

考虑应力敏感影响的气井产能分析新方法

陈建华¹, 骆逸婷¹, 刘凯¹, 殷修杏¹, 童传新²

1. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司南海西部石油研究院 广东湛江 524057

2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司科技与信息化部 广东湛江 524057

通讯作者: Email: chenjh20@cnoc.com.cn

引用: 陈建华, 骆逸婷, 刘凯, 等. 考虑应力敏感影响的气井产能分析新方法[J]. 油气井测试, 2020, 29(2): 1-6.

Cite: CHEN Jianhua, LUO Yiting, LIU Kai, et al. A new method for gas well productivity analysis considering stress sensitivity [J]. Well Testing, 2020, 29(2): 1-6.

摘要 低渗气井回压试井测试时, 地层未达到稳定流动而录取井底流压资料, 会导致采用常规二项式产能方程求取产能误差较大, 甚至无法求取。从渗流理论出发, 通过引入渗透率应力敏感表达式, 建立了适用于异常高压低渗气藏的气井不稳定产能方程; 针对回压试井测试, 提出了考虑应力敏感影响的气井产能分析方法。在莺歌海盆地 M7 井, 应用该方法能够较好地回归出产能分析曲线, 求得该井无阻流量 $84.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 与“一点法”计算结果基本一致。经过对比分析, 考虑应力敏感后计算的产能减少 19%。可见, 应力敏感对异常高压低渗气井产能的影响不容忽视。该方法为异常高压低渗气藏不稳定产能测试资料的处理提供了有益的借鉴。

关键词 回压试井; 产能方程; 不稳定流动; 低渗气藏; 应力敏感分析; 数学模型; 异常高压

中图分类号: TE353 **文献标识码**: A **DOI**: 10.19680/j.cnki.1004-4388.2020.02.001

A new method for gas well productivity analysis considering stress sensitivity

CHEN Jianhua¹, LUO Yiting¹, LIU Kai¹, YIN Xiuxing¹, TONG Chuanxin²

1. Western South China Sea Petroleum Research Institute, Zhanjiang Branch of CNOOC (China) Co. Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524057, China

2. Ministry of Science and Informatization, Zhangjiang Branch of CNOOC (China) Co. Ltd., Zhangjiang Guangdong 524057, China

Abstract: During back pressure test in low permeability gas wells, the productivity calculated by conventional binomial productivity equation will have a large error, or even cannot be obtained if the bottom-hole flow pressure data is collected under an unstable flow,. Based on the flow theory in porous media, an unsteady productivity equation of gas well is established, which is applicable to abnormal high pressure and low permeability gas reservoir, by introducing the permeability stress sensitivity expression. For back pressure well testing, a method of gas well productivity analysis considering stress sensitivity is presented in this paper. This method was applied to Well M7 in Yinggehai Basin and a better regression analysis curve was obtained. The absolute open flow potential obtained of this well is $84.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, which is basically consistent with the calculation result of "single-point method". After comparative analysis, the calculated productivity was reduced by 19% after considering the stress sensitivity. It can be seen that the influence of stress sensitivity on the productivity of abnormal high pressure and low permeability gas wells cannot be ignored. This method provides a useful reference for processing unstable productivity testing data in abnormal high pressure and low permeability gas reservoirs.

Keywords: back pressure well testing; productivity equation; unstable flow; low permeability gas reservoir; stress sensitivity analysis; mathematical model; abnormal high pressure

回压试井是现场目前常用的气井产能测试方法, 即连续以 3~5 个不同的工作制度生产, 每个工作制度均要求产量及井底流压稳定, 然后采用稳定试井解释方法回归求取二项式或指数式产能方程^[1-2]。然而, 对于低渗气藏, 由于达到压力稳定所需要的时间很长, 为了减少测试成本, 有时候并未

等待地层中的流动达到稳定状态就录取了井底流压资料。此时用常规二项式产能方程求取产能必然导致较大的误差, 甚至回归出的产能分析曲线斜率为负值, 导致无法求取产能。针对上述问题, 文献[3-4]将其考虑为变产量不稳定试井, 给出了常规气藏快速求取气井产能方程的新方法并应用于

