

层状盐岩能源储库典型夹层渗透特性 及其密闭性能研究

刘伟¹, 李银平¹, 杨春和¹, 马洪岭¹, 刘俊新^{1,2}, 王兵武¹, 黄小兰³

(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. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010; 3. 武汉轻工大学 多孔介质力学研究所, 湖北 武汉 430023)

摘要: 夹层的渗透率是深部层状盐岩中能源储库密闭性评价的关键参数。针对我国深部层状盐岩中常见的3种典型夹层, 采用稳态气测法测试了渗透率并给出密闭性分析结果。研究指出:(1) 3类典型夹层的低渗特征明显, 渗透率均为 $10^{-2} \sim 10^{-5}$ mD; 但各盐矿区的夹层岩性及地质条件差别较大, 导致渗透率出现较明显差异, 其中以平顶山硬石膏泥岩的渗透率最低、渗透率变化范围居中; 金坛灰质泥岩渗透率次之、变化范围却最大; 而淮安含盐泥岩渗透率最高、变化范围最小。(2) 静水压力对渗透率的影响极为显著, 具体表现为静水压力越大渗透率越低; 存在某一“压密临界压力”, 当静水压力位于该值前渗透率随静水压力增大而急剧下降(下降1~2个数量级), 超过该值后渗透率降低很小并渐趋于平缓; 静水压力与渗透率基本满足 $K = AP^{-B}$ (K 为渗透率; P 为静水压力; A , B 为拟合参数)的拟合关系。(3) 渗透率随静水压力变化的内在机制是测试岩心具有可压缩性, 但压缩效果随压力增大逐渐减小, 到一定程度后增加压力也无法使岩体进一步压密, 从而导致渗透率渐趋于恒定。以上研究表明, 中国层状盐岩的典型夹层均具有较低的渗透率, 可基本满足能源储库的密闭性要求。

关键词: 岩石力学; 渗透率; 静水压力; 压密临界压力; 压缩性

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2014)03-0500-07

INVESTIGATION ON PERMEABLE CHARACTERISTICS AND TIGHTNESS EVALUATION OF TYPICAL INTERLAYERS OF ENERGY STORAGE CAVERNS IN BEDDED SALT ROCK FORMATIONS

LIU Wei¹, LI Yinping¹, YANG Chunhe¹, MA Hongling¹, LIU Junxin^{1,2}, WANG Bingwu¹, HUANG Xiaolan³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China; 3. Institute of Porous Media Mechanics, Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430023, China)

Abstract: The permeability of interlayer is a key parameter for the tightness evaluation of energy storage caverns constructed in bedded rock salt formations. Thus, the steady gas flow method of permeability tests for typical interlayers of 3 kinds of bedded rock salt areas of China, as well as the analysis of tightness evaluation, has been carried out. The research indicated that: (1) The low permeable properties of the three kinds of typical interlayers are very obvious, with the corresponding permeability range of $10^{-2} - 10^{-5}$ mD. Due to the large difference of petrophysical properties and geological conditions of interlayers in different areas, the permeability exhibits obviously different with each other, in which the anhydrite mudstone of Pingdingshan has the lowest permeability, but the variance range is the medium; the calcareous mudstone of Jintan has the middle permeability, but the variance range is the maximum; and the saline mudstone of Huai'an has the highest permeability, but the

收稿日期: 2013-04-08; **修回日期:** 2013-09-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB724602, 2009CB724603); 国家自然科学基金资助项目(51274187)

作者简介: 刘伟(1986-), 男, 2009年毕业于中国石油大学(北京)石油天然气工程学院土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事层状岩体力学特性方面的研究工作。E-mail: whrsmliuwei@126.com

variance range is the minority. (2) The hydrostatic stress states greatly influence the permeability, exhibiting the permeability decreasing as hydrostatic stress increasing. The “compaction critical pressure” phenomenon is obviously for permeability. When the hydrostatic stress is lower than the transition stress, permeability decreases rapidly (about 1–2 orders). However, while beyond the transition stress the permeability decreases very slow and sustains steady gradually. The fitting relationship of hydrostatic stress versus permeability can be basically expressed by power function: $K = AP^{-B}$ (K is permeability, P is hydrostatic pressure, A and B are fitting parameters). (3) The mechanism of the permeability's development versus the hydrostatic stress informs that the compressibility of porous interlayer rock. But the compaction effect will become lower and lower even become almost useless while the hydrostatic stress has reached some threshold value; so the permeability will not decrease after then. The test results presents that the permeability of the typical interlayers in bedded salt rock in China is very low so the tightness of storage caverns is basically satisfied.

