

硅酸盐水泥固化/稳定化剩余污泥探索研究

卫建伟¹, 付怀佳², 梁纪灵¹, 贺 涵¹, 韩婷婷¹, 张 颜¹, 韩 杰¹

(1. 辽宁石油化工大学 土木工程学院, 辽宁 抚顺 113001; 2. 淄博齐翔腾达化工股份有限公司, 山东 淄博 255438)

摘 要: 以普通硅酸盐水泥固化污水处理厂剩余污泥为建筑材料, 探索了剩余污泥资源化处置方法。将剩余污泥与水泥按照一定配比混合均匀, 置于标准养护箱中养护 3~28 d, 以污泥-水泥固结体无侧限抗压强度(R_c)和总有机物质量分数(TOC)为评价指标。结果表明, 当污泥与水泥质量比(R_m)为 0.63、液固质量比($R_{l/s}$)为 0.31 时, 固结体 28 d 的 R_c 约为 6.9 MPa, 该强度不满足非烧结砖最低强度要求, 但满足剩余污泥填埋要求; 污泥-水泥固结体浸出液中有机物质量分数(TOC_l)较固结体中初始有机物质量分数(TOC_0)减少约 86%。硅酸盐水泥固化剩余污泥可以有效地将剩余污泥中有机物稳定在固结体中, 对其进行填埋处理可有效抑制剩余污泥对土壤的二次污染。

关键词: 剩余污泥; 固化/稳定化; 无侧限抗压强度; 硅酸盐水泥

中图分类号: TE992.3

文献标志码: A

doi:10.12422/j.issn.1672-6952.2023.02.002

Inquiry Investigation about Solidification/Stabilization of Surplus Sludge Using Silicate Cement

Wei Jianwei¹, Fu Huaijia², Liang Jiling¹, He Han¹, Han Tingting¹, Zhang Yan¹, Han Jie¹

(1. College of Civil Engineering, Liaoning Petrochemical University, Fushun Liaoning 113001, China;

2. Zibo Qixiang Tengda Chemical Co., Ltd., Zibo Shandong 255438, China)

Abstract: In order to realize the resource disposal of surplus sludge from sewage treatment plant, ordinary silicate cement was used to solidify it as a building material. The surplus sludge and cement were mixed evenly according to a certain ratio and placed in a standard curing box for 3~28 days. The unconfined compression strength (R_c) and total organic carbon (TOC) content of the sludge-cement consolidated body were used as evaluation indicators. It was found that the R_c of 28 days for surplus sludge-cement solidified block could reach about 6.9 MPa when mass ratio (R_m) of surplus sludge to ordinary silicate cement and mass ratio ($R_{l/s}$) of liquid to solid are 0.63 and 0.31. The R_c can't meet the minimum strength requirement of non-sintered brick, but meets the strength requirement for surplus sludge landfill. The total organic carbon value in leached solution (TOC_l) of surplus sludge-cement solidified block decreased by about 86% compared with the initial value (TOC_0) in consolidated block. It indicates ordinary silicate cement solidified surplus sludge can effectively solidify organics from surplus sludge in the solidified body, which can effectively inhibit the secondary pollution of surplus sludge for land in the landfill treatment process.

Keywords: Surplus sludge; Solidification/stabilization; Unconfined compression strength; Silicate cement

随着工业化、城镇化和经济的快速发展, 污水排水系统和废弃物处理系统不断增设, 污水处理厂生产能力不断提高, 水处理设施逐渐完善, 剩余污泥作为污水处理厂的一种副产物, 其产量日益增加, 剩余污泥的妥善处置问题亟待解决。一般地, 剩余污泥主要由病原体、重金属、有机污染物、废活

性污泥及沉淀物等组成, 且含水率高, 渗透性差, 重金属和有机物质量分数较高^[1-7]。

剩余污泥处理方法主要包括化学处理、热处理和生物处理等, 以碳/氮回收、体积/质量减量、杀灭病原体和重金属稳定性等为评价指标^[8]。其中, 化学处理是一种简单的处理方法, 添加化学药剂后只