实际产能测试资料。

开发实践以及实验结果表明,异常高压低渗气藏存在较强的应力敏感性^[5-7]。康莉霞等^[8]研究了应力敏感性对气藏产量的影响,建立的渗流模型和产量递减分析方法为分析碳酸盐岩气藏的产量规律提供了理论支持。而在进行产能分析时,更需要考虑应力敏感的影响。人们对稳态或拟稳态流动时应力敏感对产能的影响进行了大量的研究^[9-11],但是针对上述不稳定流动时产能方程的研究相对较少。在前人研究的基础上,从渗流理论出发,推导建立了考虑应力敏感影响的气井不稳定产能方程,并针对回压试井测试提出了一种产能分析新方法。

新方法在南海西部莺歌海盆地 M 气田 M7 井获得了较好的应用,解决了常规稳态产能方程无法回归计算的问题,得到了考虑应力敏感影响新的二项式产能方程,为异常高压低渗气藏未达到稳定测试工艺条件的产能测试资料的处理提供了一种新的途径。

1 考虑应力敏感的不稳定产能方程

从渗流理论出发,推导建立气井定产量生产时考虑应力敏感影响的不稳定渗流数学模型,通过引入 Pedrosa 变换式消除方程的非线性,最终求解得到考虑零阶摄动解的不稳定产能方程。

1.1 渗流数学模型

在建立考虑应力敏感不稳定渗流数学模型时,作如下假设:①地层均质各向同性,地层孔隙度为常数不随压力变化,地层渗透率随压力变化;②储层中流体为单相气体,且作平面径向等温渗流;③忽略重力、毛管力和井筒储集效应的影响。

结合气体运动方程、状态方程、连续性方程,可以得到渗流基本微分方程,即

$$\phi C_g \frac{p}{Z} \frac{\partial p}{\partial t} = 3.6 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rK \frac{p}{\mu Z} \frac{\partial p}{\partial r} \right) \quad (1)$$

式中: K 为储层渗透率, μm^2 ; ϕ 为储层孔隙度; μ 为气体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; p 为储层压力, MPa ; r 为渗流半径, m ; Z 为气体偏差系数; C_g 为气体等温压缩系数, MPa^{-1} ; t 为渗流时间, h 。

引入气体的拟压力来推导气体的渗流方程,拟压力表示为

$$\varphi = \int_{p_0}^p \frac{2p}{\mu Z} dp \quad (2)$$

引入拟压力后,微分方程(1)变为

$$\mu\phi C_g \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 3.6 \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rK \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) \quad (3)$$

有学者提出,渗透率随有效应力变化可以用下式来表达^[12-13],即

$$\gamma = \frac{1}{K} \frac{dK}{d\varphi} \quad (4)$$

对(4)式积分,得

$$K = K_i \exp[-\gamma(\varphi_i - \varphi)] \quad (5)$$

式中: γ 为视渗透率模量, $\text{mPa}\cdot\text{s}/\text{MPa}^2$; K_i 为原始地层压力下储层渗透率, μm^2 ; φ_i 为原始地层压力下气体拟压力, $\text{MPa}^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ 。

将(4)式、(5)式代入(3)式,得到考虑渗透率应力敏感影响的渗流微分方程^[14],即

$$\frac{\bar{\mu}\phi C_g}{3.6K_i} e^{\gamma(\varphi_i - \varphi)} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \gamma \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \quad (6)$$

式中: $\bar{\mu}$ 为气体平均黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。

假设在一水平均质等厚无穷大地层中存在一口井,以恒定产量投产,投产前地层中压力处处相等,且等于原始地层压力 p_i ;在离井无穷远处,压力恒等于 p_i 。则气体不稳定渗流数学模型为

$$\begin{cases} \frac{\bar{\mu}\phi C_g}{3.6K_i} e^{\gamma(\varphi_i - \varphi)} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \gamma \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \\ \varphi(r, 0) = \varphi_i \\ \lim_{r \rightarrow \infty} \varphi(r, t) = \varphi_i \\ r \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)_{r=r_w} = \frac{36.86q_{sc}p_{sc}T}{KhT_{sc}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: q_{sc} 为气井产量, $10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

