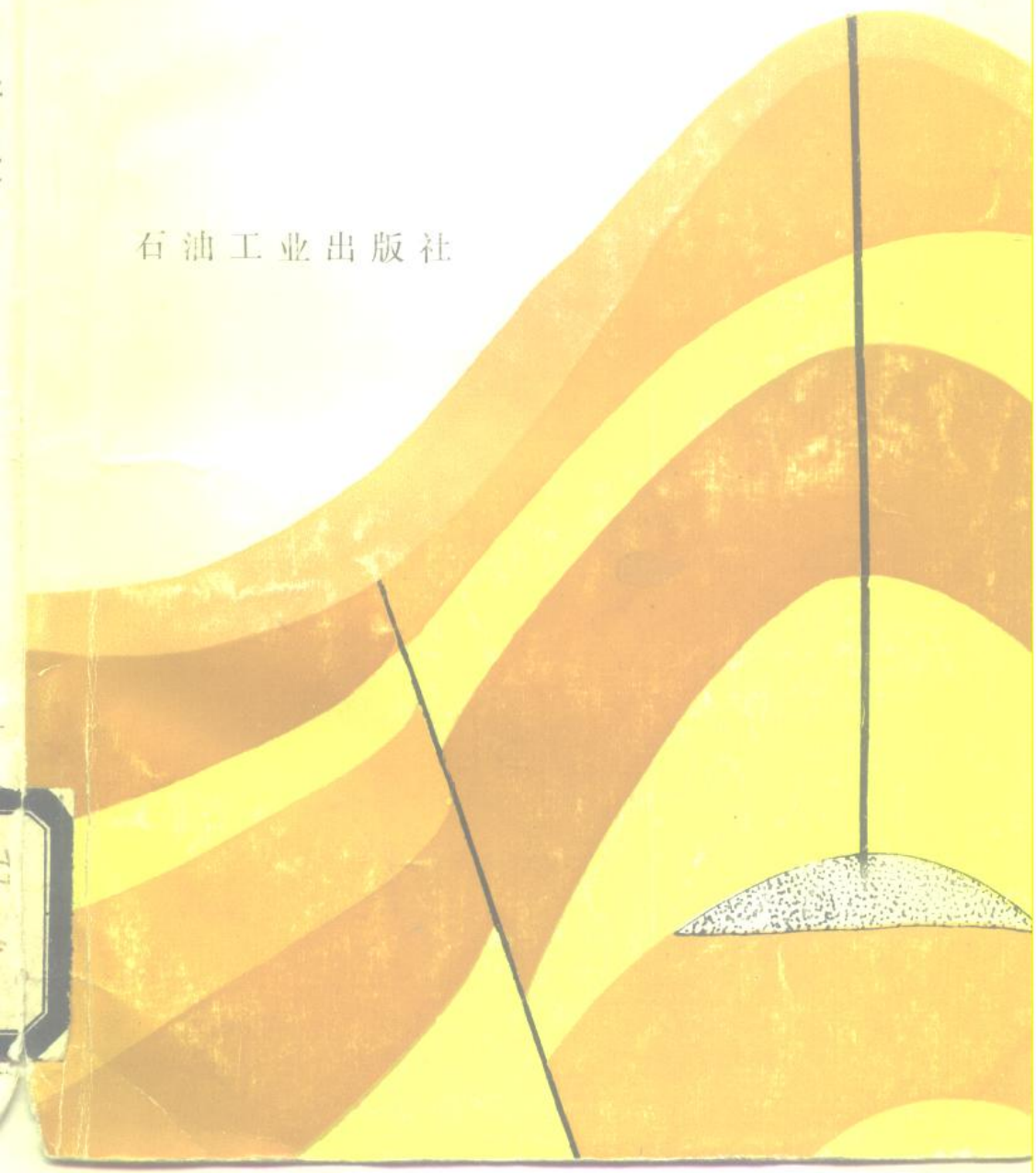


异常

〔苏〕A.T. 戈尔布诺夫 著

油田开发

石油工业出版社



30876

异常油田开发

[苏]A.T.戈尔布诺夫 著

张树宝 译 申中辉 校



00284462



200419840

石油工业出版社

内 容 提 要

书中叙述了异常油田开发的理论基础,液体和气体在弹性、弹-塑性、塑性孔隙及裂缝介质中的渗流方程。书中从数值上估价了不可逆和部分不可逆效应对被开发油、气层孔隙度和渗透率值的影响,指明了深部油田油井产能可能多次发生不可逆变化,直到油流完全停止为止。作者提出了超深油田开发的某些方法,叙述了根据水动力试井资料来求地层和液体参数的方法,以及如何计算这类油田开发主要工艺指标的方法。

书中对非牛顿性质原油油田的开发和研究的问题、非牛顿液体在孔隙介质中的渗流特点以及这类油田开发的特点等作了详细的叙述。其中指出:开发非牛顿原油油田时,提高压力梯度对提高原油最终采收率有利,但储层的裂隙性及其弱胶结性会导致开发过程的复杂化。

本书可供从事石油和天然气开发和开采的科研和现场工作人员、以及石油院校有关专业师生参考。

А.Т.Горьунов

Разработка аномальных нефтяных

месторождений

Издательство «Недра» 1981

异常油田开发

[苏]А.Т.戈尔布诺夫 著

张树宝 译 申中辉 校

石油工业出版社出版

(北京安定门外外馆东后街甲36号)

妙峰山印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

