

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.134



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 渗滤液浸泡对碱渣固化污泥长期性能的影响

何俊, 周莉蓉, 张磊, 冯潇莹

(湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 武汉 430068)

**摘要:**以碱渣-矿渣-生石灰固化污泥用作填埋场临时覆盖材料为背景,开展不同渗滤液浓度、浸泡时间和碱渣掺量条件下固化污泥性质的研究,探讨渗滤液浸泡对固化污泥长期性能的影响规律及微观机理。结果表明:固化污泥在渗滤液中长期浸泡时,生成钙矾石和水化硅酸钙等物质,试样强度随浸泡时间的增加而增大,固化污泥有较好的耐久性;但当碱渣掺量 60% 的试样浸泡 210 d 时,试样中生成大量的碳酸钙和不同尺寸的钙矾石,结构变得疏松,试样出现裂隙,强度大幅降低,低于垃圾填埋场临时覆盖材料强度要求,碱渣掺量过多对固化污泥的长期强度不利。渗滤液对固化污泥有一定的侵蚀性,固化污泥强度随渗滤液浓度的增大而降低。固化污泥具有结构性,不同渗滤液浓度和浸泡时间下固化污泥结构屈服应力变化与强度变化规律基本一致。在渗滤液长期浸泡过程中,碱渣-矿渣-生石灰对污泥和渗滤液中的铬、铜、铅、砷等污染物可起到稳定作用。

**关键词:**渗滤液;浸泡;固化污泥;碱渣;耐久性

**中图分类号:**X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2023)03-0164-09

## Influence of leachate soaking on long-term properties of sludge solidified with soda residue

HE Jun, ZHOU Lirong, ZHANG Lei, FENG Xiaoying

(School of Civil Engineering, Architectural and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, P. R. China)

**Abstract:** Sewage sludge was solidified with soda residue (SR), ground granulated blast furnace slag (GGBS), and quicklime, which was used as a temporary covering material for landfills. The effect of leachate concentration, soaking time and SR content on the long-term properties of solidified sludge was carried out. The micro mechanism of long-term performance was investigated. The results indicate that hydration products such as ettringite and calcium silicate hydrate are generated when the solidified sludge is soaked in the leachate. The strength of the sample increases with the increase in soaking time, indicating that the solidified sludge has good durability to the leachate. Nevertheless, a large amount of calcium carbonate and ettringite of different sizes are generated in the sample with 60% SR content after being soaked for 210 d. Then the structure becomes loose, cracks appear in the sample, the strength decreases significantly, and its long-term strength reduces to lower

**收稿日期:**2021-03-06

**基金项目:**国家自然科学基金(41772332);湖北省技术创新专项(2017ACA090)

**作者简介:**何俊(1977-),女,教授,主要从事环境岩土工程研究, E-mail: hjunas@163.com.

**Received:**2021-03-06

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 41772332); Major Technology Innovation of Hubei Province (No. 2017ACA090)

**Author brief:** HE Jun (1977-), professor, main research interest: geoenvironmental engineering, E-mail: hjunas@163.com.

than the strength requirement for temporary cover. Too much SR content is not good for the long-term strength of solidified sludge. The strength of solidified sludge decreases as the leachate concentration increases due to the corrosive effects of leachate. The solidified sludge is structural, and the changes in the yield stress under leachate soaking are basically similar to the strength. During the long-term leachate soaking, SR-GGBS-quicklime can stabilize some pollutions such as chromium, copper, lead and arsenic in the sludge and leachate.

**Keywords:** leachate; soaking; solidified sludge; soda residue; durability

随着城市的迅速发展,不同规模的污水处理厂日益增多,污水处理能力持续增长,但也产生了大量污泥。城市建设统计年鉴显示,2019年中国城镇污水处理厂数量达2 471座,污水处理总量为 $5.26 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,湿污泥产生量约为 $5 \times 10^7 \text{ t}^{[1]}$ 。由于污泥含水率高、体积大,含有多种有毒、有害物质,中国大部分污水处理厂常采用的填埋、焚烧、土地利用等处理、处置方法均存在二次污染的风险<sup>[2-3]</sup>。干化或固化后的污泥作为填埋场临时覆盖材料,既能对污泥进行资源化利用,又能利用填埋场的设施控制污染物迁移,是一种较好的污泥处理方法<sup>[4]</sup>。

学者们对固化污泥作为填埋场覆盖材料时的性质进行了大量研究。常用的固化材料除水泥和石灰等传统固化剂外,粉煤灰、钢渣、电石渣、磷石膏、垃圾焚烧灰等废弃物也被广泛研究,这些固化剂对于降低污泥含水率和压缩性、提高污泥强度都有一定效果<sup>[5-9]</sup>,能够满足其用作垃圾填埋场覆盖土添加料的可操作性和强度要求(横向抗剪强度不小于25 kPa或无侧限抗压强度不小于50 kPa)<sup>[10]</sup>。

