

天然气开发

低渗透气藏水平井气水两相产能研究

袁 淋, 李晓平

(西南石油大学“油气藏地质及开发工程”国家重点实验室, 四川 成都 610500)

摘要:低渗透含水气藏开发过程中,水平井底见水不仅增加了地层流体渗流的复杂性,而且降低了水平井产量。以气水两相渗流理论为基础,建立了气水两相运动方程,定义气水两相启动压力梯度以及气水两相广义拟压力,考虑应力敏感、滑脱效应、紊流效应和表皮效应对气水同产水平井产能的影响,利用保角变换方法推导出低渗透气藏中水平井气水两相三项式产能新公式。通过实例计算,利用新公式计算的无阻流量结果与实际产能测试结果相对误差较小,仅为5.13%,说明新公式精确可靠,且敏感性分析表明,水平气井产水量随着滑脱因子以及水气质量比的增大而增大,而随着启动压力梯度以及应力敏感指数的增大而减小,但启动压力梯度对产水量影响较小,若生产压差较大,启动压力梯度可以忽略不计。

关键词:低渗透;水平井;气水两相;产水量;启动压力梯度;应力敏感;滑脱;水气质量比

中图分类号:TE37 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-1926(2014)09-1455-07

引用格式:Yuan Lin, Li Xiaoping. The productivity study of gas-water two phase horizontal well in low-permeability gas reservoir[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(9): 1455-1461. [袁淋, 李晓平. 低渗透气藏水平井气水两相产能研究[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(9): 1455-1461.]

0 引言

随着水平井技术在国内外低渗透气藏开发中广泛的应用^[1-2],近年来,四川盆地和鄂尔多斯盆地的低孔、低渗、高含水气藏也采用了水平井技术,且取得了较好的效果,但是气井产水一直是制约气井产量的一个重要因素。目前,不少学者对含水气藏直井气水两相渗流和产能做了大量的研究^[3-11],但对水平井气水两相产能的研究相对较少^[12],对低渗气藏水平井气水两相产能的研究更是几乎未见报道。

笔者以水平井气水两相渗流理论为基础,定义了气水两相启动压力梯度与气水两相广义拟压力,利用保角变换方法,推导出了考虑启动压力梯度、应力敏感、滑脱效应、紊流效应和表皮效应的低渗透气藏水平井气水两相三项式产能公式,并通过实例论证了新公式的准确性,同时分析了启动压力梯度、应力敏感指数、滑脱因子以及水气质量比对气水两相

流水相流入动态的影响。

1 水平井产能公式推导

目前对于水平井产能的研究,通常利用 Joshi^[13]提出的将水平井的三维渗流简化为2个二维渗流,即近井地带的垂向径向流以及远井地带的平面拟径向流。对于水驱气藏,水平气井一旦见水,近井地带则变为气水两相的渗流,而远井地带仍为单相水的渗流,因此可以分别求取2个二维平面内的渗流问题,利用等值渗流阻力法求解水平井三维渗流问题。

1.1 近井地带产能公式

近井地带的垂向径向流可以看成上下封闭边界中一点汇的渗流问题,引入儒柯夫斯基变换,取保角变换函数:

$$\xi = (1 - e^{-\frac{r}{h}}) \times (1 + e^{\frac{r}{h}}) \quad (1)$$

式(1)中: h 为气层厚度,m。

通过该变换,将Z平面内的带型区域($-0.5h < y < 0.5h$)转换成 ξ 平面内的单位圆形区域,Z平面

上的汇点(0,0)变成 ξ 平面上的圆心(0,0),如图1所示。

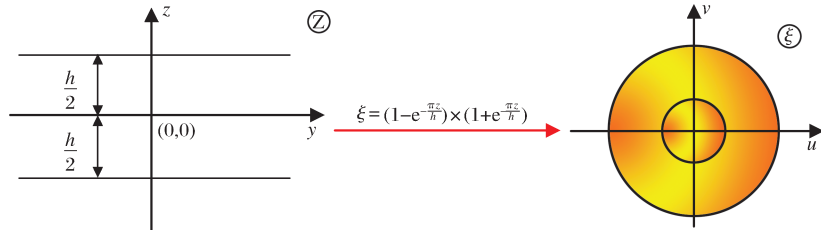


图1 垂直平面内保角变换示意

Fig. 1 Conformal mapping in vertical plane

Z平面上的井半径 r_w 在 ξ 平面上变成 R_w ,则:

$$R_w \approx \left| \frac{d\xi}{dz} \right|_{(0,0)} r_w = \frac{2\pi r_w}{h} \quad (2)$$