引入无因次量,即

$$\begin{aligned} \varphi_D &= \frac{K_i h T_{sc} (\varphi_i - \varphi)}{36.86q_{sc} p_{sc} T}, r_D = \frac{r}{r_w} \\ t_D &= \frac{3.6K_i t}{\phi \bar{\mu} C_g r_w^2}, \gamma_D = \frac{36.86q_{sc} p_{sc} T}{K_i h T_{sc}} \gamma \end{aligned}$$

对渗流数学模型进行化简,即

$$\begin{cases} e^{\gamma_D \varphi_D} \frac{\partial \varphi_D}{\partial t_D} = \frac{\partial^2 \varphi_D}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \varphi_D}{\partial r_D} - \gamma_D \left(\frac{\partial \varphi_D}{\partial r_D} \right)^2 \\ \varphi_D(r_D, 0) = 0 \\ \lim_{r_D \rightarrow \infty} \varphi_D(r_D, t_D) = 0 \\ \left(r_D e^{-\gamma_D \varphi_D} \frac{\partial \varphi_D}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} = -1 \end{cases} \quad (8)$$

1.2 不稳定产能方程

(8)式是一个非线性很强的偏微分方程,无法直接求解。通过引入 Pedrosa 变换式,消除方程的

非线性^[15-17],即

$$\varphi_D(r_D, t_D) = -\frac{1}{\gamma_D} \ln[1 - \gamma_D \eta_D(r_D, t_D)] \quad (9)$$

并且引入如下的摄动变换关系式:

$$\eta_D = \eta_{0D} + \gamma_D \eta_{1D} + \gamma_D^2 \eta_{2D} + \dots$$

$$\frac{1}{1 - \gamma_D \eta_D} = 1 + \gamma_D \eta_D + \gamma_D^2 \eta_D^2 + \dots$$

考虑到实际的无因次渗透率模量是一个较小的量,零阶摄动解即可满足精度要求^[18],于是渗流数学模型(8)式转化为

$$\begin{cases} \frac{\partial \eta_{0D}}{\partial t_D} = \frac{\partial^2 \eta_{0D}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial \eta_{0D}}{\partial r_D} \\ \eta_{0D}(r_D, 0) = 0 \\ \lim_{r_D \rightarrow \infty} \eta_{0D}(r_D, t_D) = 0 \\ \left(r_D \frac{\partial \eta_{0D}}{\partial r_D} \right)_{r_D=1} = -1 \end{cases} \quad (10)$$

采用分离变量法求解得到:

$$\eta_{0D} = -\frac{1}{2} e^{\frac{1}{4t_D}} E_i \left(-\frac{r_D^2}{4t_D} \right) \quad (11)$$

于是

$$\varphi_D(r_D, t_D) = -\frac{1}{\gamma_D} \ln \left[1 + \frac{1}{2} \gamma_D e^{\frac{1}{4t_D}} E_i \left(-\frac{r_D^2}{4t_D} \right) \right] \quad (12)$$

其中

$$-E_i \left(-\frac{r_D^2}{4t_D} \right) = \int_{\frac{r_D^2}{4t_D}}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (13)$$

当 $r_D^2/(4t_D) \leq 0.01$ 时,可以近似表示为

$$-E_i \left(-\frac{r_D^2}{4t_D} \right) \approx \ln \left(\frac{4t_D}{r_D^2} \right) - 0.5722 = \ln \frac{2.25t_D}{r_D^2} \quad (14)$$

在井底处:

$$\frac{r_D^2}{4t_D} = \frac{1}{4t_D} = \frac{\phi \bar{\mu} C_g r_w^2}{14.4 K_i t}$$

在几秒钟之后就可以满足 $r_D^2/(4t_D) \leq 0.01$,同时

$$e^{\frac{1}{4t_D}} \approx 1 + 1/(4t_D) \approx 1$$

故在井底处可表示为

$$\varphi_{wD} = -\frac{1}{\gamma_D} \ln \left[1 - \frac{1}{2} \gamma_D \ln(2.25t_D) \right] \quad (15)$$

将无因次的定义式以及标况下压力温度数值代入后,可以得到:

$$\varphi_i - \varphi_w = -\frac{1}{\gamma} \ln \left[1 - \frac{6.637 \times 10^{-3} q_{sc} T \gamma}{K_i h} \times \right.$$

$$\left. \ln \left(\frac{8.1 K_i t}{\phi \bar{\mu} C_g r_w^2} \right) \right] \quad (16)$$

