

DOI: 10.11779/CJGE2015S2040

# 膨润土系隔离墙材料渗透特性研究综述

杨玉玲<sup>1, 2</sup>, 杜延军<sup>1, 2</sup>, 范日东<sup>1, 2</sup>, 魏明俐<sup>1, 2</sup>

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏 南京 210096)

**摘 要:** 渗透特性是隔离墙材料的主要工程特征之一。根据大量文献中有关隔离墙材料渗透特性的相关报道, 对比介绍了隔离墙材料渗透系数室内测试技术, 总结分析了材料特性和化学溶液特性对渗透系数的影响规律。结果表明: 渗透试验终止条件的合理选择对正确评价隔离墙材料长期渗透特性起决定性作用; 级配较好的原位土可使材料渗透系数降低; 渗透系数随膨润土掺量和双电层厚度增加而减小; 溶液阳离子价数和离子浓度升高、溶液介电常数降低均可使渗透系数产生不同程度增大; 膨润土预水化作用和离子水化半径对材料渗透特性的影响机制尚不完全明确。建议深入研究典型污染物和复合污染物与隔离墙材料间的相互作用, 积极推广低质量膨润土及其改性土在中国隔离墙技术中的应用。

**关键词:** 膨润土; 隔离墙; 渗透特性; 化学相容性; 双电层

**中图分类号:** TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2015)S2-0210-07

**作者简介:** 杨玉玲(1986 - ), 女, 广西贵港人, 博士研究生, 主要从事环境岩土方面的研究。E-mail: yangyuling\_seu@163.com。

## Advances in permeability for bentonite-based hydraulic containment barriers

YANG Yu-ling<sup>1, 2</sup>, DU Yan-jun<sup>1, 2</sup>, FAN Ri-dong<sup>1, 2</sup>, WEI Ming-li<sup>1, 2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering and Environmental Safety (Southeast University), Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Permeability is one of the most important engineering properties of the barriers. The permeability of the barriers is overviewed based on literature studies. The performances of various laboratory test methods are compared, and the effects of properties of barrier materials as well as chemical solution conditions on hydraulic conductivity of the barriers are summarized. The results show that the accuracy of long-term performance evaluation of the barriers depends on proper selection of the test termination criteria. Well graded in-situ soil benefits the permeability resistance of the barriers. The hydraulic conductivity generally increases with the decrease in bentonite content in the barriers, in thickness of decreases electrical double layer of the bentonite, increases in cation valence and cation concentration, and/or decreases in dielectric constant of the chemical solution. The influence mechanism of prehydration of the bentonite and hydrated ionic radius on the permeability of the barriers is not fully clear. Finally, it is suggested that further researches on interaction between bentonite-based barrier and typical contaminant or multiple contaminant should be conducted, and applications of low-quality bentonite and/or its amended product should be promoted in China.

**Key words:** bentonite; hydraulic containment barrier; permeability; chemical compatibility; electrical double layer

## 0 引 言

隔离墙技术常被用于临时或长期阻滞以下类型的污染物扩散<sup>[1-3]</sup>: ①有毒有害废弃物处置不当或污染物泄露所导致的土水污染; ②大型废弃物填埋场, 如垃圾填埋场和矿山尾矿库等渗滤液渗漏所造成的土水环境污染。隔离墙技术的工作原理是利用低渗透性的墙体对污染物或受污染土水进行封装, 防止污染物向周围环境扩散。与其他隔离墙技术相比(如水泥系隔离墙、钢板桩墙等), 膨润土系隔离墙具有防渗能力强、成本低廉和施工方便等优点, 在污染土水修复中得到

广泛应用<sup>[4]</sup>。隔离墙为人类寻求彻底、有效的污染场地修复技术提供了充分的时间保障。

低渗透性是膨润土系隔离墙材料的主要工程特征。相关研究表明, 膨润土与受污染的水体接触时, 稳定性变差, 防渗性降低, 进而影响膨润土系隔离墙材料对污染物的阻滞效果<sup>[5-6]</sup>。Shackelford 等<sup>[7]</sup>将化学溶液对材料工程特性(如渗透特性、抗剪和抗

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278100); 江苏省自然科学基金项目(BK2012022)

