

酸性气藏深井产能试井方法

庞 伟

中国石化石油工程技术研究院 北京 100101

通讯作者:Email:pangwei.sripe@sinopec.com

项目支持:国家科技重大专项子课题“高压低渗油气藏固井完井技术”(2016ZX05021-005)、中国石化重大科技攻关项目“特深层完井测试与改造技术”(P17049-5)

引用:庞伟.酸性气藏深井产能试井方法[J].油气井测试,2018,27(2):67-72.

Cite: PANG Wei. Deliverability test method for deep sour gas wells [J]. Well Testing, 2018,27(2):67-72.

摘要 针对酸性气藏深井产能试井测试风险大、测试时间短难以达到稳定流动影响测试结果准确性的难题,考虑关井后续流造成的压降,建立了耦合井筒流动与地层渗流的酸性气藏深井产能试井模型,通过 Laplace 变换和数值反演进行求解,根据压力恢复试井解释结果设计4个生产制度,模拟压力变化直到达到稳定流动,利用稳定流动对应的产量和压力点回归产能方程,形成产能试井新方法。结果表明,渗透率为 $0.21 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层,气井达到稳定流动需要近1000 h,而采用该方法仅依靠1次压力恢复测试数据,通过模拟4个生产制度下的流动即可求取具有较高精度的气井产能方程和无阻流量。该方法对缩短酸性气藏深井产能试井测试周期,降低复杂事故,提高产能试井的准确性具有重要作用。

关键词 酸性气藏;深井;产能试井;压力恢复;产能方程;无阻流量;稳定流动;测试时间

中图分类号:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2018.02.011

Deliverability test method for deep sour gas wells

PANG Wei

Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing 100101, China

Abstract: Deliverability test for deep wells in sour gas reservoir involves high risks and short duration, making it impossible to realize steady flow, which finally impedes the accuracy of test result. With consideration to pressure drops induced by continuous flows after shut-in, a deliverability test model coupled with wellbore flow and formation seepage was built for deep wells in sour gas reservoirs. This model was solved using the Laplace transform and numerical inversion. According to the interpretation results for build-up well test, four production systems were developed to simulate pressure changes till reaching the steady flow. Then, production and pressure points corresponding with the steady flow were used for regression of deliverability equation to generate a new deliverability test method. A gas well in reservoir with permeability of $0.21 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ may take almost 1000 h to reach steady flow; however, by using the new method, high-accuracy deliverability equation and open-flow capacity of the gas well can be obtained by using only the data of one build-up test and through simulating the flows in four production systems. The new method is of great importance to minimize the time required for deliverability test for deep wells in sour gas reservoirs, reduce the complexities and enhance the accuracy of deliverability test.

Keywords: sour gas reservoir; deep well; deliverability test; build-up; deliverability equation; open-flow capacity; steady flow; test time

含硫化氢(H_2S)、二氧化碳(CO_2)的酸性气藏在全球广泛分布,如法国拉克气田、加拿大卡布南气田等,中国的普光、元坝、罗家寨、赵兰庄等气田^[1-2]。大部分酸性气井深度超过4500 m或6000 m,属于深井或超深井。产能试井对了解气井产气能力(如无阻流量)从而进行合理配产具有重要作用。常用的产能试井有“一点法”、系统试井、等时试井、修正等时试井等四种方法。在国外,为了获

取储层的准确产能,酸性气藏深井和超深井产能试井一般采用修正等时试井,如巴西桑塔斯盆地某气田(H_2S 含量大于10000 ppm)^[3],科威特的 Najmah 和 Sargelu 储层(H_2S 含量20%~35%)^[4],印度尼西亚苏门答腊岛S气田(H_2S 含量100~250 ppm, CO_2 含量30%)^[5],沙特阿拉伯某气田(H_2S 含量25%, CO_2 含量10%)^[6]。在国内,针对普光气田,彭鑫岭等^[7]介绍了在普光气田通过生产测井和系统试井

