

裂隙对压实膨胀土渗气性影响试验

袁俊平^{1,2}, 张 锋^{1,2}, 王启贵^{1,2}, 丁 巍^{1,2}

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了研究裂隙膨胀土渗气规律, 采用自行设计加工的气体渗透测试装置, 对人工制备裂隙膨胀土试样进行渗气试验。结果表明: 压实膨胀土中气体渗透符合达西定律; 试样完全切开且未夹纸条时, 试样中仍然存在贯通裂隙, 此时气体渗透系数相比压实膨胀土试样中的渗透系数提高了1倍; 土中裂隙的存在为气体运移提供便利通道, 改变气体原有运移路径, 形成“优势流”现象; 对比达西理论和非达西理论分析结果, 土体中出现贯通人工裂隙时, 采用非达西理论分析更合适。

关键词: 裂隙; 气体渗透; 优势流; 非达西理论

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2014)03-0034-05

The influences of fissure on gas permeability of the compacted expansive soil//YUAN Junping^{1,2}, ZHANG Feng^{1,2}, WANG Qigui^{1,2}, DING Wei^{1,2} (1. *Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China*; 2. *Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: A series of gas permeability tests were carried out in order to study its permeability on expansive soil with artificial fissures using self-designed and made apparatus. The results show that Darcy's law expresses the gas flow in the compacted expansive soil. When the soil sample is cut up completely, there is still a penetrated fissure within it that makes the permeability coefficient doubles. The fissures change the original gas flow path providing a convenient channel for it flows, consequently the "gas preferential flow" phenomenon could be observed in the fissured expansive soil. Comparing the theoretical analysis results of Darcy with that of non-Darcy, it is indicated that the non-Darcy theory is better than Darcy theory to analyze the gas permeability when there are artificial fissures in the soil.

Key words: fissure; gas permeation; preferential flow; non-Darcy theory

膨胀土是一种具有胀缩性、超固结性和裂隙性的特殊黏土。土中裂隙的产生一方面破坏土体结构,降低土体抗剪强度;另一方面,为雨水入渗提供便利通道,大幅度增加土体的渗透性,因此膨胀土裂隙形态以及渗透性研究成为日益紧迫的研究课题^[1]。然而膨胀土中裂隙遇水后形态会发生变化,这就使得测定裂隙膨胀土的渗水系数具有较大难度,考虑到渗气系数可以反映土体结构及渗水系数等^[2],因此通过渗气特性研究间接反映渗水特性,为裂隙膨胀土渗水特性研究提供了新思路。同时非饱和土渗气特性的研究能够完善非饱和土渗透理论,指导实际工程的开展,避免工程中气体(瓦斯)渗透引起的问题。

针对土体中气体渗透规律的研究,国外学者研

制出不同仪器,包括用于测定不同围压下渗气系数的三轴渗透仪、可同时测定渗气系数和渗水系数的三轴渗透仪等;同时也开展了一系列的试验研究,如在小压力梯度下分别测定土体中空气和水的渗透系数,发现当土体中含水率接近最优含水率时,渗气系数急剧下降;通过渗气试验比较了土体中注入和未注入水泥浆时的渗气特性,结果表明注入水泥浆后土体孔隙率发生变化,渗气系数急剧减小^[3,4]。

近年来国内学者也进行了大量试验,陈正汉等^[5-8]通过自制仪器,测定了不同土体的渗气系数,但裂隙对土体渗气性影响的研究尚不多见。本文对人工制备裂隙试样进行渗气试验,对比分析有无裂隙以及不同裂隙开展深度对土体渗气性的影响,研究气体在裂隙土体中运移的特点和规律,讨论达西

基金项目:国家自然科学基金(51008117);“十二五”国家科技支撑计划(2011BAB10B04)

