

致密油气藏储层应力敏感各向异性及其微观机制 ——以鄂尔多斯盆地安塞油田长6油层为例

张志强,师永民,李 鹤

(北京大学 地球与空间科学学院,北京 100871)

摘要: 中国陆相致密储层应力敏感各向异性研究对低渗透油气藏开发过程中储层伤害评价具有重要作用。鉴于注水开发过程中的实际问题,选取鄂尔多斯盆地安塞油田长6油层3块典型岩样,分别从水平 X 、 Y 及垂直 Z 方向钻取小岩心柱,并依次恢复至地层条件下变化围压测定渗透率,并结合铸体薄片、扫描电镜及XRD等实验,对致密油气藏储层渗透率应力敏感各向异性及其微观机制进行分析。研究表明:不同岩样的应力敏感性存在差异,且同一岩样不同方向的应力敏感性也存在差异,应力敏感性指数由强到弱分别为细粒岩屑长石砂岩、长石岩屑质石英粉砂岩和中细粒岩屑长石砂岩,各向异性系数由强到弱分别为长石岩屑质石英粉砂岩、中细粒岩屑长石砂岩和细粒岩屑长石砂岩。通过微观实验可知,不同类型储层的矿物成分、排列方式及孔隙结构特征差异大,是造成储层应力敏感各向异性的关键因素。因此认为,致密油气藏不同类型储层应力敏感及各向异性存在较大差异,而储层微观非均质性特征是应力敏感及各向异性的主要影响因素。这一结论对鄂尔多斯盆地陆相致密非均质性储层的高效开发具有重要意义。

关键词: 应力敏感性;各向异性;微观非均质性;油田开发;致密油气藏;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE311

文献标识码:A

Stress sensitivity anisotropy and its microscopic mechanism of tight oil and gas reservoirs: A case from the Chang-6 reservoir in Ansai oilfield of Ordos Basin

Zhang Zhiqiang, Shi Yongmin, Li He

(School of Earth and Space Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Study on stress sensitivity anisotropy of continental tight reservoirs in China plays an important role in evaluation of reservoir damage during the exploitation of low permeability oilfield. In view of the practical problems, the X , Y and Z columns from three inter-perpendicular orientation of three typical samples from Chang-6 reservoir in Ansai oilfield of Ordos Basin are used to test permeability by changing confining pressure under the in-situ condition and study the relationship between permeability and effective stress. In addition, microscopic mechanism and anisotropy of stress sensitivity in tight oil and gas reservoirs are analyzed through integrating various data including casting thin sections, scanning electron microscopy and XRD, etc. The results demonstrate that stress sensitivities of different rock samples are different and stress sensitivities of the same rock sample are also quite different in different directions. The ranking of stress sensitivity index from strong to weak is fine-grained lithic feldspathic sandstone, feldspar lithic quartz siltstone and medium to fine-grained lithic feldspathic sandstone, and the ranking of anisotropy coefficient from strong to weak is feldspar lithic quartz siltstone, medium to fine-grained lithic feldspathic sandstone and fine-grained lithic feldspathic sandstone. Microscopic experiments indicate that mineral composition, the arrangement and pore structure characteristics of different types of reservoir are key factors to cause reservoir stress sensitivity anisotropy. Therefore, stress sensitivity anisotropies are quite different in different types of tight reservoirs, and the microscopic heterogeneity characteristics of reservoirs are the major factors influencing stress sensitivity and anisotropy. This understanding is of great significance to highly-efficient exploitation of the continental heterogeneous tight reservoirs in Ordos Basin.

Key words: stress sensitivity, permeability anisotropy, microscopic heterogeneity, oilfield development, tight Oil & Gas reservoir, Ordos Basin

收稿日期:2015-06-03;修订日期:2016-01-04。

第一作者简介:张志强(1990—),男,硕士,低渗油田开发地质。E-mail: zhiqiangzhang@pku.edu.cn。

通讯作者简介:师永民(1966—),男,研究员,低渗油田开发和储层地质。E-mail: sym@pku.edu.cn。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2009CB219302)。

整个过程应力以 0.02 MPa/min 的速度进行加载,都是在计算机控制系统的精准控制之下完成。实验流体为氮气,在控制不同有效应力条件下,实验流体以一定流速流过岩心,同时数据采集与处理终端实时获取岩心渗透率的变化情况,测量分辨率高达 1/200 000。实验装置系统的具体参数表 1。

1.2 实验方法及岩心参数

实验样品选取鄂尔多斯盆地长 6 油层 3 块典型岩样(表 2),从水平 X 、 Y 及垂向 Z 分别钻取小岩心柱,3 个样品可以代表 3 类具有典型成分、结构构造特征的致密砂岩储层。在实验测试之前,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 h。岩样具体的信息如表 2 所示,岩样孔隙度为 3.26%~15.52%,平均为 8.72%,渗透率为 $(0.002\ 0\sim0.815\ 2)\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$,平均为 $0.202\ 9\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$ 。

