

马兰黄土渗气性试验研究

刘锦阳¹, 李喜安^{1,2}, 张凯旋¹, 郭泽泽¹, 简涛¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2. 国土资源部岩土工程开放研究实验室, 西安 710054)

摘要: 利用改进的 ZC-2015 型渗气仪对不同类型的原状风干和重塑的马兰黄土进行渗气试验, 分析土样体积、渗径、干密度、取样深度等对渗气率 k_a 的影响, 并利用扫描电镜 (SEM) 试验得到的孔隙结构参数解释黄土渗气特性。结果表明: 渗气率 k_a 不仅是气体渗透特性的衡量指标, 也是描述非饱和和马兰黄土孔隙和结构特征的重要参数。不同体积的土样由于尺寸效应, 其渗气率随着土样体积的增大而增大。另外, 渗气率随着渗径、干密度的增大而减小。对比 3 种不同类型黄土的透气性试验结果和电镜照片, 并结合统计的孔隙结构参数, 得出渗气率在区域和深度上有一定的规律, 区域上黄土颗粒中黏粒含量增高, 总孔隙和大孔隙面积减小, 土体有效渗气孔隙减少, 重塑黄土的渗气率随着取土深度的增加有微小的减小。

关键词: 渗气率; 土样体积; 渗径; 干密度; 扫描电镜试验

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2018)01-0141-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2018.01.023

Experiment Study on Air Permeability of Malan Loess

LIU Jinyang¹, LI Xian^{1,2}, ZHANG Kaixuan¹, GUO Zeze¹, JIAN Tao¹

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054;

2. Open Research Laboratory of Geotechnical Engineering, Ministry of Land and Resources, Xi'an 710054)

Abstract: A series of tests on undisturbed dry soil and remoulded Malan loess were conducted by using improved ZC-2015 air permeameter. Gas permeability experiments analyzed the effects of soil volume, permeability diameter, dry density and sampling depth on air permeability (k_a), and loess permeability was explained by the pore structure parameters, which were obtained by electron microscopy in SEM tests. The results showed that k_a was not only a quantitative index of the gas seepage, but also was an important parameter that describing the pore and structure characteristics of unsaturated Malan loess. Due to the size effect in different soil volumes of loess, and their permeability increased with the increasing of volume of soil samples. In addition, k_a decreased with the increasing of dry density and permeability diameter. Comparing the test results and the SEM photographs of three different types of Malan loess, and combining with the statistics of the pore structure parameters, we can conclude that k_a has a certain regularity in area and depth. Regionally, the content of clay particles in the soil particles increased, while the total pore and macropore area decreased, and the effective seepage porosity decreased, and k_a of remolded soil with the increase of soil depth has a little decrease.

Keywords: air permeability; soil volume; permeability diameter; dry density; SEM tests

气体渗流现象广泛存在于非饱和岩土体中。气体渗透率作为多孔材料的固有属性, 是多孔介质渗透性能的重要参数, 多孔介质的孔隙分布、颗粒组成、结构特征以及外界因素是影响多孔材料渗气率的主要因素。

国内外在研究渗气率时主要考虑饱和度和干密度^[1]、施加的压力^[2]以及试样体积^[3]等因素。苗强强等^[4]研究含水率和干密度对渗气系数的影响, 并得到渗气系数与含水率和干密度之间的线性表达式; 姚志华等^[5]分析了黄土的各向异性对渗气系数的影响, 发现横向试样的渗气系数总是小于竖向试样的渗气系数; 汪

龙等^[6]研究了膨润土-砂混合材料的渗气系数范围, 得出混合物的渗气系数随干密度和含水率的增加呈指数降低; 彭尔兴等^[7]研究了高渗透率含砂细粒土的气体渗透规律, 发现土样渗气率测试值随着进气压力增大逐渐趋于稳定; 陈存礼等^[8]发现体积含气率、应力对渗气系数有明显的影 响, 在增湿状态下, 含水率对渗气系数的影响稍大; Blackwell 等^[9]研究发现当垂向压力达到 200 kPa 时, 尽管小孔隙的压力响应小于大孔隙, 大孔隙的渗气率也会受到明显的影 响; Iversen 等^[10]分析了两种不同体积土样的渗气性的尺寸依赖效应, 这种效应在砂

土中不明显; Moon 等^[11]发现在最优含水率(最大干密度)时渗气率最低,非饱和土的结构和孔隙特征对渗气性有显著的影响; Minh 等^[12]研究了压实作用下 3 种法国耕植土的渗气性,得出砂壤土的渗气性与垂向应力有很强的相关性。