作者简介:袁俊平(1975—),男,湖北麻城人,副教授,博士,主要从事非饱和土和堤坝工程研究。E-mail:yuan_junph@163.com

理论和非达西理论对人工裂隙试样气体运移规律的适用性。

1 试验方案

1.1 试验设备

借鉴 Matyas^[9]研制的渗气试验装置,自行设计加工的渗气试验装置如图 1 所示,主要包括供气系统、渗气系统和量测系统。供气系统主要由氮气瓶和气体缓冲装置组成;渗气系统由三轴压力室和试样组成;量测系统主要包括围压表,进气口、出气口压力测定 U 形管,气体体积量测系统等。气体体积流量通过排水法测得的体积流量换算而来,水的体积用量筒(最小刻度 5 mL)测定;试验时间用秒表(最小刻度 1 s)测定;U 形管液面高差用钢尺(最小刻度 1 mm)测量;试验温度用温度计(最小刻度 0.1℃)测量。

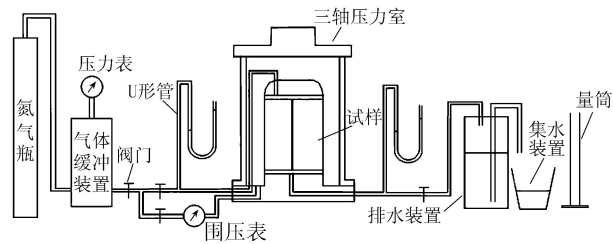


图 1 渗气试验装置示意图

1.2 试样制备及装样

试验用土为南水北调中线工程新乡潞王坟试验段膨胀土^[10],基本物理性能参数如下:塑限 19.2%,液限 42.7%,塑性指数 24,相对密度 2.74、自由膨胀率 57.5%、最大干密度 1.81 g/cm³。试样为直径 10.1 cm、高度 20 cm 的圆柱样,分 5 层击实,控制其初始含水率为 13%,干密度为 1.60 g/cm³。在对开模的保护下,用钢丝锯将击实好的试样小心地切开一定深度(5 cm、10 cm、20 cm),在土体中形成人工裂隙,完全切开后的试样(切开深度为 20 cm)见图 2。对完全切开的试样进行试验时,采用夹不同厚度纸条(宽度为 1 cm)的办法来控制裂隙宽度大小^[11],纸条厚度用游标卡尺(最小刻度 0.02 mm)测得。试验时

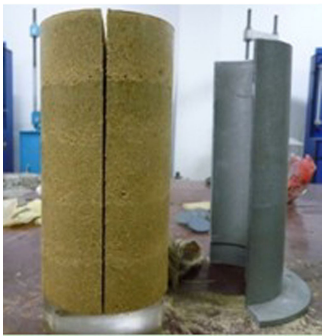


图 2 对切后的试样

用保鲜膜密封包裹纸条,以防试验时纸条吸水厚度发生变化。

装样时,在试样两端各加一个大约 5 mm 厚的圆环形垫片,见图 3。垫片是用几层硬纸板黏合修剪而成,其外径和试样直径相同,均为 101 mm,内径约为 90 mm。常规渗透试验多采用透水石或多孔板,本实验若采用透水石,则透水石两端面的压力不等,增大压力量测难度;若采用多孔板,则当较多孔对着裂隙时,渗气量较大,反之较小。采用圆环形垫片则可避免上述问题,可使试样上下表面形成圆形空腔,使气体均匀地从整个截面通过。

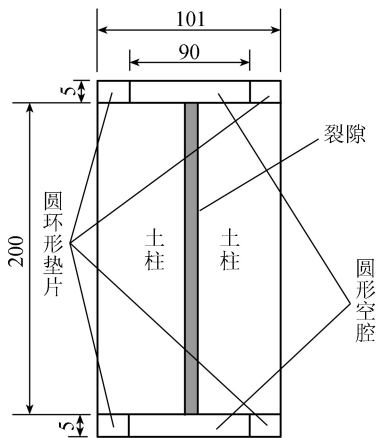


图 3 垫片安装示意图(单位:mm)

