

干湿循环对固化污泥微观结构及强度的影响

何俊,管家贤,张磊,吕晓龙,张驰

(湖北工业大学土木建筑与环境学院,湖北武汉 430068)

摘要:为探索用作填埋场覆盖材料的固化污泥的干湿循环耐久性,开展了干湿循环条件下碱渣-矿渣-石灰固化污泥强度性质试验。结果表明:随着干湿循环次数的增加,水化反应持续进行,钙矾石、水铝钙石和水化硅酸钙等水化产物增多,试样孔隙体积减小,结构趋于密实;总体来看,固化污泥的无侧限抗压强度随着干湿循环次数的增加呈增大趋势,7次干湿循环后试样的强度为干湿循环前的1.16~1.45倍;从微观结构和无侧限抗压强度来看,碱渣-矿渣-石灰固化污泥具有良好的干湿耐久性。

关键词:碱渣;固化污泥;干湿循环;无侧限抗压强度;干湿耐久性;微观结构

中图分类号:P642

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2022)04-0039-06

Effects of dry-wet cycles on microstructure and strength of solidified sludge//HE Jun, GUAN Jiexian, ZHANG Lei, LYU Xiaolong, ZHANG Chi (*School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China*)

Abstract:To explore the dry-wet durability of solidified sludge in the application of landfill cover, solidification strength tests of soda residue-slag-lime were performed under the condition of dry-wet cycles. The results show that the hydration reaction continues with the increase of dry-wet cycles, leading to increasing amount of hydration products including ettringite, hydro aluminite and calcium silicate hydrate, decreasing pore volume, and dense microstructure. In general, the unconfined compressive strength has an increase trend with the dry-wet cycles. The strength after the seventh dry-wet cycle is 1.16 to 1.45 times of that before the cycles. From the perspective of microstructure and unconfined compressive strength, sludge solidified with soda residue-slag-lime has good durability under dry-wet cycles.

Key words: soda residue; solidified sludge; dry-wet cycle; unconfined compressive strength; dry-wet durability; microstructure

我国在利用污水处理技术解决水污染问题的同时也产生了日益严重的污泥处置问题。由于污泥具有高含水率、低强度、高压缩性和低渗透性等特点且含有一些污染物质,在处置过程中安全事故和环境污染事故频发,故常常需要采用固化和预压等方法对污泥进行预处理^[1-2]。水泥是污泥固化常用的固化剂,但由于污泥含水率和有机质含量高,单一掺入水泥往往需要较大的掺入量才能有效改善污泥力学性质,由此带来了高能耗、CO₂排放和不可再生资源消耗等环境问题^[2-3]。因此,钢渣、矿渣、粉煤灰、生活垃圾焚烧底渣、石膏、废弃土等废弃物也被用于污泥固化,且取得了不错的效果,在改善污泥力学性质的同时还可对污染物起到一定稳定作用^[4-6]。通过适当的固化技术对污泥进行固化处理,使其能够循环再利用,是解决污泥问题的途径之一。

固化污泥常被用作填埋场覆盖材料。研究发现,污泥经过固化处理后密度与黏土相当,防渗性较好,能够达到垃圾填埋场覆盖材料的要求,是一种低成本且环境友好的填埋场覆盖替代材料^[7-10]。然而,填埋场从建成到封场,运行过程可长达数十年,固化污泥用作覆盖材料时不可避免地会受到周围环境和因素的影响,如干湿循环、冻融循环、降雨冲刷等。其中,固化污泥的干湿循环耐久性是非常重要的性质,很多学者对此进行了研究。李亚林等^[10]研究发现,污泥经过干湿循环后质量损失小于4%,体积损失小于12%,强度可满足污泥填埋的要求。胡学涛^[11]研究发现,第1次干湿循环对固化污泥体积、无侧限抗压强度和渗透性影响较大。Yang等^[12]研究发现,固化污泥的强度随干湿循环次数的增加而减小,当循环次数超过10次后强度保持稳

