9月

2014 年

李国庆 孟召平 ,王保玉. 高煤阶煤层气扩散 - 渗流机理及初期排采强度数值模拟 [J]. 煤炭学报 2014 39(9):1919 - 1926. doi: 10.13225/j. enki. jccs. 2014. 8024

Li Guoqing Meng Zhaoping , Wang Baoyu. Diffusion and seepage mechanisms of high rank coal-bed methane reservoir and its numerical simulation at early drainagerate [J]. Journal of China Coal Society 2014 39(9):1919 – 1926. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2014.8024

高煤阶煤层气扩散 – 渗流机理及初期排采强度数值模拟

李国庆¹ 孟召平² 汪保玉²

(1. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室,湖北武汉 430074;2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院,北京 100083)

摘 要:为了分析排采控制对气井产能的影响,以沁水盆地南部煤层气藏为例,应用分子动力学、岩石力学理论,分析了高阶煤层气扩散、渗流机理;应用 Simed 软件,分别采用不变渗透率、应力敏感以及考虑割理压缩率变化的 S – D 渗透率模型,进行了不同煤体结构高阶煤层气井初期排水强度数值研究。研究表明:解吸、扩散、天然裂缝渗流以及压裂裂缝导流等环节需协调作用,才有利于产气;随着排采的进行,扩散系数会逐渐增大,而压裂裂缝导流系数会因有效应力作用、煤粉堵塞等因素而降低;渗透率是影响研究区气井产能的关键因素,渗透率高的产气效果好;构造煤对于初期降液速率较敏感,对较高的导流系数不敏感;原生、碎裂煤对初期降液速率不敏感,但对导流系数较敏感;低渗煤层气井宜采用较低的初期降液速率;高渗煤层气井可以采用较高的初期排采强度持续排出水和煤粉。

关键词:煤层气;扩散 - 渗流机理;排水强度;高煤阶 中图分类号:P618.11 文献标志码:A 文章编号:0253 - 9993(2014)09 - 1919 - 08

Diffusion and seepage mechanisms of high rank coal-bed methane reservoir and its numerical simulation at early drainage rate

LI Guo-qing¹ ,MENG Zhao-ping² ,WANG Bao-yu²

(1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources Ministry of Education China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 2. College of Geosciences and Surveying Engineering China University of Mining and Technology (Beijing) Beijing 100083 China)

Abstract: To investigate the influence of drainage strategy on gas production with the coal-bed methane (CBM) reservoir in Southern Qinshui Basin , China as example , based on molecular dynamics and rock mechanics theory , the mechanisms of methane , diffusion and seepage in high rank coal were systematically investigated. Based on a constant permeability soft , a stress-dependent permeability model and a S-D permeability model considering the varying cleat compressibility , respectively , the influence of early drainage rate on gas production potential in high rank coal seams of different coal textures was investigated using a CBM numerical simulation soft called Simed. It demonstrates that the transportation of methane in coal seam involves desorption , diffusion , seepage in natural fractures and hydraulic fractures and the gas production will be sufficient only when all these four steps work coordinately. The diffusivity will increase and the conductivity will decrease due to the increase of effective stress and plugging in hydraulic fracture by pulverized coal during CBM depletion. Coal seam permeability is one of key factors influencing the gas production po-

收稿日期:2014-06-08 责任编辑:韩晋平

基金项目:山西省煤层气联合研究基金资助项目(2012012014);国家自然科学基金资助项目(41172145);中央高校基本科研业务费专项基金 资助项目(CUGL120258)

作者简介:李国庆(1980—),男,湖北武汉人,讲师,博士。Tel:027 – 67884179,E – mail:ligq@cug.edu.cn

tential in the study area. High permeability will result in high gas production. Tectonically deformed coals are sensitive to early drainage rate but not sensitive to the fracture conductivity above a certain value. Intact and blocky coal seams are not very sensitive to early drainage rate but sensitive to fracture conductivity. A low rate of early drainage suits low permeability coal seam. A high drainage rate can be used to extract the coal and water continually from a high permeability coal seam during CBM depletion.

