

聚合物改性膨润土-砂混合物防渗工程应用初探

杨 微^{1,2} 何逸飞^{1,2} 任孟健³ 陈仁朋^{1,2} 王瀚霖^{1,2} 袁 平⁴ 郭承晖³

1. 湖南大学建筑安全与节能教育部重点试验室, 湖南长沙 410082

2. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082

3. 湖南麓谷环保科技有限公司, 湖南长沙 410012

4. 中冶长天国际工程有限责任公司, 湖南长沙 410205

摘要: 聚合物改性膨润土(PMB)因其低渗透性和优异的抗盐能力, 已成为工业固废防渗领域的研究热点。然而, 目前关于 PMB 在真实尾矿库服役环境中的研究与应用仍较有限。系统比较 PMB 与钠基膨润土(NaB)在不同污染环境下的膨胀性和重金属吸附性能, 评估聚合物改性膨润土-砂(PMB-S)与 NaB-砂(NaB-S)混合物的渗透性能, 并进一步探讨磷矿现场弃渣作为基质材料与 PMB 混合用于防渗的可行性。结果表明, PMB 在 pH 2~pH 12 范围内自由膨胀指数始终 >50 mL/2 g, 显著高于 NaB; 同时, 其对 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的吸附性能也优于 NaB, 尤其在酸性环境下, 去除率分别提高 58.42% 和 61.31%。PMB-S 混合物的渗透系数明显低于 NaB-S, 且在多数污染环境下可稳定低于 1×10^{-8} cm/s。PMB 与三种磷矿弃渣混合物的渗透性能与 PMB-S 接近, 验证弃渣作为防渗基质材料的可行性。通过在强碱性铅锌矿和强酸性磷石膏尾矿库开展原位防渗工程示范, 进一步验证 PMB-S 在实际工况下的防渗与污染阻隔性能。

关键词: 聚合物改性膨润土; 膨胀特性; 吸附性能; 渗透系数; 原位试验

中图分类号: TU41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2026)01-0087-13

DOI: 10.15951/j.tmgcxb.25060359

Preliminary study on the engineering application of polymer-modified bentonite-sand mixtures for seepage control

Yang Wei^{1,2} He Yifei^{1,2} Ren Mengjian³ Chen Renpeng^{1,2} Wang Hanlin^{1,2}

Yuan Ping⁴ Guo Chenghui³

1. Key Laboratory of Building Safety and Energy Efficiency of the Ministry of Education, Hunan University, Changsha 410082, China

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

3. Hunan Lugu Environmental Protection Technology Co., Ltd., Changsha 410012, China

4. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, China

Abstract: Polymer-modified bentonite (PMB) has been extensively investigated for industrial waste containment due to its low hydraulic conductivity and salt resistance. Its performance under actual field conditions, however, remains insufficiently documented. Swelling and heavy-metal adsorption behaviors of PMB and sodium bentonite (NaB) were systematically compared under varied contaminant solutions. The hydraulic performance of polymer-modified bentonite-sand (PMB-S) and sodium bentonite-sand (NaB-S) mixtures was evaluated. Furthermore, the feasibility of using in situ phosphate mine waste as a substrate material in PMB-based barriers was discussed. Results show that across the pH range of 2 to 12, PMB always maintains a free swelling index greater than 50 mL/2 g, significantly higher than that of NaB. Additionally, its adsorption performance for Pb^{2+} and Cu^{2+} is superior to that of NaB, with the removal rates increasing by 58.42% and 61.31%, respectively, particularly in acidic environments. The hydraulic conductivity of

基金项目: 国家自然科学基金(U23A20665)、湖南省自然科学基金-杰青项目(2024JJ2020)、湖南省科技创新青年科技人才项目(2022RC1174)和长沙市重大科技专项项目(kh2401033)

作者简介: 杨微, 博士, 教授 **收稿日期:** 2024-06-11

PMB-S is significantly lower than that of NaB-S, and may consistently achieve values below 1×10^{-8} cm/s in most contaminated environments. The mixtures of PMB with three phosphate mine wastes have comparable hydraulic performance to PMB-S, confirming its feasibility as a barrier material. Furthermore, field demonstrations in alkaline lead-zinc and acidic phosphogypsum tailings validate the robust hydraulic and contaminant barrier properties of PMB-S under actual conditions.

Keywords: polymer-modified bentonite; swelling characteristics; adsorption properties; hydraulic conductivity; in-situ test

E-mail: yangwei86@hnu.edu.cn

0 引 言

膨润土-砂混合物凭借其优异的防渗特性及力学特性,已成为工业固废填埋场防渗系统中替代天然黏土层的理想材料。该混合物的性能优势主要源于砂颗粒构建的稳定骨架结构与膨润土吸水膨胀后对孔隙的有效填充,两者协同作用显著提升了防渗垫层的整体抗剪强度和防渗能力^[1-2]。国内外相关研究探讨了膨润土-砂混合物的防渗性能, Xu 等^[3]研究发现,当 5% 膨润土掺入砂中时,混合物的水中渗透系数可低于 1.0×10^{-7} cm/s,且渗透系数随着膨润土掺量的增加而降低; Pandian 等^[4]发现,在固结压力为 100 kPa 时,膨润土(36%)-砂(64%)混合物的渗透系数低于 9.32×10^{-9} cm/s,且随着固结压力的增加,渗透系数减小; Garvin 等^[5]通过水泥-膨润土防渗墙材料在污染溶液中进行长时间水浸试验,评估了其在污染阻隔工程中的适用性。

然而,工业固废和尾矿填埋场渗滤液成分复杂,常含有重金属、非金属离子及有机污染物^[6]。在此类侵蚀性渗滤液的作用下,膨润土晶体的双电层结构会因离子交换作用发生改变,从而削弱其膨胀能力,导致渗透系数显著增大^[7-8]。为提升膨润土的化学相容性,国外学者通过物理或化学方法开发多种改性膨润土,如高密预水化 GCL(DPH-GCL)^[9]、多膨胀膨润土(MSB)^[10]、膨润土-聚合物复合材料(BPC)^[11-12]、超级黏土(HYPER clay)^[13]等。其中,聚合物改性膨润土(Polymer-Modified Bentonite, PMB, 属于 BPC 一种)因其良好的抗酸碱盐性能,优异的抗干湿循环能力和自愈合能力而受到广泛关注。Scalia 等^[14]研究表明, PMB 在强酸强碱的环境中表现出优于其他类型的改性膨润土的低渗透性; Yang 等^[15]通过聚合物改性膨润土-砂混合物(Polymer-Modified Bentonite-Sand, PMB-S)在不同盐溶液环境中的渗透

试验,证实 PMB 的抗盐性较钠基膨润土显著提升。郭子郝等^[16]研究表明, PMB 在氯化钙溶液中经历 6 次干湿循环处理后,其渗透系数数量级仅由 10^{-10} cm/s 上升至 10^{-9} cm/s,变化幅度较小,显示出良好的干湿循环稳定性。Prongmanee、Chai 等^[17-18]在聚合物改性膨润土防水毯上设置损伤孔,采取渗漏率试验评价了 PMB 的自愈合能力,结果表明 PMB 在酸、碱、盐环境中均具有优异的自愈合能力。

尽管 PMB 的试验研究已有较为深入的探讨,但在复杂工程环境中的应用研究仍显不足。为了推动其在实际工程中的应用,需要考虑以下关键问题:

(1) 服役环境复杂性: 现有室内试验研究多关注单一污染物(如 H^+ 、 OH^- 、 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 等)作用下的材料响应^[19-21],难以反映实际工况中多种污染离子的协同作用。此外,试验室条件通常过于理想化(如小尺寸、压实均匀、恒温 and 材料均匀混拌),亦与现场环境的复杂性存在差距。国内目前尚无系统性的工程示范应用研究, PMB 材料的现场适用性与施工可行性尚缺乏足够验证。

(2) 基质材料选择: 实验室常用标准砂作为基质材料配制膨润土-砂混合物,但在工程实际中需要考虑运输距离和材料成本。若能够利用填埋场附近的尾矿渣、工程弃土或其他固体废弃物替代传统基质材料,不仅可显著降低成本,更能有效促进资源循环利用,具有良好的经济与环境效益。已有研究证实替代材料(如大理石粉末^[22]、钢渣^[23]、粉煤灰^[24]、凝灰岩^[25]等)在技术上具备可行性,为就地取材用于防渗提供了参考。

