

地层压力保持水平对低渗透油藏渗透率的影响

刘 丽 房会春 顾辉亮

(中国石化胜利油田分公司 地质科学研究院, 山东 东营 257015)

摘 要:低渗透油藏岩性致密、渗流阻力大、压力传导能力差,地层压力下降会对渗透率造成部分不可逆伤害而影响油井产能。通过室内流动试验模拟地层压力的升降过程,基于原始地层压力下的油藏渗透率,研究了不同地层压力保持水平下渗透率的保留程度;借助压汞、核磁共振、岩石力学等试验手段,对地层压力升降过程中渗透率的变化机理进行了分析。认识到地层压力下降对渗透率的伤害程度取决于岩石的初始渗透率、地层压力初次回升时机和地层压力升降次数等三个主要因素;明确了岩石的弹塑性变形是导致孔喉平均半径减小、渗透率下降的根本原因,其中塑性变形是造成渗透率不能完全恢复的主因;提出了岩石初始渗透率越低,越应及早注水保持地层压力开采的观点。

关键词:低渗透油气藏; 渗透率; 地层压力; 孔隙喉道半径; 岩石变形; 弹性模量

中图分类号:TE348 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2011)02-0104-04

The Impact of Formation Pressure Maintenance on Permeability in Low Permeability Reservoirs

Liu Li Fang Huichun Gu Huiliang

(Geological Scientific Research Institute, Shengli Oilfield Company, Sinopec, Dongying, Shandong, 257015, China)

Abstract: In low permeability reservoirs, reservoir pressure decline would induce irreversible damages to formation permeability and reduce well productivity. Permeability at different reservoir pressure was studied using experimental study. Through mercury-injection test, nuclear magnetic resonance spectrometry analysis and rock mechanics test, the mechanism of permeability change in reservoir pressure fluctuation was analyzed. The degree of rock permeability reduction depends on its initial permeability, pressure rebound time and cycles of pressure up and down. The results demonstrated that the reduction of pore throat from rock deformation is the key factor of rock permeability reduction. Permeability can't be completely recovered due to plastic deformation. So we suggest that the lower the initial rock permeability, the earlier the waterflooding time.

Key words: low permeability reservoir; permeability; formation pressure; pore throat radius; rock deformation; module of elasticity

生产实践表明,低渗透油田投产后,若能量补充不及时,地层压力大幅度下降,会引起油井产量的迅速递减,以后即使采用注水、注气等方式恢复地层压力,油井产量也难以恢复^[1-3]。大部分国内外学者和研究人员都认为,地层压力的下降和上升,会造成岩石承受的净上覆压力的变化,使低渗透油藏岩石的渗透率受到伤害而影响其产能^[4-10]。但前人的研究成果评价的都是地面渗透率随净上覆压力变化的规律,没有考虑地层压力下降对地层条件下渗透率的影响,不能有效指导低渗透油藏的水驱开发。为此,笔者采用胜利油田某低渗透油藏的天然岩心,通过室内试验模拟地层压力的升降过程,分析了地层压力保持水平与渗透率之间的关系,为高效开发低渗透油藏提供了理论依据。

1 试验方案设计

1.1 试验岩心

试验岩心全部为取自胜利油田滨 425 井的柱塞样品,样品除油除盐并在低于 65 °C 的温度下烘干,然后施加 1.2 MPa 的净上覆压力测定地面条件下

收稿日期:2010-03-23; 改回日期:2011-01-18

基金项目:中国石化胜利油田分公司项目“地层压力保持水平对低渗透油藏注水开发效果的影响研究”(编号:YKS0902)部分研究内容

作者简介:刘丽(1972—),女,河南温县人,1995年毕业于石油大学(华东)采油工程专业,2005年获中国石油大学(华东)油气井工程专业硕士学位,工程师,主要从事油气层渗流机理的实验研究工作。

联系方式:(0546)8715380, liuli-1972@163.com

的空气渗透率为 $(1\sim 50)\times 10^{-3}\ \mu\text{m}^2$, 肉眼观察试验岩心全部为基质孔隙岩心, 无明显裂缝存在。

1.2 试验流体

根据滨 425 井的地层水分析资料配制总矿化度为 16 000 mg/L 的 KCl 溶液作为饱和介质, 以保证岩心不发生水敏; 选择使用 $0.22\ \mu\text{m}$ 滤膜过滤后的中性煤油作为测定不同地层压力保持水平下渗透率的流动介质。

