

胡建林,杨文龙,周永祥,等.生石灰激发地质聚合物固化土剪切特性试验研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(5):568-577.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250058
HU Jianlin, YANG Wenlong, ZHOU Yongxiang, et al. Experimental study on shear properties of quicklime-stimulated geopolymer solidified soil[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(5): 568-577. DOI: 10.11956/j. issn. 1008-0562.20250058

生石灰激发地质聚合物固化土剪切特性试验研究

胡建林^{1,2}, 杨文龙¹, 周永祥², 冷发光³, 杜修力²

(1. 河北建筑工程学院 土木工程学院, 河北 张家口 075000; 2. 北京工业大学 桥梁工程安全与韧性全国重点实验室, 北京 100124; 3. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100124)

摘要: 为提高土体抗剪强度, 以生石灰作为碱激发剂制备地质聚合物并用来固化土体, 通过直剪试验研究生石灰掺量、高炉矿渣与粉煤灰质量比、固化剂掺量、养护龄期对地质聚合物固化土抗剪强度的影响规律, 并通过扫描电子显微镜 (SEM) 和能量色散谱仪 (EDS) 研究土体的微观结构。研究结果表明: 生石灰掺量对地质聚合物固化土的抗剪强度存在显著的阈值效应, 生石灰掺量为 10% 时, 土体抗剪强度达到峰值; 随着高炉矿渣与粉煤灰质量比的增大, 土体抗剪强度逐渐增大; 随着固化剂掺量的增加和养护龄期的延长, 土体黏聚力和抗剪强度逐渐增大, 内摩擦角呈先增大后趋于稳定的变化趋势; 掺加适量的生石灰可促进缩聚反应, 生成大量的 C-A-S-H 凝胶, 从而改善土体结构, 提高土体强度。研究结论为生石灰激发地质聚合物固化土的应用提供参考。

关键词: 直剪试验; 地质聚合物固化土; 剪切特性; 微观结构; 聚合产物; 生石灰

中图分类号: TU447

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)05-0568-10

Experimental study on shear properties of quicklime-stimulated geopolymer solidified soil

HU Jianlin^{1,2}, YANG Wenlong¹, ZHOU Yongxiang², LENG Faguang³, DU Xiuli²

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, China;
2. National Key Laboratory of Bridge Safety and Resilience, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. China Academy of Building Research Company Limited, Beijing 100124, China)

Abstract: To enhance the shear strength of soil, geopolymers were prepared using quicklime as the alkaline activator and used to solidify the soil. The influence laws of the dosage of quicklime, the mass ratio of blast furnace slag to fly ash, the dosage of solidifying agent, and the curing age on the shear strength of geopolymer-solidified soil were studied through direct shear tests. The microstructure of the soil was studied by scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). The results show that the dosage of quicklime has a significant threshold effect on the shear strength of geopolymer solidified soil. When the dosage of quicklime is 10%, the shear strength of the soil reaches the peak. With the increase of the mass ratio of blast furnace slag to fly ash, the shear strength of the soil gradually increases. With the increase of the dosage of the curing agent and the extension of the curing age, the cohesion and shear strength of the soil gradually increase, and the internal friction angle shows a changing trend of first increasing and then tending to stabilize. Adding an appropriate amount of quicklime can promote the polycondensation reaction, generating a large amount of C-A-S-H gel, thereby improving the soil structure and enhancing the soil strength. The research results can provide a reference for the application of quicklime-activated geopolymer solidified soil.

Keywords: direct shear test; geopolymer solidified soil; shear properties; microstructure; polymerizate; quicklime

收稿日期: 2025-02-20 修回日期: 2025-03-17 接受日期: 2025-04-02 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52378213); 河北省高等学校科学技术研究项目 (QN2024070)

作者简介: 胡建林 (1986-), 男, 河北 张家口人, 博士研究生, 副教授, 主要从事岩土加固方面的研究。E-mail: hjl185@126.com

0 引言

天然地基承载力一般无法满足实际工程需要,常需进行加固处理。水泥土搅拌桩复合地基适用于土质种类多、加固深度大、施工工期短等工程,应用较广泛。其工作原理是以普通硅酸盐水泥为固化剂,利用特制的搅拌设备将地基土体与浆状或粉状的固化剂强制搅拌,使地基土体硬化,形成均质搅拌桩体,从而提高地基承载力。水泥土搅拌桩抗压性能较好,但抗折、抗拉及抗剪性能相对较差^[1-3],若应用于山区软弱土斜坡,桩体易发生脆性破坏。桩体的抗剪性能是维持边坡稳定的关键指标^[4]。由于材料特性和固化工艺的限制,固化土搅拌桩的抗剪强度通常较低,易导致路基边坡失稳。目前,全球生产水泥所排放的二氧化碳正以每年6%的速度增长,过多的生产和使用水泥,会对环境造成严重污染^[5-7]。为了满足绿色经济的工程建设发展需求,寻找一种绿色低碳且性能优异的新型凝胶材料来代替水泥具有重要的现实意义^[8]。

地质聚合物是以工业固体废物或富硅铝酸盐的天然矿物为原料,在碱性激发剂作用下合成的具有三维网状结构的聚硅铝酸盐胶凝材料,在工程领域应用广泛。刘景锦等^[9]以矿渣粉和粉煤灰为原材料,以氢氧化钠为碱激发剂制备地质聚合物,研究碱激发剂掺量及养护龄期对固化淤泥质软土的影响。张津津等^[10]以粉煤灰、矿渣为主要原料,以氢氧化钠、硅酸钠为激发剂制备地质聚合物,研究激发剂种类、矿渣与粉煤灰比例、养护条件对地质聚合物固化砂土力学性能的影响。王东星等^[11]以粉煤灰为原料,以氢氧化钠、碳酸钠、硅酸钠为激发剂制备地质聚合物,研究养护龄期、激发剂掺量及种类等多种因素对地质聚合物固化土抗压强度的影响,并通过微观分析揭示其固化机制。吴俊等^[12]以矿渣、粉煤灰为原材料,以氢氧化钠为激发剂,采用“一步法”制备矿渣-粉煤灰地质聚合物并用来固化淤泥质黏土,揭示激发剂与原材料之比、水灰比对固化淤泥质黏土抗压强度的影响及固化机制。周恒宇等^[13]以氢氧化钠为碱激发剂,采用偏高岭土地质聚合物固化淤泥,研究其微观结构及碱固比、氢氧化钠浓度、养护温度、养护龄期和矿渣掺量对固化淤泥力学特性的影响。