Key words: coal-bed methane; diffusion and seepage mechanisms; drainage rate; high rank coal

抽采煤层气(瓦斯)具有3种效益:提供天然气 资源、降低煤矿瓦斯灾害风险、减少温室气体排放。 据国家能源局统计,截止到2013年底,我国已完成钻 进煤层气井12500余口,煤层气产能建设已达到一 定规模。但总体而言,已有生产井的排采效果不佳, 单井日均产气量不足500m³,大量的井产气量很低 或者不产气。由于缺乏科学有效的理论指导,排采已 成为目前煤层气工业发展的瓶颈,不合理的排采制度 导致气产量衰减过快、煤粉堵塞近井带、煤粉损坏排 采设备等不良后果。

我国含煤盆地经历了复杂的构造与热变质作用 改造 煤层变质程度高、非均质性强、各向异性强烈、 透气性差 煤层气成藏机理、产出机理方面具有特殊 性。国内外学者在煤层渗透率动态变化、煤粉产出等 方面取得了一些研究成果。Shi 和 Durucan^[1-2]提出 了考虑应力敏感、基质收缩效应的渗透率模型,并考 虑了割理压缩系数的变化,该模型得到了广泛的应 用。Liu 和 Rutqvist^[3]认为煤基质收缩或膨胀产生内 部应力,并与割理发生相互作用 S-D 模型高估了基 质收缩或膨胀效应。Pan 和 Connell^[4]则提出现有渗 透率模型没有考虑顶板沉降 ,且对近井带渗透率存在 低估。孟召平等^[5-7]进行了高阶煤层应力敏感及其 影响因素的实验研究。邹雨时等^[8]提出煤粉的聚集 附着、桥堵孔喉是支撑剂充填层导流能力伤害的主要 原因。张双斌等^[9]提出变流量排采、煤粉嵌入会使 导流能力大幅下降。魏迎春等^[10] 指出构造煤发育是 煤粉产出的主控地质因素 排采初期及产气量快速上 升期容易发生卡泵事故。康永尚等[11]分析了鄂尔多 斯盆地 35 口煤层气井的排采动态特征并提出了 8 个 排采指标。林鑫等^[12]对柳林地区中阶煤层气藏的敏 感性进行了实验研究。刘升贵等^[13] 指出潘庄区块含 气量、地层压力及渗透率等指标值高 ,产气峰值出现 早且持续时间长。总体而言,已有研究成果多是针对 中阶煤的 有关高阶煤层气的研究主要是渗透性、吸 附性方面的 ,而排采控制方面的研究报道较少 ,高阶 煤层气排采仍处于探索阶段 缺乏必要的理论方法指 导。

煤层气井排采效果主要受地质、工程两方面因素

影响,有时还受到采煤采气接替关系的影响。地质方 面包括资源条件(煤厚、含气量)、解吸条件(吸附饱 和度、兰氏压力、地解比)、扩散性能(扩散系数、基质 孔隙半径与迂曲度、分子种类、储层压力、温度)、渗 透性(横向、纵向水文地质边界条件、渗透率、煤体结 构、裂缝发育程度、裂缝开度、地应力)、储层压力、构 造环境、水动力条件等;工程方面包括井网布置、钻 井、完井质量、改造措施、排采制度等。笔者以沁水盆 地南部煤层气藏为例,结合生产实际,系统阐述高阶 煤层甲烷扩散-渗流机理及影响因素,并应用数值模 拟技术研究了高阶煤层气井初期排水强度对产气潜 力的影响,揭示了高煤阶煤储层应力敏感性特征,为 本区煤层气开发提供了理论依据。

1 高阶煤层甲烷扩散、渗流机理

目前,煤层气开发的主要方法是压力衰竭法,一般采用直井压裂方式增强煤层渗透性,通过抽取煤层 水降低储层压力,进而采出煤层甲烷气。在降压排采 时,煤层中吸附态气体会经历解吸、扩散和渗流3个 过程。高阶煤微孔发育,吸附能力强,一般含气性好, 但构造煤普遍发育,渗透率低。根据气体分子动力学 理论,气体分子的吸附与解吸速率很快,在一个大气 压下,解吸速率约3×10²³ mol/(cm²•s),解吸与吸 附几乎是瞬时完成的^[14]。因此,扩散与渗流是煤层 甲烷产出机理的关键。

1.1 扩 散

物理扩散是在浓度差或其他推动力的作用下,由 于分子、原子等的热运动所引起的物质在空间的迁移 现象,是质量传递的一种基本方式。扩散的推动力主 要有浓度差、温度差以及电场、磁场等外力作用,固 体、液体、气体均可以发生扩散。扩散速度在气体中 最大,液体中其次,固体中最小,而且浓度差越大、温 度越高、参与的粒子质量越小,扩散速度也越大。由 于气体分子热运动的速率很大,分子间极为频繁地互 相碰撞,每个分子的运动轨迹都是无规则的杂乱折 线。温度越高,分子运动就越激烈。在0℃时空气分 子的平均速率约为400 m/s,但是,由于极为频繁的 碰撞,分子运动的速度大小和方向时刻都在改变,气 体分子沿一定方向迁移的速度就相当慢 ,所以气体扩 散的速度比气体分子运动的速度要慢得多。