1.3 试验压力和温度

根据试验样品的埋藏深度(约 2 600 m)及岩石密度($2.3\ \text{kg/L}$), 计算得到施加的上覆压力为 60 MPa; 由油井压力测试资料获得滨 425 井的原始地层压力为 32 MPa; 由于该试验主要考察地层压力变化对岩心渗透率的影响, 因此试验在常温下进行, 试验温度保持在 $25\ ^\circ\text{C}$ 。

1.4 试验方法

1) 对柱塞样品抽真空饱和 KCl 溶液, 用煤油驱替建立束缚水饱和度;

2) 同时加上覆压力和孔隙压力, 分别加至 60 MPa 和 32 MPa, 测定束缚水饱和度下的油相渗透率;

3) 保持上覆压力 60 MPa 不变, 逐步改变孔隙压力, 模拟地层压力的升降过程, 测定不同孔隙压力下的油相渗透率;

4) 以原始地层压力 p_i 作为地层压力基值, 定义 p/p_i 为地层压力保持系数, 用来描述地层压力的保持水平; 以原始地层压力下的渗透率 K_i 作为渗透率基值, 定义 K/K_i 为渗透率保留系数, 用来描述渗透率的伤害程度; 绘制地层压力升降过程中的 $p/p_i - K/K_i$ 关系曲线。

2 试验结果分析

2.1 地层压力单次下降对渗透率的影响

2.1.1 地层压力单次下降过程中渗透率的变化规律

保持上覆压力不变, 逐步降低岩心孔隙压力, 使孔隙压力由原始地层压力单调降至 50% 的原始地层压力, 分别绘制了空气渗透率级别不同的 7 块岩心的 $p/p_i - K/K_i$ 关系曲线, 结果见图 1。

从图 1 可以观察到: 虽然岩心的渗透率级别不同, 但渗透率都呈现出随地层压力下降而减小的趋势。在地层压力保持水平较高的情况下, 随着地层压力的降低, 渗透率下降幅度较大, 但随着地层压力

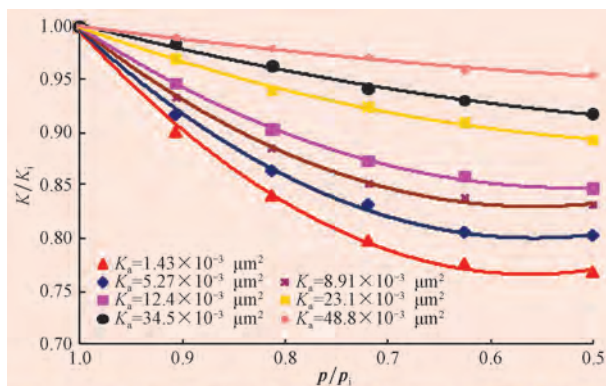


图1 地层压力保持系数与渗透率保留系数的关系曲线
Fig.1 The relationship of permeability retention factor with pressure maintenance factor

保持水平的下降, 继续降低地层压力则渗透率的下降幅度越来越小。

从图 1 还可观察到, 岩心的空气渗透率越低曲线的位置越靠下, 即在相同的地层压力保持系数下, 油藏岩石空气渗透率越低渗透率保留系数越小。这一现象表明, 对于低渗透油藏, 岩石渗透率越低, 地层压力下降对渗透率的伤害程度也越大。

2.1.2 地层压力单次下降过程中渗透率的变化机理

利用压汞试验测得了 7 组不同渗透率级别的岩心在地层压力下降前后岩石平均孔喉半径的变化规律, 结果见图 2。从图 2 可看出, 地层压力下降导致岩石的平均孔喉半径减小。由于岩石的渗透率与平均孔喉半径呈正相关^[4-8], 因此, 地层压力下降, 平均孔喉半径减小, 使岩石的渗透率也呈现下降趋势, 并且渗透率越低, 地层压力下降所导致的平均孔喉半径的降低幅度越大, 相应的渗透率降低幅度也越大。

