

低渗透储层原位条件下应力敏感性评价

盛英帅¹ 胡清雄² 高辉² 师永民^{1,†} 党永潮³ 邵飞³ 杜书恒¹ 方媛媛¹

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国石油天然气股份有限公司新疆油田分公司采气一厂, 克拉玛依 834000;
3. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第一采油厂, 延安 727501; † 通信作者, E-mail: sym@vip.163.com

摘要 为探讨围压和孔隙压力对岩石渗透率的影响及岩石渗透率敏感性评价的新方法, 选取松辽盆地3块低渗透储层岩样, 采用岩石伺服三轴实验系统, 分别做常规条件和原位条件下的应力敏感性评价, 得到三方面结果。1) 3块样品的渗透率随围压增大而降低, 随着孔隙压力的增大而增大。2) 原位条件下, 物性越差的样品储层应力敏感性越强。借助扫描电子显微镜和恒速压汞实验, 解释了低渗透储层敏感性差异存在的机理。储层岩石喉道的大小和形态、黏土含量和类型、矿物胶结程度是决定渗透率敏感性差异的原因。3) 塑性矿物含量和类型是决定渗透率敏感性差异的主要因素, 即云母、黏土等塑性矿物含量越高, 致密岩石储层渗透率应力敏感性越强。在实际工作中, 评价岩石渗透率敏感性时一般只考虑围压单因素的影响, 会对评价结果带来较大的人为误差, 而岩样地层所处的孔隙压力等条件对渗透率影响不容忽视。为准确地认识低渗透储层的应力敏感特征, 制定更合理的生产压差, 建议进行岩样渗透率敏感性评价时, 恢复地下原位条件。

关键词 原位条件; 渗透率; 应力敏感; 微观结构

中图分类号 TE348

Evaluation on Stress Sensibility of Low Reservoir *in Situ* Conditions

SHENG Yingshuai¹, HU Qingxiong², GAO Hui², SHI Yongmin^{1,†}, DANG Yongchao³, SHAO Fei³,
DU Shuheng¹, FANG Yuanyuan¹

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. The First Gas Production Plant, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Kelamayi 834000; 3. The First Oil Production Plant, Changqing Oilfield Company, PetroChina, Yan'an 727501;
† Corresponding author, E-mail: sym@vip.163.com

Abstract In order to study the effect of confining press and pore press on permeability, the new method of evaluation on stress sensibility is proposed. Three pieces of low permeable reservoir rock samples in Songliao Basin are selected. A servo-controlled triaxial rock mechanics test system is employed to investigate the permeability of sandstone samples under conventional conditions and *in situ* conditions. The results show that: 1) The permeability of three pieces of samples reduce with confining press increasing and pore press reducing. 2) The denser the rock is, the stronger stress sensitivity is, *in situ* conditions, which explains the mechanism of low permeability reservoir sensitivity differences by means of X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), constant speed mercury injection experiment. What's more, throat size and shape, plastic mineral content and type contribute to the differences of permeability sensitivity. 3) Mineral content and type of plastic are the major factor of the sensitivity of permeability differences. The stress sensitivity of tight reservoir permeability rock becomes strong with the increasement of mica, clay and other plastic mineral content. In the practical work, evaluation on stress sensitivity of permeability, the effect of confining pressure single factor is mostly considered, but the effect pore press would be ignored, which is bound to bring larger human error. So evaluation on stress sensibility *in situ* conditions is essential, which is significant for further understanding of stress sensitivity of low permeability reservoir characteristics and development.

Key words *in situ* conditions; permeability; stress sensitivity; microscopic structure

石油天然气开发过程中,渗透率和孔隙度是评价储层的两个重要参数。储层在地下受到上覆地层压力、构造应力、孔隙流体压力的作用,并处于一个相对平衡的系统中。随着油气开发的进行,岩石骨架承受净上覆应力增大,平衡会被打破,表征岩石渗流能力的渗透率也将改变,这就是储层岩石渗透率应力敏感性^[1]。

