

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.04.006

基于特低渗砂岩覆压试验渗透率方向性特征分析

高 超^{1,2}, 谢凌志^{2,3}, 熊 伦^{2,4}, 王永胜⁵

(1. 四川大学 水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 四川大学 能源工程安全与灾害力学教育部重点实验室, 四川 成都 610065; 3. 四川大学 新能源与低碳技术研究院, 四川 成都 610065; 4. 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065; 5. 神华鄂尔多斯煤制油分公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017209)

摘 要: 由于地质成因的不同, 岩石渗透率往往具有不同程度的大小和方向性差异, 即呈各向异性的特点。目前, 岩石渗透率方向性特征的理论 and 试验研究仍然不足, 缺乏岩石渗透率各向异性量化评估。基于国内 CCUS 场地储层砂岩, 沿正交方向钻取岩芯试件若干, 完成瞬态法覆压渗透率测试。试验结果表明, 特低渗砂岩正交方向渗透率随围压(上覆岩层压力)加载呈幂律函数递减, 当围压加载至 20 MPa 以后, 正交方向渗透率差异性逐步降低, 即渗透率由各向异性逐步向各向同性过渡, 且储层砂岩竖向渗透率压力敏感系数普遍低于水平侧向。通过建立一种空间坐标系下渗透率计算模型, 将岩石内部渗流规律等效为空间正交方向渗透率模型, 并借用统计学标准差定义提出渗透率各向异性系数 ξ_k , 将不同岩性储层岩石渗透率不均匀性作归一化处理, 定量地描述了覆压试验过程中试件渗透率各向异性的变化规律。

关 键 词: 覆压试验; 渗透率; 压力敏感性; 各向异性系数

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2016) 04-0948-09

Analysis of direction-dependent characteristics of permeability of sandstone with ultra-lowly permeability in confining pressure tests

GAO Chao^{1,2}, XIE Ling-zhi^{2,3}, XIONG Lun^{2,4}, WANG Yong-sheng⁵

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, College of Water Resources & Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 2. Key Laboratory of Energy Engineering Safety and Disaster Mechanics of Ministry of Education, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 3. Institute of New Energy and Low-Carbon Technology, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 4. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China; 5. China Shenhua Coal Liquefaction Co. Ltd. (CSCLC) Ordos, Ordos, Inner Mongolia 017209, China)

Abstract: The permeability of rock is apparently dependent on the direction or anisotropic, which is resulted from the rock-forming geological processes. At present, theoretical and experimental studies on directional permeability properties of sandstone remain insufficient, and there is lack of quantitative assessment on the anisotropy of permeability. The transient tests are performed on sandstone from CCUS by orthogonally sampling cores. Experiential results indicate that there exists a power function relation between the permeability and the confining pressure. However, as the confining pressure is increased up to 20 MPa, the difference of permeability in orthogonal direction declines gradually, which shows a convert of permeability from anisotropy to isotropy. The pressure sensitivity of the permeability in the vertical coring samples is generally lower than that in the horizontal ones. Furthermore, a theoretical model is deduced in the Cartesian coordinate for the anisotropic permeability, which can be used to explain the vector properties of rock permeability. The parameter of anisotropy ξ_k is also proposed on the basis of the standard deviation and then is employed to normalize the heterogeneity of permeability in different reservoir sandstones. It shows that the proposed method is quantitative to describe variations of anisotropy in the seepage field system.

Keywords: confining pressure experiment; permeability; pressure sensitivity; parameter of anisotropy

1 引 言

岩体渗流-应力耦合一直是岩石力学领域的研

究热点, 特别是在矿产资源开采、地下热能利用、核废料处理方面应用广泛^[1-3]。在油气资源开采过程中, 随着油气不断地采出, 直接导致储层岩石内部

收稿日期: 2014-07-08

基金项目: 国际科技合作项目(No.2012DFA60760); 国家科技支撑计划项目(No.2011BAC08B02)。

This work was supported by the International Science & Technology Cooperation Program of China (2012DFA60760) and National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2011BAC08B02).

第一作者简介: 高超, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事岩石损伤方面的研究工作。E-mail: gaochao199009@163.com

通讯作者: 谢凌志, 男, 1976 年生, 教授, 主要从事岩土工程等方面的研究工作。E-mail: xielingzhi@scu.edu.cn

孔隙压力持续降低,固相应力重新分布,引起储层岩石骨架的变形,使油气藏的物性参数特别是孔隙度和渗透率发生变化。而这些变化又反过来影响储层流体在孔隙空间的流动^[4],因此,对岩石受压变形时渗透率的研究尤为重要。但值得注意的是,在油气藏研究中,几乎没有渗透率完全均质或各向同性的油藏岩样^[5]。当油藏岩样受到上覆岩层扰动影响或者地应力状态发生改变时,渗透率沿不同方向差异性变化。而这种差异主要体现在随有效应力的变化产生的不同方向渗透率应力敏感性以及不同地质走向渗透率相对大小差异等。在 CO₂ 捕捉利用和地质封存(CCUS)中,由于上覆岩层压力扰动变化,CO₂ 在储层岩石中会发生渗流迁移,同样也会面临内部渗透率方向性差异问题。