联合确定多个层位无阻流量的工艺;王军民等^[8]研究了应用三项式产能方程确定气井无阻流量的方法,并以普光气田系统试井的数据进行了验证;针对普光气田产能试井过程中酸性气体的产出危害环境的问题,李明志等^[9]、姜春河等^[10]分别介绍了利用天然气焚烧炉进行修正等时试井的工艺技术,缩短了测试周期,降低了酸性气体对环境的影响。鲁宜全^[11]、景艳等^[12]、黄德明等^[13]分别研究了用“一点法”和“改进一点法”进行普光气田产能预测的方法。针对元坝气田,孙金朝^[14]、董海峰等^[15]分别介绍了应用系统试井测试气井无阻流量的方法。针对罗家寨气田,张烈辉等^[16]建立了考虑硫沉积的产能试井解释模型,并应用罗家寨气田修正等时试井数据进行了验证。针对建南气田,陈忠等^[17]介绍了“一点法”在建南气田的应用及改进方法。

目前的产能试井方法应用于酸性气藏深井时存在三个问题:(1)系统试井、等时试井、修正等时试井,都需要开井生产4个生产制度,且至少有一个制度达到稳定流动,因此开井生产时间长,对测试工具耐温、耐压、耐腐蚀性能及环保要求高,测试风险大,导致经常出现故障^[18-19];(2)因为测试时酸性气体的产出对当地环境有影响,因此测试时间不能太长,导致在低渗储层流动很难达到稳定,从而影响产能试井的准确性;(3)与系统试井、等时试井、修正等时试井相比,“一点法”^[11-13,17]所需的开井生产时间明显缩短,但前提是对储层有较清楚的认识,而对储层认识不清的探井则不适用。针对上述难题,本文提出了利用压力恢复的瞬时压力资料进行产能试井的方法,即应用压力恢复资料解释地层参数,设计4个生产制度,模拟系统试井、等时试井、修正等时试井过程,模拟压力变化直到达到稳定,可以在保证产能试井准确性的前提下大幅度缩短测试时间。

1 产能试井物理模型描述

四川盆地元坝地区长兴组-飞仙关组、川西雷口坡组储层为典型的酸性气藏,埋藏深(超过6 000 m)、高温(储层温度大于150℃)、高压(储层压力大于65 MPa)、高含硫化氢和二氧化碳(如元坝地区长兴组平均H₂S含量5.77%、CO₂平均含量7.5%),因此产能试井时对测试工具耐温、耐压、耐腐蚀性能要求非常高,酸性气体的燃烧也容易造成环境污染。

该酸性气藏主要为滩相和礁相沉积。其中,滩相储层岩石类型以灰色溶孔白云岩、含生屑粉细晶白云岩、灰色灰质白云岩、灰色生屑、砂屑、砾屑灰岩为主。储层具有中-低孔隙度、中-低渗透率的特征,孔隙度平均4%左右,渗透率分布主峰值范围(0.01~0.10)×10⁻³ μm²,因此产能试井时需要很长的测试时间才能达到稳定流动。

储层发育有微裂缝或溶蚀孔洞,储集空间类型主要为孔隙、裂缝-孔隙、裂缝-溶蚀孔洞型,因此建立产能试井模型时地层渗流模型须考虑双孔模型。

测试时一般采用射孔-酸压-测试三联作、射孔-测试二联作或酸压-测试二联作工艺,以射孔-酸压-测试三联作为主,因此,关井测试时地层向井筒的续流往往是气液两相流,井底压力不仅与渗流有关而且与井筒流体分布也有关系,故建立产能试井模型时需要考虑井筒中气液两相续流的影响。

2 产能试井模型建立

考虑关井压力恢复时续流造成的压降,建立耦合井筒流动与地层渗流的酸性气藏深井产能试井模型,数值求解后根据压力恢复试井解释结果设计4个生产制度,模拟压力变化直到达到稳定流动,然后利用稳定流动对应的产量和压力点回归产能方程。

2.1 井筒续流方程

井筒流体能量守恒方程为

$$\frac{dp}{\rho_g g} + dH + \frac{u_g du_g}{g} + \frac{f_g u_g^2}{2gd} dH = 0 \quad (1)$$

式中: p 为压力,MPa; ρ_g 为井筒气液混合流体的密度,kg/m³; g 为重力加速度(值取9.8),m/s²; H 为井筒内流体高度,m; u_g 为井筒流体的体积流速,m/s; f_g 为井筒流体摩擦系数,无因次; d 为井筒直径,m。

