

文章编号:1673-9469(2026)03-0057-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.03.007

铁氧化物对桂林黏土界限含水率的影响

邓杰¹,肖桂元^{1*},邓旺云²

(1. 桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室,广西 桂林 541004;

2. 桂林市公路建设养护中心,广西 桂林 541004)

摘要: 为了探究铁氧化物对黏土界限含水率的影响,选用桂林地区普通黏土作为母质土,制备了铁氧化物与 NaNO_3 混合土样以及单掺 NaNO_3 土样,开展了界限含水率试验。研究了不同温度和掺量条件下土样界限含水率的变化规律,并结合颗粒分析试验及土样微观试验阐明了铁氧化物对土颗粒的影响机理。试验结果表明, NaNO_3 会降低桂林黏土的界限含水率,且其加入量越大,界限含水率的降幅越明显,土样的液限、塑限和缩限均同步降低。而铁氧化物能够提高桂林黏土在加入 NaNO_3 后的液限、塑限和缩限,且液限增幅最大,其次是塑限和缩限;这一增强作用随铁氧化物浓度增加而加强,随温度升高而减弱。混合土样在 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干 48 h 后,铁氧化物对土样液限、塑限和缩限的影响作用基本消失。高温干燥会改变铁氧化物与土颗粒间的连接方式并影响颗粒粒径,从而对土体的界限含水率产生影响。

关键词: 桂林黏土;铁氧化物;界限含水率;温度;钠离子

中图分类号:TU422

文献标识码:A

Effect of Iron Oxides on Consistency Limits of Guilin Clay

DENG Jie¹, XIAO Guiyuan^{1*}, DENG Wangyun²

(1. Guangxi Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Guilin Highway Construction and Maintenance Center, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: To investigate the effect of iron oxides on consistency limits of clayey soil, the ordinary clay from Guilin was selected as the parent soil for this study, and mixed soil samples of iron oxides and NaNO_3 as well as soil samples added with NaNO_3 alone were prepared. Tests were conducted to study the variation of consistency limits under different temperature and dosage conditions, and the particle size analysis and microstructural test were conducted to explain the mechanism of iron oxides' influence on soil particles. The test results showed that NaNO_3 reduced the consistency limits of Guilin clay. The greater the dosage was, the more obvious the reduction in consistency limits was. The trends of liquid limit, plastic limit and shrinkage limit changes were consistent. Iron oxides increased the liquid limit, plastic limit and shrinkage limit of Guilin clay after the addition of NaNO_3 , and the liquid limit increased the most, followed by plastic limit and shrinkage limit. This enhancement effect intensified with the increase of iron oxide concentration and weakened with the rise of temperature. After drying the mixed soil at $105\text{ }^\circ\text{C}$ for 48 hours, the effect of iron oxides on liquid limit, plastic limit and shrinkage limit was nearly eliminated. High-temperature drying alters the interaction between iron oxides and soil particles and affects the particle size, thereby influencing the consistency limits of soil.

Key words: Guilin clay; iron oxides; consistency limits; temperature; sodium ion

收稿日期:2025-02-10 修回日期:2025-04-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52169022)

第一作者:邓杰(1991—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,主要从事特殊土灾变机理及地下工程防灾方面的研究。

*通信作者:肖桂元(1976—),男,湖南祁东人,博士,教授,主要从事特殊土灾变机理及地下工程防灾方面的研究。

界限含水率是土体最基本的物理性质指标之一,它与土体的渗透性、胀缩性、抗剪强度和压缩性等多种工程特性密切相关,是分析土体性质变化的重要基础^[1-2]。中国南方的红黏土、湛江黏土以及墨西哥东南部的热带土体因富含铁氧化物,工程特性显著区别于普通黏土,比如,红黏土通常具有相对较高的含水率、液塑限和孔隙度^[3],同时具有低压缩性、高抗剪强度和高硬度等较好的力学特性。因此,深入研究铁氧化物对黏土界限含水率的影响机理,对含铁黏土在工程中的应用具有重要的理论价值与实践意义。

含铁黏土中的铁氧化物具有多种赋存形态,主要包括游离态氧化铁、无定形态氧化铁和络合态氧化铁。根据是否能被 X 射线衍射(X-Ray Diffraction, XRD)检测,铁氧化物可划分为晶体和无定形两大类,并将无定形铁占游离态铁的比例定义为铁氧化物的活化度^[4]。土体中的可溶铁离子可转化为较稳定的针铁矿(α -FeOOH)、赤铁矿(γ -Fe₂O₃)、胶体铁(Fe(OH)₃),而各类铁氧化物形态间的转换关系与温度、pH 值、有机质含量等因素有关^[5-6]。相关研究表明,铁氧化物对土体的胶结力、液塑限、团聚体生成、孔隙发育和持水特性等具有重要影响^[7-9]。杨荫华等^[10]研究了干燥脱水对红土的影响,指出干燥脱水会显著改变红土的压缩性、强度和渗透性。冯金良等^[11]研究发现,无定形态游离氧化铁的富集可显著提高黏土的液限、塑限、塑性指数及缩限,其提升效果受养护老化的影响。孔令伟等^[12]研究了游离氧化铁形态转化对典型红土工程性质的影响,发现其形态变化对红土的塑性指数、颗粒大小及活化度具有显著作用,并在渍水与渗水条件下表现出不同的影响规律。目前,关于铁氧化物与土体界限含水率的研究,多利用自制红土或天然红土经去铁处理后的土样进行对比试验^[13]。利用自制红土进行试验通常存在 Na⁺ 残留或土样 pH 值改变的问题,而天然红土去铁处理步骤较繁琐,且强氧化剂可能会对土样中的其他氧化物产生影响。综上,铁氧化物影响土体界限含水率的微观核心机理还需进一步探究。

