

文章编号:1007-9629(2025)03-0227-09

赤泥复合固化剂固化粉土路用性能及其机理

吴伟军¹, 张鲲鹏^{1,*}, 张 宁², 丁北斗², 王佳辉²

(1. 上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海 200433;

2. 中国矿业大学 土木工程灾变与智能防控省高校重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:利用工业废弃物赤泥、电石渣和脱硫石膏组成的赤泥复合固化剂对低液限粉土进行固化,探究了固化粉土的力学性能(无侧限抗压强度和劈裂强度)和耐久性(水稳定性和干湿循环),并采用扫描电镜(SEM)和X射线衍射仪(XRD)分析赤泥复合固化剂的固化机理.结果表明:固化粉土的无侧限抗压强度和劈裂强度随着赤泥复合固化剂掺量的增加和养护龄期的延长而提高;当赤泥复合固化剂掺量由8%增至24%且养护龄期由7d延至28d时,固化粉土的水稳系数由69.5%提高到82.4%;干湿循环12次后,固化粉土的强度损失率为35.14%.赤泥复合固化剂掺入粉土中发生水化反应,生成具有胶凝作用的水化硅酸钙(C-S-H)和水化铝酸钙(C-A-H)凝胶,同时C-A-H与CaSO₄生成钙矾石(AFt)晶体;C-S-H和C-A-H包裹并填充着土颗粒,AFt晶体穿插在土颗粒间,使其成为一个整体,有效提高了固化粉土的路用性能.

关键词:赤泥;低液限粉土;路用性能;固化机理

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.03.005

Road Performance of Red Mud Composite Solidification Agent for Solidified Silt and Its Mechanism

WU Weijun¹, ZHANG Kunpeng^{1,*}, ZHANG Ning², DING Beidou², WANG Jiahui²

(1. Shanghai Road and Bridge(Group) Co. Ltd., Shanghai 200433, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Disaster Impact and Intelligent Prevention in Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Red mud composite stabilizers, composed of industrial wastes such as red mud, carbide slag, and desulfurized gypsum, were used to solidify low liquid limit silt. The changes in mechanical properties (unconfined compressive strength and splitting strength) and durability (water stability and dry-wet cycle) of the solidified silt were explored. Additionally, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) were employed to analyze the solidification mechanism of red mud composite solidification agent. The results show that the unconfined compressive strength and splitting strength of solidified silt increase with both the increasing content of the stabilizer and the extension of curing age. When the content of red mud composite solidification agent is increased from 8% to 24% and the age of maintenance is extended from 7 d to 28 d. The water stability coefficient improves from 69.5% to 82.4%. After 12 dry-wet cycles, the strength loss rate of stabilized silt reaches 35.14%. When the red mud composite stabilizer is incorporated into the silt, hydration reactions occur, forming gelatinous calcium silicate hydrate (C-S-H) and calcium aluminate hydrate (C-A-H) gels. Simultaneously, C-A-H reacts with CaSO₄ to produce ettringite (AFt) crystals. The C-S-H and C-A-H gels encapsulate and fill the soil particles, while the AFt crystals interpenetrate the soil particles, integrating them into a whole and effectively enhancing the road performance of solidified silt.

Key words: red mud; low liquid limit silt; road performance; solidification mechanism

收稿日期:2024-04-12;修订日期:2024-07-25

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2023YFC2907301)

第一作者:吴伟军(1973—),男,上海人,上海公路桥梁(集团)有限公司高级工程师,工学硕士.E-mail:zn01142023@163.com

通讯作者:张鲲鹏(1983—),男,上海人,上海公路桥梁(集团)有限公司高级工程师,工学硕士.E-mail:57494757@qq.com

粉土因具有级配差、整体结构松散、强度低等特点,不宜直接作为路基材料.为实现对粉土的有效利用,采用固化剂来固化粉土已成为一种常见的处理方法^[1-4].目前最常见的固化剂是水泥,许多学者将其与一些工业废弃物组合使用^[5-8].但水泥生产过程会污染环境,不符合中国绿色、可持续的发展战略^[9].此外,中国还面临大宗工业废物综合利用不充分等问题^[10].为响应“十四五”时期无废城市的建设号召,需要发展基于固弃物的土壤固化剂及技术^[11-13].赤泥是工业生产 Al_2O_3 所产生的废渣,具有一定的胶凝性和水硬性,其资源化利用也逐渐被关注^[14-18].如Chandra等^[19]研究发现,在赤泥中加入粉煤灰和碱性激发剂后强度显著提高;李丽华等^[20]将赤泥作为碱性激发剂,与粉煤灰和矿渣相结合,用于固化镉污染土,发现赤泥-粉煤灰与赤泥-矿渣固化粉土强度均有显著提高;Li等^[21]使用石灰激发赤泥固化路基土,发现石灰-赤泥固化粉土的抗干湿循环和抗冻融循环能力远高于纯石灰固化粉土;宋志伟等^[22]研究了CaO改性赤泥固化黄土的电阻率特性,发现固化粉土的电阻率随着CaO和赤泥掺量的增加而降低;孙兆云

等^[23]制备烧结法赤泥-沥青粉固化剂(RAC),并对粉土进行综合固化稳定,发现与单掺水泥相比,RAC稳定粉土具有良好的力学性能和水稳性能,能很好地适应恶劣的自然环境.

考虑到电石渣和脱硫石膏可以组成复合激发剂,在一定程度上能够提高反应环境的pH值,有助于硅铝酸盐的溶解.本试验选用由工业废弃物赤泥、电石渣和脱硫石膏组成的赤泥复合固化剂,对河南地区高速路段低液限粉土进行固化,研究赤泥复合固化剂对粉土的固化效果及其固化机理.

