

DOI: 10.11779/CJGE201702012

# 等向应力条件下原状 $Q_3$ 黄土的渗气特性研究

陈存礼<sup>1,2</sup>, 张登飞<sup>1,2</sup>, 张洁<sup>3</sup>, 陈惠<sup>1</sup>, 杨帆<sup>1</sup>, 吴康<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学陕西省黄土力学与工程重点实验室, 陕西 西安 710048;

3. 北京理正软件股份有限公司, 北京 100044)

**摘要:** 用改装的三轴渗气仪, 在不同等向应力条件下对不同含水率的原状  $Q_3$  黄土进行渗气试验, 分析了含水率、体积含气率及应力对渗气系数的影响, 提出了直接及间接地反映含水率与应力变化对渗气系数影响的 3 种类型渗气函数。研究结果表明: 应力对渗气系数与含水率及体积含气率关系皆有明显的影响, 增湿时含水率及体积含气率对渗气系数的影响比减湿时稍大; 应力变化 (含水率不变) 和含水率变化 (应力不变) 时渗气系数与体积含气率的关系不同。不同应力条件下相对渗气系数与相对体积含气率关系, 渗气系数与修正体积含气率关系皆可分别用唯一的幂函数描述; 不同含水率下渗气系数与规格化应力关系皆可用指数函数描述, 且仅一个参数随含水率而变化。用 3 种类型的渗气函数皆可较好预测含水率及应力变化时的渗气系数, 而其中无需引入水力耦合作用引起孔隙比变化的指数型渗气函数更便于工程应用。

**关键词:** 原状  $Q_3$  黄土; 渗气系数; 等向应力; 含水率; 体积含气率

**中图分类号:** TU47

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2017)02-0287-08

**作者简介:** 陈存礼(1964-), 女, 陕西人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土的静动力学特性研究。E-mail: chencl@xaut.edu.cn。

## Gas permeability of intact $Q_3$ loess under isotropic stresses

CHEN Cun-li<sup>1,2</sup>, ZHANG Deng-fei<sup>1,2</sup>, ZHANG Jie<sup>3</sup>, CHEN Hui<sup>1</sup>, YANG Fan<sup>1</sup>, WU Kang<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Shaanxi Province, Xi'an 710048, China; 2. Shaanxi Provincial

Key Laboratory of Loess Mechanics and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 3. Beijing Leading Software

Co., Ltd., Beijing 100044, China)

**Abstract:** The tests are performed to study the gas permeability of unsaturated intact  $Q_3$  loess with various water contents under different isotropic stresses using the improved triaxial gas permeability equipment. The influences of water content, volumetric gas content and stress on coefficients of gas permeability are analyzed. Three gas permeability functions are proposed to directly and indirectly reflect the effects of change in water contents and stresses on coefficients of gas permeability. The results show that the stress remarkably affects the coefficient of gas permeability as functions of both water content and volumetric gas content. The water content and volumetric gas content slightly have higher influence on the coefficient of gas permeability during wetting than drying. The relationships between coefficient of gas permeability and volumetric gas content at the same water content but different stresses were different from that at the same stress but different water contents. The relative coefficient of gas permeability versus relative volumetric gas content, coefficient of gas permeability versus modified volumetric gas content for different stresses all can be respectively described by the unique power function. The relationships between coefficient of gas permeability and normalized stress for different water contents can be expressed by the exponential function, in which only one of parameters changes with moisture content. The proposed three functions of gas permeability can well predict the coefficient of gas permeability as water content and stress change. The exponential function of gas permeability which needs not to introduce the change in void ratio caused by hydro-mechanical coupling is more convenient for engineering application.

**Key words:** intact  $Q_3$  loess; coefficient of gas permeability; isotropic stress; water content; volumetric gas content

## 0 引言

非饱和土是固、液、气三相介质, 其渗透特性需研究孔隙水和孔隙气两种流体的渗透运动规律, 既包

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (50878183); 陕西省教育厅省级重点实验室重点科研项目 (14JS063); 西安理工大学博士创新基金项目 (310-252071509)

**收稿日期:** 2015-11-14

括渗水，也包括渗气<sup>[1]</sup>。渗气特性与孔隙气体的连通性，土的湿度、密度、结构性及应力状态等因素有关<sup>[1]</sup>。文献[2~8]研究了饱和度、基质吸力及干湿循环等因素对重塑土渗气系数的影响；文献[9~17]研究了湿度和密度对原状及重塑土渗气系数的影响；文献[18~20]研究了应力对重塑黏土、城市固体废弃物及膨润土-砂混合型材料渗气系数的影响。

黄土是干旱半干旱地区的沉积物，是一种典型的非饱和土。文献[9~11]研究了湿度、密度对重塑黄土渗气系数的影响，姚志华等<sup>[12]</sup>研究了湿度、密度、各向异性及结构性对原状及重塑黄土渗气特性的影响，且建立了考虑含水率（或饱和度）与干密度（或孔隙比）影响的渗气函数。但黄土地区天然地基与边坡等土体皆为一定应力状态下原状黄土，地下水位下降或降雨入渗引起土体减湿或增湿时，力水耦合作用使土体产生变形进而引起渗气特性发生变化。因此，研究应力及含水率变化对原状黄土渗气特性的影响具有重要的理论和实际意义。目前，而有关应力作用下原状黄土渗气特性的研究成果还鲜有报导。

本文用改装的三轴渗气仪，在等向应力条件下对不同含水率的原状 Q<sub>3</sub> 黄土进行渗气试验，探讨含水率及应力对渗气系数的影响，提出可以直接及间接地考虑含水率及应力影响的渗气函数，为建立渗流-固结耦合本构关系奠定基础。

