

# 油气田开发过程中的压力拱效应

王钊濂<sup>1</sup>, 李相方<sup>1</sup>, 钱其豪<sup>2</sup>, 和向楠<sup>1</sup>, 赵晶晶<sup>1,3</sup>, 张新<sup>4</sup>

1. 中国石油大学(北京)石油工程教育部重点实验室, 北京 102249
2. 中国石油勘探开发研究院开发所, 北京 100083
3. 中国石化股份有限公司江苏油田分公司试采一厂, 江苏扬州 225264
4. 中国石油吐哈油田分公司, 新疆哈密 839009

**摘要** 与矿山开采类似, 油气开采时, 储层和上覆岩层中会产生不均匀变形, 从而在上覆岩层中形成压力拱。本文对油气开采时, 储层和上覆岩层的变形特征进行了总结, 利用现场实例说明了压力拱效应在油气开发过程中的存在性, 同时对压力拱的表征参数以及计算方法进行了总结。提出了如果低渗和致密储层忽略压力拱效应, 将会夸大应力敏感对储层开发特征的影响, 同时导致该类储层开发策略的错误制定。对于该类储层, 压力拱将会使得上覆岩层的部分重量传递到外围岩层中, 有效地防止储层进一步变形, 部分消除应力敏感的影响。压力拱将随着压降漏斗半径的增加而不断地向外扩展, 可以增大压降漏斗内外裂缝的导流能力, 从而提高油气井的产量和采收率, 因此压力拱比较大的低渗致密储层可以适当放大生产压差。

**关键词** 压力拱效应; 压力拱比; 包裹体理论; 非均质理论; 上覆岩层压力; 应力敏感

中图分类号 F407.22

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.15.010

## Stress Arching in the Development of the Oil and Gas Reservoirs

WANG Fanliao<sup>1</sup>, LI Xiangfang<sup>1</sup>, QIAN Qihao<sup>2</sup>, HE Xiangnan<sup>1</sup>, ZHAO Jingjing<sup>1,3</sup>, ZHANG Xin<sup>4</sup>

1. MOE Key Laboratory of Petroleum Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development in China, Beijing 100083, China
3. No.1 Oil Production Plant of Jiangsu Oil Field Branch, Sinopec Co. Ltd., Yangzhou 225264, Jiangsu Province, China
4. Company of China Petroleum in Tuha Oilfield, Hami 839009, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

**Abstract** Similar to the situation in the mining engineering, there will be a non-uniform deformation in the reservoir and the overburden during the development of oil and gas from underground. A stress arching will occur in the overburden due to this deformation. This deformation is analyzed in this paper and the features of the stress arching are illustrated with field examples. The stress arching ratio is used to describe the degree of the stress arching. The stress arching effect cannot be neglected during the production, otherwise the stress sensitivity will be exaggerated and unreasonable measures will be taken during the development of the low permeability and tight gas reservoirs. For these reservoirs, a part of the weight of the overburden is transferred to the non-formation (i.e. sideburden) though the stress arching, which can protect the formation from deforming and eliminate the influence of the stress sensitivity. The range of the arching will increase with the increase of the pressure conductive ability and it will enhance the nature fracture conductive ability inside and outside the arching to improve the productivity and the recovery factor. Therefore, it is possible to use a large pressure drop to develop the low permeability and tight gas reservoir with a large stress arching ratio.

**Keywords** stress arching effect; stress arching ratio; theory of inclusion; theory of inhomogeneity; overburden pressure; stress sensitivity

收稿日期: 2012-12-12; 修回日期: 2013-03-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2007CB209506, 2009CB219606); 国家科技重大专项(2011ZX05038-4)

作者简介: 王钊濂, 博士研究生, 研究方向为天然气开发, 电子邮箱: wangfanliao@163.com; 李相方(通信作者), 教授, 研究方向为油气田开发, 电子邮箱: lxfang@263.net

