

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.05.011

非饱和含砂细粒土的气体渗透特性研究

彭尔兴^{1,2,3}, 孙文博^{1,2}, 章定文^{1,2,3}, 刘松玉^{1,2}, 朱小丹⁴

(1.东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2.东南大学 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096;
3.南京水利科学研究院 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210029; 4.安徽省电力设计院, 安徽 合肥 230601)

摘 要: 为了探讨非饱和含砂细粒土的气体渗透规律, 制备不同含水率和干密度试样进行气体渗透试验, 并基于多孔介质渗流理论分析进气压力、孔隙比和饱和度对气体渗透率的影响规律, 总结了非饱和土中渗透率的经验公式。试验结果表明, 随着进气压力的增加, 土样气体渗透率测试值逐渐趋于稳定值; 含水率较高时, 进气压力对土样气体渗透率的影响程度较大; 含水率较低时, 土样气体渗透率随进气压力增加而变化幅值较小。气体渗透率随土样含水率的增加(或饱和度的增加)呈减小趋势; 当含水率低于最优含水率时, 气体渗透率变化较小, 但当含水率大于最优含水率后, 气体渗透率急剧降低; 在最优含水率两侧, 土样微观结构的差异(絮凝结构和分散结构)是导致气体渗透率发生突变的主要原因; 气隙比可有效表征土体孔隙比与饱和度对气体渗透率的影响规律, 气体渗透率与气隙比呈良好的幂函数关系, 并采用已有文献中试验数据验证了经验公式的合理性。

关 键 词: 气体渗透率; 进气压力; 最优含水率; 饱和度; 气隙比

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2016)05-1301-07

Air permeability of unsaturated fine sandy soil

PENG Er-xing^{1,2,3}, SUN Wen-bo^{1,2}, ZHANG Ding-wen^{1,2,3}, LIU Song-yu^{1,2}, ZHU Xiao-dan⁴

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering and Environmental Safety, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

3. Key Laboratory of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-Rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing, Jiangsu 210029, China; 4. Anhui Electric Power Design Institute, Hefei, Anhui 230601, China)

Abstract: To investigate the gas permeability performance of unsaturated fine sandy soil, a series of samples with different moisture contents and different dry densities is prepared and air permeability tests are conducted. Based on the porous media permeation theory, the effects of inlet pressure, void ratio, saturation on the air permeability of samples are analyzed, and an empirical formulation of air permeability is proposed. The experimental results demonstrate that air permeability tends to a stable value with the increase of the inlet pressure. The effect of inlet pressure on air permeability is far more obvious for samples with high moisture content than for samples with low moisture content. The increases of moisture content or degree of saturation can result in a decrease in air permeability of sample. When the moisture content is lower than the optimum moisture content, the variation of the air permeability is negligible; however, a rapid decrease in air permeability is observed when the moisture content is higher than the optimum moisture content. The difference of soil microstructure (flocculation structure and dispersion structure) accounts for the air permeability mutation at the two sides of the optimum moisture content. Air void ratio can effectively represent the influence of void ratio and saturation on air permeability. A power function relationship well adapts the relationship of air permeability with air void ratio. Test dates from the literatures also demonstrate the effectiveness of proposed empirical formulation.

Keywords: air permeability; inlet pressure; optimum moisture content; saturation; air void ratio

收稿日期: 2014-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51578148); 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放研究基金(No. YK914021); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(No. 2242014R30020); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(SJLX_0091, KYLX15_0158); 江苏省高校“青蓝工程”优秀青年骨干教师培养对象项目资助。

This work was supported by the National Natural Science foundation of China(51578148), the Key Laboratory Program of Failure Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-Rock Dam of the Ministry of Water Resources(YK914021), the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2242014R30020), the Research Innovation Program funds for Jiangsu College Graduate(SJLX_0091, KYLX15_0158) and the Personnel Training Found for Outstanding Young Teacher of Qing-lan Project of Higher Education in Jiangsu Province.