1 试验

1.1 试验材料

1.1.1 原材料

试验用土取自河南安鹤高速工程现场地下150 cm深处土体.根据JTG 3430—2020《公路土工试验规程》测定土样的基本物理指标.由于粒径小于 $75\ \mu\text{m}$ 的土样占比(质量分数,文中涉及的占比、组成等均为质量分数)为60.2%,故判定其为低液限粉土,基本物理指标见表1.

表1 土样的基本物理指标
Table 1 Basic physical indicators of silt sample

Natural moisture (by mass)/%	Plastic limit(by mass)/%	Liquid limit(by mass)/%	Plasticity index	Maximum dry density/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Optimal moisture(by mass)/%
13.3	17.2	26.2	9	1.96	11.2

1.1.2 固化剂

试验用赤泥为河南恒源新材料有限公司生产的烧结法赤泥,脱硫石膏购于河南锦源环保科技有限公司,电石渣购于武汉华英新世纪环保设备有限公司.3种固化剂的化学组成及X射线衍射(XRD)图谱见表2和图1.由图1可知:赤泥的主要矿物为方解石、赤铁矿和石英等;电石渣的主要矿物为方

解石和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$;脱硫石膏为半水石膏.固化剂配比试验选用响应面法中的BBD(Box-Behnken设计)法,采用三因素三水平进行设计,响应目标值为7、28 d固化粉土的无侧限抗压强度.通过BBD法优化设计得到赤泥复合固化剂的最佳配比 $m(\text{赤泥}):m(\text{电石渣}):m(\text{脱硫石膏})=15.84:14.32:7.32$.

表2 3种固化剂的化学组成
Table 2 Chemical compositions (by mass) of three kinds of solidification agents

Material	CaO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	Na_2O	SO_3
Red mud	34.38	25.61	7.84	9.43	2.99	0.31	
Carbide slag	84.30	3.40	0.18	0.23	0.79	0.11	
Desulfurization gypsum	45.06	1.08	0.78	0.46		0.11	32.14

1.2 试验方法

1.2.1 试样制备

试样制备参照JTG E51—2009《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》与JTG 3430—2020进行.将赤泥复合固化剂按设计掺量(w)掺入粉土中,设置赤泥复合固化粉土(以下简称固化粉土)含水率为最

佳含水率11.2%,压实度为98%.采用静力压实法制备尺寸为 $\phi 50\times 50\ \text{mm}$ 的圆柱试样,每组6个,试验值取其平均值.

