

铁尾矿砂替代率对水泥土热力性能的影响

张根宝^{1,2}, 徐长节², 邓兰庭¹, 成稳林¹, 钟俊麟¹,
熊紫依¹, 金文英¹, 邓宗伟¹

(1.湖南城市学院土木工程学院,湖南 益阳 413000;2.华东交通大学交通工程博士后流动站,江西 南昌 330013)

摘要:水泥土桩和水泥土锚杆作为能量桩和能源锚杆等能源土工结构的应用场景日益丰富,其中兼具粘结材料和换热材料作用的水泥土需要满足力学性能和导热性能的双重要求。铁尾矿砂作为工业固废,其所含金属成分的导热性较好,将其作为水泥土中部分土体的替换材料,可改善水泥土的导热性能。对不同替代率下铁尾矿砂改性水泥土的微观结构及热力宏观性能进行了系统试验研究,探究了铁尾矿砂对水泥土导热和力学性能指标的影响机理。研究结果表明:增大铁尾矿砂替代率可以提升水泥土的导热系数,长期养护条件下最大增幅为77.4%。增大铁尾矿砂替代率对水泥土抗压强度有劣化作用,但最大降幅小于20%;对水泥土抗折强度具有增强作用,最大增幅达20.3%。微观结构分析发现,铁尾矿砂通过孔隙空间效应、介质填充效应和介质传输效应对水泥土导热性能产生影响;铁尾矿砂通过水化阻隔效应、重金属抢夺效应和活性矿物减损效应对水泥土力学性能产生影响。

关键词:水泥土;铁尾矿砂;替代率;导热系数;抗压强度;抗折强度;微观结构

能量桩和能源锚杆等综合承载和换热功能的能源土工结构是实现土木工程建设和浅层地热能开发协同的主要方式^[1-4],其组构特征具体表现为在原本只具有传递荷载作用的桩体和锚杆的灌浆料中置入具有传递热量作用的换热管。当桩体和锚杆的灌浆料为现场搅拌形成的水泥固化土时,就形成了水泥土桩和水泥土锚杆。为实现水泥土桩和水泥土锚杆向能量桩和能源锚杆转化,要求兼具传荷和换热作用的水泥土满足导热性能和力学性能双重要求。

尾矿砂是选矿作业中矿物含量较低而无法生产的部分,是工业固体废弃物(固废)的主要组成成分^[5]。大量尾矿砂堆积造成了土地占用、环境污染等诸多问题^[6-7],在土木工程

收稿日期:2024-05-07;修订日期:2024-07-13

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFC3009400);江西省博士后研究人员择优资助项目(2021KY59);湖南省大学生创新训练项目(20223987);湖南省教育厅科学研究重点项目(21A0511)

作者简介:张根宝(1988—),男,博士,副教授.E-mail:genbao@hncu.edu.cn

中对铁尾矿砂进行资源化利用^[8]成为未来促进双碳目标(碳达峰、碳中和)实现的一个有效途径。考虑到铁尾矿砂中含有相当的金属成分,其相对土体具有更好的导热性,将铁尾矿砂替代水泥土中的部分土体,形成铁尾矿砂改性水泥土,可为水泥土类能源土工结构提供更好的导热性能,但其对水泥土导热性能的提升效应及其对工程力学特性的影响机理仍有待深入研究。

关于水泥土力学性能^[9]、水泥土水化反应机理^[10-11]等方面的研究,已有大量文献报道;关于尾矿砂改性水泥土的研究则主要集中在其配比对力学性能的影响方面。2012年,张晓辉等^[12]从工程应用视角对比研究了水泥特细尾矿砂、水泥砂浆和水泥土的力学性能和抗冻性能,对特细尾矿砂水泥胶凝材料的拓展应用奠定了基础。胡建林等^[13]研究了铁尾矿砂改性水泥土的抗冻融耐久性,发现加入铁尾矿砂可降低水泥土的脆性指数,使其抗冻融能力得到有效提升。Song等^[14]研究了铁尾矿砂和纳米二氧化硅复合改性水泥土的力学性能,发现占土体质量20%的铁尾矿砂含量对其强度提升最明显。侯芮等^[15]研究了铁尾矿砂改性水泥土的力学性能,发现当铁尾矿砂掺量小于25%时,增加铁尾矿砂含量可提高水泥土的抗压和抗折强度。

目前,关于铁尾矿砂改性水泥土的导热性能研究尚未见报道,但对于未掺入尾矿砂的素水泥土(即仅由土体、水泥和水搅拌而成的水泥固化土)和其他尾矿砂改性水泥砂浆的导热特性已有部分研究。2016年,鲍旭明等^[16]关注水泥土在能源土工结构中作为导热介质的适用性,重点考察了土体含水量和水泥掺量对水泥固化软土导热系数的影响,发现增大土体含水量会降低水泥土的导热系数,增大水泥掺量则可提高水泥土的导热系数。2018年, Kim等^[17]综合研究了石英基尾矿砂和池塘灰联合改性水泥砂浆的导热和力学性能,发现此类改性水泥砂浆的力学性能指标没有明显劣化,但其导热系数明显高于仅掺有膨润土的常规水泥砂浆。2019年,宋新焯^[18]针对素水泥土的导热性能研究发现,水泥掺量和养护龄期对水泥土导热系数的影响均不明显,需要有专门的掺料才能有效提升水泥土的导热性能。