式中: T 为储层温度, K_i 。

考虑污染和湍流引起的附加压力降后,拟压力形式的压降方程可以写为^[19]

$$\varphi_i - \varphi_w = -\frac{1}{\gamma} \ln \left[1 - \frac{13.274 \times 10^{-3} q_{sc} T \gamma}{K_i h} \times \left(\frac{1}{2} \ln \left(\frac{8.1 K_i t}{\phi \bar{\mu} C_g r_w^2} \right) + S + D q_{sc} \right) \right] \quad (17)$$

式中: S 为拟表皮系数; D 为非达西流系数(可采用 Jones 公式计算), $(10^4 \text{ m}^3/\text{d})^{-1}$ 。

将(17)式化简后得到:

$$1 - e^{-\gamma(\varphi_i - \varphi_w)} = \lambda q_{sc} \left(M + \frac{1}{2} \ln t + D q_{sc} \right) \quad (18)$$

其中

$$\lambda = \frac{13.274 \times 10^{-3} T \gamma}{K_i h}, M = \frac{1}{2} \ln \frac{8.1 K_i}{\phi \bar{\mu} C_g r_w^2} + S$$

$$\Psi_w = e^{-\gamma(\varphi_i - \varphi_w)}, \Psi_i = e^{-\gamma(\varphi_i - \varphi_i)} = 1$$

于是有

$$\Psi_i - \Psi_w = \lambda q_{sc} \left(M + \frac{1}{2} \ln t + D q_{sc} \right) \quad (19)$$

(19)式即为考虑应力敏感影响的不稳定产能方程。

2 产能分析新方法的建立

假设回压试井过程中,在 $t_0 \sim t_1$ 时刻气井以产量 q_{sc1} 进行测试(令 $t_0=0$);在 $t_1 \sim t_2$ 时刻以产量 q_{sc2} 进行测试, ..., 在 $t_{n-1} \sim t_n$ 时刻以产量 q_{scn} 进行测试,而每一阶段压力均没有达到稳定。

在第一时间段($t_0 < t < t_1$)内,以产量 q_{sc1} 进行测试。根据前面推导的不稳定渗流压降公式,在该时间段内任意时刻 t 井底压降为

$$\Psi_i - \Psi_w = \lambda q_{sc1} \left(\frac{1}{2} \ln t + M + D q_{sc1} \right)$$

$$\text{即 } \Psi_i - (\Psi_w + \frac{\lambda}{2} q_{sc1} \ln t) = \lambda M q_{sc1} + \lambda D q_{sc1}^2$$

在第二时间段($t_1 < t < t_2$)内,以产量 q_{sc2} 进行测试。根据压降叠加原理,在该时间段内 t 时刻的压降等于第一个产量 q_{sc1} 在 t 时刻产生的压降与以产量变化($q_{sc2} - q_{sc1}$)从 t_1 时刻生产至 t 时刻产生的压降的代数和。因此,该时间内压降表达式为

$$\Psi_i - \Psi_w = \lambda q_{sc1} \left(\frac{1}{2} \ln t + M + D q_{sc1} \right) +$$

$$\lambda (q_{sc2} - q_{sc1}) \left[\frac{1}{2} \ln(t - t_1) + M + D (q_{sc2} - q_{sc1}) \right]$$

即

$$\Psi_i - \left\{ \Psi_w + \frac{\lambda}{2} [q_{sc1} \ln t + (q_{sc2} - q_{sc1}) \ln(t - t_1) - 4D(q_{sc2} - q_{sc1})q_{sc1}] \right\} = \lambda M q_{sc2} + \lambda D q_{sc2}^2$$

对于 n 级流量的产能测试,由压降叠加原理得到在 $t_{n-1} < t$ 时间段内的井底压降表达式为

$$\Psi_i - \left\{ \Psi_w + \frac{\lambda}{2} \left[\sum_{i=1}^n (q_{sci} - q_{sci-1}) \ln(t - t_{i-1}) - 4D \sum_{i=1}^n (q_{sci} - q_{sci-1}) q_{sci-1} \right] \right\} = \lambda M q_{scn} + \lambda D q_{scn}^2$$

