

文章编号: 1001-1986(2017)06-0034-06

煤矿采动条件下煤层气储层模型及应用

赵继展^{1,2}, 张群², 张培河²

(1. 煤炭科学研究院, 北京 100013; 2. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 煤矿区煤层气开发受煤矿采动影响, 为实现煤矿采动条件下煤层气井产能数值模拟, 抽象概括了采动条件下煤层气开发的地质模型, 构建了采动条件下煤层气储层的数学模型, 并通过对 CBM-SIM 软件二次开发, 实现了采动条件下煤层气储层的数值模拟。在建模和数值解算软件开发中, 基于采动离层量变化曲线公式构建了采动条件下储层渗透率变化曲线公式, 利用采动井水位变化规律构建了储层漏失水量变化公式, 利用时间卡机制解决了煤储层渗透率及漏失水量的动态求解和循环迭代过程中作为系数和边界条件的调用赋值, 实现了渗透率随采动影响的动态变化、储层水漏失降压和储层产气的耦合解算。应用开发的软件对淮南矿区某矿采动条件下煤层气抽采井生产数据进行历史拟合和产量模拟应用, 预测煤层气产量曲线与实际生产曲线基本一致, 判定系数达到 0.92。

关 键 词: 采动条件; 煤层气; 储层; 数值模拟

中图分类号: TD712.62 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-1986.2017.06.006

C Coalbed methane reservoir model under mining conditions and its application

ZHAO Jizhan^{1,2}, ZHANG Qun², ZHANG Peihe²

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

Abstract: In order to realize the numerical simulation of coalbed methane reservoir under mining conditions, the geological model of coalbed methane development under mining conditions is generalized, the mathematical model of coalbed methane reservoir under mining condition is constructed, through the secondary exploration of CBM-SIM software, the numerical simulation of coalbed methane reservoir under mining conditions is realized. In the process, the formula of reservoir permeability change curve under mining condition is established based on the formula of variation curve of strata separation, the variation formula of water loss in reservoir is established based on the variation law of water level. By the time card mechanism, the dynamic solution of permeability and leakage water quantity of coal reservoir is made, and the call assignment of coefficients and boundary conditions in the iteration process is solved. The coupling calculation of the dynamic change of permeability with mining influence, the reservoir water leakage and reservoir gas production is realized. By using the software development, the production data of coalbed methane extraction well under mining conditions in Huainan mining area are simulated by historical and yield prediction. The production curve is consistent in shape, and the coefficient of judgment is 0.92. Good simulation results have been achieved.

Keywords: mining condition; coalbed methane; reservoir; numerical simulation

基于地面煤层气产业的发展特点, 煤层气开发的数值模拟对象主要为原始储层, 从平衡吸附模型^[1]到双重扩散模型^[2-3], 再到 COMETPC-3D^[4]和后来的 COMET2.1^[5]、COMET3.0, 都是对原始煤层中煤层气吸附、运移过程的描述。围绕煤矿安全生产、减少瓦斯灾害等问题, 国内众多学者^[6-10]进行了大量

瓦斯运移数值模拟研究, 但主要是为抽采瓦斯的钻孔部署提供依据, 所以多以分析覆岩裂隙场的分布和瓦斯渗流为主, 也有研究工作面采动岩层移动影响下的地面井套管变形破坏^[11]和研究采空区地面抽采效率及抽采技术^[12-13], 鲜有从地面煤层气资源开发数值模拟的角度考虑煤矿采动对煤储层中煤层气

收稿日期: 2016-04-13

基金项目: 国家科技重大专项课题(2011ZX05040-002)

Foundation item: National Science and Technology Major Project(2011ZX05040-002)

第一作者简介: 赵继展(1978—), 男, 河北宣化人, 博士研究生, 从事煤矿安全及煤层气开发工作.E-mail: zhaojizhan@cctegxian.com

引用格式: 赵继展, 张群, 张培河. 煤矿采动条件下煤层气储层模型及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(6): 34-39.

ZHAO Jizhan, ZHANG Qun, ZHANG Peihe. Coalbed methane reservoir model under mining condition and its application[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(6): 34-39.