定。He 等^[13]开展了以碱渣为主要固化剂的疏浚淤泥固化试验研究,发现碱渣能起到很好的固化作用,固化淤泥具有良好的干湿循环耐久性。栗志翔^[14]对固化污泥的强度、渗透性和重金属浸出浓度等进行了研究,结果表明固化污泥可用作填埋场覆盖材料。然而,有关固化污泥用作填埋场中间及封场覆盖材料时的干湿循环耐久性、干湿循环条件下碱渣的骨架作用及固化污泥性质变化等方面,还有待于深入研究。

本文在前期研究基础上,针对填埋场中间及封场覆盖材料的干湿循环条件,以碱渣-矿渣-石灰固化污泥为研究对象,开展干湿循环作用下固化污泥的强度性质试验,结合 X 射线衍射(XRD)、核磁共振(NMR)和扫描电镜(SEM)等微观测试手段,探讨干湿循环次数、养护时间和固化剂掺量等对固化污泥性质的影响规律。从干湿循环耐久性角度探讨碱渣-矿渣-石灰固化污泥用作填埋场覆盖材料的可行性,以进一步扩展碱渣和污泥等废弃物的资源化利用途径,减少废弃物带来的环境污染,保障填埋场的安全。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验所用污泥取自武汉东湖生活污水处理厂,污泥中含有大量的水,其含水率高达 566.0%,pH 值为 6.45,密度为 1.1 g/cm³,液限和塑限分别为 380.3% 和 62.9%,塑性指数为 317.4。根据 He 等^[13-14]的研究及前期试验发现,碱渣颗粒是一种碱性材料,其对矿渣具有一定的激发作用,并能在污泥中形成固体骨架;而石灰可快速降低污泥含水率并激发碱渣活性,故本文选择碱渣、矿渣、石灰组成污泥固化剂,其中污泥、碱渣和矿渣的化学成分组成见表 1。

表 1 试验材料的化学成分组成 单位:%

材料	CaO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	MnO	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	Cl	其他
污泥	5.6	6.7	45.1	4.0	0.1	16.4	12.9	0.9	4.6	0.3	3.4
碱渣	66.5	1.0	8.6	0.3	0	0.1	4.1	0.2	11.3	6.7	1.2
矿渣	38.6	0.3	33.9	7.5	0.3	1.3	15.3	0.7	2.1	0	0

1.2 试验方案与方法

干湿循环试验方案见表 2,其中,矿渣和生石灰掺量参考栗志翔^[14]的试验结果,并将其掺量固定不变;为更多地消纳碱渣,且考虑不同掺量的影响,设定碱渣掺量较高,碱渣掺量分别取 30%、40%、50%;为研究养护龄期的影响,分别于养护 7 d、14 d 和 28 d 后开展干湿循环试验^[12,15]。

试验时,先将碱渣、矿渣在 60℃ 烘箱中烘干后过 1 mm 筛,再将固化剂与污泥混合搅拌均匀,置于

30℃ 恒温环境下密封熟化 3 d。由于石灰有放热作用,为保持试验条件的一致性,也选取 30℃ 恒温环境进行熟化。熟化 3 d 能使混合料降低含水率并有较高的初始强度,有利于制样和后期试验。制样前将制样模具(直径 3.91 cm,高度 8 cm)内壁均匀涂抹凡士林,然后将混合料分 3 层装入模具中,每层用击实器进行振捣密实,以排除试样中的空气,并将表面进行刮毛处理。试样制备完成后脱模,置于温度(20±1)℃、湿度大于 90% 的养护箱中养护至预定龄期。

表 2 干湿循环试验方案

试样编号	污泥掺量/%	碱渣掺量/%	矿渣掺量/%	生石灰掺量/%	龄期/d	循环次数/次
S3T28	100	30	20	12	28	0~7
S4T28	100	40	20	12	28	0~7
S5T28	100	50	20	12	28	0~7
S5T7	100	50	20	12	7	0~7
S5T14	100	50	20	12	14	0~7

