

朱苗森, 朱武卫. 矿渣与工业废渣改良黄土的性能与机理研究进展[J]. 灾害学, 2022, 37(1): 129–133. [ZHU Miaomiao and ZHU Wuwei. Research Progress on Properties and Mechanism of Loess Modified by Slag and Industrial Waste Residue [J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(1): 129–133. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.01.022.]

矿渣与工业废渣改良黄土的性能与机理研究进展^{*}

朱苗森^{1,2}, 朱武卫¹

(1. 陕西省建筑科学研究院有限公司, 陕西 西安 710082; 2. 四主体一联合建筑工程技术研究中心, 陕西 西安 710082)

摘要: 黄土在世界上分布面积较广, 在我国也有约 $60 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的分布, 具有湿陷性是其区别于其它区域性土的最显著特点, 并由此引发造成各种地质灾害和工程问题。采用石灰、水泥或高分子材料等对其进行改性以达到消除湿陷性或提高黄土强度的目的, 是岩土工程领域的重要课题。选用矿渣和工业废渣作为改性参料, 用以研究改性黄土的力学特性变化和改性机理, 既希求获得良好的工程应用效果, 又期望同时解决其填埋造成的污染风险和环境问题, 最大限度进行资源化利用。国内外该方面的研究目前尚处于起步阶段。该文通过文献调研, 对国内外通过矿渣和工业废渣改良黄土的研究晶型综合分析, 对近年来矿渣和工业废渣改良黄土性能、机理和潜在风险进行了总结, 在此基础上提出该领域未来的研究与发展趋势。

关键词: 矿渣; 工业废渣; 改良黄土; 性能; 机理; 风险预测

中图分类号: X43; X915.5; Tu444 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2022)01-0129-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.01.022

受成因、成土气候条件、颗粒形状及组成、矿物成分等多重因素影响, 黄土包含了较多的孔隙并具有大孔隙结构, 但由于其矿物成分中的碳酸钙胶结效应, 使得黄土在低含水的天然状态下往往具有显著的结构性, 黄土的结构性也使得黄土在外加压力下具有表面较高的强度和较低压缩性, 但一旦发生浸水, 可溶性的碳酸盐溶于水中, 使得黄土原本具有的结构性大大降低甚至丧失殆尽, 在加载和受湿过程中发生突然的湿陷变形和结构破坏, 并由此造成一系列的建筑物地基病害, 诱发滑坡、泥流、岸坡坍塌等地质灾害, 构成严重的水土流失等环境灾害和不均匀沉降等工程灾害, 造成了大量的经济损失和人员伤亡^[1]。加之基于建设需要, 在黄土高原上开展大规模大厚度的挖、填方工程等人类工程活动, 如果处理不当, 必将加剧对湿陷性黄土地区建构筑物地基和道路路基、管道等使用环境的恶化, 形成更多不可预测的工程问题和灾害事故。

为使湿陷性黄土地区建构筑物地基能满足强度、变形、水稳定性及耐久性等要求, 有必要对湿陷性黄土进行改良^[1]。目前在湿陷性黄土改良方面多采用水泥、石灰、无机纤维和高分子材料复合掺杂, 国内外相关研究已取得了丰硕的成果^[2-7]。以上使用石灰、水泥和高分子材料改良湿陷性黄土的方法虽然效果明显, 但同时存在能耗高、成本高的缺点^[7-10], 开发一种低能耗成本适中的改良剂, 是目前国内外许多学者研究的新热

点。而将矿渣和工业废渣作为湿陷性黄土改良剂, 既能够解决其大批量的填埋所造成的污染风险, 还能够变废为宝, 最大程度的进行资源化利用。近年来国内外学者对工业废渣改良湿陷性黄土的效果和机理已经进行了一些研究, 但目前缺少相关文献报道的总结。为了使矿渣和工业废渣改良黄土被全面和深入的认识, 本文将近年来矿渣和工业废渣改良黄土的性能、机理和潜在的风险进行总结分析, 以便为矿渣和工业废渣改性黄土的进一步深入研究和工程应用打下基础。