目前,关于铁尾矿砂改性水泥土的研究大多针对其宏观力学性能,对其导热性能的研究尚有待开展。本文研究了不同替代率下铁尾矿砂改性水泥土的导热系数等热力性能,抗压、抗折强度,以及微观结构演化过程,得到不同铁尾矿砂替代率对水泥土导热性能和力学性能的影响规律,揭示了铁尾矿砂改性水泥土的导热性能提升机理,以期相关结论为以水泥土为传荷-换热介质的能源土工结构的设计研究提供借鉴和参考。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验用土取自湖南城市学院土木楼南侧的规划预留地块,土样基本物理性质见表1,粒度分析测得其颗粒级配如图1。铁尾矿砂取自凉山彝族自治州某金属矿坑,铁尾矿砂改

表1 土样的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of soil sample

液限/%	塑限/%	天然含水率/%	天然密度/(g/cm ³)
35.24	18.98	23.98	1.554

性水泥土试样通过在土样中替换部分铁尾矿砂,并加入PO42.5普通硅酸盐水泥和水搅拌而成。在热力性能测试完成后,提取微量试样进行X射线衍射(XRD)分

析,测得其化学成分和含量,如表 2 和图 3 所示,粒度分析测得其颗粒级配如图 2.试验中,铁尾矿砂和土样的总质量(简称砂土总质量)保持恒定,仅改变铁尾矿砂和土样质量的相对比例(其中,铁尾矿砂占砂土总质量的比例即为铁尾矿砂替代率),水泥的掺量保持为砂土总质量的 30%,水的掺量保持为砂土总质量的 50%.各组试样的材料配合比如表 3 所示.

表 2 铁尾矿砂改性水泥土及铁尾矿砂的化学成分

Table 2 Chemical composition of iron tailings sand modified cemented soil and iron tailings sand

铁尾矿砂改性水泥土				铁尾矿砂			
成分	含量/%	成分	含量/%	成分	含量/%	成分	含量/%
SiO ₂	62	PrO _{1.83}	1	SiO ₂	39	Pr ₂ O ₃	9
CaCO ₃	36	CaF ₂	1	NaErF ₄	11	CaF ₂	8
Si	3	Cu ₅ FeS ₄	1	UO ₂	10	CuFeS ₂	5
UO ₂	1			Si	10	NaCl	3

表 3 试验中各组试样的材料配合比

Table 3 The material mix ratio of each group of samples in the test

水/(土+铁尾矿砂) 的质量比	水泥/(土+铁尾矿砂) 的质量比	土/(土+铁尾矿砂) 的质量比	铁尾矿砂/(土+铁尾矿砂) 的质量比(即替代率)
0.5	0.3	1.00	0.00
0.5	0.3	0.90	0.10
0.5	0.3	0.85	0.15
0.5	0.3	0.80	0.20
0.5	0.3	0.70	0.30
0.5	0.3	0.65	0.35
0.5	0.3	0.60	0.40
0.5	0.3	0.55	0.45
0.5	0.3	0.50	0.50
0.5	0.3	0.40	0.60
0.5	0.3	0.35	0.65
0.5	0.3	0.30	0.70

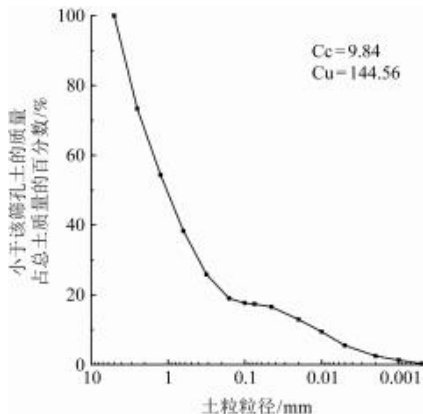


图 1 土样的颗粒级配曲线

Fig.1 Particle size distribution curve of soil sample

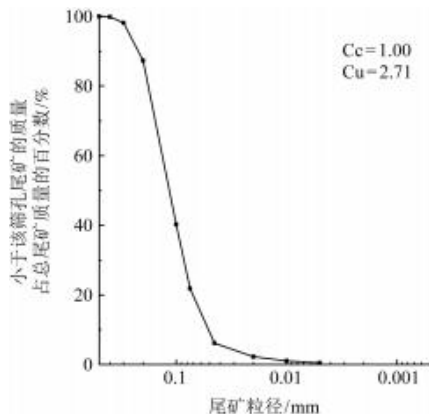


图 2 铁尾矿砂的颗粒级配曲线

Fig.2 Grain gradation curve of iron tailing sands

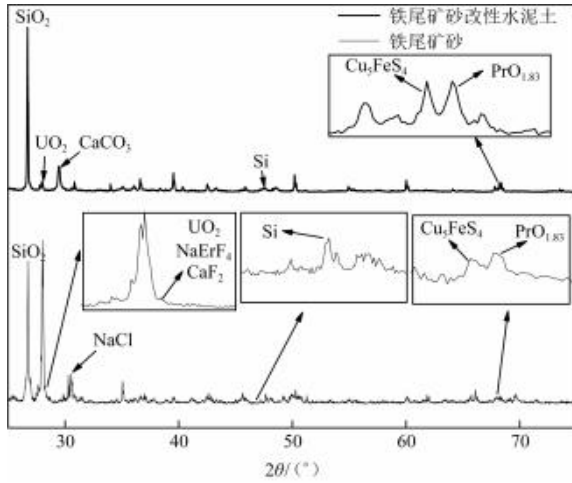


图3 铁尾矿砂及其改性水泥土的XRD分析结果

Fig.3 The XRD analysis results of iron tailings and modified cement soil

1.2 试验过程

1.2.1 试样制备

(1) 导热性能试样制备. 导热试样分为长期组试样和短期组试样, 试样尺寸均为 $300\text{mm} \times 300\text{mm} \times 30\text{mm}$, 每组试验制备两个平行试样. 制备完成后, 长期组试样放入标准养护室中养护 60d, 短期组试样放入标准养护室中养护 28d.

