

# 临兴地区煤系多层合压工艺方案优化研究

王 波<sup>1,2</sup>, 张 兵<sup>1,2</sup>, 米洪刚<sup>1,2</sup>, 杜 佳<sup>1,2</sup>, 段佳佳<sup>1,2</sup>, 崔树辉<sup>1,2</sup>, 张浩哲<sup>1,2</sup>, 付天宇<sup>1,2</sup>

(1. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100016; 2. 三气共采省技术创新中心, 山西 太原 030000)

**摘要:** 【目的】鄂尔多斯盆地东缘临兴区块含煤地层具有多层系交互赋存, 纵向薄层(夹层)发育的特点, 多层合压是实现煤系气经济高效开发的必然要求。多储层合压能否成功的关键取决于裂缝高度能否达到预期效果。当前裂缝垂向伸展距离和裂缝形态不明, 裂缝高度预测与实际高度存在较大偏差, 对增产储层体积有很大影响。【方法】通过室内实验测量煤层顶底板地应力, 以上下部地层破裂压力为基础, 结合现场测试数据与临界缝长公式所反映的裂缝形态, 对一层煤层、上部煤层/下部砂岩、上部砂岩/下部煤层、煤层/砂岩/煤层 4 种模式下的合层压裂方案进行分析, 提出改善裂缝形态和压裂效果的工艺优化措施。【结果和结论】结果表明: 多储层合压时, 以煤层起裂可利用上下部地层应力遮挡的优势, 通过控制裂缝高度, 增加煤层中裂缝长度; 当砂岩为主要改造层位时, 压裂目标为在砂岩层中造长缝、提高裂缝导流能力为主。压裂参数计算结果与现场压裂实例均表明, 裂缝在缝高方向扩展突出, 有必要对压裂工艺及参数进行调整, 在压裂设计时根据多地层合压的需要, 进行压裂液量的优化, 保证缝长增量大于缝高增量。研究成果可为多层合压时各层应力计算、合压的判断依据与条件、起裂层位的选择以及不同组合地层压裂液量的设计提供一定理论依据。

**关键词:** 煤系; 多层合压; 裂缝扩展; 缝高; 压裂层位

中图分类号: TE357.2; P618.11

文献标志码: A

## Optimization study of coal system multi-layer combined pressure process scheme in Linxing area

WANG Bo<sup>1,2</sup>, ZHANG Bin<sup>1,2</sup>, MI Honggang<sup>1,2</sup>, DU Jia<sup>1,2</sup>, DUAN Jiajia<sup>1,2</sup>, CUI Shuhui<sup>1,2</sup>, ZHANG Haozhe<sup>1,2</sup>, FU Tianyu<sup>1,2</sup>

(1. China United Coalbed Methane Corporation, Ltd., Beijing 100016, China;

2. Provincial Technology Innovation Center for Three Gas Co extraction, Taiyuan 030000, China)

**Abstract:** Coal-bearing strata in the eastern edge of Ordos Basin are characterized by the interaction of multi-layer system and the development of longitudinal thin layer (interlayer), and multi-layer compression is an inevitable requirement to realize the economic and efficient development of coal gas. The key to the success of multi-layer compression depends on whether the fracture height can reach the expected effect. Currently, the vertical extension distance and fracture morphology are unknown, and there is a large deviation between the fracture height prediction and the actual height, which has a great impact on the volume of the production reservoir. Through indoor experiments to measure the top and bottom ground stresses of coal seams, based on the rupture pressure of the upper and lower strata, combined with the field test data and the fracture morphology reflected by the critical seam length formula, we analyze the combined fracturing schemes in four modes: one coal seam, upper coal seam/lower sandstone, upper sandstone/lower coal seam, and coal seam/sandstone/coal seam, and put forward the optimization measures for the process of improving the fracture morphology and the fracturing effect. The results show that, in multi-reservoir combined fracturing, starting fracturing with coal seam can take advantage of the upper and lower strata stress shielding, and increase the fracture length in coal seam by controlling the fracture height; when sandstone is the main reforming stratum, the fracturing target is to create long fractures in sandstone layer and improve the fracture inflow capacity. The results of fracturing parameter calculations and on-site fracturing examples show that the fracture extension is prominent in the direction of the seam height, which makes it necessary to adjust the fracturing process and parameters, and optimize the fracturing fluid volume according to the needs of multi-layer combined fracturing in the fracturing design, so as to ensure that the increment of the seam length is greater than the increment of the seam height. The research results can provide some theoretical basis for the calculation of the stress in each layer, the judgment basis and conditions of combined fracturing, the selection of fracture initiating layer and the design of fracturing fluid

收稿日期: 2024-02-20; 接收日期: 2024-06-26

基金项目: 中国海洋石油有限公司“十四五”重大科技项目(KJGG-2024-1007)

第一作者: 王波, 1994年生, 男, 山西大同人, 硕士, 工程师, 从事非常规天然气开发开采工作. E-mail: wangbo62@cnooc.com.cn

volume in different combinations of formations.

**Keywords:** coal measure; multi-layer commingled fracturing; fracture propagation; seam height; fracturing interval

鄂尔多斯盆地东缘是典型的含煤盆地，非常规油气资源十分丰富，通过近年勘探开发实践，发现盆地东缘具有良好的成藏条件和广阔的勘探前景，具有多层系资源交互赋存和薄层(夹层)发育的典型煤系特征，即上部层段的致密砂岩气资源、中部层段的煤层气资源、铝土岩天然气资源及上下盖/底层的薄层泥岩与炭质泥岩天然气资源<sup>[1]</sup>。但单层煤层厚度较薄，同时部分砂岩及页岩层为含气层，在纵向上多层叠置、连续成藏，总体呈薄互层状复合型天然气产层。为了提高气井采气效率，降低勘探开发成本，在砂岩层或泥岩与煤层相接触的条件下，可以考虑通过技术措施使得水力裂缝贯穿煤层，以实现致密砂岩气与煤层气的合采<sup>[2]</sup>。由于储层间各向异性特征显著，压裂产生的裂缝在产层与隔层间难以控制，如果裂缝没有达到预期变化的高度，将无法形成大面积的产层。相反，如果水力裂缝扩展到邻近的非生产岩层中，将浪费大量的压裂液与支撑剂<sup>[3]</sup>。尤其邻层中存在含水层时，裂缝的不利延伸将使储层面临出水，造成措施成本的增加以及气井的提前衰竭。因此迫切需要预测水力压裂裂缝高度的变化，进而调整与优化起裂层位及工艺参数，以期指导现场施工<sup>[4-5]</sup>。

在低渗透地层中，裂缝的复杂性通常与裂缝和天然岩石结构之间的相互作用有关<sup>[6]</sup>。随着裂缝前端接近层理面界面，应力强度因子趋近于零，强度较大的岩性阻碍了裂缝的延伸<sup>[7-8]</sup>。研究表明<sup>[9]</sup>，裂缝高度的增长主要受地应力、岩石非均质性以及层理面界面性质的影响。通过对不同类型裂缝进行分类，发现界面厚度不可忽视<sup>[10]</sup>。由物模实验可知，煤岩系产层组多气合采时“岩性过渡区”影响水力裂缝穿层扩展，单层和多层之间最大的区别是界面附近的断裂不确定性，T形和H形裂缝是界面周围的主要裂缝模式<sup>[11-13]</sup>，当裂缝从弹性材料向塑性材料扩展时为平面/直线断裂<sup>[14-15]</sup>，相反，从塑性材料向弹性材料