为此,本文从研究方法和影响机理两方面开展研究。为保证土体矿物的原状,以桂林地区普通黏土为母质土,制备了 2 种土样,即添加自制铁氧化物与 NaNO₃ 的混合土样以及单掺 NaNO₃ 的土样,开展了土样的界限含水率试验,系统研究不

同温度和掺量条件下土样界限含水率的变化规律。从土颗粒粒径、矿物成分及微观结构等多个角度,探讨 Na⁺、铁氧化物及其活性变化对黏土界限含水率的影响机理,为富含铁氧化物黏土的特性研究提供理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

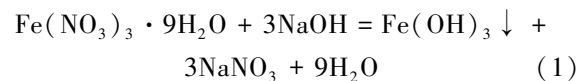
母质土取自桂林市临桂区某工地,取土深度为 2~3 m,其基本物理性质见表 1。母质土经 XRD 分析得到的矿物组成为高岭石(32.1%)、白云母(25.4%)、石英(42.5%)。

表 1 母质土物理性质

Tab. 1 Physical properties of parent soil

名称	比重	液限/%	塑限/ /%	最大干密度 /(g·cm ⁻³)	最优含 水率/%
黏土	2.59	63.73	33.27	1.38	29.00

依据化学原理,参考顾新运等^[14]的化学结晶试验方法,利用 Fe(NO₃)₃·9H₂O 恒温水解加 NaOH 的方法制备铁氧化物,反应化学方程式如下:



虽然式(1)仅表明 Fe³⁺ 与 OH⁻ 反应生成 Fe(OH)₃ 沉淀,但实际反应中的沉淀和悬浊液中还包含水合氧化铁(Fe₂O₃·xH₂O)、FeO(OH)、Fe(OH)₃ 等^[15]。为避免误解,文中提到的铁氧化物即为上述反应生成的所有含铁物质。为排除 pH 值的影响,依据式(1),利用相对分子质量计算精确控制 Fe(NO₃)₃·9H₂O 与 NaOH 的加入量,使两者充分反应,从而将悬浊液的 pH 值调节至中性。

根据式(1),混合悬浊液中同时含有 NaNO₃ 与铁氧化物,本试验将 Fe(NO₃)₃·9H₂O 的加入量与母质土的质量之比定义为掺量,设定掺量为 5%、10%、15%、20%,并据此计算出 NaNO₃ 的相应加入比例为 3.1%、6.2%、9.3%、12.4%。按此标准将混合悬浊液、NaNO₃ 溶液加入母质土中,由此设置 3 种土样:母质土(未掺入任何试剂)、加 NaNO₃ 土、混合土(加铁氧化物混合悬浊液土)。为保证铁氧化物与土颗粒充分胶结,加入铁氧化物混合悬浊液或 NaNO₃ 溶液后充分搅拌 2 h,最后将各土样在保湿缸中养护 60 d。

1.2 试验方法

在自然条件下,土中铁氧化物的活性变化过程较为缓慢,其中温度引起的脱水程度和 pH 值是关键影响因素^[5]。已有研究表明,一些无定形铁在高温烘干条件下会转化为针铁矿或赤铁矿^[14]。为研究铁氧化物活性变化对黏土性质的影响,本试验在保持土样初始 pH 值不变的前提下,以温度为梯度设置了3种脱水条件:25℃自然风干、45℃烘干和105℃烘干。为使铁氧化物发生老化,将45℃烘干条件下的土样在45℃水浴中密封老化3 d后再进行烘干,45℃、105℃烘干的处理时间均为48 h。试验步骤流程图如图1所示,主要包括界限含水率试验、颗粒分析试验。

1.2.1 界限含水率试验

根据土样的黏粒含量,本试验采用液塑限联合测定仪法测定土样的液限和塑限。具体操作步骤为:称取200 g过0.5 mm筛的土样,均匀分成3份,分别加入蒸馏水调制成3种不同含水率的土样;采用圆锥自由锥入法,将锥入深度范围分别控制在3~5、7~9、13~15 mm范围内;土样静置24 h后,复测锥入深度并进行含水率试验;整理分析试验结果以计算土样的液限和塑限,同时进行多组平行试验以确保数据准确性。

依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[16]开展缩限试验,依次称取200 g过0.5 mm筛的各土样,加入蒸馏水将含水率调制为接近土样液限,保湿养护1 d后测定含水率;选用内径为(62.00±0.15) mm、高为20.00 mm的环刀作为

