

油层物理

绪 言

油层物理学是石油地质专业的一门专业基础课。这门学科所涉及的内容包括三个部份：即 (1) 岩石物理性质，包括岩石的孔隙度、渗透率、饱和度、比面、电学性质等；(2) 地层条件下气体和石油的性质，包括地下油、气的粘度、比重、体积系数、压缩系数等；(3) 岩石和流体的相互关系，包括岩石的润湿性、相对渗透率和毛细管压力。

对于石油地质专业来说，侧重点放在岩石物理性质以及与石油勘探和认识油层有关的物理——化学性质。因此，篇幅的重点是第一、三部份。(章)。流体物理性质主要侧重在基本理论的叙述，而不着重写这些性质的测定方法。在最后即第四章中，选用了部份参考教材和研究成果，组成了资料应用的汇编。这是为了培养学生能够应用油层物理的所有知识来解决实际地质问题的能力。

至于油层物理知识在油田开发和储量计算中的应用，将在本专业的专业课程中系统讲授。在本课程中仅打下基础，而不作进一步的叙述。

油层物理学所涉及的内容，主要以物理——化学、岩石学为基础。还需要物理学、化学、数学、石油地质学的基础知识。

从石油勘探和认识油层的角度来看，油层物理知识正逐步与岩相学及测井学构成新的边缘学科。近年来国内外的沉积相研究都广泛地应用油层物理的基本知识，为进一步寻矿有利相带中的有利油气聚集带提供依据。同时，在已勘探的含油(气)面积上，广泛使用测井资料来研究油层的物理性质。

油层物理学所研究的对象是储油(气)岩石(井下岩心)以及油、气、水。因此，它所取得的都是最直接、最宝贵的原始资料。对这些岩心和流体，在测定它们的性质时，都不断引用最新的仪器

设备。例如研究岩石结构的电子扫描。研究油、水分布的微波技术等等都是最新的技术成果。因此。要充分掌握油层物理学的全部知识。需要有坚实的基础理论知识。

这本讲义主要适用于石油地质专业 也可供其它专业参考。在编写本讲义时。主要选用了以下的参考书：

- 《1》 《苏》 卡佳霍夫著 油层物理基础
1958年 10月
- 《2》 《美》 阿米克斯著 油层工程物理学部分
1961年 原文
- 《3》 《美》 G. V. 奇林加等著 碳酸盐岩石油与天然
1972年 气的开采
- 《4》 《美》 E. 麦斯盖特著 采油物理原理 (上册)
1949年
- 《5》 《美》(苏译) 别尔切克著 地层液体性质
1960年 (原文)
- 《6》 《美》 E. B. 斯坦丁著 地下石油与天然气的
相态特性

除上述参考书外。还引用了国内外一些杂志发表的研究成果。

由于时间仓促。编写中肯定会有不少错误或不当之处。请读者提出宝贵意见。

编者。 1979年3月

绪 言

第一章 储油岩石的物理性质

§1 储油岩石的物理性质

- 一、孔隙度
- 二、渗透率
- 三、饱和度
- 四、岩石的压缩性
- 五、岩石的比面
- 六、饱和岩石的电导性
- 七、碳酸盐含量

§2 影响储油岩石物理性质的地质因素

- 一、碎屑成份对储油物性的影响
- 二、粒度对储油物性的影响
- 三、胶结物对储油物性的影响
- 四、岩石构造对储油物性的影响
- 五、后生作用对储油物性的影响

§3 储油岩石物理性质的确定

- 一、岩样的清洗
- 二、孔隙度的测定
- 三、渗透率的测定
- 四、饱和度的测定

§4 碳酸盐岩石的物理性质

- 一、理想裂缝性岩石的渗透率
- 二、实际裂缝系统

三	碳酸盐岩基质渗透率的确定	55
四	碳酸盐岩的孔隙系统	58
五	碳酸盐岩的薄片统计法	62
六	碳酸盐岩的比表面	

§5 岩心分析的近代进展

第二章 储油气层的流体性质

§1 储油气层流体相态的基本特征

- 一、单组份系统
- 二、双组份系统
- 三、多组份系统

§2 天然气的性质

- 一、理想气体定律
- 二、气体的压缩因子
- 三、天然气中非烃类成份对压缩因子的影响
- 四、天然气的比重
- 五、天然气的粘度

§3 地下石油的性质

- 一、饱和压力
- 二、地层气体的体积系数
- 三、天然气在石油中的溶解度
- 四、地层石油的体积系数、压缩系数
- 五、地下石油的比重
- 六、地层液体的二相体积系数
- 七、地下石油的粘度

