

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.08.012

盐穴储气库泥岩夹层渗透性测试新方法

尹洪武^{1,2}, 马洪岭¹, 施锡林¹, 杨春和¹

(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, 湖北 武汉 430071; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要: 金坛盐穴储气库现场压井试验发现某泥岩夹层密封性欠佳, 可能影响储气库运行的密闭性, 钻井取芯情况表明, 该夹层易破碎, 难以开展系统的渗透性测试试验。针对该问题, 提出了一种测试易碎泥岩夹层渗透率的新方法, 将泥岩夹层岩芯浇筑在环氧树脂中, 通过切割打磨等工序制备出符合渗透试验要求的标准试样。为了观测泥岩夹层岩芯与环氧树脂的胶结情况, 对人工合成试样进行了镀金电镜扫描试验, 发现交界面孔隙较岩石孔隙小、胶结良好, 说明夹层岩芯是人工合成试样中的主要渗透通道。利用稳态法对人工合成试样进行渗透率测试, 测试结果与其他学者的测试结果吻合, 证实了该方法的可靠性。同时开展了理论分析, 结果表明, 浇筑式方法测得的渗透率与理论结果相符, 从理论上进一步证实了其可行性。文中所述的泥岩夹层渗透性测试方法, 对测试不规则破碎岩芯的渗透率具有一定参考意义。

关键词: 盐穴储气库; 易碎泥岩夹层; 环氧树脂; 人工合成试样; 渗透率测试

中图分类号: TU 451

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2017)08-2241-08

A new method for permeability test on mudstone interlayer in a salt cavern gas storage

YIN Hong-wu^{1,2}, MA Hong-ling¹, SHI Xi-lin¹, YANG Chun-he¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Permeability of mudstone interlayer is an important factor to evaluate the sealing property of salt cavern gas storage. The permeability of a certain mudstone interlayer in Jintan is relatively high according to pressure tests, and thus it is inappropriate for the sealing performance. Since the borehole cores of mudstone interlayer are easy to be broken, it is substantially difficult to carry out systematic permeability tests. To solve the problem, we proposed a new method for testing the permeability of brittle mudstone interlayer. The brittle interlayer cores tightly wrapped by epoxy resin were cut and polished to prepare standard samples for meeting the requirement of permeability tests. To observe the cement situation of the mudstone interlayer cores and the epoxy resin, the synthetic samples are carried out by scanning electron microscope (SEM). It is found that the pore of the interface is lower than that of rock and the interface cement as well, which shows that the interlayer core is the main seepage channel of synthetic samples. The results of permeability tests on synthetic samples by using a steady-state method are consistent with other results in the literature, which proves the reliability of this new method. The theoretical analysis also shows that the permeability results measured by the new method are consistent with the theory, and thus the feasibility of the method is verified theoretically. The new method of testing the permeability of mudstone interlayer proposed is feasible and reliable. This method has a certain reference value for the test of the permeability of the irregular brittle core.

Keywords: salt cavern gas storage; brittle mudstone interlayer; epoxy resin; synthetic sample; permeability test

1 引 言

盐岩具有良好的密封性、低渗透性和损伤自愈合的特性, 被公认为是能源储存、高放射核废料永

久处置的理想介质^[1]。盐矿开采后形成的地下空间, 能够为不溶解于盐的物质(石油、天然气或高放射性物质)提供储存和处置场所^[2]。近 50 年来, 欧美等地区对盐岩地下能源储存开展大量研究, 相对而

收稿日期: 2016-06-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 41472285, No. 51404241, No. 41602328)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41472285, 51404241, 41602328).

第一作者简介: 尹洪武, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事盐穴地下储气库方面的研究工作。E-mail: yinhongwu14@mails.ucas.ac.cn

通讯作者: 施锡林, 男, 1983 年生, 博士, 助理研究员, 主要从事盐岩工程力学特性及盐穴储库水溶造腔方面的研究工作。

E-mail: xlshi@whrsm.ac.cn

言,我国对这方面研究起步较晚。不同于欧美等地区的盐丘型盐岩,我国盐岩具有埋深浅、盐岩厚度小、不溶夹层多等特点^[3]。我国盐岩属于层状构造,物理力学特性极为复杂,急需开展关于层状盐岩夹层渗透特性的研究^[4]。