收缩皿,分层将湿土装入环刀内;经晾干、烘干称得总质量,并按蜡封法得出干土体积;整理计算各土样的缩限,并进行3组平行试验以确保数据准确性。

1.2.2 土颗粒分析试验

研究表明,土体中的铁氧化物对细颗粒具有显著的凝聚作用^[9]。因此,在颗粒分析试验中,选取过0.075 mm筛的土样为研究对象,并采用《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[16]推荐的密度计法进行颗粒分析试验。为准确评估铁氧化物和Na⁺对土颗粒的作用,试验过程中不添加其他分散剂,利用搅拌器在量筒内沿悬液深度以上下搅拌2 min、往复60次的物理方式进行土颗粒分散,使悬液内土颗粒均匀分布。

2 试验结果与分析

2.1 界限含水率试验结果

图2展示了土样塑限随不同掺量的变化情况。结果表明,加NaNO₃土的塑限随掺量增加呈递减趋势,且温度对土样塑限的影响较小。图2(b)显示,混合土的塑限变化趋势与加NaNO₃土的相似,但递减幅度和温度的影响作用有所差异。掺量为20%时,加NaNO₃土在3种温度下的塑限值分别为16.12%、14.23%、13.30%,而混合土在相应温度下的塑限值较高,分别为20.80%、21.68%和15.07%,这种差异主要归因于混合土中铁氧化物的存在。铁氧化物中的无定形氧化铁能够凝聚细小土颗粒形成团聚体,并吸附大量水分子。此外,

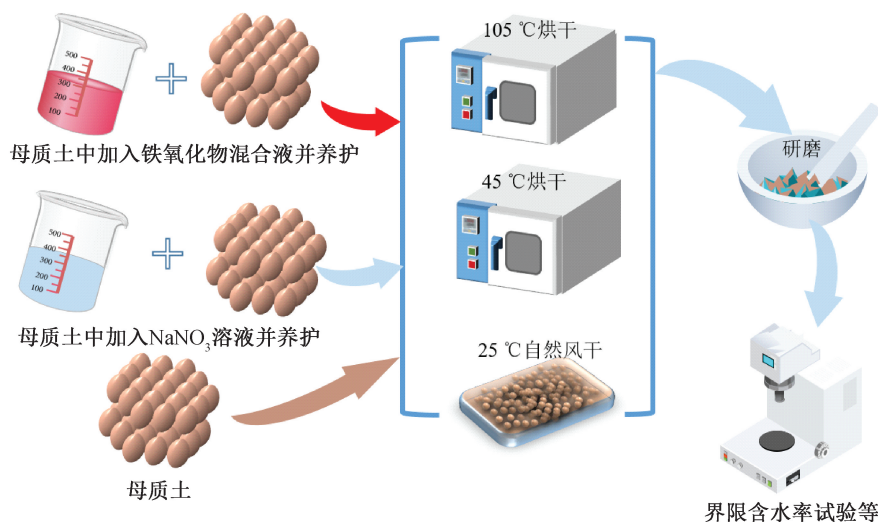


图1 试验流程图

Fig. 1 Test flow chart

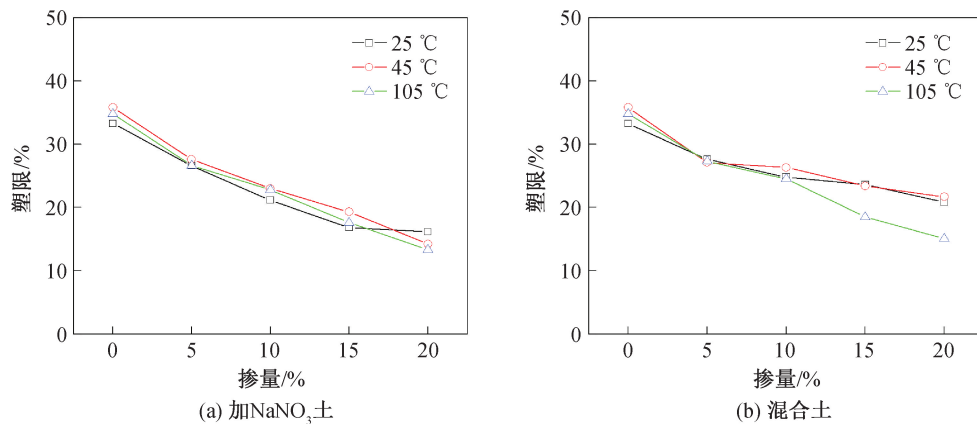


图2 3种温度下不同掺量的土样塑限值

Fig. 2 Plastic limits of samples with different dosages at three temperatures

铁氧化物因其高比表面积和优良的亲水特性,显著提高了土样的塑限。混合土中的 NaNO_3 对土样塑限的削弱作用大于铁氧化物对土样塑限的增强作用,导致混合土塑限低于母质土。母质土的塑限随温度小幅上升,变化不明显。

图3展示了3种温度下不同掺量土样的液限变化情况。从图中可以看出,2种土样的液限均随掺量增加而降低,这与塑限的变化趋势相似。然而,不同土样的液限受温度的影响存在显著差异。母质土经 25 °C、45 °C、105 °C 干燥后的液限值分别为 63.73%、61.08%、51.60%,经 105 °C 干燥后液限显著降低;不同掺量下的加 NaNO_3 土经 3 种温度处理后的液限变化不明显;而混合土的液限值呈阶梯状分布,不同掺量下的混合土经 3 种温度处理后的液限值从大到小依次为 25 °C、45 °C、105 °C,这种差值阶梯在 15% 和 20% 掺量下尤为明显。这是由于母质土为桂林黏土,土体自身同样含有胶凝物质形成的土颗粒团聚体,土颗粒团聚体可吸附大量水分子形成吸附水膜,母质土经 105 °C

