



移动扫码阅读

孙 政,李相方,徐兵祥,等.低渗欠饱和煤层气井产能分析新方法研究[J].煤炭科学技术,2019,47(6): 238-243.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.06.036

SUN Zheng, LI Xiangfang, XU Bingxiang, *et al.* Study on novel method of production capacity analysis on low permeability and unsaturated coalbed methane well [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(6): 238-243. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.06.036

低渗欠饱和煤层气井产能分析新方法研究

孙 政¹,李相方¹,徐兵祥²,肖芝华³,张 砚⁴,苗亚楠¹,彭泽阳¹,王小果⁵

(1.中国石油大学(北京)石油工程学院教育部重点实验室,北京 102249;2.中海油研究总院 新能源研究中心,北京 100028;

3.中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司,北京 100095;4.中国石油西南油气田分公司 川西北气矿,四川 江油 621700;

5.中国石油北京油气调控中心,北京 100007)

摘 要:为准确获取煤层气井物理性能参数,提出了一种简便的基于生产初期排水数据的产能分析新方法,首先,考虑煤层普遍具有的低渗特征,引入调查半径公式,计算各个时刻煤层气井压力波前缘位置,然后,基于连续稳态方法,推导各个时刻考虑应力敏感与压力波扩展的稳态渗流方程;最后,对渗流方程进行线性化处理,得到适用于低渗欠饱和煤层气井的产能分析新方法,该方法的可靠性与应用性通过与数值模拟以及现场实例对比进行研究。研究结果表明:新方法预测的渗透率与实际渗透率间的误差为2.38%,表皮因子的误差为6.59%,满足现场工程应用需求,新方法能够准确获取储层物性参数,为气井后期产能预测,生产制度调整提供有效理论依据。

关键词:煤层气井;低渗;欠饱和;应力敏感;产能分析方法

中图分类号:TE132.2

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)06-0238-06

Study on novel method of production capacity analysis on low permeability and unsaturated coalbed methane well

SUN Zheng¹, LI Xiangfang¹, XU Bingxiang², XIAO Zhihua³, ZHANG Yan⁴, MIAO Yanan¹, PENG Zeyang¹, WANG Xiaoguo⁵

(1. MOE Key Lab, School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. New Energy Research Center, CNOOC Research Institute, Beijing 100028, China; 3. National Engineering Research Center Limited, China United Coalbed Methane Company Limited, Beijing 100095, China; 4. Northwest Sichuan Gas Mine, Southwest Oil and Gas Field Company, China National Petroleum Corporation, Jiangyou 621700, China; 5. Beijing Oil & Gas Control Center, National Petroleum Corporation, Beijing 100007, China)

Abstract: In order to accurately have the physical performance parameters of the coalbeds methane well, based on the water drainage data at the initial production period, a new method of a easy production capacity analysis was provided. Firstly in consideration of the low permeability features of the seam generally, an investigation radius formula was introduced to calculate s front edge position of the pressure wave in the coal bed methane at each time. Secondly based on the continuous steady state method, the stress sensitivity considered at each time and the steady-state seepage equation of the pressure wave expansion was derived. Finally, a linear treatment was conducted on the seepage equation and a new method of the production capacity analysis suitable to the low permeability and unsaturated coal bed methane well was obtained. A study was conducted on the reliability and application of the method with the numerical simulation and site case comparison. The study results showed that the error between the permeability predicted with the new method and the actual permeability was 2.38% and the error of the epidermal factor was 6.59%. All those errors could meet the requirements of the site engineering application. The new method could accurately obtain the reservoir physical parameters and could provide the effective theoretical basis to the late production prediction of the gas well and the adjustment of the production system.