在已取得的岩石渗透率方向性差异研究,特别是应力敏感性研究工作中,国内外学者较少考虑岩芯样品的取芯方向对渗透率的影响,试验测得的渗透率及相对应计算得到的渗透率围压敏感性着重考虑单一方向,相对应的岩石宏观和微观机制分析也未完全考虑方向性差异变化。Fatt 等^[6]通过试验最早发现油气藏储集层渗透率随围压升高而减小,且认为选取合适的围压在岩芯室内渗透率测试时极为重要;Worthington^[7]对岩芯试件轴向渗透率与有效应力进行拟合,认为二者之间具有三次多项式函数关系;Davies 等^[8]对不同岩芯渗透率应力敏感特征进行了系统对比研究,认为孔隙度和渗透率越大,则其应力敏感性越强,但特别地是,胶结致密的低渗砂岩岩芯渗透率越小,其应力敏感性越强;Min 等^[9]利用数值模拟方法,提出由于岩石内部裂隙引起的非线性正应力与位移作用,使得岩石在低应力条件下渗透率应力较为敏感;黄远智等^[10]应用驱替评价系统进行低渗砂岩流-固耦合渗流试验,研究表明,低渗岩石存在明显的流-固耦合效应,并且定义了岩石渗透敏感系数 C_k ,从而将影响渗透率的因素归一化处理;肖文联等^[11]通过变内压试验,从岩石变形机制上认识应力敏感特征的缘由;孙军昌等^[12]结合 CT 成像和铸体薄片技术,研究了孔隙结构差异对岩石渗透率应力敏感特征的影响。而在岩石渗透率方向性大小差异成因的研究中,Pettijohn 等^[13]研究认为,由于成岩过程中砂粒长轴主要平行于水流方向,造成渗透率的方向性差异;Mast 等^[14]研究认为,岩石骨架颗粒排列方向和填充方式与渗透率方向性密切相关,在平行于砂粒搬运的方向上渗透率明显增加。因此,特别需要将岩石受压变形与渗透率方向性变化规律结合考虑。在以往的岩芯渗透

试验和相关文献中,早期国外学者研究包括 Donald 等^[15]利用立方砂岩试件测定静水压力作用时试件渗透率,指出砂岩渗透率各向异性是上覆岩层压力的函数关系。Greenkorn 等^[16]进行张量推导和岩芯试验,指出砂岩内部渗透率的差异是由于颗粒晶体尺寸大小和层理结构的影响。综上所述,岩石渗透率方向性特征的理论 and 试验研究仍然不足,较少对不同方向渗透率应力敏感作对比研究,尚缺乏渗透率方向性特征的分析,对储层岩石渗透率各向异性评价也较少^[5, 12, 17-19]。

本文对我国华北某 CCUS 备选场地获取的储层砂岩进行加工,获得正交方向岩芯试件若干,借助 CORETEST 公司研发的覆压孔隙度渗透率仪(AP-608)进行相关测试和数据自动采集,重点研究在正交方向岩芯试件加工条件下,不同围压对特低渗砂岩渗透率影响的规律,分析岩芯随围压加载条件下渗透率方向性特征统计变化规律,简化考虑空间坐标系下的渗透率计算模型,并提出渗透率各向异性系数 ξ_k 。

2 研究方法

2.1 试样材料

本文岩芯取自我国华北某 CCUS 备选场地储层,其中 CO₂ 注入层位于三叠系刘家沟组、二叠系石盒子组、二叠系石千峰组,其余为夹层。地下储层概化模型如图 1 所示。其中 v 为储层竖直向, l_1 储层水平侧向。试验共获得砂岩岩芯 5 段,制备岩芯粉末进行 XRD 分析测试获得岩芯成分组成,见表 1。

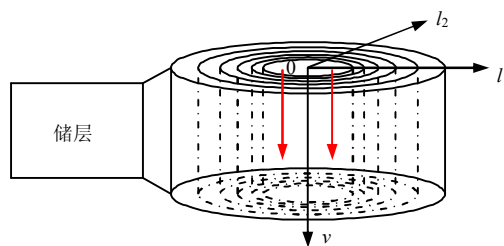


图 1 储层概化模型

Fig.1 Generalized model of reservoir

表 1 岩芯物性参数

Table 1 Physical properties of sandstone samples

编号	储层	埋深/m	岩性	成分
1	纸坊组	1 320	棕红色砂岩	石英方解石透长石
2	和尚沟组	1 548	浅红棕色细砂岩	石英微斜长石
3	刘家沟组	1 637	浅棕色砂岩	石英白云母珍珠云母
4	石千峰组	1 931	棕红色细砂岩	石英钠长石
5	石盒子组	2 203	浅灰色粗砾砂岩	石英镍绿泥石

每段岩芯 ($\phi 100\text{ mm}$) 沿正交方向 (见图 2) 钻取岩芯试件 3 组, 每组单轴方向取得岩芯试件 2 块, 试件尺寸参数为 $\phi 25\text{ mm} \times H 25\text{ mm}$ (见图 3), 共加工获得岩芯试件 30 块。

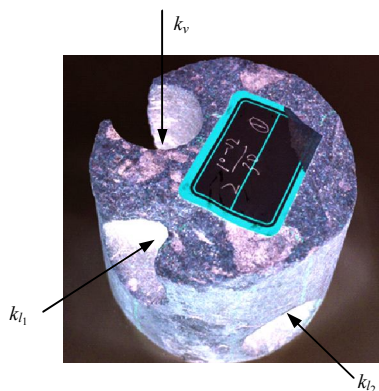


图 2 岩芯取芯方向图
Fig.2 Sampling in a core

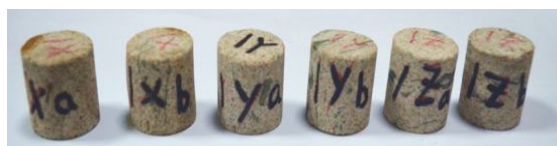


图 3 纸坊组储层砂岩试件
Fig.3 Typical samples of Zhifang formation sandstone

2.2 试验设备

试验测试采用美国 CORETEST 公司研发的覆压孔隙度渗透率仪 (AP-608) 进行相关测试和数据采集, 仪器如图 4 所示。围压加载范围在 $3.45 \sim 65.50\text{ MPa}$, 渗透率测量范围在 $10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2$, 孔隙度测量范围在 $0.1\% \sim 40\%$ 之间, 试验仪器采用高纯度氮气, 利用瞬态法进行渗透率量测。