扩展时可能会发生裂纹停滞或发生其他断裂机制，如在界面上形成次生裂缝或裂纹扭结。此外，砂岩与煤层之间的过渡带是具有一定厚度和不同岩石性质的典型界面，力学性能的变化给裂缝建模增加了较大难度<sup>[16]</sup>。针对水力裂缝建模中的非均质问题，边界法并不适用，水力压裂模型<sup>[17-18]</sup>没有考虑储层之间的模量变化，或对压裂层的弹性模量进行加权平均来代替一定厚度过渡层，未考虑层间过渡带性质、界面厚度及层间应力差对裂缝高度增长的影响，导致裂缝扩展规模计算结果不符合实际，现场多层合压效果达不到预期效果。

笔者通过鄂尔多斯盆地东缘临兴区块井区地质、岩心及测井等资料，对典型煤层及顶底板砂泥岩的力学性质进行研究，在现有开发的裂缝扩展模型基础上<sup>[19]</sup>，考虑实际地应力剖面函数，预测层状地层中的裂缝高度。研究起裂层位、相邻地层间的层间厚度、弹性模量、泊松比、地应力差及破裂压力对缝长及缝高的影响。最后，结合现场测试数据提出改善裂缝形态和压裂效果的工艺对策，以期为该区块多层合压现场施工提供参考。

## 1 多储层合压裂缝扩展特征

### 1.1 煤层界面裂缝扩展机理

当起裂层位为煤层时，由于煤层破裂压力低，在裂缝扩展达到煤层界面后会受到应力遮挡的作用，延伸一段距离后进入顶板中，直至缝高方向延伸至砂岩层中；另一种是从砂岩层起裂，由于砂岩层破裂压力大，在缝高方向上到达煤层时会直接穿透煤层，合压无阻碍进行。岩石断裂力学性质是判断裂缝到达煤层界面后能否穿透夹层并进一步延伸的重要参数，主要取决于裂缝、储层和夹层交点处应力强度因子能否高于夹层的断裂韧性。研究区地层组合类型如图1所示。

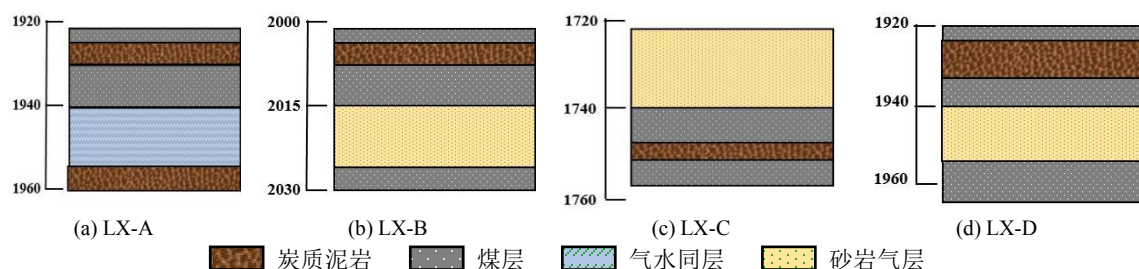


图3 不同地层组合

Fig.1 Schematic diagram of different stratigraphic combinations

### 1.2 模型构建

假设：(1) 目标层位于矩形均质封闭储层中；(2) 上下部夹层与储层岩石的断裂韧性不同；(3) 孔眼位于储层中心；(4) 裂缝延伸至上下层夹层；(5) 不计黏性摩擦和流体漏失等；(6) 此处忽略压裂液沿缝高方向的静止和流动压降。

考虑到储层应力场计算过程复杂，且本文模

型是建立在直井基础上的，与水平井多簇射孔引起的应力干扰有很大不同，本次研究仅考虑储层应力强度因子和断裂韧性之间的关系，以确定纵向裂缝扩展高度。裂缝向上延伸的临界条件<sup>[20]</sup>为：

$$K_A = 2\sqrt{\frac{h_1}{\pi}}(p - \sigma_{23}) \geq K_{Ic} \quad (1)$$

根据方程式(1)，可得临界破裂压力如下：

$$p_N = \frac{K_{ic}}{2} \sqrt{\frac{\pi}{h}} + \sigma_{ij} \quad (2)$$

压裂施工中缝长增加, 垂向应力强度因子增加, 达到隔层断裂韧性时, 裂缝会突破界面或者沿界面扩展, 此时对应着一个裂缝长度, 称为临界缝长。临界缝长  $l$  及上下夹层的断裂韧性  $K_{ic}$  计算公式为:

$$l = \left[ \frac{p_2 - \sigma_{ij}}{p_1 - \sigma_{ij}} \right]^2 h \quad (3)$$

$$K_{ic} = \frac{2(p - \sigma_{33})}{\pi - 1} \sqrt{\frac{h}{\pi} \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin(1 - \frac{d_2}{h}) - \sqrt{2 \frac{d_2}{h} - (\frac{d_2}{h})^2} \right]} + \frac{2(p - \sigma_{23})}{\pi - 1} \sqrt{\frac{h}{\pi} \left[ \arcsin(1 - \frac{d_2}{h}) + \sqrt{2 \frac{d_2}{h} - (\frac{d_2}{h})^2} - 1 \right]} + \frac{2(p - \sigma_{23})}{\pi - 1} \sqrt{\frac{h}{\pi} \left[ \arcsin(1 - \frac{d_1}{h}) - \sqrt{2 \frac{d_1}{h} - (\frac{d_1}{h})^2} + 1 \right]} + \frac{2(p - \sigma_{13})}{\pi - 1} \sqrt{\frac{h}{\pi} \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin(1 - \frac{d_1}{h}) + \sqrt{2 \frac{d_1}{h} - (\frac{d_1}{h})^2} \right]} \quad (4)$$

$$K_{2c} = \frac{2(p - \sigma_{33})}{\pi - 1} \sqrt{\frac{h}{\pi} \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin(1 - \frac{d_2}{h}) + \sqrt{2 \frac{d_2}{h} - (\frac{d_2}{h})^2} \right]} + \frac{2(p - \sigma_{23})}{\pi - 1} \sqrt{\frac{h}{\pi} \left[ \arcsin(1 - \frac{d_2}{h}) - \sqrt{2 \frac{d_2}{h} - (\frac{d_2}{h})^2} + 1 \right]} + \frac{2(p - \sigma_{23})}{\pi - 1} \sqrt{\frac{h}{\pi} \left[ \arcsin(1 - \frac{d_1}{h}) + \sqrt{2 \frac{d_1}{h} - (\frac{d_1}{h})^2} - 1 \right]} + \frac{2(p - \sigma_{13})}{\pi - 1} \sqrt{\frac{h}{\pi} \left[ \frac{\pi}{2} - \arcsin(1 - \frac{d_1}{h}) - \sqrt{2 \frac{d_1}{h} - (\frac{d_1}{h})^2} \right]} \quad (5)$$