收稿日期: 2015-03-26

压强度等)的影响称为材料与化学溶液的化学相容性。化学相容性反映工程构件服役性能的优劣,其中渗透特性是隔离墙材料与化学溶液相容性的重要指标之一。

在欧美发达国家,膨润土系隔离墙材料在化学溶液作用下渗透特性的变化已得到广泛研究,而中国在此方面的研究才刚起步,严重制约了隔离墙修复技术在我国的应用与发展。因此,积极开展膨润土系隔离墙材料渗透特性相关研究,是中国污染场地修复技术的重要课题。本文在相关文献报道的基础上,系统介绍了膨润土系隔离墙材料渗透系数室内测试技术,总结了材料自身特性和外部化学溶液条件对隔离墙材料渗透特性的影响,并根据中国基本国情,针对现有隔离墙修复技术存在的不足,提出了一些相关建议。

### 1 渗透系数室内测试技术

#### 1.1 测试方法

实验室通常采用刚性壁或柔性壁渗透仪对隔离墙材料渗透系数进行测量,试验装置见图 1。如图 1(a)所示,刚性壁渗透仪由固结仪改装而成,在固结试验中每级荷载施加稳定后(24 h),下一级荷载施加之前,通过进水管向试样中导入渗透液进行渗透试验,渗透液可为去离子水(DIW)、自来水或污染液;渗透压力由进水管中初始液面高度控制<sup>[8]</sup>;测量出水管渗出液的渗出量或所需相关参数;渗透试验结束后施加下一级荷载重复上述试验步骤,直至所有荷载施加完毕。

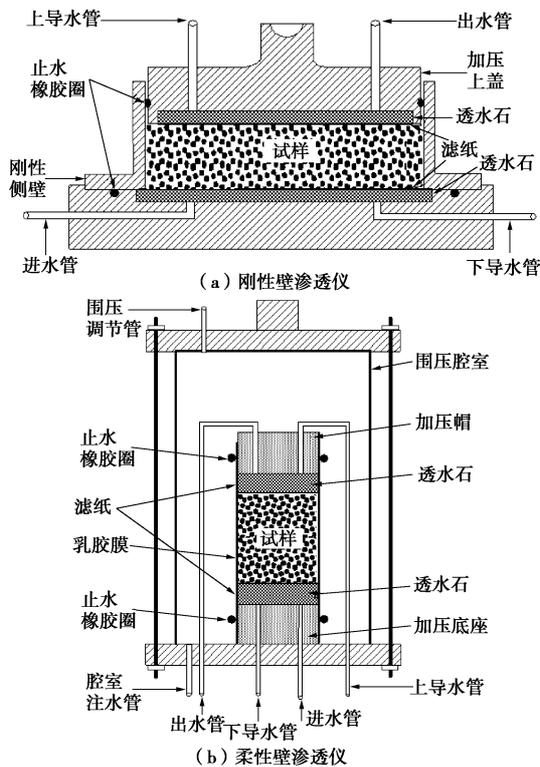


图 1 室内渗透试验装置

Fig. 1 Device of laboratorial permeability tests

与刚性壁渗透试验相比,业内更推荐柔性壁渗透试验。柔性壁渗透试验装置如图 1(b)所示,其原理与刚性壁渗透试验基本一致。柔性壁渗透仪与刚性壁渗透仪的区别在于前者试样侧面与柔性乳胶膜贴合,围压经由乳胶膜传递到试样侧面,可任意控制试样侧面围压大小;而刚性壁渗透仪中试样侧面围压由竖向荷载控制。

表 1 总结了两种渗透仪的优缺点。通常认为刚性壁渗透仪的侧漏现象会显著影响渗透试验结果。图 2 为不同材料刚性壁与柔性壁渗透试验结果对比。Bowders 等<sup>[9]</sup>采用上述两种方法对高岭土渗透系数进行测量,结果表明,刚性壁渗透仪由于试样侧漏导致所得渗透系数值偏大;Evans<sup>[10]</sup>和 Hong 等<sup>[11]</sup>则指出对于膨润土系隔离墙材料,由于膨润土的膨胀特性,侧漏现象并不显著,两种试验方法测试结果较为接近。

表 1 刚性壁与柔性壁渗透仪优缺点对比

Table 1 Comparison between rigid-wall and flexible-wall permeameters

测试方法	优点	缺点
刚性壁渗透仪	设备简易;可控制竖向荷载;可监测试样竖向变形;试验时间较短	试样侧面与刚性侧壁间易发生侧漏,造成渗透系数偏大;无法控制水平应力条件;试样厚度过薄可能不具代表性
柔性壁渗透仪	可对试样进行反压饱和;避免试样侧面发生侧漏;可控制试样应力条件;可监控试样变形情况	试验设备复杂;渗透液可能会腐蚀乳胶膜;无法检测试样开裂情况;水力梯度过大会导致试样有效应力不合理