有关围压、孔隙压力、温度等条件对不同岩石渗透率的影响,已有大量研究。Ghabezloo 等^[2]研究了灰岩在有效应力作用下对渗透率的影响,并指出孔隙压力对渗透率的影响大于围压。Morrow 等^[3]总结出花岗岩的渗透率随着围压、有效应力的增大而渗透率降低的规律,指出裂缝的存在对岩样渗透率有较大的影响。Li 等^[4]提出 E-bei 的砂岩具有较强的应力敏感性和应力敏感滞后,认为原因是砂岩为非弹性材料,卸载后不能较好地恢复原状。Al-Wardy^[5]依据富含黏土矿物的砂岩渗透率对孔隙压力的敏感性强于对围压的敏感性,定性地解释了黏土含量和应力对岩石渗透率的影响。贺玉龙等^[6]初步提出温度和有效应力对砂岩渗透率的影响机制,认为有效应力对砂岩渗透率的影响主要在于有效应力对孔隙和喉道的压缩作用,而温度的影响主要是加剧黏土矿物的分散作用以及砂岩骨架的热膨胀对喉道的压缩作用。张海勇等^[7]从裂缝介质变形的机制方面定量地分析了裂缝性低渗透储层的应力敏感特征。Dong 等^[8]针对页岩和砂岩,分析应力对孔隙度和渗透率的影响,结果显示,页岩和砂岩的孔隙度敏感性基本上相同,页岩的渗透率则比砂岩敏感。肖文联等^[9]对低渗透致密砂岩做应力敏感性评价,研究了不同围压下渗透率随孔隙流体压力的变化规律,结果显示,渗透率随着孔隙流体压力的降低而减小,随着孔隙压力的增加而增加;低围压下渗透率的变化幅度较大,高围压下变化幅度较小。胡大伟等^[10]对多孔红砂岩进行了三轴压缩实验,结果显示,初始压实阶段和弹性变形阶段试样渗透率均匀减小,塑性变形阶段渗透率与轴向变形曲线逐渐趋于水平。刘晓旭等^[11]阐述了低渗透储层应力敏感性产生的机理,分析了内部因素和外部因素的影响。

综上所述,前人的研究主要集中在有效应力对储层渗透率的影响(有效应力增大,渗透率减小,有效应力的改变主要通过围压变化来实现)方面,较少注重孔隙压力变化对储层岩石渗透率的作用,储

层敏感性机理方面的研究较为欠缺,没有形成一致的认识。

本研究针对以上问题,利用三轴孔隙压力伺服实验,分别变化围压和孔隙压力,测定储层的渗透率,并借助扫描电子显微镜、X 射线衍射全岩分析、恒速压汞实验等手段,解释储层渗透率应力敏感性的机理。本文研究结果可以为油气不同开发阶段应力变化对渗透率的改变提供新认识,为低渗透油田开发方案的制定提供理论与实验依据。

1 实验特征和实验方法

1.1 实验装置和实验方法原理

储层岩石的应力敏感性指油气藏岩石的渗透率等物性参数随应力条件变化而变化的性质。储层岩石同时受到上覆压力和孔隙压力的共同作用^[12],有效应力指围压和孔隙压力的差值。探讨渗透率的应力敏感性,可以通过改变围压或孔压两种方法来实现有效应力的变化。变围压应力敏感性的实验研究的理论基础是建立在 Terzaghi 有效应力^[13]基础之上的:

$$p_{\text{eff}} = p_c - p_p, \quad (1)$$

其中, p_{eff} 为有效应力(MPa), p_c 为围压(MPa), p_p 为孔隙压力(MPa)。

采用稳态法测定岩芯气体渗透率,实验样品的渗透率用达西定律(Darcy's Law)^[14]计算:

$$\kappa_a = \frac{2p_a Q_o \mu L}{A(p_1^2 - p_2^2)} \times 10^2, \quad (2)$$

其中, κ_a 为气体渗透率($10^{-3} \mu\text{m}^2$), Q_o 为出口气体流量(mL/s), p_a 为大气压力(MPa), μ 为气体的黏度(MPa·s), L 为样品长度(cm), p_1 为入口压力(MPa), p_2 为出口压力(MPa), A 为样品横截面积(cm^2)。

有效应力改变会影响储层岩石的渗透率,因此渗透率可以表示成有效应力的函数^[15]:

$$\kappa = f(p_{\text{eff}}), \quad (3)$$

其中, κ 为渗透率(μm^2), $f(p_{\text{eff}})$ 为有效应力与渗透率之间的函数。

为使岩样所受应力恢复至地层原位条件,采用 Taw 岩石三轴孔隙压力伺服实验系统(图 1)进行实验。该系统由围压、孔隙压力和轴向压力 3 套独立的加载部分组成,可以进行应力-渗流耦合等岩石力学实验。实验过程中,在计算机控制系统的精准

控制下,按照 0.02 mm/min 的应变速率,对样品进行应力加载。岩石在不同围压和孔隙压力下的孔隙渗透实验,测量分辨率高达 1/200000。实验系统的具体参数见表 1,实验流程见图 2。

储层的上覆地层压力是由该深度岩石的骨架和孔隙流体的总质量产生的压力,计算公式^[16]为

$$p_{ob} = [\varphi \rho_w + (1 - \varphi) \rho_s] g h, \tag{4}$$

其中, p_{ob} 为上覆地层压力(MPa), φ 为孔隙度(%), ρ_w 为地层水密度(g/cm³), ρ_s 为岩石骨架密度(g/cm³), g 为重力常数(N/kg), h 为潜水面至油层的深度(km)。