350×1168毫米 32开本 8³/₈印张 1插页 218千字 印1—1,800

1987年5月北京第1版 1987年5月北京第1次印刷

书号: 15037·2694 定价: 2.00元

前 言

异常油田开发的理论基础是油田开发科学中急待解决的问题之一。

迄今为止，根据地下流体动力学领域取得的成就，已研究出适用于孔隙性储层水驱或气驱油田的开发方法，以及其开发设计的计算方法。这是苏联石油科学的一项重大成就。但是，与此同时发现这类的油田越来越多，其开发过程和研究结果，按现有油田开发的观念是无法解释的。

由于技术水平提高，苏联有多一半采油联合企业开始钻4000~5000m以上的深井。这么深的油、气层要承受很高的压力和温度。在开发这些油田的过程中，储层要发生部分或全部的不可逆形变。地层形变加上液体和气体性质的变化，会明显地影响这些油田动态的特征（主要是开发指标），酿成极其不良的结果——油井产能急剧地下降，且无法恢复。现行的地层液、气渗流理论以及油田开发理论均不能解释和描述这些过程。因为到目前为止，几乎没有形成弹-塑性或塑性形变的孔隙以及裂缝岩石中液、气体的渗流理论。此外这类油田的开发设计方法也没有进行过论证。

在开发任一深度的出砂油、气田过程中，疏松砂岩会变为砂子。因此，这类油田的开发过程需从应用及学术方面加以研究。

由于强化了油田开发过程，无论地层压力还是压力梯度都要增加。超过原始地层压力时，以前闭合着的天然裂缝可能张开，致使注水井的吸水能力和油井产能均发生变化。提高注入压力，会造成地层压力梯度增加（渗流速度加快）。非牛顿原油渗流时，原油以及储层的参数要随压力梯度的改变而变化。