烘干后,团聚体间的胶结物失去活性,团聚体减少,液限值降低。 Na^+ 的加入直接破坏了母质土原有的团聚结构,减少了团聚体的数量,因此加入 NaNO_3 后土样的液限和塑限受温度影响较小。而混合土因铁氧化物的作用,其液限和塑限对温度变化表现出阶梯状特征。

图4展示了土样缩限的变化情况。母质土加入 Na^+ 后,其缩限减小,且变化规律与土样的液限和塑限基本一致,但不同掺量下的混合土缩限随温度的变化并不明显。对比液塑限变化,铁氧化物对土样缩限的影响相对较小。

2.2 铁氧化物的影响作用分析

为了更好地说明不同温度和掺量条件下铁氧化物对土体界限含水率的影响,以混合土与加 NaNO_3 土为研究对象,分析两者界限含水率的变化,结果如图5所示。

图5显示,在相同的掺量与温度条件下,混合土的界限含水率均高于加 NaNO_3 土的界限含水率,

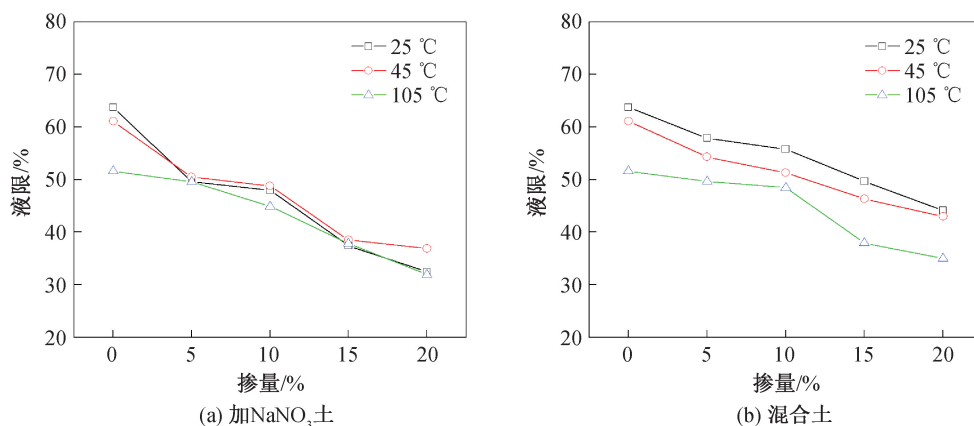


图3 3种温度下不同掺量的土样液限值

Fig. 3 Liquid limits of samples with different dosages at three temperatures

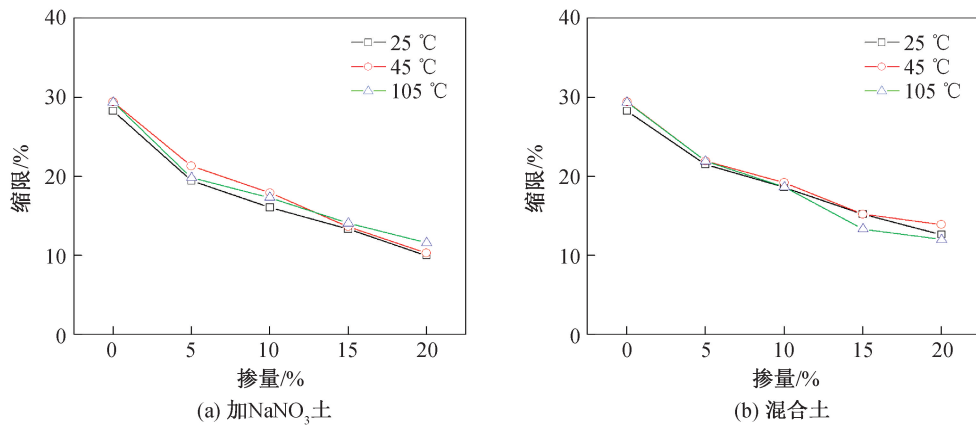


图 4 3 种温度下不同掺量的土样缩限值

Fig. 4 Shrinkage limits of samples with different dosages at three temperatures

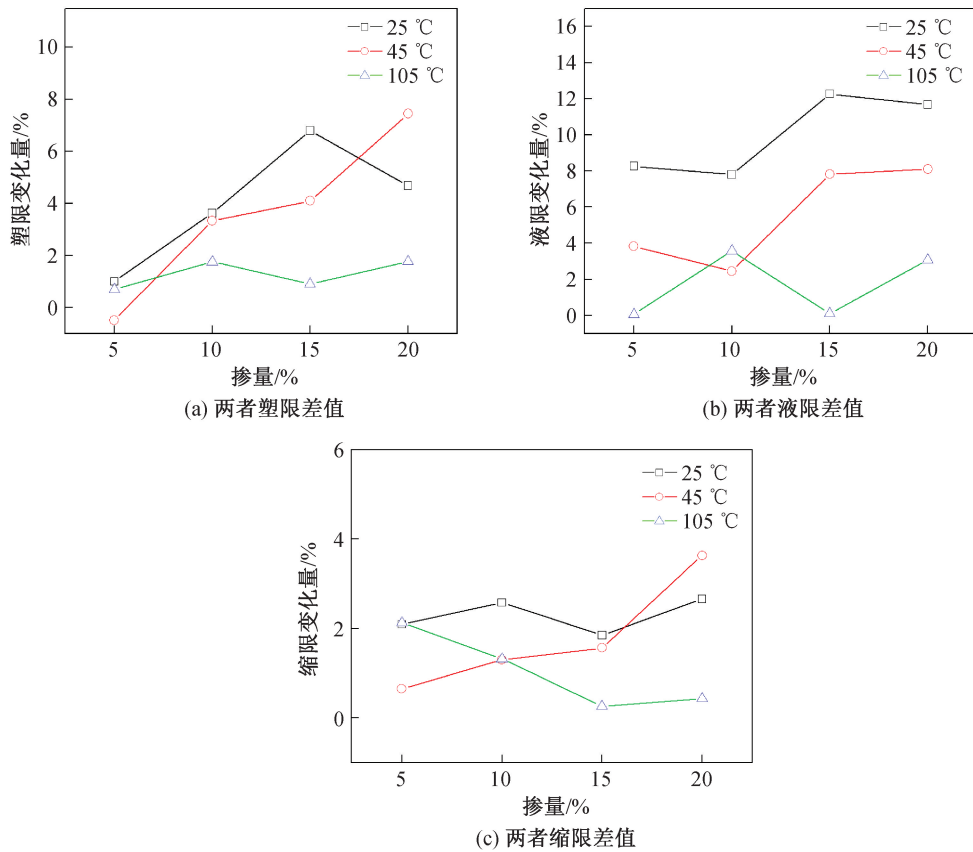


图 5 3 种温度下混合土与加 NaNO₃ 土的界限含水率差值

Fig. 5 Difference of consistency limits between mixed soil and soil added with NaNO₃ alone at three temperatures

而加 NaNO₃ 土的界限含水率均低于母质土,可以推测铁氧化物对母质土界限含水率具有增强作用。混合土与加 NaNO₃ 土的最大塑限差值为 7.45%,最大液限差值为 12.27%。相对于液限和塑限而言,两者缩限差值较小,最大差值为 3.63%。铁氧化物在不同温度下对土样界限含水率的增强效果由大到小依次为 25 °C、45 °C、105 °C。掺量为 15%时,25 °C、45 °C、105 °C 下混合土与加

