

文章编号: 1000-7598 (2009) 12-3587-08

应力-温度对低渗透介质渗透率影响研究

杨建平, 陈卫忠, 田洪铭, 于洪丹

(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)

摘 要: 在石油/天然气地下储存、核废料地下处置等工程中, 低渗透介质的渗透率测试及其随着应力、温度的变化是工程稳定性和环境评价的基础。通过研制的低渗透介质温度-渗流-应力耦合三轴仪 (T-M-PTS), 对不同静水压力、不同温度条件下锦屏大理岩的渗透率进行了渗透特性测试, 并通过微裂隙模型从理论方面对致密岩石渗透率演化进行了研究。研究结果表明: (1) 致密岩石中气体渗透的 Klinkenberg 效应显著, 不能忽略; (2) 基于统计理论和逾渗理论的圆盘裂隙模型可以较好地模拟致密岩石扩容和压密过程中渗透率演化特征; (3) 静水压力增大, 渗透率降低, 其降低趋势是开始压缩阶段降低速率较快, 随后降低速率越来越小; (4) 温度升高, 岩石弹性模量降低, 岩石被压缩得更加致密, 渗透率降低较为明显, 从 15℃ 升高至 40℃ 即会降低一个量级, 低至 $3.9 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ 。

关 键 词: 低渗透介质; Klinkenberg 效应; 逾渗; 渗透率

中图分类号: TE 122.2⁺³

文献标识码: A

Study of permeability evolutions in low permeability media under different stresses and temperatures

YANG Jian-ping, CHEN Wei-zhong, TIAN Hong-ming, YU Hong-dan

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Determination of permeabilities of low permeability rock ($\leq 10^{-18} \text{ m}^2$) under different stress conditions and temperatures is the basis of stability evaluation in geological disposal of radioactive waste, underground gas and oil storage tanks and construction of deep cavern groups. Based on the developed low permeability test equipment (T-M-PTS), gas transport properties of typical Jinping marbles are studied under different hydrostatic pressures and temperatures. Based on microcrack linkage model, evolution of permeability is also studied theoretically. Some results are achieved: (1) Klinkenberg effect is remarkable when gas transport through dense rocks, and should be considered; (2) based on statistic theory and percolation theory, a 3-D penny-shaped microcrack model has been developed to predict and investigate the evolution of permeability due to microcrack closure in compressive regime; (3) permeability decreases as hydrostatic stress increases because of the decrease of porosity under compression, and permeability decreases faster at the first stage of compression; and (4) permeability decreases from $21.9 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ to $3.9 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ as temperature increases from 15℃ to 40℃ because of the decrease of elasticity, which lead to decrease of porosity under the same hydrostatic stress.

Key words: low permeability medium; Klinkenberg effect; percolation; intrinsic permeability

1 引 言

我国规划与实施中的石油/天然气地下能源储存、低渗透油气田开发、高瓦斯矿井瓦斯抽放、放射性废料地质深埋处置等工程, 都涉及到在复杂的地质结构中建造地下工程, 其中对低渗透岩石渗透

率的测试及其对环境影响的评估是一个重要方面。考虑到地温梯度和地应力的影响, 特别是盐岩储气库周期性注采气过程中气压变化会影响储库围岩的应力, 研究低渗透岩石的渗透率随着温度、应力的变化尤为重要。

渗透率随应力的变化规律试验研究方面有: 李

收稿日期: 2009-05-28

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (973) (No. 2009CB724603); 国家自然科学基金重大国际合作项目 (No. 50720135906); 国家自然科学基金 (No. 40772184) 资助。