2 实验结果

2.1 岩样 1

图 2a 是岩样 1 的渗透率随有效应力的绝对变化值。3 个钻柱的渗透率都随有效应力的增加而降低,当有效应力增加到 40 MPa 时,渗透率绝对变化值分别为 $0.132\ 0\times10^{-3}$ 、 $0.103\ 8\times10^{-3}$ 和 $0.043\ 1\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$;当有效应力从 40 MPa 恢复到 10 MPa 时,3 个样品储层岩心渗透率分别恢复了 85.23%、92.00%和 95.17%,由于地下应力状态变化,岩石在不同方向发生不同程度的弹塑性变形。图 2b 是岩样 1 的渗透率随有效应力的相对变化值。3 个方向

的渗透率在随着有效应力增加过程中,渗透率都是先快速下降,之后降速相对变缓,相对变化率分别为 18.46%、15.82%和 35.92%,3 个方向储层应力敏感性差异较大, X 和 Y 方向敏感性较为接近,而与 Z 方向差异大。这一现象表明,岩石受到压缩变形,水平和垂直方向的储层特征存在差异,会导致岩石发生不同的变形特征,因此,渗透率的应力敏感在水平与垂直方向存在较大差异。

2.2 岩样 2

图 3a 是岩样 2 的渗透率随有效应力的绝对变化值。3 个岩心柱的渗透率都随着有效应力的增加而降低,当有效应力增加到 40 MPa 时,渗透率绝对变化值分别为 $0.003\ 9\times10^{-3}$ 、 $0.003\ 4\times10^{-3}$ 和 $0.001\ 1\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$;当有效应力从 40 MPa 恢复到 10 MPa 时,3 个样品储层岩心渗透率分别恢复了 43.11%、51.31%和 61.54%。地下应力状态变化,岩石在不同方向发生不同程度的弹塑性变形,且塑性变形程度较岩样 1 大。图 3b 是岩样 2 的渗透率随有效应力的相对变化值。3 个方向的渗透率在随有效应力增加过程中,渗透率都是先快速下降,之后降速相对变缓,相对变化率分别为 72.29%、79.24%和 62.94%,3 个方向储层应力敏感性差异较大, X 和 Y 及 Z 方向下降程度都超过 60%。这一现象表明,不同方向的结构存在差异,岩石压缩过程中会发生不同的变形特征,因此渗透率的应力敏感不同方向存在各向异性。

2.3 岩样 3

图 4a 是岩样 3 的渗透率随着有效应力的绝对变化值。3 个岩心的渗透率都随有效应力的增加而降低,当有效应力增加到 40 MPa 时,渗透率绝对变化值分别为 $0.014\ 4\times10^{-3}$ 、 $0.011\ 4\times10^{-3}$ 和 $0.008\ 5\times10^{-3}\ \mu\text{m}^2$;当有效应力从 40 MPa 恢复到 10 MPa 时,3 个样品储层岩心渗透率分别恢复了 37.35%、38.95%和 41.29%。地下应力状态变化,岩石发生较大程度

表 1 实验仪器技术规格

Table 1 Specifications of testing system

围压测量 范围	围压测量 误差	最大孔隙 压力/MPa	孔隙水 流量精度	最大轴向 实验力/KN
2%~100%FS	±2%	0~60	±1%	1 000

表 2 实验岩心钻柱参数统计

Table 2 Parameters of testing samples and cutting column

岩样编号	岩性	钻柱方向	长度/cm	直径/cm	密度/(g·cm ⁻³)	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)
1	中细粒岩屑 长石砂岩	X	4.901	2.511	2.21	12.05	0.815 2
		Y	4.862	2.510	2.22	9.36	0.722 1
		Z	5.025	2.508	2.19	5.58	0.169 1
2	长石岩屑质 石英粉砂岩	X	4.891	2.509	2.62	2.74	0.008 7
		Y	4.904	2.511	2.63	6.75	0.010 4
		Z	4.973	2.496	2.61	3.26	0.002 0
3	细粒岩屑 长石砂岩	X	5.126	2.507	2.01	12.84	0.042 7
		Y	4.879	2.498	2.02	15.52	0.029 0
		Z	4.946	2.513	2.05	10.39	0.027 2