1.3 试验步骤

试验前先检查装置的通畅性,主要是防止进气孔、出气孔以及围压孔被堵塞,操作如下:首先不装试样而施加进气压和围压,观察是否有气体从进气孔以及围压孔排出;然后将进气管拔下而将出气管接到气源上,通气后观察排气孔是否有气体排出。其次检查装置的气密性,关闭出气口三通阀门、打开进气阀门和围压阀门,待围压以及进、出气口 U 形管液面差稳定后关闭进气阀门和围压阀门,一段时间后通过观察围压以及进、出气口 U 形管液面差是否发生变化来判断装置气密性是否良好。试验主要包括以下几个步骤:

步骤 1 将配好的含水率为 13% 的土制成干密度为 1.60g/cm³ 的中三轴圆柱样。

步骤 2 对制好的中三轴试样进行气体渗透试验,测量一定时间内通过试样的气体流量。

步骤 3 将试样分别切开 5 cm、10 cm 及 20 cm 进行气体渗透试验,测定不同裂隙深度时通过试样的气体流量。

步骤 4 改变裂隙宽度进行气体渗透试验,试验完成后用保鲜膜将试样进气端除裂隙外的部分密封起来,只允许气体通过裂隙通道,测得该裂隙宽度下的渗气量,并将同一裂隙宽度试样进气端密封与

未密封时所测流量进行对比。

由于整个试验过程都是在地下室进行,环境温度基本保持在 15℃ 左右,故数据处理时忽略了温度变化对试验结果的影响;试验中围压大小控制在 24 kPa 左右。

2 试验结果及分析

2.1 压实膨胀土渗气规律

采用达西理论对压实膨胀土的渗气性进行分析,按式(1)和式(2)计算气体流速 v 和压力梯度 i :

$$v = \frac{Q}{At} \tag{1}$$

$$i = \frac{\Delta P}{\rho_a g L} \tag{2}$$

式中: Q 为试验中所测气体流量, m^3 ; A 为试样进(出)气面面积, m^2 ; t 为试验时间, s ; ΔP 为压力差, kPa ; ρ_a 为氮气密度,取 1.25 kg/m^3 ; g 为重力加速度,取 10 m/s^2 ; L 为渗径, m 。

将膨胀土压实试样的渗气试验结果绘制于图 4 中,从中可以看出,试样气体流速与压力梯度呈线性关系,表明气体渗透符合达西定律,这与已有成果^[5]相一致。由 $v = ki$ 计算出此时渗气系数为 $k = 1.17 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。

2.2 贯通裂隙对气体运移的影响

将膨胀土完全切开试样的渗气试验结果也绘制于图 4 中,可以看出完全切开(未夹纸条,裂隙宽度为零)试样的气体流速与压力梯度也呈线性关系,表明此时气体渗透同样符合达西定律,计算出此时的渗气系数为 $2.97 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。与压实膨胀土试样渗气试验结果对比可见,试样完全切开后,即使未夹纸条,试样中仍然存在一条贯通裂隙,使得其渗气系数提高了 1 倍,由此可见,压实膨胀土中贯通裂隙的产生和发展对土体渗透性影响较大。

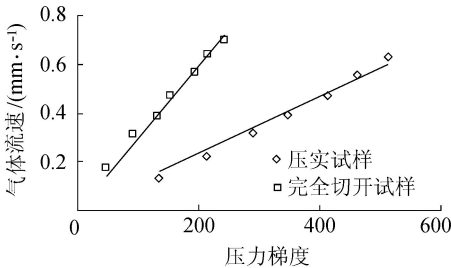


图 4 膨胀土不同试样渗气试验结果

当试样中出现贯通裂隙,此时土体中气体如何运移需通过图 5 来解释。图 5 给出了裂隙宽度为 0.2 mm 时试样进气端未密封与密封两种情况下试验结果的对比。可以看出,进气端未密封和密封时实测气体流量值随压力差的变化关系重合在同一条

曲线上,表明气体主要从裂隙通道中通过试样,裂隙的存在为气体运移提供便利通道,是土壤优势理论中所谓的“优势路径”,即流体整个绕过土壤基质,只通过少部分孔隙或裂隙快速运移,这与土壤中优势流路径起源于裂隙和大孔隙这一结论相一致^[12-13]。可见,优势理论也可用来解释和描述贯通裂隙试样中的气体渗透规律。

