

孟召平,张纪星,刘 贺,等.考虑应力敏感性的煤层气井产能模型及应用分析[J].煤炭学报,2014,39(4):593-599. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2013.1780

Meng Zhaoping, Zhang Jixing, Liu He, et al. Productivity model of CBM wells considering the stress sensitivity and its application analysis [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(4): 593-599. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2013.1780

考虑应力敏感性的煤层气井产能模型及应用分析

孟召平^{1,2},张纪星¹,刘 贺¹,刘珊珊¹,周晓得¹

(1. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083;2. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室,湖北 宜昌 443002)

摘要:煤储层应力敏感性是影响煤层气井产能的地质因素,在煤层气井排采过程中如何降低或避免煤储层应力敏感性对煤层气井产量的影响是值得考虑的问题。在对煤储层应力敏感性分析的基础上,推导了考虑应力敏感性的煤层气井产能模型,提出了用产量降低幅度值(β)描述应力敏感性对煤层气井产量的影响程度,揭示了有效应力对煤储层渗透性和煤层气井产能的影响规律。研究表明:煤储层渗透率随有效应力的增加按负指数函数规律降低,在煤层气开发中煤储层表现出明显的应力敏感性。考虑煤储层应力敏感性后,煤层气井的产量低于不考虑应力敏感性的气井产量;随生产压差的增大,煤层气井的产量增加幅度较小,并逐渐趋向稳定,且煤层气井产量下降幅度 β 值增大;煤层气井的产量降低幅度 β 值随应力敏感系数的增大整体呈增高趋势。随着生产压差的增加,煤层气井的产量增加幅度较小,并逐渐趋向稳定,说明放大生产压差并不能获得最大产量,煤层气开发需要制定合理的生产压差和严格控制排采强度。

关键词:煤储层;应力敏感性;煤层气井;产能模型

中图分类号:P618.11 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2014)04-0593-07

Productivity model of CBM wells considering the stress sensitivity and its application analysis

MENG Zhao-ping^{1,2}, ZHANG Ji-xing¹, LIU He¹, LIU Shan-shan¹, ZHOU Xiao-de¹

(1. College of Geosciences and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The stress sensitivity of the coal reservoir is one of the geological factors affecting the productivity of CBM wells, how to reduce or avoid effect of the stress sensitivity on CBM well production is a question worth considering in CBM wells production process. Through the analysis of the stress sensitivity of coal reservoir, the productivity model of CBM wells considering the permeability stress sensitivity was deduced, then the yield reduced the magnitude of value (β) was put forward to describe the influence degree of the stress sensitivity on the productivity of CBM wells, and the impact of the effective stress on the permeability of coal reservoir and the effect law of CBM wells productivity were finally revealed. Research results show that the permeability of coal reservoir reduces with the effective pressure increases by the negative exponential law and coal reservoir shows obvious stress sensitivity during the development of CBM wells. The productivity of CBM wells which consider the stress sensitivity of the coal reservoir is lower than that don't. With the producing differential pressure increases, CBM wells productivity increases significantly, and gradually tend to be stable, and the yield reduced the magnitude of value (β) increases meanwhile. The value (β) should be the

收稿日期:2013-12-04 责任编辑:韩晋平

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41372163,41172145);国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2012CB214705)

作者简介:孟召平(1963—),男,湖南汨罗人,教授,博士生导师,博士。E-mail:mzp@cumt.edu.cn

overall increased with increasing the stress sensitive coefficient of coal reservoir. The production of CBM well increases to a lesser extent with the pressure difference increases and gradually tend to be stable. Enlarging the production pressure difference can not get the maximum yield. Therefore CBM development need to be draw up a reasonable production pressure difference and strictly control the production intensity.

