

一种煤层气采收率分析新方法

朱苏阳,李传亮,杜志敏,彭小龙,王超文

(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 610599)

摘要:目前煤层气采收率计算方法较为简单,对采收率影响因素的认识并不系统。为此,提出了一种煤层气采收率分析新方法,并对其进行了验证,该方法可以反映煤层气不同生产阶段采收率的影响因素。煤层气采收率主要受压降波及效率和解吸效率的影响。压降波及效率受井网、井型及压裂等工程因素控制;解吸效率受到气体吸附特征与废弃压力等因素影响,每降低0.1 MPa的废弃压力,可以提高采收率为4.43%。开发初期煤层气的采出程度取决于压降波及效率,提高压降波及效率可以提高煤层气的采气速度;而开发后期,煤层气的采出程度主要由解吸效率控制。提高煤层气压降波及效率的有效方法是采用与煤层地质特征参数相匹配的井网,使井网有效控制煤层,形成体积解吸;负压采气可以进一步降低煤层气藏的废弃压力,从而提高煤层气解吸效率。

关键词:煤层气 采收率 压降波及效率 解吸效率 自由气滞留率

中图分类号:TE313.7

文献标识码:A

文章编号:1009-9603(2016)06-0099-06

A new analysis method of recovery of coalbed methane

Zhu Suyang, Li Chuanliang, Du Zhimin, Peng Xiaolong, Wang Chaowen

(State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu City, Sichuan Province, 610599, China)

Abstract: The current calculation methods of recovery of CBM (coalbed methane) are simple, which ignores the influence factors of recovery systematically. Therefore, a new analysis method of the recovery of CBM was put forward and verified, which can reflect major influence factors during each production period. The recovery of CBM is mainly controlled by sweep efficiency of reservoir pressure drop and desorption efficiency. The sweep efficiency of pressure drop depends on well pattern, well types, fracturing and other engineering factors. Desorption efficiency is determined by gas sorption parameters and abandoned pressure. Reduction of 0.1 MPa of abandoned pressure can lead to enhancement of recovery by 4.43%. During the early period of CBM production, the sweep efficiency of pressure drop mainly contributes to the CBM recovery degree and its increasing will result in a faster production speed of coalbed methane. During the later production period, the recovery degree is controlled by desorption efficiency. The efficient way to improve the sweep efficiency of pressure drop is to adopt the optimized well pattern which can match the coalbed geological parameters. And then the well pattern can control the coalbed effectively and volumetric desorption may be formed. Negative pressure production method can reduce the abandoned pressure of coalbed reservoir to improve the desorption efficiency of the coalbed methane.

Key words: coalbed methane; recovery; sweep efficiency of pressure drop; desorption efficiency; detained ratio of free gas

目前煤层气采收率的计算方法有类比法、等温吸附曲线法、解吸法、产量递减法、物质平衡法以及气藏数值模拟法等^[1-5]。类比法是一种通过与相似区块类比,从而估算煤层气采收率的预测方法,理

收稿日期:2016-07-20。

作者简介:朱苏阳(1989—),男,江苏如皋人,在读博士研究生,从事油藏工程和渗流力学研究。联系电话:15828512977, E-mail:zhusuyang1989@aliyun.com。

基金项目:国家自然科学基金项目“基于非结构六面体网格模型和并行计算的裂缝性油藏数值模拟研究”(51474179),国家科技重大专项“山西沁水盆地南部煤层气直井开发示范工程”(2011ZX05060-004)。

