文章编号:1673-5005(2014)05-0116-08

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2014.05.016

页岩气藏分段压裂水平井不稳定渗流模型

樊冬艳^{1,2},姚 军²,孙 海²,谢银伍³,曾 慧²,张 凯²

(1.中国石油大学地质资源与地质工程博士后流动站,山东青岛 266580; 2.中国石油大学石油工程学院,山东青岛 266580;3.长庆油田分公司第三采油厂,宁夏银川 750005)

摘要:针对页岩气藏中吸附气和游离气共存的储集方式,基于双重介质模型建立考虑吸附解吸过程的页岩气藏不稳 定渗流数学模型,并定义新的参数来表征基质中吸附解吸气量与游离气弹性释放量的比值,利用 Laplace 变换计算 页岩气藏点源解,通过叠加原理得到定产量生产时水平井分段压裂改造后井底压力解,对考虑井筒和表皮系数的影 响以及定井底流压生产时水平井动态产能进行分析。结果表明:在开采过程中页岩吸附解吸气量所占比例较大,且 考虑吸附解吸后,定产量生产所需压差小,压力波传播到边界时间晚,压力导数曲线凹槽更加明显,同时定井底流压 生产时压裂水平井产量更大,稳产时间更长; Langmuir 吸附体积越大,压力波传播越慢,所需压差越小,压力导数曲 线凹槽越深,同时页岩气藏稳产时间越长,产量越大,但产量的增幅越小。

关键词:页岩气藏; Langmuir 等温吸附; 压裂水平井; 点源解; 不稳定渗流

中图分类号:TE 332 文献标志码:A

引用格式:樊冬艳,姚军,孙海,等.页岩气藏分段压裂水平井不稳定渗流模型[J].中国石油大学学报:自然科学版, 2014,38(5):116-123.

FAN Dongyan, YAO Jun, SUN Hai, et al. Transient flow model of stage-fractured horizontal wells in shale gas reservoirs [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science),2014,38(5):116-123.

Transient flow model of stage-fractured horizontal wells in shale gas reservoirs

FAN Dongyan^{1,2}, YAO Jun², SUN Hai², XIE Yinwu³, ZENG Hui², ZHANG Kai²

(1. Mobile Post-Doctoral Stations, School of Geoscience in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;

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

3. The 3rd Oil Production of Changqing Oilfield Company, Yinchuan 750005, China)

Abstract: Considering the coexistence of adsorbed gas and free gas in shale gas reservoir, a mathematical transient flow model incorporating gas desorption process was established based on dual porosity gas reservoir model. A new parameter was defined to represent the ratio of gas production from desorbed gas to that from free gas in matrix system. The analytical point source solution of shale gas reservoir was solved in Laplace space, and the bottom-hole pressure of multi-stage fractured horizontal well with constant rate was obtained by superposition. Then the impacts of wellbore storage and skin factor on well production performance were evaluated and the rate decline response at constant bottom hole pressure was investigated. The results show that a large portion of gas production comes from desorbed gas. When gas desorption in shale matrix is considered, lower draw down pressure is required to achieve constant production rate for those fractured horizontal wells, it takes longer time for the pressure front reaching boundary, and the pressure derivative curve shows more obvious groove. If the fractured well is produced under constant bottom hole pressure condition, higher gas production rate and lower decline rate can be achieved. The results also show that the bigger the Langmuir absorption volume is, the slower the pressure front propagates,

收稿日期:2013-11-21

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51234007);国家科技重大专项(2011ZX05005-006-007HZ);中央高校基本科研业务费专项资金 (14CX05025A);中国石油科技创新基金项目(2012D-5006-0207)

作者简介:樊冬艳(1985-),女,博士,从事水平井及压裂水平井渗流理论及产能研究。E-mail: fandongyan2010@126.com。

and the deeper the groove shows on the pressure derivative curve. But the Langmuir absorption pressure impact must be analyzed with both matrix pressure and Langmuir adsorption isotherm curve.

Key words: shale gas reservoir; Langmuir adsorption isotherms; fractured horizontal well; point source solution; transient flow

页岩气藏资源丰富、潜力巨大,已成为目前研究 的热点问题^[1-2],美国 2010 年页岩气年产量已达到 了1038 亿 m³,接近北美天然气总产量的 20%^[3], 中国页岩气储量与美国相当,开发前景广阔。室内 试验和现场实践[45]表明页岩内吸附气与游离气共 存,不同于常规的气藏大部分为游离气,也不同于煤 层气主要以吸附状态赋存在煤基质孔隙[6],需要同 时考虑游离气的弹性释放和吸附气的解吸脱附:其 次,由于页岩气藏渗透率极低,一般只有几百个纳达 西[78],页岩气藏商业化开采主要依赖于水平井及多 段压裂改造技术^[9].开展页岩气藏压裂水平井的动 态压力及产能分析非常有必要。目前大部分压裂水 平井的模拟主要基于达西流动,没有考虑吸附解吸 的影响[10-11],或者类似于煤层气藏只考虑了基质系 统的吸附解吸,忽略了页岩内的游离气体[12-13]。笔 者在前人研究的基础上建立同时考虑游离气和吸附 气两种储集方式并存的页岩气藏渗流模型,讨论吸 附解吸特性对压裂水平井井底压力及产能的影响, 以及 Langmuir 参数的敏感性分析,为页岩气藏分段 压裂水平井开采的压力动态特征、效果评价以及产 能预测奠定理论基础。