Key words: rock mechanics; permeability; hydrostatic stress; compaction critical pressure; compressibility

1 引言

盐岩具有优良的物理力学特性, 如良好的蠕变性、损伤自修复、低渗等性能, 从而被作为地下能源(石油, 天然气)储备的最佳场所^[1-3]。其中, 盐岩极低的渗透率是确保深部盐腔安全性最关键的条件^[4-5]。国外大部分能源储备库建造在巨厚盐层或盐丘构造中^[6], 一般而言, 盐岩极低的渗透率可有效阻滞油气的泄漏, 从而确保储库的密闭性要求。

近年来, 我国深部盐穴能源储备的相关研究工作及工程建设正大力开展。但我国盐岩属于层状构造, 其地质条件复杂、盐岩单层薄、含不溶或难溶夹层(硬石膏泥岩、灰质泥岩、含盐泥岩、砂质泥岩, 等)多, 故物理力学特性极为复杂, 与国外的巨厚盐层及盐丘构造相比存在很大差异。因此, 针对层状盐岩物理力学性质的研究, 尤其是关于夹层渗透特性的相关课题, 亟待开展。

在国际上, 关于盐岩的渗透特性的相关研究已经取得了一系列的成果: 其中大量的现场测试结果表明盐岩的渗透率低于 10^{-18} m^2 ^[7-9]; 同时, 较多的室内试验测试也表明, 盐岩在未受扰动或压缩紧密的情况下气测渗透率低于 10^{-20} m^2 ^[10-13]。国外的研究中, 仅有 J. C. Stormont^[14]提到过盐岩中泥质夹层的渗透率高出相邻盐层几个数量级。因此, 国内很多专家曾一度担心层状盐岩中夹层的存在可能导致储气库无法安全运行。

在国内也开展了一些关于层状盐岩渗透特性的研究, 如周宏伟等^[15]测试了应城的纯盐岩和含泥盐岩的渗透率并通过 CT 扫描揭示了低渗的微观机制; 陈卫忠等^[16]开展了盐岩储气库渗透演化规律的数值模拟。但受夹层取心及试样加工困难、低渗介

质测试精度要求高等条件限制, 以上研究均未涉及夹层的渗透特性的试验研究, 其具体数值范围一直都是未知数。这难为层状盐岩中能源储库的建设及密闭性评价提供可靠指导。

各盐矿区的夹层由于成岩环境、矿物组分、地质构造历史等条件的差异, 其物理力学属性往往差别较大。Y. L. Yang 和 C. A. Andrew^[17]指出, 泥岩的渗透率会因为岩性及沉积环境的不同而出现 1~6 个数量级的巨大差异。我国层状盐岩中的夹层主要为硬石膏泥岩, 灰质泥岩、含盐泥岩等, 从油气储集层的盖层评价角度^[18]来说, 这些岩层一般都是具有良好遮挡性能的盖层。此外, 油气盖层作用时间长达数百万年乃至上亿年, 其评价标准也远高于储库。因此, 应针对我国夹层特有的地质条件、物理力学属性等, 开展相关的渗透特性研究和密闭性评价分析。

本文针对我国多个盐矿区(国家战略油气储备候选基地)3 种最为常见的典型夹层开展了渗透率测试试验, 获取了渗透率的数值范围和变化规律, 并对相应的密闭性给出了评价。对试验中出现的现象给出了合理的解释并阐述了相应的工程意义。此外, 也在一定程度上为储气库密闭性评价的试验体系构建提供了一些方法和参考。

2 渗透率测试试验

2.1 试样准备

分别选取金坛盐矿区的灰质泥岩夹层、平顶山盐矿区的硬石膏泥岩夹层、淮安盐矿区的含盐泥岩开展渗透率测试试验。此 3 种夹层为我国层状盐岩中最为常见的夹层类型。因此, 该研究对于同类矿区的能源储库可行性研究具有较好的参考价值。按照方法^[19]的规定, 标准试样直径为 25 mm、高径

比为 1.0~2.5, 所有夹层试样均“水平方向”制取(盐层中的夹层一般为水平或近于水平方向)。岩心含有黏土矿物及可溶盐分, 试样均采用钢锯配合 40 目的细砂纸手工打磨而成。泥岩属于低渗介质(渗透率 $< 10^{-17} \text{ m}^2$ [16]), 对仪器的精度要求高、测试耗时长, 故仅针对 8 块试样开展了测试。图 1 为 8 块渗透测试所用试样(J, P, H 分别代表金坛盐矿区、平顶山盐矿区和淮安盐矿区试样)。表 1 为试样的基本信息。

