



文章栏目：固体废物处理与资源化

DOI 10.12030/j.cjee.201912027

中图分类号 X705

文献标识码 A

林珊伊, 孙德安, 朱明瑞, 等. 芬顿与氧化钙联合处理填埋库污泥的力学特性[J]. 环境工程学报, 2020, 14(10): 2813-2822.
LIN Shanyi, SUN De'an, ZHU Mingrui, et al. Mechanical properties of landfill sludge conditioned by Fenton's reagent with calcium oxide[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(10): 2813-2822.

芬顿与氧化钙联合处理填埋库污泥的力学特性

林珊伊¹, 孙德安^{1,*}, 朱明瑞², 武亚军¹

1. 上海大学土木工程系, 上海 200444

2. 上海城投污水处理有限公司, 上海 200120

第一作者: 林珊伊(1995—), 女, 硕士研究生。研究方向: 污泥处理。E-mail: lsyer031@shu.edu.cn

*通信作者: 孙德安(1962—), 男, 博士, 教授。研究方向: 土力学。E-mail: sundean@shu.edu.cn

摘要 面对城市生活污水填埋库容趋于饱和的现状, 亟需研究开发城市生活污水的减量化及资源化技术。以填埋库污泥和新鲜污泥为研究对象, 进行岩土工程特性实验, 发现填埋库污泥有机质含量及含水率远低于新鲜污泥。通过固结实验和直剪实验, 分别对比、分析了未加药剂的填埋库污泥和药剂调质填埋库污泥的固结系数、渗透系数和抗剪强度变化规律。结果表明: 填埋库污泥在 pH 为 4 时, 芬顿试剂(硫酸亚铁和过氧化氢)的最佳配比为 $\text{Fe}^{2+}=8\%$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2=12\%$; 当氧化钙投加量增加时, 调质污泥的压缩指数减小, 抗剪强度略微增大; 考虑到联合处理后污泥的资源化利用、强碱性对环境的影响和处理成本, 在实际污泥处理工程中, 氧化钙投加量 15% 是较为合适的添加量, 且效果优于常用的氯化铁药剂调制污泥。经芬顿与氧化钙联合处理的填埋库污泥抗剪强度满足填埋库要求, 能够实现减容减量, 对填埋库污泥后续资源化利用具有一定的指导意义。

关键词 填埋库污泥; 芬顿试剂; 氧化钙; 力学特性; 胞外聚合物 (EPS)

随着新型城镇化建设的蓬勃发展, 我国人口城镇化率呈高速增长趋势, 伴随而来的是高体量污水及剩余污泥的大量产生。据统计^[1], 截至 2016 年 9 月底, 我国污泥年产生量达 4×10^7 t, 并以每年 10% 的速度增长, 预计 2025—2050 年间将突破 6×10^8 t (以含水率 80% 计)。我国目前主要的污泥处置方式为土地填埋^[2-3], 面对体量逐年增长的污泥, 各填埋库容量已趋近饱和。因此, 亟需对填埋库污泥进行深度脱水处理, 实现减容减量并提高污泥力学性质, 为后续资源化利用打下基础。

由于污泥中含有大量胞外聚合物 (EPS), 这种亲水基团会形成高度水化的带电絮凝基质, 从而产生黏结力, 使得污泥难以通过机械压滤方式真正实现固液分离^[4-5]。深度脱水的实质是破坏污泥胞外聚合物的亲水结构, 进而改变絮体凝胶状态及表面结构^[6]。近年来, 国内外学者尝试使用芬顿试剂氧化破解细胞, 来改善污泥的脱水性能。NEYENS 等^[7]研究发现, 当亚铁离子 (Fe^{2+}) 及过氧化氢 (H_2O_2) 质量比大于 1 时, 对污泥的作用机理以絮凝作用为主, 反之以氧化破解作用为主。TONY 等^[8]使用响应面曲线法探究 Fe^{2+} 、 H_2O_2 浓度及 pH 对污泥脱水特性的影响, 结果表明, Fe^{2+} 与 H_2O_2 投加量分别为 $21 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 及 $105 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, 毛细吸水时间 (CST) 降低 48%。洪晨等^[9]通过测试泥饼含水率及 CST, 研究了芬顿试剂对污泥脱水性能的影响, 并通过液相色谱分析芬顿试剂

收稿日期: 2019-12-04; 录用日期: 2020-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (41772303)

对污泥大分子有机物氧化分解的程度。

考虑到单一的药剂调质无法满足污泥后续资源化利用的需求, 研究人员^[10-11]尝试通过添加生石灰等固化剂进行探讨, 发现污泥固化能够提高污泥强度、降低透水性, 并且能够使重金属离子固化, 从而减少环境污染, 因此, 污泥固化可作为资源化利用的预处理手段, 而且已成为污泥处置的研究热点。蒋建国等^[12]利用污泥与石灰高效混合器制备5%、10%、15%石灰添加量的稳定化污泥, 发现在均匀混合条件下, 污泥臭味强度明显降低。于文华等^[13]研究了2种阳离子表面活性剂与石灰联合调理对剩余污泥脱水性能的影响, 发现石灰投加量15 g:100 g(干基)时, 污泥比阻降低17.7%, 明显改善了污泥的脱水性能。杨爱武等^[14]对城市污泥进行生石灰消化处理, 发现固化后污泥的重金属浸出毒性满足要求, 且无侧限抗压强度随养护龄期的增加而增大。可见, 大部分学者的研究对象为未经填埋的剩余活性污泥(即新鲜污泥), 主要关注芬顿试剂对污泥脱水性能的改善以及固化剂对重金属离子的作用机理, 而对填埋年限超过5 a的填埋库污泥力学特性研究较少。因此, 本研究以上海某污水处理厂填埋库污泥为研究对象, 与新鲜污泥进行对比, 分析两者物理力学性质的差异。通过固结实验和直剪实验, 以固结系数、渗透系数和抗剪强度为指标, 探究填埋库污泥芬顿试剂(硫酸亚铁和过氧化氢)的最佳配比; 在此基础上, 联合氧化钙处理污泥, 研究其压缩特性、渗透特性以及抗剪强度, 并将实验结果与氯化铁药剂调质污泥进行对比, 全面探讨芬顿与氧化钙联合处理填埋库污泥的力学特性。

