

不同调理方案下污泥脱水性能评价指标的相关性研究

刘欢¹, 杨家宽^{1*}, 时亚飞¹, 李野², 何姝²

(1. 华中科技大学环境科学与工程学院, 武汉 430074; 2. 宇星科技发展(深圳)有限公司, 深圳 518057)

摘要: 污泥脱水性能评价指标选取不同导致目前调理剂难以进行比选. 以聚丙烯酰胺(PAM)、FeCl₃及无机复合物等几种常用的调理剂为例, 通过测定调理后污泥比阻(SRF)、毛细吸水时间(CST)、污泥沉降性能、泥饼含水率及污泥脱水率 5 个常用评价指标, 探讨了各种指标之间的相关性. 结果表明, 当分别使用不同种类和不同投加量的调理剂时, SRF 与 CST 具有良好的正线性相关性(R^2 分别为 0.96、0.93). SRF 及 CST 均能准确地反映污泥板框压滤脱水性能, 但不能很好地预测离心脱水效果. 污泥的沉降性能与 SRF、CST 大致呈现出相同的变化规律. 由于泥饼含水率与脱水率存在一定的相关性, 但不存在对应性, 因此优选调理剂时, 建议综合考虑泥饼含水率和脱水率.

关键词: 污泥; 调理; 脱水性能; 比阻; 毛细吸水时间; 沉降性能; 脱水率

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)11-3394-06

Relationship of Evaluation Indexes of Sludge Dewatering Performance Under Different Conditioning Programs

LIU Huan¹, YANG Jia-kuan¹, SHI Ya-fei¹, LI Ye², HE Shu²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;

2. Universtar Science & Technology (Shenzhen) Co. Ltd., Shenzhen 518057, China)

Abstract: Performances of different sludge conditioners are difficult to evaluate due to the use of various evaluation indexes. Taking several traditional sludge conditioners, e. g. PAM, FeCl₃ and inorganic composite conditioners as examples and five evaluation indexes include specific resistance to filtration (SRF), capillary suction time (CST), sludge settling performance, water content of sludge cake and dewatering efficiency, were investigated respectively in order to study the correlation among those indexes. The results indicate a significant positive linear correlation between SRF and CST (R^2 values are 0.96 and 0.93, respectively) after adding different types of conditioners or different amount of conditioners. While they can precisely reflect plate and frame filter press efficiency, but they fail to predict the effects of centrifugal dewatering. Sludge settling performance presents the similar tendencies with SRF and CST. Since there is only limited correlation rather than strict correspondence between water content of sludge cake and dewatering efficiency. Thus, both factors should be considered synthetically in optimizing dosage performances.

Key words: sludge; conditioning; dewatering performance; specific resistant to filtration (SRF); capillary suction time (CST); settling performance; dewatering efficiency

城市生活污水有机物含量高^[1], 污泥脱水困难成为污泥处理与处置的瓶颈问题. 近年来, 开发新型调理剂来改善污泥脱水性能已成为国内外的研究热点. 现有的研究主要集中于调理方案的比选及优化配方等方面^[2-7], 但学者们选取的评价指标各异. 衡量污泥脱水难易程度最常用的指标包括比阻 (specific resistance to filtration, SRF) 及毛细吸水时间 (capillary suction time, CST). 污泥沉降速率或时间-界面高度曲线所反映的沉降性能也被作为衡量调理污泥脱水性能的指标^[8, 9]. 此外, 测定真空抽滤、板框压滤和离心脱水实验后泥饼的含水率也可作为脱水性能最直观的评价方式.

吴幼权等^[10]采用复合絮凝剂 CAM-CPAM 调理污泥, 以脱水率及沉降速率为主要评价指标, 得出其投加量为 30 mg·L⁻¹时, 脱水率为 90% 以上, 沉降速率达 0.155 cm·s⁻¹. 杜丽英等^[11]利用抽滤 1 min 的滤