为了解决上述问题及其他一些问题，作者原则上拟定了经水动力学论证过的新工艺方法。

本书实质上试图把饱和油、水地层、具有异常岩石性质的油田设计和开发的理论原理统一起来。

作者对B.H.尼科拉耶夫斯基, IO. II. 鲍里索夫和 3.A. 阿凡江富有成效的学术合作以及书中问题的讨论表示深切的谢意。

目 录

第一章 油田开发过程中异常油层渗流性质变化	
过程的物理原理	(1)
一、弹性、弹-塑性、塑性驱动的主要物理基础	(1)
二、测定孔隙度与压力依变关系的试验	(6)
三、测定压力影响下的渗透率变化的实验	(9)
四、确定裂缝性岩石渗透率随压力变化的特点	(11)
五、实验数据的解析表示法	(13)
六、在开发过程中异常高压油田动态的特点	(15)
七、深部地层液体的性质	(19)
八、相渗透率曲线分析	(22)
九、流动系数与压力梯度的关系	(27)
第二章 油田开发中弹-塑性驱动的研究	(32)
一、概述	(32)
二、弹-塑性驱动渗流模型	(34)
三、弹-塑性驱动的主要渗流方程	(37)
四、用近似公式研究弹-塑性驱动的不稳定渗流	(40)
五、用精确公式研究稳定渗流	(49)
六、用近似公式研究稳定渗流	(59)
七、根据试井解释资料确定地层参数	(65)
八、岩石弹性极限的计算	(70)
九、弹-塑性驱动下油层开发设计的特点	(72)
十、弹-塑性介质中气体渗流模型	(76)
十一、形变岩石中多组分混合物和气化液体的渗流特点	(79)
第三章 对油田开发中非线性-弹性驱动的研究	(82)
一、非线性-弹性驱动渗流的主要方程式	(82)
二、非线性方程的自动模拟解和近似解	(82)

三、对弹性液体稳定渗流的研究	(88)
四、稳定试井	(92)
五、根据注水井的试井资料求地层参数	(98)
六、对非线性-弹性驱动下气化液体稳定渗流的研究	(102)
七、根据不稳定试井资料求地层参数	(106)
八、非线性-弹性驱动下水驱油过程	(110)
九、非线性-弹性油田开发设计的特点	(118)
第四章 对油田开发中塑性驱动的研究	(123)
一、基本渗流方程	(123)
二、液体在塑性孔隙介质中的稳定渗流	(125)
三、根据稳定试井资料解释成果求地层参数	(130)
四、塑性驱动下的水驱油特点	(130)
五、塑性驱动油田开发设计的几个问题	(135)
六、出砂渗流的机理	(138)
七、出砂液体的渗流方程	(140)
八、考虑出砂液体渗流中的弹性极限问题及渗流区的划分	(144)
第五章 裂缝性储层研究和开发特点	(146)
一、概况	(146)
二、裂缝-孔隙储层中液体渗流的基本方程及其解	(148)
三、根据稳定试井资料求裂缝性地层的参数	(159)
四、根据不稳定试井资料计算裂缝-孔隙性地层参数值	(166)
五、裂缝储层中原油储量的计算	(176)
六、求井网的产量	(179)
第六章 在油田开发时对孔隙介质中异常液体渗	
流的研究	(181)
一、非牛顿液体渗流的一些模型	(181)
二、非形变介质中均质非牛顿液体的平面平行稳定渗流	(186)
三、非形变介质中非牛顿液体的轴向对称稳定渗流	(188)
四、形变介质中均质非牛顿液体的稳定渗流	(197)
五、根据试井资料求地层和非牛顿液体的参数	(200)
六、非线性驱动方式下的水驱油过程	(201)
七、求井网产量	(207)

第七章 异常油田开发的矿场经验	(209)
一、深部油田的开发经验.....	(209)
二、出砂油田开发的一般矿场分析.....	(216)
三、西伯利亚油田谢诺曼含水层和油层出砂开发的几个问题.....	(219)
四、乌津油田(非牛顿性质原油)的开发特征.....	(221)
第八章 异常油田的开发方法和开发设计的一般性问题	(224)
一、弹-塑性和塑性驱动方式下深部油田的开发方法	(224)
二、一般深度油田裂缝性和孔隙性形变储层的开发方法.....	(228)
三、考虑地层渗流性质变化确定油田开发主要工艺指标方法的特点.....	(234)
四、地层“工作”与油井“工作”的关系.....	(237)
五、对油田开发完全用自喷开采的论证.....	(242)
六、异常原油油田开发的特点.....	(247)
结束语	(249)
译后语	(250)
参考资料	(251)

