

煤层气多分支水平井井筒压力及入流量分布规律

李明忠¹, 陈会娟¹, 张贤松^{2,3}, 李卫东⁴, 孙晓飞¹, 孙仁远¹

(1. 中国石油大学石油工程学院, 山东青岛 266580; 2. 海洋石油高效开发国家重点实验室, 北京 100027;

3. 中海油研究总院, 北京 100027; 4. 延长油田股份有限公司定边采油厂, 陕西定边 718600)

摘要:运用流体力学相关理论,结合质量守恒和动量守恒方程,推导考虑多分支水平井井筒内摩擦压降、加速度压降和混合压降的井筒压降模型,建立煤储层渗流与多分支水平井井筒内变质量流耦合的数学模型,并对其进行求解;在此基础上对煤层气多分支水平井主井筒及分支井筒的井筒压力及入流量分布进行研究。结果表明:开采期间,煤层气多分支水平井主支和分支井筒的压力均随距跟端距离的增大而增大,但主井筒压力增加的幅度越来越小;在开采前期,煤层气多分支水平井主井筒入流量分布曲线呈上凸趋势,在开采后期则呈下凹趋势;各分支井筒入流量在开采前期呈 U 型分布,在开采后期呈倒 U 型分布。

关键词:煤层气;多分支水平井;井筒变质量流;井筒压力;井筒入流量

中图分类号:TE 37 **文献标志码:**A

Wellbore pressure and inflow rate distribution of multi-lateral horizontal well for coalbed methane

LI Ming-zhong¹, CHEN Hui-juan¹, ZHANG Xian-song^{2,3}, LI Wei-dong⁴, SUN Xiao-fei¹, SUN Ren-yuan¹

(1. School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

2. State Key Laboratory of Offshore Oil Exploitation, Beijing 100027, China;

3. CNOOC Research Institute, Beijing 100027, China;

4. Dingbian Oil Production Plant of Yanchang Oilfield Company Limited, Dingbian 718600, China)

Abstract: According to corresponding hydrodynamic theory and combined with the principles of mass and momentum conservation, a pressure drop model along a multi-lateral horizontal wellbore was derived, in which the influences of wellbore friction, flow acceleration and mixture on the pressure drop were considered. The mathematical model was coupling with the gas flow in coal-bed with a variable mass flow in multi-lateral horizontal wellbore, and the solving method was given. Based on the model, the distribution characteristics of the wellbore pressure and inflow performance along the main and lateral wellbores were studied. The results show that, during gas production, the pressures in the main and lateral wellbores increase with the increase of the distance to the heel, but the extent of this pressure increasing in the main wellbore reduces gradually. The curve of the main wellbore inflow rate distribution is convex at the early production stage while the curve is concave at the later production stage. The curve of the lateral wellbore inflow rate distribution is the shape of "U" at the early production stage, while at the later production stage, the curve is the shape of reverse "U".

Key words: coalbed methane (CBM); multi-lateral horizontal well; wellbore variable mass flow; wellbore pressure; wellbore inflow rate

多分支水平井以其独特的优势在煤层气开采中得到广泛应用,并获得了较好的经济效益^[1-3]。在其生产时,除井筒内流体沿水平井筒从趾端向跟端流

动外,还有地层流体向井筒的径向流及分支流体向主支的汇合流动,因此水平井筒内流体流动为变质量流,不能忽略井筒压降对其生产动态的影响^[4-8]。

收稿日期:2013-03-25

基金项目:国家科技重大专项(2009ZX05042-003);中央高校基本科研业务费专项资金项目(09CX05003A)

作者简介:李明忠(1963-),男,教授,博士,博士生导师,主要从事采油工程方面的教学和研究工作。E-mail:limzh@upc.edu.cn。

国外学者基于煤层气直井建立了描述煤层气渗流的吸附-扩散模型、组分模型和黑油模型^[9],在此基础上国内研究者^[10-12]对煤层气多分支水平井进行了研究,但研究中忽略了多分支水平井主支和分支混合引起的压降。笔者运用流体力学相关理论,结合质量守恒和动量守恒方程,建立考虑多分支水平井井筒内摩擦压降、加速度压降和混合压降的井筒压降模型,并将其与煤储层渗流模型进行耦合,研究煤层气多分支水平井主井筒及分支井筒的井筒压力及入流量分布规律。