目前,大部分研究均以水玻璃、氢氧化钠等强碱性物质为激发剂来制备地质聚合物,这些物质碱性较强,且价格相对较高,不利于大规模工程应用。生石灰属于弱碱,且价格远低于氢氧化钠,若能代替氢氧化钠等强碱来制备地质聚合物胶凝材料,可拓宽地质聚合物的工程应用前景。

本文以高炉矿渣(GGBS)、粉煤灰(FA)为原材料,以生石灰为碱激发剂制备地质聚合物并用来固化土体,通过直剪试验研究生石灰掺量、高炉矿渣与粉煤灰质量比(以下简称GF比)、固化剂掺量以及养护龄期对地质聚合物固化土抗剪强度的影响,并通过扫描电子显微镜(SEM)和能量色散谱仪(EDS),从微观角度探究生石灰掺量及固化剂掺量对土体内部结构的影响,揭示其固化机制,以为生石灰激发地质聚合物固化土的应用提供参考。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料

土样取自张家口市某工地,为粉质黏土。室内试验测得土样塑限为15.1%,液限为27.4%,最优含水率为12.2%,相对密度为2.734 g/cm³,最大干密度为1.790 g/cm³。采用型号为P·O 42.5和P·O 32.5的普通硅酸盐水泥。试验用水为自来水。生石灰取自张家口市,高炉矿渣和粉煤灰取自河北灵寿矿产品公司。试验材料见图1,高炉矿渣和粉煤灰的XRD谱图见图2。由图2可以看出,高炉矿渣的主要成分为非晶质矿物。粉煤灰的XRD谱图中存在多个明显波峰,其主要成分为石英石、莫来石和赤铁矿。原材料微观形貌见图3。由图3可以看出,粉煤灰中含有大量不同尺寸的球形颗粒,高炉矿渣呈无序分散状态,主要为不规则的块状结构。

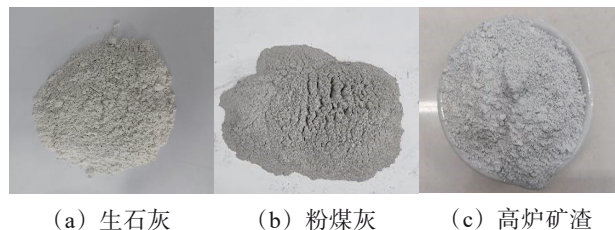


图1 试验材料

Fig.1 experimental materials

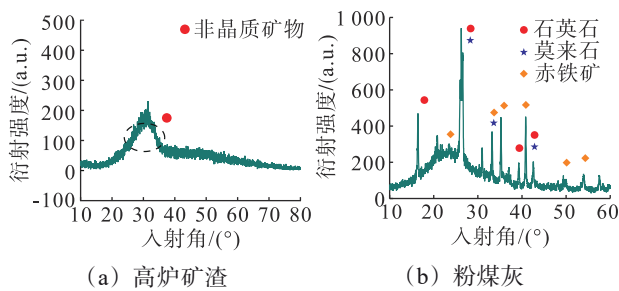
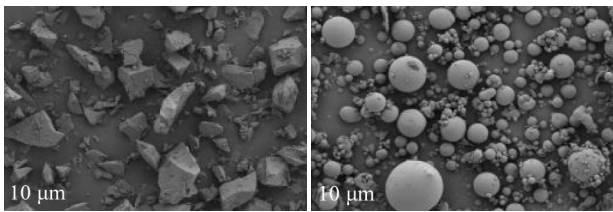


图2 高炉矿渣和粉煤灰XRD谱图
Fig.2 XRD pattern of blast furnace slag and fly ash



(a) 高炉矿渣 (b) 粉煤灰
图3 原材料微观形貌

Fig.3 microstructure of raw materials

1.2 试验方案

(1)剪切试验

利用往复循环直剪仪实施剪切试验。加载过程通过恒定的剪切速率进行控制,垂直和水平载荷的最大值均设定为20 kN。具体试验方案见表1。采用3种固化剂,分别为高炉矿渣、粉煤灰及生石灰。固化剂掺量 a_c 、生石灰掺量 a_w 分别为

$$a_c = \left[\frac{(m_1 + m_2 + m_3)}{m} \right] \times 100\%, \quad (1)$$

$$a_w = \left[\frac{m_3}{(m_1 + m_2 + m_3)} \right] \times 100\%, \quad (2)$$

表1 试验方案

Tab.1 experimental scheme

类别	组号	$a_w/\%$	$a_c/\%$	养护龄期/d	GF比	法向正应力 σ_n/kPa
试验组	A	5,10,15,20	20	7	9:1,8:2,7:3,6:4,5:5	100
	B	a_f	10,15,20,25	7	9:1,8:2,7:3,6:4,5:5	100
	C	a_f	10,15,20,25	7	9:1	100,200,300
	D	a_f	20	3,7,14,28	9:1,8:2,7:3,6:4,5:5	100
	E	a_f	10,15,20,25	7	9:1,8:2,7:3,6:4,5:5	100,200,300
	F	a_f	20	3,7,14,28	9:1,8:2,7:3,6:4,5:5	100,200,300
	G	5,10,15,20	20	28	7:3	100
	H	a_f	10,15,20,25	28	7:3	100
对照组	O1	0	10,15,20,25	7		100
	O2	0	20	3,7,14,28		100

注:对照组中O1试件采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥;O2试件采用P·O 32.5普通硅酸盐水泥。

式(1)、式(2)中, m_1 、 m_2 、 m_3 、 m 分别为高炉矿渣质量、粉煤灰质量、生石灰质量、土体质量, g。

首先,开展生石灰掺量单因素试验研究,确定最优生石灰掺量 a_f 。为了精确捕捉土体强度变化拐点,生石灰掺量范围设定为5%~20%。然后,在获取最优生石灰掺量的基础上,对固化剂掺量及养护龄期开展研究。综合考虑经济性及固化土活跃期至稳定期的强度变化情况,固化剂掺量取10%~25%,养护龄期取3~28 d。

