

煤储层地质建模思路与方法 ——以鄂尔多斯盆地东南缘韩城矿区为例

马平华¹, 邵先杰¹, 霍梦颖¹, 褚庆忠¹, 霍春亮², 梁武斌¹

(1. 燕山大学 石油工程系, 河北 秦皇岛 066004; 2. 中海石油有限公司 天津分公司, 天津 300452)

摘要: 由于煤岩样易碎, 很难通过室内实验获得煤层真实的渗透率; 煤岩弹性模量低, 泊松比高, 对应力十分敏感, 地面条件下实验的渗透率不能反映地下的情况; 常用的测井物性解释方法在煤层渗透率解释中很难应用。这些因素导致煤储层地质建模不能照搬常规砂岩油气藏的方法。依据试井确定渗透率, 并通过渗透率影响因素的分析, 分煤岩类型建立了渗透率与地应力的定量关系。提出了四步建模法: 首先建立煤储层空间格架模型, 然后建立煤岩相(类型)模型和地应力模型, 在三者的约束下, 通过井点试井渗透率和地应力井点计算渗透率的控制, 采用随机模拟技术完成渗透率模型的建立。通过矿场实际数据的检验, 模型与生产状况吻合比较好, 证明该建模思路与方法在实际应用中可行。

关键词: 煤岩类型; 地应力场; 地质建模; 渗透率; 煤储层; 韩城矿区; 鄂尔多斯盆地东南缘

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Concepts and methods for coalbed geology modeling: A case study in the Hancheng mining area, Southeastern margin of Ordos Basin

Ma Pinghua¹, Shao Xianjie¹, Huo Mengying¹, Chu Qingzhong¹, Huo Chunliang², Liang Wubin¹

(1. Department of Petroleum Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China;

2. Tianjing Branch of CNOOC Ltd., Tianjing 300452, China)

Abstract: The way of coalbed geology modeling is quite different from that of modeling conventional sandstone oil/gas reservoirs due to the following factors. (1) It is difficult to obtain the actual permeability of coalbed through laboratory experiment because the coal rock sample is brittle; (2) the permeability derived through laboratory experiments cannot reveal the subsurface conditions, since the coal rock is low in elastic modulus, high in poisson's ratio, and thus it is sensitive to stress; (3) it is difficult to apply the methods of well log petrophysical interpretation to interpret coalbed permeability. Thus in this study, we determine the permeability via well testing data, and establish a quantitative relationship between in-situ stress and permeability according to the types of coalbed, based on the analysis of all critical factors for permeability. In addition, we propose a 4-step modeling, namely, to set up the model of coal reservoir space framework, the coal facies (type) model, and the in-situ stress model. Then, under these 3 constraints, the model of permeability is established with stochastic simulation technique and the controlling points from the permeability obtained from well test and well in-situ calculation. Further, the model fits well with the production data status quo from the actual coal data of bed methane fields, which proves the feasibility of the concepts and methods in practical application.

Key words: coal rock type, in-situ stress field, geology modeling, permeability, coalbed, Hancheng mining area, southeastern margin of Ordos Basin

近20年来,我国煤层气开发经历了矿场试验到规模化开发,获得了突破性进展。根据统计,截止到

2017年底,经过地质与石油工作者的不懈努力,累计探明煤层气地质储量超过了 $30 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 已完钻煤层

收稿日期: 2016-05-19; 修订日期: 2018-03-26。

第一作者简介: 马平华(1983—), 男, 博士、讲师, 油气田开发。E-mail: mapinghua@ysu.edu.cn。

通讯作者简介: 褚庆忠(1974—), 男, 博士、副教授, 油藏描述与油气田开发。E-mail: qzhchu@ysu.edu.cn。

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05038-001); 河北省自然科学基金资助项目(D2016203253)。

气井超过14 000口,年产量达到了 $70.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,取得了巨大成绩。但有相当大的一部分井为低产井,稳产时间短,影响整体开发效益,目前迫切需要提高煤层气井的产能^[1]。

国家依托“973”项目和科技重大专项,开展了大量的基础性研究。针对中国的中高煤阶,在煤储层基本地质特征、微观孔隙结构、煤层气富集、解吸和渗流等基础理论方面取得了很多成果;在钻井、采气和压裂等工艺方面形成了相对完善的矿场技术。但是在煤储层地质建模方面明显滞后于矿场生产,甚至在这方面是一项空白。地质建模是气藏数值模拟和开发动态分析的基础,没有可靠、准确、能真实反映煤储层特征的地质模型根本就得出可信的数值模拟结果,严重影响了开发方案编制和开发措施的实施,从而影响了煤层气井的产量。

煤储层地质建模存在的主要困难是:①煤岩样易碎,很难通过室内实验获得煤层真实的渗透率;②煤储层具有双孔隙介质的特性,储层物性受煤岩组构、割理和微裂隙等因素影响^[2-4],存在高度的非均质性,即使做出个别样品的实验结果,也不能完全代表储层的物性;③煤岩具有弹性模量低、泊松比高的特点,对应力十分敏感,地面条件下测试的渗透率不能反映地下的情况;④煤岩渗透率极低,与孔隙度之间相关性不明显,砂岩储层中常用的测井物性解释方法在煤储层渗透率解释中很难应用。

国外煤储层厚度大^[5]、渗透率高、相对均质,基本上是采用砂岩储层的建模方法。国内的矿场生产实践证明,砂岩储层的建模方法对于我国中高煤阶和超低渗煤储层不适应。因此,迫切需要建立一套完善的、在煤岩组构和地应力约束下,能够反映煤储层特性的地质建模理论与方法,为煤层气的高效开发奠定基础。

1 煤储层地质建模思路

煤储层渗透率是成煤物质在成岩作用下经压实、失水、收缩、有机质演化和破裂等地质过程综合作用的结果,当前地质条件下的地应力对煤岩的渗透率影响很大,因为当地应力高时,煤岩基质颗粒堆积紧密,割理和微裂隙闭合,渗透率往往比较低,反之则高。