液体积和抽滤 5 min 的泥饼含水率为标准, 判定壳聚糖接枝共聚物调理污泥的效果. 李恺等^[12]研究了表面活性剂对改善污泥脱水性能的影响, 结果表明药剂投加量在 7.38 g·L⁻¹时, 真空抽滤 15 min 后, 泥饼含水率降至 68.73%. Lu 等^[13]采用 Fenton 试剂作为调理剂, 能使污泥比阻减少 90% 以上, 测定比阻后的泥饼含水率可降至 75.2%. Dentel 等^[14]则用 CST 评价污泥脱水性能. 由于国内外学者们选取的反映污泥脱水性能的指标并不完全一致, 且未见对于多种指标之间相关性的系统研究报道, 导致目前很难将不同调理

收稿日期: 2010-12-14; 修订日期: 2011-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078162); 教育部新世纪人才支持计划项目(NCET-09-0392); 华中科技大学自主创新研究基金项目(2011TS123)

作者简介: 刘欢(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为污泥的处理与处置, E-mail: nichole0320@126.com

* 通讯联系人, E-mail: jkyang@mail.hust.edu.cn

方案进行比较,为污泥调理剂的筛选带来了困难。

本研究对污泥比阻(SRF)、毛细吸水时间(CST)、污泥沉降性能、泥饼含水率及脱水率等指标之间的相关性进行了分析,旨在为选取合适的污泥脱水性能评价指标提供参考依据。

1 材料与方

1.1 实验材料

污泥取自武汉市龙王嘴污水处理厂初沉池和二

沉池排出的混合污泥,其基本特性见表 1。为减小污泥特性的变化对实验结果的影响,污泥取回后立即放入 4℃ 冰柜中冷藏,全部实验于 3 日内完成。实验所用阳离子型聚丙烯酰胺(PAM)为相对分子质量 500 万以上的分析纯试剂;一级粉煤灰由平顶山姚孟电厂提供;生石灰过 0.5 mm 标准方孔筛,有效氧化钙为 60.0%;FeCl₃ (分析纯试剂)杂质含量低于 1.0%,使用时配制成 5 g·L⁻¹ 的溶液。

表 1 污泥的基本特性

Table 1 Basic properties of sludge

密度/g·mL ⁻¹	pH	含水率/%	COD/mg·L ⁻¹	SCOD/mg·L ⁻¹	SS/g·L ⁻¹	有机物含量/g·g ⁻¹	比阻×10 ¹² /m·kg ⁻¹
1.011	6.0	97.49	13 124.0	328.3	24.1	0.357	9.326

1.2 实验及分析方法

1.2.1 调理剂的选取及调理方案

如表 2 所示,实验方案中共选取了 4 大类调理剂,并采用原污泥进行一组空白对比实验。聚丙烯酰胺(PAM)是污水处理厂普遍采用的污泥调理剂^[15, 16],实验序号定为 I;粉煤灰与生石灰作为常见的无机助凝剂,在污泥脱水中充当骨架构建体(skeleton builder)^[1],能够有效改善污泥的可压缩性能,对污泥深度脱水具有积极作用,实验序号定为 II;FeCl₃ 是最常用的高价阳离子无机混凝剂,在调理中起到电负性中和作用,实验序号定为 III;基于骨架构建体的无机复合调理剂(FeCl₃ +

粉煤灰 + 生石灰)可以发挥铁盐混凝与粉煤灰、生石灰骨架构建体的协同作用,实验序号定为 IV。多组分中单因子变化对污泥脱水性能的影响是复合调理剂研究中不可或缺的环节,因此本文以生石灰投加量为例,研究此实验过程中各种评价指标之间的相关性,依次定义为 IV-0、IV-1、IV-2、IV-3 和 IV-4。

取 200 mL 原污泥于 500 mL 烧杯中,分别投加不同种类、不同质量的调理剂。设定快速搅拌转速为 300 r·min⁻¹,慢速搅拌转速为 50 r·min⁻¹^[17, 18]。为保证实验数据的代表性,单组实验重复 4 次并计算相应的标准差。

