

低渗气藏产能测试评价技术

宋刚祥,伍锐东,罗岐岚,朱文娟,马恋,闫鑫源

中海石油(中国)有限公司上海分公司 上海 200335

项目支持:中海油重大科技专项“西湖凹陷在生产油气田中后期综合调整关键技术研究与实践”(KJ135ZDXM39SH03)

通讯作者:Email:songgx5@cnooc.com.cn

引用:宋刚祥,伍锐东,罗岐岚,等.低渗气藏产能测试评价技术[J].油气井测试,2022,31(6):74-77.

Cite: SONG Gangxiang, WU Ruidong, LUO Qilan, et al. Productivity testing and evaluation technology for low-permeability gas reservoirs[J]. Well Testing, 2022,31(6):74-77.

摘要 针对低渗气藏测试经常出现压力不稳定、恢复缓慢导致测试解释及产能求取受阻的问题,提出短时不关井等时试井和简化的修正等时试井快速产能测试方法。短时不关井等时试井在等时试井的基础上,以井筒储集效应时间作为等时流动时间,剔除等时试井中关井阶段;简化的修正等时试井方法能规避产能方程负斜率风险,不进行延续期的测试。简化的修正等时试井方法应用于海上M低渗气藏,有效地缩短测试时间,取得良好效果。该技术可为同类低渗致密气藏产能测试评价提供技术支撑。

关键词 低渗气藏;产能测试;修正等时试井;不关井等时试井;井储效应;等时流动时间;试井解释

中图分类号:TE353 **文献标识码**:B **DOI**:10.19680/j.cnki.1004-4388.2022.06.015

Productivity testing and evaluation technology for low-permeability gas reservoirs

SONG Gangxiang, WU Ruidong, LUO Qilan, ZHU Wenjuan, MA Lian, YAN Xinyuan

Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200335, China

Abstract: During testing of low-permeability gas reservoirs, unstable and slowly recovered pressure cause difficulty in testing interpretation and productivity calculation. In order to solve this problem, a short-term non-shut-in isochronal well testing and simplified modified isochronal well testing method was proposed for rapid productivity testing. On the basis of isochronal well testing, the short-term non-shut-in isochronal well testing takes the wellbore storage effect time taken as the isochronal flow time, and excludes the shut-in period in the isochronous well testing. The simplified modified isochronal well testing method can avoid the slope of productivity equation being negative, and performs no testing for extended period. The simplified modified isochronal well testing method was applied to the offshore low-permeability gas reservoir M, which can effectively shorten the testing time and achieve better results. This technology can provide a technical support on productivity testing and evaluation for similar low-permeability tight gas reservoirs.

Keywords: low-permeability gas reservoir; productivity testing; modified isochronal well testing; not-shut-in isochronal well testing; well storage effect; isochronal flow time; well testing interpretation

东海盆地具有储层非均质性强,断层、水体发育特征。低渗-致密气资源储量较大,低渗致密气产量的比重逐年攀升。由于地质油藏条件复杂,地层流体性质多样化,导致在进行回压试井时,产能分析过程中经常遇到各类问题。例如,低渗气层开井生产时产量流压难以达到稳定,关井后难以恢复至地层压力。王颖^[1]、杨敏等^[2]、杨柳等^[3]、李浩等^[4]针对地层压力监测及产能测试时间长、常规试井应用规模受限、开发方式特殊等问题,通过气井产能评价方法综合分析,在利用井口压力考虑节流

状态确定井底流压的基础上,运用气井的生产数据对单井产能进行评价,并据此计算地层压力、建立产能方程。研究表明:在气井渗流达到拟稳态的条件下,可以用常规的压力平方二项式方程求取低渗气藏的产能方程和无阻流量。对于低渗气藏,由于地层渗透率低,压力向外波及速度慢,测试很难达到稳定条件,国内外低渗气藏产能测试多选择不稳定的修正等时试井测试方法,李跃刚等^[5]、朱文娟^[6]、LARSEN L^[7]将修正等时试井技术应用于长庆低渗气田,通过不断实践,其理论、测试工艺、资