1 数学模型的建立

1.1 基本假设

①煤层是由基质微孔隙和裂隙组成的双重孔隙介质,具有非均质和各向异性;②煤层裂隙在原始状态下100%饱和水,不含游离气和溶解气;③煤基质孔径很小,水不能进入,只含气,气体以吸附状态储集在煤基质内表面;④气体在煤基质内表面的吸附服从Langmuir等温吸附定律,其扩散为非平衡拟稳态过程,服从Fick第一定律;⑤气体和水在裂隙系统中的流动服从达西定律,考虑重力和毛管力的作用。

1.2 裂隙系统中气、水两相流动方程

根据运动方程、连续性方程以及真实气体状态方程,得到裂隙系统中气相和水相流动方程^[13]为

$$\nabla \left(\frac{kK_{rg}}{\mu_g B_g} (\nabla p_g - \rho_g g \nabla D) + D_f \nabla \left(\frac{S_g}{B_g} \right) \right) + q_{mv} - q_{gv} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varphi_f S_g}{B_g} \right), \quad (1)$$

$$\nabla \left(\frac{kK_{rw}}{B_w \mu_w} (\nabla p_w - \rho_w g \nabla D) \right) - q_{wv} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varphi_f S_w}{B_w} \right). \quad (2)$$

式中,下角g和w分别代表气相和水相; k 为储层渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_{rg} 和 K_{rw} 分别为气相和水相相对渗透率; μ 为黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; B 为体积系数; p 为压力,MPa; ρ 为密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度; D 为标高,m; D_f 为裂隙系统中气体扩散系数, m^2/d ; q_{mv} 为地面标准状况下,单位体积储层的煤层气经解吸扩散到裂隙中的体积流量, $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$; q_{gv} 和 q_{wv} 分别为单位体积储层的日产气量和日产水量, m^3/m^3 ; t 为时间,d; S 为饱和度; φ_f 为裂隙系统孔隙度。

为了求解方程(1)和(2),给定如下辅助方程:

$$S_g + S_w = 1, \quad (3)$$

$$p_{cgw}(S_g) = p_g - p_w. \quad (4)$$

式中, $p_{cgw}(S_g)$ 为气水两相毛细管压力,MPa。

1.3 基质系统中气相解吸扩散方程

煤层气从基质向裂隙系统的扩散遵循Fick第一定律,认为煤层气的解吸速度与基质内表面气体浓度和基质中气体平均浓度的差成正比,即

$$\frac{dV_m}{dt} = D_m \sigma (V_E(p_g) - V_m), \quad (5)$$

$$q_{mv} = - \frac{\rho_c}{B_g} \frac{dV_m}{dt}. \quad (6)$$

其中

$$V_E(p_g) = \frac{V_L p_g}{p_g + P_L}.$$

式中, V_m 为基质单元内气体的平均浓度, m^3/kg ; D_m 为煤基质的气体扩散系数, m^2/d ; σ 为基质单元形状因子; ρ_c 为煤岩密度, kg/m^3 ; V_L 为Langmuir体积常数, m^3/t ; P_L 为Langmuir压力常数,MPa。