第一章 油田开发过程中异常油层

渗流性质变化过程的物理原理

在开发一系列油田的过程中，当地层压力和井底压力下降时，生产井的产能不可逆的急剧下降，相反，注水井的吸水能力却明显增加。出砂地层的开发及其液体的渗流过程是不可思议的。在牛顿原油油田的开发过程中会遇到许多复杂情况。

详细分析了孔隙性岩石中液、气渗流过程的室内和矿场研究结果后认为，偏离线性达西渗流定律的原因各不相同。其中主要的是：1) 压力对地层和液体参数的影响；2) 渗流速度(压力梯度)变化时，原油组分及其性质对渗流过程的影响；3) 当渗流速度很大时，惯性和湍流引起渗流阻力增加，这种情况可能发生在井底附近，特别是在裂缝性地层中。

实验工作表明，对许多储层岩石来讲，考虑不可逆形变是完全必要的。对13条相渗透率曲线的分析表明，确定每一具体情况下的相渗透率与饱和度的关系以及计算油田开发主要技术指标时利用这些关系是必要的。在沥青-胶质原油以及其他原油的渗流速度很低时，发现它们的流动系数与压力梯度有明显的依变关系。普通水在泥质砂岩或小孔隙通道的砂岩中渗流时，亦然存在同样的依变关系。

一、弹性、弹-塑性、塑性驱动的主要物理基础

油田钻开之前，地层处于平衡状态，在油田钻开和投入开发之后，地层压力开始变化(降低)。这时，地层骨架应力增加造成岩石形变，骨架粒团产生位移，胶结物的结构发生变化。

在一般情况下，由于岩石本身的颗粒尤其是胶结物质，都是

由弹性和粘性（塑性）碎屑组成，因此形变可以是弹性的，非理想弹性的，甚至是非弹性的（塑性的）。

在含油储层岩石中，由于其机械性能的非均质性，一部分发生弹性形变，而另一部分在相同应力下可能发生塑性形变。地层

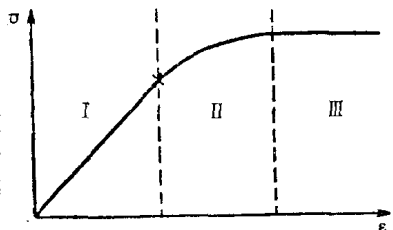


图 1 孔隙性和裂缝性岩石的应力 σ 与形变 ϵ 的依变关系

I—弹性形变区；II—弹-塑性形变区；III—塑性形变区；“x”—岩石的弹性极限

塑形变及塑性形变时渗流。

压力恢复后，某一部分由于具有弹性，力图恢复原始体积形状，而另一部分则部分地或全部地保持已产生的形变。许多研究人员^[51]指出，残余形变程度与孔隙介质所含液体的组分有关。由此可见，地层中的液体，既可在其弹性形变时渗流，又可在弹-

储层岩石的特性最好用试验过程中测绘的“应力 σ ——形变 ϵ ”图（图 1）来研究。该图可分成三个区：I——服从虎克定律区；

$$\sigma = E\epsilon \quad (I.1)$$

式中 E ——弹性模量；

II——弹-塑性形变区；

III——塑性形变区。

I 区中的形变是可逆的，II 区中是部分可逆的，III 区中是完全不可逆的。开始偏离虎克定律的点称为岩石的弹性极限（图 1 中的“x”点）。

许多研究者的研究指出，高渗透储层的形变在地层压力变化以后的 10~40 分钟就终止了，在低渗透岩石（泥岩，致密石灰岩和砂岩）中，地层压力变化后，形变能持续时间长达 20~40 小时^[92, 93]。