式(2)中: r_w 为井半径,m。

气相与水相启动压力梯度变为:

$$\lambda_g' = \frac{h/2 - r_w}{1 - \frac{2\pi r_w}{h}} \lambda_g \quad \lambda_{w1}' = \frac{h/2 - r_w}{1 - \frac{2\pi r_w}{h}} \lambda_w \quad (3)$$

式(3)中: λ_g 为气相启动压力梯度,Pa/m; λ_w 为水相启动压力梯度,Pa/m。

考虑启动压力梯度的气相与水相的运动方程为:

$$\frac{dp}{dr} - \lambda_g' = \frac{\mu_g}{k \times k_{rg}} \frac{q_g}{2\pi r L} \quad (4)$$

$$\frac{dp}{dr} - \lambda_{w1}' = \frac{\mu_w}{k \times k_{rw}} \frac{q_w}{2\pi r L} \quad (5)$$

式(4)–(5)中: p 为径向上任一点压力,Pa; r 为任一点的径向距离,m; μ_g 、 μ_w 分别为气相与水相黏度,Pa·s; k 为气藏测试渗透率,m²; k_{rg} 、 k_{rw} 分别为气相与水相相对渗透率; q_g 、 q_w 分别为地下产气量与产水量,m³/s; L 为水平段长度,m。

定义水气质量比为:

$$R_{wg} = \frac{m_w}{m_g} = \frac{\rho_w q_w}{\rho_g q_g} = \frac{\rho_{wsc} q_{wsc}}{\rho_{gsc} q_{gsc}} \quad (6)$$

式(6)中: m_w 、 m_g 分别为产水与产气的质量,kg/s; ρ_w 、 ρ_g 分别为水与气的地下密度,kg/m³; ρ_{wsc} 、 ρ_{gsc} 分别为水与气地面标准状况下密度,kg/m³; q_{wsc} 、 q_{gsc} 分别为地面标准状况下产水量与产气量,m³/s。

式(4)与式(5)经过变形得:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{k_{rg} \times \rho_g}{\mu_g} + \frac{k_{rw} \times \rho_w}{\mu_w} \right) \frac{dp}{dr} = \\ & \left(\frac{k_{rg} \times \rho_g}{\mu_g} \lambda_g' + \frac{k_{rw} \times \rho_w}{\mu_w} \lambda_{w1}' \right) + \\ & (m_w + m_g) \frac{1}{2\pi r k L} \end{aligned} \quad (7)$$

在低渗透气藏中,滑脱效应与应力敏感较明显,

对于滑脱效应,根据Klinkenberg^[14]得到的测试渗透率 k 与绝对渗透率 k_g 的关系为:

$$k = k_g \left(1 + \frac{\delta}{p} \right) \quad (8)$$

式(8)中: k_g 为气藏绝对渗透率,m²; δ 为滑脱因子,Pa。

对于应力敏感,根据Farquhar等^[15]的研究,绝对渗透率 k_g 为:

$$k_g = k_i e^{-\alpha(p_i - p)} \quad (9)$$

式(9)中: k_i 为原始渗透率,m²; α 为应力敏感指数,Pa⁻¹; p_i 为原始地层压力,Pa。

将式(8)与式(9)带入式(7)中,定义气水两相启动压力梯度为:

$$\lambda_{wg} = \left(\frac{k_{rg} \times \rho_g}{\mu_g} \lambda_g' + \frac{k_{rw} \times \rho_w}{\mu_w} \lambda_{w1}' \right) \quad (10)$$

则整理式(7)得到:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{k_{rg} \times \rho_g}{\mu_g} + \frac{k_{rw} \times \rho_w}{\mu_w} \right) \left(1 + \frac{\delta}{p} \right) e^{-\alpha(p_i - p)} \frac{dp}{dr} = \\ & \lambda_{wg} \left(1 + \frac{\delta}{p} \right) e^{-\alpha(p_i - p)} + \frac{(m_w + m_g)}{2\pi r k_i L} \end{aligned} \quad (11)$$

定义气水两相广义拟压力为:

$$\begin{aligned} \varphi(p) = \int_0^p & \left(\frac{k_{rg} \times \rho_g}{\mu_g} + \frac{k_{rw} \times \rho_w}{\mu_w} \right) \\ & \left(1 + \frac{\delta}{p} \right) e^{-\alpha(p_i - p)} dp \end{aligned} \quad (12)$$