1 考虑吸附解吸过程的点源解

1.1 双重介质渗流方程的建立

大部分页岩气藏压裂改造后天然裂缝开启,页 岩基质属于典型的低孔低渗介质,假定页岩气藏由 基质系统和天然裂缝系统构成,满足双重介质模型 的页岩气藏基本假设:①页岩基质表面吸附有大量 的甲烷气体,且气体的吸附量与压力满足 Langmuir 等温吸附公式;②基质系统中气体以游离相和吸附 相形式共存,压力下降时气体排出包括游离气膨胀 和吸附气解吸两部分;③基质系统渗透率极低,一般 只有几百个纳达西,故不考虑基质内部的流动;④天 然裂缝系统内气体主要以游离相的形式出现,是气 藏主要运移通道,遵循达西渗流规律;⑤基质系统与 天然裂缝系统之间服从拟稳态窜流过程;⑥页岩气 藏温度恒定不变。为了方便,采用国际标准单位进 行推导,结果讨论部分采用油藏工程的矿场实用单 位制。建立页岩气藏双重介质模型的渗流方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_{\rm f} \varphi_{\rm f}) + \nabla \left(-\frac{k_{\rm f} \rho_{\rm f}}{\mu_{\rm f}} \nabla p_{\rm f} \right) = Q_{\rm p}, \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_{\rm m} \varphi_{\rm m}) + (1 - \varphi_{\rm m}) \frac{\partial Q_{\rm ads}}{\partial t} = -Q_{\rm p}. \end{cases}$$
(1)

其中

$$\rho_i = \frac{M_{\rm g} p_i}{ZRT}$$

式中, ρ_i 为气体的密度(i = m, f分别代表基质系统和 天然裂缝系统), kg/m^3 ;Z为气体压缩因子; M_g 为气 体的摩尔质量,kg/mol; p_m 和 p_f 分别为基质和天然 裂缝系统的压力值,Pa;R为理想气体常数,R =8.314 J/($K \cdot mol$);T为油藏温度, $K;\varphi_f$ 和 φ_m 分别 为天然裂缝和基质系统的孔隙度; k_f 为天然裂缝系 统的渗透率, $m^2;\mu$ 为气体的黏度, $Pa \cdot s;Q_p$ 为基质 向天然裂缝的窜流量, $kg/(m^3 \cdot s);Q_{ads}$ 为页岩基质 单位骨架体积的甲烷吸附量, $kg/m^3;t$ 为时间, s_o

定义气体的拟压力值 $\Psi_i = 2 \int_{0}^{\mu_i} \frac{p}{\mu Z} dp$, 化简方程 组(1) 得:

$$\begin{cases} \mu \varphi_{\rm f} C_{\rm t} \frac{\partial \Psi_{\rm f}}{\partial t} + \nabla \left(-k_{\rm f} \nabla \Psi_{\rm f} \right) = 2\alpha k_{\rm m} (\Psi_{\rm m} - \Psi_{\rm f}) ,\\ \mu \varphi_{\rm m} C_{\rm t} \frac{\partial \Psi_{\rm m}}{\partial t} + \left(1 - \varphi_{\rm m} \right) \frac{\rho_{\rm s} RT V_{\rm L}}{V_{\rm std}} \times \\ \frac{\mu Z p_{\rm L}}{p_{\rm m} (p_{\rm m} + p_{\rm L})^2} \frac{\partial \Psi_{\rm m}}{\partial t} = -2\alpha k_{\rm m} (\Psi_{\rm m} - \Psi_{\rm f}) . \end{cases}$$

$$(2)$$

式中, C_1 为综合压缩系数, Pa^{-1} ; α 为窜流的形状因 子, m^{-2} ; ρ_s 为基质骨架的密度, kg/m^3 ; V_L 为 Langmuir体积, m^3/kg ; V_{std} 为气体在 0.101 325 MPa、273 K下的摩尔体积, m^3/mol_o

其中,双重介质模型中气体拟稳态窜流量^[14]化 简过程为

$$Q_{\rm p} = \frac{\alpha k_{\rm m}}{\mu} (\rho_{\rm m} p_{\rm m} - \rho_{\rm f} p_{\rm f}) = \frac{\alpha k_{\rm m}}{\mu} \left[\frac{p_{\rm m}^2 M_{\rm g}}{ZRT} - \frac{p_{\rm f}^2 M_{\rm g}}{ZRT} \right] \approx \alpha k_{\rm m} \frac{M_{\rm g}}{RT} (\Psi_{\rm m} - \Psi_{\rm f}).$$
(3)

假定页岩基质单位骨架的甲烷吸附量满足 Langmuir等温吸附公式^[15],即

$$Q_{\rm ads} = \frac{\rho_{\rm s} M_{\rm g} V_{\rm L}}{V_{\rm std}} \frac{p_{\rm m}}{p_{\rm m} + p_{\rm L}}.$$
(4)

随着页岩基质内压力降低,单位骨架体积在单位时 间内的气体解吸量为

$$\frac{\partial Q_{ads}}{\partial t} = \frac{\rho_s M_g V_L}{V_{std}} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p_m}{p_m + p_L} \right) = \frac{\rho_s M_g V_L}{V_{std}} \times \frac{\partial}{\partial t} \left(1 - \frac{p_L}{p_m + p_L} \right) = \frac{\rho_s M_g V_L}{V_{std}} \frac{\mu Z p_L}{p_m (p_m + p_L)^2} \frac{\partial \Psi_m}{\partial t}.$$

1.2 双重介质点源解

定义无因次变量为

$$\Delta \Psi_{\rm f} = \Psi_{\rm o} - \Psi_{\rm f}, \ \Delta \Psi_{\rm m} = \Psi_{\rm o} - \Psi_{\rm m}, \ \lambda = \frac{2\alpha k_{\rm m} L^2}{k_{\rm f}}$$
$$\eta = \varphi_{\rm m} C_{\rm t} + \varphi_{\rm f} C_{\rm t}, \ \omega = \frac{\varphi_{\rm f} C_{\rm t}}{\eta}, \ t_{\rm D} = \frac{k_{\rm f} t}{\eta \mu L^2},$$