从前人的研究来看,对于气体渗透特性的研究主要集中在土壤、砂、膨润土等材料上,对典型马兰黄土渗气性的研究较少,而且只是从数据角度分析多孔材料的渗气规律,并没有从微观试验角度进行解释。为了更好的研究典型马兰黄土的气体渗透特性,本次主要利用马兰黄土的室内渗气试验,并结合微观电镜照片研究马兰黄土的渗气规律,本文得出的渗气参数以及相关的渗气规律对研究马兰黄土孔隙特征、水气渗透特性及与马兰黄土相关的环境问题(垃圾填埋和废气扩散)具有重要的参考价值。

1 材料与方方法

1.1 试验材料

马兰黄土(Q₂)作为一种分布广且厚度稳定(一般厚度 10—30 m)的多孔材料,其位于更新统最顶部,是典型的风成黄土,各向异性明显,且竖向,孔隙较横向孔隙发育,这种疏松多孔的结构特性为水、气在土体中的运移、储存提供了天然通道,水、气两相在马兰黄土中流动,使孔隙空间发生变形,甚至造成土体部分细颗粒重新排

列,造成马兰黄土的湿陷变形和强度降低,这些问题与马兰黄土地区的工程施工密切相关。本次土样于 2016 年 7 月取自粉黄土和黏黄土带中甘肃黑方台、陕西延安、陕西泾河附近的典型风积黄土剖面,3 个取样点位于图 1 中黄土高原的粉黄土带和黏黄土带^[13]。

试验分析时间为 2016 年 9—12 月,通过试验得到 3 种黄土的基本物理学指标。由表 1 可知,3 种黄土的颗粒组成差异较大,都主要以粉粒为主,粉粒含量基本保持稳定,其含量在 70% 左右,但黑方台黄土的砂粒含量明显高于其他两种黄土,3 种土中黏粒含量最高的是泾河剖面黄土。

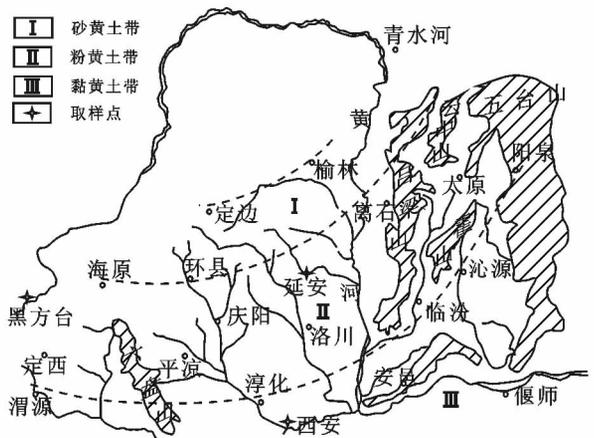


图 1 马兰黄土粒度水平分带及取样点

表 1 埋深 4 m 3 种黄土的基本物理指标

取样地点	比重/ (g · cm ⁻³)	天然 含水率/%	液限/ %	塑限/ %	干密度/ (g · cm ⁻³)	颗粒组成/%		
						砂粒	粉粒	黏粒
						(0.25~0.075 mm)	(0.075~0.005 mm)	(<0.005 mm)
甘肃黑方台	2.69	5.35	26.90	16.12	1.35	23.46	67.80	8.74
陕西延安	2.65	11.62	27.67	15.14	1.43	12.35	73.46	14.19
陕西泾河	2.70	11.97	29.12	14.00	1.47	2.78	73.06	24.16

1.2 试验装置及方案

本次渗气性试验装置为改进的 ZC-2015 型渗气仪^[14],测试原理是基于抽真空在仪器系统内形成负压,仪器密闭系统与外界大气压形成压差,进而进行变压差渗气测试,本次试验采用的渗气仪有两个气室,10 L 的大气室够满足一般工况下非饱和黄土的渗气试验,1 L 小气室可以用于低渗气率材料的渗气性测量。本文中 原状风干黄土和重塑土的渗气率范围在 10⁻¹²~10⁻¹⁵ m²,试验装置的渗气率测量范围为 10⁻¹⁰~10⁻¹⁶ m²,测试的渗气率范围较大,能很好的满足非饱和黄土的渗气试验。另外,渗气仪能进行不同体积土样的渗气试验,测试装置 a 可用于大土块的渗气试验,测试装置(b)一般用于小体积试样的渗气试验。原理图如图 2 所示。

渗气仪的主要测试步骤为:(1)抽真空阶段。该阶段主要是利用真空泵对渗气仪内部的密闭系统进行抽真空,使仪器内部系统和外界大气压形成测试所需的压差。(2)试验阶段。试验过程中空气通过土样进入仪器系统,测试装置中的汞柱在压差作用下通过标定的测试

点,利用测试点记录的数据得出土样的渗气率。本次试验的测试气体为空气,空气在试验土样中的流动属于低速渗流,土体渗气率的计算满足气体达西定律。利用仪器测试过程中气体的物质的量守恒以及达西定律的微分公式,最终得出黄土的气体渗透率公式。

