

文章编号:1000-7393(2007)01-0069-03

# 低渗透砂岩储层压力敏感性对开采速度的影响

张风义<sup>1</sup> 岳湘安<sup>1</sup> 庞宏伟<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学石油工程教育部重点实验室,北京 102249; 2. 中国石油天然气勘探开发公司,北京 100034)

**摘要:**采用一套系统的模拟地层上覆压力、模拟油藏原始状态的加压方式及加压后物性平衡时间确定的实验方法,进行低渗透砂岩压力敏感性对开采速度的影响实验研究。通过模拟油田实际开采中压力变化过程,对比研究急速改变有效应力与慢速改变有效压力对储层岩石物性的影响,分析低渗透储层物性参数孔隙度、渗透率随有效应力变化规律及压力敏感性特征,进而研究储层压力敏感性对低渗透油藏开采速度的影响。研究表明:即使低渗透储层孔隙度只发生微小损失,将引起岩石的渗透率显著降低,且其受加压方式影响较大,有效压力增加速度越快,岩石渗透率降低幅度越大,不可逆的渗透率损失越大;反之,有效压力增加速度越慢,岩石渗透率降低幅度越小,不可逆渗透率损失越小。建议在开发低渗透油田时采取多次逐级降低井底流压、保持合理的开采速度,以提高最终采收率。

**关键词:**低渗透;压力敏感性;有效压力;开采速度

**中图分类号:** TE348; TE326 **文献标识码:** A

低渗透油田开发过程中,由于地层压力下降,储层受到有效压力作用,渗透率不断降低,这种渗透率受压力变化的敏感程度定义为渗透率的压力敏感性<sup>[1]</sup>。国内外许多研究者对此已进行了大量研究,最新研究成果<sup>[2-5]</sup>是:低渗透砂岩储层具有很强的压力敏感性,压力敏感性是由于孔隙和毛细管被压缩和关闭引起的;岩石力学特性是孔隙压力、孔隙流体(油气水)分布的函数。但对于岩石孔隙喉道变化及受压情况特别是增减有效压力速度对低渗透砂岩油藏开采速度的影响作用还需进行深入研究。

## 1 实验设计

测试低渗透砂岩岩石的围压—孔隙度关系和围压—渗透率关系,观察和分析变围压下低渗透岩石孔隙度、渗透率变化规律。

### 1.1 实验设备

浮子流量计和皂沫流量计、113型氮孔隙度仪、112型高低渗透率仪、JB-80高压计量泵、HSB-2高压恒速泵。

### 1.2 实验样品

实验用岩心取自中原油田,岩心直径2.54 cm左右,长度5.98~7.22 cm不等。首先将岩心切磨后测量其长度及直径,然后用酒精与苯(体积比例1:3)配成的溶液清洗岩心,取出岩样放入带抽真空设备的烘箱中在105℃下真空烘干至岩心质量不再改变为止,取出岩心气测渗透率,最后将岩心抽真空饱和水确定其孔隙度。基本数据见表1。

表1 天然岩心基本数据

井号	岩心编号	长度/cm	孔隙度/%	渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$
文13-35	1-2	7.205	8.6	1.60
文13-35	3-1	6.360	14.0	20.30
文13-35	7-1	6.500	16.3	1.20
文13-85	3-1	7.115	16.1	16.70
文13-85	4-2	6.362	20.2	20.70
文13-85	6-1	6.055	19.6	10.80
文13-28	2-1	7.930	14.1	13.20
文13-28	2-2	7.830	18.4	39.50

### 1.3 实验方法

参照中华人民共和国石油天然气行业标准SY/T 5336-1996和覆压下岩石孔隙度和渗透率测定方法SY/T 6385-1999设计实验方法。

(1)岩心在105℃下烘干至恒重,将样品装入

基金项目:国家973项目“低渗透油藏提高采收率基础理论研究”(2002CCA00700)部分研究成果。

作者简介:张风义,1981年生。2004年毕业于长江大学石油工程专业,现为中国石油大学(北京)2004级油气田开发工程专业硕士研究生,主要从事油气田开发研究工作。电话:010-89734056, E-mail: fengyi624@yahoo.com.cn。

岩心夹持器,建立模拟上覆压力,测量岩石的孔隙度、渗透率,然后逐点增加上覆压力同时测量各上覆压力下的孔隙度、渗透率。

(2)施加环压,依次为 1.38 MPa、5 MPa、10 MPa、15 MPa、20 MPa、25 MPa、30 MPa、35 MPa、40 MPa,采用氮气和地层水测试岩心渗透率,并减小环压进行逆向实验。实验设计围压上升和围压下降两个过程,围压上升过程模拟孔隙流体压力降低和净上覆岩石压力增大的过程;围压下降过程模拟孔隙流体压力升高和净上覆岩石压力减小的过程,即模拟渗透率恢复的过程。

