

异常高压低渗透气藏储层应力敏感 对气井产能的影响^{*}

向祖平¹ 谢峰² 张箭² 魏学斌³

1. 中国石化西南油气分公司博士后科研工作站 2. 中国石化西南油气分公司勘探开发研究院

3. 中国石油青海油田公司勘探开发研究院

向祖平等. 异常高压低渗透气藏储层应力敏感性对气井产能的影响. 天然气工业, 2009, 29(6): 83-85.

摘要 异常高压低渗透致密气藏由于其自身的地质特征, 在衰竭式开发过程中表现出较强的储层应力敏感, 特别是渗透率应力敏感会明显影响气藏的开发效果。在渗流力学理论上建立了考虑应力敏感的三维气、水两相流数值模型, 并编写了相应的数值模拟软件。模拟计算结果表明: 随压力下降, 岩石形变对低渗透储层的影响明显要高于对高渗透储层的影响; 储层渗透率越低, 应力敏感就越强, 导致气井所需生产压差就越大, 使得气井对地层能量的利用率越低, 故由应力敏感所导致气井产能的损失就越大; 异常高压气藏由于原始地层压力高, 有效应力变化范围大且变化的下限低, 导致储层岩石具有更强的应力敏感。因此在异常高压、低渗透、特低渗透气藏开发中应充分考虑储层应力敏感的影响, 并针对不同渗透率的储层制订相应的开发对策, 使开发方案能更加准确地指导该类气藏的开发。

关键词 低渗透油气藏 异常高压 生产能力 应力 数值模型 开发对策

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2009.06.024

目前, 在我国西部发现了大量的异常高压、低渗透致密气藏, 如四川的磨溪气田嘉二段气藏、马井气田蓬莱镇组气藏等。这是一类特殊的气藏, 其渗流特征不同于一般的常规气藏。异常高压气藏由于地压系数高、原始地层压力高, 在衰竭式开采过程中, 随着气藏的压力下降, 气藏的岩石骨架承受的有效应力会大幅度增加, 结果会使岩石发生显著的弹性形变, 岩石渗透率、孔隙度和岩石压缩系数等物性参数减小, 这种性质叫做储层的应力敏感, 且不同渗透类型的储层应力敏感对气藏的最终开发效果有着不同的影响^[1]。因此, 研究该类气藏开发过程中不同渗透储层应力敏感对气井产能的影响是一个非常重要的课题。

1 异常高压低渗透气藏储层应力敏感

位于异常高压带的储层岩石孔隙度通常比正常压力下同类型的岩石孔隙度大^[2], 孔隙度的增加往

往伴随着岩石其他特征的变化(如渗透率增加, 油气体积增大, 毛细管压力减小等)。气藏开发中, 由于地层压力下降导致有效应力增加, 从而使岩石的相关物性特征发生变化(即岩石变形)。由有效应力、上覆压力和地层流体压力的关系可知, 异常高压使得储层岩石的原始有效应力降低, 且增大了气藏开发过程中有效应力的变化范围, 特别是使得有效应力变化的下限降低, 这将使得储层岩石变形更加敏感。关系式为:

$$\alpha = \alpha - p \quad (1)$$

式中: α 为岩石基质的垂直有效应力, MPa; α 为上覆净岩压力, MPa; p 为地层流体静压, MPa。

由实际实验数据(图 1)可知, 不同渗透类型的储层应力敏感具有较大差别。当地层压力由原始值(19.5 MPa)降到 10 MPa 时, 压力下降了 48.72%, 气藏平均产能由原始值 1.0 降到 0.533, 下降了 46.7%。

* 本文受到中国石油天然气集团公司中青年创新基金项目(编号: 07E1016)和中国石化西南油气分公司博士后科研项目(编号: GJ-87-0720)的联合资助。

作者简介: 向祖平, 1978 年生, 博士, 在站博士后; 主要从事油气藏工程及数值模拟研究工作。地址: (610081) 四川省成都市一环北路北四段 116 号。电话: (028) 83355281。E-mail: zuping@163.com

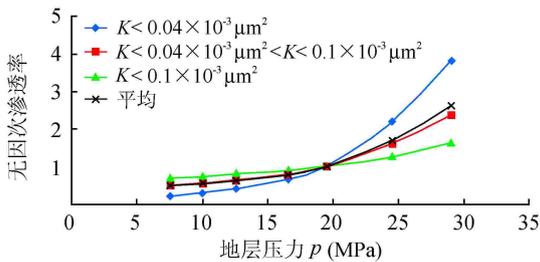


图1 马井蓬莱镇组气藏不同渗透类型储层应力敏感图

当地层压力降到 10 MPa 时,第 1 种特低渗透储层 ($K \leq 0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 的产能下降幅度最大,产能只有初始的 30.2%,该类储层的应力敏感最强;第 2 种储层 ($0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < K \leq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 的产能只有初始的 56.0%;第 3 种储层 ($K > 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 的应力敏感相对较弱,产能仍保持在初始的 73.8% 左右。