1 材料与方法

1.1 实验材料

供试污泥为上海城市生活土覆盖填埋库污泥, 库中污泥经絮凝剂聚丙烯酰胺(PAM)离心脱水后填埋且填埋期已达7 a; 对比实验的污泥样品为取自同一污水处理厂并添加PAM离心脱水未经填埋的新鲜污泥。实验期间污泥样品存放于4℃恒温冷藏箱中。

1.2 实验仪器与试剂

激光粒度仪(Mastersizer2000, 英国马尔文仪器公司); 二联中压式固结仪(GJZ, 国电南京自动化股份有限公司); 气动直剪仪(HM-2560A.3F, 美国Humboldt公司); pH计(pHS-3C型, 上海精密科学仪器有限公司)。

实验所用试剂包括七水合硫酸亚铁($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)、浓硫酸(H_2SO_4 , 98%)、氧化钙(CaO)、过氧化氢(H_2O_2 , 30%), 以上药剂均为分析纯(AR)。

1.3 实验方法

采用原位钻孔法^[15]进行取样, 共设置3个取样点, 每个取样点均采集4个深度的污泥, 采样点深度分别为0.5~1.0、2.0~3.0、4.0~5.0和5.0~6.3 m。其中, 药剂调质所用污泥为取样污泥均匀搅拌所得。采用常规土工实验方法^[16]测定填埋库污泥及新鲜污泥的基本性质。其中, 颗粒分析实验采用激光粒度仪^[17]测定。称取等量填埋库污泥, 加入蒸馏水, 调含水率为75%, 以避免药剂调质过程中药剂分布不均而影响调质效果。利用浓硫酸将污泥的pH调至4, 再依次加入占干基不同百分比的硫酸亚铁和过氧化氢, 根据固结实验^[16]测得的渗透系数和直剪实验^[16]测得的抗剪强度, 确定芬顿试剂最佳配比。其中, 固结实验采用二联中压式固结仪, 直剪实验采用气动直剪仪。根据固结实验结果, 利用时间平方根法^[16]计算固结系数 C_v , 再根据式(1)求得渗透系数 k ^[18]。

$$k = C_v \frac{a_v \gamma_w}{1 + e_1} \quad (1)$$

式中: e_1 为前一级压力下的孔隙比; a_v 为前一级压力与本级压力区段下的压缩系数, MPa^{-1} ; γ_w 为水的重度, $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

确定芬顿试剂最佳配比后，采用该配比对填埋库污泥进行调质，并分别加入 5%、10% 及 15% 的氧化钙联合处理污泥，测定孔隙比、压缩指数、渗透系数及抗剪强度，具体药剂调质方案列于表 1，药剂含量按占填埋库污泥干基的百分比计算。

2 结果与讨论

2.1 新鲜污泥与填埋库污泥的物理性质对比

填埋库污泥与新鲜污泥的比重分别为 1.85 和 1.56；液限分别为 179% 和 422%；塑限分别为 115% 和 125%；湿密度分别为 $1.12 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 和 $1.02 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ；pH 分别为 6.7 和 7.2。颗粒分析实验^[16]结果见图 1。由图 1 可知，填埋库污泥和新鲜污泥粒径大于 0.075 mm 的砂颗粒占比分别为 14.2% 和 50.6%，小于 0.002 mm 粒径的胶体颗粒占比分别为 6.6% 和 0.6%；且填埋库污泥平均粒径 d_{50} 为 0.017 mm，新鲜污泥平均粒径 d_{50} 为 0.082 mm。可见，新鲜污泥由于含有大量菌胶团及大分子有机物，粒径较大；而填埋库污泥经过一段时间的降解，大分子有机物分解为小分子有机物及无机物，微生物中的胞内结合水转化为自由水^[19]。因此，胶体颗粒占比大于新鲜污泥。此外，CAMPBELL 等^[19]研究发现，市政污泥约有 90% 的颗粒能过 0.075 mm 筛孔，本研究填埋库污泥小于 0.075 mm 的粒径占比 85.5%，结果略大于其粒径。

填埋库污泥有机质含量随取样深度的变化见图 2。由图 2 可知，填埋库污泥的有机质含量最大可达 55.2%，最小为 28.2%，大部分为 35.2%~44.8%，平均值为 40.9%，且有机质含量随深度增加的变化规律不明显。对比新鲜污泥测得的有机质含量 66.7%，填埋库污泥有机质含量较小，可见其降解程度远高于新鲜污泥，降解明显。