且令:

$$f(p) = \left(1 + \frac{\delta}{p} \right) e^{-\alpha(p_i - p)} \quad (13)$$

用式(11)分离变量积分,并将式(12)、式(13)代入式(11)得:

$$\begin{aligned} \varphi(p_p) - \varphi(p_{wf}) = & \int_{\frac{2\pi r_w}{h}}^1 \lambda_{wg} f(p) dr + (1 + R_{wg}) \\ & \frac{\rho_{gsc}}{2\pi k_i L} \text{Ln} \frac{h}{2\pi r_w} q_{gsc} \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)中: p_p 为近井地带驱动压力,Pa; p_{wf} 为井底流压,Pa。

考虑近井地带表皮效应与紊流效应的影响,并将式(14)变为SI制矿场单位,则有:

$$\varphi(p_p) - \varphi(p_{wf}) = \int_{\frac{2\pi r_w}{h}}^1 \lambda_{wg} f(p) dr + (1 + R_{wg}) \frac{1.842 \rho_{gsc}}{k_i L} \left(\ln \frac{h}{2\pi r_w} + S + Dq_{gsc} \right) q_{gsc} \quad (15)$$

其中:

$$D = 2.191 \times 10^{-18} \frac{\beta \rho_g k \left(\frac{p_{wf} + p_p}{2} \right)}{\mu_g L r_w^2} \quad (16)$$

$$\beta = 7.644 \times 10^{10} / k \left(\frac{p_{wf} + p_p}{2} \right)^{1.5} \quad (17)$$

式(15)中: S 为表皮因子。

1.2 远井地带产能公式

远井地带的渗流为平面拟径向渗流,引入儒柯夫斯基变换,取保角变换函数

$$\frac{Z}{L/2} = \frac{1}{2} \left(\xi + \frac{1}{\xi} \right) \quad (18)$$

通过此变换将 Z 平面内长半轴为 a 、短半轴为 b 的椭圆形泄油区域变换成 ξ 平面内半径为 $(a+b)/(L/2)$ 的圆形区域,将线段 $(-L/2, 0)$ 到 $(L/2, 0)$ 映射成单位圆周,这就等价于半径为 $(a+b)/(L/2)$ 的泄油区域内一口半径为1的直井的渗流问题,如图2所示。

经过儒柯夫斯基变换,启动压力梯度变为:

$$\lambda_{w2} = \frac{r_e - L/2}{\frac{a+b}{L/2} - 1} \lambda_w \quad (19)$$

式(19)中: a 、 b 为椭圆形供给区域的长半轴与短半轴,m; r_e 为供给半径,m。

考虑启动压力梯度以及应力敏感的水相运动方程为:

$$\frac{dp}{dr} - \lambda_{w2} = \frac{\mu_w}{k_i e^{-a(p_i - p)}} \frac{q_t}{2\pi r h} \quad (20)$$

式(20)中: q_t 为远井地带水相流量, m^3/s 。

为了构造气水两相广义拟压力,式(20)两边同时乘以 $\left(\frac{k_{rg} \times \rho_g}{\mu_g} + \frac{k_{rw} \times \rho_w}{\mu_w} \right) \left(1 + \frac{\delta}{p} \right)$,分离变量积分得到:

$$\varphi(p_e) - \varphi(p_p) = \frac{\rho_w \lambda_{w2}}{\mu_w} \int_1^{\frac{a+b}{L/2}} f(p) dr + \frac{\rho_w}{2\pi k_i h} q_t \int_1^{\frac{a+b}{L/2}} \left(1 + \frac{\delta}{p} \right) \frac{1}{r} dr \quad (21)$$

式(21)中: p_e 为气藏供给压力,Pa。

当水体入侵时,不考虑封闭气的形成,根据气藏体积守恒公式:

$$q_t = q_w + q_g = \left(\frac{R_{wg}}{\rho_w} + \frac{ZRT}{28.97 \gamma_g \bar{p}} \right) \rho_{gsc} q_{gsc} \quad (22)$$

式(22)中: Z 为气体偏差因子; γ_g 为气体相对密度; T 为气层温度,K; R 为气体常数, $Pa \cdot m^3 / (kmol \cdot kg)$; \bar{p} 为远井地带平均压力,Pa。

对于远井地带,压力梯度较小,平均压力与供给边界压力相差较小,整个渗流场平均压力较大,且气体密度在高压下变化较小,因此,取近似值 $\bar{p} \approx p_e$,则有:

$$q_t = q_w + q_g = \left(\frac{R_{wg} \rho_{gsc}}{\rho_w} + \frac{ZT p_{sc}}{p_e T_{sc}} \right) q_{gsc} \quad (23)$$