论依据不强^[6]。等温吸附曲线法所需的数据较少,考虑了气体吸附特征对采收率的影响,认为废弃压力下解吸出的气体都可被采出^[7];解吸法是一种通过计算解吸气与损失气之和占煤样含气量比例而预测采收率的方法^[8];这2种方法均忽略了工程因素对采收率计算的影响。产量递减法^[9]、物质平衡法^[10-12]以及数值模拟法^[13-15]均为采收率的动态计算方法,适用于勘探程度较高的研究区,对于参数获取较少的研究区难以保证其预测的准确性,同时动态方法难以直接反映工程因素对煤层气采收率计算的影响。除数值模拟法外,目前的采收率预测方法都忽略了工程因素对采收率的影响,而直接计算煤层气的最终采收率,不利于系统分析影响采收率的因素。因此,笔者提出一种可以兼顾工程因素及气体吸附特征的煤层气采收率分析新方法,对其进行了验证,并对煤层气采收率的影响因素进行了分析。

1 采收率计算新方法

与常规气藏不同,煤层气的初始状态下并不存在自由气,生产过程存在临界解吸现象。煤层气井的产量来自于煤层压降波及体积内的解吸气。因此,定义煤层的压降波及效率为发生解吸的煤层(即压降波及的煤层)占煤层总体积的比例。其物理意义为井网对煤层的控制程度,是表征压降在煤层中波及范围的物理量,其计算公式为

$$E_v = \frac{V_d}{V_c} \quad (1)$$

式中: E_v 为煤层的压降波及效率; V_d 为发生解吸的煤层体积, m^3 ; V_c 为煤层的体积, m^3 。

定义解吸体积内(压降波及体积内)的解吸效率为发生解吸煤层的解吸量占原始压力下煤层气吸附量的比例。其物理意义为发生解吸的煤层中煤层气吸附平衡的移动程度,是表征气体吸附特性对采收率影响的物理量,其计算公式为

$$E_d = \frac{V_c(V_{p_i} - V_p)}{V_c V_{p_i}} = \frac{\int \left[V_{p_i} - \frac{V_m b p}{(1 + b p)} \right] dV_c}{V_c V_{p_i}} \quad (2)$$

式中: E_d 为压降波及体积内的解吸效率; V_{p_i} 为煤层的初始含气量, m^3/m^3 ; V_p 为煤层气吸附量, m^3/m^3 ; V_m 为兰氏体积, m^3/m^3 ; b 为气体吸附系数, $\text{MPa}^{-1} \cdot \text{m}^3/\text{m}^3$; p 为气体压力, MPa ; dV_c 为煤层体积微元, m^3 。

定义煤层的自由气滞留率为煤层中虽解吸但不能被采出的自由气量占原始压力下煤层含气量的比例。其物理意义为煤层对解吸出的自由气的滞留能力,是表征虽解吸但不能采出的自由气体积的物理量,其计算公式为

$$E_{np} = \frac{\bar{S}_g \phi}{B_g V_{p_i}} \quad (3)$$

式中: E_{np} 为自由气滞留率; \bar{S}_g 为平均含气饱和度; ϕ 为煤层的孔隙度; B_g 为煤层气体积系数, m^3/m^3 。

煤层气采收率受煤层的压降波及效率、解吸效率以及自由气滞留效率的共同控制,其计算公式为

$$E_R = E_v E_d - E_{np} \quad (4)$$

式中: E_R 为煤层气采收率。

开采一定时间后,整个煤层开始解吸,压降波及效率为1,煤层气采收率在数值上等于煤层气的解吸效率与自由气滞留率的差值。由于考虑了煤层中滞留的气量,新方法计算得到的采收率小于等温吸附曲线法得到的采收率,废弃时煤层气采收率为

$$E_R = \left[1 - \frac{V_m b p_{abn}}{V_{p_{abn}} (1 + b p_{abn})} \right] - \frac{\phi \bar{S}_g}{B_g V_{p_i}} \Big|_{p_{abn}} \quad (5)$$

式中: p_{abn} 为气藏废弃压力, MPa ; $V_{p_{abn}}$ 为废弃压力下的气体吸附量, m^3/m^3 。

2 新方法验证

为验证新方法,以沁水盆地柿庄南煤层气区块某井组地质资料为依据,建立均质、各向同性煤层的地质模型,煤层的裂缝孔隙度为0.05,渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,煤层平面尺寸为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 、厚度为 10 m ,煤层原始压力为 4 MPa ,初始含气量为 $20 \text{ m}^3/\text{m}^3$,兰氏体积为 $35 \text{ m}^3/\text{m}^3$,兰氏压力为 1.85 MPa ,井距为 $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ 。设定煤层气藏的废弃压力为 0.7 MPa ,模拟4口井生产30 a的产气动态。

