

滇东黔西地区多层叠置煤层压裂分层决策方法研究

杨兆中¹, 刘云锐¹, 张平², 李丹琼², 李小刚¹, 闵超¹

(1. 西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610500; 2. 中联煤层气有限责任公司, 北京 100011)

摘要:为了实现成功水力压裂煤层, 从而获得工业产能的目的, 提出了一套针对多层叠置煤层的压裂分层决策方法, 该方法以煤层压力梯度和渗透率作为刚性判别指标; 以煤层裂缝延伸模拟结果为依据, 建立目标函数, 优选最佳射孔组合; 对封隔方式适用条件进行判断, 甄别出合适的压裂分层方式。此方法有效解决了煤层含气系统间的兼容性和系统内部的共享性问题。以中国西南地区某区块某井为例, 压裂分层决策划分结果为: 存在 2 个含气系统、4 个渗透率差异大的小层组, 并对 Ab 层组进行射孔位置优化, 建议对 4、5 号煤层进行合层压裂, 并使用封隔器封堵上下层, 结果证明了该方法对多层叠置煤层的适用性。

关键词:煤层压裂; 多层叠置煤层; 分层方法; 煤层含气系统

中图分类号: P618 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2017)09-0007-06

Study on fracturing and slicing decision method of multi layer overlay seam in East Yunnan and West Guizhou

YANG Zhaozhong¹, LIU Yunrui¹, ZHANG Ping², LI Danqiong², LI Xiaogang¹, MIN Chao¹

(1. State Key Lab of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China; 2. China United Coalbed Methane Corporation Limited, Beijing 100011, China)

Abstract: In order to achieve the goal of successful hydraulic fracturing of coal seams to obtain industrial production capacity, a fracturing slicing decision method according to the multi layer overlay seams was provided and the method was based on the seam pressure gradient and the permeability as the rigid judgement index. With the simulation results of the seam crack expansion as the basis, the target function was established and the best perforation combination was optimized. A judgement was conducted on the applicable conditions of the packing mode and the suitable fracturing method was judged. The method could effectively solve the compatibility between the gas bearing system of the seam and the internal share of the system. With a mine in a block in Southwest China as a case, the fracturing slicing decision was conducted. The divided results showed that there were two gas bearing systems existed and four small seam groups with large difference of the permeability. An optimization of the perforation location was conducted on Ab seam group. A combined seam fracturing was proposed and conducted on No. 4 and No. 5 seams. The packers were applied to seal the top seam and low seam. The application of the method showed the suitability to the multi layer overlay seams.

Key words: coal seam fracturing; multi layer overlay seam; slicing method; gas bearing system in seam

0 引言

煤层气作为一种极有潜力的非常规油气资源, 其勘探开发不仅可以缓解国家能源紧缺问题, 还有助于减少煤矿瓦斯事故, 具有极其重要的社会和经济意义。但是煤层气的开发存在技术难题, 煤层低

孔低渗的特点决定了需要对其进行压裂才能获得工业产能, 而现阶段还在进行先导性开发试验, 未实现工业化规模开采。滇东黔西地区煤层纵向上多薄, 呈现出多层叠置的现象, 即纵向上发育多套含气系统, 呈现出层序地层格架与含气系统相互叠置的现象^[1]。地质上的这种发育特征一方面利于保存煤

收稿日期: 2017-04-23; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2017.09.002

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05044-004-002)

作者简介: 杨兆中(1969—), 男, 四川泸州人, 教授, 博士生导师。通讯作者: 刘云锐, E-mail: 765746862@qq.com

引用格式: 杨兆中, 刘云锐, 张平, 等. 滇东黔西地区多层叠置煤层压裂分层决策方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(9): 7-12.

YANG Zhaozhong, LIU Yunrui, ZHANG Ping, et al. Study on fracturing and slicing decision method of multi layer overlay seam in East Yunnan and West Guizhou[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 7-12.

