

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.251



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 羟丙甲纤维素对铜污染土-膨润土屏障工程特性的改良效果

葛均健<sup>1</sup>, 崔琦<sup>1</sup>, 陈兵<sup>1</sup>, 刘宁<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学海洋工程国家重点实验室; 上海市公共建筑和基础设施数字化运维重点实验室, 上海 200240; 2. 上海胜义环境科技有限公司, 上海 200240)

**摘要:**土-膨润土屏障作为污染场地隔离保护的重要手段之一, 现已在工程中广泛应用。在土-膨润土屏障中加入羟丙甲纤维素(HPMC), 能有效弥补因在重金属污染环境中受侵蚀而导致防渗性能衰减的问题。通过自由膨胀试验、扫描电镜试验、渗透试验、一维压缩试验与直剪试验, 研究铜离子对膨润土膨胀性能的破坏作用及HPMC的改良作用机理, 并研究高铜离子浓度(50 mmol/L)环境下不同掺量的HPMC对屏障材料防渗性能的改良效果及其对力学性能的影响规律。结果表明: HPMC可减小铜污染膨润土的团聚, 并保持膨润土的连续结构; 随着HPMC掺量的增加, 屏障材料受破坏程度变低, 防渗性能更好, 其渗透系数 $k < 10^{-10}$  m/s; 材料压缩性变大, 但抗剪强度略有降低。

**关键词:**羟丙甲纤维素; 膨润土; 渗透; 压缩; 剪切强度

中图分类号: TU443 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2023)06-0165-08

## Improvement effect of hydroxypropyl methylcellulose on engineering characteristics of soil-bentonite barrier polluted by copper

GE Junjian<sup>1</sup>, CUI Qi<sup>1</sup>, CHEN Bing<sup>1</sup>, LIU Ning<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering; Shanghai Key Laboratory for Digital Maintenance of Buildings and Infrastructure, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, P. R. China; 2. Shanghai Shengyi Environmental Technology Co., Ltd., Shanghai 200240, P. R. China)

**Abstract:** Soil-bentonite barrier is one of the most important means to isolate contaminated sites, which has been widely used in engineering practice. Adding hydroxypropyl methylcellulose (HPMC) to the soil-bentonite barrier can effectively make up for the attenuation of its anti-seepage performance in heavy metal environment. A series of experiments including free expansion, scanning electron microscope, permeability, one-dimensional compression and direct shear strength for the destruction of bentonite structure by copper ion, the improvement mechanism of HPMC and the barrier mixing HPMC with different ratios are conducted under high ion concentration (50 mmol/L) environment. The results show that HPMC can reduce the agglomeration of copper

收稿日期: 2021-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(51972209)

作者简介: 葛均健(1997-), 男, 主要从事环境岩土工程研究, E-mail: Ge-Junjian@sjtu.edu.cn。

陈兵(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: hntchen@sjtu.edu.cn。

Received: 2021-07-14

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 51972209)

Author brief: GE Junjian (1997-), main research interest: environmental geotechnical engineering, E-mail: Ge-Junjian@sjtu.edu.cn.

CHEN Bing (corresponding author), professor, doctoral supervisor, hntchen@sjtu.edu.cn.

contaminated bentonite, keep the continuous structure of bentonite and as HPMC mixing ratio increases, the damage degree of barrier gets lower and the anti-seepage performance becomes better. The mechanical properties of barrier such as the compressibility increases, but shear strength decreases slightly with higher HPMC mixing ratio.

**Keywords:** hydroxypropyl methylcellulose (HPMC); bentonite; permeability; compression; shear strength

重金属冶炼厂未有效处理的大量固液废弃物会对场地造成严重污染<sup>[1-2]</sup>。若对污染场地进行原位修复,工程量大、耗时长,期间很容易造成污染物向四周迁移<sup>[3-4]</sup>。因此,工程上一般使用隔离屏障将污染源隔绝,避免其向周边土体、地下水迁移。其中,土-膨润土隔离屏障因施工简易<sup>[5-6]</sup>、可就地取材(原位土和少量膨润土)<sup>[7]</sup>、防渗效果好( $k < 10^{-10}$  m/s)<sup>[8]</sup>、热稳定性和化学稳定性高<sup>[9]</sup>等优点,应用最为广泛。但在某些特定的环境中,单纯的土-膨润土屏障受污染物作用后会失效<sup>[10]</sup>,表现为膨润土的蜂窝状结构被破坏、比表面积缩小、对基土的包裹性变差、防渗性能下降等,无法满足工程要求<sup>[11-15]</sup>。

