

基于三维地应力的渗透率转换方法

朱苏阳¹,李传亮¹,董凤玲²

(1.西南石油大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室,四川 成都 610500;

2.中国石化中原油田分公司 采油二厂,河南 濮阳 457001)

摘要: 储层渗透率的测量及其储层条件下的转化方式是油藏工程研究的重要内容。随着储层岩石有效应力的增加,储层岩石孔隙半径减小,渗透率降低,地面测量的岩石渗透率比地层条件下的渗透率高。为将地面测量的渗透率应用于油藏工程,须将其换算到储层条件。根据岩石在地面和地层条件下的应力状态,研究了地面—地下渗透率的转换方法,该方法采用三维地应力,克服了仅采用上覆地层压力的不足。胜利油区渗透率覆压实验校正结果表明,仅采用上覆地层压力计算的渗透率转换值,比采用三维地应力计算的渗透率转换值明显偏小。对于中渗透地层,三维地应力的渗透率转换方法与原方法差别不大,对于低渗透地层,基于三维地应力的渗透率转换方法的计算值比原方法增大10%。

关键词: 上覆地层压力 三维地应力 储层条件 渗透率转换方法 胜利油区

中图分类号: TE319

文献标识码: A

文章编号: 1009-9603(2013)04-0069-03

把实验室条件下测量的岩心渗透率,通过有效应力转换为储层条件下的渗透率,是了解地层岩石性质的重要途径。中国许多学者对渗透率的转换方法进行了研究,并取得了一定成果。大部分研究方法采用岩心围压模拟上覆地层压力,岩心内压模拟地层孔隙压力^[1-2]。地下岩体工程和煤层开采过程中,在三轴应力实验条件下,对岩土和煤层进行了渗透率测量的研究^[3-4]。渗透率测量中应力状态的模拟研究不仅需要掌握岩石的应力机制,还需要了解储层的应力状态,李传亮解决了岩石的应力机制问题,提出渗透率的转换须采用本体有效应力对岩石的应力状态进行等效还原^[5]。然而,储层条件下的地应力是各向异性的,由上覆地层压力、最小水平地应力和最大水平地应力构成。在渗透率的转换计算中,大多数学者只考虑了上覆地层压力,而忽视了水平地应力,最终导致转化的渗透率不能很好地反映真实地层的渗透率。因此,笔者基于储层条件下真实的三维地应力状态,研究了渗透率的转换方法。

1 计算方法

地层岩石通常同时受到外应力(外压)和内应

力(内压或流体压力)的共同作用^[6-9]。内应力是各向同性的,而外应力往往是各向异性的。但是,在实验室测量岩心渗透率时,内、外应力都是各向同性的(静水压力状态)。渗透率的实验室测量通常是在内压为常压、不断增大外压的情况下进行的。

由岩心渗透率的测量结果图1可见,渗透率随外压的增大而减小,其原因是地层孔隙被压缩。实验中,渗透率随围压或外应力的变化趋势通常可用指数方程进行描述^[10],即

$$K = K_0 \exp(-b\sigma) \quad (1)$$

式中: K 为任意应力值时的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_0 为应力为0时的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; b 为常数, MPa^{-1} ; σ 为围压或外应力, MPa 。

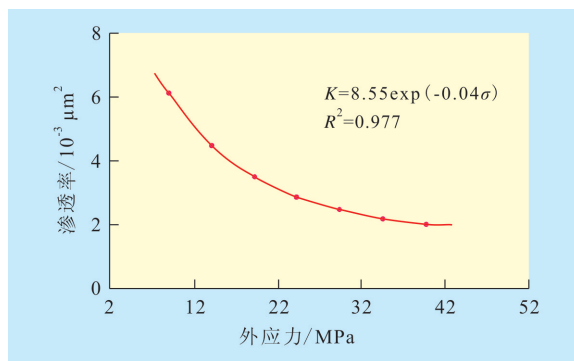


图1 岩心渗透率与外应力的关系

收稿日期:2013-05-17。

作者简介:朱苏阳,男,在读博士研究生,从事油藏工程和渗流力学的研究。联系电话:15828512977, E-mail: zhusuyang@yahoo.com.cn。
基金项目:国家科技重大专项“多层疏松砂岩气藏开发关键技术”(2011ZX05027-003-01)。

当用式(1)计算地层条件下的渗透率时,须首先采用本体有效应力^[5]将图1中的渗透率转换到地层条件下的渗透率^[5],即将式(1)改写为

$$K = K_0 \exp[-b(\sigma - \phi p)] \quad (2)$$

式中: ϕ 为地层孔隙度; p 为内压或内应力,MPa。

若已知地层流体压力和储层的地应力,将其代入式(2),即可计算出地层条件下的岩心渗透率。但是,地层条件下的地应力是各向异性的,由上覆地层压力、最小水平地应力和最大水平地应力组成,因此,实际计算时须将式(2)中的外应力写成平均外应力^[11]的形式,即

$$K = K_0 \exp[-b(\bar{\sigma} - \phi p)] \quad (3)$$

其中

$$\bar{\sigma} = \frac{p_{ob} + \sigma_h + \sigma_H}{3} \quad (4)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为地层岩石3个方向的平均外应力,MPa; p_{ob} 为上覆地层压力,MPa; σ_h 为最小水平地应力,MPa; σ_H 为最大水平地应力,MPa。

