

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2017.01.13

不同泥质含量砂岩三轴渗透试验研究

周 祥

(重庆水利电力职业技术学院, 重庆 402160)

摘要: 为探讨三向应力状态下不同泥质胶结物含量砂岩渗透力学性能的异同,对泥质含量分别为 4%、15%、24%、31% 的 4 组不同泥质含量砂岩进行了三轴压缩渗透试验。试验结果表明:砂岩的强度和弹性模量随着泥质胶结物的增加呈幂函数型减小,随围压的升高而增大,内摩擦角和黏聚力随含泥量增加而逐渐减小;相同围压和泥质含量下,渗透性随加载应力的增大呈先减小后增大、再略微减小的整体趋势,渗透系数在峰值应力附近达到最大值;相同围压和偏应力下,渗透系数随泥质胶结物含量的升高而呈线性减小;同等泥质含量和偏应力下,砂岩的渗透性随围压的升高呈对数型函数减小。基于试验结果,分析得到了一种综合考虑围压、孔隙度以及泥质含量影响的砂岩综合渗透模型,并通过理论与试验数据对比分析验证了模型的合理性。

关键词: 砂岩;泥质含量;三轴;渗透;模型

中图分类号: TU458⁺.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2017)01-0084-07

An experimental study on permeability of sandstone with different shale contents under 3-D stress conditions

ZHOU Xiang

(Chongqing Water Resources and Electric Engineering College, Chongqing 402160, China)

Abstract: In order to examine the difference in permeability and mechanical properties of sandstones in the three direction stress state, the permeability tests are carried out on shale contents of 4%, 15%, 24% and 31%. The research results show that the strength and elastic modulus of sandstones decrease with the increasing clay cement, and decrease with the increasing confining pressure, and the internal friction angle and cohesive force decrease with the increasing clay content. Permeability with increasing stress decreases first and then increases again slightly in the overall trend under the same confining pressure and clay contents, and the permeability coefficient in the peak stresses near the maximum. The permeability coefficient decreases linearly with the increasing contents of the cement under the same confining pressure and the partial stress. The permeability of sandstones decreases with the increasing confining pressure. Based on the experimental results, a comprehensive model of sandstone permeability considering confining pressure, porosity and shale content is obtained. The rationality of the model is verified by the comparison of the theoretical and experimental data.

Keywords: sandstone; shale content; triaxial; permeation; model

砂岩是现代水利、交通、矿井、油气探井等工程中最常见的一种岩石之一,而渗透特性对工程的安全

和稳定具有重要影响,因此砂岩的渗透性能历来受到众多专家学者的关注和研究。

收稿日期: 2016-08-30; 修订日期: 2016-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51378521);重庆市科委重点基金项目资助(CSTC2013JJB0005)

第一作者: 周祥(1986-),男,讲师,主要研究方向为水利施工技术、建筑材料、工程项目管理。E-mail: luoxiacnm@163.com

张守良等^[1]、郭琴等^[2]研究了砂岩、泥岩等变形破坏过程中渗透率随荷载的变化规律,并对其影响因素进行了探讨,同时建立了渗透率与应力之间的关系式;王小江等^[3]利用三轴耦合试验机进行粗粒砂岩不同围压条件下变形破坏过程的渗流试验,分析了粗粒砂岩变形破坏过程中渗透性变化规律和围压对于粗粒砂岩渗透性质的影响,通过理论推导了渗透系数与体积应变的关系;张渊等^[4]分析探讨了温度和孔隙压力对细砂岩渗透率的影响规律,认为渗透率同时存在门槛值温度和孔隙压力门槛值;邹航等^[5]探讨分析了砂岩粒度对力学行为和渗透特性的影响;杨建等^[6]则根据孔隙结构参数建立描述砂岩孔隙结构的分形几何模型,分析松散地层孔隙结构的分形特征,并进行了多孔介质渗透率的实验测量和分形计算。