1.4 孔隙度和渗透率的压力敏感性模型

在煤层气开采过程中,随储层压力降低,有效应力增加,割理闭合,导致储层渗透率降低,这种现象称为有效应力的负效应;另一方面,随储层压力降低,煤层气解吸,基质收缩,割理宽度增大,使储层渗透率增加,这种现象称为煤基质收缩的正效应。Palmer和Mansoori^[14]提出如下考虑有效应力和基质收缩效应的关系式:

$$\varphi_f = \varphi_{f0} + c_m (p - p_0) + \varepsilon_l \left(\frac{K}{M} - 1 \right) \left(\frac{bp}{1 + bp} - \frac{bp_0}{1 + bp_0} \right), \quad (7)$$

$$k = k_{f0} \left(\frac{\varphi_f}{\varphi_{f0}} \right)^3. \quad (8)$$

其中

$$c_m = \frac{1}{M} - \left[\frac{K}{M} + f - 1 \right] \gamma, \quad \frac{K}{M} = \frac{1}{3} \left(\frac{1 + \nu}{1 - \nu} \right), \quad b = \frac{1}{P_L}.$$

式中, φ_{f0} 为煤储层原始裂隙孔隙度; p 为煤储层压力,MPa; p_0 为煤储层原始压力,MPa; ε_l 为Langmuir体积应变常数; K 为体积模量,MPa; M 为单轴模量,MPa; f 取0~1; γ 为煤颗粒压缩系数, MPa^{-1} ; k_{f0} 为煤储层原始裂隙渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; ν 为泊松比。

1.5 井筒压降模型

对于多分支水平井,将其主支和分支均看作由若干微元段组成(图1),则在井筒内部,主支或分支的上下游相邻两井段的压力关系表示为

$$p_{wf,i+1} = p_{wf,i} + 0.5 (\Delta p_{wf,i+1} + \Delta p_{wf,i}), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (9)$$

若为定压生产,则出口端处的井底压力 $p_{wf,e}$ 为已知,则

$$p_{wf,1} = p_{wf,c} + 0.5\Delta p_{wf,1} \quad (10)$$

式中, $p_{wf,i+1}$ 和 $p_{wf,i}$ 分别为第 $i+1$ 个和第 i 个井筒微元中点的压力, MPa; $p_{wf,c}$ 为多分支水平井井筒出口端压力, MPa。

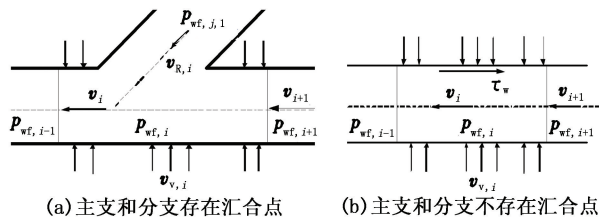


图1 多分支水平井微元段示意图

Fig. 1 Sketch map of multi-lateral horizontal well element

若为定产气量生产, 则 $p_{wf,c}$ 未知, 需增加一个方程, 气产量为所有分支及主支产量之和, 即

$$q_{\text{sum}} = \sum I_{\text{PD}i} \frac{K_{rg}}{\mu_g} (p_g - p_{wf,i}) \quad (11)$$

其中, I_{PD} 为井指数, 其表达式为

$$I_{\text{PD}} = 2\pi k_e L_p / \left(\ln \frac{r_b}{r_w} + S \right) \quad (12)$$

式中, k_e 为与各向异性介质等价的各向同性渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; L_p 为变换空间上网格内井段的长度, m; r_b 为井格块等效半径, m; r_w 为等效井径, m; S 为表皮因子。

$\Delta p_{wf,i}$ 为相邻两井段压降, 分两种情况来求解。

(1) 主支和分支存在汇合点。在主支井筒上取流动微元控制体如图1(a)所示, 则该汇合点处即可简化为斜三通, 根据伯努利方程^[15-16]可得,

$$\frac{p_{wf,i+1}}{\rho_i g} + \frac{\alpha_{i+1} v_{i+1}^2}{2g} - \frac{f_i \Delta x_i}{d} \frac{\bar{v}_i^2}{2g} = \frac{p_{wf,i}}{\rho_i g} + \frac{\alpha_i v_i^2}{2g} + \xi_i \frac{v_i^2}{2g} \quad (13)$$

$$\frac{p_{wf,j,1}}{\rho_i g} + \frac{\alpha_{j,1} v_{R,i}^2}{2g} - \frac{f_{j,1} \Delta x_{j,1}}{d} \frac{\bar{v}_{R,i}^2}{2g} = \frac{p_{wf,i}}{\rho_i g} + \frac{\alpha_i v_i^2}{2g} + \xi_i \frac{v_i^2}{2g} \quad (14)$$

