

沁水盆地煤层气井压裂效果评估研究

陈峥嵘, 刘书杰, 冯桓椿, 彭成勇
(中海油研究总院, 北京 100028)

摘要:为了分析评估煤层气井压裂增产后的生产效果,以沁水盆地煤层气井为实例,通过 G 函数曲线、时间平方根曲线和双对数函数曲线预测煤层压裂裂缝闭合压力,并建立了煤层气井的地应力模型。基于该地应力模型的结果,将注入摩阻及停泵裂缝净压力 2 项指标与煤层气井压裂前后产能进行对比,并拟合了煤层气井平均日产气量与该 2 项指标之间的关系模型。结果表明:预测的煤层地应力与测试结果的误差仅为 0.75 MPa;注入摩阻及停泵裂缝净压力与煤层气产能存在较好的相关性,压裂注入摩阻和停泵裂缝净压力越高,裂缝的复杂程度越高且延伸越困难,导致煤层气井产能越低。该理论方法可为煤层气井的地应力模型和压裂后产能效果预测提供参考。

关键词:煤层气井压裂;闭合压力;地应力;压降分析;注入摩阻;净压力

中图分类号:P618.11 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2017)09-0188-06

Research on fracturing performance evaluation of coalbed methane well in Qinshui Basin

CHEN Zhengrong, LIU Shujie, FENG Huanzhi, PENG Chengyong
(CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: In order to evaluate productivity after fracturing of coalbed methane wells, closure stress of coalbed fracture was predicted with Function Curve G , square root of time curve, double logarithmic function curve and in-situ stress model of coal was established based on the coalbed methane wells of Qinshui Basin. According to in-situ stress model, net pressure, fracture friction and production were contrasted. Then a model to evaluate the productivity after fracturing was established with fitting the correlations between net pressure, fracture friction with productivity. The results showed that the error of the predicted stress and well testing result was 0.75 MPa. There were good relevance between the productivity with net pressure and friction. The higher net pressure and fracture friction were, the more complexity the fracture would be and the more difficulty the fracture propagation would be. Then the productivity of coalbed methane wells would be low. The methods could provide the references to in-situ stress and production prediction after fracturing of coalbed methane wells.

Key words: fracture of coalbed methane well; closure pressure; in-situ stress; pressure decline analysis; fracture friction; net pressure

0 引言

我国煤层气储层具有低压、低渗和低饱和度的特性,自然产能较低,非均质性较强^[1]。煤层通常经过水力压裂增产措施改造后才能获得工业的生产价值^[2]。而煤储层埋深较浅,地应力相对较小,且微裂隙和割理发育丰富,使得煤层压裂时裂缝更容易形成较为复杂的裂缝形态^[3-4],并造成煤层气压

裂预测及效果评估较为困难。煤层压裂效果评估通常采用监测技术或室内试验对裂缝形态进行监测模拟,并建立压裂模型以拟合监测的结果,或者运用压裂参数直接拟合施工后裂缝参数,建立裂缝参数与施工参数的转换关系,但该方法需要针对于煤层建立更加精确的压裂扩展模型,并且煤层压裂形成的复杂裂缝通过经典压裂模型难以进行解释和模拟^[5-10]。测试技术由于煤层特殊的结构无法精确构

收稿日期:2017-01-28;责任编辑:曾康生 DOI:10.13199/j.cnki.est.2017.07.031

基金项目:中海石油(中国)有限公司资助项目(YXKY-2016-ZY-08, FQTFWQYZL-14-071)

作者简介:陈峥嵘(1988—),男,江西南昌人,工程师,硕士。Tel:15901097419, E-mail:zrchen12345@163.com

引用格式:陈峥嵘,刘书杰,冯桓椿,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.