第一作者简介: 杨建平, 男, 1982 年生, 博士, 主要从事隧道及地下工程方面的研究。E-mail: jpyang@whrsm.ac.cn

小春等^[1]介绍的渗透系数-变形耦合试验系统可以测量岩石变形过程中渗透系数的变化;张守良等^[2]研究了岩石变形过程中渗透率变化;姜振泉等^[3]利用岩石力学电液伺服系统研究了岩石试样应力-应变全过程阶段的渗透系数的变化;黄润秋等^[4]开发的岩石高压渗透装置可以在一定围压、轴压情况下进行渗出水体积的测定获得岩石的渗透系数;Stormont等^[5-6]通过室内试验研究了静水压力过程中、三轴偏应力下盐岩的孔隙度、渗透率变化特性;Schulze等^[7-8]在盐岩室内试验中通过多种测试手段,包括超声波速测试、渗透率测试和体积应变变化测试,研究了在不同压力状态下盐岩的渗透性质变化,得到了岩石的压缩扩容应力边界;Popp等^[9-11]通过渗透率和超声波速测试研究了盐岩的渗透性,并研究了不同加载状态下内部裂隙生成演化的各向异性特征;Peach等^[12]从实验和理论方面研究了人造盐岩加载过程中扩容及渗透率的演化;吴文等^[13]研究了不同应力状态下盐岩的渗透特性。渗透率演化理论方面: Dienes^[14]基于流体流动泊肃叶流动定律,通过圆盘状裂隙空间分布规律通过统计理论、逾渗理论研究了渗透率的演化;Gueguen等^[15]基于统计理论和逾渗理论研究了渗流通道为一维管状和二维平面圆盘状裂隙网络的渗透率,两种模型下渗透率均依赖于平均管道长度(平均圆盘裂隙半径)、平均管道半径(平均圆盘裂隙宽度)和管道之间平均距离(圆盘裂隙中心之间平均距离);Simpson等^[16-17]研究了各向同性裂隙在应力作用下扩容、滑移从而导致各向异性渗透率的演化过程;Zhu等^[18-20]通过逾渗理论和随机网络模型研究了岩石加载过程中渗透率的演化。渗透率随温度的变化规律研究都集中在高温方面:梁冰等^[21]从理论和试验方面研究了高温作用下,岩石内部物理化学特征和结构特征发生变化,导致裂隙延伸、矿物脱水及汽化,从而导致岩石孔隙率和渗透率改变;刘均荣等^[22]对储层岩石渗透率受热变化规律进行了实验研究,并对岩石渗透率在高温作用下发生变化的机理进行了探讨;Somerton等^[23]在大气压力和模拟油藏压力及400℃~800℃条件下对大量砂岩进行了加热试验,研究了岩石在加热过程中的渗透率变化规律。

本文通过室内试验研究低渗透介质渗透率随应力、温度的变化情况,基于统计理论和逾渗理论研究了致密岩石在压密过程中渗透率的演化规律。研究结果对于了解压缩区内不同应力下和正常温度范围内低渗透介质渗透率的演化有深入的认识,对于石油/天然气地下储存和放射性废料地质深埋处

置等工程的安全性评价和环境评价提供重要支持。

2 岩石渗透率演化的微观物理模型

2.1 逾渗理论

裂隙的连通性能影响岩石的渗透性,随着裂隙密度的变化,可用导水连通裂隙占总裂隙数的比例变化来研究渗透率的演化。很多学者通过逾渗理论研究了岩石渗透率的演化^[14-15, 20]。

对于规则网格上的座和键以某一概率 p 被占有,不被占有的概率为 $1-p$,这种逾渗模型称为格子逾渗(lattice percolation)模型。Dienes 假设三维圆盘状裂隙连通方式为 Bethe 格子(Bethe Lattice)连接,用格子逾渗模型研究岩石渗透率演化。Bethe 格子连接结构示意图见图 1(a),每个圆盘状裂隙最多有四个裂隙与之相切割。若两个裂隙相切割,它们之间发生连接关系,称为键占有;裂隙称为座。当键占有达到某一临界值 p_c ,会引起系统渗透特性的突变,也即有连通的导水裂隙系统出现, p_c 称为逾渗阈值,是逾渗理论中的一个重要概念。键和座示意图见图 1(b)。

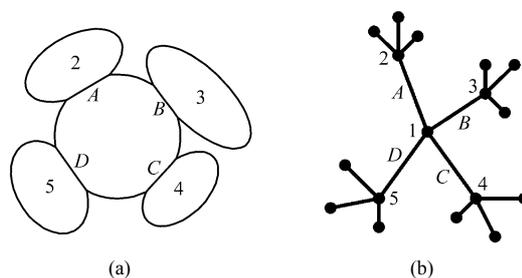


图 1 Bethe 格子连接示意图^[14]

Fig.1 Sketch map of Bethe lattice structure^[14]

1、2、3、4 表示圆盘状裂隙,在图 1(b)中以黑点表示,称为座;A、B、C、D 为裂隙切割,在图 1(b)中以线表示,称为键

根据文献[14],Bethe 格子的逾渗概率 P^* (P^* 为导水连通裂隙占总裂隙的比例)为

$$P^* = 1 - 4 \left[\left(\frac{1}{p} - \frac{3}{4} \right)^{1/2} - \frac{1}{2} \right]^3 + 3 \left[\left(\frac{1}{p} - \frac{3}{4} \right)^{1/2} - \frac{1}{2} \right]^4 \quad (1)$$

键占有 p 的临界值 $p_c = 1/3$ 。逾渗概率随着键占有概率的增大而增大,关系图见图 2。

三维圆盘裂隙网络中,键占有的概率为 p ,渗流阈值附近 p 可以估计为^[24-25]

$$p \approx \frac{\pi^2 c^3}{4l^3} \quad (2)$$

式中： \bar{c} 为裂隙半径平均值； \bar{l} 为相邻裂隙中心点之间距离的平均值。

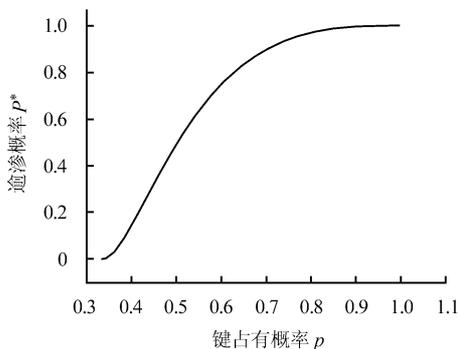


图 2 逾渗概率与键占有概率关系^[14]