砂岩的渗透性能不仅与应力环境、温度、粒径大小等因素相关,也与自身的成分含量有关,其中,泥质胶结物含量的多少也直接影响着砂岩的渗透性。在测井钻探技术研究当中,重点研究了泥质含量对砂岩孔隙度、电阻率、弹性模量等的影响。李智武^[7]等对川东地区不同类型砂岩进行了实验分析,认为随着岩石中泥质含量和孔隙度的降低,以及石英类碎屑含量的增加,岩石抗压强度和杨氏模量均增加,而泊松比的变化较为复杂;沈建国^[8]通过理论计算发现,砂岩的分散泥质含量 E 对 $\Delta t - \phi$ 关系的影响不大,由声波测井时差 Δt 仍能较精确地计算砂岩的孔隙度 ϕ ;杜超等^[9]探讨了利用泥质含量及孔隙度的关系来计算砂岩的渗透特性,得到了基于泥质含量和孔隙度的渗透模型;韩志勇等^[10]通过改变砂样中的黏土矿物的种类和含量结合咸淡水之间的单一和驱替实验,研究不同黏土矿物的水敏性特征。Ma rion. D 等^[11]则分析了泥质含量对砂岩声速、孔隙度以及渗透率的影响,并建立了其相互之间的模拟关系。

上述研究成果对于砂岩渗透性能的理解和工程运用具有一定的意义,但同一地区的砂岩,由于其所处地层深度不同、以及孔隙度、泥质胶结物含量的差别,造成了砂岩各项力学性质特别是渗透特性变化较大,同一地层深度下的砂岩会因孔隙度、泥质含量不同而各异,而相同泥质含量和孔隙度的砂岩也会受地层深度的影响。因此,本文在上述研究成果的基础上,选取 4 组不同泥质含量的砂岩进行了不同应力环境下的三轴渗透试验,力求得到泥质胶结物含量、孔隙度以及围压大小与砂岩渗透特性之间的相互关系,为油气、矿井、水电工程等的建设提供一定的基础数据和理论指导。

1 试验概况

1.1 试验试件

试件取自某水电工程厂房地 100 ~ 120m 处,中等粒径颗粒占 80% 以上,属灰黑色沉积纹理砂岩,通过 D/Max-3B 型 X 射线衍射仪分析得到砂岩的主要成分为石英、长石、方解石、泥质胶结物等,根据泥质胶结物含量将其分为 4 组(表 1)。通过试验分析,得到 4 组砂岩的孔隙率依次为: 3.7%, 7.8%, 11.2% 以及 17.8%。将现场取回的岩芯按《工程岩体试验方法标 GB/T50266—99》^[12]通过钻、切、磨的方法加工成 $\varphi 50 \text{ mm} \times H100 \text{ mm}$ 的标准圆柱形试件。

表 1 成分含量分析结果

Table 1 Composition content analysis results

结构物	矿物成分	1 组	2 组	3 组	4 组
碎屑物	石英	63	66.3	64.2	63.5
	长石	1.5	1.7	1.5	2.7
	锆石	2.7	1	2.4	1.8
	锐钛矿	0.8	1	1.9	2
胶结物	方解石	1	15	16	26
	泥质	31	24	15	4

1.2 试验方案

试验共设 5, 10, 15, 20 MPa 等 4 个围压,整个应力-应变全过程中,渗透点选取采用等加载应力差的测试方式,在峰前每隔 10 MPa 进行 1 次测试,并在峰值应力处进行 1 次渗透测试,峰后视情况进行 2 ~ 3 次测试。每次渗透测试时上下两端初始压差均为 1 MPa,围压加载速率为 3 MPa/min,荷载加载速率为 60 kN/min。

2 试验结果及分析

2.1 强度变形特征分析

渗透试验得到砂岩的应力-应变曲线见图 1,其中 $\sigma_1, \sigma_3, \varepsilon_1$ 分别表示试样的主应力、围压以及轴向应变。从图 1 中可以看出,砂岩在三维应力状态下的变形过程包括压密阶段、弹性变形阶段、塑性变形阶段以及峰后残余阶段等 4 个阶段。相同泥质含量下,随着围压的升高,砂岩的变形能力逐渐增强,塑性变形特征越明显,破坏时达到的轴向应变有逐渐增大的趋势,而破坏方式也逐渐由脆-延性向延性破坏特征转变,并呈典型的剪切破坏特征。