建测试模型,并且测试结果无法直接评价压裂施工后的效果^[11-13]。通过神经网络及决策树法等计算方法,需要经过大量的数据演算,无法解释压裂本身的效果且算法难以得到推广应用^[14-15]。针对以上问题基于煤层气地质特点和裂缝延伸规律,将注入摩阻及停泵裂缝净压力作为2项指标,来评价裂缝的复杂程度和延伸难易程度,并评估煤层气井压裂施工后的产能。2项指标大部分计算参数可通过压裂施工曲线获取,仅停泵裂缝净压力需要掌握有效的煤层地应力模型,笔者通过 G 函数曲线、时间平方根曲线和双对数函数曲线预测煤层压裂裂缝闭合压力,对目标煤层的地应力进行准确预测,注入摩阻和停泵裂缝净压力2项参数的计算可基于水力压裂致裂理论通过现场压裂施工压力曲线^[16-18],并结合目标井的地应力特征获取^[19]。其中煤层地应力可通过室内试验^[20]、现场水力致裂测试^[21]、结合区域整体地应力场的特征进行表征^[22]。笔者综合地应力的预测方法通过压裂压力的 G 函数曲线、时间平方根曲线和双对数函数曲线预测煤层压裂裂缝闭合压力,并基于地应力计算模型对目标煤层的地应力进行准确的预测。在煤层地应力模型预测的基础上,通过注入摩阻及停泵裂缝净压力建立压后产能效果评估、优选目标区块甜点区的方法。

1 煤层地应力模型建立

对煤储层进行压裂施工,地应力模型是指导压裂施工的一个极为重要的理论基础,因此准确获取煤储层地应力的状态是压裂过程中保证压裂效果的前提。地应力场主要由上覆岩层应力 σ_v 和水平应力 σ_h 组成,如图1所示。

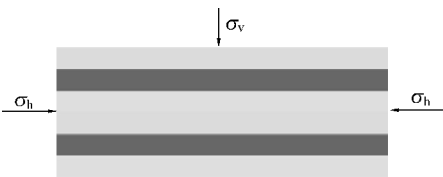


图1 煤储层地应力场示意

Fig. 1 In-situ stress schematic of coal reservoirs

1.1 上覆岩层应力评估

上覆岩层应力可通过对上覆岩层应力梯度的积分获得,即由下式计算得到:

$$\sigma_v = \int G_z dH \quad (1)$$

式中: G_z 为上覆岩层应力梯度,MPa/m; H 为岩层厚

度,m。

通过密度测井数据,按照式(1)对梯度进行积分就可以计算上覆岩层应力。通过对不同井的上覆岩层应力的积分求解,可将式(1)近似为

$$\sigma_v = G_z H \quad (2)$$

对沁水盆地A区块的6口井的上覆岩层应力进行计算,并对6口井的上覆岩层应力进行拟合得到 $G_z = 0.025$ MPa/m。

表1 沁水盆地A区块上覆岩层应力拟合误差

Table 1 Fitted errors of overburden stress in Block A, Qinshui Basin

井号	深度/m	上覆岩层应力/MPa	相对误差/%
拟合	650	16.27	0
A1	650	16.22	0.29
A2	650	15.88	2.46
A3	650	16.26	0.08
A4	650	16.75	2.88
A5	650	16.41	0.88

对比上覆岩层应力拟合公式在650 m深岩层的上覆岩层应力与测井密度积分计算的上覆岩层应力,二者的最大误差为2.88%,符合工程参数要求。

1.2 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作出压力与 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。

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^[23]

$$G(t) = \frac{4}{\pi} [g(t) - g_0] \quad (3)$$

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

式中: $g(t)$ 初始值 $g_0 = 4/3$; 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,可以用 G 函数压力的导数 G' 图像来反映斜率的变化,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。即有

$$G' = \frac{dP}{dG} \quad (5)$$

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。 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, 对应的压力值即为闭合压力。 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。

$$DG' = G \frac{dP}{dG} \quad (6)$$

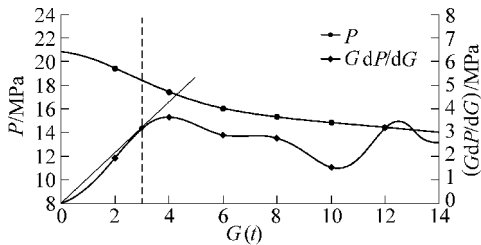


图2 G 函数曲线确定闭合压力

Fig. 2 Determine closure pressure with Function G

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像, 通过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。即有

$$T' = \frac{dP}{d\sqrt{t}} \quad (7)$$

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。 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裂缝闭合点, 对应的压力即闭合压力。

$$DT' = \sqrt{t} \frac{dP}{d\sqrt{t}} \quad (8)$$

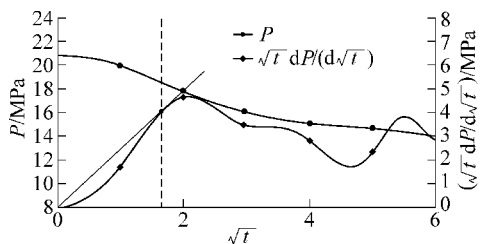


图3 时间平方根曲线确定闭合压力

Fig. 3 Determine closure pressure with square root of time

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 ΔP 与时间的双对数曲线表示。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。