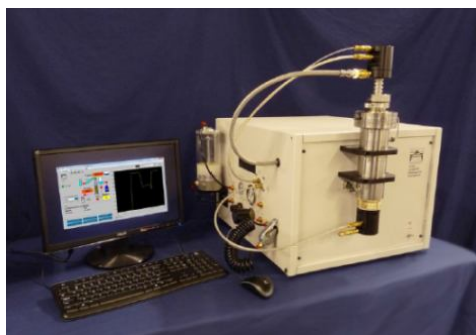


图 4 覆压孔隙率渗透仪 (AP-608)
Fig.4 Automated permeameter-porosimeter (AP-608)

2.3 试验方法

CCUS 场地注入层位于地下 $1\,316 \sim 2\,206\text{ m}$ 之间, 其岩石视密度范围约为 $2.41 \sim 2.48\text{ g/cm}^3$, 换算

得到储层上覆岩层压力分布在 $31.17 \sim 53.55\text{ MPa}$ 之间。本次试验中, 对于取自不同深度储层的岩芯, 利用覆压孔隙度渗透率仪 (AP-608), 采用 Hassler 型岩芯夹持器, 试验过程中温度保持在 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 仅在岩芯径向施加围压 (p), 轴向岩芯两端刚性约束固定, 加载至储层原始围压状态结束。特别注意的是, 由于试件水钻加工, 需将试件风干 24 h 后进行试验。以纸坊组 (储层) 岩芯为例, 其储层埋深为 $1\,319.7\text{ m}$, 岩石视密度为 2.41 g/cm^3 , 原始地层压力为 31.17 MPa , 设置围压梯度加载, 第 1 级加载围压为 4.72 MPa , 共分 5 级加载至原始地层压力。

3 试验结果与分析

3.1 岩石方向性渗透率应力敏感

按照试验方法, 获得纸坊组岩芯正交方向 (v 、 l_1 、 l_2) 孔隙度与渗透率值, 其中依据试验取芯轴向方向命名渗透率值, 即竖向渗透率 k_v , 水平侧向渗透率分别为 k_{l_1} 、 k_{l_2} 。同理测得其余 4 组岩芯相关数据, 文中仅罗列纸坊组与石千峰组数据, 如表 2、3 所示, 其中 p 为覆压渗透仪围压加载值。

表 2 纸坊组砂岩试验数据

Table 2 Experimental results of porosity and permeability for different directions of Zhifang formation sandstone

p/MPa	孔隙度/%			渗透率/ $(10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2)$		
	l_1	l_2	v	k_{l_1}	k_{l_2}	k_v
4.72	3.709	5.571	5.174	0.122	0.298	0.152
11.81	3.392	5.167	4.769	0.051	0.158	0.083
18.89	3.315	5.081	4.694	0.030	0.117	0.061
25.98	3.325	5.043	4.644	0.021	0.097	0.049
31.17	3.314	5.045	4.6375	0.018	0.088	0.044

表 3 和尚沟组砂岩试验数据

Table 3 Experimental results of porosity and permeability for different directions of Heshangou formation sandstone

p/MPa	孔隙度/%			渗透率/ $(10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2)$		
	l_1	l_2	v	k_{l_1}	k_{l_2}	k_v
4.72	7.956	8.696	10.013	0.057	0.091	0.121
11.81	7.699	8.453	9.829	0.036	0.060	0.089
18.89	7.548	8.428	9.773	0.029	0.051	0.080
25.98	7.458	8.408	9.732	0.025	0.045	0.074
33.07	7.405	8.405	9.723	0.022	0.042	0.069
36.57	7.425	8.461	9.711	0.021	0.041	0.068

岩芯渗透率随围压变化的曲线关系见图 5。

对照图 5 可以得出, 砂岩存在不同程度的渗透率各向异性。由图 5(a)、5(b)可知, 纸坊组岩芯在围压加载至原始地层压力时, 竖向渗透率 k_v 介于水平侧向渗透率 k_{l_1} 、 k_{l_2} 之间, 而和尚沟组岩芯 k_v 显著高于 k_{l_1} 和 k_{l_2} ; 由图 5(c)~5(e)可知, 当处于较低

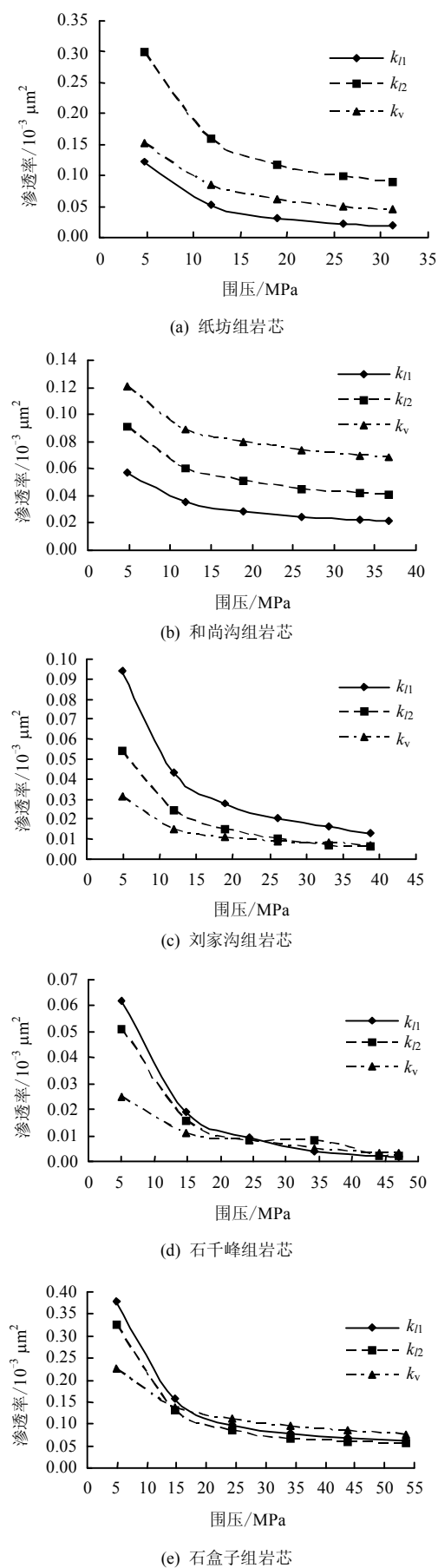


图5 不同储层围压加载岩芯渗透率

Fig.5 Relationships between permeability and confining pressure for different formations