Key words: coal reservoir; stress sensitivity; CBM wells; productivity model

应力敏感性是指当有效应力增大时,煤的孔隙度、渗透率等物性参数降低的现象。煤储层为孔隙-裂隙型储集层,有关裂隙岩体渗透性与应力之间关系已进行了广泛的研究,并取得了显著进展和成效^[1-4]。但煤储层与常规油气储层相比有明显差异,煤层既是生气层,又是储气层,煤层强度低、变形大,具有双重孔隙结构特征。由于煤储层所具有的这些特点,必然导致其煤体结构的强烈不均质性和储层物性的各向异性,表现出明显的应力敏感性^[5-11],从而对煤层气井产能产生影响。

煤储层渗透率是决定煤层气井产能的关键参数,应力敏感性对气井产能有显著的影响。李相等^[12]通过实验研究了煤储层变形特征,建立了储层变形与渗透率变化关系的数学模型。向祖平等^[13]建立了考虑应力敏感性的三维气、水两相流数值模型。杨满平等^[14]通过对煤储层应力敏感性的分析,建立了考虑煤储层应力敏感性的达西流动和非达西流动气井产能方程,分析了应力敏感性下气井产能的变化规律。陈振宏等^[15]通过煤样的应力敏感性实验,分析了不同含水条件下煤储层应力敏感性特征和模拟分析了应力敏感对煤层气井产能的影响。陶树^[16]分析了沁南煤储层渗透率动态变化效应及气井产能响应,建立了煤储层渗透率动态预测模型。以上研究为煤层气开发产能研究提供了理论基础,但由于煤储层应力敏感性试验可靠的测量数据有限和现场实际资料缺乏,在煤层气开发过程中,随着水、气介质的排出,煤岩体与流体之间的耦合作用较为复杂,煤层气井实际渗透率要高于试井渗透率,加之在煤层气开发过程中的应力敏感性影响,使得煤层气井产能预测研究受到一定的限制,与实际相差较大。因此,开展煤储层应力敏感性研究,建立考虑应力敏感性的煤层气井产能模型,准确预测煤层气井产能,对于有效开发我国煤层气资源具有理论和实际意义。以往主要是通过考虑应力敏感性分析煤层气气井产能变化规律,确定合理的生产压差。本文在前人研究的基础上推导了考虑应力敏感性的煤层气气井产能分析模型,进一步提出了用产量降低幅度值(β)这一概念来描述不同生产压差下应力敏感性对煤层气井产能的影响程度,使煤层气开发中生产压差的确定更趋合理与可靠。

1 煤储层应力敏感性

在煤层气开发过程中,随着水、气介质的排出,煤储层压力逐渐下降,导致煤储层有效应力(原岩应力-煤储层压力)增加,煤储层微孔隙和裂隙被压缩、闭合,煤体发生显著的弹塑性形变,从而使煤储层渗透率明显下降,煤储层表现出明显的应力敏感性,这种性质将对煤层气井产气效果产生重大影响。

已有研究结果表明^[9,11],煤储层应力敏感性远比砂岩的应力敏感性强,而且煤储层应力敏感性试验方法尚无行业标准,参照石油天然气行业标准(SY/T5336,5358,6358),测量渗透率随净围压变化情况,通过试验对煤储层应力敏感性进行评价。

煤储层无因次渗透率与有效应力之间服从负指数函数关系,也就是煤储层渗透率随着有效应力的增加按负指数函数规律降低(图1),其关系式为

$$\frac{K}{K_0} = be^{-a\Delta\sigma_e} \quad (1)$$

$$\sigma_e = \sigma - \alpha p \quad (2)$$

式中, K, K_0 为渗透率和初始渗透率, 10^{-15} m^2 ; a 为回归得到的应力敏感系数(或渗透率模量), MPa^{-1} ; b 为比例系数; $\Delta\sigma_e$ 为从初始到某一应力状态时有效应力的变化值, MPa ; σ_e 为有效应力, MPa ; σ 为原岩应力或初始地应力, MPa ; α 为有效应力系数,取 $\alpha=1$; p 为储层压力, MPa 。

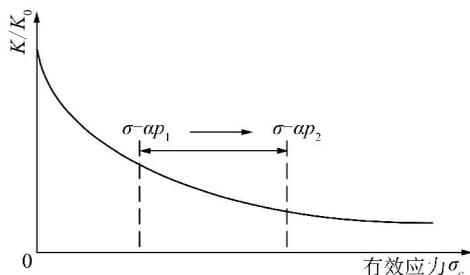


图1 煤样无因次渗透率(K/K_0)与有效应力 σ_e 的关系

Fig. 1 Relationship between dimensionless permeability of coal sample and effective stress

煤层气的生产是通过抽排煤层及上覆岩层中的地下水,降低煤储层的孔隙流体压力进行排采,而排采过程中煤储层所受的地应力基本保持不变,实际变化的是煤储层的孔隙流体压力,即煤储层压力。由