式中, $p_{wf,j,1}$ 为与主支相连的分支井段压力, MPa; ρ_i 为该微元段内流体密度, kg/m^3 ; v_{i+1} 和 v_i 分别为流体流入和流出该微元段的速度, m/s ; $v_{R,i}$ 为汇合处分支流体流入主支的速度, m/s ; d 为主井筒直径, m; $\bar{v}_{R,i}$ 为第 j 分支流体流入主支的平均速度, m/s ; $\bar{v}_i$ 为该微元段主支流体平均流速, m/s ; f_i 和 $f_{j,1}$ 为分别为该微元段内流体和管壁之间的摩擦系数; α_{i+1} 、 α_i 和 $\alpha_{j,1}$ 分别为动能修正系数, 在实际应用中, 可令 $\alpha_{i+1} \approx \alpha_i \approx \alpha_{j,1} = \alpha$; ξ_i 为局部阻力系数, 查表得 $\xi_i = 0.05$ 。

对于该微元段, 根据质量守恒原理, 得

$$\rho_i v_{i+1} \frac{\pi d^2}{4} + \rho_i v_{v,i} \pi d \Delta x_i - \rho_i v_i \frac{\pi d^2}{4} + \rho_i \frac{\pi d^2}{4} v_{R,i} = 0 \quad (15)$$

$$\text{令 } Q_i = \frac{v_{i+1} \pi d^2}{4}, q_i = v_{v,i} \pi d \Delta x_i, Q_{R,i} = \frac{v_{R,i} \pi d^2}{4}。$$

整理得主支与分支存在汇合点时主支上、下游及主支与分支之间的井筒压力表达式分别为

$$p_{wf,i+1} - p_{wf,i} = \frac{8\alpha\rho_i(Q_{R,i} + q_i)(2Q_i + Q_{R,i} + q_i)}{\pi^2 d^4} + \frac{2\rho_i f_i \Delta x_i (2Q_i + Q_{R,i} + q_i)^2}{\pi^2 d^5} + \frac{2\rho_i (Q_i + Q_{R,i} + q_i)^2}{5\pi^2 d^4} \quad (16)$$

$$p_{wf,j,1} - p_{wf,i} = \frac{8\alpha\rho_i(Q_i + q_i)(Q_i + 2Q_{R,i} + q_i)}{\pi^2 d^4} + \frac{8\rho_i f_{j,1} \Delta x_{j,1} Q_{R,i}^2}{\pi^2 d^5} + \frac{2\rho_i (Q_i + Q_{R,i} + q_i)^2}{5\pi^2 d^4} \quad (17)$$

其中

$$Q_i = \sum_{i+1}^n q_i + \sum_{i+1}^n \sum_{k=1}^{m_i} q_{ik}, q_i = q_{g,i} + q_{w,i}。$$

式中, $v_{v,i}$ 为流体由煤层径向流入该微元段的平均流速, m/s ; $Q_{R,i}$ 为该微元段内分支流入主支的流量, m^3/s ; q_i 为由煤层流入该微元段的流量, m^3/s 。

式(16)右端第一项表示主支上下游之间的加速度压降, 式(17)右端第一项表示主支与分支之间的加速度压降, 两式第二项均为摩擦压降, 第三项均为混合压降。

(2) 主支和分支不存在汇合点。在主支上取长度为 Δx_i 的微元井段(图1(b))。微元井段内流体受到上、下游段压力以及管壁摩擦阻力 τ_w 的作用, 该微元井段的质量守恒和动量守恒方程分别为

$$\rho_i v_{i+1} \frac{\pi d^2}{4} + \rho_i v_{v,i} \pi d \Delta x_i - \rho_i v_i \frac{\pi d^2}{4} = 0 \quad (18)$$

$$p_{wf,i+1} A - p_{wf,i} A - \tau_w \pi d \Delta x_i = (\rho_i A v_i) v_i - (\rho_i A v_{i-1}) v_{i-1} \quad (19)$$

