

纳米石墨粉掺入对红黏土微观结构的影响

郭心荷¹, 谢锦生¹, 白汉营¹, 付伟^{1,2}

¹桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

²有色金属矿产勘查与资源高效利用省部共建协同创新中心, 广西 桂林

收稿日期: 2023年3月1日; 录用日期: 2023年4月13日; 发布日期: 2023年4月23日

摘要

纳米石墨粉是一种具有良好应用潜力的土体外掺剂, 可以运用于红黏土的性质改良中。本研究对采自桂林两地红黏土的矿物成分进行分析, 并对原状样品与纳米石墨粉改性后样品进行微观成像观察, 探究了纳米石墨粉对红黏土微观结构的影响。结果显示: 雁山、杨堤两地红黏土主要矿物成分为高岭石、石英、埃洛石和三水铝石, 两地红黏土均有较强的淋滤、风化程度, 其中雁山红黏土的淋滤、风化程度均强于杨堤红黏土。纳米石墨粉的掺入有效地改善了红黏土的微观结构, 缩小了其孔隙尺寸, 增强了其土体结构的整体胶结性, 使其向均匀的密实结构变化。雁山、杨堤两地原始未压缩样品在1%~2%掺量比时可呈现出最为致密的土黏结构, 而压缩样品的土黏结构均于2%掺量比时达到最为致密的状态。

关键词

纳米石墨粉, 红黏土, 微观结构, 矿物分析

Effect of Addition of Nano-Graphite Powder on Microstructure of Red Clay

Xinhe Guo¹, Jinsheng Xie¹, Hanying Bai¹, Wei Fu^{1,2}

¹College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

²Collaborative Innovation Center for Exploration of Non-Ferrous Metal Deposits and Efficient Utilization of Resources, Guilin Guangxi

Received: Mar. 1st, 2023; accepted: Apr. 13th, 2023; published: Apr. 23rd, 2023

Abstract

Nano-graphite powder is a kind of *in vitro* soil admixture with good application potential, which can be used in the property improvement of red clay. In this study, the mineral composition of the

red clay in Guilin, and the micro-morphology of the original samples and the modified samples were observed, so as to explore the influence of the nano-graphite powder on the microstructure of the red clay. The results show that the main mineral components of Yanshan and Yangdi red clay are kaolinite, quartz, halloite and bauxite. The red clay of Yanshan and Yangdi have strong leaching and weathering degrees, among which the leaching and weathering degrees of Yanshan red clay are stronger than those of Yangdi red clay. The addition of nano-graphite powder effectively improved the microstructure of the red clay, reduced the pore size, enhanced the overall cementation of the soil structure, and made it change to a uniform compact structure. The original uncompressed samples from Yanshan and Yangdi showed the densest soil structure at 1%~2%, while the soil structure of the compressed samples reached the densest state at 2%.

Keywords

Nano-Graphite Powder, Red Clay, Microstructure, Mineral Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

红黏土是一类由碳酸盐岩在各种地质应力作用下, 经过强烈物理化学风化作用及红土化作用后形成的特殊土体[1] [2] [3]。其具有高黏粒含量、高含水率、高孔隙比、高液塑限、多裂隙性的工程地质特性, 在工程中往往产生诸如道路开裂、地基失稳、不均匀沉降等工程病害[4] [5]。

近年来, 采用相关改性材料对红黏土工程性能的开展改性机理研究十分普遍, 且前人已经做了大量的尝试。谈云志等[6]尝试通过掺水泥来改良软黏土性质, 发现水泥改良软黏土在冻融循环作用下会引起黏土体内部结构产生损伤, 从而降低了黏土体的力学强度。刘之葵等[7]通过掺入粉煤灰对桂林红黏土进行改良试验, 发现粉煤灰能有效提高红黏土的抗剪强度, 但是掺量比达到某一值时粘聚力开始下降。Suits等[8]则采用高炉灰渣的固体废弃物对膨胀土中进行改良, 有效地改善了膨胀土的膨胀性和可塑性。综合上述材料来看, 具有小尺寸效应、表面能大的材料相对于普通外掺剂在改良土体本身不良的基本物理性质上, 能更好地提升红黏土的整体强度[9] [10] [11] [12]。

然而, 相比以上普通外掺剂而言, 在红黏土纳米级材料的改性运用研究上, 目前前人的成果并不甚充分。近些年, 纳米材料已经运用到建筑材料等领域, 这暗示着纳米材料亦可被运用于改良红黏土的力学性质。纳米石墨粉便是其中极具潜力的一种土性改良剂[13] [14]。其本身具有粒径细小, 粒度均匀, 表面活性大、高纯度等特点, 颗粒巨大的表面能够产生团聚效应, 有利于黏土颗粒的聚集[15] [16] [17]。侯越峰等[18]发现加入少量的纳米石墨颗粒就能起到很好的抗磨减摩作用。官文超等[19]采用自由基原位聚合的方法对纳米石墨粉进行化学修饰, 发现纳米石墨具有优异的减摩性能和承载能力。

现有研究均证明将纳米石墨粉掺杂于红黏土当中, 能够强化粒间结构而改善基本物理指标, 从而提升土体力学性能[20] [21], 但鲜有针对纳米石墨粉对红黏土微观结构影响的研究。因此, 为充分探索纳米石墨粉对红黏土的改性潜力, 厘清纳米石墨粉对红黏土的改性机理, 本文在分析原状红黏土样品的矿物成分基础上, 对原状样品和纳米石墨粉改性后样品进行微观成像观察, 探究纳米石墨粉对红黏土微观结构的影响, 为红黏土的工程利用价值提供更为佳的参考手段。

2. 样品采集及分析测试方法

样品采自广西桂林雁山区及桂林杨堤，取样位置见图 1。桂林雁山红黏土取自桂林理工大学雁山校区 2 号组团宿舍区旁，为山林地区残积、积所成红黏土。采用挖坑取土的方法，取土深度 2~3 m，所取土样颜色呈红棕色，稍湿，土质均匀、硬塑状态、网状裂隙发育，粘性较强，含少量植物根系。桂林杨堤红黏土取自桂林杨堤漓江边桃源公路旁，为河流阶地冲积、冲洪积所成红黏土。在路旁斜坡黏土出露面取土，取土深度 1~2 m，土样颜色黄褐色，稍湿、结构紧密、指压土芯不易变形、裂隙不发育、粘性较弱。

