

沁水盆地北缘煤层气井地应力模型研究

陈峥嵘, 刘书杰, 张滨海, 彭成勇, 李莹莹

(中海油研究总院, 北京 100028)



扫码移动阅读

摘要:为了准确求取无声波测井的裂缝性煤层地应力模型,以沁水盆地北缘煤层气井为研究目标,通过大量室内力学试验测试了煤岩力学参数。结合声波时差测井数据与深侧向电阻率测井、自然伽马测井、密度测井数据之间的关系,数据拟合建立了声波时差模型,并采用压后压力降落 G 函数曲线、时间平方根曲线和双对数函数曲线预测了煤层压裂裂缝闭合压力;基于试验结果、声波时差模型、预测的闭合压力、压裂破裂压力及水平地应力模型综合反演得到了沁水盆地北缘煤层的地应力模型;对目标井区地应力进行预测。结果表明:预测最大和最小水平地应力误差分别仅为 0.5 MPa 和 0.6 MPa。该方法实现了无声波时差测井条件下裂缝性煤层地应力模型的计算。

关键词:煤层气;声波时差;地应力;闭合压力;构造应变系数

中图分类号:P622

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2018)10-0136-07

Study on geostress model of coalbed methane wells in north edge of Qinshui Basin

CHEN Zhengrong, LIU Shujie, ZHANG Binhai, PENG Chengyong, LI Yingying

(China National Offshore Oil Corporation Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: In order to accurately obtain a geostress model of the fractured seam with non acoustic logging, based on the coalbed methane wells in the north edge of Qinshui Basin as the study object, great indoor mechanics tests were applied to measure the mechanics parameters of coal and rock. In combination with the relationship between sonic time difference logging data and data from the deep lateral resistivity logging, natural gamma-ray logging and density logging, the data fitting was applied to establish a sonic time difference model. The pressure breakdown G Function curve after the pressurization, time square root curve and Double Logarithm Function curve were applied to predict the closure pressure of the seam fractured cracks. Based on test results, sonic time difference model, predicted closure pressure, fractured crack pressure and horizontal geostress model, a comprehensive inversion was conducted to have the geostress model of the seam in north edge of Qinshui Basin. A prediction was conducted on the geostress in the target well block. The results showed that the errors of the maximum and the minimum horizontal geostress predicted were only 0.5 MPa and 0.6 MPa respectively. The method could realize the calculation of the geostress model for the fractured seam under the condition of the non sonic time difference logging.

Key words: coalbed methane; sonic time difference; geostress; closure pressure; tectonic strain coefficient

0 引言

沁水盆地是我国煤层气储量最大的盆地之一,具有丰富的开采价值和前景。同时煤层是一种低孔隙度和低渗透率的储层,其开采完全取决于水力压裂施工效果的成功与否^[1-3]。对煤储层进行水力压

裂施工,地应力模型是指导煤层压裂施工的重要理论基础^[4-6],不同的地应力状态导致压裂裂缝模拟结果、裂缝延伸规律和形态认识存在较大差异^[7-9],煤层地应力通常采用深度趋势或数值模拟的方法表征均存在一定的误差^[10-11],因此掌握煤储层地应力的真实状态是正确认识压裂裂缝形态并保证压裂过

收稿日期:2018-02-09;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2018.10.021

基金项目:中海石油(中国)有限公司资助项目(YXKY-2016-ZY-08)

作者简介:陈峥嵘(1988—),男,江西南昌人,工程师,硕士。E-mail: zrchen12345@163.com

引用格式:陈峥嵘,刘书杰,张滨海,等.沁水盆地北缘煤层气井地应力模型研究[J].煤炭科学技术,2018,46(10):136-142.

CHEN Zhengrong, LIU Shujie, ZHANG Binhai, et al. Study on geostress model of coalbed methane wells in north edge of Qinshui Basin[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(10): 136-142.