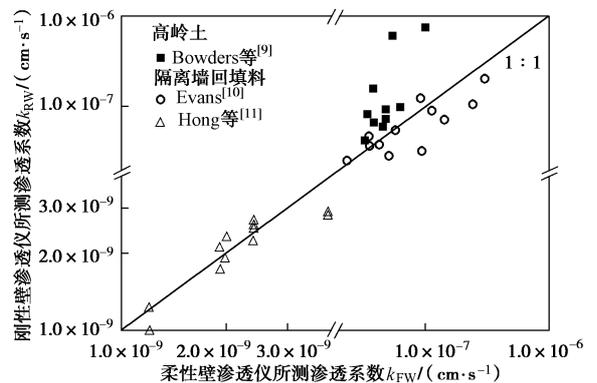


图 2 刚性壁与柔性壁渗透仪试验结果对比

Fig. 2 Correlation of hydraulic conductivities measured in flexible-wall and in rigid-wall permeameters

#### 1.2 测试要求

目前针对隔离墙材料进行渗透试验的主要依据为美国材料与试验协会(ASTM)的 D5048 规范、D7100

规范和 D6766 规范。上述规范均对柔性壁渗透试验终止准则进行了规定，其中 D5048 规范规定满足以下条件即可终止试验：①4 个连续测量的流入量和流出量之比为 0.75~1.25；②渗透系数  $k$  达到稳定值，即 4 个或以上连续测得的  $k$  值在平均值  $\pm 25\%$ （对  $k < 1 \times 10^{-8}$  cm/s 的土样为  $\pm 50\%$ ）范围内，且渗透系数值在  $k$ -时间曲线上无明显变化趋势。除上述条件外，D7100 和 D6766 规范要求试验终止还应满足；③渗透试样的溶液通量至少为试样孔隙体积的两倍；④渗透液与试样间化学反应达平衡状态，即渗出液的浓度、pH 值、电导率或介电常数等在相应渗入液的  $\pm 10\%$  范围内，且随时间增长无明显上升或下降趋势。

渗入液与试样间达化学平衡耗时较长，因而 D7100 和 D6766 较之 D5048 更为严格，可用于评价膨润土系隔离墙材料长期渗透性能。Bowders<sup>[12]</sup>指出仅两倍孔隙体积通量的渗透液不足以判定化学溶液与试样间达化学平衡。Malusis 等<sup>[13]</sup>对比了 D5048 和 D7100 规范条件下隔离墙材料的渗透系数，结果表明所得渗透系数结果无明显差异。Jo 等<sup>[6]</sup>则认为评价隔离墙材料长期渗透特性时，为避免过早停止试验而高估其抗渗性能，应尤其注意试验终止条件的选取。

目前，中国尚未制定出隔离墙材料渗透性或化学相容性的相关标准和规范。因此，积极开展污染条件下隔离墙材料渗透试验研究，并制定相关试验规范或标准，对于提高中国污染场地修复技术具有重要意义。

## 2 隔离墙材料特性对渗透系数的影响

### 2.1 原位土级配

图 3 为原位土级配与隔离墙材料渗透试验关系图。由图可知，渗透系数随细粒含量增加而降低<sup>[10, 14]</sup>。对级配良好的原位土，土颗粒间孔隙得到有效填充，渗透性和压缩性远低于级配较差但细粒含量较高的土，且化学相容性更好。

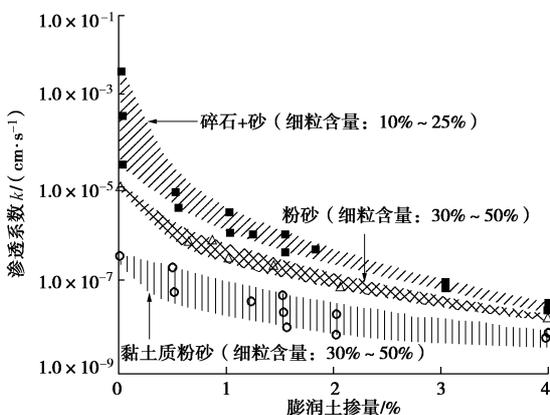


图 3 细粒含量与渗透系数关系 (数据来源于文献[14])