式(2)可得有效应力变化值 $\Delta\sigma_e$ 为

$$\Delta\sigma_e = p_e - p \quad (3)$$

式中, p_e 为原始储层压力, MPa。

由式(1)~(3)可以看出,在煤储层压力不断降低的过程中,煤储层有效应力不断增大,渗透率随之降低,初期表现剧烈,后期比较平缓;当有效应力降低以后,煤储层渗透率有所恢复,但是由于有效应力增大的过程中,煤中孔隙-裂隙压密闭合,造成渗透率损害,渗透率不能恢复到原始水平,整个变化过程中煤储层表现出明显的应力敏感性。应力敏感性的强弱可以通过渗透率应力敏感系数(或渗透率模量) a 来表示, a 值越大,表明煤储层应力敏感性越强。

对于不同地应力下,实际煤储层承受着一定的原岩应力 σ (地应力),不同位置煤储层压力不同,煤储层所受有效应力 σ_e 变化范围应为 $\sigma - p_1 \rightarrow \sigma - p_2$,并且煤储层埋藏越深,这种差距越大。因此在较低地应力(埋藏较浅条件)下,随着有效应力的增加,煤储层在应力作用下发生压密的塑性变形,造成渗透率大幅度降低;在较高地应力(埋藏较深条件)下,煤储层应力敏感性将会减弱。在煤层气井排采过程中,煤储层渗透性动态变化的实质是由于排水降压过程中,煤储层压力的降低导致有效应力增高所致。因此煤储层渗透率与有效应力之间关系($K-\sigma_e$)反映了煤层气井开发过程中煤储层渗透率与生产压差之间的关系($K-\Delta p$)。

2 考虑应力敏感性的煤层气井产能模型

2.1 煤层气井产能模型

煤层气的排采经历解吸—扩散—渗流等3个阶段,其生产过程包括排水、降压和采气。通过排水降压,在井筒附近形成一定的压降漏斗,在煤储层压力低于临界解吸压力的区域,被吸附的甲烷分子开始从煤基质孔隙内表面解吸,由吸附态变为游离态,解吸过程可以用 Langmuir 方程来描述。

由于排采作用导致基质孔隙内煤层气产生浓度差,在浓度差的作用下,甲烷分子从基质内高浓度区向低浓度区进行扩散,扩散过程符合 Fick 定理。

煤层裂隙中的甲烷气体在流体势(压力差)的作用下,通过裂隙系统向压裂裂缝及生产井筒渗流,进而使煤层气连续产出,煤层甲烷在裂隙系统中的流动符合 Darcy 定理。

假定水平等厚和均质的煤层,煤层气气体径向流入井底,如图2所示^[17],气体为服从达西流动的平面径向流,并考虑煤储层应力敏感性的影响。根据达西

定律,其渗流方程为

$$v = \frac{K}{\mu} \frac{dp}{dr} \quad (4)$$

式中, v 为 r 处的气体渗流速度, m/d; μ 为气体黏度, mPa·s; r 为距井的任意半径, m。

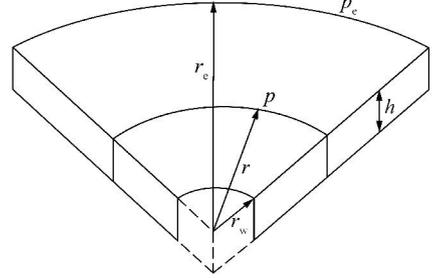


图2 平面径向渗流模型^[17]

Fig. 2 Model of plane radial flow^[17]

由式(1)~(4)可得渗流流量表达式为

$$Q_r = 2\pi r h v = 2\pi r h \frac{bK_0 \exp[-a(p_e - p)]}{\mu} \frac{dp}{dr} \quad (5)$$

式中, Q_r 为半径 r 处的流量; h 为煤层的有效厚度, m。

根据气体连续方程

$$\rho Q = \rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 = \text{常数} \quad (6)$$

和气体压缩状态方程

$$\rho = \frac{pM}{ZRT} \quad (7)$$

式中, ρ 为气体密度, kg/m³; Q 为气体流量, m³/d; Z 为气体压缩系数; T 为气层温度, K。

将半径 r 处的流量 Q_r 折算为标准状态下的流量 Q_{sc} , 有

$$Q_r = Q_{sc} B_g = Q_{sc} \frac{p_{sc}}{Z_{sc} T_{sc}} \frac{ZT}{p} \quad (8)$$

