

DOI: 10.11779/CJGE20240058

# 游离氧化铁赋存形式对脱吸湿条件下红黏土热传导性能的影响

徐云山<sup>1,2</sup>, 肖子龙<sup>1</sup>, 孙德安<sup>\*2</sup>, 李建平<sup>1</sup>

(1. 福建理工大学地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350108; 2. 上海大学土木工程系, 上海 200444)

**摘要:** 游离氧化铁赋存形式对红黏土热传导性能的影响尚不清楚。利用热探针法对去除游离氧化铁前后原状和压实样的热传导性能进行测试, 并结合红黏土在脱、吸湿条件下微观结构特征的演化, 探讨了游离氧化铁和制样方式对其热传导性能的影响机制。热传导性能试验结果表明, 相同含水率下压实红黏土的热传导系数小于原状样, 平均约小4.8%。同条件下去铁后原状样的热传导系数比未去铁试样平均高约29.3%, 去除游离氧化铁后原状样的热传导系数在含水率变化曲线上呈现滞回减弱现象。微观试验结果表明, 去铁后原状试样的孔隙数量明显少于未去铁试样, 未去铁原状样存在少量孔径约为10 μm的较大孔隙, 去除游离氧化铁后原状样中较大的孔隙基本上消失。游离氧化铁对红黏土试样热传导性能的影响机制可理解为, 游离氧化铁以“包膜”“桥接”和“附着”形式将土粒或团聚体集聚胶结起来, 去铁后, 部分较大团聚体分散为较小团聚体或土粒, 充填土中较大孔隙, 从而增加土颗粒间的接触与传热路径。

**关键词:** 红黏土; 游离氧化铁; 赋存形式; 热传导性能; 土体微观结构

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)04-0811-09

作者简介: 徐云山(1990—), 男, 博士, 副教授, 主要从事特殊土的工程特性与微观机制、非饱和土力学等方面的教学和科研工作。E-mail: xuyunshanf@163.com。

## Effects of occurrence form of free iron oxide on thermal conductivity of lateritic clay during drying and wetting conditions

XU Yunshan<sup>1,2</sup>, XIAO Zilong<sup>1</sup>, SUN Dean<sup>2</sup>, LI Jianping<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Underground Engineering of Fujian Provincial Universities, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

**Abstract:** The influences of occurrence form of free iron oxide (FIO) on the thermal conductivity of lateritic clay are still unclear. In this study, the thermal probe method is used to measure the thermal conductivity (TC) of undisturbed and compacted specimens before and after removing FIO. Combined with the evolution of microstructural characteristics, the influence mechanism of FIO and the specimen preparation method on TC is investigated. The thermal conductivity test results show that the TC of compacted specimens is lower than that of undisturbed specimens (US) under the same water content, with an average decrease of about 4.8%. After removing FIO, the TC of the US significantly increases, with an average increase of about 29.3%. Moreover, the hysteresis phenomenon between the TC and the volumetric water content of US after FIO removal is weakened. The microscopic test results show that the pore number in US after FIO removal is significantly less than that in untreated specimens. There are a small number of larger pores with a pore size of ~10 μm in US without FIO removal. The larger pores are basically eliminated in US after FIO removal. The mechanism by which FIO affects the TC of lateritic clay can be understood as: FIO can aggregate and bond soil particles or aggregates in the form of "encapsulation", "bridging", and "attachment". After removing FIO, some larger aggregates are dispersed into smaller aggregates or soil particles, which in turn fill the larger pores, increasing the contact and heat transfer paths between soil particles.

**Key words:** lateritic clay; free iron oxide; occurrence form; thermal conductivity; soil microstructure

## 0 引言

红黏土主要由碳酸盐岩在湿热气候下经过风化、红土化作用下形成的, 其广泛分布于中国南部、日本

基金项目: 国家自然科学基金项目(42202295, 42207230); 福建省自然科学基金项目(2021J05219)

收稿日期: 2024-01-17

\*通信作者(E-mail: sundean@shu.edu.cn)

西南部、南美、东非、南非以及泰国等热带、亚热带地区<sup>[1-5]</sup>。中国红黏土分布面积约为  $200 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 主要集中分布在广西、广东、湖南、云南和贵州等地区, 经常被用作地基、路基、坝基和地源热泵系统等各类工程的回填材料<sup>[6]</sup>。

在自然状态下, 红黏土具有高含水率、高孔隙比和高液塑限等较差的物理特性, 同时又表现出低压缩性、高分散性和高强度等较好的物理与力学性质<sup>[7]</sup>。已有研究表明, 红黏土中存在特殊的胶结物质(如游离氧化铁), 它会以不同的形式胶结土壤颗粒, 对其工程性质造成不同程度的影响<sup>[8-9]</sup>。在实际工程中, 游离氧化铁的存在可改善红黏土的工程性质, 但它也会受物理化学环境的影响而发生不同程度的退化, 最终影响土体的理化性质<sup>[10-11]</sup>。譬如, 大气污染形成的酸雨以及较高的地层温度均会使得土中游离氧化铁发生质变<sup>[12]</sup>。在过去的几十年里, 有关游离氧化铁对红黏土理化性质、微观结构特征和水力-力学特性的影响研究取得了较好的成果。牛庚等<sup>[13]</sup>研究了游离氧化铁对红黏土持水特性的影响, 并从微观角度分析了去铁前后红黏土孔径分布的变化。张文博等<sup>[14]</sup>利用化学淋溶法对原状土样中的游离氧化铁进行去除, 分析了不同淋溶时间对红黏土物理力学特性及微观孔隙结构的影响, 发现红黏土中内部孔隙随着淋溶时间的增长而增大, 土中的粒团-堆叠结构也随之转变为聚集体-松散颗粒状结构。张先伟等<sup>[15]</sup>探讨了红黏土中氧化铁胶体界面活性和胶结特征, 并分析了其与矿物成分的相互作用机制, 发现红黏土微观结构特征变化的本质是通过改变颗粒联结状态和粒间力实现的。刘莉等<sup>[16]</sup>研究发现, 经过去铁处理后的红黏土, 其收缩率明显高于去铁前, 主要原因可归结为游离氧化铁的胶结作用抑制了红黏土的收缩性。刘鹏等<sup>[17]</sup>试验研究了红黏土在浸泡条件下铁离子的迁移特性, 发现随着击实功的减小、土体初始含水率及温度的升高, 土中铁离子迁移量随之增多。