综上,尽管已有研究证实了 PMB 在室内理想条件下的良好防渗性能,但其在复杂离子环境中的适应性及现场工程条件下的应用效果仍缺乏系统评估,尤其在多污染耦合作用和基质材料本地化替代方面研究相对薄弱。因此,本文通过室内试验与现场工程示范相结合,评估 PMB 在不同服役条件下

的膨胀、吸附与防渗性能，探究不同基质材料对防渗效果的影响，并在铅锌矿区和磷石膏堆场两类不同的工况中进行防渗示范研究，以评价聚合物改性膨润土-砂混合物(PMB-S)的实际服役性能，为其在固废防渗处置工程中的推广应用提供理论支撑与实践依据。

1 试验方案

1.1 组成材料

膨润土：本试验所用钠基膨润土(sodium bentonite, NaB)是由福建省连城县恒河膨润土有限公司生产，蒙脱石含量 $\geq 70\%$ 。聚合物改性膨润土(PMB)购自麓谷环保科技有限公司，其是在聚丙烯酸钠原位聚合过程中引入NaB制备而成，具体制备方法可参阅前期研究成果^[15]。PMB和NaB基本特性如表1所示。

表1 膨润土(NaB)与聚合物改性膨润土(PMB)的基本特性指标

材料	比重	液限/%	塑限/%	膨胀指数/ ($\text{mL} \cdot 2\text{g}^{-1}$)	阳离子交换容量/ ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)
NaB	2.74	242.8	72.6	29	83.69
PMB	2.32	598.4	105.1	76	95.00

基质材料：如图1所示，本研究采用了四种不同的材料用于探明基质材料对PMB-砂/土混合物防渗性能的影响：①标准砂(S)，由厦门ISO公司生产，粒径在0.10~1.10 mm；②级配不良砾(GP)和③级配不良砂(SP)，均为磷矿采矿现场获取的弃渣；④水洗无害化磷石膏(washed phosphogypsum, PG)。需要注意的是，水洗无害化磷石膏粒径较小，在与膨润土混合的过程中易发生团聚，因此需要和一定比例的标准砂混拌使用^[26]。四种基质材料S、GP、SP、调整级配后砂-磷石膏(S-PG)的粒径分布曲线如图2所示。

1.2 试验溶液

模拟渗滤液：实验室采用去离子水作为溶剂来制备模拟渗滤液，化学药品均购自中国国药集团有限公司。采用50 mmol/L浓度开展不同污染离子价态(KCl、CaCl₂、AlCl₃)及不同pH(2~12)下PMB及NaB

膨胀性能的对比试验。并探究不同pH值下PMB及NaB对Pb²⁺和Cu²⁺的吸附能力影响。

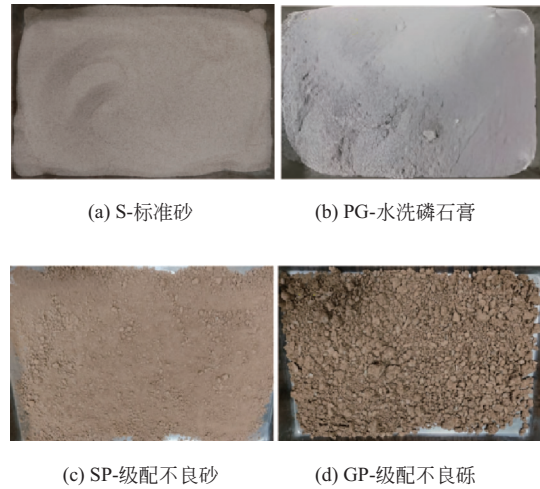


图1 试验所用基质材料

Fig. 1 Matrix materials used in test

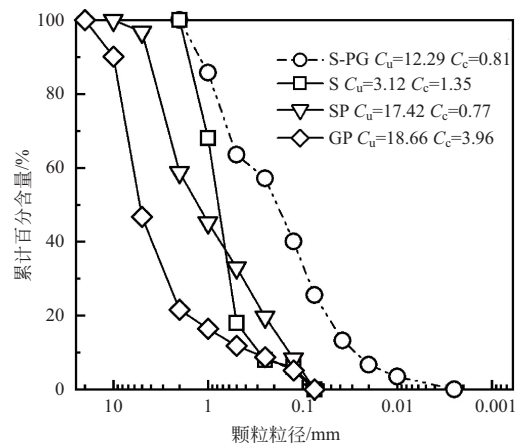


图2 基质材料颗粒级配曲线

Fig. 2 Particle size distribution of matrix material

现场渗滤液：从西藏嘉黎县蒙亚啊铅锌尾矿库和贵州龙井湾磷石膏堆场现场分别收集铅锌尾矿渗滤液和磷石膏渗滤液。利用这两种原位渗滤液开展PMB及NaB的膨胀特性、吸附特性及防渗性能试验研究。两种原位渗滤液的污染特性如表2所示，表中限值选自《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)。铅锌尾矿渗滤液和磷石膏渗滤液分别来源于碱性和酸性环境，均含有多种超标污染物。然而，在强碱性环境下，大部分重金属与氢氧根结合形成沉淀，导致铅锌尾矿渗滤液重金属污染程度低于磷石膏渗滤液。

表 2 磷石膏渗滤液 (PL) 和铅锌尾矿渗滤液 (LZL) 的污染物含量及理化指标

Table 2 Pollutant content and physico-chemical parameters of phosphogypsum leachate (PL) and lead-zinc tailings leachate (LZL)

	pH	电导率/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	COD/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	氟化物/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	溶磷量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	As/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Pb/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	Cr/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	Cu/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	Cd/ ($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
限值 (V)	6~9	—	≤40	≤1 500	≤400	≤100	≤100	≤100	≤1 000	≤100
LZL	12.23	3 580	211	81	—	117	97	275	53	—
PL	1.88	14 980	—	2 753	1 771	1 283	3 924	1 595	—	51

2 试验方法

2.1 室内试验

膨胀指数试验：本研究进行了不同 pH 值、阳离子价态及现场渗滤液对 PMB 和 NaB 膨胀性能的测试，并进行对比分析。根据《钠基膨润土防水毯行业标准 JG/T 193—2006》进行自由膨胀指数测试，具体步骤如下：先称取经过 200 目筛筛分的 2 gPMB 或 NaB 样品，每次向装有 90 mL 溶剂的 100 mL 量筒中添加 0.1 g 土样，待上一次添加的土样完全沉入量筒底部后，再进行下一次添加，直到所有样品添加完毕。最后，将量筒补充至 100 mL，静置 24 h 后观察膨胀样品的最终体积。每种条件下测试三次并取平均值，计算膨胀指数 m 。

吸附试验：本试验旨在探究在酸性、中性及原位渗滤液条件下 PMB 与 NaB 对 Pb^{2+} 与 Cu^{2+} 的吸附性能。具体操作步骤如下：取 50 mL 的 2 mmol/L 浓度的 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 或 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 溶液于试剂瓶中，用 HNO_3 与 NaOH 调节 pH，再分别称取 0.2 g 的 PMB 或 NaB 加入试剂瓶，并将其置于 20 °C 水浴恒温振荡槽中，以 125 r/min 的速度震荡吸附 12 h。振荡结束后，通过离心法分离溶液，过滤去除固体颗粒，得到重金属清液。最后，采用 PXSJ-216F 式离子计检测清液中 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 的浓度，并计算 PMB 和 NaB 对两种离子的去除率。

变水头渗透试验：采用膨润土与基质材料混合制备膨润土-砂/土混合物，并开展渗透试验。通过比较 PMB-S 和 NaB-S 砂土混合物在不同 pH 值、盐溶液及原位渗滤液条件下的渗透性能，评估 PMB 和 NaB 的防渗效果。此外，针对 PMB-SP/PMB-GP/PMB-S-PG 三种混合物，在磷石膏渗滤液条件下开展渗透试验，以此探究替换基质材料在实际工程应用中的可行性。各试样的组成成分、最大干密度 (maximum dry density, MDD) 和最优含水率 (optimum moisture content, w_{opt}) 见表 3。参照《土工试验方法标准 GB/T

50123—2019》进行变水头渗透试验，试样规格为高 40 mm、直径 61.8 mm。在一定水头作用下静置，待水头稳定下降后开始测定渗透系数，并取两组测试结果的均值作为最终值。试样制备采用湿拌法混合和静压法压实，按照既定比例将各类材料加入搅拌机，加入水至最优含水率，搅拌均匀后装入塑封袋密封，焖料 24 h 后使用。根据《高分子聚合矿物质防渗材料》(T-CECS 2010152—2021) 要求，试样压实度控制为 90%，并使用静压加载装置将材料压入环刀中完成制样，试样均为未水化处。