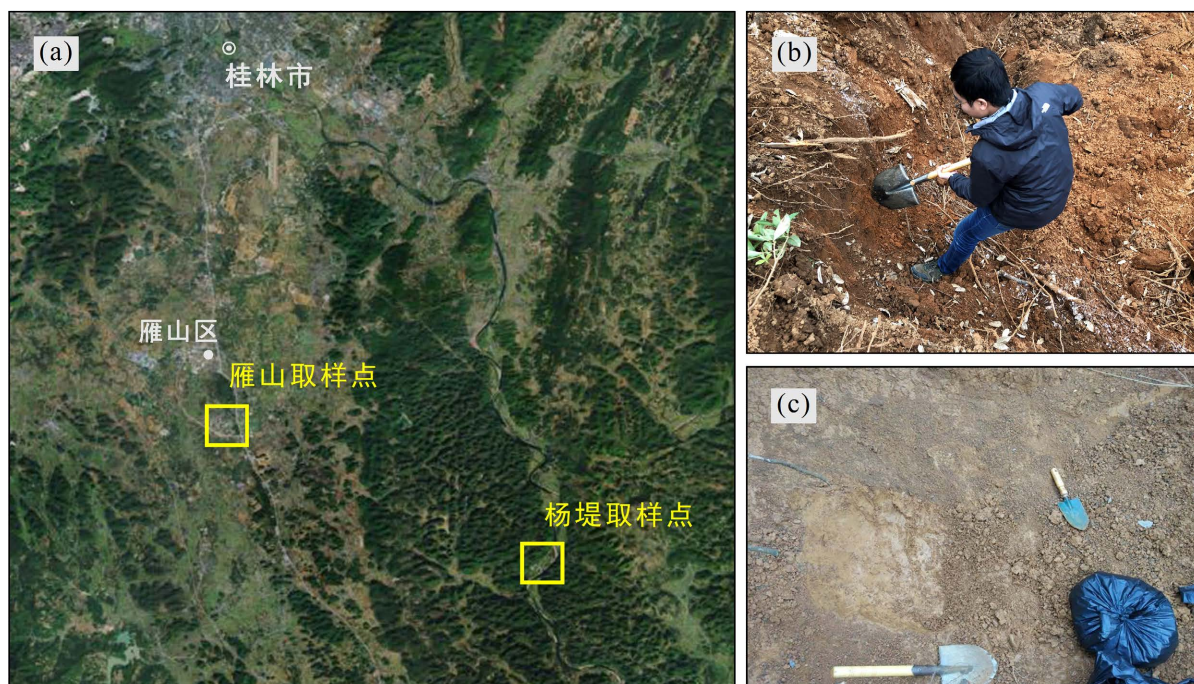


Figure 1. (a) Sampling location map of Guilin red clay; (b) Yanshan red clay collection site; (c) Yangdi red clay collection site
图 1. (a) 桂林红黏土取样位置图; (b) 雁山红黏土取土现场; (c) 杨堤红黏土取土现场

Table 1. System resulting data of standard experiment

表 1. 标准试验系统结果数据

名称	纳米石墨粉
外观	黑色粉末
晶体形状	球形
晶形	单晶或多晶
粒径尺寸	<30 nm
比表面积	>600 m ² /g
氧化温度	≈600℃
密度	2 g/cm ³
粒度	325 目
纯度	≥99.6 wt%

所选纳米石墨粉为南京先丰纳米材料科技有限公司自主开发的纳米石墨粉,其具体参数如上表 1 所示。此款纳米石墨产品采用了负氧平衡炸药爆轰的新方法,通过调节混合炸药的成分来改变爆轰时体系的温度和压力,在合适的工艺条件下制得了高纯度的纳米石墨。

本文采用了 X 射线能量色散光谱仪分析法(EDS)及 X 射线衍射分析法(XRD)两种方式对红黏土的元素及矿物成分进行了定性、定量分析,同时采用 XRD-Rietveld 全谱拟合法对桂林红黏土的矿物进行定性定量测试。并设计了扫描电镜(SEM)试验,观察不同掺量比的纳米石墨粉红黏土在压缩和未压缩条件下微观形貌的变化,探究纳米石墨粉对红黏土的改性效果。

3. 原状红黏土的基本性质

3.1. 元素化学分析

选取了一份雁山、杨堤红黏土原状样,置于烘箱内部以 105℃烘烤 24 h,至样品质量恒重,后选取粉末状样置于样品台上于 SEM 镜下观察,并各选取五个随机靶点进行 EDS 能谱分析。雁山、杨堤红黏土能谱衍射图谱见图 2、图 3。

通过能谱分析对雁山、杨堤两地原状红黏土相对元素含量进行试验后,可以发现雁山土样无 Ca 元素,而杨堤土样含 Ca 元素但极少,说明两地红黏土淋滤程度极高,且雁山红黏土淋滤程度较杨堤更甚。两地土样能谱衍射图谱结果显示含有大量 O、Al 及 Si 元素,表明两地土样均含有大量粘土矿物,如高岭石、埃洛石等,可能含三水铝矿及石英,且 K、Mn 元素极少,未见 Na 元素,则土体可能存在伊利石、蒙脱石、绿泥石、蛭石但含量极少。两地土样还含有 Ti、Fe、Mg、K、Au 等其它元素,但相对 Al、Si 含量极少,说明由这些元素组成的矿物成分不构成土体性质的主要控制因素。同时由能谱衍射图谱还可看出,雁山红黏土 Fe 元素的含量高于杨堤红黏土,应是雁山红黏土宏观上看起来较杨堤红黏土颜色上呈现更红的原因。

但是,由于 EDS 具有只能给出相对元素含量的不足,故所生成能谱图只能说明其所对应样品各元素的相对比例,而不能说明两样品间各元素的绝对含量的高低。因此 EDS 测试只能作为较粗略的定性参考试验,为准确界定两地红黏土中的主要矿物成分,对相同试样进行了 XRD 试验以得到更为准确的定性定量结果。