土中游离氧化铁的赋存形式主要包含 3 类: ①通过分子间吸引力和静电吸附等作用, 将土颗粒或团集体以“桥接”形式连接, 在海相黏土中居多<sup>[18]</sup>; ②土壤颗粒被游离氧化铁包覆形成更大尺寸的团集体, 该类型称作“包膜”形式, 主要赋存于红黏土中<sup>[10]</sup>; ③游离氧化铁以独立的结晶颗粒附着于土壤颗粒上或填充在孔隙中, 该类型在热带氧化土中常有报道<sup>[19]</sup>。为此, 一些学者探讨了游离氧化铁的赋存形式对红黏土工程性质的影响。Zhang 等<sup>[20]</sup>对比研究了湛江和龙门红黏土去除游离氧化铁前、后的理化指标、矿物组成及微观特征, 并探讨了游离氧化铁的胶结机制, 研究发现湛江红黏土中游离氧化铁主要以“桥接”的形式

存在, 龙门红黏土中游离氧化铁则多以“包膜”的形式存在, 且“包膜”的胶结作用要强于“桥接”形式。Farouki<sup>[21]</sup>指出, 土颗粒间连接形式和分布特征的变化会影响土中热流传输和热量存储。然而, 针对游离氧化铁形成的胶结作用及其颗粒间特殊的连接方式对红黏土热传导性能的影响尚不清楚, 而且大多数相关研究是针对重塑土样(压实或击实样)开展探究的。原状红黏土在经历重塑过程之后, 其内部的黏粒团聚体会遭到破坏, 使得红黏土孔隙增大、黏聚力降低同时颗粒间的摩擦增大<sup>[22]</sup>, 是否也会对红黏土热传导性能造成影响? 在工程实践中, 土体热传导性能是评价地下热量传导效率的重要热工指标, 对核废料深地质处置<sup>[23]</sup>、联络通道人工冻结<sup>[24]</sup>、地下高压线缆散热<sup>[25]</sup>及深部矿产资源开发<sup>[26]</sup>等热工项目的传热分析、模型建立和合理设计具有重要意义。目前, 国内外学者对不同土体热传导性能展开了大量研究探讨, 发现热传导性能受土体含水率、干密度、矿物组成及环境温度等多种因素的影响<sup>[27-30]</sup>。但是, 针对游离氧化铁赋存形式对原状和压实红黏土热传导性能的影响及内在机制的研究尚不充分。

为此, 本文利用热探针法对红黏土热传导性能进行测试, 探究了制样方式(原状和压实样)和游离氧化铁赋存形式对红黏土热传导性能的影响机制, 得到了去铁前、后原状和压实红黏土在脱、吸湿路径下热传导性能参数的演化规律。此外, 对部分试样进行了压汞和扫描电镜试验, 结合去除游离氧化铁前、后原状和压实样微观结构的变化特征, 重点探讨了游离氧化铁对红黏土热传导性能影响的微观机制。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

红黏土试样取自于广西师范大学雁山校区图书馆地址, 深度约为地下 3 m 处, 土样呈褐红色, 切面光滑, 黏性较强, 属于典型的碳酸盐岩残坡积红土。在进行试验前, 对部分土样进行风干、碾散和过筛处理, 然后将其均匀混合以供后续试验使用。经试验测定, 得到了供试土样的基本理化性质指标, 详见表 1~3。

### 1.2 原状和压实试样制备

试验土样包含原状和压实红黏土。原状红黏土采用挖坑取土法取得, 即利用定制的环刀(内径为 70 mm, 高度为 52 mm)压入目标土层进行取样, 随即用保鲜膜密封包裹好, 以供室内热传导性能测试。经烘干法测定, 原状红黏土试样的天然含水率和干密度分别为 27.5% 和  $1.55 \text{ g/cm}^3$ 。压实红黏土则利用静压法制得, 即在原状样相同深度附近处取适量的扰动土样,

表1 试验土样基本物性指标

Table 1 Physical property indexes of soil specimens

土粒相对质量密度	液限/%	塑限/%	缩限/%	体缩率/%	收缩系数	自由膨胀率/%	粒径分布/%		
							2~0.05 mm	2~0.05 mm	2~0.05 mm
2.74	61.8	38.1	27.1	15.51	0.23	25	24.95	24.95	24.95

表2 试验土样化学成分

Table 2 Chemical composition of soil specimens 单位: %

红黏土	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	其他
去铁前原状样	26.68	7.19	55.81	0.39	0.56	3.1	0.32	5.95
去铁后原状样	23.54	0.53	60.35	0.13	0.05	4.21	2.86	8.33

表3 试验土样矿物组成

Table 3 Mineral composition of soil specimens 单位: %

红黏土	高岭石	伊利石	透辉石	长石	白云石	石英	其他
去铁前原状样	30.7	12	8.1	9.9	4.6	34.7	3.1
去铁后原状样	28.4	11.5	0.4	10.6	5.1	41.6	2.4

用以制备压实样。压实样制备时, 先用喷雾法制得含水率为 27.5% (与原状样保持一致) 的湿土样, 随后用保鲜袋密封静置 3 d, 待湿土样内水分均化后利用静压法将其压制为干密度为 1.55 g/cm<sup>3</sup> 的压实样。

### 1.3 去除试样中游离氧化铁

选择性化学溶解法<sup>[31-32]</sup>是国际上公认去除土中游离氧化铁较高效的方法。许多学者利用该方法进行了试验, 发现平均去铁率均可超过 80%<sup>[16]</sup>。为此, 本文研制了一套渗滤装置, 随后利用化学溶解法对红黏土试样中游离氧化铁进行去除。

