



移动阅读

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(S2): 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.

临兴地区深部煤岩力学性质及其对煤储层压裂的影响

高向东¹, 王延斌², 倪小明³, 陶传奇⁴, 赵石虎²

(1. 东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013; 2. 中国矿业大学(北京) 地球科学与测绘工程学院, 北京 100083; 3. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 4. 辽宁石油化工大学 矿业工程学院, 辽宁 抚顺 113001)

摘 要:煤、岩力学性质是影响煤储层压裂改造效果的关键因素。基于煤的原位条件的全应力-应变试验、煤和顶底板围岩的单轴和三轴力学参数统计, 结合 FracproPT 压裂模拟软件, 揭示了深部煤储层原位力学性质, 查明了研究区煤、岩组合特征及力学性质差异, 探讨了煤、岩力学性质对深部煤储层压裂的影响。研究表明: 随着温度的增加, 煤的弹性减弱, 塑性增强, 力学强度呈减弱趋势。温度对煤力学性质的影响很小, 对于煤整体的力学强度而言, 这种影响可以忽略不计。应力增强了煤岩弹性性能和力学强度, 且影响显著, 在不同的应力范围内其影响特征不同。在弹性变形阶段, 随着有效围压的增大, 煤的弹性模量增大, 泊松比减小, 但是在不同围压条件下, 弹性模量和泊松比随应力的变化显示出不同的特征。当有效围压为 20 MPa 时, 随着轴向应力的增大, 煤的弹性模量和泊松比先快速增大后逐渐恒定。当有效围压为 10 MPa 时, 弹性模量和泊松比在轴向应力加载初期也呈快速增大趋势, 但泊松比在轴向应力为 10 MPa 附近经历短暂的稳定后继续增大。当有效围压为 30 MPa 时, 弹性模量和泊松比开始就是一个相对恒定的值, 缺少弹性模量和泊松比的上升段。在塑性变形阶段, 随着有效围压的增大, 塑性变形发生时对应的应力和应变值增大, 且屈服点更加显现, 表明随着有效围压的增大, 煤的塑性变形延迟出现。在残余强度阶段, 随着有效围压的增大, 煤的残余强度也有所提高。研究区煤层与顶底板存在 7 种组合类型, 以泥岩-煤-泥岩为主, 细砂岩-煤-细砂岩次之, 力学性能按照煤、炭质泥岩、泥岩、砂质泥岩、粉砂岩、细砂岩、中砂岩的顺序增强。煤岩弹性模量越大, 压裂容易形成高、窄、短缝; 煤、岩弹性模量差越大, 压裂容易形成矮、长、宽缝。

关键词:鄂尔多斯盆地; 临兴地区; 深部煤储层; 力学性质; 煤储层压裂

中图分类号: TD313

文献标志码: A

文章编号: 0253-9993(2020)S2-0912-10

Mechanical properties of deep coal and rock in Linxing area and its influences on fracturing of deep coal reservoir

GAO Xiangdong¹, WANG Yanbin², NI Xiaoming³, TAO Chuanqi⁴, ZHAO Shihu²

(1. School of Earth Science, East China University of Technology, Nanchang 330013, China; 2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 3. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 4. School of Mining Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

Abstract: The mechanical properties of coal and surrounding rock are the key factors influencing the effect of coal reservoir fracturing transformation. Based on full stress-strain experiment of coal under in-situ conditions, and uniaxial and triaxial mechanical parameters statistics of coal and surrounding rock on top and bottom of coal seam, combined with

收稿日期: 2020-05-04 修回日期: 2020-06-05 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0754

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05066001-002)

作者简介: 高向东(1988—), 男, 陕西延川人, 讲师。E-mail: gaoxid1990@163.com

FracproPT fracturing simulation software, the in-situ mechanical properties of deep coal reservoir were revealed, the combination characteristics and mechanical properties differences of coal and surrounding rock in the study area were identified, and the influence of mechanical properties of coal and surrounding rock on fracturing of deep coal reservoir was discussed. With the increase of temperature, the elasticity of coal decreases, the plasticity of coal increases and the mechanical strength of coal decreases. The effect of temperature on the mechanical properties of coal is very small, which can be ignored for the whole mechanical strength of coal. The stress enhances the elastic property and mechanical strength of coal, and the influence is significant. The influence characteristics are different in different stress range. In the stage of elastic deformation, with the increase of effective confining pressure, the elastic modulus of coal increases and Poisson's ratio of coal decreases, but under different confining pressure conditions, the elastic modulus and Poisson's ratio of coal show different characteristics with the change of stress. When the effective confining pressure is 20 MPa, with the increase of axial stress, the elastic modulus and Poisson's ratio of coal increase rapidly and then become constant. When the effective confining pressure is 10 MPa, the elastic modulus and Poisson's ratio of coal also increase rapidly at the initial stage of axial stress loading, but Poisson's ratio continues to increase after a short period of stability near the axial stress of 10 MPa. When the effective confining pressure is 30 MPa, the elastic modulus and Poisson's ratio of coal are relatively constant at the beginning, lacking the rising section of elastic modulus and Poisson's ratio. In the stage of plastic deformation, with the increase of effective confining pressure, the corresponding stress and strain values increase when plastic deformation occurs, and the yield point is more obvious, which shows that with the increase of effective confining pressure, the plastic deformation of coal is delayed. In the stage of residual strength, with the increase of effective confining pressure, the residual strength of coal also increased. There are seven combination types of coal seam and surrounding rock in the study area, mainly mudstone-coal-mudstone, followed by fine sandstone-coal-fine sandstone, and the mechanical properties are enhanced according to the sequence of coal, carbonaceous mudstone, mudstone, sandy mudstone, siltstone, fine sandstone, medium sandstone. The greater the elastic modulus of coal, it is easy to form high, narrow and short fracturing cracks; the greater the difference of elastic modulus of coal and surrounding rock, it is easy to form short, long and wide fracturing cracks.