在土-膨润土中添加聚合物,使之能够有效抵抗污染物的破坏,增强其防渗吸附效果。陈延君等<sup>[16]</sup>用十六烷基三甲基溴化铵作为改性剂改良膨润土,改良后的膨润土对苯酚和  $Fe^{3+}$  的防渗吸附能力大幅提高。孙杰等<sup>[17]</sup>用阳离子聚丙烯酰胺改良膨润土,研究了其对靛蓝的吸附防渗效果,并对膨润土的性能进行了表征,改良后的膨润土在结构和性能上明显优于未改良膨润土。Fehervari 等<sup>[18]</sup>用碳酸甘油改良膨润土,使其在高浓度氯化钠和氯化钙溶液中依然保持良好的防渗性,相较于未改良膨润土,其渗透系数低约一个数量级。土-膨润土作为隔离屏障,会受到高压荷载或剪切应力,所以也要有良好的压缩特性和抗剪强度特性<sup>[19-23]</sup>。Malusis 等<sup>[24]</sup>在膨润土中添加活性炭,增强了隔离屏障的可压缩性和耐久年限。范日东等<sup>[25]</sup>研究了高岭土-膨润土屏障与硝酸铅作用后的物理性质、压缩固结特性等,并引入归一化孔隙比进一步评价压缩特性。刘松玉等<sup>[26]</sup>基于试验数据,定量评价盐溶液作用下土的压缩指数的控制因素,并建立基于物理性质指标的

预测公式。

膨润土具有选择性吸附的特点<sup>[27]</sup>,不同价数、浓度的离子对膨润土的性能影响也存在差异<sup>[28-29]</sup>。上述研究通过有机/无机物等改良土-膨润土屏障,并研究了多种污染物对屏障渗透、压缩和耐久等方面的作用。但针对使用有机纤维醚、高浓度重金属环境和剪切强度特性等方面,并没有进行系统性研究。笔者使用铜离子溶液代表重金属污染物,使用羟丙甲纤维素(HPMC)改良土-膨润土屏障材料。在不同浓度铜离子溶液中进行膨润土的自由膨胀试验,并观察其微观结构,证明铜离子对膨润土结构的破坏性;将 50 mmol/L 铜离子浓度为典型浓度值,在此浓度下对 HPMC 改良的土-膨润土屏障材料,进行一系列渗透、压缩和直剪等试验,探究 HPMC 对受铜离子污染的土-膨润土屏障材料防渗性能的改良能力,以及对压缩和抗剪强度的作用规律。

## 1 试验

### 1.1 试验材料

一般工程中,土-膨润土屏障的基土材料就地取材,各不相同。试验选用过 1 mm 筛、级配较差的普通细砂,模拟最不利工况。试验用砂(S)的级配曲线与物理特性参数如图 1、表 1 所示。

试验用膨润土(B)选用商用钠基膨润土,其物理特性参数如表 2 所示。

试验采用  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  晶体与去离子水配置铜离子溶液。晶体购自国药集团,纯度  $\geq 99.9\%$ ,当溶液浓度为 50 mmol/L 时,pH 值为 4.39。

试验采用的 HPMC 属非离子型纤维素醚类(H),具有增稠、黏合等特性,且有着良好的 pH 和温度稳定性,不与重金属反应,水溶性和黏度适中,能

表 1 砂的物理特性参数表

Table 1 Physical properties of sand

比重 $G_s$	平均粒径/mm	不均匀系数 $C_u$	曲率系数 $C_c$	最大密实度 $\rho_{max}/(g/cm^3)$	最小密实度 $\rho_{min}/(g/cm^3)$	耐酸性
2.63	0.29	1.89	0.66	1.42	1.56	不发生反应

表 2 膨润土物理特性参数表

Table 2 Physical properties of bentonite

比重 $G_s$	塑限 $\omega_p$	液限 $\omega_L$	塑性指数 $I_p$	吸蓝量/(g/(100 g))	蒙脱石含量/%
2.72	43	339	296	27.5	62.2