令

$$\Psi'_w = \Psi_w + \frac{\lambda}{2} \left[\sum_{i=1}^n (q_{sci} - q_{sci-1}) \ln(t - t_{i-1}) - 4D \sum_{i=1}^n (q_{sci} - q_{sci-1}) q_{sci-1} \right]$$

$$A = \lambda M, B = \lambda D$$

$$\text{则有} \quad \Psi_i - \Psi'_w = A q_{scn} + B q_{scn}^2 \quad (20)$$

根据 A 、 B 表达式可以看出, A 、 B 是与时间无关的常数。上式即为考虑应力敏感时,以拟压力形式表示的变流量产能试井新的二项式产能方程。

作 $(\Psi_i - \Psi'_w)/q_{scn} \sim q_{scn}$ 关系曲线,直线回归后,直线的斜率为 B ,直线的截距为 A 。根据 A 、 B ,即可求出气井无阻流量,即

$$q_{AOF} = \frac{\sqrt{A^2 + 4B[\Psi_i - \Psi'_w(p_{wf} = 0.101 \text{ MPa})]} - A}{2B}$$

不考虑应力敏感时,以拟压力形式表示的压降方程为^[20]:

$$\varphi_i - \varphi_w = 14.667 \times 10^{-3} \frac{q_{sc} T}{Kh} \left[\lg \frac{Kt}{\phi \mu C_g r_w^2} + 0.9077 + 0.87(S + D q_{sc}) \right] \quad (21)$$

对于 n 级流量的产能测试,在 $t_{n-1} < t$ 时间段内的井底压降表达式为

$$\varphi_i - \left\{ \varphi_w + \lambda \sum_{i=1}^n (q_{sci} - q_{sci-1}) \lg(t - t_{i-1}) - 1.74D \sum_{i=1}^n (q_{sci} - q_{sci-1}) q_{sci-1} \right\} = \lambda \left(\lg \frac{K}{\phi \mu C_g r_w^2} + 0.9077 + 0.87S \right) q_{scn} + 0.87\lambda D q_{scn}^2$$

其中
若令

$$\varphi'_w = \varphi_w + \lambda \sum_{i=1}^n (q_{sci} - q_{sci-1}) \lg(t - t_{i-1}) -$$

$$1.74D \sum_{i=1}^n (q_{sci} - q_{sci-1}) q_{sci-1}$$

$$a = \lambda \left(\lg \frac{K}{\phi \mu C_g r_w^2} + 0.9077 + 0.87S \right)$$

$$b = 0.87\lambda D$$

$$\text{则有} \quad \varphi_i - \varphi'_w = a q_{scn} + b q_{scn}^2 \quad (22)$$

推导建立的考虑应力敏感影响新的二项式产能方程,同常规二项式产能方程一样,可利用回压试井测试资料回归出产能分析曲线,求解气井无阻流量。

3 现场应用

M 气田位于南海西部海域莺歌海盆地内,气田原始地层压力 53.5 ~ 54.1 MPa,压力系数 1.90 ~ 1.94,平均渗透率为 8.9 mD,属于异常高压低渗气田。该气田 M7 井在投产两年后进行了回压试井测试,测试过程中录取的资料如图 1 所示。

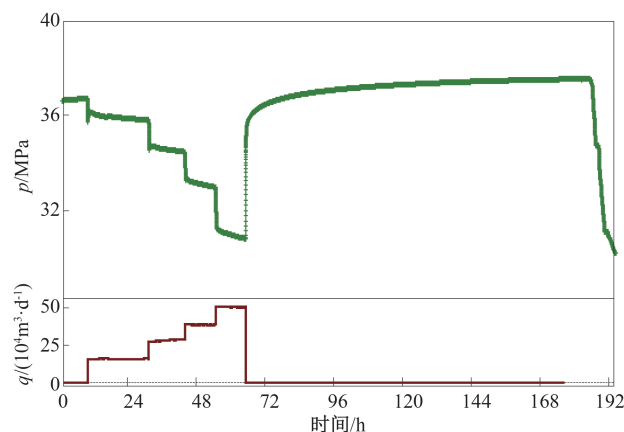


图 1 M7 井回压试井测试时压力与产量变化曲线
Fig.1 Production and pressure changes of Well M7 during back pressure well testing