围压时 (5~20 MPa), 竖直渗透率明显小于水平渗透; 在中高围压时 (20~40 MPa) 水平侧向渗透率 k_1 、 k_2 趋于接近 k_v , 特别地, 石盒子组岩芯在围压大于 15 MPa 时, k_v 测定值超过 k_1 、 k_2 。从整个围压加载历程上看, 储层岩芯渗透率由各向异性向各向同性逼近。这是由于岩芯由原位地层取至地面过程中, 岩石内部经历上覆岩层压力和孔隙流体压力释放过程, 岩石颗粒骨架、细观裂隙、孔隙结构扩张发育, 在试验时岩芯二次加载至原位压力初期, 由于成岩作用晶粒排布形成不同的渗流通道, 造成不同取芯方向岩芯渗透率取值差异。当围压继续加载, 岩芯内部发育的裂隙、孔隙结构逐渐闭合, 同时骨架的压缩变形引起渗流通道迂曲度增加, 产生盲孔, 渗流通道的闭塞数目的增加, 使得决定岩样不同方向渗透率大小差异的影响因素相关性增加, 即某方向区域内决定渗透率大小的物性参数也同时作用于其他方向区域内渗透率, 这从试验数据曲线上即表现出储层岩芯渗透率由各向异性向各向同性转变的宏观特征。

正交方向渗透率的变化关系及相互大小直接影响流体在储层宏观方向的迁移规律, 而在 CCUS 过程中, 重点关注 CO_2 在注入层的侧向和竖向迁移。如图 1 所示, 当 CO_2 沿井口注入至储层时, 注入井附近的渗流都可近似为平面径向渗流, 同时伴随有竖直方向的流体迁移。随着储层埋深的增加, 上覆岩层压力的增大, 导致储层沿不同方向渗透率产生变化, 进而影响场地储层内流体迁移扩散范围。由数据分析可得: 石盒子组储层流体竖直迁移趋势普遍大于水平方向; 刘家沟组储层流体水平方向迁移趋势普遍大于竖直方向; 石千峰组储层正交方向流体迁移趋势均匀。同时, 对照图 5(a)~(e) 可得, 各储层岩芯初始渗透率范围不同, 正交方向渗透率随围压的增加近似呈幂律函数降低, 其中仅对 5 组岩芯试件竖直方向渗透率 k_v 与围压 p 拟合, 获得岩芯围压-渗透率拟合公式。如表 4 所示。

表4 储层岩芯渗透率-围压幂指数拟合方程
Table 4 Fitting equations of vertical permeability and confining pressure of different formations

编号	岩芯储层	拟合公式	相关系数 R^2
1	纸坊组	$k_v = 0.423p^{-0.659}$	0.999
2	和尚沟组	$k_v = 0.183p^{-0.279}$	0.993
3	刘家沟组	$k_v = 0.088p^{-0.697}$	0.996
4	石千峰组	$k_v = 0.125p^{-0.938}$	0.956
5	石盒子组	$k_v = 0.459p^{-0.45}$	0.999

基于瞬态法^[20]测试岩芯渗透率, 试验过程中氮

气压力较小, 可作如下假设:

$$k(\sigma, \sigma_p) = k(\sigma_{\text{eff}}) \approx k(P, P_p) = k(P_{\text{eff}}) = k(p) \quad (1)$$

式中: σ 为总应力; σ_p 为孔隙压力; σ_{eff} 为有效应力; P 为总压力; P_p 为气体压力; P_{eff} 为有效围压; p 为试验仪器加载围压。参照兰林等^[21]提出的储层应力敏感评价模型:

$$\left(\frac{k}{k_0}\right)^{\frac{1}{3}} = 1 - S_s \lg \frac{\sigma_{\text{eff}}}{\sigma_{\text{eff}0}} \quad (2)$$

式中: k_0 为初始渗透率; k 为加载某围压状态下渗透率; S_s 为压力敏感系数, 量纲为 1, 可以反映出岩芯渗透率随有效围压 (上覆岩层压力) 的变化趋势, S_s 值越大, 渗透率敏感性越强。由式 (1)、(2) 得

$$\left(\frac{k}{k_0}\right)^{\frac{1}{3}} = 1 - S_s \lg \frac{p}{p_0} \quad (3)$$

式中: p_0 为初始加载围压。以上处理即对各储层岩芯渗透率敏感性作归一化处理, 得

$$S_s = \left[1 - \left(\frac{k}{k_0}\right)^{\frac{1}{3}} \right] / \left(\lg \frac{p}{p_0} \right) \quad (4)$$

由式 (4) 分别计算不同储层岩石正交方向岩芯试件渗透率敏感系数。根据计算结果, 同组储层岩芯相同方向渗透率敏感系数随围压加载小范围地减少, 近似由平均值表达, 如表 5 所示。

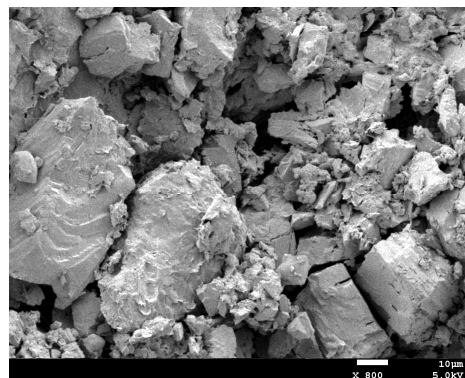
表 5 储层岩芯方向性渗透率敏感系数

Table 5 Sensitivity coefficients of directional permeability for sandstones in reservoir