气资源,另一方面也给合层排采开发带来了难度。多层叠置含气系统压裂排采难点在于解决含气系统间的兼容性和含气系统内部的共享性问题。含气系统间的兼容性指各个含气系统流体能量存在差异,共采时能量的传递和分配难以控制,容易形成流体“倒灌”的现象,限制了产能的最大释放,降低了单井产量^[2-4]。含气系统内部的共享性指系统内部不同储层孔渗条件、力学性质在适应相同增产改造措施时的兼容性。排采实践表明,当渗透性质差异过大的煤层合层排采时,渗透性差的煤层压降较大,容易引起应力敏感^[5-7],裂缝闭合严重,致使煤层气产量主要来自于渗透性好的产层,而渗透性差的产层对产量贡献极小,这样的排采组合不利于充分发掘每个产层的潜能。因此,多层叠置煤层开发格外强调开发层系的划分与组合^[8]。

传统开发层系划分组合方法有3大类,即灰色关联度下的模糊决策机制^[9-10]、模糊神经网络^[11-12]和多元回归分析^[13-14]。模糊决策机制是通过灰色关联度优选分层主控因素,通过划分模糊矩阵来实现对层组的分类。模糊神经网络是通过样本进行大量训练,得出目标与输入参数的隐式关系,从而实现对层组的划分。多元回归是对压裂层组基础参数进行回归分析,得出回归关系式,从而确定待压裂层组的类别。但是,这些分层方法只是找出了分层决策因素和结果的隐含关系,对所有因素采用统一的处理方式,具有笼统性的弱点,无法鲜明有效地解决多层叠置含气煤层系统间的兼容性和系统内的共享性这2大地质问题。对于多层叠置煤层,2大地质问题是压裂分层的首要矛盾。若不解决这2大问题而盲目采用常规储层的分层方法进行分层,则会导致压裂排采工作困难、煤层产能封堵、各层气窜液窜等不利结果。

秦勇等^[15]提出多层叠置煤层的划分要以含气系统共采的兼容性为刚性约束条件,以最大限度释放叠置含气系统产能为目标。这一思想建议包含了地质、工程2大方面条件指标,即以含气系统的地质指标为刚性约束条件,从而解决含气系统间的兼容性和系统内部的共享性问题;以压裂工程施工参数为柔性约束条件,通过最大限度释放产能来优化施工参数,从而实现多层叠置煤层开发层系的划分与组合。笔者承接这一建议并结合工程地质一体化的思想,将压裂分层分为地质、工程2个相互衔接的部分,提出了一套针对多层叠置含气系统的压裂层组

划分与优化工艺方法。该方法以问题为导向,解决了多层叠置含气系统2大地质问题,克服了传统压裂分层方法的局限性,具有目标明确、层次分明、逻辑性强等特点。

1 分层决策方法

1.1 总体思路

层组划分组合优化方法的总体思路(图1)为:通过地质刚性约束条件,对煤层进行第1次和第2次划分,完成地质粗划分。在地质划分的基础上,通过对不同射孔位置煤层裂缝延伸情况进行模拟,得到裂缝延伸参数并以此来表征产能大小。建立以产能为目标的函数,优选最佳射孔的分层组合,完成以最大限度提高产能为导向的第3次划分。在上述划分的基础上,对待压裂施工的层组进行可压性判断。判断该层组是否满足现有封隔工具作业条件,若不满足条件,则将不满足条件的小层剔除,即第4次划分。上述4次划分的分层流程便是笔者提出的在解决了含气系统间兼容性和系统内部共享性问题基础上,满足压裂施工可行性以释放产能为目标的多层叠置含气系统分层决策方法。