八 汽——液的平衡

九 地层流体的高压物性测定

第三章 储油岩石的润湿性、相渗透率和毛细管压力

§1 润湿性

一、表面张力和表面能

二、润湿性

三、润湿性的确定方法

§2 相渗透率

一、一般概念

二、相渗透率——饱和度和关系曲线

三、相渗透率曲线的物理解释

四、相对渗透率的测定方法

§3 毛细管压力

一、基本概念

二、理想介质中的毛细管压力

三、饱和顺序对毛细管压力的影响

§4 毛细管压力的测定方法

一、半渗透隔板法

二、离心机法

三、水银注入法

四、动力毛细管压力法

五、蒸气压力法

§5 毛细管压力资料的应用

一、简述

二、毛细管压力曲线的一般特征

- 三 毛细管压力曲线的形态
- 四 毛细管压力用液柱高度表示的方法
- 五 毛细管压力曲线的定量特征
- 六 确定储油层的平均毛细管压力
- 七 应用毛细管压力曲线计算渗透率
- 八 应用毛细管压力资料计算相渗透率
- 九 碳酸盐岩的毛细管压力与隙缝宽度的关系
- 十 毛细管压力曲线与相对渗透率曲线的关系
- 十一 毛细管的吸入与排替资料
- 十二 应用毛细管压力资料确定储油岩石的润湿性
- 十三 应用毛细管压力资料确定岩样的孔隙管道大小分布
- 十四 正态概率曲线及其特征
- 十五 按岩石学特征及孔隙结构特征对储集岩进行分类

第四章 资料应用选编

- 一 孔隙度和渗透率
- 二 孔隙几何特征在勘探上的应用
- 三 应用岩相学及统计学研究碳酸盐储集岩的某些物理性质
- 四 油层孔隙结构、润湿性和油田采收率
- 五 认识油层的方法 技术手段及发展状况
- 六 碳酸盐储集岩的孔隙结构研究
- 七 RESERVOIR ENGINEERING

FUNDAMENTALS

(Chapter 1)

第一章 储油岩石的物理性质

§1 储油岩石的物理性质

一、孔隙度

孔隙度是岩石的孔隙体积与其总体积之比。它表示岩石容纳液、气、碳氢化物的能力。是油田储量计算的一个重要参数。

对具有工业价值的储油层，一般都是胶结性的沉积岩，其胶结物质可以堵塞部份孔隙空间。因此，孔隙的一部份形成孤立的，不与其它孔隙相连通的“死孔隙”。在实际油田开采和开发中，必须分别确定其绝对孔隙度和有效孔隙度。

岩石的绝对孔隙度是岩石总的孔隙体积与岩石总体积的比值。

岩石的有效孔隙度是岩石中连通的孔隙体积与岩石总体积的比值。

对于颗粒状的沉积岩石，当其中含有少量或中等数量的胶结物质时，其绝对的和有效的孔隙度大致相近；而对于比较复杂的，含有较多胶结物质的颗粒状沉积岩以及碳酸盐岩，则两者差别甚大。

有一部份孔隙与孔隙之间的通道虽然是相互连通的，但是其半径极小，在一般开采的压差下仍然不能使流体通过；此外，孔隙空间表面粘附的水薄膜，也会缩小孔隙通道的直径。而孔隙空间中所包含的油、气、水的性质，例如具有较高的粘度，则造成这一部份孔隙通道是不能为流体所通过的。因此，又引入流动孔隙度的概念。

流动孔隙度是指在一定压差下，在岩石中能为流体所通过的孔隙体积与岩石总体积的比值。流动孔隙度在数值上是不确定的，其大小随压力差和流体性质而改变。对于特定油层，其开采条件和油、气、水性质确定时，流动孔隙度才具有实际意义。

二、渗透率

(岩石中流体通过)

岩石的渗透率是在一定压力差下流体通过岩石(多孔介质)的能力。岩石渗透率的大小直接影响到油田开发速度。油井的日产量甚至确定油层是否具有工业价值。渗透率主要取决于孔隙通道的大小和形状。

通常使用达西定律来计算岩石渗透率。

达西在 1856 年做了大量的渗透实验。实验结果归结为一个通用的公式即达西定律。

达西定律指出：当单相渗透的液体粘度为 1 厘泊。它完全饱和孔隙及孔隙通道，并以层流方式渗透通过 1 平方厘米的岩样截面，以及岩样两端的压力差为 1 个大气压。液体的流量在 1 厘米长度的岩样上通过 1 厘米³/秒时，孔隙介质的渗透率为 1 达西。