2 考虑应力敏感的数值模型

在渗流力学基础上,从推广的达西定律和黑油模型出发建立了三维气、水两相流考虑应力敏感的非线性渗流数学模型^[3-4],即

$$\nabla \left[\frac{K(p_g)K_{rl}}{B_l \mu} \nabla \Phi \right] - q_l = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varphi S_l}{B_l} \right) \quad (l = g, w) \quad (2)$$

令 $K(p_g) = K_{\text{MULT}}(p_g)K_i$, 并代入式(2)得:

$$\nabla \left[\frac{K_{\text{MULT}}(p_g)K_i K_{rl}}{B_l \mu} \nabla \Phi \right] - q_l = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varphi S_l}{B_l} \right) \quad (l = g, w) \quad (3)$$

式(2)中包含了 4 个基本变量: p_g 、 p_w 、 S_g 、 S_w 。为了完整地描述方程,还需 3 个附加的辅助关系式:

$$S_w + S_g = 1 \quad (4)$$

$$p_{\text{gw}} = p_g = p_w = f(S_w) \quad (5)$$

$$K_{\text{MULT}}(p_g) = \frac{K(p_g)}{K_i} = f(p_g) \quad (6)$$

笔者采用有限差分方法^[5]离散方程式(3)(空间采用中心差分,时间采用向前差分),并整理得到相应的数值方程:

$$\Delta T_l^{n+1} \Delta \Phi^{n+1} - q_l^{n+1} = \frac{V_b}{\Delta t} \left[\left(\frac{\varphi S_{gl}}{B_l} \right)^{n+1} - \left(\frac{\varphi S_{gl}}{B_l} \right)^n \right] \quad (7)$$

式中: T_l 为网格间的传导率, $T_l = \frac{K_{\text{MULT}} K_i K_{rl}}{B_l \mu} f_G$; K_{MULT} 为随地层压力变化的渗透率乘子; K_i 为原始地层压力下的渗透率; f_G 为几何因子, $f_G = A/L$; A 、 L 分别为网格间流动的截面积和距离; V_b 为网格块

体积, $V_b = \Delta x \Delta y \Delta z$; Δx 、 Δy 、 Δz 为网格步长。

3 应力敏感对气井产能的影响

在所建立的数学模型基础上,编制了考虑储层应力敏感的单井数值模拟软件。用本软件模拟计算了马井蓬莱镇组气藏气井在 3 种不同渗透储层应力敏感情况下的生产动态,并研究分析了不同渗透储层的应力敏感对气井产能的影响(图 1)。将气藏相关参数输入气藏数值模拟模型进行计算,预测期为 120 个月(见表 1)。

对比预测期各项生产指标(表 1)可知:

3.1 随压力下降,岩石形变对低渗透储层的影响明显要高于其对高渗透储层的影响

储层渗透率越低,应力敏感就越强,由于应力敏感导致气井产能的损失就越大。

与不考虑应力敏感时等产量预测:考虑基块应力敏感和不考虑基块应力敏感相比,第 3 种储层中的气井稳产期只缩短了 30.43%,稳产期末采出程度只降低了 30.78%;第 2 种储层中的气井稳产期缩短了 77.46%,稳产期末采出程度降低了 78.58%;而第 1 种储层种的气井稳产期缩短了 87.23%,稳产期末采出程度降低了 89.32%,稳产期大大缩短了。

与不考虑应力敏感时等稳产期预测:考虑基块应力敏感和不考虑基块应力敏感相比,要达到相同稳产期,第 3 种储层中的气井产量只减小了 14.50%,稳产期末采出程度只降低了 14.50%;第 2 种储层中的气井产量减小了 30.33%,稳产期末采出程度降低了 30.33%;而第 1 种储层种的气井产量减小了 51.80%,稳产期末采出程度降低了 51.80%,稳产期产量降低了一半多。

3.2 渗透率越低的储层,气井对地层能量的利用率越低

与不考虑应力敏感时等产量预测:考虑基块应力敏感和不考虑基块应力敏感相比,第 3 种储层中的气井稳产期末单位压降采气量只降低了 30.75%;第 2 种储层中的气井稳产期末单位压降采气量降低了 78.59%;而第 1 种储层种的气井稳产期末单位压降采气量则非常低,降低了 89.32%。