分析得到砂岩的峰值应力 σ_1 、弹性模量 E 、内摩擦角 φ 以及内聚力 c 的变化曲线见图 2。从图 2a 中可以看到,泥质含量一定时,砂岩的抗压强度随围压的升

高而呈线性增大;围压、石英等碎屑物含量和胶结物含量一定的情况下,泥质胶结物含量越高,砂岩强度越低,这是因为泥质物本身的强度较其它物质低,也说明了其与其他物质之间的相互胶结力较弱。从图 2b 中可以看到,砂岩的弹性模量表现出与强度一致的规律性,即随围压升高而呈线性增长,随泥质含量增高而增大。从图 2c 可以看到,砂岩的内摩擦角和内聚力均随泥质含量的升高而逐渐减小,这也说明了泥质胶结物相对于方解石而言,与其它物质成分的胶结连接力及与其它颗粒之间的摩擦力较小,因此内摩擦角和内聚力随泥质胶结物升高而降低。

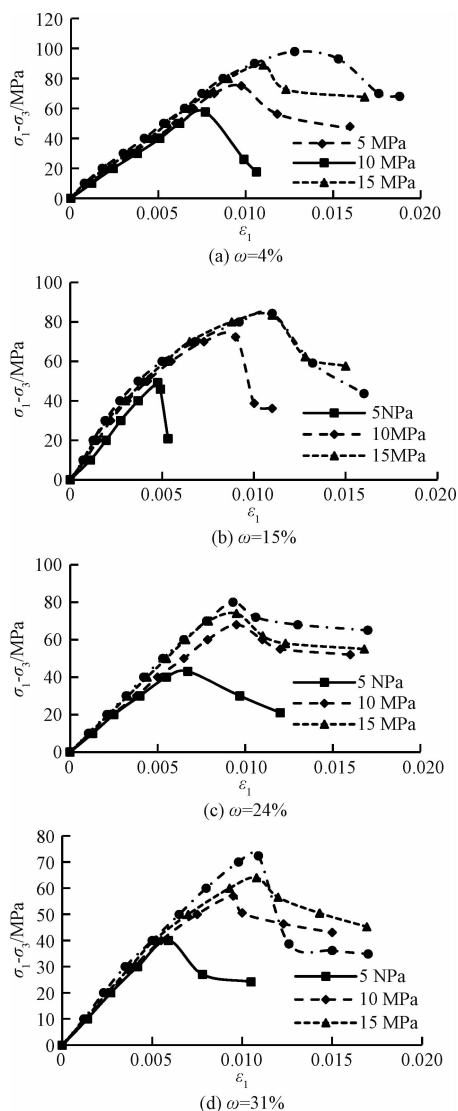


图 1 应力-应变曲线
Fig. 1 Stress strain curve

2.2 渗透特性分析

2.2.1 随加载应力的变化分析

相同泥质含量和围压下砂岩渗透率变化特征见图

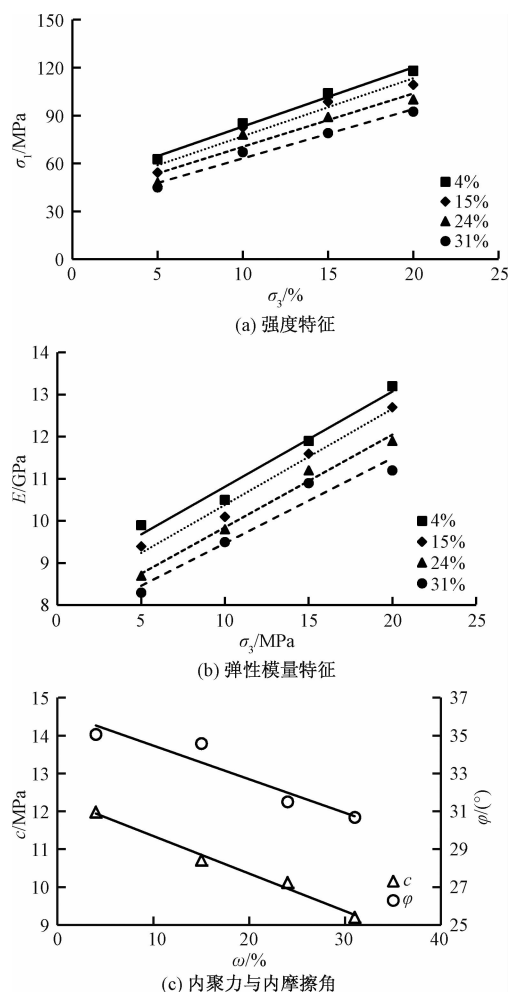


图 2 强度及变形特征参数分析
Fig. 2 Analysis of strength and deformation characteristic parameters