由于实际储层以及上下夹层的地质参数不同, 尤其是岩层弹性模量的变化导致上下半裂缝高度不对称<sup>[21-22]</sup>。如果在储层中心进行射孔, 上半部分裂缝高度通常超过下半部分裂缝高度。需要对上部夹层、储层和下部夹层的弹性模量进行厚度加权和平均。假设裂缝同时穿透上

部和下部岩层, 计算  $h_1$  和  $h_2$  及穿过顶底板的高度, 然后叠加, 如图 2 所示。裂缝高度计算公式依据文献[23]。

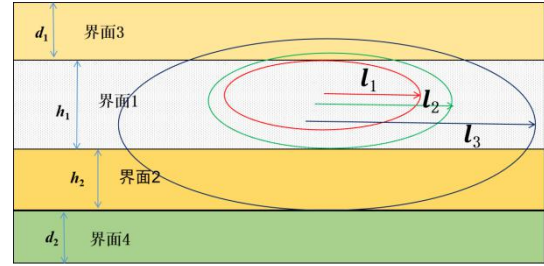


图 2 缝高到达不同界面对应临界缝长

Fig.2 Schematic diagram of the critical seam length corresponding to the seam height reaching different interfaces

储层与层间界面交点裂缝向上延伸的临界条件表示如上, 裂缝半高  $h = (h_1 + h_2 + d_1 + d_2)/2$ 。由式(3)—式(5)可以计算在不同水压下的穿透距离  $d_i$ , 裂缝长度通过 PKN 模型计算<sup>[24]</sup>, 其中裂缝长度:

$$L = 0.68 \left[ \frac{Q^2}{E(1-\nu)\mu H^4} \right]^{1/5} t^{4/5} \quad (6)$$

### 1.3 模型参数设置

各井岩性参数通过室内 TAW-1000 型岩石力学三轴应力测试系统获得。试样取自临兴中区块, 在岩样垂直方向取一块, 在水平方向, 沿增量为  $45^\circ$  的方向取 3 块, 加工成标准样(直径 25 mm、长度 50 mm)<sup>[25]</sup>。岩样参数测试结果见表 1, 取样井岩性柱状如图 3 所示, 合压井临界缝长计算结果见表 2。

表 1 合压井地质结构、岩性参数及施工参数

Table 1 Geological Structure, Lithological Parameters, and Construction Parameters of Combined Pressure Wells

岩性参数	井号			
	LX-A	LX-B	LX-C	LX-D
目标层深度/m	1 928.6~1 937.7	2 006.8~2 013.7	1 730.4~1 739.4	1 950.3~1 954.2
目标层岩层	厚 9.1 m 的煤层	厚 6.9 m 煤层	厚 9 m 砂岩气层	厚 3.8 m 砂岩气层
上部岩性/层	多层煤层夹层	多层煤层夹层	厚 6.9 m 砂岩气层	2 层煤层
上部岩层破裂压力/MPa	43	46	38	39
	1 940.8~1 944.2 m 为气水同层	2 020.7~2 023.3 m 为 1 层砂岩气层	1746.7~1752.8 为厚 6.1 m 的煤层	1 958.2~1 963.6 m 为厚 5.5 m 煤层
下部岩性/层	1 944.2~1 953.6 m 为含气水层	2 026.1~2 028.3 m 为 1 层砂岩气层		
下部岩层破裂压力/MPa	46	47.5	35.5	40
弹性模量/GPa	煤层稳定在 2~8 目标层 2~3	煤层稳定在 1~6 目标层 1~3	上部砂岩气层在 20 左右 目标层 17~21 煤层基本在 2~3 煤层 0.31 目标砂岩气层 0.26	上煤层为 2 目标层为 20 下煤层为 2.2~4
煤层泊松比	0.31	0.3~0.32		0.31
抗拉强度/MPa	目标层 0~1, 较上下部地层低 1	目标层 0~1, 较上下部地层低 2~3	上煤层 0.3, 目标层 2~3, 下煤层 0.2~0.8	目标砂岩气层与上部砂岩气层为 3~5, 煤层为 0.1~0.5
压裂液排量/m <sup>3</sup> min <sup>-1</sup>	7	7	4	7
加砂量/m <sup>3</sup>	50	50	70	40
压裂液黏度/(mPa·s)	1	25	25	15
隔层最小水平主应力/MPa	28.5	30	25	28~28.5
各层断裂韧性/(MPa·m <sup>1/2</sup> )	0.1053	0.00520/0.605	0.58/0.003 78	0.001 06/0.6/0.001 44

