

文章编号: 0253-9985(2007)01-0088-04

新场蓬莱镇异常高压气藏气体单相渗流实验特征

郑祥克¹, 何顺利², 王昔彬¹, 李远钦¹

(1. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083 2. 中国石油大学, 北京 102249)

摘要: 从气藏的常规岩心实验出发, 结合气藏压敏性特征, 引出了由于气藏压敏特征而产生的“滑脱”现象和“启动压力”特征。通过对四川蓬莱镇浅层异常高压致密气藏岩样单相渗流数据的分析, 探讨其出现既有“滑脱”现象又有“启动压力”特征这种复杂渗流特征的原因, 认为这种渗流特征主要是由于压敏特征, 而很可能不是传统的滑脱机制或低速非达西机制所致。实验结果显示, 新场蓬莱镇组气层压敏特征明显, 拟合系数 a 的范围为 0.3~1.9, 渗透率降低幅度约为 10%~80%。

关键词: 异常高压; 渗流特征; 蓬莱镇组地层; 新场气田

中图分类号: TE112.3 **文献标识码:** A

Gas single-phase percolation characteristics of overpressured gas reservoir in Penglaizhen Formation, Xinchang gas field

Zheng Xiangke¹, He Shunli², Wang Xibin¹, Li Yuanqin¹

(1. Exploration & Development Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2. China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract Based on the conventional core experiments and pressure-sensitive features of gas reservoirs, it is suggested that the “slip flow of gas” and “threshold pressure” may be caused by pressure sensitivity of gas reservoir. This paper takes the overpressured tight gas reservoir in the shallow Upper Jurassic Penglaizhen Formation, Xinchang gas field, Sichuan province, as a research object, analyses the data collected from gas single-phase percolation experiments on its rock samples, and discusses the causes of the sophisticated percolation process with the coexistence of “slip flow of gas” phenomena and “threshold pressure” features. It proposes that the percolation process be induced by pressure sensitivity rather than by traditional Klinkenberg effect or low rate non-Darcy mechanism. The experiments also indicate that the Penglaizhen gas reservoirs in Xinchang gas field shows strong pressure sensitivity, and its fitting factor ranging between 0.3 to 1.9 and permeability reduction magnitude varying from 10% to 80%.

Key words overpressure; percolation characteristics; Penglaizhen Formation; Xinchang gas field

当气体在孔隙介质中渗流时, 表现出有别于油、水等液体渗流的重要物理现象, 这就是滑脱现象^[1,2]。而以往研究针对气藏是否存在启动压力一直存在着争论, 但不断有实验给出了相关的验证^[3,4]。异常高压气藏开发实践与开发实验都表明, 此类储层可能存在明显的压敏性特征^[5~7]。从储层压敏性规律出发, 本文初步探讨了气体单相渗流实验中出现的上述偏离达西规律现象。据

示上述现象之间的可能联系。

1 压敏性气藏单相渗流公式

通常, 将压敏性地层的渗透率表达为:

$$K(\sigma) = K_0 e^{\sigma} \quad (1)$$

式中: σ 为净上覆压力, MPa; $K(\sigma)$ 为净上覆压力为 σ 时的岩石渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_0 为净上覆压

收稿日期: 2006-11-04

第一作者简介: 郑祥克(1976—), 男, 硕士、工程师, 油气藏工程研究及海外项目评估

基金项目: 中国石油化工股份有限公司“提高采收率先导试验项目(YTB2001-02)

力为 0 时的岩石渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; a 为拟合系数。

由实验可知^[1~4], 气体单相渗流偏离达西线性规律是在低压差时出现的。目前, 对这种偏差主要以低速非达西特征^[3,4]或者滑脱效应^[1,2]来解释。由实验可知, 滑脱现象是在低压差时出现的。目前, 对这种偏差主要以流体分子与毛细管壁表面的相互作用来解释^[1,2]。从压敏性实验可知, 在净上覆压力较低时, 压敏性特征最明显^[6]。我们怀疑, 这两者之间是否存在关联。

通常, 岩心实验气体测试用的达西公式为:

$$q = \frac{KA(p_1^2 - p_2^2)}{2\mu p_a} \quad (2)$$

若考虑滑脱效应^[2], 则上式修正为:

$$q = K \left[1 + \frac{b}{p} \right] \frac{A(p_1^2 - p_2^2)}{2\mu p_a} \quad (3)$$