图 1 三轴高压釜
Fig. 1 The triaxial press cell

表 1 实验仪器参数

Table 1 Parameters of testing system

参数	数值
围压测量范围/%FS	2~100
围压测量误差/%	±2
最大孔隙水压/MPa	0~60
孔隙水流量精度/%	±1
最大轴向实验力/KN	1000

说明: FS 表示满量程(full scale)。

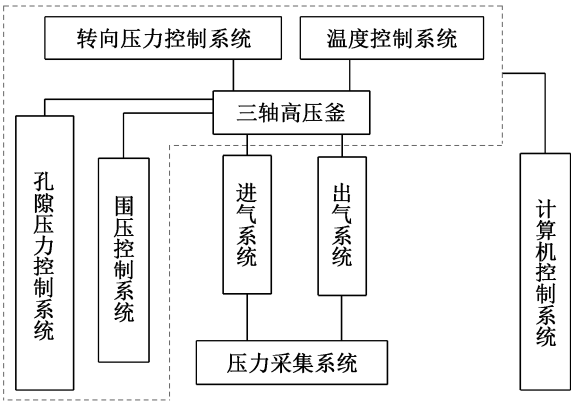


图 2 原位条件下压力敏感性评价流程
Fig. 2 Flowchart of stress sensibility evaluation system *in situ* condition

储层岩石的孔隙压力 p_w (MPa)是由岩石孔隙流体质量所产生的压力,计算公式^[16]为

$$p_w = \rho_w g h. \tag{5}$$

1.2 实验样品

实验样品选自松辽盆地南部扶余油层的 3 类不同储层。实验前对岩样进行预处理,主要包括岩样的洗油和烘干。洗油用酒精和苯的混合物,烘干温度控制在 45℃,连续烘干 36 小时。岩样具体的信息如表 2 所示。

根据式(3)和(4),储层上覆地层压力主要根据埋藏深度、孔隙度、岩石骨架密度以及地层水密度来确定。采样区的岩石骨架密度平均为 2.65 g/cm³,设计编号为 1, 2 和 3 的实验样品所处的围压分别为 28, 30 和 30 MPa,孔隙压力分别为 18, 20 和 20 MPa。

2 原位条件下敏感性评价

利用三轴岩石力学系统,分别在常规条件下(不施加孔隙压力,只逐步施加和卸载围压)和地层原位条件下对样品进行应力敏感性评价。

常规条件下,保持岩样所受的孔隙压力为 0 MPa 不变,围压从 2 MPa 持续加载到 40 MPa (步长 2 MPa),随后卸载围压(步长 2 MPa)。在每种状态下测量渗透率(图 3),可以看出,不同围压下 3 块样品的渗透率变化较大,具有较强的压敏性。样品 2 的压力敏感性强于其他两块样品。围压卸载后,样品 1 的渗透率损失小于其他两块样品。

常规条件下,保持岩样所受的围压为 0 MPa 不

表 2 实验样品信息
Table 2 Parameters of testing samples

编号	岩性	长度/cm	直径/cm	密度/(g·cm ⁻³)	气测孔隙度/%	气测渗透率/(10 ⁻³ μm ²)
1	砂岩	3.992	2.502	2.106	20.25	1.236
2	砂岩	4.652	2.499	2.212	16.97	0.580
3	泥质粉砂岩	4.335	2.502	2.459	9.52	0.010

说明: 密度是岩样洗油烘干后测算。

变, 孔隙压力从 8 MPa 持续加载到 26 MPa (步长 2 MPa), 在每种状态下测量渗透率(图 4)。可以看出, 不同孔压下 3 块样品渗透率变化较大, 具有较强的压敏性。样品 3 渗透率对孔隙压力的敏感性强于其他两块样品。

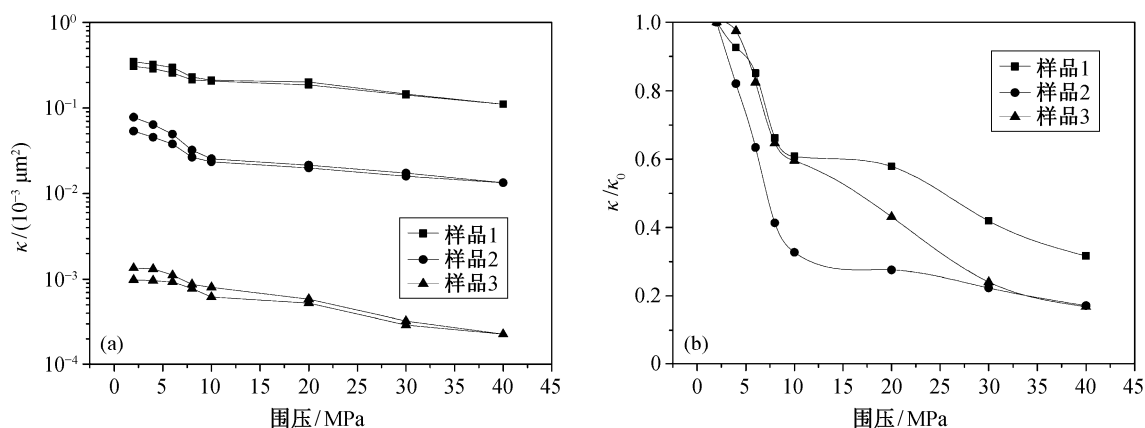
原位条件下, 3 块样品的围压分别为 28、30 和 30 MPa, 孔隙压力分别为 18、20 和 20 MPa, 分别变化围压和孔隙压力条件: 1) 围压保持原位条件, 孔隙压力从 10 MPa 增加到 26 MPa (步长 2 MP); 2) 孔隙压力保持原位条件, 围压从 22 MPa 增加到 40 MPa (步长 2 MPa)。