试样制备流程见图4。具体步骤如下。

步骤1 将粉质黏土碾碎,过2 mm筛后放入烘箱中烘干。

步骤2 将准备好的土样、生石灰、高炉矿渣、粉煤灰和水依次加入搅拌机中进行搅拌,搅拌完成后分3层浇筑至环刀中。试样直径为100 mm,高为40 mm。

步骤3 养护48 h后脱模,并用保鲜膜将试样包裹密封,在自然条件下养护至规定龄期。

步骤4 将试样放入剪切盒内,设置3种法向正应力,分别为100 kPa、200 kPa和300 kPa,剪切速率为1 mm/min。

依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[14],若剪切过程中存在峰值应力,则该峰值应力即为试样的抗剪强度;若剪应力持续增大,则将剪切应变达到6 mm时所对应的最大剪应力视为试样的抗剪强度。



图4 试样制备流程

Fig.4 sample preparation process

(2) SEM-EDS 试验

采用德国蔡司公司生产的 Sigma300 热场发射扫描电子显微镜,最高分辨率可达 1.0 nm。采用美国 EDAX 公司生产的 Octance Plus 型 X 射线能谱仪,扫描前对试样进行喷金处理。剪切试验结束后,选取部分试样,对其断裂面处的碎块进行分析,研究不同条件下固化土的微观结构。

2 试验结果与分析

2.1 最优生石灰掺量

法向正应力为 100 kPa、固化剂掺量为 20%、养护龄期为 7 d 时,不同 GF 比下,生石灰掺量对土体抗剪强度的影响见图 5。其中, G9F1 表示 GF 比为 9:1,其他以此类推。

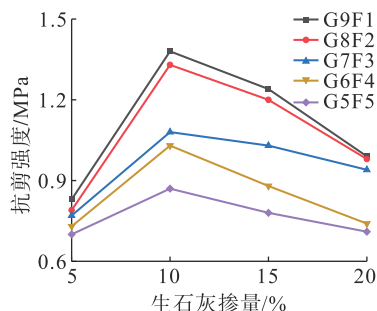


图5 不同GF比下生石灰掺量对抗剪强度的影响

Fig.5 effect of lime content on shear strength under different GF ratios

由图 5 可知,在 GF 比相同的条件下,土体抗剪强度随生石灰掺量的增加呈先增大后减小的趋势,最优生石灰掺量为 10%。这是由于适量的生石灰不仅能为聚合反应提供适宜的碱性环境,促

进矿渣解聚。同时,生石灰中的 Ca^{2+} 可与矿渣解聚产生的硅铝四面体进一步聚合,生成大量网状凝胶,从而提高土体强度。然而,当生石灰掺量过大时,土体内硅铝原料较少,聚合反应生成的网状凝胶显著减少,导致土体强度降低。在生石灰掺量相同的条件下,土体抗剪强度随 GF 比的增大逐渐增大。这是由于随着 GF 比的增大,原料中活性 SiO_2 、 Al_2O_3 增多,在生石灰提供的碱性环境中可与 Ca^{2+} 发生缩聚反应,生成致密的网状凝胶,从而有效提高土体的抗剪强度^[15]。

2.2 抗剪强度

(1) 固化剂掺量对抗剪强度的影响

法向正应力为 100 kPa、生石灰掺量为 10%、养护龄期为 7 d 时,固化剂掺量对土体抗剪强度的影响见图 6。

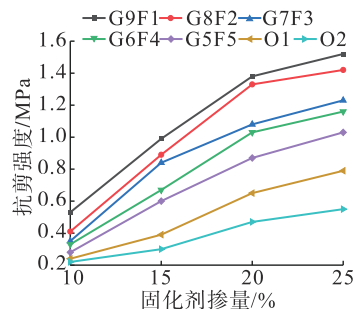


图6 不同GF比下固化剂掺量对抗剪强度的影响

Fig.6 effect of curing agent content on shear strength under different GF ratios

由图 6 可知,水泥石与地质聚合物固化土的抗剪强度变化规律无显著差异。固化剂掺量相同的条件下,地质聚合物固化土的抗剪强度均大于水泥石,

且GF比越大,土体抗剪强度越大。GF比相同的条件下,土体抗剪强度随固化剂掺量的增加逐渐增大。

GF比为9:1、生石灰掺量为10%、养护龄期为7 d时,不同法向正应力下,固化剂掺量对土体抗剪强度的影响见图7。由图7可知,固化剂掺量相同的条件下,土体抗剪强度随法向正应力的增大而增大。这是由于随着法向正应力的增大,对试样的约束作用增强,在剪切作用下,地质聚合物固化土需克服更大的力才能发生破坏。法向正应力相同的条件下,固化剂掺量为10%~20%时,土体抗剪强度增速较快。固化剂掺量为20%~25%时,土体抗剪强度增速较小,最终趋于稳定。

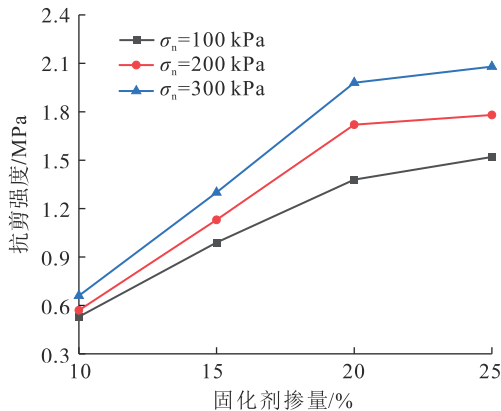


图7 不同法向正应力下固化剂掺量对抗剪强度的影响

Fig.7 effect of curing agent content on shear strength under different normal stresses