Key words: Ordos Basin; Linxing area; deep coal reservoir; mechanical properties; fracturing of coal reservoir

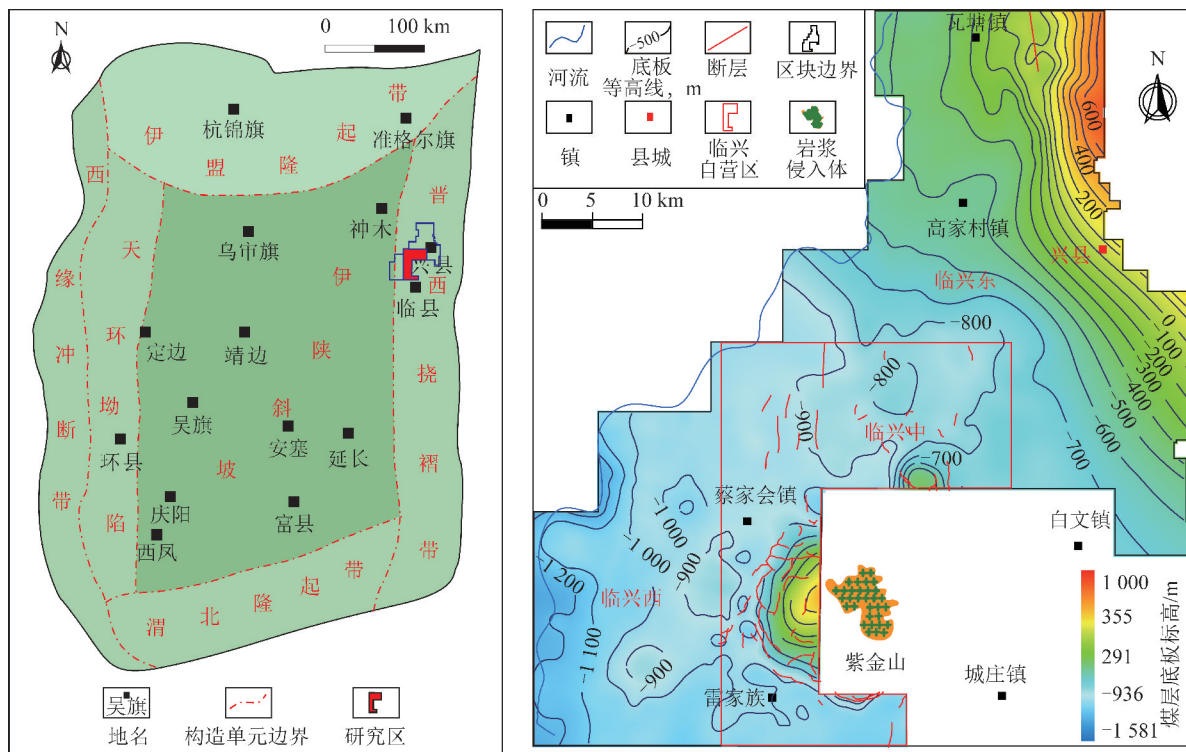
深部煤储层低孔、低渗的特性决定了其压裂改造势在必行^[1-3]。煤储层的压裂改造效果与煤层本身及顶底板围岩的力学性质密切相关,煤、岩力学性质共同决定了压裂裂缝的延伸和扩展特征^[4]。随着埋深的增加,煤储层温度和地应力逐渐增大,其力学性质在高温和高应力协同作用下与浅部产生显著差异。深部煤储层力学性质的研究,主要是围绕温度和应力条件开展力学实验模拟或数值模拟,但是认识不统一。关于温度对煤岩力学性质的影响,一些学者认为,煤岩力学强度随温度的升高呈减小趋势,也有学者认为煤岩力学强度随温度的升高呈先减小后增大再减小的趋势^[5-7]。关于应力对煤岩力学性质的影响相对统一,认为应力可以增大煤岩力学强度,但是在不同的应力范围、应变阶段都存在差异^[8-9]。也有学者综合考虑温度和应力的影响,认为煤岩力学性质随埋深的增加存在拐点^[10]。因此,温度和应力对煤岩力学性质的影响特征有待进一步明确。煤、岩力学性质差异必然影响压裂裂缝的延伸特征,深部煤储层力学性质的特殊性,也导致了其压裂改造充满挑战和

不确定性,而针对深部煤储层力学性质对压裂效果的影响研究却鲜有报道。

依据上述问题,笔者基于全应力-应变试验,明确了温度和应力对煤力学性质的影响特征,揭示了深部煤储层原位力学特性;通过钻井和测井煤、岩鉴定,查明了研究区煤、岩组合类型,结合煤、岩单轴和三轴力学参数统计,阐明了研究区煤、岩力学性质差异;在上述研究的基础上,采用 FracproPT 压裂模拟软件,探讨了煤、岩力学性质对深部煤储层压裂的影响特征。该研究成果以期对深部煤储层的压裂改造提供借鉴。

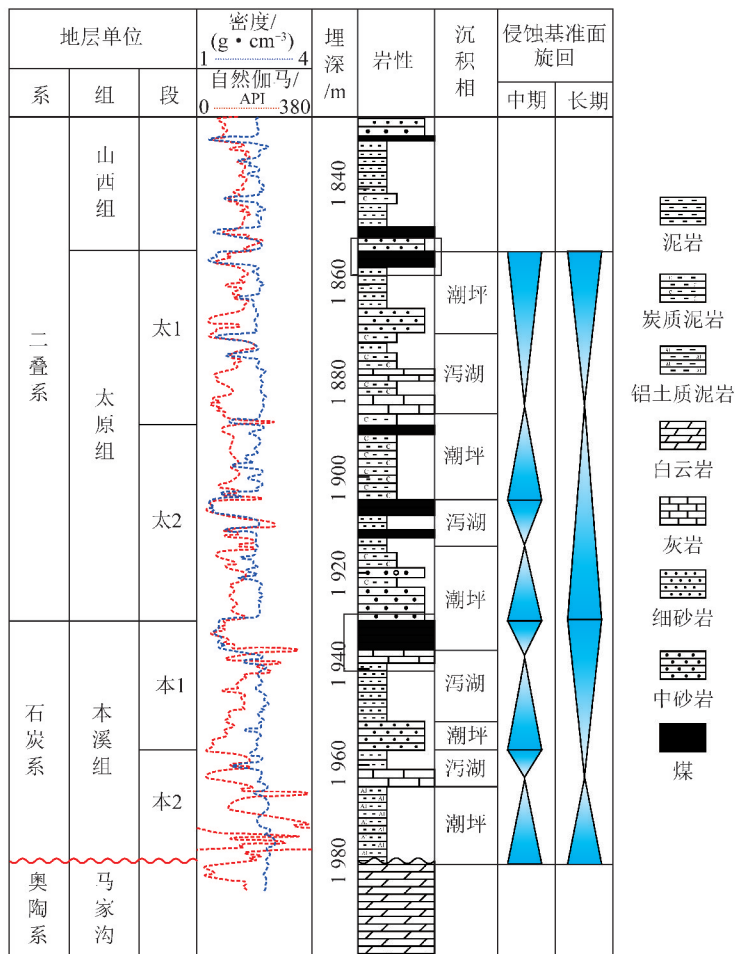
1 区域地质背景

鄂尔多斯盆地横跨陕西、山西 2 省,面积达 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$,构造位置属于华北地台西部,是华北地台上的一个典型中、新生代陆相盆地,形成于印支期的板内构造运动阶段,内部由 6 个构造单元组成^[11-12]。盆地的主体是伊陕斜坡,整体为一西倾的单斜构造(图 1(a))^[13]。