程中压裂效果的重要前提^[12-13]。与常规储层不同,煤层岩石发育丰富的割理及微裂隙系统,且非均质性较强,导致煤岩力学性质存在较大的差异^[14]。如果采用常规的地应力计算方法对煤层地应力进行预测,结果将产生较大的误差。同时,由于煤层钻完井工程的经济性限制,煤层大部分井没有进行声波时差测井,导致无法根据声波时差测井数据计算煤层岩石力学参数。针对以上存在的问题,以沁水盆地北缘煤层气区块为研究目标,基于煤岩室内试验的数据对煤层力学性质进行拟合,得到煤岩力学参数计算转换基础。结合声波时差测井数据与深侧向电阻率测井、自然伽马测井、密度测井数据之间的关系,数据拟合建立声波时差模型,实现无声波测井数据条件下目标区块煤层力学参数的计算。由大量的现场压裂施工数据采用压后压力降落 G 函数曲线、时间平方根曲线和双对数函数曲线精确评估了煤层裂缝闭合压力。基于上述试验结果、声波时差数据拟合模型、预测的闭合压力、压裂破裂压力及水平地应力模型反演煤层构造应变系数,从而建立了目标区块准确的煤层地应力模型。该地应力模型方法对煤层气压裂增产施工参数设计和评估以及煤层钻井井壁稳定性研究均有重要指导作用。

1 煤岩力学参数试验

煤层气地应力需要获取准确的地层岩石力学参数,煤岩岩石力学参数的获取通常采用试验测试和测井数据拟合的方法。不同的煤层气区块煤岩的岩石力学参数变化较大,不能根据其他区块的岩石力学参数直接计算。而采用测井数据拟合方法计算的岩石力学参数需要通过力学参数室内试验结果进行校正,因此准确测试岩石力学参数是准确计算地应力的基础。采用深水孔隙压力伺服试验系统进行煤岩力学参数试验。

1.1 动态弹性参数测试

测试时利用伺服控制三轴岩石力学试验系统对岩心加载围压及轴压,利用智能超声 P-S 波综合测试仪测定岩石试件的纵波和横波波速。将岩心置于高压釜中,进行声波波速测试,测试结果见表 1。

在现场实际测井过程中,声波测井通常只测量了地层的纵波波速而没有横波波速,而计算岩石力学参数过程需要准确的纵波波速与横波波速,因此根据声波测试结果,通过拟合得到横波波速与纵波波速的关系:

$$V_s = 11.361 (\rho V_p)^{0.5989} \quad (1)$$

式中: V_p 为纵波波速, m/s; V_s 为横波波速, m/s; ρ 为岩心密度, g/cm³。

试验测得的岩石纵波和横波的传播速度,由动态弹性模量、泊松比与纵波、横波波速之间的关系,可求得煤岩岩石的动态弹性模量和泊松比^[15],见表 1。

表 1 煤岩动态弹性参数试验结果

Table 1 Experimental results of dynamic elastic parameters of coal

岩心编号	纵波波速/ (m · s ⁻¹)	横波波速/ (m · s ⁻¹)	动态弹性 模量/GPa	动态 泊松比
1	2 688.00	1 562.79	9.829 2	0.244 7
2	2 255.56	1 432.08	6.529 3	0.162 3
3	2 423.73	1 495.90	7.167 4	0.192 3
4	2 436.73	1 503.90	7.244 4	0.192 4
5	2 845.90	1 789.69	12.144 1	0.172 9
6	2 893.33	1 808.33	12.467 9	0.179 5
7	2 613.95	1 522.47	9.738 2	0.243 3

1.2 静态弹性参数测试

通过三轴岩石力学试验系统对煤岩岩心进行静态弹性模量和静态泊松比测试,测试结果见表 2。由煤岩静态弹性参数测试结果可得,煤岩试样的静态弹性模量为 2.993~5.161 GPa,静态泊松比为 0.370 9~0.437 2,可见,煤岩相较于砂岩等岩石的弹性模量较小,而泊松比则较大,这说明煤岩的塑性较强。不同煤岩岩心试样的弹性模量、泊松比以及峰值强度等的变化范围较大,这表明煤岩的非均质性较强。