料分析都得到了进一步的发展和完善,拓宽了修正等时试井资料的应用范围。尽管如此,绝大多数低渗气藏的延续生产稳定点测试也很难获取。针对海上深层储层低渗近致密特点,亟待发展短期无稳定点的产能测试评价方法。

1 快速产能测试方法

快速产能测试方法,主要包括短时不关井等时试井、简化的修正等时试井测试方法。

1.1 短时不关井等时试井

在油气井测试中,等时试井需要多次关井,在操作程序上较回压试井繁琐,且测试时间相对较长。在等时试井的基础上,对测试时间进一步优化,剔除等时试井中关井阶段,以井筒储集效应作为等时流动时间来进一步缩短测试时间(见图1)。

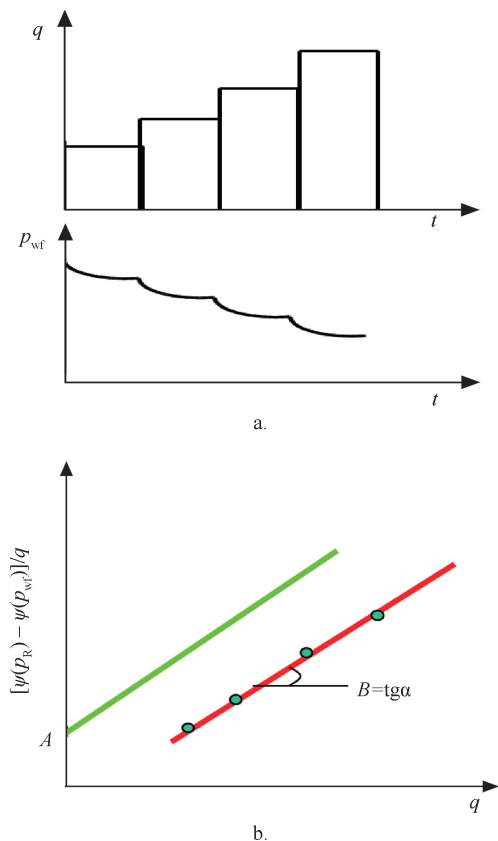


图1 短时不关井等时试井示意图

Fig. 1 Schematic diagram of short-term non-shut-in isochronal well testing

利用变产量试井方法,分别给出各产量下拟压力降变化公式

$$\begin{aligned}\psi_R - \psi_{wf1} &= M \cdot \lg(N \times t_p) \cdot q_1 + \\ &M \cdot 0.868 6 \times D \times (q_1)^2 \\ \psi_R - \psi_{wf2} &= M \lg 2 \times q_1 + M \lg(N \times t_p) \times q_2 +\end{aligned}\quad (1)$$

$$0.868 6 DM(q_2)^2 \quad (2)$$

$$\begin{aligned}\psi_R - \psi_{wf3} &= M q_1 \lg \frac{3}{2} + M q_2 \lg 2 + M \lg(N \times t_p) \times \\ &q_3 + 0.868 6 DM(q_3)^2\end{aligned}\quad (3)$$

$$\begin{aligned}\psi_R - \psi_{wf4} &= M q_1 \lg \frac{4}{3} + M q_2 \lg \frac{3}{2} + M \lg 2 \times q_3 + \\ &M \lg(N \times t_p) q_4 + 0.868 6 DM(q_4)^2\end{aligned}\quad (4)$$

$$\text{其中 } M = \frac{42.42 \times 10^3 p_{sc} \bar{T}}{k h T_{sc}}, N = \frac{8.091 \times 10^{-3} k}{\phi \mu_g C_i r_w^2},$$