## 0 引言

油气藏开采时,储层和外围岩层应力将无法维持初始的平衡状态而重新分布,分布的形态与隧道开挖、矿山开采引起的应力重新分布类似,但也有其独特的特征。岩石力学中将巷道顶板的围岩的不均匀变形发展到一定程度,逐渐终止,形成一个新的应力平衡状态,在顶部围岩中形成的稳定拱称之为压力拱。油气田开发中虽没有明确地提出压力拱的概念,但是却用单位孔隙流体压力降引起的应力变化值即压力拱比<sup>[2-9]</sup>描述压力拱效应。目前,研究孔隙流体压力变化导致的应力场变化的方法有半解析法<sup>[3-9]</sup>,解析法<sup>[10,11]</sup>及流固耦合软件方法<sup>[12-14]</sup>,但是都局限于流体压力变化产生压力拱的分析,而对于油气田开发过程中如何应用压力拱却没有详细的介绍。

本文分析油气田开发过程中储层及外围岩层的变形特征,利用油田实例证明压力拱的存在性,重点对压力拱的特征参数进行总结,并提出压力拱效应在油气田开发过程中的应用前景。

## 1 压力拱效应及其变形特征

隧道开挖、煤层开采时,岩层中初始应力平衡状态被打破,在一定的范围内发生应力重新分布,隧道、矿区顶部岩层在无支护条件下发生层间滑动、离层、断裂破坏等活动,但是这种断裂破坏并不是无止境的,当断裂层向上发展到一定程度后,将不再增加,形成稳定的压力拱结构,阻止上覆岩层继续坍塌。

油气田开发过程与矿山开采过程中上覆岩层变形特征有类似之处,由于储层与外围岩层(上覆岩层,平面外边界之外的非储层,下伏岩层)之间相互制约,相互影响,储层中孔隙流体压力在井筒附近压降大,远井地带压降小,且基本呈漏斗型分布,这种不均匀的孔隙流体压力分布将导致储层以及上覆岩层应力分布不均,从而产生不均匀变形,因此也会在上覆岩层中产生压力拱效应。

### 1.1 压力拱效应变形特征

上覆岩层形成压力拱后,岩石承受荷载的传递路径也将发生变化,主应力场将发生偏转。上覆岩层的重量将通过压力平衡拱,沿主应力线方向传至压力拱以外的岩层中,并形成应力集中区,此时储层与外围岩层的也由原来的整体压缩变形而发生变化<sup>[15-18]</sup>,总结起来,可以分为4个变形区域,如图1所示。A为靠近井筒附近的储层岩石发生压缩变形;B为储层压缩区域对应的上覆岩层中,表现为垂向应力降低,水平应力增大,产生拉伸变形;C为该区剪切力增大,在层间摩擦力,结构力的作用下,上覆岩层部分重量通过压力拱向远离井筒的方向传递,主要表现为剪切变形;D为储层外围边界处,上覆岩层和储层岩石中,则表现为垂向应力增大,水平应力减小,发生压缩变形。

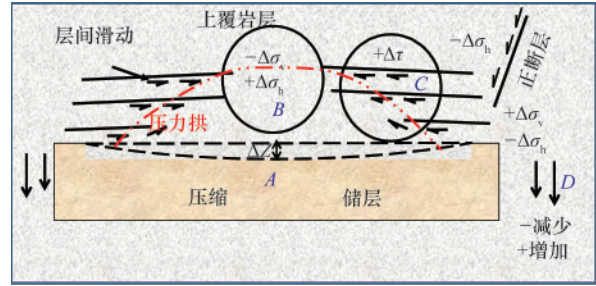


图1 压缩储层围岩层中压缩变形、剪切变形及拉伸变形分区  
Fig. 1 Zones of compaction, shear and extension above a compaction reservoir

### 1.2 压力拱效应存在的实际证明

目前可以通过地震波测试<sup>[17-19]</sup>及应力场测试<sup>[2-4,20]</sup>两种方法确定油气开采时是否形成压力拱以及压力拱的规模。

(1) 地震波测试实例。形成压力拱之后,不同变形区域的地震波传播速度与传播时间将发生较大的变化,压缩区域,地震波传播速度大,传播时间短,而拉伸区域,地震波传播速度小,传播时间长<sup>[17]</sup>。图2为Vall油田碳酸岩储层中一口长度为1000m的水平井孔隙流体压力降低6.89MPa时,地震波在地层当中的传播时间分布图<sup>[17]</sup>。可以看出,上覆岩层中有明显的压力拱产生,如箭头2,该区内发生拉伸变形,地震波传播速度降低,传播时间增长,呈现红色,储层下伏岩层中也有部分区域拉伸变形,如箭头3,同时远离井筒的部分区域产生压缩变形,地震波传播时间降低,如箭头1,同时根据地震波传播时间降低的范围来看,该压力拱的高度大约150m。