收稿日期: 2021-11-01 修回日期: 2022-05-29

基金项目: 辽宁省科学技术厅博士启动基金项目(201601335); 辽宁省教育厅青年基金项目(L2017LQN018); 辽宁石油化工大学博士启动基金项目(2016xJJ-031)。

作者简介: 卫建伟(1995-), 男, 硕士研究生, 从事污泥资源化无害化方面的研究; E-mail: weijianwei126@163.com。

通信联系人: 梁纪灵(1985-), 女, 博士, 讲师, 从事污水处理与利用方面的研究; E-mail: l2j418@126.com。

需监测 pH, 但会因化学添加剂造成剩余污泥质量增加, 且无法回收生物质碳^[8]; 热处理技术如焚烧、热解、气化和超临界水氧化等在剩余污泥减量方面更有优势, 且能将回收的碳转化为生物燃料^[1,9-10]; 生物处理是利用微生物加快污泥中有机物分解, 以更少的能源消耗回收碳。然而, 由于这些技术的处理成本较高, 导致利用率仍然很低。因此, 设计普适性的可持续、资源化/无害化、低成本的剩余污泥处理技术仍是一项具有挑战性的工作。

水泥固化/稳定化 (Solidification/Stabilization, S/S) 技术因操作方便、原材料廉价易得、水泥良好的兼容性和力学性能^[7,11-12], 为污泥资源化/无害化处理提供了一种可能性。S/S 技术通过物理-化学方法将固体废弃物包容在密实的惰性基材中, 限制其有害成分释放, 使污染物质转变为低溶解性、低迁移性和低毒性物质, 减少污泥中有害离子和有机物对土壤的侵蚀, 从而减少固体废弃物对环境的影响和危害^[13-16]。因此, 该技术在污染土壤修复、固体废弃物的处理处置方面引起了广泛关注。S/S 技术所用的惰性材料为固化剂, 有害废物经固化处理所形成的固化产物为固结体。常用固化剂包括有机固化剂 (脲醛树脂、聚酯、环氧乙烷、丙烯酰胺凝胶体、聚丁二烯等)、无机固化剂 (普通硅酸盐水泥、水玻璃、玻特兰水泥、粉煤灰、黏土、氯氧镁水泥及磷石膏等) 及复合固化剂^[14-21]。

本文以普通硅酸盐水泥固化污水处理厂剩余污泥, 在一定液固质量比 ($R_{l/s}$) 条件下, 考察了剩余污泥与水泥质量比 (R_m) 对固结体无侧限抗压强度 (R_c) 的影响, 从力学角度分析评价了固结体用作建筑材料的可行性; 分析了固结体浸出液中可溶性有机物含量, 以评价有机物在固结体中的稳定性, 了解经雨水淋滤作用的固结体对土壤和地下水可能带来的影响, 从环境安全角度分析了污泥用于建筑材料实现资源化的可行性。

1 实验部分

1.1 实验材料及设备

实验材料: 剩余污泥, 抚顺市望花区污水处理厂; 普通硅酸盐 (PO42.5), 抚顺市大伙房水泥有限公司; 去离子水, 实验室自制。

实验设备: SX2 马弗炉, 绍兴市上虞道墟科析仪器厂; SHZ 82A 水浴恒温振荡器, 金坛区西域新瑞仪器厂; DHG 9076 A 干燥箱, 上海精宏实验设备有限公司; HKD 10 纯水机, 深圳市华南高科水处理设备有限公司; S8 Tiger X 射线荧光分析仪, 德国布鲁克公司; FTIR 660 傅里叶变换红外光谱仪, 安捷伦科技

有限公司; HZJ A 振动台, 河北信达仪器有限公司; 微机控制电液伺服低温压力试验机, 济南东方试验仪器有限公司; HBY 30A 养护箱, 无锡锡仪建材仪器厂; SU 8010 场发射电子扫描显微镜, 日本日立公司。