生活垃圾填埋场产生的渗滤液是一种成分复杂、难以处理的高有机、高氨氮污水,且渗滤液COD、氨氮等指标可随填埋时间的推移而不断变化<sup>[11]</sup>。由于固化污泥的性质可能会因为受到渗滤液的腐蚀而发生劣化,一些学者对渗滤液作用下污泥的性质进行了研究。He等<sup>[12]</sup>研究发现,在模拟渗滤液中,浸泡时间的增加使改性污泥无侧限抗压强度增大,渗透系数略有降低。Chen等<sup>[13]</sup>研究发现,在渗滤液和蒸馏水中浸泡2个月后,污泥渗透系数在 $0.68 \times 10^{-8} \sim 1.3 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 之间变化。Zhang等<sup>[14]</sup>研究发现,生活污水用作填埋场衬垫材料可对渗滤液中的重金属产生沉淀和吸附作用。Xu等<sup>[15]</sup>指出,渗滤液长期腐蚀会影响垃圾填埋场地基的稳定性。李磊等<sup>[16]</sup>认为,渗滤液中含有大量微生物和营养物质,且渗滤液浸泡可降低固化污泥碱性而改变微生物所处的生化环境,促进有机质的降解。目前,关于渗滤液浓度对固化污泥长期性能的影响还缺乏系统研究。

碱渣作为氨碱法制碱过程中排放的一种废弃

物,堆存处置过程中易造成土壤盐渍化、空气粉尘及地下水污染<sup>[17]</sup>。碱渣在固化淤泥、疏浚淤泥和污泥及处理重金属污染土方面都具有一定的效果。例如,He等<sup>[18]</sup>用碱渣和矿渣处理固化淤泥,发现在侵蚀环境下固化淤泥的耐久性良好。刘晶晶等<sup>[19]</sup>研究了碱渣固化铅污染土,发现增加碱渣掺量和养护龄期可有效降低浸出液中的 $\text{Pb}^{2+}$ 浓度。栗志翔<sup>[20]</sup>研究发现,从强度、固结压缩、重金属浸出毒性和渗透性等方面综合来看,碱渣-矿渣-生石灰固化污泥用作填埋场覆盖材料具有可行性,但生活垃圾填埋场复杂环境下固化污泥的性质还有待进一步研究。

笔者在前期研究基础上,开展填埋场渗滤液长期浸泡作用下碱渣-矿渣-生石灰固化污泥的无侧限抗压强度和固结等试验,研究固化污泥强度性质随渗滤液浓度、浸泡时间和碱渣掺量的变化规律,结合核磁共振(NMR)、X-射线衍射(XRD)及扫描电子显微镜(SEM)等微观测试结果探讨渗滤液对固化污泥性质的作用机理,为碱渣固化污泥作为垃圾填埋场临时覆盖材料的应用提供理论支持。

## 1 试验材料与方案

### 1.1 试验材料

试验所用脱水污泥取自武汉东湖生活污水处理厂,为灰黑色泥状物质,其基本物理性质指标见表1。污泥取回后置于聚乙烯桶中,在封闭、遮光、低温条件下保存。固化材料有碱渣、矿渣及生石灰。试验材料主要化学成分及含量见表2,生石灰中CaO含量 $\geq 98\%$ 。

表1 污泥的基本物理性质指标

Table 1 Basic physical properties of sludge

含水率/%	有机质含量/%	pH值	密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	液限/%	塑限/%	塑性指数/%
566.0	35	6.45	1.1	380.3	62.9	317.39

浸泡采用的渗滤液取自武汉陈家冲生活垃圾填埋场。该填埋场一期启用时间为2008年,填埋方式为卫生填埋,采用土工膜防渗,目前处于封场状

表2 污泥、碱渣和矿渣的主要化学组成

Table 2 Main chemical composition of sludge, SR and GGBS

试验材料	化学组成/%									
	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	Cl
污泥	5.60	6.70	45.10	4	0.1	16.40	12.90	0.90	4.60	0.30
碱渣	66.46	1.02	8.57	0.28		0.14	4.06	0.22	11.27	6.72
矿渣	38.60	0.30	33.90	7.5	0.3	1.30	15.30	0.70	2.10	

态;二期仍在运行中。所取渗滤液为一期和二期混合渗滤液,其主要化学成分见表3。

表3 垃圾渗滤液的主要成分

Table 3 The main constituent in landfill leachate

pH值	NH <sub>3</sub> -N/ (mg·L <sup>-1</sup> )	COD/ (mg·L <sup>-1</sup> )	Cu/ (mg·L <sup>-1</sup> )	Pb/ (mg·L <sup>-1</sup> )	Cr/ (mg·L <sup>-1</sup> )
8.25	1 784.95	16 427.10	0.50	1.63	0.10

## 1.2 试验方案及方法

采用的试验方案见表4。其中,固化剂掺量及养护龄期根据前期试验及参考文献[20]确定。试验前期准备:碱渣与矿渣在60℃烘箱中烘干并过1mm滤筛,然后将污泥与固化剂按固化剂掺量配比混合。由于搅拌过程中生石灰发生放热反应,故搅拌借助土工刀完成。为了减少试样环境的影响,将

混合料密封后置于30℃烘箱中焖样3d后制样。制样前,在模具内部均匀涂上一层凡士林,无侧限抗压强度试验试样( $D \times H = 3.91 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$ )采用三瓣膜配合击样法,分5层击实试样;固结压缩试样( $D \times H = 6.18 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ )采用压样法制样,振动密实,以排除其中的空气,并保证试样不出现离析现象。试样脱模后用保鲜膜包裹、密封,放入标准养护箱(温度为 $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ ,湿度为 $98\% \pm 1\%$ )养护3d后取出,浸泡于不同浓度渗滤液中至规定时间,然后进行无侧限抗压强度试验和固结压缩试验。为考虑临时覆盖层处于不同浓度渗滤液长期浸泡环境,将渗滤液与蒸馏水按不同比例混合,浸泡时间为30~210d或240d。下文中S4T30IV表示试样碱渣掺量为40%、浸泡时间为30d、浸泡环境为渗滤液,其他以此类推。