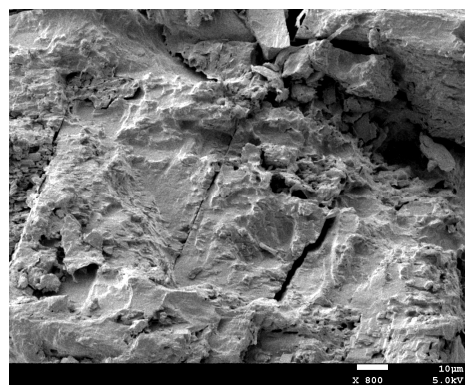
编号	储层	渗透率敏感系数 S_s		
		l_1	l_2	v
1	纸坊组	0.607	0.438	0.433
2	和尚沟组	0.331	0.286	0.212
3	刘家沟组	0.546	0.581	0.468
4	石千峰组	0.701	0.648	0.498
5	石盒子组	0.486	0.489	0.303

对比 5 组储层岩芯三轴方向敏感性系数, 竖向渗透率 k_v 敏感性系数普遍低于水平侧向, 这表明在相同埋深条件下, 竖向渗透率 k_v 较不易受到上覆岩层压力扰动影响, 同理可得, 当上覆岩层压力 (围压) 保持不变, 岩层内部孔隙和裂隙流体压力随时间发生变化时, 竖向渗透率 k_v 受到有效应力扰动作用相比较于水平侧向渗透率 k_l 、 k_2 改变不明显。值得注意的是, 不同储层岩芯渗透率敏感系数有较大

差异。其中初始渗透率较大的纸坊组 ($0.20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 与石盒子组 ($0.31 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 岩芯渗透率敏感系数平均值分别为 0.492、0.426, 而初始渗透率较低的刘家沟组 ($0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 与石千峰组 ($0.046 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$) 岩芯渗透率敏感系数平均值分别为 0.531、0.616, 这说明初始渗透率较小的特低渗砂岩储层, 其岩芯敏感系数往往较大。这是由于渗透率越小的岩样其所发育半径较大的孔喉越少, 有效围压作用后发育较少的较大孔喉的压缩变形将使得岩石渗透率急剧减小^[22-23], 即表现出渗透率越小的岩芯, 其压力敏感性越强。借助 SEM 扫描, 分别获得纸坊组与石千峰组岩芯断口处微观孔隙-裂隙结构电镜扫描图, 如图 6 所示。



(a) 纸坊组岩芯



(b) 石千峰组岩芯

图 6 岩芯 SEM 图像 (×800)

Fig.6 SEM images of core samples (×800)

根据电镜扫描图, 纸坊组砂岩在 800 倍下清晰可得颗粒形态, 粒径在 $10 \sim 50 \mu\text{m}$ 范围内, 颗粒边界不规则, 颗粒之间存在众多不规则溶蚀粒间孔隙结构且分布整个观察区域, 孔隙成多边形且孔隙开度范围在 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 间, 孔隙连通性好。石千峰组砂岩在相同放大倍数下观察发现无粒间颗粒, 并且无明显的粒间孔隙结构, 断口表面发现裂纹并贯穿整个观察区域, 裂纹长度约为 $30 \mu\text{m}$, 裂纹较大

开度约为 $2\ \mu\text{m}$ 。对比图 6(a)、6(b)，随围压的加载，岩石骨架受压变形，包括骨架的压缩与裂隙孔隙结构的闭合。初始渗透率较大的纸坊组岩芯，内部孔隙结构较多，随着围压加载，颗粒间孔隙结构受岩石骨架变形影响，孔道迂曲度增加，孔吼逐步收缩形成盲孔，渗透率逐步减低；初始渗透率较低的石千峰组岩芯，内部孔隙结构发育较少，仅有微裂隙存在，当围压加载，岩石骨架压缩并伴有裂隙的逐步闭合，因而较小的通道会迅速消失。即从微观观测解释了渗透率越小的岩芯其压力敏感性越强。

3.2 渗透率各向异性评价

超临界 CO_2 在储层迁移过程中，受到上覆岩层压力作用下，由于各方向渗透率差异，从宏观上存在明显的各向异性。根据等效驱替原理，王端平等^[5]利用达西定律，建立平面二维考虑渗透率方位角的矢量性渗透率定量计算模型为

$$k_n = k_{\text{mx}} \cos^2(\alpha_n - \theta) + k_{\text{my}} \sin^2(\alpha_n - \theta) \quad (5)$$

式中： k_n 为 n 方向渗透率； k_{mx} 为 x 轴方向极值渗透率； k_{my} 为 y 轴方向极值渗透率； α_n 为方向 n 方位角； θ 为极值渗透率 k_{mx} 方位角。本文忽略极值渗透率方位角影响，考虑空间三维坐标渗透率矢量计算模型。在多孔介质空间如图 7 所示。

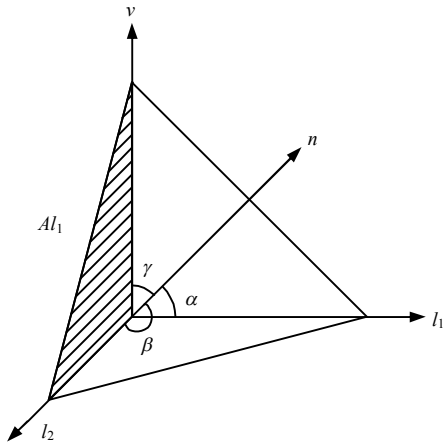


图 7 渗透率计算模型示意
Fig.7 Calculation model of permeability

某点 O 受到 ∇P_n 作用，通过任意截面 A 的流量 Q_n ，等于在 ∇P_{n_l} 作用下流体沿 l_1 方向通过截面 A_{l_1} 的流量 Q_{l_1} 与相同方法得到的 Q_{l_2} 和 Q_v 叠加，即