抽采和运移的影响。因此可以以原始储层煤层气开发数值模型为基础, 分析在采动条件下发生变化的主要煤储层物性参数, 研究其在采动条件下的变化规律, 修正煤层气抽采数值模拟模型, 进而研究形成采动条件下的地面煤层气抽采数值模拟技术。

1 采动条件下煤储层物性参数分析

影响煤层气开发的储层物性主要有: 储层几何特征、孔隙度、含气量、储层压力、饱和度、储层解吸吸附特性、储层渗透性等^[14], 显然相对于整个储层受采动影响发生改变的主要有煤储层孔隙度、储层压力、储层的渗透性和含气饱和度等。受地面煤层气开发经过采空区技术的限制, 当前研究的采动条件下煤层气抽采主要指煤储层位于回采工作面上部受采动影响的情况, 依据采场上覆岩层“砌体梁”的结构模型, 某个时间点上采动影响区域在走向上可分为“煤壁支承区”、“离层区”、“重新压实区”^[15]。而随着工作面的不断推进, 走向上储层的每个区域都将依次经历支承、离层和压实的动态变化过程, 当采动区井的供气区域处在“煤壁支承区”时, 受地应力增加的影响, 煤储层孔隙度减小、储层压力增加、渗透性减小, 此时该区域对采动区煤层气井的产能提高基本不做贡献; 当采动区井的供气区域处在“离层区”时, 煤储层发生采动卸压、渗透率得到了极大的提高^[16], 此时该区域成为采动区煤层气井产能提高的关键; 由于压实是一个缓慢的过程, 所以“重新压实区”对煤层气井的产出仍有一定贡献, 因此主要分析处于“离层区”、“重新压实区”供气储层孔隙度、储层压力、渗透性和饱和度的变化情况。

由“离层区”的形态特点可知, 区域内煤储层基本不再支承上覆地层压力, 且在自重作用下发生变形破断, 其原生裂隙扩张延展、大量新生裂隙产生, 整体的裂隙体积增加。钱鸣高等^[17]基于关键层理论, 给出了采动离层量的变化曲线, 离层量在采场推进方向的变化主要受主关键层最大下沉量、关键层和亚关键层断块长度的影响。考虑其内在联系, 在“离层区”, 受采动影响的煤储层孔隙度和渗透率的变化与离层量成正相关。煤储层压力是煤储层孔隙中流体压力的体现, 与储层骨架应力共同平衡地层应力, 在“离层区”, 由于储层不再支承上覆地层压力, 储层压力与裂隙内静水压力动态平衡, 若储层破裂裂隙与采空区“垮落带”导通, 地层裂隙水漏失, 形成裂隙水卸压漏斗, 则储层压力也随之降低。由于裂隙系统中液态流体(主要为水)的体积压缩系数小, 卸压后体积膨胀有限, 所以“离层区”煤储层

裂隙系统空间增加主要由气态填补(主要为甲烷), 在水体未发生漏失减少的情况下, 数值上会出现水饱和度减小、气饱和度增加, 但煤储层系统内物质总量保持不变。在“重新压实区”, 随着工作面的推进, “砌体梁”结构的“岩块”逐渐滑移恢复成水平位置, 其上部载荷几近线性增加, 最后恢复到原岩应力强度^[15], 同时实验研究证明压实曲线(应力-应变曲线)符合指数曲线特征^[18], 显然压实量与工作面距离也符合指数曲线, 而对应孔隙度和渗透率的减小量与压缩位移成正相关, 储层压力与地层应力成正相关。

2 采动条件下煤层气储层模型

2.1 地质模型

常规煤层气开发是通过生产井排水, 储层压力降低, 形成压降漏斗, 煤层气解吸、扩散、渗流, 经生产井产出。考虑“离层区”和“重新压实区”, 采动条件下煤层气的运移产出过程依然遵循解吸、扩散和渗流过程, 所不同的是储层孔隙度和渗透率发生了动态变化, 采动区井不再排水, 而是实施负压抽采, 储层压力的降低是由于采动卸压和裂隙水漏失引起。因此对采动区煤层气储集和运移的地质模型作如下概化。