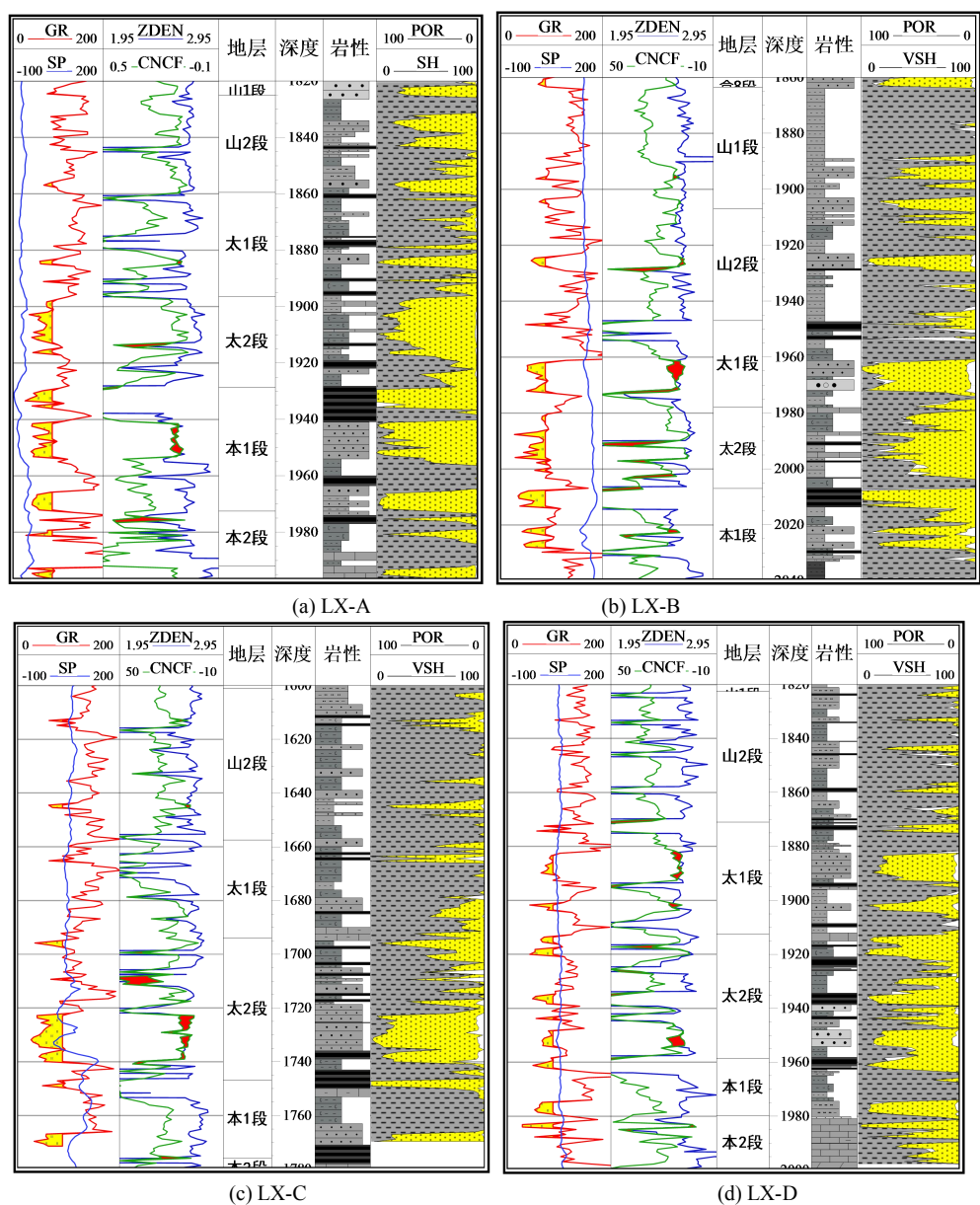


图3 煤层气井岩性柱状图

Fig.3 Lithological Histogram

表2 合压井临界缝长

Table 2 Critical fracture length of combined pressure well

起裂层位	临界缝长	井名			
		LX-A	LX-B	LX-C	LX-D
煤层起裂	突破上界面/m	19	15.8		
	突破下界面/m	20.1	18		
	到达气水同层上界面/m	33.7	35		
上部煤层起裂	裂缝达到目标层下界面/m			30	
	裂缝突破砂岩气层上界面/m				32.4
	裂缝突破下煤层上界面/m				65.43
下部煤层起裂	裂缝突破砂岩气层下界面/m				15.7
	突破上煤层下界面/m				66.4
砂岩层起裂	不存在临界缝长				

## 2 多储层合压压裂工艺参数优化及设计

### 2.1 一层煤层(LX-A 井)

#### 2.1.1 裂缝扩展特征

LX-A 井的唯一目标层是煤层, 无合压储层, 因此裂缝需要被限制在煤层。由于顶底板破裂压力大于煤层破



裂压力, 因此存在“临界缝长”。当射孔点在煤层中部时, 由表 1 知煤层的上界面与下界面的破裂压力差别不大, 计算得出的临界缝长较为接近(表 2)。当裂缝半长达到 20 m 左右进入煤层顶板中, 此时压裂效果将会变差。压裂液从 300 m<sup>3</sup> 增加到 550 m<sup>3</sup> 时, 缝长增量为 14%, 缝高增

量为 27.5%(图 4)。这说明随着压裂液量的增加, 缝高方向的扩展占优势, 因此, 需要控制好压裂液量来调节压裂规模。此外, 缝长扩展突出但缝高的扩展受到限制, 特别是下部受到限制更多, 说明下部地层的应力遮挡效果较好<sup>[26]</sup>。

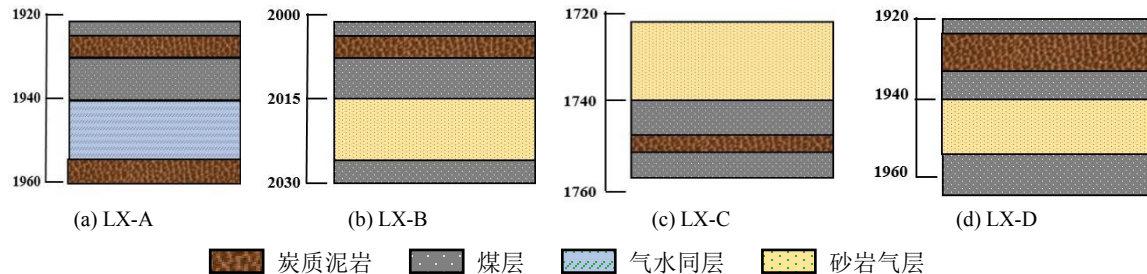


图 3 不同地层组合

Fig.3 Schematic diagram of different stratigraphic combinations

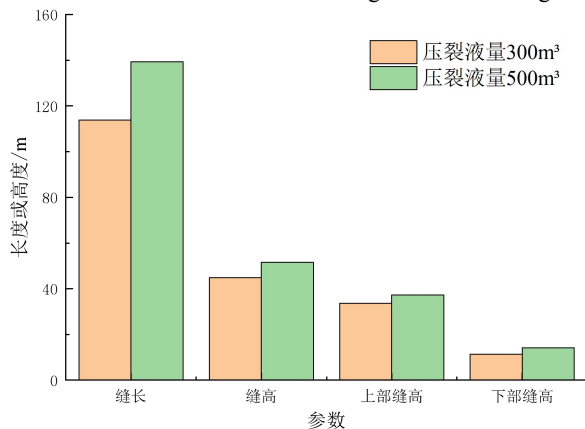


图 4 不同压裂液下煤层起裂裂缝扩展效果(LX-A 井)

Fig.4 Effect diagram of coal seam initiation fracture propagation under different fracturing fluids of well LX-A

## 2.1.2 裂缝高度扩展的验证

对 LX-A 井进行了现场压裂工作, 压裂初期放大部分如图 5 所示, 在图示附近有压力突降, 在突降之前, 压力升高, 表明隔层具备一定的应力遮挡效果, 但是其后压力突降达 10 MPa, 这说明顶板或者底板被压开。

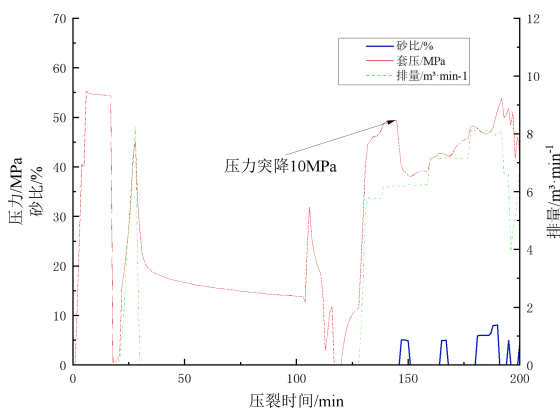


图 5 LX-A 井初期压裂曲线

Fig.5 Early stage fracture of well LX-A

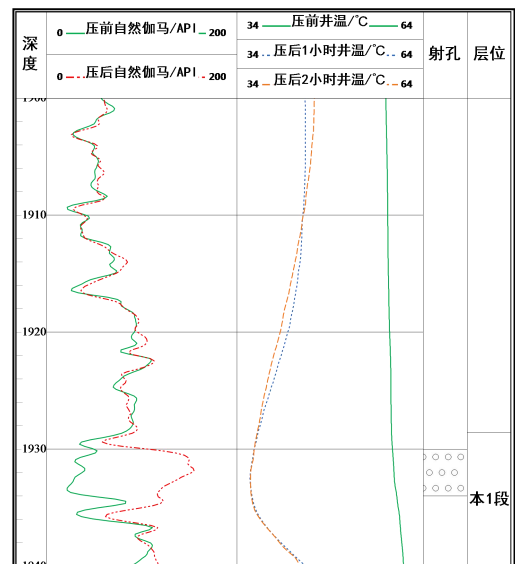


图 6 LX-A 井压裂后井温测量曲线

Fig.6 Well Temperature Measurement Curve after well LX-A

结合图 6 压后井温测量曲线可知对煤层压裂时, 上部缝高延伸较为明显, 下部缝高延伸不明显, 裂缝垂向主要突破顶板, 缝高深度范围为: 1 905~1 940 m。