表 3 试样的组成成分与击实试验结果

Table 3 Composition of specimens and compaction test results

试样	NaB/PMB/ %	S/GP/SP/ %	PG/%	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	最优含水率/ %
PMB-S	10	90	—	1.56	16.4
NaB-S	10	90	—	1.52	14.2
PMB-SP	10	90	—	1.79	15.4
PMB-GP	10	90	—	1.65	14.4
PMB-S-PG	10	40	50	1.51	24.7

2.2 现场试验

2.2.1 西藏嘉黎县蒙亚啊铅锌矿场地试验

西藏嘉黎县蒙亚啊铅锌矿尾矿库是在建期海拔最高的尾矿库(约 5 398 m)，地处高寒地带，每年 10 月中旬至次年 5 月中旬为酷寒冻期，最低气温可达 -30 °C。多项研究表明，膨润土材料在冻结作用下裂缝发育，孔隙结构和水力-力学特性会发生改变，导致渗透性大幅提高^[27-28]。此外，该尾矿库渗滤液呈强碱性 (pH = 12.23)，多种污染物浓度超标(表 2)。这意味着在该工况下，黏土防渗材料需要同时承受冻结和强碱性环境的双重作用，对材料的工程性能要求更为严格。团队前期对 PMB 混合物开展了冻融循环研究，发现在多次冻融循环后渗透系数仍维持 $<1 \times 10^{-8}$ cm/s，表现出较强的抗冻融循环能力^[26]。故相较于钠基膨润土，PMB 在存在冻融工况的防渗工程中具有更

大的应用潜力。

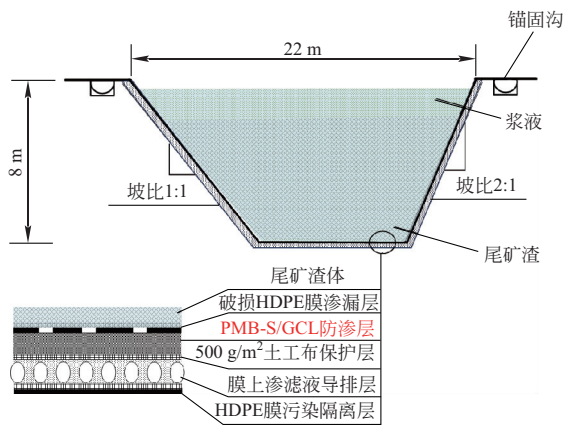


图3 铅锌矿区场地试验施工剖面图
Fig. 3 Cross-sectional diagram of test site construction in the lead-zinc mine area

在尾矿库原位开挖两个尺寸相同的试验坑(坑顶 22 m×22 m, 深约 8 m), 并填充湿排铅锌尾矿渣以形成小型尾矿库。在模拟高密度聚乙烯膜(HDPE 膜)破损的条件下, 对比传统钠基膨润土防水毯(GCL)

(坑 1)与 PMB-S(坑 2)的防渗效果。复合防渗系统参照《一般工业固体废物贮存和填埋污染控制标准》(GB 18599—2020)设置, 现场施工顺序由下往上如图 3 和图 4 所示为: ①开挖及底部隔离: 矿坑开挖后整体铺设完好的 HDPE 膜, HDPE 膜用于隔绝和防止渗滤液进入周边环境; ②导排设置: HDPE 膜上设置导排管及排水网格, 用于收集透过防渗层的渗滤液, 并在排水网格上方铺设 500 g/m²土工布防止尾渣进入导排系统; ③防渗层铺设: 试验坑 1 和 2 底部分别采用 5 kg/m²传统 GCL 和厚 7 cm、压实度 90%的 PMB-S 防渗衬层, 边坡分别采用规格为 5 kg/m²的传统 GCL 和 PMB-S 防水毯; ④模拟破损: 在防渗层上部铺设 HDPE 膜, 每个膜上人工设置 8 个 15 cm 大小破损孔, 以此模拟 HDPE 膜失效后黏土层的防渗效果; ⑤尾矿填充: 防渗系统进行锚固后湿排尾矿渣及浆液入坑, 浆液液面高度超过矿渣表面约 30 cm。试验坑在经历当年 10 月至次年 5 月的冻期后, 重新填入浆液, 随后进行约 2 个月的渗漏监测, 并采集渗出液进行分析。

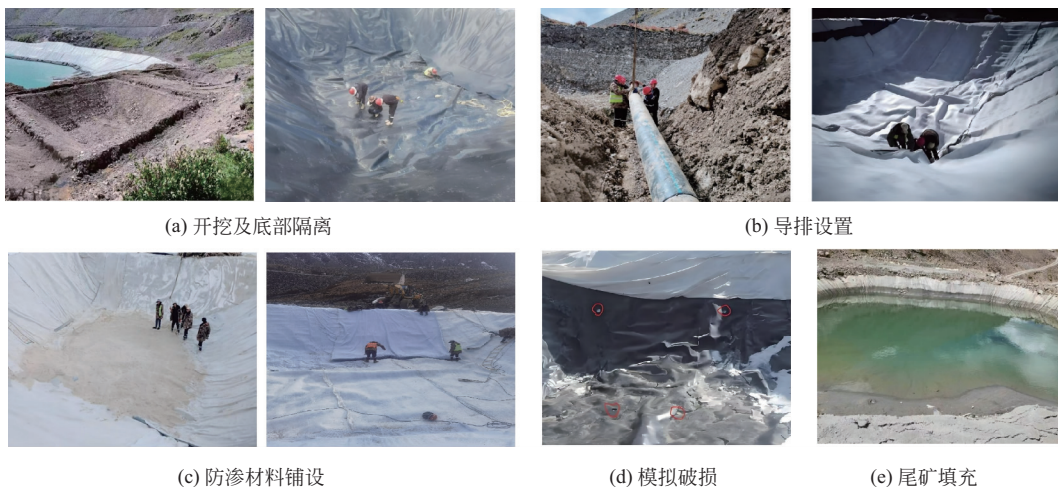


图4 铅锌矿场地试验施工流程
Fig. 4 Test site construction procedure at the lead-zinc mine site

2.2.2 贵州龙井湾磷石膏堆场场地试验

贵州龙井湾磷石膏堆场海拔约 990 m, 库容 5 662.98 万 m³, 年平均气温 14~16 ℃、年降水量较多, 常年相对湿度约为 70%。磷石膏是工业湿法磷酸生产的主要副产物, 其渗滤液呈强酸性 (pH<2), 富含磷、氟等污染物, 同时多种重金属含量显著超标(表 2), 具有较高的环境污染风险。在该工况下, 酸性及重金属的复合污染环境对黏土防渗材料的化学稳定性产生不利影响。

为推动磷石膏资源化利用, 贵州省于 2018 年出

台“以渣定产”政策, 提出实现“产消平衡”目标。在政策引导下, 水洗磷石膏已满足《磷石膏无害化处理指南》(T/CPFIA000X—2023)技术标准, 具备在防渗工程中的可行性与固废再利用的价值。因此, 本次示范试验在 PMB-S 与 GCL 的基础上, 新增采用水洗磷石膏(PG)为基质材料的 PMB-S-PG 防渗层, 旨在通过比较三种材料在 HDPE 膜失效条件下对磷石膏渗滤液的阻隔性能, 评估其实际工程适用性。在堆场内设置了 3 个试验坑(尺寸均为坑顶 6 m×6 m, 深 2 m)。施工步骤参照铅锌矿区试验设

计, 试验坑 1 底部铺设厚 7 cm、压实度 90% 的 PMB-S-PG 防渗衬层; 试验坑 2 底部铺设厚 7 cm、压实度 90% 的 PMB-S 防渗衬层; 试验坑 3 底部则采用规格为 5 kg/m² 的传统 GCL 衬垫。防渗系统施工完成后, 在各试验坑中填入磷石膏矿渣, 并注入渗滤液至坑顶表面, 待渗流速度稳定确保防渗材料饱和后, 再次注入渗滤液至坑顶, 进行渗漏监测并收集渗出液做检测。