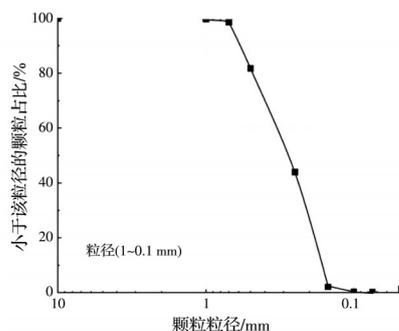


图1 砂的级配曲线

Fig. 1 Grading curve of sand

够防止屏障材料开裂等优点,常用在建筑材料等行业。其性质如表3所示。

表3 HPMC物理特性参数表

Table 3 Physical properties of HPMC

性状	pH值	凝胶温度/°C	比重 $G_s$	甲氧基含量/%	羟丙基含量/%
白色粉末	6.5	65	1.31	27	12

## 1.2 试验步骤及试样基本性质

### 1.2.1 试验步骤

1)自由膨胀试验。配置浓度为0、5、10、20、40、50、75、100 mmol/L的铜离子溶液,分别取各浓度溶液80 mL倒入100 mL量筒,取烘干的膨润土5 g,分10次放入量筒中,待稳定后观察膨润土的体积。进行两次平行试验,结果取平均值。根据试验结果,选定典型铜离子浓度。

2)扫描电镜试验。将膨润土放入清水和铜离子溶液中,将HPMC-膨润土放入铜离子溶液中,充分搅拌,静置。取出部分试样进行真空冻干、喷金处理,并使用扫描电镜观察其微观结构,确认铜离子对膨润土的破坏作用,以及HPMC对铜污染的膨润土试样的改良机理。

3)制样。屏障材料由HPMC(H)、膨润土(B)和砂(S)按一定比例混合制成(HBS)。首先将HPMC与膨润土混合(HB),后将HB经2 h振荡摇匀;将HB与砂混合(HBS),搅拌均匀。分别编号为HBS-0、HBS-2、HBS-6、HBS-10。

其中,HPMC的掺量,HB质量与砂质量比,根据式(1)、式(2)计算。

$$X_{HB} = \frac{M_H}{M_B} \times 100\% \quad (1)$$

$$X_{HBS} = \frac{M_{HB}}{M_S} \times 100\% \quad (2)$$

式中: $X_{HB}=0、2\%、6\%、10\%$ ;  $X_{HBS}=10\%$ ;  $M_H$ 为HPMC干粉质量;  $M_B$ 为膨润土烘干后质量;  $M_{HB}$ 为HPMC-膨润土混合质量;  $M_S$ 为干砂质量。

4)一维压缩试验。配置典型浓度的铜离子溶液,按施工坍塌度要求,取液限的1.5倍溶液加入到HBS中,充分搅拌,静置48 h,使HBS与溶液充分反应。将屏障材料分多次填入环刀,抹平后进行真空饱和,排出气泡。将试样放入固结渗透仪,加载序列为12.5、50、100、200、300、400、500、600 kPa。

5)变水头渗透试验。待试样在各级压力下沉降稳定后,测定渗透系数。试验期间保持室内恒温恒湿,使试样性质、水的黏度系数等因素不变。试样高度根据压缩固结变化而定。

6)直剪试验。对不同HPMC掺量的试样进行固结不排水快剪试验,剪切速率为0.8 mm/min,测试试样抗剪强度。

### 1.2.2 试样的基本性质

试样物理特性参数如表4所示。

表4 试样物理特性参数表

Table 4 Physical properties of samples

试样编号	饱和密度 $\rho_{sat}/(g/cm^3)$	含水率 $\omega/\%$	孔隙比 $e$	固相高度/mm
HBS-0	1.71	26.0	0.95	10.24
HBS-2	1.67	36.3	1.16	9.25
HBS-6	1.62	40.3	1.30	8.71
HBS-10	1.60	45.4	1.41	8.30

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 自由膨胀试验

图2为5 g膨润土颗粒在不同浓度的铜离子溶液中的自由膨胀结果,并以 $V_x$ 表示铜离子浓度为 $x$  mmol/L时的自由膨胀体积。膨胀体积随离子浓度的变化大致可分为I、II、III三个阶段:第I阶段,离子浓度从0增至20 mmol/L,膨胀体积降幅较大, $V_{20}$ 大约为 $V_0$ 的46.5%;第II阶段,离子浓度增至50 mmol/L,此阶段膨胀体积小幅降低, $V_{50}$ 约为 $V_{20}$ 的75%;当离子浓度超过50 mmol/L时,进入第III阶段,此时,随着离子浓度的增大,膨胀体积几乎不变,离子浓度增大一倍,体积仅减小13%。此外,将HPMC掺量为2%、4%、6%、8%、10%的膨润土样放入50 mmol/L的铜离子溶液中,其膨胀体积如图中红线所示,相较于未添加HPMC的膨润土样,添加2%的土样膨胀体积从15 mL升至21 mL,增幅为40%;且随着HPMC掺量越高,膨润土膨胀体积越大,受铜离子破坏作用越小。