3。从图 3 中可以看出,测试点的渗透率呈阶段性变化特征,即随加载偏应力的增大呈先减小后增大、再略微下降的过程。屈服阶段之前,砂岩的渗透率先是略有减小然后处于动态平衡之中,这一阶段渗流通道主要为砂岩的原始微裂隙、微裂纹,且由于砂岩初期的压密闭合作用使得渗透率相对于加载前略有减小;砂岩屈服过后,渗透率逐渐加大,并在破坏前快速增加,破坏后渗透率达到最大值,在这一阶段,新生裂纹逐渐产生并发展,水通过这些新生裂纹进行渗流,破坏后,大量裂纹贯通,形成宏观裂纹和裂隙,因此渗透性会显著增强;峰后阶段,渗透率略有减小,这主要是因为峰后阶段岩石内部应力重新分布,产生的破裂面在荷载作用下又被重新压密,且破坏时产生的碎屑和泥质颗粒会堵塞部分通道,同时由于峰后阶段采取应变控制的方式,使得轴向应力出现松弛现象,裂纹扩展速度变缓,因此,渗透率均出现一定的降低。

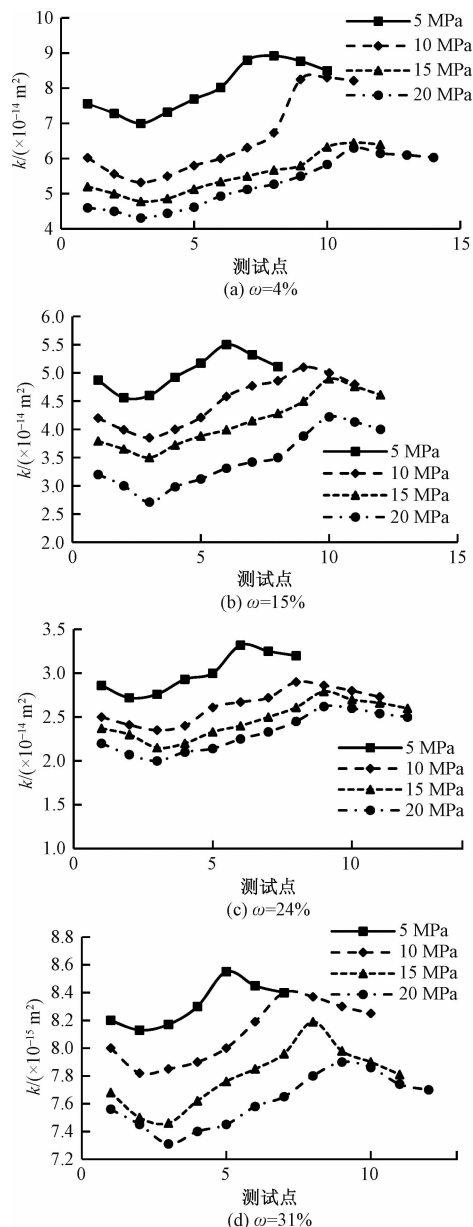


图3 渗透率随加载应力的变化特征

Fig. 3 Variation in permeability with loading stress

2.2.2 围压对渗透特性的影响

相同泥质含量及偏应力下(由于峰后对渗透率的影响因素更加复杂,文中仅考虑峰值应力前)砂岩的渗透系数随围压的变化特征见图4。从图4中可知,相同泥质胶结物含量在同一加载偏应力下,围压越大,渗透系数越小,且通过数据拟合发现,随着围压的升高,渗透系数呈对数型函数的形式减小,表明渗透性由于更大的侧向约束力使得砂岩试件内部结构更加致密而逐渐减小。加载偏应力前(围压加载过后),砂岩的渗透通道主要依靠原始微裂隙和微孔隙,但越大的围压会使得内部颗粒更大程度上被挤压密实,因此渗透