(2) 养护龄期对抗剪强度的影响

法向正应力为100 kPa,固化剂掺量为20%时,不同GF比下,养护龄期对土体抗剪强度的影响见图8。

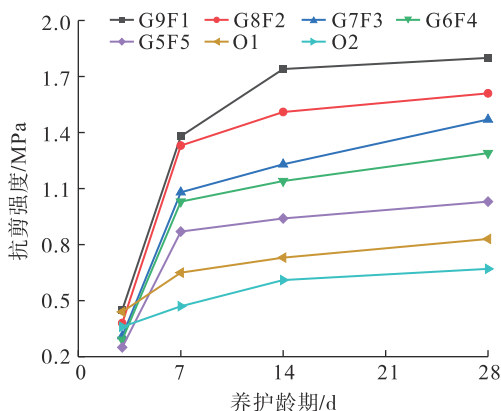


图8 养护龄期对抗剪强度的影响

Fig.8 influence of curing age on shear strength

由图8可知,养护龄期为3 d时,与水泥土相比,地质聚合物固化土的抗剪强度较小,只有GF

比为9:1时,地质聚合物固化土的抗剪强度略大于水泥土。养护龄期大于等于7 d,地质聚合物固化土的抗剪强度均大于水泥土。当GF比为9:1时,随着养护龄期由3 d增至7 d、7 d增至14 d、14 d增至28 d,土体抗剪强度分别提升了207%、26%、3%。由此可知,养护龄期小于14 d时,延长养护龄期可有效提高地质聚合物固化土的抗剪强度;而当养护龄期超过14 d后,继续延长养护龄期对地质聚合物固化土抗剪强度的提高效果不显著。

2.3 抗剪强度指标

(1) 固化剂掺量对抗剪强度指标的影响

依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[14],以法向正压力为横轴、抗剪强度为纵轴,采用式(3)库伦公式对试验数据进行拟合。拟合直线的倾角和纵轴截距分别为固化土的内摩擦角和黏聚力。

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c, \quad (3)$$

式中: τ 为抗剪强度, kPa; c 为黏聚力, kPa; φ 为内摩擦角, $^{\circ}$ 。

不同GF比下,地质聚合物固化土抗剪强度与法向正应力的关系类似,本文仅以GF比为7:3为例,当生石灰掺量为10%,养护龄期为7 d时,不同固化剂掺量下,法向正应力对土体抗剪强度的影响见图9。不同固化剂掺量下土体的抗剪强度指标见表2。由图9和表2可知,在固化剂掺量相同的条件下,地质聚合物固化土的抗剪强度随法向正应力的增大而增大,二者呈线性相关关系。

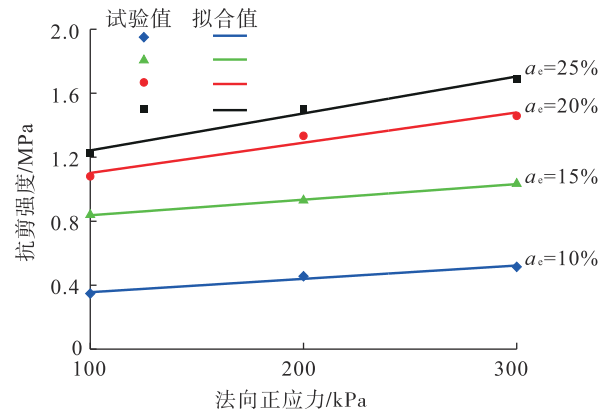


图9 不同固化剂掺量下法向正应力对土体抗剪强度的影响

Fig.9 influence of normal stress on shear strength of soil under different dosages of curing agent

表2 不同固化剂掺量下土体的抗剪强度指标

Tab.2 shear strength index of soil under different curing agent contents

$a_c/\%$	拟合公式	相关系数 R^2	c/MPa	$\varphi/(\circ)$
10	$\tau=0.83\sigma_n+0.27$	0.97	0.27	39.84
15	$\tau=0.97\sigma_n+0.84$	0.99	0.74	44.26
20	$\tau=1.89\sigma_n+0.91$	0.96	0.91	62.14
25	$\tau=2.31\sigma_n+1.01$	0.98	1.01	66.61

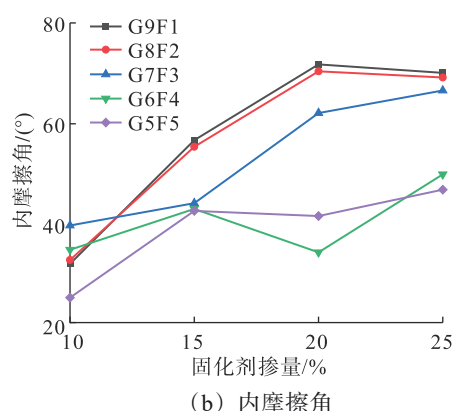
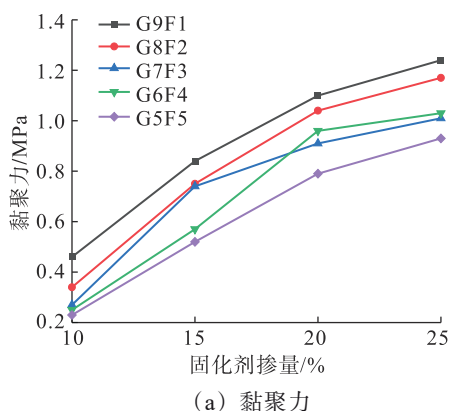


图10 土体抗剪强度指标与固化剂掺量的关系

Fig.10 relationship between soil shear strength index and curing agent content

(2) 养护龄期对抗剪强度指标的影响

GF 比为 7 : 3、生石灰掺量为 10%、固化剂掺量为 20% 时, 不同养护龄期下, 法向正应力对土体抗剪强度的影响见图 11。

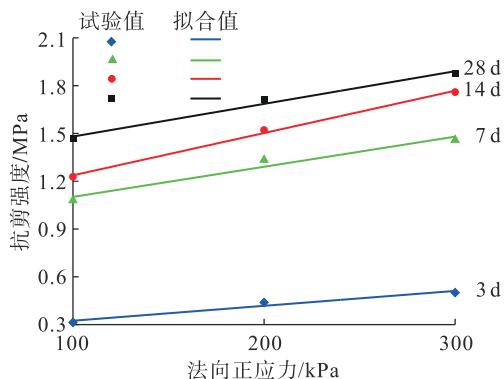


图11 不同养护龄期下法向正应力对土体抗剪强度的影响

Fig.11 influence of normal compressive stress on the shear strength of soil under different curing ages