1 试验方案与方法

1.1 试验用土及方案

试验用土取自西安北郊的原状 Q<sub>3</sub> 黄土，取土深度 3~4 m，物理性质指标见表 1。黄土的颗粒组成中砂粒（含量为 4%）很少，粉粒（含量为 73%）为主，黏粒含量为 23%，按液塑限分类属于粉质黏土。

用专门的削样器制备直径约 3.91 cm，高度 8 cm 的三轴试样，选取相近干密度（平均值为 1.30 g/cm<sup>3</sup>，且彼此差值<0.02 g/cm<sup>3</sup>，以减小干密度差异的影响）的试样进行试验。

表 1 原状 Q<sub>3</sub> 黄土的物理性质

Table 1 Physical properties of intact Q <sub>3</sub> loess									
相对 密度 $G_s$	含水率 $w_n/\%$	干密度 $\rho_{dn}/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_P/\%$	颗粒组成/%				
					>0.075	0.075~0.005	<0.005		
					mm	mm	mm		
2.70	15.2	1.23~1.35	30.9	19.8	4	73	23		

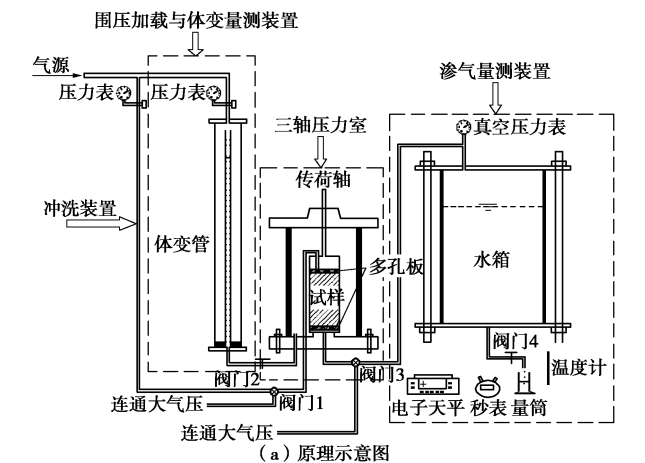
为了研究含水率对原状黄土渗气特性的影响，对 1.5%（风干含水率），8.5%，13.5%，15.2%，16.6%，19.8%，21.8%共 7 个不同初始含水率  $w_0$  的试样进行渗气试验。通过增湿或减湿把天然含水率  $w_n$  的试样控

制到不同初始含水率  $w_0$ 。 $w_0 < w_n$  时，采用风干的方法；自然风干至试样质量基本不变时，测定出风干含水率为 1.5%。 $w_0 > w_n$  时，采用滴定注水的方法。待风干或注水达到控制含水率后，在保湿缸中密闭放置 72 h 以上，以使水分扩散均匀。

为了研究等向应力对原状黄土渗气特性的影响，对不同初始含水率的原状黄土皆在不同等向应力  $p$ （分别为 0，50，100，200，300，400 kPa）作用下进行渗气试验，具体试验方案见表 2。

1.2 试验仪器与方法

试验仪器是基于文献[9，15]的思路，通过增设渗气量测和冲洗装置，由常规三轴仪改装而成的三轴渗气仪（如图 1 所示）。试样的体变（外体变）通过双管体变装置量测。外管为可以承受一定压力(<1 MPa)的有机玻璃筒。内管为注入无气水的碱式滴定管（量程 50 mL，精度 0.1 mL），其上部与外管相通（可使其内外压力相等），下部与外管相隔离，且与压力室内试样周围的水相通。在一定等向压缩应力（周围压力）作用下，试样的体变等于内管水量变化与仪器体变之差。



(b) 试验装置  
图 1 三轴渗气仪

Fig. 1 Triaxial apparatus for gas permeability

渗气量测装置主要由水箱（内径 30 cm，高度 50 cm，体积 11250 cm<sup>3</sup>，以保证渗气过程中压差的稳定）及真空压力表组成。试样上部与大气相通，下部与水

表 2 渗气试验方案及试样固结后的孔隙比与含水率

Table 2 Schemes of gas permeability tests and void ratios and water contents of consolidated specimen															
$e_0$	$p$ /kPa	$w_0=1.5\%$		$w_0=8.5\%$		$w_0=13.5\%$		$w_0=15.2\%$		$w_0=16.6\%$		$w_0=19.8\%$		$w_0=21.8\%$	
		$e$	$w/\%$	$e$	$w/\%$	$e$	$w/\%$	$e$	$w/\%$	$e$	$w/\%$	$e$	$w/\%$	$e$	$w/\%$
1.077	0	1.077	1.5	1.077	8.5	1.077	13.5	1.077	15.2	1.077	16.6	1.077	19.8	1.077	21.8
	50	1.066	1.5	1.064	8.5	1.058	13.5	1.046	15.1	1.048	16.5	1.040	19.7	1.037	21.6
	100	1.059	1.5	1.053	8.5	1.044	13.5	1.037	15.0	1.037	16.4	1.029	19.6	1.021	21.4
	200	1.051	1.5	1.038	8.5	0.999	13.2	0.990	14.8	0.964	16.1	0.955	19.2	0.952	21.2
	300	1.033	1.5	0.999	8.5	0.972	13.1	0.940	14.7	0.916	15.9	0.910	19.0	0.896	20.8
	400	0.993	1.5	0.959	8.5	0.922	12.8	0.902	14.5	0.885	15.8	0.873	18.8	0.859	20.7