1 传统矿渣与工业废渣改良黄土的性能与机理研究进展

相对新型的工业废渣而言, 以往的黄土改良剂多采用粉煤灰、硅灰和石灰等矿渣和生产废渣, 国内外的学者对其单掺和多掺使用的效果和机理已经取得了一定的研究成果。

1.1 单掺改良

对于黄土而言, 石灰是较为常用的一种单掺矿物。ZHANG F 等^[11]研究了不同石灰含量和养护天数下石灰处理黄土的物理化学和力学性能的变化。物理测试包括石灰处理黄土的粒度分布、比重、比表面积和阳离子交换容量, 化学测试包括电导率、总溶解固体、pH 值和 1:5 土壤提取物对水的氧化还原电位。最后, 进行了无侧限抗压强

* 收稿日期: 2021-07-06 修回日期: 2021-08-27

基金项目: 西安市莲湖区重点领域产业链成长企业培育引领项目(莲科发7号)

第一作者简介: 朱苗森(1987-), 女, 汉族, 陕西西安人, 博士, 高级工程师, 主要从事废渣矿渣的资源化综合利用研究.

E-mail: 165643569@qq.com

度的相关力学试验, 28 d 龄期下, 未掺杂石灰的黄土的无侧限抗压强度仅为不到 75 kPa, 而掺杂 15 wt% 石灰的黄土的无侧限抗压强度约为 500 kPa; 120 d 时, 掺杂 15 wt% 石灰的黄土的无侧限抗压强度可达 1 200 kPa。这是因为, 石灰处理的黄土在水化和火山灰反应过程中, 其物理化学和力学性质发生了变化, 从而形成了团聚体和新的胶凝矿物, 使石灰处理黄土的性能比未处理黄土有了很大的改善。这种改善可归因于阳离子交换引起的絮凝: 首先, 阳离子交换引起的絮凝而立即形成了团聚体, 之后, 新形成的胶凝矿物在骨料或颗粒之间进行了填充。此外, 石灰处理黄土的化学性质比物理力学性质对环境变化更为敏感。

胡再强等^[12]对石灰改性黄土进行击实试验, 得到改性黄土的石灰掺量分别与最优含水量和最大干密度的变化规律。并且, 在不同石灰掺量下, 冻融循环后改性黄土的应力应变关系曲线随冻融循环次数的增加由弱硬化型向弱软化型过渡, 最后趋于强度软化型。

1.2 多掺改良

除了使用单一组分的改良剂外, 有学者尝试使用二元甚至三元的复合改良剂对黄土进行了固化, 除了能够提高黄土的力学性能外, 还能够赋予黄土其它的物理化学性能。

解邦龙等^[13]研究了不同龄期下粉煤灰水泥土的三轴抗剪强度变化。结果表明, 粉煤灰水泥土的应力应变曲线呈现应变软化型, 试样的抗剪强度随养护龄期的增加逐渐增大; 由于试样内部各物质之间的反应随养护龄期的增加而持续进行, 龄期越长试样内部各物质之间的胶结作用越强, 致使试样的内摩擦角和黏聚力随养护龄期逐渐增大。通过电子扫描显微镜观察试验机理发现, 试样内部生成的结晶物质(钙矾石)与胶凝物质(C-S-H 凝胶)等填充试样内部的大孔隙且相互粘结, 导致试样结构性强度明显上升, 抗剪强度增大。

硅微粉是以天然石英或熔融石英为原材料, 经过分拣、破碎、研磨、浮选、酸洗净化、高纯水处理等多道工艺制成的二氧化硅粉体材料, 葛菲等通过掺入水泥和硅微粉对黄土进行改良, 提高了水泥土的抗剪强度^[14]。由于硅微粉的火山灰反应使得水化硅酸钙胶凝产物不断增加, 同时, 硅微粉的存在促进了水泥水化反应, 因此水泥和硅微粉双掺的固化效果优于两者单掺的改良效果。

张豫川等^[15]将粉煤灰-脱硫石膏-水泥三元凝胶体系运用于湿陷性黄土固化, 使用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 NaOH 作为活性激发剂形成复合湿陷性黄土固化剂, 复合固化湿陷性黄土中后期强度增长率高, 90 d 强度达到 6.85 MPa, 强度来源主要是钙矾石和水化硅酸钙。白龙剑等^[16]采用硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥与黄土、粉煤灰和沸石粉为主题, 开发了一种流动性良好、微膨胀、早强快硬的复合注浆材料, 其抗压强度可达 24 MPa。

