

DOI : 10.16285/j.rsm.2016.S2.034

磷酸镁水泥固化铅污染土的力学特性 试验研究及微观机制

张亭亭, 李江山, 王 平, 黄 茜, 薛 强

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要:采用磷酸镁水泥(MPC)对铅污染土进行固化/稳定化处理。基于无侧限抗压强度试验和渗透试验,研究了MPC添加量、水土比对固化污染土强度及渗透特性的影响规律。结果表明,固化土的强度随MPC添加量增加而增大,渗透系数减小;水土比对固化土的强度及渗透特性的影响均存在临界值,为0.45。低于临界值时,固化土的强度随着水土比的增加而增加,渗透系数随着水土比的增加而减小。压汞试验(MTP)结果表明,随MPC添加量的增大,固化土孔隙体积减小,水土比不超过临界值时,固化土孔隙体积随着水土比的增大而减小。扫描电镜试验结果表明,随着MPC添加量的增加,土颗粒团聚化越明显,胶结程度加强;水土比不超过临界值时,土颗粒团聚体增多。镁钾磷酸盐晶体(MKP)主要通过减少孔径大于1 μm的孔隙体积来影响固化土的强度和渗透特性。

关键词:固化/稳定化;磷酸镁水泥(MPC);铅污染土;无侧限抗压强度;渗透系数;微观结构

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2016) 增 2 - 0279 - 08

Experimental study of mechanical and microstructure properties of magnesium phosphate cement treated lead contaminated soils

ZHANG Ting-ting, LI Jiang-shan, WANG Ping, HUANG Qian, XUE Qiang

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Magnesium phosphate cement(MPC) is used to stabilize/solidify lead-contaminated soils. Unconfined compressive strength test and permeability test are conducted to investigate the variation of mechanical properties of MPC treated lead-contaminated soils along with MPC dosage and water content. Results show that the unconfined compressive strength increased significantly with MPC dosage, while the hydraulic conductivity changed oppositely. There is a threshold value for water content of 0.45 of its influence on unconfined compressive strength and hydraulic conductivity. The unconfined compressive strength increased with the water content before the threshold value, while the hydraulic conductivity changed oppositely. "MTP" test results show that the total void volume reduce as the MPC dosage, the total void volume of soil reduce as the water content before the threshold value. SEM test results show that a larger aggregation formation, with a smaller void space in soils as the MPC dosage increase, more obvious aggregation and cementation occur in soils space as the water content less than the threshold value. These results can be attributed to the decreases of the pore volume of soil pores, which the diameter larger than 1 μm.

Keywords: solidification/stabilization(S/S); magnesium phosphate cement(MPC); lead contaminated soil; unconfined compressive strength; hydraulic conductivity; microstructure

1 引 言

近年来,“镉大米”、“癌症村”、“砷中毒”、“毒

生姜”等土地重金属污染带来的问题层出不穷,据统计,我国受铅、镉、砷、铬等重金属污染的耕地面积近 $2\ 000 \times 10^8\ \text{m}^2$, 全国每年被重金属污染的粮

收稿日期: 2016-04-20

基金项目: 国家自然科学基金(No. 51479194); 中国科学院学科交叉与合作创新团队项目(No. Y426011C01); 岩土力学与工程国家重点实验室资助课题(No. Z015003)

This work was supported by the Chinese National Natural Science Foundation(51479194), Cross-disciplinary Collaborative Teams Program for Science, Technology and Innovation, Chinese Academy of Sciences (Y426011C01), and Project Supported by the State Key Laboratory of Geomechanics, and Geotechnical Engineering(Z015003).

第一作者简介: 张亭亭, 男, 1990 年生, 博士研究生, 主要从事污染土多相体作用效应与修复技术方面的研究工作。E-mail: ztt_cersm@163.com

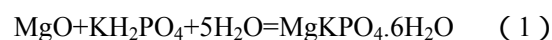
食达 $1\ 200 \times 10^4$ t,造成的直接经济损失超过 200 亿元。土地重金属污染具有长期性、隐匿性、不可逆性以及不能完全被分解或消逝等特点,治理难度大,环境风险突出^[1],且土壤受重金属污染后不但影响环境安全和人民身体健康,其理化、工程特性也会发生变化。Peter 等^[2]研究发现,土体被重金属污染后土体的孔隙比和压缩性增大,抗剪强度降低、承载力下降。Vatsala 等^[3]研究发现,土体被重金属元素污染后会出现表面粗糙、颗粒变大、裂隙面扩延、颗粒分散、局部空穴等现象,且毒性较大的重金属元素可使土体由硬塑或可塑状态变为软塑状态,甚至变为流塑。在工程建设中人们大多将重金属污染土作为一般土进行处理,导致一些道路、建筑物出现路面、墙体开裂、地基土软化以及建筑物不均匀沉降等问题^[4],重金属污染土的修复已刻不容缓。