在黑方台和延安马兰黄土剖面顶部以下的 2, 4, 6, 8, 10 m 深度处取大块土样,在泾河剖面顶部以下取 4 m 深度处的大块土,将取回的大块土样先放置在室内自然风干得到原状风干样。重塑土制样时,通过对黄土样进行烘干、碾碎、过筛(孔径 0.5 mm)、加水拌匀、静置、压样等制备过程得到不同工况的重塑土样。在土样与环刀接触面,不存在完全的气体零流速“固壁”情况,会产生“气体滑脱”现象^[15]。在制样时,考虑气体易从环刀壁绕流和土样边缘泄露问题,在环刀周围涂抹一层凡士林,主要起到密封作用。

1.3 渗气率计算方法

渗气率计算方法参照刘锦阳等^[14]的方法计算,计算公式为:

$$k = \ln \frac{h_0 EV_S L}{h AP_{\text{atm}} t}$$

式中: k 为气体渗透率 (m^2); h_0 为 P_0 点汞柱对应的刻度 (cm); h 为任一时刻 t 水银柱高度为 h (cm); E 为空气黏滞系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); L 为气体渗径 (m); A 为气体渗透面积 (m^2); V_S 为密闭系统的体积 (cm^3); P_{atm} 为标准大气压 (Pa)。

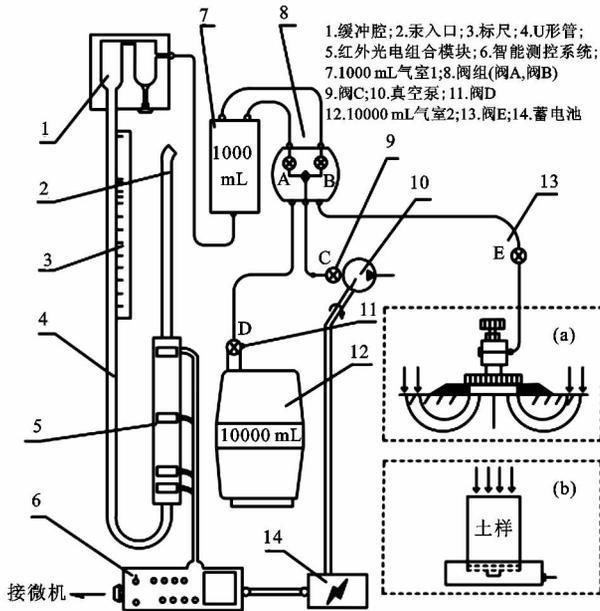


图 2 改进的 ZC-2015 型渗气仪

2 结果与分析

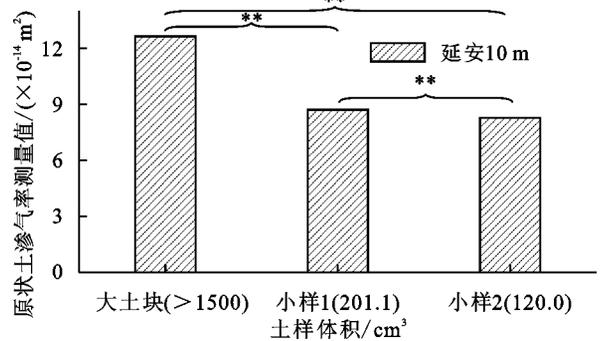
2.1 渗气率与土样体积的关系

渗气率又称气体渗透率, 是多孔材料的基本性质, 表征在压力梯度作用下气体通过测试多孔材料的难易程度, 也是多孔介质流体传导性的指标。主要与土样体积、干密度、饱和度、孔隙结构、压实度等土的结构参数有关, 同时受外加压力梯度的影响。与饱和渗透系数存在一定的函数关系, 能预测非饱和土的饱和渗透系数。

原位和室内试验表明, 不同体积土样的渗气率测量值有一定的尺寸效应, 即土样体积越大, 渗气率测量值越大。以延安 10 m 黄土为例, 取 3 种不同体积 (体积大于 1500 cm^3 的大土块、小样 1 ($\phi=8 \text{ cm}, h=4 \text{ cm}$)、小样 2 ($\phi=6.18 \text{ cm}, h=4 \text{ cm}$)) 的土样进行渗气试验, 其中大土块与小样 1 和小样 2 的渗气面积和渗径不同造成的体积不同, 小样 1 和小样 2 渗径相同, 渗气面积不同造成土样体积差异。由图 3 可知, 渗气率测量值随着土样体积增大而增大, 即尺寸依赖效应。由图 4 可知, 当试样的体积增大时, 贯通的主动脉孔隙及延伸的边缘孔隙越多^[16], 孔隙的连通性越好, 气体流动的有效路径越多, 土样的渗气性越好。从数据自身考虑, 运用独立样本 T 检验法对 3 组数据的均值进行显著性比较。得出不同体积的渗气率均值间显著性关系为极显著性差异。综上, 土样体积对渗气性影响较大。