Key words: coalbed methane well; low permeability; unsaturated; stress sensitivity; production capacity analysis method

收稿日期:2018-12-18;责任编辑:曾康生

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05042,2017ZX05039);国家自然科学基金资助项目(51504269,51490654)

作者简介:孙 政(1993—),男,湖北荆州人,博士研究生。E-mail:szcup613@163.com

通讯作者:李相方(1955—),男,山东阳谷人,教授,博士生导师。E-mail:lix2013@vip.163.com

0 引 言

得益于产能分析方法自身的简便性与可靠性,气井产能分析方法是现场工程师获取储层参数的常用手段^[1-3]。绝大部分产能分析方法假设储层到达拟稳态或边界控制流,随后通过储层渗流规律推导出产量与井底流压关系,结合现场每天记录的生产数据与井底流压即可确定相应的地层参数。对于常规砂岩气藏与国外煤层气藏,由于渗透率较高(接近 $10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),它们仅需要较短的时间即可达到储层边界,能够满足气井产能分析方法的适用条件。然而,国内煤层气藏渗透率普遍很低,小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的煤层气藏普遍存在,需要半年或更长时间才能使压力波到达边界^[4-5]。而且,由于气、水两相渗流将极大延缓压力波的扩展速度,若现场生产过程中气、水两相流出现过早,会导致煤层气井的压力波在整个生产周期内都无法到达边界^[6-7]。所以,现在非常有必要针对该类气井建立新型的产能分析方法。

在欠饱和煤层气藏的生产过程中,当井底流压高于临界解吸压力时,储层内部为单相水流动^[8-9]。随着煤层气藏的持续开发,整体气藏压力会进一步降低,当井底流压低于临界解吸压力时,近井煤储层区域内以吸附态赋存的甲烷气开始发生解吸,导致内部流体流动形态由单相水渗流向气水两相渗流转变^[10]。这个过程中,煤层内部的压力传递特征也会发生复杂转变^[11]。XU 等^[12]发现单相水阶段的压力扩展速度明显快于两相流和单相气阶段,所以他建议在压力波未达到边界前,通过人为调节使井底流压始终高于临界解吸压力。笔者遵循文献^[12]的生产制度优化原则,故本文研究的重点是如何解决压力波未达边界前不稳定单相水渗流。2003年,METTAR 提出了适用于微可压缩流体渗流的流动物质平衡方程,他假设气井压力波已经达到边界并满足拟稳态流动规律,该模型得到了广泛应用^[13]。2017年,CLARKSON 考虑煤层应力敏感对储层渗透率的影响,得到井底流压高于解吸压力的煤层单相水流动物质平衡方程^[14]。然而,储层的渗透率变化是通过储层平均压力体现,不能表征储层实际压力分布对产能的影响。而且,CLARKSON 同样假设压力波已到达边界。

在引入连续稳态方法时,认为气井生产过程中的非稳态流特征可由多个稳态流表征^[15-17]。随着生产的进行,各个稳态流的边界会不断向前扩展,直至到达储层边界。各个时刻的动态边界位置通过径

向流调查半径公式计算得到^[8]。考虑到煤岩脆性高的特点,笔者模型中考虑了应力敏感的影响。随后,将得到的稳态渗流方程线性化,形成应用性较强的产能分析方法。该方法的可靠性通过数值模拟得以验证,其实用性通过韩城煤层气田一口实际气井数据得到验证,显示本文方法应用性强的特点。本文提出的模型能够通过前期气井产能数据得到储层物性参数,为生产中后期的产能预测,生产制度调整提供建议。

1 低渗煤层气井产能分析方法建立

正如引言中提到的内容,假设煤层气井开采过程中遵循文献^[8]提出的生产制度优选准则,即通过设置井底流压降幅,保证井底流压下降至临界解吸压力时储层压力波能够扩展至边界。随着压力波到达边界,气井会很快进入边界控制流或拟稳态,针对该阶段的产能分析方法已有较多研究。所以,本文的重点在于建立井底流压高于临界解吸压力的生产阶段的产能分析方法。至此,结合已有的适用于边界控制流的产能分析方法,形成一套能适用于煤层气井生产全过程的产能分析方法。

1.1 受应力敏感的渗透率变化规律

已有研究结果显示,煤储层的应力敏感特性远比砂岩敏感性强。当气井井底流压高于临界解吸压力时,煤储层渗透率会受应力敏感影响而降低。煤层气井生产初期为单相水渗流,仅需考虑煤层绝对渗透率随压力的变化,即可用式(1)表示为^[18]

$$\frac{k(p)}{k_i} = \exp[\gamma_k(p_i - p)] \quad (1)$$

式中: $k(p)$ 为对应储层压力 p 的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; k_i 为储层初始渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; γ_k 为煤层渗透率模量, MPa^{-1} ; p_i 为煤储层初始地层压力, MPa ; p 为气井生产过程中储层各点压力, MPa 。