国外盐丘型构造中的盐岩品位高、厚度大,关于其渗透特性的研究,国外学者已取得了较为丰富的成果。Stormont 等^[5]建议,渗透率小于 10^{-17} m^2 的岩体采用脉冲法测试,并通过脉冲法对盐腔的渗透性测试,发现扰动区的渗透率为 $10^{-16} \sim 10^{-20} \text{ m}^2$,而非扰动区的渗透率低于 10^{-21} m^2 ; Hunsche^[6]对比分析了不同矿区盐岩的压缩-扩容边界的异同,盐岩的扩容对其渗透率有着显著的影响; Gueguen 等^[7]基于流体力学、统计学和逾渗理论,从理论上研究了岩石的渗透率与岩石内部裂隙特征的关系。国内众多学者针对我国层状盐岩的特性也开展了一些研究,如陈卫忠等^[8]开展了盐岩储气库渗透演化规律的数值模拟;吴文等^[9]针对盐岩的低渗透特性,提出针对渗透率低于 10^{-22} m^2 和高于 10^{-22} m^2 两种情况所采用的计算理论,即盐岩采用岩石扩散与对流-扩散理论和达西理论来研究其渗透特性,并分析了影响盐岩渗透性的因素;周宏伟等^[10]通过对不同成分盐岩渗透率的测试,并结合 CT 扫描试验,发现纯盐岩渗透率相对含有夹层的盐岩较高,夹层的存在对气体渗透有明显的阻隔作用。

国外由于盐丘型构造,对夹层渗透率研究较少,而国内关于夹层渗透率的研究,一般针对完整性较好的夹层,通过常规方法可以测得渗透率,未涉及一些取芯困难的夹层渗透率的研究。因此,针对工程实际中遇到的特殊岩性夹层渗透性,无法使用常规方法进行测试时,有必要探索新的渗透率测试方法。

2 渗透率测试试样制备方法

2.1 制作人工合成试样的必要性

试验夹层岩块为低含盐泥质岩,取自江苏省金坛市某层状盐岩矿区,该夹层位于 876.60~884.60 m 深度范围内,在此深度范围内,泥岩层 0.87 m 为盐穴储库夹层。夹层为棕色盐质泥岩,性硬、脆,较疏松,团块状钻屑,局部发育有多孔构造、针孔构造、蜂窝状构造等次生构造,裂纹部分被盐岩后期充填,呈条带分布。该夹层渗透性偏大,为准确地对其渗透性进行评价,需要开展渗透性试验,试验主要用于获取夹层的渗透率数值,为地层的漏失程度给出定量标准。

所选取泥岩夹层比较特殊,钻取过程中夹层有散落情况,无法加工成渗透试验所需标准试样。通过综合调研分析和多次预试验,作者摸索出一套对夹层试块进行人工加工,选用环氧树脂胶将其包裹制作成符合试验标准的试样的方法。本文对该方法进行了介绍,并对该方法的可行性进行分析探讨。

2.2 试样制备过程

将易碎泥岩夹层岩芯浇筑在环氧树脂中,通过切割打磨等工序制备出符合试验要求的标准试样,将此方法命名为浇筑式方法。

浇筑式方法制样过程如下:

(1) 将待测夹层岩块置于直径 50 mm 的 PC 管中间,然后将 PC 管底部和环周用保鲜膜缠绕以防止倒入的环氧树脂渗漏;

(2) 按 1:1 分别称量出 A、B 胶水各 100 g,倒入同一烧杯,搅拌 5 min 使其混合均匀,将配比好的胶经搅拌棒引流均匀倒入 PC 管;

(3) 将室温控制在 15 °C 固化 24 h;

(4) 固化完成后,用 25 mm 直径的钻头钻取圆柱形岩芯,泥岩夹层岩块被包裹在固化的环氧树脂胶中;

(5) 将钻取出来的试样在车床上进行加工,将两端车平整并使夹层岩块在端面露出;

(6) 将加工好的试样端面和环面进行抛光打磨,最终制作出所需样品。

因夹层岩块获取较困难,加之制作过程复杂,制作出了 6 块人工合成试样,4 块用作渗透率测试试验,如图 1 所示,其余两块做镀金电镜扫描(SEM)试验。需要说明的是,泥岩夹层较破碎,夹层岩块大小不统一,加之为了暴露出夹层,每个岩芯加工位置不一,故 6 块试样高度有所差别,但这对渗透测试并影响不大。



图 1 加工完成的人工合成试样
Fig.1 Synthetic samples after machining

试验前,将在 105 °C 条件下烘烤 24 h,之后测量试样基本物理参数,如表 1 所示。1 号试样直径较其他 3 个试样略小,这是因为试样抛光打磨过程所致,并不影响试验的结果。

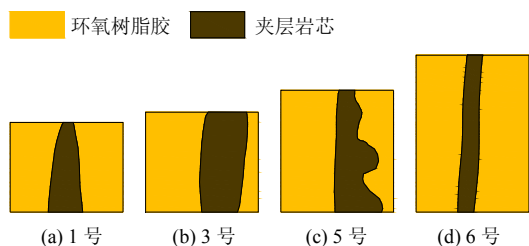


图 2 样品剖面示意图

Fig.2 Schematic diagram of sample profile

表 1 样品几何参数

Table 1 Geometrical parameters of synthetic samples

试样编号	高度 / cm	直径 / cm	截面积 / cm ²	上端面夹层面积 / cm ²	下端面夹层面积 / cm ²
1	2.12	2.42	4.599 6	0.540 8	1.060 8
3	2.36	2.47	4.791 6	0.664 5	0.898 9
5	2.88	2.47	4.791 6	0.260 3	0.874 1
6	3.71	2.47	4.791 6	0.593 5	0.770 9

