DOI：10.11779/CJGE202104013

赤泥渗滤液对改性 GCL 防渗性能的影响

傅贤雷，杜延军，尤星源，杨玉玲*，姜哲元
（东南大学岩土工程研究所，江苏 南京 211189）

摘 要：旨在评价商用土工合成材料黏土衬垫（GCL）用于阻隔赤泥渗滤液的有效性。赤泥渗滤液作用下 GCL 的防渗特性是评价其防污性能的关键因素。以商用改性 GCL 中膨润土为研究对象，通过自由膨胀试验，研究了 4 种赤泥渗滤液中膨润土的自由膨胀指数。以商用改性 GCL 为研究对象，通过改进滤失试验，研究了 4 种赤泥渗滤液作为渗透液作用下 GCL 渗透系数的变化规律，评价了预水化作用对渗透系数的影响。研究还采用清洁自来水作为 GCL 的渗透液作为对照。结果表明，随着离子强度的增加，改性 GCL 中的膨润土自由膨胀指数随之减小。预水化处理改性 GCL 的渗透系数相较于未预水化处理试样降低了 5 倍左右。在实际工程应用中，建议采用自来水预水化处理 GCL，以此充分发挥其防渗性能。随着改进滤失试验中施加气压的增大，不同赤泥渗滤液作用下的改性 GCL 渗透系数均下降。随着离子强度和一价二价离子摩尔数比的增加，改性 GCL 的渗透系数随之增大。随着膨润土自由膨胀指数的增加，改性 GCL 的渗透系数随之减小。与自来水渗透情况相比，赤泥渗滤液渗透作用下，改性 GCL 渗透系数增大 4.35～12.0 倍。

关键词：改性土工合成材料黏土衬垫；赤泥；预水化；渗透特性；离子强度；一价二价离子摩尔数比
中图分类号：TU441 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－4548(2021)04－0706－09

作者简介：傅贤雷(1993—)，男，博士研究生，主要从事环境岩土及非饱和土力学相关的研究。E-mail: fuxianlei@seu.edu.cn。

Influences of red mud leachates on hydraulic performance of a modified geosynthetic clay liner

FU Xian-lei, DU Yan-jun, YOU Xing-yuan, YANG Yu-ling, JIANG Zhe-yuan
(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: The effectiveness of a commercial modified geosynthetic clay liner (GCL) for the containment of the red mud leachates is investigated. The hydraulic conductivity (*k*) of GCL permeated with red mud leachate is an important index reflecting its containment performance. A series of free swell tests are conducted to evaluate the free swell index (FSI) of bentonite of the GCL in four types of red mud leachates. A series of modified fluid loss tests are conducted to evaluate *k* of the GCL using four types of red mud leachates as permeating liquids. The clean tap water is tested as a benchmark for comparison purpose. The influence of prehydration methods on *k* of the GCL sample are assessed. The results indicate that the FSI decreases with the increasing ionic strength (*I*). The *k* of non-prehydrated GCL is about 5 times that of the prehydrated GCL. The prehydration of GCL with tap water is suggested to achieve superior hydraulic performance exposed to the red mud leachate. The results show that *k* decreases slightly with the increasing air pressure and FSI, while it increases with the increasing *I* and relative abundance of monovalent and divalent cations (RMD). In the tested red much leachates, the hydraulic conductivity ratio (*k* in red mud leachate to that in tap water) of the GCL is found to vary within 4.35 to 12.0.

Key words: modified GCL; red mud; prehydration; hydraulic performance; ionic strength; RMD

0 引 言

赤泥是由铝土矿生产氧化铝过程中排放的强碱性颗粒型废弃物，每生产 1 吨氧化铝约产生 1.5 吨赤泥[1]。作为铝工业大国，中国氧化铝产量占全世界总量的 1/3 以上[2]，由此产生的赤泥主要以堆存方式处理，目前累积堆存量已达到 5 亿吨[3]。赤泥属于第Ⅱ类一般工业固体废物，但其长期堆存将产生大量强碱性的赤泥渗滤液（pH 值可达 12.1～13.0）[4]，若渗入地下会对赤泥堆场的地基土产生腐蚀，从而影响地基土的强度，最终影响赤泥堆场的安全，而且渗滤液会

基金项目：国家重点研发计划项目（2018YFC1802300，2018YFC1803100，2019YFC1806000）；国家自然科学基金项目（41877248，41907248）；江苏省重点研发计划项目（BE2017715）
收稿日期：2020－06－28
*通信作者（E-mail: ylyang@seu.edu.cn）

污染地下水，对周边环境和人体健康造成严重威胁[5]。因此，有必要对赤泥渗滤液进行有效的防渗阻隔，以提高赤泥堆场的环境安全性。

根据《干法赤泥堆场设计规范》（GB50986—2014）[6]的要求，赤泥堆场的底部防渗层主要采用高密度聚乙烯土工膜，但是土工膜不可避免地存在破损缺陷，极大程度地削弱了其防渗截污性能。根据 Rowe 的研究[7]，这些破损可能来自于以下几个方面：①土工膜生产安装运输过程破损（常见）；②土工膜现场铺设过程破损（最常见）；③上部材料（本文中为赤泥）对土工膜的长期作用导致破损；④长期服役期间由于应力拉伸开裂破损。而且在铺设过程中由于大气热辐射的影响土工膜不可避免地出现褶皱，褶皱的长度及连通都会导致土工膜破损处的渗漏量及渗漏范围大幅增加[7]。因此寻求潜在的防渗材料具有重要意义。土工合成材料黏土衬垫（GCL）作为一种防渗土工复合材料，因为其防渗阻隔效果优越、施工周期短、难度低，在各类阻隔工程中应用越来越广泛[8]。例如，现代垃圾卫生填埋场中，GCL 已经被广泛应用于底部防渗衬垫系统及顶部覆盖系统[9]。在污染场地中，GCL 作为底部防渗衬垫也引起了诸多学者的关注。Bouazza 等[10]将 GCL 作为底部防渗衬垫应用于加油站的地下油罐防渗系统，以有效防止油罐渗漏而污染地下水。Mcwatters 等[11]将 GCL 应用于南极州凯西站的碳氢化合物污染场地的底部防渗系统，发现其在极端环境下依然保持着良好的防渗性能。Kalinovich 等[12-13]将 GCL 应用在加拿大北极多氯联苯有机污染土的底部防渗阻隔工程中，以防止有机污染物向下迁移污染地下水。