(3)岩石压缩过程中物性变化与岩石受压情况特别是与岩石受压缩时间密切相关。为去除时间效应,进行控时覆压稳定时间的确定:根据前苏联戈尔布诺夫 A T<sup>[6]</sup> 研究结果对实验岩心进行加压和卸压稳定时间确定。结果表明实验用岩心的稳定时间为 2.5~5.0 h。实验过程中为了测试准确,改变环压后均保持一定时间的停留,使其物性重新达到平衡和稳定。实验在室温 25℃ 条件下进行的。

## 2 实验结果分析

(1)随着有效压力的升高,孔隙度、渗透率均有不同程度的损失,孔隙度的最大损失 10%,大部分损失都在 5% 以内,而渗透率却损失了约 25%,见图 1、图 2。也就是说,渗透率对有效压力变化的敏感程度与孔隙度相比要强得多。由孔隙与喉道变形理论<sup>[7]</sup>可知,砂岩受压缩时,最先被压缩的是喉道,而非孔隙。而低渗透和特低渗透储层的孔隙结构通常为小孔细喉型,流体在低渗储层孔隙介质中流动的难易程度直接受喉道大小的控制<sup>[8]</sup>。所以孔隙度的微小(特别是喉道)损失,将引起岩石的渗透率显著降低。在有效压力作用下,渗透率下降的本质是岩石孔隙结构发生变化,引起流体渗流通道的变异和破坏。

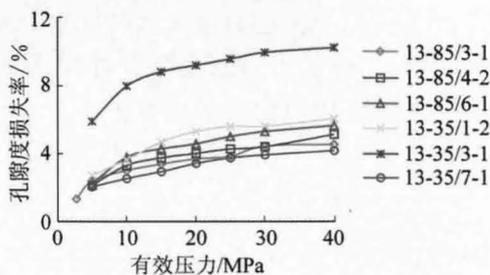


图1 孔隙度损失率与有效压力的关系

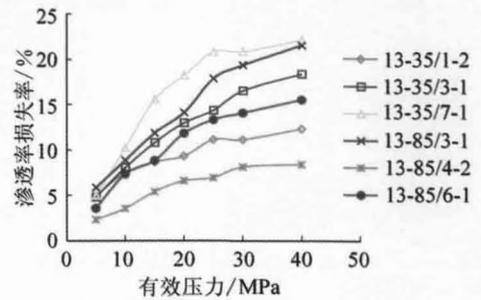


图2 渗透率损失率与有效压力的关系

(2)渗透率随覆压变化呈台阶式变化趋势。孔隙度的损失主要发生在低有效压力阶段,在有效压力为 10 MPa 时,平均已完成总损失量的 79.2%;而渗透率的损失主要发生在中、低有效压力阶段,在有效压力为 20 MPa 时平均完成总损失量的 64.1%,有效压力大于 25 MPa 以后损失量已很少,见图 1、图 2。

(3)孔隙度相近,孔喉比(视孔喉体积比)越小的岩样,初始渗透率就越小,渗透率损失率就越大(见图 2)。文 13-35/7-1 和文 13-85/6-1 孔隙度相近,分别是 16.3% 和 19.6%,由于视孔喉体积比的差别,前者压力敏感性更强。岩心渗透率的损失率与其初始渗透率的大小呈反向关系,即渗透率越小的岩样,特别是初始渗透率小于  $5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  的岩样渗透率损失程度越大。

(4)岩石在减压恢复后,岩石孔隙度和渗透率都有一定程度恢复,但未恢复到初始值。图 3 是文 13-85 岩心 3-1 的增压和减压恢复实验结果,解除有效压力作用后,岩石还存在一定的渗透率损失率,即恢复不到原始渗透率。在受到外加压力时,首先胶结物结构发生应变,被压实并发生变形,这时的变形具有软塑性变形特点,围压恢复后,压实和变形的胶结物不能恢复原状;继续加压,则主要是颗粒受压弹性变形,当围压恢复时,岩石主要是弹性恢复,可以恢复,对最终的渗透率损失无影响。