在长期的科研生产实践中,我们探讨了煤储层新的地质建模思路和方法(图1)。

1) 利用试井资料确定渗透率。韩城矿区部分井投产前进行了试井,通过试井资料的分析,计算出渗透率,这一结果基本反映了煤层地下的真实渗透率。

2) 依据压裂资料确定地应力。煤层气井(直井)投产前都要实施压裂,利用压裂资料计算地应力的大小。

3) 煤岩类型测井解释。不同类型煤岩的岩石力学参数不同,密度不同,测井响应不同。通过煤岩测井响应关系的研究,建立煤岩识别图板,定性识别出各类煤岩,为煤岩约束渗透率奠定基础。

4) 渗透率与地应力定量关系的建立。煤储层对地应力比较敏感,通过其关系的定量研究,为地应力约束煤岩渗透率提供依据。

5) 煤储层空间几何分布模型建立。在钻井和沉积相约束下采用随机建模技术建立煤层空间几何分布模型。

6) 煤岩相(类型)模型建立。利用测井煤岩类型识别技术和图板,逐井逐层识别,在井点约束下采用示性点过程模拟方法建立煤岩相模型。

7) 地应力模型建立。在构造背景约束下,通过井点的控制,采用随机建模技术建立地应力模型。

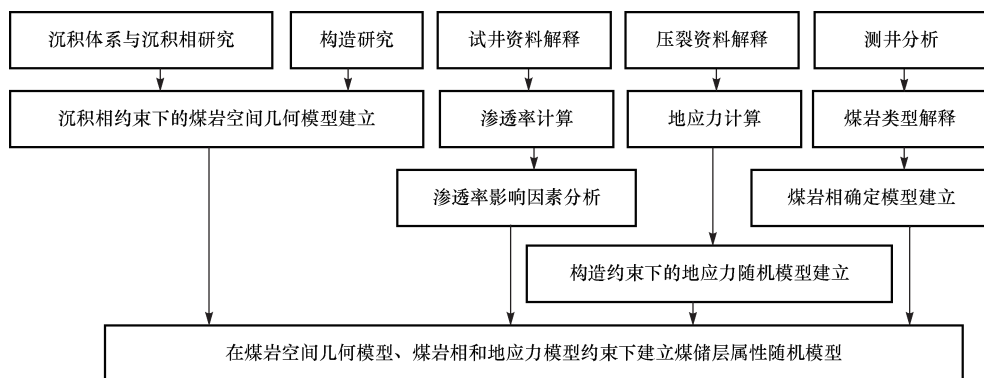


图1 多参数约束下的煤储层随机地质建模技术路线

Fig. 1 Technology roadmap for stochastic geology modeling of coalbed under the constraints of multi-parameters

8) 渗透率模型建立。有试井数据的井点,渗透率以试井数据控制,没有试井但有压裂的井,利用地应力计算的渗透率控制井点渗透率。空间上在沉积相、煤岩相模型和地应力模型的约束下,采用随机建模技术建立煤储层渗透率模型。

2 地质概况

2.1 地质背景

韩城地区位于鄂尔多斯盆地东南缘,南邻渭河断裂,东接汾河地堑,西与鄂尔多斯盆地西缘逆冲构造带相毗邻,面积约为 1 100 km²。由于受韩城和渭河两条边界断层的影响,矿区边缘地带和浅部,构造复杂,断裂发育;中深部地层则较为平缓,仅存在少量宽缓褶皱起伏,总体为单斜构造形态,倾向北西,浅部倾角较大,深部较平缓,一般为 5°~10°。矿区的北部主要受挤压作用的控制,南部受拉伸作用控制。煤层气的主产层位为山西组发育的 3[#]煤层和太原组的 5[#]和 11[#]煤层^[6]。

3[#]、5[#]和 11[#]煤层埋藏深度一般为 400~1 000 m,地层压力为 2.42~2.80 MPa,压力系数为 0.6~0.8。变质程度较高,以瘦煤和贫煤为主。实验样品的渗透率为 $0.01 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。含气量为 9.78~11.23 m³/t,平均资源丰度为 $2.91 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ 。

2.2 沉积环境与沉积相

韩城矿区的 3[#]煤层发育相对较薄,厚度在 0.8~4.4 m;5[#]煤层厚度中等,为 0.5~9.1 m,中部夹一比较稳定的夹矸;11[#]煤层厚度大,并且相对稳定,为 4.0~11.6 m。

依据研究区地质背景资料,通过岩心观察和对测井资料、岩性特征、岩性组合以及沉积构造的分析,认为研究区太原组属于潟湖-潮坪-障壁岛沉积体系,可进一步划分为潟湖亚相、沼泽亚相、潮坪亚相和障壁岛亚相。5[#]和 11[#]煤层属滨海沼泽环境形成的泥炭堆积,环境相对稳定,厚度较大(图 2),总体趋势是东北方向厚度大,西南方向厚度减薄;煤岩显微组分中硫化铁类矿物和碳酸盐类矿物含量偏高,平均值分别为 0.85% 和 5.75%。山西组为河控三角洲沉积体系^[7],包括三角洲平原分流河道、分流间、间湾沼泽和决口扇等微相类型。3[#]煤层属于三角洲平原间湾沼泽环境堆积,由于环境不稳定,煤层厚度较薄,总体上呈不规则的条带状分布;煤岩显微组分中硫化铁类矿物和碳酸盐类矿物含量较其它两层低,平均分别为 0.2% 和 3.2%。

3 地应力分布规律

3.1 地应力计算

地应力的测试方法很多,主要有差应变法、Kaiser 效应法、井眼崩落法和地球物理法等,但对于煤层气来讲,几乎每口井都压裂投产,压裂资料丰富,利用压裂资料计算地应力是最便捷有效的方法。

