

不同渗透压力下盐岩的渗透率测试研究

武志德^{1,2}, 周宏伟^{1,3}, 丁靖洋¹, 冉莉娜², 易海洋¹

(1. 中国矿业大学 岩石力学与分形研究所, 北京 100083; 2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北 廊坊 065007;
3. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 地下盐腔被广泛应用于核废料地下处置、石油天然气地下储存和二氧化碳封存, 由于盐岩的低渗透性, 目前很难通过试验获得其渗透率。通过稳态法对 3 种不同成分盐岩进行渗透特性试验研究, 获得盐岩的渗透参数, 并对拟压力法和考虑克氏效应的 2 种渗透率计算方法的结果进行对比研究。结果表明: (1) 盐岩的渗透率与孔隙度极低, 孔隙度为 0.3%~3.0%, 纯盐岩渗透为 10^{-20} m² 左右, 而含杂质盐岩渗透率更低, 为 10^{-20} ~ 10^{-21} m²; (2) 对盐岩的气测渗透率进行测试, 进气压力为 1~5 MPa 时, Klinkenberg 效应影响明显, 当渗透力超过 5 MPa 后, 岩体在渗透力作用下会产生损伤, 渗透率升高; (3) 通过对比, 考虑 Klinkenberg 效应的方法较拟压力法在盐岩渗透率计算中更为理想。

关键词: 岩石力学; 盐岩; 渗透率; 损伤; 拟压力; 克氏效应

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2012)增 2 - 3740 - 07

RESEARCH ON PERMEABILITY TESTING OF ROCK SALT UNDER DIFFERENT PERMEABILITY PRESSURES

WU Zhide^{1,2}, ZHOU Hongwei^{1,3}, DING Jingyang¹, RAN Lina², YI Haiyang¹

(1. *Institute of Rock Mechanics and Fractals, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;*

2. *Research Institute of Petroleum Exploration and Development-Langfang, Langfang, Hebei 065007, China;*

3. *State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China*)

Abstract: Rock salt cavern is widely used for nuclear waste disposal, petroleum and natural gas storage and CO₂ sequestration. The permeability of rock salt is too low to be obtained easily by experiments. The permeability of three different rock salt samples are obtained through the steady-state method. The permeability calculated by pseudo-pressure method and considering Klinkenberg effect are compared. The results show that: (1) The permeability and porosity of rock salt are extremely low, and the porosity is between 0.3% and 3%. The permeability of pure rock salt is about 10^{-20} m², greater than that of impurity rock salt, which is between 10^{-20} and 10^{-21} m². (2) During the permeability experiment, when the inlet pressure is 1 - 5 MPa, Klinkenberg effect is obvious. When the inlet pressure is higher than 5 MPa, the rock salt is damaged and the permeability increases. (3) By comparing the results, the method of considering Klinkenberg effect is more ideal than pseudo-pressure method in rock salt permeability calculation.

Key words: rock mechanics; rock salt; permeability; damage; pseudo-pressure; Klinkenberg effect

收稿日期: 2012 - 04 - 28; **修回日期:** 2012 - 07 - 17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11172318); 国家重点基础研究计划(973)项目(2009CB724602); 科技部国际科技合作项目(2010DFA64560)

作者简介: 武志德(1982 -), 男, 博士, 2005 年毕业于西安科技大学地质工程专业, 现任工程师, 主要从事石油天然气地下储存等岩土工程、工程地质方面的研究工作。E-mail: wuzhide69@petrochina.com.cn

1 引言

盐岩具有良好的密封性和蠕变行为、低渗透性及损伤自愈合性, 被称为能源(如石油和天然气)的地下储存和废弃物(核废料、二氧化碳等)地下处置的良好地质体^[1]。西方发达国家如美国、德国、法国等已经建立了大量的盐穴地下油气库群, 用于国家战略能源储备。由于我国能源储备的巨大需求, 盐穴地下储库的大规模兴建已经开始。相对于其他岩体, 盐穴能源地下储备具有良好的安全性, 但近些年来, 如油气渗漏、溶腔失效和库区地表沉降等在国外的盐穴储库中时有发生, 如美国的 Lerov 地下储气库由于天然气大量流失, 不得不于 1982 年停用。因此针对盐岩储库的研究是当前热点课题^[2]。