(a) 鄂尔多斯盆地构造单元

(b) 临兴区块构造



(c) 临兴区块地层柱状图

图 1 临兴区块构造纲要和含煤地层发育特征

Fig. 1 Structural outline and coal-bearing stratum development characteristics of Linxing Block

临兴区块位于鄂尔多斯盆地东缘,区域构造上属于晋西挠褶带北部偏中,构造相对简单,整体也为单斜构造,地层倾角小,一般为 $1^{\circ}\sim 4^{\circ}$ ^[14-15]。区块中部邻近紫金山岩体,受岩浆侵入的影响,构造关系相对复杂。区块北部和南部,受侵入岩的影响较弱,主要发育宽缓的褶皱和少量小型断层(图 1(b))^[16]。研究区煤层厚度最大的是本溪组顶部的 8+9 号煤层,是目前煤层气勘探开发的主力煤层。煤层埋深为 1 093~2 114 m,平均为 1 897 m,埋深普遍较大(图 1(c))^[17-18]。

2 深部煤储层力学性质

2.1 样品和实验设计

此次研究所用样品采自临兴中的 8+9 号煤层。为了控制变量,实验样品从同一个煤芯的相同位置钻

取 6 个平行样品,编号为 1~6(图 2)。由于全应力-应变试验需要加载到样品破坏为止,深部煤层取样、制样异常困难,因此,探讨温度的影响时,只固定一个有效围压,而探讨应力的影响时,也只固定一个温度。温度和有效围压的选取基于研究区煤储层地质背景,实验最大有效围压取 30 MPa,最大模拟温度取 65 $^{\circ}\text{C}$ 。样品信息及实验条件见表 1。



图 2 用于力学实验的煤样

Fig. 2 Coal samples for mechanical experiment

表 1 实验样品的基础参数和实验条件

Table 1 Basic parameters of coal samples and experimental conditions

样品编号	样品条件				实验条件	
	长度/mm	直径/mm	质量/g	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$	有效围压/MPa
1	48.33	24.96	35.02	1.48	25	30
2	49.76	24.92	35.75	1.47	45	30
3	50.61	24.71	34.51	1.42	65	30
4	45.60	24.56	31.53	1.46	65	10
5	47.74	24.49	35.75	1.59	65	20
6	46.93	24.98	35.68	1.48	65	30

2.2 实验仪器

力学实验在中海油渤海实验中心开展,所用仪器的型号为 TAW-1000(图 3)。该仪器属于高温、高压力学实验设备,最高围压可以加载到 80 MPa,最高实验温度可设置为 200 $^{\circ}\text{C}$,可装载的最大岩芯直径为 50 mm。围压和变形的控制精度都为 $\pm 0.1\%$,围压和变形的测量误差分别为 $\pm 2.0\%$ 和 $\pm 0.5\%$ 。实验过程实现了全自动控制,操作方便、简单。



图 3 力学实验设备

Fig. 3 Mechanical laboratory instrument

2.3 实验结果及分析

2.3.1 温度对煤岩力学性质的影响

煤在不同温度条件下的应力-应变曲线类似,温

度对煤力学性质的影响从弹性模量、泊松比和峰值强度 3 方面来具体论述。在弹性变形阶段,随着温度的升高,煤的弹性模量呈减小趋势,泊松比则呈增大趋势,弹性模量和泊松比的变化都很小(表 2)。当进入塑性变形阶段以后,随着温度的升高,屈服点逐渐消失,出现较小的力学性质分异。随着塑性变形的增加,煤达到其峰值强度,煤的峰值强度也随着温度的增加有所减小(图 4)。总的来看,随着温度的增加,

表 2 煤力学实验测试结果

Table 2 Test results of coal mechanical experiment

样品编号	温度/ $^{\circ}\text{C}$	有效围压/MPa	峰值强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
1	25	30	74.8	6.2	0.27
2	45	30	73.6	6.0	0.27
3	65	30	71.4	5.8	0.28
4	65	10	40.2	3.7	0.35
5	65	20	61.0	4.6	0.32
6	65	30	71.7	6.4	0.28

煤的弹性减弱,塑性增强,力学强度呈减弱趋势。温度对煤力学性质的影响很小,对于煤整体的力学强度而言,这种影响可以忽略不计。

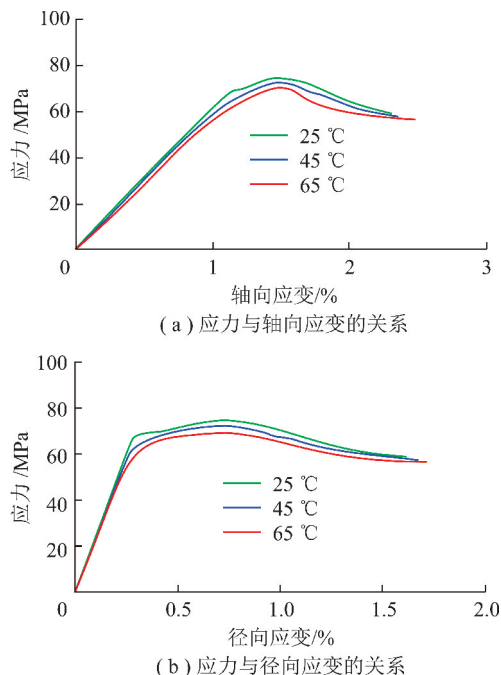


图4 煤在不同温度条件下的应力-应变曲线

Fig. 4 Relationship between stress and strain of coal under different temperatures

2.3.2 应力对煤岩力学性质的影响

煤在不同有效围压条件下的应力-应变曲线差异明显,可见应力对煤力学性质的影响比较显著(图5)。从演化过程来看,不同有效围压条件下的应力-应变曲线可以大致分为3个阶段:弹性变形阶段、塑性变形阶段和残余强度阶段。在弹性变形阶段,随着有效围压的增大,煤的弹性模量增大,泊松比减小(表2),但是在不同围压条件下,弹性模量和泊松比随应力的变化显示出不同的特征(图6)。