通过水力压裂施工曲线以及压裂施工过程中的压力变化等参数,可直接读取取出煤岩的破裂压力、裂缝延伸压力和瞬时停泵压力^[8]。而闭合压力可通过压裂施工过程中压力变化数据求取。突然停止向井中泵入液体,此时已经压开的裂缝由于地应力的作用而开始闭合,根据闭合压力可以计算出最小水平主应力^[7]。再根据岩石的抗张强度与破裂压力,可以进一步求出最大水平主应力^[9]。其关系式如下:

$$\sigma_h = p_c + p_w - p_m \quad (1)$$

$$\sigma_H = 3\sigma_h - p_f - p_o + S_t \quad (2)$$

式中: σ_h 为最小水平主应力,MPa; σ_H 为最大水平主应力,MPa; p_w 为井筒液柱压力,MPa; p_c 为裂缝闭合压力,MPa; p_m 为井筒摩阻,MPa; p_f 为煤岩石破裂压力,MPa; p_o 为煤层孔隙压力,MPa; S_t 为煤岩的抗张强度,MPa。

根据上述方法计算出了韩城矿区所有试井层位的地应力值,共计 118 个井层。

3.2 地应力分布

根据计算结果,不同井以及不同层之间的差别很大,最小水平主应力最大的井是 H3-041 井的 3[#]煤层,38.92 MPa;最小值是 H3-037 井 11[#]煤层,7.1 MPa。同一口井不同层位间也存在比较大的差别,比如 H3-032 井,3[#]、5[#]和 11[#]煤层的最小水平主应力分别为 13.67, 16.73 和 28.55 MPa。总体趋势是随着深度增加地应力呈增大的趋势,但具体到某一构造部位的井并不全是这样的规律。

根据绘制的最小水平主应力图分析,3[#]煤层高应力区分布在西南和东北部,东南部为低地应力区,西北部为中应力区(图 3);5[#]煤层的高应力区分布在北部,南部为地应力区;11[#]煤层的高应力区分布在南部,北部为低地应力区。11[#]煤层深度大,断层少,整体特征是最小水平主应力值分布比较均匀,多在 22~32 MPa 范围内,3[#]和 5[#]煤层埋藏浅,断层发育,平面上地应力变化大。

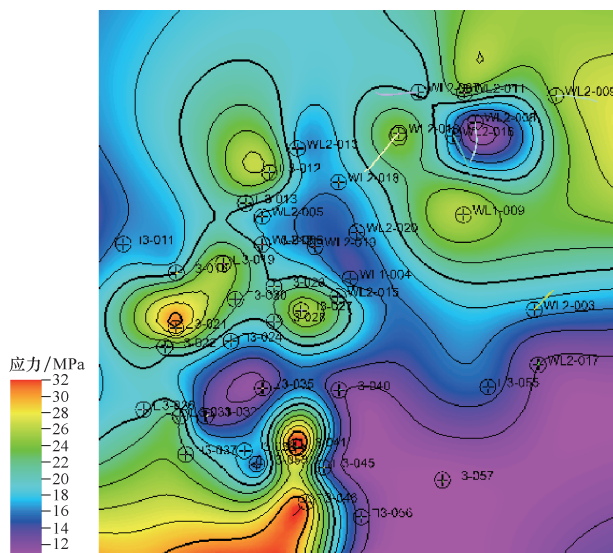


图3 韩城矿区3#煤层最小水平主应力分布

Fig. 3 Distribution of minimum horizontal principal stress in the coalbed 3# of the Hancheng mining area

4 煤储层渗透率约束因素

4.1 试井渗透率计算

通过试井压力恢复曲线数可以得到储层的有效渗透率^[10-12],其分析方法有MDH法、Horner法、Ramey图板法及Boudet图板法等^[10-11]。本次研究采用Horner分析法求取煤储层的渗透率。

$$p_{ws} = p_i - \frac{2.121 \times 10^{-3} q \mu B}{Kh} \lg \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \quad (3)$$

在直角坐标系中, P_{ws} 与 $\lg[(t_p + \Delta t)/\Delta t]$ 呈线性关系,若设其斜率为 m ,则渗透率为:

$$K = \frac{2.121 \times 10^{-3} q \mu B}{mh} \quad (4)$$

式中: p_{ws} 为井底压力, MPa; p_i 为原始地层压力, MPa; t_p 为开井生产流动时间, h; Δt 为开井生产流动时间, h; K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; q 为地面的日产气量, m^3 ; μ 为气体粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; B 为气体体积系数; h 为有效厚度, m; m 为 Horner 直线段的斜率。

根据计算结果,渗透率分布区间为 $0.0013 \times 10^{-3} \sim 0.0710 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.0220 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。各井层间渗透率差别比较大。3#煤层的渗透率为 $0.0026 \times 10^{-3} \sim 0.0440 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.0183 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 5#煤层的渗透率为 $0.0060 \times 10^{-3} \sim 0.0710 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.0232 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 11#煤层的渗透率为 $0.0013 \times 10^{-3} \sim 0.0517 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 平均为 $0.0128 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 总体情况是 5#煤层的渗透率稍高, 3#煤层中等, 11#煤层最小。

4.2 渗透率影响因素

煤储层渗透率的影响因素有很多,比如煤岩变质程度、煤层厚度、煤体结构、煤岩类型、割理、微裂隙以及地应力等因素。其中,最直观、影响最明显的因素是煤岩类型、割理(包括微裂隙)以及地应力。

4.2.1 煤岩类型对渗透率的影响

光亮煤和半亮煤脆度大,机械强度小,易破碎,内生裂隙发育,灰分含量低,密度小,含气量高,渗透率相对高。半暗煤光泽较弱,较坚硬,密度较大,内生裂隙欠发育,灰分含量较高,渗透率较低。暗淡煤光泽暗淡,质地坚硬,密度大,内生裂隙不发育,矿物质含量高,灰分含量高,渗透率低。

根据实际资料统计^[13],不同的煤岩类型,割理发育程度存在很大差别(图4),从光亮煤到暗淡煤,割理密度逐渐降低,光亮煤中割理密度比暗淡煤割理密度高出1倍以上,渗透率高出8倍以上。由此可见,煤岩类型对割理的分布和渗透率大小的影响是至关重要的因素。