表 2 污泥调理方案¹⁾

Table 2 Sludge conditioning schemes

序号	调理剂编号	调理方案
0	RS	原污泥空白对比实验
I	PAM	PAM (0.1 g·L ⁻¹)→快搅 2 min→慢搅 10 min
II	FA-L	粉煤灰 (10 g·L ⁻¹)→慢搅 7 min→生石灰 (5 g·L ⁻¹)→慢搅 5 min
III	Fe	FeCl ₃ (2 g·L ⁻¹)→快搅 2 min→慢搅 10 min
IV-0	Fe-FA-L0	FeCl ₃ (2 g·L ⁻¹)→快搅 2 min→粉煤灰 (10 g·L ⁻¹)→慢搅 10 min
IV-1	Fe-FA-L5	FeCl ₃ (2 g·L ⁻¹)→快搅 2 min→粉煤灰 (10 g·L ⁻¹)→慢搅 5 min→生石灰 (5 g·L ⁻¹)→慢搅 5 min
IV-2	Fe-FA-L10	FeCl ₃ (2 g·L ⁻¹)→快搅 2 min→粉煤灰 (10 g·L ⁻¹)→慢搅 5 min→生石灰 (10 g·L ⁻¹)→慢搅 5 min
IV-3	Fe-FA-L15	FeCl ₃ (2 g·L ⁻¹)→快搅 2 min→粉煤灰 (10 g·L ⁻¹)→慢搅 5 min→生石灰 (15 g·L ⁻¹)→慢搅 5 min
IV-4	Fe-FA-L20	FeCl ₃ (2 g·L ⁻¹)→快搅 2 min→粉煤灰 (10 g·L ⁻¹)→慢搅 5 min→生石灰 (20 g·L ⁻¹)→慢搅 5 min

1) 括号中数据表示调理剂在原污泥中的投加量

1.2.2 污泥过滤性能表征

污泥过滤性能一般用 SRF 或 CST 表征,SRF 越大,污泥脱水性能越差;CST 越小,污泥脱水性能越好。本研究中 SRF 测定采用图 1 所示的自制装置^[19]。CST 测定采用 CST 仪 (304 M, Triton Electronics),选用直径 1 cm 的漏斗。

1.2.3 污泥沉降性能表征

量取 120 mL 原污泥,按照表 2 所示的方案进行调理后,倒入 100 mL 具塞量筒中,每隔 10 min 记录 1 次固液分界面高度,共计时 90 min,在同等条件下,比较调理污泥的沉降性能。

1.2.4 污泥脱水性能表征

以真空抽滤、板框压滤、离心脱水后泥饼的含水率以及折算的脱水率为标准衡量调理后污泥的脱水

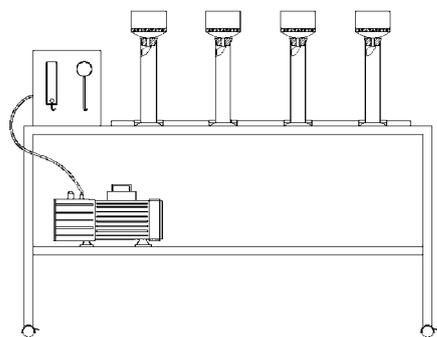


图1 多联式污泥比阻测定装置

Fig. 1 Multi-coupled measuring device of sludge SRF

性能. 含水率采用重量法测定: 取出部分污泥泥饼置于蒸发皿中, 于烘箱内 105°C 恒温烘干 $6 \sim 8$ h 至恒重, 放入干燥器中冷却后称重, 根据下式计算:

$$\text{含水率} = \frac{W_2 - W_3}{W_2 - W_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中, W_1 为空蒸发皿质量 (g); W_2 为蒸发皿和湿样质量 (g); W_3 为蒸发皿和干样质量 (g)^[20].

脱水率计算公式如下:

$$\text{脱水率} = \frac{Q_r - Q_c}{Q_r} \times 100\% \quad (2)$$

式中, Q_r 为原污泥中的总水量, Q_c 为泥饼中残留的水量.

真空抽滤脱水实验采用上述比阻测定装置, 通过调节转子流量计将压力保持在 0.08 MPa . 由于 Fe-FA-L 系列配方脱水速率较快, 泥饼在 2 min 左右龟裂, 真空压力下降. 因此为保证实验条件的一致性, 抽滤 2 min 后即测定泥饼的含水率. 板框压滤脱

水实验采用图 2 所示实验室设计定做的压滤机完成, 压滤时间为 45 min 左右, 压力为 1.0 MPa ; 隔膜时间为 5 min 左右, 压力为 1.1 MPa . 离心脱水采用湖南星科科学仪器有限公司生产的 DL-5M 型离心机. 由于 SRF 及 CST 代表的是污泥脱水的快慢, 而泥饼含水率反映的则是一定条件下达到平衡状态时的脱水程度. 因此, 实验中为了更好地反映应离心脱水效果的极限状态, 设定转速为 $2500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 离心时间为 40 min ^[21].