表4 不同浓度渗滤液浸泡的试验方案

Table 4 Test scheme for soaking in leachate with different concentration

碱渣掺量S	养护龄期	浸泡时间 $t/d$	浸泡环境	试验类型	
				宏观	微观
40%、50%、60%	3d+3d	30、60、120、210或240	I、II、III、IV	强度、固结	XRD、NMR、SEM

注:1. 碱渣掺量为固化剂与湿污泥的质量比;矿渣和生石灰掺量分别为10%和12%;2. 养护龄期3d+3d为30℃烘箱焖样3d,标准养护3d;3. 浸泡环境I表示蒸馏水;II表示蒸馏水与渗滤液质量比为2:1;III表示蒸馏水与渗滤液质量比为1:1;IV表示渗滤液。

无侧限抗压强度试验采用应变控制式无侧限压力仪,依据《公路土工试验规程》(JTJ3430—2020)<sup>[21]</sup>进行。变形速率为1.18mm/min,取峰值或轴向应变15%所对应的轴向应力为无侧限抗压强度,每组试样测定2个平行样。固结压缩试验仪器为GZQ-1型全自动气压固结仪,试验压力为25~1600kPa,每级荷载以每小时沉降量不大于0.01mm为压缩稳定标准。

NMR试验采用苏州纽迈股份有限公司生产的核磁共振岩心分析仪(MicroM12-025VR)。达到浸泡时间后取出试样,用改造的胶制注射器取样( $D \times H = 17 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ ),根据反演FID数据绘制 $T_2$ 分布曲线。XRD试验采用CuK $\alpha$ 辐射为0.154nm的BrukerD8Advance系统(BrukerAXS, Madison,

WI, USA),扫描速度为2( $^\circ$ )/min,扫描范围为 $5^\circ \sim 75^\circ$ ,测试样经60℃烘干后过75 $\mu\text{m}$ 筛,然后进行测试。SEM试验采用SU8010(Hitachi Ltd., Tokyo, Japan),试样切成1cm<sup>3</sup>左右小块,干燥后取新鲜断面进行测试。

## 2 试验结果分析及讨论

### 2.1 无侧限抗压强度

2.1.1 浸泡时间的影响 图1为不同碱渣掺量下固化污泥无侧限抗压强度与浸泡时间的关系。可以看出,由于污泥和渗滤液性质都比较复杂,固化污泥强度随浸泡时间的增长呈一定的波动性。总体来看,随着浸泡时间的增加,不同浸泡环境下的试样S4和S5的强度呈增大趋势;试样S6的强度也

呈增大趋势,但在浸泡 210 d 时试样中出现裂隙,导致其强度显著降低。对于试样 S4,在浸泡环境相同的情况下,浸泡时间从 30 d 增加至 120 d 时其强度缓慢增大,从 120 d 到 210 d 时强度增幅明显(图 1(a))。试样 S5 也有相似的规律(图 1(b)),表明试样 S4 和 S5 具有较好的渗滤液耐久性。对于碱渣掺量较高的试样 S6,其长期耐久性不如试样 S4 和 S5。

210 d 情况下,碱渣掺量从 40% 增至 50% 时,强度小幅下降,增至 60% 时强度下降至 42.8 kPa(图 2(d))。这表明碱渣掺量对固化污泥短期、中期和长期效应的影响存在差异性。另外,对比 3 种不同碱渣掺量的试样,试样 S6 受渗滤液浓度的影响最大,其强度随渗滤液浓度的增加而降低的趋势更明显。

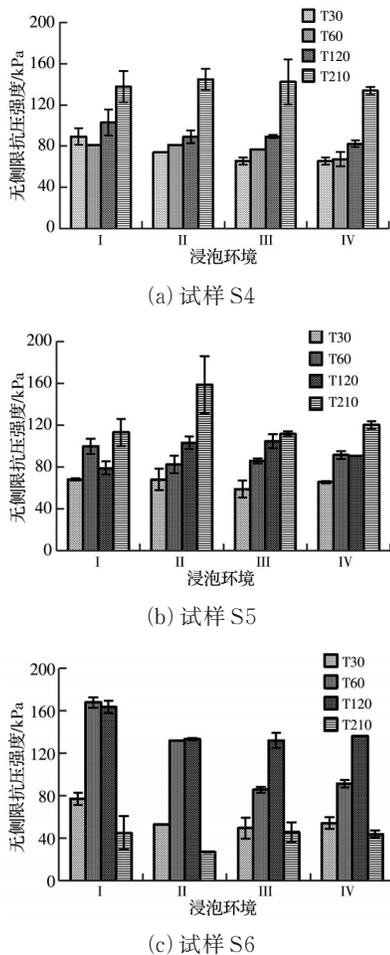


图 1 不同碱渣掺量时无侧限抗压强度与浸泡时间的关系

Fig. 1 Relationships between unconfined compressive strength and soaking time with different SR content