3 试验结果及分析

3.1 室内试验

3.1.1 膨胀特性

图 5 展示了 PMB 和 NaB 在不同 pH、阳离子价态、现场渗滤液下的膨胀指数。可以看出, 两种材料均在中性条件下表现出最优膨胀性, 酸碱性条件下膨胀性能有所减弱, 且酸性影响更大。酸性条件下膨润土膨胀性能的减弱是由于大量 H⁺ 的存在会降低膨润土表面 zeta 电位绝对值^[19], 导致表面水合阳离子数量减少, 从而抑制膨润土的膨胀。而对于碱性溶液中膨润土膨胀性下降的现象, 其原因可能是由于 NaOH 溶液中 Na⁺ 浓度的升高, 这会削弱膨润土的渗透膨胀。此外, 在所有溶液中, PMB 的自由膨胀量始终高于 NaB。这主要归因于 PMB 中引入的聚合物长链上含有大量羟基和羧基基团, 能够优先吸附 H⁺, 从而削弱其对膨润土的侵蚀作用, 有助于维持 PMB 的三维交联网络结构稳定(pH=2, 52 mL/2 g)。

在 50 mmol/L 盐溶液中, NaB 的膨胀性能则随着阳离子价态的升高逐渐减弱, 表现出 K⁺>Ca²⁺>Al³⁺ 的趋势, 而 PMB 同样受高价阳离子影响显著(图 5)。高价阳离子对膨润土膨胀的抑制作用主要源于其对晶体膨胀和渗透膨胀的影响。首先, 层间的 Na⁺ 被高价阳离子取代后, 电荷密度更大的阳离子对黏土层的吸引力更强, 导致结合水需要克服更高的隔层吸引能才能使层间发生分离膨胀。其次, 高价阳离子由于更强的离子交换能力, 能够有效替代低价阳离子, 使双电层显著变薄, 从而削弱渗透膨胀能力, 最终促使膨润土颗粒发生团聚。此外, 试验还观察到 PMB 的膨胀性受 Ca²⁺ 影响更为显著。这是因为 Ca²⁺ 能与聚丙烯酸钠分子链上的羧酸根基团结合, 从而中和负电荷, 降低链间静电排斥力, 使分子链发生收缩和构象变化。当 Ca²⁺ 浓度达到一定阈值时, 聚合物链的收缩进一步加剧, 最终形成聚丙烯酸钙沉淀, 从而显著降低聚合物胶体的膨胀能力^[29]。

PMB 与 NaB 在铅锌尾矿渣渗滤液中的膨胀性显

著高于在磷石膏渗滤液中的表现(图 5)。根据表 2 数据, 磷石膏浸出液呈强酸性(pH=1.88)且含多种超标重金属离子, 而铅锌尾矿渣浸出液为碱性(pH=12.23), 其污染物浓度相对较低。膨润土在酸性与高价重金属离子共存的体系中, 其膨胀性能显著受限, 这主要源于 H⁺ 和高价阳离子对膨润土颗粒表面电位的双重影响, 最终导致水化膨胀抑制效应。此外, 磷石膏渗滤液中磷氟和污染离子含量较铅锌尾矿渣渗滤液更高, 磷氟的存在可能与膨润土的表面活性基团(如羟基、铝氧基等)发生反应, 改变膨润土的表面电荷分布, 从而影响其水合作用和膨胀特性。

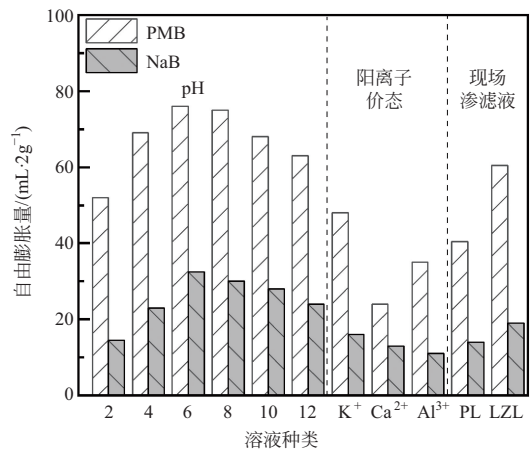


图 5 不同溶液中的自由膨胀量 (pH、50 mmol/L 盐溶液、磷石膏渗滤液-PL 和铅锌尾矿渣渗滤液-LZL)

Fig. 5 Free swelling index under different solutions

3.1.2 吸附特性

由于重金属离子在碱性环境中易发生化学反应生成沉淀, 因此本节重点研究酸性至中性条件下 PMB 和 NaB 对 Pb²⁺ 和 Cu²⁺ 的去除效果, 重金属的初始浓度均为 2 mmol/L。根据表 4 可知 PMB 和 NaB 对 Pb²⁺ 和 Cu²⁺ 的去除率均随 pH 值升高呈非线性增加的趋势, 并在中性时均达到近 100% 的去除率。这是由于 pH 值的升高降低了溶液中 H⁺ 的浓度, 减少了对膨润土表面活性吸附位点的占据, 释放出更多吸附位点提升对金属离子的吸附效果。

由表 4 可以看出 PMB 对 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 的去除率显著高于 NaB, 且在酸性条件下该优势更为突出。尤其在 2 mmol/L 初始污染浓度和 pH=1 条件下, PMB 对 Cu²⁺ 和 Pb²⁺ 的去除率较 NaB 分别提升了 58.42% 和 61.31%。这一提升是由于膨润土与聚丙烯酸钠形成了三维交联网状结构, 吸水后聚合物链条向三维方向扩展, 链上的大量羧基与金属离子之间具有较强的亲和力, 为金属离子提供了充足的吸附位点, 从

而表现出更强的污染物吸附能力和效率。值得注意的是，在酸性条件下，PMB对Cu²⁺的去除率低于Pb²⁺，这是由于Cu²⁺具有更强的水合能力，易于水分子结合形成[Cu(H₂O)₆]²⁺配合物。该配合物的八面体结构阻碍了Cu²⁺与膨润土表面基团结合，而酸性环境下表面基团的质子化进一步增强了这一阻碍效应，从而降低了Cu²⁺的吸附效率^[30]。

表4 不同pH条件下PMB和NaB对Cu²⁺和Pb²⁺去除率

Table 4 Removal efficiency of Cu²⁺ and Pb²⁺ by PMB and NaB under different pH cases.

条件(金属)	NaB η/%	PMB η/%	性能提升/%
pH=1(Cu ²⁺)	49.47	78.37	58.42
pH=4(Cu ²⁺)	90.29	96.05	6.38
pH=7(Cu ²⁺)	99.44	99.79	0.35
pH=1(Pb ²⁺)	53.32	86.01	61.31
pH=4(Pb ²⁺)	87.06	94.14	8.13
pH=7(Pb ²⁺)	99.76	99.98	0.22
PL(Pb ²⁺)	45.82	73.12	46.49

3.1.3 渗透特性

污染溶液影响：如图6所示，不同污染溶液下PMB-S与NaB-S的渗透系数变化趋势与其自由膨胀量基本一致，且无论何种环境，PMB-S始终表现出更低、更稳定的渗透性能。具体而言，在pH值为2~12的范围内，PMB-S的渗透系数始终保持在小于1×10⁻⁸ cm/s的水平，明显低于NaB-S。尤其在pH=2时，PMB-S和NaB-S的渗透系数分别为7.82×10⁻⁹ cm/s和1.17×10⁻⁷ cm/s，前者的渗透系数低于后者两个数量级。在50 mmol/L Na⁺、Ca²⁺和Al³⁺溶液中，NaB-S的渗透系数分别为PMB-S的8.75倍、7.63倍和31.21倍。在磷石膏渗滤液和铅锌矿渗滤液中，PMB-S的渗透系数分别为9.08×10⁻⁹和4.73×10⁻⁹ cm/s，均低于NaB-S渗透系数1~2个数量级。PMB-S优异的防渗性能主要归因于聚合物的引入，使其链条上大量亲水基团吸水形成高膨胀性及高黏度水凝胶，从而显著降低了混合物的孔隙率。

基质材料影响：为评估磷矿废弃物(SP、GP和PG)作为基质材料在磷石膏防渗工程中的应用潜力，开展了PMB-SP、PMB-GP和PMB-S-PG 3种混合物在磷石膏渗滤液条件下的渗透试验，并与PMB-S进行了对比分析。4种基质材料(S、SP、GP和PG-S)初始渗透系数分别为3.95×10⁻⁴、3.42×10⁻⁴、9.91×10⁻³和8.38×10⁻³ cm/s。掺入10% PMB后，四者在磷石膏渗滤液作用下均表现出显著