第一作者简介: 彭尔兴, 男, 1986 年生, 博士研究生, 主要从事特殊地基处理与环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: 349438987@qq.com

通讯作者: 章定文, 男, 1978 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事交通岩土工程与环境岩土工程等方面教学与科研工作。E-mail: zhangdw@seu.edu.cn

1 引言

气体在非饱和土层中的渗透现象广泛存在于地下工程、环境工程等众多领域当中,如有机质污染土的曝气修复、垃圾填埋场中废气抽放、土体气压劈裂等均涉及气体渗透现象^[1-3]。国内外学者对土体内液体渗透率的研究已经比较成熟,但对气体渗透规律的研究较少。因此,对气体渗流问题的研究有着重要的理论与应用价值。

气体的渗流理论主要包括单相和两相渗流理论。单相渗流理论方面,达西定律是基础。气体在土体中的流动形式可以采用雷诺数 Re 进行分析,通常认为,当 $Re < 1$ 时,流动状态属于达西流动,压力梯度与流速之间呈线性关系;当雷诺数 $1 < Re < 10$ 时,流动状态转化为非达西流动,压力梯度与流速的关系转化为非线性。科林斯^[4]提出了考虑气体压缩性的达西公式。随后,一些学者在科林斯的研究基础上进行了拓展,如 Wu 等^[5]对考虑 Klinkenberg 效应的达西流进行研究,并给出了多孔介质中气体定常与非定常流动的解析解。

气体渗透率是评价多孔介质气体渗透性能的核心参数,影响多孔介质气体渗透性能的主要因素有多孔介质的材料性质、结构组成、孔隙大小、孔隙溶质和外界条件等因素^[6]。Vairogs 等^[7]分析了围压、孔压与饱和度对致密砂岩气体渗透率的影响。Loosveldt 等^[8]针对进入稳态的水泥砂浆,研究了气体、乙醇与水渗透率的差异,结果表明,气体的渗透率最高,乙醇次之,水最低,水的渗透率基本等于多孔介质的固有渗透率。任晓娟^[9]分析了不同饱和度下低渗透岩芯气体渗透规律,结果表明气体渗透率与岩芯的液体渗透率、饱和度与压力梯度密切相关,当饱和度小于 30% 且压力梯度小于达西流下限时,气体的流动受 Klinkenberg 效应影响显著;当饱和度大于 30% 时,气体的流态会表现为非达西形式,渗流曲线呈一段上凹型曲线。叶为民等^[10]研究了非饱和黏土中的气渗性,结果表明,在非饱和黏土中气体流速与压力平方差梯度之间的关系存在明显的分段特征,并存在启动压力平方差梯度与临界压力平方差梯度,指出在工程中主要考虑气体流速低于临界流速的情况。

从已有成果可以看出,前人对气体渗透规律的研究主要集中在低渗透率多孔介质,如致密砂岩和黏土等,但对高渗透率多孔介质的研究较少。气体渗透现象涉及不同类型土体。为了研究高渗透率土体的气体运移规律,本研究针对典型含砂细粒土,

采用室内试验方法对其气体运移规律进行研究,所获的相关渗透参数及气体运移规律为有机质污染含砂细粒土的曝气修复工程等提供指导。

2 试验材料与试验方法

2.1 试验材料

本次试验用土取自江苏省某加油站油库污染场地,对其进行含水率、界限含水率、颗分和击实等一系列常规试验,得到该土基本性质如表 1 所示,粒径分布曲线如图 1 所示。由表 1 可知,土样的细粒含量大于 50%,粗粒含量介于 25%~50% 之间,且无砾粒,依据《土的工程分类标准》^[11],定名为含砂细粒土,其最优含水率为 13.8%,最大干密度为 1.635 g/cm^3 。

表 1 试验所用土样的基本物理性质
Table 1 Physical properties of soil samples

塑限 /%	液限 /%	塑性指数	黏粒含量 /%	粉粒含量 /%	砂粒含量 /%
18.8	28.4	9.6	2.85	48.91	48.24

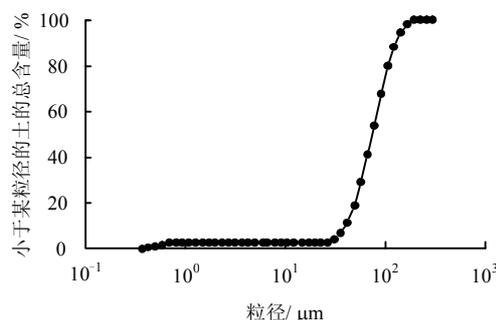


图 1 土样的粒径分布曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of soil sample

2.2 试验方法

气体渗透试验装置是在柔性壁渗透仪基础上改进的,该设备具有在试样两端加载气压并于出口端收集气体的功能。为实现恒定压差功能,在柔性壁渗透压力室的基础上,增加了气体注气系统和气体收集系统,如图 2 所示。试样为直径 5 cm、高度 10 cm 的圆柱形。