由图 11 可知, 养护龄期相同的条件下, 随着法向正应力的增大, 土体的抗剪强度均逐渐增大, 且呈线性关系。采用库伦公式对试验值进行拟合, 得到不同养护龄期下土体的抗剪强度指标,

生石灰掺量为 10%, 养护龄期为 7 d 时, 不同 GF 比下, 土体抗剪强度指标与固化剂掺量的关系见图 10。由图 10 (a) 可知, 随着固化剂掺量的增加, 黏聚力逐渐增大。固化剂掺量相同的条件下, 黏聚力随着 GF 比的增大逐渐增大。由图 10 (b) 可知, 随着固化剂掺量的增加, 内摩擦角整体呈先增大后趋于稳定的变化趋势。固化剂掺量相同的条件下, GF 比越大, 土体内摩擦角越大。

见表 3。

表3 不同养护龄期下土体的抗剪强度指标

Tab.3 shear strength index of soil under different curing ages

养护龄期 /d	拟合公式	相关系数 R^2	c/MPa	$\varphi/(\circ)$
3	$\tau=0.94\sigma_n+0.23$	0.96	0.23	43.14
7	$\tau=1.89\sigma_n+0.91$	0.96	0.91	62.14
14	$\tau=2.66\sigma_n+0.97$	0.99	0.97	69.37
28	$\tau=2.05\sigma_n+1.28$	0.98	1.28	64.01

生石灰掺量为 10%, 固化剂掺量为 20% 时, 不同 GF 比下, 土体抗剪强度指标与养护龄期的关系见图 12。由图 12 (a) 可知, 养护龄期由 3 d 增至 7 d, 黏聚力增速最快。养护龄期由 7 d 增至 14 d, GF 比为 9 : 1 和 8 : 2 时, 黏聚力增速相对较快。养护龄期由 14 d 增至 28 d, 黏聚力增速较小。由图 12 (b) 可知, 内摩擦角在养护龄期为 3~7 d 时增幅最大, 养护龄期超过 7 d 后, 内摩擦角无明显增长趋势且最终趋于稳定。

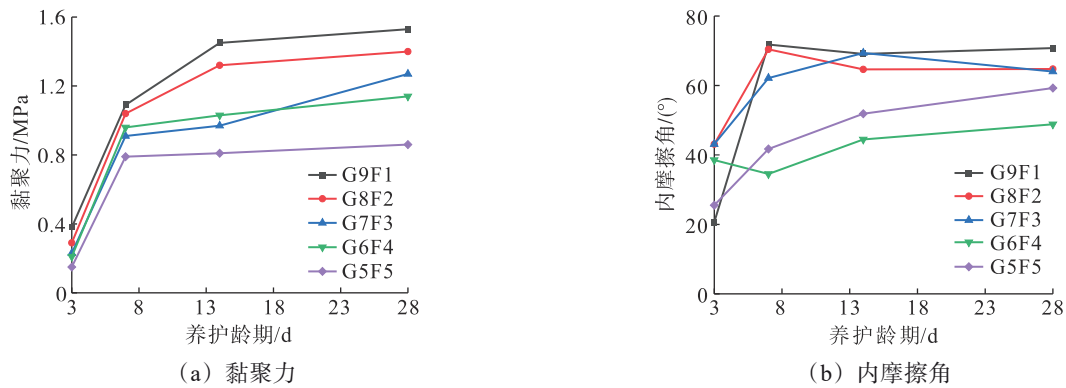


图12 土体抗剪强度指标与养护龄期的关系

Fig.12 relationship between soil shear strength index and curing age

3 微观分析

土体矿物成分会影响其宏观性质与微观结构,通过研究土体化学成分,可更好地了解土体强度改变的机理。固化剂掺量为20%、GF比为7:3、养护龄期为28 d时,不同生石灰掺量下土体的微观形貌见图13。由图13可知,掺加生石灰后,土体内出现纤维状钙矾石晶体AFt和网状凝胶C-A-S-H,结构更致密。这是由于生石灰与水会发生水化反应,生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和AFt。在此过程中会释放大量的 Ca^{2+} 和 OH^- ,形成碱性环境,高炉矿渣、粉煤灰内富含活性的 SiO_2 和 Al_2O_3 溶解生成活性单体(SiO_4^{4-} 、 AlO_4^{5-}), SiO_4^{4-} 单体可与 Ca^{2+} 发生聚合反应,生成C-S-H凝胶,C-S-H凝胶可与 AlO_4^{5-} 单体进一步反应,缩聚成C-A-S-H网状凝胶^[16]。纤维状晶体穿插在土颗粒之间,网状凝胶产物附着在土颗粒表面,均会增大颗粒之间的摩擦力,提高胶

结力,使整体结构更加紧密,从而提高土体强度。此外,掺加生石灰后,土体内会发生阳离子置换反应^[17], Ca^{2+} 取代土体中的 Na^+ 与 K^+ ,导致电荷密度减小,双电层厚度减小,土颗粒相互靠近形成絮凝状稳定结构,也会提高土体强度^[18]。

整体来看,生石灰掺量为10%时,土体内的纤维状晶体和网状凝胶最多,土颗粒表面的摩擦力最大,土体结构的稳定性最强。生石灰掺量超过10%后,土体内出现较多孔隙。产生这种现象有以下两方面原因:一是固化剂掺量一定的条件下,掺入生石灰过多会导致土体内活性硅铝原料减少,生成的聚合产物较少。二是生石灰遇水放热会强化碱性环境,过高的温度、过强的碱性会导致土体内部颗粒发生非均匀聚合,形成裂纹,且地质聚合物凝胶形成过早,会阻碍活性硅铝原材料的溶解,导致土体强度降低,与文献[19]、文献[20]的研究结论一致。