图2 隔膜板框压滤机

Fig. 2 Plate and frame filter press equipment

2 结果与讨论

2.1 不同种类调理剂调理后污泥各种性能评价指标的相关性

将表 2 中方案 0、I、II、III、IV-1 调理后污泥的脱水性能测定结果进行比较, 如图 3 所示, 各种评价

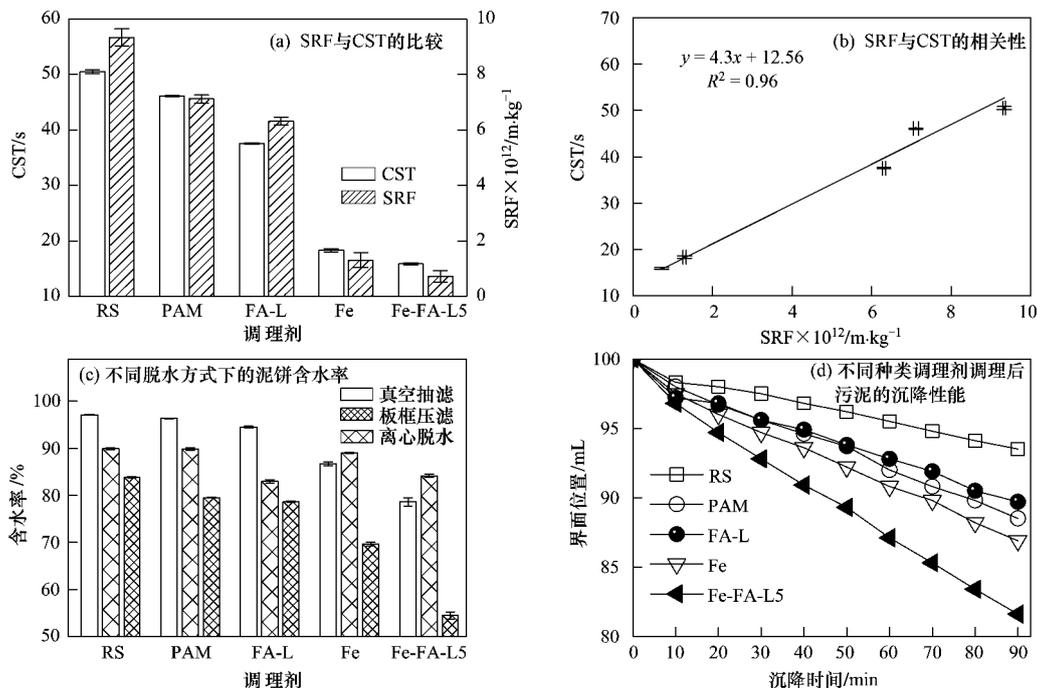


图3 不同种类调理剂调理后污泥各种性能评价指标的比较

Fig. 3 Comparison of various evaluation indexes of sludge conditioned by different types of conditioners

指标的总变化趋势大致相同. 由图 3(a) 可以看出, 采用不同类型的调理剂来改善污泥脱水性能后, SRF、CST 的变化趋势一致. 将 SRF 作为横坐标、CST 作为纵坐标, 采用线性函数拟合, 如图 3(b), 从拟合结果来看, CST 与 SRF 的关系满足方程 $y = 4.3x + 12.56$, 线性相关系数 $R^2 = 0.96$. 说明 SRF 与 CST 具有很好的正相关性, 这一结果与 Baskerville 等^[22] 的研究相符.

图 3(a) 与 3(c) 中, SRF 的变化趋势与真空抽滤、板框压滤得到的泥饼含水率的变化趋势是一致的. SRF 测定原理与真空抽滤脱水、压滤脱水原理类似, 所以 SRF 能准确地反映出污泥的真空抽滤脱水性能及压滤脱水性能. 但由于离心脱水原理与 SRF 测定原理相差较大, 故离心脱水泥饼含水率的变化趋势与 SRF 的变化趋势不同. CST 也能很好地反映真空抽率、板框压滤脱水效果, 但与离心脱水的测定结果不完全一致. 离心脱水效果不仅取决于污泥絮体亲水性的强弱, 还取决于絮体颗粒大小及密度, 颗粒变大或密度增大都能提高污泥的离心脱水性能^[23, 24]. 通过上述实验, 可初步推断, 调理方案对离心脱水效果有明显影响.