式(23)中: p_{sc} 为标况下压力, $\times 10^5 Pa$; T_{sc} 为标准状况下温度,K。

将式(21)、式(23)化为SI制矿场单位,与式(15)联立得到低渗透气藏水平井气水两相拟压力形式的三项式产能公式:

$$\varphi(p_e) - \varphi(p_{wf}) = C + Aq_{gsc} + Bq_{gsc}^2 \quad (24)$$

其中:

$$C = \int_{\frac{2\pi r_w}{h}}^1 \lambda_{wg} f(p) dr + \frac{\rho_w \lambda_{w2}}{\mu_w} \int_1^{\frac{a+b}{L/2}} f(p) dr \quad (25)$$

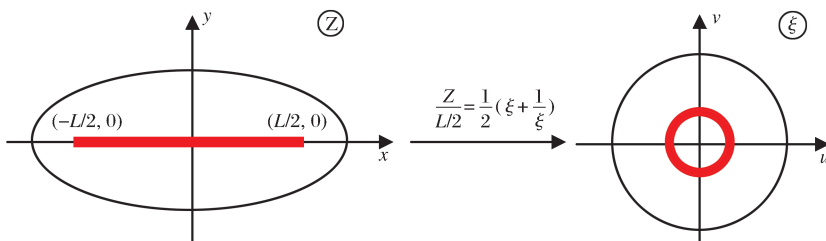


图2 水平平面内保角变换示意

Fig. 2 Conformal mapping in horizontal plane

$$A = \frac{1.842}{k_i} \left[\frac{1+R_{wg}}{L} \left(\text{Ln} \frac{h}{2\pi r_w} + S \right) \rho_{gsc} + \left(\frac{R_{wg} \rho_{gsc}}{h} + \frac{\rho_w Z T p_{sc}}{p_e T_{sc} h} \right) \left(1 + \frac{\delta}{p_e} \right) \text{Ln} \frac{a+b}{L/2} \right] \quad (26)$$

$$B = \frac{4.036 \times 10^{-18} (1+R_{wg}) \rho_{gsc} \beta \gamma_g}{\mu_g L^2 r_w} \quad (27)$$

1.3 拟压力函数的计算

对于广义气水两相拟压力, 根据水气两相相对渗透率与水气质量比 R_{wg} 的关系为:

$$\frac{k_{rw}}{k_{rg}} = R_{wg} \frac{\rho_g \mu_w}{\rho_w \mu_g} \quad (28)$$

一方面, 水相黏度 μ_w 与密度 ρ_w 随压力变化很小, 那么 ρ_w, μ_w 可以视为常数, 而 μ_g/ρ_g 为压力的函数, 根据式(28) 可以求得 k_{rw}/k_{rg} 与 p 的关系; 另一方面, k_{rw}, k_{rg} 均为 S_w 的函数, 即 k_{rw}/k_{rg} 为 S_w 的函数, 则可以求得 S_w 与 p 的关系, 进而获得 k_{rw}, k_{rg} 与 p 的关系。最终将 k_{rw}, k_{rg} 与 p 的关系代入式(12), 计算得到气水两相广义拟压力函数。

对于启动压力梯度造成的压降 C , 由于很难获得 p 与 r 的关系, 无法利用积分方法求解, 因此近似采用数值积分方法。

$$\int_{\frac{2\pi r_w}{h}}^1 \lambda_{wg} f(p) dr = \frac{1}{2} [\lambda_{wg}(p_p) f(p_p) + \lambda_{wg}(p_{wf}) f(p_{wf})] \left[1 - \frac{2\pi r_w}{h} \right] \quad (29)$$

$$\int_1^{\frac{a+b}{L/2}} f(p) dr = \frac{1}{2} [f(p_e) - f(p_p)] \left[\frac{a+b}{L/2} - 1 \right] \quad (30)$$

在计算式(29) 与式(30) 时, 由于内部渗流场驱动压力 p_p 无法确定, 因此先假设一个 $p_\rho^{(0)}$ 值, 将其代入式(24) 求得 q_{gsc} , 再将 q_{gsc} 代入式(15) 或式(21) 反求得 $p_\rho^{(1)}$, 若 $|p_\rho^{(0)} - p_\rho^{(1)}| \leq \epsilon$, 则 $p_\rho^{(1)}$ 即为所求, 若不满足, 则重新假设初值, 直到 $|p_\rho^{(i)} - p_\rho^{(i+1)}| \leq \epsilon$ 为止。

2 实例计算及影响因素分析

某水平井基本参数: 气层温度 T 为 366K, 天然气相对密度 γ_g 为 0.6, 水平井井筒半径 r_w 为 0.1m, 气藏驱动压力 p_e 为 30MPa, 水平井井底流压 p_{wf} 为 20MPa, 气藏原始地层压力 p_i 为 35MPa, 气藏原始渗透率 k_i 为 $0.3 \times 10^{-3} \mu m^2$, 气层厚度 h 为 20m, 表皮因子 S 为 2, 水平井驱动半径 r_e 为 500m, 水平段