1.2 实验方法

1.2.1 剩余污泥性质分析 以重量法分析剩余污泥含水率及有机物质量分数: 称取剩余污泥试样 20.0 g (m_0) 于培养皿中, 在 105 °C 干燥箱中干燥 12 h 后, 冷却至室温, 测得干污泥质量为 m_1 , 根据式 (1) 计算剩余污泥中含水率 (W_w)。以灼烧法测定剩余污泥中有机物质量分数, 另取一份剩余污泥试样 20.0 g 放入恒重的坩锅内, 在 600 °C 马弗炉中不加盖灼烧 3 h 后, 冷却至室温称重为 m_2 , 计算剩余污泥损失质量, 根据式 (2) 计算剩余污泥有机物质量分数 (W_o)。坩锅中残余物质为灰分, 由式 (3) 计算灰分质量分数 ($W_{灰}$)。

$$W_w = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$W_o = \frac{m_0 - m_2}{m_0} \times 100\% - W_w \quad (2)$$

$$W_{灰} = 1 - W_w - W_o \quad (3)$$

参照《城市污水处理厂污泥检验方法》(CJ/T 221—2005)^[22], 称取 5.0 g 剩余污泥置于 200 mL 玻璃瓶中, 加入 50 mL 去离子水, 密封, 置于水浴恒温振荡器中, 在 25 °C 条件下振荡 4 h, 再以 3 000 r/min 的转速离心 5 min, 取上清液, 以玻璃电极法测其 pH, 即为剩余污泥 pH。此外, 对剩余污泥进行 X 射线荧光 (XRF) 和傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 分析, 以确定剩余污泥中是否存在金属和有机物, 作为分析固结体中金属和有机物稳定性的空白对照。

1.2.2 固化实验 设计硅酸盐水泥和剩余污泥质量比为 0~2.50, 加入适量的水, 使 $R_{l/s}$ 约为 0.31, 高速搅拌使其混合均匀, 并在振动台中振荡 20 min, 排除泥浆中的气泡。将泥浆注入涂有脱模剂的立方体有机玻璃模具 (40 mm × 40 mm × 40 mm) 中, 脱膜后放在温度为 (23.6 ± 0.5) °C、湿度为 74% ± 5% 的养护箱中养护 3~28 d 使其固结, 用微机控制电液伺服低温压力试验机测固结体 3~28 d 的无侧限抗压强度 (R_c)。每个试件三个平行试样, R_c 为三个平行试样抗压强度的平均值。水泥固化剩余污泥的实验方案见表 1。

以 FTIR 对剩余污泥-水泥固结体进行红外谱图表征, 通过检测固结体中是否存在 C—C 和 N—H 基团来确定水泥能否固化剩余污泥; 采用场发射电子扫描显微镜 (SEM) 观察污泥掺量对固结体微观结构的影响。

表 1 水泥固化剩余污泥实验方案

样品	<i>m</i> (剩余污泥)/g	<i>m</i> (水泥)/g	<i>R_m</i>
S100P40	800.0	320.0	2.50
S100P60	800.0	480.0	1.67
S100P80	800.0	640.0	1.25
S100P100	600.0	600.0	1.00
S100P120	700.0	840.0	0.83
S100P140	600.0	840.0	0.71
S100P160	600.0	960.0	0.63
水泥固结体	0	1 400.0	0

1.2.3 浸出毒性实验 参照《固体废物浸出毒性浸出方法水平振荡法》(HJ 557—2010)对固结体进行环境影响分析^[23]。将研磨成粉末状的剩余污泥-水泥固结体试样置于干燥箱中,在 40 ℃下干燥至恒重;取此粉末试样 40.0 g 于 2 L 提取瓶中,以去离子水为浸提液,按照固液质量比为 1:10 加入 400.0 g 去离子水,加盖密封;将提取瓶置于水浴恒温振荡器中,在 25 ℃条件下,以 110 次/min 的频率振荡 8 h,而后静置 16 h,取适量上清液,检测其中有机物质质量,并计算其质量分数(TOC₁)。