用公式表示则为：

$$K = \frac{Q \mu L}{F(P_1 - P_2)} \quad (1.1)$$

式中 K ——岩样的渗透率，达西；

Q ——在压力差为 $(P_1 - P_2)$ 时，通过岩石的液体流量，厘米³/秒

F ——岩样的横截面积，厘米²；

L ——岩样的长度，厘米；

μ ——液体的绝对粘度，厘泊；

P_1, P_2 ——分别为岩样两端的压力，大气压。

在式(1.1)中使用的是混合单位制，如使用厘米·克·秒制单位时，渗透率的因次则为：

$$K[\text{厘米}^2] = \frac{Q[\text{厘米}^3/\text{秒}] \mu[\text{达因} \cdot \text{秒}/\text{厘米}^2] L[\text{厘米}]}{F[\text{厘米}^2] (P_1 - P_2)[\text{达因}/\text{厘米}^2]}$$

因此 $1 \text{ 达西} = 10^{-8} \text{ 厘米}^2$ 。

为了对比仅仅是岩石的通过能力，通常使用一种不与岩石发生相互作用的、不可压缩的液体或气体，在层流条件下使其通过岩石。这样所确定的渗透率称为绝对渗透率。它仅仅是岩石的物理特性。

由于液体或多或少地会与岩石颗粒表面发生物理——化学作用，因此在实验中通常用乾空气或氮气作为流体来确定岩石的绝对渗透率。

当流体是气体时，则公式改为：

$$K = \frac{\bar{Q} \mu L}{F(P_1 - P_2)} \quad (1.2)$$

或

$$K = \frac{2 Q_0 \mu L P_0}{F(P_1^2 - P_2^2)} \quad (1.3)$$

式中 $\bar{Q}$ ——在平均压力 $\bar{P}$ 下， $(\bar{P} = \frac{P_1 + P_2}{2})$ ，气体的流量，

厘米³/秒；

Q_0 ——在压力为 P_0 时通过岩样的气体体积，厘米³/秒；

P_1, P_2, P_0 ——分别为岩样进口、出口和大气压力；

μ ——气体的粘度，厘泊。

在实验室中测定岩石渗透率时，通常是使用园柱形或长方形的

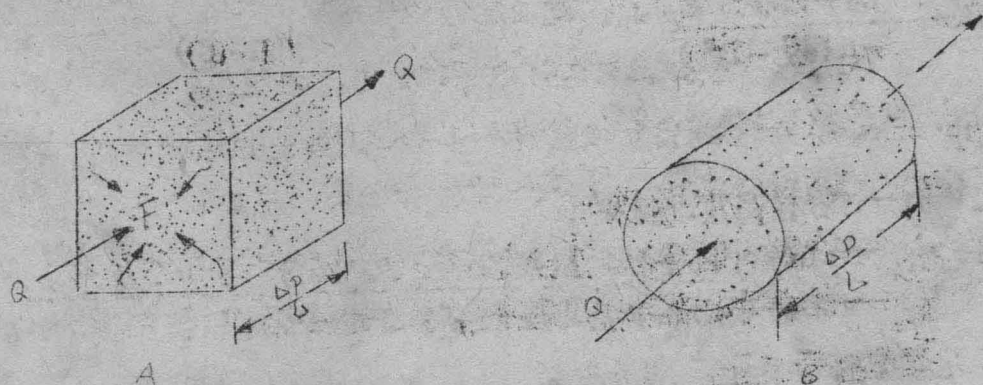


图 (1.1) 单向渗透率测定

岩样。在某些情况下使用具有中心孔的圆柱形岩样。

对于圆柱形或长方形的岩样，当其为平行层面水平流动时使用不可压缩液体或者空气或氮气时可分别按式(1.1)和式(1.3)计算。

当岩样是带中心孔的圆柱形时(图1.2)，则应按径向达西定律进行计算。见式(1.4)及式(1.6)。

对于不可压缩的液体

$$K = \frac{R_k}{2\pi h(P_1 - P_2)} \frac{Q \mu l \ln R_c}{R_k}$$

(1.4)