将式(5)代入式(8),分离变量后积分得

$$\frac{2\pi b K_0 h Z_{sc} T_{sc}}{Q_{sc} Z \mu T p_{sc}} p \exp[-a(p_e - p)] dp = \frac{dr}{r} \quad (9)$$

对式(9)积分可得

$$\frac{2\pi b K_0 h Z_{sc} T_{sc}}{Q_{sc} T \mu Z p_{sc}} \int_{p_{wf}}^{p_e} p \exp[-a(p_e - p)] dp = \int_{r_w}^{r_e} \frac{dr}{r} \quad (10)$$

这里采用法定计量单位,标准状态条件下 $Z_{sc} = 1$, $T_{sc} = 293.15$ K, $p_{sc} = 0.101325$ MPa,可移出积分号,则式(10)可简化为

$$\frac{1549.2 b K_0 h}{Q_{sc} T \mu Z} \int_{p_{wf}}^{p_e} p \exp[-a(p_e - p)] dp = \ln \frac{r_e}{r_w} \quad (11)$$

式(11)左边积分并整理后可得

$$(ap_e - 1) - (ap_{wf} - 1)e^{-a(p_e - p_{wf})} = \frac{0.645 \times 10^{-3} a Q_{sc} T \mu Z}{b K_0 h} \ln \frac{r_e}{r_w} \quad (12)$$

考虑气井的表皮系数 S , 则有

$$Q_{sc} = \frac{1549.2 b K_0 h [(ap_e - 1) - (ap_{wf} - 1)e^{-a(p_e - p_{wf})}]}{a^2 T \mu Z \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + S \right)} \quad (13)$$

式(13)就是考虑煤储层应力敏感性的气体稳定流动的达西产能公式,或称为考虑煤储层应力敏感性的煤层气平面径向流模型。

当完全不考虑渗透率变异(煤储层应力敏感性)的影响时,气体的渗流是渗透率为 K_0 条件下的达西渗流,气井产能公式为

$$\beta = \left\{ 1 - \frac{2b [(ap_e - 1) - (ap_{wf} - 1)e^{-a(p_e - p_{wf})}] \ln \frac{r_e}{r_w}}{a^2 (p_e^2 - p_{wf}^2) \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + S \right)} \right\} \times 100\% \quad (16)$$

与 β 相关的参数有 $a, b, p_e, p_{wf}, r_e, r_w, S$, 其中应力敏感系数 a 的影响最大。

3 应用实例分析

3.1 煤层气井产能的计算

延川南区块位于鄂尔多斯盆地东南缘地区,地理位置位于晋陕交界处,构造上隶属于晋西挠褶带南部,总体上表现为一向西倾斜的单斜构造,构造发育具有明显的分带性,盆缘以断层及伴生的挠褶为主,中部发育宽缓的褶皱,向西逐渐过渡为比较平缓的单斜构造。研究区地层为典型的华北地区地层,含煤地层主要为上古生界石炭-二叠系,主要煤层为山西组 2 号煤层和太原组 10 号煤层,为贫煤和无烟煤,煤层含气量大,是煤层气勘探开发的目标层。

延川南区块煤层气井产气效果相差较大,但均受到储层应力敏感的影响,实际产气量远小于理想情况下(不考虑应力敏感性)的达西流动气井产量。

生产压差是储层压力与井底流压之间的差值。储层压力一般通过试井资料确定,井底流压主要通过套压和动液面来控制且它们之间具有相互调整的变化关系,二者的共同作用导致井底流压的变化,从而影响产气量的变化。为了分析煤储层应力敏感性对煤层气井产能的影响,选取延川南区块内典型煤层气井(延 1 井、延 3 井、延 5 井和延 7 井),主要目标层为山西组 2 号煤层,分别对煤层气井在不同生产压差下考虑应力敏感性的产量和不考虑应力敏感性的产量进行理论对比分析。计算参数见表 1。

$$q_{sc} = \frac{774.6 K_0 h (p_e^2 - p_{wf}^2)}{T \mu Z \ln \frac{r_e}{r_w}} \quad (14)$$