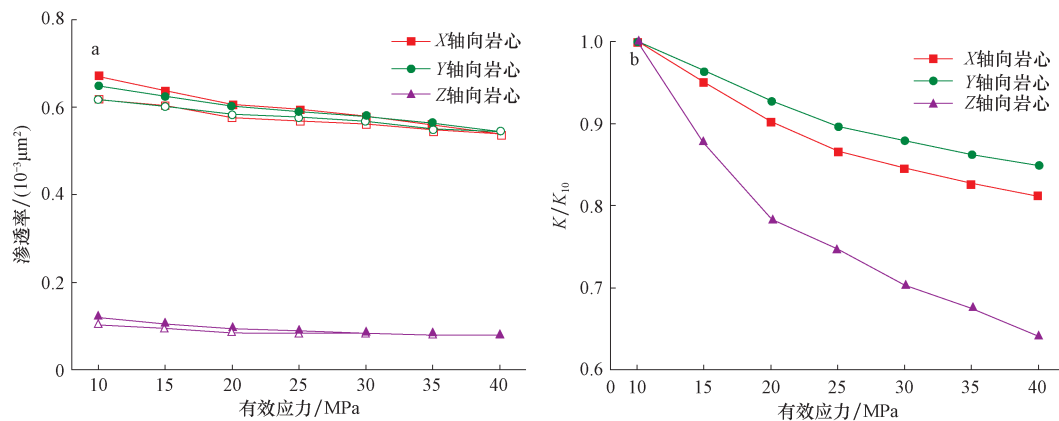


图2 岩样1的渗透率与有效应力关系

Fig. 2 Relationship between permeability and effective stress of Sample 1

a. 岩心绝对渗透率与有效应力关系; b. 以地层条件下(10 MPa)有效应力为基准的应力敏感曲线

K. 渗透率; K_{10} . 有效应力为10MPa时的渗透率

注: 实心为加载曲线, 空心为卸载曲线。

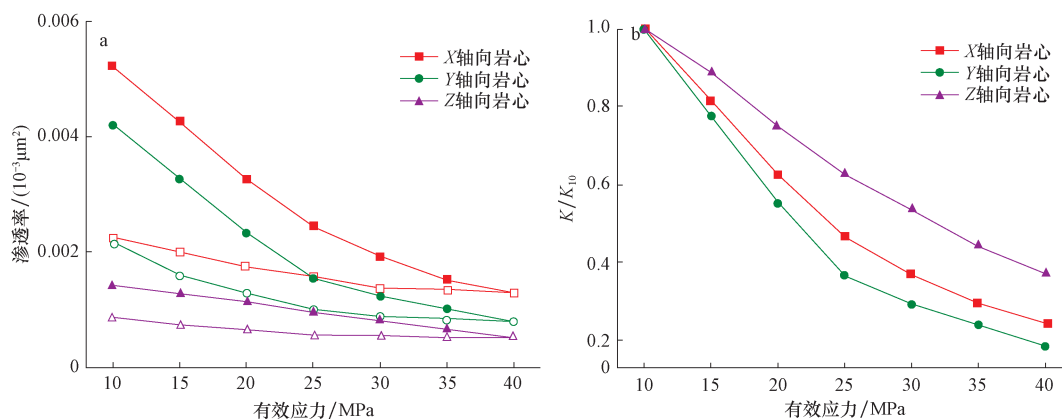


图3 岩样2的渗透率与有效应力关系

Fig. 3 Relationship between permeability and effective stress of Sample 2

a. 岩心绝对渗透率与有效应力关系; b. 以地层条件下(10 MPa)有效应力为基准的应力敏感曲线

K. 渗透率; K_{10} . 有效应力为10MPa时的渗透率

注: 实心为加载曲线, 空心为卸载曲线。

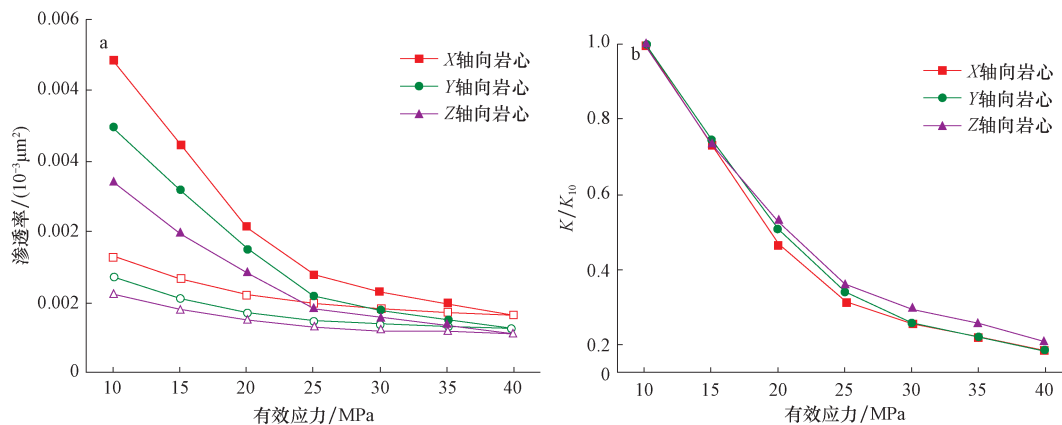


图4 岩样3的渗透率与有效应力关系

Fig. 4 Relationship between permeability and effective stress of Sample 3

a. 岩心绝对渗透率与有效应力关系; b. 以地层条件下(10 MPa)有效应力为基准的应力敏感曲线

K. 渗透率; K_{10} . 有效应力为10MPa时的渗透率

注: 实心为加载曲线, 空心为卸载曲线。

表 3 经过线性回归得到的各岩样的应力敏感指数 A_k Table 3 Index (A_k) of stress sensitivity obtained by linear fitting for each sample