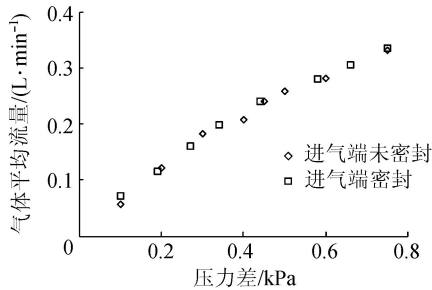


图 5 贯通裂隙试样中气体运移试验结果

2.3 裂隙深度对渗气规律的影响

按式(1)和式(2)计算气体流速和压力梯度,绘制不同裂隙深度试样的渗气试验结果(图 6)。由图 6 可以看出,不同裂隙深度试样的渗气规律仍符合达西定律,随着裂隙深度的增大,试样渗气系数逐渐增大(表 2)。这主要是由于随着裂隙深度增加,气体通过试样的实际渗径逐渐变小。值得注意的是,对比裂隙深度为零(即无裂隙时)以及裂隙深度为 10 cm 试样的渗气系数,可以看出,裂隙深度为 10 cm 时,尽管实际渗径减小了 1/2,然而其渗气系数并未增大 1 倍,实测结果偏小可能与裂隙面粗糙不平有关^[14]。

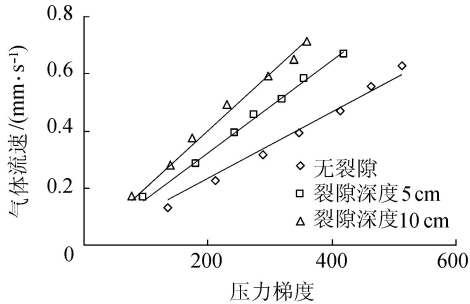


图 6 不同裂隙深度试样渗气试验结果

陈正汉等^[5]指出渗气系数与土的饱和度及密度有关。当试样中裂隙未贯通时,虽然裂隙深度发生改变,但对于相同饱和度和相同密度的试样,渗气系数理应保持不变。因此,这里对达西定律中的渗径进行修正,即采用实际渗径(试样高度减去裂隙深度)来计算,修正渗径后不同裂隙深度试样渗气试验结果如图 7 所示,修正前后的渗气系数对比列于表 2。可以看出,随着裂隙深度增加,渗径修正后试样渗气系数几乎保持不变,与前述理论分析一致。因此,采用达西理论分析裂隙未贯通试样的渗气规

律时,对渗径进行修正是有必要的。

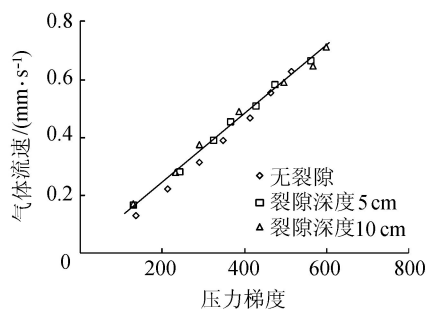


图 7 修正渗径后不同裂隙深度试样渗气试验结果

表 2 不同裂隙深度试样渗气系数值

裂隙深度/cm	渗气系数 $k/(10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})$	
	修正前	修正后
0	1.17	1.17
5	1.62	1.20
10	2.01	1.20

2.4 渗气试验的达西理论与非达西理论分析结果

对裂隙宽度为零(未夹纸条)和裂隙宽度为 0.2 mm 的贯通裂隙试样,分别用达西理论和非达西理论分析其试验结果。计算裂隙宽度为零的试样的渗气流速时,气体过流截面积按试样进气端面积计算;计算裂隙宽度为 0.2 mm 试样渗气流速时,按裂隙面积计算。非达西理论分析采用考虑气体压缩性的 Darcy-Forchheimer 修正的运动方程^[15-16],其表达式如下:

$$\frac{dP}{dl} = -\frac{\mu}{K}v - C_F \rho v^2 \tag{3}$$

式中: P 为气体压力,Pa; μ 为气体黏滞系数,Pa·s; ρ 为气体密度,kg/m³; C_F 为惯性系数,m⁻¹; K 为渗透率,m²。边界条件为: l 为零时, $P=P_1$; $l=L$ 时, $P=P_2$ 。经化简后得到:

$$y = ax + bx^2 \tag{4}$$

其中

$$y = \frac{P_1^2 - P_2^2}{2L}$$
$$x = Pv$$
$$a = \frac{\mu}{K}$$
$$b = \frac{C_F M}{RT}$$