生产初期,产气源于各井独立的解吸体积(图1a);生产一定时间(3.5 a)后,井间发生干扰,煤层中形成体积解吸。定义体积解吸为从单井独立解吸到多井联合解吸的现象,其本质是通过井间干扰在煤层中形成均衡压降。由图1b可以看出井间干扰产生的解吸体积明显大于未干扰形成的解吸体积;生产较长时间(14 a)后,整个煤层开始解吸,压降波及效率为1(图1c)。

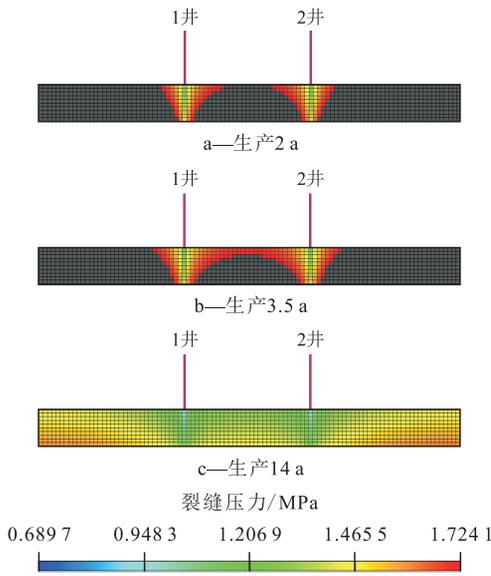


图1 不同生产阶段的煤层压降情况

Fig.1 Pressure drop situation at different production periods

根据不同生产阶段的煤层压降(图1),统计得到每个阶段内发生解吸(网格压力小于临界解吸压力2.47 MPa)的网格数量及每个网格的压力与裂缝含气饱和度,可以计算压降波及效率及自由气滞留率(图2a)。解吸区域内的平均压力计算公式为

$$\bar{p} = p_c - \frac{p_c - p_{wf}}{2 \ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (6)$$

式中: \bar{p} 为解吸区域内的平均压力,MPa; p_c 为储层供给边缘压力,MPa; p_{wf} 为井底流压,MPa; r_e 为解吸半径,m; r_w 为气井半径,m,计算中取值为0.03。

通过统计得到压降波及区域的外边界与内边界的压力,代入式(6)得到压降波及区域内的平均压力,代入式(2)可得到不同时间段解吸效率(图2a)。当体积解吸形成后,压降波及效率快速上升;生产14 a后,整个煤层开始降压,此时压降波及效率为1,之后采收率的主控因素为煤层气的解吸效率,而自由气滞留率的数值较小,对煤层气采收率计算的影响不大。

若废弃压力为0.7 MPa,根据等温吸附曲线法计算得到的采收率为51.6%。通过式(1)一式(3)分别计算压降波及效率、气体解吸效率及自由气滞留率(图2a),再由式(4)可计算得到煤层气采收率。对比新方法数值模拟得到的采收率(图2b)可知,在生产初期,2种方法计算得到的采收率基本一致,相对误差在0.05以内。生产后期新方法计算值比数值模拟计算值略大,有可能是压力传至煤层边缘后平均压力计算方法(式(6))不准确造成的。