其中 $\tau_w = \rho_i f_i \bar{v}_i^2 / 8$, 整理得

$$p_{wf,i+1} - p_{wf,i} = \frac{2\rho_i f_i \Delta x_i (2Q_i + q_i)^2}{\pi^2 d^5} + \frac{16\rho_i q_i (2Q_i + q_i)}{\pi^2 d^4} \quad (20)$$

由式(1)~(8)组成的煤储层渗流方程和由式(9)~(20)组成的井筒压降方程耦合可得完整的煤层气多分支水平井渗流数学模型。

2 模型的求解

上述煤储层渗流方程和井筒压降方程通过井筒

压力耦合在一起,具体求解过程如下:

(1)在定井底流压条件下令井筒压力均为已知,定产条件则可设为任意合理的井筒压力值,利用隐压显饱法求解该煤储层渗流方程可得煤储层压力值。

(2)将所得储层压力值代入井筒压降方程组中进行求解,得到相应的井筒压力值。

(3)将最新的井筒压力值带入煤储层渗流方程中重复计算,如此反复迭代,直到所求未知数满足一定的收敛条件,即得该时刻储层压力及各段井筒压力值。

(4)将求得的压力值代入水相差分方程,由水组分方程显式计算出水相饱和度,然后由饱和度辅助方程计算出气相饱和度。

(5)重复(1)~(4),即可得任意时刻煤储层压力、井筒压力和饱和度值。

3 实例分析

利用樊庄区块实际地质资料对所建模型进行验证,并对煤层气多分支水平井主井筒及分支井筒的压力及入流量分布进行研究。模型基础数据为:区块面积 1.29 km²,煤层埋深 500 m,煤层厚度 5.0 m,裂缝渗透率 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,裂缝孔隙度 4.48%,煤层原始含水饱和度 1.0,原始压力 3.84 MPa,Langmuir 压力 2.68 MPa,Langmuir 体积 47.38 m³/t,表皮系数 -1.23,井底流压 0.5 MPa,解吸时间 12.33 d,煤岩密度 1350 kg/m³,煤层初始含气量 20 m³/t,泊松比 0.25,弹性模量 3.0 GPa,Langmuir 体积应变常数 0.04。煤层气多分支水平井含有 6 个分支,主支长 900 m,分支长 360 m,将分支井筒由主井筒跟端到趾端依次编号,如图 2 所示。

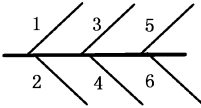


图 2 多分支水平井示意图

Fig. 2 Sketch map of multi-lateral horizontal well

3.1 模型的可靠性验证

为验证所建模型的准确性,将模型预测煤层气多分支水平井产能与应用广泛的 CMG 软件预测结果进行对比,如图 3 所示。由图 3 可知,本文预测结果与 CMG 软件预测结果趋势一致,煤层气多分支水平井日产气量均先增大后减小,日产水量逐渐减低。但本文所建模型考虑了多分支水平井井筒内的摩擦压降、加速度压降和混合压降,能更好地反映煤层气多分支水平井井筒入流动态。