式中, B_g 为换算系数; p_{wf} 为井底流压, MPa; Q_{sc}, q_{sc} 为标准状态下考虑应力敏感性、不考虑应力敏感性的气井产气量, m^3/d ; r_e 为井控半径或泄流半径, m; r_w 为井底半径, m。

2.2 应力敏感性对煤层气井产量的影响评价模型

为了反映应力敏感性对煤层气井产量的影响程度,定义产量降低幅度值为 β , 其表达式为

$$\beta = \left(1 - \frac{Q_{sc}}{q_{sc}} \right) \times 100\% \quad (15)$$

将 Q_{sc}, q_{sc} 的表达式(13), (14)代入式(15), 消去同类项后, 可得

表 1 煤层气井参数

Table 1 Basic parameters of CBM wells

参数	数值	数据来源
煤层厚度/m	4.6 ~ 5.0	试井
煤储层渗透率/($10^{-15} m^2$)	0.049 ~ 0.250	注入压降测试
原始储层压力/MPa	3.86 ~ 9.97	注入压降测试
井底半径/m	0.07	现场测试
井控半径/m	150	经验类比
气体压缩系数	0.92	实验
表皮系数	-0.75 ~ -0.10	试井
应力敏感系数	0.127 ~ 0.235	室内实验或试井资料分析
储层温度/K	307.57 ~ 313.55	试井

根据表 1 中煤层气井测试参数,计算出考虑和考虑应力敏感的煤层气稳定流动气井产能,计算结果如图 3 所示。

从图 3 可知,煤层气井的产能具有以下特点:

(1) 考虑煤储层应力敏感性后,气井的产量低于不考虑应力敏感性的气井产量,而且随着生产压差的增大,二者之间的产量差距也逐渐增加,说明随着生产压差的增加,煤储层受到的有效应力逐渐增加,煤储层渗透率大大降低,影响到煤层气井产能。

(2) 煤储层的应力敏感性对煤层气井的产能有很大的影响,随着生产压差的增加,气井的产量增加幅度较小,并逐渐趋向稳定,说明增大生产压差并不能获得最大产量。

(3) 煤层气的开发需要制定合理的生产压差,既

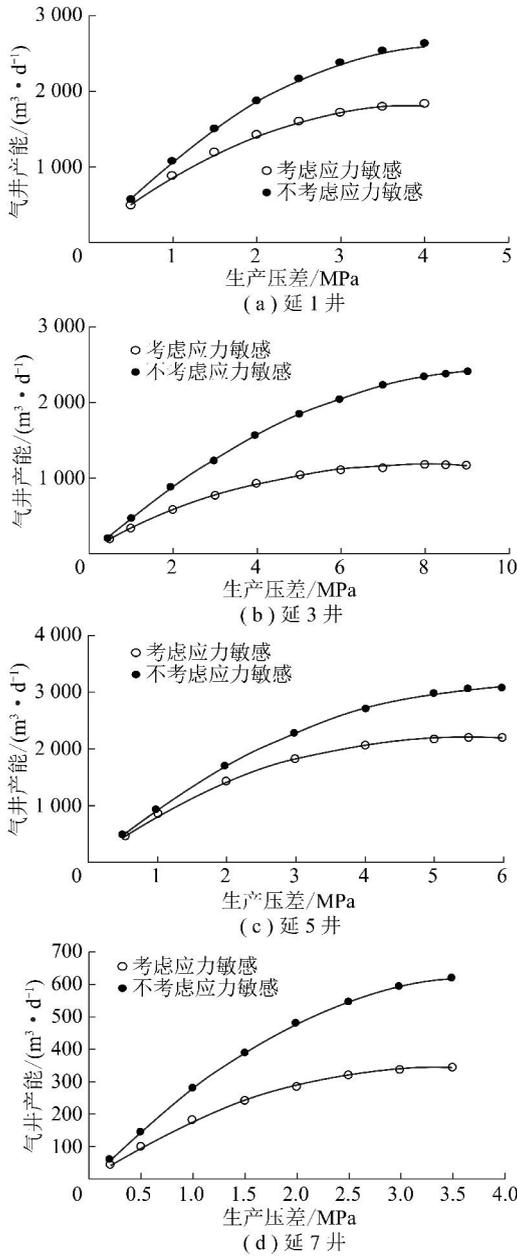


图3 典型煤层气井产能随生产压差的变化(应力敏感系数取 $0.187 MPa^{-1}$)