具体试验方案如表 2 所示。

首先采用静压法按照表 2 试验方案中的不同干密度 ρ_d 与含水率 w 制备试样。将试样装入柔性壁渗透的渗透压力室。为了防止气体从试样的侧壁与柔性薄间渗漏,所有试样的均施加恒定围压 400 kPa (大于所有进气压力)。进气压力由空气压缩机并通过稳压装置控制,出口端压力为大气压,气体收集

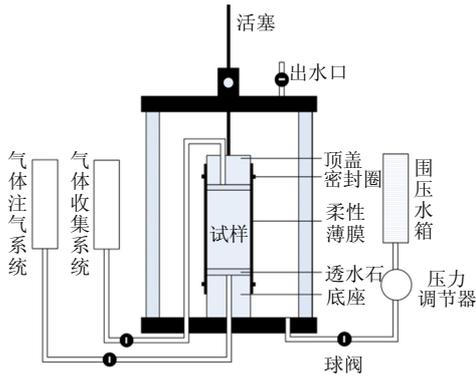


图 2 试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of experimental device

表 2 试验方案

Table 2 Programs of tests

干密度 ρ_d /(g/cm ³)	含水率 w /%	进气压力 P_A /kPa
1.40, 1.45	10, 14, 16	20, 40, 80
1.50, 1.55	18, 20, 22	160, 240

系统记录出口端气体的排出量，待其与时间的关系达到稳定之后，增加进气压力，循环上述试验步骤直至试验结束。试验过程中气体的排出量由气体收集系统的位移传感器获得。

参考文献[10]，气体渗透率的计算公式为

$$K = \frac{2P_B Q_B \mu L}{A(P_A^2 - P_B^2)} \quad (1)$$

式中： Q_B 为出气端的气体流量； μ 为空气黏滞系数，20 °C 下为 $1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ [12]； L 为试样长度； A 为试样的横截面积； P_A 与 P_B 分别为进气端与出气端的气体压力。

由于在试验过程中难以测得试样的干密度、孔隙比、含水率、饱和度和气隙比等参数的变化情况，若无特殊说明，文中相关的上述参数均为初始状态值。

3 试验结果分析与讨论

3.1 气体渗透率与进气压力的关系

围压相同条件下不同干密度试样气体渗透率与进气压力的关系典型曲线如图 3 所示。除干密度为 1.40 g/cm^3 且含水率为 10% 与 14% 的两个试样外，其余试样气体渗透率均随进气压力的增加而增加，并趋于稳定。该现象符合气体稳态试验的基本规律。稳态法是测定土体气体渗透率的经典方法，从饱和土样一端进阶加压，达到土体初始进气压力后，随着进气压力的增大，土体饱和度降低，每一

阶压力均对应一组饱和度与气体渗透率。进气压力逐渐增加时，气体渗透率逐渐增大，并最终趋于稳态的气体渗透率。进气压力达到 240 kPa 时，所有试样的气体渗透率趋于稳定，此时的气体渗透率可代表土体由稳态法测定的气体渗透率。

含水率不同时，进气压力对试样气体渗透率的影响程度也不同。含水率较低时（如 w 为 10% 和 14%），进气压力的变化对试样的气体渗透率影响较小；但随着含水率的增加（如 w 为 20% 和 22%），进气压力的变化对试样气体渗透率的影响程度增加。由结合水性质可知，强结合水具有极大的黏滞度，强结合水随孔隙中气体的渗流而迁移困难；但弱结合水离土颗粒表面距离较强结合水远，受到的电分子吸引力减弱，随进气压力的增加，试样孔隙中的自由水和一部分外层弱结合水随气体运移而带出，气体渗流的孔隙通道有效直径增大，气体渗透率增加。试样含水率越高，弱结合水与自由水越多，土样气体渗透率随进气压力的增加现象越明显。