Fig. 3 Correlation between fine content and hydraulic conductivity

### 2.2 膨润土质量

一般认为高质量膨润土具有较高蒙脱石含量、较大比表面积、剩余表面电荷及可交换  $\text{Na}^+$  离子的量<sup>[7]</sup>，上述特征赋予膨润土更强的膨胀能力和低渗透性。Lee 等<sup>[15]</sup>对比了高/低质量膨润土对化学溶液的抗渗性，研究表明，虽然高质量膨润土具有低渗透性，但同时其活性更强，化学相容性不如低质量膨润土。Gleason 等<sup>[16]</sup>研究了化学溶液作用下钠基/钙基膨润土渗透特性的变化，指出在干净的水或盐溶液条件下，钠基膨润土的渗透系数均低于钙基膨润土。

### 2.3 膨润土掺量

掺入膨润土会使得隔离墙材料中细粒含量增加，从而引起渗透系数变化。图 4 为膨润土掺量对隔离墙材料渗透系数的影响。总体而言，隔离墙材料中膨润土掺量越高，其渗透系数越低，但膨润土掺量存在临界值，高于此掺量，渗透系数不再显著降低<sup>[8, 16-18]</sup>。

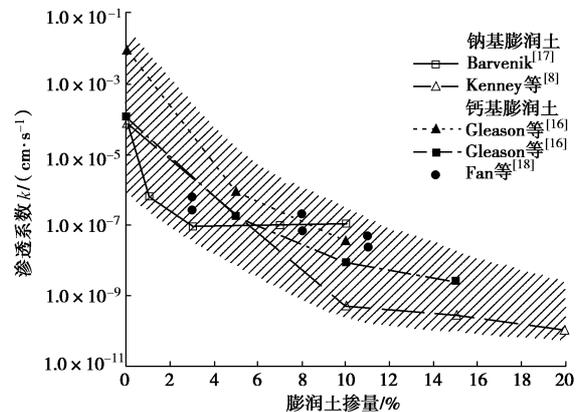


图 4 膨润土掺量与渗透系数关系

Fig. 4 Effect of bentonite content on hydraulic conductivity

### 2.4 膨润土双电层厚度

膨润土的双电层厚度与孔隙液阳离子价数、浓度电解质溶液介电常数和温度有关<sup>[19]</sup>。双电层厚度的大幅降低会引起土颗粒间引力增加，土体收缩甚至开裂，进而导致土体渗透系数增大<sup>[9, 20]</sup>。Rao 等<sup>[21]</sup>认为双电层厚度的减小会使膨润土中的微孔隙发展成大孔隙，增加溶液流通空间，使得膨润土渗透系数增大。对于温度的影响，Mitchell 等<sup>[19]</sup>指出随温度升高，双电层厚度将增大，但同时水溶液的介电常数降低，而介电常数降低会导致双电层厚度减小，因此两者作用相互抵消后，认为温度对双电层厚度影响不显著。

### 2.5 预水化作用

预水化过程是指在膨润土接触化学溶液前，用干净的水溶液将膨润土充分水化，即渗透试验中渗透液顺序为先水后化学溶液。已有许多学者研究了膨润土预水化作用对隔离墙材料抵抗化学溶液渗透的影响，结果如图 5 所示。文献<sup>[16, 22]</sup>表明，预水化作用可

显著改善 GCL 材料对盐溶液的抗渗性。对于初始含水率较高的竖向隔离墙 (slurry trench cutoff wall) 材料, 膨润土在试样制备过程中已水化, 因而渗透试验过程中再次预水化作用并未提高其对  $\text{CaCl}_2$  溶液的抗渗性能<sup>[13]</sup>。此外, Daniel 等<sup>[23]</sup>探讨了初始含水率对 GCL 材料在有机物溶液条件下渗透特性的影响, 发现初始含水率  $\geq 100\%$  试样的渗透系数比初始含水率  $\leq 50\%$  的试样低 3~5 个数量级。考虑到上述结果大多为短期试验结果, 预水化作用对隔离墙材料渗透特性的长期影响仍有待进一步研究。