填埋库污泥含水率随取样深度的变化如图 3 所示，由图 3 可知，填埋库污泥含水率为 72.2%~76.3%，平均值为 72.5%，低于新鲜污泥的含水率为 82.0%，且随取样深度的变化不明显。其原因在于，土覆盖填埋库区并未在底部设置液体导排层，水分无法排走，因而测得的填埋库污泥含水率差异较小^[20]。

表 1 填埋库污泥药剂调质方案
Table 1 Test schemes of landfill sludge with different reagents %

实验编号	Fe ²⁺ 占比	H ₂ O ₂ 占比	CaO占比
F4H4	4	4	0
F4H6	4	6	0
F4H8	4	8	0
F8H4	8	4	0
F8H8	8	8	0
F8H12	8	12	0
F8H16	8	16	0
FHC5	8	12	5
FHC10	8	12	10
FHC15	8	12	15

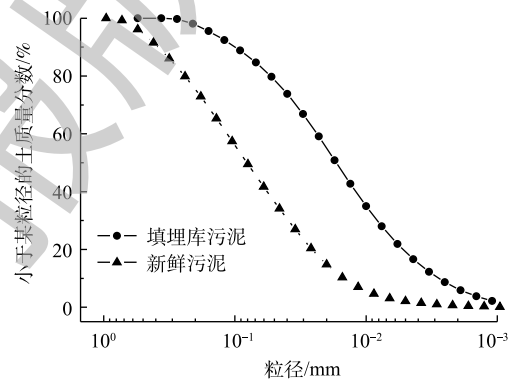


图 1 不同龄期污泥颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size grading curves of sludge with different ages

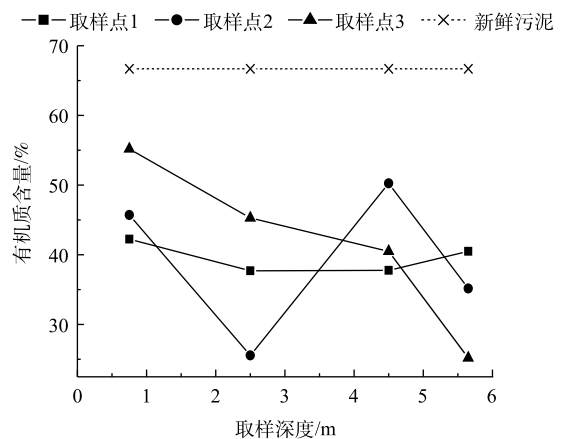


图 2 有机质含量与取样深度的关系

Fig. 2 Relation between organic content and sampling depth

2.2 填埋库污泥芬顿试剂的最佳配比

为了研究过氧化氢 (H_2O_2) 和亚铁离子 (Fe^{2+}) 对填埋库污泥 (除特别说明外, 以下简称为污泥) 处理效果的影响, 亚铁离子占干基 4% 和 8% 时, 不同过氧化氢投加量调质污泥的孔隙比 e 随固结压力 p 的变化 (e - lgp) 分别见图 4(a) 和图 4(b)。由图 4(a) 可知, 当亚铁离子占污泥干基 4% 时, 对比原泥, 发现芬顿药剂调质污泥的压缩指数较小 (压缩指数即 e - lgp 曲线的斜率), 且不同含量过氧化氢调质污泥的压缩指数大致相似。由图 4(b) 可知, 当亚铁离子占污泥干基 8% 时, 芬顿药剂调质污泥的压缩指数相比原泥明显减小, 压缩性较低。其原因在于芬顿试剂破坏 EPS 后, 二价铁等絮凝剂在污泥脱水过程中充当骨架结构作用^[21], 因而调质污泥的压缩性减小。此外, 在不同应力范围内, 原泥与调质污泥的孔隙比大小关系不同。由图 4(a) 可知, 在应力为 1~7 kPa 时, 原泥与调质污泥的孔隙比大致相同, 但应力超过 8 kPa 后, 随着压力的增加, 原泥的孔隙比逐渐减小, 且均小于调质污泥的初始孔隙比。由图 4(b) 可得到相同的规律, 在压力较大的情况下, 原泥的孔隙比随着压力的增大迅速减小。原因在于: 加荷初期, 原泥的颗粒接触点具有一定的胶结力, 能够承受一定的压力而变形较小; 但压力较大时胶结被破坏, 原泥的变形较大, 孔隙结构被压缩, 因此, 随着压力的增加, 原泥的孔隙比明显减小^[1]。此外, 由图 4(b) 可知, 亚铁离子占污泥干基 8% 时, 调质污泥的初始孔隙比均小于原泥。这表明加入芬顿试剂后, 污泥的孔隙结构被填充, 密实度变高。