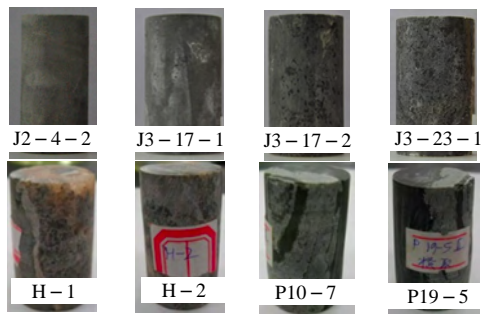


图 1 渗透测试所用试样

Fig.1 Samples prepared for permeability tests

表 1 试样基本信息

Table 1 Information of samples

试样编号	深度/m	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	岩性	矿区名
J2-4-2	897.71~898.04	2.421	灰色泥岩	金坛矿区
J3-17-1	973.25~973.67	2.448	灰色含盐泥岩	金坛矿区
J3-17-2	973.25~973.67	2.507	灰色含盐泥岩	金坛矿区
J3-23-1	975.98~976.43	2.510	灰色含盐泥岩	金坛矿区
P10-7	1422.72~1423.70	2.674	硬石膏泥岩	平顶山盐矿区
P19-5	1466.38~1468.77	2.723	硬石膏泥岩	平顶山盐矿区
H-1	1352.10~1353.08	2.422	含次生盐泥岩	淮安盐矿区
H-2	1421.78~1424.56	2.361	泥盐混合体	淮安盐矿区

2.2 测试原理及试验设备

泥岩遇水膨胀, 盐类矿物易溶于水, 为排除水对试样的影响, 故采用氮气(N_2)作为渗流介质。测试采用“稳态气测法”: 待渗流稳定后再开始测试(通过“入口压力表”来反映)。该方法测到过的渗透率值最低达 $10^{-4} \sim 10^{-5} \text{ mD}$, 基本满足本次测试要求。试验中待入口压力表在 3~8 h 以上无变化, 则认为渗流场达到稳定可进入流量测试环节进行计时测定。便于与石油行业的计量标准相统一, 本文渗透率的单位均采用 mD ($1 \text{ mD} = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$)。

对于稳态气测法, 渗透率的计算可用达西公式:

$$K = - \frac{P_0 Q_0 \mu}{S} \frac{dL}{PdP} \quad (1)$$

积分可得

$$K_g = \frac{2P_0 Q_0 \mu L}{S(P_{in}^2 - P_{out}^2)} \times 1000 \quad (2)$$

式(1), (2)中: K 为岩体的渗透率(μm^2 , $1 \mu\text{m}^2 = 1\text{D} = 10^3 \text{ mD} = 10^{-12} \text{ m}^2$); K_g 为气测渗透率(mD); P_0 为大气压力(0.10 MPa); Q_0 为大气压力下的流量(mL/s); μ 为气体的黏度($\text{Pa} \cdot \text{s}$); L 为测试岩心的长度(cm); S 为测试岩心的横截面积(cm^2); P_{in} 为入口压力(MPa); P_{out} 为出口压力, 一般取大气压值。

试验在中国石油大学(北京)提高采收率中心开展, 所用仪器为 HALS-1 型高温高压动态滤失仪(见图 2)。该仪器可以测试高温高压下岩体的渗透率、动态滤失量, 测试流体可为液体、气体、混合相流体, 测试温度范围为“室温~120”, 岩心夹持器可提供的围压为 0~40 MPa, 入口压力为 0~2 MPa, 测试方法为稳态法。该仪器可完全满足本次测试要求。



图 2 HALS-1 型高温高压动态滤失仪

Fig.2 High temperature and high pressure dynamic filtration apparatus of HALS-1

2.3 测试条件设定

随着造腔的进程及注、采循环作业, 围岩中出现不同的应力状态, 为了正确评估围岩中的夹层在不同运行状态下的渗透特性演化规律, 测试中设定了不同的入口压力和静水压力状态(常规测试中环向压力须高于入口压力, 用于防止气体侧窜, 本次研究中环向压力还能为试样提供不同的应力状态)。气体入口压力为 0.4~1.0 MPa(设 P_1, P_2, P_3, P_4 共 4 级, 分别为 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 MPa); 静水压力范围为 2.5~10.0 MPa(个别达 12.5 MPa), 测试中发现静水压力达到 10.0 或 12.5 MPa 时, 灰色泥岩、硬石膏泥岩的渗透率已经低至 10^{-5} mD , 达到仪器精度极限, 故未进一步开展更高静水压力的试验。同时发现入口压力对渗透率的影响远不及静水压力的影响, 且当入口压力达到 0.6~1.0 MPa 时, 渗透率的差别不明显, 故金坛试样测试结束后, 平顶山与淮安的试样均仅设定了一级入口压力 1.0 MPa。