2 结果与讨论

2.1 剩余污泥基本性质

经重量法分析可知,剩余污泥中含水率、有机物质质量分数和灰分质量分数分别为 84.6%、4.6% 和 10.8%,其中有机物质质量相当于干燥剩余污泥质量的 29.9%,而干燥水剩余污泥的总有机物质质量分数(TOC)为 25.4%,两种测试方法有机物质质量分数的平均值为 27.6%,相对误差为 8.3%。根据城市污水处理厂污泥检验方法测得剩余污泥 pH 为 7.2,满足填埋要求,但含水率不满足垃圾作为填埋覆盖土质要求(含水率<60%)。

为检测剩余污泥中金属或重金属元素的质量分数,将剩余污泥在马弗炉中 600 ℃焚烧,并对其灰分进行了 X 射线荧光分析(XRF),结果见表 2。由表 2 可知,剩余污泥中主要含有 Fe、Al、Mg、Ca、Ti、Zn、Ba、Mn 等金属元素,Si、P、K 和 S 等非金属元素。其中,Si、Fe、Al、Ca、P、K 元素为主要成分,Fe、Al、Ca 元素主要来自于污水处理过程中絮凝剂和混凝剂,Si 元素可能来自于泥渣中的细砂,P、K、S 元素主要来自于市政污水,经生物化学反应最终转移至剩余污泥中。

图 1 为干燥剩余污泥和剩余污泥灰分的红外谱图。从图 1 可以看出,剩余污泥灰分的红外谱图中

3 697.84 cm⁻¹和 3 416.96 cm⁻¹峰值消失,主要原因是其所对应的 N—H 经高温焚烧转化为 NO_x 或 NH₃^[24];2 923.60 cm⁻¹和 2 852.70 cm⁻¹对应的 C—H 伸缩振动峰几乎消失,即干燥剩余污泥经高温焚烧失去大量可燃性有机物;1 034.48 cm⁻¹和 797.59 cm⁻¹对应的是 Si—O—Si 的反对称伸缩振动吸收峰和弯曲振动伸缩峰^[25],537.85、468.17 cm⁻¹和 419.05 cm⁻¹分别对应的是 Fe—O 和 Al—O。红外光谱分析结果进一步说明剩余污泥中含有有机物、氮化物以及 Fe、Al、Si 等元素。

表 2 剩余污泥灰分 X 射线荧光分析(XRF)结果 %

成分	<i>w</i>	成分	<i>w</i>
SiO ₂	38.52	SO ₃	1.63
Fe ₂ O ₃	20.06	TiO ₂	0.98
Al ₂ O ₃	16.80	Na ₂ O	0.68
P ₂ O ₃	9.81	Cl	0.22
CaO	8.19	ZnO	0.19
MgO	2.67	BaO	0.17
K ₂ O	2.27	MnO	0.16

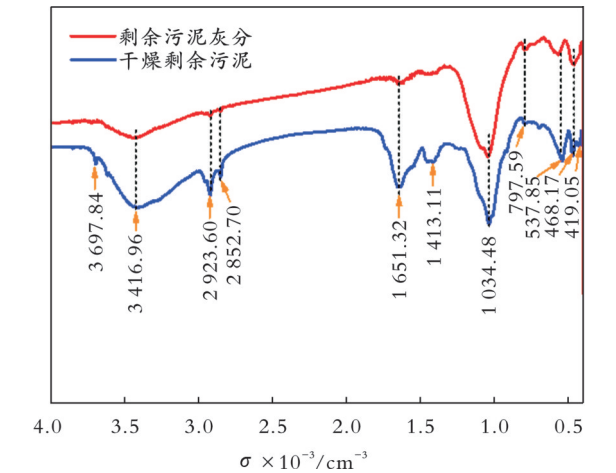


图 1 干燥剩余污泥和剩余污泥灰分的红外谱图

实验所用剩余污泥中未检测出《城镇污水处理厂污泥处置混合填埋用泥质》(GB/T 23485—2009)^[26]标准中限值的 Gd、Cr、Hg、As、Ni、Cu 金属元素,而 Zn 质量分数约为 0.19%,在标准限值之内(Zn 质量分数小于 0.40%)。因此,在评价剩余污泥-水泥固结体的环境安全性时,固结体中可能存在的金属元素多是来自于水泥,剩余污泥满足填埋用泥中金属限值要求。