张星辰等^[8]对水泥熟料、粉煤灰、石膏、核心原料和纳米 SiO_2 的改性黄土进行力学性能研究。结果发现, 采用纳米材料的掺量对固化土的无侧限抗压强度提高效果显著, 并与固化土的无侧限抗压强度呈指数函数关系, 纳米固化土各龄期无侧限抗压强度相较普通固化土和 32.5 号水泥土可提升 10% ~ 30%。其原理是, 具有大量高火山灰

活性的纳米 SiO_2 分子, 能够激活土壤惰性矿物活性, 并强化胶体空间网状结构, 使得固化土土体颗粒粒径更细, 空间分布更均匀, 土体微观结构更复杂, 进而获得更佳的力学性能。

近年来, 一些学者也尝试将矿渣改良黄土应用于更广泛的领域。DASSEKPO 等^[17]将碱激发黄土制备为环保、可持续、减少碳排放的修复材料——地聚合物砂浆, 用于水泥混凝土结构劣化修补材料, 以适应扩大的应用量。具体做法是, 将黄土和磨细高炉矿渣为原料, 用氢氧化钠或氢氧化钠和硅酸钠的混合溶液进行活化, 制备了地聚合物砂浆。实验结果表明, 不同的碱激发剂对黄土超细颗粒的表观粘度、粗糙度、压缩性和微观结构特性均有较大影响。纳米压痕结果表明, 砂浆具有良好的附着力、较高的体积压痕模量和硬度, 这使得黄土聚合物成为一种极具潜力的修补材料, 可用作水泥混凝土基层的屏障涂层。MANIKANTA 等^[18]介绍了利用磨细粒化高炉矿渣、膨润土和硅酸盐水泥混合作为填埋场的衬里, 以防止地下水污染的实验。研究了膨润土和 PC 混合料对高炉矿渣的液限、自由膨胀指数、压实度、无侧限抗压强度和水导率的影响。本研究采用去离子水和柴油污染物作为渗透液。结果表明, 随着高炉矿渣含量的增加, 共混物的液限、自由膨胀指数和水导率降低, 最佳含水率、最大干密度和 0 d、14 d 和 28 d 熟化期的无侧限抗压强度增大。通过扫描电子显微镜和 X 射线衍射对无侧限抗压强度样品进行分析, 发现胶凝化合物的形成提高了材料的强度。共混物的水导率随高炉矿渣含量的增加而降低, 与渗透液无关。之后对重金属的浸出性进行了分析, 实验显示较高比例的高炉矿渣混合物与渗透剂的相互作用降低了金属离子的溶解度, 从而分别提高了重金属的浓度。根据研究结果, 高炉矿渣用作衬砌的最佳比例应在 15% ~ 20% 之间。

随着粉煤灰的价格上涨, 氧化钙等矿物开采的政策限制, 传统的矿渣改良黄土价格将逐渐变高。因此, 越来越多的学者将研究重点转移到了工业废渣这一较为便宜且具有水化能力的固化剂上。

2 新型矿渣与工业废渣改良黄土的性能与机理研究进展

我国是钢产量大国, 因此钢渣的产出也较大, 若能将钢渣用于黄土的改良剂使用, 将会使该产业形成良性循环。国内外新型矿渣与工业废渣改良黄土的性能与机理研究的前期, 主要是聚焦钢渣改良土方面, 除了对其性能机理进行研究, 还通过计算机模拟了钢渣黄土后期的膨胀情况, 对其工程实际应用和其它类似组分的矿渣改良黄土的研究起到了指导作用。

2.1 钢渣改良黄土

CLARA A Mozejko 等^[19]评估了通过添加钢渣来稳定黏土型湿陷性黄土的性能。通过显微镜和机械性能试验评估了钢渣含量、压实水分含量和固化时间对强度、变形模量、颗粒化和孔结构的影响。结果表明, 随着固化时间的增加, 土壤抵