NaNO₃ 土的塑限差值分别为 6.8%、4.1%、0.9%,液限差值分别为 12.3%、7.8%、0.1%,缩限差值分别为 1.8%、1.5%、0.2%。这说明经 105 °C 干燥后,混合土中的铁氧化物对土样界限含水率的增强效果基本消失。在 25 °C、45 °C 条件下,液塑限差值与掺量整体呈正相关关系;掺量为 15%、20% 时,3 种温度下的液限、塑限和缩限变化量的差值增大,这与铁氧化物的活性变化密切相关。

黏土的液塑限受土颗粒粒径、有机质和孔隙度的综合影响,其中孔隙度是主要影响因子,且与液塑限呈正相关关系^[17]。土样的塑限与能够吸附水分的颗粒和团聚体的数量有关,而液限则与水膜的厚度和含量有关。混合土的界限含水率受温度影响明显,说明混合土中的 Na^+ 不能完全分散混合土内部的团聚体。在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 下,混合土中的铁氧化物活性最高,无定形铁或附着在土颗粒表面,或自身形成结合水。铁氧化物中的游离氧化铁通过包裹土颗粒改变了颗粒的电荷,降低了颗粒间的斥力,增加了颗粒间的吸力,或在颗粒间形成结合桥梁,使颗粒更易结合,改变了土体内部孔隙分布,增加了微孔隙^[7]。因此,在 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 下,土样中铁氧化物的增强效果最显著,液塑限差值最大。

2.3 Na^+ 的影响作用分析

加入 NaNO_3 后土样的液塑限降低可通过斯特恩-古依-恰帕曼扩散双电层理论进行解释。根据该理论,扩散双电层分为两部分:一部分是紧贴固体表面的紧密层(Stern层),包括内亥姆霍兹平面和外亥姆霍兹平面,其中外亥姆霍兹平面与扩散外层相连,其界面为 Stern 面(紧密层中由反离子电性中心相连所形成的假想面),位置取决于吸附离子的大小;另一部分是扩散外层,在固-液相之间形成滑移面。结合土样液塑限的定义和性质,液限对应的含水率包括所有结合水和部分自由水,而塑限对应的含水率则主要反映弱结合水的含量。双电层结构的变化直接影响液塑限的变化。如图 6 所示,液限(W_L)为电势为零的点到 Stern 面的含水率,即为扩散层的含水率,对应图 6 中 d 点;塑限(W_P)为扩散层中塑限电势点(使黏土有塑性的临界点)到 Stern 面的含水率,对应图 6 中 c 点;图中 a 、 b 点分别表示 Stern 面和滑移面到土颗粒表面之间的含水率, ψ_0 表示土颗粒表面电势, ψ_s 表示 Stern 面电势, I_p 为塑性指数。