系数越低;试验加载过程中,由于存在更大的侧向约束力,使得试件内部的渗流通道的发展更为缓慢,因此渗透性也随围压增大而减小。

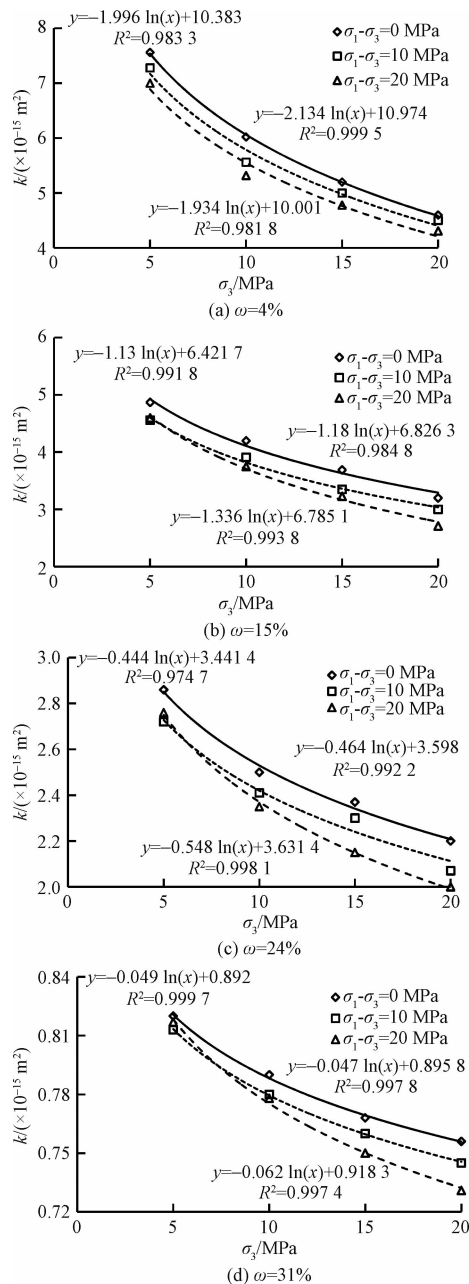


图4 渗透率与围压的变化关系

Fig. 4 Relationship between permeability and confining pressure

2.2.3 泥质含量对渗透特性的影响

为得到泥质胶结物含量对砂岩渗透特性的影响,分析得到了相同围压和偏应力下不同泥质含量砂岩的渗透率大小对比见图5(限于篇幅,文中仅选取列出围压5 MPa,偏应力0 MPa以及围压15 MPa,偏应力10 MPa的情况进行说明)。从图5中可以看到,相同应

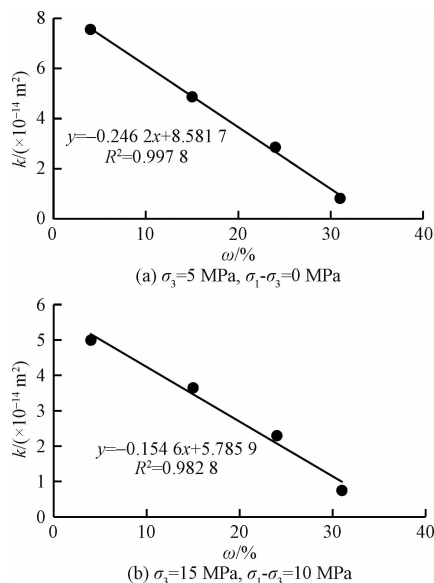


图5 渗透率与泥质含量的关系曲线

Fig. 5 Relationship between permeability and shale content

力环境下,泥质含量越高,砂岩的渗透系数越小,抗渗性越好。由于泥质胶结物颗粒较细,与其它物质相互胶结形成的渗透通道更细小,泥质胶结物对渗流通道的阻塞作用越明显,而砂岩内部颗粒间排列越紧密使得孔隙度越低,因而砂岩的渗透性越小。文献[9]通过大量的理论分析认为,处于同一层面(即所处应力环境基本一致)的砂岩,其渗透率、孔隙度以及泥质含量之间存在如下关系:

$$k = a \cdot \left(\frac{\phi}{\omega} \right)^b \quad (1)$$

式中: a, b ——经验系数;

ϕ ——孔隙度;

ω ——泥质胶结物含量。

从式(1)中可以看到,泥质含量越高,孔隙度越低,渗透系数越小,这与本文得出的结果相似。

2.2.4 考虑围压影响的砂岩渗透经验模型

通常而言,围压大小随地层深度的增加而增大,从上述试验研究结果可以看出,砂岩的渗透特性不仅与孔隙度、泥质含量等相关,还与围压大小相关,因此在前人研究基础上,认为砂岩的渗透性是关于三者的关系函数,即:

$$k = f(\sigma_3, \phi, \omega) \quad (2)$$

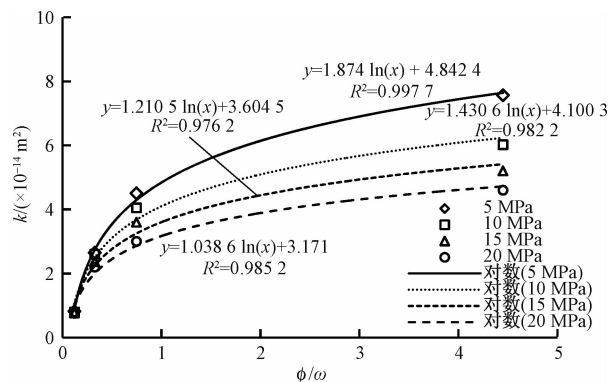
式中: σ_3 ——围压大小。

为得到渗透系数的具体的表达式,首先将围压进行固定,然后再借鉴文献[9]思路,得到了初始渗透率 k_0 与 ϕ/ω 的关系(图6),从图6中分析可以看到,本

次试验砂岩在同一围压下的渗透性 k 与 ϕ/ω 呈良好的对数型函数关系,相关系数 R 均大于0.98,即可简单表述为:

$$k_0 = c \ln\left(\frac{\phi}{\omega}\right) + d \quad (3)$$

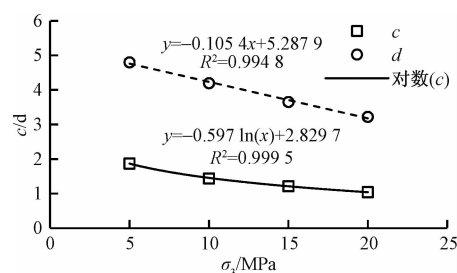
式中: c, d ——与围压相关的经验常数。

图6 k 与 ϕ/ω 的关系Fig. 6 Relationship between k and ϕ/ω

经验常数 c, d 与围压的关系见图7,从图7中可以看到, c 随着围压的升高呈良好的对数型函数降低,而 d 则随围压呈线性减小,相关系数均大于0.99。因此,可建立起考虑围压、泥质含量及孔隙度大小等综合因素影响的渗透归一化经验模型,即:

$$k_0 = (\alpha \ln(\sigma_3) + \beta) \cdot \ln\left(\frac{\phi}{\omega}\right) + \lambda \sigma_3 + \eta \quad (4)$$

式中: $\alpha, \beta, \lambda, \eta$ ——与围压相关的经验常数。

图7 渗透经验常数 c, d 与 σ_3 的关系Fig. 7 Relationship between infiltration experience constant c, d and σ_3