气体在多孔介质中的扩散,可根据孔隙的大小、 形状以及气体性质分为3类,用 Knudsen 因子($K_n = d/\lambda$)定量区分,其中 λ 为分子热运动自由程 d为煤 层的孔隙直径,即 Fick 扩散($K_n > 10$)、Knudsen 扩散 ($K_n < 0.1$)及过渡型扩散($K_n = 0.1 \sim 10$)^[15-18]。

1.1.1 Fick 扩散

Fick 扩散也叫布朗扩散,当孔隙直径远大于分子 平均自由程时,分子运动以分子间的相互碰撞为主, 极少数与孔壁碰撞,其扩散规律可用 Fick 定律来定 量描述,只需考虑多孔介质的孔隙率和曲折因数(表 示因毛细孔道曲折而增加的扩散距离),对一般的分 子扩散系数加以修正,见式(1),(2)^[14]。当 A, B 为 同一种气体时,则 D_{AB}表示气体分子自扩散系数。

$$D_{AB} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{k_B^3}{\pi^3}} \sqrt{\frac{1}{2m_A} + \frac{1}{2m_B}} \frac{4T^{\frac{3}{2}}}{p (d_A + d_B)^2}$$
(1)
$$D_{ABp} = D_{AB} \frac{\varepsilon}{\tau}$$
(2)

式中, D_{AB} 为气体 A 在气体 B 中的扩散系数; k_{B} 是 Boltzmann 常数, l. 38 × 10⁻²³ J/K; d_{A} 和 d_{B} 分别为气 体 A 和 B 的分子直径;T 为绝对温度;p 为气体压力; m_{A} m_{B} 为气体分子摩尔质量; D_{ABp} 为多孔介质内气 体 A 在 B 中有效扩散系数; ε 为多孔介质孔隙率; τ 为多孔介质的曲折因数。

1.1.2 Knudsen 扩散

当孔隙直径很小、气体压力很低时,气体分子运 动平均自由程远大于孔隙直径,气体分子与孔隙壁频 繁发生碰撞,物质沿孔扩散的阻力主要取决于分子与 壁面的碰撞。根据气体分子运动论,Knudsen 扩散系 数为

$$D_{\rm kp} = 97.0r \left(\frac{T}{m_{\rm A}}\right)^{\frac{1}{2}}$$
 (3)

其中, D_{kp} 为 Knudsen 扩散系数;r为毛细孔道的平均 半径。Knudsen 扩散可进一步分为两种: 当 $K_n = 0.1$ ~0.01 时,气体扩散表现为分子沿着孔隙壁面的滑 动,即滑脱效应; 当 $K_n < 0.01$ 时,可认为是连续介质 流动。 D_{kp} 随着压力的降低而升高。

1.1.3 过渡型扩散

气体在孔隙中的运动情况介于上述 Fick 扩散与 Knudsen 扩散之间 过渡型扩散系数 D_p 为

$$D_{\rm p} = \left(\frac{1}{D_{\rm ABp}} + \frac{1}{D_{\rm kp}}\right)^{-1}$$
(4)

式(4)中如果 $1/D_{kp}$ 项可以忽略,则扩散为分子 扩散;如果 $1/D_{ABp}$ 项可以忽略,则扩散为 Knudsen 扩 散。甲烷、二氧化碳分子直径分别为 0.38 0.33 nm, 在 2 MPa、27 ℃下,分子自由程分别为 3.23 ,4.28 nm。而煤是一种双孔隙介质,孔隙直径从纳米到毫 米级不等,因此以上 3 种扩散均有可能发生,而不同 煤阶的煤基质孔径分布不同,其甲烷吸附、扩散特征 也存在很大差异。在直径为 2 ~ 50 nm 的孔隙中, Knudsen 扩散占主导地位;在直径大于 50 nm 的孔隙 中,分子扩散与过渡性扩散占主导。

根据气体分子运动理论 ,分子热运动自由程为

$$A = \frac{K_{\rm B}T}{\sqrt{2\pi}d_0^2 p} \tag{5}$$

式中 d_0 为分子有效直径 ,nm。

随着压力的降低,气体分子运动平均自由程迅速 增大(图1)扩散类型及扩散系数发生了明显变化, 扩散能力明显增强。而在目前的研究中,通常采用吸 附时间常数来表征煤层甲烷的扩散能力。实际上扩 散系数在煤层气产出过程中并非定值,在低压区扩散 系数明显升高,因此,吸附时间也应该是一个变 量^[18]。在低压下,构造煤的扩散能力明显高于原生 结构煤,一个反映煤体对低压气体吸附-扩散能力的 指标——瓦斯放散速度,被广泛用于指导瓦斯突出灾 害防治。