1.2 径向流调查半径扩展规律

引入调查半径概念,用于计算各个生产时刻,储层内部压力波扩展边界位置。本文以未压裂直井为例,故采用的是径向流调查半径公式,若煤层气井井型为水平井或压裂直井,则应该采用线性流调查半径公式为^[8]

$$r_e = 0.59 \sqrt{\frac{k_i}{\phi \mu_w C_t}} t \quad (2)$$

$$C_t = C_f + C_w \quad (3)$$

式中: t 为气井生产时间, d ; μ_w 为地层水黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; C_t 为地层综合压缩系数, MPa^{-1} ; C_f 为煤岩压缩系数,

MPa^{-1} ; C_w 为地层水的压缩系数, MPa^{-1} ; φ_i 为煤层初始孔隙度。

1.3 煤层单相水稳态渗流方程

引入连续稳态法,其认为储层的不稳定状态可由一系列稳定状态表征,基于此,气井生产初期各个时刻的产水量^[19-21]满足式(4),即

$$2\pi rh \frac{k}{\mu_w} \frac{dp}{dr} = q_w(t) \quad (4)$$

将式(1)代入式(4),可得

$$\frac{2\pi k_i h}{\mu_w} \exp[\gamma_k(p_i - p)] dp = \frac{q_w(t)}{r} dr \quad (5)$$

对式(5)两边进行积分,可得式(6)为

$$\frac{2\pi k_i h}{\mu_w \gamma_k} [e^{\gamma_k(p_i - p_w)} - 1] = q_w(t) \ln \frac{r_e}{r_w} \quad (6)$$

对式(6)进行单位转换,可得

$$\frac{0.543 k_i h}{\mu_w \gamma_k} [e^{\gamma_k(p_i - p_w)} - 1] = q_w(t) \ln \frac{r_e}{r_w} \quad (7)$$

将式(2)代入式(7)中,可得

$$\frac{0.543 k_i h}{\mu_w \gamma_k} [e^{\gamma_k(p_i - p_w)} - 1] = q_w(t) \ln \frac{0.59 \sqrt{\frac{k_i}{\varphi_i \mu_w C_t}} t}{r_w} \quad (8)$$

对式(8)进行线性化处理,进一步推导得

$$\ln t = \frac{1.086 k_i h}{\mu_w \gamma_k} \left[\frac{e^{\gamma_k(p_i - p_w)} - 1}{q_w(t)} \right] - 2 \ln \frac{0.59 \sqrt{\frac{k_i}{\varphi_i \mu_w C_t}}}{r_w} \quad (9)$$

考虑煤层气井的不完善性对渗流的影响,将井的半径 r_w 用折算半径 r_{wr} 代替,则式(9)可变形为

$$\ln t = \frac{1.086 k_i h}{\mu_w \gamma_k} \left[\frac{e^{\gamma_k(p_i - p_w)} - 1}{q_w(t)} \right] - 2 \ln \frac{0.59 \sqrt{\frac{k_i}{\varphi_i \mu_w C_t}}}{r_{wr}} \quad (10)$$

$$r_{wr} = r_w e^{-S} \quad (11)$$

式中: S 为气井表皮因子。

基于式(10),令

$$X = \frac{e^{\gamma_k(p_i - p_w)} - 1}{q_w(t)} \quad (12)$$

$$Y = \ln t \quad (13)$$

则式(10)可由以下线性关系式表征为

$$Y = \frac{1.086 k_i h}{\mu_w \gamma_k} X - 2 \ln \frac{0.59 \sqrt{\frac{k_i}{\varphi_i \mu_w C_t}}}{r_{wr}} \quad (14)$$