箱上部相通。当打开阀门 4 放水时, 在水箱上部及试样下部形成一定的负压, 即气体压力差  $\Delta p$  (渗气压力), 且可通过安装在水箱上部的真空压力表 (量程 10 kPa, 精度 0.1 kPa) 量测; 根据一定时间  $\Delta t$  流出的水量  $Q_w$  可换算出流过试样的空气体积  $Q_a$ , 这样可以有效避免测量空气体积难的问题。为了准确起见, 用电子天平 (称量 1200 g, 感量 0.01 g) 称取量筒及水的质量。

为了使试样在等向压缩应力作用下单向排水, 在试样上部放置透气不透水的薄膜和多孔板, 下部放置多孔板 (孔径 0.5 mm)。固结完成后, 分别把阀门 1, 阀门 3 转到与冲洗装置, 大气相通的方向, 通过给试样内部施加的气压力 ( $<p$ ) 冲掉附着在下部多孔板内的水, 以避免应力作用下试样排出的水堵塞渗气通道。冲洗完毕后, 阀门 1, 阀门 3 分别转到与大气相通, 水箱相通的方向。

渗气试验主要包括试样的等向固结、冲洗 (应力作用产生的水) 及渗气量测 3 个阶段。

在渗气量测阶段, 不同试验条件下通过改变阀门 4 的开度放水, 控制水流量及渗气速度, 在试样上下两端形成至少 4 个不同气压差 (压力梯度)。一定压力梯度下渗气量测时, 先在一定的阀门开度下放水, 当经过试样进入水箱上部气体流速与从水箱下部流出水的流速达到动态平衡时, 真空压力表指针保持恒定, 即在试样两端形成一定的气压差  $\Delta p$ ; 然后, 用量筒接水, 同时打开秒表, 量测一定水量  $Q_w$  ( $>5$  mL) 对应的时间  $t$ 。完成渗气试验后拆样, 并测定试样的含水率  $w$ 。

1.3 渗气系数的确定

根据理想气体状态平衡方程, 渗过试样的气体在标准温度  $T_0$  ( $T_0=20^\circ\text{C}$ ) 及标准气压  $p_a$  ( $p_a=101$  kPa) 下的体积  $Q_a^{[9-10, 12, 15]}$ 为

$$Q_a = (p_a - \Delta p)T_0Q_w / p_aT \quad (1)$$

式中,  $Q_w$ ,  $T$  分别为试验量测的水体积 ( $\text{cm}^3$ ) 与温度 ( $^\circ\text{C}$ ),  $\Delta p$  为试样上下的气压差 (kPa)。

已有研究<sup>[1, 9-10, 21]</sup>表明, 在气相流速较低且不计液相运动的影响时, 可以用达西定律来描述气相运动。故渗气速度  $v_a$  与渗气压力梯度  $i_a$  成正比, 则

$$v_a = Q_a / At \quad (2a)$$

$$i_a = \Delta p / \rho_w g L \quad (2b)$$

$$k_a = v_a / i_a = Q_a \rho_w g L / \Delta p A t \quad (2c)$$

式中,  $k_a$  为渗气系数 ( $\text{cm/s}$ ),  $L$ ,  $A$  为试样的高度 ( $\text{cm}$ ) 与面积 ( $\text{cm}^2$ ),  $t$  为试验历时 ( $\text{s}$ ),  $\rho_w$  为水的密度 ( $\text{g/cm}^3$ ),  $g$  为重力加速度 (取  $10 \text{ m/s}^2$ )。

2 试验结果与分析

等向固结后试样的孔隙比  $e$  (根据固结体变量计算) 和含水率  $w$  见表 2。可以看出, 不同等向应力  $p$  作用下, 固结后试样的含水率  $w$  和试验前初始含水率  $w_0$  相差很小 ( $\leq 1.1\%$ ), 反映出应力作用使含水率的变化很小, 可以忽略不计。在  $p \leq 400$  kPa,  $w_0 \leq 21.8\%$  时, 可以近似取  $w=w_0$ , 下文皆称为含水率  $w$ 。

根据量测的气压差  $\Delta p$ , 水量  $Q_w$  及其对应的时间  $t$ , 由式 (1)、(2) 计算出渗气压力梯度  $i_a$  及渗气速度  $v_a$ 。试验结果表明, 不同试验条件下  $v_a - i_a$  关系 (由于篇幅所限, 图略) 呈线性, 即应力作用下, 不同湿度原状黄土的渗气特性符合达西定律, 直线的斜率即为渗气系数  $k_a$ 。

2.1 渗气系数与含水率的关系

不同应力  $p$  作用下, 渗气系数  $k_a$  与含水率  $w$  关系如图 2 所示, 可以看出:

(1) 对于不同  $p$ , 增湿及减湿时  $k_a - w$  关系曲线皆呈先陡后缓的型式, 但总体上增湿曲线比减湿的略陡, 即增湿对渗气系数的影响比减湿的稍大。这主要是天然含水率的原状黄土在应力作用下饱和度介于  $38\% \sim 43\%$  (由表 2 中  $w$ ,  $e$  计算), 当含水率减小 (减湿) 时, 气相可能处于完全联通, 含水率增大 (增湿) 时, 气相处于双联通状态所致<sup>[14]</sup>。

(2) 随着  $p$  的增大,  $k_a - w$  关系曲线下移, 即对于相同含水率, 渗气系数随应力的增大而减小。这主要是由于孔隙比随应力的增大而减小 (表 2), 孔隙通道被压缩, 流程的绕曲度增加, 渗气阻力增大所致。反映出应力对渗气系数有明显的影 响, 建立渗气函数时需考虑应力的影响。