1.2.2 力学性能试验

设计5种掺量(8%、12%、16%、20%和24%)的赤泥复合固化剂和5个养护龄期,以探究赤泥复合固

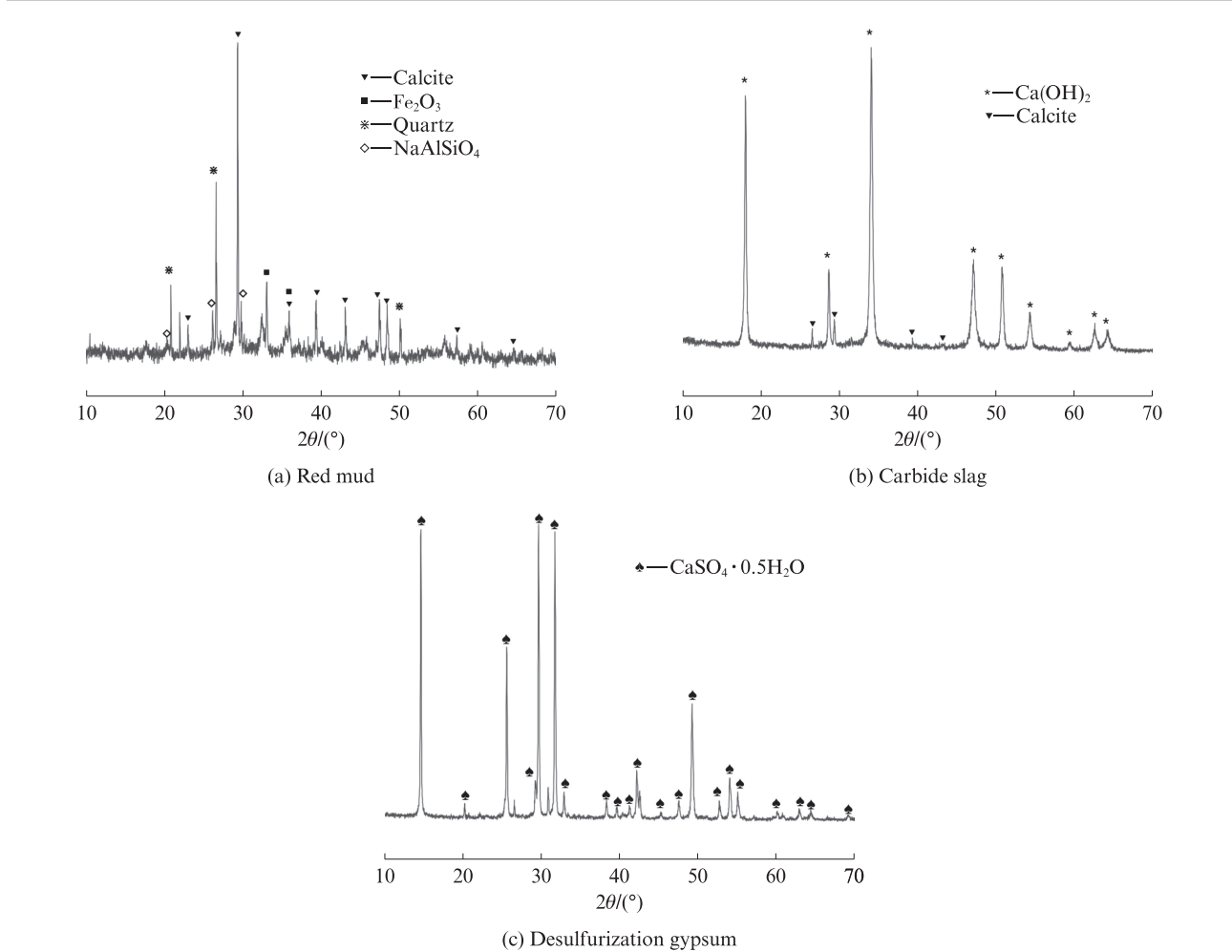


图1 3种固化剂的XRD图谱

Fig. 1 XRD patterns of three kinds of solidification agents

化剂掺量和养护龄期对固化粉土无侧限抗压强度和劈裂强度的影响。

1.2.3 耐久性试验

固化粉土的耐久性通过水稳定性试验和干湿循环试验进行评价。采用5种掺量(8%、12%、16%、20%和24%)的赤泥复合固化剂,通过水稳系数 K (%)表征固化粉土的水稳定性。 K 的计算式为:

$$K=\frac{R_w}{R_0}\times 100\% \tag{1}$$

式中: R_w 为试样浸泡24 h的无侧限抗压强度,MPa;

R_0 为试样养护至规定龄期的无侧限抗压强度,MPa。

干湿循环试验采用掺量为16%的赤泥复合固化剂,固化粉土养护28 d后分别进行1、3、6、9、12次干湿循环过程,以试验前后试样的质量、体积和强度变化来评价固化粉土的抗干湿循环能力。

1.2.4 微观试验

为研究固化粉土的固化机理,选取3种典型试样(未掺固化剂的粉土,单掺赤泥的粉土和复掺赤泥、电石渣、脱硫石膏的粉土)进行扫描电镜(SEM)试验和XRD试验。固化粉土微观试验方案见表3。

表3 固化粉土微观试验方案

Table 3 Microscopic test scheme for solidified silts

Sample name	$w(\text{solidification agent})/\%$			Curing age/d	Experimental project
	Red mud	Carbide slag	Desulfurized gypsum		
Silt	0	0	0		
Silt of single-doped red mud	15.84	0	0	7/28	SEM/XRD
Red mud composite solidified silt	15.84	14.32	7.32		

2 结果与分析

2.1 力学性能

2.1.1 无侧限抗压强度

图2为固化粉土无侧限抗压强度随赤石复合固化剂掺量和养护龄期的变化.由图2可见:(1)未参加固化剂粉土的无侧限抗压强度非常低,其7 d无侧限抗压强度仅为0.25 MPa,且随着养护龄期的延长,强度增速趋缓,60 d无侧限抗压强度只达到0.68 MPa,整体上无太大变化.(2)赤泥复合固化剂的掺入使固化粉土的无侧限抗压强度得到很大提升,当固化剂掺量为8%、12%、16%、20%和24%时,固化粉土7 d无侧限抗压强度分别为1.12、1.38、1.55、1.78、1.93 MPa.这主要是因为固化剂掺量的增加为火山灰反应提供了更多的原料,生成了大量的胶凝物质和白色晶体,从而提高了土体强度.(3)固化粉土的无侧限抗压强度增速先快后慢,前7 d最为迅速,14 d后趋于平稳.这主要是因为赤泥复合固化剂刚加入到粉土中会快速提高固化粉土的pH值,激发粉土中的大量活性物质,迅速提高固化粉土的强度;但随着火山灰反应不断消耗固化粉土中的活性物质,固化粉土的pH值有所降低,固化粉土的火山灰反应逐步放缓后趋于稳定^[24].

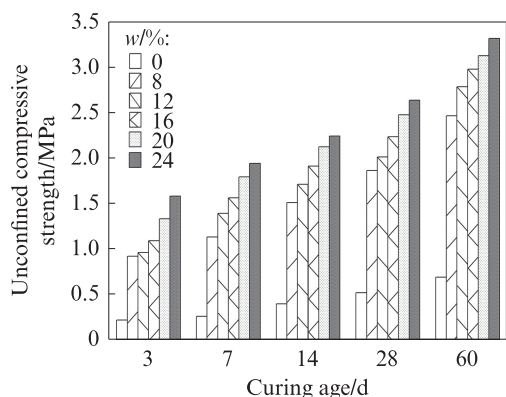


图2 固化粉土无侧限抗压强度随赤泥复合固化剂掺量和养护龄期的变化

Fig. 2 Variation of unconfined compressive strength of solidified silts with red mud composite solidification agent content and curing age

2.1.2 劈裂强度试验

图3为固化粉土劈裂强度随赤石复合固化剂掺量和养护龄期的变化.由图3可见:(1)未参加固化剂粉土的劈裂强度很低,其7 d劈裂强度仅为29.12 kPa,且随着养护龄期的延长,强度增速趋缓,60 d劈裂强度只达到60.37 kPa,整体上无明显变化.(2)随着固化剂掺量的增加,固化粉土的劈裂强度随

之增加;当固化剂掺量由8%增至24%时,固化粉土的7 d劈裂强度较60 d劈裂强度增幅有所下降.这是因为随着养护龄期的延长,不稳定的 SiO_2 和 Al_2O_3 水解基本完成,水化产物增多^[25].(3)固化粉土的劈裂强度增速在前14 d较快,后14 d基本稳定.这是因为当固化粉土成为一个整体后,养护龄期的延长并不会进一步提高土颗粒间的抗拉能力.