表 2 煤岩静态弹性参数测试结果

Table 2 Experimental results of static elastic parameters of coal and rock

岩心编号	静态弹性模量/ GPa	静态泊松比	峰值强度/ MPa
1	3.612	0.420 0	35.00
2	2.993	0.423 3	26.16
3	3.425	0.435 5	45.65
4	3.719	0.437 2	54.00
5	4.500	0.430 0	36.41
6	5.161	0.407 4	53.48
7	3.814	0.379 1	57.12

1.3 动静弹性参数转换

通过大量的岩石力学试验发现岩石的动态弹性参数与静态弹性参数之间存在一定的线性关系,基

于上述动、静态弹性参数测试结果进行线性回归,可以分别得到弹性模量和泊松比的动、静态弹性参数转化模型为

$$E_s = 1.288\ 6 + 0.290\ 4E_d \quad (2)$$

$$\mu_s = 0.351\ 1 + 0.323\ 6\mu_d \quad (3)$$

式中: E_s 、 E_d 分别为静态、动态弹性模量, GPa; μ_s 、 μ_d 为静态、动态泊松比。模型计算得到的静态弹性模量、静态泊松比与动态弹性模量、动态泊松比的平均绝对误差分别仅为 0.20 GPa 和 0.02, 符合工程计算的要求。

1.4 抗拉强度测试

抗拉强度是岩石力学性质的重要指标之一。采用国际岩石学会试验室委员会推荐并普遍采用的间接拉伸法(又称巴西劈裂法)测定岩样的抗拉强度^[16]。测试结果见表 3。

表 3 煤岩抗拉强度试验结果

Table 3 Experimental results of uniaxial tension strength of coal rock

岩心编号	高度/ mm	直径/ mm	峰值载荷/ kN	抗拉强度/ MPa
1	16.40	24.40	0.530 5	0.844 4
2	15.50	24.40	0.335 2	0.564 5
3	15.70	24.40	0.467 0	0.776 5
4	15.30	24.40	0.243 1	0.414 8
5	11.70	24.40	0.437 4	0.975 9
6	13.90	24.40	0.232 9	0.437 4
7	15.90	24.40	0.219 6	0.360 5
8	18.50	24.40	0.182 8	0.257 9
9	18.70	24.40	0.410 8	0.573 5

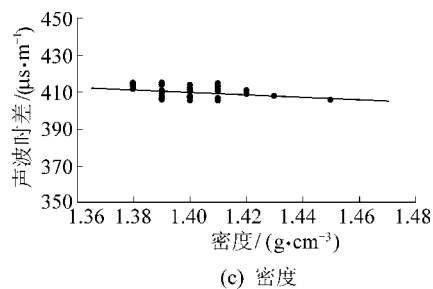
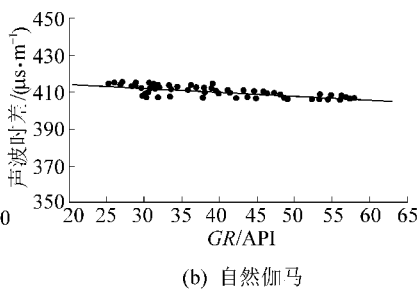
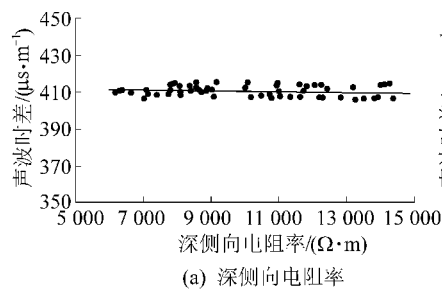


图 1 煤层声波时差与测井参数的关系

Fig.1 Relationship between acoustic interval transit time logging parameters of coal seam