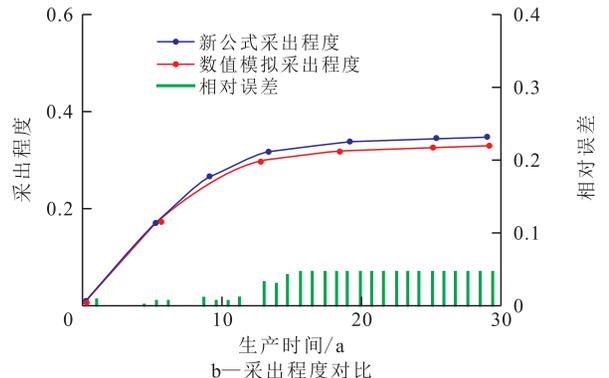
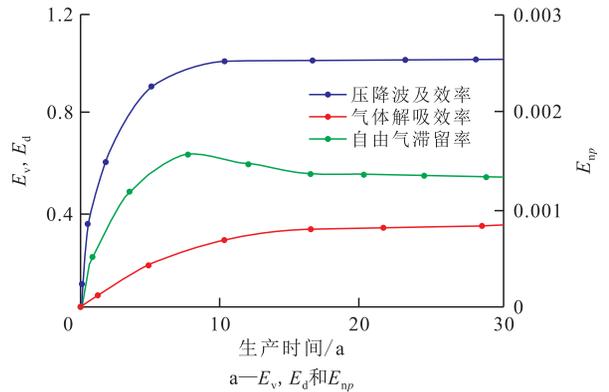


图2 新方法计算结果

Fig.2 Calculation results of the new method

3 采收率影响因素分析

数值模拟是一种简便的采收率计算方法,但是数值模拟得到的采收率难以系统地反映煤层气采收率的影响因素。根据压降波及效率以及波及区域内的解吸效率动态(图2a)可知,生产初期压降波及效率变化较大,煤层气早期的采出程度主要由压降波及效率控制;开发后期压降波及效率为1,煤层气晚期的采出程度主要由解吸效率控制。

3.1 压降波及效率

压降波及效率反映了井网对煤层的控制程度。为研究压降波及效率对采收率的影响,根据上述模型设置煤层的各向异性 x 方向渗透率为 $0.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, y 方向渗透率为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,模拟井距分别为 $200 \text{ m} \times 300 \text{ m}$, $100 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ 和 $300 \text{ m} \times 300 \text{ m}$ 共3种非均匀井网生产40 a的产气动态(图3a)。

由于废弃压力相同,不同井网的解吸效率相同,但早期的压降波及效率不同。与煤层地质特征参数匹配的井网可以提高早期的压降波及效率,从而快速提高煤层气的产量。非均匀井网由于井间干扰发生较早,产气量高于均匀井网(图3a)。在开发前期,井网并未控制整个气藏;然而,煤层气一般开采10 a后开始采矿,此时井网对采收率的影响效

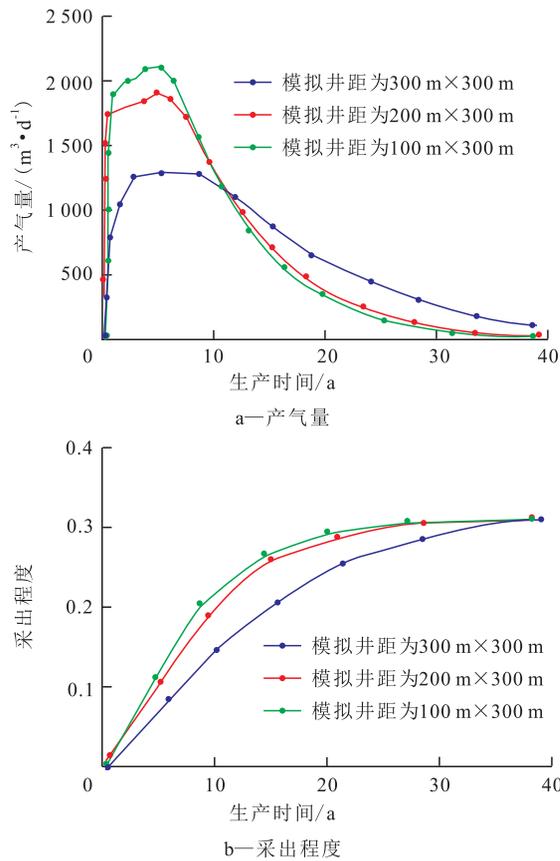


图3 压降波及效率对生产的影响

Fig.3 Influence of sweep efficiency of pressure drop on production

果比较明显,各向异性煤层中均匀井网的采收率为14.1%,而100 m×300 m井网的采收率为21.3%(图3b)。因此合适的井网可以显著提高煤层气早期的采出程度。