2.2 硅酸盐水泥固化剩余污泥

图 2 为水泥固结体和剩余污泥-水泥固结体无侧限抗压强度随养护时间的变化曲线。从图 2 可以看出,在养护条件下,水泥固结体养护 28 d 的 *R_c* 为

42.8 MPa;当剩余污泥掺入水泥中,剩余污泥-水泥固结体养护 28 d 的 R_c 较水泥固结体低,且 R_c 随 R_m 降低而增大;当 $R_m=0.63$ 时,28 d 的 R_c 最大,可达 6.9 MPa。固化废弃物强度达到 0.025 MPa 时,满足用作垃圾填埋场覆盖土添加料的污泥横向剪切强度要求^[26]。由此可知,在实验条件下剩余污泥-水泥固结体的强度满足剩余污泥作为填埋堆填要求。

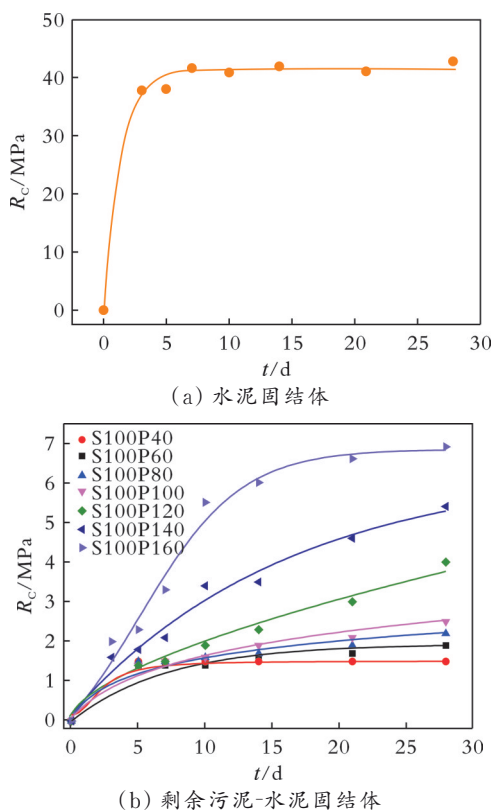


图2 水泥固结体和剩余污泥-水泥固结体无侧限抗压强度随养护时间的变化曲线

图3为剩余污泥-水泥固结体样品 S100P80、S100P120 和 S100P160 的红外谱图。

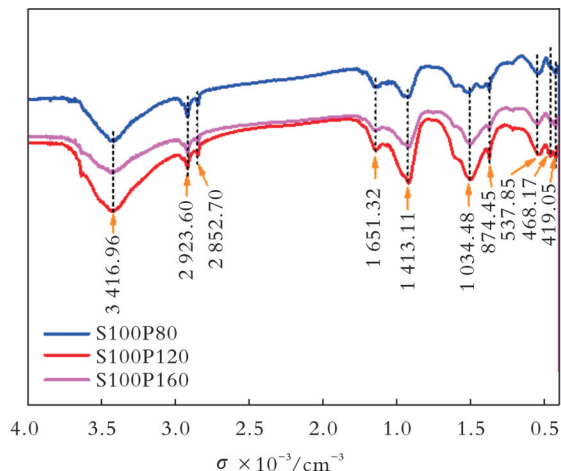


图3 剩余污泥-水泥固结体样品 S100P80、S100P120 和 S100P160 的红外谱图

对比图1和图3可知,剩余污泥-水泥固结体在 $2\,923.60\text{ cm}^{-1}$ 和 $2\,852.70\text{ cm}^{-1}$ 处出现了明显的 C—H 伸缩振动峰,说明固结体中含有机物; $1\,034.48\text{ cm}^{-1}$ 处有 Si—O—Si 的反对称伸缩振动吸收峰和弯曲振动伸缩峰^[25], 537.85 、 468.17 cm^{-1} 和 419.05 cm^{-1} 处出现了 Fe—O 和 Al—O 吸收峰,说明水泥能够固化剩余污泥。