抗力和刚度增加。这是由于黏土质粉质颗粒的玻璃状部分与钢渣之间的相互作用产生了天然胶凝材料。黄伟等^[20]采用土体固化技术制备新型道路基层材料—钢渣混合土。结果发现, 50% 钢渣 + 50% 黄土并掺入占钢渣重量 40% 的矿渣微粉, 其强度值可达 7.19 MPa。电子扫描显微镜(SEM)结果表明, 钢渣混合土内部结构早期为单一混合料团聚体堆叠, 随着龄期增长, 逐渐衍变为团聚体与 C-S-H 凝胶片状网格结构相结合, 使得土体结构更加密实。这种类型的反应也可以通过直接测量火山灰指数, 以及采用降低含水量的方法来确定。

J M MONTEMNEGRO - COOPER 等^[21]对钢渣和与天然土壤的混合物进行了体积膨胀试验, 以期将其用于路堤建设和相关土方工程等土木工程项目。分析了氧化镁的影响, 并提出了一个分析模型预测钢渣土的膨胀, 模拟与实验的结果表明, 粘性土混合物与矿渣之间的化学反应主要发生在电位膨胀试验的前 40 h。

2.2 其它工业废渣改良黄土

铜渣是一种需要妥善处理或回收利用的工业副产品。铜渣天然富含硅酸铁、氧化钙和氧化铝, 少量的铜、铅、锌和其他金属。R GOBINATH 等^[22]在天然冲积土中分别掺入 1 wt% 和 2 wt% 的铜渣进行稳定化处理, 研究了掺铜渣和不掺铜渣土样的抗拉强度和承载能力。研究发现, 随着土壤中铜渣含量的增加, 抗拉强度成倍提高, 土体承载强度也有较大幅度的提高。随着铜渣含量的增加, 土壤表现出明显抗侵彻能力, 3 wt% 的铜渣含量可以有效地增强土壤的强度特性。

镁渣是一种 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (40 wt% ~ 50 wt%)、 MgO (4 wt% ~ 7 wt%)、 Fe_2O_3 (5 wt% ~ 8 wt%)、 Al_2O_3 (1 wt% ~ 4 wt%) 和少量 f-CaO 的工业废渣, 大量分布于陕西省陕北地区, 具有水化活性和火山灰活性, 并且成本低廉, 耗能低, 是一种具市场潜力和应用价值的新型湿陷性黄土改良材料。狄圣杰等^[23]发现活性 MgO (镁渣的主要成分之一)可显著提高湿陷性黄土抗剪强度; 随着活性 MgO 掺量和养护龄期增加, 固化湿陷性黄土的粘聚力和内摩擦角先增大后减小, 这是由于活性 MgO 与湿陷性黄土均匀混合后发生水化反应, 水解生成 Mg^{2+} 和 OH^- , Mg^{2+} 可进一步与土颗粒中阳离子发生离子交换, 使土颗粒凝聚成团、颗粒间联结力增大, 从而引起固化土粘聚力和内摩擦角明显增加。

陈立东等^[24]采用 CaO 改性氧化铝工业生产废料赤泥(与镁渣成分类似, 含有 β 型硅酸二钙)作为湿陷性黄土固化剂, 结果发现强度随赤泥掺量的增加符合二次函数变化, 随龄期的增加符合线性变化规律; 发现在 28 ~ 90 d 龄期且赤泥掺量为 30% ~ 60% 时, 强度相比水泥固化土可提高 2.5 ~ 4 倍。CHEN Ruifeng 等^[25]通过实验发现赤泥含量对碾压混凝土的无侧限抗压强度有显著影响。适量赤泥废渣能有效改善黄土路基填筑的力学性能。在本研究中, 黄土路基填筑的最佳赤泥含量约为 15 wt% ~ 20 wt%。微观分析表明, 赤泥具有较强的碱性和水解性, 可以促进更多胶凝水合物的生成, 如 C-S-H/C-A-S-H 和 Aft。这些水合物、赤泥细粒和团聚体可以附着在黄土颗粒表面或填充粒间孔隙, 使土体结构更加致密、稳定,