详细过程如下: 先配制由 0.1 mol/L 氯化钠、0.05 mol/L 碳酸钠以及 0.05 mol/L 连二亚硫酸钠三者混合组成的去铁渗滤液 (图 1 (a) 中 DCB 溶液), 随后利用渗滤装置 (见图 1 (b)) 对试样中的游离氧化铁进行为期 60 d 的渗滤去除, 最后用蒸馏水再渗滤 30 d 以去除试样中残留的 DCB 溶液。为保证去铁过程中试样体积不发生变化, 提高试验精度, 设计了一套不锈钢材料制作而成的恒体积支架 (见图 1 (b)), 该装置由不锈钢圆板和长螺栓组成, 将试样和透水石放入圆板之间后, 拧紧螺栓, 使其维持恒体积状态。试验总共制备 16 个原状样和 12 个压实样, 用于热传导性能、压汞、扫描电镜和孔隙比量测试验。

### 1.4 试样热传导性能测试

为连续获取脱、吸湿条件下红黏土试样的热传导性能参数, 先在室温 (20±1°C) 下将试样 (未去铁原状样和压实样、去铁后试样) 风干, 每当脱湿约 2% 含水率后立刻密封并静置 20 d, 待试样内水分均化后对其热传导性能进行量测, 依次重复该过程直至试样为

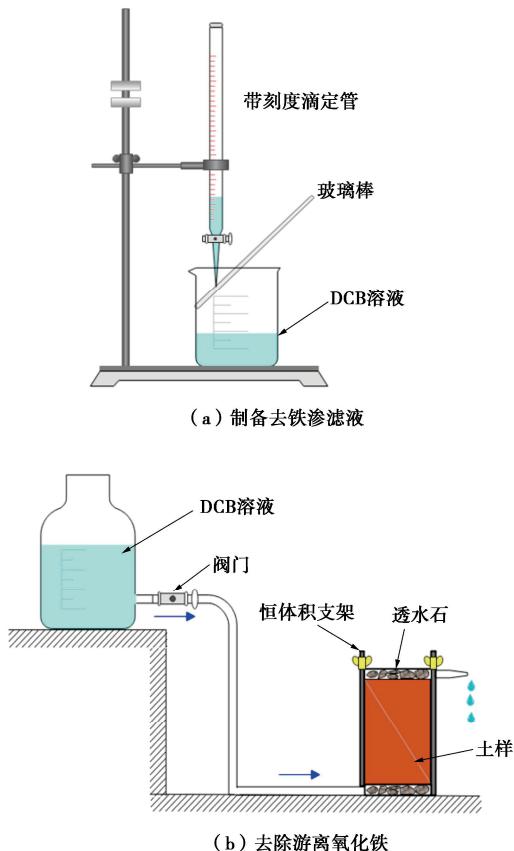


图1 试样去铁过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the iron removal process of specimen  
接近风干状态时, 即结束脱湿条件下热传导性能试验。吸湿过程则通过喷雾增湿法实现, 即对脱湿至风干的试样进行喷雾增湿, 同样每增加约 2% 含水率后密封静置 20 d, 随后进行热传导性能试验。当试样增湿至接近初始含水率附近时, 对试样进行最后一次热传导性能测试, 随即结束该脱、吸湿条件下热传导性能测定试验。为获取脱、吸湿过程试样干密度和孔隙比的变化规律, 利用蜡封法对试样体积进行量测, 以供后续的试样变形分析。

试样热传导性能测试采用的是基于热探针法的 KD2 Pro 型导热测试仪, 它是一种瞬态测量土体热特性的方法。该测试仪主要部件包含主机控制器和热探针, 针对不同待测样品类型配备有 KS-1、TR-1 和 SH-1 三种热探针。其中, SH-1 型探针长 30 mm, 直径 1.3 mm, 双针间距 6 mm, 被广泛用于土体热传导性能的测试, 其热传导系数的测试精度和分辨率均较高, 分别为±5% 和 0.001 W/(m·K)。因此, 本次试验利用 SH-1

型热探针进行热传导性能测定。在热传导性能试验过程中, 需先将热探针竖直插入试样, 随后启动 KD2 Pro 导热测试仪的控制器, 此时热探针会先和试样进行热平衡, 随后通过热脉冲加热试样 30 s, 再经过 30 s 的冷却阶段即可完成测试(图 2)。在导热测试仪测试期间, 热探针会自动采集并处理待测样品内温度的变化, 进而计算得出试样的热传导性能参数(即, 热传导系数)。为保证测试结果的可靠性, 每个试样测试 3 次, 每 2 次测试间隔 20 min, 试样最终的热传导性能系数取多次量程结果的平均值。为确保脱、吸湿过程中红黏土试样热传导性能测试的准确性, 整个试验过程中热探针始终插在试样上, 避免了反复插拔对测试结果的干扰。

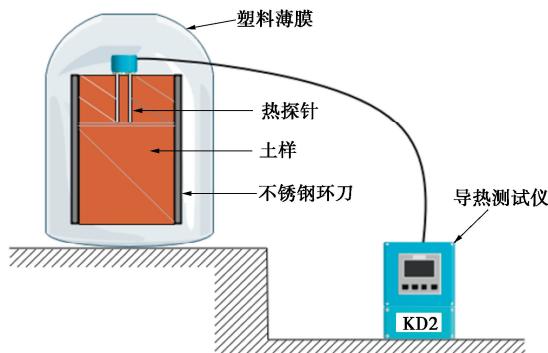


图 2 试样热传导性能测试

Fig. 2 Thermal conductivity tests on specimens

### 1.5 微观探测试验

为探明去铁前、后红黏土试样在脱、吸湿过程中微观结构特征的演化规律, 根据《非饱和土试验方法标准》<sup>[33]</sup>的规定, 通过压汞和扫描电镜试验分别测得试样的孔径分布和微观形貌特征。具体试验步骤如下: 当试样脱、吸湿至目标含水率后, 用美工刀切取约 1 cm<sup>3</sup> 的块状样品, 进行干燥处理。采用冻干法制备压汞和扫描电镜所需干燥样品, 该方法可避免样品失水引起的体变和微观结构变化, 即先将块状样品用液氮冷冻约 30 min, 再用冷冻干燥机在低温高真空环境下抽气 1 d, 待样品水分抽空后即可用于压汞和扫描电镜测试。压汞试验采用康塔公司的 PoreMaster GT33 进行测试, 最大注汞压力为 413.7 MPa。采用 Quanta-200 进行扫描电镜试验, 其在高和低真空条件下的分辨率为 3.5 , 15 nm。