快速提高煤层气产量的有效途径是通过井网优化在煤层中形成体积解吸^[16-17]。井间干扰是在煤层中形成体积解吸的必要条件。对于均质且各向同性的理想煤层(图4a),均匀井网可较好地形成体积解吸。然而,在非均质煤层(图4b)及各向异性的煤层(图4c)中,均匀井网在短时间内并不能快速形成有效的体积解吸。因此采用合适的井网,快速形成体积解吸是增大压降波及效率的根本途径。

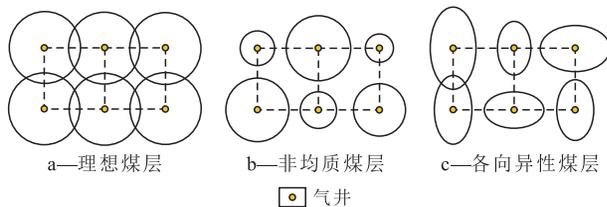


图4 不同煤层的压降波及效率

Fig.4 Schematic diagram of sweep efficiency of pressure drop for different coalbeds

3.2 煤层气解吸效率

根据式(2)可知煤层气藏的初始含气量、兰氏

体积、气体吸附系数及废弃压力是煤层气解吸效率的直接影响因素。煤阶、成熟度、组分等间接因素^[18-23]则通过影响这些直接因素来改变解吸效率。通过工程因素可以改变的参数为煤层气藏的废弃压力。为研究解吸效率对采收率的影响,根据原模型模拟0.7,0.6,0.5 MPa共3种废弃压力条件下煤层的产气动态(图5)。

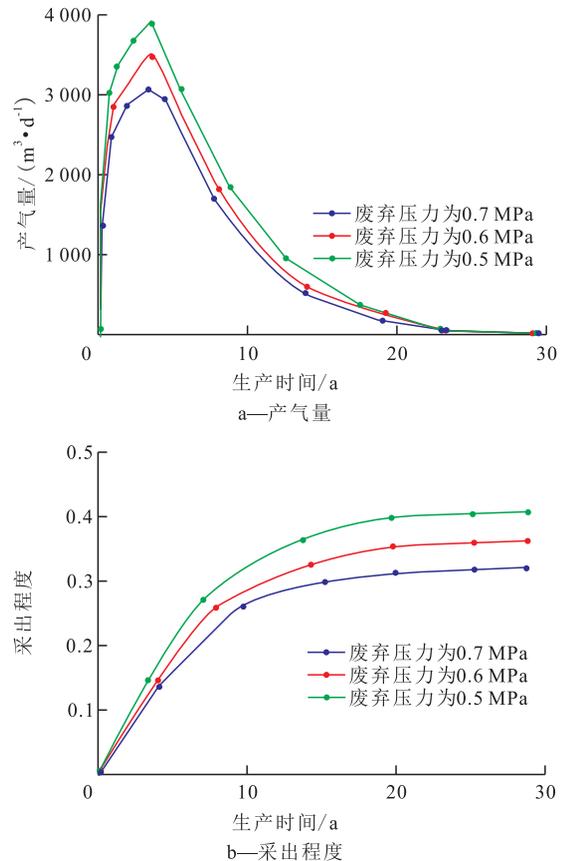


图5 解吸效率对生产的影响

Fig.5 Influence of desorption efficiency on production

废弃压力的变化可以直接改变煤层气的解吸效率,而对压力波及效率影响不大。不同废弃压力对产气量的影响主要反映在生产中后期(图5a)。煤层气生产后期,压降波及效率为1,由于自由气滞留率较小,煤层气晚期的采出程度主要取决于煤层气的解吸效率。生产后期,煤层的压力处于气体的敏感解吸阶段,较小的压力变化就可以带来较大的解吸量^[24],废弃压力每下降0.1 MPa,采收率可以平均提高4.43%,平均提高幅度为13.31%。因此降低废弃压力可以显著影响解吸效率。