3.2. 矿物成分分析

选取了一份雁山、杨堤红黏土原状样,经球磨机仔细研磨后过 200 目筛,后于 XRD 载样片上铺平并置于仪器内进行扫描。实验测定的 X 射线衍射图通过 XRD-Rietveld 全谱拟合法对两地原状红黏土样进行物相分析,以对矿物成分进行精确量化,XRD-Rietveld 分析结果如图 4 所示。

全谱拟合精修效果好坏主要评价于参数 R 因子,包拟合形式(R_p)、拟合值(R_{wp})和拟合期望值(R_{exp}),以及拟合优度值(gof , $gof = R_{wp}/R_{exp}$)。在实际应用中一般认为, $R_{wp} < 15\%$ 、 $R_{exp} < 15\%$ 、 $gof < 5$ 即可视为计算谱与实测谱相匹配[22]。其中雁山原状红黏土拟合值 $R_{wp} = 4.5\%$, $R_{exp} = 4.0\%$, $gof = 1.12$,杨堤原状红黏土拟合值 $R_{wp} = 4.1\%$, $R_{exp} = 4.1\%$, $gof = 1.00$,可认为两谱峰拟合效果极佳,量化结果可信。

由图 4 得到雁山原状红黏土主要矿物有高岭石、石英、埃洛石和三水铝石四种,其中各矿物质量分数为:高岭石 45.31%、石英 11.91%、埃洛石 11.23%、三水铝石 31.56%。杨堤原状红黏土主要矿物与雁山原状红黏土相同,为高岭石、石英、埃洛石和三水铝石四种,其中各矿物质量分数为:高岭石 39.18%、石英 21.35%、埃洛石 20.51%、三水铝石 18.96%。

从矿物质量分数占比来看,雁山原状红黏土中高岭石及三水铝石的质量分数要高于杨堤原状红黏土。因此,由红黏土风化过程:长石→伊利石→埃洛石→高岭石→三水铝石可知,雁山及杨堤两地红黏土风化程度相当彻底,且雁山红黏土风化程度要高于杨堤红黏土[23]。

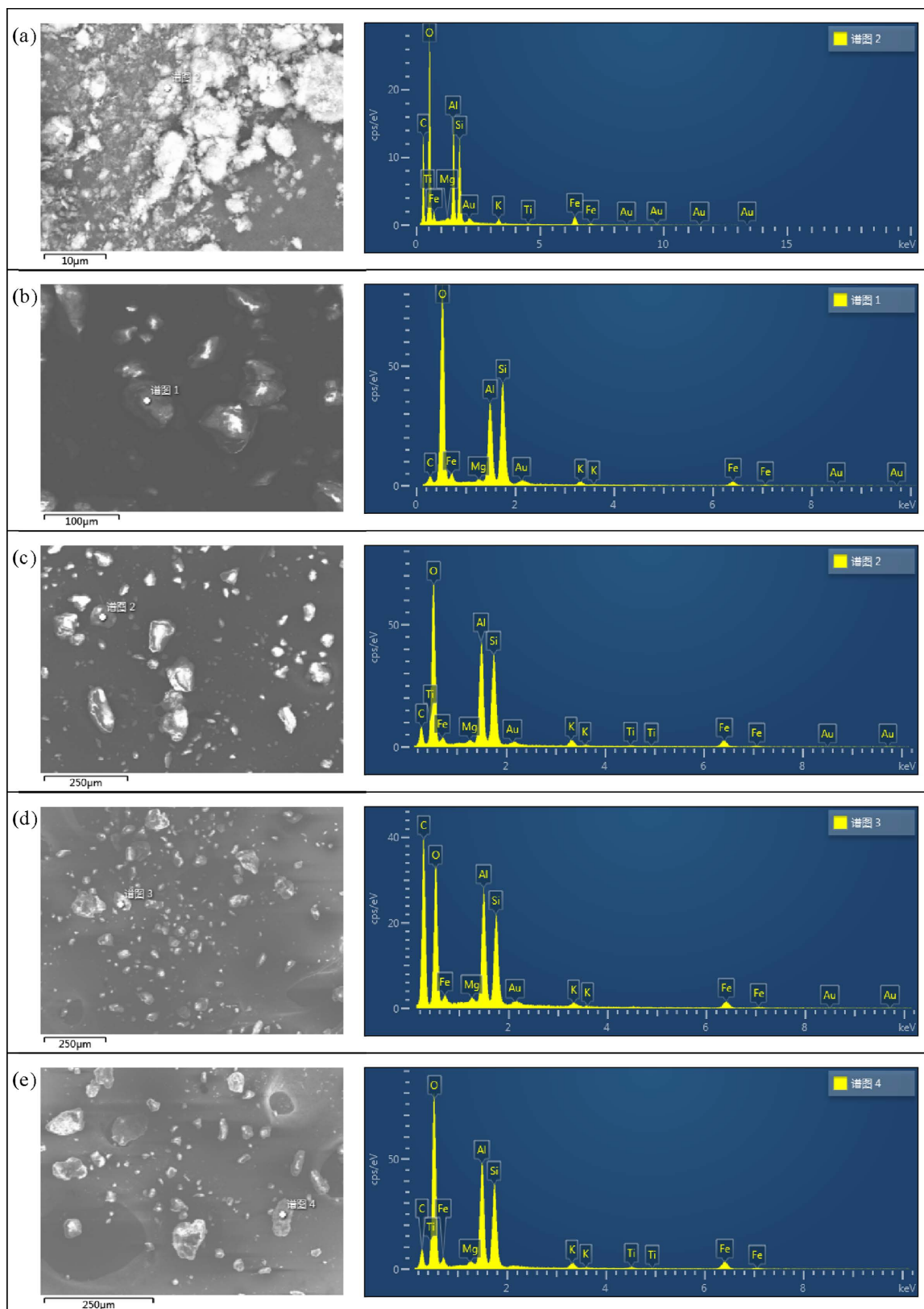


Figure 2. Energy spectrum diffraction of elements in Yanshan red clay
图 2. 雁山红黏土元素能谱衍射图