Fig.2 Relationship between percolation probability and the probability of bond existence^[14]

2.2 岩石微裂隙模型渗透率演化理论

Dienes 假设圆盘状裂隙在空间各个方向均匀分布，以及流体在薄板中流动服从泊肃叶流定律 (Poiseuille' law)，根据统计理论和连续化方法推导得到了各向同性渗透张量^[14]：

$$k = \frac{8\pi^2}{15} \theta \bar{A}^3 N_0 \bar{c}^5 \quad (3)$$

式中： θ 为真实裂隙中流体流动偏离薄板泊肃叶流动的偏差因子； \bar{A} 为裂隙平均高宽比 ($\bar{A} = \bar{w} / \bar{c}$ ， \bar{w} 为裂隙半隙宽平均值)； N_0 为单位体积、单位球面度中连通裂隙的密度。

式 (3) 中 N_0 和逾渗概率 P^* 关系见式 (4)：

$$2\pi N_0 = P^* N = P^* / \bar{l}^3 \quad (4)$$

式中： N 为总裂隙的裂隙数密度。

假设理想化的完好岩石不存在裂隙 (无损伤)，在岩样采集、加工过程中由于扰动等影响而产生微裂隙，形成初始损伤体积应变 ε_{v0} 。在进一步的加载过程中，岩石的总体积应变 ε_{vt} 为初始损伤引起的体变 ε_{v0} 和加载中产生的体变 ε_v 之和：

$$\varepsilon_{vt} = \varepsilon_{v0} + \varepsilon_v = 2\pi\alpha \frac{\bar{c}^2 \bar{w}}{\bar{l}^3} \quad (5)$$

式中： α 为裂隙圆盘形状改变体积修正系数，理想状态下，圆盘周边厚度为 0， $\alpha = 1/3$ 。

根据式 (3)、(4) 和 (5)，可以得到：

$$k = \frac{2}{15\alpha} \bar{w}^2 \theta \varepsilon_{vt} P^* \quad (6)$$

由式 (2)、(5) 可以得出：

$$p \approx \frac{\pi \varepsilon_{vt}}{8A\alpha} \quad 1/3 \leq p \leq 1 \quad (7)$$

将式 (1)、(7) 带入式 (6)，可得：

$$k \approx \frac{2}{15\alpha} \bar{w}^2 \theta \varepsilon_{vt} \left[1 - 4 \left[\left(\frac{8A\alpha}{\pi \varepsilon_{vt}} - \frac{3}{4} \right)^{1/2} - \frac{1}{2} \right]^3 + 3 \left[\left(\frac{8A\alpha}{\pi \varepsilon_{vt}} - \frac{3}{4} \right)^{1/2} - \frac{1}{2} \right]^4 \right] \quad (8)$$

根据式 (7)，可知 $\varepsilon_{vt} \in \left[\frac{8A\alpha}{3\pi}, \frac{8A\alpha}{\pi} \right]$ 。体积应

变对渗透率的影响为：在 ε_{vt} 增大到 $\frac{8A\alpha}{3\pi}$ 时，键占有概率 p 达到逾渗阈值 $p_c = 1/3$ ，此时岩石的渗透性由无到有，发生突变；随着 ε_{vt} 进一步增大，渗透率发生演化，见图 3 的扩容段渗透率随着扩容的演化曲线；当 ε_{vt} 增大到 $\frac{8A\alpha}{\pi}$ 以后， $p = 1$ ， $P^* = 1$ ，此时渗透率演化参考式 (6)。岩石压密过程中，渗透率演化曲线见图 3 的压密段，该段 ε_{vt} 值的减小是由于裂隙隙宽在受压时降低，裂隙数目不变，所以 \bar{l} 不变， \bar{w} 不断降低，其演化方程见式 (10)。

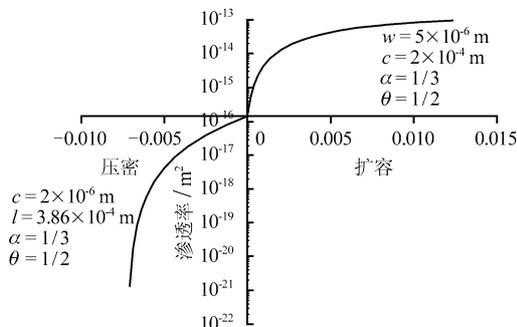


图 3 渗透率与扩容及压密的关系曲线示意图

Fig.3 Permeability versus dilatancy and compression curves based on the clack linkage model