目前针对盐岩的力学特性, 国内外众多学者已经做了较为广泛的研究, 但针对盐岩的渗透特性的研究, 国内刚处于基本的起步阶段。储气库气体密封性能是评价储气库安全的一项重要技术指标, 因此针对盐岩的渗透性的研究已成为当前的一个重要研究课题。J. C. Stormont 和 J. J. K. Daemen^[3]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 。周宏伟等^[4]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。陈卫忠等^[5-6]对低渗透介质大理岩进行了渗透性测试, 采用不同方法对大理石的渗透率进行了计算并做了对比分析; 同时采用等效边界气体渗流模型, 运用数值方法研究了盐穴储气库中在不同的注-采气不同压力作用下 5 a 内围岩内气体压力分布, 发现层理面的渗透性对储库压力分布有着重要影响。梁卫国等^[7]研究了层状盐岩中盐岩与夹层的孔隙率与渗透率在气压作用下的变化规律, 提出了层状盐岩储气库极限运行压力确定原则。吴文等^[8]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 的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。郜保平等^[9]通过对层状盐岩流变后的渗透特性的试验和数值模拟两方面研究, 发现盐岩与夹层的交界面处产生了损伤, 界面有可能成为气体渗透的主要通道。本文基于盐岩

低渗透性, 针对不同成分的盐岩进行了渗透率测试, 获得盐岩的渗透率, 为盐穴储气库工程提供一定的参考。

2 渗透率测试方法

渗透率的测试方法主要有 3 种, 一是稳态法, 即在岩石两端加上一个压力差, 等到岩石中流体的运输达到稳态时, 测量流量与压力差的关系, 从而计算出岩石的渗透率。二是脉冲法, 即首先保持整个岩石中的孔隙压力, 然后在岩石的上端施加一个孔隙压力脉冲, 然后测试岩石两端压差, 进而计算岩石的渗透率。三是周期加载法, 是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。由于盐岩渗透率极低(非扰动盐岩渗透率小于 10^{-21}m^2), 国内关于盐岩的渗透性测试刚处于起步阶段, 许多设备达不到测试要求。本文采用中国石油勘探开发研究院的岩石渗透率测试仪, 基于气体稳态法原理对 3 种不同成分盐岩的进行了渗透性试验研究。

3 渗透率计算方法

3.1 克氏效应

理论上讲, 岩石绝对渗透率与测试流体性质无关, 但人们对不同渗透性的岩芯进行试验后发现: 同一岩石的气测渗透率比液测渗透率要高, 这主要是存在滑脱效应, 由于滑脱效应是在实验中发现的, 故又成为克氏效应。岩石中只有在气体分子的自由行程和它流动所在的孔道直径相当时, 气体滑动的这一微观机制才能表现出来。岩石渗透率越低, 克氏效应越严重^[11]。P. Cosenza 等^[12]讨论了盐岩气体渗透中平均分子自由程和气体压力的关系, 认为气体压力为 0.06~6.00 MPa 时, 其平均分子自由程与岩石孔隙尺寸相当($10^{-7} \sim 10^{-9} \text{m}$), 克氏效应比较显著, 因此在进行渗透率测试时需要进行校正。

早在 1941 年, L. J. Klinkenberg^[10]就给出了考虑气体克氏效应的气测渗透率数学表达式:

$$K_g = K_\infty \left(1 + \frac{b}{p} \right) \quad (1)$$

式中： K_g 为气测渗透率； K_∞ 为克氏渗透率(等效液体渗透率)； \bar{p} 为进出口平均压力； b 为取决于气体性质和岩石孔隙结构的常数，称为“滑脱因子”或“滑脱系数”。