因此在一般情况下，储层岩石的整个形变过程由四部分组成：1) 短期可逆形变（弹性的），2) 短期残余形变（不可逆的），

(3)长期可逆形变(弹性的); (4)长期残余形变不可逆的。

某些岩石在地层压力明显变化时仅产生弹性变形。例如方解石胶结的砂岩(不是泥质胶结的砂岩)就属于此类岩石。现行的弹性渗流理论就是为此类岩石研制的。弹-塑性岩石在负荷变化后,不能完全恢复本身的原始性质(白云岩,石灰岩,以粘土作胶结物的岩石等)。塑性岩石具有完全不可逆形变的特点。砂子,粘土和泥质胶结的砂岩等均属此类岩石。

无论是可逆的还是不可逆的形变,由于岩石孔隙度和渗透率发生变化,都会影响地层的渗流性质。

当在虎克定律有效范围内形变时,岩石孔隙度和渗透率的变化都具有可逆的特征,当应力超过岩石的弹性极限时,渗透率和孔隙度的变化就成为不可逆的。在油田开发过程中,重要的是要确定哪些岩石,在多大压力下会发生不可逆形变或者渗透率和孔隙度产生不可逆变化。

M. H. 斯特里若夫^[175]和T. B. 伊萨科夫^[10]首先指出,液体渗流过程中须考虑孔隙度和渗透率不可逆变化的必要性^[10]。Г. И. 巴连勃拉特和A. П. 克雷洛夫考虑了不可逆形变后,制作了液体在孔隙介质中渗流的第一个数学模型^[18, 21, 118]。这些文献里只考虑了孔隙度的不可逆变化,显然这是不够的,这一点下面将要谈到,因为地层渗透率也会发生不可逆变化,并且要比孔隙度的变化大。

我们进行研究的目的是,要确定地层主要参数(孔隙度,渗透率,岩石体积等)在油田开发过程中的变化情况。

在加压条件下,对取出的含油、气岩样的机械性能进行室内研究有两个主要目的:

- 1) 求出在大气压力下测得的介质参数(形变、孔隙度和渗透率等),与其相应深度的数值(随着岩石压缩压力升高)之间的变化联系。

- 2) 确定油田开发过程中地层压力降低(增加)时地层参数的变化情况。我们对后一种作法很感兴趣。实际上实验时作用于岩样

骨架上的压力是外加的，它等于地层给定埋藏深度的岩石压力。饱和孔隙空间与恒压储油层(容器)是连通的。如果实验的目的是第二个，那么外加压力在实验过程中应保持恒定，而液体孔隙压力(“地层”压力)应从原始压力降到某一压力值(到零)。若实验的目的是第一个，那么必须改变外加压力和孔隙压力。

所有的岩样实验都是在不泄液(不泄液而压缩)，或保持孔隙压力不变(即在泄液)条件下升压进行的。一些典型的土壤实验(例如象K.捷尔查吉书中^[179]所述的)表明，利用不渗透塞子把岩石压力 p_r 施加到“软”岩样上，孔隙液体中的压力 p_π 增加同一个数值，此时几乎看不到塞子下陷。这个事实使K.捷尔查吉认识到了引入有效压力 p_{eff} ●的必要性，而有效压力变化也会引起岩石明显形变：

$$p_{\text{eff}} = p_r - p_\pi \quad (\text{I.2})$$

近来发表的一些文献[205、213—216]指出，在一般情况下关系式(I.2)可以写成以下形式：

$$p_{\text{eff}} = p_r - n p_\pi \quad (\text{I.3})$$

式中系数 n 表示实验过程中所研究岩石不完全反映孔隙压力(地层压力)变化的这一特征。B.H.尼科拉耶夫斯基^[40]完全揭示了这个系数的本质，他证明 $n \approx 1$ ，是由地层岩石颗粒的胶结性决定的，方程式(I.3)本身仅与不泄液时压缩的实验相符，在计算渗流时应利用方程式(I.2)。