2.3 渗透率演化理论在本文的应用

大理岩是致密低孔隙度岩石，具有典型的粒状变晶结构，渗透一般沿着晶体交接面，对于微裂隙渗透演化理论及 Bethe 格子连通方式适用。

岩石开采、加工成标准样的过程中，较之在原位环境下会发生一定扩容 (体积应变增大)，具有一定渗透率，逾渗概率 P^* 在 (0, 1) 之间。在应力压缩区内，不发生进一步的损伤，逾渗概率 P^* 不发生变化；此时岩石压密是由于裂隙隙宽减小所致，且岩石渗透率的降低也由于隙宽减小，根据式 (5) 和 (6)，可见 $k \propto \bar{w}^3$ 。在压缩区内岩石升温过程中，

不发生进一步的损伤,逾渗概率 P^* 不发生变化,渗透率降低同样是由于隙宽减小;此时岩石体积变化一方面由于岩石中矿物发生热膨胀,另一方面由于升温导致岩石弹性模量降低,压密性增强;由于升温过程中未能测得岩石应变变化,没有足够的数据对升温过程中渗透率的演化做进一步分析。尽管如此,升温过程中渗透率的演化的微观机制和压缩区内应力增大过程渗透率演化机制是相同的。

根据式(5)和(6),可以得到:

$$k = \frac{\theta P^*}{30\alpha^3} \left(\frac{\bar{l}^3}{\pi \bar{c}^2} \right)^2 \varepsilon_{vt}^3 \quad (9)$$

$$\text{记 } \beta = \frac{\theta P^*}{30\alpha^3} \left(\frac{\bar{l}^3}{\pi \bar{c}^2} \right)^2, \text{ 式(9) 为}$$

$$k = \beta (\varepsilon_{v0} + \varepsilon_v)^3 \quad (10)$$

对压缩区内不同应力下测得的体积应变 ε_v 和渗透率 k 通过关系式(10)进行拟合,可以描述岩石压密过程中渗透率随着体积应变的变化规律。

3 岩石低渗透性测试方法

低渗透岩石渗透性测试在中科院武汉岩土力学研究所低渗透介质温度-渗流-应力耦合三轴仪(T-M-PTS)上完成。关于低渗透介质温度-渗流-应力耦合三轴仪(T-M-PTS)的介绍及测试指标见文献[26]。

渗透测试方式为气体稳态渗流法。试样为圆柱形,直径 50 mm,长度 75~100 mm。渗透方式为轴向渗透,试验过程中在试样上表面施加一定的气体压力,下表面为一个大气压,待试样中形成稳定的气体压力梯度后,测量一定时间内的气体流量。通过改变进气压力的大小,可以测量不同进气压力下的气体流量,再根据计算可以得到试样的渗透率。

4 岩石低渗透性计算方法

4.1 Klinkenberg 效应

当气体的平均分子自由程和岩石孔隙尺寸相当时,会出现滑脱现象,即管壁上的气体分子也处于运动状态,这样与连续流相比就多出一个附加流量,这种现象在渗流力学中称为 Klinkenberg 效应。Cosenza 等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 MPa 时,其平均分子自由程与岩石孔隙尺寸相当(10^{-7} ~ 10^{-9} m,渗透率 $\leq 10^{-16}$ m²),Klinkenberg 效应比较显著。Klinkenberg 得到的气体渗透率公式为

$$K_g = K \left(1 + \frac{b}{p} \right) \approx K \left(1 + \frac{2b}{p_0 + p_L} \right) \quad (11)$$

式中: K_g 为气体渗透率; K 为绝对渗透率,简称渗透率; p 为气体压力; b 为 Klinkenberg 系数;式(11)右端表达式将 p 近似为试样进气压力 p_0 和出气压力 p_L 的平均值。

4.2 渗透率计算方法

根据式(11),有两种计算渗透率的方法:第一种根据近似表达式先求出气体渗透率 K_g ,再利用气体渗透率和平均气体压力倒数的线性关系拟合得到绝对渗透率,称为传统拟压力法;第二种是使用精确的气体渗透率表达式,在气体渗流方程中考虑 Klinkenberg 效应,这样求得的渗透率更精确,因为整个推导过程中不需要近似假设,称为气体渗流方程考虑 Klinkenberg 效应方法。关于这两种方法的详细公式推导见文献[26]。

5 试验条件和结果

设计两种试验方案分别研究压力和温度对低渗透岩石渗透率的影响:

试验方案 1: 恒温、不同静水压力下大理岩的渗透率;