## 2 试验结果及分析

图 3 为脱、吸湿条件下原状和压实红黏土试样热传导系数与体积含水量的关系曲线。由图 3 可知, 在脱、吸湿条件下, 原状和压实样的热传导系数均随着体积含水量的增加而增大。在相同体积含水量下, 原

状样的热传导系数明显要大于压实样, 平均约大 4.8%。此外, 脱、吸湿条件下原状和压实样的热传导系数与体积含水量的关系曲线均存在“滞回现象”, 即相同体积含水量下脱湿下试样的热传导系数大于吸湿下的试样。而且, 原状样热传导系数与体积含水量关系曲线的“滞回现象”比压实样稍显著些。

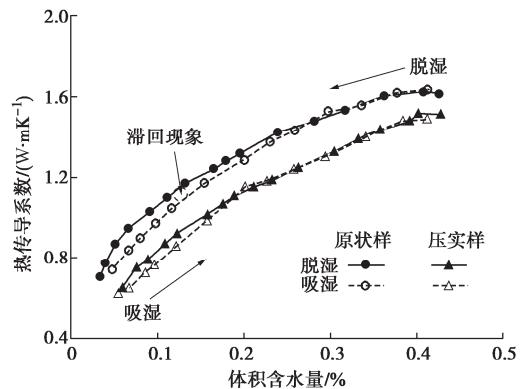


图 3 原状与压实样脱吸湿路径下热传导系数随含水率的变化

Fig. 3 Change in thermal conductivity of undisturbed and compacted specimens with water content during drying and wetting conditions

图 4 对比了去铁前、后原状样热传导系数与体积含水量的关系曲线。由图 4 可知, 相同含水率条件下, 去铁后原状红黏土的热传导系数明显大于去铁前。当体积含水量由 0.03 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 增加至 0.44 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 时, 去铁前原状红黏土试样的热传导系数从 0.690 W/mK 增大至 1.636 W/mK, 而去铁后原状样的热传导系数则由 1.109 W/mK 增大至 1.899 W/mK, 即去铁后原状红黏土试样的热传导系数比未去铁试样平均增大了约 29.3%。此外, 去铁后原状样热传导系数与体积含水量关系曲线的滞回效应有所削弱。

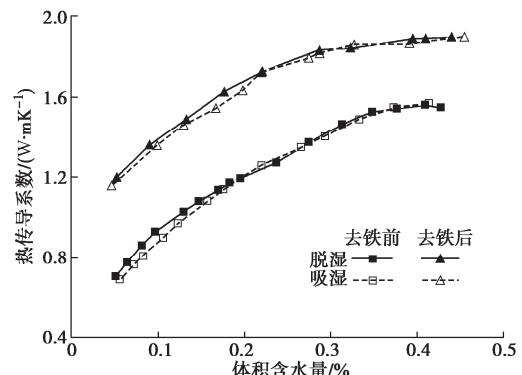


图 4 去铁前、后原状样热传导系数随含水率的变化

Fig. 4 Change in thermal conductivity of undisturbed specimens before and after iron removal with water content

图 5 为含水率 2.4%, 干密度 1.55 g/cm<sup>3</sup> 去铁前、后原状样的扫描电镜试验结果。由图 5 可知, 去铁后原状红黏土试样的微观结构更加致密, 部分大于 8 μm