对于气体在一根毛管内流动来说，存在如下关系：

$$b = \frac{4C\bar{\lambda}p}{r} \quad (2)$$

$$\bar{\lambda} = 2.13 \frac{\mu}{p} \sqrt{\frac{RT}{M}} \quad (3)$$

式中： C 为比例常数(接近 1)， r 为孔道平均半径， $\bar{\lambda}$ 为对应于平均气体压力下气体分子的平均自由程， μ 为气体的绝对黏度， R 为通用气体常数， T 为绝对温度， M 为气体相对分子量。

3.2 渗透率计算方法

3.2.1 拟压力法

在基于以下 4 个假设条件下：(1) 流体是单相气体；(2) 流动是等温的；(3) 介质是均匀各向同性的；(4) 孔隙度 ϕ 为常数，重力可以忽略不计^[5, 11]。气体的渗流微分方程为

$$\nabla \left(\delta \frac{K}{\mu} \frac{\rho}{Z} \nabla p \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\phi \frac{\rho}{Z} \right) \quad (4)$$

式中： δ 为惯性 - 湍流修正系数； Z 为偏差因子，是对理想气体状态加以修正的一个量； p 为气体压力。

通常只能用数值方法进行求解。在进行气体的渗流分析时，一般采用拟压力法对气体渗流采用更严格的处理。

在基于以下假设的条件下：(1) 流动是层流，Darcy 定律成立，即 $\delta = 1$ ；(2) 渗透率与压力无关；引入通常引用一个拟压力函数 $m(p)$ ，简称拟压力，其公式为

$$m(p) = 2 \int_{p_m}^p \frac{p}{\mu Z} dp \quad (5)$$

式中： p_m 为任一参考压力，可以取 0.0 或 0.1 MPa。

现在讨论用拟压力表示的气体渗流偏微分方程。由基本的渗流微分方程，在假设条件下，式(4)转换为

$$\frac{K}{\phi} \nabla \left[\frac{p \nabla p}{\mu(p)Z(p)} \right] = \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{p}{Z(p)} \right] \quad (6)$$

通过进行数学处理，得

$$\nabla^2 m = \frac{\phi c_g(p) \mu(p)}{K} \frac{\partial m}{\partial t} \quad (7)$$

式中： c_g 为压缩系数。式(7)即为用拟压力表示的渗流方程。

对于平面平行稳态渗流来说，设介质是均匀各项同性的，其长度为 L ，截面积为 A ，左端 $x = 0$ 和右端 $x = L$ 处压力分别为 P_e 和 P_w ，则渗流方程和边界条件如下：

$$\frac{dm^2}{dx^2} = 0 \quad (0 < x < L) \quad (8)$$

$$m = m_e = \frac{p_e^2}{\mu_e Z_e} \quad (x = 0) \quad (9)$$

$$m = m_w = \frac{p_w^2}{\mu_w Z_w} \quad (x = L) \quad (10)$$

式中： μ_e 和 μ_w ， Z_e 和 Z_w 分别为试样上、下两端的气体黏度和偏差因子。

由式(8)~(10)求解得

$$m = m_e - \frac{m_e - m_w}{L} x = \frac{p_e^2}{\mu_e Z_e} - \frac{p_e^2 \mu_w Z_w - p_w^2 \mu_e Z_e}{\mu_e Z_e \mu_w Z_w} \frac{x}{L} \quad (11)$$

经过推导得

$$p^2 = p_e^2 - \left(\frac{\bar{\mu} \bar{Z}}{\mu_e Z_e} p_e^2 - \frac{\bar{\mu} \bar{Z}}{\mu_w Z_w} p_w^2 \right) \frac{x}{L} \quad (12)$$

下面计算流量，体积流量随压力变化比较明显，假设流速 v 不太大，流动遵循 Darcy 定律，则有

$$Q_{sc} = \frac{F}{\rho_{sc}} = \frac{AK_g T_{sc}}{2p_{sc} L \bar{\mu} \bar{Z} T} (p_e^2 - p_w^2) \quad (13)$$