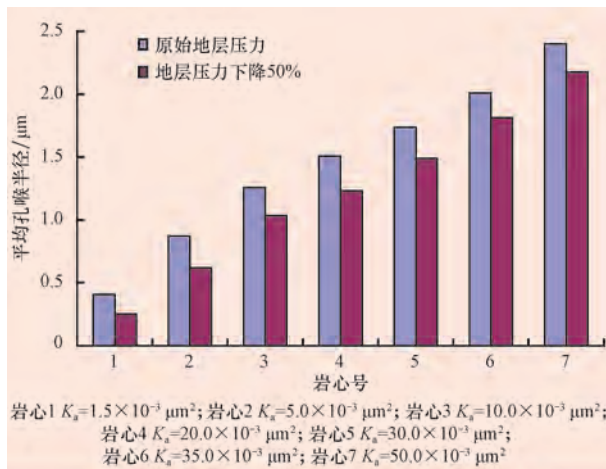


图2 地层压力下降前后平均孔喉半径对比

Fig.2 Mean pore throat radius before after pressure drop

对于不同渗透率的低渗透岩心分别进行核磁共振分析, 得到了岩心的核磁共振 T_2 谱图, 见图 3。

从图3可看出,岩心渗透率越低, T_2 谱图波峰对应的 T_2 值越小。由于 T_2 值与岩心孔喉半径正相关, 因此反映出渗透率越小, 小孔喉越多的趋势。而相对于大孔隙, 地层压力下降小孔喉容易闭合, 因此对于低渗透油藏, 渗透率越低, 随地层压力下降平均孔喉半径减小幅度越大, 渗透率降低幅度越大, 油藏受伤害程度也越大。

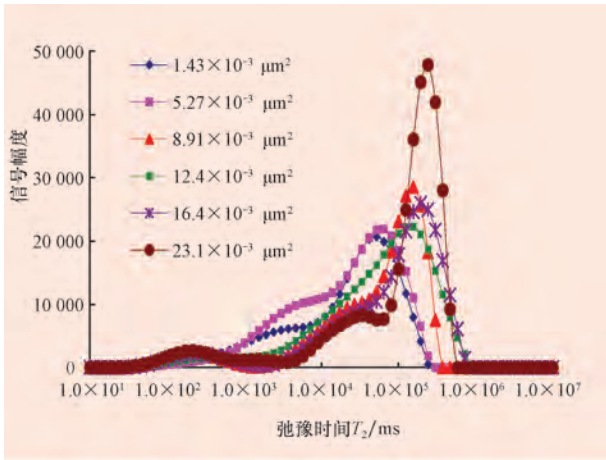


图3 岩心核磁共振测试 T_2 谱图
Fig.3 NMR T_2 spectrum for core plugs

2.2 地层压力多次升降对渗透率的影响

2.2.1 地层压力多次升降过程中渗透率的变化规律

保持上覆压力不变, 先将孔隙压力由原始地层压力 p_i 降至某一压力 p_1 , 再回升至原始地层压力 p_i , 然后再降低至更低压力 p_2 ($p_2 < p_1$), 再回升到原始地层压力 p_i , 依此类推最后将孔隙压力下降至原始地层压力的 50% 再回升至原始地层压力, 模拟地层压力的多次下降过程, 以地层压力两次升降为例, 绘制 $p/p_i - K/K_i$ 关系曲线, 见图 4。

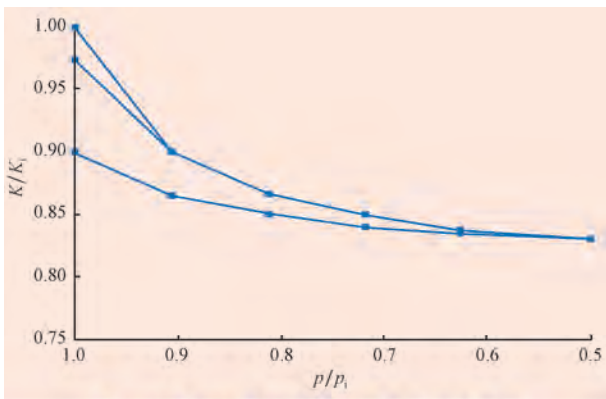


图4 地层压力保持系数与渗透率保留系数
Fig.4 The relationship of permeability retention factor with pressure maintenance factor

由图 4 可知, 在地层压力的初次升降过程中, 当

地层压力保持系数由 1.00 单调降至 0.90 时, 渗透率保留系数随着地层压力的下降而下降, 由 1.00 降至为 0.90; 然后地层压力保持系数由 0.90 回升至 1.00, 渗透率保留系数只能恢复到 0.97。在地层压力的二次升降过程中, 当地层压力保持系数由 1.00 降至 0.90 时, 渗透率保留系数沿着与初次回升相同的轨迹由 0.97 降至 0.90, 继续降低地层压力至地层压力保持系数为 0.50, 渗透率保留系数由 0.90 降至 0.83, 然后地层压力保持系数由 0.5 回升至 1.00, 渗透率保留系数只能恢复到 0.90。