 $x_{\rm D} = x/L, y_{\rm D} = y/L, z_{\rm D} = z/L.$ 式中,L 为参考长度,m_o

定义参数β,表示单位时间内由于基质压力降低,基质骨架吸附解吸气量与游离气弹性能释放量的比值,即

$$\beta = \frac{(1 - \varphi_{\rm m}) \partial Q_{\rm ads} / \partial t}{\partial (\rho_{\rm m} \varphi_{\rm m}) / \partial t} = (1 - \varphi_{\rm m}) \frac{\rho_{\rm s} RTV_{\rm L}}{V_{\rm std} C_{\rm t} \varphi_{\rm m}} \times \frac{Zp_{\rm L}}{p_{\rm m} (p_{\rm m} + p_{\rm L})^2}.$$
(5)

在计算过程中参数 β 采用上一步的基质压力值,因此,对于某一具体时间步参数 β 值已知。

根据渗流方程(2),建立页岩气藏中无限大点 源的无因次化数学模型为

$$\begin{cases} \nabla^{2}(\Delta\Psi_{\rm f}) = \omega \, \frac{\partial\Delta\Psi_{\rm f}}{\partial t_{\rm D}} - \lambda \left(\Delta\Psi_{\rm m} - \Delta\Psi_{\rm f}\right), \\ \left(1 - \omega\right) \left(1 + \beta\right) \, \frac{\partial\Delta\Psi_{\rm m}}{\partial t_{\rm D}} = -\lambda \left(\Delta\Psi_{\rm m} - \Delta\Psi_{\rm f}\right), \\ \left(\partial\Delta\Psi_{\rm f}(r_{\rm D}, t_{\rm D} = 0) = \Delta\Psi_{\rm m}(r_{\rm D}, t_{\rm D} = 0) = 0, \\ \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{2\pi k_{\rm f} T_{\rm sc} L}{Tp_{\rm sc}} \left(r_{\rm D}^{2} \, \frac{\partial\Delta\Psi_{\rm f}}{\partial t_{\rm D}}\right)_{r_{\rm D} \to \varepsilon} = -\tilde{q}. \\ \Delta\Psi_{\rm f}(r_{\rm D} \to \infty, t_{\rm D}) = \Delta\Psi_{\rm m}(r_{\rm D} \to \infty, t_{\rm D}) = 0. \\ \stackrel{\rm Kit}{=} \psi \end{cases}$$
(6)

$$T_{\rm sc} = 273 \text{ K}, p_{\rm sc} = 1.01325 \times 10^{5} \text{ Pa};$$

 $r_{\rm sc} = \sqrt{(r_{\rm sc} - r_{\rm sc})^{2} + (r_{\rm sc} - r_{\rm sc})^{2} + (r_{\rm sc} - r_{\rm sc})^{2}}$

$$\begin{split} r_{\rm D} &= \sqrt{(x_{\rm D} - x_{\rm wD})^2 + (y_{\rm D} - y_{\rm wD})^2 + (z_{\rm D} - z_{\rm wD})^2} \ . \\ 式 中, \tilde{q} 为连续点源大小, m^3/s_{\circ} \end{split}$$

对方程组(6) 关于 $t_{\rm D}$ 作 Laplace 变换,整理得

$$\nabla^2(\overline{\Delta\Psi_{\rm f}}) = u \,\overline{\Delta\Psi_{\rm f}},\tag{7}$$

$$\overline{\Delta \Psi_{\rm m}} = \frac{\lambda}{\lambda + s(1 - \omega)(1 + \beta)} \,\overline{\Delta \Psi_{\rm f}}.$$
 (8)

其中

$$u = \frac{s \left[\omega \lambda + (\omega s + \lambda) (1 - \omega) (1 + \beta) \right]}{\lambda + s (1 - \omega) (1 + \beta)}.$$

内边界条件为

$$\lim_{\varepsilon \to 0} \frac{2\pi k_{\rm f} T_{\rm sc} L}{\bar{q} T p_{\rm sc}} \left(r_{\rm D}^2 \frac{d \overline{\Delta \Psi_{\rm f}}}{d r_{\rm D}} \right)_{r_{\rm D} \to \varepsilon} = -1.$$
(9)

外边界条件为

 $\overline{\Delta \Psi_{\rm f}}(r_{\rm p} \to \infty) = \overline{\Delta \Psi_{\rm m}}(r_{\rm p} \to \infty) = 0.$ (10)

类比于 Ozkan^[16-17] 双重介质油藏 Laplace 空间 点源解求解方法,可得到页岩气藏考虑吸附解吸时 Laplace 空间裂缝系统的点源解为

$$\overline{\Delta \Psi_{\rm f}} = \frac{\tilde{q} T p_{\rm sc}}{2\pi k_{\rm f} T_{\rm sc} L} \frac{\exp(-\sqrt{u} r_{\rm D})}{r_{\rm D}}.$$
 (11)

2 水平井多段压裂改造后的解析解

一般页岩气藏为自生自储式构造,故物理模型 假设为盒状封闭油藏中的一口水平井,均匀压开 N_f 条人工裂缝,无因次参考长度 L 取值为水平井段长 度,则无因次裂缝半长为 L_m,无因次油藏尺寸为 x_{eD}×y_{eD}×h。建立的双重介质模型为双孔单渗模 型,基质系统向天然裂缝系统窜流,天然裂缝系统气 体首先流入人工裂缝,再流入水平井井底。为了得 到多段压裂水平井井底压力解,首先计算盒状油藏 单条人工裂缝的压降解。