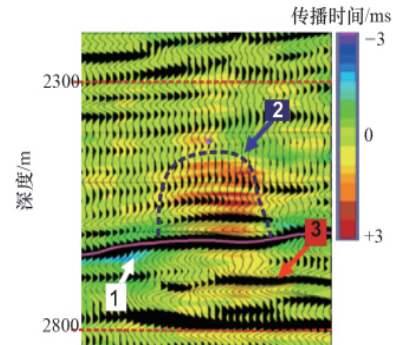


图2 地震波传播速度

Fig. 2 Seismic wave propagation velocity diagram

注:冷色调,应力增大区,地震波传播时间减小区域,箭头1;暖色调,应力降低区,地震波传播时间增加,箭头2,3。

Notes: Velocity and stress increases are shown in cold color (arrow 1) and velocity and stress decreases in warm color (arrow 2,3).

(2) 应力变化实例。应力测试能更有效地反映压力拱情况。Ekofisk油田属于狭长型储层,具有南北方向主褶皱,背斜的顶部深度为2840m,储层区域为6.8km×9.3km,平均储层厚度为300m,储层的杨氏模量为0.05~2.2GPa,围岩层的杨氏模

量为 1.1~14GPa, 储层与外围岩层的剪切模量比  $R_\mu$  为 0.1, 储层泊松比  $\nu^*$  为 0.15~0.25, 外围岩层的泊松比  $\nu$  为 0.2~0.42。从 1975—1990 年, 孔隙流体压力从 45MPa 降至 25MPa, 最小水平应力从 51MPa 降至 35MPa, 降低了 31%, 垂向应力即上覆岩层压力降低了 26%<sup>[3]</sup>。

Zama 油田位于加拿大 Alberta 西北部, 面积为 1200km<sup>2</sup>, 储层有 400 多个礁体, 主要为碳酸盐岩层。其中, 一个礁石层高度 90m, 面积为 0.16km<sup>2</sup>, 储层中部深度为 1500m, 储层的宽度为 320m, 孔隙流体压力从 14.5MPa 降低至 10.5MPa 时, 垂向应力降低了 7%<sup>[4]</sup>。

## 2 压力拱表征参数及其求解

### 2.1 压力拱比参数的定义

当上覆岩层中产生压力拱效应时, 储层垂向总应力(即上覆压力)的变化值如下<sup>[3-6]</sup>:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \alpha\Delta p \quad (1)$$

其中,  $\Delta\sigma$  为总应力的变化量, MPa;  $\Delta\sigma'$  为有效应力的变化量, Mpa;  $\Delta p$  为孔隙流体变化值, MPa, 流体流出为负, 流体注入为正;  $\alpha$  为 Biot 系数, 一般假设为 1<sup>[21]</sup>。

为了反映垂向总应力的变化, 压力拱比  $\gamma$  定义为<sup>[3-6]</sup>

$$\gamma = \Delta\sigma\alpha\Delta p \quad (2)$$

$\gamma$  反映了压力拱的发育程度,  $\gamma$  越大, 压力拱越容易形成, 反

之亦然。

有效应力则变为

$$\sigma' = \sigma_0 - \alpha p_0 - (\gamma - 1)\Delta p \quad (3)$$

其中,  $\sigma_0$  为初始上覆岩层压力, MPa;  $p_0$  初始孔隙流体压力, MPa。

从式(2)、式(3)可以看出, 只要求出压力拱比就可以求出垂向应力的变化值以及有效应力的变化值。

### 2.2 不同形状储层压力拱比







Soltanzadeh 和 Hawkes<sup>[6]</sup>结合包裹体理论和非均值理论, 得到不同形状储层条件下的压力拱比, 并提出了以下假设条件:

- (1) 假设储层厚度为  $h, m$ ; 宽度为  $w, m$ ; 储层的剪切模量为  $\mu^*, GPa$ ; 外围非储层的剪切模量为  $\mu, GPa$ ; 储层的泊松比为  $\nu^*$ , 非储层的泊松比为  $\nu$ , 储层的纵横比  $e=h/w$ , 剪切模量比  $R_\mu=\mu^*/\mu$ ;
- (2) 储层中孔隙压力降为均一的常数;
- (3) 上覆岩层中产生压力拱效应;
- (4) 储层内岩石物性均匀;
- (5) 外围岩层的岩石物性均匀;
- (6) 储层埋深较大(储层的宽度与深度的比值小于 0.1), 不考虑深度的影响。

几种简单储层形状条件下储层垂向压力拱参数如表 1<sup>[9]</sup>

表 1 不同形状储层包裹体理论以及非均值理论求出的压力拱比

Table 1 Stress arch ratios for reservoirs of different shapes using the theory of inclusion and inhomogeneity

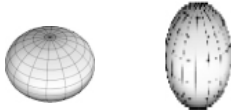
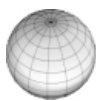
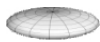

形状	包裹体理论	非均值理论
 扁球体	$\gamma = \frac{1-2\nu}{1-\nu} \left[ \frac{e \cos^{-1} e}{(1-e^2)^{3/2}} - \frac{e^2}{1-e^2} \right]$	当储层和非储层的泊松比相同时, $\gamma = B_1/B_2$ $B_1 = (1+\nu)[1 - (R_\mu - 1)X_1 - X_2] + R_\mu[(1-\nu)X_4 + 2\nu X_3]$ $B_2 = (1+\nu)[(R_\mu - 1)^2 X_1 + (R_\mu - 1)X_2 + 1]$ $X_1 = (S_{1111} + S_{1122})S_{3333} - 2S_{3311}S_{1133}, X_2 = S_{1111} + S_{1122} + S_{3333}, X_3 = S_{3333} - S_{1133}, X_4 = S_{1111} + S_{1122} - 2S_{3311}$
 长球体	$\gamma = \frac{1-2\nu}{1-\nu} \left[ \frac{e^2}{e^2-1} - \frac{e \cosh^{-1} e}{(e^2-1)^{3/2}} \right]$	
 球体	$\gamma = \frac{2(1-2\nu)}{3(1-\nu)}$	$\gamma = \frac{2(1-2\nu^*)}{R_\mu(1+\nu^*) + 2(1-2\nu^*)}$
 饼状体	$\gamma = \frac{1-2\nu}{1-\nu} \cdot \frac{\pi e}{2}$	当储层和非储层的泊松比相同时, $\gamma = C_1/C_2$ 其中, $C_1 = \pi e(1-2\nu)[\pi e(1-R_\mu)(1+\nu) - 2R_\mu(1-2\nu) - 2]$ $C_2 = (R_\mu - 1)\pi e\{(1-2\nu)[2 - \pi e(1-R_\mu)(1+\nu)] - R_\mu(3-4\nu)(1+\nu)\} - 8R_\mu(1-\nu)^2$
 椭圆柱	$\gamma = \frac{1-2\nu}{1-\nu} \cdot \frac{e}{1+e}$	$\gamma = A_1/A_2, A_1 = (1-2\nu^*)\{R_\mu[2e(1-\nu) + 1-2\nu] + 1\}e$ $A_2 = R_\mu[2(1+e)^2(1-\nu)(1-\nu^*) - 2e\nu^*(1-2\nu) + R_\mu e(3-4\nu)] + e(1-2\nu^*)$
 圆柱	$\gamma = \frac{1}{2} \frac{1-2\nu}{1-\nu}$	$\gamma = \frac{1-2\nu^*}{R_\mu + 1 - 2\nu^*}$
无限大	$\gamma = 0$	$\gamma = 0$

所示,值得注意的是包裹体理论要求储层和外围岩层岩石力学性质(剪切模量和泊松比)完全相同。

表 1 中  $S_{ijkl}$  为 Eshelby 张量,不同形状下 Eshelby 张量如表 2<sup>[22]</sup>。

从表 1 可以看出,压力拱比主要与储层的纵横比、泊松比及剪切模量比有关。纵横比增大时,压力拱比也增大;当储层泊松比较小时,压力拱比则较大;当剪切模量比增大时,压力拱比则减小。

