

深部泥岩渗透率测试方法及数据适用性分析

刘 伟¹, 李银平¹, 杨春和¹, 马洪岭¹, 施锡林¹, 黄小兰²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 武汉轻工大学 多孔介质力学研究所, 武汉 430023)

摘 要: 针对深部地层同一种泥岩, 先后采用常规渗透测试、变围压渗透测试和三轴压缩下瞬态法 3 种方法开展渗透率的测试研究。试验发现, 3 种方法下泥岩的渗透率差别极大, 其中常规渗透测试所得的渗透率高出后两种方法 3~5 个数量级; 变围压法在围压大于 5 MPa 后与三轴压缩下的瞬态法所测得的渗透率值较为接近; 瞬态法下泥岩渗透率随偏应力增加而缓慢降低, 偏应力高达 30 MPa 时仍未出现扩容现象。测试显示泥岩的渗透率具有强烈的压力敏感性, 其内在原因是较高围压下裂隙闭合、孔隙压紧、孔喉连通性减小, 进而导致渗透率下降, 而制样、烘干处理等对渗透率也有一定影响。基于试验结果与泥岩所处实际地层应力状态, 提出可采用变围压法开展油气储集层的盖层的渗透率及其演化规律研究, 而三轴压缩下瞬态法则更适用于能源储库盖层及核废料处置室围岩的渗透规律研究; 常规渗透方法所得数据的应用则须商榷。研究结论对研究深部泥岩的渗透特性和密封性能有一定参考价值。

关 键 词: 泥岩; 渗透率; 围压; 压力敏感性; 偏应力

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Methods for testing permeability of deep mudstone and analysis of data reliability of each method

LIU Wei¹, LI Yin-ping¹, ANG Chun-he¹, MA Hong-ling¹, SHI Xi-lin¹, HUANG Xiao-lan²

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. Institute of Poromechanics, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: For the same deep mudstone, three testing methods of permeability (conventional testing method, variable confining pressure method, and pulse method under triaxial compression) have been conducted respectively. According to the testing results, large difference of permeability was found inbetween the three methods, in which the permeability of conventional method is 3-5 orders higher than those of the other two methods. The results of variable confining pressures method while its confining pressure exceeds about 5 MPa approach relatively the results of pulse method under triaxial compression. Permeability of pulse method slowly decreased with the increasing of deviatoric pressure, and dilatancy didn't occur even when confining pressure reached 30 MPa. The results indicate that the permeability of mudstone is strongly sensitive to pressure; the intrinsic reason of which is that the cracks, fissures and pores in rock matrix tend to be compacted under high compression, which results in the reduction of pore size and connectivity for percolation channels and then causes the permeability to decrease; moreover, samples production, oven drying treatment, etc. also influence some of the permeability. Based on the results and the in-situ stresses conditions of mudstone, it is proposed that the variable confining method is suitable for the permeability and its development of reservoirs' cap rock, while the results of pulse method under triaxial compression is more suitable for the cap rock of energy storage caverns and rock wall of wastes disposals. However, one should be very cautious while uses the results from conventional method. The research carried out supplies some constructive references for the analysis of the percolation properties and sealability of mudstone in deep strata.

Key words: mudstone; permeability; confining pressure; pressure sensibility; deviatoric stress

1 引 言

泥岩是地球上分布最为广泛的一类沉积岩体,

从地表至地下数千米均有泥岩分布, 也是地壳最为重要的一类岩体, 大厚度大规模的泥岩地层一般都能充当良好的地质封隔体。世界上约 70%~80%的

油气田的直接或者间接盖层由泥岩构成,而泥页岩本身就是生储盖一体的优良地质封隔体^[1]。近年来随着我国层状盐岩中能源储库领域的大力发展,泥岩又成为深部盐穴储库的直接盖层^[2];此外,随着全球核电事业突飞猛进,关于把泥岩作为高放核废料永久处置基地的研究,再次引起了相关领域的学者们对泥岩的研究热潮^[3]。