式中: q 为气体流量, m^3/d ; K 为岩心液相绝对渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; p_a , p_1 , p_2 , p 和 b 分别为大气压力、进口压力、出口压力、平均压力和气体滑脱因子, MPa ; A 为岩心横截面面积, m^2 ; L 为岩心长度, m ; μ 为气体平均粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。并定义, 平均压力 $p = (p_1 + p_2)/2$ 。

将公式 (1) 代入公式 (2) 或 (3), 则有:

$$q = C(p_1^2 - p_2^2) L \quad (4)$$

其中, $C = \frac{A}{2\mu p_a} K_0 e^0$ 或 $C = \frac{A}{2\mu p_a} \left[1 + \frac{b}{p} \right] K_0 e^0$

由 (4) 式可知, 在实验中若不注意保持测试过程中的净上覆压力一致, 流量将与压差不再保持

线性关系。由此, 若仅仅根据流量与压差数据, 似乎表明介质中的流动将不再遵循达西定律。

2 新场蓬莱镇异常高压气藏单相渗流特征

新场气田蓬莱镇气藏是异常高压浅层致密气藏^[8~10], 其岩心取样情况见表 1。根据对上述岩样进行的单相渗流实验结果来看, 多数岩心具有压敏性特征 (图 1b 图 2b), 而单相渗流多数呈现出一定的“滑脱效应” (表 1; 图 1a 图 2a), 个别表现出“启动压力”特征 (图 2a)。针对这种复杂现象, 应用上述理论可以较好地揭示其内在的联系, 同时也进一步证实研究区目的层具有较强的压敏特征及其对产能具有较突出的影响, 生产中应引起足够重视。

由图 1b 可知, XP15 井岩样 w3 具有明显的压敏规律; 而图 1c 表明不出现传统的滑脱特征。根据对单相渗流实验数据的回归发现, 该岩样表现出两段式渗流特征, 并且两段都出现“滑脱”现象。由图 1a 及表 1 可知, 低流量段的斜率明显大于高流量段, 表明低流量段的流动能力更强, 这符合压敏性岩样渗透率变化特征——低压差渗透率大; 低流量段的截距低于高流量段, 这也符合压敏性岩样渗透率变化特征——低压差渗透率变化程度大。由此表明, 该岩样的单相渗流出现的“滑脱”并不是常规滑脱, 而是由于渗透率的压敏特征所造成的。

表 1 蓬莱镇气藏岩样单相渗流实验统计数据

Table 1 Statistics of gas single-phase percolation experiments on the samples from Penglaizhen gas reservoir

井号	岩样号	取样深度 /m	绝对渗透率 / ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	回归直线			阶段最大渗透率 / ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	最大流量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	相对滑脱程度, %	备注
				斜率 / ($\text{cm}^4 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-2}$)	截距 / ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	R^2				
XQ43	2	1 106.81	0.142	0.490 0	7.0×10^{-4}	0.999 5	0.044 3	0.062 0	1.13	大流量段
				0.553 5	2.0×10^{-4}	0.997 3	0.051 2	0.003 7	5.43	低流量段
XQ43	5	1 107.53	2.140	13.932 0	3.0×10^{-5}	0.999 8	1.010 0	0.486 1	0.01	全段
Q62	2	919.49	0.021	0.007 1	1.4×10^{-3}	0.992 4	0.009 5	0.012 0	11.71	大流量段
				0.012 0	2.0×10^{-4}	0.985 4	0.020 9	0.001 7	12.07	低流量段
	5	920.67	0.036	0.110 5	2.1×10^{-3}	0.996 0	0.016 4	0.046 0	4.57	大流量段
				0.215 9	1.0×10^{-4}	0.995 8	0.023 4	0.001 5	6.85	低流量段
XQ66	12	971.76	0.202	0.557 4	5.0×10^{-4}	0.999 6	0.058 6	0.019 1	2.62	大流量段
XQ66	17	973.57	1.870	15.982 0	3.2×10^{-3}	0.999 8	1.330 0	0.647 2	0.49	全段
XP15	w3		0.549	1.497 1	8.4×10^{-3}	0.999 6	0.159 0	0.187 6	4.48	大流量段
				2.205 4	4.0×10^{-4}	0.998 4	0.203 0	0.017 2	2.32	低流量段
XQ66	12	971.76	0.202	0.804 6	-4.0×10^{-6}	0.993 8	0.061 4	0.001 1	-0.35	低流量段

