

文章编号: 1001-6112(2003)05-0498-03

# 裂缝—孔隙型双重介质应力 敏感模拟试验研究

向阳, 向丹, 黄大志

(成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:** 在上覆压力 75MPa、地层温度 120℃、地层压力 30MPa 和水饱和度下的全直径全模拟降压开采试验揭示了裂缝—孔隙型双重介质由于生产压差的增大所导致有效上覆压力的增加而使裂缝高度减小所造成的地层气相渗透率的损害规律: 渗透率越高, 渗透率的损害越大。在此基础上, 作者提出了不同类型储层的临界生产压差。

**关键词:** 渗透率损害; 临界生产压差; 裂缝—孔隙型双重介质; 全模拟试验

**中图分类号:** TE135

**文献标识码:** A

裂缝—孔隙型双重介质是构成油气储集岩的主要储渗介质之一。在油气田的开发中, 往往采取降低井底流压、增大生产压差的方法来提高单井产量。由于井底流压的降低, 必然使近井壁地带的孔隙压力降低, 从而导致产层有效上覆压力的增大而使裂缝高度减小。过高的生产压差, 甚至产生裂缝闭合, 增大了油气在近井壁地带的渗流阻力, 导致产量降低, 这种现象被称为储层的应力敏感效应<sup>[1]</sup>。

迄今, 有关的研究都是在常温变应力的条件下用逐点测定岩石渗透率的方法来评价, 因模拟条件不够, 所获得的结果不能完全反映地层情况。本文介绍了模拟有效上覆压力、地层温度、地层压力和地层水饱和度时, 裂缝—孔隙型双重介质在模拟逐渐降低的井底流压时所导致有效上覆压力增加而对储层渗透率所造成的影响。这为油气田的开发提供了敏感的临界生产压差<sup>[2]</sup>。

## 1 试验样品

试验岩心全部取自井深 3 600m 的地层。为了使模拟试验更接近地层实际, 样品全部采用  $\phi 105\text{mm} \times 120\text{mm}$  的全直径岩心, 并且样品发育有数量不等的裂缝。

岩心为微晶白云和细晶粉白云岩, 普遍发育次生溶孔, 部分样品发育了溶洞, 多数样品发育了溶蚀

缝和破裂缝, 孔隙度为 3%~14%, 水平渗透率为  $(0.5 \sim 135) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 垂直渗透率为  $(0.3 \sim 230) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

根据物性和孔隙结构特征将储层划分为 3 类<sup>[3]</sup> I 类储层粒间溶孔发育, 晶间孔含量少, 溶蚀缝和破裂缝以及网状微裂隙发育, 个别斜交缝高度可达 0.5~0.8mm; II 类储层以细小溶孔和晶间孔为主, 连通孔隙的渗流通道主要为片状和网状微裂隙, 储渗性相对较差; III 类储层岩性致密, 基质可见晶间微孔, 镜下可见细而短的微裂隙, 但对改善流体渗流能力作用极其微弱, 此类储层产能极低。

## 2 试验设备

试验设备是由作者独立研制并具有独立知识产权的 WS-2100 全岩心全模拟联合测试系统<sup>[4]</sup>。系统可在上覆压力 160MPa、孔隙压力 70MPa 和温度 250℃ 的试验条件下, 模拟岩心物性分析测试一维水平、垂直方向上的两相流体渗流, 模拟水驱油、气和有、无底水弹性驱油(气)以及三次采油等进行多项分析测试, 并在该系统上成功地完成了 5 个大型项目的相关岩心分析试验任务, 取得了预期的良好效果。系统由高温高压全直径岩心室、全数字温度和压力自动控制 and 检测系统、注入和产出气、液冷凝和流量计量系统等部分组成。

收稿日期: 2002-01-25, 修订日期: 2003-06-25.

基金项目: 国家重点实验室基金重点资助项目(PLC9916).

作者简介: 向阳(1941—), 男(汉族), 重庆市开县人, 教授, 主要从事油气田开发及油气储层保护技术领域的教学和科学研究工作.

表 1 全模拟试验不同有效应力下的气相渗透率数据表

Table 1 Data of gas permeability under different effective stress in the full simulation experiment