岩样编号	岩性	钻柱方向	$K_0/(10^{-3} \mu\text{m}^2)$	A_k	R^2	损害程度
1	中细粒岩屑 长石砂岩	X	0.900 3	0.153	0.961	弱
		Y	0.817 4	0.121	0.917	弱
		Z	0.219 8	0.316	0.964	弱
2	长石岩屑质 石英粉砂岩	X	0.019 6	0.737	0.898	中等偏强
		Y	0.036 8	0.942	0.915	强
		Z	0.003 4	0.463	0.852	中等偏弱
3	细粒岩屑 长石砂岩	X	0.119 6	0.935	0.946	强
		Y	0.089 3	0.962	0.922	强
		Z	0.073 6	0.916	0.956	强

的塑性变形,从而对油气藏产生不可恢复的破坏。如图 4b 所示,在不同有效应力条件下,岩样 3 的渗透率变化相对于岩样 2 而言,应力敏感性减弱。3 个方向相对变化率分别为 80.44%,81.86% 和 78.85%,都超过 75%,但差异很小。这一现象表明,岩石受到压缩变形,储层不同方向的结构非均质性较弱,会导致岩石发生程度类似的变形特征,因此渗透率的应力敏感各向异性较小。

3 讨论

3.1 应力敏感各向异性

3.1.1 应力敏感性

分析实验得到的 3 类样品渗透率随有效应力变化关系,借助幂指数方程拟合可以表示为^[23]:

$$K(p_{\text{eff}}) = K_0 p_{\text{eff}}^{-A_k} \quad (3)$$

式中: $K(p_{\text{eff}})$ 是有效应力为 p_{eff} 时样品的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; K_0 为有效应力为零时样品的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; A_k 是拟合得到的应力敏感指数,无量纲。

3 个样品致密储层应力敏感性存在明显差异(表 3),实验结果的相关系数在 0.852 ~ 0.964,相关性好。岩样 1 的 3 个方向应力敏感指数分布在 0.121 ~ 0.316,平均为 0.197,应力敏感性较弱,X 和 Y 方向比较接近,二者与 Z 方向的敏感指数存在差异。岩样 2 在 3 个方向的应力敏感指数分布于 0.463 ~ 0.942,应力敏感性中等偏强,3 个方向应力敏感性差异较大。岩样 3 应力敏感指数为 0.916 ~ 0.962,平均为 0.938,为强应力敏感性,3 个方向的差异小。

3.1.2 各向异性

实验样品中 X,Y 与 Z 三个方向相互垂直,因此通过实验测得 X,Y 与 Z 三个方向的渗透率,就相应的得到了 YZ,XZ 与 XY 三个平面的渗透率,三个平面内的渗透率各向异性用 α_k 表示^[21]:

$$\alpha_k(d_i, d_j, p_{\text{eff}}) = \lg \left[\frac{K_i(p_{\text{eff}})}{K_j(p_{\text{eff}})} \right] \quad (4)$$

通过代入渗透率与压力的幂函数方程式(3),渗透率各向异性方程式(4)可用下式表示:

$$\alpha_k(d_i, d_j, p_{\text{eff}}) = \lg \alpha_{k0} + A_{\alpha k} \lg p_{\text{eff}} \quad (5)$$

$$\alpha_{k0} = \frac{K_{0,i}}{K_{0,j}} \quad (6)$$

$$A_{\alpha k} = A_{k,j} - A_{k,i} \quad (7)$$

式中: d_i, d_j 代表方向; K_i, K_j 表示不同有效应力条件下的渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$ (i, j 代表 X,Y,Z 中任意二者)。

经计算得到所测样品 3 个平面内的渗透率各向异性随有效应力的变化规律(表 4)。 α_{k0} 可以表示有效应力为零时,在 YZ,XZ 与 XY 平面内的渗透率各向异性系数。岩样 1 在水平方向上渗透率差异较小,而水平与垂直方向各向异性明显。岩样 2 在三维空间内存在明显的各向异性特征。分析岩样 3 认为,各个方向的渗透率变化都比较接近,各向异性最弱。

为直观分析不同样品的不同平面间的渗透率各向异性随有效应力的变化趋势,将渗透率各向异性参数进行归一化处理,得到归一化的渗透率各向异性(α_{kg}) (图 5)。在有效应力 40 MPa 范围内,XY 平面内的渗透率各向异性随有效应力的增加而变化不大;YZ 和 XZ 平面内的渗透率各向异性随有效应力的增加而出

表 4 渗透率各向异性系数

Table 4 Coefficient of permeability anisotropy

岩样编号	d_i/d_j	α_{k0}	$\lg \alpha_{k0}$	$A_{\alpha k}$
1	Y_1/Z_1	3.72	0.571	-0.176
	X_1/Z_1	4.09	0.612	-0.144
	X_1/Y_1	1.10	0.042	0.032
2	Y_2/Z_2	10.82	1.034	0.519
	X_2/Z_2	4.65	0.667	0.254
	X_2/Y_2	0.53	-0.367	-0.265
3	Y_3/Z_3	1.21	0.084	0.006
	X_3/Z_3	1.62	0.211	0.039
	X_3/Y_3	1.34	0.127	0.033