2.1 单条裂缝的井底压降解

由页岩气藏 Laplace 空间无限大地层点源解公 式(11),首先通过 z 方向的镜像映射消除上下边界 的影响,利用叠加原理得到上下封闭、四周无限大点 源的压力解为

$$\overline{\Delta\Psi_{\rm f}} = \frac{\bar{q}Tp_{\rm sc}}{2\pi k_{\rm f}T_{\rm sc}L} \bigg\{ \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-\sqrt{u}\sqrt{r_{\rm D}^2 + (z_{\rm D} - z_{\rm wD} - 2nh_{\rm D})^2}}{\sqrt{r_{\rm D}^2 + (z_{\rm D} - z_{\rm wD} - 2nh_{\rm D})^2}} + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-\sqrt{u}\sqrt{r_{\rm D}^2 + (z_{\rm D} + z_{\rm wD} - 2nh_{\rm D})^2}}{\sqrt{r_{\rm D}^2 + (z_{\rm D} + z_{\rm wD} - 2nh_{\rm D})^2}} \bigg\}.$$
(12)
 π IIII Poisson 公式对上式(12) 进行化简,得

$$\overline{\Delta\Psi_{\rm f}} = \frac{\overline{\tilde{q}}Tp_{\rm sc}}{\pi k_{\rm f}T_{\rm sc}Lh_{\rm D}} \left[K_0(r_{\rm D}\sqrt{u} + 2\sum_{n=1}^{+\infty} K_0(r_{\rm D}\varepsilon_n)\cos(n\pi z_{\rm D}/h_{\rm D})\cos(n\pi z_{\rm wD}/h_{\rm D}) \right]. (13)$$

$$\pm \Phi$$

$$r_{\rm D} = \sqrt{(x_{\rm D} - x_{\rm wD})^2 + (y_{\rm D} - y_{\rm wD})^2},$$
$$\varepsilon_n = \sqrt{u + \frac{n^2 \pi^2}{h_{\rm D}^2}}.$$

同理,消除 x、y 方向封闭边界的影响,得到盒状 封闭页岩气藏点源解为

$$\overline{\Delta \Psi_{\rm f}} = \frac{\overline{\tilde{q}} T p_{\rm sc}}{k_{\rm f} T_{\rm sc} L x_{\rm eD} h_{\rm D}} \left\{ \frac{\cos h(\sqrt{u} \tilde{y}_{\rm D1} + \cos h(\sqrt{u} \tilde{y}_{\rm D2}))}{\sqrt{u} \sin h(\sqrt{u} y_{\rm eD})} + \right.$$

$$2\sum_{k=1}^{+\infty} \left[\cos\left(k\pi \frac{x_{\rm D}}{x_{\rm eD}}\right) \cos\left(k\pi \frac{x_{\rm wD}}{x_{\rm eD}}\right) \times \frac{\cos\left(k\pi \frac{x_{\rm wD}}{x_{\rm eD}}\right)}{\varepsilon_{k} \sin h(\varepsilon_{k} y_{\rm eD})} \right] + 2\sum_{n=1}^{+\infty} \cos\left(n\pi \frac{z_{\rm D}}{h_{\rm D}}\right) \cos\left(n\pi \frac{z_{\rm D}}{h_{\rm D}}\right) \times \left[\frac{\cos\left(n\pi \frac{x_{\rm D}}{h_{\rm D}}\right) \cos\left(n\pi \frac{x_{\rm wD}}{h_{\rm D}}\right)}{\varepsilon_{n} \sin h(\varepsilon_{n} y_{\rm eD})} + 2\sum_{k=1}^{+\infty} \cos\left(k\pi \frac{x_{\rm D}}{x_{\rm eD}}\right) \cos\left(k\pi \frac{x_{\rm wD}}{x_{\rm eD}}\right) \times \frac{\cos\left(k\pi \frac{x_{\rm D}}{x_{\rm eD}}\right) \cos\left(k\pi \frac{x_{\rm wD}}{x_{\rm eD}}\right)}{\varepsilon_{k,n} \sin h(\varepsilon_{k,n} y_{\rm eD})} \right] \right\}.$$
(14)

$$\begin{split} \tilde{y}_{\rm D1} &= y_{\rm eD} - |y_{\rm D} - y_{\rm wD}|, \ \tilde{y}_{\rm D2} &= y_{\rm eD} - |y_{\rm D} + y_{\rm wD}|, \\ \varepsilon_k &= \sqrt{u + \frac{k^2 \pi^2}{x_{\rm eD}^2}}, \ \varepsilon_{k,n} = \sqrt{u + \frac{k^2 \pi^2}{x_{\rm eD}^2} + \frac{n^2 \pi^2}{h_{\rm D}^2}}. \end{split}$$

假定单条裂缝面为均匀流量模型,对盒状油藏 点源在裂缝面进行积分,其中 x 方向从 $(x_{wD} - L_{D})$ 到 $(x_{wD} + L_{D}), z$ 方向为 $(z_{wD} - h_{wD}/2)$ 到 $(z_{wD} + h_{wD}/2),$ 得到盒状油藏不完全穿透情况下单条裂缝 内产生的压降解为