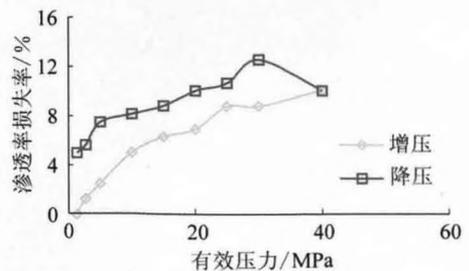


图3 压力恢复曲线

(5)有效压力增加速度越快,岩心视渗透率降

低幅度越大,不可逆的渗透率损失越大。图4是不同加压方式对比曲线。文13-281岩心2-1和2-2属于同一深度点,2-1进行了快速加压实验,压力点为1.5 MPa、20 MPa和40 MPa;2-2则进行了慢速加压实验,压力点为多个压力点,从1.5 MPa、5 MPa、10 MPa、20 MPa等5 MPa间隔一直增大到40 MPa。实验结果看出,快速与慢速相比,渗透率损失率为13.3%和12.2%,进行可逆实验后,不可逆的渗透率为7.7%和4.6%。充分说明压力增加速度越快,岩心视渗透率降低幅度越大,且不可逆的渗透率损失也越大。

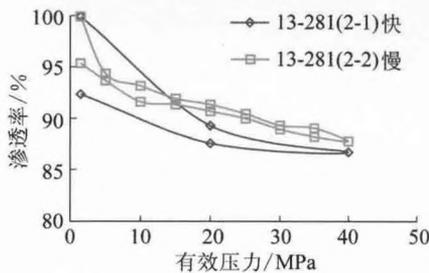


图4 不同加压方式对比曲线

### 3 压敏效应对低渗透油藏开采速度的影响

低渗透油田开发<sup>[9]</sup>过程中,由于油藏压力的降低,储层的压力平衡系统被破坏,引起岩石颗粒、孔隙和孔喉形态变形,影响油层渗透率、渗流特征、水驱油效率和最终采收率。由此诱发的渗透率的压力敏感性伤害将不可避免,从而给合理开发低渗透油田提出了条件,在开发低渗透油田时更应注意保持合理的生产压差,密切注意地层压力的下降,并保持合理的开采速度和降压方式。

压敏效应的存在,在地层中由于压力分布不同,距离油井不同半径处的渗透率值损失差别较大。距离油井越远的地方,渗透率损失越大;越远的地方,渗透率损失越小。这将导致低渗透油藏采取降压开采时,如果采油速度太大时,井底附近地层压力下降大,压敏效应的存在,引起井壁附近的岩石颗粒、孔隙和孔喉形态变形较大,渗透率损失较大,部分喉道闭合,地层中部能量没有充分利用,所以油井初期产量高,很快产油量大幅度下降,甚至出现有油有能量却采不出现象,采收率很低,所以,低渗透油田开发确定合理的开采速度,以充分利用地层能量。

采取逐步降压方式开采低渗砂岩油藏,只要地层有压力降,地层渗透率就有“损失”,但地层压力

降低速度不同,地层渗透率损失不同,压力降低越快,地层渗透率降低幅度越大,不可逆的渗透率损失越大。说明必须保持一定压降速度水平,才能使储层物性变化较小,油井以较高的产能生产。高压低渗油藏在弹性开采阶段除了要控制油井流压,以保证生产压差外,还必须控制降压速度,采取逐步降低流压的方式,以减小井底附近储层渗透率的损失。

### 4 结论

(1)低渗透储层在有效压力的作用下,孔隙度发生微小(特别是喉道)损失,将引起岩石的渗透率显著降低;孔喉比(视孔喉体积比)越小的岩样,初始渗透率就越小,渗透率损失率就越大,对有效应力的变化越敏感。

(2)有效压力增加速度越快,岩心渗透率降低幅度越大,不可逆的渗透率损失越大;反之,有效压力增加速度越慢,岩心渗透率降低幅度越小,不可逆的渗透率损失越小。

(3)低渗透油田开发,特别是异常高压油藏,需确定合理的开采速度,以充分利用地层能量,提高最终采收率。

参考文献:

- [1] 王江,王玉英.异常高压、特低渗透油藏储层压力敏感性研究[J].大庆石油地质与开发,2003,22(5):28-31.
- [2] 刘建军,刘先贵.低渗透储层流-固耦合渗流规律的研究[J].岩石力学与工程学报,2002,21(1):88-92.
- [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.
- [4] 秦积舜.变围压条件下低渗砂岩储层渗透率变化规律研究[J].西安石油学院学报:自然科学版,2002,17(4):28-31.
- [5] 高树生,熊伟.有效应力对低渗低孔介质孔渗参数的影响[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2001,20(4):538-540.
- [6] 戈尔布诺夫 A T.异常油田开发[M].北京:石油工业出版社,1987.
- [7] 孙广忠.岩石结构力学[M].北京:科学出版社,1994.
- [8] 黄延章,刘先贵,李道品.低渗透油层渗流机理[M].北京:石油工业出版社,1998:12-20.
- [9] 阮敏,王连刚.低渗透油田开发与压敏效应[J].石油学报,2002,23(3):73-76.

(修改稿收到日期 2006-09-26)

[编辑 景 暖]