通过声波时差数据拟合模型可根据自然伽马测井、深侧向电阻率测井、密度测井数据拟合声波时差数据,将拟合数据与正常实测声波时差数据进行对比,如图 2 所示,拟合的误差判定系数 $R^2 = 0.816$ 。拟合声波时差数据与正常声波时差的吻合度较好,

由试验结果可知,煤岩的抗拉强度均较小,但抗拉强度试验结果的变化范围较大。部分岩心的抗拉强度明显偏小,由于该岩心中含有节理、裂隙等弱面,致使其抗拉强度大幅降低。

2 声波测井转换方法

利用测井资料分析地层岩石力学参数是岩石力学分析的基本手段之一,可通过测井资料并结合上述岩石力学试验公式及试验结果对煤层弹性模量及泊松比等岩石力学参数进行计算,即可得到建立地应力模型所需的岩石力学基础参数。然而煤层气大部分井没有进行声波测井作业,而绝大部分煤层气井均需要压裂作业,在没有声波测井的区域,无法通过声波数据建立区域地质力学参数和地应力模型,从而难以进行压裂优化设计。基于目标区块已测声波测井的煤层气井,统计分析其声波时差测井数据与深侧向电阻率测井、自然伽马测井、密度测井数据之间的关系,测井数据之间存在较好的关联性,如图 1 所示。因此结合声波时差测井数据与深侧向电阻率测井、自然伽马测井、密度测井数据之间的关系,通过数学拟合方法计算得到地层声波时差数据,从而建立声波时差数据拟合模型:

$$DT = -0.286GR - 2.552 \times 10^{-3}RD - 60.274DEN + 533.729 \quad (4)$$

式中: DT 为声波时差, $\mu\text{s}/\text{m}$; GR 为自然伽马, API; RD 为深侧向电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; DEN 为密度, g/cm^3 。

表明该拟合方法的准确性。

3 煤层地应力模型建立

地应力通常由上覆地层压力和水平最大、最小地应力组成。其中,上覆地层压力可以通过测井曲

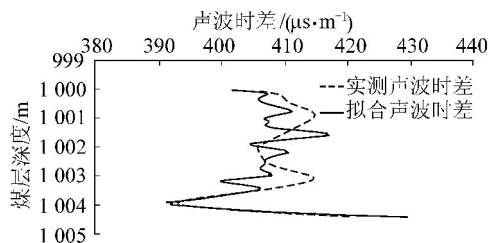


图2 声波时差数据拟合

Fig.2 Fitting of acoustic time data

线中的密度测井数据计算得到。目前预测水平地应力的模型大部分是建立在弹塑性模型的基础上,考虑了上覆地层压力和构造应力的影响,即在平面应变的条件下,假设地下岩层的地应力主要由上覆地层压力与水平方向的构造应力产生。

3.1 地应力模型

上覆地层压力通过对上覆地层压力梯度的积分获得,可以通过下式计算:

$$\sigma_v = \int G_z dz \quad (5)$$

式中: σ_v 为上覆地层压力, MPa; G_z 为上覆地层压力梯度, MPa/m; H 为地层厚度, m。

结合孔隙压力及构造载荷的影响建立煤层气水平地应力模型^[17-18]。水平地应力模型可以表示为

$$\sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu}(\sigma_v - \alpha P_p) + \frac{E}{1-\mu^2}\varepsilon_h + \frac{E\mu}{1-\mu^2}\varepsilon_H + \alpha P_p \quad (6)$$

$$\sigma_H = \frac{\mu}{1-\mu}(\sigma_v - \alpha P_p) + \frac{E}{1-\mu^2}\varepsilon_H + \frac{E\mu}{1-\mu^2}\varepsilon_h + \alpha P_p \quad (7)$$

式中: σ_h 为水平最小地应力, MPa; σ_H 为水平最大地应力, MPa; E 为弹性模量, MPa; μ 为泊松比; P_p 为地层孔隙压力, MPa; α 为有效应力系数; ε_h 为水平最大构造应变系数; ε_H 为水平最小构造应变系数。

