

# 储层多孔介质变形类型及有效应力研究

商永涛 冯 青 李胜胜 孙艳妮 (中海油服油田生产研究院, 天津 300450)

**摘 要:** 随着低渗透气藏的开采, 储层多孔介质物性参数的大小均会随着应力变化而发生改变, 比如渗透率、压缩系数和孔隙度等。文中主要探讨了多孔介质的变形类型及其机理, 并且分析了影响多孔介质变形的内外因素。在前人研究成果的基础上, 对不同有效应力修正方程的适用性和可行性进行了对比分析, 同时对 Terzaghi 有效应力方程和双重有效应力进行了分析研究。研究结果表明多孔介质变形存在本体变形和结构变形两种变形机制, 双重有效应力比 Terzaghi 有效应力更加全面地反映了地层岩石的实际情况。

**关键词:** 多孔介质; 本体变形; 结构变形; 双重有效应力

## 0 引言

随着低渗透气藏的开采, 储层多孔介质一些物性参数的大小均会随着应力变化而发生改变, 比如渗透率、压缩系数和孔隙度等。其原因在于储层介质随着流体的采出, 所受的应力场发生了变化, 从而导致介质的孔隙结构发生了变形。岩石骨架颗粒及孔隙喉道变形是储层应力敏感性的本质, 因此分析和研究多孔介质的变形原因和机理是进行应力敏感性研究的基础。

## 1 多孔介质变形的类型及变形机制

### 1.1 多孔介质的变形类型

由储层岩石的力学特征可知, 随着气藏的开发, 地层中流体的产出导致地层能量的衰减, 介质孔隙压力也发生改变使得储集层的岩石结构发生了变形, 其类型主要有弹性变形、塑性变形及弹-塑变形——二者之间的过渡变形, 其如图 1 所示。

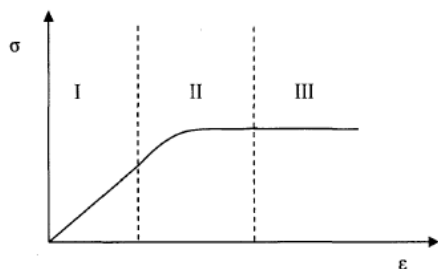


图 1 多孔介质形变与应力关系示意图

图中, I 表示弹性变形; II 表示弹-塑形变; III 表示塑性形变。

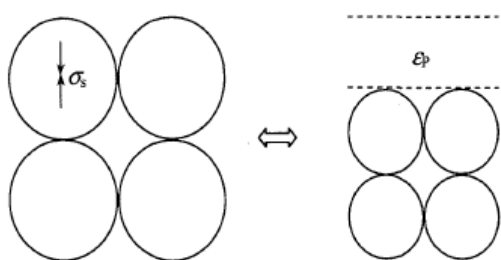


图 2 本体形变示意图

### 1.2 多孔介质的变形机制

多孔介质变形的实质是介质内部固体物质或颗粒发生了位移, 导致其形态结构发生了变化。根据多孔介质变形的形式, 可将储层中的变形分为本体变形和结构

变形两种。

#### 1.2.1 本体变形

指的是骨架颗粒自身体积或形状发生改变而导致的岩石变形。在本体变形过程中, 岩石骨架颗粒的排列方式没有发生变化, 变化的仅仅是骨架颗粒本身, 本体变形实质上就是岩石的压缩变形, 如图 2 所示。

#### 1.2.2 结构变形

指的是由于受到外界压力使得岩石骨架颗粒的排列方式发生改变而导致岩石的整体变形。结构变形实际上就是岩石的压实变形, 在其变形过程中, 岩石颗粒的排列方式发生变化但颗粒自身的形状体积不变, 如图 3 所示。

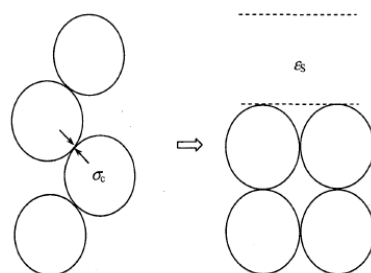


图 3 结构形变示意图

在油气藏储集层中, 一般认为其发生的变形为弹性或弹-塑性变形, 随着流体的采出对地层的影响, 发生变化主要为岩石骨架体积和介质的孔隙体积。因此, 可以说储集层中的介质变形是由于流体采出而使得有效应力发生变化而引起的。

## 2 引起多孔介质变形的因素

导致多孔介质发生形变既有所处环境的影响, 也有介质自身结构和性质的影响。外在因素一般会使得介质的应力平衡状态发生了改变, 内在因素是介质内部各质点发生了相对位移, 从而使得岩石发生了形变。