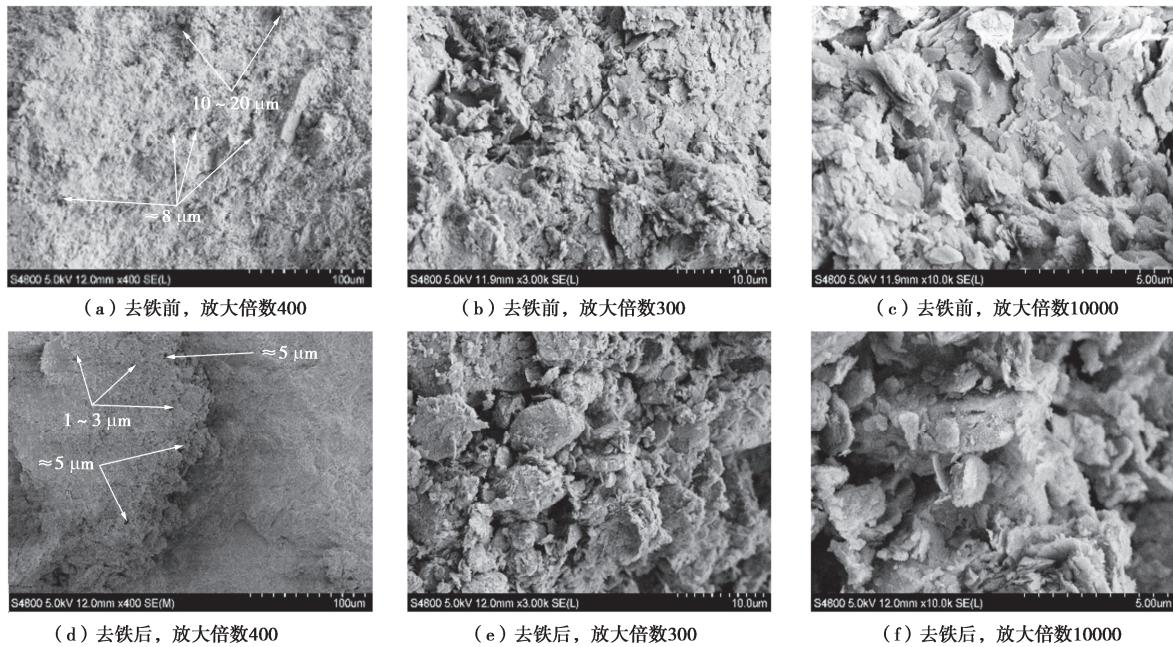


图5 去铁前、后原状样的扫描电镜图像

Fig. 5 SEM images of undisturbed specimens before and after iron removal

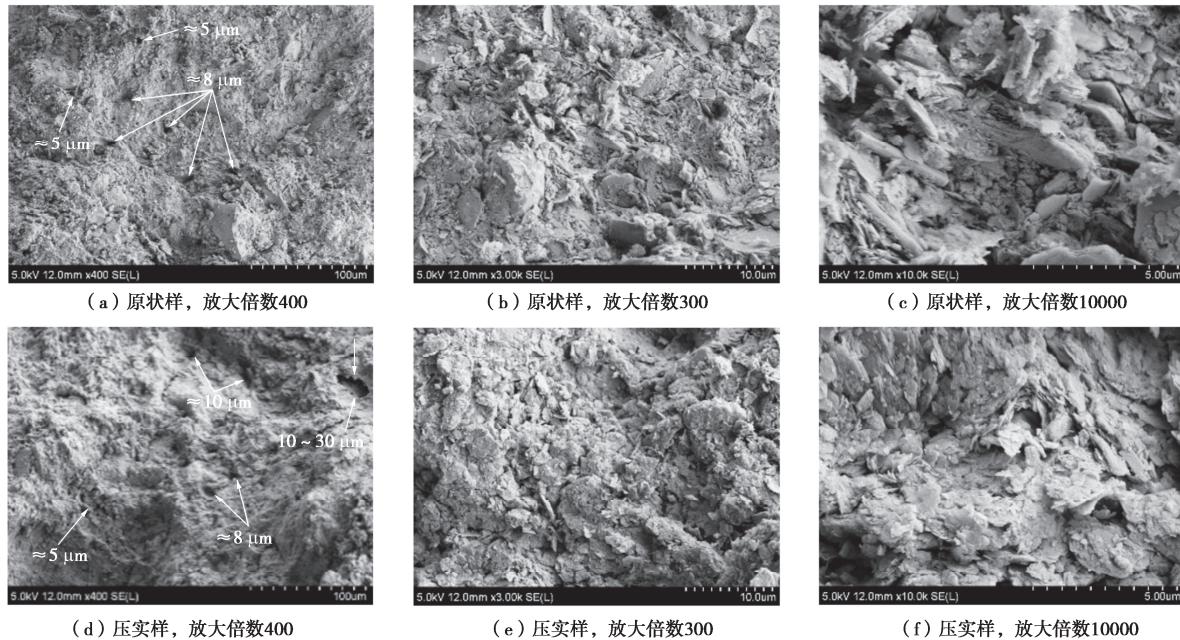


图6 原状和压实样的扫描电镜图像

Fig. 6 SEM images of undisturbed and compacted specimens

的较大孔隙消失不见(图5(a), (d))。此外,去除游离氧化铁前,原状红黏土试样内部堆叠体间接接触处轮廓比较模糊,而去铁试样微观结构中土屑和颗粒单元体却明显增多(图5(b), (c), (e), (f)),本文认为这可能与土中联结物质被破坏有关,而且这种胶结物质主要是以游离氧化铁为主,将在下文进行探讨。

图6为含水率27.5%,干密度1.55 g/cm<sup>3</sup>原状样和压实样的扫描电镜试验结果。由图6(a), (b)可见,原状红黏土试样的微观结构比较均质,土中孔隙的孔径普遍小于10 μm。压实红黏土试样内既含有孔

径小于10 μm的孔隙(图6(d), (e)),还存在一些相对较大的孔隙,孔径范围约为10~30 μm(图6(d))。由图6(c), (f)可发现,原状和压实样的微结构单元主要由土屑、颗粒单元体、片状体堆叠构成,而部分片状体被胶结物质联结着,导致土中结构单元体轮廓比较模糊。

图7为原状和压实样在脱湿过程中的孔径分布,试样初始含水率和干密度分别为27.5%和1.55 g/cm<sup>3</sup>。比较图6, 7可发现,红黏土试样的微观形貌与孔径分布是比较吻合的。原状样孔径分布呈单峰结构,孔径

基本小于  $10 \mu\text{m}$ , 且孔隙体积会随着含水率的减少而减小。压实样的孔径分布呈双峰结构, 其孔径主要分布在  $0.01\sim1 \mu\text{m}$  和  $1\sim100 \mu\text{m}$ 。由图 7(a), (b) 可知, 对于原状和压实红黏土试样, 失水主要会引起孔径在  $0.01\sim1 \mu\text{m}$  的孔隙发生收缩。

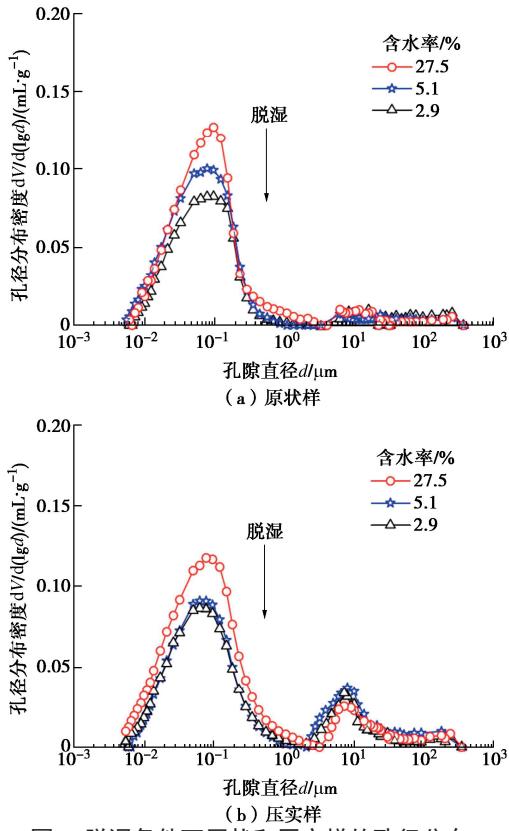


图 7 脱湿条件下原状和压实样的孔径分布

Fig. 7 Pore size distributions of undisturbed and compacted specimens during drying conditions

图 8 为去铁后原状样在脱、吸湿过程中的孔径分布。由图可知, 在脱湿过程中, 孔隙数量随着含水率的降低而减少。在吸湿条件下, 孔隙数量会随着含水率的升高而稍有增加。此外, 去铁后原状样的孔隙失水收缩量明显大于吸水膨胀量。