从而使力学性质得到明显改善。

贺生云等^[26]利用镁渣对宁夏平罗县的超盐渍土进行固化处理, 结果发现镁渣具有物理加固作用, 即粉煤灰与镁渣的填充润滑密实作用, 相同粉煤灰掺量的超盐渍土的摩擦角随着镁渣掺量的增加基本呈现增加的趋势。研究发现, 固化过程中存在化学加固和物理加固两个过程: 化学加固为粉煤灰、镁渣与盐渍土中 SiO_2 和 Al_2O_3 等高活性氧化物进入溶液, 生成水化硅酸钙、水化铝酸钙、水化铁酸钙和氢氧化钙等具有强度的水化物, 从而提高土体强度。物理加固是指粉煤灰与镁渣的填充润滑密实作用, 较小的镁渣、粉煤灰颗粒填充进入盐渍土颗粒之间的小孔隙, 使得后者密实; 粉煤灰、镁渣的黏性较小, 粉煤灰、镁渣的掺入使得盐渍土的黏性减小, 易于压实, 利于土体密实均匀。而镁渣 - 粉煤灰的加固作用主要体现为物理加固。

2019 年张磊等^[27]发现镁渣对于膨胀土膨胀性的改良具有显著的效果, 而镁渣改性土的无侧限抗压强度和抗剪强度都呈现先增加后减小的趋势, 在镁渣掺量为 15 wt% 时达到峰值。他认为镁渣的改良机理主要为两点: ①镁渣与水混合后, 电离出大量的高价阳离子 (Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al^{3+}), 它们通过离子交换置换出黏土颗粒中的低价阳离子 (Na^+ 、 K^+), 改性土的颗粒间距变小, 使得改性土的液限和塑性指数降低, 进而改善土体的膨胀特性。②镁渣中的 β 型硅酸二钙具有良好的水化活性, 遇水反应后可生成水化硅酸钙凝胶 ($\text{xCaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{nH}_2\text{O}$)。凝胶物质产生会将土颗粒充分包裹, 成网状的紧密连接在一起。它改变了土颗粒杂乱无章的分布状态, 并使单独的颗粒形成一个整体, 从而增加了土体的强度, 它是膨胀土体强度提高的主要原因。

李宏波等^[28]对水泥、粉煤灰、硅灰、镁渣共掺作为渠道盐渍土地基固化剂的固化效果进行了研究。结果发现, 水泥是影响盐渍土抗剪强度的主要因素, 粉煤灰和硅灰掺入增加了盐渍土的干缩性能, 而镁渣掺入土体中生成的硫酸镁会使体积膨胀, 因此, 当粉煤灰、硅灰和镁渣共同掺入到盐渍土中时就能够减小盐渍土的干缩变形, 同时加强固化效果。

通过贺生云、张磊和李宏波等人的研究, 可以发现, 镁渣与粉煤灰对土的加固具有协同作用, 然而目前仍然缺少将镁渣与其它矿物废渣共同应用于黄土固化改良方面的研究。

矿渣与废渣改良湿陷性黄土具有理论基础和现实需求, 并且具有相当大的经济效益与社会效益, 即提高了矿渣与废渣作为产品的附加值, 也能够降低其造成的扬尘污染与填埋占地。但目前为止, 尚缺少矿渣与废渣改良湿陷性黄土的相关标准, 对矿渣与废渣的处理方法和掺量控制等因素的参数控制并不明确, 这对于该方面市场的开发造成了极为不利的影响。

3 工业废渣改良黄土的潜在风险研究进展

西北地区的黄土具有一定的亚稳定性, 加入

的化学物品往往能改变黄土的微观结构，同时还会对黄土造成潜在的污染风险^[29~30]。然而，目前报道的矿渣与工业废渣中难以避免的含有微量的化学成分与重金属，为了避免矿渣与废渣造成二次污染，这些成分对黄土的污染与微观结构的影响也应成为研究的重点。