$$\begin{split} \overline{\Delta\Psi_{\rm f}} &= \frac{\overline{\tilde{q}}Tp_{\rm sc}}{k_{\rm f}T_{\rm sc}Lh_{\rm D}} \frac{2L_{\rm fD}h_{\rm wD}}{x_{\rm eD}} \Big\{ \frac{\cos h(\sqrt{u}\,\tilde{y}_{\rm D1} + \cos h(\sqrt{u}\,\tilde{y}_{\rm D2})}{\sqrt{u}\sin h(\sqrt{u}\,y_{\rm eD})} + \\ \frac{2x_{\rm eD}}{\pi L_{\rm fD}} \sum_{k=1}^{+\infty} \left[\frac{1}{k}\cos\left(k\pi\frac{x_{\rm D}}{x_{\rm eD}}\right)\cos\left(k\pi\frac{x_{\rm wD}}{x_{\rm eD}}\right)\sin\left(k\pi\frac{L_{\rm fD}}{x_{\rm eD}}\right) \times \\ \frac{\cos h(\varepsilon_k\tilde{y}_{\rm D1} + \cos h(\varepsilon_k\tilde{y}_{\rm D2})}{\varepsilon_k\sin h(\varepsilon_k y_{\rm eD})} \right] \Big\} + \frac{\overline{\tilde{q}}Tp_{\rm sc}}{\pi k_{\rm f}T_{\rm sc}Lh_{\rm D}} \times \\ \frac{8h_{\rm D}L_{\rm fD}}{x_{\rm eD}} \Big\{ \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n}\cos\left(n\pi\frac{z_{\rm D}}{h_{\rm eD}}\right)\cos\left(n\pi\frac{z_{\rm wD}}{h_{\rm D}}\right) \times \\ \sin\left(n\pi\frac{h_{\rm wD}}{2h_{\rm D}}\right) \left[\frac{\cos h(\varepsilon_n\tilde{y}_{\rm D1} - \cos h(\varepsilon_n\tilde{y}_{\rm D2})}{\varepsilon_n\sin h(\varepsilon_n y_{\rm eD})} + \\ \frac{2x_{\rm eD}}{\pi L_{\rm fD}} \sum_{k=1}^{+\infty} \frac{1}{k}\cos\left(k\pi\frac{x_{\rm D}}{x_{\rm eD}}\right)\cos\left(k\pi\frac{x_{\rm wD}}{x_{\rm eD}}\right) \times \\ \sin\left(k\pi\frac{L_{\rm fD}}{x_{\rm eD}}\right) \frac{\cos h(\varepsilon_k\tilde{y}_{\rm D1} + \cos h(\varepsilon_k\tilde{y}_{\rm D2})}{\varepsilon_{k,n}\sin h(\varepsilon_{k,n} y_{\rm eD})} \right] \Big\}.$$
(15)

2.2 多条裂缝的压降解

分段压裂水平井定产量生产假定总产量为 Q_{total},则对于分段压裂水平井定义无因次压力值为

$$\Psi_{\rm fD} = \frac{\pi k_{\rm f} h T_{\rm sc}}{Q_{\rm total} T p_{\rm sc}} \Delta \Psi_{\rm f}, \ \Psi_{\rm mD} = \frac{\pi k_{\rm f} h T_{\rm sc}}{Q_{\rm total} T p_{\rm sc}} \Delta \Psi_{\rm m}.$$

由于各条裂缝内部为均匀流量,则各条裂缝的 产量为 $q_{ij} = (2L_{m}h_{wD}\tilde{q})_{ij}$,无因次裂缝流量为 $q_{nj} = (2L_{m}h_{wD}\tilde{q})_{ij}/Q_{total}$ 。考虑多条裂缝间的干扰,由于各条裂缝的产量变化,变产量时在Laplace空间地层中 任意一点压力降采用 Duhamel 原理^[19],第 *i* 条裂缝 中心由 *N*_f 条人工压裂裂缝引起的无因次压力降可 表示为

$$\overline{\Psi}_{\text{fD}i}(x_{\text{D}}, y_{\text{D}}, z_{\text{D}}) = \sum_{i=1}^{N_{\text{f}}} s \bar{q}_{i\text{fD}j} \overline{\Psi}_{\text{D}ij}.$$
(16)
为了书写方便,记

$$\begin{split} \overline{\Psi}_{\text{Dij}} &= \frac{\pi}{x_{e\text{D}}s} \left\{ \frac{\cos h(\sqrt{u}\,\tilde{y}_{\text{D1}} + \cos h(\sqrt{u}\,\tilde{y}_{\text{D2}})}{\sqrt{u}\sin h(\sqrt{u}\,y_{e\text{D}})} + \frac{2x_{e\text{D}}}{\sqrt{u}\sin h(\sqrt{u}\,y_{e\text{D}})} \sin\left(k\pi\frac{L_{\text{D}}}{x_{e\text{D}}}\right) \times \frac{2x_{e\text{D}}}{\pi L_{\text{D}}} \sum_{k=1}^{+\infty} \left[\frac{1}{k}\cos\left(k\pi\frac{x_{\text{wDi}}}{x_{e\text{D}}}\right)\cos\left(k\pi\frac{x_{\text{wDj}}}{x_{e\text{D}}}\right)\sin\left(k\pi\frac{L_{\text{D}}}{x_{e\text{D}}}\right) \times \frac{\cos h(\varepsilon_{k}\tilde{y}_{\text{D1}} + \cos h(\varepsilon_{k}\tilde{y}_{\text{D2}})}{\varepsilon_{k}\sin h(\varepsilon_{k}y_{e\text{D}})} \right] \right\} + \frac{4h_{\text{D}}}{\varepsilon_{k}\sin h(\varepsilon_{k}y_{e\text{D}})} \left\{ \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n}\cos\left(n\pi\frac{z_{\text{D}}}{h_{\text{D}}}\right)\cos\left(n\pi\frac{z_{\text{wDj}}}{h_{\text{D}}}\right)\sin\left(n\pi\frac{h_{\text{wD}}}{2h_{\text{D}}}\right) \times \left[\frac{\cos h(\varepsilon_{n}\tilde{y}_{\text{D1}} - \cos h(\varepsilon_{n}\tilde{y}_{\text{D2}})}{\varepsilon_{n}\sin h(\varepsilon_{n}y_{e\text{D}})} + \frac{2x_{e\text{D}}}{\varepsilon_{n}\sin h(\varepsilon_{n}y_{e\text{D}})} \cos\left(k\pi\frac{x_{\text{wDj}}}{x_{e\text{D}}}\right)\sin\left(k\pi\frac{L_{\text{D}}}{x_{e\text{D}}}\right) \times \frac{\cos h(\varepsilon_{k,n}\tilde{y}_{\text{D1}} + \cos h(\varepsilon_{k,n}\tilde{y}_{\text{D2}})}{\varepsilon_{k,n}\sin h(\varepsilon_{k,n}y_{e\text{D}})} \right\} \right\}.$$
(17)