3 渗透测试结果及分析

3.1 金坛灰质泥岩测试结果

入口压力为 0.4 ~ 1.0 MPa、静水压力为 2.5 ~ 10.0 MPa 时，试样的渗透率为 $6.23 \times 10^{-3} \sim 1.26 \times 10^{-5}$ mD，属于极低渗透的范围，即使采用天然气盖层的评价标准^[18]，也被认为是密封性较好的盖层。因此，可认为金坛夹层满足储库的密闭性要求。对比发现下部夹层的渗透率比上部的略低，这可能是因为下

部夹层埋深更大、固结程度更高，岩心更密实的缘故。同时还发现，当静水压力为 2.5 ~ 6.0 MPa 时，渗透率下降极为迅速；超过该范围时渗透率就已经达到较低数值，且此后下降极为缓慢直至趋于恒定。静水压力似乎存在一个可导致渗透率突变的“临界压力”值。此外，入口压力越高渗透率越低，但它对渗透率的影响远远小于静水压力的影响，且当入口压力越高时，同等测试条件下渗透率的差异也极为微小。图 3 左侧为金坛盐矿区 4 个试样的静水压力 - 渗透率关系曲线，右侧为同时给出的对应的拟

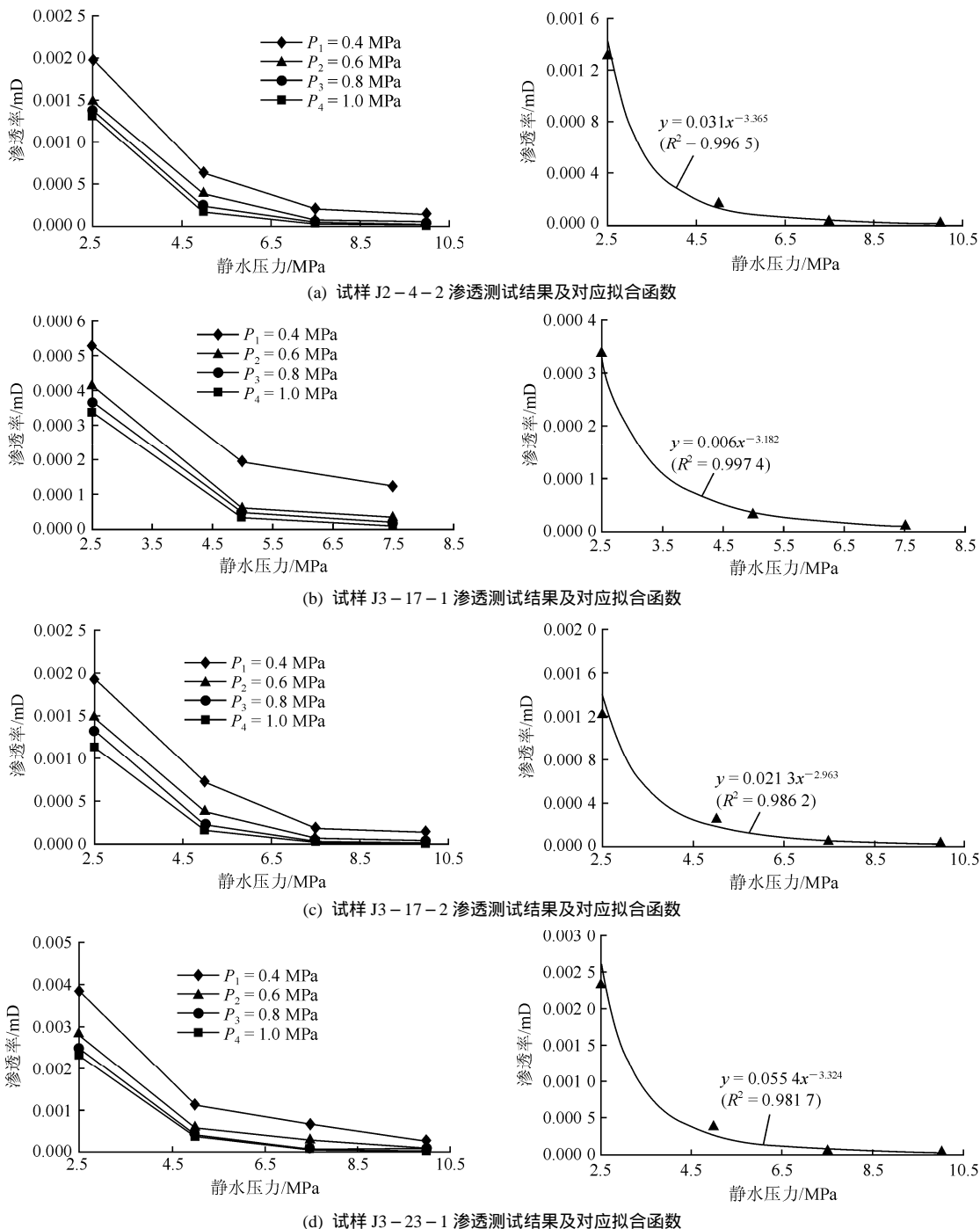


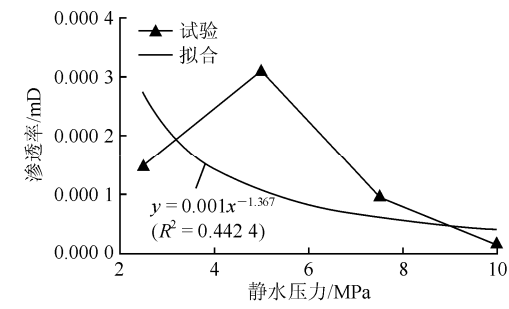
图 3 金坛盐矿区夹层试样渗透测试结果及拟合函数

Fig.3 Measurement results of interlayer samples of Jintan salt mine and corresponding fitting equation

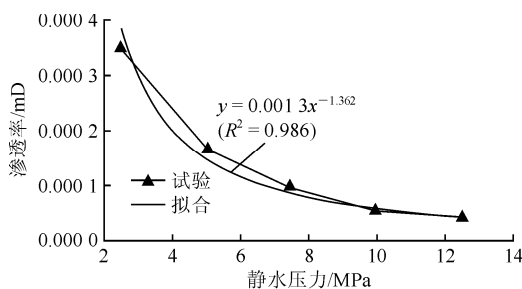