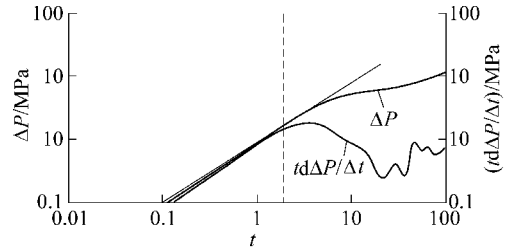


图4 双对数函数曲线确定闭合压力

Fig. 4 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种方法相结合确定, 单独某一种方法求取的闭合压力一般会引入结果产生误差。

通过压后压降分析方法可得到沁水盆地A区块压裂井的闭合压力, 见表2。

表2 沁水盆地A区块压裂井的闭合压力

Table 2 Closure pressure in Block A, Qinshui Basin

井号	闭合压力/MPa
A1	7.72
A2	6.93
A3	8.90
A4	10.19
A5	9.95
A6	7.79

1.3 水平地应力评估

目前预测水平地应力的模型大部分建立在岩层均质各向同性的基础上。多数学者考虑了上覆岩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岩层压力与水平方向的构造应力产生, 且水平方向的构造应力与上覆压力成正比。基于线弹性理论, 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。水平地应力模型可以表示为^[24-25]

$$\sigma_h = \frac{\mu}{1-\mu}(\sigma_v - \alpha P_p) + \frac{E}{1-\mu^2} \varepsilon_h + \frac{E\mu}{1-\mu^2} \varepsilon_H \quad (9)$$

式中: μ 为泊松比; α 为有效应力系数; E 为弹性模量, MPa; P_p 为岩层孔隙压力, MPa; ε_H 为水平最大

构造应变; ε_{h} 为水平最小构造应变。

根据上述上覆岩层应力评估方法可得到上覆岩层压力,通过闭合压力评估方法可计算裂缝闭合压力。在裂缝闭合时的闭合压力主要受最小水平地应力控制,即闭合压力近似于最小水平地应力。通过上述闭合压力评估方法拟合的闭合压力对最小水平地应力进行校正可得到更为准确的地应力模型。

根据水平地应力模型计算得到沁水盆地 A 区块 A5 井地应力剖面,如图 5 所示,煤层的最小地应力平均为 9.95 MPa,该井煤层测试中的闭合压力为 9.2 MPa,二者的误差仅为 0.75 MPa,说明水平地应力评估达到预测的要求。

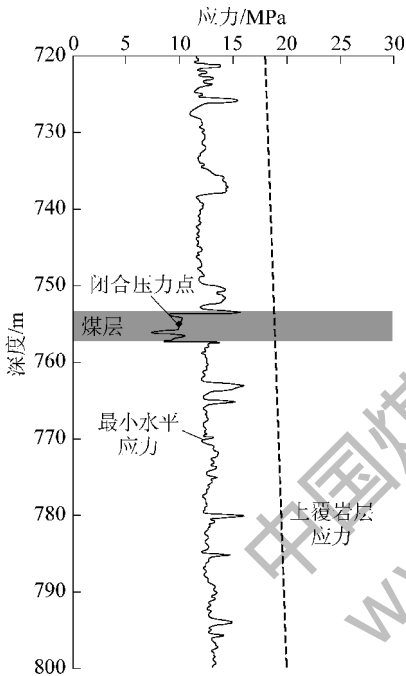


图 5 沁水盆地 A 区块 A5 井地应力剖面

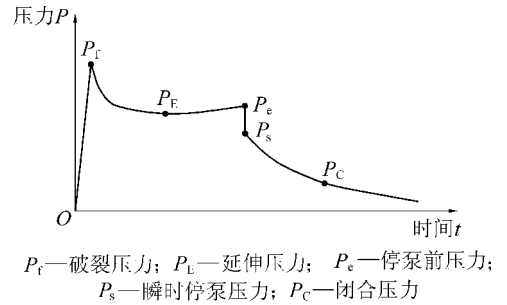
Fig. 5 In-situ stress profile of Well A5 in Block A, Qinshui Basin