图 1 20 ℃时气体分子运动平均自由程随压力的变化

Fig. 1 Variation of gas motion free path with pressure at 20 ℃ 1.2 渗 流

煤层是一种双孔隙介质,内生割理、次生裂隙系统是渗流的主要通道,煤层渗透率主要依赖裂隙系统。对于理想光滑平直裂缝,体积流量与等效隙宽的 立方成线性关系,即立方定律,有

$$Q = -\frac{\rho g w h^3}{12\eta} \frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}l} \tag{6}$$

其中 Q 为体积流量; ρ 为流体密度;g 为重力加速度; w 为断面宽度;h 为裂缝等效宽度; $\frac{dh}{dl}$ 为水力梯度; η 为流体动力黏度。但实际岩体裂隙具有一定的粗糙 度,并非光滑平直,粗糙岩体裂缝中流体流动阻力增 大,渗透性降低。因此,裂隙的宽度及粗糙度是决定 煤层渗透率高低的关键参数。 有效应力通过改变裂隙宽度而改变渗透率:裂隙 面法向应力变化导致裂隙宽度变化,渗透性改变;裂 隙发生剪切变形,剪胀或剪缩效应使得裂隙宽度、粗 糙度发生变化,从而使渗透性增大或减小。

有效应力水平越高,煤层裂隙渗透率越低。渗透 性主要依赖裂隙系统,对于因强烈构造改造而形成的 粉煤层而言,通常没有裂隙系统,煤粉颗粒间孔隙是 渗流通道。有裂隙系统的煤层渗透率明显高于无裂 隙系统或者裂隙不发育的煤层渗透率,即原生结构、 碎裂结构煤层渗透率高于碎粒、糜棱结构的煤层渗透 率。

应力敏感实验表明,渗透率与围压呈负指数函数 关系。但事实上,由于煤层的非均质各向异性特征, 渗透率与围压之间并非严格的负指数函数关 系^[2-3,7]。应力敏感系数定义为

$$\alpha_{\rm e} = -\frac{\Delta k}{k} \frac{1}{\Delta \sigma_{\rm e}} = -\frac{1}{k} \frac{\mathrm{d}k}{\mathrm{d}\sigma_{\rm e}} \tag{7}$$

其中 Δk 为渗透率改变量 10^{-15} m^2 ; $\Delta \sigma_e$ 为有效应力 改变量 MPa; k 为渗透率 10^{-15} m^2 。式(7)的解析解 为

$$k = e^{-\alpha_e \sigma_e + c}$$

式中 ρ 为通解的积分常数项。

式(7)和式(8)表明,应力敏感系数的定义已经 决定了渗透率与有效应力为负指数关系。实验数据 与负指数函数的吻合情况并不十分理想^[7],尤其是 降压测试数据。究其原因,一方面可能是存在实验误 差,另一方面是应力敏感系数实际并非定值,应力敏 感系数会随着压力区间的不同以及加载和卸载的不 同而变化。

从应力敏感的机理看,在低有效应力水平下,裂 缝开度相对较大,有效应力增加使得裂缝开度较快、 较大幅度闭合,渗透率也相应出现较大幅度下降;在 达到较高有效应力条件下,因为裂缝的不平整性,裂 缝进一步闭合的幅度有限,渗透率下降的幅度也有 限。同时当地层压力降低至临界解吸压力时,煤层气 开始解吸、扩散,煤基质发生收缩变形,又促使渗透率 上升,即有效应力效应与基质收缩效应综合作用影响 渗透率的变化。在初期排水阶段,仅出现有效应力效 应,即应力敏感,地层压力越高,排水引起更大幅度的 水压下降,进而渗透率下降越多。

2 高煤阶煤层气井初期排采强度数值研究

2.1 数值方法概述

数值模拟是研究煤层气藏参数、预测气井产量的

重要技术手段。Simed 是一款由澳大利亚联邦科学 与工业研究院与新南威尔士大学共同开发的高级煤 层气藏数值模拟软件,该软件采用全耦合隐式求解 法,可以模拟煤层有效应力效应、基质收缩与膨胀效 应、多组分气体吸附以及气井排采控制等。软件不仅 内置了4个渗透率模型,还可以由用户自定义渗透率 动态变化等参数^[19-21]。笔者以沁水南部不同煤体结 构高阶煤层气藏为例,采用Simed 软件进行不同初期 排采强度下的气井产能模拟。