式中: P_1 和 P_2 分别为出气口和进气口压力,kPa; M 为氮气相对分子质量,取 28; T 为气体温度,K; R 为气体常数,取 8 314 m²/(s²·K)。

a. 裂隙宽度为零。如前所述,试样完全切开且未夹纸条时裂隙宽度为零,其渗气规律符合达西定律。这里采用非达西理论对试验结果也进行分析整理,见图 8。由图 8 可以看出,用非达西理论也可较好地描述裂隙宽度为零时的试样渗气试验结果。按

式(3)和式(4)可计算得出该试样的渗透率 $K=4.86 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ 。根据渗透率 K 和渗透系数 k 之间的转化关系 $k=K \frac{\rho_a g}{\mu}$,可计算出渗透系数为 $2.70 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。这一计算结果与达西理论分析结果 $2.97 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 相近。可见,当裂隙宽度为零时,试样的渗气试验用达西理论和非达西理论分析差别不大。

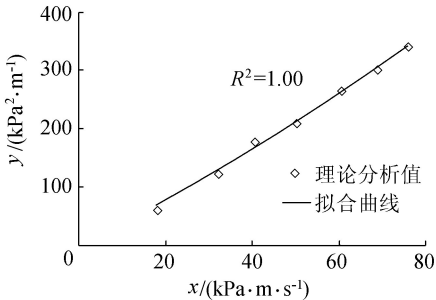
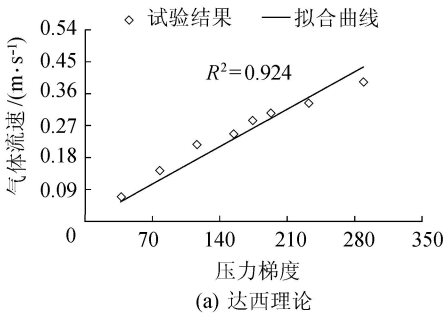
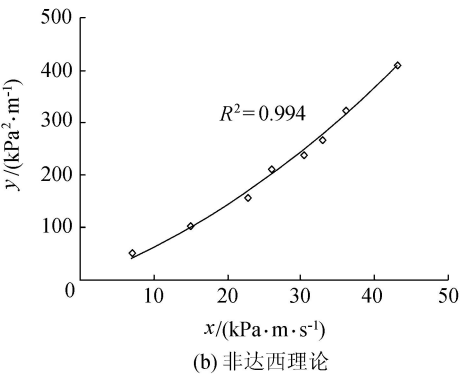


图 8 裂隙宽度为零时非达西理论分析结果

b. 裂隙宽度为 0.2 mm。图 9 分别给出了采用达西理论和非达西理论分析裂隙宽度为 0.2 mm 试样渗气试验结果的情况,可以看出,采用非达西理论分析试验结果时,拟合曲线与试验结果符合程度较采用达西理论分析时更好。李广悦等^[16]对松散破碎介质进行气体渗透试验,结果发现松散破碎介质气体渗透不符合达西定律而满足非达西定律,这主要是由于试验中气体流速较大,并且气体压缩性不可忽略所致。本文裂隙宽度为 0.2 mm 的试样进行试验时也满足类似的条件,因此采用非达西理论分析气体渗透规律可能更合适。



(a) 达西理论



(b) 非达西理论

图 9 裂隙宽度为 0.2 mm 时不同理论分析结果

3 结 论

a. 压实膨胀土气体渗透符合达西定律。

b. 当压实膨胀土中出现裂隙且裂隙未贯通时,试样中气体渗透同样符合达西定律,但采用达西理论分析时应考虑试样渗径的变化;压实膨胀土中出现贯通裂隙时,试样气体渗透系数会明显增大,此时膨胀土中的气体运移主要经过裂隙,呈现出典型的“优势流”现象。

c. 非达西理论比达西理论更适合描述贯通的人工裂隙试样的渗气规律。

参考文献:

- [1] 殷宗泽,袁俊平,韦杰,等.论裂隙对膨胀土边坡稳定的影响[J].岩土工程学报,2012,34(12):2155-2161. (YIN Zongze, YUAN Junping, WEI Jie, et al. Influence of fissuring on slope stability of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(12): 2155-2161. (in Chinese))
- [2] RATTAN L. Encyclopedia of soil science[M]. 2nd ed. Florida, USA: CRC Press, 2005.
- [3] 弗雷德隆德 D G, 拉哈尔佐 H. 非饱和土力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [4] SAIYOURI N, BOUASKER M, KHELIDJ A. Gas permeability measurement on injected soils with cement grout[J]. Cement and Concrete Research, 2008, 38: 95-103.
- [5] 陈正汉, 谢定义, 王永胜. 非饱和土的水气运动规律及其工程性质研究[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 9-20. (CHEN Zhenghan, XIE Dingyi, WANG Yongsheng. Experimental studies of laws of fluid motion, suction and pore pressures in unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(3): 9-20. (in Chinese))
- [6] 叶为民, 王初生, 王琼, 等. 非饱和黏性土中气体渗透特性[J]. 工程地质学报, 2009, 17(2): 244-248. (YE Weimin, WANG Chusheng, WANG Qiong, et al. Laboratory tests on the characteristics of air-permeation in unsaturated Shanghai soft soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(2): 244-248. (in Chinese))
- [7] 王勇, 孔令伟, 郭爱国, 等. 杭州地铁储气砂土的渗气性试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 815-819. (WANG Yong, KONG Lingwei, Guo Aiguo, et al. Experimental research on gas permeability of shallow gassy sand in Hangzhou metro project[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 815-819. (in Chinese))
- [8] 苗强强, 陈正汉, 张磊, 等. 非饱和黏土质砂的渗气规律试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3746-3750. (MIAO Qiangqiang, CHEN Zhenghan, ZHANG Lei, et al.

Experimental study of gas permeability of unsaturated clayey sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3746-3750. (in Chinese))

- [9] MATYAS E L. Air and water permeability of compacted soils[J]. Permeability and Capillary of Soils, 1967, 417: 160-175.
- [10] 吴珺华, 袁俊平, 杨松, 等. 干湿循环下膨胀土胀缩性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2013, 33(1): 62-65. (WU Junhua, YUAN Junping, YANG Song, et al. Experimental study on swell-shrinking performance of expansive soil under wetting-drying cycles[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013, 33(1): 62-65. (in Chinese))
- [11] 肖正刚. 裂隙膨胀土气渗性研究[D]. 南京: 河海大学, 2011.
- [12] 徐绍辉, 张佳宝. 土壤中优势流的几个基本问题研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(4): 85-93. (XU Shaohui, ZHANG Jiabao. Study on foundational problems on preferential flow in soils[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1999, 5(4): 85-93. (in Chinese))
- [13] MERDUN H. Types and modeling of preferential flow[J]. KSU Journal of Science and Engineering, 2005, 8(1): 76-83.
- [14] 陈冰雁, 姚朝晖, 何枫, 等. 表面粗糙度对微细管内气体流动特性的影响[J]. 应用力学学报, 2003, 20(3): 1-5. (CHEN Binyan, YAO Zhaozhui, HE Feng, et al. The effects of surface roughness on the gas flow in microchannels[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2003, 20(3): 1-5. (in Chinese))
- [15] 孔祥言. 高等渗流力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.
- [16] 李广悦, 丁德馨, 张志军, 等. 松散破碎介质中气体渗流规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 791-798. (LI Guangyue, DING Dexin, ZHANG Zhijun, et al. Experimental study of laws of gas seepage in loose fragmented medium[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 791-798. (in Chinese)).

(收稿日期: 2013-07-28 编辑: 骆超)