根据现场煤层气井收集的日产水量与通过煤岩试验测得的煤层渗透率模量,可视 X 、 Y 分别为直角坐标系中的横轴与纵轴,可得到任意时刻的 X 、 Y 值,将二者绘制于同一直角坐标体系内,可拟合出式(14)体现的线性关系。进一步,通过该线性关系的斜率可计算地层系数($k_i h$),若已知煤储层厚度,则可得储层原始渗透率。根据该线性关系的截距可计算气井的表皮因子,确定气井的不完善性。

2 模型验证

在此部分内容中,为验证上述产能分析方法的可靠性,利用数值模拟软件(CMG)模拟低渗煤层气井的生产过程。在数值模型中,保持井底流压稳定且始终高于解吸压力,模拟实际气井生产前期的排水阶段。截取该阶段日产水量,结合式(14)计算得到储层的原始渗透率与气井表皮因子,并与数值模型输入数据比较,若二者间误差在合理范围内则可验证模型的可靠性。输入的数值模型基本物性参数见表1。

表1 数值模拟量煤层基本物理性能参数

Table 1 Basic physics parameters in numerical simulation

参数	数值	参数	数值
原始渗透率 $k_i/10^{-3} \mu\text{m}^2$	0.5	渗透率模量 γ_k/MPa^{-1}	-0.058
原始储层压力 p_i/MPa	5.0	临界解吸压力 p_d/MPa	3.40
储层厚度 h/m	5.0	孔隙度 φ_i	0.03
设定井底流压 p_{wf}/MPa	3.5	表皮因子 S	-1
气井边界半径/ m	250	综合压缩系数 C_t/MPa^{-1}	0.043 5
原始含水饱和度 $S_{wi}/\%$	100	地层水黏度 $\mu_w/(\text{mPa} \cdot \text{s})$	0.62

由式(2)可知,气井生产过程中压力波的扩展速度仅与时间相关,故可根据此式判断气井压力波到达边界的时间。由图1可知,该图展示了该煤层气井的压力波随生产时间的扩展规律,发现该气井生产287 d时,压力波将到达边界。这意味着287 d以后,气井将很快进入边界控制流阶段,故本文方法的适用范围为287 d之前的气井生产动态。

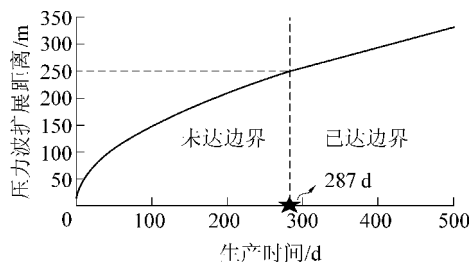


图1 压力波随生产时间的扩展位置
Fig.1 Propagation position of pressure wave with production days

截取煤层气井前 250 d 的日产水量及井底流压,基于式(12)、式(13)得到各个生产时刻的 X 、 Y 值,进而线性拟合,根据斜率与截距计算储层渗透率与气井表皮因子,拟合效果如图 2 所示。

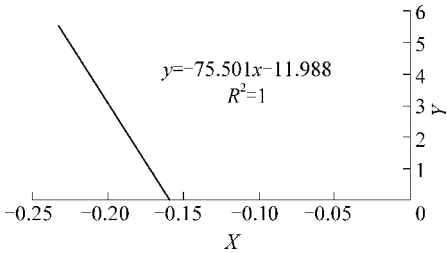


图2 煤层气井产能分析

Fig.2 Novel production data analysis for CBM wells

由图 2 可知,气井前 250 d 的生产数据经过上述处理后,符合线性关系,拟合效果极佳。如表 2 所示,本文提出的产能分析方法的预测值与实际值间差距极小,其中储层渗透率的误差为 0.006%,气井表皮因子的误差为 0.05%。故该产能分析新方法的可靠性通过数值模拟得到了有效验证。但建立的数值模型假设储层等厚均质,与实际储层存在差异,故该方法是否具备相当的实用性还需通过现场实例来验证。

表 2 产能分析新方法对数值模型的应用效果

Table 2 Application effect of novel production data analysis method to numerical model

参数	方法预测值	实际值	误差/%
渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	0.500 03	0.5	0.006
表皮因子	-1.000 50	-1.0	0.050

3 实例分析

在此部分,以 HC 煤层气田的一口实际气井 A 的产能数据为例,分别采用常规的产能分析方法与本文提出的产能分析新方法对其进行分析。比较两者分析结果与实际物性参数,体现产能分析方法的优越性与实用性。该气藏的基本物性参数见表 3。