对于干空气或氮

气

$$K = \frac{R_k}{2\pi h(P_1 - P_2)} \frac{Q \mu l \ln R_c}{R_k}$$

或

$$K = \frac{R_k}{\pi h(P_1^2 - P_2^2)} \frac{Q_0 \mu P_0 l \ln R_c}{R_k}$$

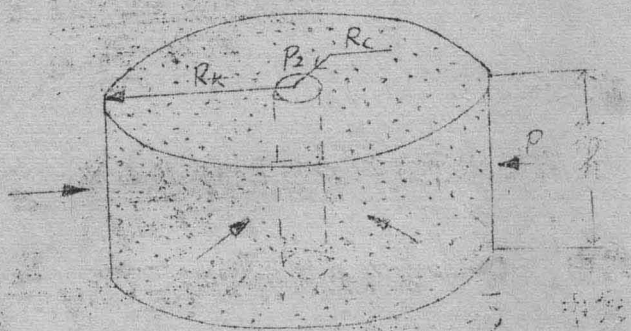
式中

h ——岩样高度，厘米；

R_k ——岩样外圆半径，厘米；

R_c ——岩样中心孔半径，厘米。

其它符号同上。



图(1.2) 径向渗透率测定

(1.5)

(1.6)

实际储层的岩石性质是十分复杂的。岩石渗透率具有很大的变

化幅度。在油田面积上为了合理布置油井，合理地掌握及分配油井的开采和开发速度，通常需要掌握整个储层水平方向与垂直方向的变化。可以使用实验室模拟的方法，电子计算机方法以及用矿场资料和电测井等方法来求得整个储层的渗透率变化图。

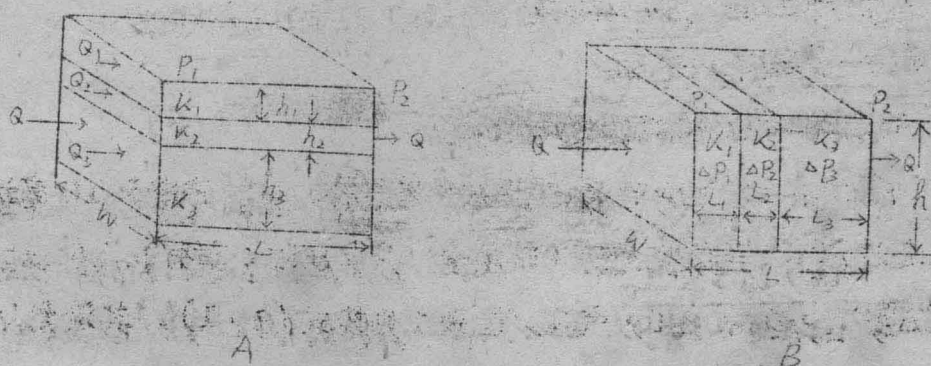
可以将复杂情况简化为几种简单情况的总和。

对于垂直方向有几个互不渗透的地层渗透率变化的平均值，可按式计算

$$\bar{K} = \frac{\sum_{j=1}^n K_j h_j}{\sum_{j=1}^n h_j} \quad (1.7)$$

对于水平方向渗透率顺序变化时，则

$$\bar{K} = \frac{L}{\sum_{j=1}^n \frac{L_j}{K_j}} \quad (1.8)$$



图(1-3)垂直方向和水平方向渗透率变化的情况

对于径向地层情况也完全相同。

如果岩层中具有一些沟道时，则岩层的渗透率应为基质部分的渗透率与沟道渗透率的总和，亦即

$$K_{\text{总}} = K_{\text{基}} + E_{\text{沟}} \quad (1.9)$$

基质渗透率 $K_{基}$ 即为通常所指的岩石渗透率。当具有沟道时，可引用泊叶稷 (Poiseuille) 定律：

$$Q = \frac{\pi r^4 \Delta P}{8 \mu L} \quad (1.10)$$

把沟道看成是一支圆形的，半径为 r 的毛细管，则其流动应服从式 (1.10)。

如果孔隙介质的通道完全看作互相平行的毛细管束所组成，则泊叶稷定律可与达西定律相比较。

将式 (1.10) 与式 (1.1) 相等，则可得

$$K = \frac{r^2}{8} \quad (1.11)$$

使用混合制单位，当 r 的单位为厘米， K 为达西时，则

$$K = \frac{r^2}{8} = \frac{r^2}{8 \times 9.869 \times 10^{-9}} = 12.5 \times 10^6 r^2$$