(2) 力学性能试样制备. 力学试样为标准抗压抗折试样. 参考水泥胶砂强度试验 (GB/T17671—2021)^[19] 的相关规定与流程, 试样尺寸为 $160\text{mm} \times 40\text{mm} \times 40\text{mm}$, 每组试验制备 3 个平行试样. 制备完成后, 将所有试样放入标准养护室中养护 28d (与短期组导热试样的养护龄期相同).

1.2.2 导热性能测试试验 根据 JGJ/T 233—2011《水泥土配合比设计规程》的要求, 对试样进行导热性能测试. 采用上海魅宇试验仪器有限公司生产的 DRCD-3030 型导热系数测定仪测定导热系数. 到养护龄期后, 短期组试样放入烘干箱内烘干 24h; 长期组试样在室内静置 48h, 然后再进行导热性能测试.

1.2.3 力学性能测试试验 根据 JGJ/T 233—2011《水泥土配合比设计规程》的要求, 对试样进行力学性能测试. 试验仪器采用型号为 WHY-300/10 的微机控制压力试验机. 到养护龄期后, 对 3 个平行试样分别测试抗压和抗折强度, 取 3 个平行试样测试结果的平均值作为试样强度.

1.2.4 微观测试试验 采用的微观测试试验主要采用 XRD、扫描电镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 和光学显微镜以及电子计算机断层扫描 (Computed Tomography, CT) 4 种测试方法. XRD 是一种通过仪器进行检测的光学分析法, 用于研究材料的成分、内部原子或分子的结构或形态等信息; 试验所用仪器型号为 Bruker D8 Advance; 取试样的块状平整面为样品, 扫描范围选择 $10^\circ \sim 80^\circ$, 扫描速度为 $10^\circ/\text{min}$. SEM 是一种利用扫描电子显微镜对材料进行微观形貌观察和成分分析的技术, 试验所用仪器型号为 Zeiss

Gemini 300; 试验所用光学显微镜仪器型号为 Olympus MVX10.CT 是一种利用 X 射线或 γ 射线等辐射源, 通过计算机断层扫描的方式, 获取被检测物体内部的结构信息的分析方法; 试验所用仪器型号为 skysCan2211.

2 试验结果

2.1 导热性能试验结果

针对长期组和短期组导热试样分别开展导热性能试验, 测得水泥土的导热系数如表 4、表 5 所示. 提升效果表示采用铁尾矿砂部分替代后的水泥土试样的导热系数相比未进行铁尾矿砂替换的水泥土试样的导热系数的增长率; 相应的变化趋势如图 4 所示. 可以看出, 两组导热系数变化趋势大致相同, 相比未掺入铁尾矿砂的素水泥土, 随着替代率增加, 铁尾矿砂改性水泥土导热系数整体均有所提升. 对于短期组试样, 铁尾矿砂对导热系数提升效果并不明显, 最大提升效果出现在 0.6 替代率下, 达到 40%; 对于长期组试样, 铁尾矿砂在替代率为 0.4 时即可达到超 70% 的导热系数提升效果. 值得说明的是, 在铁尾矿砂替代率为 0.5 时, 短期组和长期组试样导热系数均跌至谷点, 达到与素水泥土相当的水平.

表 4 长期组试样导热系数

Table 4 Long-term group sample thermal conductivity

土/(土+铁尾矿砂) 的质量比	铁尾矿砂/(土+铁尾矿砂) 的质量比(即替代率)	导热系数/(W/(m·K))	提升效果/%
1.00	0.00	0.27	0.0
0.90	0.10	0.34	25.9
0.85	0.15	0.30	11.1
0.80	0.20	0.31	14.8
0.70	0.30	0.41	51.9
0.65	0.35	0.44	63.0
0.60	0.40	0.47	74.1
0.55	0.45	0.41	51.9
0.50	0.50	0.33	22.2
0.40	0.60	0.43	59.3
0.35	0.65	0.44	63.0
0.30	0.70	0.48	77.8

表 5 短期组试样导热系数

Table 5 Short-term group sample thermal conductivity

土/(土+铁尾矿砂) 的质量比	铁尾矿砂/(土+铁尾矿砂) 的质量比(即替代率)	导热系数/(W/(m·K))	提升效果/%
1.00	0.00	0.20	0.0
0.90	0.10	0.19	-5.0
0.85	0.15	0.20	0.0
0.80	0.20	0.22	10.0
0.75	0.25	0.23	15.0
0.70	0.30	0.25	25.0
0.60	0.40	0.25	25.0
0.50	0.50	0.20	0.0
0.40	0.60	0.28	40.0

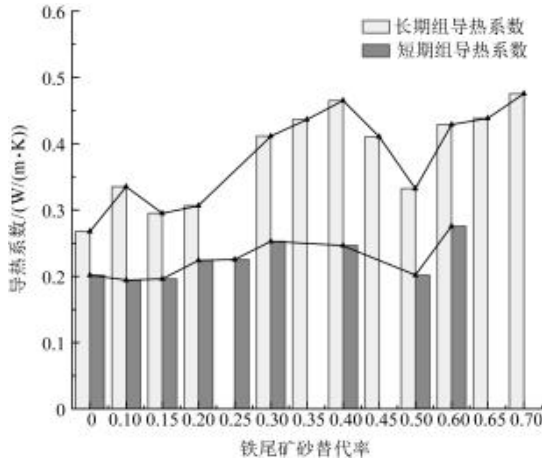


图4 导热系数随替代率的变化关系

Fig.4 Relationship between thermal conductivity and substitution rate

2.2 力学性能试验结果

不同铁尾矿砂替代率下水泥土试样的抗压强度及抗折强度如表6所示.提升效果表示水泥土采用铁尾矿砂部分替代后的水泥土试样的强度指标相比未进行铁尾矿砂替换的水泥土试样的强度指标的增长率;对应的变化趋势如图5和图6所示.随着铁尾矿砂替代率增加,水泥土试样的抗折强度在1.3~1.6MPa间变化,水泥土试样的抗压强度在6.6~9.0MPa间变化.总体上,相比未掺入铁尾矿砂的素水泥土,掺入铁尾矿砂对水泥土的抗压强度有劣化作用,最大可造成18.4%的降幅;掺入铁尾矿砂对水泥土的抗折强度则有增强作用,最大增幅达到20.3%.