长度 L 为 800m, 天然气偏差因子 Z 为 0.9, 目前日产气量 q_{gsc} 为 $1.8 \times 10^4 m^3/d$, 目前日产水量 q_w 为 $482 m^3/d$, 经折算水气质量比 R_{wg} 约为 0.035, 滑脱因子 δ 为 0.5MPa, 应力敏感指数 α 为 $0.01 MPa^{-1}$, 气相启动压力梯度 λ_g 为 $0.00015 MPa/m$, 水相启动压力梯度 λ_w 为 $0.0005 MPa/m$, 该井通过产能测试获得目前地层压力以及产水量条件下无阻流量约为 $3.7 \times 10^4 m^3/d$ 。

通过实验测得气水相对渗透率曲线以及气体黏度和密度之比与压力的关系曲线如图 3、图 4 所示。

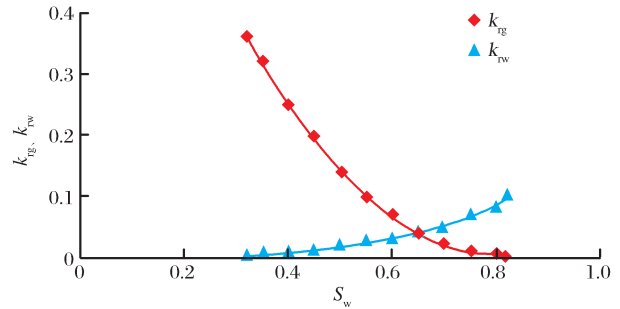


图 3 气水两相相渗曲线

Fig. 3 Relative permeability curve of gas-water two-phase

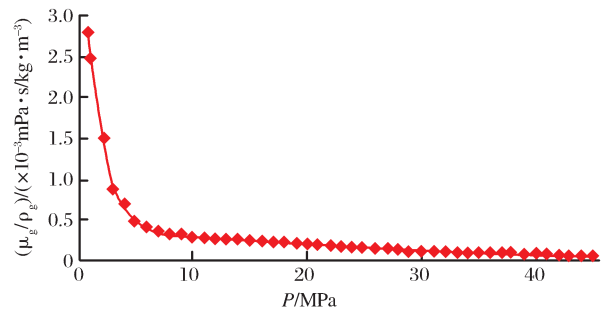


图 4 气体黏度与密度比随压力变化曲线

Fig. 4 Relationship curve between viscosity-density ratio and pressure

根据已知数据, 结合图 3、图 4 所示曲线, 得到两相渗透率比值随含水饱和度变化的关系曲线和两相拟压力随压力变化的关系曲线(图 5, 图 6)。

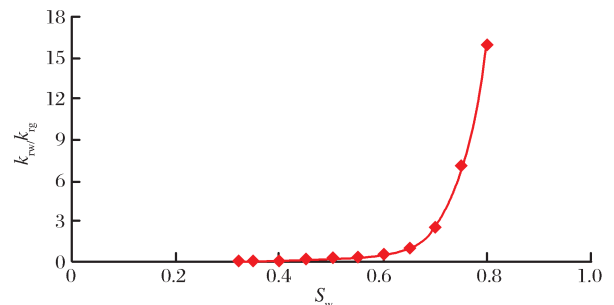


图 5 k_{rw}/k_{rg} 随含水饱和度 S_w 变化的关系曲线

Fig. 5 Relationship curve between k_{rw}/k_{rg} and S_w

根据图 3—图 6 相关关系曲线,利用式(24)、式(25)、式(26)以及式(27)等产量计算公式,将实例数据代入以上各式中,算得该井无阻流量 q_{AOF} 约为 $3.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,而实际产能测试无阻流量为 $3.7 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,两者的绝对误差为 $0.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,相对误差为 5.13%,其绝对误差与相对误差均较小,因此本文公式能够运用于低渗透气藏水平井气水两相流产能预测。

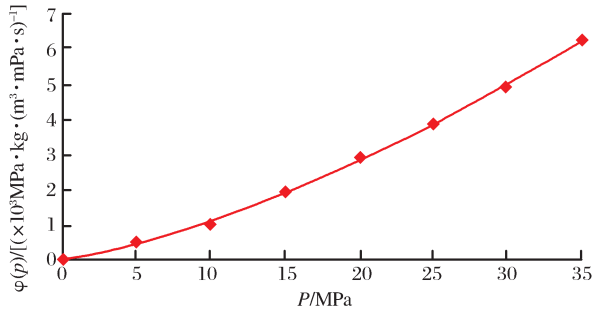


图 6 气水两相拟压力随压力变化的关系曲线
Fig. 6 Relationship curve between gas-water two phase pseudopressure and pressure