2.1.2 碱渣掺量及浸泡环境的影响 图 2 为不同浸泡时间下固化污泥无侧限抗压强度与碱渣掺量及浸泡环境的关系。可以看出,在浸泡环境相同的情况下,浸泡 30 d 时碱渣掺量的变化对强度影响不明显;当浸泡时间增加至 60、120 d 时,强度随碱渣掺量的增加呈增大趋势;浸泡时间为 210 d 时,强度随碱渣掺量的增加而减小,当碱渣掺量增加至 60% 时,强度降低尤其明显。例如在蒸馏水(I)浸泡 60 d 的情况下,试样 S4、S5 和 S6 对应强度分别为 81.2、100、168 kPa(图 2(b));在渗滤液(IV)浸泡

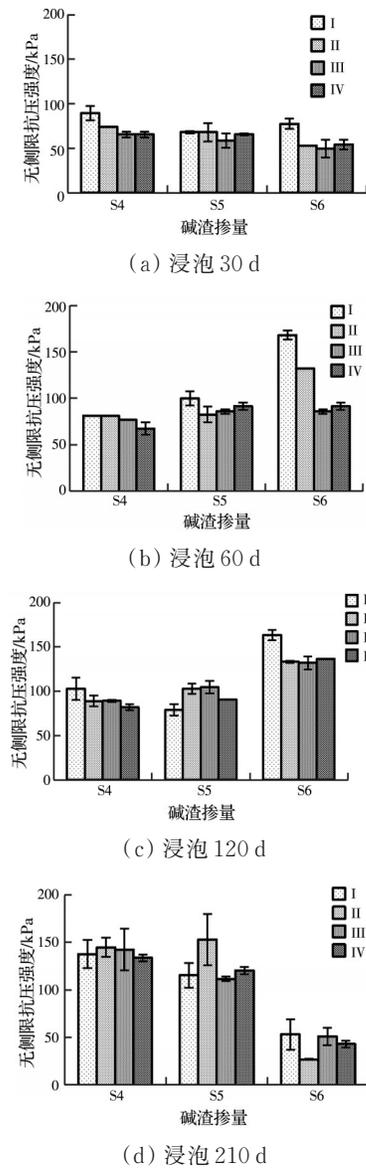


图 2 不同浸泡时间下无侧限抗压强度与碱渣掺量的关系

Fig. 2 Relationships between unconfined compressive strength and SR content under different soaking time

在浸泡时间相同的情况下,随着渗滤液浓度的增大,固化污泥的强度虽有一定波动,但整体呈减小趋势(除浸泡 210 d,规律性较差外),表明渗滤液

对固化污泥具有侵蚀作用。浸泡 210 d,后固化污泥的强度与渗滤液浓度的关系不大,其原因可能在于渗滤液和污泥的性质比较复杂,长期浸泡过程中实验室温度环境变化、渗滤液浓度分布不均等因素对强度的影响超过了渗滤液浓度差异的影响。渗滤液浸泡时试样表面出现一些黄褐色砂质结晶体, XRD 检测出其主要成分为钙钒石、碳酸钙和氯化钠,而蒸馏水浸泡试样则没有出现(见图 3),反映出渗滤液与固化污泥发生相互作用,渗滤液对固化污泥具有侵蚀性。

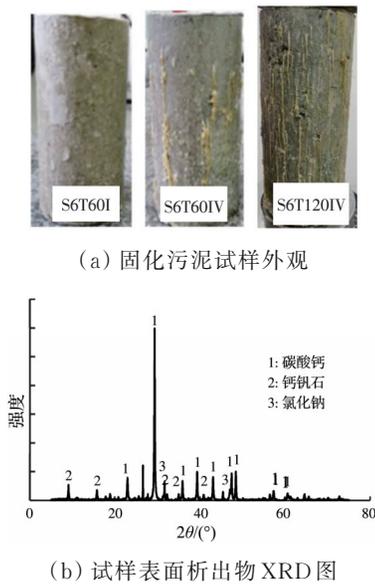


图 3 不同浸泡环境下固化污泥试样外观和析出物 XRD 图  
 Fig. 3 The appearance of solidified sludge under different soaking environment and XRD pattern of precipitates

2.2 结构屈服应力

选取试样 S4T60 的  $e\text{-lg } p$  关系曲线为代表,如图 4 所示。可以看出,与水泥固化污泥类似<sup>[22]</sup>,不同浸泡环境下固化污泥试样也具有结构性特点,即  $e\text{-lg } p$  曲线存在一个明显的屈服点,即为结构屈服应力。采用 Butterfield 的  $\ln(1+e)\text{-lg } p$  双对数坐标法<sup>[22]</sup>得到固化污泥的结构屈服应力,如图 5 所示。可以看出,

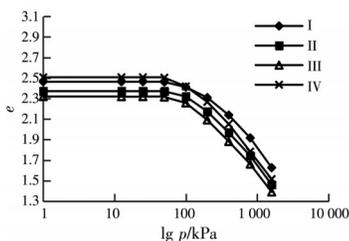


图 4 S4T60 的  $e\text{-lg } p$  关系曲线  
 Fig. 4 The  $e\text{-lg } p$  relationship curve of S4T60