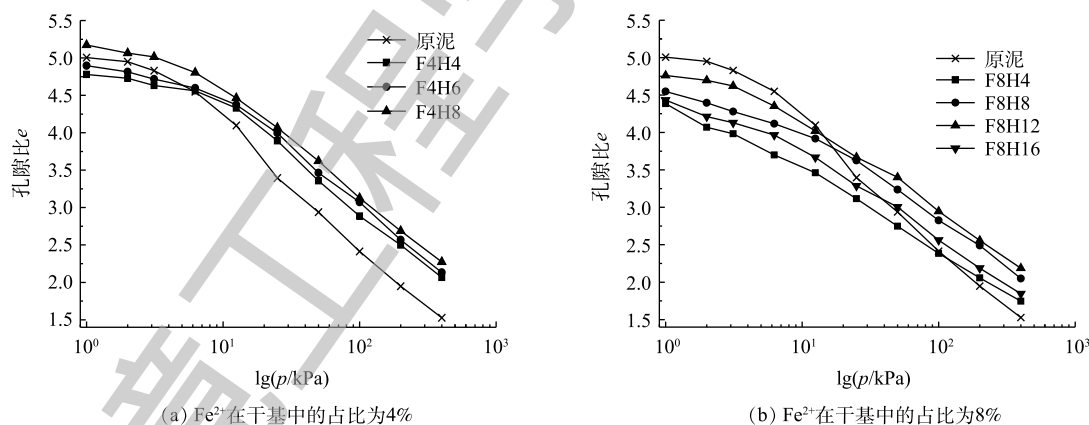


图 4 不同配比芬顿试剂调质污泥的孔隙比-压力曲线

Fig. 4 Void ratio-pressure curves of landfill sludge conditioned by Fenton's reagent in different ratios

由于渗透系数能够一定程度上反映同一类土的孔隙结构, 不同过氧化氢 (H_2O_2) 和亚铁离子 (Fe^{2+}) 配比下, 调质污泥的渗透系数 k 随应力 p 和孔隙比 e 的变化见图 5。由图 5(a) 可知, 在应力相同的条件下, 相比其他工况污泥的渗透系数, 芬顿配比 $Fe^{2+}=4%$ 、 $H_2O_2=8%$ 和芬顿配比 $Fe^{2+}=8%$ 、 $H_2O_2=12%$ 2 组工况调质污泥的渗透系数较高, 且远高于原泥的渗透系数, 说明脱水性能较好。由图 5(b) 可知, 随着孔隙比的减小, 不同芬顿试剂调质污泥的渗透系数逐渐减小, 反之, 渗透性增大。在重合的孔隙比区间内, 相同孔隙比下芬顿配比 $Fe^{2+}=8%$ 和 $H_2O_2=12%$ 调质污泥的渗透系数最

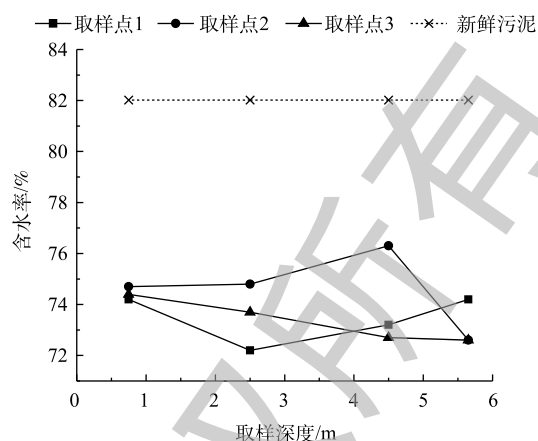


图 3 含水率与取样深度的关系

Fig. 3 Relation between water content and sampling depth

大，脱水性能最佳。其主要原因在于：该配比下，调制污泥中的亲水基团 (如 EPS) 被芬顿试剂氧化破坏，释放结合水，当水流经污泥时所受阻力较小；同时，过氧化氢完全反应释放大量气体，因而调质污泥中的连通孔隙多于封闭孔隙，排水通道增多，渗透系数增大^[4]。此外，由图 5(b) 可知，亚铁离子投加量为 8% 时，当 H₂O₂ 投加量低于 12%，同一孔隙比下污泥的渗透系数随过氧化氢投加量的增加而增大，反之则减小。可见，H₂O₂ 投加量并非越高越好，投加过量时，气泡会抑制羟基自由基数量，从而对污泥的脱水性能产生负效应^[22]。

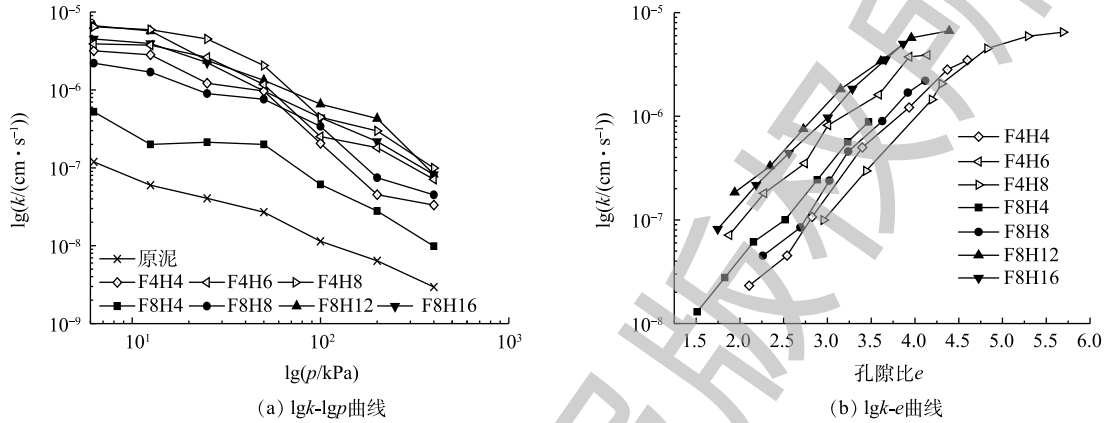


图 5 不同配比芬顿试剂调质污泥的渗透特性

Fig. 5 Permeability characteristics of landfill sludge conditioned by Fenton's reagent in different ratios