单井地应力剖面是煤层压裂地质模型的基础。由水平地应力模型可知,通过已知煤层一点的地应力的大小可反演求解得到水平最大和最小构造应变系数 ε_H 、 ε_h ,从而计算得到煤层水平地应力的大小。煤层压裂时裂缝闭合压力主要受最小水平地应力 σ_h 控制,可认为裂缝闭合压力与最小水平地应力 σ_h 近似相等。而水平最大地应力 σ_H 可通过目标煤层直井压裂施工的裂缝破裂压力模型计算求取。

3.2 闭合压力评估

裂缝闭合压力是指开始张开已经存在的裂缝所需的流体压力,或使裂缝恰好保持不闭合所需要的

流体压力。现场可通过对小型压裂压降曲线数据分析确定闭合压力,常见的压降分析确定闭合压力的方法是做出压力与 G 函数、时间平方根或时间双对数的曲线图,由这 3 条曲线图斜率的变化得到闭合压力值。

3.2.1 G 函数曲线

G 函数是一个时间的无量纲函数,用于表示压裂裂缝滤失时裂缝内压力的变化情况。 G 函数值的特征表明了裂缝内滤失机理。基于裂缝内线性滤失的条件, G 函数可以表示为^[19]

$$G(t) = \frac{4}{\pi} [g(t) - g_0] \quad (8)$$

$$g(t) = \frac{4}{3} [(1+t)^{1.5} - t^{1.5}] \quad (9)$$

式中: $g_0 = \frac{4}{3}$; t 为无因次关井时间。

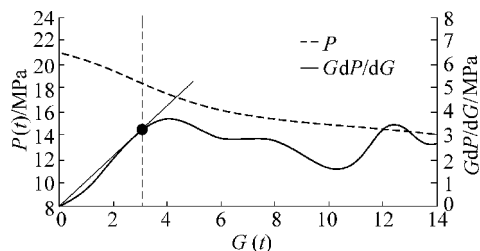
由于许多非理想因素的影响, G 函数曲线可能会没有明显的斜度变化或者会有多重斜度变化。所以常规关井测试通常并不能反映真实客观的闭合压力值,可以用 G 函数压力导数 G' 图来放大斜率的变化并增强识别斜度的变化。闭合压力为 G 函数压力导数的最大值。

$$G' = \frac{dP}{dG} \quad (10)$$

式中: P 为压裂压力, MPa。

然而某些情况下导数曲线不能明确表示裂缝闭合点,因此可使用半对数导数 DG' 曲线确定裂缝的闭合点(图3)。 DG' 曲线中间一段为直线,表示人工裂缝闭合过程。当 DG' 曲线偏离直线段时,表示人工裂缝闭合,因此曲线偏离直线段的点即为裂缝闭合点,对应的压力值即闭合压力。 DG' 曲线对人工裂缝闭合更加敏感,更能清楚地指示出人工裂缝闭合点。

$$DG' = G \frac{dP}{dG} \quad (11)$$

图3 G 函数曲线确定闭合压力Fig.3 Determine closure pressure with G function curves

3.2.2 时间平方根曲线

时间平方根曲线与 G 函数曲线相类似,可以用时间平方根的压力导数图来放大斜率的变化并增强识别斜度的变化。闭合压力为时间平方根导数的最大值。

$$T' = \frac{dP}{d\sqrt{t}} \quad (12)$$

同样与 G 函数相类似,某些情况下导数曲线不能明确表示裂缝闭合点,因此可使用半对数导数曲线 DT' 确定裂缝的闭合点(图4)。 DT' 曲线中间一段为直线,表示人工裂缝闭合过程。当 DT' 曲线偏离直线段时,表示人工裂缝闭合,因此曲线偏离直线段的点即为裂缝闭合点,对应的压力即为闭合压力。