表6 力学性能指标

Table 6 Mechanical performance indices

土/(土+铁尾矿砂) 的质量比	铁尾矿砂/(土+铁尾矿砂) 的质量比(即替代率)	抗折强度/MPa	提升效果/%	抗压强度/MPa	提升效果/%
1.00	0.00	1.33	0.0	8.58	0.0
0.90	0.10	1.50	12.8	8.10	-5.6
0.85	0.15	1.37	3.0	8.05	-6.2
0.80	0.20	1.50	12.8	7.95	-7.3
0.70	0.30	1.60	20.3	7.90	-7.9
0.65	0.35	1.47	14.0	7.32	-14.7
0.60	0.40	1.43	7.5	7.68	-11.7
0.55	0.45	1.50	17.0	7.28	-17.9
0.50	0.50	1.40	5.3	7.37	-14.1
0.40	0.60	1.51	18.0	7.98	-7.0
0.35	0.65	1.54	15.8	7.30	-15.0
0.30	0.70	1.57	18.0	7.00	-18.4

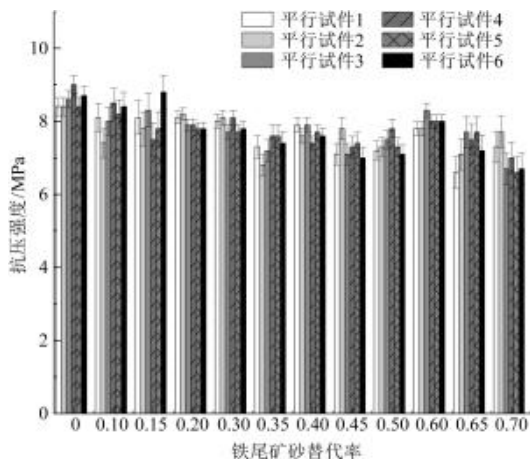


图5 抗压强度与替代率的关系

Fig.5 Relationship between compressive strength and substitution rate

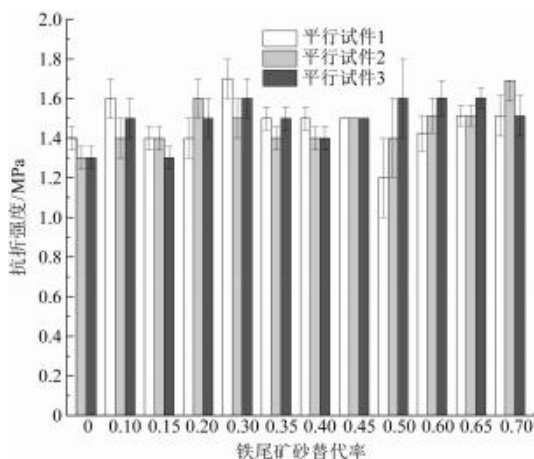


图6 抗折强度与替代率的关系

Fig.6 Relationship between flexural strength and substitution rate

3 试验结果分析

3.1 导热试验结果

3.1.1 基本效应 从土-水泥土-铁尾矿砂改性水泥土 3 个层次的孔隙特征分析出发,根据水泥固化材料导热原理,将铁尾矿砂改性水泥土导热性能来源归纳为 3 种递进式基本效应,即孔隙空间效应、介质填充效应和介质传输效应。

(1) 孔隙空间效应

铁尾矿砂改性水泥土的孔隙分布决定了导热介质的赋存空间^[20]。土样初始状态较为松散,孔隙空间相对富余;水泥水化反应、水泥土水化反应(水泥水化反应产生的氢氧化钙进一步与黏土矿物发生离子交换反应、硬凝反应和碳酸钙反应)均产生胶凝硬化产物,孔隙空间持续减小。此外,随着铁尾矿砂替代部分土颗粒,原有黏土颗粒体系级配变化引起初始孔隙减小,同时土-砂颗粒体系的整体比表面积加大,导致水泥水化产物与黏土矿物的上述系列反应更加充分,孔隙空间进一步减小。

(2) 介质填充效应

孔隙空间演化过程伴随着填充介质的变化^[18]。土样初始孔隙中主要填充介质为孔隙水和孔隙气。水泥水化反应和水泥土水化反应大量消耗孔隙水,代之以水泥水化胶凝硬化产物(C-S-H、C₃AH₆、C₄AF、AFt)和水泥土水化结晶化合物(CSH、CAH、CASH 和碳酸钙等)。铁尾矿砂对部分土颗粒的替代,在上述反应中引入了更多种类的金属离子,离子交换反应和碳酸结晶反应更为多源,产生多种类型的结晶化合物。孔隙填充介质逐渐由水气主导转变为固体结晶物主导。

(3) 介质传输效应

水泥土骨架和孔隙填充物共同组成了其传热介质。传热方式主要包括土骨架中的固-固传热,孔隙内的液-液、气-气、气-液传热,以及孔隙与固壁间的固-液、固-气传热等^[21]。从

材料相态属性看,按照导热系数排序:铁尾矿砂>土颗粒,孔隙水>孔隙气>固体水化物;从游离电荷密度看,金属离子更多的铁尾矿砂改性水泥土的水化物>素水泥土的水化物>黏土矿物;从界面传热属性看,在同等接触材料情况下,水泥土水化物参与的界面>铁尾矿砂参与的界面>黏土矿物参与的界面。