MASRUR M 等^[30]指出，粉煤灰和矿渣是潜在的有毒物质来源，可能会将重金属和微量金属淋溶到土壤、地表水和地下水中，从而对环境造成风险。为了评估这些风险，他采用毒性特征淋溶试验研究了粉煤灰、矿渣、I/II类水泥、水泥活化粉煤灰和矿渣稳定土中铝(Al)、铜(Cu)、铁(Fe)和锌(Zn)的淋溶环境危害。硫酸盐、可溶性无机碳和可溶性有机碳浓度也被量化，以评估它们对淋溶的影响。为了解 pH 对浸出行为的影响，在 pH 值为 2~14 的范围内进行了 pH 相关的浸出试验。结果表明，粉煤灰或矿渣含量的增加并不一定会增加粉煤灰中的有效金属浓度，在酸性和碱性条件下，Al、Cu、Zn 和有机碳均遵循两性淋溶模式，浓度均增加。相反，可溶性无机碳的最大浓度出现在中性或近中性的 pH 值。Fe 和 SO₄²⁻ 均表现出阳离子浸出行为，浓度随出水 pH 升高而降低。此外，利用地球化学模拟程序 Visual MINTEQ 对金属的浸出控制机理进行了探讨。分析表明，在所有 pH 值下，Al³⁺ 和 Fe³⁺ 的溶解度受氧化物/氢氧化物矿物的沉淀/溶解反应控制。Cu²⁺ 的浸出仅在 pH 高于 7 时被控制在溶解度范围内，而 Zn²⁺ 的浸出在 pH 值为 8~12 范围内被控制在溶解度范围内。

FEI Z 等^[31]研究了黄土对沉积物中 Cu、Zn、Cd、Pb 的固化效果。将黄土与 10 kg 湿泥沙按 0、0.5、1、2、5、10、20 kg 剂量养护 70 d，然后进行毒性特征淋溶实验，之后用 X 射线衍射和扫描电子显微镜分析了重金属固定化的可能机理。试验结果表明，与未经处理的沉积物相比，黄土降低了 Cu 和 Zn 的淋失率，分别降低了 42.4% 和 17.6%。黄土对沉积物中的铜和锌有显著的固定作用，10 kg 湿沉淀物中黄土的最佳用量为 5 kg。而黄土对 Cd、Pb 的固定效果较差。相关分析表明，毒性特征淋洗处理法可用于预测黄土改良沉积物中 Cu、Zn、Cd、Pb 的毒性。黄土化底泥的 pH、电导率、有机物含量和 CaCO₃ 在毒性特征淋溶实验中起主导作用。

MASRUR M 等^[32]还研究了水泥掺入粉煤灰和矿渣混合土后可能引起的元素的淋溶特性。实验以水泥活化土壤—粉煤灰、土壤—矿渣混合物、土壤、粉煤灰、钢渣和水泥中钙(Ca)、镁(Mg)、硫(S)、锰(Mn)、钡(Ba)和铬(Cr)的淋溶特性作为研究对象，进行了间歇水浸出试验、酸中和容量试验和 pH 依赖浸出试验。试验结果表明，首先，随着水泥掺量的增加，浸出液中 Ca、Ba 浓度增加，而 Mg 浓度降低，硫浓度与水泥含量变化趋势不同，水泥掺入不影响铬、锰的浸出量。其次，溶液 pH 对元素的浸出行为影响最大，铬的浓度在极端酸性条件下最高，然后在 pH 值为 5.5~10 的范围内出现一个浓度平台，然后在 pH 为 11.5 和 13 时分别下降和升高。最后，地球化学模拟结果表明，除 Cr 外，元素的淋溶机理主要受其硫酸盐矿物和氢氧化物矿物的控制。铬的浸出可能受 BaCrO₄ 和 CaCrO₄ 的控制，而水泥

作为活化剂时，碳酸盐矿物的存在对元素的淋溶机理没有显著影响。

WANG 等^[33]指出，虽然钢铁废渣中含有钙(Ca)、镁(Mg)、磷(P)和硅(Si)，可用作硅和磷肥，生产钙镁磷肥料，或者作为农业土壤改良剂。然而，在钢铁冶炼过程中，铁矿中的几种污染物不可避免地会转移到钢铁渣中，导致镍(Ni)、铜(Cu)、汞(Hg)、锌(Zn)、镉(Cd)、铬(Cr)、砷(Ar)、硒(Se)、氟(F)和氯(Cl)等污染物富集，其中一些污染物(特别是 Cr、Ni、F 和 Cl)超标。钢渣中锰、钡、钒元素含量高于土壤环境背景值。为保障土壤健康、食品安全和环境质量，建议对未经有害污染物减排预处理、具有环境安全风险的钢铁渣等工业固体废物，不得直接用于土壤修复或农田调理，防止污染物进入食物链，危害人体健康。基于类似的原因，WANG 等也不建议在没有任何减少有害污染物的预处理情况下，将镁渣直接用于土壤修复或直接进入农田。