由图 5 可知, 不同体积下渗气率测量值存在明显

的规律, 即体积越小, 渗气率测量值越小, 不同深度下延安黄土的渗气率测量值呈现一定的波动性, 黑方台黄土的渗气率测量值随着深度增大而减小。图 5(a) 中 6 m 的原状风干样中连通性孔隙较多, 3 种体积下其渗气率测量值相比其他深度的值大。对比小样 1 和小样 2, 渗径都为 4 cm, 渗气面积不同。小样 2 的渗气面积较小, 单位时间内进入土样中的空气体积小。测试水银柱下降较慢, 渗气率测量值较小。



注: ** 表示置信度为 0.95 时极显著差异。

图 3 延安原状风干黄土渗气率测量值与土样体积的关系

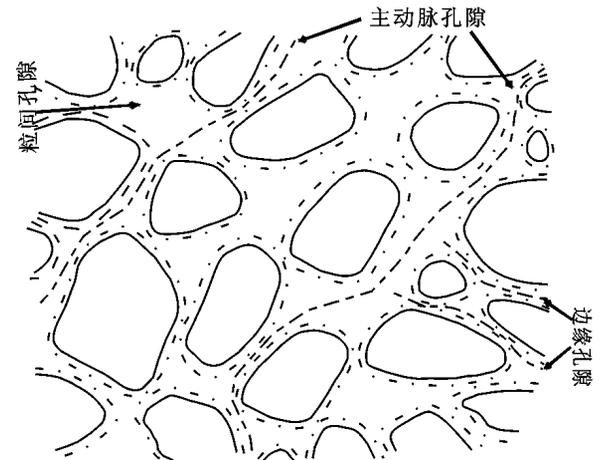


图 4 主动脉孔隙

2.2 渗气率与土样渗径的关系

渗气率是土样渗透性的基本物理指标, 渗气性试验过程中合理的渗径是确定渗气率的关键, 实际的试验中不同渗径下的渗气率只是渗气率的测量值。图 6(a) 为泾河剖面的原状黄土风干后的试样 (下文称原状风干黄土) 和重塑土 ($\rho_d = 1.4 \text{ g/cm}^3, \omega = 10\%$) 的渗气率与渗径的关系曲线, 原状风干黄土和重塑土的渗气率都是随着渗径的增大而减小, 最终趋于稳定, 重塑土中含水率越大, 这种变化趋势更明显。

土样的渗气面积相同时, 渗径越大时空气通过土样的时间越长, 渗气率越低。经过长期的自然风干作用, 原状样中的自由水和部分弱结合水已经完全蒸发, 渗气试验可以忽略水-气和水-固两相之间的相互作用^[17], 原状黄土中的孔隙主要是结构性大孔隙, 这些孔隙在土中分布均匀且连通性好, 而重塑土需要考虑水、气、土三相相互作用, 且制样过程破坏了原状

风干黄土的结构和颗粒间的胶结,因此,原状黄土的渗气率测量值和重塑黄土的渗气率测量值相差一个量级。另外,图 6(a)中不同渗径的原状黄土存在结构性差异,这种结构性差异随着渗径增大而减小,渗气率测量值也随着渗径的增大呈现波动性变化,而重塑土的土样疏松,结构性和胶结较差,其渗气率测量值随着渗径平稳下降。

图 6(b)为干密度 $\rho_d=1.5 \text{ g/cm}^3$ 时,不同含水率下沪河重塑黄土渗气率测量值和土样渗径的关系曲线,含水率在 11.8% 时,渗气率测量值与渗径的关系

不明显,关系曲线呈现波动状。重塑土样渗径的变化范围为 4~10 cm,土样的渗气率测量值变化范围较小,基本在同一个量级内变化,不同含水率下,土样稳定的渗径基本为 8 cm。含水率越大时渗气率测量值随着渗径的增大而减小的趋势越明显。综上,原状风干黄土和重塑土的渗径大于 8 cm 时,渗气率测量值基本不变,则渗气率对应的土样的稳定渗径为 8 cm,下文中不同工况下重塑土样的渗径都为 8 cm,这样既使制样方便,又能降低测量误差。