随着浸泡时间的增长,结构屈服应力呈先增大后减小的趋势(图 5(a)),例如,对于 S4IV,当浸泡时间为 15、60、240 d 时,结构屈服应力分别为 92.6、156.6、82.1 kPa。结构屈服应力与无侧限抗压强度随浸泡时间的变化存在一定的差异性,可能是在无侧限抗压强度试验和固结试验中试样尺寸和受力状态存在差异造成的。固化污泥中生成了具有膨胀性的钙钒石,在竖向压力作用下,环刀的侧向限制可能导致试样更易被压坏,因此,在长期浸泡时试样的结构屈服应力降低;而在无侧限条件下侧向提供了变形的空间,试样无侧限抗压强度增大,但其变化应该与钙钒石的量有关,如前所述,试样 S6 在长期浸泡时无侧限抗压强度也会降低。结构屈服应力随碱渣掺量的增加呈先减小后增大的趋势,但在渗滤液浓度较高的情况下随碱渣掺量的增加而增大(图 5(b)、(c))。另外,和无侧限抗压强度的变化规律一致,整体上看,固化污泥的结构屈服应力随浸泡渗滤液浓度的增加呈减小的趋势。

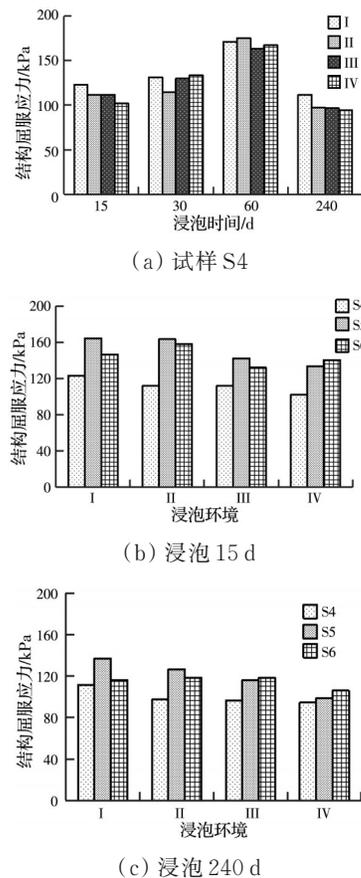


图 5 结构屈服应力与浸泡时间、浸泡环境及碱渣掺量的关系

Fig. 5 Relationships between structural yield stress and soaking time, soaking environment and SR content

2.3 微观特征

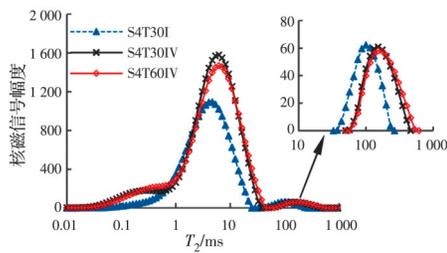
2.3.1 NMR 试验 图6为部分固化污泥的  $T_2$  分布曲线,表5为对应的  $T_2$  峰值及积分面积。可以看出, S4T30 I 曲线为双峰形态,而 S4T30 IV 曲线为三峰形态,表明渗滤液浸泡试样的孔隙分布连续性较弱;当碱渣掺量和浸泡时间相同时,随着渗滤液浓度的增加,  $T_2$  曲线向右上方移动,其峰值和积分面积逐渐增加。例如,当浸泡环境分别为蒸馏水和渗滤液时,试样的  $T_2$  主峰值分别为 4.642、6.136 ms,大孔隙  $T_{2max}$  分别为 100、152 ms。土体中  $T_2$  值与孔

隙结构相关,  $T_2$  与孔隙半径  $R$  成正比,且对应的积分面积可反映孔隙体积的大小<sup>[23]</sup>。因此,渗滤液浓度增大使得试样中的孔隙变大,孔隙体积也增大。对比 S4T30 IV 和 S4T60 IV 可以发现,后者积分面积和峰值小于前者,且  $T_2$  曲线略微右移,孔隙体积随浸泡时间的增加而减小。在浸泡 30 d 的情况下,随着碱渣掺量的增加,  $T_2$  曲线向左移动,试样孔隙尺寸有减小趋势,孔隙体积也有所减小,从而有助于强度的提高。

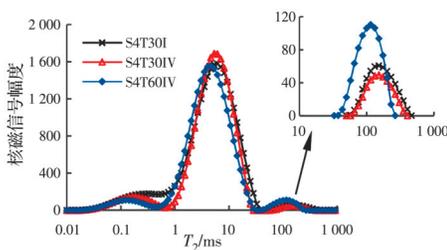
表 5 NMR 试验中峰值  $T_2$  和积分面积

Table 5 Peak  $T_2$  and integral area for NMR tests

参数	$T_{2max1}$	$T_{2max2}$	$T_{2max3}$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S$
S4T30I	4.64	100		17 656.12	479.51		18 135.630
S4T30IV	0.33	6.14	152	2 494.95	24 351.21	526.80	27 372.960
S4T60IV	6.14	152		26 411.63	542.90		26 954.534
S5T30IV	0.19	5.34	152	2065.50	22 451.70	386.95	24 904.139
S6T30IV	0.12	4.64	114.98	1 427.33	22 317.21	864.16	24 608.693



(a) 浸泡环境和时间的影响



(b) 碱渣掺量的影响

图 6 不同浸泡时间、环境及碱渣掺量的  $T_2$  曲线

Fig. 6  $T_2$  curves with different soaking time, soaking environment and SR content