此时, $\tilde{y}_{D1} = y_{eD} - |y_{wDi} - y_{wDj}|$; $\tilde{y}_{D2} = y_{eD} - (y_{wDi} + y_{wDj})$ 。假设水平井井筒无限导流,则井底各点的压力值处处相等,其次为了简单,假设水平井只在人工裂缝处射孔,即井底流量为各条人工裂缝处流入的总和,故有

$$\{ \overline{\Psi}_{wfDi} = \overline{\Psi}_{wfDi+1}, i = 1, 2, \cdots, N_{f}, \\ \sum_{i=1}^{N_{f}} \overline{q}_{fDi} = 1/s.$$

$$(18)$$

压裂水平井各条裂缝的无因次产量值及 Laplace 空间井底压力值可转化为如下方程组的形 式,

$\int s \overline{\Psi}_{D1,1}$	$s\overline{\Psi}_{D1,2}$		$s\overline{\Psi}_{D1,N_{\mathrm{f}}}$	- 1	$\left[\bar{q}_{\mathrm{Df1}}\right]$		0	
:	÷	·	÷	:		=	÷	
$s\overline{\Psi}_{\mathrm{D}i,1}$	$s\overline{\Psi}_{{ m D}i,2}$		$s\overline{\Psi}_{{ m D}i,N_{ m f}}$	- 1	\bar{q}_{Dfi}		0	
:	÷	·.	:	:			÷	
$s\overline{\Psi}_{\mathrm{D}N_{\mathrm{f}},1}$ s	$\overline{\Psi}_{\mathrm{D}N_{\mathrm{f}},2}$		$s\overline{\Psi}_{\mathrm{D}N_{\mathrm{f}},N_{\mathrm{f}}}$	- 1	$\bar{q}_{{\rm Df}N_{\rm f}}$		0	
L s	\$		\$	0	$\lfloor \overline{\Psi}_{_{\mathrm{wD}}} floor$		_1	

(19)

页岩气藏中压裂水平井求解过程为:首先根据 参数定义公式(5),根据上一步页岩基质的压力值 计算参数值,代入公式(8)计算 u 值;根据公式(17) 计算各裂缝处所产生的压降分布,得到方程组(19) 的系数,求解该方程组可得到页岩气藏各条裂缝及 井底处在 Laplace 空间的流量值和压力值,再利用 Stehfest 数值反演^[18] 得到实空间的压力及各条裂缝 的产量值;最后利用公式(8) 计算页岩基质压力值, 循环计算下一时间步的裂缝处流量及压力值。

2.3 产能计算及考虑井筒存储和表皮系数

上述计算的水平井井底压力并没有考虑井筒存储和表皮系数的影响。在 Laplace 空间利用 Duhamel 原理,引人无因次井筒存储系数 C_D和总表皮系数 S₁^[19],得到 Laplace 空间解的关系式为

$$\overline{\Psi}_{wD}(s) = \frac{s\Psi_{wD} + S_t}{s\{1 + C_D s[s\overline{\Psi}_{wD} + S_t]\}}.$$
(20)

在计算过程中,首先利用方程组(19)得到压裂水平 井 Laplace 空间井底压力值,利用式(20)附加上井 筒存储和表皮系数的影响,借助 Stehfest 数值反演 得到考虑井筒存储和表皮系数的井底压力解。

其次,在Laplace空间定井底流压生产时的产量 可通过定产量生产时井底压力值^[20]得到

$$\bar{q}_{\rm D} = 1/s^2 \bar{\Psi}_{\rm wD}.$$
 (21)

其中

$$q_{\rm D} = \frac{qTp_{\rm sc}}{\pi k_{\rm f} hT_{\rm sc}(\Psi_{\rm o} - \Psi_{\rm w})}$$

3 考虑吸附解吸特性时压力及产能 动态分析

为了研究页岩气藏考虑吸附解吸特性下压力 及产能的动态变化,页岩气藏基本参数为:气藏初始 压力 $p_o = 10$ MPa,定产气量生产q = 10000 m³/d,天 然裂缝系统渗透率 $k_f = 5 \times 10^{-3} \mu m^2$,基质系统渗透 率 $k_m = 1 \times 10^{-6} \mu m^2$,油藏厚度h = 20 m,窜流系数 $\lambda = 5$,弹性储能比 $\omega = 0.1$,基质系统孔隙度 $\varphi_m =$ 0.05,天然裂缝系统孔隙度 $\varphi_f = 0.005$,甲烷气体的 压缩系数 $C_g = 8.217 \times 10^{-2}$ MPa⁻¹,甲烷的摩尔质量 $M_g = 0.016$ kg/mol,甲烷的摩尔体积 $V_{std} = 0.02237$ m³/mol,页岩密度 $\rho_s = 2600$ kg/m³,理想气体常数R= 8.314 J/(K·mol),油藏温度T = 323 K,水平井长 度为1.0 km, $x_{eD} = y_{eD} = 20$,油藏厚度 $h_D = 0.01$,3 条 人工裂缝位于油藏中心,坐标为 $x_{wD} = [10,10,10]$, $y_{wD} = [9.5,10.0,10.5]$,假设人工裂缝全部穿透储 层, $h_{wD} = 0.01$ 。

3.1 吸附解吸特征对页岩气藏动态的影响

分别计算不考虑吸附解吸特性($\beta = 0$)和考虑 吸附解吸特性时压裂水平井动态特征,页岩气藏的 基本参数同上,取页岩对甲烷气体的 Langmuir 吸附 体积 $V_{\rm L} = 8 \times 10^{-4}$ m³/kg, Langmuir 吸附压力 $p_{\rm L} = 5$ MPa,则该页岩气藏的吸附等温曲线如图1所示。



图 1 页岩气藏 Langmuir 吸附等温曲线

Fig. 1 Langmuir adsorption isotherm curve in shale gas reservoir

由 Langmuir 吸附等温公式(4)可知, Langmuir 体积对应页岩对甲烷气体的最大吸附量,一般难以 达到,而 Langmuir 压力则表示当吸附量对应 0.5 倍 Langmuir 体积时页岩储层的压力值, Langmuir 体积 越大则页岩对甲烷气体的吸附能力越强,同时 Langmuir 压力越大,页岩的吸附能力也越强。在此页岩 储层条件下分别计算定产量生产时水平井的压力动 态如图 2 所示,定井底流压生产时水平井的产量动 态如图 3 所示。