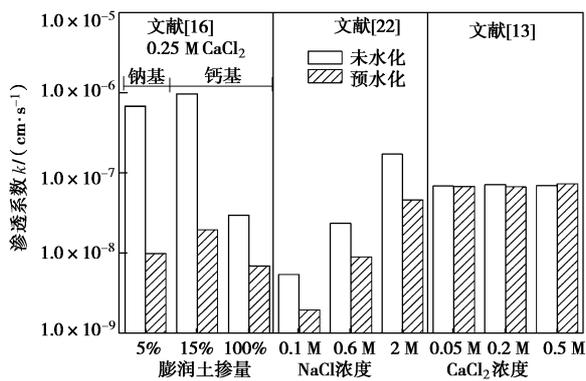


图 5 预水化作用对渗透系数的影响

Fig. 5 Effect of prehydration on hydraulic conductivity

### 3 化学溶液特性对渗透系数的影响

#### 3.1 阳离子价数

膨润土双电层中的一价阳离子被化学溶液中的多价阳离子置换后, 双电层厚度发生改变, 进而影响隔离墙材料渗透系数。图 6 为阳离子价数对隔离墙材料渗透系数的影响。相同溶液浓度下, 隔离墙材料渗透系数随阳离子价数升高而增大, 此趋势在中等浓度时 (0.01~1 M 之间) 尤为显著。低、高浓度下, 阳离子价数升高引起渗透系数增量不大于一个数量级。阳离子价数从二价增至三价引起的渗透系数增量远小于阳离子价数从一价增至二价时的增量。文献<sup>[19]</sup>认为阳离子价数升高可引起膨润土表面电势和双电层厚度减小, 颗粒间斥力减小, 从而抑制了膨润土的膨胀性能。

#### 3.2 离子浓度

离子浓度对隔离墙材料渗透系数的影响如图 7 所示。随离子浓度增加, 渗透系数增大<sup>[5, 22, 24]</sup>。Jo 等<sup>[5]</sup>指出渗透系数的变化由膨润土孔隙结构变化引起, 而非渗透液粘度和密度。离子浓度较低 ( $\leq 0.01$  M) 或离子浓度较高 ( $\geq 1$  M) 时, 离子浓度对渗透系数的影响占主导作用; 中等离子浓度水平 (0.01~1 M) 时, 离子价数对渗透系数影响更显著。图 7 还可看出, 渗

透系数随多价阳离子浓度增加而急剧增加, 当浓度超过一定值后 ( $\geq 0.1$  M), 渗透系数趋于稳定; 然而, 渗透系数对一价阳离子溶液浓度变化的敏感性较小。

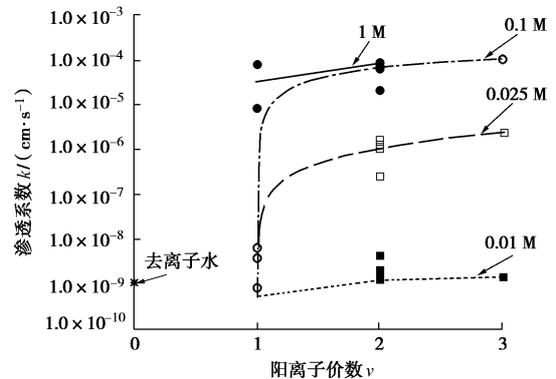


图 6 阳离子价数与渗透系数关系 (数据来源于文献<sup>[5]</sup>)

Fig. 6 Effect of cation valence on hydraulic conductivity

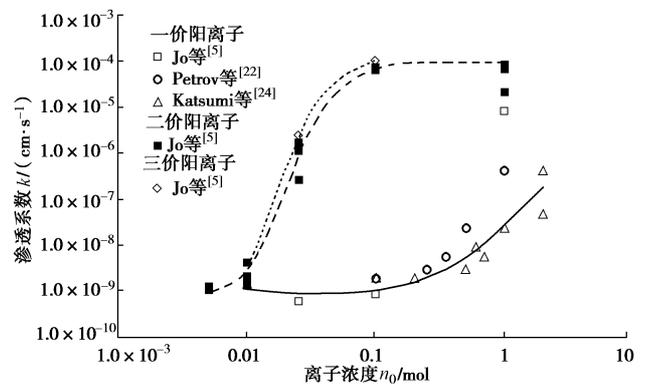


图 7 离子浓度与渗透系数关系

Fig. 7 Effect of cation concentration on hydraulic conductivity

#### 3.3 介电常数

图 8 描述了介电常数对隔离墙渗透系数的影响。渗透液介电常数从 80 降至 2, 隔离墙材料渗透系数增幅可达 6 个数量级<sup>[25-27]</sup>。膨润土双电层厚度随着渗透液介电常数降低而减小, 土体中渗透液流通的孔隙通道增加, 导致渗透系数增大。Fernandez 等<sup>[25]</sup>对比分析了水溶性有机物不同含量引起的介电常数变化对萨尼亚压实黏土渗透系数的影响, 结果表明: 渗透系数与有机物含量间并不呈单调递增关系; 有机物含量较低时, 粘度对对渗透系数的影响占主导; 当有机物含量超过某一值后, 介电常数对渗透系数的影响较大, 如图 8 (b) 所示。Petrov 等<sup>[26]</sup>通过不同乙醇含量的溶液对 GCL 渗透系数影响的研究得到与上述一致的结论。

