

文章编号:1006-6616(2001)01-0041-04

有效压力对低渗透多孔介质孔隙度、 渗透率的影响

刘建军, 刘先贵

(中国科学院渗流流体力学研究所, 河北 廊坊 065007)

摘要:以低渗透多孔介质为研究对象,通过实验得出孔隙度、渗透率随有效压力变化曲线。研究表明,流体在低渗透多孔介质中渗流时,流固耦合效应十分显著。这是因为低渗透多孔介质的孔隙很小,而孔隙度的微小变化,都会对渗透率产生大的影响,因此低渗透介质随有效应力的变化十分明显。由于流固耦合效应的存在,在低渗透油气藏的开发中,不宜采用降压开采,进行油藏数值模拟时,也应进行油藏流固耦合数值模拟。

关键词:低渗透多孔介质;流固耦合;孔隙度;渗透率

中图分类号:TE312

文献标识码:A

0 引言

流体在多孔介质中流动时,流体与多孔介质之间不可避免地要发生交互作用,即流固耦合作用^[1,2],多孔介质骨架在流体载荷的作用下会发生变形和运动,而变形和运动又反过来影响其中流体的流动,从而改变流体载荷的分布和大小。近年来,岩土工程界对岩体中的流固耦合渗流问题进行了大量的研究^[3,4],但大多是以中高渗介质为对象研究的,对低渗透多孔介质研究很少。

低渗透油气田在我国石油工业中占有十分重要的地位,已探明的低渗透油田的储量达20亿吨左右,占已探明未动用储量的60%~70%,因此,低渗透油田将是我国石油工业增储上产的资源基础。在大庆、吉林等油田开发低渗透储层的过程中发现,低渗透储层的流固耦合效应较中高渗透油田明显^[5]。搞清低渗透介质的流固耦合特征对于低渗透油田的开发具有重要的实际意义。

中国科学院渗流流体力学研究所“九五”期间,在中国科学院渗流力学基金的资助下,对流体在低渗透多孔介质渗流时的流固耦合特征进行了大量的研究。本文的内容主要为“低渗透储层流固耦合渗流理论研究”的实验研究部分。

收稿日期:2000-06-18

基金项目:中国科学院渗流力学基金资助项目(编号:KY953)

作者简介:刘建军(1972—),男,1996年毕业于辽宁工程技术大学,获硕士学位。现为中国科学院渗流流体力学研究所在读博士研究生,主要从事岩石流体力学的研究工作。

1 实验原理与实验流程图

测定有效压力对孔隙度的影响时,首先将岩心抽真空,然后饱和地层水,接入岩心夹持器中,排去夹持器间隙内的气体,将岩心夹持器的出口封堵死,在岩心夹持器的排气口安装好计量装置,对计量进行初始化,以消除原始的计量误差,实验过程中固定流压,调整围压,有效压力先一直增大,随后一直降低,从计量装置读取岩心中流体的释放和侵入量,从而得到相应的孔隙体积的变化,计算孔隙度的变化。实验流程如图1所示。

研究有效压力对渗透率的影响时,利用不同润湿性的岩心对气体均是非润湿相的原理,采用氮气测量有效压力对气测渗透率的影响,气体流量由浮子流量计计量,压力由自动计量系统计量,在一定有效压力下,流量和压力稳定后,测量岩心的气测渗透率,改变有效压力测量渗透率随有效压力的变化规律。实验流程图如图2所示。

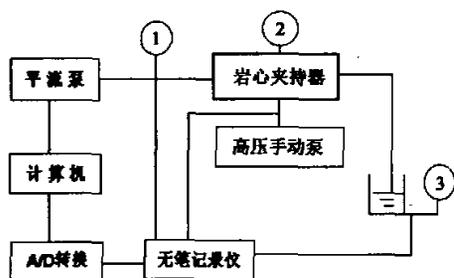


图1 测定孔隙度变化的实验流程图

Fig.1 Flow chart of measuring porosity change

1. 流压表;2. 围压表;3. 流量计

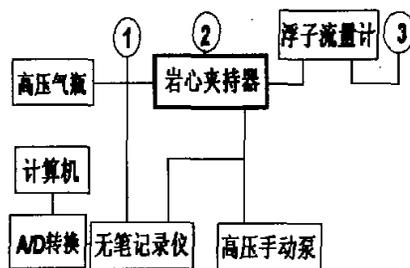


图2 测定渗透率变化的实验流程图

Fig.2 Flow chart of measuring permeability change

1. 流压表;2. 围压表;3. 流量计

实验岩心为大庆头台油田天然岩心,表一为岩心基本参数。表中孔隙度、渗透率均为有效压力为2MPa时的值。此处基质岩心指裂缝不发育的岩心。

表1 测试岩心基本参数

Table 1 Basic parameters of testing cores

岩心号	类型	孔隙度(%)		渗透率 (10^{-9}m^2)
		总孔隙度	裂缝孔隙度	
13 [°]	裂缝性	4.97	0.63	24.35
17 [°]	裂缝性	8.72	1.12	86.62
18 [°]	裂缝性	12.98	1.05	19.60
15 [°]	基质	6.81	/	0.28
21 [°]	基质	10.22	/	0.60
30 [°]	基质	9.53	/	0.62
基质平均		8.85	/	0.50
裂缝平均		8.89	0.93	43.40

2 实验结果

实验过程中,有效压力先从 2MPa 一直增加到 20MPa,然后从 20MPa 降低到 2MPa。分别测定在压力变化过程中孔隙度和渗透率的变化。图 3、图 4 分别为裂缝性和基质岩心平均孔隙度变化曲线。图 5、图 6 分别为基质和裂缝性岩心的平均渗透率变化曲线。图中 ϕ 、 k 分别表示孔隙度和渗透率, ϕ_2 、 k_2 分别为有效压力为 2MPa 时的孔隙度和渗透率。