合关系(便于与其他 2 种夹层结果的一致性,仅给出了气压 1 MPa 的拟合结果)。

3.2 平顶山硬石膏泥岩测试结果

入口压力均采用 1 MPa。平顶山盐矿区夹层试样渗透测试结果及拟合函数如图 4 所示。夹层的渗透率变化范围为 $8.77 \times 10^{-4} \sim 1.15 \times 10^{-5}$ mD,其渗透率为本次测试中最低值。如此低的渗透率对于储库的密闭性而言是极为有利的。观察测试所用硬石膏泥岩岩心也可发现:岩心密度较大、无孔洞及裂隙发育、质地极为致密,其组构特性能有效地防止气体流通和突破。试样 P10-7 出现了围压增加渗透率反而升高的反常现象,即围压升高渗透率反而增加,周宏伟等^[15]对盐岩的测试中也出现过类似的渗透率随着压力波动的现象。这可能与岩心内部局部孔隙结构和连通性在压力下的发生了一定的调整和变化有关。试样 P19-5,静水压力在 6 MPa 之前渗透率下降较为迅速,但超过该值以后,渗透率下降就较为缓慢,达到 10 MPa 附近时渗透率基本上趋于平稳。两块试样的渗透率的整个变化范围均低于金坛泥岩,但比淮安泥岩的要高。



(a) 试样 P10-7



(b) 试样 P19-5

图 4 平顶山盐矿区夹层试样渗透测试结果及拟合函数(入口压力 $P_{\text{气}} = 1$ MPa)

Fig.4 Measurement results of interlayer samples of Pingdingshan salt mine and corresponding fitting equation(inlet pressure $P_{\text{气}} = 1$ MPa)