当对渗透率进行转换计算时,通常只考虑了上覆地层压力,而忽视了水平地应力,即把式(2)写为

$$K = K_0 \exp[-b(p_{ob} - \phi p)] \quad (5)$$

显然,上覆地层压力的变化并不能代表三维应力的变化特征,导致渗透率转化计算时出现差错。

2 实例分析

为了对比渗透率转换时新建方法与原方法的差别,对胜利油区不同渗透率岩心进行对比分析(图2)。其中,王126井和坨143井岩心渗透率中等,坨715及桩421井岩心渗透率较低;实验是在内压为常压并不断增大外压的条件下进行的。

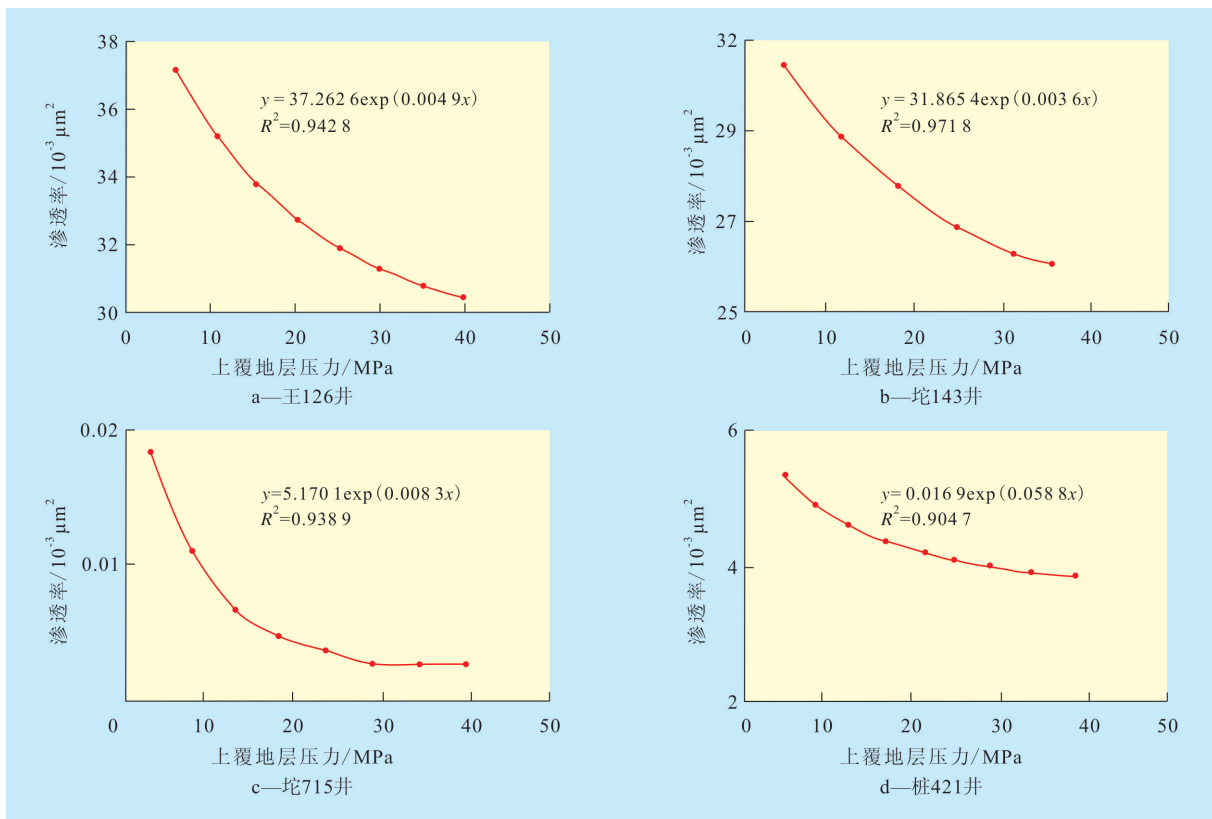


图2 胜利油区中低渗透岩心实验条件下渗透率与上覆地层压力的关系

所取岩心均位于胜利油区1300~3300m井段,统计资料^[12]显示,该深度范围的三维地应力可分别表示为

$$\sigma_H = -22.58 + 0.034D \quad (6)$$

$$\sigma_h = -11.65 + 0.022D \quad (7)$$

$$\sigma_v = 0.0215D \quad (8)$$

式中: D 为油层深度,m; σ_v 为垂向主应力,MPa。

依据式(6)~式(8)可计算得到地层条件下的三维地应力,再结合式(5)和式(3),可计算得到考虑上覆地层压力和三维地应力时的渗透率(表1)。由表1可知,对于中渗透地层,三维地应力的渗透率转换方法与原方法差距不大,对于低渗透地层,基于三维地应力的渗透率转换方法的计算值比原方法增大约10%。