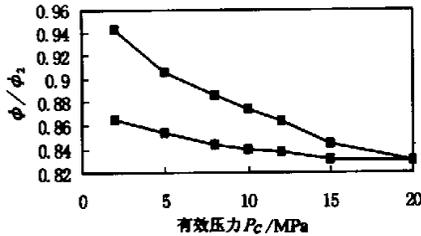


图 3 有效压力对裂缝性岩心孔隙度的影响

Fig.3 Effect of effective pressure
on porosity of fracture cores
靠上曲线为加压曲线,靠下为减压曲线

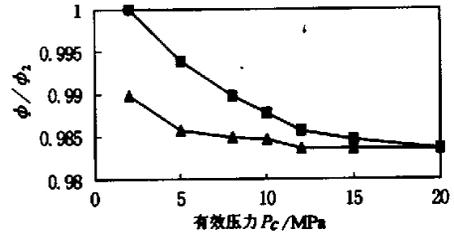


图 4 有效压力对基质岩心孔隙度的影响

Fig.4 Effect of effective pressure on
porosity of matrix cores
靠上曲线为加压曲线,靠下为减压曲线

3 结果分析

分析实验结果可知:

(1)随着有效压力的增加,岩心的渗透率和孔隙度均有不同程度的下降,当有效压力降低后,岩心的渗透率和孔隙度有所恢复,但不能恢复到原始数据。由此表明对于低渗透储层,开发过程中压力的变化会造成孔隙的变形,对储层的渗透性能造成伤害。孔隙的变形具有塑性变形的特征,因此当压力恢复后储层的物性参数并不能恢复到原始值,即伤害是永久性的。

(2)岩心的渗透率和孔隙度随有效压力的增加而下降的程度不同。当有效压力增加至 20MPa 时,裂缝性岩心孔隙度平均下降 13% (至原值的 87% 左右,图 3),而渗透率平均下降 80% 多(图 6),基质性岩心孔隙度平均下降不足 2% (图 4),而渗透率平均下降接近 60% (图 5)。它说明多孔介质中孔隙通道的微小变化对流体的流动能力的影响是非常显著的,特别是低渗透储层由于其原本就具有孔隙细微的特点,因此孔隙体积略有下降都将造成渗透率的急剧降低。

(3)低渗透岩心中裂缝的存在将改变有效压力作用下岩心孔隙的变形能力,相对于基质性岩心,裂缝性岩心物性参数受到的伤害程度更大,且更难以恢复。比较图 5、图 6 可知,随着有效压力的增加,裂缝性岩心渗透率的下降程度明显大于基质性岩心,而当有效压力减小时裂缝性岩心渗透率的恢复程度却明显低于基质性岩心。

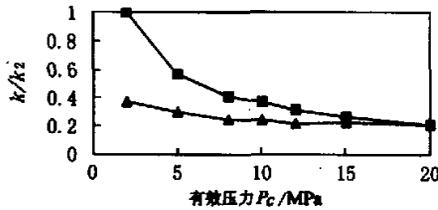


图5 有效压力对基质岩心渗透率的影响

Fig.5 Effect of effective pressure on permeability of matrix core
靠上曲线为加压曲线,靠下为减压曲线

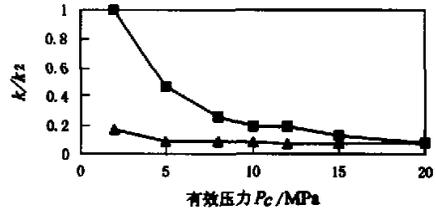


图6 有效压力对裂缝性岩心渗透率的影响

Fig.6 Effect of effective pressure on permeability of fracture core
靠上曲线为加压曲线,靠下为减压曲线

(4)根据实验结果,可用指数关系描述孔隙度、渗透率随有效压力的变化规律:

$$\phi = \phi_0 e^{-\alpha P_c}, k = k_0 e^{-\beta P_c} \quad (1)$$

式中 α, β 是参数, P_c 为有效压力。

参 考 文 献

- [1] Zienkiewicz O C, Chang C T, Bettess P. Drained, undrained, consolidating and dynamic behaviour assumptions in soils[J]. *Limits of Validity*. *Geotechnique*, 1980, 30:385 ~ 395.
- [2] Jacob Bear 著, 李竞生, 陈崇希译. 多孔介质流体动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982.
- [3] Desai C S. Flow through porous media[A]. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*[C]. New York: McGraw-Hill, 1977.
- [4] 李世平, 李玉寿. 岩石全应力应变过程对应的渗透率—应变方程[M]. *岩土工程学报*, 1995, 17(2): 13 ~ 19.
- [5] 李道品. 低渗透砂岩油田开发[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997.

THE EFFECT OF EFFECTIVE PRESSURE ON POROSITY AND PERMEABILITY OF LOW PERMEABILITY POROUS MEDIA

LIU Jian-jun, LIU Xian-gui

(Institute of Porous Flow & Fluid Mechanics of the Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, China)

Abstract: On the basis of experimental study, the law of porosity and permeability versus effective pressure are developed. Because porosity of low permeability media is very small, a little change of its porosity can make its permeability decline rapidly. The paper is useful in solid-fluid coupled simulation of oil reservoir. The paper gives coupled relations in solid-fluid coupled simulation. During the oil and gas field developing, the coupled effect should be considered.

Key words: low permeability porous media; fluid-solid interaction; porosity; permeability