表 3 储层的基本物理性能参数

Table 3 Basic physical properties of coal seams

参数	数值	参数	数值
原始储层压力 p_i/MPa	5.8	渗透率模量 γ_k/MPa^{-1}	-0.078
储层厚度 h/m	6.1	孔隙度 φ_i	0.03
井底流压 p_{wf}	见图 3	煤岩压缩系数 C_t/MPa^{-1}	0.038
气井边界 m/m	275	地层水黏度 $\mu_w/\text{mPa} \cdot \text{s}$	0.51
原始含水饱和度 $S_{wi}/\%$	100	地层水压缩系数 C_w/MPa^{-1}	0.000 43

从表 3 中气井边界值根据气井间井距的 1/2 确

定。图 3 展示的是煤层气井井底流压随生产时间的变化关系,可以看出井底流压随着生产的进行,总的趋势是逐渐下降。

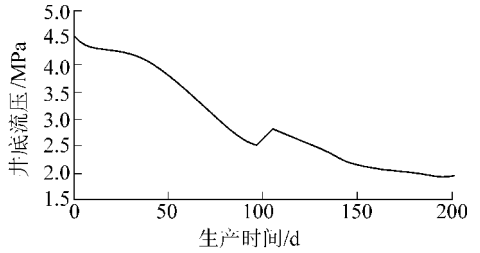


图 3 煤层气井井底流压随生产时间的变化曲线

Fig.3 Variation curve of bottom flowing pressure versus production days

图 4 展示的是该煤层气井前 200 d 的生产动态,由图可知前 128 d 储层内部为单相水渗流,128 d 以后,气井开始产气,储层内部出现气、水两相渗流,随着近井区域含气饱和度的上升,水相相对渗透率下降较快,导致气井产水量迅速下降。根据现场测试分析可知,在 128 d 左右该区块煤层气井并未形成井间干扰,这表明 128 d 的生产过程中,气井压力波没有到达边界,故该口气井的产水阶段符合本文方法的应用要求。通过本文提出的产能分析方法对现场数据进行线性拟合,得到的结果如图 5 所示。

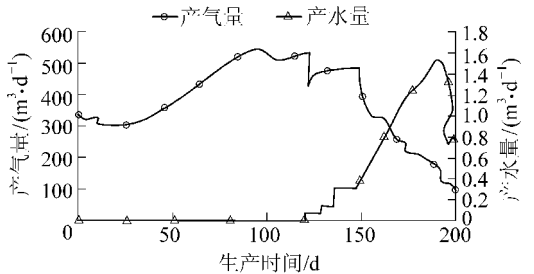


图 4 实际气井的日产气量与日产水量

Fig.4 Production performance of actual CBM well

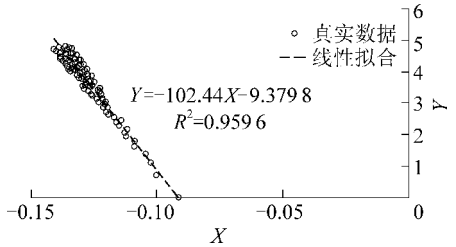


图 5 新产能分析方法对真实数据进行线性拟合

Fig.5 Linear fitting of real data through novel production data analysis method

为进一步展现本文方法的优越性,引入常规的产能分析方法,即针对单相水流动的物质平衡方程,

分析该气井单相水阶段的产能数据^[10,16-17]。常规产能分析方法的具体公式为

$$\frac{q_w}{p_i - p_{wf}} = m \frac{W_p}{C_t(p_i - p_{wf})} + b \quad (15)$$

$$m = -\frac{1}{W_i b_{pss}} \quad (16)$$

$$b = \frac{1}{b_{pss}} \quad (17)$$

$$b_{pss} = \frac{141.2\mu_w}{kh} \left(\ln \frac{r_e}{r_{wr}} - \frac{3}{4} \right) \quad (18)$$

