

DOI: 10.11779/CJGE2021S2016

# 聚丙烯酰胺改性击实黏土气体阻隔性能试验研究

温嘉明, 万佳磊, 毕钰璋, 李颖臻, 杜延军\*

(东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 211189)

**摘要:** 以常州某污染场地覆土为研究对象, 通过持水性能测试、土体气体渗透试验和气体扩散试验, 研究 PAM 改性击实黏土的含水率、失水率、气体渗透率  $K_p$  和气体扩散系数  $D_p$  随掺量的变化规律。结果表明, 掺量增加, 烘干后击实黏土的含水率增大, 失水率则反之, 当 PAM 掺量为 0.8%~1.0% 时, 持水性能优于普通农林持水剂; 掺量增加, 气体渗透率  $K_p$  和气体扩散系数  $D_p$  降低, 当掺量从 0 增加到 1.0% 时, 气体渗透率  $K_p$  下降约 1 个数量级, 气体扩散系数  $D_p$  为原来的 35%。

**关键词:** 击实黏土; 聚丙烯酰胺; 气体阻隔性能; 气体渗透率; 气体扩散系数

**中图分类号:** TU43      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2021)S2-0068-04

**作者简介:** 温嘉明(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事环境岩土工程方面的研究工作。E-mail: Wjming7@163.com。

## Experimental investigation on gas permeability and diffusion of polyacrylamide-amended CCL

WEN Jia-ming, WAN Jia-lei, BI Yu-zhang, LI Ying-zhen, DU Yan-jun

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** A series of water retention tests, gas permeability and diffusion tests are conducted to investigate the water content, water loss rate, gas permeability  $K_p$  and gas diffusion coefficient  $D_p$  of CCL with different modified amounts of PAM. The results indicate that the water content increases with the increasing amount of PAM, the water loss rate exhibits an opposite trend, and the water retention performance is better than that of the ordinary agroforestry water-retaining agent with the dosage ranged from 0.8% to 1.0%. The gas permeability and gas diffusion coefficient decrease with the increasing amount of PAM. When the content increases from 0 to 1.0%,  $K_p$  decreases by about one order of magnitude, and  $D_p$  is 35% of the original one.

**Key words:** compacted clay liner; polyacrylamide; gas barrier property; gas permeability; gas diffusion coefficient

## 0 引言

击实黏土层(CCL)作为水平阻隔系统中的主要阻隔结构之一, 可以有效防止挥发性有机物(VOC)气体向上迁移。研究表明, 气体在土体中的迁移方式为对流和扩散, 但包括甲苯、三氯乙烯等 VOC 气体在土体中的迁移均以扩散为主, 其扩散通量较对流通量大 1~3 个数量级<sup>[1]</sup>, 对流作用仅在夏季土体中蒸气压较高时影响高分子 VOC 气体在其中的迁移, 气体在土体中的迁移还受到气体渗透率、空气-水相对渗透率以及含水率 3 个指标的影响<sup>[2]</sup>。因此, 有必要研究击实黏土气体的对流和扩散行为随含水率的变化规律, 以评价其对 VOC 气体的阻隔性能。

关于含水率对土体中气体迁移方式的影响多见于膨润土防水毯(GCL)。Pitanga 等<sup>[3]</sup>和 Bouazza 等<sup>[4]</sup>发现 GCL 水化后, 气体渗透率随重量含水率的增加而减小, 变化范围为  $1.0 \times 10^{-18} \sim 1.0 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ , 当 GCL 失水开裂后, 甚至可达  $0.03 \sim 0.21 \text{ m}^2$ 。Rouf 等<sup>[5]</sup>进一

步研究了不同含水率下 GCL 的气体扩散系数和气体渗透率, 当 GCL 的表观饱和度超过 65% 时, 二者均下降, 但其气体扩散系数的量级远大于气体渗透率, 此时扩散作用为主要驱动力。因此推测, 对于 CCL, 过低的含水率会导致扩散-对流作用联合驱动 VOC 气体在土体中迁移, 严重影响 CCL 的气体阻隔性能。同时, 当含水率较低时, 击实黏土层会失水开裂, 进一步发展为裂隙网络, 最终成为新的优势通道, 使 VOC 气体在单相流作用下沿裂隙迁移<sup>[6]</sup>, 对周边环境造成极大威胁。

为解决上述问题, 亟需在黏土中加入改性剂防止其失水开裂, 以提高击实黏土层的气体阻隔性能。聚丙烯酰胺(PAM)作为工业生产中最常见的超级持水

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1802300, 2018YFC1803100); 国家自然科学基金项目(41872248)