参考美国试验与材料学会(ASTM)所发布规范^[16],并考虑填埋场实际环境温度情况开展干湿循环试验,每种配比共制 16 个试样。干湿循环开始前,先测量试样质量和体积,再取出 2 个试样,测其无侧限抗压强度和含水率;剩下试样分成 7 组,每组有 2 个平行样。试样置于(20±1)℃ 中干燥 24 h,然后放入宽口玻璃杯中,并加水直至将试样淹没,浸水 24 h,这个过程为干湿循环^[15]。每次干湿循环后取出试样,在室温下静置 10 min,观察试样外观并测其质量、体积、无侧限抗压强度和含水率。无侧限抗压强度采用 YSH-2 型无侧限抗压仪测量,变形速率为 1.18 mm/min,取最大轴向应力作为无侧限抗压强度。

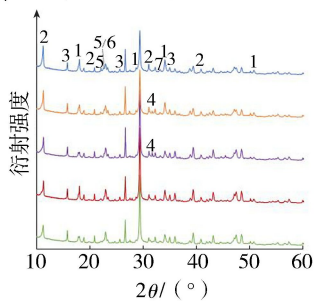
之后进行 XRD、SEM 和 NMR 测试,以研究干湿循环对固化污泥矿物成分和微观结构的影响。XRD 测试时将土样风干后过 75 μm 筛,扫描速度为 2°/min,范围为 10°~70°。XRD 数据采用 MDI Jade 6 软件进行物相检索,并进行物相分析。SEM 测试时将试样切成 1 cm³ 左右的完整试块,干燥后取新鲜断面进行观测。采用 PQ-001 型 NMR 核磁共振分析仪进行 NMR 测试,利用苏州纽迈公司提供的反演软件进行反演,得到横向弛豫时间(T_2)的分布曲线。

2 试验结果与分析

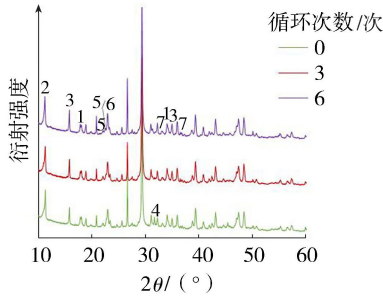
2.1 微观特征

2.1.1 XRD 分析

选择代表性试样进行 XRD 测试,结果见图 1,其中 2θ 为衍射角。可以看出,在固化污泥中可检测出钙矾石、水铝钙石和水化硅酸钙(CSH)等水化产物,表明当碱渣-矿渣-石灰用于污泥固化时,矿渣被石灰和碱渣激发,与 Ca(OH)₂ 和 SO₄²⁻ 等发生水化



(a) 未经干湿循环试样



(b) 试样S5T28

1—Ca(OH)₂; 2—水铝钙石; 3—钙矾石; 4—磷石膏;
5—水砷铜石; 6—碳镁铬石; 7—CSH

图1 固化污泥 XRD 图谱

反应,在碱渣提供 SO₄²⁻ 的条件下生成钙矾石。生石灰熟化形成的 Ca(OH)₂ 与碱渣中的氯盐反应生成水铝钙石,为层状双金属氢氧化物,可对污泥中的重金属具有较好的吸附作用^[17]。Ca(OH)₂ 与矿渣及污泥中的活性 SiO₂ 发生反应,生成胶结能力强的 CSH。对于未经过干湿循环的试样,随着养护龄期的增加,Ca(OH)₂ 峰先上升后下降;水铝钙石和钙矾石峰呈上升趋势;水砷铜石和碳镁铬石峰也呈上升趋势。由此可见,碱渣-矿渣-石灰对污泥中铜、砷和铬等污染物有稳定作用。对比试样 S3T28、S4T28 和 S5T28 可以发现,钙矾石峰随碱渣掺量的增加呈上升趋势,但试样 S3T28 中水砷铜石和碳镁铬石峰较弱,表明碱渣掺量较低时碱渣-矿渣-石灰对污染物的固化效果有限。此外,试样 S4T28 和 S5T28 中出现磷石膏峰,表明随着碱渣掺量的增加和养护龄期的增长生成了磷石膏。