当有效围压为20 MPa时,随着轴向应力的增大,煤的弹性模量和泊松比先快速增大后逐渐恒定。在应力加载初期,煤中的显微裂隙和大孔快速压实闭合,煤的弹性性能快速提高。当显微裂隙闭合、大孔隙逐渐压缩后,煤才开始进入线弹性阶段,煤的弹性模量和泊松比逐渐恒定^[19-20]。当有效围压为10 MPa时,弹性模量和泊松比在轴向应力加载初期也呈快速增大趋势,但泊松比在轴向应力为10 MPa附近经历短暂的稳定后继续增大。分析认为,当轴向压力小于10 MPa时,围压的束缚作用控制了径向应变,当轴向压力超过10 MPa时,径向的约束作用相对减弱,径向应变比较显著,导致泊松比持续增大。当有效围压为30 MPa时,弹性模量和泊松比开始就是一个相对恒定的值,这是因为有

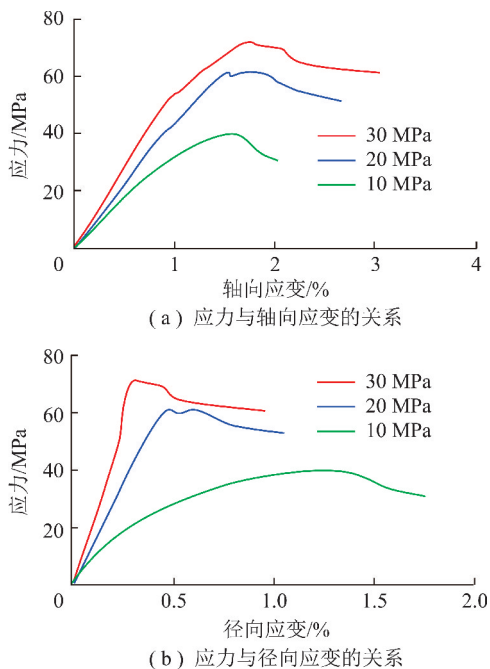


图5 煤在不同围压条件下应力-应变曲线

Fig. 5 Relationship between stress and strain of coal under different confining pressures

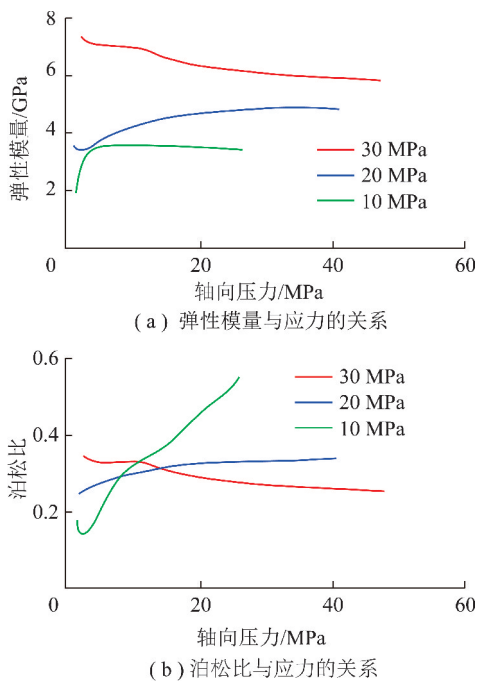


图6 煤的力学参数在不同围压条件下与应力的关系

Fig. 6 Relationship between stress and mechanical parameters of coal under different effective confining pressures

效围压较大,煤中的孔裂隙在轴向应力未加载时已趋于闭合,所以缺少弹性模量和泊松比的上升段。在塑性变形阶段,随着有效围压的增大,塑性变形发生时对应的应力和应变值增大,且屈服点更加显现,表明随着有效围压的增大,煤的塑性变形延迟出现。当塑性变形达到极限时,煤达到其峰值强

度,随着有效围压的增大,煤的峰值强度明显增大,且峰值强度对应的轴向应变增大,径向应变减小。在残余强度阶段,随着有效围压的增大,煤的残余强度也有所提高。整体而言,随着有效围压的增大,煤的岩石力学强度明显提高,且由 10~20 MPa 提高到 20~30 MPa。由于煤力学性能的提高依赖于围压增大过程中的趋实性,当围压增大到一定程度时(不引起变形破坏前提下),煤很难被压缩,煤的力学强度的提高速率逐渐减缓。

3 煤、岩组合特征及力学性质对比

3.1 煤、岩组合类型

煤与顶底板岩石的力学性质差异,控制着压裂裂缝的纵向延伸^[21]。通过对研究区钻井岩心编录和测

井岩性解释资料的分析,归纳出主力煤层与顶底板岩石的组合情况主要有以下 7 种:泥岩-煤-泥岩、炭质泥岩-煤-炭质泥岩、泥岩-煤-砂质泥岩、泥岩-煤-灰岩、泥岩-煤-粉砂岩、泥岩-煤-细砂岩、泥岩-煤-中砂岩(图 7)。煤与顶底板岩石的组合特征主要受控于沉积环境,4+5 号煤层所处的沉积环境为下三角洲平原,煤层主要发育在分流间湾中^[22],所以 4+5 号煤层与顶底板岩石的组合类型以①和②为主,含少量的⑤,⑥。8+9 号煤层所处的沉积环境为障壁海岸相,煤层主要发育在潮坪和泻湖环境中^[22],所以 8+9 号煤层及顶底板围岩的组合以类型①,②和⑥为主,类型③,④,⑦比较少见。根据统计,类型①,②约占组合的 60%,类型⑥约占组合的 30%,其余的类型占组合不足 10%。

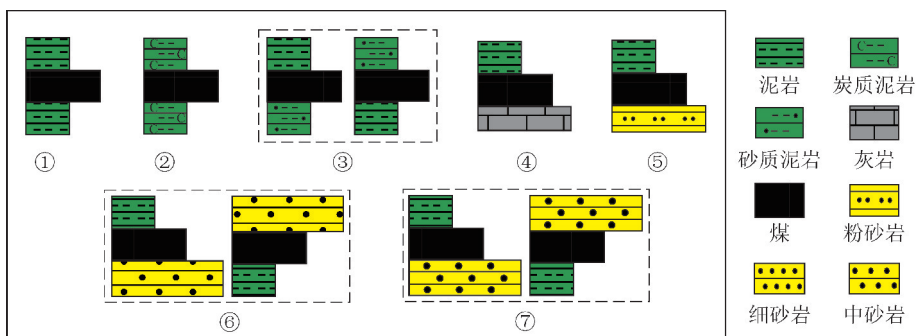


图 7 研究区煤、岩组合类型

Fig. 7 Combination types of coal and surrounding rocks in study area

3.2 煤、岩力学性质差异

根据上述煤、岩组合描述可知,煤层顶底板岩性为炭质泥岩、泥岩、砂质泥岩、粉砂岩、细砂岩、中砂岩和灰岩。由于研究区灰岩段取芯较少,且不是煤层的主要顶底板,因此,此次研究中不考虑灰岩的岩石力学参数。除了灰岩以外,对上述 7 种岩石的力学参数(基于单轴和三轴力学实验数据,其中三轴力学实验的围压都为 30 MPa)进行详细统计,包括抗压强度、抗拉强度、杨氏模量(弹性模量)、泊松比,统计结果见表 3。