① 煤储层具有典型的裂隙-孔隙双重孔隙结构, 由煤基质块中的微孔隙系统和裂隙系统构成; 采动影响导致煤储层中裂隙系统的裂隙延展、数量增加, 少数煤基质块中的微孔隙破裂。

② 煤基质块中的微孔隙是煤层气的主要储集空间, 煤层气主要以吸附状态赋存于微孔隙的内表面上; 裂隙系统既是气体和水的储集空间, 也是气、水两相流体的渗流通道。

③ 采动条件下煤储层裂隙系统的渗透率是变化的, 在空间上动态分布, 受采动控制, 其煤层渗透率变化具有规律性。

④ 煤基质块表面的解吸非常快, 足以维持自由气和吸附气之间的平衡, 煤基质块内部的吸附气与自由气处于不平衡状态; 煤基质块中气体的扩散过程为非平衡拟稳态过程且服从 Fick 第一定律。

⑤ 煤储层中存在气、水两相流体, 孔隙介质中的两相流体为牛顿流体, 流动为层流运动符合 Darcy 定律。

⑥ 煤层气从煤储层运移产出, 经历解吸、扩散和渗流 3 个阶段。

⑦ 采动条件下煤储层原岩应力释放, 同时采动致使一定范围内煤储层裂隙发展, 系统中水位快速下降, 离层区不考虑气体逸失。

⑧ 煤储层中气、水的运移过程，温度不变。

2.2 数学模型

2.2.1 基本方程

裂隙系统气、水两相流动符合质量守恒原理和 Darcy 定律，推导获得两相渗流的基本数学方程^[14]：

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{k_{tx} k_{rg} \rho_g}{\mu_g} \left(\frac{\partial p_g}{\partial x} - \rho_g g \frac{\partial H}{\partial x} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{k_{ty} k_{rg} \rho_g}{\mu_g} \left(\frac{\partial p_g}{\partial y} - \rho_g g \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k_{tz} k_{rg} \rho_g}{\mu_g} \left(\frac{\partial p_g}{\partial z} - \rho_g g \frac{\partial H}{\partial z} \right) \right] + \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} q_m - q_g &= \frac{\partial}{\partial t} (\rho_g S_g) \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{k_{tx} k_{rw} \rho_w}{\mu_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial x} - \rho_w g \frac{\partial H}{\partial x} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{k_{ty} k_{rw} \rho_w}{\mu_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial y} - \rho_w g \frac{\partial H}{\partial y} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k_{tz} k_{rw} \rho_w}{\mu_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial z} - \rho_w g \frac{\partial H}{\partial z} \right) \right] - \end{aligned} \quad (2)$$

$$q_w = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w S_w)$$

式中 k_t 为煤储层的绝对渗透率； k_{rg} 、 k_{rw} 分别为气、水的相对渗透率； ρ_g 、 ρ_w 分别为气、水的密度； μ_g 、 μ_w 分别为气、水的黏度； p_g 、 p_w 分别为气、水压力； g 为重力加速度； H 相对某基准面的深度，下为正； q_m 为点气源(基质扩散到裂隙中的气体)； q_g 、 q_w 分别为气、水汇项(分别表征产气量和裂隙水漏失量)。

2.2.2 基质解吸-扩散

基质块微孔隙系统受采动影响发生变化对气产量影响作用较小。首先煤层作为一个整体，裂隙系统是其薄弱位置，受采动外力作用后，裂隙系统优先发生再次破坏，而基质虽然包含大量微孔隙，但相对强度高，发生再次破坏的情况相对要弱得多。其次，对于基质块大量微孔隙吸附气体来说，基质块发生破裂时微孔隙吸附气体迅速解吸并进入裂隙系统的自由气体量占比少，同时这一过程对气产量的贡献与基质块卸压解吸和裂隙系统渗透率提高对气产量的贡献相比要小的多。因此忽略基质块内由于微孔隙破裂解吸的吸附气，仍将基质块视为点源，其内部气体以扩散方式向外运移，符合 Fick 第一定律，可以得到单位时间单位基质块扩散出的气体量为^[14]