式中: W_p 为气井累计产水量, m^3 ; W_i 为原始储层中水的储量, m^3 ; b 为上述单相水流动物质平衡方程的 Y 轴截距, m^3/MPa ; b_{pss} 为水相产能指数的倒数, MPa/m^3 。

根据式(15), 以 $\frac{W_p}{C_t(p_i - p_{wf})}$ 为 X 轴, $\frac{q_w}{p_i - p_{wf}}$ 为 Y 轴, 将其绘制于同一直角坐标体系中, 可得到对应的线性关系如图6所示, 进而计算出储层中地层水的储量与气井表皮因子。

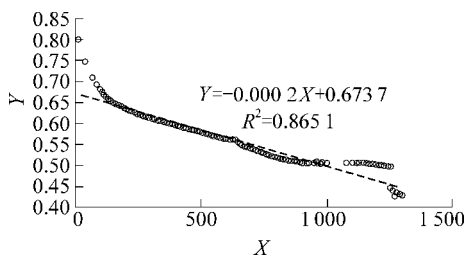


图6 常规产能分析方法对真实数据进行线性拟合

Fig.6 Linear fitting of real data through regular production data analysis method

从图6展示, 不难发现常规方法的拟合效果很差, 不能够满足工程应用需求。究其原因, 首先, 该气井单相水生产阶段的压力波未达到边界, 而常规产能分析方法的首要条件即气井进入边界控制流; 其次, 由于气井压力波不断扩展, 储层的地层水储量并不为定值, 故通过上述方法处理后的真实数据必定不会具有较强的线性特征。最后, 常规产能分析方法未考虑应力敏感对储层渗透率的影响, 而煤层对应力变化非常敏感, 会对其产能产生较大影响。对比图5中产能分析新方法对现场数据进行的线性拟合效果, 凸显出本文方法比常规方法具有更强的适应性与优越性。通过图5的线性关系, 根据斜率与截距对储层渗透率与气井表皮因子进行计算, 并与实际数据比较, 结果见表4。

通过表4可知, 产能分析新方法预测的渗透率与实际值间的误差为2.38%, 表皮因子的误差为6.59%。与表2比较, 发现该方法对数值模型的应用

效果明显优于对实际煤层气井的应用效果, 这主要是由于实际煤储层不同于数值模型, 不具备等厚、均质等一系列理想特性, 其自身复杂的储层物性导致该方法对实际气井的误差扩大。但对表4的进一步分析可知, 该误差在可接受的范围之内, 能够满足现场煤层气井的工程需要。通过提出的针对低渗欠饱和煤层气井产能分析新方法, 储层的渗透率与气井表皮因子能够通过前期煤层气井单相水生产阶段产能数据获取, 鉴于常规单相水产能分析方法不能应用于低渗煤层气井, 该产能分析新方法是现有煤层气井产能分析方法的必要补充。

表4 产能分析新方法对实际气井产能提高应用效果

Table 4 Application of novel production data analysis method to actual well

参数	方法预测值	实际值	误差/%
渗透率/ $10^{-3} \mu m^2$	0.615	0.63	2.38
表皮因子	0.437	0.41	6.59

4 结 论

1) 引入径向流调查半径公式, 用于计算各个生产时刻气井压力波的扩展位置。应用连续稳态方法, 认为气井的非稳态渗流可由一系列的稳态渗流表征。基于此, 本文推导了考虑应力敏感影响的稳态渗流方程, 并对其进行线性化处理, 建立了适用于低渗欠饱和煤层气井的产能分析新方法。

2) 对煤层气井单相水阶段生产数据的线性化处理, 根据线性关系的斜率可得到储层原始渗透率, 根据线性关系的截距可得到气井的表皮因子。该方法的可靠性通过数值模型得到验证, 结果显示新方法预测的渗透率与实际值的误差为0.006%, 表皮因子的误差为0.05%。

3) 通过对HC煤层区块的一口实际气井进行产能分析, 发现常规单相水产能分析方法不能应用于低渗煤层气井。主要的原因有: ①气井压力波未到达边界; ②压力波不断扩展, 储层地层水储量不为定值; ③常规方法未考虑应力敏感对煤层气井产能的影响。使用产能分析新方法对该实际气井进行分析, 结果显示新方法预测的渗透率与实际渗透率间的误差为2.38%, 表皮因子的误差为6.59%, 满足现场工程应用需求。

参考文献(References):

- [1] 景兴鹏, 宋永辉. 基于流体注入诊断法的煤层气试井技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(12): 1-6.