图4为干燥剩余污泥、水泥固结体与剩余污泥-水泥固结体的照片。从图4可以看出,水泥成功地将剩余污泥固化且成型,具有一定的力学强度,但力学强度仍不能满足建筑材料强度需求。根据《非烧结垃圾尾矿砖》(JC/T 422—2007)标准^[27],单块最小抗压强度要求为 12.0 MPa。在该实验条件下,固结体的最大抗压强度为 6.9 MPa,强度不满足作为制砖建筑材料的要求。



图4 干燥剩余污泥、水泥固结体与剩余污泥-水泥固结体的照片

为了分析影响水泥固化剩余污泥强度的原因,对固结体的微观结构进行了表征,结果见图5,其固化时间为 21 d。从图5可以看出,干燥剩余污泥和水泥固结体主要由类块状结构组成;图5(c)~(h)的剩余污泥-水泥固结体中出现似针状的细棒结构,且细棒结构物从图5(c)至图5(h)依次减少,而图5(i)中几乎无细棒状结构。结合图2(b)可知,随着 R_m 的减小,样品 28 d 的 R_c 逐渐增大, S100P160 样品 28 d 的 R_c (6.9 MPa) 最大,其对应样品中剩余污泥与水泥的质量比降低,即水泥掺量增大。对比图5(b),推测剩余污泥-水泥固结体的强度主要来自于水泥的块状结构,而似针状的细棒状结构或许对 R_c