图 2 考虑和不考虑吸附解吸下压力与压力导数曲线

Fig. 2 Pressure and pressure derivative curves of whether considering adsorption and desorption or not

由图 2 可知,由于在页岩气藏中只是在基质中 考虑了吸附解吸过程,因此在定产量生产早期,主要 为天然裂缝内气体向井底流动,吸附解吸过程对压 力和压力导数没有影响;当天然裂缝与基质发生窜 流后,由于基质中吸附解吸气体的补充,考虑吸附解 吸过程后所需的压降值比不考虑时要小,并延缓了 压力波传播到边界的时间;同时压力导数的双重介 质特征凹槽更加明显,说明考虑吸附解吸后,增加了 基质系统的弹性储层,减小了裂缝系统的弹性储能 比,因此在压力导数曲线上的凹槽下凹更加明显。

与压力响应结果类似,生产初期考虑吸附解吸 与不考虑吸附解吸产能相同,基质与天然裂缝发生 拟稳态窜流后,考虑吸附解吸过程压裂水平井产量 更大,稳产生产的时间也越长,取无因次产量0.1为 基准点,考虑与不考虑吸附解吸过程达到的无因次 时间分别约为500和250,相当于稳产时间延长为 原来的2倍,因此页岩气藏生产过程中,吸附解吸气 量是页岩气产量的有力补充。为了说明吸附解吸气 量,参数值的变化如图4所示。





Fig. 3 Rate decline responses of whether considering adsorption and desorption or not





由图4可见,随着时间的增加,参数β在很长一 段时间内保持在一定水平,约等于1.28,由于β表 示单位时间内由于基质压力降低吸附解吸气量与游 离气弹性能释放量的比值,因此基质中释放的气量 中,吸附解吸气量所占比例约为β/(β+1)= 56.14%,即页岩气藏生产过程中吸附解吸气量占有 较大的比例,因此页岩气藏生产过程中必须考虑吸 附解吸气体的影响。

3.2 Langmuir 体积对压裂水平井动态的影响

页岩对甲烷的吸附量满足 Langmuir 吸附等温 公式,在 Langmuir 压力不变的情况下,随着 Langmuir 体积 V_L 的增大,页岩对甲烷的吸附能力增强。 为了研究页岩 Langmuir 体积对压裂水平井压力及 产量的影响,在 Langmuir 压力 p_L = 5 MPa 一定的情 况下,不同 Langmuir 体积 V_L 值下吸附等温曲线如 图 5 所示。可见随着 Langmuir 体积的增大,同一基 质压力下页岩对甲烷的吸附能力增强,且随着基质 压力的增加,增幅越来越大。其他参数同上,分别计 算定产量生产时压力及压力导数曲线以及定井底流 压生产的产量曲线如图 6 和 7 所示。



由图 6 可见,Langmuir 吸附体积越大,发生窜流 后所需压差越小,压力波传播到边界的时间越晚,说 明页岩的吸附解吸能力越强,在定产量生产条件下, 降低了井底所需的压力差,延缓了压力波传播的速 度;其次,Langmuir 吸附体积越大,窜流过程压力导 数曲线下凹越明显,但对发生窜流的时间并无影响, 说明页岩吸附解吸能力越大,页岩基质的弹性储能 越大,即天然裂缝的弹性储能比越小,但对窜流能力 并没有影响;最后,随着 Langmuir 吸附体积线性增 大,对水平井影响幅度越来越小,主要是由于页岩基 质的吸附能力随 Langmuir 吸附体积的线性增大,但





由图 7 可见, Langmuir 吸附体积越大,发生窜流 以后的产能越大,页岩气藏稳产时间也越长;同时随 着 Langmuir 吸附体积线性增加,即页岩的最大吸附 能力线性增加,页岩气藏的产能增加幅度减小,同时







3.3 Langmuir 压力对压裂水平井动态的影响

在 Langmuir 体积 $V_L = 8 \times 10^{-4}$ m³/kg 不变的情况下,不同 Langmuir 压力 p_L 下的吸附等温曲线如图 8 所示。在 Langmuir 体积一定的情况下,随着 Langmuir 压力增大,页岩对甲烷的吸附量减小,但最大吸附量相同;在基质压力一定的情况下,随 Langmuir 压力线性增加,页岩吸附解吸能力降低幅度减小。





其他参数同上,分别计算定产量生产时压力及 压力导数曲线以及定井底流压生产的产量曲线如图 9和10所示。由图9和图10可见,随着 Langmuir 压力 p_L 线性增加,对压力和产能的影响并非线性变 化,其中 Langmuir 压力 p_L =5和8 MPa 时吸附量小 于 p_L =2 MPa 时的吸附量,但定产量生产所需压差 更小,产能越大稳产时间越长,同时 Langmuir 压力 由 5 MPa 增加到 8 MPa,对压力及产能的影响不明 显,主要是由于地层初始压力为 10 MPa,开采过程 中基质压力逐渐减小,随基质压力的减小页岩吸附 量减小,且减小幅度随 Langmuir 压力的增大而逐渐 增大,故 Langmuir 压力为5和8 MPa 时定产量生产时间越长,产能越大稳产时间越长,吸附量斜率变化不大,因此 Langmuir 压力由5 MPa 增加到8 MPa 时压力及产能的变化不明显,Langmuir 吸附压力对页 岩气藏水平井动态的影响必须结合地层压力和 Langmuir 吸附等温曲线进行分析。



Fig. 9 Pressure and pressure derivative responses affected by Langmuir absorption pressure