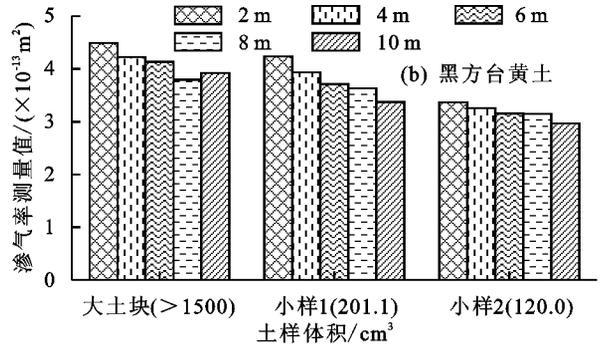
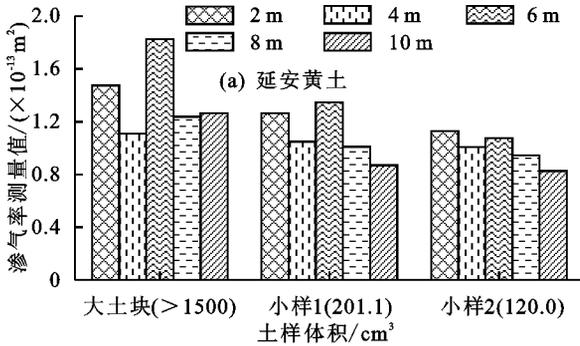


图 5 原状风干黄土渗气率测量值与土样体积的关系

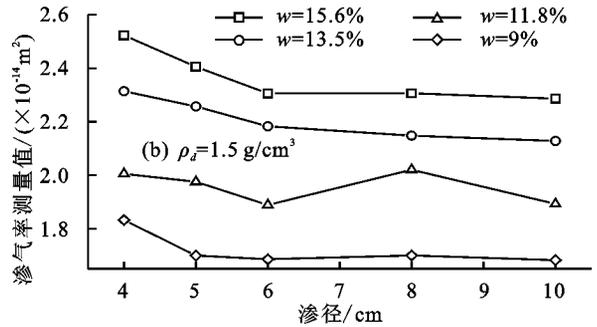
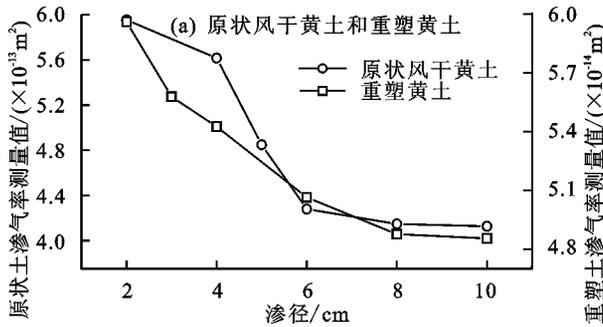


图 6 沪河剖面黄土渗气率与渗径的关系曲线

2.3 渗气率与土样干密度的关系

由图 7 可知, ρ_d 范围为 $1.35 \sim 1.60 \text{ g/cm}^3$, 不同含水率下, 渗气率的整体变化趋势都是随着干密度的增大而减小, 干密度越大, 重塑土越密实, 单位体积内的土骨架颗粒越多, 有效渗气孔隙越少, 渗气率越小。在干密度较小时, 渗气率的减小趋势很明显, 随着干密度的增大, 渗气率缓慢减小。在 $\rho_d=1.6 \text{ g/cm}^3$, 渗气率最小, 含水率在 17.3% 时, 渗气率随着干密度的变化最明显, 随着含水率的减小, 渗气率的变化趋势逐渐减小, 在 $w=7.4\%$ 时, 渗气率在不同干密度下的变化范围最小。本次渗气试验基于小范围变压渗气原理, 压差绝对值变化范围为 $90 \sim 66 \text{ kPa}$, 而本次工况下基质吸力的范围为 $80 \sim 1000 \text{ kPa}$, 基质吸力的值明显大于试样压差, 且方向与孔隙气压方向相反, 则其对土样渗气产生一定的阻滞作用。基质吸力随着土样含水率的增大而减小^[18], 所以阻滞作用会随着含水率的增大而逐渐减小, 导致渗气率随着含水率的增大而增大, 渗气率和渗径的趋势随含水率的增大而更明显。

为了进一步探究典型黄土渗气规律, 利用微观试

验进行研究。首先制备电镜试样, 将不同干密度和不同埋深的重塑黄土置于室内自然风干, 然后, 将风干后的土样切成直径 1 cm, 高 1.5 cm 的圆柱体, 再按照环氧树脂、丙酮、乙二胺、邻苯二甲酸二丁酯溶液比例 $100:50:4:1$ 配成树脂混合液。将树脂混合液用注射器注入圆柱体土样, 在自然状态下硬化 30 d。对硬化样进行抛光、喷碳、粘贴导电胶等过程。最后, 利用 Quanta FEG 型扫描电镜得到不同放大倍数下的电镜图像。