注: 空白处缺相应数据; 相对滑脱程度为回归直线截距占最大流量的百分比。

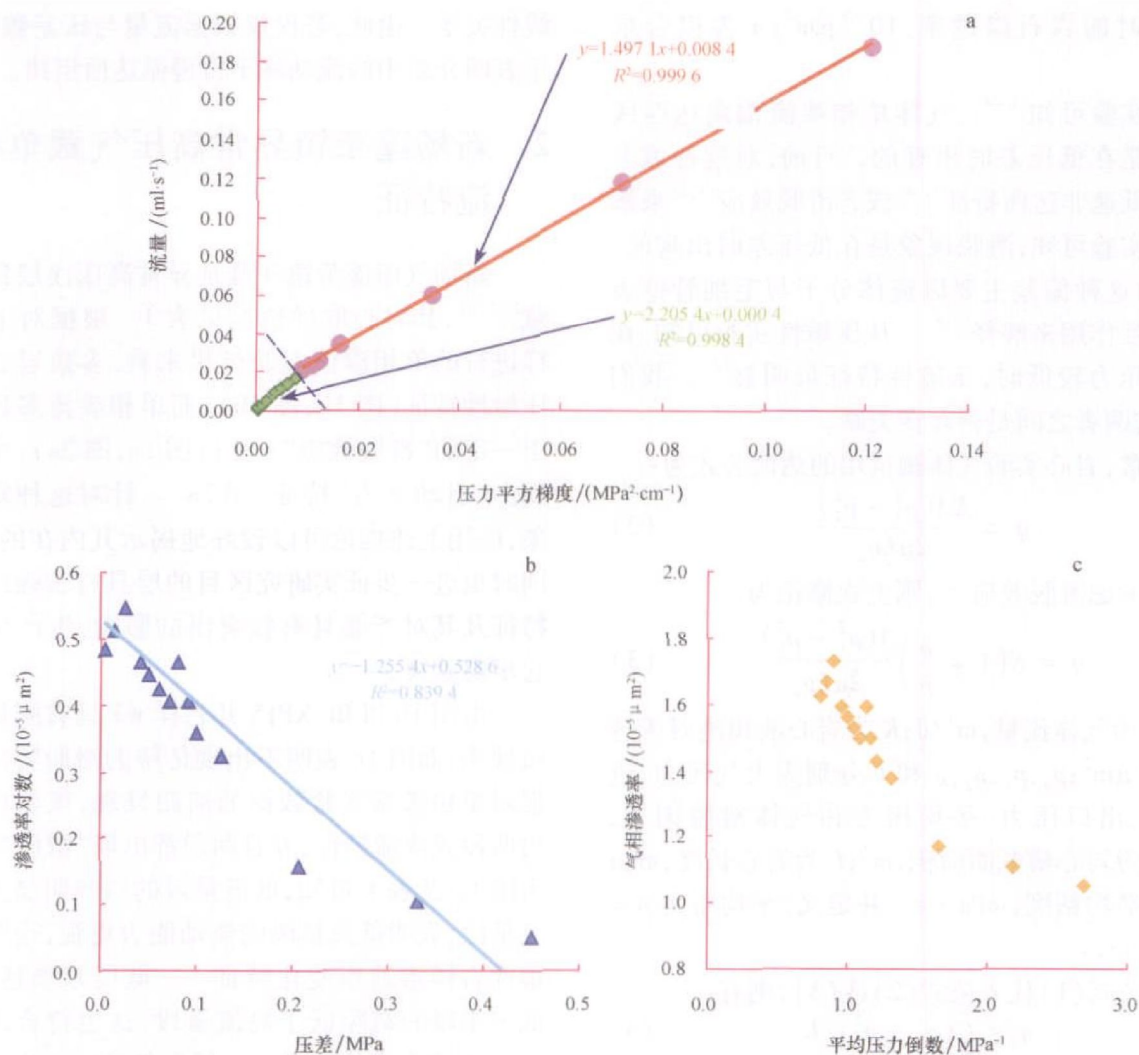


图 1 XP15井岩样 w3的单相渗流实验曲线

Fig. 1 Laboratory curves of gas single-phase percolation for core sample w3 from well XP15