3.3 淮安含盐泥岩测试结果

淮安的夹层为含较多次生盐的石膏质泥岩。所测试样 H-1、H-2 的渗透率范围为 $4.66 \times 10^{-2} \sim$

5.69×10^{-3} mD,渗透率较低,但是比金坛和平顶山的夹层高出 1~2 个数量级,同时也发现静水压力为 2.5~12.5 MPa 时,渗透率在前半部分(6~7 MPa)渗透率下降较为迅速,而在后半部分渗透率下降极为缓慢,但渗透率的整体下降(仅为 8 倍)相对金坛(500 倍)和平顶山夹层(50 倍)要小得多。淮安夹层含盐量较高,但含盐量更高的 H-2 的渗透率却大于含盐量较低的 H-1。周宏伟等^[15]所测得的盐岩的渗透率范围为 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ mD,与本文淮安含盐泥岩夹层的渗透率相当,但高于本次试验的金坛和平顶山泥岩的值,也高于同类研究的盐岩的值^[10-12]。众所周知,盐岩属于蒸发型的结晶构造,本身结构极为致密、几乎不含任何孔洞,但当其结晶构造受到扰动时则极有可能导致晶粒错动、晶界张开,从而导致渗透率发生突变^[8,20]。因此,本文中淮安的含盐泥岩,以及周宏伟等^[15]所研究的盐岩,其测到的渗透率极有可能是受扰动损伤之后的渗透率。这是容易理解的,所测试的含盐泥岩、盐岩都属于粗粒盐(粒径达到 5 mm 以上),而渗透试样直径仅有 25 mm,钻井取心、加工等过程必然对试样造成扰动损伤。即使肉眼观察也发现了,淮安所用试样的盐岩微裂隙较为明显。即便如此,淮安损伤夹层的渗透率仍然低达 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ mD。因此,初步判断淮安矿区的夹层密闭性较好,但考虑到含盐泥岩特殊的物理力学属性,仍需进一步开展研究加以论证。

3.4 拟合关系

盐穴储气库的围岩均处于一定变化的压力条件下,为了更真实地反映夹层在地层中的渗透特性,必须考虑不同的应力状态对渗透率的影响。前文分析表明,渗透率随着静水压力的增加而相应降低(除 P10-7 外),两者表现出高度的非线性,分析发现其关系基本可用下式进行拟合:

$$K = AP^{-B} \tag{3}$$

式中:K 为渗透率;P 为测试中设置的静水压力值;A, B 为与岩心相关的常数。

图 5 为淮安盐矿区夹层试样渗透测试结果及拟合函数。表 2 给出了所涉及试样(除试样 P10-7 外)的拟合相关数据。由表 2 可见,同一矿区的夹层的拟合参数较为接近,说明相同矿区的夹层由于成岩环境接近,渗透特性也较为相似;但不同矿区的夹层的渗透特性差异是比较明显的。综合判断 3 种典型夹层的密闭性能排名为:硬石膏泥岩 > 灰质泥岩 > 含盐泥岩。

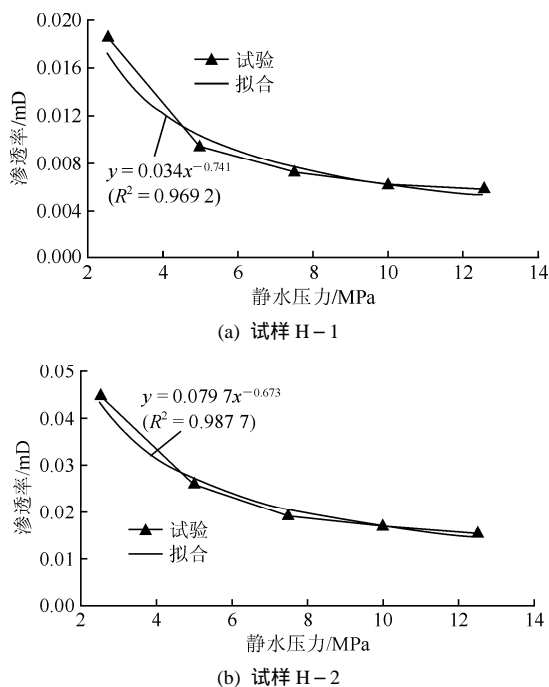


图 5 淮安盐矿区夹层试样渗透测试结果及拟合函数(入口压力 $P_{eq} = 1$ MPa)

Fig.5 Measurement results of interlayer samples of Huai'an salt mine and corresponding fitting equation(inlet pressure $P_{eq} = 1$ MPa)

表 2 静水压力与渗透率拟合信息

Table 2 Fitting parameters of hydrostatic stress and permeability

试样编号	A	B	R^2	入口压力/MPa
J2-4-2	0.031 0	3.365	0.997	1
J3-17-1	0.006 0	3.182	0.997	1
J3-17-2	0.021 3	2.963	0.986	1
J3-23-1	0.055 4	3.324	0.986	1
P10-7	0.001 0	1.367	0.442	1
P19-5	0.013 0	1.362	0.986	1
H-1	0.034 0	0.741	0.969	1
H-2	0.079 7	0.673	0.988	1