为验证本经验理论模型的合理性,以定围压(5 MPa)及一定泥质含量、孔隙度($\phi/\omega = 0.325$)下试验所测砂岩初始渗透率大小与理论经验模型预测渗透率大小的对比值(图8)。从图8中可以看到,理论预测值与试验值相差较小,误差均不到5%,表明本文通过试验及理论分析分析建立的综合渗透经验模型具有一定的准确性和可靠性。

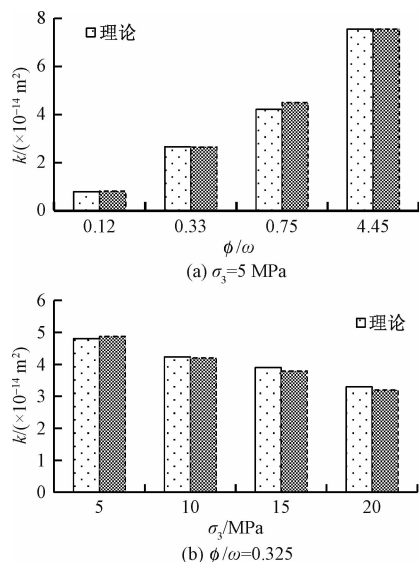


图8 模型理论值与试验值对比

Fig. 8 Comparison of the theoretical and experimental values of the model

本渗透理论经验模型不仅考虑了孔隙度、泥质含量对砂岩渗透的影响,还将围压大小考虑到渗透模型当中,得到了考虑地层深度因素影响的渗透经验模型,能够促进各工程地区砂岩渗透性能的理论研究和工程运用。

3 结论

(1) 砂岩的强度和弹性模量随泥质含量的升高而降低,随围压的增大而增大;内聚力和内摩擦角随泥质含量的升高而呈线性减小。

(2) 砂岩的渗透性随加载应力的增加呈先减小后增大、再略微减小的整体趋势;相同加载应力和泥质含量下,围压越大,渗透率呈对数型函数减小;同等围压和加载应力时,渗透率随泥质含量增高而呈线性减小。

(3) 在前人研究基础上,得到了一种考虑孔隙度、泥质含量及地层深度(围压)影响的砂岩的综合渗透模型,该模型能够较为准确模拟得到各地层深度、泥质含量及孔隙度下砂岩的渗透率大小。

参考文献:

[1] 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(增刊1): 885-888. [ZHANG S L, SHEN C, DENG J G. 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(Sup 1): 885-888. (in Chinese)]

[2] 郭琴, 张金功, 王永诗, 等. 泥质岩和砂岩渗透率特征及其影响因素初步分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2008, 44(增刊1): 46-48. [GUO Q, ZHANG J G, WANG Y S, et al. Characteristics of permeability of shale and sandstone and preliminary analysis of its influence factors [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Science edition), 2008, 44(Sup 1): 46-48. (in Chinese)]

[3] 王小江, 荣冠, 周创兵. 粗砂岩变形破坏过程中渗透性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(增刊1): 2940-2947. [WANG X J, RONG G, ZHOU C B. Permeability experimental study of gritstone in deformation and failure process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(Sup1): 2940-2947. (in Chinese)]

[4] 张渊, 赵阳升, 万志军, 等. 不同温度条件下孔隙压力对长石细砂岩渗透率影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(1): 53-58. [ZHANG Y, ZHAO Y S, WAN Z J, et al. Experimental study on the effect of pore pressure on the permeability of feldspar fine sandstone under different temperature conditions [J]. Journal of rock mechanics and engineering, 2008, 27(1): 53-58. (in Chinese)]

[5] 邹航, 刘建锋, 边宇, 等. 不同粒度砂岩力学和渗透特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(8): 1462-1468. [ZOU H, LIU J F, BIAN Y, et al. Experimental study on mechanical and permeability properties of sandstone with different granularities [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(8): 1462-1468. (in Chinese)]

[6] 杨建, 陈家军, 杨周喜, 等. 松散砂粒孔隙结构、孔隙分形特征及渗透率研究[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(3): 93-98. [YANG J, CHEN J J, YANG Z X, et al. A study of pore structure, pore fractal feature and permeability of unconsolidated sand [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35(3): 93-98. (in Chinese)]