$$q_m = D\sigma [V_m - V_e(p_g)] \quad (3)$$

式中 D 为基质块气体扩散系数 σ 为 Warren & Root 形状因子，与基质块单元的大小和形状有关； V_m 为

单位基质块吸附气体平均含气量； V_e 为单位基质块裂隙面上与自由气体压力处于平衡状态的吸附气体量，通过 Langmuir 模型求解。

$$V_e = V_L p_g / (p_L + p_g) \quad (4)$$

式中 V_L 为 Langmuir 体积； p_L 为 Langmuir 压力； p_g 为自由气体压力。

2.2.3 裂隙系统渗透率

分析采动影响导致的顶板离层变化情况，文献[17]给出了采动离层量的变化曲线

$$\Delta y = W_2 (e^{-\frac{x}{2l_2}} - e^{-\frac{x}{2l_1}}) \quad (5)$$

式中 l_1 、 l_2 分别为亚关键层、主关键层的破断块长； W_2 为主关键层中部的最大下沉位移。考虑采动后渗透率 k_t 与采动离层量 Δy 的正相关关系，构建采动条件下储层渗透率的变化曲线表达式

$$k_t = k_0 + G (e^{-\frac{d_x}{2l_2}} - e^{-\frac{d_x}{2l_1}}) \quad (6)$$

式中 G 为采动影响渗透率变化系数，受储层物性、与关键层距离及采高等因素综合控制，可通过历史拟合获得； k_0 为原始地层渗透率，作为采动后储层渗透率变化的基准值； d_x 表征观测点距工作面的距离，由工作面的推进速度和时间间隔确定。考察式(5)在“重新压实区”的变化规律，符合压实曲线特征，因此在该区域内仍采用构建的渗透率变化曲线(式(6))。

2.2.4 裂隙系统水降压

裂隙系统地层受采动影响裂隙扩张水漏失压力降低，导致储层压力下降，工程实践显示受采动影响煤层气井内水位快速下降，处于回采工作面正上方时煤层气井内水位低于煤储层。以煤储层底板高度为水位零点，原始储层状态水位距煤层底板的高度为 H_{w0} ，则水位下降量 H_{wj} 满足

$$H_{wj} = \begin{cases} 0 & \text{超前采动边界, } x=r \\ H_{w0} & \text{采动工作面正上方位置, } x=0 \end{cases} \quad (7)$$

为了建立储层裂隙水压力的变化函数，采用煤储层单位体积水漏失量 q_{wk} 来表征储层裂隙水的水位降低，根据公式(7)可知，工作面推进 r 距离，储层水位下降 H_{w0} ，设工作面宽度为 A ，则累积漏失水量为 $H_{w0} \times A \times r$ ，就储层尺度而言 r 的数值较小，漏失水量与距离 r 的关系简化为线性关系，则单位体积水漏失量 q_{wk} 在数值上等于水位下降高度 H_{w0} 。在采动条件下煤层气抽采模式中，地面并不进行排水作业，则储层系统内水相基本数学方程(2)中的水汇项 q_w 主要由储层的水漏失构成，显然 q_w 在 q_{wk} 在时间和空间的函数。

2.2.5 辅助方程

以压力和饱和度为求解变量，欲完整描述煤层

气和水在煤储层中的运移过程, 需再结合饱和度方程、毛细管压力方程、密度方程、黏度方程和相对渗透率方程等辅助方程, 如式(8)。

$$\begin{aligned} S_g + S_w &= 1; & p_c &= p_g - p_w; \\ \begin{cases} \rho_g = \rho_g(p_g) \\ \rho_w = \rho_w(p_g) \end{cases} & ; \quad \begin{cases} \mu_g = \mu_g(p_g) \\ \mu_w = \mu_w(p_g) \end{cases} & ; \\ p_c &= p_c(S_w) \\ \begin{cases} k_{rg} = k_{rg}(S_g, S_w) \\ k_{rw} = k_{rw}(S_g, S_w) \end{cases} & \end{aligned} \quad (8)$$