JING Xingpeng, SONG Yonghui. Technical research on test well of

- coalbed methane based on Diagnostic Fracture Injection Test Method [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 1-6.
- [2] 贾慧敏,孙世轩,毛崇昊,等.基于煤岩应力敏感性的煤层气井单相流产水规律研究[J].煤炭科学技术, 2017, 45(12): 189-193.
- JIA Huimin, SUN Shixuan, MAO Chonghao, *et al.* Study on single-phase flow water production law of coalbed methane well based on coal and rock stress sensitivity [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(12): 189-193.
- [3] SUN Z, SHI J, ZHANG T, *et al.* The modified gas-water two phase version flowing material balance equation for low permeability CBM reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 165: 726-735.
- [4] 徐兵祥,李相方,杜希瑶,等.煤层气井解吸区预测模型研究[J].中国矿业大学学报, 2013, 42(3): 421-427.
- XU Bingxiang, LI Xiangfang, DU Xiyao, *et al.* The predictive models of desorption region for coalbed methane wells [J]. Journal of China University of mining & Technology, 2013, 42(3): 421-427.
- [5] SUN Z, LI X, SHI J, *et al.* A semi-analytical model for drainage and desorption area expansion during coal-bed methane production [J]. Fuel, 2017, 204: 214-226.
- [6] 冯其红,舒成龙,张先敏,等.煤层气井两相流阶段排采制度实时优化[J].煤炭学报, 2015, 40(1): 142-148.
- FENG Qihong, SHU Chenglong, ZHANG Xianmin, *et al.* Real-time optimization of drainage schedule for coalbed methane wells at gas-water two-phase flow stage [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 142-148.
- [7] 邵先杰,王彩凤,汤达祯,等.煤层气井产能模式及控制因素:以韩城地区为例[J].煤炭学报, 2013, 38(2): 271-276.
- SHAO Xianjie, WANG Caifeng, TANG Dazhen, *et al.* Productivity mode and control factors of coalbed methane wells: a case from Hancheng region [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(2): 271-276.
- [8] SUN Z, SHI J, ZHANG T, *et al.* A fully-coupled semi-analytical model for effective gas/water phase permeability during coal-bed methane production [J]. Fuel, 2018, 223: 44-52.
- [9] 邢力仁,柳迎红,王存武,等.柿庄南区块断层发育特征及对煤层气井产能的影响[J].煤炭科学技术, 2017, 45(9): 25-31.
- XING Liren, LIU Yinghong, WANG Cunwu, *et al.* Influences of development characteristics of faults on coalbed methane well productivity in Southern Shizhuang Block [J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(9): 25-31.
- [10] 明 盈,汤达祯,陶 树,等.煤层气水平井产能预测模型及其适用性研究[J].煤炭科学技术, 2016, 44(12): 113-117.
- MING Ying, TANG Dazhen, TAO Shu, *et al.* Study on productivity prediction model of horizontal coalbed methane well and its applicability [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(12): 113-117.
- [11] 杜彩霞,张遂安,刘 程,等.煤层气规模开发条件下压力传播特征研究[J].煤炭科学技术, 2016, 44(12): 179-183.
- DU Caixia, ZHANG Suian, LIU Cheng, *et al.* Study on reservoir pressure transmission feature of coalbed methane under condition of multi-well exploitation [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(12): 179-183.
- [12] XU B, LI X, REN W, *et al.* Dewatering rate optimization for coalbed methane well based on the characteristics of pressure propagation [J]. Fuel, 2017, 188: 11-18.
- [13] MATTAR L, ANDERSON D. A systematic and comprehensive methodology for advanced analysis of production data [R]. Denver: SPE 84472, 2003.
- [14] CLARKSON C, SALMACHI A. Rate-transient analysis of an undersaturated CBM reservoir in Australia: Accounting for effective permeability changes above and below desorption pressure [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2017, 40: 51-60.
- [15] ZHANG J, HUANG S, CHENG L, *et al.* A mathematical model for drainage and desorption area analysis during shale gas production [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2014, 21: 1032-1042.
- [16] SUN Z, SHI J, WANG K, *et al.* The gas-water two phase flow behavior in low-permeability CBM reservoirs with multiple mechanisms coupling [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 52: 82-93.
- [17] ZHENG D, YUAN B, MOGHANLOO R. Analytical modeling dynamic drainage volume for transient flow towards multi-stage fractured wells in composite shale reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science & Engineering, 2016, 149: 756-764.
- [18] SUN Z, LI X, SHI J, *et al.* A semi-analytical model for the relationship between pressure and saturation in the CBM reservoirs [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 49: 365-375.
- [19] CLARKSON C, MCGOVERN J. Optimization of coalbed methane reservoir exploration and development strategies through integration of simulation and economics [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2005, 8(6): 502-519.
- [20] CLARKSON C. Production data analysis of unconventional gas wells: Review of theory and best practices [J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 109-110(2): 101-146.
- [21] YARMOHAMMADTOOSKI Z, SALMACHI A, WHITE A, *et al.* Fluid flow characteristics of Bandanna Coal Formation: a case study from the Fairview Field, eastern Australia [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2017, 64(3): 319-333.
- [22] SUN Z, LI X, SHI J, *et al.* Apparent permeability model for real gas transport through shale gas reservoirs considering water distribution characteristic [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 1008-1019.