收稿日期: 2021-08-16

\*通信作者(E-mail: duyanjun@seu.edu.cn)

凝胶 (SAP) 之一, 其长期持水性能优良, 常用作农业领域中的持水剂<sup>[7]</sup>。聚合物通过物理化学作用吸附于土体颗粒表面, 将颗粒完全包裹后经分子展开进行联结, 提升土体的持水性能, 从而改善其水力特性和渗透性能<sup>[8]</sup>。Qi 等<sup>[9]</sup>通过恒温蒸发试验和图像处理技术, 发现 PAM 抑制土体中裂隙的形成。而 Rowe 等<sup>[10]</sup>采用土柱试验, 对比了 PAM 改性前后 GCL 在不同温度场下的开裂情况, 结果表明 40℃下 PAM 改性后 GCL 中裂缝数量明显较小。当前, 针对聚合物改性土的研究主要集中于力学和水力特性, 对其抑制土体失水开裂的研究相对较少, 尚无改性前后土体气体阻隔性能的测试结果。因此, 有必要开展 PAM 改性后击实黏土层气体阻隔性能的试验研究。

本文通过持水性能测试、气体渗透试验和气体扩散试验, 研究经 PAM 改性后击实黏土层的持水性能和气体阻隔性能, 明确 PAM 改性击实黏土层的作用机理, 确定其作为击实黏土层改性剂的最优掺量。

## 1 试验材料和方法

### 1.1 黏土

试验用黏土取自江苏常州某污染场地, 典型污染物包括总石油烃、苯系物、氯苯、氯代烃等。其基本物理性质指标为:  $G_s=2.72$ ,  $w_L=35.14\%$ ,  $w_p=19.90\%$ ,  $w=22.5\%$ ,  $w_{opt}=15.6\%$ ,  $\rho_{dmax}=1.78 \text{ g/cm}^3$ 。

### 1.2 聚丙烯酰胺

预备试验表明, 两性离子型 PAM 持水性能和气体阻隔性能最佳, 选其为改性剂, 由河南郑州绿洁环保材料有限公司提供。

### 1.3 试验方法

#### (1) 持水性能测试

将烘干后的黏土与 PAM 混合, 加水后拌和均匀, 采用液压制样法制备击实土样, 具体方案如表 1 所示。

表 1 试验方案

Table 1 Test schemes

| 改性剂<br>名称       | 类型        | 分子<br>量/w | 掺量<br>/%                         | 烘干时<br>间/h                      | 测试<br>参数   |
|-----------------|-----------|-----------|----------------------------------|---------------------------------|--|
| 聚丙烯酰<br>胺 (PAM) | 两性<br>离子型 | 1200      | 0, 0.2,<br>0.4, 0.6,<br>0.8, 1.0 | 0, 3.5, 7,<br>10.5, 14,<br>17.5 | 含水率<br>$w$ 、失水<br>率 $W_s$ 、气<br>体渗透率<br>$K_p$ 、气<br>体扩散系数<br>$D_p$ |

预备试验表明, 击实土样的初始含水率均应控制为 25%, 干密度为 1.51 g/cm<sup>3</sup>, 其压实度均为 85%。将击实土样置于开孔率大于 85% 的铝盒中, 置于烘箱中, 温度为 100℃, 每 3.5 h 记录土样质量变化, 根据式 (1) ~ (2) 计算土样的含水率  $w$  和失水率  $W_s$ :

$$w = \frac{m_s \times 0.25 - (m_0 - m_t)}{m_s} \times 100\% , \quad (1)$$

$$W_s = \frac{m_0 - m}{m_s \times 0.25} \times 100\% . \quad (2)$$

式中,  $m_s$  为黏土与 PAM 的质量之和 (g),  $m_0$  和  $m_t$  为烘烤前和  $t$  时间击实土样的质量 (g)。

#### (2) 土体气体渗透试验

试验仪器为德国 Eijkelkamp 公司的土体空气渗透仪, 以此测试不同 PAM 掺量下击实土样的气体渗透率。试验步骤为: ①按表 1 制备试样, 试样尺寸为 50 mm×50 mm, 压样静置 7 d 后; ②依次将厚橡胶密封圈、样板、多孔板、击实土样放入样品支架内, 放置夹具后固定, 完成密封; ③将开关逆时针旋转至垂直位置, 打开流量计, 控制气压在适当的范围内进行测量, 测量时间应尽量小于 2 min, 记录测量值。