2.1 启动压力梯度对产水量的影响

在水气质量比 R_{wg} 一定条件下,作不同气相与水相启动压力梯度下的气水两相流水相流入动态曲线(图 7),由图 7 可以看出,随着井底压力的减小,产水量明显的增大,但随着水相与气相启动压力梯度的逐渐增大,水相流入动态曲线左移,即水相无阻流量减小,但是变化的总体趋势不太明显,即启动压力梯度对气水两相渗流过程产水量的影响并不大,特别是对于生产压差较大的井,启动压力梯度的影响更加微小,此时启动压力梯度引起的产水量基本可以忽略不计。

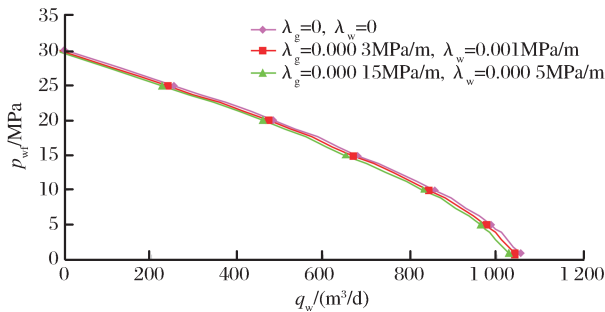


图 7 启动压力梯度对产水量的影响
Fig. 7 Effect of start-up pressure gradient on water-output

2.2 应力敏感指数对产水量的影响

在水气质量比 R_{wg} 一定条件下,作不同应力敏感指数下气水两相流水相流入动态曲线(图 8),由

图 8 可以看出,应力敏感指数并未改变产水量随压力变化的趋势,且随着应力敏感指数的增大,水相流入动态曲线左移,即水相无阻流量减小,特别是井底流压较低时,产水量降低幅度越大。这是因为应力敏感指数越大,井底流压越低,地层渗透率降低的程度越大,同时增加了气相与水相的渗流阻力,使得产水量与产气量同时降低,但在低渗透气藏中,气体滑脱效应有利于气体的渗流,因此产水量比产气量下降的幅度将更大。

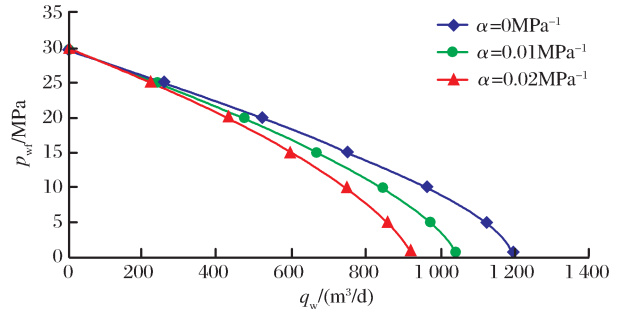


图 8 应力敏感指数对气水两相流入动态的影响
Fig. 8 Effect of stress sensitivity index on water-output

2.3 滑脱因子对产水量的影响

当水气质量比 R_{wg} 一定时,作不同滑脱因子下气水两相流水相流入动态曲线(图 9),由图 9 可以看出,当井底压力较高时,滑脱因子的大小对产水量基本无影响,但是井底压力较低时,随着滑脱因子的增大,水相流入动态曲线右移,即水相无阻流量增大,且井底流压越低,产水量增加的幅度越大。这是因为滑脱现象增大了气体的渗透率,使得气相比水相渗流速度更快,同时也给水相流动提供了更大的流动空间,减小了流动阻力,两者的产量都将增大。

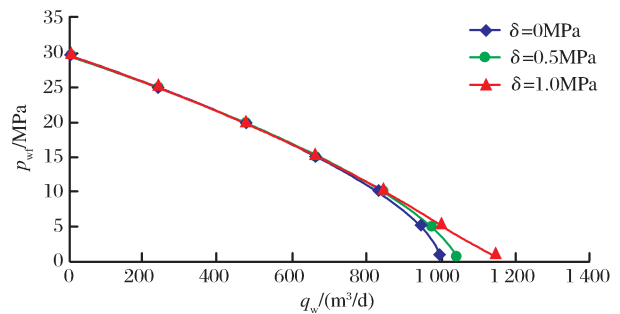


图 9 滑脱因子对产水量的影响
Fig. 9 Effect of slippage on water-output

2.4 水气质量比对产水量的影响

在其他参数一定条件下,作不同水气质量比下气井流入动态曲线(图 10),水气质量比是最能够明确判断井底产水量多少的一个参数,由图 10 可以看

出,在同一生产压差下,随着水气质量比的增大,水相流入动态曲线右移,即水相无阻流量增大。因此通过地面产气量与产水量的比例关系,可以反推地层中水相流入动态,即地层产水量的大小,若地面水气质量在逐渐的增大,那说明地层产水量也将逐渐增大,此时应采取合理的控水措施,延缓气藏大面积水侵的时间。