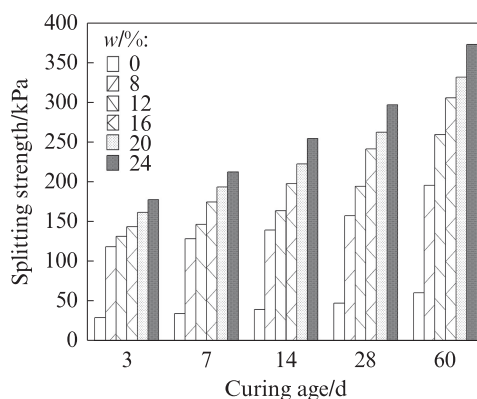


图3 固化粉土劈裂强度随赤泥复合固化剂掺量和养护龄期的变化

Fig. 3 Variation of splitting strength of solidified silts with red mud composite solidification agent content and curing age

2.2 耐久性能

2.2.1 水稳定性试验

图4为固化粉土水稳系数随赤泥复合固化剂掺量和养护龄期的变化.由图4可见:当养护龄期为7 d且固化剂掺量由8%增至24%时,固化粉土的水稳系数由69.5%增至77.6%;当养护龄期为28 d且固化剂掺量由8%增至24%时,固化粉土的水稳系数由76.4%增至82.4%.这表明固化粉土的水稳系数与固化剂掺量、养护龄期存在正向关联.

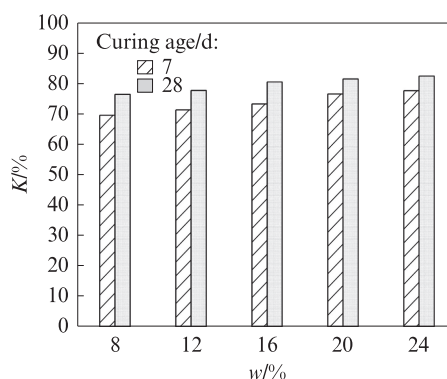


图4 固化粉土水稳系数随赤泥复合固化剂掺量和养护龄期的变化

Fig. 4 Variation of water stability coefficient of solidified silts with red mud solidification agent content and curing age

2.2.2 干湿循环试验

图5为固化粉土(赤泥复合固化剂掺量为16%)质量损失率和体积膨胀率随干湿循环次数的变化。由图5可见:(1)固化粉土的质量损失率和体积膨胀率随着干湿循环次数的增加而增大。(2)当干湿循环次数较少时,固化粉土的质量损失率增速较平缓;而当干湿循环次数增加时,固化粉土的质量损失率增

速显著增大。当干湿循环次数大于6次时,粉土颗粒的脱落现象随着干湿循环次数的增加而更加严重。(3)当干湿循环次数较少时,固化粉土的体积膨胀率增速较快;而当干湿循环次数较大时,固化粉土的体积膨胀率增速有所放缓。这主要是因为当水完全渗透进固化粉土后并不会使粉土颗粒间的孔隙持续增大。

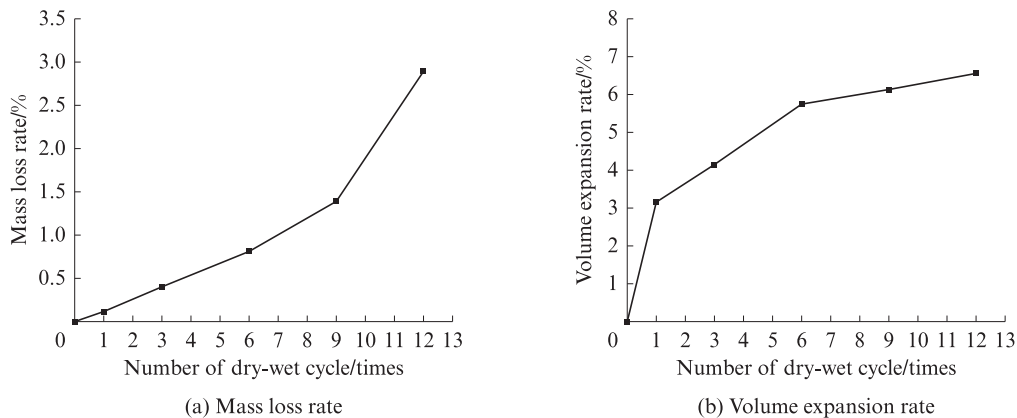


图5 固化粉土(赤泥复合固化剂掺量为16%)质量损失率和体积膨胀率随干湿循环次数的变化

Fig. 5 Variation of mass loss rate and volume expansion rate of solidified silts (red mud solidification agent content is 16%) with number of dry-wet cycle

图6为固化粉土(赤泥复合固化剂掺量为16%)无侧限抗压强度随干湿循环次数的变化。由图6可见:随着干湿循环次数的增加,固化粉土的无侧限抗压强度整体呈下降趋势;干湿循环12次后,固化粉土的强度损失率达到35.14%。

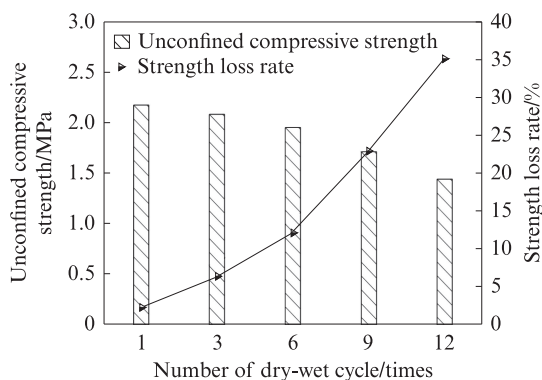


图6 固化粉土(赤泥复合固化剂掺量为16%)无侧限抗压强度随干湿循环次数的变化

Fig. 6 Variation of unconfined compressive strength of solidified silts (red mud solidification agent content is 16%) with number of dry-wet cycle