式中: ψ 拟压力,MPa; q 产量, m^3/d 。

将 q_2 、 q_3 、 q_4 与 q_1 建立特定关系,联立 M 、 N 表达式,经过迭代计算得到 $q_2 = 1.5 q_1$, $q_3 = 3 q_1$, $q_4 = 6 q_1$,代入(2)式、(3)式、(4)式得

$$\begin{aligned}\psi_R - \psi_{wf2} &= M q_2 (\lg(N \times t_p) + 0.2) + \\ &0.868 6 DM(q_2)^2\end{aligned}\quad (5)$$

$$\begin{aligned}\psi_R - \psi_{wf3} &= M q_3 (\lg(N \times t_p) + 0.2) + \\ &0.868 6 DM(q_3)^2\end{aligned}\quad (6)$$

$$\begin{aligned}\psi_R - \psi_{wf4} &= M q_4 (\lg(N \times t_p) + 0.2) + \\ &0.868 6 DM(q_4)^2\end{aligned}\quad (7)$$

可以看出 $(q_2, \psi_R - \psi_{wf2})$ 、 $(q_3, \psi_R - \psi_{wf3})$ 、 $(q_4, \psi_R - \psi_{wf4})$ 之间满足同一线性关系,即产能方程系数 $A = M(\lg(N \times t_p) + 0.2)$, $B = 0.868 6 DM$,该系数对应于拟压力二项式产能方程式(8)中的 A_1 、 B_1 系数,即

$$\Psi(p_R) - \Psi(p_{wf}) = A_1 q + B_1 q^2 \quad (8)$$

短时不关井等时试井测试流程:用若干个满足一定关系的产量,并且生产相同的时间进行试井测试。

上述产能方程系数求取过程如下:

(1) 产能方程系数 B 的确定,利用四开三关不稳定测试资料,进行线性拟合,求取产能方程系数 B 。

(2) 估算边界距离,计算得到测试达到稳定的时间,结合 $A(t) \sim \lg t$ 关系,确定达到稳定时的产能方程系数 A ;此外,依据现场测试判别气井达到稳定流动状态的经验性方法,同样可以确定达到稳定流动的时间。

1.2 简化的修正等时试井

所谓修正等时试井,即用3~4个不同的产量生产相同的时间;在每一产量生产后均关井相同的时间(无需恢复到气层静压);最后再以某一定产量生产一段较长的时间,直至井底流压达到稳定。在回压试井过程中,需要不同油嘴生产时井底流压达到

稳定,而在低渗气藏中,达到井底流压稳定需要耗费较长的时间,甚至无法达到稳定。修正等时试井仅要求最后一个油嘴生产时井底流压达到稳定,因此大大缩短了测试时间,尤其适用于低渗气藏气井产能评价。

针对海上深层储层低渗近致密特点,在修正等时试井基础上进行改进,发展了短期无稳定点的产能测试评价方法。简化的修正等时试井仅进行等时阶段的不稳定测试(图 2),而不进行延续期的测试,从而缩短测试时间。

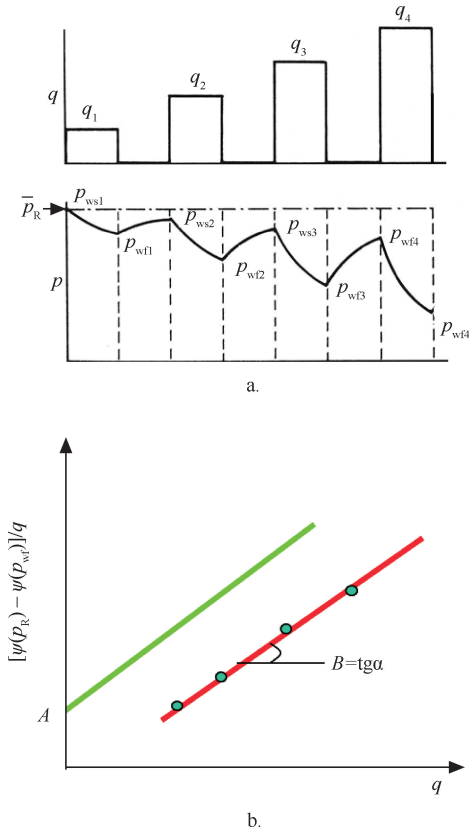


图 2 简化的修正等时试井产量及压力变化示意图
Fig. 2 Schematic diagram of the changes in production and pressure for simplified modified isochronal well test