#### 3.4 离子水化半径

离子价数相等时, 离子水化半径越小, 双电层厚度越薄<sup>[21, 28]</sup>。图 9 为离子水化半径对隔离墙材料渗透系数的影响。总体而言, 离子水化半径对隔离墙材料

渗透系数影响不大。相同离子浓度下，一价阳离子水化半径由 0.3 nm 增至 0.6 nm 时，渗透系数略微降低；二价或三价阳离子水化半径增大，渗透系数基本无变化，此现象的原因可能是由于离子浓度过高造成的。徐超等<sup>[29]</sup>还针对低浓度条件下离子水化半径与渗透系数的关系进行了研究，发现浓度 < 0.1 M 时，GCL 渗透系数随多价阳离子水化半径增大而增加，而文献 [21, 28] 中的观点未能解释这一现象。上述分歧表明，离子水化半径对渗透系数的影响机制尚不明确。

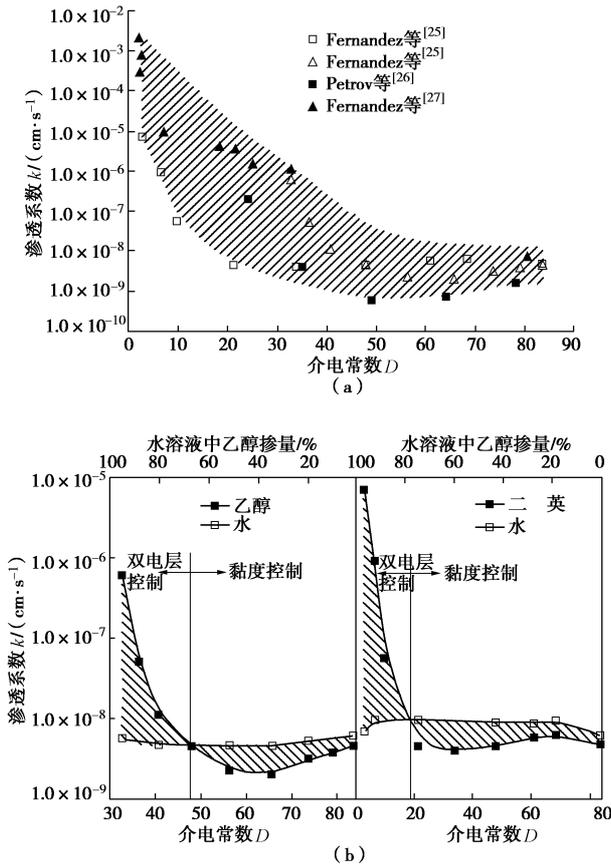


图 8 介电常数与渗透系数关系

Fig. 8 Effect of dielectric constant on hydraulic conductivity

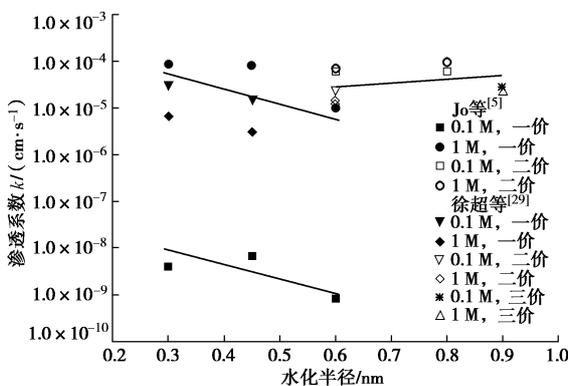


图 9 离子水化半径与渗透系数关系

Fig. 9 Effect of hydrated ionic size on hydraulic conductivity

### 3.5 pH 值

根据文献[19]，孔隙液 pH 影响膨润土表面矿物或基团的解离，使土粒表面带电情况发生变化，如 pH 较高时，膨润土颗粒表面羟基中的 H<sup>+</sup> 极易电离到溶液中，表面负电荷增加，颗粒间斥力增大。pH 对隔离墙材料渗透特性的影响如图 10 所示。Scalia 等<sup>[30]</sup>和 Ruhl 等<sup>[31]</sup>认为强酸或强碱条件下 (pH ≤ 2 或 pH = 13)，隔离墙材料渗透系数较高，基本处于 10<sup>-7</sup> ~ 10<sup>-5</sup> cm/s 范围内；其它 pH 值条件下，隔离墙材料渗透系数维持在 10<sup>-9</sup> cm/s 量级内，这是膨润土具有一定缓冲能力的结果。Jo 等<sup>[5]</sup>研究结果表明强碱条件对隔离墙材料渗透特性影响不大；CaCl<sub>2</sub> 溶液条件下，Ca<sup>2+</sup> 具有抑制膨润土膨胀性和抗渗性的作用，此时溶液 pH 变化对渗透系数影响较小。说明隔离墙材料抵抗酸碱溶液渗透的能力应视具体隔离墙材料情况而定。