由此可见,重金属离子对膨润土的膨胀性破坏效果明显。仅当浓度较低( $<20$  mmol/L)时,膨润土膨胀性即可大幅衰减;当浓度超过50 mmol/L时,膨润土的膨胀性能几乎完全被破坏。根据双电

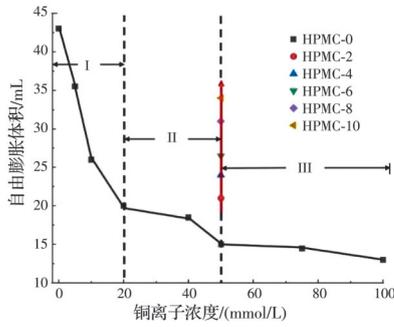


图 2 自由膨胀体积

Fig. 2 Free expansion volume of Bentonite

层理论,  $K$  的倒数为双电层厚度,  $K$  与离子浓度  $n$ 、离子价数  $Z$  的关系式可以表示为

$$K = \frac{e^2 \sum n_i Z_i^2}{\epsilon k T} \quad (3)$$

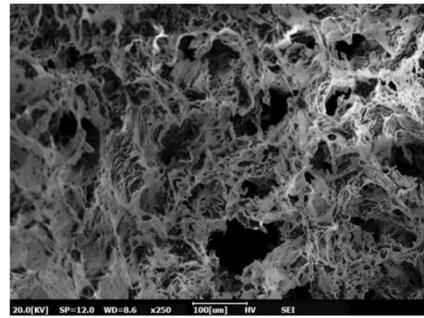
式中:  $e$  为电子电荷;  $\epsilon$  为电容率;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $T$  为热力学温度。在高浓度的铜离子溶液中, 膨润土双电层中的  $\text{Na}^+$  被  $\text{Cu}^{2+}$  置换, 离子价数增大,  $K$  值变大, 双电层厚度减小。从而膨润土颗粒的蜂窝状结构被破坏, 产生团聚现象, 孔隙变小, 吸水能力减弱, 膨胀率降低。

图 3(a) 为清水中膨润土的 250 倍微观结构图。膨润土颗粒搭接呈蜂窝状结构, 存在大量孔隙, 膨润土膨胀率较高。图 3(b) 为 50 mmol/L 铜离子溶液中膨润土的 200 倍微观结构图。在铜离子的作用下, 膨润土蜂窝状结构被破坏, 土颗粒收缩形成土团结构, 且土团分散不相连, 膨胀体积变小。图 3(c) 为 50 mmol/L 铜离子溶液中 HPMC 改良膨润土的 200 倍微观结构图。HPMC 溶解后, 形成的凝胶将膨润土颗粒包裹, 一定程度上抵抗铜离子对膨润土的破坏, 并使轻微团聚的土团相连, 使膨润土仍为连续结构, 保持一定的吸水膨胀能力, 膨胀体积相较于未改良的污染膨润土变大。

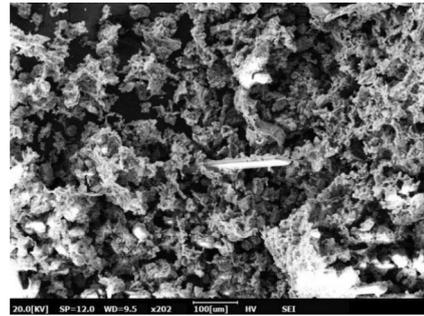
### 2.2 一维压缩试验

图 4 为不同 HPMC 掺量试样的一维压缩试验的  $e-\lg p$  曲线。由图可见, 随着 HPMC 掺量的增大, 试样的压缩性越大。在 50 kPa 固结压力之前, HBS-0、HBS-2、HBS-6 孔隙比小幅变小, HBS-10 的孔隙比变化略大。在此阶段, 试样中的大量铜离子溶液排除, 试样发生压缩固结。随着固结压力的增大,  $e-\lg p$  曲线逐渐进入直线阶段。根据图 4 计算试样的压缩模量与压缩指数, 结果如图 5 所示。