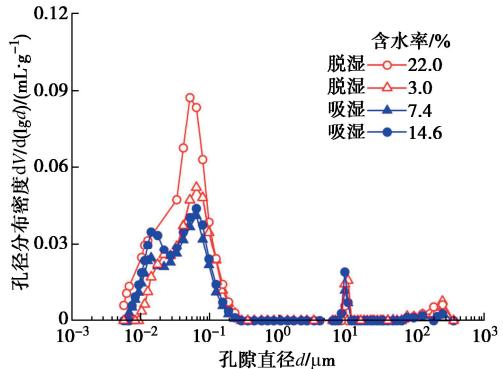


图 8 脱、吸湿条件下去铁后原状样的孔径分布

Fig. 8 Pore-size distributions of undisturbed specimens after iron removal during drying and wetting conditions

图 9 对比了脱湿条件下去铁前、后原状样的孔径

分布。由图可发现, 去铁后原状样的孔隙数量明显少于未去铁试样。去铁前原状样存在少量孔径约为  $10 \mu\text{m}$  的较大孔隙, 而去铁后原状样内的这些较大孔隙基乎消失不见。此外, 去铁后原状样孔隙的失水收缩现象比去铁前要稍明显些。

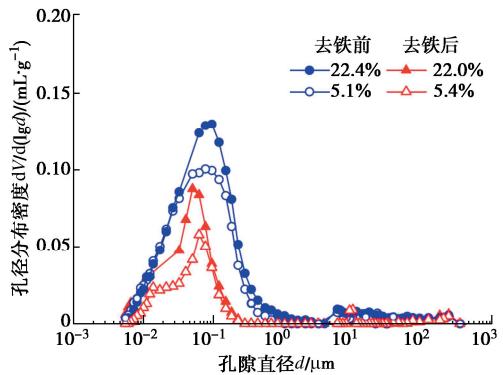


图 9 脱湿条件下去铁前、后原状红黏土试样的孔径分布

Fig. 9 Pore-size distributions of undisturbed specimens before and after iron removal during drying conditions

### 3 讨论

热传导性能试验结果表明, 原状红黏土的热传导系数大于压实样(图 3)。这主要是由两种试样间微观结构特征差异引起的, 进而影响到颗粒间接触和液桥的传热机制。Sun 等<sup>[22]</sup>指出, 原状样在历经自然界中反复干湿循环作用后, 致使土中较大孔隙会逐渐消失, 故其孔径分布多呈单峰结构。而压实样在制作过程中, 其内部结构受到不同程度的挤压破坏, 颗粒间的胶结作用减弱, 导致土颗粒更加分散, 孔隙数量和大小也随之增加, 故而压实样的孔径分布多以双峰结构为主。由图 6, 7 可知, 原状样内孔径分布比较均匀, 且多为较小孔隙。①一方面, 该微观结构特征更有利与土颗粒间、团聚体间以及土颗粒-团聚体间的接触传热; ②另一方面, 也使得土粒间的液桥更易形成, 增加了土中传热的途径, 由此可解释原状样与压实样间热传导性能差异的原因。

牛庚等<sup>[13]</sup>试验研究了游离氧化铁对原状土持水特性的影响, 发现原状土中也存在少量相对较大的孔隙, 孔径大小约为  $6 \mu\text{m}$ , 当去铁后较大的孔隙也随之消失了。Ju 等<sup>[34]</sup>和 Usowicz 等<sup>[35]</sup>研究了团聚体尺寸对热传导性能的影响, 发现随着土中团聚体尺寸的增大, 团聚体间的大孔隙增多, 导致相邻团聚体或颗粒间的接触程度减弱, 热传导系数随之减小。据此, 本文认为游离氧化铁对红黏土试样热传导性能的影响机制可理解为: 红黏土试样内含有起集聚、胶结作用的游离氧化铁, 它会以“包膜”形式将土粒包裹住、“桥接”形式将土粒连接起来或者“岛”的形式附着在土粒表

面(图10);这些游离氧化铁赋存形式使得试样形成更稳定的团聚体结构,而试样内相对较大孔隙便存在于团聚体内和团聚体间,但随着游离氧化铁的去除,这些起“包膜”“桥接”和“附着”作用也就被削弱,使得部分较大团聚体分散成较小团聚体或土颗粒,不可避免会充填土中较大的孔隙。换言之,去铁后原状红黏土试样内土颗粒间的接触更充分,增加了颗粒间的热传导路径,因此未去铁原状样的热传导性能小于去铁后的试样。

压汞试验结果表明,去铁后原状红黏土试样内部部分孔径约 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙也有所减少(图9),这可能也与游离氧化铁胶结作用的削弱有联系。当红黏土中的游离氧化铁被去除后,部分形成团聚体的土颗粒呈分散状态,因而在渗虑条件下会逐渐填充其附近孔隙,导致部分孔隙减少甚至消失。此外,去铁后试样内土骨架抵抗变形的能力会有所减弱,致使试样内孔隙更易失水收缩,特别是土中较大的孔隙,其抵抗变形的能力相对较弱,由此也就可解释去铁前试样内孔隙的数量及大小均比去铁后试样要多且大(图9)。

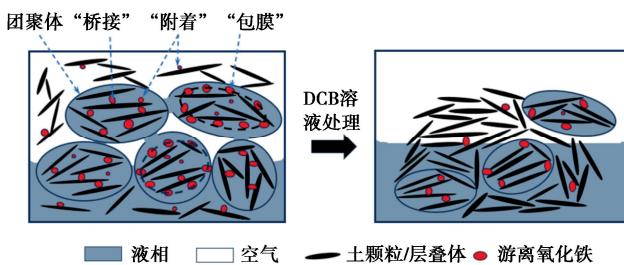


图10 原状红黏土去铁前后微观结构变化示意图

Fig. 10 Schematic diagram of microstructural changes in undisturbed specimens before and after iron removal