2.2.2 地层压力初次回升时机和升降次数对渗透率的影响

选择地层压力由下降开始初次回升时对应的地层压力保持系数来表示地层压力初次回升时机, 对应的地层压力保持系数越大, 地层压力初次回升时机越早。保持地层压力升降次数相同, 考虑了 5 种不同的地层压力初次回升时机, 绘制了同一地层压力保持水平下渗透率保留系数与地层压力回升时机的关系曲线, 见图 5。由图 5 可看出, 地层压力初次回升时机越晚, 相同地层压力保持水平下的渗透率保留系数越小, 油藏受伤害程度越大。

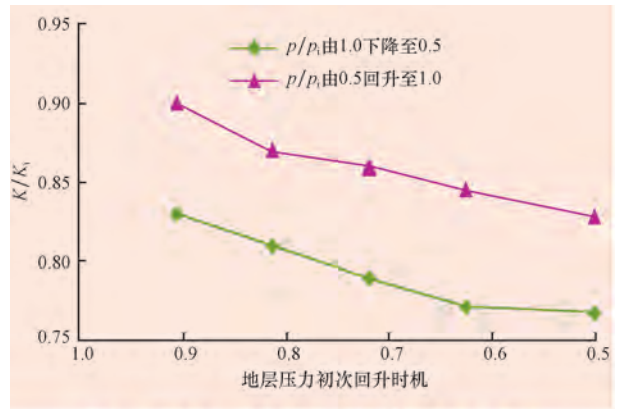


图5 地层压力初次回升时机对渗透率的影响
Fig.5 Impact of initial pressure rebound time on rock permeability

保持地层压力初次回升时机相同, 考虑了 5 种不同的地层压力升降次数, 绘制了同一地层压力保持水平下, 地层压力升降次数与渗透率保留系数的关系曲线, 见图 6。从图 6 可看出, 地层压力升降次数越少, 在相同地层压力保持水平下的渗透率保留系数越小, 油藏受伤害程度越大。

2.2.3 地层压力多次升降过程中渗透率的变化机理

随着地层压力的下降, 岩石承受的有效上覆压力增加, 岩石产生变形, 其中一部分为弹性变形, 一

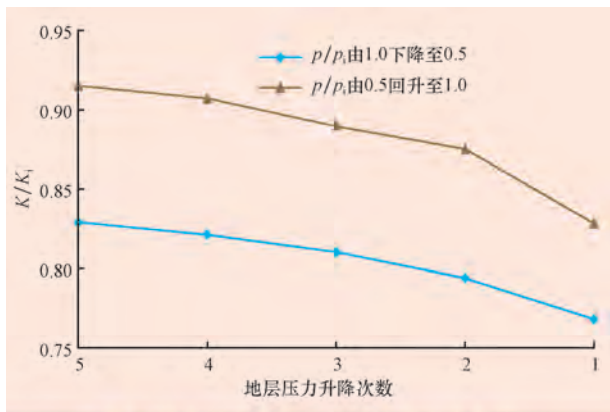


图6 地层压力升降次数对渗透率的影响

Fig.6 Impact of numbers of pressuring and de-pressuring cycle on rock permeability

部分为塑性变形,变形导致岩石的孔喉缩小和闭合,造成渗透率下降;当地层压力开始回升时,岩石承受的有效上覆压力减小,岩石的弹性变形消失,使孔喉扩大和张开,渗透率由下降开始升高,但由于塑性变形无法消失,因此即使地层压力回升至原始地层压力,岩石的渗透率也不能恢复到初始渗透率。岩石杨氏模量的大小反映了岩石抵抗变形能力的强弱,杨氏模量越大,则岩石抵抗变形的能力越强。而杨氏模量在数值上与应力应变曲线的斜率值相等,因此岩石应力应变曲线斜率的大小就反映了岩石变形程度的难易。比较地层压力单次下降和多次升降过程中岩石的应力应变曲线(见图7),发现多次升降曲线的斜率有增大的趋势。可见地层压力的多次升降,可以提高岩石的杨氏模量,增强岩石抵抗变形的能力,因此地层压力下降相同幅度,多次升降对油藏的伤害程度小于单次下降。