3 测试方法选择

3.1 不同测试方法的适用性分析

渗透率是表征岩土体本身传导流体能力的参数，用来表示渗透性的大小，一般采用室内岩芯渗透试验获取，计算基本原理为达西定律，其测试方法主要有 3 种：

(1) 稳态法

在岩石两端施加一个流体压差，待岩石中流体的输送达到稳态，测量流量与压力差的关系，并采用达西公式计算岩芯的渗透率。对于低渗介质该方法达到稳态所需时间极长，故不宜使用此法，而对渗透率大于 10^{-17} m^2 的岩石则可采用稳态法测量。

(2) 脉冲法

首先保持整个岩石的孔隙压力，然后在岩石上端施加一个孔隙压力脉冲，然后测试岩石两端压差，计算岩石渗透率。该方法是利用气压在孔隙介质中的衰减规律计算渗透率，耗时远远低于稳态法，测试精度较高，对渗透率低于 10^{-17} m^2 的致密低渗岩石，可使用气体压力脉冲法进行测量

(3) 周期加载法

在岩样的一端施加随时间正弦变化的孔隙压力，测量岩样另一端对此周期加载的孔隙压力的振幅和相位的变化。对比岩石上、下端对此周期加载的孔隙压力的振幅和相位变化曲线，经过计算可以得到岩石的渗透率。

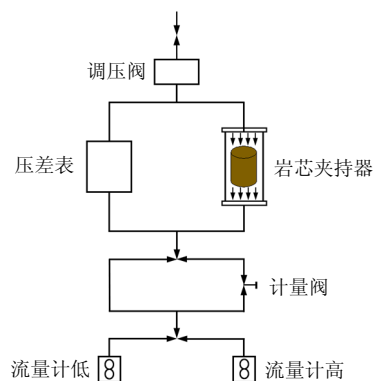
泥质岩不及盐岩结构致密，孔隙度也比盐岩大，其表现出的渗透率一般较盐岩高，故对加工的人工

合成试样采用稳态法进行测试。

3.2 测试设备与原理

试验所用仪器为低渗透率测量仪（见图 3），该仪器是依照美国石油协会（API）和中国地质矿产部石油地质海洋地质局标准设计制造，用于测量岩芯在稳态气体流动下的渗透率，测试时所用气体为氮气。连接不同的夹持器，可测量 25 mm 和 38 mm 直径岩芯的渗透率；渗透率测量范围最低可达 10^{-18} m^2 。测量仪器中高流量计测量范围为 0~500 ml/min，低流量计测量范围为 0~50 ml/min。

该仪器基于气体稳态法原理，采用达西公式对试样进行渗透率测试。



(a) 流程示意图



(b) 仪器照片

图 3 低渗透率测量仪

Fig.3 Measuring instrument of ultra low permeability

根据玻意耳定律：

$$PQ = P_0Q_0 \tag{1}$$

故

$$Q = \frac{P_0Q_0}{P} \tag{2}$$

式中：P 为压力；Q 为流量；P₀ 为大气压力；Q₀ 为

大气压力下的流量。

对稳态渗流有

$$Q = \frac{KA dP}{\mu dL} \quad (3)$$

联立式 (2)、(3)，可得用于渗透率计算的达西公式为

$$K = \frac{QP_0 \mu}{A} \frac{dL}{PdP} \quad (4)$$

对式 (4) 积分可得

$$K = \frac{2P_0 Q_0 \mu L}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (5)$$

式中： K 为气体渗透率； A 岩样截面积； μ 为气体黏度； dL 为岩样长度的微分； dP 为压力的微分； L 为岩样长度； P 为压力； P_1 为上游压力； P_2 为下游压力。

每个渗透率测试仪器都有修正系数及其对应的计算公式，而此试验仪器对应的修正后的公式为

$$K_g = \frac{29\ 208QP_2\mu}{A(P_1^2 P_2^2)} \quad (6)$$

式中： K_g 为岩体气测渗透率 (10^{-15} m^2)； P_1 为上游压力 (6.895 kPa)； P_2 为下游压力 (大气压)， $P_2 = 6.895 \text{ kPa}$ ； μ 为测试温度下气体的黏度 ($10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$)； L 为测试岩芯的长度 (cm)； A 为测试岩芯的横截面积 (cm^2)； Q 为表观流量 (cm^3/s)。