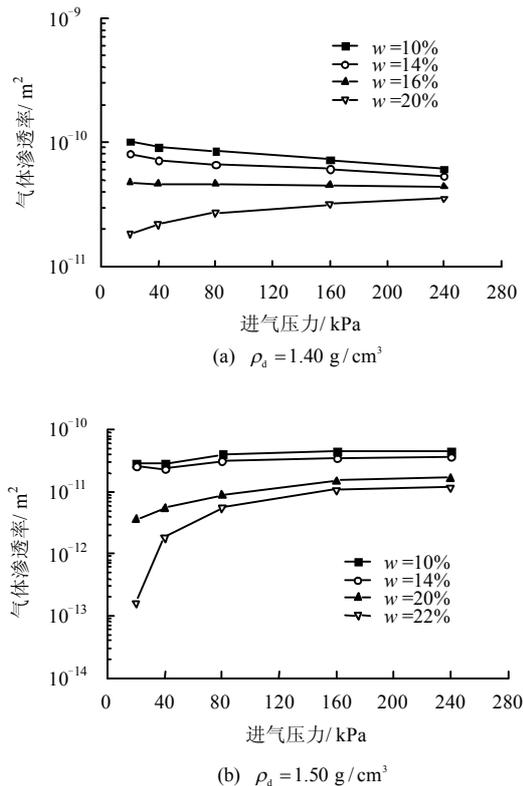


图 3 气体渗透率随进气压力的变化

Fig.3 Variation of air permeability with inlet pressure

干密度较小且含水率较低试样（ $\rho_d = 1.40 \text{ g/cm}^3$ 且 w 为 10%、14%）的气体渗透率随进气压力的增大而略有减小，这种现象可能是由于 Klinkenberg 效应引起的 [13]。Klinkenberg 效应亦称滑脱效应，是

指在单相流中气体不会在多孔介质孔隙表面形成附着层，导致靠近多孔介质孔隙表面的气体分子与孔道中心气体分子的流速几乎没有差别，所以多孔介质的气体渗透率明显地依赖于压力。Klinkenberg^[13]针对气体的滑脱现象提出了气体渗透率与平均流动压力的关系表达式：

$$K = K_{\infty} \left(1 + \frac{b}{p} \right) \quad (2)$$

式中： K_{∞} 为不可压缩流体的渗透率； p 为平均流动压力，且 $p = (P_A + P_B)/2$ ； b 为滑脱因子，表征气体和多孔介质自身性质的常数。

由式(2)可知，多孔介质的气体渗透率只与不可压缩流体的渗透率和平均流动压力有关，然而不可压缩流体的渗透率只与流体和多孔介质本身有关^[14]，所以平均流动压力成为影响气体渗透率的主要因素。由于上述试样的初始饱和度较低，在其内部可能存在一些未被水占据的细小通道，气体在细小通道中运移并与多孔介质的孔隙表面充分接触，滑脱效应明显。气体渗透率会随平均流动压力的增加而减小，若平均流动压力趋于无穷大，气体渗透率将会无限接近不可压缩流体渗透率。如图3(a)所示，进气压力达到240 kPa，气体渗透率基本趋于稳定。