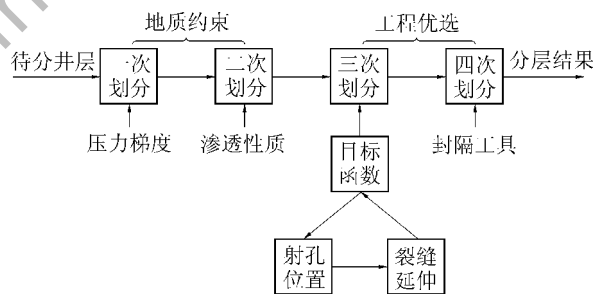


图1 分层决策方法总体思路

Fig. 1 The general idea of the Slicing Decision method

1.2 基于地质参数的分层方法

第1、第2次划分用以解决多层叠置含气系统兼容性问题。以地质条件为刚性约束,通过分析甄别筛选地质参数,结合前人选井选层的判别条件,认为含气系统间的兼容性问题,其实质是不同煤层间流体能量差异的问题,最能合理有效表征煤层流体能量的参数是煤储层的压力梯度;而含气系统内部的共享性问题,其实质是各层之间渗透性差异引起的产能差异问题,最能合理有效表征这一情况的参数是煤层渗透率。对这2个地质参数设置判断分层的临界值,即可达到解决含气系统兼容性问题的目标。临界值的取值范围关系到含气系统兼容性的大小。较宽泛的临界值对应兼容性较大的划分方式,但也可能导致将性

质差异较大的煤层划分到同一层组,也就是说临界值取值不恰当,则分层结果就无实际意义。基于此,调研前人分层决策的条件^[16],认为将压力梯度的临界值设置在0.5 MPa/hm较为合理;渗透率以同一个数量级为判别标准,即同一个小层组内,各层渗透率最大值与最小值之比不超过10。

1.3 基于裂缝延伸的分层方法

第3次划分是该分层决策方法的核心内容,即通过对不同煤层射孔位置组合下裂缝延伸的模拟,获得相应的压裂裂缝参数,用以表征增产改造措施的效果;以增产效果为目标函数,建立模型优化出最佳的射孔位置组合。第3次划分其实是一个不断假设、模拟、优选的过程,而整个流程中最重要也是最难的一部分在于对煤层裂缝延伸的模拟。

煤层裂缝动态延伸的机理一直是一个世界级难题,现今最普遍用于描述煤层裂缝延伸情况的是PKN和CGD模型。对于多层叠置煤层的情况,由于煤层厚度极薄,压裂时裂缝纵向上高度往往穿层,与PKN和CGD模型的基本假设不符,所以它们不能很好地描述多层叠置煤层裂缝延伸的情况。基于此,在文献[17]模型的基础上,对其裂缝宽度方程和扩展判据进行了改进,提出一套适合描述纵向多层叠置煤层压裂裂缝延伸情况的裂缝延伸模型。基本方程包括:

1) 缝宽方程:

$$w = \frac{4(1 - \nu^2)}{\pi E} \sum_{i=1}^N (P_i - \sigma_{i-1/2} - 10^{-6} \rho g l_{i-1/2}) \times$$
$$\left\{ (l_i - z) \operatorname{arcosh} \frac{l^2 - (l_i - s)(z - s)}{l |z - l_i|} + \left[\arcsin \left(\frac{l_i - s}{l} \right) - \arcsin \left(\frac{l_{i-1} - s}{l} \right) \right] \sqrt{l^2 - (z - s)^2} - (l_{i-1} - z) \operatorname{arcosh} \frac{l^2 - (l_{i-1} - s)(z - s)}{l |z - l_{i-1}|} \right\} \quad (1)$$

式中: w 为裂缝宽度,mm; E 为岩石弹性模量,MPa; ν 为岩石泊松比; P_i 为缝内流体压力,MPa; g 为重力加速度, m/s^2 ; l_i 为第 i 点到裂缝下尖端的距离,m; $l_{i-1/2}$ 为第 i 点和第 $i-1$ 点这2点的中点到裂缝下尖端的距离,m; z 为某点到裂缝中心的距离,m; $\sigma_{i-1/2}$ 为第 i 点和第 $i-1$ 点这2点的中点处地层水平最小地应力; ρ 为压裂液密度, kg/m^3 ; s 为裂缝中心偏距,m。

2) 连续性方程:

$$-\frac{\partial q}{\partial x} = \frac{4lc_l}{\sqrt{t - \tau}} + 2l \frac{\partial w}{\partial t} \quad (2)$$

式中: q 为 t 时刻缝长 x 处的压裂液的体积流量, m^3/min ; c_l 为压裂液综合滤失系数, $\text{m}/\text{min}^{\frac{1}{2}}$; τ 为压裂液到达 x 处的时间,min。

3) 降压方程:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -2^{n+1} \left[\frac{(2n+1)q}{2nl} \right]^n \frac{k}{w^{2n+1}} \quad (3)$$