2.2.6 定解条件

定解条件包括边界条件和初始条件, 内边界煤层气井产量, 依据裘皮产量公式计算。

$$q_g = \frac{2\pi h k_{rg} k_t \rho_g}{\mu_g \left(\ln \frac{r_e}{r_w} + s \right)} (p_g - p_{wfg}) \quad (9)$$

式中 h 为煤储层厚度; k_{rg} 为气体相对渗透率; p_{wfg} 煤层气井底气流压; r_e 为排泄半径; r_w 井筒半径; s 为表皮系数。

外边界包括定压、定流量和混合边界, 定压边界为边界上每一点在每一时刻的压力分布都是已知的, 定流量边界为边界上每一点在每一时刻的通过的流量是已知的, 混合边界为前两类的混合形式, 以上形式的外边界可用压力的已知函数表示。初始条件为煤层气开发的初始时刻 $t=0$, 煤储层内的压力分布和饱和度分布函数是已知的。

2.3 数值求解

选择气相压力 p_g 和水相饱和度 S_w 为独立变量, 建立的描述煤层气在煤储层中运移规律的数学模型显然是一个复杂的非线性偏微分方程(组), 无法用解析法直接求解。可采用有限差分法进行空间和时

间离散, 用有限差商代替微商, 建立基于离散空间网格和离散时间点的差分方程组, 然后采用牛顿迭代对方程中各项系数和未知项进行全隐式处理, 求解方程组。需要特殊处理的是煤储层水漏失量 q_w 和煤储层绝对渗透率 k_t , 可以认为在气体运移过程中这两个参数与选定的独立变量气相压力 p_g 和水相饱和度 S_w 相关性不大, 因此受采动影响后两个参数分别简化视为是与工作面推进相关的空间和时间函数, 在方程迭代解算过程中, 作为定解边界处理, 即先用离散的空间和时间间隔求解 q_w 和 k_t 作为系数, 再参与方程解算, 通过在每个解算循环中增加一组 q_w 和 k_t 的迭代求解实现整个方程组系数动态赋值, 采用牛顿迭代来保障求解过程的收敛。

2.4 模拟软件开发

根据上述提出的采动条件下储层数值模型, 在CBM-SIM软件基础上进行二次开发, 见图1。关闭生产井排水, 通过设立时间卡机制, 实现时间离散, 按工作面的回采进度建立时间卡和空间位置的对应关系, 解算每个时间间隔整个空间尺度煤储层水漏失量 q_w 和煤储层绝对渗透率 k_t , 其中 q_w 通过对储层的空间离散后由 q_{wk} 和时间间隔确定, 在每次迭代循环中可以直接解算获得, 而 k_t 则通过 d_x 和工作面推进速度与离散的空间网格和时间建立对应关系, 在迭代循环过程中解算。然后在每个循环迭代过程中进行方程组系数和边界条件的调用赋值, 从而实现采动影响渗透率动态变化、储层水漏失降压和储层产气的耦合解算, 软件解算界面如图2所示。

3 实例模拟及结果分析

运用上述开发的CBM-SIM软件采动条件下煤层气抽采模拟模块, 对淮南矿区某矿1252(1)工作面采动区W1井生产数据进行拟合, 利用拟合获取的

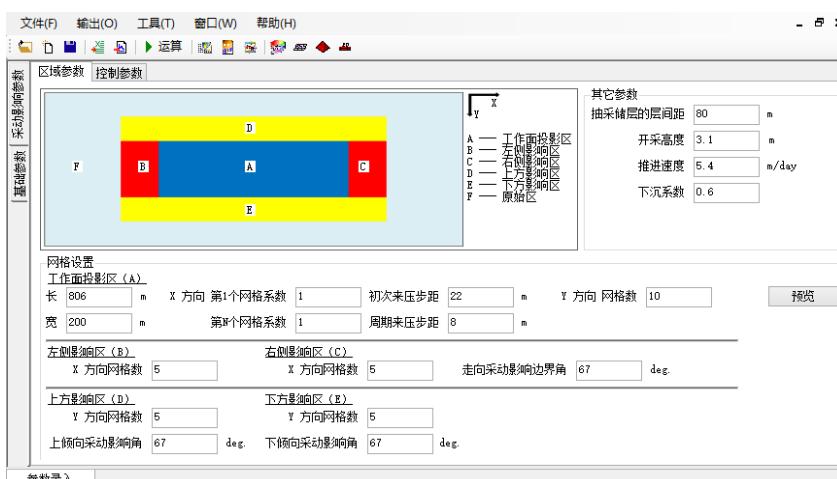


图1 CBM-SIM软件增加的采动模拟模块示意图
Fig.1 Mining simulation module added by CBM-SIM software