井筒混合流体密度为

$$\rho_g = \frac{M_g}{R} \cdot \frac{p}{Z_g T} = \frac{M_{\text{air}}}{R} \cdot \frac{\gamma_g p}{Z_g T} \quad (2)$$

式中: M_g 为井筒气液混合流体分子量,kg/kmol; R 为通用气体常数(值取0.008 314),MPa·m³/(kmol·K); Z_g 为井筒流体偏差因子,无因次; γ_g 为井筒流体相对密度,无因次; T 为温度,K。

井筒混合流体的体积流速 u_g 为

$$u_G = \frac{4W_G}{86400\pi d^2} \cdot \frac{V_{\text{kmol}}}{M_G} \cdot \frac{p_{\text{sc}}}{T_{\text{sc}}} \cdot \frac{Z_G T}{p} \quad (3)$$

式中: W_G 为气液混合流体质量流量, kg/d ; V_{kmol} 为标准状况下每千摩尔气体的体积(值取 24.04), m^3/kmol ; p_{sc} 为标准状况下的压力(值取 0.101 325), MPa ; T_{sc} 为标准状况下温度(值取 293), K 。

由气体拟压力定义^[20]得

$$dp = \frac{\mu \cdot Z}{2p} d\psi \quad (4)$$

式中: μ 为气体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; Z 为气体偏差因子, 无因次; ψ 为拟压力, $(\text{MPa})^2/(\text{mPa}\cdot\text{s})$ 。

将式(2)、(3)、(4)带入式(1), 得

$$\begin{aligned} & \frac{1}{0.03418\gamma_G} \frac{d\psi}{dt} + \frac{dH}{dt} - 1.53 \times 10^{-15} \times \\ & \left(\frac{1}{d^4} \right) \left(\frac{W_G}{M_G} \right)^2 \left(\frac{Z_G T}{p} \right) \left(\frac{1}{p} \right) \frac{d\psi}{dt} + \\ & 7.65 \times 10^{-16} \left(\frac{f_G}{d^5} \right)^2 \left(\frac{W_G}{M_G} \right)^2 \left(\frac{Z_G T}{p} \right) \frac{dH}{dt} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

式中的 $\frac{dH}{dt}$ 表示液面上升的速度。当关井压力

恢复时, 可近似认为 $\pi r_w^2 \frac{dH}{dt}$ 就是地层提供给井筒的续流量, 式(5)可以表示为

$$\begin{aligned} & \left[1.53 \times 10^{-15} \left(\frac{1}{d^4} \right) \left(\frac{W_G}{M_G} \right)^2 \left(\frac{Z_G T}{p} \right) \left(\frac{1}{p} \right) - \frac{1}{0.03418\gamma_G} \right] \times \\ & \frac{d\psi}{dt} = \frac{q}{\pi r_w^2} \left[1 + 7.65 \times 10^{-16} \left(\frac{f_G}{d^5} \right)^2 \left(\frac{W_G}{M_G} \right)^2 \left(\frac{Z_G T}{p} \right) \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\bar{m}_{\text{WD}} = \left(\frac{1}{u} + \bar{m}_{\varphi\text{D}} \right) \frac{K_0(\sqrt{f(u)u}) + S\sqrt{f(u)u}K_1(\sqrt{f(u)u})}{\sqrt{f(u)u}K_1(\sqrt{f(u)u}) + C_{\text{D}u}[K_0(\sqrt{f(u)u}) + S\sqrt{f(u)u}K_1(\sqrt{f(u)u})]} \quad (14)$$

式中: $f(u)$ 为双孔模型对应的表达式。

得到式(14)后, 反演得到真实空间的解, 采用 1 次压力恢复测试的数据, 由试井解释得到地层参数; 再设计 4 个生产制度(4 个产量), 计算不同生产制度下的井底压力; 将每个生产制度下的最后一个流压作为稳定压力, 通过二项式或指数法即可得到产能方程^[21]。