由表 3 可知,按照煤、炭质泥岩、泥岩、砂质泥岩、粉砂岩、细砂岩、中砂岩的顺序,三轴抗压强度、弹性模量和单轴抗拉强度呈增大趋势(图 8(a)~(c)),三轴泊松比呈减小趋势(图 8(d)),表明煤、岩力学性质按照该岩性顺序增强。各岩性的抗拉强度和泊松比相差不大,从岩性组合来看,煤与炭质泥岩和泥岩的力学性质相对接近,与砂岩的力学性质差异较大。由于研究区煤层顶底板岩性主要为泥岩、炭质泥岩和细砂岩,当炭质泥岩和泥岩作为煤层顶底板时,压裂裂缝更容易向顶底板延伸,而细砂岩作为煤层的顶底

板时,压裂裂缝更容易被限制在煤层中。

4 煤、岩力学性质对煤储层压裂的影响

在研究区煤、岩力学参数研究的基础上,利用 FracproPT 压裂模拟软件(该软件常用于水力压裂的设计和分折,其最大的优势在于可以进行现场施工数据和室内模拟参数的动态交互,从而对施工参数进行及时的调整和优化),开展煤、岩力学性质对煤储层压裂效果的影响研究。

4.1 煤的弹性模量对压裂效果的影响

根据上述煤的三轴力学实验可知,研究区深部煤储层的弹性模量介于 4~7 GPa,此次研究取煤储层的弹性模量为 3,4,5,6,7 GPa,开展煤弹性模量对压裂的影响研究。模拟结果如图 9 所示,压裂裂缝参数统计结果如图 10 所示。

由图 10 可知,随着煤储层弹性模量的增大,压裂裂缝的长度呈减小趋势;压裂裂缝的高度随弹性模量的增大而增大;压裂裂缝的宽度随弹性模量的增加而减小。分析认为,随着煤弹性模量的增加,煤体在单位应力作用下的应变减小,则压裂裂缝在沿着裂缝长

表3 煤、岩力学参数统计

Table 3 Statistical table of mechanical parameters of coal and surrounding rocks

力学参数	中砂岩	细砂岩	粉砂岩	砂质泥岩	泥岩	炭质泥岩	煤
密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$\frac{2.35 \sim 2.63}{2.47}$	$\frac{2.35 \sim 2.65}{2.51}$	$\frac{2.38 \sim 2.71}{2.56}$	$\frac{2.42 \sim 2.81}{2.60}$	$\frac{2.45 \sim 2.86}{2.62}$	$\frac{2.46 \sim 2.59}{2.53}$	$\frac{1.35 \sim 1.75}{1.43}$
单轴							
抗压强度/MPa	$\frac{38 \sim 84}{57}$	$\frac{22 \sim 89}{52}$	$\frac{17 \sim 77}{46}$	$\frac{18 \sim 69}{42}$	$\frac{12 \sim 65}{39}$	$\frac{13 \sim 44}{27}$	$\frac{2 \sim 21}{10}$
弹性模量/GPa	$\frac{5.7 \sim 54.5}{17.0}$	$\frac{4.3 \sim 57.8}{20.5}$	$\frac{5.5 \sim 42.9}{15.2}$	$\frac{4.7 \sim 33.2}{13.7}$	$\frac{4.4 \sim 26.7}{12.6}$	$\frac{3.2 \sim 22.8}{7.3}$	$\frac{0.8 \sim 1.75}{1.09}$
泊松比	$\frac{0.12 \sim 0.35}{0.21}$	$\frac{0.10 \sim 0.32}{0.21}$	$\frac{0.13 \sim 0.32}{0.22}$	$\frac{0.15 \sim 0.33}{0.24}$	$\frac{0.20 \sim 0.32}{0.24}$	$\frac{0.20 \sim 0.35}{0.29}$	$\frac{0.26 \sim 0.39}{0.32}$
抗拉强度/MPa	$\frac{2.31 \sim 5.76}{3.79}$	$\frac{2.91 \sim 5.54}{3.96}$	$\frac{1.78 \sim 5.12}{3.58}$	$\frac{1.60 \sim 5.24}{3.18}$	$\frac{0.91 \sim 5.35}{2.97}$	$\frac{1.64 \sim 3.42}{2.35}$	$\frac{0.22 \sim 1.03}{0.52}$
三轴							
抗压强度/MPa	$\frac{142 \sim 237}{188}$	$\frac{108 \sim 227}{170}$	$\frac{90 \sim 199}{149}$	$\frac{80 \sim 178}{127}$	$\frac{85 \sim 157}{116}$	$\frac{64 \sim 125}{92}$	$\frac{66 \sim 87}{74}$
弹性模量/GPa	$\frac{19.4 \sim 27.4}{24.7}$	$\frac{20.8 \sim 28.6}{25.5}$	$\frac{16.3 \sim 24.1}{19.4}$	$\frac{10.3 \sim 24.2}{16.3}$	$\frac{8.7 \sim 19.8}{14.5}$	$\frac{4.2 \sim 15.6}{10.6}$	$\frac{4.5 \sim 6.5}{5.8}$
泊松比	$\frac{0.18 \sim 0.26}{0.23}$	$\frac{0.20 \sim 0.27}{0.23}$	$\frac{0.20 \sim 0.28}{0.25}$	$\frac{0.22 \sim 0.31}{0.27}$	$\frac{0.23 \sim 0.33}{0.28}$	$\frac{0.24 \sim 0.35}{0.30}$	$\frac{0.27 \sim 0.38}{0.33}$