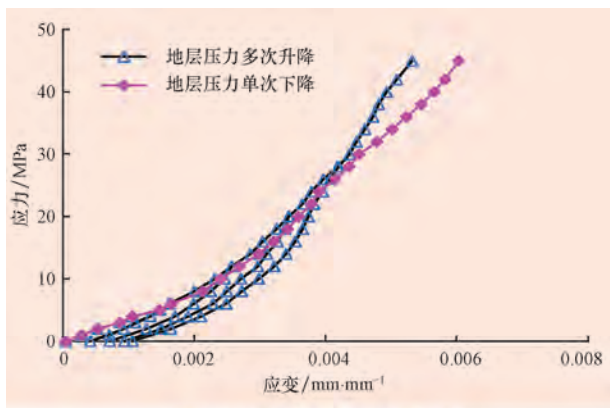


图7 岩石的应力应变曲线

Fig.7 Rock stress-strain curves

3 结 论

1) 地层压力单次下降过程中渗透率保留系数

随地层压力保持系数减小而减小,但减小幅度呈减小趋势。

2) 同一地层压力保持水平下,岩石的空气渗透率越低,小孔喉对渗透率的贡献越大,渗透率保留系数越小。随着地层压力下降,渗透率越低,储层受伤程度越大。建议低渗透油藏应该保持地层压力开采。

3) 相同地层压力保持水平下,地层压力回升时机越早,升降次数越多,渗透率保留系数越大。建议低渗透油藏应及早补充地层能量进行开采,控制地层压力下降幅度,避免降幅过大而对储层造成严重伤害。

4) 地层压力下降岩石发生弹性和塑性变形,导致孔喉平均半径减小是渗透率下降的根本原因,其中塑性变形是造成地层压力回升后渗透率不能完全恢复的主因。

5) 在相同地层压力保持水平下,地层压力多次升降,可以提高岩石的杨氏模量,增强岩石抵抗变形的能力,故多次升降对渗透率的伤害程度小于单次下降。

参 考 文 献

- [1] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京:石油工业出版社, 1997:105-110.
Li Daopin. The development of the low permeability sandstone oil field[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997:105-110.
- [2] 王端平, 时佃海, 李相远, 等. 低渗透砂岩油藏开发主要矛盾机理及合理井距分析[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 87-89.
Wang Duanping, Shi Dianhai, Li Xiangyuan, et al. The main challenges and the reasonable well spacing for the development of low-permeability sandstone reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(1): 87-89.
- [3] 张兴焰, 闫志军, 李淑梅, 等. 压敏效应对文东异常高压低渗透油田开发的影响[J]. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(2): 55-56.
Zhang Xingyan, Yan Zhijun, Li Shumei, et al. Influence of pressure-sensitive effects upon development of Wendong low-permeability oilfield with abnormal high pressure[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2005, 24(2): 55-56.
- [4] 郑浩, 马春华. 基于正交试验法的低渗透油藏超前注水影响因素分析[J]. 石油钻探技术, 2007, 35(5): 90-93.
Zheng Hao, Ma Chunhua. Analysis of factors affecting advance water injection in low-permeability reservoir by orthogonal experiment method[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(5): 90-93.
- [5] 王道富, 李忠兴, 赵继勇, 等. 低渗透油藏超前注水理论及其应用[J]. 石油学报, 2007, 28(6): 78-81, 86.
Wang DaoFu, Li Zhongxing, Zhao Jiyong, et al. Advance waterflooding theory for low-permeability reservoirs and its application [J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(6): 78-81, 86.
- [6] Lorenz J C. Stress-sensitive reservoirs[R]. SPE 50977, 1999.
- [7] Farquhar R A, Smart B G D, Todd A C, et al. Stress sensitivity of low-permeability sandstones from the Rotliegendes sandstone[R]. SPE 26501, 2001.
- [8] Davies J P, Davies D K. Stress-dependent permeability, characterization and modeling[R]. SPE 71750, 2001.
- [9] Lei Qun, Xiong Wei, Yuan Jiangru, et al. Analysis of stress sensitivity and its influence on oil production from tight reservoirs[R]. SPE 111148, 2007.
- [10] Rosalind Archer. Impact of stress sensitive permeability on production data analysis[R]. SPE 114116, 2008.