式中: p 为裂缝缝口压力,MPa; n 为压裂液流态指数; k 为压裂液稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$ 。

4) 裂缝扩展判据:

$$\begin{cases} K_{\text{low}} = \frac{0.806E\sqrt{\pi}}{4(1 - \nu^2)\sqrt{2a}} w_1 \\ K_{\text{top}} = \frac{0.806E\sqrt{\pi}}{4(1 - \nu^2)\sqrt{2a}} w_2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: K_{low} 为裂缝下尖端应力强度因子, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$; K_{top} 为裂缝上尖端应力强度因子, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$; w_1 为裂缝下尖端的宽度,mm; w_2 为裂缝上尖端的宽度,mm; a 为距离裂缝的微小距离,m。

对于裂缝长度和高度的延伸,笔者运用位移不连续法^[18-19]的裂缝扩展判据。对于裂缝宽度,考虑到多层叠置煤层纵向上最小水平主应力变化复杂,用单一的一个应力差很难准确描述上下隔层的应力情况,故采用复杂应力条件下考虑重力变化的非对称缝的缝宽方程。

1.4 基于封隔方式的分层方法

在第3次划分结果的基础上,各层组应当满足工程可压性条件,即回答在现有井矿条件下,用什么工具进行封隔的问题。对于多层叠置煤层系统,应重点关注各种封隔工具的适用层间距。不同型号的封隔工具都有其对应的下入条件,对于具体区块和封隔工具应加以调整,文献[20]认为适合煤层的封隔工具及其适用条件见表1。

表1 分层压裂工艺相关参数

Table 1 Parameters of layered hydraulic fracturing technique

分层压裂工艺	井身质量要求	储层间距/m
封隔器	较高	>5.0
限流法	高	>1.0
暂堵球	高	>1.2
填砂	高	>0.9
连续油管	较高	>0.5

2 分层决策方法运用

2.1 基础数据

以西南某区块某井为例,对 650~800 m 井深层

段进行压裂分层决策。依据现场实测资料,对该井的测井曲线、试井曲线进行解释,获得煤层基本参数见表 2。

表 2 煤层基本参数信息
Table 2 Basic information of the coal seam

煤层号	煤层深度/m	煤层压力梯度/(MPa·hm ⁻¹)	煤层渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	煤层弹性模量/GPa	煤层最小水平主应力/MPa	盖层弹性模量/GPa	盖层最小水平主应力/MPa	底层弹性模量/GPa	底层最小水平主应力/MPa
1	668.2~669.6	0.84	0.170	3.1	11.3	14.6	11.9	17.5	12.4
2	682.2~683.5	0.88	0.210	3.9	11.7	17.5	12.4	13.9	12.4
3	692.9~694.0	0.74	0.150	4.4	11.9	13.9	12.4	16.4	12.9
4	717.9~721.4	1.03	0.012	2.8	12.3	16.4	12.9	18.2	13.3
5	727.5~728.1	0.97	0.011	5.9	12.6	18.2	13.3	18.2	13.6
6	749.8~751.7	1.26	0.006	3.0	12.9	18.2	13.6	16.1	14.0
7	776.6~780.0	1.15	0.082	3.4	13.4	16.1	14.0	17.3	14.4

2.2 基于地质参数的分层方法运用

运用多层叠置系统压裂层组分层方法,对上述 7 个层组进行划分。通过第 1 次压力梯度划分,将上述煤层分为 2 个含气系统,即含气系统 A,包含 1—5 号煤层;含气系统 B,包含 6—7 号煤层。通过第 2 次渗透率划分,将含气系统 A 划分为 2 个子层组,即层组 Aa,包含 1—3 号煤层;层组 Ab,包含 4—5 号煤层。将含气系统 B 也划分为 2 个子层组,即层组 Ba,包含 6 号煤层;层组 Bb,包含 7 号煤层。前 2 次地质划分的结果如图 2 所示。

个煤层,无需进行第 3 次划分,直接进行第 4 次工程可压性判断即可。层组 Aa、Ab 表现出的“五夹三”和“三夹二”是多层叠置煤层典型的层组情况,现对层组 Ab 进行进一步的划分,层组 Aa 可参照层组 Ab 的成分方法。