2.3 微观机理

2.3.1 XRD试验

图7为3种典型试样的XRD图谱。由图7可见:(1)对于未掺任何固化剂的粉土,其主要矿物成分为石英、方解石和钠长石,且养护7、28 d时矿物成分基

本没有变化。(2)当养护龄期为7、28 d时,对于单掺赤泥的固化粉土,其主要矿物成分为石英、方解石、斜绿泥石和C-S-H。与未掺固化剂的粉土对比后发现,由于经过离子置换作用,粉土中原有的钠长石被逐渐溶解^[26-27],从而增加了新的矿物——斜绿泥石和C-S-H,其中斜绿泥石是赤泥中自带的铝酸盐矿物。这是因为赤泥中的CaO与水反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,不仅提高了土体的pH值还提供了 OH^- 和 Ca^{2+} ;土体中的钠长石溶解出 AlSiO_4^- ,与固化粉土中不稳定的 SiO_2 和 Al_2O_3 水解生成 $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$ 、 HSiO_3^- 和 $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$,这类物质又与 Ca^{2+} 反应生成了C-S-H。(3)当养护龄期为7 d时,赤泥复合固化剂固化粉土的主要矿物成分为石英、C-S-H、AFt、石膏和C-A-H;与单掺赤泥的固化粉土对比后发现,赤泥、电石渣和脱硫石膏共同作用下生成的矿物种类更多。这是因为赤泥、电石渣中的CaO水化成大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,不仅为固化粉土提供了大量 Ca^{2+} ,还提高了固化粉土的pH值,有效激发了赤泥和粉土中的活性物质,所产生的大量阴离子与 Ca^{2+} 结合,生成了C-S-H和C-A-H等胶凝物质。脱硫石膏的加入也为固化粉土提供了反应所需要的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} , SO_4^{2-} 又与生成物C-A-H进一步反应生成AFt。

