的割理、裂隙及有机质组分是裂纹优先扩展路径(图11a);泥岩屈服段较长且峰后下降平缓,具有弹塑性变形特点(图11b);灰岩与砂岩线弹性段斜率大,屈服段极短,峰后载荷骤降,呈现典型脆性断裂特征(图11c、图11d)。

3.4　多岩性试验差异分析

上述四种岩性力学参数的显著差异,本质上是其物质组成、微观结构及成岩演化的综合反映。煤以有机质为主体,发育面割理、端割理及微裂隙等多尺度结构面,成岩程度低、压实作用弱,导致其呈现低杨氏模量、低强度、高泊松比的典型延性特征。砂岩以石英、长石等刚性碎屑颗粒为骨架,成岩程度高,颗粒间嵌合紧密,因而表现出高杨氏模量、高抗压强度、低泊松比的脆性力学特征。泥岩富含伊利石、蒙脱石等黏土矿物,层理面发育,力学性质介于煤与砂岩之间,呈弹塑性过渡特征。灰岩以方解石为主,晶体镶嵌紧密且解理发育,具备高模量、高强度的脆性特质。综上所述,不同岩性力学差异可归因于物质组成、微观结构和成岩作用三者耦合控制的结果,该认识为后续工程参数优化提供了地质基础。

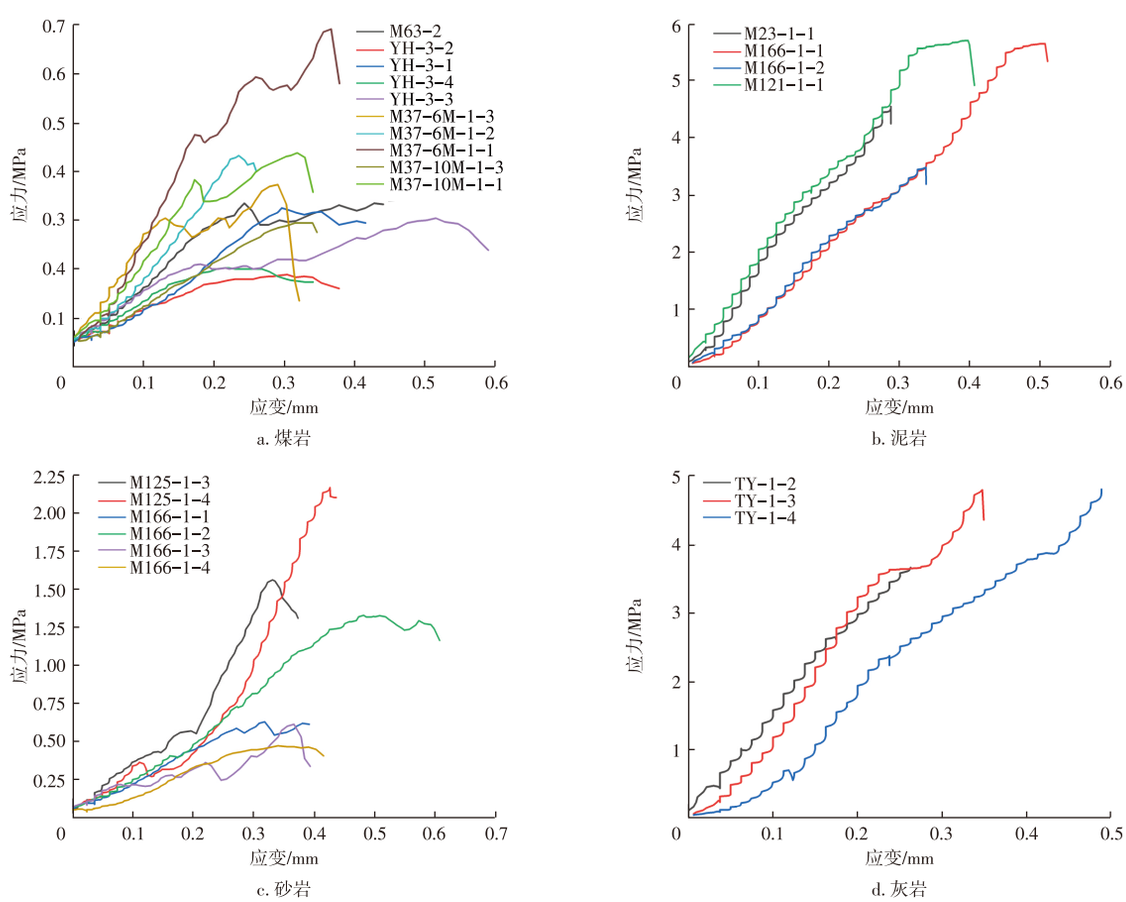


图11　鄂尔多斯盆地东缘试样断裂韧度应力—应变曲线

Fig. 11　Stress-strain curve of fracture toughness of samples in eastern Ordos Basin