4 结 论

(1)页岩气藏开采过程中,基质内吸附解吸气量所占比例(β/(β+1)=56.14%)较大,因此页岩气藏必须考虑吸附解吸特征的影响。

(2)吸附解吸过程对分段压裂水平井压力和产 能的影响表现在基质与天然裂缝发生窜流后,且考 虑吸附解吸过程后,水平井定产量生产所需的压降 值比不考虑时要小,压力波到达边界的时间更晚,压 力导数曲线凹槽更加明显;同时考虑吸附解吸过程 后,页岩气藏压裂水平井产能越大,稳产时间越长, 约为不考吸附解吸时稳产时间的2倍。

(3) Langmuir 吸附体积越大,页岩气藏发生窜 流后定产量生产所需压差越小,压力波传播到边界 越晚,压力导数曲线下凹越明显,考虑吸附解吸后定 井底流压生产时压裂水平井产能越大,稳产时间也 越长;随着 Langmuir 吸附体积线性增大,页岩气藏 压裂水平井压力影响幅度逐渐减小,产能增加幅度 也减小。

(4) Langmuir 吸附压力线性增加,对压力和产能的影响并非线性变化,需要根据地层压力并结合吸附等温曲线的变化趋势进行具体分析。

参考文献:

- [1] U. S. Energy Information Administration. World shale gas resources: an initial assessment of 14 regions outside the United States [M]. Washington: U. S. Department of Energy, 2011.
- [2] 陈尚斌,朱炎铭,王红岩,等.中国页岩气研究现状与发展趋势[J].石油学报,2010,31(4):689-694.
 CHEN Shangbin, ZHU Yanming, WANG Hongyan, et al. Status and trends of shale gas in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010,31(4):689-694.
- [3] PAUL Stevens. The shale gas revolution: developments and changes[R]. London: Chatham House, 2012.
- [4] HILL D G, NELSON C R. Gas productive fractured shales: an overview and update [J]. Gas Tips, 2000,6 (2):4-18.
- [5] VERMYLEN John P. Geomechanical studies of the barnett shale[D]. Texas, USA: Stanford University, 2011.
- [6] 陈霞,刘洪林,王红岩,等. 沁水盆地含水煤层气藏的 气体渗流特性[J]. 石油学报, 2011,32(3):500-503. CHEN Xia, LIU Honglin, WANG Hongyan, et al. Gasseepage characteristics of coalbed reservoirs with different water saturation in the Qinshui Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(3):500-503.
- [7] JAVADPOUR Farzam, FISHER D, UNSWORTH M. Nanoscale gas flow in shale sediments [J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2007, 46(10):55-61.
- [8] ROBERT G L, ROBERT M R, STEPHEN C R, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudestones of the mississippian Barnett shale [J]. Journal of Sedimentary Research, 2009,79: 848-861.
- [9] 崔思华, 班凡生, 袁光杰. 页岩气钻井完井技术现状及难点分析[J]. 天然气工业, 2011,31(4):1-4.
 CUI Sihua, BAN Fansheng, YUAN Guangjie. Status and challenges of global shale gas drilling and completion[J]. Natural Gas Industry, 2011,31(4):1-4.
- [10] 孙海,姚军,廉培庆,等.考虑基岩向井筒供液的压 裂水平井非稳态模型[J].石油学报,2012,33(1): 117-122.

SUN Hai, YAO Jun, LIAN Peiqing, et al. A transient

reservoir/wellbore couping model for fractured horizontal wells with consideration of fluid inflow from base rocks into wellbores[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(1): 117-122.

- [11] RBEAWI S A, TIAB D. Transient pressure analysis of a horizontal well with multiple inclined hydraulic fractures using type-curve matching[R]. SPE 120540, 2012.
- [12] 李建秋,曹建红,段永刚,等.页岩气井渗流机理及 产能递减分析[J].天然气勘探与开发,2011,34
 (2):34-37.
 LI Jianqiu, CAO Jianhong, DUAN Yonggang, et al. Seepage mechanism and productivity decline of shale-gas well [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2011,34(2):34-37.
- [13] GUO Jingjing, ZHANG Liehui, WANG Haitao. Pressure transient analysis for multi-stage fractured horizontal wells inshale gas reservoirs[J]. Transp Porous Med, 2012,93(3):635-653.
- [14] 李笑萍,赵子刚.真实气体在裂缝性气藏内流动问题的精确解[J].石油学报,1993,14(2):81-89.
 LI Xiaoping, ZHAO Zigang. Analytical solution of the flowing equation in a fractured gas reservoir with real gas flow[J]. Acta Petrolei Sinica, 1993,14(2):81-89.
- [15] CIVAN C S, RAIS C H. Shale-gas permeability and diffusivity inferred by improved formulation of relevant retention and transport mechanisms [J]. Transp Porous Med, 2010,86(3):925-944.
- [16] OZKAN E, RAGHAVAN R. New solutions for well test analysis problems: part 1-an anlytical considerations
 [J]. SPE Formation Evaluation, 1991,6(3):359-368.
- [17] OZKAN E, RAGHAVAN R. New solutions for well test analysis problems: part 2-computational considerations and applications[J]. SPE Formation Evaluation, 1991, 6(3):369-378.
- [18] 同登科,陈钦雷.关于 Laplace 数值反演 Stehfest 方法的一点注记[J].石油学报,2001,22(6):91-92.
 TONG Dengke, CHEN Qinlei. A note on the Laplace numerical inversion Stehfest method [J]. Acta Petrolei Sinica,2001,22(6):91-92.
- [19] 姚军,李爱芬. 单孔隙介质渗流问题的统一解[J]. 水动力学研究与进展:A辑, 1999,14(3):317-324.
 YAO Jun, LI Aifen. General solutions for seepage flow in single porous medium[J]. Journal of Hydrodynamics (ser A),1999,14(3):317-324.
- [20] NIE Renshi, MENG Yingfeng, JIA Yongfu, et al. Dual porosity and dual permeability modeling of horizontal well in naturally fractured reservoir [J]. Transp Porous Med, 2012,92(1):213-235.

(编辑 李志芬)