随着干湿循环次数的增加,试样 S5T28 的 Ca(OH)₂ 峰呈下降趋势,水铝钙石、钙矾石峰呈上升趋势,表明在干湿循环作用下固化污泥中的水化反应仍在进行,水化产物增多;干湿循环前出现的磷石膏峰在干湿循环后逐渐消失,其原因在于磷石膏为单斜晶系,在一定范围内可被取代^[18],且含可溶性磷,因而易溶于水^[17],故易受干湿循环影响。干湿循环后,水砷铜石和碳镁铬石峰仍存在,表明污染物仍被稳定在固化污泥中。

2.1.2 NMR 分析

土体中孔隙水的 T₂ 值与其所处的孔隙结构相关,T₂ 与孔隙半径成正比,即孔隙越大,T₂ 越大;且曲线积分面积的大小可反映孔隙体积的大小^[19]。选择干湿循环前以及 3 次和 6 次干湿循环后的 S5T28 试样进行 NMR 试验,T₂ 分布曲线见图 2。可以看出,该试样 T₂ 分布曲线均为双峰形态。当干湿循环次数由 0 次增加为 3 次时,T₂ 分布曲线的主峰和次峰面积均出现明显减小,表明循环次数的增加使得小孔隙和大孔隙的体积均减小。当干湿循环次数由 3 次增加为 6 次时,对应的 T₂ 分布曲线的主峰面积(小孔隙体积)减小,而次峰面积(大孔隙体积)略有增大。峰面积减小表明部分孔隙水转化为水化产物中的化合水,固化污泥内水化反应在干湿循环过程中继续进行,与 XRD 测试结果一致。比较干湿循环 3 次和 6 次的曲线,可以看出其差别相对较小,表明干湿循环 3 次后,固化污泥内部水化速率开始减缓,内部结构的变化相对较小、趋于稳定。

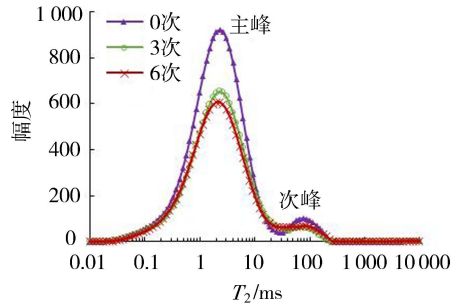


图2 干湿循环次数对固化污泥 T₂ 分布曲线的影响

2.1.3 SEM 分析

部分试样的 SEM 照片见图 3。可以看出,未经干湿循环的试样颗粒以团聚状为主,团聚体周围和孔隙中存在大量针状或棒状的钙矾石晶体,起到胶结和填充的作用。当干湿循环次数为 3 次时,钙矾



(a) 循环0次



(b) 循环3次



(c) 循环6次

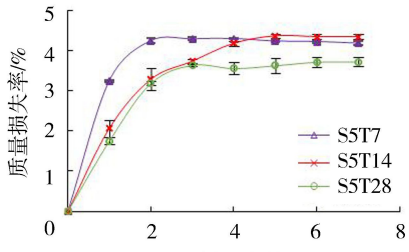
图3 固化污泥 S5T28 的 SEM 照片

石晶体周围有一些絮状 CSH 凝胶,颗粒间的胶结作用增强,孔隙被填充,结构变得更加密实。当干湿循环次数达 6 次时,孔隙内可观察到絮状 CSH 填充,六角板状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 表面及周围覆盖着一些絮状 CSH 凝胶。