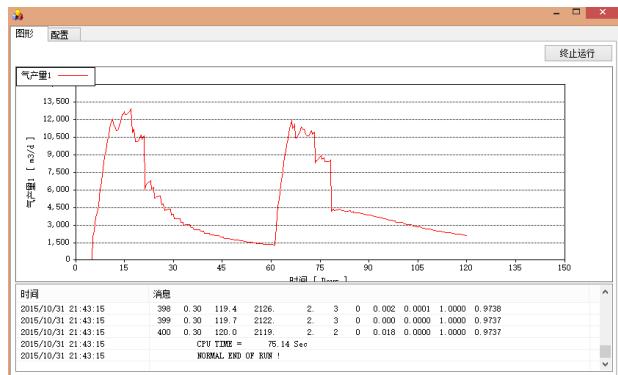


图 2 采动条件下煤层气抽采模拟模块

Fig.2 Simulation of coalbed methane extraction under mining conditions

参数模拟同区 W2 井抽采情况, 模拟结果与实际抽采数据非常吻合。

两口采动区井 W1 井和 W2 井均采用 $\Phi 177.8$ mm 石油套管下到 13-1 煤顶板 10 m, 以下采用 $\Phi 177.8$ mm 筛管下到 11-2 煤顶板 5 m, 该矿 1252(1) 工作面开采

11-2 煤, 采高 3 m, 保护上部 13-1 煤层, 层间距 80 m, 13-1 煤储层模拟参数取值见表 1。

该矿 1252(1) 工作面倾向 208 m, 工作面推进速度 5.4 m/d, W1 地面井距开切眼 52 m, 距回风巷 106 m, W2 地面井距切眼 351 m, 距回风巷 108 m, 依据工作面顶板来压观察取定亚关键层和主关键层的破裂后岩块长度分别为 15 m 和 23 m, 单位体积漏失水系数观测解算为 $0.1 \text{ m}^3/\text{d}$ 。工作面开始推采为时间起点, 位于井下方时地面井开始抽采, 抽采负压为 40~60 kPa, 对 2011-11-29—2012-02-09 时间段内 W1 地面井抽采数据进行历史拟合, 得到的产气量数据见图 3, 获得采动影响渗透率变化系数为 460。可以看到数值模拟计算结果与实际井抽采数据接近, 变化趋势一致, 拟合效果较好, 初步说明构建的采动条件下储层渗透率变化曲线公式和储层漏失水量变化曲线公式符合采动条件下煤层气储层参数变化规律; 提出模型是可行的, 且能够实现采动条件下煤层气井开发模拟。

表 1 1252(1) 工作面 13-1 煤储层模拟参数取值

Table 1 Simulation parameters of coal reservoir 13-1 in working face 1252(1)

煤层厚度/m	含气量/ $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	储层压力/MPa	裂隙孔隙度/%	原始渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	Langmuir 体积/ $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$	Langmuir 压力/MPa	吸附时间/d	相对密度/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	初始水饱和度/%
4.2	6	1.4	2	0.1	11	4.74	3	1.41	100