2.2 渗气系数与体积含气率的关系

体积含气率  $\theta_a$  为气体体积  $V_a$  与土的总体积  $V$  之

比<sup>[4, 19]</sup>, 或称为充气孔隙率<sup>[12, 22]</sup>, 它与物性指标的关系为  $\theta_a = n(1 - S_r) = nS_a(e - G_s w)/(1 + e)$ ,  $n$  为孔隙率,  $S_r$  为饱和度,  $S_a$  为气体饱和度。由表 2 中含水率  $w$ , 孔隙比  $e$  计算出不同试验条件下体积含气率  $\theta_a$ , 绘出  $p$  一定  $w$  变化和  $w$  一定  $p$  变化时, 渗气系数  $k_a$  与体积含气率  $\theta_a$  的关系曲线如图 3 所示。

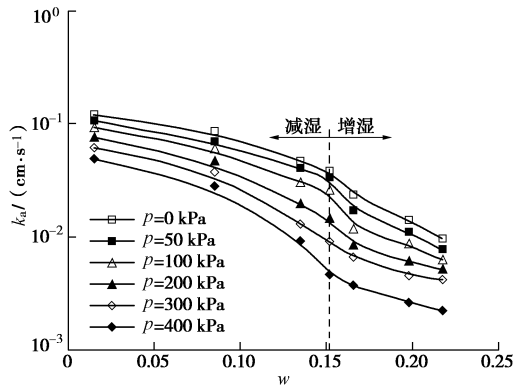


图 2 不同应力下渗气系数与含水率关系

Fig. 2 Relationships between coefficient of gas permeability and water content under different stresses

由图 3 (a) 可以看出:

(1) 对于不同  $p$ , 增湿时 ( $\theta_a$  减小)  $k_a - \theta_a$  关系曲线皆比减湿 ( $\theta_a$  增大) 时陡。说明增湿及减湿时体积含气率的变化对气体渗透性的影响程度不同, 增湿时影响较大, 减湿时影响较小。

(2) 不同  $p$  作用下,  $k_a - \theta_a$  曲线分布范围较大, 且曲线随着  $p$  的增大而下移, 即对于相同  $\theta_a$ ,  $k_a$  随  $p$  的增大而减小, 说明应力对具有相同天然干密度原状黄土的  $k_a - \theta_a$  关系有明显影响。

(3) 由于在一定应力下, 含水率变化引起孔隙比变化 (表 2), 则  $k_a - \theta_a$  关系试验点对应的孔隙比并非常值。因此, 对于不同应力, 无法通过直接建立不同常孔隙比下  $k_a - \theta_a$  关系的渗气函数来反映应力变化引起孔隙比变化的影响。

由图 3 (b) 可以看出:

(1)  $w$  一定,  $p$  增大引起  $\theta_a$  减小时, 不同  $w$  下  $k_a - \theta_a$  关系皆呈陡降趋势, 且减小的速率基本不变, 但其明显大于  $p$  一定,  $w$  变化时的速率 (图 3 (a)), 即应力增大引起体积含气率的减小对渗气系数的影响更大。由于  $w$  一定,  $p$  增大时, 含水率的变化很小 ( $\leq 1.1\%$ , 见表 2), 主要是孔隙比的减小使体积含气率减小, 且幅度较小;  $p$  一定,  $w$  变化时, 含水率的变化及力水耦合作用引起孔隙比的变化使体积含气率变化的幅度较大, 且主要是含水率变化所致。说明  $k_a - \theta_a$  关系曲线的型式与体积含气率变化的机理有关。

(2)  $w$  增大及减小时,  $k_a - \theta_a$  曲线分别向左下方及右上方移动, 且含水率愈大, 坡度愈缓, 渗气系数

减小的速率愈小, 即应力对渗气系数的影响随含水率增大而减小。说明虽然含水率愈大, 应力作用引起的体积含气率减小程度愈大, 但对渗气系数的影响程度却愈小。

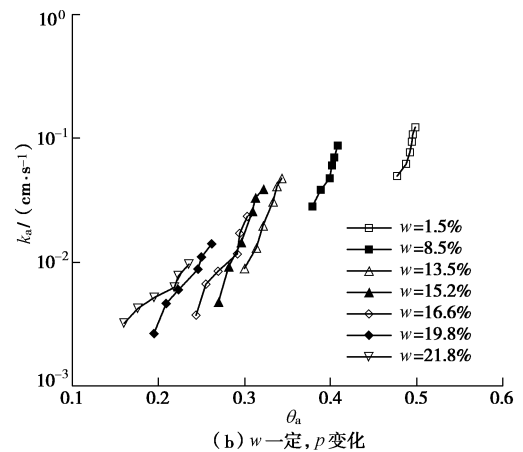
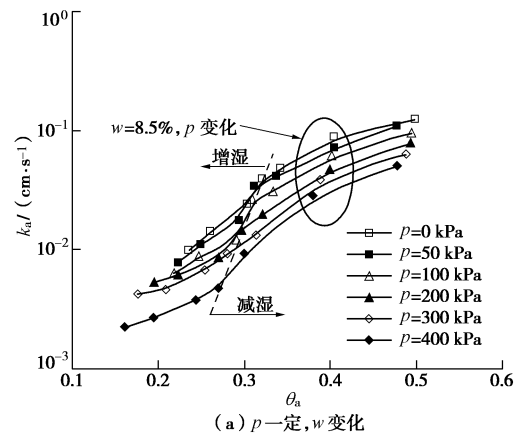


图 3 不同试验条件下渗气系数与体积含气率的关系

Fig. 3 Relationships between coefficient of gas permeability and volumetric gas contents under different test conditions

综上所述, 应力及含水率变化引起的体积含气率变化对渗气系数的影响规律明显不同。因此, 建立渗气系数与体积含气率关系的渗透性函数时, 需考虑含水率及应力引起体积含气率的变化对渗气系数的影响。