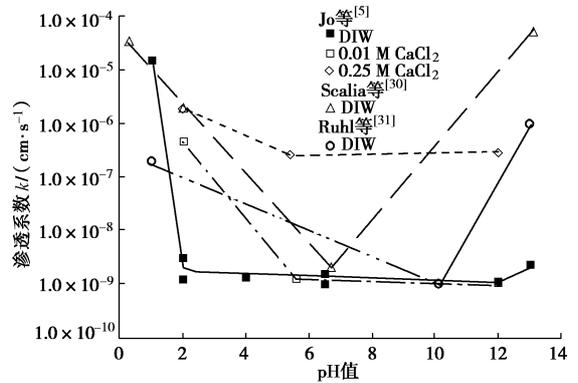


图 10 溶液 pH 与渗透系数关系

Fig. 10 Effect of penetrant pH on hydraulic conductivity

上述化学溶液对隔离墙材料渗透特性影响研究的文献中，涉及的无机溶液大多为钠、钙等盐溶液，而实际污染场地的无机污染物多为铅、锌、铬等重金属，故文献结论是否可直接用于评价现场情况仍待进一步探讨。此外，复合污染（如多种重金属复合污染、重金属和有机物复合污染）是实际工况中最为常见的污染类型，文献中报道的多为单一污染物情况，复合污染物对隔离墙材料渗透特性的影响仍需进一步明确。

## 4 结 论

(1) 刚性壁和柔性壁渗透试验是隔离墙材料渗透系数室内测量常用技术；不同背景的渗透试验规范对试验终止条件规定不一，评价化学溶液对隔离墙材料长期渗透特性时，应谨慎选择合理的试验终止条件。

(2) 原位土级配较好的隔离墙材料具有低渗透系数；隔离墙材料渗透系数随膨润土掺量和双电层厚度增加而减小；膨润土质量和预水化作用也对渗透系数产生影响，但预水化作用的长期影响有待进一步研究。

(3) 溶液阳离子价数和离子浓度升高、溶液介电常数降低均可使渗透系数产生不同程度的增大; 离子水化半径和 pH 值与渗透系数间无明显相关关系, 离子水化半径的作用机制尚不完全明确。