泥岩之所以能发挥隔挡作用而成为盖层/封隔体,是其所具有的优良的物性封闭能力^[4]。一般而言,良好的盖层都具有极低的渗透率和极细小的孔隙,渗透率常常是衡量泥岩封闭能力的最为重要的指标之一。岩体渗透率一般可通过室内试验测试获取,由达西定律的定义可知,渗透率是与流体类型、孔隙介质无关的独立量。然而,从实际情况来看,岩体性质及应力状态对渗透率却有显著影响,其原因在于岩石属于孔隙和骨架构成的物质,一般具有可压缩性,可导致在不同压力下内部孔隙结构和尺寸发生变化,使得渗透率对压力状态具有一定的敏感性,被称为“岩体渗流-应力耦合效应”^[5]。

关于岩石渗透率的压力敏感性课题,国内外已经有了较多的有益成果,主要集中在储层岩体及晶体类岩体,如碳酸盐储层、火山岩储层、花岗岩、岩盐等。Fatt 等^[6]在试验中最早发现了碳酸盐岩的渗透率随围压升高而减小的现象。孙昌军等^[7]对不同孔隙类型的火山岩储层开展了渗透率应力敏感性分析,指出孔隙结构差异是导致岩石渗透率应力敏感强弱差异的主要原因。周宏伟等^[8]对盐岩开展了不同静水压力下的渗透率测试,表明在压缩下盐岩孔隙度不断减小、连通性降低是导致渗透率下降的细观原因。Yang 等^[9]建立了反映深部泥岩渗透率随固结程度变化的力学模型。Billiotte 等^[10]对埋深 500 m 处不同饱和度的泥岩开展了不同偏应力状态下的渗透特性研究。Hangx 等^[11]对石膏质泥岩开展了不同偏应力下的渗透率测试,研究表明石膏质泥岩的渗透率低至 10^{-21} m^2 ,且在偏应力达 60 MPa 才发生扩容(相应围压 10 MPa)。

泥岩涉及学科涵盖石油地质学、岩土工程、渗流力学等领域,属于典型的低渗介质,对测试方法和仪器精度要求极高,针对泥岩的渗透特性的研究,国内鲜见报道。渗透率的测试方法若按岩芯受力状态划分有常规渗透测试法、变围压渗透测试法和三轴压缩测试法,前两者在石油工程中应用较多,后者主要服务于岩土工程领域。泥岩较软,属于典型的软岩,内部主要分布大量的微孔隙,与一般的储层或裂隙岩体有较大差异,直接导致了其在

不同应力条件下会呈现出与其他岩体不同的响应特征。因此,对于深部泥岩的渗透率,每种方法所得数据对具体工程条件的可靠性和适用性值得探讨,以建立对具体工程最为使用的渗透率测试方法,是值得开展的科研课题。

本文采用 3 种测试方法对同一泥岩开展了渗透率测试研究,获得了每种方法下泥岩渗透率值及其变化规律,同时分析了造成差异的原因,确定了各方法下数据的可靠性和适用范围,可供开展同类试验研究参考。

2 3 种渗透试验的开展

渗透性是流体透过岩体的能力,一般用渗透率表示。岩体内部存在的各种不连续面,如晶界、节理面、微裂隙等提供了流体渗透的通道,是造成岩体具有可渗透性的根本原因。岩体内部孔隙结构、尺寸、孔隙连通程度、矿物亲水性等的不同使得不同岩体具有不同的渗透特性。渗透率一般采用室内岩心渗透试验获取,计算的基本原理为达西定律。根据研究的需要,渗透率可采用液体(淡水、卤水、煤油)或气体(氮气、氩气、氦气)作为渗透介质,特殊情况下也有采用混相流体的情形。

若用液体作为测试介质,渗透率一般采用式(1)计算。

$$K_l = \frac{Q_l \mu_l L}{A(P_{in} - P_{out})} \quad (1)$$

式中: K_l 为液测渗透率; A 为岩芯横截面积; P_{in} 、 P_{out} 分别为入口端与出口端流体压力; μ_l 为液体动力黏度; Q_l 为液体流量; L 为岩心长度。

若用气体作为渗透介质,则必须考虑气体的压缩性,应采用对式(1)修正后的微分形式:

$$K_g = -\frac{Q_g P_0 \mu_g}{A} \frac{dL}{p dp} \quad (2)$$

对式(2)积分,可得

$$K_g = \frac{2P_0 Q_g \mu_g L}{A(P_{in}^2 - P_{out}^2)} \quad (3)$$

式中: K_g 为气测渗透率; μ_g 为气体动力黏度; P_0 为大气压值; Q_g 为气体流量。

本次测试所用泥岩岩芯取自江苏省金坛市某层状盐岩矿区,该泥岩层位于 860~900 m 深度范围内,是某拟建地下能源储库的盖层。岩石呈灰黑色,性质均一,岩性稳定。通过 X 衍射试验(X-Ray diffraction)可知,泥岩主要由铁白云石(20.46%)、