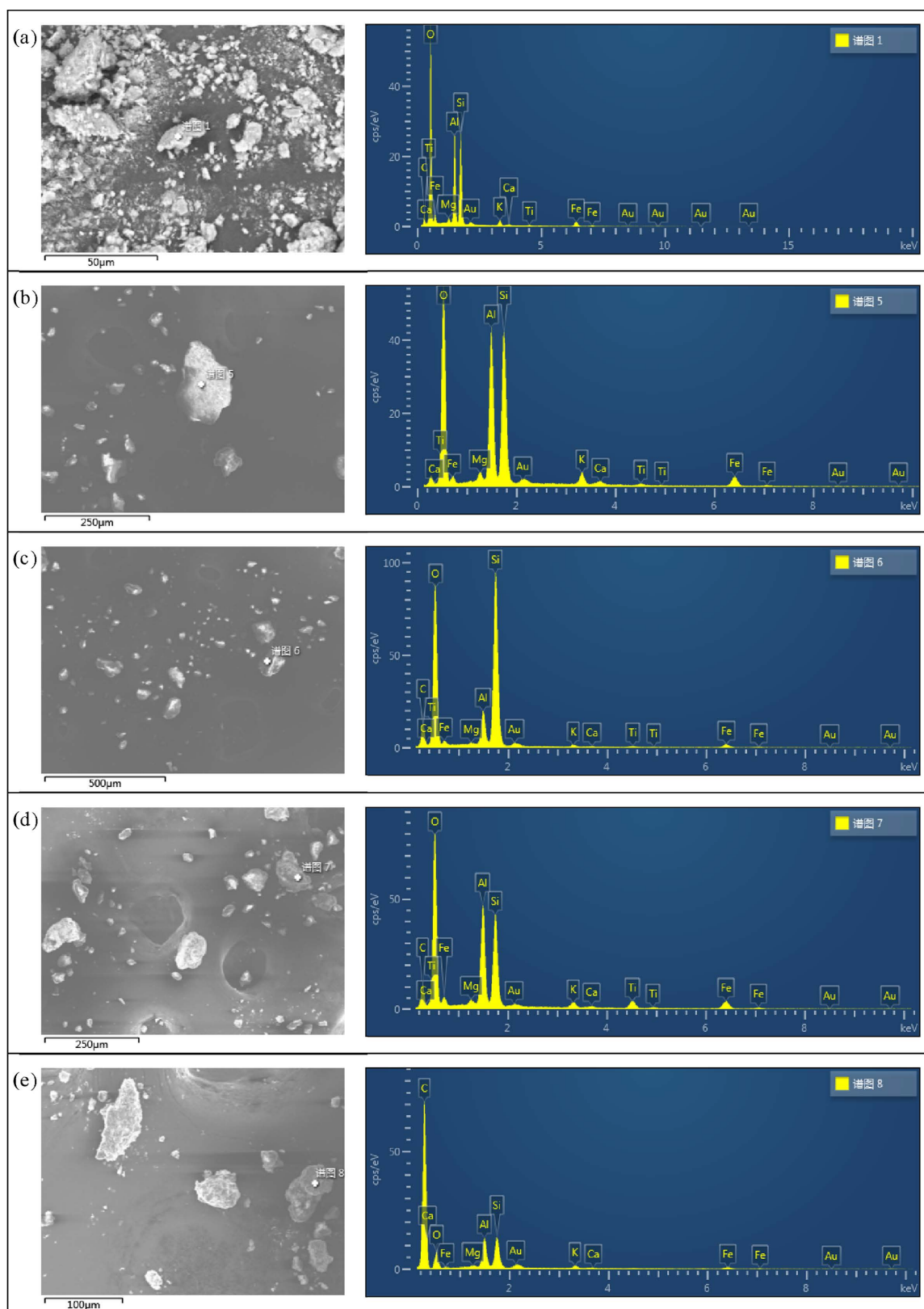
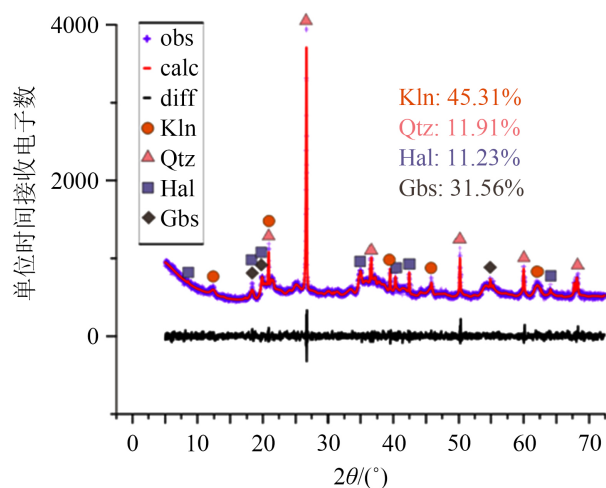
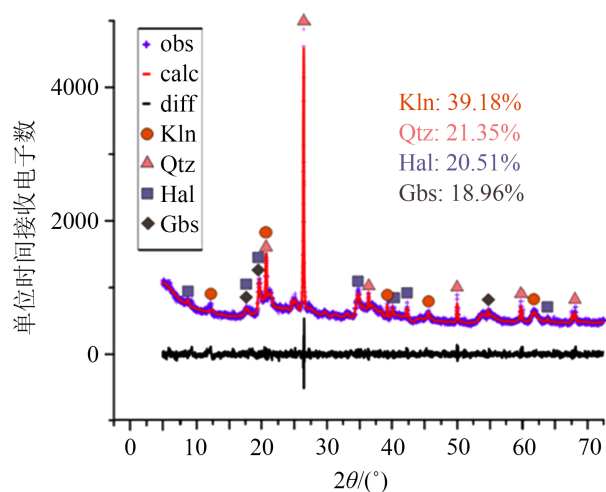


Figure 3. Energy spectrum diffraction of elements in Yingdi red clay

图 3. 杨堤红黏土元素能谱衍射图



(a) 雁山原状红黏土



(b) 杨堤原状红黏土

Figure 4. XRD-Rietveld full spectrum fitting quantization map of Yanshan and Yangdi undisturbed red clay (obs—original spectrum; calc—fitting spectrum; diff—fitting effect indicator line, the flatter the better the effect; Kln—kaolinite; Qtz—quartz; Hal—halloysite; Gbs—alumina)