4 多岩性力学参数对深部煤层气开发的启示

4.1 对压裂裂缝穿层扩展的启示

在水力压裂过程中,裂缝能否从煤层穿入顶底板砂岩、泥岩和灰岩主要取决于缝内净压力产生的应力强度因子大小及岩石的断裂韧度,其直接决定压裂改造体积及最终产能[31]。在地应力强度不变的条件下,断裂韧度是影响裂缝穿层和扩展的主要因素[32]。试验结果表明,煤的断裂韧度最低,平均值0.036 8 MPa·$m^{1/2}$,在注入相同压力条件下,煤抵抗裂缝扩展能力最弱,水力裂缝极易在煤岩内部起裂、延伸。泥岩的断裂韧度处于中等偏下水平,平均值0.121 3 MPa·$m^{1/2}$,表明泥岩在压裂改造后易形成纵向延伸的长裂缝,具备良好的穿层改造潜力。砂岩和灰的断裂韧度值较高,平均值分别为0.496 8 MPa·$m^{1/2}$和0.453 2 MPa·$m^{1/2}$,裂缝扩展阻力较大,水力裂缝难以垂直穿透岩层。

鉴于鄂尔多斯盆地东缘砂岩、灰岩及泥岩的断裂韧度远高于煤,裂缝穿层扩展极为困难,因此工程重点不应过度追求穿层,而应集中于层内缝网最大化。建议深部煤层气压裂优先采用层内缝网压裂策略,充分利用煤低断裂韧度的有利条件,采用大排量、低黏度压裂液激活天然割理,在煤层内形成高密度、高连通性的复杂缝网,同时减少无效滤失与支撑剂无效铺置,从而充分改造煤储层,实现高效开发。

4.2 对支撑剂嵌入与导流能力的启示

水力压裂后,裂缝导流能力直接决定气井产能。煤杨氏模量极低、塑性变形强,支撑剂嵌入问题突出,导致裂缝宽度减小、导流能力快速衰减。支撑剂在裂缝壁面的嵌入深度(δ)受岩石力学性质、闭合应力及支撑剂性质共同控制[33]。根据弹性接触力学理论,对于单个球形支撑剂颗粒与平面弹性半空间的接触问题,嵌入深度可表示为[34]:

$$\delta = \frac{\sigma_c(1-\mu^2)}{E}d \tag{6}$$

式中:δ为嵌入深度,单位mm;σ_c为裂缝闭合应力,单位MPa;μ为岩石泊松比;E为岩石杨氏模量,单位GPa;d为支撑剂颗粒直径,单位mm。

基于三轴压缩试验获取的杨氏模量与泊松比,参考杨帆等研究的裂缝闭合应力为36 MPa[35]和支撑剂颗粒直径为0.4 mm[36],并以砂岩为基准,计算相同闭合应力下四种岩性的相对嵌入深度。结果表明:砂岩为1.00,泥岩为0.89,灰岩为0.87,煤为6.74。煤的相对嵌入深度为砂岩的6.74倍,且其高塑性特征会使嵌入进一步加剧。这一显著差异表明,煤裂缝壁面支撑剂嵌入远大于砂岩和灰岩,导致煤层内裂缝导流能力衰减速率显著高于围岩,是深部煤层气初期产量高但递减快的重要原因。灰岩和泥岩因较高的杨氏模量和适中的泊松比,嵌入深度低于砂岩。

基于上述分析,针对煤支撑剂嵌入深度较大的问题,建议从支撑剂优选、辅助技术及施工参数三方面综合优化。具体措施如下:①在相同体积浓度下,增加支撑剂颗粒数量可有效增加支撑点、分散闭合应力、降低单颗粒嵌入深度,同时有助于支撑剂顺利进入缝网分支,提高铺置均匀性。②尽管煤闭合应力较低,但嵌入导致支撑剂点接触应力较高,建议采用高强度陶粒替代石英砂,减少破碎风险。③在压裂液中加入可降解纤维,与支撑剂形成网状结构,增加接触面积、分散应力,从而有效减轻嵌入。④在施工参数方面,采用阶梯式加砂程序以防止砂堵,并控制压后放喷速率,避免支撑剂回流与嵌入加剧。

4.3 对井壁稳定性的启示

在钻井过程中,井壁稳定性是保障安全、降低复杂性的关键[37-39]。根据三轴压缩试验,煤与泥岩、砂岩、灰岩力学特征差异显著。煤抗压强度最低,均值为67.93 MPa,仅为灰岩的26.5%;杨氏模量极低,均值为3.89 GPa,约为砂岩杨氏模量(26.20 GPa)的13.5%;泊松比最高,均值为0.273。