经过数学推导获得气体的渗透率公式为

$$K_g = \frac{2Q_{sc} p_{sc} L \bar{\mu} \bar{Z} T}{AK_g T_{sc} (p_e^2 - p_w^2)} \quad (14)$$

试验中测得不同进气压力下的体积流量 Q_{sc} ，并通过式(14)计算出气测渗透率 k_g ，通过式(1)进行线性拟合，获得岩石的克氏渗透率以及滑脱系数 b 。

3.2.2 考虑克氏效应方法

Y. S. Wu 等^[13]引入一个新变量 P_b ：

$$P_b = P + b \quad (15)$$

当在假设条件(1)和(2)下，式(1)可以写成如下形式：

$$\nabla(\nabla P_b^2) = \frac{1}{a} \frac{\partial P_b^2}{\partial t} \quad (16)$$

式中： a 为气体扩散系数，可定义为压力的函数：

$$a = \frac{k_{\infty} P_b}{\phi \mu} \quad (17)$$

陈卫忠等^[5]在式(16)基础上，采用与拟压力法对平行渗流的相同处理方法，得到考虑克氏效应的计算公式为

$$\frac{2Q_{sc} P_{sc} L \bar{\mu} \bar{Z} T}{A T_{sc}} = K_{\infty} [(p_e + b)^2 - (p_w + b)^2] = K_{\infty} (p_e^2 - p_w^2) + 2K_{\infty} b (p_e - p_w) \quad (18)$$

通过试验测得不同气体压力条件下气体的流量 Q_{sc} ，通过式(18)拟合得到克氏渗透率 K_{∞} 和滑脱系数 b 。

4 盐岩渗透性测试

4.1 试验样品、设备及结果

试验样品为 3 种不同成分盐岩(见图 1)，试样 1 为纯盐岩，试样 2 为含杂质的盐岩，试样 3 为含界面盐岩，且存在泥岩与盐岩的交界面，具体样品参数如表 1 所示。试验设备为中国石油勘探开发研究院的渗透率测试仪(见图 2 和 3)，采用稳态法测定岩样的渗透率，即通过压力控制系统分别对岩石施加围压和轴压，进气端控制岩石上表面气压，出气端控制试件底面气压，出气端使用皂泡流量计测定气体流量，待形成稳定渗流后，测试单位时间透过岩芯的气体体积。设备可对试件为 $\phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 的试件进行测试，测试轴压和围压均为可达 60 MPa，进入气体压力最大可达到 15 MPa。



(a) 试样 1 (b) 试样 2 (c) 试样 3
图 1 试样

Fig.1 Testing samples

试验前首先在 80° 条件下烘干 24 h，然后测试盐岩的基本物理参数，随后在 15 MPa 静水压力条件，静压 24 h，尽量使原有损伤恢复，减少扰动对盐岩渗透率的影响。24 h 后开始测试，测试进气压

表 1 试样基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of samples

试样	长度 L/cm	直径 D/cm	截面积 A/cm^2	岩样质量 M/g	视密度 ρ' $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙度 $\phi/\%$
1	4.998	2.491	4.873	52.357	2.15	0.68
2	4.989	2.492	4.877	55.765	2.29	2.00
3	5.026	2.504	4.924	61.413	2.48	3.00

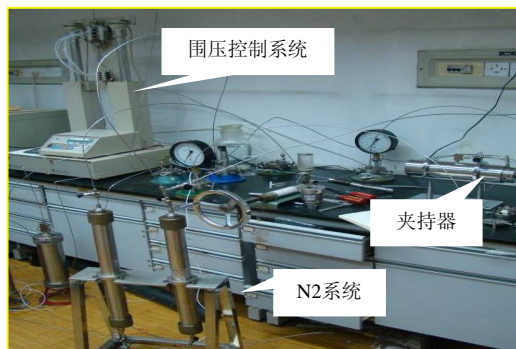


图 2 试验设备

Fig.2 Testing equipments

力分别为 1.1, 2.0, 3.1, 4.1, 5.1, 6.1, 7.1, 8.1, 9.1, 10.1, 11.1, 12.1 和 13.1 MPa 条件下盐岩的渗透率，出气压力为大气压，测试气体为氮气。具体试验结果如表 2 所示。