### 2.1 外部因素

目标油气层都会埋藏于几千米的地层以下, 不仅会受到温度、地层流体类型及特征等条件的影响, 也会受到上覆地层压力、孔隙压力等各种压力的影响。

#### 2.1.1 温度的影响

温度对岩石的弹性极限和强度极限都会有一定的影响, 当温度升高时, 岩石的弹性极限和强度极限都会降

低,弹性模量变小,屈服点越来越明显,塑性增加,从而导致岩石从脆性到塑性转变。

### 2.1.2 孔隙中流体类型的影响

不同的流体类型具有不同的体积弹性模量,从而导致孔隙压力的变化也不同,对岩石的形变影响较大。

## 2.2 内部因素

### 2.2.1 物质组成

构成多孔介质的组成成分类型不同,对应的硬度也会不同。硬度较低时,越易发生变形,比如低硬度的泥质砂岩就很容易变形。

### 2.2.2 颗粒的接触关系

岩石介质骨架颗粒间的接触关系对岩石的变形程度会有很大的作用,一般来说,按线接触、凹凸接触及缝合接触方式的岩石不易发生变形,但按点接触排列的岩石就更容易发生变形。

### 2.2.3 胶结类型

岩石一般通过胶结作用将不同的骨架颗粒连接在一起,胶结程度越高,岩石就越不容易发生变形;反之,越容易发生变形。

## 3 储集层多孔介质的应力研究

多孔介质变形一般存在着两种变形机制:一种是本体变形,是因骨架颗粒自身受力变形而导致的整个岩石变形;第二种是结构变形,是因为骨架颗粒之间发生了相对位移而使得孔隙度发生变化的变形。

### 3.1 结构有效应力

岩石多孔介质是由分散的骨架颗粒所构成的,岩石骨架颗粒之间会发生不可逆转的相对位移,从而导致了岩石发生了结构变形,如图4示。

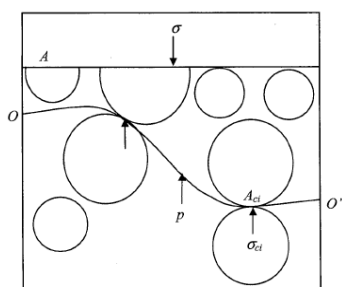


图4 多孔介质结构有效应力示意图

结构变形是由于颗粒之间的触点应力,而不是颗粒内部的应力导致的。在图4中,取由一接触点连成的曲面o-o'。 $A_{ci}$ 表示第*i*个触点应力垂向分量 $\sigma_{ci}$ 作用面积的垂向投影面积,则存在以下应力平衡关系式(1)

$$\sigma A = \sum \sigma_{ci} A_{ci} + (A - \sum A_{ci}) p \quad (1)$$

令结构有效应力:

$$\sigma_{eff}^s = \sum \sigma_{ci} A_{ci} / A$$

$$\phi_c = 1 - \sum A_{ci} / A = 1 - R_c$$

则式(1)可变为:

$$\sigma_{eff}^s = \sigma - \phi_c p \quad (2)$$

式中: $\phi_c$ 表示触点孔隙度,为介质触点处孔隙面积占整个介质横截面积的百分数。 $\phi_c$ 为多孔介质胶结

程度的度量参数,其值越大,胶结程度越弱,反之,则胶结程度越强。

### 3.2 本体有效应力

本体应变是骨架颗粒本身发生变形造成的,由固体骨架的性质决定的,它的大小取决于骨架应力的数值变化。把作用在整个多孔介质上并且使得介质发生形变的应力称之为本体有效应力 $\sigma_{eff}^p$ 。

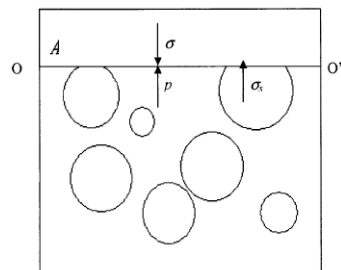


图5 多孔介质本体有效应力示意图

在图5中,任取一多孔介质界面 $oo'$ ,其截面积为 $A$ ,然后在该截面上对整个介质施加一个总应力 $\sigma$ ,假设 $\sigma_s$ 为介质骨架颗粒上的平均应力,那么根据应力平衡原理,可得到本体有效应力的计算公式(3)

$$\sigma_{eff}^p = \sigma - \phi p \quad (3)$$

结构有效应力和本体有效应力共同构成了多孔介质的两个有效应力,合称为多孔介质的双重有效应力。

## 4 结论

随着储层介质随着流体的采出,所受的应力场发生了变化,从而导致介质的孔隙结构发生了变形,类型主要有弹性变形、塑性变形及弹-塑变形。储层的渗透率或孔隙度均都会发生变化,其变化的大小与岩石的类型、储层的结构以及是否存在裂缝等有关。

### 参考文献:

- [1] 贾文瑞,李福垠,肖敬修.低渗透油田开发部署中几个问题的研究[J].石油勘探与开发,1995,22(4).
- [2] 石玉江,孙小平.长庆致密碎屑岩储集层应力敏感性分析[J].石油勘探与开发,2001(10).
- [3] 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(05):44-48.
- [4] 陈元千.油藏工程实用方法[M].北京:石油工业出版社,1996.
- [5] 宋付权.变形介质低渗透油藏的产能分析[J].特种油气藏,2002,9(14):33-37.
- [6] 姜汉桥,刘奋,刘伟.不完全可逆变形介质油藏流体渗流模型及其数值解[J].水动力学研究与进展,2003,18(3):343-348.

### 作者简介:

商永涛(1981-),男,硕士,信息工程师,2005年7月毕业于中国石油大学(华东)应用物理学专业,2008年6月毕业于中国石油大学(华东)无线电物理专业,现工作于中海油田服务股份有限公司油田生产事业部,长期从事油藏数值模拟及油田数字化技术应用工作。