不同岩性的井壁失稳机制存在差异,应区别对待:①煤因低强度-高塑性,在钻井液压力与地应力下易发生压碎崩落,高泊松比与大峰值应变导致塑性缩径,割理及层理面易引发剪切掉块,失稳以力学失稳为主。泥岩抗压强度与杨氏模量分别为175.66 MPa和28.74 GPa,泊松比仅次于煤。②泥岩黏土矿物含量高,遇水水化膨胀,杨氏模量与泊松比剧变,抗压强度锐减,导致井壁坍塌,失稳以水化—力学耦合失稳为主。③砂岩与灰岩则呈高抗压强度、低泊松比的显著脆性特征,其黏土矿物含量低,水化弱化不显著,井壁稳定性良好。

基于上述差异,在深部煤层气储层钻井过程中,建议采取差异化钻井液策略:煤段应以力学支撑为核心,采用低密度钻井液平衡地层压力,维持井壁力学平衡;泥岩段应以化学抑制为核心,采用强抑制性钻井液,抑制水化膨胀;砂岩和灰岩段稳定性良好,常规维护并注意防漏堵漏。

4.4 深部煤层气可压裂性评价

可压裂性是指储层在水力压裂下形成复杂缝网的能

力，是压裂选层与工艺优化的关键依据[40]。多岩性含煤岩系力学差异显著，传统单一参数评价存在局限性。本文基于三轴压缩、巴西劈裂及断裂韧度试验得到的杨氏模量、泊松比、抗压强度、抗拉强度及断裂韧度等参数，建立可压裂性评价体系。抗拉强度决定起裂程度，值越低则破裂压力越小；杨氏模量与泊松比控制脆性特征，高模量、低泊松比有利于张性裂缝发育，提升缝网复杂度；断裂韧度表征扩展能力，值越低则扩展阻力越小[41-42]。因此，需构建多参数融合的综合指标，对不同岩性可压裂性进行定量评估。

4.4.1　基于弹性参数的脆性指数（BIE）

采用Jun等[43]提出的经典脆性指数计算方法，对杨氏模量和泊松比进行归一化处理，计算公式如下：

$$E_{\mathrm{norm}}=\frac{E-E_{\min}}{E_{\max}-E_{\min}}\times 100\% \tag{7}$$

$$\mu_{\mathrm{norm}}=\frac{\mu-\mu_{\max}}{\mu_{\min}-\mu_{\max}}\times 100\% \tag{8}$$

$$I_{\mathrm{BIE}}=\frac{E_{\mathrm{norm}}+\mu_{\mathrm{norm}}}{2} \tag{9}$$

式中：E为杨氏模量，单位GPa；E_{norm}、$E_{\max}$、$E_{\min}$分别为一般杨氏模量、最大杨氏模量、最小杨氏模量，单位GPa；μ_{norm}、$\mu_{\max}$、$\mu_{\min}$分别为一般泊松比、最大泊松比、最小泊松比；I_{BIE}为基于弹性参数的脆性指数。

$\mathrm{BI_E}$数值越大表示岩石脆性越强，越易形成张性裂缝。该指标反映了岩石在受力破坏前的弹性储能能力和塑性变形倾向。灰岩的脆性指数（BIE）均值最高，为78.67，与其高杨氏模量、低泊松比的典型脆性特征一致；砂岩次之，均值75.68；泥岩均值为72.38；煤均值最低，为13.70，与其低模量、高泊松比的延性特征相符，属于典型的低脆性、高塑性岩石。

4.4.2　基于强度与断裂韧度的综合可压指数（CFI）

针对煤低强度、低断裂韧度的特性，引入可压裂性综合指数，同时考虑抗压强度、抗拉强度和断裂韧度的贡献[44]。抗压强度反映岩石抵抗压缩破坏的能力；抗拉强度和断裂韧度则直接影响起裂和扩展[45]。基于强度与断裂韧度的综合可压指数计算公式如下[46]：

$$I_{\mathrm{CFI}}=\frac{\sigma_{\mathrm{t,min}}}{\sigma_{\mathrm{t}}}\times\frac{K_{\mathrm{I,min}}}{K_{\mathrm{I}}}\times\frac{\sigma_{\mathrm{c}}}{\sigma_{\mathrm{c,max}}} \tag{10}$$

式中：I_{CFI}为基于强度与断裂韧度的综合可压指数；σ_{t}、$\sigma_{\mathrm{t,min}}$分别为抗拉强度、抗拉强度最小值，单位MPa；K_{I}、$K_{\mathrm{I,min}}$分别为断裂韧度、断裂韧度最小值，单位$\mathrm{MPa\cdot m^{1/2}}$；$\sigma_{\mathrm{c}}$、$\sigma_{\mathrm{c,max}}$分别为抗压强度、抗压强度最大值，单位MPa。