3.1.2 微观结构分析

(1) SEM 和光学显微镜分析

利用光学显微镜和扫描电镜(SEM)对不同替代率下铁尾矿砂改性水泥土的微观结构进行分析,图7和图8分别为典型替代率下试样的扫描电镜图和光学显微镜图。可以发

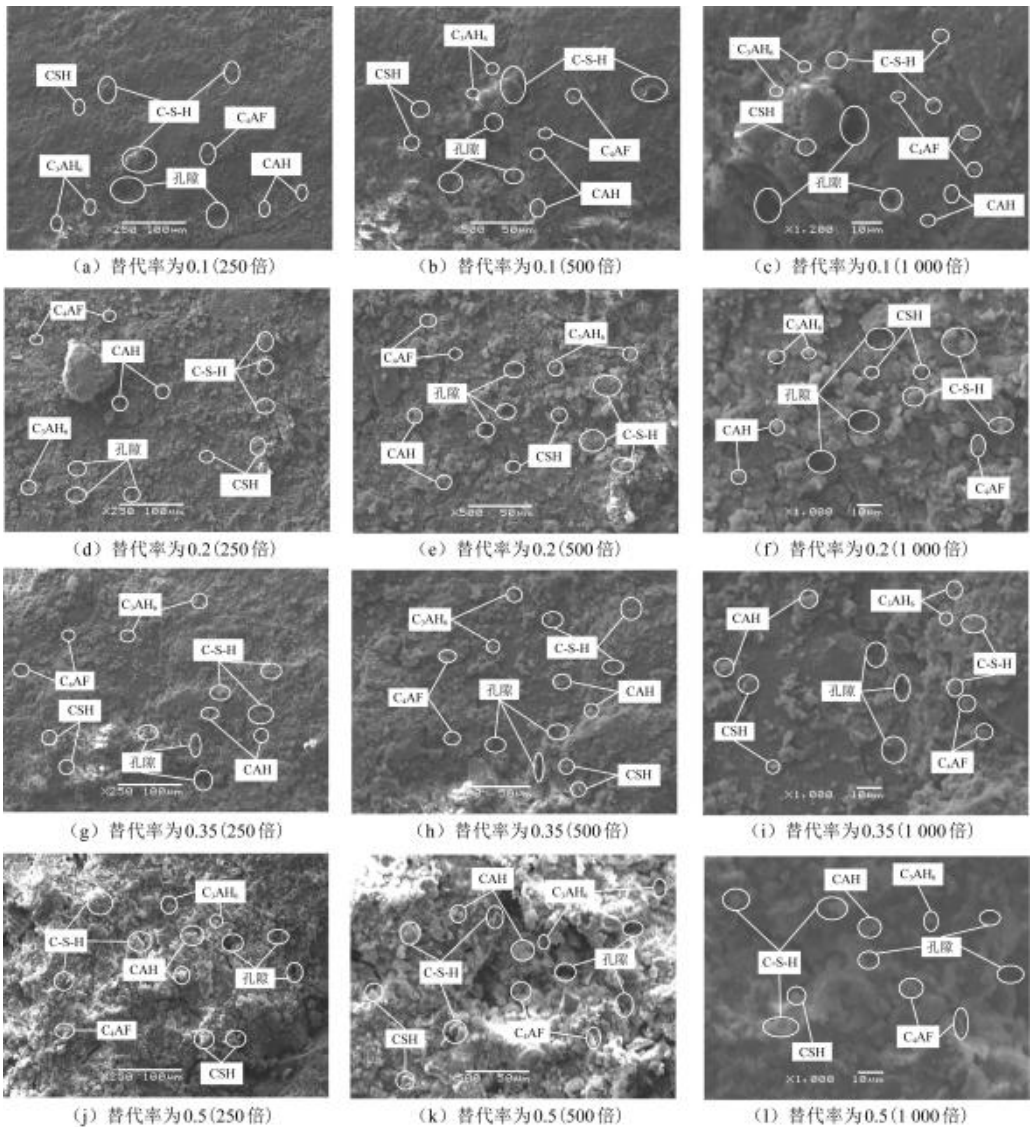


图7 不同替代率下铁尾矿砂改性水泥土的扫描电镜

Fig.7 SEM images of iron tailing sands modified cemented soils under different substitution rates

现,当替代率较低时(<0.2),试样表面稀疏,孔隙空间较大,水泥水化反应消耗孔隙水,填充介质由孔隙水变为孔隙气和水化结晶物(包括水泥水化胶凝物 and 水泥土水化结晶物),介质填充效应占主导,导热系数缓慢提升(图4).当替代率为 $0.2\sim 0.4$ 时,黏土矿物减少,水泥土水化结晶物减少,孔隙填充介质中的铁尾矿砂增加,热量的传输模式改变,介质填充和介质传输效应共同主导,导热系数加速提升.