$$Q_n = Q_{l_1} + Q_{l_2} + Q_v \quad (6)$$

结合达西定律^[24],

$$v_n = -\frac{k_n}{\mu} \nabla P_n \quad (7)$$

式中： v_n 为沿 n 方向上的多孔介质流体表征渗流速度； μ 为流体的黏度。建立空间直角坐标系，设定渗透介质正交各向异性^[25]，通过等效横截面 A 的流量为

$$Q_n = v_n A = -A \frac{k_n}{\mu} \nabla P_n \quad (8)$$

用 A_{l_1} 表示横截面 A 在 v - l_2 平面内的投影面积，即与 l_1 方向垂直的等效渗流面积：

$$A_{l_1} = A \cos \alpha \quad (9)$$

式中：用 α 表示 n 与 l_1 方向夹角，同理，用 β 表示 n 与 l_2 方向夹角， γ 表示与 v 方向夹角， A_{l_2} 表示与 l_1 方向垂直的等效渗流面积， A_v 与 v 方向垂直的等效渗流面积：

$$A_{l_2} = A \cos \beta \quad A_v = A \cos \gamma \quad (10)$$

∇P_n 在 l_1 方向上的分量表示为

$$\nabla P_{l_1} = \nabla P_n \cos \alpha \quad (11)$$

∇P_{l_1} 作用下流体沿 l_1 方向的表征渗流速度为

$$v_{l_1} = -\frac{k_{l_1}}{\mu} \nabla P_{l_1} \quad (12)$$

同理

$$v_{l_2} = -\frac{k_{l_2}}{\mu} \nabla P_{l_2} \quad v_v = -\frac{k_v}{\mu} \nabla P_v \quad (13)$$

∇P_x 作用下沿 x 方向等效渗流量为

$$Q_{l_1} = v_{l_1} A_{l_1} = -A \frac{k_{l_1}}{\mu} \nabla P_n \cos^2 \alpha \quad (14)$$

得

$$\begin{aligned} -A \frac{k_n}{\mu} \nabla P_n &= -A \frac{k_{l_1}}{\mu} \nabla P_n \cos^2 \alpha - A \frac{k_{l_2}}{\mu} \nabla P_n \cos^2 \beta - \\ &\quad A \frac{k_v}{\mu} \nabla P_n \cos^2 \gamma \end{aligned} \quad (15)$$

即

$$k_n = k_{l_1} \cos^2 \alpha + k_{l_2} \cos^2 \beta + k_v \cos^2 \gamma \quad (16)$$

由式 (16) 可知，渗透率 k_n 可由正交方向渗透率 k_{l_1} 、 k_{l_2} 、 k_v 表示，王端平等^[5]通过反证法指出，

渗透率是渗流通道（或渗流路径）的渗透率，不能脱离渗流通道独立存在，也不可简单矢量合成。通过驱替模型建立的正交渗透率模型，空间某点等效渗透率受坐标轴分量与夹角共同作用。在本文中，低渗砂岩受到围压（上覆岩层压力）作用时，忽略夹角影响，如图8所示，流体在多孔介质中，将无序地渗流迁移转化为正交渗流模型。

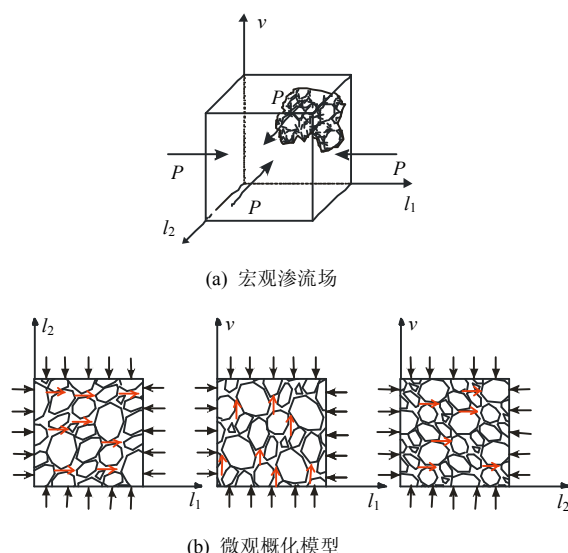


图8 渗流场微观概化模型
Fig.8 Generalized model of microscopic seepage field system

在受到上覆岩层压力的影响，即在不同围压条件下，各主轴方向渗透率与初始渗透率相比，会产生不同程度的非线性递减。设定初始围压 P_0 条件下正交方向渗透率为 k_{v0} 、 k_{h10} 、 k_{l20} ，随围压加载至 P_j 状态时，渗透率表示为 k_{vj} 、 k_{hj} 、 k_{lj} ，不同状态 P_j 时，三轴方向渗透率相对变化程度不同，如图9所示。为定量描述某围压状态下，渗透率正交方向上不均匀性差异，借用统计标准差形式，定义渗透率各向异性系数 ξ_k 。

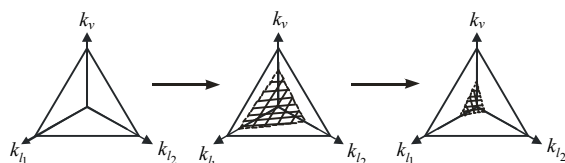


图9 方向性渗透率相对变化示意
Fig.9 The relative variation of directional permeability

$$\bar{k}_j = \frac{1}{3}(k_{vj} + k_{hj} + k_{lj}) \quad (17)$$

$$\xi_k = \sqrt{\frac{(k_{vj} - \bar{k}_j)^2 + (k_{hj} - \bar{k}_j)^2 + (k_{lj} - \bar{k}_j)^2}{3}} \quad (18)$$