原位条件下, 通过改变围压和孔隙压力, 储层样品渗透率的变化不一致。如图 5 所示, 随着围压增大, 渗透率减小, 减小幅度比常规条件下大大降低; 但是随着物性变差, 从样品 1 至样品 3 渗透率压敏性增强。如图 6 所示, 渗透率随孔隙压力增大而增大, 随着物性变差, 渗透率敏感性增强。

常规条件下渗透率表现出较强的敏感性。有效

应力从 2 MPa 变化到 20 MPa 时, 样品 2 的渗透率变化率约为 82.87%。在有效应力从 4 MPa 变到 20 MPa 的条件下, 对 3 块样品测算渗透率的敏感性。从表 3 看出: 不施加孔隙压力, 只改变围压, 渗透率应力敏感性最强, 样品 1、2 和 3 的渗透率变化率分别为 40.95%、66.42%和 62.63%; 不施加围压, 只改变孔隙压力, 渗透率也表现出较强的敏感性, 有效应力从 8 MPa 变到 26 MPa 时, 样品 1、2 和 3 的渗透率的变化率分别为 42.15%、45.81%和 52.62%。

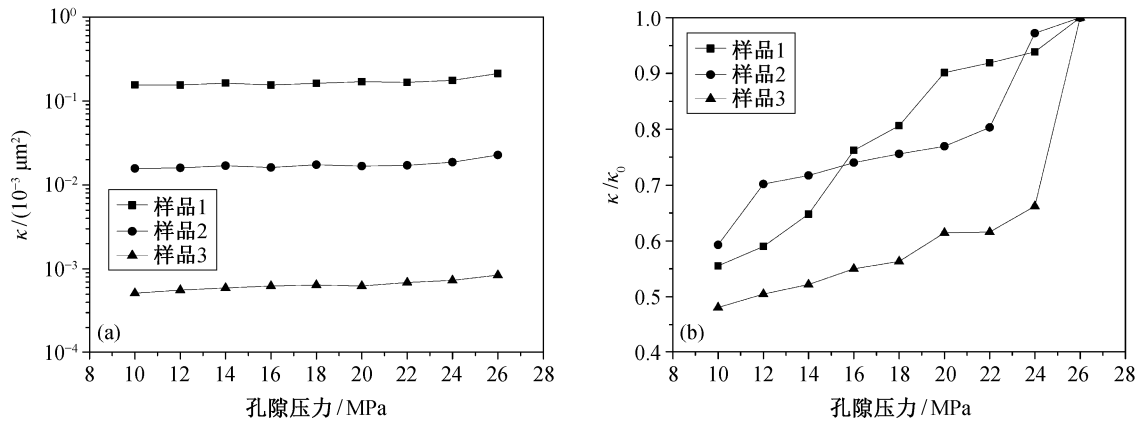
如表 3 所示, 原位条件下, 对 3 块岩样分别通过改变围压和孔隙压力的方式, 将有效应力从 4 MPa 变化到 20 MPa。结果显示: 物性最差的样品 3 渗透率变化最大, 两种情况下分别为 57.28%和 41.67%; 物性最好的样品 1 渗透率变化最小, 两种情况下分别为 10.84%和 11.26%; 样品 2 渗透率变化居中, 两种情况下分别为 45.04%和 30.71%。从数据分析看, 随着物性变差, 渗透率变化率增大, 即渗透率随应力增大敏感性增强。