固化/稳定化法是重金属污染场地常用的修复技术之一,具有快速、高效、经济、适用范围广等优点。通过固化剂与污染土之间的一系列化学反应,将重金属固定在固化剂-土的体系中,减轻重金属向周边环境的迁移^[5],固化后重金属污染土的渗透特性、强度特性是评价处理效果的最主要力学参数,是决定其工程资源化利用的关键。许多国家对固稳后的重金属污染土资源化利用(填埋、基层填料、建筑材料)提出了力学参数要求与环境标准^[6-11]。

对水泥固稳后重金属污染土的工程性质及其资源化利用有较多研究,陈蕾等^[5]采用水泥固化含铅量 $1\ 000$ mg/kg 污染土,试验结果表明水泥添加量为 5%、7.5%、10% 时其 90 d 龄期的固化土强度均可达到 2.0, 4.0, 5.5 MPa,随着铅含量的增加,固化土的强度显著降低。魏明俐 等^[12]研究表明,采用水泥固化含锌量 $2\ 000$ mg/kg 污染土,试验结果表明水泥添加量为 12%,其 7 d 龄期的固化土强度均可达到 0.3 MPa。水泥固化后的污染土具有很好的化学和物理长期稳定性、相对好的力学和结构特性,但水泥在处理重度重金属和复合重金属污染场地时,固化效果较差^[13]。此外,水泥生产具有高能耗、高污染等缺点。

以过烧氧化镁(MgO)和磷酸二氢钾(KH_2PO_4)为主要成分的磷酸镁水泥(MPC)具有成本低、能耗小、 CaO_2 排放量小、固稳重金属效果显著等优点,MPC 水化产物呈弱碱性^[14],便于固稳材料的资源化利用,且 MPC 具有较高的早期强度和良好的长期稳定性,在混凝土修复、道路快速修复及处理低含量的核废料和危险废弃物等领域效果显著^[15]。

MgO 和 KH_2PO_4 主要发生以下水化反应^[16]:



生成的镁钾磷酸盐晶体($\text{MgKPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, MKP)类似于天然的磷酸盐矿物,具有非常好的物理、化学稳定性^[16],且 MKP 极难溶于水,具有良好的隔离性^[17],可替代水泥处理含有铅、铬、镉等重金属污染土。国内外对 MPC 固化重金属污染土的研究主要关注于重金属固化机制与浸出特性,Cho 等^[18]采用 MPC 固化汞含量为 $(10\ 663 \pm 562)$ $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的污染土,28 d 养护龄期固化土浸出浓度在 $(0.1 \sim 4.4)$ $\mu\text{g}/\text{L}$ 。Vinokurov 等^[19]采用 MPC 处理含 Pu、Np、Am、Cs 等元素的低品位核废料毒性浸出试验表明,Pu、Np、Am、Cs 的浸出浓度在 $(0.006 \sim 0.050)$ mg/L 。

对 MPC 处理重金属污染土力学特性和微观特性研究却鲜有报道,尤其是与工程建设相关的强度和渗透方面的研究。然而,强度是固化土用作建筑材料的主要参数之一,固化土的渗透性与重金属扩散和溶出特性密切相关,是评估固化土中重金属溶出风险的关键参数之一,须进行大量磷酸镁水泥固化污染土强度和渗透方面研究,为后期资源化利用提供参数支撑,为此开展 MPC 固化/稳定化重金属污染土的强度和渗透特性研究,对于固化/稳定化处理重金属污染土的循环利用具有重要的工程意义。为了探明 MPC 固化/稳定化重金属污染土的力学特性和微观机制的演化规律,本文以 MPC 固化/稳定化后的重金属铅污染土为研究对象,采用无侧限抗压强度试验和渗透试验,揭示了 MPC 添加量和水土比对固化土的强度和渗透特性的影响规律,并通过压汞试验(MIP)和扫描电镜试验(SEM)分析了 MPC 固化土微观结构的演化规律,研究成果可为重金属铅污染土固化/稳定化修复及资源化利用提供关键的理论和参数支持。

2 材料与方法

2.1 材料

2.1.1 土壤

试验用土取自武汉市某地铁开挖处,属于粉质黏土。试验前将土样在 105°C 下烘干 24 h 至恒重,粉碎过 2 mm 筛并取筛下土备用,土壤主要物理力学性质指标见表 1,土壤物理力学试验方法依据土工试验方法标准^[20],击实试验采用轻型击实法,击实曲线如图 1 所示。

2.1.2 MPC 制备

MPC 由磨细的过烧 MgO 与 KH_2PO_4 按照质量

比 1:1 混合均匀后获得^[21]。试验所用的过烧 MgO 温度为 1 400 ,活性 MgO 含量大于 98%。将过烧由辽宁省海城市东旭耐火材料有限公司提供, 烧结

表 1 试验用土壤基本物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of soil in tests

含水率 / %	天然密度 / (g/cm ³)	土粒相对密度	孔隙率	液限 / %	塑限 / %	最优含水率 / %	粒径分布 / %			最大干密度 / (g/cm ³)
							砂粒	粉粒	黏粒	
20.78	1.85	2.72	0.74	41.6	21.8	19.5	3.45	62.27	34.28	1.72