基于文献[5]推导出击实土样的气体渗透率:

$$K_p = \rho_l g \frac{VL}{tpA} . \quad (3)$$

式中  $\rho_l$  为空气密度 (kg/m<sup>3</sup>);  $t$  为测试时间 (s);  $V$  为  $t$  时间内通过试样的空气体积 (m<sup>3</sup>);  $L$  为 CCL 的厚度 (m);  $p$  为进气气压值 (hPa);  $A$  为 CCL 的底面积 (m<sup>2</sup>)。

#### (3) 土体气体扩散试验

采用自主研发的 3D 打印气体扩散仪 (如图 1 所示) 测试不同 PAM 掺量下击实土样的气体扩散系数。试验步骤为: ①根据表 1 制备不同 PAM 掺量下的 CCL, 试验尺寸为 61.8 mm×20 mm, 压样静置 7 d 后; ②将其置于扩散室顶端开口处, 并在土样与扩散室顶端接触部位均匀涂抹凡士林, 盖上网格盖; ③开启进气口和出气口, 打开氮气瓶, 使氮气均匀平稳地经进气口进入扩散室内, 采用氧气传感器实时显示扩散室内氧气浓度变化, 至扩散室内氧气体积浓度减小至 0.3%~0.6% 时, 继续通 5~15 s 氮气后, 关闭进气口、出气口和氮气瓶; ④采用数据采集仪和氧气传感器每 5 min 自动采集记录扩散室内氧气浓度  $C_t$ , 直至  $C_t$  与大气中氧气浓度  $C_0$  相同并达到稳定状态。

基于文献[11], 结合 Fick 第一定律, 联立式(4)~(7) 计算击实土样的气体扩散系数  $D_p$ :

$$D'_p = h_s h_c k , \quad (4)$$

$$\ln \frac{\Delta C_t}{\Delta C_0} = kt , \quad (5)$$

$$K_j = \frac{D_p}{D'_p} = \frac{\varepsilon}{\alpha_1^2} \frac{1}{h_s h_c} , \quad (6)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s} - \theta_v . \quad (7)$$

式中  $D'_p$  和  $D_p$  为校正前后的气体扩散系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )； $h_s$  为 CCL 高度 (cm)； $h_c$  为扩散室高度 (cm)； $k$  为  $\ln(\Delta C_t / \Delta C_0)$  与  $t$  图中直线部分的斜率； $\Delta C_t$  和  $\Delta C_0$  分别为  $t$  和  $t_0$  时刻土样两端的氧气浓度差； $K_j$  为考虑土体中氧气浓度变化引入的校正系数； $\alpha_1$  为方程  $(\alpha \cdot h_s) \tan(\alpha \cdot h_s) = (h_s \cdot \varepsilon) / h_c$  的第 1 个大于 0 的解； $\varepsilon$  为气体孔隙率； $\rho_b$  为土柱密度，单位为  $\text{g}/\text{cm}^3$ ； $\rho_s$  为土体的颗粒密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )； $\theta_v$  为土样体积含水率。

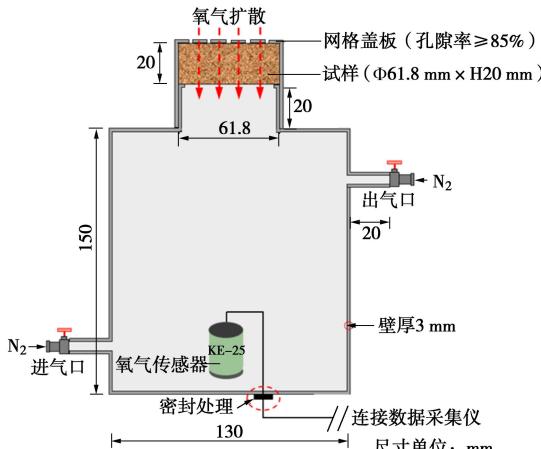


图 1 3D 打印气体扩散腔室

Fig. 1 Schematic diagram of 3D-printing gas diffusion cell

## 2 试验结果及讨论

### 2.1 PAM 摊量对击实黏土持水性能的影响

由图 2 得, 随烘干时间的增加, 击实黏土含水率下降, 失水率增大。烘干 17.5 h 后, 随 PAM 摊量增加, 击实黏土含水率依次为 4.14%, 7.49%, 8.69%, 9.39% 和 11.87%, 失水率分别为 83.43%, 70.05%, 65.24%、62.43% 和 52.52%。此外, 还发现随 PAM 摊量的增加, 击实黏土的液限依次为 45.21%, 48.79%, 51.55%, 53.62% 和 55.12%, 相对于未改性黏土的液限提高 29%~57%。