样品号	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	水饱 和度/ %	有效上覆应力下的渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$												
			渗透率变化/%												
			压差/MPa												
			45.2	45.4	45.55	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55
B232	122.331	26.18	$\frac{40.237}{-}$	$\frac{35.011}{-12.99}$	$\frac{31.975}{-20.53}$	$\frac{28.214}{-29.88}$	$\frac{21.507}{-46.55}$	$\frac{18.079}{-55.07}$	$\frac{15.897}{-60.49}$	$\frac{14.512}{-63.93}$	$\frac{13.744}{-65.84}$	$\frac{13.179}{-67.25}$	$\frac{12.516}{-68.89}$	$\frac{11.864}{-70.51}$	$\frac{11.525}{-71.36}$
B217	61.179	31.09	$\frac{7.961}{-}$	$\frac{6.824}{-14.28}$	$\frac{6.182}{-22.35}$	$\frac{5.347}{-32.84}$	$\frac{4.072}{-48.85}$	$\frac{3.449}{-56.68}$	$\frac{3.182}{-60.03}$	$\frac{3.026}{-61.99}$	$\frac{2.855}{-64.14}$	$\frac{2.739}{-65.59}$	$\frac{2.642}{-66.81}$	$\frac{2.546}{-68.02}$	$\frac{2.507}{-68.51}$
B224	57.293	33.44	$\frac{4.151}{-}$	$\frac{3.468}{-16.45}$	$\frac{3.221}{-22.40}$	$\frac{2.907}{-29.97}$	$\frac{2.347}{-43.46}$	$\frac{2.054}{-50.52}$	$\frac{1.883}{-54.64}$	$\frac{1.796}{-56.73}$	$\frac{1.729}{-58.35}$	$\frac{1.691}{-59.26}$	$\frac{1.682}{-59.48}$	$\frac{1.657}{-60.08}$	$\frac{1.609}{-61.24}$
B220	15.476	30.82	$\frac{3.785}{-}$	$\frac{3.237}{-14.48}$	$\frac{3.069}{-18.92}$	$\frac{2.844}{-24.86}$	$\frac{2.279}{-39.79}$	$\frac{2.048}{-45.89}$	$\frac{1.982}{-47.64}$	$\frac{1.895}{-49.93}$	$\frac{1.822}{-51.86}$	$\frac{1.745}{-53.90}$	$\frac{1.719}{-54.58}$	$\frac{1.701}{-55.06}$	$\frac{1.689}{-55.38}$
B223	10.065	37.66	$\frac{2.812}{-}$	$\frac{2.675}{-4.87}$	$\frac{2.558}{-9.03}$	$\frac{2.376}{-15.50}$	$\frac{2.099}{-25.36}$	$\frac{1.942}{-30.94}$	$\frac{1.891}{-32.75}$	$\frac{1.822}{-35.21}$	$\frac{1.801}{-35.95}$	$\frac{1.772}{-36.98}$	$\frac{1.753}{-37.66}$	$\frac{1.724}{-38.69}$	$\frac{1.708}{-39.26}$
B225	3.414	40.57	$\frac{1.125}{-}$	$\frac{1.081}{-3.91}$	$\frac{1.015}{-9.78}$	$\frac{0.972}{-13.60}$	$\frac{0.904}{-19.64}$	$\frac{0.862}{-23.38}$	$\frac{0.838}{-25.51}$	$\frac{0.819}{-27.20}$	$\frac{0.804}{-28.53}$	$\frac{0.799}{-28.98}$	$\frac{0.788}{-29.95}$	$\frac{0.771}{-31.47}$	$\frac{0.764}{-32.09}$
B226	2.217	44.65	$\frac{1.189}{-}$	$\frac{1.108}{-6.81}$	$\frac{1.060}{-10.09}$	$\frac{0.963}{-19.01}$	$\frac{0.879}{-26.07}$	$\frac{0.825}{-30.81}$	$\frac{0.784}{-34.06}$	$\frac{0.773}{-34.99}$	$\frac{0.757}{-36.33}$	$\frac{0.746}{-37.26}$	$\frac{0.731}{-38.52}$	$\frac{0.717}{-39.70}$	$\frac{0.697}{-41.38}$
B218	1.695	47.46	$\frac{0.191}{-}$	$\frac{0.187}{-2.09}$	$\frac{0.185}{-3.14}$	$\frac{0.188}{-1.57}$	$\frac{0.185}{-3.14}$	$\frac{0.189}{-1.05}$	$\frac{0.185}{-3.14}$	$\frac{0.190}{-0.52}$	$\frac{0.186}{-2.62}$	$\frac{0.188}{-1.57}$	$\frac{0.189}{-1.05}$	$\frac{0.191}{0}$	$\frac{0.188}{-1.57}$
B219	0.514	50.77	$\frac{0.031}{-}$	$\frac{0.030}{-3.23}$	$\frac{0.032}{-3.23}$	$\frac{0.030}{-3.23}$	$\frac{0.031}{0}$	$\frac{0.031}{0}$	$\frac{0.032}{-3.23}$	$\frac{0.031}{0}$	$\frac{0.032}{-3.23}$	$\frac{0.032}{-3.23}$	$\frac{0.030}{-3.23}$	$\frac{0.031}{0}$	$\frac{0.032}{-3.23}$
B221	1.517	46.23	$\frac{0.027}{-}$	$\frac{0.027}{0}$	$\frac{0.028}{-3.70}$	$\frac{0.029}{-7.41}$	$\frac{0.026}{-3.70}$	$\frac{0.027}{0}$	$\frac{0.028}{-3.70}$	$\frac{0.029}{-7.41}$	$\frac{0.028}{-3.70}$	$\frac{0.029}{-7.41}$	$\frac{0.027}{0}$	$\frac{0.028}{-3.70}$	$\frac{0.027}{0}$