的防渗性能，渗透系数较掺入前降低了5~6个数量级(图7)。这表明PMB在混合防渗体中具有优异的防渗效果，同时具备较强的抗酸及复合污染液体侵蚀能力。

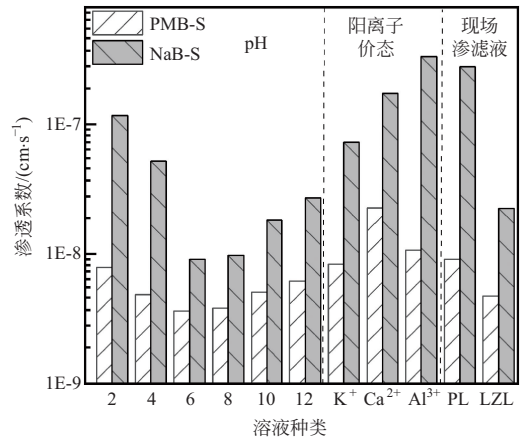


图6 不同溶液中的渗透系数(pH、50 mmol/L盐溶液、磷石膏渗滤液-PL和铅锌尾矿渗滤液-LZZ)

Fig. 6 Hydraulic conductivity under different solutions

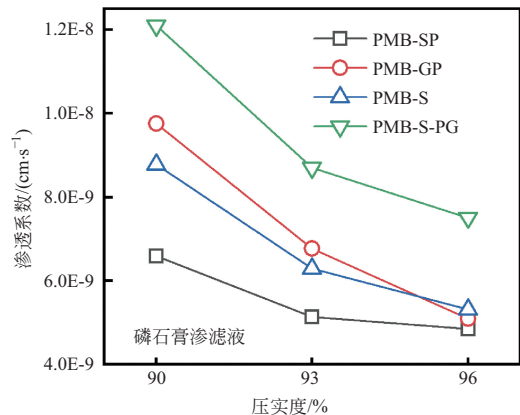


图7 不同基质材料的PMB混合物的渗透系数(S-砂, SP-级配不良砂, GP-级配不良砾, PG-水洗磷石膏)

Fig. 7 Hydraulic conductivity of PMB mixtures with different matrix materials

不同压实度下的渗透系数结果表明，除PMB-S-PG外，在较低压实度(90%)下，不同基质材料对混合物渗透系数的影响差异较大；随着压实度的增加，渗透系数的差异逐渐缩小。四种混合物的渗透系数基本遵循PMB-S<PMB-SP<PMB-GP<PMB-S-PG的顺序，这主要受基质材料的级配差异影响，即孔隙结构的不同所致。如图2和表3所示，与较粒组成单一的S相比，SP具有更大的均匀系数和更宽的粒度分布范围。在相同压实度条件下，PMB-SP混合物具有最高的干密度和最低的孔隙率，因此展现出最优的防渗性能。研究表明，混合物中的大孔(D>3×10⁴ nm)主

要由基质材料颗粒间的孔隙构成，而非膨润土颗粒间的孔隙^[23]。尽管 GP 和 SP 的级配曲线形状相似，但 GP 含有较多大颗粒，导致大孔比例增加、孔隙填充效果较差，从而使混合物渗透系数偏高。PG 虽经水洗处理，但 pH 仍保持在 3.5，呈酸性。水流通过时，磷石膏中的酸性物质易溶出，进而影响 PMB 的膨胀效果。尽管 PMB-S-PG 的防渗性能相对较弱，但在 93% 压实度下，其渗透系数仍能保持在低于 1×10^{-8} cm/s，这为磷石膏应用于防渗材料提供了可行的依据。综上，应合理选择粒径分布宽、已无害化的现场固废作为基质，掺入适量 PMB，并在必要时提高压实度以满足渗透系数要求，从而为现场施工提供经济高效的防渗方案。

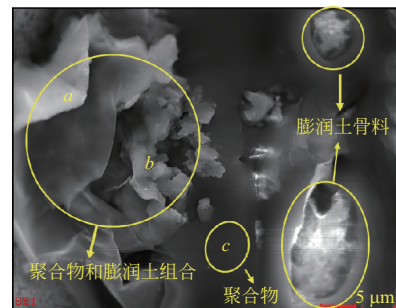
3.1.4 防渗阻污机理

PMB 在聚合物改性过程中引入了聚丙烯酸钠长链，其上富含大量羟基和羧基等亲水性基团。这些基团的引入显著增强了材料的亲水性、表面负电位及吸附位点^[19]，进而提升了膨胀性能、Zeta 电位和阳离子交换容量，该改性对微观结构的形成亦有直接影响。为深入阐释 PMB 的防渗阻污机理，本研究采用扫描电子显微镜 (SEM) 与环境扫描电子显微镜 (ESEM) 对其微观结构进行了系统观察 (图 8)。

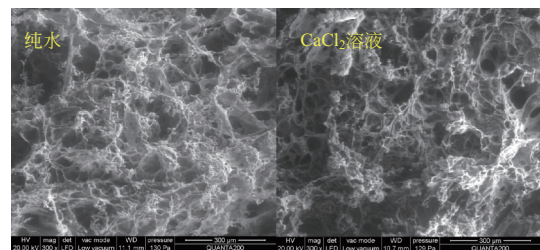
如图 8(a) 所示，SEM 图像展示了 PMB 在干燥状态下的微观结构特征。PMB 呈现出两种典型形貌：膨润土以细小颗粒形式存在，而层状聚合物薄膜覆盖并包裹于颗粒表面，穿插于黏土片层孔隙间，构建了复合结构。显微形貌分析表明，*a*、*b* 区域所在外表面因密集颗粒堆积在卷曲片状结构边缘形成粗糙表面，而 *c* 区域呈现典型的光滑聚合物形貌。能谱定量分析 (EDS) 结果显示，*a*、*b* 区域 C、Si 元素含量较高，证实其为聚丙烯酸钠与钠基膨润土的复合区域，其中 *a* 区膨润土含量更高；*c* 区 C 与 O 元素含量达 99.43%，对应纯聚丙烯酸钠相。SEM-EDS 分析结果表明，聚丙烯酸钠主要通过表面覆盖和交联作用形成三维网络体系，其中弯曲聚合物胶体与正交堆叠黏土片层形成互穿结构。该三维网络通过物理阻隔效应，有效抑制膨润土颗粒在高离子强度渗滤液中发生阳离子交换，增强其化学相容性。

如图 8(b) 所示，ESEM 图像展示了 PMB 在湿润状态下的微观结构特征。在纯水环境中，三维交联的 PMB 链条充分吸水后形成致密的三维网状结构，显著降低了防渗体中有效孔隙率，使渗流路径变得更为曲折，甚至发生堵塞。在 CaCl_2 溶液中， Ca^{2+} 不仅压缩膨润土颗粒表面的扩散双电层，削弱颗粒间

的静电排斥作用，还可与聚丙烯酸钠分子链上的羧基发生配位结合，中和聚合物链上负电荷，降低链间斥力，引起分子链收缩与构象变化，导致凝胶结构发生一定程度的收缩。尽管如此，由于聚合物与土颗粒之间仍保持良好的嵌合与物理交联，PMB 体系虽然有一定程度的收缩，但整体仍维持了三维网状的空间结构。因此，尽管 PMB 在 50 mmol/L 高浓度的 CaCl_2 溶液中的膨胀指数由纯水中的 76 mL/2 g 降至 24 mL/2 g，但在 10% PMB 掺量下混合物的渗透系数依然保持在 2.28×10^{-8} cm/s 的较低水平。该结果表明，PMB 不同于 NaB，其膨胀指数与渗透系数不再呈现紧密的正相关性。得益于三维网络骨架结构，PMB 具备优良的化学相容性和环境适应能力，因而在高价阳离子污染场地中，PMB-S 混合物作为防渗材料具有更强的适用性。



(a) 干燥状态 SEM 图



(b) 湿润状态 ESEM 图

图 8 PMB 微观结构表征图

Fig. 8 Microstructural characterization of PMB

综上所述，PMB 防渗阻污机理可归纳如下 (图 9)：聚丙烯酸钠聚合物通过改性被引入并包裹于膨润土颗粒表面，其长链上富含羧基、羟基等亲水基团。这些基团在两方面发挥重要作用：一方面提升了蒙脱石表面的吸附电位，增强其吸附阳离子污染的能力，并在高价盐离子作用下仍能维持三维网状结构，有效增强了化学相容性能力；另一方面亲水基团能够吸附大量结合水，膨胀形成高黏度水凝胶填充颗粒间孔隙。蒙脱石晶层膨胀与聚合物胶体膨胀效应叠加，显著降低混合物有效孔隙率，使得渗流通道狭窄曲折甚至封闭。综上所述，聚合物改性