Fig. 3 Relationship between the producing differential pressure and CBM wells productivity (stress sensitivity coefficient is $0.187 MPa^{-1}$)

要保证较高产量,又要避免生产压差过大导致煤储层产生明显的应力敏感性,影响气井产能。

3.2 应力敏感性对煤层气井产量的影响程度

随生产压差增大,煤层气井产能下降幅度 β 增大,如图4(a)所示。本区延1井、延3井、延5井和延7井煤层气井产量下降幅度 β 值分别为 $14.10\% \sim 30.14\%$, $20.62\% \sim 50.93\%$, $3.32\% \sim 28.57\%$ 和 $30.98\% \sim 43.77\%$,说明煤储层应力敏感性对产量的影响程度较大。

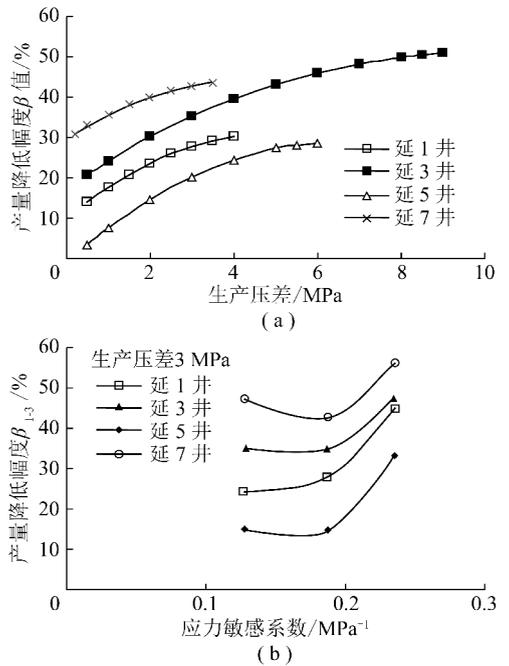


图4 生产压差、应力敏感系数与产能降低幅度的关系

Fig. 4 Relationship between the producing differential pressure, stress sensitivity coefficient and the Yield reduced the magnitude of value(β)

为便于对比分析,取生产压差为 3 MPa,计算应力敏感性对产量的影响,记为 β_{1-3} 。计算得到各井产量降低幅度与应力敏感系数之间关系曲线,如图4(b)所示。反映出煤层气井的产量降低幅度值 β 随应力敏感系数的增大整体呈增高趋势。

煤层气排采过程中,产量的减少实质上是由于排采过程中渗透率减小所致。随着井底流压的减小,煤储层有效应力逐渐增大,导致孔隙-裂隙发生闭合,对煤储层的渗透性造成伤害,渗透率急剧减小。应力敏感系数 a 值越大,在同一生产压差下,渗透率下降得就越厉害(图5)。为了说明煤储层应力敏感性,当生产压差 Δp 取 3 MPa、应力敏感系数取 $0.187 MPa^{-1}$ 时,煤层气开采中渗透率降低值在 43% 左右,这对煤层气井在生产时影响比较显著。

3.3 气井产能影响因素的讨论

3.3.1 应力敏感性的影响

考虑应力敏感性后气井产能明显低于不考虑应力敏感性的产能,而且随着生产压差的增大,两者之间差异幅度也逐渐增大,煤储层应力敏感性对气井的产能产生重要影响。

以延3井参数为例,根据煤样的应力敏感性试验结果,分别取应力敏感性系数 a 为 $0.127, 0.187, 0.235 MPa^{-1}$,进行气井产能分析,如图6所示。随着煤储层应力敏感性的增大,煤层气井产量降低程度增加,而且随着生产压差的增大,影响程度也随之增大。

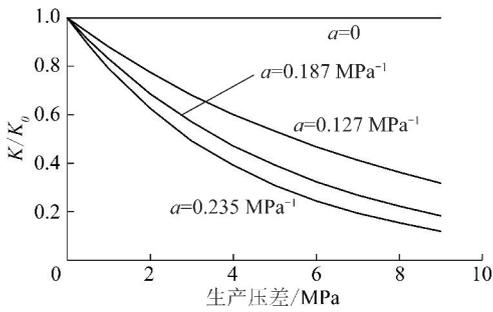


图5 无因次渗透率与生产压差的关系曲线(延3井)