试验方案 2: 恒压、不同温度下大理岩的渗透率。

5.1 试验方案 1

5.1.1 试样及试验条件

选取锦屏电站白山组大理岩试样进行 10、20、30 MPa 静水压力下渗透特性的研究,试样过程中,下端保持一个大气压,改变进气端压力,油温 14.5 °C,室温 16 °C。在试验前,将试样在 80 °C 的烘箱中烘烤 24 h,保证试样内微裂隙处于干燥状态,不含有裂隙(孔隙)水。

5.1.2 试验结果

试验结果见表 1。

表 1 不同静水压力下大理岩的渗透试验结果
Table 1 Seepage velocities of Jinping marble sample under different temperatures

10 MPa		20 MPa		30 MPa	
进气压力 / MPa	渗流速率 / (mL/s)	进气压力 / MPa	渗流速率 / (mL/s)	进气压力 / MPa	渗流速率 / (mL/s)
1.95	0.001 45	2.80	0.001 83	2.97	0.001 35
3.00	0.002 50	4.00	0.002 84	3.98	0.001 96
4.04	0.003 91	4.98	0.003 92	4.95	0.002 65
5.10	0.005 95	5.99	0.005 15	5.94	0.003 48
6.10	0.008 06	6.92	0.006 45	6.96	0.004 63
7.05	0.010 10				

5.2 试验方案 2

选取锦屏电站白山组大理岩试样进行 20 MPa 静水压力、不同油温（分别为 15 °C、30 °C 和 40 °C）下渗透特性的研究。试验过程中，下端面保持一个大气压，改变进气端压力，在试验前，将试样在 80 °C 的烘箱中烘烤 24 h，保证试样内处于干燥状态，不含有孔隙水。试验结果见表 2。

表2 20 MPa静水压力、不同油温下试样的渗透试验结果

Table 2 Seepage velocities of Jinping marble sample versus different temperatures under 20 MPa hydrostatic pressure

15 °C		30 °C		40 °C	
进气压力 / MPa	渗流速率 / (mL/s)	进气压力 / MPa	渗流速率 / (mL/s)	进气压力 / MPa	渗流速率 / (mL/s)
4.31	0.003 21	4.21	0.001 83	4.52	0.000 64
5.35	0.004 67	5.44	0.002 84	5.43	0.000 86
6.42	0.006 41	6.50	0.003 92	6.32	0.001 14
7.57	0.008 93	7.45	0.005 15	7.33	0.001 49

6 试验结果分析

分别用传统拟压力法和气体渗流方程考虑 Klinkenberg 效应的方法对试验数据进行拟合得到不同条件下岩石的渗透率。

6.1 试验方案 1

图 4、5 分别为传统拟压力法和气体渗流方程考虑 Klinkenberg 效应方法得到的结果的拟合曲线，表 3 为不同静水压力下渗透率计算结果比较。

图 6 为气体渗流方程考虑 Klinkenberg 效应方法得到的渗透率随着静水压力变化趋势线。

岩石在静水压力加载过程中轴向应力-轴向应变曲线见图 7，据图 7 可以得到不同静水压力下岩石的体积应变值 ($\epsilon_v = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 3\epsilon_1$)，通过分析得到的不同静水压力的渗透率以及体积应变，利用式(10)可以拟合得到参数 β 和岩样初始损伤值 ϵ_{v0} ，拟合结果为

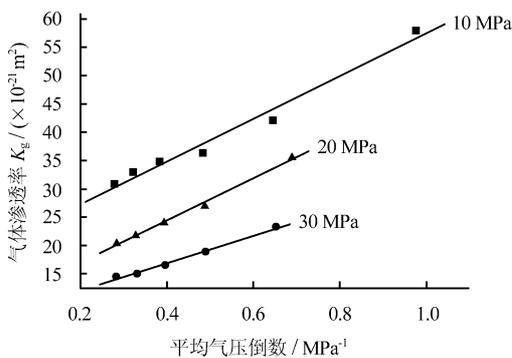


图 4 气体渗透率与平均气压倒数拟合结果

Fig.4 Fitting results between gas permeability and reciprocal of mean gas pressure of the tested samples

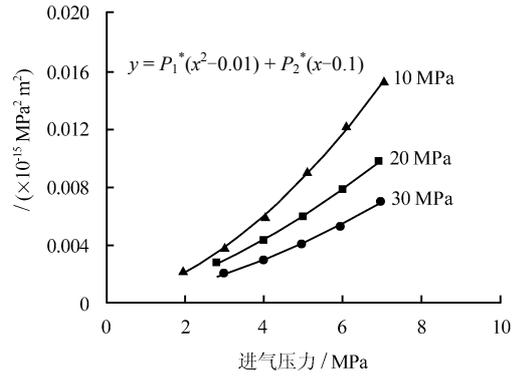


图 5 考虑 Klinkenberg 效应的拟合结果

Fig.5 Fitting results considering Klinkenberg effects of the tested samples

表 3 锦屏试样在不同静水压力下渗透率计算结果
Table 3 Permeability of Jinping marble sample under different hydrostatic pressures