由试验结果可知，气体渗透率不会随着进气压力的增大而无限增大或减小，而是趋于一个稳定值。在下面的分析中将此稳定值作为评价试样气体渗透性能的标准。

3.2 气体渗透率与孔隙比的关系

试验测得气体渗透率随土样干密度和孔隙比的变化规律如图4、5所示。结果表明，在含水率相同条件下，气体渗透率随着干密度的增加而减小，随孔隙比的增加而增加。

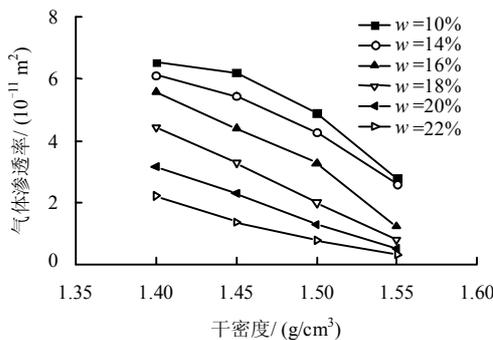


图4 气体渗透率随干密度的变化
Fig.4 Variation of air permeability with dry density

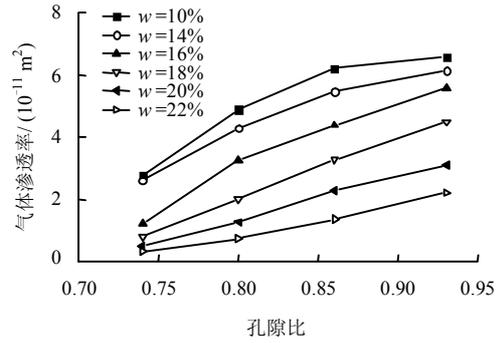


图5 气体渗透率随孔隙比的变化
Fig.5 Variation of air permeability with void ratio

固有渗透率是指当多孔介质中只有一种流体通过，且流体不与其发生任何物理化学反应时，允许流体通过的能力。多孔介质的固有渗透率与孔隙比和当量直径的函数存在如下正比关系^[15]：

$$k \propto D^2 \frac{e^2}{1+e} \quad (3)$$

式中： k 为土体的固有渗透率； e 为孔隙比； D 为颗粒的当量直径。由式(3)可见，固有渗透率只与孔隙比和颗粒的当量直径等多孔介质的本身特性有关，与流体性质并无关系；土体的固有渗透率会随孔隙比的降低而呈减小趋势。土体中存在一些具有连通性的孔隙通道，有外加气体压力梯度作用时，土体内气体沿连通的孔隙通道流动，若土体压实程度增大，即孔隙比减小后，土体的固有渗透率降低，原本连通的孔隙通道中有一部分被封闭，影响气体的流通，故导致气体渗透率的降低^[4]。

3.3 气体渗透率与饱和度的关系

图6为气体渗透率与含水率的关系。由图看出，在干密度相同条件下，当含水率低于最优含水率时，气体渗透率随含水率的增大而略有降低；当含水率超过最优含水率后，气体渗透率急剧减低，曲线斜率明显增大。

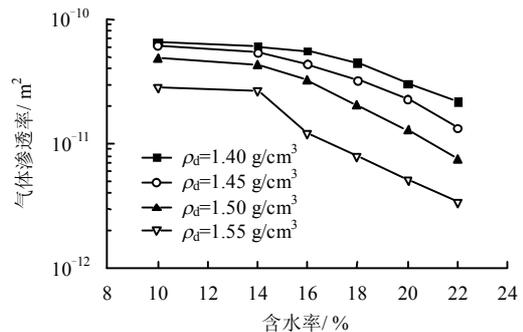


图6 气体渗透率随含水率的变化
Fig.6 Variation of air permeability with moisture content

气体渗透率与饱和度的关系如图 7 所示，气体渗透率随饱和度的增加而减小，在半对数据曲线上，二者近似呈折线关系。曲线弯折点出现在最优含水率附近。此现象是由最优含水率两侧压实土体微观结构差异引起的。当含水率低于最优含水率时，黏土颗粒吸着水膜较薄，颗粒间表现为净吸力，主要以面-边和面-角接触为主，土粒间呈任意排列，土体微观结构呈絮凝结构，孔隙连通性较好（如图 8 所示）。而含水率高于最优含水率时，黏土颗粒吸着水膜厚度增加，土粒间表现为净斥力，粒间以面-面接触为主，分散结构占主体，孔隙连通性差（如图 8 所示）。由于土体微观结构在最优含水率两侧发生突变，导致孔隙连通性的剧烈变化，进而造成土样气体渗透率在最优含水率两侧呈现不同变化规律。