(4) 膨润土系隔离墙技术是一种具有应用前景的污染场地修复措施, 明确典型污染物或复合污染物对隔离墙材料(长期)渗透特性的影响对于评价隔离墙阻滞污染物运移的性能具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 陈云敏, 施建勇, 朱 伟, 等. 环境岩土工程研究综述[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(4): 165 - 182. (CHEN Yun-min, SHI Jian-yong, ZHU Wei, et al. A review of geoenvironmental engineering[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(4): 165 - 182. (in Chinese))
- [2] 杜延军, 金 飞, 刘松玉, 等. 重金属工业污染场地固化/稳定处理研究进展[J]. 岩土力学, 2011, **32**(1): 116 - 124. (DU Yan-jun, JIN Fei, LIU Song-yu, et al. Review of stabilization/solidification technique for remediation of heavy metals contaminated lands[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(1): 116 - 124. (in Chinese))
- [3] SHARMA H D, REDDY K R. Geoenvironmental engineering: site remediation, waste containment, and emerging waste management technologies[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004.
- [4] 杨玉玲, 杜延军, 范日东, 等. 分散剂改良土-膨润土竖向隔离墙材料黏度试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, **44**(3): 650 - 654. (YANG Yu-ling, DU Yan-jun, FAN Ri-dong, et al. Experimental study on viscosity of soil-bentonite vertical cut-off wall backfills amended with dispersant[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, **44**(3): 650 - 654. (in Chinese))
- [5] JO H Y, KATSUMI T, BENSON C H, et al. Hydraulic conductivity and swelling of nonprehydrated GCLs permeated with single-species salt solutions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(7): 557 - 567.
- [6] JO H Y, BENSON C H, SHACKELFORD C D, et al. Long-term hydraulic conductivity of a geosynthetic clay liner permeated with inorganic salt solutions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(4): 405 - 417.
- [7] SHACKELFORD C D, SAMPLE-LORD K M. Hydraulic conductivity and compatibility of bentonite for hydraulic containment barriers[C]// Soil Behavior Fundamentals to Innovations in Geotechnical Engineering. Olson: ASCE, 2014.
- [8] KENNEY T C, VEEN W A V, SWALLOW M A, et al. Hydraulic conductivity of compacted bentonite-sand mixtures[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, **29**(3): 364 - 374.
- [9] BOWDERS JR J J, DANIEL D E. Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1987, **113**(12): 1432 - 1448.
- [10] EVANS J C. Hydraulic conductivity of vertical cutoff walls[J]. ASTM Special Technical Publication, 1994, **1142**: 79 - 94.
- [11] HONG C S, SHACKELFORD C D, MALUSIS M A. Consolidation and hydraulic conductivity of zeolite-amended soil-bentonite backfills[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(1): 15 - 25.
- [12] BOWDERS JR J J. Discussion of "Termination criteria for clay permeability testing[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1988, **114**(8): 947 - 949.
- [13] MALUSIS M A, MCKEEHAN M D. Chemical compatibility of model soil-bentonite backfill containing multiswellable bentonite[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, **139**(2): 189 - 198.
- [14] D'APPOLONIA D J. Soil-bentonite slurry trench cutoffs[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1980, **106**(4): 399 - 417.
- [15] LEE J M, SHACKELFORD C D. Impact of bentonite quality on hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(1): 64 - 77.
- [16] GLEASON M H, DANIEL D E, EYKHOLT G R. Calcium and sodium bentonite for hydraulic containment applications[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, **123**(5): 438 - 445.
- [17] BARVENIK M J. Design options using vertical barriers systems[C]// International Convention and Exposition, Environmental Geotechnical Symposium. New York: ASCE, 1992.
- [18] FAN R D, DU Y J, REDDY K R, et al. Compressibility and hydraulic conductivity of clayey soil mixed with calcium bentonite for slurry wall backfill: Initial assessment[J]. Applied Clay Science, 2014, **101**: 119 - 127.
- [19] MITCHELL J, SOGA K. Fundamentals of soil behavior[M].

- Hoboken: John Wiley and Sons, Inc., 2005.
- [20] SHACKELFORD C D, BENSON C H, KATSUMI T, et al. Evaluating the hydraulic conductivity of GCLs permeated with non-standard liquids[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2000, **18**(2): 133 - 161.
- [21] RAO S N, MATHEW P K. Effects of exchangeable cations on hydraulic conductivity of a marine clay[J]. *Clays and Clay Minerals*, 1995, **43**(4): 433 - 437.
- [22] PETROV R J, ROWE R K. Geosynthetic clay liner (GCL)-chemical compatibility by hydraulic conductivity testing and factors impacting its performance[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1997, **34**(6): 863 - 885.
- [23] DANIEL D E, SHAN H Y, ANDERSON J D. Effects of partial wetting on the performance of the bentonite component of a geosynthetic clay liner[C]// *Proceedings of Geosynthetics*. Minnesota, 1993: 1483 - 1496.
- [24] KATSUMI T, ISHIMORI H, ONIKATA M, et al. Long-term barrier performance of modified bentonite materials against sodium and calcium permeant solutions[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2008, **26**(1): 14 - 30.
- [25] FERNANDEZ F, QUIGLEY R M. Viscosity and dielectric constant controls on the hydraulic conductivity of clayey soils permeated with water-soluble organics[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1988, **25**(3): 582 - 589.
- [26] 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.
- [27] FERNANDEZ F, QUIGLEY R M. Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1985, **22**(2): 205 - 214.
- [28] OLPHEN H. An introduction to clay colloid chemistry, for clay technologists, geologists, and soil scientists[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1977.
- [29] 徐超, 李志斌, 高彦斌. 溶液特征对 GCL 膨胀和渗透特性的影响[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2009, **37**(1): 36 - 40, 46. (XU Chao, LI Zhi-bin, GAO Yan-bin. Influence of solution characteristics on swelling and hydraulic performance of geosynthetic clay liner[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2009, **37**(1): 36 - 40, 46. (in Chinese))
- [30] SCALIA IV J, BENSON C H, BOHNHOFF G L, et al. Long-term hydraulic conductivity of a bentonite-polymer composite permeated with aggressive inorganic solutions[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2013, **140**(3): 1 - 13.
- [31] RUHL J L, DANIEL D E. Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, **123**(4): 369 - 381.

(本文责编 胡海霞)