亚铁离子占干基 4% 和 8% 时，不同过氧化氢投加量调质污泥的抗剪强度随应力的变化见图 6。由图 6(a) 可知：当应力较低时，芬顿试剂调质污泥的抗剪强度相比原泥略微提高；当应力较高时，调质污泥的抗剪强度则大幅度提高。由图 6(b) 可得到相同的规律，且不同过氧化氢投加量下的调质污泥抗剪强度差异较小。其原因在于：芬顿试剂会破坏胞外聚合物释放结合水，在应力作用下，调质污泥的初始孔隙比小于原泥，密实度高；同时，亚铁离子易被氧化，与带负电荷的污泥土颗粒形成胶体，胶结力增大，从而抗剪强度增强^[13]。

综上所述，根据压缩特性及抗剪强度相似，而渗透特性最优的条件，选取芬顿试剂配比 ($Fe^{2+}=8\%$ 、 $H_2O_2=12\%$) 作为填埋库污泥的最佳配比，用最佳配比调质的污泥渗透系数相比原泥，高出一个数量级。

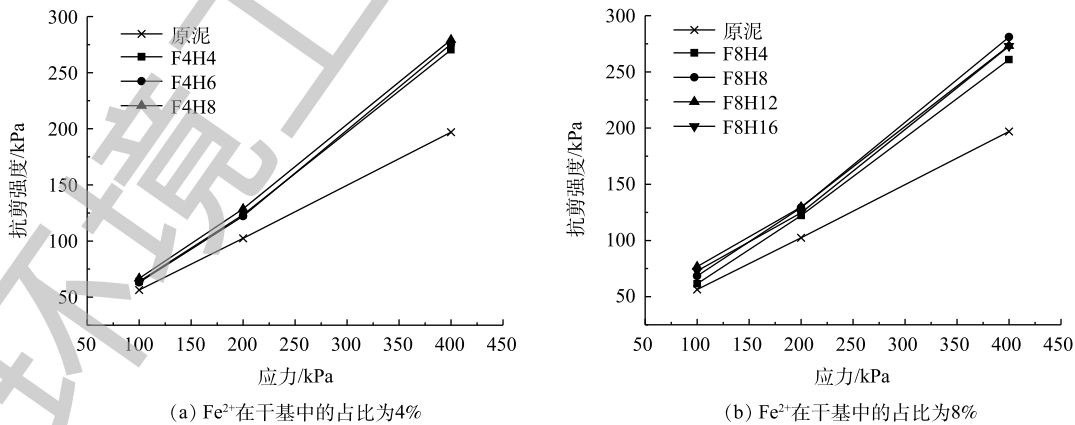


图 6 不同配比芬顿试剂调质污泥的抗剪强度

Fig. 6 Shear strength of landfill sludge conditioned by Fenton's reagent in different ratios

2.3 芬顿与氧化钙联合处理污泥的力学特性

在确定芬顿试剂最佳配比的基础上,研究氧化钙投加量对污泥压缩特性的影响,在芬顿试剂最佳配比的条件下,分别投加5%、10%、15%氧化钙调质污泥的孔隙比和压缩指数随应力的变化见图7。由图7(a)可知,与原泥相比,调质污泥的初始孔隙比明显减小,且氧化钙投加量越大,污泥初始孔隙比越小,污泥初始孔隙比与最终孔隙比的差值越小。这说明污泥经芬顿与氧化钙联合处理后体积明显减小。对比图7(a)和图4(b)污泥的初始孔隙比可得,经芬顿与氧化钙联合处理后,污泥的初始孔隙比为3.0~4.4。相比于芬顿试剂调质污泥,初始孔隙比明显减小,能够达到减容减量的目的。这可以克服单一芬顿试剂调质污泥不能明显减容的缺点,在一定程度上可缓解填埋库容量饱和的现状,具有实际工程意义。随氧化钙投加量的增大,污泥初始孔隙比减小的原因在于,在反应过程中,氧化钙与污泥中的水分发生水化反应,释放热量致使污泥中的水分蒸发,且污泥中的固体物质质量也随着氧化钙投加量的增多而增加。曾庆洋等^[23]研究发现,石灰投加比越大,污泥的初始含水率越低,这与本研究结果相同。

由图7(b)可知,原泥的压缩指数大于0.4,属于高压缩性土,在高于100 kPa压力下,随着压力的增大,原泥的压缩指数逐渐减小,压缩性变差。其原因在于,EPS使得结合水难以通过机械压滤方式直接排出^[5]。此外,在芬顿试剂最佳配比的条件下,分别投加5%、10%、15%氧化钙的调质污泥在有侧限条件下受压,低于100 kPa时调质污泥的压缩指数随应力的增加逐渐增大,高于100 kPa后压缩指数几乎不变;而且,应力相同的情况下,与原泥相比,氧化钙投加量越大,调质污泥的压缩指数越小,压缩性越低。这是因为芬顿试剂调质填埋库污泥会释放大量气体^[9],加入氧化钙后,碱首先发生中和反应,提升反应体系pH。随着氧化钙投加量的增加,氢氧化铁胶体转变为絮体,带负电荷的污泥土颗粒会与带正电的钙离子发生结合,在絮体表面形成氢氧化铁-硫酸钙晶体的复合刚性结构,土颗粒骨架形成,从而降低调质污泥的压缩性^[24]。可见,芬顿与氧化钙联合处理的污泥若应用到土工建筑材料中,则沉降量较小,稳定性较高。