3 实例分析

以某酸性气藏深井为例。该井为位于四川盆地川西坳陷的一口直井, 完钻井深 6 050 m, 原始地层压力 65 MPa, 地层温度 145 $^{\circ}\text{C}$, 储层有效厚度 65.7 m, 孔隙度 5.1%, 井径 0.165 m; 套管完井, 射孔井段为 5 814~5 866 m; 取芯发现主要岩性为灰色

式中: q 为地层向井筒的续流量, m^3/d 。

(6) 式表示了井底续流量与拟压力之间的关系, 将井筒流动与地层流动联系起来。

2.2 井筒流动与地层渗流耦合方程

对于无限大双孔介质地层, 考虑井筒流动(式(6))的无量纲后的地层流动方程为

$$\frac{\partial^2 m_{\text{D}}}{\partial r_{\text{D}}^2} + \frac{1}{r_{\text{D}}} \frac{\partial m_{\text{D}}}{\partial r_{\text{D}}} = \omega \frac{\partial m_{\text{D}}}{\partial t_{\text{D}}} + \lambda(m_{\text{D}} - m_{\text{mD}}) \quad (7)$$

$$\lambda(m_{\text{D}} - m_{\text{mD}}) = (1 - \omega) \frac{\partial m_{\text{mD}}}{\partial t_{\text{D}}} \quad (8)$$

$$m_{\text{D}}(r_{\text{D}}, t_{\text{D}} = 0) = 0 \quad (9)$$

$$\lim_{r_{\text{D}} \rightarrow \infty} m_{\text{D}}(r_{\text{D}}, t_{\text{D}}) = 0 \quad (10)$$

$$\left[C_{\text{D}} \left(\frac{dm_{\text{WD}}}{dt_{\text{D}}} - \frac{dm_{\varphi\text{D}}}{dt_{\text{D}}} \right) - r_{\text{D}} \frac{\partial m_{\text{D}}}{\partial r_{\text{D}}} \right]_{r_{\text{D}}=1} = 1 \quad (11)$$

$$m_{\text{WD}} = \left[m_{\text{D}} - S \frac{\partial m_{\text{D}}}{\partial r_{\text{D}}} \right]_{r_{\text{D}}=1} \quad (12)$$

式中: $m_{\varphi\text{D}}$ 为方程(6)表示的井筒流动标准压力, MPa 。

标准压力定义为

$$m(p) = \left(\frac{\mu_i Z_i}{p_i} \right) \int_{p_0}^p \frac{p}{\mu Z} dp \quad (13)$$

式中: p_i 为原始地层压力, MPa ; μ_i 为原始地层压力下的气体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; Z_i 为原始地层压力下的偏差因子, 无因次; p_0 为参考压力, MPa 。

对上述方程进行 Laplace 变换并求解, 得到 Laplace 空间上的解为

微—粉晶白云质灰岩、白云岩、灰质白云岩, 天然裂缝较发育, 裂缝密度为 10~30 条/m。

该井产出气组分中 H_2S 占 4.53%, CO_2 占 7.47%, CH_4 占 85%, C_2H_6 占 2%, 其他组分占 1%。

该井采用 APR 射孔—酸压—测试三联作工艺进行测试。累计注入酸液和压裂液 975 m^3 进行酸压。开井排液 19 h, 累计排液 220 m^3 , 返排率为 19.8%; 之后开井生产 8 h, 累计产气 $28.4 \times 10^4 \text{m}^3$ 。井下关井进行压力恢复测试 190 h, 实测压力恢复数据如图 2 所示。

采用拟稳态双孔复合模型对压力恢复数据进行试井解释, 图 1 为双对数拟合图, 图 2 为压力历史拟合图。从图 1 和图 2 可以看出, 双对数图和历史拟合图均具有很好的拟合效果, 因此解释结果是可

信的;试井解释结果:渗透率 $0.21 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,井储系数 $0.0546 \text{ m}^3/\text{MPa}$,表皮系数 -2.31 ,储容比 0.658 ,窜流系数 7.36×10^6 ,流度比 0.21 ,复合气藏内半径 147 m ,探测半径 318.4 m 。