为统一方向，抗拉强度和断裂韧度采用逆向归一化，抗压强度正向归一化。加权形式为：

$$I_{\mathrm{CFI}}=\omega_1\left(1-\frac{\sigma_{\mathrm{t}}-\sigma_{\mathrm{t,min}}}{\sigma_{\mathrm{t,max}}-\sigma_{\mathrm{t,min}}}\right)+\omega_2\left(1-\frac{K_{\mathrm{I}}-K_{\mathrm{I,min}}}{K_{\mathrm{I,max}}-K_{\mathrm{I,min}}}\right)+\omega_3\left(\frac{\sigma_{\mathrm{c}}-\sigma_{\mathrm{c,min}}}{\sigma_{\mathrm{c,max}}-\sigma_{\mathrm{c,min}}}\right) \tag{11}$$

式中：$\sigma_{\mathrm{t,max}}$为抗拉强度最大值，单位MPa；$K_{\mathrm{I,max}}$为断裂韧度最大值，单位$\mathrm{MPa\cdot m^{1/2}}$；$\sigma_{\mathrm{c,min}}$为抗压强度最小值，单位MPa；$\omega_1$、$\omega_2$、$\omega_3$分别为抗拉强度、断裂韧度、抗压强度的权重值。

根据深部煤层气压裂工程经验，取权重ω_1=0.25，ω_2=0.45，ω_3=0.30，即断裂韧度的权重最高，抗拉强度次之，抗压强度权重最低[47]。煤的CFI均值为0.69，主要是由于其低抗拉强度与断裂韧度特征，起裂与扩展能量门槛低；砂岩的CFI均值最低为0.38，由于砂岩抵抗破裂的能力较强；泥岩的CFI均值最高为0.75，主要是由于其裂缝极易萌生和延展；灰岩的CFI均值为0.54，其起裂与扩展能量适中。

4.4.3　多参数归一化加权综合评价指数（FI）

上述弹性脆性指数（BIE）仅反映岩石弹性变形阶段的脆性特征，未考虑强度与断裂特性；综合可压指数（CFI）虽引入强度与断裂韧度，但未纳入弹性参数的影响。为克服单一指数和双参数指数的局限性，本文将进一步融合五项核心力学参数杨氏模量、泊松比、抗压强度、抗拉强度、断裂韧度，构建多参数归一化加权综合评价指数（FI），以实现对储层可压裂性的全面、定量评估。采用λ_{E}=0.15、λ_{μ}=0.10、$\lambda_{\sigma,\mathrm{c}}$=0.10、$\lambda_{\sigma,\mathrm{t}}$=0.25、$\lambda_{\mathrm{K,I}}$=0.40权重的极差归一化法对各参数进行标准化处理，再通过加权求和综合计算。

其中，杨氏模量、抗压强度作为正向指标，可压裂性与数值呈正相关，数值归一化采用公式（12）[48]：

$$X_{\mathrm{norm}}=\frac{X-X_{\min}}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{12}$$

对于泊松比、抗拉强度、断裂韧度作为逆向指标，可压裂性与数值呈负相关。逆向指标归一化采用公式（13）[49]：

$$X_{\mathrm{norm}}=\frac{X_{\max}-X}{X_{\max}-X_{\min}} \tag{13}$$

加权求和公式为：

$$I_{\mathrm{F}}=\lambda_{\mathrm{E}}E_{\mathrm{norm}}+\lambda_{\mu}\mu_{\mathrm{norm}}+\lambda_{\sigma,\mathrm{c}}\sigma_{\mathrm{c,norm}}+\lambda_{\sigma,\mathrm{t}}\sigma_{\mathrm{t,norm}}+\lambda_{\mathrm{K,I}}K_{\mathrm{I,norm}} \tag{14}$$

计算结果表明：泥岩的FI值最高为0.78，其裂缝易形成且具有一定缝宽支撑能力，可压裂性最优；煤的FI值为0.67，具适中的杨氏模量与抗压强度，同时低抗拉强度

和低断裂韧度使其起裂与扩展能量较低,可压裂性次之;砂岩和灰岩的FI值分别为0.53和0.41,其裂缝起裂与扩展需要极高的能量,同时力学参数整体偏“硬脆”,可压裂性最差。