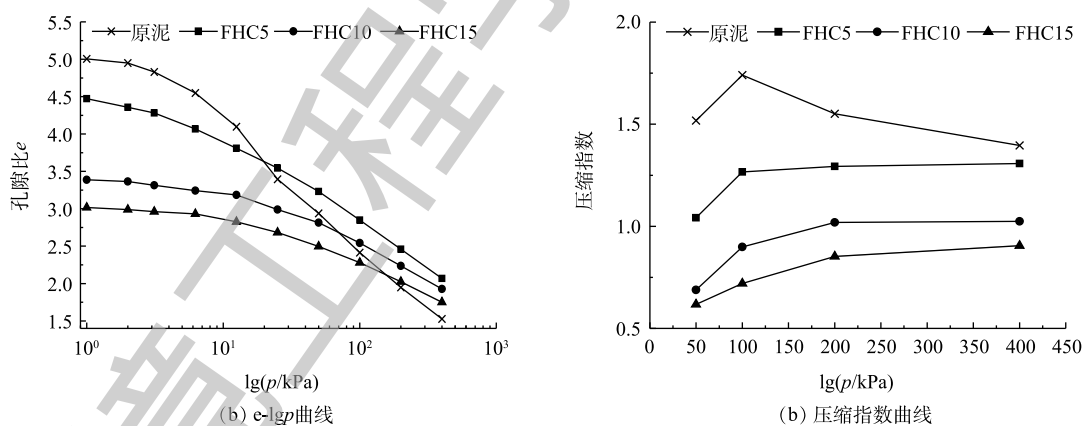


图7 芬顿与氧化钙联合处理填埋库污泥的压缩特性

Fig. 7 Compression characteristics of landfill sludge conditioned by Fenton's reagent with calcium oxide

在芬顿试剂最佳配比的条件下,分别投加5%、10%、15%氧化钙调质污泥的渗透系数随应力的变化见图8。由图8可知,在6 kPa荷载下,氧化钙投加量5%、10%、15%调质污泥的渗透系数分别为 5.10×10^{-6} 、 2.80×10^{-6} 和 $2.58 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,远高于原泥的渗透系数 $1.19 \times 10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。可见,芬顿与氧化钙联合处理后,填埋库污泥的渗透系数在 10^{-6} 量级,与原泥相比,渗透系数大幅提高,脱水性能较优,调质效果较好。其原因在于:污泥经芬顿与氧化钙联合处理后,蛋白质和多糖均呈下降趋势,亲水性基团EPS得到有效去除;同时,氢氧化铁和钙的混合物嵌入到污泥的絮体

中，形成刚性骨架与排水通道，也可能使污泥的脱水性能提高^[25]。

为了验证经芬顿与氧化钙联合处理后，污泥是否形成刚性骨架，将调质污泥进行剪切。污泥的抗剪强度随应力的变化如图 9 所示。由图 9 可知，与原泥相比，调质污泥的抗剪强度明显增加，表明已形成刚性骨架，且在芬顿试剂最佳配比的条件下，随着氧化钙投加量的增加，调质污泥的抗剪强度略微增大，均满足填埋库填埋污泥无侧限抗压强度需高于 50 kPa 的要求^[26]。

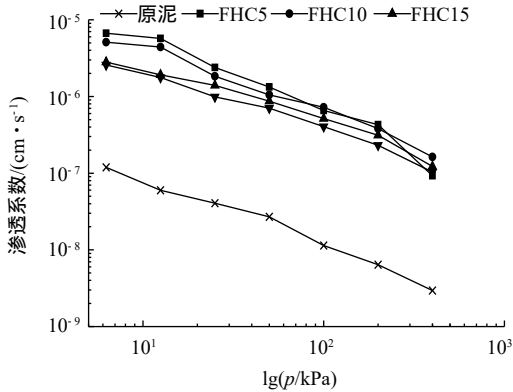


图 8 芬顿与氧化钙联合处理下污泥的渗透特性
Fig. 8 Permeability characteristics of landfill sludge conditioned by Fenton's reagent with calcium oxide

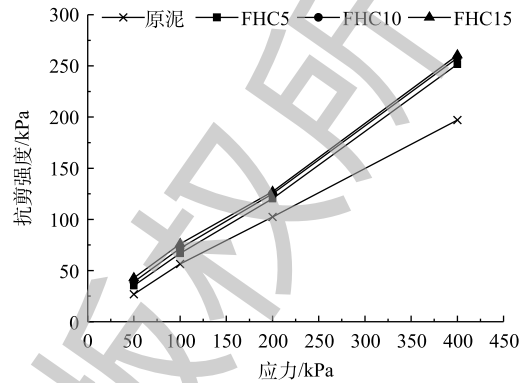


图 9 芬顿与氧化钙联合处理下填埋库污泥的抗剪强度
Fig. 9 Shear strength of landfill sludge conditioned by Fenton's reagent with calcium oxide

综上所述，芬顿试剂与氧化钙联合处理污泥后，随着氧化钙投加量的增加，填埋库污泥的初始孔隙比明显减小，压缩指数递减，抗剪强度略微递增，能够实现减容减量，作为污泥堆肥等资源化利用的前处理手段^[27]。考虑到药剂调质处理后污泥的后续资源化利用、强碱性(芬顿与 15% 氧化钙联合处理污泥的 pH 为 9.46)对环境的影响以及处理成本，在实际污泥处理工程中，氧化钙投加量 15% 是较为合适的添加量。于文华等^[13]研究了生石灰对污泥处理的影响，发现氧化钙投加量为 15%(干基)时，污泥比阻最低，脱水率最高，与本研究中有氧化钙的适宜投加量相同。