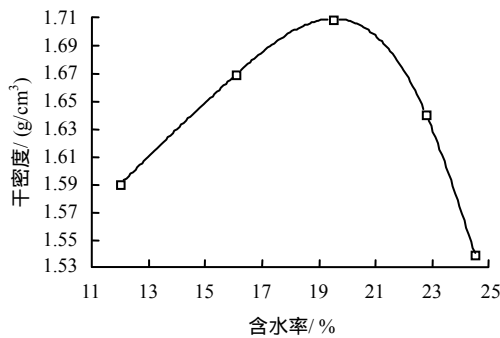


图 1 试验用土击实曲线

Fig.1 Compaction curve of tested clay

MgO 颗粒在 60 下烘干 24 h 后磨细, 过 200 目筛备用。分析纯 KH_2PO_4 由国药集团化学试剂有限公司生产, 使用前先在 60 下烘干 24 h 后磨细。

2.1.3 Pb 污染土壤配制

将土壤烘干粉碎过 2 mm 筛, 取筛下的土壤备用。向土壤中添加 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, 至土壤中铅含量(干重比)为 5 000 mg/kg。5 000 mg/kg 为我国工业污染场地铅污染典型含量值^[22-23], 选择 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 作为污染介质是因为 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 具有较高溶解度(较强的阳离子活动性), 且硝酸根具有惰性, 对水化反应干扰很小^[24]。再向污染土壤中添加蒸馏水使土壤含水率为 19.5%, 拌合均匀后密封, 于标准养护条件下 (20 ± 2 , 湿度为 95%) 焖土 10 d, 使 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 与土壤反应充分。

2.1.4 试样制备

将配好铅污染土、MPC 固化剂、蒸馏水充分搅拌均匀。MPC 固化剂添加量依次为干土质量的 30%、40%、50%、60%、70%, 采用 5 L 行星式搅拌机对混合物进行搅拌(10 ± 0.1) min, 向其中加蒸馏水, 使液固比(质量比, 水:(固化剂+污染土))分别为 40%、45%、50%、55%、60%形成泥浆。将泥浆分 3 层倒入 39.1 mm×80 mm 和 50 mm×50 mm 的圆柱体磨具中, 采用振动台对每层固化泥浆进行振实, 振动台频率和振幅分别为 48 Hz 和 0.5 mm。将试样密封后在标准养护条件下(温度(20 ± 2), 湿度大于 90%) 养护 1 d, 然后脱模, 将试样密封

后在标准养护条件下(温度(20 ± 2), 湿度大于 90%) 养护 7 d。

2.2 试验方法

2.2.1 无侧限抗压试验

采用济南市中正试验机制造有限公司生产的 WDW-20 型万能试验机, 试验过程中的压缩速率控制在 2 mm/min。每个试验重复 3 次, 试验结果取平均值。

2.2.2 渗透试验

渗透试验方法参照美国试验标准^[25], 采用美国 HUMBOLDT 公司生产的 HM-4160A 型环境土柔性壁渗透仪进行渗透试验。试样围压保持在 100 kPa, 使膜紧贴试样, 防止溶液侧漏。试样下部渗透压为 80 kPa, 上部渗透压为 0, 有效围压为 20 kPa, 室温控制在 25 。试样首先在真空饱和器中抽真空 30 min, 再进水进行 24 h 预饱和, 用蒸馏水进行渗透测试。

2.2.3 微观试验

MTP 试验: 为探究固化土的孔隙结构特性, 将养护后固化土小心地掰开, 取有新鲜断面的约 1 cm³ 的小试块, 采用真空冷冻干燥技术对试样进行处理, 采用美国康塔公司 PoreMaster-33 型全自动压汞仪进行压汞(MIP)试验。

SEM 试验: 为探究固化土微观显微结构, 将养护后的固化土小心掰开, 在距试样外表面 1 cm 处取约 1 cm³ 的小试块, 在乙醇中常温下浸泡 96 h, 随后对其冻干并抽真空 12 h。采用 Quanta 250 扫描电子显微镜进行 SEM 试验。

3 试验结果与分析

3.1 强度特性

MPC 添加量与固化土抗压强度变化规律如图 2 所示。固化土的养护龄期为 7 d, 水土比为 0.5, 铅含量为 5 000 mg/kg。从图中可以看出, 抗压强度随着 MPC 添加量的增加而增加, 当 MPC 添加量从 30% 增加到 70% 时, 抗压强度从 0.17 MPa 增加到 0.68 MPa。这是因为随着 MPC 添加量的增加, MPC 的水解和水化反应、硬凝反应越剧烈, MPC 和污染

土之间的离子交换和团粒化等作用加强,生成较多MKP,形成了良好的骨架结构,固化土整体的结构性较好^[26]。此外,MPC添加量增大,水化反应降低了固化土的含水率,进一步提高了固化土强度^[27]。随着MPC添加量的增大,固化土抗压强度显著增大。