综上所述,基于“三轴—巴西—断裂”试验构建的多参数可压裂性评价体系,建议压裂工艺应根据FI值分档优选参数:①FI≥0.65(高可压裂性,主要为泥岩和部分煤岩层段),采用低黏滑溜水(黏度小于10 mPa·s)与小粒径陶粒(40/70目),配合大排量注入以形成复杂缝网;②0.50≤FI<0.65(中等可压裂性,主要为煤层段),采用中等黏度线性胶(黏度介于10~30 mPa·s)及中等粒径支撑剂(30/50目),适当提高砂比以保障导流能力;③FI<0.50(低可压裂性,主要为砂岩和灰岩层段),裂缝起裂与扩展需要较高能量,建议采用高黏度冻胶(黏度大于30 mPa·s)与大粒径支撑剂(20/40目),必要时辅以酸化预处理降低起裂压力。该体系突破了传统单一脆性指数局限,采用多参数力学数据相关联,为深部煤层气可压裂性评价与工艺优选提供定量化依据。

4 结论

1)鄂尔多斯盆地东缘本溪组—太原组四种岩石力学参数呈现显著分异。煤呈典型延性特征,杨氏模量均值3.89 GPa、泊松比0.273、抗压强度67.93 MPa、抗拉强度0.49 MPa、断裂韧度0.036 8 MPa·$m^{1/2}$,均显著低于砂岩、泥岩和灰岩;砂岩与灰岩呈典型脆性,力学参数值高;泥岩的力学参数介于二者之间,呈弹塑性过渡特征。

2)煤的断裂韧度最低,仅为砂岩的7.4%、灰岩的8.1%,使裂缝难以穿入顶底板围岩,在压裂过程中应采用层内缝网最大化,并以大排量、低黏度压裂液激活天然割理,形成高密度连通复杂缝网,从而改造煤储层,实现高效开发;煤的支撑剂嵌入深度为砂岩的6.74倍,导致裂缝导流能力快速衰减,在压裂过程中采用小粒径高强度支撑剂和阶梯式加砂程序避免支撑剂回流和嵌入加剧;煤的抗压强度最低,仅为灰岩的26.5%,井壁稳定性较差,在钻井过程中使用低密度钻井液平衡地层压力并维持井壁稳定。

3)基于弹性脆性指数(BIE)、综合可压指数(CFI)及多参数归一化加权综合评价指数(FI)的可压裂性评价结果表明,本溪组煤层可压裂性良好,储层起裂与裂缝扩展阻力较低,适合水力压裂改造。多参数综合评价结果优于砂岩及灰岩,可见低脆性-低韧度煤层具备良好的压裂改造潜力。

参 考 文 献

[1] 张水昌, 张斌, 马行陟, 等. 中国煤岩气生成阶段及气藏成因类型[J]. 石油勘探与开发, 2026, 53(3): 533-544.
Zhang Shuichang, Zhang Bin, Ma Xingzhi, et al. Generation stages and genetic types of coal-rock gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2026, 53(3): 533-544.

[2] 张水昌, 张斌, 马行陟, 等. 中国煤层气/深部煤层气生成阶段及成藏类型划分[J/OL]. 石油勘探与开发, 2026, 53(3): 1-12.
Zhang Shuichang, Zhang Bin, Ma Xingzhi, et al. Classification of generation stages and accumulation types of coalbed methane/coal-rock gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2026, 53(3): 1-12.

[3] 崔广智, 张扬, 王珣尧, 等. 鄂尔多斯盆地宜川地区薄层煤岩气富集主控因素及有利区评价[J]. 地球科学, 2026, 51(5): 1908-1923.
Cui Guangzhi, Zhang Yang, Wang Xunyao, et al. Main controlling factors of gas enrichment in thin coal seams and evaluation of favorable zones in Yichuan area of Ordos Basin[J]. Earth Science, 2026, 51(5): 1908-1923.

[4] 侯雨庭, 费世祥, 范立勇, 等. 鄂尔多斯盆地煤岩气储层孔裂隙结构类型划分及其勘探意义[J]. 天然气工业, 2026, 46(5): 11-24.
Hou Yuting, Fei Shixiang, Fan Liyong, et al. Classification of pore-fracture structures in coal-rock gas reservoirs in the Ordos Basin and its exploration significance[J]. Natural Gas Industry, 2026, 46(5): 11-24.

[5] 赵松, 侯雨庭, 费世祥, 等. 深层煤岩气缝网激活无砂压裂理论基础与实践[J/OL]. 石油与天然气地质, 2026-06-11. https://link.cnki.net/urlid/11.4820.te.20260611.0913.002.
Zhao Song, Hou Yuting, Fei Shixiang, et al. Theoretical basis and field application of fracture network activation and proppant-free stimulation for deep coal-rock gas development[J/OL]. Oil & Gas Geology, 2026-06-11. https://link.cnki.net/urlid/11.4820.te.20260611.0913.002.

[6] 费世祥, 侯雨庭, 张正涛, 等. 鄂尔多斯盆地东部煤岩气水平井差异化精细导向方法及应用[J]. 天然气地球科学, 2025, 36(6): 985-999.
Fei Shixiang, Hou Yuting, Zhang Zhengtao, et al. Differentiated and refine geosteering methods for coal-rock gas horizontal wells and their applications in the eastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2025, 36(6): 985-999.