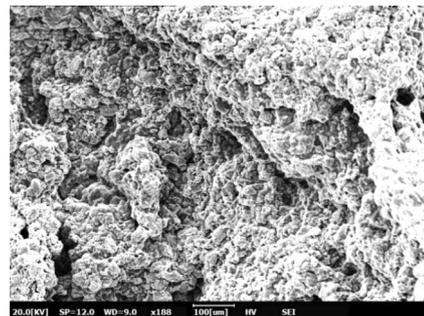
图 5 中为不同 HPMC 掺量试样的压缩模量  $E_c$  与压缩指数  $C_c$  变化关系。由图 5 可见, 随着 HPMC 掺量越高, 试样的压缩模量越小, 压缩指数越大, 试样可压缩性越大。相较于 HBS-0 的试样, HBS-10 试样压缩模量下降约 34%, 压缩指数增大了近 4 倍,



(a) B-250×



(b) B-50 mmol/L Cu<sup>2+</sup>-200×



(c) HB-Cu<sup>2+</sup>-200×

图 3 膨润土微观结构图

Fig. 3 Microstructure of bentonite

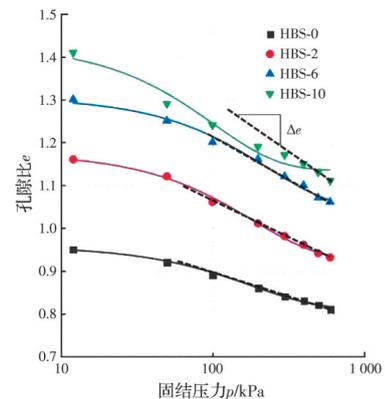


图 4 试样的  $e-\lg p$  曲线图

Fig. 4  $e-\lg p$  curve of samples

可压缩性能大幅提高。当 HPMC 掺量超过 6% 时, 存在不能与膨润土相互结合的余量, 由于 HPMC 具有较强的吸水保水性能, 溶解后吸附大量水, 这部分水计算在孔隙比中, 试样压缩时, 吸附水受挤压

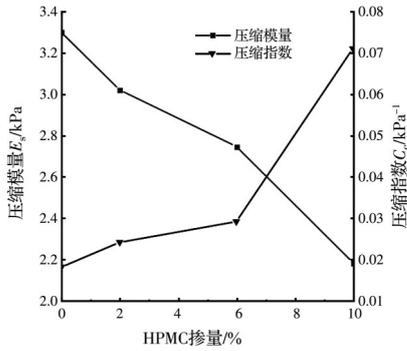


图 5 试样的压缩模量与压缩指数图

Fig. 5 Compression modulus and compression index of samples

出,压缩系数与压缩指数变化幅度较之前更大。

图 6 为各试样固结的孔隙比变化图。从图中可看出,相较于 HBS-0, HBS-2 的孔隙比变化量明显增大,此结果与表 4 给出的试样基本性质情况相同,添加 2% HPMC 后,试样含水率从 26.0% 提高至 36.3%。且随着 HPMC 掺量的增大,试样的孔隙比变化值越大。

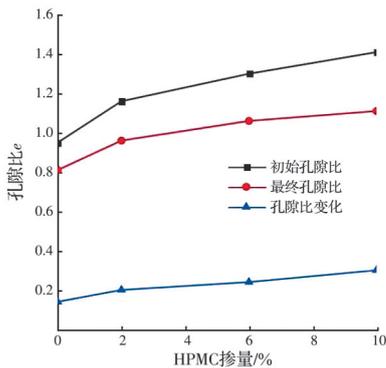


图 6 试样的孔隙比变化图

Fig. 6 Variation of void ratio in the samples

综合图 4、图 5、图 6,随着 HPMC 掺量的增大,膨胀性越好,孔隙比变化量越大,可压缩性增强,屏障材料对铜离子的破坏作用抵抗性越高。HPMC 溶解后的溶液与膨润土颗粒相结合,使膨润土颗粒依然有较强的吸水膨胀能力。

### 2.3 直剪试验

对不同 HPMC 掺量的试样(增加 HBS-4 与 HBS-8 两组试样)进行直剪试验,黏聚力  $c$  值的变化如图 7 所示,由于试样中黏土质量占比较低,黏聚力较小,砂-膨润土试样黏聚力在 6 kPa 左右。随着 HPMC 掺量越高,其黏聚力越小,且基本呈线性变化关系。HPMC 掺量为 10% 时,黏聚力降至 4.4 kPa,相较于未改良膨润土黏聚力下降约 25%。黏聚力主要来源于颗粒间的静电力和范德华力,随 HPMC 掺量增大,膨润土受铜离子破坏作用小,土