由图 2b可知, XQ66井岩样 12也具有明显的压敏规律; 而图 2c也表明其不出现传统的滑脱特征。根据对单相渗流实验数据的回归发现, 该岩样也表现出两段式渗流特征, 并且两段出现明显差异的“滑脱”现象。由图 2a及表 1可知, 低流量段的斜率明显大于高流量段, 表明低流量段的流动能力更强, 这符合压敏性岩样渗透率变化特征——低压差渗透率大; 低流量段的截距呈现出负值, 似乎表明该岩样又存在“启动压力”现象, 若将该负“滑脱量”折算成启动压力梯度, 则高达 0.099 MPa/m, 超出文献 [11]报道的范围。由此可见, 该岩样的单相渗流出现的复杂特征很可能也是由于渗透率的压敏特征所造成的。

对表 1数据的进一步分析表明, 上述“滑脱”现象的相对滑脱程度与测试阶段的最大渗透率成负相关性, 并且多数是低流量段高于高流量段。

这也间接表现出压敏性岩样渗透率在低压差时变化程度大的特点。

在实验中发现, 拟合系数 a 的范围为 0.3~1.9, 随着降压, 渗透率降低了约 10%~80%, 降低程度与初始渗透率有关, 即初始渗透率高的样品, 渗透率降低越低。这与文献 [12]对致密油藏的认识基本一致。

3 结论与建议

综上所述, 气藏常规实验测试出现的“滑脱”现象或“启动压力”特征很可能是由于岩石的压敏性特征所引起的。实验数据进一步表明, 这种由于压敏性特征而产生的非达西特征有可能与常规出现的非达西特征相混淆, 其规模甚至可能相当。因此, 通过室内实验测试“滑脱”效应或“启动压力”