利用扫描电镜观察不同工况下黄土的微结构特征, 并用 Ipp 图像处理软件处理得到的电镜照片, 主要对孔隙结构参数进行统计分析。本文采用雷祥义^[19]提出的孔隙划分标准为标尺对孔隙进行分类, 将孔隙分为大孔隙 $d > 32 \mu\text{m}$ 、中孔隙 $8 < d < 32 \mu\text{m}$ 、小孔隙 $2 < d < 8 \mu\text{m}$ 、微孔隙 $d < 2 \mu\text{m}$ 。本次选取的 SEM 图像都是放大倍数为 800 倍下的图像。不同干密度下重塑土的电镜照片如图 8 所示, 干密度越大, 小颗粒充填了孔隙, 使单位面积内颗粒含量越高, 孔隙面积减小。图 9 为孔隙面积与干密度关系图, 干密度小于 1.5 g/cm^3 时, 大孔隙明显减小。随着干密度

的增大, 总孔和大孔面积减小, 中、小孔面积增大, 总孔面积的变化趋势受大孔和中孔面积决定, 大孔隙和中孔隙在渗气过程起主导作用。

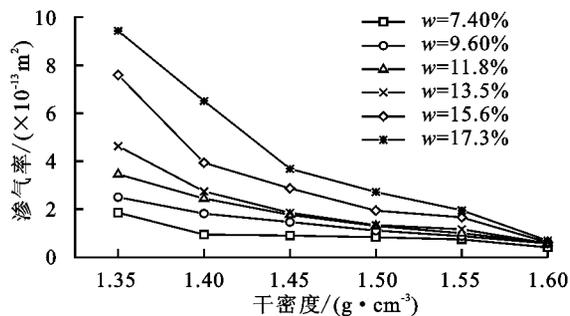


图 7 延安重塑黄土的渗气率与干密度的关系曲线

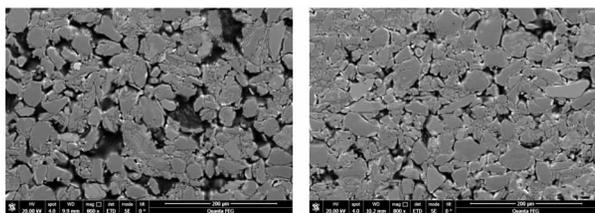


图 8 延安 10 m 重塑黄土的电镜照片 (×800)

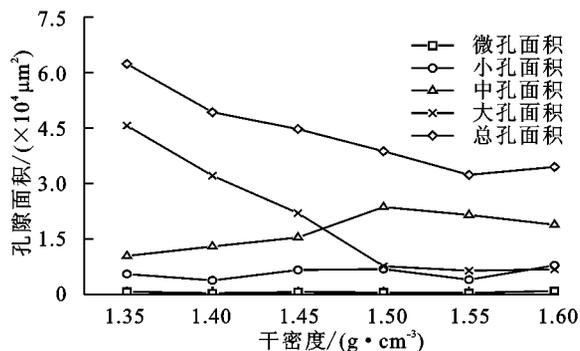


图 9 孔隙面积与干密度的关系曲线

对于不同粒组的土, 细粒土(黏土和粉土)的渗气性小于粗粒土(砂土)的渗气性。3 种土的渗气率与干密度的关系如图 10 所示, 渗气率都随着干密度的增大而减小。黑方台黄土中砂粒含量最高, 微观电镜下大孔较多, 气体渗流通道多, 渗气率最大, 而浐河剖面黄土中的黏粒含量远大于砂粒含量如图 11 所示, 黏粒主要聚集在骨架颗粒周围, 并能堵塞大孔隙, 这使得有效渗气孔隙减少, 因此, 浐河剖面黄土的渗气率明显小于其他两种土的渗气率。