石英(16.22%)、方沸石(9.57%)、钠长石(8.97%)、蒙脱石~绿泥石(8.30%)、钙芒硝(8.2%)等组成。考虑到作为盖层主要发挥垂直封闭功能,岩芯为竖向制样,均采用钢锯配合细砂纸手工打磨而成。考虑到泥岩中黏土矿物遇水膨胀,本次研究的3种方法测试均用气测法,方法1为常规渗透率测试,方法2为变围压渗透测试,方法3为3种压缩下瞬态法渗透测试。

2.1 常规渗透率测试(方法1)

常规渗透率测试方法是將岩芯固定于岩芯夹持器内,环向施加围压,轴向施加气压,采用达西公式计算渗透率。试验围压 P_c 的值较低,一般取1.379 MPa或2 MPa左右。围压的作用使气体不从侧面溢出,而不反映岩芯所在地层应力状态,由于该方法围压的有效应力仅为1~2 MPa,故所得渗透率又常称为“地面渗透率”,常用于对储集层渗透率的测试。围压值可按式(4)确定。

$$P_c \geq P_m + 1 \quad (4)$$

式中: P_c 为环向围压(MPa),可用水或气体施加; P_m 为入口端气压(MPa),一般取0~1.0 MPa。

对100块泥岩岩芯开展了渗透率测试试验,试验围压为1.38 MPa,气压为0.4 MPa,同时给出了利用气体膨胀法所得的孔隙度。测试结果如图1所示。

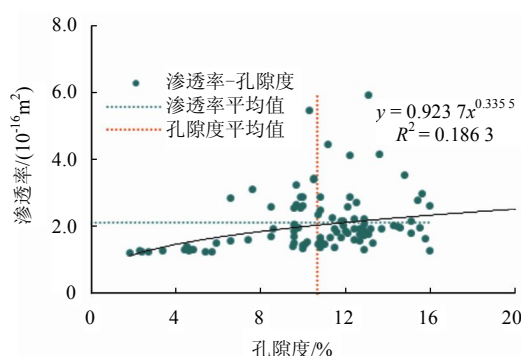


图1 常规渗透率测试法的渗透率与孔隙度

Fig.1 Relationship of permeability vs. porosity under conventional permeability method

由图1可见,渗透率基本上为 10^{-16}m^2 量级,平均为 $2.13 \times 10^{-16} \text{m}^2$,绝大部分数值介于 $(1 \sim 3) \times 10^{-16} \text{m}^2$ 之间,最高、最低值的比值不超过3倍。孔隙度的变化范围为3.5%~16.2%,平均值为10.6%,孔隙度的变化范围较大,涵盖了低孔和中孔范围。一般而言,孔隙度对渗透率应该有较大影响,但从图1结果来看,渗透率与孔隙度之间无明显函数关系,只是在整体上渗透率随孔隙度增大而缓慢升

高,两者呈非常弱的幂函数拟合关系,这并不说明孔隙度对渗透率的影响不存在,恰恰表明岩样的渗透性取决于岩样中连通的孔隙和微裂纹。采样扰动产生的微裂纹的体积率在岩样的孔隙率中所占比重甚小,但对岩样的渗透性影响却极大。

对于泥岩而言, 10^{-16}m^2 的渗透率虽然已经处于较低的值,但并不算极低,仅相当于低渗储层^[1]。这样的渗透率是否具有良好的封闭性能,值得商榷。与盐岩($10^{-21} \sim 10^{-22} \text{m}^2$)、石膏岩(10^{-21}m^2)等低渗介质相比,本次泥岩渗透率高出5~6个量级,与Billiotte等^[10]所测的泥岩相比也高出数个量级。