颗粒分散,粒间间距变大,单位面积上土粒接触点变少,粒间黏聚力减弱,使黏聚力变小。

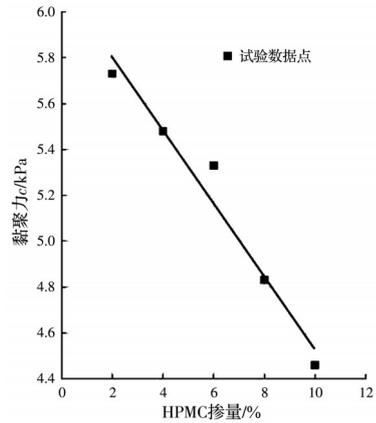


图 7 试样的黏聚力图

Fig. 7 Cohesion of samples

不同 HPMC 掺量试样内摩擦角的变化如图 8 所示,砂-膨润土试样的摩擦角约为 33.5°,随着 HPMC 掺量的增大,内摩擦角小幅减小,且同样呈现线性变化关系。

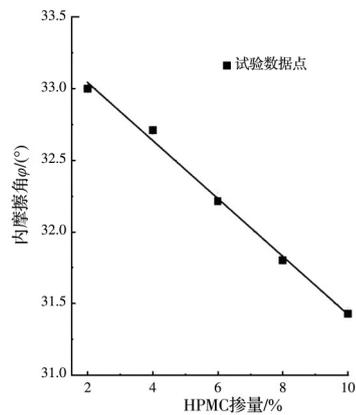


图 8 试样的内摩擦角图

Fig. 8 Internal friction angle of samples

由表 4 可知,随 HPMC 掺量增大,试样孔隙比越大,土颗粒越稀疏,且由于改良膨润土对砂颗粒的紧密包裹作用,使砂颗粒的磨圆度变大,颗粒之间的咬合与摩擦作用减弱,内摩擦角变小。

屏障材料的抗剪强度随着 HPMC 掺量增大而逐渐变小,但影响程度有限,在工程中可以忽略不计。

### 2.4 渗透试验

图 9 所示为不同 HPMC 掺量的试样的  $e$ -lg  $k$  曲线图,图 10 为试样在 600 kPa 固结压力下的渗透系数图。

结合图 9、图 10 可以看出,受铜离子污染的试样,其初始渗透系数在  $10^{-8}$  m/s 量级。试样的渗透

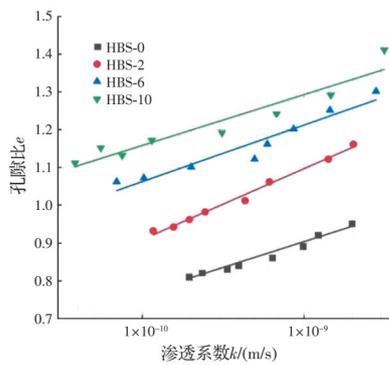


图 9 试样的  $e$ - $\lg k$  曲线图  
Fig. 9  $e$ - $\lg k$  curve of samples

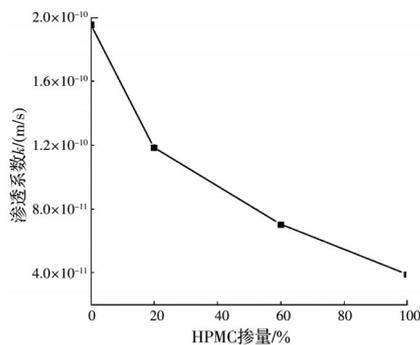


图 10 试样 600 kPa 固结压力下的渗透系数  
Fig. 10 Permeability coefficient of samples under consolidation pressure of 600 kPa

系数随着孔隙比的减小、HPMC 掺量的增加而减小。对于未改良的试样,紧密压实后,其渗透系数最小可降至  $2 \times 10^{-10}$  m/s,而改良后的试样渗透系数可降至  $4 \times 10^{-11}$  m/s。对于改良的试样,同一孔隙比情况下,HPMC 掺量越高,渗透系数越小。如  $e=1.1$  时,HBS-2 试样渗透系数  $k \approx 1 \times 10^{-9}$  m/s, HBS-6 试样  $k \approx 2 \times 10^{-10}$  m/s,降低近一个数量级, HBS-10 试样  $k \approx 4 \times 10^{-11}$  m/s,完全可满足工程防渗需求的  $10^{-11}$  m/s。