2.3.2 SEM试验

图8为3种典型试样的微观形貌。对比图8(a)、

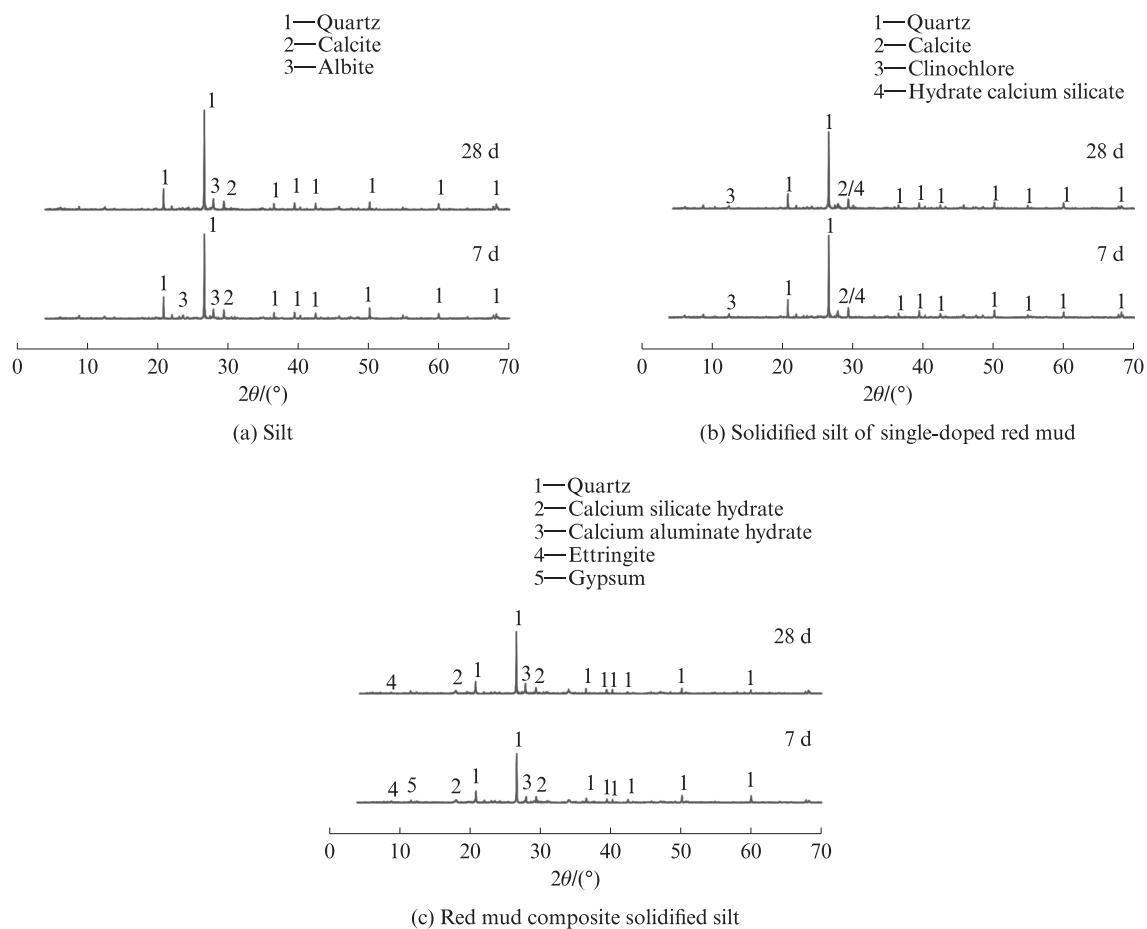


图7 3种典型试样的XRD图谱

Fig. 7 XRD patterns of three kinds of typical samples

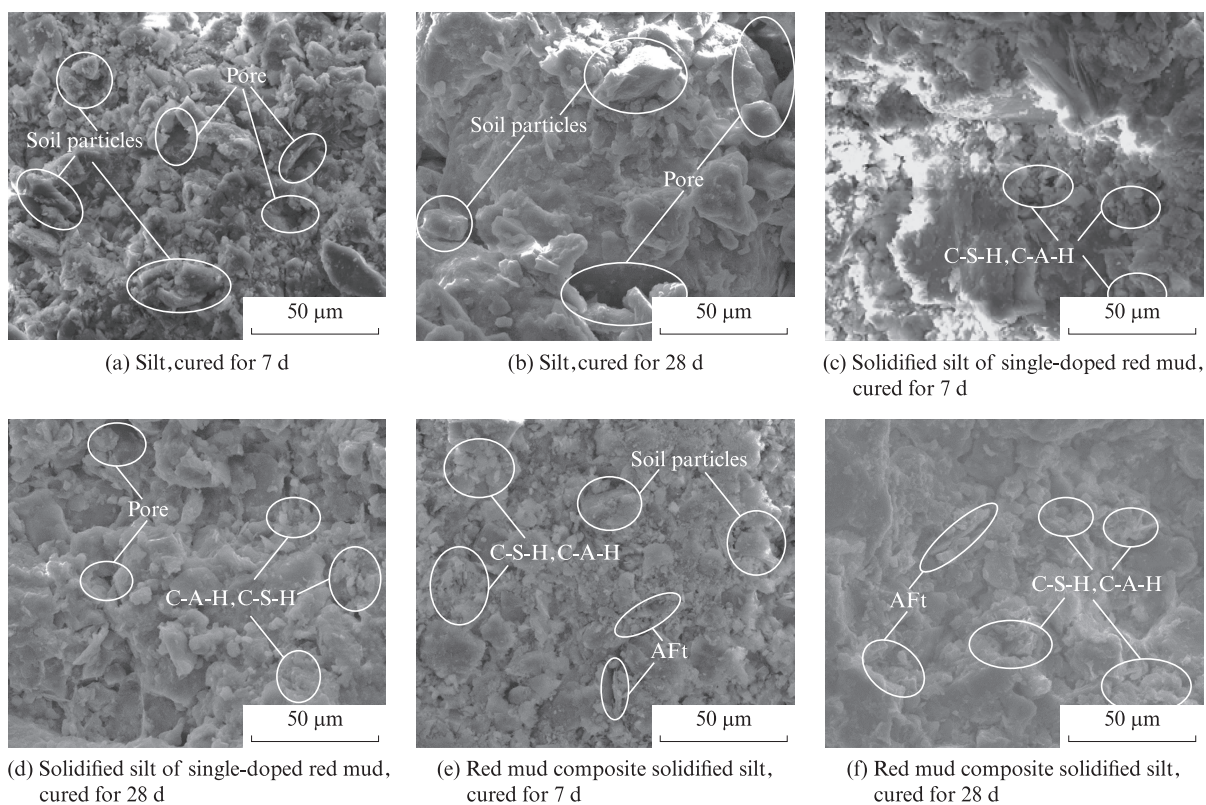
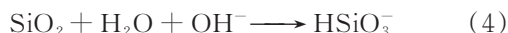


图8 3种典型试样的SEM照片

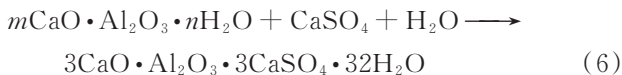
Fig. 8 SEM images of three kinds of typical samples

(b),同时结合XRD试验结果后发现:(1)7 d龄期时,未掺固化剂的粉土颗粒形态多样,尺寸不均匀,且以不规则方式排布,颗粒边缘清晰可见,部分呈尖锐边角;这些颗粒主要通过点接触相互连接,形成了一个结构相对疏松的体系,其中分布着各种形状的孔洞。(2)28 d龄期时,粉土试样形成较大的粉土颗粒,但颗粒间的链接形式还是点接触,整体结构仍较为松散。

对比图8(a)、(c),同时结合XRD试验结果后发现:(1)当赤泥掺入粉土中时,其中的CaO与水发生反应生成Ca(OH)₂,提高了土体的pH值,激发了赤泥和土体中SiO₂和Al₂O₃的活性。不稳定SiO₂和Al₂O₃水解生成[SiO(OH)₃]⁻、HSiO₃⁻和[Al(OH)₄]⁻,这类物质最终与Ca²⁺反应生成具有胶凝作用的C-S-H和C-A-H,并消耗大量的OH⁻,使土体pH值降低,减缓了火山灰反应。(2)生成的C-S-H和C-A-H包裹着小颗粒,形成了较大颗粒,整体结构较为密实。部分反应方程式见式(2)~(5)。



对比图8(c)、(e),同时结合XRD试验结果后发现:(1)与单掺赤泥的固化粉土相比,电石渣和脱硫石膏的掺入使得土体生成更多絮状、网格状的胶凝物质和针装、丝状的白色晶体。这是因为赤泥在发生火山灰反应的过程中会消耗大量的OH⁻和Ca²⁺,使土体的pH值降低,导致火山灰反应减弱;而电石渣和脱硫石膏的主要成分是Ca(OH)₂和CaSO₄,一方面提供大量Ca(OH)₂,提高了土体的pH值,最大程度激发了固化粉土中SiO₂和Al₂O₃,使其与Ca²⁺反应生成大量具有胶凝作用的C-S-H和C-A-H;另一方面生成的C-A-H与CaSO₄进一步反应生成AFt,反应式见(6)。(2)C-S-H和C-A-H包裹并填充着土颗粒,AFt晶体穿插在土颗粒之间,使其成为一个整体。



对比图8(c)、(d)和(e)、(f),同时结合XRD试验结果后发现:随着养护龄期的延长,火山灰反应持续进行,生成了更多的胶凝物质和晶体;这些生成物一方面包裹着小颗粒形成大颗粒,另一方面填充着颗粒间的孔隙,使土体成为一个整体,结构更加密实。