图 3(a) 与 3(d) 可以看出, SRF 及 CST 越小, 污泥沉降性能越好, 其中 PAM 与 FA-L 的调理效果相差不大.

国内外研究者大多关注泥饼的含水率, 却并未将脱水率进行比较. 目前, 石灰、粉煤灰等无机助凝剂用于污泥调理时, 脱水泥饼含水率下降明显但药剂投加量过大, 为污泥干基的 100% ~ 400%^[25-27]. 此种情况下, 泥饼含水率下降并不能保证脱水率提高. 图 4 表明, 脱水方式不同, 泥饼含水率与脱水率之间的关系不同. 如图 4(a) 及 4(b) 所示, 从 RS → PAM → FA-L → Fe → Fe-FA-L5, 真空脱水和板框压滤脱水泥饼含水率依次下降, 脱水率总体上呈现上升趋势, PAM 与 FA-L 两个配方所表现出的异常可能是由于调理剂的种类和投加量对于含水率与脱水率之间的关系也存在一定的影响.

如图 4(c) 所示, 采用离心脱水方式, 尽管脱水泥饼含水率不同, 但脱水率相当, 说明不同种类调理剂比重的差别在离心方式下被“均化”了, 对离心脱水效果改善不明显. 然而由于药剂投加量不同, 造成 4 种不同类型调理剂调理后的污泥含水率大小各异. 这种规律明显区别于真空抽率及板框压滤脱水的情况.

2.2 不同投加量调理剂调理后污泥各种性能评价指标的相关性

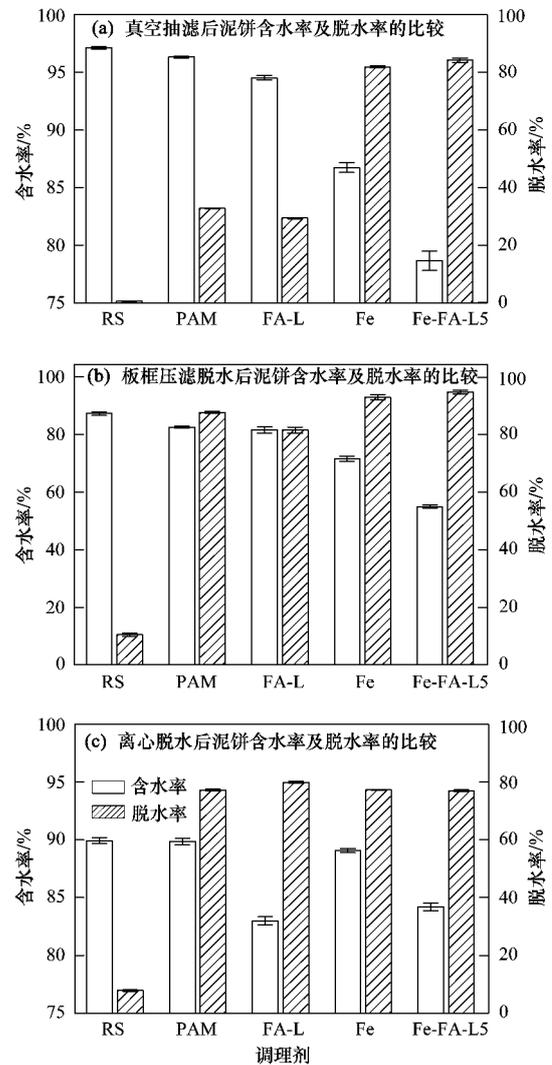


图 4 不同种类调理剂调理后脱水泥饼含水率与脱水率的比较
Fig. 4 Comparison between water content and dewatering efficiency of sludge conditioned by different types of conditioners

将表 2 中方案 IV-0 ~ IV-4 调理后污泥的脱水性能测定结果进行比较. 图 5(a) 表明, 采用同种复合调理剂调理污泥, 当生石灰投加量从 $0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加到 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, SRF 与 CST 的变化趋势一致. 如图 5(b) 所示, 对 SRF 与 CST 进行拟合, 其关系满足方程 $y = 3.73x + 13.67$, 线性相关系数 $R^2 = 0.93$.