2.3.2 XRD 测试 图7为不同影响因素下固化污泥的 XRD 图谱。可以发现,固化污泥主要有碳酸钙( $\text{CaCO}_3$ )、石英( $\text{SiO}_2$ )、氢氧化钙( $\text{Ca(OH)}_2$ )、钙矾石( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ )、钙铬矾( $\text{Ca}_6\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ )、水铝钙石

( $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{Cl}_2\cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )/geminite ( $\text{Cu}^{2+}2\text{As}^{2+}5\text{O}_7\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )/dundasite( $\text{Pb}_2\text{Al}_4(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_8\cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )和水化硅酸钙(C-S-H)等物质。

从图7(a)可以看出,渗滤液浸泡的试样中  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Ca(OH)}_2$  峰较弱,而  $\text{CaCO}_3$  峰较强,表明渗滤液浸泡环境下发生的碳化反应对强度有不利影响;而蒸馏水浸泡环境下 C-S-H 峰较强,可能是造成其强度和结构屈服应力较高的原因。钙矾石主要由碱渣提供  $\text{SO}_4^{2-}$ ,与  $\text{Ca(OH)}_2$  及活性  $\text{Al}_2\text{O}_3$  反应生成,钙铬矾则由  $\text{Cr}^{3+}$  取代钙矾石铝柱中的  $\text{Al}^{3+}$  形成。

从图7(b)可以看出,相同浸泡时间和浸泡环境下,碱渣掺量 60% 试样中生成的  $\text{CaCO}_3$  和钙矾石最多。S4T210 中  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Ca(OH)}_2$  较少,而  $\text{CaCO}_3$  和钙矾石的量也较少,表明  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Ca(OH)}_2$  参与水化反应生成胶结性较强的 C-S-H 等物质。经过 210 d 渗滤液浸泡后,固化污泥中水铝钙石/geminate/dundasite 峰都较强。

从图7(c)可以看出,当浸泡时间从 30 d 增至 60 d 时,  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Ca(OH)}_2$  峰显著减少,钙矾石和 C-S-H 量增多,表明水化反应逐渐加强。当浸泡时间从 60 d 增加至 210 d 时,  $\text{Ca(OH)}_2$  增多,钙矾石和 C-S-H 有所减少。水铝钙石/geminate/dundasite 对应的峰随浸泡时间的增加逐渐增加。

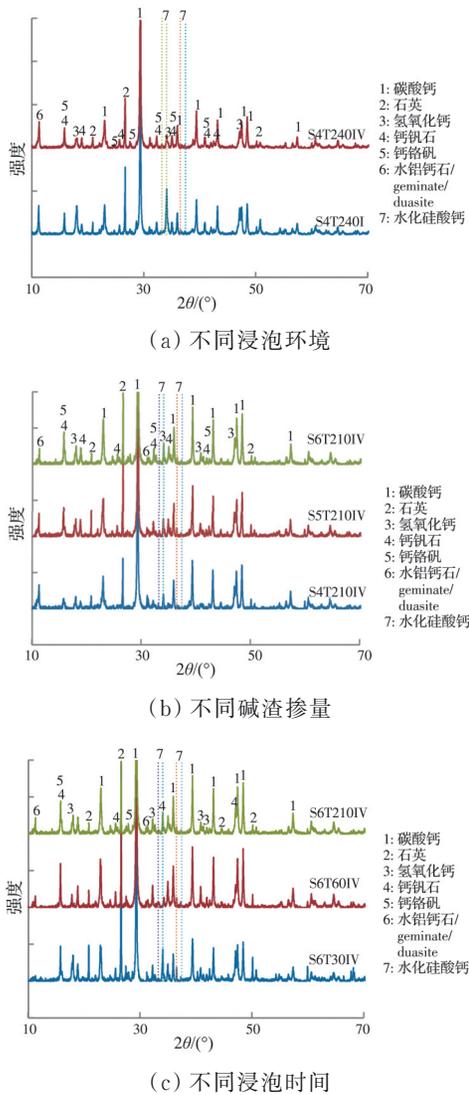


图 7 不同影响因素下固化污泥 XRD 图谱  
Fig. 7 XRD patterns of solidified sludge under different influence factors

2.3.3 SEM 测试 图 8 为部分固化污泥的 SEM 照片。可以看出, S4T60I 中有六角板状  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、针棒状钙矾石生长在颗粒表面和孔隙中(图 8(a)); 随着浸泡时间的增加, 试样中针棒状钙矾石增多,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  表面也有钙矾石晶体生成, 在颗粒边缘观察到絮状 C-S-H(图 8(b)), 有效包裹颗粒、填充颗粒间孔隙, 使颗粒间相互粘结且整体结构性增强; 在渗滤液长期浸泡的情况下, 试样 S4T210IV 中也有大量尺寸较均匀的钙矾石生成, 但 C-S-H 凝胶相对较少(图 8(c)); 对比图 8(c)、(d) 可以发现, 在渗滤液浸泡 210 d、碱渣掺量由 40% 增加至 60% 时, 试样中颗粒较大, 钙矾石尺寸大小悬殊, 结构较为疏松。