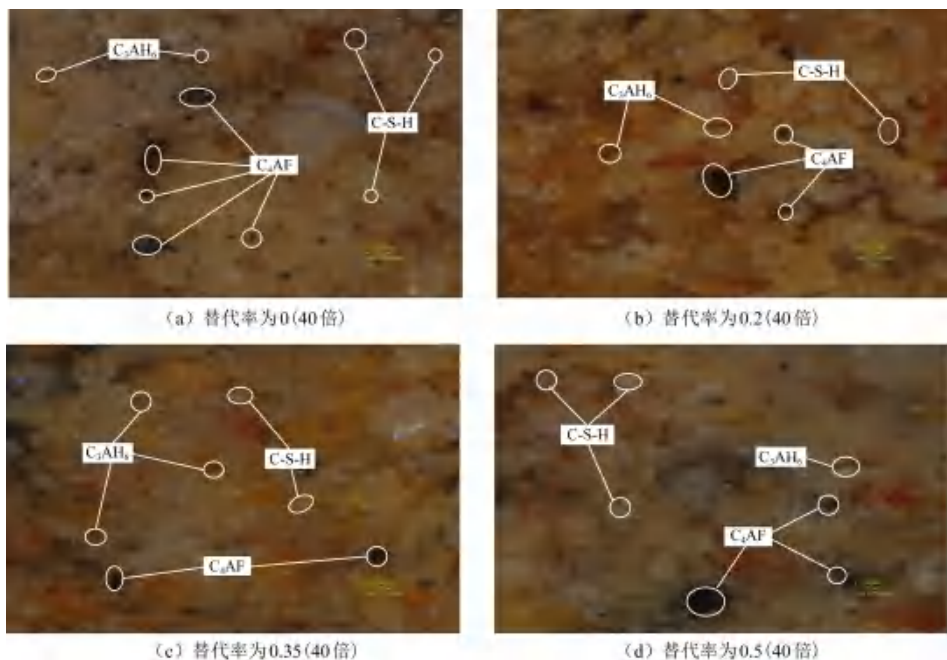


图8 不同替代率下铁尾矿砂改性水泥土的光学显微镜

Fig.8 Optical microscope images of iron tailing sand modified cemented soils under different substitution rates

值得指出的是,在试验所采用的替代率区间内,短期组试样导热系数的提升效果低于长期组试样的提升效果,原因在于短期组试样测试前经过烘箱烘干,孔隙介质中无孔隙水,而经过自然风干的长期组试样中仍残留部分孔隙水.当替代率为 $0.4\sim 0.5$ 时,土颗粒被铁尾矿砂大量替代,黏土矿物含量大幅降低,比表面积减小,水泥土水化产物数量减少,孔隙空间效应占主导,导热系数出现明显下降.当替代率继续增大($0.5\sim 0.7$)时,铁尾矿砂引起的介质填充和传输效应逐渐抵消孔隙空间效应,导热系数再次提升.

(2) CT 分析

利用 CT 技术对不同替代率下铁尾矿砂改性水泥土试样的孔隙结构进行分析.图9为典型替代率下水泥土试样 CT 图.CT 图中圆框标记部分代表孔隙空间.可以看出,随着替代率增加,对应孔隙空间基本效应演化过程,孔隙空间整体经历先增后减再增的变化,孔隙分布则相应经历大孔隙零散分布、大/小孔隙均匀分布、大孔隙集聚分布和微孔隙均匀分布的变化.特别是替代率为 0.5 的试样,因为铁尾矿砂对土颗粒的大量替代,其内部孔隙分布均匀,且均为微孔隙,需要黏土矿物参与的水泥土水化产物大幅减少,微孔隙内主

要为孔隙气,导致其综合导热系数降低至谷点.

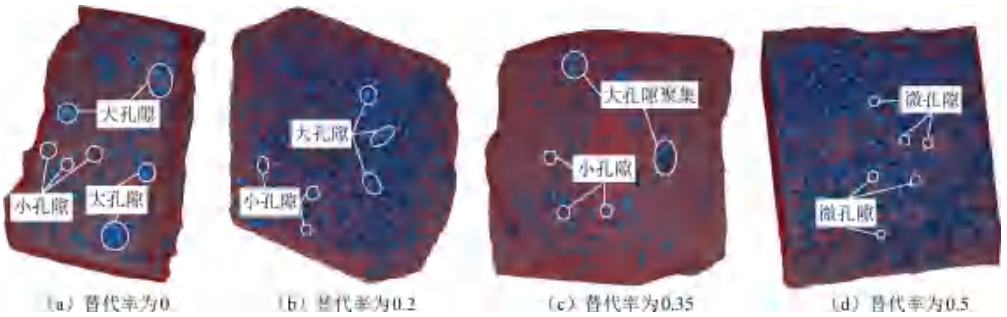


图9 不同替代率下铁尾矿砂改性水泥土的 CT 图

Fig.9 CT images of iron tailing sand modified cemented soils under different substitution rates

3.2 力学试验结果分析

3.2.1 基本效应

根据水泥土试样微观结构测试结果和水泥土水化反应等基本原理进行分析,可以将铁尾矿砂改性水泥土宏观力学性能指标演化机理归纳为以下 3 种基本效应.

(1) 水化阻隔效应

水泥水化反应产生多种可进一步硬化的胶凝化合物,水泥土水化反应产生多种结晶化合物,二者与土颗粒(包括黏土颗粒和铁尾矿砂)共同组成水泥土骨架结构^[22].铁尾矿砂中的小颗粒物将本可参与水化反应的部分水泥颗粒包裹住,从而阻止了这一部分水泥颗粒发生水化反应,造成水泥水化胶凝物减少;水泥土骨架整体孔隙空间较大,填充效果不佳,压缩性增大;胶结物数量受限,抗拉能力降低.

(2) 重金属抢夺效应

水泥水化产物和水泥土水化产物中的硅酸钙水合物 CSH 是水泥土强度和粘聚力的主要来源,起着稳定水合物中所含重金属的作用^[23].铁尾矿砂对部分土颗粒的替代,在水合物引入了大量铁、铬、铜等重金属,这些重金属抢夺了本可参与水泥土水化反应的氢氧化钙,造成水泥土水化反应产生的结晶化合物数量减少^[22],水泥土骨架中的胶结物减少,孔隙结构密实度降低,引起强度指标劣化.

(3) 活性矿物减损效应

由于铁尾矿砂中大部分为低活性石英矿物^[10],相对于黏土矿物,其水化反应条件严苛,无法充分发生类似水泥土水化的系列反应,大部分铁尾矿砂微颗粒游离在水化产物之中,封闭了水泥水化胶凝物的吸附活性,降低了水泥土水化结晶物的产量,阻碍了水泥水化氢氧化钙与空气的接触以及碳酸钙的形成^[22],从而造成水泥土中硬凝产物数量减损,不利于水泥土强度生长.