4.2.2 割理(微裂隙)对渗透率的影响

煤岩虽然属于双孔隙介质结构,但基质孔隙属于纳米级孔隙,对渗透率贡献很小,几乎可以忽略,在生产过程中,对渗流起贡献作用的主要是割理和微裂隙^[11]。

根据实验数据统计^[13](图5),渗透率与割理(微裂隙)具有正相关关系:

$$K = 0.1614 \ln M - 0.3054, \quad R = 0.8652 \quad (5)$$

式中: K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; M 为割理(微裂隙)密度 $\times$ 开启率, 条/(5 cm)。

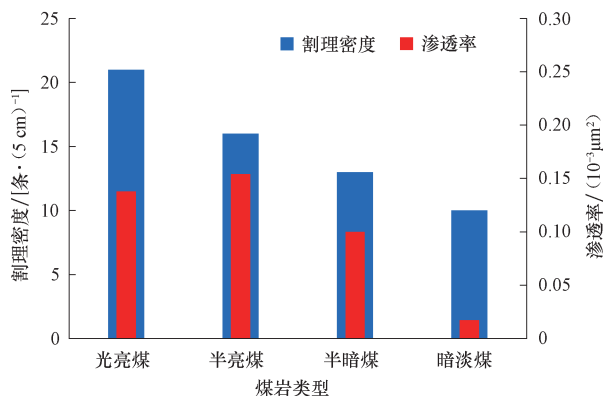


图4 韩城矿区不同煤岩类型的微裂隙和渗透率

Fig. 4 Various microcracks of different coal-rocks and their permeability in the Hancheng mining area

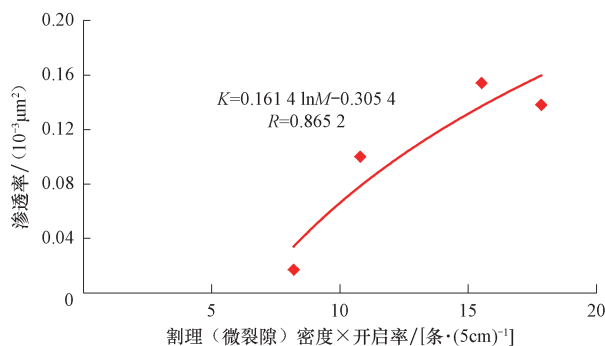


图5 韩城矿区渗透率与割理发育程度的关系

Fig. 5 Relationship between permeability and cleat frequency of occurrence in the Hancheng mining area

4.2.3 地应力对渗透率的影响

因为煤岩对应力比较敏感,煤储层渗透性与地应力关系密切,一般情况下,地应力小的地区,煤储层渗透率高,煤层气井产气量也高;反之,煤储层渗透率低。但煤岩类型不同,岩石力学参数不同,对地应力的敏感程度不同,因此,研究过程中分煤岩类型统计渗透率与地应力的关系相关程度会提高(图6),四种煤岩类型

的渗透率都随最小水平主应力值的增大呈指数下降的趋势,且相关性较好。

光亮煤渗透率与最小主应力关系:

$$K = 0.1007e^{-0.0937\sigma_h}, \quad R = 0.8464 \quad (6)$$

半亮煤渗透率与最小主应力关系:

$$K = 0.1018e^{-0.073\sigma_h}, \quad R = 0.8327 \quad (7)$$

半暗煤渗透率与最小主应力关系:

$$K = 0.1089e^{-0.1483\sigma_h}, \quad R = 0.8328 \quad (8)$$

暗淡煤渗透率与最小主应力关系:

$$K = 0.0591e^{-0.125\sigma_h}, \quad R = 0.8661 \quad (9)$$

5 多因素约束下的煤储层地质建模

由于煤层渗透率参数的获得一直比较困难,因此需要从多个方面研究确定。有试井的井点其渗透率利用试井渗透率控制,没有试井但有压裂资料的井点根据试井计算的地应力与渗透率关系模型,在煤岩类型约束下确定井点的渗透率,其它区域的渗透率在煤岩相和地应力模型的约束下采用序贯高斯法确定。总结为四步建模法:首先建立煤储层空间格架模型,然后在