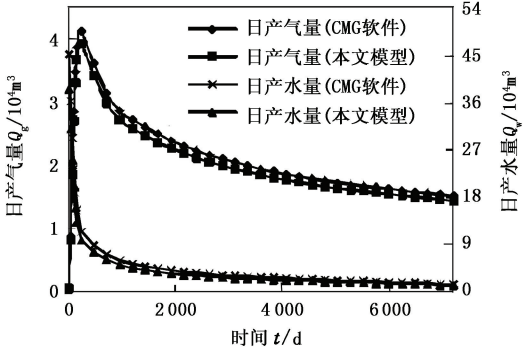


图 3 煤层气多分支水平井产能

Fig. 3 Productivity of multi-lateral horizontal well for coalbed methane

3.2 井筒压力分布

根据煤层气多分支水平井的生产特征,其沿水平井筒的压力分布特征可分开采前期和开采后期两种情况来分析,模拟计算结果如图 4、5 所示。

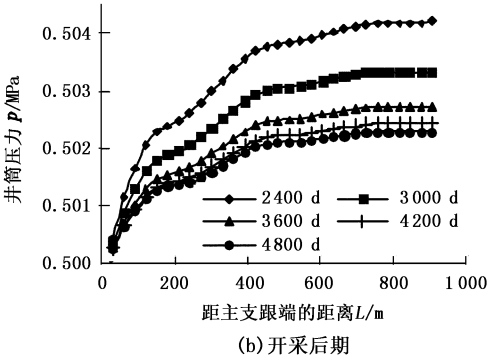
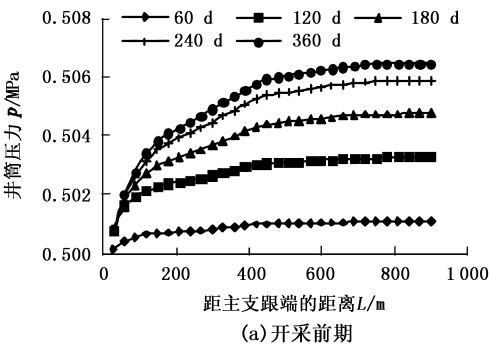


图 4 不同时刻主支井筒的压力分布

Fig. 4 Main wellbore pressure distribution at different time

由图 4 可知,无论在煤层气多分支水平井开采前期还是在开采后期,由于井筒内压降的存在,主支

井筒压力均随距主支跟端距离的增大而增大,但增加的幅度越来越小。在开采前期,随着时间的增加,

主支井筒内流量增加,井筒内产生的压降亦增加,井筒压力呈上升趋势,如图4(a)所示;而在开采后期则呈现相反的趋势,如图4(b)所示。

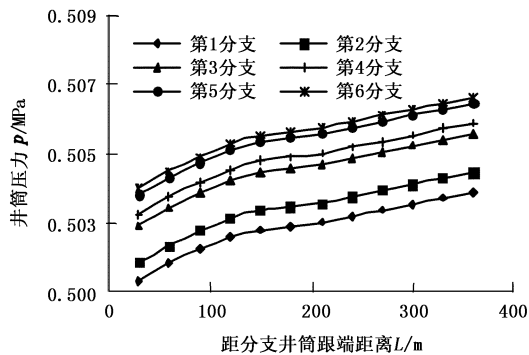


图5 生产2000 d 各分支的井筒压力分布

Fig.5 Multi-lateral wellbore pressure distribution after producing 2000 days

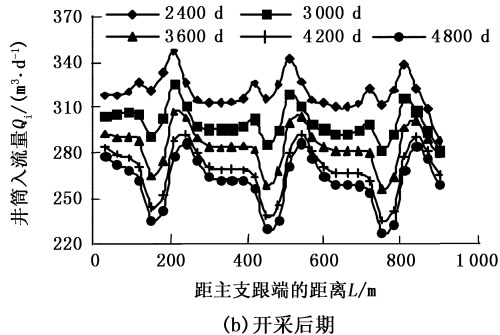
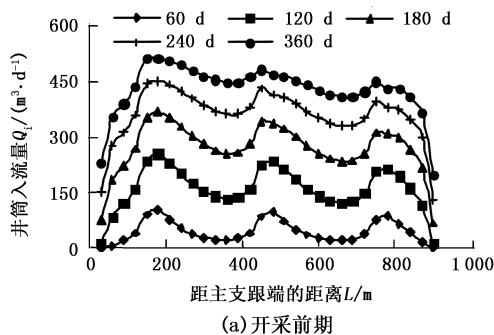