从图 5(a)、5(c) 可以看出, SRF 和 CST 越小, 3 种方式脱水后泥饼的含水率越低, 但是 SRF、CST 的变化幅度与真空抽率、板框压滤脱水泥饼含水率的变化幅度更为接近, 即 SRF、CST 能很好地反映真空抽率、板框压滤脱水效果. 图 5(d) 中调理污泥的沉降性能变化趋势与图 5(a) 中 SRF、CST 的变化趋势吻合.

图 6 表明, 调理剂投加量、脱水方式对泥饼含水

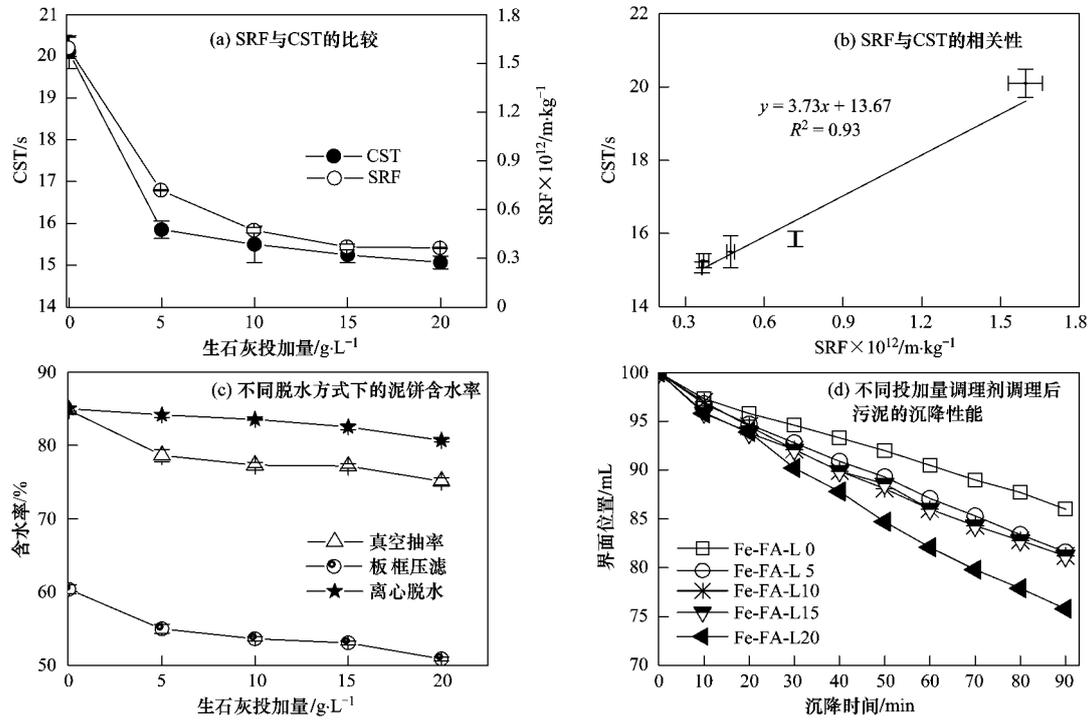


图 5 不同投加量调理剂调理后污泥各种性能评价指标的比较

Fig. 5 Comparison of various evaluation indexes of sludge conditioned by different dosages of conditioners