$$DT' = \sqrt{t} \frac{dP}{d\sqrt{t}} \quad (13)$$

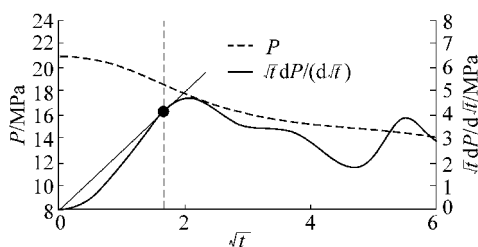


图4 时间平方根曲线确定闭合压力

Fig.4 Determine closure pressure with square root of time

3.2.3 双对数函数曲线

双对数函数常用于对 G 函数曲线和时间平方根曲线求取的闭合压力进行验证,通过停泵后压力的变化与时间的双对数曲线表示(图5)。在双对数坐标中压力降曲线与压力降的半对数导数曲线的分离点表示裂缝的闭合。

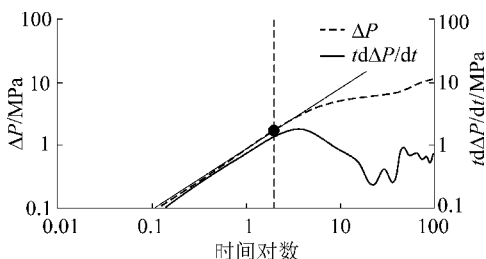


图5 双对数函数曲线确定闭合压力

Fig.5 Determine closure pressure with double logarithmic function

由于煤储层割理和裂缝的发育,储层厚度较薄等特点,使煤层闭合压力求取较为困难。实际压后

评估过程中煤层闭合压力需要通过以上3种方法拟合过程的精度综合选取并平均确定,单独某一种方法求取的闭合压力一般会引起结果产生误差。

3.3 反演构造应变系数

根据上述分析,水平最大地应力可通过目标煤层直井压裂施工的裂缝破裂压力模型计算得到^[20],见式(14),其中力学参数通过上述试验测试得到,水平最小地应力通过闭合压力评估求得。

$$P_f = \frac{3\sigma_h - \sigma_H - \alpha \frac{1-2\mu}{1-\mu} P_p + S_t}{1 - \alpha \frac{1-2\mu}{1-\mu}} \quad (14)$$

式中: P_f 为地层破裂压力, MPa; S_t 为抗拉强度, MPa。

结合上述试验测试得到的力学参数以及闭合压力评估得到的水平最小地应力,即可求出目标井地层水平应力的最大构造应变系数和最小构造应变系数为

$$\begin{cases} \varepsilon_H = \frac{1}{E} [(\sigma_H - \alpha P_p) - \mu(\sigma_v + \sigma_h - 2\alpha P_p)] \\ \varepsilon_h = \frac{1}{E} [(\sigma_h - \alpha P_p) - \mu(\sigma_v + \sigma_H - 2\alpha P_p)] \end{cases} \quad (15)$$

4 算 例

以沁水盆地北缘煤层气井为研究目标,通过上述试验结果、声波时差模型、闭合压力评估方法和破裂压力计算模型对地应力进行计算,可以得到沁水盆地目标区块3口井的煤层的最大水平地应力和最小水平地应力,见表4。

计算得到煤层的地应力后,即可利用地应力模型反演煤层的构造应变系数。计算的水平最大和最小构造应变系数平均分别为 1.06×10^{-3} 和 -1.35×10^{-3} 。通过该模型计算得到沁水盆地北缘 Q19 井地应力剖面,如图6所示,煤层的最小水平地应力预测结果平均为 12.70 MPa,该井煤层通过测试得到的闭合压力为 13.3 MPa,二者的误差仅为 0.6 MPa;煤层的最大水平地应力预测结果平均为 14.7 MPa,而通过破裂压力模型^[20]计算得到最大水平地应力为 15.2 MPa,二者的误差仅为 0.5 MPa,说明水平地应力评估达到了预测的要求。

该地应力模型结果基于室内实验测试、声波时差拟合、现场施工曲线数据,通过拟合及反演建立准确的地应力计算模型,满足了现场设计的要求。

表 4 沁水盆地北缘 3 口井地应力状态
Table 4 In-situ stress of 3 wells in north edge of Qinshui Basin