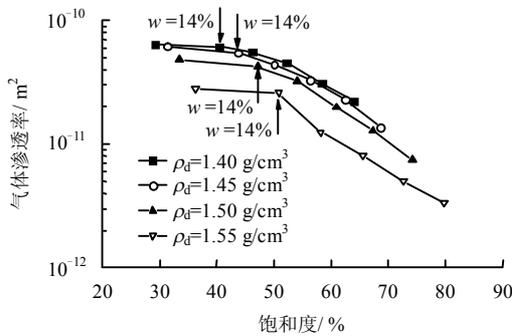


图 7 气体渗透率随饱和度的变化

Fig.7 Variation of air permeability with saturation

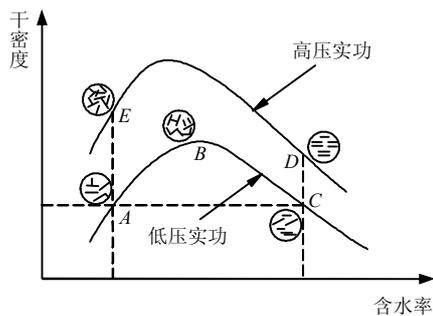


图 8 压实土微观结构与含水率的关系^[16]

Fig.8 Relationship of microstructure of compacted soils with moisture content

另外，土样气体渗透率随饱和度的增加而降低也与气体在孔隙中的存在形态有关。随着饱和度的降低，气体在孔隙内可以分为完全封闭、内部连通、部分连通和完全连通等 4 种不同的形态^[17-18]。完全封闭状态，土体本质上处于饱和状态；随着饱和度的降低，土体内部形成封闭气泡，并有一部分处于连通状态，此为内部连通状态；随着饱和度的继续

降低，土体进入部分连通状态，由内部连通的气体通道开始逐渐扩展形成贯穿土体的气相通道；在完全连通状态，土体内孔隙通道基本全部成为气相通道。

本试验中，随着饱和度的升高，原本连通的气相通道内的孔隙水增多，使气相通道的有效直径减小，直到饱和度升高到一定程度时，一部分连通的气相通道被孔隙水隔断，形成孤立的气泡，这些气泡比较稳定，只能随孔隙水的移动而运移，且运移速度急剧降低^[19]，造成气体渗透率的降低。

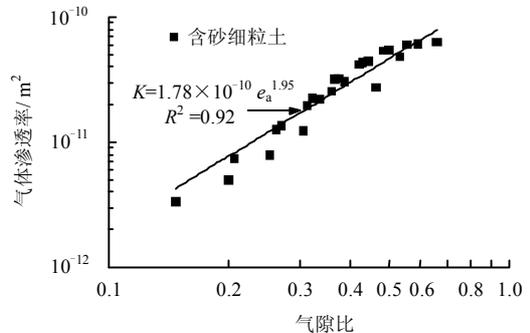
3.4 含砂细粒土气体渗透率经验公式

非饱和含砂细粒土的气体渗透率受孔隙比与饱和度的共同影响，且二者的影响实质上均是通过改变气相通道的状态而实现。为了能准确地预测含砂细粒土的渗透规律，引用 Delage^[19]提出的气隙比 e_a 概念，气隙比定义如下：

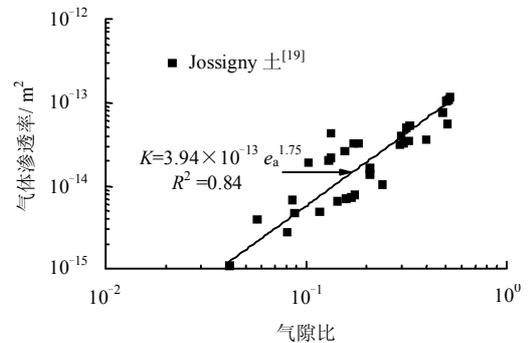
$$e_a = e(1 - S_r) \tag{4}$$

式中： S_r 为饱和度。

图 9(a)为表 2 中试样气体渗透率随气隙比的变化规律。由图可见，气体渗透率与气隙比具有很好的幂函数关系，其相关系数达到 0.92 左右，即气隙比可以描述 92%左右的气体渗透率影响因素。含砂细粒土的气体渗透率可用拟合公式表示为