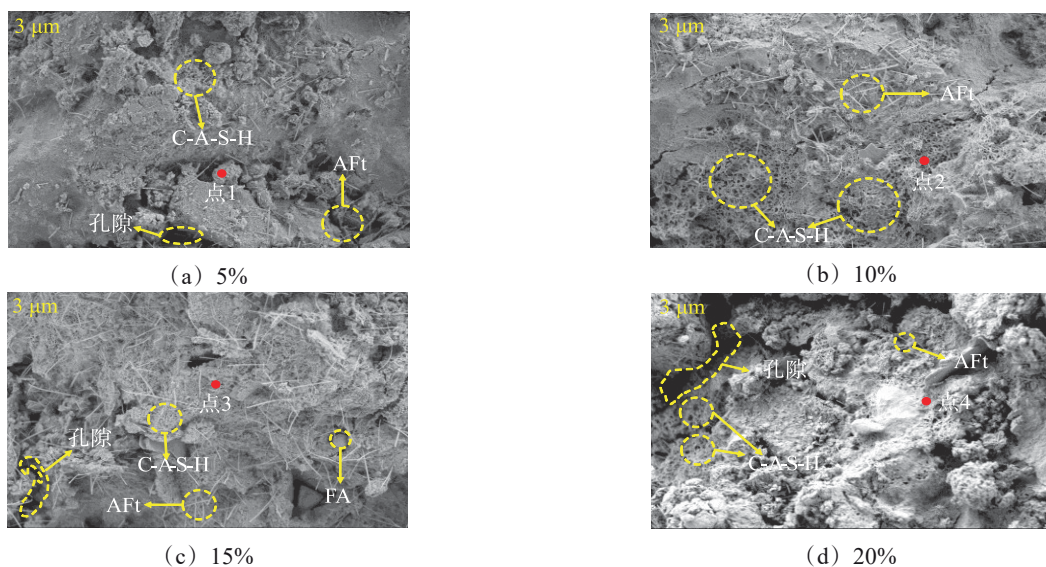


图13 不同生石灰掺量下土体的微观形貌

Fig.13 icroscopic morphology of soil under different lime contents

选择能观察到网状凝胶产物的区域进行EDS点扫测试, 点位见图 13 中的点 1~点 4。不同生石灰掺量下土体的 EDS 谱图见图 14, 土体元素含量(质量分数)见表 4。

由图 14 可知, 不同生石灰掺量下, 土体 EDS 谱图中均存在 O、Al、Si、Ca 元素, 与土体中 Ca^{2+} 发生聚合反应、水化反应所生成的 C-A-S-H 凝胶、AFt 晶体的元素一致。由表 4 可知, 生石灰掺量为

10% 时, 土体内 Ca、Si、Al 元素含量最多, 表明 Ca^{2+} 与 Al_2O_3 、 SiO_2 发生缩聚反应生成的 C-A-S-H 凝胶最多。通过以上分析可知, 适量掺加生石灰, 可加剧土体内部颗粒的缩聚反应, 生成较多的聚合产物。若生石灰掺量过多, 虽然土体内 Ca^{2+} 含量增加, 但硅铝原料溶解生成的 SiO_4^{4-} 、 AlO_4^{5-} 较少, 导致聚合产物减少, 不利于提高土体强度。

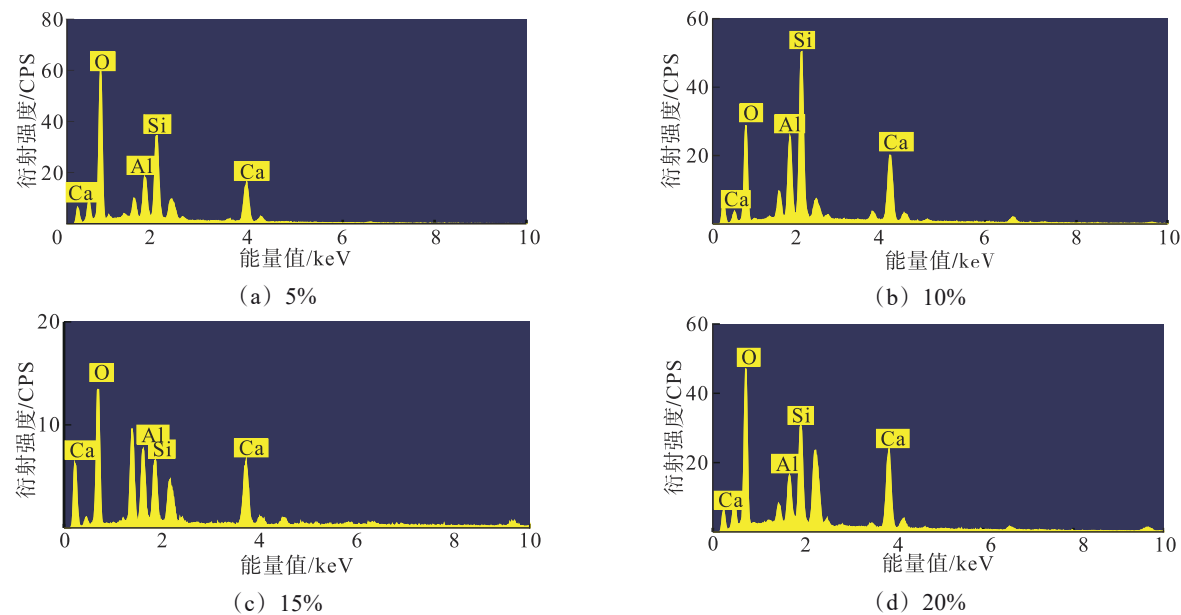


图 14 不同生石灰掺量下土体的 EDS 谱图

Fig.14 EDS spectra of soil under different lime contents

表 4 不同生石灰掺量下土体元素含量

Tab.4 element content of soil under different lime contents

生石灰掺量/%	元素含量/%							
	C	O	Na	Al	Si	S	Ca	Fe
5	21.87	55.76	0.75	4.26	8.07	0.38	8.17	0.74
10	16.62	41.62	0.51	7.65	15.65	0.48	13.44	4.03
15	13.29	58.38	1.06	6.61	5.62	0.55	12.66	1.83
20	22.60	50.81	0.50	3.76	7.39	0.43	12.55	1.96

生石灰掺量为 10%、GF 比为 7 : 3、养护龄期为 28 d 时, 不同固化剂掺量下土体的微观形貌见图 15。由图 15 可知, 土颗粒在凝胶的包裹下形成骨架结构, 纤维状晶体 AFt 穿插在骨架结构中。随着固化剂掺量的增加, 网状凝胶产物和纤维状晶体逐渐增多, 在胶结作用及填充作用下, 土体结构更加密实。选择能观察到网状凝胶产物的区域进行 EDS 点扫测试, 点位见图 15 中的点 5~点 7。