赤泥堆场防渗层中，当土工膜支持层缺乏细粒土时，GCL 亦被要求用作膜料的保护层[6]。值得注意的是，由于赤泥渗滤液富含高浓度阳离子以及高 pH 值的特点，普通 GCL 用于阻隔赤泥渗滤液时其化学相容性较差，防渗性能容易发生劣化。Ruhl 等[14]通过柔性壁渗透试验发现强碱溶液（pH=13）作用下 GCL 具有良好的缓冲能力，但其防渗性有一定程度的下降。Chen 等[15]、Tian 等[16]采用柔性壁渗透试验，针对 GCL 在赤泥渗滤液作用下的防渗特性进行了研究，发现改性 GCL 比普通 GCL 表现出更低的渗透系数。因此，采用改性措施有望克服 GCL 化学相容性差的问题，提高其防渗性能。现今市场上虽然已研发出多种商用改性 GCL，如美国 CETCO 公司的抗酸碱改性 GCL，但并没有用于赤泥堆场底部防渗的专属 GCL，这些商用改性 GCL 在赤泥渗滤液作用下的防渗性能尚未进行研究。因此，有必要开展中国赤泥堆场渗滤液作用下商用改性 GCL 防渗性能的研究。

实验室内一般采用柔性壁渗透试验对阻隔材料的渗透特性进行评价，涉及污染液渗透时，要求进、出试样的测试液达到化学平衡状态，这导致试验耗时较长[17]。因此，通过改进滤失试验快速评价土样的渗透特性的方法逐渐被广大学者接受。Filtz 等[18]证明了 API 标准滤失仪评估砂-膨润土混合泥浆渗透特性的可行性。Rico 等[19]基于改进滤失试验评估了砂-膨润土试样的渗透特性。Du 等[20]采用改进滤失试验评估了聚合物改性膨润土材料的渗透特性。范日东等[21]基于改进滤失试验研究了重金属污染膨润土的渗透特性。Fan 等[22]采用改进滤失试验对改性膨润土的化学相容性进行了研究。这些研究表明改进滤失试验在快速评定土-膨润土材料渗透系数方面表现良好。Liu 等[17]采用改性滤失试验测定了 GCL 中的膨润土在尾矿库渗滤液作用下的渗透系数，并与柔性壁渗透试验结果作了对比，发现在低离子浓度下，改性滤失试验可以作为渗透系数的快速测定方法。但是，基于改进滤失试验快速评价 GCL 在赤泥渗滤液作用下的渗透特性研究还较少报道。

本文采用改进滤失试验定量地评价了一种商用抗酸碱改性GCL在4种赤泥渗滤液作用下的防渗性能以及预水化作用对 GCL 防渗性能的影响。研究成果对中国赤泥堆场防渗层专属改性 GCL 的研发和应用具有参考作用。

1　试验材料和方法

1.1　GCL

试验用 GCL 由美国 CETCO 子公司-捷高科技（苏州）有限公司提供，型号为 Resistex。该产品是一种采用针织法制得的抗酸碱改性 GCL，总厚度约为 7 mm；上下侧为土工织物，厚度约为 1.0～1.5 mm；中间为改性膨润土，GCL 的单位面积质量为 4 kg/m^2。其中，改性膨润土为颗粒状，基本物理化学特性见表 1。

1.2　测试溶液

试验用赤泥渗滤液为取自山西原平赤泥堆场的两组渗滤液（记为 RML$^{\#}$1 和 RML$^{\#}$2）和山西阳泉赤泥堆场的两组渗滤液（记为 RML$^{\#}$3 和 RML$^{\#}$4）。表 2 总结了 4 种赤泥渗滤液的相关化学特性，可以发现 4 种赤泥渗滤液均为高 pH 值液体，且离子强度（I）和一价二价离子摩尔数比（RMD）存在明显不同。研究表明[26]离子强度 I 和一价二价离子摩尔数比 RMD 显著影响 GCL 防渗性能。其中，离子强度 I 计算公式如式（1）所示，其综合考虑了赤泥渗滤液中阳离子的浓度

及相应的离子化合价[27-28]；一价二价离子摩尔数比 RMD 计算公式如式（2）所示。

$$\mathrm{I}=\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{n}c_iZ_i^2 \quad , \tag{1}$$

$$\mathrm{RMD}=\frac{M_{\mathrm{MC}}}{\sqrt{M_{\mathrm{DC}}}} \quad , \tag{2}$$

式中，c_i 为第 i 种阳离子浓度（mmol/L），Z_i 为第 i 种阳离子化合价，M_{MC} 为一价阳离子浓度（mmol/L），M_{DC} 为二价阳离子浓度（mmol/L）。

表 1 GCL 中膨润土的基本物理化学特性

Table 1 Physical and chemical properties of bentonite in GCL

指标	参数	测试标准或方法
相对质量密度 G_s	2.63	《公路土工试验规程》（JTG 3430—2020）[23]
孔隙比 e	1.70	
天然含水率 w/%	7	
黏粒含量/%	58	
细粒含量/%	100	
砂粒含量/%	0	
液限 w_L /%	431	
塑限 w_P /%	53	
塑性指数 I_P	378	
pH	9.53	ASTM D4972[24]
比表面积/($m^2\cdot g^{-1}$)	345	文献[25]