图 4. 雁山及杨堤原状红黏土 XRD-Rietveld 全谱拟合量化图谱合图(obs——原始谱; calc——拟合谱; diff——拟合效果指示线, 越平直效果越好; Kln——高岭石; Qtz——石英; Hal——埃洛石; Gbs——三水铝矿)

4. 纳米石墨粉对红黏土微观结构的影响

4.1. 实验设计

本文在雁山、杨堤红黏土中选取了十六组样品, 进行了 SEM 试验, 观察其微观形貌的变化。各样品设计如下:

- 1) 雁山未压缩红黏土样品四组, 纳米石墨粉掺量分别为 0%、1%、2%、3%;
- 2) 雁山压缩后红黏土样品四组, 纳米石墨粉掺量分别为 0%、1%、2%、3%;
- 3) 杨堤未压缩红黏土样品四组, 纳米石墨粉掺量分别为 0%、1%、2%、3%;
- 4) 杨堤压缩后红黏土样品四组, 纳米石墨粉掺量分别为 0%、1%、2%、3%。

其中纳米石墨粉掺量为 0% 的样品即为未经纳米石墨粉改性的原状红黏土，压缩样的压缩率近似 100%，压缩方式使用直剪试验模具定型，并利用液压千斤顶进行压缩。将样品进行喷碳处理后置于 SEM 镜下观察其微观结构形貌，其中改性且未压缩样放大倍率为 3000 倍，改性压缩样放大倍率为 1500 倍。通过对改性前后样品以及改性前后又经压缩的样品的微观形貌结构观察，分析纳米石墨粉对红壤土微观结构的影响。

4.2. 实验结果及分析

图 5 为不同掺量比改性前后未经压缩的雁山红黏土 SEM 图。在未掺入纳米石墨粉时(图 5(a))，雁山红黏土呈现出明显的松散团块状结构，各团粒间相互松散联结构成土体的主要架构，粒团间孔隙十分发育。当开始掺入纳米石墨粉后(图 5(b))，土体开始变得致密，粒间孔隙开始减少，土体基本单元从团块状开始向片状转化。当掺入 2% 的纳米石墨粉后(图 5(c))，土体变得十分致密，粒间孔隙明显减少，土体基本单元从团块状部分向片状转化，并主要以互相镶嵌作为主要接触方式。但当掺入 3% 的纳米石墨粉后(图 5(d))，土体基本单元基本全部向片状转化，然而此时粒间孔隙却又开始增大。这可能是由于过量的纳米石墨粉在片状的土体表面形成了一层薄膜层，增大了土体的润滑性，导致了土体联结力减小并使土体分散滑移。由是可见，纳米石墨粉应于 2% 掺量左右时对雁山红黏土的微观结构拥有最佳的改性效果。

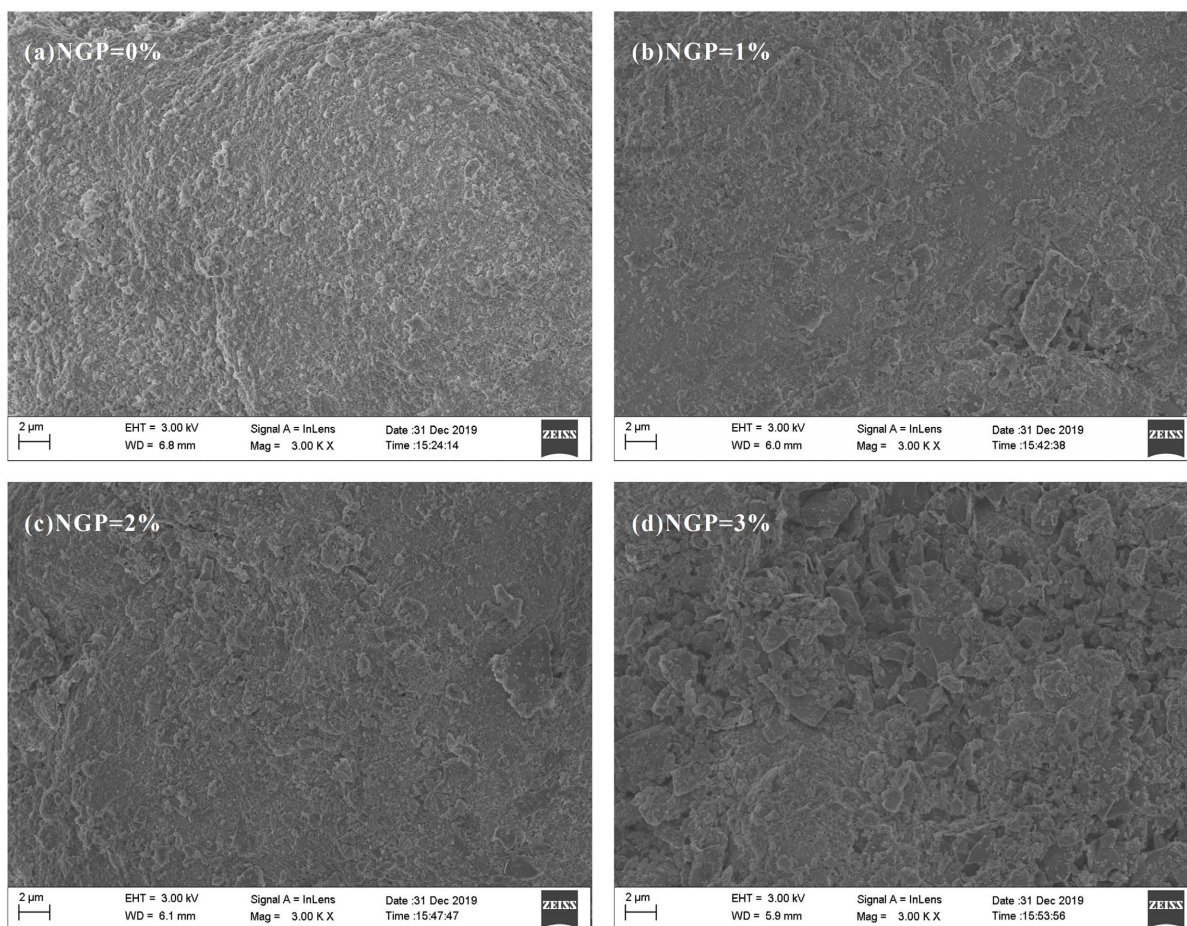


Figure 5. SEM diagram of Yanshan red clay before and after modification with different dosage ratios (NGP refers to the dosage ratio of nanometer graphite powder)