方法	静水压力 / MPa	K / ($10^{-21} m^2$)	R^2
传统拟压力法	10	19.57	0.980
	20	9.47	0.995
	30	7.15	0.990
气体渗流方程考虑 Klinkenberg 效应的方法	10	21.90	0.999
	20	10.60	0.999
	30	8.30	0.999

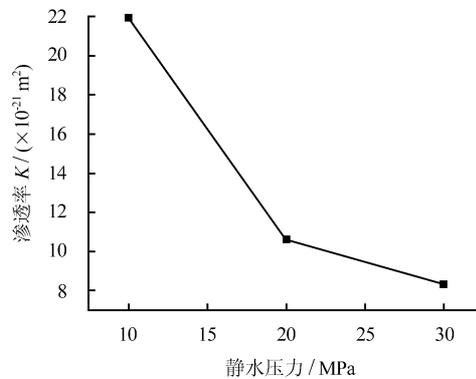


图 6 渗透率随静水压力变化趋势

Fig.6 Relationship between permeability and hydrostatic pressure

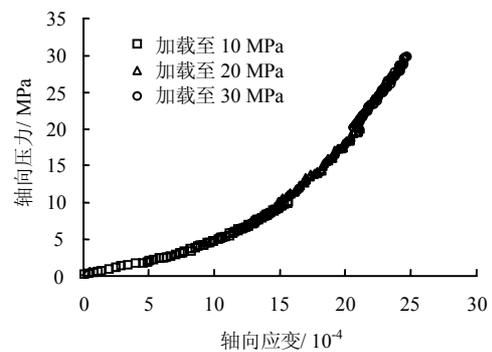


图 7 岩石静水压力加载过程中轴向应力-轴向应变曲线

Fig.7 Curve of axial stress-strain during hydrostatic pressure loading

$$k = 23.47 \times 10^{-15} (0.0145 + \epsilon_v)^3 \quad (12)$$

根据拟合参数得到的式(12)可以得到岩石在初始压密阶段渗透率随着体积应变的变化曲线,见图8。如果要得到初始压密阶段岩石渗透率随应力变化关系,通过岩石的弹性模量将应力和应变联系起来,需要注意的是在初始压密阶段弹性模量是不断变化的(图7),做渗透演化研究时要采用合理的弹性模量随应力变化模型,不能像力学分析中那样使用常弹性模量来简化,否则会对岩石渗透率计算造成很大误差。

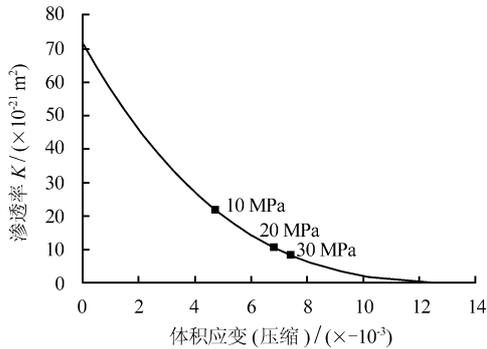


图8 拟合结果及压密过程中渗透率随体积应变变化规律
Fig.8 Permeability versus volumetric strain during hydrostatic pressure loading

6.2 试验方案2

随着温度的增大,平均分子自由程增大,另外岩石由于弹性模量降低导致渗透通道孔径降低,这进一步导致了岩石中气体渗透趋于滑流、自由分子流,愈来愈偏离了连续流。用传统拟压力法假设岩石中气体压力为两端压力平均值偏差较大,所以用气体渗流方程考虑 Klinkenberg 效应的方法拟合。

图9为用气体渗流方程考虑Klinkenberg效应的方法得到的结果的拟合曲线,表4为不同油温下渗透率计算结果比较。图10为渗透率随着油温的变化趋势线。

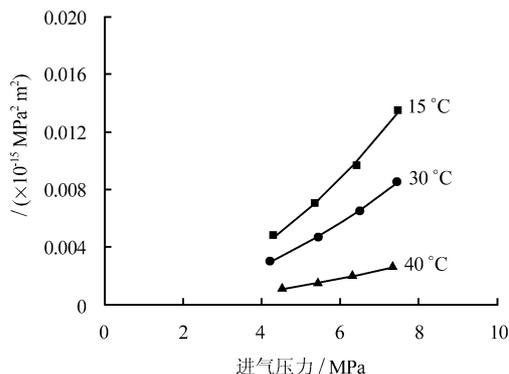


图9 考虑 Klinkenberg 效应的拟合结果
Fig.9 Fitting result considering Klinkenberg effects of the tested samples