[7] 孟召平, 彭苏萍, 傅继彤. 含煤岩系岩石力学性质控制因素探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1): 102-106.
Meng Zhaoping, Peng Suping, Fu Jitong. Study on control factors of rock mechanics properties of coal-bearing formation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1): 102-106.

[8] Song Z X, Zhang J W, Zhao S K, et al. Brittleness of layer sandstone under triaxial loading and unloading[J]. Journal of Central South University, 2023, 30(7): 2234-2251.

[9] 初绍飞, 张超, 王振, 等. 应力应变类脆性指数在典型矿区储层压裂性评价的发展趋势[J]. 中国安全生产科学技术, 2025, 21(12): 59-66.
Chu Shaofei, Zhang Chao, Wang Zhen, et al. Development trend of stress-strain brittleness index in evaluation of reservoir fracturing in typical area[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2025, 21(12): 59-66.

[10] 付海峰, 才博, 修乃岭, 等. 含层理储层水力压裂缝高延伸规律及现场监测[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(11): 1610-1621.
Fu Haifeng, Cai Bo, Xiu Nailing, et al. The study of hydraulic fracture vertical propagation in unconventional reservoir with

beddings and field monitoring[J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(11): 1610-1621.

[11] 郭建春, 卢聪, 赵金洲, 等. 支撑剂嵌入程度的实验研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(6): 661-664.
Guo Jianchun, Lu Cong, Zhao Jinzhou, et al. Experimental research on proppant embedment[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(6): 661-664.

[12] 陈峥嵘, 时贤, 刘伟, 等. 考虑支撑剂嵌入的煤层气井压裂优化方法[J]. 断块油气田, 2025, 32(1): 159-164.
Chen Zhengrong, Shi Xian, Liu Wei, et al. Optimization method of coalbed methane well fracturing considering proppant embedding[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2025, 32(1): 159-164.

[13] 辛佳博. 钻井过程中井壁稳定性评估方法改进与实践[J]. 煤炭技术, 2025, 44(10): 45-48.
Xin Jiabo. Improvement and practice of wellbore stability evaluation method during drilling process[J]. Coal Technology, 2025, 44(10): 45-48.

[14] 梁兴, 张涵冰, 李守定, 等. 五峰组-龙马溪组页岩可压裂性分析及工程甜点评价: 以我国西南地区某井为例[J]. 工程地质学报, 2025, 33(5): 1687-1696.
Liang Xing, Zhang Hanbing, Li Shouding, et al. Fracability analysis and engineering sweet spot evaluation of the Wufeng-Longmaxi shale: a case study from a well in the southwest China[J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(5): 1687-1696.

[15] Xiong J, Liu K J, Shi C Y, et al. Logging prediction and evaluation of fracture toughness for the shales in the Longmaxi Formation, Southern Sichuan Basin[J]. Petroleum, 2021, 7(3): 254-262.

[16] Guo J, Wang S, Chang L, et al. A novel method for conventional logging prediction of brittleness index: A case of tight sandstone in western ordos basin[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 819078.

[17] 卢浩, 白玉湖, 马晓强, 等. 鄂尔多斯盆地东北部中煤阶深煤层孔隙结构非均质性定量表征与影响因素研究[J]. 天然气地球科学, 2026, 37(9): 1806-1821.
Lu Hao, Bai Yuhu, Ma Xiaoqiang, et al. Quantitative characterization and influencing factors of pore structure heterogeneity of medium-rank deep coal seams in the northeastern Ordos Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2026, 37(9): 1806-1821.

[18] Li D L, Wang Z L, Sun X Y, et al. Genesis and model of nodular pyrite in Jurassic coal-bearing strata, Ordos Basin: Evidence from petrography, mineralogy, and geochemistry[J]. Ore Geology Reviews, 2025: 107007.

[19] 李得路, 王行哲, 孙学阳, 等. 鄂尔多斯盆地煤油气共生矿井中原油来源及时空演化: 以芦村矿区为例[J]. 煤炭学报, 2025, 50(9): 4432-4449.
Li Delu, Wang Xingzhe, Sun Xueyang, et al. Origin and spatial-temporal evolution of crude oil in coal-oil-gas symbiotic mines in Ordos Basin: taking Lucun Mining Area as an example[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(9): 4432-4449.

[20] 费世祥, 崔越华, 李小锋, 等. 鄂尔多斯盆地中、东部深层煤岩气水平井高效开发主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 273-287.
Fei Shixiang, Cui Yuehua, Li Xiaofeng, et al. Main factors controlling the efficient production of horizontal wells for deep coalrock gas in the eastern and central Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 273-287.