图 5. 不同掺量比改性前后未经压缩的雁山红黏土 SEM 图(NGP 即纳米石墨粉掺量比)

图 6 为不同掺量比改性前后未经压缩的杨堤红黏土 SEM 图。在未掺入纳米石墨粉时(图 6(a)), 杨堤红黏土便呈现出了松散片状的土体结构, 与雁山红黏土的团块状结构有很大不同, 但是杨堤红黏土土粒间的小孔径孔隙亦十分发育。当掺入 1% 的纳米石墨粉后(图 6(b)), 土体开始变得致密, 粒间孔隙明显减少, 并开始以互相镶嵌作为主要接触方式。但当掺入 2% 的纳米石墨粉后(图 6(c)), 土体开始呈现出分散滑移的状况, 孔隙以大孔径孔隙为主。当掺入 3% 的纳米石墨粉后(图 6(d)), 土体再次变得致密, 土体颗粒以较大的片状颗粒为主, 而土体中也出现了数道贯穿土体的大裂隙。由是可看出, 纳米石墨粉应于 1%~2% 掺量时对杨堤红黏土的微观结构具有最佳的改性效果。

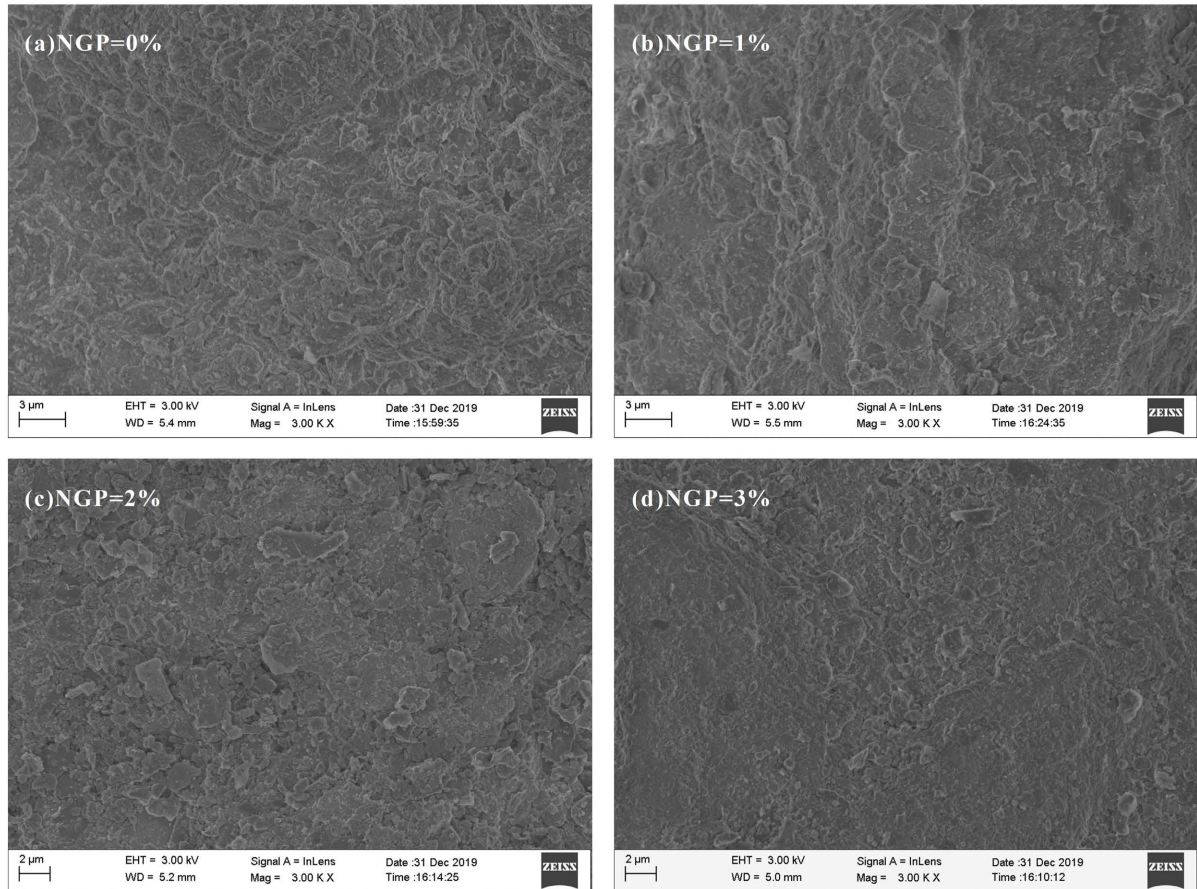


Figure 6. SEM diagram of Yangdi red clay before and after modification with different dosage ratios

图 6. 不同掺量比改性前后未经压缩的杨堤红黏土 SEM 图

图 7、图 8 均为雁山、杨堤压缩后的纳米石墨粉红黏土样 SEM 图。杨堤、雁山两地原状红黏土在压实后依然残余较多孔隙及微裂隙, 且杨堤土样的孔隙、微裂隙较雁山土样更为发育, 两地土体单元联结均较紧密且能看出明显轮廓, 但在土体形态上雁山试样基本结构单元整体呈絮状, 杨堤试样则呈现出以大孔隙分离的片状, 指示雁山土样在土体单元尺度上有着比杨堤土样更为紧密的联结。

由图 7(b)、图 8(b)中掺量 1% 试样可看出, 掺杂纳米石墨粉后, 雁山、杨堤两地压实后土样的孔隙及微裂隙结构均有所减少, 且雁山土样较杨堤土样减少更为明显: 雁山压缩样已出现局部无裂隙的密实联结区域, 而杨堤压缩样仍呈现出多裂隙状的片状结构, 指示纳米石墨粉对雁山红黏土微观结构改善的程度应大于杨堤红黏土。