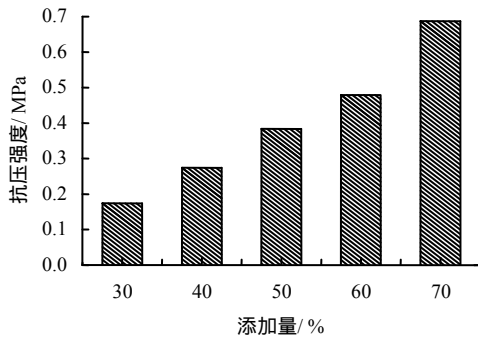


图2 MPC添加量对抗压强度的影响
Fig.2 Effect of MPC dosage on unconfined compressive strength

水土比与MPC固化土抗压强度变化规律如图3所示。固化土的MPC添加量为50%,养护龄期为7d,铅含量为5000 mg/kg。从图中可以看出,当水土比不超过0.45时,抗压强度随水土比的增加而增加;当水土比超过0.45时,抗压强度随水土比的增加而减小。这是因为水土比对MPC水化反应存在临界值,MPC的水解和水化反应是在水作用下发生的,水土比影响MPC水化反应的速度和MKP的质量,当水土比不超过0.45时,此时含水率较低时,MPC的水化反应不够充分,生成的MKP相对较少,随着水土比增加,MPC的水化反应加强,MKP与土颗粒团粒化作用加强,提高了固化效果,故抗压强度显著增加。当水土比继续增大,固化土中多余的水附着在土颗粒或团粒表面,降低了土颗粒间的黏聚力,破坏了固化土内的骨架结构,使固化土弱化^[28-29]。水土比对MPC水化反应存在临界值,其临界值受MPC添加量和铅含量的影响,随着MPC添加量的增加,MPC水化反应需要较多的水,临界值可能呈现增大趋势^[28];随着铅含量的增加,临界值可能会呈现先增大后减小的趋势,这是因为较低

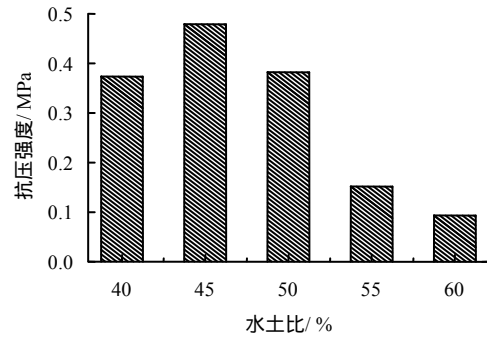


图3 水土比对抗压强度的影响
Fig.3 Effect of water content on unconfined compressive strength

的铅含量,可在一定程度上促进MPC的水化反应,增加了MPC的水化反应的需水量,故临界值增大,当铅含量较高时,铅会阻碍MPC的水化反应,使临界值减小^[5]。因此,在实际MPC固化铅污染土工程应用时应充分考虑MPC添加量和铅含量对水土比的影响,确定最优水土比,既保证MPC水化硬化充分,又避免多余的水降低固化效果。

3.2 渗透特性

不同MPC添加量固化土渗透系数随时间变化规律如图4所示。固化土的养护龄期为7d,水土比为0.5,铅含量为5000 mg/kg。从图中可以看出,固化土渗透系数随着MPC添加量的增加显著减小,当MPC添加量从30%增加到70%时,固化土渗透系数从 1.72×10^{-6} cm/s减小到 4.0×10^{-7} cm/s。这是因为随着MPC添加量的增大,生成较多MKP充填了固化土内的孔隙,有效阻滞了孔隙的贯通性,减小了水流通过的速率,故固化土渗透系数随着MPC添加量的增加而减小。

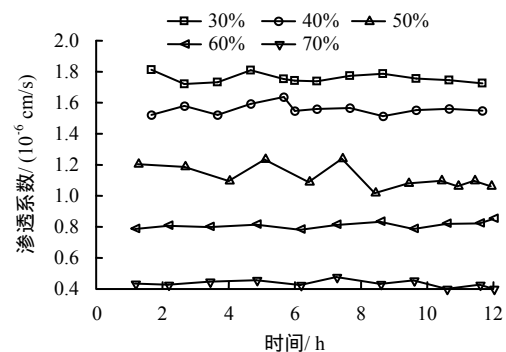


图4 MPC添加量对渗透系数的影响
Fig.4 Effect of MPC dosage on hydraulic conductivity

不同水土比MPC固化土渗透系数随时间变化规律如图5所示。固化土的MPC添加量为50%,养护龄期为7d,铅含量为5000 mg/kg。从图中可以看出,随着水土比的增加,固化土渗透系数呈先