表 2 对 LX-A 井的裂缝形态做出了计算判断, 结果表明顶底板均可能压开, 但裂缝主要突破上部地层, 其裂缝扩展趋势与井温测缝高结果符合。对于该类储层, 在实际压裂中要注意控制缝高, 防砂堵<sup>[27]</sup>。

## 2.2 上部煤层/下部砂岩层(LX-B 井)

### 2.2.1 起裂部位为煤层

LX-B 井的主要目标层为煤层, 需要合压下部砂岩层。当射孔点在煤层中部时, 由表 2 知当裂缝半长达到 15.8 m 左右时, 水力裂缝将突破煤层上界面; 半长达到

18 m 时, 突破煤层下界面; 裂缝半长达到 35 m 时, 将突破下部砂岩层, 此时达到压裂要求。当压裂液从 450 m<sup>3</sup> 分别增至 550、700 m<sup>3</sup> 时, 缝长增量分别为 7.5% 和 1.3%, 缝高增量分别为 18.5% 和 25%(图 7)。随着压裂液量的增加, 缝长增量变小, 缝高增量高于缝长, 且下部缝高的增量少, 此时的液量已达到最佳, 无需增大。同时由于下部应力遮挡作用高于上部应力遮挡作用, 裂缝受到的应力遮挡效果很好, 可以对下部砂岩层实现合压, 最佳压裂液量为 550 m<sup>3</sup>。

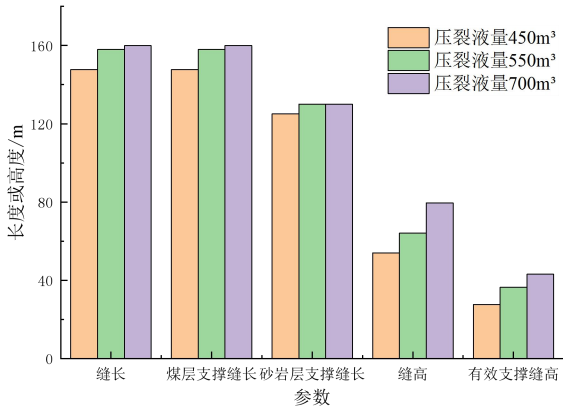


图 7 不同压裂液下煤层起裂裂缝扩展效果图(LX-B 井)

Fig.7 Effect diagram of coal seam initiation fracture propagation under different fracturing fluids of well LX-B

### 2.2.2 起裂部位为砂岩层

由于砂岩层破裂压力与煤层顶底板岩层基本一致, 可以看作上下部地层对裂缝无应力遮挡, 再加上从砂岩起裂时不存在明显的地层界面, 因此不存在“临界缝长”, 上下部储层和煤层均可顺利打开。当从砂岩起裂时, 增加压裂液量时缝长扩展有限, 而缝高扩展占优势, 有效支撑缝高几乎与压裂缝高相同(图 8), 导致很多无效缝高, 不利于支撑剂的有效使用。因此, 对于 LX-B 井, 建议控制压裂液量为 450 m<sup>3</sup>, 并从煤层起裂。

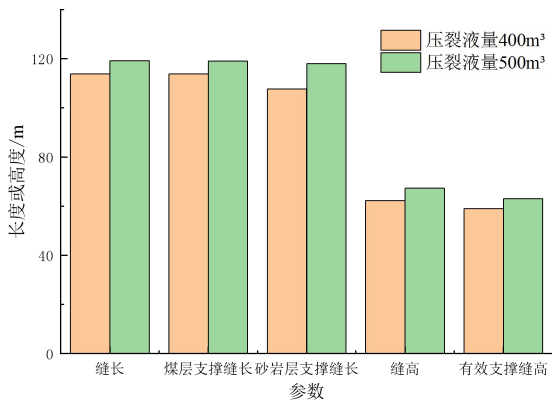


图 8 不同压裂液下砂岩层起裂裂缝扩展效果图(LX-B 井)

Fig. 8 Effect diagram of fracture propagation in sandstone layer under different fracturing fluids of well LX-B

## 2.3 上部砂岩层/下部煤层(LX-C 井)

LX-C 井的压裂目标主要包括目标砂岩层、上部砂岩

层以及下部煤层。由于目标砂岩层与上部砂岩层相差仅 1.4 m, 其地应力相同, 因而将这两层当作一层处理。根据表 1、表 2 可知, 下部煤层的地应力偏小, 破裂压力为 35.2 MPa, 向下延伸至 1 752 m 才受到应力遮挡作用。目标砂岩层上部地层无应力遮挡, 裂缝可以顺利延伸至上部砂岩层, 目标砂岩层下部煤层破裂压力较高, 具备一定的应力遮挡作用, 但由于砂岩层太薄(两层 4.8 m), 直到下部缝高延伸至 1 754 m 才会有明显的应力遮挡效果。目标层形成垂直裂缝的破裂压力为 38 MPa, 比水平缝破裂压力至少低 4 MPa, 判断产生垂直缝。

### 2.3.1 起裂部位为砂岩层

起裂位置为上部砂岩层时, 由于底板无应力遮挡能够顺利打开下部煤层。从图 9 可以看出, 当压裂液量从 500 m<sup>3</sup> 增加到 700 m<sup>3</sup> 时, 裂缝的缝长与缝高等量扩展。但后续缝高扩展逐步占优势。说明从砂岩层起裂时, 裂缝能顺利沟通下部煤层, 上部缝高也延伸较明显; 压裂液量的增加对缝高的增加明显而对缝长的扩展作用有限, 因此, 可适当控制压裂液量以保证缝长并控制缝高。

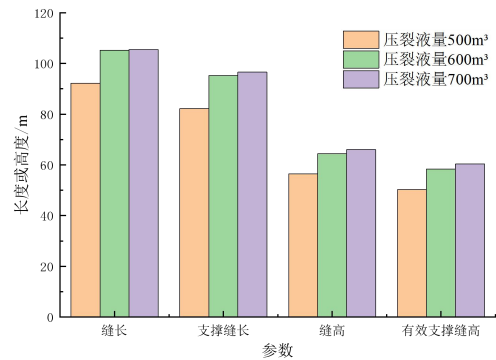


图 9 不同压裂液下砂岩层起裂裂缝扩展效果(LX-C 井)

Fig. 9 Effect diagram of fracture propagation in sandstone layer under different fracturing fluids of well LX-C