表 2 赤泥渗滤液的化学特性

Table 2 Chemical properties of red mud leachates

指标	RML#1	RML#2	RML#3	RML#4
EC/($mS\cdot cm^{-1}$)	81.8	32.6	33.8	16.4
pH	12.85	12.88	12.56	12.58
I/($mmol\cdot L^{-1}$)	473	284	213	131
RMD/($mmol\cdot L^{-1}$)$^{1/2}$	3438	1879	1198	1222
钠/($mmol\cdot L^{-1}$)	220	451	211	83
钾/($mmol\cdot L^{-1}$)	42	36	8	8
钙/($mmol\cdot L^{-1}$)	0.0058	0.0658	0.0334	0.0055
镁/($mmol\cdot L^{-1}$)	0.0031	＜0.0001	0.0038	＜0.0001
铁/($mmol\cdot L^{-1}$)	0.0047	0.0001	0.0001	0.0001
铝/($mmol\cdot L^{-1}$)	76	9	23	19
硫酸盐/($mmol\cdot L^{-1}$)	436	588	397	162
硝酸盐/($mg\cdot L^{-1}$)[a]	14.8	29.5	8.61	4.73
氯化物/($mg\cdot L^{-1}$)	174	172	150	75
总硬度[b]	18	9	6	8

注：EC 为电导率；a 以氮含量计算；b 以碳酸钙含量计算。

工程应用中通常需要对 GCL 进行预水化处理。研究表明[28]，预水化作用对 GCL 的渗透系数具有显著影响：经去离子水预水化后，GCL 渗透系数比未经预水化处理试样降低一个数量级以上；而在实际工程施工中，往往采用自来水或者当地的地下水对 GCL 进行预水化处理。为模拟实际应用工况，本文选用江苏省某化工厂区污染场地地下水（pH=8.12，电导率（EC）=905 μS/cm）、去离子水（pH=6.78，EC=0.01 μS/cm）、自来水（pH=7.29，EC=143.7 μS/cm）作为预水化液体，对比不同类型预水化液体对 GCL 渗透系数的影响。地下水的主要化学成分如表 3 所示，可以发现该地下水各检测指标皆低于地下水质量标准（GB/T 14848—2017）[29]中 IV 类地下水限定值，根据污染地块地下水修复和风险管控技术导则（HJ 25.6—2019）[30]，无需启动风险评估或修复或风险管控。

表 3 工业污染场地地下水的主要化学成分

Table 3 Main chemical composition of groundwater in contaminated site

指标	浓度/($mg\cdot L^{-1}$)	IV 类地下水限定值/($mg\cdot L^{-1}$)
铅	0.0026	0.10
砷	0.0033	0.05
四价铬	0.036	0.10
氨氮	1.16	1.50
氯化物	321	350
氟化物	0.91	2.0
硫酸根离子	72	350
高锰酸根离子	1.48	10

1.3 试验方法

（1）自由膨胀试验

将改性 GCL 试样中的膨润土取出，并研磨过 200 目筛（0.075 mm），然后置于 105℃烘箱 24 h 后称取 2 g 进行自由膨胀试验。改性 GCL 试样中的膨润土材料的自由膨胀试验参照 ASTM D5890 [31]进行。试验采用去离子水及上述 4 种赤泥渗滤液，取约 90 mL 溶液倒入 100 mL 量筒内，为了确保膨润土在溶液中充分水化，每次取约 0.1 g 膨润土加入量筒内的溶液中，待 2 g 膨润土完全加入后，用少量溶液冲洗量筒侧壁以冲去附着在内壁上的膨润土，并将量筒内溶液加至 100 mL，静置 24 h 后，记录量筒内膨润土体积读数。每种溶液的自由膨胀试验的平行样为 3 组。

（2）改进滤失试验

本文采用 API 标准滤失仪进行改进滤失试验，对 GCL 在不同赤泥渗滤液作用下的防渗性能进行研究。改进滤失试验测定 GCL 试样渗透系数的示意图如图 1 所示。首先，将 GCL 试样裁剪为直径为 76.2 mm 的圆形试样，为防止膨润土颗粒散落，在裁剪的同时沿 GCL 试样边缘膨润土暴露部位均匀滴加 2～3 滴去离子水，以使膨润土湿润黏结。然后在滤失仪腔室内壁涂抹凡士林，将透水石、GCL 试样、滤纸以及特制塑料垫圈按图 1 顺序置于试验腔室内，完成腔室组装。腔室由下述部件组成：塑料垫圈为 3D 打印特制，材料为复合树脂，高 36 mm，内径 43 mm，外径 43.75 mm，此垫圈能使 GCL 试样、透水石和滤纸等装填完毕后，正好紧紧顶住腔室顶部和底部。实验中 GCL 的预水化过程包括如下步骤：向组装好的腔室内部注满预水化液体（去离子水、自来水或地下水）后，将腔室浸泡在饱和缸的预水化液体中，并在−85 kPa 的压

力下真空放置 24 h。在上述 GCL 预水化完成后，用针管将预水化液体自腔室中抽出，向腔室内部注入 120 mL 赤泥渗滤液，并对腔室施加气压进行改进滤失试验，以 35 kPa→56 kPa→112 kPa→224 kPa 逐级加压，渗出液通过放置于腔室出液口处的量筒进行收集。

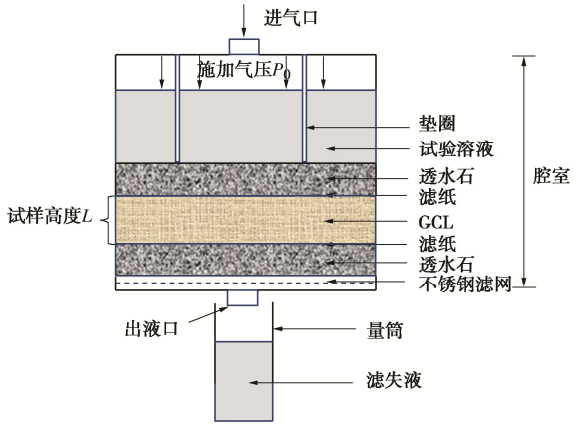


图 1 改进滤失试验示意图

Fig. 1 Illustration of modified fluid loss tests

试验前后分别测定 GCL 试样高度及含水率，并对每个气压下的 10 mL 渗出液的 pH、EC 以及浓度进行测试。其中由于根据表 2 赤泥渗滤液的成分，以及考虑到本试验更关注 GCL 中膨润土阳离子交换作用的影响，由于该 GCL 中的膨润土为钠基膨润土，因此浓度测试不考虑 Na^+，仅针对 Al^{3+}和 K^+。EC 和 pH 值分别根据规范 ASTM D1125[32]和 ASTM E70[33]，采用 Thermo Orion 4-Star 精密便携式 pH/离子浓度测量仪测定。Al^{3+}和 K^+浓度采用赛默飞世尔科技有限公司制造的 ICE3000 原子吸收分光光度计测定，测定前应通过滴加浓硝酸将收集液的 pH 调至 2 以下。本文共进行了 9 组试验，具体方案如表 4 所示。其中前 4 组试验研究了不同预水化液体对 GCL 试样渗透系数的影响，后 5 组试验研究了不同渗透液体（自来水、赤泥渗滤液）对 GCL 防渗性能的影响。