减小后增大的趋势。水土比从 0.40 增加到 0.45 时，渗透系数从 4.4×10^{-7} cm/s 减小到 2.3×10^{-7} cm/s；水土比从 0.45 增加到 0.6 时，渗透系数从 2.3×10^{-7} cm/s 增加到 2.7×10^{-6} cm/s。这是由于随着水土比的增大，MPC 水解和水化反应加快，生成了较多水化产物，降低了固化土的孔隙，故渗透系数随水土比的增大而减小；当含水率进一步增大固化土内出现多余水，导致土颗粒或团粒表面的水膜增厚而产生解离作用，粒间孔隙变大，固化土的孔隙率增大，故此时渗透系数随水土比的增大而增加。水土比对固化土渗透性的影响规律，进一步证明了水土比对 MPC 水化反应存在“临界值”，即为 0.45。

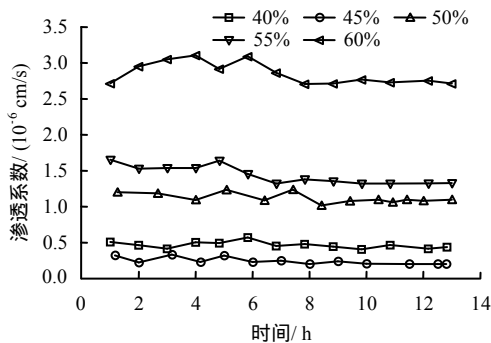


图 5 水土比对渗透系数的影响

Fig.5 Effect of water content on hydraulic conductivity

3.3 微观特性

3.3.1 孔隙结构分析

不同 MPC 添加量固化土的孔隙累计分布曲线如图 6、7 所示。固化土的养护龄期为 7 d，水土比为 0.5，铅含量为 5 000 mg/kg。从图 6 中可以看出，固化土的汞累计注入量随着 MPC 添加量的增大而逐渐减小，随着 MPC 添加量从 30% 增加到 70%，汞累计注入量从 $0.25 \text{ cm}^3/\text{g}$ 减少到 $0.17 \text{ cm}^3/\text{g}$ ，表明固化土的孔隙体积随着 MPC 添加量的增加而逐渐减小。添加量为 30% 时，固化土累积进汞量在孔径约 $70 \mu\text{m}$ 时出现明显的转折；添加量为 50% 和 70% 时，固化土累积进汞量在孔径约 $10 \mu\text{m}$ 时出现明显的转折，因此添加量为 30% 的固化土孔隙孔径普遍小于 $70 \mu\text{m}$ ，添加量为 50% 和 70% 的固化土孔隙孔径普遍小于 $10 \mu\text{m}$ 。图 7 中，孔隙大小的划分参照 Horpibulsuk 等^[30]将固化土孔隙划分为：孔径小于 $0.01 \mu\text{m}$ 的孔隙（团粒内孔隙）； $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ 之间的孔隙（团粒间孔隙）； $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 的孔隙； $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 的孔隙；孔径超过 $10 \mu\text{m}$ 的孔隙。从图 7 中可以看出，随着 MPC 添加量的增大，固化土中孔径小于 $1 \mu\text{m}$ 的孔隙体积增加，而孔径大于 $1 \mu\text{m}$ 的孔隙体

积减小，表明 MKP 主要充填在 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 和超过 $10 \mu\text{m}$ 的孔隙，而对小于 $1 \mu\text{m}$ 的孔隙影响较小，与 Horpibulsuk 等^[30]研究结果一致。

不同水土比固化土的孔隙累计分布曲线如图 8、9 所示。固化土的 MPC 添加量为 50%，养护龄期为 7 d，铅含量为 5 000 mg/kg。从图 8 可以看出，当水土比不超过 0.45 时，固化土汞累计注入量随着水土比的增大而减小；当水土比超过 0.45 时，固化土汞累计注入量随着水土比的增大而增大，表明水土比不超过 0.45 时固化土孔隙体积随水土比的增大而减小，超过 0.45 时固化土孔隙体积随水土比的增大