式中： ξ_k 表征渗流场系统微观状态内部的统计量，描述多孔介质系统渗流规律的复杂性和不确定性。渗透率不均匀系数越大，表明岩芯渗透率各向异性特征明显。根据式(17)、(18)的推导， ξ_k 可以将不同岩石渗透率正交方向渗透率归一化统计。

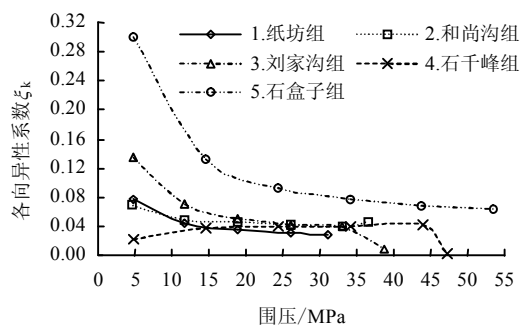


图10 渗透率各向异性系数
Fig.10 Permeability parameters of anisotropy ξ_k

图10给出了5组岩芯随围压加载渗透率各向异性系数变化情况。总体上看，随围压加载至原始上覆岩层压力过程中， ξ_k 值大多逐步减小。而石千峰组试件加载过程中， ξ_k 值呈现小范围上升，加载结束时，较初始 ξ_k 呈明显降低，这标明岩样在受到围压加载后，渗透率各向异性逐步向各向同性过渡，从而定量描述了某围压状态渗透率方向性差异变化。值得注意的是，不同储层岩石在相同围压加载情况下计算得出的 ξ_k 存在差异，石盒子组岩芯 ξ_k 明显高于其余4组岩芯，表明较大地初始渗透率随围压加载过程中，内部渗透率各向异性较明显。

4 结 论

(1) 低渗透性砂岩具有不同程度的渗透率各向异性特征，且在低围压条件下，正交方向渗透率差异较大，当围压加载至 20 MPa 以后，正交方向渗透率差异性逐步降低，渗透性由各向异性向各向同性转变。

(2) 在围压加载过程中，竖向岩芯渗透率压力敏感值普遍小于水平方向压力敏感值，即低渗砂岩储层竖向渗透率不易受到上覆岩层地应力或孔隙裂隙流体压力扰动影响，且渗透率偏低的低渗砂岩压力敏感性较强。

(3) 随围压加载至原始地层压力过程中，渗透率近似呈幂律函数降低。

(4) 根据等效驱替原理建立的矢量性渗透率计算模型, 得出空间某点的渗透率受等效正交方向渗透率以及坐标夹角因素控制, 但不能简单的矢量性叠加。

(5) 建立渗透率不均匀系数 ξ_k , 定量描述储层岩石空间内部渗流场各向异性差异程度。不同储层低渗砂岩随围压加载, 渗透率各向异性差异变化。

参 考 文 献

- [1] 贺玉龙, 杨立中. 围压升降过程中岩体渗透率变化特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 415—419.
HE Yu-long, YANG Li-zhong. Testing study of variational characteristics of rock mass permeability under loading-unloading of confining pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3): 415—419.
- [2] DAVIES J, DAVIES D. Stress-dependent permeability: characterization and modeling[J]. **Society of Petroleum Engineer Journal**, 2001, 6(2): 224—235.
- [3] RUTQVIST J, WU Y S, TSANG C F, et al. A modeling approach for analysis of coupled multiphase fluid flow, heat transfer, and deformation in fractured porous rock[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2002, 39(4): 429—442.
- [4] 刘建军, 冯夏庭. 我国油藏渗流-温度-应力耦合的研究进展[J]. 岩土力学, 2003, 24(增刊): 645—650.
LIU Jian-jun, FENG Xia-ting. Advance of studies on thermo-hydro-mechanical interaction in oil reservoir in China[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(Supp.): 645—650.
- [5] 王端平, 周涌沂, 马泮光, 等. 方向性岩石渗透率的矢量特性与计算模型[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1294—1297.
WANG Duan-ping, ZHAO Yong-yi, MA Pan-guang, et al. Vector properties and calculation model for directional rock permeability[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(8): 1294—1297.
- [6] FATT I, DAVIS D H. Reduction in permeability with overburden pressure[J]. **Journal of Petroleum Technology**, 1952, 4(12): 1—16.
- [7] WORTHINGTON PAUL F. A diagnostic approach to quantifying the stress sensitivity of permeability[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2008, 61(2): 49—57.
- [8] DAVIS J P, DAVIS D K, DAVIS K. Stress-dependent permeability: characterization and modeling[C]//The 1999 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston: [s. n.], 1999.
- [9] MIN KI-BOK, RUTQVIST J, TSANG CHIN-FU, et al. Stress dependent permeability of fracture rock masses: a numerical study[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(7): 1191—1210.
- [10] 黄远智, 王恩志. 低渗透岩石渗透率对有效应力敏感系数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 410—413.
HUANG Yuan-zhi, WANG En-zhi. Experimental study of coefficient of sensitiveness between percolation rate and effective pressure for low permeability rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(2): 410—413.
- [11] 肖文联, 李闽, 赵金洲, 等. 低渗致密砂岩渗透率应力敏感性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 775—779.
XIAO Wen-lian, LI Min, ZHAO Jin-zhou, et al. Laboratory study of stress sensitivity to permeability in tight sandstone[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 775—779.
- [12] 孙军昌, 杨正明, 魏国齐, 等. 不同孔隙类型火山岩储层渗透率应力敏感特征[J]. 岩土力学, 2012, 33(12): 3577—3584.
SUN Jun-chang, YANG Zheng-ming, WEI Guo-qi, et al. Characterization of stress-dependent permeability of volcanic gas reservoir of different types of pore structure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(12): 3577—3584.
- [13] PETTIJOHN F J, POTTER P E, SIEVER R. Sand and Sandstone[M]. New York: Springer, 1987.
- [14] MAST R F, POTTER P E. Sedimentary structures, sand shape fabrics, and permeability[J]. **Journal of Geology**, 1963, 71(5): 548—565.
- [15] DONALD H. Gray irving fatt. The effect stress on permeability of sandstone cores[J]. **Society of Petroleum Engineers**, 1963, 3(2): 95—100.
- [16] GREENKORN R A, JOHNSON C R, SHALLENBERGER L K. Directional permeability of heterogeneous anisotropic porous media[J]. **Society of Petroleum Engineers**, 1964, 4(2): 124—132.
- [17] 孙军昌, 杨正明, 郭和坤, 等. 致密储层渗透率测试的稳态与非稳态法对比研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(4): 1009—1016.
SUN Jun-chang, YANG Zheng-ming, GUO He-kun, et al. Comparative study of tight reservoir permeability using steady-state and unsteady-state methods[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(4): 1009—1016.
- [18] 乔丽苹, 王者超, 李术才. 基于 Tight gas 致密砂岩储层渗透率的有效应力特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,