表 4 试验方案

Table 4 Test schemes

试样编号	预水化液体	渗透液体	气压 P_0/kPa	平均上覆有效应力 σ_{ave}/kPa
Y1	无	去离子水	56, 112	28, 56
Y2	去离子水	去离子水		
Y3	自来水	去离子水		
Y4	地下水	去离子水		
Z1	自来水	自来水	35, 56, 112, 224	17.5, 28, 56, 112
Z2	自来水	RML#1		
Z3	自来水	RML#2		
Z4	自来水	RML#3		
Z5	自来水	RML#4		

1.4 渗透系数的计算

本文基于文献[18，19]，对改进滤失试验中 GCL 的渗透系数计算进行了推导，达西定律如下：

$$\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}=K\frac{P_0A}{\mu L}=\frac{k_{\mathrm{MFL}}}{\gamma_{\mathrm{w}}}\times\frac{P_0A}{L}\quad,\tag{3}$$

式中，V 为渗出液体积（m^3），t 为试验持续时间（s），K 为固有渗透系数（m^2），P_0 为 GCL 试样所受气压（kPa），A 为滤失仪腔室横截面积（m^2），μ 为液体黏度（kN/m^3），L 为 GCL 试样的高度（m），k_{MFL} 为 GCL 试样的渗透系数（m/s），γ_{w} 为水的重度（kN/m^3）。

根据式（3）可得 GCL 试样的渗透系数为

$$k_{\mathrm{MFL}}=\frac{V\gamma_{\mathrm{w}}L}{P_0At}=\frac{V}{iAt}\quad,\tag{4}$$

式中，i 为水力梯度。

试验过程中，膨润土单元的上覆有效应力 σ' 计算如下[34]：

$$\sigma'=P_0\times\left(1-\frac{x}{L}\right)\quad,\tag{5}$$

式中，x 为该膨润土单元距离试样底部的距离（m）。

为简化计算，平均有效上覆应力 σ'_{ave} 计算如下[18-19]：

$$\sigma'_{\mathrm{ave}}=\frac{P_0L\times\int_0^L\left(1-\frac{x}{L}\right)}{L}=0.5P_0\quad。\tag{6}$$

GCL 试样中膨润土的孔隙比 e 计算公式如下：

$$e=\frac{G_{\mathrm{s}}\times\gamma_{\mathrm{w}}\times(1+w)}{G_{\mathrm{s}}\times\gamma_{\mathrm{w}}-1}\quad,\tag{7}$$

式中，G_{s} 为膨润土的相对质量密度，w 为 GCL 试样中膨润土的含水率（%）。

2 试验结果及讨论

图 2 为赤泥渗滤液作用下的改性 GCL 试样中膨润土的自由膨胀指数（FSI）情况。改性 GCL 试样中的膨润土在去离子水中的自由膨胀指数为 42 mL/2g，在 RML#1、RML#2、RML#3、RML#4 中的自由膨胀指数分别为 14，17，19，23 mL/2g。相对去离子水，赤泥渗滤液对膨润土的扩散双电层厚度的压制极为明显，因此在赤泥渗滤液相对于在去离子水中膨润土的自由膨胀指数更小。根据表 2 中的赤泥渗滤液离子强度可以发现，随着赤泥渗滤液离子强度的增长，膨润土的自由膨胀指数逐渐减小。

表 5 为试验前后的 GCL 试样的基本参数情况。可以发现，在预水化过程中，GCL 中的膨润土吸水膨胀，含水率上升，试样的整体高度和平均孔隙比明显增加。在去离子水中水化的 GCL 试样各参数增量最大。而在改进滤失试验后，预水化 GCL 试样的高度、含水率及平均孔隙比整体出现下降，这是由于试验过程中施加气压在 GCL 试样上产生渗流固结压缩，导致 GCL 试

样的各参数有所减小。在赤泥渗滤液作用下，GCL 试样的各参数下降幅度显著，这是由于赤泥渗滤液压缩了膨润土的扩散双电层，抑制了 GCL 试样的膨胀。

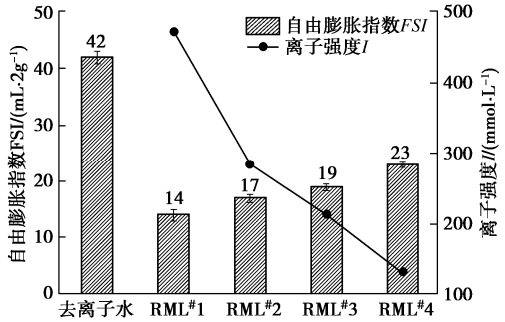


图 2 不同赤泥渗滤液作用下的膨润土自由膨胀指数

Fig. 2 FSI of bentonite in GCL with red mud leachates

表 5 试验前后 GCL 的基本参数

Table 5 Basic parameters of GCL before and after tests

试样编号	含水率 w/%	膨润土孔隙比 e	试样高度 L/mm
Y1[a]	7	1.70	7
Y1[b]	16	1.85	7.41
Y2[a]	33	2.12	9.53
Y2[b]	29	2.06	9.17
Y3[a]	33	2.12	9.48
Y3[b]	28	2.05	9.06
Y4[a]	32	2.12	9.41
Y4[b]	28	2.05	9.05
Z1[b]	23	1.96	8.71
Z2[b]	17	1.87	8.11
Z3[b]	20	1.91	8.31
Z4[b]	21	1.92	8.35
Z5[b]	21	1.92	8.46