注:数据格式 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

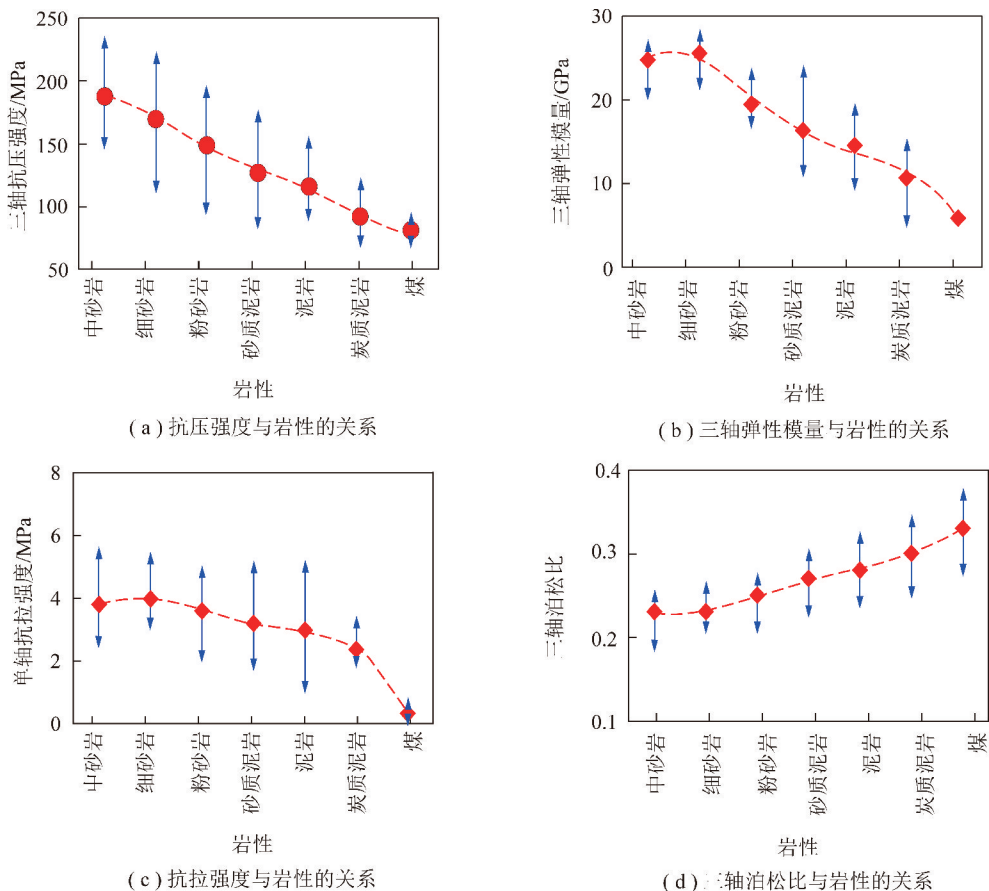


图8 研究区不同岩性的力学参数

Fig. 8 Mechanical parameters of different lithologies in the study area

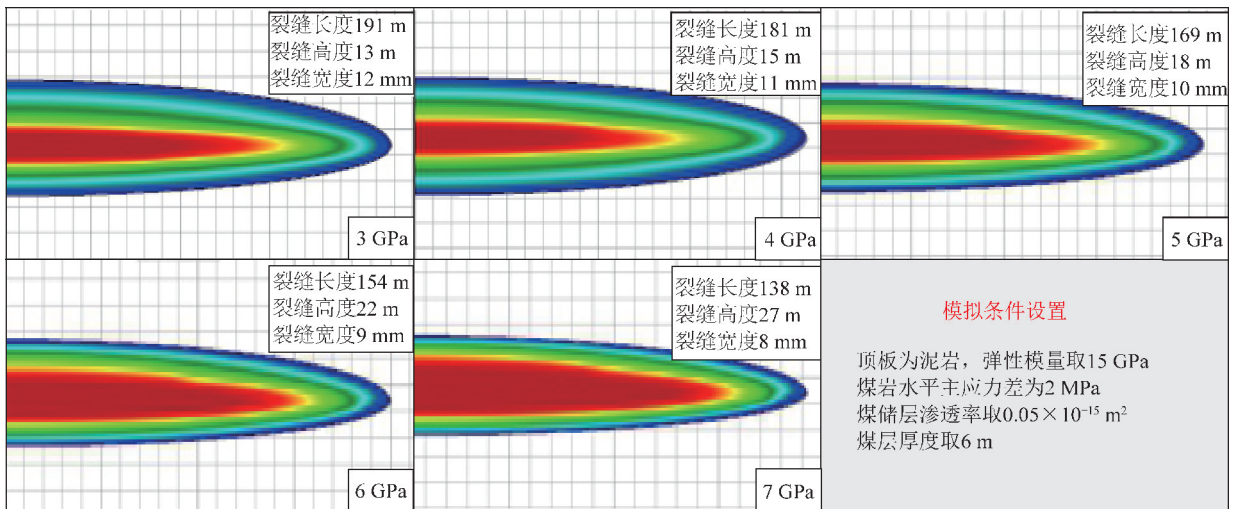


图9 不同煤弹性模量条件下的水力压裂模拟

Fig. 9 Hydraulic fracturing simulation under different coal elastic modulus

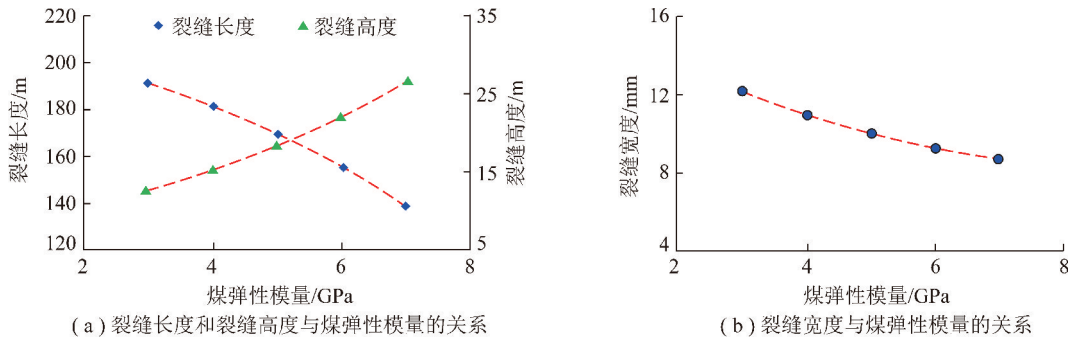


图10 不同煤弹性模量条件下的水力压裂裂缝参数

Fig. 10 Hydraulic fracture parameters under different coal elastic modulus

度方向宽度减小, 裂缝则会通过向裂缝高度方向延伸来达到体积平衡。其次, 煤自身弹性模量越大, 则煤、岩弹性模量差异越小, 越有利于压裂裂缝向裂缝高度方向延伸, 但这种影响与前者相比, 则相对较弱, 因为煤储层的弹性模量变化很小。2种作用叠加, 使得裂缝高度的增长速度在弹性模量较大时也比较大。总的来说, 随着煤储层弹性模量的增大, 压裂裂缝越倾向于形成高、窄、短缝。煤储层弹性模量随着埋深的增大而增大, 对于深部煤储层而言, 煤弹性模量较大, 裂缝容易在垂直方向延伸, 这对于煤层气的单独开发而言是不利的, 因为煤储层厚度整体较小, 压裂裂缝在垂直方向延伸时, 容易沟通煤层顶底的含水层, 对煤层气的排水降压不利。临兴地区8+9号煤层顶部离桥头砂岩和庙沟灰岩较近, 而4+5号煤层底部离区域北岔沟砂岩(分流河道砂岩)较近, 如果砂岩或灰岩含水, 则煤层气的排水降压难度会增大。