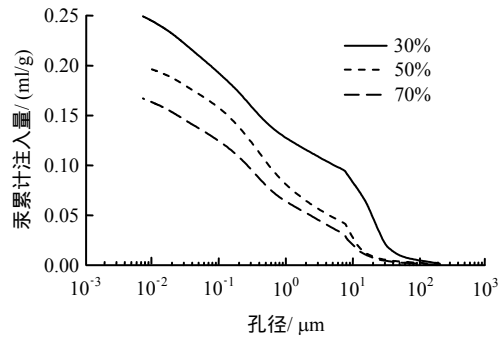


图 6 MPC 添加量对汞累计注入量的影响

图 6 Effect of MPC dosage on cumulative mercury injection volume

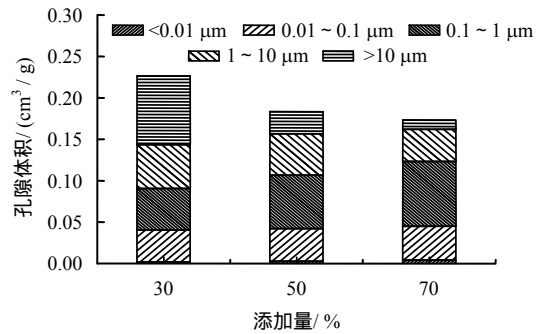


图 7 MPC 添加量对孔隙分布的影响

Fig.7 Effect of MPC dosage on pore volume distribution

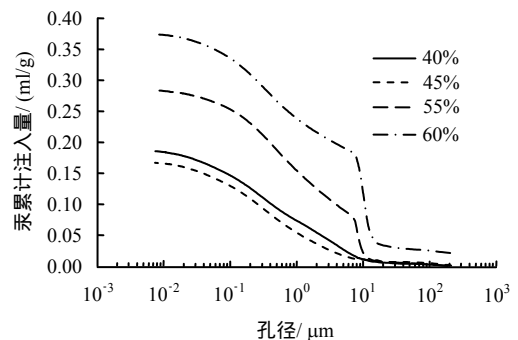


图 8 水土比对汞累计注入量的影响

图 8 Effect of water content on cumulative mercury injection volume

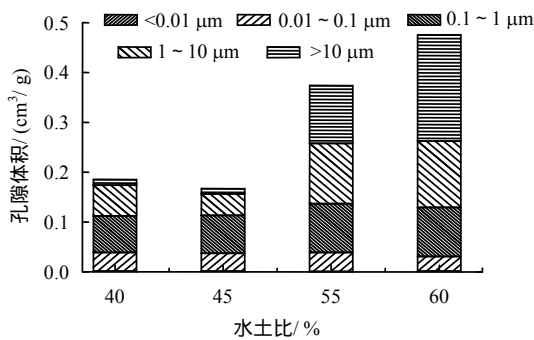
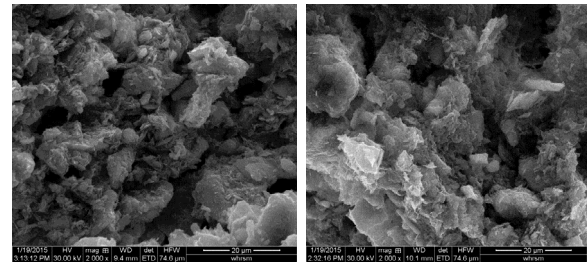


图9 水土比对孔隙分布的影响

Fig.9 Effect of water content on pore volume distribution 而增大。从图9可以看出,当水土比从0.40增加到0.45时,固化土中小于 $1\mu\text{m}$ 和大于 $1\mu\text{m}$ 的孔隙体积均减小;水土比从0.45增加到0.60时,固化土中孔径小于 $1\mu\text{m}$ 的孔隙体积增加,而大于 $1\mu\text{m}$ 的孔隙体积减小,表明水土比对固化土中内孔隙分布影响较大。原因是水土比对MPC水化反应存在临界值,低于临界值时,此时生成的MKP相对较少,但MKP的产量随水土比的增加而较快增加, MKP充填了大于 $1\mu\text{m}$ 的孔隙,因此 $1\sim 10\mu\text{m}$ 和超过 $10\mu\text{m}$ 的孔隙体积减少;高于临界值时,多余的水使团聚体产生解离作用,造成团聚体孔隙增大。

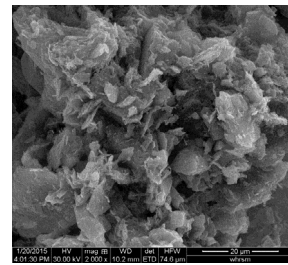
3.4 SEM分析

不同MPC添加量固化土微观显微结构见图10。固化土的养护龄期为7d,水土比为0.5,铅含量为 5000mg/kg 。放大倍数均为2000倍。当MPC添加量为30%时,观察图10可见,固化土内团状胶结物(MKP)生成量较少,土颗粒(或团聚体)外形上表现为不规则的块状和粒状,相互之间散乱搭接堆叠,呈无序排列,颗粒大小差异明显,形成了大小不等连通的架空孔隙,孔隙较大。这是因为MPC添加量较低,生成的MKP少, MKP与土颗粒的胶结程度较弱。从图10(b)~10(c)可见, MPC添加量的继续增加,污染土颗粒相互靠近紧密,且土颗粒间出现大量MKP, MKP包裹土颗粒并充填于颗粒孔隙,使颗粒呈团聚状,形成致密的团聚体,降低了孔隙之间的连通性。渗透系数减小,且固化土变得坚硬,固化土强度增加。