引发的微观结构变化是导致 PMB-S 渗透系数显著降低的关键原因。

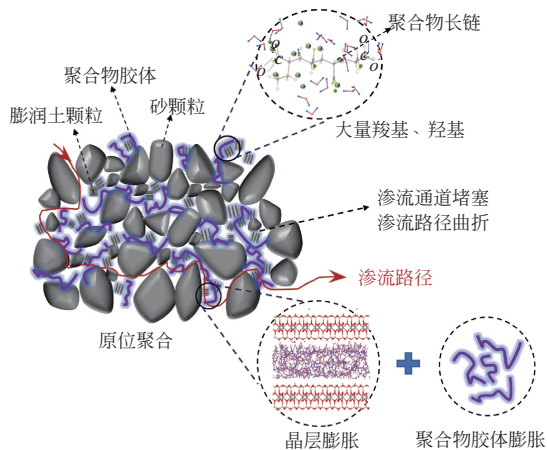


图 9 PMB 防渗阻污机理阐述
Fig. 9 Mechanism of PMB for seepage prevention and pollutant barrier

3.2 场地试验结果与分析

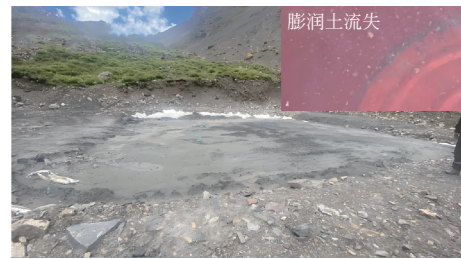
3.2.1 铅锌矿场地试验情况与分析

本场地试验研究中，尾矿库渗滤液呈强碱性($\text{pH}=12.23$)，且多种污染物浓度超标。将湿排尾矿渣及浆液填入坑中，并保持浆液水头高于矿渣表面约 30 cm。试验坑在经历约 7 个月的冻期后，重新补充浆液至相同水头高度，随后进行为期约 2 个月的渗流监测，并采集渗出液进行分析。结果如下：

渗流监测：图 10 和图 11 分别展示了 GCL 坑与 PMB-S 坑的表面水位变化及 60 d 内的渗流监测数据。监测结果显示，GCL 坑表面水在两周内即完全干枯，向下挖掘 50 cm 仍未见浸润线，表明其渗流量较大；而 PMB-S 坑表面水位在整个试验期内变化较小，表明该坑内的渗流量极低。进一步分析渗流数据(图 11)表明，GCL 坑初始渗速高达 198.5 L/d，后续因水位下降迅速减缓，且浆液于 21 d 内基本排出，后期无有效渗流监测数据；相比之下，PMB-S 坑渗速始终稳定在 2.0~3.3 L/d，水位变化平稳，且降雨对其影响有限。综上，PMB-S 在高寒与复杂化学环境中展现出远优于 GCL 的防渗性能。

材料稳定性：值得注意的是，在收集渗出液的过程中观察到 GCL 坑中有大量膨润土颗粒随水流流失(图 10(a))。这可能是由于在高寒地区长达 7 个月冻结作用下，钠基膨润土颗粒间的结合力减弱^[31]。在 HDPE 膜失效的情况下，水流冲刷作用加剧导致 GCL 有效成分持续流失，严重影响其防渗效果。而 PMB-S 坑中未见膨润土流失，这得益于聚合物吸附大量结合水后形成的膨胀凝胶体，显著增强了混合

物颗粒间黏结力，从而提升其抗冲刷能力和整体结构稳定性。



(a) 坑1-GCL



(b) 坑2-PMB-S

图 10 铅锌矿原位试验表面水位观测情况

Fig. 10 Surface water level observations at the lead-zinc mine test site

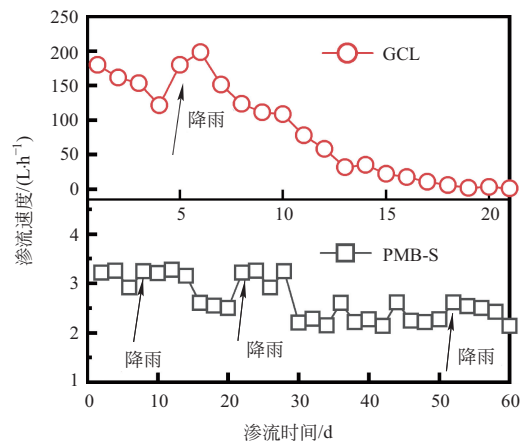


图 11 铅锌矿试验坑渗流情况

Fig. 11 Seepage conditions of the lead-zinc mine test pit

渗出液污染检测：对试验坑收集的渗出液进行污染成分分析，结果如表 5 所示。与坑内废液相比，经 GCL 和 PMB-S 防渗层过滤后，各项污染指标均显著下降。具体而言： pH 值由酸性变为中性；GCL 和 PMB-S 过滤后的渗出液在电导率、化学需氧量(COD)、Pb 浓度和 Cu 浓度方面的下降幅度分别为 39.9% 与 58.7%、62.5% 与 84.1%、77.3% 与 91.9%、90.4% 与 96.4%，可以看出 PMB-S 在吸附污染物方面的表现都要优于传统 GCL，这与室内吸附试验结果相一致。

表 5 铅锌矿试验坑渗出液理化指标

Table 5 Physico-chemical parameters of seepage from lead-zinc mine test pits

项目	标准(V类)	铅锌矿渗滤液	GCL坑渗出液	PMB-S坑渗出液
pH	6~9	12.23	6.97	7.13
电导率/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	—	3 580	2 150	1 480
COD/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	<40	206	77.2	32.8
Pb/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	<100	97	21.6	7.9
Cu/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	<1 000	53	5.1	1.9

3.2.2 磷石膏场地试验情况与分析

该场地试验中，渗滤液呈强酸性(pH<2)，富含磷、氟等污染物。除 PMB-S 及 GCL 外，试验增设了以水洗磷石膏为基质材料的 PMB-S-PG，对比这三种防渗材料在 HDPE 膜完全失效条件下对磷石膏尾矿的防污阻隔性能。结果如下：

渗流监测：图 12 和图 13 分别展示了三种防渗材料在原位试验中的表面水位变化及 60 d 内的渗流监测数据。现场监测第 45 d 时，PMB-S-PG 坑表面水已基本干涸，而 PMB-S 与 GCL 坑表面仍保有明显水位，且 PMB-S 坑水位略高于 GCL 坑，初步判断三者防渗效果为：PMB-S >GCL>PMB-S-PG。进一步分析渗流数据(图 13)表明，在前 15 d 内，PMB-S-PG 的平均渗流速率为 4.68 L/d，显著高于 GCL(1.93 L/d)和 PMB-S(1.29 L/d)，为后两者的 2 至 3 倍。在监测的 45 d 内，三种材料的的渗流速度随着水位持续下降而减缓，其中 PMB-S-PG 降幅最大，表明其渗透性强、水头损失较快，防渗效果较差；而 PMB-S 始终保持最低渗流速度，防渗效果最优。综上，在酸性渗滤液环境下，PMB-S 表现出最佳防渗性能，有望作为 GCL 的有效替代材料；而 PMB-S-PG 渗流速率偏高，其在该类工况下的适用性仍需进一步验证。

渗出液污染检测：各试验坑收集的渗滤液经检测，pH 值、电导率、总磷含量等污染物程度如表 6 所示。结果表明，渗滤液经防渗材料过滤后污染程度均有不同程度降低，pH 值普遍上升。其中，PMB-S 坑渗出液电导率、总磷、Pb 浓度降幅最大，分别为 42.59%、65.56%、61.14%，而 As 和 Cr 浓度降幅与 GCL 坑相近。综合来看，PMB-S 在酸性复合污染条件下吸附性能优于 GCL。而相比之下，PMB-S-PG 的渗出液中各项指标均高于 PMB-S，这可能与磷

石膏中的部分磷酸根或金属杂质在酸性环境下易溶解有关。尽管如此，相比于坑内原废液，PMB-S-PG 渗出液的电导率、总磷、Pb、As 和 Cr 浓度仍分别下降了 20.42%、15.13%、48.20%、33.83% 和 50.03%，显示其具有一定的污染阻控效果。