4.2 煤、岩弹性模量差异对压裂效果的影响

由于煤本身塑性较强, 埋深增大只是在一定程度上提高了煤的力学强度, 因此弹性模量的变化并不是

很大, 对压裂的影响也是有限的, 而煤、岩力学性质差异, 无论在浅部还是深部都相对较大, 其对压裂的影响也很大。由顶底板岩石力学参数统计可知, 煤层顶底板岩石的平均弹性模量为10~26 GPa, 此次研究固定煤弹性模量为5 GPa, 取顶底板岩石弹性模量为10, 15, 20, 25, 30 GPa, 开展煤、岩弹性模量差异对压裂效果的影响研究。模拟结果如图11所示, 压裂裂缝的参数统计结果如图12所示。

由图12可知, 随着煤、岩弹性模量差的增大, 压裂裂缝的长度增加, 高度减小, 裂缝宽度呈增大趋势。随着煤、岩弹性模量差的增加, 煤、岩力学性质的纵向非均质性导致压裂裂缝在垂向上的延伸难度增加, 压裂裂缝更容易被限制在煤层中延伸, 因此, 压裂裂缝的长度呈线性增加, 裂缝宽度也呈增大趋势。当煤、岩弹性模量差增加到一定程度时, 对裂缝高度的限制作用减弱。整体而言, 随着煤、岩弹性模量差的增大, 压裂改造在煤层中容易形成更大的裂缝体积, 不仅增大了煤储层的有效改造体积, 同时增大了煤层气的降压解吸体积, 因此, 煤、岩力学性质差异对深部煤层气的压裂改造而言是一个非常关键的影响因素。

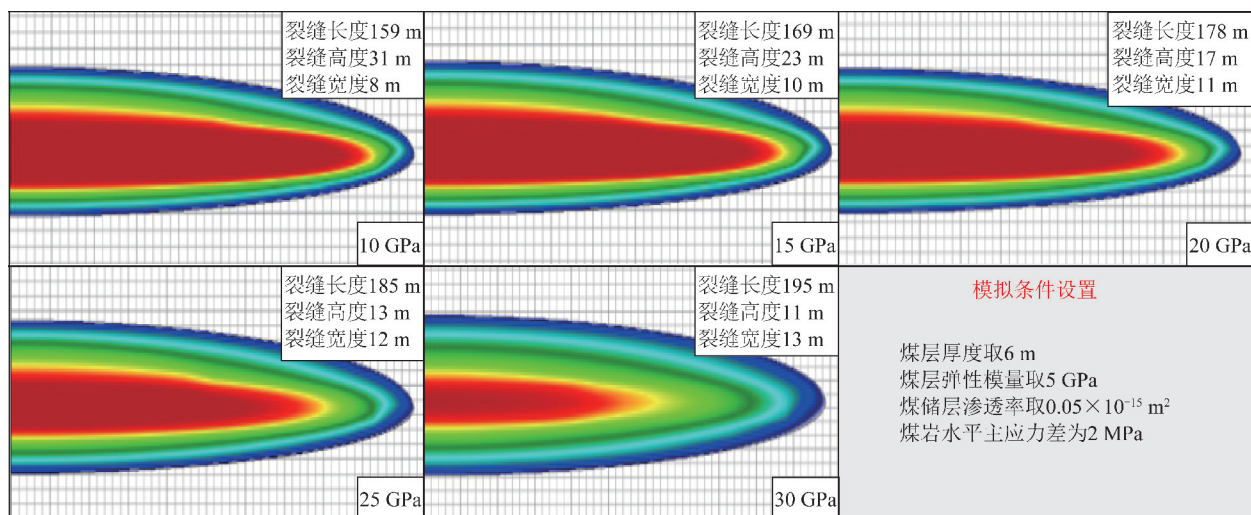
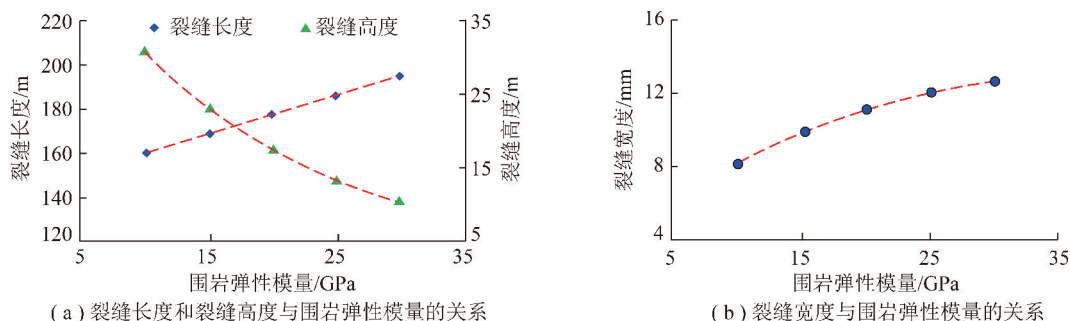


图 11 不同围岩弹性模量条件下的水力压裂模拟

Fig. 11 Hydraulic fracturing simulation under different surrounding rock elastic modulus



(a) 裂缝长度和裂缝高度与围岩弹性模量的关系

(b) 裂缝宽度与围岩弹性模量的关系

图 12 不同围岩弹性模量条件下的水力压裂裂缝参数

Fig. 12 Hydraulic fracture parameters under different surrounding rock elastic modulus

5 结 论

(1) 温度降低了煤岩弹性性能和力学强度,在不同的应变阶段其对力学性能的影响存在差异;应力明显增强了煤岩弹性性能和力学强度,在不同的应力范围内其影响特征不同。

(2) 研究区煤层与顶底板存在 7 种组合类型,以泥岩-煤-泥岩为主,细砂岩-煤-细砂岩次之,力学性能按照煤、炭质泥岩、泥岩、砂质泥岩、粉砂岩、细砂岩、中砂岩的顺序增强。

(3) 煤的弹性模量越大,压裂容易形成高、窄、短缝;煤、岩弹性模量差越大,压裂容易形成矮、长、宽缝。

参考文献 (References):

[1] 秦勇, 申建, 王宝文, 等. 深部煤层气成藏效应及其耦合关系[J]. 石油学报, 2012, 33(1): 48-54.
QIN Yong, SHEN Jian, WANG Baowen, et al. Accumulation effects and coupling relationship of deep coalbed methane[J]. Acta Petrolci Sinica, 2012, 33(1): 48-54.