(a) 渗透率与围压的关系, 每个样品的两条曲线分别表示加载和卸载渗透率; (b) 以 2 MPa 为基准渗透率与围压的关系。孔隙压力为 0 MPa

图 3 常规条件下围压对渗透率的影响

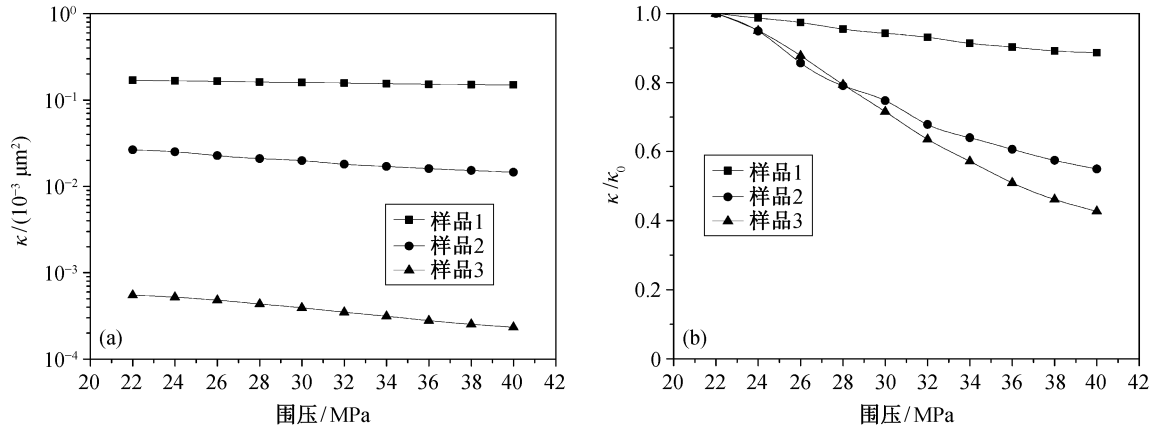
Fig. 3 Effect of confining press on permeability of sandstone in conventional condition



(a) 渗透率与孔隙压力的关系; (b) 以 8 MPa 为基准渗透率与孔隙压力的关系。围压为 0 MPa

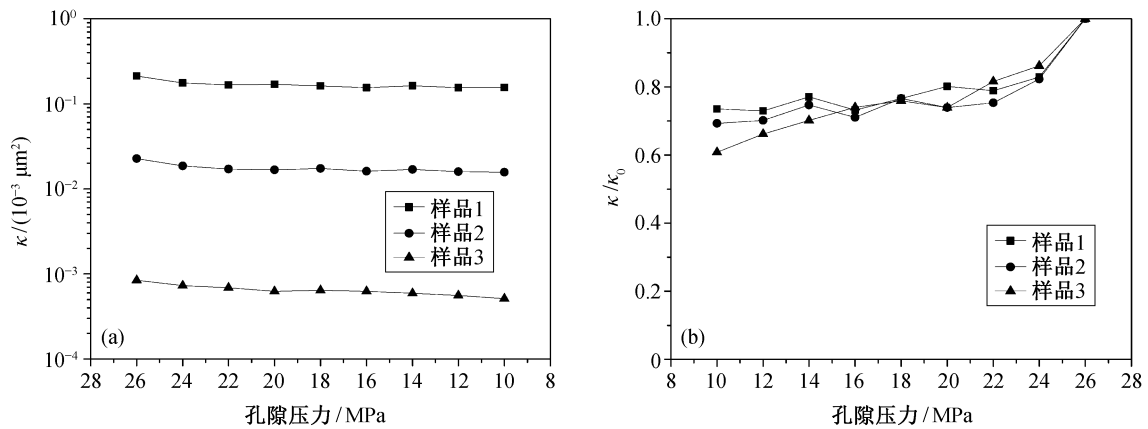
图 4 常规条件下孔隙压力对渗透率的影响

Fig. 4 Effect of pore press on permeability of sandstone in conventional condition



(a) 渗透率与围压的关系; (b) 以 20 MPa 为基准渗透率与围压的关系。样品 1 施加孔隙压力 18 MPa, 样品 2 和样品 3 施加孔隙压力 20 MPa

图 5 原位条件下围压对渗透率的影响

 Fig. 5 Effect of confining press on permeability of sandstone *in situ* condition


(a) 渗透率与孔隙压力的关系; (b) 以 20 MPa 为基准渗透率与孔隙压力的关系。样品 1 施加围压 28 MPa, 样品 2 和样品 3 施加围压 30 MPa

图 6 原位条件下孔隙压力对渗透率的影响

 Fig. 6 Effect of pore press on permeability of sandstone *in situ* condition

表 3 不同条件下渗透率的变化率
Table 3 Rates of permeability change under different conditons

样品编号	有效应力/MPa	围压/MPa	孔隙压力/MPa	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)	渗透率变化率/%
1	4	4	0	0.3912	40.95
	20	20	0	0.2310	
	4	28	24	0.2118	11.26
	20	28	18	0.1907	
	4	22	18	0.1647	10.84
	20	38	18	0.1469	
2	4	4	0	0.0640	66.42
	20	20	0	0.0215	
	4	30	26	0.0227	30.71
	20	30	10	0.0157	
	4	24	20	0.0265	45.04
	20	40	20	0.0146	
3	4	4	0	0.0010	62.63
	20	20	0	0.0004	
	4	30	26	0.0007	41.67
	20	30	10	0.0005	
	4	24	20	0.0005	57.28
	20	40	20	0.0002	