(a) 坑1-PMB-S-PG



(b) 坑2-PMB-S



(c) 坑3-GCL

图 12 磷石膏原位试验表面水位观测情况

Fig. 12 Surface water level observations at the phosphogypsum test site

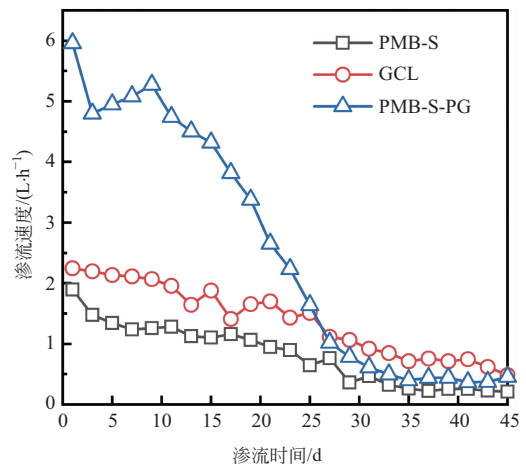


图 13 磷石膏试验坑渗流情况

Fig. 13 Seepage conditions in the phosphogypsum test pit

表 6 磷石膏试验坑渗出液理化指标

Table 6 Physico-chemical parameters of seepage from phosphogypsum test pits

项目	标准 (V类)	磷石膏 渗滤液	PMB-S-PG 渗出液	PMB-S 渗出液	GCL 渗出液
pH	6~9	1.88	3.02	4.21	3.59
电导率/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	—	14.98	11.92	8.63	11.47
总磷/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	<400	1 771	1 503	610	789
Pb/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	<100	3 927	2 034	1 526	2 232
As/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	<100	1 283	849	543	536
Cr/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)	<100	1 595	797	653	672

结合渗流速度与渗出液污染指标的分析结果可知, PMB-S 在应用中展现出优于 GCL 的防渗与阻隔性能, 具备替代 GCL 的潜力; 而 PMB-S-PG 的防渗效果相对较差。已有研究表明, PMB-S-PG 在中性条件下 90% 压实度下的渗透系数可维持在 $3.92 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$, 且随压实度增加而下降, 同时其表现出良好的抗干湿与冻融性能^[26]。因此, 针对 PMB-S-PG 在强酸环境下防渗效果下降的问题, 在应用中可考虑通过提高 PMB 掺量、增加压实度或优先在弱酸至中性环境中应用, 以增强其综合防渗性能。

3.3 防渗工程设计建议

室内试验与现场验证表明, PMB 具有良好的抗酸碱盐性能, 能在复杂化学环境中保持优异的膨胀性与吸附性。尤其在高寒、高碱及强酸等极端条件下, PMB-S 的防渗效果显著优于传统 GCL, 故在相同条件下可优先选用 PMB-S 作为防渗材料。结合本研究结果及相关文献^[32-33], 提出如下工程应用建议: ①PMB 掺量: 在常规环境中建议控制于 5%~10%, 若处于强酸或高盐条件, 可适当提高至 15%, 以确保混合料渗透系数控制在 $1 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 以下; ②压实度要求: 施工压实度不宜低于 90%, 必要时可提升至 93% 以进一步增强防渗性能; ③基质材料选择: 应优先选用粒径分布较宽、污染程度较低的本地材料(如 SP 或 GP), 而化学性质复杂的 PG 更适用于弱酸至中性环境; ④衬层设计: 衬层厚度宜不小于 7 cm, 亦可依据《高分子聚合矿物质防渗材料》(T-CECS 2010152—2021)中的平流通量比公式进行计算与设计。

4 结 论

本研究围绕聚合物改性膨润土-砂材料(PMB-S)

的防渗阻隔性能及其工程应用展开, 重点分析了 PMB-S 在复杂原位服役环境下的工程性能, 并探讨了将工程现场弃渣资源化利用作为基质材料的可行性。本研究结合室内与现场试验, 系统分析了主要结论如下:

(1) 相比于碱性溶液, 酸性溶液对 PMB 和 NaB 的膨胀性能影响较大。因此, 在强酸性的磷石膏渗滤液中膨胀量小于强碱性的铅锌尾矿渗滤液。PMB 的自由膨胀量在各种污染环境下始终为 NaB 的 2~3 倍, 对 NaB 而言, 其膨胀量随离子价态增大而降低。相较 NaB, 高价阳离子作用下 PMB 的膨胀性下降, 但发现 Ca^{2+} 的影响最为显著, 主要由于 Ca^{2+} 与聚丙烯酸钠分子链上的羧酸根结合, 导致长链结构收缩。

(2) PMB 对 Pb^{2+} 和 Cu^{2+} 的吸附效果显著优于 NaB, 尤其在酸性条件 PMB 对 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 的去除率分别比 NaB 提高了 58.42% 和 61.31%, 这得益于聚合物长链上存在大量与金属离子具有强亲和力的羧基。此外, Cu^{2+} 具有强水合能力易与水分子结合形成 $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$ 配合物, 较厚的水膜阻碍了其吸附基团的结合, 使得膨润土对 Cu^{2+} 的去除率低于 Pb^{2+} 。

(3) 采用磷矿弃渣作为防渗基质材料, 发现 PMB-GP 和 PMB-SP 在磷石膏渗滤液中的渗透系数甚至低于 PMB-S。而在 90% 压实度下, PMB-S-PG 渗透系数为 $1.21 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$, 防渗效果较弱。这表明采用弃渣 GP 和 SP 在磷石膏堆场中的应用具备工程可行性, 而 PG 需要进一步评估。

(4) PMB-S 在场地铅锌尾矿库及磷石膏堆场这两种工况下均表现出优于传统 GCL 的防渗和阻污效果。在铅锌尾矿工况下, GCL 坑的渗流速度约为 PMB-S 坑的 74 倍, 且在服役过程中观察到 GCL 内膨润土颗粒流失现象。在磷石膏堆场工况下, 防渗效果依次为 PMB-S>GCL>PMB-S-PG, 水洗磷石膏(PG)中的污染物质与酸可能发生反应溶出, 导致防渗效果低于传统 GCL, 因此其在酸性工况下的应用需谨慎评估。

参 考 文 献

- [1] DIMITROVA R S, YANFUL E K. Factors affecting the shear strength of mine tailings/clay mixtures with varying clay content and clay mineralogy[J]. Engineering Geology, 2012, 125: 11-25.
- [2] CODEVILLA M, CASAGRANDE C, MONTORO M, et al. Evaluation of sand-clay-anionic polyacrylamide blends for alternative compacted clay landfill liner design[J]. MATEC Web of Conferences, 2021, 337: 04002.