从以上研究可以发现，在对矿渣与工业废渣固化黄土的研究的同时，应注意其浸出液 pH 值的变化和重金属等微量元素含量的检测值。

4 总结与展望

通过上述分析论述可以发现，在绿色低碳转型的大背景下，将工业废渣和矿渣用于建设用地的黄土改良将是未来研究的热点。然而，由于矿渣与废渣自身成分和属性的问题，其应用依然需要科研人员与工程师进行大量的研究与实践。特别是对以下三个方面，应给予重视。

(1) 为保护我国土壤健康，避免二次污染，黄土固化后引起的环境问题必须受到重视，因此，必须通过大量测试在保证土壤性能安全和稳定的前提下，并着重检测土壤的 pH 值、有机碳以及重金属的渗出液等参数。

(2) 由于将工业废渣应用于建筑工程的标准尚未制定，因此，还需要岩土领域的专家根据已有的研究成果、经验和计算机模拟，探索制定此类标准。

(3) 关于新型的矿渣与废渣的研究较少，特别是其与水泥、粉煤灰和矿渣等传统的废渣共同改良黄土的研究尚缺乏，而后者往往能够体现很好的协同作用，可在一定程度上提高土体稳定性，还能够降低改良成本。因此，这也是一个非常有前景的研究方向。

参考文献：

- [1] CG A, XUL A, MRC B, et al. An investigation of particle breakage in loess[J]. Engineering Geology, 2021, 286(6): 106083.
- [2] ANDAVAN S, PAGADALA V K. A study on soil stabilization by addition of fly ash and lime[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 22: 1125~1129.
- [3] 刘俊霞, 吴晓博, 张茂亮, 等. 改性方法对生土材料水分传输特性的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21 (6): 162~166.
- [4] 朱敏, 倪万魁, 苑康泽, 等. 黄土渗透和强度性能的改良优化[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(6): 195~200.
- [5] 江涛. 银西高铁甘宁段水泥改良黄土路基冻胀规律及冻胀防治效果评价[J/OL]. 铁道标准设计, 2021, 65(9): 8~17.
- [6] 房军, 梁庆国, 贺谱, 等. 兰州水泥改良黄土拉压强度对比试验研究[J]. 铁道建筑, 2018, 58(10): 81~85.