4 渗透率测试结果分析

4.1 胶结面情况观测

为观测人工合成试样的胶结情况，做了两组镀金电镜扫描 (SEM) 试验，如图 4 所示。

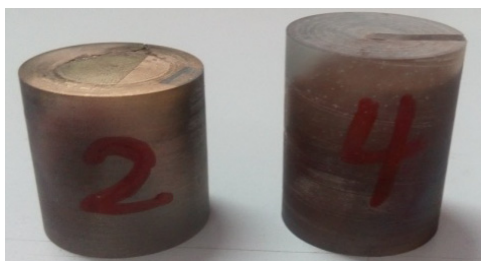
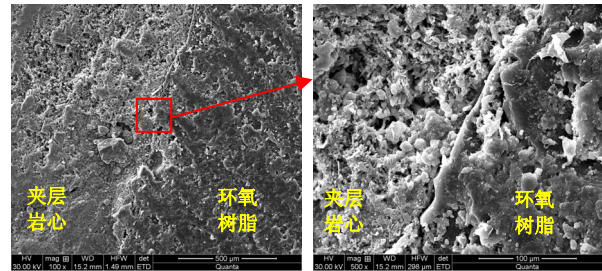


图 4 电镜扫描(SEM)试验样品
Fig.4 Prepared samples for SEM tests

SEM 所用仪器为 Quanta250 电子扫描仪，典型测试结果如图 5 所示。从图中可以看出，环氧树脂胶较夹层岩块致密，交界面处胶结情况较好。相对于环氧树脂而言，夹层试块内部孔隙、裂纹较大，

最大孔隙宽度可达 $10 \mu\text{m}$ 以上，说明气体主要通过夹层试块内部的孔隙及吼道等渗透通道穿过，环氧树脂胶和胶结面处渗透忽略不计。



(a) 放大 100 倍 (b) 放大 500 倍

图 5 夹层与环氧树脂胶结面的 SEM 图片
Fig.5 SEM images of bonding surface between the interlayer and epoxy

4.2 渗透测试结果

表 2 中渗透率为计算机依据式 (6) 计算得来，其中 A 为人工合成试样截面积，试验的围压为 1.379 MPa，大气压 0.103 MPa，温度为 $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 。因夹层岩块在环氧树脂胶中各截面面积不一，有必要对表 2 中数据进行修正。为方便分析，分别取上、下端面夹层暴露面积计算试样渗透率，其中在制作人工合成试样时，上端面夹层面积为夹层岩块最小面积。

表 2 仪器实测渗透率
Table 2 Permeability testing results by the instrument

试样编号	上游压力 / MPa	下游压力 / MPa	流量 / (cm^3/s)	渗透率 / 10^{-15} m^2
1	0.536	0.102	0.136	0.081 3
3	0.253	0.102	0.604	1.992 0
5	0.531	0.102	0.061	0.048 4
6	0.516	0.102	0.061	0.066 2

表 3 中 3 号试样渗透率较其他试样高了两个量级，下面分析这种现象出现的原因。从表 2 中可以看到 3 号试样上游绝对压力为 0.253 MPa，而其他试样平均 0.528 MPa，试样下游绝对压力均为 0.102 MPa，由式 (6) 知，下游绝对压力一致时，上游压力越小，测得的渗透率就越大。因渗透率测试方法为稳态法，在上游压力为 0.253 MPa 时并未达到稳态流通，故而 3 号试样渗透率较其他试样高出许多。

除去 3 号试样，表 2 中对 1、5、6 号试样渗透率求平均值为 $0.065 3 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ，标准差为 1.65%，变异系数为 25.22%。表 3 中对 1、5、6 号试样以夹层

最小截面积求得渗透率平均值为 $0.7056 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ，标准差为 17.86%，变异系数为 25.31%。表 3 中对 1、5、6 号试样下端面渗透率平均值为 $0.3431 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ，标准差为 7.35%，变异系数为 21.43%。夹层岩块形状不规则，人工合成试样各截面夹层面积不一，因此，难以测得其渗透率具体的数值，只能从量级上定性分析其相对渗透率范围。以人工合成试样横截面计算得到的渗透率偏小，其平均渗透率为 $0.0653 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ，以夹层最小截面为横截面积计算得到的渗透率偏大，其平均渗透率为 $0.7056 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。从试验结果来看，除 3 号试样外，其他试样在稳态下渗透率量级范围为 $10^{-17} \sim 10^{-16} \text{ m}^2$ 。