对于兰氏体积和气体吸附系数等气体吸附参数的改变,一般在气相吸附理论的基础上注入CO₂对煤层气进行置换。同时,对煤层气的吸附系统供给能量使得吸附平衡逆向移动,一般采用对煤层加热或超声波等方式,可以使被吸附的煤层气分子获

得动能,分子运动加剧、易于解吸,影响煤层气解吸效率,从而提高煤层气的采收率。

4 结论

通过提出一种煤层气采收率的分析新方法,研究了煤层气采收率的影响因素以及各因素对煤层气不同阶段采出程度的影响,形成的认识包括:①煤层气的采收率由煤层的压降波及效率、解吸效率与自由气滞留率共同控制,其中压降波及效率受工程因素的影响,解吸效率受气体吸附特征与负压采气等增产措施的影响;②煤层气早期的采出程度主要取决于压降波及效率;在开发后期,煤层气的采出程度则主要取决于煤层气的解吸效率,而自由气滞留率对采收率整体影响较小;③采用与煤层地质特征参数配套的井网,利用井间干扰实现体积解吸可以提高早期压降波及效率,实现煤层气的快速采气;降低煤层气废弃压力可以提高解吸效率,从而影响煤层气的采收率。

参考文献:

- [1] 拜文华,赵庆波,刘锐娥.山西沁水煤层气田采收率预测[J].现代地质,2001,15(4):438-444.
Bai Wenhua, Zhao Qingbo, Liu Ruie. Predicting the recovery efficiency of Qinshui coalbed methane field, Shanxi province[J]. Geoscience, 2001, 15(4): 438-444.
- [2] 李清,赵兴龙,谢先平,等.延川南区块煤层气井高产水成因分析及排采对策[J].石油钻探技术,2013,41(6):95-99.
Li Qing, Zhao Xinglong, Xie Xianping, et al. Causes of high water yield from CBM wells in Yanchuannan Block and draining measures[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2013, 41(6): 95-99.
- [3] 李相方,石军太,杜希瑶,等.煤层气藏开发降压解吸气运移机理[J].石油勘探与开发,2012,39(2):203-213.
Li Xiangfang, Shi Juntao, Du Xiyao, et al. Transport mechanism of desorbed gas in coalbed methane reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 203-213.
- [4] 陈振宏,陈艳鹏,杨焦生,等.高煤阶煤层气储层动态渗透率特征及其对煤层气产量的影响[J].石油学报,2010,31(6):966-969.
Chen Zhenhong, Chen Yanpeng, Yang Jiaosheng, et al. Reservoir dynamic permeability of high rank coalbed methane and its effect on the coalbed methane output[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6): 966-969.
- [5] King G R. Material-balance techniques for coal-seam and Devonian shale gas reservoirs with limited water influx[J]. SPE Reservoir Engineering, 1993, 8(1): 67-71.
- [6] 李明宅,孙晗森.煤层气采收率预测技术[J].天然气工业,2008,28(3):25-29.
Li Mingzhai, Sun Hansen. Methods of predicting CBM recovery factor[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(3): 25-29.
- [7] 张骞,冯文光,杨宇,等.煤层气采收率影响因素分析[J].科学技术与工程,2012,12(30):8 026-8 028.
Zhang Qian, Feng Wenguang, Yang Yu, et al. Influencing factors analysis of coalbed methane recovery[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(30): 8 026-8 028.
- [8] 郑玉柱,韩宝山.煤层气采收率的影响因素及确定方法研究[J].天然气工业,2005,25(1):120-123.