2.3.3 固化机理分析

赤泥的主要成分为CaO、SiO₂、Al₂O₃和Fe₂O₃,当其掺入粉土后首先发生水化反应,生成的Ca(OH)₂激发粉土中的SiO₂、Al₂O₃,生成C-S-H和C-A-H等凝胶物质。这些凝胶物质不断连接土颗粒并填充土颗粒间的孔隙,有效提高了土体强度。

随着电石渣和脱硫石膏的掺入,电石渣中大量的Ca(OH)₂不仅提高了土体的pH值,更好地激发了土颗粒和赤泥中SiO₂和Al₂O₃的活性,还参与反应生成更多的凝胶物质。这些凝胶物质进一步与CaSO₄反应生成AFt,C-S-H和C-A-H凝胶物质包裹着土颗粒,填充着土颗粒间的空隙,AFt晶体穿插在土颗粒中,使其成为一个整体,提高了固化粉土整体强度。

粉土表面吸附着的Na⁺、K⁺等低价阳离子与固化剂水化产生的Ca²⁺进行交换,导致土粒表面吸附的水膜厚度有所减少,进一步增强了分子间的引力,使得粉土中的黏性土颗粒更为接近,土粒间的压缩性增强,膨胀性降低,从而提高了固化粉土的路用性能。

3 结论

(1)赤泥复合固化剂对粉土力学性能有显著改善作用。固化粉土的无侧限抗压强度和劈裂强度随着赤泥复合固化剂掺量的增加和养护龄期的延长而提高。当赤泥复合固化剂掺量由8%增至24%,且养护龄期由7 d延至28 d时,固化粉土的水稳系数由69.5%提高到82.4%。干湿循环12次后,固化粉土的强度损失率达到35.14%。

(2)赤泥复合固化剂掺入粉土中会激发其中不稳定的SiO₂和Al₂O₃水解生成[SiO(OH)₃]⁻、HSiO₃⁻和[Al(OH)₄]⁻,这类物质与Ca²⁺反应生成具有胶凝作用的水化硅酸钙(C-S-H)和水化铝酸钙(C-A-H),同时C-A-H与CaSO₄生成钙矾石(AFt)晶体。C-S-H和C-A-H凝胶包裹并填充着土颗粒,AFt晶体穿插在土颗粒间,使其成为一个整体,有效提高了固化粉土的路用性能。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部.中国路基工程学术研究综述·2021[J].中国公路学报,2021,34(3):1-49.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's subgrade engineering research·2021[J].China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3): 1-49. (in Chinese)