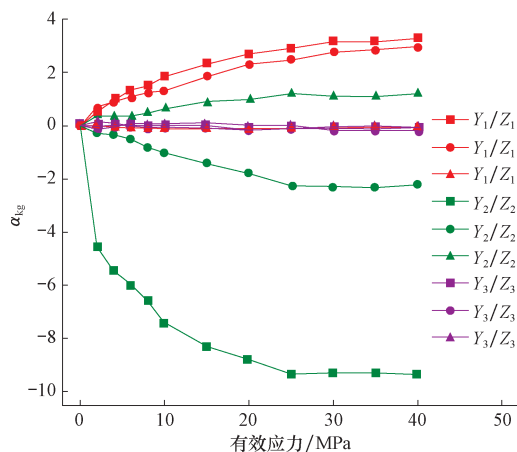


图5 归一化的渗透率各向异性 α_{kg} 随有效应力变化

Fig. 5 Change of normalized permeability anisotropy (α_{kg}) with effective stress

现差异性变化,且变化幅度差异较大,最大的渗透率各向异性达到 9.33 (YZ 平面)。因此,对于陆相致密储层应力敏感各向异性参数变化不能一概而论,需要结合储层微观非均质特征进行分析。

3.2 应力敏感性内在机制

致密储层渗透率应力敏感性主要受到矿物成分、排列方式及微观孔隙结构等因素的综合影响^[24-25]。将 3 组岩样共 9 个钻柱制成铸体薄片置于偏光显微镜下观察(图 6)。就岩样 1 而言,岩石颗粒成分以石英、钙长石为主,含量大于 80%,岩屑含量少(表 5),岩石受应力主要发生本体变形,弹性变形远大于塑性变形程度,因此 3 个方向的渗透率降幅较小,最大不超过 40%,属于较弱的应力敏感性,且在卸压加载过程中,3 个方向的渗透率恢复率都大于 85%。

X 和 Y 方向(图 6a,b)样品颗粒排列方向性较强,且 X 方向发育明显微裂缝,孔隙多以定向排列的粒间孔为主,因此在受压过程中,渗透率下降率接近。Z 方向(图 6c)颗粒排列方向性较弱,孔隙较小且分布较为分散,由于钙长石大量破碎形成粒内孔-缝为主的结构,微裂缝受压容易闭合,导致变有效应力条件下 Z 样品的渗透率下降率大于 X 和 Y 样品,与之前通过线性回归计算得到的应力敏感指数 A_k ($X \approx Y < Z$) 结果一致。

分析可知,岩石受到压缩变形,水平与垂直方向的岩石结构非均质性强,因此渗透率的应力敏感存在各向异性,通过岩石薄片对其微观机制分析可以得到应力敏感性在水平(XY 平面)和垂直方向(XZ 和 YZ 平面)出现明显的差异,各向异性顺序为 $YZ \approx XZ > XY$,这与归一化的渗透率各向异性随有效应力变化情况一致($\alpha_{k_X} \approx \alpha_{k_Y} > \alpha_{k_Z} \approx 0$)。

岩样 2 以残余粒间孔隙为主,粘土杂基含量较高

(表 5),矿物颗粒之间被大量粘土矿物充填,导致连通性差。岩石受应力主要发生结构变形,塑性变形大于弹性变形程度,在应力达到 40 MPa 的压缩过程中,3 个方向的渗透率降幅较大,X,Y 及 Z 向损害程度都超过 60%,在卸压加载过程中,3 个方向的渗透率恢复率平均小于 50%。

3 个方向储层应力敏感性差异较大。X 方向(图 6d)岩石颗粒定向排列,发育明显的微裂缝,导致 YZ 平面渗透率存在很大的差异;Y 方向(图 6e)孔隙呈半定向排列,存在细小的微裂缝,因此在 XZ 平面渗透率差异性小于 YZ 面;Z 方向(图 6f)颗粒分选磨圆好,定向性较差,因此 XY 平面渗透率差异性较小。这直接导致变有效应力条件下 X,Y 及 Z 样品的渗透率损害率都存在差异,顺序为 $Y > X > Z$,与拟合计算得到的应力敏感指数 A_k ($Y > X > Z$) 结果一致。

分析可知,非均质性强较强的岩石受压变形,渗透率的应力敏感在不同方向存在较大的各向异性,通过岩石薄片对其微观机制分析可以得到应力敏感性在三维空间内(XY,XZ 及 YZ 平面)出现明显的差异,储层岩石微观非均质性顺序为 $X > Y > Z$,分析得到 3 个平面渗透率各向异性顺序为 $YZ > XZ > XY$,这与之前的归一化的渗透率各向异性随有效应力变化情况一致($\alpha_{k_X} > \alpha_{k_Y} > \alpha_{k_Z}$)。