层组 Ab 可能的射孔位置方案有单独射开 4 号煤层、单独射开 5 号煤层、4 号和 5 号煤层共同射开(图 3)。对于多层叠置煤层压裂,工程上最关心裂缝的纵向剖面,希望压裂裂缝高度上有效沟通多个煤层而不失控,裂缝宽度尽量大以保证较大的裂缝导流能力。

通过对 3 种射孔方案的裂缝延伸模拟,以裂缝宽度和高度为目标函数,优化出最佳射孔方案为 4、5 号煤层合层压裂。

2.4 基于封隔方式的分层方法运用

由 4、5 号煤层井段固井质量(图 4)可知,4 号煤层水泥环胶结质量中等,5 号煤层胶结质量良好,两煤层上下砂泥岩段胶结良好,满足常用封隔方式条件。考虑到各层间应力差较小,限流法分层和暂堵球分层不宜使用;煤层滤失较大,常采用大排量加砂压裂,故连续油管分层压裂不宜使用。4、5 号煤层与 3、6 号煤层间隔较大,能满足下封隔器分层和填砂分层的最小储层间隔要求,考虑到该区块压裂历史和封隔工艺技术的成熟度,建议使用封隔器封堵上下层。

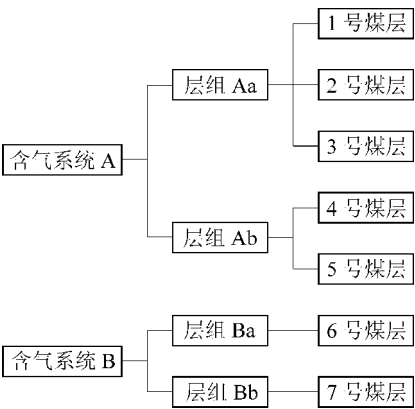


图 2 地质划分结果
Fig. 2 The result of geological division

2.3 基于裂缝延伸的分层方法运用

从地质划分结果可知,层组 Ba、Bb 都只包含 1

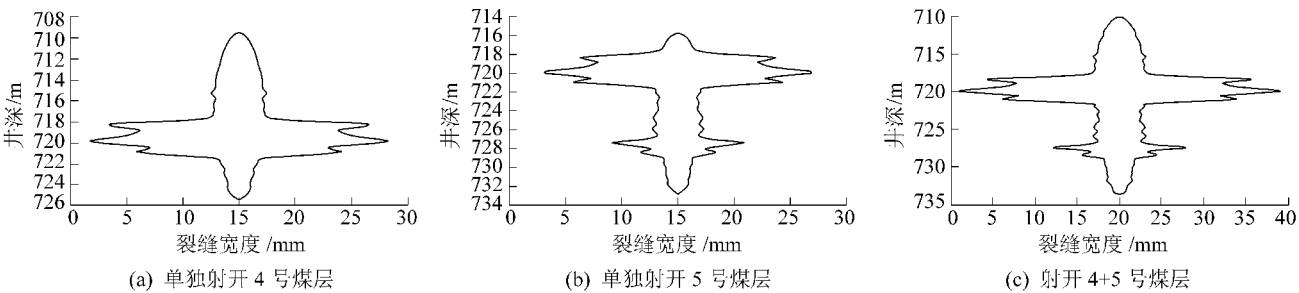


图 3 垂向上煤层裂缝宽度剖面
Fig. 3 The width of the crack in the vertical direction

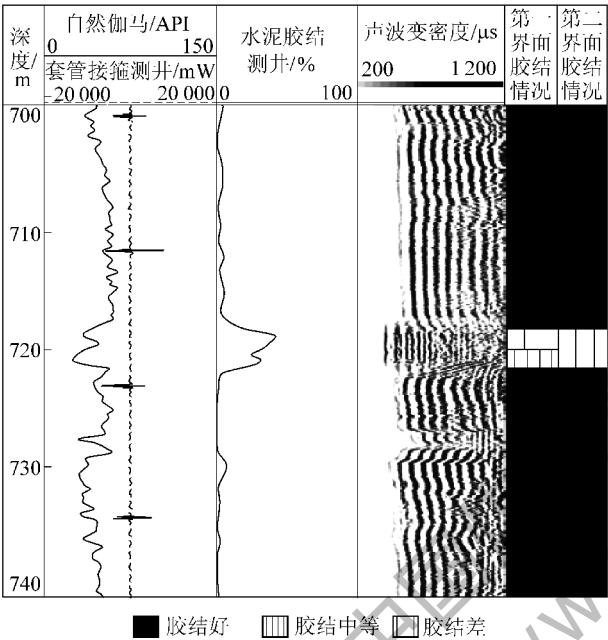


图 4 4、5 号煤层段固井质量
Fig. 4 Cementing quality of No. 4 and No. 5 coal seam

3 结 论

1) 针对多层叠置煤层提出了一种新的压裂层组分层决策方法,该方法以问题为导向,逐级划分从而获得最优压裂分层方案。以西南某区块某井为例,划分出 2 个含气系统、4 个渗透率差异大的小层组,对 Ab 层组进行射孔位置优化,得出最佳射孔方案为 4、5 号煤层合层压裂,建议使用封隔器封堵上下层。

2) 压裂层组的划分要综合考虑地质、工程条件。以地质参数作为刚性约束条件,解决了含气系统间兼容性和系统内部共享性 2 个主要地质问题。通过对不同射孔位置裂缝延伸的模拟来优化射孔方案,判断封隔方式的适用性,得出工程划分的结论,给出分层组合和施工建议。

3) 地质划分仅以煤层压力梯度和渗透率 2 个

参数表征可能不够全面,建议接下来研究以煤层压力、压力梯度、渗透率和含气量 4 个参数综合表征的地质划分方法。

参考文献 (References) :

[1] 秦 勇,熊孟辉,易同生,等.论多层叠置独立含煤层气系统:以贵州织金:纳雍煤田水公河向斜为例[J].地质论评,2008,54(1):65-70.
QIN Yong, XIONG Menghui, YI Tongsheng, et al. On unattached multiple superposed coalbed-methane system: in a case of the Shuigonghe syncline, Zhijin-Nayong coalfield, Guizhou [J]. Geological Review, 2008, 54(1): 65-70.