井号	深度/m	上覆地层压力/MPa	闭合压力/MPa	破裂压力/MPa	最大水平应力/MPa	最小水平应力/MPa
Q06	793	19.8	14.8	21.0	16.6	14.8
Q08	725	18.2	13.6	19.2	15.3	13.6
Q14	743	18.6	13.9	19.7	15.6	13.9

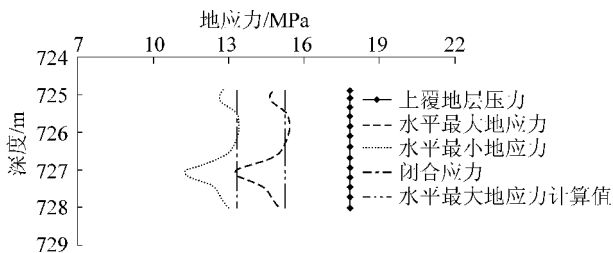


图 6 Q19 井地应力剖面

Fig.6 In-situ stress profile of Well Q19

5 结 论

1)结合声波时差测井数据与深侧向电阻率测井、自然伽马测井、密度测井数据之间的关系,通过数学拟合建立声波时差数据拟合模型,实现了无声波时差测井条件下力学参数的计算。

2)采用大量压裂施工数据,对压裂压降曲线数据分析,作出施工压力的 G 函数、时间平方根或时间双对数的曲线图,通过 3 种曲线图斜率的变化得到准确的压裂裂缝闭合压力。

3)基于现场压裂施工曲线压降分析得到的闭合压力、破裂压力和水平地应力模型反演计算构造应变系数,最大和最小构造应变系数平均分别为 1.06×10^{-3} 和 -1.35×10^{-3} ,从而建立整个区域的煤层地应力模型,应用该模型预测最大和最小水平地应力误差分别仅为 0.5 MPa 和 0.6 MPa。模型可用于指导煤层气井压裂增产方案设计和井壁稳定性研究。

参考文献 (References) :

[1] 徐 刚,彭苏萍,邓绪彪.煤层气井水力压裂压力曲线分析模型及应用[J].中国矿业大学学报,2011,40(2):173-178.
XU Gang,PENG Suping,DENG Xubiao.Hydraulic fracturing pressure curve analysis and its application to coalbed methane wells [J].Journal of China University of Mining & Technology,2011,40 (2):173-178.

[2] 鲜保安,崔思华,蓝海峰,等.中国煤层气开发关键技术及综合利用[J].天然气工业,2004,24(5):104-106.
XIAN Baoan,CUI Sihua,LAN Haifeng,et al.Key techniques and

integrative utilization of coal-bed gas development in China [J]. Natural Gas Industry,2004,24(5):104-106.

[3] 孙良田,李玉魁,朱 宁,等.煤层气井压裂中可钻桥塞电缆射孔联作技术研究[J].煤炭科学技术,2016,44(5):30-33,73.
SUN Liangtian,LI Yukui,ZHU Ning,et al.Study on drillable bridge plug cable perforation co-operated technology in coalbed methane hydraulic fracturing process [J].Coal Science and Technology,2016,44(5):30-33,73.

[4] JIN Xianpeng,LAN Zhongxiao,LAN Chengyu,et al.Fracturing technology of coalbed methane in Qinshui Basin [C]// SPE 167108-MS,presented at SPE Unconventional Resources Conference and Exhibition-Asia Pacific,Brisbane,Australia,2013:1-8.

[5] WU Jianguang,SUN Hansen,LIU Xinghui,et al.CBM development in the Qinshui Basin:hydraulic fracture complexities revealed by modeling analysis and microseismic monitoring [C]// SPE 167045- MS, presented at SPE Unconventional Resources Conference and Exhibition-Asia Pacific,11-13 November,Brisbane,Australia,2013:1-23.