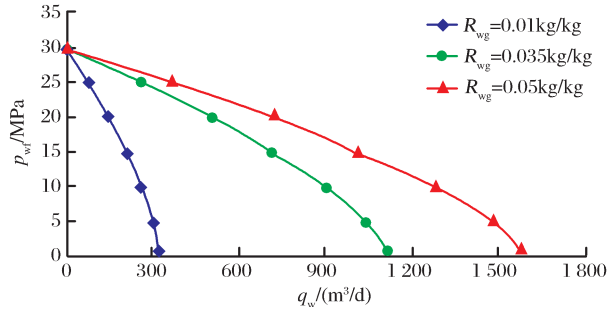


图 10 水气质量比产水量的影响

Fig. 10 Effect of water-gas mass ratio on water-output

3 结论

(1)通过对含水气藏的研究,利用保角变换方法,推导了同时考虑紊流效应、启动压力梯度、滑脱效应、渗透率应力敏感和表皮效应的低渗含水气藏气水两相流的水平井产能公式。

(2)通过实例计算,利用新公式计算无阻流量结果与实际产能测试结果相对误差较小,说明新公式准确性较高,且通过敏感性分析表明,水平气井产水量随着滑脱因子以及水气质量比的增大而增大,而随着启动压力梯度以及应力敏感指数的增大而减小,但启动压力梯度对产水量影响较小,若生产压差较大,启动压力梯度可以忽略不计。

参考文献 (References):

[1] Chen Wenlong, Wu Di, Yin Xianlin, *et al.* The application and effectiveness evaluation of the horizontal wells in the development of gas condensate reservoir[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2004, 15(3): 290-293. [陈文龙, 吴迪, 尹显林, 等. 水平井在凝析气田开发中的应用及效果评价[J]. *天然气地球科学*, 2004, 15(3): 290-293.]

[2] Zhang Ji, Chen Fengxi, Lu Tao, *et al.* Horizontal well geosteering technology and its application in development of Jingbian Gasfield[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2008, 19(1): 137-140. [张吉, 陈凤喜, 卢涛, 等. 靖边气田水平井地质导向方法与应用[J]. *天然气地球科学*, 2008, 19(1): 137-140.]

[3] Li Xiaoping, Hu Yong. A discussion on the transient inflow performance relationship curve of gas-water well[J]. *Natural Gas Industry*, 2001, 21(3): 65-67. [李晓平, 胡勇. 气水同产井瞬态流入

动态关系曲线探讨[J]. *天然气工业*, 2001, 21(3): 65-67.]

[4] Li Xiaoping, Zhao Birong. Analysis method for gas-water well [J]. *Well Test*, 2001, 10(4): 8-10. [李晓平, 赵必荣. 气水两相流井产能分析方法研究[J]. *油气井测试*, 2001, 10(4): 8-10.]

[5] Zhang Hewen, Feng Qihong, Yan Xuemei. Binomial deliverability equation of gas-water two-phase flow[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2008, 15(6): 62-64. [张合文, 冯其红, 鄧雪梅. 气水两相流二项式产能方程研究[J]. *断块油气田*, 2008, 15(6): 62-64.]

[6] Zhu Guangya, Liu Xiangui, Gao Shusheng, *et al.* A gas-water two-phase flow model for low permeability gas reservoirs and deliverability analysis[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(9): 67-70. [朱光亚, 刘先贵, 高树生, 等. 低渗透气藏气水两相渗流模型及其产能分析[J]. *天然气工业*, 2009, 29(9): 67-70.]

[7] Wen Hua, Liu Yikun, Sun Na. The productivity equation for water-producing gas well in deep volcanic gas reservoir based on generalized pseudo-pressure[J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2010, 34(1): 43-46. [文华, 刘义坤, 孙娜. 基于广义拟压力法的深层火山岩产水气井产能方程[J]. *大庆石油学院学报*, 2010, 34(1): 43-46.]

[8] Huang Quanhua, Wang Fuping, Chen Yan. Productivity evaluation of water-producing gas-wells in low-permeability gas reservoirs[J]. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 2010, 29(5): 73-76. [黄全华, 王富平, 谌燕. 低渗气藏产水气井产能评价[J]. *大庆石油地质与开发*, 2010, 29(5): 73-76.]