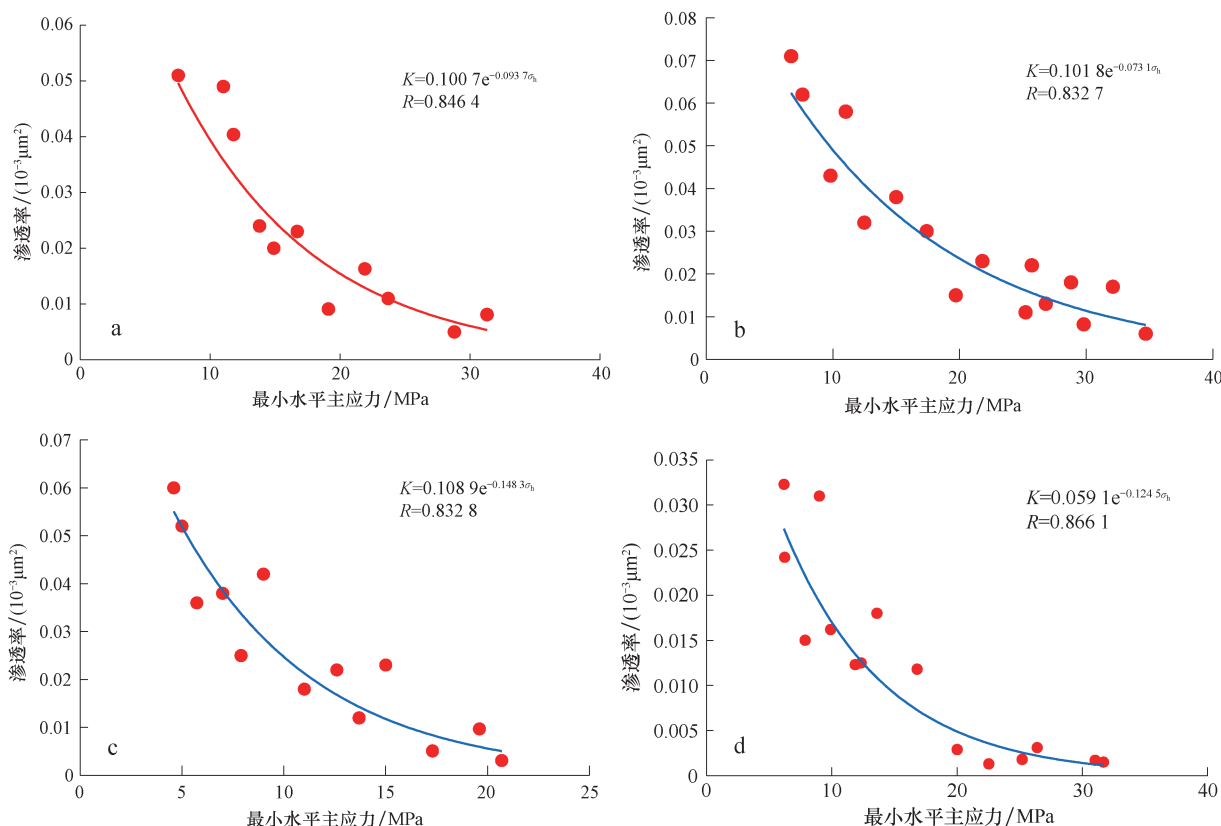


图6 韩城矿区煤渗透率与最小水平主应力关系

Fig. 6 Relationship between permeability and minimum horizontal principal stress in the Hancheng mining area

- a. 光亮煤渗透率与最小水平主应力关系; b. 半亮煤渗透率与最小水平主应力的关系; c. 半暗煤渗透率与最小水平主应力的关系; d. 暗淡煤渗透率与最小水平主应力的关系

格架模型上分别建立煤岩相(类型)模型和地应力模型,最后在三者的约束下完成渗透率模型。

5.1 煤储层宏观空间分布模型建立

根据沉积相演化规律和煤厚度变化趋势分析,煤层分布明显具有分带性。 $3^{\#}$ 煤层大致上呈北东向条带状分布,受分流河道的方向控制,通过厚度变差函数的分析,优势方向确定为 50° ,变程设定为260 m,次方向变程设定为120 m。 $5^{\#}$ 和 $11^{\#}$ 煤层厚带基本上都是分布在东北部,即向陆方向厚度增大,向海方向厚度减薄,等厚线基本上是平行岸线。把优势方向确定为 150° (即平行于岸线方向),变程设定为280 m,次方向的变程确定为100 m。煤层厚度虽然在空间上变化比较大,但以渐变为主,横向上具有连续性和过渡性,因此采用序贯高斯模拟法,依据井点数据,在沉积相背景的约束下,通过变程控制完成空间分布模型。

5.2 煤岩相(类型)模型建立

前面分析可以看出,煤岩类型不同,其化学组分、显微组分不同,基质颗粒的大小不同,岩石力学性质也不同,对应力敏感程度不同,直接影响到渗透率。煤岩类型是渗透率的重要约束因素,所以识别出不同的煤岩类型,建立煤岩类型空间分布模型是建立渗透率模型的基础。

5.2.1 煤岩类型的测井解释

根据对韩城煤层气井岩电关系的研究,从光亮煤到暗淡煤,补偿密度测井值逐渐增大,补偿声波时差值逐渐减小,扩径率逐渐降低^[13]。光亮煤的补偿密度测井一般小于 1.50 g/cm^3 ,补偿声波时差测井大于 $425\text{ }\mu\text{s/m}$ 井径扩径率大于50%;半亮煤的密度测井为 $1.48\sim 1.60\text{ g/cm}^3$,补偿声波时差测井是 $400\sim 430\text{ }\mu\text{s/m}$,井径扩径率20%~50%;半暗煤的密度测井为 $1.58\sim 1.67\text{ g/cm}^3$,补偿声波时差测井是 $390\sim 420\text{ }\mu\text{s/m}$,井径扩径率是10%~20%;暗淡煤的补偿密度测井为 $1.65\sim 1.75\text{ g/cm}^3$,补偿声波时差测井为 $365\sim 400\text{ }\mu\text{s/m}$,井径扩径率小于10%;夹矸的补偿密度测井大于 1.75 g/cm^3 ,补偿声波时差测井小于 $370\text{ }\mu\text{s/m}$,几乎不扩径。

利用煤岩测井响应关系建立煤岩测井解释图板(图7),依据图板完成全区各井层煤岩类型的解释。

5.2.2 煤岩相建模

煤岩相的分布存在随机性,各类型之间在纵向和

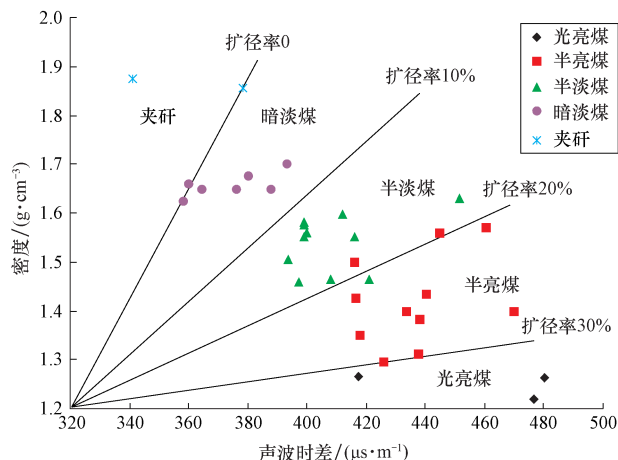


图7 韩城矿区煤岩类型解释图板

Fig. 7 Interpretation chart of coal lithotypes in the Hancheng mining area

横向上不存在过度性,界限通常是突变的,因此选择了示性点过程的模拟方法。示性点过程是基于目标的随机模拟方法^[14],根据点过程的概率产生模拟对象在空间上的分布,然后将模拟对象的属性标注于网格节点上。从地质统计学的角度看,示性点过程主要是模拟对象及其属性在三维空间上的联合分布^[15-18]。