3.2.2 微观结构分析

(1) SEM 和光学显微镜分析

铁尾矿砂替代率较低(<0.2)时,因为水泥水化阻隔效应,其存在消耗了水泥水化产生的 CSH 等胶凝物,骨架胶结缺乏,试样抗拉和抗压强度均有所降低;当替代率为 $0.20 \sim$

0.35 时,孔隙被剩余铁尾矿砂填充,孔隙体积明显减少,密实度增加,骨架颗粒摩擦锁固增强,抗拉强度有所增长;但重金属抢夺和水化阻隔两种劣化效应叠加,水化产物数量依然受到约束,抗压强度并未明显增长.当替代率继续增加(0.35~0.70)时,铁尾矿砂大量替代土颗粒,作为砂土混合物的试样骨架进一步强化,骨架颗粒摩擦锁固大幅增强,基本可以抵消水化阻隔等上述 3 种劣化叠加效应,从而导致试样力学性能指标基本维持稳定.

(2)CT 分析

在替代率较低(0.2)时,铁尾矿砂引起的 3 种劣化效应并未占主导,大孔隙附近的水泥水化产物和水泥土水化产物生长并填充大孔隙,孔隙大小分布逐渐均匀;替代率继续增加(0.35),较小孔隙被铁尾矿砂填充而逐渐消失,大孔隙聚集区的水化反应受到上述 3 种劣化效应的约束,未能得到水化产物的有效填充;当替代率进一步增加(0.5),水泥水化和水泥土水化反应以及上述劣化效应已经发展殆尽,铁尾矿砂开始过剩,对小孔隙进一步填充,形成大小和分布都更为均匀的微孔隙.

4 结论

开展了铁尾矿砂改性水泥土的导热性能和力学性能测试,对典型替代率下的水泥土试样进行了微观形貌与孔隙结构分析,并探究了铁尾矿砂替代率变化对改性水泥土导热性能和力学性能的影响规律,得出主要结论如下:

(1)在长期和短期养护条件下,铁尾矿砂的掺入均可提升水泥土的导热系数,长期养护条件下提升效果更为显著,最高增幅可达 77.4%;

(2)铁尾矿砂替代率的增大对水泥土抗折强度具有增强作用,抗折强度最高增长 20.3%;对水泥土的抗压强度具有劣化作用,但抗压强度折减保持在 20% 以下;

(3)随着铁尾矿砂替代率的增加,试样的孔隙空间整体经历先增后减再增的变化,孔隙分布则相应经历大孔隙零散分布、大/小孔隙均匀分布、大孔隙集聚分布和微孔隙均匀分布的变化;

(4)铁尾矿砂通过孔隙空间效应、介质填充效应和介质传输效应对水泥土导热性能产生影响,铁尾矿砂通过水化阻隔效应、重金属抢夺效应和活性矿物减损效应对水泥土力学性能产生影响.

参考文献

- [1] 黄芸,赵蕾,王振宇,等.基于实测的桩基埋管换热性能和温变沉降特征分析[J].安全与环境,2017,17(6):2206-2211
Huang Yun,Zhao Lei,Wang Zhenyu, et al. In-situ test analysis of the heat transfer features of the energy piles and their settlement due to cyclic temperature variations[J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(6): 2206-2211
- [2] Han C, Yu X. Analyses of the thermo-hydro-mechanical responses of energy pile subjected to non-isothermal heat exchange condition[J]. Renewable Energy, 2020, 157: 150-163
- [3] Ounaies W. Geotechnical impacts of energy piles[J]. International Journal of Civil Engineering, 2019, 6(2): 1-3
- [4] 吴冠中,张丹,程健,等.不同埋管形式的预制能量管桩热响应试验研究[J].防灾减灾工程学报,2019,39(4):615-621
Wu Guangzhong, Zhang Dan, Cheng Jian, et al. Thermal response test on PHC energy piles with different configuration of heat exchange loop[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(4): 615-621
- [5] 张以河,胡攀,张娜,等.铁矿废石及尾矿资源综合利用与绿色矿山建设[J].资源与产业,2019,21(3):1-13