注：a 为进行改进滤失试验前测得的 GCL 参数；b 为进行改进滤失试验后测得的 GCL 参数；平行样个数为 3，高度、含水率各测试 3 次取平均值。

图 3 反映了预水化过程对 GCL 试样渗透系数的影响。由图 3 所示，预水化 GCL 的渗透系数相较于未预水化处理的试样的渗透系数降低了 5 倍左右。因此在实际工程应用中，建议进行预水化处理以充分发挥 GCL 的防渗性能。采用去离子水和自来水预水化后，GCL 试样的渗透系数相近，均达到《生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范》（CJJ 113—2007）[35]中 GCL 的设计要求（$k<5\times10^{-11}$ m/s）。而采用地下水预水化后，GCL 试样的渗透系数略高于其他两种液体预水化试样，未满足规范要求。这是由于本文所用的地下水中存在丰富的多价阳离子，可与膨润土表面的低价阳离子发生置换作用，压缩膨润土的扩散双电层，导致渗透系数增大。因此，在实际工程中推荐使用自来水对 GCL 进行预水化，若要采用地下水作为预水化液体，需提前检测地下水成分，并进行相关试验分析。

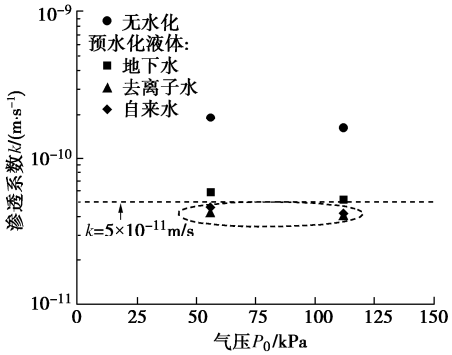
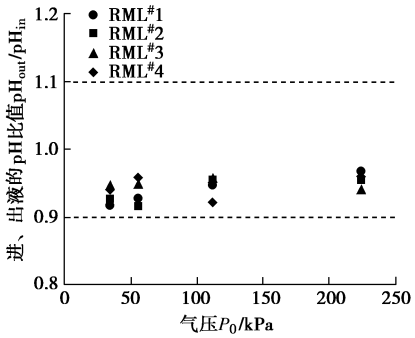


图 3 不同预水化液体对 GCL 渗透系数（k）的影响

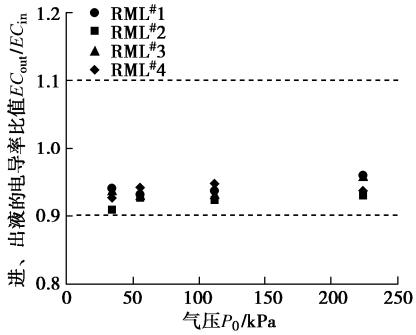
Fig. 3 Effects of different hydration liquid on hydraulic conductivity of GCL

目前基于考虑化学平衡的渗透试验的终止准则有 ASTM D6766[36]和 ASTM D7100[37]。然而，研究表明[26]当渗出液的电导率达到 ASTM D6766[36]的试验终止条件时，GCL 的渗透系数依然在增加，这意味着仅依据 ASTM D6766[36]的化学平衡条件（渗出液的电导率为渗进液的±10%）不够充分。规范 ASTM D7100[37]相对于规范 ASTM D6766[36]提出了更为严苛的要求，不仅需要渗出液/渗进液间达化学平衡状态，即渗出液的电导率为渗进液的±10%，而且要求渗出液的离子浓度、pH 值均在渗进液相应参数的±10%范围内，且随时间增长无明显上升或下降趋势。由于现今没有判断改进滤失试验中 GCL 化学平衡的规范，因此本文采用更为严苛的 ASTM D7100[37]，通过测量进、出液的 pH、电导率、Al^{3+}和 K^+浓度作为判断在赤泥渗滤液作用下 GCL 的改进滤失试验达到化学平衡的依据。图 4 为赤泥渗滤液作用下渗出、进液的 pH 比值、电导率、Al^{3+}浓度比值和 K^+浓度比值随气压 P_0 变化的关系。可以发现，在不同的气压下，所有渗透试验的进、出液的 pH 比值、电导率及 Al^{3+}浓度比值和 K^+浓度比值都在 0.9～1.1 之间（即 $0.9 \leqslant pH_{out}/pH_{in}$，$EC_{out}/EC_{in}$，$c_{out}/c_{in} \leqslant 1.1$）。根据规范 ASTM D7100[34]，该结果可视为试样达到化学平衡状态。

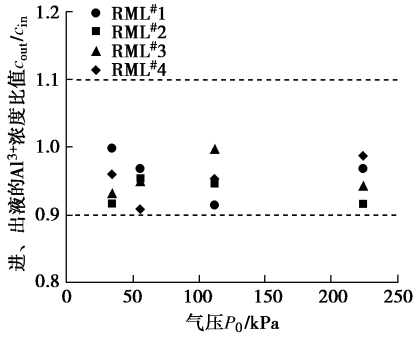
图 5 为不同赤泥渗滤液作用下 GCL 试样渗透系数随气压变化关系。如图 5 所示，随着气压的增大，各 GCL 试样渗透系数均有所下降，这是由于 GCL 试样



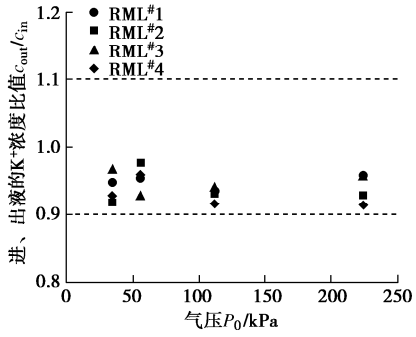
（a）进、出液的pH比值



（b）进、出液电导率比值



（c）进、出液Al^{3+}浓度比值



（d）进、出液K^+浓度比值

图 4 赤泥渗滤液作用下渗出、进液的 pH 比值、电导率、Al^{3+}浓度比值和 K^+浓度比值

Fig. 4 pH, electrical conductivity and concentration equilibrium status of outflow and inflow with red mud leachates