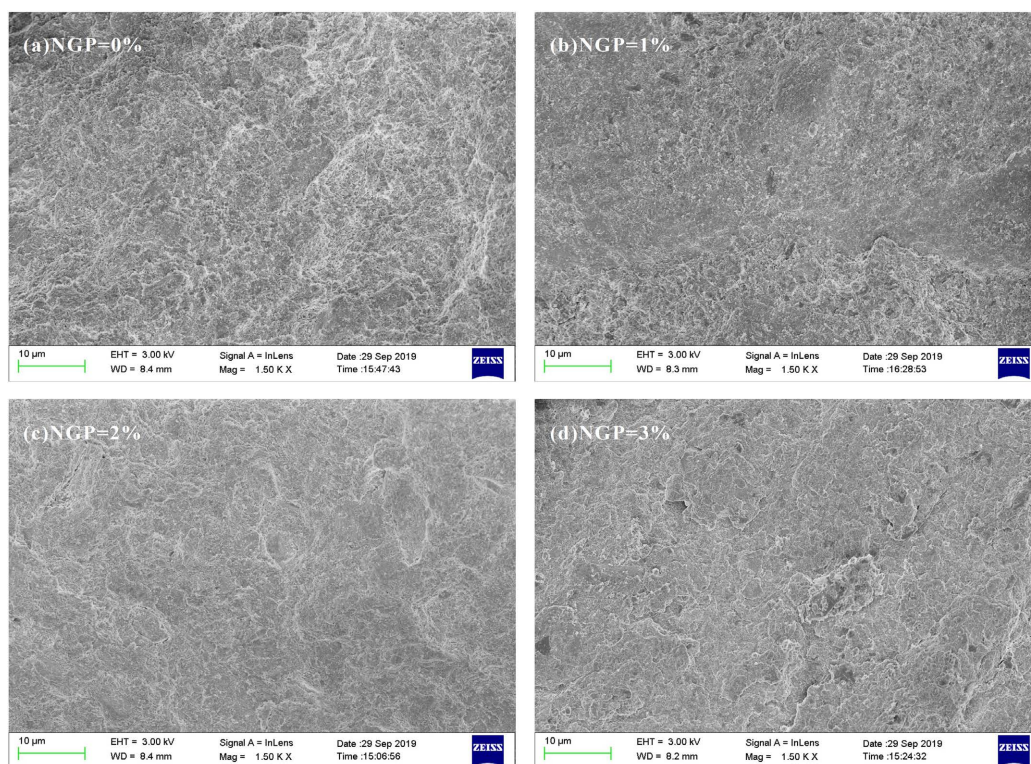


Figure 7. SEM images of Yanshan red clay after modification and compression with different dosage ratios
图 7. 不同掺量比改性前后且经过压缩的雁山红黏土 SEM 图

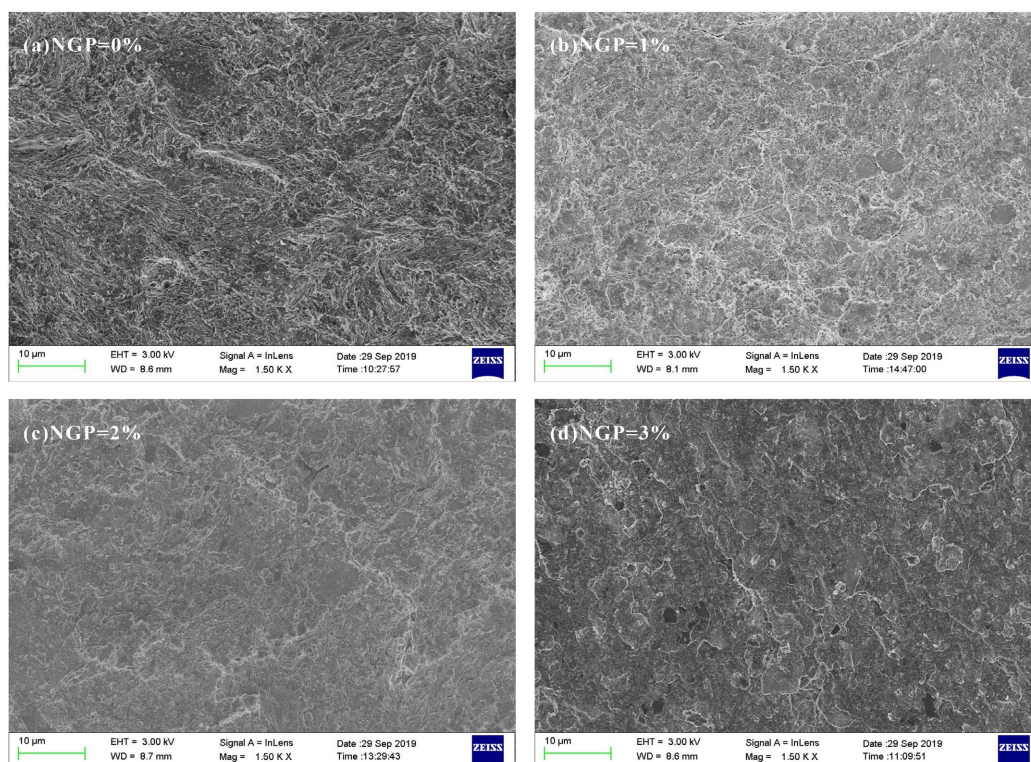


Figure 8. SEM images of Yangdi red clay after modification and compression with different dosage ratios
图 8. 不同掺量比改性前后且经过压缩的杨堤红黏土 SEM 图

由图 7(c)、图 8(c)中掺量 2%试样可看出,雁山及杨堤压缩土样微观结构均出现大范围改善,红黏土土体互相镶嵌,紧密相连,质地变得均匀,这是因为纳米石墨粉的充分掺入增强了其土体结构的整体胶结性,使其向均匀的密实结构变化。