[6] 唐书恒,朱宝存,颜志丰.地应力对煤层气井水力压裂裂缝发育的影响[J].煤炭学报,2011,36(1):65-69.
TANG Shuheng,ZHU Baocun,YAN Zhifeng.Effect of crustal stress on hydraulic fracturing in coalbed methane wells [J].Journal of China Coal Society,2010,36(1):65-69.

[7] CHUPRAKOV D,PRILOUL R.Hydraulic fracture height containment by weak horizontal interfaces [C]// SPE 173337-MS,presented at SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference,The Woodlands,Texas,USA,2015:1-16.

[8] 张小东,张 鹏,刘 浩,等.高煤级煤储层水力压裂裂缝扩展模型研究[J].中国矿业大学学报,2013,42(4):573-579.
ZHANG Xiaodong,ZHANG Peng,LIU Hao,et al.Fracture extended model under hydraulic fracturing engineering for high rank coal reservoirs [J].Journal of China University of Mining & Technology,2013,42(4):573-579.

[9] 陈峥嵘,刘书杰,冯恒椿,等.沁水盆地煤层气井压裂效果评估研究[J].煤炭科学技术,2017,45(9):188-193.
CHEN Zhengrong,LIU Shujie,FENG Huanzhi,et al.Research on fracturing performance evaluation of coalbed methane well in Qinshui Basin [J].Coal Science and Technology,2017,45(9):188-193.

[10] 吕润生,倪小明,刘高峰,等.煤层气井水力压裂有效消突边界物理模型[J].煤炭学报,2016,41(9):2273-2280.
LYU Runsheng,NI Xiaoming,LIU Gaofeng,et al.A physical model of outburst elimination boundary after hydraulic fracturing

- in coal-bed methane well [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(9): 2273-2280.
- [11] 孟召平, 田永东, 李国富, 等. 沁水盆地南部地应力场特征及其研究意义[J]. 煤炭学报, 2010, 35(6): 975-981.
- MENG Zhaoping, TIAN Yongdong, LI Guofu, *et al.* Characteristics of in-situ stress field in southern Qinshui Basin and its research significance [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6): 975-981.
- [12] 吴晓东, 席长丰, 王国强. 煤层气井复杂水力压裂裂缝模型研究[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 124-126.
- WU Xiaodong, XI Changfeng, WANG Guoqiang. The mathematic model research of complicated fracture system in coalbed methane wells [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(12): 124-126.
- [13] 单学军, 张士诚, 李安启, 等. 煤层气井压裂裂缝扩展规律分析[J]. 天然气工业, 2005, 25(1): 130-132.
- SHAN Xuejun, ZHANG Shicheng, LI Anqi, *et al.* Analyzing the fracture extended law of hydraulic fracturing in coalbed gas wells [J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 130-132.
- [14] 申卫兵, 张保平. 不同煤阶煤岩力学参数测试[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(S1): 860-862.
- SHEN Weibing, ZHANG Baoping. Testing study on mechanical parameters of coal [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(S1): 860-862.
- [15] 刘向君, 罗平亚. 岩石力学与石油工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015: 15-19.
- [16] 杨建林, 王来贵, 张 鹏, 等. 泥岩试件改性前后拉破坏试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(12): 2812-2819.
- YANG Jianlin, WANG Laigui, ZHANG Peng, *et al.* Experimental research on tensile failure of mudstone samples before and after modification [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12): 2812-2819.
- [17] THIERCELIN M J, PLUMB R A. A core-based prediction of lithologic stress contrasts in east Texas formations [J]. SPE Formation Evaluation, 1994, 9(4): 251-258.
- [18] 邓金根, 陈峥嵘, 耿亚楠, 等. 页岩储层地应力预测模型的建立和求解[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(6): 59-64.
- DENG Jinggen, CHEN Zhengrong, GENG Yanan, *et al.* Prediction model for in-situ formation stress in shale reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2013, 37(6): 59-64.
- [19] 俞绍诚. 水力压裂技术手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 409-410.
- [20] 陈 勉, 金 衍, 张广清. 石油工程岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 99-106.