借鉴文献[3, 4, 16, 17]建立气体渗透率  $K_a$  ( $K_a = k_a \mu / \rho_a g$ ,  $\mu$  为气体黏滞系数,  $\rho_a$  为气体密度) 与体积含气率  $\theta_a$  的方法, 以不同应力作用下天然及风干含水率分别作为参考点,  $k_{a*}$ ,  $\theta_{a*}$  分别为参考点的渗气系数与体积含气率, 由图 3 (a) 得到不同应力下相对渗气系数  $k_a/k_{a*}$  与相对体积含气率  $\theta_a/\theta_{a*}$  关系曲线如图 4 所示。可以看出:

(1) 增湿 (含水率增大) 和减湿 (含水率减小) 时, 不同  $p$  ( $p=0 \sim 400$  kPa) 下  $k_a/k_{a*} - \theta_a/\theta_{a*}$  关系试验点皆分布在一个较为狭窄的范围, 可近似归一。说明应力变化引起孔隙比 (干密度) 的变化对渗气系数与体积含气率关系的影响, 可用一定含水率 (天然或风

干状态)下渗气系数与体积含气率作为参考值来进行归一,且与所选取的参考点无关。这与无应力作用时,以基质吸力 10 kPa 为参考点,干密度对不同种类土的相对气体渗透性与相对体积含气率关系没有影响<sup>[17]</sup>的结果相一致;而与以基质吸力 1235 kPa 为参考点,干密度对压实土的结果有影响<sup>[16]</sup>的规律不同。反映出干密度变化对气体渗透性的影响可能与土的种类及结构性等有关。

(2)不同应力作用下增湿及减湿时,归一的  $k_a/k_{a^*} - \theta_a/\theta_{a^*}$  关系皆可用同一幂函数描述,其表达式为

$$k_a/k_{a^*} = (\theta_a/\theta_{a^*})^\eta, \quad (3)$$

式中,  $\eta$  为土性参数,可以反映充气孔隙的弯曲度和连通性的综合影响<sup>[22]</sup>,可由无应力作用增减湿时的  $k_a/k_{a^*} - \theta_a/\theta_{a^*}$  关系确定。对于本文试验研究的黄土,天然及风干含水率作为参考点时  $\eta=3.586, 2.971$ 。这与 Moldrup 等<sup>[3-4, 22]</sup>以不同基质吸力为参考点时,不同种类土的相对气体渗透率与相对体积含气率间关系呈幂函数,参数  $\eta$  ( $\eta=1.34\sim3.48$ ) 与土种类有关<sup>[22]</sup>的结果一致;而与姚志华等<sup>[12]</sup>以干燥状态作为参考点,兰州 Q<sub>3</sub> 原状黄土的相对渗气系数与相对体积含气率关系呈指数函数的结果不同。这可能是不同区域原状黄土的结构性,颗粒组成及矿物成分等不同所致。

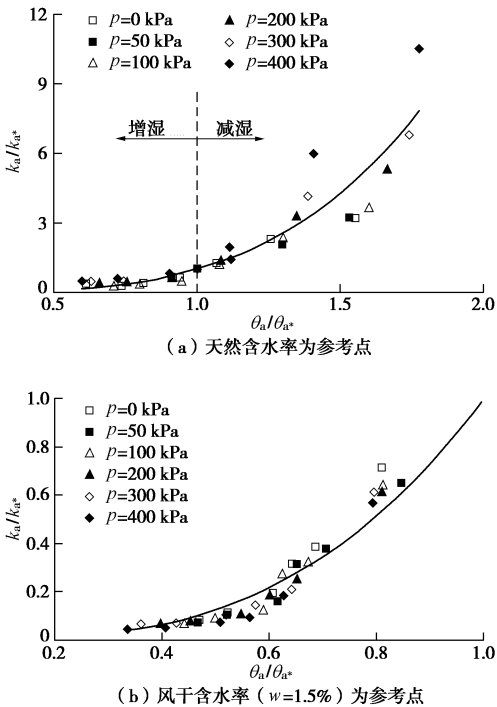


图4 不同应力下相对渗气系数与相对体积含气率的关系  
Fig. 4 Relationships between relative coefficient of gas permeability and relative volumetric gas content under different stresses

(3) 由于体积含气率可以同时反映含水率及应力作用引起的孔隙比变化,图3(a)的试验点既可以

反映  $p$  一定,  $w$  变化时  $k_a - \theta_a$  关系曲线(实线),又可以反映  $w$  一定,  $p$  增大时  $k_a - \theta_a$  关系曲线(如椭圆中实线),故可归一的  $k_a/k_{a^*} - \theta_a/\theta_{a^*}$  关系的表达式(式(3))能预测含水率及应力变化时的渗气系数。

(4) 选取不同参考点时,虽然相对渗气系数与相对体积含气率关系皆可以用幂函数描述,但土性参数不同。以风干状态作为参考点时,把天然含水率试样减湿需要较长的时间,这使得渗气系数的测定比较困难。而以天然含水率作为参考点,不需要改变含水率,可直接地测定原状土的渗气系数及体积含气率,更便于实际工程应用,故选用天然含水率作为参考点为宜。

以天然含水率为参考点时,应力增大条件下  $k_{a^*}/k_{an0}$  与  $\theta_{a^*}/\theta_{an0}$  ( $k_{an0}, \theta_{an0}$  分别为无应力作用时天然含水率试样的渗气系数与体积含气率)关系可用幂函数描述(见图5),即

$$k_{a^*}/k_{an0} = (\theta_{a^*}/\theta_{an0})^a, \quad (4)$$

式中,  $a$  为土性参数,对于本文试验研究的原状黄土,  $a=10.443$ 。将式(4)代入式(3)中得

$$k_a = k_{an0} (\theta_{a^*}/\theta_{an0})^a (\theta_a/\theta_{a^*})^\eta. \quad (5)$$