4.2 试验结果分析

(1) 渗透率变化规律分析

通过气测渗透率公式，计算出 3 种试样在不同进气压力下的渗透率(见表 3)。

通过表 3 可发现，纯盐岩渗透率 $1 \times 10^{-19} \text{ m}^2$ 左右，而含杂质盐岩与含界面盐岩渗透率明显很低，在 $1 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ 左右，这主要是由于杂质盐岩中含有硬石膏、钙芒硝，盐岩颗粒本身较大，但杂质颗粒小，小颗粒将盐岩中裂隙填充，阻碍了气体的流动，这也与周宏伟等^[4]的研究结果相同。而含界面盐岩渗透率较纯盐岩要低，也表明界面一侧泥岩在整个试样渗透率中起着主导作用，表明泥岩的渗透率较盐岩低。从表 2 中可见，3 种不同盐岩孔隙度也存在明显差异，纯盐岩孔隙度为 0.68%，其他 2 种盐岩孔隙度分别为 2.0% 和 3.0%，这明显反应了 3 种岩体中孔隙连通性的差别，试样 2 和 3 的孔隙度虽然大，但渗透率低。从图 4^[14]的关于 2 种岩石的 SEM 图像上可看到盐岩颗粒较大，且表面分布着裂隙，有可能成为渗透通道；但泥岩颗粒较小，表面较为粗糙，孔隙分布不明显，借此可推测其连通性比纯盐岩要差，主要受着其中杂质与泥岩的影响，借此可充分说明在溶腔建设中，泥岩可作为良好的盖层。

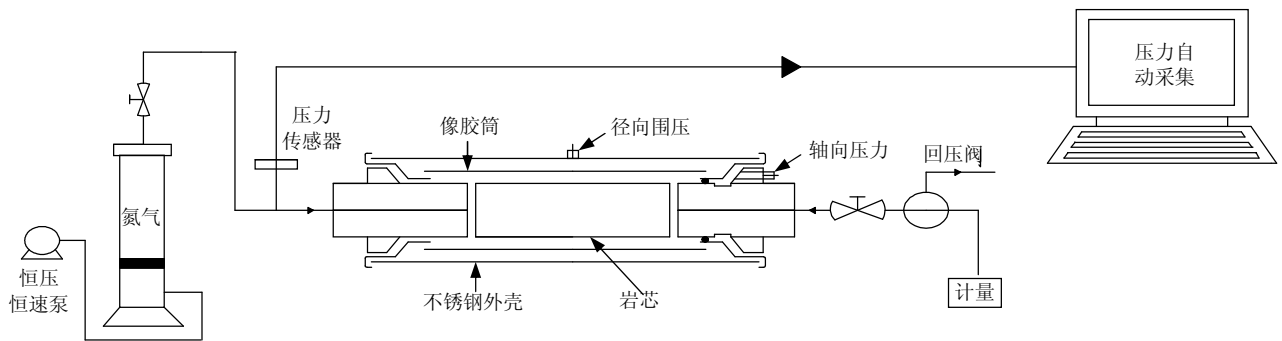


图 3 试验设备示意图

Fig.3 Sketch of test equipments

表 2 试验条件及结果

Table 2 Testing conditions and results

入口压力/ MPa	流量/(10 ⁻³ mL · s ⁻¹)		
	试样 1	试样 2	试样 3
1.1	0.079 5	0.001 1	0.001 7
2.1	0.238 0	0.003 2	0.005 8
3.1	0.452 7	0.006 4	0.009 8
4.1	0.766 2	0.009 9	0.015 3
5.1	1.119 8	0.016 5	0.027 7
6.1	2.783 3	0.028 8	0.037 5
7.1	3.753 9	0.054 2	0.060 6
8.1	7.198 9	0.108 0	0.137 9
9.1	13.541 5	0.274 7	0.426 1
10.1	13.016 6	0.431 8	0.793 5
11.1	21.225 8	1.079 5	1.144 8
12.1	67.483 0	2.878 7	4.264 8
13.1	269.712 3	10.623 8	14.109 9