由于各自的物理性质、成岩特征、测试条件等不同,岩芯造成结果有差异是正常的。为找寻与同类研究成果存在差异的原因,对试验的测试条件对比发现,本次试验与Billiotte等^[10]的测试压力条件相差较大,Billiotte给定的围压达11 MPa,而Hangx等^[11]的最低围压也高达10 MPa,岩芯钻取及加工扰动造成孔隙和裂隙张开,而常规测试时较低的围压尚不足以使其闭合,故而呈现较高渗透率。此外,岩芯烘干也可能是影响渗透率的原因。测试前,先将试样在100℃下烘烤48 h,但对于泥岩可能会对其造成严重的损伤。在较高温度下岩芯内部的结合水会成为自由水而散失及岩芯在温度下干缩作用都有可能造成内部裂隙增加和体积增加,后续的试验中烘干温度均设为40~50℃,以免造成物性变化。

2.2 变围压渗透率测试(方法2)

在油气田开发过程或在岩土工程建设中(储气库造腔、核废料处置室开挖)盖层/围岩的压力都是处于不断变化的,通过改变围压来模拟岩体在开采/工程建设中的压力变化,以探寻压力变化对渗透率的影响。考虑到常规渗透测试中围压仅有一级,其值(如1.38 MPa)远低于实际地层压力,故本次测试中针对同一地层的相同岩芯设定了多级围压,从2.5 MPa开始,每级增加2.5 MPa,采用稳态法对其开展渗透率试验,直至达到稳态法测试精度(10^{-20}m^2)时停止试验。

稳态法在围压较高时渗透率已经非常低,达到稳态耗时极长,能测到流量的时间更长,故仅针对5块泥岩开展了变围压渗透率测试,发现围压对渗透率的影响极为显著,围压在2.5 MPa时,渗透率的数值为 $10^{-17} \sim 10^{-18} \text{m}^2$,随着围压的增加渗透率快速下降;围压达到10 MPa时,渗透率的值低达 $10^{-19} \sim 10^{-20} \text{m}^2$,故未针对10 MPa以上围压开展渗透率测试。图2为“泥岩-1”渗透率测试的典型曲

线,同时给出了渗透率与围压的拟合关系,表1为测试结果。

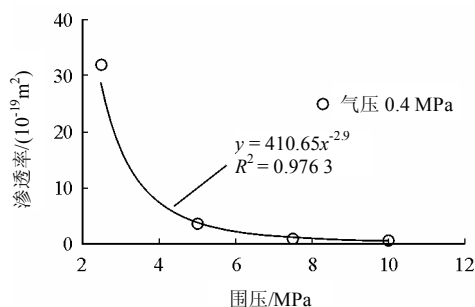


图2 围压与渗透率的关系曲线(入口气压为0.4 MPa)

Fig.2 Relationship curve of confining pressure versus permeability while the inlet pressure of gas is 0.4 MPa

表1 变围压测试结果汇总(入口压力均为0.4 MPa)

Table 1 Permeability testing results under variable confining pressure(each inlet pressure 0.4 MPa)

岩样 编号	不同围压(MPa)下的渗透率/(10 ⁻¹⁹ m ²)			
	2.5	5.0	7.5	10.0
泥岩-1	32.00	3.60	0.85	0.70
泥岩-2	81.30	11.80	8.20	2.10
泥岩-3	71.80	8.80	1.20	2.00
泥岩-4	20.90	2.40	0.50	0.40
泥岩-5	13.70	2.30	0.40	0.20

5块岩心的渗透率与围压基本上都符合图2的变化趋势,都满足一个特点,即初始加载时渗透率的值都较高,随着围压的增加,渗透率都有所下降,尤其在最初的两级围压下渗透率的下降非常迅速,以后渗透率的变化就变得非常缓慢,甚至趋于平缓。从围压5 MPa之后的结果来看,泥岩的低渗特性还是非常明显的,围压达到10 MPa时,其渗透率更是低至10⁻²⁰ m²,与同类研究成果也较为接近^[10],也说明该地层段的泥岩的确是具有良好密封性能的地层,采用常规渗透测试时则无法得出此结论。

与常规渗透测试结果(10⁻¹⁶ m²)相比,本测试的渗透率低2~4个数量级,说明压力条件对渗透率的影响非常显著,甚至是决定性的影响。对泥岩测试渗透率的进行时,必须充分考虑了压力条件的影响,其结果才可靠。这一点下文会详细分析。

2.3 三轴压缩下的瞬态法渗透测试(方法3)