用式(5)及其相关参数,确定出不同应力作用下,含水率变化时原状黄土的渗气系数,绘出预测渗气系数  $k_{ap}$  与实测渗气系数  $k_{am}$  关系如图6所示,可见预测效果良好。

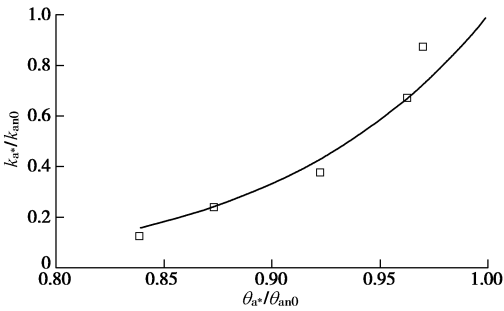


图5  $k_{a^*}/k_{an0} - \theta_{a^*}/\theta_{an0}$  关系曲线  
Fig. 5 Curve of  $k_{a^*}/k_{an0}$  and  $\theta_{a^*}/\theta_{an0}$

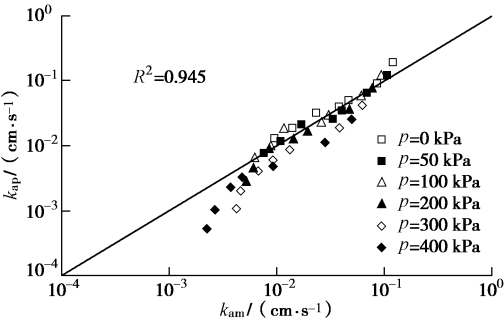


图6 渗气系数的实测值与式(5)的预测值比较  
Fig. 6 Comparison between coefficients of gas permeability predicted by formula (5) and measured values

### 2.3 渗气系数与修正体积含气率的关系

当借鉴 Mitchell 等<sup>[23]</sup>建立考虑孔隙比影响的非饱和和土渗水系数与饱和度关系时引入  $e^3/(1+e)$  的方法, 由图 3(a) 绘出渗气系数  $k_a$  与修正体积含气率  $\theta_{am} (\theta_{am}=e^3/(1+e)S_a=e^2\theta_a)$  之间的关系如图 7 所示。可以看出:

(1) 增湿 ( $w$  增大) 和减湿 ( $w$  减小) 时, 不同应力作用下  $k_a - \theta_{am}$  关系试验点分布在一个较为狭窄的范围, 可近似归一, 即  $k_a$  是  $\theta_{am}$  的单值函数。说明应力不变, 含水率变化及含水率不变, 应力变化条件下, 渗气系数与修正体积含气率关系皆可用相同的函数描述, 且与引起体积含气率变化的机理无关。

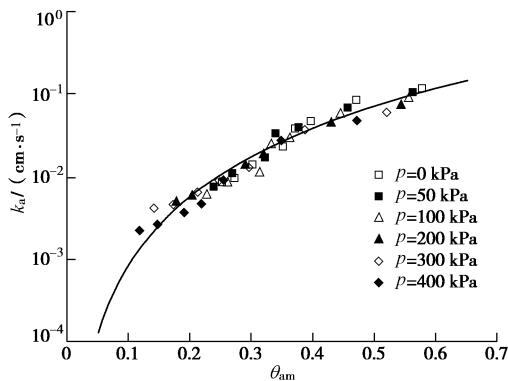


图 7 不同应力下渗气系数与修正体积含气率关系

Fig. 7 Relationships between coefficient of gas permeability and modified volumetric gas content under different stresses

(2) 归一的  $k_a - \theta_{am}$  关系可以用幂函数描述, 其表达式为

$$k_a = \alpha \theta_{am}^\beta = \alpha (e^2 \theta_a)^\beta, \quad (6)$$

式中,  $\alpha$ ,  $\beta$  为土性参数, 可由无应力作用增减湿时的  $k_a - e^2 \theta_a$  关系确定。对于本文试验研究的黄土,  $\alpha = 0.504$ ,  $\beta = 2.767$ 。

(3) 虽然式 (6) 与式 (5) 参数的个数相同, 但是, 式 (5) 比式 (6) 的表达式复杂; 通过测定无应力作用时不同含水率原状黄土的渗气系数, 可以确定式 (6) 的参数  $\alpha$ ,  $\beta$  及式 (5) 的参数  $\eta$ , 式 (5) 的参数  $a$  还需通过测定不同应力作用下天然含水率原状黄土的渗气系数确定。故相比较而言, 预测一定应力及含水率条件下原状黄土的渗气系数时, 选用式 (6) 更加方便。

用式 (6) 及其相关参数, 确定出不同应力作用下, 含水率变化时原状黄土的渗气系数, 绘出预测渗气系数  $k_{ap}$  与实测渗气系数  $k_{am}$  关系如图 8 所示。可见, 用式 (6) 预测时, 相关系数 ( $R^2=0.974$ ) 比式 (5) 的值 ( $R^2=0.945$ ) 大, 预测效果更好。