2 压裂效果评估方法

压裂的基本原理是通过施工泵柱将高压流体注入岩层使岩层发生破坏从而产生裂缝。水力压裂作用下裂缝的几何形状,主要由岩层应力和岩石力学性质等条件所决定。煤储层由于具有较强的非均质性并发育丰富的割理,使煤层压裂时裂缝易形成极为不规则的复杂裂缝。而煤层气压后裂缝形态对煤层气产能具有重要影响。现场作业表明通过排量、砂比、注液量等施工参数难以对煤层压裂裂缝形态及增产效果进行准确评估。

基于煤层气压后产能,通过压裂施工曲线(图 6)

对沁水盆地 A 区块 53 口井的压裂裂缝摩阻及停泵裂缝净压力进行统计分析,结果表明,压裂注入摩阻及停泵裂缝净压力与煤层气产能存在较好的相关性。



P_f —破裂压力; P_L —延伸压力; P_e —停泵前压力;
 P_s —瞬时停泵压力; P_c —闭合压力

图 6 压裂施工曲线

Fig. 6 Fracture operation curve

煤层压裂时形成不规则的裂缝导致压裂液注入过程中存在较大的摩阻,限制了裂缝的扩展并影响最终的压裂效果。注入摩阻可通过压裂施工曲线停泵前后的地面压力差表示为

$$P_{\text{fri}} = P_e - P_s \quad (10)$$

式中: P_{fri} 为注入摩阻,MPa; P_e 为地面停泵前压力,MPa; P_s 为瞬时停泵压力,MPa。

通过沁水盆地 A 区块各井压裂注入摩阻的大量统计,如图 7 所示。注入摩阻越高,其产能越低,表明注入摩阻越高,压裂液注入受摩阻影响越大,注入能量越小且压裂裂缝越不规则,压裂效果越差。

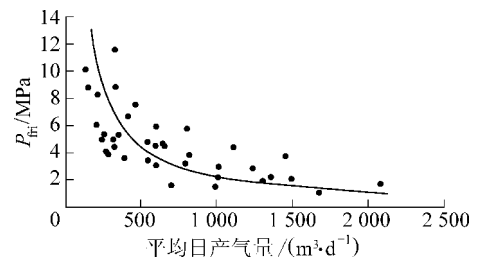


图 7 注入摩阻与产能的关系

Fig. 7 Relationship of fracture friction and productivity

压裂停泵裂缝净压力是水力裂缝内流体流动压力与岩层岩石闭合压力的差值。压裂停泵净压力反应了裂缝延伸最后的形态类型和裂缝复杂程度,即反应了形成裂缝的难易程度。因此通过净压力数据描述裂缝特性,进而对压后煤层气的产能进行评价。

停泵裂缝净压力可通过下式表示:

$$P_n = P_s - P_c + P_w \quad (11)$$

式中: P_n 为停泵裂缝净压力,MPa; P_w 为静液柱压力,MPa; P_c 为闭合压力,MPa。

裂缝闭合压力可通过上述压裂压力的平方根函数、 G 函数和双对数函数等数据曲线确定。

通过统计分析沁水盆地 A 区块各井压裂停泵时裂缝净压力(图 8)。可知,净压力越高,其产能越低,这是由于净压力越高,裂缝复杂程度越高,裂缝延伸越困难,难以形成有效裂缝,导致压裂效果越差。

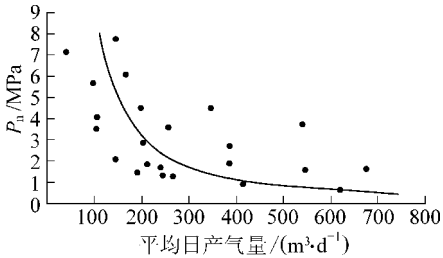


图 8 净压力与产能的关系

Fig. 8 Relationship of net pressure and productivity

统计沁水盆地 A 区块和附近 B 区块的压裂井停泵裂缝净压力(图 9),对比发现沁水盆地 A 区块各井的净压力相对 B 区块普遍较低,而 A 区块煤层气井平均日产气量 968.3 m³/d, B 区块煤层气井平均日产气量 323.5 m³/d, A 区块各井的产能普遍高于 B 区块。说明 B 区块煤层气井相比于 A 区块形成裂缝更加困难,改造效果更差,从而造成产能相对较低。