2.2 输入参数

本次模拟采用的渗透率模型为 Shi – Durucan (S -D)模型,该模型描述了煤的含气性、膨胀收缩效应 及应力变化,然后再将应力变化和渗透率联系起来, 能较好地反映气井排采过程中煤层渗透率的动态变 化以及产能的响应。S-D模型数学表达式^[1-2]为

$$k = k_0 e^{-3c_f(\sigma - \sigma_0)} \tag{9}$$

$$\sigma - \sigma_0 = -\frac{\nu}{1 - \nu} (p - p_0) + \frac{E}{3(1 - \nu)} \times$$

$$[\varepsilon(C_{tot}) - \varepsilon(C_{tot0})]$$
 (10)

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} C_{tot} / V_{Lmax}$$
(11)

$$C_{\text{tot}} = \sum_{j=0}^{n} C_{j} = \sum_{j=0}^{n} \frac{V_{\text{L}j} p_{j} b_{j}}{1 + \sum_{j=1}^{n} p_{j} b_{j}}$$
(12)

$$c_{\rm f} = \frac{c_{\rm f0}}{\alpha(\sigma - \sigma_0)} \{1 - \exp\left[-\alpha(\sigma - \sigma_0)\right]\}$$
(13)

式中, σ_0 为初始有效应力, MPa; σ 为有效应力, MPa; p_0 为初始地层压力, MPa; k_0 为初始渗透率, 10^{-15} m²; ν 为泊松比; *E* 为杨氏模量, MPa; V_{Lj} 为j气体的 Langmuir 体积, m³/t; V_{Lmax} 为最大吸附体积, m³/t; b_j 为j气 体组分的 Langmuir 常数; C_{tot0} 为初始气体总含量, m³/ t; C_{tot} 为气体总含量, m³/t; ε 为体积应变; ε_{max} 为最大 吸附量时的体积应变; c_f 为煤的平均割理压缩率, MPa⁻¹; α 为割理压缩率的下降率, MPa⁻¹; c_{t0} 为初始 煤割理压缩率, MPa⁻¹。

沁水盆地南部主采的3号煤层主要为无烟煤,兰 氏体积和原地含气量高,甲烷含量高达21 m³/t,30 ℃的兰氏体积高达50 m³/t,兰氏压力为0.6~2.5 MPa,普遍低于1.5 MPa。区内煤层埋深400~700 m 构造煤广泛发育,其中原生结构、碎裂结构煤中裂 隙系统较发育,渗透率相对较高,而碎粒、糜棱煤中裂 隙基本消失,渗透率低。除潘庄区块外,煤层气井排 采效果普遍不佳。根据生产数据与实验结果,本次模

拟主要参数见表1和图2。

采用压裂直井进行降压排采,初始液位降速分别 为1 m/d 和5 m/d 降至150 kPa 后保持稳定,当井底 流压小于150 kPa 时停止模拟。分别考察储层在以 下3 种情形下的产气规律:① 既无应力敏感又无基 质收缩,即渗透率不变;② 仅有应力敏感;③ 既有应 力敏感又有基质收缩。

表1 Simed 软件输入参数





图 3 显示了渗透率为 5.0×10⁻¹⁵ 0.5×10⁻¹⁵ m² 的煤层气井产能数值模拟结果。其中 1 2 和 3 分别 表示不考虑应力敏感和基质收缩、考虑应力敏感、既 有应力敏感又有基质收缩 3 种情况。表 2 为模拟结 果的统计与对比。



图 3 渗透率为 5.0×10⁻¹⁵ 0.5×10⁻¹⁵ m²的煤层气井不同降液速率的产气效果

2014	年第	39	卷
------	----	----	---

Table 2 Numerical simulation results of gas production in coal seams of different coal textures							
煤体 结构	渗透率/ 10 ⁻¹⁵ m ²	初期降液速 率/(m・d⁻¹)	渗透率模 型编号	渗透率模型	产气速率峰 值/(m ³ ・d ⁻¹)	累计产气 量/万 m ³	累计产气 增幅/%
原生、碎裂	5.0	1	1	渗透率不变	707.67	87.95	
			2	有效应力效应	452.75	46.56	-47.06
			3	有效应力效应和基质收缩效应	949.95	127.91	45.43
		5	1	渗透率不变	1 089. 20	89.13	
			2	有效应力效应	795.87	47.24	-47.00
			3	有效应力效应和基质收缩效应	1 252.97	129.64	45.45
碎粒、糜棱	0.5	1	1	渗透率不变	249. 20	14. 12	
			2	有效应力效应	143. 50	8.57	- 39. 31
			3	有效应力效应和基质收缩效应	339. 26	21.42	51.70
		5	1	渗透率不变	434. 85	14.30	
			2	有效应力效应	228.90	8.53	- 40. 35
			3	有效应力效应和基质收缩效应	406.90	20.99	46.78