有不利影响。该细棒状结构可能是剩余污泥中的镁在固化过程中形成的镁盐晶体,随剩余污泥与水

泥质量比的降低,固结体中镁盐含量降低,故细棒状结构减少。

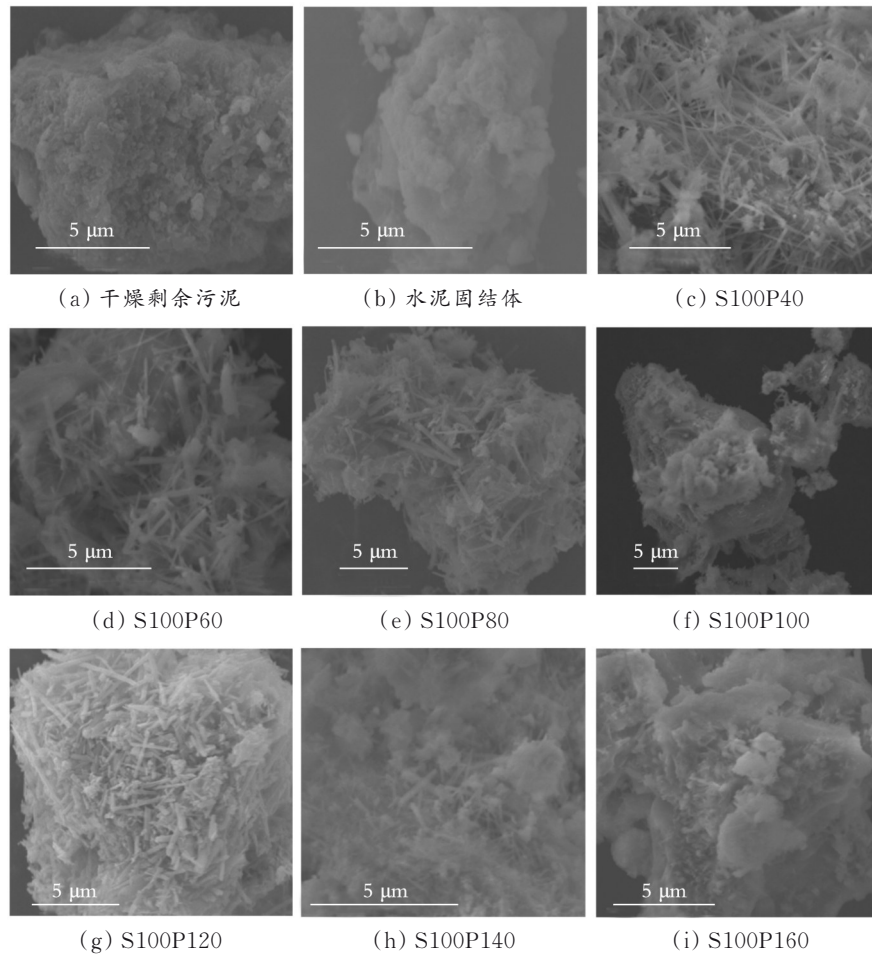


图 5 干燥剩余污泥、水泥固结体与剩余污泥-水泥固结体的 SEM 照片

2.3 固结体浸出毒性分析

为评价剩余污泥中有机物在固结体中的稳定性,对固结体开展了浸出实验,测定其浸出液中有有机物质量分数(TOC),计算剩余污泥-水泥固结体中有机物的浸出率,计算公式如下:

$$L = \frac{TOC_1}{TOC_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中, L 为有机物的浸出率,%; TOC_1 为浸出液中有有机物质量分数,%; TOC_0 为固结体中有有机物初始质量分数,%。

表 3 为浸出毒性实验结果。

表 3 浸出毒性实验结果

样品	$TOC_0/$ ($mg \cdot g^{-1}$)	$TOC_1/$ ($mg \cdot g^{-1}$)	浸出 率/%
干燥剩余污泥	276.0	—	—
S100P80	44.6	6.68	15.0%
S100P120	31.4	3.57	11.4%
S100P160	24.2	3.50	14.5%
平均值			13.6%

由表 3 可知, R_c 最大的剩余污泥-水泥固结体(S100P160)中有机物的浸出率为 14.5%,而样品 S100P120 中有机物的浸出率最低(11.4%),三个样品中有机物的浸出率平均值为 13.6%。因此,推测水泥固化剩余污泥可将剩余污泥中约 86% 的有机物稳定在固结体中,在对其进行填埋处理时可有效抑制剩余污泥对土壤的二次污染。

3 结 论

(1)水泥可固化污水处理厂剩余污泥,当 $R_{1/s}=0.31$ 、 $R_m=0.63$ 时,剩余污泥-水泥固结体的抗压强度最大(6.9 MPa),满足垃圾填埋强度要求;可将剩余污泥中约 86% 的有机物稳定在固结体中,降低其对土壤二次污染的风险。