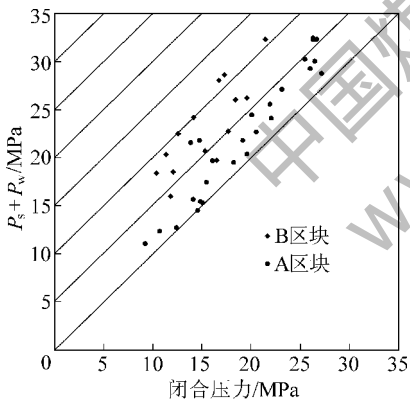


图 9 沁水盆地 A 区块与 B 区块净压力对比

Fig. 9 Contrast of net pressure in Block A and B, Qinsui Basin

通过拟合可得到平均日产气量 Q 与注入摩阻和停泵裂缝净压力之间的关系:

$$Q = 1064.1 P_{\text{fr}}^{-0.98} + 208.3 P_n^{-0.63} \quad (12)$$

通过注入摩阻和停泵裂缝净压力与产能之间的关系式(12)可以对目标区块煤层气井的压裂效果进行评价,同时通过注入摩阻和停泵裂缝净压力的大小评价目标区块煤层气井压裂产能风险和目标区块工程甜点区域,优选目标区块有利区,指导区域的开分布井措施。

3 结 论

1) 通过对压裂压降曲线数据分析,得到压裂压力的 G 函数、时间平方根或时间双对数的曲线图,利用 3 种曲线图斜率的变化得到压裂裂缝的闭合压力值。

2) 通过裂缝闭合压力拟合得到最小水平地应力,积分上覆岩层密度求得上覆岩层应力,结合煤层地质特征,进而建立煤层地应力计算模型。

3) 压裂施工注入摩阻越高,压裂液注入受摩阻影响越大,注入能量越小,压裂裂缝越不规则,压裂效果越差。停泵裂缝净压力越高,裂缝复杂程度越高,裂缝延伸越困难,难以形成有效裂缝,产能越低。

4) 通过注入摩阻和停泵裂缝净压力数据与产能的拟合关系可评估煤层气井压裂效果和产能风险,指导目标煤层气区块工程优选煤层气甜点区和开分布井设计。

参考文献(References):

- [1] 张 群,冯三利,杨锡禄.试论我国煤层气的基本储层特点及开发策略[J].煤炭学报,2001,26(3):230-235.
ZHANG Qun, FENG Sanli, YANG Xilu. Basic reservoir characteristics and development strategy of coalbed methane resource in China [J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(3): 230-235.
- [2] 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.
- [3] 王 鹏,茅献彪,杜春志,等.煤层钻孔水压致裂的裂缝扩展规律研究[J].采矿与安全工程学报,2009,26(1):31-35.
WANG Peng, MAO Xianbiao, DU Chunzhi, et al. Study on the propagation mechanism of the crack for the borehole hydraulic fracturing in coal seam [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(1): 31-35.
- [4] 蔺海晓,杜春志.煤岩拟三轴水力压裂实验研究[J].煤炭学报,2011,36(11):1801-1805.
LIN Haixiao, DU Chunzhi. Experimental research on the quasi three-axis hydraulic fracturing of coal [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(11): 1801-1805.
- [5] WU Jianguang, SUN Hansen, LIU Xinghui, et al. CBM development in the Qinsui Basin: hydraulic fracture complexities revealed by modeling analysis and microseismic monitoring [C]. SPE 167045, Presented at SPE Unconventional Resources Conference and Exhibition-Asia Pacific, Brisbane, Australia, 2013: 1-23.
- [6] ABASS H H. Mathematical and experimental simulation of hydrau-