表 3 试样截面修正后的渗透率
Table 3 Test results after correction

试样 编号	上端面夹层 岩块面积 / cm^2	下端面夹层 岩块面积 / cm^2	上端面 渗透率 / 10^{-15} m^2	下端面 渗透率 / 10^{-15} m^2
1	0.540 8	1.060 8	0.691 5	0.352 6
3	0.664 5	0.898 9	14.364 0	10.618 3
5	0.260 3	0.874 1	0.890 9	0.265 3
6	0.593 5	0.770 9	0.534 5	0.411 5

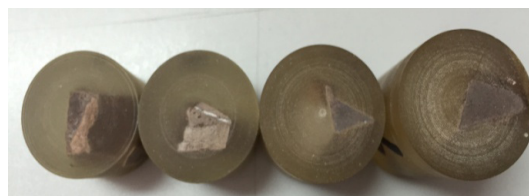
刘伟等^[11]利用常规渗透率测试方法，对 100 块泥岩岩芯开展了渗透率测试，试验围压为 1.38 MPa，气压为 0.4 MPa，测得的渗透率基本上为 10^{-16} m^2 量级，随孔隙度的变化其渗透率绝大部分介于 $(1 \sim 3) \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 之间，平均为 $2.13 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ ，与本试验测得结果相符。尽管 10^{-16} m^2 的渗透率对于泥岩而言已经是处于较低的量级，但并不算极低，与石膏岩 (10^{-21} m^2)^[12]、盐岩 ($10^{-16} \sim 10^{-22} \text{ m}^2$)^[9-10, 13-14] 等低渗介质相比，待测泥岩夹层渗透率偏高。由前文描述知，待测夹层性硬、脆，较疏松，团块状钻屑，局部发育有多孔构造、针孔构造、蜂窝状构造等次生构造，故与石膏岩、盐岩等低渗介质相比，夹层呈现较高的渗透率。

4.3 气体渗透方向对测试结果的影响

由图 6 可以看出，试样上下端面夹层暴露形状迥异，面积大小不一。为分析气体渗透方向对测试结果的影响，以 5 号试样上、下端面分别为进气端，做了对比测试，测试条件与 4.2 小节相同。

由表 4 知，以上端面为进气端，流量大小为 $0.061 \text{ cm}^3/\text{s}$ ，而从下端面进气时，流量大小为 $0.062 \text{ cm}^3/\text{s}$ ，其流量无明显变化，考虑到试验本身误差性，故认为进气端面不影响流量大小。为保证其计算参数相

同，计算面积取人工合成试样横截面面积，分别以上下端面为进气端求得渗透率为 0.0484×10^{-15} 和 $0.0508 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。由式 (6) 可知，其他参数相同，在流量大小也相同的情况下，渗透率也应该不变，结果也反映出渗透率几乎无变化。因选取夹层岩块试样形状不规则，故其在环氧树脂胶体中各位置横截面积不一致，通过 5 号试样对比试验，可以说明在固定渗透路径的情况下，流量不因渗透方向的改变而变化。试验采用的是稳态法，其要求气体流动稳定，岩芯内部虽然各个位置孔隙结构具有差异性，但仅仅影响局部流动，当超过特征流动时间，待流动稳定后对整体而言并无较大影响，反映在宏观上表现为流量稳定，渗透率无变化。



(a) 上端面



(b) 下端面

图 6 制备出的渗透率测试试样端面形态
Fig.6 Photos of the end face of prepared samples

表 4 对比测试结果
Table 4 Results of comparative tests

试样 编号	进气 端面	上游压力 / MPa	下游压力 / MPa	流量 / (cm^3/s)	渗透率 / 10^{-15} m^2
5	上	0.531	0.102	0.061	0.048 4
5	下	0.523	0.102	0.062	0.050 8

4.4 夹层试样渗透率理论分析

从图 7 可以看出，夹层试块内部孔隙较发育，孔隙、裂纹大小不均一，小孔隙居多，宽度为 $1 \mu\text{m}$ 以下，大孔隙较少，最大孔隙其宽度可达 $10 \mu\text{m}$ 以上。分析得出孔隙直径的大致范围为下文利用理论公式计算孔隙率提供依据。

下面从理论方面分析夹层试样的渗透率，与试验结果进行对比。裂纹模型使用最广泛的是球形模型和圆盘模型^[15]，刘伟等^[16]在解释泥岩渗透率时，

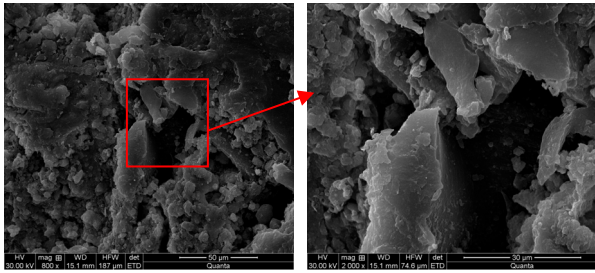


图 7 夹层岩芯的 SEM 图片
Fig.7 SEM images of the core of the interlayer

运用圆盘模型来研究泥岩渗透演化过程中的压密机制。本文同样采用圆盘模型进行分析(见图 8), 含圆盘形裂纹岩体, 假定岩石中有 N 个硬币形圆盘裂纹, 其形状与大小完全相同, 它们的 3 个半轴分别为 r 、 r 、 αr (α 是裂纹短轴与长轴长度之比, 也就是裂纹纵横比)。对于圆盘形裂纹而言, 如泥岩、黏土岩等, 其纵横比约为 $0.001 \sim 0.01$ ^[15], 纵横比的取值受很多因素的影响, 这里不做讨论。裂纹总体积为