表1 考虑与不考虑三维地应力时渗透率计算结果对比

| 井号 | 深度/m | $\sigma_{11}/$ MPa | $\sigma_{22}/$ MPa | $\sigma_{33}/$ MPa | 渗透率计算值 / $10^{-3} \mu\text{m}^2$ | | 差值 比例, % |
|------|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|---------|-------------|
| | | | | | 不考虑三维地应力 | 考虑三维地应力 | |
| 王126 | 2 977 | 78.64 | 53.84 | 64.01 | 49.85 | 50.21 | 1 |
| 坨143 | 2 960 | 78.06 | 53.47 | 63.64 | 39.12 | 39.32 | 1 |
| 坨715 | 3 209 | 86.53 | 58.95 | 68.99 | 8.27 | 9.09 | 9 |
| 桩421 | 3 279 | 88.91 | 60.49 | 70.50 | 0.78 | 0.92 | 15 |

三维地应力相差较大时,2种方法计算的渗透率相差也较大,若用图1中的曲线计算地层条件下的岩石渗透率,其三维地应力状态下的计算式为

$$K = 8.55 \exp[-0.04(\bar{\sigma} - 0.05p)] \quad (9)$$

若地层的应力条件为:内应力为40 MPa,上覆地层压力为90 MPa,最小水平地应力为50 MPa,最大水平地应力为60 MPa,根据式(9)可计算出地层的平均外应力为66.67 MPa,得地层条件下的渗透率为 $0.64 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;若地层的应力条件为:内应力为40 MPa,上覆地层压力为90 MPa,最小水平地应力为70 MPa,最大水平地应力为80 MPa,根据式(9)可计算出地层的平均外应力为80 MPa,得地层条件下的渗透率为 $0.38 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。若仅采用上覆地层压力进行计算,则地层条件下渗透率的表达式为

$$K = 8.55 \exp[-0.04(p_{\text{ob}} - 0.05p)] \quad (10)$$

由式(10)计算的地层条件下的渗透率仅为 $0.25 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,与式(9)的计算结果相比,考虑与不考虑三维地应力时渗透率分别相差61%和34%。表明三维地应力差距越大,2种方法计算结果相差越大。由此可知,地层条件下的岩石应力状态与实验室条件下完全不同,仅采用上覆地层压力计算地层条件下的渗透率是不合理的。

3 结束语

实验室条件下进行岩心分析时的应力状态与地层条件下完全不同,实验室条件为内、外应力均为各向同性,而地层条件下外应力为各向异性;忽视岩石的水平地应力,将使地层渗透率的计算结果

与实际值有差异,若平均地应力大于上覆地层压力,渗透率修正结果比原计算值偏小,若平均地应力小于上覆地层压力,渗透率修正结果比原计算值偏大;通过地面渗透率测试结果计算地层条件下的渗透率时,须考虑三维地应力状态,而不能仅考虑上覆地层压力。

参考文献:

- [1] 薛清太.上覆地层压力下物性参数特征研究[J].油气地质与采收率,2005,12(6):43-45.
- [2] 章星,杨胜来,章玲,等.低渗透气藏克氏渗透率影响因素室内实验研究[J].油气地质与采收率,2012,19(2):84-86.
- [3] 胡大伟,周辉,潘鹏志,等.砂岩三轴循环加卸载条件下的渗透率研究[J].岩土力学,2010,31(9):2 749-2 754.
- [4] 许江,张丹丹,彭守建,等.三轴应力条件下温度对原煤渗流特性影响的实验研究[J].岩石力学与工程学报,2011,30(9):1 848-1 854.
- [5] 李传亮.渗透率的应力敏感性评价方法[J].新疆石油地质,2006,27(3):348-350.
- [6] 李传亮,孔祥言,徐献芝,等.多孔介质的双重有效应力[J].自然杂志,1999,21(5):288-292.
- [7] 李传亮,孔祥言,杜志敏,等.多孔介质的流变模型研究[J].力学学报,2003,35(2):230-234.
- [8] 李传亮.多孔介质的有效应力及其应用研究[D].合肥:中国科学技术大学,2000.
- [9] 李传亮.多孔介质应力关系方程[J].应用基础与工程科学学报,1998,6(2):145-148.
- [10] 李传亮.油藏工程原理[M].2版.北京:石油工业出版社,2011:96-100.
- [11] 刘鸿文.材料力学[M].2版.北京:高等教育出版社,1982:296.
- [12] 葛洪魁,林英松.油田地应力的分布规律[J].断块油气田,1998,5(5):1-5.

编辑 武云云