岩样 3 以非定向的粒间孔隙为主,岩石颗粒如石英、长石含量高(表 5),长石的大量溶蚀形成粒内孔隙,孔渗通道分布较为复杂,总孔隙度较岩样 1 和 2 大。X,Y 及 Z 方向岩石孔隙空间较大,而喉道较细,且被粘土矿物充填,导致 3 个平面渗透率在有效应力逐渐增加情况下,喉道快速闭合而渗透率损失大,3 个样品的损失率都在 80% 左右,具有较强的应力敏感性。并且长石大量溶蚀,导致骨架颗粒硬度下降,在增压过程中容易被压实变形,发生较大程度的结构变形,因此卸压后,渗透率恢复仅 40%。

X,Y 及 Z 方向(图 6g-i)岩石颗粒均呈现非定向排列,粒间孔隙分布均匀,在 YZ,XZ 和 XY 平面渗透率的差异很小,导致变有效应力条件下 X,Y 及 Z 样品压缩变形机制相似,其渗透率损害幅度 $X \approx Y \approx Z$,与计算得到的应力敏感指数 A_k 结果一致。

综上所述,岩石受到压缩变形,均质性好的岩石结构差异小,因此渗透率的应力敏感各向异性较小,通过岩石薄片对其微观机制分析可以得到渗透率损害程度在三维空间内(XY,XZ 及 YZ 平面)差异很小,3 个方向的储层岩石微观非均质性 $X \approx Y \approx Z$,分析得到 3 个平面渗透率各向异性为 $YZ \approx XZ \approx XY$,结果与归一化的渗透率各向异性随有效应力变化情况一致($\alpha_{k_X} \approx \alpha_{k_Y} \approx \alpha_{k_Z} \approx 0$)。

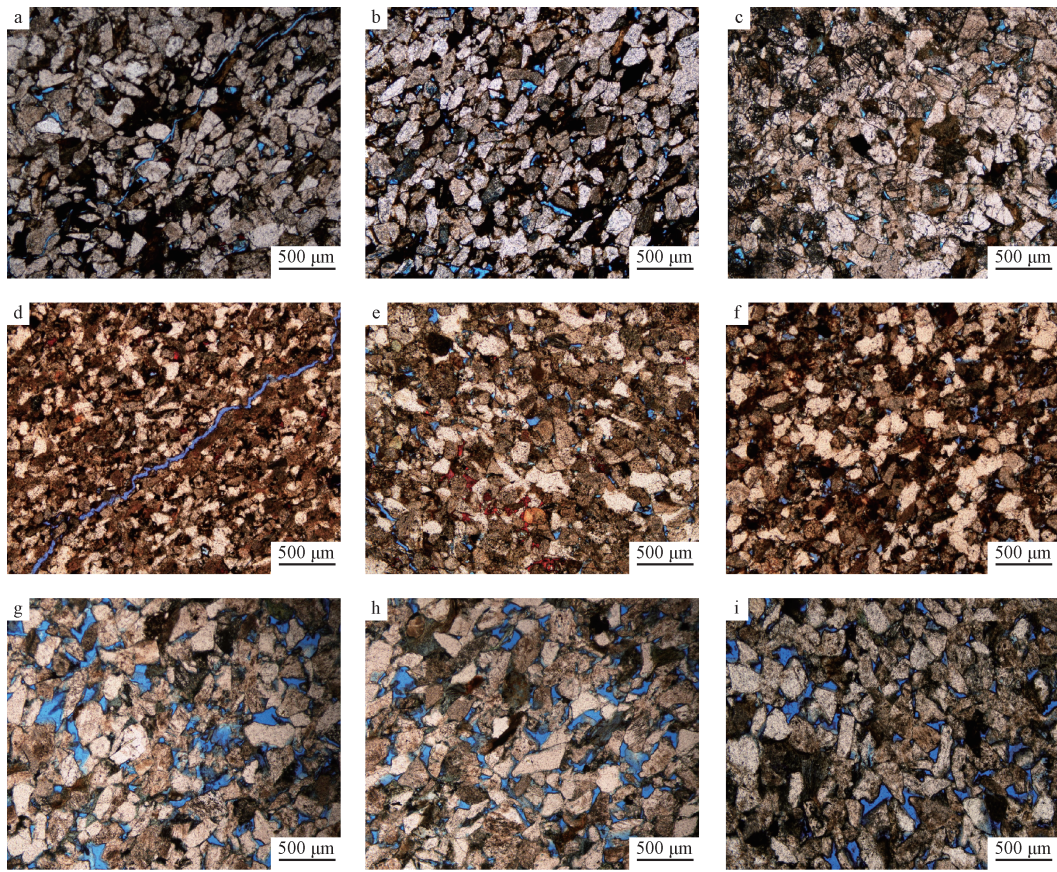


图 6 3 个样品在 X,Y 及 Z 方向的铸体薄片特征

Fig. 6 Casting thin section features in X,Y and Z directions of rock samples

a,b,c. 分别是岩样 1 在 YZ,XZ 及 XY 平面的微观特征;d,e,f. 分别代表岩样 2 在 YZ,XZ 及 XY 平面的微观特征;
g,h,i. 分别是岩样 3 在 YZ,XZ 及 XY 平面的微观特征