不同固化剂掺量下土体的 EDS 谱图见图 16, 土体元素含量(质量分数)见表 5。由图 16 和表 5 可知, 随着固化剂掺量的增加, Ca、Si、Al 元素含量逐渐增加。这是由于固化剂掺量的增加会促进 Ca^{2+} 与 SiO_2 和 Al_2O_3 发生聚合反应, 使 C-A-S-H 凝胶产物增多, 从而提高土体的抗剪强度, 结构更稳定。

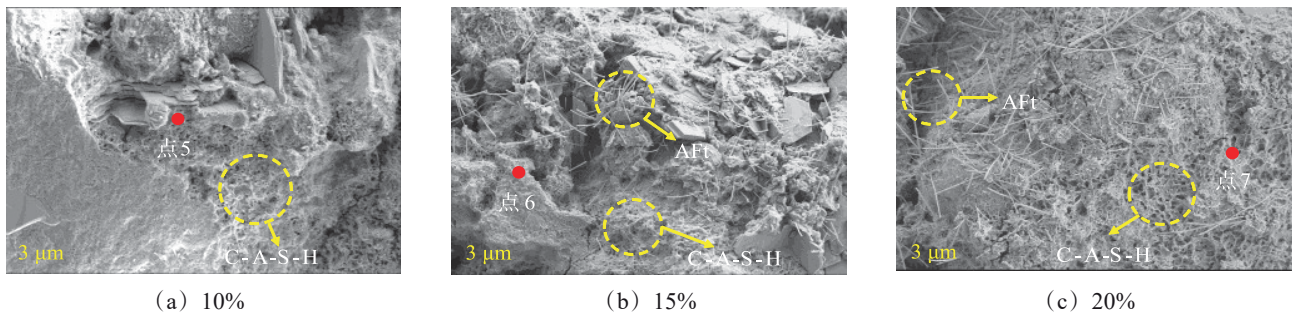


图 15 不同固化剂掺量下土体的微观形貌

Fig.15 icroscopic morphology of soil under different dosages of curing agent

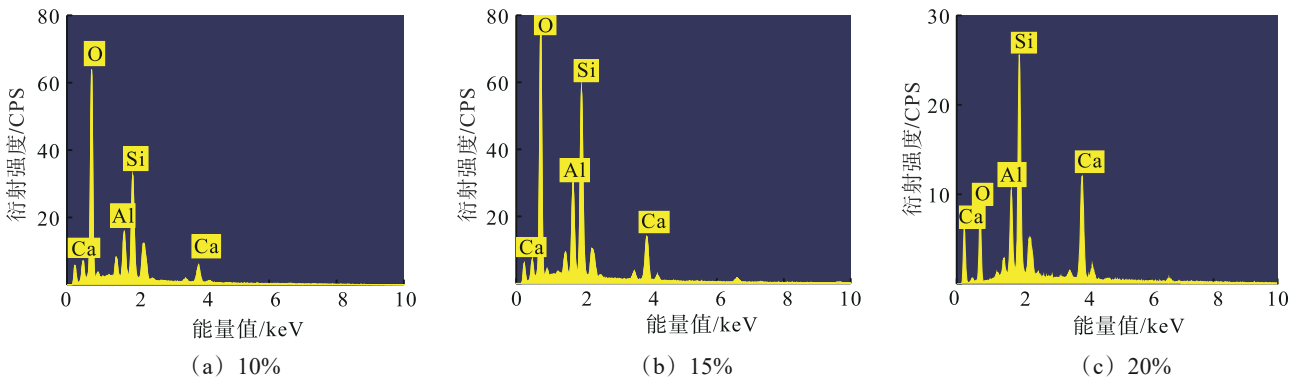


图 16 不同固化剂掺量下土体的EDS谱图

Fig.16 EDS spectra of soil under different dosages of curing agent

表 5 不同固化剂掺量下土体元素含量

Tab.5 element content of soil under different dosages of curing agent

固化剂掺量/%	元素含量/%							
	C	O	Na	Al	Si	S	Ca	Fe
10	21.37	60.77	0.46	4.40	9.14	0.16	3.25	0.45
15	17.18	56.20	0.42	5.98	11.90	0.23	6.14	1.95
20	16.62	41.62	0.51	7.65	15.65	0.48	13.44	4.03
25	7.69	37.97	0.81	7.89	21.35	0.48	21.80	2.01

4 结论

本文通过直剪试验、SEM电镜扫描、能量色散谱仪(EDS),研究生石灰掺量、GF比、固化剂掺量、养护龄期对地质聚合物固化土抗剪性能的影响,得出如下结论。

(1) 地质聚合物固化土的抗剪强度随生石灰掺量的增加呈先增大后减小的变化趋势,生石灰最优掺量为10%。

(2) 生石灰掺量相同的条件下,土体抗剪强度随GF比的增大逐渐增大。固化剂掺量的增加会促进 Ca^{2+} 与 SiO_2 和 Al_2O_3 发生聚合反应,生成较多的网状凝胶,土体黏聚力逐渐增大,内摩擦角先增大后趋于稳定,土体强度有所提高。

(3) 随着养护龄期的延长,土体黏聚力、内摩擦角和抗剪强度逐渐增大。养护龄期为3~7 d,

黏聚力和内摩擦角增速最快,养护龄期超过7 d,地质聚合物固化土的抗剪强度均高于水泥土。养护龄期超过14 d,延长养护龄期对土体抗剪强度的提升效果不显著。

(4) 生石灰水化会生成纤维状晶体AFt并释放 Ca^{2+} 和 OH^- ,形成的碱性环境会导致高炉矿渣与粉煤灰中的活性 SiO_2 、 Al_2O_3 溶解生成硅铝单体, Ca^{2+} 可与硅铝单体进一步缩聚形成C-A-S-H网状凝胶。在AFt的搭接作用以及网状凝胶的填充作用下,土体抗剪强度有所提高。

参考文献(References):

- [1] 黄敏建.玻璃纤维水泥土劈裂抗拉强度试验研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(4):938-942.
HUANG Minjian. Experimental study on split tensile strength of glass fiber reinforced cement soil[J].Journal of Railway Science and