$$V_c = \frac{4N\pi r^3}{3} \alpha \quad (7)$$

则孔隙度可表示为

$$\eta = \frac{V_c}{V} = \frac{4N\pi r^3}{3V} \alpha \quad (8)$$

式中: η 为孔隙度; V_c 为裂隙总体积; V 为岩石总体积。

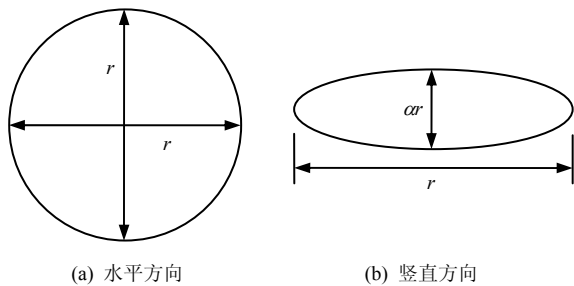


图 8 圆盘裂纹截面示意图
Fig.8 Schematic diagram of disc crack section

为获取此夹层的孔隙度, 对同一批试样进行了 15 组压汞试验, 试验数据如表 5 所示。

表 5 中孔体积与样品体积的比值即为孔隙度, 孔体积与样品体积通过压汞试验测得。对表 5 中孔隙度求平均值, 得出平均孔隙度为 14.38%。

表 5 孔隙度测试结果
Table 5 Results of porosity tests

样品名称	进汞时初始注汞体积 / (cm ³ /g)	进汞时结束注汞体积 / (cm ³ /g)	孔体积 / (cm ³ /g)	样品体积 / (cm ³ /g)	孔隙度
K-1	3.178 6	3.226 2	0.047 6	0.443 189	0.107 403
K-2	0.019 6	0.064 7	0.045 1	0.324 884	0.138 819
K-3	3.291 7	3.339 3	0.047 6	0.445 450	0.106 858
K-4	3.662 5	3.712 3	0.049 8	0.550 497	0.090 464
K-5	3.707 1	3.761 8	0.054 7	0.451 674	0.121 105
K-6	0.009 2	0.055 2	0.046 0	0.542 579	0.084 780
K-7	0.000 1	0.051 5	0.051 4	0.343 211	0.149 762
K-8	0.002 7	0.066 5	0.063 8	0.445 465	0.143 221
K-9	0.000 1	0.089 2	0.089 1	0.546 674	0.162 986
K-10	0.001 4	0.087 6	0.086 2	0.340 209	0.253 374
K-11	0.011 0	0.110 3	0.099 3	0.455 663	0.217 924
K-12	0.004 8	0.090 0	0.085 2	0.548 275	0.155 396
K-13	0.000 8	0.082 7	0.081 9	0.326 729	0.250 666
K-14	0.000 1	0.030 8	0.030 7	0.444 447	0.069 075
K-15	0.000 0	0.057 7	0.057 7	0.548 466	0.105 202

因压汞试验曲线结果较多, 不逐一分析, 以 K-7 试样测试结果为例进行分析, 从图 9 中可以看出, 进汞、退汞主要在 1 000 nm 即 1 μ m 以下孔径内完成, 有少量在 10 000 nm 即 10 μ m 直径内完成, 说明 K-7 孔隙直径大小主要分布范围在 1 000 nm 即 1 μ m 以内。分析全部 15 组压汞试验中进汞、退汞曲线与有关孔隙直径数据, 试样孔隙直径主要大小分布范围为 1 μ m 左右, 偶尔也有超过 10 μ m 的孔隙, 这与图 7 中所观察到的结果一致。