对于无限大均质气藏

$$\psi_R - \psi_{wf} = Aq_g + Bq_g^2 \tag{9}$$

其中

$$A = \frac{42.42T_{p_{sc}} \left(\lg \frac{8.085kt}{\phi\mu C_t r_w^e} + \frac{S}{2.302} \right)}{kh}$$

$$B = \frac{42.42T_{p_{sc}}}{kh} \times 0.87D$$

由(9)式可以看出,在地层参数及流体性质确定的情况下,产能方程系数 A 仅与 lgt 有关,利用上述公式计算得知 A(t) 与 lgt 存在良好的线性关系,因此对

于修正等时试井利用延时开井稳定测试点确定稳定产能方程系数 A,可以在给定供气半径 r_e 的条件下,计算到达边界所需的测试时间 t_s ,利用 A(t) 与 lgt 关系,确定到达边界时的稳定产能方程系数 A。

产能方程系数求取过程如下:(1)产能方程系数 B 的确定,利用四开三关不稳定测试资料,进行线性拟合,求取产能方程系数 B。(2)估算边界距离,利用(10)式计算得到测试达到稳定的时间,结合 A(t) ~ lgt 关系,确定达到稳定时的产能方程系数 A,即

$$t_s = \frac{\phi\mu C_t r_e^2}{14.4k} \tag{10}$$

利用产能方程系数,进而建立气井的产能方程,确定气井绝对无阻流量。

2 应用情况

在测试井外边界未知的情况下,通常供给半径经验取值 300~700 m,由于供给半径在对数函数里,因而边界距离对产能方程系数影响较小,结合上述产能方程,针对供给半径进行参数敏感性分析。

根据计算结果表 1 可知,边界距离从 100~700 m,无阻流量相对误差最大为 6.7%,因此在测试井外边界未知的情况下,经验取值边界距离对产能影响在误差可接受的范围以内。

表 1 低渗储层不同供给半径下产能计算数据
Table 1 Productivity data of low permeability reservoirs calculated with different supply radius

供给半径/m	无阻流量/(10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	相对误差/%
100	69.0	0
300	64.8	4.1
500	62.3	5.6
700	61.1	6.7

为提高修正等时试井在海上低渗气藏应用的成功率,对修正等时试井中无阻流量的适用范围、设计试井参数结合矿场实例进行了研究。以东海 M 低渗气藏为例,M3 井 2017 年生产低渗气藏 H3 层,产层渗透率 5 mD,通过采用简化的修正等时试井产能测试方法,设计合理的测试工作制度,避免因储层物性差,导致短时间内无法使各工作制度下的生产达到稳定的问题发生。现场进行四开三关不稳定测试(表 2),通过测试资料建立产能方程,规避了二项式产能方程斜率为负的风险,为 M3 井获得了相对准确的产能,通过二项式产能方程计算无阻流量为 21×10⁴ m³/d。

表 2 M3 井修正等时试井产能测试数据

Table 2 Productivity testing data of Well M3 by the modified isochronal well testing method

开关井 顺序	开关井 时间/h	关井井底 压力/MPa	开井井底 压力/MPa	产气量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)
初始关井	/	33.2	/	/
开井 1	6	/	31.96	2.3
关井 1	6	33.17	/	/
开井 2	6	/	29.3	6.2
关井 2	6	33.0	/	/
开井 3	6	/	26.7	10.0
关井 3	6	32.8	/	/
开井 4	30	/	23.8	14.1