在油田开发中引入有效压力(压缩压力)是极其重要的。现在对确定正常地层压力和异常地层压力油田，在开发前及开发过程中的有效压力(压缩压力)进行一些初步计算(表1)。编制表1时，为了确定岩石压力 p_r ，取岩石的平均密度单位为 g/cm^3 ，取相应静水柱压力作为正常地层压力，取超过正常地层压力的一半或更多的压力作为异常高的地层压力。

正常地层压力下的有效压力可作为深部孔隙地层骨架应力状

● 苏联文献中有时把 p_{eff} 称为“虚构”压力或压缩压力——原注。

态的参数。在未开发的地层中,岩石骨架处于很高的有效压力下,例如在3000m深处达45MPa(见表1)。在开发过程中,如果地层压力减少一半,是完全有规律的话,那么上述深度的有效压力达60MPa(有效压力的波动范围为15MPa)。在开发异常高压地层时,

表 1 确定正常地层压力和异常高地层压力油田开发前和开发过程中的有效压力

参 数	地 层 埋 藏 深 度 H, m								
	500	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000
岩石压力, MPa	12.5	25	50	75	100	125	150	175	200
开发前正常地层压力, MPa	5	10	20	30	40	50	60	70	80
有效压力, MPa	7.5	15	30	45	60	75	90	105	120
开发过程中地层压力P, MPa	2.5	5	10	15	20	25	30	35	40
有效压力, MPa	10.0	20	40	60	80	100	120	140	160
有效压力变化范围, MPa	2.5	5	10	15	20	25	30	35	40
开发前异常地层压力, MPa	7.5	15	30	45	60	75	90	105	120
有效压力, MPa	5.0	10	20	30	40	50	(60	70	80)①
开发过程中地层压力, MPa	2.5	5	10	15	20	25	30	35	40
有效压力, MPa	10.0	20	40	60	80	100	120	140	160
有效压力变化范围, MPa	5.0	10	20	30	40	50	60	70	80

①括号内数据为译者所加,数据计算得到——译者。

有效压力波动更大。例如开发前3000m深处的有效压力为30MPa,而在开发过程中达60MPa(有效压力波动为30MPa)。随着开发目的层埋藏深度的增加,开发前后有效压力变化也增加,在正常地层压力下,8000m深处的有效压力变化为40MPa,而在异常高的地层压力下,有效压力的变化为80MPa或更大。

表2列举了在平均地温梯度为0.03℃/m及偏离该值时,不同深度地层温度的估算值。深部油田的温度可能很高。例如高于平均地温梯度①下8000m深处的地层温度为300~400℃。

深部地层的岩石压力、地层压力和地层温度都很高,对储层的渗流特征,饱和流体的物理状态及物理-化学性质都有明显的影

① 原文误为“在平均地温梯度下”——译者。

表 2 地层温度随深度的变化

条 件	深 度				
	2000	4000	6000	8000	10000
平均地温梯度等于 $0.03^{\circ}\text{C}/\text{m}$ 时	70	120	180	240	300
偏离平均地温梯度值时 ^①	80	160	240	320	400

① 根据西西伯利亚油田地层温度测定资料2000m深度的平均温度约 80°C ——原注。

响。因此,需要对试井仪表以及整个油矿设备提出一些特殊要求。

二、测定孔隙度与压力依变关系的试验

在土壤力学专著[57,178]中首次描述了确定岩石压缩性的试验,这些试验是用颗粒之间几乎没有胶结物的岩样(砂子)完成的。图2列出了这类实验的一个典型例子。实验时首先把载荷加到 0.35