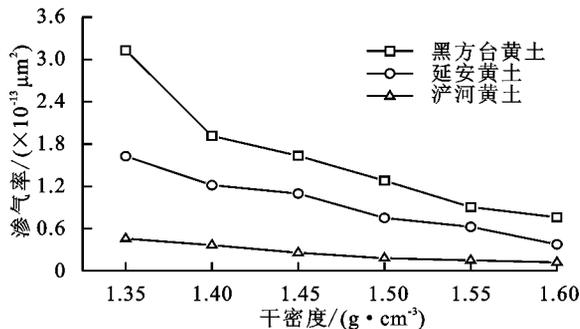


图 10 3 种重塑黄土的渗气率与干密度的关系曲线

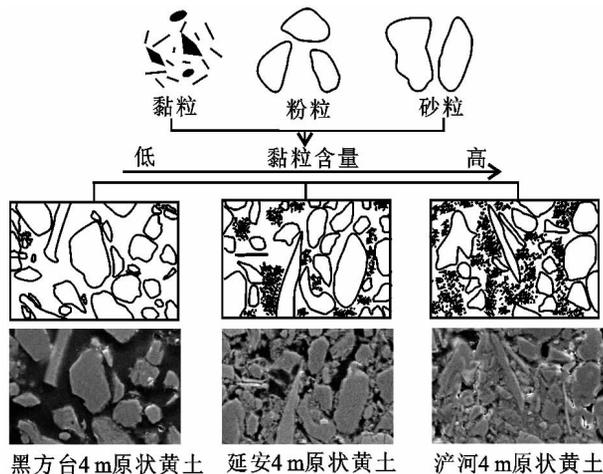


图 11 3 种黄土不同粒组的概念模型

2.4 渗气率与土样埋深的关系

含水率为 11.8% 时, 不同干密度重塑黄土的渗气率和深度的关系曲线如图 12 所示, 渗气率随深度的变化规律基本一致, 不同深度的渗气率基本稳定, 变化幅度较小, 整体表现为随深度增加渗气率有微小的减小。由于黄土是风积作用形成的, 在深度上其粒径分布为上粗下细, 随深度增加砂粒含量较小, 黏粒含量增大, 因此, 重塑土的渗气率随深度增加有微小的减小。图 12 中干密度较小时, 渗气率波动最明显。随着干密度增大, 不同深度下渗气率波动性减小。4 m 的重塑黄土相比其他深度颗粒较细, 渗气率较低, 4 m 处图形呈下凹趋势。

图 13 为 $\rho_d = 1.5 \text{ g/cm}^3$, $w = 14\%$ 时, 两种深度重塑土的电镜照片, 随着深度增大, 黏粒含量增大, 孔隙面积明显减少; 图 14 统计了不同深度下各种孔隙的面积, 随着深度增加, 大孔和中孔变化明显, 总孔面积整体呈下降趋势。

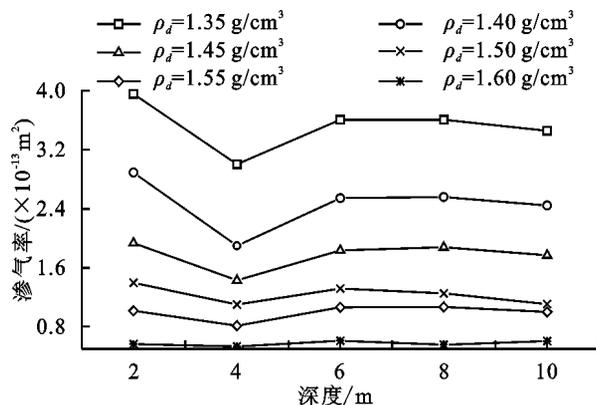


图 12 延安重塑黄土渗气率与深度的关系曲线

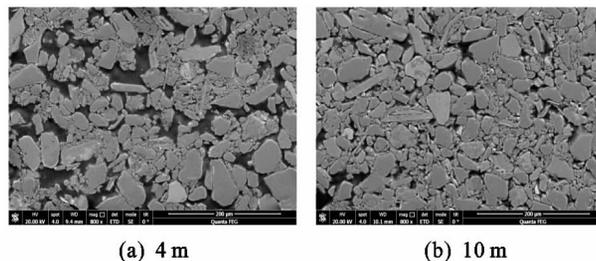


图 13 不同深度延安重塑黄土的电镜照片 (×800)

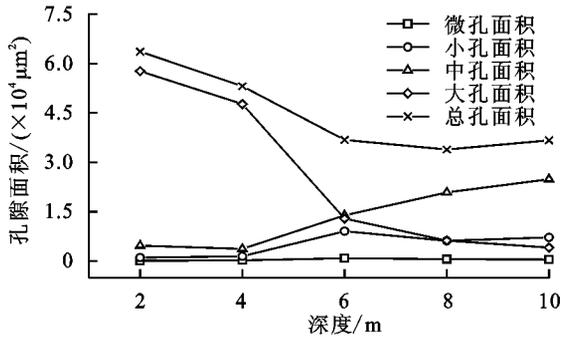


图 14 孔隙面积与深度的关系曲线

William 等^[20]通过对前人工作的整理,根据粒径大小、颗粒干净和均匀程度绘制了典型多孔介质的渗气率量级(图 15),多孔介质的渗气率量级在 $10^{-7} \sim 10^{-16} \text{ m}^2$ 。不同材料的渗气率差异较大,本文中状风干黄土和重塑土的渗气率范围在 $10^{-13} \sim 10^{-15} \text{ m}^2$,这与图中的渗气率量级比较吻合。