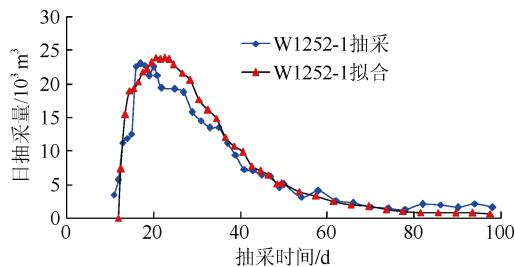


图 3 W1 井气产量历史拟合曲线

Fig.3 Historical fitting curve of gas production in Well W1

由于在一个工作面采动区域, 地层地质条件接近, 采动条件相同, 而且实际抽采气量接近, 抽采数据曲线形态一致, 因此采用相同地质储层参数、采动参数和通过 W1 井获得的采动影响渗透率变化系数, 来模拟预测 W2 井的产气量, 结果见图 4。可以看到在模拟预测的时间段内, 产量曲线的变化形态与实际抽采一致, 产气量最大差值为 $9.14 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$, 平均差值为 $1.41 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{d}$ 。日产气量模拟预测值与实际抽采值的均方根为 1.95, 以实际日抽采量为基准考察模拟产气量拟合度, 判定系数为 0.92, 拟合度很好, 进一步验证了构建的模型符合采动条件下煤层气抽采储层特征。

4 结 论

a. 在经典关键层理论推导的采动离层量变化

规律的基础上, 构建了采动条件下煤储层渗透率变化规律公式, 并通过工程实践总结提出了采用单位体积水漏失量 q_{wk} 的线性变化来表征采动条件下储层水的漏失规律。

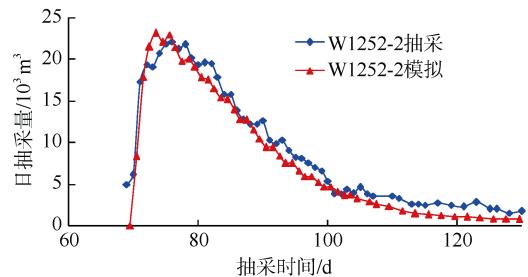


图 4 W2 井模拟气产量与实际抽采量曲线

Fig.4 Simulated gas production and actual production curve of well W2

b. 建立了采动条件下煤层气运移产出的地质模型和数学模型, 模型在煤层气解吸、扩散和渗流运移规律的基础上扩展了受采动条件下煤储层渗透率发生动态变化的规律和储层水漏失规律。

c. 在数值求解过程中, 对每个离散的时间间隔和空间单元, 先利用建立的函数公式求解煤储层渗透率和漏失水量作为中间值, 然后再进行迭代求解差分方程组, 有效地解决了方程组系数的动态赋值问题。

d. 应用建立的储层模型对淮南矿区某矿采动条

件下 W1 地面煤层气井进行历史拟合, 拟合效果较好。采用获得的采动影响渗透率变化系数, 对相同区域生产井 W2 井的产气量进行模拟, 预测结果与实际生产数据吻合较好, 进一步验证了提出的地质模型和构建的数学模型、数值模型是可行的。