- [7] 王开拓, 张立新, 王银涛, 等. 玻璃纤维对湿陷性黄土力学性能的影响研究[J]. 水力发电, 2020, 46(10): 117–121.
- [8] 张星辰, 高建恩, 樊恒辉, 等. 纳米土壤固化剂重构黄土力学性能的试验研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(6): 131–137, 143.
- [9] 米文静, 张爱军, 任文渊, 等. 轻量土减重换填消减黄土湿陷的方法研究[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 51–61.
- [10] 朱皓轩. 粉煤灰和路液(Roadyes)改良黄土的崩解冲刷特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [11] ZHANG Fanyu, PEI Xiangjun, YAN Xude. Physicochemical and Mechanical Properties of Lime – Treated Loess [J]. Springer International Publishing, 2018, 36(1): 1–12.
- [12] 解邦龙, 张吾渝, 张丙印, 等. 不同龄期下粉煤灰水泥土的UU抗剪强度试验研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(4): 1216–1223.
- [13] 胡再强, 梁志超, 吴传意, 等. 冻融循环作用下石灰改性黄土的力学特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(S1): 211–217.
- [14] 葛菲, 巨玉文, 蒋宗耀, 等. 水泥硅微粉改良黄土的抗剪强度试验研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(16): 6565–6569.
- [15] 张豫川, 乔子秦, 高飞, 等. 工业废渣复合固化黄土强度特性及影响因素研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(3): 103–109.
- [16] 白龙剑, 严国超. 矿用双组分复合注浆材料试验与应用研究[J]. 煤矿安全, 2020, 51(12): 12–17, 22.
- [17] DASSEKPO Jean – Baptiste Mawulé, FENG Weipeng, LI Yanru, et al. Synthesis and characterization of alkali – activated loess and its application as protective coating[J]. Construction and Building Materials, 2021, 282: 122631–122641.
- [18] MANIKANTA Devarangadi, UMA Shankar M. Use of ground granulated blast furnace slag blended with bentonite and cement mixtures as a liner in a landfill to retain diesel oil contaminants [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2019, 7(5): 103360–103372.
- [19] CLARA A Mozejko, FRANCO M Franciscia. Enhanced mechanical behavior of compacted clayey silts stabilized by reusing steel slag [J]. Construction and Building Materials, 2020, 239: 117901–117910.
- [20] 黄伟, 邱鹏, 唐刚, 等. 钢渣混合土基层材料制备及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10): 3237–3242, 3265.
- [21] J M MONTENEGRO – COOPER, M CELEMÍN – MATACHANA, J. CAÑIZAL, et al. Study of the expansive behavior of ladle furnace slag and its mixture with low quality natural soils[J]. Construction and Building Materials, 2019, 203: 201–209.
- [22] GOBINATH R, AKINWUMI Isaac, GANAPATHY G P, et al. Compaction and shear strength enhancement of weak soil by copper slag addition[J]. Materials Today: Proceedings 2021, 39: 834–838.
- [23] 狄圣杰, 杜怡莹, 王东星, 等. 活性MgO固化黄土抗剪强度特性研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(10): 878–884.
- [24] 陈立东, 宋志伟. CaO改性赤泥固化剂固化黄土的力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(1): 213–218.
- [25] CHEN Ruifeng, CAI Guojun, DONG Xiaoqiang, et al. Mechanical properties and micro – mechanism of loess roadbed filling using by – product red mud as a partial alternative[J]. Construction and Building Materials, 2019, 216: 188–201.
- [26] 贺生云, 李宏波, 吴振华, 等. 粉煤灰–镁渣改良超盐渍土的工程性质研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(22): 176–180.
- [27] 张磊, 孙树林, 张岩, 等. 镁渣改良膨胀土的物理力学特性试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2019, 36(3): 79–83.
- [28] 李宏波, 田军仓, 南红兵, 等. 几种固化剂对渠道盐渍土地基力学性能影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(12): 94–99.
- [29] HU Wenle, CHENG Wenchieh, WEN Shaojie, et al. Effects of chemical contamination on microscale structural characteristics of intact loess and resultant macroscale mechanical properties [J]. Catena, 2021, 203: 105361–105376.
- [30] MASRUR Mahedi, BORA Cetin, ASLI Y Dayioglu. Leaching behavior of aluminum, copper, iron and zinc from cement activated fly ash and slag stabilized soils[J]. Waste Management, 2019, 95: 334–355.
- [31] ZANG Fei, WANG Shengli, NAN Zhongren, et al. Leachability of heavy metals in loess – amended dredged sediment from Northwest of China [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 183: 109561–109567.
- [32] MASRUR Mahedi, BORA Cetin, ASLI Y Dayioglu. Effect of cement incorporation on the leaching characteristics of elements from fly ash and slag treated soils[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 253: 109720–109731.
- [33] WANG Xiaobin, LI Xiuying, YAN Xiang, et al. Environmental risks for application of iron and steel slags in soils in China: A review[J]. Pedosphere, 2021, 31(1): 28–42.

Research Progress on Properties and Mechanism of Loess Modified by Slag and Industrial Waste Residue

ZHU Miaomiao^{1,2} and ZHU Wuwei¹

(1. Shaanxi Academy of Building Research Co., Ltd., Xi'an 710082, China;
2. Four – main – one Joint Construction Engineering Technology Research Center, Xi'an 710082, China)

Abstract: Loess is widely distributed in the world and has collapsibility, which is easy to cause geological disasters and engineering problems. In order to avoid economic losses and casualties caused by loess collapsibility, it is often modified by lime, cement and polymer to solidify loess and strengthen the strength of loess. However, the materials used in these methods are limited in the context of energy saving, emission reduction and sustainable development. Using slag and industrial waste as collapsible loess modifiers can not only solve the pollution risk caused by landfill, but also turn waste into treasure and maximize resource utilization. At present, the research in this field at home and abroad is in the initial stage, which mainly focuses on the mechanical properties, mechanism and potential environmental risk prediction in the application of slag and industrial waste slag to improve loess. This paper will summarize and discuss the above three aspects, and point out the possible research and development trends in this field, so as to lay a foundation for further research and application in the future.

Key words: slag; industrial waste; improved loess; performance; mechanism; risk prediction