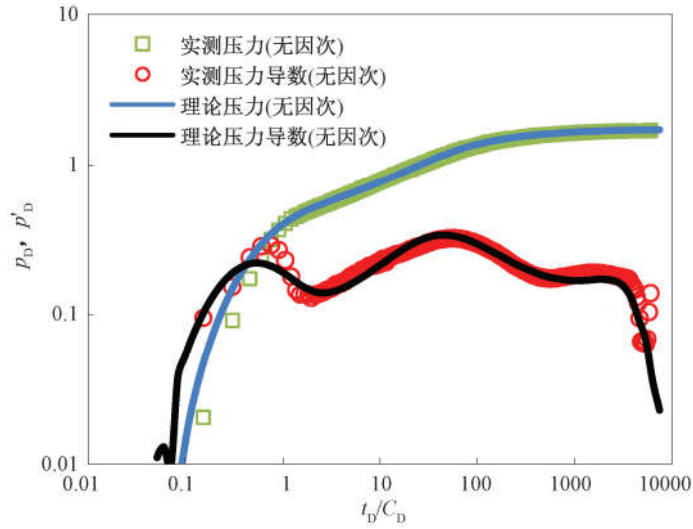


图 1 实例井压力及导数双对数拟合图
Fig.1 Log-log fitting of pressure and derivative of an example well

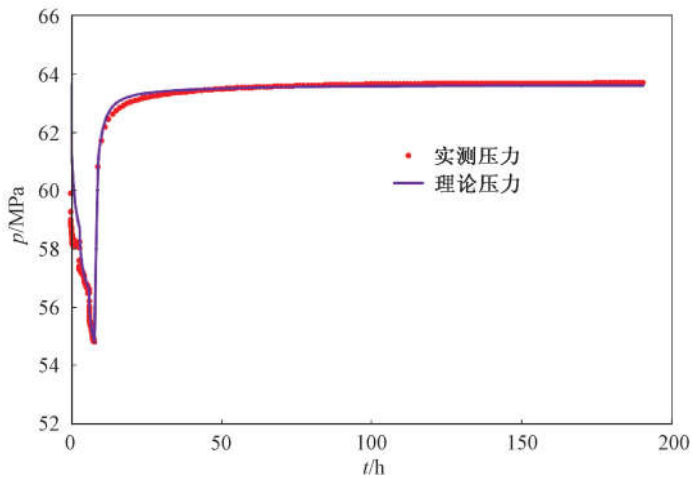


图 2 实例井压力历史拟合图
Fig.2 Pressure history fitting of an example well

在探测半径内流动达到稳定所需要的时间为

$$t_s = \frac{74.2\varphi\bar{\mu}r_c^2S_g}{Kp_e} \quad (15)$$

式中: t_s 为流体流动达到稳定所需的时间,h; r_e 为探测半径,m; $\bar{\mu}$ 为气体黏度, $\text{mPa}\cdot\text{s}$; φ 为孔隙度,%; K 为渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; S_g 为含气饱和度,%。

假设 $S_g = 1$,原始地层压力下气体黏度为 $0.03496 \text{ mPa}\cdot\text{s}$,利用(15)式计算 t_s 为 984.48 h 。因此,该井进行产能试井时,为得到稳定的井底流压,至少要开井 984.48 h 。若采用产能试井,会造成大量浪费,且酸性气藏深井测试工具长时间在高温高压环境下故障率非常高。采用本文提出的方法,在由 1 次压恢资料得到储层参数的基础上,设计了

4 个生产制度方案见表 1,计算得到井底压力变化曲线如图 3 所示。

表 1 生产制度设计
Table 1 Production system design

序号	时间/h	日产量/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
1	0~1 000	10
2	1 000~2 000	20
3	2 000~3 000	30
4	3 000~4 000	40
5	4 000~5 000	0

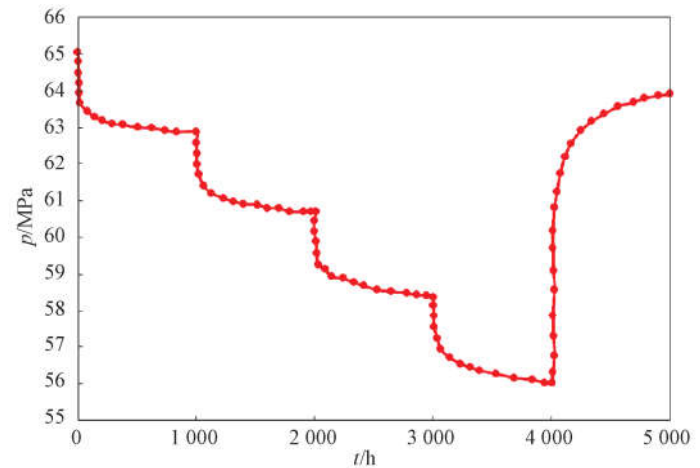


图 3 不同制度下井底压力变化
Fig.3 Bottomhole pressure changes under different production systems