欢迎订阅 2019 年《煤炭科学技术》杂志

《煤炭科学技术》(月刊,刊号 ISSN 0253-2336,CN 11-2402/TD)创刊于 1973 年,是由国家煤矿安全监察局主管、煤炭科学研究总院主办的综合性煤炭科技期刊,是中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE 中国核心学术期刊(A),中国学术期刊综合评价数据库、中国期刊网、中国学术期刊(光盘版)、《中国科技论文与引文数据库》、俄罗斯《文摘杂志》、美国《史蒂芬斯数据库》《化学文摘》《地质学参考及预览数据库》《乌利希期刊指南》、波兰《哥白尼索引》收录期刊,为国家图书馆重点收藏书刊,是煤炭行业新技术、新成果、新产品的主要发布媒体。

刊登内容:煤田地质、煤矿基建、矿山测量、煤炭开采、岩石力学与井巷支护、煤矿安全、矿山机电及自动化、煤炭加工与环保、煤层气开发与利用等专业领域的学术论文。

读者对象:煤炭、石油、电力、基建、机械、冶金等行业的科研、教学、工程技术和管理人员。

覆盖范围:煤炭行业各政府部门、行业协会、全国各矿业集团、煤炭科研机构、高等院校、煤矿机械设备厂家及美国、德国、日本等 15 个国家和地区。

获奖情况:2017 年,国家新闻出版广电总局第三届“中国百强报刊”

2016 年,中国煤炭学会“第一届全国煤炭优秀科技期刊一等奖”

2013 年,国家新闻出版广电总局“第三届中国出版政府奖提名奖”

2013 年,国家新闻出版广电总局“中国百强报刊”

2005 年,新闻出版总署第三届国家期刊奖百种重点期刊

2001 年,新闻出版总署“中国期刊方阵”之“双百期刊”

1997 年,国家科委、中宣部、新闻出版署“第二届全国优秀科技期刊二等奖”

1992 年,国家科委、中宣部、新闻出版署“首届全国优秀科技期刊三等奖”

1992 年,北京市“全优期刊奖”

发行订阅:国内外公开发行。国际标准大 16 开本,论文 36 篇/期,每期 30.00 元,全年 12 期共 360.00 元。

(1) 邮局直接订阅,邮发代号 80-337。

(2) 编辑部联系方式:

地 址:北京市和平里和平街 13 区煤炭大厦 1204(100013)

联系人:朱老师

电 话:(010)84262926-8006

QQ:1019952653

E-mail:mtkjzeg@126.com

(3) 编辑部办理订购业务,银行汇款方式:

户 名:煤炭科学研究总院

开户行:中国工商银行北京分行和平里支行

账 号:0200004209089115910

开户地:北京市朝阳区