通过统计分析海上气田、苏里格、大牛地、长庆、榆林、松南等国内 13 个气田 40 口修正等时试井实施成功井的无阻流量,其中 38 口井修正等时试井实施成功,无阻流量均小于 100×10⁴ m³/d;2 口井修正等时试井测试异常,无阻流量大于 100×10⁴ m³/d。因此建议实施修正等时试井的无阻流量范围为小于 100×10⁴ m³/d。通过实例研究,进一步验证表 1 结果的准确性(低渗储层在不同供给半径下无阻流量范围为小于 100×10⁴ m³/d)。

对比海上历次修正等时试井中测试产量、测试时的生产压差、相邻油嘴的流压级差、以及无阻流量等参数可以看到:在出现负斜率的井次中,生产压差均小于 1 MPa,相邻油嘴的流压级差均小于 1 MPa,无阻流量均大于 200×10⁴ m³/d,各油嘴测试产量与无阻流量的比值均小于 15%;而测试成功的 M3 井中,生产压差均大于 1 MPa,相邻油嘴的流压级差均大于 1 MPa,计算无阻流量为 21×10⁴ m³/d,各油嘴测试产量与无阻流量的比值均大于 15%。同时在确定最小油嘴产量时,为保证非达西项计算准确,最小油嘴的产量需在非达西效应显著的流量范围内,尽可能的选择较大的产量。

3 结论

(1)短时不关井等时试井在等时试井的基础上,对测试时间进一步优化,剔除等时试井中关井阶段,可以进一步缩短测试时间。该方法的成功应用对后续类似低渗气藏(对渗透率低于 10 mD 的气藏普遍适用)产能测试提供了有效的指导手段。

(2)改进的短时不关井等时试井比简化的等时试井测试时间进一步缩短,适宜在低渗致密储层开展产能测试。

(3)采用简化的修正等时试井方法,能规避产能方程负斜率风险,不进行延续期的测试,从而缩

短测试时间。该方法可以满足复杂低渗气藏的产能测试需求。

致谢:感谢中海石油(中国)有限公司上海分公司同意本文公开发表。

参考文献

[1] 王颖.一种利用生产数据评价苏里格低渗气井产能的新方法[J].非常规油气,2020,7(4):85-90.
WANG Ying. A new method for evaluating the productivity of gas wells in sulige low permeability reservoirs by using the production data[J]. Unconventional Oil&Gas, 2020, 7(4):85-90.

[2] 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):63-65.
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):63-65.

[3] 杨柳,袁辉,杨志兴,等.东方气田产能测试数据应用新方法研究[J].科学技术与工程,2013,13(13):3701-3703.
YANG Liu, YUAN Hui, YANG Zhixing, et al. The new application method of productivity test data in DF gas fields[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(13): 3701-3703.

[4] 李浩,周伟,汪来潮,等.南海深水高产气井测试分析及产能评价技术[J].科学技术与工程,2019,19(33):140-141.
LI Hao, ZHOU Wei, WANG Laichao, et al. Test analysis methods and productivity evaluation technology in deep-water high production gas reservoir, south China sea[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(33): 140-141.

[5] 李跃刚,范继武,唐乐平,等.修正等时试井技术在长庆气田的应用与发展[J].天然气工业,2002,22(6):68-71.
LI Yuegang, FAN Jiwu, TANG Leping, et al. Application and expansion of modified isochronal testing technique in Changqing gas field[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(6):68-71.

[6] 朱文娟.修正等时试井在西湖凹陷低渗储层中的应用[J].油气井测试,2017,26(5):28-30.
ZHU Wenjuan. Application of modified isochronal testing in the low permeability reservoirs of Xihu Sag[J]. Well Testing, 2017, 26(5):28-30.

[7] LARSEN L, HOVDAN M. Analyzing well test data from linear reservoirs by conventional methods. SPE16777, 1987.

编辑 穆立婷

第一作者简介:宋刚祥,男,硕士,高级工程师,2013年毕业于长江大学油气田开发工程专业,现从事油气田开发研究相关工作。电话:021-22830790;Email:songgx5@cnoc.com.cn。通信地址:上海市长宁区通协路388号中海油大厦A座,邮政编码:200335。