对于土-膨润土屏障材料,膨润土颗粒吸水膨胀后堵塞砂颗粒之间的透水通道,但由于铜离子的破坏作用,膨润土膨胀性降低,膨胀量锐减,形成团粒,无法有效填充砂颗粒间隙,防渗性能随之减弱。HPMC 溶解形成凝胶,可将膨润土颗粒包裹、相连,形成一层土膜,使其仍保持一定的吸水膨胀性能;HPMC 溶解释放的羟基等官能团亦能与铜离子结合,降低侵入膨润土颗粒的铜离子浓度,保障防渗性能达标。

### 3 结论

1)铜离子浓度达到 50 mmol/L 时,膨润土膨胀性几乎被完全破坏,颗粒团聚。在膨润土中添加 HPMC,可有效抵抗铜离子破坏作用,使之依然有

较强的连续性和膨胀能力。同时,HPMC 可使土-膨润土饱和和密度变小,含水率、孔隙比变大。

2)HPMC 能大幅提高受铜离子污染的土-膨润土屏障材料的压缩固结性能,且 HPMC 掺量越高,压缩性能越好。

3)HPMC 可使土-膨润土屏障材料的黏聚力和内摩擦角基本呈线性趋势变小,即抗剪强度小幅下降。

4)高浓度铜离子污染会使土-膨润土屏障材料的渗透系数增大两个数量级至  $10^{-8}$  m/s。HPMC 可使防渗性能有效提高,渗透系数可降至  $10^{-11}$  m/s。

### 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 Y M, SHI J Y, ZHU W, et al. A review of geoenvironmental engineering [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(4): 165-182. (in Chinese)
- [2] 薛强,詹良通,胡黎明,等.环境岩土工程研究进展[J].土木工程学报,2020,53(3):80-94.  
XUE Q, ZHAN L T, HU L M, et al. Environmental geotechnics: State-of-the-art of theory, testing and application to practice [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(3): 80-94. (in Chinese)
- [3] 方江华,张志红,姜玉松.对环境岩土工程几个问题的探讨[J].岩土力学,2005,26(4):655-659.  
FANG J H, ZHANG Z H, JIANG Y S. Discussion on problems in environmental geotechnology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(4): 655-659. (in Chinese)
- [4] 刘松玉,詹良通,胡黎明,等.环境岩土工程研究进展[J].土木工程学报,2016,49(3):6-30.  
LIU S Y, ZHAN L T, HU L M, et al. Environmental geotechnics: State-of-the-art of theory, testing and application to practice [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(3): 6-30. (in Chinese)
- [5] LI Y C, PAN Q, CHEN Y M. Stability of slurry trenches with inclined ground surface [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(9): 1617-1619.
- [6] 梅丹兵,杜延军,刘松玉,等.土-膨润土系竖向隔离墙材料施工和易性试验研究[J].东南大学学报(自然科学版),2016,46(2):400-405.  
MEI D B, DU Y J, LIU S Y, et al. Experimental study on workability of soil-bentonite backfills for vertical slurry cutoff walls [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2016, 46(2): 400-405. (in Chinese)
- [7] FAN R D, YANG Y L, LIU S Y. Impact of in situ soil in soil-bentonite cutoff wall backfill on compressibility