Zheng Yuzhu, Han Baoshan. Affecting factors and estimating methods of recovery percent of coal-bed gas[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(1): 120-123.
- [9] 李明宅,胡爱梅,孙晗森,等.煤层气储量计算方法[J].天然气工业,2002,22(5):32-35.
Li Mingzhai, Hu Aimei, Sun Hansen, et al. Calculation methods of coal-bed gas reserves[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(5): 32-35.
- [10] 刘银山,王聚团,刘飞,等.考虑煤层气扩散作用的物质平衡模型[J].油气地质与采收率,2015,22(6):68-73.
Liu Yinshan, Wang Jutuan, Liu Fei, et al. A material balance model considering the effect of coal bed methane diffusion[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(6): 68-73.
- [11] 邱广强,任广磊,李治平,等.煤层气藏产能动态预测方法及参数敏感性分析[J].油气地质与采收率,2012,19(6):73-77.
Qiu Xianqiang, Ren Guanglei, Li Zhiping, et al. Study on dynamic prediction method and parameter sensitivity analysis of coalbed methane reservoir production[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6): 73-77.
- [12] 周尚忠,张文忠.当前我国煤层气采收率估算方法及存在问题[J].中国煤层气,2011,8(4):9-12.
Zhou Shangzhong, Zhang Wenzhong. The current methods for estimating recovery rate of CBM and the existing problems in China[J]. China Coalbed Methane, 2011, 8(4): 9-12.
- [13] 刘升贵,涂坤,付裕,等.寿阳区块煤层气采收率预测方法及井间距优化[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2015,34(8):892-897.
Liu Shenggui, Tu Kun, Fu Yu, et al. CBM recovery rate prediction method and well spacing optimization in Shouyang block[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2015, 34(8): 892-897.
- [14] 陈德飞,康毅力,孟祥娟,等.变应力条件下气体吸附对煤岩渗流特性的影响[J].油气地质与采收率,2016,23(1):107-112.
Chen Defei, Kang Yili, Meng Xiangjuan, et al. Effect of gas adsorption on seepage characteristic of coal seam under the condition of varying stress[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(1): 107-112.
- [15] 孟艳军,汤达祯,李治平,等.高煤阶煤层气井不同排采阶段渗透率动态变化特征与控制机理[J].油气地质与采收率,2015,22(2):66-71.
Meng Yanjun, Tang Dazhen, Li Zhiping, et al. Dynamic variation characteristics and mechanism of permeability in high-rank CBM wells at different drainage and production stages[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(2): 66-71.
- [16] 冯文光.提高解吸速度是煤层气藏工业化生产的关键[J].矿物