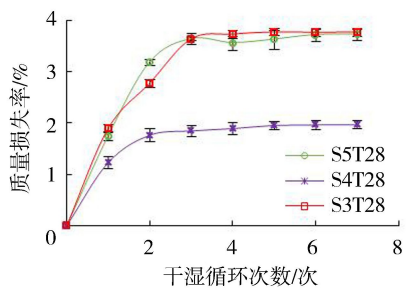
2.2 宏观特征

2.2.1 质量损失率

对干湿循环过程中的试样进行观测,发现固化污泥经过干湿循环后外观没有发生变化,仅在表面有少量颗粒脱落。固化污泥质量损失率(即干湿循环前与循环后质量之差占干湿循环前质量的百分比)随干湿循环次数的变化见图 4。可以看出,固化污泥质量损失率随干湿循环次数的增加呈先增大后趋于稳定的规律。第 1 次干湿循环时质量损失率增大幅度最明显,表明质量大幅降低;第 3 次循环后质量损失率逐渐趋向稳定。质量损失率随养护龄期的增加而减小,试样 S5T7、S5T14 和 S5T28 的稳定质量损失率分别为 4.25%、3.28% 和 3.19%,表明固化污泥的干湿耐久性随着养护龄期的增加而增强。从图 4(b)可以看出,试样 S4T28 的质量损失率小于试样 S5T28 和 S3T28,可能是由于当碱渣掺量较低时生成的水化产物较少,其填充和胶结作用不明显,故 S3T28 质量损失严重;随着碱渣掺量的增加,水化产物增多,填充和胶结作用增强,S4T28 质量损失率减小;试样 S5T28 中磷石膏等物质的溶解可能是造成该试样质量损失率大于试样 S4T28 的原因。当养护龄期为 28 d 时,固化污泥的质量损失率都小于 4%,与李亚林等^[10]得到的结果一致。



(a) 不同养护龄期

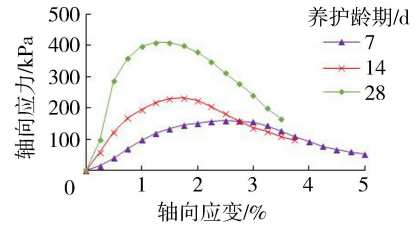


(b) 不同碱渣掺量

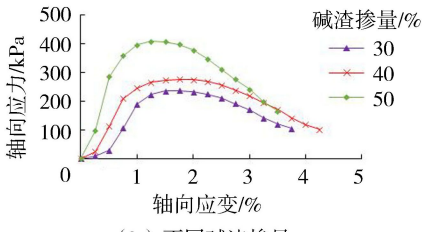
图 4 质量损失率随干湿循环次数的变化

2.2.2 无侧限抗压强度和破坏形态

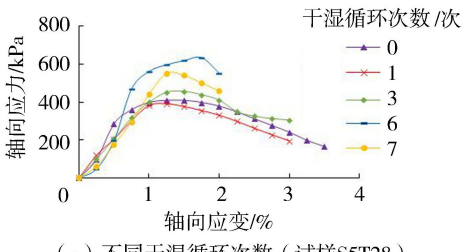
固化污泥的应力-应变曲线见图 5,可以看出,固化污泥表现出应变软化的特征。当养护龄期较短(7 d)时,由于水化反应形成的水化产物相对较少,试样应力-应变曲线塑性破坏特征相对明显,破坏应变约为 2%~3%;随着养护龄期的增加,试样中水化产物增多,胶结力增强,其应变软化和脆性破坏特征更明显,无侧限抗压强度由 7 d 时的 159.22 kPa 增大到 28 d 时的 408.99 kPa,破坏应变由 2.5% 减少至 1.25%。当碱渣掺量增加时,钙矾石等水化产物增多,无侧限抗压强度由 237.18 kPa 增大到 408.99 kPa,破坏应变由 1.75% 减少至 1.25%。不同干湿循环次数下固化污泥的应力-应变曲线均表现出明显的脆性破坏特征,破坏应变在 1%~2% 之间。



(a) 不同养护龄期



(b) 不同碱渣掺量



(c) 不同干湿循环次数(试样 S5T28)