表 2 不同形状储层的 Eshelby 张量  
Table 2 Eshelby tensor for reservoirs of different shapes

Eshelby 张量	球状体 	球体 	饼状体 	椭圆柱 
$S_{1111}$	$\frac{3}{8(1-\nu)} \left[ 1 - \frac{1+3F}{2(e^2-1)} \right] + \frac{1-2\nu}{4(1-\nu)} (1+F)$	$\frac{7-5\nu}{15(1-\nu)}$	$\frac{13-8\nu}{32(1-\nu)} \pi e$	$\frac{1}{2(1-\nu)} \left[ \frac{e^2+2e}{(1+e)^2} - (1-2\nu) \frac{e}{1+e} \right]$
$S_{1122}$	$\frac{1}{8(1-\nu)} \left[ 1 - \frac{1+3F}{2(e^2-1)} \right] - \frac{1-2\nu}{4(1-\nu)} (1+F)$	$\frac{5\nu-1}{15(1-\nu)}$	$\frac{8\nu-1}{32(1-\nu)} \pi e$	$\frac{1}{2(1-\nu)} \left[ \frac{e^2}{(1+e)^2} - (1-2\nu) \frac{e}{1+e} \right]$
$S_{1133}$	$\frac{1}{4(1-\nu)} \frac{e^2(1+3F)}{e^2-1} - \frac{1-2\nu}{4(1-\nu)} (1+F)$	$S_{1122}$	$\frac{2\nu-1}{8(1-\nu)} \pi e$	$\frac{\nu}{1-\nu} \frac{e}{1+e}$
$S_{2211}$	$S_{1122}$	$S_{1122}$	$S_{1122}$	$\frac{1}{2(1-\nu)} \left[ \frac{1+2e}{(1+e)^2} - (1-2\nu) \frac{1}{1+e} \right]$
$S_{2222}$	$S_{1111}$	$S_{1111}$	$S_{1111}$	$\frac{1}{2(1-\nu)} \left[ \frac{1+2e}{(1+e)^2} + (1-2\nu) \frac{1}{1+e} \right]$
$S_{2233}$	$S_{1133}$	$S_{1122}$	$S_{1133}$	$\frac{\nu}{(1-\nu)} \frac{1}{1+e}$
$S_{3311}$	$\frac{1}{4(1-\nu)} \frac{1+3F}{(e^2-1)} + \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} F$	$S_{1122}$	$\frac{\nu}{1-\nu} \left( 1 - \frac{4\nu+1}{8\nu} \pi e \right)$	0
$S_{3322}$	$S_{3311}$	$S_{1122}$	$S_{3311}$	0
$S_{3333}$	$\frac{1}{2(1-\nu)} \left[ 1 - \frac{e^2(1+3F)}{(e^2-1)} \right] - \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} F$	$S_{1111}$	$1 - \frac{1-2\nu}{1-\nu} \frac{\pi e}{4}$	0
说明	$e > 1$ (长球体) 时, $F = 1/(e^2-1) - (e \cosh^{-1} e)/(e^2-1)^{3/2}$ $e < 1$ (扁球体) 时, $F = 1/(e^2-1) + (e \cos^{-1} e)/(1-e^2)^{3/2}$	$e = 1$	$e \leq 0.2$	平面应变条件

Segura 等<sup>[13]</sup>和 Verdon<sup>[14]</sup>通过数值模拟方法也得到了同样的结论,对于正方形或者长方形储层,在水平某个方向或者各个方向上的纵横比较大,储层与外围岩层的弹性模量比值为 0.01 时,压力拱比近似等于 1,泊松比的影响没有弹性模量比的影响大,且外围岩层的泊松比对储层压力拱比几乎没有影响,可以忽略。

同时深度对压力拱比也会有较大的影响,对于与外围岩层岩石力学参数相同(剪切模量和泊松比)的半无限大储层,当深度参数  $n$  (储层半宽长  $w/2$  与储层埋深  $D$  的比值) 小于

0.1 时,  $n$  对压力拱比没有影响。当储层的倾角为  $30^\circ$ ,  $n$  小于 1 时,垂向压力拱比始终大于 0.2<sup>[6]</sup>。