PAM 具备较强的吸水性和持水性, 其表面有大量亲水基团, 水解后阴离子固定在聚合物链上, 阳离子储存于聚合物内部, 而阴离子间的静电排斥及 PAM 内外阳离子浓度差导致的渗透差将使其发生线性膨胀, 产生三维网络状结构, 导致大量水分子进入 PAM 内部, 表明该聚合物网络对水分子具备较强的物理吸附作用<sup>[7]</sup>。因此, PAM 摊量从 0.2% 增加到 1.0%, 含水率提升 187%, 持水性能提升显著。此外, 当 PAM 摊量为 0.8% 和 1.0% 时, 100°C 下烘干 17.5 h 后土体失水率为 62.43% 和 52.52%, 对比普通农林持水剂在 60°C 下加热蒸发 360 min 后, 失水率为 62.8%~54.6%<sup>[12]</sup>, PAM 的持水性能更优, 且持水性能的提升

效果与摊量成正比。然而预实验结果表明, 摊量大于 1%, 黏土过于黏稠, 无法拌和均匀。因此, PAM 最优摊量取 1.0%。

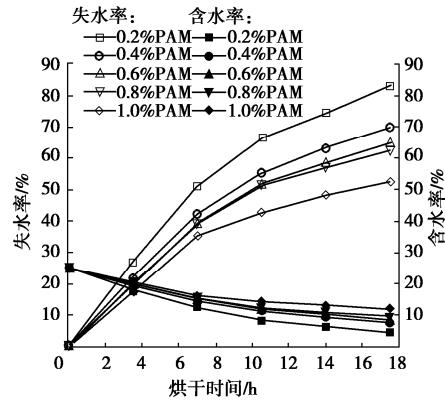


图 2 不同 PAM 摊量下击实黏土的含水率和失水率

Fig. 2 Water contents and water loss rates of CCL with different contents of polyacrylamide

### 2.2 PAM 摊量对击实黏土气体阻隔性能的影响

由图 3 可以看出, 随 PAM 摊量增加, 气体渗透率  $K_p$  和气体扩散系数  $D_p$  均降低, 与 Rouf 等<sup>[5]</sup>结果一致。当 PAM 摊量从 0 增加至 1.0% 时, 烘干后土体气体渗透率为  $1.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ , 下降约 1 个数量级; 土体气体扩散系数为  $3.05 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , 仅为 0 摊量下的 35%。结合 Li 等<sup>[8]</sup>的研究结果, 发现 PAM 可改变黏土颗粒的微观结构, 从而包裹桥接黏土颗粒, 导致改性后气体迁移通道更为曲折狭窄, 进一步降低土体的  $K_p$  和  $D_p$ 。

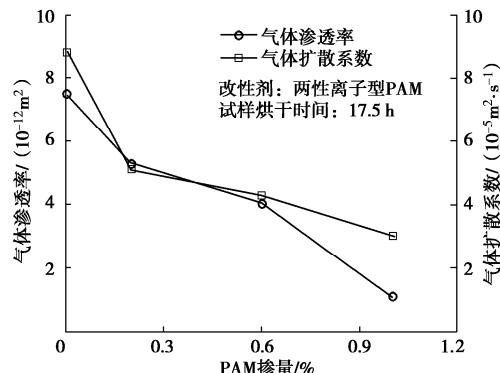


图 3 PAM 摊量对击实黏土气体渗透率和气体扩散系数的影响

Fig. 3 Effects of different amounts of polyacrylamide on gas permeability and gas diffusion coefficient of CCL

由图 4 得, 不同 PAM 摊量下, 随着烘干时间增加, PAM 改性后击实黏土的含水率降低, 气体渗透率和气体扩散系数均增大, 与 Rouf 等<sup>[5]</sup>结果一致。当 PAM 摊量达 1.0% 时, 改性后击实黏土的气体渗透率甚至优于相同含水率下的 GCL。