取每个制度下末点的压力并计算对应的标准压力(见表 2)。

表 2 不同生产制度下的稳定压力
Table 2 Steady pressures under different production systems

序号	时间/h	井底流压/MPa	标准压力/MPa
1	1 000	62.929	49.465
2	2 000	60.718	47.139
3	3 000	58.428	44.758
4	4 000	56.081	42.349

根据表 2 中的数据,绘制分别绘制两种产能曲线,即二项式产能曲线和指数式产能曲线(又称作“经验产能曲线”),分别如图 4 和图 5 所示。然后根据图 4 和图 5 的曲线和两种产能方程的一般形式,回归出产能方程为

二项式产能方程:

$$m_i - m_{wf} = 5.53 \times 10^{-4} q^2 + 0.2067 q$$

指数式产能方程:

$$\lg(m_i - m_{wf}) = 0.9475 \lg q + 5.0173$$

由图 4 和图 5 回归即可得到二项式、指数式产能方程对应的无阻流量分别为 $173.16 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $210.71 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

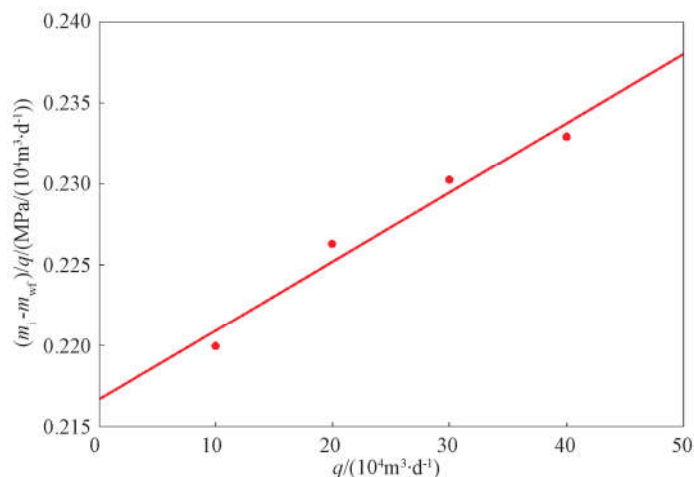


图 4 二项式产能方程回归图

Fig.4 Binomial productivity regression equation

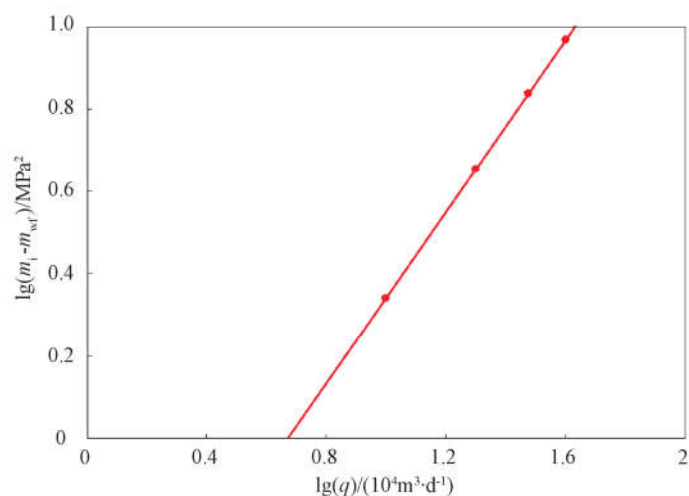


图 5 指数式产能方程回归图

Fig.5 Exponential regression of deliverability equation

4 结论

(1)考虑酸性气藏深井关井后地层流体向井筒的续流,建立了耦合井筒流动与地层渗流的酸性气井产能试井模型,形成了利用压力恢复数据进行产能试井的新方法。

(2)四川盆地部分酸性气藏渗透率低(实例井压恢试井解释渗透率为 $0.21 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),达到稳定流动需要 1 000 h 左右,而目前进行产能试井时间约 168 h,所以流动很难达到稳定,会影响产能试井的准确性。该研究为解决现场酸性气藏深井产能试井测试周期长、复杂事故率高、测试结果准确性的难题提供了一种技术手段。