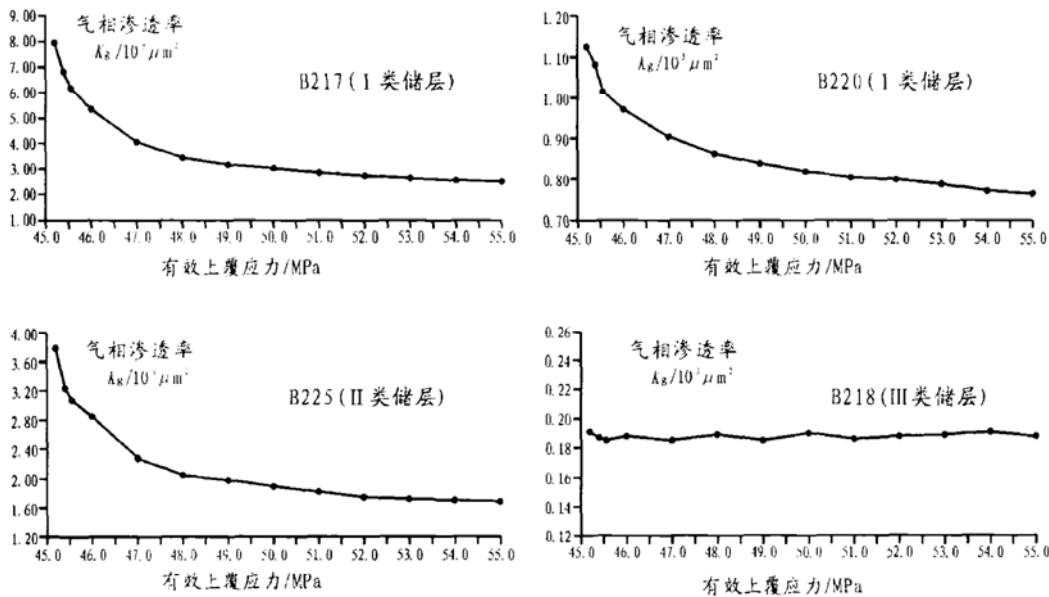


图 1 气相渗透率随温度、压力变化曲线

Fig. 1 Curves of gas permeability changing with temperature and pressure

### 3 试验程序

已烘干的岩心预先抽空饱和模拟地层水,用隔板法模拟临界水饱和度后放入岩心室密封。系统升温(120℃),岩心饱和 30MPa 的高压气体(模拟气田开

发),同时提高上覆压力至 75MPa,维持上述条件至系统压力、温度达到平衡。为了保持恒定的流动压差,岩心水平方向入口将始终维持 30MPa 的孔隙压力,控制出口回压阀,以保证在设定的压差下测定气体流量,然后分别计算渗透率。

## 4 模拟试验结果

部分岩心在模拟不同生产压差下所测得的渗透率见表 1, 典型岩心的渗透率随有效上覆压力的变化曲线见图 1。

由图表可以看出:

a) 地表渗透率大于  $15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的 4 块样品, 随有效上覆压力的增加, 地层气相渗透率降幅在 13%~71% 之间。

b) 地表渗透率在  $2 \times 10^{-3} \sim 15 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  时, 随有效上覆压力的增加, 地层气相渗透率降幅在 4%~40% 之间。

c) 有效上覆压力在 45.2~49MPa 范围内, 渗透率的降幅最大, I 类储层降幅为 13%~60%, II 类储层降幅则在 4%~30% 之间; 有效上覆压力在 49MPa 以后, 渗透率降幅明显减小, 最终趋于稳定。

d) 地表渗透率小于  $2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  时, 随有效上覆压力的增加, 渗透率降幅在 3%~7% 左右, 而且上下波动, 变化无规律, 这可能是低渗样品的测试误差所造成的。

## 5 裂缝—孔隙型双重介质应力敏感机理

1976 年 Dabbous 和 Rezenik 提出流体在裂缝系统中流动时计算裂缝高度的数学模型是<sup>[5]</sup>:

$$W^3 = 12 \times 10^{-8} Q \mu L / h \Delta P \quad (1)$$

当流体在上述裂缝系统中流动时, 同样遵循达西定律:

$$K = Q \mu L / A \Delta P \quad (2)$$

(1) 式和 (2) 式将流量等同起来并通过整理后得到:

$$K = 10^{11} W^3 h / 12 A$$

式中:  $W$  为裂缝高度, cm;