图 5 固化污泥典型应力-应变曲线

固化污泥无侧限抗压强度随干湿循环次数的变化见图 6。可以看出:①当试样经历 1 次干湿循环时,无侧限抗压强度均出现小幅下降,可能原因是干湿循环 1 次时,固化污泥的质量损失率变化最为明显(图 4),而养护 28 d 后试样含水率有小幅上升,导致强度有所下降。②当干湿循环次数从 1 次增加至 7 次时,试样 S5T7 和 S5T14 无侧限抗压强度增大,这是因为养护龄期较短,固化污泥在干湿循环过程中水化反应持续进行(图 1),生成的水化产物逐渐增多,使颗粒间的联结增强,结构更加紧密。③养护龄期为 28 d、干湿循环次数从 1 次增加至 6 次时,无

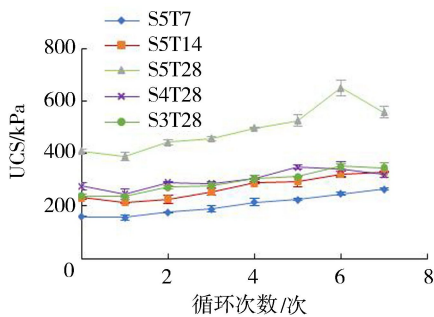


图6 无侧限抗压强度随干湿循环次数的变化

侧限抗压强度逐渐增大,第6次干湿循环后试样S5T28、S4T28和S3T28的强度分别是未经干湿循环试样强度的1.59倍、1.24倍和1.48倍,这是因为随着干湿循环次数的增加,固化污泥中孔隙体积减小,絮状CSH增多,使得颗粒间的胶结作用增强(图3)。但在第7次干湿循环后,无侧限抗压强度略有下降,且S5T28试样强度下降相对明显,这可能是由于膨胀性较强的钙矾石较多,对试样结构有一定不利影响。循环次数增大时大孔隙体积略有增大在一定程度上反映了这种不利影响(图2)。但第7次干湿循环后试样S5T28、S4T28和S3T28的强度分别是未经干湿循环试样强度的1.36倍、1.16倍和1.45倍。因此,总体而言,碱渣-矿渣-石灰固化污泥对干湿循环具有良好的耐久性。

2.3 讨论

随着干湿循环次数的增加,养护28d固化污泥的无侧限抗压强度总体上呈增大趋势,但在第1次和第7次略有波动:第1次干湿循环后强度为干湿循环前的89%~99%,第6次干湿循环后强度为干湿循环前的1.23~1.50倍,第7次干湿循环后强度为干湿循环前的1.16~1.45倍,这与已有研究成果存在一定的差异。李亚林等^[10]基于对骨架构建体污泥脱水水泥饼的研究发现,无侧限抗压强度从第1次干湿循环开始总体呈下降趋势,在12次循环后无侧限抗压强度下降了22.7%。胡学涛^[11]发现固化污泥的无侧限抗压强度在第1次干湿循环后增大到原来的2.3倍,随着干湿循环次数的继续增加,强度出现衰减现象,到第7次干湿循环后强度约为干湿循环前的1.5倍。Yang等^[12]采用自主研发的固化剂对污泥进行固化,发现三轴剪切强度从第1次干湿循环开始即呈下降趋势,到第7次时减小到原来的70%。本文研究与上述文献存在差异的原因主要包括:

a. 干燥过程中设置的温度不同。本文试验时干燥温度设置为 $(20\pm 1)^{\circ}\text{C}$,李亚林等^[10]和Yang等^[12]分别取值 $(60\pm 5)^{\circ}\text{C}$ 、 $(35\pm 3)^{\circ}\text{C}$,胡学涛^[11]对干燥温度没有具体说明。不同的干燥温度可能对试样的影响不同,进而表现出强度变化也存在一定的差异。