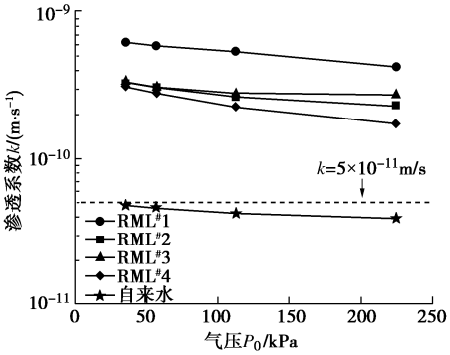


图 5 GCL 的渗透系数（k）随气压（P_0）变化关系

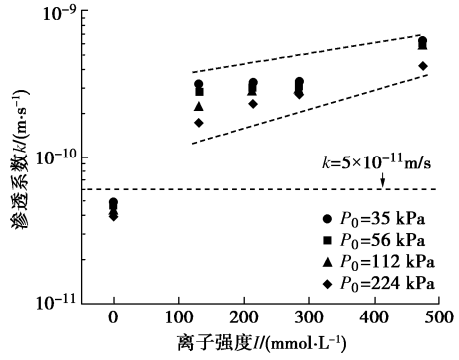
Fig. 5 Relationship between hydraulic conductivity of GCL and air pressure

中的膨润土在气压的作用下产生压缩固结，导致孔隙比下降，供渗滤液流动的孔隙通道变窄，进而导致 GCL 试样的渗透系数轻微下降。此外，在 4 种赤泥渗滤液作用下，GCL 试样的渗透系数均高于自来水渗透情况，这表明赤泥渗滤液导致 GCL 防渗性能出现了不同程度的下降。

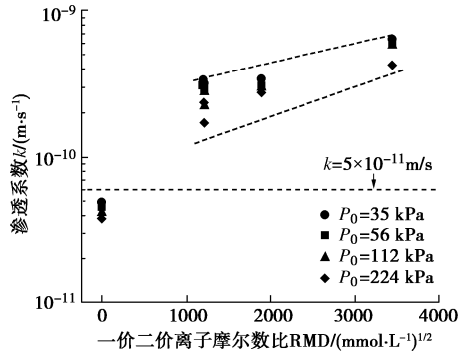
图 6 为不同气压作用下赤泥渗滤液的离子强度与一价二价离子摩尔数比和 GCL 试样渗透系数的关系。赤泥渗滤液中的金属阳离子对 GCL 试样的渗透系数影响显著，随着离子强度和一价二价离子摩尔数比的增加，GCL 试样的渗透系数随之增大。图 6 表明赤泥渗滤液中的离子浓度及离子种类会对 GCL 试样的渗透性能产生显著的影响。上述现象可以通过 Gouy-Chapman 扩散双电层理论[38]来解释，式（8）为扩散双电层厚度（$1/\kappa$）的计算公式。根据式（8）可以发现膨润土孔隙溶液中阳离子价和阳离子浓度呈反比。随着膨润土中孔隙溶液的阳离子浓度和阳离子价的增加，膨润土的扩散双电层厚度减小，导致膨润土中的孔隙尺寸增大，渗流通道增大，渗透系数随之增大[39-40]。

$$\frac{1}{\kappa}=\left(\frac{\varepsilon_0 D k_B T}{2 n_0 E^2 v^2}\right)^{1/2} \quad , \tag{8}$$

式中，κ 为双电层系数，ε_0 为静态介电常数，D 为介电常数，k_B 为波兹曼（Boltzmann）常数（1.38×10^{-23} J/K），T 为凯尔文绝对温度（K），n_0 为中轴线处离子浓度（mmol/L），E 为基本电荷单位（4.8×10^{-10} esu），v 为离子价。



（a）离子强度I



（b）一价二价离子摩尔数比RMD

图 6 不同赤泥渗滤液作用下 GCL 的渗透系数（k）随离子强度（I）及一价二价离子摩尔数比（RMD）变化关系

Fig. 6 Relationship between hydraulic conductivity of GCL and I or RMD

图 7 为改性 GCL 中膨润土自由膨胀指数与 GCL

渗透系数的关系。由图可见，随着 GCL 中膨润土自由膨胀指数的增加，GCL 的渗透系数逐渐减小，自由膨胀指数和渗透系数存在明显的负相关关系。图 8 为膨润土自由膨胀指数、224 kPa 气压作用下的 GCL 渗透系数及改进滤失试验后膨润土孔隙比之间的关系图。从图 8 中 $x-y$ 平面可以发现，随着膨润土自由膨胀指数的增加，改进滤失试验后膨润土的孔隙比逐渐减小。从 $x-z$ 平面可以发现，随着膨润土孔隙比增加，GCL 渗透系数反而随之减小。这是由于当气压为 224 kPa（根据式（5）可得上覆有效应力为 112 kPa）时，赤泥渗滤液对 GCL 中膨润土的化学影响依然显著。离子交换作用使膨润土颗粒表面的 Na^+被其他阳离子（如 Al^{3+}和 K^+）所替代，赤泥渗滤液离子强度和阳离子价态越高，膨润土颗粒扩散双电层厚度越小，导致膨润土团聚体的有效孔隙比越大[41]。因此，即使如图 8 所示，RML#1 作用下膨润土孔隙比最小，但是其有效孔隙比最大，导致其渗透系数最大。