4 渗透率演化特性讨论及应用

4.1 渗透率演化规律

静水压力对渗透率的影响，其实质为岩体骨架结构对于外界压力作用的响应。对于深部(> 1 000 m)钻取的岩体，由于应力释放及套钻取心扰动，取出地面之后原先闭合的微裂隙将重新张开，其最为明显的就是岩心饼化现象^[21]。因此对于较低的静水压力测试条件时，渗透率表现出较高的值，这与储库围岩的真实情况是不符合的。本次测试的试样均为泥岩类，内部均存在较多的孔洞和裂隙(灰质泥岩孔隙度高达 5% ~ 15%，硬石膏泥岩为 1% ~ 2%，含盐

泥岩为 2%左右)，随着静水压力的增加，岩体被逐渐压密，孔隙、喉道尺寸逐渐缩减，气体流通的孔道逐渐减小、阻力逐渐增加，进而致使渗透率逐渐下降。很显然，岩心的压密程度是有限的，当被压密到一定程度时，增加压力只能导致尺寸较小的喉道和微裂隙相互挤压闭合，而难以达到使孔洞尺寸进一步缩小的效果，对渗透率的影响反而不明显。显然，对于处于较低静水压力状态时，压密效果是极为显著的，这类似于应力-应变曲线中的压密阶段，渗透率在对应的应力状态下的下降也将极为迅速；而达到较高静水压力状态时，压密效果就会变得不明白了，使得渗透率的下降也变得极为缓慢。压密效果与岩体的本身强度、矿物组成、孔隙度、孔隙尺寸和形状等因素都有较大关系。一般而言，强度越低、孔隙度越高的岩体，其压密效果也越明显，渗透率的变化范围也将越大，这可能就是孔隙度最高、强度较低的金坛灰质泥岩的渗透率变化范围最大的原因。

4.2 工程意义

节 4.1 解释了试验中出现的现象：静水压力小于 5 ~ 6 MPa 时，渗透率下降极为迅速，而超过该压力范围时，渗透率的下降就极为缓慢直至趋于平缓。换言之，岩心的主要压密作用在静水压力达到 5 ~ 6 MPa 时就已基本完成，进一步增加压力对渗透率下降的贡献不大。将渗透率从“快速下降”到“缓慢下降”变化时对应的静水压力定义为“压密临界压力”，分析发现对金坛的泥岩临界压力可取 5 ~ 6 MPa，而平顶山、淮安夹层的临界压力略高，取 6 ~ 7 MPa 较为合适。这就是说，只要压力超过“压密临界压力”，岩心的渗透率一般就能维持在较低范围，这对储气库的设计及运行具有较好指导意义。

深部储气库的围岩处于三向压缩状态，越往围岩深处其应力状态也越接近静水压力状态。围岩中的三向应力值远高于本文试验的应力，即真实围岩中的夹层其压密状态应大于本测试条件的情形，其渗透率应当能维持在更低的数值范围。该性质对于维持储气库的密闭性和稳定性是极为有利的。需要指出的是，围岩由于造腔作用在临近腔避附近必然导致偏应力的产生，这对渗透率可能造成一定的影响，这也是笔者下一步亟待开展的研究内容。

5 结 论

金坛、平顶山和淮安盐矿区的夹层的渗透率均处于低渗范围，但因岩性和沉积环境的不同而表现

出较明显差别,其中以平顶山的硬石膏质泥岩夹层最低($8.77 \times 10^{-4} \sim 1.15 \times 10^{-5}$ mD),金坛的灰质泥岩次之($6.23 \times 10^{-3} \sim 1.21 \times 10^{-5}$ mD),淮安的含盐泥岩夹层最高($4.66 \times 10^{-2} \sim 5.69 \times 10^{-3}$ mD)。3种典型夹层的渗透率基本满足储库密闭性要求。

静水压力对渗透率的影响极为显著,表现为当静水压力低于“压密临界压力”时,渗透率随该值增大而急速下降,而超过该值时,渗透率可达到较低的值,此后随静水压力的增加变化不明显。入口压力对渗透率影响不显著,且入口压力越大,其对渗透率的影响越微弱。

渗透率随静水压力的演化特性,反映了岩心的压实机制,即岩体的压缩效果是有限的,当超过“压密临界压力”时,增加压力难以使岩体进一步压密,故相应的渗透率逐渐保持稳定。此外还发现,岩体越致密、含盐量越高,静水压力对其渗透率的影响也越微弱。