b. 固化方案不同。本文采用碱渣-矿渣-石灰来固化污泥,当石灰与水反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 时激发了矿渣的活性,矿渣中的 Ca^{2+} 、 SiO_4^{4-} 等离子进入孔隙溶液中,与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成CSH等物质,并在有 SO_4^{2-} 的情况下生成钙矾石。絮状CSH使得颗粒间的胶结作用变强,孔隙被填充,钙矾石将土中的自由水以结合水的形式固定下来。在污泥这种含水率高、孔隙比大的物质中,钙矾石具有很好的填充孔隙和胶结颗粒的作用,使结构更为紧密。石灰水化形成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与碱渣中的 Cl^- 反应生成水铝钙石,也能起到胶结作用。当污泥中的碱渣掺量较多(如掺量为40%和50%)时,碱渣提供的 SO_4^{2-} 与污泥中的 PO_3^{3-} 发生反应生成磷石膏。磷石膏易受干湿循环影响,逐步分解,其中 Ca^{2+} 与 Si^{4+} 发生反应生成CSH,对固化污泥强度的增大起到一定作用。除生成了钙矾石和CSH外,还生成了水铝钙石等产物,这些产物的共同作用使得固化污泥的强度随干湿循环次数的增加而增大。

c. 碱渣的骨架构建作用。碱渣颗粒尺寸较大,掺量也较多。经过干湿循环后将试样进行无侧限抗压强度试验,从试验后的试块中仍可以看到白色的、没有参与水化反应的碱渣颗粒,其在污泥中能起到骨架构建作用。垃圾焚烧灰渣骨架构建体可有效抵抗固化污泥在干湿循环过程中的体积变化^[11],本文的碱渣也起到类似的作用。因此,经过7次干湿循环后固化污泥的无侧限抗压强度比干湿循环前的强度高,干湿耐久性好。

3 结论

a. 在生石灰的激发作用下,碱渣中的 SO_4^{2-} 和 Cl^- ,矿渣中的 Ca^{2+} 、 SiO_4^{4-} 等与污泥发生水化反应,生成钙矾石、水化硅酸钙和水铝钙石等水化产物;在干湿循环过程中水化反应持续进行,水化产物增多,尤其是水化硅酸钙的填充和胶结作用增强,孔隙体积减小,结构更为密实,且碱渣具有骨架构建作用,使得碱渣-矿渣-石灰固化污泥具有良好的干湿耐久性。

b. 随着干湿循环次数的增加,碱渣-矿渣-石灰固化污泥的无侧限抗压强度总体呈增大趋势。不同养护龄期和碱渣掺量下,固化污泥质量损失率随干湿循环次数的增加而增大,第1次干湿循环作用对固化污泥的质量影响较大,导致第1次干湿循环后固化污泥的强度略有下降,但后续干湿循环次数增加无侧限抗压强度增大。养护28d的固化污泥在第7次干湿循环后强度略有降低,但仍为干湿循环前的1.16~1.45倍。

c. 经历7次干湿循环后,碱渣-矿渣-石灰固化污泥试样表面没有产生裂纹和表皮脱落等现象,质量损失率较小(低于4%),无侧限抗压强度比干湿循环前有所提高,碱渣掺量为30%时强度已超过50 kPa,满足垃圾填埋场覆土材料的性质要求。

参考文献:

[1] WANG F, YANG G L, LIU L S, et al. Research on development and utilization of municipal sewage sludge [J]. South-to-North Water Transfer and Water Science and Technology, 2013, 11(2): 99-103.

[2] 杨爱武, 胡焱, 杨少坤. 城市污泥新型固化技术及其力学特性[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4439-4449. (YANG Aiwu, HU Yao, YANG Shaokun. New solidification technology and mechanical properties of municipal sludge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4439-4439. (in Chinese))

[3] 薛飞, 王佩, 李磊, 等. 污泥固化土强度特性研究[J]. 人民长江, 2018, 49(17): 81-86. (XUE Fei, WANG Pei, LI Lei, et al. Study on strength characteristics of solidified sludge[J]. Yangtze River, 2018, 49(17): 81-86. (in Chinese))

[4] 王月香, 丁建文, 顾欢达. 碱矿渣-废石材新型复合凝胶材料稳定固化污泥的试验分析[J]. 环境工程, 2014, 32(11): 127-131. (WANG Yuexiang, DING Jianwen, GU Huanda. Analysis on performance of sewage sludge stabilization & solidification with a compound gelation material made from alkalinity slag and waste stone [J]. Solid Waste Treatment and Disposal, 2014, 32(11): 127-131. (in Chinese))