(2)固结体的强度或与固结体中块状结构或细棒状结构有关,细棒状结构似乎不利于强度的提高,其原因尚不清楚。

(3)该实验条件下以水泥固化剩余污泥,其固结体的力学强度尚不满足非烧结垃圾尾矿砖强度要求。

参 考 文 献

- [1] Liew C S, Kiatkittipong W, Lim J W, et al. Stabilization of heavy metals loaded sewage sludge: Reviewing conventional to state-of-the-art thermal treatments in achieving energy sustainability[J]. *Chemosphere*, 2021, 277: 130310.
- [2] Al-Gheethi A A, Efaq A N, Bala J D, et al. Removal of pathogenic bacteria from sewage-treated effluent and biosolids for agricultural purposes[J]. *Applied Water Science*, 2018, 8(2): 1-8.
- [3] Liu X, Zhai Y, Li S, et al. Hydrothermal carbonization of sewage sludge: Effect of feed-water pH on hydrochar's physicochemical properties, organic component and thermal behavior[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 388: 122084.
- [4] Ren J, Wang F, Zhai Y, et al. Effect of sewage sludge hydrochar on soil properties and C_d immobilization in a contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2017, 189: 627-633.
- [5] Xu Z X, Song H, Deng X Q, et al. Dewatering of sewage sludge via thermal hydrolysis with ammonia-treated Fenton iron sludge as skeleton material[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 379: 120810.
- [6] 姚建群. 城市污水厂剩余污泥脱水的环保意义及措施[J]. *资源节约与环保*, 2021(5): 98-99.
- [7] 李鹏华, 李兆敏, 李宾飞, 等. 含油污泥制成高温调剖剂资源化技术[J]. *辽宁石油化工大学学报*, 2009, 29(3): 19-22.
- [8] Liew C S, Yunus N M, Chidi B S, et al. A review on recent disposal of hazardous sewage sludge via anaerobic digestion and novel composting[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423: 126995.
- [9] Ge S, Foong S Y, Ma N L, et al. Vacuum pyrolysis incorporating microwave heating and base mixture modification: An integrated approach to transform biowaste into eco-friendly bioenergy products[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 127: 109871.
- [10] Lam S S, Mahari W A W, Ma N L, et al. Microwave pyrolysis valorization of used baby diaper[J]. *Chemosphere*, 2019, 230: 294-302.
- [11] 陈蕾, 刘松玉, 杜延军, 等. 水泥固化重金属铅污染土的强度特性研究[J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(12): 1898-1903.
- [12] Conner J. Chemical fixation and solidification of hazardous wastes[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [13] Shen Z, Jin F, O'Connor D, et al. Solidification/stabilization for soil remediation: An old technology with new vitality[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53: 11615-11617.
- [14] Tuncan A, Tuncan M, Koyuncu H. Use of petroleum-contaminated drilling wastes as sub-base material for road construction[J]. *Waste Management & Research*, 2000, 18: 489-505.
- [15] Al-Ansary M S, Al-Tabbaa A. Stabilisation/solidification of synthetic petroleum drill cuttings[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 141: 410-421.
- [16] Ma J L, Zhao Y C, Wang J M, et al. Effect of magnesium oxychloride cement on stabilization/solidification of sewage sludge[J]. *Construction and Building Materials*, 2010, 24: 79-83.
- [17] Kogbara R B, Yi Y, Al-Tabbaa A. Process envelopes for stabilization/solidification of contaminated soil using lime-slag blend[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, 18: 1286-1296.
- [18] 冯吉利, 屈撑国, 王新强, 等. 含油污泥的固化实验研究[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2005, 20(2): 43-45.
- [19] 屈撑国, 王新强, 陈杰蓉. 含油污泥固化处理技术研究[J]. *石油炼制与化工*, 2006, 37(2): 67-70.
- [20] 李铭, 余太平, 杨早, 等. 污泥固化稳定技术在南太子湖环境整治中的工程应用分析[J]. *净水技术*, 2021, 40(3): 144-151.
- [21] 徐琦, 李也, 王维仪. 重金属污染土壤固化稳定化药剂研究进展[J]. *山东化工*, 2021, 50(8): 257-261.
- [22] 中华人民共和国建设部. CJ/T 221—2005 城市污水处理厂污泥标准检验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [23] 中华人民共和国环境保护部. HJ 557—2010 固体废物浸出毒性浸出方法水平振荡法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010.
- [24] Ma J, Li P, Wang W, et al. Biodegradable poly(amino acid)-gold-magnetic complex with efficient endocytosis for multimodal imaging-guided chemo-photothermal therapy[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(9): 9022-9032.
- [25] 张于弛, 江丽芳. KH550 改性 SiO_2 /TPU 复合材料的制备及性能研究[J]. *广州化工*, 2021, 49(4): 41-43.
- [26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会. GB/T 23485—2009 城镇污水处理厂污泥处置混合填埋用泥质[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [27] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. JC/T 422—2007 非烧结垃圾尾矿砖[S]. 北京: 中国建材工业出版社, 2008.

(编辑 宋官龙)