与不考虑应力敏感时等稳产期:考虑基块应力敏感和不考虑基块应力敏感相比,第 3 种储层中的气井稳产期末单位压降采气量只降低了 14.96%;第 2 种储层中的气井稳产期末单位压降采气量降低了 31.03%;而第 1 种储层种的气井稳产期末单位压降采气量则降低了 52.51%,降低了一半多。

表 1 不同渗透率储层应力敏感对产能影响的指标预测表

生产指标	$K \leq 0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$			$0.04 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 < K \leq 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$			$K > 0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$		
	不考虑 应力敏感	考虑基块应力敏感		不考虑 应力敏感	考虑基块应力敏感		不考虑 应力敏感	考虑基块应力敏感	
		等稳产期	等产量		等稳产期	等产量		等稳产期	等产量
配产产量 ($10^4 \text{ m}^3/\text{d}$)	1.000	0.482	1.000	1.500	1.045	1.500	2.000	1.710	2.000
储层渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	0.040	0.040	0.040	0.080	0.080	0.080	0.160	0.160	0.160
稳产期(mon)	47	47	6	71	71	16	92	92	64
稳产期末采出 程度(%)	8.357	4.027	0.892	19.070	13.285	4.085	33.079	28.283	22.897
稳产期末地层 压力(MPa)	2.646	2.399	2.658	2.866	2.699	2.861	3.048	2.958	3.056
稳产期末井底 流压(MPa)	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000
稳产期末生产 压差(MPa)	0.646	0.399	0.658	0.866	0.699	0.861	1.048	0.958	1.056
稳产期末单位 压降采气量 ($10^4 \text{ m}^3/\text{MPa}$)	83.064	39.449	8.873	192.051	132.467	41.124	336.825	286.423	233.260

3.3 储层渗透率越低,气井所需生产压差就越大

从生产压差曲线上可以看出,渗透率越低的储层,气井在稳产期所需的生产压差上升速度越快,这是由于井筒周围的地层渗透率越低,渗透率随压力下降的幅度就越大,若要维持一定的产量,则必须快速降低井底流压,放大生产压差。

等稳产期预测时,考虑和不考虑基块应力敏感相比,第 3 种储层中的气井稳产期所需生产压差比后者仅高 8.59%;第 2 种储层中的气井稳产期所需生产压差比后者高 19.28%;而第 1 种储层的气井稳产期所需生产压差最高,比后者高出了 38.24%。

总之,储层渗透率越高,应力敏感就越低,气藏就越容易开采;异常高压、低渗透、特低渗透储层中的应力变化范围大、敏感性非常强,渗透率随地层压力下降将会较大程度地降低,因此,异常高压、低渗透、特低渗透储层在开发过程中就更应重视储层应力敏感的影响。

4 结论

1)建立了考虑应力敏感的异常高压、低渗透气藏单井数值计算模型,并编制了考虑应力敏感的单井数值模拟软件。

2)模拟计算表明,随压力下降,岩石形变对低渗透储层的影响明显要高于其对高渗透储层的影响。储

层渗透率越低,应力敏感就越强,导致气井所需生产压差就越大,使得气井对地层能量的利用率越低,因此,由于应力敏感导致气井产能的损失就越大。

3)异常高压气藏由于原始地层压力高,有效应力变化范围大且有效应力变化的下限低,其导致储层岩石具有更强应力敏感。因此,在异常高压、低渗透、特低渗透气藏开发中应充分考虑储层应力敏感的影响,且针对不同的渗透储层制订相应的开发对策,以使编制的开发方案能更加准确的指导该类气藏的开发。

参 考 文 献

- [1] DAVIES J P, DAVIES D K. Stress-dependent permeability: Characterization and modeling [C] // SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Houston: SPE, 1999.
- [2] 史蒂文, 罗伯特. 异常高压气藏[M]. 北京: 石油工业出版社, 2003.
- [3] 张居增. 气藏非线性渗流数值模拟技术研究[D]. 成都: 西南石油大学石油工程学院, 2004.
- [4] 张烈辉, 向祖平, 冯国庆. 低渗透气藏考虑启动压力梯度的单井数值模拟[J]. 天然气工业, 2008, 28(1): 108-109.
- [5] 李允. 油藏模拟[M]. 山东东营: 石油大学出版社, 1999.

(修改回稿日期 2009-04-28 编辑 韩晓渝)