### 2.3.2 起裂部位为下部煤层

起裂部位为下部煤层时, 顶底板都存在应力遮挡作用。当裂缝到达目标煤层下界面时, 临界缝长为 30 m。当压裂液量从 450 m<sup>3</sup> 增加到 700 m<sup>3</sup> 时, 缝长的增量越来越小, 缝高增量越来越大(图 10), 也就是说缝高的扩展占优势, 因此, 减少压裂液量能够在遏制缝高的同时保证缝长; 同时由于砂岩层支撑缝长太小, 煤层支撑缝长太大, 造成支撑剂大部分沉降于下部煤层中[28]。

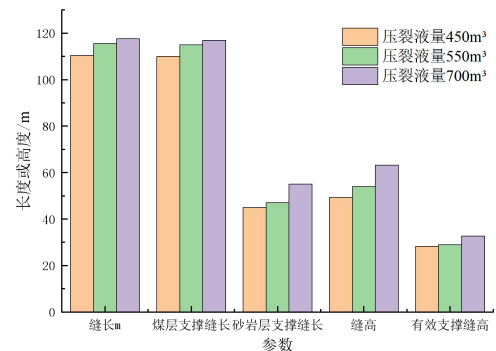


图 10 不同压裂液下煤层起裂裂缝扩展效果(LX-C 井)

Fig.10 Effect diagram of coal seam initiation fracture propagation under different fracturing fluids of well LX-C

### 2.3.3 目标砂岩层起裂与煤层起裂对比

结合表 1 对比发现:两个砂岩层层位相隔仅仅 1.4 m,在目标砂岩层中起裂时,很容易就可以沟通上下部砂岩层,达到合压的效果,而且从目标砂岩层起裂时,下部地层的应力遮挡小,利于沟通下部煤层。此外,从目标砂岩层起裂,裂缝的扩展长度大,支撑缝长与缝高也大;从煤层起裂时,缝高遏制效果好,裂缝延伸效果也类似,但是煤层的漏失量大,而且缝宽大,支撑剂的沉降多,压裂液漏失量大,上部砂岩层中裂缝支撑效果很差,有效缝长较短,不利于厚砂岩层的开发。

综上,建议适当采用上部地层缝高控制技术,从目标砂岩层起裂,既可以增加缝长,又可以提高压裂液的利用效率。

## 2.4 煤层-砂岩层-煤层(LX-D 井)

### 2.4.1 起裂部位为下部煤层

从下部煤层起裂时,要考虑裂缝能否顺利达到砂岩层及上部煤层的缝高延伸情况。从图 11 可知,压裂液量的增加对缝长影响较小,但是会增加缝高增长速率,而且在上部煤层中支撑缝长很短,在砂岩层中支撑裂缝长也有限,仅在下部煤层中支撑很好。

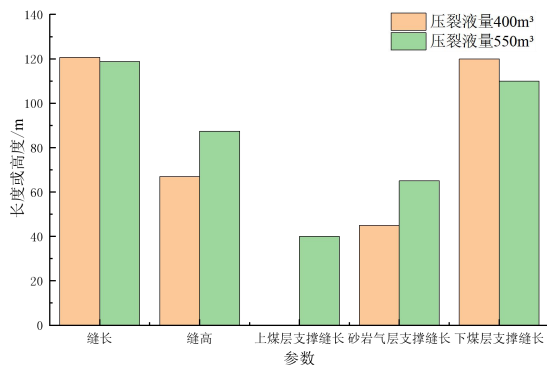


图 11 不同压裂液下下部煤层起裂裂缝扩展效果(LX-D 井)

Fig.11 Effect diagram of fracture propagation in the lower coal seam under different fracturing fluids of well LX-D

### 2.4.2 起裂部位为上部煤层

从上部煤层起裂时,要考虑裂缝能否顺利到达下部煤层。从上部煤层起裂与从下部煤层起裂的不同点在于,支撑剂沉降后,裂缝支撑效果不同。压裂液量从 400 到 500 m³ 时,缝长增量为 16.1%,缝高增量为 3%;而从 500 到 600 m³ 时,缝长、缝高增量分别为 5.6%、9.5%(图 12),说明压裂液量的增大使缝长增量降低、缝高增量增加,

下煤层的缝长增加,缝高从 69.7 m 增加到 78.6 m,说明增加液量有助于下部煤层的打开,完全能够满足 3 层储层之间的间距。从上煤层起裂时,3 层储层都能较好地压裂开,但由于支撑剂下沉,使得上部煤层支撑效果有限。

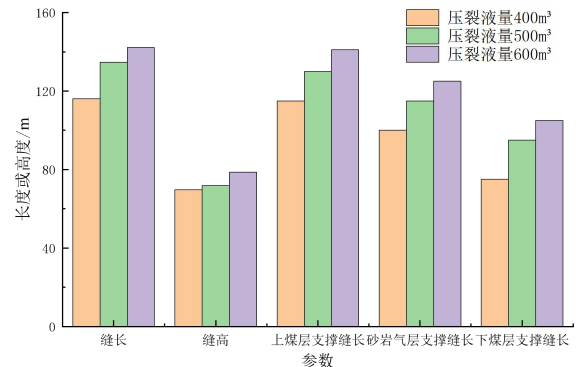


图 12 不同压裂液下上部煤层起裂裂缝扩展效果图(LX-D 井)

Fig.12 Rendering of fracture propagation in the upper coal seam under different fracturing fluids of well LX-D

### 2.4.3 起裂部位为砂岩层

从砂岩层中起裂时,缝高方向突破下部煤层(1 963.6 m),则裂缝半长为 20 m,缝高为 26 m;若在缝高方向上突破上部煤层(1 934.5 m),裂缝半长为 22 m,缝高为 31.4 m,这说明裂缝高度的扩展占优势,裂缝可以无阻碍进入上下煤层,合压可以顺利进行。

从图 13 可知,当压裂液量从 400 m³ 增加到 500 m³ 时,缝长增量为 10%,缝高增量为 9.3%,说明在此阶段裂缝高度与长度的扩展差异较小。当压裂液量从 500 m³ 增大到 700 m³ 时,缝长与缝高都基本无变化。因此,优化压裂液量,可保证有效支撑缝长。

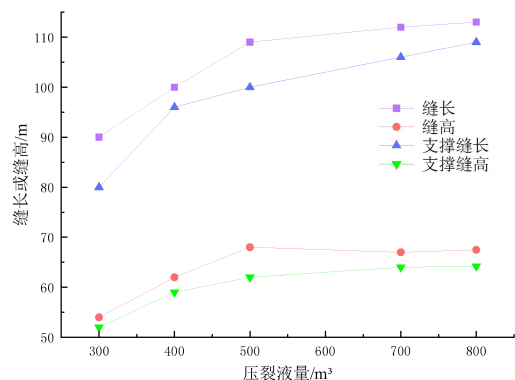


图 13 不同压裂液下砂岩层起裂裂缝扩展效果(LX-D 井)

Fig. 13 Effect diagram of fracture propagation in sandstone layer under different fracturing fluids of well LX-D