由图 1 可以看出,除了“一开”和“二开”由于测试时间较长,井底流压基本达到稳定外,“三开”和“四开”井底流压未稳定。

气藏及气井的基本参数为:气层温度 140 ℃,气层厚度 13.5 m,原始渗透率 $2.7 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度 16.7%,井半径 0.108 m,岩心实验渗透率模量 0.05 MPa^{-1} (根据压力和拟压力关系换算视渗透率模量为 $2 \times 10^{-5} \text{ mPa} \cdot \text{s}/\text{MPa}^2$),气体组分 CH_4 含量 65.3%, CO_2 含量 27.5%, N_2 含量 7.2%,气体相对密度 0.86,平均黏度 $0.029 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,根据试井解释物性利用 Jones 公式计算非达西系数 $0.0445 \times 10^{-4} (\text{m}^3/\text{d})^{-1}$ 。

根据产能测试数据(表 1),采用常规拟压力二项式产能方程做出了产能分析曲线(图 2),由于第

一个点偏离较大,导致回归的曲线斜率为负值,无法计算产能。

表 1 M7 井回压试井测试成果数据
Table 1 Result data of backpressure well testing for Well M7

油嘴/ mm	测试 时间/ h	井底 压力/ MPa	产气量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	外推 压力/ MPa	计算无阻流量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)			
					陈-1	陈-2	不考虑 应力 敏感	考虑 应力 敏感
2	17	35.82	14.9	37.94	60	62		
9	13	34.46	28.6	37.94	83	87		
12	11	33.01	38.7	37.94	91	94	104	84.1
16	11	30.86	50.7	37.94	96	99		

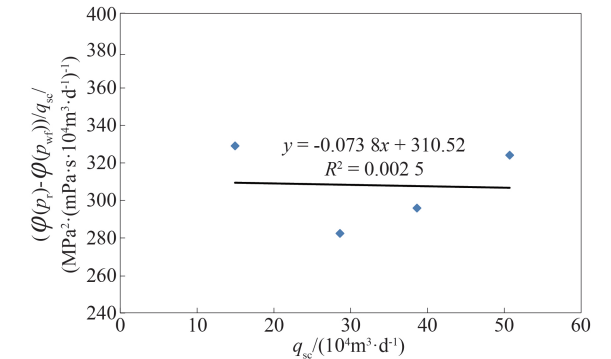


图 2 常规拟压力二项式产能分析曲线
Fig.2 Binomial productivity analyses under conventional pseudo pressure

利用推导建立的产能分析新方法,对测试资料处理后可以较好的回归出二项式产能分析曲线(图 3、图 4),解决了常规稳定产能方程无法回归计算的问题。

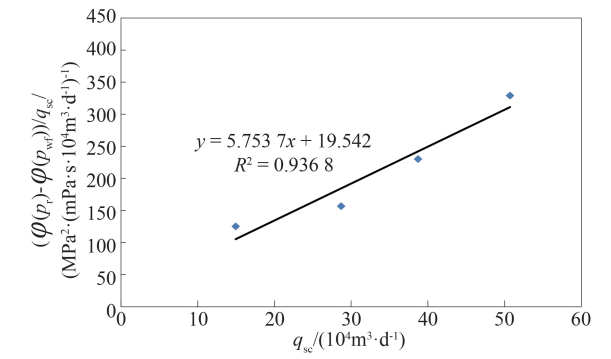


图 3 不考虑应力敏感新的二项式产能分析曲线
Fig.3 New binomial productivity analyses without consideration of stress sensitivity

由岩心实验结果可知,莺歌海盆地异常高压气藏具有弱~中等应力敏感性,进行产能分析时需要考虑应力敏感的影响,最终根据建立的考虑应力敏感影响的不稳定产能分析方法获得 M7 井二项式产能方程为:

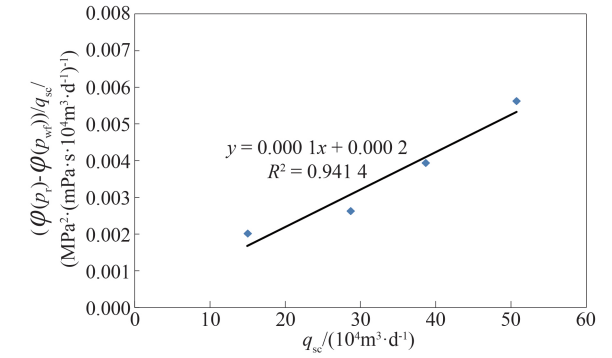


图 4 考虑应力敏感新的二项式产能分析曲线
Fig.4 New binomial productivity analyses with consideration of stress sensitivity

$$\Psi_i - \Psi_w = 0.0002q_{scn} + 0.0001q_{scn}^2$$

由上述二项式产能方程求得该井无阻流量为 84.1×10⁴ m³/d,与“一点法”计算结果基本一致(表 1)。

根据该井的 IPR 曲线可知,考虑应力敏感时计算的无阻流量减少 19%。因此,应力敏感对异常高压低渗气井产能的影响不容忽视。

4 结论

(1) 针对低渗气井回压试井测试时井底流压未达到稳定状态的情形,将其考虑为变产量不稳定试井,从理论上推导建立了考虑应力敏感影响的气井产能分析新方法,为异常高压低渗气藏未达到稳定测试工艺条件的产能测试资料的处理提供了一种新的途径。

(2) 提出的新方法在莺歌海盆地 M 气田 M7 井获得了较好的应用,解决了常规稳定产能方程无法回归计算的问题,求出了该井产能方程和无阻流量,并且分析了应力敏感对产能的影响。

(3) 新方法是在考虑无因次渗透率模量较小时建立的,对于应力敏感性较强的气藏,新方法应用时可能存在一定误差。

致谢:感谢中海油湛江分公司研究院气田项目组同事提供的 M 气田基础数据和产能测试数据;感谢中海油湛江分公司科技部领导对论文的审核以及保密审查。

参考文献

[1] 庄惠农. 气藏动态描述和试井[M]. 北京:石油工业出版社,2009:30-78.
[2] 曾凡华. 气井产能分析方法研究[D]. 成都:西南石油学院,2002.
ZENG Fanhua. Research of gas well capacity analysis method [D]. Chengdu: Southwest Petroleum Institute, 2002.