- and hydraulic conductivity [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 2021: 1-12.
- [8] 陈永贵, 叶为民, 王琼, 等. 砂-膨润土混合屏障材料渗透性影响因素研究[J]. *工程地质学报*, 2010, 18(3): 357-362.
- CHEN Y G, YE W M, WANG Q, et al. Influence factors of sand-bentonite mixtures on hydraulic conductivity [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(3): 357-362. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] 刘志彬, 方伟, 陈志龙, 等. 锌离子污染对膨润土一维压缩特性影响试验研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(8): 2211-2217.
- LIU Z B, FANG W, CHEN Z L, et al. Experimental study of influence of zinc ions on one-dimensional compressibility of bentonite [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(8): 2211-2217. (in Chinese)
- [11] OUHADI V R, YONG R N, SEDIGHI M. Influence of heavy metal contaminants at variable pH regimes on rheological behaviour of bentonite [J]. *Applied Clay Science*, 2006, 32(3/4): 217-231.
- [12] DI MAIO C. Exposure of bentonite to salt solution: Osmotic and mechanical effects [J]. *Géotechnique*, 1996, 46(4): 695-707.
- [13] SUZUKI S, PRAYONGPHAN S, ICHIKAWA Y, et al. In situ observations of the swelling of bentonite aggregates in NaCl solution [J]. *Applied Clay Science*, 2005, 29(2): 89-98.
- [14] MISHRA A K, OHTSUBO M, LI L Y, et al. Effect of salt of various concentrations on liquid limit, and hydraulic conductivity of different soil-bentonite mixtures [J]. *Environmental Geology*, 2009, 57(5): 1145-1153.
- [15] WU H L, JIN F, ZHOU A N, et al. The engineering properties and reaction mechanism of MgO-activated slag cement-clayey sand-bentonite (MSB) cutoff wall backfills [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 271: 121890.
- [16] 陈延君, 王红旗, 赵勇胜. 改性膨润土作为防渗层材料的性能研究及影响因素分析[J]. *环境科学研究*, 2006, 19(2): 90-94.
- CHEN Y J, WANG H Q, ZHAO Y S. Study on modified bentonite performance and the analysis of its influencing factors [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(2): 90-94. (in Chinese)
- [17] 孙杰, 赵新正, 曾沛. 阳离子聚丙烯酰胺改性膨润土对靛蓝的吸附性能[J]. *环境科学研究*, 2013, 26(9): 1001-1006.
- SUN J, ZHAO X Z, ZENG P. Adsorption properties of cationic polyacrylamide modified bentonite for indigo blue [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, 26(9): 1001-1006. (in Chinese)
- [18] FEHERVARI A, GATES W P, PATTI A F, et al. Potential hydraulic barrier performance of cyclic organic carbonate modified bentonite complexes against hypersalinity [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2016, 44(5): 748-760.
- [19] 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.
- [20] SRIDHARAN A, RAO S M, MURTHY N S. Compressibility behaviour of homoionized bentonites [J]. *Géotechnique*, 1986, 36(4): 551-564.
- [21] 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.
- [22] DUTTA J, MISHRA A K. Consolidation behaviour of bentonites in the presence of salt solutions [J]. *Applied Clay Science*, 2016, 120: 61-69.
- [23] FLESSATI L, DELLA VECCHIA G, MUSSO G. Mechanical behavior and constitutive modeling of cement-bentonite mixtures for cutoff walls [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2021, 33(3): 04020483.
- [24] MALUSIS M A, BARBEN E J, EVANS J C. Hydraulic conductivity and compressibility of soil-bentonite backfill amended with activated carbon [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2009, 135(5): 664-672.
- [25] 范日东, 杜延军, 陈左波, 等. 受铅污染的土-膨润土竖向隔离墙材料的压缩及渗透特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(5): 841-848.
- FAN R D, DU Y J, CHEN Z B, et al. Compressibility and permeability characteristics of lead contaminated soil-bentonite vertical cutoff wall backfills [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(5): 841-848. (in Chinese)
- [26] 刘松玉, 范日东, 杜延军, 等. 盐溶液作用下土的压缩及渗透特性预测方法[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(Sup1): 14-19.
- LIU S Y, FAN R D, DU Y J, et al. Prediction of compression and permeability behavior of salt-contaminated soils [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2016, 46(Sup1): 14-19. (in Chinese)
- [27] 施惠生, 刘艳红. 膨润土对重金属离子  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cr(VI)$ ,  $Cd^{2+}$  的吸附性能[J]. *建筑材料学报*, 2006, 9

- (5): 507-510.
- SHI H S, LIU Y H. Adsorption characteristics of bentonite to  $Pb^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cr(VI)$ ,  $Cd^{2+}$  [J]. Journal of Building Materials, 2006, 9(5): 507-510. (in Chinese)
- [28] 邵涛, 姜春梅. 膨润土对不同价态铬的吸附研究[J]. 环境科学研究, 1999, 12(6): 47-49.
- SHAO T, JIANG C M. Adsorption study on bentonites to chromium compounds of different valencies [J]. Research of Environmental Sciences, 1999, 12(6): 47-49. (in Chinese)
- [29] 范日东, 刘松玉, 杜延军. 基于改进滤失试验的重金属污染膨润土渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 2989-2996.
- FAN R D, LIU S Y, DU Y J. Modified fluid loss test for measuring the hydraulic conductivity of heavy metal-contaminated bentonites [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 2989-2996. (in Chinese)

(编辑 胡玲)