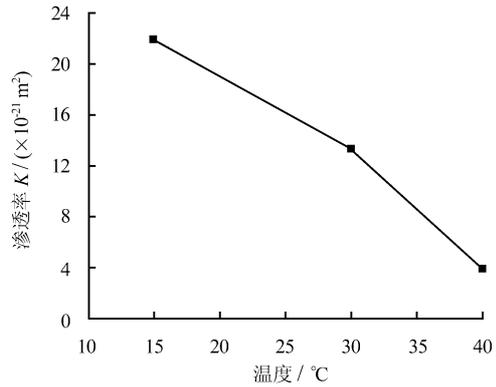


图10 渗透率随温度变化趋势
Fig.10 Relationship between permeability and temperature

表4 大理岩在20 MPa 静水压力、不同温度下渗透率计算结果

油温/ °C	$K/(10^{-21} \text{ m}^2)$	R^2
15	21.9	0.999
30	13.3	0.999
40	3.9	0.999

7 结 论

(1) 从传统拟压力法拟合的图5上可以看到,气体渗透率随着进气压力的增大而减小,说明在致密岩石中气体渗透的 Klinkenberg 效应显著,不能忽略。

(2) 压缩区内渗透率随着应力增大而降低,其降低趋势是:开始压缩阶段降低速率较快,随后降低速率越来越小;理论研究结果表明渗透率与隙宽的立方成正比关系,不加载时岩样的渗透率为 $71.5 \times 10^{-21} \text{ m}^2$,加载至30 MPa 静水压力,渗透率减小至 $8.3 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ 。

(3) 基于统计理论和逾渗理论的圆盘状裂隙网络模型可以很好的模拟低孔隙度致密岩石压密过程中渗透率的演化特点。

(4) 温度升高,岩石弹性模量降低,岩石被压缩得更加致密,渗透率降低较为明显,从15 °C升高至40 °C即会降低一个量级,低至 $3.9 \times 10^{-21} \text{ m}^2$ 。

参 考 文 献

[1] 李小春, 高桥学, 吴智深. 瞬态压力脉冲法及其在岩石三轴试验中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(增1): 1725-1733.
LI Xiao-chun, TAKAHASHI M, WU Zhi-shen, et al. Transient pulse technique and its application to conventional triaxial compressive tests[J]. Chinese

- Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(Supp.1): 1725—1733.
- [2] 张守良, 沈琛, 邓金根. 岩石变形及破坏过程中渗透率变化规律的实验研究[J]. **岩石力学与工程学报** 2000, 19(增): 885—888.
ZHANG Shou-liang, SHEN Chen, DENG Jin-gen. Testing study on the law of permeability variation in process of rock deformation and damage[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(Supp.): 885—888.
- [3] 姜振泉, 季梁军, 左如松. 岩石在伺服条件下的渗透性与应变、应力的关联性特征[J]. **岩石力学与工程学报** 2002, 21(10): 1442—1446.
JIANG Zhen-quan, JI Liang-jun, ZUO Ru-song, et al. Correlativity among rock permeability and strain, stress under servocontrolled condition[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(10): 1442—1446.
- [4] 黄润秋, 徐德敏, 付小敏. 岩石高压渗透试验装置的研制与开发[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(10): 1981—1992.
HUANG Run-qiu, XU De-min, FU Xiao-min, et al. Development and research of high pressure permeability testing system for rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(10): 1981—1992.
- [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 & Geomechanics Abstracts**, 1992, 29(4): 325—342.
- [6] STORMONT J C, DAEMEN J J K, DESAI C S. Prediction of dilation and permeability changes in rock salt[J]. **International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics**, 1992, 16(8): 545—569.
- [7] SCHULZE O. Investigations on damage and healing of rock salt[J]. **Mechanical Behavior of Salt- Understanding of Thmc Processes in Salt**, 2007: 33—43.
- [8] SCHULZE O, POPP T, KERN H. Development of damage and permeability in deforming rock salt[J]. **Engineering Geology**, 2001, 61(2-3): 163—180.
- [9] 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.
- [10] POPP T, KERN H. Monitoring the state of microfracturing in rock salt during deformation by combined measurements of permeability and P- and S-wave velocities[J]. **Physics and Chemistry of the Earth Part a-Solid Earth and Geodesy**, 2000, 25(2): 149—154.
- [11] POPP T, KERN H, SCHULZE O. Evolution of dilatancy and permeability in rock salt during hydrostatic compaction and triaxial deformation[J]. **Journal of Geophysical Research-Solid Earth**, 2001, 106(B3): 4061—4078.
- [12] PEACH C J, SPIERS C J. Influence of crystal plastic deformation on dilatancy and permeability development in synthetic salt rock[J]. **Tectonophysics**, 1996 256(1-4): 101—128.
- [13] 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.
- [14] DIENES J K. Permeability, percolation and statistical crack mechanics. Issues in rock mechanics[M]// GOODMAN R E, HEUZE F E. New York: American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1982: 86—94.
- [15] GUEGUEN Y, DIENES J. Transport-properties of rocks from statistics and percolation[J]. **Mathematical Geology**, 1989, 21(1): 1—13.
- [16] SIMPSON G, GUEGUEN Y, SCHNEIDER F. Permeability enhancement due to microcrack dilatancy in the damage regime[J]. **Journal of Geophysical Research-Solid Earth**, 2001, 106(B3): 3999—4016.
- [17] SIMPSON G D H, GUEGUEN Y, SCHNEIDER F. Analytical model for permeability evolution in microcracking rock[J]. **Pure and Applied Geophysics**, 2003, 160(5-6): 999—1008.
- [18] ZHU W L, DAVID C, WONG T. Network modeling of permeability evolution during cementation and hot isostatic pressing[J]. **Journal of Geophysical Research-Solid Earth**, 1995, 100(B8): 15451—15464.
- [19] ZHU W L, WONG T F. Permeability reduction in a dilating rock: Network modeling of damage and tortuosity[J]. **Geophysical Research Letters**, 1996, 23(22): 3099—3102.