### 2.4.4 不同目标层起裂对比

通过对 3 种起裂方式的裂缝参数计算发现:从砂岩层起裂时,裂缝可顺利沟通上下部储层,3 个储层都能有



效沟通，且缝高在垂直方向能够扩展，特别是下部缝高，但无效裂缝多；从上煤层起裂时，可顺利沟通3层储层，支撑剂在3层储层中均有分布，下部缝高遏制效果很好，上部缝高延伸明显；从下部煤层起裂时，也可将3层储层沟通，但支撑剂在上部煤层中分布很少，在砂岩层中支撑剂量也很少，支撑剂主要分布在下部煤层中。虽然3种方式都能沟通3层储层，但考虑到支撑缝高，建议从上部煤层起裂。

3 现场应用

研究区 LX-C 井目标层为砂岩、泥岩和煤层交互叠置，压裂层的上下部应力遮挡效果不突出，此时不适合采用大排量进行压裂作业，而且砂岩层中压裂液的漏失量相比煤层小很多，水力能量的衰减速度较小，在保证水力能量和缝内压力的基础上，可以适当降低压裂液排量，采用小排量(3~4 m³/min)的压裂方式。

根据前文研究结果，综合考虑支撑缝长与缝高以及气层的厚度，采用缝高控制技术，从砂岩层起裂，一方面可以增加缝长，同时可以提高压裂液的利用效率。通过模拟计算得到缝长 192.3 m，缝高 21.5 m。现场作业深度 1 730.4~1 739.4 m，排量 3.5~3.7 m³/min，净液量 376.1 m³，总砂量 40.1 m³，泵注曲线如图 14 所示。同时为更好知悉现场实际压裂效果，压后进行微震监测(图 15)，微震事件西北-东南长度基本相当，上覆泥岩地层少有微震事件，下伏煤层中部分出现微震事件，压裂裂缝主要向压裂层(1 726.4~1 746.3 m)上下扩展。监测结果表明压后井周形成了较为复杂缝网，现场实际压后缝长 180 m，缝高 19.9 m，模拟结果与现场数据吻合较好，表明所建立的模型可有效指导压裂方案的设计。

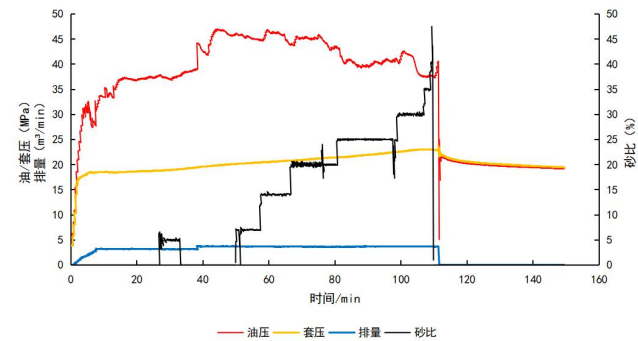


图14 LX-C 井现场压裂施工曲线  
Fig. 14 Field fracturing curves of well LX-C

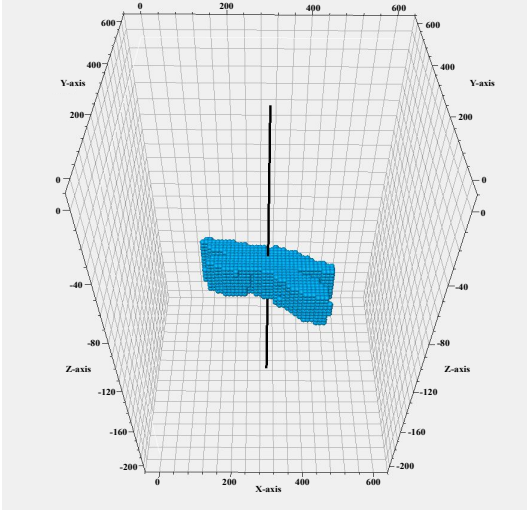


图15 LX-C 井压裂段微震裂缝形态  
Fig. 15 Microseismic monitoring fracture in fracturing section of well LX-C

4 结论

- (1) 基于构建的裂缝扩展模型，考虑实际地应力剖面函数，针对一层煤层、上部煤层/下部砂岩层、上部砂岩层/下部煤层、煤层-砂岩层-煤层 4 种典型层位组合，研究起裂层位、层间厚度、地应力差及破裂压力等对裂缝穿层的影响，模拟的水力裂缝高度与实际裂缝高度相近，模型能够较好地判断裂缝达到界面后的扩展状态，指导合压工艺的実施。
- (2) 当临兴区块煤系存在多层含气储层，进行合压前通过起裂层位分析以达到控制缝高与增加压裂效率目的。当煤层为最下部层位，支撑剂主要支撑下部煤层，对于上部地层而言，支撑效果相对差。煤层在上部，砂岩层在下部，可利用应力遮挡作用从煤层起裂，增加煤层缝长。不论从砂岩层还是煤层起裂，都要进行压裂液量的优化，保证缝长增量大于缝高增量。
- (3) 研究区各含气储层起裂方式下，目标层位均以有效支撑缝长最大、缝高最小为最优。以砂岩层为起裂层时，储层应力高，裂缝达到界面后可直接突破隔层，此时对于裂缝高度的控制尤为为重要；从煤层起裂时，裂缝达到临界缝长前沿缝高方向将停止扩展，直到裂缝突破隔层，进入上下部地层。影响缝高的人为因素为液量和压裂规模，地质因素为地应力，因此在压裂设计时根据多地层合压的需要，控制住缝高在上下部地层中扩展。
- (4) 压裂参数计算与现场压裂实践均表明，裂缝在缝高方向扩展突出，有必要对压裂工艺及参数进行调整。压裂液滤失系数对裂缝高度有明显影响，也是地层渗透率的直接反映。压裂液滤失系数越大，压裂液造缝效率越低，缝高越小。同时滤失系数大，容易造成砂堵。因此，需要从压裂液滤失、携砂性能及裂缝宽度等方面综合分析低砂比及砂堵问题的原因，确定合适范围，既能控制人工裂缝高度，又不影响压裂作业的正常进行。



## 符号注释:

$d_1$ 、 $d_2$  为上、下层的厚度, m;  $E$  为弹性模量, GPa;  $H$  为裂缝高度, m;  $h_i$  为水力裂缝中心到上下界面的距离,  $h_1$  和  $h_2$  为上下裂缝高度, m;  $L$  为裂缝长度, m;  $l_i$  为临界缝长,  $i$  等于 1、2 和 3 时, 分别对应于突破上界面的临界缝长、突破下界面的临界缝长以及突破邻层底板时的临界缝长, m;  $K_A$  为交点应力强度因子,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;  $K_{1c}$ 、 $K_{2c}$  分别为上、下隔层的断裂韧性,  $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ;  $P_N$  为临界破裂压力, MPa;  $Q$  为排量,  $\text{m}^3/\text{min}$ ;  $t$  为施工时间, min;  $v$  为泊松比;  $\mu$  为压裂液黏度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;

$\sigma_{ij}$  为地层应力, 当下标  $i$  等于 1、2 和 3 时, 分别对应上部夹层、目标层和下部夹层; 当  $j=1$  和 3 时, 表示最大和最小地应力, MPa。