Fig. 5 Relationship between dimensionless permeability and the producing differential pressure (Yan 3)

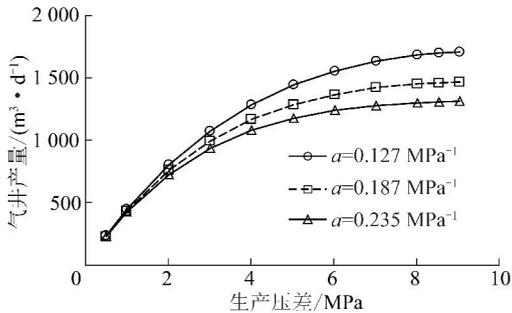


图6 不同应力敏感性系数下气井产能与生产压差的关系

Fig. 6 Relationship between CBM wells productivity and the producing differential pressure under various stress sensitivity coefficients

因此,在实际的生产工作中,必须采取合理的排采措施,制定合理的生产压差,减少应力敏感性对储层的伤害,最大程度地保证气井的高产稳产。

3.3.2 井底流压的影响

在煤层气井生产过程中,井底流压是控制气井产气量的关键参量。井底流压越大,生产压差越小,产气量就越低(图7)。

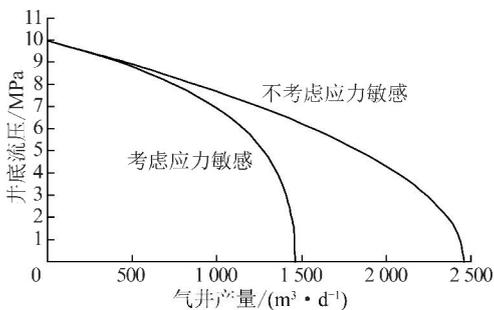


图7 气井产能与井底流压的关系(延3井)

Fig. 7 Relationship between CBM wells productivity and flowing bottom-hole pressure (Yan 3)

井底流压直接反映煤层气井内动液面高度,应用微分几何理论、等温吸附理论、达西定律等理论方法,求取煤层气井内动液面的变化量、排采影响半径和时间,最终可求得煤层气井排采初期的强度。

煤层气排采过程中,动液面和套压可通过相互调整控制井底压力,即可以人为控制井底流压的变化^[18-19]。井底流压过低或过高均不利于煤层气井形成压降漏斗,达到高产。井底流压过低,生产压差就会过大,煤储层易于产生应力敏感性,渗透性随之降低,压降漏斗横向不易继续扩展,影响产能;井底流压越高,生产压差就会越低,同样不利于漏斗的扩展。因此,在煤层气排采中,井底流压在气井初次产气之前降至最低并使之保持稳定,比较有利于产气,但必须人为地控制井底流压降低速度,既要确保气井的产能,又要避免生产压差过大,造成储层应力敏感性伤害。

4 结 论

(1)考虑煤储层应力敏感性后,煤层气井的产量低于不考虑应力敏感性的气井产量,而且随着生产压差的增大,二者之间的产量差距也逐渐增加,煤储层受到的有效应力逐渐增加,煤储层渗透率大大降低,影响到煤层气井产能的增加。

(2)为了反映应力敏感性对煤层气井产量的影响程度,定义产量降低幅度值为 β 。随生产压差增大,煤层气井产量下降幅度 β 值增大,煤层气井的产量降低幅度 β 随应力敏感系数的增大整体呈增高趋势。

(3)随着生产压差的增加,气井的产量增加幅度较小,并逐渐趋向稳定,说明放大生产压差并不能获得最大产量,煤层气开发需要制定合理的生产压差。

(4)煤层气井内动液面高度直接反映了井底流压大小,井底流压越大,生产压差越小,产气量就越低,当排采强度过大时,会引起井内动液面下降的速度过快,导致煤储层应力敏感性影响煤层气井产能,因此在煤层气井排采过程中要严格控制排采强度。

参考文献:

- [1] Gangi A F. Variation of whole and fractured porous rock permeability with confining pressure [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1978, 15(3): 249-257.
- [2] Walsh J B. Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1981, 18(2): 429-435.
- [3] Min K B, Rutqvist J, Tsang C F, et al. Stress-dependent permeability of fractured rock masses: A numerical study [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2004, 41(7): 1191-1210.
- [4] Zhang J, Rutqvist J, Roegiers J C, et al. Stress dependent fluid flow and permeability in fractured media: From lab experiments to engineering applications [J]. Rock Mech. Rock Engng., 2007, 40(1): 3-21.