式中

r ——毛细管半径，厘米；

K ——渗透率，达西。

可以举一实例说明沟道的影响。

例：有一块 $10 \times 10 \times 10$ 厘米³ 的岩样，其渗透率为 10 毫达西；通过流体（呈线性流动）的粘度 μ 为 1 厘泊；岩样两端的压力梯度 $\Delta P/L$ 为 0.0025 大气压/厘米；则按式 (1.1)，其流量 Q_1 等於 0.0025 厘米³/秒。

在同样的条件下，通过的是一支直径为 0.02 毫米的毛细管，则其流量 $Q_2 = 0.001$ 厘米³/秒（按式 1.10 计算）。

由此可见，当在 (10 厘米)³ 立方体岩样中增加一支直径为 0.02 毫米的毛细管时，其总流量将为 0.0035 厘米³/秒。即比原来增大了 40%；如果岩样的渗透率不是 10 毫达西，而是 1 毫达西，

则在同样的情况下，流量将增大400%。

因此，特别是对于致密岩层，必须重视岩层中的沟道。此外，也可以启示我们，即用人工方法增加岩层中的沟道，例如使用增产措施（如压裂、酸化）均可大大增加油井的日产量。

以上所叙述的绝对渗透率又称为物理渗透率。它是对于单相均质流体在多孔介质中流动，且与多孔介质不发生明显的物理化学作用时所测得的渗透率。然而，在实际储层内，包含油、气、水的多相流动，同时，这些流体明显地将会与岩石颗粒表面发生物理化学作用。因此，在实际应用中，还需要确定当多孔介质中存在有多相流动时其中某一相流体的渗透率，这称为相渗透率，又叫有效渗透率。

有效渗透率和绝对渗透率的比值称为相对渗透率。

相渗透率将在后面作详细叙述。

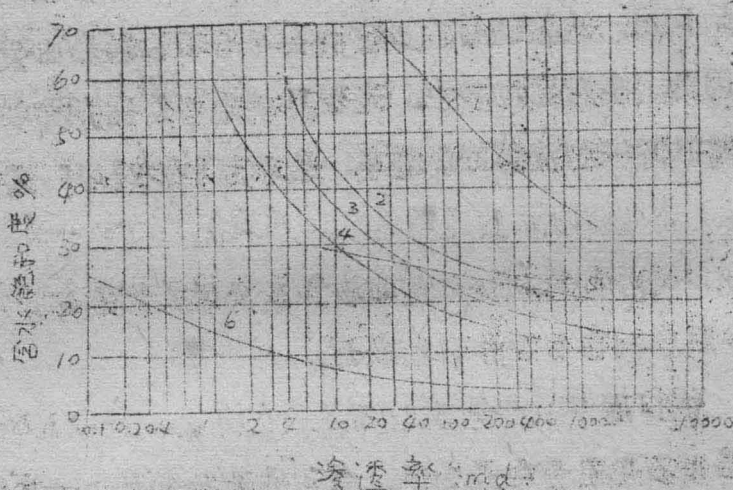
三、饱和度

储层岩石的孔隙中是为油、气、水所饱和的。在压力高于饱和压力的油藏中，则为油、水两相所饱和。所饱和的油、气、水含量分别占总孔隙体积的百分数称为油、气、水的饱和度。

绝大部分油层最初是完全为水所饱和的，当碳氢化合物向储层运移并聚集时，必然要排出原来在孔隙中所饱和的水。然而，由于各种毛细管现象，由于流体与岩石表面的相互关系以及孔隙结构的复杂性，不可能把水完全排挤出来，因而在为石油所饱和的部分，其中的岩石颗粒表面上仍含有一层水的薄膜。此外，岩石颗粒交界处，四周为很细的毛细管所包围的孔隙，仅有一端与其它孔隙相连通的“死胡同”孔隙以及极细的孔隙通道中，在石油排驱水的过程，上述孔隙中将会残存一部分水。所有残留在储油层中的水称为束缚水，或称残余水、封存水。

储油层中的束缚水量可以在很大范围内变动。其数值大小主要取决于岩石的孔隙结构，即孔隙通道的半径及其所占的比例。此外，还取决于石油排水的条件，岩层中油、气、水的物理—化学性质。一般来说，水油分界面上的表面张力越高，水对岩石的润湿性越好（即水越容易粘附在岩石表面），岩石的孔道半径越小和半径较小的孔隙越多，石油驱水压力越小，则油层中的束缚水就应该越多。

在一般情况下，束缚水的含量从宏观来看与岩石渗透率有一定关系。许多研究者指出：束缚水饱和度随岩石渗透率减小而增大。1952年E. Ben



图(1.4)