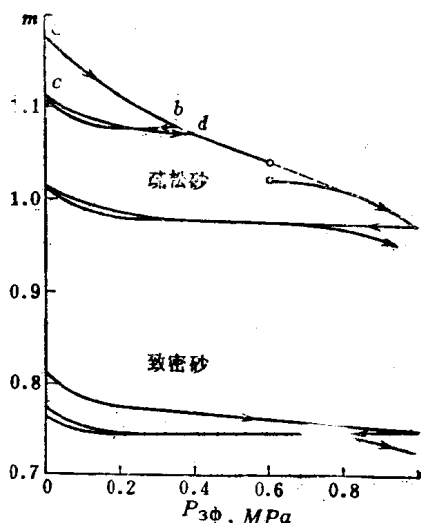


图 2 视孔隙度系数 m 与有效压力 p, ϕ 之间的关系[179]

$m = V_n / (V - V_n)$ —视孔隙度系数;
 V_n —岩石的孔隙容积, V —
 (硬物质的)岩石体积

MPa(b 点), 然后降低(c 点)。用这种方法把载荷改变了三次(三个循环)。确定砂子较大的残余(不可逆)形变就是这些试验的典型结果。在载荷变化不大(约 1MPa)时, 弹-塑性介质就有反映。孔隙度最大的不可逆变化发生在加载与卸载的第一个循环中。

美国研究人员的著作[219]具有重要的价值。在他们的实验中, 从不同方向给岩样加压, 即孔隙压力和轴向压缩压力。研

究了五块岩样：软石灰岩，比里砂岩，哈兹马尔克白云岩，里佩托粉砂岩以及泥质页岩。实验时各方向压力的变化范围从 零 到 200MPa。

对这些实验结果的分析表明：

1) 岩石的机械性能（强度极限和塑性极限）是有效应力的函数。这种情况主要是对砂岩和石灰岩而言。

2) 不同岩石的形变机理不同。砂岩：在应力不大时发生弹性形变，压实颗粒；进一步增加有效压力（大于100MPa），便引起矿物组分（石英和长石颗粒）碎裂以及胶结物质（泥质物等）流动。石灰岩：它的形变与砂岩不同点在于，不仅胶结物质流动，而且岩石骨架颗粒本身也会流动；在有效应力很大时（约100MPa），石灰岩转变为塑性。粉砂岩和页岩：虽然颗粒小，但形变与砂岩和石灰岩相似。白云岩：形变主要伴随着尚未断开的宏观裂缝。

3) 当压缩压力不大时，岩石具有弹性性质；而当超深油田的压力很高时，则具有弹-塑性质。这就是地层形状变化而不破坏其完整性的特性所在。

4) 地层温度变化范围为10—300℃，几乎并不影响岩石的机械性能。

现在分析一下在确定岩石压缩系数和孔隙压缩系数方面所进行的研究，这些研究是在接近地层的条件下进行的。

许多研究者所使用确定储层岩石压缩系数的仪表，大都与Д. А. 安托诺夫的仪表相似〔8〕。

在确定岩石压缩性实验中查明，作用于岩石骨架上的压缩压力变化时，岩石的残余形变特别明显。例如М. С. 巴戈夫和В. Н. 佐伊〔14〕在评定石灰岩的压缩系数时发现了较大的残余形变，而在砂岩里，残余形变很小甚至完全没有。

文献〔140〕中的综合表2列举了许多研究者的试验结果。可惜实验中仅记录了介质的压缩系数 β_0 ，而没有记录下岩石骨架本身的相应压缩系数 β_1 ，因此就不可能确定出所研究岩石的其他弹性常数。

然而利用这些实验资料，至少能判明地层条件下介质压缩系数的范围，并可作出如下定性的结论：

1) 随着有效压力的增加，介质压缩系数普遍下降。几乎所有的研究者都发现了这个特点。对这种现象的定性解释是：随着有效压力增加，介质变密集，颗粒接触面积加大。因此在分析很大的地层压力变化时，应当用非线性关系代替虎克定律的线性关系。