[21] 张玉红, 杨军, 赵乐义, 等. 鄂尔多斯盆地西部盐池地区上古生界煤系烃源岩生烃特征[J/OL]. 煤炭科学技术, 2026-04-27. https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20260424.1646.015.
Zhang Yuhong, Yang Jun, Zhao Leyi, et al. Hydrocarbon generation characteristics of the upper Paleozoic coal-bearing source rocks in the Yanchi area, western Ordos Basin[J/OL]. Coal Science and Technology, 2026-04-27. https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.td.20260424.1646.015.

[22] 赵喆, 徐旺林, 赵振宇, 等. 鄂尔多斯盆地石炭系本溪组煤岩气地质特征与勘探突破[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(2): 234-247.
Zhao Zhe, Xu Wanglin, Zhao Zhenyu, et al. Geological characteristics and exploration breakthroughs of coal rock gas in Carboniferous Benxi Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 234-247.

[23] Hatheway A W. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring; 1974-2006[J]. Environmental & Engineering Geoscience, 2009, 15(1): 47-48.

[24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Standard for test methods of engineering rock mass: GB/T 50266—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.

[25] 高向东, 王延斌, 倪小明, 等. 临兴地区深部煤岩力学性质及其对煤储层压裂的影响[J]. 煤炭学报, 2020, 45(增刊2): 912-921.
Gao Xiangdong, Wang Yanbin, Ni Xiaoming, et al. Mechanical properties of deep coal and rock in Linxing area and its influences on fracturing of deep coal reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S2): 912-921.

[26] 长江科学院. 水利水电工程岩石试验规程: SL/T 264—2021[S]. 北京:中国水利水电出版社,2021.
Changjiang River Scientific Research Institute. Code for rock tests in water and hydropower projects: SL/T 264—2021[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2021.

[27] 王小蕾, 张东明, 时训先, 等. 煤与页岩孔隙和力学特性对比实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(S2): 193-199.
Wang Xiaolei, Zhang Dongming, Shi Xunxian, et al. Comparative experimental study on pore and mechanical properties of coal and shale[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(S2): 193-199.

[28] 陈立超, 王生维. 煤岩断裂力学性质对储层压裂改造的影响[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(1): 122-131.
Chen Lichao, Wang Shengwei. Fracture properties of high-rank coal and its constraint on hydraulic fracturing stimulation of coal reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(1): 122-131.

[29] 赵毅鑫, 孙庄, 刘斌. 忻州窑烟煤Ⅰ型和Ⅱ型断裂特性的半圆弯曲试验对比研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(8): 1593-1604.
Zhao Yixin, Sun Zhuang, Liu Bin. Comparative study of semi-circular bending tests for modes Ⅰ and Ⅱ fracture characteristics of Xinzhouyao bituminous coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(8): 1593-1604.

[30] Ge Z L, Sun Q, Yang T, et al. Effect of high temperature on mode-I fracture toughness of granite subjected to liquid nitrogen cooling[J].

Engineering Fracture Mechanics, 2021, 252: 107834.

[31] Guo Y F, Zhang R X, Zhang X, et al. Criterion for hydraulic fracture propagation behavior at the interface of a coal measure composite reservoir[J]. Geofluids, 2022: 1988302.

[32] 姜在炳, 李浩哲, 许耀波, 等. 煤层顶板分段压裂水平井地质适应性分析与施工参数优化[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 183-192.
Jiang Zaibing, Li Haozhe, Xu Yaobo, et al. Geological adaptability analysis and operational parameter optimization for staged fracturing horizontal wells in coal seam roof[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3): 183-192.

[33] 陈铭, 张士诚, 柳明, 等. 水力压裂支撑剂嵌入深度计算方法[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 149-156.
Chen Ming, Zhang Shicheng, Liu Ming, et al. Calculation method of proppant embedment depth in hydraulic fracturing[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 149-156.

[34] 赵金洲, 何弦桀, 李勇明. 支撑剂嵌入深度计算模型[J]. 石油天然气学报, 2014, 36(12): 209-212.
Zhao Jinzhou, He Xianjie, Li Yongming. A calculation model of proppant embedment depth[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2014, 36(12): 209-212.

[35] 杨帆, 李斌, 王昆剑, 等. 深部煤层气水平井大规模极限体积压裂技术: 以鄂尔多斯盆地东缘临兴区块为例[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(2): 389-398.
Yang Fan, Li Bin, Wang Kunjian, et al. Extreme massive hydraulic fracturing in deep coalbed methane horizontal wells: a case study of the Linxing Block, eastern Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 389-398.