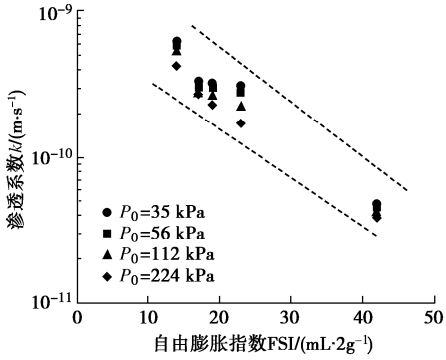


图 7 GCL 中膨润土自由膨胀指数和 GCL 渗透系数的关系

Fig. 7 Relationship between k of GCL and FSI of bentonite

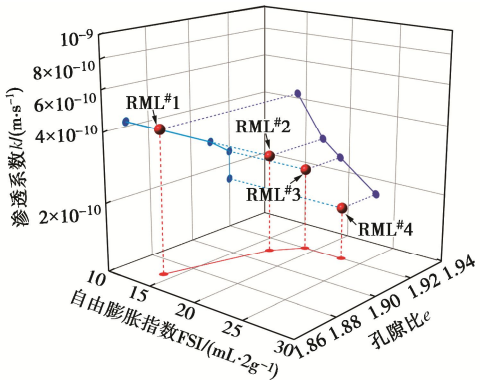


图 8 自由膨胀指数、孔隙比及渗透系数的关系

Fig. 8 Relationship among FSI, e and k

图 9 为不同赤泥渗滤液作用下 GCL 试样的渗透系数比 k_c/k_w（赤泥渗滤液作用下的渗透系数 k_c 与去离子水作用下的渗透系数 k_w 的比值）随离子强度及一价二价离子摩尔数比变化关系。本文采用渗透系数比定量评价各赤泥渗滤液作用下 GCL 试样的化学相容性。可以发现，随着离子强度及一价二价离子摩尔数比的上升，GCL 的渗透系数比逐渐增大。在不同赤泥渗滤液作用下，渗透系数比约为 4.35～12.0。

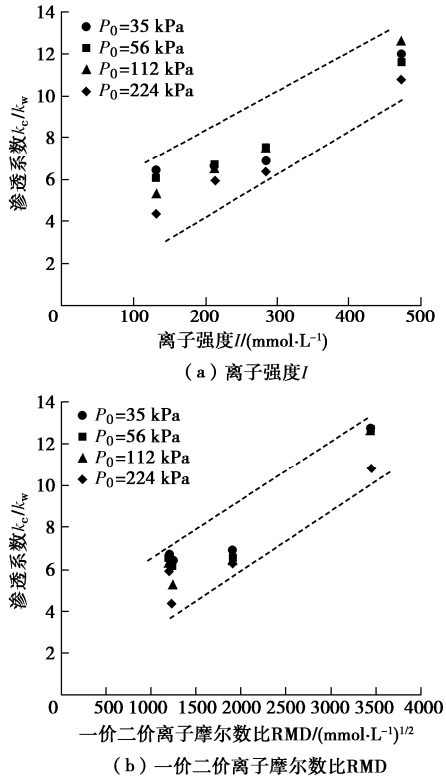


图 9 不同赤泥渗滤液作用下 GCL 的渗透系数比（k_c/k_w）随离子强度（Ⅰ）及一价二价离子摩尔数比（RMD）变化关系

Fig. 9 Relationship between k_c/k_w of GCL and I or RMD

3 结 论

本文基于改进滤失试验，研究了赤泥渗滤液作用下商用抗酸碱改性 GCL 的防渗性能。主要得到以下结论：

（1）去离子水中改性 GCL 中的膨润土自由膨胀指数大于赤泥渗滤液作用下的膨润土自由膨胀指数。随着赤泥渗滤液离子强度的增加，膨润土自由膨胀指数逐渐下降。

（2）预水化处理改性 GCL 的渗透系数相较于未预水化处理的试样的渗透系数降低了 5 倍左右，采用地下水预水化的 GCL 的渗透系数略高于去离子水和自来水预水化的试样，未满足规范要求。因此在实际工程应用中，建议进行采用自来水预水化处理 GCL 以完全发挥其防渗性能。

（3）GCL 在不同赤泥渗滤液作用下的渗透系数均高于自来水作用下的渗透系数。随着气压的增大，不同赤泥渗滤液作用下的 GCL 渗透系数均有所下降。

（4）赤泥渗滤液中的金属阳离子对 GCL 的渗透系数影响显著，随着离子强度和一价二价离子摩尔数

比的增加，GCL 的渗透系数随之增大。随着 GCL 中膨润土膨胀指数的增加，GCL 的渗透系数逐渐减小。

（5）渗透系数比随着离子强度及一价二价离子摩尔数比的增大而逐渐增大。在不同赤泥渗滤液作用下，渗透系数比约为 4.35～12.0。

参考文献：

[1] HAMADA T. Environmental management of bauxite residue—a review[J]. The Jamaica Bauxite Institute, The University of the West Indies, Kingston, 1986: 109－117.

[2] 宋志伟. 改性赤泥协同水泥固化铜污染土的性能及机理研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2017. (SONG Zhi-wei. Study on the Characteristic and Mechanism of Cu Contaminated Soil Stabilized by Modified Red Mud with Cement[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2017 (in Chinese))

[3] XUE S, ZHU F, KONG X, et al. A review of the characterization and revegetation of bauxite residues (red mud)[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, **23**(2): 1120－1132.

[4] 李　健, 巫锡勇, 侯　龙. 拜耳法赤泥的物化特性及污染防控措施研究[J]. 地球与环境, 2014, **42**(5): 677－682. (LI Jian, WU Xi-yong, HOU Long. Research on the physicochemical features of Bayer red mud and the corresponding method of pollution prevention[J]. Earth and Environment, 2014, **42**(5): 677－682 (in Chinese)).

[5] CASTALDI P, SILVETTI M, SANTONA L, et al. XRD, FTIR, and thermal analysis of bauxite ore-processing waste (red mud) exchanged with heavy metals[J]. Clays and Clay Minerals, 2008, **56**(4): 461－469.

[6] 干法赤泥堆场设计规范：GB 50986—2014[S]. 2015. (Code for Design of Dry Red Mud Stack: GB 50986—2014[S]. 2015. (in Chinese))

[7] ROWE R K. Protecting the environment with geosynthetics: 53rd Karl Terzaghi Lecture[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020, **146**(9): 04020081.

[8] BUDIHARDJO M, CHEGENIZADEH A, NIKRAZ H. A review of key factors on Geosynthetic clay liners' performance as liner system[J]. International Journal of Biological, Ecological and Environmental Sciences, 2012, **1**(3): 117－119.