[9] Sun Enhui, Li Xiaoping, Wang Weidong. Productivity analysis method of water and gas two-phase flow well in low permeability gas reservoirs[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2010, 24(6): 121-124. [孙恩慧, 李晓平, 王伟东. 低渗透气藏气水两相流井产能分析方法研究[J]. *岩性油气藏*, 2010, 24(6): 121-124.]

[10] Feng Qing, Liu Qiguo, Li Haixu, *et al.* Effect of permeability stress sensitivity on gas-water well productivity[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2013, 20(1): 89-91. [冯青, 刘启国, 李海旭, 等. 渗透率应力敏感效应对气水井产能的影响[J]. *断块油气田*, 2013, 20(1): 89-91.]

[11] Tan Xiaohua, Li Xiaoping. New method for ascertaining water-bearing gas well inflow performance[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2013, 34(1): 66-70. [谭晓华, 李晓平. 确定含水气井流入动态关系的新方法[J]. *新疆石油地质*, 2013, 34(1): 66-70.]

[12] Luo Qiyuan, Li Xiaoping, Ao Yaoting, *et al.* Method for productivity analysis of horizontal gas well while producing water [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2010, 31(6): 632-633. [罗启源, 李晓平, 敖耀庭, 等. 气水同产水平井产能分析方法[J]. *新疆石油地质*, 2010, 31(6): 632-633.]

[13] Joshi S D. Augmentation of well production with slant and horizontal wells[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1988, 40(6): 729-739.

[14] Klinkenberg L J. The permeability of porous media to liquid and gases[M]//*Drilling and Production Practice*. Washington D C; American Petroleum Institute, 1941.

[15] Farquhar R A, Smart B G D, Todd A C. Stress Sensitivity of Low-permeability Sandstones From the Rotliegendes Sand-

stone[R]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 3-6 October, Houston, Texas, SPE 26501, 1993.

The Productivity Study of Gas-Water Two Phase Horizontal Well in Low-permeability Gas Reservoir

YUAN Lin, LI Xiao-ping

(State Key Laboratory of Oil-Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: During the development of low-permeability water-cut gas reservoirs with horizontal well, water breakthrough not only adds the complexity of fluid percolation, but also decreases the production. Based on the seepage theory of gas-water two phase, this paper established a motion equation of gas-water two phase, defined the start-up pressure gradient and generalized pseudopressure of gas-water two phase, considered the effect of stress sensitivity, slippage effect, inertia turbulent effect and skin effect on the productivity of gas-water horizontal well, used the conformal mapping method to deduce a new trinomial productivity formula of horizontal well with gas-water two phase in low permeability gas reservoir. Case study shows the relative error between results calculated by new formula and actual test is very small, only 5.13%, which indicates the new formula is accurate and reliable. More ever, sensitivity analysis shows the water-output will become bigger as the increase of slippage and water-gas mass ratio, while it will become smaller as the increase of start-up pressure gradient and stress sensitivity index. However, the effect of start-up pressure gradient on water-output is very small, especially the bottom hole flowing pressure is very low, so its effect can be ignored.

Key words: Low-permeability; Horizontal well; Gas-water two phase; Water-output; Start-up pressure gradient; Stress sensitivity; Slippage; Water-gas mass ratio

简讯

WRI 研究指出全球页岩油气开发面临巨大水资源压力

2014年9月2日,世界资源研究所(WRI)发布题为《全球页岩气开发:水的可用性和商业风险》(Global Shale Gas Development: Water Availability & Business Risks)的报告。研究报告指出:全球页岩油气分布不均匀,而且在大多数情况下,并不位于淡水资源丰富地区;全球38%的页岩油气区都处于干旱或高一极高水资源压力下,19%的地区处于高或极高的水资源季节变化区,15%的人生活在高或极高水资源压力下的干旱严重地区;在拥有最大页岩气资源的前20个国家中,有8个国家的页岩气区面临干旱或高一极高水压力基线,包括中国、阿尔及利亚、墨西哥、南非、利比亚、巴基斯坦、埃及和印度;在拥有最大致密油资源的前20个国家中,页岩气区面临干旱或高一极高水压力基线的8个国家分别为中国、利比亚、墨西哥、巴基斯坦、阿尔及利亚、埃及、印度和蒙古;页岩油气的开发还受到水文条件的空间和季节变化的影响,这种变化使得企业不能准确预测新的页岩地层水力压裂和钻井深度,且影响其评估淡水需求的能力。(王立伟 摘译)