3 敏感性变化机制研究

低渗透致密储层岩石发生渗透率应力敏感,主要是由于应力状态的改变导致承载骨架颗粒与孔喉结构间的原始状态发生变化,使得渗流通道发生变化^[17]。低渗透致密储层岩石渗透率应力敏感在常规条件和原位条件表现异同,物性变化引起应力敏感的差异。因此,下面主要从岩石学特征以及孔喉结构和分布特征进行分析。

3.1 岩石学特征

储层岩石骨架矿物和填隙物具有不同的硬度和力学性质。石英、长石等硬度和脆性强的骨架颗粒在应力改变时可压缩性小;云母、黏土等塑性矿物在外力作用下易变形破碎,细小的颗粒之间发生位移、流动,进入岩石的孔隙或是堵塞孔隙和喉道,直接导致样品的渗透率和孔隙度降低。在只施加围压情况下,刚性矿物和黏土矿物受到压力时,矿物

之间的孔隙减小,使得渗透性降低(图 7(a))。在同时施加围压和孔隙压力情况下,矿物不仅受到围压的作用,降低渗透性,也受到孔隙压力的支撑,增大渗透率(图 7(b))。云母、黏土等塑性矿物易在外力的作用下压缩,因此塑性矿物含量越高,渗透率应力敏感性越强。

何江等^[18]研究了低渗储层岩石学特征与应力敏感性的关系,认为岩石样品骨架颗粒中柔性岩屑以及填隙物中基质等含量与应力敏感性正相关。因此,不同的矿物类型和含量对于岩样渗透率压敏性有较大影响。利用 X 射线衍射技术,对实验样品矿物类型和含量进行分析,结果如表 4 所示。样品 3 的塑性矿物含量达到 28.53%,样品 1 的塑性矿物含量约为 14.50%,样品 2 的塑性矿物含量居中。孔隙压力恢复至原位条件下时,随着围压的增大,岩样的渗透率大幅度减小。这主要是因为随着围压的增大,塑性矿物变形和破碎,堵塞了大量孔隙和喉道。

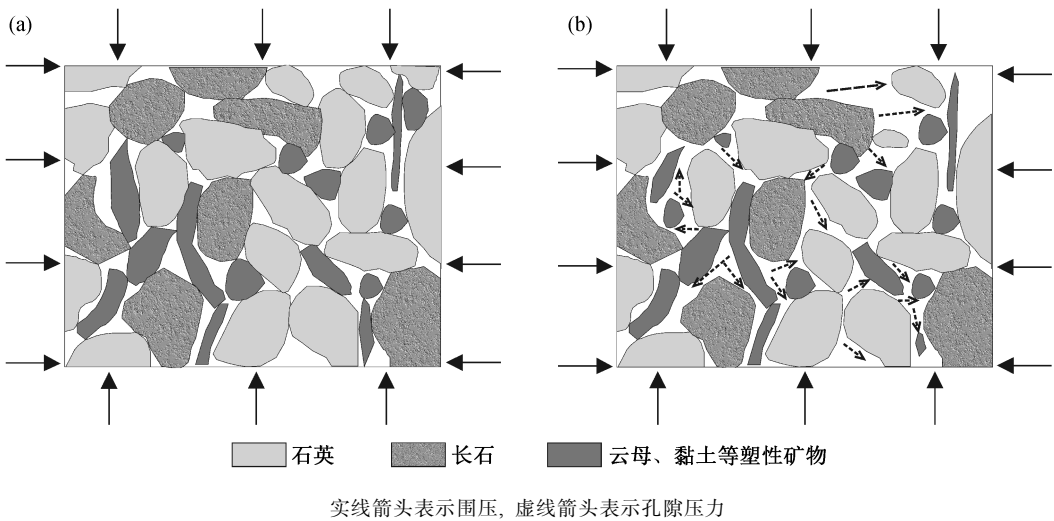


图 7 渗透率压力敏感性模式
Fig. 7 Pattern of permeability stress sensitivity

表 4 样品矿物含量
Table 4 Mineral content of testing samples

样品编号	脆性、刚性矿物含量/%							小计
	石英	微斜长石	钾长石	钠长石	钙长石	白云石	方解石	
1	28.33	7.00	5.20	4.91	37.48	1.24	1.39	85.55
2	45.91	1.40	1.27	3.31	9.79	3.96	13.57	79.21
3	11.59	7.23	5.69	13.93	31.41	0.27	1.35	71.47