(a) 添加量为30%

(b) 添加量为50%

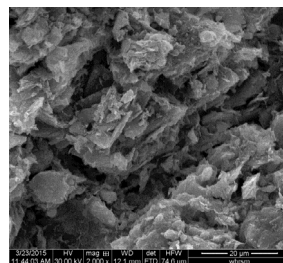


(c) 添加量为70%

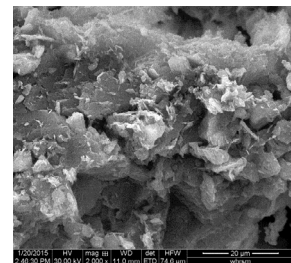
图10 MPC添加量对微观显微结构的影响

Fig.10 Effect of MPC dosage on microstructure features

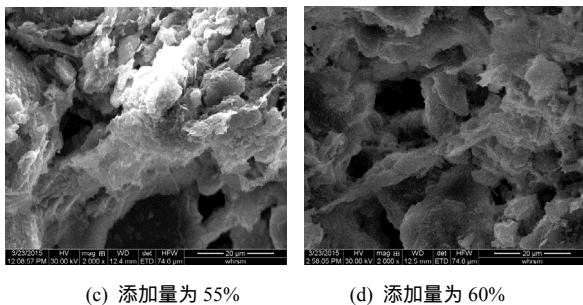
不同水土比固化土微观显微结构见图11。固化土的MPC添加量为50%,养护龄期为7d,铅含量为 5000mg/kg 。放大倍数均为2000倍。从图中可以看出,当水土比较小(图11(a))时, MPC水化反应不完全,生成的MKP较少, MKP晶体间存在很多孔隙,土颗粒之间黏结性较差,固化土整体结构松散;当水土比适中(图11(b))时,生成的MKP不断增加,结构由松散变得团聚和密实, MKP晶体结晶程度高, MKP互相紧密堆积,整个断面基本没有孔隙。当水土比较大(图11(c)和图11(d))时,虽然固化土内MKP增加,但团聚体较松散,大量层状MKP晶体重叠排列在一起,晶体间存在很多孔隙,且MKP周围明显覆盖了一层水膜,比较图11(c)和图11(d)发现,随着水土比的增大,团聚体松散度增加,部分团聚体边缘出现大的孔隙。



(a) 添加量为40%



(b) 添加量为45%



(c) 添加量为 55% (d) 添加量为 60%

图 11 水土比对微观显微结构的影响

Fig.11 Effect of water content on microstructure features

4 结 论

(1) 随着 MPC 添加量的增加, 污染土的固化效果得到明显改善, 固化土抗压强度增加, 渗透系数减小。随着 MPC 添加量的增大, 固化土的孔隙体积减小, MKP 主要通过减少孔径大于 $1\ \mu\text{m}$ 的孔隙体积来影响固化土的强度和渗透特性, 随着 MPC 添加量的增加, 土颗粒相互靠近紧密, 团聚化越明显, 土颗粒间的胶结程度加强。

(2) 水土比对 MPC 固化土影响的临界值为 0.45。当水土比小于临界值时, 随着水土比的增加, 抗压强度增加, 渗透系数减小, 固化土的孔隙体积减小, 土颗粒变得团聚和密实, 结晶程度高, 孔隙减少。当水土比超过临界值时, 随着水土比的增加, 抗压强度减小, 渗透系数增加, 固化土的孔隙体积增加。团聚体松散度增加, 部分团聚体边缘出现大的孔隙。

参 考 文 献

- [1] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 366 - 370.
CUI De-jie, ZHANG Yu-long. Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the remediation techniques[J]. **Chinese Journal of Soil Science**, 2004, 35(3): 366 - 370.
- [2] PETER P, JOHN A, GEORGE M, et al. Effect of Dilution and contaminants on sand grouted with colloidal silica[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineering**, 1999, 125(6): 461 - 469.
- [3] VATSALA A, NOVA R, S MURTHY B R. Elastoplastic model for cemented soils[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2001, 127(8): 679 - 687.
- [4] 张亭亭, 李江山, 王平. 磷酸镁水泥固化铅污染土的应力-应变特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 215 - 225.
- [5] ZHANG Ting-ting, LI Jiang-shan, WANG Ping. Experimental study of stress-strain properties of lead-contaminated soils treated by magnesium phosphate cement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Supp. 1): 215 - 225.
- [6] 陈蕾, 刘松玉, 杜延军. 水泥固化重金属铅污染土的强度特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(12): 1898 - 1903.
CHEN Lei, LIU Song-yu, DU Yan-jun. Unconfined compressive strength properties of cement solidified/stabilized lead-contaminated soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(12): 1898 - 1903.
- [7] PERERA A S R, AL-TABBAA A, REID J M. Testing and performance criteria[M]//Stabilisation/Solidification Treatment and Remediation Advances in S/S for Waste and Contaminated Land. Florida: CRC Press, 2005: 415 - 435.
- [8] Wastewater Technology Centre. Proposed evaluation protocol for cement-based solidified wastes[R]. Canada: Environment Canada. 1991.
- [9] MALONE P G, JONES L W, LARSON R J. Guide to the disposal of chemically stabilized and solidified wastes[M]. U.S.A.: [s. n.], 1980.
- [10] HILLS C D, POLLARD S J T. Influence of interferences effect on the mechanical, microstructural and fixation characteristics of cement solidified hazardous waste forms[J]. **Journal of Hazardous Materials**, 1997, 52: 171 - 191.
- [11] SHERWOOD P. T. Soil stabilization with cement and lime[M]. London: [s. n.], 1993.
- [12] GREAVES H M. An introduction to lime stabilisation[C]//Proceedings of a Seminar on Lime Stabilisation. U K: [s. n.], 1996: 5 - 10.
- [13] 魏明俐, 杜延军, 张帆. 水泥固化/稳定锌污染土的强度和变形特性试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 306 - 312.
WEI Ming-li, DU Yan-jun, ZHANG Fan. Fundamental properties of strength and deformation of cement solidified/stabilized zinc contaminated soils [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp. 2): 306 - 312.
- [14] DU Y J, WEI M L, REDDY K R, et al. Effect of acid rain pH on leaching behavior of cement stabilized lead-contaminated soil[J]. **Journal Hazard Materials**, 2014, 271: 131 - 140.