$Q$  为流体流量,  $\text{cm}^3/\text{s}$ ;

$\mu$  为流体粘度,  $\text{mP} \cdot \text{s}$ ;

$L$  为多孔介质长度, cm;

$h$  为裂缝面的宽度, cm;

$A$  为多孔介质横截面积,  $\text{cm}^2$ ;

$K$  为渗透率,  $10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

裂缝渗透率的计算公式表明, 流体在裂缝介质中的渗流能力与裂缝高度的三次方呈正比例关系。即是说, 当裂缝性介质在外加应力的作用下, 裂缝高度

稍有减小时, 裂缝介质的渗透率则呈现大幅度的降低; 相反, 当介质不含有裂缝时, 外加应力则作用在基质颗粒已紧密接触的基质上, 应力使孔隙介质弹性压缩的量也就极小, 从而对基质渗透率的降低的影响也越小, 表现出渗透率的降幅也越小。

综上所述, 任何导致裂缝—孔隙型介质的外部应力增加都将造成地层岩石中流体渗流阻力的增大而使储层渗透率产生敏感而降低。因此, 在裂缝性储层, 特别是致密低渗透裂缝储层油气田的开发中, 应充分考虑不合理的大压差生产所导致的裂缝高度减小甚至闭合而对地层渗透率所造成的损害。

## 6 保护裂缝性储层的合理生产压差

根据渗透率降低 5% 的敏感性评价标准, 对上述样品中的 I 类储层, 临界生产压差应小于 0.4MPa; II 类储层的临界生产压差应控制在 0.55MPa 范围内; 而 III 类储层, 裂缝极不发育, 流体通过基质孔隙系统渗流, 生产压差可适当放大, 但也不宜超过 10MPa。

## 7 结论

a) 裂缝—孔隙型双重介质全模拟试验揭示了随生产压差的增大(有效上覆压力增加)岩石渗透率产生敏感的变化规律, 敏感的机理是外加应力使裂缝高度减小所引起的。

b) 从保护裂缝性储层的角度出发, 其临界生产压差应控制在 0.55MPa 范围内, 而非裂缝致密储层的生产压差可适当放大, 但也不宜超过 10MPa, 但应防止因流速过快而使孔隙介质中微粒迁移而使渗透率产生速敏, 特别是碎屑岩储层则更应小心。

c) 模拟试验提醒生产的管理者和决策者, 不能片面地追求一时的高产而忽视了对地层的损害, 因为渗透率的损害是无法恢复的, 否则将增加投资用于储层的改造或者打加密井。

### 参考文献:

- [1] 杨川东. 采气工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997. 88—90.
- [2] 葛家理, 等. 复杂渗流系统的应用与实验流体力学[M]. 北京: 石油大学出版社, 1998. 27.
- [3] 罗登谭, 王允诚. 油气储集层的孔隙结构[M]. 北京: 科学出版社, 1986. 201.
- [4] 向阳. 油气储集层岩石特殊物理研究方法[M]. 成都: 四川科技出版社, 1994. 92—108.
- [5] Van Golf-Racht T D. Fundamentals of fractured reservoir engineering[M]. Paris, 1981. 114—115.

(下转第 504 页)

**Abstract:** The research of automatic modelling on three-dimension (3D) digital stratigraphic framework is a preliminary approach to the 3D automatic modelling of geologic bodies. Based on boring data, the automatic modelling was divided into two processes independent each other in the perpendicular and parallel directions of stratigraphic interfaces by numerical and non-numerical calculation such as digitization, trigonometric division and stratigraphic correlation. At first, linear interpolation was used to model stratigraphic framework cells automatically. Then, the models of framework cells were conformed according to numerical relations among them so as to form stratigraphic framework bodies.

**Key words:** framework cell; automatic modelling; 3D digital stratigraphic framework; boring data

~~~~~  
(上接第 500 页)

## STUDY ON THE STRESS SENSITIVITY OF PERMEABILITY IN FRACTURE-PORE DUAL MEDIA BY THE FULL SIMULATION EXPERIMENT

XIANG Yang, XIANG Dan, HUANG Da-zhi

*(Study Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University  
of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)*

**Abstract:** The holodiameter full-simulation blow-down exploitation experiment was done under the conditions of 75MPa of overburden pressure, 120°C of formation temperature, 30MPa of formation pressure and water saturability. The results revealed that in fracture-pore dual media, the increase of production pressure drop resulted in the increase of effective overburden pressure and the decrease of fracture height, which caused the damage of gas permeability in reservoirs. It was showed that the higher the permeability was, the greater the damage of permeability was. On this basis, the critical production pressure drops for different types of reservoirs were suggested.

**Key words:** permeability damage; critical production pressure drop; fracture-pore dual medium; full simulation experiment