图6 不同时刻主支井筒的入流量分布

Fig.6 Main wellbore inflow rate distribution at different time

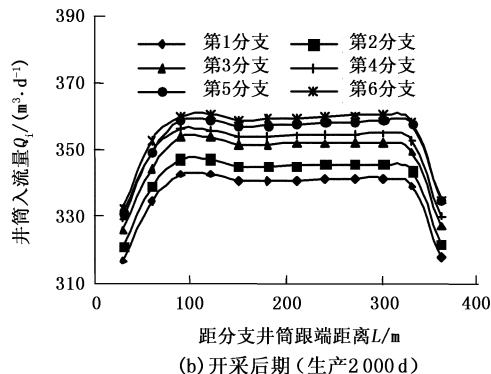
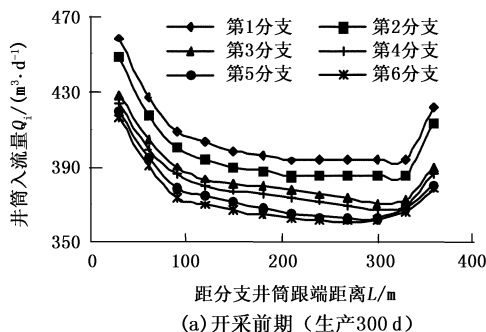


图7 不同时刻分支井筒的入流量分布

Fig.7 Multi-lateral wellbore inflow rate distribution at different time

由图7可知,在开采前期各分支井筒入流量呈U型分布,而在开采后期则呈倒U型分布。这是因为在开采前期受分支与主支之间相互干扰的影响,沿分支井筒的入流量也大,而在各分支趾端由于供气范围较大,沿分支井筒的入流量也较大;受井筒压降和供气范围的双重影响,沿各分支中部的井筒入流量变化不大。受井筒压降的影响,越靠近主井筒出口端,分支入流量越大。但在开采后期,由于开采前期各分支两

对于煤层气多分支水平井各分支来讲,在煤层气多分支水平井开采期内,各分支井筒内压力均随距分支跟端距离的增大而增大(图5)。

3.3 井筒入流量分布

不同时刻主支井筒与分支井筒的入流量分布如图6、7所示。由图6可知,在开采前期,主井筒入流量分布曲线在主支与分支汇合处呈上凸趋势,在开采后期则呈下凹趋势。这是因为在开采前期分支与主支之间的相互干扰使分支与主支汇合处煤层气解吸量大,因此主井筒入流量也大,且越靠近主井筒跟端,汇合处的主井筒入流量越大。但在开采后期,受供气范围的影响,主支与分支汇合处主井筒入流量越来越低,而主井筒端部由于供气范围大,入流量越来越高,如图6(b)所示。

端煤层解吸程度高,此时受供气范围的影响沿各分支两端的井筒入流量较小,各分支中部的井筒入流量较大,且越靠近主井筒出口端,分支入流量越小。

4 结 论

(1)无论是在开采前期还是在开采后期,煤层气多分支水平井主支和分支井筒的压力均随距跟端距离的增大而增大,但主井筒压力增加的幅度越来越

越小。

(2)开采前期,煤层气多分支水平井主井筒入流量分布曲线在主支与分支汇合处呈上凸趋势,而在开采后期则呈下凹趋势;各分支井筒入流量开采前期呈U型分布,但在开采后期呈倒U型分布。

参考文献:

- [1] 江山,王新海,张晓红,等. 定向羽状分支水平井开发煤层气现状及发展趋势[J]. 钻采工艺, 2004,27(2):4-7.
JIANG Shan, WANG Xin-hai, ZHANG Xiao-hong, et al. Development status quo and trend of directional pinnate horizontal well for coalbed gas[J]. Drilling & Production Technology, 2004,27(2):4-7.
- [2] 姜文利,叶建平,乔德武. 煤层气多分支水平井的最新进展及发展趋势[J]. 中国矿业, 2010,19(1):101-103.
JIANG Wen-li, YE Jiang-ping, QIAO De-wu. The recent process and developing tendency in CBM multi-branch horizontal well[J]. China Mining Magazine, 2010, 19(1):101-103.
- [3] 张卫东,魏韦. 煤层气水平井开发技术现状及发展趋势[J]. 中国煤层气, 2008,5(4):19-22.
ZHANG Wei-dong, WEI Wei. Status of coalbed methane horizontal well technology and trend of development[J]. China Coalbed Methane, 2008,5(4):19-22.
- [4] DIKKEN. Pressure drop in horizontal wells and its effect on production performance[R]. SPE 19824, 1990.
- [5] 黄世军,程林松,赵凤兰,等. 考虑多段流动耦合的鱼骨刺井产能评价模型[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2010,34(2):83-88.
HUANG Shi-jun, CHENG Lin-song, ZHAO Feng-lan, et al. Production evaluation model of fishbone well considering coupling among multi-segments flow[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(2):83-88.
- [6] 汪志明,张磊敏,魏建光,等. 分支参数对多分支井入流及产能的影响规律研究[J]. 石油钻探技术, 2009,37(3):83-88.
WANG Zhi-ming, ZHANG Lei-min, WEI Jian-guang, et al. The effect of branch parameters on inflow performance and productivity on multilateral wells[J]. Petroleum Drilling Technology, 2009,37(3):83-88.
- [7] 李明忠,李彦超,王卫阳,等. 考虑井筒变质量流动的砾石充填水平井产能预测[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2011,35(3):89-94.
LI Ming-zhong, LI Yan-chao, WANG Wei-yang, et al. Productivity prediction for gravel-packed horizontal well considering variable mass flow in wellbore[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011,35(3):89-94.
- [8] 苏玉亮,张东,李明忠. 油藏中渗流与水平井筒内流动的耦合数学模型[J]. 中国矿业大学学报, 2007,36(6):752-759.
SU Yu-liang, ZHANG Dong, LI Ming-zhong. Mathematical model coupling seepage in the reservoir with flow in the horizontal wellbore[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007,36(6):752-759.
- [9] 苏现波,林晓英. 煤层气地质学[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2007.
- [10] 张冬丽,王新海. 煤层气羽状水平井开采数值模拟研究[J]. 煤田地质与勘探, 2005,33(4):47-52.
ZHANG Dong-li, WANG Xin-hai. Numerical simulation of pinnate horizontal multilateral well for coalbed gas recovery[J]. Coal Geology & Exploration, 2005,33(4):47-52.
- [11] 张冬丽,王新海,宋岩. 考虑启动压力梯度的煤层气羽状水平井开采数值模拟[J]. 石油学报, 2006,27(4):89-92.
ZHANG Dong-li, WANG Xin-hai, SONG Yan. Numerical simulation of pinnate horizontal multilateral well for coalbed gas development in consideration of start-up pressure gradient[J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(4):89-92.
- [12] 席长丰,吴晓东,王新海. 多分支井注气开发煤层气模型[J]. 煤炭学报, 2007,32(4):402-406.
XI Chang-feng, WU Xiao-dong, WANG Xin-hai. A model for enhanced coalbed methane and CO₂ sequestration with multilateral wells[J]. Journal of China Coal Society, 2007,32(4):402-406.
- [13] KING G R, ERTEKIN T, SCHWERER F C. Numerical simulation of the transient behavior of coal-seam degasification wells[R]. SPE 12258, 1986.
- [14] PALMER I, MANSOORI J. How permeability depends on stress and pore pressure in coalbeds: a new model[R]. SPE 52607, 1996.
- [15] 袁恩熙. 工程流体力学[M]. 北京:石油工业出版社, 1986.
- [16] 步玉环,王瑞和,刘继林. 分支井汇合流动压降计算[J]. 钻采工艺, 2007,30(4):10-12.
BU Yu-huan, WANG Rui-he, LIU Ji-lin. Pressure drop calculation for aggregate flow in multi-lateral wells[J]. Drilling & Production Technology, 2007,30(4):10-12.

(编辑 李志芬)