- [2] 王超杰,李逢源,郭成超,等.高聚物固化粉土的力学特性与固结机理[J].建筑材料学报,2022,25(6):598-606.
WANG Chaojie, LI Fengyuan, GUO Chengchao, et al. Mechanical properties and consolidation mechanism of polymer solidified silt soil[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(6): 598-606. (in Chinese)
- [3] 刘松玉,张涛,蔡国军,等.工业废弃木质素固化改良粉土路基技术与应用研究[J].中国公路学报,2018,31(3):1-11.
LIU Songyu, ZHANG Tao, CAI Guojun, et al. Research on technology and engineering application of silt subgrade solidified by lignin-based industrial by-product [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(3):1-11. (in Chinese)
- [4] 刘建峰,张晓果,王晔晔,等.工业废渣土壤固化剂改良黄泛区粉土研究[J].城市建筑,2021,18(26):137-140,147.
LIU Jianfeng, ZHANG Xiaoguo, WANG Yeye, et al. Study on stabilization of silt in yellow river flooded area with industrial waste soil solidifying agent [J]. Urbanism and Architecture, 2021, 18(26):137-140,147. (in Chinese)
- [5] 力乙鹏,李婷.土壤固化剂的固化机理与研究进展[J].材料导报,2020,34(增刊2):1273-1277,1298.
LI Yipeng, LI Ting. Stability mechanism and research progress of soil stabilizer[J]. Materials Reports, 2020, 34(Suppl 2): 1273-1277,1298. (in Chinese)
- [6] AYDILEK A H, ARORA S. Fly ash amended soils as highway base materials[C]// Conference on Geotechnical Engineering for Transportation Projects. Los Angeles:Geotechnical Engineering for Transportation Projects. 2004:1032-1041.
- [7] 索崇娴,郝雅芬,樊佩阁,等.添加脱硫石膏和赤泥对复合水泥土性能的影响[J].硅酸盐通报,2020,39(5):1553-1558.
SUO Chongxian, HAO Yafen, FAN Peige, et al. Effect of adding FGD and red mud on properties of composite cement-soil [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39(5): 1553-1558. (in Chinese)
- [8] GONG X, NIU J G, LIANG S H, et al. Solidification of Nansha soft clay using cement-based composite curing agents [J]. Advances in Cement Research, 2020, 32(2):66-77.
- [9] 易文杰,李庄,罗竹燕,等.水泥行业环境影响评价低碳技术选择与应用[J].环境工程技术学报,2022,12(6):1905-1914.
YI Wenjie, LI Zhuang, LUO Zhuyan, et al. Selection and application of low carbon technologies in environmental impact assessment of cement industry [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(6):1905-1914. (in Chinese)
- [10] 王兆龙,姚沛帆,张西华,等.典型大宗工业固体废物产生现状分析及产生量预测[J].环境工程学报,2022,16(3):746-751.
WANG Zhaolong, YAO Peifan, ZHANG Xihua, et al. Current situation analysis and production forecast of typical bulk industrial solid wastes in China [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(3):746-751. (in Chinese)
- [11] 孙仁娟,方晨,高发亮,等.基于废弃物的固化粉土路用性能及固化机理研究[J].中国公路学报,2021,34(10):216-224.
SUN Renjuan, FANG Chen, GAO Faliang, et al. Study on pavement performance and solidified mechanism of solidifying silt based on solid waste [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10):216-224. (in Chinese)
- [12] 王元战,孙春鹏,王轩,等.掺入粉煤灰软黏土的复合碱渣土力学特性探究[J].建筑材料学报,2023,26(2):206-214.
WANG Yuanzhan, SUN Chunpeng, WANG Xuan, et al. Mechanical properties of composite soda residue soil mixed with fly ash and soft clay[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(2):206-214. (in Chinese)
- [13] 张国防,王博,张海旭,等.OPC-GBFS-NS体系土体硬化剂固化粉土的作用效果研究[J].建筑材料学报,2022,25(1):61-67.
ZHANG Guofang, WANG Bo, ZHANG Haixu, et al. Effects of OPC-GBFS-NS system based soil stabilizer on soil stabilization [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(1):61-67. (in Chinese)
- [14] 安强,潘慧敏,赵庆新,等.碱激发赤泥-粉煤灰-电石渣复合材料性能研究[J].建筑材料学报,2023,26(1):14-20.
AN Qiang, PAN Huimin, ZHAO Qingxin, et al. Properties of alkali-activated red mud-fly ash-carbide slag composites [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(1):14-20. (in Chinese)
- [15] MUKIZA E, ZHANG L L, LIU X M, et al. Utilization of red mud in road base and subgrade materials: A review [J]. Resources, Conservation & Recycling, 2019, 141:187-199.
- [16] 王聪聪,刘茂青,宋红旗,等.赤泥-钢渣粉-水泥固化流态土性能试验研究[J].硅酸盐通报,2023,42(7):2488-2496.
WANG Congcong, LIU Maoqing, SONG Hongqi, et al. Experimental study on properties of red mud, steel slag powder and cement solidified fluidized soil [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(7):2488-2496. (in Chinese)
- [17] TANG W C, WANG Z Y, DONNE S W, et al. Influence of red mud on mechanical and durability performance of self-compacting concrete[J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 379:120802.
- [18] 马璐璐,张翥,刘芳,等.赤泥-粉煤灰稳定煤矸石基层强度特性及机理[J].建筑材料学报,2023,26(7):762-770.
MA Lulu, ZHANG Xiao, LIU Fang, et al. Strength characteristics and mechanism of red mud-fly ash stabilized coal gangue base[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(7): 762-770. (in Chinese)
- [19] CHANDRA K S, KRISHNAIAH S, REDDY N G, et al. Strength development of geopolymer composites made from red mud-fly ash as a subgrade material in road construction [J]. Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste, 2021, 25(1):04020068.
- [20] 李丽华,方亚男,肖衡林,等.赤泥复合固化/稳定化镉污染土特性研究[J].岩土力学,2022,43(增刊1):193-202.
LI Lihua, FANG Yanan, XIAO Henglin, et al. Characterization of Cd-contaminated soil solidified/stabilized by red mud-based binders [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(Suppl 1): 193-202. (in Chinese)
- [21] LI W T, CHEN F, XIAO H L, et al. Physical, mechanical, and micro-scale properties of the soil stabilized with lime-activated red mud under dry-wet and freeze-thaw cycles [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(6):189-201.
- [22] 宋志伟,韩素丽,秦鹏举,等.氧化钙改性赤泥固化黄土的电阻

- 率特性及机理[J].太原理工大学学报,2024,55(2):331-337.
- SONG Zhiwei, HAN Suli, QIN Pengju, et al. Electrical resistivity characteristics and mechanism of solidified loess mixed with calcium oxide-modified red mud[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2024, 55 (2): 331-337. (in Chinese)
- [23] 孙兆云,韦金城,王林,等. 烧结法赤泥-沥青粉固化剂稳定粉土的路用性能研究[J]. 工程科学与技术, 2021, 53 (4): 101-109.
- SUN Zhaoyun, WEI Jincheng, WANG Lin, et al. Study on road performance of stabilized silt with sintering red mud-asphalt powder curing agent [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53 (4): 101-109. (in Chinese)
- [24] 张兴武,刘鹏,程钰. 矿化微生物对赤泥基碱激发胶凝材料性能的增强研究[J]. 建筑材料学报, 2024, 27 (1): 9-15.
- ZHANG Xingwu, LIU Peng, CHENG Yu. Enhancement of properties of alkali-activated red mud based cementitious materials by mineralizing microbe [J]. Journal of Building Materials, 2024, 27 (1): 9-15. (in Chinese)
- [25] 王应富,张树光,黄啸,等. 磷石膏-钢渣-矿渣固化低液限粉质黏土力学性能及耐久性能研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56 (增刊1): 12-23.
- WANG Yingfu, ZHANG Shuguang, HUANG Xiao, et al. Mechanical property and durability of low liquid limit silty clay solidified by phosphogypsum-steel slag-ground granulated blast-furnace slag [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56 (Suppl 1): 12-23. (in Chinese)
- [26] 周恩全,张曼,居东煜,等. 干湿循环下木质素改良粉土抗剪强度特性[J]. 工程科学与技术, 2024, 56 (2): 208-216.
- ZHOU Enquan, ZHANG Man, JU Dongyu, et al. Strength properties of lignin modified silty soil after dry-wet cycles [J]. Advanced Engineering Sciences, 2024, 56 (2): 208-216. (in Chinese)
- [27] 王亚丽,丁思哲,王玲玉. 利用电石渣进行赤泥脱碱研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (10): 3617-3623.
- WANG Yali, DING Sizhe, WANG Lingyu, et al. Dealkalization of red mud with calcium carbide slag [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42 (10): 3617-3623. (in Chinese)