在煤储层空间几何框架模型上,井点由测井煤岩相图板识别结果约束,井间根据点过程的概率产生模拟对象在空间的分布。由于不同层间煤岩相的变化比较大,因此不同层给出不同的煤岩相的几何约束参数。 $3^{\#}$ 煤层,厚度为 $0.8\sim 4.4\text{ m}$,无光亮煤分布;半亮煤呈不规则的条带状分布,面积为 $0.566\ 3\sim 3.664\ 9\text{ km}^2$,长轴方向是 $30^{\circ}\sim 90^{\circ}$,长度为 $651.3\sim 523\ 2.1\text{ m}$,短轴方向是 $0^{\circ}\sim 315^{\circ}$,宽度为 $268.6\sim 810.1\text{ m}$;半暗煤平面上连片分布,面积为 $2.243\ 2\sim 7.534\ 1\text{ km}^2$,长轴方向是 $10^{\circ}\sim 45^{\circ}$,长度为 $4\ 182.3\sim 7\ 395.6\text{ m}$,短轴方向是 $100^{\circ}\sim 135^{\circ}$,宽度为 $1\ 000\sim 1\ 900\text{ m}$;暗淡煤平面上呈不规则圆形分布,半径为 $149.9\sim 495.1\text{ m}$,面积为 $0.138\ 0\sim 0.647\ 5\text{ km}^2$ 。 $5^{\#}$ 煤层,厚度是 $0.5\sim 9.1\text{ m}$,光亮煤平面上呈不规则的椭圆状分布,面积是 $0.236\ 5\sim 0.914\ 3\text{ km}^2$,长轴方向为 45° 左右,长度是 $728.3\sim 1\ 610.6\text{ m}$,短轴方向为 315° ,宽度为 $378.7\sim 756.0\text{ m}$;半亮平面上连片分布,面积是 $1.022\ 4\sim 9.328\ 4\text{ km}^2$,长轴方向为 $25^{\circ}\sim 50^{\circ}$,长度是 $4\ 235.7\sim 7\ 253.4\text{ m}$,短轴方向为 300° ,宽度是 $411.8\sim 806.0\text{ m}$;半暗煤平面上呈不规则的条带状、圆状分布,面积为 $0.133\ 6\sim 2.375\ 6\text{ km}^2$,长轴方向为 40° ,长度为 $488.3\sim 4\ 009.0\text{ m}$,短轴方向为 310° ,宽度为 $400.3\sim 668.9\text{ m}$;暗淡煤平面上呈不规则的圆状分布,半径为 $325.0\sim 510.0\text{ m}$ 。 $11^{\#}$ 煤层,煤厚度为 $4.0\sim 11.6\text{ m}$,无光亮

煤分布;半亮平面上呈条带状和椭圆状分布,面积为 $0.415\ 1\sim 2.566\ 0\ \text{km}^2$,长轴方向是 90° 左右,长度为 $792.3\sim 2\ 406.4\ \text{m}$,短轴方向 0° 左右,宽度 $100.4\sim 1\ 174.9\ \text{m}$;半暗煤呈不规则的片状分布,面积 $1.024\ 5\sim 2.338\ 0\ \text{km}^2$,无方向性;暗淡煤呈条带状分布,面积为 $0.231\ 0\sim 2.698\ 2\ \text{km}^2$,长轴方向为 $36^\circ\sim 130^\circ$,长度为 $408.3\sim 5\ 043.6\ \text{m}$,短轴方向为 $40^\circ\sim 306^\circ$,宽度为 $590.4\sim 922.9\ \text{m}$ 。

最终完成了3个主力煤层的煤岩相空间模型(图8是其中的3[#]煤岩模型)。

5.3 地应力模型建立

地应力受区域构造背景和局部构造控制,在空间上一般具有连续性和过渡关系。根据井点数据的分析,确定不同方向的变差函数,优势方向是 0° ,变程确定为 $260\ \text{m}$,次方向变程为 $150\ \text{m}$ 。在模拟方法上,选用地质统计学中适用于连续变量模拟的序贯高斯模拟算法,采用井点数据约束,变程控制,井间插值的模拟过程,确保模拟的结果与区域背景一致,并能体现局部特征,同时要与手工分析的地应力趋势一致。

5.4 煤储层属性模型的随机建立

根据相控建模原则,在地应力模型约束下,确定不同煤岩相的渗透率变差函数,采用协同模拟方法建立各模拟单元中每个煤岩相的渗透率模型。

具体步骤为:①有试井的井点渗透率由试井渗透率控制;②无试井但有压裂的井点,利用煤岩约束下

的最小水平主应力与渗透率关系式,由计算出的渗透率数值约束;③以井点渗透率数据为依据,煤岩相模型和地应力模型为约束条件,结合煤岩割理和裂隙发育的优势方向,通过变差函数分析,采用序贯高斯法模拟渗透率属性三维模型,根据长宽比以及井距,采用球形函数作为变差函数。3[#]煤层,主方向为 115° ,变程为 $240\ \text{m}$,次方向变程为 $120\ \text{m}$,垂向变程 $1\ \text{m}$;5[#]煤层,主方向为 120° ,变程为 $260\ \text{m}$,次方向变程为 $130\ \text{m}$,垂向变程 $1\ \text{m}$;11[#]煤层,主方向为 130° ,变程为 $275\ \text{m}$,次方向变程为 $135\ \text{m}$,垂向变程 $1\ \text{m}$ 。以此完成了三个煤层的地质模型(图9是其中的3[#]煤层渗透率模型)。

5.5 模型检验与评价

采用矿场实际生产数据对模型进行可靠性验证,模型与井的生产现状基本吻合,高渗透率区多为中高产井,低渗透率区以中低产井为主。按照厚度对韩城矿区内各井各煤层的渗透率数值进行加权平均计算(因为区内多为合采井),与稳产期的平均日产气量进行相关性分析,结果显示二者具有比较好的正相关关系(图10)。