不同油田岩心束缚水含量随渗透率变化的曲线。图中 1——安纳古阿克—顿姆巴尔；2——多敏古兹；3——得克萨斯州东部；4——爱尔克；5——马格诺利亚（石灰岩）6——华逊（白云岩）。

mdahl Ben

A。对美国威尔克斯砂层的岩心分析中得出一个重要概念——即低渗透率地层具有55%的水饱和度

时，仍可看作生产层；对高渗透率储层来说，其水饱和度上限略小于50%。M·麦斯盖特（1949年）曾引用了一张统计图（图1.4）说明束缚水饱和度与岩石渗透率的关系。但是，必须指出，这种关系只是一个普遍的倾向，而至今尚未找到定量的关系。因为，如上所述束缚水饱和度的大小取决于一系列的因素，而不仅仅是岩样渗

透率。

岩石的束缚水饱和度直接影响到储量计算，评价储层以及油田的开采和开发。因此，在实际工作中，准确地确定岩石束缚水饱和度是极其重要的。

最直接的是从储层中取出岩心在实验室中进行测定油、气、水的饱和度。但是在钻取岩心以及将岩心取到地表来之后，岩心中的原始的流体分布发生了一些变化。其原因是：(1)取心时，由于泥浆柱的压力大于油层压力，泥浆滤液在压力差作用下渗入井底附近岩层，从而排挤掉原来在岩石孔隙中的部分原油和部分束缚水；(2)当岩心从地层取到地面过程中，随着压力降低，岩心中的油气水就要膨胀（以气体膨胀为最明显），可以把岩心中一部份油和水挤出。因此，取出的岩心所测定的油气水饱和度数值上就会与原始情况不同。

为了能更真实地反映储层实际情况，不少人研究了取心条件。认为在一般压力的油层中，使用油基泥浆取心，可以使取出岩心的束缚水饱和度只发生极小的改变。由此提出，利用油基泥浆取心，在实验室中测定其水饱和度，而总孔隙体积（100%）减去水饱和度则可认为是原始的油饱和度。

尽管对岩心所测定的饱和度有各种偏差，但它仍是最直接、最准确的方法。

近年来，发展了一些人工模拟地层条件，并确定其饱和度的方法。这些方法所得的数据，一般还只能作为对比使用。

此外，利用饱和地层水的岩石具有电传导特性，可以直接用测井方法确定岩石的水饱和度。这一方法是近年来应用最广，发展最快的方法。这种方法的原理和应用将在其它章节中叙述。

四 岩石的压缩性

埋藏在几百——几千米的储油气层承受着内、外二重压力。即，由上覆岩石建立的外压力，它在各个方向有不同的数值，以及包含在岩石孔隙中流体的内压力，内压力是水静力学的，作用在各个方向都是相同的。

可以将整个岩石的压缩性看成是由矿物的压缩性（即骨架的压缩性） $C_{\text{矿}}$ ，岩石总体积的压缩性 $C_{\text{岩}}$ 以及孔隙的压缩性 $C_{\text{孔}}$ 三部分所组成。

当储油气层未被钻开之前，它处于相对平衡状态。当储层进行钻井并打开油层时，从孔隙空间排出流体导致压力平衡的破坏。在降低压力时，被压缩的岩石骨架以及其中含的流体就会膨胀，岩石的孔隙体积也将随着减少。在实际油田开发时，最感兴趣的是孔隙体积的变化。因为当水压系统的规模较大而油层压力很高时，由于液体的膨胀及孔隙容积的减少，就可以从油层中把相当大量的液体排到油井中去。

孔隙的压缩性 $C_{\text{孔}}$ 可以由下式表示

$$C_{\text{孔}} = \frac{1}{V_{\text{岩}}} \frac{dV_{\text{孔}}}{dP} \quad (1.12)$$

它在数量上表示当压力变化 1 个大气压时，在单位体积岩石中孔隙空间的容积所减少的数值。根据大量的研究， $C_{\text{孔}}$ 的最小值等于 $(1-2) \times 10^{-5}$ 1/大气压范围内。

式中 $V_{\text{岩}}$ ——岩石的体积；

$V_{\text{孔}}$ ——岩石孔隙体积；

P ——压力，大气压。

$C_{\text{孔}}$ 的数值可以变化在很大的范围内，例如，对于胶结砂岩则在 7×10^{-5} —— 14×10^{-5} 1/大气压之间。因此对于大面积、高压、埋藏较深的油藏应当在实验室中使用恢复地层条件的仪器来确定岩石的各种压缩性，特别是孔隙体积的压缩性。