变围压渗透测试中采用稳态法为测试手段,由于气体达到稳态所需时间较长,对于低渗介质的测试效率较低,测试中围压仅达到10 MPa时就无法进一步开展试验,而围压值与实际地层压力(约21 MPa)相比,仍有一定的差异。此外,地应力的3个主应力值一般都是不相等的,无论泥岩地层作

为油气(天然气、石油等)盖层、作为能源储库盖层、还是作为核废料处置室围岩,随着油气开采或工程建设等的推进,作为盖层/围岩的应力都是处于变化的,即其实际应力应当为三向应力状态。一般地,过大的偏应力易使岩心裂隙错动、张开、产生过大变形、甚至导致剪切破碎带的形成。该影响区又被称为损伤扰动区(excavation disturbed zones,简称EDZ)。而EDZ的大小和范围是评价盖层/围岩封闭能力的重要指标。因此,开展三向应力下的渗透测试,对于探索EDZ内渗透率的演化规律及其灾变临界点,进而对工程做出合理指导具有重要意义。

鉴于瞬态法测试精度可达10⁻²¹ m²及测试时间相对较短的特性,采用该方法在岩石三轴压缩试验机上对同一地层泥岩岩芯开展该试验。

三轴压缩下瞬态法与前两种方法有较大差异,其基本原理和步骤为:将待测岩芯固定于上下压力室,然后在上、下压力室施加一个相等的恒定气压以使岩芯内形成初始压力场;给上压力室施加一个脉冲气压;在压差作用下岩芯内产生自上而下的渗流,此后上压力室的压力 P_+ 会逐渐衰减、下压力室的压力 P_- 会逐渐上升,直至达到压力平衡。利用气体衰减规律计算求得渗透率。有关瞬态法的原理和方法的介绍,详见文献[12-13]。

瞬态法的渗透率由式(5)给定^[13]:

$$K_g = \frac{d}{dt} \left(\ln \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_0} \right) \right) \frac{l}{A} \left(\frac{V_1 + V_2}{V_1 V_2} \right) \mu \beta \quad (5)$$

式中: ΔP 为岩芯内气体衰减规律,可由式(6)给定:

$$\Delta P(t) = (\Delta P_0) e^{-\alpha t} \quad (6)$$

参数 α 由式(7)给定:

$$\alpha = k \left(\frac{A}{l} \right) \left(\frac{V_1 + V_2}{V_1 V_2} \right) \left(\frac{1}{\mu \beta} \right) \quad (7)$$

式中: K_g 为岩心渗透率(m²); ΔP , $\Delta P(t)$ 为压力衰减函数(MPa); ΔP_0 为上、下气压室初始压差值(MPa); A 、 l 分别为岩芯横截面积(m²)和长度(m); μ 为氩气常温时的动力黏度(Pa·s); β 为氩气的压缩系数(Pa⁻¹); V_1 、 V_2 分别为上、下气压室体积(m³); α 为由岩芯参数和试验条件确定(s⁻¹); t 为测试时间(s)。

试样直径为50 mm,高85~92 mm。测试的围压为20 MPa(与上覆压力相同),上下端平均气压>1.5 MPa以减小滑脱效应的影响。为反映不同应力状态对渗透率的影响,偏应力设定为0-10-20-

30 MPa。为便于与前文结果对比,先在 5 MPa 的静水压力下测一次渗透率,然后才继续开展 20 MPa 的围压下的渗透率试验。

测试结果表明,渗透率的范围为 $3.29 \times 10^{-20} \sim 7.26 \times 10^{-21} \text{ m}^2$,属于典型的低渗介质。最高值 ($3.29 \times 10^{-20} \text{ m}^2$) 对应于静水压力 5 MPa,比变围压测试在相同围压下低 5~10 倍。这是因为一方面瞬态法的气压 ($\geq 1.5 \text{ MPa}$) 远大于稳态法的气压 (0.25 MPa),另一方面尺寸和气体不同,故而造成渗透率更低的结果。进入偏应力测试段后,渗透率在整体上随着偏应力的增加而缓慢下降,直至偏应力达到 30 MPa 时,渗透率仍处于下降。