- 2011, 30(7): 1422—1427.
- QIAO Li-ping, WANG Zhe-chao, LI Shu-cai, et al. Effective stress law for permeability of tight gas reservoir sandstone[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(7): 1422—1427.
- [19] 陈卫忠, 杨建平, 伍国军, 等. 低渗透介质渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 236—243.
- CHEN Wei-zhong, YANG Jian-ping, WU Guo-jun, et al. Experimental study on permeability in low permeability media[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(2): 236—243.
- [20] 陈颀, 黄庭芳, 刘恩儒. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- CHEN Yong, HUANG Ting-fang, LIU En-ru. Rock physics[M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009.
- [21] 兰林, 康毅力, 陈一健, 等. 储层应力敏感性评价实验方法与评价指标探讨[J]. 钻井液与完井液, 2005, 22(3): 1—4, 79.
- LAN Lin, KANG Yi-li, CHEN Yi-jian, et al. Investigation on experimental method and assessment criterion for reservoir stress sensitivity[J]. **Drilling and Completion Fluids**, 2005, 22(3): 1—4, 79.
- [22] 罗瑞兰, 程林松, 彭建春, 等. 确定低渗岩芯渗透率随有效覆压变化关系的新方法[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2007, 31(2): 87—90.
- LUO Rui-lan, CHENG Lin-song, PENG Jian-chun, et al. A new method of determining relationship between permeability and effective overburden pressure for low-permeability reservoirs[J]. **Journal of China University of Petroleum: Natural Science**, 2007, 31(2): 87—90.
- [23] 杨正明, 张英芝, 郝明强, 等. 低渗透油田储层综合评价方法[J]. 石油学报, 2006, 27(2): 64—67.
- YANG Zheng-ming, ZHANG Ying-zhi, HAO Ming-qiang, et al. Comprehensive evaluation of reservoir in low-permeability oilfields[J]. **Acta Petrolei Sinica**, 2006, 27(2): 64—67.
- [24] BANDIZIOL DANILO, MASSONNAT GERARD, AQUITAINE ELF. Horizontal permeability anisotropy characterization by pressure transient testing and geological data (SPE 24667)[M]. Texas: SPE Technical Publications, 1992: 39—52.
- [25] BARN A. Szabo. Permeability of orthotropic porous mediums[J]. **Water Resources Research**, 1968, 4(4): 801—808.
-
- 上接第 947 页
- [7] 安庆军, 宋林辉, 梅国雄, 等. 三轴 CD 试验稳定控制标准讨论[J]. 工程勘察, 2008, (2): 1—3.
- AN Qing-jun, SONG Lin-hui, MEI Guo-xiong, et al. Discussions on the stabilization standards on the triaxial consolidation drained test[J]. **Geotechnical Investigation and Surveying**, 2008, (2): 1—3.
- [8] 施建勇, 问延煦, 雷国辉, 等. 固结试验及其相关问题的讨论[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(2): 213—215.
- SHI Jian-yong, WEN Yan-xu, LEI Guo-hui, et al. Discussion on consolidation test and some relative problems[J]. **Journal of Hohai University (Natural Sciences)**, 2004, 32(2): 213—215.
- [9] TERZAGHI KARL. Theoretical soil mechanics[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1943: 290—296.
- [10] 陈根媛. 三向应力下饱和软粘土的应力应变时间关系[硕士学位论文 D]. 杭州: 浙江大学, 1964.
- CHEN Gen-yuan. The relationship between the stress, strain and time of the saturated soft soil under three-dimensional stress[Master's thesis D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1964.
- [11] CARRILLO N. Simple two and three dimensional cases in the theory of consolidation of soils[J]. **Journal of Mathematics and Physics**, 1942, 21(1): 1—5.
- [12] BARRON R A. Consolidation of fine grained soils by drain wells[J]. **Transactions, ASCE**, 1948, 113: 718—742.
- [13] 陈志波, 朱俊高. 宽级配砾质土三轴试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 704—710.
- CHEN Zhi-bo, ZHU Jun-gao. Triaxial tests on widely graded gravelly soil[J]. **Journal of Hohai University (Natural Sciences)**, 2010, 38(6): 704—710.
- [14] 河海大学岩土工程研究所. 土质防渗体本构特性与静力变形分析方法研究[R]. 南京: 河海大学, 2008, 10.
- Geotechnical Institute of Hohai University. Study on the constitutive properties of the anti-seepage soil and the static deformation analysis method[R]. Nanjing: Hohai University, October, 2008.
- [15] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院科学研究所. 四川省大渡河双江口水电站可行性研究阶段坝型适宜性研究专题—土工试验研究报告[R]. 成都: 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院科学研究所, 2006, 5.
- Scientific Institute of Chengdu Engineering Corporation Limited. The suitable study on the dam type during the feasibility studies phase on Dadu river in Sichuan province—The experimental study[R]. Chengdu: Scientific Institute of Chengdu Engineering Corporation Limited, May, 2006.