- [3] 韩易龙,李相方,李乐忠. 低渗气藏产能分析新方法[J]. 油气田地面工程,2009,28(10):42-44.
HAN Yilong, LI Xiangfang, LI Lezhong. New method for the productivity analysis with low-permeability gas reservoirs [J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2009, 28 (10):42-44.
- [4] 向祖平,谢峰,张箭,等. 异常高压低渗透气藏储层应力敏感对气井产能的影响[J]. 天然气工业,2009,29(6):83-85.
XIANG Zhuping, XIE Feng, ZHANG Jian, et al. The influence of stress sensitivity of abnormal high pressure and low permeability gas reservoir on the deliverability of a gas well [J]. Natural Gas Industry, 2009,29(6):83-85.
- [5] 李明军,马勇新,李红东,等. 海上异常高压低渗透气藏应力敏感实验研究[J]. 钻采工艺,2014,37(1):88-90.
LI Mingjun, MA Yongxin, LI Hongdong, et al. Stress sensitivity experiment of offshore abnormal high pressure low permeability gas reservoir [J]. Drilling & Production Technology, 2014,37(1):88-90.
- [6] 郭晶晶,张烈辉,涂中. 异常高压气藏应力敏感性及其对产能的影响[J]. 特种油气藏,2010,17(2):79-81.
GUO Jingjing, ZHANG Liehui, TU Zhong. Stress sensitivity and its influence on productivity in gas reservoirs with abnormally high pressure [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2010,17(2):79-81.
- [7] 杨敏,李明,陈宝新,等. 异常高压水驱气藏产能评价及预测方法[J]. 油气井测试,2019,28(5):62-66.
YANG Min, LI Ming, CHEN Baoxin, et al. Productivity evaluation and forecast method for waterflooding gas reservoir with abnormal high pressure [J]. Well Testing, 2019,28 (5):62-66.
- [8] 康莉霞,叶礼友,刘华勋,等. 碳酸盐岩气藏的渗流模型和产量递减分析方法[J]. 油气井测试,2019,28(5):8-15.
KANG Lixia, YE Liyou, LIU Huaxun, et al. Percolation model and production decline analysis method for carbonate gas reservoirs [J]. Well Testing, 2019,28(5):8-15.
- [9] 杨滨,姜汉桥,陈民锋,等. 应力敏感气藏产能方程研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版),2008,30(5):158-160.
YANG Bin, JIANG Hanqiao, CHEN Minfeng, et al. Deliverability equation for stress-sensitive gas reservoir [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008,30(5):158-160.
- [10] 罗瑞兰,朱华银,万玉金,等. 岩石应力敏感对苏里格气井产能的影响[J]. 天然气技术,2008,2(6):19-22.
LUO Ruilan, ZHU Huayin, WAN Yujin, et al. The effect of rock stress sensitivity on well deliverability in Sulige gasfield [J]. Natural Gas Technology, 2008, 2 (6):19-22.
- [11] 雷刚,董平川,杨书,等. 致密砂岩气藏拟稳态流动阶段气井产能分析[J]. 油气地质与采收率,2014,21(5):94-97.
LEI Gang, DONG Pingchuan, YANG Shu, et al. Productivity analysis of tight sandstone gas reservoir in pseudo-steady state [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014,21(5):94-97.
- [12] 王建光,廖新维,杨永智. 超高压应力敏感性气藏产能评价方法[J]. 新疆石油地质,2007,28(2):216-218.
WANG Jianguang, LIAO Xinwei, YANG Yongzhi. A method for productivity appraisal of super-high pressure and rock stress-sensitive gas reservoirs [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28 (2):216-218.
- [13] KIKANI J, PEDROSA O A. Perturbation analysis of stress-sensitive reservoirs [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1991,29(3):379-386.
- [14] 刘启国,唐伏平,冯国庆,等. 开关井不同程度应力敏感效应对井底压力动态的影响[J]. 石油与天然气地质,2007,28(4):523-527.
LIU Qiguo, TANG Fuping, FENG Guoqing, et al. Influence of different stress sensitivities on bottom hole pressure behaviors during well opening and shut-in [J]. Oil & Gas Geology, 2007,28(4):523-527.
- [15] 张小龙,杨志兴,时琼,等. 应力敏感低渗透气藏不稳定渗流特征研究[J]. 天然气与石油,2016,34(1):79-83.
ZHANG Xiaolong, YANG Zhixing, SHI Qiong, et al. Study on unstable seepage flow characterization in stress sensitivity low permeability gas reservoir [J]. Natural Gas and Oil, 2016,34(1):79-83.
- [16] 梁景伟,金裘明. 压敏油藏的压力动态扰动分析[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(S2):2422-2428.
LIANG Jingwei, JIN Qiuming. Perturbation analysis of pressure transient response in stress-sensitive reservoirs [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002,21(S2):2422-2428.
- [17] 戴强,焦成,段永刚,等. 应力敏感性对低渗透气藏渗流的影响[J]. 特种油气藏,2008,15(3):65-68.
DAI Qiang, JIAO Cheng, DUAN Yonggang, et al. Effect of stress sensitivity on percolation in low permeability gas reservoir [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2008,15 (3):65-68.
- [18] 田冷,何顺利,李秀生. 低渗透气田砂岩储层应力敏感试井模型研究[J]. 石油钻探技术,2007,35(6):89-92.
TIAN Leng, HE Shunli, LI Xiusheng. Study of well test of stress-sensitive sandstone in low permeability gas reservoir [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(6):89-92.
- [19] 汪洋. 低渗气藏渗流机理及产能分析[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2015.
WANG Yang. The seepage mechanism and productivity analysis in low-permeability gas reservoir [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2015.
- [20] 张皓,陆家亮,曹雯,等. 不同计量单位下的气井产能试井常用公式[J]. 油气井测试,2017,26(6):1-7.
ZHANG Hao, LU Jialiang, CAO Wen, et al. Usual productivity equation of gas well on various units of measurement [J]. Well Testing, 2017,26(6):1-7.

编辑 穆立婷

第一作者简介:陈建华,男,1986年9月出生,硕士,工程师,2012年毕业于中国石油大学(北京)油气田开发工程专业,主要从事油气田开发与油藏工程研究工作。电话:0759-3912263,13536390860;Email:chenjh20@cnoc.com.cn。通信地址:广东省湛江市坡头区南油二区南海西部石油研究院,邮政编码:524057。