表 3 孔隙压缩系数平均值及渗透率变化平均值

岩样类别	研 究 者	岩样 数	平 均 值	
			$\alpha_m, 1/\text{MPa}$	$\alpha_k, 1/\text{MPa}$
孔隙岩石	Ч. 卡尔彼捷尔和Г. 斯彼巴尔 [208]	—	0.66×10^{-3}	—
	М. С. 巴戈夫, В. И. 佐伊 [14]	13	2.80×10^{-3}	—
	Л. М. 莫尔莫尔什捷夫 [146]	27	5.90×10^{-3}	—
	И. 法特 [214]	4	1.10×10^{-3}	9×10^{-3}
	Д. А. 安托诺夫 [8]	11	0.50×10^{-3}	—
	И. 法特 [218]	9	1.80×10^{-3}	—
	Х. 霍尔 [218]	—	0.87×10^{-3}	—
	Я. Р. 莫罗佐维奇 [147]	31	1.63×10^{-3}	—
	平 均 值		2.0×10^{-3}	
孔隙岩石	Ч. 法特, Д. 戴维斯 [216]	5	—	10×10^{-3}
	А. 拉奇, Р. 赫姆斯蒂克和 Ч. 乔格 [225]	16	—	10×10^{-3}
	И. А. 布尔拉夫, Н. П. 弗尔索夫 [45]	2	—	15×10^{-3}
	Я. Р. 莫罗佐维奇 [147]	—	—	10×10^{-3}
	平 均 值		—	11×10^{-3}
裂缝-孔隙 岩 石	Д. В. 库托娃娅 [124]	3	—	0.16
	А. Г. 戈尔布诺夫 [140]	10	—	0.19
	平 均 值		—	0.17

2) 对于石英颗粒分选性和圆滑度较好的碎屑和胶结物质含量

不高(10%以下)的砂岩来说,孔隙度几乎不会发生不可逆变化。而对于分选差,碎屑和胶结物质含量高(达25%)的砂岩,以及白云岩和石灰岩来说,其孔隙度会发生十分明显的不可逆变化(达60%以上)^[92,93]。

3)对于不同储层岩石,在有效压力相当条件下,其孔隙压缩系数的变化范围相差非常悬殊(表3),即在 $11 \times 10^{-8} \frac{1}{\text{MPa}} \sim 0.2 \times 10^{-8} \frac{1}{\text{MPa}}$ 范围内变化,平均为 $2 \times 10^{-8} \frac{1}{\text{MPa}}$ 。影响孔隙压缩系数的因素有:胶结性、圆滑度、分选性以及颗粒包裹性质等。

4) X.霍尔^[218] 根据13块砂岩和石灰岩岩样的研究结果试作了孔隙压缩系数与孔隙度关系曲线。近来的研究工作表明,孔隙压缩系数与孔隙度是不相关的,因此霍尔关系至少是偶然性的,Л.М.莫尔莫尔什捷夫^[146]和Я.Р.莫罗佐维奇^[147]的研究资料突出地证实了这个问题。

三、测定压力影响下的渗透率变化的实验

在作用于岩石骨架上的压缩压力变化时,岩石的孔隙度和渗透率都要变化,并且渗透率的变化要比孔隙度的变化大得多。渗透率的变化经常是不可逆的。研究渗透率与压缩压力依变关系所用的仪表同研究孔隙度时所用仪表的原理是相同的。在苏联仪表中最常用的是УНПК型装置。

为了确定渗透率与岩石骨架压力的变化,美国学者H.法特和Л.戴维斯^[216],曾进行了充分的试验,他们研究了八种砂岩岩样,在岩样骨架不受压时,这些砂岩的渗透率为 $0.00435-0.632 \mu\text{m}^2$ 。实验表明,当岩石骨架压缩压力等于102MPa时,其渗透率比不加压时减少了11—41%。在压缩压力变化范围为0.1至20MPa时,渗透率下降很明显。继续加压,渗透率下降不大。

И.法特试验时^[214]研究了选自美国三个不同油田的四种砂岩岩样。(在不加压缩压力的情况下),渗透率为 $0.110-0.335$