模型中高渗透率区域与地应力的分布趋势也基本吻合,同时也受煤岩类型控制。如图9是3[#]煤层的渗透率模型,东南方向为高渗透率分布区域,与低地应力区基本一致(图3)。南部也出现了一个相对高的渗透率分布区,主要原因是该区以半亮煤为主,使得物性比较好。

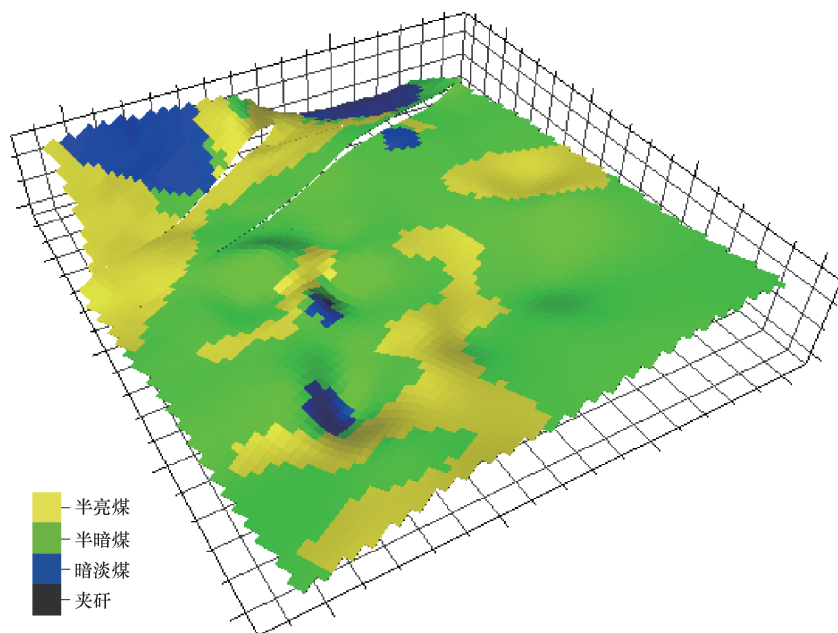


图8 韩城矿区3[#]煤层的煤岩相

Fig. 8 Coal facies distribution of the coalbed 3[#] in the Hancheng mining area

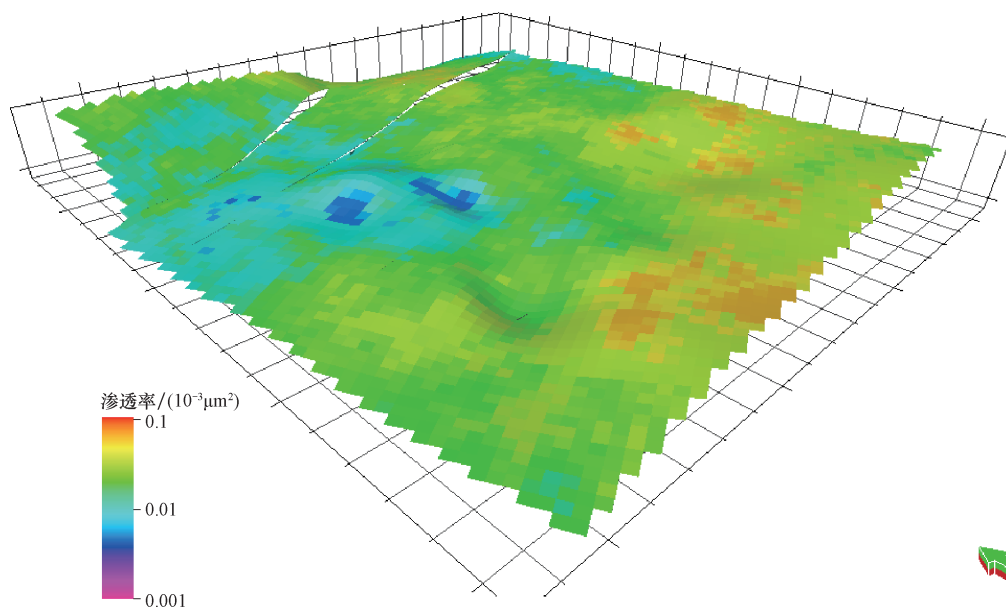


图9 韩城矿区3#煤层渗透率模拟空间展布

Fig. 9 Simulated permeability distribution of the coalbed 3# in the Hancheng mining area

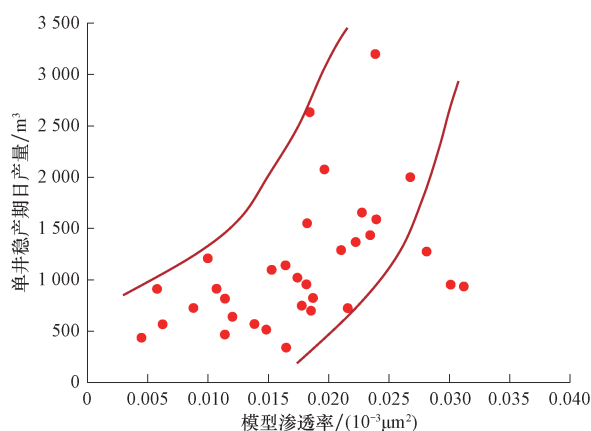


图10 韩城矿区加权渗透率与稳产期平均日产气量关系

Fig. 10 Relationship between weighted permeability and average daily gas production in stable stages in the Hancheng mining area

6 结论

1) 煤岩类型不同,其岩石力学特征不同,割理发育程度不同,渗透率不同。光亮煤和半亮煤密度小,脆度大,机械强度小,易破碎,内生裂隙发育,渗透率相对高。半暗煤较坚硬,密度较大,内生裂隙欠发育,渗透率较低。暗淡煤质地坚硬,密度大,矿物质含量高,内生裂隙不发育,渗透率低。煤岩类型是渗透率的重要约束条件。

2) 根据试井计算出的煤储层渗透率和压裂资料确定的地应力资料分析,在分煤岩类型条件下,渗透率受最小水平主应力约束明显,并且具有比较好的相关性。

3) 在煤储层空间格架模型、煤岩相(类型)模型和地应力模型约束下完成的渗透率模型比较好地刻画了煤储层的属性特征。模型与生产情况吻合比较好,该建模方法的理论依据充分,实际应用中可操作性强。

致谢:国家煤层气工程中心和中国地质大学(北京)能源与环境教研室提供了大部分矿区资料,在此表示感谢!衷心感谢审稿专家提出的宝贵修改意见!