图11为脱、吸湿条件下去铁前压实样和去铁前、后原状样孔隙比与体积含水量的关系。由图11可知,脱湿条件下红黏土试样发生了不同程度大小的失水收缩变形,由大到小的顺序分别为去铁原状样、未去铁原状样、去铁压实样。由于红黏土中存在游离氧化铁,由此产生的“桥接”“包膜”和“附着”作用会增强土骨架抵抗变形的能力,故未去铁红黏土试样失水收缩量相对较小。随着游离氧化铁的去除,其集聚胶结作用也就丧失,土骨架抵抗变形能力急剧下降,导致去铁后原状样和压实样失水收缩变形明显增大。此外,压实红黏土试样在制样过程时,土中部分团聚体结构会受到挤压破坏,导致部分较大团聚体分散成较小团聚体或土颗粒,这些较小的团聚体和土颗粒不可避免会填充土中较大的孔隙,最终使得试样内部更为致密,故其抵抗变形的能力要稍强于原状样,也就解释了压实样失水收缩变形量要小于原状样(图11)。

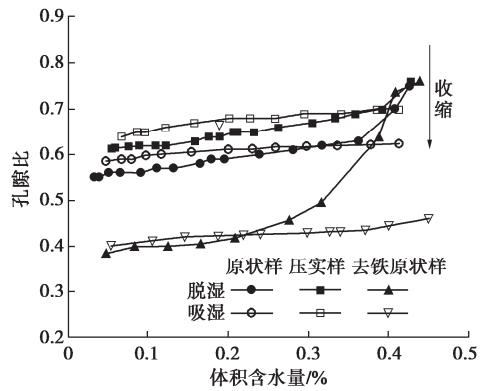


图11 红黏土试样孔隙比随体积含水量的变化

Fig. 11 Variation of void ratio of lateritic clay with volumetric water content

## 4 结 论

本文对比研究了脱、吸湿条件下去游离氧化铁前、后原状和压实红黏土试样热传导性能的变化,通过压汞和扫描电镜试验,获得了原状和压实红黏土试样微观结构特征的演化规律,基于此探讨了游离氧化铁和制样方式对红黏土热传导性能影响的微观机制,主要得出4点结论。

(1) 相同含水率下原状红黏土的热传导系数大于压实红黏土,平均约大4.8%;去铁后原状样的热传导系数大于未去铁原状样,平均约大29.3%;当去除游离氧化铁后,原状样的热传导系数在含水率变化曲线上呈现滞回减弱现象。

(2) 红黏土微结构单元主要由土屑、颗粒单元体和片状体堆叠组成,部分片状体因被胶结物质联结导致轮廓不清晰。原状样的孔径普遍小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ ,压实样存在孔径约为 $10\sim30\text{ }\mu\text{m}$ 的较大孔隙,去铁后试样微观结构致密性显著提升。

(3) 压实和原状红黏土的孔径分布分别为双峰和单峰结构;压实样孔径主要分布在 $0.01\sim1\text{ }\mu\text{m}$ 和 $1\sim100\text{ }\mu\text{m}$ ,原状红黏土试样的孔径主要分布在 $0.01\sim1\text{ }\mu\text{m}$ ;不同红黏土试样失水收缩变形量由大到小依次为:去铁后原状样、未去铁原状样、未去铁压实样。

(4) 游离氧化铁对红黏土热传导性能的影响机制可理解为,游离氧化铁会以“桥接”“包膜”“附着”的形式使红黏土颗粒/层叠体胶结形成较稳定的团聚体,经去铁处理后部分较大团聚体分散成较小团聚体或土粒,不可避免会充填土中较大的孔隙,使得土颗粒间接触更充分,增加了颗粒间的传热路径,故试样的热传导系数增大。

## 参考文献:

- [1] GAO G R. The distribution and geotechnical properties of

- loess soils, lateritic soils and clayey soils in China[J]. Engineering Geology, 1996, **42**(1): 95-104.
- [2] KANNO I. Genesis and Classification of Main Genetic Soil Types in Japan[M]. Kyushu: Agricultural Experimental Station, 1961.
- [3] BUOL S W, SANCHEZ P A. Red soils in the Americas: morphology, classification and management[C]// International Symposium on Red Soils, Beijing, 1986.
- [4] ESWAREN H. Taxonomy and management related properties of the red soils of Africa[C]// Proceedings of an International Symposium, Harare, 1988.
- [5] KETROT D, SUDDHIPRAKARN A, KHEORUENROMNE I, et al. Interactive effects of iron oxides and organic matter on charge properties of red soils in Thailand[J]. Soil Research, 2013, **51**(3): 222.
- [6] ZENG Z T, ZHAO Y L, LU H B, et al. Experimental performance study of ground-coupled heat pump system for cooling and heating provision in Karst Region[J]. Energy and Buildings, 2018, **158**: 971-986.
- [7] 高国瑞. 中国红土的微结构和工程性质[J]. 岩土工程学报, 1985, **7**(5): 10-21. (GAO Guorui. Microstructural and engineering properties of Chinese laterite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, **7**(5): 10-21. (in Chinese))
- [8] 孔令伟, 罗鸿禧. 游离氧化铁形态转化对红黏土工程性质的影响[J]. 岩土力学, 1993(4): 25-39. (KONG Lingwei, LUO Hongxi. Effect of the conversion in form of free iron oxide on the engineering property of the red clay[J]. China Industrial Economics, 1993(4): 25-39. (in Chinese))
- [9] 王继庄. 游离氧化铁对红黏土工程特性的影响[J]. 岩土工程学报, 1983, **5**(1): 147-156. (WANG Jizhuang. The effects of free iron oxides on the engineering properties of red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1983, **5**(1): 147-156. (in Chinese) )
- [10] 孔令伟, 罗鸿禧, 袁建新. 红黏土有效胶结特征的初步研究[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(5): 42-47. (KONG Lingwei, LUO Hongxi, YUAN Jianxin. Preliminary study on the effective cementation characteristics of the red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(5): 42-47. (in Chinese))
- [11] 谈云志, 占少虎, 胡焱, 等. 石灰-红黏土互损行为与偏高岭土减损机制[J]. 岩土力学, 2021, **42**(1): 104-112. (TAN Yunzhi, ZHAN Shaohu, HU Yan, et al. Behavior of lime-laterite interaction and anti-erosion mechanism of Metakaolin[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(1): 104-112. (in Chinese))
- [12] 熊毅. 土壤胶体[M]. 北京: 科学出版社, 1983. (XIONG Yi. Soil Colloid[M]. Beijing: Science Press, 1983. (in Chinese))
- [13] 牛庚, 孙德安, 韦昌富, 等. 游离氧化铁对红黏土持水特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(12): 2318-2324. (NIU Geng, SUN Dean, WEI Changfu, et al. Effects of free iron oxide on water retention behavior of lateritic clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(12): 2318-2324. (in Chinese))
- [14] 张文博, 柏巍, 孔令伟, 等. 淋溶时间对红黏土物理力学特性的影响[J]. 岩土力学, 2022, **43**(2): 443-452. (ZHANG Wenbo, BAI Wei, KONG Lingwei, et al. Effect of leaching time on physical and mechanical characteristics of lateritic soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(2): 443-452. (in Chinese))
- [15] 张先伟, 孔令伟. 氧化铁胶体与黏土矿物的交互作用及其对黏土土性影响[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(1): 65-74. (ZHANG Xianwei, KONG Lingwei. Interaction between iron oxide colloids and clay minerals and its effect on properties of clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(1): 65-74. (in Chinese))
- [16] 刘莉, 颜荣涛, 牛富俊, 等. 游离氧化铁对红黏土力学特性的影响[J]. 桂林理工大学学报, 2021, **41**(4): 810-816. (LIU Li, YAN Rongtao, NIU Fujun, et al. Effect of free iron oxide on the strength and deformation characteristics of red clay[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2021, **41**(4): 810-816. (in Chinese))
- [17] 刘鹏, 黄英, 金克盛, 等. 云南红土铁离子迁移的试验研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, **23**(3): 114-119. (LIU Peng, HUANG Ying, JIN Kesheng, et al. The test study of the iron ions migration in Yunnan laterite[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, **23**(3): 114-119. (in Chinese))
- [18] NIAN T K, JIAO H B, FAN N, et al. Microstructure analysis on the dynamic behavior of marine clay in the South China Sea[J]. Marine Georesources \& Geotechnology, 2020, **38**(3): 349-362.
- [19] SCHWERTMANN U, LATHAM M. Properties of iron oxides in some new Caledonian oxisols[J]. Geoderma, 1986, **39**(2): 105-123.
- [20] ZHANG X W, KONG L W, CUI X L, et al. Occurrence characteristics of free iron oxides in soil microstructure: evidence from XRD, SEM and EDS[J]. Bulletin of