- [14] JUENGER M C, WINNEFELD F, PROVIS J L. Advances in alternative cementitious binders[J]. **Cement and Concrete Research**, 2011, 41(12): 1232 - 1243.
- [15] SINGH D, MANDALIKA V R, PARULEKAR S J. Magnesium potassium phosphate ceramic for 99Tc^m mobilization[J]. **Journal of Nuclear Materials**, 2006, 348: 272 - 282.
- [16] WAGH A S, Chemically bonded phosphate ceramics – twenty-first century materials with diverse applications[M]. Oxford: [s. n.], 2004.
- [17] MCCARTHY G, WHITE W, SMITH D. Mineral models for crystalline hosts for radionuclides in radioactive waste disposal[M]. New York: Pergamon Press, 1982.
- [18] CHO J H, EOM Y, LEE T G. Stabilization/solidification of mercury-contaminated waste ash using calcium sodium phosphate(CNP) and magnesium potassium phosphate (MKP) processes[J]. **Journal of Hazardous Materials**, 2014, 278: 474 - 482.
- [19] VINOKUROV S E, YU M, KULYAKO O M. Myasoedov low-temperature immobilization of actinides and other components of high-level waste in magnesium potassium phosphate matrices[J]. **Journal of Nuclear Materials**, 2009, 385: 189 - 192
- [20] 南京水利科学研究所. GB T 50123 - 1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. Nanjing Hydraulic Research Institute. GB T50123 - 1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [21] BUJ I, TORRAS J, ROVIRA M. Effect of heavy metals and water content on the strength of magnesium phosphate cements[J]. **Journal of Hazardous Materials**[J]. 2009, 170: 345 - 350.
- [22] 廖晓勇, 崇忠义, 阎秀兰, 等. 城市工业污染场地, 中国环境修复领域的新课题[J]. **环境科学**, 2011, 32(3): 784 - 794. LIAO Xiao-yong, CHONG Zhong-yi, YAN Xiu-lan, et al. Urban industrial contaminated sites: A new issue in The field of environmental remediation in China[J]. **Environmental Science**, 2011, 32(3): 784 - 794.
- [23] 朱岗辉, 孙璐, 廖晓勇. 郴州工业场地重金属和 PAHs 复合污染特征及风险评价[J]. **地理研究**, 2012, 31(5): 831 - 838. ZHU Gang-hui, SUN Lu, LIAO Xiao-yong. Combined pollution of Heavy metals and PAHs and its risk assessment in industrial sites of Chen zhou city **Geographical Research**[J]. 2012, 31(5): 831 - 838.
- [24] BOARDMAN D J. Lime stabilization: clay-metallime in teractions[D]. U K: Loughboroug University, 1999.
- [25] American Society for Test and Materials. ASTM D 5084 - 03 Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permameter[S]. Philadelphia: ASTM Publisher, 2003.
- [26] 王兵, 杨为民, 李占强. 击实水泥土强度随养护龄期增长的微观机制[J]. **北京科技大学学报**, 2008, 30(3): 233 - 238. WANG Bing, YANG Wei-min, LI Zhan-qiang. Micromechanism of strength increase with curing time for compacted cement-soil[J]. **Journal of University of Science and Technology Beijing**, 2008, 30(3): 233 - 238.
- [27] 赵程, 申向东, 贾尚华. 密实度对压实水泥土强度的影响[J]. **岩土工程学报**, 2013, 35(1): 360 - 365. ZHAO Cheng, SHEN Xiang-dong, JIA Shang-hua. Influence of density on strength of cemented soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(1): 360 - 365.
- [28] 贾坚. 影响水泥土强度的综合含水率研究[J]. **地下空间与工程学报**, 2006, 2(1): 132 - 140. JIA Jian. Research on comprehensive water content of cement treated soil[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2006, 2(1): 132 - 140.
- [29] 朱龙芬. 含水率变化对水泥土室内强度的影响[J]. **山西建筑**, 2007, 33(25): 192 - 193. ZHU Long-fen. Effect of water content changes to cement indoor intensity[J]. **Shanxi Architecture**, 2007, 33(25): 192 - 193.
- [30] HORPIBULSUK S, RACHAN R, RAKSACHON Y. Role of fly ash on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay[J]. **Soils and Foundations**, 2009, 49(1): 85 - 98.