- lic fracturing in shallow coal seams [C].SPE 23452, presented at SPE Eastern Regional Meeting, Lexington, Kentucky, 1991; 367-376.
- [7] ABASS H H. Experimental observations of hydraulic fracture propagation through coal blocks [C]. SPE 21289, presented at SPE Eastern Regional Meeting, Columbus, Ohio, 1990; 239-252.
- [8] 石欣雨, 文国军, 白江浩, 等. 煤岩水力压裂裂缝扩展物理模拟实验[J]. 煤炭学报, 2016, 41(5): 1145-1151.
SHI Xinyu, WEN Guojun, BAI Jianghao, *et al.* A physical simulation experiment on fracture propagation of coal petrography in hydraulic fracturing [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(5): 1145-1151.
- [9] 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.
- [10] 赵丹, 王婷婷, 赵万春, 等. 煤岩体压裂损伤突变演化模型的研究[J]. 中州煤炭, 2016(4): 124-127.
ZHAO Dan, WANG Tingting, Zhao Wanchun, *et al.* Study on damage mutation evolution model of coal and rock mass fracturing damage [J]. Zhongzhou Coal, 2016(4): 124-127.
- [11] 刘立军, 王立中, 张增惠, 等. 煤层气井注入压降试井技术研究[J]. 天然气工业, 2004, 24(5): 79-81.
LIU Lijun, WANG Lizhong, ZHANG Zenghui *et al.* Study on pressure-drop well test with injection of coalbed gas well [J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(5): 79-81.
- [12] 景兴鹏. 不同完井方式下注入/压降煤储层参数法测试结果对比[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(2): 33-37.
JING Xingpeng. Comparison on injection and pressure drop measuring and test results of different well completion type coal reservoir parameters [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(2): 33-37.
- [13] 靳黎明, 郭海英, 曹翠. 煤层气注入/压降测试方法及其在煤储层评价中的应用[J]. 煤炭技术, 2014, 33(9): 282-284.
JIN Liming, GUO Haiying, CAO Cui. Coalbed methane injection/pressure drop testing method and its use in coal reservoir evaluation [J]. Coal Technology, 2014, 33(9): 282-284.
- [14] 孟庆民, 张士诚, 王莉, 等. 数据挖掘技术在气田压裂效果评价中的应用[J]. 石油大学学报, 2008, 32(5): 165-169.
MENG Qingmin, ZHANG Shicheng, WANG Li, *et al.* Application of data mining to postfracture response evaluation in gas field [J]. Journal of China University of Petroleum, 2008, 32(5): 165-169.
- [15] 吴亚红, 李秀生, 钟大康, 等. 人工神经网络在压裂选井及选层中的应用[J]. 石油大学学报, 2001, 25(5): 42-44.
WU Yahong, LI Xiusheng, ZHONG Dakang, *et al.* Application of the artificial nerve networks to the target selection of hydraulic fracturing [J]. Journal of China University of Petroleum, 2001, 25(5): 42-44.
- [16] 陈勉. 我国深层岩石力学研究及在石油工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(14): 2455-2462.
CHEN Mian. Review of study on rock mechanics at great depth and its applications to petroleum engineering of China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(14): 2455-2462.
- [17] 黄炳香, 程庆春, 刘长友, 等. 煤岩体水力致裂理论及其工艺技术框架[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(2): 167-173.
HUANG Bingxiang, CHENG Qingchun, LIU Changyou, *et al.* Hydraulic fracturing theory of coal-rock mass and its technical framework [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2011, 28(2): 167-173.
- [18] 陈峥嵘, 邓金根, 朱海燕, 等. 定向射孔压裂起裂与射孔优化设计方法研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(8): 2309-2315.
CHEN Zhengrong, DENG Jingen, ZHU Haiyan, *et al.* Research on initiation of oriented perforation fracturing and perforation optimization design method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(8): 2309-2315.
- [19] 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]. 石油大学学报, 2013, 37(6): 59-64.
DENG Jingen, CHEN Zhengrong, GENG Yanan, *et al.* Prediction model for in-situ formation stress in shale reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum, 2013, 37(6): 59-64.
- [20] 李志强, 鲜学福, 黄滚. 地应力地温场中煤层气富集区高精度定量预测的力学方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(S2): 395-400.
LI Zhiqiang, XIAN Xuefu, HUANG Gun. High precision and quantitative prediction mechanics method of coalbed methane enrichment area in geo-stress and geothermal field [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S2): 395-400.
- [21] 康红普, 林健, 张晓. 深部矿井地应力测量方法研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 929-933.
KANG Hongpu, LIN Jian, ZHANG Xiao. Research and application of in-situ stress measurement in deep mines [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 929-933.
- [22] 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 Guoyu, *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.
- [23] 俞绍诚. 水力压裂技术手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 409-410.
- [24] 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.
- [25] 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.