### 2.4 渗气系数与应力的关系

半对数坐标系中, 对于不同含水率  $w$ , 渗气系数  $k_a$  与规格化应力  $p/p_a$  关系曲线如图 9 所示, 可以看出,

增湿及减湿 ( $w$  增大及减小) 时,  $\ln k_a - p/p_a$  关系近似呈平行直线, 即不同含水率下渗气系数随应力增大而减小的速率基本相同。其表达式为

$$\ln k_a = \ln k_{a0} - b p/p_a, \quad (7)$$

即

$$k_a = k_{a0} \exp(-b p/p_a), \quad (8)$$

式中,  $k_{a0}$ ,  $b$  为土性参数, 分别等于  $\ln k_a - p/p_a$  关系直线的截距和斜率。它们皆有明确的物理意义, 即  $k_{a0}$  为无应力作用时不同含水率原状黄土的渗气系数,  $b$  为一定含水率下渗气系数随应力增大而减小的速率。由于参数  $b$  与含水率无关, 为了方便起见, 可由天然含水率下  $\ln k_a - p/p_a$  关系直线的斜率确定参数  $b$ 。对于本文试验研究的原状黄土,  $b=0.346$ 。参数  $k_{a0}$  随含水率的变化而变化 (图 2), 需要建立其与含水率的关系。

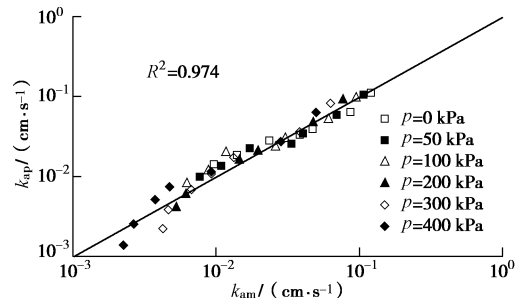


图 8 渗气系数实测值与式 (6) 的预测值比较

Fig. 8 Comparison between coefficients of gas permeability predicted by formula (6) and measured values

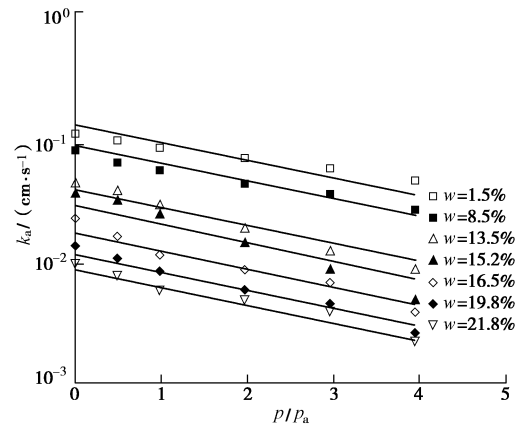


图 9 不同含水率下渗气系数与规格化等向压缩应力关系

Fig. 9 Relationships between coefficient of gas permeability and normalized isotropic compression stresses under different water contents

为了建立  $k_{a0}$  与  $w$  的关系, 引入相对湿度指标  $w_r$  ( $w_r = (w - w_d)/(w_s - w_d)$ ) 来反映增减湿时含水率相对于饱和含水率的变化程度,  $w_s$  ( $w_s = (G_s - \rho_{dn})/\rho_{dn} G_s$ ),  $w_d$  分别为无应力作用下土体的饱和含水率及可能减湿的最小含水率, 本文选取  $w_d = 1.5\%$ 。绘出无应力作用时  $k_{a0}/k_{ad0} - w_r$  关系 ( $k_{ad0}$  为含水率等于  $w_d$  时的渗气系数)

如图 10 所示。可以看出,  $k_{a0}/k_{ad0}$  随  $w_r$  的增大而减小, 且可用下列表达式来描述,

$$k_{a0}/k_{ad0} = (1 - w_r) \exp(-cw_r) \quad (9)$$

式中,  $c$  为土性参数。对于本文试验研究的原状黄土,  $c=2.215$ 。式 (9) 可以反映  $w=w_d$  ( $w_r=0$ ),  $w=w_s$  ( $w_r=1$ ) 时,  $k_{a0}/k_{ad0}$  分别为 1, 0 的特定情况。将式 (9) 代入式 (8) 得

$$k_a = k_{ad0}(1 - w_r) \exp[-(b p/p_a + cw_r)] \quad (10)$$

虽然确定参数  $b, c$  时, 试验的条件及方法与式 (5) 相同, 但可以根据式 (10) 直接确定一定含水率与应力条件下的渗气系数, 无需像式 (5)、(6) 预测渗气系数时, 需先确定一定含水率及应力条件下土的孔隙比, 再确定体积含气率。因此, 相比较而言, 式 (10) 更便于实际工程应用。

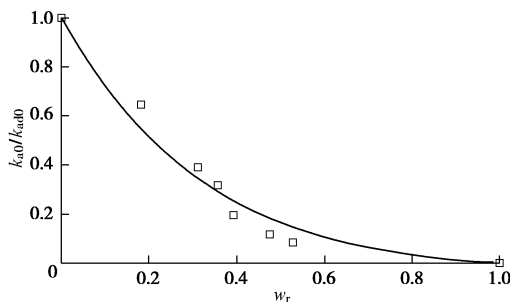


图 10  $k_{a0}/k_{ad0} - w_r$  关系曲线

Fig. 10 Curve of  $k_{a0}/k_{ad0}$  and  $w_r$

用式 (10) 及相关参数, 确定出不同含水率及等向压缩应力条件下渗气系数, 绘出预测渗气系数  $k_{ap}$  与实测渗气系数  $k_{am}$  关系如图 11 所示, 可见预测效果很好。

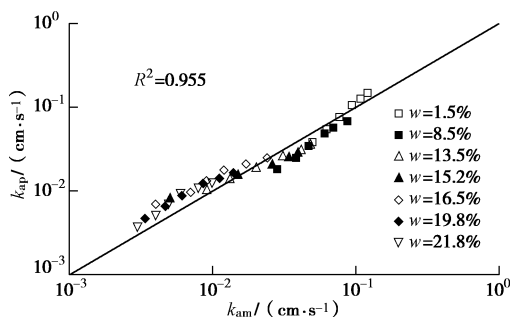


图 11 渗气系数的实测值与式 (10) 预测值比较

Fig. 11 Comparison between coefficients of gas permeability predicted by formula (10) and measured values