- [20] ZHU W L, WONG T F. Network modeling of the evolution of permeability and dilatancy in compact rock[J]. **Journal of Geophysical Research-Solid Earth**, 1999, 104(B2): 2963—2971.
- [21] 梁冰, 高红梅, 兰永伟. 岩石渗透率与温度关系的理论分析和试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(12): 2009—2012.
LIANG Bing, GAO Hong-mei, LAN Yong-wei. Theoretical analysis and experimental study on relation between rock permeability and temperature[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(12): 2009—2012.
- [22] 刘均荣, 秦积舜, 吴晓东. 温度对岩石渗透率影响的实验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(4): 51—53.
LIU Jun-rong, QIN Ji-shun, WU Xiao-dong. Experimental study on relation between temperature and rocky permeability[J]. **Journal of University of Petroleum, China**, 2001, 25(4): 51—53.
- [23] SOMERTON W H, MEHTA M M, DEAN G W. Thermal alteration of sandstones[J]. **Journal of Petroleum Technology**, 1965, 17(5): 589.
- [24] BALBERG I, ANDERSON C H, ALEXANDER S, et al. Excluded volume and its relation to the onset of percolation[J]. **Physical Review B**, 1984, 30(7): 3933—3943.
- [25] CHARLAIX E, GUYON E, RIVIER N. A criterion for percolation-threshold in a random array of plates[J]. **Solid State Communications**, 1984, 50(11): 999—1002.
- [26] 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.

上接第 3573 页

- LANG Wei-guo, ZHAO Yang-sheng, LI Zhi-ping. The coupled mathematical model and numerical simulation of hydraulic fracturing and dissolving in rock salt[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 25(4): 427—430.
- [8] 汤艳春, 周辉, 冯夏庭, 等. 应力作用下岩盐的溶蚀模型研究[J]. 岩土学报, 2008, 29(2): 296—302.
TANG Yan-chun, ZHOU Hui, FENG Xia-ting, et al. Study on dissolving model under effect of stress for rock salt[J]. **Rock And Soil Mechanics**, 2008, 29(2): 296—302.
- [9] 王让甲. 声波岩石分级和岩石动弹性力学参数的分析研究[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 13—19.
- [10] 蔡忠理. 岩土声学特性研究的回顾与展望[J]. 岩土力学, 1989, 10(3): 20—24.
CAI Zhong-li. Review and prospect for the research on acoustic characteristics of rock and soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1989, 10(3): 20—24.
- [11] 韩放, 纪洪广, 张伟. 单轴加卸荷过程中岩石声学特性及其与损伤因子关系[J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(5): 452—455.
HAN Fang, JI Hong-guang, ZHANG Wei. Relationship between the acoustic characteristics and damage variable in the process of uniaxial loading and unloading[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2007, 29(5): 452—455.
- [12] 尤明庆, 苏承东, 李小双. 损伤岩石试样的力学特性与纵波速度关系研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 458—467.
YOU Ming-qing, SU Cheng-dong, LI Xiao-shuang. Study on relation between mechanical properties and longitudinal wave velocities for damaged rock samples[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(3): 458—467.
- [13] 刘新荣, 姜德义, 余海龙, 等. 岩盐变形特性的试验研究[J]. 矿冶工程, 1999, 19(2): 12—15.
LIU Xin-rong, JIANG De-yi, YU Hai-long, et al. The experiment study of rocksalt's deformation characteristics[J]. **Mining and Metallurgical Engineering**, 1999, 19(2): 12—15.
- [14] KAWAMOTO T. Deformation and fracturing behavior of discontinuous rock mass damage mechanics theory[J]. **International Journal of Numerical Analysis Method in Geomechanics**, 1988, 12(1): 1—30.