- [5] Enever J R E, Henning A. The relationship between permeability and effective stress for Australian coal and its implications with respect to coalbed methane exploration and reservoir modeling [A]. Proceedings of the 1997 International Coalbed Methane Symposium [C]. 1997:13-22.
- [6] McKee C R, Bumb A C, Koenig A. Stress dependent permeability and porosity of coal [J]. Rocky Mountain Association of Geologist, 1998:143-153.
- [7] Levine J R. Model study of the influence of matrix shrinkage on absolute permeability of coal-bed reservoirs [J]. Geological Society Publication, 1996, 199:197-212.
- [8] 傅雪海, 秦勇, 姜波, 等. 山西沁水盆地中-南部煤储层渗透率物理模拟与数值模拟 [J]. 地质科学, 2003, 38(2):221-229. Fu Xuehai, Qin Yong, Jiang Bo, et al. Physical and numerical simulations of permeability of coal reservoir in central and southern part of the Qinshui Basin, Shanxi [J]. Chinese Journal of Geology, 2003, 38(2):221-229.
- [9] Meng Zhaoping, Li Guoqing. Experimental research on the permeability of high-rank coal under varying stress and its influencing factors [J]. Engineering Geology, 2013, 162:108-117.
- [10] 孟召平, 侯泉林. 煤储层应力敏感性及其影响因素的试验分析 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(3):430-437. Meng Zhaoping, Hou Quanlin. Experimental research on stress sensitivity of coal reservoir and its influencing factors [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3):430-437.
- [11] 孟召平, 侯泉林. 高煤级煤储层渗透性与应力耦合模型及控制机理 [J]. 地球物理学报, 2013, 56(2):667-675. Meng Zhaoping, Hou Quanlin. Coupling model of stress-dependent permeability in high-rank coal reservoir and its control mechanism [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(2):667-675.
- [12] 李相臣, 康毅力, 罗平亚. 煤层气储层变形机理及对渗流能力的影响研究 [J]. 中国矿业, 2009, 18(3):99-102. Li Xiangchen, Kang Yili, Luo Pingya. Rock deformation mechanisms and its influence on poecolation ability for CBM reservoirs [J]. China Mining Magazine, 2009, 18(3):99-102.
- [13] 向祖平, 张烈辉, 李闽, 等. 储层应力敏感性对异常高压低渗气藏气井产能影响研究 [J]. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 2009, 31(2):145-148. Xiang Zuping, Zhang Liehui, Li Min, et al. Effect of stress sensitivity on gas wells in overpressure low permeability gas reservoirs [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(2):145-148.
- [14] 杨满平, 王刚, 许胜洋, 等. 考虑应力敏感性的煤层气稳定流动气井产能方程 [J]. 天然气地球科学, 2011, 22(2):347-351. Yang Manping, Wang Gang, Xu Shengyang, et al. Steady flow productivity equation for stress sensitivity coalbed methane gas well [J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(2):347-351.
- [15] 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):966-971. 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):966-971.
- [16] 陶树. 沁南煤储层渗透率动态变化效应及气井产能响应 [D]. 北京:中国地质大学(北京), 2011.
- [17] 罗瑞兰. 深层气藏介质变形渗流机理及气藏工程应用研究 [D]. 北京:中国石油大学, 2006.
- [18] 杨秀春, 李明宅. 煤层气排采动态参数及其相互关系 [J]. 煤田地质与勘探, 2008, 36(2):19-23. Yang Xiuchun, Li Mingzhai. Dynamic parameters of CBM well drainage and relationship among them [J]. Coal Geology & Exploration, 2008, 36(2):19-23.
- [19] 杨焦生, 王一兵, 王宪花. 煤层气井井底流压分析及计算 [J]. 天然气工业, 2010, 30(2):66-68. Yang Jiaosheng, Wang Yibing, Wang Xianhua. Analysis and computation of flowing bottom-hole pressure in coalbed methane wells [J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(2):66-68.