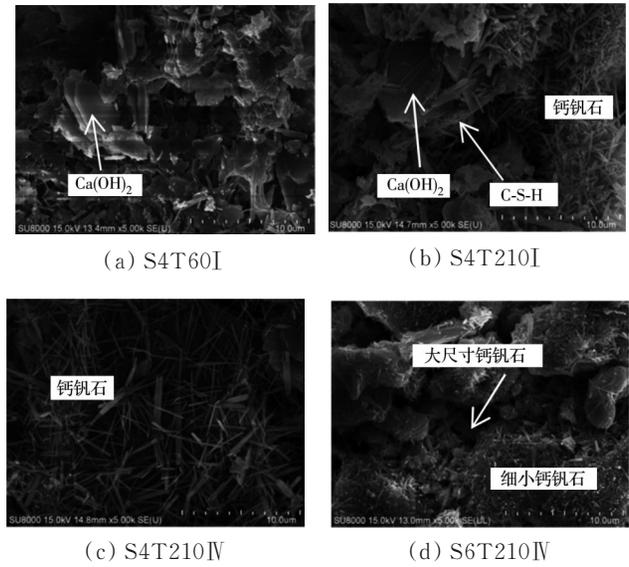


图 8 不同影响因素下固化污泥 SEM 图像 (5 000×)  
Fig. 8 SEM images of solidified sludge under different influence factors (5 000×)

综合以上微观测试结果可以看出: 在固化污泥中, 初期由于碱渣颗粒较大, 吸水性较强, 与污泥混合后短期内即可降低整体含水率, 使得试样强度增大。随着浸泡时间的增加, 固化污泥中活性  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  持续发生水化反应, 生成 C-S-H、钙矾石和  $\text{CaCO}_3$ , 有效地填充污泥颗粒间孔隙, 使得颗粒间相互粘连、搭接, 增强了颗粒间的联结作用, 孔隙体积减小, 使得固化污泥试样结构性增强、强度增大。但当浸泡时间增加至 210 d 时, 碱渣虽能在一定程度上填充颗粒间的孔隙, 但过多的碱渣会提供较多的  $\text{SO}_4^{2-}$ , 生成过多的钙矾石, 其膨胀作用会破坏已有的凝胶体<sup>[18]</sup>; 且钙矾石尺寸悬殊, 填充在孔隙中的大尺寸钙矾石膨胀力强, 使结构变得松散, 孔隙变大、数量增多<sup>[17]</sup>, 促使试样由内向外破裂, 导致试样抗压强度降低; 在固结压力作用下, 受侧限挤压作用时易发生破裂, 导致土体颗粒间联结性变弱、结构性变差。同时, 随着浸泡时间的增长, 更多的污染物被稳定, 固化污泥与渗滤液的相互作用也逐渐加强。

当浸泡环境不同时, 蒸馏水浸泡的试样生成较多针棒状钙矾石/钙铬矾和 C-S-H 凝胶, 填充颗粒间孔隙, 使得试样结构紧密; 而渗滤液浸泡试样生成的  $\text{CaCO}_3$  和钙矾石/钙铬矾较多, 并在试样的外表面大量析出。与成分单一模拟渗滤液不同<sup>[12]</sup>, 真实渗滤液成分复杂, 对固化污泥具有侵蚀作用, 其浓度越高, 对试样的侵蚀性越大, 导致试样内部孔

隙数量增多、孔隙体积增加,强度和结构屈服应力呈下降趋势。

碱渣掺量对固化污泥强度及结构屈服应力的影响与浸泡时间有关。当浸泡时间较短(30 d)时,3种碱渣掺量试样强度的差异不明显;随着浸泡时间的增加(60~120 d),水化反应生成的胶结性产物增多,生成大量针棒状钙矾石、絮状C-S-H,固化污泥的强度随碱渣掺量的增加呈增大的趋势;碱渣掺量为40%~50%时,结构屈服应力增加,但当碱渣掺量为60%时,结构屈服应力略有增大或减小。在长期浸泡作用下(210 d),碱渣掺量为40%的试样强度最高,而较多的碱渣带来较多 $\text{SO}_4^{2-}$ ,生成较多的钙矾石,且碳化形成较多碳酸钙,这使得碱渣掺量为60%的试样出现裂缝,强度大幅降低。因此,从长期性能来看,固化污泥中碱渣掺量需要控制在合理的范围内。

### 3 结论

1)在不同浓度渗滤液中长期浸泡时,碱渣-矿渣-生石灰固化污泥表现出较好的耐久性,其强度随浸泡时间的增加而增大;但碱渣掺量为60%的试样浸泡210 d时,试样中生成不同尺寸的钙矾石和较多的碳酸钙,导致结构变得疏松,强度大幅降低至46.8 kPa,低于填埋场临时覆盖材料的强度要求(50 kPa)。渗滤液长期浸泡作用下,碱渣掺量过多对固化污泥强度不利。

2)渗滤液对固化污泥具有一定的侵蚀性,固化污泥的强度随渗滤液浓度的增加而降低。其原因在于蒸馏水浸泡试样中生成钙矾石和水化硅酸钙,而渗滤液浸泡试样中生成较多的钙矾石和碳酸钙,且孔隙体积较大。

3)固化污泥具有结构性,其结构屈服应力随渗滤液浓度的增加呈减小趋势,与强度变化规律一致。渗滤液浓度较高时,结构屈服应力随碱渣掺量的增加而增大,随浸泡时间的增加呈先增后减的趋势。结构屈服应力与强度随浸泡时间变化存在一定的差异,这与试样尺寸和受力状态有关。

4)碱渣、矿渣和生石灰用于固化污泥时,在渗滤液长期浸泡的过程中,对污泥和渗滤液中的铬、铜、铅、砷等污染物可起到稳定作用。

### 参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2019年城市建设

统计年鉴[R/OL]. (2020-12-31) [2021-01-20]. <http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzljxsxytjgb/jstjnj/>.