(3)该方法对裂缝-孔隙型的低渗储层适用性较好,对孔隙型储层或含大溶洞的储层,则需要进行模型改进,这也是今后待完善的工作。

致谢:感谢中国石化石油工程技术研究院同意公开发表;感谢国家科技重大专项和中国石化重大科技攻关项目的资助。

参 考 文 献

- [1] 杜志敏. 国外高含硫气藏开发经验与启示[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 35-37.
DU Zhimin. Oversea experiences of acid gas reservoir development and their enlightenments [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(12): 35-37.
- [2] 孙玉平, 陆家亮, 万玉金, 等. 法国拉克、麦隆气田对安岳气田龙王庙组气藏开发的启示[J]. 天然气工业, 2016, 36(11): 37-45.
SUN Yuping, LU Jialiang, WAN Yujin *et al.* Enlightenments of Lacq and Meillon gas fields in France to the development of Longwangmiao Fm gas reservoirs in the Anyue gas field, Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(11): 37-45.
- [3] BORGES F A, FELIX M, BEZERRA C. Well testing design under harsh environment [C]. Paper SPE-21142-MS presented at the SPE Latin America Petroleum Engineering Conference held in Rio de Janeiro, Brazil, 14-19 October, 1990.
- [4] AL-SALALI Y Z, AL-BADER H, DUGGIRALA V S *et al.* Challenges in testing and completion of highly sour HPHT reservoir in the State of Kuwait [C]. Paper SPE-167647-MS presented at the SPE Kuwait Oil and Gas Show and Conference held in Kuwait City, Kuwait, 8-10 October, 2013.
- [5] AKBAR D, SIMANJUNTAK T, KRISTIANAWATIE N. The successful planning and implementation of high angle deviated HPHT well testing in the sour naturally fractured gas reservoir: case study of S-3 well [C]. Paper SPE-146978-MS presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition held in Jakarta, Indonesia, 20-22 September, 2011.
- [6] HOLLAENDER F, SALSMAN A, NEYAEI F A *et al.* Multi-zone well testing with down-hole tools in extreme sour-gas conditions [C]. Paper SPE-149089-MS presented at the SPE/DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition held in Al-Khobar, Saudi Arabia, 15-18 May, 2011.
- [7] 彭鑫岭, 曾大乾, 张世民, 等. 普光气田高含硫化氢气井开发测井工艺优选与应用[J]. 天然气工业, 2012, 32(11): 32-35.
PENG Xinling, ZENG Daqian, ZHANG Shimin *et al.* Optimization and application of logging technology in the development of sour gas wells in the Puguang gas field, Sichuan basin [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(11): 32-35.
- [10] 王军民, 张公社, 陆小锋, 等. 三项式产能方程在普光气田的应用[J]. 天然气技术与经济, 2012, 6(2): 36-37.
WANG Junmin, ZHANG Gongshe, LU Xiaofeng *et al.* Application of trinomial deliverability equation to Puguang gas field [J]. Natural Gas Technology and Economy,