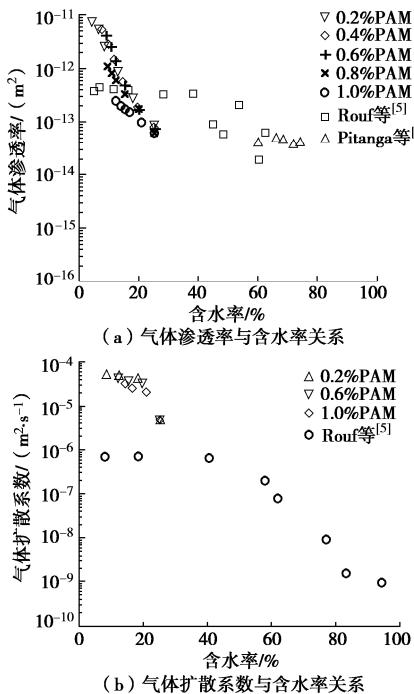


图 4 PAM 改性击实黏土气体渗透率和气体扩散系数与含水率的关系

Fig. 4 Relationship among gas permeability, gas diffusion coefficient and water content of CCL modified with polyacrylamide

### 3 结 论

本文基于持水性能测试、气体渗透试验和气体扩散试验, 研究了 PAM 改性后击实黏土的气体阻隔性能, 得到以下 2 点结论。

(1) PAM 改性后击实黏土的持水性能显著提升, 掺量为 0.8%~1.0% 时, 100°C 烘 17.5 h 后失水率为 52.52%~62.43%, 其持水效果优于普通农林持水剂。

(2) PAM 掺量增加, 含水率增加, 气体渗透率  $K_p$  和气体扩散系数  $D_p$  降低。当掺量为 1.0% 时, 击实黏土的气体渗透率  $K_p$  相对于掺量为 0 时下降约 1 个数量级, 其气体扩散系数  $D_p$  仅为 0 掺量下的 35%。

### 参考文献:

- [1] YOU K H, ZHAN H B. Comparisons of diffusive and advective fluxes of gas phase volatile organic compounds (VOCs) in unsaturated zones under natural conditions[J]. Advances in Water Resources, 2013, 52: 221~231.
- [2] CONANT B H, GILLHAM R W, MENDOZA C A. Vapor transport of trichloroethylene in the unsaturated zone: field and numerical modeling investigations[J]. Water Resources Research, 1996, 32(1): 9~22.
- [3] PITANGA H N, PIERSON P, VILAR O M. Measurement of gas permeability in geosynthetic clay liners in transient flow mode[J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, 34(1): 103000.
- [4] BOUAZZA A, VANGPAISAL T. Gas advective flux of partially saturated geosynthetic clay liners[M]// Advances in Transportation and Geoenvironmental Systems Using Geosynthetics. Denver: American Society of Civil Engineers, 2000.
- [5] ROUF M A, BOUAZZA A, SINGH R M, et al. Gas flow unified measurement system for sequential measurement of gas diffusion and gas permeability of partially hydrated geosynthetic clay liners[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(6): 1000~1012.
- [6] HORSEMAN S T, HARRINGTON J F, SELLIN P. Gas migration in clay barriers[J]. Engineering Geology, 1999, 54(1/2): 139~149.
- [7] 员学锋. PAM 的土壤保水、保肥及作物增产效应研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003. (YUAN Xue-feng. Study of PAM on Water Conservation, Fertilizer Conservation and Increasing Yield[D]. Yangling: Northwest Sci-Tech University of Agricultural and Forestry, 2003. (in Chinese))
- [8] LI Y, SHAO M G, HORTON R. Effect of polyacrylamide applications on soil hydraulic characteristics and sediment yield of sloping land[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 11: 763~773.
- [9] QI C Q, BAI Y X, LIU J, et al. Desiccation cracking behavior of polyurethane and polyacrylamide admixed clayey soils[J]. Polymers, 2020, 12(10): 2398.
- [10] YU B W, EL-ZEIN A, ROWE R K. Effect of added polymer on the desiccation and healing of a geosynthetic clay liner subject to thermal gradients[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2020, 48(6): 928~939.
- [11] 苏志慧. 应用浓度梯度法估算农田和草地土壤地表 CO<sub>2</sub> 通量[D]. 北京: 中国农业大学, 2016. (SU Zhi-hui. Using Gradient Method to Estimate Soil Surface CO<sub>2</sub> Flux in Crop and Grass Field[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese))
- [12] 张建刚. 十一种农林保水剂的基本特性对比研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009. (ZHANG Jian-gang. Comparative Analysis of Basic Properties to 11 Kind of A & F Super-Absorbent-Polymers[D]. Yangling: Northwest Sci-Tech University of Agricultural and Forestry, 2009. (in Chinese))

(编校: 孙振远)