表 5 样品的矿物类型及百分含量统计

Table 5 Statistics of the mineral type and percentage of the samples

岩样编号	石英/%	长石/%			云母/%		粘土矿物/%			
		钾长石	钠长石	钙长石	白云母	黑云母	高岭石	蒙脱石	绿泥石	伊利石
1	24. 71	7. 96	10. 06	39. 78	2. 72	0. 58	2. 11	1. 15	2. 52	8. 41
2	21. 79	9. 29	8. 67	25. 01	5. 02	1. 37	1. 96	3. 40	3. 61	19. 88
3	27. 20	12. 59	13. 69	28. 97	1. 21	0. 44	0. 40	0. 94	2. 96	10. 72

4 结论

1) 本文选取鄂尔多斯盆地长 6 油层组致密储层 3 块典型岩样,从水平 X,Y 及垂向 Z 钻柱,依次恢复至地层条件下变围压进行渗透率测定实验,借助线性拟合,建立渗透率随有效应力之间的幂函数方程,并得到各岩样的应力敏感指数 A_k ,分析可发现不同类型的岩样渗透率应力敏感性表现出不同的特征。

2) 3 块岩样在不同方向的渗透率应力敏感各向异性指数 α_k 同样也是有效应力的函数,且随着有效应力的增加,不同岩样在不同平面内的渗透率各向异性表现出完全迥异的变化规律。结合铸体薄片、扫描电镜及 XRD 等实验分析,可知岩石矿物成分、排列方式,孔隙结构等储层微观非均质性特征起主要控制作用。

3) 陆相致密储层应力敏感及其各向异性评价不

能笼统的称作强或弱敏感性,而是要根据不同储层微观非均质特征来进行深入的分类研究,对储层损害能有一个合理的评价,继而根据储层实际特征来选择合理的开发方式,这对低渗透油田开发中的提高采收率及储层损害评价具有重要的指示意义。

参 考 文 献

[1] 贾承造,邹才能,李建忠,等. 中国致密油评价标准、主要类型、基本特征及资源前景[J]. 石油学报,2012,33(3):343-350.
Jia Chengzao,Zou Caineng,Li Jianzhong, et al. Assessment criteria, main types,basic features and resource prospects of the tight oil in China[J]. Acta Petrolei Sinica,2012,33(3):343-350.

[2] 窦伟坦,田景春,王峰,等. 鄂尔多斯盆地长 6 油层组储集砂岩成岩作用及其对储层性质的影响[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),2009,36(2):153-158.
Dou Weitan,Tian Jingchun,Wang Feng, et al. Diagenesis and its influence on the reservoir quality of Member 6 of the Upper Triassic