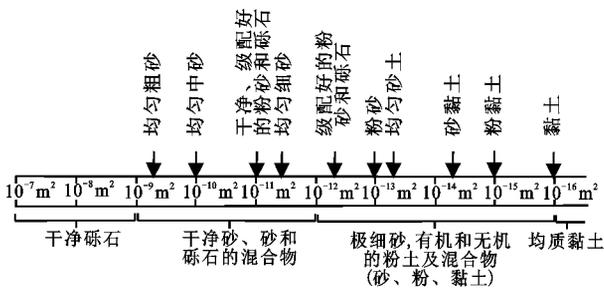


图 15 不同结构黄土的渗气率量级

3 结论

(1) 试验发现,不同体积的典型马兰黄土的渗气率 k_a 存在一定的尺寸依赖效应,即土样体积越大,渗气率越大,黑方台原状风干黄土的尺寸效应更明显。

(2) 原状风干黄土和重塑土的渗气率测量值都是随着渗径的增大而减小,最终趋于稳定,渗气率对应的土样的稳定渗径为 8 cm。原状风干黄土的渗气率测量值比重塑土的大一个数量级,渗气率测量值随着渗径的增大波动性下降,而重塑土破坏了土的结构,其测量值随着渗径平稳变化。

(3) 重塑土干密度越大,总孔和大孔面积减小,中、小孔面积增大,单位体积内的土骨架颗粒越多,有效渗气孔隙越少,渗气率越小。不同埋深的重塑土,随着深度增加,大孔和中孔变化明显,总孔面积整体呈下降趋势。

(4) 3 种黄土中颗粒组成不同,土颗粒中黏粒含量越高,土体有效渗气孔隙减少,重塑土的 k_a 减小;对比延安不同深度的重塑土,得出渗气率随着取土深度的增加有微小的减小。

参考文献:

[1] Tuli A, Hopmans J W, Rolston D E, et al. Comparison of air and water permeability between disturbed and undisturbed soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2005, 69(5): 1361-1371.
[2] Kuncoro P H, Koga K, Satta N, et al. A study on the

effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity [J]. Soil & Tillage Research, 2014, 143(12): 172-179.

[3] Iversen B V, Schjønning P, Poulsen T G, et al. In situ, on-site and laboratory measurements of soil air permeability: boundary conditions and measurement scale [J]. Soil Science, 2001, 166(2): 97-106.
[4] 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.
[5] 姚志华,陈正汉,黄雪峰,等. 非饱和 Q_0 黄土渗气特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(6):1264-1273.
[6] 汪龙,方祥位,申春妮,等. 膨润土-砂混合型缓冲/回填材料渗气规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(增刊):3381-3388.
[7] 彭尔兴,孙文博,章定文,等. 非饱和含砂细粒土的气体渗透特性研究[J]. 岩土力学,2016,37(5):1301-1306.
[8] 陈存礼,张登飞,张洁,等. 等向应力条件下原状 Q_0 黄土的渗气特性研究[J]. 岩土工程学报,2017,39(2):287-294.
[9] Blackwell P S, Green T W, Mason W K. Responses of biopore channels from roots to compression by verticle stresses [J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(4): 1088-1091.
[10] Iverson B V, Moldrup P, Schjønning P, et al. Air and water permeability in differently textured soils at two measurement scales [J]. Soil Science, 2001, 166(10): 643-659.
[11] Moon S, Nam K, Kim J K, et al. Effectiveness of compacted soil liner as a gas barrier layer in the landfill final cover system [J]. Waste Manage, 2008, 28(10): 1909-1914.
[12] Minh A, Cui Y J, Richard G, et al. A study on the air permeability as affected by compression of three French soils [J]. Geoderma, 2011, 162(1/2): 171-181.
[13] 孙建中. 黄土学上篇[M]. 香港:香港考古学会出版,2005:147-150.
[14] 刘锦阳,李喜安,简涛,等. 马兰黄土渗气率与饱和渗透系数的关系研究[J]. 水文地质工程地质,2017,44(6):154-162.
[15] Klinkenberg L J. The permeability of porous media to liquids and gases [J]. Socar Proceedings, 1941, 2(2): 200-213.
[16] Schjønning P, Lamandé M, Berisso F E, et al. Gas diffusion, Non-darcy air permeability, and Computed tomography images of a clay subsoil affected by compaction [J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(6): 1977-1990.
[17] Jalbert M, Dane J H. A handheld for intrusive and nonintrusive field measurements of air permeability [J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2(4): 611-617.
[18] 赵天宇,王锦芳. 考虑密度与干湿循环影响的黄土土水特征曲[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(6): 2445-2453.
[19] 雷祥义. 中国黄土的孔隙类型与湿陷性[J]. 中国科学(B辑),1987,38(12):1309-1316.
[20] William W N. Radon transport from soil to air [J]. Reviews of Geophysics, 1992, 30(2):137-160.