- [3] XU H Q, ZHU W, QIAN X D, et al. Studies on hydraulic conductivity and compressibility of backfills for soil-bentonite cutoff walls [J]. *Applied Clay Science*, 2016, 132: 326-335.
- [4] PANDIAN N S, NAGARAJ T S, RAJU P. Permeability and compressibility behavior of bentonite-sand/soil mixes [J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1995, 18(1): 86-93.
- [5] GARVIN S L, HAYLES C S. The chemical compatibility of cement-bentonite cut-off wall material [J]. *Construction and Building Materials*, 1999, 13(6): 329-341.
- [6] 刘宁, 徐文龙. 湿堆磷石膏渣场黏土防渗层效果分析 [J]. *环境工程*, 2011, 29(2): 91-95. (LIU Ning, XU Wenlong. Effectiveness of clay liner in seepage control for wet phosphogypsum stacks [J]. *Environmental Engineering*, 2011, 29(2): 91-95. (in Chinese))
- [7] DEMDOUM A, GUEDDOUDA M K, GOUAL I. Effect of water and leachate on hydraulic behavior of compacted bentonite, calcareous sand and tuff mixtures for use as landfill liners [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2017, 35(6): 2677-2696.
- [8] 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 Zhibin, GAO Yanbin. 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))
- [9] KOLSTAD D C, BENSON C H, EDIL T B, et al. Hydraulic conductivity of a dense prehydrated GCL permeated with aggressive inorganic solutions [J]. *Geosynthetics International*, 2004, 11(3): 233-241.
- [10] ONIKATA M, KONDO M, HAYASHI N, et al. Complex formation of cation-exchanged montmorillonites with propylene carbonate: osmotic swelling in aqueous electrolyte solutions [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1999, 47(5): 672-677.
- [11] BOHNHOFF G L, SHACKELFORD C D. Improving membrane performance via bentonite polymer nanocomposite [J]. *Applied Clay Science*, 2013, 86: 83-98.
- [12] LI Q, CHEN J N, BENSON C H, et al. Hydraulic conductivity of bentonite-polymer composite geosynthetic clay liners permeated with bauxite liquor [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2021, 49(2): 420-429.
- [13] DE CAMILLIS M, DI EMIDIO G, BEZUIJEN A, et al. Effect of wet-dry cycles on polymer treated bentonite in seawater: swelling ability, hydraulic conductivity and crack analysis [J]. *Applied Clay Science*, 2017, 142: 52-59.
- [14] SCALIA J IV, BOHNHOFF G L, SHACKELFORD C D, et al. Enhanced bentonites for containment of inorganic waste leachates by GCLs [J]. *Geosynthetics International*, 2018, 25(4): 392-411.
- [15] YANG W, ZHANG S Q, XIE P, et al. Hydraulic properties of sodium polyacrylate-modified bentonite-sand mixtures [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(7): 250.
- [16] 郭子赫, 姜璐莎, 王昆, 等. 干湿循环作用下聚合物改性膨润土渗透特性研究 [J]. *土木工程学报*, 2023, 56(增1): 55-63. (GUO Zihe, JIANG Lusha, WANG Kun, et al. Hydraulic conductivity of polymer-modified bentonite under wet-dry cycles [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2023, 56(S1): 55-63. (in Chinese))
- [17] PRONGMANEE N, CHAI J C. Performance of geosynthetic clay liner with polymerized bentonite in highly acidic or alkaline solutions [J]. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2019, 5(3): 26.
- [18] CHAI J C, PRONGMANEE N. Barrier properties of a geosynthetic clay liner using polymerized sodium bentonite [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2020, 48(3): 392-399.
- [19] 杨微, 任孟健, 陈仁朋, 等. 复杂环境条件下改性膨润土的抗盐性能 [J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2021, 55(10): 1885-1893. (YANG Wei, REN Mengjian, CHEN Renpeng, et al. Salt resistance of modified bentonite in complex environment [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2021, 55(10): 1885-1893. (in Chinese))
- [20] YU C, LIAO R P, CAI X Q, et al. Sodium polyacrylate modification method to improve the permeant performance of bentonite in chemical resistance [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 213: 242-250.
- [21] CHEN J K, XIA L X, YANG Y X, et al. Polymer-modified bentonites with low hydraulic conductivity and improved chemical compatibility as barriers for Cu^{2+} containment [J]. *Acta Geotechnica*, 2023, 18(3): 1629-1649.
- [22] JAIN A K, JHA A K, AKHTAR P M. Assessing the swelling and permeability behavior of novel marble dust-bentonite with sand-bentonite mixes for use as a landfill liner material [J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2022, 52(3): 675-690.
- [23] ZHAN L T, NI J Q, FENG S, et al. Saturated hydraulic conductivity of compacted steel slag-bentonite mixtures—a potential hydraulic barrier material of landfill cover [J]. *Waste Management*, 2022, 144: 349-356.
- [24] GUPT C B, BORDOLOI S, SAHOO R K, et al. Mechanical performance and micro-structure of bentonite-fly ash and bentonite-sand mixes for landfill liner application [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 292: 126033.
- [25] DEMDOUM A, GUEDDOUDA M K, GOUAL I, et al. Effect of landfill leachate on the hydromechanical behavior of bentonite-geomaterials mixture [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 234: 117356.
- [26] YANG W, SONG M Y, YUAN P, et al. Hydraulic conductivity of the polymer-modified bentonite-sand-phosphogypsum (PMB-S-PG) mixture under drying-wetting and freezing-thawing cycles [J]. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2024, 26(2): 1012-1026.

- [27] KRAUS J F, BENSON C H, ERICKSON A E, et al. Freeze-thaw cycling and hydraulic conductivity of bentonitic barriers[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(3): 229-238.
- [28] 赵贵涛, 韩仲, 邹维列, 等. 干湿、冻融循环对膨胀土土-水及收缩特征的影响[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(6): 1139-1146. (ZHAO Guitao, HAN Zhong, ZOU Weilie, et al. Influences of drying-wetting-freeze-thaw cycles on soil-water and shrinkage characteristics of expansive soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(6): 1139-1146. (in Chinese))
- [29] HUBER K. Calcium-induced shrinking of polyacrylate chains in aqueous solution [J]. The Journal of Physical Chemistry, 1993, 97(38): 9825-9830.
- [30] ABOLLINO O, ACETO M, MALANDRINO M, et al. Adsorption of heavy metals on Na-montmorillonite. Effect of pH and organic substances[J]. Water Research, 2003, 37(7): 1619-1627.
- [31] TANG L, CONG S Y, GENG L, et al. The effect of freeze-thaw cycling on the mechanical properties of expansive soils [J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 145: 197-207.
- [32] 任孟健. 改性膨润土组合衬垫抗渗吸附特性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021. (REN Mengjian. Research on modified GCL liner based on the improvement of Cr(VI) adsorption and salt resistance [D]. Changsha: Hunan University, 2021. (in Chinese))
- [33] 张少秋. 复杂服役条件下聚合物改性膨润土-砂混合物的防渗性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2023. (ZHANG Shaoqiu. Study on containment performance of polymer-modified bentonite-sand mixtures under complex service conditions [D]. Changsha: Hunan University, 2023. (in Chinese))

杨 微(1986—),女,博士,教授。主要从事环境岩土工程的研究。

何逸飞(1999—),男,硕士研究生。主要从事环境岩土工程的研究。

任孟健(1996—),男,硕士,工程师。主要从事环境岩土工程的研究。

陈仁朋(1972—),男,博士,教授。主要从事岩土体土拱效应、城市地下空间开发技术、交通岩土工程技术等研究。

王瀚霖(1989—),男,博士,教授。主要从事岩土体土拱效应、城市地下空间开发技术、交通岩土工程技术等研究。

袁 平(1981—),男,学士,高级工程师。主要从事冶金矿山尾矿库的研究。

郭承晖(1985—),男,学士。主要从事冶金矿山尾矿库的研究。

(上接第 86 页)

- [25] SU B L, ZHANG Y H, PENG L H, et al. The use of simultaneous iterative reconstruction technique for electrical capacitance tomography[J]. Chemical Engineering Journal, 2000, 77(1/2): 37-41.
- [26] SU B L, ZHANG Y H, PENG L H, et al. The use of simultaneous iterative reconstruction technique for electrical capacitance tomography[J]. Chemical Engineering Journal, 2000, 77(1/2): 37-41.
- [27] WOLF D, LUBK A, LICHTER H. Weighted simultaneous iterative reconstruction technique for single-axis tomography [J]. Ultramicroscopy, 2014, 136: 15-25.
- [28] 吴守亮. 基于 Matlab 的三维数字地形模拟及空间分析 [J]. 测绘工程, 2011, 20(3): 54-57. (WU Shouliang. The study of 3D digital terrain simulation and spatial analysis based on MATLAB [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2011, 20(3): 54-57. (in Chinese))
- [29] 郭超, 杜思宏, 徐晨. 冻融循环作用下含缺陷混凝土三维数值模拟[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2023, 39(1): 121-129. (GUO Chao, DU Sihong, XU Chen. Three dimensional mesoscopic numerical simulation of concrete with defects under freeze-thaw cycles [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2023, 39(1): 121-129. (in Chinese))
- [30] 刘稳. 混凝土介质隐患超声波 CT 探测技术研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015. (LIU Wen. Research on ultrasonic CT technology to detect concrete medium hidden danger [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2015. (in Chinese))
- [31] 陈文华, 侯靖, 黄世强, 等. 弹性波层析成像技术开发及其工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2022.

叶启扬(2000—),男,硕士研究生。主要从事桩基动力理论及测试技术开发研究。

吴君涛(1992—),男,博士,研究员。主要从事桩基动力理论及测试技术开发研究。

易恩泽(2001—),男,博士研究生。主要从事桩基动力理论及测试技术开发研究。

王奎华(1965—),男,博士,教授。主要从事桩基动力学理论、桩基工程及土工测试方法研究。

张智卿(1982—),男,博士,教授。主要从事土-结构相互作用方面的教学的科研。

汤旅军(1984—),男,博士,教授。主要从事岩土工程相关领域研究。