0.5

表 2 不同煤体结构煤层气井产气模拟结果

为考察压裂裂缝导流能力的影响 分别进行了不 同导流系数下的气井产能情况模拟 结果见图 4 和表 3。模拟结果表明:



图 4 不同压裂裂缝导流系数下煤层气井产气 效果(降液速率为5 m/d)

Fig. 4 The gas production with varying hydraulic fracture conductivity (drop rate of fluid level is 5 m/d)

(1) 对于渗透率为 5.0×10^{-15} m²的原生、碎裂结 构煤层 初始降液速率为15 m/d 在不同的渗透率 模型下模拟生产3000 d 其累计产气量结果较接近, 前者略低于后者。考虑应力敏感比不考虑应力敏感

产气量降低 47% ,考虑应力敏感与基质收缩累 累计 计产气量比渗透率不变的累计产气量增加45%。

表3 不同导流能力下的产气能	力
----------------	---

Table 3 Gas production with varying fracture					
conductivity					
渗透率/	导流系数/	产气速率峰值/	累计产气		
$10^{-15} \mathrm{m}^2$	(μm ² • m)	(m ³ • d ⁻¹)	量/万 m ³		
	2.0	1 252.97	129.64		
5.0	1.0	944.66	119.20		
	0.5	645.97	105.86		
	1.5	406.70	20.99		

428.25

256.80

20.89

18.35

1.0

0.5

(2) 对于渗透率为 $0.5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 的碎裂、糜棱结 构煤层,初始降液速率为1m/d和5m/d,在不同的 渗透率模型下模拟生产3000 d,其累计产气结果有 一定差别:渗透率不变时,1 m/d 降速的累计产气量 略低于 5 m/d 降速的累计产气量;但在考虑应力敏 感、应力敏感与基质收缩效应时,1 m/d 降速的累计 产气量大干5 m/d 降速的累计产气量。考虑应力敏 感与不考虑应力敏感相比,累计产气降低了39.31% 和 40.35%;但考虑应力敏感与基质收缩效应时,累 计产气增加了 51.70% 和 46.78%。表明低渗煤层宜 采用较低的初期降液速率。

(3) 渗透率是影响研究区煤层气井产气效果的 关键因素之一,渗透率5.0×10⁻¹⁵m²的煤层累计产 气量、产气速率峰值远高于 $0.5 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 的煤层。

(4) 对于渗透率 0.5×10⁻¹⁵ m²煤层 裂缝导流能

1925

力为 1.5 和 1.0 μm² • m 时,累计产气量分别为 20.99 万 m³ 20.89 万 m³,两者基本相同(图4(b)和 表 3)。压裂裂缝导流能力也是影响产气效果的重要 因素之一,导流能力越强,产气效果越好。但对于低 渗煤层,导流能力高至一定限度(本案例中约 1.0 μm² • m)以后,产气能力对导流能力不敏感。

3.2 讨 论

本次模拟中,总体上产气速率峰值不高,5.0× 10⁻¹⁵ m² 煤层产气速率峰值为1252.97 m³/d,这与 排采面积偏小、兰氏压力低、地层压力低等因素有关。 由图5可知,兰氏体积相同而兰氏压力较低的等温吸 附线在低压区较陡峭、高压区相对平缓。在地层压力 降低初期,解吸量较少,产气量较低;储层压力降至一 定阶段,等温吸附线斜率明显增大,解吸量会迅速增 加(图5)。因此,对于高阶煤层气藏,应尽量降低地 层压力,以提高可解吸量。





在排水降压过程中,采用较高的降液速率,可以 较快达到较高产气速率 但高产气速率维持时间较 短。不论采用多高的初期降液速率、煤层的有效应力 效应都不可避免 但在煤层甲烷开始解吸后 基质收 缩效应会抵消有效应力负效应 并可能导致渗透率回 升。在本案例的排采初期,有效应力效应使渗透率降 低,在地层压力由初始的 1.5 MPa 降至临界解吸压力 1 MPa 时 渗透率降至初始渗透率值的 85% ,之后由 于煤层甲烷开始解吸 ,渗透率因基质收缩效应而回 升,并在 0.86 MPa 时渗透率开始超过初始渗透率,并 在地层压力为 0.15 MPa 时达到初始渗透率的 3.76 倍。如果不考虑基质收缩效应,则在地层压力降至 0.15 MPa 时,煤层渗透率降至初始值的 64.5% (图 6)。临界解吸压力与初始地层压力比值越小,有效 应力效应作用越明显,初期排水阶段渗透率下降幅度 越大;基质收缩效应越强,排采后期渗透率升高幅度 越大。