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Statistical Yearbook of Urban Construction in 2019 [R/OL]. (2020-12-31) [2021-01-20]. <http://www.mohurd.gov.cn/xytj/tjzljxsxytjgb/jstjnj/>. (in Chinese)

[2] 姜媛媛, 王彦, 段文焱, 等. 市政污泥热解过程中重金属迁移特性及环境效应评估[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 2966-2974.

JIANG Y Y, WANG Y, DUAN W Y, et al. Migration and environmental effects of heavy metals in the pyrolysis of municipal sludge [J]. Environmental Science, 2021, 42(6): 2966-2974. (in Chinese)

[3] VIEIRA R F, MORICONI W, PAZIANOTTO R A A. Residual and cumulative effects of soil application of sewage sludge on corn productivity [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(10): 6472-6481.

[4] FAN X H, ZHU W, QIAN Y J, et al. Increasing the hydraulic conductivity of solidified sewage sludge for use as temporary landfill cover [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 1-10.

[5] 曹永华, 闫澍旺, 赵乐军. 固化污泥的工程性质及微观结构特征[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 740-744.

CAO Y H, YAN S W, ZHAO L J. Engineering properties and microstructure feature of solidified sludge [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 740-744. (in Chinese)

[6] KIM E H, CHO J K, YIM S. Digested sewage sludge solidification by converter slag for landfill cover [J]. Chemosphere, 2005, 59(3): 387-395.

[7] HERRMANN I, SVENSSON M, ECKE H, et al. Hydraulic conductivity of fly ash-sewage sludge mixes for use in landfill cover liners [J]. Water Research, 2009, 43(14): 3541-3547.

[8] 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 P, FENG B, ZHAN L T. Solidification of dewatered sewage sludge using bottom ash of MSWI as skeleton material [J]. China Environmental Science, 2014, 34(10): 2624-2630. (in Chinese)

[9] ROSLI N A, AZIZ H A, SELAMAT M R, et al. A mixture of sewage sludge and red gypsum as an alternative material for temporary landfill cover [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 263: 110420.

[10] 城镇污水处理厂污泥处置混合填埋用泥质: GB/T

- 23485—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- Disposal of sludge from municipal wastewater treatment plant—Quality of sludge for co-landfilling: GB/T 23485—2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009 (in Chinese)
- [11] KJELDEN P, BARLAZ M A, ROOKER A P, et al. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2002, 32(4): 297–336.
- [12] HE J, LI F, LI Y, et al. Modified sewage sludge as temporary landfill cover material [J]. *Water Science and Engineering*, 2015, 8(3): 257–262.
- [13] CHEN P, ZHAN L T, WILSON W. Experimental investigation on shear strength and permeability of a deeply dewatered sewage sludge for use in landfill covers [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(10): 4593–4602.
- [14] ZHANG H Y, YANG B, ZHANG G W, et al. Sewage sludge as barrier material for heavy metals in waste landfill [J]. *Archives of Environmental Protection*, 2016, 42(2): 52–58.
- [15] XU S C, LU H J, LIU J Z, et al. An experimental study on the microstructure and triaxial shear of structured clay in contact with landfill leachate [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78(6): 4611–4622.
- [16] 李磊, 王佩, 薛飞. 生化降解条件下水泥固化污泥的微观结构研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(6): 1217–1225.
- LI L, WANG P, XUE F. Research on microstructure of solidified sludge using cement under biochemical degradation [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2018, 26(6): 1217–1225. (in Chinese)
- [17] 孙家瑛, 顾昕. 新型无熟料碱渣固化土的工程特性[J]. *建筑材料学报*, 2014, 17(6): 1031–1035.
- SUN J Y, GU X. Engineering properties of the new non-clinker incorporating soda residue solidified soil [J]. *Journal of Building Materials*, 2014, 17(6): 1031–1035. (in Chinese)
- [18] HE J, LI Z X, WANG X Q, et al. Durability of soft soil treated with soda residue and ground granulated blast furnace slag in a soaking environment [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2020, 32(3): 06019018.
- [19] 刘晶晶, 查甫生, 王连斌, 等. 碱渣固化铅污染土淋滤特性试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(Sup1): 94–98.
- LIU J J, ZHA F S, WANG L B, et al. Leaching properties of lead contaminated soils treated by soda residue [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2016, 46(Sup1): 94–98. (in Chinese)
- [20] 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.
- LI Z X. Experimental research on engineering properties of municipal sludge solidified with soda residue and ground granulated blast furnace slag [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [21] 公路土工试验规程: JTG 3430—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- Test methods of soils for highway engineering: JTG 3430—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020. (in Chinese)
- [22] 李磊, 徐菲, 周灵君, 等. 固化污泥压缩特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37(1): 171–176.
- LI L, XU F, ZHOU L J, et al. Compression characteristics of solidified sewage sludge [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(1): 171–176. (in Chinese)
- [23] XU J, LI Y F, REN C, et al. Damage of saline intact loess after dry-wet and its interpretation based on SEM and NMR [J]. *Soils and Foundations*, 2020, 60(4): 911–928.

(编辑 黄廷)