## 利益冲突声明/CONFLICT OF INTERESTS

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

## 参考文献(REFERENCES)

- [1] 刘建忠, 朱光辉, 刘彦成, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部煤层气勘探突破及未来面临的挑战与对策: 以临兴—神府区块为例[J]. 石油学报, 2023, 44(11): 1827–1839.  
LIU Jianzhong, ZHU Guanghui, LIU Yancheng, et al. Breakthrough future challenges and countermeasures of deep coalbed methane in the eastern margin of Ordos Basin: A case study of Linxing–Shenfu Block[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(11): 1827–1839.
- [2] 朱光辉, 李本亮, 李忠城, 等. 鄂尔多斯盆地东缘非常规天然气勘探实践及发展方向——以临兴-神府气田为例[J]. 中国海上油气, 2022, 34(04): 16-29.  
ZHU Guanghui, LI Benliang, LI Zhongcheng, et al. Unconventional natural gas exploration practice and development direction in the eastern margin of Ordos Basin-A case study of Linxing-Shenfu gas field [J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(04): 16-29.
- [3] ABBAS S, GORDELIY E, PEIRCE A. Limited height growth and reduced opening of hydraulic fractures due to fracture offsets: an XFEM application [C] //Paper presented at the SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, Texas: 2014.
- [4] GU Hongren, SIEBRITS EDUARD. Effect of formation modulus contrast on hydraulic fracture height containment [J]. SPE Production & Operations, 2008, 23(02): 170-176.
- [5] FISHER Kevin, WARPINSKI Norm. Hydraulic-fracture-height growth: Real data [J]. SPE Production & Operations, 2012, 27(01): 8-19.
- [6] SIMONSON E R, ABOU-SAYED A S, CLIFTON R J. Containment of massive hydraulic fractures. Society of Petroleum Engineers Journal [J], 1978, 18(01): 27-32.
- [7] 张庆辉, 陈晓冬, 郭宁, 等. 水力裂缝高度关键影响因素不确定性分析 [J]. 钻采工艺, 2020, 43(2): 49-52.  
ZHANG Qinghui, CHEN Xiaodong, GUO Ning, et al. Uncertainty analysis of key influencing factors on hydraulic fracture height [J].

- Drilling and Production Technology, 2020, 43 (2): 49-52
- [8] PHILIPP S L, AFŞAR F, GUDMUNDSSON A. Effects of mechanical layering on hydrofracture emplacement and fluid transport in reservoirs [J]. Frontiers in Earth Science, 2013, 1(4): 1-19.
  - [9] WENG Xiaowei, CHUPRAKOV D, KRESSE O, et al. Hydraulic fracture-height containment by permeable weak bedding interfaces [J]. Geophysics, 2018, 83(3): 137-152.
  - [10] Peacock D C P, Sanderson D J, Rotevatn A. Relationships between fractures [J]. Journal of Structural Geology, 2018, 106, 41-53.
  - [11] HOU Bing, CHANG Zhi, FU Weineng, et al. Fracture initiation and propagation in a deep shale gas reservoir subject to an alternating-fluid-injection hydraulic-fracturing treatment [J]. Spe Journal, 2019, 24(04): 1839-1855.
  - [12] WAN Liming, HOU Bing, Tan Peng, et al. Observing the effects of transition zone properties on fracture vertical propagation behavior for coal measure strata [J]. Journal of Structural Geology, 2019, 126(01): 69-82.
  - [13] 陈灿, 刘贤, 肖洪天. 塔山煤矿坚硬顶板水力压裂裂缝扩展规律研究 [J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(9): 75-80.  
CHEN Can, LIU Xian, XIAO Hongtian. Study on the propagation law of Fracking cracks in the hard roof of Tashan Coal Mine [J]. Mining Research and Development, 2020, 40 (9): 75-80
  - [14] TANG Jizhou, WU Kan, ZENG Bo, et al. Investigate effects of weak bedding interfaces on fracture geometry in unconventional reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 165: 992-1009.
  - [15] Smith M B, BALE A B, Britt L K, et al. Layered Modulus Effects on Fracture Propagation, Proppant Placement, and Fracture Modeling [C] //Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Louisiana: 2001
  - [16] TAN Peng, JIN Yan, LIANG Yuan, et al. Understanding hydraulic fracture propagation behavior in tight sandstone-coal interbedded formations: an experimental investigation [J]. Petroleum Science, 2019, 16(1): 148–160.
  - [17] MCCLURE, Mark W.; HORNE, Roland N. Discrete fracture network modeling of hydraulic stimulation: coupling flow and geomechanics[M]. Houston, Springer Science & Business Media, 2013.
  - [18] WU Kan, OLSON J E. Simultaneous multifracture treatments: fully coupled fluid flow and fracture mechanics for horizontal wells [J]. SPE journal, 2015, 20(02): 337-346.
  - [19] 赵海峰, 陈勉, 金衍. 水力裂缝在地层界面的扩展行为 [J]. 石油学报, 2009, 30(3): 450-454.  
ZHAO Haifeng, CHEN Mian, JIN Yan. Propagation behavior of hydraulic fractures at formation interface [J]. Journal of Petroleum, 2009, 30 (3): 450-454
  - [20] BIOT M A, MEDLIN W L, MASSE L. Fracture penetration through an interface [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1983, 23(06), 857-869.
  - [21] ZHENG Heng, PU Chunsheng, WANG Yong, et al. Experimental and numerical investigation on influence of pore-pressure distribution on multi-fractures propagation in tight sandstone [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 230(1), 106993.

- [22] PALMER I D , CRAIG H R. Modeling of Asymmetric Vertical Growth in Elongated Hydraulic Fracture and Application to First MWX Stimulation [C] //Paper presented at the SPE Unconventional Gas Recovery Symposium, Pennsylvania, 1984.
- [23] ZHAO Wenwei, JI Guofa, LI Kuidong, et al, A new pseudo 3D hydraulic fracture propagation model for sandstone reservoirs considering fracture penetrating height [J] , Engineering Fracture Mechanics, 2022, 264(1), 108358.
- [24] NORDGREN R P. Propagation of a vertical hydraulic fracture [J]. Society of petroleum engineers journal, 1972, 12(04): 306-314
- [25] 王波, 吴鹏, 赵刚, 等. 临兴区块煤系地层多层合压可行性研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54 (6):151-157.
- WANG Bo, WU Peng, ZHAO Gang, et al Feasibility study on multi-layer compression of coal bearing strata in Linxing Block [J]. Coal Engineering, 2022, 54 (6): 151-157
- [26] 杨秀春, 徐凤银, 王虹雅, 等. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发历程与启示[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(3): 30-41.
- YANG Xiuchun, XU Fengyin, WANG Hongya, et al. Exploration an development process of coalbed methane in eastern margin of Ordos Basin and its enlightenment[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(3):30-41.
- [27] 徐凤银, 闫霞, 李曙光, 等. 鄂尔多斯盆地东缘深部(层)煤层气勘探开发理论技术难点与对策[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(1): 115-130.
- XU Fengyin , YAN Xia , LI Shuguang , et al. Theoretical and technological difficulties and countermeasures of deep CBM exploration and development in the eastern edge of Ordos Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(1): 115-130.
- [28] 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( Sup.2) : 912—921.

(责任编辑 范章群)