参 考 文 献

- [1] 邵先杰,董新秀,汤达祯,等.韩城矿区煤层气中低产井治理技术与方法[J].天然气地球科学,2014,25(3):435-443.
Shao Xianjie, Dong Xinxiu, Tang Dazhen, et al. Treatment technology and method of low-to-moderate production coalbed methane wells in Hancheng mining area[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(3): 435-443.
- [2] Chen Yue, Tang Dazhen, Xu Hao, et al. Pore and fracture characteristics of different rank coals in the eastern margin of the Ordos Basin, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2015, 26:1264-1277.
- [3] 马东民,张遂安,蒯亚兵.煤的等温吸附—解吸实验及其精确拟合[J].煤炭学报,2011,36(3):477-480.
Ma Dongmin, Zhang Suian, Lin Yabing. Isothermal adsorption and desorption experiment of coal and experimental results accuracy fitting

- [J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 477–480.
- [4] 栾伟娜, 林玉祥, 吴玉琛. 沁水盆地煤岩顶板致密砂岩气充注过程及运移机理研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2015, 34(3): 38–44. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.20150619.010.
- Luan Weina, Lin yuxiang, Wu Yuchen. Filling process and migration mechanism of tight sandstone gas on the coal rock roof in qinshui basin[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 34(3): 38–44. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.20150619.010.
- [5] 龙胜祥, 李辛子, 叶丽琴, 等. 国内外煤层气地质对比及其启示[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(5): 696–703.
- Long Shengxiang, Li Xinzi, Ye Liqin, et al. Comparison and enlightenment of coalbed methane geology at home and abroad[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 696–703.
- [6] 张玉平. 韩城矿区煤层气资源评价与开发分析[J]. 煤炭技术, 2007, 26(4): 100–102.
- Zhang Yuping. Evaluation and exploration analysis of coal seam gas in Hancheng Mining Area[J]. Coal Technology, 2007, 26(4): 100–102.
- [7] 郝蜀民, 李良, 张威, 等. 鄂尔多斯盆地北缘石炭系—二叠系大型气田形成条件[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 149–154.
- Hao Shumin, Li Liang, Zhang Wei, et al. Forming conditions of large-scale gas fields in Permo-Carboniferous in the northern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 149–154.
- [8] 李勇, 汤达祯, 许浩, 等. 鄂尔多斯盆地柳林地区煤储层地应力场特征及其对裂隙的控制作用[J]. 煤炭学报, 2014, 39(1): 164–168.
- Li Yong, Tang Dazhen, Xu Hao, et al. Characteristic of in-situ stress field in Liulin area, Ordos Basin and its control on coal fractures[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1): 164–168.
- [9] 赵庆. 应用压裂资料计算地应力的一种方法[J]. 河南石油, 2005, 19(1): 43–45.
- Zhao Qing. A computing method to geostress by fracturing data[J]. Henan Oil, 2005, 19(1): 43–45.
- [10] 张枫, 王振升, 马立军, 等. 一种检验试井解释有效渗透率合理性的方法[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(3): 367–370.
- Zhang Feng, Wang Zhensheng, Ma Lijun, et al. A method of testing reasonability of effective permeability by well test Interpretation[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(3): 367–370.
- [11] 安小平, 李相方, 程时清, 等. 不同方法获取渗透率的对比分析[J]. 油气井测试, 2005, 14(5): 14–17.
- An Xiaoping, Li Xiangfang, Cheng Shiqing, et al. Comparative analysis for permeability acquired from different methods[J]. Well Testing, 2005, 14(5): 14–17.
- [12] 刘峻杉. 煤储层渗透率影响因素探讨[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2014, 31(2): 100–104.
- Liu Junbin. The influencing factors of coal reservoir permeability[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2014, 31(2): 100–104.
- [13] 汤达祯, 王生维, 等. 煤储层物性控制机理及有利储层预测方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- Tang Dazhen, Wang Shengwei, et al. Control mechanism of coal properties and prediction technique of favorable reservoir[M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [14] 邵先杰, 董新秀, 汤达祯, 等. 韩城矿区煤岩类型测井解释技术及产能预测方法[J]. 测井技术, 2013, 37(6): 671–675.
- Shao Xianjie, Dong Xinxiu, Tang Dazhen, et al. Coal type definition and productivity prediction of Hancheng mining area based on logging data[J]. Well Logging Technology, 2013, 37(6): 671–675.
- [15] 王家华, 张团峰. 油气储层随机地质建模[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
- Wang Jiahua, Zhang Tuanfeng. Stochastic reservoir modelling[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [16] 霍春亮, 古莉, 赵春明, 等. 基于地震、测井和地质综合一体化的储层精细建模[J]. 石油学报, 2007, 28(6): 66–71.
- Huo Chunliang, Gu Li, Zhao Chunming, et al. Integrated reservoir geological modeling based on seismic, log and geological data[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6): 66–71.
- [17] 刘占良, 朱新磊, 杜支文, 等. 苏里格气田 ZT1 区块储层地质建模[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2015, 34(1): 1–8. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2015.01.001.
- Liu Zhanliang, Zhu Xinlei, Du zhiwen, et al. Reservoir geological modeling of ZT1 block in sulige gas field[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science). 2015, 34(1): 1–8. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2015.01.001.
- [18] 李百川, 周巨标, 丁玉盛, 等. 不同覆压条件下储层物性变化特征及水驱油实验研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2016, 35(2): 22–28. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2016.02.014.
- Li Baichuan, Zhou Jubiao, Ding Yusheng, et al. Experimental study of reservoir physical property change and water flooding under different overburden pressures[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2016, 35(2): 22–28. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2016.02.014.

(编辑 董立)