- 岩石, 1998, 18(2): 58-62.
- Feng Wenguang. Raising desorption velocity is key of commercial development for coalbed gas reservoir [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 1998, 18(2): 58-62.
- [17] 吴建光, 孙茂远, 冯三利, 等. 国家级煤层气示范工程建设的启示——沁水盆地南部煤层气开发利用高技术产业化示范工程综述[J]. 天然气工业, 2011, 31(5): 9-15.
- Wu Jianguang, Sun Maoyuan, Feng Sanli, et al. Good lessons from the state-level demonstration project of coalbed methane development: An overview of such high-tech and commercial project in the southern Qinshui Basin [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(5): 9-15.
- [18] 左银卿, 张学英, 周毅, 等. 沁南地区高煤阶煤储层水敏效应及其控制因素[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(5): 107-110.
- Zuo Yinqing, Zhang Xueying, Zhou Rui, et al. Water sensitivity and its controlling factors on high-rank coal reservoirs in southern Qinshui basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5): 107-110.
- [19] 高岗, 康莉, 刘敬明. 煤岩热模拟产物演化特征与煤层气形成关系[J]. 油气地质与采收率, 2012, 19(6): 33-36.
- Gao Gang, Kang Li, Liu Jingming. Relation between thermal simulation evolution characteristics of coal and formation of coal bed gas [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19(6): 33-36.
- [20] 东振, 鲍清英, 张义. 煤层气井排采阶段煤粉运移条件研究[J]. 特种油气藏, 2015, 22(2): 143-146.
- Dong Zhen, Bao Qingying, Zhang Yi. CBM well coal-powder migration conditions in water drainage gas recovery [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2015, 22(2): 143-146.
- [21] 尹志胜, 桑树勋, 周效志. 煤炭资源枯竭矿井煤层气运移及富集规律研究[J]. 特种油气藏, 2014, 21(5): 48-51.
- Yin Zhisheng, Sang Shuxun, Zhou Xiaozhi. Study on migration and enrichment regularities of CBM in exhausted coal resource wells [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2014, 21(5): 48-51.
- [22] 张振兵, 邱小龙, 袁月琴, 等. 沁水盆地寺河煤矿煤岩吸附甲烷规律实验研究[J]. 石油实验地质, 2014, 36(5): 656-658.
- Zhang Zhenbing, Qiu Xiaolong, Yuan Yueqin, et al. Experimental study on methane adsorption of coal bed from Sihe Mine in Qinshui Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(5): 656-658.
- [23] 王丹, 赵峰华, 姚晓莉, 等. 临汾区块煤层气产能地质影响因素分析[J]. 特种油气藏, 2016, 23(2): 1-4.
- Wang Dan, Zhao Fenghua, Yao Xiaoli, et al. Analysis of geological factors on CBM productivity in Block Linfen [J]. Special Oil & Gas Reservoir, 2016, 23(2): 1-4.
- [24] 孟艳军, 汤达祯, 许浩, 等. 煤层气解吸阶段划分方法及其意义[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(5): 612-617.
- Meng Yanjun, Tang Dazhen, Xu Hao, et al. Division of coalbed methane desorption stages and its significance [J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(5): 612-617.

编辑 刘北羿

(上接第98页)

- [10] Butler R. Application of SAGD (Steam-Assisted Gravity Drainage), related processes growing in Canada [J]. Oil & Gas Journal, 2001, 99(20): 74-76.
- [11] Yuan J, McFarlane R. Evaluation of steam circulation strategies for SAGD startup [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2011, 50(1): 20-32.
- [12] 王滨, 赵伟, 计小宇, 等. 基于传递函数模型的油田产油量预测方法[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(5): 77-80.
- Wang Bin, Zhao Wei, Ji Xiaoyu, et al. Oilfield output prediction method based on transfer function model [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(5): 77-80.
- [13] Beattie C I, Boberg T C, McNab G S. Reservoir simulation of cyclic steam stimulation in the Cold Lake oil sands [J]. SPE Reservoir Engineering, 1991, 6(2): 200-206.
- [14] 王强, 计秉玉, 聂俊. 聚合物驱油过程中不同粘度比情况下波及系数计算方法[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(4): 551-555.
- Wang Qiang, Ji Bingyu, Nie Jun. Calculation methods of sweep efficiency under different viscosity ratios for polymer flooding processes [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(4): 551-555.
- [15] 杜洋, 衣英杰, 辛军, 等. 伊朗SA油田Sarvak油藏大幅度倾斜油水界面成因探讨[J]. 石油实验地质, 2015, 37(2): 187-193.
- Du Yang, Yi Yingjie, Xin Jun, et al. Genesis of large-amplitude tilting oil-water contact in Sarvak Formation in South Azadegan Oilfield, Iran [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 187-193.
- [16] 魏绍富, 程林松, 张辉登, 等. 夹层对加拿大麦凯河油砂区块双水平井蒸汽辅助重力泄油开发的影响[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(2): 62-69.
- Wei Shaofu, Cheng Linsong, Zhang Huideng, et al. Physical simulation of the interlayer effect on SAGD production by dual horizontal well in Mackay River oil sands block, Canada [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2): 62-69.

编辑 常迎梅