2.4 不同药剂调质污泥的渗透特性对比

氯化铁(FeCl_3)调制的污泥渗透系数大幅提高且能够实现减容减量，是常用的污泥调质药剂。WU 等^[28]分别加入了占填埋库污泥干基 10%、20%、30% 和 40% 的氯化铁(分别编号为 F10、F20、F30、F40)进行药剂调质，将其实验结果与本研究结果进行对比，不同药剂调质污泥的渗透系数随应力和孔隙比的变化如图 10 所示。由图 10(a)可知，在同一应力下，芬顿与氧化钙联合处理污泥

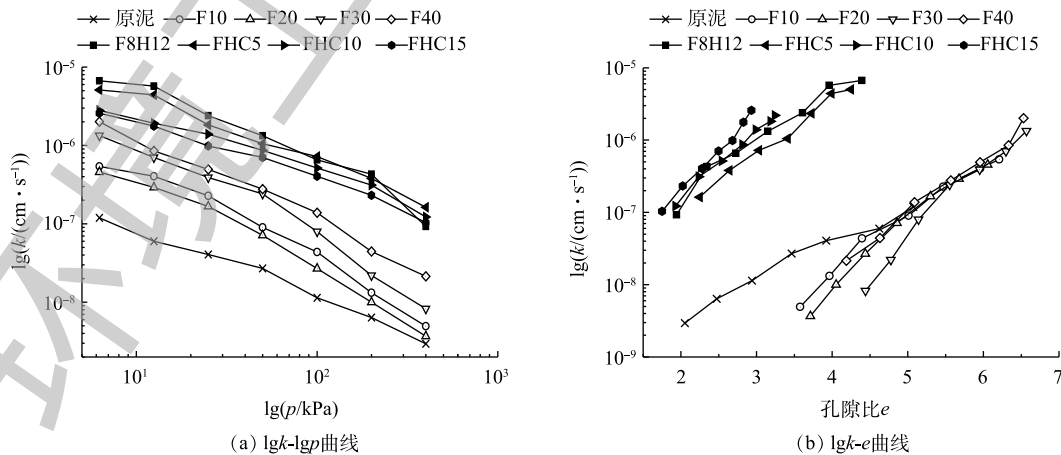


图 10 芬顿与氧化钙联合处理污泥与 FeCl_3 调质污泥渗透特性对比

Fig. 10 Permeability characteristics of landfill sludge conditioned by FeCl_3 and Fenton's reagent with calcium oxide

的渗透系数均高于氯化铁药剂调质污泥的渗透系数。由于孔隙比是表征土体孔隙结构最直接的指标,由图10(b)可知,在孔隙比相同的条件下,芬顿与氧化钙联合处理污泥的渗透系数大于氯化铁调质污泥。其原因在于:加入氯化铁进行调质后,混凝作用未能将污泥全部胶体颗粒除去,从而形成封闭孔隙影响污泥的脱水性能^[29];而芬顿与氧化钙联合处理污泥能够形成刚性骨架,连通孔隙较多,且随着亲水性胞外聚合物的减少,水分通过污泥所受阻力较小,因此渗透系数较高。

3 结论

1) 借助常规土工实验方法发现,与新鲜污泥相比,填埋期为7a的填埋库污泥降解明显,胶体颗粒占比较大,有机质含量及含水率远低于未经填埋的新鲜污泥,可见新鲜污泥与填埋库污泥的性质差异较大。

2) 根据压缩特性及抗剪强度相似,而渗透特性最优的条件,选取 $Fe^{2+}=8\%$ 和 $H_2O_2=12\%$ (pH为4)作为处理填埋库污泥芬顿试剂的最佳配比。芬顿联合氧化钙处理污泥后,发现随着氧化钙投加量的增加,污泥的初始孔隙比明显减小,压缩指数递减,抗剪强度略微递增,能够实现减容减量。考虑到联合处理后污泥的资源化利用和强碱性对环境的影响和处理成本,在实际填埋库污泥处理工程中,氧化钙投加量15%是较为合适的添加量。

3) 比较不同药剂调质污泥的渗透特性发现,芬顿与氧化钙联合处理填埋库污泥的渗透特性优于氯化铁药剂调质的污泥。其主要原因在于,氧化钙能够与铁离子形成骨架与透水通道,从而提高污泥强度。因此,建议在工程实践中采用芬顿联合氧化钙的方法处理填埋库污泥。

参考文献

- [1] 吴雪峰,李青青,李小平. 城市污泥处理处置管理体系探讨[J]. *环境科学与技术*, 2010, 33(4): 186-189.
- [2] 余杰,田宁宁,王凯军,等. 中国城市污水处理厂污泥处理、处置问题探讨分析[J]. *环境工程学报*, 2007, 1(1): 82-86.
- [3] 张华,范建军,赵由才. 基于填埋处置的污水厂脱水污泥土工性质研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(3): 361-365.
- [4] 李娟,张盼月,曾光明,等. Fenton氧化破解剩余污泥中的胞外聚合物[J]. *环境科学*, 2009, 30(2): 475-479.
- [5] LI X Y, YANG S F. Influence of loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) on the flocculation, sedimentation and dewaterability of activated sludge[J]. *Water Research*, 2007, 41(5): 1022-1030.
- [6] SHENG G P, YU H Q, LI X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: A review[J]. *Biotechnology Advances*, 2010, 28(6): 882-894.
- [7] NEYENS E, BAEYENS J, WEEMAES M, et al. Pilot-scale peroxidation (H_2O_2) of sewage sludge[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, 98(1): 91-106.
- [8] TONY M A, ZHAO Y Q, FU J F, et al. Conditioning of aluminum-based water treatment sludge with Fenton's reagent: Effectiveness and optimising study to improve dewaterability[J]. *Chemosphere*, 2008, 72(4): 673-677.