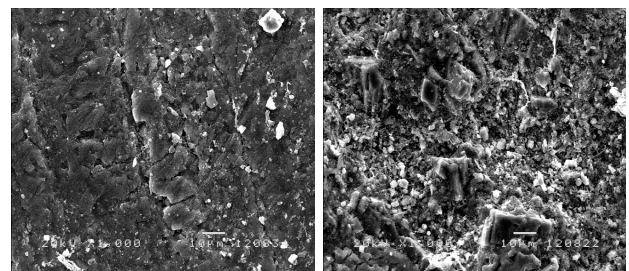
注：出口压力均为 0.1 MPa，静水压力为 15 MPa，室内温度为 20 ℃。

通过表 2, 3 中数据对比可发现，在进气压力小于 5 MPa 条件下，随着进气压力的增加，流量均在增加，但渗透率逐渐降低，出现这种现象主要原因为气体的滑脱效应，这也与 P. Cosenza 等^[11]的研究成果类似，他们认为气体压力为 0.06~6.00MPa 时，其平均分子自由程与盐岩孔隙尺寸相当(10⁻⁷~10⁻⁹ m)，Klinkenberg 效应比较显著。按照渗流常规理论来讲，气体压力越大，气体越趋于液态，受滑脱效应的影响更小，渗透率应越来越小，最后会趋于常数。但从表 3 中发现，纯盐岩在进气压力 5.1 MPa 后渗透率开始升高，试样 2 和 3 也在进气压力为 4.1 MPa 以后渗透率开始升高，3 个样品均是当进气压力达到 11.1 MPa 时，渗透率急剧升高，比初始渗透率大

表 3 气测渗透率与进气压力关系

Table 3 Relationship between gas permeability and injecting pressure

进气压力/ MPa	气测渗透率 K _g /(10 ⁻²¹ m ²)		
	试样 1	试样 2	试样 3
1.1	239.25	3.25	5.10
2.1	195.37	2.66	4.70
3.1	170.32	2.41	3.66
4.1	164.72	2.14	3.27
5.1	155.55	2.28	3.81
6.1	270.24	2.79	3.60
7.1	269.02	3.88	4.30
8.1	396.37	5.94	7.51
9.1	590.71	11.97	18.40
10.1	460.93	15.28	27.81
11.1	622.29	31.62	33.21
11.1	1 664.91	70.97	104.13
12.1	5 677.05	223.44	293.92



(a) 盐岩表面

(b) 泥岩表面

图 4 岩石表面 SEM 图^[14]

Fig.4 SEM graphs of rock surface^[14]

了 2 个数量级，而且在试验后发现，试样 3 在盐岩与泥岩的 2 个交界面处发现一圈沿着界面扩展的宏观裂纹。据此可以推断，虽然是在静水压力下进行测试，但当进气压力达到一定程度时，在渗透压力

作用下，岩石产生了新的损伤并且随着渗透力的增加损伤逐步严重。这主要是由于受压力敏感性的影响，由于岩石非常致密，当渗透力达到一定程度，其中孔隙会发生膨胀并撑开，2 个孤立的孔隙之间有可能产生新的渗流通道，导致了渗透率的急剧升高。这可以很好地解释进气压力越大，渗透率反而增大的现象。含交界面盐岩试样 3 在宏观方面表现的更加明显，出现了沿着界面的裂隙，杨春和和李银平^[15]的研究表明，交界面从力学角度分析并不是个弱面，但交界面由于本身在成岩胶结过程中，界面处孔隙相比较盐岩与泥岩孔隙较大，连通性较好，而泥岩与盐岩本身都很致密，孔隙的连通性很差。当气体在岩体中渗透时，必然沿着孔隙大连通性好的方向流动，随着气体压力的升高在界面处必然造成压力在试件内积聚，当累积到一定程度时，很容易会突破初始应力的影响，导致其中原有微裂隙的扩展以及颗粒内孔隙的膨胀，将界面处孔隙或原有微裂纹撑开，进而造成岩体新的损伤以及渗透率的增大，界面处有可能成为新的的渗流通道。