综上所述,对于纵横比大,储层泊松比小,且相对于外围储层较软的储层压力拱比较大 ( $\gamma=1$ ),此时大部分上覆岩层的重量会通过压力拱传递到周围的非储层中;而对于纵横比小,泊松比大,且坚硬的储层往往压力拱比较小 ( $\gamma=0$ ),此时上覆岩层中将不会产生压力拱效应,上覆岩层的全部重量会作用于储层,且上覆岩层压力在油气开发过程中始终保持不变。

### 3 压力拱效应的应用前景

目前压力拱理论主要应用于应力变化计算,套管安全设计以及地震数据解释中<sup>[15,23]</sup>,但是对于油气田开发过程中,如何应用,还没有相关的阐述,这将是以后研究的重点。

#### 3.1 应力敏感理论的修正

岩石渗透率往往随有效应力的增大而降低,然而目前所有的应力敏感实验都是利用式(4)计算上覆岩层压力,并假设上覆岩层压力始终不变<sup>[24-28]</sup>。

$$\sigma_0 = \int_0^z \{ [1 - \phi(z)] \rho_c(z) + \phi(z) \rho_f(z) \} g dz \quad (4)$$

式中, $z$  为目标层深度,  $m$ ;  $\phi(z)$  为  $z$  处孔隙度;  $\rho_c(z)$  为  $z$  处岩石骨架密度,  $kg/m^3$ ;  $\rho_f(z)$  为  $z$  处孔隙流体密度,  $kg/m^3$ ,  $g$  为重力加速度,  $9.8m/s^2$ 。

该公式具有一定的适用假设条件:当上覆岩层全部为流体时,用上述密度公式计算上覆岩层压力较为准确;当岩石是一个自由体,不受周围岩层限制时,储层孔隙流体压力变化只会导致储层的压缩或者膨胀,储层岩石处于单轴应力状态,上覆岩层压力不发生变化;同时对于压力拱比为 0 的储层,上覆岩层压力亦不变。

由于压力拱的存在,现有的应力敏感理论有必要进一步修正。上覆岩层中形成压力拱之后,压力衰竭区域内储层的上覆岩层压力降低,作用于储层的有效应力较不考虑压力拱情况下有所降低,则对应的渗透率应力敏感程度没有目前实验室条件下的严重。

#### 3.2 开发理念的解放

低渗甚至致密储层的开发重点在于寻找甜点,受地质构造的控制,甜点具有储量小,流体压力降幅大,地层压力衰竭快等特点。甜点的渗流能力受控于天然裂缝的导流能力,使裂缝张开,增加裂缝导流能力,从而提高产量和采收率,是开发甜点的有效方法。应力变化对裂缝导流能力的变化具有较大的影响,将应力演化和渗流理论两者有效地结合起来,采用正确的开发策略,可以使多甜点储层变成更有商业价值的油气储层。因此 Addis 等提出了应力甜点分析方法<sup>[29]</sup>。

任何一个裂缝发育的甜点,压降漏斗内因为压力衰竭而发生岩石压缩,裂缝闭合,压降漏斗外部以及甜点外部,孔隙流体压力仍旧保持在原始水平,但压力拱的存在使得压降漏斗内的总应力降低,从而维持甚至增大渗流区域内裂缝的导流能力。同时渗流区域外部也可能出现裂缝导流能力增大的情况。一般致密储层常常有多套天然裂缝发育,裂缝导流能力的增加主要依赖于最小总应力的值,或者整个系统的应力演化特征。如果压力衰竭区域在最小主应力方向收缩,将会导致压降漏斗未波及区域平行于最大主应力方向的垂直天然裂缝张开,沟通并发生导流。在裂缝张开区域钻加密井,单井的产量会比原始井的产量还高。

有序的改变渗流区域,使得高应力不断地变为低应力区,可以有效地沟通裂缝并增加压降漏斗内外裂缝的导流能力;同时压力拱随着压降漏斗的传播不断地向外扩展,漏斗

前缘附件(压力拱拱角)的储层不断地压缩、膨胀,为储层油气渗流提供脉冲能量,有利于提高油气产量和采收率。因此对于压力拱效应明显的储层,应该适当地放大生产压差,同时在压力拱拱角裂缝容易张开的位置打加密井,提高油气藏采收率。