(a) 含砂细粒土



(b) Jossigny 低液限黏土

图 9 气体渗透率随气隙比的变化

Fig.9 Variation of air permeability with air void ratio

$$K = ae_a^n \quad (5)$$

式中： a 、 n 均为经验参数，与土性相关。本次试验中的经验参数取值为 $a = 1.78 \times 10^{-10}$ ， $n = 1.95$ 。

Delage 等^[19]采用静压法制备不同含水率与孔隙比 Jossigny 土试样，并进行气体渗透试验，测得的气体渗透率与气隙比的关系见图 9(b)。结果显示，在对数坐标系中土样气体渗透率与气隙比也具有良好的幂函数关系。Jossigny 土为低液限黏土，气体渗透率远小于含砂细粒土。可见，气隙比能够有效地表征土体的渗气性，具有工程应用价值。然而本文所涉及的土样只有两种，类型偏少，在后续工作中还应增加土体类型，进一步总结与评价气体渗透率与气隙比关系的适用性，进一步揭示经验系数 a 与 n 的物理意义与取值范围。

4 结 论

(1) 在不同孔隙比与含水率下，多数试样气体渗透率随着进气压力的增加，而增加并趋于稳定；但含水率较低且干密度较小的试样，由于发生 Klinkenberg 效应，气体渗透率随着进气压力的增加会呈现减小趋势，最终趋于稳定；试样含水率越高，进气压力对土样气体渗透率影响程度越大；稳定值可代表试样真实气体渗透率。

(2) 土体气体渗透率和孔隙比与饱和度相关，二者均是通过影响孔隙气相通道来改变试样的气体渗透率。含水率超过最优含水率后，土样气体渗透率急剧降低。

(3) 气隙比可有效表征土体孔隙比与饱和度对气体渗透率的影响规律，气体渗透率与气隙比具有较好的幂函数经验关系。

参 考 文 献

- [1] ALFARO M C, WONG R C K. Laboratory studies on fracturing of low-permeability soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2001, 38(2): 303—315.
- [2] REDDY K R, ADAMS J A. Effect of groundwater flow on remediation of dissolved-phase VOC contamination using air sparging[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2000, 72(2): 147—165.
- [3] 魏海云, 詹良通, 陈云敏. 城市生活垃圾的气体渗透性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(7): 1408—1415.
WEI Hai-yun, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min. Experimental study on gas permeability of municipal solid waste[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(7): 1408—1415.
- [4] 科林斯 R E. 流体通过多孔材料的流动[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.
COLLINS R E. Flow of fluids through porous materials[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1984.
- [5] WU S Y, PRUESS K. Integral solution for transient fluid flow through a porous medium with pressure-dependent permeability[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(1): 51—61.
- [6] CHIEF K, FERRÉ T, NIJSSEN B. Correlation between air permeability and saturated hydraulic conductivity: Unburned and burned soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(6): 1501—1509.
- [7] VAIROGS J. Effect of rock stress on gas production from low-permeability reservoirs[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1971, 23(9): 1161—1167.
- [8] LOOSVELDT H, LAFHAJ Z, SKOCZYLAS F. Experimental study of gas and liquid permeability of a mortar[J]. *Cement and Concrete Research*, 2002, 32(9): 1357—1363.
- [9] 任晓娟. 低渗砂岩储层孔隙结构与流体微观渗流特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2006.
REN Xiao-juan. Pore structure of low permeability sand rock and fluid flowing[D]. Xi'an: Northwest University, 2006.
- [10] 叶为民, 王初生, 王琼, 等. 非饱和黏性土中气体渗透特征[J]. *工程地质学报*, 2009, 17(2): 244—248.
YE Wei-min, WANG Chu-sheng, 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.
- [11] 中华人民共和国国家标准编写组. GB/T50145—2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/T50145—2007 Standard for engineering classification of soil[S]. Beijing: China Planning Press, 2007.
- [12] 王云创, 李光仲, 李德尧. 气体黏滞系数的测定[J]. *物理与工程*, 2003, 13(2): 37—40.
WANG Yun-chuang, LI Guang-zhong, LI De-yao. The measurement of the gas viscosity factor[J]. *Physics and Engineering*, 2003, 13(2): 37—40.
- [13] KLINKENBERG L J. The permeability of porous media to liquids and gases[C]//Drilling and Production Practice. Washington D. C.: [s. n.], 1941: 200—213.
- [14] PETROV R J, ROWE R K, QUIGLEY R M. Selected factors influencing GCL hydraulic conductivity[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(8): 683—695.