- [9] 洪晨, 邢奕, 司艳晓, 等. 芬顿试剂氧化对污泥脱水性能的影响[J]. 环境科学研究, 2014, 27(6): 615-622.
- [10] SINGH T S, PANT K K. Solidification/stabilization of arsenic containing solid wastes using portland cement, fly ash and polymeric materials[J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 131(1): 29-36.
- [11] 孙政, 朱伟, 贺敏杰. 污水厂污泥固结特性研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(11): 3146-3150.
- [12] 蒋建国, 杜伟, 殷闽, 等. 石灰稳定化污泥恶臭物质释放特征研究[J]. 中国环境科学, 2012, 32(9): 1620-1624.
- [13] 于文华, 濮文虹, 时亚飞, 等. 阳离子表面活性剂与石灰联合调理对污泥脱水性能的影响[J]. 环境化学, 2013, 32(9): 1785-1791.
- [14] 杨爱武, 胡焱. 城市污泥新型固化技术及其力学特性[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 1-10.
- [15] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 岩土工程勘察规范: GB 50021-2001[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [16] 国家质量技术监督局, 中华人民共和国建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123-1999[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [17] 谭晓慧, 沈梦芬, 张强, 等. 用激光粒度仪进行粘土的颗粒分析[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(6): 96-100.
- [18] 孙德安, 许志良. 结构性软土渗透特性研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 36-41.
- [19] CAMPBELL H W, RUSH R J, TEW R. Sludge dewatering design manual research report[R]. Burlington: Ontario Ministry of the Environment, 1978.
- [20] 武亚军, 唐欣, 崔春义, 等. 城市生活污水真空固结特性试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(4): 772-780.
- [21] 骆丽宁, 王丽娟, 杨敏, 等. 氧化-铁盐絮凝联合对调理改善污泥脱水性能的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(2): 630-637.
- [22] 王瑰丽, 王世峰, 吴俊峰, 等. 光电Fenton技术处理污泥深度脱水液研究[J]. 环境科学, 2014, 35(1): 208-213.
- [23] 曾庆洋, 伍健东, 周兴求, 等. 石灰投加比对污泥低温干燥特性及冷凝液性质的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(10): 5603-5608.
- [24] 黄绍松, 梁嘉林, 张斯玮, 等. Fenton氧化联合氧化钙调理对污泥脱水的机理研究[J]. 环境科学学报, 2018, 38(5): 1906-1919.
- [25] 梁嘉林. 芬顿氧化联合氧化钙对五种市政污泥深度脱水性能影响的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2016.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 城镇污水处理厂污泥处理处置技术指南(试行)[S]. 2011.

- [27] 冯瑞, 银奕, 李子富, 等. 添加低比例石灰调质的脱水污泥堆肥试验研究[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(5): 1442-1448.
- [28] WU Y J, LIN Z X, KONG G Q, et al. Treatment of municipal sludge by Fenton oxidation combined vacuum preloading[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(16): 15990-15997.
- [29] 吴彦瑜, 周少奇, 覃芳慧, 等. Fenton法氧化/混凝作用去除腐殖酸的研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(4): 996-1001.
(本文编辑: 金曙光, 郑晓梅, 张利田)

Mechanical properties of landfill sludge conditioned by Fenton's reagent with calcium oxide

LIN Shanyi¹, SUN De'an^{1,*}, ZHU Mingrui², WU Yajun¹

1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China

2. Shanghai Chengtuo Wastewater Treatment Co. Ltd., Shanghai 200120, China

*Corresponding author, E-mail: sundean@shu.edu.cn

Abstract Aiming at the saturation of the storage capacity of urban domestic sludge landfill, it's urgent to analyze the reduction and recycling of landfill sludge. A series of tests were conducted to investigate geotechnical properties of landfill sludge and waste-activated sludge. Experimental results showed that the landfill sludge had much lower organic content and water content than the waste-activated sludge. Through the experiments of consolidation and direct shear, the variations of the consolidation coefficient, permeability coefficient and shear strength were compared and analyzed between unconditioned and conditioned landfill sludge with reagent. The results showed that the best ratio of Fenton's reagent was determined as $\text{Fe}^{2+}=8\%$ and $\text{H}_2\text{O}_2=12\%$ at $\text{pH}=4$. The compression index decreased and shear strength increased with the increase of calcium oxide dosage. Considering the resource utilization of joint treated landfill sludge, the impact of strong alkalinity on the environment and the treatment cost, 15% calcium oxide dosage was an appropriate one for sludge treatment, and its conditioning effect was better than often-used FeCl_3 . Moreover, the shear strength of the conditioned landfill sludge by Fenton's reagent with calcium oxide can meet the requirements in landfill and sludge volume can be reduced. The test results provide a significant reference for the subsequent reclamation of landfill sludge.

Keywords landfill sludge; Fenton's reagent; CaO ; mechanical properties; extracellular polymeric substances (EPS)