- Yanchang Formation oil reservoirs in Ordos Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2009, 36(2): 153–158.
- [3] 陈巍巍, 王华, 符迪, 等. 鄂尔多斯盆地郑庄油区长6储层孔隙结构特征及影响因素[J]. 四川地质学报, 2011, 31(2): 176–179.
- Chen Weiwei, Wang Hua, Fu Di, et al. Pore structure and influence factors of the Chang 6 reservoir in the Zhengzhuang oilfield, Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sichuan, 2011, 31(2): 176–179.
- [4] 陈祖安, 伍向阳, 方华, 等. 岩石气体介质渗透率的瞬态测量方法[J]. 地球物理学报, 1999, (S1): 167–171.
- Chen Zuan, Wu Xiangyang, Fang Hua, et al. Gas transit measurement method of permeability on rock[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, (S1): 167–171.
- [5] 王朋岩, 刘凤轩, 马锋, 等. 致密砂岩气藏储层物性上限界定与分布特征[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 238–243.
- Wang Pengyan, Liu Fengxuan, Ma Feng, et al. Upper limit and distribution of physical property of tight gas sands[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 238–243.
- [6] Lei Qun, Wei Xiong, Yuan Jiangru, et al. Analysis of stress sensitivity and its influence on oil production from tight reservoirs[J]. SPE111148, 2007.
- [7] 王厉强, 刘慧卿, 甄思广, 等. 低渗透储层应力敏感性定量解释研究[J]. 石油学报, 2009, 30(1): 96–99.
- Wang Liqiang, Liu Huiqing, Zhen Siguang, et al. Quantitative research on stress sensitivity of low-permeability reservoir[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009, 30(1): 96–99.
- [8] Yang Junfeng, Liu Renjing, Liu Huiqing. A universal model of stress sensitive coefficient in low permeability reservoir[J]. Procedia Engineering, 2011, 12: 177–183.
- [9] 刘仁静, 刘慧卿, 张红玲, 等. 低渗透储层应力敏感性及其对石油开发的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(S1): 2697–2702.
- Liu Renjing, Liu Huiqing, Zhang Hongling, et al. Study of stress sensitivity and its influence on oil development in low permeability reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(S1): 2697–2702.
- [10] 刘均一, 邱正松, 黄维安, 等. 不同渗透率储层应力敏感性实验对比[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(2): 86–91.
- Liu Junyi, Qiu Zhengsong, Huang Weian, et al. Experimental study on stress sensitivity in reservoirs with different permeability[J]. Journal of China University of Petroleum (Science & Technology Edition), 2014, 38(2): 86–91.
- [11] 李传亮. 储层岩石应力敏感性认识上的误区——回应刘晓旭博士[J]. 特种油气藏, 2008, 15(3): 26–28.
- Li Chuanliang. A misunderstanding in reservoir rock stress sensitivity—In reply to Dr Liu Xiao-xu[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2008, 15(3): 26–28.
- [12] 高建, 吕静, 王家禄. 储层条件下低渗透岩石应力敏感评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 3899–3902.
- Gao Jian, Lü Jing, Wang Jialu. Evaluation on stress sensibility of low permeability rock under reservoir condition[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3899–3902.
- [13] 杜新龙, 康毅力, 游利军, 等. 低渗透储层应力敏感性控制因素研究[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(2): 295–299.
- Du Xinlong, Kang Yili, You Lijun, et al. Controlling factors of stress sensitivity in low-permeability reservoirs[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(2): 295–299.
- [14] 焦春艳, 何顺利, 谢全, 等. 超低渗透砂岩储层应力敏感性实验[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 489–494.
- Jiao Chunyan, He Shunli, Xie Quan, et al. An experimental study on stress-dependent sensitivity of ultra-low permeability sandstone reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(3): 489–494.
- [15] Zhu Suyang. Experiment research of tight sandstone gas reservoir stress sensitivity based on the capillary bundle mode[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, SPE, 2013.
- [16] Lake L W. The Origins of Anisotropy (includes associated papers 18394 and 18458)[J]. Journal of Petroleum Technology, 1988, 40(4): 395–396.
- [17] 谷宁, 陶果, 刘书民. 电缆地层测试器在渗透率各向异性地层中的响应[J]. 地球物理学报, 2005, 48(1): 229–234.
- Gu Ning, Tao Guo, Liu Shumin. Responses of the wireline formation tester in permeability anisotropic formations[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2005, 48(1): 229–234.
- [18] Bruno M S, Bovberg C A, Nakagawa F M. Anisotropic stress influence on the permeability of weakly-cemented sandstones[C]//The 32nd US Symposium on Rock Mechanics (USRMS), American Rock Mechanics Association, 1991: 375–383.
- [19] 刘月田, 郭分乔, 涂彬, 等. 全岩心非均匀径向渗流各向异性渗透率测定方法[J]. 石油学报, 2005, 26(6): 66–68.
- Liu Yuetian, Guo Fenqiao, Tu Bin, et al. Measuring method for anisotropic permeability by non-uniform radial flow in a whole core[J]. Acta Petrolei Sinica, 2005, 26(6): 66–68.
- [20] Iheanacho P C, Tiab D, Igbokoyi A O. Vertical-Horizontal permeability relationships for sandstone reservoirs[J]. SPE 163011, 2012, 1–8.
- [21] Zisser N, Nover G. Anisotropy of permeability and complex resistivity of tight sandstones subjected to hydrostatic pressure[J]. Journal of Applied Geophysics, 2009, 68(3): 356–370.
- [22] 孙东生, 李阿伟, 王红才, 等. 低渗透砂岩储层渗透率各向异性规律的实验研究[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(3): 1101–1106.
- Sun Dongsheng, Li Awei, Wang Hongcai, et al. Experiment on anisotropy of permeability with tight sandstone[J]. Progressing Geophysics, 2012, 27(3): 1101–1106.
- [23] Dong Jiajun, Hsu Juiyu, Wu Wenjie, et al. Stress-dependence of the permeability and porosity of sandstone and shale from TCDP hole-A[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2010, 47(7): 1141–1157.
- [24] 任晓霞, 李爱芬, 王永政, 等. 致密砂岩储层孔隙结构及其对渗流的影响——以鄂尔多斯盆地马岭油田长8储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(5): 774–779.
- Ren Xiaoxia, Li Aifen, Wang Yongzheng, et al. Pore structure of tight sand reservoir and its influence on percolation—Taking the Chang 8 reservoir in Maling oilfield in Ordos Basin as an example[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(5): 774–779.
- [25] 何金钢, 康毅力, 游利军, 等. 矿物成分和微结构对泥质岩储层应力敏感性的影响[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(1): 129–134.
- He Jingang, Kang Yili, You Lijun, et al. Effects mineral composition and microstructure on stress-sensitivity of mudrocks[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(1): 129–134.