由斯特恩-古依-恰帕曼扩散双电层理论可知,土体内离子浓度 c (单位: mol/L) 与双电层厚度 $1/k$ 的关系见式(2):

$$k = \left(\frac{2e^2 N_A cz^2}{\varepsilon RT} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中, e 为电子电荷, C ; z 为平衡离子的价数; T 为热力学温度, K ; R 为理想气体常数; N_A 为阿伏伽德罗常量; ε 为介电常数。

加入 NaNO_3 后,土体内离子浓度 c 升高。根

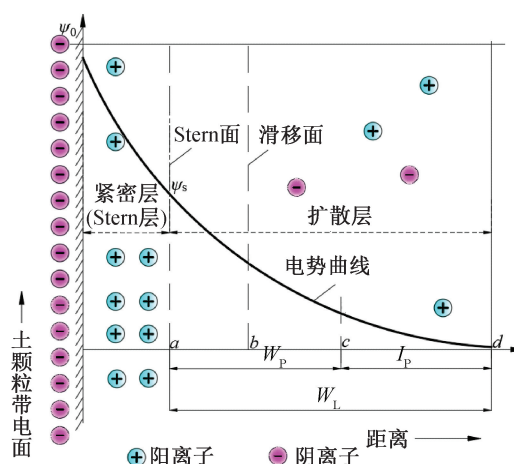


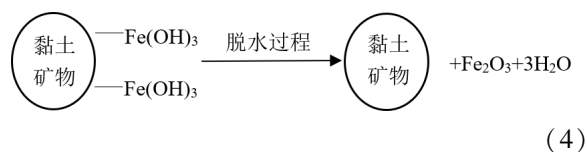
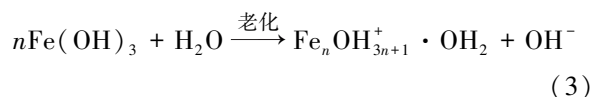
图 6 双电层结构与液塑限关系图

Fig. 6 Relationship diagram between the electric double layer structure and the liquid and plastic limits

据式(2),离子浓度 c 增大将导致双电层厚度 $1/k$ 减小,从而使土体的液塑限降低^[18]。从作用机制上看, Na^+ 主要通过离子置换增大土颗粒间的斥力,引起颗粒分散。此外,由于 Na^+ 相较于高价离子更易发生置换作用^[19],其对颗粒间团聚体的破坏作用更为显著。因此, Na^+ 的作用直接破坏了母质土颗粒间的团聚结构,显著降低了土体内部孔隙度的变化幅度。这是加入 NaNO_3 后土体界限含水率受温度变化影响较小的主要原因。

3 讨论

试验表明,本研究的结果与冯金良等^[11] 的研究结论基本一致,即铁氧化物能够显著提高土体的液塑限。此外,在不同温度条件下,铁氧化物对黏土液塑限的作用表现出显著差异。铁氧化物在温度作用下经历干燥脱水过程会发生老化,最终结晶形成针铁矿和赤铁矿^[20]。老化脱水反应的主要化学方程式如下^[21]:



从式(3)和式(4)可以看出,铁氧化物在老化过程中,其表面的亲水羟基数量逐渐减少,从而降低了吸附水分子的能力。同时,晶体化过程减少了土颗粒间的胶结物,导致团聚体数量减少,最终引起土体液塑限下降,与本次试验的观测结果一致。

为从微观层面上进行探讨,取母质土、15%掺量的混合土以及相应比例的加 NaNO_3 土进行了颗粒粒径与扫描电镜分析,试验结果如表 2 和图 7 所示。

结果表明,当温度为 45 °C 和 105 °C 时,与母质土相比,加 NaNO_3 土与混合土中粒径为 0.030~0.050 mm 的土颗粒质量分数增加,粒径为 0.015~0.030 mm 的土颗粒质量分数减少,粒径 <0.015 mm 的细颗粒质量分数增多,粒径 >0.050 mm 的土颗粒质量分数明显减少。这表明 Na^+ 对土颗粒具有显著的分散作用。此外,混合土中粒径 >0.050 mm 的土颗粒质量分数始终高于加 NaNO_3 的土样,这表明铁氧化物对土颗粒具有一定的团聚作用。进一步分析发现,在 25 °C 下,混合土中粒径 >0.050 mm 的土颗粒质量分数达到最大值,且其质量分数随温度升高逐渐减少,说明铁氧化物的胶结作用随温度升高而减弱。结合各类土样的液塑限数据可以看出,土颗粒粒径的变化与土体液塑限的变化之间存在一定的关联。然而,土颗粒粒径的改变往往伴随着孔隙度的变化,二者的关系较复杂。

图 7 表明,在 3 种温度条件下混合土结构形态存在显著差异(500 倍率放大),土样中的铁氧化物与土颗粒的连接方式发生了改变。25 °C 下,混合土颗粒被凝胶状物质包裹,呈现出鳞片状结构,排

列紧密且有序;45 °C 下,凝胶状包裹物明显减少,颗粒的排列变得较为松散;105 °C 下,凝胶状包裹物完全消失,铁氧化物晶体逐渐形成,并聚集附着在土体表面,表现为细颗粒。上述结果表明,随着温度升高,混合土土样中团聚状态的包裹物逐渐减少,土颗粒间的连接方式发生改变。随着团聚体的减少,土体的孔隙分布和颗粒粒径发生变化,从而影响土体的界限含水率。