由图 7(d)、图 8(d)中掺量 3%试样可看出,雁山土样几乎未出现微裂隙结构且土体结构均匀,指示纳米石墨粉的掺入极大改善了雁山土样的压缩性能;杨堤土样虽显得更为密实,却又开始出现少量微裂隙结构,这可能是因为大量纳米石墨粉的掺入使得土体润滑作用增加,令土体略微分散滑移。

综上所述,雁山、杨堤两地土黏样品在未掺纳米石墨粉的情况下均存在着相对其他孔隙尺寸要大的多的巨型孔隙,而掺样后孔隙平均面积变小,说明纳米石墨粉的掺入有效缩小了巨型孔隙的尺寸。同时,纳米石墨粉的掺入极大地改善了压缩后纳米石墨粉红黏土的微观结构,增强了其土体结构的整体胶结性,使其向均匀的密实结构变化。

5. 结论

1) 雁山、杨堤两地原状红黏土均有着较高的淋滤程度,且雁山红黏土较杨堤红黏土淋滤程度更高。雁山红黏土看起来较杨堤红黏土更红的原因在于,雁山红黏土中 Fe 元素的占比要高于杨堤红黏土。

2) 雁山、杨堤两地红黏土的主要矿物成分均为高岭石、石英、埃洛石和三水铝石,由高岭石及三水铝石含量偏高可知两地红黏土风化程度相当彻底,且雁山红黏土风化程度要高于杨堤红黏土。

3) 纳米石墨粉的掺入有效地改善了红黏土的微观结构,缩小了其孔隙尺寸,增强了其土体结构的整体胶结性,使其向均匀的密实结构变化。雁山、杨堤两地原始未压缩的纳米石墨粉红黏土样品在掺量比为 1%~2%时可呈现出最为致密的土黏结构,而压缩的纳米石墨粉红黏土样品的土黏结构均于 2%掺量比时达到最为致密的状态。

致 谢

感谢广西自然科学基金项目(编号:2020GXNSFAA159029)对本文的大力支持,感谢审稿专家对本文提出的宝贵意见。

基金项目

本文为广西自然科学基金项目(编号:2020GXNSFAA159029)资助。

参考文献

- [1] Xiao, M., Wang, J. and Chen, X. (2005) Material Composition and Engineering Characteristics of Red Clay in Guigang, Guangxi. *Journal of Earth Science*, **16**, 84-88.
- [2] 曾召田, 赵艳林, 吕海波, 等. 广西岩溶地区红黏土的工程地质特征及成因分析[C]//2015 年全国工程地质学术年会. 北京: 科学出版社, 2015: 7.
- [3] 方谦, 洪汉烈, 赵璐璐, 等. 风化成土过程中自生矿物的气候指示意义[J]. *地球科学*, 2018, 43(3): 753-769.
- [4] Xiang, W., Cui, D., Liu, Q., et al. (2010) Theory and Practice of Ionic Soil Stabilizer Reinforcing Special Clay. *Journal of Earth Science*, **21**, 882-887. <https://doi.org/10.1007/s12583-010-0141-x>
- [5] 李龙起, 罗书学, 姜红, 等. 非饱和红黏土土水特性及强度特征研究[J]. *西南交通大学学报*, 2014, 49(3): 393-398+431.
- [6] 谈云志, 吴军, 黄龙波, 等. 冻融作用下水泥改良软黏土的性能演化过程[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(2): 209-214.
- [7] 刘之葵, 郭彤, 王剑. 粉煤灰和二灰对桂林红黏土力学性质的影响[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(3): 86-92.
- [8] Suits, L.D., Sheahan, T.C., Al-Rawas, A.A., et al. (2002) A Comparative Evaluation of Various Additives Used in the Stabilization of Expansive Soils. *Geotechnical Testing Journal*, **25**, 199. <https://doi.org/10.1520/GTJ11363J>

- [9] 董浩强, 王永康, 朱紫阳, 等. 石灰粉煤灰改良信阳红黏土试验研究[J]. 砖瓦, 2023(2): 73-76.
- [10] 洪昌寿, 辛佳怡, 李邵, 等. 低掺量木质素磺酸钙改良红黏土氦气阻滞效果[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(10): 109-114.
- [11] 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.
- [12] 罗国夫, 陈开圣, 骆弟普. 磷石膏稳定红黏土的压缩特性及微观机理[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(2): 644-656. <https://doi.org/10.16552/j.cnki.issn1001-1625.20230207.004>
- [13] 白汉营, 高宇豪, 陈学军, 等. 纳米石墨粉红黏土改良机理试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(3): 86-92.
- [14] Gu, Y., Wan, Q., Li, X., et al. (2022) Structure and Evolution of Clay-Organic Nanocomposites in Three Leading Shales in China. *Journal of Earth Science*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1788.P.20220805.1629.014.html>
- [15] 陈学军, 李家成, 宋宇, 等. 纳米石墨粉对红黏土力学性质的影响[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 97-102.
- [16] 李佳明, 唐世斌, 宋怀博, 等. 纳米石墨粉改性膨胀土的工程特性及微观结构[J]. 中南大学学报(英文版), 2022, 29(2): 499-514.
- [17] 李佳明, 陈学军, 杨越, 等. 纳米石墨粉改良红黏土试验[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(5): 69-73+80+88.
- [18] 侯越峰, 干路平, 黄海栋, 等. 含片状纳米石墨粒子润滑油的制备及其摩擦学行为[J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2005, 31(6): 743-746.
- [19] 官文超, 刘益锋, 黄明星. 纳米石墨/聚丙烯酸乙酯复合乳液的合成及其润滑性能研究[J]. 润滑与密封, 2005(3): 9-10, 19.
- [20] 张雨昕, 白汉营, 高宇豪, 等. 纳米石墨粉红黏土强度影响因素敏感性试验研究[C]//2018 年全国工程地质学术年会. 北京: 科学出版社, 2018: 8.
- [21] 刘曦, 张养德, 乔亮, 等. 高比表面积纳米石墨粉的微波吸收性能研究[J]. 功能材料, 2020, 51(5): 5070-5075.
- [22] 李华, 孙伟, 刘加平. XRD-Rietveld 法用于水泥基材料物相的定量分析[J]. 混凝土, 2013(1): 1-5.
- [23] 任帮政. 峨眉山玄武岩斜坡残积土中粘土矿物的形成机制研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.