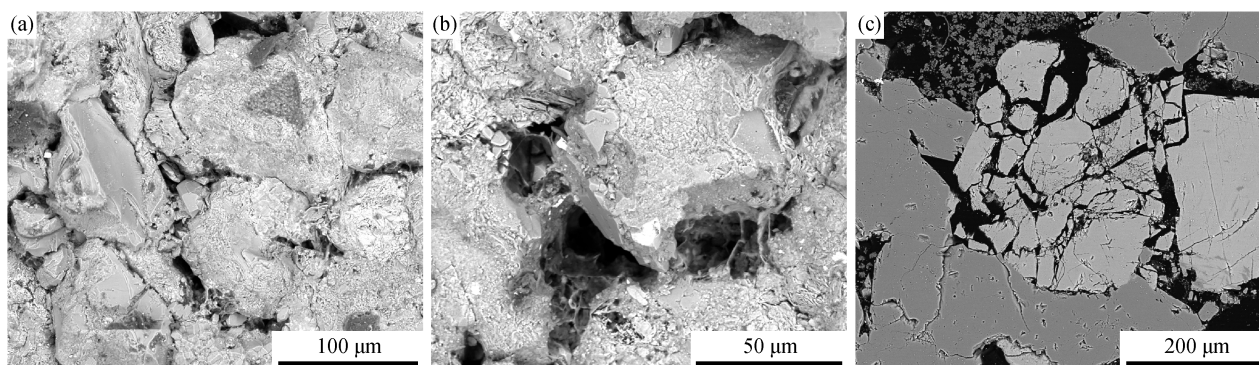
样品编号	塑性矿物含量/%							小计
	黑云母	绿泥石	蒙脱石	伊蒙混层	绿蒙混层	高岭石	伊利石	
1	0.52	1.09	0.62	9.33	1.03	1.07	0.79	14.45
2	0.67	2.65	0.76	13.10	0.71	2.89	—	20.79
3	1.99	2.11	1.85	16.00	2.18	1.16	3.24	28.53

3.2 孔喉结构和分布特征

致密岩石的孔隙受压敏性的影响较小，喉道大小和形状是决定岩石应力敏感程度的主要因素。为了直观地解释孔喉结构与压敏性的关系，借助扫描电子显微镜分析样品的孔喉结构。结果表明：储层孔隙以粒间孔为主，微裂缝主要以粒间缝、粒缘缝和穿粒缝的形式存在，是孔隙之间的连通通道；孔隙与微裂缝内部充填岩屑、黏土矿物和有机质等充填物，充填于喉道中的黏土矿物是导致渗透性降低的重要因素，渗透性越好的样品黏土矿物含量越少(图 8)。

采用恒速压汞的实验手段，分析孔喉大小的分布。如图 9 所示，3 块样品的喉道分布有较大差

异。物性较好的储层(样品 1 和样品 2)对渗透率有贡献的喉道半径为 1~8 μm，而物性差的样品 3 岩性致密，孔喉数量少，喉道半径主要分布在 1~3 μm 范围。在原位条件下，物性差的样品 3 渗透率的压敏性最强。实际上，低渗透岩石受到应力影响后，岩石渗流孔道变小，由于压力梯度等因素的影响，最小的渗流孔道最先丧失渗流能力，且随着有效应力不断增大，越来越多的小孔道丧失渗流功能^[19]。物性差的储层样品主要分布小半径喉道，且数量少，随着有效应力增大，小孔隙和喉道逐渐失去渗流能力，渗透率减小。喉道分布不均一、孔喉半径较大的样品，孔隙和喉道逐渐被压缩，渗透率降低。当有效应力继续增大时，发生矿物位移和压缩，岩石