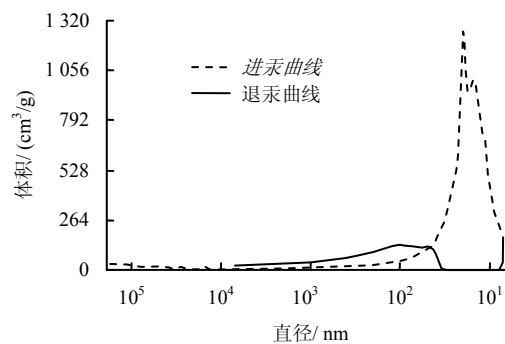


图 9 K-7 试样进汞、退汞曲线
Fig.9 Mercury withdrawal curve of sample K-7

便于简化分析, 笔者将渗透场概化为多孔介质连续体, 如图 10 所示。多孔介质处处有孔隙度, 将试样内裂纹作为毛细管开展研究, 关于渗透和毛细管有不同的模型。

孔内径与流量的关系为^[17]

$$Q = \frac{\pi \rho I}{8u} r^4 \quad (9)$$

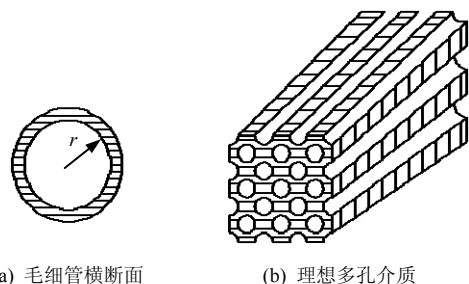


图 10 概化的平行毛细管束
Fig.10 Generalized parallel capillary tube bundles

式中： ρ 为单位流体密度； r 为毛细管内径； I 为水力梯度； u 为流体动力黏度系数。

关于渗透率与孔隙度和毛细管内径的关系为^[18-19]

$$K = \frac{1}{8} \eta r^2 \quad (10)$$

式中： K 为渗透率。

还有著名的 Kozeny-Carmen 方程为^[17]

$$K = \frac{1}{K_0 K_T (1 - \eta^2) S_f^2} \eta^3 \quad (11)$$

式中： K_0 为形状参数； K_T 为迂曲度； S_f 为比表面积。

从以上可以看出，渗透率 K 与孔隙尺寸为非线性关系。由式 (9) 可以得出如下结论：流量随孔隙半径的增大而快速增加，当孔隙半径增大一倍，流量增大 16 倍，因为流量与渗透率呈线性关系，故随着孔隙半径的增大，渗透率也快速增大。

联立式 (8)、(10) 可得

$$K = \frac{N \pi \alpha}{6V} r^5 \quad (12)$$

式中： K 为渗透率； α 为裂纹纵横比。

由式 (10) 计算渗透率，夹层孔隙度取为平均值 14.38%，因试样孔隙直径大小分布范围主要在 1 μm 左右，取孔隙直径为 10^{-2} 和 1 μm 量级，渗透率变化范围量级在 $10^{-14} \sim 10^{-18} \text{ m}^2$ ；取孔隙直径为 $10^{-1} \mu\text{m}$ 量级即 10^{-7} m 时，计算出渗透率量级为 10^{-16} m^2 ，而试验实测渗透率量级为 10^{-16} m^2 ，试验结果与理论计算相吻合，这验证了此方法的可行性。

关于式 (12)，仅定性研究渗透率与孔隙半径的关系，其中渗透率取相对渗透率，对渗透率数值进行归一化处理，将 r^5 前面的系数取为 1，即在孔隙半径为 1 时取相对渗透率为 1，则渗透率与孔隙半径可用图 11 表示。

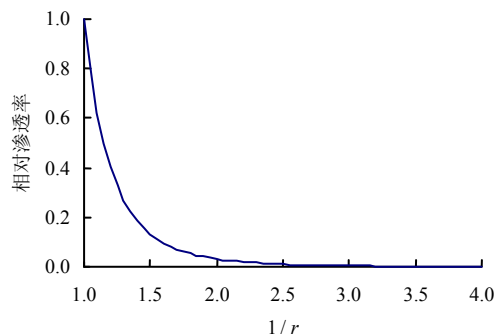


图 11 渗透率与 $1/r$ 的关系曲线
Fig.11 Relationship between permeability and $1/r$

由图可见，初始孔隙半径 $1/r_0 = 1$ 时，相对渗透率为 1，当 $1/r = 2$ 时，即孔隙半径减小为原来的一半，相对渗透率为 0.031 25，渗透率下降了两个量级，说明渗透率随孔隙半径的减小而快速下降。当孔隙半径减小到一定程度时，曲线变平缓，渗透率下降不明显，这是因为孔隙半径减小，裂纹快速闭合，导致渗透率下降，当裂纹闭合到一定程度时渗透率基本维持不变。