从表 2 可见,渗透率呈下降趋势较为明显;体应变在整个测试环节仍处于明显的下降状态,局部有异常波动。这种现象可能与局部破损有关,周宏伟等^[8]对此类现象给出了合理解释。对于晶体类岩体,如花岗岩、盐岩、硬石膏泥岩等,在三轴压缩中将体应变开始反向的点称为扩容^[14]。岩体达到扩容后,裂隙增加、孔隙加大,引起渗透率突然快速升高。Hangx 等^[11]给定的硬石膏泥岩开始扩容时偏应力高达 60 MPa (围压 10 MPa)。本次泥岩在偏应力 30 MPa 时体应变仍处于显著的下降趋势,说明该偏应力值距离扩容起始点尚早,也表明由该泥岩构成的盖层/围岩要达到扩容进而发生渗透突变是较难实现的。

表 2 渗透率测试结果(4-4-2 为例)

Table 2 Experimental results of permeability (4-4-2)

围压 /MPa	偏应力 /MPa	渗透率 /(10^{-20} m^2)	体应变 /%
5	0	3.290	
20	0	1.070	
20	10	1.200	-0.041
20	20	0.838	-0.097
20	30	0.726	-0.257

3 数据可靠性讨论

通过 3 种测试方法对同一种泥岩的渗透率试验,以找出异同。方法 1 与后两种方法所得结果相差较大,方法 2 在围压 10 MPa 时渗透率均低至 10^{-20} m^2 ,与方法 3 的结果 ($10^{-20} \sim 10^{-21} \text{ m}^2$) 较为相近,说明了压力条件是影响渗透率的重要原因,且在最初的压力段对渗透率的影响最为显著,而在较高压力下影响反而不明显。这种现象的出现是容易理解的,当岩芯从深部地层钻出后,由于套钻取芯、应力释放、试样加工等必然导致裂隙重新张开,而

对渗透率起主导作用的就是那些较大的裂隙。比较确定的是,低围压时较大的裂隙仍基本处于张开状态,低围压渗透率可以反映严重损伤扰动后的渗透特性。需要指出的是,一般地下硐室的临空面围岩受损伤扰动最为严重,其渗透率与地面渗透率应当较为类似。方法 2、3 的围压值均较高,已经导致大部分张开裂隙重新闭合,故而渗透率能够处于极低的数值。若偏应力测试下的岩芯未到扩容或者破坏,则方法 3 与方法 2 的结果差异应该很小,采用方法 2 的渗透率就基本上能够反映盖层/围岩较为真实的渗透特征。而随着偏应力的进一步增加,很显然扩容及破坏终将不可避免地产生,渗透率也必然发生突变。

无论对于油气盖层、能源储库还是核废料处置库,3 种测试方法反映了围岩中不同位置的渗透率情况,仍不建议采用方法 1 的结果作为严重损伤区的渗透率,因为其应力条件仍与 EDZ 内岩体有较大差异,建议采用在偏应力足够大的条件下发生扩容后的结果作为 EDZ 内渗透率。从以往成果^[11]和本文结果来看,泥岩达到扩容所要求的偏应力值是较高的,进而出现渗透率突变的条件也是较难实现的,这是泥岩盖层/围岩能维持其良好密封性能的有利条件。当然,扩容会随应力状态(偏应力与最小主应力大小)的不同而出现差异,也可据此作为设计合理开采方案/能源储库运行工况/核废料处置库优化设计的依据。

4 各方法的适用范围

对于油气盖层而言,随着开发的逐渐推进,盖层一般有以下趋势,但由于下方仍有孔隙介质的储层支撑,较高的偏应力是难以出现的,因此盖层仅在垂直储层方向属于变压力,在横向则是相当于两端受刚性约束,与方法 2 的测试条件较为类似,故采用变围压法(方法 2)开展渗透率测试即可。对于能源储库盖层和核废料处置室围岩,相比较而言,其应力状态就存在较大差异了,由于需要在深部通过一定工艺形成硐室,围岩中(尤其是临空面附近)容易产生较高的偏应力的,这种情况下采用方法 3 测得的渗透率最为有效和可靠。高偏应力/甚至扩容下的结果可用于表征临空面附近的渗透演化规律,而低偏应力下的值则可以反映距离临空面一定距离的渗透情形。硐室围岩中剪应力一般随临空面距离的增加而快速衰减,即极度破损的区域一般不会太大^[15],无法开展三轴压缩瞬态法的情况时,可采用方法 2 测试。