[36] 黄天坤, 郝世彦, 魏登峰. 压裂支撑剂抗破碎能力及其数学模型研究[J]. 应用力学学报, 2019, 36(3): 747-752.
Huang Tiankun, Hao Shiyan, Wei Dengfeng. Study on crushing resistance and mathematical model of fracturing proppants[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(3): 747-752.

[37] 张小平, 丁磊, 张存旺, 等. 鄂尔多斯盆地本溪组8#煤煤岩气井壁稳定性影响因素研究[J]. 煤炭技术, 2025, 44(4): 119-124.
Zhang Xiaoping, Ding Lei, Zhang Cunwang, et al. Study on factors affecting wellbore stability in Benxi Formation No. 8 coalbed methane reservoir, Ordos Basin[J]. Coal Technology, 2025, 44(4): 119-124.

[38] 吕坤鸿, 张辉, 田得粮, 等. 鄂尔多斯盆地深部煤层井壁失稳机理及钻井液对策[J]. 钻井液与完井液, 2024, 41(5): 564-573.
Lyu Kunhong, Zhang Hui, Tian Deliang, et al. Mechanisms of borehole wall instability of deep coal seam in Ordos Basin and drilling fluid countermeasures[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2024, 41(5): 564-573.

[39] 左景栾, 吴建光, 张平, 等. 基于储层保护的煤层气开发低密度钻井液研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(9): 18-24.
Zuo Jingluan, Wu Jianguang, Zhang Ping, et al. Research on light weight drilling fluid for coalbed mathane development based on coal reservoir protection[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 18-24.

[40] 葛岩, 万欢, 刘灵童, 等. 渤中凹陷孔店组砂砾岩储层可压性评价[J]. 石油地质与工程, 2025, 39(5): 25-29.
Ge Yan, Wan Huan, Liu Lingtong, et al. Fracturability evaluation of conglomerate reservoirs in the Kongdian Formation of the Bozhong Sag[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2025, 39(5): 25-29.

[41] 任岩, 曹宏, 姚逢昌, 等. 吉木萨尔致密油储层脆性及可压裂性预测[J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(3): 511-519.
Ren Yan, Cao Hong, Yao Fengchang, et al. Brittleness and fracability prediction for tight oil reservoir in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(3): 511-519.

[42] 唐晓明, 许松, 庄春喜, 等. 基于弹性波速径向变化的岩石脆裂性定量评价[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 417-424.
Tang Xiaoming, Xu Song, Zhuang Chunxi, et al. Quantitative evaluation of rock brittleness and fracability based on elastic-wave velocity variation around borehole[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 417-424.

[43] Zhang J, Ai C, Li Y W, et al. Energy-based brittleness index and acoustic emission characteristics of anisotropic coal under triaxial stress condition[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2018, 51: 3343-3360.

[44] 蒋廷学, 卞晓冰, 苏瑗, 等. 页岩可压性指数评价新方法及应用[J]. 石油钻探技术, 2014, 42(5): 16-20.
Jiang Tingxue, Bian Xiaobing, Su Yuan, et al. A new method for evaluating shale fracability index and its application[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2014, 42(5): 16-20.

[45] 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.

[46] 刘尧文, 卞晓冰, 李双明, 等. 基于应力反演的页岩可压性评价方法[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(1): 82-88.
Liu Yaowen, Bian Xiaobing, Li Shuangming, et al. An evaluation method of shale fracability based on stress inversion[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(1): 82-88.

[47] 韩磊, 申建, 张小东, 等. 构造复杂区深部煤储层可压性评价方法及应用: 以沁水盆地H区块为例[J/OL]. 煤炭科学技术,2025-12-01. https: //kns. cnki. net/kcms/detail/11. 2402. TD. 20251201. 1459. 002.
Han Lei, Shen Jian, Zhang Xiaodong, et al. Method and application of fracability of deep coal reservoirs in complex structural areas of Hengling Block, Qinshui Basin[J/OL]. Coal Science and Technology, 2025-12-01. https: //kns. cnki. net/kcms/detail/11. 2402. TD. 20251201. 1459. 002.

[48] 王建波, 冯明刚, 严伟, 等. 焦石坝地区页岩储层可压裂性影响因素及计算方法[J]. 断块油气田, 2016, 23(2): 216-220.
Wang Jianbo, Feng Minggang, Yan Wei, et al. Influence factors and evaluation methods for shale reservoir fracability in Jiaoshiba Area [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2016, 23(2): 216-220.

[49] 窦亮彬, 杨浩杰, XIAO YingJian, 等. 页岩储层脆性评价分析及可压裂性定量评价新方法研究[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(2): 576-584.
Dou Liangbin, Yang Haojie, Xiao YingJian, et al. Probability study of formation brittleness and new quantitative evaluation of fracability for shale reservoirs[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(2): 576-584.

（编辑　余聪）