4 结论

本文选用桂林黏土作为母质土,通过对添加铁氧化物与 NaNO_3 的混合土样以及单掺 NaNO_3 的土样开展界限含水率试验、颗粒分析试验与扫描电镜分析,研究了不同温度和掺量条件下土样界限含水率的变化规律,得出以下结论:

1) NaNO_3 会降低桂林黏土的界限含水率,且其加入量越大,界限含水率的降幅越明显,土样的液限、塑限和缩限均同步降低。

2) 铁氧化物能够提高桂林黏土在加入 NaNO_3 后的液限、塑限和缩限,且液限增幅最大,其次是塑限和缩限。这一增强作用随铁氧化物浓度增加而加强,随温度升高而减弱。混合土样在 105 °C 下

表 2 3 种温度下各土样中不同粒径土颗粒质量分数的变化

(单位:%)

Tab. 2 Variation in mass fraction of soil with various particle sizes for different soil samples at three temperatures (unit: %)

干燥 温度/°C	土样 类型	粒径/mm				
		<0.015	0.015~<0.030	0.030~<0.050	0.050~0.070	>0.070
25	母质土	7.55	36.75	41.75	3.38	10.57
	加 NaNO_3 土	10.01	43.50	36.88	3.07	6.54
	混合土	10.00	32.50	36.70	5.30	15.50
45	母质土	5.25	40.75	42.90	3.13	7.97
	加 NaNO_3 土	11.01	25.99	59.51	2.32	1.17
	混合土	7.31	14.66	69.08	3.95	5.00
105	母质土	3.25	35.83	48.92	4.75	7.25
	加 NaNO_3 土	11.21	16.53	67.71	2.73	1.82
	混合土	10.00	13.66	68.26	3.45	4.63

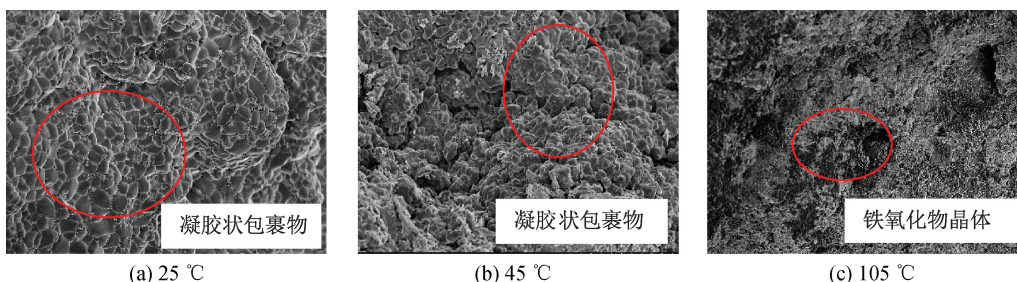


图 7 混合土(15%掺量)在不同温度下干燥后的扫描电镜照片

Fig. 7 Scanning electron microscope images of mixed soil (15% dosage) dried at different temperatures

烘干 48 h 后,铁氧化物对土样液限、塑限和缩限的影响作用基本消失。

3) 高温干燥会改变铁氧化物与土颗粒间的连接方式并影响颗粒粒径,从而对土体的界限含水率产生影响。因此,对黏土(特别是富含铁氧化物的黏土)进行液塑限试验时,不应忽视温度的影响。

参考文献:

- [1] SPAGNOLI G, FEINENDEGEN M. Relationship between measured plastic limit and plastic limit estimated from undrained shear strength, water content ratio and liquidity index[J]. *Clay Minerals*, 2017, 52(4): 509-519.
- [2] NAGARAJ H B, REESHA B, SRAVAN M V, et al. Correlation of compaction characteristics of natural soils with modified plastic limit[J]. *Transportation Geotechnics*, 2015, 2: 65-77.
- [3] 刘芟君,肖桂元,张祥宇,等. 稻壳灰固化红黏土的路用性能及微观机理[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2022, 39(3): 16-22.
- LIU W J, XIAO G Y, ZHANG X Y, et al. Road performance and micro mechanism of rice husk ash modified red clay[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2022, 39(3): 16-22.
- [4] 王璐莹,秦雷,吕宪国,等. 铁促进土壤有机碳累积作用研究进展[J]. *土壤学报*, 2018, 55(5): 1041-1050.
- WANG L Y, QIN L, LYU X G, et al. Progress in researches on effect of iron promoting accumulation of soil organic carbon[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(5): 1041-1050.
- [5] CHEN S A, HEANEY P J, POST J E, et al. Hematite-goethite ratios at pH 2-13 and 25-170 °C: a time-resolved synchrotron X-ray diffraction study[J]. *Chemical Geology*, 2022, 606: 120995.
- [6] WHITAKER A H, AUSTIN R E, HOLDEN K L, et al. The structure of natural biogenic iron (oxyhydr) oxides formed in circumneutral pH environments[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2021, 308: 237-255.
- [7] ZHANG X W, LIU X Y, KONG L W, et al. Role of free iron oxides in the physicochemical and mechanical properties of natural clay[J]. *Engineering Geology*, 2022, 303: 106665.
- [8] 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.
- [9] GAO Y, HE W, ZHANG X Y, et al. Investigation on strength and deformation properties of lateritic clay[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 411: 134276.
- [10] 杨荫华,柏树田. 红土干燥脱水不可逆性对物理力学性质的影响[J]. *岩土工程学报*, 1982(4): 104-113.
- YANG Y H, BAI S T. Influence of irreversibility of desiccation of lateritic soils on their physico-mechanical properties[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1982(4): 104-113.
- [11] 冯金良,赵泽三,高国瑞. 无定形态游离氧化铁脱水老化对粘性土物理性质的影响[J]. *工程地质学报*, 1993, 1(2): 85-92.
- FENG J L, ZHAO Z S, GAO G R. The effect of amorphous free ferric oxide on the physical properties of clay soil in the process of dehydration[J]. *Journal of Engineering Geology*, 1993, 1(2): 85-92.
- [12] 孔令伟,罗鸿禧. 游离氧化铁形态转化对红粘土工程性质的影响[J]. *岩土力学*, 1993(4): 25-39.
- KONG L W, LUO H X. Effect of the conversion in form of free iron oxide on the engineering property of the red clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1993(4): 25-39.
- [13] WANG Y, CAO Z Z, NIU Y, et al. Macromechanics, microstructure and particle contact model of artificially cemented laterite[J]. *Materials Express*, 2021, 11(5): 732-739.
- [14] 顾新运,李淑秋,徐拔和. 温度对微晶氧化铁形成与性质的影响[J]. *土壤学报*, 1989, 26(1): 9-15 + 101-102.
- GU X Y, LI S Q, HSU P H. Effect of temperature on the formation and properties of submicron iron oxides[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1989, 26(1): 9-15+101-102.
- [15] 马世昌. 化学物质辞典[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1999.
- MA S C. Dictionary of chemical substances[M]. Xi'an: Shaanxi Science & Technology Press, 1999.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准; GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for geotechnical testing method; GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [17] 韦江杏,邓羽松,廖达兰,等. 桂东南花岗岩崩岗土壤界限含水率空间变异及影响因素[J]. *土壤学报*, 2023, 60(3): 749-761.
- WEI J X, DENG Y S, LIAO D L, et al. Spatial variation and influencing factors of soil limiting water content of granite collapsing gullies in southeast Guangxi[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(3): 749-761.

- [23] 张中华,段瀚. 基于 Amos 的环境地方性与游客地方感之间的关系机理分析——以西安大明宫国家考古遗址公园为例[J]. 旅游科学,2014,28(4):81-94.
ZHANG Z H, DUAN H. Analysis on the relation mechanism between environmental locality and tourists' sense of place based on Amos7.0 platform: a case study of Xi'an Daming Palace National Archaeological Park [J]. Tourism Science,2014,28(4):81-94.
- [24] 万基财,张捷,卢韶婧,等. 九寨沟地方特质与旅游者地方依恋和环保行为倾向的关系[J]. 地理科学进展,2014,33(3):411-421.
WAN J C, ZHANG J, LU S J, et al. Relationship between specific attributes of place, tourists' place attachment and pro-environment behavioral intentions in Jiuzhaigou[J]. Progress in Geography,2014,33(3):411-421.
- [25] DONO J, WEBB J, RICHARDSON B. The relationship between environmental activism, pro-environmental behaviour and social identity [J]. Journal of Environmental Psychology,2010,30(2):178-186.
- [26] 王永桂,赵士德. 地方依恋对居民文化保护行为的影响机制——文化认同的中介作用[J]. 西安建筑科技大学学报(社会科学版),2019,38(1):19-27.
WANG Y G, ZHAO S D. The influencing mechanism of place attachment on cultural protection behavior of residents—the mediating role of cultural identity [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Social Science Edition),2019,38(1):19-27.
- [27] FORNELL C, LARCKER D F. Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error[J]. Journal of Marketing Research,1981,18(1):39-50.
- [28] HU L T, BENTLER P M. Cutoff criteria for fit indexes in covariance structure analysis: conventional criteria versus new alternatives [J]. Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal, 1999, 6(1):1-55.
- (责任编辑 王利君)

(上接第 64 页)

- [18] 肖桂元,朱杰茹,徐光黎,等. NaCl 溶液引起红黏土界限含水率变化的试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(9):3314-3321.
XIAO G Y, ZHU J R, XU G L, et al. Experimental study on change of limit water content of red clay caused by NaCl solution [J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2021,52(9):3314-3321.
- [19] 高明霞,李鹏,王国栋,等. 南坪水库筑坝土料分散机理及原因分析[J]. 岩土工程学报,2009,31(8):1303-1308.
GAO M X, LI P, WANG G D, et al. Mechanism and reason of dispersivity of dam soil in Nanping Reservoir [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009,31(8):1303-1308.
- [20] NAMAYANDEH A, ZHANG W, WATSON S K, et al. Goethite and hematite nucleation and growth from ferrihydrite: effects of oxyanion surface complexes [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(13):5952-5962.
- [21] 陈家坊,何群,邵宗臣. 土壤中氧化铁的活化过程的探讨[J]. 土壤学报,1983,20(4):387-393.
CHEN J F, HE Q, SHAO Z C. Study on the activation process of iron oxides in soil [J]. Acta Pedologica Sinica,1983,20(4):387-393.
- (责任编辑 唐彦彦)