5 结 论

(1) 通过两组镀金电镜扫描试验，发现试样中夹层与环氧树脂胶结良好，交界面孔隙较岩石孔隙小，说明夹层岩芯是主要渗透通道。

(2) 利用浇筑式方法测得的渗透率量级范围与其他学者的研究结果基本一致，说明了渗透率测试方法的可靠性。

(3) 利用稳态法进行渗透率测试，在未达到稳态流通时，测得的渗透率偏大。

(4) 在渗透率测试中，同一试样进出气端面对流量无影响，即固定渗透路径下流量大小不随渗透方向发生改变。

(5) 从理论上对夹层试样渗透率进行了分析，通过浇筑式方法测得的渗透率与理论计算结果相吻合，验证了此方法的可行性。

本文提出了一种测试易碎泥岩夹层渗透率的新方法，通过新方法测得的渗透率并与其他学者对比和进行理论分析，验证了其可行性与可靠性。此种新方法对不规则试样的研究分析具有参考意义，研究成果对储气库建造和密闭性分析提供了一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] 王兵武, 李银平, 杨春和, 等. 界面倾角对复合层状物理模型材料力学特性的影响研究[J]. 岩土力学, 2015, (增刊 2): 139-147.

- WANG Bing-wu, LI Yin-ping, YANG Chun-he, et al. Influences of interface inclination on mechanical properties of composite bedded physical model material[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, (Supp.2): 139–147.
- [2] 杨春和, 白世伟, 吴益民. 应力水平及加载路径对盐岩时效的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 270–275.
YANG Chun-he, BAI Shi-wei, WU Yi-min. Stress level and loading path effect on time dependent properties of salt rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(3): 270–275.
- [3] 杨春和, 李银平, 屈丹安, 等. 层状盐岩力学特性研究进展[J]. 力学进展, 2008, 38(4): 484–494.
YANG Chun-he, LI Yin-ping, QU Dan-an, et al. Advances in researches of the mechanical behaviors of bedded salt rocks[J]. **Advances in Mechanics**, 2008, 38(4): 484–494.
- [4] 刘伟, 李银平, 杨春和, 等. 层状盐岩能源储库典型夹层渗透特性及其密闭性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 500–506.
LIU Wei, LI Yin-ping, YANG Chun-he, et al. Investigation on permeable characteristics and tightness evaluation of typical interlayers of energy storage caverns in bedded salt rock formations[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(3): 500–506.
- [5] STORMONT J C, DAEMEN J J K. Laboratory study of gas permeability changes in rock salt during deformation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1992, 29(4): 325–342.
- [6] 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 Fourth Conference on The Mechanical Behavior of Salt. Montreal: Translation Technology Publications, 1996: 163–174.
- [7] GUEGUEN Y, DIENES J. Transport properties of rocks from statistics and percolation[J]. **Mathematical Geology**, 1989, 21(1): 1–13.
- [8] 陈卫忠, 谭贤君, 伍国军, 等. 含夹层盐岩储气库气体渗透规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1297–1304.
CHEN Wei-zhong, TAN Xian-jun, WU Guo-jun, et al. Research on gas seepage law in laminated salt rock gas storage[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(7): 1297–1304.
- [9] 吴文, 侯正猛, 杨春和. 盐岩的渗透特性研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(7): 746–749.
WU Wen, HOU Zheng-meng, YANG Chun-he. Investigations on permeability of rock salt[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(7): 746–749.
- [10] 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.
- [11] 刘伟, 李银平, 杨春和. 深部泥岩渗透率测试方法及数据适用性分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 1): 85–90.
LIU Wei, LI Yin-ping, YANG Chun-he, et al. The analysis of permeability testin methods on mudstone on deep strata and the data reliability of each method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp.1): 85–90.
- [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] 刘伟, MUHAMMAD Nawaz, 李银平, 等. 盐岩渗透特性的试验研究及其在深部储气库中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 10: 1953–1961.
LIU Wei, MUHAMMAD Nawaz, LI Yin-ping, et al. Experimental study on permeability characteristics of salt rock and its application in deep gas storage[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 10: 1953–1961.
- [14] BROUARD B, et al. In situ salt permeability testing[C]//Proc SMRI Fall Meeting. Albuquerque: [s. n.], 2001: 139–157.
- [15] 陈颢, 黄廷芳, 刘恩儒. 岩石物理学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 2009.
CHEN Yong, HUANG Ting-fang, LIU En-ru. Rock physics[M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 2009.
- [16] LIU W, LI Y, YANG C, et al. Permeability characteristics of mudstone cap rock and interlayers in bedded salt formations and tightness assessment for underground gas storage caverns[J]. **Engineering Geology**, 2015, 193: 212–223.
- [17] LEONARDS G H. Engineering properties of soils[M]. New York: McGraw-Hill, 1962.
- [18] LEONARDS GUÉGUEN Y, PALCIAUSKAS V. Introduction to the physics of rocks[M]. Princeton: Princeton University Press, 1994.
- [19] 葛家理, 宁正福, 刘月田. 油田渗流力学原理[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
GE Jia-li, NING Zheng-fu, LIU Yue-tian. Rock physics[M]. Beijing: Oil Seepage Mechanics Principle, 2001.