### 4 结论

本文对油气田开发过程中,压力拱的形成,存在性,表征参数和应用前景进行了研究。

(1) 与隧道开挖、矿山开采情况类似,油气田开发过程中,孔隙流体压力降的不均匀分布导致储层和上覆岩层发生不均匀变形,并在上覆岩层中产生压力拱,通过地震数据和应力测试数据证明了油气开发过程中压力拱是存在的。

(2) 压力拱常常通过压力拱比进行描述,压力拱比越大,上覆岩层中越容易产生压力拱。压力拱比与储层的几何特征(纵横比,形状)以及储层与外围岩层的岩石力学参数(剪切模量,泊松比,弹性模量)有关。纵横比大、储层强度小的储层,压力拱比越接近于 1,压力拱越容易形成,反之压力拱比越接近于 0,压力拱越不容易形成。

(3) 压力拱效应的存在,使得压降漏斗内储层上覆岩层的部分重量通过压力拱传递到压降漏斗以外的区域中,压降漏斗内的储层总应力降低,而压降漏斗外的岩层总应力增大,随着压力波的传播,压力拱作用区域不断增大,因此压力拱可以有效地保护储层,使降低后的储层渗透率增大,削弱应力敏感的影响。

(4) 低渗致密储层受裂缝导流能力的影响较大,压力拱的存在使得拱内裂缝导流能力因为总应力降低而增大,而拱外裂缝导流能力因为裂缝张开而增大。

(5) 忽略压力拱效应的应力敏感实验,将会导致油藏工程师对低渗、致密储层开发动态特征产生错误的认识,并且制定错误的开发技术政策,对于压力拱效应明显的储层,可以适当地放大生产压差,并在裂缝张开区域打加密井,从而提高产量和采收率。

#### 参考文献 (References)

- [1] 喻波,王呼佳. 压力拱理论及隧道埋深划分方法研究 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008: 10-20.  
Yu Bo, Wang Hujia. The theory of stress arching and deep tunnel classification method research [M] Beijing: China Railway Publishing House, 2008: 10-20.
- [2] Hettema M H H, Boström B, Pedersen E S, et al. Depletion-induced stress changes in a HPHT reservoir: Calibration and verification of a full-field geomechanical model [C]//Society of Petroleum Engineers. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA, October 4-7, 2009.
- [3] Soltanzadeh H, Hawkes C D. Induced poroelastic and thermoelastic stress changes within reservoirs during fluid injection and production [M]// Acosta J L, Camacho A F. Porous Media: Heat and Mass Transfer, Transport and Mechanics. Hauppauge, NY: Nova Science Publishers, Inc,