[2] 熊 涛,孙国忠,池 斌,等.鄂尔多斯盆地东缘桑峨区煤层气分压合采可行性分析[J].中国煤炭地质,2013(12):52-54.
XIONG Tao, SUN Guozhong, CHI Bin, et al. Feasibility study of sepa-rate layer fracturing and multi-layer drainage for CBM in Sange Area, eastern margin of Ordos Basin [J]. Coal Geology of China, 2013, 25(12): 52-54.

[3] 李国彪,李国富.煤层气井单层与合层排采异同点及主控因素[J].煤炭学报,2012,37(8):1354-1358.
LI Guobiao, LI Guofu. Study on the differences and main controlling factors of the coalbed methane wells between single layer and multi-layer drainage [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(8): 1354-1358.

[4] 张 政,秦 勇,傅雪海.沁南煤层气合层排采有利开发地质条件[J].中国矿业大学学报,2014,43(6):1019-1024.
ZHANG Zheng, QIN Yong, FU Xuehai. The favorable developing geological conditions for CBM multi-layer drainage in southern Qinshuibasin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2014, 43(6): 1019-1024.

[5] Aminian K, Ameri S. Predicting production performance of CBM reservoirs [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2009, 1(1): 25-30.

[6] Clarkson, Christopher R. Production-data analysis of single-phase (gas) coalbed-methane wells [J]. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 2007, 10(3): 312-330.

[7] LI Guofu, MENG Zhaoping. Researches on hydro-frac induced reservoir damage to anthracite coal seams of Southern Qinshui Basin [C]//The International Symposium on Safety Science and Tech-