5 结 论

(1) 常规渗透测试法(方法 1), 无法反映地层实际应力状态, 其结果高出其他两种方法 3~5 个量级, 不建议用该方法开展作为深部泥岩的渗透试验。

(2) 深部泥岩的渗透率具有显著的应力敏感性, 采用变围压渗透测试法(方法 2), 可较好地揭示渗透率随压力的变化规律。渗透率主要在最初测试阶段时快速下降, 而后下降缓慢; 围压在 5~10 MPa 之间时, 渗透率低至 $10^{-19} \sim 10^{-20} \text{ m}^2$, 属于典型的低渗介质。

(3) 三轴压缩下的瞬态法测试(方法 3)显示, 泥岩渗透率低至 $10^{-20} \sim 10^{-21} \text{ m}^2$, 其结果与方法 2 (>5 MPa 后) 的测试结果较为接近, 说明在未达扩容破坏前, 两种方法均可有效反映泥岩的渗透率规律。偏应力高达 30 MPa 时, 泥岩仍未出现扩容, 说明该地层泥岩性质较好, 对封闭极为有利。

(4) 对于储集层盖层, 建议采用方法 2 即可有效反映其渗透率演化规律; 对于能源储库/核废料处置室则最好采用方法 3, 条件不允许时亦可用方法 2 的结果代替。

鉴于渗透特性对于评估泥岩地层密封性能的重要性, 大力开展渗透特性研究, 尤其是发展和完善瞬态法测试技术, 是笔者下一步重点开展、也是极有学术价值的研究方向。

参 考 文 献

- [1] 柳广弟, 张厚福. 石油地质学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [2] 李银平, 杨春和, 罗超文, 等. 湖北省云应地区盐岩溶腔型地下能源储库密闭性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2430—2436.
LI Yin-ping, YANG Chun-he, LUO Chao-wen, et al. Study of sealability of underground energy storage in deep salt formation in Yunging area, Hubei Province[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(12): 2430—2436.
- [3] PHILIPP E C, CRUCHAUDET M, CROISÉ J, et al. Determination of the permeability of the Cllovo-Oxfordian clay at the metre to decametre scale[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2011, 36(17-18): 1669—1678.
- [4] YANG Y L, APLIN A C. A permeability-porosity relationship for mudstones[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27: 1692—1697.
- [5] 黄远智, 王恩志. 低渗透岩石渗透率对有效应力敏感系数试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 410—413.
- [6] HUANG Yuan-zhi, WANG En-zhi. Experimental study of coefficient of sensitiveness between percolation rate and effective stress of low permeability rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(2): 410—413.
- [7] FATT I, DAVIS D H. Reduction in permeability with over-burden pressure[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1952, 4(12): 1—16.
- [8] 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.
- [9] 周宏伟, 何金明, 武志德. 含夹层盐岩渗透特性及其微观结构特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2068—2073.
ZHOU Hong-wei, HE Jin-ming, WU Zhi-de. Permeability and meso-structure characteristics of bedded salt rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(10): 2068—2073.
- [10] YANG Y L, APLIN A C. Influence of lithology and compaction on the pore size distribution and modeled permeability of some mudstones from the Norwegian margin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1998, 15: 163—175.
- [11] BILLIOTTE J, YANG D S, SU K. Experimental study on gas permeability of mudstones[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2008, 33: S231—S236.
- [12] HANGX S J T, SPIERS C J, PEACH C J. The mechanical behavior of anhydrite and the effect of deformation on permeability development-implications for cap rock integrity during geological storage of CO₂[J]. *Energy Procedia*, 2011, 4: 5358—5363.
- [13] BRACE W F, WALSH J B, FRANGOS W T. Permeability of granite under high pressure[J]. *Journal of Geophysics Research*, 1968, 73 (2): 2225—2236.
- [14] WALDER J, NUR A. Permeability measurement by the pulse-decay method: Effects of poroelastic phenomena and non-linear pore pressure diffusion[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 1986, 23: 225—232.
- [15] HUNSCHE U. Determination of the dilatancy boundary and damage up to failure for four types of rock salt at different stress geometries[C]//Proceedings of the 4th Conference on the Mechanical Behavior of Salt. Clausthal: Trans Tech Publications, 1996: 163—174.
- [16] 杨春和, 李银平, 陈锋. 层状盐岩力学理论与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2007.