- 2009: 27–57.
- [4] Soltanzadeh H, Hawkes C D, McLellan P J, et al. Poroelastic modelling of production and injection-induced stress changes in a pinnacle reef[C]// Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada, May 2009.
- [5] Soltanzadeh H, Hawkes C D, Sharma J. Closed-form solutions for production- and injection-induced stresses in plane-strain reservoirs with elastic properties different from the surrounding rock [J]. International Journal of Geomechanics, 2007, 7(5): 353–361.
- [6] Soltanzadeh H, Hawkes C D. Semi-analytical models for stress change and fault reactivation induced by reservoir production and injection[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2008, 60(2): 71–85.
- [7] Segall P. Stress and subsidence resulting from subsurface fluid withdrawal in the epicentral region of 1983 Coalinga earthquake [J]. Journal of Geophysical Research, 1985, 90(B8): 6801–6816.
- [8] Segall P, Fitzgerald S D. A note on induced stress change in hydrocarbon and geothermal reservoirs[J]. Tectonophysics, 1998, 289(1–3): 117–128.
- [9] Rudnicki J W. Alteration of regional stress by reservoirs and other inhomogeneities: Stabilizing or destabilizing [C]//Proceedings of the 9th International Congress, Paris, France, Swets & Zeitlinger: A. A. Balkema Rotterdam, 1999: 1629–1637.
- [10] Gouly N R. Reservoir stress path during depletion of Norwegian chalk oilfields[J]. Petroleum Geoscience, 2003, 9(3): 233–241.
- [11] Holt R M, Flornes O, Li L, et al. Consequences of depletion-induced stress change on reservoir compaction and recovery [C]. The 6th North America Rock mechanics Symposium (NARMS): Rock Mechanics across Borders and Disciplines, Houston, Texas, USA, 2004, June 5–9.
- [12] Khan M, Teufel L W. The effect of geological and geomechanical parameters on reservoir stress path and its importance in studying permeability anisotropy [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2000, 3(5): 394–400.
- [13] Segura J M, Fisher Q J, Crook A J L, et al. Reservoir stress path characterization and its implications for fluid-flow production simulations[J]. Petroleum Geoscience, 2011, 17(4): 335–344.
- [14] Verdon J P. Geomechanical simulation of CO<sub>2</sub> injection[M]//Verdon J P. Microseismic Monitoring and Geomechanical Modelling of CO<sub>2</sub> Storage in Subsurface Reservoirs. Berlin: Verlag Berlin Heidelberg, 2012: 83–105.
- [15] Dusseault M B. Geomechanical challenges in petroleum reservoir exploitation[J]. Journal of Civil Engineering, 2011, 15(4): 669–678.
- [16] Hansford J, Fisher Q. The Influence of Fracture Closure from Petroleum Production from Naturally Fractured Reservoirs: A Simulation Modelling Approach [C]. The Oral Presentation at AAPG Annual Convention, Denver, Colorado, USA, June 7–10, 2009.
- [17] Kristiansen T G, Barkved O I, Buer K, et al. Production induced deformations outside the reservoir and their impact on 4D seismic[C]. International Petroleum Technology Conference, Doha, Qatar, November 21–23, 2005.
- [18] Massaras L V, Massaras D V, Al-Subhi S. The median ratio and near wellbore friction: Useful proppant admittance criteria for design and placement of safe and effective propped hydraulic fracture treatment[C]. SPE/DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi Arabia, May 15–18, 2011.
- [19] Sayers C M. Sensitivity of time-lapse seismic to reservoir stress path[J]. Geophysical Prospecting, 2006, 54(3): 369–380.
- [20] Sayers C M, Schutjens P M T M. An introduction to reservoir geomechanics[J]. The Leading Edge, 2007, 26(5): 597–601.
- [21] Biot M A, Willis D G. The elastic coefficients of the theory of consolidation [J]. ASME Journal of Applied Mechanics, 1957, 24(2): 594–601.
- [22] Mura T. Micromechanics of defects in solids [M]. The Hague, Netherlands: Martinus Nijhoff Publishers, 1982: 354–372.
- [23] Addis M A, Hughes GMI/Baker, Yassir N. An overview of geomechanical engineering aspects of tight gas sand developments[C]. SPE/DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi, Arabia, April 4–7, 2010.
- [24] Dautriat J, Gland N, Youssef S, et al. Stress-dependent directional permeabilities of two analog reservoir rocks: A prospective study on contribution of m-Tomography and pore network models [J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2009, 12(2): 297–310.
- [25] 罗瑞兰. 关于低渗致密储层岩石的应力敏感问题 [J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(2): 126–130.  
Luo Ruilan. Oil Drilling and Production Technology, 2010, 32(2): 126–130.
- [26] 窦宏恩, 白喜俊. 低渗透和高渗透储层都存在应力感性[J]. 石油钻采工艺, 2009, 31(2): 121–124.  
Dou Hongen, Bai Xijun. Oil Drilling and Production Technology, 2009, 31(2): 121–124.
- [27] 郭平, 张俊, 杜建芬, 等. 采用两种实验方法进行气藏岩芯应力敏感研究[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(2): 7–9.  
Guo Ping, Zhang Jun, Du Jianfen, et al. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(2): 7–9.
- [28] 中华人民共和国行业标准编写组. SY/T5358—2002 储层敏感性流动实验评价方法[S]. 北京: 石油工业出版社, 2002.  
The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SY/T5358—2002 Formation damage evaluation by flow test[S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2002.

(责任编辑 吴晓丽)

### 《科技导报》“研究论文”栏目征稿

“研究论文”栏目专门发表自然科学、工程技术领域具有创新性的研究论文,要求学术价值显著、实验数据完整、具有原始性和创造性,同时应重点突出、文字精炼、引证及数据准确、图表清晰,并附中、英文摘要以及作者姓名、所在单位、通信地址、关键词等信息。在线投稿:www.kjdb.org。