本次模拟中,采用的 S – D 渗透率模型假设煤层



图 6 渗透率动态特征

Fig.6 The dynamic characteristics of permeability 上覆载荷是不变的,并基于均质各向同性弹性假设, 推导出地层压力降低导致的水平应力变化。然而,这 些假设条件与实际煤层是不符合的。随着排采的进 行,煤层顶板会发生沉降变形,因此,近井带煤层上覆 载荷是变化的,煤层不是均质各向同性介质,不符合 弹性理论的假设条件,因此,由S-D模型计算出的 近井带渗透率值偏低^[3-4]。

本次模拟中,假定煤层是均质的,压裂裂缝是理 想的垂直裂缝形态,整个生产是连续进行无中断的。 而在实际生产中,煤层是非均质的,钻井、压裂及完井 可能给煤层造成损害,过快的降液可能增加煤粉堵塞 井底沉砂袋、卡泵等事件发生的概率,过慢的降液速 率也可能导致煤粉不易排出、生产成本高等。如果生 产中断时间过长,则会发生煤粉沉降堵塞近井带、井 筒液柱升高造成近井带水锁等,会给气井产能造成重 要影响。与扩散系数相关的吸附时间是随着解吸过 程而变化的。这些都是本案例没有考虑的因素。

黏性流体携带固体颗粒的能力与流体流速正相 关,高速流体可以携带较大尺寸固体颗粒。高渗煤层 机械强度较高、裂隙发育且裂隙宽度较大,裂隙通过 煤粉的能力较强;低渗构造软煤层机械强度低、天然 裂隙不发育且裂隙宽度小,且压裂效果往往也不理 想,煤粉产出多,高的排液速率更容易造成近井带裂 隙堵塞。

4 结 论

(1)煤层甲烷运移包括基质解吸、扩散、天然裂 缝渗流、压裂裂缝导流等环节,这些环节需协调作用, 才有利于产气。扩散系数随地层压力降低而增大,而 压裂裂缝导流系数会因有效应力作用、煤粉堵塞等因 素而降低。

(2)研究区高阶煤层气藏具有地层压力不高、兰 氏压力低、解吸困难的特点,尽量降低地层压力有利 于解吸。渗透率是影响研究区气井产能的关键地质 因素,渗透率高,则产气效果好。渗透率在排采中是 动态变化的,应力敏感效应不可避免,它能显著降低

85 - 89.

煤层渗透率和气井产能,但如果排采控制得当,基质 收缩效应可以有效恢复煤层渗透率,并获得较好的产 气效果。渗透率高、压裂效果好的煤层裂缝宽度较 大,通过煤粉能力强,在不致引起煤粉堵塞压裂裂缝 的前提下,可采用较高的降液速率,持续抽出煤粉、 水,将有利于获得高产。低渗的构造煤对初期降液速 率敏感,宜采用较低的初始降液速率,而且低渗煤层 裂缝不发育、裂缝宽度小,高强度排采更易导致煤粉 堵塞裂缝。

(3) 压裂裂缝导流能力是影响产气效果的重要因素,导流能力越高,产气效果越好。但对于低渗煤层,导流能力超过一定限度后,提高导流能力并不能提高产气效果。

(4)初期排采速率过高,易造成煤粉产出过多、 过快,堵塞近井带和井底,造成卡泵等事故。而排采 过程的中断会造成煤粉沉淀堵塞裂缝、近井带水锁, 给储层造成伤害。排采过程应保持连续,避免中断。

参考文献:

- [1] Shi J Q ,Durucan S. Drawdown induced changes in permeability of coalbeds: A new interpretation of the reservoir response to primary recovery [J]. Transport in Porous Media 2004 56:1-16.
- [2] Shi J Q ,Durucan S. Exponential growth in San Juan Basin Fruitland Coalbed permeability with reservoir drawdown:model match and new insights [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering 2010 6:914 –925.
- [3] Liu Huihai ,Rutqvist Jonny. A new coal-permeability model:Internal swelling stress and fracture-matrix interaction [J]. Transport in Porous Media 2010 §2:157 – 171.
- [4] Pan Z J ,Connell L D. Modeling permeability for coal reservoirs: A review of analytical models and testing data [J]. International Journal of Coal Geology 2012 92:1 – 44.
- [5] 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.
 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.
- [6] 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.
- [7] Meng Zhaoping ,Li Guoqing. Experimental research on the permeability of high-rank coal under a varying stress and its influencing factors[J]. Engineering Geology 2013 ,162:108 – 117.
- [8] 邹雨时 张士诚,张 劲,等. 煤粉对裂缝导流能力的伤害机理
 [J]. 煤炭学报 2012 37(11):1890 1894.
 Zou Yushi Zhang Shicheng Zhang Jin et al. Damage mechanism of

coal powder on fracture conductivity[J]. Journal of China Coal Society 2012 37(11):1890 - 1894.

[9] 张双斌 苏现波,郭红玉,等.煤层气井排采过程中压裂裂缝导

流能力的伤害与控制[J].煤炭学报 2014 39(1):124-128. Zhang Shuangbin ,Su Xianbo ,Guo Hongyu ,et al. Controlling the damage of conductivity of hydraulic factures during the process of drainage in coalbed methane well[J]. Journal of China Coal Society , 2014 39(1):124-128.

- [10] 魏迎春 涨傲翔 姚 征 ,等. 韩城区块煤层气排采中煤粉产出 规律研究[J]. 煤炭科学技术 2014 A2(2):85-89.
 Wei Yingchun Zhang Aoxiang ,Yao Zheng ,et al. Research on output laws of pulverized coal during coalbedmethane drainage in Hancheng Block [J]. Coal Science and Technology ,2014 A2(2):
- [11] 康永尚 秦绍锋 韩 军 筹 煤层气井排采动态典型指标分析 方法体系[J].煤炭学报 2013 38(10):1825-1830. Kang Yongshang Qin Shaofeng Han Jun et al. Typical dynamic index analysis method system for drainage and production dynamic curves of CBM wells [J]. Journal of China Coal Society 2013 ,38 (10):1825-1830.
- [12] 林 鑫,张士诚,张 劲.柳林煤层气储层敏感性评价实验
 [J].煤田地质与勘探 2011 39(6):28-31.
 Lin Xin Zhang Shicheng Zhang Jin. Sensitivity evaluation experiment of Liulin CBM reservoir [J]. Coal Geology & Exploration, 2011 39(6):28-31.
- [13] 刘升贵 袁文峰 涨新亮 筹. 潘庄区块煤层气井产气曲线特征 及采收率的研究[J]. 煤炭学报 2013 ,38(S1):164-167.
 Liu Shenggui ,Yuan Wenfeng Zhang Xinliang et al. The production curve and recovery rate of coalbedmethane well in Panzhuang block
 [J]. Journal of China Coal Society 2013 ,38(S1):164-167.
- [14] Duong D D. Adsorption analysis: Equilibria and kinetics [M]. London: Imperial College Press, 1998.
- [15] An F H ,Cheng Y P ,Wu D M ,et al. The effect of small micropores on methane adsorption of coals from Northern China [J]. Adsorption 2013 ,19:83 - 90.
- [16] Ju Yiwen Jiang Bo ,Hou Quanlin ,et al. Behavior and mechanism of the adsorption/desorption of tectonically deformed coals [J]. Chinese Science Bulletin 2009 54(1):88 - 94.
- [17] Alexeev A D ,Feldman E P ,Vasilenko T A. Methane desorption from a coal-bed[J]. Fuel 2007 86:2574 – 2580.
- [18] Pillalamarry Mallikarjun ,Harpalani Satya ,Liu Shimin. Gas diffusion behavior of coal and its impact on production from coalbed methane reservoir [J]. International Journal of Coal Geology 2011 , 86:342 - 348.
- [19] 潘哲军,卢克・康奈尔.煤层气产量预测和矿区优化的储层模 拟[J].中国煤层气 2006 3(3):27-31.
 Pan Zhejun, Connell Luke. Reservoir simulation for CBM/CMM production forecasting and field optimisation [J]. China Coalbed Methane 2006 3(3):27-31.
- [20] Connell L D. Coupled flow and geomechanical processes during gas production from coal seams [J]. International Journal of Coal Geology 2009 77:222 – 233.
- [21] Chen Dong ,Pan Zhejun ,Liu Jishan ,et al. Characteristic of anisotropic coal permeability and its impact on optimal design of multilateral well for coalbed methane production [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering 2012 88 -89:13 - 28.