[2] SU X B, LIN X Y, LIU S B, et al. Geology of coalbed methane reser-

voirs in the southeast Qinshui basin of China[J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 62(4): 197-210.

- [3] 杨兆中, 杨苏, 张健, 等. 800m 以深直井煤储层压裂特征分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 100-104.
YANG Zhaozhong, YANG Su, ZHANG Jian, et al. Fracturing characteristics analysis of 800 meters deeper coalbed methane vertical wells[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 100-104.
- [4] 陈杨, 姚艳斌, 崔金榜, 等. 郑庄区块煤储层水力压裂裂缝扩展地质因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(7): 98-102.
CHEN Yang, YAO Yanbin, CUI Jinbang, et al. Analysis on geological control factors of hydraulic fracture extension of coal reservoirs in Zhengzhuang block[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(7): 98-102.
- [5] 许江, 张丹丹, 彭守建, 等. 温度对含瓦斯煤力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 2730-2735.
XU Jiang, ZHANG Dandan, PENG Shoujian, et al. Experimental research on influence of temperature on mechanical properties of coal containing methane[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2730-2735.
- [6] 万志军, 冯子军, 赵阳升, 等. 高温三轴应力下煤体弹性模量的演化规律[J]. 煤炭学报, 2011, 36(10): 1736-1740.
WAN Zhijun, FENG Zijun, ZHAO Yangsheng, et al. Elastic modulus's evolution law of coal under high temperature and triaxial stress[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(10): 1736-1740.

- [7] 宋洋, 梁冰, 祝百茹, 等. 热-固耦合煤岩力学性质[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2017, 36(3): 931.
SONG Yang, LIANG Bing, ZHU Bairu, et al. Experiment of the mechanical property of coal thermal-structure interaction[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition), 2017, 36(3): 931.
- [8] 赖勇. 围压对杨氏模量的影响分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(2): 246-249.
LAI Yong. Effect analysis of confining pressure on Young's modulus[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2009, 28(2): 246-249.
- [9] 杨永杰, 宋扬, 陈绍杰. 三轴压缩煤岩强度及变形特征的试验研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 150-153.
YANG Yongjie, SONG Yang, CHEN Shaojie. Test study of coal's strength and deformation characteristics under triaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 150-153.
- [10] 申建, 秦勇, 傅雪海, 等. 深部煤层气成藏条件特殊性及其临界深度探讨[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(9): 1470-1476.
SHEN Jian, QIN Yong, FU Xuehai, et al. Properties of deep coalbed methane reservoir-forming conditions and critical depth discussion[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(9): 1470-1476.
- [11] 师晶, 黄文辉, 吕晨航, 等. 鄂尔多斯盆地临兴地区上古生界泥岩地球化学特征及地质意义[J]. 石油学报, 2018, 39(8): 876-889.
SHI Jing, HUANG Wenhui, LÜ Chenhang, et al. Geochemical characteristics and geological significance of the Upper Paleozoic mudstones from Linxing area in Ordos basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(8): 876-889.
- [12] DOU W C, LIU L F, WU K J, et al. Origin and significance of secondary porosity: A case study of upper triassic tight sandstones of Yanchang formation in Ordos basin, China[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2017, 149: 485-496.
- [13] 赵靖舟, 王力, 孙兵华, 等. 鄂尔多斯盆地东部构造演化对上古生界大气田形成的控制作用[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(6): 875-881.
ZHAO Jingzhou, WANG Li, SUN Binghua, et al. Effect of structural evolution on the formation and distribution of Upper Paleozoic giant fields in the east Ordos basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(6): 875-881.
- [14] GAO X D, WANG Y B, NI X M, et al. Recovery of tectonic traces and its influence on coalbed methane reservoirs: A case study in the Linxing area, eastern Ordos basin, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 56: 414-427.
- [15] 傅宁, 杨树春, 贺清, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴-神府区块致密砂岩气高效成藏条件[J]. 石油学报, 2016, 37(S1): 111-120.
FU Ning, YANG Shuchun, HE Qing, et al. High efficiency reservoir formation conditions of tight sandstone gas in Linxing-Shenfu blocks on the east margin of Ordos basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(S1): 111-120.
- [16] 陶传奇, 王延斌, 倪小明, 等. 临兴地区上石炭统本溪组煤系气成藏关键时期[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(3): 531-537.
TAO Chuanqi, WANG Yanbin, NI Xiaoming, et al. Key accumulation period for coal series gas reservoir in Upper Carboniferous Benxi formation, Linxing block[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2018, 47(3): 531-537.
- [17] 张兵, 徐文军, 徐延勇, 等. 鄂尔多斯盆地东缘临兴区块深部关键煤储层参数识别[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 87-93.
ZHANG Bing, XU Wenjun, XU Yanyong, et al. Key parameters identification for deep coalbed methane Linxing block of eastern Ordos basin reservoir in Linxing block of eastern Ordos basin[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 87-93.
- [18] GAO X D, WANG Y B, LI Y, et al. Characteristics of tight sandstone reservoirs and controls of reservoir quality: A case study of He 8 Sandstones in the Linxing area, eastern Ordos basin, China[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2019, 93(3): 637-659.
- [19] 范铁刚, 张广清, 丁云宏, 等. 中阶煤有效弹性力学性质研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 204-210.
FAN Tiegang, ZHANG Guangqing, DING Yunhong, et al. Research on effective elastic mechanical properties of medium rank coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(S2): 204-210.
- [20] 杨永杰, 宋扬, 陈绍杰. 三轴压缩煤岩强度及变形特征的试验研究[J]. 煤炭学报, 2006, 31(2): 150-153.
YANG Yongjie, SONG Yang, CHEN Shaojie. Test study of coal's strength and deformation characteristics under triaxial compression[J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 150-153.
- [21] 朱宝存, 唐书恒, 张佳赞. 煤岩与顶底板岩石力学性质及对煤储层压裂的影响[J]. 煤炭学报, 2009, 34(6): 756-760.
ZHU Baocun, TANG Shuheng, ZHANG Jiazan. Mechanics characteristics of coal and its roof and floor rock and the effects of hydraulic fracturing on coal reservoir[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(6): 756-760.
- [22] LI Y, TANG D Z, WU P, et al. Continuous unconventional natural gas accumulations of Carboniferous-Permian coal-bearing strata in the Linxing area, northeastern Ordos basin, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 36: 314-327.