- nology. Jiaozuo: China Coal Society, Chinese occupation safety and Health Association, Henan Polytechnic University, 2007: 2805-2808.
- [8] 于会利, 汪卫国, 荣娜, 等. 胜坨油田不同含水期层间干扰规律[J]. 油气地质与采收率, 2006, 13(4): 71-73.
YU Huili, WANG Weiguo, RONG Na, *et al.* Rule of interlayer interference in various water cut periods of Shengtuo Oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2006, 13(4): 71-73.
- [9] 闵琦, 张法, 周丰. 酸化压裂选井选层的灰色多目标局势决策方法[J]. 石油天然气学报: 江汉石油学院学报, 2005, 27(3): 364-365, 382.
MIN Qi, ZHANG Fa, ZHOU Feng. Application of multi-objective grey-state decision making method to well and layer selection in acid fracturing treatment[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2005, 7(3): 364-365, 382.
- [10] 赵艳. 压裂酸化井层优选方法研究[J]. 内蒙古石油化工, 2012(11): 148-150.
ZHAO Yan. Study on optimization method of fracturing acidizing well[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2012(11): 148-150.
- [11] 刘洪, 赵金洲, 胡永全, 等. 模糊神经网络系统在优选压裂井层中的应用[J]. 钻采工艺, 2002, 25(5): 34-37.
LIU Hong, ZHAO Jinzhou, HU Yongquan, *et al.* Application of the fuzzy neural network system in the selection of wells or layers for fracturing[J]. Drilling & Production Technology, 2002, 25(5): 34-37.
- [12] 吴建发, 赵金洲, 郭建春. 改进的模糊神经网络优选压裂井[J]. 石油工业计算机应用, 2006(1): 19-21.
WU Jianfa, ZHAO Jinzhou, GUO Jianchun. Choosing candidate wells for fracturing with improved fuzzy neural network[J]. Computer Applications of Petroleum, 2006(1): 19-21.
- [13] 曾凡辉, 郭建春, 赵金洲. 多元回归和神经网络在多影响因素下优选压裂候选井层中的应用[J]. 石油工业计算机应用, 2007(4): 6-8.
ZENG Fanhui, GUO Jianchun, ZHAO Jinzhou. Application of multiple regression and neural network in selecting a candidate zone to be fractured under multi-factor effect[J]. Computer Applications of Petroleum, 2007(4): 6-8.
- [14] 李吉雄, 李铁军, 谢寿昌, 等. 基于距离判别的煤层压裂选井选层新方法[J]. 断块油气田, 2015, 22(5): 677-680.
LI Jixiong, LI Tiejun, XIE Shouchang, *et al.* New selection method of coal seam fracturing well and layer based on distance discriminate[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2015, 22(5): 677-680.
- [15] 秦勇, 申建, 沈玉林. 叠置含气系统共采兼容性: 煤系“三气”及深部煤层气开采中的共性地质问题[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 14-23.
QIN Yong, SHEN Jian, SHEN Yulin. Joint mining compatibility of superposed gas-bearing systems: a general geological problem for extraction of three natural gases and deep CBM in coal series[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 14-23.
- [16] 敖显书, 曹丽文, 贾金龙, 等. 黔西松河井田煤层气合层开发层段优选方法研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(2): 68-72.
AO Xianshu, CAO Liwen, JIA Jinglong, *et al.* Study on optimization method of coalbed methane commingled development layer section in Songhe Mine Field, West Guizhou[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(2): 68-72.
- [17] 赵金洲, 彭瑀, 林啸, 等. 考虑复杂应力分布的数值缝宽计算模型及其应用[J]. 石油学报, 2016, 37(7): 914-920.
ZHAO Jinzhou, PENG Yu, LIN Xiao, *et al.* Numerical fracture width model considering complex stress distribution and its application[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(7): 914-920.
- [18] Olson J E. Multi-fracture propagation modeling: Applications to hydraulic fracturing in shales and tight gas sands[C]//paper 08-327 presented at the 42th U.S. Rock Mechanics Symposium (US-RMS), 29 June-2 July, San Francisco, California, USA, 2008.
- [19] WU R, Kresse O, Weng X, *et al.* Modeling of interaction of hydraulic fractures in complex fracture networks[C]. Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 2012.
- [20] 王松, 杨兆中, 李小刚. 分层压裂工艺优选的模糊综合评判方法[J]. 断块油气田, 2009, 16(5): 90-93.
WANG Song, YANG Zhaozhong, LI Xiaogang. Fuzzy comprehensive evaluation method for optimization of separate layer fracturing technology[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2009, 16(5): 90-93.