结合夹层压缩特性的演化规律,说明在实际地层中,围岩夹层处于较好的压缩状态,其渗透率一般能维持在极低的数值范围,从而对储气库的密闭性和安全性极为有利。

参考文献(References):

- COSENZA P H, GHOREYCHI M. Effects of very low permeability on the long term evolution of a storage cavern in rock salt[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(4): 527–533.
- 陈 锋,李银平,杨春和,等. 云应盐矿盐岩蠕变特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(增1): 3 022–3 027.(CHEN Feng, LI Yinping, YANG Chunhe, et al. Experimental study on creep behaviors of rock salt in Yunying salt mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Supp.1): 3 022–3 027.(in Chinese))
- YANG C H, DAEMEN J J K, YIN J H. Experimental investigation of creep behavior of salt rock[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(4): 233–242.
- 李文阳,丁国生,张昱文,等. 我国石油资源地下储备的可行性[J]. *石油化工技术经济*, 2002, 17(1): 14–17.(LI Wenyang, DING Guosheng, ZHANG Yuwen, et al. Feasibility of underground reservoir of oil resources in China[J]. *Techno-economics in Petrochemicals*, 2002, 17(1): 14–17.(in Chinese))
- 王新志,汪 稔,杨春和,等. 盐岩渗透性影响因素研究综述[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(增1): 2 678–2 686.(WANG Xinzhi, WANG Ren, YANG Chunhe, et al. Summary on influence of permeability of salt rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(Supp.1): 2 678–2 686.(in Chinese))
- PETRASCH J J, MEIER F, FRIESS H, et al. Tomography based determination of permeability, Dupuit-Forchheimer coefficient, and interfacial heat transfer coefficient in reticulate porous ceramics[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008, 29(1): 315–326.
- BEREST P, BROUARD B, DURUP J G. Tightness tests in salt cavern wells[J]. *Oil and Gas Science and Technology*, 2001, 56(5): 451–469.
- STORMONT J C. In-situ gas permeability measurements to delineate damage in rock salt[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(7): 1 055–1 064.
- COSENZA P H, CHOREYCHI M, B BAZAGAN-SABET, et al. In-situ rock salt permeability measurement for long term safety assessment of storage[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(4): 509–526.
- PEACH C J. Influence of deformation on the fluid transport properties of rock salts[Ph. D. Thesis][D]. Utrecht, Holland: Instituut voor Aardwetenschappen der Rijksuniversiteit, 1990.
- 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(2): 325–342.
- POPP T, KERN H. Ultrasonic wave velocities, gas permeability and porosity in natural and granular rock salt[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 1998, 23(3): 373–378.
- ALKANA H, CINARB Y, PUSCH G. Rock salt dilatancy boundary from combined acoustic emission and triaxial compression tests[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(1): 108–119.
- STORMONT J C. Conduct and interpretation of gas permeability measurement in rock salt[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3/4): 1–11.
- 周宏伟,何金明,武志德. 含夹层盐岩渗透特性及其细观结构特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(10): 2 068–2 073.(ZHOU Hongwei, HE Jinming, WU Zhide. Permeability and meso-structure characteristics of bedded salt rock[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(10): 2 068–2 073.(in Chinese))
- 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): 1 297–1 304.(CHEN Weizhong, TAN Xianjun, WU Guojun, et al. Research on gas seepage law in laminated salt rock gas storage[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(7): 1 297–1 304.(in Chinese))
- YANG Y L, ANDREW C A. A permeability-porosity relationship for mudstones[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(8): 1 692–1 697.
- 陈丽华,许怀先,万玉金. 生储盖层评价[M]. 北京:石油工业出版社, 1999: 1–95.(CHEN Lihua, XU Huaixian, WANG Yujin. Source-reservoir-cap evaluation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1999: 1–95.(in Chinese))
- 中华人民共和国行业标准编写组. SY/T5336—2006岩心分析方法[S]. [S.1]: [s.n], 2006.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. SY/T5336—2006 Practices for core analysis[S]. [S.1]: [s.n], 2006.(in Chinese))
- SCHULZE O, POPP T, KERN H. Development of damage and permeability in deforming rock salt[J]. *Engineering Geology*, 2001, 61(2/3): 163–180.
- 李占海,李邵军,冯夏庭,等. 深部岩体岩芯饼化特征分析与形成机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(11): 2 254–2 266.(LI Zhanhai, LI Shaojun, FENG Xiating, et al. Characteristics and formation mechanism of rock desing in deep rock mass[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(11): 2 254–2 266.(in Chinese))