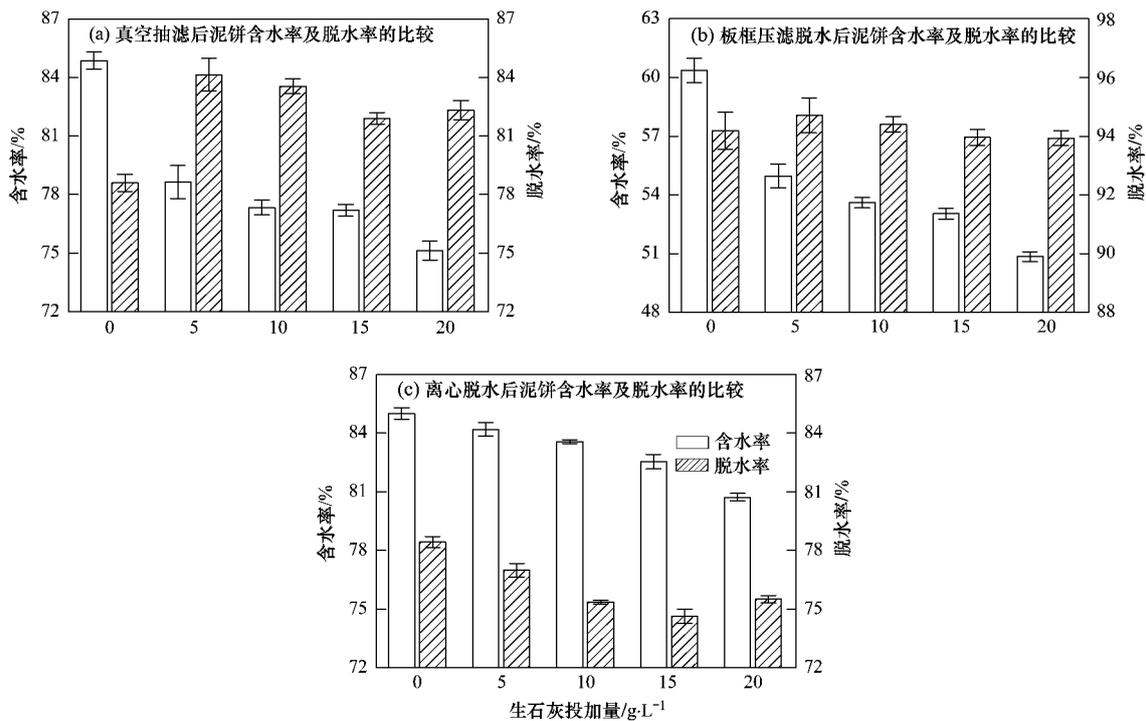


图 6 不同投加量调理剂调理后脱水泥饼含水率与脱水率的比较

Fig. 6 Comparison between water content and dewatering efficiency of sludge conditioned by different dosages of conditioners

率与脱水率的相关性均存在影响. 如图 6(a) 和 6(b), 当采用真空抽滤及板框压滤脱水方式时, 投加量从 0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 生石灰吸水程度增大, 脱水泥饼

的含水率明显下降, 脱水率提高. 从 5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 增加到 20 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 污泥固含量上升, 含水率小幅下降, 但脱水率却没有提高. 这是因为, 泥饼含水率的下降是由

于污泥含固量上升引起的,而并非调理效果得到显著改善.同理,如图6(c),当采用离心脱水方式时,生石灰投加量增加,泥饼含水率略微下降,但相应地脱水率呈现出先下降后上升的趋势.

3 结论

(1)SRF与CST的变化趋势十分吻合,具有很好的正线性相关性,采用不同种类调理剂,二者的相关系数 R^2 为0.96,采用不同投加量调理剂时, R^2 为0.93.但是SRF实验测定的工作量大,而且由于操作的熟练程度不同,误差也较大.建议采用CST来近似代替SRF,以缩短实验时间.

(2)SRF及CST能很好地反映板框压滤脱水效果,但不能很好地预测离心脱水效果.

(3)污泥的沉降性能与SRF、CST大致呈现出相同的变化规律,即SRF和CST越小,污泥沉降性能越好.

(4)调理剂的种类、投加量和污泥脱水方式都对含水率与脱水率之间的变化规律有影响,即二者存在一定的相关性,但不存在对应性.一般情况下,泥饼含水率低并不代表脱水率高,因此,在比选调理剂和优化配方时,建议综合考虑含水率和脱水率.

参考文献:

- [1] Zall J, Galil N, Rehbum M. Skeleton builders for conditioning oily sludge [J]. *Water Pollution Control Federation*, 1987, **59** (7): 699-706.
- [2] Thapa K B, Qi Y, Clayton S A, et al. Lignite aided dewatering of digested sewage sludge [J]. *Water Research*, 2009, **43** (3): 623-634.
- [3] 宋宪强,雷恒毅,余光伟,等.新型复合混凝剂改善污泥脱水性能的研究[J].*中国给水排水*, 2007, **23** (13): 87-90.
- [4] 刘立华.新型聚季铵盐与聚合硫酸铁复合絮凝剂合成及其基础理论与应用研究[D].长沙:中南大学,2004.
- [5] Boráň J, Houdková L, Elsäber T. Processing of sewage sludge: Dependence of sludge dewatering efficiency on amount of flocculant [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, **54** (5): 278-282.
- [6] Tongy M A, Zhao Y Q, Tayeb A M, et al. Exploitation of Fenton and Fenton-like reagents as alternative conditioners for alum sludge conditioning [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21** (1): 101-105.
- [7] 李恺,叶志平,王凤英,等.冷融技术联合化学调理对污泥脱水性能的影响及其机理[J].*环境科学学报*, 2010, **30** (3): 536-543.
- [8] 刘昌庚,张盼月,曾光明,等.生物淋滤-PAC与PAM联合调理城市污泥[J].*环境科学*, 2010, **31** (9): 2124-2128.
- [9] Zhang Z Q, Xia S Q, Zhang J. Enhanced dewatering of waste sludge with microbial flocculant TJ-F1 as a novel conditioner [J]. *Water Research*, 2010, **44** (10): 3087-3092.
- [10] 吴幼权,郑怀礼,张鹏,等.复合絮凝剂CAM-CPAM的制备及其污泥脱水性能[J].*环境科学研究*, 2009, **22** (5): 535-539.
- [11] 杜丽英,胡筱敏,李亮.壳聚糖接枝共聚物在污泥脱水中的应用研究[J].*环境科学与管理*, 2008, **33** (2): 82-84.
- [12] 李恺,叶志平,李焕文,等.表面活性剂CTAC对活性污泥的脱水性能及其机理研究[J].*华南师范大学学报(自然科学版)*, 2010, **2** (2): 76-81.
- [13] Lu M C, Lin C J, Liao C H, et al. Dewatering of activated sludge by Fenton's reagent [J]. *Advances in Environmental Research*, 2003, **7** (3): 667-670.
- [14] Dentel S K, Dursun D. Shear sensitivity of digested sludge: Comparison of methods and application in conditioning and dewatering [J]. *Water Research*, 2009, **43** (18): 4617-4625.
- [15] 何晶晶,顾国维,李笃中,等.城市污泥处理与利用[M].北京:科学出版社,2003. 113.
- [16] 谷晋川,蒋文举,雍毅.城市污水处理厂污泥处理与资源化[M].北京:化学工业出版社,2008. 91-95.
- [17] 王铮.城市污水处理厂污泥物化法减量试验研究[D].重庆:重庆大学,2004.
- [18] 梁梅.基于骨架构建体的污泥脱水及污泥蒸压砖耐久性研究[D].武汉:华中科技大学,2009.
- [19] 杨家宽,何妹,王荣,等.多联式污泥比阻测定装置[P].中国,201020573496. 9, 2010-10-22.
- [20] 朱书卉,许红林,韩萍芳.超声波结合复合絮凝剂强化生物污泥脱水研究及其作用机理[J].*化工进展*, 2007, **26** (4): 537-541.
- [21] 鹿雯,张登峰,王盼盼.阳离子表面活性剂对污泥脱水性能的影响研究[J].*环境科学与技术*, 2008, **31** (6): 35-39.
- [22] Baskerville R C, Gale R C. A simple automatic instrument for determining the filterability of sewage sludges [J]. *Water Pollution Control*, 1968, **67**: 233-241.
- [23] 张永吉.污泥浓缩、脱水、干化的机理及方法评述[J].*工业用水与废水*, 1981, **1** (1): 25-61.
- [24] 贾高顺,石晓薇,任欣.卧螺离心机污泥脱水试验研究[J].*浙江工程学院学报*, 1983, **2** (1): 29-41.
- [25] 师荣梅,宁平,赵健蓉,等.粉煤灰和硅藻土对昆明污水厂污泥的脱水研究[J].*昆明理工大学学报(理工版)*, 2008, **33** (5): 65-67, 85.
- [26] 杨斌,杨家宽,唐毅,等.粉煤灰和生石灰对生活污水污泥脱水影响研究[J].*环境科学与技术*, 2007, **30** (4): 98-99.
- [27] 杨崇豪,袁孟云,张利伟,等.中小型污水处理厂污泥脱水比阻调理剂研究[J].*华北水利水电学院学报*, 2008, **28** (1): 88-90.