- 2012, 6(2): 36-37.
- [11] 李明志, 聂仕荣, 张文昌, 等. 普光气田 P302-2 井焚烧炉试气技术[J]. 中国工程科学, 2010, 12(10): 61-64.
LI Mingzhi, NIE Shirong, ZHANG Wenchang *et al.* Gas testing technology for Puguang P302-2 well [J]. Engineering Sciences, 2010, 12(10): 61-64.
- [12] 姜春河, 张庆生, 张文昌, 等. 国产 SGI-10 型高含硫天然气焚烧炉在普光 D401-1 井试气中的应用[J]. 天然气工业, 2011, 31(7): 87-89.
JIANG Chunhe, ZHANG Qingsheng, ZHANG Wenchang *et al.* Application of the China-made SGI-10 incinerator to the gas production test of the well D401-1 in the Puguang gas field [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(7): 87-89.
- [11] 鲁宜全. “一点法”在川东北地区试气中的应用[J]. 油气井测试, 2008, 17(5): 34-36.
LU Yiquan. Application of “single point method” gas testing in Chuandongbei area [J]. Well Testing, 2008, 17(5): 34-36.
- [12] 景艳, 张士诚, 景宁, 等. “一点法”在普光气田产能预测中的应用与改进[J]. 石油天然气学报, 2007, 29(3): 264-266.
JING Yan, ZHANG Shicheng, JING Ning *et al.* Application of “single point method” for productivity forecast in Puguang gas field and its improvement [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2007, 29(3): 264-266.
- [13] 黄德明, 付德奎, 刘欣, 等. 一种新的“改进一点法”在普光气田产能预测中的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2012, (16): 19-20.
HUANG Deming, FU Dekui, LIU Xin *et al.* Application of new “improved single point method” for productivity forecast in Puguang gas field [J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2012, (16): 19-20.
- [14] 孙金朝. YB27 井酸性气藏系统试气技术应用[J]. 油气井测试, 2012, 21(4): 59-63.
SUN Jinchao. Application of systematic well testing in sour gas reservoir of YB27 [J]. Well Testing, 2012, 21(4): 59-63.
- [15] 董海峰, 杨顺艳, 盛伟. 元坝超深含硫气井产能试井工艺技术[J]. 油气井测试, 2012, 21(1): 42-44.
DONG Haifeng, YANG Shunyan, SHENG Wei. Deliverability test technology for Yuanba super deep sour gas wells [J]. Well Testing, 2012, 21(1): 42-44.
- [16] 张烈辉, 李成勇, 刘启国, 等. 高含硫气藏气井产能试井解释理论[J]. 天然气工业, 2008, 28(4): 86-88.
ZHANG Liehui, LI Chengyong, LIU Qiguo *et al.* Interpreting theory of gas well productivity test for high-sulfur gas reservoirs [J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(4): 86-88.
- [17] 陈忠, 沈金才, 王倩雯. “一点法”在建南气田飞三气藏的应用与改进[J]. 江汉石油职工大学学报, 2012, 25(5): 41-42.
CHEN Zhong, SHEN Jincai, WANG Qianwen. On the Application and modification of “one point method” in Feisan gas reservoir of Jiannan gas field [J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2012, 25(5): 41-42.
- [18] 陈明. 普光气田套管变形原因分析及技术对策[J]. 特种油气藏, 2010, 17(6): 110-112.
CHEN Ming. Casing deformation analysis and countermeasures of Puguang gas field [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2010, 17(6): 110-112.
- [19] 陈琛, 曹阳. 元坝气田超深高含硫水平井测试投产一体化技术[J]. 特种油气藏, 2013, 20(1): 129-131, 138.
CHEN Chen, CAO Yang. Integration of well test and production for Yuanba super deep sour gas horizontal wells [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2013, 20(1): 129-131, 138.
- [20] AL-HUSSAINY R, RAMEY H J, CRAWFORD P B. The flow of real gases through porous media [J]. Journal of Petroleum Technology, 1966, 18(5): 624-636.
- [21] 郑爱维, 李继庆, 卢文涛, 等. 涪陵页岩气田分段压裂水平井非稳态产能评价方法[J]. 油气井测试, 2018, 27(1): 22-30.
ZHENG Aiwei, LI Jiqing, LU Wentao *et al.* Unsteady productivity evaluation method of multi-stage fractured horizontal well for shale gas in Fuling shale gas field [J]. Well Testing, 2018, 27(1): 22-30.

编辑 刘述忍

第一作者简介: 庞伟, 男, 1983 年出生, 硕士研究生, 副研究员, 2010 年毕业于中国石油大学(华东)油气田开发工程专业, 主要从事非常规及高温高压油气井完井、测试研究工作。电话: 010-84988635, 18911640704; E-mail: pangwei.sripe@sinopecc.com。地址: 北京市朝阳区北辰东路 8 号北辰时代大厦 609 室, 邮政编码: 100101。