### 3 结 论

通过在不同等向应力条件下对不同含水率原状黄土进行渗气试验, 研究了含水率与应力对渗气系数的影响, 得到了以下结论:

(1) 不同应力作用下, 增湿时含水率及体积含气率对渗气系数的影响比减湿时的稍大。应力对渗气系数与含水率及体积含气率关系的影响显著。

(2) 渗气系数随体积含气率而变化的程度与引起体积含气率变化的机理有关。含水率一定, 应力增大时, 渗气系数随体积含气率而变化的程度要比应力一定, 含水率变化时大。

(3) 不同应力作用下, 渗气系数与修正体积含气率之间, 以天然和风干含水率为参考点的相对渗气系数与相对体积含气率之间皆呈近似归一的幂函数关系。用体积含气率来间接反映含水率及应力的变化时, 以修正体积含气率为参量和以天然含水率为参考点、相对体积含气率为参量的渗气函数皆可较好预测含水率及应力变化时的渗气系数, 但前者参数的确定更为简便。

(4) 不同含水率下渗气系数与规格化应力关系呈指数函数, 其参数之一与含水率无关。直接以含水率与应力为参量的渗气函数无需考虑力水耦合作用引起的孔隙比变化, 更便于实际工程应用。

### 参考文献:

- [1] 谢定义. 非饱和土土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015. (XIE Ding-yi. Soil mechanics for unsaturated soil[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015. (in Chinese))
- [2] STYLIANOU C, DEVANTIER B A. Relative air permeability as functions of saturation in soil venting[J]. Journal of Environmental Engineering, 1995, **121**(4): 337 - 347.
- [3] MOLDRUP P, POULSEN T G, SCHJONNING P, et al. Gas permeability in undisturbed soils: measurements and predictive models[J]. Soil Science, 1998, **163**: 180 - 189.
- [4] MOLDRUP M, YOSHIKAWA S, OLESEN T, et al. Air Permeability in undisturbed volcanic ash soils: predictive model test and soil structure fingerprint[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, **67**: 32 - 40.
- [5] SAMINGAN A S, LEONG E C, RAHARDJO H. A flexible wall permeameter for measurements of water and air coefficients of permeability of residual soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, **40**(3): 559 - 574.
- [6] TULI A, HOPMANS J W. Effect of degree of fluid saturation on transport coefficients in disturbed soils[J]. European Journal of Soil Science, 2004, **55**(1): 147 - 164.
- [7] JUCA J F T, MACIEL F J. Gas permeability of a compacted soil used in a landfill cover layer[J]. Geotechnical Special Publication, 2006, **147**(2): 1535 - 1546.
- [8] KAMIYA K, BAKRIE R, HONJO Y. A new method for the



- measurement of air permeability coefficient of unsaturated soil[J]. Geotechnical Special Publication, 2006, **147**(2): 1741 - 1752.
- [9] 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 Zheng-han, XIE Ding-yi, WANG Yong-sheng. 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))
- [10] 刘奉银, 张 昭, 周 冬. 湿度和密度双变化条件下的非饱和黄土渗气渗水函数[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(9): 1907 - 1914. (LIU Feng-yin, ZHANG Zhao, ZHOU Dong. Density-saturation-dependent air-water permeability function of unsaturated loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(9): 1907 - 1914. (in Chinese))
- [11] ZHAN T L T, YANG Y B, CHEN R, et al. Influence of clod size and water content on gas permeability of a compacted loess[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **51**(11): 1468 - 1474.
- [12] 姚志华, 陈正汉, 黄雪峰, 等. 非饱和  $Q_3$  黄土渗气特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(6): 1264 - 1273. (YAO Zhi-hua, CHEN Zheng-han, HUANG Xue-feng, et al. Experimental research on gas permeability of unsaturated  $Q_3$  loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(6): 1264 - 1273. (in Chinese))
- [13] 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. (in Chinese))
- [14] 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 Ling-wei, GUO Ai-guo, 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))
- [15] 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 Qiang-qiang, CHEN Zheng-han, 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))
- [16] WICKRAMARACHCHI P, KAWAMOTO K, HAMAMOTO S, et al. Effects of dry bulk density and particle size fraction on gas transport parameters in variably saturated landfill cover soil[J]. Waste Management, 2011, **31**: 2464 - 2472.
- [17] DEEPAGODA C, MOLDRUP P, SCHJONNING P, et al. Density-corrected models for gas diffusivity and air permeability in unsaturated soil[J]. Vadose Zone Journal, 2011, **10**(1): 226 - 238.
- [18] BARDEN L, PAVIAKIS G. Air and water permeability of compacted unsaturated cohesive soils[J]. Journal of Soil Science, 1971, **22**(3): 302 - 317.
- [19] STOLTZ G, GOURE J P, OXARANGO L. Liquid and gas permeabilities of unsaturated municipal solid waste under compression[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2010, **118**: 27 - 42.
- [20] LIU J F, SKOCZYLAS F, TALANDIER J. Gas permeability of a compacted bentonite-sand mixture: coupled effects of water content, dry density, and confining pressure[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, **52**(2): 1159 - 1167.
- [21] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil mechanics for unsaturated soils[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [22] KAWAMOTO K, MOLDRUP P, SCHJONNING P, et al. Gas transport parameters in the Vadose Zone: development and tests of power-law models for air permeability[J]. Vadose Zone Journal, 2006: 1205 - 1215.
- [23] MITCHELL J K, HOOPER D R, CAMPANELLA R G. Permeability of compacted clay[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, 1965, **91**: 41 - 65.