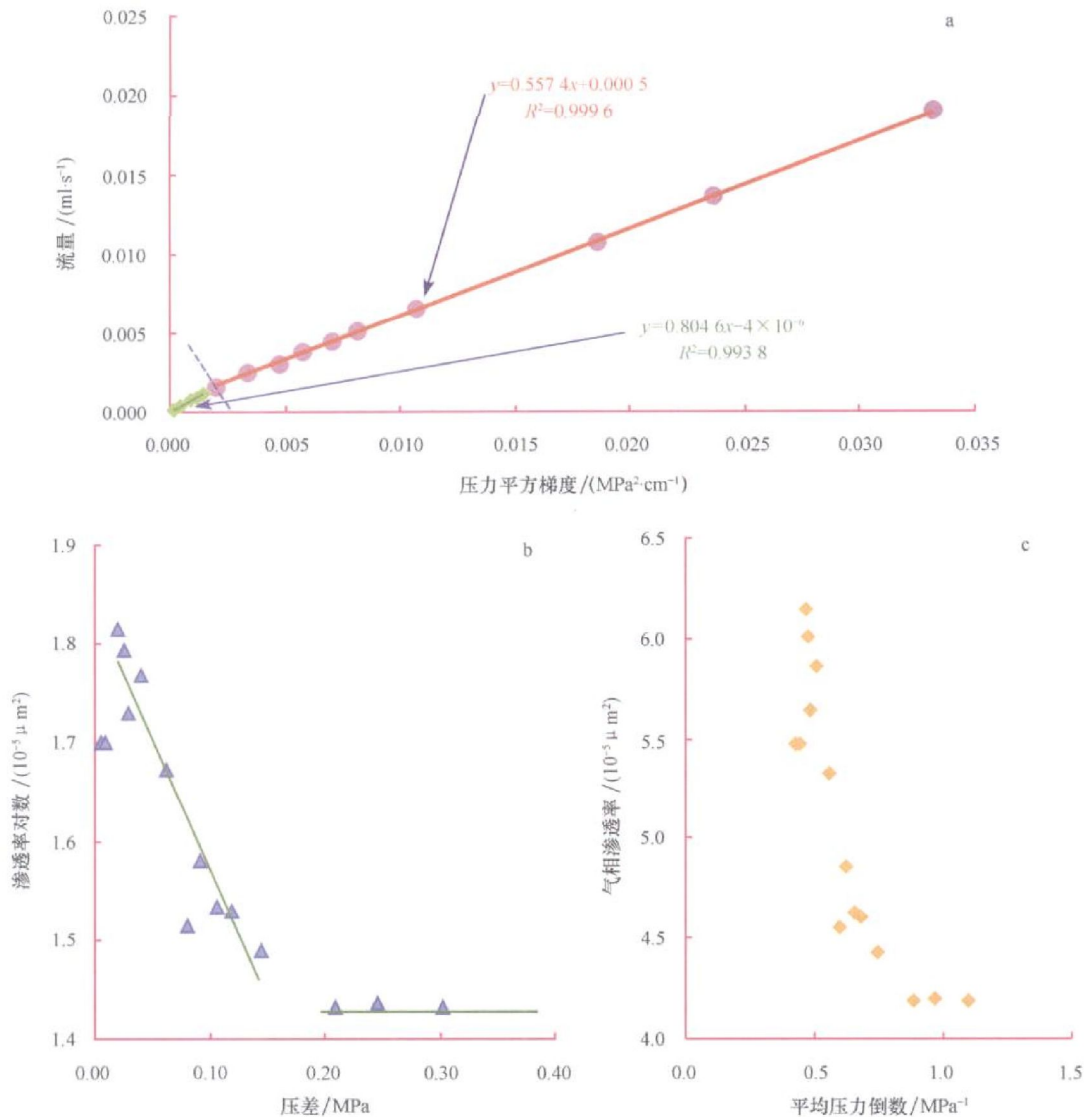


图 2 XQ66井岩样 12 的单相渗流实验曲线

Fig. 2 Laboratory curves of gas single-phase percolation for core sample 12 from well XQ66

特征时,应重视岩心压敏性特征的影响,特别是那些含有明显裂缝或微裂缝的岩心。建议在实验时,应首先排除这种可能的影响。

实验结果表明,新场蓬莱镇组气层压敏特征明显,拟合系数 a 的范围为 0.3~1.9 渗透率降低幅度约为 10%~80%。建议在此类气藏的试气或开采前进行加砂压裂,以降低生产压差、提高气量。

参 考 文 献

- 1 王勇杰,王昌杰,高家碧.低渗透多孔介质中气体滑脱行为研究[J].石油学报,1995,16(3):101~105
- 2 陈代询,王章瑞,高家碧.气体滑脱现象的综合特征参数研究[J].天然气工业,2003,23(4):65~67
- 3 吴凡,孙黎娟,乔国安,等.气体渗流特征及启动压力规律的研究[J].天然气工业,2001,21(1):82~84
- 4 王昔彬,刘传喜,郑荣臣.大牛地致密低渗气藏启动压力梯度

及应用[J].石油与天然气地质,2005,26(5):698~702

- 5 杨宇.应力敏感性伤害对双重介质砂岩气藏高效开发的影响[J].天然气工业,2000,20(4):99~100
- 6 高旺来.克拉 2 异常高压气藏开采压力变化对储层物性的影响[J].特种油气藏,2002,9(4):69~71
- 7 谈士海,韦建伟.苏北盆地 T 油田碳酸盐岩储层压力敏感性研究[J].石油实验地质,2006,28(1):91~94
- 8 汤勇,孙雷,李士伦,等.新场气田蓬莱镇组气藏增压开采数值模拟研究[J].天然气工业,2004,24(8):69~71
- 9 王昔彬,刘传喜,郑祥克,等.低渗特低渗气藏剩余气分布的描述[J].石油与天然气地质,2003,24(4):401~403
- 10 魏力民,柳梅青.川西新场蓬莱镇组层序地层研究与储层横向预测[J].石油与天然气地质,2000,21(3):220~225
- 11 薛芸,石京平,贺承祖.低速非达西流动机理分析[J].石油勘探与开发,2001,28(5):102~104
- 12 王秀娟,赵永胜,文武,等.渗透储层应力敏感性与产能物性下限[J].石油与天然气地质,2003,24(2):162~165

(编辑 李 军)