[5] 陈萍, 冯彬, 詹良通. 以垃圾焚烧底灰为骨料的脱水污泥固化试验[J]. 中国环境科学, 2014, 34(10): 2624-2630. (CHEN Ping, FENG Bin, ZHAN Liangtong. Solidification of dewatered sewage sludge using bottom ash of MSWI as skeleton material[J]. China Environmental Science, 2014, 34(10): 2624-2630. (in Chinese))

[6] 史燕南, 占川, 张超杰, 等. 污染淤泥固化稳定化处理及种植性能试验[J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(2): 89-94. (SHI Yannan, ZHAN Chuan, ZHANG Chaojie, et al. Experiments on stabilizing treatment of polluted silt solidification and planting performance[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(2): 89-94. (in Chinese))

[7] 邹庐泉, 吴长淋, 伍静静. 改性污泥替代垃圾填埋场覆土的研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(12): 2864-2868. (ZOU Luquan, WU Changlin, WU Jingjing. Study of modified sludge as landfill cover soil [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(12): 2864-2868. (in Chinese))

[8] CHUNG H I, LEE Y S. Utilization of stabilized and solidified sewage sludge as a daily landfill cover material [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2006, 10(4): 255-258.

[9] 马培东, 王里奥, 黄川, 等. 改性污泥用作垃圾填埋场日覆盖材料的研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23(23): 38-41. (MA Peidong, WANG Liao, HUANG Chuan, et al. Test on daily cover material of landfill site based on modified sludge from municipal sewage treatment plant [J]. China Water & Waste Water, 2007, 23(23): 38-41. (in Chinese))

[10] 李亚林, 杨家宽, 杨昌柱, 等. 基于骨架构建体脱水污泥填埋长期稳定性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(9): 76-80. (LI Yalin, YANG Jiakuan, YANG Changzhu, et al. Study on durability of landfill disposal of dewatered sludge conditioned by composites based on skeleton builder [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(9): 76-80. (in Chinese))

[11] 胡学涛. 复杂环境下市政污泥固化体物理力学特性试验研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2016.

[12] YANG A W, YANG S K, XU G F, et al. Study of the long-term deformation characteristics of municipal sludge solidified soil under the coupling action of dry-wet cycles and initial static deviatoric stress[J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 20: 8824414.

[13] HE J, SHI X K, LI Z X, et al. Strength properties of dredged soil at high water content treated with soda residue, carbide slag, and ground granulated blast furnace slag [J]. Construction and Building Materials, 2020, 242: 118126.

[14] 栗志翔. 碱渣-矿渣固化市政污泥的工程性质试验研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.

[15] KAMEI T, AHMED A, UGAI K. Durability of soft clay soil stabilized with recycled bassanite and furnace cement mixtures [J]. Soils and Foundations, 2013, 53(1): 155-165.

[16] American Society for Testing and Material. Standard test method for wetting and drying test of solid wastes; ASTM D 4843-1988[S]. Philadelphia: ASTM Press, 1988.

[17] 彭家惠, 彭志辉, 张建新, 等. 磷石膏中可溶磷形态、分布及其对性能影响机制的研究[J]. 硅酸盐学报, 2000, 28(4): 309-313. (PENG Jiahui, PENG Zhihui, ZHANG Jianxin, et al. Study on the form and distribution of water-soluble P₂O₅ in phosphogypsum and effective mechanism of properties [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2000, 28(4): 309-313. (in Chinese))

[18] MICHELE S, GIULIO I L, MORITZ C S, et al. Degradation processes of reinforced concretes by combined sulfate-phosphate attack [J]. Cement and Concrete Research, 2015, 68: 49-63.

[19] 王士权, 魏明俐, 何星星, 等. 基于核磁共振技术的淤泥固化水分转化机制研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1778-1786. (WANG Shiquan, Wei Mingli, HE Xingxing, et al. Study of water transfer mechanism during sediment solidification process based on nuclear magnetic resonance technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 1778-1786. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-05-18 编辑: 骆超)