(a) 样品 1, 粒间缝、粒缘缝发育; (b) 样品 2, 粒间孔发育, 含伊蒙混层; (c) 样品 3, 粒内缝发育

图 8 岩芯扫描电子显微镜照片
Fig. 8 SEM images of sandstone concerned

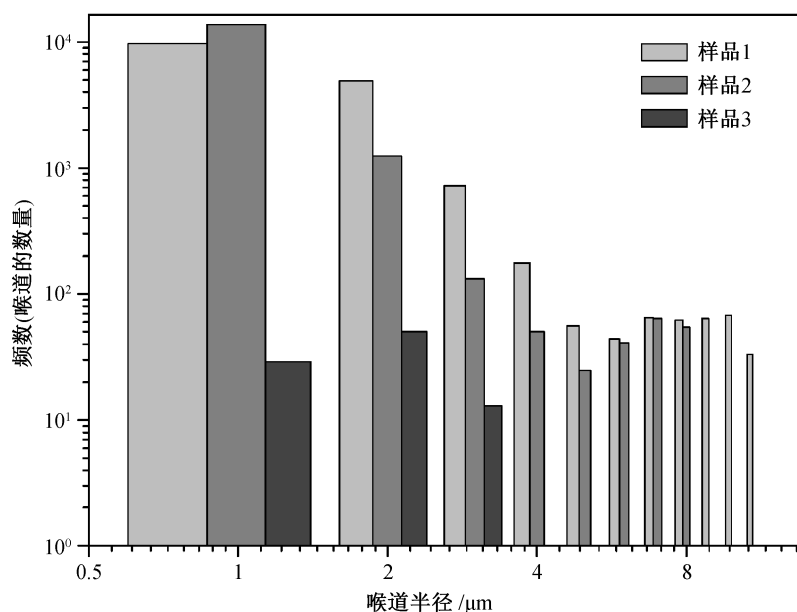


图 9 喉道半径分布
Fig. 9 Throat frequency distribution of low-permeability cores

总体压缩性降低, 渗透率降低的幅度大大减小。因此, 在原位条件下改变有效应力, 岩性越致密的储层渗透率敏感性越强。

4 结论

1) 本研究对致密储层应力敏感性进行实验测定, 常规条件和原位条件下的结果相差较大。常规条件下, 致密储层表现出中强应力敏感性; 恢复至原位条件下, 即使随着围压的增大, 由于孔隙压力支撑孔隙和喉道不闭合, 致密储层表现出中弱应力敏感性。

2) 云母、黏土等塑性矿物含量越高, 致密岩石储层渗透率应力敏感性越强。

3) 致密储层喉道半径的大小和数量是决定岩石应力敏感性的重要因素。

参考文献

- [1] 任和爱, 赵世旭, 李成福, 等. 低渗砂岩的变围压应力敏感性实验评价. 海洋地质前沿, 2012, 28(6): 60-64
- [2] Ghabezloo S, Sulem J, Guédon S, et al. Effective stress law for the permeability of a limestone. Inter-

- national Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(2): 297–306
- [3] Morrow C A, Zhang B C, Byerlee J D. Effective pressure law for permeability of Westerly granite under cyclic loading. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1986, 91(B3): 3870–3876
- [4] Li M, Bernabé Y, Xiao W I, et al. Effective pressure law for permeability of E-bei sandstones. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2009, 114: B07205
- [5] Al-Wardy W, Zimmerman R W. Effective stress law for the permeability of clay-rich sandstones. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2004, 109: B04203
- [6] 贺玉龙, 杨立中. 温度和有效应力对砂岩渗透率的影响机理研究. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2420–2427
- [7] 张海勇, 何顺利, 栾国华, 等. 超低渗透裂缝介质储层应力敏感性定量研究. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(1): 3349–3354
- [8] Dong J J, Hsu J Y, Wu W J, et al. Stress-dependence of the permeability and porosity of sandstone and shale from TCDP Hole-A. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(7): 1141–1157
- [9] 肖文联, 李闽, 赵金洲, 等. 低渗致密砂岩渗透率应力敏感性实验研究. 岩土力学, 2010, 31(3): 775–779
- [10] 胡大伟, 周辉, 潘鹏志, 等. 砂岩三轴循环加卸载条件下的渗透率研究. 岩土力学, 2010, 31(9): 2749–2754
- [11] 刘晓旭, 胡勇, 朱斌, 等. 储层应力敏感性影响因素研究. 特种油气藏, 2006, 13(3): 18–21
- [12] 高建, 吕静, 王家禄. 储层条件下低渗透岩石应力敏感评价. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 3899–3902
- [13] Terzaghi K. Die berechnung der durchlaessigkeit-sziffer des tones aus demverlauf hydrodynamischen Spannungerscheinungen. Sitzungber Aka Wiss Wien, Math Naturwiss, 1923, 132: 125–138
- [14] 何更生. 油层物理. 北京: 石油工业出版社, 1997: 30–35
- [15] Jelmet T A. 描述应力敏感性储层的平均渗透率函数. 赵卫红, 王淑玉, 译. 天然气勘探与开发, 1999, 22(2): 34–37
- [16] Terzaghi K. Stability and stiffness of cellular cofferdams. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 1945, 110: 1083–1119
- [17] 于忠良, 熊伟, 高树生, 等. 致密储层应力敏感性及其对油田开发的影响. 石油学报, 2007, 28(4): 95–98
- [18] 何江, 付永雷, 沈桂川, 等. 低渗砂岩储层岩石学特征与应力敏感性耦合关系: 以鄂尔多斯盆地苏里格-吉尔地区下石盒子组八段下亚段为例. 石油与天然气地质, 2012, 33(6): 923–931
- [19] 雷刚, 董平川. 低渗透储层应力敏感性定量评价方法 // 2014 油气藏监测与管理国际会议 (2014 ICRSM)论文集. 北京, 2014: ICRSM00304