- Zhang Yihe, Hu Pan, Zhang Na, et al. Comprehensive use of iron ore wastes and tailing and green mine construction [J]. Resources and Industry, 2019, 21(3): 1-13
- [6] 胡木刚, 尚修宇, 初慧. 金矿尾矿综合利用途径研究与展望 [J]. 世界环境, 2018, (5): 26-30
Hu Shugang, Shang Xiuyu, Chu Hui. Study and prospects of the approach of comprehensive utilization of gold tailings [J]. World Environment, 2018, (5): 26-30
- [7] 刘文博, 姚华彦, 王静峰, 等. 铁尾矿资源化综合利用现状 [J]. 材料导报, 2020, 34(增1): 268-270
Liu Wenbo, Yao Huayan, Wang Jingfeng, et al. Current situation of comprehensive utilization of iron tailings [J]. Materials Reports, 2020, 34(S1): 268-270
- [8] Shettima A U, Hussin M W, Ahmad Y, et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2016, 120: 72-79
- [9] 陈四利, 史建军, 于涛, 等. 冻融循环对水泥土力学特性的影响 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(2): 343-349
Chen Sili, Shi Jianjun, Yu Tao, et al. Effect of freezing-thawing cycle on the mechanical behaviors of cemented soil [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(2): 343-349
- [10] 侯云芬, 刘锦涛, 赵思儒, 等. 铁尾矿粉对水泥砂浆性能的影响及机理分析 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(5): 1149-1157
Hou Yunfen, Liu Jintao, Zhao Siru, et al. Effect mechanism of iron tailing powder on cement mortar properties [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(5): 1149-1157
- [11] 王旭. 铁尾矿粉在水泥基材料中的作用机理 [D]. 武汉: 武汉大学, 2019
Wang Xu. Mechanism of iron tailings powder in cement-based materials [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019
- [12] 张晓辉, 宁宝宽. 水泥稳定铁尾矿砂的力学特性研究 [J]. 低温建筑技术, 2012, 34(9): 26-27
Zhang Xiaohui, Ning Baokuan. Study on mechanical properties of cement stabilized iron tailings [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2012, 34(9): 26-27
- [13] 胡建林, 高鹏飞, 张玉龙. 冻融循环作用下铁尾矿砂水泥土强度及变形特性研究 [J]. 森林工程, 2022, 38(5): 121-127+136
Hu Jianlin, Gao Pengfei, Zhang Yulong, et al. Study on strength and deformation characteristics of cement soil of iron tailing sand under freeze-thaw cycles [J]. Forest Engineering, 2022, 38(5): 121-127+136
- [14] Song X, Xu H, Zhou D, et al. Mechanical performance and microscopic mechanism of coastal cemented soil modified by iron tailings and nano silic [J]. Crystals, 2021, 11(11): 1331
- [15] 侯芮, 陈四利, 马啸, 等. 铁尾矿砂水泥复合土的力学性能研究 [J]. 中外公路, 2019, 39(1): 206-209
Hou Rui, Chen Sili, Ma Xiao, et al. Research on mechanical properties of iron tailings composite cemented soil [J]. Journal of China and Foreign Highway, 2019, 39(1): 206-209
- [16] 鲍旭明, 邓岳保, 李语默, 等. 宁波软土及其水泥改良土的导热系数测试分析 [J]. 浙江建筑, 2016, 33(8): 9-12
Bao Xuming, Deng Yuebao, Li Yumo, et al. Testing and analysis on the thermal conductivity for the mollisol and improved soil by concrete in Ningbo [J]. Zhejiang Construction, 2016, 33(8): 9-12
- [17] Kim Y S, Do T M, Kim M J, et al. Utilization of byproduct in controlled low-strength material for geothermal systems: engineering performances, environmental impact, and cost analysis [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 909-920
- [18] 宋新焯. 改性生土的导热特性研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019
Song Xinye. Study on thermal conductivity of modified raw soil [D]. Xiayang: Northwest A&F University, 2019
- [19] 水泥胶砂强度检验方法 (ISO 法): GB/T 17671—2021 [S]
Test method of cement mortar strength (ISO method): GB/T 17671—2021 [S]
- [20] 徐云山, 孙德安, 曾召田, 等. 膨润土热传导性能的温度效应 [J]. 岩土力学, 2020, 41(1): 39-45+56
Xu Yunshan, Sun Dean, Zeng Zhaotian, et al. Temperature effect on thermal conductivity of bentonites [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 39-45+56
- [21] 唐盼盼, 徐洁, 卢永洪. 含水率及温度影响非饱和土导热系数的试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(4): 678-683
Tang Panpan, Xu Jie, Lu Yonghong. Experimental study on effects of water content and temperature on thermal conductivity of unsaturated soils [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2019, 39(4): 678-683
- [22] 郇建俊. 水泥土的强度特性、固结机理与本构关系的研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005

Li Jianjun. Research on the characters in strength, concretion mechanism and the constitutive relationship of the cement-loess[D]. Xi'an University of Architecture and Technology, 2005

- [23] Chen Q Y, Tyrer M, Hills C D, et al. Immobilization of heavy metal in cement-based solidification/stabilization: A review [J]. Waste management, 2009, 29(1): 390-403

Impact of the Substitution Rate of Iron Tailing Sands on the Thermal-Mechanical Properties of Cemented Soils

ZHANG Genbao^{1,2}, XU Changjie², DENG Lanting¹, CHENG Wenlin¹,
ZHONG Junlin¹, XIONG Ziyi¹, JIN Wenying¹, DENG Zongwei¹

(1. College of Civil Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China; 2. Post Doctoral Station of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract

With the increasingly versatile application scenarios of cemented soils piles and cemented soils anchor used as energy piles and energy anchors and other energy geotechnical structures, the cemented soils serving as binders and heat change materials are required to meet the dual requirements of mechanical and thermal properties. As a type of industrial solid waste, iron tailing sands demonstrate good thermal conductivity due to its contented metal components, and deemed as a potential substitute of a part of soils to improve the thermal conductivity of cemented soils. In this study, an experimental investigation was carried out to explore the microstructure and the thermal-mechanical properties of cemented soils with different substitution rate of iron tailing sands. Hence, the impact of substitution rate of iron tailing sands on the thermal and mechanical performance indices of cemented soils was investigated. The following concluded remarks can be found. The increasing substitution rate of iron tailing sands leads to the improvement of the thermal conductivity of cemented soils, in which a maximum increase of 77.4% can be found with specimens under long-term curing condition. The increasing substitution rate of iron tailing sands results in the deduction of the compressive strength of cemented soils, with the maximum reduction of 18.4%; but results in the enhancement of the flexural strength of cemented soils, with the maximum increment of 20.3%. The microstructural analyses reveals that the substitution rate of iron tailing sands affects the thermal conductivity of cemented soils via pore space effect, medium filling effect, and medium transmission effect; and affects the mechanical performance of cemented soils via the effect of hindrance of cement hydration, the effect of competition effect for heavy metals, and the effect of reduction of active minerals.

Keywords: cemented soils; iron tailing sands; substitution rate; thermal conductivity; compressive strength; flexural strength; microstructure