- Engineering Geology and the Environment, 2016, **75**(4): 1493-1503.
- [21] FAROUKI O T. Thermal Properties of Soils[M]. Clausthal-Zellerfeld: Trans Tech Publications, 1986.
- [22] SUN D A, GAO Y, ZHOU A N, et al. Soil-water retention curves and microstructures of undisturbed and compacted Guilin lateritic clay[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, **75**(2): 781-791.
- [23] 徐云山, 肖子龙, 孙德安, 等. 土体导热系数温度效应及其预测模型[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(6): 1180-1189. (XU Yunshan, XIAO Zilong, SUN Dean, et al. Temperature effects of soil thermal conductivity and its predictive model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(6): 1180-1189. (in Chinese))
- [24] 张虎元, 赵秉正, 童艳梅. 混合型缓冲砌块导热性能及其均匀性研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(增刊1): 1-9, 18. (ZHANG Huyuan, ZHAO Bingheng, TONG Yanmei. Thermal conductivity and uniformity of hybrid buffer blocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(S1): 1-9, 18. (in Chinese))
- [25] 陆浩杰, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 黏土热-力学特性对能量桩力学特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(1): 53-61. (LU Haojie, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, et al. Influences of thermo-mechanical properties of clay on mechanical responses of energy piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(1): 53-61. (in Chinese))
- [26] 金宗川, 王雪晴, 乌效鸣, 等. 土壤热参数及其影响因素测试分析[J]. 岩土力学, 2022, **43**(5): 1335-1340. (JIN Zongchuan, WANG Xueqing, WU Xiaoming, et al. Testing and analysis of soil thermal parameters and their influencing factors[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, **43**(5): 1335-1340. (in Chinese))
- [27] 叶万军, 董西好, 杨更社, 等. 含水率和干密度对黄土热参数影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(3): 656-662. (YE Wanjun, DONG Xihao, YANG Gengshe, et al. Effect of moisture content and dry density on thermal parameters of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(3): 656-662. (in Chinese))
- [28] CÔTÉ J, KONRAD J M. A generalized Thermal Conductivity Model for Soils and construction Materials[M]. Ottawa: NRC Research Press, 2005.
- [29] 曾召田, 吕海波, 赵艳林, 等. 广西红黏土热导率测试及理论预测模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(增刊1): 3525-3534. (ZENG Zhaotian, LÜ Haibo, ZHAO Yanlin, et al. Experimental research on thermal conductivity of red clay in Guangxi and its theory prediction models[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(S1): 3525-3534. (in Chinese))
- [30] 曾召田, 林铭宇, 孙德安, 等. 碱-热条件下膨润土缓冲材料导热系数演化及微观特征[J]. 岩土工程学报, 2024, **46**(7): 1408-1417. (ZENG Zhaotian, LIN Mingyu, SUN Dean, et al. Microscopic analysis of thermal conductivity of bentonite as buffer materials under alkaline-thermal conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, **46**(7): 1408-1417. (in Chinese))
- [31] WIRIYAKITNATEEKUL W, SUDDHIPRAKARN A, KHEORUENROMNE I, et al. Iron oxides in tropical soils on various parent materials[J]. Clay Minerals, 2007, **42**(4): 437-451.
- [32] JIANG Z X, LIU L A. A pretreatment method for grain size analysis of red mudstones[J]. Sedimentary Geology, 2011, **241**(1): 13-21.
- [33] 非饱和土试验方法标准: T/CECS 1337—2023[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023. (Standard for Unsaturated Soil Testing Method: T/CECS 1337—2023[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2023. (in Chinese))
- [34] JU Z Q, REN T S, HU C S. Soil thermal conductivity as influenced by aggregation at intermediate water contents[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, **75**(1): 26-29.
- [35] USOWICZ B, LIPIEC J, USOWICZ J B, et al. Effects of aggregate size on soil thermal conductivity: comparison of measured and model-predicted data[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, **57**(2): 536-541.