[9] 谢海建, 詹良通, 陈云敏, 等. 中国四类衬垫系统防污性能的比较分析[J]. 土木工程学报, 2011, **44**(7): 133－141. (XIE Hai-jian, ZHAN Liang-tong, CHEN Yun-min, et al. Comparison of the performance of four types of liner systems in China. China Civil Engineering Journal, 2011, **44**(7): 133－141. (in Chinese))

[10] BOUAZZA A. Geosynthetic clay liners[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2002, **20**(1): 3－17.

[11] MCWATTERS R S, ROWE R K, WILKINS D, et al. Geosynthetics in Antarctica: performance of a composite barrier system to contain hydrocarbon-contaminated soil after three years in the field[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2016, **44**(5): 673－685.

[12] KALINOVICH I K, RUTTER A, ROWE R K, et al. Design and application of surface PRBs for PCB remediation in the Canadian Arctic[J]. Journal of Environmental Management, 2012, **101**: 124－133.

[13] KALINOVICH I K, RUTTER A, POLAND J S, et al. Remediation of PCB contaminated soils in the Canadian Arctic: excavation and surface PRB technology[J]. Science of the Total Environment, 2008, **407**(1): 53－66.

[14] RUHL J L, DANIEL D E. Geosynthetic clay liners permeated with chemical solutions and leachates[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1997, **123**(4): 369－381.

[15] CHEN J, BENSON C H. Hydraulic conductivity and attenuation of bentonite-polymer composite geosynthetic clay liners permeated with bauxite liquor from China[C]// AGU Fall Meeting 2019, 2019, AGU.

[16] TIAN K, BENSON C H. Containing bauxite liquor using bentonite-polymer composite geosynthetic clay liners[C]// The International Congress on Environmental Geotechnics. Springer, 2018, Singapore: 672－678.

[17] LIU Y, GATES W P, BOUAZZA A, et al. Fluid loss as a quick method to evaluate hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners under acidic conditions[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2014, **51**(2): 158－163.

[18] FILZ G M, HENRY L B, HESLIN G M, et al. Determining hydraulic conductivity of soil-bentonite using the API filter press[J]. Geotechnical Testing Journal, 2001, **24**(1): 61－71.

[19] RICO R A, GILLES B, IRINI D M. Hydraulic conductivity determination of compacted sand-bentonite mixture using filter press[J]. Geotechnical Testing Journal, 2011, **34**(1): 9－17.

[20] DU Y J, SHEN S Q, TIAN K, YANG Y L. Effect of polymer amendment on hydraulic conductivity of bentonite in calcium chloride solutions[J]. Journal of Materials in Civil

Engineering, 2021, **33**(2): 04020452.

[21] 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 Ri-dong, LIU Song-yu, DU Yan-jun. Modified fluid loss test to measure hydraulic conductivity of heavy metal-contaminated bentonite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(8): 2989－2996. (in Chinese)).

[22] FAN R D, REDDY K R, YANG Y L, et al. Index properties, hydraulic conductivity and contaminant-compatibility of CMC-treated sodium activated calcium bentonite[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, **17**(6): 1863－1881.

[23] 公路土工试验规程：JTG 3430—2020[S]. 2021. (Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG 3430—2020[S]. 2021 (in Chinese))

[24] Standard Test Methods for pH of Soils: ASTM D4972[S]. 2019.

[25] CERATO A B, LUTENEGGERL A J. Determination of surface area of fine-grained soils by the ethylene glycol monoethyl ether (EGME) method[J]. Geotechnical Testing Journal, 2002, **25**(3): 315－321.

[26] 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.

[27] KOLSTAD D C, BENSON C H, EDIL T B. Hydraulic conductivity and swell of nonprehydrated geosynthetic clay liners permeated with multispecies inorganic solutions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(12): 1236－1249.

[28] 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.

[29] 地下水质量标准：GB/T 14848—2017[S]. 2018. (Standard for Groundwater Quality: GB/T 14848—2017[S]. 2018. (in Chinese))

[30] 污染地块地下水修复和风险管控技术导则：HJ 25.6—2019[S]. 2019. (Technical Guideline for Groundwater Remediation and Risk Control of Contaminated Sites: HJ 25.6-2019[S]. 2019. (in Chinese))

[31] Standard Test Method for Swell Index of Clay Mineral Component of Geosynthetic Clay Liners: ASTM D5890[S]. 2011.

[32] Standard Test Method for Electrical Conductivity and Resistivity of Water: ASTM D1125 [S]. 2014.

[33] Method for pH of Aqueous Solutions with the Glass Electrode: ASTM E70[S]. 2015.

[34] CHUNG J, DANIEL D E. Modified fluid loss test as an improved measure of hydraulic conductivity for bentonite[J]. Geotechnical Testing Journal, 2008, **31**(3): 243－251.

[35] 生活垃圾卫生填埋场防渗系统工程技术规范: CJJ 113—2007[S]. 2007. (Technical Code for Liner System of Municipal Solid Waste Landfill CJJ 113—2007[S]. 2007. (in Chinese))

[36] Standard Test Method for Evaluation of Hydraulic Properties of Geosynthetic Clay Liners Permeated with Potentially Incompatible Aqueous Solution: ASTM D6766[S]. 2020.

[37] Standard Test Method for Hydraulic Conductivity Compatibility Testing of Soils with Aqueous Solutions: ASTM D7100[S]. 2011.

[38] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of Soil Behavior[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.

[39] 秦爱芳, 傅贤雷, 孙德安, 等. 化–力耦合条件下膨润土的体变特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(增刊 2): 3775－3782. (QIN Ai-fang, FU Xian-lei, SUN De-an, et al. Influences of chemo-mechanical coupling on the volume change behaviour of bentonite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(S2): 3775－3782. (in Chinese)).

[40] 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 Ri-dong, DU Yan-jun, CHEN Zou-bo, 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)).

[41] YE W M, ZHANG F, CHEN B, et al. Effects of salt solutions on the hydro-mechanical behavior of compacted GMZ01 Bentonite[J]. Environmental Earth Sciences, 2014, **72**(7): 2621－2630.