(2) 2 种渗透率计算方法的对比分析

根据前面拟压力法获得的气测渗透率，进行数据拟合，获得盐岩在 5.1 MPa 以后出现渗透率增高的现象，因此笔者选择在渗透力对盐岩孔隙影响较小的范围内，对数据进行拟合，这里只拟合前面 4 个数据，拟合结果见图 5。根据考虑克氏效应方法对数据拟合见图 6。

由图 5, 6 可以看出，2 种方法的拟合效果都比较好，表 4 给出了 2 种方法拟合获得的克氏渗透率与滑脱系数结果。

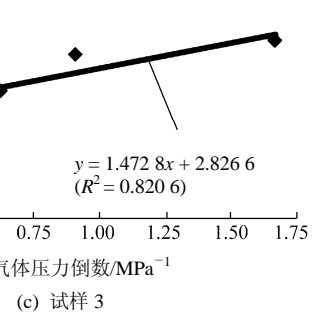
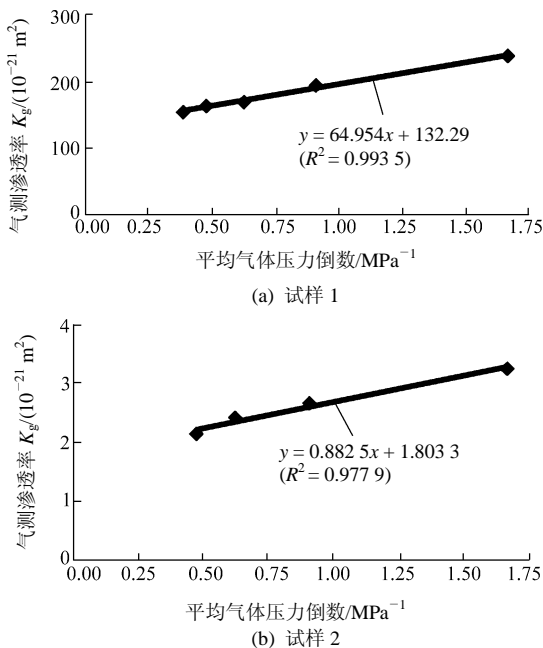


图 5 拟压力法拟合结果

Fig.5 Fitting results by pseudo-pressure method

图 6 考虑克氏效应方法拟合结果

Fig.6 Fitting results of considering Klinkenberg effect method

对比发现，通过 2 种方法拟合获得的克氏渗透率的结果差别较大，尤其是滑脱系数上差别明显，从相关性方面看，拟压力法的相关性较克氏效应要差，这是由于渗透率计算公式推导时，假设进气压力相同时试样中气体渗透率处处相同^[6]，这种简化容易出现偏差，相比较考虑克氏效应方法相关性非常的好，因此可以认为通过引进新的变量 P_b ，可以精确表达盐岩中气体渗透的 Klinkenberg 效应。

表 4 2 种方法拟合结果对比

Table 4 Comparison of the fitting results by two methods

试样编号	渗透率计算方法	克氏渗透率 $K_w/(10^{-21} m^2)$	滑脱系数 b/MPa	R^2
1	拟压力法	64.95	0.49	0.993 5
	考虑克氏效应方法	125.44	0.63	0.999 8
2	拟压力法	1.80	0.48	0.977 9
	考虑克氏效应方法	1.22	1.78	0.999 5
3	拟压力法	1.82	0.52	0.820 6
	考虑克氏效应方法	1.30	3.58	0.999 3

5 结 论

本文对利用稳态法对盐岩的渗透性进行了测试, 得到如下结论:

(1) 通过稳态法对盐岩的渗透率进行了测试, 获得了盐岩的渗透率, 盐岩的渗透率与孔隙度极低, 孔隙度为 0.6%~3.0%, 纯盐岩渗透为 $10^{-20} m^2$ 左右, 而含杂质盐岩渗透率更低, 在 $10^{-20} \sim 10^{-21} m^2$ 范围时, 杂质的存在对盐岩渗透有阻隔作用, 泥岩可作为储气库的良好盖层。

(2) 纯盐岩的气测渗透率中, 进气压力为 1~5 MPa 时, Klinkenberg 效应影响明显, 但在 5 MPa 以后表现出渗透率升高现象, 在 11.1 MPa 后, 渗透率急剧升高, 表明盐岩产生了新的损伤; 在含界面盐岩测试中, 在泥岩与盐岩交界面处产生微裂纹, 表面界面有可能成为新的渗流通道, 在建库过程中需要特别的注意。

(3) 通过对渗透率计算方法的对比, 得到考虑 Klinkenberg 效应的方法较拟压力法在盐岩渗透率计算中更为理想的结论。

参考文献(References):

[1] 李文阳, 丁国生, 张显文, 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, The feasibility of the underground reserves of oil resources in China[J]. Techno-economics in Petro Chemicals, 2002, 17(1): 14 - 17.(in Chinese))

[2] 罗富绪. 国外地下储气库发展综述[J]. 油气储运, 1998, 17(3): 58 - 59.(LUO Guoxu. Review of the development of foreign underground gas storage[J]. Gas Storage and Transportation, 1998, 17(3): 58 - 59.(in Chinese))

[3] 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.

[4] 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): 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))

[5] 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 Weizhong, YANG Jianping, WU Guojun, et al. Experimental study on permeability in low permeability media[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 236 - 243.(in Chinese))

[6] 陈卫忠, 谭贤君, 杨建平, 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, 2008, 27(2): 236 - 243.(CHEN Weizhong, TAN Xianjun, YANG Jianping, et al. Research on gas seepage law in laminated salt rock gas storage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 236 - 243.(in Chinese))

[7] 梁卫国, 杨春和, 赵阳升. 层状盐岩储气库物理力学特性运行压力[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 22 - 27.(LIANG Weiguo, YANG Chunhe, ZHANG Yangsheng. Physico-mechanical properties and limit operation pressure of gas deposit in bedded salt rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(1): 22 - 27.(in Chinese))

[8] 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 Zhengmeng, YANG Chunhe. Investigations on permeability of rock salt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 746 - 749.(in Chinese))

[9] 邵保平, 赵阳升, 赵延林, 等. 层状盐岩储库长期运行腔体围岩流变破坏及渗透现象研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(增 1): 241 - 246.(XI Baoping, ZHAO Yangsheng, ZHAO Yanlin, et al. Investigation on rheodestruction and permeability of surrounding rock for long-term running storage cavern in bedded rock salt[J]. Rock and Soil Mechanical, 2008, 29(Supp.1): 241 - 246.(in Chinese))

[10] KLINKENBERG L J. The permeability of porous media to liquids and gases[C]// Drilling and Production Practices. New York: American Petroleum Institute, 1941: 200 - 213.

[11] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1999: 248 - 265.(KONG Xiangyan. Advanced fluid mechanics in porous[M]. Hefei: China University of Science and Technology Press, 1999: 248 - 265.

[12] CONSENZA P, GHOREYCHI M, BAZARGAN-SABET B, 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.

[13] WU Y S, PRUESS K, PERSOFF P. Gas flow in porous media with Klinkenberg effects[J]. Transport in Porous Media, 1998, 32(1): 117 - 137.

[14] 武志德. 考虑渗流及时间效应的层状盐岩溶腔稳定分析[博士学位论文][D]. 北京: 中国矿业大学, 2011.(WU Zhide. Research on the stability of cavern in bedded rock salt based on permeability and time dependent behavior[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2011.(in Chinese))

[15] 杨春和, 李银平. 层状盐岩力学理论与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 33 - 43.(YANG Chunhe, LI Yinping. Bedded salt rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2009: 33 - 43.(in Chinese))