[7] 李智武, 罗玉宏, 刘树根, 等. 川东北地区地层条件下致密储层力学性质实验分析[J]. 矿物岩石, 2005, 25(4): 52-60. [LI Z W, LUO Y H, LIU S G, et al. The experimental analysis of mechanical properties of compact reservoir rocks under formation conditions Northeast of Sichuan Basin, China [J]. Mineral Rocks, 2005, 25(4): 52-60. (in

- Chinese)]
- [8] 沈建国. 分散泥质含量 E 对 $\Delta - \varphi$ 关系的影响 (砂岩) [J]. 地球物理测井, 1990, 14 (1): 54 - 55. [SHEN J G. Dispersed shale content E of $\Delta \varphi$ relationship (sandstone) [J]. Geophysical Logging, 1990, 14 (1): 54 - 55. (in Chinese)]
- [9] 杜超, 陈嵘, 赵立帅, 等. 利用泥质含量与孔隙度计算砂岩渗透率 [J]. 科技资讯, 2013 (8): 130. [DU C, CHEN R, ZHAO L S, *et al.* Calculation of permeability of sandstone [J]. Technology Using Shale Content and Porosity, 2013 (8): 130. (in Chinese)]
- [10] 韩志勇, 郑西来, 陈继红. 不同粘土矿物水敏性特征 [J]. 水文地质工程地质, 2008, 35 (1): 80 - 82. [HAN Z Y, ZHENG X L, CHEN J H. Water sensitivity characters of different clay minerals [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35 (1): 80 - 82. (in Chinese)]
- [11] Ma rion D, 雍世和. 砂岩, 泥岩和泥质砂岩中声速, 孔隙度, 渗透率和泥质含量间的模拟关系 [J]. 物探化探译丛, 1991 (6): 64 - 67. [Ma rion. D, YONG S H. Sandstone, mudstone and argillaceous sandstone velocity, porosity, permeability and [J]. Geophysical Simulation of Shale Content Between Geochemical Series, 1991 (6): 64 - 67. (in Chinese)]
- [12] GB/T50266—99 工程岩体试验方法标准 [S]. 1999. [GB/T50266—99 Standard for tests method of engineering rock masses [S]. (in Chinese)]
- 责任编辑: 张明霞
-
- (上接第 83 页)
- [9] 高博, 张鸿儒. 邯郸与太原两地粉土动力特性的试验研究 [J]. 工程地质学报, 2008, 16 (4): 502 - 506. [GAO B, ZHANG H R. Cyclical tri-axial tests for dynamic modulus characteristics of silty soils at six sites in Handan and Taiyuan [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16 (4): 502 - 506. (in Chinese)]
- [10] 国胜兵, 王明洋, 钱七虎. 饱和砂土爆炸液化特性研究 [J]. 岩土力学, 2007, 28 (3): 427 - 435. [CUO S B, WANG M Y, QIAN Q H. Study on characteristics of explosion liquefaction of saturated sandy soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (3): 427 - 435. (in Chinese)]
- [11] 黄勇, 刘干斌, 祁良, 等. 不同温度下饱和软黏土应力路径试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2016, 43 (2): 83 - 87. [HUANG Y, LIU G B, QI L, *et al.* Experimental study of the stress path of saturated soft clay under different temperatures [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2016, 43 (2): 83 - 87. (in Chinese)]
- [12] 周建, 龚晓南. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化研究 [J]. 土木工程学报, 2000, 32 (5): 62 - 68. [ZHOU J, GONG X N. Study on strain soften in saturated soft clay under cyclic loading [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 28 (3): 62 - 68. (in Chinese)]
- [13] 张茹, 涂扬举, 费文平, 等. 振动频率对饱和软土动力特性的影响 [J]. 岩土力学, 2006, 27 (5): 699 - 704. [ZHANG R, TU Y J, FEI W P, *et al.* Effect of vibration frequency on dynamic properties of saturated cohesive soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27 (5): 699 - 704. (in Chinese)]
- 责任编辑: 张明霞