- Engineering,2019,16(4):938-942.
- [2] 阮波,邓林飞,马超,等.纤维水泥土抗折强度的正交试验研究[J].铁道科学与工程学报,2018,15(10):2524-2528.
- RUAN Bo, DENG Linfei, MA Chao, et al. Orthogonal tests on flexural strength of fiber reinforced cement soil[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2018,15(10):2524-2528.
- [3] 章定文,曾彪,刘涉川,等.考虑胶结损伤的水泥土搅拌桩加固路堤破坏特征[J].中国公路学报,2023,36(10):131-141.
- ZHANG Dingwen, ZENG Biao, LIU Shechuan, et al. Study on failure characteristics of an embankment improved using deep mixed columns considering cementation damage[J]. China Journal of Highway and Transport,2023,36(10):131-141.
- [4] 涂义亮,任思雨,赵林,等.玄武岩纤维-粉煤灰提升水泥土抗剪性能试验研究[J].材料导报,2025,39(16):133-140.
- TU Yiliang, REN Siyu, ZHAO Lin, et al. Experimental study on improving shear performance of cement-soil with basalt fiber and fly ash[J]. Materials Reports,2025,39(16):133-140.
- [5] 潘志强,李晨,蒋正武.矿渣-硫铝酸盐水泥的环境影响及碳减排效应分析[J].硅酸盐通报,2023,42(11):3955-3963.
- PAN Zhiqiang, LI Chen, JIANG Zhengwu. Environmental impact of slag-calcium sulfoaluminate cement and analysis on its CO₂ mitigation effect[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2023,42(11):3955-3963.
- [6] 张延年,王众新,李志军,等.复合掺合料对混凝土的改性试验[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(6):1100-1107.
- ZHANG Yannian, WANG Zhongxin, LI Zhijun, et al. Experiment on modification of concrete with compound admixture[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2023, 39(6): 1100-1107.
- [7] MEYER C. The greening of the concrete industry[J]. Cement and Concrete Composites,2009,31(8):601-605.
- [8] 张顶飞,刘涛,郝琪,等.固废地质聚合物固化沿海软土的力学机理与劣化性能研究[J].应用基础与工程科学学报,2024,32(6):1582-1596.
- ZHANG Dingfei, LIU Tao, HAO Qi, et al. Investigation of mechanical mechanisms and deterioration properties of geological polymers from solid waste for stabilizing coastal soft soils[J]. Journal of Basic Science and Engineering,2024,32(6):1582-1596.
- [9] 刘景锦,罗昊鹏,雷华阳,等.碱激发地聚物固化海相淤泥质软土抗压强度及固化机制研究[J].铁道科学与工程学报,2024,21(7):2745-2754.
- LIU Jingjin, LUO Haopeng, LEI Huayang, et al. Compressive strength and curing mechanism of alkali-activated geopolymer curing marine silty soft soil[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2024,21(7):2745-2754.
- [10] 张津津,李博,余闯,等.矿渣-粉煤灰地质聚合物固化砂土力学特性研究[J].岩土力学,2022,43(9):2421-2430.
- ZHANG Jinjin, LI Bo, YU Chuang, et al. Mechanical properties of slag-fly ash based geopolymer stabilized sandy soil[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(9):2421-2430.
- [11] 王东星,王宏伟,邹维列,等.碱激发粉煤灰固化淤泥微观机制研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(增刊1):3197-3205.
- WANG Dongxing, WANG Hongwei, ZOU Weilie, et al. Research on micro-mechanisms of dredged sludge solidified with alkali-activated fly ash[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2019,38(Suppl.1):3197-3205.
- [12] 吴俊,征西遥,杨爱武,等.矿渣-粉煤灰地质聚合物固化淤泥质黏土的抗压强度试验研究[J].岩土力学,2021,42(3):647-655.
- WU Jun, ZHENG Xiyao, YANG Aiwu, et al. Experimental study on the compressive strength of muddy clay solidified by the one-part slag-fly ash based geopolymer[J]. Rock and Soil Mechanics,2021,42(3):647-655.
- [13] 周恒宇,王修山,胡星星,等.地聚合物固化淤泥强度增长影响因素及机制分析[J].岩土力学,2021,42(8):2089-2098.
- ZHOU Hengyu, WANG Xiushan, HU Xingxing, et al. Influencing factors and mechanism analysis of strength development of geopolymer stabilized sludge[J]. Rock and Soil Mechanics,2021,42(8):2089-2098.
- [14] 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,2019:122-126.
- [15] 吴军,张金生,谈云志,等.磷石膏-矿渣-石灰固化底泥力学性能及微观机理[J].应用基础与工程科学学报,2024,32(5):1360-1373.
- WU Jun, ZHANG Jinsheng, TAN Yunzhi, et al. Mechanical properties and microscopic mechanism of phosphogypsum-slag-lime solidified sediment[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2024,32(5):1360-1373.
- [16] 彭晖,李一聪,罗冬,等.碱激发偏高岭土/矿渣复合胶凝体系反应水平及影响因素分析[J].建筑材料学报,2020,23(6):1390-1397.
- PENG Hui, LI Yicong, LUO Dong, et al. Analysis of reaction level and factors of alkali activated metakaolin/GGBFS[J]. Journal of Building Materials,2020,23(6):1390-1397.
- [17] ABDI M R, GHALANDARZADEH A, SHAFIEI CHAFI L. An investigation into the effects of lime on compressive and shear strength characteristics of fiber-reinforced clays[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2021,13(4):885-898.
- [18] 张文杰,金典,郭兴璋,等.碱激发高炉矿渣固化/稳定化Cr(VI)污染土试验研究[J].岩土工程学报,2025,47(1):57-64.
- ZHANG Wenjie, JIN Dian, GUO Xingzhang, et al. Experimental study on solidification/stabilization of Cr(VI)-contaminated soil by alkali-activated ground granulated blast furnace slag[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2025,47(1):57-64.
- [19] 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.
- [20] 谢潇,王璐瑶,邓乐娟,等.生石灰改良黄土的微观机制试验研究[J].煤田地质与勘探,2021,49(6):193-199.
- XIE Xiao, WANG Luyao, DENG Lejuan, et al. Study on the microscopic mechanism of the loess improved by quicklime[J]. Coal Geology & Exploration,2021,49(6):193-199.