参考文献

- [1] BUMB A C , MCKEE C R. Gas-well testing in the presence of desorption for coalbed methane and Devonian shale[J]. SPEFE , 1988 , 3(1) : 179–185.
- [2] SMITH D M , WILLIAMS F L. Diffusional effects in the recovery of methane from coalbeds[J]. Society of Petroleum Engineers Journal , 1984 , 24(10) : 529–535.
- [3] RUCKENSTEIN E , VAIDYANATHAN A S , YOUNGQUIST G R. Sorption by solid with bidisperse pore structures[J]. Chemical Engineering Science , 1971 , 26(9) : 1305–1318.
- [4] PAUL G W , SAWYER W K , DEAN R H. Validation of 3D coalbed simulators[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition , SPE 20733-MS. New Orleans , Louisiana : Society of Petroleum Engineers , 1990.
- [5] Advanced Resources International , Inc. COMET2 version 2.1 user's guide[M]. Washington , DC , USA : Advanced Resources International , Inc. , 2000.
- [6] 杨天鸿, 徐涛, 刘建新, 等. 应力-损伤-渗流耦合模型及在深部煤层瓦斯卸压实践中的应用[J]. 岩石力学与工程学报 , 2005 , 24(16) : 2900–2905.
YANG Tianhong , XU Tao , LIU Jianxin , et al. Coupling model of stress-damage-flow and its application to the investigation of instantaneous seepage mechanism for gas during unloading in coal seam with depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2005 , 24(16) : 2900–2905 .
- [7] 李树刚. 综放开采围岩活动影响下瓦斯运移规律及其控制[J]. 岩石力学与工程学报 , 2000 , 19(6) : 809–810.
LI Shugang. Gas delivery feature and its control influenced by movement of the surrounding rock in fully-mechanized top coal caving[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2000 , 19 (6) : 809–810.
- [8] 涂敏, 付宝杰. 低渗透性煤层卸压瓦斯抽采机理研究[J]. 采矿与安全工程学报 , 2009 , 26(4) : 433–436 .
TU Min , FU Baojie. Extraction mechanism of relieved gas from low permeability seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering , 2009 , 26(4) : 433–436 .
- [9] 尹光志, 李铭辉, 李生舟, 等. 基于含瓦斯煤岩固气耦合模型的钻孔抽采瓦斯三维数值模拟[J]. 煤炭学报 , 2013 , 38(4) : 535–541 .
YIN Guangzhi , LI Minghui , LI Shengzhou , et al. 3D numerical simulation of gas drainage from boreholes based on solid-gas coupling model of coal containing gas[J]. Journal of Chinese Coal Society , 2013 , 38(4) : 535–541 .
- [10] 谢和平, 高峰, 周宏伟, 等. 煤与瓦斯共采中煤层增透率理论与模型研究[J]. 煤炭学报 , 2013 , 38(7) : 1101–1108 .
XIE Heping , GAO Feng , ZHOU Hongwei , et al. On theoretical and modeling approach to mining enhanced permeability for simultaneous exploitation of coal and gas[J]. Journal of China Coal Society , 2013 , 38(7) : 1101–1108 .
- [11] 孙海涛, 郑颖人, 胡千庭, 等. 地面钻孔套管耦合变形作用机理[J]. 煤炭学报 , 2011 , 36(5) : 823–829 .
SUN Haitao , ZHENG Yingren , HU Qianting , et al. Surface borehole casing coupling deformation mechanism[J]. Journal of Chinese Coal Society , 2011 , 36(5) : 823–829 .
- [12] 李日富, 梁运培, 张军. 地面钻孔抽采采空区瓦斯效率影响因素[J]. 煤炭学报 , 2009 , 34(7) : 942–946 .
LI Rifu , LIANG Yunpei , ZHANG Jun. Influencing factors to extraction efficiency of surface goaf hole[J]. Journal of Chinese Coal Society , 2009 , 34(7) : 942–946 .
- [13] 胡千庭, 梁运培, 林府进. 采空区瓦斯地面钻孔抽采技术试验研究[J]. 中国煤层气 , 2006 , 3(2) : 3–6.
HU Qianting , LIANG Yunpei , LIN Fujin. Test of drawing technology on surface borehole in coal mine goal[J]. China Coalbed Methane , 2006 , 3(2) : 3–6 .
- [14] 张群. 煤层气储层数值模拟模型及应用的研究[D]. 西安: 煤炭科学研究院西安分院 , 2003.
- [15] 钱鸣高, 缪协兴. 采场上覆岩结构形态与受力分析[J]. 岩石力学与工程学报 , 1995 , 14(2) : 97–106.
QIAN Minggao , MIAO Xiexing. Theoretical analysis on the structural form and stability of overlying strata in longwall mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 1995 , 14(2) : 97–106.
- [16] 袁亮. 低透高瓦斯煤层群安全开采关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报 , 2008 , 27(7) : 1370–1379.
YUAN Liang. Key technique of safe mining in low permeability and methane-rich seam group[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering , 2008 , 27(7) : 1370–1379.
- [17] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报 , 1996 , 21(3) : 225–230.
QIAN Minggao , MIAO Xiexing , XU Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. Journal of Chinese Coal Society , 1996 , 21(3) : 225–230 .
- [18] 缪协兴, 茅献彪, 胡光伟, 等. 岩石(煤)的碎胀与压实特性研究[J]. 实验力学 , 1997 , 12(3) : 394–399.
MIAO Xiexing , MAO Xianbiao , HU Guangwei , et al. Research on broken expand and press solid characteristics of rocks and coals[J]. Journal of Experimental Mechanics , 1997 , 12(3) : 394–399 .

(责任编辑 范章群)